

国际航空网络与国际关系网络的特征提取及关联分析

秦 昆¹, 张 凯¹, 阮建平², 卢宾宾¹, 邢玲丽¹,
叶茹琪², 喻雪松¹, 周 扬¹, 刘东海¹, 秦育罗³

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 政治与公共管理学院, 湖北 武汉 430072;
3. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了探索国际关系与国际航空交通的相互影响, 通过国际航空网络探测各国各地区之间人员交流、贸易往来关系; 通过国际关系网络探索各国各地区之间的合作、冲突等国际关系。以国家为节点、国家之间的航空交通或国际关系为边, 并嵌入地理空间, 构建地理多元流网络, 提取其时空特征, 并分析其关联关系, 分析和探索国际关系网络与国际航空网络间的关系和相互影响。利用 2013—2022 年 10 年的 OAG (官方航线指南) 数据、GDELT (全球事件、语调与语言) 数据, 分别构建国际航空网络、国际关系网络, 基于复杂网络理论和社会网络分析方法提取 2 种主题网络的时空特征, 并探索其关联。研究表明: ① 2 种网络都具有无标度特性和小世界特性; ② 2 种网络的规模都具有先升后降的趋势, 国际关系网络规模的峰值出现在 2015—2016 年, 国际航空网络规模的峰值出现在 2020 年; ③ 2 种网络的节点和结构具有相似性, 但是自俄乌冲突发生后, 相似性显著降低; ④ 国际关系网络对国际航空网络的影响具有时间滞后性。

关键词: 国际航空网络; 国际关系网络; 复杂网络; 社会网络; 特征提取; 关联分析

中图分类号: P283

文献标志码: A

Association Analysis and Feature Extraction of International Aviation Network and International Relation Network

QIN Kun¹, ZHANG Kai¹, RUAN Jianping², LU Binbin¹,
XING Lingli¹, YE Ruqi², YU Xuesong¹, ZHOU Yang¹,
LIU Donghai¹, QIN Yuluo³

(1. Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Political Science

and Administration, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. College of Surveying and Geo-informatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: It is very important to extract spatiotemporal characteristics from international aviation network and international relation network, and to analyze the association between them. The international aviation network is a kind of transportation network in the material world formed by personnel mobility and trade among countries or regions. The international relation network is a kind of social relation network in the virtual world formed by international relations such as cooperation or conflict among countries or regions. This paper, taking the countries or regions as nodes, the aviation transportation or the international relations as edges, and embedding them into geographic space, builds a geographic multiple flow network, and explores the association between them. It builds the international aviation network and the international relation network based on the airline schedule provided by OAG data and the GDELT data over the past decade. It extracts the characteristics of the two kinds of networks and explores their association based on the theories and methods of complex network and social network analysis. The research results show that both networks have scale-free properties and small world effects. The scale of the two kinds of networks shows a common trend of first increase and then decrease. The scale of the international relation network peaked in 2015 and 2016, but the counterpart of the international airport network peaked in 2020. The structures of the two kinds of networks are similar, but

收稿日期: 2023-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(42171448)

第一作者: 秦 昆(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为时空大数据分析、空间人文社会地理计算。E-mail: qink@whu.edu.cn

通信作者: 卢宾宾(1984—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空间统计。
E-mail: binbinlu@whu.edu.cn



论文
拓展
介绍

the similarity decreases significantly after the Russia-Ukraine conflict. There is a time lag in influence of the international relation network on the international aviation network.

Key words: international aviation network; international relation network; complex network; social network; feature extraction; association analysis

航空交通是现代经济体系的重要组成部分,航空交通的发展有力地促进了经济的发展。当前,我国正处于快速发展的关键时期,面对瞬息万变和复杂的国际局势,全面准确地把握国际航空交通网络的演化特征及其影响因素,有助于国际航空交通良性发展。通过分析国际航空运输与国际关系的相互影响,可以为制定合理的航空政策和外交政策提供参考。

传统的航空交通量化研究往往从中心枢纽的吞吐量和转运功能方向开展^[1-2]。长时序、广空间的研究逐渐成为主流的研究视角^[3-4]。计算机科学、社会科学和数学等学科不断融入到航空交通研究中,尤其是利用复杂网络从网络层面对航空交通网络的拓扑结构和空间结构进行分析^[5-6]。航空交通从现实空间和地理空间中延伸出“流(flow)”的概念,国家间各种“流”的关联性和交互性研究越来越受到重视^[7]。在研究数据方面,全球已涌现出大量的航班数据服务公司,其中官方航线指南(OAG)提供了海量的航空运输数据,利用这些数据,通过文本过滤、重编码匹配等建立航空交通网络的出发地-目的地(OD)流,为国际航空交通的研究提供了丰富的数据源。

国际航空交通不是独立于人口流动、贸易、通信等其他人类活动之外存在的,它们相互交织形成了复杂的地理多元流^[8]。当这些不同类型的地理流共存时,就形成了地理系统的复杂格局和功能。通过对“流”的时空分析,可以更好地理解地理系统的演化模式和动力学机制^[7]。分析国际航空交通运输和其他地理流的关系有助于挖掘影响国际航空交通的因素。反映国际联系的流数据有多种类别,如航空交通、贸易等形成的实体流以及社交媒体、信息交流、通信等形成的虚拟流^[9-10]。2种类型流的特征及反映的信息各有侧重,实体流与地理区位的关联更紧密,能够反映物质层面的流动情况;虚拟流更加灵活,不受空间范围的限制。随着各种新闻媒体和社交媒体的快速发展,社会网络分析逐渐受到重

视^[11-12]。通过虚拟网络与实体网络的融合研究,分析二者之间的协作和影响机制^[13]。

新闻媒体形成的反映国际关系的虚拟流可以用于国际政治关系研究^[8]。从快速更新的各国新闻报道中挖掘国际关系的变化,可以为重大事件进行溯源分析。国际航空交通网络的演化与疫情传播、武装冲突和经济危机等重大国际事件有关,从新闻媒体交互网络中可以探寻与演化对应的发展源头和发展路径。引入国际新闻事件交互流数据,有助于理解航空交通变化的内驱动力,分析两者之间的相互影响。全球事件、语调与语言(GDELT)数据库是一种机器编码事件数据库,它从新闻中抽取详细的空间位置、主题、参与方等信息,并对新闻媒体的语调、语气进行编码。GDELT数据已被成功应用于国际冲突与调解等国际关系研究中^[8]。

本文以OAG航班时刻表数据及GDELT新闻事件库为数据源,构建国际航空网络和国际关系网络,利用复杂网络理论与方法分析各国各地区之间航空与国际关系网络的特征,探究2种网络的时空演化规律,并分析典型事件背景下航空网络与国际关系网络的关联性。

1 网络特征提取方法

复杂网络是由大量节点构成的网络,具有复杂、多样化的结构特征,如小世界特性、无标度特性、社团结构特性等。具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度等特性中部分或全部性质的网络都是复杂网络^[14-15]。复杂网络广泛应用于社交网络、生物网络、交通网络等领域。

通常从整体特征、节点特征和网络特征三方面研究复杂网络^[16]。本文研究相关的网络特征及其计算方法如下。

(1)度、加权度和平均度。节点*i*的度 k_i 是指与之相连的节点个数。加权度是指有权网络中与节点*i*相连的边权值的累加值,反映了节点的强度。加权度的计算公式为: $W_i = \sum_{j \in G_i} w_{ij}$,式中, W_i 为加权度, w_{ij} 为节点*i*、*j*之间连边的权重, G_i 为与节点*i*相连的节点集合。平均度是指网络中每个节点的度除以节点数,反映了网络节点间连接的平均程度,用以衡量物质和信息在网络中传递的效率。平均度的计算公式为: $G = 2E/N$,式中, G 为网络的平均度, E 为网络中的连边数, N 为网络中的节点数。

(2)图密度。图密度是指网络中实际存在的边

数与可能存在的边数之比。图密度越高,表示节点之间的连接关系越紧密。图密度的计算公式为: $D=E/(N(N-1)/2)$,式中, D 为网络的图密度。

(3)平均聚类系数。聚类系数是指与该节点相邻的节点之间实际存在的边数与它们之间可能存在的边数之比。聚类系数反映了节点周围邻居之间连接的紧密程度。聚类系数的计算公式为: $C_i=2B_i/(k_i(k_i-1))$,式中, C_i 为节点 i 的聚类系数, k_i 为相邻节点的个数, B_i 为实际存在的边数。平均聚类系数 C 可以用来评价网络的整体聚集程度,计算公式为: $C=\sum C_i/N$ 。

(4)平均最短路径长度。平均最短路径长度是指网络中任意2个节点之间最短路径长度的平均值。如网络平均最短路径长度较小,说明节点之间的传播效率较高。平均最短路径长度的计算公式为: $R=\frac{2}{N(N-1)}\sum_{i>j}r_{ij}$,式中, R 为平均最短路径长度, N 为网络节点数, r_{ij} 为节点 i 和 j 之间的最短路径长度。

(5)度同配系数。度同配系数指网络中度相似的节点更倾向于相互连接的程度。①度同配系数大于零,表示度较大的节点倾向于连接连接度较大的节点;②度同配系数小于零,表示度较大的节点倾向于连接连接度较小的节点;③度同配系数约等于零,

表示网络节点的连接较为随机。

2 网络特征提取与分析

2.1 无标度特征分析

网络的无标度特性表现为少数节点拥有较高的度或强度,少数节点在网络中具有较强的控制能力和影响力。在航空网络中,少数关键节点瘫痪可能对整个航空网络造成严重威胁;国际关系网络中少数关键节点的冲突发展对全球国际关系具有重要影响。无标度网络中节点的度分布呈幂律分布^[16]。

对网络节点的强度分布进行幂律分布拟合分析。首先,利用2013—2022年10年的OAG数据、GDELT数据分别对国际航空网络、国际关系冲突网络、国际关系合作网络的节点强度分布进行统计。国际航空网络的节点强度反映了节点与其他节点10年内航班通航量的总和。国际关系网络节点强度指节点与其他节点间发生合作或冲突事件的影响程度的总和。图1为3种网络的节点强度的概率分布情况。

图1中3种网络均表现出无标度特性。幂律分布根据节点强度的概率密度函数的特征进行分析,式为: $Y=kX^{-\alpha}$,式中, Y 为概率分布, X 为随机变量,指节点强度值, k 为常数, α 为幂律指数。

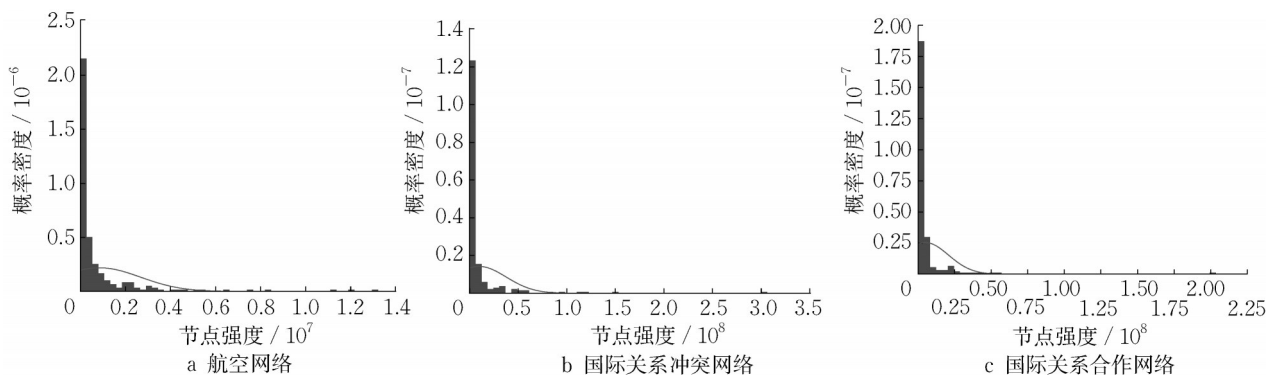


图1 网络节点强度与概率密度分布

Fig. 1 Probability density distribution diagram of network node strength

幂律分布在双对数坐标系下为线性函数。常用的幂律分布拟合模型包括:Zipf分布、Pareto分布、Yule-Simon分布等^[17-19]。采用改进的Zipf分布模型Zipf-Mandelbrot进行节点强度的幂律分布拟合。Zipf-Mandelbrot引入了一个平移参数 ρ 来描述数据抽样中导致的饱和效应^[20]。Zipf-Mandelbrot分布采用互补累计概率分布函数对数据进行拟合。互补累计概率分布的优势在于它可以更好地展现尾部的分

布特征,式为: $A_c(M>X)=k(X+\rho)^{-\alpha}$,式中, $A_c(M>X)$ 是 X 的互补累计概率分布函数,表示随机变量 M 超出约定范围 X 的概率; ρ 为平移参数。

通常认为幂律指数 α 为1~3时,数据呈幂律分布^[21]。加平移参数的航空网络与国际关系网络的节点强度累计概率分布如图2所示。加上平移参数 ρ 后,节点强度在双对数坐标系下近似呈直线分布,验证了网络的无标度特性。

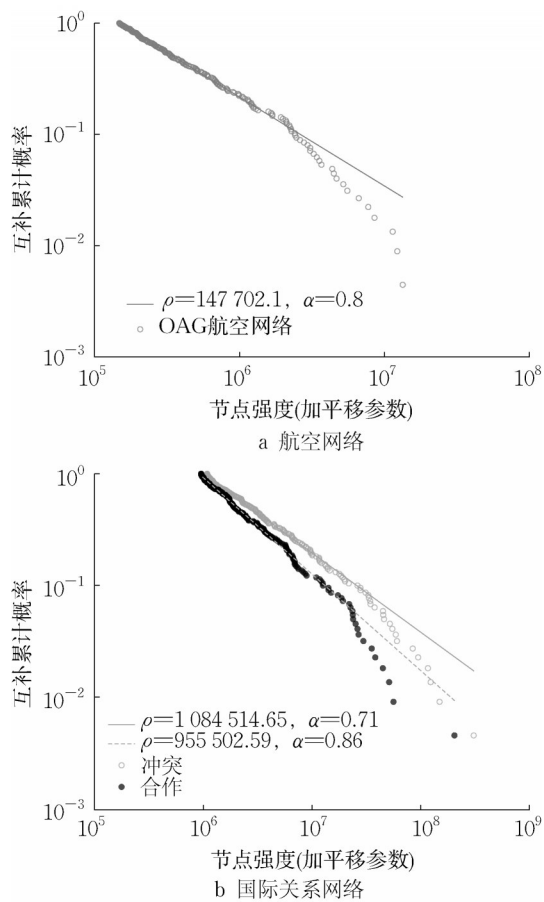


图2 节点强度累计概率分布

Fig. 2 Cumulative probability distribution of network node strength

2.2 小世界特征分析

利用2013—2022年10年的OAG数据、GDELT数据对航空网络和国际关系网络10年间的整体测度进行统计和演化分析,比较不同主题网络的整体性质,揭示网络全局特征和演化规律的异同。计算国际航空网络的整体测度,如表1所示。表中的 N 为节点数, E 为网络连边数, G 为平均度, D 为图密度, C 为平均聚类系数, R 为平均最短路径长度, D_A 为度同配系数。

从表1可以看出,航空网络的节点数保持稳定,网络连边数有明显变化。连边数自2013年以来持续增加,到2021年有较大减少,至2022年回退至2017年的水平。说明航空网络的航线数在持续增加,但在2022年全球性新冠疫情和多种局部冲突影响下,有些国家或地区间的航线被迫取消。网络的图密度、平均聚类系数、平均路径长度也表现出先增后减的趋势。航空网络的图密度保持在0.11左右,处于较低水平,说明全球航空联系变得较为稀疏。平均聚类系数约0.65,表明航空网络的整体聚集水

表1 国际航空网络整体测度10年演化

Tab. 1 10-year evolution of international aviation network

年份	N	E	G	D	C	R	D_A
2013	224	2730	24.38	0.11	0.64	2.24	-0.07
2014	224	2757	24.61	0.11	0.65	2.23	-0.06
2015	224	2786	24.86	0.11	0.65	2.23	-0.06
2016	224	2878	25.70	0.12	0.64	2.22	-0.05
2017	225	2942	26.15	0.12	0.65	2.22	-0.05
2018	225	3033	26.96	0.12	0.66	2.20	-0.04
2019	225	3037	27.00	0.12	0.65	2.21	-0.04
2020	225	3226	28.68	0.13	0.66	2.17	-0.06
2021	223	2870	25.74	0.12	0.63	2.21	-0.06
2022	223	2973	26.66	0.12	0.64	2.21	-0.06

平较高。网络的平均路径长度约2.2,体现了航空网络具有较好的整体连通性。综合来看,航空网络具有较低的图密度、较高的平均聚类系数以及较短的平均最短路径长度,表现出小世界特性。

国际冲突网络10年的测度演化如表2。其连边数的变化与航空交通网络类似,都经历了先升后降的阶段。冲突网络的连边数在2016年到达了极值,随后保持下降趋势。冲突网络的图密度、平均聚类系数和平均最短路径长度较航空网络都表现出更明显的小世界特性。图密度在0.3~0.4之间,表明国家之间的冲突联系比较密集。平均聚类系数约0.72,表现出国际冲突关系的聚集趋势。平均最短路径约1.65,表明国家或地区间更易发生冲突。这些特征表明:国际关系冲突网络中节点之间的联系较航空网络更加紧密,小世界特性更加明显。

表2 国际冲突网络整体测度10年演化

Tab. 2 10-year evolution of international conflict network

年份	N	E	G	D	C	R	D_A
2013	219	7492	68.42	0.31	0.71	1.71	-0.24
2014	218	8221	75.42	0.35	0.71	1.66	-0.23
2015	219	9170	83.74	0.38	0.74	1.62	-0.23
2016	219	9452	86.32	0.40	0.74	1.61	-0.23
2017	217	9215	84.93	0.39	0.74	1.61	-0.23
2018	217	8736	80.52	0.37	0.74	1.63	-0.24
2019	217	8625	79.49	0.37	0.72	1.64	-0.22
2020	218	7860	72.11	0.33	0.71	1.68	-0.22
2021	218	7756	71.16	0.33	0.70	1.69	-0.23
2022	218	7321	67.17	0.31	0.70	1.71	-0.23

3 网络的关联性分析

利用2013—2022年10年的OAG数据、GDELT数据,以网络节点和整体结构关联性分析为基础,分析网络在较大尺度下关联性的稳定性,并对关联性

突变的时间节点进行实证分析。通过递进缩小研究尺度,分析具体事件中事件主体在2种不同主题网络下的节点特征突变关联性和局部子网的演化特征关联性。从整体到局部分层次分析国际航空网络与国际关系网络的关联性。

3.1 网络的整体关联性分析

利用网络结构的相似性可以评价网络的关联程度。对国际航空网络、国际关系网络的节点和整体结构相似性进行分析,识别相似性发生显著变化的时间节点,为局部网络关联分析奠定基础。

Jaccard相似性(J)是一种衡量集合相似程度的度量。2个集合 A 和 B 的Jaccard相似性计算公式为: $J(A, B) = (|A \cap B|) / (|A \cup B|)$,可以用来表示相同时间尺度下参与航空交互的国家或地区(A)与参与国际关系交互的国家或地区(B)的重叠度。取值范围为 $[0, 1]$,越接近1说明2个集合越相似。

如图3,国际合作网络与国际冲突网络的重叠度约98%,表明合作伴随冲突产生,国家或地区之间的国际关系博弈是复杂的。国际航空网络与国际关系网络的节点重叠约78%,说明参与航空合作与多种事件复杂交互的国家节点虽然不完全相同,但有较高的相似性。

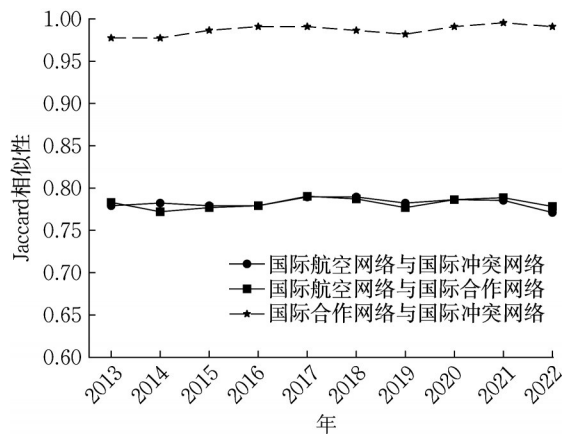


图3 网络节点相似性演化

Fig. 3 Evolution map of network node similarity

提取2种不同主题网络中的重合节点,分析2013—2022年10年的航空网络与国际关系网络重合节点强度的相关系数的演化规律,如图4所示。

从图4可以看出,航空网络与国际关系网络的节点强度相关系数为约0.6,表现为弱相关性。航空网络与国际合作网络的节点强度相关性略高于其与国际冲突网络的相关性。国际合作网络与冲突网络的相关系数较高(约0.9),表明国际合作与冲突伴随

存在,符合变和博弈的国际交互特征。

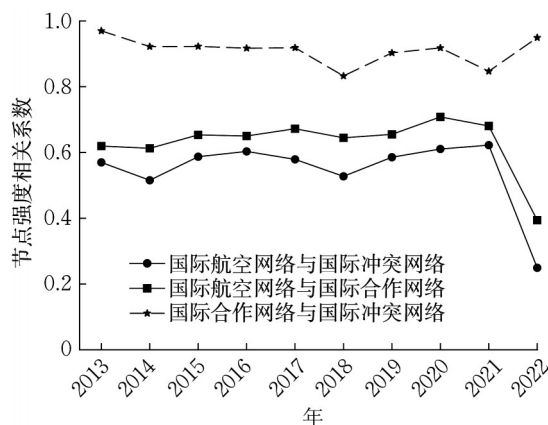


图4 网络节点强度相关系数演化

Fig. 4 Evolution map of network node strength

航空网络与国际关系网络的相关性系数在2022年之前相对稳定,但是至2022年下降幅度较大。表明之前的全球疫情对2种网络的节点相似性影响并不大,但俄乌冲突引起了航空网络与国际关系网络异向演化较大。

3.2 关联性的实证分析

从网络整体关联性分析可知,2022年网络的关联性发生了突变,网络节点相似性有较大下降,可能与俄乌冲突致使多国领空互关有关。以局部冲突中关闭国家领空措施为切入点,选取俄乌冲突事件作实证分析,对国际航空网络与国际关系网络的局部动态关联性进行验证。提取2022年俄乌冲突发生前后12周的网络数据,并筛选只与俄罗斯(RUS)、乌克兰(UKR)发生直接联系的节点,构建典型事件背景下航空网络与国际关系网络的局部子网络。

在俄乌冲突期间,UKR于2022年2月24日关闭全国领空,随后RUS与多个国家互相关闭领空。提取与RUS和UKR有直接冲突交互或航空交互的节点,构建2022年2月1日至4月25日连续12周的子网,对局部航空网络与国际关系网络的演化进行分析。代表性的部分实验结果如图5所示,各国名称用三字码表示。节点之间的线条粗细表示联系强度,线条越粗,表示节点间的联系强度越大。

根据RUS与UKR的冲突联系,可以将俄乌冲突过程分为3个阶段。

(1)第1阶段:第1~4周。从第1周开始,RUS与UKR的冲突强度逐月增加,到第4周达到最高。第4周时,美国(USA)、德国(DEU)、波兰(POL)、芬兰(FIN)、匈牙利(HUN)等欧盟国家迅速对RUS的军事行动进行谴责。同时,约旦(JOL)、以色列

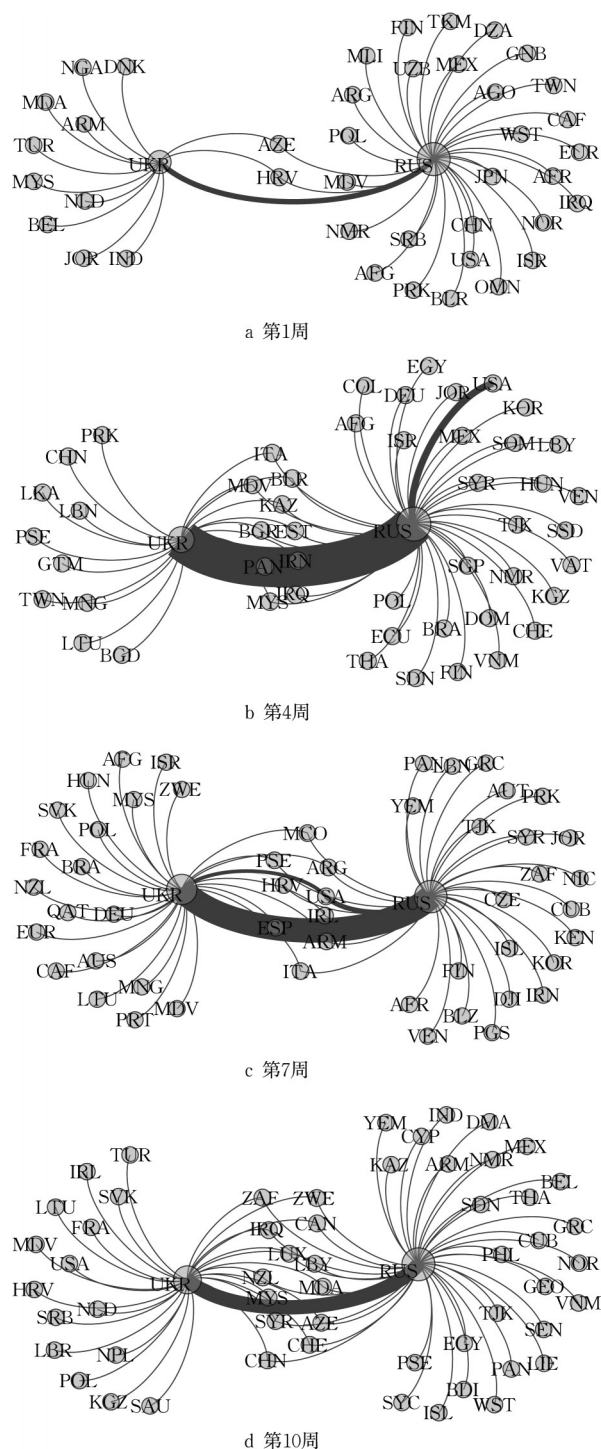


图5 俄乌冲突-局部冲突子网演化

Fig. 5 Evolution map of conflict sub-network of "Russia-Ukraine conflict"

(ISR) 等也加入了反对 RUS 的阵营。意大利 (ITA)、保加利亚 (BGR) 等国保持中立。

(2) 第 2 阶段: 第 5~7 周。冲突强度逐步减弱。至第 7 周时, 希腊 (GRC)、奥地利 (AUT)、捷克 (CZE) 等欧盟国家受影响加入与 RUS 的冲突阵营中。随着 UKR 国内局势的复杂化以及 RUS 在战场

上的局部胜利, 与之冲突的国家数量逐步增多。

(3) 第 3 阶段: 第 8~10 周。更多国家参与到俄乌冲突中, 欧盟和北约国家对 RUS 采取了经济制裁和外交压力, 但加拿大 (CAN)、意大利 (ITA)、卢森堡 (LUX)、爱尔兰 (IRL)、保加利亚 (BGR) 等国保持中立。中国 (CHN) 此阶段保持中立, 呼吁各方通过和平手段解决分歧。局部的国际冲突网络可以反映俄乌冲突相关的国际关系变化。

相应时间段的航空局部网络的变化趋势与冲突网络的演化趋势较为一致, 如图 6。随着冲突的持续发酵, USA 和西方国家关闭了与 RUS 和 UKR 的空中联系。在俄乌冲突局势恶化之前, RUS 和 UKR 与其他各国保持着密切的航空联系, 并拥有较多的共同节点, 随后的几周内共同节点的数量持续下降。与 UKR 在俄乌冲突恶化后仍然保持联系的节点在冲突网络中表现为与俄罗斯的冲突节点或中立节点, 如约旦 (JOR)、捷克 (CZE)、保加利亚 (BGR)、克

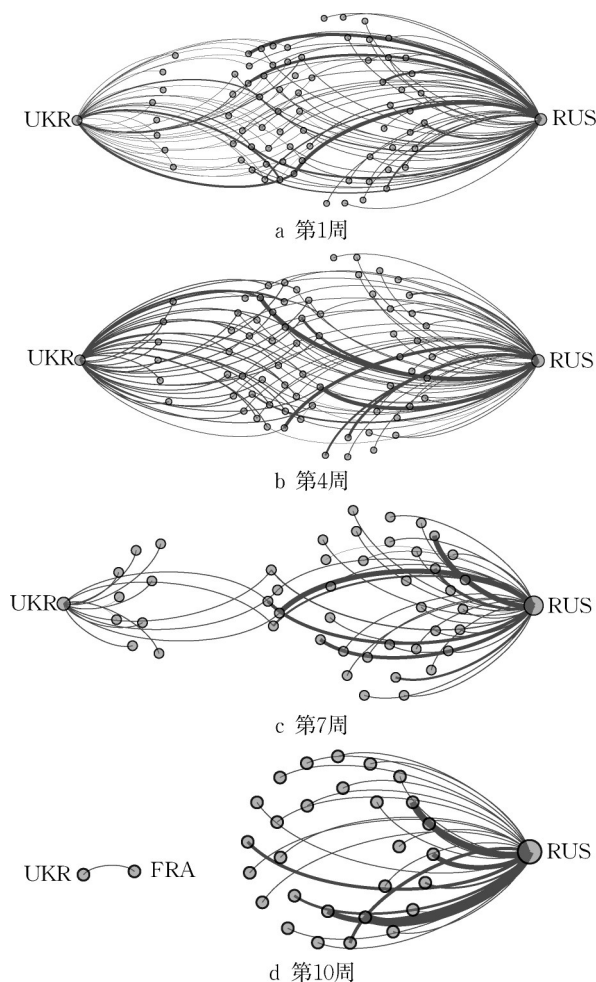


图6 俄乌冲突-局部航空子网演化

Fig. 6 Evolution map of aviation sub-network of "Russia-Ukraine conflict"

罗地亚(HRV)等。但在航空网络中,与RUS仍然保持连接的节点在冲突网络中可能表现为与俄罗斯保持冲突关系,如德国(DEU)、卡塔尔(QAT)、古巴(CUB)等。从局部航空网络中可以看出,RUS与中亚国家如哈萨克斯坦(KAZ)、吉尔吉斯斯坦(KGZ)以及中东国家如卡塔尔(QAT)、阿联酋(ARE)、埃及(EGY)等仍保持航空联系。

在俄乌冲突中,航空网络与国际冲突网络的演化规律具有很高的匹配程度,如图7。

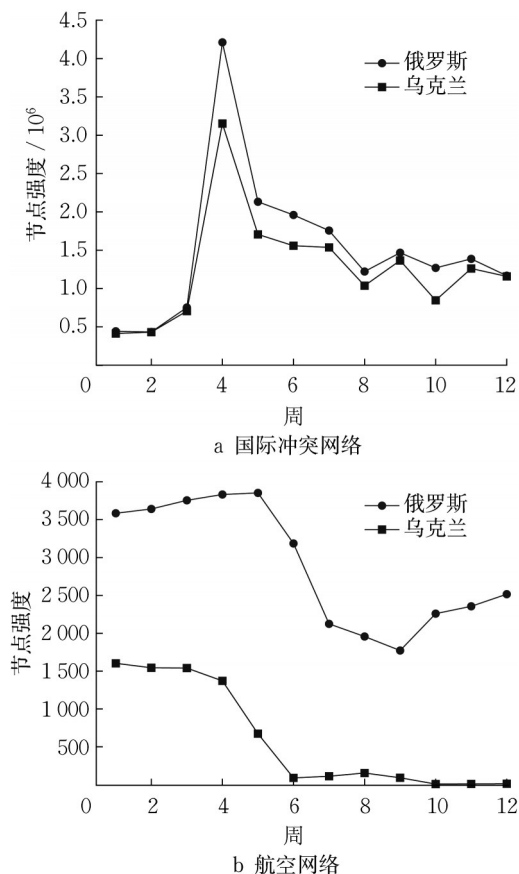


图7 俄乌冲突中两国节点强度变化

Fig. 7 Node strength change map of "Russia-Ukraine conflict"

2022年2月至4月,RUS和UKR两个节点一直保持着较高的冲突强度,在第4周达到高峰,对应俄罗斯在乌克兰境内发起军事行动。俄罗斯与乌克兰在航空网络中的节点强度在第4周并未发生大幅度降低,说明航空网络会有时间延迟。乌克兰第6周后与外界的航空交互非常弱,而俄罗斯在第9周有小幅反弹,在第8周的国际冲突网络中表现为相对较低的冲突强度,体现了俄罗斯航空网络的相对稳定性。为了分析航空网络在冲突应对方面的时间延迟性,分别计算航空网络中两国航空对外交互强度

相对上周的增量与国际冲突相较于上个月原始冲突强度增量的相关性指数,如表3所示。

表3 网络节点强度变化相关性延迟

Tab. 3 Correlation delay map of network node strength

国家	同步	延迟1周	延迟2周
俄罗斯	-0.12	-0.22	-0.65
乌克兰	-0.33	-0.73	-0.17

经相关性系数的显著性 T 检验,俄罗斯数据的 T 统计量表明节点的冲突强度相较原始冲突强度的增量与节点对外交互强度的增量在低于90%的置信水平上存在负相关,而乌克兰的数据 T 统计量表明二者在高于90%的置信水平上存在负相关。冲突强度较原始值增加得越多,航空交互强度下降得越快。俄罗斯在国际冲突到达极值后的第2周在航班计划数据中才表现出降速。相较而言乌克兰的航班计划较为敏感,第1周的航空网络节点强度下降速度很大。表明航班计划与国际冲突有一定的相关性,航班计划往往根据现实冲突的剧烈程度进行制定和调整,同时也表明俄罗斯航空网络在复杂冲突事件中具有相对稳定性。

4 结语

基于复杂网络理论和社会网络分析方法,研究了国际航空网络、国际关系(合作或冲突)网络的关联关系。利用2013—2022年10年的OAG数据、GDELT数据,分别构建了国际航空交通网络、国际关系(冲突和合作)网络,提取了这2种主题网络的演化特征,并探索其关系,主要结论如下:

(1) 国际航空网络与国际关系网络都具备小世界特性和无标度特性。2种网络都较为稠密,少数国家与其他国家存在大量的航空交互以及冲突和合作关系。基于GDELT数据构建的国际关系网络具有更稠密的网络结构。

(2) 国际航空网络与国际关系网络的规模在2013—2022年先升后降,但达到极值的时间节点不一。国际关系网络的规模在2015—2016年达到最大,国际航空网络的规模在2020年达到峰值。

(3) 国际航空网络与国际关系网络的节点和结构存在相似性,这种相似性在2022年显著下降,与俄乌局势恶化有关。2种网络的局部演化与关联分析表明:国际航空网络相较于国际关系网络的时序演化具有滞后性。

作者贡献声明:

秦 昆:构思框架、论文撰写、论文修改。
 张 凯:数据处理、论文撰写、论文修改。
 阮建平:构思框架、论文修改。
 卢宾宾:构思框架、论文修改。
 邢玲丽:处理数据、论文修改。
 叶茹琪:处理数据、论文修改。
 喻雪松:处理数据、论文修改。
 周 扬:处理数据、论文修改。
 刘东海:处理数据、论文修改。
 秦育罗:处理数据、论文修改。

参考文献:

- [1] 周慧艳, 石丽娜, 张旭, 等. 我国区域多机场复合系统协调发展研究 [J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2011, 13(2): 48.
 ZHOU Huiyan, SHI Lina, ZHANG Xu, *et al.* On coordinated development of China's regional multi-airport compound system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(Social Sciences), 2011, 13(2): 48.
- [2] 李志, 摆倩倩, 叶博嘉. 后疫情时期的机场旅客吞吐量预测 [J]. 航空计算技术, 2022, 52(6): 40.
 LI Zhi, BAI Qianqian, YE Bojia. Prediction of airport passenger throughput in post-epidemic era [J]. Aeronautical Computing Technique, 2022, 52(6): 40.
- [3] 李丹丹, 汪涛, 周辉. 基于不同时空尺度的知识溢出网络结构特征研究 [J]. 地理科学, 2013, 33(10): 1180.
 LI Dandan, WANG Tao, ZHOU Hui. The structural characteristics knowledge spillover networks based on different spatial and temporal scales [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(10): 1180.
- [4] 罗赟骞, 汤锦辉, 赵钟磊, 等. 中国航空交通网络时变和多层次特性分析 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(4): 4.
 LUO Yunqian, TANG Jinhui, ZHAO Zhonglei, *et al.* Analysis of Chinese airport network's time-varying and multi-layered features [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2014, 11(4): 4.
- [5] YAO Hongguang, XIAO Huihui, WEI Wei. Study on the hierarchical structure of the "Belt and Road" aviation network based on K-Core analysis [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022, 2022: e2349523.
- [6] 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.
 ZHANG Peiwen, DU Fumin, WANG Xue, *et al.* Spatial structure evolution and analysis of Chinese passenger aviation network in the last decade [J]. World Regional Studies, 2021, 30(6): 1253.
- [7] 裴韬, 舒华, 郭思慧, 等. 地理流的空间模式: 概念与分类 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(1): 30.
 PEI Tao, SHU Hua, GUO Sihui, *et al.* The concept and classification of spatial patterns of geographical flow [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(1): 30.
- [8] 秦昆, 罗萍, 姚博睿. GDELT 数据网络化挖掘与国际关系分析 [J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(1): 14.
 QIN Kun, LUO Ping, YAO Borui. Networked mining of GDELT and international relations analysis [J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(1): 14.
- [9] FAGIOLO G, REYES J, SCHIAVO S. The evolution of the world trade web: A weighted-network analysis [J]. Journal of Evolutionary Economics, 2010, 20: 479.
- [10] BELYI A, BOJIC I, SOBOLEVSKY S, *et al.* Global multi-layer network of human mobility [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(7): 1381.
- [11] MICHEL J B, SHEN Y K, AIDEN A P, *et al.* Quantitative analysis of culture using millions of digitized books [J]. Science, 2011, 331(6014): 176.
- [12] WANG W, KENNEDY R, LAZER D, *et al.* Growing pains for global monitoring of societal events [J]. Science, 2016, 353(6307): 1502.
- [13] GUAN M, WU S, LIU C. Comparing China's urban aviation and innovation networks [J]. Growth and Change, 2022, 53(1): 470.
- [14] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440.
- [15] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5439): 509.
- [16] 郭世泽, 陆哲明. 复杂网络基础理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
 GUO Shize, LU Zheming. Fundamental theory of complex network [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [17] ZIPF G. Human behavior and the principle of least effort [M]. Reading: Addison-Wesley, 1949.
- [18] ARNOLD B C. Pareto and generalized pareto distributions [M]. New York: Springer, 2008.
- [19] SIMON H A. On a class of skew distribution functions [J]. Biometrika, 1955, 42(3/4): 425.
- [20] 唐莲, 王大辉. 关于 Zipf-Mandelbrot 律中参数 ρ 的一种解释 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2011, 47(1): 97.
 TANG Lian, WANG Dahui. An explanation of shift parameter ρ in Zipf-Mandelbrot law [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2011, 47(1): 97.
- [21] 郭进利, 汪丽娜. 幂律指数在 1 与 3 之间的一类无标度网络 [J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5635.
 GUO Jinli, WANG Lina. Scale-free networks with power-law exponent between 1 and 3 [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5635.