引文格式:邢玲丽,秦昆,刘东海,等.国际冲突网络与国际航空网络的时空演化与关联分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(1):126-144.DOI:10.13203/j.whugis20240475

Citation: XING Lingli, QIN Kun, LIU Donghai, et al. Spatio-temporal Evolution and Association Analysis Between International Conflict Network and International Aviation Network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(1):126-144.DOI:10.13203/j.whugis20240475

国际冲突网络与国际航空网络的时空演化与关联分析

邢玲丽[1] 秦 昆[1] 刘东海[1] 喻雪松[1] 梁天祺[1] 乔治浩[1]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

摘 要:为了解构地缘政治冲击下全球系统的演化路径,剖析系统内部的耦合关系,构建了顾及时空特征的"复杂网络-关联分析"集成分析框架。首先构建国际冲突网络(international conflict network,ICN)和国际航空网络(international aviation network,IAN),然后融合复杂网络与非线性时间序列分析方法,对两种网络进行时空演化分析与关联分析,进而揭示特殊国际事件背景下地理多元流网络的时空演化规律,并剖析不同主题网络的关联性。结果表明:(1)两种网络对特殊国际事件的响应模式不同:ICN对特殊事件较为敏感,预警性较强;IAN表现出拓扑韧性。(2)以事件主体为核心的局部子网呈现相反的演化趋势:ICN子网逐渐繁荣,IAN子网逐渐凋敝。(3)因果分析实证结果表明,关键节点在双网系统中呈现非对称双向因果特征。

关键词:国际冲突网络;国际航空网络;演化分析;相关性;因果性

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-10-10

DOI:10.13203/j.whugis20240475 **文章编号**:1671-8860(2026)01-0126-19

Spatio-temporal Evolution and Association Analysis Between International Conflict Network and International Aviation Network

XING Lingli[1] *QIN Kun*[1] *LIU Donghai*[1] *YU Xuesong*[1] *LIANG Tianqi*[1] *QIAO Zhihao*[1]

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: The international conflict network (ICN) reflects geopolitical conflicts manifested through news interactions among countries or regions. While the international aviation network (IAN) mirrors aviation relationships between countries or regions. We aim to reveal the spatial-temporal evolution of ICN and IAN, and further analyze the correlation between the two networks. **Methods**: First, we utilize data from the global database of event language and tone and the official aviation guide of 2022. Then, we extract time-series data on news conflicts and air traffic in this year. The conflict between Russia and Ukraine in 2022 is a typical international emergency, with far-reaching impacts on the evolution of international relations. We construct the ICN and IAN respectively based on the different phases of the development of this event, so as to reveal the dynamic characteristics and association between the two networks. Specifically, the geometrically mapping inspired multivariate changepoint detection algorithm is used to define the various phases of the development of the special international event. On this basis, we employ heatmap technology to analyze the spatiotemporal evolution of network hotspots. From both global and local perspectives, we utilize correlation analysis methods including Jaccard similarity and correlation coefficients, as well as causal analysis methods including convergent cross mapping (CCM) and extended CCM (ECCM), to reveal

基金项目:国家自然科学基金(42171448);中央高校基本科研业务费专项资金(2042024kf0005);国家社会科学基金重大项目(21&ZD332)。

第一作者:邢玲丽,硕士生,主要从事全球尺度地理多元流的网络化挖掘分析研究。xingll@whu.edu.cn

通信作者:秦昆,博士,教授。qink@whu.edu.cn

the association between the two networks. **Results:** (1) The response patterns of the two networks to the special international event exhibit significant heterogeneity. The ICN is relatively sensitive to the special international event, with its hotspots gradually concentrating in Russia, Ukraine, Palestine and Israel. The IAN demonstrates topological resilience, with its hotspots consistently anchoring in Europe, North America, and the United Arab Emirates. (2) The evolving trends of local subnets centered on the special international event entities effectively reflect changes induced by the conflict. The two subnets demonstrate contrasting evolutionary patterns. The ICN subnet progressively expands, with its peak node count growing to 204.35% and peak edge count to 273.77% of pre-conflict levels. While the IAN subnet gradually contracts, decreasing to 82.67% of original nodes and 61.40% of edges. (3) Compared to traditional correlation-based network analysis methods, the causal inference framework enhances time-series analysis of complex networks. Traditional correlation metrics struggle to capture the evolution characteristics of the ICN and IAN, which are driven by nonlinear dynamic mechanisms. In contrast, the empirical dynamic modeling-based CCM and ECCM causal analysis frameworks, requiring no model equations, prove more suitable for complex network association analysis. (4) Causal analysis reveals asymmetric bidirectional causal relationships between key nodes. For example, the causal effect of Russia's international conflict intensity on international aviation intensity is 0.3, while the reverse causal effect is 0.7. This suggests that geopolitical conflict information has a limited impact on Russia's international aviation industry, but Russia's aviation crisis strongly influences its international public image. Notably, CCM requires no lag-time specification, while ECCM is better suited for detecting fixed-lag causal relationships. **Conclusions:** We integrate complex network analysis with nonlinear time-series analysis to establish a "dynamic coupled network-association analysis" framework to reveal the global system evolution under geopolitical shocks. The revealed ICN-IAN evolutionary patterns under the special international event hold significant decision-making value for international conflict early warning and resilience governance of aviation networks.

Key words: international conflict network (ICN); international aviation network (IAN); evolution analysis; correlation; causality

特殊国际事件对国际地缘政治关系和国际航空交通产生了深远影响,定量挖掘这些影响的模式,分析两种影响的相关性和因果关系,有助于更透彻地认识全球机制的复杂性。复杂网络分析是一种研究复杂系统元素之间拓扑关系和交互作用的理论框架,通过将系统中的元素抽象为节点,将元素之间的关系抽象为边,构建出网络模型,进而分析网络的结构、功能和动态行为。作为其分支的社会网络分析,则聚焦于探讨各类社会实体之间的关系。在时空数据分析技术[1]的加持下,复杂网络理论在社会网络分析中展现了强大的应用潜力,包括国际关系演化分析[2]、国际贸易演化分析[3]、犯罪网络[4]时空分析、人口流动演化分析[5]和航空交通演化分析[6]等。基于这些应用场景,形成了地理流[2]和地理多元流[7]框架,它们以复杂网络理论为基础[8-9],将全球物质信息交互与空间数据融合起来。双边交互种类的多样性决定了地理多元流网络的多样性,应用地理多元流框架,探测特殊事件背景下多网络的演化模式及其关联关系,有助于理解世界系统的运作规律,为防范化解重大风险提供预警信息和控制策略。

当前,网络科学研究聚焦于4大维度:(1)网络拓扑分析[10],涵盖中心性、聚类系数[11]、最短路径长度等关键统计特征。(2)复杂系统动态建模,重点研究网络中物质信息流传播的动力学过程。(3)系统鲁棒性评估,即网络在随机故障或定向攻击下的稳定性。(4)网络生成与演化规律,探索网络的连接偏好、驱动机制以及动态发展过程。尽管网络科学已在生物神经网络解析、生态系统稳定性评估、社会经济系统建模、地缘政治格局演化等领域取得了显著进展,但仍存在一些学术争论和挑战,最典型的挑战包括两个方面:(1)真实复杂系统中多维非线性动态机制与经典理论简化研究范式之间的矛盾。网络动态本质上是多维度驱动力的非线性耦合过程,这些驱动力往往不可线性叠加(如竞争与合作),且相互反馈[12],数据序列往往表现出趋势性[13]、季节性[14]、随机波动[15]等非平稳特征和影响滞后性[16];而传统方法基于过度简化的假设,如不同种类的多元

回归方法均有各自的假设[17],自回归积分滑动平均模型依赖“差分后时间序列平稳”的前提[18]等。(2)广泛应用的单元流网络与多系统复杂交互机制之间的矛盾。现有研究大多关注由单一流构成的网络,缺乏对多网络交互机制的深入探索。而事实上,许多互动发生在多系统之间[19],如疫情传播与信息传递的相互作用[20],同名用户在不同社交媒体中的社交关系网和行为特征的耦合效应[21],不同城市要素的相互作用[22]等。为了更真实地模拟现实环境,亟需通过全面的态势感知数据构建地理多元流网络,实现多维-动态耦合的分析框架。

基于社会网络分析研究国际关系问题已逐渐被广泛接受,这源于捕捉政治实体的静态交互模式、动态演化规律及关联特征[2,23]对形成国际关系发展策略[24]的必要性。国际冲突网络(international conflict network,ICN)和国际航空网络(international aviation network,IAN)是两种重要网络,前者基于新闻报道的双边冲突信息而构建,反映了国际地缘政治互动的性质和强度,为虚拟流网络;后者基于航空关系而构建,反映了国际航空联系的紧密程度,为实体流网络。研究者已对ICN和IAN进行了广泛研究,发现这两种网络具有共性,如复杂网络特性[2,25]、距离衰减效应[26-27]和密集化趋势[26,28]等。同时,两种网络也具有各自独特的属性:如国际冲突和合作网络(ICN更全面的形式)节点的聚集性逐渐减弱[23],且对重大事件敏感[2];IAN节点呈现核心-边缘结构[29],连通性表现出随季节变化的周期性特征[30]。

ICN和IAN反映了国际局势的不同方面,两者具有复杂的关联关系。然而,现有研究往往侧重分析单一网络中不同尺度的空间交互,而较少分析长时序演化特征及多种网络的关联性,这意味着对多重复杂机制耦合效应探索的缺失。这种局限性在特殊国际事件的网络化研究中尤为突出,尽管已经证实2022年所发生的特殊国际事件会影响全球航空的复苏[31],但现有文献仍存在3种局限:(1)以自然年为时间粒度,忽视更细时间粒度的冲突演变对网络结构的影响[32]。(2)侧重对地缘政治[33]或航空关系[31]的单一领域分析,忽视了两个领域网络的协同演化研究。(3)缺乏因果推断方法的应用和分析,分析框架仍然局限在传统的相关性分析方法中[31,34]。为了加深对多层次交互模式的理解,有必要开展更深入的ICN和IAN关联分析[7,35]。

关联分析包括关联性、相关性和因果性[36]。关联性是最基本、最宽泛的关系,它仅意味着变量X提供了变量Y的信息:如果$P(X|Y)\neq P(X)$,则两者存在关联[37],反映了变量之间某种程度的依赖或协同,是定性的。相关性则提供了定量衡量变量间关联性强弱和正负的统计指标,当两个变量同时呈现相同或相反的趋势时,它们就是相关的[36]。相关性分析指标包括斯皮尔曼(Spearman)相关系数[38]、皮尔逊(Pearson)相关系数[39]、杰卡德(Jaccard)系数[40]等,已经在地理多元流网络层内部[41-42]和层之间[35]得到了广泛应用。例如,文献[43]发现了IAN内多种节点中心性指标的强相关关系,秦昆等[28]通过Jaccard指数发现了国际关系网络和IAN的相关性。因果性是一种比相关性更深入的关系,蕴含了明确的导致变量变化的方向性和时间顺序。变量间有相关性并不意味着存在因果链,存在因果链的变量也有可能因非线性关系、数据分布模式和时间差异等因素而掩盖相关性。在传统线性动态系统中,格兰杰因果关系检验法因其简洁性和有效性而被广泛采用,其核心逻辑是:如果变量X提供的独特信息能够改善对变量Y的预测,那么X是Y的因[44]。然而,随着研究的深入,越来越多的学者开始关注非线性动态系统中的因果关系。图灵奖得主PEARL[45]将因果分析分为相关分析、干预分析和反事实推理3个层次,其应用的因果发现算法为结构因果模型法[46],要求对因果图有一定的先验假设。收敛交叉映射法(convergent cross mapping,CCM)是一种基于经验动态建模的因果推断方法,由于没有直接涉及干预分析和反事实推理,不在三层次因果阶梯之内,但由于对非线性动态系统和时间序列数据的关注,其适用于没有明确因果图先验知识且难以进行干预实验的场景,在捕捉复杂动态因果关系方面更为灵活。基于交叉映射的算法包括CCM[47]、拓展CCM[48](extended CCM,ECCM)、多空间CCM[49]和地学CCM[50]等。其中,CCM可以检验较弱至中等耦合强度系统中的因果关系,ECCM考虑了时间滞后,能够识别由强单向因果关系导致的伪双向因果,并且可以识别最佳滞后期。

本文以文献[28]对2013—2022年ICN、国际合作网络和IAN之间的关联性及稳定性分析为前序研究基础,该研究有时间和空间尺度多样化的优势,但两个局限性制约了其理论纵深和实践

应用价值。(1)时间粒度过粗。以年和周为构建网络的时间尺度,对于突发事件而言粒度过粗,可能掩盖关键转折信息,难以捕捉这些突发事件的特征和影响。(2)分析深度有限。对于网络演化,仅分析了全局网络整体测度的演化,定性分析了局部网络的演化,限制了对其动态变化机制的深入理解;对于关联分析,未构建因果推断框架,未分析新闻冲突与航空往来的因果关系。

本文进一步聚焦于2022年的特殊国际事件,提取关键的双边关系变量,基于几何映射多元变点发现算法(geometrically mapping inspired multivariate changepoint detection, GeomCP)识别国际关系的转折点,划分出多个阶段,分别构建不同阶段的ICN和IAN;采用热图技术分析ICN和IAN的热点时空分布特征;运用Jaccard相似度、相关系数等相关性分析方法以及CCM、ECCM等因果分析方法,从整体和局部视角分别揭示ICN和IAN的相关性和因果关系。

1　数据与网络构建

采用全球事件语言语调数据库(global database of event language and tone,GDELT)的事件库(event database,ED)提供的新闻媒体数据构建ICN。ED依据冲突与调解事件观察量表(conflict and mediation event observations,CAMEO)对事件进行编码[51],CAMEO的事件类型分为20个大类和300多个小类。GDELT对每一类事件赋予了戈德斯坦评分,打分的依据是冲突-合作量表[52],该量表是国际关系领域专家制作的对国际互动事件进行系统评分的一个连续量表。因此,ED中提取的事件均为政治合作或冲突事件,一条记录代表一个事件,每条记录有58个属性字段。本文基于ICN的构建需求遴选了5个关键属性:事件主体1、事件主体2、事件分类编码、媒体报道数、戈德斯坦评分,示例数据条目如表1所示。

表1　GDELT ED数据示例

Table 1　Example of GDELT ED Data

事件主体1 (国家/地区三字母编码)	事件主体2 (国家/地区三字母编码)	事件分类编码	媒体报道数/篇	戈德斯坦评分
GBR	FRA	3	3	−4
FRA	USA	4	7	−3
KOR	USA	3	6	−2

表1中,事件主体1、事件主体2为国家或地区的ISO(international organization for standardization)三字母编码;事件分类编码用于标识事件的主要分类,3表示口头冲突,4表示实质冲突;媒体报道数为数据库中提及该事件的文章数量;戈德斯坦评分是数据集中可直接应用的一个字段,取值范围是[−10,10],分值的正、负分别代表事件具有积极、消极的影响,分值的绝对值与该事件的影响力成正相关。

本文筛选事件分类编码为3或4的冲突事件,以国家或地区为节点,以节点间的冲突为边。边权重为某段时间内节点间的累计冲突强度,即所有冲突事件的影响程度(用戈德斯坦评分字段表示)的绝对值与报道该事件的新闻条目数的乘积之和,计算公式为:

$$W_{ij}=\sum_{v=1}^{q}N\left|G_v\right| \tag{1}$$

式中,W_{ij}为边ij的权重;q为节点i和j共同参与的冲突事件的数量;N为报道事件v的新闻数量;G_v为事件v的戈德斯坦评分。图1为根据表1 ED示例数据生成的冲突网络,英国(GBR)和法国(FRA)在新闻报道中的冲突强度为12,法国(FRA)和美国(USA)的为21,美国(USA)和韩国(KOR)的为12。



图1　新闻事件冲突网络示例

Fig. 1　Example of News Event Conflict Network

采用官方航空指南(official aviation guide,OAG)提供的航班数据和国际航空运输协会(international air transport association,IATA)提供的机场信息构建IAN。OAG提供全球99%以上的航班信息,内容包括航班编号、起降机场(采用IATA提供的国际机场代码标识)、座位数、时间序列等,示例数据条目如表2所示。IATA提供的机场代码表涵盖全球大多数机场,具体信息包括国际机场代码、所属国家/地区三字母编码(使用ISO-3166-1代码进行编码)等,示例数据条目如表3所示。

表2 OAG数据示例

Table 2 Example of OAG Data

起飞机场代码	目的机场代码	座位数/个	时间
MAD	MVD	288	2022-01-26
ZRH	FLR	125	2022-01-26
AHO	BCN	76	2022-01-26

表3 IATA数据示例

Table 3 Example of IATA Data

国际机场代码	国家/地区三字母编码
MAD	ESP
MVD	URU
ZRH	SUI
FLR	ITA
AHO	ITA
BCN	ESP

本文以国家/地区为节点,以节点间的航空交通量为边。首先,通过时间字段过滤各阶段的数据;然后,基于IATA机场数据集,对OAG数据中的机场进行国家/地区三字母编码的匹配;最后统计国家/地区对航空交通的累计座位数,在统计过程中忽略闭环数据(即忽略国家/地区内部的航班交互),构建IAN数据集。示例数据条目如表4所示。

表4 IAN数据示例

Table 4 Example of IAN Data

起点(国家/地区三字母编码)	终点(国家/地区三字母编码)	累计座位数/个
ESP	URU	288
ITA	ESP	76
SUI	ITA	125

节点强度为一个国家/地区内所有通航机场执行航班的累计座位数,边权重为两个国家/地区间所有双边航班的累计座位数,计算公式为:

$$E_{ij}=\sum_{e=1}^{m}\sum_{f=1}^{n(e)}L_f \tag{2}$$

式中,E_{ij}为边ij的权重;m是节点ij间通航机场对的数目;$n(e)$代表第e对通航机场间的实际航班数;L_f代表第e对通航机场间第f条航班的座位数。

2 技术路线与研究方法

2.1 技术路线

根据数据可行性、案例的典型性以及全球影响力,本文选取俄乌冲突作为研究背景。俄乌冲突是近年来规模较大、具有全球性影响的军事冲突之一,对国际政治、经济、能源、粮食安全以及全球交通网络(尤其是航空网络)产生了前所未有的剧烈冲击。其影响的深度和广度使其成为研究重大地缘政治危机如何重塑ICN-IAN耦合网络的极其典型和重要的案例,其冲突持续时间较长,为分析不同主题网络间的动态相互作用、因果关系及滞后效应提供了宝贵的时间窗口。技术路线如图2所示。

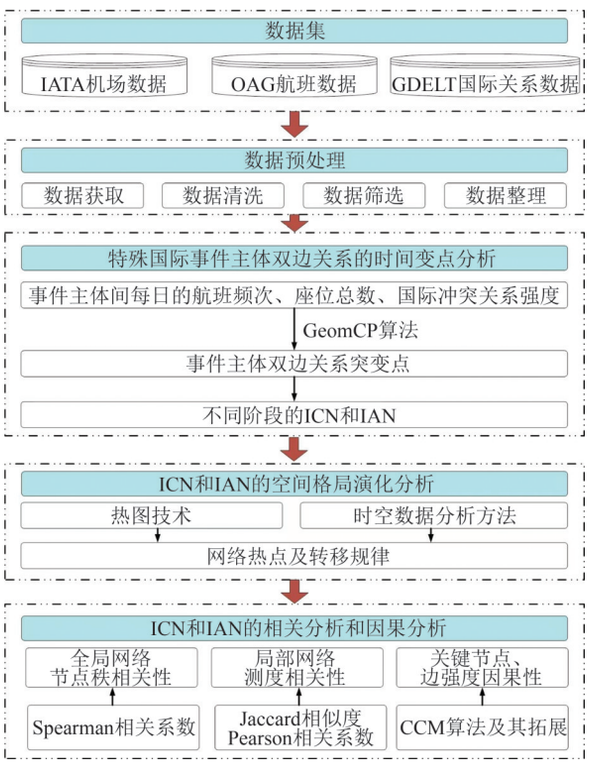


图2 技术路线图

Fig. 2 Technology Roadmap

首先,进行数据预处理,包括数据的获取、清洗、筛选和整理;从GDELT和OAG数据库中去除错误或不完整的记录,筛选出2022年新闻媒体交互数据和全球航班数据,将数据整理为ICN数据集和IAN数据集。其次,利用GeomCP算法挖掘关键双边关系的变点,基于变点将2022年划分为不同阶段,分别构建ICN和IAN。然后,使用热图技术和时空数据分析方法,分析ICN和IAN的空间演化。最后,从全局网络-关键节点-局部网络3个维度层次性地解构特殊国际事件背景下两种网络的关联机制:在全局网络层面,应用Spearman相关系数计算节点在两种网络中加权度的秩相关性,探究特殊国际事件对节点中心性的影响;在局部网络层面,采用Jaccard相似度分析事件主体及其航空直连节点组成的ICN子网和IAN子网结构相似性的演化,应用Pearson相关系数刻画子网拓扑测度的相关性,探究特殊国际事件对事件主体的一阶国际关系的影响;针对事件主体(边),通过CCM及ECCM算法揭示其

在ICN和IAN中的加权度(权重)的因果关系。

2.2 GeomCP算法

时间序列数据常常在某些时间点出现急剧的趋势变化,这种时间点被称为变点[23],挖掘变点有助于提取地缘政治关系和航空交通关系的转折点,从而明确构建ICN和IAN的阶段起止点。

GeomCP算法[53]是借鉴几何学中利用高维向量间角度和距离来量化数据差异的方法。首先,通过计算每个数据点向量与参考向量之间的夹角及距离,将复杂的高维时间序列映射至一个二维向量空间。然后,采用修剪的线性时间精确算法(pruned exact linear time, PELT)[54]分别识别角度序列和距离序列的变点。最后,设定阈值对两种变点进行合并,从而有效发掘原始数据的变点。对于阈值的合并规则,文献[53]认为,变化的方向比变化距离更重要,因而以角度序列的变点为主。然而,本文所探讨的国际冲突关系和航空交互强度时刻处于波动状态,唯有强度的大幅变化能反映冲突的急剧演变,因此本文以距离序列的变点作为主要参考[55]。

本文采用R语言changepoint.geo包的geomcp函数实现GeomCP算法,该包可在CRAN上获取(https://cran.r-project.org/package=changepoint.geo)。具体而言,首先从2022年的GEDLT数据和OAG数据中提取俄乌间的每日航班次数、航班座位总数、冲突关系强度这3个时间序列;其次,通过减去序列中位数并除以中位数的绝对偏差对序列进行标准化,将标准化后的数据映射至距离和角度两个维度;然后,使用PELT算法提取距离维度和角度维度的最优变点序列;最后,设置阈值为14 d,将原序列分割为多个内部一致(均值、方差稳定)的序列段。

2.3 热图

热图技术用渐变色系展现离散数据的数值及分布情况,可以展现复杂网络中信息或物质交互活跃的区域,适用于分析各阶段ICN和IAN热点的空间分布特征,本文采用QGIS软件实现这一技术。

2.4 网络相关性分析

2.4.1 Jaccard相似度

Jaccard相似度[40]用来衡量两个集合的相似程度,其取值范围为[0,1],越接近1说明两个集合越相似,当取值为1时,两个集合完全相同。本文采用Jaccard相似度衡量ICN与IAN的结构相似性,计算公式为:

$$J=\frac{|A\cap B|}{|A\cup B|} \tag{3}$$

式中,J代表Jaccard相似度值;A和B分别是ICN和IAN的节点集合。

2.4.2 相关系数

Pearson相关系数[39]通过度量两个变量之间线性关联的强度和方向来衡量两个变量之间的相关性。本文通过计算不同阶段特殊国际事件的主体及其一阶拓扑邻国构成的ICN和IAN局部网络的拓扑特征指标(包括节点数、边数、度中心性)的Pearson相关系数,系统揭示冲突关系与航空关系在地缘政治格局演变中的耦合机制,计算公式为:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)\left(Y_i-\bar{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i-\bar{Y}\right)^2}} \tag{4}$$

式中,r是Pearson相关系数;n是观测数据点的数量;X_i和Y_i分别是两个变量的第i个观测值;$\bar{X}$和$\bar{Y}$分别是这两个变量的样本均值。r的取值范围为[−1,1],正值和负值分别代表正相关和负相关,绝对值越大,相关性越强。

Spearman相关系数[38]是一种特殊的Pearson相关系数,通过计算每对观测值的等级差衡量两个变量之间的相关性。本文采用Spearman相关系数分析节点在两个网络中的加权度相关性,以探究节点在两个网络中的地位在特殊国际事件期间的演化方向是否趋同。具体地,首先提取ICN和IAN的公共节点,依据其在两个网络中的加权度分别构建两个时间序列,然后计算两个序列的Spearman相关系数,计算公式为:

$$r_s=1-\frac{6\sum d_i^2}{c\left(c^2-1\right)} \tag{5}$$

式中,r_s是Spearman相关系数;d_i是节点i在两个网络中的加权度的序号差;c是公共节点数量。

2.5 网络因果关系分析

本文基于Takens定理[56]和非线性状态空间重构理论,构建国际关系系统的动态演化分析框架。Takens定理表明,动力学系统的每个变量都包含全局信息,因此可以通过单个变量研究系统的演化特征。非线性状态空间重构技术[57]可以基于单一变量的时间序列,按照延迟时间τ和嵌入维度E,重构与原系统拓扑等价的状态空间(相空间)。其中,延迟时间τ是指两次采样之间的时

间间隔,一般设置为1;嵌入维度E是指重构相空间的维数(非先验),可以通过单纯形投影算法进行估计[58]。假设变量X的时间序列是$\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$,取其中一段,构成$X_t=\{x_t,x_{t-1\tau},\cdots,x_{t-(E-1)\tau}\}$,此时,延迟时间为$\tau$,序列长度(即嵌入维度)为$E$。该时序可以表示为$E$维空间上的一个状态点。改变$t$的取值,可以得到不同时间的状态点。多个状态点形成一个E维吸引子流形M_x,它和原始流形M微分同胚(即保留了M的基本拓扑特征),可以反映X所属动态系统的演化过程。因此,通过网络节点的某一交互属性来研究其国际关系复杂系统的演化特征是可行的。

文献[47]基于上述理论提出了CCM算法,用于判断两个变量之间的因果关系及其方向。该算法的核心思想是:如果变量X是Y的因,则可以利用Y的时间序列重构的流形M_Y来预测X的状态,随着用于重构和预测的时间序列长度L(即库长度)的增加,交叉映射预测的准确度ρ会逐渐提高并趋于稳定(收敛)。在具体操作中,假设变量X和Y的时间序列分别为$\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$和$\{y_1,y_2,\cdots,y_n\}$,设置τ和E,重构X和Y的吸引子流形M_x和M_y,则M_x和M_y均与原始流形M微分同胚,M_x和M_y上的点一一对应,且这种对应关系是局部平滑的。根据M_y计算X_t,得到X_t的估计值$\hat{X}_t|M_y$:首先找到Y_t在M_y上的$E+1$个近邻点Y_{t1}、Y_{t2}、$\cdots$、$Y_{t(E+1)}$,它们形成的最小多边形称为单纯形,识别它们的时间索引,这些时间索引同样也是X_t在M_x上的近邻点的时间索引。依据这些近邻点与Y_t的欧氏距离设置不同的权重W_i,结合在上述时刻的状态点$X_{t(i)}$,得到在t时刻的加权平均值,计算公式为:

$$\hat{X}_t|M_y=\sum_{i=1}^{E+1}W_iX_{t(i)} \tag{6}$$

在理想情况下,随着L的增加,重建的流形更加密集,近邻点更加精确,$\hat{X}_t|M_y$更加接近X在t时刻的真实值X_t,ρ提高,当库长度足够长时,ρ会收敛。

文献[48]提出了ECCM算法,通过计算不同滞后期下两个时间序列的交叉映射相关系数判断变量之间的因果关系,并识别最佳滞后期。其中,交叉映射相关系数代表X的原始值与估计值的Pearson相关系数。ECCM算法认为,如果X是Y的因,则从M_y中获得的$\hat{X}_t|M_y$能够交叉映射到$X_{(t+l,l<0)}$,即交叉映射相关系数应在滞后期值为负数的区间具有较高的正值。

CCM算法适用于从复杂的时间序列数据中推断非线性耦合系统中潜在的因果关系,但不适用于强单向因果关系。当原因X对结果Y的影响非常强时,CCM算法可能会错误地认为X和Y之间存在双向因果关系[48]。ECCM算法通过考虑时间滞后,能够更有效地区分强单向因果关系和双向因果关系,并给出原因导致结果变化的最可能的时滞,但这相应地要求原始数据中存在可检测的延迟。

本文提取关键节点(边)每日的国际冲突与国际航空强度(权重),分别构建时间序列,通过R语言rEDM包实现上述两种算法的对比实验。首先,为了确保重构的相空间能够充分捕捉系统的动态行为,采用基于单纯形投影算法的EmbedDimension函数计算最佳嵌入维度E,该函数将时间序列$\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$分为模拟集和预测集,采用模拟集重构吸引子流形,测试不同E取值的重构模型的预测能力,将预测能力最高的E作为最佳嵌入维度。然后,采用rEDM包中的CCM函数实现CCM算法和ECCM算法,该函数的重要参数包括采样间隔τ、嵌入维度E、库长度L、预测步长T_P、用于训练的时间序列C和用于预测的时间序列T。其中,τ为固定参数,取值1;E、L、T_P、C和T为可变参数:当判断变量X是否为Y的因时,C为Y的时序数据,T为X的时序数据。当预测步长$T_P=0$时,实现了CCM算法,用$Y(t)$预测$X(t)$,计算不同L对应的预测能力ρ,依据ρ是否收敛判断两者的因果关系;当T_P等于滞后期时,实现了ECCM算法,用$Y(t)$预测$X(t')$,t'为t与时间滞后期之和,改变T_P的取值,计算不同滞后期下的交叉映射相关系数,依据交叉映射相关系数是否在滞后期为负的区间成立来判断两者的因果关系。

3 时空演化实验与关联分析

3.1 时间变点分析

从2022年共计365 d的ICN和IAN中抽取俄乌间每日航班频次、航班座位总数、国际冲突关系强度的时间序列数据,用GeomCP算法识别双边关系变点。由图3可知,双边冲突、航空强度的时间序列数据并非服从独立同分布,而是呈现“尖峰厚尾”的特征;边权重的波动水平随冲突阶段的不同而存在异质性。

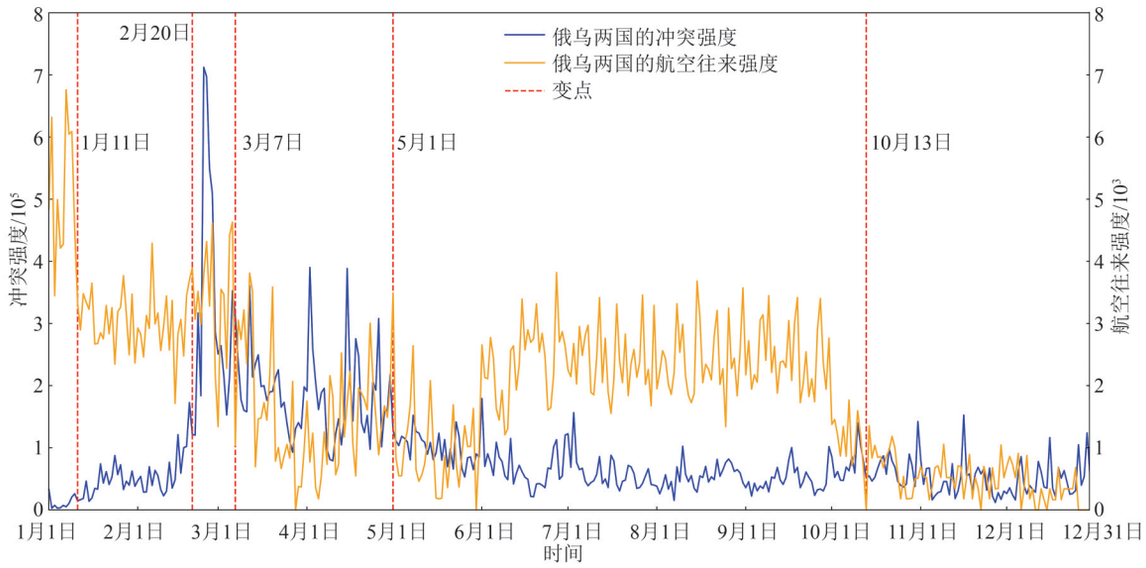


图 3　算法识别的时间分界点

Fig. 3　Algorithm-Identified Time Demarcation Points

基于变点,将2022年俄乌关系的发展分为6个阶段,各个阶段俄乌两国的冲突强度和航空往来强度如图3所示。第一阶段是1月1日至1月10日,冲突强度较弱,航空联系较强,揭示了相对稳定的政治和经济关系。第二阶段是1月11日至2月19日,冲突强度逐步增强,航空强度大幅降低,象征双边关系的急剧降温。第三阶段是2月20日至3月6日,特殊国际事件爆发,冲突强度达到顶峰,航空联系显著波动且大幅削弱。第四阶段是3月7日至4月30日,冲突强度和航空联系缩减至较低水平,但仍然波动,反映了多轮谈判对冲突局势的影响。第五阶段是5月1日至10月12日,冲突强度逐渐减弱,航空联系有所加强,表明战局的渐稳使双边局势相对缓和。第六阶段是10月13日至12月31日,冲突强度波动更加剧烈,航空联系进一步削弱,这与双方战略目标不可调和性的逐渐明朗有关。

算法识别出的变点与实际重大事件发生的时间点相比,有一定超前性。例如,第二个变点(2月20日)比特殊国际事件爆发(2月24日)早4 d,这反映了大规模热战发生前,舆论和前线形势已很严峻,如北约情报机构的预警[59]和小规模武装冲突[60]的涌现,揭示了冲突形势的渐变性。

3.2　热图分析

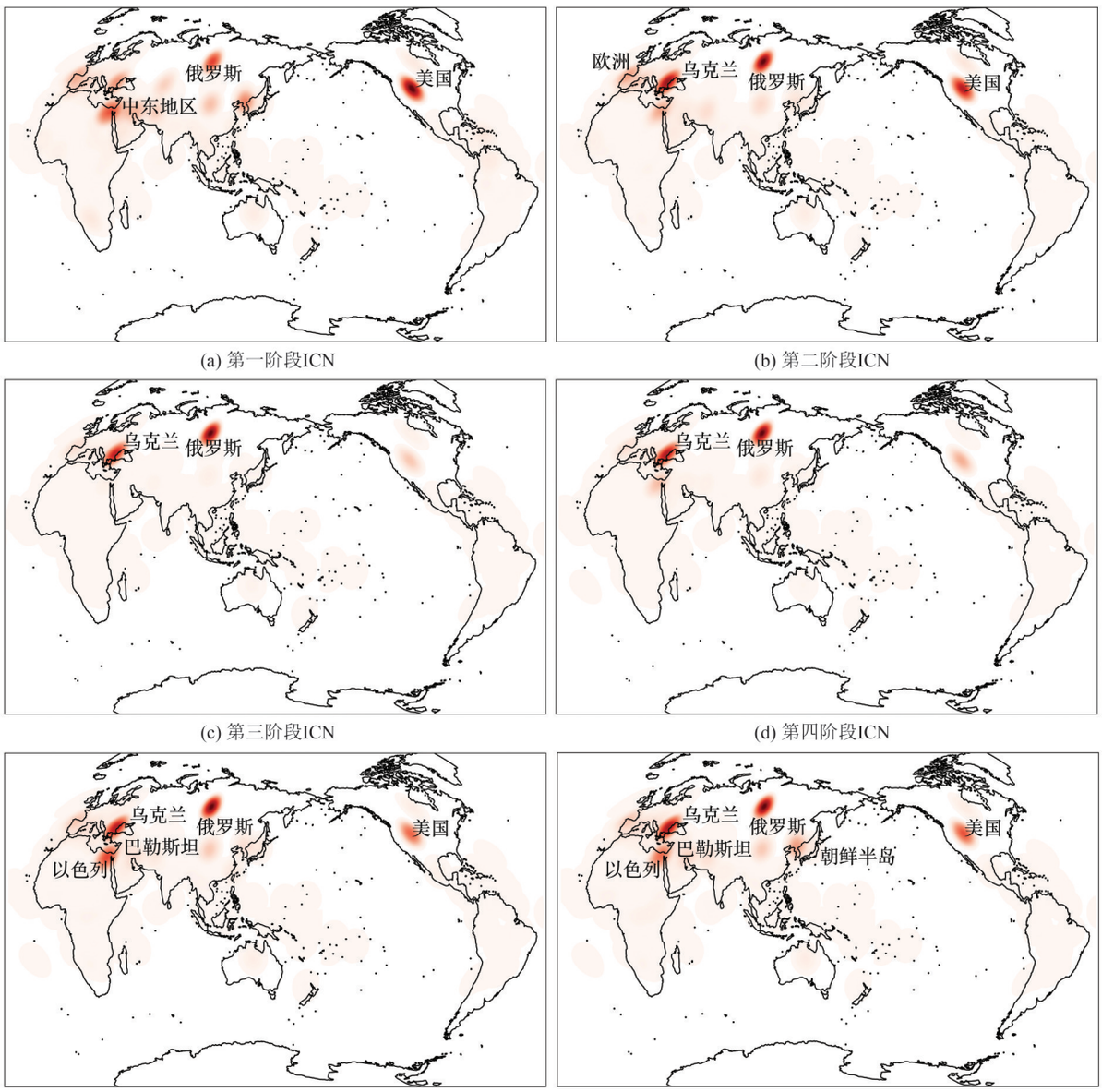
基于变点分析结果,将6个阶段的数据分别汇总,构建ICN和IAN,对冲突强度和航空往来强度进行热图分析,并进行空间可视化,结果如图4和图5所示。结果表明,ICN的热点区域发生显著变化。第一阶段,热点集中在美国、俄罗斯以及中东地区;第二阶段,随着俄乌摩擦不断升级,乌克兰已经成为热点之一,欧洲的热度也上升,反映出世界地缘政治局势的剧烈变化,实际体现在基于冲突预判的各国战略合作的增强[61];第三阶段和第四阶段,俄乌两国成为ICN的两大热点;第五阶段,俄乌的热点值仍然显著,同时巴勒斯坦和以色列的热度上升,揭示了新的地缘政治不稳定因素;第六阶段,朝鲜半岛成为新的热点区域。

与ICN的剧烈变化不同,IAN的热点一直稳定集中在欧洲、北美和阿联酋,反映了全球航空交通的稳健性。事实上,俄罗斯和乌克兰并非IAN的核心节点[62],根据2021年(冲突爆发前)的统计数据,俄罗斯和乌克兰的国际航空客运量占全球总客运量的比例不超过3%[63]。尽管如此,冲突导致的航线改道仍然给全球航空运输增加了一定的成本[31]。

3.3　网络相关性和因果关系分析

3.3.1　全局网络相关性

通过Spearman相关系数计算节点在ICN和IAN中加权度的秩相关性,可以探究节点在两个网络中地位的匹配性。由图6可知,ICN和IAN节点的加权度相关性在整个时期内均在0.60以上,并且高度显著($p<0.001$,p值是统计检验中用于衡量“观察到的结果在假设无效的情况下出现的概率”的指标),这表明:广泛参与地缘政治冲突的国家,在国际航空交通中的重要性也较高。此外,冲突爆发后,ICN和IAN的加权度相关性逐渐增大,这反映了全球国家在地缘冲突舆情和



(a) 第一阶段ICN (b) 第二阶段ICN

(c) 第三阶段ICN (d) 第四阶段ICN

(e) 第五阶段ICN (f) 第六阶段ICN

注:本文地图底图来源于标准地图服务,审图号为GS(2016)1561,行政界线无修改。

图4 ICN热图

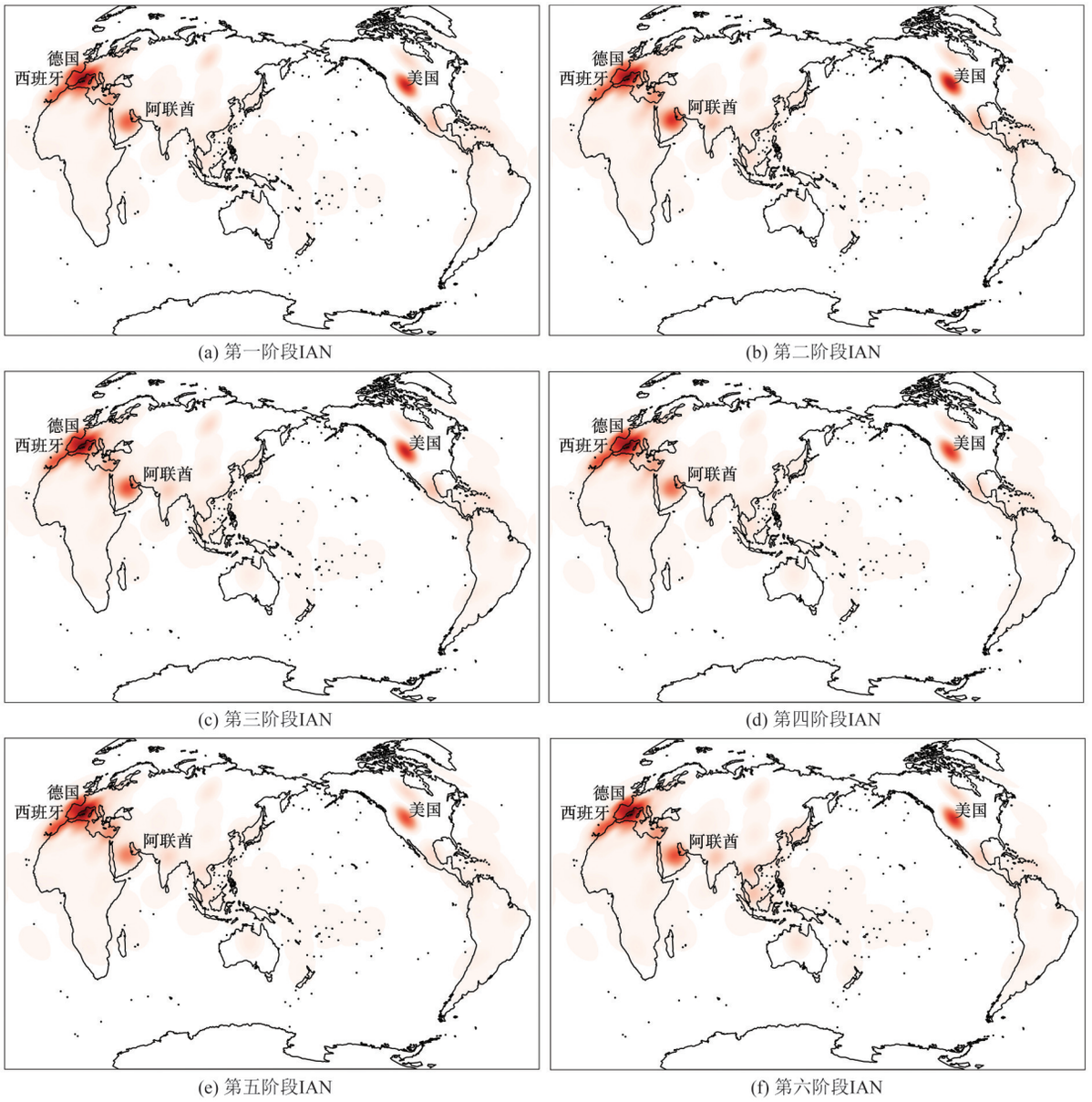
Fig. 4 Heatmaps of ICN

航空交通领域影响力的协同演化,这种网际中心性协同演化启发了两种潜在的因果机制:(1)节点在ICN中地位的变化导致其在IAN中地位的同趋势变化;(2)节点在IAN中地位的变化导致其在ICN中地位的同趋势变化。因此,需要进一步开展因果分析来揭示具体的机制。

3.3.2 局部网络相关性与因果性

1)局部网络测度演化分析。为更明朗地揭示特殊国际事件背景下局部网络的演化特征,本文筛选了事件主体(俄罗斯和乌克兰)在两个网络中的直接邻居,构建了6个阶段的局部网络。为展示演化趋势,等间隔选取第一、第三、第五阶段的网络,如图7所示,边的粗细与冲突或航空往来的强度成正比。分析可知,冲突爆发后,ICN子网的规模逐渐增大,而IAN子网的规模大幅减小。

为定量分析两种子网的演化规律,本文对6个阶段的子网进行拓扑分析。由于各阶段的天数不同,对每个阶段的加权特征进行平均化处理,结果如表5、表6所示。分析可知,两种网络具有异质性的演化特征:(1)俄乌冲突使两国的相关舆情繁盛,而航空交通凋敝。ICN子网在冲突中呈现出扩张-饱和-轻度收缩3阶段特征,节点数从第一阶段的92激增至第四阶段的峰值188(增幅104.35%),边数增长173.77%,总体上表明因受该事件波及而与两国产生地缘政治冲突的国家越来越多;而IAN子网节点数短暂上升后持续衰减



(a) 第一阶段IAN　(b) 第二阶段IAN

(c) 第三阶段IAN　(d) 第四阶段IAN

(e) 第五阶段IAN　(f) 第六阶段IAN

注:本文地图底图来源于标准地图服务,审图号为GS(2016)1561,行政界线无修改。

图 5　IAN热图

Fig. 5　Heatmaps of IAN

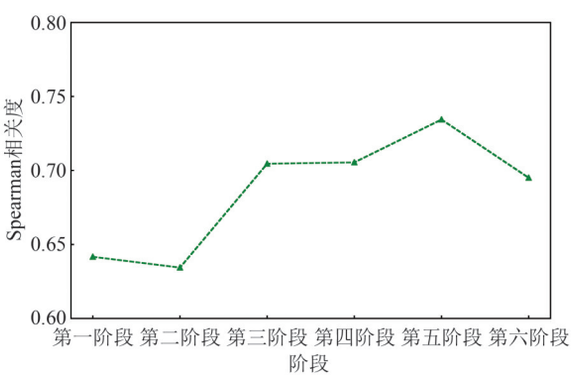
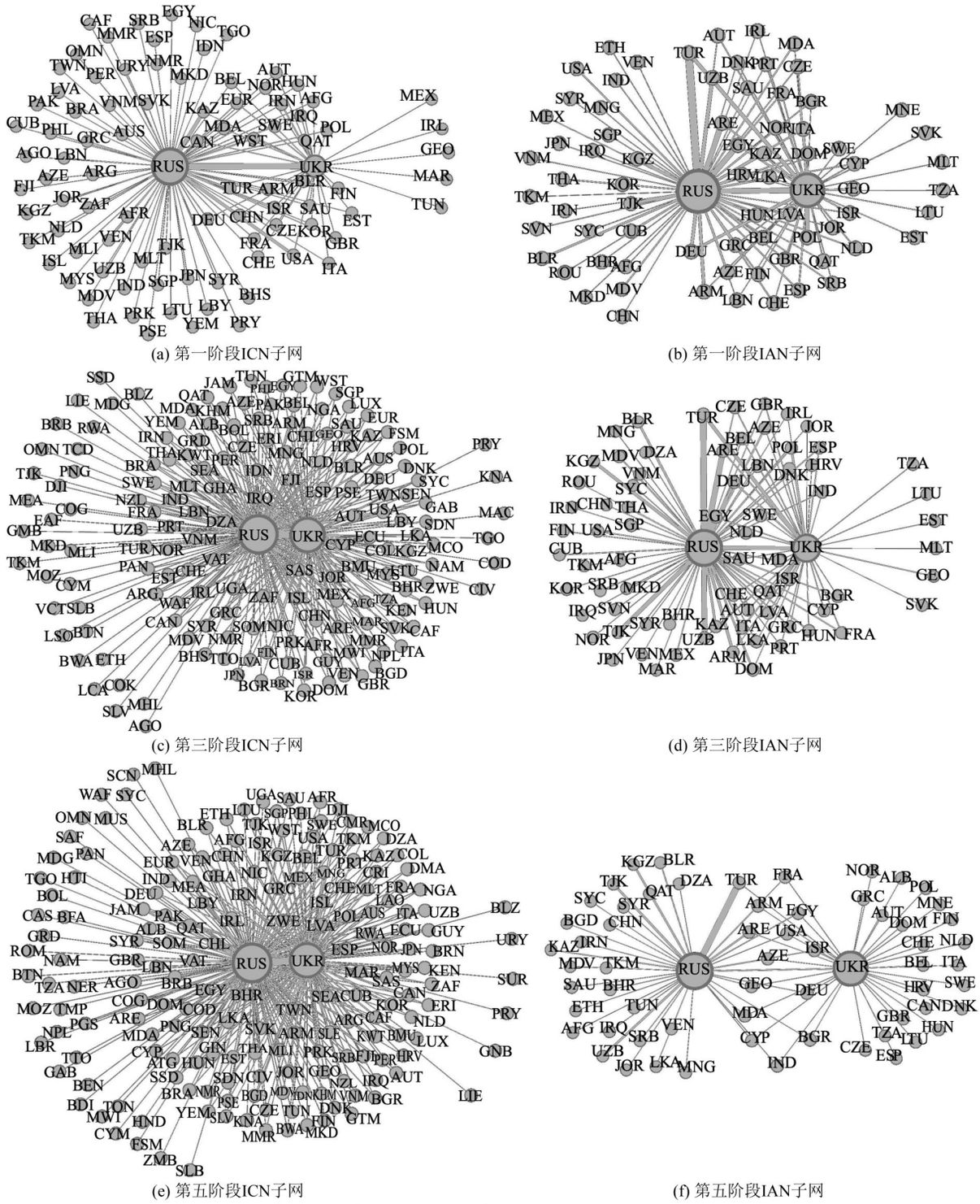


图 6　ICN和IAN的节点加权度的相关性及其演化

Fig. 6　Weighted Degree Correlation and Its Evolution of ICN and IAN Nodes

(从75降至62,降幅17.33%),边数从第二阶段开始衰减(从117降至70,降幅40.17%),反映了航空制裁[63]和航空安全风险引起的航空业务缩减。(2)两类网络节点的日平均加权度展现出不同的波动模式。ICN子网节点的日平均加权度先升后降,其峰值的出现与该事件爆发时间高度同步,随着冲突的持续,媒体关注度逐渐下降;IAN子网节点的日平均加权度呈现下降-上升-下降-上升的多阶段震荡特征,第五和第六阶段的反弹揭示了人员流动的必要性和航空网络的弹性恢复力。(3)事件主体受影响的程度不同。在ICN子网中,两国的日平均加权度上升幅度不同,俄罗斯的峰值上升至第一阶段的1 922.51%,而乌克兰的峰值上升至第一阶段的2 608.77%;在IAN子网中,两国的日平均加权度下降幅度不同,俄罗斯的日平均



(a) 第一阶段ICN子网 (b) 第一阶段IAN子网

(c) 第三阶段ICN子网 (d) 第三阶段IAN子网

(e) 第五阶段ICN子网 (f) 第五阶段IAN子网

注:圆圈中的缩写代表国家/地区的名称(三字母编码),使用ISO-3166-1代码进行编码。

图7 第一、第三、第五阶段的ICN与IAN子网

Fig. 7 ICN and IAN Subnets in the First, Third and Fifth Phases

加权度最终波动下降至第一阶段的63.72%,乌克兰的日平均加权度最终下降至第一阶段的6.30%。

为了得到更全面的结果,采用Jaccard相似度探究由俄罗斯或乌克兰及其航空直连节点构成的ICN和IAN子网的重叠度演化,结果如表7所示。俄罗斯的ICN-IAN子网重叠度最终下降至第一阶段的50%,乌克兰的ICN-IAN子网重叠度最终下降至第一阶段的37%,表明俄乌冲突的持续发酵不仅导致两国更频繁地卷入冲突关系中,而且引发其民航合作关系的破裂,印证了冲突主体在冲突和航空领域角色分化的事实。

2)局部网络测度相关性演化分析。应用Jaccard相似度反映ICN和IAN子网节点构成的

表 5　ICN 子网的测度演化

Table 5　Metrics Evolution of ICN Subnet

阶段	节点数/个	边数/条	平均度	日均加权度	RUS 日均加权度	UKR 日均加权度
第一阶段	92	122	2.65	775.00	30 769.47	16 791.24
第二阶段	143	224	3.13	1 794.97	97 219.07	83 480.76
第三阶段	170	300	3.53	8 057.33	591 545.04	438 044.96
第四阶段	188	334	3.57	3 555.47	283 604.74	233 375.07
第五阶段	187	329	3.52	1 205.25	99 532.94	79 778.64
第六阶段	161	283	3.52	1 095.31	75 803.37	64 590.71

表 6　IAN 子网的测度演化

Table 6　Metrics Evolution of IAN Subnet

阶段	节点数/个	边数/条	平均度	日均加权度	RUS 日均加权度	UKR 日均加权度
第一阶段	75	114	3.04	2 213.30	60 102.50	28 044.60
第二阶段	78	117	3.00	1 727.15	49 351.75	20 953.48
第三阶段	75	111	2.96	1 790.24	53 245.36	17 278.71
第四阶段	72	83	2.31	773.64	27 100.87	2 284.20
第五阶段	63	76	2.41	1 239.52	37 966.95	3 133.69
第六阶段	62	70	2.26	1 277.75	38 294.91	1 767.24

表 7　不同阶段 ICN 和 IAN 子网的 Jaccard 相似度演化

Table 7　Jaccard Similarity Evolution of ICN and IAN Subnets in Different Phases

国家/地区三字母编码	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段	第五阶段	第六阶段
RUS	0.50	0.47	0.40	0.35	0.22	0.25
UKR	0.62	0.41	0.32	0.10	0.23	0.23

相关性演化,结果如图 8 所示。由图 8 和表 7 可知,ICN 子网的节点数量总体呈大幅上升趋势,IAN 子网的节点数量在冲突爆发后逐渐降低,两种子网的 Jaccard 相似度大幅降低,其交互对象重叠度由第一阶段的 0.53 降至第五阶段的 0.32。这些数据表明,俄乌两国越来越频繁地卷入不同种类和程度的地缘政治冲突,两国的航空交通版图大幅收缩,反映了热战冲突的级联次生危害,以及对两国航空业的不利影响。

ICN 和 IAN 的测度相关性如表 8 所示,p 值用于判断相关性是否具有统计显著性,当 p 值小于 0.05 时,相关性被认为具有统计显著性。由表 8 可知,ICN 和 IAN 子网的拓扑指标演化并不具备显著相关性,揭示了传统相关分析方法在处理非线性复杂系统时序数据上的局限性。原因在于,复杂系统的非线性动力学机制可能导致各拓扑变量之间的相关性可随系统状态的变化而改变或消失,这种幻象性相关[64]是复杂系统的标志特征之一。

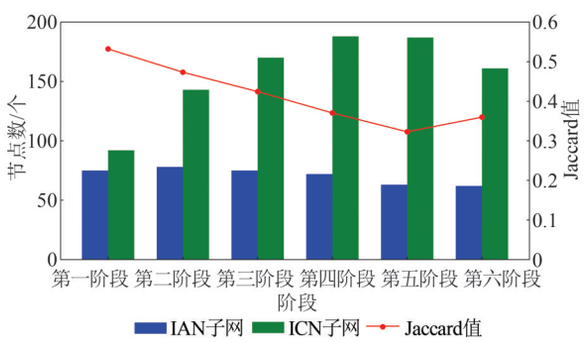


图 8　ICN 和 IAN 子网的结构相似性及其演化

Fig. 8　Structural Similarity and Its Evolution of ICN and IAN Subnets

表 8　ICN 和 IAN 的测度相关性

Table 8　Metrics Correlation of ICN and IAN

指标	节点数/个	边数/条	平均度	平均强度	RUS 日均节点强度	UKR 日均节点强度
Pearson 相关系数	−0.46	−0.65	−0.69	0.01	0.02	−0.06
p 值	0.36	−0.16	0.13	0.98	0.97	0.91

3)局部网络测度因果性分析。分析 ICN 和 IAN 中同名关键节点(边)的测度在特殊国际事件背景下的因果关系,有助于揭示节点和双边关系对冲突的反馈速度,评估不同国家(双边关系)的抗风险能力,可以辅助提供防范和应对国际性危机的针对性决策。

利用 CCM 和 ECCM 算法探测 2022 年俄罗斯和乌克兰在 ICN 和 IAN 中的加权度,以及俄乌连边在两个网络中权重的因果关系。具体而言,首先构建节点(边)在 ICN 与 IAN 的加权度(强度)

的时间序列;然后使用rEDM库中的EmbedDimension函数评估时间序列的最佳嵌入维度;最后使用CCM函数实现CCM和ECCM模型,结果如图9所示。

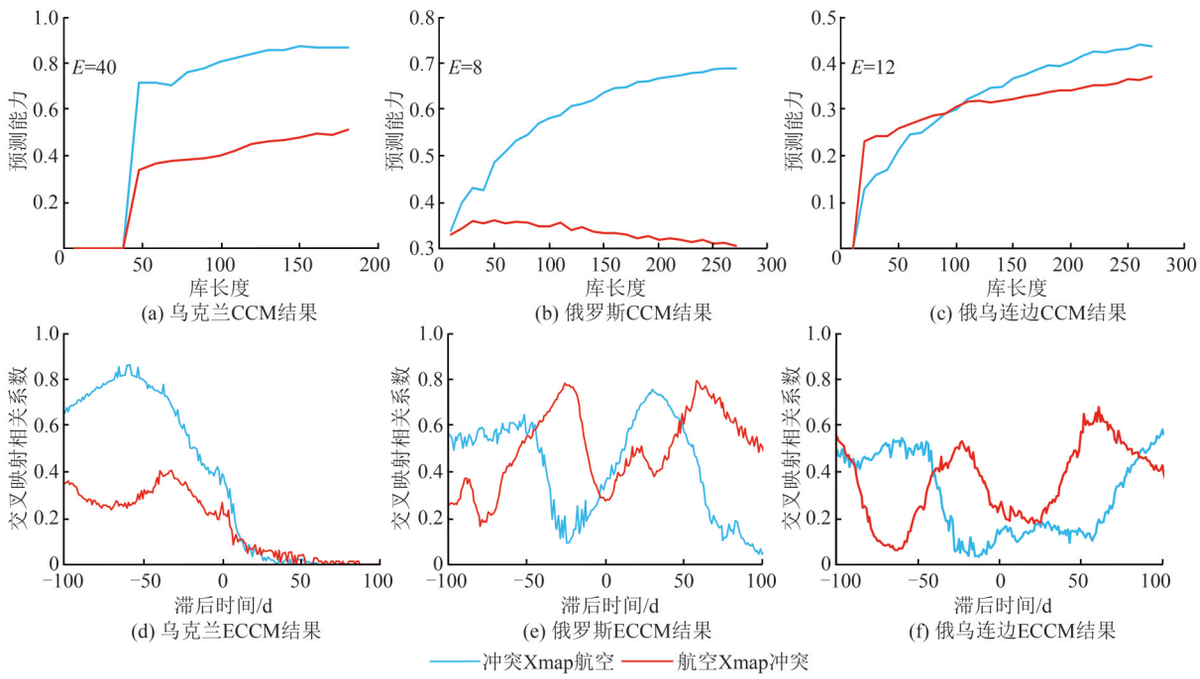


图9 关键节点(边)在ICN和IAN中加权度(权重)的因果关系

Fig. 9 Causality of Weighted Degree (Weight) of Key Nodes (Edges) in ICN and IAN

图9中,图例A Xmap B的意义是利用A中的编码信息恢复B,如果成功,表明A的时间序列保留了B的动态信息,B是A的因。在所有分图中,蓝线为节点(边)在ICN中的加权度(权重)对其在IAN中的加权度(权重)的映射;红线为节点(边)在IAN中的加权度(权重)对其在ICN中的加权度(权重)的映射。对于CCM算法,当变量的时间序列足够长时,预测能力ρ就会收敛;对于ECCM算法,滞后期表示A的变化先于B的变化天数,依据因先于果的逻辑,算法认为交叉映射相关系数应在滞后期为负的区间具有较高的正值。

图9(a)和图9(d)分析了乌克兰在ICN中的加权度与其在IAN中的加权度的因果关系。图9(a)中,蓝线收敛至约0.87,红线收敛至约0.5;图9(d)中,蓝线的交叉映射相关系数在滞后期为−60时达到最大值(约0.87),红线的交叉映射相关系数在滞后期为负的区间也为正,体现了乌克兰在ICN与IAN中的加权度存在一定的双向因果关系。图9(a)和图9(d)均表明:(1)可以从乌克兰在ICN中的加权度中恢复其在IAN中的加权度,即乌克兰的国际航空业是其在新闻媒体中体现的冲突强度的一个因,且这一影响在60 d后逐渐减小。(2)可以从乌克兰在IAN中的加权度恢复其在ICN中的加权度,即乌克兰的地缘政治冲突强度是影响其国际航空业的一个因,且这一影响在31 d后逐渐减小。

图9(b)和图9(e)分析了俄罗斯在ICN中的加权度与其在IAN中的加权度的因果关系。图9(b)中,蓝线收敛至约0.7,红线收敛至约0.3;图9(e)中,蓝线和红线在滞后期为负的区间的交叉映射相关系数值均为正数,但波动性较大。图9(b)和图9(e)均表明:(1)俄罗斯地缘政治冲突强度与国际航空业存在双向因果关系。(2)前者对后者的影响最佳滞后期约为30 d,后者对前者的影响不存在固定的滞后时间。

图9(c)和图9(f)分析了俄乌连边在ICN和IAN中权重的因果关系。图9(c)中,蓝线收敛至约0.44,红线收敛至约0.37;图9(f)中,蓝线和红线在滞后期为负的区间交叉映射相关系数值均为正数,但波动性较大。图9(c)和图9(f)均表明:(1)俄乌间政治冲突强度和航空来往强度存在双向因果关系。(2)它们的因果关系不存在固定的滞后时间。

综上,研究结果揭示了特殊国际事件的主体及其双边关系的“冲突强度(权重)-航空强度(权重)”的因果机制:两者互为因果,其因果强度和滞后时间因事件主体的不同而有差异。差异体现在:俄罗斯、乌克兰两节点的航空强度变化是

引发新闻冲突强度变化的直接原因,且两者的新闻冲突强度变化也会对航空强度产生影响。航空强度影响新闻冲突强度的缘由在于:受航空制裁和航空安全因素的影响,俄罗斯和乌克兰的航空业受到重创,并导致大量国际航线改道,这些冲突与争端是新闻媒体关注的一个重要议题。新闻冲突强度影响航空强度的缘由在于:新闻冲突强度综合反映了节点之间的地缘政治关系的僵化,这种僵化关系往往通过增加出行限制、提升出行成本、削弱公众出行信心等渠道影响航空强度。

此外,不同节点体现了不同的因果关系特性。俄罗斯的国际航空业受新闻冲突报道的影响小于乌克兰的国际航空业受新闻冲突报道的影响,原因可以从两个方面来解释:(1)武装冲突对两国航空设施的影响程度存在差异。俄罗斯本土受到的影响相对较小,主要局限在一些军事设施[65]和少数来自别国的限制措施[63];而乌克兰本土大部分地区接近冲突的主要区域,一些民用机场因安全原因或战略考虑,可能受到不同程度的影响,甚至部分机场暂时停用[65]。(2)俄罗斯的国际经济地位远高于乌克兰,这种在经济领域的关键性保障了俄罗斯的航空业稳定性。俄罗斯是世界重要资源出口国之一,在能源、农业、金属与矿产等领域的地位举足轻重[66],针对俄罗斯的制裁导致能源价格上涨[67],可能影响全球产业发展,因此导致部分航空制裁被放宽[68];相比之下,乌克兰的出口总额排名约为60名[69],综合影响力远低于俄罗斯。

4　总结与讨论

4.1　总结

本文基于GDELT媒体数据和OAG航空交通数据构建2022年ICN和IAN,分析两个网络在特定历史背景下的演化特征及其蕴含的相关性和因果关系。本文验证了文献[28]中IAN与国际关系网络的整体结构相似性,聚焦于俄乌冲突这一特殊国际事件,挖掘了事件主体间双边关系的突变点及突变机制,定量分析了地缘政治冲突和航空热点区域的时空演化规律。基于相关性分析方法,探索了全局ICN和IAN中节点地位的趋同性,以及事件主体与其他国家双边冲突和航空关系的演化情况。基于因果分析算法,定量挖掘了两种网络中同名关键节点及其双边关系的因果关系。得出以下结论:

1) 通过GeomCP算法分析2022年俄乌间冲突强度和航空强度的时间序列数据,发现2022年两国关系发展可分为6个阶段,挖掘了冲突形势的渐变性,发现了算法变点相对于实际冲突的超前性。

2) 特殊国际事件导致ICN热点区域显著变化,事件主体国成为多个阶段热点,但该事件对整体IAN格局影响有限。

3) 基于相关性分析方法,发现全局ICN和IAN中节点地位具有趋同性,随着特殊国际事件的发展,事件主体国卷入了更多地缘政治级联冲突,而两国的航空合作版图显著缩小。局部网络测度相关性演化分析显示,复杂系统非线性动力学机制可能导致幻象性相关。

4) 俄乌节点及俄乌关系在冲突强度与航空强度上存在双向因果关系,且因果强度和滞后时间因主体而异。

4.2　讨论

4.2.1　对结果的解释以及可能出现的原因

研究表明,基于GDELT国际关系数据和OAG航空数据识别的双边关系变点与实际重大事件发生的时间点相比存在预警性,这是由于正式的武装冲突爆发并非孤立或偶然事件,而是深层次矛盾长期累积、外交斡旋失败,且决策者评估和平手段已穷尽后的最终结果,因而冲突升级往往伴随前期舆论的累积与发酵,为国际冲突形势的预测提供了基础。

热图分析发现ICN热点的变化较为显著,对特殊事件更敏感,这是由于新闻媒体综合反映了军事、能源、贸易、金融等多方面的变动[70],对于能引起级联危害效应的国际武装冲突有天然的敏感性,且由于新闻媒体信息流的虚拟性,ICN链接的建立或消失都不需要距离成本。而IAN由实体流构成,代表了在一定的经济和政治关系下形成的较为稳健的航空模式,其热点变化需要强大的经济因素运作。因此,由局部冲突引发的部分非核心航线的短期调整对整体IAN格局影响相当有限。

利用Spearman相关系数、Jaccard相似度等传统相关性分析方法,揭示了两种网络对特殊国际事件的响应模式不同,以事件主体为核心的局部子网的变化趋势相反,然而仅依赖传统的相关性分析方法所揭示的临时拟合现象无法充分捕捉复杂网络的动力学特性,可能遗漏关键信息。相应地,以CCM为代表的经验动态建模方法越过了数

据拟合的过程,通过无模型的方式重构动态系统的行为[71],并从中推断变量间的因果关系,为深入理解复杂网络提供了更有力的工具。

因果分析实证结果表明,相较于基于统计相关的传统网络分析方法,因果推断框架显著提升了复杂网络时序分析的深度:传统相关性指标难以捕捉非线性动力学机制驱动的ICN和IAN演化特征;相对地,基于经验动态建模的因果分析框架不使用模型方程,更适用于复杂网络的关联分析。此外,对比CCM和ECCM的结果可知,两种算法具有异同点。其相同之处在于,两种算法在解析乌克兰节点的冲突强度-航空强度因果关系时,均得出了"具有显著因果关系"的结论;不同之处在于,在解析俄罗斯节点以及俄乌连边的因果关系时,CCM结果的显著性较强,ECCM结果不显著。检验结果呈现上述模式的原因在于数据异质性的存在和固定时间滞后的有无:(1)ECCM在检验不同对象时存在结果异质性,这源于数据的异质性。乌克兰节点国际冲突强度稳定在较高水平,国际航空强度稳定在较低水平,变化模式较为简单;俄罗斯节点的国际冲突强度与国际航空强度的变化模式复杂,呈现不同的演化规律,其国际冲突强度一直处于较高水平,但其国际航空强度在2022年4月1日前先降低,4月1日后又升高,最终恢复至年初水平的63.72%左右。(2)CCM和ECCM在检验同一对象时表现出差异性,这是由于CCM不考虑时间滞后,而ECCM适用于分析存在固定时间滞后期的因果关系。在实际应用中,应充分考虑数据的不同性质,选择具体的研究时间,并结合两种算法挖掘更全面的规律。

4.2.2 本文研究结果的应用价值

本文揭示的双边关系相变特征和局部网络响应特征,为构建多尺度国际冲突预警系统提供了理论依据。基于ICN和IAN对武装冲突响应规律的异质性,可建立双网络耦合监测平台,通过实时分析关键节点间双边冲突关系和双边航空关系的变化,结合ICN的相变临界点和空间热点转移数据,实现对双边关系恶化的早期识别及有效应对。在预警阶段,航空公司可基于ICN热点迁移趋势预判高风险空域,针对性调整运力部署,如缩减该地区航班频次或规划替代航线;在冲突升级阶段,立即启动应急机制,及时调整航线规划、重新配置航空资源,最大程度维持航空网络的总体鲁棒性;在冲突缓和阶段,决策者依据不同国家/地区的冲突-航空间的异质性因果效应,建立国别化响应策略,主动规避受冲突影响较强、航空恢复能力疲软的国家空域,而对受影响较弱、航空恢复能力较强的国家空域规划事后航线重建。这一机制可推广至其他地缘政治敏感地区,通过验证不同冲突案例中的网络演化模式,不断优化预警系统的时空泛化能力。

4.2.3 本文研究方法和研究内容的改进方向

本文研究发现,ECCM作为CCM的进一步拓展,对CCM的结论形成了有益的补充。CCM揭示了关键节点(边)的加权度(权重)在ICN和IAN中的变化存在双向的因果关系,而ECCM则进一步指出,部分因果关系存在固定的时间滞后。不同模型在同一情境下呈现出不同的效力,仅选取单一分析模型可能会制约研究结论的全面性。本文建议未来探索更加多样化的相关性分析模型和因果分析模型,以更精准地识别特殊国际事件背景下复杂系统的运行模式。此外,相关关系和因果关系随研究对象、研究时间而变化,并不存在一种普遍规律。

基于此,未来研究有3大拓展方向:(1)在研究对象方面,结合国际关系学、历史学等学科知识,基于国际冲突的分类体系,引入不同冲突类型的案例,验证研究模型的时空泛化能力,并探讨不同冲突类型对ICN和IAN的影响差异。(2)拓展数据源,纳入航空公司策略调整、票价变动等行为指标,以及贸易额、人口流动指数等双边关系指标,结合新闻媒体数据、航空数据与社交媒体等其他数据,探讨不同时间范围下多元网络测度之间的相关性和因果关系。(3)在研究方法上,探索基于机器学习技术的因果推断方法,如双重机器学习[72]、因果森林[73],并基于强化学习优化预测结果。总之,未来应从研究对象、数据和方法层面进行拓展,获得对冲突影响的更全面认知,提升地理多元流网络的可解释性和可预测性。

参 考 文 献

[1] 秦昆,许凯,吴涛,等. 智能空间信息处理与时空大数据分析探索[J]. 地理空间信息,2022,20(12):1-11.
QIN Kun, XU Kai, WU Tao, et al. Intelligent Spatial Information Processing and Spatio-temporal Big Data Analysis Exploration[J]. *Geospatial Information*, 2022, 20(12): 1-11.

[2] 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):14-24.

QIN Kun, LUO Ping, YAO Borui. Networked Mining of GDELT and International Relations Analysis[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(1): 14-24.

[3] LIU D H, YANG Z W, QIN K, et al. Spatial-Temporal Analysis of the International Trade Network [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2025, 28(5): 2567-2595.

[4] 王增利, 刘学军, 陆娟, 等. 犯罪网络构建及其时空分析: 以入室盗窃为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(5): 759-765.
WANG Zengli, LIU Xuejun, LU Juan, et al. Construction and Spatial-Temporal Analysis of Crime Network: A Case Study on Burglary[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 759-765.

[5] BARNETT G A, NAM Y. A Network Analysis of International Migration: Longitudinal Trends and Antecedent Factors Predicting Migration[J]. *Global Networks*, 2024, 24(2): e12455.

[6] AZZAM M, KLINGAUF U, ZOCK A. The Accelerated Growth of the Worldwide Air Transportation Network[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, 215(1): 35-48.

[7] 秦昆, 喻雪松, 周扬, 等. 全球尺度地理多元流的网络化挖掘及关联分析研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(10): 1911-1924.
QIN Kun, YU Xuesong, ZHOU Yang, et al. Networked Mining and Association Analysis of Geographical Multiple Flows at a Global Scale[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(10): 1911-1924.

[8] BARABASI A, ALBERT R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. *Science*, 1999, 286 (5439): 509-512.

[9] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective Dynamics of 'Small-World' Networks [J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.

[10] 栾学晨, 杨必胜, 张云菲. 城市道路复杂网络结构化等级分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(6): 728-732.
LUAN Xuechen, YANG Bisheng, ZHANG Yunfei. Structural Hierarchy Analysis of Streets Based on Complex Network Theory[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37 (6): 728-732.

[11] 万幼, 刘耀林. 基于地理加权中心节点距离的网络社区发现算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1545-1552.
WAN You, LIU Yaolin. Community Detection Algorithm Based on Geographical Weighted Central Node Distance [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10): 1545-1552.

[12] GAVINA M K A, TAHARA T, TAINAKA K I, et al. Multi-species Coexistence in Lotka-Volterra Competitive Systems with Crowding Effects [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1198.

[13] LIU P Y, WU B L, HU Y F, et al. TimeBridge: Non-stationarity Matters for Long-Term Time Series Forecasting [EB/OL]. (2024-10-06) [2025-04-08]. https://arxiv.org/abs/2410.04442.

[14] ELSEIDI M. Forecasting Temperature Data with Complex Seasonality Using Time Series Methods [J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2023, 9(2): 2553-2567.

[15] 梁文娟, 李雪艳. 基于ARIMA、LS-SVM和BP神经网络组合模型的航空运输飞行事故征候预测[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 130-136.
LIANG Wenjuan, LI Xueyan. Flight Incidents Prediction of Air Transportation Based on the Combined Model of ARIMA, LS-SVM and BPNN[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(1): 130-136.

[16] JAFARIZADEH S. Convergence Speed and Robustness Analysis of Epidemic Spreading Processes with Time-Delay [J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2023, 10(6): 3818-3833.

[17] SUN Y M, WANG X Y, ZHANG C, et al. Multiple Regression: Methodology and Applications[J]. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2023, 49: 542-548.

[18] RYAN O, HASLBECK J M B, WALDORP L J. Non-stationarity in Time-Series Analysis: Modeling Stochastic and Deterministic Trends[J]. *Multivariate Behavioral Research*, 2025, 60(3): 556-588.

[19] LING X, HUA B, GUO N, et al. Synchronization in Multilayer Networks Through Different Coupling Mechanisms[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(4): 048901.

[20] 王伟, 李文杰, 李佳晨, 等. 基于社交信息扩散的网络传染病传播防控研究[J]. 重庆医科大学学报, 2023, 48(12): 1393-1400.
WANG Wei, LI Wenjie, LI Jiachen, et al. Research on Prevention and Control of Network Infectious Diseases Based on Social Information Diffusion [J]. *Journal of Chongqing Medical University*, 2023, 48(12): 1393-1400.

[21] 郑德铭, 李思佳, 郑健龙, 等. 跨社交平台耦合网络舆情传播建模与仿真研究[J]. 农业图书情报学

报, 2024, 36(8): 69-81.
ZHENG Deming, LI Sijia, ZHENG Jianlong, et al. Modeling and Simulation of Coupled Network Public Opinion Propagation Across Social Media Platforms[J]. *Journal of Library and Information Science in Agriculture*, 2024, 36(8): 69-81.

[22] 石磊, 白永亮. 要素集聚扩散、空间网络演变与城市功能定位: 来自长江经济带108个城市数据的经验证据[J]. 区域经济评论, 2022(3): 107-117.
SHI Lei, BAI Yongliang. Factor Agglomeration and Diffusion, Spatial Network Evolution and Urban Function Orientation: Empirical Evidence from 108 Cities in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Regional Economic Review*, 2022(3): 107-117.

[23] 罗杭, 李博轩. 国际结构分析与国家权力测量: 基于大数据的网络分析[J]. 世界经济与政治, 2021(6): 48-82.
LUO Hang, LI Boxuan. International Structure Analysis and National Power Measurement: International Relations Network Analysis Based on Big Data [J]. *World Economics and Politics*, 2021(6): 48-82.

[24] SADA S, OIKAWA K, IWASAKI F, et al. International Cooperation Analysis of Asian Political Distance Network Constructed Using Event Data[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 1007796.

[25] 吴宜耽, 孙宏, 张培文, 等. 全球国际航空网络结构的复杂性及其社团特征[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 61(5): 22-30.
WU Yidan, SUN Hong, ZHANG Peiwen, et al. On the Structural Complexity and Community Characteristics of Global International Aviation Network[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2022, 61(5): 22-30.

[26] YUAN Y H, LIU Y, WEI G X. Exploring Inter-Country Connection in Mass Media: A Case Study of China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2017, 62: 86-96.

[27] 王帮娟, 刘承良. 航空网络结构和组织模式的演变: 中美欧的比较分析[J]. 地理研究, 2024, 43(1): 66-85.
WANG Bangjuan, LIU Chengliang. Evolution of Airline Network Structure and Organizational Model: A Comparative Analysis Between China, America, and Europe[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(1): 66-85.

[28] 秦昆, 张凯, 阮建平, 等. 国际航空网络与国际关系网络的特征提取及关联分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(7): 986-993.
QIN Kun, ZHANG Kai, RUAN Jianping, et al. Association Analysis and Feature Extraction of International Aviation Network and International Relation Network[J]. *Journal of Tongji University* (*Natural Science*), 2023, 51(7): 986-993.

[29] VERMA T, RUSSMANN F, ARAÚJO N A M, et al. Emergence of Core-Peripheries in Networks [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10441.

[30] ZOU L, REYNOLDS-FEIGHAN A, YU C Y. Airline Seasonality: An Explorative Analysis of Major Low-Cost Carriers in Europe and the United States[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2022, 105: 102272.

[31] CHU C, ZHANG H C, ZHANG J Y, et al. Assessing Impacts of the Russia-Ukraine Conflict on Global Air Transportation: From the View of Mass Flight Trajectories[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2024, 115: 102522.

[32] 赵鹏军, 赵桐, 张梦竹, 等. 俄乌冲突背景下"一带一路"沿线原油海运网络结构特征及变化分析[J]. 热带地理, 2024, 44(5): 820-837.
ZHAO Pengjun, ZHAO Tong, ZHANG Mengzhu, et al. Structural Characteristics and Changes of Crude Oil Shipping Network Along the Belt and Road in the Context of the Russia-Ukraine Conflict [J]. *Tropical Geography*, 2024, 44(5): 820-837.

[33] 崔守军, 杨宇. 俄罗斯与乌克兰冲突的地缘政治渊源与地缘战略逻辑[J]. 地理研究, 2022, 41(8): 2065-2075.
CUI Shoujun, YANG Yu. The Geopolitical Origins and Geostrategic Logics of Russia-Ukraine Conflict[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(8): 2065-2075.

[34] 梁晶, 龚奕境, 陈伟. 基于WSR方法论的俄乌冲突对我国航运业影响分析[J]. 重庆交通大学学报(社会科学版), 2023, 23(1): 51-59.
LIANG Jing, GONG Yijing, CHEN Wei. Analysis of the Impact of Russia-Ukraine Conflict on Chinese Shipping Industry Based on WSR Methodology[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University* (*Social Sciences Edition*), 2023, 23(1): 51-59.

[35] 董政呈, 方彦军, 田猛. 相互依存网络抗毁性研究综述[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(3): 30-44.
DONG Zhengcheng, FANG Yanjun, TIAN Meng. Review on Invulnerability of Interdependent Networks [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2017, 14(3): 30-44.

[36] ALTMAN N, KRZYWINSKI M. Association, Correlation and Causation [J]. *Nature Methods*, 2015, 12(10): 899-900.

[37] 盖晓平, 王冬青, 赵喜兰, 等. 利用概率统计特性的保护告警信息特征降维方法[J]. 电网技术,

2021, 45(5): 2017-2024.
GAI Xiaoping, WANG Dongqing, ZHAO Xilan, et al. Feature Reduction Method for Alarm Information Protection with Probability Statistical Characteristics [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 2017-2024.

[38] SPEARMAN C. The Proof and Measurement of Association Between Two Things[J]. *The American Journal of Psychology*, 1987, 100(3/4): 441-471.

[39] KARL P. LIII. on Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1901, 2(11): 559-572.

[40] NIWATTANAKUL S, SINGTHONGCHAI J, NAENUDORN E, et al. Using of Jaccard Coefficient for Keywords Similarity[C]//International Conference on Internet Computing and Web Services, Hong Kong, China, 2013.

[41] 高国华,潘英丽. 基于资产负债表关联的银行系统性风险研究[J]. 管理工程学报, 2012, 26(4): 162-168.
GAO Guohua, PAN Yingli. Financial Interlinkages and Contagion Risk in the Interbank Market in China [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2012, 26(4): 162-168.

[42] 刘华军,刘传明,孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究[J]. 中国工业经济, 2015(5): 83-95.
LIU Huajun, LIU Chuanming, SUN Ya'nan. Spatial Correlation Network Structure of Energy Consumption and Its Effect in China[J]. *China Industrial Economics*, 2015(5): 83-95.

[43] CHEUNG T K Y, WONG C W H, ZHANG A M. The Evolution of Aviation Network: Global Airport Connectivity Index 2006—2016[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 133: 101826.

[44] SHOJAIE A, FOX E B. Granger Causality: A Review and Recent Advances[J]. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 2022, 9(1): 289-319.

[45] PEARL J. An Introduction to Causal Inference[J]. *The International Journal of Biostatistics*, 2010, 6(2): 7.

[46] PEARL J. Causal Diagrams for Empirical Research (with Discussions)[M]//GEFFNER H, DECHTER R, HALPERN J Y. Probabilistic and Causal Inference. New York: Association for Computing Machinery, 2022: 255-316.

[47] SUGIHARA G, MAY R, YE H, et al. Detecting Causality in Complex Ecosystems [J]. *Science*, 2012, 338(6106): 496-500.

[48] YE H, DEYLE E R, GILARRANZ L J, et al. Distinguishing Time-Delayed Causal Interactions Using Convergent Cross Mapping[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14750.

[49] CLARK A T, YE H, ISBELL F, et al. Spatial Convergent Cross Mapping to Detect Causal Relationships from Short Time Series[J]. *Ecology*, 2015, 96(5): 1174-1181.

[50] GAO B B, YANG J Y, CHEN Z Y, et al. Causal Inference from Cross-Sectional Earth System Data with Geographical Convergent Cross Mapping[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5875.

[51] 沈石,宋长青,程昌秀,等. GDELT: 感知全球社会动态的事件大数据[J]. 世界地理研究, 2020, 29(1): 71-76.
SHEN Shi, SONG Changqing, CHENG Changxiu, et al. GDELT: Big Event Data for Sensing Global Social Dynamics [J]. *World Regional Studies*, 2020, 29(1): 71-76.

[52] GOLDSTEIN J S. A Conflict-Cooperation Scale for WEIS Events Data[J]. *The Journal of Conflict Resolution*, 1992, 36(2): 369-385.

[53] GRUNDY T, KILLICK R, MIHAYLOV G. High-Dimensional Changepoint Detection via a Geometrically Inspired Mapping[J]. *Statistics and Computing*, 2020, 30(4): 1155-1166.

[54] KILLICK R, FEARNHEAD P, ECKLEY I A. Optimal Detection of Changepoints with a Linear Computational Cost[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2012, 107(500): 1590-1598.

[55] 几何映射多元变点发现算法的思路即参数选择策略[EB/OL]. (2023-06-15)[2024-12-15]. https://blog.csdn.net/materX/article/details/148658112.
The Idea and Parameter Selection Strategy of Geometrically Mapping Inspired Multivariate Changepoint Detection[EB/OL]. (2023-06-15)[2024-12-15]. https://blog.csdn.net/materX/article/details/148658112.

[56] NOAKES L. The Takens Embedding Theorem[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1991, 1(4): 867-872.

[57] DEYLE E R, SUGIHARA G. Generalized Theorems for Nonlinear State Space Reconstruction[J]. *PLoS One*, 2011, 6(3): e18295.

[58] SUGIHARA G, MAY R M. Nonlinear Forecasting as a Way of Distinguishing Chaos from Measurement Error in Time Series [J]. *Nature*, 1990, 344

(6268):734-741.

[59] 央视网.美媒:拜登告诉西方盟友,俄罗斯可能在2月16日“入侵”乌克兰[EB/OL].(2022-02-12)[2023-06-18]. https://news.cctv.com/2022/02/12/ARTIpHvNbFFDIUguKCCRMvDz220212.shtml.
China Central Television Network. US Media: Biden Tells Western Allies That Russia May “Invade” Ukraine on February 16 [EB/OL]. (2022-02-12)[2023-06-18]. https://news.cctv.com/2022/02/12/ARTIpHvNbFFDIUguKCCRMvDz220212.shtml.

[60] 新华网.新闻背景:乌克兰局势发展时间线[EB/OL].(2022-02-22)[2023-04-15]. http://news.cn/world/2022-02/22/c_1128406953.htm.
Xinhua Network. News Background: Timeline of Developments in the Ukraine Crisis [EB/OL]. (2022-02-22)[2023-04-15]. http://news.cn/world/2022-02/22/c_1128406953.htm.

[61] 中国国防报.信息泄露,英承认向乌提供武器[EB/OL].(2022-01-26)[2024-05-06]. http://m.people.cn/n4/2022/0126/c24-15414173.html.
China National Defense News. Information Leak: UK Admits to Supplying Weapons to Ukraine [EB/OL].(2022-01-26)[2024-05-06]. http://m.people.cn/n4/2022/0126/c24-15414173.html.

[62] 中国民航网.国际航协:俄乌冲突尚未显著影响国际航空业[EB/OL].(2022-04-02)[2023-08-17]. http://www.caacnews.com.cn/1/88/202204/t20220402_1342185.html.
China Civil Aviation Network. IATA: The Conflict Between Russia and Ukraine Has not Significantly Affected the International Aviation Industry. [EB/OL]. (2022-04-02)[2023-08-17]. http://www.caacnews.com.cn/1/88/202204/t20220402_1342185.html.

[63] IATA. The Impact of the War in Ukraine on the Aviation Industry [EB/OL]. (2022-03-25)[2024-12-26]. https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-impact-of-the-conflict-between-russia-and-ukraine-on-aviation/.

[64] CHEN Z Y, XU M Q, GAO B B, et al. Causation Inference in Complicated Atmospheric Environment [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 303: 119057.

[65] 中国新闻网.俄乌局势进展:俄称两个军用机场遭乌无人机袭击 乌关键基础设施遭打击[EB/OL].(2022-12-06)[2023-12-21]. https://www.chinanews.com.cn/m/gj/2022/12-06/9909508.shtml.
China News Service Online. Progress in the Situation Between Russia and Ukraine: Russia Said Two Military Airports Were Attacked by Ukrainian Drones and Key Infrastructure of Ukraine Was Hit [EB/OL]. (2022-12-06)[2023-12-21]. https://www.chinanews.com.cn/m/gj/2022/12-06/9909508.shtml.

[66] AALTO P. Russian Energy Diplomacy [M]// TIESS G, MAJUMDER T, CAMERON P, et al. Encyclopedia of Mineral and Energy Policy. Heidelberg: Springer, 2023: 1-5.

[67] CHEN Y Y, JIANG J X, WANG L, et al. Impact Assessment of Energy Sanctions in Geo-Conflict: Russian-Ukrainian War[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 3082-3095.

[68] 俄罗斯卫星通讯社.欧盟放宽对俄航空业的限制[EB/OL].(2022-07-21)[2024-02-26]. https://big5.sputniknews.cn/20220721/1042634568.html.
Sputnik News Agency. EU Eases Restrictions on Russian Aviation Industry[EB/OL].(2022-07-21)[2024-02-26]. https://big5.sputniknews.cn/20220721/1042634568.html.

[69] CEIC. 乌克兰出口总额[EB/OL].(2025-02-20)[2025-06-21]. https://www.ceicdata.com.cn/zh-hans/indicator/ukraine/total-exports.
China Economic Information Center. Total Exports of Ukraine [EB/OL]. (2025-02-20)[2025-06-21]. https://www.ceicdata.com.cn/zh-hans/indicator/ukraine/total-exports.

[70] 刘韡昊.乌克兰危机对全球地缘政治和经济格局的冲击和影响[J].西部学刊,2024(15):44-47.
LIU Weihao. The Impacts and Influences of the Ukraine Crisis on the Global Geopolitical and Economic Pattern[J]. *Journal of Western China*, 2024(15): 44-47.

[71] 曹旨昊,牟少敏,屈洪春.基于经验动态建模的因果检测研究综述[J].计算机科学,2023,50(S1):41-52.
CAO Zhihao, MU Shaomin, QU Hongchun. Review on Causality Detection Based on Empirical Dynamic Modeling[J]. *Computer Science*, 2023, 50(S1): 41-52.

[72] 陈鎏鹏,谢帮生,周子渭,等.数字乡村建设是否推动了农村产业融合:基于双重机器学习的因果推断[J].金融与经济,2024(5):60-70.
CHEN Liupeng, XIE Bangsheng, ZHOU Ziwei, et al. Whether the Construction of Digital Villages Has Promoted the Integration of Rural Industries: Causal Inference Based on Double Machine Learning[J]. *Finance and Economy*, 2024(5): 60-70.

[73] MILLER S. Causal Forest Estimation of Heterogeneous and Time-Varying Environmental Policy Effects[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2020, 103: 102337.