



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403272

引用格式:赵冰,徐菁.基于贝叶斯网络的航空物流供应链韧性评价[J].科学技术与工程,2025,25(10):4386-4395.

Zhao Bing, Xu Qing. Evaluation of aviation logistics supply chain resilience based on the Bayesian network[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 4386-4395.

基于贝叶斯网络的航空物流供应链韧性评价

赵冰,徐菁*

(中国民航大学交通科学与工程学院,天津 300300)

摘要 为提高航空物流供应链在面对内外部冲击和不确定性的能力,将韧性理论引入航空物流供应链,提出了基于贝叶斯网络的航空物流供应链韧性评价模型。从宏观表现层、中间影响层和底部致因层建立贝叶斯网络结构指标,构建了贝叶斯网络模型,然后通过马尔科夫链蒙特卡洛算法完成贝叶斯网络节点概率推理过程,通过参数学习和模型推理获取航空物流供应链韧性的概率分布;进一步利用贝叶斯网络模型进行逆向推理、敏感性分析和致因链分析,明确航空供应链韧性影响的关键变量和敏感因素,提出了有关韧性提升的建议。研究表明,中国航空物流供应链的韧性值约为53%,处于较高韧性水平。贝叶斯网络模型能够量化航空物流供应链韧性值,并推理分析各因素对韧性值的影响,从而提高航空物流供应链的抗风险能力。

关键词 航空物流;供应链;贝叶斯网络;韧性评价

中图分类号 X951;

文献标志码 A

Evaluation of Aviation Logistics Supply Chain Resilience Based on the Bayesian Network

ZHAO Bing, XU Qing*

(Transportation Science and Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] The resilience theory has been introduced into the aviation logistics supply chain to enhance its ability to withstand internal and external shocks and uncertainty. A resilience evaluation model for the aviation logistics supply chain based on a Bayesian network was proposed. The Bayesian network structure index was established from the macro performance layer, the middle influence layer, and the bottom cause layer. Subsequently, the Bayesian network model was constructed, and the probability inference process of the Bayesian network nodes was completed using the Markov Chain Monte Carlo algorithm. This enabled the acquisition of the probability distribution of aviation logistics supply chain resilience through parameter learning and model inference. Furthermore, the Bayesian network model was employed for reverse reasoning, sensitivity analysis, and cause chain analysis to identify the key variables and sensitive factors affecting the resilience of the aviation supply chain. Based on these analyses, suggestions for improving resilience were put forward. Research findings indicate that the resilience value of China's aviation logistics supply chain is approximately 53%, signifying a high level of resilience. The Bayesian network model has proven effective in quantifying the resilience value of the aviation logistics supply chain, as well as in reasoning and analyzing the influence of each factor on resilience value, thus contributing to the enhancement of the risk resistance ability of the aviation logistics supply chain.

[Keywords] aviation logistics; supply chain; Bayesian network; resilience evaluation

近年来,新冠疫情和国际形势的变化导致世界进入百年未有之大变局,航空物流供应链也遭受到不同程度的波动。这些干扰在短期内不能满足供应链内供给和需求达成一致,从而大大降低供应链上企业的运营效率;从长远来看,这些扰动会在未来的国际市场上给中国供应链的竞争力带来巨大

挑战。因此,对航空物流供应链进行韧性研究,增强中国航空物流供应链的顺畅对保障国民经济的运行有着深远影响。

近年来,学术界对供应链韧性的研究多集中于对供应链韧性影响因素的探索。马潇宇等^[1]从单一和多元组态视角出发,采用结构方程模型(structural equation model)

收稿日期:2024-05-05; 修订日期:2025-01-02

基金项目:天津市教委社会科学重大项目(2022JWZD15);中央高校基本科研业务费重点项目(3122025030)

第一作者:赵冰(1983—),女,汉族,辽宁沈阳人,博士,副教授。研究方向:临空经济、航空物流。E-mail:zhaobingcauc@126.com。

*通信作者:徐菁(2001—),女,汉族,重庆人,硕士研究生。研究方向:航空物流。E-mail:1263633739@qq.com。

tural equation modeling, SEM) 和模糊集定性比较分析(qualitative comparative analysis of fuzzy sets, fsQ-CA)方法构建了供应链韧性影响因素研究模型;朱正玉等^[2]提出了17个EPC(engineering, procurement and construction)模式装配式建筑供应链的韧性因素,并运用结构方程模型(structural equation modeling, SEM)建立因子分析模型用于评估EPC模式装配式建筑供应链的韧性;Sunmola等^[3]对供应链绩效可见性影响因素从数字技术角度(digital technology perspective, DTP)和供应链关系角度(supply chain relationship point, SCR)进行优先顺序的排序,以此来提高韧性;Gupta等^[4]使用结构方程模型对数据进行定性分析后,结果表明与人工智能相比区块链技术促进供应链在环境动态的缓和影响因素下的财务韧性方面更强。由于研究对象的日趋复杂,使得网络及其相关工具如贝叶斯网络(Bayesian network, BN)等逐渐成为韧性研究的理想工具。贝叶斯网络模型作为一种经常用于支持决策的工具,通过发现风险性因素来处理复杂性和不确定性。王兴隆等^[5]通过建立层次化的贝叶斯网络模型,分析影响空中交通运输系统正常运行因素,评价系统韧性并进行定量分析;闫绪娟等^[6]建立了Bow-Tie—BN(Bow-Tie-Bayesian network, 蝴蝶结分析-贝叶斯网络法)的灾害风险分析模型,利用事故树构建致灾模型,再以贝叶斯网络模型预测灾害的后验概率;Caetano等^[7]使用动态贝叶斯网络对关键基础设施的复原力评估,以模拟面对故障时的复原力曲线和累积影响;Tang等^[8]提出了一种分层的贝叶斯网络模型定量评估的韧性城市交通系统,基于系统思维和可持续发展视角研究了1998—2017年中国4个城市道路交通系统的长期韧性。

深入分析发现,虽然韧性已经被应用于多领域研究中,且对供应链的研究成果丰富,但还缺乏航空物流领域有关供应链韧性的定量研究,而且将贝叶斯网络运用到供应链韧性研究中较少,缺乏对影响因素的灵敏度分析,不利于辨析航空物流供应链韧性的关键因素和制定提升供应链韧性的有效策略。因此,分析中国航空物流供应链结构特性,基于贝叶斯网络研究航空物流供应链的韧性影响因素进行,通过逆向推理、敏感性分析以及致因链分析对模型进行定量分析,以期科学评价和提升中国航空物流供应链韧性提供科学方法和对策建议。

1 航空物流供应链韧性

1.1 航空物流供应链

航空物流供应链是由节点和链组成的功能网络链结构,涉及的主体包括供应商、生产商、货运代理、快递公司、机场货站、航空公司、消费者和零售商等,如图1所示。

航空物流供应链是通过优化整合现有资源、提供地面运输服务和机场货站服务等环节来实现货物从供应商手中流通到客户手中的运输服务,其核心目标是尽可能满足客户的一系列要求,该过程所涉及的不仅仅只是运输,还包括货物在转移途中各种信息的交流。在实践操作基础上得出经验,航空物流供应链可以由一体化航空物流承运人独立完成,也可以通过企业内外部进行资源整合来实现,被整合的资源包括人力、物品和财务这种有形资源,也包括诸如信息技术和服务等这类无形资源^[9]。

1.2 航空物流供应链韧性构成及状态描述

Lexander从语源学的角度分析韧性(resilience)

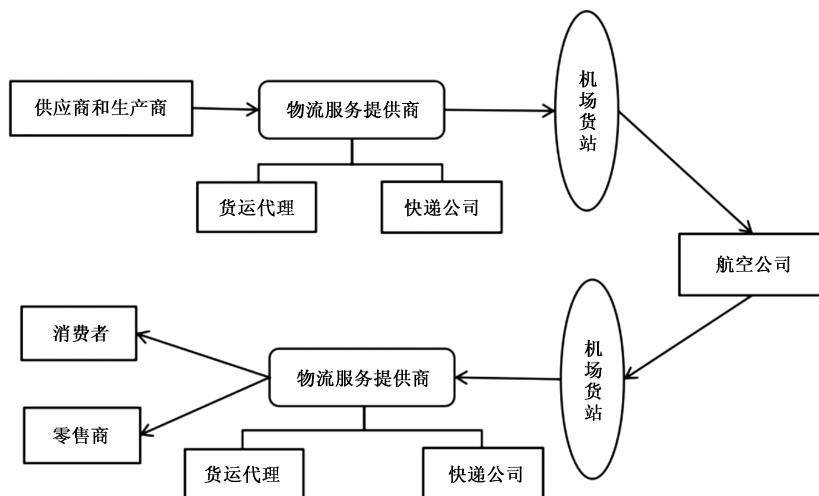
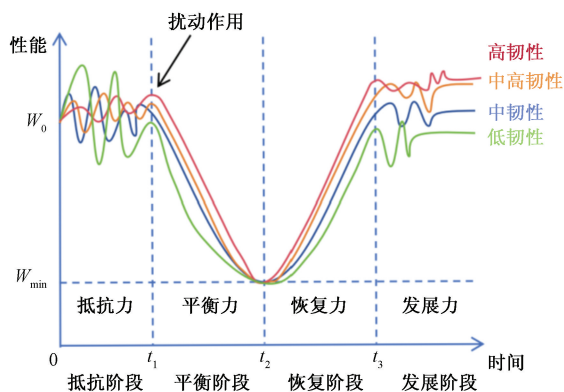


图1 航空物流供应链结构分解

Fig. 1 Structural decomposition of aviation logistics supply chain

一词,发现其来源于拉丁语“resilio”,表示“回到原始状态”的意思^[10]。对于航空物流供应链而言,韧性是指在面对不可避免的外部或内部干扰和突发事件时,航空物流供应链能够迅速恢复正常运作,并保持高效稳定的能力,具体包括航空物流供应链在面对各种风险、挑战和不确定性时,能够及时发现、快速响应和有效解决问题的能力,以确保航空物流供应链的连续性和稳定性,同时还要考虑到成本、效率和质量等方面的平衡。另外,航空物流供应链韧性不仅是企业自身的能力,也包括了企业与其各个合作伙伴之间的协同配合能力。

航空物流供应链遭遇到外界的干扰后,性能会产生明显的波动,其变化过程可以分为4个阶段,如图2所示。



W_0 为系统的初始性能; W_{\min} 为系统的最低性能;

t_n ($n = 1, 2, 3$) 为供应链韧性发生变化的第 n 个时刻

图2 航空物流供应链韧性性能曲线

Fig. 2 Resilience performance curve of aviation logistics supply chain

由图2可知,航空物流供应链韧性包括抵抗力、平衡力、恢复力和发展力这4个特征能力。供应链韧性强度的强弱不同,不同阶段对应的抵抗力、平衡力、恢复力和发展力也会有所不同。其中,抵抗力是指航空物流供应链在遭受外界环境冲击时表现出的防御能力,能够降低供应链韧性失效的概率;平衡力指的是航空物流供应链承受干扰并迅速做出响应,以控制干扰对其造成破坏的能力;恢复力是指供应链及时从因扰动导致的紊乱中迅速恢复生产,恢复其正常运营管理水平的能力;发展力是指航空物流供应链上的各个企业通过制定发展规划、再造组织管理来谋求进一步发展的能力。

2 韧性评价贝叶斯网络模型

2.1 贝叶斯网络构建

贝叶斯网络也被称之为信仰网络,通常被认为是处理不确定性、处理风险评估和协助决策过程的

有力工具。基于贝叶斯定理,贝叶斯网络是有向无环图(directed acyclic graph, DAG)的概率结构,其中节点表示结构的变量,连接从父节点指向子节点表示这些节点之间的依赖关系或因果关系。在这里,根节点(即没有父节点的节点)以先验概率进行量化。然后将条件概率用于子节点,表示为条件概率表(conditional probability table, CPT)。条件概率反映了一个BN的变量之间的因果关系。然后,对于一个随机数量的变量 X_1, X_2, \dots, X_n 和一个有 n 个节点的DAG,其中节点 j ($1 \leq j \leq n$) 与变量 X_j 相关联,以下表示BN的基本数学表达式为

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{j=1}^n P[X_j | \pi(X_j)] \quad (1)$$

式(1)中: n 为变量的总数; X_j 为第 j 个元素的父节点集合; π 为一个节点的父节点集合。

式(1)展示了贝叶斯网络通过假设每个节点和其非后代节点有着条件性独立。

利用贝叶斯网络模型对航空物流供应链进行评价首先应对影响供应链韧性的因素进行分类,分别从宏观表现层、中间影响层以及底部致因层3个层次构建指标,对应航空物流供应链在应对外界扰动时供应链在宏观、中观和微观等不同尺度下的表现。

宏观表现层:这一层次反映着整个供应链的状态变化情况,具体包含抵抗力、平衡力、恢复力和发展力。

中间影响层:这一层次介于宏观层和围观层之间,在以往文献的基础上,根据专家经验总结出了三个维度来组成中间影响层,这三个维度分别为技术维度、经济维度和组织维度。技术维度关注的是物流设施设备及其现代化水平。经济维度关注的是由于外来因素的影响所导致的直接或间接的财产损失。组织维度关注的是供应链上各企业和公司在生产运营效率造成影响的扰动已经出现的情况下,是否仍然保持着能够应对扰动导致的突发状况并执行本身职能的能力。

底部致因层:底部致因层充当微观层面的底部,支持中间影响层的应用。这一层次包括航空物流供应链韧性中的具体影响因素,根据国内外对供应链韧性的研究方向,识别并筛选出14个相对其他因素更加具有代表性和影响力的微观影响因素。

综上所述,基于对航空物流供应链各层面影响因素的分析,可以得到贝叶斯网络结构指标如表1所示。

根据表2中的航空物流供应链韧性有关影响指标,依据各个因素间的逻辑从属、并列关系构建贝叶斯网络如图3所示。

表1 贝叶斯网络结构指标

Table 1 Bayesian network structure indicators

宏观表现层	中间影响层	底部致因层
抵抗力 A_1	经济 B_2	航线网络密集程度 E_1
	技术 B_1	物流信息网络覆盖程度 E_2
	技术 B_1	基础设施设备完善程度 E_3
	经济 B_2	枢纽机场的发展水平 E_4
平衡力 A_2	经济 B_2	应急资源的配置能力 E_5
	经济 B_2	航空物流的需求水平 E_6
	经济 B_2	航空物流市场发展能力 E_7
	经济 B_2	国民经济的发展水平 E_8
恢复力 A_3	经济 B_2	临空经济的发展水平 E_9
	组织 B_3	各级政府的支持力度 E_{10}
	技术 B_1	物流科技的发展水平 E_{11}
发展力 A_4	组织 B_3	企业培养人才力度 E_{12}
	组织 B_3	应急预案的设计与培训 E_{13}
	组织 B_3	企业的组织领导能力 E_{14}

2.2 模型数据处理

确定了网络结构后,需要将网络中的变量转换为由1和0表示的二值布尔变量,用T和F表示每个节点对航空物流供应链韧性产生的正向和负向影响。由于模型涉及的两种不同类型的变量,对它们进行二值处理有助于统一数据类型、减少参数计算量,并方便后续的量化工作^[10]。

第一类变量是通过处理历史数据或者使用国家相关部门的统计信息来获取。这类变量属于非

间断且连贯,需要进行适当的二值处理。例如,在处理航空物流需求水平时,首先计算平均需求水平,然后将每组数据中的需求水平与平均需求水平进行比较。如果数量高于平均需求水平,则记为F,反之则记为T。其中T代表积极影响,F代表消极影响。

第二类变量一般是通过专家咨询或者调查问卷的方式来获取并且进行一定的处理得到的数据。可以将变量分为高、较高、一般、较低和低这5种类型,分别得分为5、4、3、2、1。之后在调查上一个节点是否对本节点产生正向影响的前提下,通过问卷调查和专家评分法来确定本节点因素产生正向影响的可能性。最后,综合多组数据计算该节点因素的平均评分。如果平均评分低于2,则记为F,表示该节点因素产生较高的负向影响;否则,记为T,表示该节点因素产生较高的正向影响。通过这种方式对各个变量因素进行量化和二值处理。

通过向从事供应链或航空领域的专家发放问卷,已收集到262组有效数据,并对其进行了统一的二值处理。接着使用基于MATLAB开发的BN工具箱Fullbn处理数据样本,计算出了贝叶斯网络节点的先验概率和后验概率。数据的统计结果如表2所示。

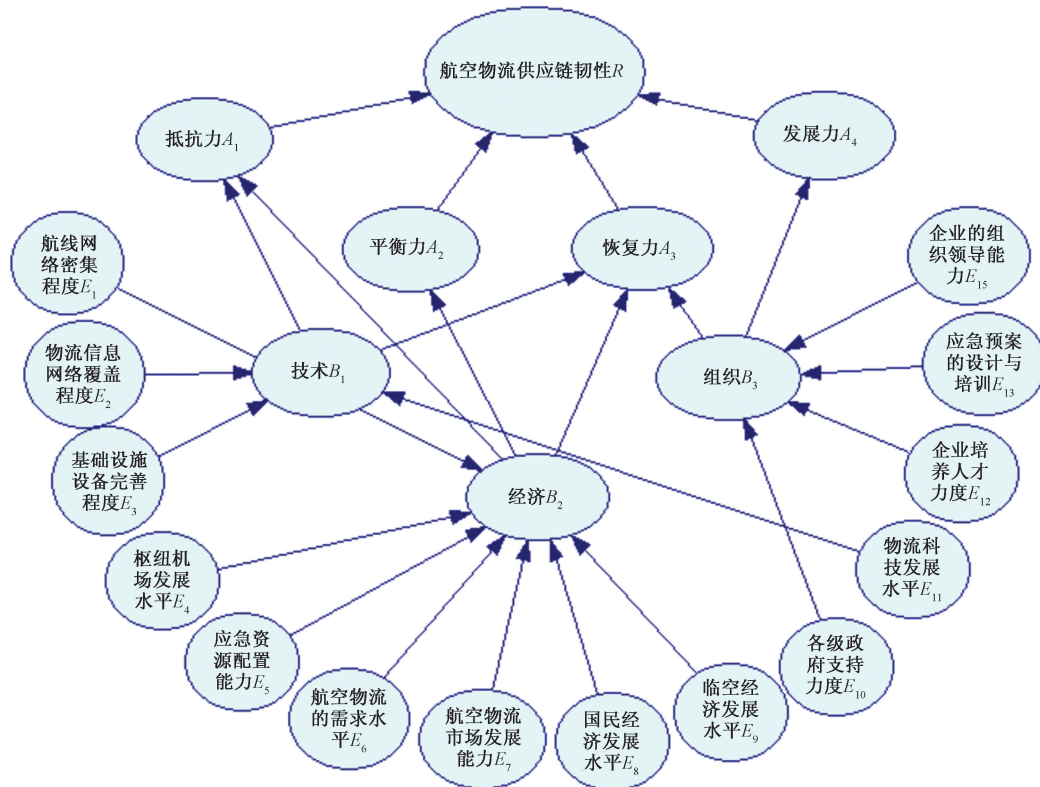


图3 航空物流供应链韧性贝叶斯网络结构

Fig. 3 Bayesian network structure of aviation logistics supply chain resilience

使用 SPSS 软件进行可信度分析是为了评估所收集数据的可靠性。克隆巴赫系数被广泛应用作为可信度指标之一,通常取值在 0~1。当克隆巴赫系数为 0.7 时,表明数据可信度较高。根据表 3 的结果显示,数据的克隆巴赫系数为 0.786,超过了 0.7 的阈值,说明数据可信度较高,可以继续进行分析。

表 2 韧性影响因素概率统计表

Table 2 Probability statistics of toughness influencing factors

因素分类	韧性影响因素	概率/%	
		正向影响 T	负向影响 F
宏观表现层	抵抗力 A_1	52.16	47.84
	平衡力 A_2	57.59	42.41
	恢复力 A_3	62.42	37.58
	发展力 A_4	50.34	49.66
中间影响层	技术 B_1	55.87	44.13
	经济 B_2	67.59	32.41
	组织 B_3	54.66	45.34
底部致因层	航线网络密集程度 E_1	64.32	35.68
	物流信息网络覆盖程度 E_2	53.77	46.23
	基础设施设备完善程度 E_3	58.53	41.47
	枢纽机场的发展水平 E_4	59.85	40.15
	应急资源的配置能力 E_5	53.67	46.33
	航空物流的需求水平 E_6	50.73	49.27
	航空物流市场发展能力 E_7	65.28	34.72
	国民经济的发展水平 E_8	60.05	39.95
	临空经济的发展水平 E_9	47.88	52.15
	各级政府的支持力度 E_{10}	52.86	47.14
	物流科技的发展水平 E_{11}	50.19	49.81
	企业培养人才力度 E_{12}	44.72	55.28
	应急预案的设计与培训 E_{13}	45.29	54.71
	企业的组织领导能力 E_{14}	48.96	51.04

表 3 韧性影响因素可信度分析

Table 3 Reliability analysis of the factors influencing toughness

克隆巴赫 α 系数	基于标准化项目的 克隆巴赫 α 系数	项数
0.786	0.798	21

2.3 模型推理计算

马尔科夫链蒙特卡洛算法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)是被广泛采用的概率推理方法,通常用于处理模型规模较大且和内部复杂结构的贝叶斯网络模型。在这种情况下,通常会选择 MCMC 算法进行概率推理^[11]。

这一类算法需要将节点从状态 x 转化为到状态 x' 的概率假设为 $q(x \rightarrow x')$, 节点状态 x 时的概率可以表示为 $\pi(x)$, 当状态趋于平缓时,其概率分布可以表示为

$$\pi(x') = \sum_x \pi(x) q(x \rightarrow x') \quad (2)$$

式(2)中: \sum_x 中节点 x 的求和范围依赖于该节点的类型(离散或连续)以及贝叶斯网络的结构。接着将另外一个节点表示为 X_i , 其剩余节点表示为 \bar{X}_i , x_i 和 \bar{x}_i 则对应着他们相应的状态值。当 X_i 的状态转变为 x'_i 的时候,结合剩余节点 \bar{X}_i 的条件,可以推导出

$$q(x \rightarrow x') = q[(x_i, \bar{x}_i) \rightarrow (x'_i, \bar{x}_i)] \\ = P(x'_i, \bar{x}_i, e) \quad (3)$$

式(3)中: e 为某个节点或变量的边缘分布。

考虑到事先确定的节点和其他还未确定的节点是相互独立关系这一情况下,使用式(4)对该节点进行概率的推导。

$$P\left[\frac{x'_i}{mb(X_i)}\right] = aP\left[\frac{x'_i}{parents(X_i)}\right] \times \\ \prod_{Y_i \in Children(X_i)} P\left[\frac{y_i}{parents(Y_i)}\right] \quad (4)$$

式(4)中: $mb(X_i)$ 为某值的节点; $parents(X_i)$ 为父节点; $Children(X_i)$ 为子节点; Y_i 为节点中的某个节点; x'_i 和 y_i 分别为节点对应的状态值。

使用式(2)~式(4)就可以进行贝叶斯网络的节点推理过程,节点状态值的确定是根据根结点收集的数据信息进行变化的,在这个变化过程里,当前状态时刻影响着节点状态。所以通过确定的节点状态和其对应的剩余状态的值的随机无规则变动,便可以完成模型的概率推理过程。

2.4 韧性评价标准

风险等级可以划分为 4 级,分别是高风险、较高风险,一般风险和较小风险,因此本文研究同样将韧性水平划分为 4 个等级,与风险等级一一对应,同时结合标准分类方法中的自然间断法和相等间断法将韧性值分为高韧性、较高韧性、中韧性和较低韧性,如表 4 所示。

表 4 航空物流供应链韧性评价标准

Table 4 Evaluation criteria for the resilience of the aviation logistics supply chain

韧性水平	韧性值	韧性状态描述
高韧性	(70%, 1]	供应链的抵抗能力极好,受到干扰时的恢复能力高,能够通过对扰乱事故的总结学习恢复到比原来更优的状态
中高韧性	(50%, 70%]	供应链的抵抗能力较好,在受到扰动后也能通过自身的总结学习恢复到初始状态或更好状态,但是所需要的时间和韧性相比较长
中韧性	(40%, 50%]	供应链的抵抗能力处于正常水平,在受到外界干扰后采取有关应急措施恢复至原有的基本水平
低韧性	[0, 40%]	供应链抵抗能力较低,在受到外界扰动作用后无法恢复其原来正常的状态

3 韧性评价结果及推理分析

3.1 航空物流供应链韧性评价结果

利用上述模型和方法评价中国航空物流供应链韧性,根据所构建的贝叶斯网络模型,选用 GeNIe 软件进行参数学习以及后续的定量分析。把这 22 个影响节点以及有向边输入 GeNIe 软件中,以此对收集到的数据进行规范化处理并推理得到模型,网络模型的参数结果则会成功的匹配出来^[12],如图 4 所示。结果显示中国航空物流供应链的韧性为 53%,证明当前中国航空物流供应链在面临冲击时有一定风险,但总体来看仍然处于较高韧性水平。

贝叶斯网络的韧性评价结果还可用来明确各指标对韧性影响程度的大小。由图 4 中航空物流供应链各层次节点概率分布可以发现,宏观层中恢复力在供应链韧性中发挥的作用力最大,为 46%;发展力发挥的作用最小,为 26%;抵抗力和平衡力发挥的作用次之,分别为 35% 和 36%。中观层中经济维度在整个供应链中所占比重最大,为 52%,组织维度所占比重次之,为 43%,比重占据最小的为技术维度,为 37%。微观层中航线网络密集程度所占比重相对最大,为 66%,其他因素所占比重差距较小。

3.2 贝叶斯网络模型推理分析

3.2.1 贝叶斯网络逆向推理

为了更方便地进行韧性影响值的敏感因素分析,可以通过调整网络结构中各个节点因素的状态,进行逆向推断。逆向推理是指已知网络中的某些变量的状态,通过计算其他变量的后验概率来推断这些已知变量的原因,逆向推理从目标变量出发,逐步向后推理,直到得到原因变量的概率分布。

进行逆向推理时,将航空物流供应链韧性值提高 100% 时,图 5 结果显示,在宏观层面,抵抗力提升到了 51%,平衡力提升到了 50%,恢复力提升到了 63%,发展力提升到了 36%。在中观层面,技术维度提升到了 45%,经济维度提升到了 68%,组织维度提升到了 52%。其中,恢复力和经济维度的变化最大,因此应注重提升恢复力和经济维度的相关指标,从而有针对性地提升航空物流韧性。

3.2.2 敏感性分析

敏感性分析是验证 BN 模型结构的有用技术,可以确定哪些输入变量对输出结果影响最大,从而帮助决策者更好地理解系统的行为模式,提高对系统的把握能力。基于 GeNIe 软件对贝叶斯网络模型进行敏感性分析,参数敏感度越高,对推理结果的影响越显著。在贝叶斯网络模型的敏感性分析中,节点的颜色深度反映了其对指标影响程度的大小,

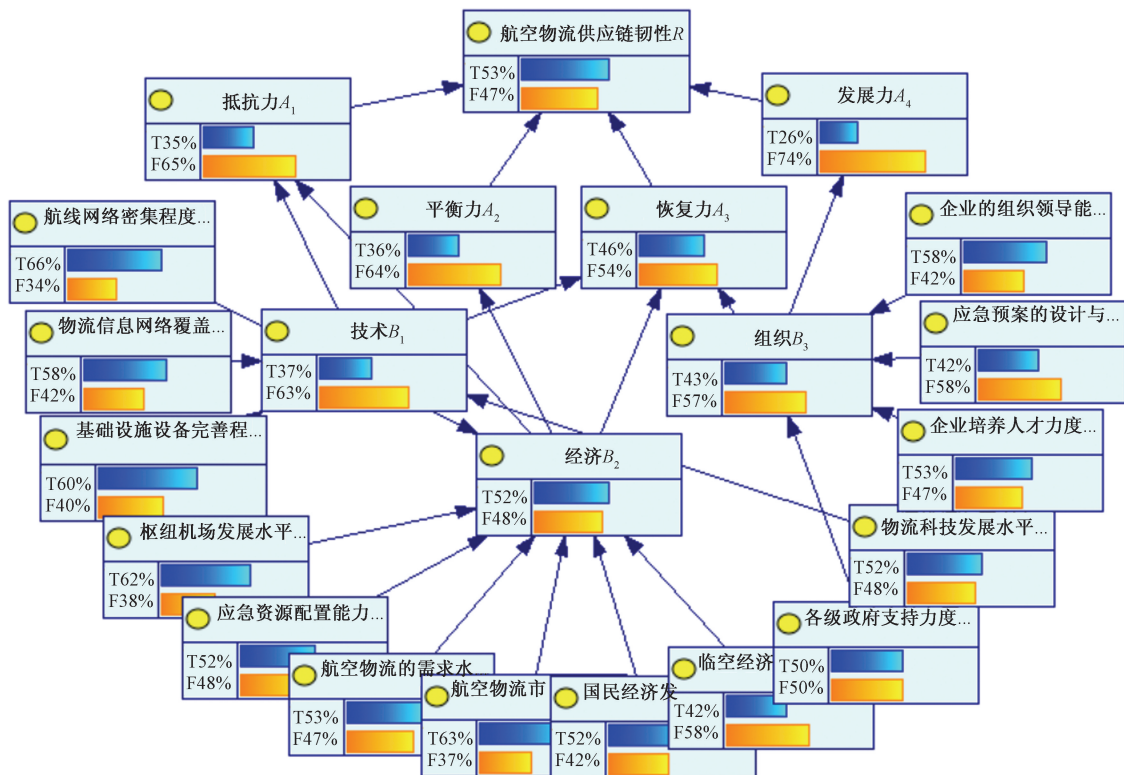


图 4 参数学习模型结果
Fig. 4 Parameter learning model results

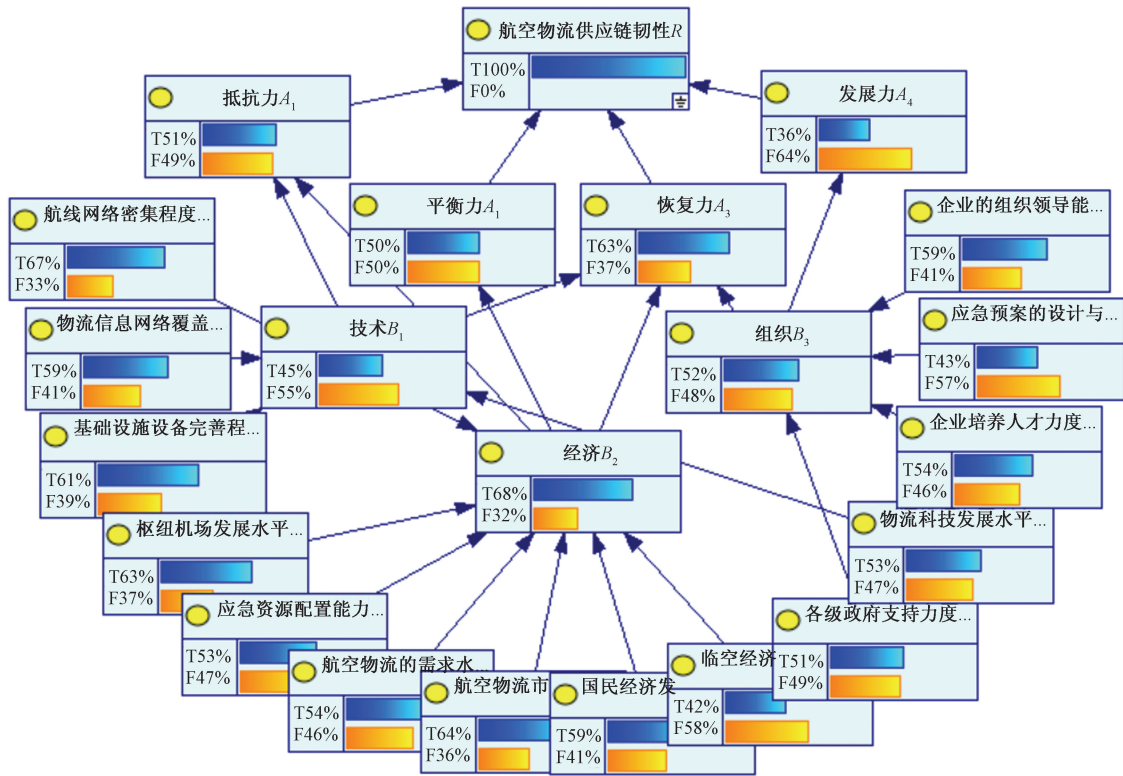


图5 逆向推理结果

Fig. 5 Reverse reasoning results

颜色越深表示影响程度越高。在这个情况下,将航空物流供应链的韧性作为目标节点,通过敏感性分析获得了不同颜色深度的网络模型,如图6所示。

通过观察可以发现航线网络密集程度、物流信息网络覆盖程度、基础设施设备完善程度、枢纽机场发展水平程度、企业培养人才力度等指标的敏感性较高。重点关注这些敏感因素,可以降低扰动供应链韧性的风险概率,有针对性的提高系统韧性。

另外,比较敏感性分析的结果和各韧性影响因素的发生概率后可知,尽管技术和组织维度相对经济维度有较低的先验概率,但这两个维度的因素具有较高的敏感性。因此,在维护供应链韧性时,仅仅根据影响因素的大小来评估供应链韧性的影响程度并不充分,一些发生概率较低的因素也可能成为破坏韧性的重要因素。寻找敏感因素可以为航空物流企业提供指导,帮助他们快速识别对供应链韧性影响较大的因素,并将重点放在这些敏感性因素上。

3.2.3 致因链分析

通过致因链分析确定节点之间的依赖程度可通过节点间连线的宽度来表示,影响强度越大则表示该连线的宽度也越大,也表示致因程度越高。致因强度的大小是根据子节点的条件概率表得出,最终得到的致因链分析结构如图7所示。

从图7可知,模型中致因强度较大的5条致因链为:物流信息网络覆盖程度→技术→抵抗力;基础设施设备完善程度→技术→恢复力;经济→抵抗力;经济→平衡力;组织→航空物流供应链韧性。经济维度的各要素对平衡力的影响为最大致因链,共同组成影响航空物流供应链韧性的关键节点变量,这些关键节点是整个供应链中的关键驱动因素,对供应链的稳定和发展具有重要作用。针对致因链带来的影响,航空物流企业各部门可以预测供应链未来状态并及时调正对策,以确保供应链能够更好地适应可能的变化和冲击。

4 中国航空物流供应链韧性提升建议

基于对贝叶斯网络模型的定量分析结果,从经济维度、技术维度、组织维度三个方面对中国航空物流供应链韧性的提升提出有关建议。

4.1 经济维度

通过逆向推理分析结果可知供应链在遭受到外部干扰后,其恢复力和经济维度的变化最大,所以要想快速提高航空物流供应链韧性,主要从经济维度下手,推动国内物流网络畅通高效,完善全货运航线网络布局;加快多式联运发展,引导国内航空物流网络与铁路、公路等运输方式便捷衔接;推进专业性货运枢纽机场建设,强综合性枢纽机场和

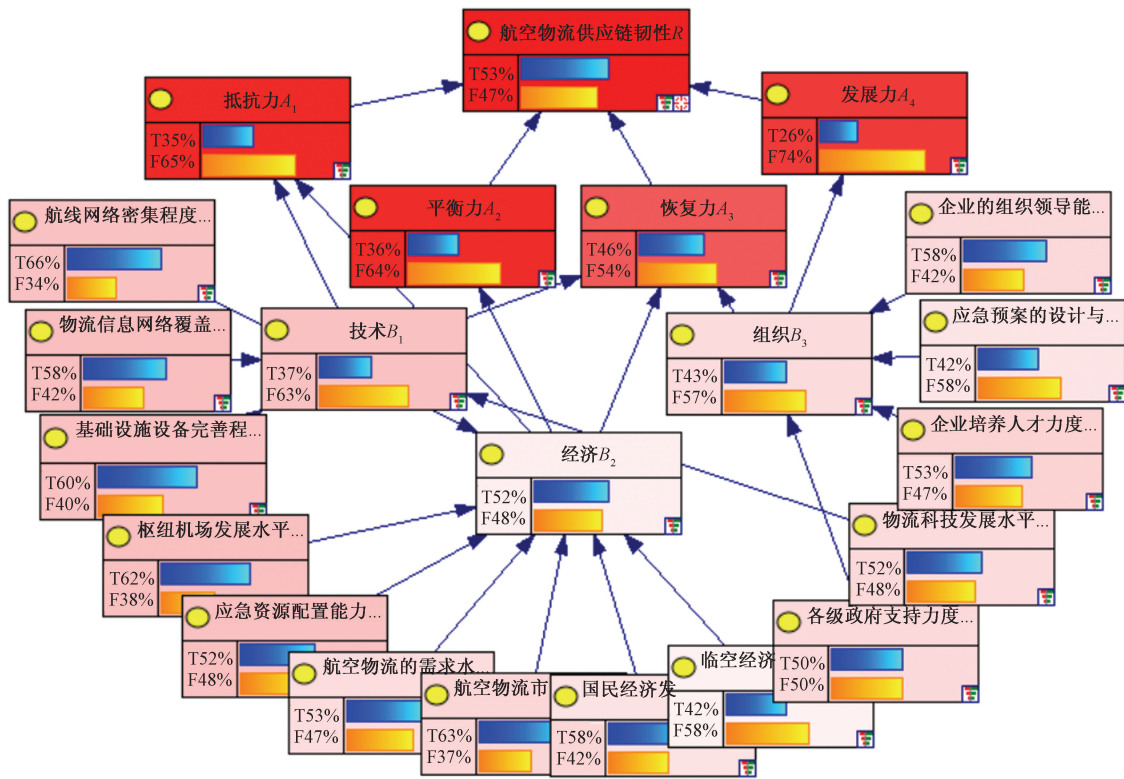


图 6 敏感性分析结果

Fig. 6 Results of the sensitivity analysis

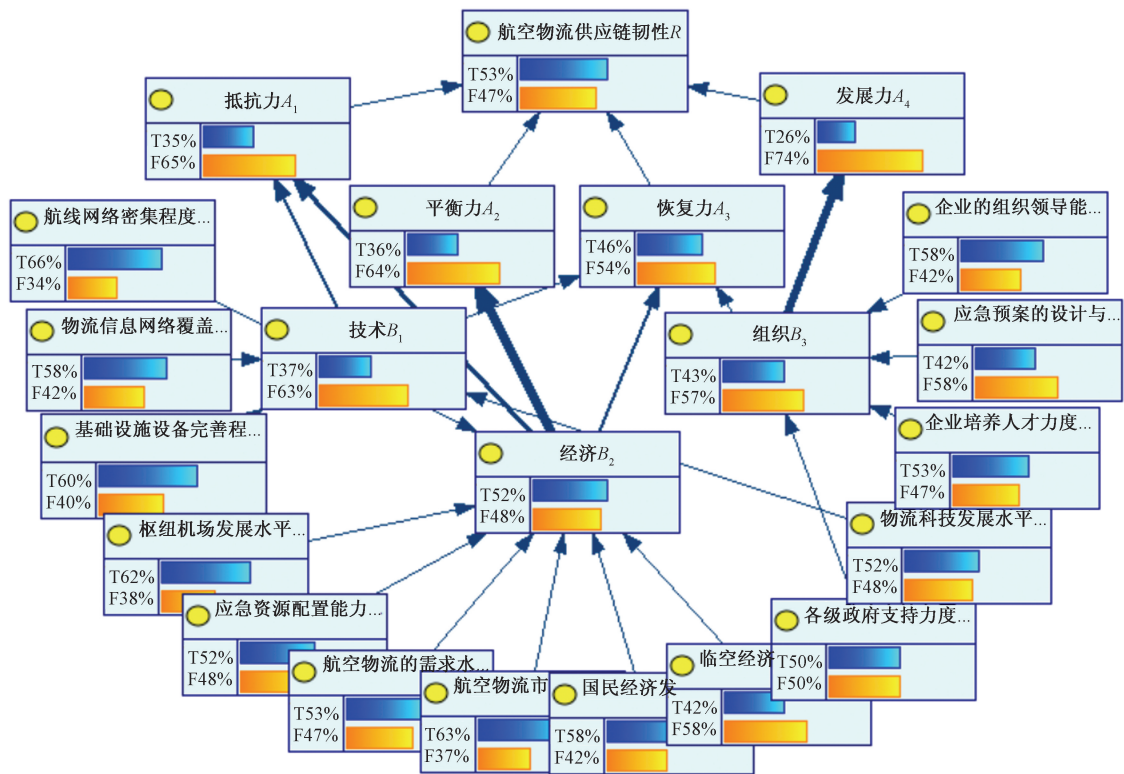


图 7 影响强度分析结果

Fig. 7 Impact strength analysis results

专业性货运枢纽机场的分工协作;建设现代化的航空港设施,提升服务水平和效率,发展相关产业如物流和航空服务等,形成产业集聚效应,以此来促进临空经济和临港经济的发展。

4.2 技术维度

由敏感性分析可知,在不同阶段供应链应重点管控的影响因素有所不同,且技术维度具有较高的敏感性。因此在供应链前期抵抗阶段,应推广应用智能设施,提高物流科技水平;促进物流信息互联互通,增强物流网络信息能力。在供应链中期平衡和恢复阶段,应加快新增设施建设,科学布局物流设施;推动专业设施设备建设,完善快递、冷链、生物医药等设施设备,支持建设快递公司,推动机场和物流设施同步规划。在供应链后期发展阶段,应依托航空物流枢纽打造物流信息组织中枢,推动物流设施设备全面联网,在满足数据安全的前提下,促进货运代理、机场、货站、航空公司、企业之间的信息互联互通,推进行业内外信息开放共享,以此增强航空物流的综合发展能力。

4.3 组织维度

根据致因链分析结果可知在供应链受到干扰和冲击后,其平衡能力相对薄弱,但仍存在巨大的提升空间,因此建议采取关键措施,以最大致因链为作用路径^[13]。主要从经组织维度下手,重视航空物流领域内人才的培养,鼓励航空物流方向的学术研究;加强组织领导能力,增大职能整合,形成工作合力;加强组织协同,加强各部门和产业间的组织协调能力,充分发挥各部门的职能作用,以此增强航空物流的发展能力。

5 结论

提高航空物流供应链韧性,增强其面对扰动的综合能力已成为亟待解决的问题,同时也是提高中国国民经济发展水平的关键所在。为定量评价中国航空物流供应链韧性,提出一种多层次多维度的贝叶斯网络韧性评价模型,根据航空物流供应链结构及供应链韧性变化过程的深入分析,从宏观表现层、中观影响层和微观致因层三个层次对航空物流供应链进行韧性评估,并通过逆向推理、敏感性分析和致因链分析,根据分析结果切实提出韧性提升的建议。得出如下结论。

(1)中国航空物流供应链结构复杂,航空物流供应链的韧性的测度值为53%,为较高韧性水平等级,虽然具有一定风险,但是仍然可以控制,韧性变化趋势总体来说具有一定波动,反映出航空物流供应链的动态特征。

(2)贝叶斯逆向推理的结果表明,快速提高供应链韧性,首先应该选择提高恢复力维度或者经济维度的相关指标,因为在改变供应链韧性值时,这两者的变化最大。

(3)敏感性分析的结果表明航线网络密集程度、物流信息网络覆盖程度,基础设施设备完善程度,枢纽机场发展水平程度的敏感性最高,临空经济的发展程度和应急预案的设计与培训敏感性最低,其余因素的敏感性次之。

(4)致因链分析的结果说明经济维度对平衡力产生的影响力较大,抵抗力次之,恢复力最小,这些链条对供应链的韧性产生的致因效果也最大,因此经济维度的指标为提高供应链韧性的关键因素。

由于航空物流供应链是一个涵盖众多要素的复杂系统,且其韧性受内外界因素的影响在不断变化中。未来可以进一步研究不同时间点航空物流供应链韧性发展变化特点及规律,以及分析影响因素间的耦合关系,进一步提高韧性评价的科学性和准确性。

参 考 文 献

- [1] 马潇宇, 黄明珠, 杨滕晰. 供应链韧性影响因素研究: 基于SEM与fsQCA方法[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(9): 2484-2501.
Ma Xiaoyu, Huang Mingzhu, Yang Mengxi. Study on the influencing factors of supply chain resilience: based on SEM and fsQCA method[J]. Theory and Practice of System Engineering, 2023, 43(9): 2484-2501.
- [2] 朱正玉, 吴正文. 基于SEM的EPC模式装配式建筑供应链韧性影响研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2022, 30(4): 92-98, 110.
Zhu Zhengyu, Wu Zhengwen. Study on the impact of supply chain toughness of EPC model prefabricated buildings based on SEM[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2022, 30(4): 92-98, 110.
- [3] Sunmola F, Burgess P, Tan A, et al. Prioritising visibility influencing factors in supply chains for resilience[J]. Procedia Computer Science, 2023, 217: 1589-1598.
- [4] Gupta S, Modgil S, Choi T M, et al. Influences of artificial intelligence and blockchain technology on financial resilience of supply chains[J]. International Journal of Production Economics, 2023: 261. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108868.
- [5] 王兴隆, 赵俊妮, 贺敏. 基于贝叶斯网络的空中交通运输系统韧性评价[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1121-1130.
Wang Xinglong, Zhao Junni, He Min. Evaluation of the resilience of air transport systems based on Bayesian networks[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 54(6): 1121-1130.
- [6] 闫绪娟, 王俊丽, 范玲, 等. 韧性城市视角下地铁洪涝灾害风险分析——基于Bow-Tie-贝叶斯网络模型[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 36-43.

- Yan Xuxian, Wang Junli, Fan Ling, et al. From the perspective of resilient cities: based on Bow-Tie—Bayesian network model[J]. *Disaster Psychology*, 2022, 37(2): 36-43.
- [7] Caetano H O, Luiz D N, Fogliatto M S S, et al. Resilience assessment of critical infrastructures using dynamic Bayesian networks and evidence propagation[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024: 241. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109691.
- [8] Tang J Q, Heinemann H, Han K, et al. Evaluating resilience in urban transportation systems for sustainability: a systems-based Bayesian network model[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020: 121. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102840.
- [9] 朱智美. 航空物流供应链存在的问题及对策研究[J]. *中国商论*, 2018(19): 18-19.
- Zhu Zhimei. Research on the existing problems and countermeasures of aviation logistics supply chain[J]. *Business Theory of China*, 2018(19): 18-19.
- [10] 陈群, 黄骞, 陈哲, 等. 基于贝叶斯网络的地铁工程系统韧性评价[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(11): 98-103.
- Chen Qun, Huang Qian, Chen Zhe, et al. Evaluation of metro engineering system resilience based on a Bayesian network[J]. *Chinese Journal of Safety Science*, 2018, 28(11): 98-103.
- [11] 邓健, 杨港, 孙浩, 等. 基于 TOPSIS 和贝叶斯网络的液体化工码头设备安全风险评价模型研究[J]. *中国航海*, 2023, 46(1): 73-79, 87.
- Deng Jian, Yang Gang, Sun Hao, et al. Study on the safety risk evaluation model of liquid chemical terminal equipment based on TOPSIS and Bayesian network[J]. *China Navigation*, 2023, 46(1): 73-79, 87.
- [12] 李航, 聂芳艺. 基于贝叶斯网络的物流无人机碰撞风险评估[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(15): 6700-6706.
- Li Hang, Nie Fangyi. Logistics UAV collision risk assessment based on a Bayesian network[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(15): 6700-6706.
- [13] 翁源, 李爱春, 赵婷, 等. 隧道工程系统韧性影响因素及评价研究[J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(5): 40-47.
- Weng Yuan, Li Aichun, Zhao Ting, et al. Impact factors and evaluation of toughness of tunnel engineering system[J]. *Modern Tunnel Technology*, 2023, 60(5): 40-47.