

基于级联失效的应急产业供需网韧性研究

成思颖

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月16日

摘要

这篇论文研究了基于级联失效的应急产业供需网韧性, 旨在为提升应急响应效率提供理论依据和实践指导。作者构建了一个应急产业供需网的级联失效模型, 并通过模拟不同强度的随机攻击, 分析节点失效对网络稳定性的影响, 量化了网络的抵抗、吸收、缓冲与恢复能力等韧性指标。研究发现, 网络韧性与其灾后恢复效率直接相关, 冗余设计和关键节点保护对提升网络韧性至关重要。

关键词

级联失效, 应急管理, 应急产业供需网, 复杂网络, 韧性评价

Research on the Resilience of Emergency Industry Supply-Demand Network Based on Cascading Failure

Siying Cheng

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 16th, 2025

Abstract

This paper studies the resilience of the emergency industry supply-demand network based on cascading failure, aiming to provide theoretical foundations and practical guidance for improving emergency response efficiency. The author constructs a cascading failure model for the emergency industry supply-demand network and simulates random attacks of varying intensities to analyze the impact of node failures on network stability. The resilience indicators, including resistance, absorption, buffering, and recovery capabilities, are quantified. The study finds that network resilience is directly related to post-disaster recovery efficiency, and that redundant design and protection

of key nodes are critical to enhancing network resilience.

Keywords

Cascading Failure, Emergency Management, Emergency Industry Supply-Demand Network, Complex Network, Resilience Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在《“十四五”国家应急体系规划》的指引下，如何提升应急产业供需网的韧性已成为应急管理领域的重要课题。应急产业供需网的高效协同依赖于网络中各节点与连边的相互作用，其韧性不仅决定了物资与资源的流动效率，还影响到整个应急系统在面对突发灾害时的应对能力。供需网络韧性指的是供应链网络在遭遇中断时，抵抗和吸收负面影响的能力，以及在中断发生后快速恢复的能力。提升供需网络的韧性对于应急组织至关重要，高韧性的网络能更快速地恢复功能，保障资源流动，确保关键物资和服务能够及时送达灾区，从而提高应急响应效率，减少灾害对社会的负面影响。级联失效(Cascading Failures)是一个或少数几个节点或连线的失效通过节点之间的耦合关系引发其他节点也失效，进而产生级联效应，最终导致相当一部分节点甚至整个网络崩溃的现象，在面对供需网络中的级联失效现象时，如何有效提升应急产业供需网的抗冲击能力和恢复能力，仍是一个亟待解决的问题。

当前，有关供需网络韧性的研究主要聚焦于探讨韧性的内涵以及对韧性水平的评价分析。刘家国等[1]研究了影响韧性的各个因素之间的相互作用及其对供应链韧性的作用机制，并明确了供应链韧性形成的过程。Pournader等[2]从供应链的节点及整体网络层面出发，采用模糊数据包络分析模型对节点和网络层次的供应链韧性进行了评估。Kazemian等[3]在量化供应链网络结构因素及其与各种韧性策略之间关系的基础上，提出了一个用于评估网络层面供应链韧性的框架。随着经济贸易的增长以及企业业务范围的不断拓展，供需网络中的参与主体数量不断增加，且主体之间的关联形式愈加多样化。随着这一趋势的发展，部分研究开始关注供应链网络中的关联性问题，尤其是局部中断在网络中传播所引发的涟漪效应[4]。在复杂网络理论中，这种现象被称为级联失效，表现为一种具有传染性质的复杂网络动力学过程[5]。基于这一理论框架，一些学者深入探讨了供应链网络中级联失效的过程，并对网络的整体性能进行了评估。Tang等[6]提出了一种考虑负载传播的级联失效模型，研究了在节点故障情况下供应链网络的鲁棒性表现。Zhao等[7]研究了不同结构下供应链网络中断的传播过程，并对网络的韧性进行了评估。

随着应急产业供需网在全球应急响应体系中的重要性日益增加，如何提高其韧性，尤其是在遭遇级联失效的情况下，成为了当前研究的核心问题之一。本文将基于复杂网络理论，通过构建应急产业供需网的级联失效模型，深入分析其在突发公共卫生事件下的韧性表现，旨在为提升我国应急产业供需网的韧性、提高应急响应效率提供理论依据和实践指导。

2. 应急产业供需网构建

若某一特定阶段，应急产业供需网中包含 n 个主体， m 条协同互动关系数，设其网络模型为 G ，其数学描述为：

$$G=(V,E)=\begin{cases} V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}, v_i \in V \\ E=\{e_1,e_2,\dots,e_m\}, e_i \in E \end{cases} \quad (1)$$

其中, 应急产业供需网记为 $G(V,E)$, 由 n 个节点和 m 条边构成, $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ 为节点集合, 表示应急供需网中的各个主体, 包括政府、企业、非政府组织、媒体组织等。 $E=\{e_1,e_2,\dots,e_m\}$ 为边集合, 表示应急产业供需网的所有主体间共存在 m 条协同互动关系, 边的方向是应急产品供给方向, 方向用箭头表示, 构成一个有向加权网络图。

数据来源于企查查开放平台(<https://www.qichacha.com>)。采用文本分析法, 根据三维场景需求划分, 从个体、社区和社会三个层面来详细探讨应急产品需求的特点和差异, 收集处理突发公共卫生事件场景下相关的上海市应急产业数据, 包括政府机构、医疗机构、生产企业及物流服务等关键节点的信息及公共交易数据。保留招标类型为中标、成交及验收, 并去除个体采购信息及其他地区企业的采购信息, 对收集的数据进行人工清洗与标准化处理, 确保分析的准确性。

3. 应急产业供需网的韧性影响因素分析

涟漪效应是指应急产业供需网中, 单一节点或连边的中断可能引发连锁反应, 并逐渐蔓延至整个网络。该效应常表现为局部故障扩散至全局失效的动态过程, 对网络韧性产生显著冲击。涟漪效应的特点在于, 初始故障节点的资源流动中断会通过动态交互影响其他节点。例如, 医疗物资的枢纽节点失效可能导致整个供应链断裂。即使初始干扰范围有限, 涟漪效应也可能使灾害的影响超出预期, 进一步挑战网络的缓冲能力。随着失效节点的增加, 网络修复所需资源和时间呈非线性增长, 导致网络恢复难度加大, 这对恢复能力提出了更高的要求。

网络结构是指应急产业供需网中, 各节点之间的联系和交互方式。供需网络的结构直接影响资源流动的效率和路径选择, 从而决定了网络的韧性表现。良好的网络结构能够优化资源配置, 提高网络的适应性和恢复能力。

涟漪效应与网络结构特征密切相关。良好的网络结构能够在涟漪效应蔓延时及时隔离故障, 并通过备选路径确保资源流动的持续性。提升应急产业供应链网络的韧性, 不仅能提高应急响应的效率, 还能在灾害发生时减少物资短缺、避免关键节点瘫痪, 从而减轻灾害对社会经济和民众生活的深远影响。本研究借助网络建模仿真方法, 量化分析涟漪效应及网络结构对应急产业供应链韧性的影响, 揭示网络在灾害中断和恢复过程中的韧性表现, 如图 1 所示, 为提升应急响应效率和网络恢复能力提供理论支持和实践依据。

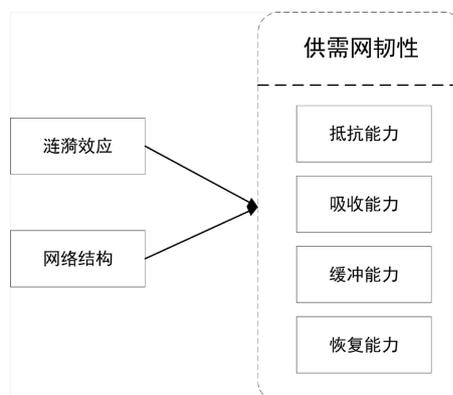


Figure 1. Factors influencing resilience

图 1. 韧性的影响因素

4. 应急产业供需网级联失效模型

4.1. 应急产业供需网级联失效假设条件

本文通过级联失效模型来模拟和表示供需网中的涟漪效应，分析突发灾害对应急产业供需网节点失效的传递过程，并探讨这些失效如何影响整个网络的稳定性和功能。突发灾害导致的应急产业供需网节点的失效是一种极不确定的现象，属于随机攻击类型。所谓的“随机”，是指在完全未知网络结构的情况下，以一定概率随机选择节点进行破坏。被攻击节点及其所有连接会失效，导致网络中的资源流动停止。随机攻击会引发应急产业供需网的级联失效，被攻击节点的失效会增加其邻接节点的负载，如果这些邻接节点的负载超出承载能力，它们也将失效，进而引发更广泛的级联效应。在提取真实灾害特征和相关应急产业的基础上，本文结合应急产业供需网的特点设置了以下攻击条件限制：

1) 攻击位置：在不同层次的节点(个体、社区和社会层面)中，分别随机选择目标节点进行攻击。通过这种方式，可以模拟灾害对各个层级节点的随机性影响。

2) 攻击顺序：采用单步攻击模拟多点同步灾害的初始影响。单步攻击指的是在初始时刻一次性随机选择若干节点进行攻击，模拟多点同时受损的情况。此方法能够反映突发事件中多个节点同时遭遇灾害的情形，进而引发广泛的资源流动中断。

3) 攻击强度：初始攻击比例设置为 10%，然后逐步增加至 90%。通过这一设置，可以观察在不同灾害强度下，供需网络的级联效应及其恢复能力的变化，从而评估网络在不同灾害强度下的韧性表现。

4.2. 场景驱动下应急产业供需网级联失效过程

在应急产业供需网络中，级联失效指的是由于节点失效引发的资源流动重分配过程。其本质在于网络中各节点的负载超出了其承载能力，导致后续节点发生失效，进而触发更广泛的级联效应[8]。以下是具体的级联失效过程：

1) 初始失效

在初始时刻，根据设定的随机攻击条件，随机选择若干节点作为攻击目标。被攻击的节点及其所有连接的连边被移除，从而导致与这些节点相连的邻居节点的负载增加，进而可能引发后续连锁反应。

2) 负载分配

当负载在失效节点周围重新分配时，供需网进入负载重分配阶段。失效节点的资源需求由邻居节点接管，每个失效节点的负载重新分配到其他邻居节点，导致这些邻接节点的负载增加，可能触发新的失效，邻居节点的负载更新为：

$$L_i = L_i + \sum_{j \in N_i} w_{ij} \quad (2)$$

其中， L_i 为节点 i 的当前负载， w_{ij} 为从节点 j 到节点 i 的边权重。

3) 失效判断

邻居节点的负载 L_i 超过其承载能力 C_i 时，该节点失效，具体判定条件为：

$$L_i > C_i \quad (3)$$

其中， $C_i = \alpha \cdot L_i^{\text{init}}$ ， $\alpha > 1$ 表示冗余系数，本文设置为 1.5。 L_i^{init} 为节点的初始负载。

4) 迭代传播

新失效节点的负载继续向其邻居节点传递，可能导致这些节点也发生失效，进而触发更广泛的失效过程。该过程将持续迭代，直到网络中不再有节点失效，或整个网络崩溃，进入新的稳定状态。

5) 终止条件

当网络中不再有新增的失效节点时,级联失效的传播过程停止。此时,网络达到一个新的稳定状态,意味着所有可能的失效都已经发生,网络的资源流动和负载分配进入了一个新的平衡。

5. 应急产业供需网韧性评估

应急产业供需网是社会应对突发事件的核心保障体系,其韧性直接影响灾害冲击下资源调配的效率与效果。供需网络的韧性是指系统在面对不确定性风险事件时的适应能力以及恢复到正常运行状态的能力。韧性过程包括四个关键能力:抵抗能力(防止网络受损),吸收能力(应对并减缓网络受到的负面影响),缓冲能力(通过调整资源流动来降低灾害影响),以及恢复能力(在灾后恢复正常状态的速度和效果)。这些能力共同作用,决定了网络的整体韧性水平。如图2本文选取网络密度、网络效率、特征路径数量和最大连通子图4个指标,分别测度应急产业供需网在遭受扰动后的抵抗、吸收、缓冲和恢复能力[9]-[11],从而评估应急产业供需网的韧性。

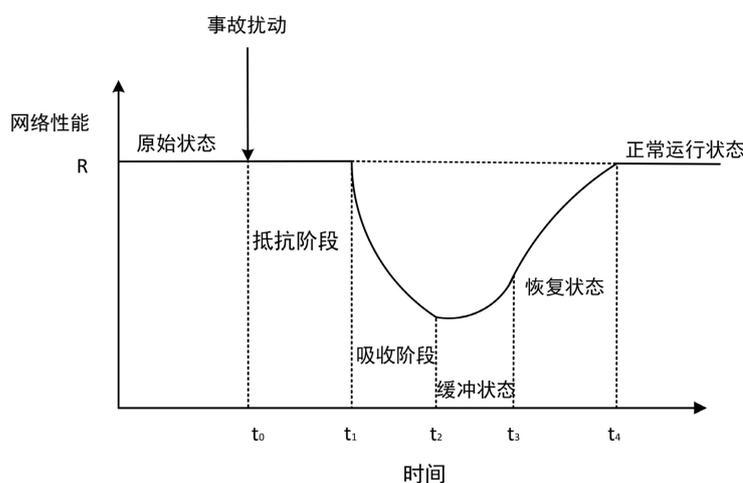


Figure 2. Resilience of the emergency industry supply-demand network
图2. 应急产业供需网韧性

1) 抵抗能力。抵抗能力是指网络受到攻击时,能够维持网络正常运行水平的能力。应急产业供需网的网络密度越大,表明节点间连边数量越多,在网络受到扰动时,应急组织之间有更多的选择抵抗冲击,从而能够维持网络正常运行水平,即网络具有较高的抵抗能力。因此,可用网络密度表征网络的抵抗能力,抵抗能力 R_1 计算公式如下:

$$R_1 = \frac{D'}{D_0} \quad (4)$$

式中: D' 为网络受到攻击后的网络密度; D_0 为未收到攻击时的网络密度。网络密度 D 计算公式为:

$$D = \frac{2m}{n(n-1)} \quad (5)$$

2) 吸收能力。吸收能力是指在网络受到攻击时,网络能够抵御外界的干扰,抵抗网络从正常运行水平降低到攻击后较低的运行水平的能力。在复杂网络中,网络效率越高,表明网络节点相互连接越紧密,网络传输性能越好,当某一节点企业或供应链受到扰动时,系统可以对外部刺激做出较快的反应,防止网络运行水平降低。因此,网络效率可以表征网络的吸收能力,吸收能力 R_2 计算公式如下:

$$R_2 = \frac{E'}{E_0} \quad (6)$$

式中： E' 为网络受到攻击后的网络效率； E_0 为未受到攻击时的网络效率。网络效率 E 计算公式为

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in C} \frac{1}{d_{ij}} \quad (7)$$

式中 d_{ij} 为连接节点 i 与节点 j 之间的特征路径(即最短路径)的长度。 n 代表应急产业供需网中节点的数量。

3) 缓冲能力。缓冲能力是指网络在受到攻击后，应急产业可以在网络中选择备用供应商或其他连通路径完成资源的快速调配，以适应新环境并提高网络因扰动而降低的网络运行水平的能力，网络平均特征路径数量可表征这种能力。因此，用平均特征路径数量对网络的缓冲能力 R_3 进行评估，计算公式如下：

$$R_3 = \frac{F'_p}{F_{p0}} \quad (8)$$

式中： F'_p 为网络受到攻击后的平均特征路径数量； F_{p0} 为未收到攻击时网络的平均特征路径数量。网络的平均特征路径数量 F_p 计算公式如下：

$$F_p = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in C} f_{p_{ij}} \quad (9)$$

式中 $f_{p_{ij}}$ 为网络中节点 i 与节点 j 之间的特征路径数量。

4) 恢复能力。恢复能力是指应急产业供需网受到攻击后调整并适应当前环境，从侵扰后较低的运行水平快速恢复到正常运行水平的能力。最大连通子图的相对大小的比值反映网络遭受破坏后，拓扑结构的变化情况。最大连通子图的相对大小是指受到攻击后的网络最大连通子图中节点规模与原始网络最大连通子图的节点规模的比值，该值越大代表网络在受到攻击后的恢复能力越好。因此，使用最大连通子图相对大小的比值评估网络受到攻击后的恢复能力 R_4 ，计算公式如下：

$$R_4 = \frac{p'}{p_0} \quad (10)$$

式中： p' 为网络受到攻击后的最大连通子图的节点数量； p_0 为未受到攻击时网络的节点的数量。

综合考虑拓扑结构与网络运输功能，对网络受灾后的恢复能力 R_4 进行如下修正：

$$R_4 = \frac{\sum_{i \neq j \in C'} w_{ij}}{\sum_{i \neq j \in C_0} w_{ij}} \quad (11)$$

式中： w_{ij} 为节点 i 与节点 j 间的连边权重； C' 与 C_0 分别为受到攻击后的应急产业供需网的最大连通子图与未受到攻击扰动的应急产业供需网的最大连通子图。

抵抗能力 R_1 、吸收能力 R_2 、缓冲能力 R_3 与恢复能力 R_4 是衡量应急产业供需网韧性的 4 个重要维度， R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 的值越大表示其网络韧性越好，在每轮传播后，计算网络的四项韧性指标，应急产业供需网韧性计算公式如下：

$$R = \lambda_1 R_1 + \lambda_2 R_2 + \lambda_3 R_3 + \lambda_4 R_4 \quad (12)$$

应急产业供需网韧性是其在面对突发事件时抵抗、吸收、适应与恢复 4 个不同阶段下的综合反映因此， R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 在评估应急产业供需网韧性时具有同等重要性，故设 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4$ ，且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$

以上不同阶段的表示指标为本文研究提供了理论基础，见表 1：

Table 1. Resilience measurement indicators of the emergency industry supply-demand network
表 1. 应急产业供需网韧性测度指标

韧性评估维度	特征	指标
结构韧性	抵抗能力	网络密度
	吸收能力	网络效率
	缓冲能力	平均特征路径数量
	恢复能力	最大连通子图
全局韧性	综合韧性指数	综合韧性指标

6. 突发公共卫生事件下的应急产业供需网动态韧性分析

突发公共卫生事件具有高复杂性和强时效性的特点，严重影响社会经济运行和公共安全。此类事件往往伴随着医疗资源需求的骤增、物资流动的受阻和信息传播的延迟，使得应急产业供需网的稳定性和适应能力受到严峻考验。本研究通过模拟随机攻击下的网络级联失效过程，分析不同攻击比例对网络韧性的影响。

通过模拟随机攻击下不同比例的节点失效，各韧性指标(R_1, R_2, R_3, R_4)及综合韧性指数(R)在不同攻击比例下的变化情况如表 2 所示。

Table 2. Resilience index under different attack proportions
表 2. 不同攻击比例下的韧性指数

攻击比例	R	R_1	R_2	R_3	R_4
0	1	1	1	1	1
0.1	0.85	0.98	0.9	0.6	0.9
0.2	0.71	0.89	0.81	0.35	0.8
0.3	0.61	0.88	0.69	0.15	0.7
0.4	0.62	1.1	0.7	0.08	0.6
0.5	0.41	0.73	0.39	0.03	0.5
0.6	0.43	0.93	0.37	0.02	0.4
0.7	0.41	1.01	0.31	0.02	0.3
0.8	0.38	1.11	0.21	0.01	0.2
0.9	0.16	0.5	0.02	0	0.1

在攻击比例较低(0.1~0.3)时，综合韧性指数和各分项能力的下降较为缓慢，说明此阶段网络具有较强的抵抗能力和吸收能力，能够有效抵御外界扰动并保持网络功能的稳定性。此时抵抗能力接近于 1 (从 0.98 逐渐下降到 0.88)，说明供需网络在失去边缘节点后，整体结构依然稳固，资源路径的连通性未受到严重影响。抵抗能力的高水平表明，网络具有良好的结构冗余性，可以避免小范围扰动导致全局失效。吸收能力从 0.9 下降至 0.69，反映出网络在承受负载重分配时仍能够快速适应资源需求的变化。攻击比例较低时，网络的核心资源路径(高权重路径)尚未受到显著影响，因此吸收能力表现较强。缓冲能力和恢复能力随着攻击比例的增加，均呈显著下降趋势。缓冲能力的下降(从 0.6 降至 0.15)说明网络在部分资源路径被削弱后，已经开始出现局部资源供需失衡的现象。恢复能力的降低(从 0.9 降至 0.7)表明资源流动

的灵活性受到了初步影响，但尚未对整体功能造成毁灭性破坏。

当攻击比例达到 0.4 时，综合韧性指数出现了轻微回升(从 0.61 回升至 0.62)，同时抵抗能力和吸收能力分别升至 1.1 和 0.7。可能因为边缘节点的移除释放了局部区域内的冗余负载，缓解了部分路径的拥堵，从而在短期内提升了网络的整体连通性和节点负载分配的均衡性。这一现象说明，网络在初期失效时可能会通过冗余的资源配置实现短暂的自适应调整。随着部分冗余节点和低效路径的移除，网络的核心节点和高权重路径得到了更集中的资源支持，整体资源调配效率在局部区域内出现了临时性提升。这种现象仅限于攻击比例达到一定范围时的短期效应。尽管有短暂的回弹，其他能力如缓冲能力和恢复能力依然持续下降，表明这种回升是局部的、临时的，并未真正提高网络的全局韧性。

当攻击比例从 0.4 增加至 0.5 时，综合韧性指数和各项能力指标出现了显著的非线性下降，这种非线性下降标志着网络的韧性临界点已被突破，网络的功能崩溃速度显著加快，系统难以在短期内恢复。在攻击比例超过 0.6 后，网络的各项能力均下降至极低水平，综合韧性指数维持在 0.2 左右，但部分能力仍表现出一定的残余功能。

分析结果明确了不同韧性能力的重要性及其对网络功能的支撑作用。抵抗能力和吸收能力在低攻击比例下的稳定性体现了网络结构冗余的重要性，而缓冲能力和恢复能力在高攻击比例下的急剧下降则突出了关键节点和路径保护的必要性。

7. 结论与展望

本研究基于复杂网络理论，通过模拟级联失效过程，深入探讨了应急产业供需网在突发灾害下的韧性表现。研究表明，应急产业供需网的韧性直接影响到灾后资源的高效调配与恢复速度，网络结构的冗余性、资源路径的优化配置、以及节点间的协同合作均是提升韧性的关键因素。通过仿真分析，随着攻击比例的增大，网络的各项韧性指标表现出显著下降，尤其是在恢复能力和缓冲能力方面，突出了关键节点保护和冗余设计的重要性。

本文研究还存在一定的不足，当前模型的适用范围主要集中在特定类型的灾害情境中，未来可以扩展至多种类型的灾害，以提高模型的普适性。

参考文献

- [1] 刘家国, 姜兴贺, 赵金楼. 基于解释结构模型的供应链弹性系统研究[J]. 系统管理学报, 2015, 24(4): 617-623.
- [2] Pournader, M., Rotaru, K., Kach, A.P. and Razavi Hajiagha, S.H. (2016) An Analytical Model for System-Wide and Tier-Specific Assessment of Resilience to Supply Chain Risks. *Supply Chain Management: An International Journal*, **21**, 589-609. <https://doi.org/10.1108/scm-11-2015-0430>
- [3] Kazemian, I., Torabi, S.A., Zobel, C.W., Li, Y. and Baghersad, M. (2021) A Multi-Attribute Supply Chain Network Resilience Assessment Framework Based on SNA-Inspired Indicators. *Operational Research*, **22**, 1853-1883. <https://doi.org/10.1007/s12351-021-00644-3>
- [4] Hosseini, S., Ivanov, D. and Dolgui, A. (2019) Review of Quantitative Methods for Supply Chain Resilience Analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **125**, 285-307. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.001>
- [5] 尹航, 侯霁珊, 齐岳. 基于节点蓄意攻击的集群式供应链网络抗毁性研究[J]. 中国管理科学, 2025, 33(2): 161-171.
- [6] Tang, L., Jing, K., He, J. and Stanley, H.E. (2016) Complex Interdependent Supply Chain Networks: Cascading Failure and Robustness. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **443**, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.09.082>
- [7] Zhao, P., Li, Z., Han, X. and Duan, X. (2022) Supply Chain Network Resilience by Considering Disruption Propagation: Topological and Operational Perspectives. *IEEE Systems Journal*, **16**, 5305-5316. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2022.3161788>
- [8] 张钦, 雷世豪, 王海. 过载及欠载情形下产业链网络风险级联失效的建模与仿真[J]. 系统工程, 2021, 39(2): 50-60.

- [9] 杨琦, 张雅妮, 周雨晴, 等. 复杂网络理论及其在公共交通韧性领域的应用综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 215-229.
- [10] 马潇宇, 黄明珠, 杨朦晰. 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.
- [11] 刘家国, 施高伟, 卢斌, 等. 供应链弹性三因素模型研究[J]. 中国管理科学, 2012, 20(S2): 528-535.