

## 多层供应链网络中欠载失效和过载级联失效的协同演化研究

李 姝<sup>1</sup> 杨 华<sup>1</sup> 宋 波<sup>2</sup>

1 南京邮电大学电子与光学工程学院 微电子学院 南京 210046

2 南京邮电大学现代邮政学院 南京 210003

(lishunjupt@163.com)

**摘 要** 供应链网络与我们的生活密切相关,而供应链网络的级联失效问题一直是研究的重点。文中提出了一种多层供应链网络混合失效模型,更好地模拟了真实供应链网络欠载失效和过载级联失效的过程,为预防供应链网络崩溃提供了参考。首先,建立了上层供应商网络过载级联失效模型和下层零售商网络欠载失效模型,它们共同构成了上下层网络混合的供应链网络模型;然后,通过采用不同的攻击方式攻击上下层网络,分析了供应链网络的失效迭代过程和脆弱性。在初始攻击比例一定的情况下,上层供应商网络相较于下层零售商网络有更强的鲁棒性,初始攻击节点为上层供应商网络节点时,网络崩溃的阈值更低,更容易使供应链网络发生全面崩溃。仿真结果验证了模型的有效性,为预防供应链网络崩溃提供了新的研究模型。

**关键词:** 多层供应链网络;欠载失效;过载失效;级联失效;脆弱性

**中图法分类号** TP311

## Study on Co-evolution of Underload Failure and Overload Cascading Failure in Multi-layer Supply Chain Network

LI Shu<sup>1</sup>, YANG Hua<sup>1</sup> and SONG Bo<sup>2</sup>

1 School of Electronic and Optical Engineering, School of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China

2 School of Modern Posts, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract** The supply chain network is closely related to our lives, and the cascading failure of the supply chain network has always been a hot research topic. This paper proposes a multi-layer supply chain network mixed failure model, which can better simulate the process of real supply chain network collapse and provide a reference for preventing supply chain network collapse. By establishing the supply chain network model of upper-level supplier network overload cascade failure and lower-level retailer network underload failure, the vulnerability of the supply chain network is studied when the upper and lower networks are attacked through different attack strategies. In the case of a certain initial attack ratio, the upper-layer supplier network is more robust than the lower-layer retailer network. Under the same attack ratio, the scale of the network crash when deliberately attacking network nodes is larger than that of random attacks. When the upper-layer supplier network node is initially attacked, the threshold of network collapse is lower, which is more prone to collapse. This paper verifies the validity of the model and provides a new research model for preventing the collapse of the supply chain network.

**Keywords** Multi-layer supply chain network, Underload failure, Overload failure, Cascading failure, Vulnerability

### 1 引言

随着移动互联网、云计算、大数据、物联网与现代制造业的融合,供应链网络在全国贸易中的核心地位越来越突出。现代供应链呈现出范围广、规模大、企业数量多、网络化、企业间竞争与合作共存、动态网络连接强等特点<sup>[1-4]</sup>。供应链网络复杂性的提高,导致供应链网络应对突发事件的能力下降,网

络越来越脆弱,所以级联失效的现象普遍存在于供应链网络中<sup>[5-9]</sup>。例如,2019年底新冠疫情的爆发使得全球经济停摆,众多企业倒闭,失业人数明显增多,造成了社会不稳定。由于企业节点的崩溃和运输通道的中断,供应链网络结构遭到大面积的破坏,引发了生产停滞、销售下滑、物流迟缓、流动性困难等问题<sup>[10-11]</sup>。据联合国贸易与发展会议2020年3月27日的调查,全球5000家跨国公司预期今年平均盈利水平将较去

到稿日期:2020-09-20 返修日期:2021-02-16 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金项目(61971240,61401226);湖南省自然科学基金项目(2019JJ60024)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61971240,61401226) and Natural Science Foundation of Hunan Province(2019JJ60024).

通信作者:杨华(yangh@njupt.edu.cn)

年缩水 30%，其中发达国家缩水 35%，发展中国家缩水 20%<sup>[12]</sup>。Zhu 等<sup>[13]</sup>对中国 1500 余家中小微企业进行调查发现，59.1%的企业预计 2020 年营业收入下降 20%以上。在新冠疫情的影响下，企业的生存面临着巨大的挑战。因此，供应链网络中的级联失效现象对个人、企业甚至国家都会造成极大的影响。提高供应链网络鲁棒性以及预防供应链网络崩溃是亟待解决的重要科学问题。

在供应链网络级联失效的研究中，Li 等<sup>[14]</sup>早在 2003 年就提出了基于 BA 模型的局部世界演化网络模型，该模型贴切地模拟了供应链网络中的节点连接，较早地展开了对供应链网络演化模型的深入研究。Duan 等<sup>[15]</sup>分析了基于负载重分配异质性的供应链网络级联失效的条件，建立了可以调节的负载重分配模型。Gao 等<sup>[16]</sup>建立了供应链网络动态级联失效模型，研究了企业的特性对供应链网络级联失效的影响，评估了供应链网络的脆弱性。Tang 等<sup>[17]</sup>建立了信息层和物理层组合的关联供应链网络，研究了网络层内和层间的级联失效过程。在这些研究中，后续企业节点的失效都是因为节点的负载超过了节点本身的容量，我们称之为过载级联失效，目前对供应链网络的研究大多是过载级联失效。事实上，在供应链网络中，企业会因产品需求下降或原料供应不足而失效，属于欠载失效。Wang 等<sup>[18]</sup>提出了一个供应链网络欠载级联失效模型，研究了模型中节点容量下限参数与级联失效规模的关系。因此，供应链网络中可能出现不同方式的级联失效过程。

事实上，真实供应链网络并不是简单的单层网络，而是由供应商网络、制造商网络、分销商网络、零售商网络以及客户网络等组成的多层复杂网络<sup>[19-20]</sup>。各层网络由于结构和功能各不相同，发生失效的方式也各不相同，另外，多层网络间密切的耦合关系也造成了供应链网络不同层间节点失效的相互影响。例如，供应商网络中的企业节点因为外在因素导致企业货物堆积，资金无法周转而倒闭，即该节点失效，失效节点的负载在上层网络按节点度的大小进行重新分配，负载重新分配又会导致上层其他节点因为负载超过容量上限而失效，即产生了过载级联失效。与此同时，供应商网络中的节点失效，会导致下层零售商网络中的零售商节点由于材料货物等供应不足而失效，产生了欠载失效。同时，若超过一定数量的零售商节点失效，则下层零售商网络对上层供货商网络的需求下降，上层供应商网络的节点因为货物无法及时输出而堆积，从而又会扩大上层供应商网络的过载级联失效范围，上层网络的级联失效规模扩大又会导致下层网络节点失效的比例增大。

但多层社交网络和交通网络中，欠载失效和过载失效共存是供应链网络发生失效时的独有特性，但在大多数社交网络和交通网络中，只会发生过载级联失效，不存在欠载失效的情况。因为供应链网络中上层网络和下层网络节点失效的方式不同，所以本文建立了上层供应商网络过载级联失效和下层零售商网络欠载失效的模型。因为供应链网络节点的失效方式不同，所以供应链网络的鲁棒性受节点容量上限和节点容量下限的影响。当上层节点负载超过容量上限或者下层节点低于容量下限时，节点都会失效，然后清除失效节点的连

边，则网络最大连通片节点的数目减少，导致网络的鲁棒性降低。

上层网络的供应商节点发生崩溃时会导致货物堆积，与之有合作的供应商节点会受到影响，随着供应商节点崩溃数目的增加，上层供应商网络发生级联失效现象，导致货物资金等无法流通。与上层失效的供应商节点有贸易往来的下层零售商节点会因为缺乏货物来源，导致部分零售商节点也崩溃，反之，下层零售商节点的崩溃将导致更多与崩溃零售商节点有物资交流的供应商货物堆积，即上层供应商节点的崩溃规模进一步扩大，从而导致更多的零售商节点因缺乏物资来源无法正常运转而崩溃。这样就形成了上下层节点失效相互影响，继而产生上下层节点失效传播的重复循环过程。由此可见，多层供应链网络层间的节点失效过程是协同演化的。及时控制供应链网络中失效的传递，可以有效抑制网络中失效节点的规模以及层间的协同演化过程。因此研究和分析多层供应链网络层间节点失效的协同演化具有重要的现实意义。

考虑到多层供应链网络中各层网络功能的异质性以及网络层间的耦合关系，本文提出了一种新的考虑欠载失效多层供应链网络中的过载级联失效模型。首先建立双层供应链网络，分析上下层网络中的节点失效过程，研究网络结构和上下层网络之间节点失效的协同演化对整个供应链网络崩溃的影响。在不同的初始节点失效比例下研究供应链网络的崩溃情况，分析供应链网络的脆弱性，同时分析初始失效节点为上层供应商网络或者下层零售商网络中的节点失效对供应链网络的影响。研究结果表明，随着初始失效节点比例的增大，网络中的总失效节点数增多，并且到达某一临界值后，网络全部崩溃。无论初始攻击的节点是上层网络节点还是下层网络节点，在供应链网络没有全部崩溃时，上层供货商网络的失效节点数总是小于下层零售商网络的失效节点数，这与下层零售商网络节点的功能有关，下层网络更脆弱。

本文第 2 节考虑了不同层网络节点失效过程的异质性，建立了欠载失效-过载级联失效的多层供应链网络混合级联失效模型；第 3 节通过仿真分析了欠载失效过程和过载级联失效之间的相互关系和协同演化；最后总结全文并展望未来。

## 2 多层供应链网络的混合级联失效模型

本节考虑了双层供应链网络，上层为供应商网络，下层为零售商网络，上下层网络之间有信息传输、物资运送、金钱交易等连接关系。上层网络节点容量具有上限，下层网络节点容量具有下限，一旦上层网络节点容量超出其自身容量上限或者下层网络节点容量低于其容量下限，节点都会失效。一个上层网络的企业节点（如某个供应商节点），受到外界干扰导致负载超出负荷上限而失效，同类型的上层供应商节点可能会因为该失效节点负载重新分配导致后续的上层节点过载级联失效，负载按上层节点度的大小进行分配。与此同时，因为上下层网络间的连接关系，上层网络节点的失效会引发下层网络节点的失效，上层供应商企业因负荷过大而失效，原本由上层供应商节点供应给下层零售商节点的货物减少为零，导致下层零售商因货物缺乏而失效。下层零售商网络的节点间没有连接，因为生活中一个零售商的倒闭对另一个零售商

的运营几乎没有影响,所以下层零售商节点的失效只与上层供应商网络有关。

## 2.1 上层网络过载级联失效模型

上层网络用具有  $N$  个节点(企业)的 BA 网络表示,生成的无向图  $G$  用一个  $N \times N$  的邻接矩阵  $A$  来表示,如果节点  $i$  与节点  $j$  之间存在一条连边,则  $a_{ij} = 1$ ; 否则  $a_{ij} = 0$ 。节点  $i$  的度定义为  $K_i$ , 表示节点  $i$  连接了  $K_i$  个上层节点。节点  $i$  的初始负载  $L_i(0)$  定义为:

$$L_i(0) = \beta k_i^{\alpha_1}, i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

其中,  $\beta, \alpha_1$  为可调参数,控制节点的初始负载,文中  $\beta$  设为 1。

企业节点会受到外界环境因素、自身的生产能力、货物流通速度等条件的约束。为了便于分析,我们将企业节点的最大耐受风险能力用节点的负载容量上限来表示。节点  $i$  的负载容量上限  $C_{i(\max)}$  定义为:

$$C_{i(\max)} = \delta \cdot L_i(0) \quad (2)$$

其中,  $\delta$  为控制节点容量上限的参数,  $\delta$  的大小代表供应链节点承受风险负载的能力,取值范围为  $\delta \geq 1$ 。

在供应链网络中,当节点失效后,将该节点移出网络再重新分配该节点的负载,然后将与之连接的边清除,即将邻接矩阵对应的位置置零。该节点的负载会按其邻居节点的度或者介数大小进行分配。此处我们用度来进行分配,因为度在一定程度上可以代表节点的抗风险能力,在受到同等程度的攻击时,度大的节点比度小的节点更不容易崩溃。

上层网络失效节点负载再分配的比例如下:

$$P_{i \rightarrow j} = \frac{k_j^{\alpha_2}}{\sum_{n \in V_i} k_n^{\alpha_2}} \quad (3)$$

其中,  $V_i$  是节点  $i$  在上层网络中邻居节点的集合,  $j$  是同层邻居节点中的一个,负载重分配的比例取决于邻居节点的度,度越大,分配到的负载越多。  $\alpha_2$  是可调整的参数,控制负载分配的比例。

负载再分配的过程如下:

$$\Delta L_{i \rightarrow j}(t) = L_i(t-1)P_{i \rightarrow j} \quad (4)$$

$$L_j(t) = L_j(t-1) + \Delta L_{i \rightarrow j}(t) \quad (5)$$

其中,  $L_i(t-1)$  是节点  $i$  上一个时刻的负载,最初是节点  $i$  的初始负载,  $P_{i \rightarrow j}$  是节点  $i$  分配到节点  $j$  的分配比例,  $\Delta L_{i \rightarrow j}(t)$  是  $i$  分配给  $j$  的负载,  $L_j(t-1)$  为  $j$  上一个时刻的负载,首轮分配时是  $j$  的初始负载。

负载进行一轮分配后,比较节点  $j$  的负载与该节点容量上限的大小,若满足以下条件:

$$L_j(t-1) + \Delta L_{i \rightarrow j}(t) \leq C_{j(\max)} \quad (6)$$

则节点  $j$  不失效;若不满足该式,即节点  $j$  的负载大于其容量上限,则节点  $j$  失效,重复上述的节点失效负载再分配过程,找到  $j$  的邻居节点,进行负载分配。直到整个上层网络崩溃或没有新生成的失效节点,则过载级联失效停止。

## 2.2 下层网络欠载失效模型

下层零售商网络的节点会受到消费者需求和货物供应的影响,若消费者需求下降或者货物供应不及时,则该节点会因为无法盈利而倒闭,所以一个企业若想正常运营,该企业的负载必须高于一个能使其正常运转的下限,若低于这个下限,则该企业将面临倒闭的风险。欠载失效导致供应链网络的崩溃

普遍存在于现实生活中。节点的负载容量下限与节点的初始负载有关,初始负载与节点本身的存储能力有关,本文用节点的度来描述下层零售商网络节点的存储能力,下层节点的度与上层节点的连接有关,与上层供货商网络连接的节点数越多,即一个节点供货商越多,则该节点存储能力越大,但是零售商节点的存储能力不可能无限大,它还受企业运营成本条件的约束。

下层网络用具有  $M$  个节点(企业)的无向图表示,这  $M$  个节点之间没有连接,上层网络与下层网络之间的连接关系用一个  $N \times M$  的矩阵  $B$  来表示,如果上层节点  $i$  与下层节点  $h$  之间存在一条连边,则  $b_{ih} = 1$ ; 否则  $b_{ih} = 0$ 。下层节点  $h$  的度定义为  $K_h$ , 表示节点  $h$  连接了  $K_h$  个上层节点。节点  $h$  的初始负载  $L_h(0)$  定义为:

$$L_h(0) = \beta k_h^{\alpha_3}, h=1,2,\dots,M \quad (7)$$

其中,  $\beta, \alpha_3$  为可调参数,控制节点初始负载,文中  $\beta$  设为 1。

节点  $h$  的负载容量下限  $C_{h(\min)}$  定义为:

$$C_{h(\min)} = \sigma \cdot L_h(0) \quad (8)$$

其中,  $\sigma$  为可调整的负载容量下限参数,取值范围为  $0 \leq \sigma \leq 1$ 。

在供应链网络中,若每个节点都正常运作,上层节点会按照下层节点的度大小给下层节点提供物资、货物等,但是若某个上层节点失效,则与之相连接的下层节点会缺少这个上层节点提供的物资。

上层节点  $i$  正常工作时向下层节点  $h$  分配物资的比例为:

$$P_{i \rightarrow h} = \frac{k_h^{\alpha_4}}{\sum_{m \in U_i} k_m^{\alpha_4}} \quad (9)$$

其中,  $U_i$  是上层节点  $i$  与下层网络相连接的所有节点的集合。  $h$  是下层网络中与  $i$  连接的一个节点。物资的分配比例取决于下层节点的度,度越大,该节点的存储能力越大,分配到的物资越多。  $\alpha_4$  是可调整的参数,控制物资分配的比例。上层节点  $i$  传输给下层节点  $h$  的物资为:

$$\Delta L_{i \rightarrow h}(i) = L_i(0)P_{i \rightarrow h} \quad (10)$$

当上层节点  $i$  失效后,本应传输给下层节点  $h$  的物资就无法传输了,所以节点  $h$  的负载应该减去节点  $i$  原本应该提供的负载:

$$L_h(n) = L_h(n-1) - \Delta L_{i \rightarrow h}(i) \quad (11)$$

遍历所有与下层节点  $h$  相连接的上层失效节点,假设有  $n$  个与之相连的上层失效节点,  $L_h(n-1)$  为减去与之相连的第  $n-1$  个上层节点后节点  $h$  的剩余负载,最后比较下层节点  $h$  的负载与负载容量下限的大小,若满足式(12):

$$L_h(n) \leq C_{h(\min)} \quad (12)$$

则节点  $h$  的负载小于自身的容量下限,节点  $h$  失效;若不满足式(12),则节点  $h$  正常工作。

若下层节点  $h$  失效,则与之相连的未失效的上层节点  $j$  会受到影响。原本上层节点  $j$  提供给节点  $h$  的物资为:

$$\Delta L_{j \rightarrow h}(j) = L_j(0)P_{j \rightarrow h} \quad (13)$$

但是因为下层节点  $h$  失效了,这一部分物资无法传输,所以只能囤积在上层节点  $j$  的仓库里,而且上层节点  $j$  会因为下层节点  $h$  失效而减少一个收入来源,即外界对节点  $j$  的需求下降,使之货物堆积,收入减少,从而容易崩溃。

当下层节点  $h$  失效后,节点  $h$  则不需要  $j$  提供货物了,上

层节点  $j$  的负载就变为:

$$L_j(n) = L_j(n-1) + \Delta L_{j \rightarrow n}(t) \quad (14)$$

遍历与上层节点  $j$  连接的失效下层节点, 依次加上原本给这些失效节点提供的物资, 最后比较上层节点  $j$  与其负载容量上限的大小, 若满足式(15):

$$L_j(n) \leq C_{j(\max)} \quad (15)$$

则节点  $j$  不失效; 若不满足式(15), 即节点  $j$  的负载大于其容量上限, 则节点  $j$  失效。

上述即为下层节点欠载失效导致上层节点过载失效的过程, 但是上层节点失效会进一步扩大上层网络的过载级联失效, 与此同时还伴随着上层节点影响下层节点的欠载失效。图 1 描述了一个双层供应链网络级联失效的过程, 上层供应商网络有 8 个节点, 下层零售商网络有 7 个节点, 上层节点  $i$  受到外界影响而失效,  $i$  失效后断开节点  $i$  的连边,  $i$  的负载在上层网络按照度的大小进行重分配, 节点  $j$  接受的负载大小为  $\Delta L_{i \rightarrow j}$ , 节点  $j$  接受负载后计算是否超过其容量上限, 若超过容量上限, 则节点  $j$  失效, 按照负载重分配函数找到与  $j$  相连接的上层节点进行分配。因为节点  $i$  失效后, 清除了节点  $i$  的所有连边, 所以原本与节点  $i$  连接的下层节点  $h$  因缺乏货物来源而导致节点  $h$  的负载减少了  $\Delta L_{i \rightarrow h}$ , 比较  $h$  减少后的负载与其容量下限的大小, 若小于其容量下限, 则节点  $h$  失效。节点  $h$  失效后, 原本给节点  $h$  提供货物的上层节点的货物会堆积, 上层节点  $k$  原本运输给节点  $h$  的  $\Delta L_{k \rightarrow h}$  会加到节点  $k$  的负载上, 导致节点  $k$  负载增加, 则上层节点  $k$  也会有失效的风险。所以在供应链网络中, 一旦发生失效, 上层网络会影响下层网络, 下层网络也会影响上层网络, 并且这个影响会导致供应链网络崩溃的范围扩大, 因此对层级供应链网络进行混合级联失效的分析很有必要。

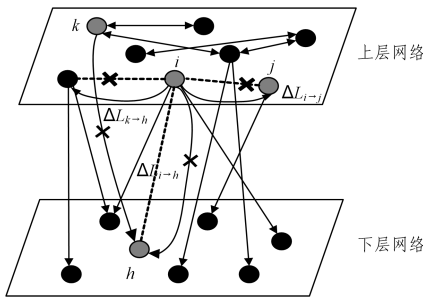


图 1 双层供应链网络中的级联失效过程

Fig. 1 Cascade failure process in a two-layer supply chain network

### 2.3 度量指标

供应链网络的失效过程可能在网络不产生新的失效节点后就停止, 也有可能整个网络崩溃时才结束。在此, 我们用失效节点的数目(和比例)来描述网络中级联失效过程的结果, 失效节点数目越多(失效节点比例越高), 网络越脆弱。  $F$  为上层网络或者下层网络的失效节点数量, 令  $S'$  为供应链网络发生过载级联失效和欠载失效后供应链网络中所有失效节点的数量,  $S$  为供应链网络中所有的初始节点的数量。那么, 失效节点比例  $P$  为:

$$P = \frac{S'}{S} \quad (16)$$

其中,  $P$  越大, 则说明网络发生失效的规模越大, 网络中的失

效节点数目增多, 网络更脆弱。

当节点失效后, 网络中的失效节点会和其他节点断开连接。因此网络的连通性会随着网络中的级联失效过程发生变化。我们用最大连通片指标  $Q$  来衡量失效节点对网络效率的影响。

$$Q = \frac{M'}{S} \quad (17)$$

其中,  $M'$  为网络中最大连通子图中节点的数量;  $Q$  为最大连通片指标,  $Q$  越大, 网络连通性越好, 则网络的效率提高, 级联失效过程对网络结构的影响更小。

### 3 仿真与分析

日常生活离不开供应链网络, 但是供应链网络却极容易受到外界的影响导致供应中断, 如 2019 年底新冠疫情的爆发, 使得许多供应商企业的物资运输通道中断, 导致货物大量堆积, 供应商节点过载失效, 失效的供应商节点的负载会流向与之有合作的其他供应商节点, 导致其他供应商节点负载超荷而失效, 即在上层供应商网络间形成了过载级联失效。同时, 下层的零售商企业因为无法及时获得上层供应商企业的物资而无法盈利导致欠载失效, 失效风险在上下层网络之间传递。现实生活中供应链网络中供货商和零售商之间的关系比较复杂。现有的研究表明, 生活中的供应链网络具有无标度特性<sup>[21]</sup>, 因此, 本文采用 BA(Barabasi-Albert) 网络模型作为上层网络, 上下层网络的连接关系采用 BA 连接。

参数  $\alpha_1$  为上层网络初始负载控制参数,  $\alpha_1$  越大, 则节点初始负载越多, 此处取  $\alpha_1 = 1.5$ 。参数  $\alpha_2$  为控制负载分配的参数,  $\alpha_2$  越大, 则上层网络节点负载重新分配受节点度的影响越大, 此处取  $\alpha_2 = 1$ 。  $\delta$  为控制上层网络节点的容量上限参数,  $\delta$  越大, 节点承受能力越强, 空余容量越多, 更不容易失效, 此处取  $\delta = 1.8$ 。  $\alpha_3$  为下层网络节点的初始负载控制参数,  $\alpha_3$  越大, 下层网络节点的初始负载就越多, 此处取  $\alpha_3 = 1.5$ 。参数  $\alpha_4$  为控制物资分配的参数,  $\alpha_4$  越大, 则分配给下层网络节点的物资受节点度的影响越大, 此处取  $\alpha_4 = 1.6$ 。  $\sigma$  为控制下层网络节点容量下限参数,  $\sigma$  越小, 节点承受亏损的能力越强, 更不容易失效, 此处取  $\sigma = 0.7$ 。

初始失效节点的攻击方法采用蓄意攻击或者随机攻击, 蓄意攻击是指选取网络中度值大的一部分节点进行攻击, 即将节点的度值从大到小进行排序, 从排好序的节点中从前往后选取一定比例进行攻击, 使之失效。随机攻击是指随机选取网络一定比例的节点攻击使之失效。选取一定比例的初始失效节点后, 级联失效过程开始, 直到整个供应链网络中没有新增加的失效节点或者整个网络崩溃, 仿真停止。仿真工具采用 MATLAB\_R2018a。首先, 在初始攻击比例为 7% 的情况下, 分别对上层网络和下层网络进行蓄意攻击, 即攻击度大的节点。

为了验证模型的有效性, 本文分析了上下层节点数分别为 300, 500 和 800 的网络(即上层网络节点数和下层网节点数相等)的失效情况。图 2(a) 为网络总节点数为 600 时每次迭代的失效节点数量变化, 图 2(b) 为网络总节点数为 1000 时每次迭代的失效节点数量变化, 图 2(c) 为网络总节点数为

1600时每次迭代的失效节点数量变化。由图2可以看出,在初始蓄意攻击节点的比例(即节点初始失效比例)为7%时,无论初始攻击节点为上层节点还是下层节点,网络规模为600和1000的网络都会全面崩溃。但是当网络规模为1600时,只有攻击节点为上层网络节点时,网络才会全部崩溃;当初始攻击节点为下层节点时,失效过程只迭代3次就不产生新的失效节点了,即网络恢复稳定,失效的风险停止传播。可见网络规模对失效的传递也有一定影响。接下来以1000的网络进行具体分析,由图2(b)可知,初始攻击节点为上层网络节点时,迭代1次后,整个网络全部崩溃;初始攻击节点为下层网络节点时,迭代7次后整个网络才全部崩溃,即下层网络节点欠载失效导致上层网络过载失效,新生成的上层网络失效节点导致上层网络级联失效,级联失效生成的新的上层网络失效节点再导致下层网络节点欠载失效,这个过程进行了7次。在迭代第7次时,新生成的失效节点数最多。由此可见,蓄意攻击时,初始攻击上层网络节点相较于初始攻击下层网络节点,供应链网络失效得更快。以7%的初始攻击比例进行随机攻击时,攻击上层网络和下层网络的迭代过程区别不大,所以我们采用15%的初始攻击比例进行随机攻击。

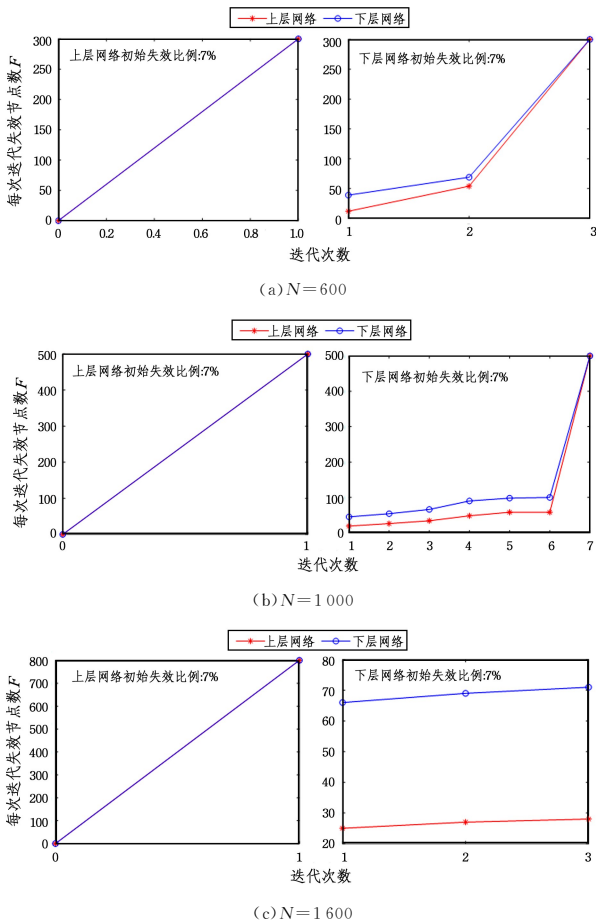


图2 节点初始失效比例为7%时网络失效的迭代过程(蓄意攻击)  
Fig. 2 Iterative process of network failure when initial failure rate of nodes is 7% (deliberate attack)

在初始攻击比例为15%的情况下,分别对上层网络和下层网络进行随机攻击,当上下层网络节点数分别为500时,随机选取75个上层节点或者下层节点进行攻击。由图3可以

看出,随机攻击时3种网络规模的网络表现出基本相同的规律,即初始攻击节点为上层网络节点时,网络最终都会崩溃。但是初始攻击节点为下层节点时,网络失效过程迭代几次后就恢复稳定,即网络不会发生全面崩溃。接下来以1000的网络进行具体分析,由图3(b)可以看出,初始攻击节点为上层网络节点时,迭代了7次,第1次迭代时,上层网络失效节点数多于下层网络,但是此后每次迭代,下层网络的失效节点数明显增多,最终整个网络失效;当初始失效节点为下层网络节点时,迭代两次后网络中不产生新的失效节点,则停止迭代,最终上层网络有23个节点失效,下层网络有87个节点失效。比较图3(b)的两个图可知,随机攻击15%的上层网络会导致整个网络崩溃,但是攻击下层网络时只迭代2次网络的失效过程就会停止,可见,在多层供应链网络的级联失效中,上层网络节点的失效对整个供应链网络的影响更大。

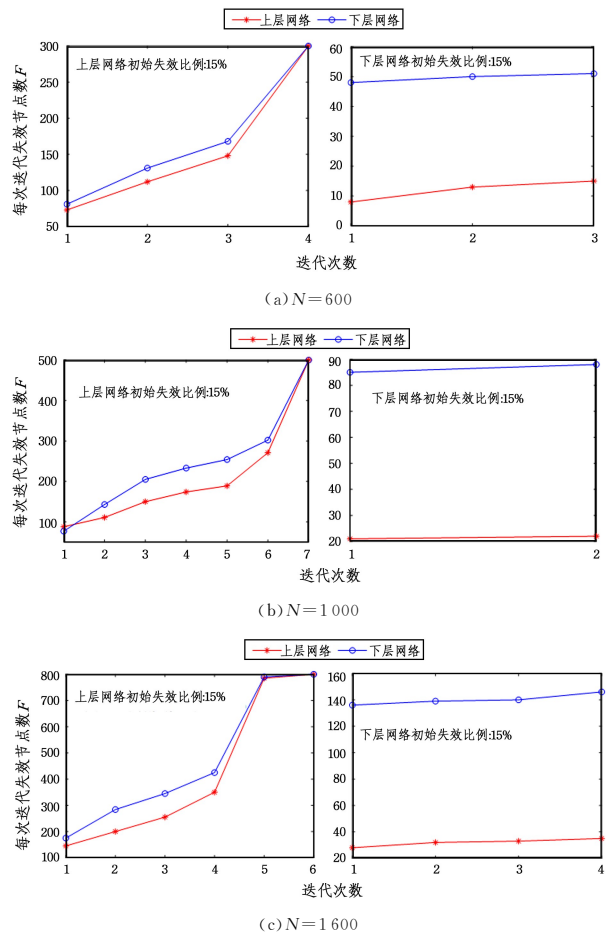


图3 节点初始失效比例为15%时网络失效的迭代过程(随机攻击)  
Fig. 3 Iterative process of network failure when initial failure rate of nodes is 15% (random attack)

由以上分析可以看出,在特定的初始攻击比例下,网络没有完全崩溃时,下层网络的最终失效节点数多于上层网络。接下来研究改变初始攻击节点比例时上下层网络的失效过程。首先我们选取上层网络节点为初始失效节点,即初始攻击节点都为上层网络节点。由于网络规模为600,1000和1600时的网络失效规律基本相同,下面以节点数为1000的网络为例,详细分析此时的网络失效情况。由图4(b)可知,“\*”型曲线为上层网络失效节点数变化,“o”型曲线为下层网

络失效节点数变化,随着攻击上层网络节点的比例的增大,上下层网络的失效节点数都增加,在网络没有崩溃的前提下,相同的初始失效比例下,“o”型曲线一直在“\*”型曲线之上,即下层网络的失效节点数比上层网络多。比较图 4(b)的两个图可知,蓄意攻击初始节点比例为 0.8%(即初始失效比例为 0.8%)时网络全部崩溃,随机攻击在初始失效节点数为 10%时网络全部崩溃,可见,蓄意攻击时网络的崩溃阈值更低,供应链网络在蓄意攻击时更容易崩溃。

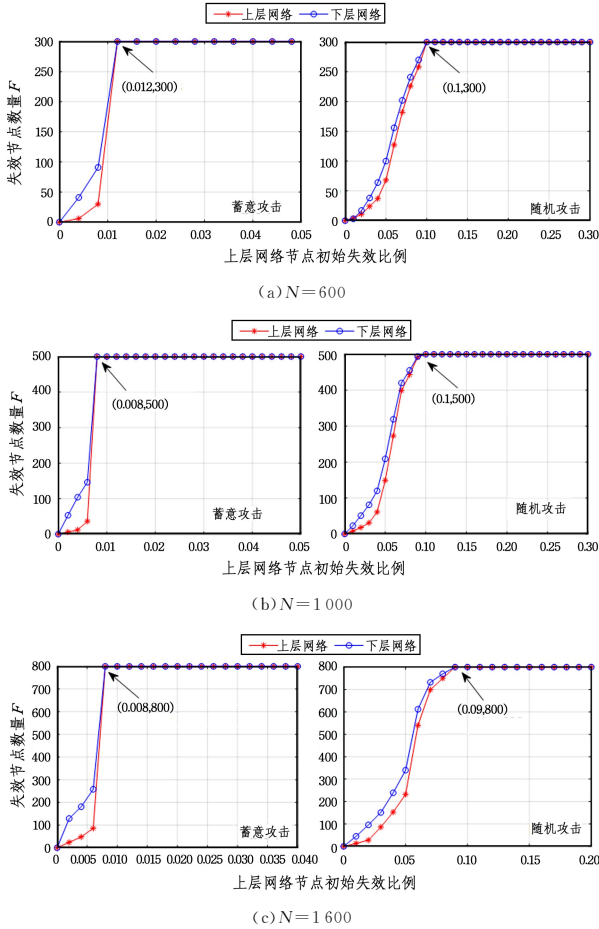


图 4 初始失效节点为上层网络节点时网络的最终失效节点数  
Fig. 4 Number of final network failure nodes when initial failure node is upper network node

可见初始攻击节点为上层网络节点时,下层网络失效节点数比上层网络多。当我们选取下层网络节点为初始攻击节点时,会使得下层网络节点失效,失效的下层网络节点会导致上层网络节点货物堆积而发生超载失效,接着与失效上层节点相连接的上层节点会发生超载级联失效,从而上层网络失效规模扩大,新生成的上层网络失效节点继续影响下层网络节点,使之发生欠载失效。整个失效过程为一个正反馈循环,直到没有新的失效节点时循环才停止。由图 5(b)可以看出,初始攻击节点为下层网络节点时,在网络没有全部崩溃的前提下,随着攻击比例的增加,网络的失效节点数增多。在相同的初始失效比例下,“o”型曲线一直在“\*”型曲线之上,下层网络的失效节点数多于上层网络的失效节点数,蓄意攻击的失效节点数多于随机攻击的失效节点数。蓄意攻击初始节点比例为 6.8%时网络全部崩溃,随机攻击在初始失效节点数

为 28%时网络全部崩溃。比较图 4 和图 5 可知,在网络没有完全崩溃的前提下,且相同的攻击比例下,初始攻击上层网络节点时最终网络失效节点数更多,网络崩溃的阈值更低,网络更容易崩溃。无论初始攻击的是上层网络的节点还是下层网络的节点,在网络没有全部崩溃时,下层网络的失效节点数总是多于上层网络,可见下层网络在面对攻击时更脆弱。接下来进一步分析分别攻击上下层网络时网络的脆弱性。

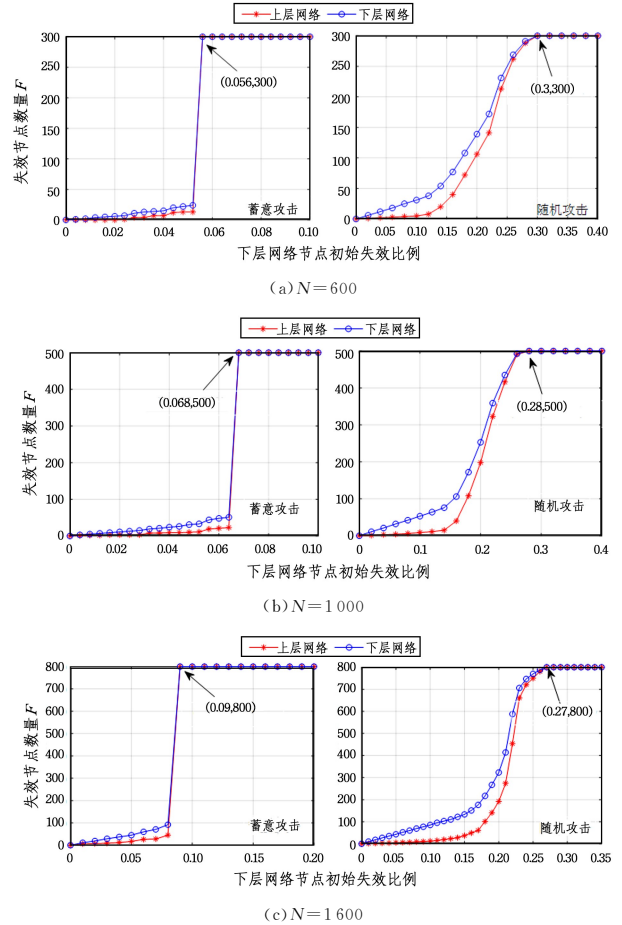


图 5 初始失效节点为下层网络节点时网络的最终失效节点数  
Fig. 5 Number of final network failure nodes when initial failure node is lower-layer network node

图 6 给出了网络的脆弱性,用网络中总的失效节点所占比例来衡量网络的脆弱性,比例越大,网络越脆弱。从图 6 中可以看出,“\*”型曲线代表初始失效节点为上层网络节点,“o”型曲线代表初始失效节点为下层网络节点,不论是蓄意攻击还是随机攻击,“\*”型曲线都先到达  $P$  为 1 的点,证明初始攻击上层网络节点时供应链崩溃阈值更小,即网络崩溃得更快。在网络没有全部崩溃的前提下,相同的初始失效比例,“\*”型曲线比“o”型曲线的  $P$  值大,即攻击上层网络时网络的脆弱性相较于攻击下层网络时大,证明攻击上层网络时供应链网络更脆弱,也更容易崩溃。比较图 6(b)的两个图可以发现,蓄意攻击时,即使初始攻击比例不到 10%,不论是攻击上层网络还是攻击下层网络,网络都全部崩溃,而随机攻击时网络表现出更强的鲁棒性,只有初始攻击比例不小于 10%时网络才有可能全部崩溃。由此可见,有目的的人为攻击供应

链网络中重要的企业,很容易导致整个供应链网络瘫痪,而在

面对小范围的自然损害时,供应链网络有一定的抗风险能力。

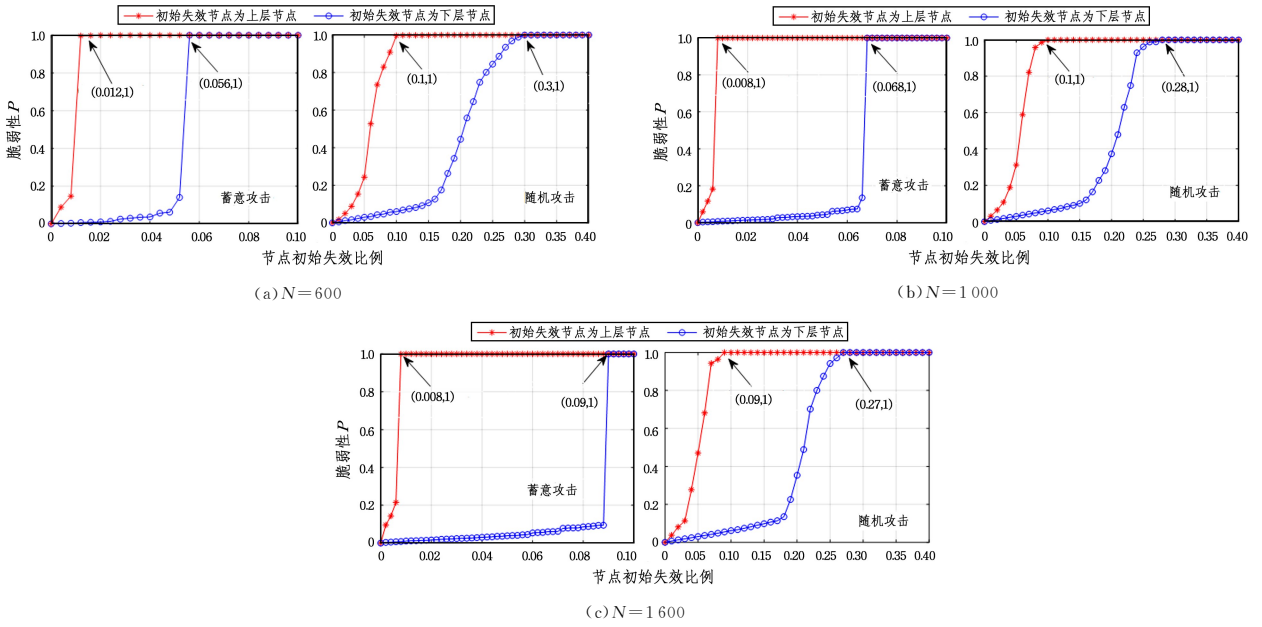


图6 不同节点初始失效比例下的网络的脆弱性

Fig. 6 Vulnerability of network under different initial failure ratios of nodes

图7给出了网络的最大连通性指标, $Q$ 为1时表示网络全部连通,此时网络的效率最高; $Q$ 为0时网络中都是孤立节点,都不连通,因此效率最低。由图7(b)可以看出,无论初始攻击的是上层网络或下层网络,蓄意攻击时最大连通片指

标更快到达为0的点,即网络效率降为0。此外,无论是蓄意攻击还是随机攻击,初始攻击节点为上层网络节点时,对网络效率的影响更大,从而使最大连通片指标更快地降为0的点。

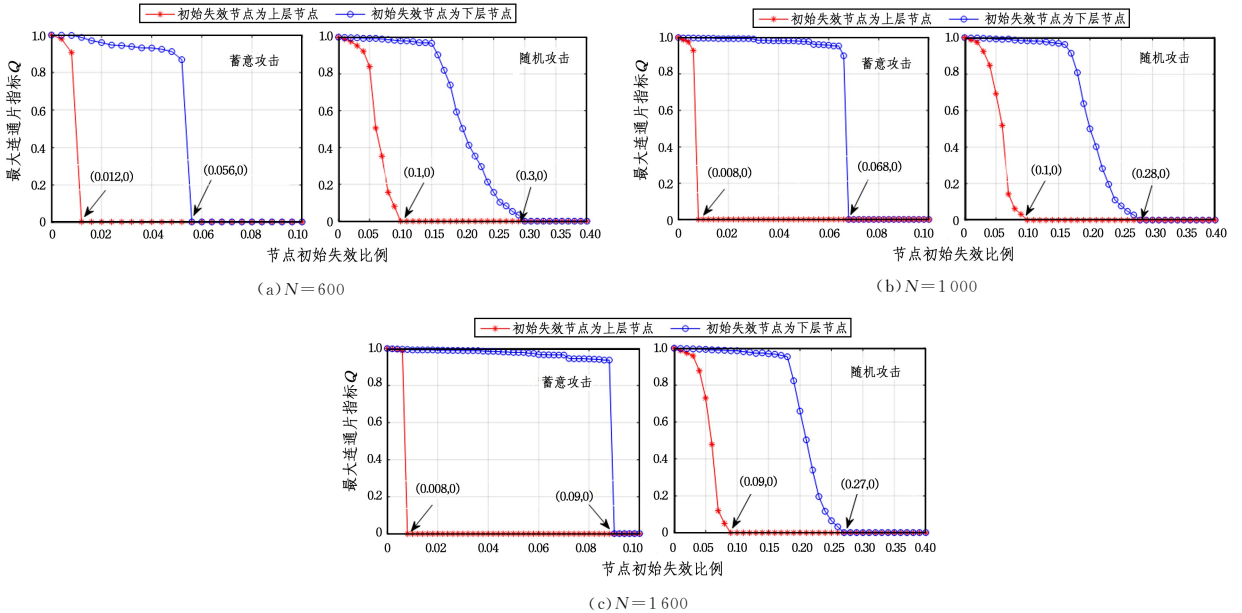


图7 不同节点初始失效比例下网络的最大连通性

Fig. 7 Maximum network connectivity under different initial failure ratios of nodes

为了证明本文模型的有效性,我们研究了在上下层网络节点数量分别为300,500和800时的网络脆弱性和最大连通性,如图6和图7所示。可以发现,不同网络规模的脆弱性和最大连通性变化规律基本相同。可见在不同网络规模下供应链网络有着相似的脆弱性,证明了供应链网络混合失效模型的有效性。

式,本文建立了多层供应链网络考虑欠载的级联失效模型,并验证了模型的有效性,分析了不同攻击模式下网络的脆弱性,研究了上下层网络对整个网络崩溃的影响。研究表明,无论初始攻击的是上层网络还是下层网络,初始失效比例相同时,网络没有全部崩溃的前提下,下层网络的失效节点数量明显多于上层网络的失效节点数,下层网络更脆弱。当初始攻击节点为上层网络节点时,网络发生全面崩溃的阈值更小,

**结束语** 考虑到供应链网络的复杂性和不同的失效方

即初始攻击上层网络节点,供应链网络更容易崩溃。这与网络的模型有关,上层网络之间联系更紧密,一个节点失效更容易引发其他节点失效,而且下层网络节点的失效仅与上层网络有关,攻击上层网络很容易使整个网络发生大面积崩溃,而且崩溃的速度也更快。但是在面对攻击时,上层网络相较于下层网络有更强的鲁棒性,因为上层网络节点间的联系使得其更稳固。在面对攻击时企业是否崩溃与企业的备用生产能力有关,即与建立成本有关。本文提出的模型能更好地反映现实生活中供应链网络失效的情况,为控制网络的崩溃提供了参考。

接下来将重点研究影响供应链网络混合失效规模的参数,以及考虑节点连边的权重对网络混合失效过程的影响,以便提高供应链网络的鲁棒性,降低网络的损失。

### 参 考 文 献

- [1] LIAO Z D, ZHENG G H. Research on the evolution of supply chain considering the characteristics of different node behavior elements[J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(6): 1679-1682, 1692.
- [2] TANG L, JING K, HE J, et al. Robustness of assembly supply chain networks by considering risk propagation and cascading failure[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 459: 129-139.
- [3] ZHAO Z G, ZHOU G G, LI H X. Research on the Attack Strategy and Robustness of Complex Weighted Supply Chain Network[J]. *Computer Science*, 2019, 46(8): 138-144.
- [4] LI Z, GUO Y H, XU G A, et al. Dynamic analysis of cascade with emergency recovery mechanism in complex network[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(15): 417-428.
- [5] DUI H Y, MENG X Y, HUI X, et al. Analysis of the cascading failure for scale-free networks based on a multi-strategy evolutionary game[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, 199: 106919.
- [6] SUN J Y, TANG J M, FU W P, et al. Construction of a multi-echelon supply chain complex network evolution model and robustness analysis of cascading failure[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 144: 106457.
- [7] LIU H, ZHOU G G, FU P H. Research on Local Evolution Model of Hierarchical Supply Chain Complex Network[J]. *Computer Science*, 2013, 40(2): 270-273.
- [8] ZHONG J L, SANHEDRAI H, ZHANG F M, et al. Network endurance against cascading overload failure[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, 201: 106916.
- [9] BELLINGERI M, CASSI D. Robutness of weighted networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 489: 47-55.
- [10] LI H L, CHEN W H. The impact of the new crown epidemic on the global manufacturing supply chain and countermeasures[J]. *Price Theory and Practice*, 2020, 40(5): 272-275.
- [11] FENG G Z, SUN Y Y. The impact of the new crown pneumonia epidemic on the economy and society from the perspective of supply chain[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Science Edition)*, 2020, 40(4): 42-49.
- [12] UNCTAD. Impact of COVID-19 pandemic on global FDI and GVCs updated analysis[R]. New York: UNCTAD, 2020.
- [13] ZHU W X, ZHANG P, LI P F, et al. The plight of small, medium and micro enterprises and the improvement of policy efficiency under the impact of the epidemic-Based on the analysis of two national questionnaire surveys[J]. *Management World*, 2020, 36(4): 13-26.
- [14] LI X, CHENG G R. A local-world evolving network model[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2003, 328(1): 274-286.
- [15] DUAN D L, WU J, DENG H Z, et al. A cascading failure model of complex networks based on adjustable load redistribution[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2013, 33(1): 203-208.
- [16] GAO J, CHEN Y Y. Analysis of supply chain network vulnerability under cascade failure[J]. *Logistics Engineering and Management*, 2016, 38(10): 80-83, 42.
- [17] TANG L, HE J, JING K. Research on the Cascade Failure Mechanism and Robustness of Related Supply Chain Networks[J]. *Journal of Management Science*, 2016, 19(11): 33-44, 62.
- [18] WANG Y C, XIAO R B. Supply chain network cascading failure modeling based on underload failure[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2020, 26(5): 1355-1365.
- [19] JIANG W J, LIU R R, FAN T L, et al. Overview of prevention and recovery strategies for multi-layer network cascade failure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(8): 81-91.
- [20] WANG H, GU T, JIN M, et al. The complexity measurement and evolution analysis of supply chain network under disruption risks[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2018, 116(11): 72-78.
- [21] LI G, ZHAO D Z. Study on the scale-free characteristics of supply chain networks[J]. *Industrial Engineering*, 2012, 15(1): 28-32.



**LI Shu**, born in 1996, postgraduate. Her main research interests include supply chain network analysis and so on.



**YANG Hua**, born in 1982, Ph.D, associate professor. Her main research interests include complex networks and chaos communications.