

# 供应链风险传播 BSR-RP 模型仿真研究

赵 蒙,潘 坚

(中国航天系统科学与工程研究院,北京 100037)

**摘 要:**在当前经济全球化背景下的复杂供应链网络中,依靠传统供应链风险管理方法难以进行风险管理,而供应链风险的传播模式和影响因素尚不明确,需要借助计算机仿真方法,对供应链风险传播进行仿真实验。为明确供应链上风险的传播模式和影响因素,对供应链风险的传导机理进行了分析,建立了供应链网络风险传播 BSR-RP 模型。结合计算机仿真方法,利用 Netlogo 仿真软件,从供应链整体角度对模型进行了仿真分析。通过调整企业影响力、风险初始模糊程度、风险模糊程度递减参数,探究各影响因素对风险传播的影响。结果表明,企业影响力越大、风险模糊程度越高,风险在供应链网络中的传播范围越广、速度越快。模型从企业和风险的特性角度,一定程度上反映了供应链风险传播的特征。

**关键词:**供应链网络;风险;风险传播;仿真

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2020)04-0139-07

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.04.027

## Simulation of BSR-RP Model in Supply Chain Network Risk Propagation

ZHAO Meng, PAN Jian

(China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In the complex supply chain network under the background of current economic globalization, it is difficult to manage the risk by relying on the traditional supply chain risk management method. The propagation mode and influencing factors of supply chain risk are not clear, so it is necessary to carry out simulation experiments on the propagation of supply chain risk by means of computer simulation method. In order to clarify the transmission mode and influencing factors of risk in supply chain, the transmission mechanism of supply chain risk is analyzed, and the BSR-RP model of supply chain network risk propagation is established. Combining with the computer simulation method and using Netlogo simulation software, we simulate and analyze the model from the whole point of view of supply chain. By adjusting the parameters of enterprise influence, initial fuzzy degree of risk and decreasing degree of risk, we explore the influence of various influencing factors on risk propagation. The results show that the greater the influence of enterprises and the higher the degree of risk ambiguity, the wider and faster the risk spread in the supply chain network. From the point of view of the characteristics of enterprise and risk, the model reflects the characteristics of supply chain risk propagation to a certain extent.

**Key words:** supply chain network; risk; risk propagation; simulation

## 0 引 言

随着全球化进程的不断加深,供应链也面临着全球化带来的便利和挑战,特别是由于供应链的复杂性和不确定性进一步增加,供应链面临的风险与日俱增。在形成全球供应链网络的大背景下,传统的供应链风险管理方法已经不足以解决供应链风险问题,需要结合计算机仿真技术,对供应链的风险传播情况进行仿真,探究供应链结构和供应链要素对风险传播的影响,明确风险传播机理,进而实现对供应链风险的控制。

晏春平等建立了一种基于 HLA 的分布交互式供应链仿真平台,体现出了供应链上企业的自主性特点<sup>[1]</sup>; Mizgier K J 等研究了全球供应链的风险敏感性,并提出了对多产品供应链网络的产品配置方法<sup>[2]</sup>;杨康等引入了 SIS 模型分析供应链风险传播阈值和扩散速度<sup>[3]</sup>;Azadeh 等采用数据包络分析法对供应链上供应商选择进行了研究<sup>[4]</sup>;Zegordi 等利用 Petri 网对供应链网络物流风险的跟踪进行仿真<sup>[5]</sup>;辛玉红等对风险传导中的供应链鲁棒性进行了仿真<sup>[6]</sup>。除了对供应链

收稿日期:2019-03-18

修回日期:2019-07-23

网络出版时间:2019-12-05

基金项目:国家自然科学基金(U1501253)

作者简介:赵 蒙(1995-),男(满),硕士研究生,助理工程师,研究方向为复杂网络、计算机仿真;潘 坚,硕士,研究员,研究方向为战略管理、计算机应用。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20191205.1104.020.html>

风险的总体研究外,王文利等对企业间信息共享风险进行了仿真,认为小世界型供应链网络上的企业信息共享风险更小<sup>[7]</sup>;钱奕凡等则对供应链上企业间的信息共享过程进行了分析,认为控制共享风险可以增强企业间信息共享效率<sup>[8]</sup>。也有学者对不同产品的供应链进行了细化研究,如田小意等针对通讯类电子产品进行了供应链风险仿真<sup>[9]</sup>,雷勋平建立了决策模型,对国内汽车制造业供应链进行了风险评价<sup>[10]</sup>,李远远等基于 ANP-Fuzzy 模型对农业供应链进行了风险评价等<sup>[11]</sup>。

上述研究的内容主要表现在供应链设计、风险评估、组合优化等项目,对风险在供应链网络中的传播研究较少。文中针对供应链上的风险,构建能够反映企业供应链风险传播特点的 BSR-RP (breakout-susceptible-recovery-risk propagation) 模型,并基于复杂适应系统视角,利用计算机仿真方法,进行多主体建模仿真,研究企业影响力、风险模糊度等要素对风险传播的影响。

## 1 相关概念辨析

### 1.1 供应链网络及特性

供应链网络是围绕核心企业,与其他企业通过信息流,物流,资金流等相连接,从原材料制成中间产品并组合为完整产品,最后通过销售与消费者相连接的功能性网状系统,具有复杂性、开放性、协调性、自适应性<sup>[12]</sup>等特点。供应链在实际运行中,并没有改变企业在市场中的独立法人属性,也没有消除潜在的利益冲突。

### 1.2 供应链风险及特性

目前供应链风险尚没有统一定义,如马士华从风险源角度将供应链风险分为内生风险和外生风险两类<sup>[13]</sup>。丁伟东认为供应链风险是种潜在的威胁,风险会利用供应链系统的脆弱性,对供应链系统造成破坏,给上下游企业以及整个供应链带来损害和损失<sup>[14]</sup>。文中将风险定义为供应链上企业在生产经营过程中,由于各种不确定因素产生影响,导致供应链企业实际情况与预期情况偏离。

### 1.3 企业风险脆弱性

脆弱性一般指资产能被威胁利用的弱点,分为两大类,即:资产本身的脆弱性和安全控制措施的不足。二者都是企业的自身特性,可以用来衡量企业抵抗风险的能力。在供应链风险评估中关注的是企业风险脆弱性。脆弱性本身不引起风险,但正由于企业具有风险脆弱性的性质,因此风险最终会产生和爆发。文中将风险脆弱性定义为企业易受到风险影响的程度。

### 1.4 风险模糊性

企业风险作为一种信息,具有信息模糊性特质。信息模糊性用于表征不够清晰的模糊测度。文中用风险初始模糊性和模糊程度下降参数表征风险模糊性。

### 1.5 风险传播特性

风险在供应链上的传播与病毒传播有相似性,表现在如下四个方面:

#### (1) 系统结构。

病毒在人类社会网络或计算机网络中进行传播,其中个人和计算机单机作为节点,人与人的社会关系、计算机与计算机间的通讯连接作为边。在供应链网络中,企业作为节点,企业间资金流、物资流、信息流作为边。二者都具有类似的复杂网络结构。

#### (2) 存在主体。

与病毒传播中作为存在主体的人类个体或计算机单机类似,供应链网络系统中的存在主体是企业。对每个企业而言,存在自身不同的战略目标、利益诉求和管理方式,也存在风险控制能力的差异。与病毒传播中的人类个体具有不同特性且免疫能力不同、计算机单机性能不同且防火墙性能不同类似,在存在主体上,风险在供应链网络中的传播行为与病毒传播有相似性。

#### (3) 传播过程。

在病毒的传播中,病毒感染者将病毒传播给与感染者产生接触的人或计算机,实现了病毒传播。在供应链网络中,风险爆发的企业会将风险传递给供应链相连的企业,最终影响供应链网络。二者在传播过程上表现出了相似性。

#### (4) 传播方向。

病毒在社会网络或计算机网络中的传播呈无向的辐射状;风险在供应链网络中的传播也会将风险传播给与其相邻的上下游企业,最终呈现无向的辐射状。因此,病毒和风险的传播方向是相似的。

## 2 模型建立

主体是复杂适应系统中的研究对象,具有自主性、社会性、反应性和主动性,能够与其他主体、环境、信息等要素进行交流,并不断适应整个系统,改变自身结构和行为。Choi T Y 等指出,供应链具有自组织、自适应、拟均衡、协作演化、非线性变化等特点,需要将供应链系统作为复杂自适应系统 (complex adaptive system, CAS) 去研究和管理<sup>[15]</sup>。作为一种复杂自适应系统,很难通过理论推导得出系统演化方程式,但复杂自适应系统本身常常能够达到类似的平衡状态,因此通过计算机对系统中的每个主体进行定义,并设定简单的演化规则,通过仿真实验结果对系统的统计特性

进行描述就很有必要。文中选择多主体建模方法构建仿真模型。

2.1 模型描述

随着复杂网络理论和系统动力学理论研究的发展,出现了很多传播模型,其中就包括SIR(susceptible-infected-removed)病毒传播模型。文中在SIR模型的基础上,结合制造业供应链网络特征,建立BSR-RP模型,对供应链网络中的风险传播的机制和影响因素进行研究。BSR-RP模型中,主体是供应链上的企业,主体间的边代表主体间的资金流、物资流、信息流等。当某企业风险爆发时,风险会通过各类供应关系传导至其他企业。

在BSR-RP模型中,企业具有三种状态:企业风险爆发(B)、企业易受风险影响(S)、企业已解决风险影响(R)。当风险从初始传播源爆发后,通过计算传播者对企业影响函数,将病毒传染给与之相邻的易受影响企业(S),易受影响企业(S)一旦爆发风险,就会成为传播源,但其本身有一定的抗风险能力和修复能力,通过计算其爆发阈值和自身状态变化函数,企业有一定机会解决风险,成为解决风险影响的企业(R),不会再被此风险影响,也不会将风险再次传播。最终,易受影响企业数量会减为0,风险被解决。

2.2 模型假设

结合BSR-RP模型和供应链特点,对模型做如下基本假设:

- (1)每个企业*i*具有企业受到风险影响、企业未受风险影响、企业已解决风险影响三种状态,但是在某一时刻,企业*i*只能呈现其中一种状态。
- (2)供应链上爆发风险时,通过物资流、资金流、信息流的变化,对上下游企业都产生影响,故文中将供应链网络视为无向网络。
- (3)供应链网络中的企业仅可能受到与其有相关关系的企业影响,即风险必须通过节点间相连的边传播。

2.3 主体属性

作为供应链风险传播过程中的主体,企业和风险分别具有以下性质,见表1。

表1 主体属性

主体	企业	风险
属性	状态	重要性
	影响力	模糊性
	风险脆弱性	传播强度

2.3.1 企业属性描述

状态: $S_i(t)$ 表示企业*i*在*t*时刻的状态。其中 $S_i(t) = 1, 0, -1$ 分别表示企业风险爆发、企业易受风

险影响、企业已解决风险影响三种状态。

影响力:影响力代表了企业在供应链中的地位,以及风险爆发时企业能够影响的范围,与相关联企业的数量正相关。用 $In_i(t)$ 表示企业*i*在*t*时刻的影响力大小。

风险脆弱性:由于不同企业的抗风险能力不同,其风险脆弱性并不相同。用 $D_i(t)$ 表示企业*i*在*t*时刻的风险脆弱性,其中 $D_i(0) \in [0, 1]$ 。但随着时间发展,企业会采取风险管理措施,使得企业的风险脆弱性下降。用式1表示为:

$$D_i(t) = D_i(0) - \alpha_1 * (t - t_0) \tag{1}$$

其中, $D_i(0)$ 为企业风险脆弱性初始值, $\alpha_1$ 为常数,表示企业风险脆弱性的下降程度。

2.3.2 风险属性描述

重要性:风险的重要性不能一概而论,用 $I(t)$ 表示*t*时刻风险的重要程度, $I(t) \in (0, 1)$ 。

模糊性:风险出现之初存在一定的模糊性,用 $A(t)$ 表示风险在*t*时刻的模糊程度, $A(t) \in (0, 1)$ ,随着时间的推移,风险模糊程度随之下降,用式(2)表示:

$$A(t) = A(0) - \alpha_2 * (t - t_0) \tag{2}$$

其中, $A(0)$ 为风险模糊性初始值, $\alpha_2$ 为常数,表示风险模糊性的下降程度。

传播强度:表示风险在供应链网络中传播速度的快慢,用式(3)表示:

$$CI(t) = \beta * I(t)A(t) \tag{3}$$

其中, $\beta \in R^+$ 。

2.4 演化规则

在风险传播过程中,传播者对企业的影响情况与企业风险脆弱性和风险的传播强度有关。*t*时刻传播者*i*对企业*j*的影响函数为:

$$f(i, j, t) = a_1 In_i(t) + a_2 D_j(t) + a_3 CI(t) \tag{4}$$

其中, $In_i(t)$ 、 $D_j(t)$ 、 $CI(t)$ 分别为*t*时刻传播者*i*的影响力,企业*j*的风险脆弱性和风险传播强度, $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3 \in R^+$ ,且 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 。

2.4.1 新被影响企业

当企业*j*是新受传播者*i*的影响时,根据状态变化阈值,企业*j*的状态为:

- 若 $f(i, j, t) \in [0, \theta)$ ,则 $S_j(t) = 0$ ;
  - 若 $f(i, j, t) \in [\theta, 1]$ ,则 $S_j(t) = 1$ 。
- 其中, $\theta \in [0, 1]$ 。

2.4.2 已受影响企业

当企业*j*为已经存在的易受到风险影响企业时,在受到传播者*i*影响后,根据状态变化阈值,其状态为:

- 若 $f(i, j, t) \in [0, \lambda)$ ,则 $S_j(t) = -1$ ;

若 $f(i,j,t) \in [\lambda,\mu)$  ,则 $S_j(t) = 0$ ;  
若 $f(i,j,t) \in [\mu,1]$  ,则 $S_j(t) = 1$ 。  
其中,  $\lambda,\mu \in [0,1]$  。

2.4.3 企业自身状态变化

企业在不受其他企业影响的情况下,其状态会随着自身风险脆弱性下降和风险传播强度的变化而变化。企业 $j$ 状态转变函数为式(5) :

$f(j,t) = a_4D_j(t) + a_5CI(t)$  (5)

若 $f(j,t) \in [0,\eta_1)$  ,令 $S_j(t) = -1$ ;  
若 $f(j,t) \in [\eta_1,\eta_2)$  ,令 $S_j(t) = 0$ ;  
若 $f(j,t) \in [\eta_2,1]$  ,令 $S_j(t) = 1$ 。

$a_4,a_5 \in R^+$  且  $a_4 + a_5 = 1$  ,  $\eta_1,\eta_2 \in [0,1]$  且  $\eta_1 < \eta_2$  。

全过程如图 1 所示。

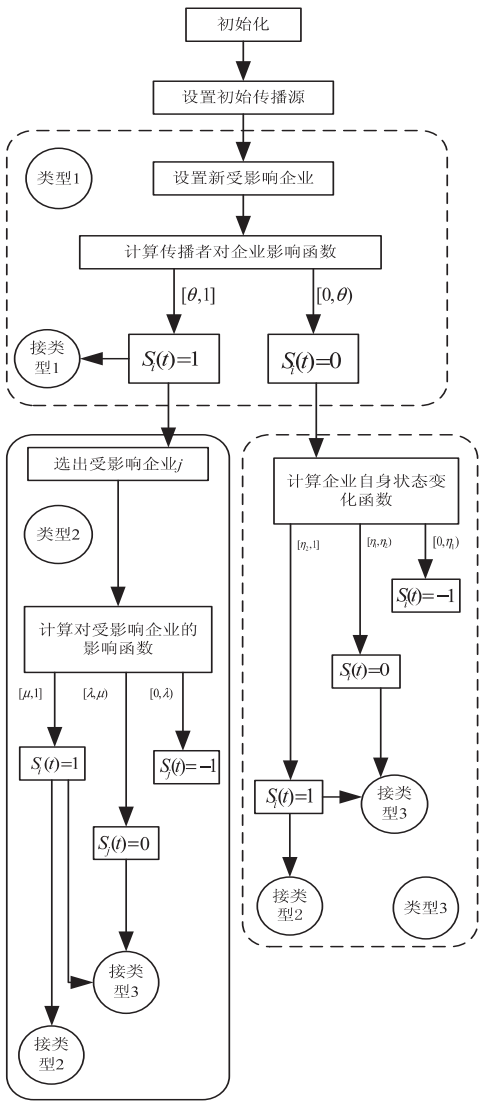


图 1 企业风险传播仿真算法流程

3 仿真分析

3.1 参数设置

研究表明具有若干家强势企业的供应链网络形式

一般是小世界网络。因此文中构建供应链网络为小世界网络。设置参数如下:网络规模为 300,重连概率为 0.25,平均度为 6。

在风险的相关参数设置中,将风险重要性设为 0.9,风险模糊性初值设为 0.9,模糊程度递减参数设为 0.04,脆弱性递减参数设为 0.1;在风险传播强度的计算中,权重  $\beta$  取 1;在传播者对企业影响函数计算中,设置传播者 $i$ 的影响力权重为 0.3,企业 $j$ 风险脆弱性权重为 0.3,风险传播强度影响权重为 0.4;在企业状态转变函数计算中,设置企业风险脆弱性权重为 0.5,风险传播强度影响权重为 0.5。

各状态改变界限  $\theta,\lambda,\mu,\eta_1,\eta_2$  分别设为 0.7、0.4、0.7、0.45、0.75。

3.2 影响因素分析

3.2.1 总体趋势

在仿真平台上运行模型,各类型企业数量在仿真过程中的变化如图 2 所示,从上到下分别为企业风险爆发、企业易受风险影响、企业已解决风险影响、风险波及的全部企业数量。从图中可以看出风险爆发的企业数量最高值为 33,而最终波及到的供应链企业数量达到 120。可以看到,即使企业存在一定的解决风险能力,但供应链上任何一家企业爆发风险后,都会引发风险在供应链网络中的传播和扩散。

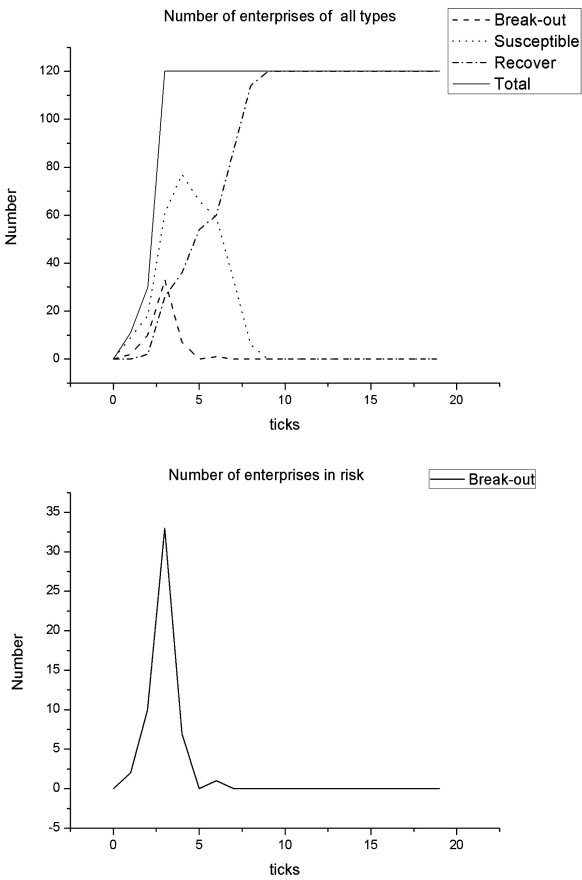


图 2 风险传播总体趋势



3.2.2 企业影响力

在供应链网络中,存在着核心的企业,其影响力比供应链上其他企业影响力更大。文中设置传播源的初始影响力为 10 和 50,其他参数设置不变,来考察企业

影响力在供应链风险传播中所起的作用。在仿真平台上运行模型,各类型企业数量在仿真过程中的变化如图 3、图 4、图 5 所示。

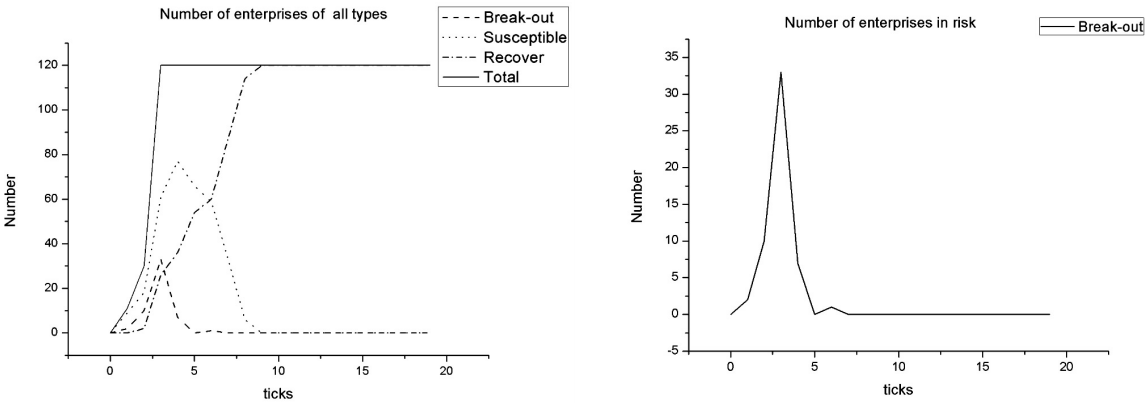


图 3 企业数量变化(初始传播源企业影响力为 10)

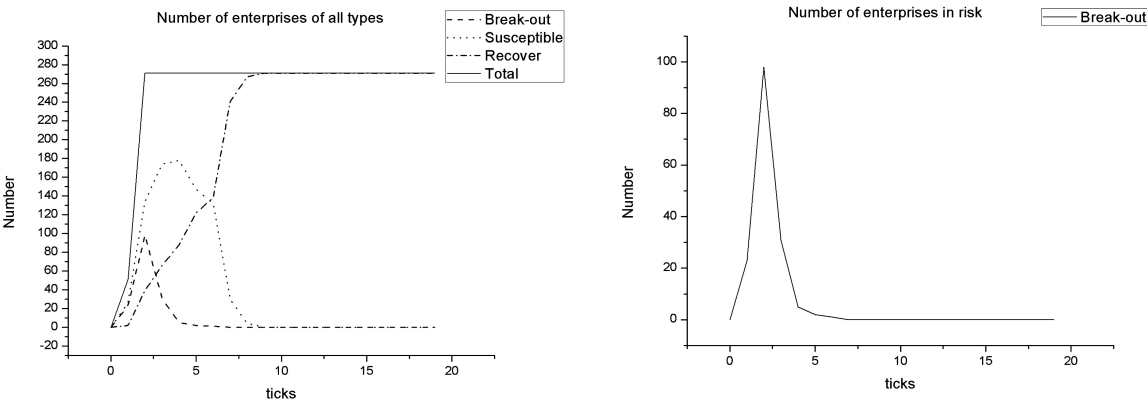


图 4 企业数量变化(初始传播源企业影响力为 50)

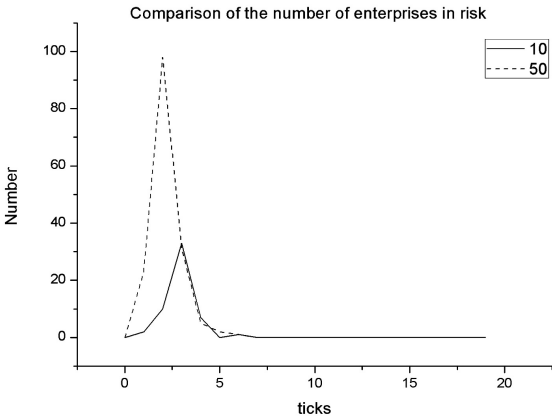


图 5 风险爆发企业数量对比

由图 3、图 4、图 5 可知,风险传播趋势是一致的。但由于企业影响力变大,风险传播的范围在不断扩大,最终风险波及企业数量达到 271,且风险爆发企业数量最多达 98。高影响力的企业爆发风险也加速了风险扩散,在更短的时间步长内风险扩散达到最大值。

3.2.3 风险模糊程度

调整风险模糊度递减参数为 0.08,研究风险模糊

度下降速度对供应链风险传播的影响。在仿真平台上运行模型,各类型企业数量在仿真过程中的变化如图 6 所示。

由图 6 可知,风险爆发企业数量最高为 7,最终风险波及企业数量为 101,与调整前的运行结果(图 3)相比,风险传播周期缩短了 2 个时间步长,风险波及范围也减小。可以看出风险模糊程度对风险传播有一定影

响,能够降低风险模糊程度,可以在控制风险传播过程中起关键作用。

调整风险初始模糊程度为 0.5,研究风险初始模

糊程度对供应链风险传播的影响。在仿真平台上运行模型,各类型企业数量在仿真过程中的变化如图 7 所示。

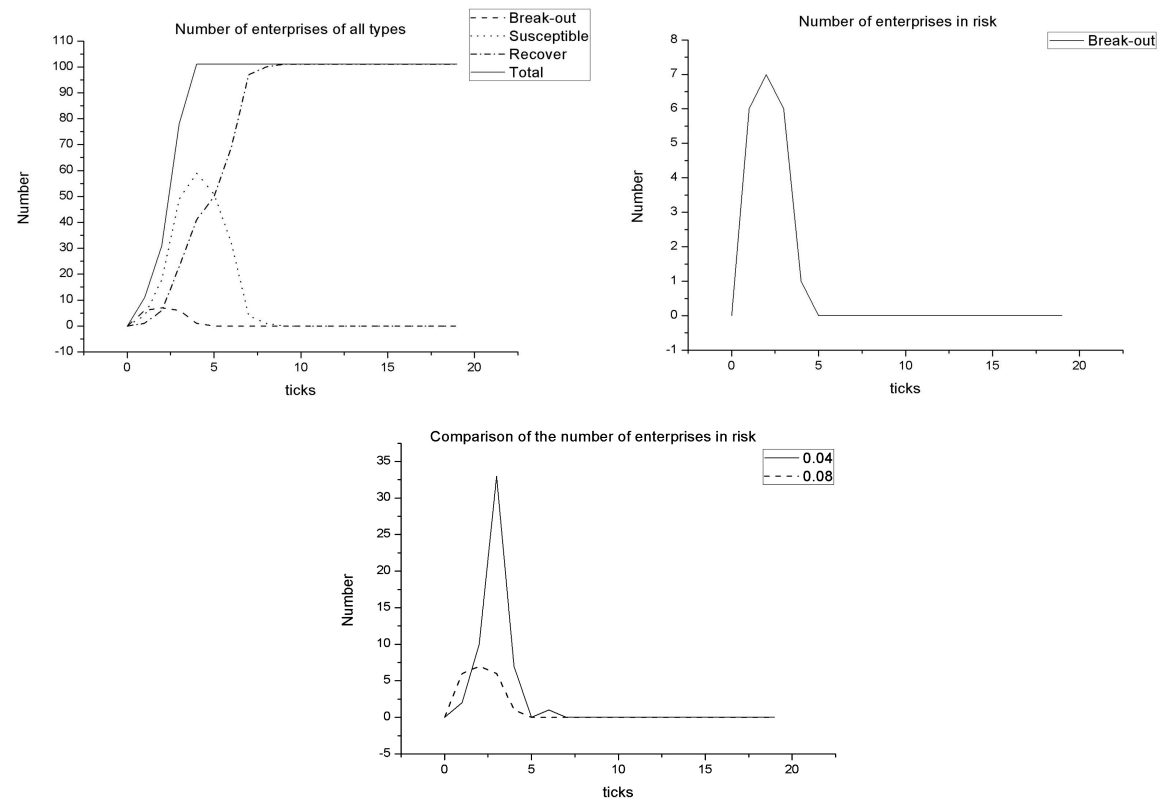


图 6 企业数量变化(风险模糊度递减参数 0.08)

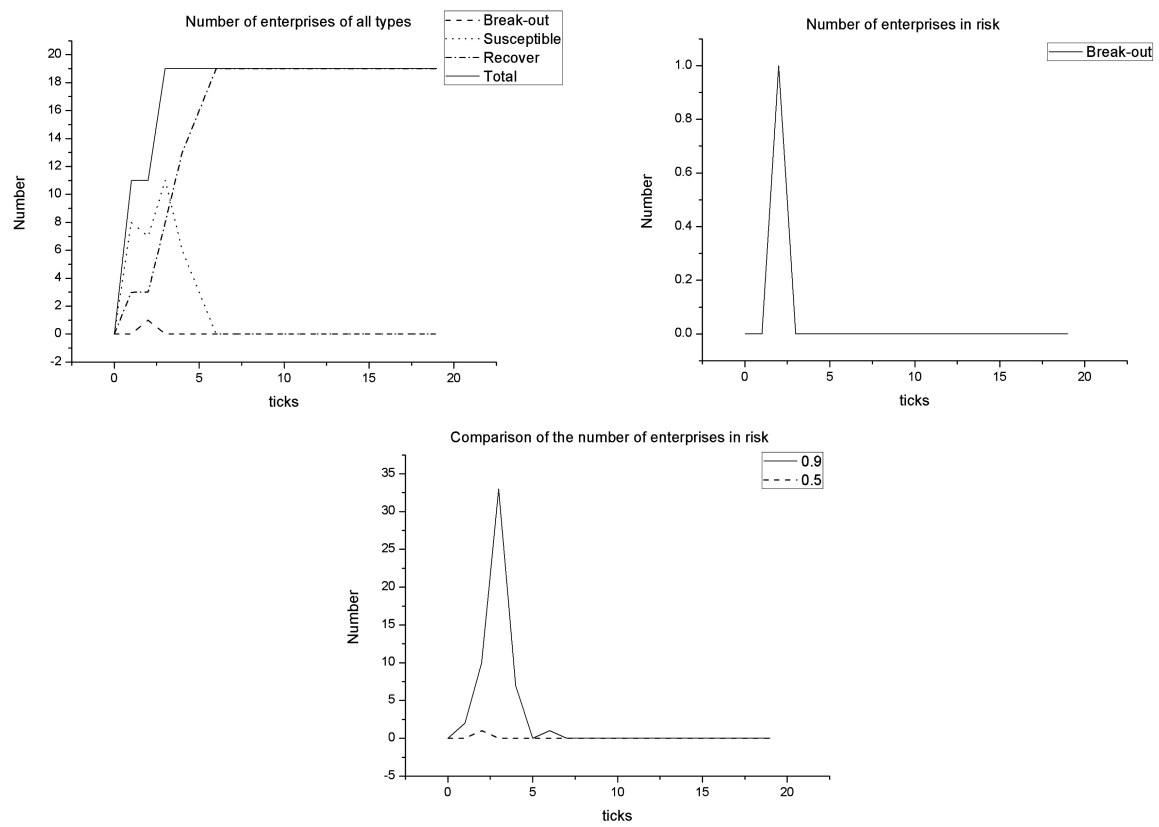


图 7 企业数量变化(初始模糊程度调整为 0.5)

由图7可知,风险波及到的企业数量很少,为19家。模糊程度低的风险更难在供应链中传播。风险能够传播扩散,与其具有高不确定性相关,若能确定其风险,则风险在供应链中能够得到较好的解决,不容易传播开来。

## 4 结束语

首先基于复杂适应系统和复杂网络理论构建了BSR-RP供应链风险传播模型,对主体的属性进行了描述,明确了主体间的交互规则;其次,在Netlogo软件平台上进行了建模仿真,通过模型中企业影响力、信息模糊程度等参数的变化,分析其对供应链风险传播的影响情况,得出如下结论:

(1)爆发风险的企业影响力越强,风险传播波及的企业数量就越多,引起的其他企业爆发风险的可能性就越强,企业需要的解决风险的时间越长。因此,越是供应链上的核心企业,越应该完善风险处理机制,提高对风险处理能力,才能促进整个供应链网络的稳定性提升。

(2)当风险爆发后,可以看出风险的模糊程度对风险传播的范围有重要影响。作为风险爆发企业应当快速明确风险的类型和原因,降低风险模糊程度,这样能够对风险在整个供应链网络上的传播起到更好的控制作用。

(3)初始传播源的风险爆发后,在较短的时间里就会引起其他企业的风险爆发。因此,企业的风险识别和防范尤为重要;在风险发生后,企业应尽快解决风险,防止风险爆发对其他企业产生影响。

文中所开展的研究反映了风险在供应链网络中的传播行为,并明确了供应链中的一些要素对风险传播的影响,但很多主体的要素仍需要进一步深化研究。如目前作为系统主体的企业的特性同质化,节点状态只有0、1、-1三种,受到的风险类型也是单一的。但在实际供应链中,各企业在供应链网络中具有不同的风险管理水平(体现在应对风险的演化规则中),受风险影响后的处理方式和最终状态也存在更进一步细分的可能(体现在主体状态中),风险也需要进一步划分且存在风险间互相转化的可能(包括资金风险、物流风险及风险之间的转化等)。下一步工作可以在进一

步细化主体属性,建立更完善的演化规则,构建符合实际情况的供应链网络模型方面进行探索。

## 参考文献:

- [1] 晏春平,齐 欢,吴义明. 基于HLA的企业供应链管理仿真研究[J]. 计算机仿真,2005,22(5):248-250.
- [2] MIZGIER K J. Global sensitivity analysis and aggregation of risk in multi-product supply chain networks[J]. International Journal of Production Research,2016,55(1):130-144.
- [3] 杨 康,张仲义. 基于复杂网络理论的供应链网络风险传播机理研究[J]. 系统科学与数学,2013,33(10):1224-1232.
- [4] AZADEH A, ALEM S M. A flexible deterministic, stochastic and fuzzy data envelopment analysis approach for supply chain risk and vendor selection problem: simulation analysis[J]. Expert Systems and Applications,2010,37:7438-7448.
- [5] ZEGORDI S H, DAVARZANI H. Developing a supply chain disruption analysis model: application of colored Petri-nets[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 2102-2111.
- [6] 辛玉红,孙延明. 风险传导下的供应链鲁棒性分析与仿真研究[J]. 科技管理研究,2017,37(14):245-253.
- [7] 王文利,薛耀文. 供应链复杂网络企业间信息共享风险的仿真[J]. 系统仿真学报,2009,21(19):6276-6279.
- [8] 钱奕凡. 供应链网络节点间信息共享的演化博弈分析[J]. 网络安全技术与应用,2017(3):63-64.
- [9] 田小意,张慧妍. 通讯类电子产品供应链建模及风险仿真[J]. 计算机系统应用,2012,21(7):79-83.
- [10] 雷勋平. 我国汽车制造业供应链风险评价实证研究——基于熵权可拓决策模型的分析[J]. 计算机工程与应用,2015,51(12):264-270.
- [11] 李远远,刘礼帅. 基于ANP-Fuzzy模型的农产品供应链风险评价研究[J]. 数学的实践与认识,2017,47(13):24-32.
- [12] 白世贞,张鹤冰. 供应链复杂系统建模与仿真[M]. 北京:科学出版社,2014:3-4.
- [13] 马士华. 新编供应链管理[M]. 北京:中国人民大学出版社,2008.
- [14] 丁伟东,刘 凯,贺国先. 供应链风险研究[J]. 中国安全科学学报,2003,13(4):64-66.
- [15] CHOI T Y, DOOLEY K J. Supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence[J]. Journal of Operation Management,2001,19:351-366.