

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.e17-3135

基于捕食者—猎物模型的突发事件下供应链稳定性研究

胡卉, 马海, 李博, 赵姣

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 供应链稳定性已成为供应链风险管理的重要研究领域。为了剖析突发事件与供应链系统之间的互动机理, 本文将捕食者—猎物模型应用于突发事件与供应链系统稳定性研究中。论文首先基于供应链弹性系数与突发事件干扰系数构建了突发事件与供应链系统的捕食者—猎物模型。模型中的两个动态微分方程分别代表突发事件和供应链系统的状态。之后求解模型的平衡点, 并应用Matlab对系统平衡点 P_2 与 P_4 下突发事件与供应链稳定性之间的关系进行仿真分析。结果表明, 为保证供应链稳定, 当达到 P_4 平衡点时, 应使供应链弹性系数 $\sigma_1 > 1$ 且趋于2, 而突发事件干扰系数 $\sigma_2 > 1$ 且逐渐趋于1。当达到 P_2 平衡点时, 应使供应链弹性系数 $\sigma_1 > 0$ 且趋于2, 而突发事件干扰系数 $0 < \sigma_2 < 1$, 且逐渐趋于0。该模型可以有效地捕捉、表征突发事件与供应链系统状态之间的关系, 为研究突发事件下供应链稳定性提供了全新思路, 对于丰富供应链突发事件建模方法, 有效预防和应对供应链突发事件具有重要意义。

关键词: 突发事件; 供应链; 稳定性; 捕食者—猎物模型

中图分类号: N949

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2017)06-0039-08

A Study of the Stability of Supply Chain with Predator-Prey Model

HU Hui, MA Hai, LI Bo, ZHAO Jiao

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Stability of the supply chain has become an important research area in supply chain. To study the interactive mechanism between disruption and supply chain, a Predator-Prey Model of disruption and supply chain is built based on supply chain resilience coefficient and disruption interference coefficient, representing the two states of disruptions and supply chain. Then the equilibrium points are found and interdependent correlation of disruption and supply chain is analyzed, and the stability of supply chain under disruption simulated by Matlab. The results show that, in order to ensure the stability of the supply chain when the equilibrium point P_4 is reached, the resilience coefficient of the supply chain should be $\sigma_1 > 1$ and approaching 2, and the disturbance coefficient of the disruption should be $\sigma_2 > 1$ and gradually approaching 1. When the equilibrium point P_2 is reached, the resilience coefficient of the supply chain should be $\sigma_1 > 0$ and approaching 2, and the disturbance coefficient of the disruption should be $0 < \sigma_2 < 1$ and gradually approaching 0. The model is effective to formulate the interdependent correlation between disruption and the stability of supply chain. The exploration is meaningful to enrich the modeling methodology of supply chain disruption, and it is also significant to prevent and handle the disruption effectively.

Key words: disruption; supply chain; stability; Predator-Prey Model

供应链突发事件频发会给供应链系统带来巨大的经济损失。突发事件会对供应链系统稳定性产生影响, 甚至导致供应链崩溃。然而, 从已有研究成果来看, 研究多集中于库存控制因素的讨论上, 从

抑制牛鞭效应的角度研究如何通过调整库存控制策略增加供应链稳定性, 涉及突发事件对于供应链稳定性影响的研究较少, 尤其定量研究更是缺乏。而从突发事件与供应链系统之间的相互关系角度, 借

收稿日期: 2017-05-27

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2017JM7016); 中国博士后基金资助项目(2014M552401); 中央高校基本科研业务费资助项目(310822172204, 31082216016)

作者简介: 胡卉(1979-), 女, 辽宁省人, 副教授, 博士, 主要研究方向为供应链稳定性。

助模型定量分析两者互动机理, 据此研究供应链稳定性还是一个崭新的思路。

供应链系统中每一节点及各节点之间相互关系的变动是影响供应链稳定性的主要方面。本文以供应链系统突发事件(如运输中断、生产中断等)下的供应链系统稳定性为研究对象, 从两者之间的相互关系角度出发, 应用捕食者—猎物模型, 对突发事件及供应链系统进行建模, 确定影响系统平衡点稳定性的影响因素及程度大小, 为供应链企业把握突发事件下的供应链状态演化规律, 高效地应对供应链突发事件提供借鉴。

1 文献综述

稳定性是系统生存和发展的重要机制, 如何在干扰下评估系统的稳定性, 以及保证系统稳定, 对系统正常运行至关重要。因此, 许多学者对供应链稳定性进行了研究。1892年, Lyapunov系统研究了由微分方程所描述的动力学系统和运动稳定性问题, 建立了至今仍起主导作用的稳定性理论的研究框架与方法^[1-2]。Omkar等^[3]应用非合作博弈理论模型研究了具有两种生产制造商(独立生产制造商和网络制造商)的两级供应链的稳定性问题。Schönlein等^[4]在动态供应链中, 对多类排队网络的鲁棒稳定性进行了度量与优化。国内学者覃正等^[5]从系统论信息熵的角度应用信道容量、聚合度、冗余度等指标, 建立了线性供应链系统稳定性的数学模型。罗文彬^[6]研究了二级链式供应链系统的稳定性, 建立了其离散库存控制状态空间模型, 采用离散时滞系统和切换系统的稳定性条件分析了其子系统的稳定性条件。张学龙等^[7]针对具有区间灰色非线性特征的精敏供应链系统波动性问题, 建立了灰色非线性精敏供应链系统, 采用线性矩阵不等式算法分析其稳定性问题, 并获得了一种灰色非线性精敏供应链系统的稳定性判定方法。李京文、何喜军^[8]从结构与关系两个视角对供应链网络稳定性研究进行总结和评述, 并提出基于“结构—关系”的供应链网络稳定性分析框架。笔者^[9]从实体关联稳定性角度对供应链稳定性进行研究, 构建了供应链系统动态非线性模型, 应用Lyapunov指数对其进行稳定性判定, 并通过数值仿真确定关键指标的稳定性阈值。之后笔者^[10]考虑库存动态性和突发事件等级对于运输提

前期影响的双重切换, 构建了供应链离散切换模型, 并通过仿真探讨了突发事件与供应链系统状态演化间的作用机理。

在供应链相关研究中, 突发事件下供应链稳定性相关研究已经成为一个重要的主题。突发事件的影响, 使供应链中生产商和其他成员更需了解他们的决策, 以及他们的决策是如何影响供应链。Ohmori^[11]描述了一个对整个供应链防突发事件缓解策略框架, 并提出稳定、吸收和备用三类突发事件缓解方法。Cantor^[12]等基于调节定向理论解释了供应链中个人的促进和预防风险决策行为。Pal^[13]等以一个由供应商、生产企业与零售商组成的集成多级供应链为对象, 研究了其在供应中断、机器故障、库存充足、维修失败等条件下, 供应链期望成本模型与Stakelberg模型结果的差异。Fahimnia^[14]等用文献计量学和网络分析工具对1975年至今全世界的供应链风险和供应链突发事件管理已有的研究进行了系统分析和总结。Han^[15]等应用一种新的评估机制考虑突发事件传播时的供应链结构鲁棒性。国内学者朱新球^[16]通过研究发现, 需建立信息共享机制、多层次的供应链防御体系、委托代理机制和供应链应急机制等来打造弹性供应链, 以降低供应链风险。李永红等^[17]基于供应链弹性分析方法, 构建了描述供应链弹性系统形变的模型, 研究了在风险冲击下供应链内在学习能力及其对风险的修复能力对于供应链弹性变形的影响。赵林度等^[18]提出供应链弹性研究要解决的4个问题: 供应链弹性定义、供应链弹性测度、供应链弹性塑造方法与供应链弹性优化。吕文栋等^[19]从定义、影响因素和测度方法等方面详细回顾了供应链弹性、组织弹性等相关研究, 提出建构企业弹性风险管理框架亟需解决的问题。总的来说, 目前的研究主要集中在风险管理、供应链突发事件应急协调、中断管理、柔性供应链网络等领域。但突发事件和供应链系统之间的相互作用机制, 以及突发事件下供应链的稳定性仍然缺乏研究。本文主要基于捕食者—猎物模型对突发事件下供应链稳定性进行相关研究。

捕食者—猎物方程由Lotka和Volterra提出, 因此被称为Lotka-Volterra模型。该模型是一组不能相互分离的一阶非线性微分方程, 不能用封闭形式求解, 它们主要用来描述两个物种相互作用的生物系

统的动态性。捕食者—猎物方程目前普遍应用到各个领域, 包括心理学^[20]、生态学^[21]、社会学^[22]、生物学^[23]、流行病学^[24]。其生态学中最著名的例子是加拿大森林中的猞猁和雪兔之间相互关系的说明。

最早的捕食者—猎物模型是基于数学原理提出的, 同时提出了一些假设的环境以及捕食者和猎物种群的演变规律。捕食者—猎物模型的基本假设如下。

1) 捕食者种群完全依赖猎物种群作为其唯一的食物供应;

2) 猎物种群有无限的食物供应, 除了特定的捕食者外, 它的生长不会受到任何限制;

3) 数量的变动率与数量规模成正比;

4) 环境不会改变取代任一物种。

通常, 有2个物种, 捕食者(P)和猎物(V), 相关等式定义如下。

猎物模型为

$$\frac{dV}{dt} = bV - aVP. \quad (1)$$

捕食者模型为

$$\frac{dP}{dt} = caVP - dP. \quad (2)$$

式(1)中, V 是猎物的数量, 其增长率为 b , 捕食率为 a 。式(2)中, P 是捕食者的数量, 它随着猎物的减少而减少。 d 为捕食者的死亡率, c 表示转换率。Lotka-Volterra模型的一个基本假设是猎物对食物供应的依赖, 如猎物供给是无限的。因此, 假设猎物数量演变随着承载能力 K 均遵从Logistic规律, 则可将式(1)改进为式(3)。

改变后猎物模型为

$$\frac{dV}{dt} = bV\left(1 - \frac{V}{K}\right) - aVP. \quad (3)$$

2 数学模型

本研究基于捕食者—猎物模型, 研究突发事件和供应链系统之间的相互作用, 据此分析供应链系统在突发事件下的稳定性。首先进行以下假设:

1) 突发事件和供应链系统可进行有效的量化;

2) 突发事件和供应链系统之间有着相互的联系;

3) 在该模型中, 供应链系统作为猎物, 突发事件看作是捕食者。

捕食者—猎物模型当涉及到多个物种时具有复杂的、双层次的关系。然而, 本文主要分析供应链系统突发事件(以下简称突发事件)和供应链系统之间的相互关系。

突发事件始终破坏供应链系统, 甚至使供应链失稳。因此, 将突发事件作为捕食者, 而供应链作为猎物。突发事件发生时, 将持续消耗破坏供应链现有稳定性, 并使供应链失稳, 最终造成供应链系统崩溃。供应链稳定性受突发事件影响的程度越大, 供应链要保持稳定性的压力也会随之增大。因此, 突发事件可以看作是一个捕食者, 以供应链系统为猎物。

据此, 供应链系统和突发事件的动态微分方程为

$$f_1 = \dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} = rx(1 - \alpha x - \sigma_1 \beta y), \quad (4)$$

$$f_2 = \dot{y}(t) = \frac{dy}{dt} = dy(-1 + \sigma_2 \alpha x - \beta y). \quad (5)$$

其中, r 与 d 分别是供应链系统稳定性固有增长率和供应链突发事件消亡率; α 与 β 分别是供应链系统和突发事件的Logistic增长率参数; σ_1 为突发事件下供应链弹性系数; σ_2 是突发事件干扰系数; x 和 y 分别是供应链系统稳定性和突发事件危害度; f_1 是供应链系统稳定性随时间变化的函数; f_2 是突发事件危害度随时间变化的函数。

σ_1 可通过供应链网络弹性(R_1)、供应链产品生产弹性(R_2)、供应链产品配送弹性(R_3)、供应链信息系统弹性(R_4)和供应链企业间的互信关系(R_5)确定, 即 $\sigma_1 = \sum_{i=1}^5 R_i w_i$, 其中 w_i 为第 i 个指标所占的权值。

考虑到供应链弹性不足时会增加供应链脆弱性, 弹性过度会侵蚀供应链企业的利润, 因此供应链系统须确定合理的弹性系数取值范围。由试验可知, 当 $\sigma_1 > 2$ 时, 供应链系统波动幅度加大, 其稳定性呈下降趋势, 故 σ_1 最大取值为2。根据《国家突发公共事件总体应急预案》, 各类突发公共事件按照其性质、严重程度、可控性和影响范围等因素, 可分为4级: 一般、较大、重大和特别重大。据此, 将 σ_2 阈值进行划分。 σ_2 取值范围见表1。

表1 σ_2 取值范围
Tab.1 The scope of σ_2

突发事件等级	取值范围
一般	(0, 0.5]
较大	(0.5, 1]
重大	(1, 1.5]
特别重大	(1.5, 2]

式(4)表明供应链系统稳定性的变化率与它的稳定度直接成比例关系,也受到供应链自身Logistic增长率参数的限制。式(4)展开后最后一项 $-r\sigma_1\beta xy$ 主要表明突发事件和供应链之间的相互影响关系,即突发事件对供应链造成的影响。式(5)中,展开后第1项 $-dy$ 表示没有供应链(猎物)时,没有供应链维持突发事件的发生,突发事件将会指数的递减;中间一项 $d\sigma_2\alpha xy$ 表示突发事件依赖于供应链而发生。

3 分析与讨论

3.1 平衡点稳定性分析

为了研究突发事件和供应链系统之间的相互关系,即 $t \rightarrow \infty$ 时, f_1 、 f_2 的变化趋势,对其平衡点

进行稳定性分析。

首先,根据微分方程(4),(5)解代数方程组

$$\begin{cases} g(x, y) \equiv dy(-1 + \sigma_2\alpha x - \beta y) = 0, \\ f(x, y) \equiv rx(1 - \alpha x - \sigma_1\beta y) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

得到4个平衡点,即

$$P_1(0, 0), P_2\left(\frac{1}{\alpha}, 0\right), P_3\left(0, -\frac{1}{\beta}\right), P_4\left(\frac{1 + \sigma_1}{\alpha(1 + \sigma_1\sigma_2)}, \frac{\sigma_2 - 1}{\beta(1 + \sigma_1\sigma_2)}\right). \quad (7)$$

按照判断平衡点稳定性的方法计算

$$A = \begin{bmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(1 - 2\alpha x - \beta\sigma_1 y) & -r\beta\sigma_1 x \\ d\alpha\sigma_2 y & d(-1 + \alpha\sigma_2 x - 2\beta y) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$p = -(f_x + g_y)|_{p_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (9)$$

$$q = \det A|_{p_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (10)$$

根据微分方程稳定性理论可知,若 $p > 0, q > 0$,则平衡点稳定;否则,若 $p < 0$ 或 $q < 0$,则平衡点不稳定。突发事件和供应链的各平衡点及其稳定性条件见表2。

表2 突发事件和供应链之间的平衡点及稳定性条件

Tab.2 The equilibrium points between the disruptions and supply chain system and their stability conditions

平衡点	p	q	稳定性条件
$P_1(0, 0)$	$d - r$	$-rd$	失稳
$P_2\left(\frac{1}{\alpha}, 0\right)$	$r + d(1 - \sigma_2)$	$rd(1 - \sigma_2)$	$\sigma_2 < 1$
$P_3\left(0, -\frac{1}{\beta}\right)$	$-r(1 + \sigma_1) - d$	$rd(1 + \sigma_1)$	失稳
$P_4\left(\frac{1 + \sigma_1}{\alpha(1 + \sigma_1\sigma_2)}, \frac{\sigma_2 - 1}{\beta(1 + \sigma_1\sigma_2)}\right)$	$\frac{r(1 + \sigma_1) + d(\sigma_2 - 1)}{1 + \sigma_1\sigma_2}$	$\frac{rd(1 + \sigma_1)(\sigma_2 - 1)}{1 + \sigma_1\sigma_2}$	$\sigma_2 > 1$

根据式(6),代数方程可写为

$$\begin{cases} \varphi(x, y) = 1 - \alpha x - \sigma_1\beta y, \\ \psi(x, y) = -1 + \sigma_2\alpha x - \beta y. \end{cases} \quad (11)$$

对于 σ_1, σ_2 的不同取值范围,直线 $\varphi(x, y) = 0$ 和 $\psi(x, y) = 0$ 在相平面上的相对位置不同,如图1所示。

3.2 突发事件下供应链稳定性分析

接下来基于平衡点讨论突发事件与供应链系统稳定性的关系。在理论中,平衡点必须确保供应链

稳定,当平衡点受突发事件影响失衡时,供应链亦失稳。

上述方程组(6)可用微分方程稳定性理论优化控制和轨迹求解。主要基于微分方程算法,通过Matlab实现。

为了求解式(4)和(5),设 $r = 1, d = 0.5, \sigma_1 = 0.5, \sigma_2 = 0.2, \alpha = 0.01$ 和 $\beta = 0.1$ 。图2表示该参数条件下供应链与突发事件之间的相互曲线和相轨线。

图2表示了 $\sigma_1 < 1$ 和 $\sigma_2 < 1$ 时供应链和突发事件

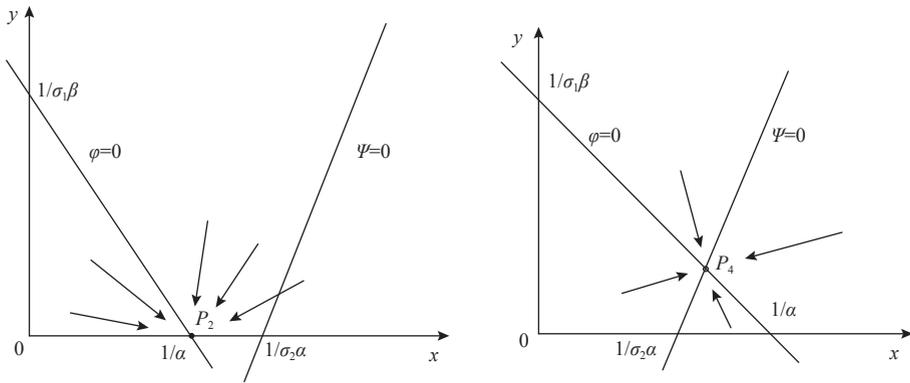


图1 两直线相对位置图

Fig.1 Relative position of the two lines

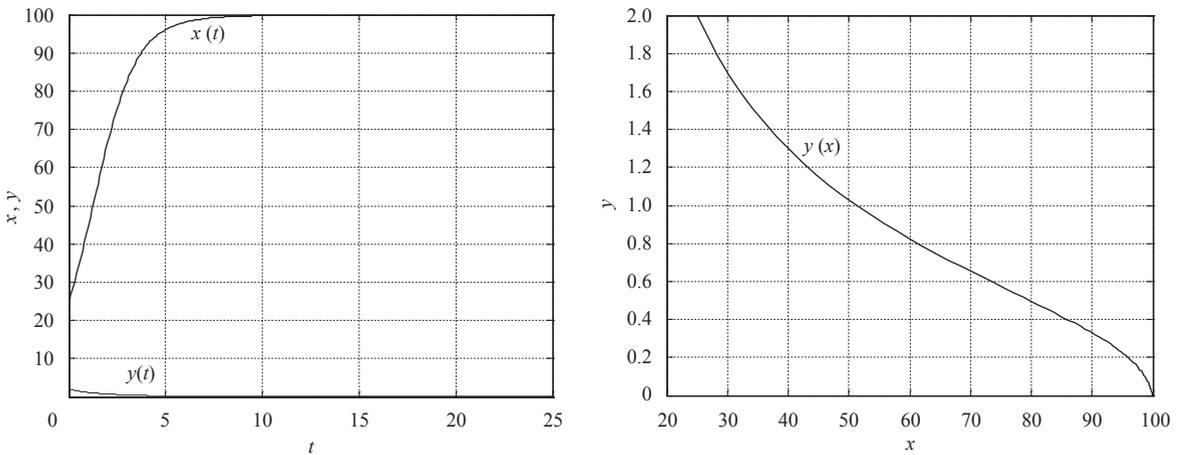


图2 在 $\sigma_1 < 1$ 和 $\sigma_2 < 1$ 时供应链和突发事件相互曲线和相轨线

Fig.2 The curves and phase trajectory of the disruptions and supply chain when $\sigma_1 < 1$ and $\sigma_2 < 1$

之间的相互关系, 其中 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示供应链稳定性和突发事件危害度。该图表明当突发事件对供应链的危害度越低时, 则供应链的稳定度越高并逐渐趋于一定的稳定性值, 即 $y(x)$ 随着 x 的增加而减少。

当参数值 $r=1, d=0.5, \sigma_1=2, \sigma_2=0.2, \alpha=0.01$ 和 $\beta=0.1$ 时, 通过Matlab得到图3。当 $\sigma_1 > 1, \sigma_2 < 1$ 时, 突发事件危害度逐渐减小且趋于0, 供应链稳定性值逐渐达到最大值且趋于稳定。由图3相轨线可知, $y(x)$ 的下降趋势比图2中 $y(x)$ 更快, 即增大供应链弹性系数可减缓突发事件的发生, 表明供应链弹性系数增大可以有效避免突发事件的影响。

当参数值 $r=1, d=0.5, \sigma_1=0.5, \sigma_2=2, \alpha=0.01$ 和 $\beta=0.1$ 时, 通过Matlab得到图4。当 $\sigma_1 < 1, \sigma_2 > 1$ 时, 可知当 $t > 5$ 时, 突发事件危害度逐渐增大, 随之供应链稳定性值逐渐减小, 当 $t=15$ 时, 两者之间

趋于稳定值而保持不变, 供应链趋于稳定。说明当 $\sigma_2 > 1$ 时, 突发事件对供应链稳定性影响明显。而相轨线 $y(x)$ 无限逐渐趋近于其相应的中心, 其趋近程度较缓, 表明供应链系统在突发事件下最终达到稳定, 但所需时间较长。

当参数值 $r=1, d=0.5, \sigma_1=2, \sigma_2=2, \alpha=0.01$ 和 $\beta=0.1$ 时, 通过Matlab得到图5。当 $\sigma_1 > 1, \sigma_2 > 1$ 时, 在 $t=12$ 时, 供应链稳定性和突发事件危害度都分别趋于60和2, 系统处于平衡状态, 供应链趋于稳定。并且相轨线 $y(x)$ 逐渐趋近于其中心位置, 趋近程度比当 $\sigma_1 < 1$ 时的 $y(x)$ 更大; 而图4, 当 $\sigma_1 < 1$ 和 $\sigma_2 > 1$ 时, 供应链稳定性和突发事件危害度分别趋于76和5。相比可知, 增强供应链弹性系数, 可减少突发事件对供应链的危害度并使供应链尽快趋于稳定。

该部分分析了供应链与突发事件在 σ_1, σ_2 不同取

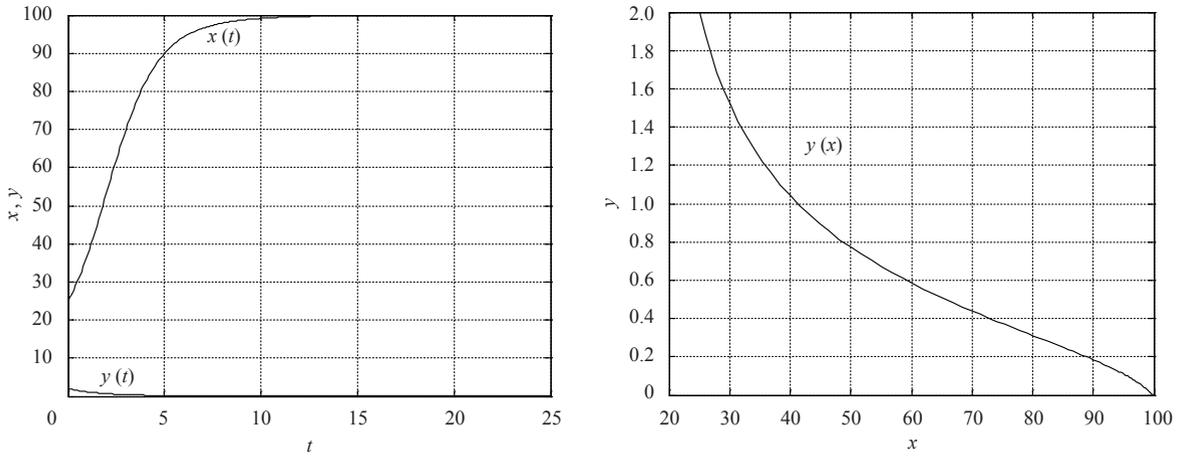


图3 在 $\sigma_1 > 1$ 和 $\sigma_2 < 1$ 时供应链和突发事件相互曲线和相轨线

Fig.3 The curves and phase trajectory of the disruptions and supply chain when $\sigma_1 > 1$ and $\sigma_2 < 1$

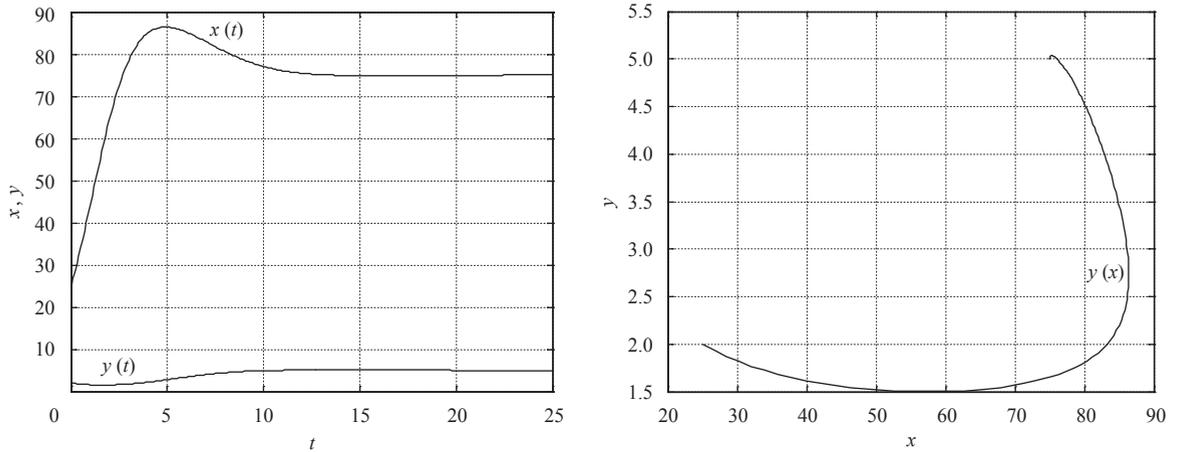


图4 在 $\sigma_1 < 1$ 和 $\sigma_2 > 1$ 时供应链和突发事件相互曲线和相轨线

Fig.4 The curves and phase trajectory of the disruptions and supply chain when $\sigma_1 < 1$ and $\sigma_2 > 1$

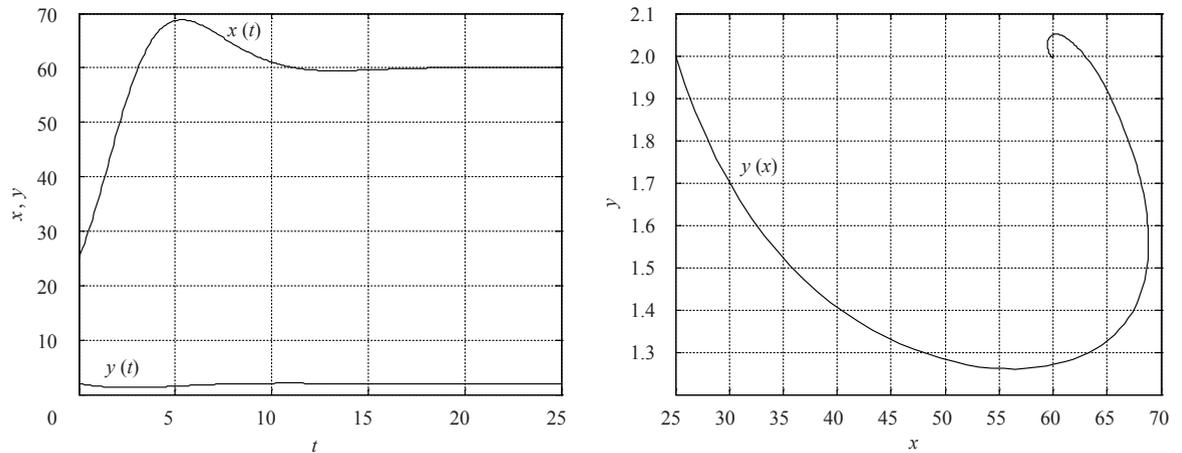


图5 在 $\sigma_1 > 1$ 和 $\sigma_2 > 1$ 时供应链和突发事件相互曲线和相轨线

Fig.5 The curves and phase trajectory of the disruptions and supply chain when $\sigma_1 > 1$ and $\sigma_2 > 1$

值影响。对于平衡点 P_1 , 供应链稳定性值和突发事件危害度均为0, 在实际中不存在这种情形; 对于平衡点 P_3 , 其供应链稳定性值为0, 而突发事件的危害度并不为0, 类似的, 在现实中也不存在这种情况。因此, 剔除对于现实没有意义的平衡点 P_1 与 P_3 。

当 $0 < \sigma_2 < 1$ 时, 平衡点 P_2 稳定, 因为供应链(猎物)不具备引发突发事件(捕食者)的要素, 即突发事件的危害度很弱, 很难对供应链系统稳定性产生影响, 从而供应链稳定运行。

当 $1 < \sigma_2 < 2$ 时, 平衡点 P_4 稳定, 此时供应链系统稳定性和突发事件危害度都随时间推移达到极值而趋于平衡, 供应链系统趋于稳定。

在突发事件下为保证供应链稳定性, 在点 P_4 达到平衡时, 应使供应链弹性系数 $\sigma_1 > 1$ 且趋于2, 而突发事件干扰系数 $\sigma_2 > 1$ 且逐渐趋于1。当在点 P_2 达到平衡时, 应使供应链弹性系数 $\sigma_1 > 0$ 且趋于2, 而突发事件干扰系数 $0 < \sigma_2 < 1$, 且逐渐趋于0。据此, 可以通过增强供应链弹性应对突发事件, 比如通过增强供应链成员的合作关系和合作强度, 减少运营环境不确定性来创造供应链弹性等, 进而达到供应链的稳定性。

4 结论

为了研究突发事件和供应链系统稳定性之间的相互关系, 本文基于捕食者—猎物模型构建突发事件和供应链系统状态关系模型, 通过 Matlab 仿真研究两者之间的互动机理。研究表明, 突发事件下供应链稳定性主要取决于突发事件下供应链弹性系数 σ_1 和突发事件干扰系数 σ_2 , 当供应链系统与突发事件之间的相互关系达到平衡点 P_2 时, 只有当突发事件干扰系数 $0 < \sigma_2 < 1$ 时, 供应链系统才能达到稳定状态; 当相互关系达到平衡点 P_4 时, 只有当突发事件干扰系数 $1 < \sigma_2 < 2$ 时, 供应链才能达到稳定状态。即突发事件下供应链稳定性主要取决于平衡点 P_2 与 P_4 。当突发事件和供应链稳定性之间关系达到平衡点时, 即供应链稳定性和突发事件危害度达到一定值时, 则两者保持平衡, 供应链系统稳定。因此, 可以通过对供应链稳定性和突发事件危害度值进行预测, 以减少突发事件对供应链造成的损失。

本文应用捕食者—猎物模型对突发事件与供应

链之间的关系进行研究, 是该模型在供应链领域的一次有益尝试。但本文还存在一些不足之处。如本文模型分析都是静态的, 而突发事件是动态变化和复杂的。突发事件干扰系数会随着突发事件的演化而发生变化, 供应链应对突发事件能力系数也会随着供应链系统的决策调整而改变, 因此突发事件与供应链系统之间的动态关系有待进行进一步研究与分析。

参考文献:

- [1] BUSE C, BARBU D. The Lyapunov equations and nonuniform exponential stability[J]. *Mathematical Reports*, 1997, 49(1): 25-31.
- [2] PAL B, SANA S S, CHAUDHURI K. A multi-echelon production-inventory system with supply disruption[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2014, 33(2): 262-276.
- [3] PALSULE-DESAI O D, TIRUPATI D, CHANDRA P. Stability issues in supply chain networks: Implications for coordination mechanisms[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 142(1): 179-193.
- [4] SCHÖNLEIN M, MAKUSCHEWITZ T, WIRTH F, et al. Measurement and optimization of robust stability of multiclass queueing networks: Applications in dynamic supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 229(1): 179-189.
- [5] 覃正, 姚公安. 基于信息熵的供应链稳定性研究[J]. *控制与决策*, 2006, 21(6): 693-696.
QIN Zheng, YAO Gongan. Evaluation on stability of supply chain with information entropy[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(6): 693-696.
- [6] 罗文彬. 供应链系统稳定性与混沌动力学行为分析[D]. 南京: 东南大学, 2007.
LUO Wenbin. Analysis of the stability and chaos dynamics behavior of supply chain system[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [7] 张学龙, 王云峰. 基于LMI的灰色非线性精敏供应链稳定性判定方法[J]. *工业工程*, 2014, 17(2): 64-69.
ZHANG Xuelong, WANG Yunfeng. LMI-based research on stability of fragile supply chain with grey non-linear characteristics[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2014, 17(2): 64-69.
- [8] 李京文, 何喜军. 供应链网络稳定性研究评述[J]. *经济与管理研究*, 2014, (4): 99-103.
LI Jingwen, HE Xijun. Review on the stability of supply chain network[J]. *Research on Economics and Management*, 2014, (4): 99-103.
- [9] 胡卉, 胡大伟, 陈栋. 面向供应链协同的实体关联稳定性[J]. *工业工程*, 2011, 14(5): 31-35.
HU Hui, HU Dawei, CHEN Dong. Study on entity correlation stability in supply chain coordination. *Industrial Engineering Journal*, 2011, 14(5): 31-35.

- [10] HU H, SHI L, MA H, et al. Stability of the supply chain based on disruption classification[J]. *Technical Gazette*, 2017, 24(4): 1187-1195.
- [11] OHMORI S, YOSHIMOTO K. A framework of managing supply chain disruption risks using network reliability[J]. *Industrial Engineering and Management Systems*, 2013, 12(2): 103-111.
- [12] CANTOR D E, BLACKHURST J V, CORTES J D. The clock is ticking: The role of uncertainty, regulatory focus, and level of risk on supply chain disruption decision making behavior[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 72: 159-172.
- [13] PAL B, SANA S S, CHAUDHURI K. A multi-echelon production-inventory system with supply disruption[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2014, 33(2): 262-276.
- [14] FAHIMNIA B, TANG C S, DAVARZANI H, et al. Quantitative models for managing supply chain risks: A review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 247(1): 1-15.
- [15] HAN J, SHIN K S. Evaluation mechanism for structural robustness of supply chain considering disruption propagation[J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(1): 1-17.
- [16] 朱新球, 苏成. 应对供应链风险的弹性供应链机制研究[J]. *北京工商大学学报(社会科学版)*, 2010, 25(6): 45-55.
ZHU Xinqiu, SU Cheng. Research on the mechanisms of supply chain for supply chain risk[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University (Social Science Edition)*, 2010, 25(6): 45-55.
- [17] 李永红, 赵林度. 基于弹性模型的供应链风险响应分析[J]. *系统管理学报*, 2010, 19(5): 563-570.
LI Yonghong, ZHAO Lindu. Analyzing supply chain risk response based on resilience model[J]. *Journal of System and Management*, 2010, 19(5): 563-570.
- [18] 赵林度, 王新平. 供应链弹性管理研究进展[J]. *东南大学学报(哲学社会科学版)*, 2013, 15(4): 21-27.
ZHAO Lindu, WANG Xinping. Review on the supply chain resilience[J]. *Journal of Southeast University (Philosophy and Social Science Edition)*, 2013, 15(4): 21-27.
- [19] 吕文栋, 田丹, 赵杨. 弹性企业风险管理体系建构的探讨—基于供应链弹性等领域的文献回顾与拓展[J]. *科学决策*, 2015, (3): 1-27.
LYU Wendong, TIAN Dan, ZHAO Yang. Study on resilient enterprise risk management: based on review and expansion of supply chain resilience, engineering resilience, and organizational resilience[J]. *Scientific Decision-Making*, 2015, (3): 1-27.
- [20] NOWAK V, VALLACHER R R. *Dynamical social psychology*[M]. New York: Guilford Press, 1998.
- [21] RICKLEFS R, RELYEA R. *Ecology: The economy of nature*[M]. 7th edition, New York: W. H. Freeman and Company, 2013.
- [22] FELMLEE D H, GREENBERG D F. A dynamic systems model of dyadic interaction[J]. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1999, 23(3): 155-180.
- [23] ELTON C S. Periodic fluctuations in the numbers of animals: their causes and effects[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1924, 2(1): 119-163.
- [24] BRAUER C, CASTILLO-CHAVEZ C. Mathematical models in population biology and epidemiology[J]. *American Mathematical Monthly*, 2012, 40(3): 267-291.