



# 面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同演化仿真

龚 英<sup>1,2,3</sup>, 何彦婷<sup>4</sup>, 曹策俊<sup>2,3\*</sup>

(1. 重庆工商大学 长江上游经济研究中心, 重庆 400067;

2. 重庆市特色农产品加工储运工程技术研究中心(重庆工商大学), 重庆 400067;

3. 重庆工商大学 管理科学与工程学院, 重庆 400067; 4. 重庆工商大学 工商管理学院, 重庆 400067)

(\* 通信作者电子邮箱 caoccejun0601@tju.edu.cn)

**摘 要:**为提高重大公共卫生风险治理过程中的应急物流效率,在分析政府与物流企业行为特征的基础上,设计了面向重大公共卫生风险治理的高效应急物流协同机制。通过构建地方政府与物流企业的演化博弈模型,探究了地方政府监管和物流企业协同的演化规律与路径,然后利用数值仿真来验证所提模型的可行性和有效性。结果表明,与商业物流协同机制相比,面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制更依赖于地方政府的监管力度,并且该机制使得物流企业的协同水平在0.25与0.9之间反复波动;而建立针对地方政府的动态奖惩机制后,在博弈次数达到30时,物流企业的协同水平为0.46,并一直维持稳定,可见这个动态奖惩机制显著提高了应急物流协同机制的稳定性。

**关键词:**重大公共卫生风险治理;应急物流;协同机制;演化博弈

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A

## Co-evolutionary simulation regarding emergency logistics in major public health risk governance

GONG Ying<sup>1,2,3</sup>, HE Yanting<sup>4</sup>, CAO Cejun<sup>2,3\*</sup>

(1. Research Center for Economy of Upper Reaches of the Yangtze River,

Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. Chongqing Engineering Research Center for Processing, Storage and Transportation of Characterized Agro-Products

(Chongqing Technology and Business University), Chongqing 400067, China;

3. School of Management Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

4. School of Business Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** To enhance the efficiency of emergency logistics during the process of major public health risk governance, an efficient emergency logistics collaboration mechanism was designed based on the analysis of the behavioral characteristics of government and logistics enterprise. An evolutionary game model between local government and logistics enterprise was established to investigate the evolutionary laws and paths of local government's supervision and logistics enterprise's collaboration. Then, the feasibility and effectiveness of the proposed model were verified based on the numerical simulation. The results indicate that the emergency logistics collaboration mechanism in major public health risk governance significantly depends on local government's supervision compared with the collaboration mechanism of commercial logistics and it makes the collaboration level of logistics enterprise fluctuate between 0.25 and 0.9 repeatedly. After the establishment of a dynamic reward and punishment mechanism for local government, the obtained collaboration level of logistics enterprise stabilizes at 0.46 when the number of games reaches 30. It can be seen that this dynamic reward and punishment mechanism improves the stability of emergency logistics collaboration mechanism significantly.

**Key words:** major public health risk governance; emergency logistics; collaboration mechanism; evolutionary game

## 0 引言

近年来,诸如美国甲型H1N1流感疫情、西非埃博拉疫情、南美寨卡疫情等重大公共卫生风险频发,对国家经济发

展、社会稳定造成了重大影响。类似的重大公共卫生风险具有传播速度快、感染范围广、治理难度大等特点,严重威胁了我国甚至全球经济发展和人民生命健康。基于此,如何提高重大公共卫生风险的治理能力,健全应急管理体系,是当前亟

**收稿日期:**2020-11-06;**修回日期:**2020-12-23;**录用日期:**2020-12-28。 **基金项目:**国家自然科学基金资助项目(71904021);重庆市社会科学规划项目(2019QNGL27);重庆市自然科学基金资助项目(cstc2020jcyj-msxmX0164);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201900830);长江上游经济研究中心开放基金资助项目(KFJJ2019004);重庆工商大学“应对重大突发公共卫生事件”专题研究重点项目(ctbuyqzx01);重庆工商大学校内科研项目(1951025);重庆工商大学引进高层次人才科研启动项目(1955011)。

**作者简介:**龚英(1968—),女,重庆人,教授,硕士,主要研究方向:应急管理、物流与供应链管理;何彦婷(1995—),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向:物流与供应链管理;曹策俊(1990—),男,四川南充人,副教授,博士,主要研究方向:灾害运作管理、应急决策仿真、演化博弈论。



待解决的重大问题。此问题也引起了国内外学者的广泛关注,并取得了一定的成果<sup>[1-4]</sup>。研究表明,在重大公共卫生风险治理过程中,如何将应急物资及时、准确、快速地送至应急需求点,确保医疗物资、民生物资和后续生产物资的充分供应,从而提高公众的感知满意度是首要任务之一<sup>[5-6]</sup>。因此,研究面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制设计问题重要和紧迫的。

然而,在重大公共卫生风险治理过程中,采取的交通限制、延迟复工复产等有效防控措施,部分国际物流企业发布的停航通知,打乱了跨区域运输节奏,对应急物流系统提出了新的挑战。例如,医疗物资和民生物资短缺,以及物资运输的不及时,对民众的生命健康和日常生活保障造成威胁。随着态势的好转,各地政府和企业大力推进复工复产,但由于高速公路通行受限、境外运输受限等问题,使有序复工复产又成为难题,短期内影响供应链和产业链的运转,阻碍了社会发展。为解决上述问题,政府应立即对应急物资供需进行统筹规划,采取各种措施,激励物流企业相互合作或协同,但也需要进行适当的监督。从这种意义而言,稳定有效的应急物流协同机制有助于推进医疗物资、民生物资、生产物资等运输工作的顺利开展,从而提高重大公共卫生风险治理的效果或绩效<sup>[7]</sup>。在重大公共卫生风险治理过程中,政府和物流企业的行为选择直接影响整体绩效,彼此之间根据对方的选择来调整自身的策略,以确保自身的策略始终处于最优状态。在这样的形势下,为保障应急物资的充分供应,提高重大公共卫生风险的治理能力,在重大公共卫生风险治理过程中,地方政府与物流企业的应急物流协同演化问题是值得研究的课题。

在对应急物流协同机制的研究中,国内外学者已取得了一定的成果。部分学者采用定性方法研究了应急物流协同机制总体框架的构成,以及应对的挑战。例如,张臻竹<sup>[8]</sup>针对自然灾害中的应急物流协同问题,从组织、流程、信息三个角度出发,建立了基于供应链的应急物流战略协同机制。卢冰原等<sup>[9]</sup>为实现城市突发事件中应急物流协作框架的平稳高效运作,着重考虑框架内部的信息化水平,构建了智能化信息平台,以提供信息、知识与决策支持;Jiang等<sup>[10]</sup>认为解决大规模灾害应急物流中的多方协作问题仍是研究的重点,提出可将不同决策主体间信息交换、资源共享等行为的相互影响作为未来研究方向。还有部分学者使用定量研究方法,对应急物流协同机制中供需失衡、组织配置不合理、成本收益分配等具体问题进行了优化。如,Sheu等<sup>[11]</sup>通过模糊聚类分析和随机规划模型,确定了大规模灾害中潜在的应急物资供应者,并尽量减少供需不平衡的影响;Cao等<sup>[12]</sup>提出一个多目标的0-1整数规划模型,目的是降低损失、提高灾害应对效率,解决了应急组织配置不合理的问题;孙佰清等<sup>[13]</sup>基于合作博弈理论建立应急救援协同模型,探讨了激励应急物流协同的途径和措施,以提高救援效率,降低物流成本。根据上述文献可知,大多数学者关注了大规模灾害应急物流中的关键问题和挑战,设计了自然灾害、事故灾难和社会安全事件中的应急物流协同总体框架,或者使用最优化模型解决资源最佳分配、组织合理配置、成本最低等问题,设计了应急物流协同机制,却较少关注重大公共卫生风险治理中的相关问题。

在重大公共卫生风险治理中,应急物流协同机制的形成是一个不断修正、优化和改进的过程。期间,地方政府和物流

企业在信息不完备的情况下作出监管和协同的决策,并根据环境和前期结果调整决策,最终才可能形成稳定高效的应急物流协同机制。演化博弈理论可以刻画有限理性条件下系统成员间基于学习的策略动态演化过程,为系统性调整群体行为提供支持<sup>[14]</sup>。其优点还在于考虑了博弈主体会犯错以及多种因素的不确定性,尊重随机性,更深刻和现实地对现象进行刻画和解释。因此,运用演化博弈理论刻画政府监管和物流企业协同的动态变化过程,可以回答面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制能否形成,以及如何形成的问题。

近年来,演化博弈理论早已成为经济、管理、医学等领域的研究工具。例如,Yang等<sup>[15]</sup>针对流行病传播后的经济损失和社会问题,分析了政府与公众的行为策略选择过程;Qiu等<sup>[16]</sup>针对突发性事故后的跨区域行政协同问题,构建了地方政府与周边政府的演化博弈模型;Li等<sup>[17]</sup>研究了考虑信任水平的私人组织和人道主义组织之间的协作机制设计问题;汪明月等<sup>[18]</sup>为实现区域合作减排目标,模拟了考虑环境规制的地方政府独立减排及合作减排的策略选择过程;Yang等<sup>[19]</sup>针对不同的三峡大坝通过模式,研究了政府和承运人的行为策略。通过文献发现,演化博弈论被广泛应用于解决流行病控制、灾害管理、碳排放控制、物流运输等领域的行为策略和协作机制问题,从信任、环境规制、舆论等角度,探究了政府与公众、政府与企业、私人企业与人道主义组织之间的策略演化问题;然而,在面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制设计中,采用演化博弈理论,研究政府监管和物流企业协同之间策略动态演化问题的成果较少。

针对上述问题,本文在前人研究成果的基础上,采用演化博弈理论,研究面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制。在该机制中,地方政府和物流企业是最主要的参与者,地方政府的监管行为、物流企业的协同行为,以及地方政府监管和物流企业协同之间的关系都是机制的重要组成部分。因此,本文对地方政府监管和物流企业协同的互动演化规律和路径进行研究。首先,在分析地方政府和物流企业损益的基础上,构建应急物流协同机制的演化博弈模型;接着,讨论不同情形下地方政府和物流企业在重大公共卫生风险治理过程中的演化特征;然后,通过算例仿真,探讨和验证有助于稳定高效应急物流协同机制形成的因素;最后,结合重大公共卫生风险治理的特性,提出完善当前应急物流协同机制的结论和建议。

## 1 模型构建

### 1.1 问题描述和符号说明

重大公共卫生风险发生后,各地对物资、设备、人员的跨区域流动进行更严格的管控,在风险治理期间不仅应急物资短缺,物流资源也难以满足运输需求<sup>[20-22]</sup>。此时迫切需要稳定高效的应急物流协同机制,集合并最大化使用物流资源,推动应急物资运输有序进行,保障风险治理过程中应急物资的供应。但在实际运行中,由于各大小型物流企业存在物流能力不匹配、任务模糊、目标不统一等限制,难以在应急物流体系中形成协同关系,导致物流资源得不到充分利用<sup>[23]</sup>。因此,在重大公共卫生风险发生后,地方政府应对物流企业的协同水平进行监管,同时提供通行费减免、税收减免、金融支持等政策,使物流企业提高协同水平,并持续协同,以此促进稳

定高效的应急物流协同机制形成,为重大公共卫生风险治理提供支持,维持经济社会的正常发展。面向重大公共卫生风险治理的应急物流流程结构示意图如图1所示。

为研究面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制设计问题,刻画分析地方政府监管和物流企业协同的演化规律和路径,设定相关参数如表1。在表1中,所有参数取值均大于0。假设 $C_S < C_W + L$ ,地方政府的监管成本 $C_S$ 应小于基本行政成本 $C_W$ 与应急物资保障工作不利带来的政绩和经济损失 $L$ 之和,否则地方政府会因采取不监管策略也不会受到

多少损失而放弃监管。

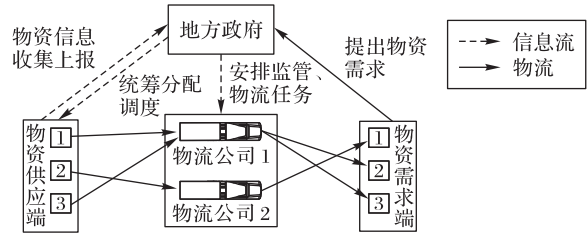


图1 应急物流流程结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of emergency logistics process structure

表1 相关参数及其含义

Tab. 1 Related parameters and their meanings

参数	含义
$x(1-x)$	地方政府选择监管/不监管的概率, $x \in (0, 1)$
$y(1-y)$	物流企业选择协同/不协同的概率, $y \in (0, 1)$
$C_W$	地方政府不监管时,仅负担基本行政成本
$C_A$	物流企业承担的协同成本
$C_S$	地方政府承担的监管成本
$T_P$	地方政府监管期间物流企业保持协同,对物流企业征收优惠税额
$T_N$	地方政府监管期间物流企业不协同,对物流企业征收规定税额
$H$	当物流企业选择协同,则地方政府获得政绩和经济收益
$R$	物流企业协同所获的协同收益
$\pi$	地方政府监管时,物流企业从地方政府处获得的协同奖励
$F$	物流企业采取不协同策略时,获得额外收益
$\phi$	地方政府监管且企业不协同时,物流企业失去的经营绩效
$L$	地方政府不监管且物流企业不协同时,地方政府因应急物资保障不利,承担的政绩和经济损失

## 1.2 地方政府与物流企业博弈模型

针对重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制设计问题,建立演化博弈模型,基本要素如下:

1)博弈方:应急物流协同机制的参与主体。博弈方1为地方政府,博弈方2为物流企业,有限理性且重复博弈。

2)策略集合:地方政府和物流企业根据历史收益同时选择策略,策略集合分别为{监管,不监管}、{协同,不协同}。

3)得益情况:根据地方政府和物流企业策略集合的4种结果,构建地方政府与物流企业之间的应急物流博弈收益矩阵,得益情况如表2所示。

表2 应急物流博弈收益矩阵

Tab. 2 Emergency logistics game payoff matrix

地方政府		物流企业	
		协同 $y$	不协同 $1-y$
监管 $x$	地方政府收益	$T_P + H - C_S$	$T_N - C_S$
	物流企业收益	$R + \pi - T_P - C_A$	$F - T_N - \phi$
不监管 $1-x$	地方政府收益	$T_N + H - C_W$	$T_N - C_W - L$
	物流企业收益	$R - T_N - C_A$	$F - T_N$

据表2,地方政府对物流企业在应急物流体系中的协同水平,采取监管和不监管策略的期望收益分别为:

$$E_x = T_N - C_S + y(H + T_P - T_N) \quad (1)$$

$$E_{1-x} = T_N - C_W - L + y(H + L) \quad (2)$$

地方政府的平均期望收益为:

$$\begin{aligned} \overline{E_{x(1-x)}} &= xE_x + (1-x)E_{1-x} = \\ &= T_N - C_W - L + x(C_W - C_S + L) + \\ &+ y(H + L) + xy(T_P - T_N - L) \end{aligned} \quad (3)$$

同理,物流企业采取协同和不协同策略的期望收益分

别为:

$$E_y = R - T_N - C_A + x(\pi - T_P + T_N) \quad (4)$$

$$E_{1-y} = F - T_N - x\phi \quad (5)$$

物流企业的平均期望收益为:

$$\begin{aligned} \overline{E_{y(1-y)}} &= yE_y + (1-y)E_{1-y} = \\ &= F - T_N - x\phi + y(R - C_A - F) + \\ &+ xy(\pi + \phi + T_N - T_P) \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(1)~(6),地方政府选择监管策略概率 $x$ 和物流企业选择协同策略概率 $y$ 的复制动态方程分别为 $F(x)$ 和 $F(y)$ ,分别描述了地方政府和物流企业的策略选择随时间变化的过程。 $\frac{dx}{dt}$ 和 $\frac{dy}{dt}$ 为 $x$ 和 $y$ 对时间 $t$ 的导数,结果为正时,地方政府和物流企业选择监管和协同的概率整体上升,反之下降。

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{dx}{dt} = x(E_x - \overline{E_{x(1-x)}}) = \\ &= x(1-x)[C_W + L - C_S + y(T_P - T_N - L)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F(y) &= \frac{dy}{dt} = y(E_y - \overline{E_{y(1-y)}}) = \\ &= y(1-y)[R - F - C_A + x(\pi + \phi + T_N - T_P)] \end{aligned} \quad (8)$$

## 2 模型分析

### 2.1 复制动态系统与均衡点

在重大公共卫生风险治理的过程中,地方政府监管和物流企业协同的演化博弈过程由复制动态方程(7)、(8)构成的微分方程组进行描述。令 $F(x) = 0, F(y) = 0$ ,得到5个均衡点,是潜在的演化稳定策略,均衡点分别是 $O(0, 0)$ 、 $A(0, 1)$ 、 $B(1, 0)$ 、 $C(1, 1)$ 和 $D(x^*, y^*)$ ,其中:



$$x^* = \frac{C_A + F - R}{\pi + \phi + T_N - T_P}$$
$$y^* = \frac{C_S - C_W - L}{T_P - T_N - L}$$

根据 Friedman<sup>[24]</sup>所提复制动态系统的雅克比矩阵的定义,求解系统的演化稳定策略(ESS)。用  $J$  表示雅克比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dF(x)}{dx} & \frac{dF(x)}{dy} \\ \frac{dF(y)}{dx} & \frac{dF(y)}{dy} \end{bmatrix}$$

其中:

$$\begin{cases} \frac{dF(x)}{dx} = (1 - 2x)[C_W - C_S + L + y(T_P - T_N - L)] \\ \frac{dF(x)}{dy} = x(1 - x)(T_P - T_N - L) \\ \frac{dF(y)}{dx} = y(1 - y)(\pi + \phi + T_N - T_P) \\ \frac{dF(y)}{dy} = (1 - 2y)[R - F - C_A + x(\pi + \phi + T_N - T_P)] \end{cases} \quad (9)$$

雅克比矩阵  $J$  的行列式和迹分别为:

$$\begin{cases} \det J = \frac{dF(x)}{dx} \cdot \frac{dF(y)}{dy} - \frac{dF(x)}{dy} \cdot \frac{dF(y)}{dx} \\ \text{tr } J = \frac{dF(x)}{dx} + \frac{dF(y)}{dy} \end{cases} \quad (10)$$

当  $\det J > 0$  且  $\text{tr } J < 0$  时,复制动态系统的均衡点为局部稳定,是应急物流协同机制中地方政府和物流企业的 ESS。接下来在不同情形下,对均衡点进行稳定性讨论,判断过程见表 3~5。

## 2.2 不同情形下的演化稳定策略

情形一 当  $R - F - C_A < T_P - T_N - \pi - \phi < 0$  时,  $x^* > 1, 0 < y^* < 1$ , 有 4 个均衡点  $O, A, B, C$ , 博弈系统的唯一 ESS 是  $(1, 0)$ , 该点具备全局均衡性。因在系统内从全范围不同起始点出发,经演化后均收敛于同一点,该点具备全局稳定性;但若仅在系统的一定范围内才收敛于一均衡点,则该点仅为系统的局部稳定点<sup>[25-26]</sup>。均衡点局部稳定性结果如表 3,表中符号“+”或“-”分别表示该均衡点雅克比矩阵行列式和迹的值为正或负,是判断该点是否为 ESS 的依据,演化路径如图 2。

表 3 情形一的均衡点局部稳定性分析 I

Tab. 3 Stability analysis of equilibrium point of case I

均衡点	$\det J$	$\text{tr } J$	稳定性
$(0, 0)$	-	不确定	鞍点
$(0, 1)$	-	不确定	鞍点
$(1, 0)$	+	-	ESS
$(1, 1)$	+	+	不稳定

从表 3 和图 2 可看出,经多次博弈,虽然地方政府选择对物流企业的协同水平进行监管,但物流企业的最优策略仍是完全不协同,未形成有效的应急物流协同机制。其原因可能是物流企业实施协同策略所获的净收益(物流企业协同收益与其成本之差),远低于实施不协同策略所获的额外收益,故为维护自身利益,物流企业选择不协同策略。缺乏有效的应急物流协同机制,物流企业的不同行为将引起路线混乱重

复、物流资源被浪费、地方物资需求得不到缓解等一系列负面后果。应急物流负责人应从降低物流企业协同成本,提高协同收益,控制额外收益等方面考虑,促使物流企业在重大公共卫生事件的风险治理过程中选择协同策略,从而形成有效的应急物流协同机制。

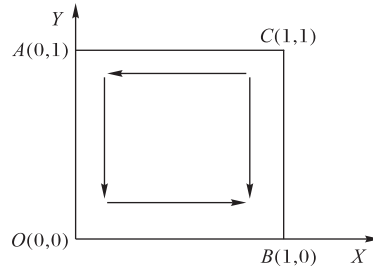


图 2 情形一的系统演化路径

Fig. 2 System evolution path of case I

情形二  $T_P - T_N - \pi - \phi < R - F - C_A < 0$ , 此时  $0 < x^* < 1, 0 < y^* < 1$ , 有 5 个均衡点  $O, A, B, C, D$ , 但不存在 ESS, 不具备稳定性,系统在均衡点  $D$  周边反复震荡。均衡点局部稳定性结果如表 4,演化路径如图 3。

表 4 情形二的均衡点局部稳定性分析

Tab. 4 Stability analysis of equilibrium point of case II

均衡点	$\det J$	$\text{tr } J$	稳定性
$(0, 0)$	-	不确定	鞍点
$(0, 1)$	-	不确定	鞍点
$(1, 0)$	-	不确定	鞍点
$(1, 1)$	-	不确定	鞍点
$(x^*, y^*)$	+	0	中心点

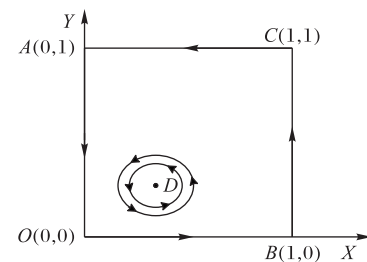


图 3 情形二的系统演化路径

Fig. 3 System evolution path of case II

在物流企业的协同净收益稍高于额外收益的情形下,考虑到地方政府因监管成本、经济收益和政绩变化而产生的不稳定行为,以及地方政府行为和协同成本收益水平对物流企业策略选择产生的影响,系统会出现不稳定现象:在应急物流协同机制中监管力度和协同水平相互影响,围绕均衡点  $D$  循环变动。该现象与重大公共卫生风险发生后地方政府和物流企业的现实反应和行为比较吻合。地方政府没有坚持实施合适的风险治理政策,物流企业没有持续采取协同的物流合作方案,双方均根据历史损益和历史策略选择情况不断调整监管力度和协同水平,无法形成稳定的应急物流协同机制。为改变这一现象,除了如情形一调整地方政府和物流企业的成本和收益外,地方政府应尽快出台合适的风险治理方案和协同激励政策,并坚持实施,使应急物流协同机制趋于稳定。

情形三  $R - F - C_A > 0$ , 此时  $x^* < 0, 0 < y^* < 1$ , 有 4 个均衡点  $O, A, B, C$ , 博弈系统的唯一 ESS 为  $(0, 1)$ , 系统内所有起始点演化后均收敛于此,该点具有全局稳定性。均衡点局

部稳定性结果如表 5,演化路径如图 4。

表 5 情形三的均衡点局部稳定性分析

Tab. 5 Stability analysis of equilibrium point of case III

均衡点	$\det J$	$\text{tr} J$	稳定性
(0, 0)	+	+	不稳定
(0, 1)	+	-	ESS
(1, 0)	-	不确定	鞍点
(1, 1)	-	不确定	鞍点

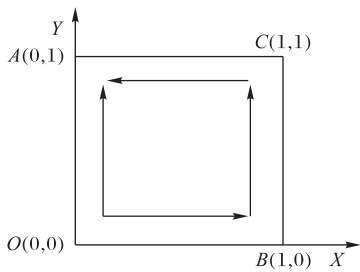


图 4 情形三的系统演化路径

Fig. 4 System evolution path of case III

从表 5 和图 4 可看出,即使地方政府采取不监管策略,物流企业仍保持协同,这种情形是应急物流协同机制的最理想状态。原因可能是,物流企业执行协同策略的净收益远高于采取不协同策略的额外收益。在这种情形下,即使地方政府不监管物流企业的协同水平,也不给予物流企业奖励,并且物流企业还需承担比正常时期更高的成本,但物流企业之间依旧会主动寻求协同,清除或克服运输障碍,使物流资源得到充分利用,各类应急物资的供应得到坚实保障。

### 3 算例仿真

在面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制中,各大小型物流企业是应急物流协同机制的主要参与者,在应急物资的运输配给中发挥重要作用。物流企业应积极地实施横向和纵向的协同策略,在风险治理过程中形成高效的应急物流协同机制<sup>[27]</sup>。例如,在重大公共卫生风险治理的初期,物流企业间还未形成协同调配系统。尽管部分机构已经收到了大量物资,但由于未及时分类、配送,灾区仍表现出应急物资严重缺乏的状况。问题暴露后,地方政府加大与物流企业的联系,形成应急物资信息集成平台,物流企业配合地方政府提供运力、时间等必要信息,形成高效的应急物流协同机制,实现供需精准匹配,运输配送主体计划与任务的协同。同时,地方政府制定了税收减免、金融支持等利好政策,提高物流企业收入、降低运营成本,激励物流企业持续接受统一调度指挥。

#### 3.1 地方政府与物流企业博弈的仿真结果分析

由于应急背景下实际数据的获取较为困难,故本文结合实际情况,对各参数进行模拟,从而验证所构建的模型。在重大公共卫生风险治理初期,为使物流企业之间形成协同关系,地方政府采取监管手段,使物流企业采取协同策略的净收益稍高于额外收益,满足条件  $T_p - T_N - \pi - \phi < R - F - C_A < 0$ 。因此,设定地方政府的监管成本  $C_S = 4$ ,基本行政成本  $C_W = 2$ ,对选择协同策略的物流企业征收优惠税额  $T_p \in (1, 2)$ ,否则征收正常税额  $T_N = 2$ 。物流企业的协同成本  $C_A = 4$ ,协同收益  $R = 8$ ,协同奖励  $\pi = 2$ ,地方政府从中获得收益  $H = 5$ ,图 5 中优惠税额  $T_p = 1.5$ 。如果物流企业采取不

协同策略,则可获得额外收益  $F = 6$ ,承受损失  $\phi = 2$ ,若此时地方政府采取不监管策略,则承担损失  $L = 6$ 。演化初始点为  $(0.4, 0.3)$ ,演化 1 000 步,结果如图 5~6 所示。

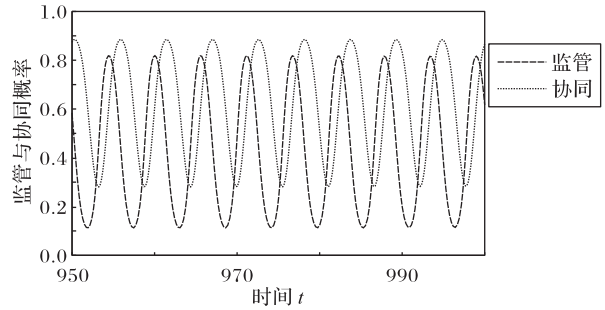


图 5 监管力度与协同水平波动图

Fig. 5 Fluctuation chart of supervision intensity and collaboration level

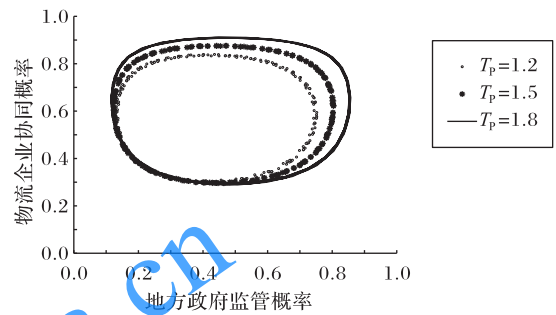


图 6 政府与物流企业策略演化路径

Fig. 6 Strategy evolution path of government and logistics enterprises

如图 5,当  $T_p = 1.5$  时,地方政府的监管力度在 0.10~0.80 内反复波动,物流企业的协同水平在 0.25~0.90 内反复波动,呈周期性变化,始终无法形成稳定的应急物流协同机制。但当地方政府提高税收优惠程度时,如图 6 所示,策略演化路径明显向内收缩。这说明,地方政府的监管行为能在短时间内较小程度提高物流企业的协同水平和稳定程度,但应急物流协同机制依旧不稳定。

因此,在重大公共卫生风险发生之后,针对物流企业协同水平的波动问题,地方政府应及时制定激励保障政策,在一定程度上提高应急物流协同机制的整体稳定性。同时,通过上级监管、舆论压力等方法,控制地方政府的监管力度在较高水平不变,从而在重大公共卫生事件的风险治理过程中,完全形成稳定高效的应急物流协同机制。

#### 3.2 考虑动态奖惩机制后的仿真结果分析

由于在重大公共卫生风险治理初期,地方政府的监管力度和物流企业的协同水平不稳定,即使是一线重点物资的保障也严重不足。因此,为促使地方政府保证稳定有效的监管力度和激励政策,本文引入中央督导组,对地方政府采取动态奖惩机制,即以地方政府的应急物资运输保障工作为监管考核对象。地方政府会因应急物资保障不利而承受损失,损失随监管水平变化而变化,设  $L = 5 - 2x$  (可为其他形式),优惠税额  $T_p = 1.5$ ,其他因素不变。经过 1 000 步演化,由图 7~8 可知,在重大公共卫生风险治理的前期,系统内出现一系列波动;但随时间推移,振幅越来越小,最终如图 9 所示,地方政府的监管力度和物流企业的协同水平都趋于平稳。

由仿真结果可知,如在重大公共卫生风险治理的起始,中央督导组就对地方政府的应急物资运输保障工作进行监管。那么经历短暂的振幅递减波动后,如图 8,在  $t = 30$  时,地方政



府便可长期稳定监管力度在0.45,物流企业维持稳定的协同水平在0.46。

因此,重大公共卫生事件发生后,中央政府应及时指派指导组,对地方政府的应急物资运输保障工作进行动态管理,以此改善物流企业在重大公共卫生风险治理过程中的协同水平,并显著提高其稳定性。最终,在重大公共卫生风险治理开始后不久,便形成稳定的应急物流协同机制,保障应急物资运输配送有序进行,提升应急物流体系的整体效率。

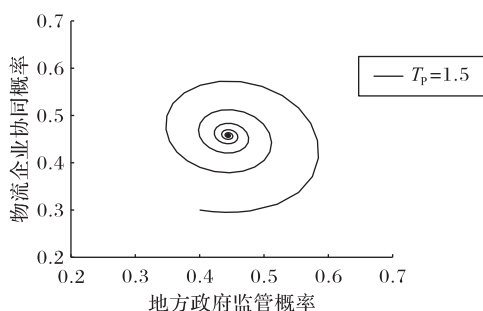


图7 考虑奖惩机制后政府与物流企业策略演化路径

Fig. 7 Strategy evolution paths of government and logistics enterprises considering reward and punishment mechanism

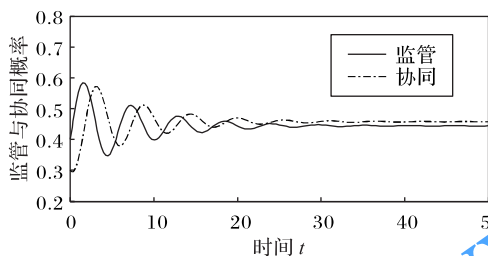


图8 前期策略波动图

Fig. 8 Strategy fluctuation chart of earlier stage

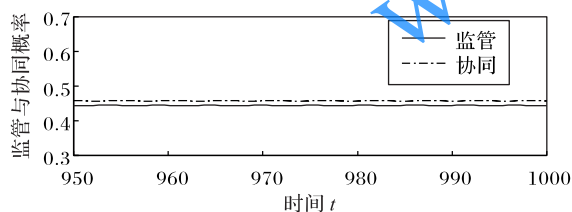


图9 后期策略波动图

Fig. 9 Strategy fluctuation chart of later stage

## 4 结语

稳定高效的应急物流协同机制是保障医疗、民生、生产等应急物资流通的关键,本文基于面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制所存在的实际问题,建立了地方政府监管和物流企业协同的演化博弈模型。通过收益成本分析和算例仿真,分析了地方政府和物流企业在不同情形下的策略选择倾向、动态演化规律,验证了动态奖惩机制对地方政府监管行为的影响。主要结论如下:

1)相较于商业物流协同机制,面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制更依赖于政府的监管行为和激励政策,因此,地方政府的应急管理能力是形成稳定高效应急物流协同机制的关键,地方党政和相关应急物资保障部门的专业精神、应急响应能力和决断能力对机制的构建、关系整合和运行效果影响极大。

2)地方政府出台的激励政策,可在一定程度上提高物流企业协同水平的稳定性。在重大公共卫生风险治理的过程中,以税收优惠、贷款贴息、许可延期等为代表的激励政策,具有稳定物流企业协同水平的作用,但不能形成完全稳定的应急物流协同机制。

3)对地方政府进行动态监管,可改变应急物流协同机制的波动现象,因此,只要中央政府对地方政府的应急物资运输保障工作设置合理的动态奖惩机制,就可以改变原应急物流协同机制的恶性循环现象,显著提升应急物流协同机制的长期协同水平和稳定性。

基于以上分析和结论,本文提出以下建议,为完善面向重大公共卫生风险治理的应急物流协同机制提供参考:

1)出台促进物流企业协同的激励政策。除了对物流企业运输疫情防控重点保障物资取得的收入免征增值税外,还可减缓缴纳社保和公积金,以及国有资产类经营性用房租金。特别是对中小物流企业,应允许其缓缴贷款利息,缓解其现金压力。建议凡是国家或地方政府已公告的如减免税收等利好政策,全部无需申报自动执行。

2)各地方政府应落实长效的物流保障政策。针对应急或民生物资的运输,对始发地检疫合格的运输车辆发放特许通行证,省内全程给予放行,提供运营支持。针对生产物资的运输,至少在全面复工复产之前,地方政府应实地走访督查,详细了解当地企业的物流需求和供给情况,主动协调对接信息,着力解决企业实际问题。同时,建议地方政府主动给予物流企业防护物资支持或提供防疫补贴,使员工愿意且安心投入到应急物流工作中。

3)中央政府应尽早对地方政府的应急物资运输保障工作进行监管。无论实例或理论分析,都表明中央政府的及时介入对应急物流协同机制意义重大。在治理前期,中央监管组应高密度地对应急物资运输保障工作进行监管,适时适度地对地方政府施加压力,以此约束和稳定地方政府对物流企业协同水平的监管力度。

4)完善全国协同统一的应急物流信息平台。通过公众号、小程序、APP等线上平台,引导各省市相关部门录入应急物资运输动态和相关政策,鼓励行业协会和物流企业发布相关运输需求和资源信息,以此实现对各地区物资需求变化和保障情况的实时掌握。

## 参考文献 (References)

- [1] BARNETT D J, THOMPSON C B, SEMON N L, et al. EPPM and willingness to respond: the role of risk and efficacy communication in strengthening public health emergency response systems [J]. Health Communication, 2014, 29(6): 598-609.
- [2] RATHORE M M, AHMAD A, PAUL A, et al. Real-time medical emergency response system: exploiting IoT and big data for public health[J]. Journal of Medical Systems, 2016, 40(12): No. 283.
- [3] NI Z J, RONG L L, WANG N, et al. Knowledge model for emergency response based on contingency planning system of China [J]. International Journal of Information Management, 2019, 46: 10-22.
- [4] 黄晓燕,陈颖,何智纯. 城市突发公共卫生事件应急处置核心能力快速评估方法的研究和应用[J]. 中国卫生资源, 2019, 22(3): 236-241. (HUANG X Y, CHEN Y, HE Z C. Study and application on the rapid assessment method of city's core capacity for public health emergency response [J]. Chinese Health Resources, 2019, 22(3): 236-241.)
- [5] SHEU J B. An emergency logistics distribution approach for quick





- response to urgent relief demand in disasters [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43 (6): 687-709.
- [6] 曹策俊, 李从东, 屈挺, 等. 救援物资跨区域调度双层规划模型——考虑幸存者感知满意度和风险可接受度[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(9): 113-128. (CAO C J, LI C D, QU T, et al. A bi-level programming model for relief trans-regional scheduling: taking into consideration survivors' perceived satisfaction and risk acceptability[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(9): 113-128.)
- [7] CHEN X, ZHANG J W. A stochastic programming duality approach to inventory centralization games [J]. *Operations Research*, 2009, 57(4): 840-851.
- [8] 张臻竹. 基于供应链视角下的应急物流控制体系建设研究[J]. *技术经济与管理研究*, 2014(2): 35-39. (ZHANG Z Z. Study on the construction of emergency logistics control system based on the perspective of supply chain [J]. *Technoeconomics & Management Research*, 2014(2): 35-39.)
- [9] 卢冰原, 黄传峰. 基于第二代VBE的城市应急物流联盟协作框架[J]. *中国流通经济*, 2015(1): 25-31. (LU B Y, HUANG C F. Collaboration framework for urban emergency logistics alliance based on second-generation VBE [J]. *China Business and Market*, 2015(1): 25-31.)
- [10] JIANG Y P, YUAN Y F. Emergency logistics in a large-scale disaster context: achievements and challenges [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 (5): No. 779.
- [11] SHEU J B, PAN C. Relief supply collaboration for emergency logistics responses to large-scale disasters [J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2015, 11(3): 210-242.
- [12] CAO C J, LI C D, YANG Q, et al. Multi-objective optimization model of emergency organization allocation for sustainable disaster supply chain [J]. *Sustainability*, 2017, 9(11): No. 2103.
- [13] 孙佰清, 朱晓鑫, 洪鑫磊. 基于合作博弈理论的应急物流协同机制研究[J]. *灾害学*, 2017, 32(2): 181-184, 189. (SUN B Q, ZHU X X, HONG X L. Research of coordination mechanism based on cooperative game theory in emergency logistics [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(2): 181-184, 189.)
- [14] FRIEDMAN D. On economic applications of evolutionary game theory [J]. *Journal of Evolutionary Economics*, 1998, 8 (1): 15-43.
- [15] YANG F, YANG Q, LIU X X, et al. SIS evolutionary game model and multi-agent simulation of an infectious disease emergency [J]. *Technology and Health Care*, 2015, 23(S2): S603-S613.
- [16] QIU Y, SHI X L, CHENG Z C. Evolutionary game models on regional administrative collaborations to accidents and disasters [J]. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 2018, 21 (4): 807-823.
- [17] LI C D, ZHANG F S, CAO C J, et al. Organizational coordination in sustainable humanitarian supply chain: an evolutionary game approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 219: 291-303.
- [18] 汪明月, 刘宇, 杨文珂. 环境规制下区域合作减排演化博弈研究[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(2): 158-169. (WANG M Y, LIU Y, YANG W K. Evolutionary game analysis of regional cooperative emission reduction under environmental regulation [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27 (2): 158-169.)
- [19] YANG L J, ZHANG Y, CHIONG R, et al. Using evolutionary game theory to study behavioral strategies of the government and carriers under different transshipment modes [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 18514-18521.
- [20] 曹策俊, 李从东, 王玉, 等. 大数据时代城市公共安全风险治理模式研究[J]. *城市发展研究*, 2017, 24(11): 76-82. (CAO C J, LI C D, WANG Y, et al. Governance mode of urban public safety risk in big data era [J]. *Urban Development Studies*, 2017, 24 (11): 76-82.)
- [21] 曹策俊, 刘桔. 灾害运作管理中应急组织决策建模方法综述[J]. *计算机应用*, 2020, 40(7): 2142-2149. (CAO C J, LIU J. Overview of modeling method of emergency organization decision in disaster operations management [J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(7): 2142-2149.)
- [22] 曹策俊, 高学鸿. 基于数学规划的救援物资分配优化模型及其求解算法综述[J]. *计算机应用*, 2020, 40(8): 2398-2409. (CAO C J, GAO X H. Overview of relief distribution optimization models based on mathematical programming and their solving algorithms [J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(8): 2398-2409.)
- [23] KAYNAK R, TUČER A T. Coordination and collaboration functions of disaster coordination centers for humanitarian logistics [J]. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2014, 109: 432-437.
- [24] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics [J]. *Econometrica*, 1991, 59(3): 637-666.
- [25] 王健, 赵凯. “智猪博弈”下的合作创新研究——基于非对称演化博弈的分析[J]. *科技与经济*, 2016, 29(2): 21-25. (WANG J, ZHAO K. Cooperative innovation of enterprises under “boxed pig game” — a research based on asymmetric evolutionary game [J]. *Science & Technology and Economy*, 2016, 29(2): 21-25.)
- [26] 殷辉, 陈劲. 共性技术下异质企业对学研方合作行为的演化博弈仿真分析[J]. *科技进步与对策*, 2015, 32(8): 101-107. (YIN H, CHEN J. Evolutionary game and simulation analysis of heterogeneous enterprise's behavior to university and research institution under common technology [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2015, 32(8): 101-107.)
- [27] 龚英. 灾害救助中的应急供应链管理研究[J]. *软科学*, 2009, 23(12): 17-21. (GONG Y. A study of emergency supply chain management in disaster relief [J]. *Soft Science*, 2009, 23(12): 17-21.)

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (71904021), the Social Science Planning Project in Chongqing (2019QNGL27), the Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2020jcyj-msxmX0164), the Project of Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN201900830), the Project of Opening Foundation of Research Center for Economy of Upper Reaches of the Yangtze River (KFJJ2019004), the Key Project of Special Research of “Response to Major Public Health Emergency” of Chongqing Technology and Business University (ctbuyqzx01), the Research Project in Chongqing Technology and Business University (1951025), the Scientific Research Start-up Project for Introduction of Advanced Talents in Chongqing Technology and Business University (1955011).

**GONG Ying**, born in 1968, M. S., professor. Her research interests include emergency management, logistics and supply chain management.

**HE Yangting**, born in 1995, M. S. candidate. Her research interests include logistics and supply chain management.

**CAO Cejun**, born in 1990, Ph. D., associate professor. His research interests include disaster operations management, emergency decision-making simulation, evolutionary game theory.