

重大卫生事件下政企应急物资点协同合作博弈研究

潘向磊, 孟芳*

武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年10月16日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

为提高重大卫生事件突发情况下的应对效率, 缓解特殊时期物流运输体系无法满足当即需求的问题, 建立政府与相关企业间的演化博弈模型, 将合作激励价值与合作感染风险放大系数引入模型, 通过模型命题仿真, 分析政府与企业间的应急物资点协同合作问题。结果表明, 双方合作意愿与感染风险、可获得社会声望、合作感染风险放大系数、合作激励价值等因素有直接关系, 尤其过高的合作激励价值将反过来抑制合作达成。本研究可为重大卫生事件突发时的应急物流建设提供参考。

关键词

演化博弈, 应急物资点, 协同合作, 合作激励价值

Study on Cooperative Game of Government and Enterprise Emergency Supplies Recruitment under Major Health Events

Xianglei Pan, Fang Meng*

School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Oct. 16th, 2022; accepted: Nov. 23rd, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

To improve the efficiency of major health event under the emergency response, ease the immediate problems in the special period that logistics transport system can't meet the demand, establish a evolutionary game model between the government and relevant enterprises, the cooperation incentive value and risk of infection amplification coefficient were introduced into model, and

*通讯作者。

the problem of emergency supplies point cooperation between the government and enterprises was analyzed through the model propositional simulation. The results show that the cooperative willingness is directly related to infection risk, social prestige, amplification coefficient of cooperative infection risk, cooperative incentive value and other factors, especially, the high cooperative incentive value will inhibit the cooperation. This study can provide reference for the construction of emergency logistics in the event of a major health event.

Keywords

Evolutionary Game, Emergency Supply Points, Collaboration and Cooperation, Cooperative Incentive Value

Copyright © 2022 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

自新冠爆发以来, 针对重大卫生事件的应对问题成为了全球议题。在早前, 世界范围内曾有诸多类似卫生事件的发生, 如 SARS (2003)、人致禽流感(2004)、甲型 H1N1 流感(2009)、欧洲大肠杆菌疫情(2011)、西非埃博拉疫情(2014~2015), 这些公共卫生事件的发生, 不仅严重危害人们的安全与健康, 也对全球经济发展和社会运行造成重大影响[1]。经 SARS 后, 中国颁布《国家突发公共卫生事件应急预案》, 标志着对公共卫生事件应急体系建设的初步探索。2020 年新冠疫情爆发是中国面临的又一次大考, 也是全球面临的难题。不难发现, 对于突发卫生事件, 人们通过地震、洪涝、飓风等自然灾害所积累下的经验借鉴余地十分有限, 一方面源于卫生事件的爆发几率低, 另一方面源于病毒的辐射范围难以控制。纵观疫情爆发期, 我国应急物流领域暴露出诸多问题——指挥调度低效无序、信息不对称、物资供求无法保证、分配不均、政府企业协同性差等[2]。在中央全面深化改革委员会第十二次会议上, 国家提出“15 个体系、9 种机制、4 项制度”, 要从体制机制上创新完善重大疫情防控举措, 健全国家公共卫生应急管理体系, 提高应对突发重大公共卫生事件的能力水平, 彰显了国家改革的决心和力度。实践证明在疫情期内, 国家通过各地征集物资、战略储备库调运物资的模式依然有效, 不过因疫情的特殊性, 带来事发地区的物流负荷增大, 对疫情的管控治理带来了负面影响。

为缓解上述问题, 已有相关学者切合不同角度做出了相应研究。在应急物资调度层面, 许德刚[3]等人以需求点满意度最大和车辆行驶时间最小为目标, 建立了双目标医疗物资应急调度模型; 唐伟勤[4]等人研究了在多个应急供应点中, 根据时间段所需消费品数量, 确定各时间段应从哪个或哪几个应急物资供应点调度相应数量的消费品以使应急成本最小; 杨继君[5]等人建立了面向多灾点需求的应急资源博弈调度模型; 时俊杰[6]运用 CVA 管理法对物资的储存管理、FAHP 对物资的配送进行合理的优先级划分, 研究在突发公共卫生事件背景下应急物资优先级的建立; 安聪琢[7]等人考虑时效性和多受灾点情况, 构建了纵横结合的物流配送路径优化模型。

在应急物流网中的应急物资点问题上, 冯舰锐[8]等人考虑时效性与经济性特征, 利用可变权重因子构建辅助函数, 建立了应急物资储备点选址模型; 刘浪[9]等人研究了在加权网络中应急物资及普通物流储备物资的储备点选址方法; 许伦慧[10]等人综合考虑运输距离和运输成本, 建立了物流配送中心选址问题和多目标物资调度问题的数学模型; 张英慧[11]等人构建应急物资筹集点动态保障能力的表达模型, 研究了在应急物流资源动态使用情况下应急物资筹集点的现存保障能力。

另外, 基于疫情时期的社会秩序, 探讨政府、企业、公众之间的利益关系以求达成协同联动效应也是一个重要角度。孙伯清[12]等人讨论了在何种情况下政企通过协同合作能在应急救援工作中发挥关键效用, 并探讨激励应急物流协同的途径和措施, 并构建了合作博弈模型; 朱姝帆[13]等人将病毒感染风险系数及损失引入, 分析冷链应急医疗保障部门与冷链物流企业配送策略选择问题, 构建了冷链应急医疗物资协同配送决策的演化博弈模型; 刘德海[14]等人建立重大突发公共卫生事件疫情传播方程, 将政府部门和社会公众的策略互动和行为演化融入传染病自然传播 SI 模型, 在三种情景下对疫情传播初期阶段进行了分析。许智琪[15]等人讨论在突发公共卫生事件中社会公众与地方政府之间的博弈关系, 分析博弈双方决策行为的动态调整过程, 得到在不同条件下社会公众和地方政府的演化稳定策略; 宋宗宇[16]等人考虑征用问题, 认为在征用阶段应遵循约束与激励并重, 在保障措施中坚持权力与责任均衡, 强化行政主体责任配置、建立多元征用监督机制、设计梯次征用的救济程序。

可以看到, 上述文献分别从物资调度、应急物资点角度, 以及社会理论角度对突发卫生事件展开了研究, 但文献鲜有将两者结合起来的讨论。以应急物资点问题为例, 应急物资点是应急物流网中的枢纽节点, 主要承担灾害突发时应急物资的临时储备、中转与分拨权责, 而现有文献多是针对其选址问题展开, 鲜有考虑政府与企通过招标合作方式建立应急物资点的模式, 包括政府如何制定激励补贴政策, 企业将自身仓储点投标成为应急物资点能否实现自身利益的增长, 政府与企业分别采取什么样的策略能够实现双赢。

本研究基于重大突发公共卫生事件, 考虑到公共卫生事件下病毒的传染性、政府出台的政策约束, 企业存在规避而不参与合作的可能, 政府与企业形成一种风险与利益的权衡关系, 双方合作意愿在环境因素干扰下趋近于一个动态变化收敛过程, 由梅纳德[17] (Maynard Smith) 于 1973 年提出的演化博弈理论在解决类似市场经济博弈、政企博弈等领域有较高的适用性。本文就此针对政府与企业间的应急物资点招投标合作问题, 建立演化博弈模型, 分析政府与企业间的策略演化以及双方达到策略稳定的条件, 后通过 MATLAB 仿真提出建议, 不仅有助于引导企业在非常时期获得自身利益, 也为政府针对突发公共卫生事件下的应急物资点建立提供理论基础与政策指导, 以期对重大突发公共卫生事件下的应急管控提供参考。

2. 演化博弈模型的假设与构建

2.1. 模型假设

在重大突发公共卫生事件背景下, 政府与有能力提供应急物资点的企业共同构成了演化博弈的主体, 但由于社会处于非常时期, 不确定的感染风险使得政府和企业没有足够的选择最佳策略以达他们的最大化利益, 即政府和企业只能根据其拥有的局部信息做出决策, 故本文假设政府和企业均为有限理性。

由于卫生事件具有潜在的感染风险, 政府出于保障社会安全角度出台的防控政策, 例如人车流限行、区域封锁等措施会使事发地企业处于紧张运营状态, 这将削减企业利益, 而与政府谋求协同合作是企业非常时期取得利益突破的有效方式, 同时也面临着风险增长。对于应急物资点政府一般通过紧急搭建或通过大型场馆临时改造的方式建立, 而当考虑与企业合作, 以类似招标方式招收企业仓储点成为应急物资点的模式, 政府将面临两种策略选择, 以此假设政府行为策略集为 $G_1 = \{M_1 \text{ 合作策略}, M_2 \text{ 自建策略}\}$ 。与之对应, 企业权衡利益与风险后的行为策略集表示为 $G_2 = \{N_1 \text{ 合作策略}, N_2 \text{ 避险策略}\}$ 。根据政府和企业的行为策略集, 可得四种演化博弈行为策略组合, 分别为 (M_1, N_1) 、 (M_1, N_2) 、 (M_2, N_1) 、 (M_2, N_2) 。

结合现有文献观点, 在公共卫生事件突发背景下政府侧更重于追求整体社会利益的最大化, 而社会公众侧重于保障自身利益, 且在疫情时期, 企业为疫情管控贡献出的社会价值将会带来企业形象的增值, 为企业发展起到良好促进作用, 因此本文将社会效益、可获得社会声望、运营收益、运营成本相关参数纳入模型。另外基于已有学者将病毒感染风险引入政企应急协同中的研究, 但鲜有考虑到协同合作后风

险的放大量, 因此本文在病毒感染风险基础上引入合作感染风险放大系数, 以衡量合作后企业面临的风险增长量。特别的, 考虑到政企双方均有合作意向需求, 当政府与企业一方表现出合作态度时, 其会为了促成合作而付出一定的激励成本, 因此本文引入合作激励价值(P 值), 用来衡量双向合作状态与单向合作状态中双方博弈的刺激行为。模型相关参数具见表 1, 部分参数假设如下:

1) 政府与企业的合作当且仅当双方均持“合作策略”时才可达成, 记双向合作状态; 当只有一方持“合作策略”时, 合作无法达成, 记单向合作状态; 其余为非合作状态。

2) 企业需在特殊时期表现出配合政府抗疫的积极性, 才能赢得自身企业形象的增值, 以此假设企业可获得的社会声望(V, V_1), 当且仅当企业采取 N_1 “合作策略”时才可获得。

3) 合作激励价值(P 值), 当 P 值为正, 为政府对企业的激励, 当 P 值为负, 为企业对政府的激励, 双向合作状态 P 值大于单向合作 P 值, 表现为: $P_1 > P_2 > 0 > P_3$ 。

Table 1. Paraments and their meanings

表 1. 模型参数及含义

参数	含义	参数	含义
W	政府自行建设应急物资点获取的社会效益	A	企业避险运营收益
W_1	政府与企业合作建立应急物资点获取的社会效益	A_1	企业与政府合作建立应急物资点后的运营收益
T	政府自建应急物资点的建立成本	V	企业单向合作状态(M_1, N_2)下的可获得社会声望
T_1	合作状态下政府所付出的合作建设成本、运营成本	V_1	企业双向合作状态(M_1, N_1)下的可获得社会声望
P_1	双向合作状态(M_1, N_1)下的合作激励价值	R	企业避险运营成本
P_2	单向合作状态(M_1, N_2)下的合作激励价值	R_1	企业处于合作状态下的运营成本
P_3	单向合作状态(M_2, N_1)下的合作激励价值	h	合作感染风险放大系数
f	病毒感染风险	S	企业风险资产价值

2.2. 演化博弈模型的构建

1) 政府与企业的收益矩阵。根据上文的行为策略集, 结合表 1 对模型参数的设定, 可以得到政府和企业四种行为策略组合下的收益支付矩阵, 详见表 2。

Table 2. Revenue matrix of both parties in the game

表 2. 博弈双方收益支付矩阵

	(M_1, N_1)	(M_1, N_2)	(M_2, N_1)	(M_2, N_2)
政府收益	$W_1 - T_1 - P_1$	$W - T - P_2$	$W - T - P_3$	$W - T$
企业收益	$A_1 + P_1 + V_1 - R_1 - hfS$	$A + P_2 - R - fS$	$A + P_3 + V - R - fS$	$A - R - fS$

2) 政府与企业的期望收益。假设政府采取 M_1 策略的概率为 x ($0 \leq x \leq 1$), 则采取 M_2 策略的概率表示为 $1-x$; 企业采取 N_1 策略的概率为 y ($0 \leq y \leq 1$), 采取 N_2 策略的概率则为 $1-y$ 。设 E 为期望收益, E_{11} 为政府采取 M_1 策略的期望收益, E_{12} 为采取 M_2 策略的期望收益, 混合期望收益为 E_1 ; E_{21} 为企业采取 N_1 策略的期望收益, E_{22} 为采取 M_2 策略的期望收益, 混合期望收益为 E_2 。

则政府期望收益表现为:

$$\begin{aligned}
 E_{11} &= y(W_1 - T_1 - P_1) + (1-y)(W - T - P_2) \\
 &= y[(W_1 - W) - (T_1 - T) - (P_1 - P_2)] + (W - T - P_2)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$E_{12} = y(W - T - P_3) + (1 - y)(W - T) = -yP_3 + W - T \tag{2}$$

$$E_1 = xE_{11} + (1 - x)E_{12} \tag{3}$$

企业期望收益表现为:

$$E_{21} = x(A_1 + P_1 + V_1 - R_1 - fhS) + (1 - x)(A + P_3 + V - R - fS) \\ = x[(A_1 - A) + (P_1 - P_3) + (V_1 - V) - (R_1 - R) - fS(h - 1)] + (A + P_3 + V - R - fS) \tag{4}$$

$$E_{22} = x(A + P_2 - R - fS) + (1 - x)(A - R - fS) = xP_2 + (A - R - fS) \tag{5}$$

$$E_2 = yE_{21} + (1 - y)E_{22} \tag{6}$$

3) 政府与企业的复制动态方程。由演化复制动态式 $\bar{x}_i(j) = [y(i, x) - y(x, x)]x_i(j)$ 及式(3)式(6)可得政府与企业复制动态方程如下:

$$F(x) = dx/dt = x(E_{11} - E_1) = x\{E_{11} - [xE_{11} + (1 - x)E_{12}]\} = x(1 - x)(E_{11} - E_{12}) \\ = x(1 - x)\{y[(W_1 - W) - (T_1 - T) - (P_1 - P_2)] + (W - T - P_2) - (-yP_3 + W - T)\} \\ = x(1 - x)\{y[(W_1 - W) - (T_1 - T) - (P_1 - P_2 - P_3)] - P_2\} \tag{7}$$

$$F(y) = dy/dt = y(E_{21} - E_2) = y\{E_{21} - [yE_{21} + (1 - y)E_{22}]\} = y(1 - y)(E_{21} - E_{22}) \\ = y(1 - y)\{x[(A_1 - A) + (P_1 - P_3) + (V_1 - V) - (R_1 - R) - fS(h - 1)] \\ + [(A + P_3 + V - R - fS) - (xP_2 + A - R - fS)]\} \\ = y(1 - y)\{x[(A_1 - A) + (P_1 - P_2 - P_3) + (V_1 - V) - (R_1 - R) - fS(h - 1)] + P_3 + V\} \tag{8}$$

2.3. 演化博弈模型的稳定性分析

演化博弈模型中的稳定状态指政府和企业于策略点的复制行为处于均衡状态, 其策略选择概率将保持不变, 由政府与企业的复制动态方程可得雅克比矩阵 φ 如式(9)所示。

$$\varphi = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - 2x) \left\{ y \begin{bmatrix} (W_1 - W) \\ -(T_1 - T) \\ -(P_1 - P_2 - P_3) \end{bmatrix} \right\} & x(1 - x) \begin{bmatrix} (W_1 - W) \\ -(T_1 - T) \\ -(P_1 - P_2 - P_3) \end{bmatrix} \\ y(1 - y) \begin{bmatrix} (A_1 - A) \\ +(P_1 - P_2 - P_3) \\ +(V_1 - V) \\ -(R_1 - R) \\ -fS(h - 1) \end{bmatrix} & (1 - 2y) \left\{ x \begin{bmatrix} (A_1 - A) \\ +(P_1 - P_2 - P_3) \\ +(V_1 - V) \\ -(R_1 - R) \\ -fS(h - 1) \\ +P_3 + V \end{bmatrix} \right\} \end{bmatrix} \tag{9}$$

演化系统的稳定性可以通过判断雅克比矩阵的局部稳定性得到, 其中雅克比矩阵行列式 $\det(\varphi) = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \times \frac{\partial F(y)}{\partial y} - \frac{\partial F(x)}{\partial y} \times \frac{\partial F(y)}{\partial x}$, 矩阵的迹 $\text{tr}(\varphi) = \frac{\partial F(x)}{\partial x} + \frac{\partial F(y)}{\partial y}$ 。联立式(7)与式(8)令其等于 0, 可得五个复制动态均衡点: $L_1(1,1), L_2(1,0), L_3(0,1), L_4(0,0), L_5(x_0, y_0)$ 。根据演化博弈理论, 当雅克比矩阵行列式 $\det(\varphi) > 0$ 且迹 $\text{tr}(\varphi) < 0$ 时, 均衡点为演化过程的局部渐进稳定点, 五个均衡点的行列式

(det)与迹(tr)如表 3 所示。注: $x_0 = \frac{-(P_3+V)}{[(A_1-A)+(P_1-P_2-P_3)+(V_1-V)-(R_1-R)-fS(h-1)]}$,

$$y_0 = \frac{P_2}{[(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_2-P_3)]}$$

由表 3 可知, 在参数取不同值时, 均衡点的行列式(det)与迹(tr)的符号会发生变化, 均衡点的稳定性分多种情况讨论, 综合以上四种情景, 根据相应参数条件对均衡点进行行列式(det)与迹(tr)迭代, 得表 4。

Table 3. Equilibrium point and their determinants and traces

表 3. 均衡点及其秩与迹

均衡点	行列式与迹	矩阵行列式与迹的表达式
$L_1(1,1)$	Det Tr	$[(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_3)] \times [(A_1-A)+(P_1-P_2)+V_1-(R_1-R)-fS(h-1)]$ $-[(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_3)] - [(A_1-A)+(P_1-P_2)+V_1-(R_1-R)-fS(h-1)]$
$L_2(1,0)$	Det Tr	$P_2[(A_1-A)+(P_1-P_2)+V_1-(R_1-R)-fS(h-1)]$ $P_2 + [(A_1-A)+(P_1-P_2)+V_1-(R_1-R)-fS(h-1)]$
$L_3(0,1)$	Det Tr	$[(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_3)] \times [-(P_3+V)]$ $[(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_3)] - (P_3+V)$
$L_4(0,0)$	Det Tr	$(-P_2)(P_3+V)$ $(-P_2) + (P_3+V)$
$L_5(x_0,y_0)$	Det Tr	$\frac{P_2(P_3+V)[(A_1-A)+(P_1-P_2)+V_1-(R_1-R)-fS(h-1)] \times [(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_3)]}{[(A_1-A)+(P_1-P_2-P_3)+(V_1-V)-(R_1-R)-fS(h-1)] \times [(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_2-P_3)]}$ 0

Table 4. The evolutionary stability analysis

表 4. 演化稳定性分析

情景	条件	均衡点	Det	Tr	局部稳定性
情景一	$(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_3) > 0, P_3+V > 0$ 且 $(A_1-A)+(P_1-P_2)+V_1-(R_1-R)-fS(h-1) > 0$	$L_1(1,1)$	+	-	ESS
		$L_2(1,0)$	+	+	不稳定
		$L_3(0,1)$	-	+,-	鞍点
		$L_4(0,0)$	-	+,-	鞍点
		$L_5(x_0,y_0)$	+,-	0	鞍点
情景二	$(W_1-W)-(T_1-T)-(P_1-P_3) < 0$ 且 $P_3+V > 0$	$L_1(1,1)$	+	+	不稳定
			-	+,-	鞍点
		$L_2(1,0)$	+	+	不稳定
			-	+,-	鞍点
		$L_3(0,1)$	+	-	ESS
	-	+,-	鞍点		
		$L_4(0,0)$	-	+,-	鞍点
		$L_5(x_0,y_0)$	+,-	0	鞍点

Continued

情景三	$P_3 + V < 0$ $(A_1 - A) + (P_1 - P_2) + V_1 - (R_1 - R) - fS(h-1) < 0$ $\cup (W_1 - W) - (T_1 - T) - (P_1 - P_3) < 0$	$L_1(1,1)$	+	+	不稳定
			-	+,-	鞍点
		$L_2(1,0)$	+	+	不稳定
			-	+,-	鞍点
		$L_3(0,1)$	+	+	不稳定
			-	+,-	鞍点
	$L_4(0,0)$	+	-	ESS	
	$L_5(x_0, y_0)$	+,-	0	不稳定	

其中 $L_5(x_0, y_0)$ 为中心点, 当 $x = x_0$, y 为不定向演化, 同理, 当 $y = y_0$, x 为不定向演化, $L_5(x_0, y_0)$ 不具备稳定不动点特征。假设 $L_2(1,0)$ 为演化稳定策略, 因援助效益 $P_2 > 0$, 要满足行列式与迹的稳定条件, 即 $(A_1 - A) + (P_1 - P_2) + V_1 - (R_1 - R) - fS(h-1) > 0$ 且 $P_2 + (A_1 - A) + (P_1 - P_2) + V_1 - (R_1 - R) - fS(h-1) < 0$, 与假设条件相矛盾, 故 $L_2(1,0)$ 难以达到演化稳定要求, 表示当合作激励价值为正值时, 政府的合作意愿很难被企业回绝。现根据表 4 中演化过程的稳定性, 提出以下命题。

命题一: 当 $(W_1 - W) - (T_1 - T) - (P_1 - P_3) > 0$, $P_3 + V > 0$ 且 $(A_1 - A) + (P_1 - P_2) + V_1 - (R_1 - R) - fS(h-1) > 0$ 时, 双方策略会演化至 $L_1(1,1)$ 达到稳定, 政府将选择 M_1 合作策略, 企业将选择 N_1 合作策略。

命题二: 当 $(W_1 - W) - (T_1 - T) - (P_1 - P_3) < 0$ 且 $P_3 + V > 0$ 时, 双方策略会演化至 $L_3(0,1)$ 达到稳定, 政府将选择 M_2 自建策略, 企业将选择 N_1 合作策略。

命题三: 当 $P_3 + V < 0$ 且 $(A_1 - A) + (P_1 - P_2) + V_1 - (R_1 - R) - fS(h-1) < 0 \cup (W_1 - W) - (T_1 - T) - (P_1 - P_3) < 0$ 时, 双方策略会演化至 $L_4(0,0)$ 达到稳定, 政府将选择 M_2 自建策略, 企业将选择 N_2 避险策略。

3. 仿真效验

为了直观地验证不同情景中双方博弈的收敛结果, 本文采用 MATLAB 软件对博弈模型的动态演化过程进行模拟, 现根据不同情景对参数予以赋值, 假设政府自建应急物资点所能获得社会效益 $W = 150$, 投入成本 $T = 100$, 与企业合作所能获得社会效益 $W_1 = 180$, 投入成本 $T_1 = 80$; 企业避险运营所能获得运营收益 $A = 70$, 运营成本 $R = 50$, 与政府合作所能获得运营收益 $A_1 = 80$, 运营成本 $R_1 = 60$ 。另外, 病毒感染风险 $f = 0.5$, 合作感染风险放大系数 $h = 1.2$, 企业风险资产价值 $S = 100$ 。

若合作激励价值 $P_1 = 20$ 、 $P_2 = 10$ 、 $P_3 = -10$, 企业单向合作可获得社会声望 $V = 15$, 双向合作可获得社会声望 $V_1 = 20$ 。此时参数条件与命题一吻合, 政府与企业行为策略随时间变化的演化过程如图 1 所示, 可以看出 $L_1(1,1)$ 为演化稳定点, 即无论政府与企业处于何种初始状态, 最终策略都会收敛于(合作策略, 合作策略)。若 $P_1 = 40$ 、 $P_2 = 20$ 、 $P_3 = -15$, $V = 20$, $V_1 = 25$, 此时参数条件与命题二吻合, 演化过程如图 2 所示, 可知此时 $L_3(0,1)$ 为演化稳定点, 无论政府与企业处于何种初始状态, 最终都会收敛于(自建策略, 合作策略)。若 $P_1 = 30$ 、 $P_2 = 20$ 、 $P_3 = -30$, $V = 15$, $V_1 = 25$, 参数条件与命题三吻合, 演化过程如图 3, 可知此时演化稳定点为 $L_4(0,0)$, 即无论政府与企业处于何种初始状态, 双方策略最终将收敛于(自建策略, 避险策略)。

图 4 刻画了政府与企业于上述三种命题赋值情况下的策略演化路径, 如图所示, 情景一条件下企业的收敛速度要大于政府的收敛速度, 企业表现出更高的合作积极性, 政府的收敛过程具有波动性, 为先走低后走高的趋势。同样的情景三中企业的收敛具有相似的波动, 企业的合作意愿表现为先走高后走低, 最终收敛至 0。

参数的变化影响着收敛过程及收敛结果, 为了进一步验证参数变化对博弈整体的影响, 本文将针对具体参数进行模拟。假设参数基础取值同命题一: 政府自建应急物资点社会效益 $W = 150$, 投入成本 $T = 100$, 与企业合作社会效益 $W_1 = 180$, 投入成本 $T_1 = 80$; 企业避险运营收益 $A = 70$, 运营成本 $R = 50$, 与政府合作运营收益 $A_1 = 80$, 运营成本 $R_1 = 60$, 单向合作社会声望 $V = 15$, 双向合作社会声望 $V_1 = 20$; 合作激励价值 P_1

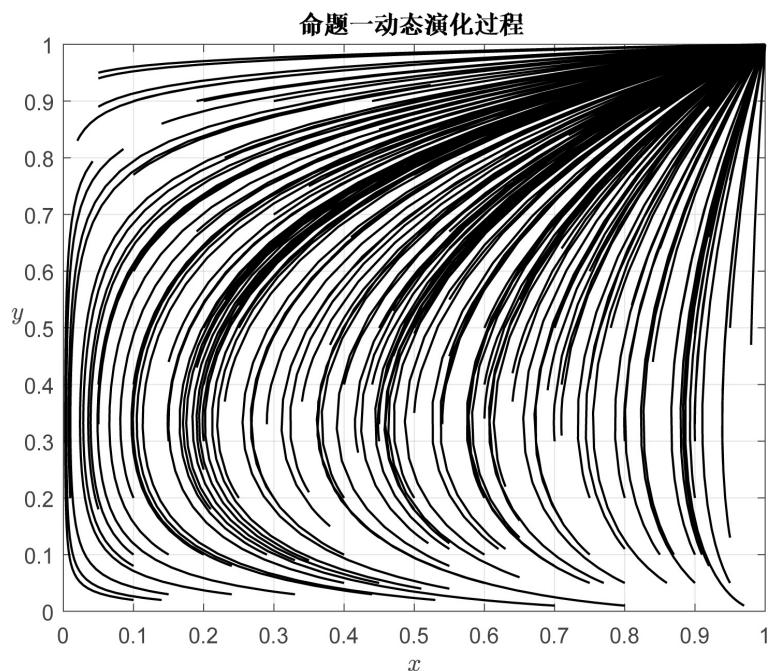


Figure 1. Dynamic evolutionary paths for both strategies in proposition NO.1

图 1. 命题一政府与企业行为策略随时间变化动态演化过程

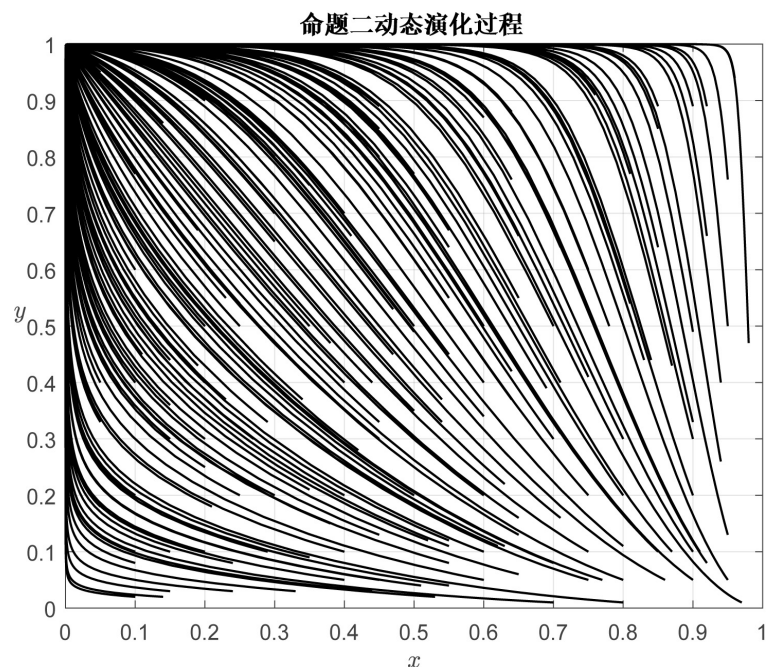


Figure 2. Dynamic evolutionary paths for both strategies in proposition NO.2

图 2. 命题二政府与企业行为策略随时间变化动态演化过程

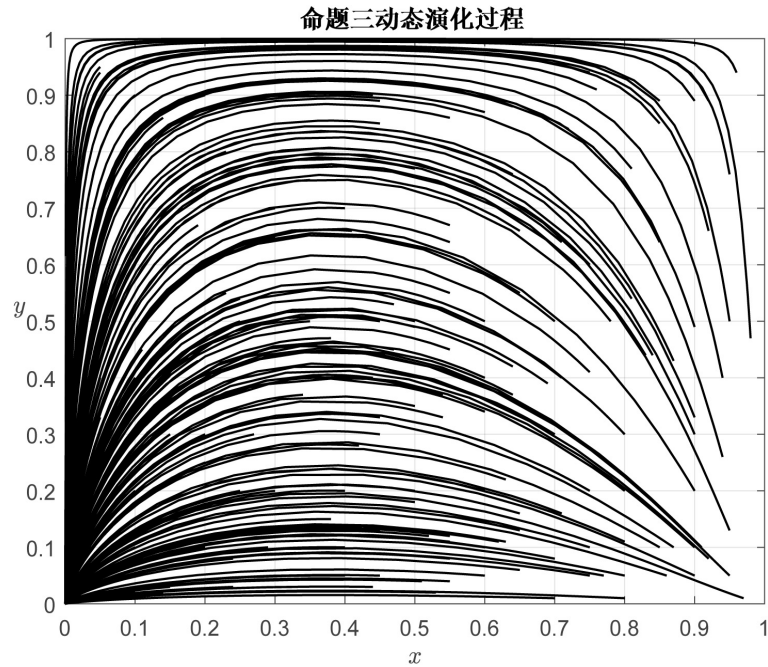


Figure 3. Dynamic evolutionary paths for both strategies in proposition NO.3
图 3. 命题三政府与企业行为策略随时间变化动态演化过程

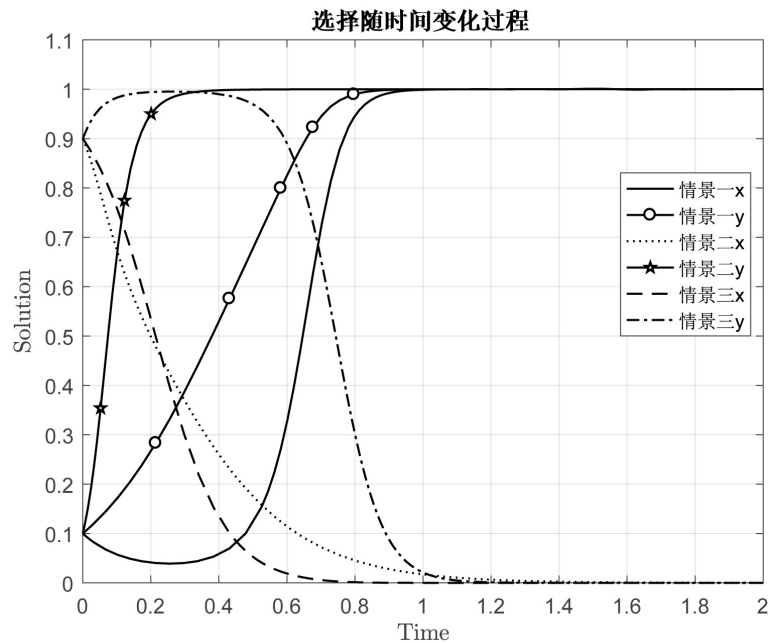


Figure 4. The replication dynamic evolution path of government and enterprise under three scenarios
图 4. 三种情景下政府与企业的复制动态演化路径

$= 20$ 、 $P_2 = 10$ 、 $P_3 = -10$ ，企业病毒感染风险 $f = 0.5$ ，合作感染风险放大系数 $h = 1.2$ ，风险资产价值 $S = 100$ 。

当双方合作收益增大时，政府与企业的策略演化如图 5 所示，对于双方的初始选择概率，我们给予三组初始值(0.1, 0.05, 0.9)，可以看出对于收达成合作结果的收敛，企业的收敛速度要大于政府的收敛速度，这对整体局势是有利的，且随着 W_1 与 A_1 的增大，双方趋于合作的收敛速度明显加快，即双方合作积极

性提高, 且政府在初始状态为 0.1 时表现的“凹陷性”显著减小, 表明政府对于合作策略的演化路径更加明确。

图 6 刻画了合作激励价值(P 值)增大后双方策略的演化趋势, 可以看出, 在基础参数条件下, 双方最终策略均收敛于合作。当 $P_1=30$ 、 $P_2=20$ 、 $P_3=-17.5$, 双方选择“合作策略”的概率取决于演化的初始

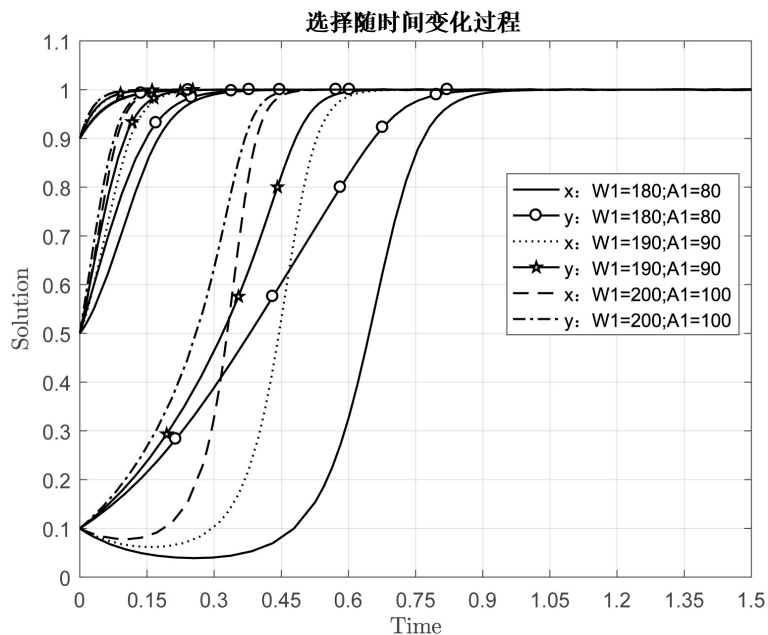


Figure 5. The strategy evolution trend of both parties after the increase of cooperation returns

图 5. 合作收益增加后双方策略演化趋势

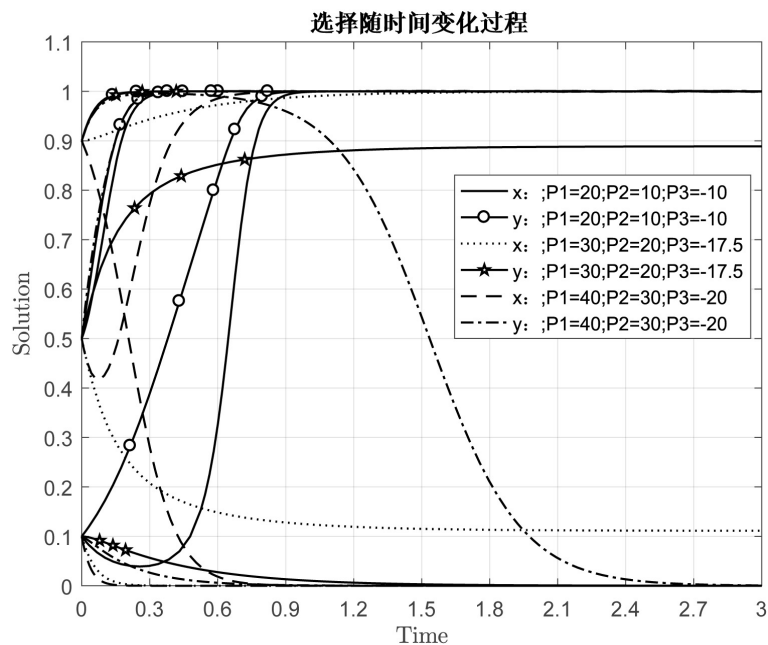


Figure 6. The evolvement trend of mutual aid strategy after the increase of cooperative incentive value

图 6. 合作激励价值增大后双方策略演化趋势

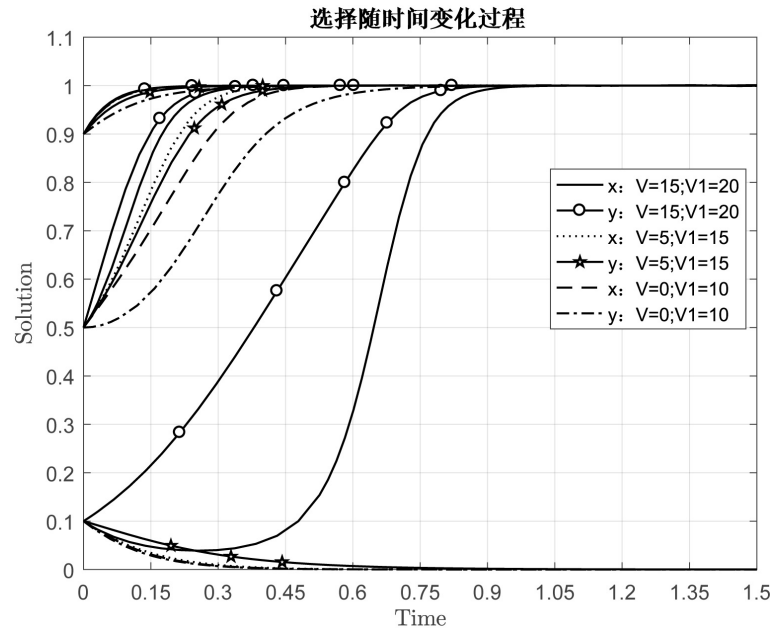


Figure 7. The strategy evolution trend of both parties after the reduction of social prestige
图 7. 可获得社会声望降低后双方策略演化趋势

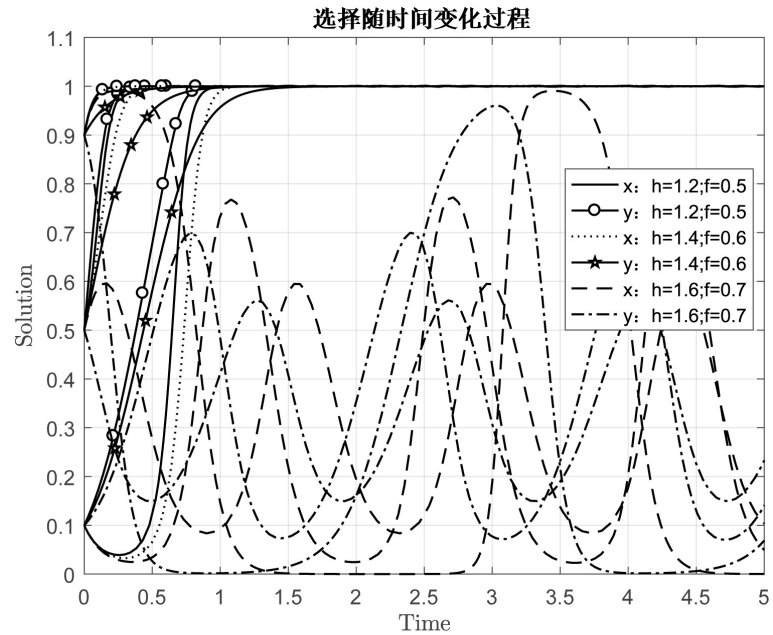


Figure 8. Strategy evolution trend after risk increases
图 8. 风险增大后双方策略演化趋势

概率, 当初始值为 0.1, 政府与企业最终策略收敛于(自建策略, 避险策略); 当初始值为 0.5, 政府与企业选择“合作策略”的概率经过演化后, 分别保持在 0.88 与 0.12; 当初始值为 0.9, 政府与企业最终策略收敛于(合作策略, 合作策略)。随着 P 值继续增大, 当 $P_1=40$ 、 $P_2=30$ 、 $P_3=-20$, 双方选择“合作策略”的概率收敛于 0。可以看出 P 值的增大, 即双方为谋求合作赋予对方的激励增大会消耗付出方的积极性, 过高的 P 值会对合作局面造成阻碍作用。

图 7 刻画了企业可获得声望降低后双方策略的演化趋势, 收敛结果表明, 企业可获得社会声望的变化影响并不是单方的, 随着 V 、 V_1 的减小, 政府与企业选择“合作策略”收敛速度均减缓, 且企业收敛速度的减缓程度尤为明显; 特别的, 当初始概率为 0.1 时, V 、 V_1 的减小使政府与企业的最终策略收敛于(自建策略, 避险策略)。由此可知, 为了促进政府与企业间的合作, 保证企业能够获得一定的社会声望十分关键。

图 8 刻画了病毒感染风险及合作风险放大系数增大后对策略演化趋势的影响, 可以看到当病毒感染风险 f 从 0.5 增至 0.6, 风险放大系数 h 从 1.2 增至 1.4 时, 政府与企业合作的收敛速度明显减缓。随着而当 f 上升至 0.7, h 增至 1.6 时, 政府与企业选择“合作策略”的概率均会随着时间增加而上下震动, 呈现出不收敛的波动性。

4. 结论及建议

在重大公共卫生事件突发背景下, 本文针对政府与企业间的应急物资点招投标合作问题展开研究, 研究表明, 当满足相关条件前提下, 存在三个命题所在的稳定区间, 区间范围内无论初始状态如何, 政府与企业最终策略都会朝着区间对应方向发展。在实践中, 我们希望营造一个政企协同联动以求提高应急效率的环境, 因此, 保证命题一相关条件的满足有利于促进政企间的协同合作。

通过模拟仿真分析, 我们可以看出双方的合作意愿与病毒感染风险、可获得社会声望、合作风险放大系数、合作激励价值等因素有直接关联。过大的风险放大量使政府企业的合作意愿呈现波动, 可获得社会声望的降低将削减双方合作的积极性。特别的, 为谋求合作而存在的合作激励价值, 若过高将会反过来抑制合作的达成。为此我们提出以下建议: 政府可通过加大防控力度且企业严格执行防控措施使风险放大系数降低, 政府通过增加媒体报道等方式保证企业保持积极合作态度的同时可获得一定的社会声望及企业形象增值, 此外, 双方应将合作激励价值控制在一个适度范围内, 以此保证政府与企业间的合作顺利进行。

通过对模型的数据分析, 我们可推论出如下结论及建议: 在博弈过程中, 政府更侧重于合作后的社会效益放大程度, 其次为相关成本变化, 企业更侧重于与自身的合作付出量与可获得的社会声望, 其次为利益与成本的变化。表明企业可通过例如协助政府进行物资管理、物资分配, 提供相关设施设备等方式来放大通过合作所取得的社会效益, 政府方可在保证企业可获得社会声望和管控风险放大量的同时, 协助企业获得更多的社会资源来促进合作的达成。

基金项目

国家自然科学基金(51975432)。

参考文献

- [1] 刘明, 李颖祖, 曹杰, 章定. 突发疫情环境下基于服务水平应急物流网络优化设计[J]. 中国管理科学, 2020, 28(3): 11-20.
- [2] 邓秀琴, 倪卫红, 陈太. 新冠疫情下基于区块链的应急物流和物资保障体系研究[J]. 物流技术与应用, 2020, 25(10): 176-179.
- [3] 许德刚, 许德刚, 李凡, 王露, 郭奕欣, 邢奎杰, 梁腾翔. 优化烟花算法在医疗物资应急调度中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(24): 249-258.
- [4] 唐伟勤, 陈容秋, 赵曼, 张敏. 大规模突发事件快速消费品的应急调度[J]. 科研管理, 2010, 31(2): 121-125.
- [5] 杨继君, 余廉. 面向多灾点需求的应急资源调度博弈模型及优化[J]. 中国管理科学, 2016, 24(8): 154-163.
- [6] 时俊杰. 重大突发公共卫生事件下应急物资优先级的研究[J]. 物流工程与管理, 2021, 43(1): 65-67.
- [7] 安聪琢, 王玖河. 突发性公共卫生事件下纵横结合应急物资配送模式[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23):

10029-10036.

- [8] 冯舰锐, 盖文妹. 应急物资储备点选址多目标优化模型及算法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(6): 64-69.
- [9] 刘浪, 黄有方, 逢金辉. 加权网络应急物资储备点选址方法[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(2): 244-248, 252.
- [10] 许伦辉, 曹宇超, 林培群. 基于融合免疫优化和遗传算法的多物资中心应急选址与调度[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(6): 1-13.
- [11] 张英慧, 汪贻生. 应急物资筹集点动态保障能力评估研究[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 71-77.
- [12] 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.
- [13] 朱姝帆, 桂萍. 重大疫情下冷链应急物流协同配送决策博弈分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 30-36.
- [14] 刘德海, 王维国, 孙康. 基于演化博弈的重大突发公共卫生事件情景预测模型与防控措施[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 937-946.
- [15] 许智琪, 程郁琨, 姚双良. 突发公共卫生事件中地方政府与社会公众间的演化博弈研究[J]. 运筹学学报, 2021, 25(4): 1-14.
- [16] 宋宗宇, 李南枢. 重大公共卫生事件中政府应急征用的法制构造——兼评我国《突发事件应对法》第 12 条[J]. 广东社会科学, 2022(2): 252-263.
- [17] Maynard Smith, J. and Price, G.R. (1973) The Logic of Animal Conflict. *Nature*, **246**, 15-18.
<https://doi.org/10.1038/246015a0>