

米俊, 郝李静, 曲国华, 等. 考虑惩罚成本和恐慌心理的灾后应急救援决策优化研究[J]. 灾害学, 2023, 38(2): 1-11.  
[MI Jun, HAO Lijing, QU Guohua, et al. Research on Post-Disaster Emergency Relief Decisions Considering Punishment Cost and Panic Psychology[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(2): 1-11. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.02.001.]

# 考虑惩罚成本和恐慌心理的灾后应急救援决策优化研究<sup>\*</sup>

米俊<sup>1,2</sup>, 郝李静<sup>2</sup>, 曲国华<sup>1</sup>, 王迪<sup>1</sup>

(1. 山西财经大学 管理科学与工程学院, 山西 太原 030006; 2. 山西财经大学 工商管理学院, 山西 太原 030006)

**摘要:**近年来, 全球重大突发事件多发频发, 如何制定科学合理、高效稳健的灾后应急救援策略十分必要。基于此, 将惩罚成本和恐慌心理新概念纳入灾后应急救援决策研究, 构建政企协议应急救援决策模型, 剖析政企合作灾后应急救援的效用机制与策略选择, 并借助数值算例验证模型的有效性。研究表明: 惩罚成本分担行为和灾后民众恐慌心理程度对灾后应急物资救援效率均存在显著性作用关系。其中, 惩罚成本分担行为在分散决策下强化政府统筹协调功能, 驱动协议企业完善升级, 是促进应急救援系统发挥整体效能的能动因素。而民众恐慌心理程度在集中决策和分散决策情形下均表现为消极制约作用, 缩减应急物资服务需求, 阻碍应急治理体系优化提升。

**关键词:**惩罚成本; 恐慌心理; 应急救援; 决策优化

**中图分类号:** X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)02-0001-11

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.02.001

近年来, 自然灾害、公共卫生、事故灾难等各类突发事件在全球范围内频繁爆发, 如2008年中国汶川大地震以及席卷全球并至今仍在持续的新冠疫情等, 对人类生命与财产安全造成了巨大威胁和损失, 给应急救援与治理工作带来严峻挑战, 暴露出应急管理低效率、弱成效等诸多弊端。紧急灾难数据库(EM-DAT)统计显示, 2021年全球共发生突发灾害432起, 总计造成2700多亿美元的经济损失。根据应急管理部公开数据, 2021年我国全年自然灾害共造成1.07亿人次受灾, 直接经济损失高达3340.2亿元。由此, 灾后应急救援工作被提到了一个新的历史高度, 完善应急救援机制、提升应急救援效率刻不容缓<sup>[1]</sup>。新形势下, 随着应急救援关注度的不断提升, 面向多方协作的资源选择与决策优化的重要性日益凸显, 《中华人民共和国突发事件应对法》与《“十四五”应急救援力量建设规划》均强调了构建稳定高效的政企灾后应急救援协同机制的重要性。政企协作共赢成为灾后应急救援发展的必然趋势, 对于增强应急救援的协调性、整体性与高效性具有重要意义<sup>[2-6]</sup>。

大规模公共突发事件的爆发, 在破坏社会经济平稳发展的同时, 不可避免会给受灾民众造成严重的负面心理影响, 民众紧张、焦虑等异常情绪最终演变为恐慌心理甚至极端非理性行为, 对社会安全稳定构成严重威胁。部分学者聚焦于恐慌心理视角下的应急物资分配调度优化问题, 使用风险决策和

损失函数刻画痛苦感知成本且将人员的心理影响与行为作为影响因素进行量化研究<sup>[7-9]</sup>。还有学者则针对资源短缺和需求不确定情境, 考虑受灾群众生理及心理因素, 以救灾经济成本和灾民恐慌心理最小化为目标导向, 引入不同实证模型进行了大量实证研究, 探索应急救援效率与效能的提升路径<sup>[10-15]</sup>。此外, 恐慌心理的产生会造成资源浪费、监管受阻、救援滞后, 由此带来相应的惩罚成本, 即对灾民因缺陷物资需求而遭遇心理创伤的经济衡量<sup>[16-17]</sup>。关于心理惩罚成本, 国外学者对灾民心理惩罚成本进行定量刻画, 构建集成应急救援网络, 致力于研究灾民疏散路径选择和临时安置点选址决策优化问题<sup>[18-19]</sup>。相比之下, 国内学者们则引入灾民的心理承受代价作为惩罚成本, 结合救灾经济成本建立灾民疏散及物资分派的多目标模型, 或重点研究突发灾害下灾民对风险的感知能力<sup>[20-22]</sup>。关于其他惩罚成本, 部分学者综合考虑应急物流系统配送成本和时间惩罚成本, 构建多目标应急救援规划模型探究应急物资分配调度问题, 或多维度探析社会惩罚成本、缺货惩罚成本及成本平衡关系<sup>[16-17, 23-26]</sup>。

通过梳理现有文献发现, 其一, 已有基于政企合作的应急救援研究文献较为零散和笼统, 且较多研究应急物资储备策略, 对政企协议应急救

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2022-10-24 修回日期: 2023-01-17

基金项目: 国家社会科学基金一般项目“区块链背景下重大突发事件应急物资保障体系构建与效能提升研究”(22BJY173)

第一作者简介: 米俊(1974-), 男, 汉族, 山西忻州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事应急战略决策与知识创新研究。

E-mail: mijungood@126.com

通信作者: 郝李静(1996-), 女, 汉族, 山西忻州人, 硕士生, 主要从事应急决策与知识创新研究。E-mail: 1838064551@qq.com

援决策的影响机理缺乏关注。其二,以往研究通常局限于考虑救援经济成本,对惩罚成本的探讨相对匮乏,甚少涉及痛苦惩罚成本以及声誉惩罚成本。其三,已有文献侧重研究惩罚成本和恐慌心理的单向机制,亟待补充二者结合的灾后应急救援决策优化问题的研究。鉴于此,本文在重大突发事件背景下,融合灾民心理特征、资源限制等现实因素,围绕惩罚成本和恐慌心理概念,构建政企协议灾后应急救援决策模型,力图理清恐慌心理程度与惩罚成本分担行为对整个应急供应链救援决策的作用机理,剖析集中决策和分散决策下的应急救援供应链系统效用最大化问题,进而探寻灾后应急救援决策优化策略。本研究有利于充分发挥政企联合灾后应急救援的优势与效果,提高重大突发应急物资供应与需求匹配能力,提升灾后应急救援系统整体效率,推动我国应急管理体系现代化建设。

## 1 问题描述及模型设计

### 1.1 问题描述

政企协议应急供应链系统是由政府主导,协议企业参与的应急物资调配供应体系<sup>[27]</sup>,探析灾后应急救援决策优化问题,涉及政府、应急物资生产企业(简称协议企业)和受灾民众三个主体<sup>[28]</sup>。政府经评估审核确定合格的应急物资生产企业作为应急物资主要供应单位,在应急准备期对其实施督促监管,在应急响应期按约向其采购物资;协议企业作为应急物资生产商,为应急救援供应链系统供产供能,提供应急物资强力支撑与保障;而受灾民众作为受援主体,受时间的紧迫性、环境的复杂性及服务缺陷性影响极易产生恐慌心理,势必会给应急救援活动带来惩罚成本,阻碍应急救援的响应能力与处置效率。本文拟构建政企协议应急供应链决策模型,以应急物资供应流程视角为切入口,探讨集中决策和分散决策下的政企协议应急救援供应链系统效用最大化问题(图1),旨在探索、厘清并验证恐慌心理和惩罚成本与应急救援决策之间的影响关系与逻辑关联,为灾后应急救援决策优化提供清晰的实现路径与参考策略,推动政企双方建立长期稳定的常态化合作关系。

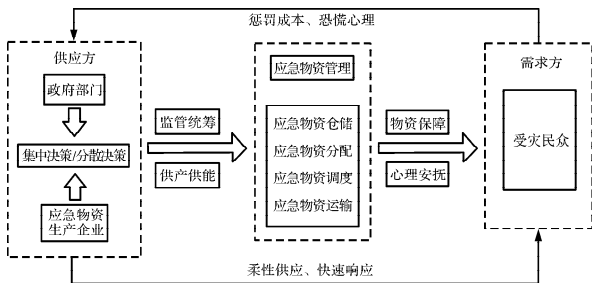


图1 政企协议应急救援供应链系统框架图

### 1.2 模型假设

本文构建的模型中包含一个政府和一个协议企业,双方构成一对一的两级应急物资供应链系统。需要明确的是,政府通过市场化手段而非行政手段与企业展开合作<sup>[6,27,29-30]</sup>。为了使得本研究提出的政企协议灾后应急救援决策模型具有现实意义,参考现有相关研究文献,下面作出如下假设:

(1)当缺陷应急物资服务发生时,假设协议企

业会对自身应急物资服务进行改进加工,额外改进加工成本为 $b = \frac{1}{2}h\alpha^2$ ,  $h$ 为额外加工成本系数。

(2)假设预期缺陷应急物资服务会产生负效用,相应的,惩罚成本与总负效用相关联。通常情况下,惩罚成本主要来源于严重恐慌心理,因此本文着重考虑痛苦惩罚成本与总效用的关系,而忽略名誉惩罚成本(一般恐慌心理)对负效用的贡献,即 $\beta(n-c)$ 表示净负成本<sup>[31]</sup>。

(3)本文参考朱莉等<sup>[32]</sup>相关文献,构造“痛苦惩罚成本”来度量灾民遭受严重心理创伤而采取极端行为的心理代价,且构造“名誉惩罚成本”来描述灾民因缺陷应急服务产生消极负面情绪的心理成本。假设痛苦感知的衡量建立在可用经济损失量化灾民遭遇痛苦的基础上。对于应急物资服务需求未满足问题,民众极易产生恐慌心理,其中, $\beta \in (0, 1)$ 比例的民众会采取非理性甚至极端行为,即存在严重恐慌心理。基于福利经济学的角度,借鉴痛苦感知的系列研究<sup>[33-35]</sup>,本研究假设严重恐慌心理产生的痛苦惩罚成本 $c$ ;相比前者而言, $(1-\beta)$ 比例的民众恐慌心理倾向相对较弱,主要表现为发表消极言论,存在质疑、批判等负面情绪,即存在一般恐慌心理,对应产生名誉惩罚成本 $e$ 。

(4)假设最终的物流需求为 $D = 1 - p - (1-\alpha)\beta(n-c)$ ,  $p$ 为应急物资服务的单位市场价值,后文中用作表示政府提供应急物资服务的单位价值, $(1-\alpha)\beta(n-c)$ 为缺陷应急物资服务带给受灾民众的预期净负成本。

(5)假设政府与供应商二者共同承担缺陷应急物资服务带来的惩罚成本, $s \in (0, 1)$ 表示协议企业的惩罚成本分担比例,而 $(1-s)$ 表示政府承担的份额。

### 1.3 符号说明及参数约束

#### 1.3.1 模型参数设置

本文所涉及的模型参数如表1所示。

#### 1.3.2 符号说明及参数约束

为使模型符合实际,相关参数关系设置如下:

(1) $\alpha$ 衡量协议企业提供的应急物资服务保障水平, $\alpha \in (0, 1)$ 。

(2) $z$ 表示民众对于应急物资服务的评价感知,且服从 $[0, 1]$ 均匀分布,则 $E_z = \frac{1}{2}$ ,表示平均满意程度,即应急物资服务达到满意标准的界定。

(3) $n$ 表示协议企业的缺陷应急物资服务(未满足应急物资服务)给受灾民众带来的预期负效用,当 $n \leq \frac{1}{2} = Ez$ 时,表明民众对应急物资服务持

满意态度,反之, $n \geq \frac{1}{2}$ 则说明民众对应急物资服务持质疑和不认可等负面评价<sup>[31]</sup>。

(4) $e \leq c \leq n$ ,其中 $e \leq c$ 表示一般恐慌心理带来的声誉惩罚成本小于因严重恐慌心理产生的痛苦惩罚成本; $c \leq n$ 表示痛苦惩罚成本低于缺陷应急物资服务所带来的总负效用<sup>[31]</sup>。忽略不计与缺陷应急服务无关的其他成本,由此可得,可得每单位缺陷应急物资服务给政企协议供应链系统带来的总损失为 $G = \beta c + (1-\beta)e$ , $\beta c$ 为严重恐慌心理带来的总痛苦惩罚成本, $(1-\beta)e$ 为一般恐慌心理带来的总声誉惩罚成本。

(5) $v = p - u$ 为政府提供单位应急物资服务价值除去服务成本所得,即政府提供的单位应急物资服务净值。

表 1 参数设置

符号	定义	符号	定义
$\alpha$	协议企业应提供的应急物资服务保障水平	$D$	应急物资服务需求
$p$	政府提供应急物资服务的单位价值	$G$	单位未满足物资需求服务带来的总惩罚成本
$u$	协议企业的单位服务成本	$s$	惩罚成本中协议企业的分担比例
$v$	政府提供应急物资服务的单位净值	$h$	协议企业的加工成本系数
$Z$	群众对物资服务水平的评价感知	$\Pi_k^D$	协议企业在分散决策下的效用
$\beta$	有严重恐慌心理的群众比例	$\Pi_G^D$	政府在分散决策下的效用
$c$	单位未满足物资需求服务带来的痛苦惩罚成本	$\Pi_c^D$	政企协议供应链系统在分散决策下的总效用
$e$	单位未满足物资需求服务带来的声誉惩罚成本	$\Pi_c^C$	政企协议供应链系统在集中决策下的总效用
$n$	单位未满足物资需求服务给群众带来的预期负效用		

#### 1.4 模型构建

本文考虑两种决策方式下的模型构建: 集中决策和分散决策。

集中决策情形下, 政府和协议企业相互联动, 在信息、资源共享的条件下实现系统化协同运作, 进行一体化决策与服务(图 2), 具体表现为应急救援供应链系统向受灾民众提供筹集成本为  $u$ 、服务价值为  $p$  的应急物资服务, 可得总效用函数为:

$$\pi_c = \pi_E + \pi_G = [p - (1 - \alpha)G][1 - p - (1 - \alpha)\beta(n - c)] - \frac{1}{2}h\alpha^2. \quad (1)$$

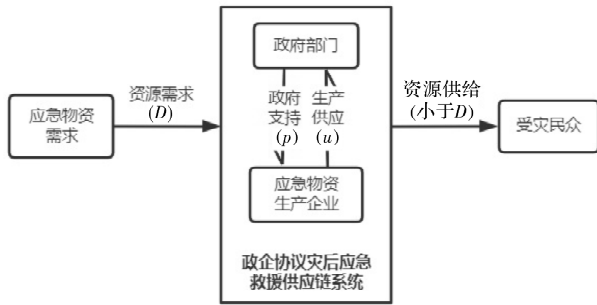


图2 集中决策下政企协议应急救援供应链系统运作图

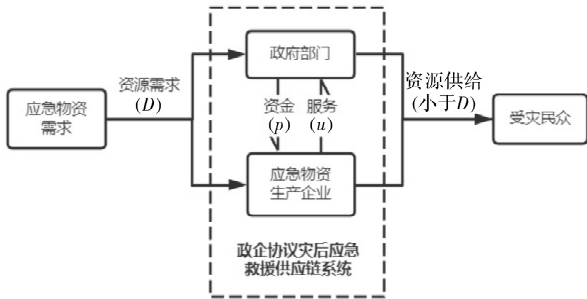


图3 分散决策下政企协议应急救援供应链系统运作图

在分散决策情形下, 重点聚焦由相互独立的政府和协议企业构成的应急救援供应链系统的决策优化问题, 可以视为一个以政府为主导者, 协议企业为跟随者的 Stackelberg 博弈。具体而言, 在应急救援决策第一阶段, 先由政府决定提供给受灾民众的单位应急物资服务的价值, 第二阶段再由协议企业来决定面向政府的服务费用及应急物资服务保障水平(图 3)。需要说明的是, 在实施应急救援过程中, 政府以  $u$  成本从协议企业采购应急

物资, 而后发放给受灾民众, 继而表现为  $p$  的服务价值。忽略不计与政企协议机制完善优化无关的成本, 可得政府与协议企业的预期效用:

$$\pi_G = [p - u - (1 - s)(1 - \alpha)G][1 - p - (1 - \alpha)\beta(n - c)]; \quad (2)$$

$$\pi_E = [u - s(1 - \alpha)G][1 - p - (1 - \alpha)\beta(n - c)] - \frac{1}{2}h\alpha^2. \quad (3)$$

式(2)表示政府提供应急物资服务单位净效用与应急物资需求量相乘所得的政府应急救援总效用; 式(3)为协议企业提供应急物资服务单位收益与应急物资需求量相乘所得总收益再除去额外加工成本所得的应急救援总利润。其中,  $(1 - \alpha)G$  表示单位缺陷应急物资服务的预期惩罚成本,  $s(1 - \alpha)G$  表示协议企业分担的预期惩罚成本,  $(1 - s)(1 - \alpha)G$  则表示政府分担的预期惩罚成本,  $(1 - \alpha)\beta(n - c)$  为单位缺陷应急物资服务的预期负效用。

## 2 模型求解与分析

命题 1. 在集中决策情形下, 若  $h > \frac{\beta(n - c) + G}{2}$ , 则最优应急物资服务保障水平  $\alpha^C$ 、

政府提供的最优单位应急物资服务价值  $p^C$ 、最优应急物资服务需求量  $D^C$  和政企协议应急供应链系统的最大服务效用  $\pi_c^C$  分别为:

$$\alpha^C = \frac{[\beta(n - c) + G][1 - (\beta(n - c) + G)]}{2h - [\beta(n - c) + G]^2}; \quad (4)$$

$$p^C = \frac{h[1 + G - \beta(n - c)] + G[\beta(n - c) + G]}{2h - [\beta(n - c) + G]^2}; \quad (5)$$

$$D^C = \frac{h[1 + G - \beta(n - c)]}{2h - [\beta(n - c) + G]^2}; \quad (6)$$

$$\pi_c^C = \frac{h[1 - G - \beta(n - c)]^2}{2[2h - [\beta(n - c) + G]^2]}. \quad (7)$$

命题 2. 在分散决策情形下, 政府作为核心决策主体, 与协议企业系分散合作关系, 基于此采用逆推归纳法求解应急供应链系统总效用函数, 分别得出协议企业的最优物资服务保障水平  $\alpha^D$ 、最优应急物资服务费用  $u^D$  以及最优单位应急物资服务价值  $p^D$ , 政府的最大服务效用  $\pi_G^D$ , 协议企业的最大服务效用  $\pi_E^D$  以及政企协议供应链系统整体最大总效用  $\pi_c^D$ 。

$$\alpha^D = \frac{[\beta(n - c) + sG][1 - (\beta(n - c) + G)]}{2[2h - [\beta(n - c) + G][\beta(n - c) + sG]]}; \quad (8)$$

$$u^D = \frac{h[1 - (\beta(n-c) + G) - (1-4s)G] - sG[1 + \beta(n-c) + 2G][\beta(n-c) + G + sG]}{2[2h - [\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + sG]]}; \quad (9)$$

$$v^D = \frac{2h[1 - \beta(n-c) + G - 2sG] + (sG + \beta(n-c))[sG^2 - \beta^2(n-c)^2 - G(2-s-\beta(n-c) - s\beta(n-c))]}{2[2h - [\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + sG]]}; \quad (10)$$

$$p^D = \frac{3h(1 - \beta(n-c)) + (sG + \beta(n-c))[sG^2 - \beta^2(n-c)^2 - G(2-s-\beta(n-c) - s\beta(n-c))]}{2[2h - [\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + sG]]} - \frac{sG[1 + \beta(n-c) + 2G][\beta(n-c) + G + sG]}{2[2h - [\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + sG]]}; \quad (11)$$

$$D^D = \frac{h[1 - (\beta(n-c) + 2G)]}{2[2h - [\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + sG]]}; \quad (12)$$

$$\pi_E^D = \frac{h[1 - (\beta(n-c) + 2G)]^2[2h - (sG + \beta(n-c))^2]}{8[2h - [\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + sG]]^2}; \quad (13)$$

$$\pi_G^D = \frac{h[1 - (\beta(n-c) + 2G)]^2}{4[2h - [\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + sG]]^2}; \quad (14)$$

$$\pi_C^D = \frac{h[1 - (\beta(n-c) + 2G)]^2[6h - (sG + \beta(n-c))(2h + 3\beta(n-c) + sG)]}{8[2h - [\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + sG]]^2}. \quad (15)$$

## 2.1 惩罚成本分担系数的影响

集中决策条件下,政府与协议企业处于柔性合作状态,相互联结、共同协作,并未进行成本分担行为,因此惩罚成本分担比例对决策结果不存在显著作用关系,这里不做分析。

命题3.分散决策条件下,惩罚成本分摊系数 $s$ 越大,民众应急物资服务需求 $D^D$ 和政府提供的单位应急物资服务净值 $v$ 趋于降低,相反,协议企业的单位服务成本 $u$ 与应急物资服务保障水平 $\alpha$ 则趋于增加。

究其原因,在分散决策下,惩罚成本分担系数 $s$ 越大,固然协议企业分担的惩罚成本越多,反之政府分担的份额则越少。因此政府会出于经济理性进行统筹调控,降低应急物资单位服务净值 $v$ ,保障政府收支变动处于合理范围内,以维持政企协议供应链系统总效用的平衡状态;而协议企业为弥补惩罚成本带来的负面损失,提升应急救援增量价值,一方面会适当提高单位应急物资服务费用 $u$ ,另一方面,则努力进行生产服务质量改进,提高应急物资保障水平 $\alpha$ ,以满足应急保障需求,提高物资供给能力。

命题4.分散决策情形下,随着惩罚成本分担系数 $s$ 的增加,协议企业效用 $\pi_E^D$ 、政府效用 $\pi_G^D$ 、政企协议机制的总效用 $\pi_C^D$ 均得到显著提升。

在分散决策方式进行惩罚成本分担,强化了激励督促机制的作用效果,推动了政府和协议企业实现双赢局面,显著提高了政企协议机制整体以及各组成的效用成果,有助于进一步完善政企应急管理体系,提升应急救援效率及保障供应能力,实现对应急管理机制全方位、系统性的科学调整和规划。

## 2.2 群众恐慌心理比例的影响

### 2.2.1 集中决策下有严重恐慌心理的民众比例 $\beta$ 对结果的影响

由于 $h > \frac{\beta(n-c) + G}{2}$ , 且 $\frac{\beta(n-c) + G}{2} < \frac{1}{2}$ , 对式(4)到式(15)进行求导,可得命题5到命题9。

命题5.当 $\beta$ 属于低值范围时,有 $\frac{\partial \alpha^C}{\partial \beta} > 0$ ,而当 $\beta$ 值超过一定水平时,则可得 $\frac{\partial \alpha^C}{\partial \beta} < 0$ ,即随着民众产生严重恐慌心理比例的提高,协议企业应急物资服务保障度 $\alpha^C$ 先升后降。此外, $\frac{\partial p^C}{\partial \beta} < 0$ , $\frac{\partial D^C}{\partial \beta} < 0$ , $\frac{\partial \pi_C^C}{\partial \beta} < 0$ ,即民众产生严重恐慌心理的比例越

大,政府提供应急物资服务的单位价值 $p^C$ 越低,民众的应急物资服务需求 $D^C$ 随之缩减,双方利益受损从而导致政企协议供应链系统整体效用 $\pi_C^C$ 也呈下降趋势。

出现上述现象的原因可能在于,在前期阶段,民众严重恐慌程度增加,对协议企业产生了正向激励作用,督促其进行生产质量改进,应急物资服务保障水平随之提高;后期阶段,在柔性合作下,虽然缺陷应急物资服务产生的惩罚成本大多由协议企业承担,但是由于缺乏明确且严格的惩罚措施,再加上部分惩罚成本带来的负面影响被参加政府所分担,从而削弱了惩罚成本对于协议企业的积极影响,激励效果甚微,导致协议企业应急物资保障程度不升反降的局面。从整体维度来看,民众出现严重恐慌心理,一方面会引发社会信任危机,对应急物资服务需求产生反向制约作用,另一方面,对社会负面情绪的协调处理无形中增加了潜在管理成本。在此基础上,为抑制严重恐慌心理的蔓延,协议企业会倾向于相应减少向政府收取的应急服务费用来缓解成本压力,从而降低应急物资的市场价值即政府向民众提供的单位服务价值,以期化解重大突发事件下社会公众的信任危机,通过协同经济的增量效应提高应急物资救援水平。

### 2.2.2 分散决策下有严重恐慌心理的民众比例 $\beta$ 对结果的影响

命题6. $\frac{\partial \alpha^D}{\partial \beta} < 0$ , $\frac{\partial u^D}{\partial \beta} > 0$ , $\frac{\partial v^D}{\partial \beta} < 0$ , $\frac{\partial D^D}{\partial \beta} < 0$ ,即民众产生恐慌心理的比例越大,协议企业的应急物资服务保障度 $\alpha^D$ 和面向政府的应急物资费用 $u^D$ 呈上升趋势,与之不同的是,政府的最优单位服务净值越低以及最优物资服务需求则呈下降趋势。

与集中决策情形分析相类似,在分散决策下民众严重恐慌心理对协议企业应急物资服务保障程度与面对政府的服务费用均具有正向影响,原因解释不再赘述。但值得注意的是,在政府和协议企业进行分散合作背景下,民众产生严重恐慌心理的比例越大则意味着政府惩罚成本负担越重,再加上协议企业应急服务费用的加压,双重作用致使政府在应急反应速度、应急资源配置、应急处置效率等方面步入“瓶颈期”,削减了政府向民众提供的单位应急服务净效用。

命题7. $\frac{\partial \pi_G^D}{\partial \beta} < 0$ , $\frac{\partial \pi_E^D}{\partial \beta} < 0$ , $\frac{\partial \pi_C^D}{\partial \beta} < 0$ ,即民众产生恐慌心理的比例越大,使得协议企业的最大

效用  $\pi_E^D$ 、政府的最大效用  $\pi_G^D$ 、政企协议供应链系统的整体效用  $\pi_C^D$  均趋于下降。

究其原因,一方面,如命题6所述,民众严重恐慌心理比例的增加削减政府单位应急服务净效用,抑制应急物资服务需求,导致应急资源的低效配置,间接致使政府应急救援总效用降低;另一方面,民众恐慌心理的加重虽然会释放激励监管效应,提供必要的经济动力,但也只能在一定程度上补偿惩罚成本,不能完全弥补其所产生的负效用,所以最终协议企业的应急总效用整体仍表现为下降趋势。显然,政企协议供应链系统整体效用发展趋势也趋同于二者,与自变量呈现负相关关系。

### 2.3 比较分析

命题8. 关注惩罚成本分担比例时,与分散决策相比,集中决策下的应急物资保障水平  $\alpha^C$ 、应急物资服务需求  $D^C$  都相对更优,且集中决策下的政企协议机制整体效用  $\pi_C^C$  也表现出显著优势。

经分析可得,  $\alpha^C > \alpha^D$ ,  $D^C > D^D$ ,  $\pi_C^C > \pi_C^D$ 。

由上可得,在分散决策下进行惩罚成本分担可有效提升应急救援效率和能力,提高整个政企协议供应链系统以及各组成的实际效用价值,有利于实现政企双方的协同联动与合作双赢。但相比较而言,集中决策下应急供应链系统整体效用提升效果更显著,在资源利用与协调调度方面具有明显优势,是实现应急物资救援工作效用最大化的更优选择。

命题9. 关注民众严重恐慌心理时,就应急物资保障水平和应急物资服务需求而言,集中决策为首要选择。值得一提的是,关注政企协议应急供应链系统整体效用时,则分散决策是更优选择。

一般地,集中决策下政企双方进行一体化协同运作,对灾民应急需求回应和反馈接收更及时和高效,具备较高的资源整合能力与资源利用效率优势。但不可否认的是,相较于集中决策,分散决策下政企双方处于分散合作状态,能有效督促政府进行监管调控,激励协议企业进行质量改进

与升级,最大程度发挥应急资源的救灾价值,对政企协议供应链系统整体效用的提升具有更显著的作用,救灾优越性明显。

## 3 数值算例

为了进一步厘清并验证集中决策和分散决策下惩罚成本和恐慌心理对应急救援供应链系统效用的影响关系,在满足模型基本假设的前提下,综合考虑本研究的约束条件,本文运用 matlab2016b 软件进行数值仿真分析,假设相关参数如下:

有严重恐慌心理的民众比例( $\beta$ )为0.2,单位缺陷应急物资服务带来的痛苦惩罚成本( $c$ )为0.5,单位缺陷应急物资服务给群众带来的预期负效用( $n$ )为1,单位缺陷应急物资服务带来的总惩罚成本( $G$ )为0.3,协议企业的生产服务改进成本系数( $h$ )为50,协议企业分担的惩罚成本比例( $s$ )设为0.6。

### 3.1 集中决策

如前文所述,集中决策下,不存在惩罚成本分担行为,因此本研究着重分析集中决策下严重恐慌心理比例 $\beta$ 对各决策变量、各组成效用及政企协议供应链系统整体效用的影响规律。

如图4所示,在柔性合作情形下,随着民众严重恐慌心理比例增加,协议企业应急物资保障水平发展趋势呈现“倒U形”分布,出现向下的突变转折,而包含政府单位应急物资服务价值、应急物资需求以及应急供应链系统整体效用在内的其他变量的变化轨迹均相对稳定,均呈现反作用关系趋势。换言之,协议企业的服务保障水平存在阈值限制,随民众严重恐慌心理的增加先提高后降低,而应急物资服务需求和单位应急物资服务效用则受到显著的负面约束作用,最终造成政府、协议企业以及政企协议供应链系统整体效用处于反向变动趋势,抑制作用明显。

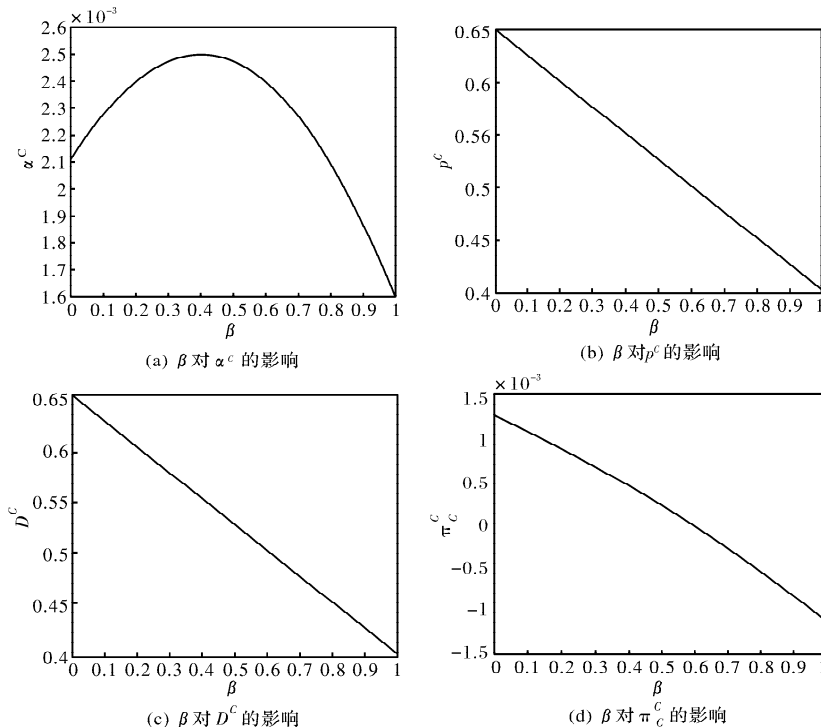


图4 集中决策下 $\beta$ 对各变量的影响研究示意图

### 3.2 分散决策

#### 3.2.1 严重恐慌心理比例 $\beta$ 的影响

如图 5 所示, 在分散决策下, 协议企业的应急物资服务保障水平和服务费用、政府单位应急物资服务的净效用以及应急物资服务需求均是民众严重恐慌心理比例的减函数。换言之, 民众严重恐慌心理比例越高, 上述变量无一例外均呈反向变动趋势, 受到显著消极影响。

分析图 6, 相关研究变量的变化曲线虽出现小幅度振荡, 但整体均与自变量呈反向变动趋势。显然, 民众严重恐慌心理制约了协议企业、政府部门及政企协议供应链系统整体的应急实际效用价值, 前后者存在显著反相关关系。

#### 3.2.2 惩罚成本分担系数 $s$

如图 7 所示, 随着惩罚成本分摊比例  $s$  的增大, 协议企业提高了面向政府的服务费用和自身应急服务保障水平。相反的是, 政府每单位应急

物资服务价值则显著降低, 且民众应急物资服务需求受到明显约束, 严重缩减。纵观全局, 整体变量增减幅度相对稳定。

如图 8 所示, 惩罚成本分担比例  $s$  与各效用函数均呈正线性关系。也就是说, 随着惩罚成本分担比例  $s$  增大, 为矫治利益失衡现象, 应急物资企业一方面提高服务费用额度, 另一方面重视生产管理的改造升级, 综合驱动应急服务的提升优化。而基于政府视角来看, 虽然服务成本耗费有所增多, 但由于利润的增长幅度远大于服务成本的增长幅度, 再加上惩罚成本分担压力趋于减轻, 政府应急救援效用最终表现为积极的作用效果。可以发现, 政企协议应急救援供应链系统整体效用变化规律亦之, 最终呈现正向上升趋势, 总体实现了供应链系统成员收益帕累托改善。

总体来看, 以上数值模拟的结果基本与命题相符, 验证了本研究模型的有效性。

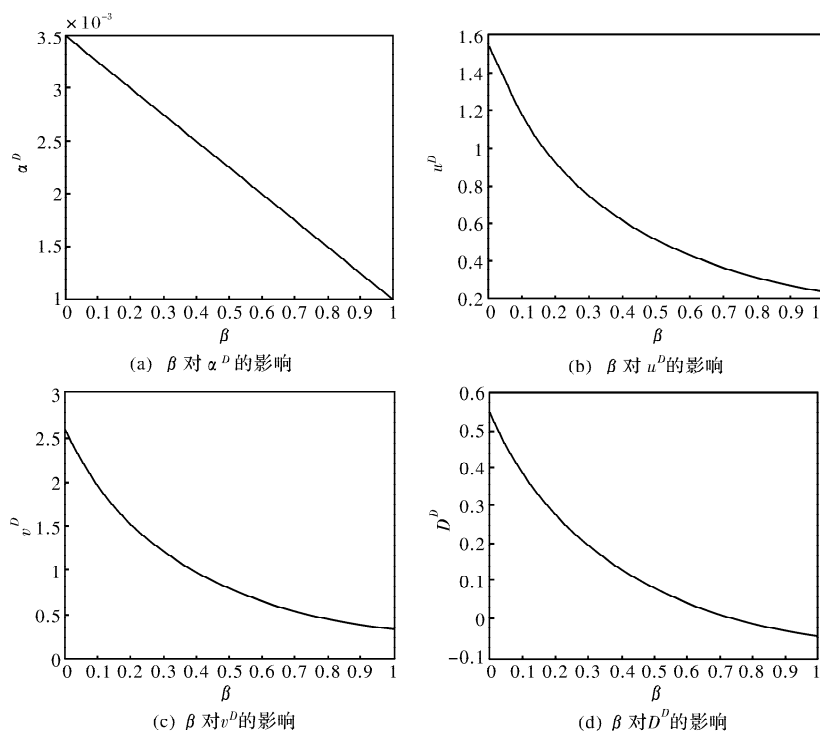


图 5 分散决策下  $\beta$  对各变量的影响研究示意图

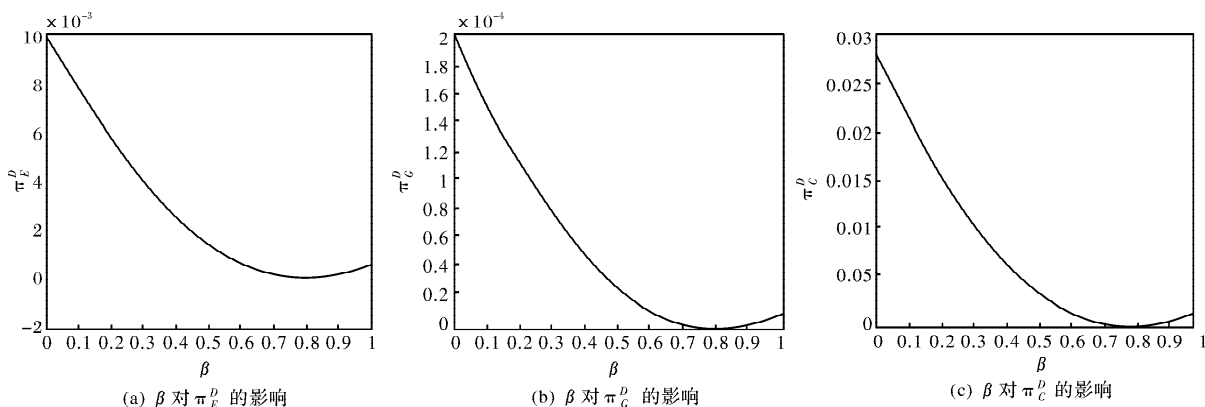
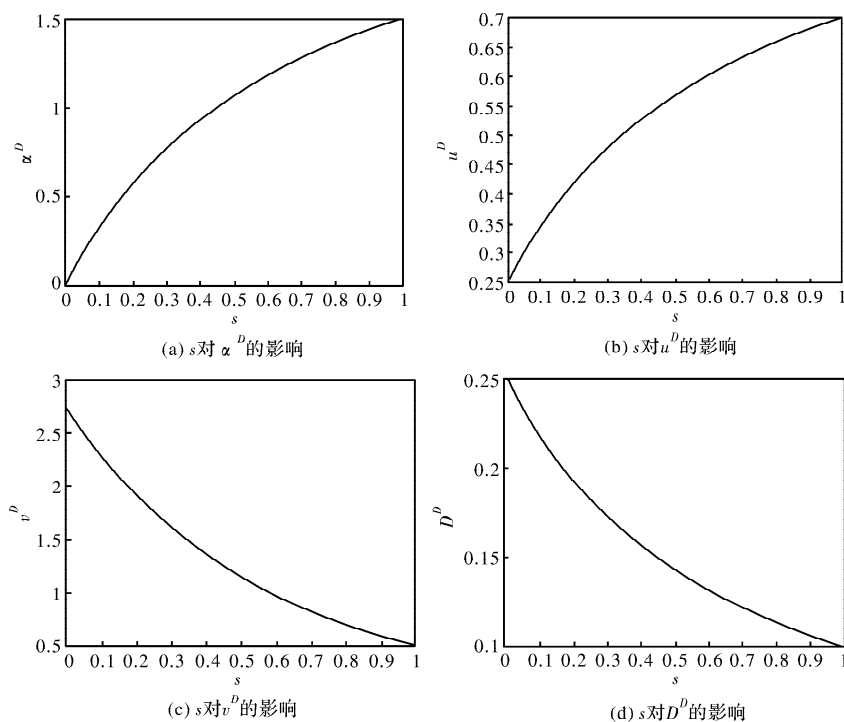
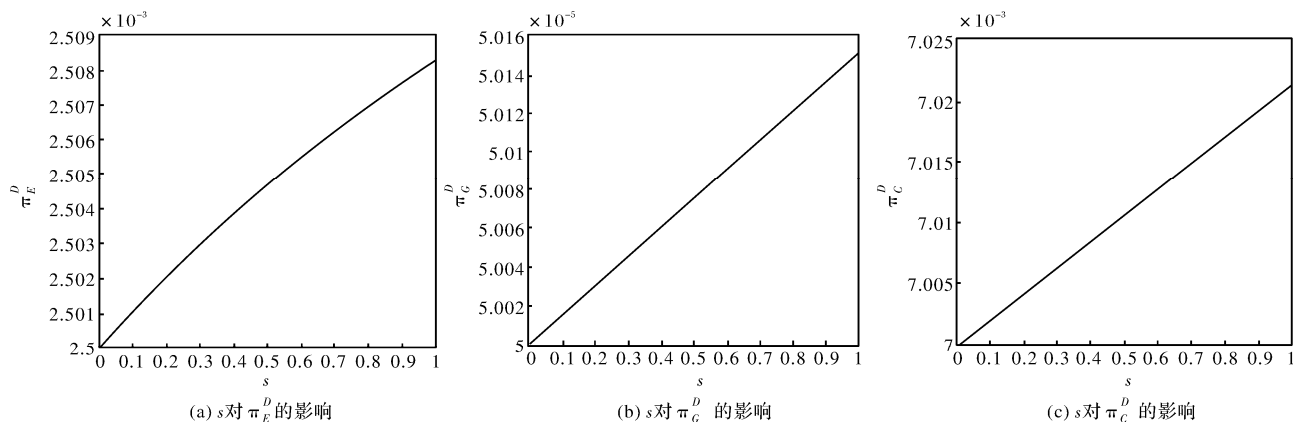


图 6 分散决策下  $\beta$  对各变量的影响研究示意图

图7 分散决策下  $s$  对各变量的影响研究示意图图8 分散决策下  $s$  对各变量的影响研究示意图

## 4 结论与展望

本文基于重大突发事件背景, 考虑民众因应急物资需求未被满足而产生恐慌心理及相应惩罚成本的现实情况, 聚焦政企协议供应链系统决策优化问题, 旨在探索出一条系统高效、切实可行的优化途径。得出以下主要结论:

(1) 关于恐慌心理。无论在分散决策还是在集中决策情形下, 民众严重恐慌心理比例对政府、协议企业以及政企协议供应链系统整体的应急效用价值均主要表现为消极影响。

(2) 关于惩罚成本。在集中决策情形下, 赔偿成本分担比例无任何显著影响; 而在分散决策下则对应急物资服务整体效用的提升发挥积极正向影响。

(3) 关于两种决策的比较分析。在应急救援过

程中, 惩罚成本分担比例和民众严重恐慌心理程度均能有效影响应急物资服务能力与效率, 需要注意的是, 在不同决策方式下效用也有所不同。考虑恐慌心理时, 政府与协议企业采取分散合作方式, 互适协作, 相互制衡, 搭建指挥高效的工作架构, 从而更有利于发挥出政企联合应急救援的优势与效果。考虑惩罚成本分担比例时, 由于集中决策下不存在赔偿成本分担行为, 协同共治与资源配置优势显著, 届时应急政府效用、协议企业效用以及政企协议应急机制整体效用均优于分散决策。

后续可以进一步研究多周期、多物资的应急救援决策优化问题, 以及考虑灾民群体之间恐慌心理传播对救灾工作的影响。此外, 本研究仅考虑了参与政府和协议企业组成的两级供应链系统, 未来可以深入探讨更加复杂的供应链结构, 如考虑多级供应链系统。



## 参考文献:

- [1] 刘阳, 田军, 冯耕中, 等. 期权契约机制下应急物资储备模型研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(12): 338-351.
- [2] 胡少龙, 韩传峰, 孟令鹏, 等. 考虑企业生产能力储备的应急物资配置随机规划模型[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(6): 1536-1544.
- [3] 陈涛, 黄钧, 张玲. 协议企业实物储备、生产能力储备模式的协调性研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(5): 149-156.
- [4] 马树建, 芦宁, 张丽丽. 非常规突发极端洪水灾害风险应急金融服务供应链构建与优化[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 52-56.
- [5] 李健, 李梦春, 董雪璠. 基于双向期权契约的应急物资采购储备模型[J/OL]. 系统管理学报: 1-19 [2022-08-12]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD64gQN6Y7094azp6PcK4FRQ3WbVJ5SvL\\_pHlisArrsle-qqBiOAQwKZ&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD64gQN6Y7094azp6PcK4FRQ3WbVJ5SvL_pHlisArrsle-qqBiOAQwKZ&uniplatform=NZKPT).
- [6] 刘阳, 田军, 冯耕中, 等. 供应商风险规避下基于期权契约的政企联合储备应急物资模型[J]. 运筹与管理, 2020, 29(11): 102-111.
- [7] 王旭坪, 张娜娜, 詹红鑫. 考虑灾民非理性攀比心理的应急物资分配研究[J]. 管理学报, 2016, 13(7): 1075-1080.
- [8] HELBING D, MOLNÁR P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [9] VORST H C M. Evacuation models and disaster psychology[J]. Procedia Engineering, 2010(3): 15-21.
- [10] 林庆福, 胡志华. 考虑心理代价的灾民疏散及救灾物资分派问题研究[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(5): 1339-1344.
- [11] MANDELL M B. Modelling effectiveness - equity trade-offs in public service delivery systems[J]. Management Science, 1991, 37(4): 467-482.
- [12] 王妍妍, 孙佰清. 多受灾点应急物资动态多阶段分配模型研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(10): 138-147.
- [13] 陈莹珍, 赵秋红. 基于公平原则的应急物资分配模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(12): 3065-3073.
- [14] 罗福周, 巨绍伟, 王腊银. 重大疫情衍生社会恐慌链式灾害应急策略研究: 基于 COVID-19 疫情的 SD 分析[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 183-191.
- [15] HE Y X, LIU N. Methodology of emergency medical logistics for public health emergencies[J]. Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review, 2015(79): 178-200.
- [16] 包兴, 季建华, 邵晓峰, 等. 应急期间服务运作系统能力的采购和恢复模型[J]. 中国管理科学, 2008, 16(5): 64-70.
- [17] 邵鲁生, 秦绪伟. 面向供应节点失效的供应链应急策略研究[J]. 管理学报, 2013, 10(6): 913-918, 924.
- [18] HU Z H, SHEU J B, XIAO L. Post-disaster evacuation and temporary resettlement considering panic and panic spread[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 69: 112-132.
- [19] SHEU J B, PAN C. A method for designing centralized emergency supply network to respond to large-scale natural disasters[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014(67): 284-305.
- [20] 陈希, 韩菁, 张晓. 考虑心理期望与感知的多属性匹配决策方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 2027-2033.
- [21] 崔璇, 丁一, 林国龙. 等待心理代价影响下的灾区伤员疏散决策模型研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(19): 309-314.
- [22] 李景宜, 周旗, 严瑞. 国民灾害感知能力测评指标体系研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 129-134.
- [23] 张晓楠, 范厚明, 李剑锋. 变动补偿的多模糊选址-路径机会约束模型及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 442-453.
- [24] 楼振凯. 应急物流系统 LRP 的双层规划模型及算法[J]. 中国管理科学, 2017, 25(11): 151-157.
- [25] WANG B C, QIAN Q Y, GAO J J, et al. The optimization of warehouse location and resources distribution for emergency rescue under uncertainty[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 48: 101278.
- [26] 田亮, 李亚东. 考虑时间惩罚成本的配送路线优化[J]. 物流工程与管理, 2020, 42(4): 105-109.
- [27] 刘阳, 田军, 冯耕中, 等. 基于期权契约的政企联合储备应急物资模型与利润分配机制研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(8): 162-171.
- [28] 魏洁, 郑迎迎, 刘畅, 等. 政府补贴下应急医疗物资政企协议储备决策研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-13 [2022-08-12]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD67s\\_kBxcpWey4-4bdLVvpDWd0faugLybQvHmFYorQhvpqPrmi5KO5Z&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD67s_kBxcpWey4-4bdLVvpDWd0faugLybQvHmFYorQhvpqPrmi5KO5Z&uniplatform=NZKPT).
- [29] 扈衷权, 田军, 王鹏, 等. 政企联合储备模式下应急物资储备及采购定价研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(12): 3181-3193.
- [30] WANG X H, LI F, LIANG L, et al. Pre-purchasing with option contract and coordination in a relief supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2015(167): 170-176.
- [31] 刘德智, 薛林彩, 王小溪, 等. 考虑赔偿成本和投诉行为的物流服务提供商质量改进策略研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(2): 377-382.
- [32] 朱莉, 曹杰, 顾珺, 等. 公平缓解灾民创伤下的应急物资动态调配研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(9): 2427-2437.
- [33] CHEN J, LIANG L, YANG F. Cooperative quality investment in outsourcing[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 162: 174-191.
- [34] HOLGUÍN-VERAS J, JALLER M, VAN WASSENHOVE L N, et al. On the unique features of post-disaster humanitarian logistics[J]. Journal of Operations Management, 2012, 30(7/8): 494-506.
- [35] HOLGUÍN-VERAS J, PEREZ N, JALLER M, et al. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models[J]. Journal of Operations Management, 2013, 32(5): 262-280.

## Research on Post-Disaster Emergency Relief Decisions Considering Punishment Cost and Panic Psychology

MI Jun<sup>1,2</sup>, HAO Lijing<sup>2</sup>, QU Guohua<sup>1</sup>, WANG Di<sup>1</sup>

(1. School of Management Science and Engineering, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China; 2. School of Business Administration, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In recent years, major global emergencies have occurred frequently, thus how to develop the post-disaster emergency rescue strategies that are scientifically efficient and robust becomes an important issue in e-



emergency management. Based on this realistic background, the new conceptual innovation of punishment cost and panic psychology is incorporated into the research on making emergency rescue decision, the decision model of emergency rescue is constructed, and the utility mechanism and strategic choice of emergency rescue are analyzed. Moreover, the validity of the model is verified with numerical calculation finally. The results show that both penalty cost – sharing behavior and the degree of post – disaster public panic have significant influence on the efficiency of emergency rescue. Specifically, under decentralized decision, the behavior of penalty cost – sharing can strengthen the coordination and control function of government, and impel the improvement and upgrading of the agreement enterprises. Meanwhile, as the dynamic factor, it promotes the overall effectiveness of the emergency relief system. For another, the degree of public panic has negative impact on decentralized decision and centralized decision, which reduces the demand of emergency supplies and services, and hinders the optimization and enhancement of the emergency governance system.

**Keywords:** penalty cost; panic psychology; emergency rescue; decision optimization

附录:

命题 1 的证明:

(1) 对政企协议应急救援供应链系统整体的效用函数分别求  $p$  和  $\alpha$  的一阶偏导数, 并令其为零, 即:

$$\frac{\partial \pi_c}{\partial p} = 1 + (1 - \alpha) [G - \beta(n - c)] - 2p = 0;$$

$$\frac{\partial \pi_c}{\partial \alpha} = G[1 - (1 - \alpha)\beta(n - c) - p] + \beta(n - c)[p - G(1 - \alpha)] - h\alpha = 0。$$

(2) 对上述所求一阶导数进行二次求导, 可得二阶条件满足:

$$\frac{\partial^2 \pi_c}{\partial p^2} = -2 < 0;$$

$$\frac{\partial^2 \pi_c}{\partial \alpha^2} = 2\beta(n - c)G - h < 0;$$

$$\text{并且} \begin{vmatrix} -2 & -G + \beta(n - c) \\ -G + \beta(n - c) & 2\beta(n - c)G - h \end{vmatrix} = 2h - [\beta(n - c) + G]^2 > 0。$$

由此, 当  $h > \frac{\beta(n - c) + G}{2}$  时, 另一阶条件等于零可得政府提供单位应急物资服务的最优服务价值  $p^c$  和最优应急物资服务保障水平  $\alpha^c$ , 将其分别代入需求函数、效用函数求出最优应急物资服务需求  $D^c$ , 政企协议应急救援供应链系统最大效用  $\pi_c^c$ 。

命题 2 的证明:

(1) 在第二阶段, 依据政府决定的单位应急物资服务价值, 协议企业对其应急物资服务保障水平和单位应急物资服务成本进行决策, 运用逆推归纳法求解, 首先对协议企业的效用函数求解应急物资单位服务成本和应急物资服务保障水平的一阶导, 并令其为零, 即:

$$\frac{\partial \pi_E}{\partial u} = 1 - v - 2u - (1 - \alpha)\beta(n - c) + sG(1 - \alpha) = 0;$$

$$\frac{\partial \pi_E}{\partial \alpha} = s(1 - v - 2u) - u\beta(n - c) + 2sG(1 - \alpha)\beta(n - c) = 0。$$

(2) 之后进行二阶求导, 求导条件满足:

$$\frac{\partial^2 \pi_E}{\partial u^2} = -2 < 0;$$

$$\frac{\partial^2 \pi_E}{\partial \alpha^2} = 2sG^2\beta(n - c) - h < 0;$$

$$\text{且} \begin{vmatrix} -2 & -sG + \beta(n - c) \\ -sG + \beta(n - c) & 2sG^2\beta(n - c) - h \end{vmatrix} = 2h - [\beta(n - c) + sG]^2 > 0。$$

由此可得:

$$u = \frac{h(1 - v - \beta(n - c) - sG) - sG(1 - v)[\beta(n - c) + sG]}{2h - [\beta(n - c) + sG]^2};$$

$$\alpha = \frac{(1 - v - \beta(n - c) - sG)[sG + \beta(n - c)]}{2h - [\beta(n - c) + sG]^2}。$$

(3) 将求解得到的  $u$  和  $\alpha$  代入政府应急物资服务效用函数中, 并对  $v$  求一阶导, 可得:

$$v^D = \frac{2h(1-\beta(n-c) + G - 2sG) + (sG + \beta(n-c))[sG^2 - \beta^2(n-c)^2 - G(2-s-\beta(n-c) - s\beta(n-c))]}{2[2h - [\beta(n-c) + G]][\beta(n-c) + sG]}$$

此时将  $v^D$  代入  $u$ 、 $\alpha$  的表达式得到最优的  $u^D$ 、 $\alpha^D$ ，将其分别代入协议企业应急物资服务需求函数和效用函数则得到分散决策下的最优需求  $D^D$ 、协议企业的最大效用  $\pi_E^D$ 、政府的最大效用  $\pi_G^D$ 、政企协议机制的最大效用  $\pi_C^D$ 。

命题 3 的证明：

$$\frac{\partial u^D}{\partial s} = \frac{GA}{2[2h - (\beta(n-c) + G)(\beta(n-c) + sG)]^2};$$

其中，

$$A = 8h^2 - h[7\beta^2(n-c)^2 + \beta(n-c) + 4G\beta(n-c)(2+s) - G(1-G-4s-4sG)] + (\beta(n-c) + G)(1 + \beta(n-c) + G)[\beta(n-c) + sG]^2。$$

由分析得，如上文所述， $h > \frac{\beta(n-c) + G}{2}$ ，且  $\frac{\beta(n-c) + G}{2} < \frac{1}{2}$ ，计算  $A$  可得对称轴  $\frac{7[\beta(n-c)]^2 + (4G+1)\beta(n-c) - G(1-G-4s-4sG)}{16} < \frac{\beta(n-c) + G}{2}$ ，经分析可得  $A$  是关于  $h$  的严格凸函数，所以在  $h > \frac{\beta(n-c) + G}{2}$  区域内， $A$  关于  $h$  单调递增，因此可得  $A(h) > A(\frac{\beta(n-c) + G}{2})$ 。令  $A(\frac{\beta(n-c) + G}{2}) = \frac{\beta(n-c) + G}{2}B$ ， $B = 4[\beta(n-c) + G] - [7\beta^2(n-c)^2 + \beta(n-c) + 4G\beta(n-c)(2+s) - G(1-G-4s-4sG)] + (G + \beta(n-c))(1 + G + \beta(n-c)) + sG + \beta(n-c)^2$

同样地，由于  $B$  的对称轴  $\frac{1-\beta(n-c)}{2} > 1$ ， $s \in [0, 1]$ ，且  $B$  是关于  $S$  的严格凸函数，所以  $B$  关于  $S$  单调递减，则可得  $B(s) > B(1)$ ，又因为  $B(1) = [1 - G - \beta(n-c)][2\beta(n-c) + (G + \beta(n-c))(1 - 2(G + \beta(n-c)))]$ ，其中  $\frac{\beta(n-c) + G}{2} < \frac{1}{2}$ ，可得  $B(1) > 0$ ，进一步可得  $A(h) > 0$ ，最终证明  $\frac{\partial u^D}{\partial s} > 0$ 。

同理可证明：

$$(1) \frac{\partial v^D}{\partial s} = \frac{G[(\beta(n-c) + sG)[G(2-s-\beta(n-c) - s\beta(n-c)) + \beta^2(n-c)^2 - sG^2] - 2h(G - 2sG - \beta(n-c) + 1)]}{2[2h - [\beta(n-c) + G]][\beta(n-c) + sG]^2} - \frac{[4Gh + (\beta(n-c) + sG)(-G^3 - G - G\beta(n-c))] + G[G(2-s-\beta(n-c) - s\beta(n-c)) + \beta^2(n-c)^2 - sG^2]}{2[2h - [\beta(n-c) + G]][\beta(n-c) + sG]} < 0;$$

$$(2) \frac{\partial \alpha^D}{\partial s} = \frac{hD[1 - (\beta(n-c) + G)]}{[2h - (\beta(n-c) + G)(\beta(n-c) + sG)]^2} > 0;$$

$$(3) \frac{\partial D^D}{\partial s} = \frac{-hG[1 - (\beta(n-c) - 2G)]}{2[2h - (\beta(n-c) + G)(\beta(n-c) + sG)]^2} > 0。$$

命题 4 的证明：

$$(1) \frac{\partial \pi_G^D}{\partial s} = \frac{hG[\beta(n-c) + G][1 - (\beta(n-c) + G)]^2}{4[2h - (\beta(n-c) + G)(\beta(n-c) + sG)]^2} > 0;$$

$$(2) \frac{\partial \pi_E^D}{\partial s} = \frac{h^2G^2(1-s)[1 - (\beta(n-c) + G)]^2}{2[2h - (\beta(n-c) + G)(\beta(n-c) + sG)]^3} > 0;$$

$$(3) \frac{\partial \pi_C^D}{\partial s} = \frac{hG[1 - (\beta(n-c) + G)]^2[2h(2G + \beta(n-c) - sG) - [\beta(n-c) + sG]^2]}{4[2h - (\beta(n-c) + G)(\beta(n-c) + sG)]^3} > 0。$$

命题 5 的证明：

$$\frac{\partial p^C}{\partial \beta} = -\frac{(n-c)(G+h)}{2h - [\beta(n-c) + G]^2} - \frac{2(n-c)G(\beta(n-c) + G)^2 + h[1 + G - \beta(n-c)]}{[2h - [\beta(n-c) + G]^2]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial D^C}{\partial \beta} = -\frac{h(n-c)}{2h - [\beta(n-c) + G]^2} + \frac{2h(n-c)(\beta(n-c) + G)[1 + G - \beta(n-c)]}{[2h - [\beta(n-c) + G]^2]^2};$$

$$\frac{\partial \pi_C^C}{\partial \beta} = \frac{h(n-c)[\beta(n-c) + G - 1]}{[2h - (\beta(n-c) + G)]^2} + \frac{h(n-c)[\beta(n-c) + G - 1]^2}{[2h - (\beta(n-c) + G)]^3} < 0。$$

命题 6 的证明：

$$\frac{\partial \alpha^D}{\partial \beta} = -\frac{(n-c)}{4h - 2\beta(n-c) - 2G} + \frac{2(n-c)[1 - \beta(n-c) - G]}{[4h - 2\beta(n-c) - 2G]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial u^D}{\partial \beta} = -\frac{(n-c)[h + Gs(2\beta(n-c) + 3G + Gs + 1)]}{4h - 2[\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + Gs]} -$$

$$\frac{2(n-c)[2\beta(n-c) + Gs + G][h[4Gs - \beta(n-c) - 2G + 1] - Gs[\beta(n-c) + Gs + G][\beta(n-c) + 2G + 1]]}{[4h - 2[\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + Gs]]^2};$$

$$\frac{\partial v^D}{\partial \beta} = \frac{-(n-c)[G(2-s-\beta(n-c) - s\beta(n-c)) + \beta^2(n-c)^2 - sG^2] - 2h(n-c) + [G(n-c)(1+s) - 2\beta(n-c)^2][\beta(n-c) + Gs]}{4h - 2[\beta(n-c) + G][\beta(n-c) + Gs]} -$$

$$\frac{2(n-c)[2\beta(n-c)+Gs+G][[\beta(n-c)+Gs][G(2-s-\beta(n-c)-\beta(n-c))+\beta^2(n-c)^2-sG^2]-2h[G-2sG-\beta(n-c)+1]]}{[4h-2[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+Gs]]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial D^D}{\partial \beta} = \frac{h(n-c)}{4h-2[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]} + \frac{2h(n-c)[2\beta(n-c)+sG+G][1-\beta(n-c)-2G]}{[4h-2[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^2} < 0.$$

命题 7 的证明:

$$(1) \frac{\partial \pi_c^D}{\partial \beta} = -\frac{h(n-c)[1-\beta(n-c)-2G]}{2[2h-[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^2} + \frac{h(n-c)[2\beta(n-c)+sG+G][1-\beta(n-c)-2G]^2}{2[2h-[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^3} < 0;$$

$$(2) \frac{\partial \pi_E^D}{\partial \beta} = \frac{h(n-c)[2h-(sG-\beta(n-c))^2][1-\beta(n-c)-2G]}{4[2h-[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^2} + \frac{h(n-c)[sG-\beta(n-c)][1-\beta(n-c)-2G]^2}{4[2h-[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^2} + \frac{h(n-c)[2\beta(n-c)+sG+G][2h-(sG-\beta(n-c))^2][1-\beta(n-c)-2G]^2}{4[2h-[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^3} < 0;$$

$$(3) \frac{\partial \pi_c^D}{\partial \beta} = -\frac{h(n-c)[2h+4sG+6\beta(n-c)][1-\beta(n-c)-2G]^2}{8[2h-[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^2} - \frac{h(n-c)[6h-(sG+\beta(n-c))(2h+sG+3\beta(n-c))][1-\beta(n-c)-2G]}{4[2h-[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^2} + \frac{h(n-c)[2\beta(n-c)+sG+G][6h-(sG+\beta(n-c))(2h+sG+3\beta(n-c))][1-\beta(n-c)-2G]^2}{4[2h-[\beta(n-c)+G][\beta(n-c)+sG]]^3} < 0.$$

命题 8 的证明:

由于  $h > \frac{\beta(n-c)+G}{2}$ , 且  $\frac{\beta(n-c)+G}{2} < \frac{1}{2}$ ,  $0 \leq s \leq 1$ , 可得

$$(1) \alpha^c - \alpha^D = \frac{[\beta(n-c)+G][1-(\beta(n-c)+G)]}{2h-[\beta(n-c)+G]^2} - \frac{[\beta(n-c)+sG][1-(\beta(n-c)+G)]}{2[2h-(\beta(n-c)+G)(\beta(n-c)+sG)]} > 0,$$

故  $\alpha^c > \alpha^D$ ;

$$(2) D^c - D^D = \frac{h[1+G-\beta(n-c)]}{2h-(\beta(n-c)+G)^2} - \frac{h[1+2G-\beta(n-c)]}{2[2h-(\beta(n-c)+G)(\beta(n-c)+sG)]} > 0,$$

故  $D^c > D^D$ ;

$$(3) \pi_c^c - \pi_c^D = \frac{h[1-(\beta(n-c)+G)]^2}{2[2h-(\beta(n-c)+G)^2]} - \frac{h[1-(\beta(n-c)+2G)]^2[6h-(\beta(n-c)+sG)(2h+3\beta(n-c)+sG)]}{8[2h-(\beta(n-c)+G)(\beta(n-c)+sG)]^2} > 0,$$

故  $\pi_c^c > \pi_c^D$ .

### 致谢 2022 年度《灾害学》审稿专家

2022 年,《灾害学》杂志圆满完成了出版工作,来自灾害研究各领域的各位审稿专家精益求精,一丝不苟的治学态度为期刊的质量提供了强有力的保证,在此向一年来为本刊审稿的专家们致以诚挚的谢意!(拼音为序)

毕雪梅 蔡建峰 曹永强 陈 晨 陈 斐 陈 剑 陈 莉 陈长坤 陈 虹 陈洪凯  
 陈睿山 陈孝国 陈燕丽 谌 芸 成连华 程朋根 程希平 戴湘毅 丁 香 杜志强  
 段 玮 段 旭 方 建 冯玉涛 高 超 高 荣 郭恩栋 郭建平 郭小东 郭雪松  
 何爱平 何明琼 何学松 侯光良 胡蓓蓓 胡信布 黄崇福 霍治国 江辉仙 姜丽霞  
 金菊良 靳小兵 孔 锋 匡昭敏 雷小途 李陈侠 李继清 李 建 李军霞 李 林  
 李 明 李 蒙 李培仁 李茂松 李双成 李尧远 李胜乐 李永红 李耀庄 李怡文  
 李志强 李祝龙 廖玉芳 刘 辉 刘吉夫 刘兰芳 刘平英 刘希林 刘小钢 刘严萍  
 刘耀龙 卢全中 栾庆祖 骆正山 罗 慧 罗华春 骆凤涛 马 冀 马建明 莫招育  
 屈绍建 阮爱国 尚志海 商彦蕊 盛 俭 石 勇 宋立军 苏桂武 苏 筠 孙 磊  
 孙业君 汤秋鸿 唐雪琼 滕宏泉 王宝亮 王冬妮 王根龙 王贵荣 王国复 王 冀  
 王启光 王少华 王文圣 王晓青 王 勇 王 瑛 王子超 温家洪 吴先华 武晋雯  
 夏登友 肖东升 肖天贵 辛 晶 徐 燕 徐选华 许 冲 宣葵葵 闫绪娴 颜 烨  
 阳富强 杨润林 杨若文 杨文涛 杨雅琼 杨月巧 姚 琪 尹 芳 尹丽云 尹占娥  
 尤 飞 于文金 于小兵 余明高 袁美英 袁志祥 韵 江 翟国方 张 恒 张 强  
 张 勤 张继权 张俊香 张丽娟 张万诚 张小兵 张孝奎 张以晨 张 英 赵春雨  
 赵法锁 赵 飞 赵 霞 郑学召 郑 艳 钟 鸣 庄贵阳 周 旗 邹逸江 翟 越

《灾害学》编辑部