

中文引用格式:褚宏睿,黄宾. 基于贝叶斯劝说理论的企业代储应急物资研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(8):244-252.

英文引用格式:CHU Hongrui, HUANG Bin. Study on enterprise-led emergency supply reserve system using Bayesian persuasion theory[J]. China Safety Science Journal,2025,35(8):244-252.

基于贝叶斯劝说理论的企业代储应急物资研究^{*}

褚宏睿¹副教授,黄宾²教授

(1 首都经济贸易大学 管理工程学院,北京 100070;

2 浙江水利水电学院 经济与管理学院,浙江 杭州 310018)

中图分类号:X915.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1376

基金项目:国家自然科学基金资助(72101165);北京市教育委员会科技/社科计划项目(SM202210038002);浙江省软科学重点项目(2022C25020)。

【摘要】 为应对日益频发的自然灾害,保障企业代储应急物资的效率,从经济学信息披露角度给出加强企业参与度的措施。首先,基于期权合同构建企业代储应急物资模型,说明灾害发生概率对企业代储决策的内在驱动作用;其次,进一步采用斯塔克尔伯格序贯博弈框架,评估政府补贴政策在提升物资储备量和政企目标方面的效果;然后,引入贝叶斯劝说理论,设计政府的信息披露机制,引导企业代储决策,并增强应急物资储备的整体效率;最后,以洪涝灾害为具体应用场景,进行数值分析。研究表明:企业的应急物资代储量与灾害发生概率呈正相关关系,显示出企业对灾害风险的敏感认知;虽然政府补贴能够增加物资储备量并降低政府成本,但在提升企业收益方面存在局限性;基于贝叶斯劝说理论设计的信息披露机制,在提升物资储备量、降低政府成本和增加企业收益等方面均展现出优于基准模型和补贴模型的显著优势。政府可通过有效的披露灾害信息,改善企业代储应急物资模式的物资救援效率。

【关键词】 企业代储; 应急物资; 贝叶斯劝说; 期权合同; 灾害发生概率; 信息披露

Study on enterprise-led emergency supply reserve system using Bayesian persuasion theory

CHU Hongrui¹, HUANG Bin²

(1 School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business,
Beijing 100070, China; 2 School of Economy and Management, Zhejiang University of
Water Resources and Electric Power, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: In order to effectively address the escalating challenges of natural disasters and enhance the efficiency of the enterprise-led emergency supply reserve system, an economic information disclosure mechanism was proposed to boost enterprise participation. Firstly, an enterprise-led emergency supply reserve model was constructed based on an option contract to clarify the intrinsic driving mechanism of disaster occurrence probability on enterprises' reserve decisions. Then, the Stackelberg sequential game framework was further employed to evaluate the effectiveness of government subsidy policies in increasing supply reserve volumes and improving government-enterprise objectives. Furthermore, Bayesian persuasion

theory was introduced to design a government information disclosure mechanism, aimed at guiding enterprises' reserve decisions and improving the overall efficiency of relief supply reserves. Finally, a numerical analysis was conducted with flood disasters as a specific application scenario. The research findings indicate that the volume of enterprise-led emergency supply reserves is positively correlated with disaster occurrence probability, reflecting enterprises' sensitivity to disasters. Although government subsidies can increase reserve quantities and reduce government costs, they have limitations in improving enterprises' profits. The information disclosure mechanism designed based on Bayesian persuasion theory outperforms both the baseline model and the subsidy model in terms of reserve quantities, government costs, and enterprises' profits. Through effective disaster information disclosure, the government can enhance the relief efficiency of the enterprise-led emergency supply reserve system.

Keywords: enterprise-led reserve system; emergency supply; Bayesian persuasion; option contract; disaster occurrence probability; information disclosure

0 引言

近年来,自然灾害频发,这对应急物资储备提出了更高要求。传统的政府主导物资集中储备模式虽然有响应速度快等优势,但受灾后需求的高不确定性、强时效性和多样性等特征影响^[1],常面临物资不足和闲置浪费的双重困境,难以满足当前的应急管理要求。为此,加强社会化参与度,提升救援储备的规模和柔性成为共识。企业代储应急物资作为近些年备受关注的社会化参与方式,实践中却因企业的利益导向,普遍存在参与积极性不足的问题。因此,研究影响企业代储的因素及其影响机制,从信息披露角度为政府管理提供有针对性的改进措施,不仅可丰富经济学与应急管理的交叉研究成果,同时对于提高物资救援效率具有重要意义。

在政企应急合作方面,BALCIK等^[2]较早提出战略联盟、协议联合采购等政企合作机制,ERTEM等^[3]则基于拍卖理论提出了应急物资的政企采购框架,政企储备合作逐渐成为研究热点。近年来,随着应急供应链的提出,学者们开始运用供应链合同机制加强政企储备合作的效率。常见合同包括数量柔性^[4]、数量承诺^[5]、价格折扣^[6]和期权合同等。其中,期权合同具有弹性供给、渠道协调和风险共担等优势,适用于企业代储物资场景,因而备受关注。LIANG Liang等^[7]探讨了储备成本、灾害发生概率等对应急物资期权定价的影响。WANG Xihui等^[8]证明了期权合同比回购等合同在提升救援效率和政企收益上更具优势。扈衷权等^[9-10]则比较了政企期权共同储备与政府单独储备的优劣,并探索了看跌期权在应急储备中的应用。刘阳等^[11]则聚焦于多供应企业的应急物资期权模型。此外,王喆等^[12]运

用微分博弈分析了政企物资维护水平对物资损耗和系统利润的影响。同时,学者们还关注应急物资分配的公平性、灾民心理等人道主义因素^[13]。通过文献回顾可知:现有研究多局限于传统的合约类型、储备模式等视角,关注储备决策、运输优化等问题,对应急物资储备合作中企业参与积极性不足的问题、以及灾害信息对政企储备合作的影响缺少深入分析。研究发现,灾害发生概率对企业参与应急合作和储备量决策具有显著影响^[9],而企业对灾害发生的判断主要基于先验认知。在这种情况下,政府能否通过合理的披露灾害信息影响企业的决策,从而提升政企合作的效果,是主要的研究出发点。

信息披露源于经济学对自由市场中资源配置失灵的研究。经济学家发现信息不对称是市场失灵的原因之一,并提出了信号博弈理论,试图通过披露“对称信息”引导信息接收者的决策。但经过漫长探索后,学者们发现,适度披露不完全对称信息或许更有利于信息发送方。2011年,KAMENICA等^[14]提出贝叶斯劝说理论,阐明有效披露“不对称信息”的条件和设计机制,该理论已在推荐系统、排队论等交叉领域得到广泛应用,但在应急管理领域的使用还相对较少,仅有ALIZAMIR等^[15]针对流行病疫苗接种问题,设计了政府预警信息的发布机制。在政企应急储备合作中,企业通常难以准确评估灾害发生概率、救援需求等关键信息,政府则能凭借检查监测、历史数据分析等手段更精确地掌握这些信息,导致灾害信息不对称现象普遍存在。

鉴于此,笔者拟聚焦于政府和企业通过期权合同建立应急物资代储合作的特定情景,采用库存管理、博弈论、补贴机制等方法构建基准模型和补贴模型,分析灾害发生概率对企业决策的影响以及传统

补贴对政企合作的提升效果,判断政府成本目标是否满足有效信息披露的凹化条件,并基于贝叶斯劝说理论设计政府信息披露策略,以期为科学提升应急救援能力、提高政企合作效率提供支撑。

1 企业代储问题描述与模型构建

考虑政府和单个企业组成的应急物资代储供应链,双方通过期权合同建立代储合作关系,政府通过支付期权价格获得灾后约定数量物资的采购权,企业提前锁定部分收益,但需承担物资的剩余风险。企业代储的应急物资属于基本生活保障类,如食品、饮用水等。这类物资的灾后需求会急剧增加,且对保质期和储备环境有一定要求,政府集中储备的成本较高且效率低,多由企业代为储备。

在代储合作模式下,企业以自身收益最大化为目标,其物资储备决策往往与政府救援目标不一致。具体表现为,政府倾向于增加储备量以确保供应稳定,减少缺货风险;企业则倾向于减少储备,以避免库存过剩损失。针对该矛盾,从政府视角出发,提出一种创新的灾害信息披露机制,旨在不损害企业收益的前提下,改善政府的绩效目标。

1.1 参数说明与模型假设

灾害发生前,政府向企业公布物资期权价格 p_o 元和执行价格 p 元。企业依据灾害发生概率 θ 、物资生产储备成本 c 元和随机需求 x 决定是否参与代储。如果参与,需向政府反馈该企业代储的应急物资量 Q 个,随后政府支付灾前采购金 $p_o Q$ 元。合作期内,如果灾害发生,应急物资需求 x 确定,企业提供不超过代储量的 $\min(Q, x)$ 个物资,同时政府支付灾后采购金。若需求超过代储量,未满足部分的单位惩罚为 m 元。如果灾害未发生,企业承担全部剩余物资损失。企业的期望收益目标为 Π 元,政府的期望成本目标为 V 元。下标 s 和 b 分别为补贴模型和贝叶斯劝说模型,上标 $*$ 为最优状态。为简化问题,作如下假设:

假设 1:政府只能从合作企业获取物资,不考虑灾后现货市场采购。储备合作期与物资保质期一致,合作期满后,剩余物资的残值为 0。

假设 2:政府与企业对灾害发生概率具有相同的先验信念。政府可进一步确认灾害发生可能性,并通过发布预警等方式将灾害信息传递给企业。

假设 3: x 服从 $(0, U]$ 上的均匀分布, U 为应急物资需求上界。需求期望 $\mu = \frac{U}{2}$, 密度函数 $f(x) =$

$\frac{1}{U}$, 分布函数 $F(x) = \frac{x}{U}$ 。

假设 4:参数设定确保企业不会无限制地增加储备,即 $c > p_o$ 。在回购补贴模型中, $c > p_o + k$, 防止企业通过超储不当获利, k (元) 为政府的单位回购补贴。同时,单位缺货惩罚满足 $p < m < \frac{c + p_o}{c - p_o} p$ 。

1.2 不存在信息披露的应急物资代储模型

将政府不采取信息披露的模型定义为基准模型,为便于对比,基准模型仅考虑企业的储备量决策。企业目标函数包括灾前采购收益、灾后采购收益和生产储备成本 3 部分:

$$\Pi = p_o Q + \theta p \min(Q, x) - cQ \quad (1)$$

命题 1:当且仅当 θ 满足 $\underline{\theta} < \theta \leq 1$ 时,企业才会

参与代储合作,其中阈值下限 $\underline{\theta} = \frac{c - p_o}{p}$ 。企业代储应急物资的最优量 $Q^* = \frac{U(\theta p - c + p_o)}{\theta p}$, Q^* 关于 θ 单调递增。

证明:对式(1)求 Π 关于 Q 的一阶、二阶导数:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial Q} = \theta p \left(1 - \frac{Q}{U}\right) + p_o - c, \frac{\partial^2 \Pi}{\partial Q^2} = -\frac{\theta p}{U} < 0, \text{说明 } \Pi \text{ 是 } Q \text{ 的凹函数, } Q^* \text{ 由一阶条件给出,即 } Q^* = \frac{U(\theta p - c + p_o)}{\theta p}。$$

$\Pi(Q^*) > 0$ 且 $Q^* > 0$ 时,企业才会参与代储合作。求解不等式,可得企业参与条件为 $\theta > \underline{\theta} = \frac{c - p_o}{p}$ 。由 $\frac{\partial Q^*}{\partial \theta} = \frac{U(c - p_o)}{\theta^2 p} > 0$, 可得 Q^* 关于 θ 单调递增。证毕。

将 Q^* 代入式(1),得企业的最优目标值:

$$\Pi^* = \frac{U(\theta p - c + p_o)^2}{2\theta p} \quad (2)$$

政府目标函数包括灾前采购成本、灾后采购成本和缺货惩罚:

$$V = \theta(m \max(x - Q, 0) + p \max(x, Q)) + p_o Q \quad (3)$$

将 Q^* 代入政府目标 V , 整理得:

$$\tilde{V} = \frac{Up\theta}{2} - \frac{U(c - p_o)(-cm + cp + mp_o + pp_o)}{2\theta p^2} + Up_o \quad (4)$$

式中 $\tilde{V}$ 为代入 Q^* 后的政府目标。

命题 2: $\tilde{V}$ 是 θ 的增凹函数。

证明:对式(4)求 $\tilde{V}$ 关于 θ 的一阶、二阶导数:

$$\frac{\partial \tilde{V}}{\partial \theta} = \frac{Up}{2} + \frac{U(c - p_o)(-cm + cp + mp_o + pp_o)}{2\theta^2 p^2},$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial \theta^2} = -\frac{U(c - p_o)(-cm + cp + mp_o + pp_o)}{\theta^3 p^2}。根据$$

参数假设,当 $c - p_o > 0, m < \frac{c + p_o}{c - p_o} p$ 时, $\frac{\partial \tilde{V}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial \theta^2} <$

0, 即 $\tilde{V}$ 是关于 θ 的增凹函数。证毕。

基准模型的结果揭示了企业参与代储合作的决策逻辑:仅当灾害概率较高时,企业才有动力参与代储并提高储备量。灾害概率较低时,企业为了规避库存剩余风险,倾向于减少储备量,甚至不参与代储,模型在一定程度上解释了实践中企业参与度不高的原因。命题 2 说明 $\tilde{V}$ 是 θ 的增凹函数,这是灾害信息有效披露的凹化条件。

回购是供应链管理领域缓解供应商库存风险的常用措施。为了更全面地对比传统供应链效率改善方法与贝叶斯信息披露方法的差异,进一步分析政府回购措施的激励效果,并将其定义为补贴模型。值得注意的是,灾害未发生或灾情较轻时,物资剩余量较大,此时补贴的效果更显著。同时,为了便于求解和对比分析,在补贴模型中仅考虑灾害未发生时政府进行物资回购。

政府按单价 k 元进行回购补贴,以补偿灾害未发生时的企业储备损失。此时,政企构成斯塔克尔伯格博弈关系:政府作为领导者,首先决定 k ; 企业作为跟随者,随后决定代储量 Q_s 。

补贴模型的企业目标包括灾前采购收益、灾后采购收益、补贴收益和生产成本:

$$\Pi_s = p_0 Q_s + \theta p \max(x, Q_s) + (1 - \theta) k Q_s - c Q_s \tag{5}$$

命题 3: 给定 k , 企业的最优代储量 $Q_s^* = U \frac{\theta(p - k) - c + k + p_o}{\theta p}$ 。

证明:对式(5)求 Π_s 关于 Q_s 的一、二阶导数:

$$\frac{\partial \Pi_s}{\partial Q_s} = \theta p \left(1 - \frac{Q_s}{U}\right) + (1 - \theta) k + p_o - c, \frac{\partial^2 \Pi_s}{\partial Q_s^2} = -\frac{\theta p}{U}。$$

由 $\frac{\partial^2 \Pi_s}{\partial Q_s^2} < 0$ 可得 Π_s 是关于 Q_s 的凹函数, $Q_s^* = U$

$$\frac{\theta(p - k) - c + k + p_o}{\theta p}。证毕。$$

预测到 Q_s^* 后,政府以救援成本最小化决策最优单位补贴 k^* , 其目标函数包括灾前和灾后采购成本、缺货惩罚和补贴成本:

$$V_s = p_0 Q_s + \theta(p \max(x, Q_s) + m \max(x - Q_s, 0)) + (1 - \theta) k Q_s \tag{6}$$

将 $Q_s^* = U \frac{\theta(p - k) - c + k + p_o}{\theta p}$ 代入政府目标 V_s , 可得:

$$V_s = Q_s^*(p_o + (1 - \theta)k) + \theta \left(\frac{Um}{2} + (p - m) \left(Q_s^* - \frac{Q_s^{*2}}{2U} \right) \right) \tag{7}$$

命题 4: 补贴模型中, $k^* = \frac{\theta p^2 - cm + p_o(m + p)}{\theta(m + p) - m - p_o}$ 。

证明:根据式(7), 计算可得: $\frac{\partial V_s}{\partial k} = \frac{U(1 - \theta)(\theta(-mk + p^2 - pk) - cm + mp_o + mk + pp_o + pk)}{\theta p^2},$

$$\frac{\partial^2 V_s}{\partial k^2} = \frac{U(1 - \theta)^2(m + p)}{\theta p^2}。由于 \frac{\partial^2 V_s}{\partial k^2} > 0, 说明 V_s$$

是关于 k 的凸函数, k^* 在 $\frac{\partial V_s}{\partial k} = 0$ 处取得。证毕。

引入补贴机制后中,企业参与的灾害概率下界变为 $\underline{\theta}_s = \frac{c - p_o - k}{p - k} < \underline{\theta}$ 。与基准模型相比,补贴机制扩大了企业的合作区间,提高了企业的参与度。当博弈均衡时,企业和政府的目标函数分别为:

$$\Pi_s^* = \frac{Up(\theta^2 m^2 - 2\theta cm + c^2)}{2\theta(m^2 + 2mp + p^2)} \tag{8}$$

$$V_s^* = \frac{U(\theta^2 mp + 2\theta cm - c^2)}{2\theta(m + p)} \tag{9}$$

推论 1: 补贴机制能够降低政府成本: $V_s^* - \tilde{V} = -\frac{U(\theta p^2 - cm + cp + mp_o + pp_o)^2}{2\theta p^2(m + p)} < 0。$ 当

$$\min\left\{\frac{c(m - p) - (m + p)p_o}{p}, \frac{c(m + 2p) - (m + p)p_o}{p(2m + p)}\right\} < \theta <$$

$$\max\left\{\frac{c(m - p) - (m + p)p_o}{p}, \frac{c(m + 2p) - (m + p)p_o}{p(2m + p)}\right\} \text{ 时,}$$

有 $\Pi_s^* - \Pi^* =$

$$-\frac{U(\theta p + cp - cm + mp_o + pp_o)(\theta(2mp + p^2) - cm - 2cp + mp_o + pp_o)}{2\theta p(m + p)^2} >$$

0, 补贴机制才能提升企业收益。

推论 1 表明:虽然补贴机制能够有效降低政府的成本,但仅在 1 个特定的灾害概率区间内,能够提升企业预期收益。在区间外,企业会因为收益未达预期而选择不参与补贴计划,导致政府的补贴政策失效。基准模型和补贴模型均说明了灾害概率对企业决策的显著影响。

1.3 存在信息披露的应急物资代储模型

采用贝叶斯劝说理论框架,考察政府披露灾害信息对企业决策的影响。政府为信息发送者,通过监测分析手段获得灾害信息,并通过发布预警信息和新闻报道等方式,向企业传递信息。企业为接收者,收到灾害信息后会改变对灾害的先验认知。

灾害状态集合 $\Omega = \{0, 1\}$, 0 表示不发生, 1 表示灾害发生。企业对灾害的先验信念是 Ω 上的函数, 记作 $\beta_o(\omega)$, ω 为灾害状态, $\omega \in \Omega$ 。将 $\beta_o(1)$ 简记为 β_o , 表示企业对灾害发生的先验信念, 对应上文的 θ , 即 $\beta_o = \theta$ 。政府获得灾害信息后, 可选择低等级预警 L (黄色或蓝色预警) 或高等级预警 H (红色或橙色预警) 进行披露, 信息集合 $\Lambda = \{L, H\}$ 。政府信息披露规则可由条件概率 $\pi(\alpha | \omega)$ 给出, $\omega \in \Omega, \alpha \in \Lambda$, 表示政府观测到灾害状态为 ω 时, 选择向企业披露 α 信息的概率。政府在监测前已确定信息披露规则 $\pi(\alpha | \omega)$, 企业知晓政府的信息发布规则。

企业收到预警信息 α 后, 更新获得关于灾害的后验信念 $\beta_\alpha(\omega)$, 将 $\beta_\alpha(1)$ 简记为 β_α 。根据条件概率公式, 企业的后验信念服从:

$$\beta_\alpha(\omega) = P(\omega | \alpha) = \frac{\pi(\alpha | \omega) \beta_o(\omega)}{\sum_{\omega \in \Omega} \pi(\alpha | \omega) \beta_o(\omega)} \quad (10)$$

对任意 α , $\beta_\alpha(\omega)$ 满足 $\sum_{\omega \in \Omega} \beta_\alpha(\omega) = 1$ 。

定义 $\tau(\beta_\alpha)$ 为企业接收到信号 $\alpha \in \{L, H\}$ 的概率, 简记为 τ_α 。显然, τ_α 也是 β_α 的分布函数, 满足 $\sum_{\alpha \in \Lambda} \tau_\alpha = 1$, 由全概率公式可得:

$$\tau_\alpha = \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\alpha | \omega) \beta_o(\omega), \quad (11)$$

物资代储模式中的政府以成本最小化为目标, 对应的信息披露设计问题可转化为如下优化问题:

$$\min_{\tau_\alpha} \sum_{\beta_\alpha} \tilde{V}(\beta_\alpha) \tau(\beta_\alpha) \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \beta_o(\omega) = \sum_{\beta_\alpha} \tau(\beta_\alpha(\omega)) \beta_\alpha(\omega) \quad (13)$$

式中 $\tilde{V}(\beta_\alpha)$ 为企业灾害发生信念为 β_α 时的政府目

标。式 (13) 为贝叶斯相容约束。政府决策转化为找到一组概率分布 τ_α^* , 以最小化期望成本。 τ_α^* 确定后, 信息披露机制如下:

$$\pi^*(\alpha | \omega) = \frac{\beta_\alpha \tau^*(\beta_\alpha)}{\beta_o(\omega)} \quad (14)$$

由命题 2 可知:给定 Q^* , 政府目标 $\tilde{V}(\theta)$ 是 θ 的增凹函数。结合文献 [14], 通过构造 $\tilde{V}(\beta)$ 的凸包并求解相应的闭包函数, 可实现信息披露机制的设计。 $\tilde{V}(\beta)$ 及其凸包函数如图 1 所示, 图中线段所指部分即为政府通过信息披露降低的成本量。

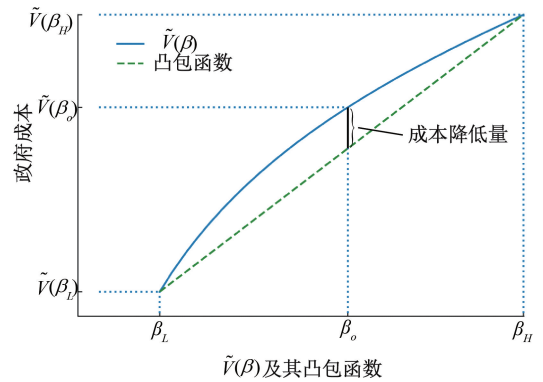


图 1 $\tilde{V}(\beta)$ 及其凸包函数

Fig. 1 An illustration of $\tilde{V}(\beta)$ and convex closure

由于政府的信息披露空间 Λ 是二元集合, 确定 β_α 的取值区间后, 直接求解式 (13) 和式 (14) 即可。基于 2 种认知区间的信息披露设计过程如下:

1) 假设政府和企业对灾害发生的先验认知较为模糊, 认知区间为 $(\theta, 1)$ 。选择后验信念为

$$\beta_L(1) = \frac{c - p_o}{p}, \beta_H(1) = 1, \text{ 即当企业收到 } L \text{ 信息时,}$$

其更新获得的后验信念为 $\beta_L(1) = \frac{c - p_o}{p}$; 当企业收到

H 信息时, 其更新获得的后验信念为 $\beta_H(1) = 1$ 。由贝叶斯相容约束与概率条件, 得联立方程组:

$$\begin{cases} \tau(\beta_L) \beta_L(1) + \tau(\beta_H) \beta_H(1) = \beta_o = \theta \\ \tau(\beta_L) + \tau(\beta_H) = 1 \end{cases} \quad (15)$$

求解可得: $\tau^*(\beta_L) = \frac{(1 - \theta)p}{p + p_o - c}, \tau^*(\beta_H) = 1 - \frac{(1 - \theta)p}{p + p_o - c}$ 。

根据式 (14), 政府信息披露机制为: $\pi^*(L | 0) = \frac{\beta_L(0) \tau^*(\beta_L)}{\beta_o(0)} = \frac{\beta_L(0) \tau^*(\beta_L)}{1 - \theta} = 1, \pi^*(H | 0) = \frac{\beta_H(0) \tau^*(\beta_H)}{\beta_o(0)} = \frac{\beta_H(0) \tau^*(\beta_H)}{1 - \theta} = 0, \pi^*(L | 1) =$

$$\frac{\beta_L(1)\tau^*(\beta_L)}{\beta_o(1)} = \frac{(c - p_o)(1 - \theta)}{\theta(p + p_o - c)}, \pi^*(H \mid 1) = \frac{\beta_H(1)\tau^*(\beta_H)}{\beta_o(1)} = \frac{p + p_o - c - (1 - \theta)p}{\theta(p + p_o - c)}.$$

政府信息披露策略为:当监测调查显示灾害倾向于不发生,政府将确定性地发布低等级预警信息,不发布高等级预警信息;当监测调查显示灾害倾向于发生,政府将以 $\frac{(c - p_o)(1 - \theta)}{\theta(p + p_o - c)}$ 概率发布低等级预警信息,以 $\frac{p + p_o - c - (1 - \theta)p}{\theta(p + p_o - c)}$ 概率发布高等级预警信息。

2) 假设政府与企业对灾害的先验认知较为明确,灾害发生先验区间为 $(\theta - \varepsilon, \theta + \varepsilon)$, 参数 ε 为波动程度。此时,选择后验信念上下界为 $\beta_L(1) = \theta - \varepsilon$ 和 $\beta_H(1) = \theta + \varepsilon$, 求解方程组:

$$\begin{cases} \tau(\beta_L)\beta_L + \tau(\beta_H)\beta_H = \theta \\ \tau(\beta_L) + \tau(\beta_H) = 1 \end{cases} \quad (16)$$

得 $\tau^*(\beta_L) = 0.5, \tau^*(\beta_H) = 0.5$ 。

政府信息披露机制为: $\pi^*(L \mid 0) = \frac{\beta_L(0)\tau^*(\beta_L)}{\beta_o(0)} = \frac{1 - \theta + \varepsilon}{2(1 - \theta)}, \pi^*(H \mid 0) = \frac{\beta_H(0)\tau^*(\beta_H)}{\beta_o(0)} = \frac{1 - \theta - \varepsilon}{2(1 - \theta)}, \pi^*(L \mid 1) = \frac{\beta_L(1)\tau^*(\beta_L)}{\beta_o(1)} = \frac{\theta - \varepsilon}{2\theta}, \pi^*(H \mid 1) = \frac{\beta_H(1)\tau^*(\beta_H)}{\beta_o(1)} = \frac{\theta + \varepsilon}{2\theta}.$

政府信息披露策略为:当监测结果表明灾害倾向于不发生,政府将以 $\frac{1 - \theta + \varepsilon}{2(1 - \theta)}$ 概率发布低等级预警信息,以 $\frac{1 - \theta - \varepsilon}{2(1 - \theta)}$ 概率发布高等级预警信息;当监测结果显示灾害倾向于发生,政府将以 $\frac{\theta - \varepsilon}{2\theta}$ 概率发布低等级预警信息,以 $\frac{\theta + \varepsilon}{2\theta}$ 概率发布高等级预警信息。

命题 5:政府基于贝叶斯劝说理论设计的信息披露机制能够同时改善政府和企业的目标。

证明:对第一种披露机制,企业收到 L 信息的概率 $\tau(\beta_L) = \frac{(1 - \theta)p}{p + p_o - c}$, 后验信念 $\beta_L(1) = \frac{c - p_o}{p}$, 此时企业不参与代储,期望收益为 0。企业收到 H 信

息的概率 $\tau(\beta_H) = 1 - \frac{(1 - \theta)p}{p + p_o - c}$, 后验信念 $\beta_H(1) = 1$, 企业最优储备量为 $\frac{U(p - c + p_o)}{p}$, 收益为 $\frac{U(p - c + p_o)^2}{2p}$ 。因此, $\Pi_b = \frac{U(p - c + p_o)(\theta p - c + p_o)}{2p}$, 与基准模型相比,有 $\Pi_b - \Pi^* = \frac{U(1 - \theta)(\theta p - c + p_o)(c - p_o)}{2\theta p} > 0$, 即企业的期望收益有所增加。对政府而言,以 $\tau(\beta_L)$ 的概率承担 $\frac{U\theta m}{2}$ 的成本,以 $\tau(\beta_H)$ 的概率承担 $\frac{U(\theta mp^2 - (m - p)(-c + p + p_o)(c + p - p_o)) + 2pp_o(-c + p + p_o)}{2p^2}$

的成本。由于图 1 中 V_b 的凹性,显然 $V_b < V^*$ 。同理,当政府采用第二种信息披露方式时,对企业而言,期望收益仍有所增加,即 $\Pi_b - \Pi^* = \frac{2U\delta^2((c - p_o)^2 + 2cp_o)}{4\theta p(\theta - \delta)(\theta + \delta)} > 0$ 。对政府而言,期望成本仍然小于基准模型,即 $V_b < V^*$ 。证毕。

2 模型对比的算例分析

通过数值算例进一步说明信息披露的效果。每年 7—8 月,我国雨季暴雨频发,极易造成城市洪涝灾害。例如:2021 年河南郑州“7·20”特大暴雨灾害^[16]、2023 年河北暴雨灾害^[17]等都造成了严重的人员伤害和经济损失。以城市洪涝灾害为例,假设政府与企业就某一社区的救灾食品进行代储合作,参考文献[12]和调研,设置参数如下: $c = 6$ 元, $p_o = 5$ 元, $p = 4$ 元, $m = 30$ 元, $\theta = \beta_o = 1/3$, $U = 20\,000$ 个。利用 Python 编程对模型进行算例分析。

灾害先验信念 $\beta_o = 1/3$ 时,2 种贝叶斯劝说模型的信息披露策略见表 1。可知:当企业的先验信念相对模糊时,模型 1 中政府更倾向于披露低等级预警信息。具体而言,监测发现灾害不发生时,政府只发布低等级预警 $\pi^*(L \mid 0) = 1$;监测发现灾害发生时,政府以 $\pi^*(L \mid 1) = 2/3$ 的概率发布低等级预警。此时,企业接收到低等级预警的概率较高,达到 $\tau^*(\beta_L) = 8/9$ 。针对重要性一般的物资,政府可采取这种信息披露机制。相应的,当企业的先验信念较为明确时,模型 2 中政府发布高低等级预警的概率更平均,企业收到高低预警的概率相等,为 1/2。

表 1 贝叶斯劝说信息披露规则

Table 1 Bayesian persuasion information disclosure rules

信息披露规则	贝叶斯劝说模型 1	贝叶斯劝说模型 2
$\pi^*(L 0)$	1	$0.5+0.75\varepsilon$
$\pi^*(H 0)$	0	$0.5-0.75\varepsilon$
$\pi^*(L 1)$	$2/3$	$0.5-1.5\varepsilon$
$\pi^*(H 1)$	$1/3$	$0.5+1.5\varepsilon$
$\tau^*(\beta_L)$	$8/9$	0.5
$\tau^*(\beta_H)$	$1/9$	0.5

ε 对信息披露策略的影响如图 2 和图 3 所示,其中,下标 1 和 2 分别表示上述 2 种信息披露策略。可知:随着 ε 的增大,企业对灾害发生的先验信念范围越大,政府越倾向于真实、准确地披露灾害情况。实践中,政府可根据具体的灾害类型和物资类型,结合 ε 制定相应的信息披露计划。

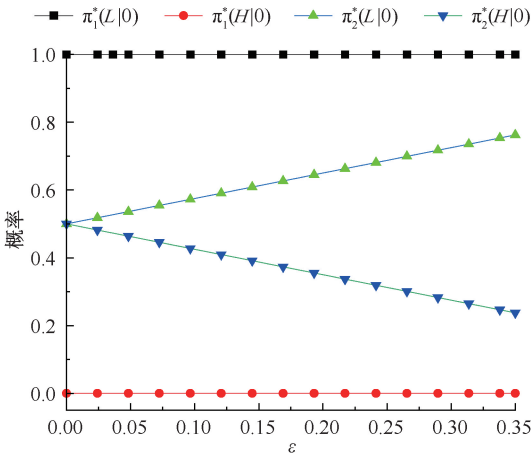


图 2 监测到灾害不发生时 ε 对信息披露的影响
Fig. 2 Influence of ε on information disclosure when monitoring disaster does not occur

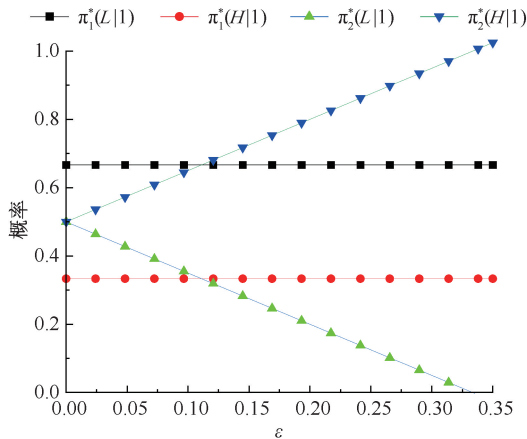


图 3 监测到灾害发生时 ε 对信息披露的影响
Fig. 3 Influence of ε on information disclosure when monitoring disaster does occur

先验信念 β_0 对信息披露的影响如图 4 和图 5 所示,其中, ε 取值 0.15。可知:当政府监测到灾害不发生时,随着 β_0 的增加,政府选择低等级预警的概率 $\pi_2^*(L|0)$ 随之增加,说明劝说模型还可以纠正企业对灾害发生的过高估计。当政府监测到灾害发生时,随着 β_0 的增大,劝说模型 1 倾向于如实披露,劝说模型 2 倾向于平均披露,即发布高低等级预警的几率相对均衡。可见,基于不同概率区间构造的劝说机制存在明显差异。

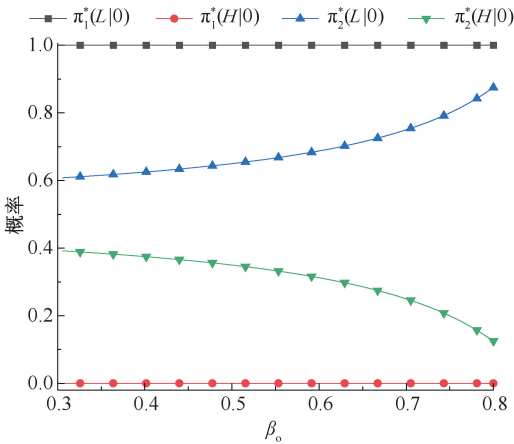


图 4 监测到灾害不发生时 β_0 对信息披露的影响
Fig. 4 Influence of β_0 on information disclosure when monitoring disaster does not occur

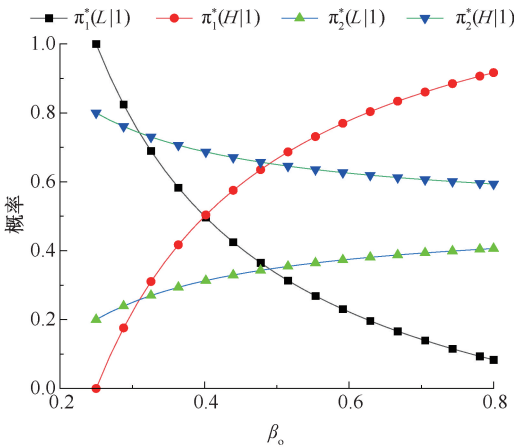


图 5 监测到灾害发生时 β_0 对信息披露的影响
Fig. 5 Influence of β_0 on information disclosure when monitoring disaster does occur

3 种模型在物资储备量、企业收益和政府成本等方面的比较结果见表 2。结果显示,补贴模型在提高物资储备上表现最为出色,提供了最大的储备量,其次是基准模型,贝叶斯劝说模型的储备量相对较少。需要说明的是,贝叶斯劝说模型的储备量是

表 2 不同模型结果对比

Table 2 Comparison of results of different decision models

对比项	基准模型	补贴模型	贝叶斯模型 1	贝叶斯模型 2($\varepsilon=0.1$)	贝叶斯模型 2($\varepsilon=0.15$)
最优储备量	5 000	7 059	1 667	3 516	1 191
最优单位补贴	—	0. 206	—	—	—
企业期望收益	833	1 661	2 500	1 575	2 738
政府期望成本	87 083	85 882	81 250	84 487	80 418

基于政府发布预警信息的期望值,当 $\beta_0=1/3$ 较低时,贝叶斯劝说模型通过较低的期望储备量避免了物资浪费。尽管期望储备量较低,但贝叶斯劝说模型在企业期望收益和政府期望成本方面的表现都明显优于基准模型和补贴模型,其中, $\varepsilon=0.15$ 的贝叶斯劝说模型 2 效果最好,降低了约 8% 的政府成本支出,而补贴模型仅能降低约 1.4% 的政府成本支出。同样,贝叶斯劝说模型的政府和企业目标也是期望值,当政府发布低等级预警信息时,企业的后验信念降低,储备量减少,政府主要成本为缺货惩罚;当政府发布高等级预警信息时,企业的后验信念提高,储备量增加,政府主要成本为采购支出。结果说明通过有效的信息披露策略,可以更好地平衡企业和政府的利益,实现整体效益的最大化。

β_0 对物资储备量、政府成本和企业收益的影响如图 6—图 8 所示。随着 β_0 的增加,各模型的储备量均呈现显著上升趋势,但模型间的储备量差异逐渐缩小。同时,政府的期望成本 and 企业的期望收益也随着 β_0 的增加而逐渐上升,但贝叶斯劝说模型在降低政府成本和提升企业收益方面的效果随 β_0 的增大而逐渐减弱。对政府而言,贝叶斯劝说模型比其他模型的优势明显;而对企业而言,当灾害概率区间较小 $\varepsilon=0.1$ 或 β_0 较大时,补贴模型的企业收益优

于劝说模型 2 的企业收益,但劝说模型 1 的企业收益始终高于补贴模型的企业收益。数值结果表明:基于贝叶斯劝说理论设计的信息披露机制同时有利于政府和企业的目标改善,且在大部分情况下,信息披露机制的效果优于传统的供应链回购补贴策略。

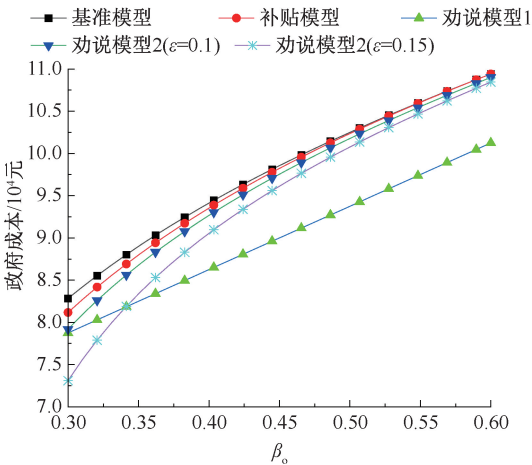


图 7 β_0 对政府期望成本的影响

Fig. 7 Influence of β_0 on government expected cost

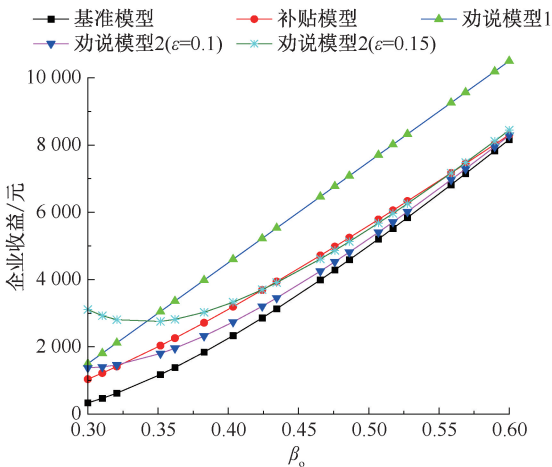


图 8 β_0 对企业期望收益的影响

Fig. 8 Influence of β_0 on enterprise expected profit

3 结 论

1) 企业的代储合作意愿与灾害发生概率紧密相关。只有当企业认为灾害发生可能性较高时,才

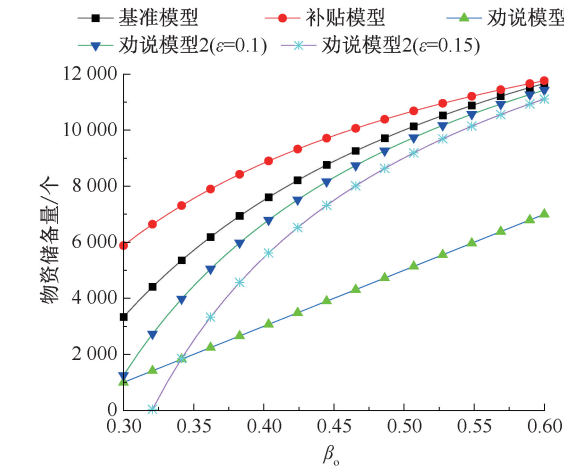


图 6 β_0 对物资储备量的影响

Fig. 6 Influence of β_0 on supplies reserve

会积极参与应急物资代储合作;随着灾害发生概率的增加,企业也会提高物资储备量。

2) 传统回购补贴措施能够改善政企双方目标,同时在提升物资储备量方面表现出色。但补贴模型不能保证企业收益一定有所提高,其成功实施需要满足特定的灾害概率条件。

3) 相较于基准模型和补贴模型,贝叶斯劝说模型在储备量、政府成本和企业收益方面均表现最优。贝叶斯劝说模型的物资期望储备量和政府期望成本

均低于其他两种模型,且在多数情况下,贝叶斯劝说模型的企业期望收益也高于基准模型。但随着企业灾害发生信念的上升,贝叶斯劝说模型的优势会减弱。

4) 为了便于求解分析,文中限制了一些模型参数,如缺货惩罚额等。未来可考虑放宽这些参数的限制范围,以更全面地反映实际情景。此外,还可以从政府监测成本、多供应企业以及生产能力储备等角度展开进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] MENG Qingchun, KAO Zhiping, GUO Ying, et al. An emergency supplies procurement strategy based on a bidirectional option contract[J]. Socio-economic Planning Sciences, 2023, 87: DOI: 10.1016/j.seps.2023.101515.
- [2] BALCIK B, BEAMON B M, KREJCI C C, et al. Coordination in humanitarian relief chains: practices, challenges and opportunities[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 126(1): 22-34.
- [3] ERTEM M A, BUYURGAN N, ROSSETTI M D. Multiple-buyer procurement auctions framework for humanitarian supply chain management[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2010, 40: 202-227.
- [4] 巩玲君,姜星宇,郭柯廷. 数量柔性契约下的政企三方联合储备决策研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(10): 221-228.
GONG Lingjun, JIANG Xingyu, GUO Keting. Research on joint reserve decision-making of government and enterprises under quantity flexibility contract[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 221-228.
- [5] ZHANG Lin, TIAN Jun, FUNG R Y K, et al. Materials procurement and reserves policies for humanitarian logistics with recycling and replenishment mechanisms[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 127: 709-721.
- [6] HU Shaolong, DONG Zhijie. Supplier selection and pre-positioning strategy in humanitarian relief[J]. Omega, 2019, 83: 287-298.
- [7] LIANG Liang, WANG Xihui, GAO Jianguo. An option contract pricing model of relief material supply chain[J]. Omega, 2012, 40: 594-600.
- [8] WANG Xihui, LI Feng, LIANG Liang, et al. Pre-purchasing with option contract and coordination in a relief supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 167: 170-176.
- [9] 扈袁权,田军,冯耕中. 基于期权采购的政企联合储备应急物资模型[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(8): 2 032-2 044.
HU Zhongquan, TIAN Jun, FENG Gengzhong. The model of joint emergency supplies reserves of governments and enterprises based on option procurement[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(8): 2 032-2 044.
- [10] HU Zhongquan, TIAN Jun, FENG Gengzhong. A relief supplies purchasing model based on a put option contract[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 127: 253-262.
- [11] 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.
LIU Yang, TIAN Jun, FENG Gengzhong, et al. The model of pre-positioning relief supplies under option contracts[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(12): 338-351.
- [12] 王喆,丛子皓,梁梦宇,等. 考虑维护水平的城镇防汛物资政企联合储备决策[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 202-209.
WANG Zhe, CONG Zihao, LIANG Mengyu, et al. Government-enterprise joint reserve decision for urban flood control materials considering level of maintenance[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 202-209.
- [13] 宋英华,宋迎辉,李潮欣,等. 考虑物资损毁对心理影响的应急物流配送模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 173-179.
SONG Yinghua, SONG Yinghui, LI Chaixin, et al. Emergency supplies distribution model considering psychological impact of supplies damage[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 173-179.
- [14] KAMENICA E, GENTZKOW M. Bayesian persuasion[J]. American Economic Review, 2011, 101: 2 590-2 615.
- [15] ALIZAMIR S, VÉRICOURT F, WANG Shouqiang. Warning against recurring risks: an information design approach[J]. Management Science, 2020, 66: 4 612-4 629.
- [16] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布 2021 年全国十大自然灾害[EB/OL]. (2022-01-23). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202201/t20220123_407199.shtml.
- [17] 中华人民共和国应急管理部. 国家防灾减灾救灾委员会办公室应急管理部发布 2023 年全国自然灾害[EB/OL]. (2024-01-20). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475696.shtml.



作者简介: 褚宏睿 (1987—),男,山东枣庄人,博士,副教授,主要从事应急物流与供应链等方面的研究。E-mail: chuhongrui@cueb.edu.cn。