

中文引用格式: 伍佳妮,刘之敬,王莹. 期权契约机制下考虑社会捐赠的应急物资混合储备决策[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7): 225-232.

英文引用格式: WU Jiani, LIU Zhijing, WANG Ying. Hybrid reserve decision-making for emergency supplies considering social donations under option contract mechanism[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 225-232.

期权契约机制下考虑社会捐赠的应急物资混合储备决策*

伍佳妮 副教授, 刘之敬, 王莹

(长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064)

中图分类号: X915.2; F251

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.0090

基金项目: 国家自然科学基金资助(72104037); 中央高校基本科研业务费项目(300102231647)。

【摘要】 为改善因过度依赖政府实物储备,在未发生突发事件时,造成高沉没成本或因物资不足造成高紧急采购成本的问题,首先引入期权契约,构建应急物资混合储备决策模型,并将社会捐赠纳入决策框架;然后研究期权契约机制下,考虑最小化政府期望成本,选择最优的混合储备模式和分配储备量,并提出最优决策的卡罗需-库恩-塔克(KKT)条件和最优策略,得出关于最优政府实物储备量、协议企业实物储备量和协议企业生产能力储备量的标准隐函数;最后将物资捐赠和资金捐赠作为应急物资供应的关键渠道,对相关参数进行敏感性分析和数值模拟,探讨期权契约权利金、捐赠物资处理成本、物资和资金捐赠量对最优储备策略及政府期望成本的影响。研究表明:政府可以灵活选择是否执行契约,降低期望成本并扩大储备规模;应急物资现货市场采购成本的增加会提高政府期望成本对需求量变化的敏感度;政府应积极引导社会力量参与应急救援,并根据突发事件的强度灵活调整捐赠策略。

【关键词】 期权契约; 社会捐赠; 应急物资; 混合储备决策; 物资捐赠; 资金捐赠

Hybrid reserve decision-making for emergency supplies considering social donations under option contract mechanism

WU Jiani, LIU Zhijing, WANG Ying

(School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: In order to improve the issues that excessive reliance on government physical reserves can lead to high sunk costs when no emergencies occur or high emergency procurement costs due to insufficient supplies. Firstly, the option contract was introduced to construct a hybrid reserve decision-making model for emergency supplies, incorporating social donations into the decision-making framework. Secondly, the selection of optimal hybrid reserve mode and allocation of reserve amount under the option contract mechanism were studied to minimize expected costs of the government. Then, the optimal decision based on the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions and optimal strategies were proposed. The standard implicit functions were obtained for the optimal amount of government physical reserves, contracted enterprise physical reserves, and contracted enterprise production capacity reserves. Finally, taking material donations and financial donations as the key channels for emergency supply provision. A

sensitivity analysis and numerical simulations of related parameters were conducted. The effects of option contract premiums, disposal costs of donated materials, and the amount of material and fund donations on optimal reserve strategies and expected costs of the government were explored. The results indicate that the government may flexibly choose whether to execute contracts for reducing expected costs and expanding reserve scale. The increase in procurement costs in the spot market for emergency supplies enhances the sensitivity of expected costs of the government to changes in demand. The government should actively guide social forces to participate in emergency rescue and flexibly adjust donation strategies according to the intensity of emergencies.

Keywords: option contract; social donations; emergency supplies; hybrid reserve decision-making; material donations; financial donations

0 引言

近年来,自然灾害、事故灾难、公共卫生事件等突发事件频发,且破坏力逐渐加剧,对国家安全、社会稳定和经济发展构成极大威胁,新冠疫情就曾暴露出我国多地应急物资保障体系的短板和不足。单一的政府实物储备已不足以应对多变的应急需求,拓展应急物资多元保障渠道成为必然趋势。

在此背景下,学者们开始关注政府储备和企业储备相结合、实物储备和产能储备相统筹的混合储备模式^[1-2],并验证其优势。巩玲君等^[3]研究表明:政企三级联合储备模式在提升整体储备规模、降低政府储存风险和提高企业利润上均具正向效应;王伟等^[4]构建了防汛物资政企联合储备模型,证明其能实现供应链整体利润最大化,使政府成本与企业利润最优。利用这类模型可以更加高效、可靠地供应应急物资,同时还能降低储备成本,提高储备效率,减少物资浪费和损失。为有效应对不确定风险,政企联合储备需要政企之间建立一定的契约机制,即买方支付一定的权利金给卖方,以获得这种选择权利。作为金融衍生品,因其独特的设计机制,在采购和风险管理中具有显著优势。一些学者发现期权契约机制可以使买方在一定程度上降低库存风险,供应商也能减少产能过剩的风险^[5-6]、收益共享^[7]。刘阳等^[8]构建了政企合作模式下基于期权契约的应急物资储备模型,并研究协调企业利润分配的柔性机制。HU Zhongquan 等^[9]比较了不同情景的契约模型,证明期权契约的优越性,并针对应急物资储备供应提出政企合作策略。

综上,期权契约既能缓冲突发需求波动对政府储备体系的冲击,又能通过权利金定价激励企业可持续参与,因此,将期权契约应用到应急物资混合储备决策问题研究中是一个合理的选择。另外,越来越多的学者提倡应急物资筹备方式应多样化^[10-11],

如实物储备、资金储备、紧急生产和采购、社会捐赠。

当前,社会力量尚未全面融入我国的应急管理体系,这一现状增加了政府应急物资保障体系的不确定性。《“十四五”国家应急体系规划》强调要优化应急物资管理,完善应急物资储备模式及应急捐赠物资管理分配机制。通过构建“政府主导—企业协同—社会参与”的多元储备体系,来高效应对突发事件,这对健全应急物资保障体系具有重要理论价值与实践意义。尽管有研究尝试量化社会捐赠,但相关文献存在不足之处,特别是在影响应急物资储备决策方面,仅有少量文献深入剖析物资捐赠对政府实物储备决策的影响^[12],且忽略了资金捐赠对优化救援物资储备的作用。

鉴于此,笔者在期权契约机制下探讨政府实物储备、协议企业实物储备(简称企业实物储备)和协议企业生产能力储备(简称企业产能储备)构成的混合储备决策问题,即应如何分配不同储备模式储备量,将社会捐赠作为随机参数纳入决策框架,并进一步考虑社会捐赠因素对储备决策的影响,以实现既能满足应急需求、又能节约成本的物资管理。

1 期权契约机制下混合储备问题描述

1.1 应急物资混合储备决策流程描述

我国应急物资储备体系在应对突发事件时呈现多层次响应特征。在期权契约机制下,突发事件发生后,政府优先启用政府实物储备量 Q_1 (件)实施紧急救援,同步启动社会动员机制吸纳物资捐赠量 D (件)与资金捐赠量 S (件),以弥补初期资源缺口。其中, Q_1 的采购成本为单位应急物资采购成本 P_1 (元/件),储备期间需承担单位应急物资储备成本 c (元/件), S 为按单位应急物资现货市场采购成本 P_2 (元/件)换算的物资等效量。

由于仓储设施容量限制,捐赠物资需建立快速

通道实施即收即发动态调配,需支付单位物资捐赠处理成本 r (元/件)用于运输分发,尤其是本地企业、民间组织的物资捐赠能迅速抵达灾区,填补 Q_1 的短期缺口。当 Q_1 与 D 仍无法满足救灾需求时,政府将快速启用企业实物储备量 Q_2 (件)与企业产能储备量 Q_3 (件)组织生产,最后通过 S 在现货市场采购应急物资。其中, Q_2 为企业预先储备的实物应急物资,政府需预付企业实物储备模式单位应急物资期权契约权利金 O_1 (元/件),灾时调用按执行价格 e_1 (元/件)采购,同时需防范企业投机行为,协议企业投机被发现的概率为 θ ,投机时可处以单位应急物资罚款 ε ,该模式下企业投机比例为 w_1 ; Q_3 为企业预留的生产能力,政府预付企业产能储备模式单位应急物资期权契约权利金 O_2 (元/件),灾时调用按执行价格 e_2 (元/件)采购,企业投机比例为 w_2 。

由于受赠机构将资金转换成物资需要一定流转时间,且物资捐赠等来源的应急物资已经占据了一部分市场资源,用捐赠而来的资金去现货市场采购合适数量物资的难度会增加,因此资金捐赠的响应时间会相对较长。

假设突发事件发生概率为 ρ ($0 < \rho < 1$),应急物资随机需求量为 x ($x > 0$, 件), x 的上限为区域内最大应急物资需求量 M ,其概率分布函数为 $F(x)$,概率密度函数为 $f(x)$, $F(x)$ 连续递增可导,反函数为 $F^{-1}(x)$ 。

综上所述,在突发事件发生后,政府通常按照“政府实物储备—物资捐赠—企业实物储备—企业产能储备—资金捐赠”的顺序满足灾后应急物资需求;若仍有需求未得到满足,将以 P_2 从现货市场紧急采购物资补充。若 Q_1 、 D 、 Q_2 、 Q_3 在满足需求后仍有剩余,则在期末进行报废处理,处理后将产生单位应急物资残值 v (元/件)收入,即期末政府实物储备库库存为 0。

1.2 期权契约机制下混合储备决策模型假设条件

1) 模型涉及的应急物资为需求量大、生产周期短、保质期长且适用性广泛的单一物资品种,如帐篷、棉被等。参照文献[13-14], x 服从指数分布。

2) 模型是单期的,且只有 1 个政府与 1 家企业构成的二级供应链。

3) 不考虑时间对应急物资储备成本的影响。

4) $e_1 > v$, $e_2 > v$,若产能储备执行价格低于期末残值,企业可能在灾害未发生时选择不执行契约,转而将物资以更高残值在市场上出售,导致政府应急物

资无法保障。 $e_2 > e_1$,产能储备模式下,企业紧急启动生产,需承担额外成本:生产启动成本、应急采购溢价等。因此,产能储备的执行价格需高于实物储备,以补偿企业应急生产的动态成本。

5) $P_2 > O_1 + e_1$, $P_2 > O_2 + e_2$,若不满足此条件,政府将不再采用期权契约的方式提前储备应急物资,而是在突发事件发生后从现货市场紧急采购。

6) $e_1 > r + v$,否则在调用企业实物储备之前不会优先调用捐赠物资。

2 期权契约下混合储备决策模型

2.1 应急物资混合储备决策模型构建

若应急物资储备周期内未发生突发事件,政府相关部门将政府实物储备中未使用的物资转换为残值收入,并获得因协议企业的投机行为而产生的一部分罚款收入,此时的政府期望成本 EC_g 为:

$$EC_{g1} = (P_1 + c - v)Q_1 + O_1Q_2 + O_2Q_3 - \theta\varepsilon(w_1Q_2 + w_2Q_3) \quad (1)$$

若应急物资储备周期内发生突发事件,政府期望成本分为以下 6 种情况:

1) 当 $0 \leq x \leq Q_1$ 时,政府调用自身实物储备以满足需求,在储备周期结束后,获得残值收入 $v(Q_1 + D - x)$,全部资金捐赠转换为资金收入,获得资金收入 P_2S 。

2) 当 $Q_1 < x \leq Q_1 + D$ 时,政府调用完全部自身实物储备后调用物资捐赠,同时支付 $r(x - Q_1)$,在储备周期结束后,获得残值收入 $v(Q_1 + D - x)$,全部资金捐赠转换为资金收入,获得资金收入 P_2S 。

3) 当 $Q_1 + D < x \leq Q_1 + D + Q_2$ 时,政府调用全部自身储备和物资捐赠,并支付 rD 后,以执行企业实物储备期权契约的方式采购物资来进一步满足应急物资需求,支付执行价 $e_1(x - Q_1 - D)$,全部资金捐赠转换为资金收入,获得资金收入 P_2S 。

4) 当 $Q_1 + D + Q_2 < x \leq Q_1 + D + Q_2 + Q_3$ 时,政府需要支付 rD 和 e_1Q_2 ,同时还需要以执行产能储备期权契约的方式采购物资,并支付执行价 $e_2(x - Q_1 - D - Q_2)$,全部资金捐赠转换为资金收入,获得资金收入 P_2S 。

5) 当 $Q_1 + D + Q_2 + Q_3 < x \leq Q_1 + D + Q_2 + Q_3 + S$ 时,政府为进一步满足应急物资需求,需要支付 rD 和 e_1Q_2 ,同时支付 e_2Q_3 ,未使用的资金捐赠转换为资金收入,获得资金收入 $P_2(Q_1 + D + Q_2 + Q_3 + S - x)$ 。

6) 当 $Q_1 + D + Q_2 + Q_3 + S < x \leq M$ 时,政府需要支付

rD, e_1Q_2 和 e_2Q_3 , 政府还会以从现货市场采购的形式补充其余的应急物资需求, 支付 $P_2(x - Q_1 - D - Q_2 - Q_3 - S)$ 。

根据以上分析可知: 若应急物资储备周期内发生突发事件, 政府期望成本为:

$$\begin{aligned} EC_{g2} = & (P_1 + c)Q_1 + O_1Q_2 + O_2Q_3 - \theta\varepsilon(w_1Q_2 + \\ & w_2Q_3) - \int_0^{Q_1} [v(Q_1 + D - x) + \\ & P_2S]f(x)dx + \int_{Q_1}^{Q_1+D} [r(x - Q_1) - \\ & v(Q_1 + D - x) - P_2S]f(x)dx + \\ & \int_{Q_1+D}^{Q_1+D+Q_2} [rD + e_1(x - Q_1 - D) - \\ & P_2S]f(x)dx + \int_{Q_1+D+Q_2}^{Q_1+D+Q_2+Q_3} [rD + \\ & e_1Q_2 + e_2(x - Q_1 - D - Q_2) - \\ & P_2S]f(x)dx + \int_{Q_1+D+Q_2+Q_3}^{Q_1+D+Q_2+Q_3+S} [rD + \\ & S - x]f(x)dx + \int_{Q_1+D+Q_2+Q_3+S}^M [rD + \\ & e_1Q_2 + e_2Q_3 + P_2(x - Q_1 - D - Q_2 - \\ & Q_3 - S)]f(x)dx \quad (2) \end{aligned}$$

整理式(1)可得出期权契约机制下考虑社会捐赠的应急物资混合储备决策模型, 即目标函数政府期望成本:

$$\begin{aligned} \min EC_g = & (1 - \rho)EC_{g1} + \rho EC_{g2} = \\ & (P_1 + c + \rho v - v - \rho P_2)Q_1 + \\ & (O_1 + \rho e_1 - \theta\varepsilon w_1 - \rho P_2)Q_2 + \\ & (O_2 + \rho e_2 - \theta\varepsilon w_2 - \rho P_2)Q_3 + \\ & \rho P_2(M - D - S) - \rho v \int_0^{Q_1} F(x)dx - \\ & \rho(r + v) \int_{Q_1}^{Q_1+D} F(x)dx - \\ & \rho e_1 \int_{Q_1+D}^{Q_1+D+Q_2} F(x)dx - \\ & \rho e_2 \int_{Q_1+D+Q_2}^{Q_1+D+Q_2+Q_3} F(x)dx - \\ & \rho P_2 \int_{Q_1+D+Q_2+Q_3}^M F(x)dx \quad (3) \end{aligned}$$

2.2 混合储备策略分析

定理 1: EC_g 是关于 (Q_1, Q_2, Q_3) 的严格凸函数。 其中,

$$\begin{aligned} \delta_1 = & P_1 + c + \theta\varepsilon w_1 - v - \rho(e_1 - v), \delta_2 = \frac{(O_2 - \theta\varepsilon w_2)(e_1 - v) + \theta\varepsilon w_1(e_2 - v) + (e_2 - e_1)(P_1 + c - v)}{e_2 - v}, \\ \eta = & \frac{\theta\varepsilon w_2(P_2 - e_1) + (P_2 - e_2)(O_1 - \theta\varepsilon w_1)}{P_2 - e_1}. \end{aligned}$$

由定理 1 可知: 若最优策略为采用 3 种模式混合储备的情况, 其全局最优解可通过求解以下卡罗需-库恩-塔克 (Karush-Kuhn-Tucker, KKT) 条件得出:

$$\begin{aligned} P_1 + c + \rho v - v - \rho P_2 + \rho rF(Q_1) + \\ \rho(e_1 - r - v)F(Q_1 + D) + \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho(e_2 - e_1)F(Q_1 + D + Q_2) + \\ \rho(P_2 - e_2)F(Q_1 + D + Q_2 + Q_3) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_1 + \rho e_1 - \theta\varepsilon w_1 - \rho P_2 + \\ \rho(e_2 - e_1)F(Q_1 + D + Q_2) + \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho(P_2 - e_2)F(Q_1 + D + Q_2 + Q_3) = 0 \\ O_2 + \rho e_2 - \theta\varepsilon w_2 - \rho P_2 + \end{aligned} \quad (6)$$

$$\rho(P_2 - e_2)F(Q_1 + D + Q_2 + Q_3) = 0$$

通过以上 KKT 条件的运算得出最优储备策略最优政府实物储备量 Q_1^* (件)、最优企业实物储备量 Q_2^* (件)、最优企业产能储备量 Q_3^* (件) 的标准隐函数形式:

$$\begin{aligned} P_1 + c + \theta\varepsilon w_1 - v - O_1 + \rho[v - e_1 + \\ rF(Q_1^*) + (e_1 - r - v)F(Q_1^* + D)] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} O_1 - O_2 + \theta\varepsilon(w_2 - w_1) + \rho(e_2 - \\ e_1)[F(Q_1^* + D + Q_2^*) - 1] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} O_2 - \theta\varepsilon w_2 + \rho(P_2 - e_2) \\ [F(Q_1^* + D + Q_2^* + Q_3^*) - 1] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 混合储备决策模型关键参数的敏感性分析

定理 2: 当 $D=S=0$ 时, 在满足 $\delta_1 < O_1 < \delta_2$ 以及 $O_2 < \eta$ 时, 政府采用 3 种模式混合储备策略, 最优储备量如下:

$$\begin{cases} Q_1^* = F^{-1}\left(1 + \frac{O_1 + v - \theta\varepsilon w_1 - P_1 - c}{\rho(e_1 - v)}\right) \\ Q_2^* = F^{-1}\left(1 + \frac{O_2 + \theta\varepsilon w_1 - \theta\varepsilon w_2 - O_1}{\rho(e_2 - e_1)}\right) - Q_1^* \\ Q_3^* = F^{-1}\left(1 + \frac{\theta\varepsilon w_2 - O_2}{\rho(P_2 - e_2)}\right) - Q_1^* - Q_2^* \end{cases} \quad (10)$$

- 此时:
- 1) Q_1^* 随着 O_1 的增大而增大,随着 P_1 和 c 的增大而减小,不受 O_2 的影响。
 - 2) Q_2^* 随着 P_1 、 O_2 和 c 的增大而增大,随着 O_1 的增大而减小。
 - 3) Q_3^* 随着 O_1 的增大而增大,随着 O_2 的增大而减小,不受 P_1 和 c 的影响。
 - 4) 最优总储备量 $Q_1^* + Q_2^* + Q_3^*$ 不受 O_1 的影响。

定理 2 表明:当最优策略为政府采用 3 种模式混合储备时,单位应急物资采购成本和单位应急物资储备成本的上升造成政府实物储备模式的成本上升,为了保持一定的实物储备量以保证救援效率,政府应降低其实物储备量,增加成本较低的企业实物储备期权契约购买量;当单位应急物资实物储备期权契约权利金上升时,政府成本增加,因此降低企业实物储备期权契约购买量,同时,为了保持一定的实物储备量并进一步降低政府期望成本,政府应增加实物储备量和成本低的企业产能储备期权契约购买量;当单位应急物资产能储备期权契约权利金上升时,政府会降低产能储备期权契约购买量,同时保持原有储备水平,政府会增加成本较低的企业实物储备期权契约购买量。随着单位应急物资实物储备期权契约权利金的增大,企业实物储备量减少,政府实物储备量与企业产能储备量增加,但由于最优总储备量不受 O_1 的影响,因此,企业实物储备模式的减少量等于政府实物储备模式与企业产能储备模式的增加量总和。

定理 3:当 $D>0, S>0$ 时, Q_1^* 随着 r 的增大而增加; Q_2^* 随着 r 的增大而减少; Q_3^* 和 $Q_1^* + Q_2^* + Q_3^*$ 均不受 r 的直接影响。

定理 3 表明:单位捐赠物资处理成本增大并不会直接影应急物资的最优总储备量,但它会导致政府使用物资捐赠的成本上升。因此,政府倾向于增加自身实物储备量以减少对物资捐赠的依赖,并相应减少企业实物储备量以降低政府期望成本。在单位捐赠物资处理成本增大时,政府会考虑到企业履约能力不足、生产能力失效等情况,因此更愿意增加自身的物资储备。政府自储的成本虽然高于企业自储,但政府可以通过集中管理降低协调风险,减少对外部不确定性的依赖。因此,捐赠处理成本上升会迫使政府减少企业储备和物资捐赠,转向内部储备。同时,鉴于政府自储存在空间承载力限制,政府仍然需要持有足够多的企业产能储备量。

定理 4: Q_1^* 和 $Q_1^* + Q_2^* + Q_3^*$ 均随着 D 的增加

而减少; Q_3^* 不受 D 的影响; Q_2^* 随着 D 的增加的具体变化取决于 Q_1^* 随 D 的变化。此外, Q_1^* 、 Q_2^* 、 Q_3^* 和 $Q_1^* + Q_2^* + Q_3^*$ 均不受 S 的影响。

根据定理 4,随着物资捐赠量的增加,政府会降低应急物资的政府实物储备量和总储备量。由于物资捐赠通常能够迅速到位并直接用于灾区,能够有效弥补政府应急物资储备不足的风险。在此情况下,政府可以适度降低应急物资的总储备量,以更高效地利用资源,并确保应急响应的及时性和有效性。考虑到应急物资需求的不确定性,在降低总储备量时,政府通常会倾向于维持企业产能储备量不变。储备策略不受资金捐赠量的影响,这是因为资金捐赠量的作用类似于当发生突发事件后所获得的额外应急物资采购资金补助,对突发事件发生前的应急物资储备模式没有影响。

3 应急混合储备决策模型数值仿真

现定义政府可能采用的 8 种储备策略,见表 1。

表 1 储备策略分类

Table 1 Classification of reserve strategies				
情况	Q_1 /件	Q_2 /件	Q_3 /件	储备策略类型
I	>0	>0	>0	3 种模式混合储备
II	>0	>0	$=0$	政府+企业实物储备
III	>0	$=0$	>0	政府实物+企业产能储备
IV	$=0$	>0	>0	企业实物+产能储备
V	>0	$=0$	$=0$	仅政府实物储备
VI	$=0$	>0	$=0$	仅企业实物储备
VII	$=0$	$=0$	>0	仅企业产能储备
VIII	$=0$	$=0$	$=0$	无提前储备

假设 x 服从参数为 0.000 02 的指数分布, D 和 S 均服从区间 $(0, 10\ 000)$ 上的均匀分布^[15]。

3.1 期权契约权利金对最优储备量的影响

3.1.1 企业实物储备模式期权契约权利金

$O_1 = 27 : 0.001; 35$ 为企业实物储备模式单位应急物资期权契约权利金以 0.001 为步长从 27 增加到 35,相关参数设置如下: $D = S = 0, r = 0, P_1 = 43, P_2 = 200, c = 1.2, v = 10, O_2 = 22, e_1 = 22, e_2 = 40, \theta = 0.4, \varepsilon = 45, w_1 = 0.1, w_2 = 0.1, \rho = 0.5$ 。仿真结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,当企业实物储备模式单位应急物资期权契约权利金处于较低水平时 $(27 \leq O_1 \leq 30)$,即图中对应的情况 IV,企业实物储备量随 O_1 增大而减少的速度与企业产能储备量随 O_1 增大而增加的速度相等,总储备量维持不变。当企业实物储备模式单位应急物资期权契约权利金进一步增大

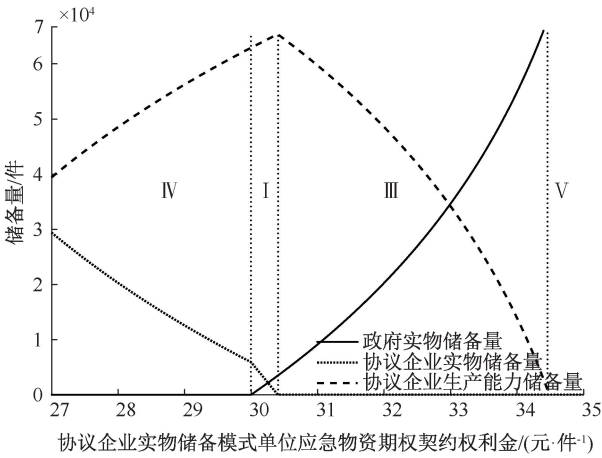


图1 企业实物储备模式单位应急物资期权契约权利金对储备策略的影响

Fig.1 Impact of unit emergency materials option contract premium in contracted enterprise physical reserve mode on optimal reserve strategy

时($30 \leq O_1 \leq 30.4$),即图中对应的情况I,此时由于企业实物储备模式成本较高,企业实物储备量减少的速度加快,为了保持一定的实物储备量,政府会增加政府实物储备量,与定理1中关于 O_1 的结论一致。当企业实物储备模式单位应急物资期权契约权利金高于一定阈值时($30.4 \leq O_1 \leq 35$),即图1中对应的情况III,此时企业实物储备模式失去了成本优势,政府最优储备策略为政府实物储备和企业产能储备两种模式混合储备。此外,从作图数据还可以发现,总储备量始终不受企业实物储备模式单位应急物资期权契约权利金的影响。

3.1.2 产能储备模式期权契约权利金

$O_2 = 19 : 0.001 : 27$ 为产能储备模式单位应急物资期权契约权利金以0.001为步长从19增加到27,对相关参数设置如下: $D = S = 0, r = 0, P_1 = 43, P_2 = 200, c = 1.2, v = 10, O_1 = 31, e_1 = 22, e_2 = 40, \theta = 0.4, \varepsilon = 45, w_1 = 0.1, w_2 = 0.1, \rho = 0.5$ 。仿真结果如图2所示。

从图2可以发现,当企业产能储备模式单位应急物资期权契约权利金处于较低水平时($19 \leq O_2 \leq 21$),即图中对应的情况VII,政府的最优储备策略为大量持有产能储备量,充分利用企业产能储备模式的成本优势。随着企业产能储备模式单位应急物资期权契约权利金进一步增大($21 \leq O_2 \leq 23.5$),即图中对应的情况III,政府相关部门将逐渐采用政府实物储备模式。当企业产能储备模式单位应急物资期权契约权利金达到较高水平时($23.5 \leq O_2 \leq 27$),政府的最优储备策

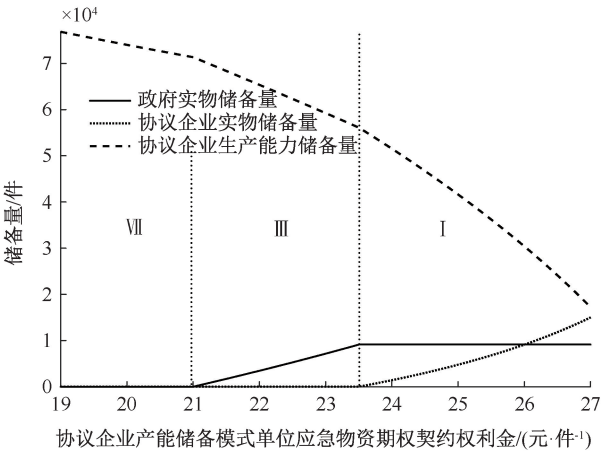


图2 协议企业产能储备模式单位应急物资期权契约权利金对储备策略的影响

Fig.2 Impact of unit emergency materials option contract premium in contracted enterprise capacity reserve mode on optimal reserve strategy

略为采用3种模式混合储备,政府实物储备量将不再受企业产能储备模式单位应急物资期权契约权利金的影响,此时企业产能储备模式成本过高,政府会降低企业产能储备持有量,同时增加企业实物储备量,进一步提高了应急物资储备的总体可靠性。

3.2 物资捐赠处理成本对最优储备策略的影响

$r = 0 : 0.01 : 1.2$ 为单位物资捐赠处理成本以0.01为步长从0增大到1.2,对相关参数设置如下: $D = 5\,000, S = 0, P_1 = 43, P_2 = 200, c = 1.2, v = 10, O_1 = 30, O_2 = 22, e_1 = 22, e_2 = 40, \theta = 0.4, \varepsilon = 45, w_1 = 0.1, w_2 = 0.1, \rho = 0.6$ 。仿真结果如图3所示。

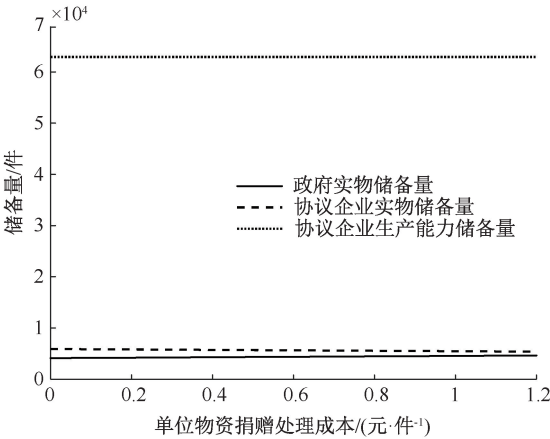


图3 单位物资捐赠处理成本对最优储备策略的影响

Fig.3 Impact of handling cost of unit material donation on optimal reserve strategy

从图3可以发现,当单位物资捐赠处理成本在逐渐增大时,最优政府实物储备量增加,最优企业实

物储备量则相应减少,政府期望成本会随着单位物资捐赠处理成本的增大而增大。这是因为随着单位物资捐赠处理成本的增大,政府会选择增加自身的政府实物储备量,以减少对物资捐赠的依赖,同时为了维持原有实物储备量并进一步降低成本,政府还会相应地减少企业实物储备量。此外,为了应对应急物资需求的不确定性,最优企业产能储备量和最优应急物资总储备量并未受到单位物资捐赠处理成本变化的直接影响。这一发现与定理 3 的结论相吻合,进一步验证了定理的准确性和适用性。

3.3 物资捐赠量对最优储备策略的影响

$D=4\ 500:5:10\ 000$ 为物资捐赠量以 5 为步长从 4 500 增大到 10 000,对其余相关参数设置如下: $P_1=43, P_2=200, c=1.2, v=10, r=0.6, O_1=30, O_2=22, e_1=22, e_2=40, \theta=0.4, \varepsilon=45, w_1=0.1, w_2=0.1, \rho=0.6$ 。仿真结果如图 4 所示。

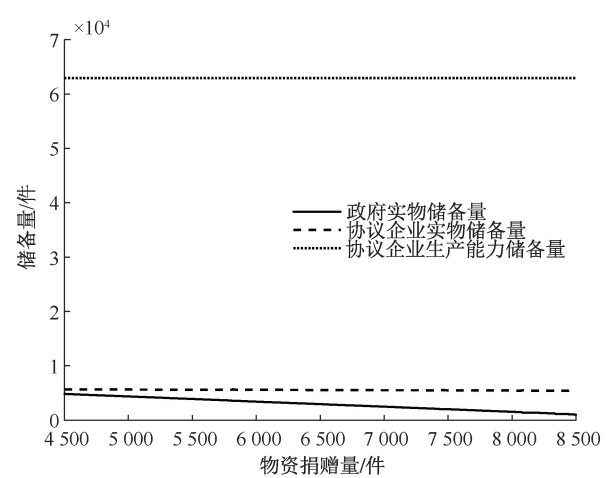


图 4 物资捐赠量对最优储备策略的影响
Fig. 4 Impact of material donation volume on optimal reserve strategy

从图 4 可以看出,随着应急物资捐赠量的增加,最优政府实物储备量呈下降趋势,因为物资捐赠是以实物的形式捐赠,可以有效弥补政府实物储备不足的风险,因此,政府为了进一步降低期望成本会减少政府实物储备量;同时,为了应对应急物资需求的不确定性,最优企业实物储备量和最优企业产能储备量保持不变。然而,无论物资捐赠量的变化如何,应急物资的总储备量将呈现减小的趋势,这一发现与定理 4 中关于物资捐赠量的结论相吻合。因此,政府相关部门应对持续优化物资捐赠制度,积极引导社会力量参与物资筹措环节,不仅可以提高应急物资的供应量,还可以降低政府成本。

3.4 物资和资金捐赠量对政府期望成本的影响

$D=4\ 500:5:10\ 000 (S=4\ 500:5:10\ 000)$ 为物资捐赠量(资金捐赠量)以 5 为步长从 4 500 增大到 10 000,对其余相关参数设置如下: $S=5\ 000 (D=5\ 000), P_1=43, P_2=200, c=1.2, v=10, r=0.6, O_1=30, O_2=22, e_1=22, e_2=40, \theta=0.4, \varepsilon=45, w_1=0.1, w_2=0.1, \rho=0.6$ 。仿真结果如图 5 所示。

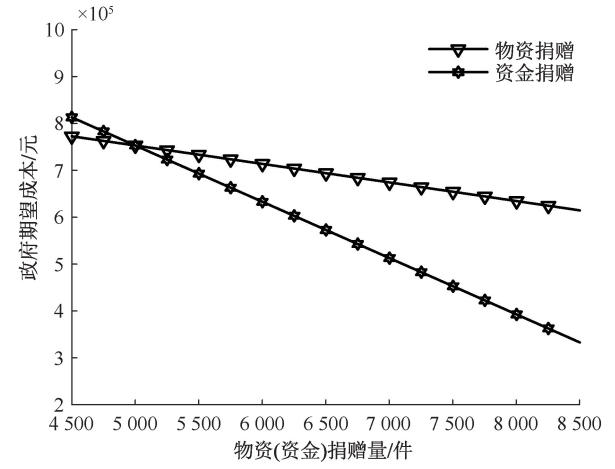


图 5 物资/资金捐赠量对政府期望成本的影响
Fig. 5 Impact of material/financial donation volume on government's expected costs

从图 5 可以看出,无论是物资捐赠量或资金捐赠量的增加,都将使政府期望成本降低;且政府期望成本对资金捐赠量的敏感程度要高于对物资捐赠量的敏感程度;当物资/资金捐赠量低于 5 000 时,物资捐赠对应的政府期望成本更低。因此,政府相关部门应当积极号召个人、企业或慈善组织等以多样化的社会捐赠形式参与到应急救援保供中,从而降低政府期望成本,提高应急救援效率;此外,当突发事件强度不高时,政府可号召社会进行物资捐赠;当突发事件强度较高时,资金捐赠带来的成本优势更大,政府可加强引导社会进行资金捐赠。

4 结 论

- 1) 政府期望成本对应急物资需求量变化的敏感度随采购成本增加而提高,因此,政府要提升应急物资需求预测能力,避免因储备不足被迫高价采购现货,合理调整储备数量,从而有效控制整体成本。
- 2) 在期权契约机制下,契约权利金的浮动对政府储备策略的影响显著,因此,政府应密切关注期权契约权利金的波动情况,灵活调整应急物资储备策略,以应对不同情境。同时,政府应积极与供应链上游企业建立长期稳定的合作关系,通过谈判和协商降低期权契

约权利金,降低应急物资储备的整体成本。此外,政府还应提高应急响应能力和效率,确保在突发事件发生时能够及时、有效地提供所需的应急物资。

3) 当单位物资捐赠处理成本在一定范围内提高时,政府会增加实物储备量,减少对捐赠物资的依

赖。因此,采取一系列措施,进一步提高物资捐赠的处理效率和管理水平,这样不仅可以提升应急响应的及时性和有效性,还能降低政府在储备周期内的期望成本,例如:优化流程与标准化操作、引入信息化技术和合理利用志愿者资源等。

参考文献

[1] 杨曼,刘德海,李德龙. 政企实物-生产能力应急物资储备与采购定价的微博弈模型[J]. 管理评论, 2023, 35(9): 274-286.
YANG Man, LIU Dehai, LI Delong. A differential game model of government and enterprises material-production capacity emergency supplies reserve and procurement pricing[J]. Management Review, 2023, 35(9): 274-286.

[2] 扈袁权, 田军, 冯耕中, 等. 协议企业代储模式下应急物资储备策略及采购定价研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(3): 605-616.
HU Zhongquan, TIAN Jun, FENG Gengzhong, et al. Research on emergency supplies reserve strategy and procurement pricing under agreement enterprise reserve[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020, 40(3): 605-616.

[3] 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 reverse decision-making of government and enterprise under quantity flexibility contract[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 221-228.

[4] 王伟,宋月,陈志松,等. 防汛物资应急储备管理博弈决策模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 191-198.
WANG Wei, SONG Yue, CHEN Zhisong, et al. Game decision model of emergency reserve management of flood control materials[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 191-198.

[5] CHEN Xu, HAO Gang, LI Ling. Channel coordination with a loss-averse retailer and option contracts[J]. International Journal of Production Economics, 2014, 150: 52-57.

[6] DEVANGAN L, AMIT R K, MEHTA P, et al. Individually rational buyback contracts with inventory level dependent demand[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 142(2): 381-387.

[7] SHARMA A, DWIVEDI G, SINGH A. Game-theoretic analysis of a two-echelon supply chain with option contract under fairness concerns[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 137: DOI: 10.1016/j.cie.2019.106096.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 李晟,丰景春,吴凯丽,等. 政企联合储备应急物资的合作策略研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(11): 222-232.
LI Sheng, FENG Jingchun, WU Kaili, et al. Study on cooperative strategy of government-enterprise joint reserve of emergency supplies[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(11): 222-232.

[11] 姜旭,秦子楚,辛少凡. 基于代储模式政企应急物资多级储备决策[J]. 系统工程, 2024, 42(1): 87-99.
JIANG Xu, QIN Zichu, XIN Shaofan. Multi-stage reserve decision of government and enterprise emergency supplies based on agent storage model[J]. Systems Engineering, 2024, 42(1): 87-99.

[12] 陈敬贤,梁樑. 多产品救援物资的储备决策:一个扩展的 Newsvendor 模型[J]. 中国管理科学, 2018, 26(6): 143-152.
CHEN Jingxian, LIANG Liang. Pre-positioning decisions of stockpiling multiple relief materials: an extended Newsvendor approach[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(6): 143-152.

[13] PATRA D T P, JHA J K. Bidirectional option contract for prepositioning of relief supplies under demand uncertainty[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 163: DOI: 10.1016/j.cie.2021.107861.

[14] 胡婉婷,丁晶晶,梁樑. 基于期权代储协议的应急物资政企联合储备模型研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(9): 101-112.
HU Wanting, DING Jingjing, LIANG Liang. Emergency supplies procurement pricing strategy under quantity flexible contract[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(9): 101-112.

[15] 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.
LIU Yang, TIAN Jun, FENG Gengzhong, et al. The model of joint relief supplies pre-positioning by the government two suppliers based on option contracts and suppliers' profits allocation mechanism[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(8): 162-171.



作者简介: 伍佳妮 (1984—),女,湖南溆浦人,博士,副教授,博士生导师,主要从事物流与供应链管理、安全应急管理等方面的研究。E-mail: jianiwu@chd.edu.cn。