

考虑制造商补贴的政企三方联合应急物资储备决策与工程应用研究

吕柏路

江西理工大学安全工程学院, 江西 赣州

收稿日期: 2026年9月28日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月29日

摘要

针对应急物资三级供应链中供应商原材料储备剩余损失自担导致储备不足问题, 本文基于管理工程视角开展契约机制设计, 在数量柔性契约框架下, 设计制造商对供应商剩余原材料的事后补贴机制, 构建政府主导的三级供应链Stackelberg博弈模型; 运用逆向归纳法求解三方最优储备决策, 并通过数值算例对比有无补贴两种情形的均衡结果。博弈求解结果证明, 补贴机制能够同步抬高供应商原材料储备、制造商成品储备规模, 降低政府期望应急成本; 数值仿真结果显示补贴可以改善供应商期望利润, 且补贴作用于制造商期望利润存在阈值效应: 仅当制造商灾后原材料采购价低于临界阈值并且补贴强度适中时可达成三方帕累托改进, 补贴过高或是灾后原材料采购价高于临界值都会压缩制造商收益。结合应急物资储备工程实际工况, 本文验证了上述均衡结果的工程适用性, 并提出了相应的补贴参数选取建议。该研究可为政企联合应急储备体系上游供应链契约优化、风险共担机制设计与应急运营决策提供理论参考。

关键词

应急物资储备, 政企三方联合储备, 数量柔性契约, 制造商补贴, 帕累托改进, 风险分担, 运营决策, 工程应用

Research on Decision-Making and Engineering Application of Government-Enterprise Tripartite Joint Emergency Material Reserve Considering Manufacturer Subsidies

Bailu Lyu

School of Safety Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

文章引用: 吕柏路. 考虑制造商补贴的政企三方联合应急物资储备决策与工程应用研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(6): 1103-1113. DOI: 10.12677/mse.2026.156107

Abstract

To address the problem of insufficient raw material reserves caused by suppliers bearing the residual loss of unused raw materials in a three-tier emergency supply chain, this paper conducts a contract mechanism design from the perspective of management engineering. Within the framework of a quantity flexibility contract, we design an expost subsidy mechanism provided by the manufacturer to compensate the supplier for leftover raw materials, and construct a government-led Stackelberg game model for the three-tier supply chain. The optimal reserve decisions of the three parties are derived using backward induction, and the equilibrium outcomes under scenarios with and without the subsidy are compared through numerical examples. The game-theoretic results demonstrate that the subsidy mechanism can simultaneously increase both the supplier's raw material reserve and the manufacturer's finished product reserve, while reducing the government's expected emergency cost. Numerical simulations reveal that the subsidy can improve the supplier's expected profit, but its effect on the manufacturer's expected profit exhibits a threshold effect: a tripartite Pareto improvement can be achieved only when the manufacturer's post-disaster raw material procurement price is below a critical threshold and the subsidy intensity is moderate. An excessively high subsidy or a post-disaster procurement price above the critical value will reduce the manufacturer's profit. Combined with the actual working conditions of emergency material reserve engineering, this paper verifies the engineering applicability of the above equilibrium results and puts forward corresponding suggestions for selecting subsidy parameters. This study provides theoretical references for upstream supply chain contract optimization, risk-sharing mechanism design, and emergency operations decisions within the government-enterprise joint reserve system.

Keywords

Emergency Supplies Reserve, Tripartite Government-Enterprise Joint Reserve, Quantity Flexibility Contract, Manufacturer Subsidy, Pareto Improvement, Risk Sharing, Operations Decisions, Engineering Application

Copyright © 2026 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

我国是世界上自然灾害最为严重的国家之一，灾害种类多、分布地域广、发生频率高。2024 年自然灾害造成全国 9413 万人次不同程度受灾，直接经济损失 4011.1 亿元[1]。构建高效可靠的应急物资储备体系，是保障人民生命财产安全与国家稳定的基石。然而，传统以政府实物储备为主的“静态”模式，存在成本高、资源浪费等弊端[2]，难以满足“快速、精准、高效”的现代应急需求。为此，国家层面持续推动应急物资储备体系现代化转型，《“十五五”国家应急体系规划》明确提出“完善多元化应急物资储备和快速调拨投送机制”，政企联合储备已成为提升储备效能的关键路径。

在政企合作储备应急物资方面，数量柔性契约在实物储备模式下得到了广泛应用。WANG 等[3]剖析了实物储备策略对政府最优储备规模的作用机制；张琳等[4]、NIKKHOO 等[5]指出该契约有助于提升物资供应量、控制政府成本并提高群众满意度；TORABI 等[6]进一步指出与多家企业签订此类契约可提高整体效率并降低成本。在此基础上，学者们结合市场机制、价格波动、灾害演化等因素进行了更细化的

探讨。扈衷权等[7]-[9]探讨了不同市场参与模式对企业储备与政府定价策略的影响；褚宏睿等[10]针对现货价格稳定和波动两种情形，分别研究代储企业的储备决策和政府的定价决策问题；刘阳等[11]分析了灾害状态转移对储备决策的影响。

上述文献基于实物储备模式，其缺陷在于企业需承担高额库存成本，同时面临需求不确定风险。后续研究沿两方面深化：一方面，在实物储备框架内优化契约设计以分担风险与成本。朱莉等[12]在数量柔性契约中引入代储补贴，分析了政企双方不同风险偏好对最优代储与补贴策略的影响；扈衷权等[13]研究表明补贴柔性契约能有效提升物资储备量及整体合作效益。另一方面，学者们提出以“生产能力储备”作为补充或替代方案，以规避高额库存成本并降低需求不确定性风险。WHYBARK 等[14]奠定了企业参与实物与产能双轨储备的研究基础；陈业华等[15]、ZHANG 等[16]指出该模式可实现供应链协调并降低管理成本；张琳等[17]探讨了生产能力储备与现货市场结合下的最优决策；王喆等[18]构建了政企联合储备定价博弈模型，得出供应商最优实物与原材料储备量决策及政府最优定价策略；姜旭等[19]聚焦三级联动储备机制，搭建了“政府-制造商期权契约”与“制造商-供应商带补贴原材料代储契约”的协同分析框架；巩玲君等[20]提出了在“政府-制造商-供应商”三级系统中均采用数量柔性契约的联合储备模型，证明了该模式在提升整体储备量、降低政府风险和提高了企业利润方面的有效性。

尽管现有研究已从政府补贴、期权契约等多维度展开分析，但在上游超额应急原材料残值风险分担方面仍存在三点局限：第一，现有补贴机制多聚焦政府对下游制造商的财政激励，或面向整体代储原材料的普惠式补贴，未专门针对高风险原材料储备设计精准的事后残值分担机制；第二，期权类契约虽锁定灾后采购权限，但核心保障原材料调用收益，无法系统性覆盖灾害未发生时超额储备原材料的残值损失，上游超额备货激励依然不足；第三，部分三级供应链研究虽完成整体储备结构分层建模，但缺少适配应急原材料残值风险的专项契约设计，难以匹配其差异化的风险特征。

基于此，本文从供应链内部风险共担视角出发，设计制造商对剩余原材料的事后补贴机制：仅对供应商专为灾后加急生产而额外储备、灾后未被调用的原材料给予单位补贴，精准分担这部分专项储备的残值损失。与事前期权付费模式不同，该机制采用“事后结算”方式，在不增加制造商事前固定成本的前提下，优化应急超额原材料储备的风险收益结构。本文构建政府主导的三级 Stackelberg 博弈模型，运用逆向归纳法求解三方最优储备决策，通过数值算例与多维度敏感性分析，系统探究该激励机制的均衡效果与适用边界，以期为企业联合储备体系的上游契约设计提供理论依据。

2. 问题描述与条件假设

2.1. 问题描述

本文构建政府、应急物资制造商、原材料供应商三级应急物资供应链系统。其中，政府与制造商采用数量柔性契约合作；制造商一方面配合政府储备成品应急物资，另一方面通过含剩余原材料补贴的数量柔性契约(补贴柔性契约)与上游原材料供应商合作，将部分实物储备转化为原材料形式的生产能力储备。模型整体分为政府主导的第一阶段、制造商主导的第二阶段两级决策流程。

第一阶段为政企协同决策。储备周期初期，政府以常规单价 p_0 向制造商采购 Q_1 应急物资作为基础储备，产生对应单位仓储成本 h_g ，同时与制造商签订数量柔性契约，约定灾害发生后，政府可按协商的柔性采购价格 p_1 追加采购物资，且追加采购总量不超过约定上限 $Q_2 + Q_3$ 。制造商结合政企契约确定物资代储规模，以固定单价 c_0 向上游采购原材料，按固定单位成本 m_f 生产物资，并承担代储物资的单位仓储成本 h_m 。

第二阶段为制造商与供应商协同决策。为应对灾害不确定性，双方签订补贴柔性契约，约定供应商提前储备 Q_3 原材料，承担对应的原材料单位生产与仓储成本 h_s 。灾害触发物资紧急需求时，制造商会按

协议单价采购原材料 c_s ($c_s < c_0 < c_s + h_s < \omega_1$)，此时原材料单位生产成本 m_g ($m_g > m_f$ 且 $c_0 + m_f + h_s < \omega_1 + m_g < p_1$) 将上涨且高于常规成本；若灾害未发生或原材料储备剩余，制造商将向供应商支付单位补贴 t ($0 \leq t < c_s + h_s - v_s$)，分担其储备风险。

设定应急储备周期内灾害发生概率为 ρ ($0 < \rho < 1$)，物资实际需求 x 取值区间为 $[0, U]$ ，累积分布函数与反函数分别为 $F(x)$ 、 $F^{-1}(x)$ 。灾害发生后，政府优先动用自有基础储备；储备不足时，启动政企契约追加采购；政企成品储备仍无法满足需求时，制造商紧急采购原材料、加急生产物资；若仍存在需求缺口，政府以高价 M 从现货市场采购补足。未动用的成品物资与原材料，分别按对应残值 v_m 和 v_s 处置。

2.2. 条件假设

- 1) 模型中参与主体为单一政府、单一制造商和单一供应商，且各方签订的是单周期合同[20]。
- 2) 模型中所有决策者均为风险中性的完全理性经济人，且供应链各层级间的信息是完全对称与共享的。
- 3) 政府的行为模式被限定于经济手段，即不实施行政强制征用，也不对下游企业的自主决策进行干预。
- 4) 本模型针对的是生产周期短且难以长期保持物理形态的应急物资，如食品、药品等。
- 5) 制造商的生产过程具有确定的投入产出比，单位原材料可以转化为单位应急物资成品，即原材料与成品之间保持 1:1 的线性转换关系。

3. 考虑制造商补贴的政企三级联合储备决策模型

3.1. 供应商决策分析

供应商的原材料储备决策受政企储备规模、成本参数、应急需求及制造商补贴机制共同影响。储备周期内，供应商获得固定基础收益；依据突发事件是否发生及应急需求规模，其额外收益分为三种场景：

- 1) 当 $0 < x \leq Q_1 + Q_2$ 时，成品储备完全覆盖需求，原材料未调用，供应商获全额残值与补贴。
- 2) 当 $Q_1 + Q_2 < x \leq Q_1 + Q_2 + Q_3$ 时，制造商紧急采购部分原材料，剩余部分仍获残值与补贴。
- 3) 当 $Q_1 + Q_2 + Q_3 < x \leq U$ 时，制造商采购全部原材料，供应商仅获销售收益，无残值与补贴收入。

综上，供应商的期望利润函数 π_s 为：

$$\begin{aligned} \pi_s = & (c_0 - c_s)(Q_1 + Q_2) - (c_s + h_s)Q_3 + (1 - \rho)(v_s + t)Q_3 + \rho \left\{ \int_0^{Q_1 + Q_2} (v_s + t)Q_3 f(x) dx \right. \\ & \left. + \int_{Q_1 + Q_2}^{Q_1 + Q_2 + Q_3} [\omega_1(x - Q_1 - Q_2) + (v_s + t)(Q_1 + Q_2 + Q_3 - x)] f(x) dx + \int_{Q_1 + Q_2 + Q_3}^U \omega_1 Q_3 f(x) dx \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

求解式(1)关于 Q_3 的二阶导数，得 $\partial^2 \pi_s / \partial Q_3^2 < 0$ ，这表明 π_s 是关于 Q_3 的凹函数，根据极值条件，令 $\partial \pi_s / \partial Q_3 = 0$ ，可得：

$$Q_3^* = F^{-1} \left(1 - \frac{c_s + h_s - v_s - t}{\rho(\omega_1 - v_s - t)} \right) - Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

3.2. 制造商决策分析

制造商采用双层柔性契约机制：与政府签订数量柔性契约参与实物储备，同时与供应商订立原材料剩余补贴契约，其应急保障能力由自有实物储备与供应商代储原材料形成的产能储备共同构成。

制造商储备周期内存在固定常规订单收益与实物储备持有成本。根据应急需求差异，其应急期收支结构分为四种场景：

- 1) 当 $0 < x \leq Q_1$ 时，政府储备完全覆盖需求，制造商无需供货，获取实物储备残值并支付供应商全部原材料补贴。

2) 当 $Q_1 < x \leq Q_1 + Q_2$ 时, 政府以柔性价格采购部分成品储备, 未动用部分产生残值, 制造商仍承担全部原材料补贴

3) 当 $Q_1 + Q_2 < x \leq Q_1 + Q_2 + Q_3$ 时, 成品储备耗尽, 制造商采购部分原材料加急生产, 仅对剩余未耗用原材料支付补贴, 收益由柔性销售收益、采购成本与剩余补贴支出共同决定。

4) 当 $Q_1 + Q_2 + Q_3 < x \leq U$ 时, 制造商采购全部原材料用于应急生产, 无剩余补贴, 收益由销售收益与全额采购成本构成。

综合上述场景, 制造商期望利润函数 π_m 为:

$$\begin{aligned} \pi_m = & (p_0 - m_f - c_0)Q_1 - (c_0 + m_f + h_m)Q_2 + (1 - \rho)(v_m Q_2 - tQ_3) + \rho \left\{ \int_0^{Q_1} (v_m Q_2 - tQ_3) f(x) dx \right. \\ & + \int_{Q_1}^{Q_1+Q_2} [p_1(x - Q_1) + v_m(Q_1 + Q_2 - x) - tQ_3] f(x) dx \\ & + \int_{Q_1+Q_2}^{Q_1+Q_2+Q_3} [p_1(x - Q_1) - (\omega_1 + m_g)(x - Q_1 - Q_2) - t(Q_1 + Q_2 + Q_3 - x)] f(x) dx \\ & \left. + \int_{Q_1+Q_2+Q_3}^U [p_1(Q_2 + Q_3) - (\omega_1 + m_g)Q_3] f(x) dx \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

将 Q_3^* 代入得式(3)得到 $\partial^2 \pi_m / \partial Q_2^2 < 0$, 表明 π_m 是关于 Q_2 的凹函数, 令 $\partial \pi_m / \partial Q_2 = 0$, 可得:

$$Q_2^* = F^{-1} \left(1 - \frac{c_0 + m_f + h_m - v_m - t}{\rho(\omega_1 + m_g - v_m - t)} \right) - Q_1 \quad (4)$$

3.3. 政府决策分析

为提升应急储备体系运行效率, 政府通过数量柔性契约与制造商开展储备合作, 获得灾后柔性采购权限并设置采购上限, 以成本最小化为目标决策最优自有储备量。全储备周期内, 政府需持续承担自有物资的采购与持有成本。无突发事件时, 政府可对未动用储备物资进行残值处置以获取收益。若发生突发事件, 政府成本与采购行为随应急需求规模分为三类场景:

1) 当 $0 < x \leq Q_1$ 时, 政府自有储备可完全覆盖应急需求, 无需对外采购, 未耗用储备物资可实现残值收益。

2) 当 $Q_1 < x \leq Q_1 + Q_2 + Q_3$ 时, 政府自有储备供给不足, 需以柔性价格向制造商采购物资, 补足应急储备缺口。

3) 当 $Q_1 + Q_2 + Q_3 < x \leq U$ 时, 政企联合储备完全耗尽, 政府先足额采购全部柔性合作储备, 剩余物资缺口需通过现货市场采购补足。

综上, 政府的期望成本函数 π_g 为:

$$\begin{aligned} \pi_g = & (p_0 + h_g - v_m)Q_1 + \rho v_m Q_1 + \rho \left\{ \int_0^{Q_1} [v_m(x - Q_1)] f(x) dx + \int_{Q_1}^{Q_1+Q_2+Q_3} p_1(x - Q_1) f(x) dx \right. \\ & \left. + \int_{Q_1+Q_2+Q_3}^U [p_1(Q_2 + Q_3) + M(x - Q_1 - Q_2 - Q_3)] f(x) dx \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

将 Q_3^* 、 Q_2^* 代入上式得 $\partial^2 \pi_g / \partial Q_1^2 > 0$, π_g 是关于 Q_1 的凸函数, 令 $\partial \pi_g / \partial Q_1 = 0$, 可得:

$$Q_1^* = F^{-1} \left(1 - \frac{p_0 + h_g - v_m}{\rho(p_1 - v_m)} \right) \quad (6)$$

联立式(3)、式(6)、式(9), 可得:

$$\begin{cases} Q_1^* = F^{-1}\left(1 - \frac{p_0 + h_g - v_m}{\rho(p_1 - v_m)}\right) \\ Q_2^* = F^{-1}\left(1 - \frac{c_0 + m_f + h_m - v_m - t}{\rho(\omega_1 + m_g - v_m - t)}\right) - F^{-1}\left(1 - \frac{p_0 + h_g - v_m}{\rho(p_1 - v_m)}\right) \\ Q_3^* = F^{-1}\left(1 - \frac{c_s + h_s - v_s - t}{\rho(\omega_1 - v_s - t)}\right) - F^{-1}\left(1 - \frac{c_0 + m_f + h_m - v_m - t}{\rho(\omega_1 + m_g - v_m - t)}\right) \end{cases} \quad (7)$$

当补贴强度 $t=0$ 时, 本文模型可退化为无补贴基准模型, 对应的均衡储备量与利润记为 $q_1^*, q_2^*, q_3^*, \pi_{s0}^*, \pi_{m0}^*, \pi_{g0}^*$, 用于与补贴情景均衡结果开展对比。较于无补贴基准模型, 本文的核心并非简单引入补贴参数, 而是重构了上下游残值风险分担机制。无补贴模式下供应商独自承担原材料储备的剩余风险, 本文通过制造商事后补贴实现风险共担, 有效改变了供需双方的利润结构与均衡决策。

将均衡储备量 Q_1^* 、 Q_2^* 和 Q_3^* 代入对应收益与成本公式, 可求得各主体最优期望利润与最小期望成本。为保证模型经济有效性, 需满足三方最优储备量均为正, 即 $Q_1^* > 0$, $Q_2^* > 0$, $Q_3^* > 0$ 。通过联立可行性约束条件, 可得到推论 1。

推论 1: 在含原材料剩余补贴的三方联合储备模型中, 仅当灾害发生概率 ρ 、柔性采购价 p_1 、原材料采购价 ω_1 及补贴强度 t 满足特定取值条件时, 模型存在有效正均衡解。

- 1) $\rho > \frac{p_0 + h_g - v_m}{p_1 - v_m}$
- 2) $\max\{p_0 + h_m, \omega_1 + m_g\} < p_1 < \min\left\{\frac{(p_0 + h_g - v_m)(\omega_1 + m_g - v_m - t)}{c_0 + m_f + h_m - v_m - t} + v_m, M\right\}$
- 3) $\max\left\{c_0 + m_f + h_m - m_g, \frac{(m_g - v_m - t)(c_s + h_s - v_s - t) + (c_0 + m_f + h_m - v_m - t)(v_s - t)}{(c_0 + m_f + h_m - v_m) - (c_s + h_s - v_s)}\right\} < \omega_1 < p_1 - m_g$

在模型有效参数区间内, 对补贴强度 t 开展比较静态分析, 分别对各方最优储备量求取一阶偏导数。经过符号判断可得 $\partial Q_1^*/\partial t > 0$, $\partial Q_2^*/\partial t > 0$, $\partial Q_3^*/\partial t > 0$, 据此得到推论 2。

推论 2: 在均衡解有效的参数条件下, 增大剩余原材料补贴强度, 能够带动供应商原材料储备与制造商应急物资实物储备同步提升, 政府最优物资储备决策不受该补贴机制影响。

由于各方期望利润和期望成本属于复杂非线性表达式, 难以通过解析推导明确其随补贴强度的变化规律, 因此三方收益变化将在后文数值算例当中展开探究。

4. 算例分析

4.1. 参数设置与基准情景

参考巩玲君等[20]相关文献, 该模型相关参数设置为 $x \sim U(0, 20000)$, $M = 300$, $p_0 = 100$, $c_0 = 30$, $m_f = 20$, $m_g = 25$, $h_g = 15$, $h_m = 10$, $h_s = 5$, $c_s = 25$, $v_m = 10$, $v_s = 5$, $\rho = 0.44$ (其中价格单位为元/件, 储备量单位为件)。由推论 1 可知, 数值模拟涉及变量 p_1 , ω_1 , t 。本文固定政府柔性采购价 $p_1 = 250$ 。其中政府最优储备量不受补贴 t 影响, 仅制造商与供应商储备决策随补贴参数变化。以 $t=0$ 的无补贴基准模型确定 ω_1 的可行区间: 将基础参数与 p_1 、 $t=0$ 代入推论 1, 解得 ω_1 的可行范围为 $695/7 < \omega_1 < 225$ 。后续算例均在此 ω_1 区间内开展, 保证对比处于同一参数空间; 选取 $t=0$ 的均衡结果作为基准参照, 与 $t>0$ 的补贴模型结果进行对照分析。本文借助 MATLAB 软件完成均衡求解与数值模拟, 探究补贴机制对三方最优储备决策及供应链绩效的影响。

4.2. 有无补贴下的储备数量对比

为考察本文提出的制造商补贴机制对供应链储备结构的影响，我们将有补贴情形与无补贴基准模型进行数值对比。两种情景下制造商、供应商的最优储备量对比见图 1。

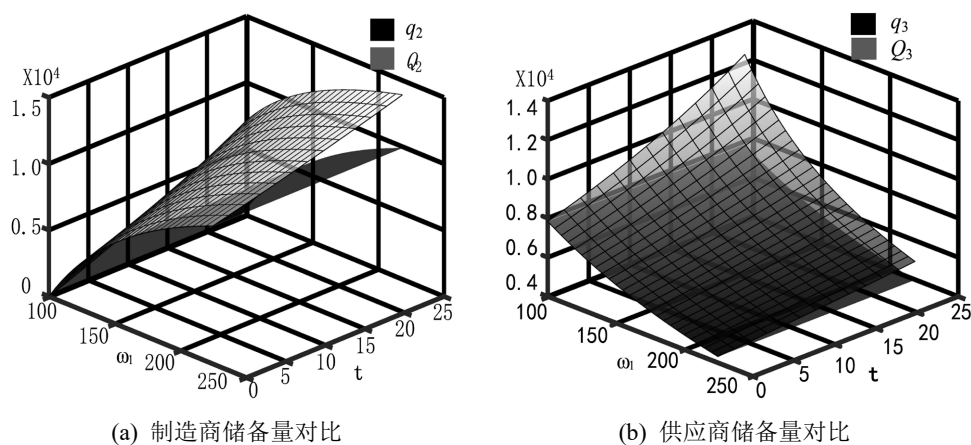


Figure 1. Comparison of manufacturer and supplier reserves with and without subsidies

图 1. 有无补贴下制造商和供应商储备量对比

1) 由图 1(a)可知，有补贴时制造商最优储备始终高于无补贴情景，储备量随补贴强度增加而上升。补贴缓释了供应商储备风险，上游原材料供给稳定性提升，进而推动制造商扩充应急物资储备。

2) 从图 1(b)可以看出，供应商的最优储备量在有补贴情形下同样高于无补贴情形。制造商对剩余原材料的补贴分担了供应商的储备风险，减少了其在需求不足时的潜在损失，使其边际收益提升，从而愿意扩大原材料储备规模。

4.3. 有无补贴下的成本与利润对比

进一步考察补贴机制对各方经济绩效的影响。两种情景下政府期望成本对比见图 2，供应商与制造商的期望利润对比见图 3。

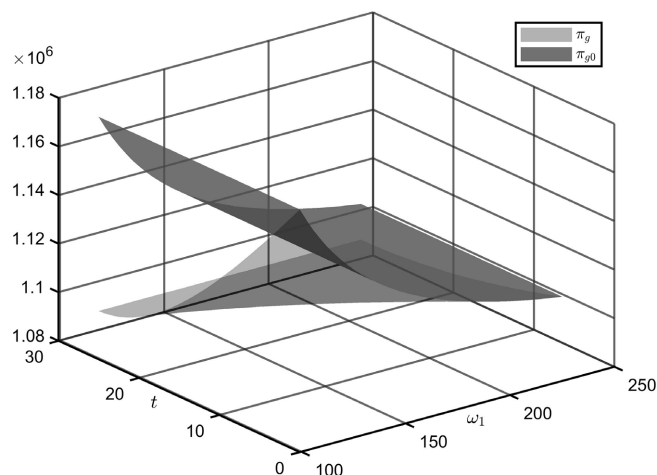


Figure 2. Comparison of government expected costs with and without subsidies

图 2. 有无补贴下政府期望成本对比

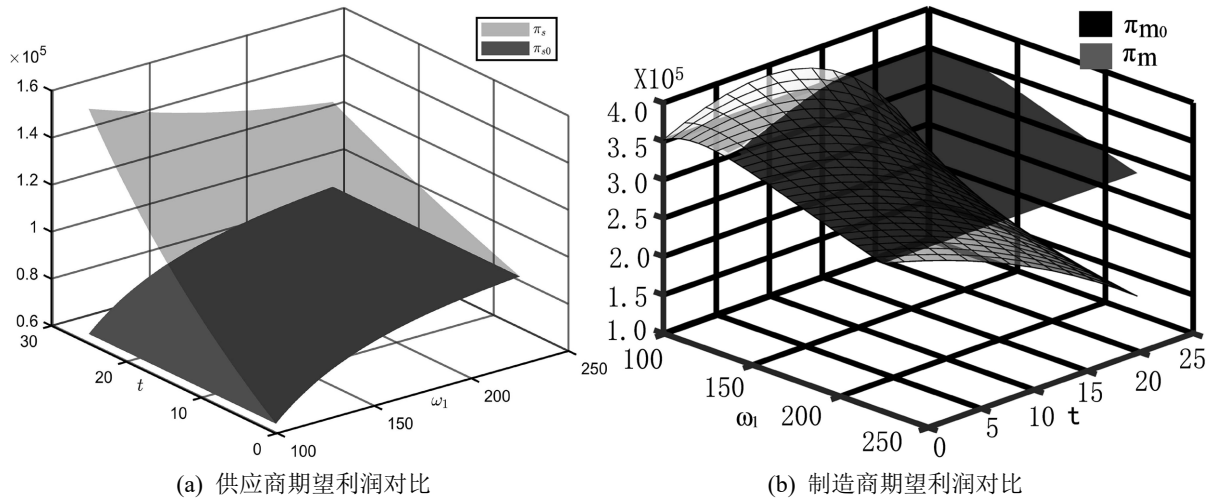


Figure 3. Comparison of enterprise expected profits with and without subsidies

图 3. 有无补贴下企业期望利润对比

1) 由图 2 可知, 在全部 ω_1 取值区间当中, 有补贴模式下政府期望成本低于无补贴模式。补贴并不会调整政府最优储备决策, 但能够激励供应商、制造商加大应急物资储备, 扩充整体社会储备, 缩减灾害物资缺口, 最终降低政府的缺货处置成本。

2) 由图 3(a)能够看出, 供应商期望利润在补贴机制下优于无补贴情景。剩余原材料补贴分担了备货的存货损失, 缓解其风险顾虑, 供应商扩大原材料储备之后整体收益得到改善。

3) 由图 3(b)可得, 有无补贴情景下制造商期望利润曲线存在交点, 具备显著阈值效应。当 ω_1 小于临界数值且补贴强度处在合理区间时, 补贴模式下制造商利润更高; 一旦 ω_1 超过临界值, 或是补贴强度过高, 补贴便会压低制造商收益。这是因为补贴总会推动制造商加大应急物资储备。较低的 ω_1 下, 上游备货充足所降低的缺货损失, 可以抵消适度的补贴开销; 但 ω_1 走高意味着现货采购成本昂贵, 又或者补贴支出过大, 此时成本增量超过风险下降带来的收益。因而会出现储备规模持续上涨, 期望利润遭到挤压的现象。

4.4. 参数的敏感性分析

由上述的分析可知, 补贴对制造商利润的影响方向取决于 ω_1 的水平, ω_1 较低时补贴有利, ω_1 较高时补贴侵蚀利润, 即存在一个使补贴有利性发生反转的临界值。根据参数设置, 该临界值约为 $\omega_1 = 135$ 。通过均衡结果可以看出, 除 ω_1 外, 灾害发生概率 ρ 及政府柔性采购价 p_1 同样直接进入各方的最优决策表达式, 其变动可能对系统绩效产生显著影响。为此, 分别对 ρ 和 p_1 进行敏感性分析。以更全面地揭示补贴机制发挥作用的条件与边界。

4.4.1. 灾害发生概率敏感性分析

以 $p_1 = 250$ 、 $\omega_1 = 130$ 、 $t = 1$ 为例, 分析 ρ 对有补贴与无补贴两种情形下各方决策与绩效随 ρ 的变化。根据模型参数设定, ρ 的可行范围为 $7/16 < \rho < 1$ 。分析结果如表 1 所示。

由表 1 可知:

1) 政府储备量与 ρ 呈强正相关, 表现为“预防式储备”特征。 ρ 越高, 政府作为最终保障者的储备投入越大。与之相反, 制造商与供应商的储备量随 ρ 上升而下降。二者呈现此消彼长的替代关系: 政府储备的增加降低了企业对尾部风险的暴露, 企业相应缩减自身储备以节约成本。

Table 1. Sensitivity analysis of emergency occurrence probability**表 1.** 突发事件发生概率的敏感性分析

ρ	考虑制造商补贴的政企三方联合储备模式						不考虑制造商补贴的政企三方联合储备模式					
	Q_1^*	Q_2^*	Q_3^*	π_s^*	π_m^*	π_g^*	q_1^*	q_2^*	q_3^*	π_{s0}^*	π_{m0}^*	π_{g0}^*
0.44	114	4419	6670	83,338	361,408	1,142,535	114	4212	6583	81,218	360,884	1,145,420
0.54	3796	3601	5434	86,424	479,666	1,337,992	3796	3432	5364	84,696	479,239	1,340,343
0.64	6328	3038	4585	88,545	560,968	1,475,493	6328	2896	4526	87,088	560,607	1,477,477
0.74	8176	2628	3966	90,093	620,297	1,578,534	8176	2505	3914	88,832	619,985	1,580,250
0.84	9583	2315	3494	91,272	665,499	1,659,423	9583	2206	3448	90,162	665,225	1,660,935
0.94	10,691	2069	3122	92,201	701,085	1,725,229	10691	1972	3081	91,209	700,839	1,726,580

2) 伴随 ρ 上涨, 各方期望利润与期望成本均同步升高。 ρ 越高, 政府储备规模越大, 采购与储备成本随之上升; 对企业而言, 政府更大的采购量意味着更大的订单规模, 企业期望利润随之增加。

3) 在 ω_1 低于临界值的条件下, 政府最优储备量不受补贴机制影响; 相较于无补贴方案, 各类灾害概率之下, 补贴模式均可促成供应商和制造商储备上涨、企业期望收益提升以及政府应急成本下降。说明 ω_1 达标以后, 不论灾害概率大小, 补贴机制能够实现三方绩效的帕累托改进。

4.4.2. 政府柔性采购价敏感性分析

以 $\rho=0.44$ 、 $\omega_1=130$ 、 $t=1$ 为例, 分析 p_1 对比有补贴与无补贴两种情形下各方最优储备量、期望利润与期望成本随 ρ 的变化。根据参数设定, ρ 的可行范围为 $7/16 < \rho < 1$, 分析结果如表 2 所示。

Table 2. Sensitivity analysis of government flexible procurement price**表 2.** 政府柔性采购价格的敏感性分析

p_1	考虑制造商补贴的政企三方联合储备模式						不考虑制造商补贴的政企三方联合储备模式					
	Q_1^*	Q_2^*	Q_3^*	π_s^*	π_m^*	π_g^*	q_1^*	q_2^*	q_3^*	π_{s0}^*	π_{m0}^*	π_{g0}^*
250	114	4419	6670	83,338	361,408	1,142,535	114	4212	6583	81,218	360,884	1,145,420
252	278	4255	6670	83,338	367,512	1,149,461	278	4048	6583	81,218	366,872	1,152,231
254	440	4093	6670	83,338	373,488	1,156,245	440	3886	6583	81,218	372,733	1,158,899
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
297	3370	1163	6670	83,338	476,084	1,273,494	3370	956	6583	81,218	472,847	1,273,667
298	3428	1105	6670	83,338	477,975	1,275,674	3428	898	6583	81,218	474,681	1,275,790
299	3485	1047	6670	83,338	479,848	1,277,833	3485	841	6583	81,218	476,496	1,277,891

由表 2 可知:

1) p_1 增大促使政府增加事前储备、制造商缩减成品储备, 供应商储备不受影响。为规避昂贵的灾后采购, 政府加大备货; 政府柔性订货需求下降加大制造商存货过剩风险; 供应商原材料订单稳定, 因此储备维持原状。

2) p_1 上涨推高政府应急成本、提升制造商收益, 供应商利润恒定。政府储备持有成本与采购对价上升抬高总成本; 制造商依靠更高的收购单价获利。

3) 同等 p_1 之下, 补贴模式拥有更高的企业储备、企业利润以及更低的政府成本。当 ω_1 低于临界值, 补贴的优化作用不受政府柔性采购价格扰动。

5. 结论

本文针对应急物资供应链上游原材料储备储备剩余损失自担导致储备不足问题, 构建了包含制造商事后补贴机制的三级联合储备博弈模型, 通过逆向求解与数值分析得到以下结论, 并提出对应管理启示:

第一, 制造商剩余原材料补贴机制能够抬高整条供应链应急物资储备规模, 增强系统应急保障能力, 降低政府的期望应急成本并且提高供应商期望收益。该契约分担供应商储备原材料的滞销亏损, 缓解其收益风险不对称困境; 激励效果顺着供应链向上下游传导, 带动制造商加大成品物资储备。落实政企联合储备工作时, 应当延伸上游供应商激励链条, 把制造商和供应商之间的风险分担契约纳入储备合作考核指标; 针对药品、生鲜食品这类原材料残值损耗快的应急物资, 可以优先落地剩余原材料事后补贴方案。

第二, 补贴对于制造商期望利润具备阈值效应。只有制造商灾后原材料采购价 ω_1 小于临界阈值、补贴强度适中时, 机制能够促成三方帕累托改进; 一旦原材料灾后采购价超出临界点, 补贴开支便会挤压制造商收益, 难以实现多方共赢。上下游柔性契约签约之前, 管理人员应当核查灾后原材料采购价位, 保证参数落在补贴可行区间; 针对原材料现货采购成本偏高的物资品类, 不要单独依靠制造商承担补贴成本, 可以配套政府专项补助、常态化订单让利等手段, 平衡制造商的成本和收益。

第三, 由数值敏感性试验可得, 各类外生参数对补贴有效性的影响各不相同: 上调补贴强度能够持续增厚企业储备量与供应商利润, 制造商收益却仅在合适的补贴区间内上涨。实际契约管理当中, 依据应急物资重要程度划定补贴强度上限, 防止高额补贴降低制造商参与意愿。

本文在单周期、完全信息、风险中性、一对一链式供应链假设下开展建模分析, 与现实应急供应链存在一定差距。未来可以进一步放宽假设: 构建信息不对称下的委托-代理模型; 拓展为多周期动态规划模型; 引入多主体市场竞争; 同时可结合实际案例数据提升模型的实践价值。

参考文献

- [1] 国家防灾减灾救灾委员会办公室 应急管理部 发布 2024 年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202501/t20250117_516032.shtml, 2025-01-17.
- [2] 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.
- [3] Wang, X.H., Li, F., Liang, L., Huang, Z. and Ashley, A. (2015) Pre-Purchasing with Option Contract and Coordination in a Relief Supply Chain. *International Journal of Production Economics*, **167**, 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.05.031>
- [4] 张琳, 田军, 杨瑞娜, 等. 数量柔性契约中的应急物资采购定价策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(10): 2590-2600.
- [5] Nikkhoo, F., Bozorgi-Amiri, A. and Heydari, J. (2018) Coordination of Relief Items Procurement in Humanitarian Logistic Based on Quantity Flexibility Contract. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **31**, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.05.024>
- [6] Ali Torabi, S., Shokr, I., Tofighi, S. and Heydari, J. (2018) Integrated Relief Pre-Positioning and Procurement Planning in Humanitarian Supply Chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **113**, 123-146. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.03.012>
- [7] 扈衷权, 田军, 冯耕中. 基于数量柔性契约的双源应急物资采购定价模型[J]. 中国管理科学, 2019, 27(12): 100-112.
- [8] 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.
- [9] 扈衷权, 周晓阳, 樊慧荣, 等. 企业储备模式下应急物资储备及采购定价决策研究[J]. 系统工程理论与实践,

- 2023, 43(02): 438-454.
- [10] 褚宏睿, 王晓冉, 陈寅莹. 价格波动对应急物资代储的影响与协调研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(10): 3976-3988.
- [11] 刘阳, 田军, 冯耕中. 基于数量柔性契约与 Markov 链的应急物资采购模型[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(1): 119-133.
- [12] 朱莉, 杨潇, 曹杰. 政府补贴下考虑不同风险偏好的政企联合应急储备决策研究[J]. 中国管理科学, 2026, 34(6): 91-102.
- [13] 扈衷权, 沈奥, 李小美, 等. 协议企业储备模式下的应急物资采购储备及补贴策略研究[J]. 中国管理科学, 2025, 33(7): 243-252.
- [14] Clay Whybark, D. (2007) Issues in Managing Disaster Relief Inventories. *International Journal of Production Economics*, **108**, 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.12.012>
- [15] 陈业华, 史开菊. 突发事件灾前应急物资政企联合储备模式[J]. 系统工程, 2014, 32(2): 84-90.
- [16] Zhang, Y. and Chen, L. (2015) Emergency Materials Reserve of Government for Natural Disasters. *Natural Hazards*, **81**, 41-54. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2065-3>
- [17] 张琳, 李孟涛, 田军. 考虑灾后现货市场采购的应急物资供应协议企业实物与原材料储备策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(4): 1001-1012.
- [18] 王喆, 单红颜, 陶梦琪, 等. 基于柔性契约的应急物资政企联合储备定价博弈模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(9): 20-28.
- [19] 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.
- [20] 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.