

考虑企业社会责任的应急物资协同储备：Stackelberg 博弈模型

论文汇报

张珂，周吉林

北京邮电大学智能工程与自动化学院

2025 年 5 月 18 日



目录

- ① 背景介绍
- ② 模型构建
- ③ 模型求解
- ④ 算例分析
- ⑤ 结论与未来展望

1 背景介绍

2 模型构建

3 模型求解

4 算例分析

5 结论与未来展望

背景介绍: 研究背景与意义

- 我国自然灾害频发，应急物资储备至关重要^[1-2]。
- 传统储备模式问题：物资单一、成本高、效率低^[3-4]。
- 国家政策导向：构建政企协同、实物与产能结合的储备模式^[5-6]。
- 强调应急物流社会化^[7]。

背景介绍: 文献回顾

- 博弈论应用：
 - Stackelberg 博弈模型分析政企合作^[8]。
 - 演化博弈模型分析多方参与^[9-10]。
 - 国际研究关注激励与协调机制^[11-14]。
- 契约机制设计：
 - 期权契约降低决策风险^[15-17]。
 - 数量柔性契约协调供需^[18-19]。
 - 多企业参与的复杂契约^[20-21]。
 - 期权契约理论基础^[22-24]。
- 其他关键因素与复杂供应链：
 - 三级供应链与数量柔性契约^[25]。
 - 人道主义供应链整体优化^[26]。
 - 企业社会责任 (CSR) 融入模型^[27]。
 - 物资维护水平^[28]。
 - 生产能力储备^[29-30]。
 - 多级供应链与代储模式^[31]。

背景介绍: 现有研究不足与本文贡献

现有研究不足:

- 企业社会责任 (CSR) 考量不足: 多将企业视为纯粹逐利者^[8,20], 忽视利他行为^[27]。
- 需求分布假设简化: 多采用均匀分布^[3,19], 与现实差异大。
- 多样化储备方式协同研究不足: 多单独研究物资储备^[8,20,32] 或产能储备^[25], 企业捐赠协同效应研究空白。

本文研究目的与贡献:

- 构建更全面且贴近现实的政企联合应急物资储备决策模型。
- 考虑企业社会责任、多种储备方式协同及更真实的需求分布。

1 背景介绍

2 模型构建

3 模型求解

4 算例分析

5 结论与未来展望

模型构建: 模型框架

- 参与主体: 政府 (领导者), 企业 (跟随者) - Stackelberg 博弈^[8]。
- 储备方式:
 - ① 政府实物储备 (Q)
 - ② 企业实物储备 (q)
 - ③ 企业捐赠 (Q_j) (考虑企业社会责任)
 - ④ 企业生产能力储备

北京邮电大学

图 1: 多主体协同应急物资储备计划示意 (概念图, 替换为论文图 1)

模型构建: 前提与假设

- ① 物资调用顺序: 政府实物储备 \rightarrow 企业实物储备 \rightarrow 企业捐赠物资 \rightarrow 企业生产能力储备。
- ② 物资保质期: 储备周期小于保质期, 期末残值 v 轮换。
- ③ 政府协同前提: $p_1 + c_1 - v - p_2 > 0$ 。
- ④ 企业参与激励: $s > v$ 且 $m > s + p_2$ 。

模型构建: 应急物资需求概率分布

- 传统模型多采用均匀分布^[3,19,29]:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{x}{U} & 0 \leq x \leq U \\ 1 & x > U \end{cases} \quad (1)$$

- 本文后续算例将采用基于历史数据拟合的反高斯分布, 以更贴近现实。

模型构建: 政府方期望收益

灾害未发生时 $(1 - \alpha)$ 政府利润 $(\pi_{g,0})$:

$$\pi_{g,0}(Q, q) = vQ - (p_1 + c_1)Q - p_2q \quad (2)$$

灾害发生时 (α) 政府利润 $(\pi_{g,\alpha})$, 考虑四种需求情况:

- $0 < x \leq Q$: $v(Q - x) - (p_1 + c_1)Q - p_2q$
- $Q < x \leq Q + q$: $-(p_1 + c_1)Q - p_2q - s(x - Q)$
- $Q + q < x \leq Q + q + Q_j$: $-(p_1 + c_1)Q - p_2q - sq$
- $Q + q + Q_j < x \leq U$: $-(p_1 + c_1)Q - p_2q - sq - m(x - Q - q - Q_j)$

政府总期望利润 $(\pi_g(Q, q))$:

$$\pi_g(Q, q) = (1 - \alpha)\pi_{g,0}(Q, q) + \alpha\pi_{g,\alpha}(Q, q, Q_j) \quad (3)$$

(详细积分形式见论文公式 3, 4)

模型构建: 企业期望收益

灾害未发生时 $(1 - \alpha)$ 企业利润 $(\pi_{r,0})$:

$$\pi_{r,0}(q) = (v + p_2 - c_2)q \quad (4)$$

灾害发生时 (α) 企业利润 $(\pi_{r,\alpha})$, 考虑四种物资调用阶段。

- $0 < x \leq Q$: $(v + p_2 - c_2)q$
- $Q < x \leq Q + q$: $s(x - Q) + v(Q + q - x) + (p_2 - c_2)q$
- $Q + q < x \leq Q + q + Q_j$: $sq + (p_2 - c_2)q + \lambda(m - e)\sqrt{Q_j m} - eQ_j$
- $x > Q + q + Q_j$:
 $sq + (p_2 - c_2)q + \lambda(m - e)\sqrt{Q_j m} - eQ_j + (m - e)(x - Q - q - Q_j)$

企业总期望利润 $(\pi_r(Q_j, q))$:

$$\pi_r(Q_j, q) = (1 - \alpha)\pi_{r,0}(q) + \alpha\pi_{r,\alpha}(Q_j, q) \quad (5)$$

(详细积分形式见论文公式 6, 7)

1 背景介绍

2 模型构建

3 模型求解

4 算例分析

5 结论与未来展望

模型求解: Stackelberg 博弈与求解思路

- 博弈框架：政府为领导者，企业为跟随者。
- 求解方法：逆向归纳法^[12]。
 - ① 企业在给定政府决策 Q 后，最大化自身收益，确定 $q^*(Q)$ 和 $Q_j^*(Q)$ 。
 - ② 政府预测到企业响应，最大化自身收益，确定 Q^* 。

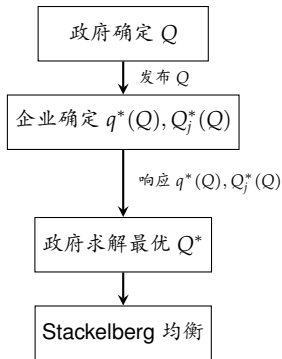


图 2: Stackelberg 博弈求解流程 (源自论文图 1)

模型求解: 企业最优响应

1. 确定最优捐赠量 Q_j^*

- 对 $\pi_r(Q_j, q)$ 关于 Q_j 求一阶偏导数 $\frac{\partial \pi_r}{\partial Q_j}$ (论文公式 ??)。
- 二阶偏导数 $\frac{\partial^2 \pi_r}{\partial Q_j^2} < 0$ (论文公式 ?? 及后续分析), 表明 π_r 是 Q_j 的严格凹函数。
- 最优捐赠量 Q_j^* (由 $\frac{\partial \pi_r}{\partial Q_j} = 0$ 且 $f(Q + q + Q_j) \approx 0$ 近似得到):

$$Q_j^* = \frac{\lambda^2 m(m - e)^2}{4e^2} \quad (6)$$

此 Q_j^* 不依赖于 Q 和 q 。

2. 确定最优储备量 q^*

- 对 $\pi_r(Q, q)$ 关于 q 求一阶偏导数 $\frac{\partial \pi_r(Q, q)}{\partial q}$ (论文公式 ??)。
- 结果显示 $\frac{\partial \pi_r(Q, q)}{\partial q} > 0$ 恒成立。
- 结论: 企业期望利润随 q 单调递增。在政府引导或设定企业储备量 q 的框架下, 企业最优响应是执行政府设定的 q 值。

模型求解: 政府最优决策

- 政府目标: 最大化期望利润 $\pi_g(Q, q)$ 。
- 决策变量: Q (政府实物储备) 和 q (对企业的储备要求)。
- 约束条件: $Q \geq 0, q \geq 0, Q \geq q$ (论文公式 ??)。
- Hessian 矩阵分析 (论文公式 ??, ??):
 - $\frac{\partial^2 \pi_g(Q, q)}{\partial Q^2} \frac{\partial^2 \pi_g(Q, q)}{\partial q^2} - \left(\frac{\partial^2 \pi_g(Q, q)}{\partial Q \partial q} \right)^2 > 0$
 - 表明政府利润函数是 Q 和 q 的凹函数, 最大值存在。
- 模型复杂, 无法获得 Q, q 的显式解, 需采用数值方法。

模型求解: 序列最小二乘二次规划 (SLSQP) 算法

- 适用性: 求解带约束的非线性规划问题, 无需显式 Hessian 矩阵。
- 核心思想: 迭代求解二次规划子问题。

SLSQP 算法流程概述 (参考论文算法 ??):

- 1: 输入: 初始点 x_0 , 允许误差 ε , 最大迭代次数 K
- 2: 初始化: $k \leftarrow 0, B_0 \leftarrow I$
- 3: **while** $k < K$ **and** 未收敛 **do**
- 4: 计算 $f(x_k), \nabla f(x_k), c_i(x_k), \nabla c_i(x_k)$
- 5: 求解 QP 子问题得搜索方向 d_k (论文公式 ??)
- 6: 线搜索确定步长 α_k (论文公式 ??, ??)
- 7: 更新 $x_{k+1} \leftarrow x_k + \alpha_k d_k$
- 8: 更新 Hessian 近似 B_{k+1} (论文公式 ??)
- 9: 判断收敛
- 10: $k \leftarrow k + 1$
- 11: **end while**
- 12: 输出: 近似最优解 x_k

- 1 背景介绍
- 2 模型构建
- 3 模型求解
- 4 算例分析**
- 5 结论与未来展望

算例分析: 算例情景与参数设置

单位应急物资构成参考:《全国基础版家庭应急物资储备建议清单》^[33]。

- 饮用水、罐头、压缩饼干、手电筒、小刀、医疗用品等。
- 单位应急物资灾前采购成本 (p_1) 设定为 220 元。

表 1: 算例参数设置 (源自论文表 ??)

参数符号	参数含义	数值	单位
p_1	单位应急物资灾害前采购成本	220	元
v	单位物资残值	150	元
m	灾害后应急物资市场单价	500	元
α	灾害发生概率	1	-
e	企业单位物资加急生产成本	400	元
p_2	企业单位物资代储收入	170	元
c_2	企业单位物资储存成本	300	元
s	企业单位物资使用补贴	180	元
c_1	政府单位物资储存成本	120	元
λ	企业捐赠行为影响系数	0.2	-
U	最大物资需求量	15	万

参数设置满足模型假设条件。

算例分析: 需求概率分布建模

- 数据来源: EM-DAT 数据库 (1900-2022 年中国洪涝灾害)。
- 拟合方法: 对历史需求数据进行概率分布拟合与检验。

表 2: 不同概率分布拟合统计量比较 (源自论文表 ??)

分布类型	SSE (10^{-13})	AIC	BIC
逆高斯分布	6.57	4028.48	4039.04
对数正态分布	10.34	3928.83	3939.38
Burr 分布	9.00	3951.92	3965.99
帕累托分布	8.21	3970.38	3980.94
贝塔分布	13.17	4192.39	4206.46

结论: 反高斯分布的 SSE 最小, 拟合效果较好。

$$f(x) = \sqrt{\frac{4.87}{2\pi(x+0.97)^3}} e^{\left[-\frac{4.87((x+0.97)-40.69)^2}{2(40.69)^2(x+0.97)}\right]} \quad (7)$$

算例分析: 需求分布拟合结果

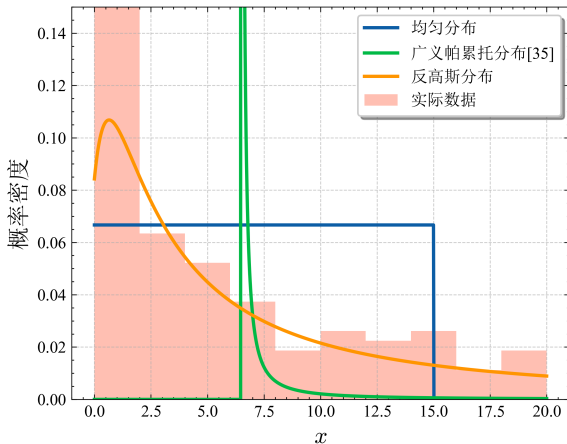


图 3: 分布拟合结果 (源自论文图 ??)

实际数据与拟合分布的概率密度函数

算例分析: 不同需求分布下的最优储备结构对比

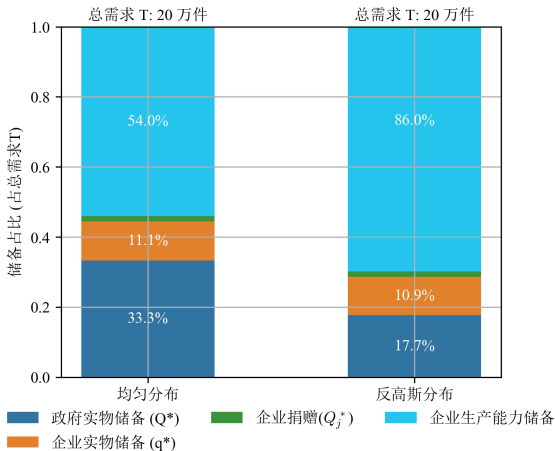


图 4: 储备结构对比 (U=15 万件) (源自论文图 ??)

算例分析: 不同情景下计算结果 I

表 3: 不同情景下应急物资储备与利润计算结果 (源自论文表 ??)

情景	分布	Q^*	q^*	p^*	政府利润	企业利润
基准模型	均匀	5.00	1.54	0.31	-3113.73	210.26
	反高斯	2.34	0.85	0.31	-1710.55	184.15
不考虑捐赠	均匀	5.00	2.03	0.00	-3197.66	288.79
	反高斯	2.34	1.35	0.00	-1767.42	238.15
不考虑企业代储	均匀	6.41	0.00	0.31	-3115.91	157.06
	反高斯	3.11	0.00	0.31	-1771.28	164.47
不考虑企业代储和生产	均匀	7.50	0.00	0.31	-3129.75	109.95
	反高斯	39.72	0.00	0.31	-6123.92	139.60

关键启示:

- 企业参与能有效分担政府压力，优化储备结构。
- 合理的协同契约与激励机制是核心。
- 需求特征对最优策略有决定性影响^[27,34-35]。
- 多主体协同储备体系能提升保障能力、降低社会总成本。

算例分析: 敏感性分析 - m 和 p_1

灾害后市场单价 (m) 影响

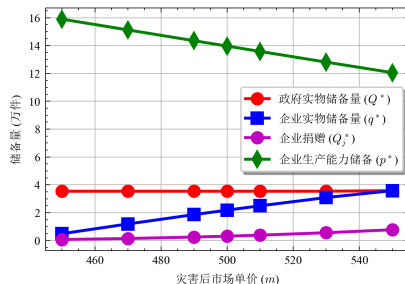


图 5: *

(源自论文图 ??)

$$m \uparrow \Rightarrow Q^* \text{ 稳定}, q^* \uparrow, Q_j^* \uparrow, p^* \downarrow$$

灾害前物资单价 (p_1) 影响

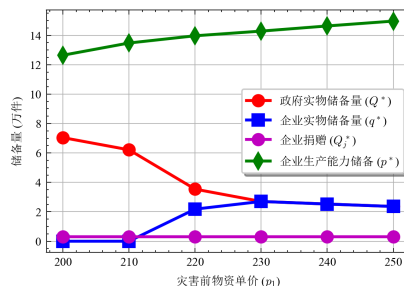


图 6: *

(源自论文图 ??)

$$p_1 \uparrow \Rightarrow Q^* \downarrow, q^* \text{ 先增后稳}, p^* \uparrow$$

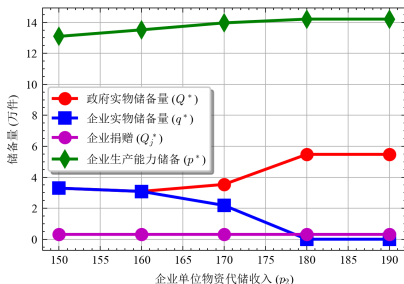
算例分析: 敏感性分析 - p_2 和 s 企业代储收入 (p_2) 影响

图 7: *

(源自论文图 ??)

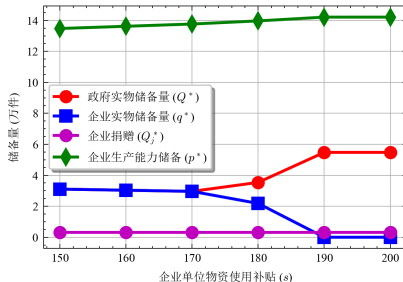
 $p_2 \uparrow \Rightarrow Q^*$ 先稳后增, $q^* \downarrow$ (趋零)企业使用补贴 (s) 影响

图 8: *

(源自论文图 ??)

 $s \uparrow \Rightarrow Q^*$ 先稳后增, $q^* \downarrow$ (趋零)

算例分析: 敏感性分析 - v 和 α

单位物资残值 (v) 影响

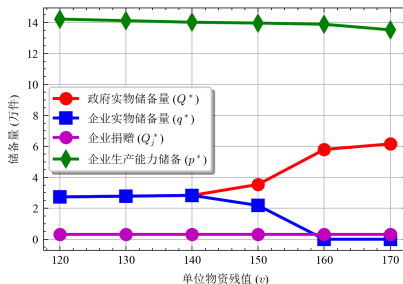


图 9: *

(源自论文图 ??)

 $v \uparrow \Rightarrow Q^* \uparrow, q^*$ 先稳后降 (趋零)

灾害发生概率 (α) 影响

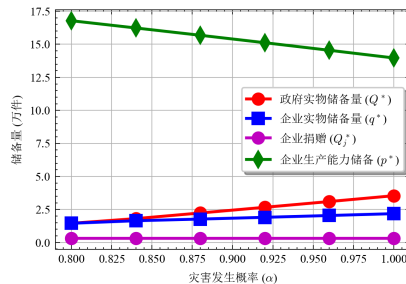


图 10: *

(源自论文图 ??)

 $\alpha \uparrow \Rightarrow Q^* \uparrow, q^* \uparrow, p^* \downarrow$

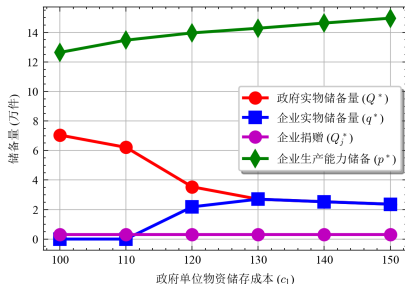
算例分析: 敏感性分析 - c_1 和 λ 政府储存成本 (c_1) 影响

图 11: *

(源自论文图 ??)

 $c_1 \uparrow \Rightarrow Q^* \downarrow, q^* (c_1 \geq 120 \text{ 后}) \uparrow$ 后稳

总结: 政企决策相互影响, 构建有效契约需综合考量各参数。

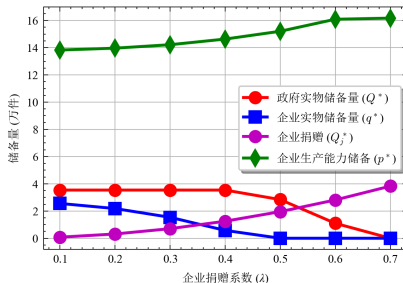
企业捐赠系数 (λ) 影响

图 12: *

(源自论文图 ??)

 $\lambda \uparrow \Rightarrow Q^*$ 先稳后降, $q^* \downarrow$ (趋零), $Q_j^* \uparrow$

算例分析: 算法有效性验证

参照文献：文献^[34] 中结构简化的模型 (政府实物 + 企业实物 + 企业生产)。

- 本文模型设置 $\lambda = 0$ (无捐赠) 以对标。

表 4: SLSQP 算法求解结果与文献精确解对比 (源自论文表 ??)

分布类型	决策变量	文献精确解	SLSQP 数值解	相对误差 (%)
均匀分布 (UD)	Q^*	2082	2081.6188	0.0183
	q^*	520	520.4230	0.0813
广义帕累托分布 (GPD)	Q^*	679	678.8855	0.0169
	q^*	346	345.1098	0.2573

结论：

- SLSQP 算法数值解与精确解高度吻合。
- 相对误差极小，验证了算法的有效性和准确性。

- 1 背景介绍
- 2 模型构建
- 3 模型求解
- 4 算例分析
- 5 结论与未来展望**

结论与未来展望: 主要结论

- ① 需求分布影响显著：反高斯分布更贴近现实，优化储备结构，降低政府开支。
- ② 灾害概率与捐赠意愿：灾害概率增加促使实物储备增加；企业捐赠主要受捐赠效益系数影响。
- ③ 政企决策相互影响：政府成本、企业代储收入/补贴等参数均影响双方决策平衡点。
- ④ 市场价格与残值：其增加会降低实物储备净成本，促使增加实物储备。
- ⑤ 算法有效性：SLSQP 算法能有效准确求解模型。

结论与未来展望: 管理启示

- 应急储备规划应考虑需求分布长尾特性，避免资源浪费。
- 政府应加强实物储备，并通过激励机制鼓励企业履行社会责任 (如捐赠)。
- 设计政企合作契约时，需平衡各方利益，合理设置费用和补贴。

结论与未来展望: 研究不足与未来展望

不足之处:

- 未考虑需求动态变化。
- 未区分不同类型物资。
- 未考虑多层级供应链结构。

未来研究方向:

- 构建更复杂、贴近实际的应急物流储备模型。
- 探索更精巧的契约机制设计。
- 提升应急物资保障体系的韧性和效率。

参考文献 I

- [1] 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 年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. 2024 [2024-01-20].
https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml.
- [2] 陈安, 陈宁, 倪慧荟, 等. 现代应急管理理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 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.
- [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.
- [5] 国家发展和改革委员会. “十四五”国家应急体系规划[Z]. 2022.
- [6] 国家防灾减灾救灾委员会办公室. 国家防灾减灾救灾委员会办公室关于进一步加强应急抢险救灾物资保障体系和能力建设的指导意见[Z].
https://www.mem.gov.cn/gk/zfxgkpt/fdzdgnr/202410/t20241023_506225.shtml. 2024.
- [7] 卢少平, 袁春满, 朱斌, 等. 应急物资储备的社会化研究[J]. 物流技术, 2009, 28(8): 15-17.
- [8] LI Y, LIU Z, LI S, et al. Government-Enterprise Collaboration Reserve Decision Model of Emergency Supplies Based on Stackelberg Game[J/OL]. SSRN Electronic Journal, 2022.
<https://ssrn.com/abstract=4165443>. DOI: 10.2139/ssrn.4165443.
- [9] ZHANG M, KONG Z. A tripartite evolutionary game model of emergency supplies joint reserve among the government, enterprise and society[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 169: 108132. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108132.

参考文献 II

- [10] 邵舒羽, 刘艳, 王晴, 等. 非常规突发事件下应急物资储备政企协同演化博弈[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 210-220.
- [11] EGAN M J. Private goods and services contracts: Increased emergency response capacity or increased vulnerability[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 126: 46-56.
- [12] 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: 22-34.
- [13] VAN WYK E, BEAN W L, YADAVALLI V S S. Modeling of uncertainty in minimizing the cost of inventory for disaster relief[J]. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2011, 22(1): 1-11.
- [14] COSKUN A, ELMAGHRABY W, KARAMAN M M. Relief aid stocking decisions under bilateral agency cooperation[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2019, 67(9): 147-165.
- [15] RABBANI M, ARANI H V, RAFIEI H. Option contract application in emergency supply chain [J]. *International Journal of Services and Operations Management*, 2015, 20(4): 385-397.
- [16] WANG X, 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.
- [17] 庞海云, 叶永. 基于实物期权契约的应急物资政企联合储备模型[J]. 系统管理学报, 2020, 29(4): 733-741. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2542.2020.04.012.

参考文献 III

- [18] NIKKHOO F, BOZORGI-AMIRI A, HEYDARI J. Coordination of relief items procurement in humanitarian logistic based on quantity flexibility contract[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31: 331-340.
- [19] 柴亚光, 李芄萱. 考虑储备周期的应急物资柔性采购模型[J]. *管理学报*, 2021, 18(7): 1068-1075.
- [20] 陈建华, 余郭婧. 应急物资政企联合储备契约机制研究[J]. *管理荟萃*, 2023(12): 044. DOI: 10.19885/j.cnki.hbqy.2023.12.044.
- [21] 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. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0859.
- [22] BLACK F, SCHOLES M. The pricing of options and corporate liabilities[J]. *The Journal of Political Economy*, 1973, 81(3): 637-639.
- [23] BARNES-SCHUSTER D, BASSOK Y, ANUPINDI R. Coordination and flexibility in supply contracts with options[J]. *Manufacturing and Services Operations Management*, 2002, 4(3): 171-207.
- [24] XU H. Managing production and procurement through option contracts in supply chains with random yield[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 126(2): 306-313.
- [25] 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. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.10.0310.

参考文献 IV

- [26] TORABI S A, SHOKR I, TOFIGHI S, et al. Integrated relief pre-positioning and procurement planning in humanitarian supply chains[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 113: 123-146.
- [27] 郑慧敏. 考虑企业社会责任的政企联合应急物资储备模式优化研究[D]. 南京财经大学, 2023.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] ZHANG Y, CHEN L. Emergency materials reserve of government for natural disasters[J]. *Natural Hazards*, 2016, 81: 1-14.
- [31] 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研究[J]. *系统工程*, 2024, 42(1): 87-99.
- [32] 李晟, 丰景春, 吴凯丽, 等. 政企联合储备应急物资的激励决策[J]. *系统管理学报*, 2022, 31(5): 840-850.
- [33] 中华人民共和国应急管理部. 全国基础版家庭应急物资储备建议清单[EB/OL]. 2020. https://www.mem.gov.cn/kp/shaq/202011/t20201129_372149.shtml.
- [34] 李璎珂, 刘振翼, 李舒泓, 等. 基于 Stackelberg 博弈的应急物资政企协同储备决策模型[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(6): 33-39.
- [35] 庞海云, 叶永. 基于实物期权契约的应急物资政企联合储备模型[J]. *系统管理学报*, 2020, 29(04): 733-741.