

# 供应不确定风险下的应急采购策略

傅 啸<sup>1,2</sup>, 毛佳豪<sup>3</sup>, 尹 庆<sup>3</sup>, 韩广华<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 安泰经济与管理学院, 上海 200030; 2. 杭州电子科技大学 浙江省信息化发展研究院, 杭州 310018;

3. 杭州电子科技大学 管理学院, 杭州 310018)

**摘要:** 针对供应中断和产量不稳定双重风险下的制造商应急采购决策问题, 构建包含制造商和供应商的双层供应链模型, 分析了制造商在单源采购中普通零部件采购、关键零部件采购和双源应急采购 3 种不同情况下的最优采购策略。研究发现: 供应商中断概率的降低不仅能够提升其在供应链中的议价能力, 还为制造商创造更高利润, 形成双赢局面; 供应商产量不稳定不仅会降低供应商的期望利润, 还会迫使制造商增加订货量而承担更多的供应不确定风险。在双源应急采购中, 供应商之间中断概率的相关性强化了高稳定性供应商的竞争优势; 并且, 当采购价格和中断风险同时增大时, 双源应急采购在可靠性和成本效益上的优势显著显现; 此外, 双源应急采购能够使得供应链不稳定性降低, 尤其在高中断风险、高采购成本环境下, 该策略能有效提升供应链韧性。

**关键词:** 供应中断; 产量不稳定; 应急采购; Stackelberg 博弈

中图分类号: F 405; TP 18

文献标志码: A

## Emergency procurement strategies under the risk of supply uncertainty

FU Xiao<sup>1,2</sup>, MAO Jiahao<sup>3</sup>, YIN Qing<sup>3</sup>, HAN Guanghua<sup>1</sup>

(1. Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Zhejiang Information Development Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

3. School of Management, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the emergency procurement strategies of manufacturers facing supply disruption and yield uncertainty risks, a two-tier supply chain model that includes manufacturers and suppliers was constructed. The optimal procurement strategies for manufacturers in three different purchasing scenarios: single-source procurement of ordinary and critical components, and dual-source emergency

收稿日期: 2025-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72272046); 教育部人文社会科学研究项目(22YJC630024)

第一作者: 傅 啸(1986—), 男, 研究员. 研究方向: 供应链管理. E-mail: fuxiao@hdu.edu.cn

通信作者: 韩广华(1982—), 男, 副教授. 研究方向: 应急管理. E-mail: hanguanghua@sjtu.edu.cn

引文格式: 傅啸, 毛佳豪, 尹庆, 等. 供应不确定风险下的应急采购策略[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(2): 119-128.

Citation: FU Xiao, MAO Jiahao, YIN Qing, et al. Emergency procurement strategies under the risk of supply uncertainty[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(2): 119-128.

procurement were analyzed. The results show that reducing the disruption probability of suppliers not only enhances their bargaining power but also generates higher profits for manufacturers, resulting in a win-win situation. Additionally, production instability on the part of suppliers not only reduces their expected profits but also forces manufacturers to increase order quantities, thereby assuming greater risks associated with supply uncertainty. In dual-source emergency procurement, the correlation between disruption probabilities among suppliers strengthens the competitive edge of high-stability suppliers. Furthermore, when both procurement prices and disruption risks increase simultaneously, the advantages of dual-source emergency procurement in terms of reliability and cost-effectiveness become significantly evident. Beyond this, the dual-source emergency procurement contributes to reducing supply chain instability, particularly in the environments characterized by high disruption risks and high procurement costs, where this strategy effectively enhances supply chain resilience.

**Keywords:** *supply disruption; yield uncertainty; emergency procurement; Stackelberg game*

制造商在进行零部件等物资采购时，通常会面临供应的不确定性风险<sup>[1]</sup>，主要表现为两种形式：由外部因素导致的供应链中断和由内部因素引发的产量不稳定。供应不确定性会对制造商采购生产带来很大的挑战，因此，研究供应中断与产量不稳定对制造商的影响，并探讨应急采购策略，对帮助制造商降低供应不确定性带来的风险及确保生产连续性具有重要意义。

供应中断指的是在供应链中某个环节出现了无法继续进行的情况，导致产品无法按时交付或无法继续生产，包括设备损坏、自然灾害、政治局势变化等<sup>[2]</sup>。这种中断将迫使企业的生产线停止运行，导致生产延误，给企业造成巨大损失。例如，2022 年，由于芯片供应严重短缺，长安汽车在前三个季度产能损失超 60 万辆。与此同时，上汽通用五菱柳州工厂也未能幸免，其生产受到来自上海地区零部件发货短缺的直接影响，导致工厂停产<sup>[3]</sup>。为了减少供应链中断带来的损失，学者们对此展开了研究。马士华<sup>[4]</sup>指出供应链中断可以分为内生风险和外生风险。外生风险主要是指由各种不可抗力或其他社会因素所造成的供应中断，包括自然灾害、政治风险、经济风险等，这种风险破坏性强，不受人为主控；而内生风险主要是指由于企业内部管理不当或决策失误等原因造成的供应中断。在此基础上，Giri 等<sup>[5]</sup>考虑了一个制造商和原材料供应商都面临生产中断风险的情况，结果表明，供应链中断对供应链决策影响显著。董霜霜等<sup>[6]</sup>构建了供应中断风险下风险中性与损失规避零售商综合运用双源采购和紧急

订购策略的多供应商采购决策模型。Heese<sup>[7]</sup>研究了两个竞争零售商在面对两个可能发生供应中断的供应商时的均衡采购策略选择（单一采购或双源采购）。Wu 等<sup>[8]</sup>探讨了风险规避对供应中断缓解策略选择的影响。由于疫情、国际冲突等突发事件具有不可预测性，企业难以完全规避此类中断风险，本研究将供应链中断界定为外生风险，并将供应商可靠性定义为维持正常供应的概率。

除了供应链中断，供应商的产量不稳定性在生产过程中也很常见，主要是由于生产中受到自身条件的限制，例如技术水平、材料污染以及人为因素所造成的投产量与实际产量不符的情况。这种情况在电子元器件和芯片等生产中比较常见<sup>[9]</sup>，例如，台积电在 4 nm 制程工艺上的良品率超过 70%，而三星的仅为 35% 左右<sup>[10]</sup>。大多数的研究都将产量不稳定下的供应商的生产数量定义为一个依赖于订单量的随机变量，因此，生产数量通常建模为具有随机性的乘性变量<sup>[11-13]</sup>。为了降低产量不稳定带来的风险，学者们对不确定产量下的供应链协调进行了研究。Deo 等<sup>[9]</sup>受到流感疫苗市场背景启发，建立了基于古诺竞争的两阶段模型，分析了产量不确定性对企业进入和生产决策的影响。Yu 等<sup>[14]</sup>构建了包含随机产量和随机需求的双重不确定性供应链模型。在实际生产中，供应商可通过提高生产所投入的时间和资金来缓解产量不稳定性。本文将供应商的产量稳定性水平作为内生变量，其提升需以成本增加为代价。因此，供应商需要在产量稳定性与投入成本之间寻找经济平衡点，制定最优策略。

许多制造商不仅通过增加投入来提高产量的稳定性, 还将双源采购作为应急采购策略之一, 以确保生产的连续性。例如, 华晨宝马曾预计海外供应链存在较大中断风险, 于是以最快速度在国内找好备用供应商, 迅速完成了产品验证, 并在疫情爆发之后, 有效地避免了供应中断的可能性。不仅如此, 学者们也对供应不确定风险下的双源采购问题以及应急策略展开了研究<sup>[15-19]</sup>。陈崇萍等<sup>[1]</sup>分别研究了只考虑产出随机和同时考虑供应商产出随机与供应中断下的制造商与两个供应商之间的博弈模型。景熠等<sup>[20]</sup>考虑两个供应商均存在中断风险且消费者对不同来源的核心零部件及其产品存在不同偏好, 分别构建了单源采购和多源采购的博弈模型。Shan 等<sup>[21]</sup>研究了两个战略性供应商, 引入相关性变量来表示两者之间的竞争关系, 表明供应商能够从高相关性中受益。Niu 等<sup>[22]</sup>通过研究大众汽车与小鹏汽车的合作案例, 对单一采购和双源采购策略进行了深入分析。

综上所述, 现有研究多聚焦于供应中断或产量不稳定等单一风险因素, 缺乏对多重不确定性的综合考量, 并且较少探讨供应链权力结构差异对采购策略的影响机制。因此, 本文基于现有研究, 在统一框架下综合考虑供应中断与产量不稳定的双重风险, 并引入供应链权力结构维度, 区分普通零部件与关键零部件的采购情况。通过构建制造商-供应商两级供应链博弈模型, 将产量不稳定性作为内生决策变量, 中断风险作为外生冲击, 系统分析了单源采购(分普通与关键零部件)和双源应急采购(含供应商相关性分析)3 种情况下的应急采购策略, 为企业在面对供应不确定风险时提供理论和实践指导。

1 问题描述与模型假设

在采购过程中, 制造商通常会面临两类供应不确定风险——供应中断风险以及产量不稳定性风险。本文构建了单一制造商和单一供应商组成的两阶段博弈模型, 基本假设如下:

- a. 供应商的生产过程受到产量稳定性的影响。对于计划生产量 $q$ , 能够得到实际产出量 $\theta q$ <sup>[1]</sup>。 $\theta$ 为产量的稳定性水平,  $0 \leq \theta \leq 1$ , 是供应商的决策变量。
- b. 供应商的稳定性成本为 $\beta \theta^2/2$ , 其随产量稳定性水平的提升呈加速增长趋势,  $\beta$ 为努力成本系

数。供应商增加投入成本可以提高产量的稳定性。

c. 供应商的生产受到外部环境的影响, 中断概率为 $P(0 \leq P \leq 1)$ , 供应商的可靠性水平为供应商不发生中断的概率, 即 $1-P$ , 在“all-or-nothing”的情况下, 供应商的产出有两种可能: 不发生中断时产量为 $\theta q$ , 发生中断时为 $0$ <sup>[16]</sup>。

d. 终端消费者的需求是随机的, 市场需求量的概率分布函数为 $F(x)$ , 概率密度函数为 $f(x)$ 。

2 模型构建与求解

分别构建单源采购和双源应急采购的博弈模型。单源采购情况下, 供应商的利润函数 $\pi_s(\theta)$ 与制造商的利润函数 $\pi_m(q)$ 分别如下:

$$\pi_s(\theta) = (1 - P) \left( w\theta q - \frac{\beta \theta^2}{2} \right) - cq \tag{1}$$

$$\pi_m(q) = (1 - P) [r \min\{x, \theta q\} - h(x - \theta q)^+ + s(\theta q - x)^+ - w\theta q] - Ph\bar{x} \tag{2}$$

式中:  $w$ 为制造商的采购价格;  $c$ 为供应商的生产成本;  $r$ 为销售价格;  $x$ 为市场需求量, 是随机变量;  $\bar{x}$ 为市场需求量的期望值;  $s$ 为单位残值;  $h$ 为制造商的单位缺货成本。

2.1 普通零部件采购

制造商作为 Stackelberg 博弈的领导者先决定订货量, 供应商随后根据订货量决定产量稳定性水平。该假设与汽车制造商采购普通零部件时的情况相符, 制造商在供应链中资金和技术实力雄厚, 供应商的决策会按其决策进行调整。

2.1.1 供应商的最优产量稳定性水平

对供应商的利润函数求导, 得到供应商的最优产量稳定性水平。

命题 1 供应商的最优产量稳定性水平 $\theta^*$ 为

$$\theta^* = \min \left\{ 1, \frac{wq}{\beta} \right\} \tag{3}$$

证明  $\frac{d^2 \pi_s(\theta)}{d\theta^2} = (P-1)\beta < 0$ , 因此  $\frac{d\pi_s(\theta)}{d\theta} = (1-P)(wq - \beta\theta) = 0$ , 得到最优产量稳定性水平 $\theta^* = \frac{wq}{\beta}$ 。又因为 $0 \leq \theta \leq 1$ , 故最优产量稳定性水平 $\theta^* = \min \left\{ 1, \frac{wq}{\beta} \right\}$ 。

由命题 1 可知, 当制造商的采购策略满足 $\frac{wq}{\beta} \geq 1$ 时, 供应商的产量达到完全稳定; 反之, 供应商的产量具有不稳定性, 不能完全输出订单。供应商的稳定性水平与其努力成本系数成反

比,与制造商订货量和采购价格成正比。

**推论 1** 当  $\frac{wq}{\beta} < 1$  时,  $\frac{d\theta^*}{dq} > 0$ , 即当供应商的稳定性水平未达到完全稳定前, 供应商的稳定性水平与制造商的订货量成正比。

推论 1 表明, 当供应商处于不完全稳定的情况时, 制造商订货量的增加会激励供应商提高生产稳定性以保障供货, 从而获得更大利润。

基于命题 1, 分别考察供应商产量稳定与不稳定两种情形下的制造商最优决策。

2.1.2 制造商最优订货量

a. 产量完全稳定

当  $\frac{wq}{\beta} \geq 1$  时,  $\theta^* = 1$ , 将其代入式(2), 得到制造商的期望利润  $E[\pi_m(q)]$ :

$$E[\pi_m(q)] = (1-P)\left[\int_0^q rxf(x)dx + \int_q^\infty rxf(x)dx - \int_q^\infty h(x-q)f(x)dx + \int_0^q s(q-x)f(x)dx - wq\right] - Ph\bar{x} \quad (4)$$

由式(4)可得,  $E[\pi_m(q)]$ 是关于  $q$ 的凹函数, 故制造商存在最优订货量, 如命题 2 所示。

**命题 2** 当  $\frac{wq}{\beta} \geq 1$  时, 制造商的最优订货量  $q_0^*$ 为

$$q_0^* = F^{-1}\left(\frac{r+h-w}{r+h-s}\right) \quad (5)$$

**证明** 当  $\frac{wq}{\beta} \geq 1$  时,  $\frac{d^2E[\pi_m(q)]}{dq^2} = (1-P)f(q) \cdot (s-h-r) < 0$ 。根据  $\frac{dE[\pi_m(q)]}{dq} = 0$ , 可得制造商的最优订货量  $q_0^* = F^{-1}\left(\frac{r+h-w}{r+h-s}\right)$ 。

b. 产量不完全稳定

当  $\frac{wq}{\beta} < 1$  时,  $\theta^* = \frac{wq}{\beta}$ , 将其代入式(2), 得到:

$$E[\pi_m(q)] = (1-P)\left[\int_0^{\frac{wq^2}{\beta}} rxf(x)dx + \int_{\frac{wq^2}{\beta}}^\infty \frac{rwq^2}{\beta}f(x)dx - \int_{\frac{wq^2}{\beta}}^\infty h\left(x - \frac{wq^2}{\beta}\right)f(x)dx + \int_0^{\frac{wq^2}{\beta}} s\left(\frac{wq^2}{\beta} - x\right)f(x)dx - \frac{w^2q^2}{\beta}\right] - Ph\bar{x} \quad (6)$$

同理, 根据式(6)可得, 制造商存在最优订货量, 如命题 3 所示。

**命题 3** 当  $\frac{wq}{\beta} < 1$  时, 制造商的最优订货量  $q_1^*$ 为

$$q_1^* = \sqrt{F^{-1}\left(\frac{w-r-h}{s-r-h}\right)\frac{\beta}{w}} \quad (7)$$

由命题 3 可得, 当供应商的产出未达到完全稳定时, 制造商会综合考虑供应商的努力成本系数  $\beta$ 和采购价格  $w$ 来调整订货量。

**证明**  $\frac{d^2E[\pi_m(q)]}{dq^2} = (1-P)\frac{2w}{\beta}\left[r+h-w-F\left(\frac{wq^2}{\beta}\right) \cdot (r+h-s)\right] - (1-P)\frac{4w^2q^2}{\beta^2}(r+h-s)f\left(\frac{wq^2}{\beta}\right)$ , 当  $F\left(\frac{wq^2}{\beta}\right) + \frac{2wq^2}{\beta}f\left(\frac{wq^2}{\beta}\right) > \frac{r+h-w}{r+h-s}$  时, 制造商存在最优订货量。根据  $\frac{dE[\pi_m(q)]}{dq} = 0$ , 得到制造商的最优订货量为  $q_1^* = \sqrt{F^{-1}\left(\frac{w-r-h}{s-r-h}\right)\frac{\beta}{w}}$ , 此时, 上述存在最优订货量的条件恒成立。

$$\text{推论 2} \quad \frac{\partial q_1^*}{\partial \beta} = \frac{F^{-1}\left(\frac{w-r-h}{s-r-h}\right)}{2w\sqrt{F^{-1}\left(\frac{w-r-h}{s-r-h}\right)\frac{\beta}{w}}} > 0, \text{ 即}$$

制造商的最优订货量与供应商的努力成本系数呈正比。

推论 2 表明, 努力成本系数越高, 代表供应商的稳定性越低, 因此, 制造商需要提高订货量来避免缺货情况。

普通零部件采购下的求解结果如表 1 所示。

表 1 普通零部件采购下的均衡结果

Tab.1 Equilibrium results under ordinary components procurement

| 产量稳定性 | $q$                                                            | $\theta$                                                       |
|-------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 稳定    | $F^{-1}\left(\frac{w-r-h}{s-r-h}\right)$                       | 1                                                              |
| 不稳定   | $\sqrt{F^{-1}\left(\frac{w-r-h}{s-r-h}\right)\frac{\beta}{w}}$ | $\sqrt{F^{-1}\left(\frac{w-r-h}{s-r-h}\right)\frac{\beta}{w}}$ |

观察最优订货量与最优稳定性水平, 可以发现, 在供应商产量不稳定的情况下, 制造商更关注的是期望实现的生产量, 而不是订货量, 即  $q_0^* = \theta q_1^*$ 。

2.2 关键零部件采购情况

若供应商为关键零部件供应商, 则供应商作为 Stackelberg 博弈的领导者, 首先决定产量的稳定性水平, 制造商随后根据供应商的产量稳定性水平决定订货量。这种假设符合汽车制造商采购

芯片的情形, 芯片厂商的主营业务是消费电子芯片, 汽车芯片业务仅占其营收的 5%, 汽车制造商在供应链中处于弱势地位。

2.2.1 制造商的最优订货量

对制造商利润进行求导, 得到制造商的最优反应函数, 制造商的最优订货量水平如命题 4 所示。

**命题 4** 关键零部件采购下, 制造商的最优订货量水平为

$$q_2^* = \frac{1}{\theta} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right) \tag{8}$$

**证明**  $\frac{d^2 E[\pi_m(q)]}{dq^2} = (1-P)f(\theta q)\theta^2(s-r-h) < 0$ , 即  $E[\pi_m(q)]$  是关于订货量  $q$  的凹函数。因此, 根据  $\frac{dE[\pi_m(q)]}{dq} = (1-P)[\theta(r+h-w) + \theta F(\theta q)(s-h-r)] = 0$ , 可得制造商的最优订货量  $q_2^* = \frac{1}{\theta} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)$ 。

根据命题 4 可得, 当供应商的产量完全稳定时, 制造商的最优订货水平为  $F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)$ ; 当供应商产量不完全稳定时, 制造商的最优订货水平为  $\frac{1}{\theta} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)$ 。

**推论 3** 制造商的最优订货量与供应商的产量稳定性水平与采购价格呈反比, 与缺货成本成正比。

推论 3 表明, 当供应商的产量稳定性水平较低或制造商的缺货成本增大时, 制造商会增加订货量来保证供给。

2.2.2 供应商的最优产量稳定性水平

将制造商的最优订货量代入式(1), 得到供应商的利润函数为

$$\pi_s(\theta) = (1-P) \left[ w F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right) - \frac{\beta}{2} \theta^2 \right] - \frac{c}{\theta} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right) \tag{9}$$

**命题 5** 关键零部件采购情况下, 供应商的最优产量稳定性水平为

$$\theta^* = \min \left\{ \sqrt[3]{\frac{c}{\beta(1-P)} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)}, 1 \right\} \tag{10}$$

**证明**  $\frac{d^2 \pi_s(\theta)}{d\theta^2} = -\beta(1-P) - \frac{2c}{\theta^3} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right) < 0$ , 则供应商存在最优的产量稳定水平。因此, 由  $\frac{d\pi_s(\theta)}{d\theta} = -\beta\theta(1-P) + \frac{c}{\theta^2} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right) = 0$ , 可得此

时最优产量稳定水平  $\theta^* = \sqrt[3]{\frac{c}{\beta(1-P)} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)}$ 。由于供应商的最优产量稳定水平  $0 \leq \theta \leq 1$ , 因此,  $\theta^* = \min \left\{ \sqrt[3]{\frac{c}{\beta(1-P)} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)}, 1 \right\}$ 。

**推论 4**  $\theta$  与  $\beta$  成负相关, 与  $P$  呈正相关。

推论 4 说明供应商中断概率的降低会提高供应商的话语权, 此时, 供应商不会付出过多的成本用于提升其产量的稳定性水平。

关键零部件采购情况下的均衡结果见表 2。

表 2 关键零部件采购情况下的均衡结果

Tab.2 Equilibrium results for critical components procurement

| 产量稳定性 | $q$                                                          | $\theta$                                                                       |
|-------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 稳定    | $\frac{1}{\theta} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)$ | 1                                                                              |
| 不稳定   | $\frac{1}{\theta} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)$ | $\sqrt[3]{\frac{c}{\beta(1-P)} F^{-1} \left( \frac{r+h-w}{r+h-s} \right)} < 1$ |

3 两个相关联供应商的双源应急采购分析

为分析制造商在单源与双源采购模式间的选择策略, 本研究构建了由两个同质供应商和一个制造商组成的两级供应链模型。在该模型中, 两个供应商不仅具有同质性特征, 其中断概率也存在相关性, 从而更真实地反映了实际采购决策环境。为了模拟两个不可靠供应商之间的相互依赖性, 本文参考 Shan 等<sup>[21]</sup> 的设定, 引入参数  $\psi_{11}$ ,  $\psi_{11} \in (0, \min\{P_1, P_2\})$ , 表示两个供应商同时中断供应的概率, 即供应链完全中断概率。另外,  $\psi_{10}$  为供应商 1 中断供应而供应商 2 正常供应的概率;  $\psi_{01}$  为供应商 1 正常供应而供应商 2 中断供应的概率;  $\psi_{00}$  为两个供应商同时供应的概率。可以得到:

$$\begin{cases} \psi_{11} \in (0, \min\{P_1, P_2\}) \\ \psi_{10} = P_1 - \psi_{11} \\ \psi_{01} = P_2 - \psi_{11} \\ \psi_{00} = 1 - P_1 - P_2 + \psi_{11} \\ \psi_{11} + \psi_{10} + \psi_{01} + \psi_{00} = 1 \end{cases} \tag{11}$$

在  $P_1$  和  $P_2$  不变的情况下, 当两个供应商的中断风险之间的相互依赖性增加时, 随着  $\psi_{11}$  和  $\psi_{00}$  的增加,  $\psi_{10}$  和  $\psi_{01}$  减少。基于此, 计算皮尔逊相关系数  $\rho$ ,  $\rho$  表示两个供应商中断概率之间线性关系的强度与方向, 计算如下:

$$\rho = \frac{\psi_{11} - P_1P_2}{\sqrt{P_1P_2(1-P_1)(1-P_2)}} \tag{12}$$

$\rho$ 与 $\psi_{11}$ 存在一一对应关系，因此，下文使用 $\psi_{11}$ 来衡量两个不可靠供应商之间的相关性。另外， $\psi_{11}$ 与 $\rho$ 的可行域取决于 $P_1$ 和 $P_2$ 的值。当 $P_1 = P_2 = \frac{1}{2}$ 时， $\psi_{11} \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$ ， $\rho \in (0, 1)$ ，两者可能呈现完全正相关或负相关。当 $\psi_{11}$ 增大时， $\rho$ 也增大，供应商可靠性之间的相关性增强。

a. 两个供应商同时供货，概率为 $\psi_{00}$ 。

$$E(\pi_{m1}) = r \min \left\{ x, \sum_{i=1}^2 \theta_i q_i \right\} + s \left( \sum_{i=1}^2 \theta_i q_i - x \right)^+ - h \left( x - \sum_{i=1}^2 \theta_i q_i \right)^+ - \sum_{i=1}^2 w_i \theta_i q_i \tag{13}$$

b. 只有一个供应商正常供货，概率为 $\psi_{01} + \psi_{10}$ 。

$$E(\pi_{m2i}) = r \min \{ x, \theta_i q_i \} + s (\theta_i q_i - x)^+ - h (x - \theta_i q_i)^+ - w_i \theta_i q_i \tag{14}$$

c. 两个供应商同时中断供应，概率为 $\psi_{11}$ 。

$$E(\pi_{m3}) = -h\bar{x} \tag{15}$$

此时，制造商的期望利润为

$$E(\pi_m) = \psi_{00}E(\pi_{m1}) + \psi_{10}E(\pi_{m22}) + \psi_{01}E(\pi_{m21}) + \psi_{11}E(\pi_{m3}) \tag{16}$$

**命题 6** 同时考虑供应商中断风险与产量不稳定风险时，制造商存在唯一的最优订货量，使得自身利润最大。

**证明** 分别对 $q_i$ 进行一阶二阶求导，得到 Hessian 矩阵  $H$  为

$$H(E(\pi_m)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_1^2} & \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_1 \partial q_2} \\ \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_2 \partial q_1} & \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_2^2} \end{bmatrix}$$
$$H_1 = \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_1^2} = \psi_{00} \theta_1^2 f(\theta_1 q_1 + \theta_2 q_2)(s-h-r) + \psi_{01} \theta_1^2 f(\theta_1 q_1)(s-h-r) < 0$$
$$H_2 = \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_1^2} \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_2^2} - \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_1 \partial q_2} \frac{\partial^2 E(\pi_m)}{\partial q_2 \partial q_1} = (D_1 + D_2)(D_3 + D_4) - D_5^2 > 0$$

其中，

$$D_1 = \psi_{00} \theta_1^2 f(\theta_1 q_1 + \theta_2 q_2)(s-h-r)$$
$$D_2 = \psi_{01} \theta_1^2 f(\theta_1 q_1)(s-h-r)$$
$$D_3 = \psi_{00} \theta_2^2 f(\theta_1 q_1 + \theta_2 q_2)(s-h-r)$$

$$D_4 = \psi_{10} \theta_2^2 f(\theta_2 q_2)(s-h-r)$$
$$D_5 = \psi_{00} \theta_1 \theta_2 f(\theta_1 q_1 + \theta_2 q_2)(s-h-r)$$

由于 $s-h-r < 0$ ，故 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 < 0$ ，因此 $H_2 = D_1 D_4 + D_2 D_3 + D_2 D_4 > 0$ 。

由于制造商针对两个供应商的最优订货量难以获得解析解，因此，本文进行数值计算，以探索双源应急采购下中断概率对制造商最优决策的影响。

4 数值分析

4.1 单源采购分析

为了研究供应中断下制造商的应急采购策略以及供应商的生产策略，通过数值计算分别分析了单源采购与双源应急采购下的各方决策以及期望利润。假定随机市场需求量 $X$ 服从均匀分布 $U[200, 300]$ ，即 $X \sim U[200, 300]$ ，供应商的生产成本 $c = 20$ 元，最终产品的销售价格 $r = 150$ 元，每单位的缺货损失 $h = 50$ 元，未销售的产品单位价格 $s = 70$ 元，制造商的采购价格 $w = 50$ 元，供应商的中断概率 $P = 0.1$ <sup>[1]</sup>。

以下分别分析了关键零部件采购以及普通零部件采购情况下供应商的最优产量稳定性水平。

由图 1 可知，供应商的最优产量稳定性水平与努力成本系数 $\beta$ 成反比，并且在制造商占主导地位时的普通零部件采购情况下，供应商的产量稳定性水平更高。

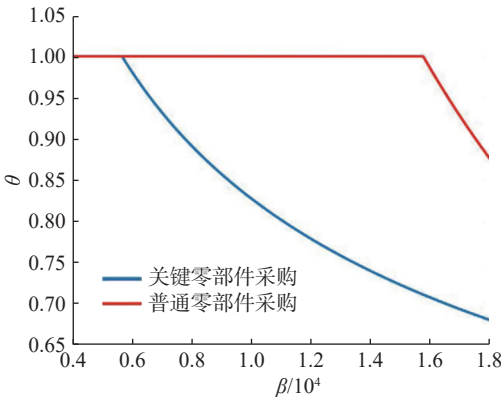


图 1  $\beta$ 对供应商产量稳定性水平的影响

Fig.1 Effect of  $\beta$  on supplier's production stability level

表 3 分析了在 $\beta = 7000$ 、 $\psi_{11} = 0.05$ 时，供应商的最优稳定性水平以及制造商的最优订货量与利润。由表 3 可知，决策顺序的变化不会对制造商利润造成影响，但会对供应商的最优产量稳定性

水平产生影响。对比单源采购与双源应急采购, 双源应急采购的总订货量高于单源采购, 并且双源应急采购可以通过降低供应链完全中断概率从而有效地降低供应链风险, 提高制造商利润。

表 3 3 种情况下的制造商最优订货量和利润  
Tab.3 Optimal order quantities and profits of manufacturer under three scenarios

| 采购方式    | 产量稳定性水平    | 最优订货量           | 利润/元     |
|---------|------------|-----------------|----------|
| 普通零部件采购 | 1          | 315.38          | 20711.55 |
| 关键零部件采购 | 0.93       | 339.12          | 20711.55 |
| 双源应急采购  | (0.95,0.9) | (211.88,140.92) | 21592.25 |

4.2 双源应急采购分析

在双源应急采购情况下, 假设一个制造商同时向两个供应商采购同一种零部件, 制造商向两个供应商的采购价格分别为 $w_1 = 52$ 元、 $w_2 = 50$ 元, 两个供应商的中断概率分别为 $P_1 = 0.1$ 、 $P_2 = 0.15$ , 供应链完全中断概率 $\psi_{11} \in (0, 0.1)$ <sup>[20]</sup>。两个供应商均存在产量不稳定的情况, 产量稳定性水平分别为 $\theta_1 = 0.95$ 、 $\theta_2 = 0.9$ 。随机市场需求 $X \sim U[200, 300]$ , 最终产品的销售价格 $r = 150$ 元, 每单位的缺货损失 $h = 50$ 元, 未销售的产品单位价格 $s = 70$ 元<sup>[1]</sup>。

图 2 给出了采购价格对制造商订货量的影响, 其中,  $q_1$  为制造商对供货商 1 的订货量,  $q_2$  为制造商对供货商 2 的订货量。可以发现, 当供应商 1 的价格较低时, 综合考虑供应商的可靠性与采购价格, 制造商倾向于选择供应商 1 作为主要供货方。而随着供应商 1 的采购价格上涨, 采购份额逐步向更具价格优势的供应商 2 转移, 并且一旦价格超过临界阈值, 供应商 2 将成为主要采购来源。

图 3 和图 4 分别给出了 $\psi_{11}$ 对制造商利润及订

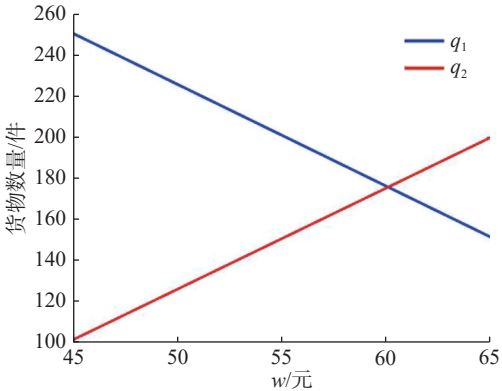


图 2 采购价格对订货量分配的影响  
Fig.2 Effect of procurement price on order quantity allocation

货量的影响。随着供应商中断相关性的增强, 即同步中断或同步供应的概率上升, 制造商利润呈 U 型变化。图 4 进一步表明, 当完全中断风险增大时, 制造商显著增加对高可靠性供应商 1 的订货比例。

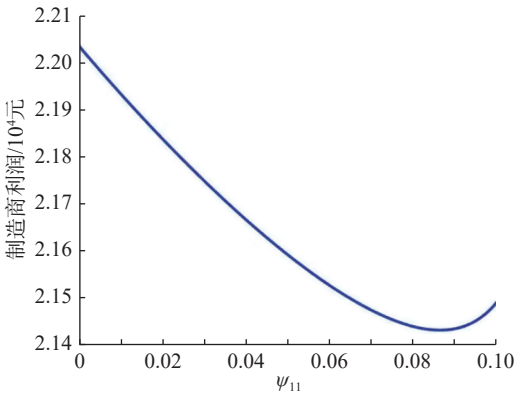


图 3  $\psi_{11}$ 对制造商利润的影响  
Fig.3 Effect of  $\psi_{11}$  on manufacturer's profit

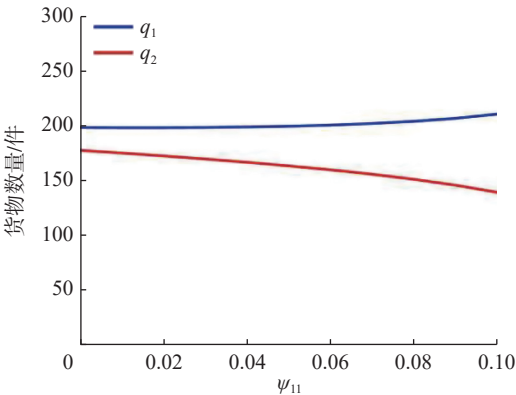


图 4  $\psi_{11}$ 对订货量分配的影响  
Fig.4 Effect of  $\psi_{11}$  on order quantity allocation

4.3 单源采购与双源应急采购对比分析

图 5 和图 6 分别给出了单源和双源采购模式下, 采购价格和 $\psi_{11}$ 对制造商利润的影响。由图 5 可以看出, 随着采购价格的增加, 制造商的利润呈下降趋势。当采购价格低于阈值时, 单源采购的利润将高于双源应急采购, 此时制造商将倾向于选择单源采购模式。图 6 表明, 随着供应链完全中断概率的增加, 制造商利润呈下降趋势, 并且单源采购模式下, 制造商利润下降更为显著, 而双源应急采购模式下, 制造商利润相对平稳, 这也意味着双源应急采购具有更强的稳定性。

图 7 揭示了制造商在选择采购策略时的偏好。结果显示, 供应商的相关性对制造商的策略选择影响较小。然而, 随着供应链中断概率的上升, 即供应不确定性增加时, 制造商更倾向于选择能带来更高期望利润的双源应急采购策略。

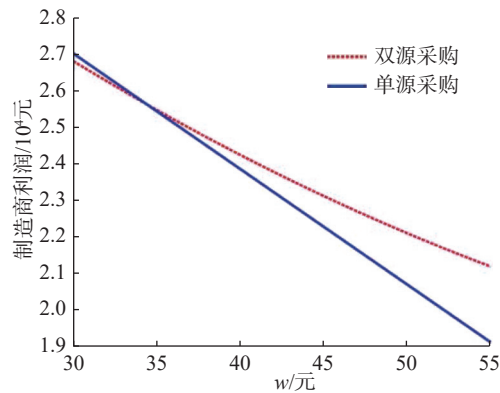


图 5 单元和双源采购价格对制造商利润的影响

Fig.5 Effect of procurement prices in single and dual sources on manufacturer's profit

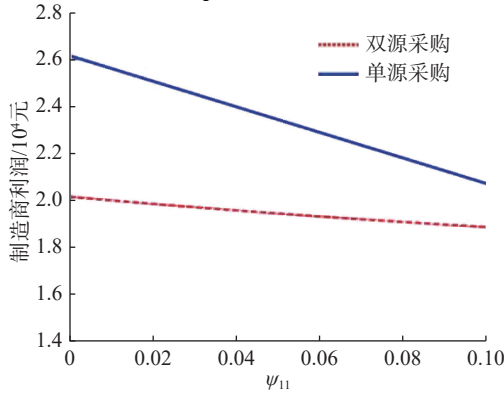


图 6  $\psi_{11}$  对制造商利润的影响

Fig.6 Effect of  $\psi_{11}$  on manufacturer's profit

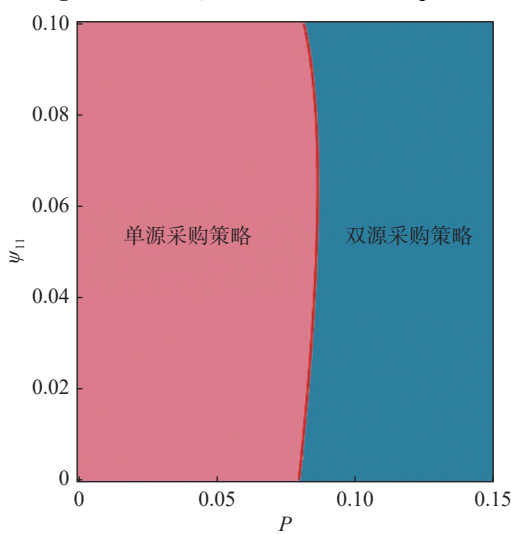


图 7 中断概率对制造商采购策略选择偏好的影响

Fig.7 Effect of disruption probability on manufacturer's procurement strategy preference

从上述结论以及数值结果可以发现，在应急采购决策中，单源采购的适用性高度依赖于供应链权力结构。当制造商在供应链中占据主导地位（如汽车厂商采购通用零部件），且供应商稳定性

可通过订单量调控时，单源采购模式最为适用。这类场景通常满足以下条件：a. 产品标准化程度高，供应商可替代性较强；b. 采购价格较低，制造商可通过调整订单量激励供应商提升稳定性；c. 供需关系稳定，缺货风险主要来自供应商生产波动而非外部环境。典型案例包括汽车标准件、基础工业品等采购，制造商通过交易中的领导者地位优化供应链效率。

当关键零部件供应商具有市场垄断性或技术壁垒（如芯片厂商对汽车制造商），且制造商缺货成本较高时，单源采购模式仍可能被动采用。其适用条件或场景包括：a. 供应商议价能力显著高于制造商；b. 产品专用性强，短期难以找到替代供应源；c. 供应商稳定性外生给定，制造商只能通过超额订货对冲风险。典型场景如车规级芯片采购，此时供应链风险管理的核心在于制造商如何通过订货策略适配供应商的稳定性水平。

相比之下，双源应急采购模式更适合以下 3 类特殊情况：a. 高价值关键零部件采购（如车规级芯片、航空发动机部件），当供应中断可能造成重大损失且单一供应商可靠性不足时；b. 价格敏感型物资采购（如动力电池原材料、大宗商品），存在多个合格供应商且价格竞争显著时；c. 战略应急物资储备（如医疗防护设备、国防物资），必须规避单一供应源突发中断风险时。这 3 类情况的共同特征是供应中断概率较高、缺货成本显著、产品存在技术壁垒或具有战略重要性。

4.4 案例分析

本节通过宁德时代（CATL）动力电池原材料双源应急采购策略的案例分析，验证理论结果的适用性。

2021 年，全球锂价格剧烈波动，碳酸锂价格从 5 万元/t 飙升至 50 万元/t，中国动力电池产业链面临严峻的原材料供应压力。作为全球动力电池龙头企业，宁德时代在 2021 年开始，就在年报中明确将“原材料价格波动及供应风险”列为关键挑战，指出锂、镍、钴等大宗商品价格波动对成本控制造成显著影响。在此形势下，宁德时代坚持执行双源采购策略，要求每种原材料至少由两家供应商供货，且比例均衡。这一策略通过激发供应商间的竞争，有效稳定了原材料价格与质量，同时降低了单一依赖风险。表 4 给出了宁德时代 2021 年对于原材料的采购，其主要供货商占比（主供占比）情况。该数据来源于民生证券研究院。

表 4 宁德时代 2021 年原材料采购中主供占比

Tab.4 CATL's primary suppliers share in raw materials procurement in 2021

| 原材料    | 供应商1 | 供应商2 | 主供占比 |
|--------|------|------|------|
| 磷酸铁锂正极 | 湖南裕能 | 德方纳米 | 60%  |
| 三元正极   | 容百科技 | 广东邦普 | 55%  |
| 负极     | 凯金能源 | 尚太科技 | 57%  |
| 电解液    | 天赐材料 | 江苏国泰 | 84%  |
| 隔膜     | 恩捷股份 | 星源材质 | 72%  |

研究表明，当原材料价格波动突破临界阈值时，如 2021 年碳酸锂价格涨幅高达 900%，双源采购能通过调整供应商采购比例有效对冲市场风险。宁德时代 2021 年毛利率逆势提升至 26.28% 的优异表现，侧面印证了该策略在成本控制方面的显著成效。在供应链管理实践中，公司通过构建“主供+备供”的双源体系，不仅实现了对关键原材料的价格风险管控，更确保了供应的稳定性。特别值得关注的是，宁德时代在供应商选择上特别注重组合的多元化和低相关性，这与模型提出的“优先选择稳定性高且相关性低的供应商组合”的优化原则高度一致。通过将国内优质供应商（如江西锂矿）与国际战略资源（如玻利维亚盐湖）有机结合，公司成功将完全中断风险控制在行业平均水平以下，同时维持了具有竞争力的成本结构。这一实践既验证了理论模型中关于采购比例优化和供应商选择的论断，也展现了双源采购策略在应对复杂市场环境时的强大适应力，为制造业企业建立弹性供应链提供了重要参考。

本研究进一步证实，在供应链中断风险加剧的市场环境下，双源采购策略能够显著降低缺货损失并提升制造商期望利润。这一结论在宁德时代的商业实践中得到充分验证。2021 年，宁德时代通过战略性调整供应商结构，将前五大供应商采购占比优化至 15.42%<sup>[23]</sup>，较行业主要竞争对手亿纬锂能（32.11%<sup>[24]</sup>）表现出更优的供应链风险分散能力。宁德时代创新性地将资源锁定（布局全球关键锂矿）、供应商培育（扶持二线优质供应商）与技术赋能（数字化供应链管理）三大要素有机结合，成功实现了双源采购策略从风险应急措施向核心竞争力的质的飞跃。这些关键措施不仅确保了企业自身在原材料剧烈波动时期的稳定生产，更为全球动力电池行业树立了供应链韧性建设的典范，展现了理论研究成果在复杂商业环境中的

实践价值。

5 结束语

供应中断和不稳定产出给供应链的运营带来了挑战，因此，制造商在此不确定环境下实施的应急采购策略显得尤为重要。本文分别探讨了制造商在单源采购关键零部件与普通零部件两种情况下，供应商的最优产量稳定性水平与制造商的采购策略，以及双源应急采购下的制造商订货量分配策略。主要结果如下：

a. 在单源采购中，普通零部件采购情况下供应商的产量稳定性水平高于关键零部件采购。并且，随着供应商产量稳定性的提高，制造商最优订货量降低，但决策顺序不影响制造商的最优利润。

b. 在双源应急采购中，制造商对于两个供应商订货量的分配主要取决于供应商的采购价格以及中断概率，制造商的订货量与批发价格呈反比，与供应商的稳定性水平呈正比。

c. 在双源应急采购模式下，制造商利润随供应链完全中断概率 $\psi_{11}$ 的变化呈现先降后升的 U 型关系：当 $\psi_{11}$ 上升时，制造商利润出现下降；但当 $\psi_{11}$ 接近供应商 1 的中断概率水平时，制造商通过将订货量向高可靠性供应商 1 倾斜，促使利润出现回升。这一现象意味着在完全中断风险较高时，供应相关性的增加会强化制造商对可靠供应商的选择倾向。

d. 当存在供应中断风险时，双源采购策略能够有效降低供应链完全中断的概率，提高供应链韧性。随着供应链中断概率以及采购价格的增加，双源应急采购的可靠性与低成本的优势凸显，制造商更倾向于选择双源应急采购策略。另外，制造商对渠道选择的偏好主要取决于供应商的稳定性水平，而非供应商之间的相关性。综上，当供应链中断风险较强且采购价格偏高时，制造商采用双源应急采购，能够有效地降低供应链中断带来的风险，提高期望利润。

基于上述结论，得到的管理启示如下：当制造商选择双源应急采购时，如何对订货量进行分配是一个关键的决策。制造商应当综合考虑采购价格与供应商的可靠性水平进行订单的分配；当供应链不确定性增加时，制造商可以通过双源应急采购来降低中断风险，保证生产连续性，增强

供应链的韧性。并且，制造商在选择双源应急采购的供应商时，应当选择相关性更低一些的供应商，能够帮助降低供应链完全中断的概率，在现实情况中也可以得到启示，即当海外零部件存在较大断供风险时，需要提前寻找相关性较低的国内供应商来消除这些潜在风险。

未来工作可以在此研究基础上以各种方式扩展，例如：制造商可以通过设置契约等方式来帮助供应商提高产量稳定性水平；本文的批发价格为外生变量，可引入批发价格作为供应商的决策变量，探讨两个供应商之间的价格竞争情况；以及进一步研究多周期下制造商的采购问题等。

参考文献：

[1] 陈崇萍, 陈志祥. 供应商产出随机与供应中断下的双源采购决策 [J]. 中国管理科学, 2019, 27(6): 113–122.

[2] TOMLIN B. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks[J]. *Management Science*, 2006, 52(5): 639–657.

[3] 黄咏珊. 新能源车企供应链中断的因素与风险体系探究 [J]. *中国市场*, 2023 (14): 184–187,

[4] 马士华. 如何防范供应链风险?[J]. 中国计算机用户, 2003 (3): 21.

[5] GIRI B C, SARKER B R. Coordinating a multi-echelon supply chain under production disruption and price-sensitive stochastic demand[J]. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 2019, 15(4): 1631–1651.

[6] 董霜霜, 李羚子, 夏唐斌, 等. 考虑供应中断和损失规避的多供应商采购决策研究 [J]. *工业工程与管理*, 2024, 29(3): 12–21,

[7] HEESE H S. Minimum order quantity requirements in the presence of supply disruption risk and retail competition[J]. *International Journal of Production Research*, 2025: 1–15.

[8] WU M, ZHANG J W, CHEN X. Managing supply disruptions for risk-averse buyers: diversified sourcing vs. disruption prevention[J]. *Omega*, 2025, 131: 103217.

[9] DEO S, CORBETT C J. Cournot competition under yield uncertainty: the case of the U. S. influenza vaccine market[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2009, 11(4): 563–576.

[10] 半导体产业纵横. 芯片良率危机凸显 [EB/OL]. [2022-07-07]. <https://www.163.com/dy/article/HBMM77SP05520H9Y.html>.

[11] 朱传波, 季建华. 考虑供应商风险的订货与可靠性改善策略研究 [J]. 管理评论, 2013, 25(6): 170–176.

[12] TANG S Y, KOUVELIS P. Pay-back-revenue-sharing contract in coordinating supply chains with random yield[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(12): 2089–2102.

[13] 刘伟, 宋士吉, 乔颖, 等. 随机需求和产量下基于损失规避的零售商博弈 [J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 920–924.

[14] YU L W, TIAN B S. Supply chain strategic behavior and coordination with a risk-averse manufacturer under random yield and demand[J]. *International Journal of Production Economics*, 2025, 281: 109492.

[15] GIRI B C, BARDHAN S. Coordinating a supply chain under uncertain demand and random yield in presence of supply disruption[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(16): 5070–5084.

[16] 李新军, 刘兴华. 基于供应可靠性的供应链契约设计 [J]. 统计与决策, 2018, 34(18): 172–177.

[17] HUANG H, XU H Y. Dual sourcing and backup production: coexistence versus exclusivity[J]. *Omega*, 2015, 57: 22–33.

[18] DONG S S, WANG Q W, ZHENG M M. Optimal decisions with supply disruption and demand forecast updating[C]//2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore: IEEE, 2021: 83–87.

[19] KUMAR M, BASU P, AVITTATHUR B. Pricing and sourcing strategies for competing retailers in supply chains under disruption risk[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 265(2): 533–543.

[20] 景熠, 刘芹芹, 周林. 突发事件影响下考虑供应中断风险和消费者偏好的制造商采购策略研究 [J/OL]. 中国管理科学, 1–16. [2024-12-14]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0078>.

[21] SHAN X, LI T, SETHI S P. A responsive-pricing retailer sourcing from competing suppliers facing disruptions[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2022, 24(1): 196–213.

[22] NIU B Z, DENG X H, XIE F F, et al. Dual sourcing hurts supply chain viability? The value of brand-owners’ cooperation under single sourcing[J]. *Omega*, 2025, 133: 103250.

[23] 宁德时代新能源科技股份有限公司. 宁德时代: 2021 年年度报告 [R]. 宁德: 宁德时代新能源科技股份有限公司, 2022.

[24] 惠州亿纬锂能股份有限公司. 亿纬锂能: 2021 年年度报告 [R]. 惠州: 惠州亿纬锂能股份有限公司, 2022.

(编辑：董 伟)