

# 考虑供应中断风险的组合采购策略优化

肖 茜

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2023年11月30日; 录用日期: 2024年1月9日; 发布日期: 2024年1月19日

## 摘 要

全球突发事件冲击供应链而引发的少供甚至断供现象近年频发, 供应中断风险极大影响整个供应链的健康平稳运行。为减少供应中断损失, 优化采购策略, 本文基于供应商、制造商及顾客形成的二级供应链结构, 构建了单源和双源采购策略模型, 通过Stackelberg博弈逆向求解, 得到单双源采购策略模型下各主体最优决策。研究发现供应商和制造商以自身利润最大化, 分别决定最优供应价格和最优订购量, 相较单源采购策略, 采取双源采购策略有利于促进上游供应商提高供应可靠度和降低产品价格以相互竞争, 从而提高制造商和供应链整体最优利润。

## 关键词

供应中断, 采购策略优化, 供应链博弈, 单源采购, 双源采购, 利润最大化

# Optimization of Portfolio Procurement Strategy Considering the Risk of Supply Disruption

Qian Xiao

School of Economics & Management, Tongji University, Shanghai

Received: Nov. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 9<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 19<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The phenomenon of supply shortage or even supply interruption caused by global emergencies impacting the supply chain has occurred frequently, and the risk of supply interruption has greatly affected the healthy and stable operation of the entire supply chain. In order to reduce the loss of supply interruption and optimize the procurement strategy, this paper constructs a single-source and dual-source procurement strategy model based on two-tier supply chain structure

文章引用: 肖茜. 考虑供应中断风险的组合采购策略优化[J]. 管理科学与工程, 2024, 13(1): 136-148.

DOI: 10.12677/mse.2024.131013

formed by suppliers, manufacturer and customers, and obtains the optimal decision of each subject through the reverse solution of the Stackelberg model. The study finds that suppliers and manufacturers maximize their own profits by determining the optimal supply price and the optimal order quantity, respectively. Compared with the single-source procurement strategy, the dual-source procurement strategy is conducive to promoting upstream suppliers to improve supply reliability and reduce product prices to compete with each other, thereby improving the optimal profit of manufacturer and supply chains as a whole.

## Keywords

Supply Disruption, Procurement Strategy Optimization, Supply Chain Game, Single-Source Procurement, Dual-Source Procurement, Profit Maximization

Copyright © 2024 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. 研究背景

供应中断风险是企业生产活动中面临的一个常见风险，在采购过程中，采购商向上游供应商订购产品或服务时，供应中断造成供应厂商的实际到货数量可能只是订货量的一部分甚至为零，给采购商带来损失，包括生产延误、库存积压、成本增加等。特别是随着市场竞争的日益激烈，精细化生产已经成为现代制造业的重要发展趋势之一，供应链也变得愈加脆弱[1]，一旦发生供应中断事件，将对整个链条产生巨大影响。如大众集团在 2016 年因穆勒称波斯米亚零部件制造商 Prevent Group 旗下两家子公司合约争议而供货中断，导致大众旗下 6 个工厂停产，对此大众称将重新评估合约，不会再依赖于某一家供应商，而是考虑多源供应。又如 2020 年美国完全切断华为的芯片供应，迫使手机芯片供应链受到严重打击。诸如此类的事件让制造厂商意识到对单渠道采购依赖可能带来严重损失，一旦该渠道发生供应中断，整个生产供应链将受到不可逆转的打击，故部分厂商开始转向多渠道采购[2]。如全球工程机械巨头卡特彼勒公司采取双源采购，向一个低成本公司采购日常需求稳定材料的同时向另一个快速高效生产但高成本的生产商采购紧急需要的材料[3]。

由此可见，一方面，当某供应商出现断供时，采购商采取多渠道采购策略可以有效化解供应危机，增强供应链稳健性，但另一方面，与单一供应商建立长期的、稳定的战略合作关系有利于采购产品质量和成本的保证，当采购商在多渠道分配订单时，由于每个供应商获得的订单数量减少，供应商为了平衡其成本和提高利润会相应提高供应价格。因此，采购商在面对多渠道采购时，基于上下游博弈，如何综合评估采购成本和供应中断风险，在渠道间合理分配订单以最大化自身利润是一个重要难题。

因此，为了减少上游供应商的不稳定性给制造商带来风险损失和利润减少，本文构建了考虑供应中断风险的制造商单源和双源采购模型，分别比较分析两种策略下制造商的最优决策和各主体利润情况，旨在解决如下三个问题：1) 是否双源采购比传统的单源采购方式更能提高制造商利润；2) 双源采购方式下，应如何分配订单使得制造商利润最大；3) 供应商供应中断概率如何影响制造商最优决策和各主体利润。

## 2. 文献综述

### 2.1. 供应中断风险及策略优化研究

供应中断风险属于供应链中断风险的一种，也是最重要的风险之一。关于供应中断情形描述，李新

军等人根据导致供应中断的原因和范围,将突发事件划分为系统性突发事件和个体突发事件,并将二者发生的概率转化为正常供货的概率和突发事件相关性指数两个参数[4]。Ashutosh Sarkar 将引起供应中断的突发事件分为系统突发、局域突发和个体突发事件三个层次,假设三个突发事件发生的概率不相同,并求出供应中断的概率[5]。Dogan 等[6]、Li 等[7]和郑志欣等人[8]均直接设置供应中断概率或正常供应概率。张以彬等人采用“0-1”模式表示供应商供应状态[9]。李晓超等人利用实际到货量占订货量的比例变动来描述供应的不确定性,并构建两级供应链模型[10];Wadecki 等人同样利用该比例表征供应不确定,并构建完全信息的两阶段博弈模型以分析采购商在不同供应链结构中的决策[11]。

关于供应中断风险下的采购策略优化,大部分学者采用博弈模型进行研究。Tang S Y 等人利用博弈模型,研究了供应商在随机供应情况下,古诺竞争的两个零售商采用单源和双源决策的临界条件[12]。X. Chen 等人基于 Stackelberg 模型,并假定零售商为博弈领导者,通过比较期望利润值,得出双渠道供应链提高了制造商和整体供应链利润[13]。J. Chen 等人研究了制造商领导的 Stackelberg 供应链,对比分析双渠道下集中式和分散式供应链的期望利润,发现集中式双渠道供应链中的全链利润优于分散式双渠道供应链中的利润,并分析了合同的协调作用[14]。何波等人利用多阶段博弈模型,考虑了由两个供应商和两个制造商构成的供应链中同时存在纵向和横向竞争的问题,其中供应商先制定批发价,随后制造商确定订货量,构成斯塔克伯格博弈,制造商之间进行古诺博弈或合谋,求出两种行为下供应商的定价决策和制造商的订货决策,并讨论了在博弈情况下实施紧急双源订货策略和可靠单源订货策略带给企业的影响[15]。陈崇萍等人同时考虑需求与供应不确定,通过建立 Stackelberg 博弈模型,并假设采购商是博弈的领导者,即供应商根据采购商的订货量决定自身的生产量,以讨论采购商在双源采购下的最优决策[16]。石松等人以疫情为背景,考虑医疗防护产品供应中断风险,针对市场中存在两种相互竞争的不同防护等级的医疗防护产品,构建博弈模型研究消费者社会学习行为对消费者需求及零售商运营决策的影响[17]。

## 2.2. Stackelberg 博弈理论研究

Stackelberg 博弈模型由德国经济学家 Stackelberg 提出的一种产量领导模型,该模型反映了企业间不对称的竞争,是一个两阶段的完全信息动态博弈。在该模型中,企业间的关系不同于古诺模型中平等同时决策,而是跟随决策,即厂商间的地位高低导致决策次序的先后,先决策的一方被称为领导者,剩下的主体根据领导者的决策再进行决策,被称为追随者,最终达到纳什平衡。在采购博弈模型中,制造商和供应商的地位通常处于不对称状态,如牛保庄等人以芯片零部件为背景,将供应商作为 Stackelberg 博弈模型中的领导者,采购品牌商为供应商的追随者,采取逆向求解法得出模型最优决策[18]。

## 3. 问题描述与假设

单源采购模型(OB)是由一个不可靠供应商 S1、一个制造商 M 和顾客组成的二级供应链,该供应商存在一定供应中断风险,当其遭遇供应中断事件时仅能提供一定比例的订购量,从而使制造商 M 面临原材料供应的不确定性风险。因此制造商 M 会寻找另一家不存在供应中断风险的可靠供应商 S2,并分配一定订单给该供应商,记该采购策略为双源采购模型(TB)。为明确本文的研究问题,做出如下假设:

制造商向顾客销售产品的销售价格  $p_M$  和其给市场的供应量  $q$  满足逆需求函数:  $p_M = a - bq$ ,其中  $p_M$  为制造商向顾客售卖的单位产品价格,  $a$  为顾客市场规模,  $b$  为产品的需求价格弹性系数,  $q$  为制造商给顾客的供应量,即供应商给制造商的供货量。

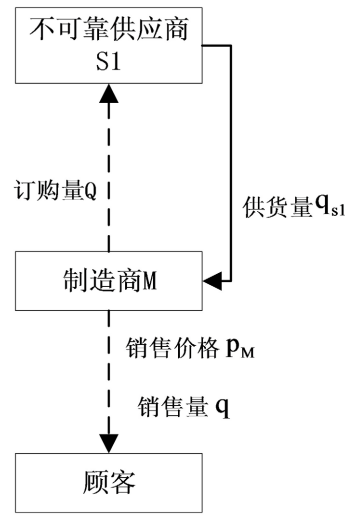
不可靠供应商 S1 是否发生供应中断事件用  $Y$  表示,其中  $Y=0$  或  $1$ ,记  $Y=1$  为供应商 S1 发生供应中断事件,事件发生的概率为供应中断概率  $\gamma$ ,此时供应商 S1 向制造商 M 提供  $\beta$  比例的订购量,其中

$0 < \beta < 1$ ;  $Y=0$  为供应商 S1 未发生供应中断事件, 概率为  $1-\gamma$ , 此时供应商 S1 正常供货, 给制造商 M 的供货量即为制造商 M 向其分配的订购量。

供应中断概率  $\gamma$  和供应商供应中断时的供应量折扣系数  $\beta$  存在关联情况, 在现实情况中, 通常供应中断概率  $\gamma$  越高, 供应商越不可靠, 则中断时可提供的产品量越少, 即供应中断时的供应量折扣系数  $\beta$  越小, 故假设二者关联时的函数关系为  $\beta=1-\gamma$ , 满足二者负相关。

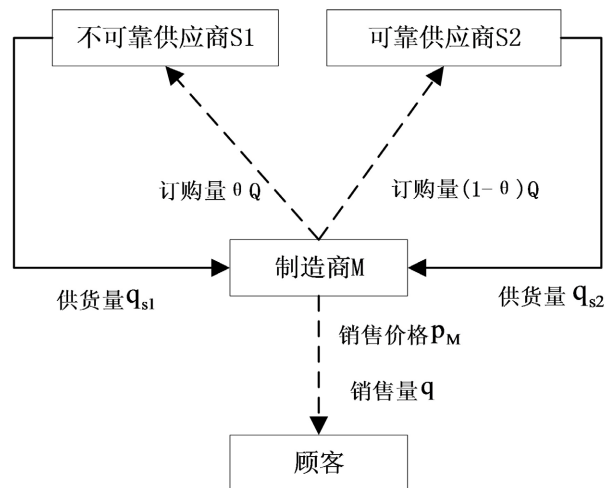
供应商是 Stackelberg 博弈的领导者, 制造商为追随者。

根据以上模型描述, 绘制单源采购策略(OB)和双源采购策略(TB)下的供应链结构如下图 1 和图 2 所示。



**Figure 1.** Supply chain structure diagram of single-source procurement strategy

**图 1.** 单源采购策略的供应链结构图



**Figure 2.** Supply chain structure diagram of dual-source procurement strategy

**图 2.** 双源采购策略的供应链结构图

本文所用参数定义见表 1。

**Table 1.** Definition of relevant symbols  
**表 1.** 相关符号定义

| 符号        | 定义                                                                                                  |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$       | 顾客市场规模                                                                                              |
| $b$       | 产品的需求价格弹性系数                                                                                         |
| $j$       | 采购策略索引 $j = \text{OB}, \text{TB}$                                                                   |
| $k$       | 供应链主体索引 $k = \text{S1}, \text{S2}, \text{M}, \text{SC}$                                             |
| $q_k^j$   | $j$ 采购策略下 $k$ 主体的实际到货量                                                                              |
| $\gamma$  | 不可靠供应商 S1 的供应中断概率                                                                                   |
| $\beta$   | 不可靠供应商 S1 供应中断时的供应量折扣系数 $\beta = 1 - \gamma$                                                        |
| $c_k$     | $k$ 主体的单位生产成本                                                                                       |
| $Q^j$     | $j$ 采购策略下制造商的订购总量                                                                                   |
| $\theta$  | 双源策略下制造商 M 分配给不可靠供应商 S1 的订单比例                                                                       |
| $p_k^j$   | $j$ 采购策略下 $k$ 主体的销售价格                                                                               |
| $Y$       | 不可靠供应商 S1 是否发生供应中断事件<br>$Y = \begin{cases} 1 & \text{发生供应中断事件} \\ 0 & \text{不发生供应中断事件} \end{cases}$ |
| $\pi_k^j$ | $j$ 采购策略下 $k$ 主体的期望利润                                                                               |

## 4. 模型构建与求解

### 4.1. 考虑供应中断风险的单源采购策略

在单源采购策略(OB)下, 供应商 S1 作为 Stackelberg 博弈领导者率先确定产品批发价  $p_{S1}^{OB}$ , 制造商 M 向该唯一供应商 S1 订购  $Q^{OB}$  的产品量。当供应商 S1 发生供应中断事件时, 即  $Y=1$ , 此时只能提供  $\beta$  比例的量, 即总到货量  $q^{OB} = q_{S1|Y=1}^{OB} = \beta Q^{OB} = (1-\gamma)Q^{OB}$ , 销售价格为  $p_{M|Y=1}^{OB} = a - bq^{OB} = a - b(1-\gamma)Q^{OB}$ ; 当供应商 S1 未发生供应中断事件时, 即  $Y=0$ , 此时总到货量  $q^{OB} = q_{S1|Y=0}^{OB} = Q^{OB}$ , 销售价格为  $p_{M|Y=0}^{OB} = a - bq^{OB} = a - bQ^{OB}$ 。相应地, 两位供应链成员的期望利润为:

$$\begin{aligned} \pi_{S1}^{OB} &= \gamma * q_{S1|Y=1}^{OB} (p_{S1}^{OB} - c_{S1}) + (1-\gamma) q_{S1|Y=0}^{OB} (p_{S1}^{OB} - c_{S1}) \\ &= \gamma * (1-\gamma) Q^{OB} (p_{S1}^{OB} - c_{S1}) + (1-\gamma) Q^{OB} (p_{S1}^{OB} - c_{S1}) \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} \pi_M^{OB} &= \gamma * q_{S1|Y=1}^{OB} (p_{M|Y=1}^{OB} - p_{S1}^{OB} - c_M) + (1-\gamma) q_{S1|Y=0}^{OB} (p_{M|Y=0}^{OB} - p_{S1}^{OB} - c_M) \\ &= \gamma * (1-\gamma) Q^{OB} (a - b(1-\gamma)Q^{OB} - p_{S1}^{OB} - c_M) + (1-\gamma) Q^{OB} (a - bQ^{OB} - p_{S1}^{OB} - c_M) \end{aligned} \quad (1.2)$$

采用逆向求解法, 首先对式(1.1)求关于  $Q^{OB}$  的二阶偏导数, 可得  $\frac{\partial \pi_M^{OB}}{\partial Q^{OB}} = 2b(-1+\gamma)(1+\gamma-\gamma^2) < 0$ ,

因此存在最优采购量  $Q^{OB*}$  使得制造商利润最大,  $Q^{OB*}$  满足  $\frac{\partial \pi_M^{OB}}{\partial Q^{OB}} = 0$ , 解得

$$Q^{OB*} = \frac{(1+\gamma)(-a+c_M+p_{S1}^{OB})}{2b(-1+(-1+\gamma)\gamma)} \quad (1.3)$$

将式(1.3)代入(1.2)，对  $p_{S1}^{OB}$  求二阶偏导数，可得  $\frac{\partial^2 \pi_M^{OB}}{\partial^2 p_{S1}^{OB}} = \frac{\gamma - \gamma^3}{b(-1 + (-1 + \gamma)\gamma)} < 0$ ，因此存在最优原材料价格  $p_{S1}^{OB*}$  使得供应商利润最大， $p_{S1}^{OB*}$  满足  $\frac{\partial \pi_M^{OB}}{\partial p_{S1}^{OB}} = 0$ ，解得

$$p_{S1}^{OB*} = \frac{a + c_{S1} - c_M}{2} \quad (1.4)$$

最终结合式代入(1.1)~(1.4)可得最终最优决策结果如下：

$$\text{供应商 S1 最优原材料价格 } p_{S1}^{OB*} = \frac{a + c_{S1} - c_M}{2}$$

$$\text{制造商 M 最优采购量 } Q^{OB*} = -\frac{(a - c_{S1} - c_M)(1 + \gamma)}{4b(-1 + (-1 + \gamma)\gamma)}$$

$$\text{供应商 S1 最优利润 } \pi_{S1}^{OB*} = \frac{(-a + c_{S1} + c_M)^2(-1 + \gamma)(1 + \gamma)^2}{8b(-1 + (-1 + \gamma)\gamma)}$$

$$\text{制造商 M 最优利润 } \pi_M^{OB*} = \frac{(-a + c_{S1} + c_M)^2(-1 + \gamma)(1 + \gamma)^2}{16b(-1 + (-1 + \gamma)\gamma)}$$

$$\text{供应链整体最优利润 } \pi_{SC}^{OB*} = \pi_{S1}^{OB*} + \pi_M^{OB*} = \frac{3(-a + c_{S1} + c_M)^2(-1 + \gamma)(1 + \gamma)^2}{16b(-1 + (-1 + \gamma)\gamma)}$$

**推论 1: (供应中断概率  $\gamma$  对各主体决策变量的影响)**  $\frac{\partial p_{S1}^{OB*}}{\partial \gamma} = 0$ ， $\frac{\partial Q^{OB*}}{\partial \gamma} > 0$ ， $\frac{\partial^2 Q^{OB*}}{\partial \gamma^2} < 0$

证明： $\frac{\partial Q^{OB*}}{\partial \gamma} = \frac{(a - c_{S1} - c_M)\gamma(2 + \gamma)}{4b(1 + \gamma - \gamma^2)^2}$ ， $a > c_{S1} + c_M$ ，否则各主体无利可图，且  $0 < \gamma < 1$ ， $b > 0$ ，因

$$\text{此 } \frac{\partial Q^{OB*}}{\partial \gamma} > 0; \quad \frac{\partial^2 Q^{OB*}}{\partial \gamma^2} = \frac{(a - c_{S1} - c_M)(1 + \gamma^2(3 + \gamma))}{2b(1 + (1 - \gamma)\gamma)^3} > 0$$

推论 1 表明在单源采购时，制造商的最优采购量  $Q^{OB*}$  随供应中断概率  $\gamma$  增大而增大，且增速也随  $\gamma$  增大而增大。这是因为制造商只有一个渠道获取产品，当供应商供应中断概率增大时，需要增加订购量以保证有充足的货物供应市场。且供应中断概率  $\gamma$  通过影响制造商的最优订购量  $Q^{OB*}$  而非最优批发价格  $p_{S1}^{OB*}$  来影响供应商自身最优利润，这是因为在单源策略下，供应商的主导优势很大。

**推论 2: (供应中断概率  $\gamma$  对各主体最优利润的影响)**  $\frac{\partial \pi_{S1}^{OB*}}{\partial \gamma} < 0$ ， $\frac{\partial \pi_M^{OB*}}{\partial \gamma} < 0$ ， $\frac{\partial \pi_{SC}^{OB*}}{\partial \gamma} < 0$

证明： $\frac{\partial \pi_{S1}^{OB*}}{\partial \gamma} = \frac{(-a + c_{S1} + c_M)^2(-3 + \gamma)\gamma^2(1 + \gamma)}{8b(1 + \gamma - \gamma^2)^2} < 0$ ； $\frac{\partial \pi_M^{OB*}}{\partial \gamma} = \frac{(-a + c_{S1} + c_M)^2(-3 + \gamma)\gamma^2(1 + \gamma)}{16b(1 + \gamma - \gamma^2)^2} < 0$ ；

$$\frac{\partial \pi_{SC}^{OB*}}{\partial \gamma} = \frac{3(-a + c_{S1} + c_M)^2(-3 + \gamma)\gamma^2(1 + \gamma)}{16b(1 + \gamma - \gamma^2)^2} < 0$$

推论 2 表明单源采购时，供应商 S1 的最优利润  $\pi_{S1}^{OB*}$ 、制造商 M 的最优利润  $\pi_M^{OB*}$  及供应链整体最优利润  $\pi_{SC}^{OB*}$  受供应中断概率  $\gamma$  影响均表现为随供应中断概率  $\gamma$  增大而递减的趋势。因为当供应商 S1 不可靠性增大时，制造商 M 供应中断风险增大，会有一定损失，同时供应商 S1 可提供的期望产品数量减少，意味着其期望利润减少，因此整体供应链利润也减少。

## 4.2. 考虑供应中断风险的双源采购策略

在双源采购策略(TB)下, 供应商 S1 和 S2 作为 Stackelberg 博弈领导者, 分别率先确定产品批发价  $p_{S1}^{TB}$  和  $p_{S2}^{TB}$ , 制造商 M 向不可靠供应商 S1 订购  $\theta$  比例的产品量即  $\theta Q^{TB}$ , 向可靠供应商 S1 订购量为  $(1-\theta)Q^{TB}$ 。同上文分析, 当供应商 S1 发生供应中断事件时, 即  $Y=1$ , 制造商收到两个供应商的总到货量  $q^{TB} = q_{S1|Y=1}^{TB} + q_{S2|Y=1}^{TB} = \beta\theta Q^{TB} + (1-\theta)Q^{TB}$ , 销售价格为  $p_{M|Y=1}^{TB} = a - bq^{TB} = a - b(\beta\theta Q^{TB} + (1-\theta)Q^{TB})$ ; 当供应商 S1 未发生供应中断事件时, 即  $Y=0$ , 此时总到货量  $q^{TB} = q_{S1|Y=0}^{TB} + q_{S2|Y=0}^{TB} = Q^{TB}$ , 销售价格为  $p_{M|Y=0}^{TB} = a - bq^{TB} = a - bQ^{TB}$ 。相应地, 两位供应链成员的期望利润为:

$$\begin{aligned}\pi_{S1}^{TB} &= \gamma * q_{S1|Y=1}^{TB} (p_{S1}^{TB} - c_{S1}) + (1-\gamma) q_{S1|Y=0}^{TB} (p_{S1}^{TB} - c_{S1}) \\ &= \gamma * \beta\theta Q^{TB} (p_{S1}^{TB} - c_{S1}) + (1-\gamma) \theta Q^{TB} (p_{S1}^{TB} - c_{S1})\end{aligned}\quad (1.5)$$

$$\pi_{S2}^{TB} = q_{S2}^{TB} (p_{S2}^{TB} - c_{S2}) = (1-\theta) Q^{TB} (p_{S2}^{TB} - c_{S2}) \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned}\pi_M^{TB} &= \gamma * (q_{S1|Y=1}^{TB} (p_{M|Y=1}^{TB} - p_{S1}^{TB} - c_M) + q_{S2|Y=1}^{TB} (p_{M|Y=1}^{TB} - p_{S2}^{TB} - c_M)) \\ &\quad + (1-\gamma) (q_{S1|Y=0}^{TB} (p_{M|Y=0}^{TB} - p_{S1}^{TB} - c_M) + q_{S2|Y=0}^{TB} (p_{M|Y=0}^{TB} - p_{S2}^{TB} - c_M)) \\ &= \gamma * (\beta\theta Q (a - b(\beta\theta Q^{TB} + (1-\theta)Q^{TB}) - p_{S1}^{TB} - c_M) \\ &\quad + (1-\theta) Q^{TB} (a - b(\beta\theta Q^{TB} + (1-\theta)Q^{TB}) - p_{S2}^{TB} - c_M)) \\ &\quad + (1-\gamma) (\theta Q^{TB} (a - bQ - p_{S1}^{TB} - c_M) + (1-\theta) Q^{TB} (a - bQ^{TB} - p_{S2}^{TB} - c_M))\end{aligned}\quad (1.7)$$

采用逆向求解法, 首先对式(1.7)求关于  $Q^{TB}$  和  $\theta$  的二阶偏导数的 Hessian 矩阵  $H_N$  为

$$\begin{pmatrix} -2b - 2b\gamma^2\theta(-2+\gamma\theta) & p_{S2}^{TB} + p_{S1}^{TB}(-1+\gamma^2) + \gamma^2(-a+c_M+4bQ^{TB}-4bQ^{TB}\gamma\theta) \\ p_{S2}^{TB} + p_{S1}^{TB}(-1+\gamma^2) + \gamma^2(-a+c_M+4bQ^{TB}-4bQ^{TB}\gamma\theta) & -2bQ^{TB2}\gamma^3 \end{pmatrix}$$

根据参数实际意义, 假设

$$\begin{aligned}|H_N| &= -p_{S2}^{TB2} - p_{S1}^{TB2}(-1+\gamma^2)^2 + 2p_{S2}^{TB}\gamma^2(a-c_M-4bQ^{TB}+4bQ^{TB}\gamma\theta) - \gamma^3((a-c_M)^2\gamma \\ &\quad + 4bQ^{TB}(2(a-c_M)\gamma(-1+\gamma\theta)+bQ^{TB}(-1+\gamma(4+3\gamma\theta(-2+\gamma\theta)))) \\ &\quad - 2p_{S1}^{TB}(-1+\gamma^2)(p_{S2}^{TB}+\gamma^2(-a+c_M+4bQ^{TB}-4bQ^{TB}\gamma\theta)) \\ &< 0\end{aligned}\quad \text{且}$$

$-2b - 2b\gamma^2\theta(-2+\gamma\theta) < 0$ , 因此  $H_N$  负定, 则制造商 M 利润函数是关于  $Q^{TB}$  和  $\theta$  的负定矩阵, 存在最优  $Q^{TB*}$

和  $\theta^*$  分别满足  $\frac{\partial \pi_M^{TB}}{\partial Q^{TB}} = 0$  和  $\frac{\partial \pi_M^{TB}}{\partial \theta} = 0$ , 使得制造商 M 利润最大, 得到

$$Q^{TB*} = \frac{p_{S2}^{TB} + (a-c_M)\gamma - p_{S1}^{TB}(1+\gamma)}{2b\gamma} \quad (1.8)$$

$$\theta^* = \frac{(p_{S1}^{TB} - p_{S2}^{TB})(1+\gamma)}{\gamma^2(p_{S1}^{TB} - p_{S2}^{TB} + (-a+c_M+p_{S1}^{TB})\gamma)} \quad (1.9)$$

将式(1.8)和(1.9)代入式(1.5)和(1.6), 分别对  $p_{S1}^{TB}$  和  $p_{S2}^{TB}$  求二阶偏导, 可得  $\frac{\partial^2 \pi_{S1}^{TB}}{\partial^2 p_{S1}^{TB}} = \frac{(-1+\gamma)(1+\gamma)^2}{b\gamma^3} < 0$ ,

$\frac{\partial^2 \pi_{S2}^{TB}}{\partial^2 p_{S2}^{TB}} = \frac{-1+(-1+\gamma)\gamma}{b\gamma^3} < 0$ ，因此存在最优原材料价格  $p_{S1}^{TB*}$  和  $p_{S2}^{TB*}$  使得供应商各自的利润最大， $p_{S1}^{TB*}$  和

$p_{S2}^{TB*}$  分别满足  $\frac{\partial \pi_{S1}^{TB}}{\partial p_{S1}^{TB}} = 0$  和  $\frac{\partial \pi_{S2}^{TB}}{\partial p_{S2}^{TB}} = 0$ ，解得

$$p_{S1}^{TB*} = \frac{2c_{S1} + c_{S2} + (2c_{S1} + c_{S2})\gamma - (2c_{S1} + c_{S2})\gamma^2 + (a - c_M)\gamma^3}{3 + \gamma(3 + (-3 + \gamma)\gamma)} \quad (1.10)$$

$$p_{S2}^{TB*} = \frac{2c_{S2} - c_{S1}(-1 + \gamma)(1 + \gamma)^2 + 2\gamma(c_{S2} - c_{S2}\gamma + (a - c_M)\gamma^2)}{3 + \gamma(3 + (-3 + \gamma)\gamma)} \quad (1.11)$$

最终结合式代入(1.5)~(1.11)可得最终最优决策结果如下，各主体最优利润将各最优决策变量代入利润函数表达式即可，由于表达式代入复杂，故不在此展示：

$$\text{供应商 S1 最优原材料价格 } p_{S1}^{TB*} = \frac{2c_{S1} + c_{S2} + (2c_{S1} + c_{S2})\gamma - (2c_{S1} + c_{S2})\gamma^2 + (a - c_M)\gamma^3}{3 + \gamma(3 + (-3 + \gamma)\gamma)}$$

$$\text{供应商 S2 最优原材料价格 } p_{S2}^{TB*} = \frac{2c_{S2} - c_{S1}(-1 + \gamma)(1 + \gamma)^2 + 2\gamma(c_{S2} - c_{S2}\gamma + (a - c_M)\gamma^2)}{3 + \gamma(3 + (-3 + \gamma)\gamma)}$$

制造商 M 最优采购量

$$Q^{TB*} = \frac{c_{S2} + c_{S2}(-2 + \gamma)\gamma^2 + c_{S1}(1 + \gamma)(-1 + (-2 + \gamma)\gamma) - (a - c_M)\gamma(-3 + \gamma(-3 + 2\gamma))}{2b\gamma(3 + \gamma(3 + (-3 + \gamma)\gamma))}$$

制造商 M 最优分配订单比例

$$\theta^* = \frac{c_{S2} + (a - c_M)\gamma^3(1 + \gamma) - c_{S2}\gamma(-2 + \gamma^2) - c_{S1}(1 + 2\gamma + \gamma^4)}{\gamma^2(c_{S2} + c_{S2}(-2 + \gamma)\gamma^2 + c_{S1}(1 + \gamma)(-1 + (-2 + \gamma)\gamma) - (a - c_M)\gamma(-3 + \gamma(-3 + 2\gamma)))}$$

**推论 3: (供应中断概率  $\gamma$  对各主体决策变量的影响)**  $\frac{\partial p_{S2}^{TB*}}{\partial \gamma} > \frac{\partial p_{S1}^{TB*}}{\partial \gamma} > 0$

证明:  $\frac{\partial p_{S1}^{TB*}}{\partial \gamma} = \frac{(3a - 2c_{S1} - 3c_M - c_{S2})(3 - \gamma)\gamma^2(1 + \gamma)}{(3 + \gamma(3 + (-3 + \gamma)\gamma))^2}$ ， $a > c_{S1} + c_M + c_{S2}$ ，否则无利可图，因此易得

$$\frac{\partial p_{S1}^{TB*}}{\partial \gamma} > 0; \quad \frac{\partial p_{S2}^{TB*}}{\partial \gamma} = \frac{2(3a - 2c_{S1} - 3c_M - c_{S2})(3 - \gamma)\gamma^2(1 + \gamma)}{(3 + \gamma(3 + (-3 + \gamma)\gamma))^2} = 2 \frac{\partial p_{S1}^{TB*}}{\partial \gamma}, \quad \text{因此 } \frac{\partial p_{S2}^{TB*}}{\partial \gamma} > \frac{\partial p_{S1}^{TB*}}{\partial \gamma} > 0$$

推论 3 表明在双源采购策略下，两个供应商的最优原材料价格均随不可靠供应商 S1 的供应中断概率  $\gamma$  增大而增大，且可靠供应商 S2 的增速大于不可靠供应商 S1。因为当不可靠供应商 S1 的供应中断概率  $\gamma$  增大时，其稳定性变弱，此时其竞争者 S2 的可靠性优势凸显，其预想制造商会加大对该渠道的订购量，故 S2 趁机提高售价以增加利润；而对于可靠性减弱的 S1 来说，收到来自制造商的订单比例减少，故需要提高售价以保证基本利润，但其仍想以相对低价吸引制造商 M 订购，因此供应商 S1 的价格增速低于供应商 S2。

**推论 4: (单双源采购策略下各主体决策变量比较)**  $p_{S1}^{0B*} > p_{S1}^{TB*}$

证明:  $\frac{\partial (p_{S1}^{0B*} - p_{S1}^{TB*})}{\partial \gamma} = \frac{(3a - 2c_{S1} - 3c_M - c_{S2})(-3 + \gamma)\gamma^2(1 + \gamma)}{(3 + \gamma(3 + (-3 + \gamma)\gamma))^2} < 0$ ，即  $p_{S1}^{0B*} - p_{S1}^{TB*}$  随  $\gamma$  增大而减小，

当  $\gamma=1$  时， $p_{S1}^{0B*} - p_{S1}^{TB*} = \frac{1}{4}(a - c_M - c_{S2}) > 0$ ，因此  $p_{S1}^{0B*} > p_{S1}^{TB*}$

推论 4 表明单源采购策略下的供应商 S1 的原材料价格  $p_{S1}^{OB*}$  高于双源采购策略下的价格  $p_{S1}^{TB*}$ 。这是因为当制造商 M 采取双源采购策略时，原材料供应商之间会相互竞争，降低原材料价格来吸引制造商增加订购量。因此制造商 M 可以通过增加采购渠道培育市场，促进市场良性竞争，推出具有竞争力的产品，最终提高自身利润。

5. 算例分析

为了更直观地比较分析各参数对两种策略下各主体决策变量和利润的影响，对部分参数进行赋值，假设  $a=200$ ， $b=1$ ， $c_M=20$ ， $c_{S1}=4$ ， $c_{S2}=6$ ，其中可靠供应商 S2 不存在供应中断风险，这意味着其产品可靠度高，生产经营能力强，由此单位生产成本低，故  $c_{S2}<c_{S1}$ ，同时令  $\gamma$  以 0.1 的步距从 0.1 增长至 0.9，表 2 和表 3 分别展示了单双源策略下的各主体最优决策及对应的最优利润。

Table 2. The optimal decision-making variables and the corresponding optimal profit under the single-source procurement strategy

表 2. 单源采购策略下各主体最优决策变量及对应的最优利润

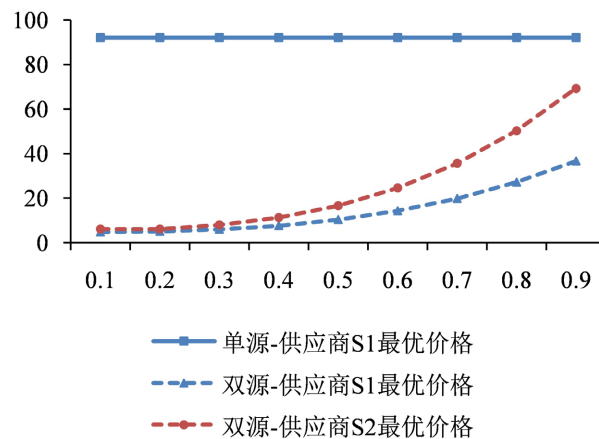
| 供应中断<br>概率 $\gamma$ | 供应商 S1 最优<br>价格 $p_{S1}^{OB*}$ | 制造商 M 最优<br>订购量 $Q^{OB*}$ | 制造商 M 最优<br>利润 $\pi_M^{OB*}$ | 供应商 S1 最优<br>利润 $\pi_{S1}^{OB*}$ | 供应链整体最优<br>利润 $\pi_{SC}^{OB*}$ |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 0.1                 | 92                             | 44.40                     | 1934.22                      | 3868.45                          | 5802.67                        |
| 0.2                 | 92                             | 45.52                     | 1922.65                      | 3845.30                          | 5767.95                        |
| 0.3                 | 92                             | 47.27                     | 1892.80                      | 3785.60                          | 5678.40                        |
| 0.4                 | 92                             | 49.68                     | 1836.08                      | 3672.15                          | 5508.23                        |
| 0.5                 | 92                             | 52.80                     | 1742.40                      | 3484.80                          | 5227.20                        |
| 0.6                 | 92                             | 56.77                     | 1598.76                      | 3197.52                          | 4796.28                        |
| 0.7                 | 92                             | 61.82                     | 1387.20                      | 2774.40                          | 4161.60                        |
| 0.8                 | 92                             | 68.28                     | 1081.49                      | 2162.98                          | 3244.47                        |
| 0.9                 | 92                             | 76.70                     | 641.19                       | 1282.38                          | 1923.57                        |

Table 3. The optimal decision-making variables and the corresponding optimal profit under the dual-source procurement strategy

表 3. 双源采购策略下各主体最优决策变量及对应的最优利润

| 供应中断<br>概率 $\gamma$ | 供应商 S1<br>最优价格<br>$p_{S1}^{TB*}$ | 供应商 S2<br>最优价格<br>$p_{S2}^{TB*}$ | 制造商 M<br>最优订购<br>量 $Q^{TB*}$ | 制造商 M 分<br>配给供应商<br>S1 的最优<br>订单比例 $\theta^*$ | 制造商 M<br>最优利润<br>$\pi_M^{TB*}$ | 供应商<br>S1 最优<br>利润 $\pi_{S1}^{TB*}$ | 供应商<br>S2 最优<br>利润 $\pi_{S2}^{TB*}$ | 供应链整<br>体最优<br>利润 $\pi_{SC}^{TB*}$ |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0.1                 | 4.79                             | 6.12                             | 90.06                        | 0.91                                          | 7655.57                        | 64.27                               | 0.93                                | 7720.76                            |
| 0.2                 | 5.07                             | 6.14                             | 90.14                        | 0.89                                          | 7598.16                        | 82.25                               | 1.37                                | 7681.78                            |
| 0.3                 | 5.96                             | 7.92                             | 90.29                        | 0.52                                          | 7444.81                        | 84.26                               | 84.26                               | 7613.33                            |
| 0.4                 | 7.63                             | 11.26                            | 90.72                        | 0.44                                          | 7178.54                        | 121.21                              | 268.47                              | 7568.21                            |
| 0.5                 | 10.32                            | 16.65                            | 91.16                        | 0.42                                          | 6761.14                        | 179.89                              | 566.60                              | 7507.63                            |
| 0.6                 | 14.29                            | 24.58                            | 91.43                        | 0.42                                          | 6164.52                        | 250.92                              | 990.60                              | 7406.04                            |
| 0.7                 | 19.80                            | 35.61                            | 91.39                        | 0.43                                          | 5370.14                        | 315.65                              | 1546.18                             | 7231.97                            |
| 0.8                 | 27.15                            | 50.31                            | 90.89                        | 0.45                                          | 4374.60                        | 339.27                              | 2224.00                             | 6937.87                            |
| 0.9                 | 36.63                            | 69.26                            | 89.81                        | 0.47                                          | 3197.74                        | 263.61                              | 2991.60                             | 6452.95                            |

图3描述了供应中断概率 $\gamma$ 对两个策略下供应商S1和供应商S2最优价格的影响,验证了推论1、推论3和4。由图可知,单源采购策略下供应商S1的最优价格不受其供应中断概率 $\gamma$ 的影响,验证了推论1,因为制造商只能通过其一个渠道采购产品,故供应商S1的主导权很大。而当制造商M采取双源采购策略时,由推论3分析可知,供应商S1的供应中断概率 $\gamma$ 增大意味着其更不可靠,因此其竞争者供应商S2的可靠性凸显,故供应商S2为提高自身利润会提高价格,供应商S1则因为获得订购量减少但又需保持低价吸引制造商,故小幅提高价格,但总体而言,双源采购策略下两个供应商的价格均小于单源采购策略下的渠道价格,因此制造商M可以采取多渠道采购方式引发上游供应商产品竞争,从而提升自身利润。

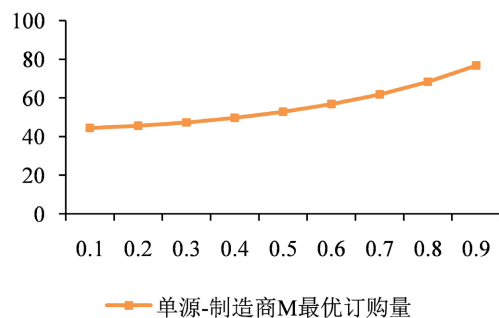


**Figure 3.** The impact of supply interruption probability  $\gamma$  on the optimal price of suppliers under the single-source and dual-source strategy

**图3.** 供应中断概率 $\gamma$ 对单双源策略下供应商最优价格的影响

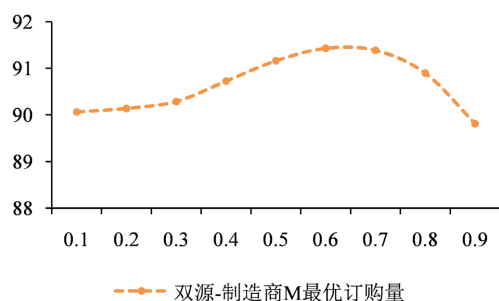
图4和图5分别描述了供应中断概率 $\gamma$ 对两个策略下制造商M最优订购量 $Q^{OB*}$ 的影响。单源策略下,由图4可知,制造商M最优订购总量随供应中断概率 $\gamma$ 增大而增大,验证了推论1,表明制造商在仅有一个渠道获取原材料时,当该渠道不稳定时,制造商为保证有充足的货物供应下游顾客,需要提高订购总量;而在双源策略下,由图5可知,制造商M随供应中断概率 $\gamma$ 增大呈现先增大后减小的趋势,因为当不可靠供应商S1极不稳定时,采取双源采购策略的制造商M可以选择另一可靠渠道,无需担心不可靠供应引发的库存不足问题,因此无需大幅提升单一渠道的订购量,故制造商在供应中断概率 $\gamma$ 较大时,为降低供应中断风险,会适当减少总订购量。

图6描述了在双源采购策略下,制造商M分配给供应商S1的订单比例 $\theta^*$ 随供应中断概率 $\gamma$ 的变化趋势,具体表现为先减小后增大的变化趋势,同时减小的速率远大于增大的速率。由图可知,当不可靠供应商的供应中断概率 $0.1 < \gamma < 0.2$ 时,分配S1的订单比例 $\theta^*$ 约0.9,因为此时供应商S1较可靠且成本低,制造商M会把大量订单分配给它,但为保持上游市场的良性竞争,依然会保持一定比例的订单给供应商S2;当不可靠供应商的供应中断概率 $\gamma$ 从0.2升高至0.3的过程中,制造商M会大幅降低向其分配的订单比例 $\theta^*$ ,因为由图3可知此时供应商S2的价格仅略高于S1,且不存在供应中断风险,因此随着供应商S1稳定性减弱,制造商会大幅提高向S2的订单比例,而当供应中断概率 $\gamma$ 增大到一定程度,供应商S2与S1的价格差距较大,供应商S1的成本优势开始凸显但可靠性依然十分弱,制造商M会综合考虑供应中断风险和订购成本,小幅度提高对其分配的订单比例 $\theta^*$ ,但仍不超过0.5。



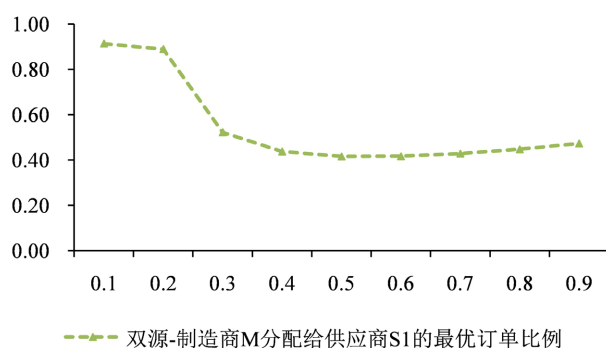
**Figure 4.** The impact of supply disruption probability  $\gamma$  on the manufacturer's optimal order quantity under the single-source strategy

**图 4.** 供应中断概率  $\gamma$  对单源策略下制造商最优订购总量的影响



**Figure 5.** The impact of supply disruption probability  $\gamma$  on the manufacturer's optimal order quantity under the dual-source strategy

**图 5.** 供应中断概率  $\gamma$  对双源策略下制造商最优订购总量的影响

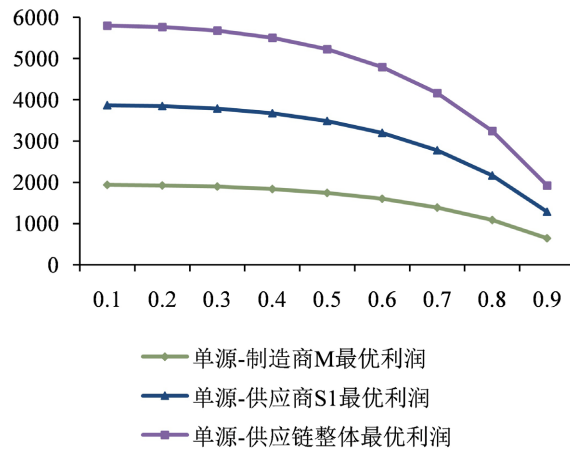


**Figure 6.** The impact of supply disruption probability  $\gamma$  on the manufacturer's optimal order proportion for supplier S1 under the dual-source strategy

**图 6.** 供应中断概率  $\gamma$  对双源策略下制造商分配给供应商 S1 的最优订单比例的影响

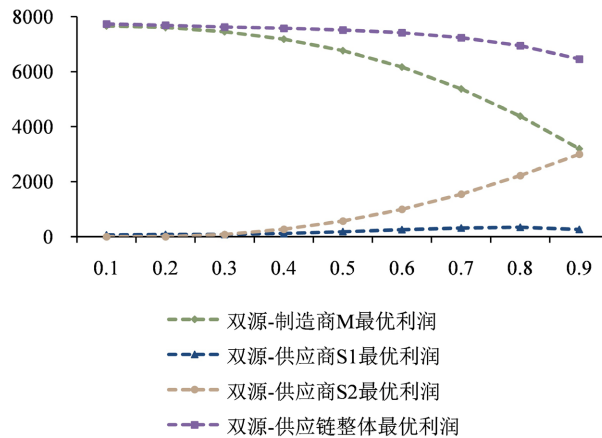
图 7 和图 8 分别描述了供应中断概率  $\gamma$  对两个策略下各主体及供应链整体最优利润的影响。单源策略下, 由图 7 可知, 制造商 M、供应商 S1 和供应链整体的最优利润均随供应中断概率  $\gamma$  增大而减少, 验证了推论 2; 双源策略下, 由图 8 可知, 制造商 M 的最优利润随供应中断概率  $\gamma$  增大而减少, 供应商 S2

的最优利润则与之相反, 呈现随  $\gamma$  增大而增多的趋势, 因为供应中断概率  $\gamma$  增大意味着制造商受到的供应风险损失增多, 尽管可以向另一渠道采购, 但采购成本会相应提高, 而供应商 S2 则因为其可靠性的优势不断凸显, 利润不断上升, 但总体而言供应链整体最优利润呈现缓慢减少趋势。同时, 分析对比单双源采购策略可知,  $\pi_M^{OB*} < \pi_M^{TB*}$ ,  $\pi_{SC}^{OB*} < \pi_{SC}^{TB*}$ , 因此制造商 M 可以通过双渠道采购提高自身和供应链整体利润。



**Figure 7.** The impact of supply disruption probability  $\gamma$  on the optimal profit under the single-source strategy

**图 7.** 供应中断概率  $\gamma$  对单源策略下各主体最优利润的影响



**Figure 8.** The impact of supply disruption probability  $\gamma$  on the optimal profit under the dual-source strategy

**图 8.** 供应中断概率  $\gamma$  对双源策略下各主体最优利润的影响

## 6. 结论

本文考虑供应中断风险基于两个供应商(不可靠供应商 S1 和可靠供应商 S2)、一个采购商 M 及顾客的二级供应链采购, 构建了单源和双源采购策略模型, 利用 Stackelberg 博弈方法论分别求解两个模型下的各主体最优决策变量和最优利润, 通过理论和数值分析供应中断风险概率对供应链的影响。研究结果发现, 从供应商角度来看, 两个供应商主要通过产品可靠度和价格相互竞争, 在双源采购策略中, 不可靠供应商最优利润远小于其竞争对手, 且自身最优利润总是随着其供应中断概率增大而减少, 同时供应商

间价格差随着供应中断概率降低而减少, 因此不可靠供应商有动机提高稳定性, 可靠供应商有动机降低价格, 市场趋向良性竞争; 从制造商角度来看, 以自身利润最大化为目标, 通过调整最优采购总量和分配订单比例来有效培育市场, 结果表明选择双源采购策略有利于上游市场竞争降低产品价格, 从而提高自身利润。未来可进一步研究每个渠道下的同质供应商数量选择, 探究最优数量问题, 同时加入产品质量等其它因素, 多维度研究采购策略优化问题。

## 参考文献

- [1] Tang, C.S. (2006) Perspectives in Supply Chain Risk Management. *International Journal of Production Economics*, **103**, 451-488. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006>
- [2] Shin, H., Collier, D.A. and Wilson, D.D. (2000) Supply Management Orientation and Supplier/Buyer Performance. *Journal of Operations Management*, **18**, 317-333. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(99)00031-5)
- [3] Rao, U., Scheller-Wolf, A. and Tayur, S. (2000) Development of a Rapid-Response Supply Chain at Caterpillar. *Operations Research*, **48**, 189-204. <https://doi.org/10.1287/opre.48.2.189.12380>
- [4] 李新军, 季建华, 王淑云. 供应中断情况下基于双源采购的供应链协调与优化[J]. 管理工程学报, 2014, 28(3): 141-147.
- [5] Sarkar, A., Mohapatra, P.K.J., Chaudhary, A., Agrawal, A., Mandal, A. and Padhi, S.S. (2013) Single or Multiple Sourcing: A Method for Determining the Optimal Size of the Supply Base. *Technology Operation Management*, **3**, 17-31. <https://doi.org/10.1007/s13727-013-0013-6>
- [6] Serel, D.A. (2008) Inventory and Pricing Decisions in a Single-Period Problem Involving Risky Supply. *International Journal of Production Economics*, **116**, 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.07.012>
- [7] Li, J., Wang, S.Y. and Cheng, T.C.E. (2010) Competition and Cooperation in a Single-Retailer Two-Supplier Supply Chain with Supply Disruption. *International Journal of Production Economics*, **124**, 137-150. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.017>
- [8] 郑志欣, 何波. 供应中断风险下链与链竞争的博弈分析[J]. 科技管理研究, 2013(16): 198-201, 209.
- [9] 张以彬, 龙静, 陈瑜. 市场需求可变的供应链中断应急策略与运作仿真[J]. 系统管理学报, 2019, 28(6): 1202-1210.
- [10] 李晓超, 林国龙. 供应不确定条件下双源与柔性采购联合决策[J]. 中国流通经济, 2016, 30(10): 38-47.
- [11] Wadecki, A.A., Babich, V. and Wu, O.Q. (2012) Manufacturer Competition and Subsidies to Suppliers. In: Gurnani, H., Mehrotra, A. and Ray, S. Eds., *Supply Chain Disruptions*, Springer, London, 141-163.
- [12] Tang, S.Y. and Kouvelis, P. (2011) Supplier Diversification Strategies in the Presence of Yield Uncertainty and Buyer Competition. *M&Som-Manufacturing & Service Operations Management*, **13**, 439-451.
- [13] Chen, X., Zhang, H., Zhang, M. and Chen, J. (2017) Optimal Decisions in a Retailer Stackelberg Supply Chain. *International Journal of Production Economics*, **187**, 260-270.
- [14] Chen, J., Zhang, H. and Sun, Y. (2012) Implementing Coordination Contracts in a Manufacturer Stackelberg Dual-Channel Supply Chain. *Omega-International Journal of Management Science*, **40**, 571-583.
- [15] 何波, 张霞. 供应中断风险下采购与定价决策分析[J]. 运筹与管理, 2015(5): 104-110.
- [16] 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.
- [17] 石松, 石平. 疫情背景下考虑社会学习的竞争防疫产品供应中断研究[J/OL]. 中国管理科学, 2022: 1-16. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1147>, 2022-02-15.
- [18] 牛保庄, 许浩涛, 李启洋, 等. 考虑供应中断的关键进口零部件本土替代及采购策略调整[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(11): 2881-2890.