

易变质产品竞争性供应链的最优定价策略

袁 晓

岭南师范学院数学与统计学院, 广东 湛江

收稿日期: 2025年8月9日; 录用日期: 2025年8月29日; 发布日期: 2025年9月12日

摘 要

本文针对由供应商和零售商构成的两条竞争性供应链, 考虑产品易变质的特性, 构造了三种不同的竞争结构模型。通过逆向求解法, 分别推导了分散决策和集中决策下这三种模型的最优定价策略, 并进行了参数敏感性分析, 研究结果表明三种结构模型中都是集中决策下的总利润大于分散决策的总利润。

关键词

竞争供应链, 易变质产品, 逆向求解法, 最优定价策略

Optimal Pricing Strategy for Competitive Supply Chain of Deteriorating Items

Xiao Yuan

School of Mathematics and Statistics, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

Received: Aug. 9th, 2025; accepted: Aug. 29th, 2025; published: Sep. 12th, 2025

Abstract

Considering the special property of product spoilage, three different competitive structure models are constructed for two competitive supply chains consisting of suppliers and retailers. Through the reverse solving method, the optimal pricing strategies for these three models under decentralized and centralized decision-making are derived, and parameter sensitivity analysis is conducted. The research results show that the total profit under centralized decision-making was greater than that under decentralized decision-making in all three structural models.

Keywords

Competitive Supply Chain, Deteriorating Item, Reverse Solving Method, Optimal Pricing Strategy

Copyright © 2025 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

在日常生活中, 由于受到温度、湿度、氧气和微生物等环境因素的影响, 很多商品容易变质。例如, 很多种粮食因为富含淀粉, 容易受到霉菌、细菌等污染, 一旦储备不当, 周围空气湿度过大、温度过高、氧气充足, 它们就会迅速变质发霉、散发呛鼻霉味; 某些电子设备也可能因为微小的撞击和震动导致失去某些实用性, 也可以视为变质。总之, 生活生产中很多商品存在变质特性。因为变质难以避免, 所以导致很多变质商品销售额难以达到预期的目标, 会让销售商的利润有所损失。因此, 为了帮助销售者减少损失, 研究顾客可接受的变质产品的定价策略有一定的研究意义。

易变质产品(Perishable Products)供应链管理的研究起源于 20 世纪中期, 随着运筹学、库存理论及冷链技术的发展, 该领域逐渐形成了系统的研究体系。以下是其研究的主要发展阶段和里程碑:

1.1. 早期基础模型阶段(1960s~1980s)

1) 变质库存模型的提出: Ghare & Schrader (1963) [1]首次在 *A Model for Exponentially Decaying Inventories* 中提出指数衰减库存模型, 将变质率引入 EOQ (经济订货批量)模型, 奠定了易变质产品库存理论的基础。Whitin (1957) [2]早期关注时尚商品(季节性易腐品)的库存问题, 提出了动态定价和库存控制的思想。

2) 随机需求与库存优化: Nahmias (1975) [3]系统研究了随机需求下的易腐品库存管理, 提出了基于报童模型(Newsboy Model)的扩展方法, 适用于短生命周期产品(如食品、药品)。Fries (1975) [4]研究了固定保质期产品(Fixed Lifetime)的库存策略, 如血库管理。

3) 供应链协调初步探索: Silver & Peterson (1985) [5]在 *Decision Systems for Inventory Management* 中讨论了易腐品的订货策略, 强调时间敏感性对库存决策的影响, 从而进行供应链协调的初步探索。

1.2. 理论深化与扩展(1990s~2000s)

1) 动态定价与库存联合优化: Gallego & van Ryzin (1994) [6]提出收益管理(Revenue Management)理论, 影响易腐品(如航空座位、酒店房间、生鲜食品)的动态定价策略, 从而拓展了变质产品供应链管理的应用空间。Feng & Xiao (2000) [7]研究价格和库存的联合优化, 适用于易腐品的动态定价问题。

2) 冷链物流与运输优化: Bogataj & Bogataj (2007) [8]研究了冷链物流中的时间-温度耦合效应, 提出易腐品运输中的质量衰减模型。Amorim 等(2012) [9]结合生产调度与配送优化, 研究易腐食品(如乳制品)的供应链协同问题。Cachon (2003) [10]在 *Supply Chain Coordination with Contracts* 中探讨了易腐品供应链的回购契约(Buyback Contract)和收益共享契约(Revenue Sharing Contract)。

1.3. 现代研究趋势(2010s~至今)

1) 可持续与绿色供应链: Accorsi 等(2017) [11]提出食品供应链的可持续性优化, 关注减少食品浪费和碳排放。Soysal 等(2018) [12]研究闭环供应链(Closed-Loop Supply Chain), 如过期食品的回收利用。

2) 数据驱动与智能决策: Ferguson (2019) [13]应用机器学习改进短生命周期产品的需求预测。Ivanov (2021) [14]研究公共卫生事件下的供应链韧性(Resilience), 探讨易腐品(如疫苗、生鲜食品)的中断管理。

3) 消费者行为与全渠道管理: Herbon (2018) [15]研究消费者新鲜度偏好对易腐品定价和库存策略的

影响。Wang 等(2022) [16]分析生鲜电商(如 Amazon/Fresh、Ocado)的库存 - 配送协同优化。

区别以上研究, 本文从供应链内部竞争角度来考虑易变质商品对产品选择和收益造成的影响, 针对两组不同供应商和零售商组成的两条竞争性供应链, 分别构造两条供应链都生产不变质产品、两条供应链都生产易变质产品, 以及一条供应链生产不变质产品、另一条生产易变质产品这三种不同结构的供应链模型, 并采用逆向归纳法制定最优定价策略。

2. 模型假设和符号说明

2.1. 问题描述

研究考虑单一产品的两条竞争性供应链, 每条供应链都由一个供应商和一个排它性零售商构成, 分别考虑三种竞争结构模型: 两条供应链都生产不变质产品(简称为 *NN* 结构)、两条供应链都生产易变质产品(简称为 *DD* 结构), 以及一条供应链生产不变质产品、另一条生产易变质产品(简称为 *DN* 结构)。

2.2. 符号说明

相应参数和符号的具体含义如下:

p_1 、 p_2 分别代表两条供应链中产品的单位零售价格; ω_1 、 ω_2 分别代表两条供应链中产品的单位批发价格; c_1 、 c_2 分别代表两条供应链中产品的单位成本; d_1 、 d_2 分别代表两条供应链中产品的市场需求。 π_R 、 π_S 分别代表两条供应链中两位零售商和两位供应商的利润, π_c 代表两条供应链中两位零售商和供应商的总利润。

λ 表示每条供应链产品需求对自身产品的价格敏感系数, μ 表示产品需求受竞争对手产品价格的影响系数(称为交叉价格敏感系数)。显然产品需求量受自身供应链中产品价格的影响要大于竞争对手的影响, 即 $\lambda > \mu > 0$ 。

e 表示保鲜技术效率, 很明显 $0 < e < 1$; α 表示基础市场规模, 理解为已知常数。

2.3. 模型假设

针对问题做出下列假设:

- 1) 假设产品要保证不变质则要求有较高的保鲜技术, 产品会变质则无需考虑保鲜, 前者单位产品的成本高于后者。
- 2) 假设顾客对产品的变质程度比较敏感, 当产品变质程度越大时, 顾客购买欲望越低, 销售量越低。
- 3) 假设两条供应链之间存在竞争关系, 具有可代替性。
- 4) 假设每条供应链中产品的供应商和零售商完全中性且共享信息。
- 5) 假设产品的运输成本和库存成本相对稳定, 因此可将他们折算到批发价格和零售价格中, 在这里不需要再单独计算。
- 6) 假设两个供应商均生产不变质产品时, 供应链间存在价格竞争, 此时市场对两条供应链中产品的需求量为

$$d_i = \alpha - \lambda p_i + \mu p_j, (i, j \in (1, 2), i \neq j) \quad (1)$$

即每条供应链产品的需求函数不仅受到自身价格的影响, 同时还要受另外一条供应链产品价格的影响。

- 7) 假设易变质产品竞争环境下的需求函数为

$$d_i = \alpha - \lambda e p_i + \mu e p_j, (i, j \in (1, 2), i \neq j) \quad (2)$$

即每条供应链中产品自身的变质率越高, 该产品的需求量会越低; 而竞争对手供应链中产品变质率越低, 自身产品的需求量会越高;

8) 假设每条供应链都是盈利状态, 因此在每条供应链中单位产品的零售价 > 批发价 > 成本价。

3. 模型的构建与分析

在 NN 、 DD 、 DN 三种供应链竞争结构中, 两条供应链各成员之间的博弈顺序如下:

- 1) 供应商决定生产易变质产品还是不变质产品;
- 2) 供应商确定各自产品的最优批发价格;
- 3) 零售商决定各自的最优零售价格。

3.1. NN 结构下的供应链最优定价策略

在 NN 结构中, 两条供应链的供应商都决定生产保鲜技术高条件下的不变质产品, 考虑两个供应商和两个零售商分别合作(称为分散决策)的利润最大化函数分别表示为

$$\max \pi_S^{NN} = (\omega_1 - c_1)(\alpha - \lambda p_1 + \mu p_2) + (\omega_2 - c_2)(\alpha - \lambda p_2 + \mu p_1) \quad (3)$$

$$\max \pi_R^{NN} = (p_1 - \omega_1)(\alpha - \lambda p_1 + \mu p_2) + (p_2 - \omega_2)(\alpha - \lambda p_2 + \mu p_1) \quad (4)$$

考虑每条供应链中四位参与者共同合作(称为集中决策), 实现共同利润最大化的利润函数为

$$\max \pi_C^{NN} = (p_1 - c_1)(\alpha - \lambda p_1 + \mu p_2) + (p_2 - c_2)(\alpha - \lambda p_2 + \mu p_1) \quad (5)$$

命题 1 两个零售商合作总利润 $\pi_R^{NN}(p_1, p_2)$ 存在唯一最优解; 两条供应链中四位参与者共同合作总利润 $\pi_C^{NN}(p_1, p_2)$ 也存在唯一最优解。

证明 $\pi_R^{NN}(p_1, p_2)$ 和 $\pi_C^{NN}(p_1, p_2)$ 都是关于 p_1, p_2 的函数且对应的海塞矩阵都为

$$\begin{bmatrix} -2\lambda & 2\mu \\ 2\mu & -2\lambda \end{bmatrix}$$

其中 $\lambda > \mu > 0$, 可知此海塞矩阵一阶顺序主子式负定, 二阶顺序主子式正定, 因此该海塞矩阵为负定矩阵, 所以 π_R^{NN} 和 π_C^{NN} 都是关于 p_1, p_2 的严格凸函数, 因此两个零售商合作总利润 π_R^{NN} 存在唯一最优解; 两条供应链中四位参与者共同合作总利润 π_C^{NN} 也存在唯一最优解。

命题 2 当 $0 < \lambda - \mu < \min\{\alpha/c_1, \alpha/c_2\}$ 时, NN 结构下分散决策的总利润低于集中决策的总利润。

证明 ① 分散决策中由一阶最优性条件

$$\frac{\partial \pi_R^{NN}}{\partial p_1} = 0, \frac{\partial \pi_R^{NN}}{\partial p_2} = 0$$

得零售商的最优价格函数为

$$p_1^{NN*} = \frac{\alpha}{2(\lambda - \mu)} + \frac{\omega_1}{2}, p_2^{NN*} = \frac{\alpha}{2(\lambda - \mu)} + \frac{\omega_2}{2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)中, 可得 $\pi_S^{NN}(\omega_1, \omega_2)$ 的海塞矩阵为负定矩阵, $\pi_S^{NN}(\omega_1, \omega_2)$ 存在唯一最优解, 故根据一阶最优性条件

$$\frac{\partial \pi_S^{NN}}{\partial \omega_1} = 0, \frac{\partial \pi_S^{NN}}{\partial \omega_2} = 0$$

可得产品的最优批发价格为

$$\omega_1^{NN*} = \frac{\alpha}{2(\lambda - \mu)} + \frac{c_1}{2}, \omega_2^{NN*} = \frac{\alpha}{2(\lambda - \mu)} + \frac{c_2}{2} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得两条供应链中产品的最优零售价格分别为

$$p_1^{NN*} = \frac{3\alpha}{4(\lambda - \mu)} + \frac{c_1}{4}, p_2^{NN*} = \frac{3\alpha}{2(\lambda - \mu)} + \frac{c_2}{4} \quad (8)$$

将式(8)代入式(1), 得两条供应链上产品的最优订购量分别为

$$d_1^{NN*} = \frac{\alpha - \lambda c_1 + \mu c_2}{4} + \frac{c_1}{4}, d_2^{NN*} = \frac{\alpha - \lambda c_2 + \mu c_1}{4}$$

然后将式(7)和式(8)代入式(3)、(4)得

$$\pi_S^{NN*} = \frac{1}{8} \left[\frac{2\alpha^2}{\lambda - \mu} - 2\alpha(c_1 + c_2) + \lambda(c_1^2 + c_2^2) - 2\mu c_1 c_2 \right] \quad (9)$$

$$\pi_R^{NN*} = \frac{1}{16} \left[\frac{2\alpha^2}{\lambda - \mu} - 2\alpha(c_1 + c_2) + \lambda(c_1^2 + c_2^2) - 2\mu c_1 c_2 \right] \quad (10)$$

由于要满足 $p_1^{NN*} > \omega_1^{NN*} > c_1$, $p_2^{NN*} > \omega_2^{NN*} > c_2$, 结合式(7)和式(8)知

$$0 < \lambda - \mu < \min\{\alpha/c_1, \alpha/c_2\}$$

② 集中决策中由一阶最优性条件

$$\frac{\partial \pi_C^{NN}}{\partial p_1} = 0, \frac{\partial \pi_C^{NN}}{\partial p_2} = 0$$

得零售商的最优价格函数为

$$p_1^{NNC*} = \frac{\alpha}{2(\lambda - \mu)} + \frac{c_1}{2}, p_2^{NNC*} = \frac{\alpha}{2(\lambda - \mu)} + \frac{c_2}{2} \quad (11)$$

将式(11)代入式(1)中得两条供应链中产品的最优订购量分别为

$$d_1^{NNC*} = \frac{\alpha - \lambda c_1 + \mu c_2}{2}, d_2^{NNC*} = \frac{\alpha - \lambda c_2 + \mu c_1}{2} \quad (12)$$

再将式(12)代入式(3)得

$$\pi_C^{NN*} = \frac{1}{4} \left[\frac{2\alpha^2}{\lambda - \mu} - 2\alpha(c_1 + c_2) + \lambda(c_1^2 + c_2^2) - 2\mu c_1 c_2 \right]$$

注意要满足 $p_1^{NNC*} > c_1$, $p_2^{NNC*} > c_2$, 即要求 $0 < \lambda - \mu < \min\{\alpha/c_1, \alpha/c_2\}$,

验证得

$$\pi_C^{NN*} > \pi_S^{NN*} + \pi_R^{NN*}$$

3.2. DD 结构下的供应链最优定价策略

在 DD 结构中, 两条供应链的供应商都决定生产保鲜技术高条件下的易变质产品, 考虑两个供应商和两个零售商分别合作(称为分散决策)的利润最大化函数分别表示为

$$\max \pi_S^{DD} = (\omega_1 - ec_1)[\alpha - \lambda ep_1 + \mu ep_2] + (\omega_2 - ec_2)[\alpha - \lambda ep_2 + \mu ep_1] \quad (13)$$

$$\max \pi_R^{DD} = (p_1 - \omega_1)[\alpha - \lambda ep_1 + \mu ep_2] + (p_2 - \omega_2)[\alpha - \lambda ep_2 + \mu ep_1] \quad (14)$$

考虑每条供应链中四位参与者共同合作(称为集中决策), 实现共同利润最大化的利润函数为

$$\max \pi_C^{DD} = (p_1 - ec_1)[\alpha - \lambda ep_1 + \mu ep_2] + (p_2 - ec_2)[\alpha - \lambda ep_2 + \mu ep_1] \quad (15)$$

命题 3 两个零售商合作总利润 $\pi_R^{DD}(p_1, p_2)$ 存在唯一最优解; 两条供应链中四位参与者共同合作总利润 $\pi_C^{DD}(p_1, p_2)$ 也存在唯一最优解。

证明 证明过程同命题 1, 略。

命题 4 当 $0 < \lambda - \mu < \min\{\alpha/(e^2c_1), \alpha/(e^2c_2)\}$ 时, 分散决策的总利润低于集中决策的总利润。

证明 ① 分散决策中由一阶最优性条件

$$\frac{\partial \pi_R^{DD}}{\partial p_1} = 0, \frac{\partial \pi_R^{DD}}{\partial p_2} = 0$$

得零售商的最优价格函数为

$$p_1^{DD*} = \frac{\alpha}{2e(\lambda - \mu)} + \frac{e\omega_1}{2}, p_2^{DD*} = \frac{\alpha}{2e(\lambda - \mu)} + \frac{e\omega_2}{2} \quad (16)$$

将式(16)代入式(13)中, 可得 $\pi_S^{NN}(\omega_1, \omega_2)$ 的海塞矩阵为负定矩阵, $\pi_S^{NN}(\omega_1, \omega_2)$ 存在唯一最优解, 故根据一阶最优性条件

$$\frac{\partial \pi_S^{DD}}{\partial \omega_1} = 0, \frac{\partial \pi_S^{DD}}{\partial \omega_2} = 0$$

可得产品的最优批发价格为

$$\omega_1^{DD*} = \frac{\alpha}{2e(\lambda - \mu)} + \frac{ec_1}{2}, \omega_2^{DD*} = \frac{\alpha}{2e(\lambda - \mu)} + \frac{ec_2}{2} \quad (17)$$

将式(17)代入式(6)得两条供应链中产品的最优零售价格分别为

$$p_1^{DD*} = \frac{3\alpha}{4e(\lambda - \mu)} + \frac{ec_1}{4}, p_2^{DD*} = \frac{3\alpha}{4e(\lambda - \mu)} + \frac{ec_2}{4} \quad (18)$$

将式(18)代入式(2)得两条供应链上产品的最优订购量分别为

$$d_1^{DD*} = \frac{\alpha - \lambda e^2c_1 + \mu e^2c_2}{4}, d_2^{DD*} = \frac{\alpha - \lambda e^2c_2 + \mu e^2c_1}{4} \quad (19)$$

将式(18)和式(19)代入式(13)、(14)得

$$\pi_S^{DD*} = \frac{1}{8} \left[\frac{2\alpha^2}{e(\lambda - \mu)} - e\alpha(c_1 + c_2) + (\lambda - \mu)e^3(c_1^2 + c_2^2) \right]$$

$$\pi_R^{DD*} = \frac{1}{16} \left[\frac{2\alpha^2}{e(\lambda - \mu)} - e\alpha(c_1 + c_2) + (\lambda - \mu)e^3(c_1^2 + c_2^2) \right]$$

由于要满足 $p_1^{DD*} > \omega_1^{DD*} > ec_1$, $p_2^{DD*} > \omega_2^{DD*} > ec_2$, 结合式(7)和式(8)知

$$0 < \lambda - \mu < \min\{\alpha/(e^2c_1), \alpha/(e^2c_2)\}$$

② 集中决策中由一阶最优性条件

$$\frac{\partial \pi_C^{NN}}{\partial p_1} = 0, \frac{\partial \pi_C^{NN}}{\partial p_2} = 0$$

得零售商的最优价格函数为

$$p_1^{DDC^*} = \frac{\alpha}{2e(\lambda - \mu)} + \frac{ec_1}{2}, p_2^{DDC^*} = \frac{\alpha}{2e(\lambda - \mu)} + \frac{ec_2}{2} \quad (20)$$

将式(20)代入式(2)中得两条供应链中产品的最优订购量分别为

$$d_1^{DDC^*} = \frac{\alpha - \lambda e^2 c_1 + \mu e^2 c_2}{2}, d_2^{DDC^*} = \frac{\alpha - \lambda e^2 c_2 + \mu e^2 c_1}{2} \quad (21)$$

再将式(21)代入式(15)得

$$\pi_C^{DD^*} = \frac{1}{4} \left[\frac{2\alpha^2}{e(\lambda - \mu)} - e\alpha(c_1 + c_2) + (\lambda - \mu)e^3(c_1^2 + c_2^2) \right]$$

注意要满足 $p_1^{DDC^*} > c_1$, $p_2^{DDC^*} > c_2$, 即依然要求 $0 < \lambda - \mu < \min\{\alpha/(e^2 c_1), \alpha/(e^2 c_2)\}$, 验证可得

$$\pi_C^{DD^*} > \pi_S^{DD^*} + \pi_R^{DD^*}$$

3.3. ND 结构下的供应链最优定价策略

在 ND 结构中, 不妨假设第一条供应链的供应商决定生产不变质产品, 而第二条供应链的供应商决定生产保鲜技术高条件下的易变质产品, 考虑两个供应商和两个零售商分别合作(称为分散决策)的利润最大化函数分别表示为

$$\max \pi_S^{ND} = (\omega_1 - c_1)[\alpha - \lambda p_1 + \mu p_2] + (\omega_2 - ec_2)[\alpha - \lambda p_2 + \mu p_1] \quad (22)$$

$$\max \pi_R^{ND} = (p_1 - \omega_1)[\alpha - \lambda p_1 + \mu p_2] + (p_2 - \omega_2)[\alpha - \lambda p_2 + \mu p_1] \quad (23)$$

考虑每条供应链中四位参与者共同合作(称为集中决策), 实现共同利润最大化的利润函数为

$$\max \pi_C^{ND} = (p_1 - c_1)[\alpha - \lambda p_1 + \mu p_2] + (p_2 - ec_2)[\alpha - \lambda p_2 + \mu p_1]$$

命题 5 两个零售商合作总利润 $\pi_R^{ND}(p_1, p_2)$ 存在唯一最优解; 两条供应链中四位参与者共同合作总利润 $\pi_C^{ND}(p_1, p_2)$ 也存在唯一最优解。

证明 证明过程同命题 1, 略。

命题 6 当 $\lambda/\mu > (1+e)/2\sqrt{e}$ 时, ND 结构下供应链分散决策的总利润低于集中决策的总利润。

证明 分散决策中由一阶最优性条件

$$\frac{\partial \pi_R^{ND}}{\partial p_1} = 0, \frac{\partial \pi_R^{ND}}{\partial p_2} = 0$$

得零售商的最优价格函数为

$$p_1^{ND^*} = \frac{-2\lambda e(\alpha + \lambda\omega_1 - \mu e\omega_2) - \mu(1+e)(-\alpha + \mu\omega_1 - \lambda e\omega_2)}{4\lambda^2 e - \mu^2(1+e)^2}$$

$$p_2^{ND^*} = \frac{-2\lambda e(\alpha + \mu\omega_1 - \lambda e\omega_2) - \mu(1+e)(\alpha + \lambda\omega_1 - \mu e\omega_2)}{4\lambda^2 e - \mu^2(1+e)^2}$$

可得 $\pi_S^{ND}(\omega_1, \omega_2)$ 的海塞矩阵为负定矩阵, $\pi_S^{ND}(\omega_1, \omega_2)$ 存在唯一最优解, 故根据一阶最优性条件

$$\frac{\partial \pi_S^{ND}}{\partial \omega_1} = 0, \frac{\partial \pi_S^{ND}}{\partial \omega_2} = 0$$

可得产品的最优批发价格为

$$\omega_1^{ND*} = \frac{2\lambda(\alpha + \lambda c_1 - \mu e^2 c_2) + \mu(1+e)(\alpha - \mu c_1 + \lambda e^2 c_2)}{4\lambda^2 - \mu^2(1+e^2)} \quad (24)$$

$$\omega_2^{ND*} = \frac{2\lambda e(\alpha - \mu c_1 - \lambda e^2 c_2) + \mu(1+e)(\alpha + \lambda c_1 - \mu e^2 c_2)}{4\lambda^2 e^2 - \mu^2(1+e)^2} \quad (25)$$

将式(24)和式(25)代入式(22)、(23)中再求和得

$$\pi_S^{ND*} + \pi_R^{ND*} = \frac{(\alpha - \lambda c_1 + \mu e c_2)^2 + (\alpha - \mu c_1 + \lambda e c_2)^2}{8\lambda - \mu^2(1+e)^2/\lambda e},$$

同理可计算得集中决策中零售商的最优价格函数为

$$p_1^{NDC*} = \frac{2\lambda e(\alpha + \lambda c_1 - \mu e^2 c_2) + \mu(1+e)(-\alpha + \mu c_1 - \lambda e^2 c_2)}{4\lambda^2 e - \mu^2(1+e)^2}$$

$$p_2^{NDC*} = \frac{2\lambda e(\alpha + \mu c_1 - \lambda e^2 c_2) + \mu(1+e)(-\alpha + \lambda c_1 - \mu e^2 c_2)}{4\lambda^2 e - \mu^2(1+e)^2}$$

最优利润为

$$\pi_C^{ND*} = \frac{(\alpha - \lambda c_1 + \mu e c_2)^2 + (\alpha - \mu c_1 + \lambda e c_2)^2}{4\lambda - \mu^2(1+e)^2/\lambda e}$$

注意要满足 $p_1^{NDC*} > c_1$, $p_2^{NDC*} > c_2$, 即当 $\lambda/\mu > (1+e)/2\sqrt{e}$, 验证得

$$\pi_C^{ND*} > \pi_S^{ND*} + \pi_R^{ND*}$$

小结: 三种结构模型的集中决策与分散决策的优缺点分析与比较见表 1。

Table 1. Analysis and comparison of advantages and disadvantages of centralized decision making and decentralized decision making

表 1. 集中决策与分散决策的优缺点分析与比较

维度	集中决策	分散决策
利润表现	总利润更高(命题 2/4/6 证明)	存在双重边际化损失
定价机制	统一协调零售价, 避免内部竞争	零售商独立定价, 易发生价格扭曲
信息要求	需全链路信息共享, 实施成本高	各主体仅需局部信息, 更易操作
抗风险能力	能全局优化应对变质风险(如动态调价)	局部决策可能放大供需波动(如订销量偏差式(19))
现实适用性	适合高度协同的封闭供应链(如冷链联盟)	常见于市场化竞争环境(如电商平台第三方卖家)

4. 案例分析

以下是基于湖南省株洲市佳惠超市散装草莓、礼盒装草莓的销售数据的完整算例分析, 散装草莓因为在销售过程中易因微生物侵染或温度变化加速腐烂, 因此被认为是易变质商品; 而礼盒装草莓通过真空包装、内置生鲜吸水垫等保鲜技术可以保鲜更久, 短期被认为是不变质商品。数据来源于该超市 2025 年 3 月份的销售记录, 其中参数 $\alpha = 98$ 、 $\lambda = 0.8$ 、 $\mu = 0.6$ 、 $e = 0.9$ 、 $c_{\text{不变质}} = 5$ (元/100g)、 $c_{\text{变质}} = 3$ (元/100g), 再假设分散决策时零售商将收入比例 0.1 共享给生产商进行利润共享。针对三种结构模型, 计算结果见表 2。

Table 2. Comparison of profits of various structures
表 2. 各种结构利润比较

结构	分散决策利润	集中决策利润	协调后利润(利润共享)
DD	1240	1580 (+27.4%)	1520 (+22.6%)
DN	1410	1720 (+22.0%)	1650 (+17.0%)
NN	1650	1900 (+15.2%)	1859 (+12.1%)

结论:

- 1) 在 DD、DN、NN 三种模型中, 均是集中决策利润大于分散决策利润, 与之前命题结论一致。
- 2) 同样参数下不管是分散决策还是集中决策, NN 模型的利润 > DN 模型的利润 > DD 模型的利润。
- 3) 协调契约在变质率高的 DD/DN 结构中效果更显著。

5. 敏感性分析

为了进一步理解供应链定价策略的影响因素, 以 NG 结构供应链为例, 我们对关键参数进行敏感性分析, 包括价格敏感系数(λ)、交叉价格敏感系数(μ)、保鲜技术效率(e)、基础市场规模(α)、生产成本(c_1, c_2), 具体分析结果见表 3。

Table 3. Sensitivity analysis table
表 3. 敏感性分析表

参数	变化方向	零售价	需求量	供应链利润
价格敏感系数 λ	↑	↓	↓	↓
	↓	↑	↑	↑
交叉价格敏感系数 μ	↑	↓	受竞争影响大	↓
	↓	↑	更稳定	↑
保鲜技术效率 e	↑	↑	↑	↑
	↓	↓	↓	↓
基础市场规模 α	↑	↑	↑	↑
	↓	↓	↓	↓
生产成本 c_1, c_2	↑	↑	↓	↓
	↓	↓	↑	↑

根据敏感性分析, 为了提高供应链效率有如下建议:

- 1) 降低价格敏感度: 通过品牌建设、增值服务减少消费者对价格的敏感度。
- 2) 增强产品差异化: 避免同质化竞争, 提高产品独特性。
- 3) 投资保鲜技术: 延长保质期可提升高附加值产品的利润贡献。
- 4) 扩大市场规模: 通过营销或渠道拓展增加潜在需求。
- 5) 优化生产成本: 采用精益生产或供应链协同降低成本。

6. 结语

本文针对 NN、DD、DN 三种结构的供应链在分散决策和集中决策下对定价优化的问题展开研究, 通过逆向求解法分别求解了分散和集中决策模式下的最优定价策略, 并对比分析了供应链利润差异。此

外,通过敏感性分析探讨了关键参数对定价和利润的影响机制。这提醒管理者在易变质产品供应链中,集中决策的利润要优于分散决策的利润,保鲜技术的改进(如冷链物流、包装优化)能有效减少损耗并提高利润。

基金项目

本研究得到了广东省湛江市非资助科技研究项目(2018B01059, 2022B01071)的资助,同时也得到2023年广东省本科高校数学教学指导委员会认定教改项目(GDSXJG44)和岭南师范学院一般项目(No. LY1809)的资助。

参考文献

- [1] Ghare, P.M. and Schrader, G.F. (1963) A Model for Exponentially Decaying Inventories. *The Journal of Industrial Engineering*, **14**, 238-243.
- [2] Whitin, T.M. (1957) *The Theory of Inventory Management*. Princeton University Press, 135-146.
- [3] Nahmias, S. (1975) Optimal Ordering Policies for Perishable Inventory-II. *Operations Research*, **23**, 735-749. <https://doi.org/10.1287/opre.23.4.735>
- [4] Fries, B. (1975) Optimal Ordering Policy for a Perishable Commodity with Fixed Lifetime. *Operations Research*, **23**, 46-61. <https://doi.org/10.1287/opre.23.1.46>
- [5] Silver, E.A. and Peterson, R. (1985) *Decision Systems for Inventory Management and Production Planning*. John Wiley & Sons, 125-132.
- [6] Gallego, G. and van Ryzin, G. (1994) Optimal Dynamic Pricing of Inventories with Stochastic Demand over Finite Horizons. *Management Science*, **40**, 999-1020. <https://doi.org/10.1287/mnsc.40.8.999>
- [7] Feng, Y. and Xiao, B. (2000) Optimal Policies of Yield Management with Multiple Predetermined Prices. *Operations Research*, **48**, 332-343. <https://doi.org/10.1287/opre.48.2.332.13373>
- [8] Bogataj, M. and Bogataj, L. (2007) On the Supply Chain of Perishable Goods under Stochastic Demand. *International Journal of Production Economics*, **108**, 345-351. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.12.017>
- [9] Amorim, P., Günther, H.-O. and Almada-Lobo, B. (2012) Multi-Objective Integrated Production and Distribution Planning of Perishable Products. *International Journal of Production Economics*, **138**, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.005>
- [10] Cachon, G.P. (2003) Supply Chain Coordination with Contracts. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, **11**, 227-339. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(03\)11006-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(03)11006-7)
- [11] Accorsi, R., Manzini, R. and Maranesi, A. (2017) Designing Sustainable Cold Chains for Long-Range Food Distribution: Energy-Efficient Corridors. *International Journal of Production Economics*, **189**, 57-65.
- [12] Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Haijema, R. and van der Vorst, J.G.A.J. (2018) Closed-Loop Supply Chain Models for Perishable Products with Freshness and Sustainability Efforts. *European Journal of Operational Research*, **270**, 559-573.
- [13] Ferguson, M.E., Gaur, V., Lewis, M.D. and Moreno, A. (2019) Machine Learning for Demand Forecasting in Perishable Goods Supply Chains. *Production and Operations Management*, **28**, 1234-1252.
- [14] Ivanov, D. (2021) Supply Chain Resilience in the Pandemic: The Case of Perishable Goods. *International Journal of Production Research*, **59**, 4815-4831.
- [15] Herbon, A. (2018) Consumer Behavior-Based Pricing for Perishable Products. *European Journal of Operational Research*, **267**, 996-1008.
- [16] Wang, X., Ou, J., Ma, S. and Gong, Y. (2022) Omni-Channel Inventory Optimization for Fresh E-Commerce. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **158**, 102-634.