

考虑供需不确定的短生命周期食品供应链风险分担机制研究

钱晓燕, 季春艺

江南大学商学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2023年11月16日; 录用日期: 2023年12月6日; 发布日期: 2024年2月28日

摘要

随着消费者越来越关注食品的多样性和物流速度的提高, 在人们的食品消费支出中, 短生命周期食品成为消费者饮食的重要组成部分, 这类产品生产提前期长、需求波动大, 面临供需不确定的风险。针对短生命周期食品供应链供需不确定风险, 探讨其供需不确定的成因, 研究短生命周期食品供应链中供应商、制造商、零售商的订货和生产决策。进一步对短生命周期食品供应链进行协调, 研究可以促使供应链成员共担供需不确定风险的协调契约。研究表明: (1) 分散决策情况下供应链失调的原因是需求不确定导致零售商订货量减少。(2) 下游协调合同可以分担零售商供应不确定风险, 提升零售商订货量, 从而提升供应链中各主体利润, 实现供应链协调。(3) 考虑上游供应商供应不确定风险, 设计了组合契约使得供应链各主体共担供需不确定风险, 可以实现供应链协调。

关键词

供需不确定, 三级供应链, 短生命周期食品, 风险分担

Study on Risk-Sharing Mechanism of Short-Life-Cycle Food Supply Chain with Uncertain Supply and Demand

Xiaoyan Qian, Chunyi Ji

School of Business, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Nov. 16th, 2023; accepted: Dec. 6th, 2023; published: Feb. 28th, 2024

Abstract

With the increasing attention of consumers to the diversity of food and the improvement of logis-

tics speed, short-life-cycle food has become an important part of consumer diet in people's food consumption expenditure, this kind of product production lead time is long, the demand fluctuation is big, faces the supply and demand uncertain risk. In view of the uncertain risk of supply and demand in short-life-cycle food supply chain, this paper discusses the causes of the uncertain supply and demand, and studies the ordering and production decisions of suppliers, manufacturers and retailers in the short-life-cycle food supply chain. Further research on coordination contract of short-life-cycle food supply chain can promote the members of supply chain to share the uncertain risk of supply and demand. The results show that: (1) Under decentralized decision-making, the reason of supply chain maladjustment is that the demand uncertainty leads to the reduction of the retailer's order quantity. (2) The downstream coordination contract can share the risk of retailer's supply uncertainty and increase the order quantity, so as to improve the profit of each main body in the supply chain and realize supply chain coordination. (3) Considering the uncertain supply risk of upstream suppliers, a combination contract is designed to make each main body of the supply chain share the uncertain supply and demand risk, which can realize the supply chain coordination.

Keywords

Uncertain Supply and Demand, Three-Level Supply Chain, Short-Life-Cycle Food, Risk-Sharing

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. 引言

随着人们生活水平的不断提高和食品消费观念的改变, 消费者越来越关注食品的多样性, 在人们的食品消费支出中, 豆制品、乳制品、糕点、面包等食品的消费增长加快, 成为人们饮食的重要组成部分, 这类食品生产提前期长、销售周期短、销售末残值低、需求波动大, 属于短生命周期食品。中国交通基础设施建设日趋完善, 物流行业迅猛发展, 物流运输速度提升, 运输时间缩短; 同时, 冷链物流不断壮大, 降低了食品在物流运输中的损耗, 很大程度上解决了购买食品的安全问题和时空问题, 很大程度上消除了消费者选择短生命周期食品的疑虑, 增加了消费者对短生命周期食品的选择和购买。

这不仅给企业带来了新的发展机遇, 同时也带来了挑战。

短生命周期食品的原材料供应受到诸如气温、水源、光照、自然灾害等各种因素的影响, 因此供应链将面临供应不确定风险, 同样的, 品牌竞争、市场入侵等影响因素会导致需求不确定风险。因此, 短生命周期食品供应链的供需不确定风险问题亟待解决, 研究短生命周期食品供应链的风险共担机制, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

目前许多学者对需求或者供应不确定的简单供应链进行了研究。Roy 等(2018)研究了需求不确定的两级供应链的最优定价问题, 比较评价不同模型下各主体的利润函数[1]。Gao 等(2020)研究表明需求不确定情况下, 新型环保产品绿色度系数和销售努力系数对定价、绿色度和销售努力有正向影响, 决策领导者获利取决于绿色程度和销售努力的权重[2]。刘家国等(2021)在需求不确定的供应链中引入零售商公平偏好, 在不同信息条件下研究零售商公平偏好的价值和策略行为, 分析需求不确定因素对公平偏好效用的影响, 并提出针对性措施[3]。朱江华等(2022)研究了需求不确定环境下政府如何对生鲜农产品供应链进行补贴的问题, 研究发现补贴策略的选择与财政预算密切相关[4]。周建亨等(2022)研究在需求不确定和市场竞争的条件下信息对品牌商加盟决策的影响, 还研究了在有无市场需求信息两种

状态下品牌商的侵入决策[5][6]。杨浩雄等(2023)针对产出不确定的二级农产品供应链, 考虑农户资金不足, 研究供应链内部融资手段实现产销均衡[7]。Wu等(2022)对价格敏感和需求不确定中国药品供应链中药店与医院之间的价格竞争和生产决策进行了研究[8]。陈静等(2018)建立单周期农副产品制造商的计划产量决策模型, 研究商业保险策略在制造商规避原材料产出不确定风险时所具有的价值[9]。许民利等(2021)研究了再制造产品产出具有不确定性的闭环供应链系统, 分析竞争和合作下的决策模型[10]。

然而, 很多时候供应链不仅仅面对着需求不确定风险, 同时还面临着供应不确定风险, 一些现有研究探讨了供需不确定条件下供应链相关问题。李小美(2019)探讨了在供需不确定情境下考虑双边努力的供应链风险共担模型, 设计组合契约实现供应链协调和供应链利润的任意分配[11]。Dong(2019)研究了供需风险下企业的数量延迟和价格延迟策略, 得出数量延迟策略可以缓解需求风险[12]。Lin(2022)研究供需不确定的流感疫苗供应链的生产与采购决策问题[13]。邱若臻等(2020)在经典报童模型下考虑供应和需求不确定性, 研究了具有风险厌恶的零售商库存优化问题[14]。Begen等(2016)研究了供给不确定性、需求不确定性和减少不确定性对生产数量和总成本的影响[15]。Fu等(2017)设计了供需不确定的分散装配系统的协调机制, 实现帕累托改进[16]。孔令丞等(2019)针对放松管制下的双边交易模式, 引入供需不确定, 研究发电商对可再生能源电的容量投资最优决策问题[17]。

许多学者考虑了多级供应链的供应不确定或需求不确定风险, 并展开研究。Adhikari(2020)研究协调了供需不确定的五级纺织供应链[18]。Li(2018)研究得出在不确定需求的概率分布部分已知的情况下, 两阶段优化方法可以指导分销商决策[19]。海江涛(2021)分析了需求不确定情况下的绿色产品在消费过程中政府对消费者的补贴策略和企业决策问题[20]。塞明等(2017)研究了供应商和制造商产出随机且零售商面临随机需求的三级供应链协调模型, 并设计回购和产出风险分担组合契约有效地协调了供应链[21]。Hsieh等(2008)研究了具有需求和供应不确定性的三级供应链中的产能分配、订购和定价决策[22]。

供应链风险共担和协调机制设计的文献很多, 但是针对短生命周期食品供应链的研究较少, 因此, 本文以三级短生命周期食品供应链为研究对象, 研究其供需不确定风险的成因, 探讨供需不确定的短生命周期食品供应链集中决策和分散决策下各主体最优决策和期望收益情况, 设计风险分担契约使各主体共同分担供需不确定风险。

2. 问题描述与基本假设

(一) 问题描述

本文建立了一个供应商 S 、一个制造商 M 和一个零售商 R 组成的三级短生命周期食品供应链。其中供应商 S 提供加工制造短生命周期食品的原材料, 由于气温、水源、光照、自然灾害等各种因素的影响, 供应商存在供应不确定的情况, 本文仅考虑供应短缺需要从市场上购买原材料的情况; 制造商 M 向供应商 S 购买原材料并加工制造销售给零售商 R ; 零售商 R 将短生命周期食品卖给消费者, 由于品牌竞争、市场入侵等因素影响, 零售商面临需求不确定的情况。本文设计的短生命周期食品供应链运作过程如下: 第一步, 供应商结合自身单位生产成本决定单位批发价格 W_S ; 第二步, 制造商根据供应商批发价格等条件决定自身批发价格 W_M ; 第三步, 零售商根据随机市场需求和制造商批发价格等条件确定订货量 Q_M ; 第四步, 制造商在获取零售商的订货量 Q_M 之后, 确定自身计划产量 Q_M 和原料订货量 Q_S ; 第五步, 供应商根据制造商的订货量 Q_S 制定原料计划产量 R_S ; 最后, 供应商完成生产后将原料交付给制造商, 制造商对原料进行加工制造, 将最终产品交付零售商进行销售。供应链网络如图 1 所示。

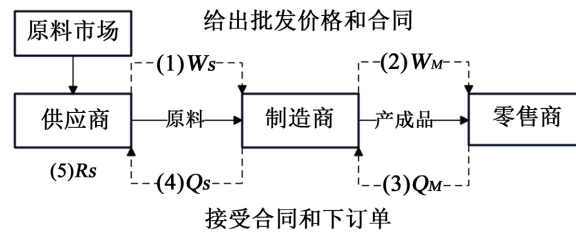


Figure 1. Short-life-cycle food supply chain network
图 1. 短生命周期食品供应链网络

本文的相关参数、符号和决策变量如表 1 所示。

Table 1. Related parameters and meanings
表 1. 相关参数及含义

参数	含义
C_S	供应商 S 单位生产成本
C_M	制造商 M 单位生产成本
p	零售商 R 单位零售价格
X	市场实际需求
z	供应商 S 的实际生产率
C'_S	供应商 S 生产不足时单位采购成本
R_S	供应商 S 计划产量
W_S	供应商 S 单位批发价格
W_M	制造商 M 单位批发价格
Q_M	零售商 R 对制造商 M 的订货量
Q_S	制造商 M 对供应商 S 的订货量
b_M	回购合同(B)中制造商 M 对零售商 R 的单位剩余产品回收价格
ω_R	组合契约(CS)中零售商 R 承担的供应商 S 市场原料购买成本的比例
ω_M	组合契约(CS)中制造商 M 承担的供应商 S 市场原料购买成本的比例
b_M	组合契约(CS)中制造商 M 支付给零售商 R 的单位剩余产品补贴
b_S	组合契约(CS)中供应商 S 支付给零售商 R 的单位剩余产品补贴
ϕ	组合契约(CS)中零售商 R 承担制造商 M 加工制造成本的比例
γ	组合契约(CS)中供应商 S 承担制造商 M 原料购买成本的比例

其中, X 表示随机的市场需求, 取值范围为 $[0, +\infty)$, 并且 X 服从累积分布函数 $F(x)$ 和概率密度函数 $f(x)$ 。 z 是一个非负随机变量, 表示供应商的实际生产率, 取值范围为 $[0, 1]$, 并且 z 服从累积分布函数 $G(z)$ 和概率密度函数 $g(z)$, $G(z)$ 是可导函数, 严格单调递增, $E(z) = \mu$, $\mu \in (0, 1)$ 。

参照 Bellantuono (2009)的研究结果[23], 引入多重心理账户表示短生命周期食品供应链中成员的风险厌恶程度, 构建期望效用函数, 为供应链的成员建立两个心理账户, 收益账户(Ra)记录供应链的成员销售商品获得的收益, 损失账户(La)记录供应链的成员缺货或生产过剩造成的损失。本文用 $U = Ra - \theta La$ 表示供应链的各成员在不同风险厌恶程度下的期望效用, 其中 θ 为风险厌恶系数, 且 $\theta \geq 1$, 其取值越大表示供应链的成员对损失的厌恶程度越高, 反之越低, 当 $\theta = 1$ 时, 供应链的成员是风险中性的。

(二) 基本假设

假设 H1: 参照 Adhikari 等(2020)的研究考虑产品的异质性[18], 采用“转换因子”来建立短生命周期食品原材料和产成品之间的关系, 当牛奶加工成酸奶、鸡蛋加工成蛋糕时, 产品的性质发生了一定改变, 因此令 $Q_S = kQ_M$ 。上式表明如果零售商改变其订货量, 那么上游成员随之调整生产计划。

假设 H2: 对于每个供应链成员来说, 为了确保自身能够获取利润, 商品的单位销售价格应当总是高于其单位生产和采购原料的总成本, 因此令零售商单位销售价格大于制造商批发价格大于制造商单位生产成本与供应商单位批发价格之和, 即 $p > W_M > C_M + kW_S$, 令供应商单位批发价格大于其单位生产成本与单位市场采购成本之和, 即 $W_S > C_S + C'_S$ 。

假设 H3: 为了确保制造商继续其生产过程, 而不是从市场上购买所有原材料, 现货市场上原料的单价应该高于供应商生产的单价, 即 $C_S < \mu C'_S$ 。

3. 模型建立求解及分析

本节比较集中决策和分散决策下短生命周期食品供应链的决策与收益情况, 揭示分散式三级短生命周期食品供应链系统失调的原因, 作为协调契约设计的依据。

(一) 集中决策模型分析(N)

在集中决策供应链中, 供应链系统看作是一个整体, 假设供应链的领导者是风险中性的, 依据最大化供应链系统的期望利润为决策目标。集中决策情况下供应链的期望利润函数可以表示为式(1), 在这个期望利润函数中, 第一个括号内的项和第二个括号内的项分别表示供应链总收入和总成本。收入包括以单位价格出售产成品的收入; 总成本包括各主体生产成本, 还包括供应商生产不足情况下从市场上采购原料的成本。

$$\begin{aligned}
 E(\pi_N) &= pE\left[\min\{(Q_M)_N, X\} - \left\{(Q_M)_N C_M + (R_S)_N C_S + C'_S E\left[(Q_S)_N - z(R_S)_N\right]^+\right\}\right] \\
 &= p\left((Q_M)_N - \int_0^{(Q_M)_N} F(x)dx\right) - C_M (Q_M)_N - k(Q_M)_N C'_S \int_0^{\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}} g(z)dz \\
 &\quad + (R_S)_N C'_S \int_0^{\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}} zg(z)dz - (R_S)_N C_S
 \end{aligned} \tag{1}$$

根据决策顺序, 应当先由零售商决策订货量, 再由供应商决策原料计划产量。

命题 1 集中式供应链的期望利润 $E(\pi_N)$ 是关于订货量 $(Q_M)_N$ 和计划产量 $(R_S)_N$ 的联合凹函数, 且短生命周期食品最优订货量 $(Q_M)_N^*$ 的最优唯一值和最优计划产量 $(R_S)_N^*$ 的最优唯一值满足以下等式

$$p\left(1 - F\left(\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*}\right)\right) - C_M - kC'_S G\left(\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*}\right) = 0 \tag{2}$$

$$\int_0^{\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*}} zg(z)dz = \frac{C_S}{C'_S} \tag{3}$$

证明对供应链总体利润函数进行海塞矩阵求解, 关于订货量 $(Q_M)_N$ 和原材料计划产量 $(R_S)_N$ 的海塞矩阵具体如下所示:

$$H\left[(Q_M)_N, (R_S)_N\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial((Q_M)_N)^2} & \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial(Q_M)_N \partial(R_S)_N} \\ \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial(Q_M)_N \partial(R_S)_N} & \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial((R_S)_N)^2} \end{bmatrix}$$

分别求 $E(\pi_N)$ 关于 $(Q_M)_N$ 和 $(R_S)_N$ 的偏导, 得

$$\frac{\partial E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N} = p(1 - F((Q_M)_N)) - C_M - kC'_S \int_0^{\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}} g(z) dz, \quad \frac{\partial E(\pi_N)}{\partial (R_S)_N} = C'_S \int_0^{\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}} zg(z) dz - C_S$$

进一步求二阶偏导, 得

$$\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial ((Q_M)_N)^2} = -pf((Q_M)_N) - \frac{k^2}{(R_S)_N} C'_S g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right) < 0$$

$$\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial ((R_S)_N)^2} = -C'_S \frac{(k(Q_M)_N)^2}{((R_S)_N)^3} g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right) < 0, \quad \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N \partial (R_S)_N} = C'_S \frac{k(Q_M)_N}{((R_S)_N)^2} g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right)$$

于是海塞矩阵 $H[(Q_M)_N, (R_S)_N]$ 为:

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial ((Q_M)_N)^2} & \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial ((Q_M)_N) \partial ((R_S)_N)} \\ \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial ((Q_M)_N) \partial ((R_S)_N)} & \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial ((R_S)_N)^2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N \partial (R_S)_N} \times \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N \partial (R_S)_N} \\ \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N \partial (R_S)_N} \times \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N \partial (R_S)_N} \end{pmatrix} \\ & = pC'_S \frac{(k(Q_M)_N)^2}{((R_S)_N)^3} f((Q_M)_N) g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right) > 0 \end{aligned}$$

因此, 海塞矩阵 $H[(Q_M)_N, (R_S)_N]$ 是负定矩阵, $E(\pi_N)$ 是关于 $(Q_M)_N$ 和 $(R_S)_N$ 的凹函数。令

$$\frac{\partial E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N} = 0, \quad \frac{\partial E(\pi_N)}{\partial (R_S)_N} = 0 \text{ 可知命题 1 成立。}$$

由命题 1 可以看出, 零售商的单位销售价格、制造商的单位生产成本、供应商的单位生产成本和单位市场购买成本、需求和供应不确定性对于确定短生命周期食品的最优订货量和原料最优计划产量都有着一定影响。

命题 2 集中决策模型下, $(Q_M)_N^*$ 和 $(R_S)_N^*$ 与其他参数满足以下关系:

- 1) $(Q_M)_N^*$ 随着 p 的增大而增大, 随着 C_M 和 C'_S 的增大而减小。
- 2) $(R_S)_N^*$ 随着 C_S 的增大而减小, 随着 C'_S 的增大而增大。

证明分别求供应链利润函数 $E(\pi_N)$ 关于 p , C_M , C_S 和 C'_S 的偏导得

$$\frac{\partial E(\pi_N)}{\partial p} = (Q_M)_N - \int_0^{(Q_M)_N} F(x) dx, \quad \frac{\partial E(\pi_N)}{\partial C_M} = -(Q_M)_N, \quad \frac{\partial E(\pi_N)}{\partial C_S} = -(R_S)_N$$

$$\frac{\partial E(\pi_N)}{\partial C'_S} = -k(Q_M)_N \int_0^{\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}} g(z) dz + (R_S)_N \int_0^{\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}} zg(z) dz$$

进一步求这些偏导关于 $(Q_M)_N^*$ 和 $(R_S)_N^*$ 的二阶偏导得

$$\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N^* \partial p} = 1 - F((Q_M)_N) > 0, \quad \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N^* \partial C_M} = -1 < 0, \quad \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (R_S)_N^* \partial C_S} = -1 < 0$$

$$\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (Q_M)_N^* \partial C'_S} = -kG\left(\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*}\right) < 0, \quad \frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial (R_S)_N^* \partial C'_S} = \int_0^{\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*}} zg(z) dz > 0$$

分别由隐函数求导定理得

$$\frac{\partial(Q_M)_N^*}{\partial p} = - \frac{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial(Q_M)_N^* \partial p} \right)}{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial((Q_M)_N^*)^2} \right)} = \frac{1 - F((Q_M)_N)}{pf((Q_M)_N) + \frac{k^2}{(R_S)_N} C'_S g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right)} > 0$$

$$\frac{\partial(Q_M)_N^*}{\partial C_M} = - \frac{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial(Q_M)_N^* \partial C_M} \right)}{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial((Q_M)_N^*)^2} \right)} = - \frac{1}{pf((Q_M)_N) + \frac{k^2}{(R_S)_N} C'_S g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right)} < 0$$

$$\frac{\partial(R_S)_N^*}{\partial C_S} = - \frac{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial(R_S)_N^* \partial C_S} \right)}{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial((R_S)_N^*)^2} \right)} = - \frac{1}{C'_S \frac{(k(Q_M)_N)^2}{((R_S)_N)^3} g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right)} < 0$$

$$\frac{\partial(Q_M)_N^*}{\partial C'_S} = - \frac{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial(Q_M)_N^* \partial C'_S} \right)}{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial((Q_M)_N^*)^2} \right)} = - \frac{kG\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right)}{pf((Q_M)_N) + \frac{k^2}{(R_S)_N} C'_S g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right)} < 0$$

$$\frac{\partial(R_S)_N^*}{\partial C'_S} = - \frac{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial(R_S)_N^* \partial C'_S} \right)}{\left(\frac{\partial^2 E(\pi_N)}{\partial((R_S)_N^*)^2} \right)} = \frac{\int_0^{\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}} zg(z) dz}{C'_S \frac{(k(Q_M)_N)^2}{((R_S)_N)^3} g\left(\frac{k(Q_M)_N}{(R_S)_N}\right)} > 0$$

可知命题 2 成立。

命题 2 中 1) 表明, 由于短生命周期食品的单位价格上升, 所以零售商会增加订货量, 以获得更高的利润; 由于制造商的单位加工制造成本上升, 零售商单位购买采购成本增加, 单位食品获利减少, 因此会减少订货量; 原料市场单位采购成本上升会使零售商对短生命周期食品采购成本的判断上升, 从而减少对食品的订货量。

命题 2 中 2) 表明, 由于市场上购买原材料的单位成本增加, 供应商会避免从原料市场额外采购原料, 所以会提升自身的计划产量; 当供应商单位生产成本上升, 与原料市场的价格差减小, 供应商会减少计划产量去使之接近订货量, 如果出现原料短缺就从原料市场购买。

(二) 分散决策模型分析(D)

分散决策情况下, 短生命周期食品供应链中各成员均以自身利益最大化为目标, 供应商和零售商分别独立决策其原材料计划产量和短生命周期食品订货量。根据多重心理账户定义, 考虑供应链中各成员对于损失是厌恶的情况, 以原料供应商为例, 得到供应商的收益是销售收入与生产成本之差, 其损失为原料市场采购成本, 其收益 SRa_D 和损失 SLa_D 分别为:

$$SRa_D = W_S(Q_S)_D - (R_S)_D C_S$$

$$SLa_D = C'_S E[(Q_S)_D - z(R_S)_D]^+$$

根据前文效用函数为 $US_D = SRa_D - \theta SLa_D$, 其中 θ 是供应链中成员的风险厌恶系数, 且 $\theta \geq 1$, 则供应商的期望效用函数为:

$$EUS_D = W_S(Q_S)_D - (R_S)_D C_S - \theta C'_S E[(Q_S)_D - z(R_S)_D]^+ \quad (4)$$

类似的, 可以得到零售商和制造商的期望效用函数 EUR_D 和 EUM_D , 因为本文不考虑零售商和制造商的损失, 所以不建立他们的损失账户, 因此他们的期望效用函数表达与他们的期望利润函数表达相同。

$$EUR_D = E(\pi_R)_D = pE[\min\{(Q_M)_D, X\}] - (Q_M)_D W_M \quad (5)$$

$$EUM_D = E(\pi_M)_D = (Q_M)_D W_M - ((Q_S)_D W_S + (Q_M)_D C_M) \quad (6)$$

根据博弈模型的决策顺序, 零售商先确定最优订货量, 然后再确定供应商的最优计划产量, 对上述模型进行逆向求解, 最后比较分散与集中决策情况下的订货量和计划产量的差异。

命题 3 分散决策情况下, 零售商的期望效用函数 EUR_D 和供应商的期望效用函数 EUS_D 分别是关于 $(Q_M)_D$ 和 $(R_S)_D$ 的凹函数。短生命周期食品订货量 $(Q_M)_D^*$ 的最优和唯一值以及原料计划生产的数量 $(R_S)_D^*$ 的最优和唯一值可以用以下等式表示:

$$(Q_M)_D^* = F^{-1}\left(\frac{p - W_M}{p}\right) \quad (7)$$

$$\int_0^{\frac{k(Q_M)_D^*}{(R_S)_D^*}} z g(z) dz = \frac{C_S}{\theta C'_S} \quad (8)$$

证明求零售商期望效用 EUR_D 关于订货量 $(Q_M)_D$ 和供应商期望效用 EUS_D 关于计划产量 $(R_S)_D$ 的偏导, 可得

$$\frac{\partial EUR_D}{\partial (Q_M)_D} = p(1 - F((Q_M)_D)) - W_M, \quad \frac{\partial EUS_D}{\partial (R_S)_D} = \theta C'_S \int_0^{\frac{k(Q_M)_D}{(R_S)_D}} z g(z) dz - C_S$$

进一步求二阶偏导, 可得

$$\frac{\partial^2 EUR_D}{\partial ((Q_M)_D)^2} = -pf((Q_M)_D) < 0, \quad \frac{\partial^2 EUS_D}{\partial ((R_S)_D)^2} = -\theta C'_S \frac{(k(Q_M)_D)^2}{((R_S)_D)^3} g\left(\frac{k(Q_M)_D}{(R_S)_D}\right) < 0$$

所以零售商的期望效用函数 EUR_D 和供应商的期望效用函数 EUS_D 分别是关于 $(Q_M)_D$ 和 $(R_S)_D$ 的凹函数。令 $\frac{\partial EUR_D}{\partial (Q_M)_D} = 0$, $\frac{\partial EUS_D}{\partial (R_S)_D} = 0$, 则得到零售商最优订货量和制造商最优计划产量的方程。可知命题 3 成立。

命题 3 表明, 零售商的订货量受短生命周期食品的单位销售价格和制造商的单位批发价格影响, 供应商的原材料计划产量与自身的风险厌恶程度和单位生产成本相关, 并受市场上原料单价的影响。

命题 4 分散决策模型下, $(Q_M)_D^*$ 和 $(R_S)_D^*$ 与其他参数满足以下关系:

- 1) $(Q_M)_D^*$ 随着 p 的增大而增大, 随着 W_M 的增大而减小。
- 2) $(R_S)_D^*$ 随着 C_S 的增大而减小, 随着 C'_S 和 θ 的增大而增大。

命题 4 表明, 当食品的单位销售价格上升, 零售商可以获得更大的收益, 因此向供应商增加了订货量, 但是如果供应商提高对零售商的批发价格, 零售商为减少成本, 会减少对食品的订货量; 当供应商对缺货损失的风险厌恶程度越大时, 供应商会增加自身计划产量, 如果市场上购买单位原料的成本上升, 供应商为避免从市场上购买原材料, 则也会增加计划产量, 但如果供应商的单位生产成本上升, 为避免生产过剩造成的损失, 则会降低计划产量。

命题 5 批发价格合同不能协调三级短生命周期食品供应链。由命题 4 可以看出, 零售商的订单量随着制造商批发价格的增大而减小, 供应商根据订货量调整其原料计划生产量, 因此, 分散决策情况下的短生命周期食品订货量小于集中决策情况下的订货量, 短生命周期食品供应链在批发价格契约下无法实现协调。

证明集中决策情况下, 零售商最优订货量 $(Q_M)_N^*$ 满足式(2)

$$\text{因此化简可得 } (Q_M)_N^* = F^{-1} \left(\frac{p - C_M - kC'_S G \left(\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*} \right)}{p} \right),$$

分散决策情况下零售商的最优订货量满足式(7)。

$$\text{根据前文假设 } W_M > C_M + kW_S, \quad W_S > C_S + C'_S, \quad \text{并且 } G \left(\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*} \right) \leq 1,$$

$$\text{可得 } W_M > C_M + kC'_S G \left(\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*} \right),$$

因此 $(Q_M)_N^* > (Q_M)_D^*$, 所以分散决策情况下无法实现供应链协调。

命题 5 表明, 相较于集中决策情况, 分散决策会下零售商会降低其订货量, 从而影响制造商对供应商的订货量, 进而供应商减少其计划产量, 导致供应链利润下降, 因此需要设计相关可行契约去提升零售商的订货量和供应商计划产量, 从而实现供应链协调。

4. 协调机制设计及分析

(一) 供应链下游回购合同协调模型(B)

分散决策下当短生命周期食品市场中新进入竞争商品或者已有的竞争商品降价时, 可能会出现顾客流失的情况, 从而导致市场需求小于零售商订货量的情况, 获利可能性减小, 零售商的订货量也会相应减小。结合上文分析出的导致供应链失调的原因, 本小节考虑当短生命周期食品零售商处于弱势地位, 而制造商话语权较强时, 制造商为了提高自身利润就需要促进零售商增加短生命周期食品的订货量, 因此制造商提供一个回购合同分担供应链下游零售商的需求不确定性风险, 激励零售商增加订货量, 根据该回购合同, 制造商决定批发价格 W_M , 并在季度结束时以回购价格 b_M 从零售商手中收回未售出的商品, 零售商利润提升则订货量会相应增加。为符合实际情况, 做出以下假设。

假设 H4: 产成品的回购价格小于相应的批发价格, 即 $b_M < W_M$ 。

在该回购合同下, 零售商、制造商和供应商的期望效用函数如下:

$$EUR_B = E(\pi_R)_B = pE \left[\min \{ (Q_M)_B, X \} \right] + b_M E \left[(Q_M)_B - X \right]^+ - (Q_M)_B W_M \quad (9)$$

$$EUM_B = E(\pi_M)_B = (Q_M)_B W_M - \left\{ k(Q_M)_B W_S + (Q_M)_B C_M + b_M E \left[(Q_M)_B - X \right]^+ \right\} \quad (10)$$

$$EUS_B = W_S(Q_S)_B - (R_S)_B C_S - \theta C'_S E[(Q_S)_B - z(R_S)_B]^+ \quad (11)$$

命题 6 供应链下游回购合同下, 零售商的期望效用函数 EUR_B 和供应商的期望效用函数 EUS_B 分别是关于 $(Q_M)_B$ 和 $(R_S)_B$ 的凹函数。对于制造商给定的批发价格和回购价格, 短生命周期食品订货量 $(Q_M)_B^*$ 的最优和唯一值以及原料计划生产的数量 $(R_S)_B^*$ 的最优和唯一值可以表示为:

$$(Q_M)_B^* = F^{-1}\left(\frac{p - W_M}{p - b_M}\right) \quad (12)$$

$$\int_0^{\frac{k(Q_M)_B^*}{(R_S)_B^*}} z g(z) dz = \frac{C_S}{\theta C'_S} \quad (13)$$

证明求 EUR_B 关于 $(Q_M)_B$ 和 EUS_B 关于 $(R_S)_B$ 的偏导, 可得

$$\frac{\partial EUR_B}{\partial (Q_M)_B} = p(1 - F((Q_M)_B)) - (W_M - b_M), \quad \frac{\partial EUS_B}{\partial (R_S)_B} = \theta C'_S \int_0^{\frac{k(Q_M)_B}{(R_S)_B}} z g(z) dz - C_S$$

进一步求二阶偏导, 可得

$$\frac{\partial^2 EUR_B}{\partial ((Q_M)_B)^2} = -(p - b_M) f((Q_M)_B) < 0, \quad \frac{\partial^2 EUS_B}{\partial ((R_S)_B)^2} = -\theta C'_S \frac{(k(Q_M)_B)^2}{((R_S)_B)^3} g\left(\frac{k(Q_M)_B}{(R_S)_B}\right) < 0$$

因此, EUR_B 和 EUS_B 分别是关于 $(Q_M)_B$ 和 $(R_S)_B$ 的凹函数。可知命题 6 成立。

命题 6 表明, 在回购合同下, 零售商的订货量受产品单位销售价格、制造商单位批发价格和单位回购价格的影响, 当食品的单位销售价格和单位回购价格上升, 零售商有获得更高利润的可能性, 因此零售商会增加订货量, 而当制造商单位批发价格上升时, 零售商获利可能减少, 会减少对制造商的订货量。供应商的计划产量与风险厌恶程度、原料单位生产成本、市场原料单位购买成本、零售商订货量有密切关系。

命题 7 当回购价格 b_M 符合式 14 时, 供应链的利润达到最优。

$$b_M^* = \frac{p \left(W_M - C_M - k C'_S G \left(\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*} \right) \right)}{p - C_M - k C'_S G \left(\frac{k(Q_M)_N^*}{(R_S)_N^*} \right)} \quad (14)$$

命题 8 回购合同模型下, 参数满足以下关系:

- 1) $(Q_M)_D^*$ 随着 p 和 b_M 的增大而增大, 随着 W_M 的增大而减小。
- 2) $(R_S)_D^*$ 随着 C_S 的增大而减小, 随着 C'_S 和 θ 的增大而增大。
- 3) b_M^* 随着 C_S 和 C'_S 的增大而减小, 随着 W_M 的增大而增大。

命题 8 中 1) 表明, 在制造商对零售商剩余产品的回购合同下, 由于短生命周期食品的零售价格增大, 因此零售商会增加食品的订货量, 制造商给的单位剩余产品回购价格增大也会激励零售商增大订货量; 但是制造商的单位批发价格上升会使得零售商减少对短生命周期食品的订货。

命题 8 中 2) 表明, 若原料的单位生产成本上升, 那么制造商会减少计划产量; 市场上原料的单位成本上升, 制造商为了避免从市场上采购原料, 会增大计划产量, 制造商是缺货损失风险厌恶的, 厌恶程度越高, 那么制造商的计划产量就会越大。

命题 8 中 3) 表明, 供应商原料生产成本和市场原料价格的上涨可能导致制造商单位原料采购成本上

升, 相应的其获益也会减少, 为了提升获益, 就会降低对零售商剩余产品的回购价格, 制造商对零售商单位短生命周期食品的批发价格上涨, 制造商有更大的可能性获益提升, 为了激励零售商增加订货量会提高单位回购价格。

(二) 三级供应链的组合协调契约(CS)

当市场需求不足时, 零售商会面临需求不确定风险, 当供应商计划产量小于制造商订货量时, 供应商面临需要从原料市场购买原料的损失, 不管是零售商还是制造商的不确定风险, 都会影响供应链中成员的期望收益, 因此设计契约, 使得供应链中成员共同分担零售商、供应商的不确定风险, 降低零售商和供应商的风险, 一定程度上提升零售商的订货量和供应商的计划产量, 从而提升供应链的整体期望收益。设计契约使得零售商承担 ω_R 比例的供应商市场原料购买成本, 并承担 ϕ 比例的制造商加工制造成本; 制造商给与零售商每单位剩余产品 b_M 价格的补贴, 并承担 ω_M 比例的供应商市场原料购买成本, 供应商承担制造商 γ 比例的原料购买成本, 并给予零售商每单位剩余产品 b_S 价格的补贴。

假设 H5: $b_M + b_S < W_M$, $\omega_M + \omega_R < 1$

该组合协调契约下, 供应链中零售商、制造商、供应商的期望效用函数如下:

$$EUR_{CS} = E(\pi_R)_{CS} = pE[\min\{(Q_M)_{CS}, X\}] - (Q_M)_{CS} W_M + (b_M + b_S)[(Q_M)_{CS} - X]^+ - \phi(Q_M)_{CS} C_M - \omega_R C'_S E[(Q_S)_{CS} - z(R_S)_{CS}]^+ \quad (15)$$

$$EUM_{CS} = E(\pi_M)_{CS} = (Q_M)_{CS} W_M - (1-\gamma)(Q_S)_{CS} W_S - (1-\phi)(Q_M)_{CS} C_M - \omega_M C'_S E[(Q_S)_{CS} - z(R_S)_{CS}]^+ - b_M [(Q_M)_{CS} - X]^+ \quad (16)$$

$$EUS_{CS} = W_S (Q_S)_{CS} - (R_S)_{CS} C_S - (1-\omega_M - \omega_R)\theta C'_S E[(Q_S)_{CS} - z(R_S)_{CS}]^+ - \gamma(Q_S)_{CS} W_S - b_S [(Q_M)_{CS} - X]^+ \quad (17)$$

命题 9 零售商的期望效用函数 EUR_{CS} 和供应商的期望效用函数 EUS_{CS} 分别是关于零售商订货量 $(Q_M)_{CS}$ 和供应商计划产量 $(R_S)_{CS}$ 的凹函数。零售商订货量 $(Q_M)_{CS}^*$ 的最优唯一值和供应商计划产量 $(R_S)_{CS}^*$ 的最优唯一值可由以下两个方程得到:

$$\int_0^{\frac{k(Q_M)_{CS}^*}{(R_S)_{CS}^*}} z g(z) dz = \frac{C_S}{(1-\omega_M - \omega_R)\theta C'_S} \quad (18)$$

$$(p - b_M - b_S) F((Q_M)_{CS}) = p - W_M - \phi C_M - \omega_R C'_S \int_0^{\frac{1}{j_{CS}}} j_{CS} k G(z) dz \quad (19)$$

其中 $(R_S)_{CS}^* = j_{CS} k (Q_M)_{CS}^*$ 。

证明求 EUS_{CS} 关于 $(R_S)_{CS}$ 的偏导, 得

$$\frac{\partial EUS_{CS}}{\partial (R_S)_{CS}} = -C_S + (1-\omega_M - \omega_R)\theta C'_S \int_0^{\frac{1}{j_{CS}}} z g(z) dz$$

进一步求二阶偏导, 得

$$\frac{\partial^2 EUS_{CS}}{\partial ((R_S)_{CS})^2} = -(1-\omega_M - \omega_R)\theta C'_S \frac{(k(Q_M)_{CS})^2}{((R_S)_{CS})^3} g\left(\frac{k(Q_M)_{CS}}{(R_S)_{CS}}\right) < 0$$

因此 EUS_{CS} 是关于 $(R_S)_{CS}$ 的凹函数。

$$\text{令 } \frac{\partial EUR_{CS}}{\partial (R_S)_{CS}} = 0, \text{ 则 } (R_S)_{CS} \text{ 的最大值满足该式 } \int_0^{\frac{k(Q_M)_{CS}}{(R_S)_{CS}}} z g(z) dz = \frac{C_S}{(1-\omega_M-\omega_R)\theta C'_S},$$

$$\text{令 } (R_S)_{CS} = j_{CS} k(Q_M)_{CS}, \text{ 则 } \int_0^{\frac{1}{j_{CS}}} z g(z) dz = \frac{C_S}{(1-\omega_M-\omega_R)\theta C'_S},$$

将 $(R_S)_{CS} = j_{CS} k(Q_M)_{CS}$ 代入 EUR_{CS} , 则

$$EUR_{CS} = p \left((Q_M)_{CS} - \int_0^{(Q_M)_{CS}} F(x) dx \right) - (Q_M)_{CS} W_M - \phi (Q_M)_{CS} C_M + (b_M + b_S) \int_0^{(Q_M)_{CS}} F(x) dx - \omega_R C'_S \int_0^{\frac{1}{j_{CS}}} j_{CS} k(Q_M)_{CS} G(z) dz,$$

求 EUR_{CS} 关于 $(Q_M)_{CS}$ 的偏导得

$$\frac{\partial EUR_{CS}}{\partial (Q_M)_{CS}} = p - W_M - \phi C_M + (b_M + b_S - p) F((Q_M)_{CS}) - \omega_R C'_S \int_0^{\frac{1}{j_{CS}}} j_{CS} k G(z) dz$$

$$\frac{\partial^2 EUR_{CS}}{\partial ((Q_M)_{CS})^2} = -(p - b_M - b_S) f((Q_M)_{CS}) < 0$$

因此 EUR_{CS} 是关于 $(Q_M)_{CS}$ 的凹函数。

令 $\frac{\partial EUR_{CS}}{\partial (Q_M)_{CS}} = 0$, 则 $(Q_M)_{CS}$ 满足式 19。因此命题 9 成立。

命题 10 要使得供应链协调, 并且利润达到最优, 零售商对供应商的市场购买成本分担比例 ω_R 和对制造商加工制造成本的分担比例 ϕ , 制造商对供应商的市场购买成本分担比例 ω_M 和零售商剩余产品的单位补贴价格 b_M , 供应商对制造商市场购买成本的分担比例 γ 和零售商剩余产品的单位补贴价格 b_S 需满足以下等式:

$$(1 - \omega_M - \omega_R)\theta = 1 \quad (20)$$

$$p \left(p - W_M - \phi C_M - \omega_R C'_S \int_0^{\frac{1}{j_{CS}}} j_{CS} k G(z) dz \right) = \left(p - C_M - k C'_S G\left(\frac{1}{j_{CS}}\right) \right) (p - b_M - b_S) \quad (21)$$

证明令 $(Q_M)_{CS}^* = (Q_M)_N^*$, $(R_S)_{CS}^* = (R_S)_N^*$, 则

$$F^{-1} \left(\frac{p - W_M - \phi C_M - \omega_R C'_S \int_0^{\frac{1}{j_{CS}}} j_{CS} k G(z) dz}{p - b_M - b_S} \right) = F^{-1} \left(\frac{p - C_M - k C'_S G\left(\frac{1}{j_{CS}}\right)}{p} \right)$$

$$\frac{C_S}{(1 - \omega_M - \omega_R)\theta C'_S} = \frac{C_S}{C'_S}$$

化简得命题 10。

命题 11 三级供应链组合契约下, 参数满足以下关系:

- 1) EUS_{CS} 随着 ω_M 和 ω_R 的增大而增大, 随着 γ 和 b_S 的增大而减小。
- 2) EUM_{CS} 随着 γ 和 ϕ 的增大而增大, 随着 ω_M 和 b_M 增大而减小。
- 3) EUR_{CS} 随着 b_M 和 b_S 的增大而增大, 随着 ϕ 和 ω_R 的增大而减小。

证明求 EUS_{CS} 关于 ω_M , ω_R , γ 和 b_S 的偏导, 得

$$\frac{\partial EUS_{CS}}{\partial \omega_M} = \frac{\partial EUS_{CS}}{\partial \omega_R} = \theta C'_S (R_S)_{CS} \int_0^{k(Q_M)_{CS}} G(z) dz > 0$$

$$\frac{\partial EUS_{CS}}{\partial \gamma} = -(Q_S)_{CS} W_S < 0, \quad \frac{\partial EUS_{CS}}{\partial b_S} = -\int_0^{(Q_M)_{CS}} F(x) dx < 0$$

因此 EUS_{CS} 与 ω_M , ω_R 正相关, 与 γ , b_S 负相关。命题 11 中 2)和 3)的证明类似。

命题 11 中 1)表明, 采用三级供应链的组合契约时, 由于制造商和零售商分担了供应商一定比例的原材料市场采购成本, 因此供应商的期望效用会随着制造商和零售商分担比例的增大而增大; 供应商分担了部分制造商的原料采购成本, 并给予零售商剩余产品一定的补贴, 因此供应商的期望效用会随着分担的比例和给与的补贴的力度的增大而减小。

命题 11 中 2)表明, 供应商和零售商分别承担一部分制造商原料采购成本和加工制造成本时, 承担的比例越大, 制造商的期望效用越大; 制造商的期望效用会随着所承担的供应商原料市场购买成本和给与零售商的剩余产品补贴而减小。

命题 11 中 3)表明, 零售商的期望效用会随着供应商和制造商给与的剩余产品的补贴的增大而增大; 零售商同时也承担了供应商和制造商的一定比例的成本, 其期望效用会随着承担比例的增大而减小。

5. 数值分析

本节通过数值分析来供应商、制造商、零售商在集中决策、分散决策、回购合同、三级供应链组合契约下的盈利能力, 以及风险分担机制对供应链中各成员盈利能力的影响。参照 Adhikari 等(2020)的研究进行参数设置[18], 假设市场需求 X 服从正态分布, 均值为 800, 标准差为 40, 原料随机产出率 z 在 $[0,1]$ 上服从均匀分布。数值分析其他相关参数见表 2。

Table 2. Related parameters of numerical analysis

表 2. 数值分析相关参数

单位价格			单位成本			风险分担机制相关参数
p	W_S	W_M	C_M	C_S	C'_S	k
10	0.2	8.5	3	0.04	0.1	10

(一) 集中决策模型数值分析

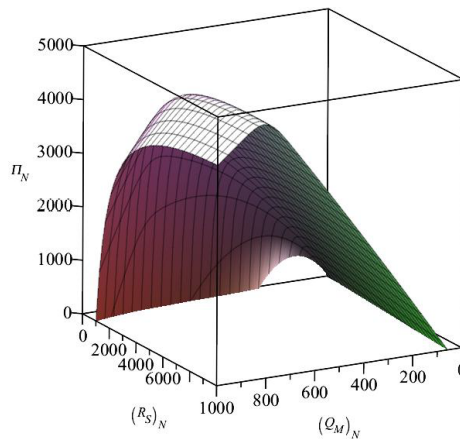


Figure 2. The effect of order quantity and planned output on supply chain profit under centralized decision making

图 2. 集中决策下订货量和计划产量对供应链利润的影响

集中决策情况下供应链的总体利润受零售商订货量和供应商计划生产量影响, 因此集中决策下供应链总利润变化如图 2 所示, 观察可得, 供应链总利润随着零售商订货量和供应商计划产量的增大先增大后减小。结合上文公式计算得, 集中决策情况下零售商的最优订货量 $(Q_M)_N^*$ 为 811.2309, 供应商的最优计划产量 $(R_S)_N^*$ 为 9069.8369, 供应链最优利润为 4731.0489。

(二) 分散决策模型数值分析

根据图 3, 观察可得, 分散决策下零售商的利润随着订货量的增大先增大后减小, 制造商的利润随着订货量的增大而不断增大, 供应商的利润随着订货量的增大而增大。计算可得, 分散决策下零售商的最优订货量 $(Q_M)_D^*$ 为 758.5427, 则零售商期望利润为 1106.7365, 制造商期望利润为 2654.8993, 当供应商为风险中性, 即 $\theta = 1$ 时, 供应商最优订货量 $(R_S)_B^*$ 为 8480.7648, 供应商的期望利润为 838.6241, 供应链的期望利润为 4600.2600。

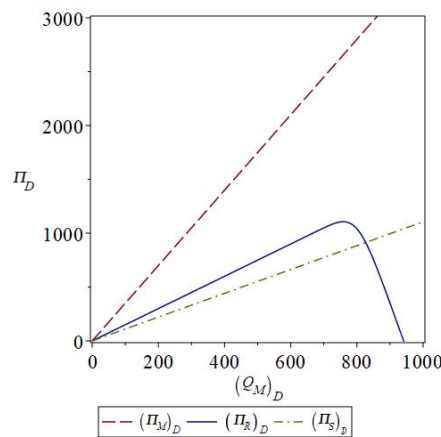


Figure 3. When $\theta = 1$, the effect of order quantity on the profit of retailer, manufacturer and supplier under decentralized decision making

图 3. $\theta = 1$ 时, 分散决策下订货量对零售商、制造商和供应商利润的影响

(三) 回购合同协调模型(B)数值分析

由表 3 观察得, 当供应商为风险中性, 且回购价格 b_M 符合一定范围时, 供应链中各成员的期望利润均大于分散决策下的期望利润, 因此成功协调了供应链。其中, 当回购价格 b_M 为 7.54 时, 零售商的订货量和供应商的计划产量均达到集中决策情况下数量, 即 $(Q_M)_B^* = (Q_M)_N^*$, $(R_S)_B^* = (R_S)_N^*$, 此时供应链期望利润达到最优, 实现了完美协调。零售商和供应商的利润随着 b_M 的增大而增大, 供应商利润随着 b_M 的增大而减小, 供应链的利润随着 b_M 的增大先增大后减小, 在 b_M 为 7.54 时达到最大值。

Table 3. The impact of b_M on the profits of retailers, manufacturers and suppliers

表 3. b_M 对零售商、制造商、供应商利润的影响

b_M	$(Q_M)_B^*$	$(R_S)_B^*$	$(\pi_R)_B$	$(\pi_M)_B$	$(\pi_S)_B$	$(\pi_L)_B$
7.60	812.7456	9086.7718	1163.5973	2668.7927	898.5494	4730.9393
7.54	811.1473	9069.8369	1162.2393	2672.0269	896.7824	4731.0486
7.50	810.1339	9057.5722	1161.3657	2673.9634	895.6620	4730.9911
7.40	807.7611	9031.0439	1159.2837	2678.1450	893.0387	4730.4674

续表

7.30	805.5884	9006.7523	1157.3327	2681.5355	890.6366	4729.5049
7.20	803.5857	8984.3612	1155.4976	2684.2847	888.4225	4728.2048

(四) 三级供应链的组合协调契约(CS)数值分析

令 $\theta = 1.1$, $b_M = 6$, $b_S = 1.4$, 通过计算可以得到 $\omega_M + \omega_R = 0.0909$, $30\phi + 4.4721\omega_R = 0.3466$, 为确保供应商的利润大于分散决策情况下利润必须有 $0 \leq \gamma < 0.0343$, 取 $\gamma = 0.01$, 得到 $6.1056b_M + 6.1056b_S - 30\phi - 4.4721\omega_R = 46.0557$, 进一步得到 ω_R 对供应链中各成员利润的影响如表 4 所示。

Table 4. ω_R impact on the profits of retailers, manufacturers and suppliers

表 4. ω_R 对零售商、制造商、供应商利润的影响

ω_R	ϕ	$(\pi_R)_{CS}$	$(\pi_M)_{CS}$	$(\pi_S)_{CS}$	$(\pi_L)_{CS}$
0.00	0.011554	1135.451684	2717.482717	878.114534	4731.0489
0.02	0.008573	1135.451601	2717.482799	878.114534	4731.0489
0.04	0.005591	1135.451591	2717.482809	878.114534	4731.0489
0.06	0.002610	1135.451606	2717.482794	878.114534	4731.0489

由表 4 观察得, 在给定的参数条件下, ϕ 随着 ω_R 的增大而减小, 零售商的利润在 1135.4516 左右浮动, 制造商利润在 2717.4827 左右浮动, 供应商的利润不变化, 供应链的利润达到最优, 供应链实现协调。因为供应商参与了风险分担, 相较于供应链下游的回购合同, 供应商利润有所提升。

其他参数取值不变的情况下, 令 $\omega_R = 0.02$, $\phi = 0.0086$, 探究 γ 取值变化对供应链中各主体利润的影响, 如图 4 所示。随着 γ 的增大, 零售商利润没有变化, 供应商利润下降, 制造商利润上升, γ 可以调节供应商和制造商之间的收益。

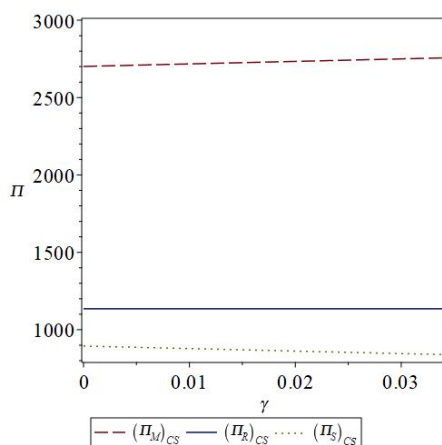


Figure 4. γ impact on the profits of retailers, manufacturers and suppliers

图 4. γ 对零售商、制造商、供应商利润的影响

6. 结论与管理启示

(一) 结论

本文构建三级短生命周期食品供应链, 在考虑供需不确定的因素下, 利用博弈模型, 分析集中和分散决策模式下短生命周期食品供应链的订货、计划生产决策, 分别设计供应链下游的回购合同、三级供应链的组合契约来协调供应链。并通过数值分析进行验证协调契约的有效性。结论如下:

供应链分散决策相较于集中决策失调的原因是需求不确定导致零售商订货量减少, 进而导致供应商计划产量减少, 因此供应链利润下降。

下游回购合同可以分担零售商的市场需求不确定风险, 激励零售商增大订货量, 供应商因此增大计划产量, 从而提升供应链中各主体利润, 实现供应链协调。

三级供应链组合契约可以使供应链中各主体共担供需不确定风险, 相较于下游回购合同, 可以实现各主体间利润分配和优化, 并实现供应链协调。

(二) 启示

短生命周期食品的零售商要提升自身收益, 需加强与制造商和供应商的合作, 与其订立合理的契约, 降低需求不确定风险的同时, 一定程度上承担制造商和供应商的成本或风险, 从而实现共赢。

制造商可通过制订合理的价格来回购零售商的过剩产品, 以此分担零售商需求不确定风险, 提升其订货量, 从而提升自身的收益, 若制造商想进一步提升利润, 需加强与供应商的合作。

供应商若想长期获益, 需参与到供应链风险的分担中, 巩固与供应商的合作, 分担部分需求不确定风险和其他成本, 通过订立契约也能够减轻自身的供应不确定风险。

在现实生活中, 短生命周期食品从供应商的原料生产, 到制造商进行加工制造为成品, 到零售商投入市场销售, 包括各个阶段的运输, 通常需要全程保鲜, 因此可以引入供应链中各成员的保鲜努力, 研究三级短生命周期食品供应链保鲜成本的分摊问题; 通常消费者对于易变质、易腐坏的食品新鲜度是敏感的, 因此可以考虑消费者新鲜度偏好对短生命周期食品市场需求的影响, 使得市场需求函数更符合短生命周期食品的特性, 可以在此基础上展开对短生命周期食品供应链供需不确定的风险分担问题的研究。

参考文献

- [1] Roy, A., Sana, S.S. and Chaudhuri, K. (2018) Optimal Pricing of Competing Retailers under Uncertain Demand—A Two Layer Supply Chain Model. *Annals of Operations Research*, **260**, 481-500. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1996-0>
- [2] Gao, R. and Zhang, Z. (2020) Analysis of Green Supply Chain Considering Green Degree and Sales Effort with Uncertain Demand. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **38**, 4247-4264. <https://doi.org/10.3233/JIFS-190783>
- [3] 刘家国, 张鑫, 李健. 需求不确定环境下零售商公平偏好机制与行为策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(7): 1794-1805.
- [4] 朱江华, 张旭梅, 但斌, 刘墨林, 马崧萱. 不确定需求下考虑资金约束的生鲜农产品政府补贴策略[J]. 中国管理科学, 2022, 30(8): 231-242. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2019.1824>
- [5] 周建亨, 常刘杰. 基于需求不确定和市场竞争的品牌商加盟决策研究[J]. 管理工程学报, 2022, 36(3): 139-148. <https://doi.org/10.13587/j.cnki.jieem.2022.03.012>
- [6] 周建亨, 石亚铭. 市场需求不确定下基于信息的品牌商侵入策略[J]. 管理工程学报, 2023, 37(2): 151-163. <https://doi.org/10.13587/j.cnki.jieem.2023.02.015>
- [7] 杨浩雄, 贾怡萌, 周永圣, 等. 产出不确定条件下农产品供应链内部融资研究[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(4): 914-928.
- [8] Wu, S., Luo, M., Zhang, J., et al. (2022) Pharmaceutical Supply Chain in China: Pricing and Production Decisions with Price-Sensitive and Uncertain Demand. *Sustainability*, **14**, Article No. 7551. <https://doi.org/10.3390/su14137551>
- [9] 陈静, 陈敬贤, 魏航. 规避农副产品原材料产出不确定风险的商业保险策略[J]. 中国管理科学, 2018, 26(6): 39-50. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2018.06.005>
- [10] 许民利, 王竟竟, 简惠云. 专利保护与产出不确定下闭环供应链定价与协调[J]. 管理工程学报, 2021, 35(3): 119-129. <https://doi.org/10.13587/j.cnki.jieem.2021.03.012>

- [11] 李小美, 张光军, 刘人境, 徐青川. 供需不确定条件下考虑双边努力的供应链组合契约设计[J]. 运筹与管理, 2019, 28(8): 48-58.
- [12] Dong, B., Tang, W. and Zhou, C. (2019) Managerial Flexibility Strategies under Supply and Demand Risks: Quantity Postponement vs. Price Postponement. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, **10**, 1747-1763. <https://doi.org/10.1007/s13042-018-0852-3>
- [13] Lin, Q., Zhao, Q. and Lev, B. (2022) Influenza Vaccine Supply Chain Coordination under Uncertain Supply and Demand. *European Journal of Operational Research*, **297**, 930-948. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.025>
- [14] 邱若臻, 张多琦, 孙艺萌, 等. 供需不确定条件下基于 CVaR 的零售商库存鲁棒优化模型[J]. 中国管理科学, 2020, 28(12): 98-107. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2018.1013>
- [15] Begen, M.A., Pun, H. and Yan, X. (2016) Supply and Demand Uncertainty Reduction Efforts and Cost Comparison. *International Journal of Production Economics*, **180**, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.07.013>
- [16] Fu, H., Ma, Y., Ni, D., et al. (2017) Coordinating a Decentralized Hybrid Push-Pull Assembly System with Unreliable Supply and Uncertain Demand. *Annals of Operations Research*, **257**, 537-557. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1865-x>
- [17] 孔令丞, 李仲, 梁玲, 等. 供需数量不确定下可再生能源发电容量投资决策[J]. 管理工程学报, 2019, 33(2): 166-172. <https://doi.org/10.13587/j.cnki.jieem.2019.02.019>
- [18] Adhikari, A., Bisi, A. and Avittathur, B. (2020) Coordination Mechanism, Risk Sharing, and Risk Aversion in a Five-Level Textile Supply Chain under Demand and Supply Uncertainty. *European Journal of Operational Research*, **282**, 93-107. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.08.051>
- [19] Li, W., Liu, Y. and Chen, Y. (2018) Modeling a Two-Stage Supply Contract Problem in a Hybrid Uncertain Environment. *Computers & Industrial Engineering*, **123**, 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.031>
- [20] 海江涛, 李旭. 需求不确定情况下绿色产品消费过程中政府的最优补贴[J]. 中国管理科学, 2021, 29(5): 180-189. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2018.1258>
- [21] 蹇明, 王永龙. 产出不确定性的三级供应链风险分担组合契约设计[J]. 运筹与管理, 2017, 26(7): 74-81.
- [22] Hsieh, C.C. and Wu, C.H. (2008) Capacity Allocation, Ordering, and Pricing Decisions in a Supply Chain with Demand and Supply Uncertainties. *European Journal of Operational Research*, **184**, 667-684. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.004>
- [23] Bellantuono, N., Giannoccaro, I., Pontrandolfo, P., et al. (2009) The Implications of Joint Adoption of Revenue Sharing and Advance Booking Discount Programs. *International Journal of Production Economics*, **121**, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.023>