



## 考虑消费者参考效应的双渠道乳制品供应链协调机制设计

杨建华, 刘淦

引用本文:

杨建华, 刘淦. 考虑消费者参考效应的双渠道乳制品供应链协调机制设计[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1609–1620.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1706>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 大数据服务商参与下供应链联合减排的动态协调策略

Dynamic coordination strategy of joint emission reduction in supply chain involving big data service provider

控制与决策. 2021, 36(8): 2013–2022 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1560>

### 考虑Showrooms效应的供应链定价与渠道模式策略

Strategies of pricing and channel mode in a supply chain considering Showrooms effect

控制与决策. 2021, 36(12): 2891–2900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0877>

### 低碳环境下双渠道供应链线上线下广告策略的微分博弈分析

Differential game analysis of online and offline advertising strategies in a dual channel supply chain under low-carbon background

控制与决策. 2020, 35(11): 2707–2714 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1721>

### 不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

控制与决策. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

### 风险规避制造商市场入侵策略

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

控制与决策. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

# 考虑消费者参考效应的双渠道乳制品供应链协调机制设计

杨建华<sup>1,2†</sup>, 刘 淞<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083; 2. 北京企业低碳运营战略研究基地, 北京 100083)

**摘 要:** 将消费者对乳制品新鲜度的参考效应引入第三方物流(third party logistics, TPL)服务商参与的双渠道乳制品供应链中, 考虑到乳制品新鲜度受到制造商加工水平和 TPL 服务商物流服务水平的影响, 构建分散式、集中式以及引入基于二部定价的成本共担契约下的微分博弈模型, 求解并比较 3 种情形下供应链成员的最优均衡策略. 研究表明: 一定条件下, 基于二部定价的成本共担契约能够使制造商加工水平、TPL 服务商物流服务水平以及供应链整体收益均达到集中式决策下的情形, 而且制造商、零售商和 TPL 服务商的收益相较于分散式决策都能得到帕累托改善, 供应链能够实现完美协调; 线上或线下渠道乳制品的零售价与该渠道所占的市场份额及渠道间的价格替代系数正相关; 消费者的参考效应能够激励制造商和 TPL 服务商提高各自的努力水平, 使供应链收益增加.

**关键词:** TPL 服务商; 乳制品新鲜度; 参考效应; 微分博弈; 双渠道供应链; 协调契约

中图分类号: F270

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1706

**引用格式:** 杨建华, 刘淞. 考虑消费者参考效应的双渠道乳制品供应链协调机制设计[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1609-1620.

## Coordination mechanism of dual channel supply chain in dairy products considering consumers' reference effect

YANG Jian-hua<sup>1,2†</sup>, LIU Song<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Enterprise Low-Carbon Operation Strategy Research Base, Beijing 100083, China)

**Abstract:** By introducing consumers' reference effect on dairy products' freshness in the study of a dual channel supply chain in dairy products with the involvement of a third party logistics service provider (TPLSP) and considering the freshness of dairy products is affected by the processing level of a manufacturer and the logistics service level of a TPLSP, this paper constructs the differential game models that are centralized, decentralized and under a contract of cost-sharing based on two-part tariff. Then the optimal equilibrium strategies of supply chain members in three cases are solved and compared. The results show that: when a certain condition is satisfied, the contract of cost-sharing based on two-part tariff can promote the processing level of the manufacturer, the logistics service level of the TPLSP and the overall revenue of the supply chain to the state under centralized decision-making, also achieve the perfect coordination of the supply chain by enhancing the revenues of the manufacturer, retailer and TPLSP; the dairy products' retail price in each channel is positively correlated with the market share of the channel and the price substitution coefficient; consumers' reference effect can encourage the manufacturer and TPLSP to increase their respective efforts and make increase in supply chain revenue.

**Keywords:** TPLSP; dairy product freshness; reference effect; differential game; dual channel supply chain; coordination contract

## 0 引 言

随着电子商务的迅速发展, 乳制品制造商拓展线上销售渠道已成为趋势, 越来越多的乳制品制造商选择线上渠道与线下渠道并存的混合渠道模式以增加

销量. 《2020 年乳制品消费趋势报告》显示, 截至 2020 年 11 月 6 日, 液态乳制品线上渠道的同比销售额增速为 64.3%, 销售额占比逐年提升. 线上渠道的发展使消费者购买乳制品更加便利, 消费者可以选择各自偏

收稿日期: 2020-12-08; 录用日期: 2021-03-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71602008, 71871016); 北京市社科基金基地项目(19JDGLA001).

责任编委: 徐泽水.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: yangjh@ustb.edu.cn.

好的渠道进行购买. 购买过程中, 消费者将受到参考效应的影响. 参考效应是指消费者在进行决策时, 根据已有的信息形成可以参考或比较的属性对象, 以参考点为依据来判断收益或损失<sup>[1]</sup>. 近年来, 消费者越来越关注乳制品新鲜度, 他们在购买乳制品前往往根据过往的购买经验等信息对乳制品的新鲜度进行评估, 形成参考新鲜度来决定购买与否.

乳制品极易受到时间和温度的影响, 需在低温环境下保存且保质期较短, 因此, 乳制品对运输过程的温度、运输时长等条件十分敏感, 直接由制造商或零售商自行运输往往无法满足这种高物流服务水平的要求, 故可引入第三方物流(third party logistics, TPL)服务商, 以满足运输要求. 例如, 国内乳制品行业领军企业蒙牛与京东冷链进行合作, 京东冷链为蒙牛提供一站式的冷链物流服务, 能够减少乳制品在运输过程中新鲜度的损耗. 制造商希望 TPL 服务商努力提高物流服务水平, 使乳制品到达销售终端时的新鲜度更高, 从而增加销量, 但这无疑会增加 TPL 服务商的运营成本. TPL 服务商出于对自身利益的考虑, 可能在运输过程中减少保鲜投入以降低成本, 这将使乳制品新鲜度下降, 间接影响到供应链中其他成员的收益. 此外, 将 TPL 服务商引入双渠道乳制品供应链后, 供应链的结构会发生改变, 制造商和零售商的决策也将受到影响. 因此, 如何设计 TPL 服务商参与的双渠道乳制品供应链的协调机制, 以激励 TPL 服务商提高物流服务水平及实现供应链成员的共赢具有重要的现实意义.

目前, 国内外众多学者对乳制品供应链的研究大多集中在质量控制<sup>[2-3]</sup>和网络均衡<sup>[4-5]</sup>的层面, 少数文献从供应链协调的角度展开了研究. 如文献[6]考虑两种决策情形下乳制品新鲜水平损耗对最优定价和成员最优利润的影响, 引入契约实现了乳制品供应链的协调. 文献[7]建立了基于修正 Shapley 值的生鲜乳供应链的收益分配模型, 实现了各主体收益的帕累托改善. 这些研究大多集中于单一渠道. 随着越来越多的制造商开辟线上渠道, 双渠道供应链也成为了研究的热点问题. 国内外学者对双渠道供应链的生产与定价<sup>[8-10]</sup>、广告促销<sup>[11-12]</sup>、渠道冲突<sup>[13]</sup>等方面展开了广泛的研究. 随着 TPL 服务商发挥着越来越重要的作用, 越来越多的双渠道供应链引入了 TPL 服务商, 但鲜有文献研究 TPL 服务商的参与对双渠道供应链的影响.

近年来, 针对 TPL 服务商参与供应链的研究多为单渠道供应链研究. 文献[14-16]研究了 TPL 服务商

参与的二级供应链, 分别设计了市场出清契约、多边旁支付契约和双边成本共担契约, 实现了供应链的协调. 其他学者在二级供应链的基础上进行扩展, 研究了 TPL 服务商参与的三级供应链协调问题. 文献[17]考虑物流服务水平对市场需求的影响, 建立了三方竞合博弈模型, 引入组合契约实现了供应链的协调. 文献[18]研究了 TPL 服务商参与的三级供应链在两种决策情形下的协调问题, 得出联合决策下各成员有着更大的利润空间. 文献[19]构建了分别由 TPL 服务商主导和供应商主导的博弈模型, 引入物流服务费用和成本分摊的契约, 在一定条件下实现了系统的帕累托改善. 文献[20]研究了由一个制造商、一个 TPL 服务商和两个竞争零售商组成的供应链, 设计 3 种不同的契约实现了供应链的协调. 文献[21]研究了信息不对称情形下 TPL 服务商参与的三级供应链的协调问题, 考虑 TPL 服务商的保鲜努力水平对产品质量的影响, 引入契约实现了供应链成员收益的帕累托改善.

上述文献在进行供应链协调的研究时, 考虑了多方面因素对消费者需求的影响, 但并没有考虑参考效应对消费者购买决策的影响. 对于参考效应, 众多学者展开了广泛的研究. 文献[22-23]研究了不同情形下参考质量效应对供应链成员决策的影响. 其他学者在此基础上进行扩展, 对参考效应的组合进行研究. 文献[24]考虑参考效应对消费者需求的影响, 研究了有无价格参考效应和有无减排水平参考效应的不同组合情形下的决策问题. 文献[25]考虑了产品质量参考效应和服务质量参考效应对需求的影响, 得到了供应链成员的最优决策, 并引入服务成本分担协调契约消除了双重边际效应.

综上所述, 双渠道供应链的协调问题已引起学者的普遍关注, 涌现了许多相关成果, 但这些文献的研究对象主要是二级供应链, 且鲜有文献考虑 TPL 服务商的参与和消费者的参考效应对双渠道乳制品供应链的影响. 鉴于此, 本文考虑参考效应对消费者购买行为的影响, 研究 TPL 服务商参与的双渠道乳制品供应链的协调机制. 本文的结构与文献[6,17]相似, 所不同的是, 本文借助微分博弈模型, 从动态的角度研究供应链的决策与协调问题. 无论是供应链成员的努力投入还是市场需求都处于动态变化中, 在动态的框架下展开研究更具有实际意义. 此外, 供应链成员在决策时需考量消费者的行为因素. 文献[26]表明, 大多数消费者都受到参考效应影响. 现实中, 消费者在购买乳制品时, 往往无法通过外观直接判断其新鲜度, 会根据以往的购买经历做出预期判断, 形成参考

新鲜度.消费者对乳制品的参考新鲜度与乳制品的实际新鲜度之间的差异是影响需求内在动态变化的重要因素,将参考效应引入供应链协调的研究中具有现实意义.因此,本文参考文献[24]量化参考效应的具体方法,考虑了参考效应对乳制品需求的影响.本文的创新点在于:1)在双渠道乳制品供应链中引入TPL服务商,研究TPL服务商的参与对供应链协调的影响;2)将消费者的参考效应纳入考察范畴,考虑参考效应对供应链成员决策的影响;3)运用微分博弈模型,从动态的角度研究双渠道乳制品供应链的协调问题,设计基于二部定价的成本共担契约,最终实现供应链完美协调.

## 1 模型建立与求解

### 1.1 模型假设与符号说明

本文以制造商、TPL服务商和零售商组成的双渠道乳制品供应链为研究对象.制造商为主导者,同

时通过线下零售商渠道与线上直销渠道销售乳制品.线上和线下渠道的乳制品都由TPL服务商通过冷链物流运输到销售终端.文中主要符号说明见表1.

文中给出如下5个假设条件.

**假设1** 消费者购买到的乳制品的新鲜度由制造商加工水平和TPL服务商物流服务水平共同决定.制造商加工水平和TPL服务商物流服务水平越高,乳制品到达销售终端时的新鲜度越高.另外,随着时间的推移,乳制品的新鲜度会自然损耗.参考文献[8],乳制品新鲜度的变化过程可用下式表示:

$$\dot{F}(t) = \alpha E_M(t) + \beta E_L(t) - \delta F(t), \quad (1)$$

其中当 $t = 0$ 时,乳制品的新鲜度最高.假定乳制品的初始新鲜度为100%,则有 $F_0 = F(0) = 100$ .

**假设2** 消费者在以往的大量购买经历中,对乳制品新鲜度形成主观上的参考点.参考文献[24],消费者的参考新鲜度的形成过程可用下式描述:

$$\dot{\kappa}(t) = \theta[F(t) - \kappa(t)], \quad (2)$$

其中参考新鲜度初始值大于0,即 $\kappa_0 = \kappa(0) > 0$ .由于消费者在以往的购买经历中并不总能买到新鲜度最高的乳制品,其形成的参考新鲜度初始值低于乳制品自身的初始新鲜度,即 $\kappa_0 < F_0$ .记忆参数 $\theta$ 的值越大,代表消费者对于以往购买经历的记忆越短暂.

**假设3** 乳制品的市场需求受价格和非价格两方面因素的影响,可构建为两种因素相乘的形式<sup>[27]</sup>.消费者偏好更新鲜、价格更低的乳制品,并受参考效应的影响,会将参考新鲜度与乳制品实际新鲜度进行对比,心理上产生“赚”或“亏”的感受,从而对购买行为产生影响.借鉴文献[11,24],将线上渠道与线下渠道的市场需求函数定为

$$D_e(t) = [kD - p_e(t) + \lambda p_r(t)]\{\varphi F(t) + \sigma[F(t) - \kappa(t)]\}, \quad (3)$$

$$D_r(t) = [(1-k)D - p_r(t) + \lambda p_e(t)]\{\varphi F(t) + \sigma[F(t) - \kappa(t)]\}. \quad (4)$$

**假设4** 由于制造商的加工成本和TPL服务商的物流服务成本均具有凸性特征<sup>[8]</sup>,制造商的加工成本和TPL服务商的物流服务成本可分别表示为

$$C_M(t) = \frac{\mu_M}{2} E_M^2(t), \quad C_L(t) = \frac{\mu_L}{2} E_L^2(t). \quad (5)$$

**假设5** 参考文献[8],在销售周期内,制造商、TPL服务商和零售商在任意时刻均具有相同的贴现因子,且均依据收益最大化的原则进行决策.

结合上述相关假设和描述可知,在乳制品保质期 $t_1$ 内,制造商收益目标函数 $P_M$ 、TPL服务商收益目标函数 $P_L$ 和零售商收益目标函数 $P_R$ 分别为

表1 模型符号及含义

| 符号                | 含义                                                                      |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $\omega(t)$       | $t$ 时刻乳制品的批发价                                                           |
| $p_e(t), p_r(t)$  | 分别为 $t$ 时刻乳制品线上渠道与线下渠道的零售价, $p_e(t) > \omega(t)$ 且 $p_r(t) > \omega(t)$ |
| $n(t)$            | $t$ 时刻对TPL服务商的支付水平                                                      |
| $E_M(t), E_L(t)$  | 分别为 $t$ 时刻制造商加工水平和TPL服务商物流服务水平                                          |
| $F(t), \kappa(t)$ | 分别为 $t$ 时刻乳制品的新鲜度和消费者对乳制品的参考新鲜度                                         |
| $\alpha, \beta$   | 分别为加工水平和物流服务水平对乳制品新鲜度的影响系数, $\alpha > 0$ 且 $\beta > 0$                  |
| $\delta$          | 乳制品新鲜度的衰减系数, $\delta > 0$                                               |
| $\theta$          | 消费者参考效应的记忆参数, $\theta > 0$                                              |
| $D_e(t), D_r(t)$  | 分别为 $t$ 时刻线上渠道和线下渠道的乳制品需求                                               |
| $D$               | 乳制品的潜在市场需求, $D > 0$                                                     |
| $k, 1-k$          | 分别为线上和线下渠道的市场份额, $0 < k < 1$                                            |
| $\lambda$         | 渠道间的价格替代系数, $0 < \lambda < 1$                                           |
| $\varphi$         | 乳制品新鲜度对需求的影响系数, $\varphi > 0$                                           |
| $\sigma$          | 参考效应对需求的影响系数, $\sigma > 0$                                              |
| $\mu_M, \mu_L$    | 分别为制造商加工成本和TPL服务商物流服务成本的成本系数, $\mu_M > 0$ 且 $\mu_L > 0$                 |
| $Z(t)$            | $t$ 时刻零售商向制造商支付的固定费用                                                    |
| $\psi(t)$         | $t$ 时刻TPL服务商需分担制造商加工成本的比例, $0 < \psi(t) < 1$                            |
| $\phi(t)$         | $t$ 时刻零售商需分担物流费用的比例, $0 < \phi(t) < 1$                                  |
| $\rho$            | 制造商、TPL服务商和零售商的贴现因子, $\rho > 0$                                         |
| $P_M, P_L, P_R$   | 制造商、TPL服务商和零售商的收益目标函数                                                   |

$$P_M = \int_0^{t_1} e^{-\rho t} [p_e(t)D_e(t) + \omega(t)D_r(t) - C_M(t) - n(t)E_L(t)]dt, \quad (6)$$

$$P_L = \int_0^{t_1} e^{-\rho t} [n(t)E_L(t) - C_L(t)]dt, \quad (7)$$

$$P_R = \int_0^{t_1} e^{-\rho t} [p_r(t)D_r(t) - \omega(t)D_r(t)]dt. \quad (8)$$

为表示方便,下文将 $t$ 省略.

## 1.2 分散式决策

分散式决策(用上标 $d$ 表示)下,制造商、TPL服务商和零售商的决策顺序为:制造商首先决定加工水平 $E_M^d$ 、乳制品线上渠道零售价 $p_e^d$ 、批发价 $\omega^d$ 和对TPL服务商的支付水平 $n^d$ ;TPL服务商在此基础上决定物流服务水平 $E_L^d$ ;最后,零售商决定线下渠道零售价 $p_r^d$ .乳制品保质期内,制造商、TPL服务商和零售商的收益目标函数分别为

$$P_M^d = \max_{p_e^d, \omega^d, n^d, E_M^d} \int_0^{t_1} e^{-\rho t} \left\{ p_e^d (kD - p_e^d + \lambda p_r^d) [\varphi F^d + \sigma(F^d - \kappa^d)] + \omega^d (D - kD - p_r^d + \lambda p_e^d) [\varphi F^d + \sigma(F^d - \kappa^d)] - \frac{\mu_M}{2} (E_M^d)^2 - n^d E_L^d \right\} dt, \quad (9)$$

$$P_L^d = \max_{E_L^d} \int_0^{t_1} e^{-\rho t} \left[ n^d E_L^d - \frac{\mu_L}{2} (E_L^d)^2 \right] dt, \quad (10)$$

$$P_R^d = \max_{p_r^d} \int_0^{t_1} e^{-\rho t} \{ (p_r^d - \omega^d) (D - kD - p_r^d + \lambda p_e^d) [\varphi F^d + \sigma(F^d - \kappa^d)] \} dt. \quad (11)$$

为得出该情形下的均衡策略,采用逆向归纳法求解.首先将 $t$ 时刻后零售商的收益最优价值函数记为 $P_R^d = e^{-\rho t} V_R^d(F^d, \kappa^d)$ ,对于任意 $F^d \geq 0$ 和 $\kappa^d \geq 0$ , $V_R^d$ 满足HJB方程,则有

$$\rho V_R^d = \max_{p_r^d} \{ (p_r^d - \omega^d) (D - kD - p_r^d + \lambda p_e^d) [\varphi F^d + \sigma(F^d - \kappa^d)] + V_{RF}^{d'} (\alpha E_M^d + \beta E_L^d - \delta F^d) + V_{R\kappa}^{d'} (\theta F^d - \theta \kappa^d) \}. \quad (12)$$

令式(12)对 $p_r^d$ 求一阶偏导,可得

$$p_r^d = \frac{1}{2} [(1-k)D + \lambda p_e^d + \omega]. \quad (13)$$

同理, $t$ 时刻后TPL服务商的收益最优价值函数记为 $P_L^d = e^{-\rho t} V_L^d(F^d, \kappa^d)$ ,对于任意 $F^d \geq 0$ 和 $\kappa^d \geq 0$ ,有

$$\rho V_L^d = \max_{E_L^d} \left[ n^d E_L^d - \frac{\mu_L}{2} (E_L^d)^2 \right]. \quad (14)$$

根据式(14)的最大化一阶偏导数条件,得

$$E_L^d = \frac{n^d}{\mu_L}. \quad (15)$$

制造商的收益最优价值函数可记作 $P_M^d = e^{-\rho t} V_M^d(F^d, \kappa^d)$ ,对于任意 $F^d \geq 0$ 和 $\kappa^d \geq 0$ ,有

$$\rho V_M^d = \max_{p_e^d, n^d, \omega^d, E_M^d} \left\{ [p_e^d (kD - p_e^d + \lambda p_r^d) + \omega^d (D - kD - p_r^d + \lambda p_e^d)] [\varphi F^d + \sigma(F^d - \kappa^d)] - \frac{\mu_M}{2} (E_M^d)^2 - n^d E_L^d + V_{MF}^{d'} (\alpha E_M^d + \beta E_L^d - \delta F^d) + V_{M\kappa}^{d'} (\theta F^d - \theta \kappa^d) \right\}. \quad (16)$$

将式(13)代入(16),分别对 $p_e^d$ 和 $\omega^d$ 求一阶偏导,并令其等于零,求解方程组得

$$\begin{cases} p_e^{d*} = \frac{\lambda + k(1-\lambda)}{2(1-\lambda^2)} D, \\ \omega^{d*} = \frac{1-k(1-\lambda)}{2(1-\lambda^2)} D. \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入(13),求得分散式决策下乳制品的最优线下渠道零售价为

$$p_r^{d*} = \left[ \frac{1-k(1-\lambda)}{2(1-\lambda^2)} + \frac{1-k}{4} \right] D. \quad (18)$$

将式(15)代入(16),将该式右侧对 $E_M^d$ 和 $n^d$ 求一阶偏导,并令其等于零,可求得 $E_M^{d*} = \alpha V_{MF}^{d'} / \mu_M$ , $n^{d*} = \beta V_{MF}^{d'} / 2$ ,相应地, $E_L^{d*} = n^{d*} / \mu_L = \beta V_{MF}^{d'} / 2\mu_L$ .将 $p_e^{d*}$ 、 $\omega^{d*}$ 、 $p_r^{d*}$ 、 $n^{d*}$ 、 $E_M^{d*}$ 和 $E_L^{d*}$ 代入式(16)和(12),整理可得

$$\begin{aligned} \rho V_M^d &= \left\{ \frac{(\varphi+\sigma)D^2}{8(1-\lambda^2)} [k^2(\lambda^2 - 4\lambda + 3) - 2k(1-\lambda)^2 + \lambda^2 + 1] - \delta V_{MF}^{d'} + \theta V_{M\kappa}^{d'} \right\} F^d - \\ &\quad \left\{ \frac{\sigma D^2}{8(1-\lambda^2)} [k^2(\lambda^2 - 4\lambda + 3) - 2k(1-\lambda)^2 + \lambda^2 + 1] + \theta V_{M\kappa}^{d'} \right\} \kappa^d + \\ &\quad \left( \frac{\alpha^2}{2\mu_M} + \frac{\beta^2}{4\mu_L} \right) (V_{MF}^{d'})^2, \\ \rho V_R^d &= \left[ \frac{(\varphi+\sigma)(1-k)^2 D^2}{16} - \delta V_{RF}^{d'} + \theta V_{R\kappa}^{d'} \right] F^d - \\ &\quad \left[ \frac{\sigma(1-k)^2 D^2}{16} + \theta V_{R\kappa}^{d'} \right] \kappa^d + \\ &\quad \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{2\mu_L} \right) V_{MF}^{d'} V_{RF}^{d'}. \end{aligned}$$

因此,可假设 $V_M^d = x_1 F^d + x_2 \kappa^d + x_3$ , $V_R^d = y_1 F^d + y_2 \kappa^d + y_3$ .其中: $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 和 $y_3$ 为常数,可通过待定系数法求得,即

$$\begin{cases} x_1 = \Delta_1 \Delta_2, \\ x_2 = -\frac{\sigma \Delta_2}{\theta + \rho}, \\ x_3 = \left( \frac{\alpha^2}{2\mu_M} + \frac{\beta^2}{4\mu_L} \right) \frac{\Delta_1^2 \Delta_2^2}{\rho}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_1 = \Delta_1 \Delta_3, \\ y_2 = -\frac{\sigma \Delta_3}{\theta + \rho}, \\ y_3 = \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{2\mu_L} \right) \frac{\Delta_1^2 \Delta_2 \Delta_3}{\rho}; \end{cases}$$

$$\Delta_1 = (\theta\varphi + \rho\varphi + \rho\sigma)/[(\theta + \rho)(\delta + \rho)],$$

$$\Delta_2 = [k^2(\lambda^2 - 4\lambda + 3) - 2k(1 - \lambda)^2 + \lambda^2 + 1]D^2/(8 - 8\lambda^2),$$

$$\Delta_3 = (1 - k)^2 D^2 / 16.$$

将  $V_{MF}^{d'} = x_1$  代入  $E_M^{d*}$ 、 $n^{d*}$  和  $E_L^{d*}$ , 可求得

$$\begin{cases} E_M^{d*} = \frac{\alpha}{\mu_M} \Delta_1 \Delta_2, \\ n^{d*} = \frac{\beta}{2} \Delta_1 \Delta_2, \\ E_L^{d*} = \frac{\beta}{2\mu_L} \Delta_1 \Delta_2. \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)代入状态方程(1)和(2), 进行求解, 可求得分散式决策情形下乳制品新鲜度和消费者参考新鲜度的最优轨迹, 分别为

$$\begin{cases} F^{d*} = F^d(\infty) + [F_0 - F^d(\infty)]e^{-\delta t}, \\ \kappa^{d*} = \kappa^d(\infty) + \frac{\theta}{\theta - \delta} [F_0 - F^d(\infty)]e^{-\delta t} + \\ \left\{ \kappa_0 - \kappa^d(\infty) - \frac{\theta}{\theta - \delta} [F_0 - F^d(\infty)] \right\} e^{-\theta t}. \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$F^d(\infty) = \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{2\mu_L} \right) \frac{\Delta_1 \Delta_2}{\delta},$$

$$\kappa^d(\infty) = \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{2\mu_L} \right) \frac{\Delta_1 \Delta_2}{\delta}.$$

由式(20)可知: 乳制品新鲜度的最优轨迹为随时间增加而递减的曲线, 这符合乳制品的物理属性; 消费者的参考新鲜度由于受以往购买经历和乳制品当前新鲜度共同影响, 其轨迹为先递增后递减的曲线, 这是因为消费者参考新鲜度初始值低于乳制品本身的初始新鲜度, 所以消费者的参考新鲜度在初期将递增; 而在后期则随着乳制品新鲜度下降而下降。

进一步, 可求得分散式决策下制造商、TPL 服务商和零售商的最优收益为

$$V_M^{d*} = \Delta_1 \Delta_2 F^{d*} - \frac{\sigma \Delta_2}{\theta + \rho} \kappa^{d*} + \left( \frac{\alpha^2}{2\mu_M} + \frac{\beta^2}{4\mu_L} \right) \frac{\Delta_1^2 \Delta_2^2}{\rho}, \quad (21)$$

$$V_L^{d*} = \frac{\beta^2 \Delta_1^2 \Delta_2^2}{8\mu_L \rho}, \quad (22)$$

$$V_R^{d*} = \Delta_1 \Delta_3 F^{d*} - \frac{\sigma \Delta_3}{\theta + \rho} \kappa^{d*} +$$

$$\left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{2\mu_L} \right) \frac{\Delta_1^2 \Delta_2 \Delta_3}{\rho}. \quad (23)$$

由式(21)可得

$$\begin{aligned} \partial V_M^{d*} / \partial \delta = & [\Delta_2 F^{d*} + (\alpha^2 / 2\mu_M + \beta^2 / 4\mu_L)(2\Delta_1 \Delta_2^2 / \rho)] \times \\ & (\partial \Delta_1 / \partial \delta) + \Delta_1 \Delta_2 (\partial F^{d*} / \partial \delta) - \\ & [\sigma \Delta_2 / (\theta + \rho)] (\partial \kappa^{d*} / \partial \delta). \end{aligned}$$

显然  $\partial \Delta_1 / \partial \delta < 0$ , 且由式(20)可求得

$$\Delta_1 \Delta_2 (\partial F^{d*} / \partial \delta) - [\sigma \Delta_2 / (\theta + \rho)] (\partial \kappa^{d*} / \partial \delta) < 0,$$

因此可知  $\partial V_M^{d*} / \partial \delta < 0$ . 同理可证  $\partial V_L^{d*} / \partial \delta < 0$ ,  $\partial V_R^{d*} / \partial \delta < 0$ , 各供应链成员的收益均与乳制品新鲜度的衰减系数负相关. 当乳制品新鲜度的衰减系数过大时, 乳制品新鲜度自身衰减带来的负面影响将大于制造商和 TPL 服务商提高努力水平带来的正面影响, 导致供应链收益减少, 此时制造商应改进加工技术或 TPL 服务商改进冷链运输技术进行优化以进行优化。

**命题 1** 当线上或线下渠道所占的市场份额增加时, 该渠道的乳制品零售价将提高, 且线下渠道零售价更容易受到其市场份额变化的影响. 此外, 当渠道间的价格替代系数增大时, 乳制品批发价及线上和线下渠道的零售价均将提高。

**证明** 将线上和线下渠道乳制品零售价分别对其渠道所占市场份额求一阶偏导, 得

$$\partial p_e^{d*} / \partial k = D / (2 + 2\lambda) > 0,$$

$$\partial p_r^{d*} / \partial (1 - k) = (3 + \lambda) D / (4 + 4\lambda) > 0,$$

因此, 线上与线下渠道零售价与各自市场份额正相关. 又因

$$\partial p_r^{d*} / \partial (1 - k) - \partial p_e^{d*} / \partial k > 0,$$

所以线下渠道零售价更容易受到其市场份额变化的影响. 再令  $\omega^{d*}$  对  $\lambda$  求一阶偏导, 得

$$\partial \omega^{d*} / \partial \lambda = [k(1 - \lambda)^2 + 2\lambda] D / (\sqrt{2} - \sqrt{2}\lambda^2)^2 > 0,$$

同理可证  $\partial p_e^{d*} / \partial \lambda > 0$ ,  $\partial p_r^{d*} / \partial \lambda > 0$ , 则乳制品批发价及线上和线下渠道的零售价均与价格替代系数正相关. □

由命题 1 可知, 渠道的市场份额增加, 意味着消费者对这一渠道的接受程度增加, 因此, 可通过提高该渠道乳制品的零售价来增加收益. 与以往研究中渠道间价格竞争越激烈, 产品零售价越低的结论不同, 命题 1 指出, 随着渠道间的价格替代系数增大, 线上与线下渠道的乳制品零售价均提高. 这是由于价格替代系数越大, 线上与线下渠道的异质性越小, 处

于主导地位的制造商将提高批发价以增加收益,零售商也随之提高线下渠道零售价.同时,制造商也将提高线上渠道零售价.近年来,随着电子商务的不断发展,线上渠道的市场份额不断增加,制造商可提高线上渠道乳制品零售价以增加收益.制造商和零售商可通过观察线上与线下渠道的市场份额以及渠道间价格替代系数的大小,制定恰当的价格策略.

**命题2** 当渠道间的价格替代系数或参考效应对需求的影响系数增大时,制造商的加工水平和TPL服务商的物流服务水平将提高.

**证明** 令制造商加工水平分别对渠道间价格替代系数和参考效应对需求的影响系数求一阶偏导,得

$$\begin{aligned} \partial E_M^{d*} / \partial \lambda &= \\ \alpha[k(1-k)1 - \lambda^2 + \lambda][\theta\varphi + \rho(\sigma + \varphi)]D^2 / \\ [2\mu_M(\delta + \rho)(\theta + \rho)(1 - \lambda^2)^2] &> 0, \\ \partial E_M^{d*} / \partial \sigma &= \alpha\rho\Delta_2 / [\mu_M(\theta + \rho)(\delta + \rho)] > 0, \end{aligned}$$

同理可证  $\partial E_L^{d*} / \partial \lambda > 0$ ,  $\partial E_L^{d*} / \partial \sigma > 0$ , 因此,制造商和TPL服务商的加工水平均与价格替代系数以及参考效应对需求的影响系数正相关.  $\square$

命题1指出,价格替代系数增加时,线上与线下渠道乳制品零售价将提高.此时为吸引更多消费者,制造商和TPL服务商将分别提高加工水平和物流服务水平以提高乳制品新鲜度,这一点在命题2中得到体现.此外,命题2指出,当参考效应对需求的影响系数增大时,制造商加工水平和TPL服务商物流服务水平将提高.这是由于当乳制品新鲜度高于参考新鲜度时,消费者参考效应对需求有正向影响.参考效应影响越显著时,制造商和TPL服务商越提高各自努力水平使乳制品新鲜度提高,可进一步增强参考效应的正向影响.因此,建议乳制品制造商和零售商采用广告宣传等方式,提高消费者对新鲜度高的乳制品的购买意识,增强参考效应的影响,使供应链收益增加.

### 1.3 集中式决策

集中式决策情形(用上标 $c$ 表示)下,供应链成员都以供应链的总收益最大化为目标确定自身最优决策变量,则供应链总收益的目标函数为

$$\begin{aligned} P_T^c &= \max_{p_e^c, p_r^c, E_M^c, E_L^c} \int_0^{t_1} e^{-\rho t} \left\{ p_e^c(kD - p_e^c + \lambda p_r^c)[\varphi F^c + \right. \\ &\quad \left. \sigma(F^c - \kappa^c)] + p_r^c[(1-k)D - p_r^c + \lambda p_e^c][\varphi F^c + \right. \\ &\quad \left. \sigma(F^c - \kappa^c)] - \frac{\mu_M}{2}(E_M^c)^2 - \frac{\mu_L}{2}(E_L^c)^2 \right\} dt. \end{aligned} \quad (24)$$

与分散式决策模型求解的过程相似,可求得集中式决策下的最优策略

$$\begin{cases} p_e^{c*} = \frac{\lambda + k(1-\lambda)}{2(1-\lambda^2)} D, \\ p_r^{c*} = \frac{1-k(1-\lambda)}{2(1-\lambda^2)} D, \\ E_M^{c*} = \frac{\alpha}{\mu_M} \Delta_1 \Delta_4, \\ E_L^{c*} = \frac{\beta}{\mu_L} \Delta_1 \Delta_4, \end{cases} \quad (25)$$

其中  $\Delta_4 = [1 - 2k(1-k)(1-\lambda)]D^2 / (4 - 4\lambda^2)$ .

将式(25)代入状态方程(1)和(2),进行求解,求得乳制品的新鲜度和消费者参考新鲜度的最优轨迹分别为

$$\begin{cases} F^{c*} = F^c(\infty) + [F_0 - F^c(\infty)]e^{-\delta t}, \\ \kappa^{c*} = \kappa^c(\infty) + \frac{\theta}{\theta - \delta} [F_0 - F^c(\infty)]e^{-\delta t} + \\ \quad \left\{ \kappa_0 - \kappa^c(\infty) - \frac{\theta}{\theta - \delta} [F_0 - F^c(\infty)] \right\} e^{-\theta t}. \end{cases} \quad (26)$$

其中

$$\begin{aligned} F^c(\infty) &= \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{\mu_L} \right) \frac{\Delta_1 \Delta_4}{\delta}, \\ \kappa^c(\infty) &= \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{\mu_L} \right) \frac{\Delta_1 \Delta_4}{\delta}. \end{aligned}$$

进一步求得乳制品供应链的最优收益为

$$\begin{aligned} V_T^{c*} &= \Delta_1 \Delta_4 F^{c*} - \frac{\sigma \Delta_4}{\theta + \rho} \kappa^{c*} + \\ &\quad \left( \frac{\alpha^2}{2\mu_M} + \frac{\beta^2}{2\mu_L} \right) \frac{\Delta_1^2 \Delta_4^2}{\rho}. \end{aligned} \quad (27)$$

**命题3** 比较集中式与分散式决策下的情形,有:1)线上与线下渠道的乳制品零售价的大小关系是  $p_e^{c*} = p_e^{d*}, p_r^{d*} > p_r^{c*}$ ;制造商的加工水平和TPL服务商的物流服务水平的大小关系是  $E_M^{c*} > E_M^{d*}, E_L^{c*} > E_L^{d*}$ ;乳制品新鲜度和消费者的参考新鲜度的大小关系是  $F^{c*} \geq F^{d*}, \kappa^{c*} \geq \kappa^{d*}$ . 2)乳制品供应链整体最优收益的大小关系是  $V_T^{c*} > (V_M^{d*} + V_L^{d*} + V_R^{d*})$ .

**证明** 由式(17)、(18)和(25)易知  $p_e^{c*} = p_e^{d*}$  和  $p_r^{d*} > p_r^{c*}$  成立,由式(19)和(25)可知,  $E_M^{c*} - E_M^{d*} = \alpha\Delta_1(\Delta_4 - \Delta_2)/\mu_M$ , 而  $\Delta_4 - \Delta_2 = (1-k)^2/8 > 0$ , 因此  $E_M^{c*} - E_M^{d*} > 0$ . 同理可证  $E_L^{c*} - E_L^{d*} > 0$ . 由式(20)和(26)可知

$$\begin{aligned} F^{c*} - F^{d*} &= \\ [F^c(\infty) - F^d(\infty)](1 - e^{-\delta t}) &= \\ \left[ \frac{\alpha^2 \Delta_1 (\Delta_4 - \Delta_2)}{\mu_M} + \frac{\beta^2 \Delta_1 (2\Delta_4 - \Delta_2)}{2\mu_L} \right] (1 - e^{-\delta t}) &\geq 0, \end{aligned}$$

因此  $F^{c*} \geq F^{d*}$ . 同理可证  $\kappa^{c*} \geq \kappa^{d*}$ . 结合式(21)~(23)可知

$$V_M^{d*} + V_L^{d*} + V_R^{d*} = \Delta_1(\Delta_2 + \Delta_3)F^{d*} - \frac{\sigma(\Delta_2 + \Delta_3)}{\theta + \rho}\kappa^{d*} + \left[ \frac{\alpha^2(2\Delta_2 + \Delta_3)}{2\mu_M\Delta_2} + \frac{\beta^2(3\Delta_2 + 4\Delta_3)}{8\mu_L\Delta_2} \right] \frac{\Delta_1^2\Delta_2^2}{\rho},$$

结合式(27)可得  $V_T^{c*} > (V_M^{d*} + V_L^{d*} + V_R^{d*})$ . □

由命题3可知,与分散式决策相比,集中式决策下的线上渠道乳制品零售价不变,而线下渠道零售价更低.此外,集中式决策下的乳制品新鲜度、参考新鲜度、制造商加工水平、TPL服务商物流服务水平以及供应链整体收益均高于分散式决策下的情形.这是因为分散决策下,供应链成员均追求自身收益的最大化,造成了“双重边际效应”,所以,为了促进供应链中三方成员合作,需要设计协调机制.

## 2 供应链协调机制设计

为消除分散式决策下出现的“双重边际效应”,下面引入基于二部定价的成本共担契约.为能够达到集中式决策下供应链整体的最优收益,制造商可提供两部定价契约,即直接按照集中式决策下的定价策略进行定价,同时零售商向制造商支付一笔固定费用 $Z$ .现实中,由于运输过程中的损耗导致乳制品变质的事件时有发生,TPL服务商应承担一部分责任,需分担比例为 $\psi$ 的制造商加工成本.此外,零售商将分担比例为 $\phi$ 的物流费用.在协调机制下,制造商、TPL服务商和零售商的收益目标函数分别为

$$P_M = \max_{p_e, \omega, n, E_M} \int_0^{t_1} e^{-\rho t} \left\{ p_e(kD - p_e + \lambda p_r)[\varphi F + \sigma(F - \kappa)] + \omega(D - kD - p_r + \lambda p_e)[\varphi F + \sigma(F - \kappa)] - (1 - \psi)\frac{\mu_M}{2}(E_M)^2 - (1 - \phi)nE_L + Z \right\} dt, \quad (28)$$

$$P_L = \max_{E_L, \psi} \int_0^{t_1} e^{-\rho t} \left[ nE_L - \frac{\mu_L}{2}(E_L)^2 - \frac{\psi\mu_M}{2}(E_M)^2 \right] dt, \quad (29)$$

$$P_R = \max_{p_r, \phi, Z} \int_0^{t_1} e^{-\rho t} \{ (p_r - \omega)(D - kD - p_r + \lambda p_e)[\varphi F + \sigma(F - \kappa)] - \phi nE_L - Z \} dt. \quad (30)$$

与分散式决策模型求解过程相似,采用逆向归纳法可求得供应链成员的最优策略分别为

$$p_e^* = \frac{\lambda + k(1 - \lambda)}{2(1 - \lambda^2)} D, \\ \omega^* = \frac{\lambda^2 + k\lambda(1 - \lambda)}{2(1 - \lambda^2)} D,$$

$$p_r^* = \frac{1 - k(1 - \lambda)}{2(1 - \lambda^2)} D, \\ E_M^* = \frac{\alpha(k + \lambda - k\lambda)^2 \Delta_1}{4\mu_M(1 - \psi)(1 - \lambda^2)} D^2, \\ n^* = \frac{\beta(k + \lambda - k\lambda)^2 \Delta_1}{8(1 - \phi)(1 - \lambda^2)} D^2, \\ E_L^* = \frac{\beta(k + \lambda - k\lambda)^2 \Delta_1}{8\mu_L(1 - \phi)(1 - \lambda^2)} D^2. \quad (31)$$

**命题4** 基于二部定价的成本共担契约下,当TPL服务商分担加工成本的比例和零售商分担物流费用的比例满足下式时:

$$\begin{cases} \psi^* = \frac{(1 - k)^2(1 - \lambda^2)}{2k^2(1 - \lambda) - 2k(1 - \lambda) + 1}, \\ \phi^* = \frac{2k(\lambda^2 + \lambda - 2) - k^2(\lambda^2 + 2\lambda - 3) - \lambda^2 + 2}{4k^2(1 - \lambda) - 4k(1 - \lambda) + 2}, \end{cases} \quad (32)$$

该契约可以实现供应链的协调.当线上渠道所占市场份额增加时,TPL服务商分担加工成本的比例和零售商分担物流费用的比例均减少.

**证明** 供应链达成协调状态表明,在此契约下制造商加工水平和TPL服务商物流服务水平等于在集中式决策下的情形.因此,令  $E_M^* = E_M^{c*}$ ,  $E_L^* = E_L^{c*}$ , 结合式(25)和(31)可求解出  $\psi^*$  和  $\phi^*$ , 结果如式(32)所示.将  $\psi^*$  和  $\phi^*$  分别对  $k$  求一阶偏导,可得

$$\begin{aligned} \partial\psi^*/\partial k &= -2(1 - k)(1 - \lambda^2)[k(1 - \lambda) + \\ &\quad \lambda]/[(2k^2 - 2k)(1 - \lambda) + 1]^2 < 0, \\ \partial\phi^*/\partial k &= -(1 - k)(1 - \lambda^2)[k(1 - \lambda) + \\ &\quad \lambda]^2/[(2k^2 - 2k)(1 - \lambda) + 1]^2 < 0, \end{aligned}$$

表明TPL服务商分担加工成本的比例和零售商分担物流费用的比例与线上渠道市场份额负相关. □

将  $E_M^*$  和  $E_L^*$  代入状态方程(1)和(2),求解出乳制品的新鲜度和消费者参考新鲜度的最优轨迹为

$$\begin{cases} F^* = F(\infty) + [F_0 - F(\infty)]e^{-\delta t}, \\ \kappa^* = \kappa(\infty) + \frac{\theta}{\theta - \delta}[F_0 - F(\infty)]e^{-\delta t} + \\ \quad \left\{ \kappa_0 - \kappa(\infty) - \frac{\theta}{\theta - \delta}[F_0 - F(\infty)] \right\} e^{-\theta t}. \end{cases} \quad (33)$$

其中

$$F(\infty) = \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{\mu_L} \right) \frac{\Delta_1\Delta_4}{\delta}, \\ \kappa(\infty) = \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{\mu_L} \right) \frac{\Delta_1\Delta_4}{\delta}.$$

进一步,求得协调机制下制造商、TPL服务商和零售商的最优收益分别为

$$V_M^* = \Delta_1 \Delta_5 F^* - \frac{\sigma \Delta_5}{\theta + \rho} \kappa^* + \frac{Z}{\rho} + \left( \frac{\alpha^2}{\mu_M} + \frac{\beta^2}{\mu_L} \right) \frac{\Delta_1^2 \Delta_7}{\rho}, \quad (34)$$

$$V_L^* = \frac{\beta^2 \Delta_1^2 \Delta_4^2}{2\rho\mu_L} - \frac{\alpha^2(1-k)^2(1-\lambda^2)\Delta_1^2 \Delta_4^2}{[4k^2(1-\lambda) - 4k(1-\lambda) + 2]\rho\mu_M}, \quad (35)$$

$$V_R^* = \Delta_1 \Delta_6 F^* - \frac{\sigma \Delta_6}{\theta + \rho} \kappa^* - \frac{Z}{\rho} + \frac{\alpha^2 \Delta_1^2 \Delta_4 \Delta_6}{\mu_M} + \frac{\beta^2 \Delta_1^2 \Delta_8}{\mu_L \rho}. \quad (36)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta_5 &= (k + \lambda - k\lambda)^2 D^2 / (4 - 4\lambda^2), \\ \Delta_6 &= (1 - k)^2 D^2 / 4, \\ \Delta_7 &= \Delta_4 \Delta_5 - [k + (1 - k)\lambda]^2 \Delta_4^2 / [4k^2(1 - \lambda) - 4k(1 - \lambda) + 2], \\ \Delta_8 &= \Delta_4 \Delta_6 - [2k(\lambda^2 + \lambda - 2) - k^2(\lambda^2 + 2\lambda - 3) - \lambda^2 + 2] \Delta_4^2 / [4k^2(1 - \lambda) - 4k(1 - \lambda) + 2]. \end{aligned}$$

结合式(22)和(35)可知,引入契约后,TPL服务商的最优收益高于分散式决策的情形(即  $V_L^* > V_L^{d*}$ ),但制造商和零售商的最优收益却未必总是得到提升,因为  $V_M^* - V_M^{d*} \geq 0$  和  $V_R^* - V_R^{d*} \geq 0$  同时成立需要满足一定的条件.而只有当  $V_M^* - V_M^{d*} \geq 0$ ,  $V_L^* - V_L^{d*} \geq 0$ ,  $V_R^* - V_R^{d*} \geq 0$  均成立时,供应链成员才会接受这一契约.因此,还需进一步探讨零售商的固定支付费用的合理区间,使契约下各成员的最优收益均高于分散式决策下的情形.

**命题5** 当  $Z \in [\max Z_1, \min Z_2]$  时,该协调机制不仅能够实现供应链整体收益的最优,还能实现供应链各成员的帕累托改善.其中

$$\begin{aligned} Z_1 &= -\rho \Delta_1 (\Delta_5 F^* - \Delta_2 F^{d*}) + \frac{\sigma \rho (\Delta_5 \kappa^* - \Delta_2 \kappa^{d*})}{\theta + \rho} - \left[ \frac{\alpha^2 (2\Delta_7 - \Delta_2^2)}{2\mu_M} + \frac{\beta^2 (4\Delta_7 - \Delta_2^2)}{4\mu_L} \right] \Delta_1^2, \\ Z_2 &= \rho \Delta_1 (\Delta_6 F^* - \Delta_3 F^{d*}) - \frac{\sigma \rho (\Delta_6 \kappa^* - \Delta_3 \kappa^{d*})}{\theta + \rho} + \left[ \frac{\alpha^2 (\Delta_4 \Delta_6 - \Delta_2 \Delta_3)}{\mu_M} + \frac{\beta^2 (2\Delta_8 - \Delta_2 \Delta_3)}{2\mu_L} \right] \Delta_1^2. \end{aligned}$$

**证明** 当契约下的制造商的最优收益和零售商的最优收益均不低于分散式决策下的情形时,即  $V_M^* - V_M^{d*} \geq 0$  和  $V_R^* - V_R^{d*} \geq 0$  均成立.结合式(21)、(34)和(23)、(36),当

$$V_M^* - V_M^{d*} = \frac{Z}{\rho} + \Delta_1 (\Delta_5 F^* - \Delta_2 F^{d*}) - \frac{\sigma (\Delta_5 \kappa^* - \Delta_2 \kappa^{d*})}{\theta + \rho} + \left[ \frac{\alpha^2 (2\Delta_7 - \Delta_2^2)}{2\mu_M} + \frac{\beta^2 (4\Delta_7 - \Delta_2^2)}{4\mu_L} \right] \frac{\Delta_1^2}{\rho} \geq 0$$

和

$$V_R^* - V_R^{d*} = -\frac{Z}{\rho} + \Delta_1 (\Delta_6 F^* - \Delta_3 F^{d*}) - \frac{\sigma (\Delta_6 \kappa^* - \Delta_3 \kappa^{d*})}{\theta + \rho} + \left[ \frac{\alpha^2 (\Delta_4 \Delta_6 - \Delta_2 \Delta_3)}{\mu_M} + \frac{\beta^2 (2\Delta_8 - \Delta_2 \Delta_3)}{2\mu_L} \right] \frac{\Delta_1^2}{\rho} \geq 0$$

均成立时,解得

$$\begin{aligned} \rho \Delta_1 (\Delta_6 F^* - \Delta_3 F^{d*}) - \frac{\sigma \rho (\Delta_6 \kappa^* - \Delta_3 \kappa^{d*})}{\theta + \rho} + \left[ \frac{\alpha^2 (\Delta_4 \Delta_6 - \Delta_2 \Delta_3)}{\mu_M} + \frac{\beta^2 (2\Delta_8 - \Delta_2 \Delta_3)}{2\mu_L} \right] \Delta_1^2 &\geq Z \geq \\ -\rho \Delta_1 (\Delta_5 F^* - \Delta_2 F^{d*}) + \frac{\sigma \rho (\Delta_5 \kappa^* - \Delta_2 \kappa^{d*})}{\theta + \rho} - \left[ \frac{\alpha^2 (2\Delta_7 - \Delta_2^2)}{2\mu_M} + \frac{\beta^2 (4\Delta_7 - \Delta_2^2)}{4\mu_L} \right] \Delta_1^2. \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} Z_1 &= -\rho \Delta_1 (\Delta_5 F^* - \Delta_2 F^{d*}) + \frac{\sigma \rho (\Delta_5 \kappa^* - \Delta_2 \kappa^{d*})}{\theta + \rho} - \left[ \frac{\alpha^2 (2\Delta_7 - \Delta_2^2)}{2\mu_M} + \frac{\beta^2 (4\Delta_7 - \Delta_2^2)}{4\mu_L} \right] \Delta_1^2, \\ Z_2 &= \rho \Delta_1 (\Delta_6 F^* - \Delta_3 F^{d*}) - \frac{\sigma \rho (\Delta_6 \kappa^* - \Delta_3 \kappa^{d*})}{\theta + \rho} + \left[ \frac{\alpha^2 (\Delta_4 \Delta_6 - \Delta_2 \Delta_3)}{\mu_M} + \frac{\beta^2 (2\Delta_8 - \Delta_2 \Delta_3)}{2\mu_L} \right] \Delta_1^2, \end{aligned}$$

则当  $Z \in [\max Z_1, \min Z_2]$  时,  $V_M^* - V_M^{d*} \geq 0$ ,  $V_R^* - V_R^{d*} \geq 0$  均成立.  $\square$

由命题4和命题5可知,协调机制的引入可使供应链成员的最优策略达到集中式决策下的情形,且当固定支付费用满足一定条件时,能够实现供应链的完美协调.这说明虽然制造商开通了线上渠道,与零售商合作的同时也存在着竞争,但这种关系能够得到协调.作为供应链主导者的制造商不应秉持独立决策的传统博弈思维,而应积极地与零售商和TPL服务商进行合作,通过协调机制实现共赢.

### 3 算例分析

为了更深入地进行研究,本文利用 Matlab 分别对上述3种情形进行算例分析. 参考文献[8]和文献[13],同时考虑各参数的现实意义、相互关联和赋值条件,对模型中各参数赋值如下:1) 令  $\theta = 0.9$ ,  $\varphi = 0.5$ ,  $\delta = 0.5$ ,  $\rho = 0.9$ ,  $\sigma = 0.2$ ,  $D = 68$ ,  $\alpha = 1.2$ ,  $\beta = 1$ ,  $\mu_M = 20$ ,  $\mu_L = 18$ ,  $t_1 = 20$ ,  $\lambda \in (0, 1)$ ; 2) 为确保乳制品线上渠道和线下渠道的零售价均大于批发价,将式(17)的  $p_e^{d*}$  和  $\omega^{d*}$  比较后可知,只有当  $k > 0.5$  时,才能满足  $p_e^{d*} > \omega^{d*}$ ,因此取  $k \in (0.5, 1)$ ; 3) 由假设1和假设2可知,在  $t = 0$  时乳制品的新鲜度最高,且消费者的参考新鲜度初始值往往低于乳制品本身新鲜度的初始值,因此令  $F_0 = 100$ ,  $\kappa_0 = 85$ .

图1为分散式决策下,渠道因素对决策变量的影响. 由图1(a)可知,当渠道间的价格替代系数  $\lambda$  增大时,线上和线下渠道零售价以及批发价也提高. 随着线上渠道的市场份额  $k$  的不断增大,制造商会提高线上渠道零售价,以增加线上渠道的收益;零售商则会降低线下渠道零售价,以增加线下渠道的价格优势. 取  $k = 0.6$ ,绘制出制造商最优加工水平和 TPL 服务商最优物流服务水平随  $\lambda$  变化的图像,如图1(b)所示. 可知,当  $\lambda$  不断增大时,制造商和 TPL 服务商将提高各自的努力水平,以提高乳制品新鲜度.

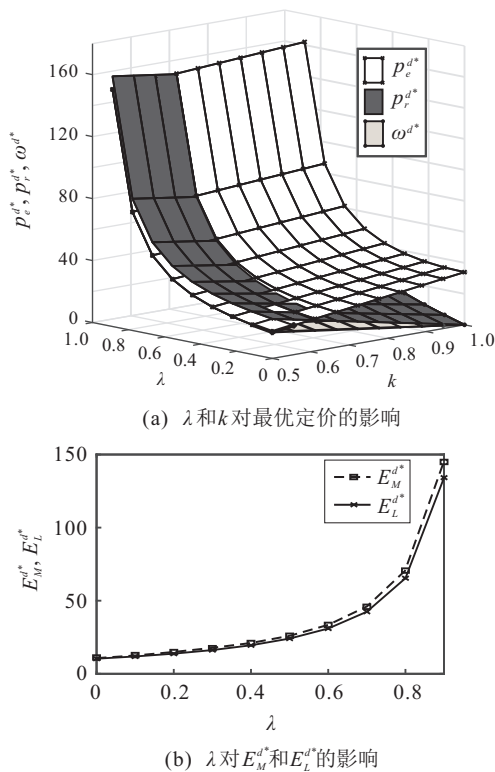


图1 分散式决策下渠道因素对决策变量的影响

取  $\lambda = 0.3$ ,绘制出3种情形下状态变量随时间变化的最优轨迹,如图2所示. 可见,协调契约下的乳制

品新鲜度与消费者参考新鲜度均高于分散式决策下的情形,且与集中式决策下的情形相同. 3种情形下乳制品新鲜度的最优轨迹均单调递减,且递减速度越来越慢,逐渐趋于稳定状态. 而消费者参考新鲜度的最优轨迹均为先递增后递减的曲线. 这一趋势符合实际情况,消费者受过去购买经历的影响,其参考新鲜度的初始值往往低于乳制品本身的初始新鲜度,因此消费者参考新鲜度在初期递增,后期乳制品新鲜度下降,消费者的参考新鲜度也随之下降. 乳制品新鲜度和消费者参考新鲜度在3种情形下的变化趋势大体相同,但在分散式决策下的下降速度均快于另外两种决策状态下的下降速度.

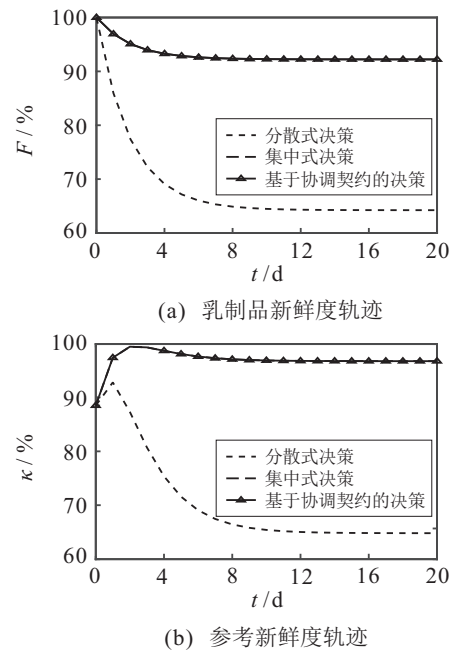


图2 状态变量的最优轨迹

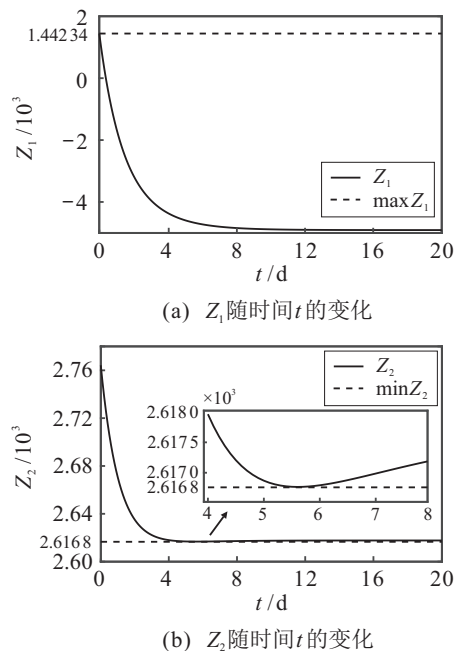


图3  $Z$  的阈值变化情况

命题5指出,当零售商支付的固定费用满足 $Z \in [\max Z_1, \min Z_2]$ 时,该契约可以实现供应链完美协调.图3给出 $Z_1$ 和 $Z_2$ 随时间变化的曲线.

由图3可知, $\max Z_1 = 1442.34$ ,  $\min Z_2 = 2616.8$ .因此当 $Z \in [1442.34, 2616.8]$ 时,该契约能

达成协调目的.现实中, $Z$ 的具体数值由零售商和制造商谈判决定,这取决于两方讨价还价的能力.为验证契约的协调效果,取 $Z = 1800$ ,绘制出3种决策状态下,供应链整体与各供应链成员最优收益随时间变化的情况,见图4.

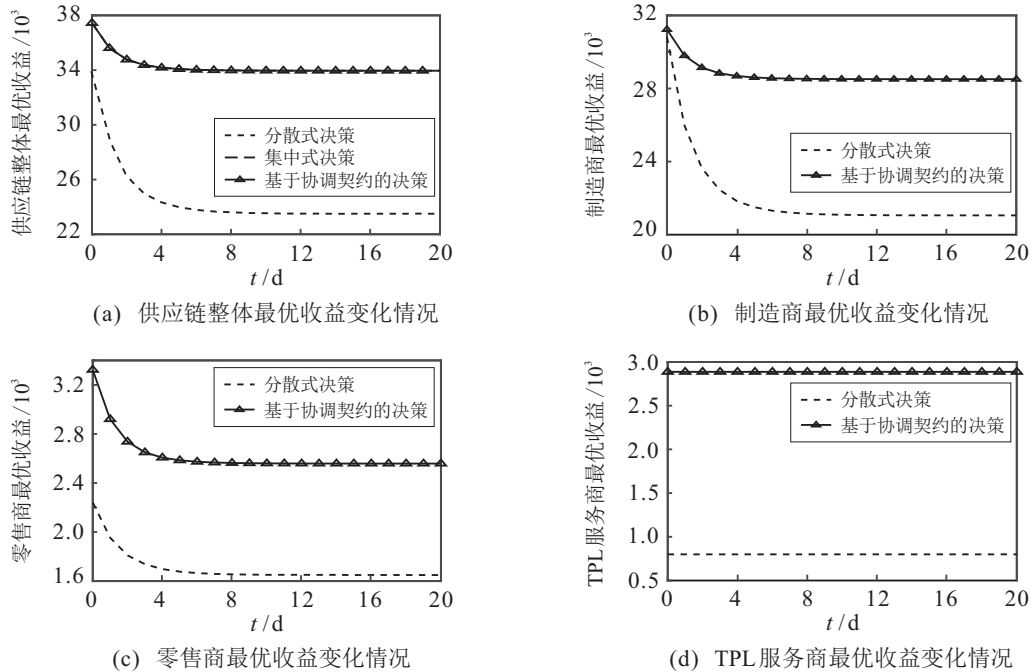


图4 最优收益的变化情况

由图4(a)可知,协调契约下的供应链整体最优收益高于分散式决策下的情形,且与集中式决策下的情形相同.由图4(b)、图4(c)和图4(d)可知,各供应链成员在协调契约下的最优收益均高于分散式决策下的情形.这表明本文设计的协调机制是合理的,能够实现各成员收益的帕累托改善.此外,供应链整体最优收益以及制造商和零售商的最优收益均随时间的增加而递减,且递减速度越来越慢,最终趋于稳定.这是由于随时间增加,乳制品新鲜度下降,导致需求减少,从而使收益减少.可见,随着乳制品临近保质期,制造商和零售商的收益空间将缩小.而TPL服务商的最优收益不受时间的影响,保持为恒定的值.

保持其他参数不变,取 $t = 2$ ,  $\sigma \in [0, 2]$ ,绘制出基于协调契约的决策和分散式决策下的制造商和TPL服务商的努力水平以及供应链整体最优收益随参考效应对需求的影响系数 $\sigma$ 的变化情况,如图5所示.由图5(a)可知,两种情形下的制造商和TPL服务商努力水平均与 $\sigma$ 正相关.由图5(b)可知,基于协调契约的决策下的供应链整体最优收益始终高于分散式决策下的情形,两种情形下供应链整体最优收益均受到 $\sigma$ 的正向影响,这进一步验证了命题2的结论.

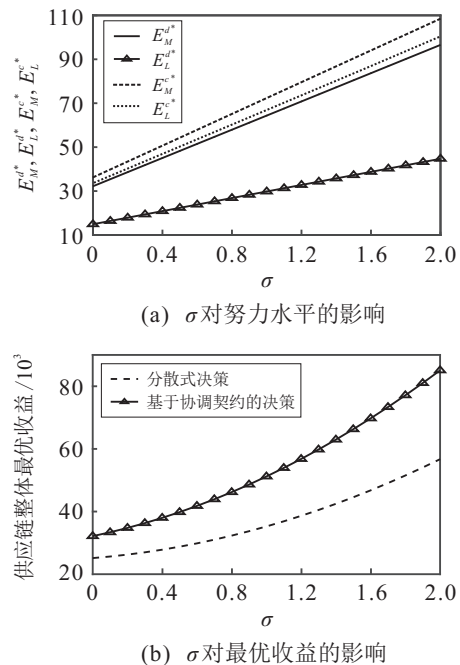


图5 参考效应对努力水平和最优收益的影响

## 4 结论

本文以TPL服务商参与的双渠道乳制品供应链为研究对象,考虑参考效应对消费者购买行为的影响,将乳制品新鲜度与消费者参考新鲜度作为状态变量构建微分博弈模型,比较分析了分散式决策、集中

式决策和引入基于二部定价的成本共担契约的决策下的最优均衡策略和最优收益. 通过对模型的求解和分析可以得到以下结论:

1) 与分散式决策相比, 引入契约后, 当零售商给制造商的固定支付费用  $Z$  满足  $Z \in [\max Z_1, \min Z_2]$  时, 供应链所有成员收益均提高, 且最优策略能达到集中式决策下的情形. 因此, 通过协调机制中参数的合理设计, 能够实现供应链的完美协调.

2) 乳制品线上与线下渠道的零售价与该渠道所占市场份额正相关. 当市场份额增大时, 该渠道会提高零售价以增加收益, 而另一渠道则会降低零售价以增加价格优势. 此外, 渠道间的价格替代系数越大, 线上和线下渠道的零售价将越高, 制造商加工水平和TPL服务商物流服务水平也越高.

3) 参考效应的影响越显著, 制造商的加工水平和TPL服务商的物流服务水平越高, 供应链的整体收益也将增加. 这说明参考效应的影响越大, 越能够激励制造商和TPL服务商提高各自的努力水平, 进而提高乳制品新鲜度, 使参考效应对需求产生正向影响, 从而使供应链的收益增加.

基于以上分析, 可得到以下管理启示: 1) 实际运营中, 乳制品供应链各成员往往独立决策, 这将造成“双重边际效应”, 使供应链收益减少. 供应链成员应积极引入协调契约, 达成合作. 2) 随着电子商务普及, 线上渠道将占据更大的市场份额, 制造商将拥有更大定价话语权. 线上和线下渠道可通过观察各自的市场份额以及渠道间的价格替代系数大小进行市场定位, 制定恰当的价格策略. 3) 消费者的参考效应对乳制品供应链收益有正向影响. 因此, 建议制造商和零售商加大对乳制品新鲜度的宣传, 提高消费者对更新鲜的乳制品的偏好程度, 从而增强参考效应这一行为因素意识对购买的影响.

本文仅考虑了完全信息下的微分博弈模型, 没有考虑供应链成员之间信息不对称时的情形, 下一步可将信息不对称考虑到模型中.

## 参考文献(References)

- [1] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263.
- [2] Mu L Y, Dawande M, Mookerjee V. Improving the milk supply chain in developing countries: Analysis, insights, and recommendations[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(7): 1098-1112.
- [3] Chen C, Zhang J, Delaurentis T. Quality control in food supply chain management: An analytical model and

- case study of the adulterated milk incident in China[J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, 152: 188-199.
- [4] 陈佳佳, 周根贵, 梁薇薇, 等. 基于努力水平的生鲜乳制品供应链均衡研究[J]. *工业工程与管理*, 2018, 23(5): 67-73.  
(Chen J J, Zhou G G, Liang W W, et al. Research on the equilibrium of fresh dairy supply chain considering effort levels[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018, 23(5): 67-73.)
- [5] 郭传好, 陈芳, 单而芳. 短生命周期乳制品供应链网络成本与收益优化研究[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(2): 87-97.  
(Guo C H, Chen F, Shan E F. Cost and revenue optimization for supply chain network of dairy products with short-life-cycle[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(2): 87-97.)
- [6] 徐胜, 林国龙, 孟燕萍. 考虑新鲜折损水平的奶制品双渠道供应链协调研究[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 51(3): 349-355.  
(Xu S, Lin G L, Meng Y P. Coordination of dual-channel supply chain in dairy products under the fresh discount level[J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 2017, 51(3): 349-355.)
- [7] 宦梅丽, 迟亮, 陈鹏飞, 等. 基于修正Shapley值的生鲜乳供应链收益分配机制[J]. *中国乳品工业*, 2020, 48(1): 32-37.  
(Huan M L, Chi L, Chen P F, et al. Profit distribution mechanism of fresh milk supply chain based on modified shapley value method[J]. *China Dairy Industry*, 2020, 48(1): 32-37.)
- [8] 唐润, 彭洋洋. 基于微分对策的生鲜食品供应链双渠道协调机制[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(4): 1034-1045.  
(Tang R, Peng Y Y. Coordination mechanism of dual channels of fresh food supply chain based on differential game[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(4): 1034-1045.)
- [9] Rahmani K, Yavari M. Pricing policies for a dual-channel green supply chain under demand disruptions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127: 493-510.
- [10] Li G, Li L, Sethi S P, et al. Return strategy and pricing in a dual-channel supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 215: 153-164.
- [11] 陈山, 王旭, 吴映波, 等. 低碳环境下双渠道供应链线上线下广告策略的微分博弈分析[J]. *控制与决策*, 2020, 35(11): 2707-2714.  
(Chen S, Wang X, Wu Y B, et al. Differential game

- analysis of online and offline advertising strategies in a dual channel supply chain under low-carbon background[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(11): 2707-2714.)
- [12] Li X, Li Y J, Cao W J. Cooperative advertising models in O2O supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 215: 144-152.
- [13] 陈静, 胡婷婷, 韩燕, 等. 基于收益共享的双渠道供应链低碳协调研究[J]. *统计与决策*, 2020, 36(10): 176-180.  
(Chen J, Hu T T, Han Y, et al. Dual-channel supply chain low-carbon coordination based on revenue sharing[J]. *Statistics & Decision*, 2020, 36(10): 176-180.)
- [14] Cai X Q, Chen J, Xiao Y B, et al. Fresh-product supply chain management with logistics outsourcing[J]. *Omega*, 2013, 41(4): 752-765.
- [15] 秦星红, 李海南, 曹园园. 多服务商竞争环境下考虑利润公平分配的网购服务供应链激励契约[J]. *工业工程与管理*, 2020, 25(6): 144-153.  
(Qin X H, Li H N, Cao Y Y. Incentive contract design for online shopping service supply chains considering fair profit distribution in multi-servicers competition environment[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2020, 25(6): 144-153.)
- [16] 何彦东, 王旭, 周福礼, 等. 基于双边努力因素的网购供应链协调研究[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(2): 83-92.  
(He Y D, Wang X, Zhou F L, et al. Coordination of online shopping supply chain based on bilateral effort factors[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(2): 83-92.)
- [17] 冯颖, 余云龙, 张炎治, 等. TPL服务商参与决策的生鲜农产品三级供应链协调机制[J]. *管理工程学报*, 2015, 29(4): 213-221.  
(Feng Y, Yu Y L, Zhang Y Z, et al. Coordination in a three-echelon supply chain of fresh agri-products with TPLSP's participation in decision-making[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015, 29(4): 213-221.)
- [18] 王夫冬, 周梅华. 基于第三方物流参与的三级供应链协调机制研究[J]. *统计与决策*, 2018, 34(14): 41-45.  
(Wang F D, Zhou M H. Research on three-level supply chain coordination mechanism based on participation of third-party logistics[J]. *Statistics & Decision*, 2018, 34(14): 41-45.)
- [19] 冯颖, 张炎治. 不同权力结构下 TPL 服务增值的供应链决策与效率评价[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(10): 164-175.  
(Feng Y, Zhang Y Z. Decision making and efficiency evaluation in A supply chain with TPL's value-added services under different power structures[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(10): 164-175.)
- [20] Jiang L, Wang Y, Yan X M. Decision and coordination in a competing retail channel involving a third-party logistics provider[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 76: 109-121.
- [21] Ma X L, Wang S Y, Islam S M N, et al. Coordinating a three-echelon fresh agricultural products supply chain considering freshness-keeping effort with asymmetric information[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 67: 337-356.
- [22] He Y Y, Zhang J, Gou Q L, et al. Supply chain decisions with reference quality effect under the O2O environment[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 268(1/2): 273-292.
- [23] Chenavaz R. Dynamic quality policies with reference quality effects[J]. *Applied Economics*, 2017, 49(32): 3156-3162.
- [24] 楼高翔, 张永明, 万宁. 基于参考效应的动态定价和减排决策[J]. *控制与决策*, 2018, 33(9): 1667-1676.  
(Lou G X, Zhang Y M, Wan N. Dynamic pricing and emission abatement with reference effect[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(9): 1667-1676.)
- [25] Zhou X D, Xu B, Xie F, et al. Research on quality decisions and coordination with reference effect in dual-channel supply chain[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2296.
- [26] Winer R S. A reference price model of brand choice for frequently purchased products[J]. *Journal of Consumer Research*, 1986, 13(2): 250-256.
- [27] El Ouardighi F. Supply quality management with optimal wholesale price and revenue sharing contracts: A two-stage game approach[J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, 156: 260-268.

## 作者简介

杨建华(1965—),男,教授,博士生导师,从事运营管理、全球物流与供应链等研究, E-mail: yangjh@ustb.edu.cn;

刘淞(1998—),男,硕士生,从事供应链协调的研究, E-mail: 18811501969@163.com.

(责任编辑: 李君玲)