

Mean-CVaR准则下延期支付供应链决策与协调

李 荣, 刘 露*

(南开大学商学院, 天津 300071)

摘要: 基于决策者风险偏好程度对决策的重要影响, 研究使用延期支付融资时各企业风险态度对其最优决策及整个供应链和各企业利润的影响。运用 Mean-CVaR 准则刻画各企业风险态度, 通过建立双层规划博弈模型, 并运用均衡分析方法对不同资金情形下的分散式和集中式供应链决策及均衡解的性质进行了理论分析, 探究了风险态度及初始资金等参数的影响。设计了两类合同以实现成员收益协调改进, 进而通过数值分析论证并补充了相关结论。对考虑缺货惩罚时决策情形进行了拓展分析。研究表明, 风险规避型企业制定决策更加保守, 延期支付的实施对生产商, 受资金约束零售商及供应链整体均有利, 但零售商不应过度使用延期支付, 应合理选择其资金使用量, 生产商应适当追求风险, 二部定价和收益共享合同均能实现此类供应链完美协调。

关键词: 风险态度; 资金约束; 延期支付; 商业信用; 供应链协调

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2017)03-0370-15

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.03.008

Decision-making and coordination of the supply chain with a delay in payment under mean-CVaR criterion

Li Rong, Liu Lu*

(School of Business, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Considering the large impact of decision-makers' risk attitude on their decision making, this paper studies how each SC partner's risk attitude affects its optimal decisions and profit and the whole SC's profit under DP. The risk attitude is modeled using mean-CVaR criterion. A Stackelberg game model is established to analyze the equilibrium decisions of the manufacturer and the retailer, and the impacts of each firm's risk attitude and the retailer's initial capital are discussed. Two kinds of contracts are designed to coordinate the SC and several numerical studies are performed to demonstrate and supplement the analytical results. The results show that risk averse firms are more conservative in decision making. DP benefits the manufacturer, the retailer and the whole SC. But the retailer should use a reasonable amount of its working capital and not overuse DP, and the manufacturer should seek risk appropriately. The two-part tariff contract and the revenue sharing contract can both achieve SC coordination.

Key words: risk attitude; budget constraint; delay in payments; trade credit; supply chain coordination

1 引言

延期支付(delay in payments, DP), 又称商业信用, 是指买方因资金约束而采取的先赊销后还款的一种

收稿日期: 2016-07-13; 修订日期: 2017-02-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71401081).

*通信作者

融资贸易形式。该交易形式能缓解买方资金压力,促进贸易开展且易于执行,因此被企业界广泛采纳。截至2015年末,我国规模以上工业企业应收账款额高达11万亿元^[1],多数企业采用该模式开展交易。可见,延期支付规模巨大,但对于上游授信业来说,在为下游企业提供延期付款服务同时,也须承担可能发生的下游企业违约或坏账风险,鉴于不同企业对待风险的态度和感知差异,及不同风险态度对决策制定的较大影响,研究决策者风险偏好程度如何影响企业决策制定和绩效损益对于指导企业合理开展运营决策具有重要现实意义。同时,合理的开展供应链协调有助于改善供应链整体效率并实现企业双赢,当考虑延期付款且上下游企业均具备风险偏好时,如何设计新的合同机制实现此类供应链协调?相关问题研究能为企业绩效提升提供理论指导。

近年来,学者们分别从延期支付决策与价值^[2-4],应收账款与延期支付组合策略^[5],考虑延迟期限^[6]、易腐品^[7]、延期保险^[8]等特定条件对延期支付供应链的影响,延期支付供应链的协调合同设计(如批发价合同^[9]、数量折扣合同^[10]等方面对延期支付供应链开展了广泛研究。遗憾的是,文献[2-10]均未考虑上下游决策者风险态度的影响。

针对风险态度问题,多数研究忽略缺货损失影响且仅讨论供应链一方企业(上游^[11]或下游^[12,13]风险厌恶研究链内决策与协调问题,文献[14-16]讨论了上下游均风险厌恶时供应链决策与协调,文献[17]分析了缺货惩罚对决策影响,其不足之处在于未考虑上游决策且文献[11-17]均未考虑企业资金约束影响,研究结论对广泛存在的资金约束型中小型企业并不适用。风险态度刻画方面,相对于均值方差(MV)和风险值(VaR度量准则,条件风险值(CVaR)准则具有反映超额损失,适用非正态分布,等价于凸规划等优势^[18,19],而相对于 CVaR 准则,均值条件风险值(Mean-CVaR)准则^[13,20-22]更具一般性,同时可克服 CVaR 准则过于保守等弊端,能同时反映决策者风险厌恶,风险中性,及风险追求等特性。

综上,现有研究未综合考虑风险偏好和资金约束影响。本文运用 Mean-CVaR 准则刻画企业风险态度,探究延期支付供应链决策及该类型供应链的协调等问题,研究结论可为企业合理化制定运营策略提供理论依据和决策参考。

2 供应链均衡策略分析

2.1 问题描述

零售商 R 从生产商 M 处以批发价 w 订购 q 单位生产成本为 c 的商品,该零售商初始资金为 η ,当 $\eta \geq wq$ 时,零售商资金充足,反之当 η 小于订货资金 wq 时,其初始资金不足以订货。此时生产商将根据其利润情况决策是否为零售商提供延期授信。市场随机需求 $Z \in [0, +\infty)$,其概率分布和密度函数分别为 $F(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$,令 $\bar{F}(\cdot) = 1 - F(\cdot)$,并假设分布函数满足广义递增失败率(increasing generalized failure rate, IGFR)^[23](即 $G(x) = xf(x)/\bar{F}(x)$ 单调递增)。零售商以价格 p 出售商品,销售期末,当 $Z < q$ 时,商品出现剩余且零售商以残值 s 处理商品。分别用上标 D, N, S 表示零售商资金约束且延期支付、资金约束但无延期支付、资金充足三类资金情形,用 $\Pi_i^j (i = M, R, j = D, N, S)$ 表示 j 情形下决策者 i 的期望均值条件风险值(以下简称风险值),上标 * 和 0 分别表示分散式和集中式情形下均衡最优决策及风险值。令 $k = p - s, t = w^D - s, \hat{\eta} = \min\{w^{D*}q^{D*}, w^{S*}q^{S*}\}$,根据零售商初始资金大小可将决策区域划分为三部分,分别用符号 D, N, S 表示这三类决策区域,有如下结论成立。

命题 1 若分散式供应链成员展开以生产商为领导者的 Stackelberg 博弈,融资均衡策略满足下述情形

$$(q^*, w^*) = \begin{cases} (q^{D*}, w^{D*}), & \text{若 } \eta \in D \\ (q^{N*}, w^{N*}), & \text{若 } \eta \in N \\ (q^{S*}, w^{S*}), & \text{若 } \eta \in S. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $D = \{\eta < \hat{\eta}, \Pi_M^{D*} \geq \Pi_M^{N*}\}, N = \{\eta < \hat{\eta}, \Pi_M^{N*} \geq \Pi_M^{D*} \text{ 或 } w^{D*}q^{D*} \leq \eta < w^{S*}q^{S*}\}, S = \{\eta \geq w^{S*}q^{S*}\}$.

证明 首先对三个决策区域的划分依据进行阐释, 只有零售商资金量同时小于情形 D 和情形 S 下的订货资金, 即 $\eta \leq \hat{\eta}$ 时, 该零售商才具备融资需求, 然而融资能否达成则取决于生产商融资决策, 只有延期所获得的风险值 Π_M^{D*} 不低于不提供延期时 Π_M^{N*} , 生产商才愿为资金约束零售商提供延期融资, 此时 η 满足区域 D. 当零售商初始资金高于正常订货资金 $w^{S*}q^{S*}$ 时, 零售商资金充足, 无需融资. 否则, 零售商资金约束但无法获取资金延期. 证毕.

上述结论给出了零售商获取延期支付的条件以及融资均衡情况, 下面针对上述结论中三种资金情形中成员均衡决策情况展开详细分析.

2.2 情形 D

由于市场需求的不确定性, 当需求量较低时, 无法确保零售商销售回款 $pZ + s(q^D - Z)^+$ 一定能偿清授信额 $w^D q^D - \eta$. 因此生产商可回笼资金额度为 $\min\{pZ + s(q^D - Z)^+, w^D q^D - \eta\}$, 零售商无法偿还全款并违约的需求临界值 $\theta = \max\left\{\frac{tq^D - \eta}{k}, 0\right\} < q^D$.

根据以上描述, 零售商和生产商收益情况可表示为

$$(\pi_R^D, \pi_M^D) = \begin{cases} (-\eta, \eta + pZ + s(q^D - Z) - cq^D), & \text{若 } 0 < Z < \theta \\ (pZ + s(q^D - Z) - w^D q^D, (w^D - c)q^D), & \text{若 } \theta \leq Z < q^D \\ ((p - w^D)q^D, (w^D - c)q^D), & \text{若 } Z \geq q^D. \end{cases} \quad (2)$$

经计算, 零售商和生产商的期望收益分别为

$$E[\pi_R^D] = -\eta + k \int_{\theta}^{q^D} \bar{F}(x)dx, \quad (3)$$

$$E[\pi_M^D] = (w^D - c)q^D - k \int_0^{\theta} F(x)dx. \quad (4)$$

与其它情形相比, D 情形下上下游企业均承担风险, 为分析风险态度对各企业决策和利润影响, 以 Mean-CVaR 刻画决策目标, 由定义 2 可知 Mean-CVaR 同时与决策者期望收益和 CVaR 相关, 需首先给出 CVaR, 令 $e = (q^D, w^D)$, 可将 CVaR 定义如下^[18].

定义 1 令 $\alpha_i \in (0, 1]$ 表示风险厌恶因子, $\xi_{\alpha_i}(\pi_i^D(e, Z)) = \sup(v_i | \Pr(\pi_i^D(e, Z) \leq v_i) \leq \alpha_i)$ 表示分位数. 延期支付模式下决策者 $R(M)$ 关于订货量 q^D (批发价 w^D) 的条件风险值可表示为

$$\alpha_i - \text{CVaR} : C(\pi_i^D(e, Z)) = E[\pi_i^D(e, Z) | \pi_i^D(e, Z) \leq \xi_{\alpha_i}(\pi_i^D(e, Z))].$$

令 $u_i(e, v_i) = v_i - \frac{1}{\alpha_i} E[v_i - \pi_i^D(e, Z)]^+$, 上述条件风险值等价于^[18]

$$C(\pi_i^D(e, Z)) = \underset{v_i \in R}{\text{Max}} \left(v_i - \frac{1}{\alpha_i} E[v_i - \pi_i^D(e, Z)]^+ \right) = \underset{v_i \in R}{\text{Max}} u_i(e, v_i). \quad (5)$$

下面对延期支付下生产商和零售商条件风险值的具体形式展开分析, 由证明可知 v_i^* 满足如下结论.

命题 2 存在下述形式的最优分位数 v_i^* , 使得 $C(\pi_i^D) = u_i(e, v_i^*)$,

$$v_R^* = \begin{cases} y_3, & \text{若 } q^D < F^{-1}(\alpha_R) \\ y_2 + kF^{-1}(\alpha_R), & \text{若 } q^D \geq F^{-1}(\alpha_R), \end{cases}$$

$$v^{M*} = \begin{cases} z_2, & \text{若 } \theta < F^{-1}(\alpha^M) \\ z_1 + kF^{-1}(\alpha^M), & \text{若 } \theta \geq F^{-1}(\alpha^M), \end{cases}$$

其中 $y_3 = (p - w^D)q^D > y_1 = -\eta > y_2 = -tq^D$, $z_2 = (w^D - c)q^D > z_1 = \eta - (c - s)q^D$.

证明 首先分析 v_R^* 的具体形式, 根据上述定义可将 u_R 写作如下形式,

$$\begin{aligned}
u_R(q^D, v_R) &= v_R - \frac{1}{\alpha_R} \left(\int_0^\theta (v_R - y_1)^+ f(x) dx + \int_\theta^{q^D} ((v_R - y_2) - kx)^+ f(x) dx + \int_{q^D}^{+\infty} (v_R - y_3)^+ f(x) dx \right) \\
&= \begin{cases} v_R, & \text{若 } v_R < y_2 \\ v_R - \frac{1}{\alpha_R} \left(\int_\theta^{\frac{v_R - y_2}{k}} ((v_R - y_2) - kx) f(x) dx \right), & \text{若 } y_2 \leq v_R \leq y_1 \\ v_R - \frac{1}{\alpha_R} \left(\int_0^\theta (v_R - y_1) f(x) dx + \int_\theta^{\frac{v_R - y_2}{k}} ((v_R - y_2) - kx) f(x) dx \right), & \text{若 } y_1 \leq v_R \leq y_3 \\ v_R - \frac{1}{\alpha_R} \left(\int_0^\theta (v_R - y_1) f(x) dx + \int_\theta^{q^D} ((v_R - y_2) - kx) f(x) dx + \int_{q^D}^{+\infty} (v_R - y_3) f(x) dx \right), & \text{若 } v_R > y_3, \end{cases} \\
0 \geq \frac{\partial^2 u_R(q^D, v_R)}{\partial v_R^2} &= \begin{cases} -\frac{1}{\alpha_R k} f\left(\frac{v_R - y_2}{k}\right), & \text{若 } y_2 \leq v_R \leq y_3 \\ 0, & \text{其它.} \end{cases}
\end{aligned}$$

上述分析表明 $u_R(q^D, v_R)$ 为关于 v_R 的可微严格凹函数, 下面分析其极值情况, 关于 v_R 求解一阶条件可知

$$\frac{\partial u_R(q^D, v_R)}{\partial v_R} = \begin{cases} 1, & \text{若 } v_R < y_2 \\ 1 - \frac{1}{\alpha_R} \left(F\left(\frac{v_R - y_2}{k}\right) - F(\theta) \right), & \text{若 } y_2 \leq v_R \leq y_1 \\ 1 - \frac{1}{\alpha_R} F\left(\frac{v_R - y_2}{k}\right), & \text{若 } y_1 \leq v_R \leq y_3 \\ 1 - \frac{1}{\alpha_R}, & \text{若 } v_R > y_3. \end{cases}$$

分析以上一阶条件表达式可知最优分位数满足下述情形

$$v_R^* = \begin{cases} y_2 + kF^{-1}(\alpha_R + F(\theta)), & \text{若 } q^D \geq F^{-1}(\alpha_R), y_2 \leq v_R \leq y_1 \\ y_2 + kF^{-1}(\alpha_R), & \text{若 } q^D \geq F^{-1}(\alpha_R), y_1 \leq v_R < y_3 \\ y_3, & \text{若 } q^D < F^{-1}(\alpha_R), v_R \geq y_3. \end{cases}$$

进一步分析可知, 由于 v_R^* 的第 1 种情形需满足 $v_R^* = y_2 + kF^{-1}(\alpha_R + F(\theta)) < y_1$, 对该式移项可知 $\theta > F^{-1}(\alpha_R + F(\theta))$, 显然不成立. 因此, 最终 v_R^* 仅存在下述两类情形, 当 $q^D < F^{-1}(\alpha_R)$ 时 $v_R^* = y_3$, 当 $q^D \geq F^{-1}(\alpha_R)$ 时, $v_R^* = y_2 + kF^{-1}(\alpha_R)$. 类似上述分析同样可得出 v^{*M} 亦满足命题 2 所述形式. 证毕.

由定义 1 及命题 2 可知零售商和生产商条件风险值可描述为

$$C(\pi_R^D) = \begin{cases} -\eta + k(q^D - \theta) - \frac{k}{\alpha_R} \int_\theta^{q^D} F(x) dx, & \text{若 } q^D < F^{-1}(\alpha_R) \\ -\eta + k(F^{-1}(\alpha_R) - \theta) - \frac{k}{\alpha_R} \int_\theta^{F^{-1}(\alpha_R)} F(x) dx, & \text{若 } q^D \geq F^{-1}(\alpha_R), \end{cases} \quad (6)$$

$$C(\pi^{MD}) = \begin{cases} (w^D - c)q^D - \frac{k}{\alpha^M} \int_0^\theta F(x) dx, & \text{若 } \theta < F^{-1}(\alpha^M) \\ (w^D - c)q^D - k(\theta - F^{-1}(\alpha^M)) - \frac{k}{\alpha^M} \int_0^{F^{-1}(\alpha^M)} F(x) dx, & \text{若 } \theta \geq F^{-1}(\alpha^M). \end{cases} \quad (7)$$

定义 2 用 $\lambda_i \in [0, 1]$ 表示决策者悲观程度, 决策者均值条件风险值可定义为

$$\Pi_i^D(e, Z) = \lambda_i E[\pi_i^D(e, Z) | \pi_i^D(e, Z) \leq \xi_{\alpha_i}(\pi_i^D(e, Z))] + (1 - \lambda_i) E[\pi_i^D(e, Z) | \pi_i^D(e, Z) \geq \xi_{\alpha_i}(\pi_i^D(e, Z))].$$

经简单推导和分析可知, 定义 2 中的风险值目标函数形式等价于下述等式

$$\Pi_i^D = \delta_i E[\pi_i^D] + (1 - \delta_i) C(\pi_i^D), \quad (8)$$

其中 $\delta_i = (1 - \lambda_i)/(1 - \alpha_i)$ 且 $\alpha_i < \lambda_i, \alpha_i = \lambda_i$ 和 $\alpha_i > \lambda_i$ 分别表示决策者 i 为风险厌恶, 风险中性和风险追求.

定义 2 同时表明当 $\lambda_i = 1$ 和 $\alpha_i = \lambda_i$ 时 Π_i^D 分别退化为 $C(\pi_i^D)$ 和 $E[\pi_i^D]$. 下面分析供应链博弈均衡策略情况, 首先将分散式供应链上下游博弈问题刻画为如下双层规划优化模型.

$$\left\{ \begin{array}{l} \underset{w^D}{\text{Max}} \quad \Pi_M^D(w^D, q^{D*}(w^D)) \\ \text{s.t.} \\ \quad q^{D*} \in \arg \max \quad \Pi_R^D(q^D) \\ \quad p \geq w^D \geq c > 0 \\ \quad q^D \geq \theta > 0. \end{array} \right. \quad (9)$$

为便于分析和推导, 下文仅考虑均衡策略取在驻点时情形, 若目标函数为关于相应决策变量的可微严格凹函数, 依据双层规划逆向求解算法, 首先求解 Π_R^D 关于 q^D 的一阶条件得到订货决策关于批发价的最优反应函数 $\check{q}(w^D)$, 进而将其代入生产商收益函数表达式中并求解 $\Pi_M^D(w^D, \check{q}(w^D))$ 关于 w^D 的一阶条件可得到均衡批发价决策 w^{D*} , 将 w^{D*} 代回订货量反应函数即可得到均衡订货决策 $q^{D*} = \check{q}(w^{D*})$. 由式(6), 式(7)和式(8)可知, 根据 q^D 和 $F^{-1}(\alpha_R)$ 、 θ 和 $F^{-1}(\alpha_M)$ 的大小关系, 成员 i 决策目标函数 Π_i^D 均具有两类形式, 分别用下标 $n_i = 1, 2$ 表示这两种情形, 因此 $\Pi_{R|n_R}^D, \Pi_{M|n_M}^D$ 共有四类组合情形. 令 (q_{n_R}, w_{n_M}) 表示情形 (n_R, n_M) 下函数值取在驻点时均衡策略.

$$\begin{aligned} \text{令 } \tau_i &= \frac{\lambda_i}{\alpha_i}, \quad \tilde{F}(\cdot) = \frac{\alpha_R}{\lambda_R} - F(\cdot), \\ A_{1n_M} &= k\tilde{F}(q_1) - t(w_{n_M})\tilde{F}(\theta(q_1, w_{n_M})), \quad A_{2n_M} = \delta_R k\bar{F}(q_2) - \tau_R t(w_{n_M})\tilde{F}(\theta(q_2, w_{n_M})), \\ B_{n_R 1} &= \tau_M \tilde{F}(\theta(q_{n_R}, w_1)) q_{n_R} + ((s - c) + \tau_M t(w_1)\tilde{F}(\theta(q_{n_R}, w_1))) (\check{q}_{n_R})'_{w^D}(w_1), \\ B_{n_R 2} &= \delta_M \bar{F}(\theta(q_{n_R}, w_2)) q_{n_R} + ((s - c) + \delta_M t(w_2)\bar{F}(\theta(q_{n_R}, w_2))) (\check{q}_{n_R})'_{w^D}(w_2), \\ C_{2n_M} &= -\delta_R k^2 f(q_2) + \tau_R t^2(w_{n_M}) f(\theta(q_2, w_{n_M})), \quad \theta_{n_R n_M} = \theta(q_{n_R}, w_{n_M}), \end{aligned}$$

假设 $q_{n_R}, w_{n_M} \in D$, 则分散式供应链均衡策略满足如下结论.

命题 3 D 情形下分散式供应链均衡订货和批发价决策满足如下情形.

$$(q^{D*}, w^{D*}) = \left\{ \begin{array}{ll} (q_1, w_1), & \text{其中 } A_{11} = 0, B_{11} = 0, \\ & \text{若 } q_1 < F^{-1}(\alpha_R), \theta_{11} < F^{-1}(\alpha_M), (\Pi_M^D)'_{w^D}(w_1, \check{q}_1(w_1)) < 0 \\ (q_2, w_1), & \text{其中 } A_{21} = 0, B_{21} = 0, \\ & \text{若 } q_2 \geq F^{-1}(\alpha_R), \theta_{21} < F^{-1}(\alpha_M), C_{21} < 0, (\Pi_M^D)'_{w^D}(w_1, \check{q}_2(w_1)) < 0 \\ (q_1, w_2), & \text{其中 } A_{12} = 0, B_{12} = 0, \\ & \text{若 } q_1 < F^{-1}(\alpha_R), \theta_{12} \geq F^{-1}(\alpha_M), (\Pi_M^D)'_{w^D}(w_2, \check{q}_1(w_2)) < 0 \\ (q_2, w_2), & \text{其中 } A_{22} = 0, B_{22} = 0, \\ & \text{若 } q_2 \geq F^{-1}(\alpha_R), \theta_{22} \geq F^{-1}(\alpha_M), C_{22} < 0, (\Pi_M^D)'_{w^D}(w_2, \check{q}_2(w_2)) < 0. \end{array} \right. \quad (10)$$

证明 当目标函数关于决策变量严格负定时, 函数存在可微的极大值点, 令 $A_3 = k^2 f(q^D) - t^2 f(\theta)$, 依据 $\Pi_{R|1}^D$ 关于 q^D 的一阶条件以及需求分布函数的 IGFR 性质可知

$$\frac{d^2 \Pi_{R|1}^D}{d(q^D)^2} = -\frac{\tau_R A_3}{k} = -\tau_R \bar{F}(q^D) \left(\frac{k f(q^D)}{\bar{F}(q^D)} - \frac{t^2 f(\theta)}{k \bar{F}(q^D)} \right) = -\tau_R \bar{F}(q^D) \left(\frac{k f(q^D)}{\bar{F}(q^D)} - \frac{t f(\theta)}{\bar{F}(\theta)} \right) < 0,$$

这说明 $\Pi_{R|1}^D$ 关于 q^D 严格可微凹, $\Pi_{R|2}^D$ 和 $\Pi_{M|n_M}^D$ 则需分别满足 $C_{2n_M} < 0$ 和 $(\Pi_M^D)'_{w^D}(w_{n_M}, \check{q}_{n_R}(w_{n_M})) < 0$ 才是关于决策量的可微凹函数, 此时通过逆向求解一阶条件方程即可得到均衡策略解满足式(10). 证毕.

从博弈理论表明命题 3 所述策略组合情形中, 均衡批发价和订货决策取决于主导方生产商最优

风险值大小。下面针对参数对决策及风险值影响展开进一步分析,由于 $\Pi_{i|2}^D$ 并非总是关于决策的凹函数(如 $\lambda_i = 1$ 时 $\Pi_{R|2}^D$ 关于 q^D 严格正定, $\Pi_{M|2}^D$ 关于 w^D 严格单调),以及各情形证明相似性,以下仅列出 $n_i = 1$ 时的证明。

结论 1 固定 w^D 时,由分析可知: (i) 各情形下订货决策满足 $q^{N*} \leq q^{S*} \leq q^{D*} \leq q^{D0}$. (ii) 随着 α_R 的增加, η 的降低, s 的增加, p 的增加, q^{D*} 增加, Π_R^{D*} 增加。

证明 (i) 相比其它情形,处于 N 情形的零售商无法以最优方式订货,边际利润大于 0,因此 q^{N*}, Π_R^{N*} 最低,比较 q^{D*}, q^{S*} 表达式可知,由于 D 情形下有限责任偿款降低了零售商成本,因此有 $q^{N*} \leq q^{S*} \leq q^{D*} \leq q^{D0}$ 成立。(ii) 令 $\theta_1 = \theta(q^{D*}, w^D)$, $A_{41} = A_3(q^{D*})$, $A_{42} = F(q^{D*}) - F(\theta_1)$, $A_{43} = q^{D*} - \theta_1$, $A_{44} = (p - w^D) - \tau_R(kF(q^{D*}) - tF(\theta_1))$, $A_{45} = \tau_R\left(\int_{\theta_1}^{q^{D*}} F(x)dx - A_{43}F(\theta_1)\right)$, $A_{46} = \tau_R\left(A_{43} - \int_{\theta_1}^{q^{D*}} F(x)dx\right) + \theta_1\tilde{F}(\theta_1)$, 易知 $A_{42} > 0$, $A_{43} > 0$,由命题 3 证明部分可知 $A_{41} > 0$,由

$$\frac{d\Pi_R^D}{dq^D} = \tau_R(k\tilde{F}(q^D) - t\tilde{F}(\theta)) = 0, \quad (11)$$

可知 $A_{44} = 0$,由积分中值定理可知 $A_{45} > 0$, $A_{46} > 0$. 综上,对 q^{D*} 及 Π_R^{D*} 分别关于参数求导并分析可知

$$\begin{aligned} \frac{dq^{D*}}{d\alpha_R} &= \frac{k(p - w^D)}{\lambda_R A_{41}} > 0, \quad \frac{dq^{D*}}{d\eta} = -\frac{tf(\theta_1)}{A_{41}} < 0, \quad \frac{dq^{D*}}{ds} = \frac{kA_{42} + tf(\theta_1)A_{43}}{A_{41}} > 0, \\ \frac{dq^{D*}}{dp} &= \frac{t(\tilde{F}(\theta_1) - \theta_1 f(\theta_1))}{A_{41}} > 0, \quad \frac{d\Pi_R^{D*}}{d\alpha_R} = A_{44} \frac{dq^{D*}}{d\alpha_R} + \frac{\tau_R k}{\alpha_R} \int_{\theta_1}^{q^{D*}} F(x)dx > 0, \\ \frac{d\Pi_R^{D*}}{d\eta} &= A_{44} \frac{dq^{D*}}{d\eta} - F(\theta_1) < 0, \quad \frac{d\Pi_R^{D*}}{ds} = A_{44} \frac{dq^{D*}}{ds} + A_{45} > 0, \quad \frac{d\Pi_R^{D*}}{dp} = A_{44} \frac{dq^{D*}}{dp} + A_{46} > 0. \end{aligned}$$

证毕.

结论 1 表明,零售商越惧怕风险其决策越保守,风险值也相应越低。而当考虑生产商批发价决策时,零售商因风险厌恶导致的订货减少对生产商不利,因此生产商将尽可能降低批发价来抑制零售商非理性行为,鼓励其订货以缓解利益遭受过多损失。但最终批发价和订货水平双重下降必然导致生产商风险值水平降低,但对于零售商来说,批发价的降低可能使得零售商从中获利。综合上述分析,有如下结论成立。

结论 2 博弈均衡状态下,存在参数组合使得零售商受益于其风险规避行为。

零售商风险态度对其均值条件风险值的影响如图 1 所示。

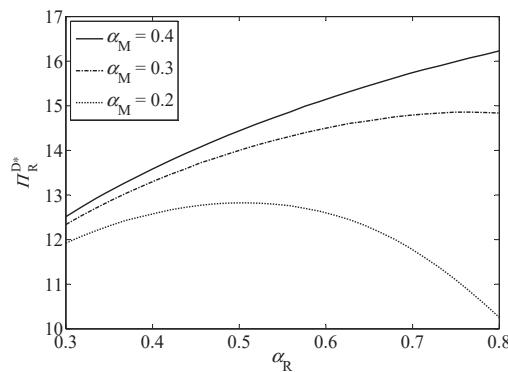


图 1 零售商风险态度对其均值条件风险值的影响

Fig. 1 The impact of retailer's risk attitude on his Mean-CVaR

($p = 8, c = 3, s = 2, Z \sim N(50, 20), \lambda_i = 0.8, \eta = 10$)

图 1 论证了结论 2 的有效性,结合图 1 和结论 3 可知,当生产商风险厌恶程度较高($\alpha_M = 0.2$)时,零售商选择适当风险规避(α_R 降低)引发的批发价(订货成本)下降带来的益处高于其订货降低导致的损害,使得其期望风险值增加。这说明零售商应视参数情形适当选择风险规避或追求,生产商则应当关注相关影响。

结论 3 随着 α_M 的增加, w^D 降低, q^{D*} 增加, Π_R^{D*} 增加,生产商风险追求对零售商有益但影响有限。

证明 由 $\int_0^\theta F(x)dx$ 关于 θ 递增且 θ 与 $w^D q^D$ 呈正比可知, $\int_0^\theta F(x)dx$ 关于 $w^D q^D$ 单调递增,又

由于 q^D 关于 w^D 单调递减, 且相关因素与 α_M 无直接关联, 不失一般性, 将这些单调关系拟合为线性, 令 $\int_0^q F(x)dx = A_{51}w^D q^D$, $q^D = A_{52} - A_{53}w^D$, $\tau_M k = A_{54}$, 拟合后生产商风险值变为

$$\Pi_M^D = (w^D - c)q^D - A_{54}A_{51}w^D q^D = (A_{51}A_{54}A_{53} - A_{53})(w^D)^2 + (A_{52} + cA_{53} - A_{51}A_{54}A_{52})w^D - cA_{52},$$

系数中仅 A_{54} 随 α_M 增加而降低, Π_M^D 为二次函数且对称轴 $b = -\frac{A_{52} + cA_{53} - A_{51}A_{54}A_{52}}{2(A_{51}A_{54}A_{53} - A_{53})}$ 随 α_M 增加而递减, 即 w^{D*} 降低, q^{D*} , Π_R^{D*} 随之增加, 由 $\lim_{\alpha_M \rightarrow +\infty} \pi_M^{D*} = (w^D - c)q^D$ 可知 α_M 对决策影响是有限的. 证毕.

通过上文分析不难发现, 供应链上下游企业适当风险追求可能使双方同时获益. 以上针对风险态度对决策和风险值影响进行了讨论, 下面进一步分析资金约束对各方影响. 定义 α_R -IGFR, 即需求分布函数满足

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{xf(x)}{\tilde{F}(x)} \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{xf(x)}{\bar{F}(x)} \frac{\bar{F}(x)}{\tilde{F}(x)} \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{xf(x)}{\bar{F}(x)} \right) \left(\frac{\bar{F}(x)}{\tilde{F}(x)} \right) + \left(\frac{xf(x)}{\bar{F}(x)} \right) \left(\frac{(\lambda_R - \alpha_R)f(x)}{\lambda_R \tilde{F}^2(x)} \right) > 0,$$

上式表明分布满足 IGFR 及 $\lambda_R > \alpha_R$ 是 α_R -IGFR 成立的一个必要条件, 进而分析可得下述结论.

结论 4 当需求分布函数满足 α_R -IGFR 时, (i) 随着 η 的降低, $w^{D*}, q^{D*}, \theta, \Pi_M^{D*}$ 增加, Π_R^{D*} 降低, 特别当 $\eta \rightarrow 0$ 且 $\tau_M = \tau_R$ 时, $w^{D*} \rightarrow p$, $q^{D*} \rightarrow q^{D0}$, $\Pi_M^{D*} \rightarrow \Pi^{D0}$, $\Pi_R^{D*} \rightarrow 0$.

(ii) 分别存在参数临界值使得 η 低于相应临界值时各满足 $w^{D*} > w^{S*}$, $q^{D*} > q^{S*}$, $\Pi_M^{D*} > \Pi_M^{S*}$, $\Pi_R^{D*} < \Pi_R^{S*}$. 当 $\eta \rightarrow (w^D - s)q^D$ 且 $\alpha_M \rightarrow +\infty$ 时, 有 $q^{D*} = q^{S*}$, $w^{D*} = w^{S*}$, $\Pi_i^{D*} = \Pi_i^{S*}$ 成立.

(iii) 用 \check{q} 表示 θ 取极值对应的订货量, 有 $q^{D0}f(q^{D0}) = \tilde{F}(q^{D0})$, $\check{q}f(\check{q}) = \tilde{F}(\check{q})$ 成立. 随着 w^D 的增加, q^{D*} 减小, 随着 q^D 的增加, θ 增加.

证明 (i) 由 $\frac{d\Pi_M^D}{dw^D} = \frac{dq^D}{dw^D} \left(\frac{\partial \Pi_M^D}{\partial q^D} + \frac{\partial \Pi_M^D}{\partial w^D} \frac{dw^D}{dq^D} \right) = \frac{dq^D}{dw^D} \frac{d\Pi_M^D}{dq^D} = 0$, 决策顺序可等价于先由零售商决策 $w^{D*}(q^D)$, 再由 $\Pi_M^D(q^D, w^{D*}(q^D))$ 决策产量 q^{D*} . 根据需求 α_R -IGFR 性质并结合 (iii) 可知

$$\frac{\theta f(\theta)}{\tilde{F}(\theta)} < \frac{q^D f(q^D)}{\tilde{F}(q^D)} < \frac{q^{D0} f(q^{D0})}{\tilde{F}(q^{D0})} = 1,$$

令 $\theta_2 = \theta(q^D, w^{D*})$, $t_1 = w^{D*} - s$, 由上述不等式可知

$$\frac{\partial w^{D*}}{\partial \eta} = -\frac{k t_1 f(\theta_2)}{k \tilde{F}(\theta_2) - t_1 q^D f(\theta_2)} < -\frac{k t_1 f(\theta_2)}{k \tilde{F}(q^D) - t_1 q^D f(q^D)} < 0,$$

可见当 $\eta \rightarrow 0$ 时, $w^{D*} \rightarrow p$, $\theta_2 \rightarrow q^D$, 由 $\Pi_M^D(q^D)$ 表达式可知其逐渐接近集中式利润函数, 因此 q^{D*} 增加. 特别当 $\tau_M = \tau_R$ 时, 有 $q^{D*} \rightarrow q^{D0}$, $\Pi_M^{D*} \rightarrow \Pi^{D0}$, $\Pi_R^{D*} \rightarrow 0$.

上述分析同时表征了(ii)成立性, 下面证明(iii), 对式(11)关于 w^D 进行隐函数求导分析可得

$$k\tilde{F}(\theta_1) - tq^{D*}f(\theta_1) = A_{41} \frac{dq^{D*}}{dw^D}, \quad (12)$$

当 $\eta \rightarrow 0$ 时, 式(12)右侧趋近于 0, 对该式左侧移项分析可知 $q^{D0}f(q^{D0}) = \tilde{F}(q^{D0})$. 对该式移项可知

$$\frac{dq^{D*}}{dw^D} = -\frac{k\tilde{F}(\theta_1) - tq^{D*}f(\theta_1)}{A_{41}} < 0,$$

上述结论说明了主从博弈均衡的存在性, 进一步对其他参数分析可知

$$\frac{d\theta}{dq^D} = \frac{1}{k} \left(t_1 + q^D \frac{dw^{D*}}{dq^D} \right) = \frac{k(q^D f(q^D) - \tilde{F}(q^D))}{t_1 q^D f(\theta) - k\tilde{F}(\theta)} \geq 0,$$

且上式等于 0 时 θ 取得极值, 此时 $\check{q}f(\check{q}) = \tilde{F}(\check{q})$, 结论得证. 证毕.

综合结论 1 和结论 4 对 η 的灵敏度分析可知, 零售商初始资金量越低, 其订货水平, 批发价和生产商风险值水平越高, 零售商风险值越低. 这源于资金越缺乏的零售商破产(违约)概率越高, 而破产后有限责任偿款可视为降低了零售商总“成本”, 这激励了其增加订货量, 进而生产商借机提高批发价. 但破产免责无法实质性改进零售商收益, 批发价的提升反而对零售商造成了不利影响. 最终当 η 趋近于 0 时, 批发价将无限接

近零售价 p , 均衡订货量和生产商风险值无限接近集中式订货和期望水平, 而过高的批发价致使零售商利润无限降低至 0. 可见对于零售商来说, 过多的依赖延期支付对其并非益事, 但对生产商来说, 提供延期能为其攫取更高利益, 对于供应链整体, 相比其它情形, 延期支付是有益的(能起到供应链协调作用).

2.3 情形 N 和情形 S

情形 N 和情形 S 下不存在延期付款, 此时零售商期望收益与经典报童模型类似, 即

$$E[\pi_R^l] = (p - w^l)q^l - k \int_0^{q^l} F(x)dx, \quad l = N, S, \quad (13)$$

$$E[\pi_M^l] = (w^l - c)q^l, \quad l = N, S. \quad (14)$$

与命题 2 类似推导可得到无延期支付时零售商 CVaR 满足下式, 即

$$C(\pi_R^l) = \begin{cases} (p - w^l)q^l - \frac{1}{\alpha_R}k \int_0^{q^l} F(x)dx, & \text{若 } q^l < F^{-1}(\alpha_R) \\ k \left(F^{-1}(\alpha_R) - \frac{1}{\alpha_R} \int_0^{F^{-1}(\alpha_R)} F(x)dx \right) - (w^l - s)q^l, & \text{若 } q^l \geq F^{-1}(\alpha_R). \end{cases} \quad (15)$$

Mean-CVaR 值 $\Pi_R^l = E[\pi_R^l] + C(\pi_R^l)$, 此时生产商无需承担任何风险, $\Pi_M^l = E[\pi_M^l]$, 下面对两种情形下的供应链决策情况进行简要分析.

N 情形下, 零售商资金缺乏但无法获得延期, 仅能使用初始资金 η 订货, 其订货量始终为 $q^{N*} = \frac{\eta}{w^N}$, 将其代入生产商风险值函数可知 $\Pi_M^N = (w^N - c)q^{N*} = (w^N - c)\frac{\eta}{w^N}$, 分析可知 Π_M^N 关于 w^N 严格单调增, 因此最优批发价决策 w^{N*} 仅能取在情形 N 有效区间的右侧端点.

S 情形下, 链内双方均能够取到利润极值对应决策, 经分析, 博弈均衡解存在且唯一. 运用逆向求解法依次计算一阶条件 $\Pi_R^S(q^S)$ 关于 q^S 及 $\Pi_M^S(w^S, q^{S*}(w^S))$ 关于 w^S 的一阶条件可知最优均衡决策满足下式.

$$(q^{S*}, w^{S*}) = \begin{cases} \left(F^{-1}\left(\frac{p - w^{S*}}{\tau_R k}\right), \quad c + \tau_R k q^{S*} f(q^{S*}) > c \right), & \text{若 } \lambda_R k > p - w^S \\ \left(F^{-1}\left(\frac{\delta_R k - w^{S*} + s}{\delta_R k}\right), \quad c + \delta_R k q^{S*} f(q^{S*}) > c \right), & \text{若 } \lambda_R k \leq p - w^S. \end{cases} \quad (16)$$

3 供应链协调机制设计

上文介绍了不同资金情形下的分散式供应链决策. 然而, 由于分散式供应链成员各自为政且互相博弈, 加剧了成员间双重边际效应, 导致供应链效率较低. 与之对应的集中式供应链决策主体一致, 效率较高. 但现实中企业相隔甚远且缺乏信任, 分散式成为广泛存在的一种管理模式. 协调理论表明, 可通过设计和签订合同以提升分散式供应链绩效并使其达到集中式决策水平. 有必要对本文提出的供应链类型设计合同以改善分散式供应链绩效. 由于协调基准是集中式供应链风险值, 需对集中式决策函数及解的形式进行说明.

3.1 集中式决策

供应链成员均具备风险偏好时, 集中式供应链决策目标应定义为系统整体的风险值帕累托最优^[14,15], 根据上文分析可将集中式供应链决策目标函数表示为 $\Pi_{n_R n_M}^D = \Pi_{R|n_R}^D + \Pi_{M|n_M}^D, n_i = 1, 2$. 分析集中式供应链最优决策, 有如下结论成立.

命题 4 若 $\Pi_{n_R n_M}^D$ 在区域 D 为关于 (w^D, q^D) 的可微凹函数, 则 D 情形下集中式供应链的最优订货决策为

$$q^{D0} = \begin{cases} F^{-1}((p - c)/(\tau_R k)), & \text{若 } \lambda_R k > p - c \\ F^{-1}((\delta_R k - c + s)/\delta_R k), & \text{若 } \lambda_R k \leq p - c. \end{cases} \quad (17)$$

证明 与风险中性下集中式供应链决策目标函数不同, $\Pi_{n_R n_M}^D$ 同时包含批发价 w^D 和订货量 q^D 决策, 需对两变量进行联立求解, 当利润函数为关于两决策量的联合凹函数(海塞矩阵负定), 通过求解 $\Pi_{n_R n_M}^D$ 关于 (w^D, q^D) 的一阶条件方程组即可得到集中式最优策略. 各情形下 $\Pi_{n_R n_M}^D$ 关于 w^D, q^D 的一阶条件分别为

$$\frac{\partial \Pi_{n_R n_M}^D}{\partial w^D} = \begin{cases} (\tau_R - \tau_M)q^D F(\theta) = 0, & \text{若 } n_R = 1, n_M = 1 \text{ 或 } n_R = 2, n_M = 1 \\ (\tau_R F(\theta) + \delta_M \bar{F}(\theta) - 1)q^D = 0, & \text{若 } n_R = 1, n_M = 2 \text{ 或 } n_R = 2, n_M = 2, \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \Pi_{n_R n_M}^D}{\partial q^D} = \begin{cases} p - c - \tau_R k F(q^D) + t(\tau_R - \tau_M)q^D F(\theta) = 0, & \text{若 } n_R = 1, n_M = 1 \\ p - c - \tau_R k F(q^D) + t(\tau_R F(\theta) + \delta_M \bar{F}(\theta) - 1)q^D = 0, & \text{若 } n_R = 1, n_M = 2 \\ \delta_R k \bar{F}(q^D) - c + s + t(\tau_R - \tau_M)q^D F(\theta) = 0, & \text{若 } n_R = 2, n_M = 1 \\ \delta_R k \bar{F}(q^D) - c + s + t(\tau_R F(\theta) + \delta_M \bar{F}(\theta) - 1)q^D = 0, & \text{若 } n_R = 2, n_M = 2, \end{cases} \quad (19)$$

由式(18), 式(19)可得

$$\begin{cases} p - c - \tau_R k F(q^D) = 0, & \text{若 } n_R = 1, n_M = 1 \text{ 或 } n_R = 1, n_M = 2 \\ \delta_R k \bar{F}(q^D) - c + s = 0, & \text{若 } n_R = 2, n_M = 1 \text{ 或 } n_R = 2, n_M = 2. \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)移项可知集中式供应链最优订货决策 q^{D0} 满足式(17). 证毕.

结论 5 (i) q^{D0} 与 α_M, η 无关, 且随 α_R 的增加而增加, Π^{D0} 随 α_i 的增加而增加. (ii) 当 $\tau_0 = \tau_R$ 时, Mean-CVaR 具备可加性(其中 τ_0 为供应链一体化控制时系统整体风险偏好因子).

证明 由命题 5 易知(i)成立, 用 Π_0 表示整条供应链仅由一家企业控制时的供应链整体风险值, 通过计算该风险值表达式并比较可知当 $\tau_0 = \tau_R$ 时有 $\Pi_0 = \Pi_R^D + \Pi_M^D$, 即本文中风险度量准则满足可加性. 证毕.

3.2 协调合同

根据供应链协调定义, 仅需令分散式供应链零售商边际风险值与集中式相等即可实现分散式供应链整体协调. 同时为保证供应链成员均接受该契约, 需满足协调后各企业风险值水平均高于未协调时. 以上标“^”表示协调后决策及风险值, \hat{T} 表示零售商支付给生产商的固定收益, 满足上述条件的协调合同如下.

定理 1 当协调价格 \hat{w}^D 属于区域 D 且满足式(21), 固定转移支付 \hat{T} 满足 $\hat{\Pi}_R^D = \Pi_R^D(\hat{w}^D) - \hat{T} \geq \Pi_R^{D*}$ 和 $\hat{\Pi}_M^D = \Pi_M^D(\hat{w}^D) + \hat{T} \geq \Pi_M^{D*}$, 二部定价合同 (\hat{w}^D, \hat{T}) 可实现风险偏好型延期支付分散式供应链有效协调(其中 $\hat{\theta} = \theta(\hat{w}^D, q^{D0}), \hat{t} = t(\hat{w}^D)$).

$$\begin{cases} k \tilde{F}(q^{D0}) - \hat{t} \tilde{F}(\hat{\theta}) = 0, & \text{若 } \lambda_R k > p - c \\ \delta_R k \bar{F}(q^{D0}) - \tau_R \hat{t} \tilde{F}(\hat{\theta}) = 0, & \text{若 } \lambda_R k \leq p - c. \end{cases} \quad (21)$$

证明 当 \hat{w}^D 满足 $\hat{w}^D \in \{w^D | q^{D*}(w^D) = q^{D0}\}$, 协调可实现供应链整体利润达到集中式, 进而通过固定转移 \hat{T} 实现供应链利润再分配, 需满足激励相容约束, 即实施协调后成员利润均不低于协调前. 证毕.

结论 6 \hat{w}^D 可能存在多个且满足 $\hat{w}^D \in [c, p]$, 当分布函数服从 α_R -IGFR, \hat{w}^D 随 α_R 及 η 增加而减小.

证明 由式(21), 因 $F(\hat{\theta})$ 关于 \hat{w}^D, q^{D0} 单调增, 若将该关系拟合为线性可知, 等式变为关于 \hat{w}^D 的二次方程, 可能存在两个对应根. 令 $A_{61} = k \tilde{F}(\hat{\theta}) - \hat{t} q^{D0} f(\hat{\theta})$, 由结论 4 可知 $A_{61} > 0$, 进而可知

$$c \leq s + \frac{c - s}{\tau_R \tilde{F}(\hat{\theta})} = \hat{w}^D = s + \frac{k \tilde{F}(q^{D0})}{\tilde{F}(\hat{\theta})} \leq p, \frac{d \hat{w}^D}{d \eta} = -\frac{k \hat{t} f(\hat{\theta})}{A_{61}} < 0, \frac{d \hat{w}^D}{d \alpha_R} = -\frac{k(p - \hat{w}^D)}{\lambda_R A_{61}} < 0. \quad \text{证毕.}$$

上述结论表明协调价格制定仅与零售商风险偏好程度有关, 且生产商执行合约时应当为资金较少及风险规避的零售商调高协调价格. 除上述二部定价合同, 还可通过以下收益共享合同实现供应链协调, 令 $\hat{\chi}$ 表示零售商共享给生产商的收益比例, 该收益共享合同满足如下结论.

定理 2 当协调价格 \hat{w}^D 属于区域 D 且满足式(22), 且实现收益共享后成员收益满足 $\hat{\Pi}_i^D > \Pi_i^{D*}$, 收益共享合同 $(\hat{\chi}, \hat{w}^D)$ 可实现风险偏好型延期支付分散式供应链的有效协调.

$$\begin{cases} (1 - \hat{\chi})k\tilde{F}(q^{D0}) - (\hat{w}^D - (1 - \hat{\chi})s)\tilde{F}(\check{\theta}) = 0, & \text{若 } \lambda_R k > p - c \\ \delta_R(1 - \hat{\chi})k\bar{F}(q^{D0}) - \tau_R(\hat{w}^D - (1 - \hat{\chi})s)\tilde{F}(\check{\theta}) = 0, & \text{若 } \lambda_R k \leq p - c. \end{cases} \quad (22)$$

其中 $\check{\theta} = \frac{(\hat{w}^D q^{D0} - \eta) - (1 - \hat{\chi})s q^{D0}}{(1 - \hat{\chi})k}$.

证明 令 $\theta_3 = \check{\theta}(w^D, q^D)$, $A_{62} = \delta_R q^D + (1 - \delta_R)F^{-1}(\alpha_R) - \theta_3$, 收益共享后零售商期望风险值变为

$$\Pi_R^D = \begin{cases} -\eta + (1 - \hat{\chi})k(q^D - \theta_3) - \tau_R(1 - \hat{\chi})k \int_{\theta_3}^{q^D} F(x)dx, & \text{若 } q^D < F^{-1}(\alpha_R) \\ -\eta + (1 - \hat{\chi})k \left(A_{62} - \left(\delta_R \int_{\theta_3}^{q^D} F(x)dx + \frac{1 - \delta_R}{\alpha_R} \int_{\theta_3}^{F^{-1}(\alpha_R)} F(x)dx \right) \right), & \text{若 } q^D \geq F^{-1}(\alpha_R). \end{cases} \quad (23)$$

满足式(22)的协调价格可保证该类型供应链利润达集中式水平, $\hat{\Pi}_i^D \geq \Pi_i^{D*}$ 可保证协调的激励相容. 证毕.

相比二部定价合同, 收益共享合同仅需控制收益共享比例参数 $\hat{\chi}^D$ 即可实现协调, 但不足之处在于协调所需批发价可能小于生产成本. 经分析, 情形 N 和情形 S 下集中式订货决策 q^{10} 与 q^{D0} 是一致的, 可类似定理 1 和定理 2 设计相应的二部定价或收益共享合同以实现相应资金情形的供应链协调. 二部定价和收益共享合同在现实中均具有广泛的应用, 这保证了协调合同易于实施, 在实际应用上可将该合同嵌入到延期支付融资合约中结合使用以提升企业收益, 但需确保风险偏好等参数信息实性及双方信息对称性. 上文针对风险偏好型供应链协调问题进行了理论分析, 下面进一步通过数值分析对本文结论进行验证和补充.

4 数值分析与理论拓展

4.1 数值分析

选取与图 1 所示相同的模型参数值, 首先通过例 1 对三种资金决策情形进行直观说明, 分析和补充风险偏好, 资金约束等对均衡策略、风险值的影响, 并通过例 2 验证协调合同.

例 1 固定其它参数, 分别对风险偏好因子 α_i 和初始资金 η 进行灵敏度分析 (图 2), 并对其它参数影响进行拓展分析 (表 1), 可得以下结论. 1) 风险厌恶企业决策更加保守: 随着零售商风险厌恶程度的增加 (α_R 降低), $w^{j*}, q^{j*}, \Pi_M^{j*}, \Pi_R^{j*}$ 均降低. 这体现了厌恶风险零售商制定决策的保守性, 为降低影响, 生产商降低批发价鼓励其订货. 最终订货和批发价双重降低导致各方风险值下降; 同样, 随着生产商风险厌恶程度增加 (α_M 降低), w^{D*} 增加, $q^{D*}, \Pi_M^{D*}, \Pi_R^{D*}$ 均降低. 这源于惧怕风险的生产商提高批发价抑制零售商过量订货以规避风险. 受此影响, 零售商订货降低, 最终导致供应链成员均遭受损失. 该结果同时论证了结论 1 和结论 3 的正确性.

2) 延期支付能实现双赢: 延期支付下, 随着零售商初始资金量降低, 其破产风险增加, 破产免责也有效激励了零售商提高订货, 生产商提升批发价以补偿风险共担损失. 最终, 受益于订货收益的增加, 生产商利润增加并逐步接近集中式水平. 而对于零售商, 面临资金约束时, 延期支付有益 ($D > N$), 但过分依赖延期支付则会产生不利影响, 这是由于破产免责带来的“收益”无法实质性的为零售商带来利润, 而过高的批发价反而导致其成本过高, 因此, 资金量处于 N 情形的零售商应适当降低资金使用量迫使生产商为其提供延期, 但不应过度. 同时, 供应链整体效率随延期程度增加而增加, 可见延期支付中的风险共担可起到供应链协调作用. 该例同时也对文中的结论 1 和结论 4 的有效性进行了论证.

3) 供应链成员应合理选择合作者: 由图 2 中的 D, N, S 三种资金情形可知, 生产商可依据其风险偏好程度及零售商初始资金大小选择有利于自己的合作零售商. 比如, 当风险追求度较高时, 选择次序依次为 $D > N > S$ 所对应资金量零售商, 而随风险追求程度降低, 选择次序依次变为 $N > D > S$ 和 $N > S > D$; 对

于零售商,应改变自有资金量以尽可能使其处于有利决策区间中,比如处于D情形时应尽量提供更多初始资金并与风险追求型生产商合作,可以发现, α_M 的增加可使零售商的选择(使用资金量大小)由 $S > D$ 变为 $D > S$. 综上可知,存在 α_M 区间使得供应链双方均选择 $D(S)$ 而非 $S(D)$,但值得注意的是, α_M 增加带来的影响是有限的(结论3),观察 α_M 对 $w^{D*}, q^{D*}, \Pi_M^{D*}, \Pi_R^{D*}$ 的影响变化可知,决策和风险值变化最终趋于平缓. 由图中亦可知,风险态度改变也将影响各情形临界点的变化.

4) 其它参数的影响分析: 进一步对其他参数(p, c, s)影响展开分析,表1阐述了当参数增加时均衡决策和风险值的改变趋势,可结合该灵敏度分析通过移动图2中线段以表征参数变化时均衡的最终状态.

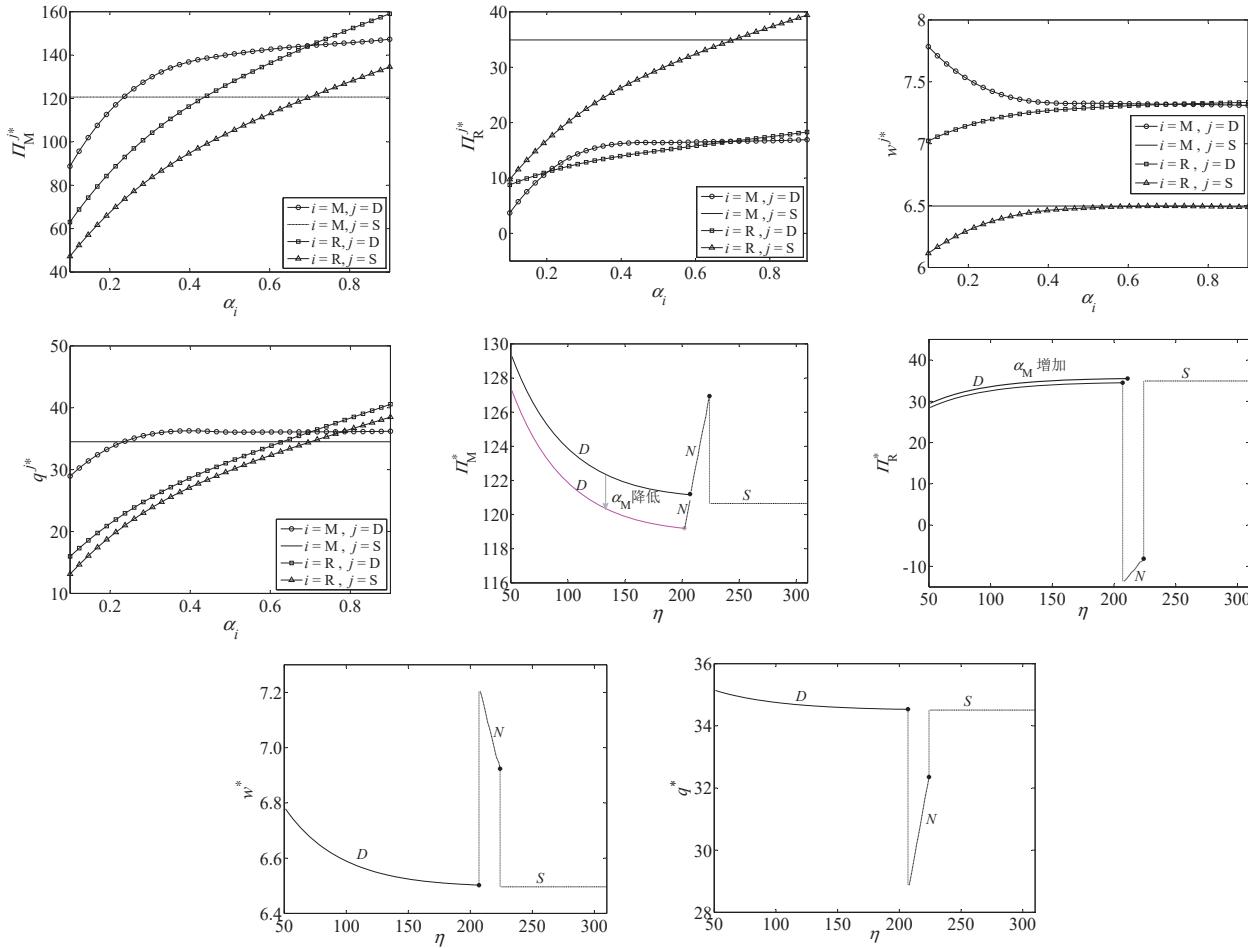


图2 风险态度及零售商初始资金量对供应链决策和均值条件风险值影响

Fig. 2 The impacts of changing α_i and η on SC members' decisions and Mean-CVaRs

表1 参数(p, c, s)增加对供应链决策和均值条件风险值的影响

Table 1 The impacts of increasing (p, c, s) on SC members' decisions and Mean-CVaRs

	w^{j*}	q^{j*}	Π_M^{j*}	Π_R^{j*}
D	(↗, ↗, ↘)	(↗, ↘, ↗)	(↗, ↘, ↗)	(↗, ↘, ↗)
N	(↗, →, ↘)	(↖, →, ↘)	(↗, ↘, ↗)	(↖, →, ↘)
S	(↗, ↗, ↘)	(↗, ↘, ↗)	(↗, ↘, ↗)	(↗, ↘, ↗)

下面,通过例2对本文协调合同的有效性及协调价格性质进行分析和论证.

例2 固定 $\alpha_i = 0.7$, 取固定转移支付 $\hat{T} = 170$ 并通过式(21)计算可知满足 $c < \hat{w}^D < p$ 条件的协调价格仅有 $\hat{w}^D = 3.02$, 协调后零售商订货量及成员风险值 $(\hat{q}^D, \hat{\Pi}_M^D, \hat{\Pi}_R^D) = (62.2, 171.32, 34.14) > (36.1, 144.4, 16.6) = (q^{D*}, \Pi_M^{D*}, \Pi_R^{D*})$, 上述计算结果表明协调后企业决策和风险值水平相比未执行协调合

同时均得到显著提升, 同时供应链整体风险值达到集中式水平, 说明二部定价合同可实现风险偏好延期支付供应链完美协调。降低 $\alpha_R = 0.6$ 时, \hat{w}^D 增加为 3.03, 增加 $\eta = 30$ 时, \hat{w}^D 降低为 3.01, 且随着 η 的增加 \hat{w}^D 逐渐趋近于 3, 上述分析验证了结论 6 的合理性。取定理 2 中收益共享比例 $\hat{\chi} = 0.8$, 经计算, $\hat{w}^D = 0.6$, 协调后供应链决策及风险值 $(\hat{q}^D, \hat{\Pi}_M^D, \hat{\Pi}_R^D) = (64.09, 162.95, 40.62) > (36.1, 144.4, 16.6) = (q^{D*}, \Pi_M^{D*}, \Pi_R^{D*})$, 供应链总风险值达到集中式水平, 收益共享合同同样可实现该类型供应链协调。

4.2 缺货惩罚影响分析

存在资金约束零售商将更加关注市场缺货造成的机会损失, 这也是零售商积极寻求资金支持的原因。考虑缺货损失影响能更加真实的反应零售商决策, 有必要针对缺货惩罚影响采取进一步补充分析。假设零售商业单位缺货损失感知为 g , 令 $\bar{\alpha}_R = 1 - \alpha_R$, 有如下结论成立。

命题 5 存在以下形式的最优分位数 v_R^* , 使得 $C(\pi_R^D) = u_R(q^D, v_R^*)$ 。

$$v_R^* = \begin{cases} h_3 + gq^D - gF^{-1}(\bar{\alpha}_R), & \text{若 } q^D < A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R) \\ \hat{v}_R, & \text{若 } q^D \geq A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R), \end{cases}$$

其中 $h_3 = (p - w^D)q^D > h_1 = -\eta > h_2 = -(w^D - s)q^D, A_7 = g/(k + g)$, 且 \hat{v}_R 满足

$$\frac{1}{\alpha_R} \left(1 + F((\hat{v}_R - h_2)/k) - F(h_3 + gq^D - (\hat{v}_R)/g) \right) = 1.$$

$$\begin{aligned} \text{证明 } u_R(q^D, v_R) = & v_R - \frac{1}{\alpha_R} \left(\int_0^\theta (v_R - h_1)^+ f(x) dx + \int_\theta^{q^D} ((v_R - h_2) - kx)^+ f(x) dx + \right. \\ & \left. \int_{q^D}^{+\infty} (v_R - h_3 + g(x - q^D))^+ f(x) dx \right), \end{aligned}$$

与命题 2 中的证明类似, 可按 $v_R < h_2, h_2 \leq v_R \leq h_1, h_1 \leq v_R \leq h_3, v_R > h_3$ 将 u_R 分为四种情形, 由

$$0 \geq \frac{\partial^2 u_R(q^D, v_R)}{\partial v_R^2} = \begin{cases} -\frac{1}{\alpha_R g} f((h_3 + gq^D - v_R)/g), & \text{若 } v_R < h_2 \\ -\frac{1}{\alpha_R g} f((v - h_2)/k) - f((h_3 + gq^D - v_R)/g), & \text{若 } h_2 \leq v_R \leq h_3 \\ 0, & \text{其它,} \end{cases}$$

可知 $u_R(q^D, v_R)$ 是关于 v_R 的连续可微凹函数, 存在驻点 $v_R^*(q^D)$, 下面对极值进行分析, 对 $u_R(q^D, v_R)$ 关于 v_R 求一阶条件可知

$$0 = \frac{\partial u_R(q^D, v_R)}{\partial v_R} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\alpha_R} \left(1 - F\left(\frac{h_3 + gq^D - v_R}{g}\right) \right), & \text{若 } v_R < h_2 \\ 1 - \frac{1}{\alpha_R} \left(1 - F(\theta) + F\left(\frac{v_R - h_2}{k}\right) - F\left(\frac{h_3 + gq^D - v_R}{g}\right) \right), & \text{若 } h_2 \leq v_R \leq h_1 \\ 1 - \frac{1}{\alpha_R} \left(1 + F\left(\frac{v_R - h_2}{k}\right) - F\left(\frac{h_3 + gq^D - v_R}{g}\right) \right), & \text{若 } h_1 \leq v_R \leq h_3 \\ 1 - 1/\alpha_R, & \text{若 } v_R > h_3, \end{cases}$$

求解上述一阶条件并分析可知

$$v_R^* = \begin{cases} h_3 + gq^D - gF^{-1}(\bar{\alpha}_R), & \text{若 } q^D < A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R), v_R < h_2 \\ \bar{v}_R, & \text{若 } q^D \geq A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R), h_2 \leq v_R < h_1 \\ \hat{v}_R, & \text{若 } q^D \geq A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R), h_1 \leq v_R < h_3. \end{cases}$$

令 $\bar{v}_R = h_2 + kH < h_1$, 移项可知 $H < \theta$, 因此 $(\bar{v}_R - h_2)/k = H < \theta$, 这说明 u_R 中的情形 2 退化为

情形1, 即 v_R^* 中仅有情形1和情形3是存在的.

证毕.

用 r 表示需求上限, 据上述分析, 当 $q^D < A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R)$ 时,

$$C(\pi_R^D) = h_3 + gq^D - gF^{-1}(\bar{\alpha}_R) - \frac{1}{\alpha_R} \int_{F^{-1}(\bar{\alpha}_R)}^r g(x - F^{-1}(\bar{\alpha}_R)) f(x) dx, \quad (24)$$

当 $q^D \geq A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R)$ 时,

$$\begin{aligned} C(\pi_R^D) &= \hat{v}_R - \frac{1}{\alpha_R} \left(\int_0^\theta (\hat{v}_R - h_1) f(x) dx + \int_\theta^{\frac{\hat{v}_R - h_2}{k}} (\hat{v}_R - h_2 - kx) f(x) dx + \right. \\ &\quad \left. \int_{\frac{h_3 + gq^D - \hat{v}_R}{g}}^r (\hat{v}_R - h_3 + g(x - q^D)) f(x) dx \right) \\ &= \hat{v}_R - \frac{1}{\alpha_R} \left(k \int_\theta^{\frac{\hat{v}_R - h_2}{k}} F(x) dx + rg - h_3 - gq^D - g \int_{\frac{h_3 + gq^D - \hat{v}_R}{g}}^r F(x) dx \right). \end{aligned} \quad (25)$$

考虑缺货惩罚的零售商期望收益函数为

$$E[\pi_R^D] = -\eta + k \int_\theta^{q^D} \bar{F}(x) dx - g \left(r - q + \int_{q^D}^r F(x) dx \right), \quad (26)$$

此时 $E[\pi_M^D]$ 和 $C(\pi_M^D)$ 的表达式与式(4)和式(7)是相同的, 进一步进行与 2.2 节类似均衡分析可知延期支付下考虑缺货损失时零售商最优订货决策满足如下命题和结论.

命题 7 考虑缺货损失时 Mean-CVaR 准则下延期支付供应链零售商最优订货决策

$$q^{D*} = \begin{cases} \lambda_R U + (1 - \lambda_R)(p - w^D + g), & \text{若 } q^D < A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R), v_R < h_2 \\ \lambda_R U + (1 - \lambda_R)V // \alpha_R, & \text{若 } q^D \geq A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R), h_2 \leq v_R < h_3. \end{cases} \quad (27)$$

其中 $U = k\bar{F}(q^{D*}) + g(1 + F(q^{D*})) - (w^D - s)\bar{F}(\theta_1)$,

$$V = (w^D - s) \left(F\left(\frac{\hat{v}_R - h_2}{k}\right) - F(\theta_1) \right) + (p - w^D + g) \left(F\left(\frac{h_3 - \hat{v}_R g q^{D*}}{g}\right) - 1 \right),$$

$$\hat{v}_R = h_2 + kF^{-1}\left(\frac{(w^D - s)F(\theta_1) + \alpha_R(p - w^D + g)}{k + g}\right).$$

结论 7 $\lambda_R = 1$ 时, Π_R^D 退化为 $C(\pi_R^D)$, 此时只有 $q^D \geq A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R)$ 时 Π_R^D 才是关于 q^D 的凹函数.

证明 由式(24)可知当 $q^D < A_7 F^{-1}(\bar{\alpha}_R)$ 时, $C(\pi_R^D)$ 关于 q^D 的一阶条件等于 $p - w^D + g > 0$. 证毕.

除此之外, 考虑缺货惩罚时的 $q^{l*}, w^{j*}, q^{j0}, w^{j0}$ 决策及供应链协调合同设计与第 2, 3 节是类似的, 不再赘述, 通过以下算例可直观的理解该情形下 g 和 α_i 对决策及风险值影响.

例 3 令需求分布 $Z \sim U(0, 100)$, 对 g 和 α_i 进行灵敏度分析(图 3)可知缺货损失感知程度越高, 零售商订货越积极, 生产商将借机提升批发价, 最终导致生产商风险值增加, 零售商风险值下降; 风险规避决策者制定决策偏于保守(高批发价, 低订货量), 导致决策者风险值水平明显低于风险追求时.

5 结束语

本文主要探究了决策者风险态度及资金约束对供应链均衡、收益和协调的影响, 运用 Mean-CVaR 准则刻画上下游企业风险偏好程度, 对零售商三种资金情形进行了讨论. 研究表明: 1) 生产商的风险规避行为不利于供应链双方, 而零售商可能因风险规避而受益. 2) 延期支付融资能实现双赢, 深入开展对生产商有益, 但不利于零售商, 因此零售商不应过度依赖融资, 应提供更多自有资金. 3) 企业应根据风险偏好和资金大小等参数合理制定运营策略, 比如何时参与融资等, 应关注供应链协调以提升运作效率, 延期支付融资本身具备一定协调作用, 而二部定价和收益共享合同可实现不同资金情形和风险偏好供应链有效协调. 本文研究对企业合理开展延期支付融资实践具有理论指导意义, 但结论是基于零售商完全守信, 无资金时间价

值,信息完全对称,无市场竞争等假设下得出的,考虑相关因素的影响将是未来进一步研究的方向。

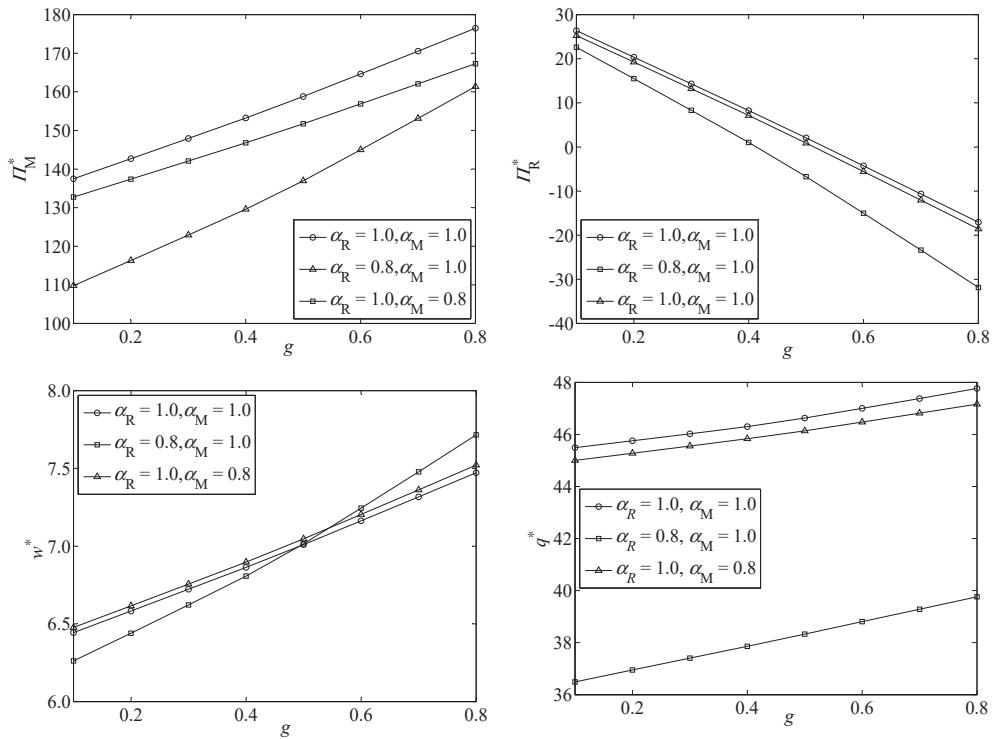


图3 缺货惩罚对决策和均值条件风险值影响

Fig. 3 Effect of shortage penalty on SC members' decisions and Mean-CVaRs

参考文献:

- [1] 国家统计局. 2015年全国规模以上工业企业利润总额比上年下降2.3%. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201601/t2016_0127_1310925.html, 2016-01-27.
- [2] Luo J W, Zhang Q H. Trade credit: A new mechanism to coordinate supply chain. *Operations Research Letters*, 2012, 40(5): 278–384.
- [3] 陈祥锋. 资金约束供应链中贸易信用合同的决策与价值. *管理科学学报*, 2013, 16(12): 13–21.
Chen X F. The value of trade credit contract in capital-constrained supply chains. *Journal of Management Sciences in China*, 2013, 16(12): 13–21. (in Chinese)
- [4] Chen X F. A model of trade credit in a capital-constrained distribution channel. *International Journal of Production Economics*, 2015, 159(1): 347–357.
- [5] 占济舟, 张福利, 赵佳宝. 供应链应收账款融资和商业信用联合决策研究. *系统工程学报*, 2014, 29(3): 384–394.
Zhan J Z, Zhang F L, Zhao J B. Research on decision-making with supply chain accounts receivable financing combined trade credit. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 29(3): 384–394. (in Chinese)
- [6] Gupta D, Wang L. A stochastic inventory model with trade credit. *Manufacturing Service & Operations Management*, 2009, 11(1): 4–18.
- [7] Chen S C, Teng J T. Inventory and credit decisions for time-varying deteriorating items with up-stream and down-stream trade credit financing by discounted cash flow analysis. *European Journal of Operational Research*, 2015, 243(2): 566–575.
- [8] Li Y J, Zhen X P, Cai X Q. Trade credit insurance, capital constraint, and the behavior of manufacturers and banks. *Annals of Operations Research*, 2016, 240(2): 1–20.
- [9] 张义刚, 唐小我. 延期支付下短生命周期产品批发价契约研究. *中国管理科学*, 2011, 19(3): 63–70.
Zhang Y G, Tang X W. Study on wholesale price contract of short-life-cycle product with permitting delay in payments. *Chinese Journal of Management Science*, 2011, 19(3): 63–70. (in Chinese)
- [10] Zhang Q H, Dong M, Luo J W, et al. Supply chain coordination with trade credit and quantity discount incorporating default risk. *International Journal of Production Economics*, 2014, 153(4): 352–360.

- [11] 但斌, 伏红勇, 徐广业. 风险厌恶下天气影响产出的农产品供应链协调. 系统工程学报, 2014, 29(3): 362–371.
Dan B, Fu H Y, Xu G Y. Coordination of agri-food supply chain with weather-related yield under risk-averse profucer. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(3): 362–371. (in Chinese)
- [12] Yang L, Xu M H, Yu G, et al. Supply chain coordination with CVaR riterion. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2009, 26(1): 135–160.
- [13] 罗春林, 田歆. 基于收益共享的风险厌恶供应链协调研究. 系统工程学报, 2015, 30(2): 210–218.
Luo C L, Tian X. Risk averse supply chain coordination with revenue-sharing contract. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(2): 210–218. (in Chinese)
- [14] Gan X, Sethi S P, Yan H. Coordination of a supply chain with risk-averse agents. Production and Operations Management, 2004, 13(2): 135–149.
- [15] Chen X, Shum S, Simchi D. Stable and coordinating contracts for a supply chain with multiple risk-averse suppliers. Production and Operations Management, 2014, 23(3): 379–392.
- [16] 闻卉, 曹晓刚, 黎继子. 基于 CVaR 的供应链回购策略优化与协调研究. 系统工程学报, 2013, 28(2): 211–217.
Wen H, Cao X G, Li J Z. Research on buy-back policy optimization and coordination of closed-loop supply chain based on CVaR. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(2): 211–217. (in Chinese)
- [17] 许明辉, 于刚, 张汉勤. 带有缺货惩罚的报童问题模型中的 CVaR 研究. 系统工程理论与实践, 2006, 26(10): 1–8.
Xu M H, Yu G, Zhang H Q. CVaR in a newsvendor model with lost sale penalty cost. Systems Engineering: Theory & Practice, 2006, 26(10): 1–8. (in Chinese)
- [18] Rockafellar R T, Urtasev S. Conditional value at risk for general loss distribution. Journal of Banking & Finance, 2002, 26(7): 1443–1471.
- [19] Alexander G J, Baptista A M. A comparison of VaR and CVaR constraints on portfolio selection with the mean-variance model. Management Science, 2004, 50(9): 1261–1273.
- [20] Jammerlegg W, Kischka P. Risk-averse and risk-taking newsvendors: A conditional expected value approach. Review of Managerial Science, 2007, 1(1): 93–110.
- [21] Xu M H, Li J B. Optimal decisions when balancing expected profit and conditional value-at-risk in newsvendor models. Journal of Systems Science & Complexity, 2010, 23(6): 1054–1070.
- [22] Wu M, Zhu S X, Teunter R H. The risk-averse newsvendor problem with random capacity. European Journal of Operational Research, 2013, 231(2): 328–336.
- [23] Banciu M, Mirchandani P. New results concerning probability distributions with increasing generalized failure rates. Operations Research, 2013, 61(4): 925–931.

作者简介:

李 荣(1977—), 女, 新加坡人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向: 运营管理, Email: rli@nankai.edu.cn;
刘 露(1990—), 男, 山东沂水人, 博士生, 研究方向: 运营与金融结合管理, Email: LiuLu_77@126.com.