

需求不确定性对混合条件风险价值约束供应链系统的影响

禹海波, 王莹莉, 董承华

(北京工业大学 经济与管理学院, 北京 100124)

摘要: 运用随机占优研究风险偏好和需求不确定性对混合条件风险价值约束供应链系统的影响. 证明在批发价和收益共享契约下零售商的最优订货量和利润随风险偏好系数的增加而减小; 只有在零售商为风险追求型时, 批发价契约才能实现供应链协调; 无论零售商的风险偏好如何, 收益共享契约都能实现供应链协调. 在收益共享契约下, 随机大需求将导致零售商获得较高的最优利润; 当零售商为风险中性或风险厌恶时, 其最优利润随需求可变性的增加而减少.

关键词: 混合 CVaR; 最优利润; 供应链协调; 可变性; 随机占优

中图分类号: C934

文献标志码: A

Impact of demand uncertainty in supply chain systems with mixture conditional value-at-risk criterion

YU Hai-bo, WANG Ying-li, DONG Cheng-hua

(School of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China. Correspondent: WANG Ying-li, E-mail: 474570979@qq.com)

Abstract: Impacts of risk preference and demand uncertainty on the optimal order quantity and profit in supply chain system with mixture conditional value-at-risk constrain are studied by using stochastic dominance. It is proved that the optimal order quantity and profit of the retailer will decrease while risk preference coefficient increases under the wholesale price contract and revenue sharing contract. The wholesale price contract can coordinate the supply chain system only when the retailer is risk-taking. The supply chain system can also be coordinated by the revenue sharing contract for any risk preference of the retailer. Under the revenue sharing contract, stochastic larger demand leads to higher optimal profit of the retailer; more variable demand leads to less profit of the retailer when risk preference coefficient is larger than or equal to one.

Key words: mixture conditional value-at-risk; optimal profit; supply chain coordination; variability; stochastic dominance

0 引言

目前, 基于风险偏好的研究在供应链所属的运作管理领域受到越来越多的关注, 研究工具主要有损失规避、最大化 CVaR 准则、混合 CVaR 准则和效用函数准则等. Kahneman 等^[1]最早提出了分段线性损失规避效用函数, 其直观解释是决策者对损失比对收益更加敏感. 近年来, 越来越多的学者将其应用于报童模型和供应链协调中以刻画决策者风险规避的特性^[2-10]. 21 世纪初, 人们提出了用最小化 CVaR 和最大化 CVaR 准则刻画决策者风险厌恶的特性. 许明辉等^[11]研究了带有缺货惩罚最大化 CVaR 报童问题. Chen 等^[12]研究了最大化 CVaR 准则下需求依赖价格的报童模型. Yang 等^[13]研究了由风险中性供应商与

最大化 CVaR 约束零售商组成的供应链模型, 证明了收益共享契约、回购契约和数量折扣契约都能使供应链协调. Ma 等^[14]研究了供应商和零售商均采用最大化 CVaR 准则的供应链模型.

在最小化 CVaR 和最大化 CVaR 准则的基础上, Gotoh 等^[15]和 Jammernegg 等^[16]提出了混合 CVaR 的概念, 它由最大化 CVaR 和最小化 CVaR 通过加权平均方式得到, 包括风险规避、风险中性和风险追求 3 种情形. 同时, 他们研究了风险偏好对混合 CVaR 约束库存系统最优订货量的影响. 关于效用准则下库存或供应链优化问题可参见文献 [17-19].

上述文献都是从库存与供应链优化角度进行分析, 没有考虑需求不确定性对系统的影响. 可变序

收稿日期: 2013-09-06; 修回日期: 2014-05-26.

作者简介: 禹海波(1965—), 男, 副研究员, 博士, 从事随机库存与供应链管理、风险管理等研究; 王莹莉(1987—), 女, 硕士生, 从事随机库存与供应链管理的研究.

是研究此类问题的有用工具. 常见的可变序有: 二阶随机占优(递增凹序)、递增凸序、凸序、割准则序等. Whitt^[20]首次用两个随机变量密度函数之差的符号变换次数定义多可变序, 该序蕴含割准则序和二阶随机占优. 关于随机占优较全面的研究参见文献 [21] 和 [22]. 需求不确定性对库存系统影响方面具有代表性的研究包括: Song^[23-24], Song 等^[25], Ridder 等^[26], Gerchak 等^[27]. Xu 等^[28]研究了需求依赖于价格的报童模型; 禹海波^[29]研究了需求不确定性对最大化 CVaR 约束的库存系统的影响. 关于随机占优理论及其在供应链系统中应用的最新研究参见文献 [30].

本文推广 Gotoh 等^[15]及 Jammernegg 等^[16]的库存模型, 进一步分析供应链协调和需求不确定性对系统的影响问题; 推广禹海波^[29]的最大化 CVaR 约束库存模型, 研究混合 CVaR 供应链模型; 推广 Yang 等^[13]的模型, 研究需求不确定性对混合 CVaR 约束供应链系统的影响. 本文运用应用概率中的随机占优研究由风险中性供应商和混合 CVaR (mixture conditional value-at-risk) 约束零售商构成的供应链模型, 分析在批发价契约和收益共享契约下供应链的协调问题以及零售商的风险偏好和需求不确定性对供应链系统的影响. 此类研究对企业在面对风险偏好和需求不确定时进行库存决策有较大的启示和帮助. 本文主要创新之处包括: 1) 引入刻画零售商风险态度的“风险偏好系数”. 当风险偏好系数大于 1 时, 混合 CVaR 与前景理论中的损失规避效用函数具有共同的特征, 它们均能刻画零售商对损失的敏感性高于对收益的敏感性; 当风险偏好系数小于 1 时, 对应于风险追求的情形. 2) 得到在批发价契约和收益共享契约下零售商的最优订货量和利润关于风险偏好系数的单调性(性质 1 和性质 2). 3) 证明当风险偏好系数小于 1 时, 批发价契约能够实现供应链协调(定理 1); 无论风险偏好系数大于等于 1 或小于 1, 收益共享契约都能实现供应链协调(定理 2). 4) 证明在收益共享契约下, 随机大需求导致较高的零售商最优利润; 当风险偏好系数大于或等于 1 时, 零售商最优利润随需求可变性的增加而减少(推论 1).

1 记号说明

文中引入以下记号来简化表述.

1) $\Pi^c(y, X_i)$ 、 $\pi_i^c(y)$ 、 y_i^c 和 $\pi_i^c(y_i^c)$ 分别表示供应链集中系统 i 的随机利润、期望利润、最优订购量和最优利润; $\Pi^s(y, X_i)$ 和 $\pi_i^s(y)$ 分别表示系统 i 中供应商的随机利润和期望利润; $\Pi^r(y, X_i)$ 和 $\pi_i^r(y)$ 分别表示系统 i 中零售商的随机利润和期望利润; \hat{y}_i^r 和 $\hat{\pi}_i^r(\hat{y}_i^r)$ 分别表示批发价契约下混合 CVaR 准则约束零售商的最优订货量和最优利润; y_i^r 和 $\pi_i^r(y_i^r)$ 分别表示

收益共享契约下混合 CVaR 准则约束零售商的最优订货量和最优利润.

2) X_i 的广义 TTT (total time on test) 变换定义为

$$\tilde{T}_i(\gamma) = \int_{\underline{\ell}_i}^{F_i^{-1}(\gamma)} (\gamma - F_i(x)) dx + \gamma \underline{\ell}_i, \quad \gamma \in [0, 1]. \quad (1)$$

3) $\tilde{\lambda} = \lambda/\eta$, $k(\tilde{\lambda}) = (1 - \eta\tilde{\lambda})/(1 - \eta)$. 其中: $\lambda \in [0, 1]$ 为权重系数, $\eta \in (0, 1)$ 为风险水平, $\tilde{\lambda} \in [0, 1/\eta]$ 为风险偏好系数.

4) $\rho^c = (p - c)/(p - s)$, $\hat{\rho}^r = (p - w)/(p - s)$, $\rho^r = (\phi p - w_r)/\phi(p - s)$, $(x)_+ = \max\{x, 0\}$. 其中: c 为供应商生产单位产品的成本; p 为单位产品零售价格; s 为多余产品的单位销售剩余; w 为批发价契约下供应商提供给零售商的批发价; w_r 为收益共享契约下供应商提供给零售商的批发价, 且在需求实现后零售商保留 ϕ 比例的销售收入. 上述参数满足以下关系: $p > c > s$, $\phi p > w_r > \phi s$, 且 $\rho^c, \hat{\rho}^r, \rho^r, \phi \in (0, 1)$.

2 模型与最优解

考虑两个单周期单类产品且分别由风险中性供应商和混合 CVaR 约束零售商构成的供应链系统. 这两个系统除市场需求分布不同外, 其余参数(如风险偏好系数、单位零售价格等)均相同. 系统 i 中市场需求 X_i 是定义在区间 $[\underline{\ell}_i, \infty)$ 上的一般连续型随机变量, $\underline{\ell}_i \geq 0$, 记 X_i 的概率密度函数和累积分布函数分别为 $f_i(\cdot)$ 和 $F_i(\cdot)$, 其均值、方差和变异系数分别为 $E[X_i] < \infty$, $\text{Var}(X_i) < \infty$ 和 $\text{Cv}(X_i) = \sqrt{\text{Var}(X_i)}/E[X_i]$, $i = 1, 2$. 假设 $F_i(\cdot)$ 严格单调增, 其逆分布函数记为 $F_i^{-1}(\cdot)$.

供应链运营进程如下: 供应商提供一类契约, 零售商选择接受或拒绝. 如果接受该契约, 则零售商在需求实现前决定其向供应商订购产品的数量 y , 需求实现后根据该契约供应链实现从零售商到供应商的转移支付 T . 如果零售商不接受该契约, 则博弈结束. 对于零售商而言, 当市场需求的实现小于 y 时, 多余库存有数值 s 的销售剩余; 当市场需求的实现大于 y 时, 多余的需求将损失掉且不考虑缺货惩罚. 假定产品在订单下达后可以立即得到, 而且不计固定订货成本. 供应商生产单位产品的成本为 c , 零售商单位产品的售价为 p , $p > c > s$.

供应链集中系统 i 的期望利润 $\pi_i^c(y) = E[\Pi^c(y, X_i)]$, 其中

$$\Pi^c(y, X_i) = p \min(y, X_i) + s(y - X_i)_+ - cy. \quad (2)$$

解得供应链集中系统 i 的最优订购量 $y_i^c = F_i^{-1}(\rho^c)$, 最优利润 $\pi_i^c(y_i^c) = (p - s) \tilde{T}_i(\rho^c)$.

系统 i 中供应商的期望利润 $\pi_i^s(y) = E[\Pi^s(y, X_i)]$, 其中 $\Pi^s(y, X_i) = T - cy$.

零售商采用混合 CVaR 准则(最大化 CVaR 和最小化 CVaR 混合加权平均), 目标函数为

$$\begin{aligned} \max_{y \geq 0} \text{CVaR}_\eta^{\text{mix}}(\Pi^r(y, X_i)) = \\ \lambda \text{CVaR}_\eta^1(\Pi^r(y, X_i)) + (1 - \lambda) \text{CVaR}_\eta^0(\Pi^r(y, X_i)). \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\text{CVaR}_\eta^1(W) = \max_{v \in \mathbf{R}} \left\{ v - \frac{1}{\eta} \mathbf{E}[(v - W)_+] \right\}, \quad (4)$$

$$\text{CVaR}_\eta^0(W) = \min_{v \in \mathbf{R}} \left\{ v + \frac{1}{1 - \eta} \mathbf{E}[(W - v)_+] \right\}, \quad (5)$$

$$\Pi^r(y, X_i) = p \min(y, X_i) + s(y - X_i)_+ - T. \quad (6)$$

问题 (3) 等价于如下形式:

$$\begin{aligned} \max_{y \geq 0} \text{CVaR}_\eta^{\text{mix}}(\Pi^r(y, X_i)) = \\ k(\tilde{\lambda}) \mathbf{E}[\Pi^r(y, X_i)] + (1 - k(\tilde{\lambda})) \text{CVaR}_\eta^1(\Pi^r(y, X_i)). \end{aligned} \quad (7)$$

当 $\tilde{\lambda} = 0$ 时, $1 - k(\tilde{\lambda}) = -\eta/(1 - \eta)$ 对应于最小化 CVaR 约束模型; 当 $0 < \tilde{\lambda} < 1$ 时, $1 - k(\tilde{\lambda}) < 0$ 对应于风险追求模型; 当 $\tilde{\lambda} = 1$ 时, $1 - k(\tilde{\lambda}) = 0$ 对应于风险中性模型; 当 $1 < \tilde{\lambda} < 1/\eta$ 时, $1 - k(\tilde{\lambda}) > 0$ 对应于风险规避模型; 当 $\tilde{\lambda} = 1/\eta$ 时, $1 - k(\tilde{\lambda}) = 1$ 对应于最大化 CVaR 约束模型.

2.1 批发价契约下的最优解及其性质

考虑批发价契约, 零售商与供应商之间的转移支付 $T = wy$, 其中 w 为供应商提供给零售商的批发价. 供应商的期望利润为 $\hat{\pi}_i^s(y) = (w - c)y$, 订货量取 y_i^c 时, 供应商的最优利润为 $\hat{\pi}_i^s(y_i^c) = (w - c)y_i^c$.

下面的性质 1 将给出批发价契约下混合 CVaR 准则约束零售商的最优订货量和最优利润的解析表达式及其关于风险偏好系数 $\tilde{\lambda}$ 的单调性(性质 1 是性质 2 的特例 ($\phi = 1$)), 证明方法与性质 2 类似, 故证明过程略).

性质 1 假设定义在区间 $[\underline{\ell}_i, \infty)$ 上的连续型随机变量 X_i 存在逆分布函数 $F_i^{-1}(\cdot)$, $i = 1, 2$, 系统 i 在批发价契约下, 有:

1) 混合 CVaR 约束零售商的最优订货批量为

$$\hat{y}_i^r = \begin{cases} F_i^{-1}\left(1 - \frac{1 - \hat{\rho}^r}{k(\tilde{\lambda})}\right), & 0 \leq \tilde{\lambda} \leq \hat{\rho}^r/\eta; \\ F_i^{-1}(\hat{\rho}^r/\tilde{\lambda}), & \hat{\rho}^r/\eta \leq \tilde{\lambda} \leq 1/\eta. \end{cases} \quad (8)$$

2) 混合 CVaR 约束零售商的最优利润为

$$\hat{\pi}_i^r(\hat{y}_i^r) = \begin{cases} (p - s) \left[k(\tilde{\lambda}) \tilde{T}_i \left(1 - \frac{1 - \hat{\rho}^r}{k(\tilde{\lambda})} \right) + (\tilde{\lambda} - k(\tilde{\lambda})) \tilde{T}_i(\eta) \right], & 0 \leq \tilde{\lambda} \leq \hat{\rho}^r/\eta; \\ \tilde{\lambda}(p - s) \tilde{T}_i(\hat{\rho}^r/\tilde{\lambda}), & \hat{\rho}^r/\eta \leq \tilde{\lambda} \leq 1/\eta. \end{cases} \quad (9)$$

3) 对于所有的 $\eta \in (0, 1)$, \hat{y}_i^r 在区间 $[0, 1/\eta]$ 上是 $\tilde{\lambda}$ 的单调减函数, $\hat{\pi}_i^r(\hat{y}_i^r)$ 在区间 $[0, 1/\eta]$ 上是 $\tilde{\lambda}$ 的单调

递减的凸函数.

2.2 收益共享契约下的最优解及其性质

考虑收益共享契约, 零售商与供应商之间的转移支付 $T = (1 - \phi)[p \min(y, X_i) + s(y - X_i)_+] + w_r y$, 其中 w_r 为供应商提供给零售商的批发价. 在需求实现后, 零售商保留 ϕ 比例的销售收入, 供应商则从零售商的收入中获取 $(1 - \phi)$ 比例的收益. 供应商的期望利润为

$$\begin{aligned} \pi_i^s(y) = [(1 - \phi)p + w_r - c]y - \\ (1 - \phi)(p - s) \int_{\underline{\ell}_i}^y F_i(x) dx, \end{aligned}$$

当订货量取 y_i^c 时, 供应商的最优利润为

$$\begin{aligned} \pi_i^s(y_i^c) = [(1 - \phi)p + w_r - c]y_i^c - \\ (1 - \phi)(p - s) \int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^c} F_i(x) dx. \end{aligned} \quad (10)$$

下面的性质 2 将给出收益共享契约下混合 CVaR 准则约束零售商的最优订货量和最优利润的解析表达式, 及其关于风险偏好系数 $\tilde{\lambda}$ 的单调性.

性质 2 假设定义在区间 $[\underline{\ell}_i, \infty)$ 上的连续型随机变量 X_i 存在逆分布函数 $F_i^{-1}(\cdot)$, $i = 1, 2$, 则系统 i 在收益共享契约下, 有:

1) 混合 CVaR 约束零售商的最优订货批量为

$$y_i^r = \begin{cases} F_i^{-1}\left(1 - \frac{1 - \rho^r}{k(\tilde{\lambda})}\right), & 0 \leq \tilde{\lambda} < \rho^r/\eta; \\ F_i^{-1}(\rho^r/\tilde{\lambda}), & \rho^r/\eta \leq \tilde{\lambda} \leq 1/\eta. \end{cases} \quad (11)$$

2) 混合 CVaR 约束零售商的最优利润为

$$\pi_i^r(y_i^r) = \begin{cases} \phi(p - s) \left[k(\tilde{\lambda}) \tilde{T}_i \left(1 - \frac{1 - \rho^r}{k(\tilde{\lambda})} \right) + (\tilde{\lambda} - k(\tilde{\lambda})) \tilde{T}_i(\eta) \right], & 0 \leq \tilde{\lambda} < \rho^r/\eta; \\ \tilde{\lambda} \phi(p - s) \tilde{T}_i(\rho^r/\tilde{\lambda}), & \rho^r/\eta \leq \tilde{\lambda} \leq 1/\eta. \end{cases} \quad (12)$$

3) 对于所有的 $\eta \in (0, 1)$, y_i^r 在区间 $[0, 1/\eta]$ 上是 $\tilde{\lambda}$ 的单调减函数, $\pi_i^r(y_i^r)$ 在区间 $[0, 1/\eta]$ 上是 $\tilde{\lambda}$ 的单调递减的凸函数.

证明 由式 (7) 可知, 混合 CVaR 约束零售商的最优效用函数可表示为

$$k(\tilde{\lambda}) \mathbf{E}[\Pi^r(y, X_i)] + (1 - k(\tilde{\lambda})) \text{CVaR}_\eta^1(\Pi^r(y, X_i)), \quad (13)$$

其中

$$\Pi^r(y, X_i) = \phi[p \min(y, X_i) + s(y - X_i)_+] - w_r y.$$

记

$$g_i(y, v) = v - \frac{1}{\eta} \mathbf{E}[(v - \Pi^r(y, X_i))_+].$$

当 $v > (\phi p - w_r)y$ 时, 可以验证 $g_i(y, v)$ 在区间 $[(\phi p - w_r)y, \infty)$ 上是 v 的严格单调减函数; 当 $0 < v \leq (\phi p - w_r)y$ 时, 可以验证 $g_i(y, v)$ 在区间 $(0, (\phi p - w_r)y]$ 上是 v 的严格凹函数, 且 $g_i(y, v)$ 在 $v = (\phi p - w_r)y$ 处是关

于 v 的左导数

$$\left. \frac{\partial g_i(y, v)}{\partial v} \right|_{v=(\phi p - w_r)y^-} = 1 - F_i(y)/\eta.$$

其中: 当 $y < F_i^{-1}(\eta)$ 时

$$\left. \frac{\partial g_i(y, v)}{\partial v} \right|_{v=(\phi p - w_r)y^-} > 0,$$

即 $g_i(y, v)$ 在 $v \in [(\phi p - w_r)y, \infty)$ 上是 v 的严格单调凹函数, 且在 $v_i^* = (\phi p - w_r)y$ 取得最大值

$$g_i(y, v_i^*) = (\phi p - w_r)y - \frac{\phi(p-s)}{\eta} \times \int_{\ell_i}^y F_i(x)dx;$$

当 $y \geq F_i^{-1}(\eta)$ 时, $g_i(y, v)$ 在 $v \in (0, (\phi p - w_r)y]$ 上取得最大值的点 v_i^* 是方程 $F_i[(v_i^* + (w_r - \phi s)y)/(\phi(p-s))] = \eta$ 的唯一解, $v_i^* = \phi(p-s)F_i^{-1}(\eta) - (w_r - \phi s)y$, 此时

$$g_i(y, v_i^*) = \frac{\phi(p-s)}{\eta} \tilde{T}_i(\eta) - (w_r - \phi s)y.$$

由 $g_i(y, v)$ 的定义可知 $CVaR_{\eta}^1(\Pi(y, X_i)) = g_i(y, v_i^*)$, 结合以上分析, $CVaR_{\eta}^1(\Pi^r(y, X_i))$ 有如下的分段形式:

$$CVaR_{\eta}^1(\Pi^r(y, X_i)) = \begin{cases} \frac{\phi(p-s)}{\eta} \tilde{T}_i(\eta) - (w_r - \phi s)y, & y > F_i^{-1}(\eta); \\ (\phi p - w_r)y - \frac{\phi(p-s)}{\eta} \times \int_{\ell_i}^y F_i(x)dx, & y \leq F_i^{-1}(\eta). \end{cases} \quad (14)$$

结合式(13)和(14)可得到(11)的最优订货量. 将式(11)代入(13)即可得到(12)中最优利润的表达式. 再由式(11)和(12)对 $\tilde{\lambda}$ 求一阶和二阶导数即可得证. \square

注 1 性质 1 和性质 2 表明了混合 CVaR 约束零售商的风险偏好对其最优订货策略和利润的影响. 具体地, 当 $0 \leq \tilde{\lambda} < 1$ (对应于风险追求情形) 时, 其最优订货量和最优利润大于风险中性情形对应的值; 当 $\tilde{\lambda} > 1$ (对应于风险规避情形) 时, 其最优订货量和最优利润小于风险中性情形对应的值.

3 供应链协调契约

本节分析供应链协调问题, 如果供应链系统满足以下 3 个条件, 则称可以实现供应链的协调: 1) 供应商和混合 CVaR 约束零售商各自得到的利润都不少于各自的保留利润 (本文取供应商和混合 CVaR 约束零售商的保留利润都为 0); 2) 零售商的效用函数, 即混合 CVaR 实现了最大化; 3) 整个供应链集中系统的利润实现了最大化.

定理 1 对于由风险中性供应商和混合 CVaR 约束零售商构成的供应链系统, 当 $\tilde{\lambda} \in [0, 1)$ 时, 在批发价契约下, 有:

1) 若 $\rho^c > \eta$ 且 $w = k(\tilde{\lambda})(c-s) + s$, 则批发价契约能使供应链协调;

2) 若 $\rho^c \leq \eta$ 且 $w = p - \tilde{\lambda}(p-c)$, 则批发价契约能使供应链协调.

定理 2 对于由风险中性的供应商和具有混合 CVaR 约束零售商构成的供应链系统, 在收益共享契约下, 有:

1) 若 $\tilde{\lambda} \in (1, 1/\eta)$, $\rho^c > \eta$, 则当 $w_r = \phi[k(\tilde{\lambda})(c-s) + s]$ 且

$$0 < \phi < \frac{\pi_i^c(y_i^c)}{\pi_i^c(y_i^c) + (1 - k(\tilde{\lambda}))(c-s)F_i^{-1}(\rho^c)}$$

时, 收益共享契约能使供应链协调; 若 $\tilde{\lambda} \in (1, 1/\eta)$, $\rho^c \leq \eta$, 则当 $w_r = \phi[p - \tilde{\lambda}(p-c)]$ 且

$$0 < \phi < \frac{\pi_i^c(y_i^c)}{\pi_i^c(y_i^c) + (\tilde{\lambda} - 1)(p-c)F_i^{-1}(\rho^c)}$$

时, 收益共享契约能使供应链协调.

2) 若 $\tilde{\lambda} \in [0, 1)$, $\rho^c > \eta$, 则当 $w_r = \phi[k(\tilde{\lambda})(c-s) + s]$ 且 $0 < \phi \leq 1$ 时, 收益共享契约能使供应链协调; 若 $\tilde{\lambda} \in [0, 1)$, $\rho^c \leq \eta$, 则当 $w_r = \phi[p - \tilde{\lambda}(p-c)]$ 且 $0 < \phi \leq 1$ 时, 收益共享契约能使供应链协调.

3) 特别地, 若 $\tilde{\lambda} = 1$, 则当 $w_r = \phi c$ 且 $0 < \phi \leq 1$ 时, 收益共享契约能使供应链协调; 若 $\tilde{\lambda} = 1/\eta$, 则当 $w_r = \phi p - \phi(p-c)/\eta$ 且

$$0 < \phi < \frac{\pi_i^c(y_i^c)}{\pi_i^c(y_i^c) + (1 - \eta)(p-c)F_i^{-1}(\rho^c)/\eta}$$

时, 收益共享契约能使供应链协调.

证明 收益共享契约 $\{w_r, \phi\}$ 能够实现供应链的协调需要满足以下 3 个条件.

条件 1: 要求 $y_i^c = y_i^r$. 通过计算可得

$$w_r = \begin{cases} \phi[k(\tilde{\lambda})(c-s) + s], & 0 < \eta < \rho^c; \\ \phi[p - \tilde{\lambda}(p-c)], & \rho^c \leq \eta < 1. \end{cases} \quad (15)$$

条件 2: 要求

$$E[\Pi^s(y, X_i)] > 0 \Leftrightarrow$$

$$E[\Pi^r(y, X_i)] < E[\Pi^c(y, X_i)]. \quad (16)$$

其中

$$\Pi^c(y, X_i) = p \min(y, X_i) + s(y - X_i)_+ - cy, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Pi^r(y, X_i) &= \phi[p \min(y, X_i) + s(y - X_i)_+] - w_r y = \\ &= \phi \Pi^c(y, X_i) + (\phi c - w_r)y. \end{aligned} \quad (18)$$

令零售商的订购量为供应链集中系统的最优订购量 y_i^c , 并将式(15)代入(18), 可得

$$E[\Pi^r(y, X_i)]|_{y=y_i^c} = \begin{cases} \phi \pi_i^c(y_i^c) + \frac{\phi \eta (\tilde{\lambda} - 1)(c-s)y_i^c}{1 - \eta}, & 0 < \eta < \rho^c; \\ \phi \pi_i^c(y_i^c) + \phi(\tilde{\lambda} - 1)(p-c)y_i^c, & \rho^c \leq \eta < 1. \end{cases} \quad (19)$$

当 $\tilde{\lambda} \in [1, 1/\eta]$ 时, 由式 (19) 可得以下结论:

$$\phi < \begin{cases} \frac{\pi_i^c(y_i^c)}{\pi_i^c(y_i^c) + \frac{\eta(\tilde{\lambda}-1)(c-s)}{1-\eta} F_i^{-1}(\rho^c)}, & 0 < \eta < \rho^c; \\ \frac{\pi_i^c(y_i^c)}{\pi_i^c(y_i^c) + (\tilde{\lambda}-1)(p-c)F_i^{-1}(\rho^c)}, & \rho^c \leq \eta < 1. \end{cases} \quad (20)$$

当 $\tilde{\lambda} \in [0, 1)$ 时, 可知式 (19) $< \pi_i^c(y_i^c)$ 对于任意的 $\phi \in (0, 1)$ 总成立.

条件 3: 要求混合 CVaR 约束零售商期望效用函数大于 0. 令 $y_i^r = y_i^c$, 当 $\tilde{\lambda} \in [0, 1)$ 时, 由 $\tilde{T}_i(\gamma)$ 是 γ 的单调增凸函数和 $\rho^c \geq \eta$, 可得

$$k(\tilde{\lambda})\tilde{T}_i(\rho^c) - (k(\tilde{\lambda}) - \tilde{\lambda})\tilde{T}_i(\eta) \geq (k(\tilde{\lambda}) - \tilde{\lambda})(\tilde{T}_i(\rho^c) - \tilde{T}_i(\eta)) \geq 0;$$

当 $\tilde{\lambda} \in [1, 1/\eta]$ 时, $\pi_i^r(y_i^r) > 0$ 也成立. 综上所述即可得到定理 2. \square

注 2 在定理 2 的 3) 中, 当 $\tilde{\lambda} = 1$ 时, 与文献 [31] 所得结论一致; 当 $\tilde{\lambda} = 1/\eta$ 时, 与文献 [13] 的定理 3.2 一致.

注 3 定理 1 可以视为定理 2 的特例 ($\phi = 1$).

4 收益共享契约下需求不确定性对系统的影响

记定义在区间 $[\underline{\ell}_1, \infty)$ 和 $[\underline{\ell}_2, \infty)$ 上随机变量 X_1 和 X_2 的累积分布函数分别为 $F_1(\cdot)$ 和 $F_2(\cdot)$. $\underline{\ell}_1 \wedge \underline{\ell}_2$ 表示 $\underline{\ell}_1$ 与 $\underline{\ell}_2$ 中较小的数. 对于所有的 $t \in [\underline{\ell}_1 \wedge \underline{\ell}_2, \infty)$ 定义如下 4 类函数:

- 1) $H^1(t) = F_2(t) - F_1(t)$;
- 2) $H^2(t) = \int_{\underline{\ell}_2}^t F_2(x)dx - \int_{\underline{\ell}_1}^t F_1(x)dx$;
- 3) $H^3(t) = \int_{\underline{\ell}_2}^t \int_{\underline{\ell}_2}^x F_2(u)dudx - \int_{\underline{\ell}_1}^t \int_{\underline{\ell}_1}^x F_1(u)dudx$;
- 4) $V(t) = \int_{\underline{\ell}_2}^t xF_2(x)dx - \int_{\underline{\ell}_1}^t xF_1(x)dx$.

其中: $H^k(\cdot)$ 和 $V(\cdot)$ 分别称为对应于随机变量 X_1 和 X_2 的 k 阶占优函数和可变函数, $k = 1, 2, 3$. 若 $H^k(t) \geq 0$ 对于所有的 $t \in [\underline{\ell}_1 \wedge \underline{\ell}_2, \infty)$ 都成立, 则称 X_1 在 k 阶随机占优意义下比 X_2 大, 记为 $X_1 \geq_{k-SD} X_2$, $k = 1, 2, 3$. 一阶随机占优又称随机大. 可以证明 $X_1 \geq_{1-SD} X_2 \Rightarrow X_1 \geq_{2-SD} X_2$.

下面的引理将给出对应于 X_1 与 X_2 的广义 TTT 变换之差和随机占优函数满足的不等式, 证明可详见禹海波^[30]的推论 3.1 或禹海波^[29]的定理 2.

引理 1 假设定义在区间 $[\underline{\ell}_i, \infty)$ 上随机变量 X_i 的逆分布函数存在且记为 $F_i^{-1}(\cdot)$, $i = 1, 2$, 则对于所有 $\gamma \in [0, 1]$, 有:

- 1) $H^2(F_2^{-1}(\gamma)) \leq \tilde{T}_1(\gamma) - \tilde{T}_2(\gamma) \leq H^2(F_1^{-1}(\gamma))$;
- 2) $\mathbf{E}[X_1^2] - \mathbf{E}[X_2^2] = 2V(\infty)$;

3) 如果 $\mathbf{E}[X_1] = \mathbf{E}[X_2]$, 则

$$H^3(\infty) > 0 \Leftrightarrow \text{Var}(X_1) < \text{Var}(X_2);$$

4) 如果 $\mathbf{E}[X_1] > \mathbf{E}[X_2]$, 则

$$V(\infty) < 0 \Rightarrow \text{Cv}(X_1) < \text{Cv}(X_2).$$

定理 3 假设定义在区间 $[\underline{\ell}_i, \infty)$ 上随机变量 X_i 的累积分布函数 $F_i(\cdot)$ 严格单调增, 逆分布函数记为 $F_i^{-1}(\cdot)$, 则对于所有的 $\tilde{\lambda} \in [0, 1/\eta]$, $\eta \in (0, 1)$, $\rho^c \in (0, 1)$, 有:

1) $X_1 \geq_{1-SD} X_2 \Rightarrow y_1^c \geq y_2^c$ 且 $\pi_1^c(y_1^c) \geq \pi_2^c(y_2^c)$.

2) 假设 $\mathbf{E}[X_1] = \mathbf{E}[X_2]$, 则

$$X_1 \geq_{2-SD} X_2 \text{ 且 } H^3(\infty) > 0 \Leftrightarrow \pi_1^c(y_1^c) \geq \pi_2^c(y_2^c) \text{ 且 } \text{Var}(X_1) < \text{Var}(X_2).$$

3) 假设 $\mathbf{E}[X_1] > \mathbf{E}[X_2]$, 则

$$X_1 \geq_{2-SD} X_2 \text{ 且 } V(\infty) < 0 \Rightarrow \pi_1^c(y_1^c) \geq \pi_2^c(y_2^c) \text{ 且 } \text{Cv}(X_1) < \text{Cv}(X_2).$$

在收益共享契约协调的系统 i 中, 零售商的最优利润为

$$\pi_i^r(y_i^r)|_{y_i^r=y_i^c} = \begin{cases} \phi(p-s)[k(\tilde{\lambda})\tilde{T}_i(\rho^c) + (\tilde{\lambda}-k(\tilde{\lambda}))\tilde{T}_i(\eta)], & 0 < \eta < \rho^c; \\ \tilde{\lambda}\phi(p-s)\tilde{T}_i(\rho^c), & \rho^c \leq \eta < 1. \end{cases} \quad (21)$$

注 4 定理 3 表明在供应链集中系统下, 最优利润在一阶和二阶随机占优意义下具有随机单调性.

推论 1 在收益共享契约协调的系统 i 中, 零售商的最优利润函数由式 (21) 给出, 对于所有的 $\eta \in (0, 1)$, $\rho^c \in (0, 1)$, 有:

1) $X_1 \geq_{1-SD} X_2 \Rightarrow \pi_1^r(y_1^r) \geq \pi_2^r(y_2^r)$ 对于所有的 $\tilde{\lambda} \in [0, 1/\eta]$ 成立.

2) 若 $\mathbf{E}[X_1] = \mathbf{E}[X_2]$ 且 $\tilde{\lambda} \in [1, 1/\eta]$, 则

$$X_1 \geq_{2-SD} X_2 \text{ 且 } H^3(\infty) > 0 \Rightarrow \pi_1^r(y_1^r) \geq \pi_2^r(y_2^r) \text{ 且 } \text{Var}(X_1) < \text{Var}(X_2).$$

3) 若 $\mathbf{E}[X_1] > \mathbf{E}[X_2]$ 且 $\tilde{\lambda} \in [1, 1/\eta]$, 则

$$X_1 \geq_{2-SD} X_2 \text{ 且 } V(\infty) < 0 \Rightarrow \pi_1^r(y_1^r) \geq \pi_2^r(y_2^r) \text{ 且 } \text{Cv}(X_1) < \text{Cv}(X_2).$$

注 5 推论 1 表明: 在收益共享契约中, 随机大的需求会导致零售商较高的最优利润; 在二阶随机占优且风险偏好系数大于或等于 1 时, 零售商最优利润具有随机单调性.

5 数值例子

下面通过两个数值例子分别验证定理 2 和定理 3 中 2) 的结果.

例 1 假设 $p = 15$, $c = 10$, $s = 5$, 可知 $\rho^c = 0.5$. 随机需求 X_i 是定义在区间 $[\underline{\ell}_i, \infty)$ 上的截尾指

数分布, 记为 $X_i \sim \text{Exp}(\ell_i, \tau_i)$. X_i 的累积分布函数为 $F_i(t) = 1 - e^{-\tau_i(t-\ell_i)}$, $t \in [\ell_i, \infty)$. 这里取 $X_i \sim \text{Exp}(30, 1/20)$. 此时供应链集中系统最优订购量 $y_i^c = 43.863$, 最优利润 $\pi_i^c(y_i^c) = 180.686$. 表 1~表 4 中的 $\pi_i^r(y_i^c)$ 和 $\pi_i^s(y_i^c)$ 是将相应参数分别代入 (21) 和 (10) 中计算得到.

当 $\tilde{\lambda} = 2$, $\eta = 0.3$ 时, 根据定理 2 中 1) 的前半部分, 对于所有的 $\phi \in (0, 0.6578)$, 供应链都可以实现协调. 从表 1 中可以发现: 当 $\phi = 0.7, 0.9$ 时, $\pi_i^r(y_i^c) < 0$; 当 $\phi = 0.1, 0.3, 0.5$ 时, $\pi_i^r(y_i^c) \geq 0$, $\pi_i^s(y_i^c) \geq 0$, 供应链能够协调.

表 1 $\rho^c = 0.5$, $\eta = 0.3$, $\tilde{\lambda} = 2$ 时契约的协调

| 指标 | ϕ | | | | |
|------------------|----------|---------|---------|----------|----------|
| | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 |
| w_r | 0.7857 | 2.357 | 3.9285 | 5.4999 | 7.0713 |
| $\pi_i^r(y_i^c)$ | 24.62 | 73.86 | 123.1 | 172.34 | 221.58 |
| $\pi_i^s(y_i^c)$ | 153.2171 | 98.2760 | 43.3437 | -11.5931 | -66.5298 |

当 $\tilde{\lambda} = 2$, $\eta = 0.7$ 时, 根据定理 2 中 1) 的后半部分, 对于所有的 $\phi \in (0, 0.4517)$, 供应链都可以实现协调. 从表 2 中可以发现: 当 $\phi = 0.5, 0.7, 0.9$ 时, $\pi_i^r(y_i^c) < 0$; 当 $\phi = 0.1, 0.3$ 时, $\pi_i^r(y_i^c) \geq 0$, $\pi_i^s(y_i^c) \geq 0$.

表 2 $\rho^c = 0.5$, $\eta = 0.7$, $\tilde{\lambda} = 2$ 时契约的协调

| 指标 | ϕ | | | | |
|------------------|----------|---------|----------|----------|-----------|
| | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 |
| w_r | 0.5 | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 4.5 |
| $\pi_i^r(y_i^c)$ | 36.137 | 108.411 | 180.685 | 252.959 | 325.233 |
| $\pi_i^s(y_i^c)$ | 140.6855 | 60.6855 | -19.3145 | -99.3145 | -179.3145 |

当 $\tilde{\lambda} = 0.7$, $\eta = 0.3$ 时, 根据定理 2 中 2) 的前半部分, 对于所有的 $\phi \in (0, 1]$, 供应链都可以实现协调. 从表 3 中可以发现, 当 $\phi = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 时, $\pi_i^r(y_i^c) \geq 0$, $\pi_i^s(y_i^c) \geq 0$, 供应链能够协调.

表 3 $\rho^c = 0.5$, $\eta = 0.3$, $\tilde{\lambda} = 0.7$ 时契约的协调

| 指标 | ϕ | | | | |
|------------------|----------|----------|---------|----------|----------|
| | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 |
| w_r | 1.0643 | 3.1929 | 5.3215 | 7.4501 | 9.5787 |
| $\pi_i^r(y_i^c)$ | 16.1031 | 48.3091 | 80.5152 | 112.7213 | 144.9274 |
| $\pi_i^s(y_i^c)$ | 165.4367 | 134.9391 | 73.944 | 43.4464 | 28.1976 |

当 $\tilde{\lambda} = 0.7$, $\eta = 0.7$ 时, 根据定理 2 中 2) 的后半部分, 对于所有的 $\phi \in (0, 1]$, 供应链都可以实现协调. 表 4 表明当 $\phi = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 时, $\pi_i^r(y_i^c) \geq 0$, $\pi_i^s(y_i^c) \geq 0$, 供应链能够实现协调.

表 4 $\rho^c = 0.5$, $\eta = 0.7$, $\tilde{\lambda} = 0.7$ 时契约的协调

| 指标 | ϕ | | | | |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 |
| w_r | 1.15 | 3.45 | 5.75 | 8.05 | 10.35 |
| $\pi_i^r(y_i^c)$ | 12.648 | 37.9438 | 63.2398 | 88.5356 | 113.8316 |
| $\pi_i^s(y_i^c)$ | 169.1964 | 146.2182 | 123.2399 | 100.2617 | 77.2835 |

例 2 记 $\text{Gam}(1, 4, 4)$ 表示左支撑为 $\ell_1 = 1$, 参数为 $\theta_1 = \lambda_1 = 4$ 的截尾伽玛分布, $\text{Gam}(1, 2, 2)$ 表示左支撑为 $\ell_2 = 1$, 参数为 $\theta_2 = \lambda_2 = 4$ 的截尾伽玛分布. 它们的密度函数分别为

$$f_1(t) = \frac{4^4(t-1)^3}{\Gamma(4)} e^{-4(t-1)},$$

$$f_2(t) = \frac{2^2(t-1)}{\Gamma(2)} e^{-2(t-1)};$$

累积分布函数分别为

$$F_1(t) = \Gamma(4, 4(t-1)),$$

$$F_2(t) = \Gamma(2, 2(t-1)), t \in [1, +\infty).$$

这两个分布满足定理 3 中 2) 的假设条件 $E[X_1] = E[X_2] = 2$, 方差 $\text{Var}(X_1) = 1/4 < 1/2 = \text{Var}(X_2)$. X_i 的广义 TTT 变换 $\tilde{T}_1(\gamma) = \Gamma(5, \Gamma^{-1}(4, \gamma\Gamma(4)))$, $\tilde{T}_2(\gamma) = \Gamma(3, \Gamma^{-1}(2, \gamma\Gamma(2)))$, 且 $\tilde{T}_1(\gamma) - \tilde{T}_2(\gamma) \geq 0$ 对于 $\forall \gamma \in [0, 1]$ 成立. 由引理 1 中 1) 可知满足二阶随机占优条件, $X_1 \geq_{2-SD} X_2$, $H^3(\infty) = 1/8 > 0$.

当取 $p = 15$, $s = 5$ 时, 表 5 中 $\pi_1^c(y_1^c) \geq \pi_2^c(y_2^c)$ 恒成立, 即有定理 3 的 2) 成立.

表 5 供应链集中系统最优利润的比较

| γ | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 |
|-----------------------------------|---|-------|-------|------|-------|---|
| $\pi_1^c(y_1^c) - \pi_2^c(y_2^c)$ | 0 | 0.324 | 0.606 | 0.76 | 0.693 | 0 |

6 结 论

本文运用随机占优理论研究风险偏好和需求不确定性对供应链系统的影响. 证明了当风险偏好系数小于 1 时, 批发价契约能够实现供应链协调; 无论风险偏好系数大于等于 1 或小于 1, 收益共享契约都能实现供应链协调. 同时还证明了在收益共享契约下, 随机大需求会导致较高的零售商最优利润; 当风险偏好系数大于或等于 1 时, 零售商最优利润随需求可变性的增加而减少. 值得进一步研究的问题是: 1) 混合 CVaR 约束下需求依赖于价格的报童模型的优化与随机比较; 2) 供应商与零售商均为混合 CVaR 约束下的供应链系统的协调与随机比较. 这是本文的后续工作.

参考文献(References)

- [1] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263-291.
- [2] Schweitzer M E, Cachon G P. Decision bias in the newsvendor problem with a known demand distribution: Experimental evidence[J]. *Management Science*, 2000, 46(3): 404-420.
- [3] Wang C X, Webster S. The loss-averse newsvendor game[J]. *Omega*, 2009, 37(1): 93-105.
- [4] Wang C X. The loss-averse newsvendor problem[J]. *Int J of Production Economics*, 2010, 124(2): 448-452.

- [5] Wang C X, Webster S. Channel coordination for a supply chain with a risk-neutral manufacturer and a loss-averse retailer[J]. *Decision Sciences*, 2007, 38(3): 361-389.
- [6] 索寒生, 储洪胜, 金以慧. 带有风险规避型销售商的供应链协调[J]. *控制与决策*, 2004, 19(9): 1042-1044.
(Suo H S, Chu H S, Jin Y H. Supply chain coordination with risk aversion retailers[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(9): 1042-1044.)
- [7] 刘珩, 潘景铭, 唐小我. 带基于损失厌恶型零售商的易逝品供应链价格补贴契约研究[J]. *控制与决策*, 2010, 25(8): 1149-1154.
(Liu H, Pan J M, Tang X W. Research on perishable product supply chain markdown money contract with a loss-averse retailer[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(8): 1149-1154.)
- [8] 林志炳, 蔡晨, 许保光. 损失厌恶下的供应链收益共享契约研究[J]. *管理科学学报*, 2010, 13(8): 33-41.
(Lin Z B, Cai C, Xu B G. Revenue sharing analysis of supply chain with loss aversion[J]. *J of Management Science in China*, 2010, 13(8): 33-41.)
- [9] 施国洪, 曾月凤, 陈敬贤. 损失厌恶供应链应对突变风险的收益共享契约[J]. *工业工程*, 2012, 15(2): 22-26.
(Shi G H, Zeng Y F, Chen J X. On revenue sharing contract in loss-aversion supply chain under disruption[J]. *Industrial Engineering J*, 2012, 15(2): 22-26.)
- [10] 刘咏梅, 成尚汶, 谢虎. 具有损失厌恶偏好零售商的供应链弹性数量契约[J]. *控制与决策*, 2012, 27(7): 975-982.
(Liu Y M, Cheng S W, Xie H. Research on supply chain quantity flexibility contract with a loss-averse preference retailer[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(7): 975-982.)
- [11] 许明辉, 于刚, 张汉勤. 带有缺货惩罚的报童模型中的 CVaR 研究[J]. *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[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 26(10): 1-8.)
- [12] Chen Y, Xu M H, Zhang Z G. A risk-averse newsvendor model under the CVaR criterion[J]. *Operations Research*, 2009, 57(4): 1040-1044.
- [13] Yang L, Xu M H, Yu G, et al. Supply chain coordination with CVaR criterion[J]. *Asia-Pacific J of Operational Research*, 2009, 26(1): 135-160.
- [14] Ma L J, Li J B, Wang H F. Coordinate the supply chain with risk-averse agents under CVaR criteria[C]. *The Int Conf on Management and Service Science(MASS)*. Wuhan: IEEE Conf Publications, 2010: 35-60.
- [15] Gotoh J, Takano Y. Newsvendor solutions via conditional value-at-risk minimization[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 179(1): 80-96.
- [16] Jammernegg W, Kischka P. Risk-averse and risk-taking newsvendors: A conditional expected value approach[J]. *Review of Managerial Science*, 2007, 1(1): 93-110.
- [17] Gan X H, Sethi S P, Yan H. Coordination of supply chain with risk-averse agents[J]. *Production and Operations Management*, 2004, 13(2): 135-149.
- [18] Agrawal V, Seshadri S. Impact of uncertainty and risk aversion on price and order quantity in the newsvendor problem[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2000, 2(4): 410-423.
- [19] Agrawal V, Seshadri S. Risk intermediation in supply chains[J]. *IEE Trans*, 2000, 32(2): 819-831.
- [20] Whitt W. Uniform conditional variability ordering of probability distributions[J]. *J of Application Probability*, 1985, 22(3): 619-633.
- [21] Stoyan D. Comparison methods for queues and other stochastic systems[M]. New York: Wiley, 1983: 41-62.
- [22] Shaked M, Shanthikumar J G. Stochastic orders and their applications[M]. New York: Academic Press, 1994: 123-170.
- [23] Song J S. The effect of leadtime uncertainty in a simple stochastic inventory model[J]. *Management Science*, 1994, 40(5): 603-613.
- [24] Song J S. Understanding the leadtime effects in stochastic inventory systems with discounted costs[J]. *Operations Research Letters*, 1994, 15(2): 85-93.
- [25] Song J S, Zhang H, Hou Y M, et al. The effect of lead time and demand uncertainties in (r, q) inventory systems[J]. *Operations Research*, 2010, 58(1): 68-80.
- [26] Ridder A, van der Laan E, Salomon M. How larger demand variability may lead to lower costs in the newsvendor problem[J]. *Operatiions Research*, 1998, 46(6): 934-936.
- [27] Gerchak Y, He Qi-ming. On the relation between the benefit of risk pooling and the variability of demand[J]. *IEE Trans*, 2003, 35(11): 1027-1031.
- [28] Xu M H, Chen Y, Xu X L. The effect of demand uncertainty in a price-setting newsvendor model[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 207(2): 946-957.
- [29] 禹海波. 需求不确定性对条件风险价值约束库存系统的影响[J]. *控制与决策*, 2013, 28(9): 1389-1392.
(Yu H B. Impact of demand uncertainty on inventory system with conditional value-at-risk constrain[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(9): 1389-1392.)
- [30] 禹海波. 供应链系统的随机比较[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 71-80.
(Yu H B. The stochastic comparison of supply chain[M]. Beijing: Science Press, 2013: 71-80.)
- [31] Cachon G P. Supply chain coordination with contracts[C]. *Handbooks in Operations Research and Management Science: Supply Chain Management*, Chap 6. Amsterdam: Elsevier, 2003: 211-221.