第 29 卷 第 10 期
Vol. 29 No. 10

控 制 与 决 策
Control and Decision

2014 年 10 月
Oct. 2014

文章编号: 1001-0920 (2014) 10-1885-08 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2013.0743

需求价格敏感下具有损失厌恶零售商的闭环供应链定价与协调

孙 浩[1], 吴亚婷[2,3], 达庆利[3]

(1. 青岛大学 商学院，山东 青岛 266071；2. 江西应用技术职业学院 工商管理系，江西 赣州 341000；3. 东南大学 经济管理学院，南京 211189)

摘 要: 基于零售商回收模式, 运用前景理论探讨了价格敏感随机需求下具有损失厌恶零售商参与的两级闭环供应链定价与协调问题. 首先针对分散式决策, 在两种批发价模式下推导和比较制造商和零售商的最优行为, 分析损失厌恶程度对零售商定价和订货联合决策的影响; 然后通过与集中式决策的对比验证了分散式供应链存在效率损失, 进而设计收益共享契约对分散式供应链进行协调; 最后通过算例验证了以上结论, 并将回收率对最优决策和成员效用的影响进行了灵敏度分析.

关键词: 闭环供应链；价格敏感；零售商回收；损失厌恶；前景理论

中图分类号: F274 **文献标志码:** A

Pricing and coordinating a closed-loop supply chain with loss-averse retailer and price-dependent stochastic demand

SUN Hao[1], *WU Ya-ting*[2,3], *DA Qing-li*[3]

(1. Business School，Qingdao University，Qingdao 266071，China；2. Business and Management Department，Jiangxi College of Applied Technology，Ganzhou 341000，China；3. School of Economics & Management，Southeast University，Nanjing 211189，China．Correspondent：SUN Hao，E-mail：rivaldoking@gmail.com)

Abstract: The prospect theory is utilized to investigate the issue of pricing and coordination mechanism for a closed-loop supply chain with a loss-averse retailer facing price-sensitive stochastic demand based on the retailer collection mode. Firstly, under two wholesale schemes, optimal behaviours of the retailer and manufacturer are derived and compared based on the decentralized decison. The impact of loss averse degree on joint decisions of optimal retail price and optimal order quantity is analyzed. The comparision between decentralized and centralized decision shows that the decentralized supply chain has efficiency losses, then revenue-sharing contract is designed to coordinate the decentralized supply chain. Finally, numerical examples are given to verify the above conclusions and analyze the impact of collection rate on optimal decisions and channel member's utilities.

Key words: closed-loop supply chian；price-sensitive；retailer collection；loss-averse; propect theory

0 引 言

科技的飞速发展和顾客需求的千变万化促使产品的生命周期日益缩短, 更新换代的速度愈来愈快, 被人们淘汰、废弃的产品数量急剧增加. 在自然资源日益稀少的大环境下, 可持续发展的呼声日益增高, 废旧品回收再利用、再制造成为人们关注的热点问题, 许多国家和地区纷纷立法, 制定相关法律法规推动逆向回收以及闭环供应链的发展.

目前闭环供应链的研究主要包括闭环供应链的结构设计、运作机理、定价策略和契约协调等几个方面. 文献 [1] 全面总结了逆向物流的系统结构并为未来的研究指明方向. 文献 [2] 从确定的线性需求出发, 建立了二级闭环供应链系统 3 种不同回收模式下的博弈模型, 通过对比集中决策和 3 种分散决策模式下的最优零售价格、最优回收率和链上各节点企业利润, 验证了零售商是开展逆向回收活动最有效的执行者. 文献 [3] 进一步研究了单一制造商面对两个竞争零售商的情形, 分别讨论直接回收和间接回收模

收稿日期: 2013-06-06；**修回日期:** 2013-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71202142)；教育部人文社科基金项目(11YJC630185).

作者简介: 孙浩(1981−), 男, 副教授, 博士, 从事逆向物流、闭环供应链的研究；达庆利(1945−), 男, 教授, 博士生导师, 从事企业经营分析与决策、物流与供应链管理等研究.

式下制造商和零售商的最优定价策略及协调机制. 文献[4-6]分别从不同角度研究了随机需求下闭环供应链如何有效运作. 文献[7]基于价格敏感的随机需求量和价格敏感的随机回收量的市场环境, 给出闭环供应链在不同回收模式下的最优回收价格以及新制造产品和再制造产品的最优产量. 但文献[1-7]均假设决策者是完全理性的经济人.

部分实证文献表明: 决策者在现实中的实际选择行为与理论模型中使期望利润达到最优的策略并不完全吻合, 个体决策往往受到自身性格、历史经验、信息完备程度和社会大环境等因素的影响. 如: 文献[8]在传统报童模型框架下对高低两种价值产品的实际订购量进行了统计检验, 得到的结果与利润最大化原则下的最优订货量有一定的偏差; 文献[9]发现实际的新式服装订购量总小于期望订购量; 文献[10]的统计数据表明, Chrysler公司总是比其竞争对手(GM和Ford公司)持有更多的库存来规避缺货损失. 以上事实均表明某些决策者具有风险厌恶的特点. 文献[11]研究了不同缺货成本下损失厌恶零售商的最优订货量并利用契约进行协调. 文献[12]研究了随机需求下损失厌恶零售商的订货量和广告费用的联合决策问题. 文献[13]比较了零售商面对损失厌恶制造商时的3种订货时机选择策略的优劣. 但文献[8-13]均局限于传统的正向供应链.

在闭环供应链中, 由于要面临需求和回收的双向不确定, 决策者更易成为风险厌恶者. 文献[14-16]分别借用金融风险度量工具中的VAR和CVAR理论, 探讨了不同回收渠道下具有下行风险偏好零售商的二级闭环供应链契约协调机制. 文献[17]运用经济学中的前景理论刻画决策者的风险厌恶特性, 在此基础上设计组合契约来协调二级闭环供应链系统. 但文献[14-17]均假定产品销售价格为外生常量.

与以上研究不同, 本文将综合考虑零售商的损失厌恶偏好和定价决策权, 针对两种批发价模式, 在价格敏感随机需求的闭环供应链中探讨分散式决策和集中式决策下的定价与订货联合策略, 并引入收益共享契约对分散式供应链进行协调.

1 问题描述与模型假设

1.1 问题描述

制造商利用原材料生产新产品的单位成本为 c_n, 利用旧产品进行再制造的单位成本为 c_r, 则每单位再制造品的成本节约为 $\Delta = c_n - c_r$. 在销售季初, 制造商以单位价格 w 向零售商批发产品数量 Q; 然后零售商将其以单位价格 p 出售给消费者, 若在销售季末还存有剩余, 则将未售产品在二手市场折价销售, 获得残值 v. τ 表示零售商的废品回收率, b 表示制造商支付给零售商的回收补贴, 回收固定成本和变动成本分别为 c_l 和 A. 在以上参量中, p 和 Q 为零售商的决策变量, 批发价的确定可分为两种情况: 1) w 由制造商和零售商通过谈判而事先协定, 此时其为外生常量, 该种批发价模式在现实生活中较为常见; 2) 双方形成纵向竞争, 进行Stackelberg博弈, 制造商是博弈的领导者, 其会根据零售商的最优决策决定使自身效用最大化的批发价格.

定义 $i \in \{C, R\}$ 分别为集中式决策和分散式决策, $k \in \{1, \lambda\}$ 分别表示零售商风险中性和损失厌恶, 则决策变量 p_k^i 和 Q_k^i 表示 i 模式下具有第 k 种风险偏好零售商的销售价格和订货量, Π_j^i 和 U_j^i 分别表示闭环供应链上节点成员 j 在模式 i 下的利润函数和效用函数 ($j \in \{R, M\}$ 分别代表零售商和制造商), 变量上标加“$*$”表示其最优值.

1.2 模型假设

假设 1 市场需求为随机变量 x, 可用加法形式表示为 $x = d(p) + \varepsilon$[18], 其中 $d(p) = \phi - \beta p$ 为确定部分, ε 为均值为正的扰动因子, 其概率密度函数和累积分布函数分别为 $f(\varepsilon)$ 和 $F(\varepsilon)$.

假设 2 再制造产品与新产品同质且无差别.

假设 3 根据实际意义, 各参数之间需满足 $p - c_r < v < c_n - \Delta\tau < w < p$. 其中: $v < c_n - \Delta\tau$ 限定了剩余产品的残值应低于产品平均生产成本, 否则制造商将无限制生产; $v > p - c_r$ 保证剩余产品残值应大于对其再制造后销售所获得的边际利润, 否则制造商会将未售出产品与回收品一并进行再制造.

假设 4 回收活动的总成本为 $C(\tau) = c_l\tau^2 + A\tau\min(x, Q)$[2]. 为保证回收活动的经济性, 还需满足关系式 $A < b < \Delta$.

假设 5 针对零售商的损失厌恶性, 采用前景理论框架中的分段线性函数[8,17]进行刻画, 即

$$U(W) = \begin{cases} W - W_0,\ W \geqslant W_0; \\ \lambda(W - W_0),\ W < W_0. \end{cases} \tag{1}$$

其中: λ 为损失厌恶系数, 此时 $\lambda > 1$; W_0 为零售商的初始财富, 为简便计算, 令 $W_0 = 0$.

1.3 分散式决策模式(模型R)

损失厌恶零售商的利润函数为

$$\begin{cases} \Pi_{R_\lambda -}^R(Q, p) = px - wQ + (Q - x)v + b\tau x - \\ \qquad c_l\tau^2 - A\tau x,\ 0 < x \leqslant Q; \\ \Pi_{R_\lambda +}^R(Q, p) = (p - w)Q + b\tau Q - \\ \qquad c_l\tau^2 - A\tau Q,\ Q < x. \end{cases} \tag{2}$$

为便于计算, 记 $b' = b - A$, 式(2)可化简为

$$\begin{cases}\Pi^R_{R_\lambda-}(Q,p)=(p-v)x+b'\tau x-\\ \qquad (w-v)Q-c_l\tau^2,\ 0<x\leqslant Q; \\ \Pi^R_{R_\lambda+}(Q,p)=(p-w+b'\tau)Q-c_l\tau^2,\ Q<x.\end{cases} \tag{3}$$

令 $\Pi^R_{R_\lambda-}(Q,p)=0$, 得到零售商的盈亏平衡点 $\overline{q}^R_\lambda(Q,p)=\dfrac{(w-v)Q+c_l\tau^2}{p-v+b'\tau}$. 该盈亏平衡点表示: 如果产品的实际需求量太低, 即 $0<x<\overline{q^R_\lambda}(Q,p)$ 时, 损失厌恶偏好零售商的利润值为负, 反之利润为正.

由式 (3) 得损失厌恶零售商的期望利润函数为

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}[\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p)]=\\&\int_0^{Q-\phi+\beta p}[(p-v+b'\tau)(\phi-\beta p+\varepsilon)+vQ]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\\&\int_{Q-\phi+\beta p}^{\infty}(p+b'\tau)Qf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-wQ-c_l\tau^2,\end{aligned} \tag{4}$$

则损失厌恶零售商的期望效用函数为

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]=\\&\mathrm{E}[\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p)]+(\lambda-1)\int_0^{\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p}(p-\\&v+b'\tau)(\phi-\beta p+\varepsilon)f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-\\&(\lambda-1)\int_0^{\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p}[(w-v)Q+c_l\tau^2]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon=\\&(p-w+b'\tau)Q-c_l\tau^2-(p-v+\\&b'\tau)\int_0^{Q-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-(\lambda-1)(p-v+\\&b'\tau)\int_0^{\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon.\end{aligned} \tag{5}$$

损失厌恶零售商所选择的最优订货量和最优定价策略组合为 $(Q^{R*}_\lambda,p^{R*}_\lambda)$, 应当使其期望效用实现最大化. 而该最优组合存在的必要条件是 $(Q^{R*}_\lambda,p^{R*}_\lambda)$ 为 $\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]/\partial p=0$ 和 $\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]/\partial Q=0$ 所联立方程组的一组实数解, 即满足

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q}=\\&p-w+b'\tau-(p-v+b'\tau)F(Q-\phi+\beta p)-\\&(\lambda-1)(w-v)F(\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p)=0,\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial p}=\\&Q-\beta(p-v+b'\tau)F(Q-\phi+\beta p)+\\&(\lambda-1)\overline{q}^R_\lambda(Q,p)F(\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p)-\\&(\lambda-1)\beta(p-v+b'\tau)F(\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p)-\\&\int_0^{Q-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-(\lambda-1)\int_0^{\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon=0.\end{aligned} \tag{7}$$

下面进一步分析 $(Q^{R*}_\lambda,p^{R*}_\lambda)$ 存在的充分条件.

命题 1　当满足条件

$$\begin{aligned}&2(\lambda-1)(w-v)\Big(\beta-\frac{(w-v)Q+c_l\tau^2}{(p-v+b'\tau)^2}\Big)\times\\&f(\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p)-1>0\end{aligned}$$

时, 损失厌恶零售商的效用函数 $\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]$ 在 $(Q^{R*}_\lambda,p^{R*}_\lambda)$ 点处的 Hesse 矩阵是负定的, 从而满足一阶条件 (6) 和 (7) 的最优订货量和最优定价策略组合 $(Q^{R*}_\lambda,p^{R*}_\lambda)$, 可使得损失厌恶零售商的期望效用达到最大.

证明　根据损失厌恶零售商的期望效用函数 $\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]$ 得到其 Hesse 矩阵为

$$\begin{aligned}&H_{\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}=\\&\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q^2} & \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q\partial p}\\ \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q\partial p} & \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial p^2}\end{bmatrix},\end{aligned} \tag{8}$$

因此, 为了证明 Hesse 阵 (8) 是负定的, 需要验证如下两个条件:

1) $\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q^2}<0$;

2) $\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q^2}\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial p^2}-\Big(\dfrac{\partial^2 E[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q\partial p}\Big)^2>0$.

为了验证条件 1), 对式 (5) 求关于 Q 的二阶偏导数, 得

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q^2}=A+B<0. \tag{9}$$

其中

$$A=-(p-v+b'\tau)f(Q-\phi+\beta p),$$

$$B=-(\lambda-1)\frac{(w-v)^2}{p-v+b'\tau}f(\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p).$$

为了验证条件 2), 对式 (5) 求关于 Q,p 的混合偏导数, 得

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial Q\partial p}=1+C+\beta A+D. \tag{10}$$

其中

$$C=-F(Q-\phi+\beta p),$$

$$\begin{aligned}D=&-(\lambda-1)(w-v)\Big(\beta-\frac{(w-v)Q+c_l\tau^2}{(p-v+b'\tau)^2}\Big)\times\\&f(\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p).\end{aligned}$$

再对式 (5) 求关于 p 的二阶偏导数, 得

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[U(\Pi^R_{R_\lambda}(Q,p))]}{\partial p^2}=2\beta C+\beta^2A+E+F. \tag{11}$$

其中

$$E=-2\beta(\lambda-1)F(\overline{q}^R_\lambda(Q,p)-\phi+\beta p),$$

$$\begin{aligned}F=&-(\lambda-1)(p-v+b'\tau)\Big(\beta-\frac{(w-v)Q+c_l\tau^2}{(p-v+b'\tau)^2}\Big)^2\times\\&f(\overline{q^R_\lambda}(Q,p)-\phi+\beta p).\end{aligned}$$

通过计算, 有

$$\beta^2AB+AF-2\beta AD>0,\ BF=D^2,\ -C-C^2>0.$$

将 Hesse 阵 (8) 改写为

$$|H_{\mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^R(Q,p))]}| =$$

$$\left|\begin{bmatrix} A+B & 1+C+\beta A+D \\ 1+C+\beta A+D & 2\beta C+\beta^2 A+E+F \end{bmatrix}\right| =$$

$$(A+B)(2\beta C+\beta^2 A+E+F)-(1+C+\beta A+D)^2 >$$

$$(A+B)E+2\beta BC-2\beta A+(C+1)(-2D-1). \tag{12}$$

易知 $(A+B)E > 0$, $2\beta BC > 0$, $-2\beta A > 0$, 只要 $(C+1)(-2D-1)$ 也满足大于零, Hesse 阵在点 $(Q_\lambda^{R*}, p_\lambda^{R*})$ 处即是负定的. 从而, 当满足

$$2(\lambda-1)(w-v)\Big(\beta-\frac{(w-v)Q+c_l\tau^2}{(p-v+b'\tau)^2}\Big)\times$$

$$f(\overline{q}_\lambda^R(Q,p)-\phi+\beta p)-1>0 \tag{13}$$

时, 损失厌恶零售商在 $(Q_\lambda^{R*}, p_\lambda^{R*})$ 处效用达到最大. □

特别地, 当 $\lambda=1$ 时, 零售商为风险中性者, 由式 (5) 得到其期望效用函数为

$$\mathrm{E}[U(\varPi_{R_1}^R(Q,p))] =$$

$$(p-w+b'\tau)Q-c_l\tau^2-(p-v+$$

$$b'\tau)\int_0^{Q-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon. \tag{14}$$

由式 (14) 易知, 风险中性零售商的最优订货量和最优定价 (Q_1^{R*}, p_1^{R*}) 需满足以下关系式:

$$\partial\mathrm{E}[U(\varPi_{R_1}^R(Q,p))]/\partial Q =$$

$$p-w+b'\tau-(p-v+b'\tau)F(Q-\phi+\beta p)=0, \tag{15}$$

$$\partial\mathrm{E}[U(\varPi_{R_1}^R(Q,p))]/\partial p =$$

$$Q-\int_0^{Q-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-\beta(p-v+$$

$$b'\tau)F(Q-\phi+\beta p)=0. \tag{16}$$

命题 2 在分散式决策下, 当双方协定批发价格时, 损失厌恶零售商的最优订货量低于风险中性零售商, 且随着损失厌恶程度的提高, 其最优订货量呈降低趋势, 即损失厌恶零售商的最优订货量偏离风险中性零售商最优订货量的程度越高.

证明 由式 (9) 易知, 式 (6) 是 Q 的减函数, 且当 $Q=Q_\lambda^{R*}$ 时, 式 (6) 的函数值为零. 将 Q_1^{R*} 代入式 (6) 并结合式 (15), 有

$$(p+b'\tau)\overline{F}(Q_1^{R*}-\phi+\beta p)-(w-v)-$$

$$(\lambda-1)(w-v)F(\overline{q_\lambda^R}(Q_1^{R*},p)-\phi+\beta p)=0. \tag{17}$$

易知式 (17) 小于零. 综上所述, 得到 $Q_\lambda^{R*} < Q_1^{R*}$.

由隐函数求导法则可得到

$$\frac{\partial Q_\lambda^{R*}}{\partial\lambda} = -\frac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^R(Q,p))]/\partial Q\partial\lambda}{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^R(Q,p))]/\partial Q^2} =$$

$$-\frac{-(w-v)F(\overline{q}_\lambda^R(Q,p)-\phi+\beta p)}{A+B}<0. \tag{18}$$

由以上证明可知, 损失厌恶系数 λ 与损失厌恶零售商最优订货量 Q_λ^{R*} 呈反比例关系, 即随着损失厌恶程度的增加, 损失厌恶零售商的最优订货量 Q_λ^{R*} 呈下降趋势. □

由命题 2 可知, 在分散式决策下, 当制造商批发价格给定时, 损失厌恶偏好零售商的最优订货量低于风险中性零售商. 这是因为在不考虑缺货损失的情形下, 损失厌恶零售商面临的主要风险来源于超额订货, 超额订货不仅会占用零售商的流动资金、降低资金周转率, 且未售出产品在销售季末具有的剩余价值也较低, 进而会造成效用损失. 因此, 零售商的损失厌恶性促使其通过降低订货量来规避需求不确定带来的风险, 且损失厌恶程度越高, 其想要规避风险的愿望越强烈, 偏离风险中性零售商的最优订货量的程度也就越高.

命题 3 在分散式决策下, 当双方协定批发价格时, 损失厌恶零售商的最优零售价低于风险中性零售商的最优零售价, 且随着损失厌恶程度的增加, 其最优零售价格逐渐降低, 即偏离风险中性零售商的最优零售价格的程度越高.

证明 由式 (11) 知, 式 (7) 是 p 的减函数, 且当 $p=p_\lambda^{R*}$ 时, 式 (7) 的函数值为零. 将 p_1^{R*} 代入式 (7) 并结合式 (16), 有

$$Q_1^{R*}-\beta(p_1^{R*}-v+b'\tau)F(Q_1^{R*}-\phi+$$

$$\beta p_1^{R*})-\int_0^{Q_1^{R*}-\phi+\beta p_1^{R*}}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-$$

$$(\lambda-1)\int_0^{\overline{q}_\lambda^R(Q_1^{R*},p_1^{R*})-\phi+\beta p_1^{R*}}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+$$

$$(\lambda-1)\Big(\frac{(w-v)Q_1^{R*}+c_l\tau^2}{p_1^{R*}-v+b'\tau}\Big)F(\overline{q}_\lambda^R(Q_1^{R*},p_1^{R*})-$$

$$\phi+\beta p_1^{R*})-\beta(\lambda-1)(p_1^{R*}-v+$$

$$b'\tau)F(\overline{q}_\lambda^R(Q_1^{R*},p_1^{R*})-\phi+\beta p_1^{R*}) =$$

$$(\lambda-1)\Big(\frac{(w-v)Q_1^{R*}+c_l\tau^2}{p_1^{R*}-v+b'\tau}\Big)F(\overline{q}_\lambda^R(Q_1^{R*},p_1^{R*})-$$

$$\phi+\beta p_1^{R*})-\beta(\lambda-1)(p_1^{R*}-v+$$

$$b'\tau)F(\overline{q}_\lambda^R(Q_1^{R*},p_1^{R*})-\phi+\beta p_1^{R*})-$$

$$(\lambda-1)\int_0^{\overline{q}_\lambda^R(Q_1^{R*},p_1^{R*})-\phi+\beta p_1^{R*}}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon. \tag{19}$$

由命题 1 可知, 若存在 $(Q_\lambda^{R*}, p_\lambda^{R*})$, 则必满足条件 $\beta>\dfrac{(w-v)Q+c_l\tau^2}{(p-v+b'\tau)^2}$, 因此式 (19) 小于零. 又因式 (7) 是 p 的单调减函数, 于是得到 $p_\lambda^{R*} < p_1^{R*}$, 即损失厌恶零售商的最优零售价格低于风险中性零售商的最优零售价.

由隐函数求导法则可得到

$$\frac{\partial p_\lambda^{R*}}{\partial\lambda} = -\frac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^R(Q,p))]/\partial p\partial\lambda}{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^R(Q,p))]/\partial p^2} =$$

$$(p-v+b'\tau)\Big(\beta-\frac{(w-v)Q+c_l\tau^2}{(p-v+b'\tau)^2}\Big)\times$$
$$F(\overline{q}_\lambda^R(Q,p)-\phi+\beta p)/(2\beta C+\beta^2A+E+F)+$$
$$\frac{\int_0^{\overline{q}_\lambda^R(Q,p)-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon}{2\beta C+\beta^2A+E+F}<0. \tag{20}$$

由式(20)可知, 损失厌恶零售商的最优零售价 p_λ^{R*} 与损失厌恶系数 λ 呈反比例关系, 即随着损失厌恶程度的提高, p_λ^{R*} 呈下降趋势. 这也符合现实情况, 即若零售商具有损失厌恶偏好, 其为了将订购的产品尽可能多地卖出去, 通常会选择较低的零售价格. □

命题2和命题3是在双方协定批发价情形下得到的, 将零售商的最优定价与订货量代入下式:

$$\begin{cases}\varPi_{M-}^R(Q,p)=(w-c_n)Q+(\varDelta-b)\tau x,\ 0<x\leqslant Q;\\ \varPi_{M+}^R(Q,p)=(w-c_n)Q+(\varDelta-b)\tau Q,\ Q<x;\end{cases} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}[U(\varPi_M^R(Q,p))]=\\&\int_0^{Q-\phi+\beta p}[(w-c_n)Q+(\varDelta-b)\tau(\phi-\beta p+\varepsilon)]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\\&\int_{Q-\phi+\beta p}^{\infty}(w-c_n+(\varDelta-b)\tau)Qf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon=\\&(w-c_n+(\varDelta-b)\tau)Q-(\varDelta-b)\tau\int_0^{Q-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon.\end{aligned} \tag{22}$$

即可计算制造商的利润和期望效用.

另一种批发价模式是双方进行Stackelberg博弈, 此时制造商作为领导者, 其会根据零售商的选择确定使自身效用达到最优的批发价格 w^*. 该决策属于典型的双层规划问题, 但零售商的最优反应函数 $Q(w)$ 和 $p(w)$ 无法用解析形式表示, 因而只能结合算例的数值解分析相应的规律.

2 集中式决策模式(模型C)

集中式决策下闭环供应链的利润函数为

$$\begin{cases}\varPi_-^C(Q,p)=\\ px-(c_nQ-\varDelta\tau x)+(Q-x)v-\\ A\tau x-c_l\tau^2,\ 0<x\leqslant Q;\\ \varPi_+^C(Q,p)=\\ (p-c_n+\varDelta\tau)Q-A\tau Q-c_l\tau^2,\ Q<x.\end{cases} \tag{23}$$

其期望效用函数为

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]=\\&\int_0^{Q-\phi+\beta p}[(p+(\varDelta-A)\tau-v)(\phi-\beta p+\varepsilon)-\\&(c_n-v)Q-c_l\tau^2]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\\&\int_{Q-\phi+\beta p}^{\infty}[(p-c_n+\varDelta\tau)Q-A\tau Q-c_l\tau^2]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon=\\&(p-c_n+(\varDelta-A)\tau)Q-c_l\tau^2-\\&(p+(\varDelta-A)\tau-v)\int_0^{Q-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon.\end{aligned} \tag{24}$$

此时, 决策者所选择的最优订货量和最优定价组合应使 $\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]$ 最大化. 同分散式决策的求解过程, (Q^{C*},p^{C*}) 存在的必要条件是需满足以下一阶微分方程组:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q}=\\&)[-2pt]p+(\varDelta-A)\tau-c_n-(p+\\&(\varDelta-A)\tau-v)F(Q-\phi+\beta p)=0,\end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial p}=\\&Q-\int_0^{Q-\phi+\beta p}F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-\beta(p+\\&(\varDelta-A)\tau-v)F(Q-\phi+\beta p)=0.\end{aligned} \tag{26}$$

下面进一步分析 (Q^{C*},p^{C*}) 存在的充分条件.

命题 4　当满足

$$\frac{F(Q^{C*}-\phi+\beta p^{C*})}{f(Q^{C*}-\phi+\beta p^{C*})}<\frac{p^{C*}+(\varDelta-A)\tau-v}{2} \tag{27}$$

时, $\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]$ 是 Q^C 和 p^C 的联合凹函数且存在唯一的 (Q^{C*},p^{C*}) 满足一阶条件(25)和(26), 并使得整个闭环供应链期望效用达到最大.

证明　根据式(24), 可求得 $\mathrm{E}[U(\varPi^c(p,Q))]$ 对于 Q^C,p^C 的Hesse矩阵为

$$H_{\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q^2} & \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q\partial p}\\ \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q\partial p} & \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial p^2}\end{bmatrix}. \tag{28}$$

为了证明Hesse阵(28)是负定的, 需要验证如下两个条件:

1) $\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q^2}<0$;

2) $\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q^2}\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial p^2}-\Big(\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q\partial p}\Big)^2>0.$

为了验证条件1), 对式(24)求 Q 的二阶偏导数, 得

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q^2}=A<0, \tag{29}$$

其中

$$A=-(p+(\varDelta-A)\tau-v)f(Q-\phi+\beta p).$$

为了验证条件2), 对式(24)求关于 Q 和 p 的混合偏导数, 得

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial Q\partial p}=1+B+\beta A, \tag{30}$$

其中 $B=-F(Q-\phi+\beta p)$. 再对式(24)求 p 的二阶偏导数, 得

$$\frac{\partial^2 \mathrm{E}[U(\varPi^C(Q,p))]}{\partial p^2} = 2\beta B + \beta^2 A. \tag{31}$$

于是将Hesse阵(28)改写为 $\begin{bmatrix} A & 2\beta B \\ 2\beta B & \beta^2 A \end{bmatrix}$, 则有

$$\begin{vmatrix} A & 2\beta B \\ 2\beta B & \beta^2 A \end{vmatrix} =$$

$$\beta^2(A^2 - 4B^2) = \beta^2(A+2B)(A-2B). \tag{32}$$

由于 $\beta^2 > 0$, $A + 2B < 0$, 只要 $A - 2B < 0$ 即可保证该Hesse矩阵的行列式大于零, 即满足下式:

$$-(p + (\varDelta - A)\tau - v)f(Q - \phi + \beta p) +$$
$$2F(Q - \phi + \beta p) < 0. \tag{33}$$

整理式(33)即得条件(27). □

3 闭环供应链的协调(模型R')

命题2和命题3说明在分散式决策下闭环供应链系统存在"双重边际化"效应, 系统效益非最优. 因此本节将探讨如何使用收益共享契约对分散式供应链进行协调.

假设制造商与零售商进行收益分成, 其中: $\gamma(0 < \gamma < 1)$ 为零售商获得的收益分成比例; $1-\gamma$ 为制造商获得的收益分成比例; $\varPi_j^{i'}$ 为引入利润共享契约后成员 j 在对应模式 i 下的利润. 此时损失厌恶零售商的利润函数为

$$\begin{cases} \varPi_{R_\lambda -}^{R'}(Q,p,\gamma) = \\ \gamma(p-v)x - (w - \gamma v)Q + b'\tau x - c_l\tau^2,\ 0 < x \leqslant Q; \\ \varPi_{R_\lambda +}^{R'}(Q,p,\gamma) = \\ (\gamma p - w + b'\tau)Q - c_l\tau^2,\ Q < x. \end{cases} \tag{34}$$

其期望利润为

$$\begin{aligned} &\mathrm{E}[\varPi_{R_\lambda}^{R'}(Q,p,\gamma)] = \\ &\int_0^{Q-\phi+\beta p} (\gamma p + b'\tau)(\phi - \beta p + \varepsilon) f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon + \\ &\int_{Q-\phi+\beta p}^{\infty} (\gamma p + b'\tau) Q f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon - wQ - c_l\tau^2 = \\ &(\gamma p + b'\tau - w)Q - c_l\tau^2 - (\gamma(p-v) + \\ &b'\tau)\int_0^{Q-\phi+\beta p} F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon. \end{aligned} \tag{35}$$

令式(34)中 $\varPi_{R_\lambda -}^{R'}(Q,p,\gamma) = 0$, 得到收益共享契约下损失厌恶零售商的盈亏平衡点 $\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma)$, 即

$$\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma) = \frac{(w - \gamma v)Q + c_l\tau^2}{\gamma(p-v) + b'\tau},$$

则损失厌恶零售商的期望效用函数为

$$\begin{aligned} &\mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^{R'}(Q,p,\gamma))] = \\ &\mathrm{E}[\varPi_{R_\lambda}^{R'}(Q,p,\gamma)] + (\lambda - 1)\int_0^{\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma)-\phi+\beta p} [\gamma(p-v) + \\ &b'\tau](\phi - \beta p + \varepsilon) f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon - \\ &(\lambda - 1)\int_0^{\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma)-\phi+\beta p} [(w - \gamma v)Q + c_l\tau^2] f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon = \\ &(\gamma p + b'\tau - w)Q - c_l\tau^2 - (\gamma(p-v) + \\ &b'\tau)\int_0^{Q-\phi+\beta p} F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon - (\lambda-1)(\gamma(p-v) + \\ &b'\tau)\int_0^{\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma)-\phi+\beta p} F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon. \end{aligned} \tag{36}$$

将 $\mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^{R'}(Q,p,\gamma))]$ 分别对 Q 和 p 求一阶偏导并使其等于零, 即可得到损失厌恶零售商的最优决策 $(Q_\lambda^{R'*}, p_\lambda^{R'*})$ 存在的必要条件

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^{R'}(Q,p,\gamma))]}{\partial Q} = \\ &\gamma p + b'\tau - w - (\gamma(p-v) + b'\tau)F(Q - \phi + \beta p) - \\ &(\lambda-1)(w - \gamma v)F(\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma) - \phi + \beta p) = 0, \end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \mathrm{E}[U(\varPi_{R_\lambda}^{R'}(Q,p,\gamma))]}{\partial p} = \\ &\gamma Q - \beta(\gamma(p-v) + b'\tau)F(Q - \phi + \beta p) - \\ &(\lambda-1)[(\gamma(p-v) + b'\tau)\beta - \\ &\gamma\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma)]F(\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma) - \phi + \\ &\beta p) - \gamma\int_0^{Q-\phi+\beta p} F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon - \\ &(\lambda-1)\gamma\int_0^{\overline{q}_\lambda^{R'}(Q,p,\gamma)-\phi+\beta p} F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon = 0. \end{aligned} \tag{38}$$

在收益共享契约下, 要实现闭环供应链协调, 由式(37)和(38)所确定的最优组合 $(Q_\lambda^{R'*}, p_\lambda^{R'*})$ 应与式(25)和(26)所决定的集中式决策下的最优组合 (Q^{C*}, p^{C*}) 相等, 但因为这是一个复杂的非线性方程组, 不能经简单的公式推导得到解析解, 所以, 具体结果同样需通过数值仿真求出.

此时, 制造商的利润函数和期望效用函数为

$$\begin{cases} \varPi_{M-}^{R'}(Q,p,\gamma) = \\ (w - c_n)Q + \varDelta\tau x - b\tau x + (1-\gamma)px + \\ (1-\gamma)(Q-v)x,\ 0 < x \leqslant Q; \\ \varPi_{M+}^{R'}(Q,p,\gamma) = \\ (w - c_n + \varDelta\tau)Q - b\tau Q + (1-\gamma)pQ,\ Q < x; \end{cases} \tag{39}$$

$$\begin{aligned} &\mathrm{E}[U(\varPi_M^{R'}(Q,p,\gamma))] = \\ &[w - c_n + (\varDelta - b)\tau + (1-\gamma)p]Q - \\ &[(1-\gamma)(p-v) + (\varDelta - b)\tau]\int_0^{Q-\phi+\beta p} F(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon. \end{aligned} \tag{40}$$

4 算例分析

本节通过数值算例对以上模型进行分析. 假设 $c_n = 5$, $c_r = 2$, $c_l = 1$, $\tau = 0.2$, $v = 4$, $A = 1$, $b = 2$, $x = 60 - 10p + \varepsilon$, $\varepsilon \in U[0, 10]$, $\varDelta = c_n - c_r = 3$.

表1给出了集中式决策(模型C)、分散式决策(模型R)和收益共享契约(模型R')下的最优价格与

订货量、节点成员效用和闭环供应链总效用. 在模型R中, 同时考虑了双方协定批发价和形成Stackelberg博弈两种批发价模式, 以及零售商的风险中性 ($\lambda=1$) 或风险厌恶 ($\lambda=6$) 两种风险偏好.

表 1　不同决策模式和风险偏好下的变量均衡解与协调结果

指标	模型C	模型R				模型R'
		协定批发价		Stackelberg 博弈		
λ	$\lambda=1$	$\lambda=1$	$\lambda=6$	$\lambda=1$	$\lambda=6$	$\lambda=6$
p	5.479	5.699	5.642	5.749	5.674	5.479
w	—	5.350	5.350	5.490	5.440	2.732
Q	9.887	5.903	5.300	4.866	4.555	9.887
γ	—	—	—	—	—	0.5499
$\mathrm{E}[U_M^i]$	—	3.163	2.849	3.302	2.898	2.989
$\mathrm{E}[U_R^i]$	—	2.406	2.248	1.653	1.748	3.607
总效用	6.596	5.569	5.097	4.955	4.646	6.596

从表1可以得到如下结论:

与分散式决策相比, 集中决策模式下的零售价最低而订货量最高, 这是因为集中决策以实现闭环供应链效率最优为目标, 决策者通过降低零售价以提高订货量, 从而实现系统总效用最大化, 正如"薄利多销"策略. 而分散决策模式下供应链各节点以自身效用最大化为基准, 此时会出现"双重加价"效应, 造成闭环供应链系统效用的损失.

在双方协定批发价情形下, 风险中性零售商的最优定价和订货量均高于损失厌恶零售商, 这也验证了命题2和命题3的正确性; 与零售商风险中性相比, 风险厌恶零售商参与的闭环供应链制造商效用、零售商效用和系统总效用均较低. 该结论说明若双方保持一定的协作关系, 则零售商的风险厌恶偏好对任何一方均无好处, 还不如保持风险中性.

在Stackelberg博弈情形下, 两种风险偏好下的零售商定价与订货量的大小关系不变; 制造商对于风险中性零售商制定的批发价格高于风险厌恶零售商; 与零售商风险中性相比, 在风险厌恶零售商参与的闭环供应链中制造商效用较低, 零售商效用较高, 系统总效用较低, 即双方形成纵向竞争时, 尽管零售商的风险规避特性的确保护了自身利益, 但却损害了制造商和闭环供应链的整体绩效.

此外, 将两种批发价模式下的节点成员效用和系统总效用横向比较可知: 由于在Stackelberg博弈模型中制造商具有渠道主导权, 其必然从自身最优的角度出发, 与双方协定批发价的情形相比, 制造商效用略有提升, 但另一方面却直接导致零售商效用和系统总效用的显著降低.

上述结论表明, 制造商和零售商之间的竞争博弈严重损害了闭环供应链系统的运作效率. 因而, 模型R'以收益共享契约为激励机制, 通过合理地确定分成比例, 在满足双方个人理性约束的基础上, 实现了损失厌恶零售商参与的分散闭环供应链系统效用达到集中式决策的水平.

进一步针对分散式决策, 分析回收率变化对不同批发价和风险偏好模式的最优均衡解和节点成员利润的影响, 其中参数选取需符合假设3, 经计算$\tau\leqslant 1/3$. 不妨将τ在区间$[0.1, 0.3]$中取值, 相邻两点间隔为0.1, 仿真结果如表2和表3所示.

表 2　批发价协定情形下回收率变化对均衡解的影响

指标	风险偏好					
	风险中性 ($\lambda=1$)			风险厌恶 ($\lambda=6$)		
τ	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
p	5.74	5.699	5.658	5.682	5.642	5.603
w	5.350	5.350	5.350	5.350	5.350	5.350
Q	5.260	5.903	6.539	4.555	5.300	5.912
$\mathrm{E}[U_M^i]$	2.332	3.163	4.106	2.040	2.849	3.786
$\mathrm{E}[U_R^i]$	1.916	2.406	2.933	1.755	2.248	2.785
总效用	4.248	5.569	7.039	3.795	5.097	6.571

表 3　Stackelberg 博弈情形下回收率变化对均衡解的影响

指标	风险偏好					
	风险中性 ($\lambda=1$)			风险厌恶 ($\lambda=6$)		
τ	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
p	5.789	5.749	5.708	5.720	5.674	5.629
w	5.488	5.490	5.492	5.454	5.440	5.426
Q	4.234	4.866	5.490	3.808	4.555	5.320
$\mathrm{E}[U_M^i]$	2.467	3.302	4.249	2.104	2.898	3.823
$\mathrm{E}[U_R^i]$	1.262	1.653	2.080	1.263	1.748	2.301
总效用	3.729	4.955	6.329	3.367	4.646	6.124

表2和表3的结果表明: 无论在何种批发价模式或风险偏好下, 随着回收率的增加, 零售商的最优价格降低, 最优订货量增加, 制造商效用、零售商效用和供应链总效用均增加, 此时消费者能以低价购买较多的产品, 消费者福利有所提升. 唯一有所不同的是Stackelberg博弈情形下批发价格的变化趋势: 当零售商风险中性时, 最优批发价随回收率的增加而略有增加. 换言之, 尽管回收率的增加降低了制造商的平均生产成本, 但制造商的批发价不降反升, 从而在产品售价降低的情况下, 零售商的边际收益缩减, 虽然此时销售量的增加使其效用也得到增加, 但增加量明显低于制造商; 当零售商风险厌恶时, 制造商的批发价随回收率的增加而减少, 此时零售商的风险厌恶特性有效保障了自身利益.

5　结　论

本文分析和比较了两种批发价模式下具有损失厌恶零售商参与的两级闭环供应链定价与协调, 得到如下主要结论:

1) 在双方协定批发价情形下, 损失厌恶零售商的最优定价和最优订货量均低于风险中性零售商, 且其风险厌恶偏好对所有节点成员均不利.

2) 在双方进行 Stackelberg 博弈情形下, 制造商可获得最优效用, 零售商的风险厌恶特性在一定程度上可保障其自身利益.

3) 双方的纵向竞争和零售商的风险厌恶偏好对于闭环供应链运作效率均是不利的, 而回收率的增加对于所有节点成员均有利.

4) 通过收益共享契约参数的合理设置可使分散式闭环供应链的利润达到集中式决策的水平.

本文仅研究了零售商具有损失厌恶偏好的情形, 未来可考虑多个渠道成员为风险厌恶者的情形.

参考文献(References)

[1] 达庆利, 黄祖庆, 张钦. 逆向物流系统结构研究的现状及展望[J]. 中国管理科学, 2004, 12(1): 131-136.
(Da Q L, Huang Z Q, Zhang Q. Current and future studies on structure of the reverse logistics system: A review[J]. Chinese J of Management Science, 2004, 12(1): 131-136.)

[2] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L N V. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.

[3] Savaskan R C, Wassenhove L N V. Reverse channel design: The case of competing retailers[J]. Management Science, 2006, 52(1): 1-14.

[4] Kaya O. Incentive and production decisions for remanufacturing operations[J]. European J of Operational Research, 2009, 3(7): 1-12.

[5] 郭亚军, 赵礼强, 李绍江. 随机需求下闭环供应链协调的收入费用共享契约研究[J]. 运筹与管理, 2007, 16(6): 15-20.
(Guo Y J, Zhao L Q, Li S J. Revenue-and-expense sharing contract on the coordination of closed-loop supply chain under stochastic demand[J]. Operations Research and Management Science, 2007, 16(6): 15-20.)

[6] 孙浩, 达庆利. 随机环境下考虑需求替代的闭环供应链决策模型[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2238-2247.
(Sun H, Da Q L. Decision model of closed-loop supply chain considering substitution relations under stochastic environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(10): 2238-2247.)

[7] Zhang Fuan, Da Qingli. Decision model for closed-loop supply chain with uncertain demand and price-dependent returns[J]. J of Southeast University: English Edition, 2010, 26(4): 638-641.

[8] Maurice E Schweitzer, Gerard P Cachon. Decision bias in the newsvendor problem with a known demand distribution: Experimental evidence[J]. Management Science, 2000, 46(3): 404-420.

[9] Fisher M A, Raman A. Reducing the cost of demand uncertainty through accurate response to early sales[J]. Operations Research, 1996, 44(1): 87-99.

[10] Patsuris P. Christmas sales: The worst growth in 33 years[DB/OL]. (2001-11-30). http://www.forbes.com/2001/10/30/1030retail.html.

[11] Charles X Wang, Scott Webster. Channel coordination for a supply chain with a risk-neutral manufacturer and a loss-averse retailer[J]. Decision Sciences, 2007, 38(3): 361-389.

[12] 周永务, 肖旦, 李绩才. 损失规避零售商订货量与广告费用的联合决策[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8): 1727-1738.
(Zhou Y W, Xiao D, Li J C. Joint decision-making of order quantities and advertising expenditure for loss-averse retailers[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(8): 1727-1738.)

[13] 熊恒庆, 黄勇, 杨建仁. 基于风险厌恶的供应链订货时机分析[J]. 中国管理科学, 2013, 21(1): 63-70.
(Xiong H Q, Huang Y, Yang J R. Analysis of order timing based on risk aversion in supply chain[J]. Chinese J of Management Science, 2013, 21(1): 63-70.)

[14] 史成东, 陈菊红, 钟麦英. Downside-Risk 测度下闭环供应链风险控制和利润分配机制研究[J]. 控制与决策, 2009, 24(11): 1693-1696.
(Shi C D, Chen J H, Zhong M Y. Risk controlling and profit distributing mechanism in closed-loop supply chain on the theory of downside-risk[J]. Control and Decision, 2009, 24(11): 1693-1696.)

[15] 史成东, 陈菊红, 邢同卫, 等. 第三方负责回收的 Downside-Risk 闭环供应链协调性研究[J]. 运筹与管理, 2011, 20(4): 39-47.
(Shi C D, Chen J H, Xing T W, et al. Downside-Risk closed-loop supply chain coordination in the circumstance of third-party logistics collecting[J]. Operations Research and Management Science, 2011, 20(4): 39-47.)

[16] 高文军, 陈菊红. 基于 CVaR 的闭环供应链优化与协调决策研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 489-494.
(Gao W J, Chen J H. Research on decisions of closed-loop supply chain optimization and coordination based on CVaR[J]. Control and Decision, 2011, 26(4): 489-494.)

[17] 史成东, 陈菊红, 郭福利, 等. Loss-averse 闭环供应链协调[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(9): 1668-1673.
(Shi C D, Chen J H, Guo F L, et al. On closed-loop supply chain coordination with loss-averse retailer[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(9): 1668-1673.)

[18] He Yong, Xuan Zhao, Lindu Zhao, et al. Coordinating a supply chain with effort and price dependent stochastic demand[J]. Applied Mathematical Modeling, 2009, 33(6): 2777-2790.

(责任编辑：孙艺红)