第 26 卷 第 4 期
Vol. 26 No. 4

控 制 与 决 策
Control and Decision

2011 年 4 月
Apr. 2011

文章编号: 1001-0920 (2011) 04-0489-06

基于CVaR的闭环供应链优化与协调决策研究

高文军[1,2], 陈菊红[1]

(1. 西安理工大学 经济与管理学院，西安 710054；2. 山西师范大学 经济管理学院，山西 临汾 041000)

摘 要: 利用条件风险值理论研究具有风险规避特性的闭环供应链的优化与协调问题. 首先, 建立了随机市场需求下由单个风险规避零售商与单个风险规避制造商组成的两阶闭环供应链的条件风险值模型, 以及基于条件风险值的收益共享费用共担契约下的最优订购量和最优批发价格决策模型; 然后在对模型进行分析的基础上, 揭示了制造商和零售商的风险规避水平对最优订购量、批发价格、条件风险值及闭环供应链协调的影响; 最后通过一个算例验证了所得的结论.

关键词: 风险规避水平；条件风险值；闭环供应链；优化与协调

中图分类号: F270.7 **文献标识码:** A

Research on decisions of closed-loop supply chain optimization and coordination based on CVaR

GAO Wen-jun[1,2], *CHEN Ju-hong*[1]

(1. School of Economics and Management，Xi’an University of Technology，Xi’an 710054，China；2. School of Economics and Management，Shanxi Normal University，Linfen 041000，China. Correspondent: GAO Wen-jun, E-mail：wenjungao@yeah.net)

Abstract: This paper researches the optimization and coordination problem of closed-loop supply chain with risk-averse characteristic. For a two-echelon closed-loop supply chain with a risk-averse manufacture and a risk-averse retailer, a conditional value-at-risk(CVaR) model, an optimal ordering quantity model and an optimization wholesale price model are constructed under revenue-and-expense sharing contract and random demand by making use of CVaR. On the basis of the analysis of the models, this paper reveals the impact of risk-averse level of manufacture and retailer on the decisions of the optimal ordering quantity, optimization wholesale price，CVaR and closed-loop supply chain coordination. Finally, a numerical example is given to verify the obtained conclusions.

Key words: risk-averse level；conditional value-at-risk；closed-loop supply chain；optimization and coordination

1 引 言

闭环供应链由不同经济实体组成, 经济实体自身收益最大化的理性行为往往使供应链系统收益受损, 因此必须建立良好的协调机制, 充分调动各方积极性, 以使供应链系统绩效最优[1].

近年来, 闭环供应链的优化与协调问题受到了广泛关注. 文献 [2] 研究了在确定线性函数下, 不同回收渠道对节点企业定价决策及利润的影响; [3] 利用数学规划模型对回收再加工产品的最优价格和回收数量之间的关系进行研究, 探讨了回收质量和成本变化对最优决策的影响; [4] 研究了错误回收报废产品的协调决策问题, 提出一种目标折扣合约以激励零售商努力回收, 降低报废无用产品的回收、加工费用, 提高净销售水平; [5] 应用博弈理论对闭环供应链的最优定价决策进行了分析; [6] 对零售商竞争环境下, 制造商收集废旧产品的逆向渠道决策与前向渠道中产品定价决策之间的关系进行了探讨; 在此基础上, [7] 和 [8] 分别研究了随机市场需求与线性市场需求下, 零售商在销售产品的同时负责废旧品回收的二阶闭环供应链的协调决策问题, 构建了收入共享费用共担契约模型; [9] 研究了第 3 方负责回收的再制造闭环供应链决策结构的效率问题; [10] 则对零售商占主导地位的闭环供应链定价决策问题进行了研究; [11] 利

收稿日期: 2010-01-15；**修回日期:** 2010-03-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70602017).

作者简介: 高文军(1977−), 男, 讲师, 博士生, 从事物流与供应链管理的研究；陈菊红(1964−), 女, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理等研究.

用 Downside-risk 测度理论, 对有风险规避零售商加盟的闭环供应链优化决策进行了探讨.

上述文献中, [2-10] 研究了节点企业风险中性情况下闭环供应链的优化与协调问题, 未考虑节点企业的风险规避特性; [11] 则只考虑了零售商的风险规避特性, 未虑及制造商的风险规避特性. 然而, 现实中诸如市场需求、废旧品回收与处理及信息不对称等外部环境的不确定性, 常常使得供应链合作伙伴均具有不同程度的风险规避特性, 会因为害怕风险而选择规避风险的行为[12]. 因此, 本文将利用一致性风险度量模型——条件风险值理论 (CVaR) 探讨随机需求下供应链成员均具有风险规避特性时闭环供应链的优化与协调问题. 通过在收益共享费用共担契约下建立基于负收益的零售商、制造商和闭环供应链的条件风险值模型, 研究闭环供应链成员风险规避水平对最优订购决策、最优批发价格决策以及闭环供应链协调决策的影响.

2 问题的描述与假设

本文研究由单个风险规避制造商和单个风险规避零售商组成的两阶闭环供应链的优化与协调问题. 制造商生产单一的短生命周期产品, 用 C_m 表示采用原材料生产时的单位生产成本, C_{rm} 表示单位再造成本, w 为单位产品批发价格, p 为单位产品零售价格, q 为零售商的订货量, v 为销售季节过后剩余产品的清空价格, b_2 为零售商面向消费者的单位废旧品回收价格, b_1 为制造商面向零售商的单位废旧品回收价格. X 表示随机需求, 其分布函数与密度函数分别为 $F(x)$ 和 $f(x)$. β_1 为零售商的风险规避水平, β_2 为制造商的风险规避水平.

假设: 1) 废旧品回收量 $L(b_2,q)=\tau b_2 q$, 其中 τ 为回收量对回收价格与市场销量交互作用的敏感系数, $0\leqslant\tau\leqslant 1/b_2$, 表示回收量不可能大于市场销售量.

2) 不考虑顾客的产品退货、制造商和零售商的库存成本和缺货成本.

3) $0\leqslant\beta_2<\beta_1<1$, 其他情况可作类似讨论.

4) 为保证研究问题有意义, 假设 $p>w$, $C_m\geqslant v$, $\varphi(p-v)>w$, $C_m>C_{rm}+b_1>b_1>b_2>0$, $p(1-\varphi)<C_m$.

5) 制造商与零售商是理性的, 均按照使自身条件风险值最小的原则进行决策.

6) 闭环供应链运作过程为: 销售季节开始前, 制造商向零售商提供收益共享费用共担契约 $T(w^*, b_1^*,\varphi,q,b_2)$, 其中 φ 为零售商与制造商均能接受的零售商的收益共享费用共担比率; 然后零售商在自身风险规避水平下确定最优订购量 q_r^* 和面向消费者的最优废旧品回收价格 b_{2r}^*.

7) 信息是完全的.

3 闭环供应链及成员的 CVaR 模型

3.1 CVaR 理论简介

CVaR 即条件风险值, 它衡量的是在正常市场条件下, 在给定时间段内损失的概率超过风险规避水平 β 损失的条件期望值. 若 Z 为描述损失的随机变量, $H(z)$ 是其概率分布函数, 则条件风险值可表示为[13]

$$\mathrm{CVaR}_\beta=E\{z\mid H(z)>\beta\}.\tag{1}$$

若设 $g(x,y)$ 为决策损失函数, y 为决策变量向量, x 为随机向量, R 为实数集, 则风险规避水平为 β 的条件风险值可由下式计算[14-15]:

$$\mathrm{CVaR}_\beta g(x,y)=\min_{\alpha\epsilon R}\{\alpha+(1-\beta)^{-1}E[g(x,y)-\alpha]^+\},\tag{2}$$

其中 $[\cdot]^+=\max\{0,\cdot\}$.

3.2 CVaR 模型的建立

在收益共享费用共担契约 $T(w^*,b_1^*,\varphi,q,b_2)$ 下, 零售商、制造商与闭环供应链的收益函数分别为

$$\pi_r(q,b_2)=\varphi[p(q\wedge x)+v(q-q\wedge x)]+b_1\tau b_2 q-\varphi\tau b_2^2 q-wq,\tag{3}$$

$$\pi_m(w,b_1)=(1-\varphi)[p(q\wedge x)+v(q-q\wedge x)]+(C_m-C_{rm}-b_1)\tau b_2 q-(1-\varphi)\tau b_2^2 q+wq-qC_m,\tag{4}$$

$$\pi(q,b_2)=(p-v)(q\wedge x)+(v-C_m)q+(C_m-C_{rm}-b_2)\tau b_2 q.\tag{5}$$

由式 (2) 可得零售商基于负收益的条件风险值为

$$\begin{aligned}&\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]=\\&\min_{\alpha_1\epsilon R}\Big\{\alpha_1+(1-\beta_1)^{-1}\int_0^q[-\pi_r(q,b_2)-\\&\alpha_1]^+f(x)\mathrm{d}x+(1-\beta_1)^{-1}\times\\&\int_q^{+\infty}[-\pi_r(q,b_2)-\alpha_1]^+f(x)\mathrm{d}x\Big\}=\\&\min_{\alpha_1\epsilon R}\Big\{\alpha_1+(1-\beta_1)^{-1}\int_0^q[-\varphi(px+\\&vq-vx)-b_1\tau b_2 q+\varphi\tau b_2^2 q+qw-\\&\alpha_1]^+f(x)\mathrm{d}x+(1-\beta_1)^{-1}\int_q^{+\infty}[-\varphi pq-\\&b_1\tau b_2 q+\varphi\tau b_2^2 q+qw-\alpha_1]^+f(x)\mathrm{d}x\Big\}=\\&\min_{\alpha_1\epsilon R}G_r(q,b_2,\alpha_1).\end{aligned}\tag{6}$$

当 $\alpha_1\leqslant-\varphi pq-b_1\tau b_2 q+\varphi\tau b_2^2 q+qw$ 时, 有

$$\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]=$$

$$\min_{\alpha_1\epsilon R}\Big\{\alpha_1+(1-\beta_1)^{-1}\int_0^q[-\varphi(px+vq-vx)-$$
$$b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw-\alpha_1]f(x)\mathrm{d}x+$$
$$(1-\beta_1)^{-1}\int_q^{+\infty}[-\varphi pq-b_1\tau b_2q+$$
$$\varphi\tau b_2^2q+qw-\alpha_1]f(x)\mathrm{d}x\Big\}=$$
$$\min_{\alpha_1\epsilon R}\Big\{\alpha_1+(1-\beta_1)^{-1}\Big[-\varphi pq-b_1\tau b_2q+$$
$$\varphi\tau b_2^2q+qw-\alpha_1+\varphi(p-v)\int_0^qF(x)\mathrm{d}x\Big]\Big\}=$$
$$\min_{\alpha_1\epsilon R}G_r(q,b_2,\alpha_1),\tag{7}$$
$$\frac{\mathrm{d}G_r(q,b_2,\alpha_1)}{\mathrm{d}\alpha_1}=1-(1-\beta_1)^{-1}<0.\tag{8}$$
当
$$\begin{cases}\alpha_1>-\varphi pq-b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw,\\ \alpha_1\leqslant-\varphi vq-b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw,\end{cases}$$
$$q_1=\frac{-\varphi vq-b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw-\alpha_1}{\varphi(p-v)}\leqslant q\tag{9}$$
时, 有
$$\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]=$$
$$\min_{\alpha_1\epsilon R}\Big\{\alpha_1+(1-\beta_1)^{-1}\int_0^{q_1}[-\varphi(px+vq-vx)-$$
$$b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw-\alpha_1]f(x)\mathrm{d}x\Big\}=$$
$$\min_{\alpha_1\epsilon R}\Big\{\alpha_1+(1-\beta_1)^{-1}\varphi(p-v)\int_0^{q_1}F(x)\mathrm{d}x\Big\}=$$
$$\min_{\alpha_1\epsilon R}G_r(q,b_2,\alpha_1),\tag{10}$$
$$\frac{\mathrm{d}G_r(q,b_2,\alpha_1)}{\mathrm{d}\alpha_1}=1-(1-\beta_1)^{-1}F(q_1)=0,\tag{11}$$
$$q_1^*=F^{-1}(1-\beta_1),\tag{12}$$
$$\alpha_1^*=-\varphi(p-v)F^{-1}(1-\beta_1)-\varphi vq-$$
$$b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw.\tag{13}$$
当 $\alpha_1>-\varphi vq-b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw$ 时, 有
$$\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]=$$
$$\min_{\alpha_1\epsilon R}\{\alpha_1\}=\min_{\alpha_1\epsilon R}G_r(q,b_2,\alpha_1).\tag{14}$$
依据前文分析可知, 当 $q<F^{-1}(1-\beta_1)$ 时, 有
$$\alpha_1^*=-\varphi pq-b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw,$$
$$\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]=G_r(q,b_2,\alpha_1^*)=$$
$$-\varphi pq-b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw+$$
$$(1-\beta_1)^{-1}\varphi(p-v)\int_0^qF(x)\mathrm{d}x;\tag{15}$$
当 $q\geqslant F^{-1}(1-\beta_1)$ 时, 有
$$\alpha_1^*=-\varphi(p-v)F^{-1}(1-\beta_1)-\varphi vq-$$
$$b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw,$$
$$\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]=G_r(q,b_2,\alpha_1^*)=$$
$$-\varphi(p-v)F^{-1}(1-\beta_1)-\varphi vq-$$
$$b_1\tau b_2q+\varphi\tau b_2^2q+qw+$$
$$(1-\beta_1)^{-1}\varphi(p-v)\int_0^{F^{-1}(1-\beta_1)}F(x)\mathrm{d}x.\tag{16}$$
同理可求得制造商基于负收益的条件风险值为: 当 $q<F^{-1}(1-\beta_2)$ 时, 有
$$\mathrm{CVaR}_{\beta_2}[-\pi_m(w,b_1)]=$$
$$-(1-\varphi)pq-(C_m-C_{rm}-b_1)\tau b_2q+$$
$$(1-\varphi)\tau b_2^2q-qw+qC_m+$$
$$(1-\beta_2)^{-1}(1-\varphi)(p-v)\int_0^qF(x)\mathrm{d}x;\tag{17}$$
当 $q\geqslant F^{-1}(1-\beta_2)$ 时, 有
$$\mathrm{CVaR}_{\beta_2}[-\pi_m(w,b_1)]=$$
$$-(1-\varphi)(p-v)F^{-1}(1-\beta_2)-(1-\varphi)vq-$$
$$(C_m-C_{rm}-b_1)\tau b_2q+(1-\varphi)\tau b_2^2q-$$
$$qw+qC_m+(1-\beta_2)^{-1}\times$$
$$(1-\varphi)(p-v)\int_0^{F^{-1}(1-\beta_2)}F(x)\mathrm{d}x.\tag{18}$$
因为条件风险值模型 CVaR 是一个一致性风险度量模型, 具有次可加性[13], 所以整个闭环供应链基于负收益的条件风险值为
$$\mathrm{CVaR}_{\beta}[-\pi(q,b_2)]=$$
$$\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]+\mathrm{CVaR}_{\beta_2}[-\pi_m(w,b_1)].\tag{19}$$
又因 $\beta_1>\beta_2\geqslant0$, 故 $F^{-1}(1-\beta_2)>F^{-1}(1-\beta_1)$. 当 $q<F^{-1}(1-\beta_1)$ 时, 有
$$\mathrm{CVaR}_{\beta}[-\pi(q,b_2)]=$$
$$-pq-(C_m-C_{rm}-b_2)\tau b_2q+$$
$$qC_m+(p-v)[\varphi(1-\beta_1)^{-1}+$$
$$(1-\varphi)(1-\beta_2)^{-1}]\int_0^qF(x)\mathrm{d}x;\tag{20}$$
当 $F^{-1}(1-\beta_1)\leqslant q\leqslant F^{-1}(1-\beta_2)$ 时, 有
$$\mathrm{CVaR}_{\beta}[-\pi(q,b_2)]=$$
$$-\varphi(p-v)F^{-1}(1-\beta_1)-(1-\varphi)pq-$$
$$\varphi vq+qC_m-(C_m-C_{rm}-b_2)\tau b_2q+$$
$$(1-\beta_1)^{-1}\varphi(p-v)\int_0^{F^{-1}(1-\beta_1)}F(x)\mathrm{d}x+$$
$$(1-\beta_2)^{-1}(1-\varphi)(p-v)\int_0^qF(x)\mathrm{d}x;\tag{21}$$
当 $q>F^{-1}(1-\beta_2)$ 时, 有
$$\mathrm{CVaR}_{\beta}[-\pi(q,b_2)]=$$
$$-\varphi(p-v)F^{-1}(1-\beta_1)-(1-\varphi)(p-v)F^{-1}(1-$$
$$\beta_2)-vq-(C_m-C_{rm}-b_2)\tau b_2q+qC_m+$$

$$(1-\beta_1)^{-1}\varphi(p-v)\int_0^{F^{-1}(1-\beta_1)}F(x)\mathrm{d}x+$$
$$(1-\beta_2)^{-1}(1-\varphi)(p-v)\int_0^{F^{-1}(1-\beta_2)}F(x)\mathrm{d}x. \quad (22)$$

4 基于CVaR的闭环供应链优化与协调决策模型

4.1 零售商基于CVaR的优化决策模型

为了求得使零售商基于负收益的条件风险值最小的订购量和废旧品回收价格, 分别求 $\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]$ 对 b_2 与 q 的一阶偏导数, 可得

$$\frac{\partial \mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]}{\partial b_2}=-b_1\tau q+2\varphi\tau b_2 q; \quad (23)$$

$$\frac{\partial \mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]}{\partial q}=$$
$$\begin{cases} -\varphi p-b_1\tau b_2+\varphi\tau b_2^2+w+ \\ (1-\beta_1)^{-1}\varphi(p-v)F(q), \\ \quad q<F^{-1}(1-\beta_1),\ b_1<\sqrt{\dfrac{4\varphi(w-\varphi v)}{\tau}}; \\ -\varphi v-b_1\tau b_2+\varphi\tau b_2^2+w,\ q\geqslant F^{-1}(1-\beta_1). \end{cases} \quad (24)$$

由式(23)与(24)等于零, 可得

$$b_{2r}^*=b_1/(2\varphi). \quad (25)$$

当 $q<F^{-1}(1-\beta_1)$ 时, 有

$$F(q)=\frac{\varphi p+\tau\dfrac{b_1^2}{4\varphi}-w}{\varphi(p-v)}(1-\beta_1)<(1-\beta_1),$$

$$q_r^*=F^{-1}\Big\{\frac{\varphi p+\tau\frac{b_1^2}{4\varphi}-w}{\varphi(p-v)}(1-\beta_1)\Big\}. \quad (26)$$

由二元函数极值判定方法可知, (b_{2r}^*,q_r^*) 为使闭环供应链中零售商基于负收益的条件风险值最小的最优决策集.

4.2 闭环供应链基于CVaR的优化决策模型

为了求得使闭环供应链基于负收益的条件风险值最小的订购量和废旧品回收价格, 分别求 $\mathrm{CVaR}_\beta[-\pi(q,b_2)]$ 对 b_2 与 q 的一阶偏导数, 可得

$$\frac{\partial \mathrm{CVaR}_\beta[-\pi(q,b_2)]}{\partial b_2}=$$
$$\tau b_2 q-(C_m-C_{rm}-b_2)\tau q. \quad (27)$$

考虑到零售商只有在 $q<F^{-1}(1-\beta_1)$ 的情况下才有最优订购量, 所以此处亦只在 $q<F^{-1}(1-\beta_1)$ 情况下求 $\mathrm{CVaR}_\beta[-\pi(q,b_2)]$ 对 q 的一阶偏导数, 即

$$\frac{\partial \mathrm{CVaR}_\beta[-\pi(q,b_2)]}{\partial q}=$$
$$-p-(C_m-C_{rm}-b_2)\tau b_2+C_m+$$
$$(p-v)[\varphi(1-\beta_1)^{-1}+(1-\varphi)(1-\beta_2)^{-1}]F(q). \quad (28)$$

由式(27)和(28)等于零, 可得

$$b_{2sc}^*=(C_m-C_{rm})/2, \quad (29)$$

$$F(q)=\frac{p+(C_m-C_{rm}-b_2)\tau b_2-C_m}{(p-v)[\varphi(1-\beta_1)^{-1}+(1-\varphi)(1-\beta_2)^{-1}]}.$$

当

$$\frac{p+\tau\dfrac{(C_m-C_{rm})^2}{4}-C_m}{(p-v)[\varphi(1-\beta_1)^{-1}+(1-\varphi)(1-\beta_2)^{-1}]}<1-\beta_1$$

时, 有

$$q_{sc}^*=$$
$$F^{-1}\Big(\frac{p+(C_m-C_{rm}-b_2)\tau b_2-C_m}{(p-v)[\varphi(1-\beta_1)^{-1}+(1-\varphi)(1-\beta_2)^{-1}]}\Big)<$$
$$F^{-1}(1-\beta_1). \quad (30)$$

由二元函数极值判定方法可知, (b_{2sc}^*,q_{sc}^*) 是使闭环供应链系统基于负收益的条件风险值最小的最优决策集.

4.3 闭环供应链基于CVaR的协调决策模型

为了实现闭环供应链的完美协调, 必须使零售商的最优决策集等于闭环供应链的最优决策集. 由 $b_{2r}^*=b_{2sc}^*$ 与 $q_r^*=q_{sc}^*$ 可得

$$b_1^*=\varphi(C_m-C_{rm}), \quad (31)$$

$$w^*=\varphi p-\frac{\varphi\Big[p+\dfrac{\tau(C_m-C_{rm})^2}{4}-C_m\Big](1-\beta_2)}{\varphi(1-\beta_2)+(1-\beta_1)(1-\varphi)}+$$
$$\frac{\tau\varphi(C_m-C_{rm})^2}{4};$$

s.t.

$$\begin{cases} \dfrac{p+\tau\dfrac{(C_m-C_{rm})^2}{4}-C_m}{(p-v)[\varphi(1-\beta_1)^{-1}+(1-\varphi)(1-\beta_2)^{-1}]}<1-\beta_1, \\ b_1<\sqrt{\dfrac{4\varphi(w-\varphi v)}{\tau}}. \end{cases} \quad (32)$$

综上所述, (b_1^*,w^*) 是在 $q<F^{-1}(1-\beta_1)$ 条件下制造商使闭环供应链实现完美协调的最优决策集.

由前文讨论可得如下命题:

命题1 在 $F^{-1}(1-\beta_1)\leqslant q\leqslant F^{-1}(1-\beta_2)$ 和 $q>F^{-1}(1-\beta_2)$ 条件下, 收益共享费用共担契约无法实现闭环供应链的协调运作.

将 b_1^* 与 w^* 分别代入零售商与闭环供应链基于负收益的条件风险值模型后, 可得

$$\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]=$$
$$(1-\beta_1)^{-1}\varphi(p-v)\int_0^q F(x)\mathrm{d}x-$$
$$\frac{\varphi\Big[p+\tau\dfrac{(C_m-C_{rm})^2}{4}-C_m\Big](1-\beta_2)q}{(1-\beta_2)\varphi+(1-\beta_1)(1-\varphi)}, \quad (33)$$

$$\mathrm{CVaR}_{\beta}[-\pi(q,b_2)]=$$
$$(p-v)[\varphi(1-\beta_1)^{-1}+(1-\varphi)(1-\beta_2)^{-1}]\times$$
$$\int_0^q F(x)\mathrm{d}x-pq-\tau\frac{(C_m-C_{rm})^2q}{4}+qC_m,\tag{34}$$
$$\mathrm{CVaR}_{\beta_1}[-\pi_r(q,b_2)]=$$
$$\mathrm{CVaR}_{\beta}[-\pi(q,b_2)]\frac{\varphi(1-\beta_2)}{\varphi(1-\beta_2)+(1-\varphi)(1-\beta_1)}.\tag{35}$$

由此可知, 当 $q<F^{-1}(1-\beta_1)$ 时, 在收益共享费用共担契约 $T(w^*,b_1^*,\varphi,q,b_2)$ 下, 零售商的条件风险值是闭环供应链条件风险值的常数项为零的线性函数, 因此使零售商条件风险值最小的最优决策亦是使整个闭环供应链条件风险值最小的最优决策, 这进一步说明 (b_1^*,w^*) 能实现闭环供应链的完美协调.

在文中假设条件下, 由 b_{2r}^* 和 b_1^* 可得如下命题:

命题 2　零售商面向消费者以及制造商面向零售商的废旧品回收价格与两者的风险规避水平无关.

命题 2 可作如下解释: 因为零售商的订购量大于废旧品的回收量, 而 $C_m>C_{rm}+b_1$, $b_1>b_2+C_1$, 所以无论是零售商还是制造商, 其通过废旧品回收或再造所得收益均与废旧品回收数量成正比, 即废旧品回收量越大, 其基于负收益的条件风险值越小, 因而零售商面向消费者和制造商面向零售商的废旧品回收价格与两者的风险规避水平无关.

求协调参数 w^* 对 β_1 与 β_2 的偏导数, 得

$$\frac{\partial w^*}{\partial\beta_1}=-\frac{\varphi\Omega(1-\beta_2)(1-\varphi)}{\Delta^2}<0,\tag{36}$$
$$\frac{\partial w^*}{\partial\beta_2}=\frac{\varphi\Omega(1-\beta_1)(1-\varphi)}{\Delta^2}>0.\tag{37}$$

其中

$$\Delta=[(1-\beta_2)\varphi+(1-\beta_1)(1-\varphi)],$$
$$\Omega=\Big[p+\tau\frac{(C_m-C_{rm})^2}{4}-C_m\Big].$$

由上可得如下命题:

命题 3　产品批发价格随着零售商风险规避水平的增大而降低, 且随着制造商风险规避水平的增大而上升.

另外, 在协调状态下, 分别求最优订购量 $q^*=q_r^*=q_{sc}^*$ 对 β_1 与 β_2 的偏导数, 得

$$\frac{\partial q^*}{\partial\beta_1}=\frac{(1-\beta_2)\Omega[-\varphi(1-\beta_2)]}{(p-v)\Delta^2}<0,\tag{38}$$
$$\frac{\partial q^*}{\partial\beta_2}=\frac{(1-\beta_1)\Omega[-(1-\varphi)(1-\beta_1)]}{(p-v)\Delta^2}<0.\tag{39}$$

由上可得如下命题:

命题 4　最优订购量随着零售商风险规避水平的增大而减小, 亦随着制造商风险规避水平的增大而减小.

同理可得如下命题:

命题 5　在协调状态下, 零售商与闭环供应链基于负收益的条件风险值随着零售商风险规避水平的增大而增大, 亦随着制造商风险规避水平的增大而增大; 制造商基于负收益的条件风险值随着自身风险规避水平的增大而减小, 随着零售商风险规避水平的增大而增大.

5　数值算例分析

考虑由一个制造商与一个零售商组成的闭环供应链. 假定市场需求 D 服从均匀分布 $(110, 1\,110)$, $p=90$, $C_m=55$, $C_{rm}=25$, $\varphi=0.64$, $v=20$, $\tau=0.06$. 将上述参数取值代入相关模型, 可得 $b_1^*=19.2$, $b_{2r}^*=15$. 不同风险组合下的最优批发价格、最优订购量、零售商和制造商以及闭环供应链的条件风险值分别如表 1～表 5 所示. 其中: 表 1 验证了命题 3, 表 2 验证

表 1　闭环供应链基于条件风险值的最优批发价格

β_1	β_2					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	34.04					
0.2	32.79	33.91				
0.3	31.44	32.50	33.74			
0.4	29.98	30.97	32.13	33.52		
0.5	28.39	29.29	30.36	31.64	33.22	
0.6	26.65	27.44	28.39	29.54	30.97	32.79
0.7	24.74	25.40	26.19	27.16	28.39	29.98
0.8	22.64	23.13	23.72	24.46	25.40	26.65

表 2　闭环供应链基于条件风险值的最优订货量

β_1	β_2					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	647					
0.2	597	577				
0.3	544	527	508			
0.4	486	472	457	438		
0.5	422	412	400	386	369	
0.6	353	346	338	328	315	299
0.7	278	273	268	262	253	243
0.8	195	192	190	187	182	177

表 3　零售商的条件风险值

β_1	β_2					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	-8 791					
0.2	-8 433	-7 880				
0.3	-7 985	-7 507	-6 966			
0.4	-7 432	-7 034	-6 576	-6 053		
0.5	-6 751	-6 433	-6 067	-5 639	-5 135	
0.6	-5 909	-5 674	-5 400	-5 076	-4 688	-4 215
0.7	-4 867	-4 716	-4 534	-4 315	-4 051	-3 716
0.8	-3 580	-3 503	-3 406	-3 288	-3 144	-2 953

表 4 制造商的条件风险值

β_1	β_2					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	-4 450					
0.2	-3 794	-3 939				
0.3	-3 144	-3 284	-3 428			
0.4	-2 508	-2 637	-2 774	-2 918		
0.5	-1 899	-2 010	-2 133	-2 265	-2 407	
0.6	-1 330	-1 419	-1 517	-1 631	-1 758	-1 896
0.7	-821	-884	-956	-1 040	-1 139	-1 254
0.8	-403	-438	-479	-529	-590	-665

表 5 闭环供应链的条件风险值

β_1	β_2					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	-13 241					
0.2	-12 227	-11 819				
0.3	-11 129	-10 791	-10 394			
0.4	-9 940	-9 671	-9 350	-8 971		
0.5	-8 650	-8 443	-8 200	-7 904	-7 542	
0.6	-7 239	-7 093	-6 917	-6 707	-6 446	-6 111
0.7	-5 688	-5 600	-5 490	-5 355	-5 190	-4 970
0.8	-3 983	-3 941	-3 885	-3 817	-3 734	-3 618

了命题 4, 表 3～表 5 验证了命题 5.

由表 1～表 4 可知, 随着零售商风险规避水平的增加, 其采用了降低订货量的策略; 而制造商为了激励零售商多订货则采取了降低批发价格的策略, 但批发价格的降低只是减缓了零售商订货量下降的速度, 并没有改变零售商订货量下降的趋势, 这说明订货量的下降对零售商条件风险值的减小影响更大. 随着制造商风险规避水平的增加, 其采取提高批发价格的策略虽导致了零售商订货量的下降, 但却使其条件风险值减小, 这说明批发价格的提升对制造商条件风险值的减小影响更大. 由表 5 可知, 任何闭环供应链成员风险规避水平的增大, 均对供应链系统收益存在负面影响, 因此降低供应链不确定性和保持成员间彼此的信任非常重要.

6 结 论

本文在假设废旧品回收量受回收价格与销量交互作用影响的基础上, 以具有风险规避特性的两阶闭环供应链为研究对象, 利用条件风险值理论研究了其基于收益共享费用共担契约的优化与协调问题, 建立了随机需求下闭环供应链基于负收益的条件风险值模型, 以及基于条件风险值的最优订购量和最优批发价格模型, 揭示了制造商与零售商的风险规避水平对闭环供应链定价、订货、条件风险值及协调的影响. 关于收益共享风险共担契约设计和零售商驱动的闭环供应链契约设计将是今后进一步研究的问题.

参考文献(References)

[1] Mayer R C, Davis J H, Schoorman F D. An integrative model of organizational trust[J]. Academy of Management Review, 1995, 20(3): 709-734.

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

[3] Vorasayanj, Ryansm. Optimal price and quantity of refurbished products[J]. Production and Operations Management, 2006, 15(3): 369-383.

[4] Ferguson M, Guide V D R, Souza G C. Supply chain coordination for failure returns[J]. Manufacturing and Service Operations Management, 2006, 8(4): 376-393.

[5] 王玉燕, 李帮义, 乐菲菲. 两个闭环供应链的定价模型研究[J]. 预测, 2006, 25(6): 70-73.
(Wang Y Y, Li B Y, Yue F F. The research on two price decision models of the closed-loop supply chain[J]. Forecasting, 2006, 25(6): 70-73.)

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

[7] 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.)

[8] 葛静燕, 黄培清. 基于博弈论的闭环供应链定价策略分析[J]. 系统工程学报, 2008, 23(1): 111-115.
(Ge J Y, Huang P Q. Price decision analysis for closed-loop supply chain based on game theory[J]. J of Systems Engineering, 2008, 23(1): 111-115.)

[9] 黄祖庆, 易荣华, 达庆利. 第三方负责回收的再制造闭环供应链决策结构的效率分析[J]. 中国管理科学, 2008, 16(3): 73-77.
(Huang Z Q, Yi R H, Da Q L. Study on the efficiency of the closed-loop supply chains with remanufacture based on third-party collecting[J]. Chinese J of Management, 2008, 16(3): 73-77.)

[10] Jie Li. Retailer-driven closed-loop supply chains with product remanufacturing[D]. Iowa: Iowa State University, 2006: 12-19.

(下转第500页)