

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.01.028

风险规避下不确定供应链收益共享契约模型

朱宝琳, 戚亚萍, 戢守峰, 邱若臻

(东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 针对零售商风险规避下单一供应商产出不确定、制造商产出确定和零售商需求不确定组成的三级供应链系统,建立了基于 CVaR 准则下供应链收益共享契约协调模型. 比较了集中、分散和风险规避模型的特征,给出了基于收益共享的供应链契约协调机制. 分析了产出和需求不确定性对供应链成员期望利润和决策的影响. 最后,通过数值算例说明了收益共享契约协调的有效性. 结果表明对于风险规避下不确定三级供应链系统,运用收益共享契约可以使分散的期望利润达到集中决策的水平,最终实现三级供应链系统协调的目的.

关 键 词: 供应链管理; 收益共享契约; 风险规避; CVaR; 协调

中图分类号: F 273; F 324 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)01-0138-05

Profit Sharing Contract Model for Supply Chain of Uncertainties Under Risk Aversion

ZHU Bao-lin, QI Ya-ping, JI Shou-feng, QIU Ruo-zhen
(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: ZHU Bao-lin, E-mail: blzhu@mail.neu.edu.cn)

Abstract: For a three-stage supply chain system which consists of single supplier with yield uncertainty, manufacturer with yield certainty and retailer with demand uncertainty under retailer risk aversion, a profit sharing contract model based on CVaR principles was established. The characteristics of centralization, decentralization and risk aversion model were compared, and a profit sharing contract coordination mechanism was proposed. The impact of yield and demand uncertainties on decision and expected profit was analyzed. Finally, the validity of contract coordination was presented by a numerical example. The results showed that the expected profit of decentralization can be proven to be at the level of that of centralization decision by the profit sharing contract. The goal of coordination is ultimately achieved for the three-stage supply chain system.

Key words: supply chain management; profit sharing contract; risk aversion; CVaR; coordination

契约机制是供应链协调的一种常用手段. 针对供应链契约协调问题,学术界进行了大量的研究. 邱若臻等^[1]通过研究需求不确定下的供应链鲁棒对策问题,得出集成和分散供应链中最优的鲁棒订货量和批发价格. 李凯等^[2]研究了需求均匀分布的单一生产商和分销商组成的两级供应链,通过奖惩比例因子对供应链进行契约协调. Li 等^[3]分析了产需不确定下单制造商和两个供应商组成的供应链协调模型,通过批发价格契约和

纳什均衡求解出制造商的最优采购量和供应商的最优批发价格. Chen 等^[4]研究了生产提前期和需求信息更新对供应链协调的影响,通过风险共担契约提高了整个供应链的绩效以及供应链成员的期望利润. Huang 等^[5]研究了销售商或第三方双渠道回收的闭环供应链模型,分析并得出双渠道回收优于单渠道的参数取值范围. 代建生等^[6]运用 CVaR 方法研究了改进收益共享契约对零售商风险规避系数和促销努力的影响. He^[7]研究了风

险规避制造商和风险中性供应商组成的两级闭环供应链定价模型,运用补偿契约实现了供应链的协调. Liu 等^[8]研究了风险规避下制造商在期权和价格折扣契约下的最优决策问题. Ma 等^[9]研究了需求不确定下零售商风险规避的定价问题,通过 CVaR 得出供应链协调下的纳什均衡解.

本文研究了产需不确定环境下零售商风险规避的三级供应链契约协调模型. 使用收益共享契约使供应链的期望利润达到集中决策水平. 通过数值算例验证了契约协调的有效性.

1 问题描述与研究假设

1.1 问题定义与描述

本文描述了不确定环境下零售商风险规避的三级供应链契约协调问题. 假定供应商产出不确定,如原材料投入量是 L ,则实际产出量为 $K = uL$, u 是一个非负随机变量. 零售商也面临市场需求不确定性的影响,可假定顾客需求为 D ,零售商的订购量为 Q ,制造商的订购量为 R . 在现实供应链环境中,不确定性往往会带来风险问题. 本文假设零售商在面对市场需求不确定时的态度是风险规避的. 因此本文研究的问题顺序如图 1 所示.

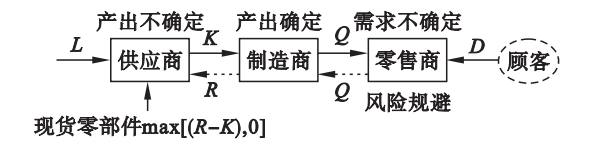


图 1 风险规避下供应链结构图

Fig. 1 Structure of supply chain under risk aversion

1.2 研究假设

1)产品的零售价大于产品采购成本与销售成本之和, $p > w_m + c_r$;2)制造商的产品批发价格大于其生产成本与采购成本, $w_m > c_m + w_s$;3)供应商的零部件批发价大于其生产成本, $w_s > c_s$;4)零售商的产品销售成本高于其残值, $c_r > v_r$;5)现货市场的单位价格高于供应商的生产成本, $C_p > c_s$.

1.3 符号与参数说明

1.3.1 基本参数

C_p 为供应商从现货市场购买零件的单位价格; v_i 为供应链未售出零件的单位残值, $i = s, m, r$; c_i 为供应链上各成员的单位边际成本; K 为供应商零件的产出数量 $K = uL$, u 为供应商随机产出因子,一个非负随机变量; $g(y)$ 为 u 的概率密度函数,假设 $g(y)$ 在 $[a, b]$ 之间,并且有 $0 < a < b \leq 1$; $G(y)$ 为 u 的累积分布函数; μ 为市场需求的均值; σ 为市场需求均值的标准差; μ_1 为供应

商随机产出因子的均值; σ_1 为供应商随机产出因子的标准差; η 为零售商风险规避因子, $0 < \eta \leq 1$; p 为最终产品的零售价格,为一个常数; D 为市场随机需求; $f(x)$ 为 D 的概率密度函数; $F(x)$ 为 D 的累积分布函数, $F(x)$ 是可微并且严格单调递增的, $F(0) = 0$.

1.3.2 契约协调与利润相关参数

φ 为收益共享契约下零售商保留自身收益的比例; Π_T^c 为集中决策下整个供应链利润; Π_i 为分散无协调下各成员利润; Π_i^* 为分散无协调下各成员最优利润; Π_i^{**} 为协调后各成员最优利润.

1.3.3 决策变量

Q 为零售商的订货量; L 为供应商的原材料计划投入量; w_s 为供应商单位零部件的批发价格; w_m 为制造商单位产品的批发价格.

2 供应链集中决策模型

根据前述模型假设,集中决策下供应链的利润及期望利润函数如下所示:

$$\begin{aligned} \Pi_T^c = & p \min(Q, D) - c_r Q - c_m R - c_s L - \\ & C_p [R - uL]^+ + v_r [Q - D]^+ + \\ & v_m (R - Q) + v_s [uL - R]^+, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E(\Pi_T^c) = & (p - v_r) S(Q) + (C_p - v_s) S(L, R) - \\ & (c_r - v_r + v_m) Q - (C_p - v_m + c_m) R - \\ & (c_s - v_s \mu_1) L. \end{aligned} \quad (2)$$

其中:

$$S(Q) = E[\min(Q, D)] = \int_0^Q xf(x) dx + Q \int_Q^{+\infty} f(x) dx;$$

$$S(L, R) = E[\min(uL, R)] = R - L \int_A^{\frac{R}{L}} G(y) dy.$$

式(1)中各项分别为零售商出售产成品的收益、零售商的销售成本、制造商生产成本、供应商生产成本、供应商从现货市场购买零部件的成本、零售商的残值收益、制造商的残值收益、供应商的残值收益.

命题 1 集中决策下三级供应链的期望利润函数 $E(\Pi_T^c)$ 取得最大值时 L^c, Q^c 满足

$$F(Q^c) = \frac{p - v_m - c_r}{p - v_r}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial S(L^c, R^c)}{\partial L} = \frac{c_s - v_s \mu_1}{C_p - v_s}. \quad (4)$$

式中, L^c 和 Q^c 分别表示集中决策下供应商的最优原材料计划投入量和零售商的最优订购量.

证明 在式(2)中分别对 Q 和 L 求一阶和二阶偏导,可以得到海塞矩阵为

$$H(Q,L)=\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E(\Pi_T^c)}{\partial Q^2} & \frac{\partial^2 E(\Pi_T^c)}{\partial Q\partial L} \\ \frac{\partial^2 E(\Pi_T^c)}{\partial L\partial Q} & \frac{\partial^2 E(\Pi_T^c)}{\partial L^2} \end{bmatrix}>0.$$

由上式可知海塞矩阵负定, $E(\Pi_T^c)$ 是关于 (Q,L) 的凹函数, 存在唯一的最大值 (Q^c,L^c) 使得 $E(\Pi_T^c)$ 取得最大值, 由二元函数取得最大值的一阶条件 $\frac{\partial E(\Pi_T^c)}{\partial Q}=0$ 和 $\frac{\partial E(\Pi_T^c)}{\partial L}=0$, 可得命题 1, 证毕.

定义 $z=\frac{R}{L}$, z 表示原材料的产出投入比, 通过式(4)可以看出, z 依赖于供应商随机产出因子、生产成本、未出售零部件的残值收益和零部件现货市场的价格.

3 供应链风险规避模型

3.1 零售商风险规避模型

分散无协调下零售商的利润函数如下所示:
 $\Pi_r=p\min(Q,D)+v_r[Q-D]^+-w_mQ-c_rQ,$ (5)
 $E(\Pi_r)=(p-v_r)S(Q)-(w_m+c_r-v_r)Q.$ (6)
式(5)中各项分别为零售商的销售收入、未售出产品的残值收益、采购成本和销售成本.

CVaR 是在 VaR 的基础上发展出来的一种风险计量方法, 主要利用置信水平对期望函数进行描述. 基于 CVaR 的零售商风险利润可以描述为 $\max_Q[CVaR_\eta(\Pi_r(Q))]=\max_v\{v+\frac{1}{\eta}E[\min(\Pi_r(Q)-v,0)]\}=v-\frac{1}{\eta}E[v-\Pi_r(Q)]^+=v-\frac{1}{\eta}\int_0^Q[v-(p-v_r)x+(w_m+c_r-v_r)Q]^+dF(x)-\frac{1}{\eta}\int_Q^{+\infty}[v-(p-v_r)Q+(w_m+c_r-v_r)Q]^+dF(x).$ (7)

引理 1 存在唯一的 $v^*=(p-w_m-c_r)Q$, 使 $CVaR_\eta(\Pi_r(Q))$ 取极大值. 证明略.

运用引理 1 的结论, 将式(7)改写为 $CVaR_\eta(\Pi_r(Q))=(p-w_m-c_r)Q-\frac{1}{\eta}\int_0^Q[(p-v_r)Q-(p-v_r)x]dF(x).$ (8)

分散无协调下存在唯一的最优决策变量 Q^* 使零售商的期望利润 $E(\Pi_r)$ 取得最大值, 且 Q^* 满足

$$Q^*=F^{-1}[\frac{\eta(p-w_m-c_r)}{p-v_r}].$$
 (9)

3.2 制造商决策模型

制造商按照零售商的最优订货量进行生产, 即 $R=Q^*$, 制造商的期望利润函数为

$$E(\Pi_m)=(w_m-w_s-c_m)Q^*.$$
 (10)

3.3 供应商决策模型

供应商的利润函数如下所示:
 $\Pi_s=w_sR-c_sL+v_s[uL-R]^+-C_p[R-uL]^+,$ (11)
 $E(\Pi_s)=(w_s-C_p)R-(c_s-v_s\mu_1)L+(C_p-v_s)S(L,R).$ (12)

式(11)中各项分别为供应商的销售收益、生产成本、未出售零部件的残值收益和从现货市场购买零部件的成本.

分散无协调下存在唯一的最优决策变量 L^* 使得零售商的期望利润 $E(\Pi_s)$ 取得最大值, 且 L^* 满足

$$\frac{\partial S(L^*,R)}{\partial L}=\frac{c_s-v_s\mu_1}{C_p-v_s}.$$
 (13)

3.4 风险规避下供应链批发价问题

在式(10)中对 w_m 求一阶导数, 可以得到唯一最优的 w_m^* , 满足如下条件:

$$w_m^*=\frac{1}{\eta}(p-v_r)Q^*f(Q^*)+w_s^*+c_m.$$
 (14)

在式(14)中 w_m^* 对 w_s 求一阶导数可得 $\frac{dw_m^*}{dw_s}=\frac{f(Q^*)}{2f(Q^*)+Q^*f'(Q^*)}.$
供应商的期望利润函数为 $E(\Pi_s^*)=[w_s-v_s-(C_p-v_s)G(z)]\times F^{-1}[\frac{\eta(p-w_m^*-c_r)}{p-v_r}].$ (15)

由 $\frac{dE(\Pi_s^*)}{dw_s}=0$, 可得 $w_s^*=\frac{1}{\eta}(p-v_r)Q^*[2f(Q^*)+Q^*f'(Q^*)]+v_s+(C_p-v_s)G(z).$ (16)

通过比较式(3)和式(9), 可以证明分散下零售商风险规避时的最优订货量 Q^* 小于集中决策水平, 由此产生双重边际效应. 为了消除此效应, 本文用收益共享契约机制对供应链进行协调.

4 供应链契约协调模型

4.1 零售商风险规避契约协调模型

在收益共享契约下, 制造商会以低于成本的价格出售最终产品给零售商, 制造商分享零售商的收益比例为 $1-\varphi$, 零售商的收益比例为 φ . 零售商的利润及期望利润分别为

$$\Pi_r = \varphi [p \min(Q, D) + v_r [Q - D]^+] - w_m Q - c_r Q, \quad (17)$$

$$E(\Pi_r) = \varphi(p - v_r)S(Q) - (w_m + c_r - \varphi v_r)Q. \quad (18)$$

风险规避下零售商的期望利润函数为

$$\begin{aligned} \text{CVaR}_\eta(\Pi_r(Q)) &= v - \frac{1}{\eta} E[v - \Pi_r(Q)]^+ = \\ &v - \frac{1}{\eta} \int_0^Q [v - \varphi(p - v_r)x + (w_m + c_r - \varphi v_r)Q]^+ \times \\ &dF(x) - \frac{1}{\eta} \int_Q^{+\infty} [v - \varphi(p - v_r)Q + (w_m + c_r - \\ &\varphi v_r)Q]^+ dF(x). \end{aligned} \quad (19)$$

引理 2 存在唯一的 $v^* = (\varphi p - w_m - c_r)Q$, 使 $\text{CVaR}_\eta(\Pi_r(Q))$ 取极大值. 证明略.

运用引理 1 的结论, 将式 (19) 改为

$$\begin{aligned} \text{CVaR}_\eta(\Pi_r(Q)) &= (\varphi p - w_m - c_r)Q - \\ &\frac{1}{\eta} \int_0^Q [\varphi(p - v_r)Q - \varphi(p - v_r)x] dF(x). \end{aligned} \quad (20)$$

式 (17) 分别为收益共享契约下零售商保留的部分收益、采购成本和销售成本. 在收益共享契约下, 存在唯一的最优决策 Q^{**} 使得零售商的 $E(\Pi_r)$ 取得最大值, 且 Q^{**} 满足

$$F(Q^{**}) = \frac{\eta(\varphi p - w_m - c_r)}{\varphi(p - v_r)}. \quad (21)$$

4.2 供应商契约协调模型

供应商的利润及期望利润分别为

$$\Pi_s = w_s R - c_s L + v_s [uL - R]^+ - C_p [R - uL]^+, \quad (22)$$

$$E(\Pi_s) = [w_s - v_s - (C_p - v_s)G(z)]Q^{**}. \quad (23)$$

供应商的最优原材料投入量 L^{**} 满足

$$\frac{\partial S(L^{**}, R)}{\partial L} = \frac{c_s - v_s \mu_1}{C_p - v_s}.$$

4.3 制造商契约协调模型

制造商契约协调下的利润及期望利润分别为

$$\Pi_m = (1 - \varphi)[p \min(Q, D) + v_r [Q - D]^+] + (w_m - w_s - c_m)Q^{**}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} E(\Pi_m) &= (1 - \varphi)(p - v_r)s(Q^{**}) + [w_m - \\ &w_s - c_m + (1 - \varphi)v_r]Q^{**}. \end{aligned} \quad (25)$$

命题 2 制造商批发价格 w_m^{**} 和风险规避因子 η 满足下式, 可以使三级供应链实现协调.

$$\begin{cases} \eta = \frac{\varphi(p - v_m - c_r)}{\varphi p - w_m^{**} - c_r}, \\ \varphi v_m - (1 - \varphi)c_r < w_m^{**} \leq \varphi p - c_r. \end{cases}$$

证明 为了使零售商的订货量和集中情况下的订货量相同, 即 $Q^{**} = Q^c$. 通过式 (3) 和式 (21) 可以求得收益共享因子为

$$\eta = \frac{\varphi(p - v_m - c_r)}{\varphi p - w_m^{**} - c_r}. \quad (26)$$

因为 $0 < \eta \leq 1$, 所以风险规避系数 w_m^{**} 的范围为

$$\varphi v_m - (1 - \varphi)c_r < w_m^{**} \leq \varphi p - c_r. \quad (27)$$

推论 1 Q^{**} 是 η 的增函数, φ 是 η 的减函数.

证明 利用式 (21) 和式 (26) 分别对 Q^{**} 和 φ 求关于 η 的一阶导数, 即可证明.

在收益共享契约下, 零售商越风险规避, 其订购量就越小. 因此, 在批发价格不变时, 给予风险规避零售商较高的收益共享比例, 才能使其订购量与风险中性零售商的订购量保持一致.

4.4 收益共享契约下批发价问题

命题 3 纳什均衡下实现供应链协调的供应商和制造商的批发价格 w_m^{**} , w_s^{**} 分别满足

$$\begin{aligned} w_m^{**} &= \frac{\varphi}{\varphi + (1 - \varphi)\eta} \left[\frac{\varphi}{\eta} (p - v_r)Q^{**}f(Q^{**}) - \right. \\ &(1 - \varphi)(p - v_r) + \left. \frac{(1 - \varphi)\eta}{\varphi} (\varphi p - c_r) + w_s^{**} + \right. \\ &\left. c_m - (1 - \varphi)v_r \right], \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} w_s^{**} &= \frac{\varphi}{\eta} (p - v_r)Q^{**}f(Q^{**}) \left[\frac{2\varphi + (1 - \varphi)\eta}{\varphi} + \right. \\ &\left. \frac{Q^{**}f'(Q^{**})}{f(Q^{**})} \right] + v_s + (C_p - v_s)G(z). \end{aligned} \quad (29)$$

证明过程同 3.4 节.

5 数值计算与分析

本文以某钢铁厂为例来验证契约对供应链的协调作用, 其供应链由矿石供应商和零售商组成. 各参数和假设值为: $p = 18$ 万元, $C_p = 5$ 万元, $c_s = 3.5$ 万元, $c_m = 4$ 万元, $c_r = 3$ 万元, $v_s = 3.5$ 万元, $v_m = 11$ 万元, $v_r = 13$ 万元, $\mu_1 = 0.8$, $\mu = 1\,000$, $\sigma = 500$. 通过计算得出集中、分散和契约协调后供应链参与者的期望利润 (如表 1 所示). 从表 1 中可以看出收益共享契约下零售商风险规避的最优订货量和供应商的最优原材料计划投入量等于集中决策时的结果, 供应商、制造商和零售商的期望利润大于分散决策时的期望利润, 供应链总期望利润大于集中决策供应链的期望利润.

表 1 不同情境下的最优利润						
Table 1 Optimal profit under different conditions						
情境	Q	L	$E(\Pi_s^*)$	$E(\Pi_m^*)$	$E(\Pi_r^*)$	$E(\Pi_T^*)$
集中决策	1 922	1 421	—	—	—	6 788
分散决策	—	—	1 324	663	1 249	3 012
契约协调	1 922	1 421	1 484	824	1 409	6 796

保持契约参数不变,仅改变 σ 的值,得到契约协调前后供应链各成员决策和期望利润随需求标准差变化的曲线图(如图 2 所示).从图 2 可以看出,随着需求随机性的增加,零售商和供应商的期望利润逐渐增加,制造商的期望利润虽然在减少,但是远远大于分散情况下的负收益,契约协调后的总利润达到集中决策的水平;零售商的最优订货量和供应商的最优原材料计划投入量逐渐增加,大于分散情况.

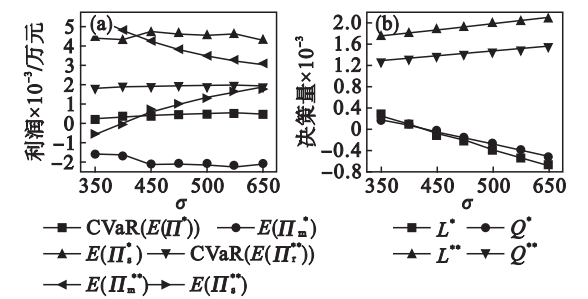


图 2 需求不确定因子对参与方期望利润和决策量的影响
Fig. 2 Impact of demand uncertainty factors on participants' expected profit and decision
(a)—利润; (b)—决策量.

保持契约参数不变,仅改变 μ_1 的值,得到供应链成员决策和期望利润随供应商随机产出因子均值的变化曲线(如图 3 所示).从图 3 中可以看出,随着供应商产出因子随机性的增加,制造商和供应商的期望利润逐渐增加,零售商的期望利润不断减少,但是远远大于分散情况,供应链总利润不断增加;在分散情况下,供应商和零售商的决策变量均为负值,为保证自己的收益,他们不会生产和订购,契约协调后,零售商的决策保持不变,供应商的原材料投入量先增加后减少.

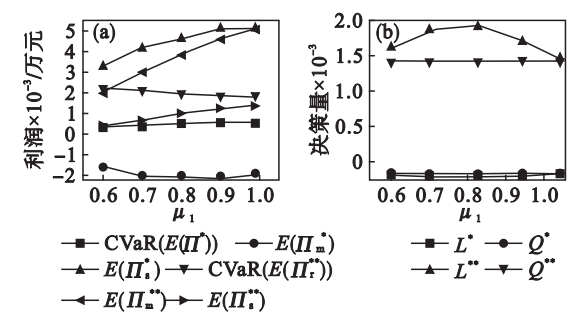


图 3 产出不确定因子对参与方期望利润和决策量的影响
Fig. 3 Impact of yield uncertainty factors on participants' expected profit and decision
(a)—利润; (b)—决策量.

6 结 论

1)随着需求随机性的增加,零售商和供应商

的期望利润逐渐增加,制造商的期望利润大于分散情况下的收益.契约协调后的总利润达到集中决策的水平.

2)随着供应商产出随机性的增加,制造商和供应商的期望利润逐渐增加,零售商的期望利润不断减少,但是远远大于分散情况.最终供应链总利润获得提高.

3)本文主要考虑供应商和零售商产需不确定的三级供应链协调问题,现实中制造商还面临着产出不确定下多渠道选择以及多个参与者风险规避问题,此类问题还有待于进一步研究.

参考文献:

[1] 邱若臻,黄小原.需求分布未知条件下的供应链鲁棒主从对策[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(8):1208-1212.
(Qiu Ruo-zhen, Huang Xiao-yuan. The condition of supply chain robust Stackelberg under demand distribution [J]. Journal of Northeast University (Natural Science), 2009, 30 (8):1208-1212.)

[2] 李凯,张迎冬,严建援.需求均匀分布条件下的供应链渠道协调——基于奖励与惩罚的双重契约[J].中国管理科学,2012,20(3):131-137.
(Li Kai, Zhang Ying-dong, Yan Jian-yuan. Supply chain coordination under the condition of uniform demand distribution double contract based on reward and punishment [J]. Management Science in China, 2012, 20(3):131-137.)

[3] Li J, Wang S Y, Cheng T C E. Competition and cooperation in a single-retailer two-supplier supply chain with supply disruption [J]. International Journal of Production Economics, 2010, 124(1):137-150.

[4] Chen H, Chen J, Chen Y H. A coordination mechanism for a supply chain with demand information updating [J]. International Journal of Production Economic, 2006, 103 (1):347-361.

[5] Huang M, Song M, Lee L H, et al. Analysis for strategy of closed-loop supply chain with dual recycling channel [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144 (2):510-520.

[6] 代建生,孟卫东.风险规避下具有促销效应的收益共享契约[J].管理科学学报,2014,17(5):25-34.
(Dai Jian-sheng, Meng Wei-dong. The revenue sharing contract under risk aversion with a promotional effect [J]. Journal of Management Science, 2014, 17 (5):25-34.)

[7] He Y J. Acquisition pricing and remanufacturing decisions in a closed-loop supply chain [J]. International Journal of Production Economics, 2015, 228 (2):582-591.

[8] Liu Z Y, Chen L H, Li L, et al. Risk hedging in a supply chain: option vs. price discount [J]. International Journal of Production Economics, 2014, 198 (2):822-829.

[9] Ma L J, Liu F M, Li S J. Channel bargaining with risk-averse retailer [J]. International Journal of Production Economics, 2012, 139 (1):155-167.