基于收益共享的风险厌恶供应链协调研究

罗春林[1]，田　歆[2*]
(1. 江西财经大学信息管理学院, 江西 南昌 330013;
2. 中国科学院虚拟经济与数据科学研究中心, 北京 100190)

摘要: 以条件风险价值(CVaR)和期望利润的加权平均作为零售商的风险效用度量, 研究了制造商与零售商的定价与订货策略, 以及风险态度给供应链运作带来的影响. 结果表明: 零售商的风险厌恶恶化了双重边际效应, 且这种恶化随CVaR权重和风险厌恶因子的增加而加剧; 而当制造商与零售商能通过收益共享进行合作, 却可以实现供应链协调; 当存在不同风险态度零售商的横向竞争时, 零售商的订货量与其风险厌恶因子之间存在着反相关性.

关键词: 供应链协调; 风险厌恶; CVaR; 收益共享
中图分类号: C931　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000−5781(2015)02−0210−08

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2015.02.008

Risk averse supply chain coordination with revenue-sharing contract

Luo Chunlin[1], **Tian Xin**[2]
(1. School of Information Technology, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang, Jiangxi 330013, China;
2. Research Center on Fictitious Economy and Data Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper studies the pricing and ordering strategy of the manufacturer and retailer, and the impact of the risk aversion on the performance of the supply chain, where the risk aversion of the retailer is measured by a weighted average of the conditionally risk-at-value (CVaR) and the expected profit. The research shows that the risk aversion aggravates the effect of double marginalization, and the aggravation increases with the weight of the CVaR and the risk aversion factor. However, if the manufacturer and the retailer can cooperate with revenue-sharing contract, they can realize the coordination of the supply chain. Lastly, when multiple retailers with different risk attitude compete in the same market, there is a negative correlation between the retailer's order quantity and its risk aversion factor.

Key words: supply chain coordination; risk averse; CVaR; revenue sharing

1　引　言

供应链在实际的运作过程中, 总不可避免地面临着供应不确定的供应风险, 需求不确定的需求风险和信息不对称的信息风险等运作风险. 陈敬贤等[1]通过对国内191个供应链企业的调研数据, 利用实证分析研究了运作风险对企业绩效的影响, 许德惠等[2]利用176个样本数据研究了运作风险对企业竞争能力与绩效的

收稿日期: 2014−08−12; 修订日期: 2014−12−09.
基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(71390330); 国家自然科学基金资助项目(71461009; 71202114; 71261006); 山东省自主创新及成果转化专项资助项目(2014ZZCX03302).
*通信作者

影响, 结果都显示运作风险对企业绩效有着明显的影响. 因此, 近年来供应链管理的研究已不只关注企业期望利润的最大化, 而更关注实现预期利润的可能性以及所面临的各种风险.

在风险管理中有两个常用的风险度量: 风险价值(VaR)和条件风险价值(CVaR). VaR 刻划的是在一定置信水平下, 决策者可能获得的最大利润水平; 而 CVaR 刻画的是在相同条件下, 利润低于相应 VaR 水平的平均值. 与 VaR 相比, 作为风险度量, CVaR 满足一致性, 而且易于计算, 因而成为许多供应链管理研究的风险度量工具. Chen 等[3]以 CVaR 为风险度量研究了风险厌恶报童的定价与订货决策, Zhang 等[4], Wu 等[5]和 Ma 等[6]将 CVaR 为风险度量的研究继续延伸到了多周期库存问题, 竞争报童和合作博弈问题上, 而但斌等[7]以 CVaR 作为农产品生产商的风险度量, 研究了风险厌恶下天气影响产出的农产品供应链协调问题. 但这些研究仅把 CVaR 作为目标准则也存在一定的缺陷. 因为 CVaR 只关注利润低于某个既定水平的利润平均值, 而忽略了利润高于该水平的情况, 因而显得过于保守. 因此 Chen 等[8]提出以 CVaR 和期望利润的加权平均作为其效用函数, 这样一方面刻划了决策者对潜在风险控制的意愿, 另一方面又体现了其追求高利润的期望. 不过文献[8]只考虑了在给定外部环境下, 决策者在少订货赢利不充分和多订货滞销之间的一个平衡, 而没有考虑到决策者的这种风险厌态度对供应链其他决策者的影响. 因此本文将在供应链环境中探讨风险厌恶零售商的订货策略以及由此给整个供应链所带来的影响.

在分散决策模式下由于供应链成员企业都只关心自身的边际利益, 导致供应链整体利润明显低于集中决策模式下的利润, 即个人理性引发集体非理性. 为了克服这种集体非理性, 企业之间常通过收益共享的合作方式来实现供应链协调. Cachon 等[9]证明了收益共享契约可以实现供应链的协调, 并且利润可以在双方之间进行任意的分配, Palsule-Desai[10]进一步研究了如何通过收益依赖的收益共享契约来实现供应链协调, 而 Govindan 等[11]以 PC 机为例研究了基于收益共享的逆向供应链协调. 这些研究都是建立在风险中性的基础上, 没有考虑决策者的风险厌恶. 近年来, 有部分学者研究了以 CVaR 为风险度量情形下的风险厌恶供应链协调问题, Yang 等[12]以 CVaR 为风险度量研究了风险厌恶零售商和风险中性制造商构成的二阶供应链协调, 证明了收益共享契约, 回购契约等都可以实现供应链协调. 以 CVaR 作为风险度量, 林强等[13]基于收益共享契约研究了随机需求弹性条件下的供应链协调, 而闻卉等[14]基于回购契约研究了成员企业均具有风险规避时的供应链协调问题. 但如前所述, 以 CVaR 为准则的研究忽略了决策者对高期望利润的追求愿望, 得到的结果显得过于保守, 因此下面以 CVaR 和期望利润的加权平均作为风险厌恶零售商的风险度量. 研究制造商与零售商的定价与订货策略, 并分析如何通过恰当的收益共享契约来实现供应链的协调.

2 模型描述

2.1 基本模型

设零售商以 w 的批发价从制造商处购得某种产品, 然后以 p 的零售价销售给市场顾客, 市场对该产品的需求 X 是随机的, 其分布函数为 $F(\cdot)$, 密度函数为 $f(\cdot)$, 其中 $F(\cdot)$ 可微, $F(0)=0$, 记 $\overline{F}=1-F$. 当供过于求时, 零售商以 s 的残值对剩余产品进行清理.

当零售商的订货量为 q 时, 其利润为

$$\begin{aligned}\pi(q,X)&=-wq+p\min\{X,q\}+s(q-X)^+\\&=(s-w)q+(p-s)X-(p-s)(X-q)^+,\end{aligned}\tag{1}$$

其中 $(x)^+=\max\{x,\,0\}$.

设制造商的单位生产成本为 c, 则其利润为

$$\Pi(w,q)=(w-c)q.\tag{2}$$

根据现实中管理问题的意义, 设 $s<c<w<p$.

2.2 风险度量

VaR 刻画的是在一定置信水平下, 决策者可能获得的最大利润. 具体来说, 对某一置信水平 β,

$$\mathrm{VaR}_\beta \pi(q,X)=\max\{v|\Pr(\pi(q,X)\geqslant v)\geqslant\beta\}, \tag{3}$$

β 亦称为风险厌恶因子, 以 VaR 为风险度量的决策者期望最大化 $\mathrm{VaR}_\beta\pi(q,X)$. 但以 VaR 作为风险度量不满足一致性且不便于计算, 而 CVaR 准则却比较好地解决了这个问题.

CVaR 是指在上述条件与置信水平下, 利润低于相应 VaR 值的平均利润, 即

$$\mathrm{CVaR}_\beta\pi(q,\ X)=\frac{1}{1-\beta}\int_{\pi(q,x)<\mathrm{VaR}_\beta\pi(q,x)}\pi(q,x)f(x)\mathrm{d}x. \tag{4}$$

Rockafellar 等[15]证明了求 $\mathrm{CVaR}_\beta\pi(q,X)$ 等价于最大化

$$F_\beta(q,v)=v-\frac{1}{1-\beta}\mathrm{E}[v-\pi(q,X)]^+, \tag{5}$$

即

$$\mathrm{CVaR}_\beta\pi(q,X)=\operatorname*{Max}_v\left(v-\frac{1}{1-\beta}\mathrm{E}[v-\pi(q,X)]^+\right). \tag{6}$$

由于 CVaR 只关注利润低于某个给定水平的利润分布情况, 而忽略了利润高于该水平的情况, 因而显得过于保守. 于是有学者提出以 CVaR 与期望利润的加权平均作为其效用, 这样不仅考虑了风险, 还兼顾了期望利润, 即最大化“CVaR－利润”

$$(1-\lambda)\mathrm{CVaR}_\beta\pi(q,X)+\lambda\mathrm{E}[\pi(q,X)], \tag{7}$$

其中 $\lambda\in[0,1]$.

设风险厌恶的零售商以最大化“CVaR－利润”式(7)为目标函数, 风险中性的制造商以最大化利润式(2)为目标函数.

3 “CVaR–利润”准则下的定价订货策略

当制造商和零售商服从集中决策模式, 以获取供应链整体期望利润最大为目标时, 供应链的利润为

$$\pi_{\text{sc}}(q,X)=p\min\{X,q\}+s(q-X)^+-cq, \tag{8}$$

最佳生产量或订货量为

$$q^*_{\text{sc}}=\overline{F}^{-1}\left(\frac{c-s}{p-s}\right)=F^{-1}\left(\frac{p-c}{p-s}\right). \tag{9}$$

而当制造商与零售商服从分散决策模式: 制造商先选择批发价 w, 然后零售商再确定订货量 q, 制造商与零售商之间形成经典的 Stackelberg 博弈. 当零售商是风险中性时的最佳订货量为

$$q_1^*=F^{-1}\left(\frac{p-w}{p-s}\right), \tag{10}$$

当零售商是风险厌恶的, 且效用由“CVaR-利润”度量时, 其订货策略有如下结论.

定理 1 当制造商的批发价为 w 时, 零售商在“CVaR–利润”目标下的最佳订货量为

1) 若 $\lambda>\dfrac{w-s}{\beta(p-s)}$, 则 $q_2^*=F^{-1}\left(1-\dfrac{w-s}{\lambda(p-s)}\right)$;

2) 若 $\lambda\leqslant\dfrac{w-s}{\beta(p-s)}$, 则 $q_2^*=F^{-1}\left(\dfrac{(1-\beta)(p-w)}{(1-\lambda\beta)(p-s)}\right)$.

定理证明过程见附录.

这时, 制造商的最优定价为

$$w_2^* = \arg\max_w \{(w-c)q_2^*\}. \tag{11}$$

由定理 1 可以看出, 给定风险因子 β, 最优订货量会随着权重 λ 的减少而减少. 给定权重 λ, 当 $\beta > \dfrac{w-s}{\lambda(p-s)}$ 时, 最优订货量会独立于 β; 而当 $\beta \leqslant \dfrac{w-s}{\lambda(p-s)}$ 时, 最优订货量会随着 β 的增加而减少. 说明最佳订货量随着风险厌恶因子和 CVaR 权重的增加而减少.

根据定理 1, 当 $\lambda > \dfrac{w-s}{\beta(p-s)}$, 由于 $1-\dfrac{w-s}{\lambda(p-s)} \leqslant \dfrac{p-w}{p-s} < \dfrac{p-c}{p-s}$, 因此有 $q_2^* \leqslant q_1^* < q_{\text{sc}}^*$; 而当 $\lambda \leqslant \dfrac{w-s}{\beta(p-s)}$ 时, 由于 $\dfrac{(1-\beta)(p-w)}{(1-\lambda\beta)(p-s)} \leqslant \dfrac{p-w}{p-s} < \dfrac{p-c}{p-s}$, 因此也有 $q_2^* \leqslant q_1^* < q_{\text{sc}}^*$. 即无论在哪种情况下, 风险厌恶情况下的最佳订货量都要低于风险中性情形下的最佳订货量, 当然更低于集中决策模式下的最佳订货量. 究其原因, 是因为在分散决策模式下, 由于零售商独自承担随机需求的市场风险, 因此即便是在风险中性情况下, 其最佳订货量也要低于集中决策模式下的最佳订货量, 这便是 Spengler 在 1950 年提到的"双重边际效应", 而零售商的风险厌恶态度更加令其紧缩了订货量, 进一步恶化了供应链的整体效益. 因此制造商作为博弈的先动者, 可以从共同分担市场风险, 共同分享收益的角度出发, 选择恰当的契约策略引导零售商增加适当的订货量以达到供应链协调.

4　基于收益共享契约的供应链协调

4.1　风险厌恶供应链协调定义

Yang 等[12]定义了以 CVaR 为风险度量的风险厌恶供应链协调, 定义如下.

定义 1[12]　对一个由风险中性的制造商和以 CVaR 为目标的风险厌恶零售商构成的二阶供应链, 一个契约实现了供应链协调是指在该契约下:

1) 整个供应链的期望利润达到最大;

2) 制造商和零售商各自的期望利润都不得低于各自的保留利润;

3) 零售商的 CVaR 值达到最大.

本文沿用这一定义, 不过需要将定义中的 3)改成"零售商的'CVaR–利润'值达到最大". 另外设他们各自的保留利润都为 0, 即不参与的机会成本为 0.

4.2　收益共享契约

一个收益共享契约 $(w,\varphi)(0<\varphi<1)$ 是指零售商须按 w 的批发价向制造商支付货款, 同时分得供应链收益中 φ 的份额. 在这个收益共享契约下, 零售商与供应链能获得的利润分别为

$$\pi_{\text{r}}(q,X) = \varphi\left(p\min\{X,q\} + s(q-X)^+\right) - wq,$$

$$\pi_{\text{s}}(q,X) = (1-\varphi)\left(p\min\{X,q\} + s(q-X)^+\right) + (w-c)q,$$

整个供应链的利润为 $\pi_{\text{sc}}(q,X) = p\min\{X,q\} + s(q-X)^+ - cq$, 因而供应链的最佳订货量为

$$q_{\text{sc}}^* = F^{-1}\left(\frac{p-c}{p-s}\right).$$

由于零售商也面临着报童问题, 当零售商是风险中性并且 $\varphi p > w$ 时, 其最佳订货量为

$$q_3 = F^{-1}\left(\frac{\varphi p-w}{\varphi p-s}\right).$$

Cachon 等[9]证明了当契约参数满足 $w=\varphi c$ 时, 可以实现供应链的协调, 并且零售商和制造商分别获得的利润为 $\pi_{\text{r}}(q,X) = \varphi\pi_{\text{sc}}(q,X), \pi_{\text{s}}(q,X) = (1-\varphi)\pi_{\text{sc}}(q,X)$.

4.3 基于收益共享契约的风险厌恶供应链协调

下面考虑零售商是风险厌恶的, 并且其效用由"CVaR−利润"来度量时的供应链协调. 在收益共享 $(w,\varphi)(0<\varphi<1)$ 契约下, 根据定理1同样的分析知, 零售商的最佳订货量为

1) 若 $\lambda>\dfrac{w-\varphi s}{\beta\varphi(p-s)}$, 则$q_4^*=F^{-1}\left(1-\dfrac{w-\varphi s}{\lambda\varphi(p-s)}\right)$;

2)若 $\lambda\leqslant\dfrac{w-\varphi s}{\beta\varphi(p-s)}$, 则 $q_4^*=F^{-1}\left(\dfrac{(1-\beta)(\varphi p-w)}{\varphi(1-\lambda\beta)(p-s)}\right)$.

因而, 为了实现供应链的协调, 要求零售商的最佳订货量要达到 q_{sc}^*, 即有

1) 当 $\lambda>\dfrac{w-\varphi s}{\beta\varphi(p-s)}$, 即$w<\varphi(s+\lambda\beta p-\lambda\beta s)$时, $q_4^*=F^{-1}\left(1-\dfrac{w-\varphi s}{\lambda\varphi(p-s)}\right)$. 由 $q_4^*=q_{\rm sc}^*$, 有 $1-\dfrac{w-\varphi s}{\lambda\varphi(p-s)}=\dfrac{p-c}{p-s}$, 即 $w=\varphi(s+\lambda c-\lambda s)$.

又因为 $\varphi(s+\lambda c-\lambda s)<\varphi(s+\lambda\beta p-\lambda\beta s)$ 等价于 $\beta>\dfrac{c-s}{p-s}$. 因此, 当 $\beta>\dfrac{c-s}{p-s}$ 时, 契约参数满足 $w=\varphi(s+\lambda c-\lambda s)$ 可以保证零售商的最佳订货量要达到 $q_{\rm sc}^*$, 实现整体期望利润的最大化. 为了实现供应链的协调, 还要求他们期望利润不得低于各自的保留利润 0. 由于零售商的利润为

$$
\begin{aligned}
\pi_{\rm r}(q_{\rm sc}^*,X)&=\varphi\left(p\min\{X,q_{\rm sc}^*\}+s(q_{\rm sc}^*-X)^+\right)-\varphi(s+\lambda c-\lambda s)q_{\rm sc}^*\\
&=\varphi\left(\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)+(1-\lambda)(c-s)q_{\rm sc}^*\right),
\end{aligned}\tag{12}
$$

根据 $0<{\rm E}\left[\pi_{\rm r}(q_{\rm sc}^*,X)\right]<{\rm E}\left[\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)\right]$, 有 $0<\varphi<\dfrac{\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)}{\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)+(1-\lambda)(c-s)q_{\rm sc}^*}$.

2)当 $\lambda\leqslant\dfrac{w-\varphi s}{\beta\varphi(p-s)}$, 即 $w\geqslant\varphi(s+\lambda\beta p-\lambda\beta s)$ 时, $q_4^*=F^{-1}\left(\dfrac{(1-\beta)(\varphi p-w)}{\varphi(1-\lambda\beta)(p-s)}\right)$. 由 $q_4^*=q_{\rm sc}^*$, 有 $1-\dfrac{w-\varphi s}{\lambda\varphi(p-s)}=\dfrac{p-c}{p-s}$, 即 $w=\dfrac{\varphi(\lambda\beta p-\lambda\beta c-\beta p+c)}{1-\beta}$.

又因为 $\dfrac{\varphi(\lambda\beta p-\lambda\beta c-\beta p+c)}{1-\beta}\geqslant\varphi(s+\lambda\beta p-\lambda\beta s)$ 等价于 $\beta\leqslant\dfrac{c-s}{p-s}$. 因此, 当 $\beta\leqslant\dfrac{c-s}{p-s}$ 时, 契约参数满足 $w=\dfrac{\varphi(\lambda\beta p-\lambda\beta c-\beta p+c)}{1-\beta}$ 可以保证零售商的最佳订货量要达到$q_{\rm sc}^*$, 实现整体期望利润的最大化. 为了实现供应链的协调, 还要求他们期望利润不得低于各自的保留利润 0. 由于这时零售商的利润为

$$
\begin{aligned}
\pi_{\rm r}(q_{\rm sc}^*,X)&=\varphi\left(p\min\{X,q_{\rm sc}^*\}+s(q_{\rm sc}^*-X)^+\right)-\frac{\varphi(\lambda\beta p-\lambda\beta c-\beta p+c)}{1-\beta}q_{\rm sc}^*\\
&=\varphi\left(\pi_{\rm sc}(q_{sc}^*,X)+\frac{\beta(1-\lambda)(p-c)q_{\rm sc}^*}{1-\beta}\right),
\end{aligned}\tag{13}
$$

同样根据 $0<{\rm E}[\pi_{\rm r}(q_{\rm sc}^*,X)]<{\rm E}[\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)]$, 有 $0<\varphi<\dfrac{(1-\beta)\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)}{(1-\beta)\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)+\beta(1-\lambda)(p-c)q_{\rm sc}^*}$.

综合上面的分析, 可得下列结论.

定理 2 设制造商与零售商愿意以收益共享 (w,φ) 的形式进行合作, 当 $\beta>(c-s)/(p-s)$ 时, 选择契约参数 $w=\varphi(s+\lambda c-\lambda s)$, 可以实现供应链协调, 其中 $\varphi\in\left(0,\dfrac{\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)}{\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)+(1-\lambda)(c-s)q_{\rm sc}^*}\right)$,

当 $\beta\leqslant(c-s)/(p-s)$ 时, 选择契约参数 $w=\varphi(\lambda\beta p-\beta c-\beta p+c)/(1-\beta)$, 可以实现供应链协调, 其中 $\varphi\in\left(0,\ \dfrac{(1-\beta)\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)}{(1-\beta)\pi_{\rm sc}(q_{\rm sc}^*,X)+\beta(1-\lambda)(p-c)q_{\rm sc}^*}\right)$.

定理 2 表明根据零售商风险厌恶因子的不同, 选择适当的收益共享契约可以实现供应链的协调, 从而达

到"集体理性". 从定理2中还可以看出当 $\beta > (c-s)/(p-s)$ 时, 即零售商的风险厌恶因子达到一定的程度, 收益共享契约参数将不再受这个风险因子的影响.

定理 3 设制造商与零售商以上述收益共享契约进行合作,

当 $\beta > (c-s)/(p-s)$ 时, 零售商的期望利润为 $\varphi\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}(q_{\mathrm{sc}}^*, X)\right] + (1-\lambda)(c-s)q_{\mathrm{sc}}^*\right)$,

当 $\lambda \leqslant (w-\varphi s)/(\beta\varphi(p-s))$, 零售商的期望利润为 $\varphi\left(\pi_{\mathrm{sc}}(q_{\mathrm{sc}}^*, X) + (\beta(1-\lambda)(p-c)q_{\mathrm{sc}}^*)/(1-\beta)\right)$.

并且 $\varphi(1-\lambda)(c-s)q_{\mathrm{sc}}^*$ 与 $\varphi\beta(1-\lambda)(p-c)q_{\mathrm{sc}}^*/(1-\beta)$ 都是 λ 的单调递减函数, $\varphi\beta(1-\lambda)(p-c)q_{\mathrm{sc}}^*/(1-\beta)$ 随 β 的增加而增加.

定理 3 表明零售商的期望利润为供应链协调利润的 φ 份额与 $\varphi(1-\lambda)(c-s)q_{\mathrm{sc}}^*$ 或 $\varphi\beta(1-\lambda)(p-c)q_{\mathrm{sc}}^*/(1-\beta)$ 之和, 与风险中性情形下的零售商期望利润占整个供应链协调利润的 φ 份额相比, $\varphi(1-\lambda)(c-s)q_{\mathrm{sc}}^*$ 或 $\varphi\beta(1-\lambda)(p-c)q_{\mathrm{sc}}^*/(1-\beta)$ 可以解释为, 由于零售商的风险厌恶, 制造商不得不给予零售商更多的"利润激励", 以打消其风险顾虑, 引导其增加订货. 并且该"利润激励"随风险厌恶因子和 CVaR 权重的增加而增加, 说明零售商越是风险厌恶型, 制造商就越需要支付更多的利润激励, 这对制造商在选择合作伙伴时有一定的指导意义.

但是从另一方面看, 由于选择不同的 φ 值, 可以使得整个供应链的协调利润可以在他们之间进行任意的分配, 因此最终具体的分配结果则依赖于他们各自的讨价还价能力.

5 考虑零售商竞争的定价与订货策略

设制造商在同一个市场通过两个零售商(零售商 I 与零售商 II)销售该产品, 该产品的市场零售价为 p, 总体需求为 X, 其分布函数为 $F(\cdot)$. 制造商选择合适的批发价 w 以最大化期望利润, 而持有不同风险态度的零售商分别选择各自的订货量 q_1 或 q_2, 以最大化其期望效用. 为了表述方便, 分别以 $\mathrm{CVaR}_{\beta_1}\pi(q_1, X)$ 与 $\mathrm{CVaR}_{\beta_2}\pi(q_2, X)$ 作为零售商 I 与零售商 II 的风险度量.

零售商 I 与零售商 II 之间存在横向竞争关系, 零售商 I 的需求量 X_1 和零售商 II 的需求量 X_2 均受到零售商I订货量 q_1 与零售商 II 订货量 q_2 的共同影响, 即有 $X_1 = Xq_1/(q_1+q_2),\ X_2 = Xq_2/(q_1+q_2)$.

首先, 分析在制造商给定批发价 w 时零售商的订货策略 $q_1(w)$ 与 $q_2(w)$. 记 X_1 与 X_2 的分布函数为 $F_1(\cdot)$ 与 $F_2(\cdot)$, 根据定理 1 可知零售商I与零售商 II 的订货策略分别满足

$$q_1(w) = {F_1}^{-1}\left((1-\beta_1)\frac{p-w}{p-s}\right) = F^{-1}\left((1-\beta_1)\frac{p-w}{p-s}\frac{q_1(w)+q_2(w)}{q_1(w)}\right) \tag{14}$$

$$q_2(w) = {F_2}^{-1}\left((1-\beta_2)\frac{p-w}{p-s}\right) = F^{-1}\left((1-\beta_2)\frac{p-w}{p-s}\frac{q_1(w)+q_2(w)}{q_2(w)}\right) \tag{15}$$

对上面 Nash 的博弈均衡求解, 可以确定零售商的订货策略 $q_1(w)$ 与 $q_2(w)$, 进而通过优化问题 $\underset{c<w<p}{\mathrm{Max}}\,(w-c)\left(q_1(w)+q_2(w)\right)$ 可以确定制造商的定价策略 w.

从式(14)与式(15)可得 $\quad q_1(w)F(q_1(w))/(q_2(w)F(q_2(w))) = (1-\beta_1)/(1-\beta_2)$.

上式表明, 给定零售商 I(或零售商 II)的风险态度, 零售商 II(或零售商 I)的订货量随其风险厌恶态度的增加而减少. 或者说, 零售商 I 或零售商 II 的订货量与其风险偏好因子 β_1 或 β_2 存在着反相关性.

6 结束语

考虑到直接面对市场随机需求的零售商既有对潜在风险进行控制的意愿又有追求高利润的期望, 选择

了 CVaR 和期望利润的加权平均作为其效用函数, 研究了零售商的订货策略以及由此给供应链带来的影响. 研究表明, 零售商的风险厌恶加剧了双重边际效应, 恶化了供应链效益, 而且这种恶化随着风险厌恶因子和 CVaR 权重的增加而加剧; 而当制造商与零售商能以合作的姿态, 共同分担风险共同分享收益, 选择恰当的收益共享契约可以实现供应链的协调; 当存在不同风险态度零售商的横向竞争时, 不同零售商的订货量与其风险厌恶因子之间存在着反相关性.

参考文献:

[1] 陈敬贤, 施国洪, 马汉武. 供应链运作风险影响供应链绩效的实证研究[J]. 工业工程与管理, 2009, 14(4): 30–37.
Chen Jingxian, Shi Guohong, Ma Hanwu. An empirical research of supply chain: The influence of operational risk on performance[J]. Industrial Engineering and Management, 2009, 14(4): 30–37. (in Chinese)

[2] 许德惠, 李　刚, 孙林岩. 供应链运作风险对企业竞争能力及绩效影响的实证研究[J]. 科研管理, 2013, 34(6): 129–137.
Xu Dehui, Li Gang, Sun Linyan. The impact of supply chain operational risks on firm competitive capability and performance[J]. Science Research Management, 2013, 34(6): 129–137. (in Chinese)

[3] Chen Y, Xu M, Zhang G. A risk-averse newsvendor model under the CVaR decision criterion[J]. Operations Research, 2009, 57(4): 1040–1044.

[4] Zhang D, Xu H, Wu Y. Single and multi-period optimal inventory control models with risk-averse constaints[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199(2): 420–434.

[5] Wu M. Zhu S X, Teunter R H. A risk-averse competitive newsvendor problem under the CVaR criterion[J]. International Journal of Production Economics, 2014, 156: 13–23.

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

[7] 但　斌, 伏红勇, 徐广业, 等. 风险厌恶下天气影响产出的农产品供应链协调[J]. 系统工程学报, 2014, 29(3): 362–368.
Dan Bin, Fu Hongyong, Xu Guangye, et al. Coordination of agri-food supply chain with weather-related yield under risk-averse producer[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(3): 362–368. (in Chinese)

[8] Chen Y, Gao F, Chao X. Joint optimal ordering and weather hedging decision: A newsvendor model[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2011, 23(1): 1–25.

[9] Cachon G P , Lariviere M A. Supply chain coordination with revenue-rharing contracts: Strengths and limitations[J]. Marketing Science, 2005, 51(1): 30–45

[10] Palsule-Desai O D. Supply chain coordination using revenue-dependent revenue sharing contracts[J]. Omega: International Journal of Management Science, 2013, 41(4): 780–796.

[11] Govindan K, Popiuc M N. Reverse supply chain coordination by revenue sharing contract: A case for the personal computers industry[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(2): 326–336.

[12] Yang L, Xu M, Yu G, et al. Supply chain coordination with CVaR criterion[J]. Asia-Pacific Journal of Operation Research, 2009, 26(1): 135–160.

[13] 林　强, 叶　飞, 陈晓明. 随机弹性需求条件下基于CVaR与收益共享契约的供应链决策模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(12): 2296–2307.
Lin Qiang, Ye Fei, Chen Xiaoming. Decision models for supply chain based on CVaR and revenue sharing contract under stochastic elastic demand[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2011, 31(12): 2296–2307. (in Chinese)

[14] 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[J]. 系统工程学报, 2013, 28(2): 211–217.
Wen Hui, Cao Xiaogang, Li Jizi. Research on buy-back policy optimization and coordination of closed-loop supply chain based on CVaR[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(2): 211–217. (in Chinese)

[15] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of conditional value-at-risk[J]. Journal of Risk, 2000, 2(3): 21–42.

作者简介:

罗春林 (1978—), 男, 江西都昌人, 博士, 副教授, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: chunlinluo@126.com;

田　歆 (1983—), 男, 湖南张家界人, 博士, 助理研究员, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: tianx@ucas.ac.cn.

附录　定理 1 的证明:

由于

$$\begin{aligned}\operatorname*{Max}_{q}\left(\lambda\mathrm{E}[\pi(q,X)]+(1-\lambda)\mathrm{CVaR}_{\beta}\pi(q,X)\right)&=\operatorname*{Max}_{q}\left(\lambda\mathrm{E}[\pi(q,X)]+(1-\lambda)\operatorname*{Max}_{v}\{v-\frac{1}{1-\beta}\mathrm{E}[v-\pi(q,X)]^{+}\}\right)\\&=\operatorname*{Max}_{q,v}\left(\lambda\mathrm{E}[\pi(q,X)]+(1-\lambda)\left(v-\frac{1}{1-\beta}\mathrm{E}[v-\pi(q,X)]^{+}\right)\right),\end{aligned}$$

于是记 $G(q,v)=\lambda\mathrm{E}[\pi(q,X)]+(1-\lambda)\left(v-\dfrac{1}{1-\beta}\mathrm{E}[v-\pi(q,X)]^{+}\right)$, 对每个固定的 q, 有

$$\begin{aligned}\frac{\partial G(q,v)}{\partial v}&=(1-\lambda)\left(1-\frac{1}{1-\beta}\mathrm{E}[1_{v>\pi(q,X)}]\right)\\&=(1-\lambda)\left(1-\frac{1}{1-\beta}\left(\int_0^q 1_{v>(p-s)x+(s-w)q}f(x)\mathrm{d}x+\int_q^{+\infty}1_{v>(p-w)q}f(x)\mathrm{d}x\right)\right)\\&=(1-\lambda)\left(1-\frac{1}{1-\beta}\left(\int_0^{\min\left(q,\frac{v+(w-s)q}{p-s}\right)}f(x)\mathrm{d}x+\int_q^{+\infty}1_{v>(p-w)q}f(x)\mathrm{d}x\right)\right)\\&=\begin{cases}(1-\lambda)\left(1-\dfrac{1}{1-\beta}\displaystyle\int_0^{\frac{v+(w-s)q}{p-s}}f(x)\mathrm{d}x\right), & v\leqslant(p-w)q\\(1-\lambda)\left(-\dfrac{\beta}{1-\beta}\right), & v>(p-w)q,\end{cases}\end{aligned}\tag{16}$$

因此在 $(p-w)q$ 处有 $\dfrac{\partial^- G(q,v)}{\partial v}\Big|_{v=(p-w)q}=(1-\lambda)\left(1-\dfrac{1}{1-\beta}\displaystyle\int_0^q f(x)\mathrm{d}x\right)$,

$$\frac{\partial^+ G(q,v)}{\partial v}\Big|_{v=(p-w)q}=(1-\lambda)\left(-\frac{\beta}{1-\beta}\right)\leqslant 0.$$

其中 $\dfrac{\partial^- G(q,v)}{\partial v}$ 和 $\dfrac{\partial^+ G(q,v)}{\partial v}$ 分别表示 $G(q,v)$ 对 v 的左偏导数和右偏导数.

1) 若 $\dfrac{\partial^- G(q,v)}{\partial v}\Big|_{v=(p-w)q}<0$, 则 $G(q,v)$ 的最大值点 v^* 满足 $v^*<(p-w)q$ 和 $1-\dfrac{1}{1-\beta}\displaystyle\int_0^{\frac{v^*+(w-s)q}{p-s}}f(x)\mathrm{d}x=0$, 这时, $G(q,v^*)=\lambda\mathrm{E}[\pi(q,X)]+(1-\lambda)\left(v^*-\dfrac{1}{1-\beta}\right)$. 从而有

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}G(q,v^*)}{\mathrm{d}q}&=\frac{\partial G(q,v^*)}{\partial q}+\frac{\partial G(q,v^*)}{\partial v}\frac{dv^*}{dq}\\&=\lambda\left(s-w+(p-s)\mathrm{E}[1_{X>q}]\right)+(1-\lambda)\left((1-\beta)^{-1}(s-w)\int_0^{\frac{v^*+(w-s)q}{p-s}}f(x)\mathrm{d}x\right)+0\\&=\lambda(s-w)+\lambda(p-s)\int_q^{+\infty}f(x)\mathrm{d}x+(1-\lambda)(s-w),\end{aligned}$$

于是, 最大值点 q_2^* 满足 $\displaystyle\int_q^{+\infty}f(x)\mathrm{d}x=\dfrac{w-s}{\lambda(p-s)}$, 即 $q_2^*=F^{-1}\left(1-\dfrac{w-s}{\lambda(p-s)}\right)$, 其中 $\lambda>\dfrac{w-s}{\beta(p-s)}$ 保证前提条件 $\dfrac{\partial^- G(q,v)}{\partial v}\Big|_{v=(p-w)q}<0$ 成立.

2) 若 $\dfrac{\partial^- G(q,v)}{\partial v}\Big|_{v=(p-w)q}\geqslant 0$, 则 $v^*=(p-w)q$, 这时,

$$G(q,v^*)=\lambda\mathrm{E}[\pi(q,X)]+(1-\lambda)\left((p-w)q-\frac{1}{1-\beta}\int_0^q((p-s)q-(p-s)x)f(x)\mathrm{d}x\right),$$

从而 $\dfrac{\mathrm{d}G(q,v^*)}{\mathrm{d}q}=\lambda\left(s-w-(s-p)\mathrm{E}[1_{X>q}]\right)+(1-\lambda)\left((p-w)-(1-\beta)^{-1}(p-s)\displaystyle\int_0^q f(x)\mathrm{d}x\right)=\lambda(s-w)-\lambda(s-p)\displaystyle\int_q^{+\infty}f(x)\mathrm{d}x+(1-\lambda)(p-w)-(1-\lambda)(1-\beta)^{-1}(p-s)\displaystyle\int_0^q f(x)\mathrm{d}x$.

于是最大值点 q_2^* 满足 $\int_0^q f(x)\mathrm{d}x=\dfrac{(1-\beta)(p-w)}{(1-\lambda\beta)(p-s)}$, 即 $q_2^*=F^{-1}\left(\dfrac{(1-\beta)(p-w)}{(1-\lambda\beta)(p-s)}\right)$, 其中 $\lambda\leqslant\dfrac{w-s}{\beta(p-s)}$ 保证前提条件 $\dfrac{\partial^- G(q,v)}{\partial v}\Big|_{v=(p-w)q}\geqslant 0$ 成立. 　　证毕.