考虑损失规避与质量水平的供应链协调契约模型

刘云志, 樊治平
(东北大学工商管理学院, 辽宁 沈阳 110167)

摘要: 针对考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链协调问题, 分别分析了分散供应链情形下供应商与损失规避型零售商的最优策略和集中供应链情形下供应链的最优策略, 并构建了回购–质量成本分担契约下的供应链协调契约模型, 并且证明了该供应链协调契约模型的有效性. 通过博弈分析可得到的结论是: 损失规避型零售商订货量的增加会促使供应商提高其产品质量水平以便保持市场竞争优势, 而供应商的产品质量水平的提高能够促使损失规避型零售商增加其订货量; 回购契约不能协调此二级供应链; 一定条件下回购–质量成本分担契约能够协调此二级供应链. 此外, 在分散供应链和集中供应链情形下, 通过数值实验分析了模型参数变化对供应商和零售商的最优策略以及供应链利润的影响.

关键词: 供应链协调; 损失规避; 质量水平; 回购–质量成本分担契约
中图分类号: F274; C931 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000−5781(2017)01−0089−14
doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.01.009

Supply chain coordination contract model considering loss aversion and quality level

Liu Yunzhi, Fan Zhiping
(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110167, China)

Abstract: In a two-stage supply chain coordination problem with loss-averse retailer and quality level, this paper analyzes the optimal strategies under the decentralized and integrated supply chain, respectively. A supply chain coordination contract model is constructed by combining the buyback contract and the quality cost sharing contract, and the validity of the model is proven. By the game analysis, several results are obtained: The increase in the loss-averse retailer's order quantity will prompt the improvement of the supplier's quality level to maintain the supplier's competitive advantage, while the improvement of the supplier's quality level will increase the loss-averse retailer's order quantity; the buyback contract cannot coordinate the two-stage supply chain; the contract combined the buyback contract and quality cost sharing contract can coordinate the two-stage supply chain under certain conditions. Furthermore, under both the decentralized and integrated supply chain, the impacts of the changes of the parameters in the model on the optimal strategies of supplier and retailer and the profits of supply chain are presented through a sensitivity analysis of the parameters.

Key words: supply chain coordination; loss aversion; quality level; buyback-quality cost sharing contract

1 引 言

供应链协调是近年来供应链管理领域的热点研究问题之一[1−3], 供应链契约是实现供应链协调的主

收稿日期: 2014−06−08; 修订日期: 2015−04−21.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271051); 中央高校基本科研业务经费资助项目(N140607001; N130606001).

要方法, 其主要包括批发价格契约、回购契约、收益共享契约、数量折扣契约等. 通过合理的契约设计, 有助于减少双重边际化和信息不对称等不利因素对供应链管理所带来的影响, 并提高供应链的整体利润, 以致使供应链达到协调[3]. 近年来, 质量管理模式的发展趋势是由企业内部质量管理转变为供应链质量管理, 高效的供应链质量管理也是现代供应链管理的关键, 而关于供应链质量管理问题的研究也越来越受到学术界的关注[4,5]. 针对考虑质量因素的供应链管理问题研究, 可以看到一些相关的研究工作[6−16], 这方面的研究工作主要体现在两个方面. 一个方面是针对竞争环境下考虑质量因素的供应链协调问题的研究成果[6−10], 例如, Hall和Porteus[6]研究了零售商同时存在服务质量竞争和价格竞争时的供应链协调问题; Bernstein和Federgruen[7,8]研究了在价格和数量竞争情景下n个零售商的协调问题, 以及三种不同的需求函数下零售商之间存在价格和服务质量竞争时的协调问题; 鲁其辉和朱道立[9]研究了存在质量和价格竞争的两条竞争的二级供应链协调问题. 另一方面是针对考虑产品质量水平的供应链协调问题的研究成果[11−16], 例如, Tapiero[11]研究了考虑消费者风险情形下供应链实现协调时质量水平选择的博弈模型; Gurnani和Erkoc[12]研究了市场需求受产品质量水平与零售商促销努力水平共同影响的二级供应链协调问题, 并分析和比较了三种不同的供应链契约; Ma等[13]研究了市场需求受产品质量水平与零售商促销努力水平共同影响的二级供应链协调问题, 并提出了一种新型契约来协调此二级供应链. 在上述两个方面的研究成果中, 均假定供应链成员是风险中性的, 即供应链各成员均以其期望利润最大化(或期望成本最小化)为决策目标, 但一些研究结果表明, 供应链成员往往并非按照期望利润最大化原则来进行决策[17,18]. 这里需要关注的是, 一些学者侧重研究考虑非风险中性假设条件下的供应链协调问题[19−22], 还有一些学者侧重研究考虑供应链成员具有损失规避行为的供应链协调问题[23−28]. 需要指出的是, 已有的研究成果大多是研究单纯考虑了供应链成员损失规避行为的供应链协调问题, 或者单纯考虑了供应商产品质量水平的供应链协调问题. 在现实中, 有时需要关注同时考虑供应链成员损失规避行为和供应商产品质量水平的供应链协调问题, 关于这方面的探索与理论分析是有必要的, 但关于此方面的研究成果尚不多见. 鉴于此, 本文则是侧重研究考虑损失规避与产品质量水平的供应链协调问题, 在假定随机市场需求受供应商的产品质量水平影响的前提下, 依据文献[26,29]的基本研究思路并在参照文献[27–34]给出基本假设的基础上, 针对由一个风险中性的供应商与一个损失规避型零售商所组成的二级供应链的协调问题, 通过博弈分析分别讨论分散供应链情形下供应商与损失规避型零售商的最优策略和集中供应链情形下供应链的最优策略, 并依据文献[33,34]中提出的成本分担思想, 构建回购– 质量成本分担契约下的供应链协调契约模型, 且进一步论证该供应链协调契约模型的有效性. 最后, 在分散供应链和集中供应链情形下, 通过数值实验分析模型参数变化对供应商和零售商的最优策略以及供应链利润的影响.

2 供应链契约与协调

考虑一个经营单一时令性产品的二级供应链, 同文献[27]的基本假设, 供应商企业的规模一般较大, 故它应是风险中性的, 而零售商规模一般相对较小, 故它应是损失规避的, 假设此二级供应链由一个风险中性的供应商和一个损失规避型零售商构成. 进一步地, 假设此二级供应链的所有信息是完全共享的, 且供应商与零售商签订回购契约合同.

在销售季前, 供应商以单位产品生产成本c生产相应的产品, 并以单位产品批发价格w将此产品出售给零售商, 且零售商的采购量为q; 在销售季中, 零售商以单位产品销售价格p销售产品给顾客, 该产品的市场需求量D为一个随机变量, 若在销售季中出现缺货情形, 则零售商所承担的单位产品缺货成本为g_r, 供应商所承担的单位产品缺货成本为g_s; 在销售季末, 若零售商仍有剩余的产品未被销售, 则供应商对剩余产品进行回购, 并将回购的剩余产品统一进行季末处理, 且单位产品的回购价格为b, 单位剩余产品的净残值为v. 依据客观现实的合理性, 则有$p > w > c > v > 0, p > w > b > v > 0, g_r, g_s > 0$.

为了提高产品的销售量, 供应商会通过一系列措施来提高产品的质量水平, 假定产品质量水平为θ, $\theta \in [0, +\infty)$, 且供应商需要付出相应的努力成本来达到此产品质量水平, 其中努力成本为产品质量水

平θ的函数, 记努力成本函数为$f(\theta)$. 在现实中, 若产品质量水平越高, 则供应商所付出的努力成本也就越高, 基于这方面的考虑并参照文献[29–32]给出的基本假设, 假设努力成本函数$f(\theta)$是关于产品质量水平θ的增函数, 即$f'(\theta) > 0$, 努力成本函数$f(\theta)$是关于产品质量水平θ的严格凸函数, 即$f''(\theta) > 0$, 表明努力成本函数$f(\theta)$关于产品质量水平θ是边际递增的. 特殊地, 若供应商未对提高产品质量水平付出任何成本, 则$f(\theta) = 0$.

需要说明的是, 在销售季中, 假定随机需求量D的期望$\mathrm{E}(D) = \mu$, 且以产品质量水平为条件的需求的条件概率分布函数为$G(x|\theta)$, 相应的条件概率密度函数为$g(x|\theta)$, 并记$\bar{G}(x|\theta) = 1 - G(x|\theta)$. 由于供应商的产品质量水平提高会导致市场需求的增加, 基于这方面的考虑并参照文献[28,29]的基本假设, 这里假设条件概率分布函数$G(x|\theta)$是关于产品质量水平θ的减函数, 即$\dfrac{\partial G(x|\theta)}{\partial \theta} < 0$, 条件概率分布函数$G(x|\theta)$是关于产品质量水平$\theta$的严格凸函数, 即$\dfrac{\partial^2 G(x|\theta)}{\partial \theta^2} > 0$, 表明由于顾客数量有限, 需求增加的速度会越来越小.

针对风险中性的供应商, 其利润为

$$\pi_s(q,\theta) = wq - cq - g_s \max\{D-q,0\} - b\max\{q-D,0\} + v\max\{q-D,0\} - f(\theta). \tag{1}$$

进一步地, 依据式(1), 可计算得到风险中性的供应商的期望利润

$$\mathrm{E}(\pi_s(q,\theta)) = (w+g_s-c)q - (b+g_s-v)\int_0^q G(x|\theta)\mathrm{d}x - g_s\mu - f(\theta). \tag{2}$$

针对风险中性的零售商, 其利润为

$$\pi_r(q,\theta) = p\min\{D,q\} + b\max\{q-D,0\} - g_r\max\{D-q,0\} - wq. \tag{3}$$

进一步地, 依据式(3), 可计算得到风险中性的零售商的期望利润

$$\mathrm{E}(\pi_r(q,\theta)) = (p+g_r-w)q - (p+g_r-b)\int_0^q G(x|\theta)\mathrm{d}x - g_r\mu. \tag{4}$$

同时, 风险中性的零售商的利润亦为

$$\pi_r(q,\theta) = \begin{cases} \pi_r^1(q,D), & D \leqslant q, \\ \pi_r^2(q,D), & D > q, \end{cases} \tag{5}$$

其中 $\pi_r^1(q,D) = (p-b)D - (w-b)q$, $\pi_r^2(q,D) = (p+g_r-w)q - g_rD$.

由式(5)易知, 存在两个需求点使得零售商的利润达到盈亏平衡. 进一步地, 依据文献[35]的分析思想, 通过计算可得到如下性质.

性质1　风险中性的零售商存在两个利润盈亏平衡需求点$k_1(q) = \dfrac{(w-b)q}{p-b}$ 和$k_2(q) = \dfrac{(p+g_r-w)q}{g_r}$. 若$D < k_1(q)$或$D > k_2(q)$, 则$\pi_r(q,\theta) \in (-\infty,0)$; 若$k_1(q) \leqslant D \leqslant k_2(q)$, 则$\pi_r(q,\theta) \in [0,+\infty)$.

证明　设k为市场的实际需求值, 则

1) 若$k \leqslant q$, 令$\pi_r^1(q,k) = (p-b)k - (w-b)q = 0$, 则$k_1(q) = \dfrac{(w-b)q}{p-b}$. 又$\dfrac{\mathrm{d}\pi_r^1(q,k)}{\mathrm{d}k} = p - b > 0$, 则$\pi_r^1(q,k)$为关于$k$的严格递增函数. 从而, 若$k < k_1(q)$, 则$\pi_r^1(q,k) \in (-\infty,0)$; 若$k_1(q) \leqslant k \leqslant q$, 则$\pi_r^1(q,k) \in [0,+\infty)$.

2) 若$k > q$, 令$\pi_r^2(q,k) = (p-w+g_r)q - g_rk = 0$, 则$k_2(q) = \dfrac{(p+g_r-w)q}{g_r}$. 又$\dfrac{\mathrm{d}\pi_r^2(q,k)}{\mathrm{d}k} = -g_r < 0$, 则$\pi_r^2(q,k)$为关于$k$的严格递减函数. 从而, 若$k > k_2(q)$, 则$\pi_r^2(q,k) \in (-\infty,0)$; 若$q < k \leqslant k_2(q)$, 则$\pi_r^2(q,k) \in [0,+\infty)$.

综上, 若$D < k_1(q)$或$D > k_2(q)$, 则$\pi_r(q,\theta) \in (-\infty,0)$; 若$k_1(q) \leqslant D \leqslant k_2(q)$, 则$\pi_r(q,\theta) \in [0,+\infty)$. 证毕.

性质1表明: 当风险中性的零售商的订货量过低或过高(即$D < k_1(q)$或$D > k_2(q)$)时, 其将面临一定的损失; 当风险中性的零售商的订货量在一定的范围内(即$k_1(q) \leqslant D \leqslant k_2(q)$)时, 其将获得一定的收益. 性

质1的管理启示是: 风险中性的零售商在采购过程中可能存在一定的风险, 其对于订货量的控制是必要的.

设W_0为零售商的初始财富值, 考虑如下形式的损失规避效用函数[35,36], 即

$$\mu(W)=\begin{cases}W-W_0, & W\geqslant W_0,\\ \lambda(W-W_0), & W<W_0,\end{cases}\tag{6}$$

其中参数$\lambda\in[1,+\infty]$表示零售商的损失规避程度. 若$\lambda=1$, 则表明零售商是风险中性的; 若$\lambda>1$, 则表明零售商具有损失规避的行为特征, 即此零售商为损失规避型零售商, 且λ的值越大, 零售商损失规避的程度越大. 为了讨论的方便且不失一般性, 假定零售商的初始财富值为0, 即$W_0=0$.

因此, 依据式(5)和式(6), 损失规避型零售商的期望效用为

$$\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))=\mathrm{E}(\pi_r(q,\theta))+(\lambda-1)(\int_0^{k_1(q)}\pi_r^1(q,x)\mathrm{d}G(x|\theta)+\int_{k_2(q)}^{+\infty}\pi_r^2(q,x)\mathrm{d}G(x|\theta)).\tag{7}$$

式(7)的经济学意义可被解释为: 损失规避型零售商的期望效用为零售商在风险中性条件下所获得的期望利润与零售商在具有损失规避行为特征下的超订和缺货所遭受的期望损失之和.

下面分别讨论分散供应链情形下供应商与损失规避型零售商的最优策略和集中供应链情形下供应链的最优策略, 并在此基础上构建回购–质量成本分担契约下的供应链协调契约模型, 且进一步论证该供应链协调契约模型的有效性.

2.1 分散供应链情形下供应商与损失规避型零售商的最优策略

在分散供应链情形下, 供应商和损失规避型零售商均被视为独立的经济个体, 各自给出相应的最优策略以最大化其个体利润或效用, 即供应商确定最优产品质量水平θ^*来实现其利润最大化, 而损失规避型零售商则确定最优订货量q_λ^*来实现其效用最大化, 且此决策过程也即是供应商与损失规避型零售商进行静态非合作博弈, 这里假定供应商的产品质量水平与损失规避型零售商订货量的最优反应函数分别为$\theta(q)$和$q(\theta)$.

定理 1 对于$\forall\theta\in[0,+\infty)$, $\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))$为关于$q$的严格凹函数, 且存在唯一最优订货量$q_\lambda^*$, 并满足$(p+g_r-w)-(p+g_r-b)G(q_\lambda^*|\theta)+(\lambda-1)(-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta))=0$.

证明 对于$\forall\theta\in[0,+\infty)$, 针对式(7)求关于$q$的一阶与二阶导数, 即

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{dE}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q}=&(p+g_r-w)-(p+g_r-b)G(q|\theta)+(\lambda-1)(-(w-b)G(k_1(q)|\theta)+\\&(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q)|\theta)),\end{aligned}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q^2}=-(p+g_r-b)g(q|\theta)-(\lambda-1)(\frac{(w-b)^2}{p-b}g(k_1(q)|\theta)+\frac{(p+g_r-w)^2}{g_r}g(k_2(q)|\theta)).$$

由于$p-b>0$, $g_r>0$, $\lambda>1$, 则$\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q^2}<0$, 故$\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))$为关于$q$ 的严格凹函数, 且存在唯一最优订货量q_λ^* 满足$\dfrac{\mathrm{dE}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q}|_{q=q_\lambda^*}=0$, 即

$$(p+g_r-w)-(p+g_r-b)G(q_\lambda^*|\theta)+(\lambda-1)(-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta))=0.$$

证毕.

定理1刻画了在供应商的产品质量水平一定的情形下损失规避型零售商的最优策略. 特殊地, 若$\lambda=1$, 则表明损失规避型零售商退化为风险中性的零售商. 由定理1可知, 风险中性的零售商的最优订货量q^*满足$(p+g_r-w)-(p+g_r-b)G(q^*|\theta)=0$, 即$G(q^*|\theta)=\dfrac{p+g_r-w}{p+g_r-b}$.

定理 2 对于$\forall\theta\in[0,+\infty)$, 有3种情况: 1) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)>0$, 则$q_\lambda^*>q^*$, $\dfrac{\mathrm{d}q_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda}>0$; 2) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)=0$, 则$q_\lambda^*=q^*$, $\dfrac{\mathrm{d}q_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda}=0$; 3) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)<0$, 则$q_\lambda^*<q^*$, $\dfrac{\mathrm{d}q_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda}<0$.

证明　对于$\forall\theta\in[0,+\infty)$, 由定理1可知

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{dE}(\mu(\pi_r(q_\lambda^*,\theta)))}{\mathrm{d}q_\lambda^*}=&(p+g_r-w)-(p+g_r-b)G(q_\lambda^*|\theta)+(\lambda-1)(-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)+\\&(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta))=0.\end{aligned}$$

进一步地整理得到

$$G(q_\lambda^*|\theta)=\frac{p+g_r-w}{p+g_r-b}+\frac{\lambda-1}{p+g_r-b}(-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)),$$

即

$$G(q_\lambda^*|\theta)=G(q^*|\theta)+\frac{\lambda-1}{p+g_r-b}(-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)).$$

依据隐函数定理, 则有

$$\frac{\mathrm{d}q_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda}=-\frac{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q\mathrm{d}\lambda}}{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q^2}}|_{q=q_\lambda^*}=-\frac{(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)}{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q_\lambda^*,\theta)))}{\mathrm{d}{q_\lambda^*}^2}}.$$

由于$p-b>0$, $g_r>0$, $\lambda>1$, 则

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q_\lambda^*,\theta)))}{\mathrm{d}{q_\lambda^*}^2}=&-(p+g_r-b)g(q_\lambda^*|\theta)-(\lambda-1)(\frac{(w-b)^2}{p-b}g(k_1(q_\lambda^*)|\theta)+\\&\frac{(p+g_r-w)^2}{g_r}g(k_2(q_\lambda^*)|\theta))<0.\end{aligned}$$

进一步地, 可得到如下结论:

1) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)>0$, 则$G(q_\lambda^*|\theta)>G(q^*|\theta)$, 即$q_\lambda^*>q^*$, 且$\dfrac{\mathrm{d}q_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda}>0$;

2) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)=0$, 则$G(q_\lambda^*|\theta)=G(q^*|\theta)$, 即$q_\lambda^*=q^*$, 且$\dfrac{\mathrm{d}q_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda}=0$;

3) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q_\lambda^*)|\theta)-(w-b)G(k_1(q_\lambda^*)|\theta)<0$, 则$G(q_\lambda^*|\theta)<G(q^*|\theta)$, 即$q_\lambda^*<q^*$, 且$\dfrac{\mathrm{d}q_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda}<0$.

证毕.

定理2揭示了在供应商的产品质量水平一定的情形下损失规避型零售商的最优订货量与风险中性的零售商的最优订货量之间的关系, 即在一定条件下损失规避型零售商的最优订货量可能多于、等于或少于风险中性的零售商的最优订货量; 同时也说明了在供应商的产品质量水平一定的情形下损失规避型零售商的最优订货量与损失规避系数之间的关系.

依据式(2)和式(7), 供应商的产品质量水平的最优反应函数$\theta(q)$与损失规避型零售商订货量的最优反应函数$q(\theta)$应分别满足式(8)和式(9), 即

$$\frac{\mathrm{dE}(\pi_s(q,\theta))}{\mathrm{d}\theta}=-(b+g_s-v)\int_0^q\frac{\partial G(x|\theta)}{\partial\theta}\mathrm{d}x-f'(\theta)=0,\tag{8}$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{dE}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q}=&(p+g_r-w)-(p+g_r-b)G(q|\theta)+(\lambda-1)(-(w-b)G(k_1(q)|\theta)+\\&(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q)|\theta))=0.\end{aligned}\tag{9}$$

定理 3　在分散供应链情形下, 供应商的产品质量水平的最优反应函数$\theta(q)$是关于损失规避型零售商订货量q的严格递增函数, 损失规避型零售商订货量的最优反应函数$q(\theta)$是关于供应商的产品质量水平θ的严格递增函数.

证明　由于供应商的产品质量水平与损失规避型零售商订货量的最优反应函数$\theta(q)$和$q(\theta)$分别满足

式(8)和式(9), 依据隐函数定理, 则有

$$\frac{\mathrm{d}\theta(q)}{\mathrm{d}q}=-\frac{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\pi_s(q,\theta))}{\mathrm{d}\theta\mathrm{d}q}}{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\pi_s(q,\theta))}{\mathrm{d}\theta^2}}=\frac{(b+g_s-v)\dfrac{\partial G(q|\theta)}{\partial\theta}}{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\pi_s(q,\theta))}{\mathrm{d}\theta^2}},$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}q(\theta)}{\mathrm{d}\theta}&=-\frac{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q\mathrm{d}\theta}}{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q^2}}\\&=\frac{(p+g_r-b)\dfrac{\partial G(q|\theta)}{\partial\theta}+(\lambda-1)((w-b)\dfrac{\partial G(k_1(q)|\theta)}{\partial\theta}+(p+g_r-w)\dfrac{\partial G(k_2(q)|\theta)}{\partial\theta})}{\dfrac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q^2}}.\end{aligned}$$

由于$p-b>0, b-v>0, g_r>0, g_s>0, \lambda>1, f''(\theta)>0, \dfrac{\partial^2G(x|\theta)}{\partial\theta^2}>0$, 则

$$\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\pi_s(q,\theta))}{\mathrm{d}\theta^2}=-(b+g_s-v)\int_0^q\frac{\partial^2G(x|\theta)}{\partial\theta^2}\mathrm{d}x-f''(\theta)<0,$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))}{\mathrm{d}q^2}=&-(p+g_r-b)g(q|\theta)-(\lambda-1)(\frac{(w-b)^2}{p-b}g(k_1(q)|\theta)+\\&\frac{(p+g_r-w)^2}{g_r}g(k_2(q)|\theta))<0.\end{aligned}$$

进一步地, 由于$b-v>0, p-b>0, w-b>0, p-w>0, g_r>0, g_s>0, \lambda>1, \dfrac{\partial G(x|\theta)}{\partial\theta}<0$, 则$\dfrac{\mathrm{d}\theta(q)}{\mathrm{d}q}>0, \dfrac{\mathrm{d}q(\theta)}{\mathrm{d}\theta}>0$.

综上, 在分散供应链情形下, 供应商的产品质量水平的最优反应函数$\theta(q)$是关于损失规避型零售商订货量q的严格递增函数, 损失规避型零售商订货量的最优反应函数$q(\theta)$是关于供应商的产品质量水平θ的严格递增函数. 证毕.

定理3表明: 在分散供应链情形下, 损失规避型零售商订货量的提高, 能够促使供应商的产品质量水平的提高, 即损失规避型零售商加大其订货量, 会促使供应商之间的竞争程度加大, 从而激励供应商提高其产品的质量水平以便获得市场竞争中的优势地位; 同时, 供应商的产品质量水平的提高, 有助于损失规避型零售商订货量的提高, 即供应商的产品质量水平的提高使得市场需求亦随之增加, 从而更多的市场需求会促使损失规避型零售商增加其订货量. 因此, 定理3给出的结论与实际经济现象相吻合.

在分散供应链情形下, 供应商的最优产品质量水平θ^*与损失规避型零售商的最优订货量q_λ^*应为式(8)和式(9)所构成的方程组的解, 即

$$\begin{cases}-(b+g_s-v)\displaystyle\int_0^q\frac{\partial G(x|\theta)}{\partial\theta}\mathrm{d}x=f'(\theta),\\G(q|\theta)=\dfrac{p+g_r-w}{p+g_r-b}+\dfrac{\lambda-1}{p+g_r-b}(-(w-b)G(k_1(q)|\theta)+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q)|\theta)).\end{cases}\tag{10}$$

2.2 集中供应链情形下供应链的最优策略

在集中供应链情形下, 供应商和零售商被视为统一的经济个体, 且供应商与零售商均是风险中性的, 并集中给出相应的最优策略以最大化其整体利润, 即统一确定供应商的最优产品质量水平$\bar{\theta}^*$与零售商的最优订货量$\bar{q}^*$来实现整体利润最大化, 且此决策过程也即是供应商与零售商进行合作博弈, 这里假定供应商的产品质量水平与零售商订货量的最优反应函数分别为$\bar{\theta}(q)$和$\bar{q}(\theta)$.

依据式(1)和式(3), 集中供应链情形下供应链的利润为

$$\begin{aligned}\pi(q,\theta)&=\pi_r(q,\theta)+\pi_s(q,\theta)\\&=p\min\{D,q\}+v\max\{q-D,0\}-(g_r+g_s)\max\{D-q,0\}-cq-f(\theta).\end{aligned}\tag{11}$$

进一步地, 可计算得到集中供应链情形下供应链的期望利润

$$\mathrm{E}(\pi(q,\theta))=(p+g_r+g_s-c)q-(p+g_r+g_s-v)\int_0^q G(x|\theta)\mathrm{d}x-(g_r+g_s)\mu-f(\theta).\tag{12}$$

依据式(12), 供应商的产品质量水平的最优反应函数$\bar{\theta}(q)$与零售商订货量的最优反应函数$\bar{q}(\theta)$应分别满足式(13)和式(14), 即

$$\frac{\partial\mathrm{E}(\pi(q,\theta))}{\partial\theta}=-(p+g_r+g_s-v)\int_0^q\frac{\partial G(x|\theta)}{\partial\theta}\mathrm{d}x-f'(\theta)=0,\tag{13}$$

$$\frac{\partial\mathrm{E}(\pi(q,\theta))}{\partial q}=(p+g_r+g_s-c)-(p+g_r+g_s-v)G(q|\theta)=0.\tag{14}$$

定理 4　在集中供应链情形下, 供应商的产品质量水平的最优反应函数$\bar{\theta}(q)$是关于零售商订货量q的严格递增函数, 零售商订货量的最优反应函数$\bar{q}(\theta)$是关于供应商产品质量水平θ的严格递增函数.

定理4的证明与定理3类似, 这里不再赘述. 定理4表明: 在集中供应链情形下, 零售商订货量的提高, 能够促使相应供应商的产品质量水平的提高, 即零售商加大其订货量, 会激励供应商提高其产品的质量水平并使其所在供应链巩固市场竞争中的优势地位; 同时, 供应商的产品质量水平的提高, 有助于零售商订货量的提高, 即供应商的产品质量水平的提高, 使其所在供应链的市场需求亦随之增加, 并促使相应的零售商增加其订货量. 因此, 定理4给出的结论亦与实际经济现象相吻合.

在集中供应链情形下, 供应商的最优产品质量水平$\bar{\theta}^*$与零售商的最优订货量$\bar{q}^*$应为式(13)和式(14)所构成的方程组的解, 即

$$\begin{cases}-(p+g_r+g_s-v)\displaystyle\int_0^q\frac{\partial G(x|\theta)}{\partial\theta}\mathrm{d}x=f'(\theta),\\ G(q|\theta)=\dfrac{p+g_r+g_s-c}{p+g_r+g_s-v}.\end{cases}\tag{15}$$

定理 5　考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链在回购契约下无法达到协调.

证明　依据Cachon的供应链协调定义[37], 则有$\theta^*=\bar{\theta}^*$, $q_\lambda^*=\bar{q}^*$. 进一步地, 依据式(10)和式(15), 则有

$$-(p+g_r+g_s-v)\int_0^q\frac{\partial G(x|\theta)}{\partial\theta}\mathrm{d}x=-(b+g_s-v)\int_0^q\frac{\partial G(x|\theta)}{\partial\theta}\mathrm{d}x,$$

$$\frac{p+g_r+g_s-c}{p+g_r+g_s-v}=\frac{p+g_r-w}{p+g_r-b}+\frac{\lambda-1}{p+g_r-b}(-(w-b)G(k_1(q)|\theta)+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q)|\theta)),$$

即

$$p+g_r-b=0,$$

$$\begin{aligned}\frac{(p+g_r+g_s)(w-b)+(p+g_r-w)v-(p+g_r-b)c}{p+g_r+g_s-v}=&(\lambda-1)(-(w-v)G(k_1(q)|\theta)+\\&(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q)|\theta)).\end{aligned}$$

由于$p>b$, $g_r>0$, 则$p+g_r-b\neq0$恒成立, 故考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链在回购契约下无法达到协调.　　证毕.

定理5的管理启示是: 在传统的回购契约下, 考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链是无法达到协调的, 即分散供应链情形下供应商与损失规避型零售商各自做出使自身利润或效用最大化的最优策略, 但不能使供应链的整体利润达到最优, 从而造成整体利益与个体利益的冲突, 这种经济现象是典型的囚徒困境, 双重边际化效应使得供应商与损失规避型零售商均不能得到可能的最大利润. 因此, 有必要对传

统的回购契约进行适当的调整或改善来影响供应商与损失规避型零售商的最优策略, 从而使该二级供应链达到协调.

2.3 回购–质量成本分担契约下的供应链协调契约模型

基于上述分析可知, 考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链在回购契约下无法达到协调, 故需要设计新的契约来协调此二级供应链, 这里参照文献[33,34]提出的成本分担思想, 通过设计一种损失规避型零售商分担供应商部分努力成本的回购–质量成本分担契约来协调此二级供应链, 即在回购契约下, 损失规避型零售商分担一部分供应商为提高产品质量水平所付出的努力成本. 但需要说明的是, 与文献[33]给出的回购– 成本分担契约不同的是, 文献[33]提出的回购–成本分担契约中的成本是指供应商与零售商的联合促销成本. 设α表示成本分担系数, $\alpha \in (0,1]$, $\alpha f(\theta)$表示供应商分担的努力成本, $(1-\alpha)f(\theta)$表示损失规避型零售商分担的努力成本. 特殊地, 当$\alpha = 1$时, 回购–质量成本分担契约退化为传统的回购契约.

回购–质量成本分担契约下, 风险中性的供应商的期望利润、风险中性的零售商的期望利润和损失规避型零售商的期望效用分别为

$$\mathrm{E}(\pi_s(q,\theta)) = (w+g_s-c)q-(b+g_s-v)\int_0^q G(x|\theta)\mathrm{d}x - g_s\mu - \alpha f(\theta), \tag{16}$$

$$\mathrm{E}(\pi_r(q,\theta)) = (p+g_r-w)q-(p+g_r-b)\int_0^q G(x|\theta)\mathrm{d}x - g_r\mu - (1-\alpha) f(\theta), \tag{17}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta))) =& \mathrm{E}(\pi_r(q,\theta)) + (\lambda-1)(\int_0^{k_1(q)} \pi_r^1(q,x)\mathrm{d}G(x|\theta) + \int_{k_2(q)}^{+\infty} \pi_r^2(q,x)\mathrm{d}G(x|\theta)) - \\ & (1-\alpha)f(\theta).\end{aligned} \tag{18}$$

在分散供应链情形下, 假定供应商的产品质量水平与损失规避型零售商订货量的最优反应函数分别为$\underline{\theta}(q)$和$\underline{q}(\theta)$, 并记回购–质量成本分担契约下供应商的最优产品质量水平与损失规避型零售商的最优订货量分别为$\underline{\theta}^*$和$\underline{q}_\lambda^*$, 类似于2.1节的分析, 可得到以下定理.

定理 6 对于$\forall\theta \in [0,+\infty)$，$\mathrm{E}(\mu(\pi_r(q,\theta)))$为关于$q$的严格凹函数, 且存在唯一最优订货量$\underline{q}_\lambda^*$, 并满足$(p+g_r-w)-(p+g_r-b)G(\underline{q}_\lambda^*|\theta)+(\lambda-1)(-(w-b)G(k_1(\underline{q}_\lambda^*)|\theta)+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(\underline{q}_\lambda^*)|\theta)) = 0$.

定理6的证明与定理1类似, 不再赘述. 定理6刻画了在供应商的产品质量水平一定的情形下损失规避型零售商的最优策略.

定理 7 对于$\forall\theta \in [0,+\infty)$, 有3种情况: 1) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(\underline{q}_\lambda^*)|\theta)-(w-b)G(k_1(\underline{q}_\lambda^*|\theta) > 0$, 则$\underline{q}_\lambda^* > q^*$, $\dfrac{\mathrm{d}\underline{q}_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda} > 0$; 2) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(\underline{q}_\lambda^*|\theta)-(w-b)G(k_1(\underline{q}_\lambda^*|\theta) = 0$, 则$\underline{q}_\lambda^* = q^*$, $\dfrac{\mathrm{d}\underline{q}_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda} = 0$; 3) 若$(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(\underline{q}_\lambda^*|\theta)-(w-b)G(k_1(\underline{q}_\lambda^*)|\theta) < 0$, 则$\underline{q}_\lambda^* < q^*$, $\dfrac{\mathrm{d}\underline{q}_\lambda^*}{\mathrm{d}\lambda} < 0$.

定理7的证明与定理2类似, 不再赘述. 定理7表明在供应商的产品质量水平一定的情形下损失规避型零售商的最优订货量与风险中性的零售商的最优订货量之间可能存在的关系, 即在一定条件下损失规避型零售商的最优订货量可能多于、等于或少于风险中性的零售商的最优订货量; 同时也刻画了在供应商的产品质量水平一定的情形下损失规避型零售商的最优订货量与损失规避系数之间的关系.

类似于2.1节的分析, 可得到供应商的最优产品质量水平$\underline{\theta}^*$与损失规避型零售商的最优订货量$\underline{q}_\lambda^*$应为下列方程组的解, 即

$$\begin{cases} -(b+g_s-v)\displaystyle\int_0^q \frac{\partial G(x|\theta)}{\partial\theta}\mathrm{d}x = \alpha f'(\theta), \\ G(q|\theta) = \dfrac{p+g_r-w}{p+g_r-b} + \dfrac{\lambda-1}{p+g_r-b}(-(w-b)G(k_1(q)|\theta)+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q)|\theta)). \end{cases} \tag{19}$$

定理 8 在分散供应链情形下, 供应商的产品质量水平的最优反应函数$\underline{\theta}(q)$是关于损失规避型零售商

订货量q的严格递增函数, 损失规避型零售商订货量的最优反应函数$\underline{q}(\theta)$是关于供应商产品质量水平θ的严格递增函数.

定理8的证明与定理3类似, 不再赘述. 定理8表明: 在分散供应链情形下, 损失规避型零售商订货量的提高, 能够促使供应商的产品质量水平的提高, 即损失规避型零售商加大其订货量, 会促使供应商之间的竞争程度加大, 从而激励供应商提高其产品的质量水平以便获得市场竞争中的优势地位; 同时, 供应商的产品质量水平的提高, 有助于损失规避型零售商订货量的提高, 即供应商的产品质量水平的提高使得市场需求亦随之增加, 从而更多的市场需求会促使损失规避型零售商增加其订货量.

在集中供应链情形下, 回购–质量成本分担契约下供应链的期望利润仍为式(12), 故供应商的产品质量水平与零售商订货量的最优反应函数分别为$\bar{\theta}(q)$和$\bar{q}(\theta)$, 供应商的最优产品质量水平与零售商的最优订货量仍为$\bar{\theta}^*$与$\bar{q}^*$, 且定理4 在回购–质量成本分担契约下亦是成立的.

定理 9　考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链在回购–质量成本分担契约(w,b,α)下可达到协调, 且满足

$$b=\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-v),\quad b\in(v,w),$$

$$w=\frac{(\lambda-1)((\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-v))G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+(p+g_r)\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))}{1+(\lambda-1)(G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))}+\frac{\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-c)}{1+(\lambda-1)(G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))},\quad w\in(c,p)\cap(b,p),$$

其中 θ^{**}和q^{**}同时满足式(15)和式(19).

证明　依据Cachon的供应链协调定义[37], 则有$\underline{\theta}^*=\bar{\theta}^*$, $\underline{q}^*_\lambda=\bar{q}^*$, 即$\theta^{**}=\underline{\theta}^*=\bar{\theta}^*$, $q^{**}=\underline{q}^*_\lambda=\bar{q}^*$. 进一步地, 依据式(15)和式(19), 则有

$$-(p+g_r+g_s-v)\int_0^{q^{**}}\frac{\partial G(x|\theta^{**})}{\partial\theta^{**}}\mathrm{d}x=-\frac{b+g_s-v}{\alpha}\int_0^{q^{**}}\frac{\partial G(x|\theta^{**})}{\partial\theta^{**}}\mathrm{d}x,$$

$$\frac{p+g_r+g_s-c}{p+g_r+g_s-v}=\frac{p+g_r-w}{p+g_r-b}+\frac{\lambda-1}{p+g_r-b}(-(w-b)G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+(p+g_r-w)\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**})).$$

进一步整理得到

$$b=\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-v),$$

$$w=\frac{(\lambda-1)((\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-v))G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+(p+g_r)\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))}{1+(\lambda-1)(G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))}+\frac{\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-c)}{1+(\lambda-1)(G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))}.$$

由于$b\in(v,w)$, $w\in(c,p)$, $w\in(b,p)$, 则

$$b=\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-v),\quad b\in(v,w),$$

$$w=\frac{(\lambda-1)((\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-v))G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+(p+g_r)\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))}{1+(\lambda-1)(G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))}+\frac{\alpha(p+g_r)-(1-\alpha)(g_s-c)}{1+(\lambda-1)(G(k_1(q^{**})|\theta^{**})+\bar{G}(k_2(q^{**})|\theta^{**}))},\quad w\in(c,p)\cap(b,p).$$

证毕.

定理9的实际含义是: 当考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链达到协调时, 单位产品的回购价格与批发价格应满足的条件, 且单位产品回购价格与单位产品的批发价格、生产成本以及损失规避系数无关, 而单位产品批发价格不仅与模型中涉及的参数相关, 而且还与供应商和损失规避型零售商的策略相关. 定理9的管理启示是: 从供应商的立场来看, 供应商在拟定回购–质量成本分担契约合同时, 可不必

考虑单位产品的批发价格、生产成本以及损失规避系数对单位产品回购价格设计的影响, 但要考虑模型中涉及的参数以及供应链成员的策略对单位产品批发价格设计的影响. 定理9 表明: 在回购–质量成本分担契约下, 考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链可达到协调, 这就说明了在回购–质量成本分担契约下供应链的整体利润可实现帕累托改进并达到协调, 即说明了供应商与损失规避型零售商中至少有一方的利润是增加的. 定理9的另一管理启示是: 无论从供应商还是损失规避型零售商的立场来看, 二者均更具意愿来签订回购–质量成本分担契约合同.

3 数值实验

为了说明上文提及模型的参数对分散供应链和集中供应链情形下供应商的最优产品质量水平和零售商的最优订货量以及供应链利润的影响, 本文进行了针对回购–质量成本分担契约下的供应链协调契约模型参数的实验分析.

为了简化分析, 假定市场需求函数$D = \theta^{\frac{1}{2}} + \delta$, 其中$\delta$为随机变量且其概率分布函数与概率密度函数分别为$H(x)$和$h(x)$, 从而可以得到随机需求$D$的条件概率分布函数与条件概率密度函数分别为$G(x|\theta) = H(x - \theta^{\frac{1}{2}})$ 和$g(x|\theta) = h(x - \theta^{\frac{1}{2}})$. 进一步地, 假定随机需求$D$服从[0,100]上的均匀分布, 则$\mu = 50$, 努力成本函数$f(\theta) = \mu\theta^2/2 = 25\theta^2$. 依据客观现实情况, 即考虑$p > w > c > v > 0$, $p > w > b > v > 0$, $g_r, g_s > 0$, 在回购–质量成本分担契约下, 供应链协调契约模型中涉及的一些参数取值为$p = 60$, $w = 25$, $c = 15$, $b = 10$, $v = 8$, $g_r = g_s = 5$, $\lambda = 2$, $\alpha = 0.8$.

本文的参数实验分析涉及9个方面, 下面简要给出参数实验分析的有关说明及相关结论. 限于篇幅, 仅给出第1个方面的参数实验分析的图示说明.

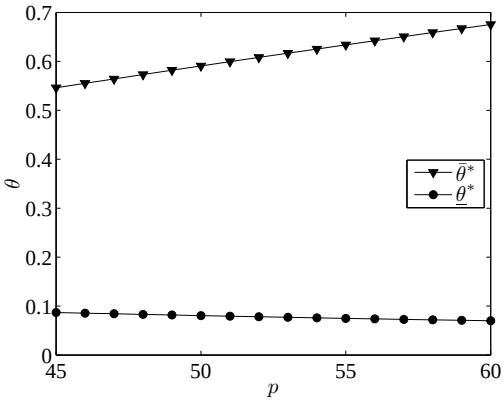

图 1 单位产品销售价格对最优产品质量水平的影响

Fig. 1 The impact of the retail price on the optimal quality level

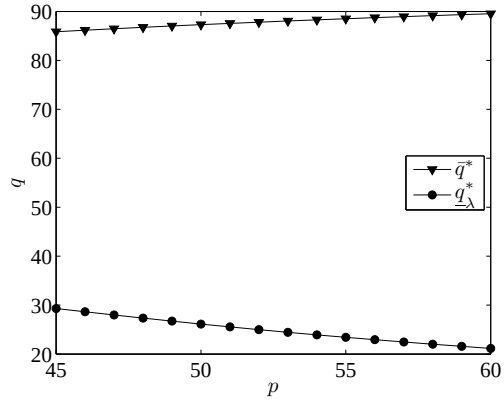

图 2 单位产品销售价格对最优订货量的影响

Fig. 2 The impact of the retail price on the optimal order quantity

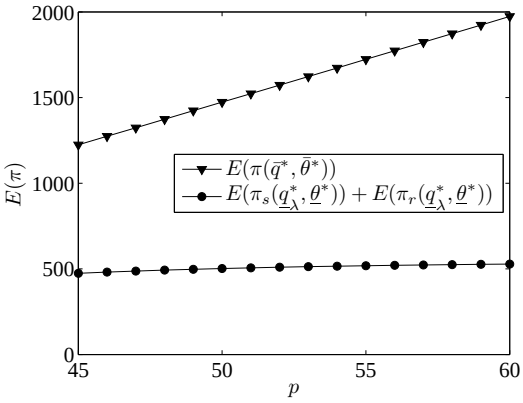

图 3　单位产品销售价格对供应链利润的影响

Fig. 3　The impact of the retail price on the profit of the supply chain

1) 将单位产品销售价格 p 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 p 变化(如考虑 p 从45 变化到60)对供应商的最优产品质量水平 $\underline{\theta}^*$ 和损失规避型零售商的最优订货量 $\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 p 变化对 $\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润 ($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 上述参数实验分析结果分别如图1、图2和图3所示. 参数实验分析结果表明: 随着单位产品销售价格的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链情形下均是减少的, 且最优产品质量水平的变化不够明显, 而在集中供应链情形下均是增加的; 供应链利润在分散供应链和集中供应链情形下均是增加的.

2) 将单位产品批发价格 w 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 w 变化(如考虑 w 从15变化到30)对供应商的最优产品质量水平 $\underline{\theta}^*$ 和损失规避型零售商的最优订货量 $\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 w 变化对 $\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润 ($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 由于式(12) 不含参数 w, 故供应链利润在集中供应链情形下是不变的; 同时, 由于式(15)不含参数 w, 故最优产品质量水平与最优订货量在集中供应链情形下均是不变的. 参数实验分析结果表明: 随着单位产品批发价格的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链情形下均是增加的, 且最优产品质量水平的变化不够明显; 供应链利润在分散供应链情形下是增加的.

3) 将单位产品生产成本 c 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 c变化(如考虑 c从10变化到25)对供应商的最优产品质量水平 $\underline{\theta}^*$ 和损失规避型零售商的最优订货量$\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 c 变化对$\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 由于式(19) 不含参数 c, 故最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链情形下均是不变的. 参数实验分析结果表明: 随着单位产品生产成本的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在集中供应链情形下均是减少的; 供应链利润在分散供应链和集中供应链情形下均是减少的.

4) 将单位产品回购价格 b 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 b 变化(如考虑 b 从8变化到20)对供应商的最优产品质量水平$\underline{\theta}^*$和损失规避型零售商的最优订货量$\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 b 变化对 $\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 由于式(12) 不含参数 b, 供应链利润在集中供应链情形下是不变的; 同时, 由于式(15)不含参数 b, 最优产品质量水平与最优订货量在集中供应链情形下均是不变的. 参数实验分析结果表明: 随着单位产品回购价格的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链情形下均是增加的, 且最优订货量的变化不够明显; 供应链利润在分散供应链情形下是增加的.

5) 将单位剩余产品的净残值 v 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过

式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 v 变化(如考虑 v 从 0 变化到15)对供应商的最优产品质量水平 $\underline{\theta}^*$ 和损失规避型零售商的最优订货量 $\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 v 变化对 $\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润 ($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 参数实验分析结果表明: 随着单位剩余产品的净残值的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链情形下均是减少的, 且最优订货量的变化不够明显, 而最优产品质量水平在集中供应链情形下是减少的且变化不够明显, 最优订货量在集中供应链情形下是增加的; 供应链利润在分散供应链和集中供应链情形下均是增加的且在分散供应链情形下的变化不够明显.

6) 将零售商所承担的单位产品缺货成本 g_r 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 g_r 变化(如考虑 g_r 从5变化到20)对供应商的最优产品质量水平 $\underline{\theta}^*$ 和损失规避型零售商的最优订货量 $\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润 ($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 g_r 变化对 $\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润 ($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 参数实验分析结果表明: 随着零售商所承担的单位产品缺货成本的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链和集中供应链情形下均是增加的; 供应链利润在分散供应链和集中供应链情形下均是增加的且在集中供应链情形下的变化不够明显.

7) 将供应商所承担的单位产品缺货成本 g_s 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 g_s 变化(如考虑 g_s 从5变化到20)对供应商的最优产品质量水平 $\underline{\theta}^*$ 和损失规避型零售商的最优订货量 $\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 g_s 变化对 $\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 参数实验分析结果表明: 随着供应商所承担的单位产品缺货成本的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链和集中供应链情形下均是增加的, 且在分散供应链情形下的最优订货量的变化不够明显; 供应链利润在分散供应链情形下是减少的, 而在集中供应链情形下是增加的且变化不够明显.

8) 将损失规避系数 λ 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 λ 变化(如考虑 λ 从2变化到20)对供应商的最优产品质量水平 $\underline{\theta}^*$ 和损失规避型零售商的最优订货量 $\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 λ 变化对 $\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 由于式(12)不含参数 λ, 故供应链利润在集中供应链情形下是不变的; 同时, 由于式(15)不含参数 λ, 故最优产品质量水平与最优订货量在集中供应链情形下均是不变的. 参数实验分析结果表明: 随着损失规避系数的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链情形下均是减少的; 供应链利润在分散供应链情形下是减少的.

9) 将成本分担系数 α 视为变量, 进行相关的数值试验. 在分散供应链情形下, 通过式(16)、式(17)和式(19), 考察参数 α 变化(如考虑 α 从0.1变化到1)对供应商的最优产品质量水平 $\underline{\theta}^*$ 和损失规避型零售商的最优订货量 $\underline{q}_\lambda^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi_s(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))+\mathrm{E}(\pi_r(\underline{q}_\lambda^*,\underline{\theta}^*))$)的影响; 在集中供应链情形下, 通过式(12)和式(15), 考察参数 α 变化对 $\bar{\theta}^*$ 和 $\bar{q}^*$ 以及供应链利润($\mathrm{E}(\pi(\bar{q}^*,\bar{\theta}^*))$)的影响. 由于式(12) 不含参数 α, 故供应链利润在集中供应链情形下是不变的; 同时, 由于式(15)不含参数 α, 故最优产品质量水平与最优订货量在集中供应链情形下均是不变的. 参数实验分析结果表明: 随着成本分担系数的增加, 最优产品质量水平与最优订货量在分散供应链情形下均是减少的且最优订货量的变化不够明显; 供应链利润在分散供应链情形下是减少的且变化不够明显.

4 结束语

本文针对考虑损失规避型零售商与产品质量水平的二级供应链协调问题, 分别讨论了分散供应链和集中供应链情形下的供应商和零售商的最优策略, 并构建了回购–质量成本分担契约下的供应链协调契约模型, 进一步地, 通过数值实验分析了分散供应链和集中供应链情形下模型参数变动对供应商和零售商的最优策略以及供应链利润的影响. 通过本文的研究, 得到如下主要结论: 1) 损失规避型零售商的订货量会促使

供应商提高其产品的质量水平以便保持市场竞争优势, 而供应商的产品质量水平的提高能够促使损失规避型零售商增加其订货量; 2) 此二级供应链在回购契约下无法达到协调; 3) 一定条件下此二级供应链在回购–质量成本分担契约下可达到协调. 与已有相关研究不同的是, 本文同时考虑了零售商的损失规避行为与市场需求受供应商的产品质量水平影响的情形. 今后需要进一步开展的研究工作是考虑损失规避型供应商与促销努力水平的供应链协调契约模型等.

参考文献:

[1] Kanda A, Deshmukh S G. Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. International Journal of Production Economics, 2008, 115(2): 316–335.

[2] Li X, Wang Q. Coordination mechanisms of supply chain systems. European Journal of Operational Research, 2007, 179(1): 1–16.

[3] 李绩才, 周永务, 肖　旦, 等. 考虑损失厌恶一对多型供应链的收益共享契约. 管理科学学报, 2013, 16(2): 71–82.
Li J C, Zhou Y W, Xiao D, et al. Revenue-sharing contract in supply chains with single supplier and multiple loss-averse retailers. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(2): 71–82. (in Chinese)

[4] Tsay A A, Agrawal N. Channel dynamics under price and service competition. Manufacturing & Service Operations Management, 2000, 2(4): 372–391.

[5] Boyaci T, Gallego G. Supply chain coordination in a market with customer service competition. Production and Operations Management, 2004, 13(1): 3–22.

[6] Hall J, Porteus E. Customer service competition in capacitated systems. Manufacturing & Service Operations Management, 2000, 2(2): 144–165.

[7] Bernstein F, Federgruen A. Pricing and replenishment strategies in a distribution system with competing retailers. Operations Research, 2003, 51(3): 409–426.

[8] Bernstein F, Federgruen A. Coordination mechanisms for supply chains under price and service competition. Manufacturing & Service Operations Management, 2007, 9(3): 242–262.

[9] 鲁其辉, 朱道立. 质量与价格竞争供应链的均衡与协调策略研究. 管理科学学报, 2009, 12(3): 56–64.
Lu Q H, Zhu D L. Research on equilibriums and coordination strategies of supply chains with quality and price competition. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(3): 56–64. (in Chinese)

[10] 肖　迪, 袁敬霞, 包　兴. 质量与价格双重竞争情景下的供应链协调策略分析. 中国管理科学, 2013, 21(4): 82–88.
Xiao D, Yuan J X, Bao X. Supply chain coordination strategy considering dual competition from price and quality. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(4): 82–88. (in Chinese)

[11] Tapiero C S. Consumers risk and quality control in a collaborative supply chain. European Journal of Operational Research, 2007, 182(2): 683–694.

[12] Gurnani H, Erkoc M. Supply contracts in manufacturer-retailer interactions with manufacturer-quality and retailer effort-induced demand. Naval Research Logistics, 2008, 55(3): 200–217.

[13] Ma P, Wang H, Shang J. Contract design for two-stage supply chain coordination: Integrating manufacturer-quality and retailer-marketing efforts. International Journal of Production Economics, 2013, 146(2): 745–755.

[14] 但　斌, 任连春, 张旭梅. 质量影响需求下的二级供应链协调模型研究. 工业工程与管理, 2010, 15(4): 1–4.
Dan B, Ren L C, Zhang X M. Research on coordination of two-stage supply chain when demand is influenced by quality. Industrial Engineering and Management, 2010, 15(4): 1–4. (in Chinese)

[15] 胡　军, 张　镓, 芮明杰. 线性需求条件下考虑质量控制的供应链协调契约模型. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 601–609.
Hu J, Zhang J, Rui M J. Supply chain coordination model contract considering quality control under the condition of linear demand. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(3): 601–609. (in Chinese)

[16] 牟小俐, 徐　毅, 陈汉林. 考虑质量水平影响的供应链利润模型. 工业工程, 2008, 11(3): 41–45.
Mu X L, Xu Y, Chen H L. Profits in supply chain considering influence of quality levels. Industrial Engineering Journal, 2008, 11(3): 41–45. (in Chinese)

[17] Kahn J A. Why is production more volatile than sales? Theory and evidence on the stockout-avoidance motive for inventory-holding. The Quarterly Journal of Economics, 1992, 107(2): 481–510.

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

[19] Anupindi R. Supply contracts with quantity commitments and stochastic demand//Quantitative Models for Supply Chain Management. Boston: Kluwer Academic, 1999: 197–232.

[20] Tsay A A, Nahmias S, Agrawal N. Modeling supply chain contracts: A review//Quantitative Models for Supply Chain Management. Boston: Kluwer Academic, 1999: 299–336.

[21] Wu S D, Roundy R O, Storer R H, et al. Manufacturing logistics research: Taxonomy and directions. Working paper, Bethlehem: Lehigh University, 1997.

[22] 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. 系统工程学报, 2014, 29(3): 365–370.
Dan B, Fu H Y, Xu G Y, et al. Coordination of agri-food supply chain with weather-related yeild under risk-averse producer. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(3): 365–370. (in Chinese)

[23] Zhang L, Song S, Wu C. Supply chain coordination of loss-averse newsvendor with contract. Tsinghua Science & Technology, 2005, 10(2): 133–140.

[24] Shi K, Xiao T. Coordination of a supply chain with a loss-averse retailer under two types of contracts. International Journal of Information and Decision Sciences, 2008, 1(1): 5–25.

[25] Deng X, Xie J, Xiong H. Manufacturer-retailer contracting with asymmetric information on retailer's degree of loss aversion. International Journal of Production Economics, 2013, 142(2): 372–380.

[26] Chen X, Hao G, Li L. Channel coordination with a loss-averse retailer and option contracts. International Journal of Production Economics, 2014, 150: 52–57.

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

[28] 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. 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. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(8): 1727–1738. (in Chinese)

[29] 侯玉梅, 田 歆, 马利军, 等. 基于供应商促销与销售努力的供应链协同决策. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12): 3087–3094.
Hou Y M, Tian X, Ma L J, et al. Coordination and decision of a supply chain with supplier's promotion and sales effort. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(12): 3087–3094. (in Chinese)

[30] 但 斌, 付红勇, 徐广业, 等. 考虑天气与努力水平共同影响产量及质量的农产品供应链协调. 系统工程理论与实践, 2013, 33(9): 2229–2238.
Dan B, Fu H Y, Xu G Y, et al. Agri-food supply chain coordination considering the impact of weather and effort level on output and quality. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(9): 2229–2238. (in Chinese)

[31] 贾 涛, 张灿荣, 徐 渝. 基于供应商努力的供应链代销加收入分享策略. 管理科学, 2007, 20(5): 2–8.
Jia T, Zhang C R, Xu Y. Supply chain revenue sharing contract under consignment with supplier's sales effort. Journal of Management Sciences, 2007, 20(5): 2–8. (in Chinese)

[32] 刘鹏飞. 需求依赖零售商努力水平的VMI协调. 系统工程学报, 2012, 27(5): 679–684.
Liu P F. Coordinating the VMI with retailer effort level dependent demand. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(5): 679–684. (in Chinese)

[33] 代建生, 孟卫东. 基于CVaR的供应链联合促销的回购契约协调研究. 中国管理科学, 2014, 22(7): 43–51.
Dai J S, Meng W D. Buy-back contracts for a supply chain with a risk-neutral supplier and a risk-averse retailer who take joint promotion actions based on CVaR. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(7): 43–51. (in Chinese)

[34] 鲁其辉. 基于成本共担策略的服务供应链协调研究. 控制与决策, 2011, 26(11): 1649–1653.
Lu Q H. Coordinate with cost sharing strategy for service supply chain. Control and Decision, 2011, 26(11): 1649–1653. (in Chinese)

[35] Wang C X, Webster S. The loss-averse newsvendor problem. Omega: The International Journal of Management Science, 2009, 37(1): 93–105.

[36] Schweitzer M E, Cachon G P. Decision bias in the newsvendor problem with a known demand distribution: Experimental evidence. Management Science, 2000, 46(3): 404–420.

[37] Cachon G P. Supply chain coordination with contracts//Handbooks in Operation and Managements Science: Supply Chain Management, Amsterdam: North Holland, 2003: 227–339.

作者简介:

刘云志 (1985—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 研究方向: 运作管理, 决策理论与方法, Email: yunzhi_liu@126.com;

樊治平 (1961—), 男, 江苏镇江人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 决策分析与运作管理等, Email: zpfan@mail.neu.edu.cn.