文章编号: 1001-0920(2018)10-1833-08 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2017.0754

考虑风险规避与质量和服务水平的VMI供应链期权协调策略

何 娟, 黄福友†, 黄福玲

(西南交通大学 交通运输与物流学院，成都 610031)

摘 要: 针对一个考虑风险规避供应商与质量和服务水平的二级VMI供应链,应用条件风险价值(CVaR)准则刻画供应商的风险规避行为,提出由期权和成本分担构成的组合契约,构建以零售商为主导的Stackelberg博弈模型,探讨供应链协调策略以及风险规避对供应链协调和利润分配的影响. 研究表明,供应商的最优生产量随着其风险规避程度的增加而减小,但最优质量和服务水平与风险规避程度无关;当且仅当供应商风险规避程度较低时供应链才能实现协调,且供应商风险规避程度是影响供应链契约设计和利润分配的关键因素.

关键词: 供应链协调；风险规避；期权契约；产品质量；顾客服务

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Option coordination strategy for VMI supply chain with a risk-averse supplier based on quality and service level

HE Juan, HUANG Fu-you†, HUANG Fu-ling

(School of Transportation and Logistics，Southwest Jiaotong University，Chengdu 610031，China)

Abstract: In a vendor-managed inventory(VMI) supply chain coordination problem with a risk-averse supplier under product quality and customer service investment, the conditional value-at-risk(CVaR) criterion is adopted to model risk aversion of the supplier, and a combined contract composed of option and cost sharing is proposed to investigate coordination and profit allocation issues of the supply chain with a Stackelberg game in which the retailer acts as the leader. It is found that the supplier's optimal production quantity decreases as the risk aversion coefficient increases, while both optimal quality and service levels are independent on the risk aversion coefficient. Furthermore, coordination of the supply chain is achievable only when the supplier is low in risk aversion, and the supplier's risk aversion is a significant factor for contract design and profit allocation.

Keywords: supply chain coordination；risk aversion；option contract；product quality；customer service

0 引 言

随着市场需求个性化和快速多变的趋势越来越明显,市场供求关系由卖方市场转变为买方市场,一些巨型零售商(例如沃尔玛、家乐福、苏宁、国美等)逐渐占据了供应链的主导地位. 与此同时,作为一种新型的集成式供应链管理思想,供应商管理库存(VMI)受到了理论界和实务界的广泛推崇. 在VMI模式下,零售商不再承担库存管理,并将自己的库存决策权转移到上游供应商的手中,且为供应商提供透明的市场信息,同时供应商由于能够获取更加真实的市场需求信息,能更好地制定生产决策. VMI模式能够帮助零售商转移库存风险、增加竞争优势并提高供应链整体绩效. 自沃尔玛和宝洁公司成功运用VMI模式以来,VMI模式被越来越多的大型零售商(如K-mart、Home Depot、JC Penny和世纪华联等企业)所采用[1-2]. 事实上,VMI供应链管理模式在一定程度上缓解了“牛鞭效应”带来的不利影响,使得供应商能够更加准确地制定生产决策,从而降低库存成本,提高供应链绩效[3-4]. 但是,VMI模式并不能使供应链实现协调,VMI模式下的供应链协调仍然是企业进一步提高供应链绩效和竞争力的关键问题[5-6]. 因此,探讨由零售商主导的VMI供应链协调问题具有重要的现实意义.

供应链契约是实现供应链协调的主要方法[7],当

收稿日期: 2017-06-14；**修回日期:** 2017-10-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71273214).

责任编委: 樊治平.

作者简介: 何娟(1975−), 女, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、供应链金融等研究；黄福友(1988−), 男, 博士生, 从事物流与供应链管理的研究.

†通讯作者. E-mail: fuyou.huang@hotmail.com

前,运用供应链契约来研究VMI模式下的供应链协调问题引起了学者们的广泛关注. 例如,张成堂等[8]以供应商和零售商组成的二阶段VMI供应链系统为研究对象,采用收益共享契约和博弈论研究了供应链的协调问题. Wong等[9]针对存在价格竞争的VMI供应链结构,应用销售返利契约考察了供应链的协调策略. 刘鹏飞[10]考虑市场需求受零售商销售努力影响,针对Nash静态博弈下VMI供应链,提出了采用零售商承担供应商部分滞销成本且供应商分担零售商部分努力成本的协调方法. 不同于上述研究,Cai等[2]引入期权契约研究了零售商占主导地位的VMI供应链协调问题,结果表明,期权契约特别适合零售商占主导地位的供应链,并能使供应链同步实现供应链协调和Pareto改进. 在实践中,大型零售巨头苏宁正是采用类似的期权契约来协调和管理供应链,最终实现了供应链双方的共赢[11]. 然而,文献[2]与大多数文献一样,都假定供应链成员是风险中性的,这与现实情况并不完全吻合.

大量实证研究表明,决策者通常具有风险规避的行为[12]. 特别在零售商主导的VMI供应链中,大多数中小型供应商在面对市场需求不确定性可能引起的生产过剩风险时,通常表现出风险规避行为,从而导致其最优生产量小于风险中性条件下的生产量,进而影响供应链的整体绩效. 供应商的风险规避行为对供应链协调和供应链整体利润分配的影响正是本文需要探讨的问题. 目前,在运作管理文献中,期望-方差(MV)[13]、风险价值(VaR)[14]和条件风险价值(CVaR)[15]是刻画企业风险规避特征的3种常用方法. 其中,MV方法存在一个内在的理论缺陷,其将偏离均值的上下侧变动均视为风险. 相比MV方法而言,VaR具有更好的实用价值,但VaR方法不满足传递不变性、正齐次性、单调性等一致性公理且计算不方便. 为此,Rockafellar等[16]在VaR方法的基础上提出了CVaR方法,CVaR方法在一定程度上克服了VaR方法存在的问题,其具有良好的结构和计算特性并满足一致性公理,受到了学者们的青睐. 近年来,越来越多的学者开始关注含有风险规避企业的供应链协调问题[17-18],少部分学者也关注了考虑风险规避的VMI供应链协调研究[19-20]. 例如,甘信华等[19]针对供销双方均存在风险规避特性时,运用收益共享契约考察了VMI供应链协调问题. 与文献[19]相比,本文进一步考虑了市场需求受产品质量和服务水平的影响,并且从零售商的角度提出一个基于期权的组合契约来研究含有风险规避的VMI供应链协调策略.

在实践中,随着社会经济水平的不断提高,消费者对产品质量和顾客服务都提出了更高的要求. 与此同时,提高产品质量和顾客服务已成为企业扩大市场需求和抢占市场份额的重要竞争手段,并且越来越多的企业意识到加强产品质量和顾客服务方面的合作有助于提高供应链整体绩效和竞争力. 因此,研究考虑产品质量和顾客服务双投入下的供应链协调问题显得尤为必要. 借鉴Tsay等[21]对顾客服务的定义,本文所指的顾客服务包括售前售后服务、产品陈列、销售促销以及广告等一系列能够增强顾客购买意愿的活动,所有这些因素集合成一个单一的顾客服务决策变量. 迄今为止,现有的供应链管理文献大多数集中于对产品质量[22]或顾客服务[23]的单方面研究,少部分学者考虑了市场需求受产品质量和顾客服务共同影响的供应链协调问题[24-25],但这些研究也是假定企业是风险中性的,还未有学者同时考虑供应商风险规避行为、产品质量和顾客服务三重因素下的VMI供应链协调问题.

鉴于以上问题,本文以一个风险规避的供应商和一个风险中性且占主导地位的零售商组成的二级VMI供应链为研究对象,考虑市场需求同时受产品质量和顾客服务水平的影响,运用CVaR准则刻画供应商的风险规避特征,构建以零售商为主导的Stackelberg博弈模型. 首先,考虑无协调契约时分散决策下和集中决策下供应链的最优策略;然后,借鉴文献[2],提出由期权和成本分担构成的组合契约来探讨供应链的协调策略问题,以及供应商风险规避行为对供应链协调契约设计和利润分配的影响. 与文献[2]相比,本文进一步考虑了市场的需求依赖于产品质量和顾客服务水平,并分析了供应商的风险规避行为对其生产决策以及供应链协调条件的影响. 此外,尽管文献[24-25]也假定市场需求同时受产品质量和顾客服务水平的影响,但均是考虑市场需求为确定性的情况,仍然没有考虑企业的风险规避特征.

1 问题描述与假设

考虑由一个风险规避的供应商和一个风险中性的零售商组成的单周期二级供应链,零售商在供应链中占主导地位,是供应链协调契约的制定者,在整个周期内供应商负责管理库存并承担库存风险. 假设供应链双方的所有信息是完全共享的,产品市场需求D是随机的且依赖于产品质量水平q和客户服务水平s,记$D=a-p+\alpha q+\beta s+x$. 其中:a为产品需求的初始规模,$a>0$;p为由市场决定的产品零售价格;α为顾客需求对产品质量的敏感系数,β为顾客需求对

服务水平的敏感系数, $\alpha > 0, \beta > 0$; x为需求随机扰动因子,假定x在$[L, U]$上服从概率密度函数为$f(x)$、累计分布函数为$F(x)$的分布,且$F(x)$为连续、可微、单调递增函数. 该需求函数表示,产品市场需求与零售价格成负相关,且产品质量水平和客户服务水平越高,产品市场需求越大,类似的线性需求函数在供应链运作管理文献中已得到广泛应用[24-25]. 在后文中,为便于书写,记$d(q, s) = a - p + \alpha q + \beta s$.

在现实中,产品质量水平越高,供应商需要投入的成本越多,且投入成本关于产品质量水平是边际递减的. 记产品质量成本为$C_q(q) = mq^2/2$,该成本函数与文献[24]是一致的. 同样地,客户服务水平的投入成本也是边际递减的,记服务成本为$C_s(s) = ns^2/2$. 假定供应商的生产成本为c,产品批发价格为w,期末时刻未出售的产品残值为υ. 为了便于模型分析且不失一般性,不考虑产品的缺货损失. 本文使用上标s、r和sc分别代表供应商、零售商和供应链,且使用下标I、w和cc分别表示集中决策情形、无协调契约的分散决策情形和有协调契约的情形.

供应商的风险规避采用CVaR准则来刻画. CVaR度量了供应商的随机利润小于给定置信水平η分位数以下部分的平均值,而忽略超出此分位数以上的部分. 给定供应商生产量为Q时的利润函数π^s,则供应商的条件风险价值可表示为

$$\mathrm{CVaR}_\eta(\pi^s) = \mathrm{E}[\pi^s | \pi^s \leqslant q_\eta(\pi^s)]. \tag{1}$$

其中: E为期望算子; $\eta \in (0, 1]$为供应商风险规避的程度, η 越小,供应商风险规避程度越大, $\eta = 1$表示供应商是风险中性的; $q_\eta(\pi^s)$表示供应商随机利润π^s的η分位数,即

$$q_\eta(\pi^s) = \inf\{z | P(\pi^s) \geqslant \eta\}. \tag{2}$$

为了便于计算和分析, Rockafellar等[16]给出了CVaR另一个等价的定义,即

$$\begin{aligned}&\mathrm{CVaR}_\eta(\pi^s) = \\ &\max_{\varphi \in R}\Big\{\varphi + \frac{1}{\eta}\mathrm{E}[\min(\pi^s - \varphi, 0)]\Big\} = \\ &\max_{\varphi \in R}\Big\{\varphi - \frac{1}{\eta}\mathrm{E}[\varphi - \pi^s]^+\Big\}.\end{aligned} \tag{3}$$

在CVaR准则下,供应商的目标是最小化其随机利润的下侧风险,即实现CVaR值的最大化.

2　基本模型构建与求解

2.1　分散化供应链决策

无协调契约时,在销售季节前,作为供应链的领导者,零售商率先确定客户服务水平s_w,随后,供应商决定产品质量水平q_w并根据对市场需求的预测确定生产量Q_w. 销售季节开始后,市场需求实现,零售商根据真实的市场需求向供应商以批发价格w采购产品并以零售价格p进行销售,且最大采购量为供应商的生产量. 期末时刻,若市场需求小于供应商生产量,则供应商承担生产过剩损失并进行残值处理. 分散决策下,零售商与供应商之间展开Stackelberg博弈,对于这类问题的求解,一般采用逆向归纳法,可先求出供应商的产品质量水平和生产量,再求解零售商的服务水平.

在CVaR准则下,供应商的问题是寻求最优的产品质量水平和生产量来实现自身CVaR的最大化,该问题可表述为

$$\begin{aligned}&\max_{Q_w, q_w} \mathrm{CVaR}_\eta(\pi^s_w) = \\ &\max_{Q_w, q_w}\max_{\varphi \in R}\Big\{\varphi - \frac{1}{\eta}\mathrm{E}[\varphi - \pi^s_w]^+\Big\},\end{aligned} \tag{4}$$

其中

$$\begin{aligned}\pi^s_w =\ & w\min\{Q_w, D_w\} + \upsilon\max\{Q_w - D_w, 0\} - \\ & cQ_w - C_q(q_w).\end{aligned}$$

求解该问题,可得到供应商的最优生产量和最优产品质量水平.

定理1　在CVaR准则下,供应商的最优生产量和最优的产品质量水平分别为

$$\begin{aligned}&Q^*_w = F^{-1}\Big(\frac{\eta(w - c)}{w - \upsilon}\Big) + d(q^*_w, s_w),\\ &q^*_w = \frac{\alpha(w - c)}{m}.\end{aligned}$$

证明　由式(4)可知,若要求解最优的生产量和产品质量水平,则首先需要求解出最优的φ. 令$g(\varphi, Q_w, q_w) = \varphi - \mathrm{E}[\varphi - \pi^s_w]^+/\eta$,有

$$\begin{aligned}&g(\varphi, Q_w, q_w) = \\ &\varphi - \frac{1}{\eta}\int_L^{Q_w - d(q_w, s_w)}[\varphi - (\upsilon - c)Q_w - \\ &(w - \upsilon)(d(q_w, s_w) + x) + C_q(q_w)]^+\mathrm{d}F(x) - \\ &\frac{1}{\eta}\int_{Q_w - d(q_w, s_w)}^U[\varphi - (w - c)Q_w + C_q(q_w)]^+\mathrm{d}F(x).\end{aligned}$$

分3种情形进行讨论,为便于书写,令$\varphi_1 = (\upsilon - c)Q_w + (w - \upsilon)d(q_w, s_w) - C_q(q_w)$和$\varphi_2 = (w - c)Q_w - C_q(q_w)$. 当$\varphi \leqslant \varphi_1$时,恒有$g(\varphi, Q_w, q_w) = \varphi$,因而有$\partial g(\varphi, Q_w, q_w)/\partial\varphi = 1 > 0$. 当$\varphi_1 \leqslant \varphi \leqslant \varphi_2$时,有

$$\begin{aligned}&g(\varphi, Q_w, q_w) = \\ &\varphi - \frac{1}{\eta}\int_L^{\frac{\varphi - \varphi_1}{w - \upsilon}}(\varphi - \varphi_1 - (w - \upsilon)x)\mathrm{d}F(x),\end{aligned}$$

则

$$\frac{\partial g(\varphi, Q_w, q_w)}{\partial\varphi} = 1 - \frac{1}{\eta}F\Big(\frac{\varphi - \varphi_1}{w - \upsilon}\Big),$$

进一步可得

$$\frac{\partial g(\varphi,Q_w,q_w)}{\partial\varphi}\Big|_{\varphi=\varphi_1}=1,$$

$$\frac{\partial g(\varphi,Q_w,q_w)}{\partial\varphi}\Big|_{\varphi=\varphi_2}=1-\frac{1}{\eta}F(Q_w-d(q_w,s_w)).$$

当$\varphi>\varphi_2$时,有

$$g(\varphi,Q_w,q_w)=\\ \varphi-\frac{1}{\eta}\int_L^{Q_w-d(q_w,s_w)}(\varphi-\varphi_1-(w-\upsilon)x)\mathrm{d}F(x)-\\ \frac{1}{\eta}\int_{Q_w-d(q_w,s_w)}^{U}(\varphi-\varphi_2)\mathrm{d}F(x),$$

进而

$$\frac{\partial g(\varphi,Q_w,q_w)}{\partial\varphi}=1-\frac{1}{\eta}<0.$$

综上可知,φ的最优值φ^*必定在区间$(\varphi_1,\varphi_2]$取得,且只存在两种情形.

1) 当$1-F(Q_w-d(q_w,s_w))/\eta\leqslant 0$,即$Q_w\geqslant F^{-1}(\eta)+d(q_w,s_w)$时,在区间$(\varphi_1,\varphi_2)$内必定存在某个$\varphi^*$满足

$$\frac{\partial g(\varphi,Q_w,q_w)}{\partial\varphi}=1-\frac{1}{\eta}F\Big(\frac{\varphi-\varphi_1}{w-\upsilon}\Big)=0,$$

故有

$$\varphi^*=(w-\upsilon)F^{-1}(\eta)+\varphi_1;$$

2) 当$1-F(Q_w-d(q_w,s_w))/\eta>0$时,则必有$\varphi^*=\varphi_2$.

假定$1-F(Q_w-d(q_w,s_w))/\eta\leqslant 0$,则$\varphi^*=(w-\upsilon)F^{-1}(\eta)+\varphi_1$,由于$\varphi^*$需满足$\varphi^*<\varphi_2$,有$Q_w>F^{-1}(\eta)+d(q_w,s_w)$. 将$\varphi^*=(w-\upsilon)F^{-1}(\eta)+\varphi_1$代入$g(\varphi,Q_w,q_w)$可得

$$g(\varphi^*,Q_w,q_w)=\\ (w-\upsilon)F^{-1}(\eta)+\varphi_1-\\ \frac{1}{\eta}\int_L^{F^{-1}(\eta)}(w-\upsilon)(F^{-1}(\eta)-x)\mathrm{d}F(x).$$

对$g(\varphi^*,Q_w,q_w)$关于Q_w求一阶导数,可得$\partial g(\varphi^*,Q_w,q_w)/\partial Q_w=\upsilon-c<0$,故有$Q_w^*=F^{-1}(\eta)+d(q_w,s_w)$,这与$Q_w^*>F^{-1}(\eta)+d(q_w,s_w)$相矛盾. 因此,必有$\varphi^*=\varphi_2$.

将$\varphi^*=\varphi_2$代入$g(\varphi,Q_w,q_w)$,可得

$$g(\varphi^*,Q_w,q_w)=\varphi_2-\frac{1}{\eta}\int_L^{Q_w-d(q_w,s_w)}(w-\\ \upsilon)(Q_w-d(q_w,s_w)-x)\mathrm{d}F(x).$$

求得$g(\varphi^*,Q_w,q_w)$关于Q_w和q_w的黑塞矩阵为

$$\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2 g(\varphi^*,Q_w,q_w)}{\partial {Q_w}^2} & \dfrac{\partial^2 g(\varphi^*,Q_w,q_w)}{\partial Q_w\partial q_w}\\ \dfrac{\partial^2 g(\varphi^*,Q_w,q_w)}{\partial q_w\partial Q_w} & \dfrac{\partial^2 g(\varphi^*,Q_w,q_w)}{\partial {q_w}^2}\end{bmatrix}=$$

$$\frac{w-\upsilon}{\eta}mf(Q_w-d(q_w,s_w))>0,$$

即$g(\varphi^*,Q_w,q_w)$是关于Q_w和q_w的联合凹函数,通过一阶最优条件,可得供应商的最优生产量和最优的产品质量水平分别为

$$Q_w^*=F^{-1}\Big(\frac{\eta(w-c)}{w-\upsilon}\Big)+d(q_w^*,s_w),$$

$$q_w^*=\frac{\alpha(w-c)}{m}.\qquad\square$$

给定任意的顾客服务水平,定理1刻画了供应商的最优反应函数.

推论1 供应商的最优生产量Q_w^*随着风险规避系数η的增加而增加,但最优的产品质量水平q_w^*与风险规避程度无关.

证明 运用隐函数理论可得

$$\frac{\partial Q_w^*}{\partial\eta}=-\frac{\partial^2 g(\varphi^*,Q_w,q_w)}{\partial Q_w\partial\eta}\Big/\frac{\partial^2 g(\varphi^*,Q_w,q_w)}{\partial^2 {Q_w}^2}=\\ \frac{F(Q_w-d(q_w,s_w))}{\eta f(Q_w-d(q_w,s_w))}>0,$$

又易得$\partial q_w^*/\partial\eta=0$,故推论1得证. $\square$

推论1表明,最优的产品质量水平不受供应商风险规避程度的影响,但供应商的风险规避程度会影响其最优生产量. 供应商风险规避程度越高,其最优生产量越小. 当供应商为风险中性,即$\eta=1$时,供应商的最优生产量为$Q_w^*=F^{-1}((w-c)/(w-\upsilon))+d(q_w^*,s_w)$,表明风险规避供应商的最优生产量不大于风险中性供应商的最优生产量. 在实践中,这是合理的,因为风险规避的供应商宁愿牺牲部分收益来获取稳定的利润,也不愿承担风险来追求更大的利润. 另外,由定理1也可看出,最优的产品质量水平与零售价格无关,但零售价格会影响供应商的生产决策.

零售商作为Stackelberg博弈的领导者,其目标是在预期到供应商的反应函数后寻求最优的服务水平来实现自身期望利润的最大化. 零售商的期望利润可表示为

$$\mathrm{E}\pi_w^r=\\ \mathrm{E}[(p-w)\min\{Q_w^*,D_w\}-C_s(s_w)]=\\ (p-w)\Big(Q_w^*-\int_L^{Q_w^*-d(q_w^*,s_w)}F(x)\mathrm{d}x\Big)-\frac{1}{2}n(s_w)^2.\tag{5}$$

由式(5)易证得$\mathrm{E}\pi_w^r$是关于s_w的凹函数. 通过一阶最优化条件,可得最优的服务水平.

定理2 在分散决策下,零售商的最优服务水平为$s_w^*=\beta(p-w)/n$.

定理2给出了分散决策下零售商的最优服务水平,显然,零售商的最优服务水平与供应商的风险规避程度无关. 由定理2可证得$\partial s_w^*/\partial p>0$,表明分散

决策下最优的服务水平与零售价格成正相关.

在分散决策下,供应链整体的期望利润为

$$\mathrm{E}\pi_w^{sc*}=\mathrm{E}\pi_w^{s*}+\mathrm{E}\pi_w^{r*}=(p-c)Q_w^*-(p-\upsilon)\int_L^{F^{-1}(\eta\frac{w-c}{w-\upsilon})}F(x)\mathrm{d}x-\frac{1}{2}m(q_w^*)^2-\frac{1}{2}n(s_w^*)^2. \tag{6}$$

2.2　集中化决策

在集中决策下,供应商和零售商集中为一个虚拟的决策主体.假定该决策主体是风险中性的,这与文献[26]中的研究一致,其目标是制定合理的客户服务水平s_I、产品质量水平q_I和产品生产量Q_I,以实现供应链整体期望利润最优. 在集中决策下,供应链的整体期望利润可表示为

$$\mathrm{E}\pi_I^{sc}=\mathrm{E}[p\min\{Q_I,D_I\}+\upsilon\max\{Q_I-D_I,0\}-cQ_I-C_q(q_I)-C_s(s_I)]=(p-c)Q_I-(p-\upsilon)\int_L^{Q_I-d(q_I,s_I)}F(x)\mathrm{d}x-\frac{1}{2}m(q_I)^2-\frac{1}{2}n(s_I)^2. \tag{7}$$

由式(7)易证得$\mathrm{E}\pi_I^{sc}$关于s_I、q_I和Q_I的黑塞矩阵为负定的,即$\mathrm{E}\pi_I^{sc}$是关于s_I、q_I和Q_I的联合凹函数. 于是,通过一阶最优化条件可得供应链整体的最优服务水平、最优产品质量和最优生产量.

定理3　在集中决策下,供应链整体的最优服务水平s_I^*、最优产品质量q_I^*和最优生产量Q_I^*分别为

$$s_I^*=\frac{\beta(p-c)}{n},\ q_I^*=\frac{\alpha(p-c)}{m},$$
$$Q_I^*=F^{-1}\Big(\frac{p-c}{p-\upsilon}\Big)+d(q_I^*,s_I^*).$$

由定理3易证得$\partial s_I^*/\partial p>0$和$\partial q_I^*/\partial p>0$,表明不同于分散决策情形,集中决策下最优的服务水平和质量水平均随着零售价格的增加而增加.

通过比较分析,可知$q_w^*<q_I^*$、$s_w^*<s_I^*$和$Q_w^*<Q_I^*$,即分散决策下的最优决策小于集中决策下的最优决策,表明在集中决策下供应链整体的期望利润大于分散决策下的期望利润($\mathrm{E}\pi_I^{sc*}>\mathrm{E}\pi_w^{sc*}$),而作为供应链的领导者,零售商有动机制定协调契约来追求更高的期望利润.

3　供应链协调模型构建和求解

为实现供应链协调,零售商需要引入协调契约来加强与供应商之间的合作. 借鉴文献[2],本文考虑由期权和成本分担构成的组合契约(o,e,λ).其中:o为期权价格,即零售商需要提前支付给供应商的单位产量保留费用;e为执行价格,即当市场需求实现后,零售商通过执行期权向供应商采购产品的单位产品购买价格;λ为成本分担系数,即供应商需要承担的质量和服务投入总成本的比例. 在组合契约下,零售商不仅能够与供应商在产品质量和服务水平方面共同投资以达到集中决策下的最优策略,还能刺激供应商生产更多产品来满足不确定的市场需求. 为避免不合理的情况,假设: 1) $c-\upsilon>o\geqslant 0$; 2) $e>\upsilon>0$; 3) $p>o+e>c$. 当$c-o\leqslant\upsilon$时,供应商通过处理剩余产品总能获得正的利润,即供应商将会生产无限多的产品来获取利润;第2个假设则是确保零售商能够执行期权来满足市场需求,当$e\leqslant\upsilon$时,供应商宁愿在残值市场处理产品而不会将产品销售给零售商;第3个假设确保零售商和供应商通过执行期权都能获取利润.

在组合契约下,事件的发生顺序如下: 销售季节开始前,零售商向供应商提供组合契约(o,e,λ)并决定服务水平s_{cc},随后,供应商制定产品质量水平q_{cc},并根据对市场需求的预测确定生产量Q_{cc};销售季节开始后,市场需求实现,零售商根据真实的市场需求向供应商以单位成本为执行价格e采购产品并进行销售,且最大采购量为Q_{cc};期末时刻,若市场需求小于供应商生产量,供应商承担生产过剩损失并进行残值处理. 在整个事件过程中,零售商和供应商展开由零售商领导的Stackelberg博弈. 组合契约下,供应商的利润函数可表示为

$$\pi_{cc}^s=e\min\{Q_{cc},D_{cc}\}+\upsilon\max\{Q_{cc}-D_{cc},0\}+oQ_{cc}-cQ_{cc}-\lambda(C_q(q_{cc})+C_s(s_{cc})). \tag{8}$$

在CVaR准则下,供应商的问题表述为

$$\max_{Q_{cc},q_{cc}}\mathrm{CVaR}_\eta(\pi_{cc}^s)=\max_{Q_{cc},q_{cc}}\max_{\varphi\in R}\Big\{\varphi_{cc}-\frac{1}{\eta}\mathrm{E}[\varphi_{cc}-\pi_{cc}^s]^+\Big\}. \tag{9}$$

求解该问题,可得如下定理.

定理4　在组合契约和CVaR准则下,供应商的最优生产量Q_{cc}^*和最优的产品质量水平q_{cc}^*分别为

$$Q_{cc}^*=F^{-1}\Big(\frac{\eta(o+e-c)}{e-\upsilon}\Big)+d(q_{cc}^*,s_{cc}),$$
$$q_{cc}^*=\frac{\alpha(o+e-c)}{\lambda m}.$$

证明　令$g_{cc}(\varphi_{cc},Q_{cc},q_{cc})=\varphi_{cc}-\mathrm{E}[\varphi_{cc}-\pi_{cc}^s]^+/\eta$,有

$$g_{cc}(\varphi_{cc},Q_{cc},q_{cc})=\varphi_{cc}-\frac{1}{\eta}\int_L^{Q_{cc}-d(q_{cc},s_{cc})}[\varphi_{cc}-(o+\upsilon-c)Q_{cc}-(e-\upsilon)(d(q_{cc},s_{cc})+x)+\lambda(C_q(q_{cc})+C_s(s_{cc}))]^+\mathrm{d}F(x)-\frac{1}{\eta}\int_{Q_{cc}-d(q_{cc},s_{cc})}^U[\varphi_{cc}-(o+$$

$e-c)Q_{cc}+\lambda(C_q(q_{cc})+C_s(s_{cc}))]^+\mathrm{d}F(x).$

若要求解供应商最优的生产量和产品质量水平,则首先需要求解出最优的φ. 与定理1的证明过程一致,易证得,在式(9)中给定任意Q_{cc}和q_{cc},存在$\varphi^*_{cc}=(o+e-c)Q_{cc}-\lambda(C_q(q_{cc})+C_s(s_{cc}))$, 将其代入$g_{cc}(\varphi_{cc},Q_{cc},q_{cc})$中,可求得$g_{cc}(\varphi^*_{cc},Q_{cc},q_{cc})$关于$Q_{cc}$和$q_{cc}$的黑塞矩阵为

$$\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2 g(\varphi^*_{cc},Q_{cc},q_{cc})}{\partial {Q_{cc}}^2} & \dfrac{\partial^2 g(\varphi^*_{cc},Q_{cc},q_{cc})}{\partial Q_{cc}\partial q_{cc}}\\ \dfrac{\partial^2 g(\varphi^*_{cc},Q_{cc},q_{cc})}{\partial q_{cc}\partial Q_{cc}} & \dfrac{\partial^2 g(\varphi^*_{cc},Q_{cc},q_{cc})}{\partial {q_{cc}}^2}\end{bmatrix}=$$
$$\frac{e-v}{\eta}mf(Q_{cc}-d(q_{cc},s_{cc}))>0,$$

即$g_{cc}(\varphi^*_{cc},Q_{cc},q_{cc})$是关于$Q_{cc}$和$q_{cc}$的联合凹函数. 令$\partial g_{cc}(\varphi^*_{cc},Q_{cc},q_{cc})/\partial q_{cc}=0$和$\partial g_{cc}(\varphi^*_{cc},Q_{cc},q_{cc})/\partial Q_{cc}=0$,可得供应商的最优生产量和最优的产品质量水平分别为

$$Q^*_{cc}=F^{-1}\Big(\frac{\eta(o+e-c)}{e-v}\Big)+d(q^*_{cc},s_{cc}),$$
$$q^*_{cc}=\frac{\alpha(o+e-c)}{\lambda m}.$$ □

在组合契约下,给定任意的顾客服务水平,定理4刻画了供应商的最优反应函数. 零售商作为Stackelberg博弈的领导者,其问题是在预期到供应商的反应函数后寻求最优的服务水平来实现自身期望利润的最大化.该问题可表述为

$$\max_{s_{cc}}\mathrm{E}\pi^r_{cc}=$$
$$\mathrm{E}[(p-e)\min\{Q^*_{cc},D_{cc}\}-oQ^*_{cc}-$$
$$(1-\lambda)(C_q(q^*_{cc})+C_s(s_{cc}))].\tag{10}$$

求解该问题,易证得$\mathrm{E}\pi^r_{cc}$是关于s_{cc}的凹函数,通过一阶最优条件,可得零售商的最优服务水平.

定理5 在组合契约下,零售商的最优服务水平为

$$s^*_{cc}=\frac{\beta(p-e-o)}{(1-\lambda)n}.$$

根据文献[7],当且仅当$Q^*_{cc}=Q^*_I$、$q^*_{cc}=q^*_I$和$s^*_{cc}=s^*_I$时,供应链实现协调.

定理6 在组合契约(o,e,λ)下,当且仅当$e=\dfrac{\eta(c-o)(p-v)-(p-c)v}{\eta p-\eta v-p+c}$,$\lambda=\dfrac{c-o-v}{\eta p-\eta v-p+c}$和$o>(1-\eta)(p-v)$时,供应链实现协调.

证明 由$Q^*_{cc}=Q^*_I,q^*_{cc}=q^*_I$以及$s^*_{cc}=s^*_I$可知$\eta\dfrac{o+e-c}{e-v}=\dfrac{p-c}{p-v},\dfrac{\alpha(o+e-c)}{\lambda m}=\dfrac{\alpha(p-c)}{m}$和$\dfrac{\beta(p-e-o)}{(1-\lambda)n}=\dfrac{\beta(p-c)}{n}$, 整理可得

$$e=\frac{\eta(c-o)(p-v)-(p-c)v}{\eta p-\eta v-p+c},$$
$$\lambda=\frac{c-o-v}{\eta p-\eta v-p+c}.$$

为确保零售商通过执行期权能够获取利润,则有$p>o+e$,进而有$o>(1-\eta)(p-v)$. □

定理6给出了组合契约能够协调供应链的条件. 由$o>(1-\eta)(p-v)$,有$\eta>(p-v-o)/(p-v)$,即当且仅当供应商风险规避程度不太高时,供应链才能实现协调. 其也表明,供应商需要承担一定的风险才能使得供应链实现协调. 若$\eta\leqslant(p-v-o)/(p-v)$,则有$o+e\geqslant p$,此时零售商通过执行期权不会带来收益. 在实践中,该类组合契约不会被零售商提供. 此外,由$o>(1-\eta)(p-v)$可知$\eta p-\eta v-p+c>0$,进而有

$$\frac{\partial e}{\partial o}=-\frac{\eta(p-v)}{\eta p-\eta v-p+c}<0,$$
$$\frac{\partial\lambda}{\partial o}=-\frac{1}{\eta p-\eta v-p+c}<0,$$

即当供应链实现协调时,期权执行价格和成本分担系数均与期权价格呈负相关关系.

推论2 在组合契约下,当供应链实现协调时,供应商的期望利润随着期权价格的增加而减小,而零售商的期望利润随着期权价格的增加而增加.

证明 将$e=\dfrac{\eta(c-o)(p-v)-(p-c)v}{\eta p-\eta v-p+c}$和$\lambda=\dfrac{c-o-v}{\eta p-\eta v-p+c}$代入式(8),供应商的期望利润函数可改写为

$$\mathrm{E}\pi^s_{cc}(o)=\frac{c-o-v}{\eta p-\eta v-p+c}\Big[(p-c)Q^*_I-$$
$$\eta(p-v)\int_L^{F^{-1}(\frac{p-c}{p-v})}F(x)\mathrm{d}x-$$
$$C_q(q^*_I)-C_s(s^*_I)\Big].\tag{11}$$

对$\mathrm{E}\pi^s_{cc}(o)$关于o求一阶导数,可得

$$\frac{\partial\mathrm{E}\pi^s_{cc}(o)}{\partial o}=-\frac{1}{\eta p-\eta v-p+c}\Big[(p-c)Q^*_I-$$
$$\eta(p-v)\int_L^{F^{-1}(\frac{p-c}{p-v})}F(x)\mathrm{d}x-$$
$$C_q(q^*_I)-C_s(s^*_I)\Big]<0.$$

因此,$\mathrm{E}\pi^s_{cc}(o)$是关于o的减函数. 由于供应链协调下供应商和零售商的期望利润之和等于集中决策下的期望利润且为一常数,显然,零售商的期望利润随着期权价格的增加而增加. □

推论2表明,当组合契约(o,e,λ)满足$e=\dfrac{\eta(c-o)(p-v)-(p-c)v}{\eta p-\eta v-p+c}$和$\lambda=\dfrac{c-o-v}{\eta p-\eta v-p+c}$时,零售商只需要调整期权价格便能实现供应链整体利润的有效分配. 在实践中,零售商仅需要制定合理的期权价格(或组合契约),便能确保供应链双方的期望利润在原有基础上(无协调契约时)不受到损害,该

组合契约能够使得供应链双方实现Pareto改进.

推论3　在组合契约的协调下,给定某一期权价格,供应商的期望利润随着其风险规避程度的增加而增加,而零售商的期望利润随着供应商的风险规避程度的增加而减小.

证明　对式(11)关于η求一阶导数,可得

$$\frac{\partial \mathrm{E}\pi_{cc}^{s}(o)}{\partial \eta}= -\frac{(c-o-v)(p-v)}{(\eta p-\eta v-p+c)^2}\Big[(p-c)Q_I^{*}- \eta(p-v)\int_L^{F^{-1}(\frac{p-c}{p-v})}F(x)\mathrm{d}x-C_q(q_I^{*})-C_s(s_I^{*})\Big]- \frac{(c-o-v)(p-v)}{\eta p-\eta v-p+c}\int_L^{F^{-1}(\frac{p-c}{p-v})}F(x)\mathrm{d}x.$$

显然,$\partial \mathrm{E}\pi_{cc}^{s}(o)/\partial\eta<0$,即供应商的期望利润随着其风险规避程度的增加而增加,由于供应链协调下供应商和零售商的期望利润之和等于集中决策下的期望利润,零售商的期望利润随着供应商的风险规避程度的增加而减小. □

推论3表明,在给定期权价格的条件下,当供应商风险规避程度增加时,零售商需要牺牲部分收益来确保供应链实现协调,从而导致供应商的期望利润随着其风险规避程度的增加而增加,而零售商则相反. 这是因为供应商风险规避程度越高,零售商需要支付更高的期权执行价格才能使得供应链实现协调. 因此,推论3也表明,供应商的风险规避程度是供应链整体利润分配和协调契约制定的关键参考变量.

4　算例分析

本节主要通过算例分析来展示组合契约下期权价格对供应链各方期望利润的影响,以及供应商风险规避程度对契约设计和利润分配的影响. 假定产品市场需求的随机扰动因子在$[-500,500]$上服从均匀分布,在满足模型假设的条件下,其他相应的参数分别设置为$c=10, w=18, p=30, v=5, a=1\,000, \alpha=2, \beta=1, m=0.05, n=0.02$和$\eta=0.9$. 分散决策下供应商的最优生产量、产品质量水平以及相应的期望利润分别为$Q_w^{*}=2\,264, q_w^{*}=320$和$\mathrm{E}\pi_w^{s*}=13\,557$;零售商的最优服务水平和相应的期望利润分别为$s_w^{*}=600$和$\mathrm{E}\pi_w^{r*}=21\,726$. 集中决策下供应链整体的期望利润为$\mathrm{E}\pi_I^{sc*}=43\,400>\mathrm{E}\pi_w^{s*}+\mathrm{E}\pi_w^{r*}$,表明集中决策下供应链整体的期望利润大于分散决策下供应链的整体期望利润.

图1和图2描述了不同风险规避程度下期权价格对供应链各方期望利润的影响,供应商的期望利润随着期权价格的增加而减小,而零售商的期望利润随着期权价格的增加而增加,这与推论2是一致的. 若$\eta=0.95$,则当期权价格满足$3.16\leqslant o\leqslant 3.84$时,与无协调契约相比,供应链实现了Pareto改进. 在实践中,零售商只需要通过调整期权价格即可实现供应链整体利润的自由分配. 特别地,当期权价格$o=3.84$时,占主导地位的零售商将获取所有的额外利润,而供应商的期望利润等于无协调契约下的期望利润.

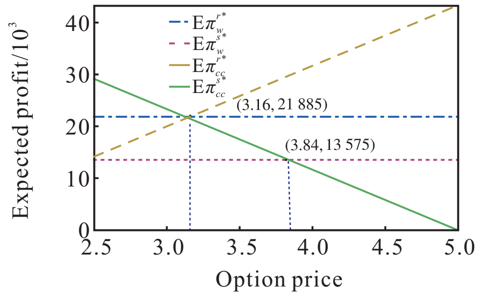

图1　$\eta=0.95$**时供应链协调下期权价格对供应链双方期望利润的影响**

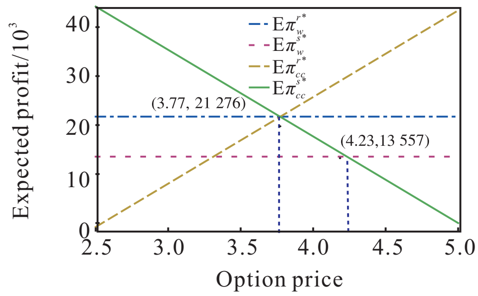

图2　$\eta=0.90$**时供应链协调下期权价格对供应链双方期望利润的影响**

此外,由图1和图2还可看出,给定供应商和零售商期望利润的分配比例,供应商风险规避程度越高,零售商需要制定的期权价格越高. 保持期权价格恒定,当供应商风险规避系数增大时,供应商的期望利润减小而零售商的期望利润增大,这与推论3是一致的,表明供应商的风险规避程度是协调契约设计和供应链利润分配的重要因素.

5　结　论

本文在考虑随机市场需求受产品质量水平和顾客服务水平影响的基础上,针对由一个风险规避的供应商与一个风险中性的零售商组成的VMI供应链,构建了以零售商为主导的Stackelberg博弈模型,并从零售商的角度提出由期权与成本分担组成的组合契约,研究了供应链协调和利润分配问题. 研究表明: 1)供应商的最优生产量随着其风险规避程度的增加而减小,但最优的产品质量水平和顾客服务水平与风险规避程度无关; 2)组合契约在供应商风险规避程度较低时能够协调供应链并实现Pareto改进,当供应链实现协调时,期权执行价格与成本分担系数均与期权价格呈负相关关系; 3)供应链协调下供应商

的期望利润随着期权价格的增加而减小,零售商的期望利润随着期权价格的增加而增加,在实践中零售商仅需要调整期权价格即可实现供应链整体利润的自由分配; 4) 在给定期权价格的条件下,供应商的期望利润随着其风险规避程度的增加而增加,零售商的期望利润随着风险规避程度的增加而减小,供应商的风险规避是协调契约设计和供应链整体利润分配的关键因素. 需要说明的是,本文假定供应链双方的信息是完全共享的,信息不对称下的供应链协调问题有待进一步研究. 此外,本文假定供应链双方均无资金约束,后续研究将进一步考虑风险规避、资金约束与信息不对称三重因素影响下的供应链协调问题.

参考文献(References)

[1] Hariga M, Gumus M, Daghfous A. Storage constrained vendor managed inventory models with unequal shipment frequencies[J]. Omega, 2014, 48(10): 94-106.

[2] Cai J, Hu X, Han Y, et al. Supply chain coordination with an option contract under vendor-managed inventory[J]. Int Trans on Operational Research, 2016, 38(6): 481-489.

[3] Dong Y, Dresner M, Yao Y. Beyond information sharing: An empirical analysis of vendor-managed inventory[J]. Production and Operations Management, 2014, 23(5): 817-828.

[4] Yu Y, Chu F, Chen H. A Stackelberg game and its improvement in a VMI system with a manufacturing vendor[J]. European J of Operational Research, 2009, 192(3): 929-948.

[5] Guan R, Zhao X. On contracts for VMI program with continuous review (r, Q) policy[J]. European J of Operational Research, 2010, 207(2): 656-667.

[6] Chakraborty A, Chatterjee A K, Mateen A. A vendor-managed inventory scheme as a supply chain coordination mechanism[J]. Int J of Production Research, 2015, 53(1): 13-24.

[7] Cachon G P. Supply chain coordination with contract[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003: 227-339.

[8] 张成堂, 周永务. 基于博弈论和 VMI 的收益共享机制协调模型[J]. 控制与决策, 2010, 25(1): 137-140.
(Zhang C T, Zhou Y W. Revenue sharing mechanism coordination model based on game theory and VMI[J]. Control and Decision, 2010, 25(1): 137-140.)

[9] Wong W K, Qi J, Leung S Y S. Coordinating supply chains with sales rebate contracts and vendor-managed inventory[J]. Int J of Production Economics, 2009, 120(1): 151-161.

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

[11] Wang X, Liu L. Coordination in a retailer-led supply chain through option contract[J]. Int J of Production Economics, 2007, 110(1): 115-127.

[12] Ho T H, Zhang J. Designing pricing contracts for boundedly rational customers: Does the framing of the fixed fee matter?[J]. Management Science, 2008, 54(4): 686-700.

[13] Xu G, Dan B, Zhang X, et al. Coordinating a dual- channel supply chain with risk-averse under a two-way revenue sharing contract[J]. Int J of Production Economics, 2014, 147: 171-179.

[14] Ravindran A R, Ufuk Bilsel R, Wadhwa V, et al. Risk adjusted multicriteria supplier selection models with applications[J]. Int J of Production Research, 2010, 48(2): 405-424.

[15] Dai J, Meng W. A risk-averse newsvendor model under marketing-dependency and price-dependency [J]. Int J of Production Economics, 2015, 160: 220-229.

[16] Rockafellar R T, Uryasev S. Conditional value-at-risk for general loss distributions[J]. J of Banking & Finance, 2002, 26(7): 1443-1471.

[17] 代建生, 孟卫东, 范波. 风险规避供应链的回购契约安排[J]. 管理科学学报, 2015, 18(5): 57-67.
(Dai J S, Meng W D, Fan B. Supply chain coordination with risk aversion via buy-back contracts[J]. J of Management Sciences in China, 2015, 18(5): 57-67.)

[18] He J, Ma C, Pan K. Capacity investment in supply chain with risk averse supplier under risk diversification contract[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 106: 255-275.

[19] 甘信华, 应可福. 考虑风险规避的供应商管理库存契约模型[J]. 系统工程, 2015, 33(1): 116-121.
(Gan X H, Ying K F. Vendor managed inventory contract model with risk averse[J]. Systems Engineering, 2015, 33(1): 116-121.)

[20] Choi T M. Coordination and risk analysis of VMI supply chains with RFID technology[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 497-504.

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

[22] Chen J, Liang L, Yao D Q, et al. Price and quality decisions in dual-channel supply chains[J]. European J of Operational Research, 2017, 259(3): 935-948.

[23] Perdikaki O, Kostamis D, Swaminathan J M. Timing of service investments for retailers under competition and demand uncertainty[J]. European J of Operational Research, 2016, 254(1): 188-201.

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

[25] Ma P, Wang H, Shang J. Supply chain channel strategies with quality and marketing effort-dependent demand[J]. Int J of Production Economics, 2013, 144(2): 572-581.

[26] 刘云志, 樊治平. 考虑损失规避型供应商的 VMI 供应链协调[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 935-942.
(Liu Y Z, Fan Z P. VMI supply chain coordination with the loss-averse supplier[J]. Control and Decision, 2016, 31(5): 935-942.)

(责任编辑: 孙艺红)