第 38 卷第 2 期
2021 年 2 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 38 No. 2
Feb. 2021

双边信息不对称参与者风险厌恶的应急数量折扣契约

刘 浪, 黄冬宏[†], 汪 惠

(华东交通大学 经济管理学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 探寻双边信息不对称、一个参与者风险厌恶时, 应急数量折扣契约协调供应链应对突发事件的内在规律. 借助"利他委托人"理论, 科学设置参与者的激励和参与约束条件, 在市场价格随机的条件下构建双边信息不对称、一个参与者风险厌恶的应急数量折扣契约. 分析信息不对称和风险厌恶对供应链上各决策变量、供应链及链上成员绩效的影响, 并通过具体的算例仿真加以验证. 研究结果表明: 当参与者风险厌恶程度确定时, 供销双方信息预测越准确, 供应链期望收益越大. 但风险厌恶的参与者收益随着信息透明度的增加而增加, 风险中性参与者的收益随着信息透明度的增加而减少. 当信息不对称状态确定时, 参与者风险厌恶程度越高其身收益越大. 在双边信息不对称的情况下, 参与者的风险防范意识有利于规避风险, 但风险厌恶的零售商有相对信息优势, 而风险厌恶的供应商没有相对信息优势.

关键词: 不对称信息; 价格随机; 风险厌恶; 应急数量折扣契约; 利他委托人

引用格式: 刘浪, 黄冬宏, 汪惠. 双边信息不对称参与者风险厌恶的应急数量折扣契约. 控制理论与应用, 2021, 38(2): 224 – 234

DOI: 10.7641/CTA.2020.00292

Emergency quantity discount contract for risk aversion of participants under bilateral asymmetric information

LIU Lang, HUANG Dong-hong[†], WANG Hui

(School of Management and Economics, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: In this paper, we explore the intrinsic law of supply chain coordination of the emergency quantity discount contract in response to emergencies under bilateral information asymmetry and risk aversion of one participant. First, we set up the incentive and engagement constraint conditions for participants scientifically with "altruistic principal" theory, and we construct the emergency quantity discount contract model based on the stochastic market prices under the conditions of bilateral information asymmetry and risk aversion of one participant. After that, we analyze the influence of information asymmetry and risk aversion on the decision variables in the supply chain, the performance of the supply chain and its members. Then we verify the results through simulation of specific examples. The results show that under the condition of determined degree of risk aversion for participants, the more accurate the information forecast between the supply and marketing parties, the greater the expected revenue of the supply chain. However, as information transparency increase, so does the revenue of risk-averse participants, while the income of risk-neutral participants will reduce with the drop of information transparency accordingly. We also find that the the higher the risk aversion degree of participants, the greater their own benefits will be based on the determined information asymmetry state. Finally, we come to the conclusion that participants' awareness of risk prevention is conducive to avoiding risks in the case of bilateral information asymmetry. But retailers of risk aversion have comparative information advantage, while risk-averse suppliers does not have this kind of characteristic.

Key words: asymmetric information; stochastic price; risk aversion; emergency quantity discount contract; altruistic principal

Citation: LIU Lang, HUANG Donghong, WANG Hui. Emergency quantity discount contract for risk aversion of participants under bilateral asymmetric information. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(2): 224 – 234

收稿日期: 2020−05−26; 录用日期: 2020−09−30.

[†]通信作者. E-mail: 3327457784@qq.com; Tel.: +86 18061637572.

本文责任编委: 王凌.

国家自然科学基金项目(71562013), 江西省自然科学基金项目(20181BAA208041)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (71562013) and the National Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20181BAA208041).

1 引言

当今世界正处于经济全球化的浪潮中, 供应链所处的运行环境日趋复杂. 众所周知, 一个稳定的外部环境是整个供应链系统持续高效运转的重要保证. 但突发事件会对市场的外部环境造成巨大的冲击, 打破原有的供需平衡, 商品的市场价格会随着供需关系的变化而发生随机变化. 与此同时, 动荡的外部环境使得供应链上的参与者变得慎小慎微, 担心自身利益遭受损失, 其对待风险的态度可能由无风险偏好转为风险厌恶. 另一方面, 由于供应链上的管理者在决策时只会考虑自身的利润, 而忽视其余参与者的利润, 会通过隐瞒私人成本信息的方式来获取超额利润, 信息不对称就由此产生. 信息不对称和风险厌恶会降低供应链的绩效[1–2]. 例如: 新型冠状病毒给武汉的小龙虾产业带来巨大的冲击, 和往年相比今年小龙虾的销售量大幅下降. 实体店经营者由于害怕购买的小龙虾不能及时的销售出去, 因此减少进货, 从而造成利润损失, 其风险的态度由风险中性转变为风险厌恶. 而小龙虾养殖户为了避免因存货过多而增加生产成本, 通常会采取薄利多销的营销策略来增加销售量, 减轻库存过大的压力. 同时, 外界根本不知道小龙虾养殖户的真实生产成本是多少, 因此养殖户会通过隐瞒真实生产成本信息的方式来获取更多的利润. 鉴于此, 诸多不确定的因素同时作用于供应链时, 供应链由协调转为失调. 若不能在短期内建立起一种有效的机制来协调此时的供应链, 必将降低供应链运作绩效. 以往研究表明, 契约机制是协调供应链的有效工具, 但怎样选择合适的契约并恰当的设置契约参数, 成为了亟待解决的理论和现实问题.

数量折扣契约主要应用于薄利多销的工业品或鲜活农产品的行业中, 优点是保障下游节点企业享受较低批发价的同时, 又能有效地控制上游供应商的库存量, 在一定的程度上避免了供应商库存量过大的风险. Monahan等[3]最早提出了数量折扣契约的概念, 并将其应用到供应商的订货策略中, 增加了整个供应链系统的订货量. Huang等[4]研究了零售商退货行为导致供应商利润损失的供应链系统, 采用数量折扣契约不仅能使整个供应链系统达到帕累托改进, 还能抑制零售商退货的潜在动机.

当突发事件来临时, 供应链成员由于害怕风险给自身利润带来损失, 因此对待风险的态度会更加谨慎, 此时, 如何规避并有效度量风险便成为研究的热点. 史思雨等[5]在供应商风险厌恶的二级供应链中, 采用均值–方差法对风险进行度量. 后来学者们发现用均值–方差法度量供应链风险存在一定的缺陷, 便提出用在险价值(value at risk, VaR)来对供应链风险进行度量. Song等[6]借助于在险价值(VaR)法, 研究了短周期易逝品的最优定价问题. Rockafller 和 Uryasev[7–8]发现VaR的方法难于计算, 便将VaR改进成条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)来度量供应链风险. Fan等[9]研究了在买方主导的供应链中, 参与者均风险厌恶的情况下, 研究了期权价格和期权执行价格对供应链成员期望收益的影响. Zhou等[10]以零售商和供应商均风险厌恶的二级供应链为研究对象, 通过建立Stackelberg博弈模型来协调供应链.

以上的研究均建立在市场价格稳定的前提下. 但当市场发生突发事件时, 短期内商品的市场价格会随着商品的市场需求变化而发生随机变化, 造成价格随机. 刘浪等[11–12]研究了在突发事件造成市场价格随机的前提条件下, 采用改进过后的契约机制来协调供应链.

拥有信息优势的一方在博弈中处于领先的地位, 通过隐瞒自身成本信息的方式来获取更大的利润是供应链上参与者的惯用之法. 当突发事件来临时, 可能会加剧这种行为. 起初学者们对单边信息不对称条件下的供应链进行了研究[13–16], 张盼等[13]在闭环供应链系统中研究了参与者风险中性回收成本信息不对称对整个闭环供应链的影响. Chen等[14]则研究了零售商风险厌恶和生产成本信息不对称时, 基于委托—代理理论研究了零售商的最优订货策略. Li等[15]接着研究了销售成本信息不对称和零售商险厌恶这两个扰动因素对供应商最优决策的影响机制. 王道平等[16]进一步在供应链参与者均风险厌恶且生产成本信息不对称的条件下, 以单一零售商和单一供应商组成的供应链为研究对象, 建立了Stackelberg博弈模型, 研究了整个供应链系统的最优定价策略. 也有学者对双边信息不对称条件下的供应链进行了研究[17–19], 王新辉等[17]在销售成本和生产成本信息不对称的情况下, 针对参与者均风险中性, 通过引入多代理人的不对称信息揭示机制, 即AGV机制(由d’Aspremont与Gerard-Varet提出的)来实现成本信息的真实揭示, 并在集中和分散决策下求出供应链系统的最优订货量. 肖美丹等[18]在参与者均风险中性前提下, 基于委托–代理理论建立了创新激励机制模型, 研究了双边创新信息不对称对创新机制中相关参数的影响. 王新辉等[19]则在销售商风险厌恶和双边信息不对称的情况下, 设计了一个契约机制来协调供应链. 以上均是市场价格稳定情况展开的研究, 也有学者在价格随机条件下, 对信息不对称的情况展开了探讨. 刘浪等[20]在突发事件造成市场价格随机的情况下, 研究了生产成本或销售成本信息不对称程度对参与者与供应链绩效的影响.

从上述研究来看, 学者们大多是研究参与者风险均中性且单边或多边信息不对称的情况, 见文献[13, 17]; 也有研究参与者风险厌恶且单边或双边信息不对称的情况, 见文献[14–15, 19]. 但上述研究均是在价格稳定的条件下展开的, 也有学者研究了价格随机

条件下信息不对称的情况, 但没有考虑风险厌恶因素, 见文献[20]. 从现有经典文献来看, 还没有学者同时考虑价格随机、双边信息不对称且参与者风险厌恶的情况, 而在现实生活中这些因素同时发生耦合作用又是普遍存在的. 因此, 本文在这些因素耦合作用下, 探讨它们对供应链上各决策变量及绩效的影响机制, 为供应链管理者提供决策参考.

2 文中涉及到的变量及其具体含义

文中涉及的变量及其具体含义见表1所示.

表 1 相关参数一览表

Table 1 The list of relevant parameters

参数	含 义
p_0	价格稳定时商品的市场价格
p	价格随机时商品的市场价格
$w(q)$	供应商向零售商提供与订货量成反比的单位批发价
q	零售商的订货量
c_{r}	零售商的单位销售成本
c_{s}	供应商的单位生产成本, $c=c_{\mathrm{r}}+c_{\mathrm{s}}$
g_{r}	零售商的单位缺货损失成本
g_{s}	供应商的单位缺货损失成本, $g=g_{\mathrm{r}}+g_{\mathrm{s}}$
v	商品的单位残值
a	市场规模系数
x	市场随机需求
θ	风险厌恶因子
$F(x)$	基准情况下市场需求的分布函数, $F(x)$可微可导
$f(x)$	基准情况下市场需求的密度函数
$G(x)$	市场需求缩小时的分布函数, $G(x)$可微可导
$g(x)$	市场需求缩小的密度函数
μ	基准情况下市场的期望需求, $\mu=\int_0^{+\infty}xf(x)\mathrm{d}x$
$S(q)$	基准情况下零售商的期望销售量
μ_{G}	市场需求缩小时的期望需求, $\mu_{\mathrm{G}}=\int_0^{+\infty}xg(x)\mathrm{d}x$
$S_{\mathrm{G}}(q)$	市场需求缩小时零售商的期望销售量
λ	剩余商品的单位处理成本
$\pi_i(x)$	参与者i的期望收益函数

表中:

$$F(0)=0,\ \bar{F}(x)=1-F(x),$$

$$G(0)=0,\ \bar{G}(x)=1-G(x),$$

$$S(q)=\int_0^q xf(x)\mathrm{d}x+\int_q^{+\infty}qf(x)\mathrm{d}x,$$

$$S_{\mathrm{G}}(q)=\int_0^q xg(x)\mathrm{d}x+\int_q^{+\infty}qg(x)\mathrm{d}x,$$

$$A(q)=\int_0^q ax^2g(x)\mathrm{d}x-\int_0^q aqxg(x)\mathrm{d}x+\int_q^{\infty}axqg(x)\mathrm{d}x-\int_q^{\infty}aq^2g(x)\mathrm{d}x,$$

各参数之间满足: $v<c_{\mathrm{s}}<w(q)<w(q)+c_{\mathrm{r}}<p_0$, $v<c_{\mathrm{s}}$是为了增加供应商销售的动力, 促进供应商多从售货中获利: $c_{\mathrm{s}}<w(q)$是为了保证供应商能从与零售商的交易中获利; $w(q)+c_{\mathrm{r}}<p_0$是为了保证零售商能从与供应商和顾客的交易中获利. 满足上述条件的参数设置保证了供应链的正常运转.

3 基准的数量折扣契约模型

在基准的数量折扣契约模型中, 假设供应链成员均险中性且信息完全对称, 商品的市场价格是一个固定的数值, 由商品的市场竞争力决定. 零售商和供应商之间按照数量折扣契约进行合作, 设零售商提供的转移支付为$T[q,w(q)]=w(q)q$.

则零售商的期望利润函数为

$$\pi_{\mathrm{r}}(q)=\int_0^q[p_0x+v(q-x)]f(x)\mathrm{d}x+\int_q^{\infty}[p_0q-g_{\mathrm{r}}(x-q)]f(x)\mathrm{d}x-c_{\mathrm{r}}q-T[q,w(q)]=(p_0+g_{\mathrm{r}}-v)S(q)-[w(q)+c_{\mathrm{r}}-v]q-g_{\mathrm{r}}\mu. \quad (1)$$

供应商的期望利润函数为

$$\pi_{\mathrm{s}}(q)=T[q,w(q)]-c_{\mathrm{s}}q-g_{\mathrm{s}}[\mu-S(q)]=[w(q)-c_{\mathrm{s}}]q+g_{\mathrm{s}}S(q)-g_{\mathrm{s}}\mu. \quad (2)$$

供应链的期望利润函数为

$$\pi_h(q)=\pi_{\mathrm{r}}(q)+\pi_{\mathrm{s}}(q)=(p_0+g-v)S(q)-(c-v)q-g\mu. \quad (3)$$

命题 1 当

$$w(q*)=\frac{[(1-\eta)(p_0+g-v)-g_{\mathrm{s}}]S(q*)}{q*}+(1-\eta)v-c_{\mathrm{r}}+\eta c,$$

$$q*=\bar{F}^{-1}[\frac{c-v}{p_0+g-v}],$$

其中$\eta(0<\eta<1)$为任意数, 由二者的谈判能力决定, 此时供应链实现协调(详细证明见文献[11]).

4 价格随机条件下参与者风险厌恶的应急数量折扣契约模型

当市场遭遇突发事件的袭击时, 供应链参与者作为理性的经济人, 由于害怕风险会给自身收益带来损失, 因此其风险态度会由风险中性转变为风险厌恶. 在本文中, 用CVaR法来度量风险, 具体的表达式为

$$\mathrm{CVaR}_{\theta}\pi_i(x)=\frac{1}{\theta}\int_{\pi_i(x)<\mathrm{CVaR}_{\pi_i(\frac{q}{\theta})}}\pi_i(x)f(x)\mathrm{d}x. \quad (4)$$

假设突发事件造成市场需求减小, 市场需求缩小必然会导致产品出现剩余, 假设剩余产品的单位处理成本为λ. 以往学者在研究应急供应链契约时, 均假设突发事件的特征是市场需求发生随机变化, 而商品市场价格稳定不变, 见文献[21]. 本文是假设突发事件不仅造成市场需求发生随机变化, 而且商品的市场价

格也随供求关系的变化而变化, 且随机价格的表达式为$\mathrm{d}p=[p_0+a(x-q)]\mathrm{d}x$, 见文献[11–12].

4.1 价格随机条件下零售商风险厌恶的应急数量折扣契约模型

当突发事件导致市场需求缩小、零售商风险厌恶以及市场价格随机变化时, 根据CVaR法, 零售商的CVaR值可以表示为

$$\begin{aligned}&\mathrm{CVaR}_\theta\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}=\\&\frac{1}{\theta}\{\int_0^q\{[p_0+a(x-q)]x+v(q-x)\}g(x)\mathrm{d}x+\\&\int_q^{\frac{q}{\theta}}\{[p_0+a(x-q)]q-g_{\mathrm{r}}(x-q)\}g(x)\mathrm{d}x+\\&\int_{\frac{q}{\theta}}^{\infty}\{[p_0+a(x-q)]q-g_{\mathrm{r}}(x-\frac{q}{\theta})\}g(x)\mathrm{d}x-\\&w(q)q-c_{\mathrm{r}}q\}=\\&\frac{1}{\theta}\{\pi_{\mathrm{r}}^{u}+g_{\mathrm{r}}\int_{\frac{q}{\theta}}^{\infty}(\frac{q}{\theta}-q)g(x)\mathrm{d}x\}.\end{aligned}\tag{5}$$

命题 2　突发事件导致市场需求萎缩且零售商厌恶风险时, 在价格随机的条件下, 依照CVaR法, 零售商存在最优的订货方案.

证　对式(5)求q的一阶、二阶导可得

$$\frac{\partial\mathrm{CVaR}_\theta\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}}{\partial q}=\frac{1}{\theta}\{\frac{\partial\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}}{\partial q}+g_{\mathrm{r}}(\frac{1}{\theta}-1)[1-G(\frac{q}{\theta})]-g_{\mathrm{r}}q(\frac{1}{\theta}-1)\frac{1}{\theta}g(\frac{q}{\theta})\},\tag{6}$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{CVaR}_\theta\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}}{\partial q^2}=\frac{1}{\theta}\{\frac{\partial^2\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}}{\partial q^2}-g_{\mathrm{r}}\frac{2}{\theta}(\frac{1}{\theta}-1)f(\frac{q}{\theta})-g_{\mathrm{r}}q(\frac{1}{\theta}-1)\frac{1}{\theta^2}f'(\frac{q}{\theta})\}<0.\tag{7}$$

根据文献[11]可知$\frac{\partial^2\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}}{\partial q^2}<0$, 所以式(7)小于零, 可知式(5)是严格凹函数, 存在唯一的最优订货量q_r^{u*}使得$\mathrm{CVaR}_\theta\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}$取得最大值, 即$\frac{\partial\mathrm{CVaR}_\theta\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}}{\partial q}|_{q_r^{u*}=q^*}=0$.

由于突发事件导致市场需求缩小, 此时供应商的期望收益函数为

$$\pi_{\mathrm{s}}^{u}=w(q)q-\int_q^{\infty}g_{\mathrm{s}}(x-q)g(x)\mathrm{d}x-c_{\mathrm{s}}q-\lambda(q^*-q).\tag{8}$$

证毕.

命题 3　突发事件导致市场需求萎缩且零售商厌恶风险时, 在价格随机条件下, 供应商存在最优的供货方案.

证　对式(8)求q的一阶、二阶导可得

$$\frac{\partial\pi_{\mathrm{s}}^{u}}{\partial q}=\int_q^{\infty}g_{\mathrm{s}}g(x)\mathrm{d}x+\frac{\partial w(q)}{\partial q}q+w(q)-c_{\mathrm{s}}+\lambda,\tag{9}$$

$$\frac{\partial^2\pi_{\mathrm{s}}^{u}}{\partial q^2}=-g_{\mathrm{s}}g(q)+2\frac{\partial w(q)}{\partial q}+\frac{\partial^2 w(q)}{\partial q^2}q<0.\tag{10}$$

采用应急数量折扣契约时, 当订货量$0\leqslant q\leqslant q^*$时订货量越大, 批发价就越低; 同时, 供应商肯定存在一个最优的批发价, 这个最优的批发价能使他在一定的区域内实现收益最大化, 否则他没有降价的积极性, 故$\frac{\partial w(q)}{\partial q}<0$, $\frac{\partial^2 w(q)}{\partial q^2}<0$, 所以式(10)小于零. 因此式(8)是严格凹函数, 供应商存在最优的供货量q_s^{u*}使得π_{s}^{u}取得最大值, 即$\frac{\partial\pi_{\mathrm{s}}^{u}}{\partial q}|_{q_s^{u*}=q^*}=0$.

当满足$q_{\mathrm{r}}^{u*}=q_{\mathrm{s}}^{u*}$时供应链实现协调, 联立式(6)(9)得到超越方程组, 代入相关参数后就可求解出具体的最优批发价和订货量w^{u*}, q^{u*}.

超越方程组为

$$\begin{cases}\frac{\partial\pi_{\mathrm{r}}^{\mu}}{\partial q}+g_{\mathrm{r}}(\frac{1}{\theta}-1)[1-G(\frac{q}{\theta})]-\\ g_{\mathrm{r}}q(\frac{1}{\theta}-1)\frac{1}{\theta}g(\frac{q}{\theta})=0,\\ \int_q^{\infty}g_{\mathrm{s}}g(x)\mathrm{d}x+\frac{\partial w(q)}{\partial q}q+w(q)-c_{\mathrm{s}}+\lambda=0.\end{cases}\tag{11}$$

证毕.

4.2 价格随机条件下供应商风险厌恶的应急数量折扣契约模型

当突发事件导致市场需求缩小、供应商风险厌恶以及市场价格随机变化时, 根据CVaR法, 供应商的CVaR值可以表示为

$$\begin{aligned}&\mathrm{CVaR}_\theta(\pi_{\mathrm{s}}^{\mu})=\\&\frac{1}{\theta}\{w(q)q-c_{\mathrm{s}}q-\int_q^{\frac{q}{\theta}}g_{\mathrm{s}}(x-q)g(x)\mathrm{d}x-\\&\int_{\frac{q}{\theta}}^{\infty}g_{\mathrm{s}}(x-\frac{q}{\theta})g(x)\mathrm{d}x-\lambda(q^*-q)\}=\\&\frac{1}{\theta}\{\pi_{\mathrm{s}}^{u}+g_{\mathrm{s}}\int_{\frac{q}{\theta}}^{\infty}(\frac{q}{\theta}-q)g(x)\mathrm{d}x-\lambda(q^*-q)\}.\end{aligned}\tag{12}$$

命题 4　突发事件导致市场需求缩小、供应商风险厌恶时, 在价格随机的条件下, 依照CVaR法, 供应商存在最优的供货策略.

证　对式(12)求q一阶、二阶导数可得

$$\frac{\partial\mathrm{CVaR}(\pi_{\mathrm{s}}^{\mu})}{\partial q}=\frac{1}{\theta}\{\frac{\partial\pi_{\mathrm{s}}^{u}}{\partial q}+g_{\mathrm{s}}(\frac{1}{\theta}-1)[1-G(\frac{q}{\theta})]-g_{\mathrm{s}}q(\frac{1}{\theta}-1)\frac{1}{\theta}g(\frac{q}{\theta})\},\tag{13}$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{CVaR}(\pi_{\mathrm{s}}^{\mu})}{\partial q^2}=$$

$$\frac{1}{\theta}\{\frac{\partial^2\pi_{\rm s}^u}{\partial q^2}-g_{\rm s}\frac{2}{\theta}(\frac{1}{\theta}-1)f(\frac{q}{\theta})-g_{\rm s}q(\frac{1}{\theta}-1)\frac{1}{\theta^2}f'(\frac{q}{\theta})\}<0. \tag{14}$$

根据式(14)小于零可知式(12)是严格凹函数, 因此供应商存在最优的供货量$q_{\rm s}^{u*}$使得CVaR$\pi_{\rm s}^{\mu}$取得最大值, 即

$$\frac{\partial {\rm CVaR}\pi_{\rm s}^{\mu}}{\partial q}|_{q_{\rm s}^{u*}=q^*}=0.$$

证毕.

命题 5 突发事件导致市场需求缩小且供应商风险厌恶时, 在价格随机的条件下零售商存在最优的订货方案.

此时零售商的期望利润函数为

$$\begin{aligned}&\pi_{\rm r}^u=\\&\int_0^q\{[p_0+a(x-q)]x+v(q-x)\}g(x){\rm d}x+\\&\int_q^\infty\{[p_0+a(x-q)]q-g_{\rm r}(x-q)\}g(x){\rm d}x-\\&c_{\rm r}q-w(q)q=\\&(p_0-v+g_{\rm r})S_{\rm G}(q)-[c_{\rm r}+w(q)-v]q-\\&g_{\rm r}\mu_{\rm G}+A(q).\end{aligned} \tag{15}$$

证 对式(15)求q一阶、二阶导数可得

$$\begin{aligned}\frac{\partial\pi_{\rm r}^u}{\partial q}=&(p_0-v+g_{\rm r})(1-G(q))-(w(q)+\\&c_{\rm r}-v)-\frac{\partial w(q)}{\partial q}q-2a\int_0^q xg(x){\rm d}x+\\&a\mu_G-2aq+2aqG(q),\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2\pi_{\rm r}^u}{\partial q^2}=&-(p_0-v+g_{\rm r})g(q)-2a(1-G(q))-\\&2\frac{\partial w(q)}{\partial q}-\frac{\partial^2 w(q)}{\partial q^2}q<0.\end{aligned} \tag{17}$$

通过上文的分析可得

$$\frac{\partial w(q)}{\partial q}<0,\ \frac{\partial^2 w(q)}{\partial q^2}<0,$$

但是根据实际情况可得: 尽管$\frac{\partial w(q)}{\partial q}$和$\frac{\partial^2 w(q)}{\partial q^2}$是个负值, 但是这两个值很小, 相较于式(17)其余的部分, 这两个值可以忽略不计, 因此式(17)小于零. 所以式(15)是严格凹函数, 故零售商存在唯一的最优订货量, 即

$$\frac{\partial\pi_{\rm r}^u}{\partial q}|_{q_r^{u*}=q^*}=0.$$

当满足$q_{\rm r}^{u*}=q_{\rm s}^{u*}$时供应链达到协调, 将式(13)(16)联立得到超越方程组, 代入相关参数后就可求出最优批发价和订货量w^{u*}, q^{u*}.

超越方程组为

$$\begin{cases}\frac{\partial\pi_{\rm s}^u}{\partial q}+g_{\rm s}(\frac{1}{\theta}-1)[1-G(\frac{q}{\theta})]-\\g_{\rm s}q(\frac{1}{\theta}-1)\frac{1}{\theta}g(\frac{q}{\theta})=0,\\(p_0-v+g_{\rm r})(1-G(q))-(w(q)+\\c_{\rm r}-v)-\frac{\partial w(q)}{\partial q}q-2a\int_0^q xg(x){\rm d}x+\\a\mu-2aq+2aqG(q)=0.\end{cases} \tag{18}$$

证毕.

5 双边信息不对称参与者风险厌恶的应急数量折扣契约模型

零售商和供应商作为理性的经济人, 在双方互相隐瞒私人成本信息时, 必然会导致双重边际效应的产生. 双边信息不对称是一个双边逆向选择问题(见文献[19]), 此时单边逆向选择的Myerson显示原理不再适用. 由此便自然想到, 若存在一个大公无私的第三方, 没有自己的私利诉求, 只有追求供应链双方利益最大的诉求. 此时供应链双方都把第三方看成是对自己没有利益诉求的"贴心人", 鉴于此, "利他委托人"(见文献[22])的概念便应运而生. 利他委托人主要的工作就是设计一套机制, 让互相隐瞒信息的双方都向利他委托人报出真实成本时, 双方利润实现最大化. 此时巧妙地将双边信息不对称问题转化为单边信息不对称问题. 考虑到供应链的参与一方存在风险厌恶, 本文便将修正后的"利润–CVaR"风险准则(见文献[12])直接引入, 然后借助Myerson显示原理来协调价格随机条件下双边信息不对称风险厌恶的供应链. 在现实生活中, 利他委托人可能是两个子公司的母公司, 也可能是供应链企业所在地的政府, 或直接看成是一套机制. 在双边信息不对称风险厌恶的供应链中, 利他委托人设计一套机制, 使双边信息不对称、单边风险厌恶的供应链期望效用为风险中性一方的期望收益与风险厌恶一方的CVaR值相加在区间$[\underline{c}_{\rm s},\bar{c}_{\rm s}]$、$[\underline{c}_{\rm r},\bar{c}_{\rm r}]$上的积分(即: $\int_{\underline{c}_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\{{\rm CVaR}_\theta\pi_r^\mu+\pi_{\rm s}^\mu\}y(c_{\rm r})\cdot y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}$), 并以该积分的数值最大化作为决策依据. 以利他委托人为协调的主体本质就是以整个供应链作为协调主体, 这样就避免了双重边际化效应. 然后, 通过两次使用显示原理, 设置激励约束和参与约束条件, 来提升整个供应链的信息透明度, 从而消减了双边信息不对称和风险厌恶给整个供应链系统带来的损失.

5.1 双边信息不对称零售商风险厌恶的应急数量折扣契约模型

据上述可建立价格随机条件下双边信息不对称零售商风险厌恶的应急数量折扣契约优化模型为

$$\max\int_{\underline{c}_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\{{\rm CVaR}_\theta\pi_{\rm r}^\mu+\pi_{\rm s}^\mu\}y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}=$$

$$\max\int_{\underline{c}_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\{\frac{1}{\theta}(\pi_{\rm r}^{\mu}+g_{\rm r}\int_{\frac{q}{\theta}}^{\infty}(\frac{q}{\theta}-q)g(x){\rm d}x)+\pi_{\rm s}^{\mu}\}y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}. \tag{19}$$

参与约束:

$$\mathrm{PC}_1:\ \pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s})\geqslant\pi_{\rm s}^{\mu\,\min}, \tag{20}$$

$$\mathrm{PC}_2:\ \pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm r})\geqslant\pi_{\rm r}^{\mu\,\min}. \tag{21}$$

激励约束:

$$\mathrm{IC}_1:\ \int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}\geqslant\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}, \tag{22}$$

$$\mathrm{IC}_2:\ \int_{\underline{c}_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm s}\geqslant\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm s}. \tag{23}$$

$\pi_{\rm r}^{\mu\,\min}$, $\pi_{\rm s}^{\mu\,\min}$ 分别表示零售商、供应商接受契约的最低期望收益, 用信息对称时的期望收益代替, 这是零售商、供应商隐瞒私人信息的内在动力; $\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})$, $\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})$分别表示零售商、供应商谎报成本时的期望收益函数, 参与约束表示零售商、供应商作为理性经济人接受契约的期望收益大于等于零售商、供应商接受契约的最低心理期望收益, 如果低于心理期望收益, 零售商、供应商将选择不合作. 激励约束表示零售商、供应商接受契约的期望收益大于等于零售商、供应商谎报成本时的期望收益, 作为理性经济人的零售商和供应商将选择收益大的决策方案, 因此满足激励约束条件时零售商和供应商将进行合作.

命题 6 价格随机条件下, 生产成本信息不对称的$\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})$是关于真实生产成本$c_{\rm s}$的减函数.

证 根据Myerson显示原理可知, 为使供应商透露出真实的生产成本信息, 应该使供应商谎报成本的期望收益函数在真实成本$c_{\rm s}$时取得最大值, 因此将$\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})$对$c_{\rm s}^{\rm l}$求一阶导并令其在$c_{\rm s}$处等于零可得

$$\frac{\partial\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm s}^{\rm l}}|_{c_{\rm s}^{\rm l}=c_{\rm s}}=\{g_{\rm s}\int_{q(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm r})}^{\infty}g(x){\rm d}x+\frac{\partial w[q(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm r})]}{\partial q(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm r})}q(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm r})+w[q(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm r})]-c_{\rm s}+\lambda\}\frac{\partial q(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm s}^{\rm l}}|_{c_{\rm s}^{\rm l}=c_{\rm s}}=0. \tag{24}$$

再将$\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})$对$c_{\rm s}$求一阶导数得到

$$\frac{\partial\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm s}}=\{g_{\rm s}\int_{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}^{\infty}g(x){\rm d}x+\frac{\partial w[q(c_{\rm s},c_{\rm r})]}{\partial q(c_{\rm s},c_{\rm r})}q(c_{\rm s},c_{\rm r})+w[q(c_{\rm s},c_{\rm r})]-c_{\rm s}+\lambda\}\frac{\partial q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm s}}-q(c_{\rm s},c_{\rm r}), \tag{25}$$

将式(24)代入式(25)得到

$$\frac{\partial\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm s}}=-q(c_{\rm s},c_{\rm r})<0. \tag{26}$$

根据式(26)小于零, 说明$\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})$在区间$[\underline{c}_{\rm s},\bar{c}_{\rm s}]$上是关于$c_{\rm s}$的减函数, 说明在生产成本信息不对称的条件下, 供应商的期望收益函数在$\bar{c}_{\rm s}$时取得最小值, 即$\pi_{\rm s}^{\mu\,\min}=\pi_{\rm s}^{\mu}(\bar{c}_{\rm s})$, 在$c_{\rm s}$处取得最大值. 因此可以将成本区间缩小至$[c_{\rm s},\bar{c}_{\rm s}]$, 此时$Y(c_{\rm s})=0,\ Y(\bar{c}_{\rm s})=1$, 同时对式(26)等号两边在区间$[c_{\rm s},\bar{c}_{\rm s}]$上积分可得

$$\pi_{\rm s}^{\rm a}(c_{\rm s},c_{\rm r})=\pi_{\rm s}^{\mu\,\min}+\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_2}q(c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm s}. \tag{27}$$

满足激励约束IC_1.

命题 7 价格随机条件下, 销售成本信息不对称的$\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})$是关于真实销售成本$c_{\rm r}$的减函数.

证 根据Myerson显示原理可知, 为了使零售商透露出真实的销售成本信息, 应使零售商谎报成本的利润函数在真实销售成本$c_{\rm r}$ 处取得最大值, 因此将$\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})$对$c_{\rm r}^{\rm l}$求一阶导并令其在$c_{\rm r}$处等于零可得.

$$\frac{\partial\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm r}^{\rm l}}|_{c_{\rm r}^{\rm l}=c_{\rm r}}=\{\int_{0}^{q(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s})}(v-ax)g(x){\rm d}x+\int_{q(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s})}^{\infty}(p_0+ax+g_{\rm r}-2aq(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s}))g(x){\rm d}x-\frac{\partial w[q(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s})]}{\partial q(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s})}q(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s})-c_{\rm r}-w[q(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s})]\}\times\frac{\partial q(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s})}{\partial c_{\rm r}^{\rm l}}|_{c_{\rm r}^{\rm l}=c_{\rm r}}=0. \tag{28}$$

将$\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})$对$c_{\rm r}$求一阶导得到

$$\frac{\partial\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm r}}=\{\int_{0}^{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}(v-ax)g(x){\rm d}x+\int_{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}^{\infty}(p_0+ax+g_{\rm r}-2aq(c_{\rm s},c_{\rm r}))g(x){\rm d}x-\frac{\partial w[q(c_{\rm s},c_{\rm r})]}{\partial q(c_{\rm s},c_{\rm r})}q(c_{\rm s},c_{\rm r})-c_{\rm r}-w[q(c_{\rm s},c_{\rm r})]\}\times\frac{\partial q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm r}}-q(c_{\rm s},c_{\rm r}). \tag{29}$$

将式(28)代入式(29)可得

$$\frac{\partial\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\partial c_{\rm r}}=-q(c_{\rm s},c_{\rm r})<0. \tag{30}$$

根据式(30)小于零, 可得$\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})$在区间$[\underline{c}_{\rm r},\bar{c}_{\rm r}]$上是关于$c_{\rm r}$的减函数, 因此$\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})$在$\bar{c}_{\rm r}$处取得最小值, $\pi_{\rm r}^{\mu\,\min}=\pi_{\rm r}^{\mu}(\bar{c}_{\rm r})$, 在$c_{\rm r}$处取得最大值. 故可将销售成本预测区间缩小为$[c_{\rm r},\bar{c}_{\rm r}]$, 满足$Y(c_{\rm r})=0,\ Y(\bar{c}_{\rm r})=1$,

对式(30)等号两边同时在区间$[c_{\rm r},\bar{c}_{\rm r}]$上积分可得

$$\pi_{\rm r}^{\rm a}(c_{\rm s},c_{\rm r})=\pi_{\rm r}^{\mu\,\min}+\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}q(c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}. \tag{31}$$

满足激励约束IC_2.

将式(27)与式(31)代入到式(19)可得

$$\begin{aligned}&\max\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\{\frac{1}{\theta}(\pi_{\rm r}^{\mu}+g_{\rm r}\int_{\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}}^{\infty}(\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}-\\&q(c_{\rm s},c_{\rm r}))\times g(x){\rm d}x)+\pi_{\rm s}^{\mu}\}y(c_{\rm s})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}=\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}(\pi_h^{\mu}-\pi_{\rm s}^{\mu})y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}+\\&\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}(\pi_h^{\mu}-\pi_{\rm r}^{\mu})y(c_{\rm r})\times y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}+\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}g_{\rm r}\int_{\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}}^{\infty}(\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}-\\&q(c_{\rm s},c_{\rm r}))g(x){\rm d}xy(c_{\rm s})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}=\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_h^{\mu}\times y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}-\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\pi_{\rm s}^{\mu}y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm s}{\rm d}Y(c_{\rm r})+\\&\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_h^{\mu}y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}-\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_{\rm r}^{\mu}y(c_{\rm r})\times\\&y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}Y(c_{\rm s})+\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}g_{\rm r}\int_{\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}}^{\infty}(\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}-\\&q(c_{\rm s},c_{\rm r}))g(x){\rm d}xy(c_{\rm s})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}=\\&\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\frac{1+\theta}{\theta}[(p_0-v+g)S_G(q(c_{\rm s},c_{\rm r}))-(c-v)\times\\&q(c_{\rm s},c_{\rm r})-g\mu_G+A(q(c_{\rm s},c_{\rm r}))-B(q(c_{\rm s},c_{\rm r}))]-\\&\frac{1}{\theta}\frac{Y(c_{\rm s})}{y(c_{\rm s})}q(c_{\rm s},c_{\rm r})-\frac{1}{\theta}\pi_{\rm s}^{\mu\,\min}-\\&\frac{Y(c_{\rm r})}{y(c_{\rm r})}q(c_{\rm s},c_{\rm r})-\pi_{\rm r}^{\mu\,\min}+\frac{1}{\theta}g_{\rm r}\int_{\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}}^{\infty}(\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}-\\&q(c_{\rm s},c_{\rm r}))g(x){\rm d}x{\rm d}Y(c_{\rm r}){\rm d}Y(c_{\rm s}),\end{aligned} \tag{32}$$

对式(32)关于$q(c_{\rm r},c_{\rm s})$求一阶导, 并令其等于零, 可得$q^{a*}(c_{\rm s},c_{\rm r})$的表达式为

$$\begin{aligned}&\frac{1+\theta}{\theta}[(p_0-v+g)(1-G(q(c_{\rm s},c_{\rm r})))-(c-v)+\\&2a\int_0^{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}G(x){\rm d}x+a\mu_G-2aq(c_{\rm s},c_{\rm r})+\lambda]-\\&\frac{1}{\theta}\frac{Y(c_{\rm s})}{y(c_{\rm s})}-\frac{Y(c_{\rm r})}{y(c_{\rm r})}+\frac{1}{\theta}g_{\rm r}\int_{\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}}^{\infty}(\frac{1}{\theta}-1)g(x){\rm d}x-\\&g_{\rm r}q(c_{\rm s},c_{\rm r})\frac{1-\theta}{\theta^3}g(\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta})=0.\end{aligned} \tag{33}$$

联立式(19)(32)可得$w^{a*}(c_{\rm s},c_{\rm r})$的表达式为

$$\begin{aligned}w=&\{\frac{1}{\theta}\frac{Y(c_{\rm s})}{y(c_{\rm s})}q(c_{\rm s},c_{\rm r})+\frac{1}{\theta}\pi_{\rm s}^{\mu\,\min}+\\&\frac{Y(c_{\rm r})}{y(c_{\rm r})}q(c_{\rm s},c_{\rm r})+\pi_{\rm r}^{\mu\,\min}+g\mu-\\&(p_0-v+g)S_G(q(c_{\rm s},c_{\rm r}))+(c-v)q(c_{\rm s},c_{\rm r})-\\&A(q(c_{\rm s},c_{\rm r}))+B(q(c_{\rm s},c_{\rm r}))\}\frac{\theta}{(1-\theta)q(c_{\rm s},c_{\rm r})}+\\&\frac{g_{\rm s}(\mu_{\rm G}-S_{\rm G}(q(c_{\rm s},c_{\rm r})))+\lambda(q^*-q(c_{\rm s},c_{\rm r}))}{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}+c_{\rm s}.\end{aligned} \tag{34}$$

5.2 双边信息不对称供应商风险厌恶的应急数量折扣契约模型

同理可建立价格随机条件下双边信息不对称供应商风险厌恶的应急数量折扣契约优化模型为

$$\begin{aligned}&\max\int_{\underline{c}_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\{{\rm CVaR}_{\theta}\pi_s^{\mu}+\pi_{\rm r}^{\mu}\}y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}=\\&\max\int_{\underline{c}_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\{\frac{1}{\theta}(\pi_{\rm s}^{\mu}+g_{\rm r}\int_{\frac{q}{\theta}}^{\infty}(\frac{q}{\theta}-q)g(x){\rm d}x)+\\&\pi_{\rm r}^{\mu}\}y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}.\end{aligned} \tag{35}$$

参与约束:

$$\mathrm{PC}_1:\ \pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s})\geqslant\pi_{\rm s}^{\mu\,\min}, \tag{36}$$

$$\mathrm{PC}_2:\ \pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm r})\geqslant\pi_{\rm r}^{\mu\,\min}. \tag{37}$$

激励约束:

$$\begin{aligned}\mathrm{IC}_1:\ &\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}\geqslant\\&\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_{\rm s}^{\mu}(c_{\rm s}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r},\end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{IC}_2:\ &\int_{\underline{c}_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm s}\geqslant\\&\int_{\underline{c}_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_{\rm r}^{\mu}(c_{\rm r}^{\rm l},c_{\rm s},c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm s}.\end{aligned} \tag{39}$$

将式(27)与式(31)代入到式(35)可得

$$\begin{aligned}&\max\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\{\frac{1}{\theta}(\pi_{\rm s}^{\mu}+g_{\rm r}\int_{\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}}^{\infty}(\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}-\\&q(c_{\rm s},c_{\rm r}))\times g(x){\rm d}x)+\pi_{\rm r}^{\mu}\}y(c_{\rm s})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}=\\&\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}(\pi_h^{\mu}-\pi_{\rm s}^{\mu})y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}+\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}(\pi_h^{\mu}-\pi_{\rm r}^{\mu})y(c_{\rm r})\times y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}+\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}g_{\rm r}\int_{\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}}^{\infty}(\frac{q(c_{\rm s},c_{\rm r})}{\theta}-\\&q(c_{\rm s},c_{\rm r}))g(x){\rm d}xy(c_{\rm s})y(c_{\rm r}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}=\\&\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_h^{\mu}\times y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}-\\&\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\pi_{\rm s}^{\mu}y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm s}{\rm d}Y(c_{\rm r})+\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_h^{\mu}y(c_{\rm r})y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}c_{\rm s}-\\&\frac{1}{\theta}\int_{c_{\rm s}}^{\bar{c}_{\rm s}}\int_{c_{\rm r}}^{\bar{c}_{\rm r}}\pi_{\rm r}^{\mu}y(c_{\rm r})\times y(c_{\rm s}){\rm d}c_{\rm r}{\rm d}Y(c_{\rm s})+\end{aligned}$$

$$\frac{1}{\theta}\int_{c_s}^{\bar{c}_s}\int_{c_r}^{\bar{c}_r} g_r \int_{\frac{q(c_s,c_r)}{\theta}}^{\infty}(\frac{q(c_s,c_r)}{\theta} - q(c_s,c_r))g(x)\mathrm{d}xy(c_s)y(c_r)\mathrm{d}c_r\mathrm{d}c_s = \int_{c_s}^{\bar{c}_s}\int_{c_r}^{\bar{c}_r}\frac{1+\theta}{\theta}[(p_0-v+g)S_G(q(c_s,c_r))-(c-v)\times q(c_s,c_r) - g\mu_G + A(q(c_s,c_r)) - B(q(c_s,c_r))] - \frac{1}{\theta}\frac{Y(c_r)}{y(c_r)}q(c_s,c_r) - \frac{1}{\theta}\pi_r^{\mu\min} - \frac{Y(c_s)}{y(c_s)}q(c_s,c_r) - \pi_s^{\mu\min} + \frac{1}{\theta}g_r\int_{\frac{q(c_s,c_r)}{\theta}}^{\infty}(\frac{q(c_s,c_r)}{\theta} - q(c_s,c_r))g(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}Y(c_r)\mathrm{d}Y(c_s). \tag{40}$$

对式 (40) 关于 $q(c_r,c_s)$ 求一阶导, 并令其等于零, 可得$q^{a*}(c_s,c_r)$的表达式为

$$\frac{1+\theta}{\theta}[(p_0-v+g)(1-G(q(c_s,c_r)))-(c-v)+2a\int_0^{q(c_s,c_r)}G(x)\mathrm{d}x + a\mu_G - 2aq(c_s,c_r)+\lambda] - \frac{1}{\theta}\frac{Y(c_r)}{y(c_r)} - \frac{Y(c_s)}{y(c_s)} + \frac{1}{\theta}g_r\int_{\frac{q(c_s,c_r)}{\theta}}^{\infty}(\frac{1}{\theta}-1)g(x)\mathrm{d}x - g_r q(c_s,c_r)\frac{1-\theta}{\theta^3}g(\frac{q(c_s,c_r)}{\theta}) = 0. \tag{41}$$

联立式(35)(40)可得$w^{a*}(c_s,c_r)$的表达式为

$$w = \{\frac{1}{\theta}\frac{Y(c_r)}{y(c_r)}q(c_s,c_r) + \frac{1}{\theta}\pi_r^{\mu\min} + \frac{Y(c_s)}{y(c_s)}q(c_s,c_r) + \pi_s^{\mu\min} - (p_0-v+g)S_G(q(c_s,c_r))+(c-v)q(c_s,c_r)+g\mu_G - A(q(c_s,c_r)) + B(q(c_s,c_r))\}\frac{\theta}{(\theta-1)q(c_s,c_r)} + \frac{(p_0-v+g_r)S_G(q(c_s,c_r))-g_r\mu_G+A(q(c_s,c_r))}{q(c_s,c_r)} + v - c_r. \tag{42}$$

6 算例分析

为了进一步验证上述契约模型的正确性, 特进行算例分析. 假设某短周期易逝品的相关参数为: $p_0 = 300$, $c_r = 50$, $c_s = 100$, $g_r = 10$, $g_s = 10$, $v = 80$, $\lambda = 20$, $a = 0.004$. 具体字母含义见表1. 基准情况下市场需求服从$X \sim N(100000, 100^2)$的正态分布, 市场需求缩小时产品的市场需求服从$X \sim N(50000, 100^2)$的正态分布. 零售商对供应商生产成本的预测分别服从[96, 104], [98, 102], [99, 101]上的均匀分布, 供应商对零售商销售成本的预测分别服从[45, 55], [47, 53], [48, 52]上的均匀分布.

将上面的公式以及初始数值代入Mathematica软件中进行计算, 结果如表2所示.

表 2 不同风险厌恶水平与成本预测区间下相关参数一览表

Table 2 The list of relevant parameters under different risk aversion levels and cost prediction intervals

	θ	成本预测区间	q	w	π_r	π_s	π_h
零售商风险厌恶	0.2	$C_s \sim U(96,104)$ $C_r \sim U(45,55)$	40729	219	2680280	3567520	6247800
		$C_s \sim U(98,102)$ $C_r \sim U(47,53)$	40979	215	2822740	3440860	6263600
		$C_s \sim U(99,101)$ $C_r \sim U(48,52)$	41104	213	2894530	3376770	6271300
	0.5	$C_s \sim U(96,104)$ $C_r \sim U(45,55)$	40708	231	2193570	4052890	6246460
		$C_s \sim U(98,102)$ $C_r \sim U(47,53)$	40958	223	2496810	3765480	6262290
		$C_s \sim U(99,101)$ $C_r \sim U(48,52)$	41083	220	2608670	3661350	6270020
	0.8	$C_s \sim U(96,104)$ $C_r \sim U(45,55)$	40694	277	322995	5922560	6245555
		$C_s \sim U(98,102)$ $C_r \sim U(47,53)$	40944	256	1146930	5114490	6261420
		$C_s \sim U(99,101)$ $C_r \sim U(48,52)$	41069	246	1542110	4727050	6269160

(转下页)

(接上页)

	θ	成本预测区间	q	w	π_{r}	π_{s}	π_h
供应商风险厌恶	0.2	$C_{\mathrm{s}}\sim U(96,104)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(45,55)$	40646	196	3622150	2620300	6242450
		$C_{\mathrm{s}}\sim U(98,102)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(47,53)$	40896	199	3483920	2774490	6258410
		$C_{\mathrm{s}}\sim U(99,101)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(48,52)$	41021	200	3434570	2831630	6266200
	0.5	$C_{\mathrm{s}}\sim U(96,104)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(45,55)$	40667	185	4068210	2175610	6243820
		$C_{\mathrm{s}}\sim U(98,102)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(47,53)$	40971	191	3809870	2449860	6259730
		$C_{\mathrm{s}}\sim U(99,101)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(48,52)$	41042	194	3679390	2588110	6267500
	0.8	$C_{\mathrm{s}}\sim U(96,104)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(45,55)$	40681	138	5979510	265211	6244721
		$C_{\mathrm{s}}\sim U(98,102)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(47,53)$	40931	158	5159770	1100830	6260600
		$C_{\mathrm{s}}\sim U(99,101)$ $C_{\mathrm{r}}\sim U(48,52)$	41056	167	4787030	1481330	6268360

数据分析:

结果1 从表2可以看出, 当零售商的风险厌恶因子为0.2时, 零售商对供应商生产成本预测区间越来越小, 即为$C_{\mathrm{s}}\sim U(96,104)\rightarrow C_{\mathrm{s}}\sim U(98,102)\rightarrow C_{\mathrm{s}}\sim U(99,101)$. 预测的误差率从4%到2%再到1%(真实成本为100), 供应商对销售成本的预测区间也越来越小, 即为$C_{\mathrm{r}}\sim U(45,55)\rightarrow C_{\mathrm{r}}\sim U(47,53)\rightarrow C_{\mathrm{r}}\sim U(48,52)$. 预测的误差率从10%到6%再到4%(真实成本为50), 最优订货量的变化为$40729\rightarrow 40979\rightarrow 41104$, 零售商期望收益的变化为$2680280\rightarrow 2822740\rightarrow 2894530$, 供应链期望收益的变化为$6247800\rightarrow 6263600\rightarrow 6271300$. 最优订货量、零售商期望收益和供应链期望收益这3个参数的数值是越来越大的. 而批发价的变化为$219\rightarrow 215\rightarrow 213$, 供应商期望收益的变化为$3567820\rightarrow 3440860\rightarrow 3376770$, 这两个参数的数值是越来越小的. 当风险因子换成0.5和0.8时, 尽管上述5个参数具体的数据有所变化, 但各个参数的变化规律没有变化, 最优订货量、零售商的期望收益和供应链的期望收益还是越来越大, 而批发价和供应商的期望收益还是越来越少.

结果2 从表2可以看出, 当供应商的风险厌恶因子为0.2 时, 零售商对供应商生产成本预测区间越来越小, 即为$C_{\mathrm{s}}\sim U(96,104)\rightarrow C_{\mathrm{s}}\sim U(98,102)\rightarrow C_{\mathrm{s}}\sim U(99,101)$, 供应商对销售成本的预测区间也越来越小, 即为$C_{\mathrm{r}}\sim U(45,55)\rightarrow C_{\mathrm{r}}\sim U(47,53)\rightarrow C_{\mathrm{r}}\sim U(48,52)$. 最优订货量的变化为$40646\rightarrow 40896\rightarrow 41021$, 批发价的变化为$196\rightarrow 199\rightarrow 200$, 供应商期望收益的变化为$2620300\rightarrow 2774490\rightarrow 2831630$, 供应链期望收益的变化为$6242450\rightarrow 6258410\rightarrow 6266200$, 这四个参数的数字是越来越大的. 而零售商期望收益的变化为$3622150\rightarrow 3483920\rightarrow 3434570$, 这个值是越来越小的. 当供应商的风险因子换成0.5和0.8时, 尽管上述5个参数具体的数据也有所变化, 但各个参数的变化规律却没有变化, 最优订货量、最优批发价、供应商的期望收益和供应链的期望收益还是越来越大, 而零售商的期望收益还是越来越少.

结果3 当生产成本的预测区间为$C_{\mathrm{s}}\sim U(96,104)$, 销售成本的预测区间为$C_{\mathrm{r}}\sim U(45,55)$时, 随着零售商的风险厌恶因子从$0.2\rightarrow 0.5\rightarrow 0.8$时, 即风险厌恶程度(风险厌恶因子为1为风险中性)越来越低时, 最优订货量的变化为$40729\rightarrow 40708\rightarrow 40694$, 零售商期望收益的变化为$2680280\rightarrow 2193570\rightarrow 322995$, 供应链期望收益的变化为$6247800\rightarrow 6246460\rightarrow 6245555$, 这3个参数值是随着风险因子的增大(即厌恶程度的减少)而减小的. 而批发价的变化为$219\rightarrow 231\rightarrow 277$, 供应商期望收益的变化为$3567520\rightarrow 4052890\rightarrow 5922560$. 这两个参数值是随着零售商风险因子的增大(即厌恶程度的减少)而增大的. 当另两个生产成本和销售成本预测区间固定时, 上述参数的数据会发生变化, 但参数的变化规律是一样的. 即成本信息不对称确定的情况下,

最优订货量、零售商的期望收益和供应链的期望收益随着零售商风险厌恶因子增大(风险厌恶程度减小)而减小. 最优批发价和供应商的期望收益随着零售商风险厌恶因子增大(风险厌恶程度减小)而增大.

结果 4　当生产成本的预测区间为 $C_{\rm s} \sim U(96, 104)$, 销售成本的预测区间为 $C_{\rm r} \sim U(45, 55)$ 时, 随着供应商风险厌恶因子从 $0.2 \to 0.5 \to 0.8$ 时, 即风险厌恶程度越来越低时, 最优订货量的变化为 $40646 \to 40667 \to 40681$, 零售商期望收益的变化为 $3622150 \to 4068210 \to 5979510$. 供应链期望收益的变化为 $6242450 \to 6243820 \to 6244721$, 这3个参数值是随着风险因子的增大(即厌恶程度的减少)而增大的. 而批发价的变化为 $196 \to 185 \to 138$, 供应商期望收益的变化为 $2620300 \to 2175610 \to 265211$, 这两个参数值是随着零售商风险因子的增大(即厌恶程度的减少)而减少的. 当另两个生产成本和销售成本预测区间固定时, 上述参数的数据会发生变化, 但参数的变化规律也是一样的. 即成本信息不对称确定的情况下, 最优订货量、零售商的期望收益和供应链的期望收益随着供应商的风险厌恶因子的增大(风险厌恶程度减小)而减小. 最优批发价和供应商的期望收益随着供应商的风险厌恶因子的增大(风险厌恶程度减小)而增大.

结果 5　当生产成本的预测区间为 $C_{\rm s} \sim U(96, 104)$, 销售成本的预测区间为 $C_{\rm r} \sim U(45, 55)$ 时, 零售商风险厌恶因子为0.2时, 供应链绩效为6247800, 供应商风险厌恶因子为0.2时, 供应链绩效为6242450: 零售商风险厌恶因子为0.5时, 供应链绩效为6246460, 供应商风险厌恶因子为0.5时, 供应链绩效为6243820: 零售商风险厌恶因子为0.8时, 供应链绩效为6245555, 供应商风险厌恶因子为0.8时, 供应链绩效为6244721. 说明在零售商和供应链风险厌恶程度相同时, 供应商风险厌恶给整个供应链带来的损失更大. 当生产成本和销售成本在其他两种预测区间时, 得出的规律也是一样的.

7　结论

本文考虑突发事件造成市场价格和市场需求均随机、一个参与者风险厌恶以及零售商和供应商之间双边信息不对称的情形, 以数量折扣契约为工具, 建立价格随机、双边信息不对称且风险厌恶的应急数量折扣契约模型, 并进行算例仿真分析, 得出如下结论:

结论 1　与文献[11]相比, 双向信息不对称造成供应链整体收益受损. 从结果1和结果2可以看出, 当参与者风险厌恶程度确定时, 随着供需双方信息预测越来越准确时, 供应链期望收益会越来越大, 这说明信息越公开透明对整个供应链越有利. 但谁持风险厌恶态度, 其收益随着信息透明度的增加而增加, 持风险中性态度, 其收益随着信息透明度的增加而减少. 说明参与者风险中性时, 拥有信息优势(隐瞒信息程度越大)会带来信息收益. 若为风险厌恶者, 拥有信息优势不仅不能带来收益, 反而会给自己带来损失. 若零售商为风险厌恶者, 最优订货量会随着信息透明度增加而增加, 说明信息公开透明有利于促进风险厌恶的零售商多进货: 若供应商为风险厌恶者, 批发价会随着信息越来越透明而提高. 这给供应链管理者带来的启示是: 突发事件造成价格随机、双方信息不对称时, 信息越透明越有利于提高整个供应链的绩效. 同时也说明, 风险厌恶的零售商在对方信息趋向透明时会通过增加进货量来增加自己的收益, 在对方隐瞒信息程度越高时会通过减少进货量来避免损失. 风险厌恶的供应商会通过提高批发价来避免信息公开带来的损失, 但不能通过加大隐瞒信息的程度而获利.

结论 2　将结果1与结果2进行对比, 发现不管是零售商风险厌恶还是供应商风险厌恶, 零售商预测的误差率都比供应商预测的误差率要小, 即准确度比供应商要高. 在零售商为风险厌恶时, 是乎体现了信息的优势, 但当供应商为风险厌恶, 其信息优势并没有得到体现. 这给供应链管理者带来的启示是: 当突发事件造成市场价格随机时, 参与者并不能完全通过信息优势来获利, 而对风险保持警惕的态度能给自身带来更多的收益. 说明在突发事件造成外部环境不稳定时, 风险厌恶的参与者不能通过信息优势(信息预测的准确度)来获利, 但能通过风险意识避免损失.

结论 3　从结果3可以得出, 突发事件造成市场价格随机, 当信息不对称的情况确定时, 随着零售商的风险厌恶程度增加(风险厌恶因子减小), 供应商通过降低批发价的来促进零售商多订货, 同时导致零售商和供应链的期望收益增加, 供应商的期望收益减少. 从结果4可以得出, 突发事件造成市场价格随机, 当信息不对称的情况确定时. 随着供应商风险厌恶程度增加(风险厌恶因子减小), 供应商会提高批发价, 零售商会降低订货量, 其结果是零售商和供应链的期望收益会减小, 供应商期望收益会增大. 从结果5可以看出, 同样的风险厌恶程度, 供应商风险厌恶给供应链带来的损失更大. 上面结论给供应链管理者的启示是: 当突发事件造成市场价格随机变化, 且双方信息不对称, 但信息不对称状态确定时, 参与者保持对风险的警惕性越高越有利于自身风险防范, 不过供应商风险厌恶造成的损失更大(零售商风险厌恶时的供应链收益大于供应商风险厌恶时的供应链收益).

本文在市场价格随机的条件下, 考虑突发事件造成市场需求随机、一个供应链参与者为风险厌恶在双边信息不对称的情形下, 采用应急数量折扣契约协调供应链展开研究, 但没有研究市场价格随机、参与者均风险厌恶在双边信息不对称时, 采用应急数量折扣

契约协调供应链的情形. 还有其他契约在本文约束条件下是否也能协调供应链, 这些都将成为后续研究的内容.

参考文献:

[1] ZHOU Y W, LI J C, ZHONG Y G. Cooperative advertising and ordering policies in two-echelon supply chain with risk-averse agents. *Omega*, 2018, 75(2): 97 – 117.

[2] LIU M Q, CAO E B. Pricing strategies of a dual-channel supply chain with risk aversion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 90(6): 108 – 120.

[3] MONAHAN J P. A quantity discount pricing model to increase vendor profits. *Management Science*, 1984, 30(6): 720 – 726.

[4] HUANG X M, CHOI S M, CHING W K, et al. On supply chain coordination for false failure returns: A quantity discount contract approach. *International Journal of Production Economics*, 2011, 133(2): 634 – 644.

[5] SHI Siyu, SUN Jingchun. Pricing decisions of a dual-channel supply chain with a risk-averse supplier and a budget constraint retailer. *Forecasting*, 2019, 38(2): 90 – 96.
(史思雨, 孙静春. 供应商风险规避下考虑零售商资金约束的双渠道供应链定价决策. 预测, 2019, 38(2): 90 – 96.)

[6] SONG Q F, SHI K, LIN S, et al. Optimal decision for a fuzzy supply chain with shrinkage under VaR criterion. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2018, 34(1): 733 – 744.

[7] ROCKAFLLER T R, URYASEV S. Optimization of conditional value-at-risk. *Journal of Risk*, 2000, 2(3): 21 – 24.

[8] ROCKAFLLER T R, URYASEV S. Conditional value-at-risk for general loss distribution. *Journal of Banking and Finance*, 2002, 26(17): 1443 – 1471.

[9] FAN Y H, FENG Y, SHOU Y Y. A risk-averse and buyer-led supply chain under option contract: CVaR minimization and channel coordination. *International Journal of Production Economics*, 2020, 219(8): 66 – 81.

[10] ZHOU Y W, LI J, ZHONG Y. Cooperative advertising and ordering policies in a two-echelon supply chain with risk-averse agents. *Omega*, 2018, 75(4): 97 – 117.

[11] LIU Lang, CHEN Wentao, GONG Lingjun. Emergency quantity discount contract under the condition of random price. *Systems Engineering*, 2016, 34(10): 116 – 121.
(刘浪, 陈文涛, 巩玲君. 随机价格条件下应急数量折扣契约. 系统工程, 2016, 34(10): 116 – 121.)

[12] LIU Lang, LIU Chongguang, WU Shuangsheng, et al. Emergency buy-back contract under risk aversion of a supplier considering stochastic price. *Jouanal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(12): 207 – 215.
(刘浪, 刘崇光, 吴双胜, 等. 价格随机条件下供应商风险厌恶的应急回购契约. 机械工程学报, 2018, 54(12): 207 – 215.)

[13] ZHANG Pan, XIONG Zhongkai. Designing incentive contract for a retailer under asymmetric information of manufacturer's collection cost. *Journal of Industrial Engineering and Enfineering Management,* 2019, 33(4): 144 – 150.
(张盼, 熊中楷. 制造商回收成本信息不对称下零售商激励合同设计. 管理工程学报, 2019, 33(4): 144 – 150.)

[14] CHEN P, LI B, JIANG Y S, et al. The impact of manufacturer's direct sales and cost information asymmetry in a dual-channel supply chain with a risk-averse retailer. *International Journal of Electronic Commerce*, 2017, 21(1): 43 – 66.

[15] LI Q H, LI B, CHEN P, et al. Dual-channel supply chain decisions under asymmetric information with a risk-averse retailer. *Annals of Operations Research*, 2017, 257(2): 423 – 447.

[16] WANG Daoping, GU Chunxiao, ZHANG Boqing. Pricing decision in dual-channel supply chain under risk-aversion and asymmetric information. *Industrial Engineering and Management*, 2016, 21(4): 20 – 25, 34.
(王道平, 谷春晓, 张博卿. 风险规避和信息不对称下双渠道供应链的定价决策研究. 工业工程与管理, 2016, 21(4): 20 – 25, 34.)

[17] WANG Xinhui, WANG Xianyu, SU Yingsheng. The coordination mechanism of supply chain with bilateral asymmetric costs information. *Journal of Industrial Engineering and Enfineering Management*, 2013, 27(4): 196 – 204.
(王新辉, 汪贤裕, 苏应生. 双边成本信息不对称的供应链协调机制. 管理工程学报, 2013, 27(4): 196 – 204.)

[18] XIAO Meidan, REN Manlin, XU Lina. Coordination and incentive mechanism under bilateral innovation information asymmetry. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(11): 3177 – 3184.
(肖美丹, 任曼琳, 徐丽娜. 双边创新信息不对称下的供应链协调激励机制. 计算机集成制造系统, 2020, 26(11): 3177 – 3184.)

[19] WANG Xinhui, WANG Xianyu. The coordination of supply chain with bilateral asymmetric information by considering risk aversion of retailer. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(3): 97 – 107.
(王新辉, 汪贤裕. 考虑销售商风险规避的双边信息不对称的供应链协调. 中国管理科学, 2015, 23(3): 97 – 107.)

[20] LIU Lang, WU Shuangsheng, SHI Wenqiang. Research on emergency quantity discount contract with stochastic price under asymmetric information. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(3): 169 – 176.
(刘浪, 吴双胜, 史文强. 信息不对称下价格随机的应急数量折扣契约研究. 中国管理科学, 2018, 26(3): 169 – 176.)

[21] YU Hui, CHEN Jian, YU Gang. Managing wholesale price contract in the supply chain under disruptions. *Theory & Practice*, 2006, 26(8): 33 – 41.
(于辉, 陈剑, 于刚. 批发价契约下的供应链应对突发事件. 系统工程理论与实践, 2006, 26(8): 33 – 41.)

[22] FUDENBERG D, TIROLE J. *Game Theory*. Massachusetts London, England: The MIT Press Cambridge, 2005.

作者简介:

刘 浪 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为应急供应链管理、应急物流, E-mail:liu_lang@hotmail.com;

黄冬宏 硕士研究生, 研究方向为应急供应链管理, E-mail: 3327457784@qq.com;

汪 惠 硕士研究生, 研究方向为应急供应链管理, E-mail: 1325114639@qq.com.