第 32 卷 第 3 期
2017 年 3 月

控 制 与 决 策
Control and Decision

Vol.32 No.3
Mar. 2017

文章编号: 1001-0920(2017)03-0498-09 **DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2015.1473

联合促销和风险规避下应对突发事件的供应链协调策略

王道平, 张博卿†

(北京科技大学 东凌经济管理学院，北京 100083)

摘 要: 针对联合促销和风险规避下考虑突发事件的供应链协调问题,应用条件风险值度量制造商和零售商的风险价值,引入回购契约协调供应链,分别构建应对常规和非常规突发事件的供应链协调模型.研究表明,常规突发事件下,订货量、促销和契约参数具有一定的稳定性,当需求扰动较大时,供应链协调被打破,而非常规突发事件下,需求扰动打破供应链协调,通过调整契约参数能够使供应链重新达到协调状态.

关键词: 联合促销；风险规避；突发事件协调；条件风险值；回购契约

中图分类号: F270 **文献标志码:** A

Disruption coordination under risk-averse supply chain and joint promotion strategy

WANG Dao-ping, ZHANG Bo-qing†

(Donlinks School of Economics and Management，University of Science and Technology Beijing，Beijing 100083，China)

Abstract: For the coordination of the supply chain under demand disturbances with a risk-averse manufacturer and a risk-averse retailer, conditional value-at-risk is used to evaluate the manufacturers and the retailers' degree of risk aversion and buy-back contract is introduced to establish supply chain coordination model under conventional and unconventional disruption. It is found that order quantity, promotion and contract decision have a certain degree of robustness under conventional disruption. If the demand disruption quantity is relatively large, conventional disruption leads to incoordination. While unconventional disruption surely leads to incoordination, by the adjustment of contract parameters, the supply chain can reach the coordination state again.

Keywords: joint promotion contact；risk-averse；disruption coordination；conditional value-at-risk；buy-back contract

0 引 言

供应链作为一个整体,需要协调各方的决策才能减少供应链中各企业的冲突和内耗,达到改善和优化供应链整体绩效的目的. 然而,突发事件可能造成需求市场或成本费用的巨大波动,原材料和零部件的供应中断或延迟,运输系统毁坏等现象,这将导致原本协调的供应链偏离协调状态,严重影响供应链的正常运作. 因此,如何应对供应链中的突发事件是企业界和学术界的热点. 另一方面,随着供应链企业的合作越来越紧密,单个企业的决策或决策时的态度将对其他企业的决策造成深远影响,比如促销决策以及在决策过程中风险规避的态度. 零售商的促销能够提高产品的市场需求,为了刺激零售商开拓市场,越来越多的上游供应商或分销商通过承担部分促销费用的方式与零售商进行联合促销. 在突发事件影响产品需求的情况下,促销决策的变动能够为管理者的决策提供更多的选择. 风险规避则往往使得突发事件来临时管理者的决策更为保守. 因此,在联合促销和风险规避的条件下,研究突发事件的协调机制具有重要的理论价值和实际意义.

1 文献综述

自 Causen 等提出突发事件应急管理以来,供应链应急管理研究取得了较快的发展,其中应急管理的协调是研究的热点问题[1]. 突发事件的一个显著特征是引起需求和成本等信息的扰动,进而导致促销、价格和订货量等决策发生变化. 文献 [2] 对需求扰动下的供应链协调问题进行了研究,发现扰动后制造商和零售商需要对订货和生产决策进行调整,并运用数量

收稿日期: 2015-11-28；**修回日期:** 2016-07-20.
基金项目: 国家自然科学基金项目 (71172169).
作者简介: 王道平 (1964−), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理和知识管理等研究；张博卿 (1991−), 男, 博士生, 从事供应链管理的研究.
†通讯作者. E-mail: zhangboqing1991@126.com

折扣契约实现了突发事件前后的供应链协调; 文献[3]构建了指数需求下的应对突发事件的供应链协调模型; 文献[4]在两零售商通过价格竞争的背景下考虑制造商生产成本扰动对供应链协调的影响, 引入了增量折扣和全量折扣批发价契约, 实现了价格决策的协调, 并进一步将模型扩展至需求和成本同时扰动的情况; 文献[5]运用委托-代理理论, 构建了生产成本或市场需求扰动且扰动信息非对称下的协调模型, 研究表明, 信息非对称下供应链的最优订货量小于信息对称的情形; 文献[6]针对鲜活农产品供应链, 在考虑损耗和新鲜度的影响下, 构建了零售商销售成本扰动且非对称下的突发事件协调模型. 文献[5]与文献[6]的区别在于: 文献[5]在分离策略下设计了契约, 实现了非对称信息的甄别; 文献[6]则在混同策略下设计了批发价契约, 制造商无法通过该契约揭示零售商的私有信息. 文献[7-8]将零售商价格由外生变量转换为内生变量作为非常规突发事件的特征, 分别在两级和三级供应链下应用回购契约构建了突发事件协调模型; 文献[2-8]指出, 信息扰动将导致供应链协调被打破, 需要对契约进行调整, 使供应链重新达到协调状态. 同时, 成本和需求等因素的扰动量不大时, 价格和订货量等决策可以保持不变, 扰动量超过一定范围将导致价格和订货量等决策发生变化.

以上文献未考虑零售商和制造商的促销决策, 作为制造商和零售商提高市场需求和增加企业利润的重要营销手段, 如何在信息扰动下对促销进行决策至关重要. 文献[9]研究了单制造商和两个互相竞争的零售商组成的供应链中, 如何使用批发价和补贴契约应对市场需求的扰动, 考虑了两零售商的促销投资对市场需求的影响, 研究发现, 突发事件发生后促销决策随的变化, 当零售商促销决策变动不大时, 订货和生产决策可以保持稳定; 文献[10]针对单个供应商、单个强势零售商和多个边缘零售商组成的供应链, 考虑强势零售商具有主导产品定价和促销决策的能力, 构建了两种数量折扣契约下突发事件协调模型; 文献[11]在突发事件导致销售努力弹性系数和产品制造、再制造成本同时扰动的情况下, 研究了闭环供应链应对突发事件的协调模型, 研究表明, 销售努力策略的调整能够有效减少突发事件所导致的闭环供应链利润的损失; 文献[12]针对制造商和零售商组成的双渠道供应链, 在联合促销和突发事件导致需求和库存持有成本扰动的条件下, 引入促销补贴契约实现了供应链的协调; 文献[9-13]的研究发现, 多数情况下需要引入联合促销契约才能实现突发事件下的供应链协调.

上述研究均假设企业持风险中性态度. 文献[14-15]指出, 供应链企业面对风险的态度也将影响突发事件发生前后供应链的协调和库存、订货策略的选择; 文献[16]发现, 企业的风险规避态度会缩小契约的可行域. 因此, 风险规避也是突发事件协调问题所需考虑的重要因素. 文献[17]考虑企业间通过应急援助的契约共同应对突发事件, 引入条件风险值(CVaR)方法刻画企业的决策目标, 假设突发事件所导致的额外销售或生产成本随机, 在一定的置信水平下给出了供应商和零售商分别遭遇突发事件时的最优援助额; 文献[18]同样运用CVaR方法度量供应不可靠下零售商所面临的突发事件风险, 并给出了实现供应链协调的收益共享契约.

综上所述, 众多学者对突发事件下的供应链协调问题进行了深入研究, 并取得了丰硕的成果. 促销决策能够帮助企业有效地应对突发事件, 同时供应链企业在面对突发事件时往往具有风险规避的倾向, 但少有文献同时将风险规避和联合促销纳入突发事件的协调问题. 因此, 本文以联合促销和企业风险规避为背景, 运用CVaR度量制造商和零售商的决策目标, 引入回购契约分别构建常规突发事件和非常规突发事件下的协调模型, 对订货量、促销量和契约参数进行有效决策.

2　联合促销和风险规避下的协调模型

2.1　问题描述和符号说明

考虑由制造商和零售商构成的两级供应链, 零售商销售一种短生命周期产品, 忽略产品的缺货成本, 假设产品的期末残值为零. 产品的市场需求D随机且受到零售商促销努力的影响, D满足

$$D(e,x)=e+x. \tag{1}$$

其中: x为非负随机变量, 概率密度和分布函数分别为$f(x)$和$F(x)$; e为零售商的促销活动带来的促销量. 促销成本为$C(e)$, 其一阶偏导数$C'(e)$和二阶偏导数$C''(e)$均为正, 即促销量越大, 促销成本越高, 随着促销量逐渐增大, 提高一单位促销量所需要的成本也越来越大.

研究单个销售周期的供应链协调问题. 销售期开始前, 零售商向制造商订货Q, 同时确定促销量e. 为了刺激零售商订货, 使用回购契约和促销成本共担契约. 一方面, 销售期结束后, 制造商以回购价格b回购零售商未售出的产品; 另一方面, 制造商按照比例α承担部分促销成本, 满足不等式$0<\alpha<1$.

模型中用到的其他符号如下: p表示产品的零售价格; c表示产品的生产成本; w表示零售商从制造商处批发产品的价格; η_1和η_2分别表示零售商和制造

商的风险规避程度,满足$\eta_1, \eta_2 \in (0,1]$;π、π_m和π_r分别表示供应链整体、制造商和零售商的利润.

供应链可能面临常规和非常规突发事件,突发事件会导致随机需求的分布函数发生变化,本文研究如何运用回购契约实现突发事件前后的供应链协调,零售商的决策变量为订货量Q和促销量e.

2.2 风险规避分析技术

本文假设制造商和零售商均风险规避,对风险规避下企业目标函数的描述有多种方法,主要包括传统的期望效用理论、均方分析技术和下侧风险测度(包括VaR和CVaR). 其中: CVaR技术具有次可加性、正齐次性和单调性等良好的计算特性,因而被广泛应用[16]. CVaR度量了企业随机利润小于给定置信水平η分位数以下部分的平均值,而忽略了超出此分位数以上的部分. 给定随机变量x下企业的利润$\Pi(x)$,则条件风险价值为

$$\mathrm{CVaR}_\eta(\Pi(x)) = \mathrm{E}[\Pi(x)|\Pi(x) \leqslant q(\eta)] = \frac{1}{\eta}\int_{\Pi(x)\leqslant q(\eta)}\Pi(x)f(x)\mathrm{d}x.$$

其中:η为企业的风险规避程度,取值范围为$(0,1]$,η越小表示企业风险规避程度越大,η为1表示企业是风险中性的;E为期望算子;$q(\eta)$为随机变量x的η分位数,表示如下:

$$q(\eta) = \sup\{v|\Pr\{\Pi(x) \leqslant v\} \leqslant \eta\}.$$

可以看出,实数v或其上限为x的η分位数. 文献[19]给出了CVaR的等价定义

$$\mathrm{CVaR}_\eta(\Pi(x)) = \max_{v\in R}\Big\{v + \frac{1}{\eta}\mathrm{E}[\min(\Pi(x)-v,0)]\Big\}. \tag{2}$$

该定义具有良好的计算特性,便于数学分析,因此本文使用式(2)求解制造商和零售商的条件风险值.

2.3 基准协调模型

基准协调模型是指突发事件发生前的协调模型,是突发事件协调的基础. 在制造商和零售商联合促销的条件下,使用回购契约协调供应链. 制造商和零售商均风险规避,决策目标为自身条件风险值最大.

命题1　基准协调模型下,零售商和制造商的条件风险值分别为

$$\mathrm{CVaR}^D_{\eta_1}(\pi_r(Q,e)) = (p-w)Q - (1-\alpha)C(e) - \frac{p-b}{\eta_1}\int_0^{Q-e}F(x)\mathrm{d}x, \tag{3}$$

$$\mathrm{CVaR}^D_{\eta_2}(\pi_m(Q,e)) = (w-c)Q - \alpha C(e) - \frac{b}{\eta_2}\int_0^{Q-e}F(x)\mathrm{d}x. \tag{4}$$

证明　根据条件风险值的定义,制造商的条件风险值为

$$\mathrm{CVaR}^D_{\eta_2}(\pi_m(Q,e)) = \max_{v\in R}\Big\{v + \frac{1}{\eta_2}\mathrm{E}[\min(\pi_m(Q,e)-v,0)]\Big\}. \tag{5}$$

令z_m为$v + \frac{1}{\eta_2}\mathrm{E}[\min(\pi_m(Q,e)-v,0)]$,可得

$$z_m = v - \frac{1}{\eta_2}\int_0^{Q-e}(v-((w-c-b)Q+ b(e+x)-\alpha C(e)))^+\mathrm{d}F(x) - \frac{1}{\eta_2}\int_{Q-e}^{+\infty}(v-((w-c)Q-\alpha C(e)))^+\mathrm{d}F(x).$$

z_m对实数v的一阶导数如下:

$$\frac{\partial z_m}{\partial v} = \begin{cases} 1,\ v \leqslant (w-c)Q - b(Q-e) - \alpha C(e); \\ 1 - \dfrac{1}{\eta_2}F\Big(\dfrac{v-(w-c)Q+b(Q-e)+\alpha C(e)}{b}\Big), \\ \qquad\qquad 其他; \\ 1 - \dfrac{1}{\eta_2},\ v \geqslant (w-c)Q - \alpha C(e). \end{cases} \tag{6}$$

可以看出,$\partial z_m/\partial v$在点$(w-c)Q-\alpha C(e)$以外的范围内是连续的. 当$v \leqslant (w-c)Q-b(Q-e)-\alpha C(e)$时,$\partial z_m/\partial v$为正;当$v \geqslant (w-c)Q-\alpha C(e)$时,$\partial z_m/\partial v$为负. 设$z_m$取最大值时的$v$取值为$v^*$,则$v^*$一定在区间$((w-c)Q-b(Q-e)-\alpha C(e),\ (w-c)Q-\alpha C(e)]$取得. 下面用反正法证明$v^*$的取值为$(w-c)Q-\alpha C(e)$.

假设v^*的取值在范围$((w-c)Q-b(Q-e)-\alpha C(e),\ (w-c)Q-\alpha C(e))$内,$\partial z_m/\partial v$在该区间连续,则$v^*$是式(5)的一个驻点,由此可得

$$1 - \frac{1}{\eta_2}F\Big(\frac{v^*-(w-c)Q+b(Q-e)+\alpha C(e)}{b}\Big) = 0. \tag{7}$$

$v^* = (w-c)Q - b(Q-e) - \alpha C(e) + bF^{-1}(\eta_2)$. 若$F^{-1}(\eta_2) \geqslant Q-e$,则$v^* \geqslant (w-c)Q-\alpha C(e)$,此时满足假设要求的驻点不存在;若$F^{-1}(\eta_2) < Q-e$,则将$v^*$代入式$z_m$可得制造商的条件风险值

$$\mathrm{CVaR}^D_{\eta_2}(\pi_m(Q,e)) = (w-c)Q - b(Q-e) - \alpha C(e) + bF^{-1}(\eta_2) - \frac{b}{\eta_2}\int_0^{F^{-1}(\eta_2)}(F^{-1}(\eta_2)-x)\mathrm{d}F(x).$$

制造商对Q求解的一阶导数$-c-b$为负. 由于Q的取

值范围为$(F^{-1}(\eta_2)+e,+\infty)$,对于制造商而言,最优订货量$Q$的取值会无限接近$F^{-1}(\eta_2)+e$,由此可得

$$\begin{aligned}&\mathrm{CVaR}_{\eta_2}^{D}(\pi_m(Q,e))<\\&(w-c)(F^{-1}(\eta_2)-e)-\alpha C(e)-\\&\frac{b}{\eta_2}\int_0^{F^{-1}(\eta_2)}(F^{-1}(\eta_2)-x)\mathrm{d}F(x).\end{aligned}\tag{8}$$

当v^*的取值为$(w-c)Q-\alpha C(e)$时,制造商的条件风险值为式(4). 由不等式$F^{-1}(\eta_2)<Q-e$可以看出,式(4)大于不等式(8)的右边,因此假设不成立,v^*的取值应为$(w-c)Q-\alpha C(e)$,制造商的条件风险值为式(4). 同理可证零售商的条件风险值为式(3). □

从命题1可以看出,零售商和制造商越风险规避,其条件风险值越小. 同时,命题1将制造商和零售商的条件风险值由式(2)转化为式(3)和(4)的形式,便于进一步求解决策变量. 条件风险值具有次可加性,因此根据命题1可以得出供应链整体的条件风险值

$$\begin{aligned}&\mathrm{CVaR}_{\eta}^{D}(\pi(Q,e))=\\&\mathrm{CVaR}_{\eta_1}^{D}(\pi_r(Q,e))+\mathrm{CVaR}_{\eta_2}^{D}(\pi_m(Q,e))=\\&(p-c)Q-C(e)-\Big(\frac{p-b}{\eta_1}+\frac{b}{\eta_2}\Big)\int_0^{Q-e}F(x)\mathrm{d}x.\end{aligned}\tag{9}$$

集中决策条件下,制造商和零售商的决策目标是供应链整体条件风险值的最大化,令式(9)对Q和e的一阶偏导数分别为0,可得集中决策下最优的订货量Q^{D*}和促销量e^{D*}满足方程组

$$\begin{cases}F(Q^{D*}-e^{D*})=\eta_1\eta_2\dfrac{p-c}{\eta_2(p-b)+\eta_1 b},\\C'(e^{D*})=p-c.\end{cases}\tag{10}$$

分散决策下,制造商和零售商分别以自身条件风险值最大化为决策目标,令式(3)对Q和e的一阶偏导数分别为0,可得零售商的最优订货决策Q^D和促销决策e^D满足方程组

$$\begin{cases}F(Q^{D}-e^{D})=\eta_1\dfrac{p-w}{p-b},\\C'(e^{D})=\dfrac{p-w}{1-\alpha}.\end{cases}\tag{11}$$

此时供应链协调的充分必要条件是Q^D等于Q^{D*}且e^D等于e^{D*},根据方程组(10)和(11)可得,联合促销下回购契约的参数b、w^D和α^D应满足

$$b=\frac{p\eta_1(w^D-c)}{\eta_2(p-w^D)+\eta_1(w^D-c)},\tag{12}$$

$$1-\alpha^D=\frac{p-w^D}{p-c}.\tag{13}$$

对比$C'(e^D)$和$C'(e^{D*})$能够发现,如果制造商和零售商没有联合促销,则单独的回购契约无法协调供应链.

由式(12)可得$\partial b/\partial w^D>0$,因此回购价格与批发价格正相关. 同时,从式(13)可以看出,促销成本承担比例α^D与批发价w^D正相关且呈线性关系.

2.4 常规突发事件下的协调模型

常规和非常规突发事件的区别是: 常规突发事件后,产品的价格外生;非常规突发事件后,价格变为内生决策变量. 假设常规突发事件导致市场随机需求x的分布函数由$F(x)$变为$G(x)$,概率密度由$f(x)$变为$g(x)$. 销售周期开始前,零售商制定最优订货量和促销量,供应商依据最优订货量进行生产. 市场需求发生扰动后,供应商需要调整原先的生产计划,产品的最优生产量由Q^{D*}变为Q^{N*},因此会产生额外的偏差成本λ_1或λ_2.

在常规突发事件后,制造商和零售商的期望利润变为

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}(\pi_m(Q,e))=\\&(w-c)Q-b\int_0^{Q-e}(Q-e-x)\mathrm{d}G(x)-\\&\alpha C(e)-\lambda_1(Q-Q^{D*})^+-\lambda_2(Q^{D*}-Q)^+,\\&\mathrm{E}(\pi_r(Q,e))=\\&(p-w)Q-(p-b)\int_0^{Q-e}G(x)\mathrm{d}x-(1-\alpha)C(e).\end{aligned}$$

生产计划增加时,对于增加的产品生产量$(Q-Q^D)$,单位产品的生产成本为$c+\lambda_1$;生产计划减少时,对于减少的产品生产量(Q^D-Q),单位产品的处理费用为λ_2. λ_1和λ_2满足不等式$b>c+\lambda_1, b>c+\lambda_2, c>\lambda_1$和$c>\lambda_2$. 符号$(y)^+$等价于$\max(y,0)$, y为任意实数. 采用类似于命题1的证明方法能够得到如下命题.

命题2 常规突发事件发生后,零售商和制造商的条件风险值分别为

$$\begin{aligned}&\mathrm{CVaR}_{\eta_1}^{N}(\pi_r(Q,e))=\\&(p-w)Q-(1-\alpha)C(e)-\\&\frac{p-b}{\eta_1}\int_0^{Q-e}(Q-e-x)g(x)\mathrm{d}x,\end{aligned}\tag{14}$$

$$\begin{aligned}&\mathrm{CVaR}_{\eta_2}^{N}(\pi_m(Q,e))=\\&(w-c)Q-\alpha C(e)-\frac{b}{\eta_2}\int_0^{Q-e}(Q-e-x)\mathrm{d}G(x)-\\&\lambda_1(Q-Q^{D*})^+-\lambda_2(Q^{D*}-Q)^+.\end{aligned}\tag{15}$$

与文献[6]类似,运用反证法能够得到如下命题.

命题3 当常规突发事件造成市场随机需求变大(即$G(x)>F(x)$)时,供应链的最优产品生产量Q^{N*}满足不等式$Q^{N*}\geqslant Q^{D*}$;常规突发事件造成市场随机需求变小($G(x)<F(x)$)时,Q^{N*}满足不等式$Q^{N*}\leqslant Q^{D*}$.

下面根据市场随机需求的扰动情况分类研究供

应链的协调策略.

1) 市场随机需求变大的协调策略.

市场随机需求变大后,供应链的条件风险值为

$$\mathrm{CVaR}_{\eta}^{N}(\pi(Q,e))=$$
$$(p-c-\lambda_1)Q+\lambda_1 Q^D-C(e)-$$
$$\Big(\frac{p-b}{\eta_1}+\frac{b}{\eta_2}\Big)\int_0^{Q-e}(Q-e-x)g(x)\mathrm{d}x.$$

根据一阶最优极值条件可得集中决策下的订货量Q_1^{N*}和促销量e_1^{N*}满足方程组

$$\begin{cases}G(Q_1^{N*}-e_1^{N*})=\eta_1\eta_2\dfrac{p-c-\lambda_1}{\eta_2(p-b)+\eta_1 b},\\ C'(e_1^{N*})=p-c-\lambda_1.\end{cases}$$

根据式(14)能够得出突发事件发生后,分散决策下零售商的订货量Q_1^N和促销量e_1^N满足方程组

$$\begin{cases}G(Q_1^N-e_1^N)=\eta_1\dfrac{p-w}{p-b},\\ C'(e_1^N)=\dfrac{p-w}{1-\alpha}.\end{cases}$$

令Q_1^N等于Q_1^{N*},且e_1^N等于e_1^{N*},可得市场随机需求变大后,调整后的契约参数b、w_1^N和α_1^N应满足

$$b=\frac{p\eta_1(w_1^N-c-\lambda_1)}{\eta_2(p-w_1^N)+\eta_1(w_1^N-c-\lambda_1)},\tag{16}$$

$$1-\alpha_1^N=\frac{p-w_1^N}{p-c-\lambda_1}.\tag{17}$$

2) 市场随机需求变小的协调策略.

与市场随机需求变大的协调策略类似,市场随机需求变小后,零售商的订货量Q_2^{N*}和促销量e_2^{N*}满足方程组

$$\begin{cases}G(Q_2^{N*}-e_2^{N*})=\eta_1\eta_2\dfrac{p-c+\lambda_2}{\eta_2(p-b)+\eta_1 b},\\ C'(e_2^{N*})=p-c+\lambda_2.\end{cases}$$

契约参数b、w_2^N和α_2^N满足

$$b=\frac{p\eta_1(w_2^N-c+\lambda_2)}{\eta_2(p-w_2^N)+\eta_1(w_2^N-c+\lambda_2)},\tag{18}$$

$$1-\alpha_2^N=\frac{p-w_2^N}{p-c+\lambda_2}.\tag{19}$$

总结上述求解结果可知,最优订货量Q^{N*}、促销量e^{N*}和契约参数分别为:当$G(x)<F(x)$且$Q_1^{N*}>Q^{D*}$时,$Q^{N*}=Q_1^{N*}$,$e^{N*}=e_1^{N*}$,$w^*=w_1^N$且$\alpha^N=\alpha_1^N$;当$G(x)>F(x)$且$Q_2^{N*}<Q^{D*}$时,$Q^{N*}=Q_2^{N*}$,$e^{N*}=e_2^{N*}$,$w^*=w_2^N$且$\alpha^N=\alpha_2^N$;其他情况下,订货量、促销量和契约参数保持不变,即$Q^{N*}=Q^{D*}$,$e^{N*}=e^{D*}$,$w^*=w^D$且$\alpha^N=\alpha^D$.

可以看出,在联合促销和常规突发事件下,原生产计划、促销决策和契约参数均具有一定的鲁棒性.

另外,在回购契约中,回购价格应低于产品的批发价格,由不等式$b<w_1^N$,$b<w_2^N$和$b<w^D$可知,常规突发事件下,回购契约实现供应链协调的必要条件是回购价格b满足不等式

$$\frac{b-c+\lambda_2}{b}<\frac{\eta_2}{\eta_1}.$$

可以看出:当$\eta_2\geqslant\eta_1$,即零售商比制造商更为风险规避时,回购价格不受两企业风险规避程度影响;当$\eta_2<\eta_1$,即制造商比零售商更为风险规避时,η_2/η_1越小,则回购价格的可行域越小.

2.5 非常规突发事件的协调模型

以上研究假设产品的销售价格p外生且不发生变化,但突发事件的发生不仅可能导致市场随机需求发生扰动,还可能使得价格p变成内生变量. 文献[7-8]将突发事件发生后价格转变为内生变量的情况定义为非常规突发事件. 依据文献[7-8]的定义,非常规突发事件后,产品价格p_0为

$$p_0=p+a(x+e-Q).\tag{20}$$

假设非常规突发事件后,市场随机需求x的概率密度和分布函数变为$h(x)$和$H(x)$.

命题4 非常规突发事件后,零售商和制造商的条件风险价值分别为

$$\mathrm{CVaR}_{\eta_1}^{H}(\pi_r(Q,e))=$$
$$(p-w)Q-(1-\alpha)C(e)-$$
$$\frac{p-b}{\eta_1}\int_0^{Q-e}H(x)\mathrm{d}x+A(Q,e),\tag{21}$$

$$\mathrm{CVaR}_{\eta_2}^{H}(\pi_m(Q,e))=$$
$$(w-c)Q-\alpha C(e)-\frac{b}{\eta_2}\int_0^{Q-e}(Q-e-x)\mathrm{d}H(x)-$$
$$\lambda_1(Q-Q^{D*})^+-\lambda_2(Q^{D*}-Q)^+,\tag{22}$$

其中$A(Q,e)$为

$$A(Q,e)=$$
$$aH^{-1}(\eta_1)Q+2(1-\alpha)C(e)-aQ(Q-e)-$$
$$\frac{1}{\eta_1}\int_0^{Q-e}2a(x+e-Q)H(x)\mathrm{d}x-$$
$$\frac{1}{\eta_1}aQ\int_0^{H^{-1}(\eta_1)}H(x)\mathrm{d}x.$$

证明 式(22)的证明与命题1类似,这里证明式(21). 与命题1的证明类似,令

$$z_r=v+\frac{1}{\eta_1}\mathrm{E}[\min(\pi_r(Q,e)-v,0)],$$

可得

$$z_r=$$
$$v-\frac{1}{\eta_1}\int_0^{Q-e}(v-((a(x+e)+p-b-aQ)x+$$
$$(b-w)Q-(1-\alpha)C(e)))^+\mathrm{d}H(x)-$$

$$\frac{1}{\eta_1}\int_{Q-e}^{+\infty}(v-(a(x+e)Q-aQ^2+(p-w)Q-(1-\alpha)C(e)))^+\mathrm{d}H(x).$$

下面分3种情况讨论v的取值.

1) $v\leqslant(b-w)Q-(1-\alpha)C(e)$.

此时$z_r=v$,因此v的取值为$(b-w)Q-(1-\alpha)C(e)$,即$z_r=(b-w)Q-(1-\alpha)C(e)$,则$\partial z_r/\partial Q=b-w$, $\partial z_r/\partial e=-(1-\alpha)C'(e)$. 这种情况下,零售商将无限订货,促销量为零. 这与现实情况不符.

2) $(b-w)Q-(1-\alpha)C(e)<v<(p-w)Q-(1-\alpha)C(e)$.

此时z_r的取值为

$$z_r=v-\frac{1}{\eta_1}\int_0^{x_1(v)}(2a(x+e)+p-b-aQ)H(x)\mathrm{d}x.$$

其中$x_1(v)$为如下方程的正根:

$$a(x+e)^2+(x+e)(p-b-aQ)+(b-w)Q-v-(1-\alpha)C(e)=0,$$

$x_1(v)$的取值范围是$(0,Q-e)$. 此时,z_r对v的一阶导数为

$$\frac{\partial z_r}{\partial v}=1-\frac{1}{\eta_1}H(x_1(v)).$$

3) $(p-w)Q-(1-\alpha)C(e)\leqslant v$.

此时z_r的取值和对v的一阶导数分别为

$$z_r=v-\frac{1}{\eta_1}\int_0^{Q-e}(2a(x+e)+p-b-aQ)H(x)\mathrm{d}x-\frac{1}{\eta_1}\int_{Q-e}^{Q-e+\frac{v-(p-w)Q-(1-\alpha)C(e)}{aQ}}aQH(x)\mathrm{d}x,$$

$$\frac{\partial z_r}{\partial v}=1-\frac{1}{\eta_1}H\Big(Q-e+\frac{v-(p-w)Q-(1-\alpha)C(e)}{aQ}\Big).$$

根据极限的定义易证z_r和$\partial z_r/\partial v$均为v的连续函数. $v=(p-w)Q-(1-\alpha)C(e)$时,$\partial z_r/\partial Q$为$1-(1/\eta_1)\times H(Q-e)$. 若此时$H(Q-e)>\eta_1$,则$v$的最优取值区间为$((b-w)Q-(1-\alpha)C(e),(p-w)Q-(1-\alpha)C(e))$;若$H(Q-e)\leqslant\eta_1$,则$v$的最优取值区间为$[(p-w)Q-(1-\alpha)C(e),+\infty)$. 假设$H(Q-e)>\eta_1$,此时$z_r$对$Q$的一阶导数为

$$\frac{\partial z_r}{\partial Q}=-a[H^{-1}(\eta_1)+e]-b+\frac{a}{\eta_1}\int_0^{H^{-1}(\eta_1)}H(x)\mathrm{d}x,$$

$$\frac{\partial z_r}{\partial e}=2a[H^{-1}(\eta_1)+e]+(p-b-aQ)-\frac{2a}{\eta_1}\int_0^{H^{-1}(\eta_1)}H(x)\mathrm{d}x-(1-\alpha)C'(e),$$

其海塞矩阵不负定,因此不存在极大值,这与现实情况不符. 所以$H(Q-e)$大于η_1的假设不合理,$H(Q-e)\leqslant\eta_1$且v的最优取值区间为$[(p-w)Q-(1-\alpha)\times C(e),+\infty)$是成立的. 令$\partial z_r/\partial v$为零可得,$v$的最优取值为$(p-w+aH^{-1}(\eta_1))Q-aQ(Q-e)+(1-\alpha)C(e)$,代入零售商的条件风险值公式可得式(21). □

由命题4可知,非常规突发事件后,如果不修正契约参数,则零售商、制造商和供应链整体条件风险值的关系为

$$\mathrm{CVaR}_{\eta_1}^H(\pi_r(Q,e))=(1-\alpha^D)\mathrm{CVaR}_\eta(\pi(Q,e))+(1-\alpha^D)(\lambda_1(Q-Q^{D*})^++\lambda_2(Q^{D*}-Q)^+)+\alpha A(Q,e),$$

$$\mathrm{CVaR}_{\eta_2}^H(\pi_m(Q,e))=\alpha^D\mathrm{CVaR}_\eta(\pi(Q,e))-(1-\alpha^D)(\lambda_1(Q-Q^{D*})^++\lambda_2(Q^{D*}-Q)^+)+(1-\alpha^D)A(Q,e).$$

因此,零售商、制造商和供应链整体的条件风险值不再呈现出线性关系,供应链偏离了协调状态. 根据式(21)和(22)可得非常规突发事件后,供应链的条件风险值为

$$\mathrm{CVaR}_\eta^H(\pi(Q,e))=(p-c)Q-C(e)-\Big(\frac{p-b}{\eta_1}+\frac{b}{\eta_2}\Big)\int_0^{Q-e}H(x)\mathrm{d}x+A(Q,e)-\lambda_1(Q-Q^{D*})^+-\lambda_2(Q^{D*}-Q)^+.$$

命题5　非常规突发事件下将批发价格调整为w^H后,供应链可重新回到协调状态. w^H计算公式为

$$w^H=w^D+\frac{1-\alpha^D}{Q}(\lambda_1(Q-Q^{D*})^++\lambda_2(Q^{D*}-Q)^+)+\frac{\alpha^D}{Q}A(Q,e).\tag{23}$$

证明　将w^H代入式(21)和(22)可得

$$\mathrm{CVaR}_{\eta_1}^H(\pi_r(Q,e))=(1-\alpha^D)\mathrm{CVaR}_\eta^H(\pi(Q,e)),$$

$$\mathrm{CVaR}_{\eta_2}^H(\pi_m(Q,e))=\alpha^D\mathrm{CVaR}_\eta^H(\pi(Q,e)).$$

因此,批发价格调整后,零售商、制造商和供应链整体的条件风险值呈线性关系,此时供应链重新达到协调状态. □

由命题5可以看出,非常规突发事件下,能够通过调整批发价格使分散决策下的订货量和促销量与集中决策相同,同时不需要调整促销成本分担比例.

集中决策下,由一阶最优极值条件可得,当$Q>Q^{D*}$时的订货量Q_1^{H*}与促销量e_1^{H*}满足的方程组为

$$\begin{cases}p-c-\lambda_1+aH^{-1}(\eta_1)-\dfrac{a}{\eta_1}\displaystyle\int_0^{H^{-1}(\eta_1)}H(x)\mathrm{d}x-aQ_1^{H*}+ae_1^{H*}+(1-2\alpha^D)C'(e_1^{H*})=0,\\ aQ_1^{H*}+(1-2\alpha^D)C'(e_1^{H*})+\Big(\dfrac{p-b}{\eta_1}+\dfrac{b}{\eta_2}\Big)\times H(Q_1^{H*}-e_1^{H*})-\dfrac{2a}{\eta_1}\displaystyle\int_0^{Q_1^{H*}-e_1^{H*}}H(x)\mathrm{d}x=0.\end{cases}\tag{24}$$

当$Q < Q^{D*}$时,订货量Q_2^{H*}与促销量e_2^{H*}满足的方程组为

$$\begin{cases} p-c+\lambda_2+aH^{-1}(\eta_1)-\dfrac{a}{\eta_1}\displaystyle\int_0^{H^{-1}(\eta_1)}H(x)\mathrm{d}x- \\ aQ_2^{H*}+ae_2^{H*}+(1-2\alpha^D)C'(e_2^{H*})=0, \\ aQ_2^{H*}+(1-2\alpha^D)C'(e_2^{H*})+\left(\dfrac{p-b}{\eta_1}+\dfrac{b}{\eta_2}\right)\times \\ H(Q_2^{H*}-e_2^{H*})-\dfrac{2a}{\eta_1}\displaystyle\int_0^{Q_2^{H*}-e_2^{H*}}H(x)\mathrm{d}x=0. \end{cases} \tag{25}$$

由于订货量和促销量的解析解不易求出,且价格变为内生变量,由需求的扰动情况无法推测出订货量和价格是变大或变小,本文在算例部分使用Matlab进行编程求解,最优订货量Q^{H*}、促销量e^{H*}、契约参数w^H以及风险价值的求解过程如下.

Step 1: 在$Q_1^{H*} > Q^{D*}$和$Q_2^{H*} < Q^{D*}$的条件下分别求解方程组(24)和(25),求得Q_1^{H*}、e_1^{H*}、Q_2^{H*}和e_2^{H*},方程组(24)和(25)可能无解.

Step 2: 1) 如果方程组(24)和(25)均无解,则有$Q^{H*}=Q^{D*}$,e^{H*}满足方程

$$p-c+aH^{-1}(\eta_1)-\frac{a}{\eta_1}\int_0^{H^{-1}(\eta_1)}H(x)\mathrm{d}x-$$
$$aQ^{D*}+ae^{H*}+(1-2\alpha^D)C'(e^{H*})=0;$$

2) 如果方程组(24)有解且方程组(25)无解,则有$Q^{H*}=Q_1^{H*}$,$e^{H*}=e_1^{H*}$;

3) 如果方程组(24)无解且方程组(25)有解,则有$Q^{H*}=Q_2^{H*}$,$e^{H*}=e_2^{H*}$;

4) 如果方程组(24)和(25)均有解,则通过对比$\mathrm{CVaR}_\eta^H(\pi(Q_1^{H*},e_1^{H*}))$与$\mathrm{CVaR}_\eta^H(\pi(Q_2^{H*},e_2^{H*}))$的大小确定$Q^{H*}$和$e^{H*}$.

Step 3: 根据式(20)求解契约参数w^H.

Step 4: 根据式(21)和(22)求解制造商和零售商的风险价值.

3 算例分析

为了进一步分析突发事件下订货决策的稳定性、风险规避程度对契约的影响和回购契约的有效性,本文给出如下算例. 模型中参数的取值为$p=100,c=25,b=40,\lambda_1=25,\lambda_2=15,a=0.5,\eta_1=0.7,\eta_2=0.8$. 促销成本$C(e)$取$5e^2$. 需求服从正态分布,不同情况下,市场需求信息分别为: 1) 突发事件发生前,市场随机需求$x\sim N[150,10^2]$; 2) 常规突发事件下,$x\sim N[\mu_N,10^2]$,其中$\mu_N\in[120,180]$; 3) 非常规突发事件下,随机需求扰动比常规突发事件大,满足$x\sim N[\mu_H,10^2]$,其中$\mu_H\in[50,120)\bigcap(180,250]$. 本文在模型建立和求解过程中假设随机需求的范围是$(0,+\infty)$,正态分布的需求在实数范围,模型中给出的结论和求解方法依然适用.

1) 订货决策的稳定性分析.

图1为常规突发事件下最优订货量随需求扰动的变化情况.

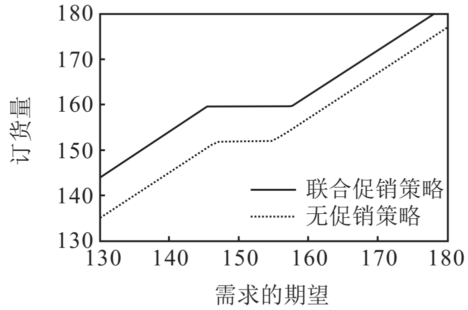

图1 常规突发事件下的订货量

从图1可以看出,常规突发事件下的订货决策具有一定的鲁棒性,当需求扰动的范围较小时,零售商不需要调整订货量,但当需求扰动较大时,订货量随需求的增加而增大. 同时可以发现联合促销策略不仅能够提高订货量,还能够增强订货量的稳定性,帮助制造商和零售商更好地应对常规突发事件.

图2为非常规突发事件下最优订货量随需求扰动的变化情况.

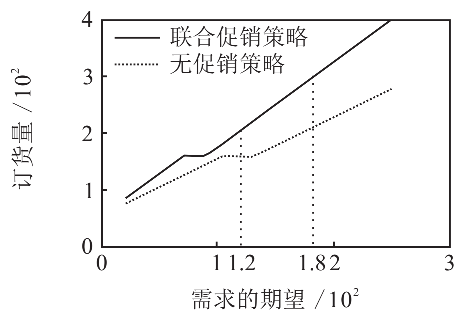

图2 非常规突发事件下的订货量

图2表明,非常规突发事件下,虽然基准模型下的订货量仍具有一定的稳定性,但订货量并不一定在需求降低时减小.

在本算例中,价格-订货量弹性$a < 1$,订货量的变动对价格影响较小,故零售商有动机通过增加订货量实现“薄利多销”,只有需求很低时才会降低订货量.

2) 风险规避程度对批发价格的影响.

批发价格是本文契约的关键参数,基准模型和常规突发事件下,批发价格与促销成本承担比例呈线性关系,非常规突发事件下促销成本承担比例则不需要做出调整,因此这里重点分析风险规避对不同情况下批发价格的影响.

基准模型及非常规突发事件下风险规避程度对

批发价格的影响如图3和图4所示.

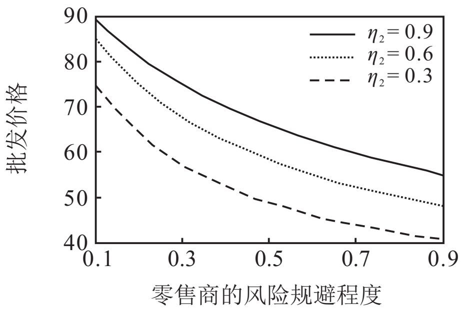

图 3　基准模型下风险规避程度对批发价格的影响

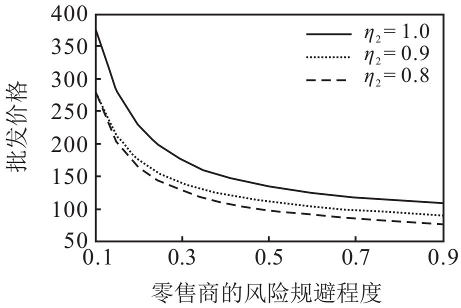

图 4　非常规突发事件下风险规避程度对批发价格的影响($\mu_H=180$)

从图3和图4可以看出,基准模型和非常规突发事件下,零售商越风险规避,批发价格越高,制造商越风险规避,批发价格越低,这与已有文献的研究结论不同. 文献[20]以供应链期望利润最大化为目标构建模型,发现零售商越风险规避,订货量越低,为实现供应链协调,制造商会降低批发价格或提升回购价格刺激零售商订货. 但本文以供应链整体风险价值为目标,零售商越风险规避,集中决策下的订货量越低,以$\eta_2=0.8,\mu_H=180$为例,当η_1分别为0.8, 0.6, 0.4和0.2时,基准下的最优订货量分别为160.1,157.5,154.3和149.6,非常规突发事件下的最优订货量分别为464.4, 360.9, 208.1和106.9,最优订货量的下降进一步导致制造商提升批发价格. 同理,制造商越风险规避,集中决策下的订货量越高,以$\eta_1=0.2,\mu_H=180$为例,当η_2取值分别为0.8, 0.6, 0.4和0.2时,基准下的最优订货量分别为149.6, 161.3, 169.1和174.9,非常规突发事件下的最优订货量分别为106.9, 134.3, 204.9和399.8,最优订货量的下降会进一步导致制造商提升批发价格. 由式(16)和(18)可知,常规突发事件和基准模型下批发价格的变化趋势类似,这里不再赘述.

3) 回购契约的有效性分析.

为了研究回购契约在突发事件下的有效性,给出表1,其中μ为随机需求的均值. 在无突发事件的情况下,回购价格、批发价格和促销成本分担比例分别为40、58和0.46,常规突发事件和非常规突发事件导致需求发生扰动后,如果不对这3个契约参数进行调整,则供应链处于失调状态. 使用调整后的回购契约能够使供应链重新回到协调状态. 另外,在调整后的回购契约下,零售商的订货量和供应链整体的风险价值更高,这进一步说明对契约参数进行调整能够帮助供应链企业有效地应对突发事件.

表 1　回购契约下的决策变量和契约参数

3种情况	采用基准的回购契约					采用调整后的回购契约					
	μ	Q	e	CVaR_η	是否协调	Q	e	CVaR_η	w	α	是否协调
无突发事件	150	159.4	7.5	11 021.5	是						
常规突发事件	120	104.7	14.1	9 121.4	否	134.1	9.2	10 262.1	44.6	0.38	是
	180	162.5	7.3	10 483.5	否	182.1	4.7	12 613.4	84.6	0.69	是
非常规突发事件	50	89.7	40.9	3 972.5	否	128.1	11.4	5 117.2	52.1	0.46	是
	250	318.9	47.7	13 778.3	否	398.7	59.4	14 668.4	66.4	0.46	是

4　结　论

本文在制造商和零售商实施联合促销策略且均为风险规避型企业的背景下,使用CVaR度量企业的风险价值,基于回购契约分别构建了无突发事件、常规突发事件和非常规突发事件下的供应链协调模型,并通过算例验证了模型的有效性和可行性. 这些模型能够对订货量、促销量和契约参数进行有效决策. 研究得到如下结论:

1) 常规突发事件下,零售商的订货量、促销量和契约参数具有一定的鲁棒性,当需求的扰动较小时,决策变量不需要改变. 但当需求的扰动较大时,供应链协调将被打破,对决策变量和契约参数进行调整能够使供应链重新达到协调状态,回购价格的可行域受制造商和零售商风险规避程度比例的影响. 同时,联合促销决策能够增强决策变量的稳定性.

2) 非常规突发事件下,零售商的订货量同样具有一定的鲁棒性,联合促销决策能够有效提高订货量,但只要需求发生扰动,供应链协调即被打破,需要对批发价格进行调整来协调供应链.

3) 常规和非常规突发事件下,零售商越风险规

避,批发价格越高,制造商越风险规避,批发价格越低.

以上结论能够为企业管理突发事件提供一定的指导. 进一步的研究内容可以考虑突发事件导致多因素同时扰动,以及多个零售商和制造商通过价格和促销决策进行竞争的情况.

参考文献(References)

[1] Causen J, Hansen J, Larsen J. Disruption management[J]. ORPMS Today, 2001, 28(5): 40-43.

[2] Qi X, Bard J F, Yu G. Supply chain coordination with demand disruptions[J]. Omega, 2004, 32(4): 301-312.

[3] Huang C, Yu G, Wang S, et al. Disruption management for supply chain coordination with exponential demand function[J]. Acta Mathematica Scientia, 2006, 26(4): 655-669.

[4] Xiao T, Qi X. Price competition, cost and demand disruptions and coordination of a supply chain with one manufacturer and two competing retailers[J]. Omega, 2008, 36(5): 741-753.

[5] Lei D, Li J, Liu Z. Supply chain contracts under demand and cost disruptions with asymmetric information[J]. Int J of Production Economics, 2012, 139(1): 116-126.

[6] 吴忠和, 陈宏, 梁翠莲. 时间约束下不对称信息鲜活农产品供应链应对突发事件协调模型[J]. 中国管理科学, 2015, 23(6): 126-134.
(Wu Z H, Chen H, Liang C L. Supply chain disruptions coordination model of fresh agricultural products under time constraints with asymmetric information[J]. Chinese J of Management Science, 2015, 23(6): 126-134.)

[7] 刘浪, 石岩. 回购契约下供应链协调应对非常规突发事件[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2014, 16(5): 108-113.
(Liu L, Shi Y. Supply chain coordination response to unconventional emergencies under buy back contract[J]. J of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition, 2014, 16(5): 108-113.)

[8] 刘浪, 石岩. 回购契约应对非常规突发事件的三级供应链协调[J]. 系统管理学报, 2015, 24(2): 296-303.
(Liu L, Shi Y. Coordination of three-stage supply chain with unconventional disruptions through buy-back contract[J]. J of Systems & Management, 2015, 24(2): 296-303.)

[9] Xiao T, Yu G, Sheng Z, et al. Coordination of a supply chain with one-manufacturer and two-retailers under demand promotion and disruption management decisions[J]. Annals of Operations Research, 2005, 135(1): 87-109.

[10] Chen K, Xiao T. Demand disruption and coordination of the supply chain with a dominant retailer[J]. European J of Operational Research, 2009, 197(1): 225-234.

[11] 覃艳华, 曹细玉, 陈本松. 努力弹性系数与成本同时扰动的闭环供应链协调应对研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23(5): 41-47.
(Tan Y H, Cao X Y, Chen B S. Closed-loop supply chain coordination when effort elasticity coefficient and production cost disruptions simultaneously[J]. Chinese J of Management Science, 2015, 23(5): 41-47.)

[12] 彭静, 林杰. 需求扰动和联合促销下双渠道供应链的竞争与协调[J]. 预测, 2015, 34(6): 62-68.
(Peng J, Lin J. Competing and coordination strategies for dual-channel supply chain with demand disruption and cooperative promotion[J]. Forecasting, 2015, 34(6): 62-68.)

[13] 冯花平, 黄俊莲, 李光杰. 基于促销投资的供应链应急协调研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1249-1252.
(Feng H P, Huang J L, Li G J. Study on supply chain disruption coordination based on sales promotion[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(4): 1249-1252.)

[14] Tomlin B. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks[J]. Management Science, 2006, 52(5): 639-657.

[15] Xanthopoulos A, Vlachos D, Iakovou E. Optimal newsvendor policies for dual-sourcing supply chains: A disruption risk management framework[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(2): 350-357.

[16] Arterzer P D, Delbaen F, Eber J M, et al. Coherent measures of risk[J]. Mathematical Finance, 1999, 9(3): 203-228.

[17] 于辉, 邓亮, 孙彩虹. 供应链应急援助的CVaR模型[J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 68-75.
(Yu H, Deng L, Sun C H. A CVaR model of supply chain emergency assistance[J]. J of Management Sciences in China, 2011, 14(6): 68-75.)

[18] 朱传波, 季建华, 曾顺秋. 供应突发事件下基于CVaR的供应链订货决策及协调[J]. 管理工程学报, 2015, 29(2): 202-209.
(Zhu C B, Ji J H, Zeng S Q. Supply chain ordering decision and coordination mechanism based on CVaR under supply disruption[J]. J of Industrial Engineering and Engineering Management, 2015, 29(2): 202-209.)

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

[20] 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.)

(责任编辑：闫 妍)