

基于 CVaR 的供应链契约及其实验研究^①

简惠云, 许民利

(中南大学商学院, 长沙 410083)

摘要: 越来越多的文献把风险偏好纳入供应链契约模型, 而实验研究依然侧重于检验风险中性假设下的契约理论, 鲜有风险偏好下的契约理论模型与实证相结合的研究. 为给具有不同风险偏好的零售商提供合适的风险决策支持工具, 以批发价契约与收益共享契约为例, 借用广泛使用的金融风险控制工具——CVaR, 建立了零售商的最优订购决策模型, 然后通过实验对模型进行了检验. 研究发现, 基于 CVaR 模型构建的回归方程能很好地拟合实验数据, 零售商具有显著的风险规避或风险寻求特征, 同时 CVaR 决策支持工具能显著减小订购量的决策偏差, 并有助于减小订购量的波动程度, 从而证实了模型的实际应用价值.

关键词: 供应链契约; 订购决策; 风险偏好; 条件风险值; 实验研究

中图分类号: F224; F274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2015)10-0056-13

0 引言

在供应链等运作管理(OM)研究中, 大多数模型以人的风险中性假设为前提, 然而近年来, 运作管理领域的学者们开始意识到, 依靠这些模型和理论会导致系统性决策偏差^[1-3]. 理论和实践的差距促使“行为运作管理”(behavioral operations management, BOM)研究的兴起, 并日益受到国内外学术界的高度重视. BOM理论认为, 人是有限理性的, 具有个体认知偏差以及行为偏好^[4, 5]. 行为运作的一个重要任务就是调查系统偏差对运作性能造成的影响, 并探究减小这些偏差的应对措施^[5, 6]. 本文拟以供应链契约为研究对象, 分析零售商具有风险偏好(risk preference)时的决策问题, 并通过实验检验理论模型的有效性以及风险控制工具在减小系统决策偏差中的作用.

目前, 考虑决策者风险偏好的供应链契约文献也逐渐增多. Gan等^[7]针对供应商风险中性、

零售商风险规避(risk-averse)的供应链, 设计了一个满足零售商下行风险约束的协调契约, 并用风险价值(value at risk, VaR)度量下行风险. Chiu等^[8]考虑了零售商的风险规避行为, 利用均值-方差(mean-variance, MV)方法设计了柔性增量返利契约来协调供应链. Choi等^[9]也在MV框架下分析了基于回购契约的供应链协调和风险控制问题. 姚忠^[10]研究了零售商具有下行风险约束时的退货合同, 分析了退货策略对单周期供应链的协调性. 在风险管理工具中, 条件风险值(conditional value at risk, CVaR)较VaR及MV等风险度量方法更能体现潜在风险, 兼有良好的计算特性, 因此它在风险测度中也广受关注和使用. 叶飞等^[11]用CVaR度量农户的风险收益, 研究订单型农业供应链的协调机制. 林强等^[12]利用CVaR工具建立了基于收益共享契约的供应链决策模型, 分析了供应链成员的风险规避程度对销售价格及收益共享份额等的影响. Hsieh和Lu^[13]针对零售

① 收稿日期: 2013-08-16; 修订日期: 2014-09-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171203); 国家社会科学基金资助项目(14BGL196); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2177).

作者简介: 简惠云(1971-), 女, 湖南桃源人, 博士, 讲师. Email: jianhuiyun@163.com

商具有竞争关系的供应链,研究了零售商的风险规避程度对制造商退货策略的影响.高文军等^[14]针对风险规避型零售商与制造商组成的两阶闭环供应链,建立了收益共享、费用共担契约下的 CVaR 模型,揭示了风险规避水平对供应链协调的影响.于辉等^[15]用 CVaR 刻画供应链在突发事件下的应急目标,分析了供应链合作伙伴在一定风险水平下的最优援助决策.Wu 等^[16]研究了风险规避的制造商与其上游供应商之间的期权契约,利用 CVaR 工具分析了制造商的最优采购决策.Ma 等^[17]以批发价契约为例,用 CVaR 度量风险,研究了具有风险规避零售商的供应链合作博弈.

上述文献中建立的供应链契约模型大都假定决策者风险规避.实际上,风险偏好除了风险中性和风险规避外,还有风险寻求(risk-taking).Jammerneegg 和 Kischka^[18]综合考虑了报童问题中决策者的风险规避和风险寻求行为,在目标函数中对低于和高于分位数的平均收益分别赋予不同的权重,通过权重因子来刻画人的风险偏好特征.邱若臻等^[19]也建立了包含风险规避和风险寻求特征的集成目标函数,并用在供应链回购契约的决策分析中.文献[18,19]并没有单独分析风险规避或风险寻求时的条件风险值,且构建的目标函数中含有风险水平和权重因子两个参数,决策的复杂性增加.于春云等^[20]以回购契约为例,研究了具有风险寻求特性的供应链优化与协调问题.

以上文献都只是从理论上建模分析,决策者行为是否与模型相符并没有得到证实.行为运作管理则强调从行为的角度研究 OM 问题,而实验是行为研究的一个重要工具.OM 理论可以通过精心设计的实验得到进一步测试、精炼和加强^[5].供应链契约领域的实验研究起源于“报童问题”,Schweitzer 和 Cachon^[2]在他们一个堪称经典的“报童问题”实验研究中发现,参与者的订购量与最优订购量存在系统性的决策偏差,订购量存在“拉向中心”(pull to center)效应.随后,Benzion 等^[21]、Bostian 等^[22]、Bolton 等^[23]和 Feng 等^[24]学者从不同的分析角度相继开展了报童问题的实验研究,他们的实验结果也都出现了强弱不等的“拉向中心”效应.Katok 和 Wu^[25]则把决策情境扩展到供应链契约中,对实验结果与风险

中性下的最优值进行了比较,并检验了零售商和供应商在不同契约机制下的决策差异.Wu^[26]在文献[25]的基础上,对实验进行了改进,契约参与方均由人扮演,研究了公平偏好对双方决策行为的影响.Wu 的实验设计中排除了风险偏好引起的决策偏差问题.Elahi 等^[6]以回购契约与收益共享契约为例,设计与实施了不同的实验方案,研究减小零售商决策偏差、提高供应链绩效的方法.

从现有研究来看,实验主要用来检验风险中性下的契约理论,并和认知心理学、社会心理学结合,探究决策行为偏离理论最优值的原因,如启发式、损失规避、锚定和缺货厌恶等.这些实验研究中,还未见从风险偏好角度对决策行为进行量化分析的文献.

与已有文献研究不同,本文考虑决策者具有风险规避或者风险寻求两种情形,借助 CVaR 工具,分别建立零售商具有风险规避或者风险寻求行为的供应链契约模型,并以此为理论基础,设计与实施实验,通过统计分析证实零售商风险规避或风险寻求特征的显著性以及 CVaR 风险控制工具在供应链契约决策环境下的有效性.

1 具有风险偏好零售商的条件风险值模型

1.1 问题描述及零售商风险中性时的最优决策

考虑一个由单个供应商、零售商组成的二级供应链,生产一种提前期长而销售季节短的短生命周期产品,市场需求 x 随机,取值区间为 $[A, B]$, $f(\cdot)$ 和 $F(\cdot)$ 分别为随机需求变量 x 的密度函数和分布函数.产品生产成本及售价分别为 c 和 p ,期末未售出产品残值 v 为 0,在一个销售周期内无补货机会,不考虑缺货惩罚.供应商假设为风险中性.

批发价契约下,供应商给定批发价格 w ,零售商对此做出最优反应,决定订购量 q .批发价契约中,供应商虽然不承担收益风险,但若零售商订购过少,供应商同样失去了销售机会,因此在供应商主导的供应链中,为了鼓励零售商多订购,增加双方利润,实现“双赢”,供应商也要求承担部分风

险,收益共享契约则是常见的“收益共享、风险共担”的契约.收益共享契约下,供应商一般以低于成本的价格把产品卖给零售商($w < c$),而零售商每售出一单位产品,需要向供应商返还 $r(c < r + w < p)$ 的利润.

记零售商风险中性时的最优订购量为 q_0^* (称为标杆值),由经典报童模型知 q_0^* 满足

$$F(q_0^*) = \frac{p - w - r}{p - r} \tag{1}$$

式(1)中,若 $r = 0$ 则为批发价契约,否则为收益共享契约.若供应商与零售商同属一个公司,在集中决策下,供应链系统的最优订购量 q_c^* 满足

$$F(q_c^*) = \frac{p - c}{p} \tag{2}$$

若零售商的最优订购量等于集中决策时的最优值 q_c^* ,则称供应链达到协调,此时供应链系统期望收益最大.收益共享契约下,令 $q_0^* = q_c^*$,可得系统协调时收益共享价格 r 和批发价格 w 之间的关系满足

$$r^* = p - p \cdot \frac{w}{c} \tag{3}$$

1.2 批发价契约下零售商具有风险偏好时的最优决策

设 $g(q, x)$ 为订购量 q 、需求 x 下零售商的随机利润,则有

$$g(q, x) = p \min\{x, q\} - wq \tag{4}$$

因为需求 x 的值随机,显然 $g(q, x)$ 也是一个随机变量.设 $Z = g(q, x)$,则 Z 的分布函数为: $G(z) = P\{Z \leq z\}$,其中 z 为目标利润.给定任意风险水平 $\beta \in (0, 1]$,利润 Z 的风险价值为: $VaR_\beta(Z) = \min\{z \mid G(z) \geq \beta\}$, VaR_β 也称为 β 分位数利润.根据零售商的风险态度,其条件风险值及最优决策分为两种情况:

1) 零售商风险规避时

给定 $\beta \in (0, 1]$,条件风险值 $CVaR_\beta Z$ 定义为

$$CVaR_\beta Z = E(Z \mid Z \leq VaR_\beta) = \frac{1}{\beta} \int_{Z \leq VaR_\beta} zg(z) dz \tag{5}$$

式(5)中 $g(z)$ 为随机变量 Z 的密度函数. $CVaR_\beta Z$ 就是求解比 VaR_β 还小的利润平均值,决策者对高于 VaR_β 的利润部分不加以控制,仅以低于 VaR_β 部分的价值大小作为决策准则.为解决

$CVaR$ 定义中因包含 VaR_β 函数而求解困难的问题, Rockafellar 和 Uryasev^[27, 28]提出了具有良好计算特性的 $CVaR$ 求解公式,按照该方法,式(5)可等价求解

$$CVaR_\beta Z = \max_{VaR_\beta \in R} \{ VaR_\beta - \frac{1}{\beta} E [VaR_\beta - Z]^+ \} \tag{6}$$

其中 $E [VaR_\beta - Z]^+$ 是 $[VaR_\beta - Z]^+$ 的期望值.根据式(6),对 VaR_β 和决策变量 q 分别求解极值,可以得到风险水平为 β 时的最优决策 q^* 及其条件风险值,鉴于已有文献有类似的分析过程^[14, 17],这里不再推导,直接写出公式如下

$$q^* = F^{-1}(\frac{p-w}{p}\beta), \beta \in (0, 1] \tag{7}$$

$$CVaR_\beta Z \Big|_{q=q^*} = (p-w) \cdot q - \frac{p}{\beta} \int_A^q F(x) dx \tag{8}$$

从式(7)知,风险水平 β 越小,订购量越小,零售商的风险规避程度越高.当 $\beta = 1$ 时, $CVaR_{\beta=1} Z = E[Z]$,此时条件风险值与期望利润相等,式(7)即为风险中性时的最优订购量公式,因此风险中性可看作风险规避的特例.由于 $\beta \leq 1$,故风险规避时,最优订购量总是小于等于风险中性时的值,即 $q^* \leq q_0^*$.

2) 零售商风险寻求时

风险规避并不能反映所有人在所有情况下的风险态度,也有部分是风险寻求的.不改变 VaR_β 的定义,某个决策者,如果他决策时仅考虑高于 VaR_β 的利润部分,并把其作为决策准则,而对低于 VaR_β 的利润部分不加以控制,则他是一个风险寻求者.为了与风险规避下的条件风险值相区别,风险寻求下的条件风险值称为条件风险寻求值(conditional value at risk-taking, $CVaRT$).借鉴供应链契约研究领域为数不多的考虑风险寻求的文献^[18-20],本文给出 $CVaRT$ 的定义

$$CVaRT_\beta Z = E(Z \mid Z \geq VaR_\beta) = \frac{1}{1-\beta} \int_{Z \geq VaR_\beta} zg(z) dz, \beta \in [0, 1] \tag{9}$$

仿照风险规避时的分析思路,按照文献[27, 28]提出的方法,虽然也可求出风险寻求下的条件风险值,但由于文献[27, 28]提出的 $CVaR$ 求解公式主要

是针对决策者风险规避,若转化为风险寻求情形,需要重新分析求解 CVaR 的一般公式,进一步应用于供应链契约决策中,还需对风险价值 VaR_β 求极值,得到不含有 VaR_β 的 $CVaRT_\beta Z$ 表达式,推导过程极其繁琐。下面给出一种简洁、易懂的 $CVaRT_\beta Z$ 求解方法,该方法以风险规避的条件风险值为基础,根据风险规避与风险寻求的条件风险值定义以及二者与期望利润之间的关系,方便地推导出任意订购量和风险水平下的 CVaRT 表达式,进而得到最优决策。

由风险规避与风险寻求的条件风险值定义,可以发现 $CVaR_\beta Z$ 、 $CVaRT_\beta Z$ 及期望利润 $E[Z]$ 三者之间满足如下关系

$$\beta CVaR_\beta Z + (1 - \beta) CVaRT_\beta Z = E[Z] \quad (10)$$

仿照文献 [17] 的分析,可以推导出批发价契约下,风险规避的零售商在任意风险水平 β 及订购量 q 下的条件风险值为

$$CVaR_\beta Z = \begin{cases} \frac{1}{\beta} \int_A^{F^{-1}(\beta)} (px - wq) f(x) dx, & q \geq F^{-1}(\beta) \\ \frac{1}{\beta} \left\{ \int_A^q (px - wq) dF(x) + \int_q^{F^{-1}(\beta)} (p - w) q dF(x) \right\}, & q < F^{-1}(\beta) \end{cases} \quad (11)$$

易知 $E[Z] = p \left[\int_A^q x dF(x) + \int_q^B q dF(x) \right] - wq$ 结合式 (10),可得风险寻求的零售商在任意风险水平 β 及订购量 q 下的条件风险寻求值为

$$CVaRT_\beta Z = \begin{cases} \frac{1}{1 - \beta} \left\{ \int_{F^{-1}(\beta)}^q (px - wq) dF(x) + \int_q^B (p - w) q dF(x) \right\}, & q \geq F^{-1}(\beta) \\ \frac{1}{1 - \beta} \int_{F^{-1}(\beta)}^B (p - w) q f(x) dx, & q < F^{-1}(\beta) \end{cases} \quad (12)$$

上式对决策变量 q 求极值,可得风险水平 β 下的最优订购量 q^* 满足

$$F(q^*) = \frac{p - w}{p} + \beta \frac{w}{p} \quad (13)$$

由于 $F(q^*) = \frac{p - w}{p} + \beta \frac{w}{p} = \beta + \frac{p - w}{p} (1 - \beta) \geq \beta$ 结合式 (12),可得风险寻求的零售商在订购 q^* 时的条件风险寻求值为

$$CVaRT_\beta Z |_{q=q^*} = \frac{1}{1 - \beta} \left\{ \int_{F^{-1}(\beta)}^q (px - wq) \times dF(x) + \int_q^B (p - w) q dF(x) \right\} \quad (14)$$

Jammernegg 和 Kischka^[18] 构建的集成目标函数中,若高利润部分权重设为 1,则决策人是完全风险寻求的,其最优订购量公式与式 (13) 完全一致。

从式 (13) 知,当风险水平 β 越大,最优订购量越大,零售商的风险寻求程度越高。特殊地,当 $\beta = 0$ 时,对任意的 q ,有 $CVaRT_{\beta=0} Z = E[Z]$,即条件风险值等于期望利润,最优订购量 q^* 满足:

$$F(q^*) = \frac{p - w}{p}$$

这恰是风险中性时的最优决策公式。因此,风险中性也可看作是风险寻求的特例。由于 $\beta \geq 0$,故风险寻求下零售商的最优订购量总是大于等于风险中性时的值,即 $q^* \geq q_0^*$ 。

1.3 收益共享契约下零售商具有风险偏好时的最优决策

收益共享契约下,设 $h(q, x)$ 为零售商在订购量 q 、需求 x 时的随机利润,则有

$$h(q, x) = (p - r) \min\{x, q\} - wq \quad (15)$$

比较式 (4) 与式 (15),可以看出,零售商的随机利润表达式中,批发价契约下产品销量前的系数为售价 p ,而在收益共享契约中变为 $p - r$,其他均相同。由于收益共享契约下,零售商每售出一单位产品,需要向供应商返还 r 的利润,相当于零售商面对的市场售价仅为 $p - r$,因此收益共享契约下的最优决策及条件风险值公式可以借鉴批发价契约下的相应公式,而不必重新推导。

零售商风险规避时,在风险水平 β 下的最优决策及条件风险值分别为

$$F(q^*) = \frac{p - r - w}{p - r} \beta, \text{ 其中 } \beta \in (0, 1], w < c \quad (16)$$

$$CVaR_\beta Z |_{q=q^*} = (p - r - w) \cdot q - \frac{1}{\beta} (p - r) \int_A^q F(x) dx \quad (17)$$

类似地,零售商风险寻求时,有

$$F(q^*) = \frac{p-r-w}{p-r} + \beta \frac{w}{p-r},$$

其中 $\beta \in [0, 1)$, $\mu < c$ (18)

$$CVaR_{\beta} T_{\beta} Z |_{q=q^*} = \frac{1}{1-\beta} \left\{ \int_{F^{-1}(\beta)}^q [(p-r)x-wq] \times dF(x) + \int_q^B (p-r-w) q dF(x) \right\} \quad (19)$$

至此,本文借助 CVaR 工具,以批发价契约与收益共享契约为例,从理论层面上完成了零售商在风险规避或者风险寻求下的供应链契约模型构建,但是实践中,零售商的决策行为是否与理论模型相符? CVaR 虽然被证实能较好地控制金融风险,但在市场不确定的供应链环境下, CVaR 是否也有助于提高决策水平? 这些问题有待在实验中检验,以确定 CVaR 模型的实际应用价值。

2 实验设计与实施

2.1 实验设计与决策支持方法

本部分以前面建立的批发价契约和收益共享契约模型为理论基础,设计与实施实验。实验中,决策者一方为由人扮演的零售商,而另一方由风险中性的计算机模拟供应商。实验设计排除了社会偏见如公平互惠等因素的影响,任何理论上的偏离可归因于个人风险偏好与随机误差,而不是其他行为偏好等。供应商根据契约类型,给出相应的价格参数,零售商根据价格做出订购决策。为了让计算机模拟自然人的定价行为,在实验中并不固定价格参数,参照文献[25],预先产生相应的批发价格序列。在收益共享契约中,供应商设置的 (w, r) 价格组合符合式(3),使得契约参数满足风险中性理论下的供应链系统协调条件。

设需求分布 $x \sim U[50, 350]$, 产品售价 $p = 12$, 单位生产成本 $c = 3$ 。每一个零售商均需做出 50 期的订购决策^②。每期开始时,零售商并不知道该期的市场需求,他做出决策后,计算机反馈

当期顾客需求并给出双方获得的利润。订购量可取需求区间 $[50, 350]$ 之间的任意一个整数。为了减少信息限制及计算等随机误差的影响,实验中提供了方便的计算工具及信息反馈工具,决策者可计算任意订购量 q 下双方的期望利润,另外,已实现的各期订购量、需求值、利润等历史交易信息以表格的形式显示在屏幕上,方便下一期参考。

为了检验 CVaR 模型的实际应用价值,设计了两种决策支持方法的实验,一种称之为 Optimal_q 支持,即在任意期的给定契约参数下,参与者可查询到风险中性时的最优订购量(标杆值)及供、销双方期望利润等;另一种称之为 CVaR 支持,实验者除了查看到 Optimal_q 支持提供的信息外,还可查询各风险水平 β 下的最优订购量、条件风险值、期望利润值等信息(风险规避与风险寻求分两个表格显示)。标杆值 q_0^* 与条件风险值 $CVaR_{\beta} Z$ 等的计算见第 1 部分相关公式。为了做到各种实验结果具有可比性,防止实验结果受需求样本的影响,两种信息支持下的实验均采用相同的需求样本,并且实验中为了防止参与者提前获知下一期的需求数据,每个实验者、每个销售期均采用需求数据随机读取的方法。实验软件是 JAVA 语言开发的基于 C/S 结构的实验系统,后台数据库采用 Oracle。

2.2 实验实施

零售商角色扮演者从作者正在授课的商学院二、三年级本科生中招募,他们已经学习了经济和管理学的一些基本课程,并且通过“运筹学”课程学习了报童问题。为了让学生充分理解实验要求,特别是理解条件风险值、期望利润等重要概念,本文在实验前单独安排了 2 个课时给学生培训,通过幻灯片讲解、演示实验程序及解答学生疑问让学生充分了解供应链契约实验,并给每个学生发放了详细实验说明,并附上实验系统理解的测试题。

实验在商学院机房完成,共有 70 人参加了实

^② 实验期数的确定参考了已有文献实验期数,如 Schweitzer 等^[2] 是 15 次, Bostian 等^[22] 是 30 次, Benzion 等^[21]、Bolton 等^[23] 和 Katok 等^[25] 是 100 次,本实验选择 50 期决策,一是考虑到大样本的需要,另一个考虑如果让参与者在实验室环境下短时间内重复决策太多次,如 100 次,可能会使实验数据质量下降。

实验,每人完成一种契约、一种决策支持方法下的实验,具体实验类型在他们到达机房时随机指定。每个实验中的参与人数见表 1,整个实验持续时间大约为 90 min。沿用实验经济学家 Friedman 的观点,实验必须使得参与人在类似真实条件下做出真实的选择,因此为了获取到高质量的实验数据,使参与实验的学生尽可能地模拟现实中人的决策行为,本文对参与者采取了两条激励措施,一是成绩激励,学生实验中获取的收益直接折算成一次课程平时考试成绩,二是对每个实验中平均收益前三名的学生进行物质奖励。事实表明成绩激励对学生非常有吸引力。

表 1 实验参与人数及有效样本量

Table 1 The number of subjects and sample sizes

决策支持 契约类型	Optimal_q 支持			CVaR 支持		
	实验参与 人数	有效样本单 位(个)	有效数据 量(个)	实验参与 人数	有效样本 单位(个)	有效数据 量(个)
批发价契约	17	17	846	17	15	748
收益共享契约	18	18	900	18	17	850

批发价契约下,Optimal_q 支持的实验中,由于实验软件故障,共有 2 人最后 2 期的实验决策数据缺失,对他们的平均利润进行探索性统计分析,未发现离群值和极端值,故仍然属于有效样本。CVaR 支持的实验中,有一个参与者的平均利润为离群值,还有一人的订购量序列中,存在 20 多条订购量为 50 的记录,认为数据可信度不高,直接剔除这二个样本单位,另外还有两人只有 49 条订购记录,仍属有效样本。用同样的方法对收益共享契约下的实验数据进行检

3 实验结果统计分析

3.1 数据的有效性检查

主要从数据的完整性与异常两个方面检查数据的有效性。如果数据记录小于 48 条,则认为数据不完整,直接剔除该样本单位。数据的异常主要从订购量和平均收益上进行比较,并借助统计工具 SPSS 进行探索性统计分析,用箱图判断是否是离群值或极端值,对异常样本,还需按期逐步检查,进一步判断异常是否是参与人非正常风险偏好导致的非真实选择。

查,最终得到各实验的有效样本单位及数据量如表 1 所示。

3.2 两种决策支持方法下的订购量分析与比较

订购量的描述性统计信息如表 2 所示,其中标准差是对混合数据(pooled data)的统计。表 2 同时列出了风险中性下的标杆订购量,以便对比。统计假设检验采用 t 检验,显著性水平设为 10%。为了保证检验性能, t 检验前对样本数据做了正态分布检验,K-S 检验表明在 10% 显著性水平下不能拒绝样本分布的正态假定。

表 2 零售商订购量与标杆值的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of retailers' orders and benchmarks

决策支持 契约类型	Optimal_q 支持		CVaR 支持		标杆值	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
批发价契约	178.4	53.71	163.6	40.18	156.8	14.21
收益共享契约	222.7	58.03	240.5	49.59	275	0.00

批发价契约中,订购量标杆值为 156.8,而 Optimal_q 支持下的订购量均值为 178.4,显著大于标杆值($p = 0.002$),由于本实验中的标杆值小于需求均值 200,因此订购量有向需求均值靠拢的趋势,这个结论与文献[21-23]的实验结果一致。但在 CVaR 支持下,订购量均值为 163.6,不

能拒绝订购量与标杆值相等的原假设($p = 0.145$)。图 1 显示了两种决策支持方法下的平均订购量与实验期的关系。从图 1 观察,批发价契约下,Optimal_q 支持的订购量曲线总体位于标杆值曲线上方,前 49 期订购量都比标杆值大,只有最后 1 期比标杆值略小,订购量的“拉向中心”效应很

明显. CVaR 支持的各期订购量在标杆值上下波动, 虽然在 25 期之后, 订购量普遍比标杆值大, 但与

Optimal_q 支持的实验结果比较, 订购量偏离标杆值的幅度明显变小, “拉向中心”效应减弱.

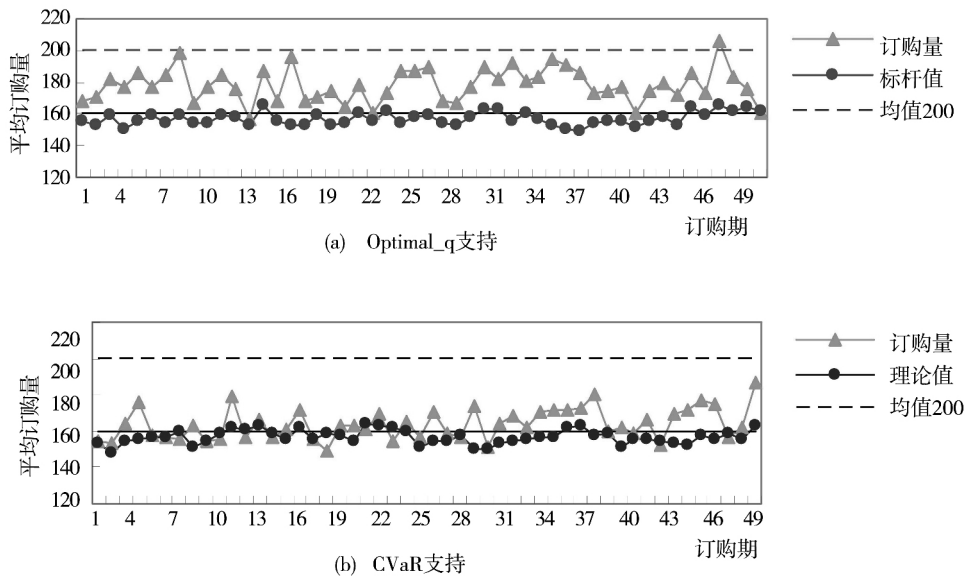


图 1 批发价契约下各期订购量

Fig. 1 Average orders by round for wholesale contract

收益共享契约中, 在 Optimal_q 与 CVaR 两种决策支持方法下, 订购量均值分别为 222.7 与 240.5, 均显著小于标杆值 275 (p 值均为 0.000), 说明零售商的决策行为显著偏离风险中性, 风险中性理论下的协调契约并不能使供应链系统协调. 本实验中, 由于标杆值 $q_0^* =$

$q_c^* = 275$, 大于需求均值 200, 两种决策支持方法下订购量均出现了较强的“拉向中心”效应, 但是, 从图 2 可看到, CVaR 支持下的订购量曲线明显处在 Optimal_q 支持的曲线上方, 前者的“拉向中心”效应相对较弱, 更加接近于最优订购量.

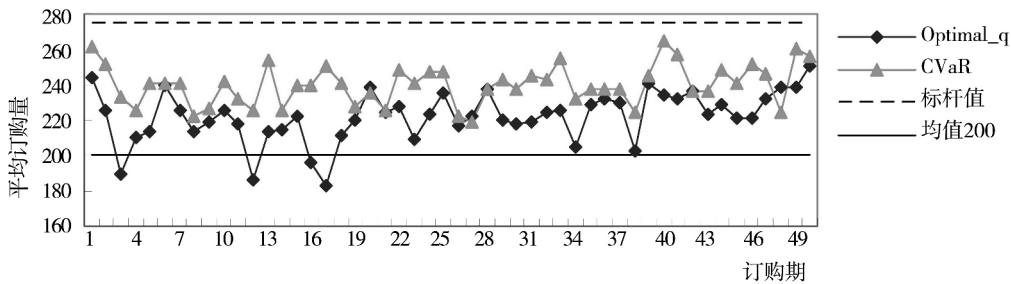


图 2 收益共享契约下各期订购量

Fig. 2 Average orders by round for revenue-sharing contract

从订购量的标准差和偏差(订购量与标杆值的差值)两个方面进一步检验两种决策支持方法下的结果差异. 订购量标准差反映了零售商决策的波动性, 标准差越大, 说明零售商每期的决策变动幅度越大, 而订购量偏差则反映了零售商的风险偏好程度, 由前面的理论分析知, 订购量偏差越大, 说明决策者的风险规避或者风险寻求程度越大. 对两种信息决策支持下的订购量的标准差及

偏差进行独立样本 t 检验, 结果如表 3 所示.

从表 3 知, 批发价契约与收益共享契约中, 两种决策支持方法下的订购量偏差均存在显著差别 (p 值分别为 0.057 与 0.056), 说明 CVaR 信息能显著减小订购量与标杆值之间的决策偏差, 有助于提高零售商的决策水平及供应链绩效. 实验结果表明, 在 CVaR 信息支持下, 决策者的风险规避或者风险寻求程度更小, 个人的风险偏好程度通

过使用 CVaR 决策支持工具是可以减轻的. 批发价契约下, 订购量标准差拒绝了兩样本总体均值相等的原假设 ($p = 0.009$), 说明 CVaR 信息能显

著减小零售商订购量的波动程度. 收益共享契约下, CVaR 信息虽然也有助于减小订购量的波动, 但不显著 ($p = 0.102$).

表 3 两种决策支持方法的实验结果比较

Table 3 Comparison of two experimental results obtained by different tools

检验对象	订购量偏差			订购量标准差		
	t 统计量	自由度 df	显著性 Sig. (双侧)	t 统计量	自由度 df	显著性 Sig. (双侧)
批发价契约	1.975	30	0.057	2.815	30	0.009
收益共享契约	-1.985	33	0.056	1.682	33	0.102

从上面的统计分析可知, 相比风险中性假设下的契约模型, CVaR 模型给决策者提供了更有价值的信息. 由于零售商决策前无法量化自己的风险水平, 给出各风险水平下的最优订购量及条件风险值等信息对零售商具有良好的决策支持作用.

4 零售商风险偏好系数的最小二乘估计

对于双边垄断市场, 需求 D 与价格 p 具有如 $D = a - bp$ (a, b 为常数) 确定关系的供应链, Katok 和 Pavlov^[29] 开展了最小订购量约束的批发价契约 (MOQ, the minimum order quantity) 实验, 他们发现, 由人扮演的供应商借助简单的计算工具, 在实验最初的几轮决策后, 供应链效率能很快达到标杆值. 本文针对的是随机需求市场, 由于实验中有很完备的决策支持工具, 实验前学生充分理解了相关概念, 决策者受计算、理解等方面的局限性影响较小, 而市场需求的不确定性使得收益具有风险性, 故认为决策偏差主要是风险偏好引起. 由前面的 t 检验知, CVaR 支持的批发价契约下, 不能拒绝订购量与标杆值相等的原假设, 但这仅是对均值进行比较得到的统计结论, 不能说每个决策者都是风险中性的. 实际上, 每个人的风险偏好不同, 偏好程度也不同, 因此有必要对个体的风险偏好进行定量分析.

在已知的契约参数与决策支持工具等环境下, 决策者的订购数据反映了他们的风险偏好及偏好程度. 下面以批发价契约为例, 通过建立回归模型实证分析决策者具有风险规避或风险寻求

特性, 并用 OLS 估计值分析各个体的风险偏好程度. 鉴于 CVaR 支持的实验结果中, 订购量波动较小, 数据更好地反映了决策者的风险偏好特征, 故本文以 CVaR 支持的实验数据进行回归分析.

4.1 基于 CVaR 的回归方程

批发价契约中, 在给定风险水平 β 下, 具有风险规避或风险寻求特性零售商的最优订购量分别满足式 (7) 和式 (13).

$$\text{由式 (7) 得: } \frac{q-A}{B-A} = \beta \frac{p-w}{p}, \text{ 令 } ra_q =$$

$\frac{q-A}{B-A}, ra_w = \frac{p-w}{p}$, 则风险规避决策者的订购量 q 与批发价 w 的关系可转换成变量 ra_q 与 ra_w 之间的关系, 以 ra_q 与 ra_w 分别为因变量和自变量, 建立如下回归方程

$$ra_{qi} = \beta \times ra_{wi} + \varepsilon \tag{20}$$

式中 ε 为随机误差, 比如随机需求扰动等因素造成的影响.

$$\text{同理, 对式 (13) 变形有: } 1 - \frac{q-A}{B-A} = \frac{w(1-\beta)}{p},$$

令 $rt_q = 1 - \frac{q-A}{B-A}, rt_w = \frac{w}{p}$, 则风险寻求零售商订购量、价格之间的关系转换为变量 rt_q 与 rt_w 之间的关系: $rt_q = (1 - \beta) \times rt_w$, 令 $\beta' = 1 - \beta$, 则回归方程为

$$rt_{qi} = \beta' \times rt_{wi} + \varepsilon \tag{21}$$

根据回归结果, 可判断决策者的风险偏好. 由式 (7) 知, 若决策者是风险规避型的, 则由式 (20) 得到的回归结果中 β 应满足 $(0, 1]$ 取值区间, 否则由式 (20) 代表的风险规避模型不适用, 改用式 (21) 回归. 同理, 若决策者风险寻求, 则由式 (21) 得到的回归结果中 rt_w 的回归系数应满足 $\beta' \in (0, 1]$, 否则与现实意义不符, 改用式 (20)

回归. 若按式(20)或者式(21)回归,自变量的系数估计值均不满足(0,1]范围或者回归的拟合度差,则说明该决策者的风险偏好特征并不显著,没有形成固定的风险偏好,有时表现为风险规避,有时为风险寻求,订购比较随机,其决策行为不能由 CVaR 模型较好地解释.

4.2 风险偏好系数的估计结果

把实验参数代入回归方程,使用软件 Stata 10.0 对建立的回归方程进行 OLS 估计,可得各个体风险偏好系数的估计值,表 4、表 5 列出了部分结果,回归后的残差检验(使用怀特检验法)均接受同方差假设.

回归结果中,由 F 统计量及模型显著性 p 值

知,模型整体线性关系成立,说明回归方程设置正确;自变量前的系数 β 或 β' 经 t 检验表明显著不为 0($p = 0.0000$),模型的拟合优度 R^2 只有一个个体小于 0.8,其他样本单位均有 $R^2 > 0.88$,说明回归值与样本观测值的拟合程度高,基于 CVaR 模型构建的回归方程能很好地拟合实验数据,零售商决策时具有显著的风险偏好行为. 风险系数 β 或 β' 估计值的标准差较小,说明系数稳定性好,意味着在已知的决策环境下,决策者的风险偏好程度比较固定,由实验数据可以推断他们的风险态度,从而能较好地预测其在任意一期的订购量. 总的说来,回归结果值得信赖,模型设定较合理.

表 4 零售商风险规避系数实证估计

Table 4 Estimation of retailers' risk-aversion coefficient

样本单位 编号	统计量 $F(1,49)$	模型显著性 p 值	拟合优度 R^2	系数 β 估计			
				回归值	t 统计量	p 值	95% 置信区间
1	1 107.62	0.0000	0.9576	0.9049 (0.0272)	33.28	0.000	[0.8503 0.9596]
2	133.57	0.0000	0.7316	0.8544 (0.0739)	11.56	0.000	[0.7059 1.0030]
3	1 068.38	0.0000	0.9561	0.9019 (0.0276)	32.69	0.000	[0.8464 0.9573]
4	621.19	0.0000	0.9269	0.7971 (0.0320)	24.92	0.000	[0.7328 0.8613]

注: 括号内数字为系数估计值的标准差. 表 5 同.

表 5 零售商风险寻求系数实证估计

Table 5 Estimation of retailers' risk-taking coefficient

样本单位 编号	F 统计量	模型显著性 p 值	拟合优度 R^2	系数 β' 估计			
				回归值	t 统计量	p 值	95% 置信区间
5	1 757.0	0.000	0.9729	0.9214 (0.0220)	41.92	0.000	[0.8773 0.9656]
...					...		
10	31 748.00	0.000	0.9985	0.9841 (0.0055)	178.18	0.000	[0.9730 0.9952]
11	20 020.62	0.000	0.9976	0.9633 (0.0068)	141.49	0.000	[0.9496 0.9770]
12	380.64	0.000	0.8860	0.8034 (0.0412)	19.51	0.000	[0.7207 0.8862]
...					...		
15	4 470.57	0.0000	0.9892	0.9724 (0.0145)	66.86	0.000	[0.9431 1.0016]

由风险偏好系数的估计结果知,批发价契约实验得到的 15 个样本单位中,有 4 个决策者表现为风险规避,风险规避系数范围 $\beta \in [0.7971, 0.9049]$,而其余 11 个决策者表现为风险寻求,风险寻求水平范围 $\beta \in [0.0159, 0.1966]$. 其中 4 号的风险规避程度最高,风险规避系数估计值 $\hat{\beta} = 0.7971$. 从置信区间来看,有 95% 的把握确定其风险规避水平在 $[0.7328, 0.8613]$ 范围内,因此可以断定 4 号每期订购量小于标杆值的可能性至少有

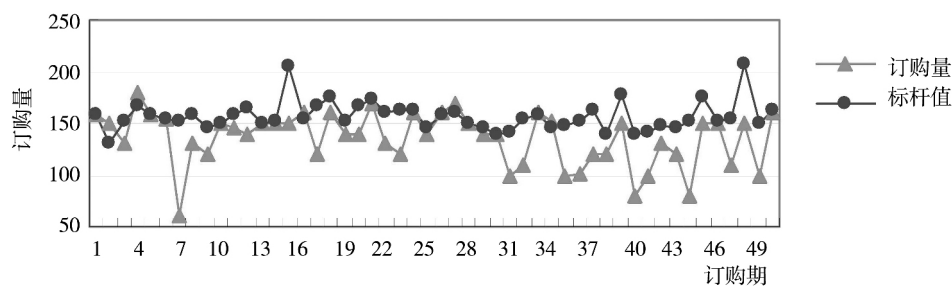


图 3 CVaR 决策支持实验中 4 号个体各期订购量

Fig. 3 Orders by round of subject 4 with CVaR support

相关实验研究文献中,学者们通常会探讨零售商订购量偏离标杆值的行为,但数据分析大都停留在抽样总体层面,并没有分析个体差异.然而,个体差异是客观存在的,可能还存在本质上的不同,如 Lau 等^[30]通过描述性统计及非参数检验等分析方法,质疑报童问题实验文献中阐述的“拉向中心”现象对个体的普遍适应性.本文中,个体风险偏好系数的 OLS 估计结果不仅能很好地说明个体决策的异质性,还能确切地告知各个体的风险偏好程度.比如, CVaR 支持的批发价契约实验中,从统计上接受订购量均值与标杆值相等的原假设($p = 0.145$),从图形观察,订购量曲线有一个较弱的“拉向中心”效应,但这些结论只对抽样总体成立,对某些个体不一定成立,比如 4 号,其订购量曲线基本处在标杆值下方,更加偏离了需求均值 200(如图 3 示),很明显,其订购量序列不存在“拉向中心”趋势,这个结论与回归分析的结果一致.实践中,个体风险偏好系数的估计结果可以用来分析、预测零售商的决策行为,为管理决策提供支持.

95%. 12 号的风险寻求程度最大,风险寻求系数的估计值 $\hat{\beta} = 1 - \beta = 0.1966$,这意味着该决策者以 80.34% 可能性的高利润部分作为决策准则,而不考虑累积概率为 19.66% 的低利润部分.从风险偏好系数 β 的估计值与置信区间两个方面来看,10 号的风险态度最接近风险中性.检查 10 号的订购量序列,发现其决策偏差(订购量与标杆值之间的差值)在所有样本单位中也是最小的,这从另一方面也验证了本文回归结果的正确性.

5 结束语

本文针对市场需求随机的二级供应链,以批发价契约与收益共享契约为例,借助 CVaR 工具,分析了具有风险偏好零售商的条件风险值及最优决策;设计并实施了两种决策支持方法下的供应链契约实验;以风险中性下的最优订购量为标杆,对不同决策支持方法下的订购量偏差与标准差进行了比较;建立了风险偏好零售商的订购决策回归模型,用最小二乘法估计了个体的风险偏好系数.主要研究结论如下:

1) 以零售商风险规避下的条件风险值模型为基础,提出了一种推导条件风险寻求值的方法,相对已有文献,该方法更加简单、清晰;收益共享契约下的最优决策及条件风险值可以借鉴批发价契约下的相应公式,而不必重新推导.

2) 以 CVaR 模型为基础构建的回归方程能很好地拟合实验数据,说明 CVaR 模型能较好地描述零售商的实际订货行为,零售商决策时具有显

著的风险规避或者风险寻求特征.

3) 即使在完全相同的订货情境下,个体的风险偏好特征也存在异质性,已有实验文献阐述的“拉向中心”效应对个体并非具有普遍适用性. 实践中,通过零售商订购的历史数据,借助 CVaR 模型,可以定量分析他们的风险偏好系数,了解他们的风险偏好特征及风险偏好程度,从而有针对性地制定策略,为管理决策提供依据.

4) 给零售商提供各风险水平下的最优订购量及条件风险值等信息,相比于仅提供订购量标杆及期望利润信息,前者能显著地减小订购量与标杆值之间的决策偏差,并有助于减小订购量的波动程度. 这说明在市场需求不确定的供应链环境下, CVaR 风险控制工具能起到良好地决策支持作用.

通过实验研究,本文认为,不确定性决策下,风险规避或者风险寻求是人们普遍存在的行为特性,因此在供应链契约设计时,应把风险偏好这一行为特征变量纳入模型考虑范畴,而不能简单地假设为风险中性. 由于决策者具有风险偏好,虽然 CVaR 工具可以帮助减小决策偏差,但风险中性假设下的协调契约不一定能使供应链系统达到协调. 因此,对于以人为中心的运作系统,还需关注模型以外的技术和方法以提高供应链绩效.

在实际运作管理中,决策者的行为特征及其影响因素是多方面的,导致决策偏差的行为也不仅仅是风险偏好. 未来的研究,可以考虑更多的行为因素,如公平偏好、学习等因素对决策者的影响,构建相应的理论模型,并进行实证研究,以期更好地指导运作管理实践.

参 考 文 献:

- [1] Fisher M, Raman A. Reducing the cost of demand uncertainty through accurate response to early sales [J]. *Operations Research*, 1996, 44(1): 87-99.
- [2] Schweitzer M E, Cachon G P. Decision bias in the newsvendor problem with a known demand distribution: Experimental evidence [J]. *Management Science*, 2000, 46(3): 404-420.
- [3] Gino F, Pisano G. Toward a theory of behavioral operations [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2008, 10(4): 676-691.
- [4] Bendoly E, Donohue K, Schultz K L. Behavior in operations management: Assessing recent findings and revisiting old assumptions [J]. *Journal of Operations Management*, 2006, 24(6): 737-752.
- [5] 刘作仪, 查勇. 行为运作管理: 一个正在显现的研究领域 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(4): 64-74.
Liu Zuoyi, Zha Yong. Behavioral operations management: An emerging research field [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(4): 64-74. (in Chinese)
- [6] Elahi E, Lamba N, Ramaswamy C. How can we improve the performance of supply chain contracts? An experimental study [J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 142(1): 146-157.
- [7] Gan X H, Sethi S P, Yan H M. Channel coordination with a risk-neutral supplier and a downside-risk-averse retailer [J]. *Production and Operations Management*, 2005, 14(1): 80-89.
- [8] Chiu C H, Choi T M, Li X. Supply chain coordination with risk sensitive retailer under target sales rebate [J]. *Automatica*, 2011, 47(8): 1617-1625.
- [9] Choi T M, Li D, Yan H M. Mean-variance analysis of a single supplier and retailer supply chain under a returns policy [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 184(1): 356-376.
- [10] 姚忠. 风险约束下退货合同对供应链的协调性分析 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(3): 96-105.
Yao Zhong. Analysis of return policy for coordinating supply chain under downside risk constraints [J]. *Journal of Manage-*

- ment Sciences in China ,2008 ,11(3) : 96 – 105. (in Chinese)
- [11]叶 飞,林 强,李怡娜. 基于 CVaR 的“公司 + 农户”型订单农业供应链协调契约机制[J]. 系统工程理论与实践,2011 ,31(3) : 450 – 460.
Ye Fei ,Lin Qiang ,Li Yina. Supply chain coordination for “company + farmer” contract-farming with CVaR criterion[J]. Systems Engineering: Theory and Practice ,2011 ,31(3) : 450 – 460. (in Chinese)
- [12]林 强,叶 飞,陈晓明. 随机弹性需求条件下基于 CVaR 与收益共享契约的供应链决策模型[J]. 系统工程理论与实践,2011 ,31(12) : 2296 – 2307.
Lin Qiang ,Ye Fei ,Chen Xiaoming. Decision models for supply chain based on CVaR and revenue sharing contract under stochastic elastic demand[J]. Systems Engineering: Theory and Practice ,2011 ,31(12) : 2296 – 2307. (in Chinese)
- [13]Hsieh C C ,Lu Y T. Manufacturer’s return policy in a two-stage supply chain with two risk-averse retailers and random demand[J]. European Journal of Operational Research ,2010 ,207(1) : 514 – 523.
- [14]高文军,陈菊红. 基于 CVaR 的闭环供应链优化与协调决策研究[J]. 控制与决策,2011 ,26(4) : 489 – 494.
Gao Wenjun ,Chen Juhong. Research on decisions of closed-loop supply chain optimization and coordination based on CVaR[J]. Control and Decision ,2011 ,26(4) : 489 – 494. (in Chinese)
- [15]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 Hui ,Deng Liang ,Sun Caihong. A CVaR model of supply chain emergency assistance[J]. Journal of Management Sciences in China ,2011 ,14(6) : 68 – 75. (in Chinese)
- [16]Wu J ,Wang S Y ,Chao X L ,et al. Impact of risk aversion on optimal decisions in supply contracts[J]. International Journal of Production Economics ,2010 ,128(2) : 569 – 576.
- [17]Ma L J ,Liu F M ,Li S J ,et al. Channel bargaining with risk-averse retailer[J]. Production Economics ,2012 ,139(1) : 155 – 167.
- [18]Jammernegg W ,Kischka P. Risk-averse and risk-taking newsvendors: A conditional expected value approach[J]. Review of Managerial Science ,2007 ,1(1) : 93 – 110.
- [19]邱若臻,黄小原. 基于条件风险值准则的供应链回购契约协调策略[J]. 运筹与管理,2011 ,20(4) : 10 – 16.
Qiu Ruozhen ,Huang Xiaoyuan. The supply chain buyback contract coordination strategy based on conditional value-at-risk criterion[J]. Operations Research and Management Science ,2011 ,20(4) : 10 – 16. (in Chinese)
- [20]于春云,赵希南,关志民,等. 具有风险偏爱特性的供应链优化与协调模型[J]. 系统工程,2009 ,27(11) : 69 – 76.
Yu Chunyun ,Zhao Xinan ,Guan Zhimin ,et al. Optimization and coordination model of supply chains with a tendency to risks[J]. Systems Engineering ,2009 ,27(11) : 69 – 76. (in Chinese)
- [21]Benzion U ,Cohen Y ,Peled R ,et al. Decision-making and the newsvendor problem: An experimental study[J]. Journal of the Operational Research Society ,2008 ,59(9) : 1281 – 1287.
- [22]Bostian A A ,Holt C A ,Smith A M. Newsvendor “pull-to-center” effect: Adaptive learning in a laboratory experiment[J]. Manufacturing & Service Operations Management ,2008 ,10(4) : 590 – 608.
- [23]Bolton G E ,Katok E. Learning-by-doing in the newsvendor problem: A laboratory investigation of the role of experience and feedback[J]. Manufacturing and Service Operations Management ,2008 ,10(3) : 519 – 547.
- [24]Feng T J ,Keller L R ,Zheng X N. Decision making in the newsvendor problem: A cross-national laboratory study[J]. Omega: The International Journal of Management Science ,2011 ,39(1) : 41 – 50.
- [25]Katok E ,Wu D Y. Contracting in supply chains: A laboratory investigation[J]. Management Science ,2009 ,55(12) : 1953 – 1968.
- [26]Wu D Y. The impact of repeated interactions on supply chain contracts: A laboratory study[J]. Production Economics ,

- 2013 , 142(1) : 3 - 15.
- [27]Rockafellar R T , Uryasev S. Optimization of conditional value-at-risk [J]. *Journal of Risk* , 2000 , 2(3) : 21 - 42.
- [28]Rockafellar R T , Uryasev S. Conditional value-at-risk for general loss distributions [J]. *Journal of Banking & Finance* , 2002 , 26(7) : 1443 - 1471.
- [29]Katok E , Pavlov V. Fairness and Coordination Failures in Supply Chain Contracts [R]. Working Paper , Pennsylvania: Penn State University , 2009.
- [30]Lau N , Hasija S , Bearden J N. Newsvendor pull-to-center reconsidered [J]. *Decision Support Systems* , 2014 , 58(2) : 68 - 73.

Models and their experiments of supply chain contracts based on CVaR

JIAN Hui-yun , XU Min-li

Business School , Central South University , Changsha 410083 , China

Abstract: More and more literatures are studying supply chain contracts with risk preferences , but experimental researches still focus on the test of supply chain contracts under the assumption of risk-neutral theory. Few literatures are found to study the contract models under risk preferences combined with experimental studies. In order to provide appropriate decision support tools for retailers with different risk preferences , CVaR , one of the most popular financial risk management tools , is applied to form the retailer's optimal ordering models based on the wholesale contract and revenue-sharing contract. Experiments are used to test the models. It is found that the regression equations based on CVaR models can fit the experimental data very well. The retailer's risk-aversion or risk-taking characteristics are significant , and CVaR can significantly reduce the deviation , and help the decision-maker decrease the volatility of the orders , which also confirms the models' practical value.

Key words: supply chain contracts; order decision; risk preferences; CVaR; experimental study