

基于CARA效用函数的报童决策偏差形成机理

丁小东^{1,2}, 庄河^{1a}, 黄修莉^{1a}, 蒋葛夫¹, 李涛^{1a}

(1. 西南交通大学 a. 交通运输与物流学院, b. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 成都 610031; 2. 中国铁道科学研究院 运输及经济研究所, 北京 100081)

摘要: 经典报童模型假设决策者为风险中性, 但决策者的实际订购行为受风险偏好的影响, 导致实际订购行为与报童模型最优解之间存在偏差. 为此, 基于常绝对风险厌恶(CARA)效用函数构建库存决策模型, 从风险偏好的角度解释报童决策偏差的形成机制. 行为实验结果表明: 随着产品的相对成本增加, 决策者的订购行为将出现风险逆转; 在高(低)利润产品中, 决策者分别表现出风险规避(风险追逐)的订购行为, 且订购行为受风险规避的影响更为显著. 报童决策偏差现象揭示, 库存管理实践中考虑决策者的风险偏好, 有利于缩小理论模型与管理实践之间的差距, 提高库存管理效率.

关键词: 库存决策行为; 风险偏好; 偏好逆转; 报童模型; 报童决策偏差
中图分类号: F272.3 **文献标志码:** A

Formation mechanism of newsvendor decision bias based on CARA utility function

DING Xiao-dong^{1,2}, ZHUANG He^{1a}, HUANG Xiu-li^{1a}, JIANG Ge-fu¹, LI Tao^{1a}

(1a. School of Transportation & Logistics, 1b. Nation and Region Combined Engineering Lab of Intelligentizing Integrated Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China. Correspondent: ZHUANG He, E-mail: xinlang0808@sina.com)

Abstract: The classical newsvendor model assumes that the decision maker is risk-neutral. Since the decision maker's actual order behavior is affected by risk preference, there is one deviation between the actual order quantity and the expected profit-maximizing order quantity. Based on the constant absolute risk aversion(CARA) utility function, the formation mechanism of newsvendor decision bias is explained from the perspective of risk preference. The results of behavioral experiments show that the decision maker's risk preference will reverse with the relative cost increase. The decision maker exhibits the risk aversion(love) order behavior under the high(low)-profit market. Furthermore, risk aversion has more significant effect on the decision maker's order behavior. The newsvendor decision bias reveals that in the actual inventory management, considering the decision maker's individual risk preference is beneficial to diminish the deviation between the theory model and the practical situation, so as to improve the inventory management efficiency.

Keywords: inventory decision-making behavior; risk preference; preference reversal; newsvendor model; newsvendor decision-making biases

0 引言

Whitin^[1]早在1955年就提出了报童模型, 用于解决需求波动情况下的库存决策问题, 之后报童模型便成为需求不确定库存问题的经典模型, 并得到了广泛应用和推广. Fisher等^[2]于1996年通过实证分析发现, 报童模型理论解与实际决策之间存在较大的偏

差. Schweitzer等^[3]于2000年通过设计行为实验进一步证实了该偏差, 并提出在低利润产品中决策者的实际订购量大于报童模型最优订购量, 在高利润产品中决策者的实际订购量小于报童模型最优订购量. 之后, Bolton等^[4]于2008年发现, 扩大实验样本后报童决策偏差现象依然存在, 并证实了该现象具有较强的

收稿日期: 2014-12-04; 修回日期: 2015-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71377156, 71403225).

作者简介: 丁小东(1987-), 男, 博士生, 从事契约协调行为、库存决策行为的研究; 庄河(1968-), 男, 教授级高级工程师, 从事高速铁路运营调度的研究.

鲁棒性; Benzion 等^[5]于 2010 年发现, 当需求分布函数已知和未知时, 决策者均表现出报童决策偏差现象; Feng 等^[6]于 2011 年从中庸思想的角度, 研究了中美两国决策者的订货行为, 指出有中国文化背景的决策者表现出了更显著的报童决策偏差现象; Lan 等^[7]于 2014 年对比分析了群体、个体订购行为, 发现报童决策偏差现象在群体订购行为中表现得更为显著。

在证实报童决策偏差的同时, 学者们也从不同角度对其进行了解释. Schweitzer 等^[3]使用锚定-调整的方法, 认为在随机需求订购问题中, 决策者从锚定在需求均值上向理论最优解方向调整; Su^[8]基于概率选择理论, 建立了库存决策有限理性模型, 提出报童决策偏差是决策者随机选择的结果; Bostian 等^[9]于 2008 年构建了 EWA 模型, 从学习效应的角度解释了报童决策偏差现象, 并使用近因效应分析了最近需求与理论最优值对决策行为的影响, 指出决策者在随机选择时放大了最近需求的权重, 从而导致报童决策偏差现象; Lurie 等^[10]从信息反馈的角度解释报童决策偏差现象, 指出频繁的信息反馈会使决策者过度关注近期信息而忽略了早期信息, 反而会降低决策绩效; Kremer 等^[11]设计了行为实验, 对比分析了 Schweitzer 等^[3]和 Su^[8]两种解释方法, 发现启发式模型比概率选择模型能更好地解释报童决策偏差现象。

经典报童模型以 Neumann 等^[12]于 1947 年提出的期望效用理论 (EUT) 为研究基础, 假设决策者是风险中性的. 但是, 现实中决策者是有限理性的, 其实际订购行为受风险偏好的影响. 为此, 本文从风险偏好的角度对报童模型进行扩展, 并试图解释报童决策偏差现象. Eeckhoudt 等^[13]于 1995 年首次在报童模型中引进风险规避因素, 指出风险规避型决策者的订购量小于报童模型最优订购量. Agrawal 等^[14]指出, 当市场价格为内生变量时, 随着市场价格变化, 风险规避型决策者的订购量小于或者大于报童模型最优订购量. Wang 等^[15]发现了与 Agrawal 等^[14]相反的结论, 指出随着价格增加, 风险规避决策者的订购量在不断减小. 张艳霞等^[16]在经典报童模型基础上研究了常风险下具有不同风险偏好组合的库存决策问题, 结果显示高利润产品的风险值总是低于低利润产品的风险值, 随着订货量的增加, 风险值会增加. 在风险偏好的基础上, 文献 [17-18] 研究了风险偏好信息非对称下的供应链契约问题; 文献 [19-21] 从损失规避的角度对报童模型进行了扩展; 文献 [22-23] 研究了风险型多属性决策问题。

本文在报童模型的基础上引进 CARA 效用函数, 构建考虑风险偏好的最优订购模型, 并采用行为实验的方法, 从决策者风险偏好的角度解释了报童决策偏

差的形成机制. 主要贡献有: 1) 通过数理推导给出了考虑风险偏好的最优库存决策模型; 2) 基于 CARA 效用函数, 从理论推导、数据仿真和行为实验 3 个方面, 证实了在随机需求库存决策中, 决策者的风险偏好将发生逆转; 3) 实验结果显示, 决策者在高利润产品中表现出风险规避的订购行为, 在低利润产品中表现出风险追逐的订购行为, 风险偏好逆转可以解释报童决策偏差; 4) 通常情况下, 决策者表现出更为显著的风险规避订购行为。

1 理论模型

1.1 报童模型

1.1.1 基本概念

报童每天早上从报社购进报纸零售, 晚上将没有卖掉的报纸退回. 假设每份报纸的购进价为 c , 零售价为 p , 退回价为 s ($p > c > s$), 每天的订购量为 q 份. 报童卖出一件产品的单位盈利为 $\kappa^u = p - c$, 积压一件产品的单位损失为 $\kappa^o = c - s$, 根据历史统计数据可知报纸每日需求量 D ($0 \leq D < \infty$) 的分布函数为 F , 概率密度函数为 f . 理性情况下, 报童的利润为

$$\pi^n(q, D) = \begin{cases} \pi_-^n(q, D) = pD + s(q - D) - cq, & D \leq q; \\ \pi_+^n(q, D) = pq - cq, & D > q. \end{cases} \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 风险中性型报童的关键分位点为 $F(q^n) = (p - c)/(p - s)$, 具体推导过程详见文献 [3].

定理 1 令 t ($1 \leq t \leq T$) 为决策顺序, 且报童的订购量满足 $q_1 < q_2 < \dots < q_{t-1} < q_t < q_{t+1} < \dots < q_{T-1} < q_T$, q_t 为当前订购量. 若决策者的订购量由 q_t 增加至 q_{t+1} 时, 报童边际收益的期望等于边际损失的期望, 则 q_t 为报童的最优订购量。

证明 订购量 q_t 将需求区间划分为 $[0, q_t] = \{x \in R : 0 \leq x \leq q_t\}$, $(q_t, \infty) = \{x \in R : q_t < x < \infty\}$. 如果需求 $D \in [0, q_t]$, 则当决策者的订购量由 q_t 增加至 q_{t+1} 后, 将出现货物积压现象 ($D < q_{t+1}$), 即出现货物积压的概率为

$$\int_0^{q_t} f(x) dx = F(q_t).$$

由报童模型定义可知, 报童积压一件产品的单位损失为 $\kappa^o = c - s$, 因此, 报童期望利润的边际损失

$$ML = (c - s)F(q_t).$$

同理, 由报童模型定义可知, 报童卖出一件产品的单位收益为 $\kappa^u = p - c$, 因此, 报童期望利润的边际收益

$$MG = (p - c)\bar{F}(q_t).$$

由关键分位点可知, 当 $(p - c)\bar{F}(q_t) = (c - s)F(q_t)$ 时, 决策者将获得最大期望利润, 因此 q_t 为报童的最优订购量. \square

1.1.2 产品分类

Schweitzer 等^[3]首次根据经典报童模型的关键分位点 $F(q^n)$ 将产品分为高利润产品 ($F(q_H^n) > 0.5$)、低利润产品 ($F(q_L^n) < 0.5$)。一般情况下, 市场价格 p 主要取决于需求市场, 且在短期内变化不显著, 因此 p 可被视为外生变量。由于现实中很多产品的期末残值可以忽略, 同时期末残值对订购行为的影响可以转嫁到订购成本上, 很多学者在构建库存决策模型时假设 $s = 0$ 。基于上述分析, 本文认为, 报童在库存决策时影响产品关键分位点的核心因素是订购成本 c 。因此, 本文基于订购成本, 并结合 c 、 p 、 s 与 $F(q^n)$ 的关系, 在 Schweitzer 等^[3]基础上, 修改了高(低)利润产品的定义, 并重新定义均衡利润产品。

定义 1 (产品分类) 如果产品的订购成本分别

满足 $c_L > (p + s)/2$ 、 $c_B = (p + s)/2$ 、 $c_H < (p + s)/2$, 则该产品分别属于低利润、均衡利润、高利润产品。

在高利润产品中 $\kappa_H^u = p - c_L > c_L - s = \kappa_H^o$, 即边际缺货损失大于边际过剩损失, 决策者的实际订购量偏高, 可见高利润产品具有较大的边际利润和较高期末残值等特性。同理, 低利润产品中, $\kappa_H^u < \kappa_H^o$, 该产品具有较小的边际利润和较低期末残值^[3]; 均衡利润产品中, 边际缺货损失等于边际过剩损失 $\kappa_H^u = \kappa_H^o$ 。

1.1.3 报童决策偏差

Schweitzer 等^[3]、Bolton 等^[4]、Bostian 等^[9]和 Lan 等^[7]以报童模型为理论基础, 设计了库存决策行为实验。实验结果显示: 在高利润产品中, 决策者的平均订购量小于报童模型最优解; 在低利润产品中, 决策者的平均订购量大于报童模型最优解。具体数据见表 1。

表 1 库存决策行为领域主要实验结果统计

	Schweitzer ^[3]		Bostian ^[4]		Bolton ^[9]		Lan ^[7]	
	低利润	高利润	低利润	高利润	低利润	高利润	低利润	高利润
$U(D)$	[0, 300]	[0, 300]	[0, 100]	[0, 100]	[50, 150]	[0, 100]	[50, 150]	[0, 100]
$\mu(D)$	150	150	50	50	100	50	100	50
q^n	75	225	25	75	75	75	75	75
\bar{q}	134 ↑	177 ↓	39 ↑	53 ↓	88 ↑	61 ↓	90 ↑	53 ↓
$\bar{\alpha}(\lambda = 2.25)$	5.4	8.4	2.8	6.5	2.5	9.2	3	6.5

注 1 Schweitzer 等^[3]和 Lan 等^[4]在设计行为实验时, 假设需求为 $D \sim U[0, 300]$, $p = 12$ 、 $s = 0$ 、 $c_H = 3$ 、 $c_L = 9$ 。主要研究决策者的实际订购行为与需求均值、报童模型最优解之间的关系, 强调决策者实际订购行为分布在需求均值与报童模型最优解之间, 故将该决策偏差定义为“均值偏向”现象。本文主要研究决策者实际订购行为与报童模型最优解之间的关系。

定义 2 (报童决策偏差) 报童决策偏差是指决策者的实际订购行为与报童模型最优订购量之间存在偏差。在低利润产品中, 决策者的实际订购量大于报童模型最优订购量; 在高利润产品中, 决策者的实际订购量小于报童模型最优订购量。

报童决策偏差是近 10 年来库存决策领域的重要发现, 反映的是决策者的实际订购行为与以报童模型为代表的理论最优解之间的偏差。报童决策偏差不仅出现在订购行为中, 近几年大量行为实验证明在供应链契约协调问题中决策者同样表现出报童决策偏差^[24-25]。因此, 研究报童决策偏差的形成机制, 对于提高库存决策精度和供应链效率有着十分重要的意义。

1.2 考虑风险偏好报童的订购行为

1.2.1 风险偏好

定义 3 (效用函数) 令 $U(\pi)$ 为具有风险偏好报童关于利润 π 的效用函数, 且 $U(\pi)$ 满足“冯·纽曼-摩

根斯坦”效用函数 (Von Neumann-Morgenstern utility), $U(\pi)$ 为 3 阶可微, 即

$$U(\pi(q, D)) = \begin{cases} U(\pi_-(q, D)) = U(pD + s(q - D) - cq), & D \leq q; \\ U(\pi_+(q, D)) = U(pq - cq), & D > q. \end{cases} \quad (2)$$

定义 4 (风险偏好)^[26-27] 令 $r(\pi) = -\frac{U''(\pi)}{U'(\pi)}$ 为“Arrow-Pratt”风险偏好测量因子。若 $r(\pi) > 0$, 则决策者为风险规避的 (risk-averse); 若 $r(\pi) = 0$, 则决策者为风险中性的 (risk neutral); 若 $r(\pi) < 0$, 则决策者为风险追逐的 (risk-seeking)。

由定义 4 可知, 风险中性决策者应满足 $U'(\pi) > 0$ 、 $U''(\pi) = 0$ 。经典的报童模型假设决策者是风险中性的, 并得出报童的最优订购量为 $F(q^n) = (p - c)/(p - s)$ 。同理可得, 风险规避决策者应满足 $U'(\pi) > 0$ 、 $U''(\pi) < 0$, 风险追逐决策者应满足 $U'(\pi) > 0$ 、 $U''(\pi) > 0$ 。因此, 考虑风险偏好时, 报童的期望效用为

$$E[U(\pi^n(q, D))] = \int_0^q U(\pi_-^n(q, D))f(D)dD + \int_q^\infty U(\pi_+^n(q, D))f(D)dD. \quad (3)$$

式 (3) 中对 q 求一阶导数, 有

$$\begin{aligned} & dE[U(\pi^n(q, D))]/dq = \\ & - (c - s) \int_0^q U'(\pi_-^n(q, D))f(D)dD + \\ & (p - c) \int_q^\infty U'(\pi_+^n(q, D))f(D)dD. \end{aligned}$$

同理可得到 q 的二阶导数

$$\begin{aligned} & d^2E[U(\pi^n(q, D))]/d^2q = \\ & (c - s)^2 \int_{D=0}^q U''(\pi_-(q, D))f(D)dD + \\ & (p - c)^2 \int_{D=q}^\infty U''(\pi_+(q, D))f(D)dD - \\ & (c - s)U'(\pi_-(q, q))F(D) - \\ & (p - c)U'(\pi_+(q, q))\bar{F}(D) < 0. \end{aligned}$$

因此, 当 $dE[U(\pi^n(q^R, D))]/dq^R = 0$ 时, 具有风险偏好的报童获得最大利润, 最优订购量 q^R 应满足

$$\begin{aligned} & (p - c) \int_{q^R}^\infty U'(\pi_+^n(q^R, D))f(D)dD - \\ & (c - s) \int_0^{q^R} U'(\pi_-^n(q^R, D))f(D)dD = 0. \quad (4) \end{aligned}$$

定理 2 风险中性报童将表现出理性的订购行为, 其实际订购量等于报童模型最优订购量.

证明 由定义 4 可知, 风险中性报童的效用满足 $U''(\pi) = 0$, 可推出 $U'(\pi)$ 为常数, 因此可令 $U'(\pi) = k > 0$ ($U'(\pi) > 0$). 将 $U'(\pi) = k$ 代入式 (4), 则有

$$\begin{aligned} & dE[U(\pi^N(q^N, D))]/dq^N = \\ & - k(c - s)F(q^N) + k(p - c)\bar{F}(q^N). \end{aligned}$$

令 $dE[U(\pi^N(q^N, D))]/dq^N = 0$, 可得

$$-(c - s)F(q^N) + (p - c)\bar{F}(q^N) = 0,$$

即 $F(q^N) = (p - c)/(p - s) = F(q^n)$. \square

定理 3 风险规避报童将表现出报童决策偏差订购行为, 其实际订购量小于报童模型最优订购量.

证明 由式 (1) 可知, $\frac{d\pi_-}{dD} = p - s > 0$, 即 $\pi_-(q, D)$ 是关于变量 D 的增函数. 令 $D_1 < q^A$, 可得 $\pi_-(q^A, D_1) < \pi_-(q^A, q^A)$. 由定义 4 可知, 风险规避报童的效用满足 $U''(\pi) < 0$, 可推出 $U'(\pi)$ 为减函数, 即存在

$$U'(\pi_-(q^A, D_1)) > U'(\pi_-(q^A, q^A)).$$

同理, 令 $q^A < D_2$, 有

$$U'(\pi_-(q^A, q^A)) > U'(\pi_-(q^A, D_2)).$$

假设 M^A 为一常数 ($M^A > 0$), 当 $D = q^A$ 时, 由式 (1) 可知 $\pi_-(q^A, q^A) = (p - c)q^A$, $\pi_+(q^A, q^A) = (p - c)q^A$, 因此可令 $M^A = \pi_+(q^A, q^A)M$. 已知

$$U'(\pi_-(q^A, D_1)) > U'(\pi_-(q^A, q^A)) > U'(\pi_+(q^A, D_2)),$$

则有

$$\begin{aligned} & dE[U(\pi(q^A, D))]/dq^A = \\ & - (c - s) \int_0^{q^A} U'(\pi_-(q^A, D))dF + \end{aligned}$$

$$(p - c) \int_{q^A}^\infty U'(\pi_+(q^A, D))dF <$$

$$- (c - s) \int_0^{q^A} U'(\pi_-(q^A, q^A))dF +$$

$$(p - c) \int_{q^A}^\infty U'(\pi_+(q^A, q^A))dF =$$

$$M^A[(p - c) - (p - s)F(q^A)].$$

通过上述证明可得

$$dE[U(\pi(q^A, D))]/dq^A <$$

$$M^A[(p - c) - (p - s)F(q^A)].$$

因此, 存在常数 M_0^A ($M_0^A > 0$), 使得如下等式成立:

$$dE[U(\pi(q^A, D))]/dq^A =$$

$$M^A[(p - c) - (p - s)F(q^A)] - M_0^A.$$

当 $dE[U(\pi(q^A, D))]/dq^A = 0$ 时, 风险规避报童获得最大期望利润, 即 $M^A[(p - c) - (p - s)F(q^A)] - M_0^A = 0$, 可得风险规避报童的关键分位点为 $F(q^A) = (p - c)/(p - s) - M_0^A/[(p - s)M^A] < F(q^n)$, 已知 $p > c > s$, $M^A > 0$, $M_0^A > 0$, 则有

$$F(q^A) < (p - c)/(p - s) = F(q^n).$$

$F(x)$ 为 x 的累计概率函数, 即 $F(x)$ 为单调递增的, 因此 $q^A < q^n$. \square

定理 4 风险追逐报童将表现出报童决策偏差订购行为, 其实际订购量大于报童模型最优订购量.

证明 由定理 3 证明可知, 当 $D_1 < q^S$ 时, $\pi_-(q^S, D_1) < \pi_-(q^S, q^S)$. 由定义 4 可知, 风险追逐报童的效用满足 $U''(\pi) > 0$, 可推出 $U'(\pi)$ 为增函数, 即如下不等式成立:

$$U'(\pi_-(q^S, D_1)) > U'(\pi_-(q^S, q^S)).$$

同理, 令 $q^S < D_2$, 可证 $U'(\pi_-(q^S, q^S)) < U'(\pi_-(q^S, D_2))$. 采用定理 3 证明方法, 可证

$$dE[U(\pi(q^S, D))]/dq^S >$$

$$M^S[(p - c) - (p - s)F(q^S)].$$

同理, 存在常数 M_0^S , 使得

$$dE[U(\pi(q^S, D))]/dq^S =$$

$$M^S[(p - c) - (p - s)F(q^S)] + M_0^S.$$

当 $dE[U(\pi(q^S, D))]/dq^S = 0$ 时, 风险追逐报童获得最大期望利润, 即 $M^S[(p - c) - (p - s)F(q^S)] + M_0^S = 0$, 可得风险规避报童的关键分位点为 $F(q^S) = (p - c)/(p - s) - M_0^S/[(p - s)M^S] < F(q^n)$, 已知 $p > c > s$, $M^S > 0$, $M_0^S > 0$, 则有

$$F(q^S) > (p - c)/(p - s)F(q^S) >$$

$$(p - c)/(p - s) = F(q^n).$$

$F(x)$ 为 x 的累计概率函数, 即 $F(x)$ 为单调递增的, 因此 $q^S > q^n$. \square

1.2.2 偏好逆转

定理5 在随机需求库存决策中, 决策者的风险偏好将发生逆转. 在高利润产品中, 决策者表现出风险规避的订购行为; 在均衡利润产品中, 决策者表现出风险中性的订购行为; 在低利润产品中, 决策者表现出风险追逐的订购行为.

证明 由定义1可知

$$c_H < (p + s)/2,$$

$$F(q_H^A) = (p - c_H)/(p - s) > [p - (p + s)/2]/(p - s) = 0.5.$$

假设 $D \sim U[a, b]$ 时 (其他函数同理), $q_H^A > 0.5(b - a) = \mu$. Schweitzer 等^[3] 已通过行为实验证明, 决策者在库存决策时, 通常锚定在需求均值 μ . 可见, 在高利润产品中报童模型的理论最优解大于决策者的心理锚定点, 此时决策者将会刻意降低其订购量. 由式(2)可知, 该订购行为属于风险规避订购行为. 同理, 在均衡利润产品中, $F(q_B^N) = 0.5, q_B^N = \mu$, 决策者将表现出风险中性的订购行为; 在低利润产品中, $F(q_B^N) < 0.5, q_B^N < \mu$, 决策者将表现出风险追逐的订购行为. 分析表明, 具有不同风险偏好的决策者在不同的产品中表现出不同的订购行为, 因此在随机需求库存问题中, 决策者的风险偏好将发生逆转. □

定理5表明, 在随机需求库存决策中, 决策者的实际风险偏好将发生逆转, 该结论与 Schweitzer 等^[3] 的研究结论不同. 本文认为, 随着相对成本增加, 决策者的风险偏好将由规避逆转为追逐, 同时本文基于偏好逆转现象, 从风险偏好的角度解释了报童决策偏差.

由定理3可知, 风险规避型决策者的实际订购量小于报童模型最优解, $q^A < q^N$, 即 $F(q^A) < F(q^N)$, 则有 $F(q^A) + \Delta = F(q^N), \Delta > 0. F(q^A) = (p - c)/(p - s) - \Delta = [(p - c) - (p - s)\Delta]/(p - s)$, 令 $\alpha = (p - s)\Delta$, 其中 $0 < \alpha < p$, 可得

$$F(q^A) = (p - c - \alpha)/(p - s).$$

同理, 由定理4可知, 风险追逐型决策者的实际订购量大于报童模型最优解, 即存在常数 $\beta (\beta > 0)$, 使得 $F(q^S) = (p - c + \beta)/(p - s)$ 成立. 由定理5可知, 当市场需求为随机变量时, 决策者在高利润、均衡利润、低利润产品中分别表现出风险规避、风险中性、风险追逐的订购行为, 因此考虑风险偏好时, 决策者的实际订购行为如下:

$$F(q^R) = \begin{cases} F(q_H^A) = \frac{p - c - \alpha}{p - s}, & c < (p + s)/2; \\ F(q_B^N) = \frac{p - c}{p - s}, & c = (p + s)/2; \\ F(q_L^S) = \frac{p - c + \beta}{p - s}, & c > (p + s)/2. \end{cases} \quad (5)$$

定理6 高利润产品中, 决策者的实际订购量与风险规避系数负相关; 在低利润产品中, 决策者的实际订购量与风险追逐系数正相关.

证明 由式(5)可知, 在高利润产品中

$$F(q_H^A) = (p - c - \alpha)/(p - s).$$

假设 $D \sim U[a, b]$ (其他函数时结论不变), 可得 $F(q_H^A) = (q_H^A - a)/(b - a)$, 即

$$(q_H^A - a)/(b - a) = (p - c - \alpha)/(p - s),$$

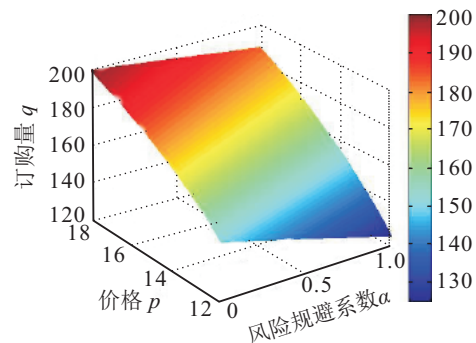
$$q_H^A = [(p - c - \alpha)(b - a)]/(p - s) + a,$$

$$dq_H^A/d\alpha = -(b - a)/(p - s) < 0,$$

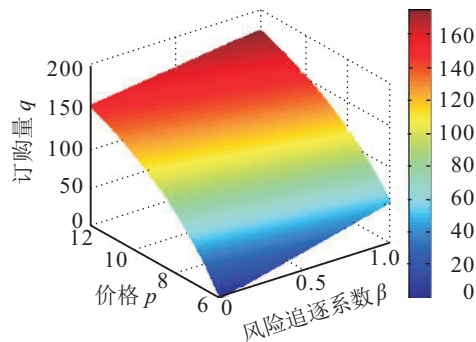
已知 $p > s, b > a$. 因此, 在高利润产品中, 决策者的实际订购量 q_H^A 与风险规避系数 α 负相关.

同理可证, 在低利润产品中, 决策者的实际订购量 q_L^S 与风险规避系数 β 正相关. □

仿真实验1 仿真环境: $D \in U[0, 300], c = 6, s = 0, \alpha \in [0, 1], p_H \in [12, 18]$ (在该仿真实验中假定成本不变, 改变产品的零售价格, 此方法与定义1是等效的). 构建如图1(a)所示的仿真实验, 结果显示: 当 $p_H = 18$ 时, $\alpha|0 \rightarrow 1$, 则 $q|200 \rightarrow 183$; 当 $p_H \in [12, 18)$ 时, 同样存在上述现象, 即随着风险规避系数增加, 决策者的实际订购量减小.



(a) 风险规避系数与订购量的关系



(b) 风险追逐系数与订购量的关系

图1 风险偏好系数与订购行为之间的关系

同理, 令 $p_L \in [6, 12], c = 6, s = 0, D \in U[0, 300], \beta \in [0, 1]$, 构建如图1(b)所示的仿真实验, 当 $p_L = 12$ 时, $\beta|0 \rightarrow 1$, 则 $q|150 \rightarrow 175$, 即随着风险追逐系数增加, 决策者的实际订购量增大.

1.3 基于 CARA 效用函数的订购行为

1.3.1 CARA 效用函数

1.2 节给出了考虑风险偏好时决策者的实际订购行为, 并从风险偏好的角度解释了报童决策偏差现象的形成机制, 但没有给出效用函数的具体表达式. 接下来本文使用 CARA 效用^[28]函数刻画决策者的实际感知效用, 并基于仿真实验解释报童决策偏差现象.

由定义 4 可知, $r(\pi)$ 为描述决策者风险偏好的参数, 在考虑风险偏好时, 决策者的效用函数主要分为 3 种类型.

1) 递减绝对风险厌恶 (DARA). 随着财富水平不断增大, 决策者的风险规避程度将不断减弱, 一般情况下可用对数函数、混合指数函数和幂函数表示该效用函数.

2) 递增绝对风险厌恶 (IARA). 随着财富水平增大, 决策者的风险规避程度将递增, 一般情况下可用二次函数表示该效用函数.

3) 常绝对风险厌恶 (CARA). 决策者的风险规避程度与财富水平不相关, 一般情况下可用指数函数表示该效用函数.

本文的重点是研究风险偏好对决策者订购行为的影响, 不研究财富与风险偏好之间的关系, 因此本文选用 CARA 效用函数, 即

$$U(\pi) = 1 - e^{-r\pi}. \quad (6)$$

由图 2(a) 可知, 对于风险规避型决策者, 随着利润水平增大, 其感知效用不断增大, 但感知效用的增速在减小. 当利润增加到某一值后, 决策者的感知效用为一确定常数. 同理, 由图 (2b) 可知, 对于风险追逐

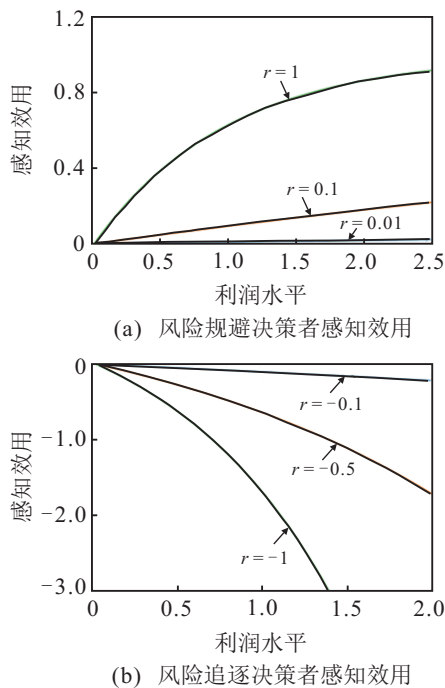


图 2 CARA 效用函数中决策者的感知效用

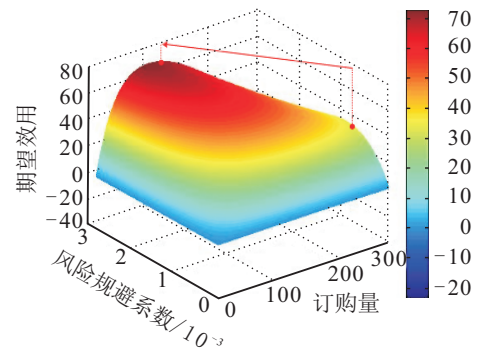
型决策者, 随着利润不断增加, 决策者的感知效用减小, 且感知效用的减速度在增大.

1.3.2 基于 CARA 效用函数的订购行为

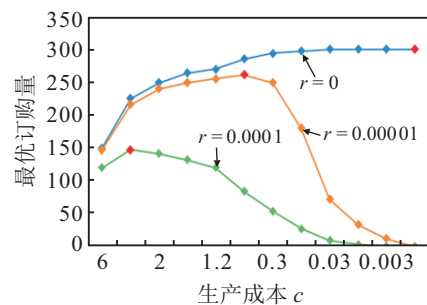
CARA 效用函数中, 决策者的感知效用与风险偏好系数、利润水平成指数关系, 期望利润的表达式十分复杂. 为了简化起见, 本文令需求为均匀分布, 将式 (6) 代入 (3), 可得考虑风险偏好后报童的期望效用为

$$EU[\pi(q, D)] = \frac{1}{b-a} \left[b - a + \frac{1}{r(p-s)} e^{-rq(p-c)} - \frac{1}{r(p-s)} e^{-r(qs-qc+pa-sa)} - (b-q)e^{-rq(p-c)} \right]. \quad (7)$$

仿真实验 2 仿真环境: $b=300, a=0, p=12, c=3, r=[0, 0.005]$. 如图 3(a) 所示, 当 $r=0$ 时, 决策者的感知效用随着订购量的增加先增后减, 当 $q=225$ 时, 感知效用达到最大值. 当 r 不断增大时, 曲面图的顶点的横坐标 (订购量) 均小于 225; 当 $0 < r < 0.005$ 时, $110 < q < 225$, 表明随着风险规避系数不断增大决策者的最优订购量在减小, 该结论与定理 2 的结论一致.



(a) 期望效用与订购量的关系



(b) 最优订购量与风险偏好系数的关系

图 3 决策者的期望效用与最优订购量

对式 (7) 求一阶导数, 可得考虑风险偏好报童的最优订购量为

$$\frac{p-c}{p-s} e^{-rq(p-c)} + \frac{s-c}{p-s} e^{-r(qs-qc+pa-sa)} + r(p-c)(b-q)e^{-rq(p-c)} + e^{-rq(p-c)} = 0. \quad (8)$$

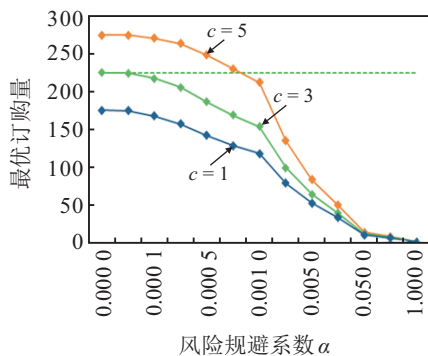
由式 (8) 可知, 决策者最优订购量表达式十分复杂. 为了分析风险偏好系数 r 与最优订购量 q^* 之间的

关系, 本文采用仿真实验的方法.

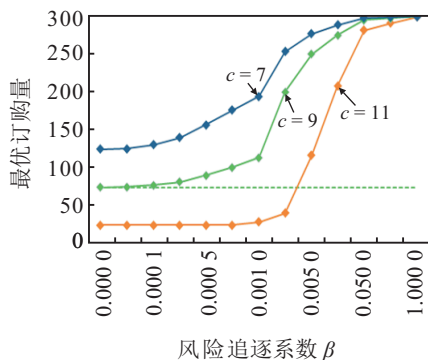
仿真实验3 仿真环境: $b=300, a=0, p=12, s=0, c=[0,6]$ (本部分以风险规避订购行为为例, 因此选取 $c < (p+s)/2$, 即 $c=[0,6]$), $r=[0,0.00001,0.0001]$. 仿真结果如图3(b)所示, 当风险偏好系数 $r=0$ 时, 随着订购成本趋近0, 订购过剩风险逐渐减小, 决策者的最优订购量不断增大. 当 $c \rightarrow 0$ 时, 决策者的最优订购量 $q^n \rightarrow 300$; 同时, 当风险规避系数由0.00001增加至0.0001时, 决策者的最优订购量将整体下移, 表明决策者的实际订购量与风险规避系数负相关, 该结论与定理6的结论一致.

由定理5可知, 在高(低)利润产品中, 决策者表现出风险规避(风险追逐)的订购行为, 为此本文采用仿真实验的方法来验证定理5.

仿真实验4 仿真环境: 由式(5)和(8)可知, 在高利润产品中, 有 $r = \alpha (r \in (0, 1))$, 可令 $b=300, a=0, p=12, s=0, c=[1,3,5]$; 在低利润产品中, 有 $r = -\beta (r \in (-1, 0))$, 可令 $b=300, a=0, p=12, s=0, c=[7,9,11]$. 仿真结果如图4(a)所示, 在高利润产品中, 当 $c=3$ 时, 风险中性决策者的最优订购量为225, 而随着风险规避系数的增加, 决策者的实际订购量均小于报童模型最优订购量. 同理, 如图4(b)所示, 在低利润产品中, 当 $c=9$ 时, 风险中性的最优订购量为75, 而随着风险追逐系数的增加, 决策者的实际订购量均大于报童模型最优订购量. 可见, 决策者的订购行为受风险偏好的影响, 实际订购量与报童模型最优订



(a) 风险规避系数与最优订购量的关系(高利润)



(b) 风险追逐系数与最优订购量的关系(低利润)

图4 风险偏好系数与最优订购量的关系

购量存在偏差, 并且该偏差满足报童决策偏差的特征.

2 行为实验分析

2.1 实验实施

2.1.1 实验设计

本文在报童模型的基础上, 借助 Microsoft Visual FoxPro 9.0 软件构建如下库存决策行为实验平台: 在每期库存决策中, 被试者面临的市场需求是不确定的, 但服从某一分布, 其分布函数已知; 在需求没有发生前, 被试者需要提前制定库存计划, 当提交库存计划后可以查看本期真实需求; 被试者在制定库存计划前, 实验屏幕会显示需求发生的概率、前10期的真实需求、成本结构以及该决策环境下对应最优订购量. 具体实验参数如下: 需求分布 $U \sim [0, 300]$, 市场零售价格 $p=12$, 期末残值 $s=0$.

实验1 (高利润市场) 进货成本 $c=3$, 最优订购为 $q^n=225$.

实验2 (平衡利润市场) 进货成本 $c=6$, 最优订购为150.

实验3 (低利润市场) 进货成本 $c=9$, 最优订购为75.

2.1.2 实验实施

本实验被试者在本科或研究生期间均选修过采购管理和运筹学, 对库存问题和报童问题均有较深的理解. 在实验开始前, 实验人员向被试者发放实验手册和实验原理等资料. 当被试者阅读完实验资料后, 实验人员使用 PowerPoint 向被试者讲解实验原理和实验操作方法, 并预留提问环节. 被试者将在一个封闭环境的计算机前完成上述3个实验, 在实验期间不允许被试者之间相互交流. 为了激励被试者在实验过程中均按自己的风险偏好和决策习惯参与实验, 尽量规避被试者的激进、保守、随意填写等极端行为, 本实验将向被试者提供实验报酬. 被试者最高可获得80元人民币, 最低可获得50元人民币. 完成上述3个实验需大约120min, 每位被试者将大约获得实验报酬65元人民币. 本行为实验于2014年9月6日在某大学决策行为研究实验室完成.

2.1.3 实验结果及分析

实验1、实验2、实验3各有18位被试者参与行为实验, 其中实验1、实验3每位被试者需完成45次决策, 实验2需完成60次决策. 为解决实验样本小的缺陷, 本文采用自助法(Bootstrap)扩大样本规模. 以均衡利润产品为例说明数据处理过程. 令决策者的实际订购量为初始样本 $y_{ij} \in Y (i=1, 2, \dots, m$ 表示第 i 个决策者, $j=1, 2, \dots, n$ 表示第 j 期订购量, 因此在均衡利润产品中有 $m=18, n=60$), Z 为 Bootstrap 样

本, $z_j \in \{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n\}$, 例如 z_1 就是从 18 个被试者第 1 期的订购量中随机选取一个样本, 重复 60 次可获得一个 Bootstrap 样本. 按照上述方法, 本文在 3 个行为实验中均生产了 10 000 个 Bootstrap 样本, 因此总样本量为 1 500 000 个.

2.2 研究假设

定理 2~定理 5 通过数理推理证明了在随机库存决策中, 决策者的风险偏好会发生逆转, 且决策者在实际库存决策中由于受风险偏好的影响, 使其订购行为表现出报童决策偏差现象. 在此, 本文将基于行为决策实验数据, 采用假设检验的方法进一步验证考虑风险偏好的库存决策模型(式 5)和定理 2~定理 5.

假设 1 (风险偏好) 在不同的决策场景中, 决策者的风险偏好保持不变, 即在高(低)利润产品中决策者均表现出风险规避订购行为, 或均表现出风险追逐订购行为.

Schweitzer 等^[3]和 Bolton 等^[4]认为, 决策者在高、低利润产品中将表现出相同的风险偏好. 诺贝尔奖得主阿莱斯于 1953 年提出了著名的阿莱斯悖论, 认为经典的期望效用理论在不确定情况下失效; 埃尔斯伯格悖论进一步证实了风险决策结果违背了期望效用理论; Lichtendtein 等^[29-30]指出, 决策者的风险偏好会在不同的决策场景中发生逆转. 本文认为, 决策者在高利润、低利润和均衡利润产品中将会表现出不同的风险偏好.

假设 2 (报童决策偏差) 决策者的实际订购行为与报童模型理论最优订购量之间存在偏差.

假设 2.1 (低利润产品) 在低利润产品中, 决策者表现出风险规避的订购行为, 即 $q_L \geq q^n$;

假设 2.2 (均衡产品) 在均衡利润产品中, 决策者表现出风险规避或风险追逐的订购行为, 即 $q_L = q^n$;

假设 2.3 (高利润产品) 在高利润产品中, 决策者表现出风险追逐的订购行为, 即 $q_L \leq q^n$.

Schweitzer 等^[3]只设计了高利润、低利润两种实验场景, 并发现了报童决策偏差现象. 本文在上述文献的基础上, 新增加了均衡利润产品, 试图通过行为实验来验证定理 5: 在高利润产品中, 决策者的平均订购量小于报童模型最优解; 在低利润产品中, 决策者的平均订购量大于报童模型最优解; 在均衡利润产品中, 决策者的平均订购量等于报童模型最优订购量.

假设 3 (风险偏好系数) 决策者的风险追逐系数显著大于风险规避系数, 即 $\beta < \alpha$.

由损失规避理论可知, 决策者在面对相同的损失和盈利时, 损失对决策者的影响更为显著. 定理 5 显

示, 决策者在高利润产品中表现出风险规避的订购行为; 在低利润产品中, 表现出风险追逐的订购行为. 本文将采用行为实验的方法, 验证决策者的订购行为是否满足损失规避理论.

2.3 假设检验

2.3.1 假设 1 检验结果

如图 5 所示, 在高利润产品 ($c = 3$) 中, 决策者的最大订购量为 217, 最小订购量为 122, 即被试者的实际订购量均小于报童模型最优订购量. 在均衡利润产品 ($c = 6$) 中, 决策者的最高订购量为 175, 最小订购量为 81, 被试者的实际订购量在报童模型最优订购量处上下波动. 在低利润产品 ($c = 9$) 中, 决策者的最大订购量为 139, 最小订购量为 73, 即大部分被试者的实际订购量大于报童模型最优订购量. 实验结果显示, 高利润产品中决策者的实际订购量小于报童模型最优解, 该结论与定理 3 的结论一致, 即在高利润产品中, 决策者将表现出规避订购行为. 同理, 在低利润产品中, 决策者的实际订购量大于报童模型最优解, 该结论与定理 4 的结论一致, 即在低利润产品中, 决策者将表现出风险追逐的订购行为.

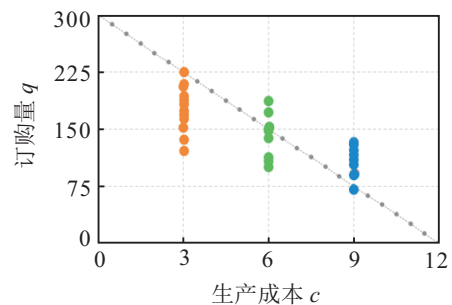


图 5 风险偏好逆转现象

2.3.2 假设 2 检验结果

如表 2 所示, 在高利润产品下, 被试者实际订购量的均值和中值分别为 177、174. 使用极大似然法 MLE (maximum likelihood estimation), 可估算出置信水平为 95% 时其分布区间为 [169, 186]. 而报童模型的理论最优解为 225, 可见在高利润产品中, 被试者的平均订购量显著性小于报童模型最优订购量. 由单样本 T 检验结果可知, $p = 0.0000 < 0.05$ ($t = -11.71$), 表明原假设(假设 2.1)不成立, 备择假设成立, 即在高利润产品中, 决策者的实际订购量显著小于理论最优解. 同理, 在低利润产品中, 决策者的平均订购量分布在 [91, 118], 最优订购量为 75, $p = 0.0002 < 0.05$ ($t = 4.38$), 表明假设 2.3 不成立, 即决策者的实际订购量显著大于理论最优解. 在均衡利润产品中, 被试者平均订购量的均值、中值分别为 147、148, 估计区间为 [143, 153], 可见在均衡利润产品中, 被试者的平均订购量与理论最优解十分接近. 由单样本 T 检验结果

可知, $p = 0.1081 > 0.05$ ($t = -1.70$), 表明原假设(假设2.2)成立, 即在均衡利润产品中, 决策者平均订购量与报童模型理论最优解无显著差异. 通过验证假设2可知, 决策者在不同产品中, 其实际订购行为与报童模型最优订购量之间存在一定差异. 假设2.1、假设2.3的验证结果进一步证实了报童决策偏差现象.

表2 决策者订购均值描述统计

原假设	均值	标准差	中值	估计区间	最优订购量	t	p
$\bar{q}_H \geq 225$	177	17	174	[169, 186]	225	-11.71	0.000 0
$\bar{q}_L \geq 75$	105	29	104	[91, 118]	75	4.38	0.000 2
$\bar{q}_B \geq 150$	147	8	148	[143, 153]	150	-1.70	0.108 1

注: 在做独立样本T检验时, 显著性水平设为0.05.

根据自助法的扩张样本, 可绘制图6所示的波动图. 如图6(a)所示, 在低利润产品的10000个Bootstrap样本中, 只有20个样本的订购量大于理论最优解($q^n = 75$), 即有99.8%的订购量满足报童决策偏差. 在高利润产品的10000个Bootstrap样本中, 所有样本的订购量均小于理论最优解($q^n = 225$). 在均衡利润产品的10000个Bootstrap样本中, 有5983个样本的订购量小于理论最优解($q^n = 150$), 即有55%(45%)的订购量小于(大于)报童模型最优订购量.

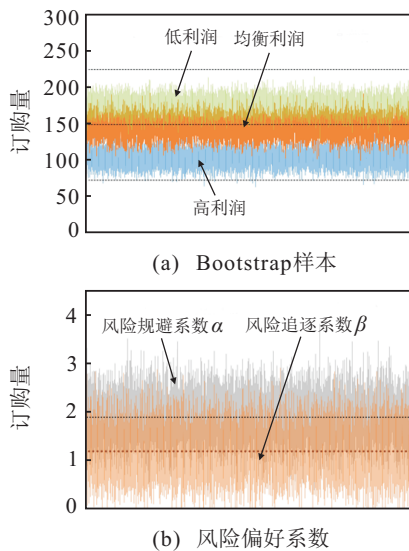


图6 决策者的实际订购量和风险偏好系数

2.3.3 假设3检验结果

根据式(5)和实验2、实验3的结果, 可计算出决策者风险规避系数 α 、风险追逐系数 β . 如图6(b)所示, 决策者风险规避系数、风险追逐系数的均值分别为1.90696、1.20393. 对 α 和 β 做配对样本T检验, 结果显示 $t = 110$, $p = 0.0000$, 表明 α 与 β 之间存在显著差异. 使用MLE可估计 α 和 β 的分布区间分别为 $\alpha \in [1.89, 1.93]$ 、 $\beta \in [1.18, 1.22]$, 可见假设3不成立, 即决策者的风险规避系数显著大于风险追逐系数. 该现象表明, 决策者在不确定库存决策问题中, 会同时表现出风险规避和风险追逐的订购行为, 但风

险规避对决策者订购行为的影响更大, 该结果与Kahneman和Tversky等^[31-32]提出的决策者在更多情况下表现出风险规避的结论一致.

3 结论

在随机需求库存决策问题中, 决策者的实际订购行为将受风险偏好的影响. 本文基于CARA效用函数构建库存决策行为模型, 并从风险偏好的角度解释了报童决策偏差形成机制, 同时使用行为实验的方法验证了模型及相关定理. 本文的主要结论如下:

- 1) 在随机需求库存决策中, 随着相对成本变化, 决策者的风险偏好会发生逆转;
- 2) 风险偏好逆转可以解释报童决策偏差现象;
- 3) 在实际库存决策中, 决策者的订购行为受风险规避偏差的影响大于风险追逐偏差的影响.

报童决策偏差是近10年来库存决策领域的重要发现, 该现象揭示了决策者的实际订购行为与理论模型之间存在偏差. 本文的研究结论显示在库存管理实践中, 考虑决策者个体风险偏好有利于缩小报童决策偏差, 提高库存管理效率. 但是, 本文在验证风险偏好对订购行为的影响时, 为了便于被试者理解需求, 假设市场需求为均匀分布, 而现实中需求比较复杂, 主要表现为正态分布; 另外, 由于实验环境受限, 本文主要研究了在校大学生的订购行为, 同时被试者数量偏少. 在接下来的研究中, 将扩大样本规模, 研究不同需求环境下企业管理者的实际订购行为.

参考文献(References)

- [1] Whitin T M. Inventory control and price theory[J]. Management Science, 1955, 2(1): 61-68.
- [2] Fisher M A, Raman A. Reducing the cost of demand uncertainty through accurate response to early sales[J]. Operational Research, 1996, 44(1): 87-99.
- [3] 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.
- [4] Bolton G, Elena K. Learning by doing in the newsvendor problem: A laboratory investigation of the role of experience and feedback[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2008, 10(3): 519-538.
- [5] Benzion U, Cohen Y, Peled R. Decision-making and the newsvendor problem: An experimental study[J]. J of the Operational Research Society, 2008, 59(9): 1281-1287.
- [6] Feng T J, Keller L, Zheng X L. Decision making in the newsvendor problem: Across-national laboratory study[J]. Omega, 2011, 39(1): 41-50.
- [7] Lan N, Sameer H, Neil B. Newsvendor pull-to-center reconsidered[J]. Decision Support Systems, 2014, 58(2): 68-73.

- [8] Su X. Bounded rationality in newsvendor models[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2008, 10(4): 566-589.
- [9] Bostian A, Holt A, Smith M. Newsvendor “pull-to-center” effect: Adaptive learning in a laboratory experiment[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2008, 10(4): 590-608.
- [10] Lurie N H, Swaminathan J M. Is timely information always better? The effect of feedback frequency on decision making[J]. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 2009, 108(2): 315-329.
- [11] Kremer M, Minner S. Do random errors explain newsvendor behavioral[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2010, 12(4): 673-681.
- [12] Neumann V J, Morgenstern O. *Theory of games and economic behavior*[M]. Princeton: Princeton University, 1947: 477-491.
- [13] Eeckhoudt L, Gollier C, Schlesinger H. The risk-averse(and prudent) newsboy[J]. *Management Science*, 1995, 41(5): 786-794.
- [14] Agrawal V, Seshadri S. Impact of uncertainty and risk aversion on price and order quantity in the newsvendor problem[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2000, 2(4): 410-423.
- [15] Wang C X, Webster S, Suresh N C. Would a risk-averse newsvendor order less at a higher selling price?[J]. *European J of Operational Research*, 2009, 196(2): 544-553.
- [16] 张艳霞, 赵晋, 霍佳震. 基于定常风险的报童问题风险分析[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(11): 485-483.
(Zhang Y X, Zhao J, Huo J Z. Risk analysis of the newsvendor problem based on steady risk preference[J]. *Chinese J of Management Science*, 2013, 21(11): 485-483.)
- [17] 秦娟娟, 赵道致. 风险偏好信息非对称下的供应链寄存契约研究[J]. *管理学报*, 2011, 8(2): 284-288.
(Qin J J, Zhao D Z. Supply chain consignment contract in context of asymmetric risk preference information[J]. *Chinese J of Management*, 2011, 8(2): 284-288.)
- [18] 陈克贵, 黄敏, 孟凡丽, 等. 非对称信息下考虑双方风险态度的外包合同设计[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2014, 35(9): 1234-1238.
(Chen K G, Huang M, Meng F L, et al. Design of outsourcing contract considering the risk attitude of both sides with asymmetric information[J]. *J of Northeastern University: Natural Science*, 2014, 35(9): 1234-1238.)
- [19] 刘咏梅, 成尚汶, 谢虎. 具有损失厌恶偏好零售商的供应链弹性数量契约[J]. *控制与决策*, 2012, 27(7): 975-982.
(Liu Y M, Cheng S W, Xie H. Research on supply chain quantity flexibility contract with a loss-averse preference retailer[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(7): 975-982.)
- [20] 李绩才, 周永务, 肖旦, 等. 考虑损失厌恶一对多型供应链的收益共享契约[J]. *管理科学学报*, 2013, 16(2): 71-83.
(Li J C, Zhou Y W, Xiao D, et al. Revenue-sharing contract in supply chains with single supplier and multiple loss-averse retailers[J]. *J of Management Sciences in China*, 2013, 16(2): 71-83.)
- [21] Nagarajan M, Shechter S. Prospect theory and the newsvendor problem[J]. *Management Sciences*, 2014, 60(4): 1057-1062.
- [22] 张晓, 樊治平, 陈发动. 考虑后悔规避的风险型多属性决策方法[J]. *系统管理学报*, 2014, 23(1): 111-116.
(Zhang X, Fan Z P, Chen F D. Risky multiple attribute decision making with regret aversion[J]. *J of Systems & Management*, 2014, 23(1): 111-116.)
- [23] 刘志云, 樊治平, 李铭洋. 考虑决策者给出参照点的风险型模糊多属性决策方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(7): 1358-1367.
(Liu Y Z, Fan Z P, Li M Y. Method for risky fuzzy multiple-attribute decision making considering decision maker's reference points[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2014, 36(7): 1358-1367.)
- [24] Katok E, Wu D Y. Contracting in supply chains: A laboratory investigation[J]. *Management Sciences*, 2009, 55(12): 1953-1968.
- [25] Kalkanci B, Chen Y, Erhun F. Contract complexity and performance under asymmetric demand information: An experimental evaluation[J]. *Management Sciences*, 2011, 57(4): 689-704.
- [26] Arrow K J. *Essays in the theory of risk bearing*[M]. Chicago: Markham Publishing Company, 1971: 155-161.
- [27] Pratt J W. Risk aversion in the small and in the large[J]. *Econometrica*, 1964, 32, 122-136.
- [28] Makarov D, Schornick A V. A note on wealth effect under CARA utility[J]. *Finance Research Letters*, 2010, 7(2010): 170-177.
- [29] Lichtendtein S, Slovic P. Reversals of preference between bids and choices in gambling decisions[J]. *J of Experimental Psychology*, 1971, 89: 46-55.
- [30] Slovic P, Lichtendtein S. Preference reversal: A broader perspective[J]. *The American Economic Review*, 1983, 73(4): 596-605.
- [31] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263-291.
- [32] Tversky A D, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. *J of Risk and Uncertainty*, 1992(5): 297-323.