第 30 卷 第 12 期
Vol. 30 No. 12

控 制 与 决 策
Control and Decision

2015 年 12 月
Dec. 2015

文章编号: 1001-0920 (2015) 12-2219-06 **DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2014.1749

随机需求下多风险偏好零售商的供应链库存决策和协调

禹海波，杨风杰

(北京工业大学 经济与管理学院，北京 100124)

摘 要: 考虑由单个风险中性供应商和 n 个风险偏好零售商组成的供应链系统. 假设市场需求是随机的, 且每个零售商面临的需求与其订货量成正比, 采用平均CVaR准则刻画零售商的风险偏好. 当零售商对称时, 得到系统总的均衡订货量关于零售商数量和风险偏好系数的单调性; 证明当风险偏好系数满足一定条件时, 批发价契约可以使供应链协调; 随机大需求导致系统较高的均衡订货量. 最后通过数值例子表明了需求可变性对系统总的均衡订货量的影响.

关键词: 需求不确定性；平均CVaR；随机占优；风险偏好；竞争

中图分类号: C934 **文献标志码:** A

Study of inventory decisions and coordination of supply chain with multiple risk preference retailers under stochastic demand

YU Hai-bo, *YANG Feng-jie*

(School of Economics and Management，Beijing University of Technology，Beijing 100124，China．Correspondent: YU Hai-bo，E-mail：haibo_yu@126.com)

Abstract: A supply chain with a risk neutral supplier and multiple risk preference retailers is studied. It is assumed that the market demand is random and each retailer's demand is directly proportional to its ordering quantity. The mean CVaR criterion is used to describe the retailers' attitudes towards risk. In the retailers symmetric, the monotonicity of the total balance order quantity of the system about retailers' number and risk preference coefficient is obtained. It is proved that when the risk appetite coefficient meets certain conditions, the wholesale contract can coordinate the supply chain, and the larger stochastic demand leads to higher total balance order quantity of the system. The numerical example is given to illustrate the influence of demand variability on the total balance order quantity of the system.

Keywords: demand uncertainty；mean CVaR；stochastic dominance；risk preference；competition

0 引 言

企业面临内外环境的诸多不确定性, 给企业造成一定损失, 如需求不确定导致企业的库存积压和库存不足损失等, 使得供应链存在一定的风险. 不同的企业对风险的态度是不同的, 供应链中的各企业是合作竞争的关系, 相互依赖又存在着潜在的利益冲突. 因此, 搞清楚风险偏好、竞争和需求不确定性对企业决策的影响, 有助于企业更好地实现企业运营目标.

条件风险价值 (CVaR) 是常用的风险测度准则之一. 21 世纪初, 学者相继提出最小化 CVaR[1]和最大化 CVaR, 并将其应用于库存和供应链研究中. 平均 CVaR 是最小化 CVaR 和最大化 CVaR 的加权平均, 能反映出决策者具有文献 [2] 提出的损失规避特性, 同时能反映出决策者 3 种风险态度:风险追求、风险中性和风险规避. 文献 [3-4] 研究了平均 CVaR 约束的报童模型, 但是没有考虑风险追求对决策的影响. 文献 [5-7] 研究了平均 CVaR 约束的报童模型, 证明风险规避情形比风险中性有较小的订货量, 风险追求情形比风险中性有较高的订货量. 文献 [8] 研究了平均 CVaR 约束的供应链协调问题. 更多有关条件风险价值在库存和供应链中的应用可参见文献 [9-13].

近年来, 学者将博弈论运用到库存和供应链研究中, 分析决策主体的竞争对决策产生的影响和决策的均衡问题. 特别地, 文献 [14-15] 研究了风险中性报童竞争模型, 文献 [16] 研究了损失规避零售商竞争模型, 文献 [17-18] 证明了零售商的风险厌恶和数量对库存有重要影响. 随机占优和可变序是研究不确定性对库存和供应链系统影响的有用工具, 常用的随机占优

收稿日期: 2014-11-17；**修回日期:** 2015-03-24.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(70971001)；北京工业大学研究生科技基金项目(ykj-2014-10729).

作者简介: 禹海波(1965−), 男, 副研究员, 从事随机库存与供应链管理、风险管理等研究；杨风杰(1990−), 女, 硕士生, 从事随机库存与供应链管理的研究.

和可变序主要有一阶随机占优 (随机大)、二阶随机占优 (递增凹序)、多可变序和割准则序等. 一些学者研究了需求不确定性对风险中性库存系统的影响[19-23]. 文献 [24] 证明了需求可变性与风险分担益处之间的关系, 文献 [25-26] 研究了需求不确定性对需求依赖于价格报童模型的影响, 文献 [7,13] 研究了需求不确定性对风险偏好零售商库存系统的影响. 文献 [8] 研究了需求不确定性对具有风险偏好零售商的供应链系统的影响, 文献 [27] 研究了需求不确定性对过度自信零售商库存系统的影响, 文献 [28] 概述了随机占优和可变序的理论知识, 及其在供应链管理中的应用.

文献 [7] 研究了需求不确定性对单个风险偏好零售商库存系统的影响, 文献 [15-16] 分别研究了多个风险中性和损失规避报童竞争模型. 本文则推广了文献 [7,15-16] 考虑多个风险偏好零售商的供应链系统, 既研究了供应链库存决策及零售商的数量和风险偏好与需求不确定性对系统均衡订货量的影响, 又研究了批发价契约下供应链的协调问题.

本文首先介绍模型, 并给出均衡订货量及其性质; 然后分析批发价契约对供应链协调问题, 分析需求不确定性对系统的影响; 最后进行总结, 并指出值得进一步研究的问题.

1 模型及其最优解

考虑两个均由 $n(n \geqslant 1)$ 个风险偏好零售商和一个风险中性供应商组成的单周期单类产品的两级供应链系统, 这两个系统除了需求分布不同外, 其余参数均相同. 系统 i 中市场的总需求 X_i 是定义在区间 $[\ell_i, \infty)$ 上的一般连续型随机变量, $\ell_i \geqslant 0$, X_i 的累积分布函数和概率密度函数分别为 $F_i(\cdot)$ 和 $f_i(\cdot)$. 假设 X_i 的累积分布函数 $F_i(\cdot)$ 严格单调增, 且其逆分布函数记为 $F_i^{-1}(\cdot)$, $i = 1, 2$. 假设在销售季节开始时系统中没有库存, 在批发价契约下, 第 i 个系统中第 j 个零售商 (简记为零售商 (i, j)) 按照需求 $X_{i,j}$, 以批发价 w 决定向供应商订购该类产品的数量 $y_{i,j}$. 当需求的实现小于 $y_{i,j}$ 时, 多余的库存有数值 v 的单位销售剩余; 当需求的实现大于 $y_{i,j}$ 时, 在销售季节结束时多余的需求损失掉, 不计缺货惩罚费用. 产品在订单下达后可以立即得到, 不计固定订货成本, 产品的市场零售价格为 p, 供应商的单位生产成本为 c, $p > w > c > v$. 为了表述方便, 引入 y_i 表示系统 i 中 n 个零售商的订货量之和, $\bar{y}_{i,-j}$ 表示系统 i 中除第 j 个零售商之外其余 $(n-1)$ 个零售商的订货量之和, $y_{i,-j}$ 表示系统 i 中除第 j 个零售商之外其余 $(n-1)$ 个零售商的订货量组成的 $(n-1)$ 维向量, 它们满足

$$y_i = \sum_{j=1}^{n} y_{i,j},\ \bar{y}_{i,-j} = y_i - y_{i,j},$$

$$y_{i,-j} = (y_{i,1}, \cdots, y_{i,j-1}, y_{i,j+1}, \cdots, y_{i,n}),$$

$$n \geqslant 1,\ i = 1, 2.$$

记 $(x)^+ = \max\{x, 0\}$, 假设顾客的市场搜索成本相当低 (如网上购物), 零售商 (i, j) 的市场需求 $X_{i,j}$ 与总需求 X_i 成比例[15], 有

$$X_{i,j} = \frac{y_{i,j}}{y_i} X_i. \tag{1}$$

零售商 (i, j) 采用平均 CVaR 准则, 其目标为

$$\max_{y_{i,j} \geqslant 0} \pi_{i,j}^r(y_{i,j}, y_{i,-j}) = \lambda \mathrm{CVaR}_\eta^1\Big(\prod_{i,j}^r(y_{i,j}, X_{i,j})\Big) + (1-\lambda)\mathrm{CVaR}_\eta^0\Big(\prod_{i,j}^r(y_{i,j}, X_{i,j})\Big). \tag{2}$$

其中: $\eta \in (0, 1)$, $\lambda \in [0, 1]$, $\mathrm{CVaR}_\eta^1(\cdot)$ 和 $\mathrm{CVaR}_\eta^0(\cdot)$ 分别为最大化和最小化 CVaR, $\prod_{i,j}^r(y_{i,j}, X_{i,j})$ 为零售商 (i, j) 的随机利润函数, 满足

$$\prod_{i,j}^r(y_{i,j}, X_{i,j}) = p\min(y_{i,j}, X_{i,j}) + v(y_{i,j} - X_{i,j})^+ - wy_{i,j}. \tag{3}$$

式 (2) 等价于如下形式[28]:

$$\max_{y_{i,j} \geqslant 0} \prod_{i,j}^r(y_{i,j}, y_{i,-j}) = k(\tilde{\lambda})E\Big[\prod_{i,j}^r(y_{i,j}, X_{i,j})\Big] + (1-k(\tilde{\lambda}))\mathrm{CVaR}_\eta^1\Big(\prod_{i,j}^r(y_{i,j}, X_{i,j})\Big). \tag{4}$$

其中

$$\mathrm{CVaR}_\eta^1(W) = \max_{z \in R}\Big\{z - \frac{1}{\eta}E[(z-W)^+]\Big\},$$

$$\tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{\eta},\ k(\tilde{\lambda}) = \frac{1-\eta\tilde{\lambda}}{1-\eta},\ \tilde{\lambda} \in [0, 1/\eta].$$

$\tilde{\lambda}$ 称为风险偏好系数, 当 $0 \leqslant \tilde{\lambda} < 1$ 时, $k(\tilde{\lambda}) > 1$, 对应于风险追求情形; 当 $\tilde{\lambda} = 1$ 时, $k(\tilde{\lambda}) = 1$, 对应于风险中性情形; 当 $1 < \tilde{\lambda} \leqslant 1/\eta$ 时, $0 \leqslant k(\tilde{\lambda}) < 1$, 对应于风险规避和损失规避情形.

为简化定理 1 的证明, 下面给出引理 1.

引理 1 $\mathrm{CVaR}_\eta^1\Big(\prod_{i,j}^r(y_{i,j}, X_{i,j})\Big)$ 有如下表达式:

$$\mathrm{CVaR}_\eta^1\Big(\prod_{i,j}^r(y_{i,j}, X_{i,j})\Big) = (p-w)y_{i,j} - (p-v)\frac{1}{\eta}\frac{y_{i,j}}{y_i}\int_{\ell_i}^{y_i} F_i(x)\mathrm{d}x,$$

$$\ell_i \leqslant y_i \leqslant F_i^{-1}(\eta); \tag{5}$$

$$\mathrm{CVaR}_\eta^1\Big(\prod_{i,j}^r(y_{i,j},X_{i,j})\Big)=$$

$$-(w-v)y_{i,j}+(p-v)\frac{y_{i,j}}{y_i}\frac{\tilde{T}_i(\eta)}{\eta},\ y_i>F_i^{-1}(\eta).\quad(6)$$

其中 $\tilde{T}_i(\gamma)=\int_{\underline{\ell}_i}^{F_i^{-1}(\gamma)}(\gamma-F_i(x))\mathrm{d}x+\gamma\underline{\ell}_i,\ \gamma\in[0,1]$, 称为 X_i 的广义 TTT (total time on test) 变换.

证明 记

$$\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)=z-\frac{1}{\eta}E\Big[\Big(z-\prod_{i,j}^r(y_{i,j},X_{i,j})\Big)^+\Big]$$

为最大化 CVaR 关于 z 的目标函数. 当 $z\geqslant(p-w)y_{i,j}$ 时, 可以验证 $\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)$ 在区间 $[(p-w)y_{i,j},\infty)$ 上是 z 的严格减函数; 当 $0\leqslant z<(p-w)y_{i,j}$ 时, 可以验证 $\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)$ 在区间 $[0,(p-w)y_{i,j})$ 上是 z 的严格凹函数, 且 $\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)$ 在 $z=(p-w)y_{i,j}$ 处的左导数为

$$\frac{\partial\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)}{\partial z}\Big|_{z=(p-w)y_{i,j}^-}=1-\frac{F_i(y_i)}{\eta}.$$

当 $\dfrac{\partial\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)}{\partial z}\Big|_{z=(p-w)y_{i,j}^-}\geqslant0$, 即 $\underline{\ell}_i\leqslant y_i\leqslant F_i^{-1}(\eta)$ 时, $\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)$ 在区间 $[0,\infty)$ 上是 z 的严格凹函数, 且在区间 $[(p-w)y_{i,j},\infty)$ 内取得最大值, 最大值点为 $z^*=(p-w)y_{i,j}$, 最大值为

$$\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z^*)=$$

$$(p-w)y_{i,j}-\frac{1}{\eta}(p-v)\frac{y_{i,j}}{y_i}\int_{\underline{\ell}_i}^{y_i}F_i(x)\mathrm{d}x.$$

当 $\dfrac{\partial\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)}{\partial z}\Big|_{z=(p-w)y_{i,j}^-}<0$, 即 $y_i>F_i^{-1}(\eta)$ 时, $\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z)$ 在区间 $[0,\infty)$ 上是 z 的严格凹函数, 且在区间 $[0,(p-w)y_{i,j})$ 内取得最大值, 最大值点为 $z^*=(p-v)y_{i,j}F_i^{-1}(\eta)/y_i-(w-v)y_{i,j}$, 最大值为

$$\varphi_i(y_{i,j},y_{i,-j},z^*)=-(w-v)y_{i,j}+(p-v)\frac{y_{i,j}}{y_i}\frac{\tilde{T}_i(\eta)}{\eta}.$$

当 n 个零售商的相关参数如产品零售价格 p, 批发价格 w, 产品残值 v, 风险偏好系数 $\tilde{\lambda}$ 均相同, 则称零售商对称. 下面的定理 1 将证明零售商纳什均衡订货量和系统总的均衡订货量. 记 $y_i^{\tilde{\lambda},n},\bar{y}_{i,-j}^{\tilde{\lambda}},y_{i,j}^{\tilde{\lambda}}$ 分别表示系统 i 中 n 个零售商总的均衡订货量, 系统 i 中除第 j 个零售商之外 $(n-1)$ 个零售商的均衡订货量之和, 零售商 (i,j) 的均衡订货量. $\rho=(p-w)/(p-v)$, $\tilde{\lambda}_0=\rho\Big/\Big(\eta-\dfrac{n-1}{n}\dfrac{\tilde{T}_i(\eta)}{F_i^{-1}(\eta)}\Big)$, $\tilde{\lambda}_0\in(0,1/\eta)$, $\rho\in(0,1)$. □

定理 1 1) 对于任意 $\tilde{\lambda}\in[0,1/\eta]$, $n\geqslant1$, 系统存在唯一纳什均衡解 $(y_{i,1}^{\tilde{\lambda}},y_{i,2}^{\tilde{\lambda}},\cdots,y_{i,n}^{\tilde{\lambda}})$, 其中 $y_{i,j}^{\tilde{\lambda}}$ 满足

$$\rho-\tilde{\lambda}\frac{y_{i,j}^{\tilde{\lambda}}}{y_i^{\tilde{\lambda},n}}F_i(y_i^{\tilde{\lambda},n})-\tilde{\lambda}\frac{\bar{y}_{i,-j}^{\tilde{\lambda}}}{(y_i^{\tilde{\lambda},n})^2}\int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^{\tilde{\lambda},n}}F_i(x)\mathrm{d}x=0,$$

$$\underline{\ell}_i\leqslant y_i^{\tilde{\lambda},n}\leqslant F_i^{-1}(\eta);\quad(7)$$

$$1-\frac{1-\rho}{k(\tilde{\lambda})}-\frac{y_{i,j}^{\tilde{\lambda}}}{y_i^{\tilde{\lambda},n}}F_i(y_i^{\tilde{\lambda},n})-\frac{\bar{y}_{i,-j}^{\tilde{\lambda}}}{(y_i^{\tilde{\lambda},n})^2}\int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^{\tilde{\lambda},n}}F_i(x)\mathrm{d}x+$$

$$\Big(\frac{\tilde{\lambda}}{k(\tilde{\lambda})}-1\Big)\frac{\bar{y}_{i,-j}^{\tilde{\lambda}}}{(y_i^{\tilde{\lambda},n})^2}\tilde{T}_i(\eta)=0,\ y_i^{\tilde{\lambda},n}>F_i^{-1}(\eta).\quad(8)$$

2) 当零售商对称时, 对于任意的 $\tilde{\lambda}\in[0,1/\eta]$, $n\geqslant1$, 系统存在唯一纳什均衡解 $(y_{i,1}^{\tilde{\lambda}},y_{i,2}^{\tilde{\lambda}},\cdots,y_{i,n}^{\tilde{\lambda}})$, 且满足 $y_{i,1}^{\tilde{\lambda}}=y_{i,2}^{\tilde{\lambda}}=\cdots=y_{i,n}^{\tilde{\lambda}}=\dfrac{1}{n}y_i^{\tilde{\lambda},n}$, 其中 $y_i^{\tilde{\lambda},n}$ 满足

$$1-\frac{1-\rho}{k(\tilde{\lambda})}-\frac{1}{n}F_i(y_i^{\tilde{\lambda},n})-\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_i^{\tilde{\lambda},n}}\int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^{\tilde{\lambda},n}}F_i(x)\mathrm{d}x+$$

$$\Big(\frac{\tilde{\lambda}}{k(\tilde{\lambda})}-1\Big)\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_i^{\tilde{\lambda},n}}\tilde{T}_i(\eta)=0,\ 0\leqslant\tilde{\lambda}<\tilde{\lambda}_0;\quad(9)$$

$$\rho-\tilde{\lambda}\frac{1}{n}F_i(y_i^{\tilde{\lambda},n})-\tilde{\lambda}\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_i^{\tilde{\lambda},n}}\int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^{\tilde{\lambda},n}}F_i(x)\mathrm{d}x=0,$$

$$\tilde{\lambda}_0\leqslant\tilde{\lambda}\leqslant1/\eta.\quad(10)$$

证明 1) 的证明类似引理 1, 证明过程略. 2) 当零售商对称时, 将 $y_{i,j}^{\tilde{\lambda}}=y_i^{\tilde{\lambda},n}/n\ (j=1,2,\cdots,n)$ 分别代入式 (7) 和 (8), 整理后即得到定理 1 的 2) 成立. □

注 1 1) 当 $\tilde{\lambda}\in[0,1/\eta]$, $n=1$ 时, 定理 1 的 2) 为

$$y_i^{\tilde{\lambda},1}=\begin{cases}F_i^{-1}\Big(1-\dfrac{1-\rho}{k(\tilde{\lambda})}\Big),\ 0\leqslant\tilde{\lambda}<\dfrac{\rho}{\eta};\\ F_i^{-1}(\dfrac{\rho}{\tilde{\lambda}}),\ \dfrac{\rho}{\eta}\leqslant\tilde{\lambda}\leqslant\dfrac{1}{\eta}.\end{cases}$$

与文献 [7] 定理 1 的结论相同. 2) 当 $\tilde{\lambda}=1$, $n\geqslant1$ 时, 定理 1 的 2) 为 $\rho-\dfrac{1}{n}F_i(y_i^{1,n})-\dfrac{n-1}{n}\dfrac{1}{y_i^{1,n}}\int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^{1,n}}F_i(x)\mathrm{d}x=0$, 与文献 [15] 的式 (22) 结论类似.

为了以下定理表述的方便, 引入函数 $g_i(y,n,\tilde{\lambda},w)$, 满足

$$g_i(y,n,\tilde{\lambda},w)=$$

$$\begin{cases}1-\dfrac{1-\rho}{k(\tilde{\lambda})}-\dfrac{1}{n}F_i(y)-\dfrac{n-1}{n}\dfrac{1}{y}\displaystyle\int_{\underline{\ell}_i}^{y}F_i(x)\mathrm{d}x+\\ \Big(\dfrac{\tilde{\lambda}}{k(\tilde{\lambda})}-1\Big)\dfrac{n-1}{n}\dfrac{1}{y}\tilde{T}_i(\eta),\ 0\leqslant\tilde{\lambda}<\tilde{\lambda}_0;\\ \rho-\tilde{\lambda}\dfrac{1}{n}F_i(y)-\tilde{\lambda}\dfrac{n-1}{n}\dfrac{1}{y}\displaystyle\int_{\underline{\ell}_i}^{y}F_i(x)\mathrm{d}x,\ \tilde{\lambda}_0\leqslant\tilde{\lambda}\leqslant\dfrac{1}{\eta}.\end{cases}$$

定理 2 当零售商对称时, 1) 对于任意的 $n\geqslant1$, 系统 i 总的均衡订货量 $y_i^{\tilde{\lambda},n}$ 在区间 $[0,1/\eta]$ 上是零售商风险偏好系数 $\tilde{\lambda}$ 的单调减函数.

2) 对于任意的 $\tilde{\lambda}\in[0,1/\eta]$, 系统 i 总的均衡订货量 $y_i^{\tilde{\lambda},n}$ 是零售商数量 $n(n\geqslant1)$ 的单调增函数.

证明 1) 假设对于任意的 $n\geqslant1$, $0\leqslant\tilde{\lambda}_1<\tilde{\lambda}_2\leqslant1/\eta$, $y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}$ 和 $y_i^{\tilde{\lambda}_2,n}$ 分别为零售商风险偏好系数是 $\tilde{\lambda}_1$ 和 $\tilde{\lambda}_2$ 时系统 i 总的均衡订货量. 再根据定理 1 得到

$$g_i(y_i^{\tilde{\lambda}_1,n},n,\tilde{\lambda}_1,w)=g_i(y_i^{\tilde{\lambda}_2,n},n,\tilde{\lambda}_2,w)=0.$$

容易证明 $\dfrac{\partial g_i(y,n,\tilde{\lambda},w)}{\partial y}<0$. 当 $0\leqslant\tilde{\lambda}_1<\tilde{\lambda}_2<\tilde{\lambda}_0$ 时,

$y, y_i^{\tilde{\lambda}_1,n} \geqslant F_i^{-1}(\eta)$, 又由 $\tilde{\lambda}_0 < 1/\eta$ 得, $\rho\eta < (\eta - ((n-1)/n)(\tilde{T}_i(\eta))/(F_i^{-1}(\eta)))$, 则有

$$\frac{\partial g_i(y,n,\tilde{\lambda},w)}{\partial \tilde{\lambda}} = \frac{1-\eta}{(1-\tilde{\lambda}\eta)^2}\Big[\frac{n-1}{n}\frac{1}{y}\tilde{T}_i(\eta) - (1-\rho)\eta\Big] < \frac{1-\eta}{(1-\tilde{\lambda}\eta)^2}\Big[\rho\eta - \Big(\eta - \frac{n-1}{n}\frac{\tilde{T}_i(\eta)}{F_i^{-1}(\eta)}\Big)\Big] < 0,$$

$$g_i(y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}, n, \tilde{\lambda}_2, w) - g_i(y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}, n, \tilde{\lambda}_1, w) = \frac{\tilde{\lambda}_2 - \tilde{\lambda}_1}{(1-\eta)k(\tilde{\lambda}_2)k(\tilde{\lambda}_1)}\Big[\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}}\tilde{T}_i(\eta) - (1-\rho)\eta\Big] < \frac{\tilde{\lambda}_2 - \tilde{\lambda}_1}{(1-\eta)k(\tilde{\lambda}_2)k(\tilde{\lambda}_1)}\Big[\rho\eta - \Big(\eta - \frac{n-1}{n}\frac{\tilde{T}_i(\eta)}{F_i^{-1}(\eta)}\Big)\Big] < 0.$$

当 $\tilde{\lambda}_0 \leqslant \tilde{\lambda}_1 < \tilde{\lambda}_2 \leqslant 1/\eta$ 时, 容易证明 $\partial g_i(y,n,\tilde{\lambda},w)/\partial\tilde{\lambda} < 0$, 且 $g_i(y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}, n, \tilde{\lambda}_2, w) - g_i(y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}, n, \tilde{\lambda}_1, w) < 0$, 即对于任意 $n \geqslant 1, 0 \leqslant \tilde{\lambda}_1 < \tilde{\lambda}_2 \leqslant 1/\eta$, 都有 $\partial g_i(y,n,\tilde{\lambda},w)/\partial\tilde{\lambda} < 0$, 且 $g_i(y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}, n, \tilde{\lambda}_2, w) < g_i(y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}, n, \tilde{\lambda}_1, w) = 0$. 因此, 对于任意的 $n \geqslant 1$, 有 $0 \leqslant \tilde{\lambda}_1 < \tilde{\lambda}_2 \leqslant 1/\eta$, $y_i^{\tilde{\lambda}_2,n} < y_i^{\tilde{\lambda}_1,n}$. 定理 2 第 2 部分的证明与定理 2 第 1 部分类似, 证明过程略. □

注 2 1) 定理 2 的1) 表明当零售商风险追求 ($\tilde{\lambda} \in [0,1)$) 时, 系统 i 总的均衡订货量大于零售商风险中性时系统 i 总的均衡订货量; 当零售商风险规避 ($\tilde{\lambda} \in (1, 1/\eta]$) 时, 系统 i 总的均衡订货量小于风险中性时系统 i 总的均衡订货量. 当 $\tilde{\lambda} \in [1, 1/\eta]$ 时, 定理 2 的 1) 与文献 [16] 性质 3 的结论相同; 当 $n = 1$ 且 $\tilde{\lambda} \in [0, 1/\eta]$ 时, 定理 2 的 1) 与文献 [7] 定理 2 的结论相同. 2) 定理 2 的 2) 表明多个零售商的竞争导致系统总的均衡订货量增加. 当 $\tilde{\lambda} \in [1, 1/\eta]$ 时, 定理 2 的 2) 与文献 [16] 性质 2 的结论相同.

注 3 当零售商非对称时, 定理1给出了零售商均衡订货量 $y_{i,j}^{\tilde{\lambda}}$ 满足的表达式, 在此, 用数值研究当每个零售商风险偏好系数 $\tilde{\lambda}$ 不同, 而产品零售价格 p、批发价格 w、残值 v 相同时, 不同风险偏好零售商的均衡订货量 $y_{i,j}^{\tilde{\lambda}}$ 和系统均衡订货量 $y_i^{\tilde{\lambda},n}$. 假设 X_i 服从区间 $[\underline{\ell}_i, a + \underline{\ell}_i]$ 上的均匀分布, 取 $\underline{\ell}_i = 1, a = 100, n = 2, p = 40, w = 30, c = 15, v = 5, \eta = 0.8$, 结果见表1.

表 1 零售商和系统均衡订货量

	$\tilde{\lambda}_2$	0.5	0.7	0.9	1	1.1	1.3
$\tilde{\lambda}_1 = 0.5$	$y_{i,1}^{\tilde{\lambda}}$	38.76	49.65	55.70	57.82	59.55	62.21
	$y_{i,2}^{\tilde{\lambda}}$	38.76	16.99	4.89	0.66	0.004 0	0.004 4
	$y_i^{\tilde{\lambda},2}$	77.52	66.63	60.59	58.47	59.55	62.22
$\tilde{\lambda}_1 = 1$	$y_{i,1}^{\tilde{\lambda}}$	0.66	11.54	17.59	19.71	21.44	24.11
	$y_{i,2}^{\tilde{\lambda}}$	57.82	36.04	23.94	19.71	16.24	10.91
	$y_i^{\tilde{\lambda},2}$	58.47	47.58	41.54	39.42	37.69	35.02
$\tilde{\lambda}_1 = 1.5$	$y_{i,1}^{\tilde{\lambda}}$	0.005	0.006	4.88	7.00	8.74	11.40
	$y_{i,2}^{\tilde{\lambda}}$	64.17	42.40	30.30	26.07	22.60	17.27
	$y_i^{\tilde{\lambda},2}$	64.17	42.40	35.19	33.07	31.34	28.67

由表 1 可见, 当零售商 1 风险偏好一定时, 零售商 1 的均衡订货量随零售商 2 的风险偏好系数的增大而增大. 随着零售商 2 的风险偏好系数的增大, 当零售商 1 为风险追求 (如 $\tilde{\lambda}_1 = 0.5$) 时, 零售商 2 的均衡订货量和系统总的均衡订货量先减小后增大; 当零售商 1 为风险中性和风险规避 (如 $\tilde{\lambda}_1 = 1, 1.5$) 时, 零售商 2 的均衡订货量和系统总的均衡订货量减小. 另外, 当两个零售商的风险偏好相同时, 两个零售商的均衡订货量相同; 当两个零售商的风险偏好不同时, 零售商越追求风险其均衡订货量越大. 如, 当 $\tilde{\lambda}_1 = 1$ 时, $\tilde{\lambda}_2 > 1$, $y_{i,2}^{\tilde{\lambda}} < y_{i,1}^{\tilde{\lambda}}$; $\tilde{\lambda}_2 < 1$, $y_{i,2}^{\tilde{\lambda}} > y_{i,1}^{\tilde{\lambda}}$, 这与现实情况相符合, 零售商越追求风险, 就越冒险, 对应的投资便越大.

2 供应链协调

本节给出供应链集中系统的最优订货量. 集中型供应链系统 $i(i = 1, 2)$ 的期望利润为

$$\Pi_i^c(y_i) = \mathrm{E}[p\min(y_i, X_i) + v(y_i - X_i)^+ - cy_i]. \quad (11)$$

经计算, 式 (11) 是 y_i 的严格凹函数, 则系统存在唯一的最优订货量 y_i^c, 记 $\rho^c = (p-c)/(p-v)$, 有

$$y_i^c = F_i^{-1}(\rho^c). \quad (12)$$

定理 3 1) 当零售商对称时, 对于任意的 $n \geqslant 1$, $\tilde{\lambda}_0 = \rho\Big/\Big(\eta - \dfrac{n-1}{n}\dfrac{\tilde{T}_i(\eta)}{F_i^{-1}(\eta)}\Big)$, 当 $\tilde{\lambda}_0 \leqslant \tilde{\lambda} < 1$ 时, 批发价契约可以使供应链协调, 此时批发价 w^* 满足

$$w^* = p - \tilde{\lambda}(p-c)\frac{1}{n} - \tilde{\lambda}(p-v)\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_i^c}\int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^c} F_i(x)\mathrm{d}x. \quad (13)$$

2) 当零售商对称时, 使供应链协调的批发价格 w^* 是零售商风险偏好系数 $\tilde{\lambda}(\tilde{\lambda}_0 \leqslant \tilde{\lambda} < 1)$ 的单调减函数, 是零售商数量 $n(n \geqslant 1)$ 的单调增函数.

证明 1) 当函数 $g_i(y,n,\tilde{\lambda},w)$ 中的 $y = y_i^c$ 时, 经计算可得 $\partial g_i(y_i^c,n,\tilde{\lambda},w)/\partial w < 0$, 当 $\tilde{\lambda}_0 \leqslant \tilde{\lambda} \leqslant 1/\eta$ 时, 有

$$g_i(y_i^c, n, \tilde{\lambda}, p) < 0,$$

$$g_i(y_i^c, n, \tilde{\lambda}, c) = \rho^c - \tilde{\lambda}\frac{1}{n}\rho^c - \tilde{\lambda}\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_i^c}\int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^c} F_i(x)\mathrm{d}x = \rho^c(1-\tilde{\lambda}) + \tilde{\lambda}\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_i^c}\Big(\rho^c y_i^c - \int_{\underline{\ell}_i}^{y_i^c} F_i(x)\mathrm{d}x\Big) > \rho^c(1-\tilde{\lambda}).$$

所以, 当 $\tilde{\lambda}_0 \leqslant \tilde{\lambda} < 1$ 时, $g_i(y_i^c, n, \tilde{\lambda}, c) > 0$, 存在 $w^* \in (c, p)$ 使得 $g_i(y_i^c, n, \tilde{\lambda}, w^*) = 0$, 即批发价契约可以使供应链协调. 当 $0 \leqslant \tilde{\lambda} < \tilde{\lambda}_0$ 时, 用类似的方法可以证明不存在 $w^* \in (c, p)$ 使得 $g_i(y_i^c, n, \tilde{\lambda}, w^*) = 0$. 2) 式 (13) 两边分别对 $\tilde{\lambda}$ 和 n 求一阶导数得到 $\partial w^*/\partial\tilde{\lambda} < 0$, $\partial w^*/\partial n > 0$. □

注 4 1) 定理 3 的 1) 表明, 当零售商的风险偏好系数满足一定条件时, 批发价契约可以使供应链协调; 2) 当 $n = 1$ 时, $\tilde{\lambda}_0 = \rho/\eta$, 定理 3 的 1) 变为当 $\rho/\eta \leqslant \tilde{\lambda} < 1$ 时, 批发价契约可以使供应链协调; 3) 当 $n = 1$, 且 $\tilde{\lambda} = 1$, 即只有一个风险中性零售商时, 批发价契

约不能使供应链协调; 4) 定理 3 的 2) 表明使供应链协调的批发价格随零售商风险偏好系数的增大而减小, 随零售商数量的增加而增大; 5) 零售商的竞争和风险偏好对批发价契约下供应链的协调有一定影响.

3　需求不确定性对系统的影响

对于定义在不同区间 $[\ell_1,\infty)$ 和 $[\ell_2,\infty)$ 上的连续型随机变量 X_1 和 X_2, 其累积分布函数为 $F_1(\cdot)$ 和 $F_2(\cdot)$, 概率密度函数分别为 $f_1(\cdot)$ 和 $f_2(\cdot)$, 均值为 $\mathrm{E}[X_1]$ 和 $\mathrm{E}[X_2]$, 方差为 $\mathrm{Var}(X_1)$ 和 $\mathrm{Var}(X_2)$. 记 $\ell_1 \bigwedge \ell_2=\min\{\ell_1,\ell_2\}$, 对于任意的 $t\in[\ell_1\bigwedge\ell_2,\infty)$, 记

$$H^1(t)=F_2(t)-F_1(t), \tag{14}$$

$$H^3(t)=\int_{\ell_2}^t\int_{\ell_2}^x F_2(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}t-\int_{\ell_1}^t\int_{\ell_1}^x F_1(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}t. \tag{15}$$

下面给出一阶随机占优和割准则序的定义.

定义 1　如果 $H^1(t)\geqslant 0$ 对于所有的 $t\in[\ell_1\bigwedge\ell_2,\infty)$ 都成立, 则称 X_1 在一阶随机占优意义下比 X_2 大, 记为 $X_1\geqslant_{1-\mathrm{SD}}X_2$. 如果 X_2 和 X_1 的累积分布函数之差的符号变换次数为 1 且符号序列为 +、−, 则称 X_2 按割准则序比 X_1 大, 记为 $X_1\leqslant_{\mathrm{cut}}X_2$.

定义 1 中的一阶随机占优又称随机大, 文献 [28] 证明 $X_1\geqslant_{1-\mathrm{SD}}X_2\Rightarrow \mathrm{E}[X_1]\geqslant\mathrm{E}[X_2]$ 且 $\tilde{T}_1(\gamma)\geqslant\tilde{T}_2(\gamma)$, $\forall\gamma\in[0,1]$; 如果 $\mathrm{E}[X_1]=\mathrm{E}[X_2]$, 则 $H^3(\infty)>0\Leftrightarrow \mathrm{Var}(X_1)<\mathrm{Var}(X_2)$.

定理 4　当零售商对称时, 系统 i 总的均衡订货量 $y_i^{\tilde{\lambda},n}$ 由式 (9) 和 (10) 给出, $i=1,2$. 则 $X_1\geqslant_{1-SD}X_2\Rightarrow y_1^{\tilde{\lambda},n}\geqslant y_2^{\tilde{\lambda},n}$ 对于所有的 $n\geqslant 1$, $\rho\in(0,1)$, $\eta\in(0,1)$, $\tilde{\lambda}\in[0,1/\eta]$ 成立.

证明　系统 1 和系统 2 总的均衡订货量为 $y_1^{\tilde{\lambda},n}$、$y_2^{\tilde{\lambda},n}$, 由定理 1 的 2) 得到 $g_1(y_1^{\tilde{\lambda},n},n,\tilde{\lambda},w)=g_2(y_2^{\tilde{\lambda},n},n,\tilde{\lambda},w)=0$. 当 $X_1\geqslant_{1-\mathrm{SD}}X_2$ 时, 由一阶随机占优的定义和性质可得: 当 $0\leqslant\tilde{\lambda}<\tilde{\lambda}_0$ 时, 有

$$y_i^{\tilde{\lambda},n}>F_i^{-1}(\eta),$$

$$\begin{aligned}&g_2(y_1^{\tilde{\lambda},n},n,\tilde{\lambda},w)-g_1(y_1^{\tilde{\lambda},n},n,\tilde{\lambda},w)=\\&\frac{1}{n}(F_1(y_1^{\tilde{\lambda},n})-F_2(y_1^{\tilde{\lambda},n}))+\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_1^{\tilde{\lambda},n}}\Big[\int_{\ell_1}^{y_1^{\tilde{\lambda},n}}F_1(x)\mathrm{d}x-\\&\int_{\ell_2}^{y_1^{\tilde{\lambda},n}}F_2(x)\mathrm{d}x\Big]+\Big(\frac{\tilde{\lambda}}{k(\tilde{\lambda})}-1\Big)\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_1^{\tilde{\lambda},n}}(\tilde{T}_2(\eta)-\tilde{T}_1(\eta))\leqslant\\&F_1(y_1^{\tilde{\lambda},n})-F_2(y_1^{\tilde{\lambda},n})+\frac{\tilde{\lambda}}{k(\tilde{\lambda})}\frac{n-1}{n}\frac{1}{y_1^{\tilde{\lambda},n}}(\tilde{T}_2(\eta)-\tilde{T}_1(\eta))<0.\end{aligned}$$

当 $\tilde{\lambda}_0\leqslant\tilde{\lambda}\leqslant 1/\eta$ 时, 有 $g_2(y_1^{\tilde{\lambda},n},n,\tilde{\lambda},w)-g_1(y_1^{\tilde{\lambda},n},n,\tilde{\lambda},w)<0$. 因此, $X_1\geqslant_{1-\mathrm{SD}}X_2\Rightarrow y_1^{\tilde{\lambda},n}\geqslant y_2^{\tilde{\lambda},n}$. □

注 5　1) 定理 4 表明, 对于任意的 $\tilde{\lambda}\in[0,1/\eta]$, $n\geqslant 1$, 随机大需求总会导致系统较高的订货量. 特别地, 当 $n=1$ 时, 定理 4 变为对于所有的 $\rho,\eta\in(0,1)$, $\tilde{\lambda}\in[0,1/\eta]$, 有 $X_1\geqslant_{1-\mathrm{SD}}X_2\Rightarrow y_1^{\tilde{\lambda},n}\geqslant y_2^{\tilde{\lambda},n}$, 这与文献 [7] 定理 3 的结论一致. 2) 在割准则序意义下, 数值例子表明系统总的订货量受需求可变性的影响.

例 1　假设 X_1 和 X_2 分别服从区间 [1, 3] 和 [0, 4] 的均匀分布, 则 X_1 和 X_2 满足 $\mathrm{E}[X_1]=\mathrm{E}[X_2]$, $\mathrm{Var}(X_1)<\mathrm{Var}(X_2)$; 广义 TTT 变换 $\tilde{T}_1(\gamma)-\tilde{T}_2(\gamma)=\gamma-\gamma^2>0$, 对于所有的 $\gamma\in[0,1]$ 成立; $H^3(\infty)=0.5>0$. 特别地, 取 $p\in[23,155]$, $c=20$, $v=5$, $\eta=0.2$. 系统均衡订货量 $y_1^{\tilde{\lambda},n}-y_2^{\tilde{\lambda},n}$ 的取值如表 2 所示.

表 2　系统均衡订货量 $y_1^{\tilde{\lambda},n}-y_2^{\tilde{\lambda},n}$ 的取值

ρ	$n=1$							$n=2$			$n=3$		
	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.4	0.5	0.57	0.2	0.4	0.42
$\tilde{\lambda}=1$	0.60	0.20	0.00	−0.20	−0.40	−0.60	−0.80	0.12	−0.13	−0.31	0.63	0.10	0.05
$\tilde{\lambda}=2$	0.80	0.60	0.33	0.07	−0.20	−0.47	−0.73	0.64	0.35	0.13	0.90	0.69	0.63
$\tilde{\lambda}=3$	0.87	0.73	0.67	0.60	0.20	−0.20	−0.60	0.79	0.94	0.79	0.94	1.10	1.11

由表 2 可见, 当 $n=1$ 时, 对于任意的 $\tilde{\lambda}\in[1,1/\eta]$, 存在 ρ_0, 当 $\rho\in(0,\rho_0)$ 时, $y_1^{\tilde{\lambda},n}>y_2^{\tilde{\lambda},n}$; 当 $\rho\in(\rho_0,1)$ 时, $y_1^{\tilde{\lambda},n}<y_2^{\tilde{\lambda},n}$. 即系统不存在竞争情况下, 当销售价格大于某个临界值时, 系统最优订购量随需求可变性的增加而增加, 但当销售价格低于该临界值时, 系统随着需求可变性的增加而减小. 当 $n=2,\tilde{\lambda}=1$, ρ 取 0.4 时, $y_1^{\tilde{\lambda},n}>y_2^{\tilde{\lambda},n}$, ρ 取 0.5、0.57 时, $y_1^{\tilde{\lambda},n}<y_2^{\tilde{\lambda},n}$; 当 $n=2,\tilde{\lambda}>1$ 时, $y_1^{\tilde{\lambda},n}>y_2^{\tilde{\lambda},n}$; 当 $n=3$ 时, $y_1^{\tilde{\lambda},n}>y_2^{\tilde{\lambda},n}$, 即当 $n(n\geqslant 2)$ 个零售商风险规避时, 系统总的均衡订货量随需求可变性的增加而减少.

4　结　论

本文探讨了零售商数量和风险偏好与需求不确定性对零售商均衡订货量的影响, 以及批发价契约下供应链的协调问题. 在零售商对称的情况下, 证明了当零售商风险偏好系数满足一定条件时, 批发价契约可以使供应链协调, 随机大需求导致系统较高的均衡订货量. 数值例子表明: 当 $n(n\geqslant 2)$ 个零售商风险规避时, 系统均衡订货量随需求可变性的增加而减少; 当零售商风险偏好不同时, 零售商越追求风险其订货量越高. 值得进一步研究的问题是, 需求依赖于销售努力时, 风险偏好和竞争对供应链系统的影响.

参考文献(References)

[1] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of conditional value-at-risk[J]. J of Risk, 2000, 2(3): 221-420.

[2] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decisions under risk[J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263-291.

[3] Xu M H, Li J B. Optimal decisions when balancing

expected profit and conditional value-at-risk in newsvendor models[J]. J of Systems Science and Complexity, 2010, 23(6): 1054-1070.

[4] Xu M H, Li J B. Comparative analysis of optimal strategies with two purchase modes under different risk-averse criterion[J]. J of Wuhan University: Natural Sciences, 2009, 14(4): 287-292.

[5] Gotoh J, Takano Y. Newsvendor solutions via conditional value-at-risk minimization[J]. European J of Operational Research, 2007, 179(1): 80-96.

[6] 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.

[7] 禹海波, 王莹莉. 不确定性对混合 CVaR 约束库存系统的影响[J]. 运筹与管理, 2014, 24(1): 20-25.
(Yu H B, Wang Y L. Effect of uncertainty in inventory systems with mixture CVaR constrain[J]. Operations Research and Management Science, 2014, 24(1): 20-25.)

[8] 禹海波, 王莹莉, 董承华. 需求不确定性对混合条件风险价值约束供应链系统的影响[J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 2011-2017.
(Yu H B, Wang Y L, Dong C H. Impact of demand uncertainty in supply chain systems with mixture conditional value-at-risk criterion[J]. Control and Decision, 2014, 29(11): 2011-2017.)

[9] Chen X, Sim M, Simchi-Levi D, et al. Risk aversion in inventory management[J]. Operation Research, 2004, 55(5): 828-842.

[10] 许明辉, 于刚, 张汉勤. 带有缺货惩罚的报童模型中的 CVaR 研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(10): 1-8.
(Xu M H, Yu G, Zhang H Q. CVaR in a Newsvendor Model with Lost Sale Penalty Cost[J]. Systems Engineering —Theory & Practice, 2006, 26(10): 1-8.)

[11] 李建斌, 张汉勤, 于刚. 带有市场搜索的供应链最优策略的分析与比较[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(10) : 53-62.
(Li J B, Zhang H Q, Yu G. Comparative analysis of optimal strategies in risk-averse distribution systems with market search[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2009, 29(10): 53-62.)

[12] Chen Y H, Xu M H, Zhang Z G. A risk-averse newsvendor model under the cvar criterion[J]. Operations Research, 2009, 57(4): 1040-1044.

[13] 禹海波. 需求不确定性对条件风险价值约束库存系统的影响[J]. 控制与决策, 2013, 28(9): 1389-1392.
(Yu H B. Impact of demand uncertainty on inventory system with conditional value-at-risk constrain[J]. Control and Decision, 2013, 28(9): 1389-1392.)

[14] Lippman S A, McCardle K F. The competitive newsboy[J]. Operations Research, 1997, 45(1): 54-65.

[15] Cachon G P. Supply chain coordination with contracts[Z]. 2003.

[16] Wang C X. The loss-averse newsvendor game[J]. Int J Production Economics, 2010, 124(2): 448-452.

[17] Li J B, Gao C X, Hu W, et al. Analysis of conditional value-at-risk for newsvendor with holding and backorder cost under market search[J]. J of Wuhan University: Natural Sciences, 2007, 12(6): 979-984.

[18] 侯阔林, 洪志明, 吴瑞溢, 等. 风险厌恶条件下竞争报童问题的二层规划模型[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(4): 45-52.
(Hou K L, Hong Z M, Wu R Y, et al. Study on bilevel programming model of competitive newsvendor problem with risk averse condition[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(4): 45-52.)

[19] Song J S. The effect of leadtime uncertainty in a simple stochastic inventory model[J]. Management Science, 1994, 40(5): 603-613.

[20] Song J S. Understanding the leadtime effects in stochastic inventory systems with discounted costs[J]. Operations Research Letters, 1994, 15(2): 85-93.

[21] Ridder A, Van der Laan E, Solomon M. How larger demand variability may lead to lower costs in the newsvendor problem[J]. Operatiions Research, 1998, 46(6): 934-936.

[22] Gerchak Y, Mossman D. On the effect of demand randomness on inventories and costs[J]. Operations Research, 1992, 40(4): 804-807.

[23] 禹海波, 杨传平. 需求依赖销售努力库存系统的随机比较[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(6): 9-17.
(Yu H B, Yang C P. Stochastic comparison on inventory system with demand depending on sales efforts[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(6): 9-17.)

[24] Gerchak Y, He Q M. On the relation between the benefit of risk pooling and the variability of demand[J]. Trans on IIE, 2003, 35(11): 1027-1031.

[25] Xu M H, Chen F, Xu X L. The effect of demand uncertainty in a price-setting newsvendor model[J]. European J of Operational Research, 2010, 207(2): 946-957.

[26] Li Q, Atkins D. On the effect of demand randomness on a price/quantity setting firm[J]. Trans on IIIE, 2005, 37(12): 1143-1153.

[27] 禹海波, 王晓薇. 过度自信和需求不确定性对库存系统的影响[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1893-1898.
(Yu H B, Wang X W. The effects of overconfidence and demand uncertainty in inventory systems[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1893-1898.)

[28] 禹海波. 供应链系统的随机比较[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 21-157.
(Yu H B. The stochastic comparison of supply chain[M]. Beijing: Science Press, 2013: 21-157.)

(责任编辑：郑晓蕾)