第 29 卷 第 10 期
Vol. 29 No. 10

控 制 与 决 策
Control and Decision

2014 年 10 月
Oct. 2014

文章编号: 1001-0920 (2014) 10-1899-08 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2013.0912

具有损失规避零售商的模糊供应链网络均衡

胡劲松, 赵光丽

(青岛大学 管理科学与工程系，山东 青岛 266071)

摘 要: 针对模糊市场需求情形, 研究具有损失规避行为零售商的无缺货成本的供应链网络均衡问题. 利用模糊事件的可信性测度理论, 推导具有分段线性效用函数损失规避零售商的模糊期望效用模型, 揭示其凹性性质. 利用变分不等式理论, 描述制造商、零售商和消费者的最优行为, 进而构建网络均衡模型. 为了简化网络均衡条件, 揭示了制造商与零售商内生交易定价机制的等价关系. 最后, 利用数值分析表明了市场需求的模糊性和损失规避系数对网络均衡的影响.

关键词: 供应链网络；损失规避；变分不等式；模糊需求

中图分类号: F274 **文献标志码:** A

Supply chain network equilibrium with loss-averse retailers under fuzzy demand

HU Jin-song, *ZHAO Guang-li*

(Department of Management Science and Engineering，Qingdao University，Qingdao 266071，China．Correspondent: HU Jin-song，E-mail：hujinsong@qdu.edu.cn)

Abstract: Under the condition of fuzzy demand, the supply chain network equilibrium, in which loss-averse retailers' shortage cost is not involved, is examined. The expected utility model of retailers with the piecewise-linear loss aversion utility function is derived by the credibility measure of the fuzzy event, and its concavity property is revealed. The optimal behaviors of manufactures, retailers and consumers are modeled by the variational inequality, and the network equilibrium model is built. It is proved that manufactures' pricing mechanisms are equivalent to retailers' at equilibrium in order to simplify network equilibrium conditions. Finally, a numerical example shows the impact of fuzzy demand and loss-averse coefficients on network equilibrium.

Key words: supply chain network；loss aversion；variational inequality；fuzzy demand

0 引 言

自 Nagurney 等[1]研究供应链网络均衡模型以来, 国内外学者进行了多方面的拓展. Dong 等[2]研究了随机市场需求的供应链网络均衡. 文献 [3] 和文献 [4] 分别研究了随机市场需求下双渠道与多商品流的供应链网络均衡问题. 上述成果均属于确定和随机市场需求情形. 然而, 当今市场需求往往呈现稳定性差、波动性强的特点, 使得企业难以准确地获取市场需求信息 (如概率信息). 此时, 随机性已不再适合描述这类不确定性因素. 为此, 许多学者利用模糊集理论研究了供应链网络均衡问题. 文献 [5-6] 针对模糊市场需求环境分别研究了单商品流和多商品流供应链网络均衡.

上述文献均未涉及网络成员风险特征, 但供应链网络成员的风险偏好问题已引起学术界的重视. 文献 [7-8] 考虑制造商与分销商的风险因素, 建立了由制造商、分销商和零售商组成的网络均衡模型. 在该模型中, 制造商和分销商追求利润最大化和风险最小化, 零售商仍追求期望利润最大化. 实质上, 该模型假设零售商持风险中性态度, 即以期望利润最优化为决策目标.

一些实证研究发现: 在不确定需求市场环境下, 决策者行为很少遵循风险中性假设的最优决策. Kahneman 等[9]提出的展望理论从认知心理学角度较

收稿日期: 2013-07-05；**修回日期:** 2013-12-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71371102)；国际 (地区) 合作与交流项目(71311120090)；山东省自然科学基金项目(ZR2012GM002).

作者简介: 胡劲松(1966−), 男, 教授, 博士生导师, 从事决策分析、物流与供应链管理等研究；赵光丽(1986−), 女, 硕士生, 从事决策分析、物流与供应链管理的研究.

好地描述了人类在不确定环境下的选择行为. 该理论陈述了人类行为的一个普遍现象: 决策者在面对同等数量的损失和收益时, 损失感受比收获更强烈, 即损失比收获更突出, 此现象称为损失规避行为. 此发现受到大量实验、实证和众学者的支持, 因此, 近年来国内外学者围绕报童与供应链管理等问题开展了损失规避行为的研究. 在报童问题方面, 文献 [10] 研究了具有损失规避行为的最优订货量问题, 指出具有损失规避零售商订货量低于风险中性者. 文献 [11] 纳入缺货成本, 拓展了文献 [10] 的模型, 探讨了缺货成本对损失规避零售商订货决策的影响. 文献 [12] 讨论了具有损失规避行为的定制件采购问题, 并分析了损失规避程度对最优采购策略的影响. 在供应链管理方面, 文献 [13-15] 考虑了单个风险中性供应商和单个损失规避零售商构成的供应链协调问题. 文献 [16-17] 研究了单个风险中性供应商与多个损失规避零售商组成的供应链协调问题.

上述研究表明: 着眼于行为特征的研究已逐步引起国内外学术界的关注. 本文旨在将损失规避行为特征进一步地扩展到网络结构情形, 并考虑市场需求的模糊性. 虽然模糊需求的供应链网络均衡问题已有初步研究, 但涉及损失规避行为特征的模糊网络均衡研究尚未见报道. 事实上, 在面对模糊市场需求时, 由于其需求信息具有高度的不确定性, 决策者更易表现出损失规避行为. 为此, 本文通过对具有损失规避零售商的模糊供应链网络均衡问题进行研究, 以探求网络成员的最优行为, 构建网络均衡条件, 并设计其求解算法. 同时, 结合数值算例, 分析需求模糊性和损失规避系数对网络成员最优行为的影响.

1 网络均衡模型

本文研究由供应市场、零售市场和需求市场构成的供应链网络均衡问题. 其中: 供应市场由 m 个生产同质产品且相互竞争的制造商组成; 零售市场由 n 个相互竞争的损失规避零售商组成, 且损失规避零售商将从制造商处订购的产品销售给消费者. 文中: 下标 $i\,(i \in \{1,2,\cdots,m\})$ 特指供应市场中的制造商; 下标 $j\,(j \in \{1,2,\cdots,n\})$ 特指零售市场中的损失规避零售商.

1.1 供应市场均衡

令 q_i 为制造商 i 的非负生产量, q_{ij} 和 ρ_{ij} 分别为制造商 i 与零售商 j 间的产品交易量和交易价格. 为了简洁起见, 下文将所有制造商的生产量记为 m 维列向量 $q \in R_+^m$; 所有制造商、零售商间的产品交易量和交易价格分别记为 mn 维列向量 $Q \in R_+^{mn}$ 和 $\rho^1 \in R_+^{mn}$.

假设制造商 i 按订单生产, 即其生产量满足流量守恒等式

$$q_i = \sum_{j=1}^{n} q_{ij}.$$

为了体现竞争性, 假设制造商 i 的生产成本函数与所有产量有关, 记为 $f_i(q)$, 且假设 $f_i(q)$ 为 q_i 的二次连续可微凸函数. 考虑到

$$q_i = \sum_{j=1}^{n} q_{ij},$$

故生产成本函数为 $f_i(Q)$. 此外, 假设制造商 i 与零售商 j 间的交易成本函数为 $c_{ij}(q_{ij})$, 且 $c_{ij}(q_{ij})$ 为 q_{ij} 的二次连续可微凸函数, 则制造商 i 的利润最大化的优化模型为

$$\max\Big\{M_i(Q) = \sum_{j=1}^{n} \rho_{ij} q_{ij} - f_i(Q) - \sum_{j=1}^{n} c_{ij}(q_{ij}),\ \forall Q \in R_+^{mn}\Big\}. \tag{1}$$

对于制造商 i 而言, 式 (1) 规划为凸规划. 供应市场均衡条件等价表示为如下变分不等式问题: 确定 $Q^* \in R_+^{mn}$, 使其满足

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\Big(\frac{\partial c_{ij}(q_{ij}^*)}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial f_i(Q^*)}{\partial q_{ij}} - \rho_{ij}^*\Big)(q_{ij} - q_{ij}^*) \geqslant 0,\quad \forall Q \in R_+^{mn}.$$

为了简洁起见, 记

$$A_{ij}(Q) = \frac{\partial c_{ij}(q_{ij})}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial f_i(Q)}{\partial q_{ij}}$$

为制造商 i 与零售商 j 间的产品边际成本, $\varphi_{ij}^M(Q,\rho_{ij}) = \rho_{ij} - A_{ij}(Q)$ 为其边际利润. 因此, 供应市场的均衡描述为: 确定 $Q^* \in R_+^{mn}$, 使其满足

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(A_{ij}(Q^*) - \rho_{ij}^*)(q_{ij} - q_{ij}^*) \geqslant 0,\quad \forall Q \in R_+^{mn}. \tag{2}$$

式 (2) 表明: 若制造商 i 的边际利润

$$\varphi_{ij}^M(Q^*,\rho_{ij}^*) = \rho_{ij}^* - A_{ij}(Q^*) = 0,$$

则制造商 i 与零售商 j 间的交易量 $q_{ij}^* > 0$; 若制造商 i 的边际利润

$$\varphi_{ij}^M(Q^*,\rho_{ij}^*) = \rho_{ij}^* - A_{ij}(Q^*) < 0,$$

则制造商 i 与零售商 j 不发生交易, 即 $q_{ij}^* = 0$. 因此, 制造商 i 与零售商 j 间的交易价格 ρ_{ij}^* 由方程 $\varphi_{ij}^M(Q,\rho_{ij}) = 0$ 内生确定.

1.2 零售市场均衡

零售市场作为供应链网络的中间层, 一方面从供应市场购买产品, 另一方面将产品销售给模糊需求市场. 设 $s_j = \sum_{i=1}^{m} q_{ij}$ 为零售商 j 的产品订购量,

$\lambda_j^+(\lambda_j^+>0)$ 为零售商 j 处的单位产品存储费, ρ_j 为零售商 j 处的产品需求价格. 下文将所有零售商的订购量记为 n 维列向量 $s\in R_+^n$, 将所有零售商的产品需求价格记为 n 维列向量 $\rho^2\in R_+^n$. 设 $\tilde{d}_j(\rho_j)$ 为产品模糊需求量, 其支集为 $[\underline{d}_j(\rho_j),\bar{d}_j(\rho_j)]$, 可信性分布函数为

$$\varPhi_j(x;\rho_j)=\mathrm{C}r(\tilde{d}_j(\rho_j)\leqslant x),$$

其中 ρ_j 为 $\underline{d}_j(\rho_j)$, $\bar{d}_j(\rho_j)$ 和 $\varPhi_j(x;\rho_j)$ 的参数. 为了体现 n 个零售商间的竞争, 假设零售商 j 处的展销费用为 $c_j(s)$, 且为 s_j 的二次连续可微凸函数. 考虑到 $s_j=\sum\limits_{i=1}^m q_{ij}$, 其展销费用可记为 $c_j(Q)$. 另外, 假设零售商 j 的效用函数为 U_j, 满足

$$U_j(w)=w_j+(\lambda_j-1)\min\{0,w_j\},\tag{3}$$

其中 w_j 为零售商 j 的利润, 参数 $\lambda_j(\lambda_j\geqslant 1)$ 描述其损失规避程度. 当 $\lambda_j=1$ 时, 零售商 j 为风险中性者; 当 $\lambda_j>1$ 时, 零售商 j 为损失规避者, λ_j 越大损失规避程度越高.

因为零售商 j 的市场需求 $\tilde{d}_j(\rho_j)$ 为模糊变量, 其利润为模糊变量, 所以, 在不考虑缺货成本的情形下, 零售商 j 的模糊利润等于销售收入减库存成本、展销成本和采购成本之和, 即

$$\begin{aligned}&\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))=\\&\rho_j\min\{\tilde{d}_j(\rho_j),s_j\}-\lambda_j^+\max\{0,s_j-\tilde{d}_j(\rho_j)\}-\\&c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}.\end{aligned}\tag{4}$$

将式 (4) 等价地表示为

$$\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))=\begin{cases}(\rho_j+\lambda_j^+)\tilde{d}_j(\rho_j)-\lambda_j^+s_j-c_j(Q)-\sum\limits_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij},\\ \quad\tilde{d}_j\leqslant s_j;\\ \rho_js_j-c_j(Q)-\sum\limits_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij},\ \tilde{d}_j>s_j.\end{cases}\tag{5}$$

式 (5) 表明: 给定订购量 Q, $\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))$ 为 $\tilde{d}_j(\rho_j)$ 的连续分段线性函数, 且存在唯一盈亏平衡点.

性质 1　给定订购量 Q, 零售商 j 存在唯一盈亏平衡点 $d_j(Q)\in[0,s_j]$, 且

$$d_j(Q)=\frac{1}{\rho_j+\lambda_j^+}\Big(\lambda_j^+s_j+c_j(Q)+\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}\Big).$$

证明　当订购量 Q 给定时, S 亦给定. 由式 (5) 可知, 若模糊需求实现 $d_j(Q)\in[0,s_j]$, 则 $\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))$ 为 $\tilde{d}_j(\rho_j)$ 的线性增函数. 当 $\tilde{d}_j(\rho_j)=0$ 时, 有

$$R_j(Q;0)=\Big(-\lambda_j^+s_j-c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}\Big)<0;$$

当 $\tilde{d}_j(\rho_j)=s_j$ 时, 有

$$R_j(Q;s_j)=\rho_js_j-c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}.$$

显然 $\rho_js_j-c_j(Q)-\sum\limits_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}$ 应大于零, 否则, 零售商在任何需求实现下均无利可图. 令式 (5) 等于零, 得到盈亏平衡点 $d_j(Q)$. 当 $d_j(Q)\in[s_j,+\infty)$ 时, $R_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))=\rho_js_j-c_j(Q)-\sum\limits_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}$ 为大于零的常数, 故此区间内不存在盈亏平衡点. □

性质 1 表明: 对于给定的订购量 Q, 当实际需求较低, 即 $\tilde{d}_j(\rho_j)\in[0,d_j(Q))$ 时, 零售商 j 出现亏损; 当实际的需求较高, 即 $\tilde{d}_j(\rho_j)\in[d_j(Q),+\infty]$ 时, 零售商 j 才盈利, 如图 1 所示. 基于性质 1 和式 (3), 可得到定理 1.

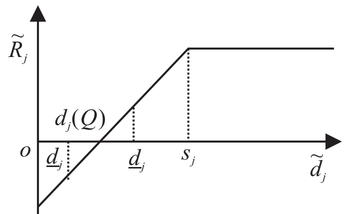

图 1　利润 $\tilde{R}_j$ 与需求实现 $\tilde{d}_j$ 关系

定理 1　损失规避零售商 j 的期望效用函数为

$$U_j(Q)=R_j(Q)+\psi_j(Q).$$

其中

$$R_j(Q)=\rho_js_j-(\rho_j+\lambda_j^+)\int_{\underline{d}_j}^{s_j}(s_j-x)\mathrm{d}\varPhi_j(x;\rho_j)-c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij},$$

$$\psi_j(Q)=(\lambda_j-1)\int_{\underline{d}_j}^{d_j(Q)}\Big((\rho_j+\lambda_j^+)x-\lambda_j^+s_j-c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}\Big)\mathrm{d}\varPhi_j(x;\rho_j).$$

证明　由式 (3) 和 (5) 可知, 零售商 j 的模糊效用为

$$\begin{aligned}&\tilde{U}_j(\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j)))=\\&\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))+(\lambda_j-1)\min\{0,\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))\}.\end{aligned}$$

为简化记号, 记模糊期望为

$$U_j(Q)=\mathrm{E}[\tilde{U}_j(\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j)))],$$
$$R_j(Q)=\mathrm{E}[\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))],$$
$$\psi_j(Q)=\mathrm{E}[(\lambda_j-1)\min\{0,\tilde{R}_j(Q;\tilde{d}_j(\rho_j))\}].$$

则零售商 j 的期望效用为

$$U_j(Q)=R_j(Q)+\psi_j(Q),$$

其中 $R_j(Q)$ 为零售商 j 的期望利润. 由定义, 有

$$R_j(Q)=\rho_j\mathrm{E}[\min\{\tilde{d}_j(\rho_j),s_j\}]-$$

$$\lambda_j^+\mathrm{E}[\max\{0,s_j-\tilde d_j(\rho_j)\}]-$$
$$c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}.$$

其中$\mathrm{E}[\min\{\tilde d_j(\rho_j),s_j\}]$、$\mathrm{E}[\max\{0,s_j-\tilde d_j(\rho_j)\}]$分别为零售商$j$的模糊销售量和存储量的期望, 其表达式[5]为

$$\mathrm{E}[\min\{\tilde d_j(\rho_j),s_j\}]=s_j-\int_{\underline{d}_j}^{s_j}(s_j-x)\mathrm{d}\Phi_j(x;\rho_j),$$
$$\mathrm{E}[\max\{0,s_j-\tilde d_j\}]=\int_{\underline{d}_j}^{s_j}(s_j-x)\mathrm{d}\Phi_j(x;\rho_j).$$

进而有

$$R_j(Q)=$$
$$\rho_js_j-(\rho_j+\lambda_j^+)\int_{\underline{d}_j}^{s_j}(s_j-x)\mathrm{d}\Phi_j(x;\rho_j)-$$
$$c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}.$$

对于$\psi_j(Q)$, 有

$$\psi_j(Q)=\mathrm{E}[(\lambda_j-1)\min 0,\tilde R_j(Q;\tilde d_j(\rho_j))]=$$
$$(\lambda_j-1)\int_{\underline{d}_j}^{\max\{\underline{d}_j,d_j(Q)\}}(\tilde R_j(Q;x))\mathrm{d}\Phi_j(x;\rho_j)=$$
$$(\lambda_j-1)\int_{\underline{d}_j}^{\max\{\underline{d}_j,d_j(Q)\}}\Big((\rho_j+\lambda_j^+)x-\lambda_j^+s_j-$$
$$c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}\Big)\mathrm{d}\Phi_j(x;\rho_j).$$

由图1可知, 当模糊需求量$\tilde d_j(\rho_j)$的支集下界$\underline{d}_j$位于盈亏平衡点$d_j(Q)$右边, 即$\underline{d}_j=\max\{\underline{d}_j,d_j(Q)\}$时, 零售商$j$不会面临亏损, $\psi_j(Q)=0$; 当支集下界$\underline{d}_j$位于盈亏平衡点$d_j(Q)$左边, 即

$$d_j(Q)=\max\{\underline{d}_j,d_j(Q)\}$$

时, 零售商j会面临亏损, $\psi_j(Q)<0$且

$$\psi_j(Q)=$$
$$(\lambda_j-1)\int_{\underline{d}_j}^{d_j(Q)}\Big((\rho_j+\lambda_j^+)x-\lambda_j^+s_j-$$
$$c_j(Q)-\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}\Big)\mathrm{d}\Phi_j(x;\rho_j).$$

显然, 当$\underline{d}_j>d_j(Q)$时, 可信性分布函数$\Phi_j(x;\rho_j)$在区间$[d_j(Q),\underline{d}_j]$内取值为零, 得到$\psi_j(Q)=0$. 此式也满足第1种情况. □

供应剩余导致的亏损

$$\int_{\underline{d}_j}^{d_j(Q)}\Big((\rho_j+\lambda_j^+)x-\lambda_j^+s_j-c_j(Q)-$$
$$\sum_{i=1}^m\rho_{ij}q_{ij}\Big)\mathrm{d}\Phi_j(x;\rho_j)$$

称为剩余损失, 记为$HL_j(Q)\leqslant 0$. $\psi_j(Q)=(\lambda_j-1)HL_j(Q)$为损失规避者因其损失规避行为而产生的费用, 称为损失规避费用. 由定理1可知, 损失规避零售商的模糊期望效用为模糊期望利润与损失规避费用之和, 零售商具有损失规避行为时的期望效用值不高于具有风险中性行为时的期望利润.

由定理1, 期望效用最优化的损失规避零售商j的最优行为为

$$\max\{U_j(Q)=R_j(Q)+\psi_j(Q),\forall Q\in R_+^{mn}\}.\tag{6}$$

进一步分析函数$U_j(Q)$, 得到如下性质.

性质2 1) $U_j(Q)$关于$\{q_{1j},\cdots,q_{ij},\cdots,q_{mj}\}$的偏导数为

$$\partial U_j(Q)/\partial q_{ij}=$$
$$\rho_j-\partial c_j(Q)/\partial q_{ij}-\rho_{ij}-(\rho_j+\lambda_j^+)\Phi_j(s_j;\rho_j)+$$
$$(\lambda_j-1)(-(\lambda_j^++\partial c_j(Q)/\partial q_{ij}+\rho_{ij})\Phi_j(d_j(Q);\rho_j);$$

2) $U_j(Q)$是$\{q_{1j},\cdots,q_{ij},\cdots,q_{mj}\}$的凹函数.

证明 函数$R_j(Q)$和$\psi_j(Q)$的一阶、二阶偏导数为

$$\partial R_j(Q)/\partial q_{ij}=$$
$$\rho_j-(\rho_j+\lambda_j^+)\Phi_j(s_j;\rho_j)-\partial c_j(Q)/\partial q_{ij}-\rho_{ij},$$
$$\partial\psi_j(Q)/\partial q_{ij}=$$
$$(\lambda_j-1)[-(\lambda_j^++\partial c_j(Q)/\partial q_{ij}+\rho_{ij})\Phi_j(d_j(Q);\rho_j)].$$

故由$\partial U_j(Q)/\partial q_{ij}=\partial R_j(Q)/\partial q_{ij}+\partial\psi_j(Q)/\partial q_{ij}$, 结论1可得证. 函数$R_j(Q)$和$\psi_j(Q)$的二阶偏导数为

$$\frac{\partial^2R_j(Q)}{\partial q_{ij}^2}=-(\rho_j+\lambda_j^+)\frac{\partial\Phi_j(s_j;\rho_j)}{\partial s_j}-\frac{\partial^2c_j(Q)}{\partial q_{ij}^2},$$
$$\frac{\partial^2\psi_j(Q)}{\partial q_{ij}^2}=$$
$$(\lambda_j-1)\Big[-\frac{\partial^2c_j(Q)}{\partial q_{ij}^2}\Phi_j(d_j(Q);\rho_j)-$$
$$\frac{(\lambda_j^++\partial c_j(Q)/\partial q_{ij}+\rho_{ij})^2}{\rho_j+\lambda_j^+}\frac{\partial\Phi_j(d_j(Q);\rho_j)}{\partial d_j(Q)}\Big].$$

考虑到$\Phi_j(s_j;\rho_j)$、$\Phi_j(d_j(Q);\rho_j)$分别为s_j, $d_j(Q)$的非减函数, 有$\partial^2U_j(Q)/\partial q_{ij}^2\leqslant 0$, 结论2成立. □

由性质2可知, 损失规避零售商最优行为的规划问题(6)为凸规划, 因此, 零售市场的均衡等价于如下变分不等式问题: 确定$Q^*\in R_+^{mn}$, 使其满足

$$\sum_{j=1}^n\sum_{i=1}^m[-(\rho_j-\partial c_j(Q^*)/\partial q_{ij}-\rho_{ij}^*)+(\rho_j^*+$$
$$\lambda_j^+)\Phi_j(s_j^*;\rho_j^*)+(\lambda_j-1)((\lambda_j^++\partial c_j(Q^*)/\partial q_{ij}+$$
$$\rho_{ij}^*)\Phi_j(d_j(Q);\rho_j^*)](q_{ij}-q_{ij}^*)\geqslant 0,\ \forall Q\in R_+^{mn},$$

其中$s_j^*=\sum_{i=1}^m q_{ij}^*$. 为描述方便, 将上式中括号内各项记为$-\varphi_{ij}^R(Q,\rho_{ij})$, 有

$$\varphi_{ij}^R(Q,\rho_{ij})=B_{ij}(Q,\rho_{ij})-\rho_{ij},$$

其中

$$B_{ij}(Q,\rho_{ij})=$$

$\rho_j - \partial c_j(Q)/\partial q_{ij} - (\rho_j + \lambda_j^+)\varPhi_j(s_j;\rho_j) -$

$(\lambda_j - 1)((\lambda_j^+ + \partial c_j(Q)/\partial q_{ij} + \rho_{ij})\varPhi_j(d_j(Q);\rho_j)$.

事实上, $B_{ij}(Q,\rho_{ij})$ 为零售商 j 除单位采购成本外的边际利润, 故 $\varphi_{ij}^R(Q,\rho_{ij}) = B_{ij}(Q,\rho_{ij}) - \rho_{ij}$ 为其从制造商 i 处订购产品并将其销售给消费者时获取的边际利润. 零售市场的均衡可简单地描述为: 确定 $Q^* \in R_+^{mn}$, 使其满足

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}(\rho_{ij}^* - B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*))(q_{ij} - q_{ij}^*) \geqslant 0,$$

$$\forall Q \in R_+^{mn}. \tag{7}$$

式 (7) 的经济意义为: 当零售商 j 从制造商 i 处订购产品, 即 $q_{ij}^* > 0$ 时, 零售商 j 的边际利润为

$$\varphi_{ij}^R(Q^*,\rho_{ij}^*) = B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*) - \rho_{ij}^* = 0;$$

当零售商 j 不从制造商 i 处订购产品, 即 $q_{ij}^* = 0$ 时, 零售商 j 的边际利润为

$$\varphi_{ij}^R(Q^*,\rho_{ij}^*) = B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*) - \rho_{ij}^* < 0.$$

因此, 零售商 j 愿意支付给制造商 i 的交易价格 ρ_{ij}^* 由方程 $\varphi_{ij}^R(Q^*,\rho_{ij}^*) = 0$ 内生确定.

1.3　需求市场均衡

类似随机需求市场均衡条件[2], 在均衡时, 模糊需求市场 j 的均衡条件可以表示为

$$\mathrm{E}[\tilde{d}_j(\rho_j^*)]\begin{cases} = \sum_{i=1}^{m} q_{ij}^*,\ \rho_j^* > 0; \\ \leqslant \sum_{i=1}^{m} q_{ij}^*,\ \rho_j^* = 0. \end{cases} \tag{8}$$

均衡条件 (8) 可等价地描述为如下变分不等式: 确定 $\rho_j^* \geqslant 0$, 使其满足

$$\Big(\sum_{i=1}^{m} q_{ij}^* - \mathrm{E}[\tilde{d}_j(\rho_j^*)]\Big)(\rho_j - \rho_j^*) \geqslant 0,$$

$$\forall \rho_j \in R_+^n. \tag{9}$$

整个需求市场均衡应满足的变分不等式为: 确定 $\rho^{2*} \in R_+^n$, 使其满足

$$\sum_{j=1}^{n}\Big(\sum_{i=1}^{m} q_{ij}^* - \mathrm{E}[\tilde{d}_j(\rho_j^*)]\Big)(\rho_j - \rho_j^*) \geqslant 0,$$

$$\forall \rho_2 \in R_+^n. \tag{10}$$

式 (10) 的经济意义为: 当损失规避零售商 j 处的产品需求量等于其订购量时, 消费者愿意以 $\rho_j^* > 0$ 的价格从零售商 j 处购买产品; 当损失规避零售商 j 处的产品需求量小于其订购量时, 零售商 j 处的产品销售价格 $\rho_j^* = 0$.

1.4　供应链网络均衡模型

在整个网络均衡状态下, 产品交易量 Q^* 与产品需求价格 ρ^{2*} 应同时满足制造商层均衡条件 (2)、零售商层均衡条件 (7) 和消费市场均衡条件 (10). 即: 确定 $(Q^*, \rho^{2*}) \in R_+^{mn} \times R_+^n$, 使得

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(A_{ij}(Q^*) - B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*))(q_{ij} - q_{ij}^*) +$$

$$\sum_{j=1}^{n}\Big(\sum_{i=1}^{m} q_{ij}^* - \mathrm{E}[\tilde{d}_j(\rho_j^*)]\Big)(\rho_j - \rho_j^*) \geqslant 0,$$

$$\forall (Q,\rho^2) \in R_+^{mn} \times R_+^n. \tag{11}$$

注意到, 式 (11) 中的 $B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*)$ 含有制造商与零售商间的均衡交易价格 ρ_{ij}^*, 因此, 为了获得均衡结果 Q^* 和 ρ^{2*}, 还需找到 Q^*、ρ^{2*} 与 ρ^{1*} 之间应满足的关系. 由第 1.1 节和第 1.2 节可知, 均衡时, 三者应满足零边际利润条件, 即

$$\varphi_{ij}^M(Q^*,\rho_{ij}^*) = \rho_{ij}^* - A_{ij}(Q^*) = 0, \tag{12a}$$

$$\varphi_{ij}^R(Q^*,\rho_{ij}^*) = B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*) - \rho_{ij}^* = 0. \tag{12b}$$

供应链网络均衡解除了满足均衡条件 (11) 外, 还应满足式 (12), 即: 确定 $(Q^*,\rho^{2*},\rho^{1*}) \in R_+^{mn} \times R_+^n \times R_+^{mn}$, 使得

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(A_{ij}(Q^*) - B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*))(q_{ij} - q_{ij}^*) +$$

$$\sum_{j=1}^{n}\Big(\sum_{i=1}^{m} q_{ij}^* - \mathrm{E}[\tilde{d}_j(\rho_j^*)]\Big)(\rho_j - \rho_j^*) \geqslant 0;$$

$$\varphi_{ij}^M(Q^*,\rho_{ij}^*) = \rho_{ij}^* - A_{ij}(Q^*) = 0,$$

$$\varphi_{ij}^R(Q^*,\rho_{ij}^*) = B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*) - \rho_{ij}^* = 0,$$

$$\forall (Q,\rho^2,\rho^1) \in R_+^{mn} \times R_+^n \times R_+^{mn}. \tag{13}$$

在供应链网络达到均衡时, 式 (12a) 和 (12b) 互为充要条件.

性质 3　存在 $\varphi_{ij}^M(Q^*,\rho_{ij}^*) = \rho_{ij}^* - A_{ij}(Q^*) = 0$, 当且仅当 $\varphi_{ij}^R(Q^*,\rho_{ij}^*) = B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*) - \rho_{ij}^* = 0$.

证明　在均衡时, 由式 (13) 可知, 对于任意 $Q \in R_+^{mn}$, 有

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(A_{ij}(Q^*) - B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*))(q_{ij} - q_{ij}^*) \geqslant 0.$$

当 $\varphi_{ij}^M(Q^*,\rho_{ij}^*) = \rho_{ij}^* - A_{ij}(Q^*) = 0$, 即 $\rho_{ij}^* = A_{ij}(Q^*)$ 时, 有

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(A_{ij}(Q^*) - B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*))(q_{ij} - q_{ij}^*) =$$

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(\rho_{ij}^* - B_{ij}(Q^*,\rho_{ij}^*))(q_{ij} - q_{ij}^*) =$$

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(-\varphi_{ij}^M(Q^*,\rho_{ij}^*)(q_{ij} - q_{ij}^*) \geqslant 0.$$

上式表明: 当 $q_{ij}^* > 0$ 时, 零售商 j 的边际利润

$$\varphi_{ij}^R(Q^*,\rho_{ij}^*) = 0.$$

同理可得, 当 $\varphi_{ij}^R(Q^*, \rho_{ij}^*) = 0$ 时

$$\varphi_{ij}^M(Q^*, \rho_{ij}^*) = 0. \qquad \square$$

利用性质3, 供应链网络均衡可以简化地描述为满足式 (11) 和 (12a) 或满足 (11) 和 (12b). 下面以满足式 (11) 和 (12a) 给出供应链网络均衡条件.

定理 2 供应链网络均衡可等价地描述为如下变分不等式: 确定 $(Q^*, \rho^{2*}, \rho^{1*}) \in R_+^{mn} \times R_+^n \times R^{mn}$, 使其满足

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(A_{ij}(Q^*) - B_{ij}(Q^*, \rho_{ij}^*))(q_{ij} - q_{ij}^*) +$$
$$\sum_{j=1}^{n}\Big(\sum_{i=1}^{m} q_{ij}^* - \mathrm{E}[\tilde{d}_j(\rho_j^*)]\Big)(\rho_j - \rho_j^*) +$$
$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(\rho_{ij}^* - A_{ij}(Q^*))(\rho_{ij} - \rho_{ij}^*) \geqslant 0,$$
$$\forall (Q, \rho^2, \rho^1) \in R_+^{mn} \times R_+^n \times R^{mn}. \tag{14}$$

注意到, 定理 2 已将方程 (12a) 等价地描述为变分不等式形式, 变分不等式 (14) 中决策变量 Q 和 ρ^2 的可行域为非负限制 R_+^{mn} 和 R_+^n, 且 ρ^1 的可行域为 R^{mn}, 因此, 利用投影算法[18]可获得其均衡解.

2 数值算例

以 2 个制造商与 2 个面临模糊需求的损失规避零售商组成的供应链网络为例进行算例分析. 其中: 制造商的生产成本函数为

$$f_1(q) = 2.5(q_1)^2 + q_1 q_2 + q_1,$$
$$f_2(q) = 2.5(q_2)^2 + q_1 q_2 + q_2;$$

制造商 i 与零售商 j 间的交易成本为

$$c_{ij}(q_{ij}) = 0.5(q_{ij})^2 + 3.5 q_{ij},\ i, j = 1, 2.$$

就零售商 $j\,(j = 1, 2)$ 而言, 其单位存储成本 $\lambda_j^+ = 1$, 损失规避系数 $\lambda_j = 1.5$, 零售商 j 处的展销费用

$$c_j(Q) = 0.5(q_{1j} + q_{2j})^2.$$

此外, 假设零售商 j 处的市场需求量 $\tilde{d}_j(\rho_j)$ 为三角形模糊数 $[b_j/\rho_j - \underline{\Delta}_j, b_j/\rho_j, b_j/\rho_j + \bar{\Delta}_j]$, 其中 $b_j = 10$.

针对零售商 j 处的模糊需求参数 $\underline{\Delta}_j = \bar{\Delta}_j = 0.5$, 运用投影算法可得到供应链网络均衡解. 为了分析市场需求的模糊性、损失规避系数对网络成员最优行为和网络均衡解的影响, 给出在零售商1处市场需求变化条件下, 两零售商同时表现为不同损失规避程度时的计算结果如表 1 所示. 为进一步探讨两零售商期望效用值在不同模糊需求市场环境和损失规避系数条件下的变化规律, 给出在不同市场需求环境下两零售商具有相同损失规避系数的期望效用值计算结果如表 2 所示. 最后, 给出两零售商在模糊需求环境下具有不同损失规避行为的计算结果, 如表 3 所示.

表 1 在不同市场需求环境下两零售商具有相同损失规避系数的模糊网络均衡结果

	λ_j	$(q_{i1}\ \ q_{i2})$	$(\rho_{i1}\ \ \rho_{i2})$	ρ_j	s_j	$-HL_j(Q)$	$M_i(Q)$	$U_j(Q)$
$\underline{\Delta}_1 = 0.5$, $\bar{\Delta}_1 = 0.5$	1.0	(0.2747 0.2747)	(8.0709 8.0709)	(17.9721 17.9721)	(0.5494 0.5494)	(0.4352 0.4352)	(0.8300 0.8300)	(2.9834 2.9834)
	1.5	(0.2551 0.2551)	(7.8170 7.8170)	(19.3290 19.3290)	(0.5102 0.5102)	(0.4499 0.4499)	(0.7162 0.7162)	(3.0496 3.0496)
	2.0	(0.2384 0.2384)	(7.5991 7.5991)	(20.6684 20.6684)	(0.4768 0.4768)	(0.4806 0.4806)	(0.6252 0.6252)	(3.0042 3.0042)
$\underline{\Delta}_1 = 0.5$, $\bar{\Delta}_1 = 1.0$	1.0	(0.2952 0.2718)	(8.1970 8.1737)	(21.2249 18.1230)	(0.5904 0.5436)	(0.8774 0.4491)	(0.8841 0.8841)	(3.3350 2.9479)
	1.5	(0.2723 0.2526)	(7.9214 7.9017)	(23.4692 19.5032)	(0.5446 0.5052)	(0.9492 0.4642)	(0.7576 0.7576)	(3.2500 3.0151)
	2.0	(0.2535 0.2360)	(7.6902 7.6727)	(25.7184 20.8668)	(0.5070 0.4720)	(1.0540 0.4962)	(0.6589 0.6589)	(4.0000 2.9650)
$\underline{\Delta}_1 = 0.5$, $\bar{\Delta}_1 = 1.5$	1.0	(0.3381 0.2659)	(8.4621 8.3899)	(23.2628 18.4806)	(0.6762 0.5318)	(1.4297 0.4821)	(1.0045 1.0045)	(3.5131 2.8796)
	1.5	(0.3123 0.2467)	(8.1661 8.1005)	(26.3511 19.9175)	(0.6246 0.4934)	(1.5529 0.4988)	(0.8603 0.8603)	(3.3422 2.9346)
	2.0	(0.2924 0.2300)	(7.9264 7.8640)	(29.3907 21.3539)	(0.5848 0.4600)	(1.7272 0.5351)	(0.7513 0.7513)	(2.8362 2.8620)

表 2 在不同市场需求环境下两零售商具有相同损失规避系数的期望效用值

	$\bar{\Delta}_1$	$\lambda_j = 1.0$	$\lambda_j = 1.3$	$\lambda_j = 1.5$	$\lambda_j = 1.7$	$\lambda_j = 2.0$	$\lambda_j = 2.3$	$\lambda_j = 2.5$
$\underline{\Delta}_1 = 0.5$	0.5	(2.9834 2.9834)	(3.0374 3.0374)	(3.0496 3.0496)	(3.0442 3.0442)	(3.0042 3.0042)	(2.9255 2.9255)	(2.8509 2.8509)
	1.0	(3.3350 2.9479)	(3.3109 3.0033)	(3.2500 3.0151)	(3.1544 3.0084)	(4.0000 2.9650)	(2.6569 2.8810)	(2.4172 2.8015)
	1.5	(3.5131 2.8796)	(3.4526 2.9288)	(3.3422 2.9346)	(3.1789 2.9203)	(2.8362 2.8620)	(2.3750 2.7589)	(2.0002 2.6641)
	2.0	(3.6814 2.8065)	(3.6119 2.8455)	(3.4665 2.8421)	(3.2486 2.8166)	(2.7913 2.7377)	(2.1796 2.6087)	(1.6857 2.4933)
	2.5	(3.8665 2.7312)	(3.8128 2.7575)	(3.6445 2.7429)	(3.3827 2.7041)	(2.8257 2.6006)	(2.0784 2.4410)	(1.4760 2.3014)

表 3 在不同市场需求环境下仅零售商 2 具有损失规避行为的模糊网络均衡结果

	λ_2	$(q_{i1}\ \ q_{i2})$	$(\rho_{i1}\ \ \rho_{i2})$	ρ_j	s_j	$-HL_j(Q)$	$M_i(Q)$	$U_j(Q)$
$\underline{\Delta}_1 = 0.5$	1.0	(0.2747 0.2747)	(8.0709 8.0709)	(17.9721 17.9721)	(0.5494 0.5494)	(0.4352 0.4352)	(0.8300 0.8300)	(2.9834 2.9834)
$\bar{\Delta}_2 = 0.5$	1.5	(0.2778 0.2518)	(7.9558 7.9298)	(17.8575 19.5063)	(0.5556 0.5036)	(0.4240 0.4646)	(0.7717 0.7717)	(3.0311 2.9996)
$\lambda_1 = 1.0$	2.0	(0.2806 0.2319)	(7.8557 7.8070)	(17.7517 21.1149)	(0.5612 0.4638)	(0.4138 0.5158)	(0.7230 0.7230)	(3.0712 2.8918)

表 1 结果表明: 1) 当模糊需求市场环境不变时, 零售商的损失规避系数 λ_j 越大, 其订购量 q_{ij} 越少, 进而市场需求价格升高, 且订购量减少和交易价格降低使得制造商利润下降. 2) 当零售商损失规避系数不变时, 随着零售商 1 处模糊需求右展宽 $\bar{\Delta}_1$ 的增加, 制造商与零售商 1 的交易量 s_1 增多; 或从零售商 1 角度而言, 由供应价格规律可知, 产品需求价格 ρ_1 的升高导致零售商 1 愿意订购更多产品. 同时, 制造商与零售商 2 的交易量 s_2 减少, 根据需求价格规律, 零售商 2 处的产品需求价格 ρ_2 将上升. 此外, 由于零售商 1 订购量增加的幅度大于零售商 2 订购量减少的幅度, 总订购量随零售商 1 处模糊需求右展宽 $\bar{\Delta}_1$ 的增加呈上升趋势, 且制造商与零售商间的交易价格增高使得制造商的利润增加.

表 2 结果表明: 零售商 1 处不同的模糊需求市场环境导致其期望效用随损失规避系数的增加呈现不同的变化规律, 但零售商 2 期望效用随损失规避系数的增加先增加后减小. 此外, 不同的损失规避系数也导致零售商 1 期望效用随其模糊需求右展宽的增加呈现不同的变化规律, 但零售商 2 期望效用随零售商 1 处模糊需求右展宽的增加而减小. 从横向角度看, 当零售商 1 处模糊需求右展宽较小时 ($\bar{\Delta}_1$ 为 0.5), 其期望效用随其损失规避系数的增加先增加后减小; 当零售商 1 处模糊需求右展宽 $\bar{\Delta}_1$ 为 1.0 时, 其期望效用不随其损失规避系数的增加呈明显变化规律; 当零售商 1 处模糊需求右展宽较大时 ($\bar{\Delta}_1$ 为 1.5、2.0 或 2.5), 其期望效用随损失规避系数的增加而减小, 零售商 2 随损失规避系数的增加先增加后减小. 从纵向角度看, 当零售商为风险中性或损失规避系数较小时 (λ_j 为 1.0、1.3、1.5 或 1.7), 零售商 1 的期望效用函数随其模糊需求右展宽的增加而增大; 当零售商损失规避系数为 2 时, 零售商 1 的期望效用函数不随其模糊需求右展宽的增加呈明显变化规律; 当零售商损失规避系数较大时 (λ_j 为 2.3 或 2.5), 零售商 1 的期望效用函数随其模糊需求右展宽的增加而减小, 零售商 2 随零售商 1 处模糊需求右展宽的增加而减小.

从表 1 和表 2 还可以看出: 当零售商 1 处的模糊需求右展宽 $\bar{\Delta}_1$ 与其损失规避系数 λ_j 同时增大时, 可减弱对制造商最优行为的影响, 却一定程度地增强对零售商最优行为的影响. 就零售商 1 而言, 分别比较 $\bar{\Delta}_1 = 0.5$ 与 $\lambda_1 = 1.0$、$\bar{\Delta}_1 = 1.0$ 与 $\lambda_1 = 1.5$ 和 $\bar{\Delta}_1 = 1.5$ 与 $\lambda_1 = 2.0$ 三种情形下的均衡解, 可以发现, 交易量 q_{ij} 分别为 0.274 7, 0.272 3, 0.292 4, 即当两因素分别增加时, 各制造商与零售商 1 间交易量变化幅度不大. 同理可以看出, 制造商利润变化幅度会弱于仅受单一因素影响下的变化. 由于零售商 1 处模糊需求右展宽 $\bar{\Delta}_1$ 或其损失规避系数 λ_j 增加, 零售商处需求价格增加, 过剩损失增大, 当两因素同时增加时, 必然增大市场需求价格和过剩损失, 且增涨幅度高于单因素情形, 进而加大零售商期望效用变化幅度.

表 3 结果表明, 在模糊需求环境下, 当零售商 1 为风险中性者, 零售商 2 为损失规避者时, 风险中性者的订购量大于损失规避者. 这是因为风险中性零售商没有损失规避零售商对产品剩余损失感受强烈, 所以风险中性零售商会选择多订货.

3 结　论

本文针对零售商的损失规避行为, 研究了零售商处不考虑缺货成本的模糊供应链网络均衡问题. 运用分段线性函数刻画了零售商损失规避行为, 同时, 结合模糊事件的可信性测度, 建立了损失规避零售商的模糊期望效用模型, 揭示了其凹性性质. 借助变分不等式理论, 描述了网络成员最优行为. 为了简化网络均衡条件, 证明了均衡时制造商的内生交易定价机制与零售商的内生交易定价机制等价. 最后, 利用投影算法对此问题进行求解, 并结合算例讨论了需求市场模糊性和零售商的损失规避系数对网络成员最优行为和网络均衡的影响. 数值结果表明:

1) 在相同模糊需求市场环境下, 零售商的损失规避系数越大, 其订购量越少, 市场需求价格升高, 制造商利润下降; 当零售商损失规避系数不变时, 零售商 1 处模糊需求右展宽越大, 制造商同零售商 2 间的交易量越多, 与零售商 2 间的交易量越少, 且制造商的利润增加.

2) 零售商 1 处不同的模糊需求市场环境导致其期望效用随损失规避系数的增加呈现不同的变化规律, 但零售商 2 会随损失规避系数的增加先增加后减小; 不同的损失规避系数也导致零售商 1 期望效用随其模糊需求右展宽的增加呈现不同的变化规律, 但零售商 2 会随零售商 1 处模糊需求右展宽的增加而减小.

3) 当零售商处的模糊需求右展宽与其损失规避系数同时增大时, 可减弱对制造商最优行为的影响, 却增强对零售商最优行为的影响.

4) 当零售商 1 为风险中性者, 零售商 2 为损失规避者时, 风险中性者的订购量大于损失规避者.

需要指出的是, 本文研究了损失规避零售商处无缺货成本的模糊供应链网络均衡问题, 当考虑损失规避零售商处的缺货成本时, 零售商利润的盈亏平衡点将发生变化, 结论也会有所不同.

参考文献(References)

[1] Nagurney A, Dong J, Zhang D. A supply chain network equilibrium model[J]. Transportation Research: Part E, 2002, 38(5): 281-303.

[2] Dong J, Zhang D, Nagurney A. A supply chain network equilibrium model with random demand[J]. European J of Operational Research, 2004, 156(1): 194-212.

[3] 杨跃翔, 夏国平, 卫昆. 双渠道两阶段供应链网络均衡模型[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(9): 1391-1395.
(Yang Y X, Xia G P, Wei K. Two- phase supply chain network equilibrium model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(9): 1391-1395.)

[4] 滕春贤, 姚锋敏, 胡宪武. 具有随机需求的多商品流供应链网络均衡模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(10): 77-83.
(Teng C X, Yao M F, Hu X W. Study on multi-commodity flow supply chain network equilibrium model with random demand[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007, 27(10): 77-83.)

[5] 胡劲松, 徐元吉. 考虑产能约束的模糊供应链网络均衡研究[J]. 管理学报, 2012, 9(1): 139-143.
(Hu J S, Xu Y J. A supply chain network equilibrium model with fuzzy demand in consideration of capacity constraints[J]. Chinese J of Management, 2012, 9(1): 139-143.)

[6] 胡劲松, 徐元吉, 刘芳霞, 等. 具有模糊需求的多商品流供应链网络均衡研究[J]. 控制与决策, 2012, 27(5): 665-672.
(Hu J S, Xu Y J, Liu F X, et al. Multi-products flow supply chain network equilibrium with fuzzy demand[J]. Control and Decision, 2012, 27(5): 665-672.)

[7] Nagurney A, Matsypura D. Global supply chain network dynamics with multicriteria decision-making under risk and uncertainty[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2005, 41(6): 585-612.

[8] Zhang L P, Zhou Y. A new approach to supply chain network equilibrium models[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(1): 82-88.

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

[10] 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.

[11] Wang C X, Webster S. The loss-averse newsvendor problem[J]. Omega, 2009, 37(1): 93-105.

[12] Shen H C, Pang Z, Cheng T C E. The component procurement problem for the loss-averse manufacturer with spot purchase[J]. Int J of Production Economics, 2011, 132(1): 146-153.

[13] Zhang L , Song S J, Wu C. Supply chain coordination of loss-averse newsvendor with contract[J]. Tsinghua Science and Technology, 2005, 10(2): 133-140.

[14] Shi K, Xiao T J. Coordination of a supply chain with a loss-averse retailer under two types of contract[J]. Int J of Information and Decision Sciences, 2008, 1(1): 5-25.

[15] 刚号, 唐小我, 慕银平. 延迟支付下损失厌恶型零售商参与的供应链运作及协调[J]. 控制与决策, 2013, 28(7): 1023-1032.
(Gang H, Tang X W, Mu Y P. Robust model predictive control with input-to-state stability[J]. Control and Decision, 2013, 28(7): 1023-1032.)

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

[17] 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): 71-81.
(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): 71-81.)

[18] Korpelevich G. The extragradient method for finding saddle points and other problems[J]. Matekon, 1977, 13(1): 35-49.

(责任编辑：郑晓蕾)