双源供应下损失厌恶零售商的订货及补贴策略

余建军, 朱　丹, 钟远光†, 谢　维

(华南理工大学 工商管理学院, 广东 广州 510640)

摘要: 供应不可靠是零售商采购时面临的难点问题, 多源采购被企业广泛应用于解决该问题. 本文研究一个风险厌恶型零售商向上游两家供应商订货的问题, 其中一家供应商为供应可靠但价格较高, 另一家供应商为供应不可靠但价格较低, 但该供应不可靠性可通过零售商提供提前支付部分货款的方式得到缓解. 基于此, 本文分别构建了零售商向供应可靠的供应商订货, 向供应不可靠供应商订货, 以及采用双源供应的订货模型. 研究结果发现零售商采用双源供应采购可获得更大的期望效用, 并且在双源供应情况下, 随着提前支付比例的提高, 零售商将从供应不可靠的供应商处订购更多产品, 而从供应可靠供应商处订购更少产品. 本研究也进一步探讨了双源供应情况下, 损失厌恶程度, 需求波动等因素对零售商最优策略的影响.

关键词: 供应链管理; 供应可靠性; 双源供应; 损失厌恶; 提前支付

引用格式: 余建军, 朱丹, 钟远光, 等. 双源供应下损失厌恶零售商的订货及补贴策略. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 1545 – 1556

DOI: 10.7641/CTA.2018.80229

Ordering and subsidizing strategies for loss-averse retailer under dual-sourcing

YU Jian-jun, ZHU Dan, ZHONG Yuan-guang†, XIE Wei

(School of Business Administration, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: It is common for retailer to encounter an unreliable supply problem and a multiple source strategy is an effective method to solve this problem. This paper examines the problem which is a risk-averse retailer orders from two upstream suppliers. One supplier is reliable but the price is high, another supplier is unreliable but the price is low. However, the latter's supply unreliability can be mitigated by the way of advanced payment provided by the retailer. Based on this, this paper constructs an order model for procuring from a reliable supplier, an unreliable supplier and two suppliers respectively. The result shows that the retailer is able to achieve greater expected utility under dual souring. Moreover, it is possible for the retailer to order more products from an unreliable supplier but fewer products from a reliable supplier as the proportion of advanced payment increases under dual souring. This study also further explores the impact of factors such as loss aversion and demand fluctuation on retailer's optimal strategy under dual souring.

Key words: supply chain management; supply reliability; dual sourcing; loss averse; advanced payment

Citation: YU Jianjun, ZHU Dan, ZHONG Yuanguang, et al. Ordering and subsidizing strategies for loss-averse retailer under dual-sourcing. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(9): 1545 – 1556

1　引言

20世纪80年代伊始, 供应链管理的重点逐渐向需求侧转移, 主要表现为由市场和客户需求驱动的“需求链”[1], 下游企业所面临的需求不确定性愈发明显, 同时, 由于许多外部(运输延迟、自然灾害等)及内部原因(外包采购、生产故障等)的影响, Handfield发现供应链越来越容易受到原材料流动所带来的不确定性的影响[2]. 据Straube 统计, 我国下游厂商因上游厂商不能及时足量供货而感到不满者占18.35%, 很不满者占2.33%[3]. 为了降低供应不确定性, 下游零售商往

收稿日期: 2018−04−02; 录用日期: 2018−11−21.

†通信作者. E-mail: bmygzhong@scut.edu.cn; Tel.: +86 20-22236983.

本文责任编委: 张化光.

国家自然科学基金项目(71871097, 71501077, 71520107001), 中央高校基本科研业务费专项资金项目, 广东省高等学校珠江学者岗位计划项目(2017), 广东省哲学社会科学“十三五”规划2017年度学科共建项目(GD17XGL56)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (71871097, 71501077, 71520107001), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, the Guangdong Province Universities and Colleges Pearl River Scholar Funded Scheme (2017) and the Guangdong Province Philosophy & Social Sciences ‘13th Five–Year’ Planning Project for Building Discipline of 2017 (GD17XGL56).

往愿意为供应不确定的供应商提供资金支持以此降低供应不确定性. 但是, 由于供应商往往是中小企业, 具有可抵押资产少, 信用低, 易产生违约. 因此, 零售商需要考虑损失造成的风险. 基于此, 本文考虑损失规避零售商的行为对决策的影响.

供需不匹配已经成为供应链领域的挑战和难点. 爱立信公司曾因为火灾导致其供应中断, 零部件严重短缺, 销售额损失4亿美元. 企业已经逐渐到意识到单源供应的风险和不可控性, 他们开始重新评估其对单源采购策略的依赖并将目光转向双源供应[4]. 例如, 诺基亚会同时面向主要供应商飞利浦和其他供应商采购从而确保相对稳定的原件供应. 迄今为止, 双源采购在众多行业中颇受关注和认可, 如飞机[5]、制药[6]、电子[7]等. 许多学者也已经证实了多源供应可以帮助企业实现成本效益的均衡, 降低供应不确定性和放松供应能力的限制[7–9]. Dada等指出如果两个供应商均为不可靠并且没有容量限制, 那么零售商应该在短周期的需求中选择价格更为便宜的供应商而不是有同样提前期的较为昂贵的供应商[10]. Tan等研究了零售商面对双源不可靠供应商时如何根据不确定的市场需求和不同供应商特性制定最优的动态采购计划[11]. Tomlin和Wang研究了报童模型下双源供应的柔性和可靠性, 分析了双源供应策略的影响因素[12].

实际上, 过程改进也可以被用于缓解单源供应的不可靠性. 许多学者的研究已经证实了这一点. Handfield和Liker等的研究指出, 本田和丰田投入大量资源以提高供应商在成本, 质量和订单执行可靠性等方面的表现[13–14]. Hu等研究如何使用激励机制来刺激供应商在产能方面的投资, 并比较该方法与传统的将部分订单分配给供应可靠但价格较高的供应商的差异[15]. Yang等发现, 当供应商供应不可靠时, 制造商可通过信任、参与、制定契约的方式提高供应商的可靠性[16]. 因此, 为了维持与下游企业的良好合作关系, 零售商愿意提前支付部分货款缓解供应可靠性. 本文考虑了供应商可靠性通过提前支付被缓解的可能, 主要借鉴了马利军等人的研究思想[17–18].

大多数报童模型往往假设决策者是风险中性的, 即决策者选择适当的订单量来最大化预期利润或最小化预期成本. 然而, 有许多实际的例子表明, 决策的订单数量往往偏离了预期利润最大化或最小化预期成本. 这种偏差也被称为报童问题中的"决策偏差"[19], 决策偏差存在的一个主要原因是决策者可能有不同的偏好, 而不仅仅为风险中立. 在所有的风险偏好中, 损失厌恶偏好被国内外学者广泛研究[20–21]. 现实中大部分理性决策者往往属于风险厌恶型[22], 因此, 为了更好地反映实际情况, 在供需不确定性的情况下, 有必要将损失厌恶风险偏好纳入到企业的最优经营策略中. 以往双源采购决策的研究往往不考虑企业的风险偏好, 近年来部分学者开始关注损失厌恶偏好的影响. Li等建立了损失厌恶的企业面对双源供应商最大化期望效用的随机规划模型, 研究结果表明不可靠供应商由于经济优势享有正订货量而可靠供应商在某些情况下是无用的[23].

通过文献梳理可知, 一方面, 目前的大部分文献主要关注如何利用双源采购或过程改进来改善供需不确定性, 部分文献虽然同时提到了两种方式, 但着重比较两种方式的优略. 另一方面, 大多数研究双源供应的文献往往假设决策方为风险中立的. 因此, 本文的贡献在于基于前景理论衡量损失厌恶零售商在面对供需不确定性时, 如何利用双源采购和提前支付最大化其期望效用, 另外, 将提前支付纳入决策变量进行研究, 这在以往的研究中往往比较少见.

2 问题描述与符号说明

考虑由两个供应商—单个零售商组成的单周期两阶段的供应链, 如图1所示. 在需求不确定, 供应商1供应比例不确定, 供应商2供应可靠, 到货率百分之百.

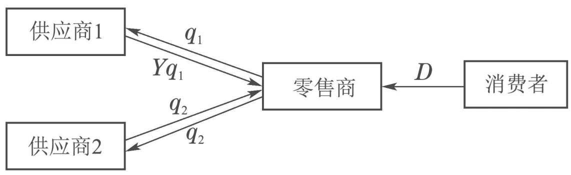

图 1 供需不匹配下的供应链结构

Fig. 1 Supply chain structure under mismatch between supply and demand

假定供应商1的实际到货率为$Y(0<Y<1)$[24]. Y服从均值为μ, 标准差为σ的一般随机分布, 其概率密度函数和分布函数分别为$g(y)$和$G(y)$. 市场需求不稳定, 假定期末需求量D服从均值为μ_d和标准差为σ_d的一般随机分布, 其概率密度函数和概率分布函数分别为$f(x)$和$F(x)$.

首先, 供应商$i(i=1,2)$向零售商公布其批发价格ω_i; 零售商在综合考察期末需求量D之后和供应商1的实际到货率Y之后, 向供应商i以批发价格ω_i订购q_i单位产品, 并以零售价p出售给消费者, 如果发生缺货现象将承担一定的缺货成本, 单位缺货成本为v, 缺货成本指由于顾客到达零售商无法满足顾客需求的失销现象所产生的利润损失[25], 即当零售商的到货量小于期末需求量时, 因其不能满足客户需求造成直接的利润损失(零售商并不进行补货), 进而影响到其最优期望效用, 如果销售结束, 产品有剩余, 则商品残值为s. 零售商的关键决策变量是最优订购量q_i, 但由于供应商1的到货率不确定, 所以零售商需要以满足期末需求量和最大化自身效用为前提, 做出最优的组合采购策略.

为降低供应不可靠性, 零售商愿意提前支付部分货款, 供应商1也愿意为了维持与下游企业的良好关系, 利用提前支付的货款改善供应可靠性. 假定零售商的提前支付比例为β, 即零售商在收到货物之前提前支付$\beta\omega_1 q_1$的货款给供应商1, 供应商1在收到提前支付的货款后, 将之用于改善供应可靠性. 参照Gupta的研究成果[26], 假定通过提前支付改善供应可靠性后的供应率满足$Y_\beta = (1-\beta)Y + \beta EY$. 则改善后的供应比例$Y_\beta$的均值$EY_\beta = EY = \mu$, 方差为

$$\begin{aligned}\mathrm{var}(Y_\beta) = E(Y_\beta)^2 - (EY_\beta)^2 = \\ (1-\beta)^2\mathrm{var}(Y) = (1-\beta)^2\sigma^2.\end{aligned}$$

与改善前相比, 改善后的供应率的均值不变, 但供应的方差却变小, 这说明零售商的提前支付比例越高, 供应商1的随机供应比例在均值不变的情况下波动程度变小, 供应的可靠性增加.

因为供应商1具有批发价格较低的成本优势, 在不考虑零售商风险厌恶的情况下, 零售商显然更乐意向供应商1订购商品. 但当考虑零售商的风险厌恶偏好时, 不同批发价不同可靠性的供应商都将被零售商纳入考虑范围. 为了避免无意义情况的发生, $s < \omega_1 < \omega_2 < p$, 假定零售商只需对实际收到的货物付款[24]. 此外, 提前支付货款虽然降低了供应不确定性而增加了收益, 但同时零售商也负担了部分资金成本, 假定零售商的无风险投资利率为r, 参考复利的计息方式[27], 则在提前期T内的利息为$c = \exp^{rT} - 1$, 因此提前支付部分货款零售商损失的资本成本为$\beta\omega_1 q_1 c$, 需要说明的是因为提前支付比例以全部到货为基础, 因此有可能实际到达货物的货款小于提前支付的货款($\omega_1 q_1 Y_\beta < \beta\omega_1 q_1$), 在此情况下, 供应商1需将多余的款项归还给零售商,同时为了维持与供应商的良好关系,多余的利息将不予追取.

3　模型与分析

本节主要考虑损失厌恶零售商存在提前支付下的双源采购决策模型, 为了比较单双源供应的优劣, 首先考虑了特殊情况即零售商分别向不稳定供应商1和稳定供应商2订货的情况并对存在提前支付比例的情况下的双源供应的部分模型参数进行分析.

3.1　面向不稳定供应商的采购决策

当零售商仅能向不稳定的供应商1订货, 假设零售商的资金雄厚, 愿意提前支付部分货款来换取供应商1可靠性的增加和自身利益增加的双赢效果. 根据以上的假设, 零售商的利润函数$\Pi(q_1,\beta)$可以表述为

$$\begin{aligned}\Pi(q_1,\beta) = p\cdot\min\{D, q_1Y_\beta\} + s(q_1Y_\beta - D)^+ - \\ \omega_1 q_1 Y_\beta - v(D - q_1Y_\beta)^+ - A. \qquad (1)\end{aligned}$$

经过进一步的分解, 可以得到以下结果:

$$\begin{cases}\Pi_1(q_1,\beta) = (p-s)D - (\omega_1 - s)q_1Y_\beta - A, \\ \qquad D \leqslant q_1Y_\beta, \\ \Pi_2(q_1,\beta) = (p+v-\omega_1)q_1Y_\beta - Dv - A, \\ \qquad D > q_1Y_\beta,\end{cases}$$

其中$A = \beta\omega_1 q_1 c$.

当到货量大于需求($D \leqslant q_1Y_\beta$)时, 此时零售商的利润由销售收入pD, 残值$s(q_1Y_\beta - D)$, 常规订货成本$\omega_1 q_1 Y_\beta$和机会成本$\beta\omega_1 q_1 c$组成, 而当到货量小于需求($D > q_1Y_\beta$)时, 零售商则会面临缺货成本, 此时零售商的利润由销售收入pD, 常规订货成本$\omega_1 q_1 Y_\beta$, 缺货成本$v(D - q_1Y_\beta)$以及机会成本$\beta\omega_1 q_1 c$组成.

令$\Pi_1(q_1,\beta)$和$\Pi_2(q_1,\beta)$分别等于0, 可得

$$d_1(q_1,\beta) = \frac{(\omega_1 - s)q_1Y_\beta + \beta\omega_1 q_1 c}{p-s},$$

$$d_2(q_1,\beta) = \frac{(p+v-\omega_1)q_1Y_\beta - \beta\omega_1 q_1 c}{v}.$$

因此, 当产品的期末需求量恰好等于d_1或者d_2时, 零售商此时的收益为零, 零售商不赔不赚; 而当产品的期末需求量为$(0, d_1)$或者(d_2, ∞)时, 零售商利润为负值, 零售商面临亏本的损失; 而当期末需求量在d_1和d_2之间时, 零售商的利润是正值, 零售商盈利. 考虑到零售商具有损失厌恶的风险偏好, 本文拟采用Kahneman文章中所运用的损失厌恶效用函数[28], 损失厌恶风险偏好零售商的效用函数$U(\Pi(q_1,\beta))$可表示为

$$U(\Pi(q_1,\beta)) = \Pi(q_1,\beta) - \gamma(\pi_0 - \Pi(q_1,\beta))^+, \quad (2)$$

其中$\gamma > 0$是损失厌恶系数, 反映决策者的损失厌恶程度, γ越大代表决策者的损失厌恶程度越大, 当$\gamma = 0$时,零售商为风险中性的. 根据Wang和马利军等人的研究, π_0代表损失厌恶零售商在销售周期开始时的目标利润参考点, 为了使模型更具一般性. 本文将其规范化为($\pi_0 = 0$)[17,29], 此时零售商的期望效用函数$\mathrm{E}U(\Pi(q_1,\beta))$可以表示为

$$\begin{aligned}\mathrm{E}U(q_1,\beta) = \mathrm{E}[\Pi(q_1,\beta) - \gamma\mathrm{E}[-\Pi(q_1,\beta)]]^+ = \\ \mathrm{E}[\Pi(q_1,\beta) + \gamma\varphi(q_1,\beta)],\end{aligned}$$

其中$\mathrm{E}[\Pi(q_1,\beta)]$为零售商的期望利润, 化简可得

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}[\Pi(q_1,\beta)] = \\ &(p+v-\omega_1)q_1\mu - \beta\omega_1 q_1 c - v\mu_\mathrm{d} - \\ &(p+v-s)\int_0^1\int_0^{q_1Y_\beta} F(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y).\end{aligned}$$

零售商损失厌恶产生的负效用

$$\gamma\varphi(q_1,\beta) = -\gamma\mathrm{E}[-\Pi(q_1,\beta)]^+,$$

因此该损失厌恶零售商的决策问题为选择合适的订货量q_1和提前支付比例β, 使得零售商的期望效用最大化, 表达式如下:

$$\max_{q_1\geqslant 0,\ 1\geqslant\beta\geqslant 0} \mathrm{E}U(q_1,\beta). \tag{3}$$

当市场不景气时, 零售商很可能利润为负, 同时本文考虑了期末未满足的需求将面临缺货成本, 这说明当零售商到货量远远小于市场需求时, 零售商也有可能利润为负. 即利润小于零的点可能出现在$\varPi_1(q_1,\beta)$和$\varPi_2(q_1,\beta)$中, 由于本文前面已经求出了$\varPi_1(q_1,\beta)=0$和$\varPi_2(q_1,\beta)=0$的点,

$$\varphi(q_1,\beta)=\int_0^1\int_0^{d_1(q_1,\beta)}\varPi_1(q_1,\beta)\mathrm{d}F(x)\mathrm{d}G(y)+\int_0^1\int_{d_2(q_1,\beta)}^{\infty}\varPi_2(q_1,\beta)\mathrm{d}F(x)\mathrm{d}G(y),$$

为证明零售商最优期望效用的最优解是否存在, 简化分析起, 不妨假设期末需求量D服从区间$D=U\sim[a,b]$上的均匀分布, 此时, 当满足一定条件时可发现存在最优订货量以及最优提前支付比例使得零售商获得最大的期望效用, 如定理1所示.

定理 1 当$-\omega_1c-(p+v-s)\dfrac{4q_1\sigma^2(\beta-1)}{b-a}<0$时, 提前支付下损失厌恶零售商的期望效用函数$\mathrm{E}U(q_1,\beta)$是关于$q_1$和$\beta$的联合凹函数, 且问题(3)存在最优解$(q_1^*,\beta^*)$.

证 因为期末需求量D服从区间$[a,b]$上的均匀分布, 则$\int_0^1\int_0^{d(q_1Y_\beta)}F(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y)$经过化简可得

$$\int_0^1\int_a^{d(q_1(1-\beta)Y+\beta EY)}\frac{x-a}{b-a}\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y)=\frac{q_1^2[(1-\beta)^2\sigma^2+\mu^2]-2a\mu q_1+a^2}{2(b-a)},$$

则零售商的期望利润函数为

$$\mathrm{E}[\varPi(q_1,\beta)]=(p+v-\omega_1)q_1\mu-v\mu_{\mathrm{d}}-\beta\omega_1q_1c-(p+v-s)\frac{q_1^2[(1-\beta)^2\sigma^2+\mu^2]-2a\mu q_1+a^2}{2(b-a)}.$$

对该式分别求q_1和β的一阶偏导数

$$\frac{\partial\mathrm{E}[\varPi(q_1,\beta)]}{\partial q_1}=(p+v-\omega_1)\mu-\beta\omega_1c-(p+v-s)\frac{2q_1[(\beta-1)^2\sigma^2+\mu^2]-2a\mu}{2(b-a)},$$

$$\frac{\partial\mathrm{E}[\varPi(q_1,\beta)]}{\partial\beta}=-\beta_1q_1c-(p+v-s)\frac{2q_1^2\sigma^2(\beta-1)}{2(b-a)}.$$

再对$\mathrm{E}[\varPi(q_1,q_2,\beta)]$分别求$q_1$, q_2和β二阶偏导数

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\varPi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1^2}=-(p+v-s)\frac{2[(\beta-1)^2\sigma^2+\mu^2]}{2(b-a)}<0,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\varPi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial\beta^2}=-(p+v-s)\frac{2q_1^2\sigma^2}{2(b-a)}<0,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\varPi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1\partial\beta}=-\omega_1c-(p+v-s)\frac{4q_1\sigma^2(\beta-1)}{2(b-a)}<0,$$

得到Hessian矩阵行列式的值为

$$H=\begin{pmatrix}\dfrac{\partial^2\mathrm{E}[\varPi(q_1,\beta)]}{\partial q_1^2} & \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[\varPi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1\partial\beta}\\ \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[\varPi(q_1,\beta)]}{\partial q_1\partial\beta} & \dfrac{\partial^2\mathrm{E}[\varPi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial\beta^2}\end{pmatrix}=J^2\cdot\frac{q_1^2\sigma^2(\mu^2-3(\beta-1)^2\sigma^2)}{(b-a)^2}-\omega_1^2c^2+\frac{4Jq_1\sigma^2(1-\beta)\omega_1c}{b-a}.$$

因此, 假定

$$-\omega_1c-(p+v-s)\frac{4q_1\sigma^2(\beta-1)}{b-a}<0,$$

则Hessian矩阵恒大于0, 零售商的利润函数是关于q_1, β的联合凹函数,参照马利军[17]的证明过程, 根据凹函数的定义, 对于$\mathrm{E}\varPi(q_1,\beta)$上的任意两个点$(q_1,\beta)$和$(q_1',\beta')$, 均有

$$\mathrm{E}\varPi(\frac{q_1+q_1'}{2},\frac{\beta+\beta'}{2})\geqslant\frac{\mathrm{E}\varPi(q_1,\beta)+\mathrm{E}\varPi(q_1',\beta')}{2},$$

又因为$(\cdot)^+=\max\{\cdot,0\}$是非减的凸函数, 因此可得

$$(-\varPi(\frac{q_1+q_1'}{2},\frac{\beta+\beta'}{2}))^+\leqslant(\frac{-\varPi(q_1,\beta)-\varPi(q_1',\beta')}{2})^+\leqslant\frac{(-\varPi(q_1,\beta))^+}{2}+\frac{(-\varPi(q_1',\beta'))^+}{2}.$$

故$(-\varPi(q_1,\beta))^+$是关于q_1和β的联合凸函数,

$$\gamma\varphi(q_1,\beta)=-\gamma\mathrm{E}[-\varPi(q_1,\beta)]^+$$

是关于q_1和β的联合凹函数, 可得证零售商的期望效用$\mathrm{E}U(q_1,\beta)=\mathrm{E}[\varPi(q_1,\beta)]+\gamma\varphi(q_1,\beta)$是关于$q_1$和$\beta$的联合凹函数. 所以$\max\mathrm{E}U(q_1,\beta)$存在最优解, 且最优解由$\mathrm{E}U(q_1,\beta)$联立一阶方程组给定.

证毕.

因此, 问题(3)的最优解需要满足以下一阶方程组:

$$\begin{cases}K-J\int_0^1B\mathrm{d}G(y)-\gamma\int_0^1C\mathrm{d}G(y)+\\ \gamma\int_0^1\mathrm{E}\mathrm{d}G(y)=0,\\ \omega_1q_1c-J\int_0^1G\mathrm{d}G(y)-\gamma\int_0^1H\mathrm{d}G(y)+\\ \gamma\int_0^1I\mathrm{d}G(y)=0,\end{cases}$$

其中:

$B = Y_\beta F(q_1 Y_\beta),\ C = ((\omega_1 - s)Y_\beta + \omega_1 \beta c)F(d_1),$

$E = ((p + v - \omega_1)Y_\beta - \beta\omega_1 c)\bar{F}(d_2),$

$G = q_1(\mu - y)F(q_1 Y_\beta),$

$H = (q_1(\omega_1 - s)(\mu - y) + \omega_1 q_1 c)F(d_1),$

$I = (q_1(p + v - \omega_1)(\mu - y) - \omega_1 q_1 c)\bar{F}(d_2),$

$J = p + v - s,\ K = (p + v - \omega_1)\mu - \beta\omega_1 c.$

3.2 面向稳定供应商的采购决策

当零售商仅能向不稳定的供应商2订货, 根据以上的假设, 零售商的利润函数$\varPi(q_2)$可表述为

$$\varPi(q_2) = p \cdot \min\{D, q_2\} + s \cdot (q_2 - D)^+ - \omega_2 q_2 - v \cdot (D - q_2)^+. \tag{4}$$

经过进一步的分解, 可以得到以下结果:

$$\begin{cases} \varPi_1(q_2) = (p - s)D - (\omega_2 - s)q_2, & 若\ D \leqslant q_2, \\ \varPi_2(q_2) = (p + v - \omega_2)q_2 - Dv, & 若\ D > q_2. \end{cases}$$

与第3.1节中模型一致, 零售商依然具有损失厌恶的风险偏好, 所以损失厌恶的零售商在提前支付的情况下的期望效用函数可表示为

$$\mathrm{E}U(q_2) = \mathrm{E}\varPi(q_2) - \gamma \mathrm{E}[-\varPi(q_2)]^+ = \mathrm{E}[\varPi(q_2) + \gamma\varphi(q_2)]. \tag{5}$$

经过对式(5)的化简, 可得零售商的期望利润

$$\mathrm{E}\varPi(q_2) = (p + v - \omega_2)q_2 - v\mu_{\mathrm{d}} - (p + v - s)\int_0^1 \int_0^{q_2} F(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y),$$

损失厌恶产生的负效用$\gamma\varphi(q_2) = -\gamma \mathrm{E}[-\varPi(q_2)]^+$, 同理出于实际情况的考量, 零售商利润小于零的点可能出现在$\varPi_1(q_2)$和$\varPi_2(q_2)$中, 令$\varPi_1(q_2)$和$\varPi_2(q_2)$分别等于0, 可得

$$d_1(q_2) = \frac{(\omega_2 - s)q_2}{p - s},\ d_2(q_2) = \frac{(p + v - \omega_2)q_2}{v}.$$

即在期末市场需求量为$(0, d_1)$或者(d_2, ∞)时, 零售商的利润将小于零, 由零售商的损失厌恶而产生的负效用$\gamma\varphi(q_2)$可化简整理为

$$\gamma\varphi(q_2) = \gamma\int_0^1 \int_0^{d_1(q_2)} \varPi_1(q_1)\mathrm{d}(F(x))\mathrm{d}(G(y)) + \gamma\int_0^1 \int_{d_2(q_2)}^{\infty} \varPi_2(q_2)\mathrm{d}(F(x))\mathrm{d}(G(y)).$$

因此, 该损失厌恶零售商的决策问题是选择合适的订货量q_2, 使得零售商的期望效用最大.

$$\max_{q_2 \geqslant 0} \mathrm{E}U(q_2). \tag{6}$$

定理 2 损失厌恶零售商的期望效用函数$\mathrm{E}U(q_2)$是关于q_2的凹函数, 并且问题(6)存在最优解q_2^*.

对$\mathrm{E}U(q_2)$求q_2的一阶偏导数有

$$\frac{\partial \mathrm{E}U(q_2)}{\partial q_2} = G_1 - J\int_0^1 F(q_2)\mathrm{d}G(y) - \gamma(\omega_2 - s) \times \int_0^1 F(d_1)\mathrm{d}G(y) + \gamma G_1 \int_0^1 \bar{F}(d_2)\mathrm{d}G(y).$$

再对$\mathrm{E}U(q_2)$求q_2的二阶偏导数有

$$\frac{\partial^2 \mathrm{E}U(q_2)}{\partial q_2^2} = -J\int_0^1 f(q_2)\mathrm{d}G(y) - \gamma\frac{(\omega_2 - s)^2}{p - s}\int_0^1 f(d_1)\mathrm{d}G(y) - \gamma\frac{G_1^2}{v}\int_0^1 f(d_2)\mathrm{d}G(y) < 0.$$

因此, 零售商的期望利润是关于q_2的凹函数, 存在最优解q_2使得零售商获得最大的期望利润.

证毕.

令$\dfrac{\partial \mathrm{E}U(q_2)}{\partial q_2} = 0$, 可得零售商最优订货量$q_2^*$所满足的条件:

$$G_1 - J\int_0^1 F(q_2)\mathrm{d}G(y) - \gamma(\omega_2 - s) \times \int_0^1 F(d_2)\mathrm{d}G(y) - \gamma G_1 \int_0^1 F(d_2)\mathrm{d}G(y) = 0.$$

3.3 双源采购决策

零售商同时面向供应商1和2采购, 并愿意提前支付部分货款提高供应商1的可靠性和自身利益增加的双赢效果. 此时零售商的利润函数$\varPi(q_1, q_2, \beta)$表示为

$$\varPi(q_1, q_2, \beta) = p \cdot \min\{D, q_1 Y_\beta + q_2\} - \omega_1 q_1 Y_\beta + s(q_1 Y_\beta + q_2 - D)^+ - \omega_2 q_2 - v(D - q_1 Y_\beta + q_2)^+ - \beta\omega_1 q_1 c. \tag{7}$$

经过进一步的分解, 可得

$$\begin{cases} \varPi_1 = I_1 D - A_1 q_1 Y_\beta - B_1 q_2 - H_1, \\ \qquad D \leqslant (q_1 Y_\beta + q_2), \\ \varPi_2 = E_1 q_1 Y_\beta + G_1 q_2 - vD - H_1, \\ \qquad D > (q_1 Y_\beta + q_2), \end{cases}$$

其中: $A_1 = \omega_1 - s,\ B_1 = \omega_2 - s,\ E_1 = p + v - \omega_1,\ G_1 = p + v - \omega_2,\ H_1 = \omega_1 q_1 \beta c,\ I_1 = p - s.$

与第3.1节中模型一致, 零售商具有损失厌恶的风险偏好, 所以其在提前支付情况下的期望效用函数可以表示为

$$\mathrm{E}U(q_1, q_2, \beta) = \mathrm{E}[\varPi(q_1, q_2, \beta)] - \gamma \mathrm{E}[-\varPi(q_1, q_2, \beta)]^+ = \mathrm{E}[\varPi(q_1, q_2, \beta) + \gamma\varphi(q_1, q_2, \beta)].$$

经过对式(7)的化简可得零售商的期望利润

$$\mathrm{E}[\varPi(q_1, q_2, \beta)] = (p + v - \omega_1)q_1\mu + (p + v - \omega_2)q_2 - v\mu_{\mathrm{d}} - \beta\omega_1 q_1 c - (p + v - s)\int_0^1 \int_0^{q_1 Y_\beta + q_2} F(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y),$$

零售商损失厌恶产生的负效用

$$\gamma\varphi(q_1,q_2,\beta)=-\gamma\mathrm{E}[-\Pi(q_1,q_2,\beta)]^+.$$

原因同上, 零售商利润小于零的点可能出现在$\Pi_1(q_1,q_2,\beta)$和$\Pi_2(q_1,q_2,\beta)$中, 令

$$\Pi_1(q_1,q_2,\beta)=0,\ \Pi_2(q_1,q_2,\beta)=0,$$

可得

$$d_1(q_1,q_2,\beta)=\frac{(\omega_1-s)q_1Y_\beta+(\omega_2-s)q_2+\beta\omega_1q_1c}{p-s},$$

$$d_2(q_1,q_2,\beta)=\frac{(p+v-\omega_1)q_1Y_\beta+(p+v-\omega_2)q_2-\beta\omega_1q_1c}{v},$$

当期末需求量为$(0,d_1)$或者(d_2,∞)时, 零售商的利润将小于零. 因此

$$\varphi(q_1,q_2,\beta)=\int_0^1\int_0^{d_1(q_1,q_2,\beta)}\Pi_1(q_1,q_2,\beta)\mathrm{d}F(x)\mathrm{d}G(y)+\int_0^1\int_{d_2(q_1,q_2,\beta)}^{\infty}\Pi_2(q_1,q_2,\beta)\mathrm{d}F(x)\mathrm{d}G(y).$$

该损失厌恶零售商需要选择合适的订货量q_1和q_2以及提前支付比例β使其期望效用最大化, 表达式如下:

$$\max_{q_1,q_2\geqslant0,1\geqslant\beta\geqslant0}\mathrm{E}U(q_1,q_2,\beta). \tag{8}$$

为了证明零售商最优期望效用的解是否存在, 参照章第3.1节, 假设期末市场需求量D服从区间$U\in[a,b]$上的均匀分布, 此时, 可以证明存在最优订货量以及最优提前支付比例使得零售商可以获得最优的期望效用, 如定理3所示.

定理 3 在和定理1相同的假设条件下, 提前支付下损失厌恶零售商的期望效用函数$\mathrm{E}U(q_1,q_2,\beta)$是关于$q_1$, q_2和β的联合凹函数, 并且问题(8)存在最优解(q_1^*,q_2^*,β^*).

因为期末需求D服从区间$[a,b]$上的均匀分布, 则$\int_0^1\int_0^{d(q_1Y_\beta+q_2)}F(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y)$经过化简可得

$$\int_0^1\int_a^{d(q_1(1-\beta)Y+\beta EY+q_2)}\frac{x-a}{b-a}\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y)=\frac{q_1^2((1-\beta)^2\sigma^2+\mu^2)-2a\mu q_1+q_2^2-2aq_2+2\mu q_1q_2+a^2}{2(b-a)},$$

则零售商的期望利润函数

$$\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]=(p+v-\omega_1)q_1\mu+(p+v-\omega_2)q_2-v\mu_\mathrm{d}-\omega_1q_1\beta c-(p+v-s)\times\frac{q_1^2((1-\beta)^2\sigma^2+\mu^2)-2a\mu q_1+q_2^2-2aq_2+2q_1q_2\mu+a^2}{2(b-a)}.$$

对$\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]$分别求$q_1$, q_2和β的一阶偏导数

$$\frac{\partial\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1}=(p+v-\omega_1)\mu-w_1\beta c-(p+v-s)\times\frac{2q_1((\beta-1)^2\sigma^2+\mu^2)-2a\mu+2q_2\mu}{2(b-a)},$$

$$\frac{\partial\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_2}=(p+v-\omega_2)-(p+v-s)\frac{2q_2-2a+2q_1\mu}{2(b-a)},$$

$$\frac{\partial\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial\beta}=-\omega_1q_1c-(p+v-s)\frac{2q_1^2\sigma^2(\beta-1)}{2(b-a)}.$$

再对$\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]$分别求$q_1$, q_2和β二阶偏导数

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1^2}=-(p+v-s)\frac{2[(\beta-1)^2\sigma^2+\mu^2]}{2(b-a)}<0,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_2^2}=-(p+v-s)\frac{2}{2(b-a)}<0,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial\beta^2}=-(p+v-s)\frac{2q_1^2\sigma^2}{2(b-a)}<0,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1\partial q_2}=-(p+v-s)\frac{2\mu}{2(b-a)}<0,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1\partial\beta}=-\omega_1c-(p+v-s)\frac{4q_1\sigma^2(\beta-1)}{2(b-a)}<0,$$

$$\frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_2\partial\beta}=0$$

得到Hessian矩阵行列式的值为

$$H=\begin{pmatrix}\frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1^2} & \frac{\partial^2\mathrm{E}U(q_1,q_2;\beta)}{\partial q_1\partial q_2} & \frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1\partial\beta}\\ \frac{\partial^2\mathrm{E}U(q_1,q_2;\beta)}{\partial q_1\partial q_2} & \frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_2^2} & \frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_2\partial\beta}\\ \frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_1\partial\beta} & \frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial q_2\partial\beta} & \frac{\partial^2\mathrm{E}[\Pi(q_1,q_2,\beta)]}{\partial\beta^2}\end{pmatrix}=$$

$$\frac{3(p+v-s)^3q^2\sigma^4(\beta-1)^2}{(b-a)^3}+(p+v-s)^2\frac{4q_1\sigma^2(\beta-1)\omega_1c}{(b-a)^2}+$$

$$(p+v-s)\frac{\omega_1^2c^2}{b-a}>0.$$

同理参照马利军[17]的证明过程, 根据定理3可知零售商的利润函数是关于q_1, q_2, β的联合凹函数, 根据凹函数的定义, 对于$\mathrm{E}\varPi(q_1,q_2,\beta)$上的任意两个点$(q_1,q_2,\beta)$和$(q_1',q_2',\beta')$, 均有

$$\mathrm{E}\varPi(\frac{q_1+q_1'}{2},\frac{q_2+q_2'}{2},\frac{\beta+\beta'}{2})\geqslant \frac{\mathrm{E}\varPi(q_1,q_2,\beta)+\mathrm{E}\varPi(q_1',q_2',\beta')}{2}.$$

又因为$(\cdot)^+=\max\{\cdot,0\}$是非减的凸函数, 因此可得

$$(-\varPi(\frac{q_1+q_1'}{2},\frac{q_2+q_2'}{2},\frac{\beta+\beta'}{2}))^+\leqslant (\frac{-\varPi(q_1,q_2,\beta)-\varPi(q_1',q_2',\beta')}{2})^+\leqslant \frac{(-\varPi(q_1,q_2,\beta))^+}{2}+\frac{(-\varPi(q_1',q_2',\beta'))^+}{2}.$$

故$(-\varPi(q_1,q_2,\beta))^+$是关于$q_1$, q_2和β的联合凸函数, $\gamma\varphi(q_1,q_2,\beta)=-\gamma\mathrm{E}[-\varPi(q_1,q_2,\beta)]^+$是关于$q_1$, q_2和β的联合凹函数, 可得证零售商的期望效用

$$\mathrm{E}U(q_1,q_2,\beta)=\mathrm{E}[\varPi(q_1,q_2,\beta)]+\gamma\varphi(q_1,q_2,\beta)$$

是关于q_1, q_2和β的联合凹函数. 所以$\max\mathrm{E}U(q_1,q_2,\beta)$存在最优解, 且最优解由$\mathrm{E}U(q_1,q_2,\beta)$联立一阶方程组给定. 证毕.

因此, 问题(8)的最优解需要满足以下一阶方程组:

$$\begin{cases} A_2-J\int_0^1 J_1\mathrm{d}G(y)-\gamma\int_0^1(K_1-L_1)\mathrm{d}G(y)=0,\\ G_1-J\int_0^1 M_1\mathrm{d}G(y)-\gamma\int_0^1(N_1-O_1)\mathrm{d}G(y)=0,\\ A_3-J\int_0^1 R_1\mathrm{d}G(y)-\gamma\int_0^1(T_1-X_1)\mathrm{d}G(y)=0,\end{cases}$$

其中:

$$\begin{aligned}&A_2=E_1\mu-\beta\omega_1c,\ A_3=-\omega_1q_1c,\\ &J_1=Y_\beta F(q_1Y_\beta+q_2),\ K_1=(A_1Y_\beta+\beta\omega_1c)F(d_1),\\ &L_1=(E_1Y_\beta-\beta\omega_1c)\bar{F}(d_2),\ M_1=F(q_1Y_\beta+q_2),\\ &N_1=B_1F(d_1),\ O_1=G_1\bar{F}(d_2),\ R_1=(\mu-y)q_1M_1,\\ &T_1=(A_1q_1(\mu-y)+\omega_1q_1c)F(d_1),\\ &X_1=(E_1q_1(\mu-y)-\omega_1q_1c)\bar{F}(d_2).\end{aligned}$$

4 参数分析

本节主要通过对双源供应模型中损失厌恶和市场需求这两个参数进行分析, 判断其对最优订货量, 最优期望效用等系统绩效的影响.

4.1 损失厌恶系数

考虑零售商的损失厌恶程度分别为γ和γ', 其他假定同上, (q_1^*,q_2^*,β^*)和$(q_1^{*\prime},q_2^{*\prime},\beta^{*\prime})$分别为零售商损失厌恶程度为$\gamma$和$\gamma'$时的最优决策, 通过分析零售商损失厌恶程度对最优决策的影响, 得到如下性质:

性质 1 1) 当$\gamma<\gamma'$, 零售商对供应商1和供应商2的最优订货量将减小; 2) $\gamma<\gamma'$, 零售商对供应商1的最优订货量波动程度大于供应商2; 3) 当$\dfrac{\partial\varphi(q_1,q_2,\beta)}{\partial\beta}>0$存在时, $\gamma<\gamma'$, 零售商的最优提前支付比例将减小, 反之亦然.

证明见附录1.

从性质1可知在其他条件不变的情况下, 随着零售商损失厌恶程度的增加, 其对市场的预测会更加保守, 将会减少订货量, 尤其将大幅减少对供应商1的订货量, 因为供应商1的到货量不可靠, 零售商为了满足期末需求量, 将不太可能提前支付更多的货款改善供应商1的可靠性, 相反, 将面向供应商2采购相对较高比例的货物.

4.2 随机需求

因为零售商所面临的市场需求是随机的, 为了分析不同市场需求对零售商最优决策的影响, 不妨假定市场需求分别为D和D_1, 服从均匀分布, 所对应的分布函数分别为$F(x)$和$F_1(x)$, 令$(q_{1\mathrm{F}}^*,q_{2\mathrm{F}}^*,\beta_{\mathrm{F}}^*)$为随机需求为$D$时的最优解, 相应的最优期望效用为$\mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_{1\mathrm{F}}^*,q_{2\mathrm{F}}^*,\beta_{\mathrm{F}}^*)$. 同理令随机需求$D_1$的最优解为$(q_{1\mathrm{F}_1}^*,q_{2\mathrm{F}_1}^*,\beta_{\mathrm{F}_1}^*)$, 则$\mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_{1\mathrm{F}_1}^*,q_{2\mathrm{F}_1}^*,\beta_{\mathrm{F}_1}^*)$为其对应的最优期望效用.

性质 2 当$D\succeq_{\mathrm{st}}D_1$时: 1) 零售商的最优期望效用将增大; 2) 零售商对供应商1和供应商2的最优订货量都将增大; 3) 零售商对供应商2的最优订货量波动程度大于供应商1; 4) 若存在

$$\begin{aligned}&\int_0^1 q_1(\mu-y)[F_1(q_1Y_\beta+q_2)-F(q_1Y_\beta+q_2)]\mathrm{d}G(y)\times\\ &(p+v-s)+\gamma\int_0^1(q_1(\mu-y)(\omega_1-s)+\omega_1q_1c)\times\\ &(F_1(d_1(q_1,q_2,\beta))-F(d_1(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y)+\\ &\gamma\int_0^1(q_1(\mu-y)(p+v-\omega_1)-\omega_1q_1c)\times\\ &(F_1(d_2(q_1,q_2,\beta))-F(d_2(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y)>0.\end{aligned}$$

零售商的提前支付比例将会增加, 反之亦然.

证明见附录2.

性质2说明, 在一阶随机占优条件下, 需求越是随机大, 最优订货款将增大, 最优期望效用也将增大, 这说明了需求越是随机大, 零售商需要更多的库存来满足需求, 因此订货量更大, 期望的销售数量增加进而利润增加, 最优期望效用也将会增大. 同时, 因为供应商2的稳定性更高, 零售商将更愿意增加对供应商2的采购量, 以应对市场需求的不确定性, 但是市场需求一阶随机占优并不一定会引起零售商的最优提前支付比例的增加, 也可能会减少.

性质 3 当市场需求$D \succeq_{\text{ssd}} D_1$, 1)零售商的最优期望效用将增大; 2) 如果满足条件

$$\int_0^1 Y_\beta(F_1(q_1Y_\beta + q_2) - F(q_1Y_\beta + q_2))\mathrm{d}G(y) \times (p+v-s) + \gamma\int_0^1(((\omega_1 - s)Y_\beta + \beta\omega_1 c) \times F_1(d_1(q_1,q_2,\beta) - F(d_1(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y) + \gamma\int_0^1(((p+v-\omega_1)Y_\beta - \beta\omega_1 c) \times F_1(d_2(q_1,q_2,\beta)) - F(d_2(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y) \geqslant 0$$

恒成立, 零售商对供应商1的订货量将增大. 如果满足条件

$$\int_0^1(F_1(q_1Y_\beta + q_2) - F(q_1Y_\beta + q_2))\mathrm{d}G(y) \times (p+v-s) + \gamma\int_0^1(\omega_2 - s)(F_1(d_1(q_1,q_2,\beta)) - F(d_1(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y) + \gamma\int_0^1(p+v-\omega_2) \times (F_1(d_2(q_1,q_2,\beta)) - F(d_2(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y) \geqslant 0$$

成立, 零售商对供应商2的最优订货量将增大; 3) 若存在

$$\int_0^1(\mu-y)q_1(F_1(q_1Y_\beta+q_2)-F(q_1Y_\beta+q_2))\mathrm{d}G(y)\times (p+v-s)+\gamma\int_0^1(q_1(\omega_1-s)(\mu-y)+\omega_1q_1c)\times (F_1((d_1(q_1,q_2,\beta))-F(d_1(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y)+ \gamma\int_0^1(q_1(p+v-\omega_1)(\mu-y)-\omega_1q_1c)\times (F_1(d_2(q_1,q_2,\beta))-F(d_2(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y)\geqslant 0,$$

零售商的提前支付比例将会增加.

证明见附录3.

性质3说明, 当市场需求二阶随机占优时, 最优期望效用增大, 换言之, 需求风险降低导致最优期望效用增大, 一般而言, 当需求分布的方差较小时, 零售商的最优订货量和最优提前支付比例也会相对应减少, 但这种情况并非一直成立, 正如性质3所示, 在需求风险降低时, 最优订货量可能增大也可能减少, 同理, 最优提前支付比例可能增大也可能减小.

5 算例分析

5.1 双源供应下提前支付比例的影响

不同损失厌恶程度的零售商对供应商订货量的变化情况在性质1中已得到说明, 但尚未比较损失厌恶程度不同时, 零售商对供应商1提前支付比例的是否会影响到各自订货量的变化以及自身期望效用的变化, 本文在研究过程中,为了保证数据的真实性和实验结果的实用性, 参照了多篇参考文献中数值例子的参数设计方法[17,23], 并且调研了与本主题相关企业的运营相关数据, 最终确定了可靠的数据参数, 最终确定的参数如下: $p=250, v=100, \omega_1=120, \omega_2=160, s=50, D\sim U(500,1000), Y\sim U(0,1)$, 零售商的提前订货期$T$为30 d, r根据银行的活期存款利率确定等于0.0035, 复利$c=\exp^{rT}-1=0.11$, 经过计算不同损失厌恶程度下的最优订货量和最优效用, 可以得到表1–2.

表 1 提前支付下损失厌恶系数对零售商决策的影响

Table 1 The impact of loss-averse coefficient for retailer's strategy with advanced payment

厌恶系数	$\beta\neq 0$(提前支付下)				
	β	q_1	q_2	$\frac{q_1}{q_1+q_2}$	$\mathrm{E}U_{\text{dual}}$
$\gamma=0.0$	0.91	1722	0	**1.000**	154318
$\gamma=0.1$	0.84	1651	0	**1.000**	138150
$\gamma=0.2$	0.78	1578	0	**1.000**	121772
$\gamma=0.3$	0.68	1513	68	**0.957**	108993
$\gamma=0.4$	0.59	1341	145	**0.902**	98350
$\gamma=0.5$	0.50	1194	232	**0.837**	87610
$\gamma=0.6$	0.45	812	322	**0.716**	74350
$\gamma=0.7$	0.36	507	386	**0.568**	61468
$\gamma=0.8$	0.28	302	439	**0.408**	50362
$\gamma=0.9$	0.19	183	490	**0.272**	40387
$\gamma=1.0$	0.00	0	500	**0.089**	31000

表 2 无提前支付下损失厌恶系数对零售商决策的影响

Table 2 The impact of loss-averse coefficient for retailer's strategy without advanced payment

厌恶系数	$\beta=0$(无提前支付下)				
	β	q_1	q_2	$\frac{q_1}{q_1+q_2}$	$\mathrm{E}U_{\text{dual}}$
$\gamma=0.0$	0	268	683	**0.281**	101503
$\gamma=0.1$	0	241	664	**0.266**	95240
$\gamma=0.2$	0	214	646	**0.248**	88472
$\gamma=0.3$	0	188	629	**0.230**	83378
$\gamma=0.4$	0	161	610	**0.209**	76454
$\gamma=0.5$	0	134	591	**0.185**	71102
$\gamma=0.6$	0	107	573	**0.157**	63306
$\gamma=0.7$	0	81	555	**0.127**	53382
$\gamma=0.8$	0	54	537	**0.090**	44993
$\gamma=0.9$	0	27	518	**0.050**	38825
$\gamma=1.0$	0	0	500	**0.000**	31000

对比表1和表2中供应商1和供应商2的最优订货量数据可知, 随着损失厌恶程度的降低, 零售商的提前支付比例将会增加, 此时零售商对供应商1的最优订货量将不断增大, 对供应商2的最优订货量将不断减小, 在到达某一个临界点, 零售商将完全放弃供应商2, 仅从供应商1处订货. 这是因为随着提前支付比例的上升, 供应商1的供应可靠性将增强, 并且其相较供应

商2而言拥有更低的批发价, 这将吸引零售商对供应商1订购更多的货物. 虽然性质2中已证明当零售商损失厌恶程度增大时, 其对供应商1和2的订货量将会减小, 但因为提前支付比例变化的影响比损失厌恶程度的影响要大, 导致零售商对不同供应商的订货量的变化出现异常情况. 而在零售商不提供提前支付比例时, 随着零售商的损失厌恶程度不断增大, 对供应商1和2的最优订货量都将降低. 横向分析零售商对供应商1订货量的占比数据可知, 提前支付下零售商对供应商1订货量的占比始终大于无提前支付的占比. 这说明了只要零售商增加对供应商1的提前支付比例, 则必然会增加对供应商1的订货量.

同时, 比较两表中最优期望效用的数据可知, 随着损失厌恶程度的增大, 零售商的最优期望效用将降低, 当零售商的损失厌恶程度逼近逼近极值1时, 即使零售商资金实力雄厚, 也不愿意向供应商1订货, 但存在提前支付比例情况下零售商的最优期望效用均高于无提前支付比例的情况. 这表明随着提前支付比例的不断增加, 零售商的最优期望效用将不断增大.

5.2　单双源供应下损失厌恶的影响

为了对比分析双源供应下具有损失厌恶偏好的零售商最优期望效用与单源供应下的差异, 本文另外考虑了两种特殊情况(零售商仅向供应商1订货和零售商仅向供应商2订货), 通过与本文第3节类似的建模可得当零售商分别仅向供应商1订货(需满足一定条件)和供应商2订货时, 均存在最优期望效用的唯一解. 因此经过计算可得单双源供应条件下零售商不同的期望效用, 如表3和表4所示.

表 3 零售商面向不稳定供应商的期望效用

Table 3 The retailer's expected utility procuring from unreliable supplier

厌恶系数	$\beta \neq 0$(不可靠供应商)			
	β	q_1	$\mathrm{E}U_1$	$\frac{\mathrm{E}U_{\mathrm{dual}}-\mathrm{E}U_1}{\mathrm{E}U_1}$
$\gamma=0.0$	0.83	1722	**154318**	**0.00**
$\gamma=0.1$	0.79	1751	**138150**	**0.00**
$\gamma=0.2$	0.72	1578	**121772**	**0.00**
$\gamma=0.3$	0.61	1530	**101325**	**0.076**
$\gamma=0.4$	0.52	1468	**88590**	**0.110**
$\gamma=0.5$	0.45	1375	**78223**	**0.120**
$\gamma=0.6$	0.36	1306	**65105**	**0.142**
$\gamma=0.7$	0.32	1227	**53265**	**0.154**
$\gamma=0.8$	0.27	1145	**43378**	**0.161**
$\gamma=0.9$	0.11	1073	**33940**	**0.190**
$\gamma=1.0$	0.00	1000	**26616**	**0.250**

从表3和表4可以看出, 相较于单源采购而言, 双源采购有利于损失厌恶零售商获得更优的期望效用, 这也从侧面说明了损失厌恶零售商不仅仅追求供应的稳定性, 也会看重价格. 横向对比来看, 在$0\leqslant\gamma\leqslant 0.7$之间三者之间的关系为双源采购的最优期望效用大于仅从供应商1处订货大于仅从供应商2处订货, 在$0.7<\gamma<1$时, 因为损失厌恶程度的增大, 零售商并不愿意承担较大的供应不可靠的风险, 因此三者之间的关系变为双源采购大于供应商2大于供应商1, 并且对供应商1的差额占比随着损失厌恶程度的降低逐渐减小, 相反对供应商2的差额占比逐渐增大. 这说明在资金雄厚的零售商提供了提前支付比例的前提下, 通过双源采购不但可以缓解供需的不均衡, 还可以获得更大的期望效用.

表 4 零售商面向稳定供应商的期望效用

Table 4 The retailer's expected utility procuring from reliable supplier

厌恶系数	可靠供应商		
	q_2	$\mathrm{E}U_2$	$\frac{\mathrm{E}U_{\mathrm{dual}}-\mathrm{E}U_2}{\mathrm{E}U_2}$
$\gamma=0.0$	816	**100067**	**0.542**
$\gamma=0.1$	785	**93826**	**0.472**
$\gamma=0.2$	753	**86806**	**0.403**
$\gamma=0.3$	722	**81006**	**0.345**
$\gamma=0.4$	690	**75818**	**0.297**
$\gamma=0.5$	658	**71225**	**0.247**
$\gamma=0.6$	627	**62113**	**0.197**
$\gamma=0.7$	595	**52074**	**0.180**
$\gamma=0.8$	564	**43801**	**0.169**
$\gamma=0.9$	532	**36018**	**0.121**
$\gamma=1.0$	500	**31000**	**0.073**

5.3　残值和缺货成本的影响

为了判断不同的缺货成本和残值对损失厌恶零售商最优期望效用的影响, 以$\gamma=0.5$为例, 本节绘制了图2和图3, 分别代表了零售商的缺货成本为40和110时的3种采购方式的最优期望效用, 由第3.3节$\mathrm{E}U$的表达式可知, 当零售商的残值逐渐增大时, 零售商的期望效用将增大, 鉴于模型难以通过公式推导判断缺货成本和残值同时变化时如何影响零售商的最优期望效用, 因此采用算例进行比较.

单独分析图2或图3可知, 当其他条件不变, 随着商品残值的上升, 零售商的最优期望效用将增大, 横向对比两图可知, 随着缺货成本的上升, 3种采购方式的最优期望效用均会下降, 当缺货成本非常低而商品残值很高时, 损失厌恶零售商将会加大对供应商2的订货量, 因此面向供应商2的单源采购的最优期望效用上升趋势最为明显, 这说明此种情况下供应商1的批发价格优势将会被弱化, 因为零售商从供应商2处采购不仅可以保证供应的可靠性, 而且存货和缺货成本

对其期望效用的影响将会大大降低, 有理由推测当零售商的损失厌恶程度非常高时, 如果商品缺货成本很低,而残值很高, 零售商很可能仅从供应商2处订货. 因此, 为了保证本文的一致性, 可以认为零售商面临的是一个商品缺货成本大于残值的市场.

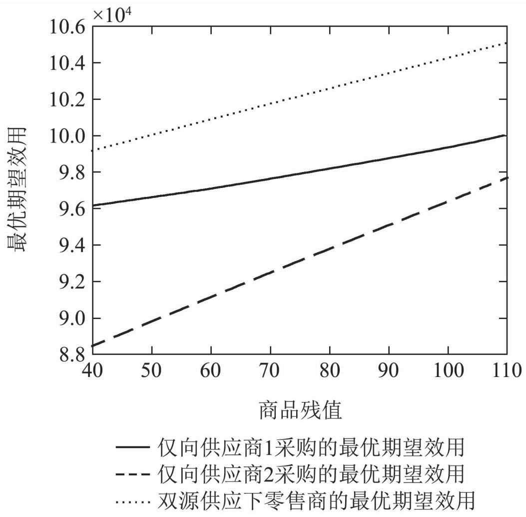

图 2 低缺货成本下零售商的期望效用

Fig. 2 The expected utility for retailer under low shortage cost

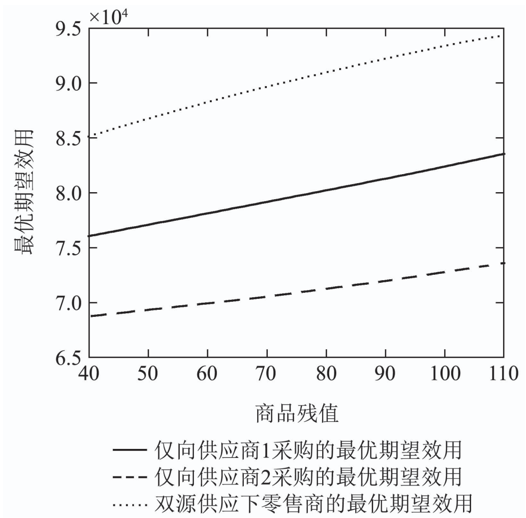

图 3 高缺货成本下零售商的期望效用

Fig. 3 The expected utility for retailer under high shortage cost

6 结论

在供应链结构日益复杂的今天, 针对需求不确定且供应商的供应数量不确定所导致的供需匹配不均衡的问题, 一直是研究领域的热点和难点. 在单源供应不能缓解供应不可靠的情况下, 学术界逐渐把目光聚焦到双源供应上, 本文致力于研究双源供应下风险厌恶零售商的订货及提前支付策略, 并将单双源采购进行对比. 研究发现, 在随机需求服从均匀分布的情况下, 风险厌恶零售商存在最优的组合订购量及提前支付比例使其获得最优期望效用. 同时, 本文还分析了两个模型参数风险厌恶程度和随机需求对提前支付零售商策略的影响, 最后通过数值分析研究了不同损失厌恶程度零售商的提前支付比例对最优订货量以及最优期望效用的变化、单双源采购下零售商最优期望效用的变化情况以及缺货成本和残值对零售商最优期望效用的影响. 研究发现, 随着提前支付比例的增加, 零售商对供应商1的订货量将增加, 对供应商2的订货量将逐渐减少至0, 最优期望效用也得到改善. 从单双源供应的效用分析情况可知, 双源采购下零售商的最优期望效用大于任何一种单源采购的情况, 另外随着缺货成本不断降低, 残值不断上升, 仅向供应商2采购的最优期望效用增势明显, 如果零售商损失厌恶程度较高, 将仅向供应商2采购, 因此本文有必要假设零售商出售的是一个短周期的缺货成本大于残值的商品.

现实很多损失厌恶的企业采用双源采购缓解供需不确定性, 但这并不是最佳的方法, 下游企业还应当在资金允许范围内以提前支付的方式向上游企业提供资金支持, 这将帮助其实现自身期望效用的最大化, 就上游供应商而言, 如果供应不可靠, 应当与下游供应商积极合作改善供应稳定性, 从而增强自身优势, 吸引下游企业订购更多货物获得更大收益.

本文在引入提前支付比例时, 仅仅考虑了方差的影响, 尚未考虑均值. 但在现实中, 供应可靠性和提前支付的关系非常复杂, 提前支付并非仅仅影响方差, 还有可能影响均值. 另外, 本文仅仅证明了在需求服从均匀分布下, 零售商有最优组合采购策略和提前支付的比例, 但对于需求服从其他分布甚至更一般的随机分布下的情况, 后面还需进行更细致的探讨和研究.

参考文献:

[1] ZHAO Xiaoyu, WANG Dingwei. Fuzzy chance constrained programming model for Bi-level distribution network design in the supply chain. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(2): 249 – 252, 238. (赵晓煜, 汪定伟. 供应链中二级分销网络优化设计的模糊机会约束规划模型. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 249 – 252, 238.)

[2] HANFIELD R. Reducing the impact of disruptions to the supply chain. http://www.sas.com/resources/asset/sascom.pdf. Accessed 18 Jan 2011.

[3] STRAUBE F, BOHN M, MA S. *Internationalisation of Logistics Systems*. Berlin: Springer, 2008.

[4] NELSON J. Evaluating supply chain risks with single vs. multiple vendor sourcing strategies. *Spend Matters*. America, 2013. Available at http://spendmatters.com/2013/02/28/evaluating-supply-chain-risks-with-single-vs-multiple-vendor sourcing-strategies.

[5] QIN F, RAO U S, GURNANI H, et al. Role of random capacity risk and the retailer in decentralized supply chains with competing suppliers. *Decision Sciences*, 2014, 45(2): 255 – 279.

[6] CHOPRA I. The increasing use of silver-based products as antimicrobial agents: a useful development or a cause for concern. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2007, 59(4): 587 – 590.

[7] TOMLIN, B. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks. *Management Science*, 2006, 52(5): 639 – 657.

[8] ALLON G, MIEGHEM J A V. Global dual sourcing: Tailored base-surge allocation to near and offshore production. *Management Science*, 2010, 56(1): 110 – 124.

[9] FENG Q, SHI R. Sourcing from multiple suppliers for price dependent demand. *Production & Operations Management*, 2012, 21(3): 547 – 563.

[10] DADA M, PETRUZZI N C, SCHWARZ L B. A newsvendor's procurement problem when suppliers are unreliable. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2007, 9(1): 9 – 32.

[11] TAN B, FENG Q, CHEN W. Dual sourcing under random supply capacities: the role of the slow supplier. *Production & Operations Management*, 2016, 25(7): 1232 – 1244.

[12] TOMLIN B, WANG Y. On the value of mix flexibility and dual sourcing in unreliable newsvendor networks. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2005, 7(1): 37 – 57.

[13] HANDFIELD, KRAUSE, SCANNELL. Avoid the pitfalls in supplier development. *Mit Sloan Management Review*, 2000, 41(2): 37 – 49.

[14] CHOI T Y, LIKER J K. Building deep supplier relationships. *Harvard Business Review*, 2004, 82(12): 104 – 113.

[15] HU X, GURNANI H, WANG L. Managing risk of supply disruptions: Incentives for capacity restoration. *Production & Operations Management*, 2013, 22(1): 137 – 150.

[16] WANG Y, XIAO Y, YANG N. Improving reliability of a shared supplier with competition and spillovers. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(2): 499 – 510.

[17] MA Lijun, GE Yangliang, XUE Weili, et al. Analysis of advanced payment strategy for the loss-averse retailer under uncertainties. *System Engneering Theory& Practice*, 2015, 35(2): 315 – 323.
(马利军, 葛羊亮, 薛巍立, 等. 不确定环境下损失厌恶零售商的提前支付决策. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2): 315 – 323.)

[18] ZHOU Yongwu, JI Kai, HU Shu'an, et al. Research on coordination strategy between hotel and two competing promoters. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(6): 868 – 877.
(周永务, 嵇凯, 胡树安, 等. 两竞争推广商与酒店的合作协调研究. 控制理论与应用, 2018, 35(6): 868 – 877.)

[19] CHEN X, HAO G, LI L. Channel coordination with a loss-averse retailer and option contracts. *International Journal of Production Economics*, 2014, 150(4): 52 – 57.

[20] CHOI T M, CHIU C H. Mean-downside-risk and mean-variance newsvendor models: Implications for sustainable fashion retailing. *Omega*, 2012, 40(3): 404 – 414.

[21] JöRNSTEN K, NONäS S L, SANDAL L, et al. Transfer of risk in the newsvendor model with discrete demand. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135(2): 552 – 560.

[22] YI Hao, YANG Zhaojun. Consumption-utility based pricing of payments following mean reversion. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(5): 494 – 498.
(易昊, 杨招军. 均值回复收益的消费效用无差别定价. 控制理论与应用, 2009, 26(5): 494 – 498.)

[23] LI X, LI Y. On the loss-averse dual-sourcing problem under supply disruption. *Computers & Operations Research*, 2016, 100(2018): 301 – 313.

[24] XU M, LU Y. The effect of supply uncertainty in price-setting newsvendor models. *European Journal of Operational Research*, 2013, 227(3): 423 – 433.

[25] LI Guojia, WANG Dingwei. Design and simulation of radio frequency identification-enabled hybrid push/pull strategy for muti-echelon inventory of supply chain. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(10): 1302 – 1309.
(李国家, 汪定伟. 供应链中控制多级存储的射频辨识Push/Pull混合策略设计与仿真. 控制理论与应用, 2014, 31(10): 1302 – 1309.)

[26] GUPTA D, COOPER W L. Stochastic comparisons in production yield management. *Operations Research*, 2005, 53(2): 377 – 384.

[27] FAN Xiaoyan. *Research on supply chain coordination with trade credit*. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
(范笑燕. 基于交易信用的供应链协调策略研究. 上海: 上海交通大学, 2008.)

[28] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk. *Journal of the Econometric Society*, 1979, 47(2): 263 – 292.

[29] CHARLES X，WANG, SCOTT W. The loss-averse newsvendor problem. *Omega*, 2009, 37(1): 93 – 105.

附录

性质1的证明如下:

证　1) 对于任意的$\gamma < \gamma'$, 有

$$\frac{\partial \mathrm{EU}(q_1^{*\prime}, q_2^{*\prime}, \beta^{*\prime}; \gamma')}{\partial q_1} - \frac{\partial \mathrm{EU}(q_1^*, q_2^*, \beta^*; \gamma)}{\partial q_1} = (\gamma - \gamma')\frac{\partial \varphi(q_1^*, q_2^*, \beta^*)}{\partial q_1}. \tag{9}$$

因为

$$\begin{aligned}&\frac{\partial \varphi(q_1^*, q_2^*, \beta^*)}{\partial q_1} = \\ &(p\omega_1 c - (p + v - \omega_1)\mu) + \\ &\int_0^1 ((\omega_1 - s)Y_\beta + \beta\omega_1 c)F(d_1(q_1, q_2, \beta))\mathrm{d}G(y) + \\ &\int_0^1 ((p + v - \omega_1)Y_\beta - \beta\omega_1 c)F(d_2(q_1, q_2, \beta))\mathrm{d}G(y) > 0,\end{aligned}$$

可得式(9)小于0, 从而有$\dfrac{\partial \mathrm{EU}(q_1^{*\prime}, q_2^{*\prime}, \beta^{*\prime}; \gamma')}{\partial q_1} < 0$. 由凹函数的性质可知随着损失厌恶程度的增大,对供应商1 的订货量将会下降. 同理可证得随着损失厌恶程度的增加, 零售商对供应商2的订货量也会下降.

2) 为了验证零售商随着损失厌恶程度的增加而对供应商订货量减少的程度, 不妨令

$$\begin{aligned}&\frac{\partial \mathrm{EU}(q_1^{*\prime}, q_2^{*\prime}, \beta^{*\prime}; \gamma')}{\partial q_1} - \frac{\partial \mathrm{EU}(q_1^*, q_2^*, \beta^*; \gamma)}{\partial q_1} - \\ &(\frac{\partial \mathrm{EU}(q_1^{*\prime}, q_2^{*\prime}, \beta^{*\prime}; \gamma')}{\partial q_2} - \frac{\partial \mathrm{EU}(q_1^*, q_2^*, \beta^*; \gamma)}{\partial q_2}) = \\ &(\gamma - \gamma')(\frac{\partial \varphi(q_1^*, q_2^*, \beta^*)}{\partial q_1} - \frac{\partial \varphi(q_1^*, q_2^*, \beta^*)}{\partial q_2}) = \\ &(\gamma - \gamma\prime)(\beta\omega_1 c - (p + v - \omega_1)\mu + (p + v - \omega_2)) + \\ &(\int_0^1 ((\omega_1 - s)Y_\beta + \beta\omega_1 c - (\omega_2 - s)) \times \\ &F(d_1(q_1, q_2, \beta))\mathrm{d}G(y) + \\ &\int_0^1 ((p + v - \omega_1)Y_\beta - \beta\omega_1 c - (p + v - \omega_2)) \times \\ &F(d_2(q_1, q_2, \beta))\mathrm{d}G(y)) \geqslant 0,\end{aligned}$$

这说明$\dfrac{\partial \mathrm{EU}(q_1^*, q_2^*, \beta^*; \gamma)}{\partial q_1} - \dfrac{\partial \mathrm{EU}(q_1^*, q_2^*, \beta^*; \gamma)}{\partial q_2} \geqslant 0$. 根据凹函数的特性, 随着损失厌恶程度的增大, 最优订货量q_1^*的衰减程度较最优订货量q_2^*而言更剧烈, 也就是说零售商不仅会降低对供应商1的订货量,而且降低的幅度较供应商2更剧烈. 这是因为供应商1的供应可靠性更差.

3) 要验证损失厌恶程度对零售商提前支付比例的影响, 令

$$\frac{\partial \mathrm{EU}(q_1^{*\prime}, q_2^{*\prime}, \beta^{*\prime}; \gamma')}{\partial \beta} - \frac{\partial \mathrm{EU}(q_1^*, q_2^*, \beta^*; \gamma)}{\partial \beta} =$$

$$(\gamma-\gamma')(q_1\omega_1 c+\int_0^1((\mu-y)q_1(\omega_1-s)+\omega_1 q_1 c)\times F(d_1(q_1,q_2,\beta))\mathrm{d}G(y)+\int_0^1((\mu-y)q_1(p+v-\omega_1)-\omega_1 q_1 c)F(d_2(q_1,q_2,\beta))\mathrm{d}G(y)),$$

如果$\dfrac{\partial\varphi(q_1,q_2,\beta)}{\partial\beta}>0$时, $\dfrac{\partial \mathrm{E}U(q_1^*,q_2^*,\beta^*;\gamma')}{\partial\beta}<0$, 那么根据凹函数的特性, 此时最优提前支付比例随着损失厌恶程度的增大而减小, 反之则亦然. 证毕

性质2的证明如下:

证 1) 参照文献[24], 若$D\succeq_{\mathrm{st}}D_1$, 则对于任意的$x$, 有$P(D>x)\geqslant p(D_1>x)$, 即结合连续型随机变量概率密度函数的性质可知, 当需求D一阶随机占优于D_1时, 可得$F(x)\leqslant F_1(x)$.

$$\mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)-\mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)=J\int_0^1\int_0^{q_1Y_\beta+q_2}B_2\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y)+\int_0^1\int_0^{d_1(q_1,q_2,\beta)}B_2\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y)\times\gamma(p-s)+\gamma v\int_0^1\int_0^{d_2(q_1,q_2,\beta)}B_2\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y),$$

其中$B_2=F_1(x)-F(x)$, 因为$F(x)\leqslant F_1(x)$, 所以

$$\mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)\geqslant \mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta),$$

因此当$D\succeq_{\mathrm{st}}D_1$时, EU_{F}的期望效用增大.

2) 同上, 如果$D\succeq_{\mathrm{st}}D_1$, 则有

$$F(q_1^*Y_\beta+q_2^*)\leqslant F_1(q_1^*Y_\beta+q_2^*),$$
$$F(d_1(q_1^*,q_2^*,\beta^*))\leqslant F_1(d_1(q_1^*,q_2^*,\beta^*)),$$
$$F(d_2(q_1^*,q_2^*,\beta^*))\leqslant F_1(d_2(q_1^*,q_2^*,\beta^*)),$$

因此

$$\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_1}-\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_1}=(p+v-s)\int_0^1 Y_\beta(F_1(q_1Y_\beta+q_2)-F(q_1Y_\beta+q_2))\mathrm{d}G(y)+\gamma\int_0^1((\omega_1-s)Y_\beta+\beta\omega_1 c)(F_1(d_1(q_1,q_2,\beta))-F(d_1(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y)+\gamma\int_0^1((p+v-\omega_1)Y_\beta-\beta\omega_1 c)(F_1(d_2(q_1,q_2,\beta))-F(d_2(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y)>0,$$

所以$\dfrac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_1}>0$, 根据凹函数的特性$q_{1\mathrm{F}}^*\geqslant q_{1\mathrm{F}_1}^*$, 同理可得$q_{2\mathrm{F}}^*\geqslant q_{2\mathrm{F}_1}^*$. 这说明在市场需求更加不确定的情况下, 零售商需要更多的库存来满足市场上的需求, 以避免因缺货而造成的损失.

3) 同理, 令

$$\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_1}-\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_1}-(\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_2}-\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_2})=\int_0^1(Y_\beta-1)(F_1(q_1Y_\beta+q_2)-F(F(q_1Y_\beta+q_2)))\mathrm{d}G(y)\times(p+v-s)+\gamma\int_0^1((\omega_1-s)Y_\beta+\beta\omega_1 c-(\omega_2-s))\times(F_1(d_1(q_1,q_2,\beta))-F(d_1(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y)+\gamma\int_0^1((p+v-\omega)Y_\beta-\beta\omega_1 c-(p+v-\omega_2))\times(F_1(d_1(q_1,q_2,\beta))-F(d_1(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y),$$

经判断可知, 该式小于零. 因此

$$\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_1}\leqslant\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_2},$$

在其他条件不变的情况下, 零售商对供应商2订货增加量大于供应商1.

4) 同理, 令

$$\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial\beta}-\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)}{\partial\beta}=\int_0^1 q_1(\mu-y)(F_1(q_1Y_\beta+q_2)-F(q_1Y_\beta+q_2))\mathrm{d}G(y)\times(p+v-s)+\gamma\int_0^1(q_1(\omega_1-s)(\mu-y)+\omega_1 q_1 c)\times(F_1(d_1(q_1,q_2,\beta))-F(d_1(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y)+\gamma\int_0^1(q_1(p+v-\omega_1)(\mu-y)-\omega_1 q_1 c)Y_\beta\times(F_1(d_2(q_1,q_2,\beta))-F(d_2(q_1,q_2,\beta)))\mathrm{d}G(y),$$

因为无法判断该式的正负, 如果该式大于零, 则零售商的提前支付比例将随着市场需求D一阶占优于D_1而增大, 反之亦然.

性质3的证明如下:

证 1) 如果存在一阶随机占优, 则二阶随机占优必然存在. 同理利用文献[24]中的定义,若$D\succeq_{\mathrm{ssd}}D_1$, 则对任意的$t$, 均有$\int_0^t(F_1(x)-F(x))\mathrm{d}(x)\geqslant 0$. 则

$$\mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)-\mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)=(p+v-s)\int_0^1\int_0^{q_1Y_\beta+q_2}(F_1(x)-F(x))\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y)+\gamma(p-s)\int_0^1\int_0^{d_1(q_1,q_2,\beta)}(F_1(x)-F(x))\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y)+\gamma v\int_0^1\int_0^{d_2(q_1,q_2,\beta)}(F_1(x)-F(x))\mathrm{d}x\mathrm{d}G(y).$$

因为

$$\int_0^t F(x)\mathrm{d}(x)\leqslant\int_0^t F_1(x)\mathrm{d}(x),$$

所以$EU_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)\geqslant EU_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)$, 根据凹函数的特点, 零售商的最优期望效用增大.

2) 如果性质3中的第2条的条件成立, 则

$$\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_1}-\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_1}\geqslant 0,$$
$$\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_2}-\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)}{\partial q_2}\geqslant 0,$$

所以零售商对供应商1和2的订货量均增大, 反之亦然.

3) 如果性质3中的第3条的条件成立, 则

$$\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}}(q_1,q_2,\beta)}{\partial\beta}-\frac{\partial \mathrm{E}U_{\mathrm{F}_1}(q_1,q_2,\beta)}{\partial\beta}\geqslant 0,$$

零售商的提前支付比例将增大, 反之亦然.

作者简介:

余建军 博士, 副教授, 目前研究方向为运作管理、物流与供应链管理, E-mail: yujj@scut.edu.cn;

朱 丹 硕士, 目前研究方向为供应链融资, E-mail: 15680730319@163.com;

钟远光 博士, 副教授, 目前研究方向为物流与供应链管理、供应链金融, E-mail: bmyzhong@scut.edu.cn;

谢 维 博士, 副教授, 目前研究方向为物流与供应链管理, E-mail: bmwxie@scut.edu.cn.