

考虑供应商损失规避性和资金约束的供应链决策

李莉英, 周俊, 汪敏

引用本文

李莉英, 周俊, 汪敏. [考虑供应商损失规避性和资金约束的供应链决策](#) [J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230800134-7.

LI Liying, ZHOU Jun, WANG Min. [Supply Chain Decisions Considering Supplier Loss Aversion and Financial Constraints](#) [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230800134-7.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[供需双方均受资金约束的低碳供应链决策研究](#)

Study on Decision-making for a Low-carbon Supply Chain with Capital Constraint on Both Supply and Demand Sides

计算机科学, 2023, 50(11A): 221200130-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221200130>

[基于子图特征的节点排序算法](#)

Node Ranking Algorithm Based on Subgraph Features

计算机科学, 2023, 50(11A): 230100122-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230100122>

[考虑风险规避和资金约束的低碳供应链决策研究](#)

Study on Decision-making for Low-carbon Supply Chain with Capital Constraint and Risk Aversion

计算机科学, 2022, 49(11A): 210900104-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210900104>

[基于改进哈希时间锁的区块链跨链资产交互协议](#)

Novel Hash-time-lock-contract Based Cross-chain Token Swap Mechanism of Blockchain

计算机科学, 2022, 49(1): 336-344. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210600170>

[基于LSTM神经网络的声发射信号识别研究](#)

Acoustic Emission Signal Recognition Based on Long Short Time Memory Neural Network

计算机科学, 2021, 48(11A): 319-326. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210700034>

考虑供应商损失规避性和资金约束的供应链决策

李莉英 周俊 汪敏

重庆交通大学数学与统计学院 重庆 400074

(llying-111@163.com)

摘要 随着市场竞争日益激烈,在产出不确定的情况下,供应商资金不足尤为常见。基于此,构建了一个以风险中性制造商为领导者,以损失规避供应商为跟随者的 Stackelberg 博弈模型。在银行融资和制造商预付款融资两种模式下,分别给出了损失规避供应商的最优生产投入量决策和制造商的最优损失分担决策。通过理论和算例分析表明:当各参数在一定范围内取不同值时,供应商和制造商可能倾向于选择不同的融资模式;在预付款融资模式下,供应商为最大化损失规避,将采取更加保守的生产策略,此时,制造商会通过承担更多的损失分担比例来激励供应商增加生产投入量。

关键词 产出不确定;损失规避;资金约束;融资策略;损失分担

中图分类号 F274

Supply Chain Decisions Considering Supplier Loss Aversion and Financial Constraints

LI Liying, ZHOU Jun and WANG Min

College of Mathematics and Statistics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract With increasingly competitive markets, it is particularly common for suppliers to be underfunded in the presence of yield uncertainty. Based on this, a Stackelberg game model is constructed with the lead of risk-neutral manufacturer and the follower of loss-averse supplier. The optimal production input quantity decision of the loss-averse supplier and the optimal loss-sharing decision of the manufacturer are given under the two modes of bank financing and manufacturer's advance payment financing, respectively. The theoretical and numerical analyses show that, when each parameter takes different values within a certain range, the supplier and the manufacturer may tend to choose different financing modes; in the advance payment financing mode, the more loss-averse the supplier is, the more conservative production strategy she will adopt, and then the manufacturer will incentivize the supplier to increase the amount of production inputs by assuming more loss-sharing ratios.

Keywords Output uncertainty, Loss aversion, Capital-constraint, Financing strategies, Loss sharing

1 引言

中小企业在我国经济发展中起着重要作用,截至 2015 年底,我国 99% 以上的企业是中小企业,它们创造了 60% 以上的 GDP 及 50% 的税收收入。中小企业普遍面临资金短缺的问题,这一问题严重制约了企业的健康发展,甚至导致企业破产。2019 年上半年美国多家零售商因破产关闭旗下门店,全美零售行业关店数量超过 7000 家^[1]。对于中小型企业融资难的问题,有效的解决方法之一就是供应链融资。供应链融资主要分为贸易信贷和银行借贷两种模式。其中,贸易信贷包括延迟支付和预付款两种融资方式。为了缓解资金压力,大多数中小企业通过贸易信贷或银行借贷等途径进行融资,导致其管理决策受到贷款利率、违约风险等多重因素影响,面临更高的不确定性和复杂性^[2]。因此,研究资金约束供应链的融资和运营策略问题是非常有必要的。

现实中,与获得同等收益相比,面临产出不确定的资金约束供应商往往更加看重如何规避损失。前景理论的一个关键

结果是,对于同样的收益,决策者往往对损失更加敏感^[3]。例如,在纺织供应链中,由于棉花生产的波动性很大,产出风险高,棉花公司的风险态度往往会导致其生产计划改变^[4]。供应商的这种损失规避行为影响其生产投入决策,从而也影响供应链其他成员的决策行为。为了增加利润,制造商可能愿意分担供应商的部分损失(如果发生的话)。对于制造商来说,如何决定恰当的损失分担比例就显得尤为重要。由此可见,在损失规避情况下研究制造商提供损失分担比例的融资决策是非常重要的。

在供应链存在资金约束的融资决策中,有部分学者研究了供应链内部融资模式,即贸易信贷融资方式。其中,在预付款融资模式方面,Peng 等^[5]在产需均不确定的预付款融资模式下,研究了分销商愿意以低于银行贷款利率的期望利率向供应商提供预付款,并讨论了预付款期望利率的可行范围。Yang 等^[6]构建了单个产出不确定且受资金约束供应商和单个销售商组成的两级供应链内部融资模型,通过求解最优农产品订购量和投产量,提出了内部融资服务规则及最优生产

基金项目:重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2021016);重庆市高校创新研究群体项目(CXQT21021)

This work was supported by the Joint Training Base Construction Project for Graduate Students in Chongqing(JDLHPYJD2021016) and Group Building Scientific Innovation Project for Universities in Chongqing(CXQT21021).

通信作者:周俊(zhoujun023@163.com)

运作策略。在延期支付融资模式方面, Huang^[7]在供应商向零售商提供部分延期付款的前提下, 研究零售商在允许延迟付款情况下的最佳补货政策。Xu 等^[8]针对由单个供应商和单个受资金约束的零售商组成的两级供应链, 研究了随机需求下的延迟支付策略, 得到了零售商和供应商的最优决策。也有部分学者关注了供应链外部融资模式, 即银行信贷融资方式。Yang 等^[9]考虑由单个供应商和两个资金约束零售商组成的两级供应链, 研究了银行融资对决策者最优决策和供应链绩效的影响。Wu 等^[10]考虑由一个制造商和一个资金约束零售商组成的两级供应链, 研究了在银行融资模式下, 碳减排如何影响供应链运营和融资决策。还有少部分学者比较了供应链内部和外部融资模式, Ding 和 Wan^[11]针对由单个资金约束且产出随机的供应商和单个制造商组成的两级供应链, 探讨了银行融资、预付款融资以及两者相结合的 3 种模式的选择问题。Guo 等^[12]针对供应链内部和外部两种融资模式, 分别构建了不同融资模式下的最优决策, 并对两种融资模式进行了比较。

上述关于供应链融资的研究中均未考虑决策者的风险偏好。然而, 随着市场竞争加剧以及市场需求或产出的不确定性, 一个企业的风险忍受程度极大地影响整个供应链的绩效。因此, 在供应链决策过程中考虑一个企业的风险偏好是更现实的。由于风险或损失规避性在经济学上的重要性, 许多研究考虑了这种情况下的订购策略问题。Wang 等^[13]利用损失规避效用函数来刻画单阶段报童模型问题上的决策行为, 研究发现, 当缺货成本存在时, 损失规避的零售商可能会比风险中性的零售商订货量更大。Wang 等^[14]针对零售商具有损失规避性, 研究了损失规避具有自适应数量为参考点的单产品、单周期库存管理问题。此外, 也有少部分学者同时考虑了损失规避性和供应链融资。Wu 等^[15]研究了单个风险中性的供应商和单个损失规避的零售商组成的两级供应链(其中供应商提供损失分担和贸易信贷), 并对比了有无损失分担对供应链各决策变量的影响。Zhou 等^[16]考虑了由单个资金约束的损失规避零售商和风险中性供应商及银行组成的供应链系统, 研究了银行融资与贸易信贷两种融资模式对小微零售商及供应商最优决策的影响。Li 等^[17]针对由单个供应商和单个受资金约束且损失规避的制造商组成的供应链, 在“碳限额与交易”制度下, 研究了供应商的最优批发价格决策和制造商最优订购和减排决策问题。

结合上述文献发现, 考虑生产商资金约束同时考虑随机产出特征和供应链成员具有损失规避性的研究成果很少。基于此, 本文针对由资金约束供应商和制造商构成的两级供应链, 假定供应商的产出随机且具有损失规避特性, 在银行融资和制造商预付款融资两种模式下, 研究供应商的最优生产投入量和制造商的最优损失分担比例问题。与本文研究最相近的是文献[15]。与文献[15]相比, 本文的创新点主要体现在: 1) 研究的供应链结构不同, 本文考虑的是下游企业向上游企业提供预付款融资模式, 而文献[15]是上游企业向下游企业提供延迟支付融资模式; 2) 本文考虑了预付款和银行融资两种模式下双方的最优决策问题, 而文献[15]未考虑银行融资模式; 3) 本文通过算例分析验证发现, 当供应商和制造商进行融资抉择时, 不同参数取值会影响他们融资模式的选择。

2 问题描述

2.1 符号与变量说明

本文使用到的符号与变量说明如表 1 所列。

表 1 符号与变量说明

Table Symbol and Variable Descriptions

符号	含义
p	单位零售价格
w	单位批发价格
Q	制造商的订购量
q	供应商的生产投入量(决策变量)
c	供应商的单位生产成本
y	产品的随机产出率(连续随机变量), 取值范围为 $[0, 1]$
r_f	无风险利率
r_a	制造商向供应商提供预付款的利率
r_b	银行向供应商提供的贷款利率
u	制造商的损失分担比例(决策变量)
K	供应商的自由资金
π_s, π_m	供应商、制造商的期望利润
λ	供应商的损失规避系数
$U(\pi_s)$	损失规避供应商的效用

2.2 问题假设

假设 1 为了避免无意义及琐碎的情形, 假设 $p > w > c > 0$ 。

假设 2 不失一般性, 假设售出的产品残值为 0, 且未满足的需求无额外的惩罚成本。

假设 3 供应商的生产产出具有不确定性, 生产投入意愿不高, 具有损失规避特性。本文使用前景理论中的损失规避模型来描述供应商的偏好, 其效用函数为分段线性函数^[18], 即

$$U(\pi_s) = \begin{cases} \pi_s - \pi_0, & \pi_s \geq \pi_0 \\ \lambda(\pi_s - \pi_0), & \pi_s < \pi_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, π_0 为供应商的初始财富值。不失一般性, 假设 $\pi_0 = 0$ 。若 $\lambda = 1$, 则表明供应商是风险中性的; 若 $\lambda > 1$, 则表明供应商具有损失规避特性, 且 λ 取值越大, 表明供应商损失规避的程度越高。

假设 4 假设所有信息对供应链成员来说都是共同知识。

假设 5 假设供应商具有有限责任能力, 即在生产季节结束后, 如果供应商销售收益不足以偿还银行贷款或者制造商的预付款, 则供应商宣布破产, 此时他只需要将全部销售收益支付给银行或者制造商。这种有限责任能力的假设在供应链融资领域很常见(参考文献[19])。

假设 6 假设资本市场是完美的, 银行贷款利率为完全竞争性定价。

2.3 问题描述

本文考虑一个两级供应链系统, 包含一个具有损失规避性且受资金约束的供应商和一个风险中性的制造商。为方便表述, 供应商用“她”来指代, 制造商用“他”来指代。供应商与制造商之间的决策反应可用 Stackelberg 博弈来刻画, 其中制造商是领导者, 供应商是跟随者。假设供应商的生产产出具有不确定性, 其产量与生产投入量成正比(参考文献[11])。当供应商的生产投入量为 q 时, 其实际产出为 qy 。其中, y 是产品的随机产出率, 取值范围为 $[0, 1]$ 。假设产品的随机产出率 y 是连续随机变量, 其概率密度函数、分布函数分别为

$f(\cdot)$ 和 $F(\cdot)$,记 $\bar{F}(\cdot)=1-F(\cdot)$ 。假设 $F(\cdot)$ 是可微的、递增的且 $F(0)=0$ 。

类似于文献[11],假设制造商的市场需求是确定的。根据该需求,制造商首先向供应商宣布其订购量 Q ,即市场需求量就是制造商的订购量。然后,供应商决定其生产投入量 q 。假设供应商资金不足无法维持正常生产,需要向银行贷款或向制造商申请预付款。由于供应商的生产投入具有损失规避性,为了增加利润,若供应商在融资模式下发生损失,则制造商会主动分担部分损失^[5]。当供应商生产完成后向制造商交付产品时,制造商向所交付的产品支付货款,供应商收到货款后需偿还银行贷款或制造商的预付款。

3 银行融资

3.1 损失规避供应商的最优决策

为了得到损失规避供应商的效用函数,首先建立当供应商为风险中性时的利润函数。在银行融资模式下,制造商首先向供应商宣布其订购量 Q ,并决定损失分担比例 u 。然后,供应商决定其生产投入量 q_b 和贷款量。最后,银行根据资本市场竞争性定价确定贷款利率 r_b 。供应商向银行融资的贷款量为 $(cq_b - K)$,从制造商那里获得的销售收入为 $\omega \min\{Q, q_b y\}$,同时应向银行偿还的本息和为 $(cq_b - K)(1 + r_b)$ 。因此,风险中性供应商的期望利润为:

$$\pi_b(q_b) = E[\omega \min\{Q, q_b y\} - (cq_b - K)(1 + r_b)]^+ - K(1 + r_f) \quad (2)$$

从假设6可知,银行贷款是竞争性定价,则有

$$(cq_b - K)(1 + r_f) = E[\min\{\omega \min\{Q, q_b y\}, (cq_b - K)(1 + r_b)\}] \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)化简,可得风险中性供应商的期望利润为:

$$\pi_b(q_b) = E[\omega \min\{Q, q_b y\}] - cq_b(1 + r_f) \quad (4)$$

当 $Q > q_b y$ 时,由 $\omega q_b y - cq_b(1 + r_f) = 0$,可得风险中性供应商的利润盈亏临界值为:

$$A = \frac{c(1 + r_f)}{\omega} \quad (5)$$

下面考虑在银行融资模式下,供应商具有损失规避特性时的效用函数。根据前面假设3,供应商的损失规避效用函数由式(1)来刻画。当制造商对供应商的损失分担比例为 μ 时,根据式(4)和式(1),可得损失规避供应商的期望效用函数为:

$$\begin{aligned} E[U(\pi_b(q_b))] &= \pi_b^+(q_b) + (1 - \mu)\lambda\pi_b^-(q_b) \\ &= \pi_b(q_b) - (1 + \lambda\mu - \lambda)[\omega q_b \int_0^A yf(y)dy - \\ &\quad cq_b(1 + r_f) \int_0^A f(y)dy] \end{aligned} \quad (6)$$

命题1 在银行融资模式下,给定制造商的损失分担比例 μ ,则损失规避供应商的最优生产投入量 q_b^* 满足:

$$\int_0^{v(q_b^*)} yf(y)dy + (1 + \lambda\mu - \lambda) \int_0^A F(y)dy = \frac{c(1 + r_f)}{\omega} \quad (7)$$

其中,

$$v(q_b) = \frac{Q}{q_b} \quad (8)$$

证明:损失规避供应商的期望效用函数(6)可进一步

写为:

$$\begin{aligned} E[U(\pi_b(q_b))] &= \omega q_b \int_0^{v(q_b)} yf(y)dy + \omega Q \bar{F}(v(q_b)) - \\ &\quad cq_b(1 + r_f) + (1 + \lambda\mu - \lambda) \omega q_b \int_0^A F(y) \\ &\quad dy \end{aligned}$$

求 $E[U(\pi_b(q_b))]$ 关于 q_b 的一阶导数,可得

$$\begin{aligned} \frac{dE[U(\pi_b(q_b))]}{dq_b} &= \omega \int_0^{v(q_b)} yf(y)dy - c(1 + r_f) + (1 + \\ &\quad \lambda\mu - \lambda) \omega \int_0^A F(y)dy \end{aligned}$$

又因为

$$\frac{d^2 E[U(\pi_b(q_b))]}{dq_b^2} = -\frac{\omega Q^2}{q_b^3} f(v(q_b)) < 0$$

由此可知, $E[U(\pi_b(q_b))]$ 是关于 q_b 的严格凹函数,故最优生产投入量 q_b^* 唯一存在。因此,损失规避供应商的最优生产投入量 q_b^* 应满足一阶条件 $dE[U(\pi_b(q_b))]/dq_b = 0$,由此得到式(7)。证毕。

从命题1可看出,在银行融资模式下,当损失规避供应商在做最优生产决策时,除了要考虑自身的生产成本和损失规避度,还要考虑制造商的损失分担比例、批发价格、订购量,以及无风险利率和破产风险等因素。

显然 q_b 是关于 μ 的一个函数,根据隐函数求导法则,由式(7)可得

$$\frac{dq_b^*}{d\mu} = \frac{\lambda q_b^3 \int_0^A F(y)dy}{Q^2 f(v(q_b^*))} \quad (9)$$

3.2 风险中性制造商的最优决策

在销售季节末,制造商应该向供应商支付的货款为 $\omega \min\{Q, q_b y\}$,同时获得销售收益为 $p \min\{Q, q_b y\}$ 。因此,在风险中性制造商提供损失分担比例为 μ 的情况下,其期望利润函数为:

$$\begin{aligned} \pi_{mb}(u) &= E[(p - \omega) \min\{Q, q_b^* y\}] + \mu[\omega q_b \int_0^A yf(y)dy - \\ &\quad cq_b(1 + r_f) \int_0^A f(y)dy] \end{aligned} \quad (10)$$

命题2 在银行融资模式下,风险中性制造商的最优损失分担比例 μ^* 满足:

$$\begin{aligned} \lambda(q_b^*)^2 [(p - \omega) \int_0^{v(q_b^*)} yf(y)dy - \mu^* \omega \int_0^A F(y)dy] = \\ \omega Q^2 f(v(q_b^*)) \end{aligned} \quad (11)$$

证明:根据式(10),风险中性制造商的期望利润函数(10)可以进一步写为:

$$\begin{aligned} \pi_{mb}(\mu) &= (p - \omega) [q_b \int_0^{v(q_b^*)} yf(y)dy + Q \bar{F}(v(q_b^*))] - \\ &\quad \mu \omega q_b \int_0^A F(y)dy \end{aligned}$$

求 $\pi_{mb}(\mu)$ 关于 μ 的一阶导数,可得

$$\begin{aligned} \frac{d\pi_{mb}(\mu)}{d\mu} &= [(p - \omega) \int_0^{v(q_b^*)} yf(y)dy - \mu \omega \int_0^A F(y)dy] \\ &\quad - \frac{\lambda(q_b^*)^3 \int_0^A F(y)dy}{Q^2 f(v(q_b^*))} - \omega q_b^* \int_0^A F(y)dy \end{aligned}$$

因此,由一阶条件 $d\pi_{mb}(\mu)/d\mu = 0$,可得式(11)。证毕。

从命题2可看出,由于问题的复杂性,且 q_b 是关于 μ 的函数,因此损失分担比例 μ^* 没有显式表达式。

4 预付款融资

4.1 损失规避供应商的最优决策

与前面类似,为了得到预付款融资模式下损失规避供应商的效用函数,首先建立风险中性供应商的利润函数。在预付款融资模式下,供应商需要向制造商申请融资金量为 $(cq_a - K)$ 的预付款。博弈顺序如下:制造商首先宣布订购量 Q 、预付款利率 r_a 和损失分担比例 μ ;然后,供应商决定生产投入量 q_a 。在生产季节结束时,供应商向制造商交付产品。若销售收益 $\omega \min\{Q, q_a\}$ 大于制造商预付款本息和,则制造商向供应商支付剩余货款: $\omega \min\{Q, q_a\} - (cq_a - K)(1 + r_a)$;否则,制造商宣布破产。因此,风险中性供应商的期望利润为:

$$\begin{aligned} \pi_{sa}(q_a) &= E[\omega \min\{Q, q_a\} - (cq_a - K)(1 + r_a)]^+ - \\ & K(1 + r_f) \\ &= \omega q_a \int_{l_1(q_a)}^{v(q_a)} yf(y) dy + \omega Q \bar{F}(v(q_a)) - \\ & \omega q_a l_1(q_a) \bar{F}(l_1(q_a)) - K(1 + r_f) \end{aligned} \quad (12)$$

当 $Q > q_a$ 时,由 $\omega q_a y - (cq_a - K)(1 + r_a) = 0$ 可得供应商的破产临界值为:

$$l_1(q_a) = \frac{(cq_a - K)(1 + r_a)}{\omega q_a} \quad (13)$$

当 $Q > q_a$ 时,由 $\omega q_a y - (cq_a - K)(1 + r_a) - K(1 + r_f) = 0$ 可得供应商的利润盈亏临界值为:

$$l_2(q_a) = \frac{cq_a(1 + r_a) - K(r_a - r_f)}{\omega q_a} \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可看出, $l_2(q_a) - l_1(q_a) = K(1 + r_f)/\omega q_a > 0$,从而有供应商的利润盈亏临界值 $l_2(q_a)$ 大于破产临界值 $l_1(q_a)$,即 $l_2(q_a) > l_1(q_a)$ 。

下面考虑预付款融资模式下,制造商承担供应商的部分损失时,损失规避供应商的效用函数。根据式(1)和式(12),可得损失规避供应商的期望效用函数为:

$$\begin{aligned} E[U(\pi_{sa}(q_a))] &= \pi_{sa}^+(q_a) + (1 - \mu)\lambda\pi_{sa}^-(q_a) \\ &= \pi_{sa}(q_a) - (1 + \lambda\mu - \lambda) \left[\int_{l_1(q_a)}^{l_2(q_a)} [\omega q_a y - \right. \\ & \left. (cq_a - K)(1 + r_a)] f(y) dy - \right. \\ & \left. \int_0^{l_2(q_a)} K(1 + r_f) f(y) dy \right] \end{aligned} \quad (15)$$

命题 3 在预付款融资模式下,给定制造商的损失分担比例 μ ,损失规避供应商的最优生产投入量 q_a^* 满足:

$$\int_{l_2(q_a^*, \mu)}^{v(q_a^*)} yf(y) dy + \lambda(1 - \mu) \int_{l_1(q_a^*, \mu)}^{l_2(q_a^*, \mu)} yf(y) dy = \frac{c(1 + r_a)}{\omega} [\lambda(1 - \mu)\bar{F}(l_1(q_a^*, \mu)) + (1 + \lambda\mu - \lambda)\bar{F}(l_2(q_a^*, \mu))] \quad (16)$$

其中,

$$n(q_a, \mu) = 1 - \frac{\omega}{c(1 + r_a)\bar{F}(l_1(q_a))} \int_{l_1(q_a)}^{l_2(q_a)} yf(y) dy \quad (18)$$

4.2 风险中性制造商的最优决策

在销售季节末,制造商获得的销售收益为 $p \min\{Q, q_a\}$ 。显然,制造商应该向供应商支付的货款为 $\omega \min\{Q, q_a\}$,制

证明:损失规避供应商的期望效用函数(15)可进一步写为:

$$\begin{aligned} E[U(\pi_{sa}(q_a))] &= \omega q_a \int_{l_2(q_a)}^{v(q_a)} yf(y) dy + \omega Q \bar{F}(v(q_a)) - \\ & \omega q_a l_2(q_a) \bar{F}(l_2(q_a)) + \lambda(1 - \mu) [\omega q_a \\ & \int_{l_1(q_a)}^{l_2(q_a)} yf(y) dy - \omega q_a l_1(q_a) \bar{F}(l_1(q_a)) \\ & + \omega q_a l_2(q_a) \bar{F}(l_2(q_a)) - K(1 + r_f)] \end{aligned}$$

求 $E[U(\pi_{sa}(q_a))]$ 关于 q_a 的一阶和二阶导数,可得

$$\begin{aligned} \frac{dE[U(\pi_{sa})]}{dq_a} &= \omega \int_{l_2(q_a)}^{v(q_a)} yf(y) dy + \lambda(1 - \mu)\omega \int_{l_1(q_a)}^{l_2(q_a)} yf(y) \\ & dy - c(1 + r_a) [\lambda(1 - \mu)\bar{F}(l_1(q_a)) + (1 + \\ & \lambda\mu - \lambda)\bar{F}(l_2(q_a))] \\ \frac{d^2 E[U(\pi_{sa})]}{dq_a^2} &= \frac{1}{\omega q_a^3} [(1 + \lambda - \lambda\mu)K^2(1 + r_a)^2 f(l_1(q_a)) - \\ & \lambda(1 - \mu)K^2(r_a - r_f)^2 f(l_2(q_a)) - \omega^2 Q^2 f(v(q_a))] \end{aligned}$$

定义 \bar{q}_a 是使得 $d^2 E[U(\pi_{sa})]/dq_a^2 < 0$ 成立的所有点构成集合的上确界。从而,当 $q_a \in [0, \bar{q}_a]$ 时, $d^2 E[U(\pi_{sa})]/dq_a^2 < 0$,即 $E[U(\pi_{sa})]$ 在 $[0, \bar{q}_a]$ 上是严格凹的函数。当 $q_a \in [\bar{q}_a, +\infty)$ 时, $d^2 E[U(\pi_{sa})]/dq_a^2 \geq 0$ 。从而,当 $q_a \in [\bar{q}_a, +\infty)$ 时,一阶导数 $dE[U(\pi_{sa})]/dq_a$ 单调递增。又因为,当 $q_a \rightarrow +\infty$ 时, $l_2(q_a) \rightarrow \frac{c(1 + r_a)}{\omega}$, $v(q_a) \rightarrow 0$ 且 $l_1(q_a) = l_2(q_a)$ 。于是,当 $q_a \rightarrow +\infty$ 时,

$$\begin{aligned} \frac{dE[U(\pi_{sa})]}{dq_a} &= -\omega \int_0^{\frac{c(1 + r_a)}{\omega}} yf(y) dy - c(1 + r_a)\bar{F}(l_2(q_a)) \\ & < 0 \end{aligned}$$

因此,当 $q_a \in [\bar{q}_a, +\infty)$ 时,有 $dE[U(\pi_{sa})]/dq_a < 0$ 。这说明, $E[U(\pi_{sa})]$ 在 $[\bar{q}_a, +\infty)$ 内单调递减。综上可知, $E[U(\pi_{sa})]$ 在 $[0, +\infty)$ 内是一个单峰函数,从而,最优生产投入量 q_a^* 唯一存在。

因此,损失规避供应商的最优生产投入量 q_a^* 应满足一阶条件 $dE[U(\pi_{sa})]/dq_a = 0$ 。由此得到式(16)。证毕。

从命题 3 可看出,在制造商预付款融资模式下,当损失规避供应商在做最优生产决策时,除了要考虑自身的生产成本、损失规避度和自有资金外,还要考虑制造商的损失分担比例、预付款利率、批发价格、订购量,以及破产风险等因素。

显然 q_a 是关于 μ 的一个函数。为简便计算, q_a^* 暂时写为 q_a 。根据隐函数求导法则,在式(16)两边关于 μ 求导,由式(16),可得

$$\begin{aligned} \frac{dq_a}{d\mu} &= \frac{\lambda\omega \int_{l_1(q_a)}^{l_2(q_a)} yf(y) dy - \lambda c(1 + r_a)\bar{F}(l_1(q_a)) + \lambda c(1 + r_a)\bar{F}(l_2(q_a))}{\lambda(1 - \mu) \frac{K^2(1 + r_a)^2}{\omega q_a^3} f(l_1(q_a)) + (1 + \lambda\mu - \lambda) \frac{K^2(r_a - r_f)^2}{\omega q_a^3} f(l_2(q_a)) - \frac{\omega Q^2}{q_a^3} f(v(q_a))} \\ &= \frac{\lambda c(1 + r_a)\omega q_a^3 \bar{F}(l_2(q_a)) - \lambda c(1 + r_a)\omega q_a^3 \bar{F}(l_1(q_a)) \cdot n(q_a, \mu)}{\lambda(1 - \mu)K^2(1 + r_a)^2 f(l_1(q_a)) + (1 + \lambda\mu - \lambda)K^2(r_a - r_f)^2 f(l_2(q_a)) - Q^2 \omega^2 f(v(q_a))} \end{aligned} \quad (17)$$

造商应拿回的本息和为 $(cq_a - K)(1 + r_a)$ 。如果 $\omega \min\{Q, q_a\} \geq (cq_a - K)(1 + r_a)$,则制造商还需要向供应商支付的尾款为 $\omega \min\{Q, q_a\} - (cq_a - K)(1 + r_a)$;否则,供应商破产,制造商不需要向供应商支付尾款。因此,风险中性制造商的期望利润函数为:

$$\pi_{ma} = E[p \min\{Q, q_a^*\} - [\omega \min\{Q, q_a^*\} - (cq_a^* -$$

$$K)(1+r_a)]^+ - (cq_a^* - K)(1+r_f)] \quad (19)$$

在风险中性制造商提供损失分担比例为 μ 的情况下,其期望利润函数为:

$$\pi_{mi}(u) = \pi_{mb} + \mu \left[\int_{l_1(q_a)}^{l_2(q_a)} [wq_a y - (cq_a - K)(1+r_a)] f(y) dy - \int_0^{l_2(q_a)} K(1+r_f) f(y) dy \right] \quad (20)$$

命题 4 在预付款融资模式下,风险中性制造商的最优损失分担比例 μ^* 满足:

$$\begin{aligned} & \left[p \int_0^{v(q_a^*)} y f(y) dy - w \int_{l_1(q_a^*, \mu^*)}^{v(q_a^*)} y f(y) dy + c(1+r_a) [(1-\mu) \bar{F}(l_1(q_a^*, \mu^*)) + \mu \bar{F}(l_2(q_a^*, \mu^*))] - c(1+r_f)] \right. \\ & \left. \frac{dq_a}{d\mu} \Big|_{(q_a^*, \mu^*)} + wq_a \int_{l_1(q_a^*, \mu^*)}^{l_2(q_a^*, \mu^*)} y f(y) dy - wq_a [l_1(q_a^*, \mu^*) \bar{F}(l_1(q_a^*, \mu^*)) + l_2(q_a^*, \mu^*) \bar{F}(l_2(q_a^*, \mu^*))] - K(1+r_f) \right] \\ & = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $dq_a/d\mu$ 的表达式见式(17)。

证明:根据式(20),风险中性制造商的期望利润可以进一步写为:

$$\begin{aligned} \pi_{mi}^1(u) &= pq_a^* \int_0^{v(q_a^*)} y f(y) dy + pQ \bar{F}(v(q_a^*)) - \pi_{sa}(q_a^*) - \\ & cq_a^* (1+r_f) + \mu [wq_a^* \int_{l_1(q_a^*)}^{l_2(q_a^*)} y f(y) dy - \\ & wq_a^* l_1(q_a^*) \bar{F}(l_1(q_a^*)) + wq_a^* l_2(q_a^*) \bar{F}(l_2(q_a^*)) \\ & - K(1+r_f)] \end{aligned}$$

求 $\pi_{mi}^1(u)$ 关于 μ 的一阶导数,可得

$$\begin{aligned} \frac{d\pi_{mi}^1(u)}{d\mu} &= \left[p \int_0^{v(q_a^*)} y f(y) dy - w \int_{l_1(q_a^*, \mu)}^{v(q_a^*)} y f(y) dy + \right. \\ & c(1+r_a) [(1-\mu) \bar{F}(l_1(q_a^*, \mu)) + \mu \bar{F}(l_2(q_a^*, \mu))] - c(1+r_f) \left. \right] \frac{dq_a}{d\mu} \Big|_{(q_a^*, \mu)} \\ & + wq_a \int_{l_1(q_a^*, \mu)}^{l_2(q_a^*, \mu)} y f(y) dy - wq_a [l_1(q_a^*, \mu) \bar{F}(l_1(q_a^*, \mu)) + l_2(q_a^*, \mu) \bar{F}(l_2(q_a^*, \mu))] - K(1+r_f) \end{aligned}$$

由一阶条件 $d\pi_{mi}(\mu)/d\mu=0$,可得式(21)。证毕。

从命题 4 可看出,由于问题的复杂性,损失分担比率 μ^* 也没有显式表达式,因为 q_a 关于 μ 的导数都依赖于 μ 。

5 算例分析

为了验证本文相关结论的正确性并得到管理上的一些视野,下面进行数值示例和灵敏度分析。

算例 1:假定产品的随机产出 y 服从均值为 $\alpha=1.4$ 的指数分布,其他参数取值为: $c=0.4, w=0.6, p=1, Q=38, K=7, r_a=0.08, r_f=0.05, \lambda=1.3$ 。计算结果如下:

在银行融资的分散决策下,最优生产投入量 $q_b^*=17.193$,最优损失分担比率 $u_b^*=0.589$,损失规避供应商的效用为 $U(\pi_{sb}(q_b^*))=1.033$,制造商的利润为 $\pi_{mb}(u^*)=3.1474$ 。

在预付款融资的分散决策下,最优生产投入量 $q_a^*=18.9575$, q_a^* 与银行融资下的 q_b^* 相比增加了 10.26%;最优损失分担比率 $u_a^*=0.655$,损失规避供应商的效用为 $U(\pi_{sa}(q_a^*))=1.2624$, $U(\pi_{sa}(q_a^*))$ 与银行融资下的 $U(\pi_{sb}(q_b^*))$ 相比增加了 22.2%;制造商的利润为 $\pi_{ma}(u^*)=3.2005$,

$\pi_{ma}(u^*)$ 与银行融资下的 $\pi_{mb}(u^*)$ 相比增加了 1.68%。因此,在算例 1 的参数取值条件下,损失规避供应商和制造商都更倾向于选择预付款融资方式。

算例 2 假定产品的随机产出 y 服从均值为 $\alpha=1.8$ 的指数分布,其他参数取值为: $c=0.3, w=0.6, p=1, Q=30, K=7, r_a=0.11, r_f=0.05, \lambda=1.3$ 。计算结果如下:

在银行融资的分散决策下,最优生产投入量 $q_b^*=18.0243$,最优损失分担比率 $u_b^*=0.564$,损失规避供应商的效用为 $U(\pi_{sb}(q_b^*))=0.8998$,制造商的利润为 $\pi_{mb}(u^*)=2.6735$ 。

在预付款融资的分散决策下,最优生产投入量 $q_a^*=20.2677$, q_a^* 与银行融资下的 q_b^* 相比增加了 12.44%;最优损失分担比率 $u_a^*=0.841$,损失规避供应商的效用为 $U(\pi_{sa}(q_a^*))=1.7336$, $U(\pi_{sa}(q_a^*))$ 与银行融资下的 $U(\pi_{sb}(q_b^*))$ 相比增加了 92.66%;制造商的利润为 $\pi_{ma}(u^*)=2.2553$, $\pi_{ma}(u^*)$ 与银行融资下的 $\pi_{mb}(u^*)$ 相比减少了 15.65%。因此,在算例 2 的参数取值条件下,损失规避供应商更倾向于选择预付款融资方式,而制造商都更倾向于选择银行融资方式。

算例 1 和算例 2 表明,各参数取值不同,可能影响供应链双方对融资方式的选择偏好。

为了得到更多的管理视野,本文进行灵敏度分析,研究参数取值的变化对决策变量以及双方利润和效用的影响。为简便计算,这里只针对预付款融资模式进行分析。

5.1 损失规避系数对决策变量的影响分析

在预付款融资模式下,考察参数 λ ($\lambda \in [1.0, 1.45]$) 的变化对供应商的最优生产投入量 q_a^* 、制造商的最优损失分担比率 u_a^* ,以及供应商效用和制造商利润的影响,其余参数取值同算例 1。相应的数值分析结果如图 1—图 3 所示。

由图 1 可见,随着供应商损失规避度 λ 的增加,供应商的最优生产投入量 q_a^* 逐渐降低。这说明,供应商的损失规避程度越高,则将采取更加保守的生产决策。由图 2 可见,随着供应商损失规避度 λ 的增加,制造商的最优损失分担比例 u_a^* 逐渐增大。这表明,随着供应商生产投入量越来越少,制造商会通过承担更多的损失分担比例来激励供应商增加生产投入量。由图 3 可见,随着供应商损失规避度 λ 的增加,供应商的效用 $U^*(\pi_{sa})$ 和制造商的利润 π_{ma}^* 都逐渐降低,但供应商的效用变化幅度较小。这主要是因为,随着供应商损失规避度的增加,供应商的生产投入量减少和制造商承担的损失分担比例增加。

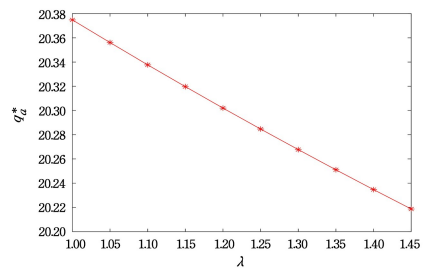


图 1 损失规避系数对最优生产投入量的影响

Fig. 1 Effect of loss aversion coefficient on optimal production inputs

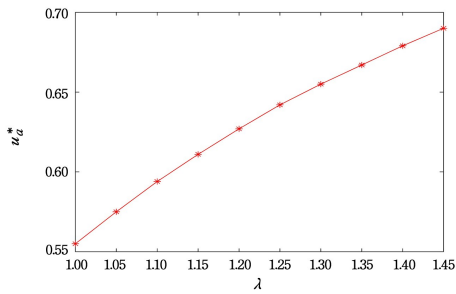


图2 损失规避系数对最优损失分担比率的影响

Fig. 2 Effect of loss aversion coefficient on optimal loss sharing ratio

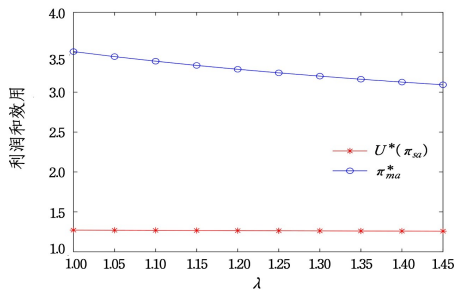


图3 损失规避系数对效用和利润的影响

Fig. 3 Effect of loss aversion coefficient on utility and profits

5.2 自由资金对决策变量的影响分析

在预付款融资模式下,考察损失规避供应商的自由资金 $K(K \in [5, 25, 7.5])$ 对供应商的最优生产投入量 q_a^* 、制造商的最优损失分担比例 u_a^* , 以及供应商效用和制造商利润的影响, 其余参数取值同算例 1。相应的数值分析结果如图 4—6 所示。

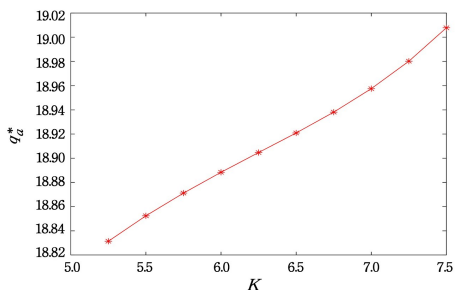


图4 供应商自由资金对最优生产投入量的影响

Fig. 4 Effect of suppliers' free capital on optimal production inputs

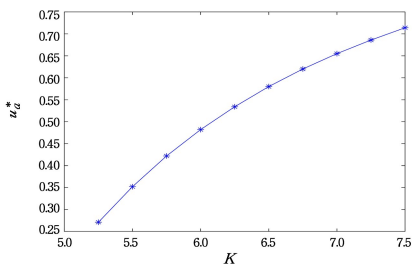


图5 供应商自由资金对最优损失分担比例的影响

Fig. 5 Effect of supplier's free funds on the optimal loss-sharing ratio

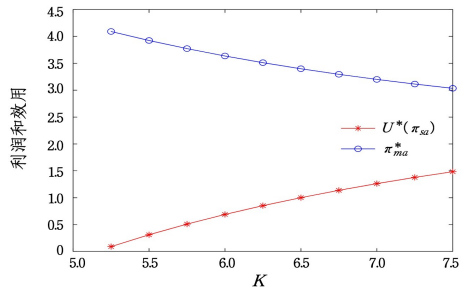


图6 供应商自由资金对效用和利润的影响

Fig. 6 Impact of suppliers' free funds on utility and profitability

由图 4 可见,随着供应商自由资金 K 的增加,供应商的最优生产投入量 q_a^* 也逐渐增大。这是因为,供应商拥有更多的自由资金,需要预付款融资的金额就越少,其融资成本也会减少,故将会增大生产投入量。由图 5 可见,随着供应商自由资金 K 的增加,制造商的最优损失分担比例 u_a^* 也逐渐增加。这表明,供应商的自由资金越充足,越会促使制造商通过增加损失分担比例的方式来刺激供应商进一步加大生产投入量。由图 6 可见,随着供应商自由资金 K 的增加,供应商的效用逐渐增加,而制造商的利润逐渐降低。这是因为,供应商的自由资金越多,其融资成本越少,销售收益增加,从而使得其期望效用增大。在此情况下,由于制造商的融资收益减少,承担供应商损失的比例增加,故制造商的利润会减少。

5.3 预付款利率对决策变量的影响分析

在预付款融资模式下,考察预付款利率 $r_a (r_a \in [0.05, 0.13])$ 对供应商的最优生产投入量 q_a^* 、制造商的最优损失分担比例 u_a^* , 以及供应商效用和制造商利润的影响, 其余参数取值同算例 1。相应的数值分析结果如图 7—9 所示。

由图 7 可见,随着预付款利率 r_a 的增大,供应商的最优生产投入量 q_a^* 逐渐减少。这是因为,供应商向制造商预付款融资需支付的贷款利息越高,其贷款量就越少,则生产投入量也会减少。由图 8 可见,随着预付款利率 r_a 的增大,制造商的最优损失分担比例 u_a^* 会逐渐增加。这说明,当预付款利率 r_a 增加时,制造商会通过承担更多的损失分担比例来激励供应商增加生产投入量。由图 9 可见,随着预付款利率 r_a 的增大,供应商的效用逐渐增加,而制造商的利润逐渐降低。这说明,若增加预付款利率,由于供应商的生产投入意愿不高,这种情况对制造商并不利。

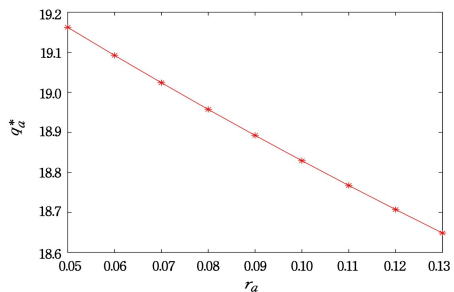


图7 预付款利率对最优生产投入量的影响

Fig. 7 Impact of advance payment rate on optimal production inputs

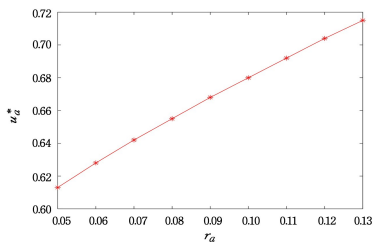


图8 预付款利率对最优损失分担比例的影响

Fig. 8 Effect of advance payment rate on the optimal loss-sharing ratio

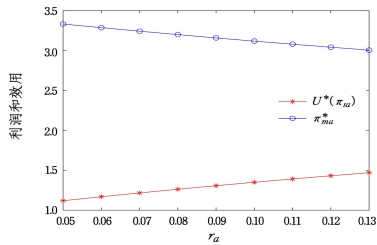


图9 预付款利率对效用和利润的影响

Fig. 9 Impact of advance payment rates on utility and profitability

结束语 本文针对由单个损失规避供应商和单个风险中性制造商组成的两级供应链,考虑到供应商受到资金约束且产出不确定性的影响,在银行融资和预付款融资两种模式下,研究了供应商和制造商的最优决策问题。通过理论和算例分析研究发现:1)在预付款融资模式下,供应商的损失规避度越高,她将采取更加保守的生产策略,而制造商会通过承担更多的损失分担比例来激励供应商增加生产投入量;2)在预付款融资模式下,当供应商的自由资金越多时,则其会增加生产投入量,而制造商也将通过增加损失分担比例的方式来刺激供应商进一步加大生产投入量;3)在预付款融资模式下,制造商的预付款利率越高,供应商的生产投入量会逐渐减少,而制造商会通过分担更多的损失分担比例来激励供应商加大生产投入量;4)当预付款融资和银行融资两种模式都可行时,各参数取值的变化,可能影响供应链双方对融资方式的选择偏好。

在本文研究基础之上,未来的研究可以考虑以下几个方向:1)考虑银行信用保证下预付款融资模式的情况;2)考虑产出随机和需求随机同时存在于本文所研究的供应链的情况。

参考文献

- [1] DAI J H, LIU X W. Coordination of supply chains under promotions by cash-strapped retailers[J]. *Journal of Management Engineering*, 2022, 36(3): 189-202.
- [2] NIE F H, LI D S, XIAO T T. A logistics strategy for capital-constrained supply chain considering exogenous financing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(3): 924-932.
- [3] YAN N, JIN X, ZHONG H, et al. Loss-averse retailers' financial offerings to capital-constrained suppliers: loan vs. investment[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 227: 107665.
- [4] ADHIKARI A, BISI A, AVITTATHUR B. Coordination mechanism, risk sharing, and risk aversion in a five-level textile supply chain under demand and supply uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 282(1): 97-107.
- [5] PENG H J, PANG T. Research on supply chain financing strategy of fund-constrained suppliers under production and demand

uncertainty[J]. *Operations Research and Management*, 2018, 27(12): 10-18.

- [6] YANG H X, JIA Y M, ZHOU Y S, et al. Study on internal financing of agricultural supply chain under output uncertainty[J]. *System Science and Mathematics*, 2023, 43(4): 914-928.
- [7] HUANG Y F. Economic order quantity under conditionally permissible delay in payments[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 176(2): 911-924.
- [8] XU X H, ZENG Q, DANG Z Z, et al. A study on deferred payment and coordination strategy of two-level supply chain under retailers' capital constraint[J]. *Operations Research and Management*, 2023, 32(5): 85-91.
- [9] YANG H, ZHUO W, SHAO L. Equilibrium evolution in a two-echelon supply chain with financially constrained retailers: The impact of equity financing[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 185: 139-149.
- [10] WU D D, YANG L, OLSON D L. Green supply chain management under capital constraint[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 215: 3-10.
- [11] DING W, WAN G. Financing and coordinating the supply chain with a capital-constrained supplier under yield uncertainty[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 230: 107813.
- [12] GUO X L, SU Z H. A study of financing strategies for random output suppliers in a competitive environment[J]. *Operations Research and Management*, 2021, 30(7): 195-202.
- [13] WANG X, WEBSTER S. The loss-averse newsvendor problem[J]. *Omega*, 2009, 37(1): 93-105.
- [14] WANG R, WANG J. Procurement strategies with quantity-oriented reference point and loss aversion[J]. *Omega*, 2018, 80: 1-11.
- [15] WU C, LIU X, LI A. A loss-averse retailer-supplier supply chain model under trade credit in a supplier-Stackelberg game[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2021, 182: 353-365.
- [16] ZHOU Y W, LIU M, YU H L, et al. A study on ordering and financing strategies of loss-averse retailers based on prospect theory[J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2022, 42(11): 2957-2975.
- [17] LI L Y, LIU G A, LI X B, et al. A study on low-carbon supply chain decision-making considering risk aversion and financial constraints[J]. *Computer Science*, 2022, 49(S2): 950-955.
- [18] 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.
- [19] KOUVELIS P, ZHAO W. Financing the newsvendor: supplier vs. bank, and the structure of optimal trade credit contracts[J]. *Operations Research*, 2012, 60(3): 566-580.



LI Liying, born in 1975, Ph.D, associate professor. Her main research interests include logistics and supply chain management and so on.



ZHOU Jun, born in 1992, postgraduate. His main research interests include logistics and supply chain management and so on.