基于供应商的供应可靠性投资与成本分摊决策

周晓宇
（东南大学经济管理学院，江苏 南京 210000）

摘　要：为保证供应链中的上游供应商供应可靠，许多研究聚焦于多源采购，但在垄断供应商主导的供应链中此方法不可行。对于内生变量导致的供应中断，供应商可投资于自身来提高可靠性。本文研究单供应商——单采购商的二级供应链中，供应商的供应可靠投资决策、产品批发价格决策，零售商的投资成本分摊决策、产品销售价格决策。为引导零售商分摊投资成本，供应商将投资是否成功的信息保密。分别在信息对称下建立供应商和零售商先后决策的斯坦克伯格博弈、在信息不对称下建立供应商和零售商的信号博弈模型。结果表明，当市场产品需求量大、投资成功率高时，供应商将进行供应可靠性投资，此时零售商分摊投资成本的意愿强烈。在投资成本分摊下，供应商的利润总会大于信号博弈下的供应商利润。当零售商不分摊投资成本时，混同均衡会成为信号博弈最可能的均衡结果。基于此，供应商可根据市场需求和投资成功率来考虑是否投资，零售商在投资分摊系数合理的情况下愿意共摊成本。

关键词：供应链；供应可靠；信号博弈；成本分摊
中图分类号：F274　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**3007-8113(2025)01-0012-03
DOI：10.12462/RED.issn3007-8113.2025.01.004

Supplier-based Investment and Cost-sharing Decisions for Supply Reliability

Xiaoyu Zhou
(School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210000)

Abstract: To ensure the supply reliability of upstream suppliers in a supply chain, many studies have focused on multi-sourcing, but this approach is not feasible in supply chains dominated by monopoly suppliers. For supply disruptions caused by endogenous variables, suppliers can invest in themselves to improve reliability. In this paper, we study the supplier's supply reliability investment decision and wholesale price decision, and the retailer's investment cost-sharing decision and selling price decision in a single-supplier-single-buyer secondary supply chain. To guide the retailer to share the investment cost, the supplier keeps the information about whether the investment is successful or not confidential. The Stankenberg game of sequential decision-making between suppliers and retailers is modeled under information symmetry, and the signaling game between suppliers and retailers is modeled under information asymmetry, respectively. The results show that when the market demand for the product is high and the investment success rate is high, the supplier will invest in supply reliability, and then the retailer has a strong willingness to share the investment cost. Under the investment cost sharing, the supplier's profit will always be greater than the supplier's profit under the signaling game. When the retailer does not share the investment cost, the mixed equilibrium will be the most likely equilibrium outcome of the signaling game. Based on this, suppliers can consider whether to invest or not based on market demand and investment success rate, and retailers are willing to share the cost when the investment sharing coefficient is reasonable.

Keywords: supply chain; reliable supply; signaling game; cost sharing

一、问题模型与求解

本文以供应商为核心企业，考虑供应商——零售商的二级供应链。供应商给零售商批发产品，零售商将产品销售到市场上。但由于交通路况较差、产品更新耗时长、供应商生产能力波动等问题，供应商可能无法按时交付产品，造成供应中断。为了提高供应链的效率，供应商将进行供应可靠投资。供应商以价格 w 向零售商出售产品，零售商再以销售价格 p 销售。考虑到供应可靠性对产品销售的积极作用，假设需求函数为：

$$D = \delta + m^j - kp$$

其中 δ 表示市场状态，$k(k > 0)$ 表示价格敏感系数，$m^j(j=\{H, L\})$ 表示零售商因供应可靠性而提高的额外订购量（其中 $m^L = 0$）。供应中断的概率以 $\alpha(0.5 < \alpha \leq 1)$ 表示。分别以下标 s 和 r 表示供应商和零售商，以上标 H 和 L 表示供应商类型。

当不投资于供应可靠性时，双方的利润分别为：

$$\pi_s^L = \alpha\left[\left(\delta + m^L - kp\right)w\right]$$

$$\pi_r = \alpha\left[\left(\delta + m^L - kp\right)(p - w)\right]$$

当供应商投资于供应可靠性时，产生的投资成本为 c，供应商提议双方以 $1 - \varphi$ 和 $\varphi(0 < \varphi < 1)$ 比例分别分摊。若零售商接受，此时供应商便会将投资后的供应商类型如实相告给零售商。若不接受，零售商则以自然成功概率 μ 猜测投资成功。

作者简介：周晓宇，硕士研究生，研究方向为复杂网络演化博弈。

（一）完全信息情形

不投资时，易证得零售商的利润函数是关于销售价格p的凹函数，根据逆向归纳法求得：

$$p(w)=\frac{kw+\delta+m^L}{2k}$$

将结果带入供应商利润函数中：

$$\pi_s^L=\alpha\left[\left(\delta+m^L-\frac{kw+\delta+m^L}{2}\right)w\right]$$

同理求得 $w^{*L}=\frac{\delta+m^L}{2k}$，$p^*=\frac{3(\delta+m^L)}{4k}$。此时双方的利润分别为：

$$\pi_s^{*L}=\frac{\alpha(\delta+m^L)^2}{8k}$$

$$\pi_r=\frac{\alpha(\delta+m^L)^2}{16k}$$

供应商进行投资，双方分摊投资成本时。如果投资不成功，双方最优决策与不投资时一致；如果投资成功，最优决策分别为：

$$w^{*H}=\frac{\delta+m^H}{2k},\ p^*=\frac{3(\delta+m^H)}{4k}$$

供应可靠性投资的成功概率为$\mu(0.5<\mu<1)$，则在分摊投资成本情形下，双方的利润期望为：

$$E(\pi_s)=(1-\mu)\alpha\left[\left(\delta+m^L-kp\right)w\right]+\mu\left[\left(\delta+m^H-kp\right)w\right]-(1-\varphi)c$$

$$=(1-\mu)\frac{\alpha\left(\delta+m^L\right)^2}{8k}+\frac{\mu\left(\delta+m^H\right)^2}{8k}-(1-\varphi)c$$

$$E(\pi_r)=(1-\mu)\alpha\left[\left(\delta+m^L-kp\right)(p-w)\right]+\mu\left[\left(\delta+m^H-kp\right)(p-w)\right]-\varphi c$$

$$=(1-\mu)\frac{\alpha\left(\delta+m^L\right)^2}{16k}+\frac{\mu\left(\delta+m^H\right)^2}{16k}-\varphi c$$

（二）不完全信息情形

当投资成本只由供应商承担时，供应可靠性信息不公开。零售商起初只能以μ的概率猜测供应商为高可靠型供应商，同时根据批发价格w调整信念。为区分不同均衡下的决策，分别以下标f和t表示分离均衡和混同均衡。

考虑两类均衡：(1)分离均衡，供应商将根据自身真实供应可靠程度来制定批发价格，此时零售商能够很好地判断供应可靠性，信念更新策略：当$w_l^{*H}\neq w_l^{*L}$，更新后$\hat{\mu}\left(w_l^{*H}\right)=1$，$\hat{\mu}\left(w_l^{*L}\right)=0$。当批发价格为$w_l^{*H}$时，零售商制定的销售价格为$p_l^{*H}$；(2)混同均衡，出于自身利润的考虑，当投资失败时，供应商有动机冒充高可靠型供应商，此时的批发价格难以传递信息。$w_t^{*H}=w_t^{*L}$，信念保持不变，$\hat{\mu}\left(w_t^{*H}\right)=\hat{\mu}\left(w_t^{*L}\right)=\mu$。

1.分离均衡。

根据前面计算可知，高可靠供应商制定的批发价格更高，零售商制定的销售价格也更高。零售商很自然地认为，越高的批发价格越能够表明供应商为高可靠性供应商。而为了避免低可靠型通过设置高批发价格冒充高可靠型供应商，均衡时的批发价格将会做出调整。

命题1：在分离均衡时，在分离均衡时，以下性质成立：

$$w_l^{*H}>w^{*H},\ w_l^{*L}=w^{*L}$$

$$\hat{\mu}=\begin{cases}1 & w\geqslant w_l^{*H}\\ 0 & w<w_l^{*H}\end{cases}$$

高可靠型供应商和低可靠型供应商利润相等，$\pi_l^{*L}=\pi_l^{*H}$

证明：分离均衡需保证不同类型供应商采取不同的批发价格。求解函数的条件极值：

$$max\pi_s^{*H}=\left(\delta+m^H-kp^{*H}(w)\right)\left(w_l^H\right)-c$$

$$s.t.$$

$$\alpha\left(\delta+m^L-kp^{*L}(w)\right)\left(w_l^L\right)-c\geqslant\alpha\left(\delta+m^H-kp^{*H}(w)\right)\left(w_l^H\right)-c$$

$$\left(\delta+m^H-kp^{*H}(w)\right)\left(p^{*H}(w)-w_l^H\right)\geqslant0$$

$$\alpha\left(\delta+m^L-kp^{*L}(w)\right)\left(p^{*L}(w)-w_l^L\right)\geqslant0$$

第一个约束条件让低可靠供应商的最大利润不小于模仿高可靠供应商的利润，这就保证了低可靠供应商没有冒充动机。后两个约束条件保证了高可靠供应时零售商的参与约束和低可靠供应时零售商的参与约束。其中 $p^{*L}(w)=\frac{kw+\delta+m^L}{2k}$，$p^{*H}(w)=\frac{kw+\delta+m^H}{2k}$。求解批发价格的条件极值，解得：

$$w_1=\frac{\delta+h+\sqrt{\left(m^H-m^L\right)\left(m^H+m^L+2\delta\right)}}{2k}$$

$$w_2=\frac{\delta+h-\sqrt{(m^H-m^L)(m^H+m^L+2\delta)}}{2k}$$

2.混同均衡。

命题2：在混同均衡时，以下性质成立：

$$w^{*L}<w_t^{*H}=w_t^{*L}<w^{*H}$$

$$\hat{\mu}=\begin{cases}\mu & w\geqslant w_t^{*j}\\ 0 & w<w_t^{*j}\end{cases}$$

高可靠供应商的利润高于低可靠型供应商，$\pi_t^{*H}>\pi_t^{*L}$

证明：在此均衡下，供应商采取相同的批发价格，价格不能传递供应可靠性信息。零售商的信念判断保持不变，依然认为投资成功的概率为μ。此时零售商的期望利润：

$$E(\pi_r)=(1-\mu)\alpha\left[\left(\delta+m^L-kp\right)(p-w)\right]+\mu\left[\left(\delta+m^H-kp\right)(p-w)\right]$$

$$=\left(\left((1-\mu)\alpha+\mu\right)\left(\delta-kp\right)+\mu m^H+\ (1-\mu)\alpha m^L\right)(p-w)$$

从整理的结果可知，混合均衡下零售商因对高可靠性的猜测，而多购买的产品数量为μm^H。据此求得反映函数：

$$p^*(w)=\frac{(1-\mu)\alpha\left(\delta+m^L+kw\right)+\mu\left(\delta+m^H+kw\right)}{2k((1-\mu)\alpha+\mu}$$

对于高可靠供应商而言，其利润函数为$\Big[\big(\delta+\mu m^H-$

$kp^*(w))w\Big]-c$。低可靠供应商利润函数为$\alpha\Big[(\delta+\mu m^H-kp^*(w))w\Big]-c$。首先求解高可靠供应商的批发价格：

$$max\pi_s^{*H}=\big(\delta+\mu m^H-kp^*(w)\big)\big(w_t^H\big)-c$$

$$s.t.$$

$$\pi_r^*(w)=(1-\mu)\alpha\Big[\big(\delta+m^L-kp\big)\big(p-w_t^L\big)\Big]+\mu\Big[\big(\delta+m^H-kp\big)\big(p-w_t^H\big)\Big]\geqslant 0$$

解得：$w_t^{*H}=\dfrac{\mu\big((\alpha-1)(\delta+2m^H)+m^H(1-2\alpha)\big)-\alpha\delta}{k(\mu(\alpha-1)-\alpha)}$。

相同的方法求得低可靠供应商的批发价格：$w_t^{*L}=\dfrac{\mu\big((\alpha-1)(\delta+2m^H)+m^H(1-2\alpha)\big)-\alpha\delta}{k(\mu(\alpha-1)-\alpha)}$。

二、成本分摊模式选择

前文已计算出三种情形下的各方利润：不进行可靠性投资、进行可靠性投资时双方承担投资成本和只有供应商承担投资成本。在最后一种情况下，双方进行信号博弈。通过对比计算，混同均衡下的供应商利润高于分离均衡，因此混同均衡是信息不对称下最可能的结果。此节通过对比分摊模式与不分摊模式下各方的利润，找出供应商愿意共享可靠性信息、零售商愿意分摊投资成本的条件，最终找到供应商投资的条件。进一步分析，只有当零售商有动机分摊投资成本且供应商有动机分享可靠性信息时，共摊成本成为双方的共同偏好，为达到这一偏好，需保证分摊时的零售商和供应商的利润分别大于混同均衡下零售商与供应商的利润。反之则供应商独自承担投资成本。

通过数学证明，分摊下的供应商利润总是高于混同均衡下的供应商利润（见附录），即分摊成本、共享信息一直对供应商有利。现将零售商在分摊投资成本与混同均衡下的利润期望作比较，得出零售商偏好分摊模式的条件如下（为使式子简洁，用$A=\alpha\mu-\alpha-\mu$，$D=\mu m^H$）：

命题3：零售商愿意分担投资成本的充要条件为$\varphi\leqslant\min\{\dfrac{(16+32A+16A^2)D^2+(2\delta+h)AD-\delta^2A^2}{16ckA},1\}$，当$\dfrac{(16+32A+16A^2)D^2+(2\delta+h)AD-\delta^2A^2}{16ckA}<1$时，$\varphi$的阈值随k和c上升而下降，随$m^h$与$\delta$上升而上升。

命题三指出，为了保证零售商有动机去分摊投资成本，应该把成本分摊系数设置在一定的范围内。

当价格敏感系数k较高时，销售价格p对需求量有显著反向影响，零售商只能通过制定较低的销售价格来保证需求。价格降低导致分担模式和混同均衡的零售商利润期望均较低，零售商分摊投资成本的动机较低；分摊投资成本可视为零售商将部分利润转移给供应商，自然投资成本越高时，零售商越不愿意分摊成本。而当市场的产品需求量较大、零售商因高可靠供应而额外购买的产品m^H混同均衡，信息共享能让零售商收获更多的利润。零售商自然愿意通过分摊投资成本来获得真实的供应可靠性信息。

三、供应可靠性投资

$$\varphi\leqslant\min\{\frac{(16+32A+16A^2)D^2+(2\delta+h)AD-\delta^2A^2}{16ckA},1\}$$

时，零售商选择分摊投资成本。现需找到供应商愿意进行供应可靠性投资的条件。仅需比较不进行可靠性投资和进行可靠性投资时供应商的期望利润便可找到φ可接受的下限：

命题4，为确保供应商进行供应可靠性投资：

$$\max\{\frac{8ck-\mu\big((1-\alpha)\delta^2+m^H+2\delta m^H\big)}{8ck},0\}\leqslant\varphi\leqslant\min\{\frac{(16+32A+16A^2)D^2+(2\delta+h)AD-\delta^2A^2}{16ckA},1\}$$

进行可靠性投资后，供应商获得的额外利润为$\left(\dfrac{-\alpha\delta^2}{8k}+\dfrac{(\delta+m^H)^2}{8k}\right)\mu-(1-\varphi)c$；

进行可靠性投资后，零售商获得的额外利润为$\left(\dfrac{-\alpha\delta^2}{16k}+\dfrac{(\delta+m^H)^2}{16k}\right)\mu-\varphi c$

四、结束语

本文以供应商为投资主体，通过建立斯坦克伯格博弈和信号博弈，研究供应商的投资决策和批发价格、零售商的分摊决策和销售价格，找出了投资决策和分摊决策的触发条件。研究得到如下管理启示：市场状态和投资成功概率对供应商的投资决策具有决定性影响，当市场的产品需求量大，投资容易成功时，供应商可通过投资获得大量的额外利润。此种市场情形下，零售商也很愿意分摊投资成本来获得更多的利润。投资后，供应商期待零售商分摊投资成本，双方共享供应可靠性信息。此时只要供应商设置的分摊系数合理，双方均能够通过共享可靠性信息、共摊投资成本获利。当零售商拒绝分摊成本时，供应商通过批发价格传递出供应商的类型信息。在分离均衡下，为了正确地传递类型信息，供应商会损失较多利润，而混同均衡下供应商的利润大于分离均衡。信号博弈最可能的结果便是高可靠供应商和低可靠供应商制定相同的批发价格。

参考文献：

[1]于辉，吴腾飞．供应风险下营业中断保险的供应链模型分析[J]．中国管理科学，2017，25(12)：39-47.

[2]张剑，张菊亮．供应不确定条件下多周期库存博弈[J]．中国管理科学，2018，26(04)：67-77.