考虑供应商流程改进的采购合同设计①

黄 河[1,2]，申笑宇[1]，徐鸿雁[1,2]
(1. 重庆大学经济与工商管理学院，重庆 400044; 2. 重庆大学现代物流重庆市重点实验室，重庆 400044)

摘要：如何降低供应风险是制造商最为关心的问题之一. 考虑供应商有关于供应初始可靠性的私有信息，同时还可通过流程改进提高初始可靠性. 在此内生风险下，运用委托代理理论，研究制造商如何设计采购合同，同时激励供应商付出努力降低风险. 研究分别得到并比较了信息对称和不对称下制造商和供应商双方的最优决策，并发现不对称信息的存在不一定降低供应链的利润或产生信息租金，同时制造商的最优合同可通过权衡供应链损失和信息租金来获得. 当供应商的初始可靠性水平及谈判力满足一定条件时，供应商将自愿显露其私有信息，与制造商分享整条供应链的利润. 所得结论对供应风险下的采购实践有很好的参考价值和指导意义.

关键词：供应风险；信息不对称；流程改进；采购合同
中图分类号：F274 文献标识码：A 文章编号：1007-9807(2015)10-0038-18

0 引 言

在供应链全球化的背景下，制造商遭受供应中断风险(supply disruption)的可能性越来越大. 2010年爱尔兰地区一家传感器供应商因冰岛火山灰蔓延中断了生产，日产汽车公司(Nissan)和宝马汽车公司(BMW)为此不得不暂缓部分生产计划[1]. 2011年日本大地震造成当地数百家汽车零部件供应商停产，许多汽车制造商被迫中断生产达半年之久[2]. 苏黎世金融服务集团(Zurich Financial Services Group)一份针对559个企业的调查报告显示，2011年度85%的企业遭受过不止一次供应中断风险[3]. 如何降低供应风险已成为企业界和学术界的重要课题[4,5].

随着制造商赋予了供应商更多设计和生产的责任，供应商所付出的改进和创新的努力成为制造商提高产品质量、降低制造成本的主要动力[6]. 供应风险的降低自然也与这些努力密切相关. 丰田汽车公司(Toyota)在2011年日本地震后采取了一系列措施来应对今后的供应风险，包括让原有供应商：(i)在不同地区投资建立新工厂；(ii)开发新技术提供更多可选择的零部件和原材料；(iii)为某些特殊零部件准备足够多的存货[2,7]. 这些措施都可看作制造商通过供应商流程改进来降低供应风险. 另一方面，制造商常常不能准确地了解其上游供应商在自身财务状况、运营状况、原料采购等方面的信息. 当供应商的供应风险源于上述决策时，供应商往往比制造商更了解风险发生的可能性[8,9]. 例如，伟创力集团(Flextronics，全球第二大电子合约制造服务商)在2000年收购德丽公司(Dii Semiconductor)，并终止其与小型客户的合作；这使得以往一直从德丽某分支公司订货的贝克曼库尔特公司(Beckman Coulter)遭受了严重的供应风险[10]. 该案例中，德丽公司比贝克曼库尔特公司更清楚收购可

① 收稿日期：2013-05-22；修订日期：2014-09-17.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(71471021；71472017；71071171；71002069)；教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-11-0550)；中央高校基本科研业务费资助项目(CQDXWL-2012-Z018；CQDXWL-2013-082；CQDXWL-2014-Z020).
作者简介：黄 河(1977—)，男，重庆人，博士，教授，博士生导师. Email：huanghe@cqu.edu.cn

能引发的供应风险. 考虑到上述两方面,本文旨在研究,当供应商拥有关于供应风险的私有信息时,制造商如何设计采购合同并激励供应商付出努力降低供应风险.

在涉及供应风险的既往文献中,许多都是从外生风险的角度,考虑双(多) 重采购、紧急采购等策略来分散供应风险[8,9,11,12]. Anupindi 和 Akella 在交货期(lead time) 或产量(yield) 不确定的情况下探讨了如何实现供应多样化[11]. Tang 和 Kouvelis[12] 研究了买方竞争对供应商多样化的影响. Yang 等[8] 研究了信息不对称对供应商紧急采购策略(backup production) 的影响,而 Yang 等[9] 分析了不对称信息下双重采购策略(dual-sourcing option) 所产生的两种效应——竞争效应和风险分散效应(competition benefits and diversification benefits) . 还有许多学者从内生风险的角度出发,研究如何通过流程改进(人力、物力、资金等方面的努力) 来直接降低单个供应商所产生的风险[13-15]. Tang 等[13] 在分散化供应链中研究买方如何通过投资补贴或订货量补贴来激励供应商付出努力改善可靠性. Wang 等[14] 考虑买方流程改进来降低供应风险,并将该策略与买方的双重采购策略做比较. Hu 等[15] 分析制造商如何在遭受供应风险后激励供应商实施产能恢复(包括供应商的事前投资和事后努力) . 本文考虑供应商流程改进来降低供应风险,同样是基于内生风险的角度. 然而与上述三篇对称信息下研究不同的是,本文假设供应商的初始可靠性为其私有信息,并考虑到在改善初始可靠性的过程中,供应商所付的努力是不可观测的[16](unobservable) . 这是本文的特色及与以上供应风险相关文献的区别所在.

根据合同理论,本文中制造商通过合同菜单(contract menu) 来甄别供应商的私有信息[17]. Yang 等[8,9] 及张煜和汪寿阳[18] 同样运用采购合同菜单来揭露供应商有关供应风险的类型信息. Chaturvedi 和 Martínez-de-Albéniz[19] 在设计采购拍卖机制时也使用了合同菜单. 菜单式合同亦是现实交易中常见的合同形式; 如联通为 3G 产品制定的各种话费套餐、基金公司为不同风险厌恶类型的基金经理制定的薪酬合同等都属于菜单式合同. 由于供应商努力不可见,采购合同菜单的设计需同时考虑逆向选择和道德风险问题. 最早将这二者结合的是 Laffont 和 Tirole[20],他们用观察成本的方式来规制垄断者. Bolton 和 Dewatripont[17] 所著的“Contract Theory”中第 6. 3 节专门讨论了这一问题并给出了一系列文献. 新近研究中,田厚平和刘长贤[21] 在销售人员的销售能力及销售努力均为私有信息的情形下分析如何激励其提高销售努力. Armstrong 等[22] 将逆向选择和道德风险并存的模型与相应的纯逆向选择、纯道德风险模型都做了比较. 这些文章都在研究如何设计合同来揭露代理人私有信息并激励其行为,其中较少有文献在代理人拥有关于供应初始可靠性这一私有信息的背景下,研究如何激励代理人付出努力来降低供应风险.

Yang 等[8] 与本文设计了相同的合同形式,且都假设供应商需按照合同中的罚金条款弥补供应风险给制造商造成的损失. 比较发现,罚金在外生风险(Yang 等[8]) 和内生风险(本文) 下的作用不同. 当供应风险外生时,只要单位罚金不低于生产的期望成本,就能刺激供应商进行生产,可见 Yang 等[8] 中最优罚金会取到一个区间内的任意值. 当供应风险为内生时,罚金的设计既要刺激供应商的生产决策,同时又要激励供应商为改善供应可靠性所作的努力决策; 在这两方面的作用下,本文中的最优罚金将为定值. 许多文献认为信息不对称会造成供应链损失[23-24],而该结论在本文中不一定成立. 不对称信息下,当两类初始可靠性水平满足一定条件时,制造商的最优订货量和供应商的最优努力程度都与对称信息下的值一样,这使得供应链的利润也维持在对称信息下的水平. 此外,在逆向选择的标准委托代理模型中,高类型代理人有正的信息租金[17],而本文中事前的不对称信息不一定给高类型供应商带来正的利润(即信息租金) . 其原因在于,当支付的信息租金过高时,制造商不向低类型供应商订货,而选择向高类型供应商订货,并向其提供对称信息下的合同. 由于最优合同的激励相容性,两类供应商都会接受相应的合同. 此时高类型供应商的信息优势不起作用,他将得到零的利润,即不存在信息租金.

综上所述,本文在供应商流程改进可降低供应风险的前提下,研究逆向选择和道德风险并存情况下的制造商采购合同. 该机制中,制造商为

委托方，供应商为代理方. 制造商先设计一组接受或拒绝(take-it-or-leave-it)的合同菜单(包含订货量、未完成订单的单位罚金和转移支付). 观察到合同后，供应商根据自身私有信息进行选择，并决策生产数量和努力程度. 模型分析时，首先考虑供应商的行为决策，再根据供应商的最优决策来分析制造商在对称信息和不对称信息下的采购策略. 此外，本文还将分别从制造商和整条供应链的角度分析信息的价值.

1 模型假设

考虑制造商向某供应商采购零部件以满足其固定的需求 D[8,9,15]. 需求无限可分，且不失一般性设 $D=1$. 该供应商存在供应风险，且初始可靠性为其私有信息. 假设市场上存在两类供应商——高初始可靠性(高类型；H)和低初始可靠性(低类型；L)，且高(低)类型供应商存在的概率为 $\alpha\in(0,1)$ $(1-\alpha)$；这是供应双方的公共知识(common knowledge). 设 i 类型供应商($i=$ H or L)的随机产出率为 ρ_i. 供应中断风险下(supply disruption)，ρ_i 服从 Bernoulli 分布[8,11].

$$\rho_i \overset{def}{=} \begin{cases} 1 & \text{概率为 } \theta_i(e_i) \\ 0 & \text{概率为 } 1-\theta_i(e_i) \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中，给定 i 类型供应商付出努力程度 $e_i\geqslant 0$，$\theta_i(e_i)$ 为供应商流程改进后实现的可靠性.

假设 1
$$\theta_i(e_i) = 1-[1-\theta_i(0)]\times \exp(-e_i) \tag{2}$$

式(2)中 $\theta_i(0)$ 为 i 类型供应商的初始可靠性；令 $\theta_{\mathrm{H}}(0)=h$ 且 $\theta_{\mathrm{L}}(0)=l(1>h>l>0)$. 沿用以往文献的假设[14]，$\theta_i(e_i)\in[\theta_i(0),1)$ 为凹函数且随着 e_i 单调递增. 设供应商的计划产量为 y_i，则最终送达给制造商的产量为 $\rho_i y_i$，其期望值为 $\mathrm{E}(\rho_i y_i)=\theta_i y_i$. 设制造商每单位产品的售价为 r，供应商每单位产品的生产成本为 c，供应商的单位努力成本为 m. 为了让问题有意义，还需如下假设.

假设 2
$$r-m-c>0 \tag{3}$$

假设 2 使得供应商愿意努力. 其合理性在于，边际收益应大于生产和努力的边际成本.

本文设计了供应商流程改进下的制造商采购机制. 该机制中，制造商在不知道供应商类型的情况下设计一组合同菜单(一个针对高类型的合同和一个针对低类型的合同)，这是合同理论中甄别供应商私有信息的常用方法[17]. 合同形式为 $\{X_i, q_i, p_i\}$ ($i=$ H or L). $X_i(X_i\geqslant 0)$ 为事前的转移支付，$q_i(q_i\geqslant 0)$ 为订货量，$p_i(p_i\geqslant 0)$ 为未实现订单的单位罚金.

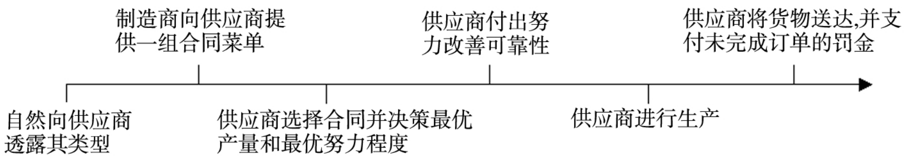

图 1 事件顺序

Fig. 1 Timing of events

图 1 描述了事件发生的时间顺序. 1) 自然向供应商透露其类型信息，而制造商并不知晓；2) 制造商设计一组合同菜单；3) 供应商选择合同，并决策其最优产量和最优努力；4) 供应商实施努力改善自身可靠性；5) 供应商进行生产；6) 供应商将货物送达并向制造商支付相应的罚金.

2 模型分析

根据逆向归纳法，首先分析供应商的最优决策，然后探讨制造商的最优合同设定.

2.1 供应商的最优产量和最优努力

若 i 类型供应商选择了合同 $\{X_j, q_j, p_j\}$ ($i,j=$ H or L)，设其生产数量和努力程度分别为 y_i^j 和 e_i^j，则该供应商的产出率上升至 ρ_i^j ($\mathrm{E}(\rho_i^j)=\theta_i(e_i^j)$)，未实现订货量为 $(q_j-\rho_i^j y_i^j)^+$，期望罚金为 $p_j E(q_j-\rho_i^j y_i^j)^+$. 本文中 $(x)^+=\max(0,x)$. 初始可靠性为 $\theta_i(0)$ 的 i 类型供应商需要解决以下问题.

$$\max_{y_i^j\geqslant 0, e_i^j} \pi_i = X_j - c y_i^j - m e_i^j - p_j \mathrm{E}(q_j-\rho_i^j y_i^j)^+ \tag{4}$$

问题(4)中，供应商的利润 π_i 来自制造商事前的

转移支付,减去生产和努力成本,再减去未完成订单的期望罚金. 由于供应商的利润π_i是关于y_i^j的分段函数,通过模型求解可知,供应商存在两个选择:(a) 不生产且不努力($y_i^j=0$且$e_i^j=0$);(b) 生产且努力($y_i^j=q_j$且$e_i^j=\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m)$). 设(b)和(a)所产生的供应商利润之差为$g(p_j)$,则$g(p_j)=(p_j-c)q_j-m-m\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m)$. 当$q_j\leqslant -m\ln(1-\theta_i(0))/c$时$g(p_j)\geqslant 0$. 当$q_j>-m\ln(1-\theta_i(0))/c$时,方程$g(p_j)=0$存在两个解$\hat{p}_i^j$和$\tilde{p}_i^j$. 此时若$p_j\leqslant\hat{p}_i^j$或$p_j\geqslant\tilde{p}_i^j$,则$g(p_j)\geqslant 0$;若$\hat{p}_i^j<p_j<\tilde{p}_i^j$,则$g(p_j)<0$. 由此可得引理1.

引理1　给定i类型供应商选择了合同$\{X_j,q_j,p_j\}(i,j=\mathrm{H\ or\ L})$,若$q_j>-m\ln(1-\theta_i(0))/c$且$\hat{p}_i^j<p_j<\tilde{p}_i^j$,则最优生产数量为$y_i^{j*}=0$且最优努力程度为$e_i^{j*}=0$. 其他情况下,$y_i^{j*}=q_j$且$e_i^{j*}=\ln[p_jq_j(1-\theta_i(0))/m]$.

证明　根据式(1),$i(i=\mathrm{H\ or\ L})$类型供应商的随机产出率ρ_i服从Bernoulli分布. 那么式(4)中π_i可改为$\pi_i=X_j-cy_i^j-p_j\theta_i(e_i^j)(q_j-y_i^j)^+-p_jq_j(1-\theta_i(e_i^j))-me_i^j$. 可见$\pi_i$是关于$y_i^j$的分段函数,那么分两种子情况进行讨论:

(i) 当$0\leqslant y_i^j<q_j$时,$\pi_i(y_i^j,e_i^j)=X_j-cy_i^j-p_jq_j+p_jy_i^j\theta_i(e_i^j)-me_i^j$;

(ii) 当$y_i^j\geqslant q_j$时,$\pi_i(y_i^j,e_i^j)=X_j-cy_i^j-p_jq_j(1-\theta_i(e_i^j))-me_i^j$.

首先分析情况(i). 该区间内π_i是关于y_i^j和e_i^j的二元函数. 通过计算可知其海赛阵为不定矩阵,因而需比较驻点和边界点来最大化π_i. 可求得唯一的驻点为$y_i^j=m/(p_j-c)$且$e_i^j=\ln[p_j(1-\theta_i(0))/(p_j-c)]$. 当$y_i^j$取边界值0时有$\pi_i=X_j-p_jq_j-me_i^j$,而合同中要求$e_i^{j*}$非负,于是假设供应商不生产时也不会付出努力,则边界点为$y_i^j=0$且$e_i^j=0$. 同理分析情况(ii). 由于$\partial\pi_i/\partial y_i^j<0$,该区间内$y_i^j$一定取边界,即$y_i^j=q_j$;又因为$\partial^2\pi_i/\partial {e_i^j}^2\leqslant 0$,那么由一阶条件可得该区间内$e_i^j$的唯一最优解为$e_i^j=\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m)$.

下面比较情况(i)和(ii)中驻点和边界点的函数值即可得全局最优解y_i^{j*}和e_i^{j*}:$\pi_i(q_j,\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m))$、$\pi_i(0,0)$和$\pi_i(m/(p_j-c),\ln[p_j(1-\theta_i(0))/(p_j-c)])$. 构造函数$f(t)=t-1-\ln t$;在定义域$t>0$内$f(t)\geqslant 0$. 函数值$\pi_i(m/(p_j-c),\ln[p_j(1-\theta_i(0))/(p_j-c)])$所对应的驻点属于情况(i),那么由该驻点满足$y_i^j>0$可知$p_j>c$,因而

$$\pi_i(q_j,\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m))-\pi_i(m/(p_j-c),\ln(p_j(1-\theta_i(0))/(p_j-c)))=mf((p_j-c)q_j/m)\geqslant 0.$$

下面还需比较$\pi_i(0,0)$和$\pi_i(q_j,\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m))$. 不失一般性,假设二者相等时,供应商会选择生产且付努力. 由前文定义可知$\pi_i(q_j,\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m))-\pi_i(0,0)=g(p_j)$. 针对函数$g(p_j)$,$\partial g/\partial p_j=q_j-m/p_j$,$\partial^2 g/\partial {p_j}^2>0$,极小值为$g_{\min}=g_{p_j=m/q_j}=-m\ln(1-\theta_i(0))-cq_j$. 根据该极小值的正负可以判断是否存在$g(p_j)=0$. 讨论以下两种情形:

1) $q_j\leqslant -m\ln(1-\theta_i(0))/c$. $g(p_j)\geqslant g_{\min}\geqslant 0$,因而$e_i^{j*}=\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m)$且$y_i^{j*}=q_j$.

2) $q_j>-m\ln(1-\theta_i(0))/c$. 此时$g_{\min}<0$. 与此同时可以找到满足$g(p_j)>0$的点(e.g.,$g(p_j=c/\theta_i(0))=mf(c(1-\theta_i(0))q_j/(m\theta_i(0)))\geqslant 0$),这说明存在$g(p_j)=0$. 进一步,由$\partial^2 g/\partial {p_j}^2>0$可知$g(p_j)=0$有两个根,设为$p_j=\hat{p}_i^j$和$p_j=\tilde{p}_i^j$.

那么,当$p_j\geqslant\tilde{p}_i^j$或$p_j\leqslant\hat{p}_i^j$时,有$g(p_j)\geqslant 0$. 此时$y_i^{j*}=q_j$且$e_i^{j*}=\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m)$;当$\hat{p}_i^j<p_j<\tilde{p}_i^j$时,有$g(p_j)<0$. 此时$y_i^{j*}=0$且$e_i^{j*}=0$.　证毕.

引理1中,若供应商选择不生产且不努力($y_i^j=0$且$e_i^j=0$),则需为所有订单缴纳罚金. 相比之下,若选择生产且努力($y_i^j=q_j$且$e_i^j=\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m)$),供应商的生产行为和可靠性的提高都可降低期望罚金,但同时会产生相应的成本. 二者相比,定义不生产且不努力所多出的期望罚金(p_jq_j-m)为供应中断成本,而生产且努力所增加的成本($cq_j+m\ln(p_jq_j(1-\theta_i(0))/m)$)为生产努力成本. 那么,供应商需在供应中断成本和生产努力成本之间权衡来使成本最小化,从而实现利润最大化. 本文发现,当订货量较小($q_j\leqslant -m\ln(1-\theta_i(0))/c$)时,生产努力成本总是小于供应中断成本,因而供应商生产且

努力. 当订货量较大时($q_j > -m\ln(1-\theta_i(0))/c$),供应商的选择还受单位罚金的影响. 若单位罚金很低($p_j \leqslant \hat{p}_i^j$)或很高($p_j \geqslant \tilde{p}_i^j$),生产努力成本小于供应中断成本,则供应商生产且努力;若单位罚金满足$\hat{p}_i^j < p_j < \tilde{p}_i^j$,供应中断成本小于生产努力成本,则供应商不生产且不努力.

2.2 对称信息下制造商的最优采购合同

对称信息下,若自然选择了$i(i = \mathrm{H\ or\ L})$类型供应商,制造商将向该供应商提供合同$\{X_i, q_i, p_i\}$. 此时制造商的最优决策如下. 本文用字符"F"表示"对称信息".

$$\max_{(X_i,q_i,p_i)} \pi_{Mi}^F = r\mathrm{E}\min(\rho_i^* y_i^*, D) + p_i\mathrm{E}(q_i - \rho_i^* y_i^*)^+ - X_i$$

s.t.

$$\text{(IR)}\quad X_i - cy_i^* - p_i\mathrm{E}(q_i - \rho_i^* y_i^*)^+ - me_i^* \geqslant 0$$

$$(y_i^*, e_i^*) = \mathrm{argmax}(X_i - cy_i - p_i\mathrm{E}(q_i - \rho_i y_i)^+ - me_i)$$

$$X_i, q_i, p_i, e_i^* \geqslant 0, i = \mathrm{H\ or\ L} \tag{5}$$

问题(5)中,π_{Mi}^F表示对称信息下供应商类型为i时制造商的利润,这等于销售收益$r\mathrm{E}\min(\rho_i^* y_i^*, D)$,加上供应商未完成订单的罚金$p_i\mathrm{E}(q_i - \rho_i^* y_i^*)^+$,再减去供应商的报酬$X_i$. 由于存在两种类型的供应商,制造商在对称信息下的期望利润为$\pi_M^F = \alpha\pi_{MH}^F + (1-\alpha)\pi_{ML}^F$. "IR"为个体理性约束(individual rationality constraint). 本文假设制造商知道供应商的保留利润(reservation profit)为0. 那么,IR约束保证了供应商接受合同所得利润不低于其保留利润,即供应商一定会接受合同. (y_i^*, e_i^*)为供应商在相应合同下的最优决策. 从现实角度出发,包含e_i^*在内的所有变量都应满足非负条件.

定义关于供应商初始可靠性的两个阈值$l_0 = (r - mt)/r$和$l_1 = (r-m)/r$,可证$l_0 < l_1$;令$t = \exp[(r-m-c)/m]$且$e_i' = \ln[r(1-\theta_i(0))/m]$;令"n. a."表示在制造商订货量为零的情况下,合同中的罚金条款不再适用(not applicable). 定理1描述了对称信息下供应双方的主要决策.

定理1 对称信息下,给定供应商类型为$i(i = \mathrm{H\ or\ L})$,制造商的最优合同$\{X_i^F, q_i^F, p_i^F\}$及供应商的最优努力e_i^F见下表1,其中$X_i^F = cq_i^F + m + m\ln[p_i^F q_i^F(1-\theta_i(0))/m]$,制造商的期望利润$\pi_M^F$见附录中的表4.

表1 对称信息下的最优决策

Table 1 Optimal decisions under full information

区间	q_H^F	q_L^F	p_H^F	p_L^F	e_H^F	e_L^F
$F_1: 1 > h > l \geqslant l_1$	1	1	$m/(1-h)$	$m/(1-l)$	0	0
$F_2: 1 > h \geqslant l_1 > l \geqslant (l_0)^+$	1	1	$m/(1-h)$	r	0	e_L'
$F_3: 1 > h \geqslant l_1 > (l_0)^+ > l > 0$	1	0	$m/(1-h)$	n. a.	0	0
$F_4: l_1 > h > l \geqslant (l_0)^+$	1	1	r	r	e_H'	e_L'
$F_5: l_1 > h \geqslant (l_0)^+ > l > 0$	1	0	r	n. a.	e_H'	0
$F_6: (l_0)^+ > h > l > 0$	0	0	n. a.	n. a.	0	0

证明 为最大化自身利润,制造商会尽可能降低X_i来使约束IR取等号,则有

$$X_i = cy_i^* + p_i\mathrm{E}(q_i - \rho_i^* y_i^*)^+ + me_i^* \tag{6}$$

将式(6)代入问题(5)的π_{Mi}^F中,化简可得

$$\pi_{Mi}^F(q_i, p_i) = r\theta_i(e_i^*)\min(y_i^*, 1) - cy_i^* - me_i^* \tag{7}$$

问题(5)中要求$e_i^* \geqslant 0$,因而y_i^*和e_i^*存在的条件需做调整. 根据引理1的证明,

(i) 当$q_j \leqslant -m\ln(1-\theta_i(0))/c$时,$y_i^* = q_i$且$e_i^* = \ln[p_i q_i(1-\theta_i(0))/m]$. 此时需$p_i \geqslant m/[q_i(1-\theta_i(0))]$以保证$e_i^* \geqslant 0$.

(ii) 当$q_j > -m\ln(1-\theta_i(0))/c$时,由于$\partial g/\partial p_j = q_j - m/p_j$且$\partial^2 g/\partial p_j^2 > 0$,则$g(p_j) = 0$的两个根中的较小者$p_j = \hat{p}_i^j$满足$m/[q_i(1-\theta_i(0))] > m/q_i > \hat{p}_i^i$. 此外,若$q_i < m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$,则$g(m/[q_i(1-\theta_i(0))]) > g(\tilde{p}_i^i) = 0$,即有$m/[q_i(1-\theta_i(0))] > \tilde{p}_i^i$;否则$m/[q_i(1-\theta_i(0))] < \tilde{p}_i^i$. 那么,若$q_i \geqslant m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$,则由$p_i \geqslant \tilde{p}_i^i \geqslant$

$m/[q_i(1-\theta_i(0))]$ 可保证解 $y_i^*=q_i$ 且 $e_i^*=\ln[p_iq_i(1-\theta_i(0))/m]$ 中 $e_i^*\geqslant 0$；而 $\tilde{p}_i^i>p_i\geqslant m/[q_i(1-\theta_i(0))]$ 时 $e_i^*\geqslant 0$ 显然成立，因为此时 $y_i^*=0$ 且 $e_i^*=0$.

若 $m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]>q_i>-m\ln(1-\theta_i(0))/c$，则由 $p_i\geqslant m/[q_i(1-\theta_i(0))]\geqslant\tilde{p}_i^i$ 可保证解 $y_i^*=q_i$ 且 $e_i^*=\ln[p_iq_i(1-\theta_i(0))/m]$ 中 $e_i^*\geqslant 0$.

通过上述分析可知，在 $e_i^*\geqslant 0$ 条件下供应商有两种决策：

(a) 若 $q_i\geqslant m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $\tilde{p}_i^i>p_i\geqslant m/[q_i(1-\theta_i(0))]$，则 $y_i^*=0$ 且 $e_i^*=0$. 此时很容易得到制造商的最大利润 $\pi_{Mi}^{F^*}=0$；

(b) 若 $q_i<m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i\geqslant m/[q_i(1-\theta_i(0))]$，或 $q_i\geqslant m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i\geqslant\tilde{p}_i^i$，则 $y_i^*=q_i$ 且 $e_i^*=\ln[p_iq_i(1-\theta_i(0))/m]$. 设此时最大化 π_{Mi}^F 的解为 q_i^* 和 p_i^*（求解过程见附录 A）.

下面比较这两种情形下的制造商利润，即可求得制造商的最优决策 q_i^F 和 p_i^F.

若(b)中 $q_i^*\neq 0$，则其对应的制造商利润为 $\pi_{Mi}^F(q_i^*,p_i^*)>0$. 这优于情况(a)中的制造商利润，因而 $q_i^F=q_i^*$ 且 $p_i^F=p_i^*$.

若(b)中 $q_i^*=0$，则其对应的制造商利润为 $\pi_{Mi}^F(q_i^*,p_i^*)=0$. 这并不优于情况(a)，因而 $q_i^F=0$ 且 p_i^F 可取任意非负值. 最后，根据式(6)可得全局最优的转移支付 X_i^F.　　证毕.

由定理 1 可知，支付给 i 类型(i = H or L)供应商的报酬 X_i^F 与订货量、单位罚金、单位生产成本以及单位努力成本都有关联. 为方便分析，本文定义了与制造商订货量 q_i 和供应商努力程度 e_i 有关的三个概念来描述供应商的情况. 当制造商的订货量为0且供应商的努力为0时，称该供应商为不活跃(inactive)供应商，表示为“In”；当制造商的订货量为正且供应商的努力为 0 时，称该供应商为半活跃(partially active)供应商，表示为“Pa”；当制造商的订货量为正且供应商的努力为正时，称该供应商为活跃(active)供应商，表示为“Ac”.

图 2 描述了不同初始可靠性下制造商的最优订货量 q_i^F 和供应商的最优努力程度 e_i^F，图中所示区域的取值范围见表 1. 从图中可观察到，每一行(列)中高(低)类型供应商的最优订货量和最优努力程度都是一样的. 由此可知，对称信息下，制造商和供应商的最优决策与两类初始可靠性之差 $h-l$ 无关. 当 $c>r-m-c-m\ln(r/m)$（即 $l_0>0$）时，原点位于“o_1”；当 $c\leqslant r-m-c-m\ln(r/m)$（即 $l_0\leqslant 0$）时，原点位于“o_2”和“o_3”之间（不包括“o_3”）. 这意味着，当供应商生产成本较低时，制造商一定会订货. 由于 $l_0>0$ 时的结论包含了 $l_0\leqslant 0$ 时的所有结论，本文接下来只讨论 $l_0>0$ 时这一情形，但仍保留 $(l_0)^+$ 这一符号.

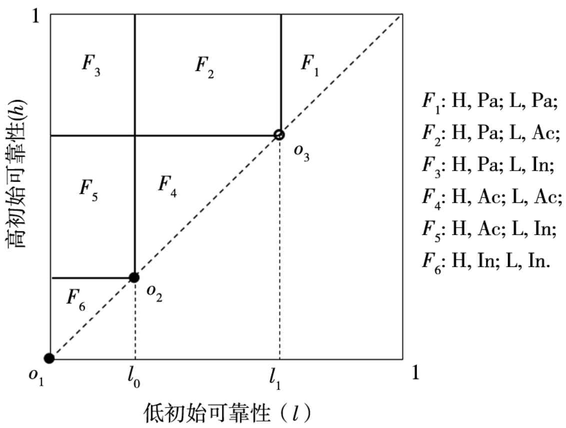

图 2　对称信息下的最优订货量和最优努力程度

Fig. 2 Optimal order quantity and optimal effort under full information

推论 1 对称信息下，阈值$(l_0)^+$和l_1将$i(i=\mathrm{H\ or\ L})$类型供应商划分为不活跃、活跃和半活跃三种情况. 具体来说，若$0<\theta_i(0)<(l_0)^+$，i类型供应商属于不活跃供应商；若$(l_0)^+\leqslant\theta_i(0)<l_1$，$i$类型供应商属于活跃供应商；若$l_1\leqslant\theta_i(0)<1$，$i$类型供应商属于半活跃供应商.

证明 由$t=\exp[(r-m-c)/m]>1$可得$(l_0)^+<l_1$. 由表1可知，当$0<\theta_i(0)<(l_0)^+$时，$q_i^F=0$且$e_i^F=0$；当$(l_0)^+\leqslant\theta_i(0)<l_1$时，$q_i^F>0$且$e_i^F>0$；当$l_1\leqslant\theta_i(0)<1$时，$q_i^F>0$且$e_i^F=0$. 根据前文定义可得该推论. 证毕.

如图2所示，以高类型供应商为例. 区域F_4和F_5中高类型供应商是活跃供应商，这是因为制造商通过订货可获得最多的正利润，而高类型供应商在此订货量下的最优努力程度也为正. 区域F_6中高类型供应商的初始可靠性较低，选择订货会给制造商带来负利润，因而高类型供应商属于不活跃供应商. 区域F_1、F_2和F_3中高类型供应商的初始可靠性较高，制造商显然愿意订货，但供应商在高初始可靠性水平下已不愿付出努力，因而高类型供应商属于半活跃供应商.

2.3 不对称信息下制造商的最优采购合同

信息对称是最理想的情况. 实际上，供应商的初始可靠性和努力程度都是制造商不能够完全准确观测到的. 此时制造商不仅需要甄别供应商的类型，还需承担供应商不可见努力所带来的道德风险. 此时制造商的问题如下. 本文中“A”代表“不对称信息”.

$$\begin{aligned}
\max_{\substack{(X_{\mathrm{H}},q_{\mathrm{H}},p_{\mathrm{H}})\\(X_{\mathrm{L}},q_{\mathrm{L}},p_{\mathrm{L}})}}\pi_M^A = {}& \alpha\left[\mathrm{E}\min(\rho_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*}y_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*},D)+p_{\mathrm{H}}\mathrm{E}(q_{\mathrm{H}}-\rho_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*}y_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*})^+-X_{\mathrm{H}}\right]+\\
&(1-\alpha)\left[\mathrm{E}\min(\rho_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*}y_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*},D)+p_{\mathrm{L}}\mathrm{E}(q_{\mathrm{L}}-\rho_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*}y_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*})^+-X_{\mathrm{L}}\right]\\
\text{s.t.}\quad&\\
(\mathrm{IC-H})\quad & X_{\mathrm{H}}-cy_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*}-p_{\mathrm{H}}\mathrm{E}(q_{\mathrm{H}}-\rho_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*}y_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*})^+-me_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*}\geqslant X_{\mathrm{L}}-cy_{\mathrm{H}}^{\mathrm{L}^*}-p_{\mathrm{L}}\mathrm{E}(q_{\mathrm{L}}-\rho_{\mathrm{H}}^{\mathrm{L}^*}y_{\mathrm{H}}^{\mathrm{L}^*})^+-me_{\mathrm{H}}^{\mathrm{L}^*}\\
(\mathrm{IC-L})\quad & X_{\mathrm{L}}-cy_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*}-p_{\mathrm{L}}\mathrm{E}(q_{\mathrm{L}}-\rho_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*}y_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*})^+-me_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*}\geqslant X_{\mathrm{H}}-cy_{\mathrm{L}}^{\mathrm{H}^*}-p_{\mathrm{H}}\mathrm{E}(q_{\mathrm{H}}-\rho_{\mathrm{L}}^{\mathrm{H}^*}y_{\mathrm{L}}^{\mathrm{H}^*})^+-me_{\mathrm{L}}^{\mathrm{H}^*}\\
(\mathrm{IR-H})\quad & X_{\mathrm{H}}-cy_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*}-p_{\mathrm{H}}\mathrm{E}(q_{\mathrm{H}}-\rho_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*}y_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*})^+-me_{\mathrm{H}}^{\mathrm{H}^*}\geqslant 0\\
(\mathrm{IR-L})\quad & X_{\mathrm{L}}-cy_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*}-p_{\mathrm{L}}\mathrm{E}(q_{\mathrm{L}}-\rho_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*}y_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*})^+-me_{\mathrm{L}}^{\mathrm{L}^*}\geqslant 0\\
& (y_i^{j^*},e_i^{j^*})=\operatorname{argmax}(X_j-cy_i^j-p_j\mathrm{E}(q_j-\rho_i^jy_i^j)^+-me_i^j)\\
& X_i,q_i,p_i,e_i^{j^*}\geqslant 0,\ i=\mathrm{H\ or\ L},\ j=\mathrm{H\ or\ L}
\end{aligned}\tag{8}$$

问题(8)中，由于制造商只知道供应商类型分布，目标函数为分别向两类供应商订货所得利润的期望. “IC”为两类供应商的激励相容约束(incentive compatibility constraint). 该约束保证供应商会如实报告自身类型，即高(低)类型供应商选择针对该类型的合同得到的利润不小于选择针对低(高)类型的合同，其中$y_i^{j^*}$和$e_i^{j^*}$为i类型供应商在合同$\{X_j,q_j,p_j\}$下的最优决策. “IR”为两类供应商的个体理性约束(individual rationality constraint). 本文假设制造商知道供应商的保留利润(reservation profit)为0. 那么，IR约束保证了供应商接受合同所得利润不低于其保留利润，即供应商一定会接受合同. 此外，包含$e_i^{j^*}$在内的所有变量满足非负条件.

再定义关于低类型供应商初始可靠性的两个阈值$l_2(h)$和$l_3(h)$：在定义域$l_1\leqslant h<1$上$l_3(h)=1-(1-h)\exp[(1-\alpha)(rh-c)/m]$，在定义域$(l_0)^+\leqslant h<l_1$上$h_2(l)=1-(1-l)\exp[-(1-\alpha)(r-m-c-me_L')/(\alpha m)]$且$l_2(h)=\max(h_2^{-1}(h),0)$. 可以证明$(l_0)^+\leqslant l_2(h)<l_3(h)$成立. 令$1(\cdot)$表示示性函数. 定理2描述了不对称信息下供应双方的主要决策.

定理 2 不对称信息下，制造商的最优合同$\{X_i^A,q_i^A,p_i^A\}(i=\mathrm{H\ or\ L})$及供应商的最优努力程

度 e_i^A 见下表 2，其中 $X_H^A = cq_H^A + m + m \ln[p_H^A q_H^A(1-h)/m] + 1(q_L^A > 0) m \ln[(1-l)/(1-h)]$，$X_L^A = cq_L^A + m + m\ln[p_L^A q_L^A(1-l)/m]$，制造商的期望利润 π_M^A 见附录中的表 4.

表 2　不对称信息下的最优决策

Table 2 Optimal decisions under asymmetric information

区间	q_H^A	q_L^A	p_H^A	p_L^A	e_H^A	e_L^A
$A_1: 1 > h \geqslant l_1, h > l \geqslant l_3(h)$	1	1	$m/(1-h)$	$m/(1-h)$	0	$\ln[(1-l)/(1-h)]$
$A_2: 1 > h \geqslant l_1, l_3(h) > l > 0$	1	0	$m/(1-h)$	n. a.	0	0
$A_3: l_1 > h \geqslant (l_0)^+, h > l \geqslant l_2(h)$	1	1	r	r	e_H'	e_L'
$A_4: l_1 > h \geqslant (l_0)^+, l_2(h) > l > 0$	1	0	r	n. a.	e_H'	0
$A_5: (l_0)^+ > h > l > 0$	0	0	n. a.	n. a.	0	0

证明　为最大化自身期望利润，制造商会尽可能降低 $X_i(i = \mathrm{H\ or\ L})$ 而使约束 IC－H 和约束 IR－L 取等号. 那么分别有

$$X_H = cy_H^{H^*} + p_H \mathrm{E}(q_H - \rho_H^{H^*} y_H^{H^*})^+ + me_H^{H^*} + X_L - cy_H^{L^*} - p_L \mathrm{E}(q_L - \rho_H^{L^*} y_H^{L^*})^+ - me_H^{L^*} \tag{9}$$

$$X_L = cy_L^{L^*} + p_L \mathrm{E}(q_L - \rho_L^{L^*} y_L^{L^*})^+ + me_L^{L^*} \tag{10}$$

将式(10)代入约束 IC-H 不等号右边的表达式，即高类型供应商选择针对低类型合同时的利润中，整理后设该利润为 π_H^A，则有

$$\pi_H^A = c(y_L^{L^*} - y_H^{L^*}) + p_L \mathrm{E}(q_L - \rho_L^{L^*} y_L^{L^*})^+ - p_L \mathrm{E}(q_L - \rho_H^{L^*} y_H^{L^*})^+ + m(e_L^{L^*} - e_H^{L^*}) \tag{11}$$

根据引理 1 可以证明 $\pi_H^A \geqslant 0$ 总是成立，即约束 IC-H 不等号右边的值非负. 那么由 IC-H 为紧约束可知，其不等号左边的值，即高类型供应商选择针对自身类型合同时的利润，也非负. 这表明约束 IR-H 为松约束.

问题(8)中，暂时先考虑不包含约束 IC-L 的松弛问题，将式(9)和(10)代入制造商在不对称信息下的期望利润 π_M^A 中，则 π_M^A 可改写为两个独立函数的组合. 问题(8)转化为如下无约束规划，其中所有变量都满足非负条件

$$\begin{aligned}\max_{(q_H,p_H)(q_L,p_L)} \pi_M^A &= \max \pi_{M,H}^A(q_H,p_H) + \max \pi_{M,L}^A(q_L,p_L) \\ &= \max_{(q_H,p_H)}\{\alpha[\mathrm{E}\min(\rho_H^{H^*} y_H^{H^*}, D) - cy_H^{H^*} - me_H^{H^*}]\} + \max_{(q_L,p_L)}\{(1-\alpha)[\mathrm{E}\times \min(\rho_L^{L^*} y_L^{L^*}, D) - cy_L^{L^*} - me_L^{L^*}] - \alpha\pi_H^A\}.\end{aligned}$$

由定理 1 可得最大化 $\pi_{M,H}^A$ 的全局最优解 q_H^A 和 p_H^A. 最大化 $\pi_{M,L}^A(q_L,p_L)$ 时，由于合同中要求 $e_i^{L^*} \geqslant 0\ (i = \mathrm{H\ or\ L})$，$y_i^{L^*}$ 和 $e_i^{L^*}$ 存在的条件需做调整. 该调整与定理 1 中类似，则不再重复，本文只给出一些必要的细节: 在 $e_i^{L^*} \geqslant 0$ 条件下，$g(p_L) = 0$ 解为 $p_L = \tilde{p}_i^L(q_L)$. 由隐函数 $(p_L - c) \times q_L - m - m\ln[p_L q_L(1-\theta_i(0))/m] = 0$ 可得 $\partial p_L/\partial\theta_i(0) = m/(1-\theta_i(0))(m/p_L - q_L) < 0$，则有 $\tilde{p}_L^L(q_L) > \tilde{p}_H^L(q_L)$. 还可证当 $p_L > m/[q_L(1-\theta_L(0))]$ 时，$p_L = m/[q_L(1-\theta_H(0))]$ 和 $p_L = \tilde{p}_L^L(q_L)$ 有唯一的交点，设为 (q_L', p_L')；且当 $q_L > q_L'$ 时有 $\tilde{p}_L^L > m/[q_L(1-\theta_H(0))]$，反之亦然. 根据这些条件，下面列出了 $e_i^{L^*} \geqslant 0$ 条件下两类供应商所决策的 $y_i^{L^*}$ 和 $e_i^{L^*}$ 构成的三种组合.

(a) 若 $q_L < q_L'$ 且 $p_L \geqslant m/[q_L(1-\theta_H(0))]$，或 $q_L \geqslant q_L'$ 且 $p_L \geqslant \tilde{p}_L^L$，则 $y_H^{L^*} = y_L^{L^*} = q_L$、$e_H^{L^*} = \ln[p_L q_L(1-\theta_H(0))/m]$ 且 $e_L^{L^*} = \ln[p_L q_L(1-\theta_L(0))/m]$. 设该区域内使 $\pi_{M,L}^A$ 最大化的最优解为 (q_L^*, p_L^*) (求解过程见附录 B).

(b) 若 $q_L' \leqslant q_L < m\theta_H(0)/[c(1-\theta_H(0))]$ 且 $p_L \geqslant m/[q_L(1-\theta_H(0))]$，或 $q_L \geqslant m\theta_H(0)/[c(1-\theta_H(0))]$ 且 $\tilde{p}_L^L > p_L \geqslant \tilde{p}_H^L$，则 $y_H^{L^*} = q_L$、$e_H^{L^*} = \ln[p_L q_L(1-\theta_H(0))/m]$、$y_L^{L^*} = 0$ 且 $e_L^{L^*} = 0$. 此时 $\pi_{M,L}^A = -\alpha\pi_H^A \leqslant 0$，很显然该区域内的最优解为 $q_L = 0$ 且 p_L 可取任意非负值.

(c) 若 $q_L \geqslant m\theta_H(0)/[c(1-\theta_H(0))]$ 且 $\tilde{p}_H^L > p_L \geqslant m/[q_L(1-\theta_H(0))]$，则 $y_H^{L^*} = y_L^{L^*} = 0$ 且 $e_H^{L^*} = e_L^{L^*} = 0$. 此时 $\pi_{M,L}^A = 0$，该区域内的最优

解为 $q_L = 0$ 且 p_L 可取任意非负值.

下面比较三种情况下 $\pi^A_{M,L}$ 的函数值可得全局最优解 q^A_L 和 p^A_L. 当(a)中 $q^*_L \neq 0$ 时,其对应的函数值为 $\pi^A_{M,L}(q^*_L, p^*_L) > 0$,这优于(b)和(c)中的 $\pi^A_{M,L}$,因而 $q^A_L = q^*_L$ 且 $p^A_L = p^*_L$. 当(a)中 $q^*_L = 0$ 时,其对应的函数值为 $\pi^A_{M,L}(q^*_L, p^*_L) = 0$,这与(b)和(c)中的最大值是一样的,因而 $q^A_L = 0$ 且 p^A_L 可取任意非负值. 将松弛问题的最优解(q^A_H, p^A_H)和(q^A_L, p^A_L)代入约束IC-L,可证明该不等式一定成立. 这表明松弛问题的最优解即为原问题(8)的最优解. 最后由式(9)和式(10)可得转移支付的最优解 X^A_H 和 X^A_L. 证毕.

由定理2可知,两类供应商的最优转移支付 X^A_H 和 X^A_L 都与订货量、单位罚金、单位生产成本以及单位努力成本有关联. 图3描述了不对称信息下制造商的最优订货量和供应商的最优努力程度,图中所示区域的取值范围见表2. 由定理1和2可知,不对称信息下高类型供应商所对应的最优订货量和最优努力程度分别与其在对称信息下的最优解相等. 对低类型供应商而言,该现象只出现在区域 A_3 中,此时低类型供应商属于活跃供应商. 在 A_2、A_4 和 A_5 中,制造商不对低类型供应商下订单,即低类型供应商属于不活跃供应商. 在 A_1 中,低类型供应商仍属于活跃供应商,而与对称信息下的最优努力相比,信息不对称使得低类型供应商付出了更多的努力; 本文称之为供应商的过度努力(over-improvement), 表示为"Ac°"(active with over-improvement).

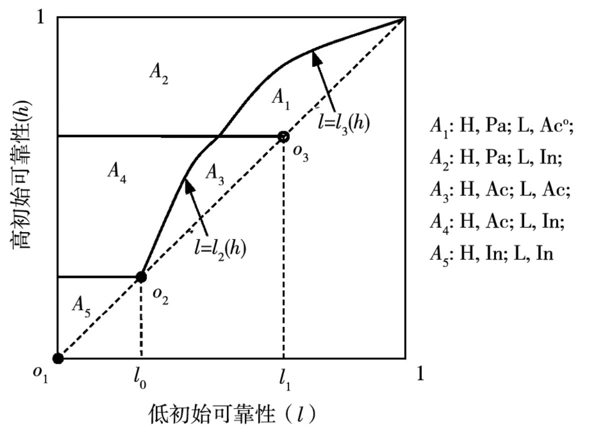

图3　不对称信息下的最优订货量和最优努力程度

Fig. 3 Optimal order quantity and optimal effort under asymmetric information

定理3　不对称信息下,存在阈值 $(l_0)^+$. 若 $0 < l < (l_0)^+$,低类型供应商属于不活跃供应商; 若 $(l_0)^+ \leqslant l < 1$,h 和 l 的相对关系所形成的边界 $l_2(h)$ 和 $l_3(h)$ 将低类型供应商划分为不活跃和活跃两种情况.

证明　在定义域 $l_1 \leqslant h < 1$ 内 $l = l_3(h)$ 等价于 $(1-\alpha)(rh-c) - m\ln[(1-l)/(1-h)] = 0$. 对该隐函数求导得 $\partial l/\partial h = (1-l)[m/(1-h) - (1-\alpha)r]/m > 0$,则 $l_3(h) \geqslant l_3(h = l_1) = 1 - (m/r)t^{(1-\alpha)}$. 注意到本文只分析 $l_0 > 0$ 这一一般情形,因为 $l_0 \leqslant 0$ 时的结论都包含在其中; 由 $l_0 > 0$ 可知 $l_2(h) > 0$. 那么在定义域 $(l_0)^+ \leqslant h < l_1$ 内,$l = l_2(h)$ 等价于 $(1-\alpha)(r - m - c - me'_L) - \alpha m\ln[(1-l)/(1-h)] = 0$. 对此隐函数求导得 $\partial l/\partial h = \alpha(1-l)/(1-h) > 0$,则 $l_2(h) < l_2(h = l_1) = 1 - (m/r)t^{(1-\alpha)}$. 可见,$l_2(h) < l_3(h)$. 又 $l_2(h) \geqslant l_2(h = (l_0)^+) = (l_0)^+$,则 $l_2(h) \geqslant (l_0)^+$. 根据前文定义和表2可得该定理. 证毕.

对比推论1和定理3,图4描绘了信息不对称对低类型供应商所对应的最优订货量和最优努力程度的影响,图中所示区域的取值范围见表3. 当 $0 < l < (l_0)^+$ 时,低类型供应商的初始可靠性太低,以至于制造商在对称信息下都不能获得正的利润,因而制造商在对称信息和不对称信息下都不对其订货,即低类型供应商属于不活跃供应商. 当 $(l_0)^+ \leqslant l < 1$ 时,对称信息下的制造商总会给低类型供应商订单,此时低类型供应商属于活跃

供应商或半活跃供应商；而在不对称信息下，h 和 l 的相对关系所形成的边界 $l_2(h)$ 和 $l_3(h)$ 将低类型供应商划分为不活跃供应商和活跃供应商．这是因为供应商的私有信息及隐藏行动会引发信息租金，且该租金会随着两种初始可靠性之差 $h-l$ 的增大而增加．当两种初始可靠性之差 $h-l$ 较小时（C_3、C_4 和 C_5），信息租金也较少，那么制造商愿意向低类型供应商订货；当两种初始可靠性之差 $h-l$ 较大时（C_1 和 C_2），支付给高类型供应商的信息租金将超过从低类型供应商处获得的利润，这使得制造商选择不向低类型供应商订货来避免支付信息租金（详细原因见推论4后面的讨论）．由此可见，不对称信息的存在降低了制造商向低类型供应商订货的可能性．

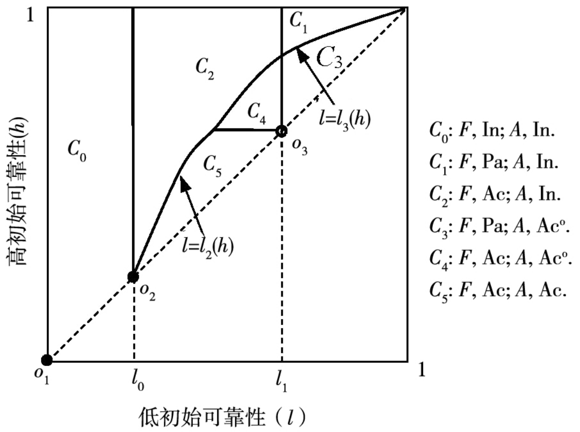

图4　信息不对称对低类型供应商的最优订货量和最优努力程度的影响

Fig. 4 Impact of information asymmetry on optimal order quantity and effort for the supplier with low initial reliability

定理4　在图4的区域 C_3 和 C_4 内，制造商在不对称信息下对低类型供应商的罚金高于对称信息下的值（$p_L^A > p_L^F$），这将造成低类型供应商的过度努力（$e_L^A > e_L^F$）．

证明　区域 C_3 内，$h>l$ 使 $p_L^F = m/(1-l) < p_L^A = m/(1-h)$，则 $e_L^A - e_L^F = \ln[(1-l)/(1-h)] > 0$；区域 C_4 内，$h > l_1 = 1-m/r$ 使 $p_L^F = r < p_L^A = m/(1-h)$，则 $e_L^A - e_L^F = \ln[m/(r(1-h))] > 0$．证毕．

不对称信息下，制造商在区域 C_3、C_4 和 C_5 内向低类型供应商订货．此时，在针对低类型的合同中，制造商需设计罚金来规制选择该合同的供应商（既可能是低类型供应商也可能是高类型供应商）付出非负努力．区域 C_5 内，对称信息下针对低类型的合同中的罚金可以满足两类供应商在不对称信息下的努力非负条件，那么制造商不会因信息不对称而改变罚金，从而使得低类型供应商的努力也保持在有效（efficient）水平．区域 C_3 和 C_4 内，对称信息下针对低类型的合同中的罚金已经不能满足不对称信息下的努力非负条件，那么制造商不得不提高罚金．在高罚金的刺激下，低类型供应商会付出比对称信息下更多的努力．这是供应商在努力成本和努力后预期罚金之间权衡的结果（罚金越高，努力越多）．该定理表明，尽管拥有私有信息的供应商有能力付出有效（与对称信息下一样多）的努力，制造商的规制可能会造成供应商努力行为的扭曲．

推论2　随着 α 增加，图4中区域 C_1 和 C_2 的范围变大，而区域 C_3、C_4 和 C_5 的范围变小．

证明　注意到本文只分析 $l_0>0$ 这一一般情形，因为 $l_0 \leqslant 0$ 时的结论都包含在其中；由 $l_0>0$ 可得 $l_2(h)>0$．那么在定义域 $(l_0)^+ \leqslant h < l_1$ 内，$l=l_2(h)$ 等价于 $(1-\alpha)(r-m-c-me_L')-\alpha m \times \ln((1-l)/(1-h))=0$；已知 $h \geqslant (l_0)^+$，由该隐函数可得 $\partial l/\partial\alpha = (1-l)(r-m-c-me_H')/m>0$，且随着 α 从0增加到1，$l=l_2(h)$ 将从 $l=(l_0)^+$ 移向 $l=h$．在定义域 $l_1 \leqslant h < 1$ 内，$l=l_3(h)$ 等价于 $(1-\alpha)(rh-c)-m\ln[(1-l)/(1-h)]=0$；已知 $h>l_1=(r-m)/r>c/r$，由该隐函数可得 $\partial l/\partial\alpha=(1-l)(rh-c)/m>0$，且随着从0增加到1，$l=l_3(h)$ 将从 $l=1-(1-h)\exp[(rh-c)/m]$ 移向 $l=h$．那么根据 $l=l_2(h)$ 和 $l=$

$l_3(h)$ 这两条曲线随 α 的变化可得该推论. 证毕.

该推论表明,随着 α 增加,制造商不向低类型供应商订货的可能性越来越高,即越难向低类型供应商订货. 其原因在于,随着高类型供应商存在的概率增加,制造商支付信息租金的可能性也随之增加.

3 信息价值

本节将从整条供应链及制造商的角度来分析信息的价值. 已知供应链的利润等于制造商和供应商的利润之和. 令对称信息(不对称信息)下供应链的利润为 $\pi_W^F(\pi_W^A)$. 对称信息下,两类供应商都没有利润,因而供应链的利润等于制造商在对称信息下的期望利润,即 $\pi_W^F = \pi_M^F$. 不对称信息下,低类型供应商没有利润,而高类型供应商可以获得信息租金 π_{H}^A(即式(11),原因见推论 4 后面的讨论部分),因而供应链的利润等于制造商与高类型供应商在不对称信息下的期望利润之和,即 $\pi_W^A = \pi_M^A + \alpha\pi_{\mathrm{H}}^A$. 对整条供应链而言,信息的价值等于对称信息与不对称信息下供应链的利润之差,即供应链损失 $\Delta_W = \pi_W^F - \pi_W^A$. 对制造商而言,制造商的信息价值为对称信息和不对称信息下制造商的期望利润之差,即 $\Delta_M = \pi_M^F - \pi_M^A$. 由引理 1、定理 1 和定理 2 可得表 3,其中 $\tilde{\pi}_{\mathrm{H}} = m\ln[(1-l)/(1-h)]$. 表 3 的推导过程见附录 C. 下面根据表 3 来分析信息的价值.

表 3 制造商的信息价值、供应链损失及信息租金

Table 3 Information value for the manufacturer, the loss of supply chain's profit, and information rent

区间	$\Delta_M = \pi_M^F - \pi_M^A$	π_{H}^A	$\Delta_W = \pi_W^F - \pi_W^A$
$C_1: 1 > h > l \geqslant l_1, l < l_3(h)$	$(1-\alpha)(rl-c)$	0	$(1-\alpha)(rl-c)$
$C_2: 1 > h \geqslant l_1 > l \geqslant (l_0)^+$, $l < l_3(h)$; $l_1 > h > l \geqslant (l_0)^+$, $l < l_2(h)$	$(1-\alpha)(r-m-c-me_{\mathrm{L}}')$	0	$(1-\alpha)(r-m-c-me_{\mathrm{L}}')$
$C_3: 1 > h > l \geqslant l_1, l \geqslant l_3(h)$	$\tilde{\pi}_{\mathrm{H}} - (1-\alpha)r(h-l)$	$\tilde{\pi}_{\mathrm{H}}$	$(1-\alpha)[\tilde{\pi}_{\mathrm{H}} - r(h-l)]$
$C_4: 1 > h \geqslant l_1 > l \geqslant l_3(h)$	$\alpha\tilde{\pi}_{\mathrm{H}} + (1-\alpha)[r(1-h) - m - me_{\mathrm{H}}']$	$\tilde{\pi}_{\mathrm{H}}$	$(1-\alpha)[r(1-h) - m - me_{\mathrm{H}}']$
$C_5: l_1 > h > (l_0)^+, h > l \geqslant l_2(h)$	$\alpha\tilde{\pi}_{\mathrm{H}}$	$\tilde{\pi}_{\mathrm{H}}$	0
$C_0: 1 > h > l > 0, (l_0)^+ > l > 0$	0	0	0

推论 3 不对称信息下供应链的利润在两种情形下保持最优水平(the first-best):(1)低类型供应商在对称信息下属于不活跃供应商;(2)低类型供应商在不对称信息下属于活跃供应商,且无过度努力. 其他情况下,信息不对称的存在会降低供应链的利润.

证明 在定义域 $t > 0$ 内构造函数 $f(t) = t - 1 - \ln t$,则 $\mathrm{d}f/\mathrm{d}t = 1 - 1/t$ 且 $\mathrm{d}^2f/\mathrm{d}t^2 = 1/t^2 > 0$. 由 $\mathrm{d}f/\mathrm{d}t = 0$ 可得 $f(t) \geqslant f_{\min} = f(t=1) = 0$,且当 $1 > t > 0$ 时有 $\mathrm{d}f/\mathrm{d}t < 0$. 区域 C_3 中由 $1 > r(1-l)/m > r(1-h)/m > 0$ 可得 $\Delta_W = (1-\alpha)m[f(r(1-h)/m) - f(r(1-l)/m)] > 0$. 区域 C_4 中 $\Delta_W = (1-\alpha)mf(r(1-h)/m) > 0$. 区域 C_1 中,由假设 2 中 $r - m > c$ 可得 $l > l_1 = (r-m)/r > c/r$,则 $\Delta_W = (1-\alpha)(rl-c) > 0$. 区域 C_2 中由 $l > (l_0)^+ \geqslant l_0$ 可得 $\Delta_W = (1-\alpha)(r-m-c-me_{\mathrm{L}}') > 0$. 区域 C_0 和 C_5 中 $\Delta_W = 0$. 证毕.

信息不对称对供应双方的影响都会造成供应链的利润变化. 由表 3 和图 4 可知,在区域 C_0 内,不论信息是否对称,制造商都不向低类型供应商订货,也就不存在供应链损失. 在区域 C_1 和 C_2 内,与对称信息相比,信息不对称使得制造商不向低类型供应商订货,因而不对称信息下供应链的利润低于对称信息下的水平,即造成了供应链损失. 在区域 C_3、C_4 和 C_5 内,制造商总会向低类型供应商订货. 其中在 C_3 和 C_4 内,与对称信息下相比,低类型供应商在不对称信息下扭曲了对自身的努力,因而产生了供应链损失;在 C_5 内,低类型供应商付出的努力与对称信息时是一样的,所以供应链的利润保持在对称信息下的最优水平. 推

论 3 表明,包含隐藏行动的信息不对称不一定造成供应链损失.

推论 4　当低类型供应商的初始可靠性较低,或两种类型的初始可靠性之差较大时,信息不对称的存在不会产生信息租金.

证明　由表 3 中区域 C_0、C_1 和 C_2 内的信息租金为 0 这一现象即可得该推论.　证毕.

不对称信息下,给定一组合同菜单(一个针对高类型的合同和一个针对低类型的合同),高类型供应商的信息优势体现在,他可以通过选择针对低类型的合同来获得利润(即式(11)). 为了激励供应商真实选择针对自身类型的合同,制造商需向高类型供应商支付同等数量的信息租金. 由式(11)可知,当制造商向低类型供应商的订货量为正(零)时,高类型供应商得到的信息租金为正(零). 因此,制造商在支付给高类型供应商的信息租金和从低类型供应商处获得的利润之间进行权衡. 在图 4 中,当两种初始可靠性之差 $h - l$ 较大(C_1 和 C_2)时,支付的信息租金将超过制造商从低类型供应商处获得的利润; 当低类型供应商的初始可靠性较低(C_0)时,制造商从低类型供应商处获得的利润为负. 这两种情形下,制造商都不会向低类型供应商订货,也就不用支付信息租金. 这表明,拥有隐藏行动的供应商不一定能从私有信息中获利.

由表 3 和图 4 可知,不对称信息下,当低类型供应商获得正的订单且过度努力时(C_3 和 C_4),制造商的信息价值不仅包含信息租金的期望值还包含了由信息不对称引起的供应链损失; 当低类型供应商获得正的订单且付出与对称信息下一样多的努力时(C_5),供应链损失为零,而制造商的信息价值等于信息租金的期望值; 当低类型供应商没有订单时(C_1 和 C_2),信息租金为零,而制造商的信息价值恰好等于供应链损失. 由此可得到关于制造商决策的一个重要定理:

定理 5　制造商在不对称信息下的最优合同取决于由信息不对称所造成的两种损失之间的权衡: 信息租金 π_{H}^{A} 和供应链损失 Δ_W,且有 $\Delta_M = \Delta_W + \alpha\pi_{\mathrm{H}}^{A}$.

证明　对称信息下 $\pi_W^F = \pi_M^F$,而不对称信息下有 $\pi_W^A = \pi_M^A + \alpha\pi_{\mathrm{H}}^A$. 又 $\Delta_W = \pi_W^F - \pi_W^A$,$\Delta_M = \pi_M^F - \pi_M^A$. 所以 $\Delta_M = \pi_M^F - \pi_M^A = \pi_W^F - (\pi_W^A - \alpha\pi_{\mathrm{H}}^A) = \Delta_W + \alpha\pi_{\mathrm{H}}^A$.　证毕.

定理 5 从信息价值的角度表明,制造商可以权衡信息租金和供应链损失来最小化信息的价值,从而最大化其在不对称信息下的期望利润.

合同理论中,代理人(供应商)只能选择接受或拒绝合同,而无讨价还价能力. 实际上,在供应双方的长期合作中,供应商通常具备正的谈判力(bargaining power). 下面从谈判的角度进一步讨论信息的价值.

定理 6　当低类型供应商的初始可靠性不太低($(l_0)^+ < l < 1$)且两类初始可靠性之差 $h - l$ 较大($l < l_2$ 且 $l < l_3$)时,只要供应商的谈判力 β 满足 $0 < \beta < \bar{\beta}$($\bar{\beta} = 1 - \pi_M^A/\pi_W^F \leqslant 1$),拥有私有信息的供应商就会自愿显露类型信息,从而与制造商分享整条供应链的利润.

证明　假设供应商的谈判力为 β($0 < \beta < 1$),则制造商的谈判力为 $1 - \beta$. 由表 3 和推论 3 的证明可知,在区域 C_1 和 C_2($(l_0)^+ < l < 1$、$l < l_2$ 且 $l < l_3$)内 $\pi_M^F - \pi_M^A = \Delta_M = \Delta_W > 0$,这说明制造商在不对称信息下的利润 π_M^A 低于其对称信息下的值 π_M^F. 已知对称信息下两类供应商的利润和不对称信息下低类型供应商的利润始终为 0,而在 C_1 和 C_2 中高类型供应商在不对称信息下的利润也为 0($\pi_{\mathrm{H}}^A = 0$). 这说明两类供应商在不对称信息下的利润都等于其对称信息下的值. 此时若供应商自愿显露其类型信息,而制造商也愿意就此进行谈判,整条供应链将实现对称信息下的利润,即 π_W^F. 下面分析该谈判发生的条件. 一方面,供应商谈判所得利润为 $\beta\pi_W^F$. 由 $\beta > 0$ 可得 $\beta\pi_W^F > 0$,这说明供应商显露私有信息所分享到的利润 $\beta\pi_W^F$ 大于保持私有信息时最优合同产生的零利润,因此供应商会自愿显露其类型信息. 另一方面,制造商谈判所得利润为$(1 - \beta)\pi_W^F$(不考虑交易成本). 若 $\beta < \bar{\beta}$ 则有 $(1 - \beta)\pi_W^F > \pi_M^A$,这说明制造商在对称信息下的谈判利润 $(1 - \beta)\pi_W^F$ 大于不对称信息下最优合同带来的利润 π_M^A,因此制造商也会愿意与供应商谈判. 由这两方面的分析可知谈判是可行的.　证毕.

在图 4 的区域 C_1 和 C_2 内,低类型供应商的初始可靠性不太低($(l_0)^+ < l < 1$),但两类初始可

靠性之差较大($l < l_2$ 且 $l < l_3$). 此时制造商在对称信息下向低类型供应商订货,而在不对称信息下不向其订货. 由表 3 可知,该区域内制造商与高类型供应商在信息不对称下的利润均不高于信息对称下的水平,而低类型供应商的利润始终为零. 此时,只要供应商的谈判力 β 满足 $0 < \beta < \bar{\beta}$,不对称信息下的供应商就会愿意显露其类型信息,而制造商也愿意与供应商就信息揭露进行谈判. 那么双方将分享整条供应链的利润,各自分享到的利润与 β 的大小有关.

4 结束语

在供应商流程改进可降低供应风险(内生供应风险)的现实背景下,考虑到供应商常常拥有关于供应风险(初始供应可靠性)的私有信息,且其努力是不可观测的,本文研究了制造商如何设计采购合同并激励供应商努力这一问题. 论文所得结论可总结为如下两个方面. 1) 关于供应链双方的主要决策: 信息不对称会降低制造商向低初始可靠性供应商订货的可能性. 尽管拥有私有信息的供应商可以付出有效(即与对称信息时一样多)的努力,制造商为了规制两类供应商的努力行为,可能会对低初始可靠性供应商设置一个过高的单位罚金(对比于对称信息下的罚金),这将诱使低初始可靠性供应商向上扭曲的努力决策. 2) 关于信息的价值: 供应链双方的行为共同决定了,信息不对称(逆向选择)不一定造成供应链损失,这是因为当初始可靠性满足一定条件时,供应双方的主要决策都保持在对称信息下的水平. 高初始可靠性的供应商不一定能获得信息租金,这是因为当制造商不向低初始可靠性供应商订货时,高初始可靠性供应商的信息优势将不起作用(他选择针对低类型的合同所获得的利润为 0). 制造商可以权衡供应链损失和信息租金来决策不同初始可靠性水平下的最优合同. 此外,在一定的初始可靠性水平下,制造商和供应商在不对称信息下的期望利润均不高于对称信息下的值. 此时,只要供应商的谈判力 β 满足一定条件,拥有私有信息的供应商会自愿显露类型信息,并与制造商分享整条供应链的利润.

参 考 文 献:

[1] Banker S. Volcano disrupts European supply chains [Z]. http://logisticsviewpoints.com/2010/04/22/volcano-disrupts-european-supply-chains/, 2010.

[2] Kim Chang-Ran. Toyota says supply chain will be ready by autumn for next big quake [Z]. http://www.reuters.com/article/2012/03/02/toyota-supply-chain-idUSL4E8E21ZJ20120302, 2012.

[3] Veysey S. Majority of companies suffered supply chain disruption in 2011: Survey [Z]. http://www.business insurance.com/article/20111102/NEWS06/111109973/majority-of-companies-suffered-supply-chain-disruption-in-2011-survey, 2011.

[4] Vakharia A J, Yenipazarli A. Managing supply chain disruptions, foundations and trends in technology [J]. Information and Operations Management, 2008, 2(4): 243 - 325.

[5] Snyder L V, Atan Z, Peng P, et al. OR/MS Models for Supply Chain Disruptions: A Review [R]. Working Paper, SSRN, 2012.

[6] Nelson D, Moody P E, Stegner J. The Purchasing Machine [M]. New York: Free Press, 2001.

[7] Kim Chang-Ran. Toyota aims for quake-proof supply chain [Z]. http://www.reuters.com/article/2011/09/06/us-toyota-idUSTRE7852RF20110906, 2011.

[8] Yang Z, Aydin G, Babich V, et al. Supply disruption, asymmetric information, and a backup production option [J]. Management Science, 2009, 55(2): 192 - 209.

[9] Yang Z, Aydin G, Babich V, et al. Dual-sourcing option under asymmetric information about supplier reliability [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2012, 14(2): 202 - 217.

[10] Knapp S. Usual suspects [N]. Los Angeles Daily Journal, 2004, January 12: 4 - 6.

[11] Anupindi R, Akella R. Diversification under supply uncertainty [J]. Management Science, 1993, 39(8): 944 - 963.

[12] Tang S, Kouvelis P. Supplier diversification strategies in the presence of yield uncertainty and buyer competition [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2011, 13(4): 439 - 451.

[13] Tang S, Gurnani H, Gupta D. Managing disruptions in decentralized supply chains with endogenous supply process reliability [J]. Production and Operations Management, 2014, 23(7): 1198 – 1211.
[14] Wang Y, Gilland W, Tomlin B. Mitigating supply risk: Dual sourcing or process improvement [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2010, 12(3): 489 – 510.
[15] Hu X, Gurnani H, Wang L. Managing risk of supply disruptions: Incentives for capacity restoration [J]. Production and Operations Management, 2013, 22(1): 137 – 150.
[16] Li C. Sourcing for supplier effort and competition: Design of the supply base and pricing mechanism [J]. Management Science, 2013, 59(6): 1389 – 1406.
[17] Bolton P, Dewatripont M. Contract Theory [M]. Cambridge: The MIT Press, 2005.
[18] **张　煜，汪寿阳. 不对称信息下供应商安全状态监控策略分析 [J]. 管理科学学报**, 2011, 14(5): 11 – 18.
Zhang Yu, Wang Shouyang. Analysis of supplier's security state inspection strategy under asymmetric information [J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(5): 11 – 18. (in Chinese)
[19] Chaturvedi A, Martínez-de-Albéniz V. Optimal procurement design in the presence of supply risk [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2011, 13(2): 227 – 243.
[20] Laffont J, Tirole J. Using cost observation to regulate firms [J]. Journal of Political Economy, 1986, 94: 614 – 641.
[21] **田厚平，刘长贤. 双重信息不对称下销售渠道双目标混合激励模型 [J]. 管理科学学报**, 2011, 14(3): 34 – 47.
Tian Houping, Liu Changxian. Bi-objective incentive model in distribution channel under the framework of dual information asymmetry [J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(3): 34 – 47. (in Chinese)
[22] Armstrong C S, Larcker D F, Su Che-Lin. Endogenous selection and moral hazard in compensation contracts [J]. Operations Research, 2010, 58(4): 1090 – 1106.
[23] Ha A Y. Supplier-buyer contracting: Asymmetric cost information and the cut-off level policy for buyer participation [J]. Naval Research Logistics, 2001, 48: 41 – 64.
[24] Ozer O, Raz G. Supply chain sourcing under asymmetric information [J]. Production and Operations Management, 2011, 20(1): 92 – 115.

Procurement contracts design in the presence of process improvement initiated by the supplier

HUANG He[1,2], *SHEN Xiao-yu*[1], *XU Hong-yan*[1,2]
1. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Logistics, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: Supply risk mitigation is one of the primary concerns of the manufacturer. We consider a manufacturer facing an unreliable supplier with private information on high or low initial reliability, and the initial reliability can be enhanced through process improvement initiated by the supplier. In the presence of such endogenous disruption risk, we utilize the principle-agent theory to analyze how the manufacturer designs the procurement contracts and motivates the supplier's process improvement to reduce the likelihood of supply disruption. We derive and compare the optimal decisions of both the manufacturer and the supplier under full and asymmetric information. The results show that, information asymmetry with hidden action does not necessarily decrease the supply chain's profit or generate information rent, and the manufacturer could optimize the procurement contracts under asymmetric information by balancing the trade-off between the information rent and the loss of the supply chain's profit. When the initial reliabilities and the supplier's bargaining power satisfy several conditions, the supplier will reveal the private information voluntarily and share the supply chain's profit with the manufacturer. The conclusions in this paper are valuable and significant to the procurement activities in the presence of supply risk.

Key words: supply disruption; information asymmetry; process improvement; procurement contract

附录 A: 补充定理 1 中的证明

本附录将在定理 1 情况(b) 的条件下最大化 π_{Mi}^F 的函数值. 当 $q_i < m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i \geq m/[q_i(1-\theta_i(0))]$,或 $q_i \geq m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i \geq \tilde{p}_i^i$(即 $(p_i - c)q_i - m - m\ln[p_iq_i(1-\theta_i(0))/m] \geq 0$) 时,供应商的决策为 $y_i^* = q_i$ 且 $e_i^* = \ln[p_iq_i(1-\theta_i(0))/m]$. 此时制造商将最大化自身利润 π_{Mi}^F:

$$\pi_{Mi}^F = r[1 - m/(p_iq_i)]\min(q_i,1) - cq_i - m\ln[p_iq_i(1-\theta_i(0))/m].$$

$\pi_{Mi}^F(q_i,p_i)$ 是关于 q_i 的分段函数,因此有两种情况需要讨论:

当 $q_i \geq 1$ 时,$\pi_{Mi}^F(q_i,p_i) = r[1-m/(p_iq_i)] - cq_i - m\ln[p_iq_i(1-\theta_i(0))/m]$. 此时目标函数无驻点.

当 $0 \leq q_i < 1$ 时,$\pi_{Mi}^F(q_i,p_i) = r[1-m/(p_iq_i)]q_i - cq_i - m\ln[p_iq_i(1-\theta_i(0))/m]$. 驻点为 $p_i = r$,$q_i = m/(r-c)$. 计算可知海赛阵为不定矩阵.

因此,需要比较可能的驻点和边界点来最大化制造商期望利润. 下面根据 $m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 大于或小于 1,分别讨论上述分段函数的不同区间.

(1) 当 $m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))] > 1$,即 $\theta_i(0) > c/(m+c)$ 时,分段函数 π_{Mi}^F 可分成三个讨论区间.

(1.1) $0 \leq q_i < 1$ 且 $p_i \geq m/[q_i(1-\theta_i(0))]$. 此时驻点不在定义域内. 下面考虑边界点.

(a) $q_i = 0$,此时 p_i 可为任意值,不失一般性,假设当制造商不定货时供应商不会生产也不努力,那么 $\pi_{Mi}^F(q_i,p_i) = 0$. 后面碰到 $q_i = 0$ 时同样如此,不再赘述;

(b) $p_i = m/[q_i(1-\theta_i(0))]$ 时,由 $\partial\pi_{Mi}^F/\partial q_i = 0$ 可得 $q_i = m/(r-c)$ 和 $p_i = (r-c)/(1-\theta_i(0))$.

(1.2) $1 \leq q_i < m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i \geq m/[q_i(1-\theta_i(0))]$. 此时无驻点. 下面考虑边界点:

(c) $q_i = 1$ 时,由 $\partial\pi_{Mi}^F/\partial p_i = 0$ 可得 $p_i = r$. 此时需 $\theta_i(0) < 1 - m/r$,$p_i = r$ 才在定义域内.

(d) $q_i = 1$ 且 $p_i = m/[q_i(1-\theta_i(0))]$ 时,有 $p_i = m/(1-\theta_i(0))$.

(e) $p_i = m/[q_i(1-\theta_i(0))]$ 时,由 $\partial\pi_{Mi}^F/\partial q_i = 0$ 可得 $q_i = [r(1-\theta_i(0)) - m]/c$ 和 $p_i = mc/[(1-\theta_i(0))(r(1-\theta_i(0)) - m)]$. 该 q_i 在定义域内需满足 $[r(1-\theta_i(0)) - m]/c \geq 1$.

(1.3) $q_i \geq m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i \geq \tilde{p}_i^i(q_i)$. 此时无驻点. 下面考虑边界点:

(f) $q_i = m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 时,由 $\partial\pi_{Mi}^F/\partial p_i = 0$ 可得 $p_i = rc(1-\theta_i(0))/[m\theta_i(0)]$. 可以证明当 $q_i \geq m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 时有 $\tilde{p}_i^i(q_i) \geq m/[q_i(1-\theta_i(0))]$,所以当 $p_i = rc(1-\theta_i(0))/[m\theta_i(0)]$ 在定义域内时,满足 $\theta_i(0) < 1 - m/r$.

(g) $q_i = m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i = \tilde{p}_i^i(q_i)$ 时,有 $p_i = c/\theta_i(0)$.

(h) 当 $p_i = \tilde{p}_i^i(q_i)$ 时,由 $\partial\pi_{Mi}^F/\partial q_i = 0$ 可得此时的解,设为 $q_i = \tilde{q}_i$ 且 $p_i = \tilde{p}_i$. 若该解在定义域内,则 $\tilde{q}_i \geq m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$. 再由 $rm/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i) = c\tilde{q}_i + m$ 可得 $\tilde{p}_i\tilde{q}_i < r(1-\theta_i(0))$. 又 $q_i \geq m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 时有 $p_i \geq \tilde{p}_i^i(q_i) \geq m/[q_i(1-\theta_i(0))]$,则有 $\tilde{p}_j\tilde{q}_j > m/(1-\theta_i(0))$,那么由 $m/[1-\theta_i(0)] < r(1-\theta_i(0))$ 可得此时有 $\theta_i(0) < 1 - \sqrt{m/r} < 1 - m/r$.

根据这些点存在于定义域内的条件,下面分两种子情况来比较供应商利润. 为了方便,直接用各点的标号来代替其所对应的 $\pi_{Mi}^F(q_i,p_i)$ 值. 首先构造函数 $f(t) = t - 1 - \ln t$,其中 $t > 0$. 可算得 $\mathrm{d}f/\mathrm{d}t = 1 - 1/t$ 且 $\mathrm{d}^2f/\mathrm{d}t^2 = 1/t^2 > 0$. 令 $\mathrm{d}f/\mathrm{d}t = 1 - 1/t = 0$ 可得,$f(t) \geq f_{min} = f(t=1) = 0$.

子情况 1: 当 $c/(m+c) < \theta_i(0) \leq 1 - m/r$ 时,由上述分析可知 (d) > (a),(d) > (b),(d) > (e),(c) > (f) > (g). (c) − (h) = $\{rm/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i) - m - m\ln[r/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i)]\} + \{rm/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i) - m - c\}$. 由于 $\theta_i(0) > c/(m+c)$,当(h) 在定义域内时有 $\tilde{p}_i\tilde{q}_i < r(1-\theta_i(0)) < rm/(c+m)$;又 $rm/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i) - m - m\ln[r/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i)] = mf(r/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i)) > 0$,所以 (c) > (h). (c) − (d) = $mf(r(1-\theta_i(0))/m) \geq 0$. 通过这些比较可知最优解来自(c),即 $q_i^* = 1$ 且 $p_i^* = r$.

子情况 2: 当 $\theta_i(0) > 1 - m/r$ 时,(c),(f) 和(h) 不在定义域,(g) < 0. 很容易可判断出 (d) > (a),(d) > (b),(d) > (e). 所以最优解来自(d),即 $q_i^* = 1$ 且 $p_i^* = m/(1-\theta_i(0))$.

(2) 当 $m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))] < 1$,即 $\theta_i(0) < c/(m+c)$ 时,分段函数 π_{Mi}^F 有如下三个讨论区间.

(2.1) $0 \leq q_i < m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i \geq m/[q_i(1-\theta_i(0))]$. 此时可能的解如下: (a) 驻点为 $p_i = r$,$q_i = m/(r-c)$;(b) $q_i = 0$,此时 p_i 可为任意非负值;(c) 由边界 $p_i = m/[q_i(1-\theta_i(0))]$ 和 $\partial\pi_M^F/\partial q_i = 0$ 可得 $q_i = m/(r-c)$ 和 $p_i = (r-c)/(1-\theta_i(0))$;

(2.2) $1 > q_i \geq m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 且 $p_i \geq \tilde{p}_i^i(q_i)$. 此时可能的解如下: (d) 驻点为 $p_i = r$,$q_i = m/(r-c)$;(e) $q_i = m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$,由 $\partial\pi_{Mi}^F/\partial p_i = 0$ 可得 $p_i = r$;(f) $q_i = m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$,由 $p_i = \tilde{p}_i^i(q_i)$ 可得 $p_i = c/\theta_i(0)$;(g) $p_i = \tilde{p}_i^i(q_i)$,由 $\partial\pi_{Mi}^F/\partial q_i = 0$ 可得 $q_i = m/(r-c)$,则设 $p_i = \tilde{p}_i^i(q_i = m/(r-c))$.

(2.3) $q_i \geq 1$ 且 $p_i \geq \tilde{p}_i^i(q_i)$. 此时可能的解如下: (h) $q_i = 1$ 和 $p_i = \tilde{p}_i^i(q_i = 1)$;(i) $q_i = 1$,由 $\partial\pi_{Mi}^F/\partial p_i = 0$ 可

得 $p_i = r$;(j) $p_i = \tilde{p}_i^i(q_i)$,$\partial \pi_{Mi}^F/\partial q_i = 0$,设此时的解为 $q_i = \tilde{q}_i$ 且 $p_i = \tilde{p}_i$.

根据这些点存在于定义域内的条件,下面分两种子情况来比较 $\pi_{Mi}^F(q_i,p_i)$ 的大小. 为了方便,直接用标号代替相应的 $\pi_{Mi}^F(q_i,p_i)$ 值.

子情况1: 当 $r \geqslant c/\theta_i(0)$ 时,(a),(d) 和(g) 不在定义域内. 根据分析可知(e) >(f),(i) >(h). 因为 $\theta_i(0) > c/r > 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$,所以 $r \geqslant \tilde{p}_i^i(q_i = 1)$ 一定成立,即(i) 在定义域内. 此时(i) 和(e) 中都有 $p_i = r$. 在 $p_i = r$ 上,令 $\partial \pi_{Mi}^F/\partial q_i = 0$ 可得,$q_{foc} = m/(r-c)$;又 $\partial^2 \pi_{Mi}^F/\partial {q_i}^2 > 0$,所以 q_{foc} 为极小值. 由 $r\theta_i(0) > c$ 可知 $1 > m\theta_i(0)/c[1-\theta_i(0)] > m/(r-c)$,所以 $\pi_{Mi}^F(q_i, p_i = r)$ 在 $q_i = 1$ 时的值大于 $q_i = m\theta_i(0)/[c(1-\theta_i(0))]$ 时的值,即(i) >(e). (i) -(j) $= \{rm/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i) - m - m\ln[r/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i)]\} + \{rm/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i) - m - c\}$. 当(j) 在定义域内时,$\tilde{p}_i\tilde{q}_i < rm/(c+m)$;根据函数 $f(t) = t - 1 - \ln t$ 的性质可得 $rm/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i) - m - m\ln[r/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i)] = mf(r/(\tilde{p}_i\tilde{q}_i)) > 0$,所以(i) >(j). 因为 $\theta_i(0) > c/r > 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$,所以(i) >(b).

(i) -(c) $= r - m - c - m\ln[r(1-\theta_i(0))/m] - m(r\theta_i(0) - c)/(r-c) > mf(r(1-\theta_i(0))/m) > 0$.

总结这些比较可知最优解来自(i),即 $q_i^* = 1$ 且 $p_i^* = r$.

子情况2: 当 $r < c/\theta_i(0)$ 时,(a),(c),(e) 和(f) 不在定义域内. 根据分析可知(b) >(d),(b) >(g). 若 $c/r > \theta_i(0) > 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$,则(i) >(b),(i) >(h). 如果(j) 在定义域内则很容易有(i) >(j),否则不考虑(j). 那么最优解来自(i),即 $q_i^* = 1$ 且 $p_i^* = r$. 若 $\theta_i(0) < 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$,如果(j) 在定义域内则有(j) <(i) < 0,否则不考虑(j). 又(i) <(b),(h) <(b). 所以最优解来自(b),即 $q_i^* = 0$ 且 p_i^* 可为任意非负值.

设情况(b) 中 π_{Mi}^F 的最优解为 q_i^* 和 p_i^*. 综合考虑以上两种情况,可以总结出如下结论: 若 $0 < \theta_i(0) < 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$,则最优解为 $q_i^* = 0$ 且 p_i^* 可为任意非负值;若 $(r-m)/r > \theta_i(0) \geqslant 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$,则最优解为 $q_i^* = 1$ 且 $p_i^* = r$;若 $\theta_i(0) \geqslant (r-m)/r$,则最优解为 $q_i^* = 1$ 且 $p_i^* = m/(1-\theta_i(0))$. 证毕.

附录 B: 补充定理 2 中的证明

本附录将在定理2情况(a) 的条件下最大化 $\pi_{M,L}^A$ 的函数值. 当 $q_L < q_L'$ 且 $p_L \geqslant m/[q_L(1-\theta_H(0))]$,或 $q_L \geqslant q_L'$ 且 $p_L \geqslant \tilde{p}_L^L(q_L)$ 时,有 $y_H^{L^*} = y_L^{L^*} = q_L$、$e_H^{L^*} = \ln[p_L q_L(1-\theta_H(0))/m]$ 且 $e_L^{L^*} = \ln[p_L q_L(1-\theta_L(0))/m]$. 此时,$\pi_{M,L}^A(q_L,p_L) = (1-\alpha)\{r[1 - m/(p_L q_L)]\min(q_L,1) - cq_L - m\ln[p_L q_L(1-l)/m]\} - \alpha\pi_H^A$,其中 $\pi_H^A = 1(q_L^A > 0)m\ln[(1-l)/(1-h)]$. $\mathbf{1}(\cdot)$ 为示性函数,用以确保当低类型供应商无订单时高类型供应商不会有正的利润. $\pi_{M,L}^A$ 是关于 q_L 的分段函数,因而要分情况讨论. 已知 $\theta_L(0) = l$,$\theta_H(0) = h$.

当 $q_L \geqslant 1$ 时,$\pi_{M,L}^A(q_L,p_L) = (1-\alpha)\{r[1 - m/(p_L q_L)] - cq_L - m\ln[p_L q_L(1-l)/m]\} - \alpha\pi_H^A$. 通过计算可知该目标函数无驻点.

当 $0 \leqslant q_L < 1$ 时,$\pi_{M,L}^A(q_L,p_L) = (1-\alpha)\{r[1 - m/(p_L q_L)]q_L - cq_L - m\ln[p_L q_L(1-l)/m]\} - \alpha\pi_H^A$. 驻点为 $p_L = r$,$q_L = m/(r-c)$. 通过计算可知海赛阵为不定矩阵.

因此,需要比较可能的驻点和边界点来最大化 $\pi_{M,L}^A(q_L,p_L)$. 下面根据 q_L' 的值大于或小于1,分别讨论分段函数 $\pi_{M,L}^A$ 的不同区间.

(1) $q_L' < 1$,即 $l < 1-(1-h)\exp[(mh - c(1-h))/(m(1-h))]$. 此时分段函数 $\pi_{M,L}^A$ 可分成三个区间来讨论.

(1.1) $q_L \geqslant 1$ 且 $p_L \geqslant \tilde{p}_L^L(q_L)$. 此时无驻点,下面考虑边界点:

(a) $q_L = 1$,$p_L = \tilde{p}_L^L(q_L = 1)$.

(b) $q_L = 1$,由 $\partial \pi_{M,L}^A/\partial p_L = 0$ 可得 $p_L = r$. 此时 $l \geqslant 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$,才保证 $p_L = r$ 在定义域内. 由于 $q_L \geqslant 1 > q_L'$,此时 $\tilde{p}_L^L(q_L) > m/(q_L(1-h))$,所以 $h < 1 - m/r$ 也成立.

(c) $p_L = \tilde{p}_L^L$,$\partial \pi_{M,L}^A/\partial q_L = 0$. 联立方程组所得解设为 $q_L = \tilde{q}_L$ 且 $p_L = \tilde{p}_L$,且需 $\tilde{q}_L \geqslant 1$.

(1.2) $q_L' \leqslant q_L < 1$ 且 $p_L \geqslant \tilde{p}_L^L(q_L)$.

(d) $q_L = q_L'$,$p_L = \tilde{p}_L^L(q_L = q_L') = p_L'$.

(e) $q_L = q_L'$,由 $\partial \pi_{M,L}^A/\partial p_L = 0$ 可得 $p_L = r$. 需 $r \geqslant \tilde{p}_L^L(q_L') = p_L'$ 才有 $p_L = r$ 在定义域内.

(f) $p_L = \tilde{p}_L^L$,$\partial \pi_{M,L}^A/\partial q_L = 0$ 可得 $q_L = m/(r-c)$,$p_L = \tilde{p}_L^L(q_L = m/(r-c))$. 此时需 $m/(r-c) \geqslant q_L'$ 才能保证 $q_L = m/(r-c)$ 在定义域内.

(g) 唯一的驻点 $q_L = m/(r-c)$,$p_L = r$. 当 $m/(r-c) \geqslant q_L'$ 且 $r \geqslant \tilde{p}_L^L(m/(r-c))$ 时驻点在定义域内. 可以证明当 $q_L > q_L'$ 时 $\tilde{p}_L^L(q_L) > m/(q_L(1-h)) > m/(q_L(1-l))$,所以由 $r \geqslant \tilde{p}_L^L(m/(r-c))$ 可推出 $l < c/r$. 而 $r \geqslant \tilde{p}_L^L(m/(r-c))$ 本身等价于 $l > c/r$. 产生矛盾,这说明驻点不在该区间内.

(1.3) $0 \leqslant q_L < q_L'$ 且 $p_L \geqslant m/[q_L(1-h)]$.

(h) $q_L = 0$,此时 p_L 可为任意非负值.

(i) $p_L = m/[q_L(1-h)]$，由 $\partial\pi^A_{M,L}/\partial q_L = 0$ 可得 $q_L = m/(r-c)$，$p_L = (r-c)/(1-h)$. 此时需 $m/(r-c) < q_L'$ 才能保证 $q_L = m/(r-c)$ 在定义域内.

(j) 驻点 $q_L = m/(r-c)$，$p_L = r$. 此时需 $m/(r-c) < q_L'$ 且 $h < c/r$ 才使驻点在定义域内.

根据这些点是否存在于定义域内，下面分两种子情况比较这些点所对应的 $\pi^A_{M,L}$ 的值. 为了方便，直接用标号代替相应的 $\pi^A_{M,L}$ 值.

子情况 1：若 $l \geqslant 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$，即(b)在定义域内，则(b)−(c) $= (1-\alpha)[mf(r/(\tilde p_L \tilde q_L)) + c(\tilde q_L - 1)] \geqslant 0$，这是因为 $\tilde q_L \geqslant 1$ 是(c)在定义域内的条件，而当 $t>0$ 时有 $f(t) = t-1-\ln t \geqslant 0$. (b)−(a) $= (1-\alpha)mf(r/\tilde p^L_L(1)) \geqslant 0$.

(b)−(d) $= (1-\alpha)\{(r-c)(1-q_L') + m(r/p_L' - 1) - m\ln[r/(p_L' q_L')]\}$. 所以

若 $c/r > h > l \geqslant 1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$，由 $p_L' q_L' = m/(1-h)$ 可得

(b)−(d) $= (1-\alpha)\{r-m-c-m\ln[r(1-h)/m] + (c-rh)m/(p_L'(1-h))\} > 0$;

若 $1>h>c/r$，因为 $q_L' < 1$ 是(d)在定义域内的条件，所以(b)−(d) $= (1-\alpha)\{r-m-c-m\ln[r(1-h)/m] + (c-rh)q_L'\} > (1-\alpha)mf(r(1-h)/m) > 0$.

(b)−(e) $= (1-\alpha)\{(r-c)(1-q_L') + m\ln(q_L')\}$. 定义函数 $F(x) = (r-c)(1-x)+m\ln x, x>0$. 通过计算可知 $F_{\max} = F_{foc}(x=m/(r-c)) > F(x=1) = 0$. 所以若 $m/(r-c) < q_L' < 1$，则 $F(x=q_L') > 0$. 已知 $q_L' < 1$ 一定成立. 而 $m/(r-c) < q_L'$ 等价于 $l > 1-(1-h)\exp[(rh-c)/((r-c)(1-h))]$. 因为 $q_L' < r$ 是(e)在定义域内的条件，该条件等价于 $l > 1-(1-h)\exp[(rh-c)/(r(1-h))]$；且 $l = 1-(1-h)\exp[(rh-c)/(r(1-h))]$ 与 $h=l$ 相交于 $h=l=c/r$，那么当 $h>l$ 时，$l > 1-(1-h)\exp[(rh-c)/(r(1-h))]$ 满足 $h>l>c/r$. 此时 $l > 1-(1-h)\exp[(rh-c)/(r(1-h))] > 1-(1-h)\exp[(rh-c)/(r(1-h))]$，即 $m/(r-c) < q_L'$ 成立. 所以(b)>(e). (d)−(f) $= (1-\alpha)mf((r-c)q_L'/m) > 0$. $h<c/r$ 时(h)>(i)成立；$h>c/r$ 时(d)−(i) $= (1-\alpha)(rh-c)f(q_L' - m/(r-c)) \geqslant 0$，因为(i)中 $m/(r-c) < q_L'$ 成立. 很显然(h)>(j). 此外(g)不在定义域内. (b)−(h) $= (1-\alpha)\{r-m-c-m\ln[r(1-l)/m]\} - \alpha m\ln[(1-l)/(1-h)]$. 若 $l > l_2(h)$($l_2(h)$ 定义见表2)，则有(b)>(h). 通过这些比较可知最优解来自(b)，即 $q_L^* = 1$ 且 $p_L^* = r$；若 $l<l_2(h)$，则(b)<(h)，即最优解来自(h)，即 $q_L^* = 0$，此时 p_L^* 可为任意非负值.

子情况 2：若 $0<l<1-(m/r)\exp[(r-m-c)/m]$，则(h)>(b). 由上面的证明可知，(g)不在定义域内，而其余所有的点所对应的 $\pi^A_{M,L}(q_L,p_L)$ 都小于(b). 因此，最优解来自(h)，即 $q_L^*=0$，此时 p_L^* 可为任意非负值.

(2) $q_L' > 1$，即 $l > 1-(1-h)\exp[(mh-c(1-h))/(m(1-h))]$. 此时 $\pi^A_{M,L}$ 可分成三个讨论区间.

(2.1) $q_L \geqslant q_L'$ 且 $p_L \geqslant \tilde p^L_L(q_L)$. 此时可能的解如下：(a) $q_L = q_L'$，$p_L = \tilde p^L_L(q_L') = p_L'$；(b) $q_L = q_L'$，由 $\partial\pi^A_{M,L}/\partial p_L = 0$ 可得 $p_L = r/q_L'$；(c) $p_L = \tilde p^L_L(q_L)$，$\partial\pi^A_{M,L}/\partial q_L = 0$. 联立方程组所得的唯一解设为 $q_L = \tilde q_L$ 且 $p_L = \tilde p_L$；

(2.2) $1 \leqslant q_L < q_L'$ 且 $p_L \geqslant m/[q_L(1-h)]$. 此时可能的解如下：(d) $q_L=1$，$p_L = m/(1-h)$；(e) $q_L=1$，由 $\partial\pi^A_{M,L}/\partial p_L = 0$ 可得 $p_L = r$；(f) $p_L = m/[q_L(1-h)]$，$\partial\pi^A_{M,L}/\partial q_L = 0$. 联立方程组可得 $q_L = (r(1-h)-m)/c$，$p_L = mc/[(r(1-h)-m)(1-h)]$；

(2.3) $0 \leqslant q_L < 1$ 且 $p_L \geqslant m/[q_L(1-h)]$. 此时可能的解如下：(g) $q_L=0$，此时 p_L 可为非负任意值；(h) $p_L = m/[q_L(1-h)]$，$\partial\pi^A_{M,L}/\partial q_L = 0$. 联立方程组可得 $q_L = m/(r-c)$，$p_L = (r-c)/(1-h)$；(i) 唯一的驻点 $q_L = m/(r-c)$，$p_L = r$.

下面比较这些点所对应的 $\pi^A_{M,L}(q_L,p_L)$ 的大小. 为了方便，直接用标号代替相应的 $\pi^A_{M,L}(q_L,p_L)$ 值. 根据这些点是否存在于定义域内，分两种子情况.

子情况 1：当 $h > 1-m/r$ 时，(b)和(e)不在定义域内. (c)同样不在定义域中. 这是因为 $\tilde q_L \geqslant q_L'$，所以 $\tilde p_L \geqslant \tilde p^L_L(\tilde q_L) > m/[\tilde q_L(1-h)]$，则 $\tilde p_L \tilde q_L = rm/(c\tilde q_L + m) > m/(1-h)$，即 $\tilde q_L < (r(1-h)-m)/c$. 又 $\tilde q_L > 1$，所以 $1 < (r(1-h)-m)/c$，则 $h < (r-m-c)/r < 1-m/r$. (d)−(a) $= (1-\alpha)(q_L'-1)c > 0$. (d)−(f) $= (1-\alpha)[r(1-h)-m-c] > 0$，这是因为(f)中 $1 < (r(1-h)-m)/c < q_L'$. 当 $h>c/r$ 时，(d)−(h) $= (1-\alpha)(rh-c)[1-m/(r-c)] > 0$；当 $h<c/r$ 时，很显然(g)>(h). (d)−(g) $= (1-\alpha)\{rh-c-m\ln[(1-l)/(1-h)]\} - \alpha m\ln[(1-l)/(1-h)]$. 当 $l > l_3(h)$ 时($l_3(h)$ 的定义见表2)，(d)>(g)，则最优解来自(d)，即 $q_L^*=1$，$p_L^* = m/(1-h)$；当 $l < l_3(h)$ 时，(d)<(g)，则最优解来自(g)，即 $q_L^*=0$，此时 p_L^* 可为任意值.

子情况 2：当 $h < 1-m/r$ 时，本文已经证明过(d)>(a)，(d)>(f). 当 $h>c/r$ 时，(d)>(h)；当 $h<c/r$ 时，(g)>(h). (e)−(b) $= (1-\alpha)(q_L'-1)c > 0$，因为 $q_L' > 1$. (e)−(c) $= (1-\alpha)[c(\tilde q_L - 1) + mf(r/(\tilde q_L \tilde p_L))] > 0$，其中 $f(t) = t-1-\ln t > 0$，$\tilde q_L > q_L' > 1$. (e)−(d) $= (1-\alpha)mf(r(1-h)/m) > 0$. (g)>(i)是显而易见的. (e)−(g) $= (1-\alpha)[r-m-c-m\ln[r(1-l)/m]] - \alpha m\ln[(1-l)/(1-h)]$. 若 $l > l_2(h)$($l_2(h)$ 定义见表2)，则

有(e) > (g). 此时可知最优解来自(e)，即 $q_L^* = 1$ 且 $p_L^* = r$; 若 $l < l_2(h)$，则(e) < (g)，那么最优解来自(g)，即 $q_L^* = 0$，此时 p_L^* 可为任意非负值.

综合考虑 $q_L' > 1$ 和 $q_L' < 1$ 两种情形可知，当 $1 - m/r > h > l \geq 1 - (m/r)\exp[(r-m-c)/m]$ 时，若 $l > l_2(h)$，则 $q_L^* = 1$ 且 $p_L^* = r$; 若 $l < l_2(h)$，则 $q_L^* = 0$，p_L^* 可为任意非负值. 当 $1 > h > 1 - m/r$ 时，若 $l > l_3(h)$，则 $q_L^* = 1$，$p_L^* = m/(1-h)$; 若 $l < l_3(h)$，则 $q_L^* = 0$，p_L^* 可为任意非负值. 若 $0 < l < 1 - (m/r)\exp[(r-m-c)/m]$，则 $q_L^* = 0$，p_L^* 可为任意非负值.　　证毕.

附录 C: 表3的简单推导过程

由式(11)和引理1可得表3中的信息租金 π_H^A. 由定理1和定理2可分别算出制造商在对称信息与不对称信息下的期望利润 π_M^F 和 π_M^A(见下表4)，由此可得表3中制造商的信息价值 $\Delta_M = \pi_M^F - \pi_M^A$. 信息不对称与不对称下的供应链的利润分别为 $\pi_W^F = \pi_M^F$ 和 $\pi_W^A = \pi_M^A + \alpha\pi_H^A$，由此可得表3中的供应链损失 $\Delta_W = \pi_W^F - \pi_W^A$.

表4　制造商在对称信息与不对称信息下的期望利润

Table 4 Expected profit for the manufacturer under both full and asymmetric information

区间		π_M^F	π_M^A
C_1	$1 > h > l \geq l_1$, $l < l_3(h)$	$\alpha(rh-c) + (1-\alpha)(rl-c)$	$\alpha(rh-c)$
C_2	$1 > h \geq l_1 > l > (l_0)^+$, $l < l_3(h)$;	$\alpha(rh-c) + (1-\alpha)(r-m-c-me_L')$	$\alpha(rh-c)$
	$l_1 > h > l > (l_0)^+$, $l < l_2(h)$	$\alpha(r-m-c-me_H') + (1-\alpha)(r-m-c-me_L')$	$\alpha(r-m-c-me_H')$
C_3	$1 > h > l \geq l_1$, $l \geq l_3(h)$	$\alpha(rh-c) + (1-\alpha)(rl-c)$	$rh - c - \tilde{\pi}_H$
C_4	$1 > h \geq l_1 > l \geq l_3(h)$	$\alpha(rh-c) + (1-\alpha)(r-m-c-me_L')$	$rh - c - \tilde{\pi}_H$
C_5	$l_1 > h > (l_0)^+$, $h > l \geq l_2(h)$	$\alpha(r-m-c-me_H') + (1-\alpha)(r-m-c-me_L')$	$\alpha(r-m-c-me_H' - \tilde{\pi}_H) + (1-\alpha)(r-m-c-me_L')$
C_0	$1 > h > l_1$, $(l_0)^+ \geq l > 0$	$\alpha(rh-c)$	$\alpha(rh-c)$
	$l_1 > h > (l_0)^+ \geq l > 0$	$\alpha(r-m-c-me_H')$	$\alpha(r-m-c-me_H')$
	$(l_0)^+ \geq h > l > 0$	0	0