供应商采取成本减少努力时垂直需求信息共享

吴军建[1], 王海燕[2]

(1. 南昌大学经济管理学院, 江西 南昌 330031;

2. 东南大学经济管理学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 针对由多个竞争供应商和两个竞争零售商构成的供应链, 供应商存在供应不确定, 零售商拥有需求信息, 供应商通过决策成本减少努力水平和批发价格来响应零售商需求信息. 建立了一个多阶段博弈模型研究零售商垂直需求信息共享问题. 结果表明, 当努力成本系数充分小时, 完全信息共享是一个均衡策略, 即两个零售商会免费地与供应商共享需求信息. 当努力成本系数充分大时, 两个零售商在向供应商收取一定的费用后会与供应商共享需求信息. 此外, 在一定条件下, 预测误差越小、努力成本系数越大、供应不确定程度越低、供应商数量越少、供应商的最优支付费用越多.

关键词: 供应不确定; 成本减少努力; 需求信息共享; 竞争

中图分类号: C934 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000−5781(2019)04−0536−19

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.04.009

Vertical demand information sharing when suppliers exert cost reduction efforts

Wu Junjian[1], **Wang Haiyan**[2]

(1. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: A supply chain composed of multiple competitive suppliers and two competitive retailers is studied, where suppliers' supply are uncertain and retailers have private demand information. The suppliers choose cost reduction efforts and the wholesale price to respond to the retailers' demand information. A multi-stage game model is set to investigate the retailers' vertical demand information sharing. The results show that when the cost coefficient of effort is small enough, complete information sharing is the equilibrium strategy, that is, the two retailers are willing to share information with the supplies for free. When the cost coefficient of effort is large enough, the two retailers are willing to share information with suppliers after charging a fee. Moreover, under some conditions, the smaller the forecast error, or the larger the cost coefficient of effort, or the lower the supply uncertainty, or the smaller the number of suppliers, the large the suppliers' optimal payment.

Key words: supply uncertainty; cost reduction effort; demand information sharing; competition

1 引 言

在过去的几十年, 企业对收集和分析日常销售数据等相关信息技术进行了大量的投资. 截止2017年, 全

收稿日期: 2018−01−28; 修订日期: 2018−09−03.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(71531004); 国家自然科学基金资助项目(71901114); 江西省高校人文社会科学研究项目(GL18226).

球信息技术的投资达到了3.5万美元[1]. 零售商利用信息技术收集数据预测未来需求, 并且与上游成员共享需求预测信息以有效地发挥这些需求预测信息的优势[2]. 例如, 在智能手机行业, Apple Inc.和Huawei Inc.根据其销售渠道数据来预测需求, 并且他们的供应商Japan Display Inc. (JDI), South Korea's LG Display Co. (LG)和Sharp Corp.等可以通过向第三方数据服务商Statista支付一定的费用来购买他们的需求预测信息. 在疫苗供应行业, Sanofi Pasteur, Seqirus, GlaxoSmithKline 等向医疗服务商提供流感疫苗[3]. 咨询公司DeHart Consulting 指出, 企业应该基于未来需求情况制定成本减少规划策略[4]. 基于以上供应链运营实际背景, 本文立足多个供应商和两个零售商组成的供应链, 考虑供应商存在供应不确定风险和信息泄露行为, 研究供应商同时决策批发价格和生产成本减少努力水平时零售商垂直需求信息共享问题.

与本文相关的一个研究主题是存在信息泄露风险的供应链信息共享问题, 这是供应链管理研究中的热门话题. Li[5]和Zhang[6]首次在一个制造商和多个零售商构成的供应链中研究了信息泄露对零售商垂直信息共享决策的影响. Qian 等[7]在供应商具有产量约束和信息泄露风险下研究零售商垂直信息共享问题, 发现适当的调整订单分配比例能够使得竞争的零售商共享需求信息. Jain 等[8]假设存在信息泄露风险且供应商针对两个零售商制定不同的价格情形下, 研究了零售商垂直信息共享问题. Anand 等[9]、Kong 等[10]、Shamir[11,12]、Tian 等[13]基于信号博弈从不同的角度探讨了供应商信息泄露行为对零售商信息共享决策的影响. 此外, 张菊亮等[14]研究了供应商和分销商均具有部分需求信息的垂直需求信息共享问题. Jiang 等[15]在不同的供应链结构下研究了垂直和水平需求信息共享激励问题. 张子辰等[16]、李波等[17]在双渠道供应链环境下研究了信息共享价值. 孙嘉轶等[18]在闭环供应链环境下分析了需求扰动对供应链协调策略的影响. 高举红等[19]分析了需求不确定和竞争环境下的闭环供应链的定价策略. Tang 等[20] 研究了双源公司与零售商网络之间需求信息共享价值问题. Ha 等[21]在两条竞争供应链中研究供应商采取成本减少努力时制造商的需求信息共享激励问题, 得出在一定条件下, 制造商会免费地向供应商披露其需求预测信息. 但是, Ha 等[21]没有考虑供应商的供应不确定对零售商垂直信息共享决策的影响, 这是本文将关注的一个重要方面.

与本文相关的另一个研究主题是供应链中成本减少努力. 在完全信息下, Gupta 等[22]研究了由两个制造商和两个零售商组成的供应链中制造商成本减少投资行为. Gilbert 等[23]研究了批发价格承诺情形下的研发成本减少投资问题. Heese 等[24]在通用组件和成本减少努力情形下研究了产品线设计问题. Gilbert 等[25]详细分析了成本减少契机下竞争原始设备制造商的外包策略问题. Iida[26]研究了供应链环境下的成本减少努力合作投资问题. Bernstein 等[27]在装配网络环境下分析了每个周期的需求对企业最优成本减少投资的影响. 黄河等[28]分析了供应中断风险和生产成本不确定环境下供应链动态投资决策问题. Kim 等[29]研究了组件生产成本信息不对称下的成本减少投资问题. 上述文献主要集中在完全信息条件下研究成本减少投资问题. 在不完全信息条件下, 供应不确定风险和需求信息泄露风险下供应商生产成本减少努力没有涉及, 这是本文将关注的另一个重要方面.

本文将在现有研究的基础上联合考虑以下三个方面因素: 1) 研究对象是由多个存在供应不确定风险的供应商和两个拥有需求预测信息的零售商组成的供应链网络, 该供应链网络比单一供应商和单一零售商组成的供应链下零售商垂直需求信息共享问题更加复杂, 需要考虑供应商泄露需求信息以及供应商竞争对零售商垂直需求信息共享决策的影响. 2) 考虑供应商数量、供应不确定程度、努力成本系数和需求预测误差等参数对供应商和零售商最优决策的影响. 3) 假设供应商之间存在着Bertrand竞争和零售商之间存在着Cournot竞争.

基于供应链运营实践, 本文将通过建立三阶段博弈模型研究两个竞争零售商的垂直需求信息共享问题, 具体研究内容包括: 1) 不同垂直信息共享策略下供应商和零售商的最优决策, 以及需求预测误差、成本努力系数、供应不确定程度、供应商数量等参数对最优决策的影响. 2) 两个零售商均愿意与供应商共享需求信息的条件. 3) 需求预测误差、成本努力系数、供应不确定程度、供应商数量等参数对供应商最优单边支付费用的影响.

2 假设与问题描述

在n个供应商和两个零售商构成的供应链中, 零售商i, i=1, 2, 拥有市场需求预测信息, 零售商i决策是否向其供应商共享这一需求预测信息. 供应商k, k=1, 2,$\ldots$, n, 的供应过程是不确定的, 供应商k同时决策批发价格和生产成本减少努力水平. 假设供应不确定和需求不确定是相互独立的.

假设n个供应商是同质的, 即n个供应商的供应不确定过程和成本结构是相同的[30,31], 供应商的供应不确定过程是一类随机比例产出[32]. 当零售商i向供应商k的订货量为q_{ik}时, 零售商i最终接收到的产品量为$Q_{ik}=y_kq_{ik}$, 其中随机变量y_k表示供应不确定因子且y_k在(0, 1]上服从期望为μ, 方差为σ_y^2的某分布. 类似于文献[30], 令$\delta_y=\dfrac{\sigma_y}{\mu}$表示供应不确定程度, δ_y值越大, 供应不确定程度越高. 供应商k的成本由单位目标产量生产成本c_1和单位运输成本c_2两部分构成, 总成本为$cy_kq_{ik}=c_1q_{ik}+c_2y_kq_{ik}$, 相应的期望边际成本为$c=\dfrac{c_1}{\mu}+c_2$. 供应商$k$实行生产成本减少努力的成本结构为$\dfrac{1}{2}\gamma e_k^2$, 其中$e_k$表示成本减少努力水平, γ表示努力成本系数, γ的值越大表示实行成本减少需要付出更高的努力成本[21].

假设Cournot竞争下, 零售商i的逆向需求函数为如下形式[6,21]

$$P=a+\theta-(Q_i+Q_j)\,, \tag{1}$$

其中 P是产品的市场清空价格, Q_i和Q_j, j=3-i, i=1, 2, 分别表示零售商i和零售商j在同一市场的产品销售总量. 参数a表示潜在的市场规模, θ是表示不确定需求的随机变量, 其期望为0, 方差为σ_θ^2[6,21].

记零售商i和零售商j对θ的预测信息分别为X_i和X_j, 对于X_i和X_j作如下假设[6,21]:

1) X_i是θ的无偏估计, 即$\mathrm{E}[X_i|\theta]=\theta$.

2) X_i和X_j是关于θ条件独立的, 且$\mathrm{E}[\theta|X_i,\ X_j]=\alpha_0+\alpha_iX_i+\alpha_jX_j$, 其中$\alpha_0$, α_i 和α_j是常数.

3) X_i和X_j是同分布的.

基于以上假设, 有

$$\mathrm{E}\left[\theta|X_i\right]=\mathrm{E}\left[X_j|X_i\right]=\frac{1}{1+\varepsilon}X_i,$$

$$\mathrm{E}\left[\theta|X_i,\ X_j\right]=\frac{1}{2+\varepsilon}\left(X_i+X_j\right),$$

$$\mathrm{E}\left[X_iX_j\right]=\sigma_\theta^2,$$

$$\mathrm{E}\left[X_i^2\right]=\sigma_\theta^2\left(1+\varepsilon\right),$$

其中$\varepsilon=\dfrac{\mathrm{E}\left[\mathrm{Var}\left[X_i|\theta\right]\right]}{\sigma_\theta^2}$表示零售商$i$ 对θ的预测误差, ε越小表示对θ的预测越准确.

供应商和零售商的决策顺序如下:

1) 供应商k决策用于购买零售商i的需求预测信息X_i的费用m_k. 零售商i决策是否接受m_k, 若接受, 则零售商i在获取到需求预测信息X_i后会真实地向所有供应商k披露X_i. (零售商与部分供应商共享需求信息的情形见附录A的分析).

2) 供应商k同时决策批发价格w_k和生产成本减少努力水平e_k.

3) 零售商i决策向每个供应商k的订货量q_{ik}. 零售商i向每个供应商k采购的固定成本为f, 并且只对实际接收到的产品支付w_k.

4) 供应商生产并将产品运输给零售商.

5) 供应和需求不确定实现.

上述决策过程是一个三阶段的博弈问题, 分别是零售商垂直需求信息共享博弈、供应商批发价格和成本减少努力水平博弈以及零售商订货量博弈.

本文所用到的变量、参数和符号归纳如下表1所示.

表 1 变量、参数和符号

Table 1 Variables, parameters and symbols

变量	描述
w_k, e_k, q_{ik}	供应商k的批发价格、成本减少努力水平和零售商i向供应商k的订货量
π_{s_k}, π_{r_i}	供应商k、零售商i的利润
$\bar{w}_k, \bar{e}_k, \bar{q}_{ik}$	没有需求不确定时, 供应商k的均衡批发价格和成本减少努力水平、零售商i的均衡订货量
$w_k^{Z_iZ_j*}, e_k^{Z_iZ_j*}$	子博弈$(Z_i,\ Z_j)$下, 供应商k的均衡批发价格以及成本减少努力水平
$\xi_{ki}^{Z_iZ_j}, \zeta_{ki}^{Z_iZ_j}$	子博弈$(Z_i,\ Z_j)$下, $w_k^{Z_iZ_j*}$和$e_k^{Z_iZ_j*}$ 对需求信号X_i的敏感系数
$q_{ik}^{Z_iZ_j*}$	子博弈$(Z_i,\ Z_j)$下, 零售商i向供应商k的均衡订货量
$f_{iki}^{Z_iZ_j}, f_{ikj}^{Z_iZ_j}$	子博弈$(Z_i,\ Z_j)$下, $q_{ik}^{Z_iZ_j*}$对需求信号X_i和X_j的敏感系数
$\bar{\Pi}_{s_k}, \bar{\Pi}_{r_i}$	没有需求不确定时, 供应商k、零售商i的最优期望利润
$\Pi_{s_k}^{Z_iZ_j*}, \Pi_{r_i}^{Z_iZ_j*}, \Pi_{sc}^{Z_iZ_j*}$	子博弈$(Z_i,\ Z_j)$下, 供应商k、零售商i以及整个供应链的最优期望利润
m^*	最优单边支付费用
参数	
a	潜在市场需求规模
n	供应商的数量
θ	未来市场需求不确定因子且$\theta \sim N\left(0,\ \sigma_\theta^2\right)$
σ_θ^2	θ的方差且$0 < \sigma_\theta^2 < \infty$
X_i	零售商i的需求预测信息
y_k	供应商k的供应不确定因子且y_k在(0, 1]上服从某分布
$\mu,\ \sigma_y^2$	y_k的期望和方差
δ_y	供应不确定程度$\delta_y = \dfrac{\sigma_y}{\mu}$且$0 < \delta_y < \infty$
ε	需求预测误差且$0 < \varepsilon < \infty$
c_1	供应商k的单位生产成本
c_2	供应商k的单位配送成本
c	供应商k的期望边际成本且$c = \dfrac{c_1}{\mu} + c_2$
γ	供应商k的努力成本系数且$0 < \gamma < \infty$
f	零售商i的固定启动成本
$\Psi_1,\ \Psi_2,\ \Psi_3,\ \Psi_4,\ \Phi_1,\ \Phi_2,\ \Phi_3,\ \Phi_4$	临界条件
$\gamma_1,\ \gamma_2,\ \gamma_3,\ \varepsilon_1$	阈值
符号	
s_k, r_i, r_j	供应商k、零售商i和零售商j
Z_i=S, Z_i=N	零售商i与供应商共享需求信息、零售商i不与供应商共享需求信息

3 供应商和零售商的最优决策以及相应的期望利润

零售商i, i=1, 2, 有两种垂直信息共享策略选择: 共享(Z_i=S)和不共享(Z_i=N). 因此, 两个零售商存在四种垂直需求信息共享策略组合: (S, S), (N, N), (S, N)和(N, S). 策略(S, N)和(N, S)是对称的, 下面采取逆向归纳只对(S, S), (N, N)和(S, N)策略下相应的子博弈进行求解, 即求解供应商k, k=1, 2,$\dots$, n, 的最优批发价格w_k和生产成本减少努力水平e_k, 以及零售商i的最优订货量q_{ik}(本文主要结果的证明见附录B).

3.1 两个零售商均与供应商共享需求信息

当两个零售商均与供应商共享需求信息时, 即策略(S, S). 供应商k在X_1和X_2下同时决策w_k和e_k. 供

应商k的最优批发价格$w_k^{\mathrm{SS}*}$包含需求预测信息X_1和X_2. 两个零售商均能通过供应商k披露出来的批发价格$w_k^{\mathrm{SS}*}$推断出彼此的需求预测信息[6]. 因此, 两个零售商均在X_1和X_2下决策q_{ik}.

零售商i, i=1, 2, 在X_1和X_2下的优化问题为

$$\underset{q_{ik}}{\mathrm{Max}}\,\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]=\mathrm{E}\left\{P\sum_{k=1}^{n}y_kq_{ik}-\sum_{k=1}^{n}w_ky_kq_{ik}-nf|X_1,\ X_2\right\},\tag{2}$$

其中 $P=a+\theta-\sum_{l=1}^{2}\sum_{k=1}^{n}y_kq_{lk}$表示产品的销售价格, $P\sum_{k=1}^{n}y_kq_{ik}$表示零售商i的总收益, $\sum_{k=1}^{n}w_ky_kq_{ik}$ 表示零售商i需要支付给所有供应商的总采购成本, nf表示向所有供应商采购所需付出的总启动成本. π_{r_i}表示零售商i的利润, $\mathrm{E}[\pi_{r_i}|X_1,X_2]$ 表示零售商i在X_1和X_2下的条件期望利润.

供应商k, k=1, 2,..., n, 在X_1和X_2下的优化问题为

$$\underset{w_k,e_k}{\mathrm{Max}}\,\mathrm{E}\left[\pi_{s_k}|X_1,X_2\right]=\mathrm{E}\left\{\left[\left(w_k-c\right)y_k+e_k\right]\left(q_{1k}+q_{2k}\right)-\frac{1}{2}\gamma e_k^2|X_1,\ X_2\right\},\tag{3}$$

其中 π_{s_k}表示供应商k的利润, $\mathrm{E}\left[\pi_{s_k}|X_1,X_2\right]$表示供应商$k$在$X_1$和$X_2$下的条件期望利润.

引理 1 在两个零售商均与供应商共享需求信息情况下, 有以下结论:

1) 供应商k的最优批发价格和成本减少努力水平分别为

$$w_k^{\mathrm{SS}*}=\bar{w}_k+\sum_{i=1}^{2}\xi_{ki}^{\mathrm{SS}}X_i,\tag{4}$$

$$e_k^{\mathrm{SS}*}=\bar{e}_k+\sum_{i=1}^{2}\zeta_{ki}^{\mathrm{SS}}X_i,\tag{5}$$

其中 $\bar{w}_k=\dfrac{\left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)-2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}a+3\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]c}{R}$, $\xi_{ki}^{\mathrm{SS}}=\dfrac{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)}{(2+\varepsilon)R}-\dfrac{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]}{(2+\varepsilon)R}$, $\bar{e}_k=\dfrac{2\mu\left[\delta_y^2+(n-1)\right](a-c)}{R}$, $R=3\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]-2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]$, $\zeta_{ki}^{\mathrm{SS}}=\dfrac{2\mu\left[\delta_y^2+(n-1)\right]}{(2+\varepsilon)R}$.

2) 零售商i的最优订货量为

$$q_{ik}^{\mathrm{SS}*}=\bar{q}_{ik}+f_{iki}^{\mathrm{SS}}X_i+f_{ikj}^{\mathrm{SS}}X_j,\tag{6}$$

其中 $\bar{q}_{ik}=\dfrac{\gamma\mu\left[\delta_y^2+(n-1)\right](a-c)}{R}$, $f_{iki}^{\mathrm{SS}}=f_{ikj}^{\mathrm{SS}}=\dfrac{\gamma\mu\left[\delta_y^2+(n-1)\right]}{(2+\varepsilon)R}$.

引理1中的系数ξ_{ki}^{SS}和ζ_{ki}^{SS}分别表示在策略(S, S)下供应商k的最优决策对X_i的敏感系数. 系数f_{iki}^{SS}和f_{ikj}^{SS}分别表示零售商i的最优决策对X_i和X_j的敏感系数. $\bar{w}_k$和$\bar{e}_k$ 表示供应商k在$\sigma_\theta^2=0$时的最优决策. $\bar{q}_{ik}$表示零售商i的最优决策.

此外, 观察引理1, 可知ξ_{ki}^{SS}、ζ_{ki}^{SS}和$f_{iki}^{\mathrm{SS}}\left(=f_{ikj}^{\mathrm{SS}}\right)$ 关于ε递减. 这就说明, 在一定的条件下, ε越小, 供应商k将制定越高的批发价格和生产成本减少努力水平、零售商i 将制定越高的订货量来响应X_i和X_j. 表2归纳了γ、δ_y以及n等供应特征参数对敏感系数ξ_{ki}^{SS}、ζ_{ki}^{SS}和$f_{iki}^{\mathrm{SS}}(=f_{ikj}^{\mathrm{SS}})$的影响.

表 2 策略(S, S)下供应特征参数对敏感系数的影响

Table 2 Impact of supply characteristics on sensitivity coefficients under strategy (S, S)

供应特征参数	敏感系数			
	ξ_{ki}^{SS}		ζ_{ki}^{SS}	$f_{iki}^{\mathrm{SS}}(=f_{ikj}^{\mathrm{SS}})$
$\gamma\uparrow$	$\uparrow$		$\downarrow$	$\downarrow$
$\delta_y\uparrow$	$\Psi_1(\gamma,\ \delta_y,\ n)>0\uparrow$	$\Psi_1(\gamma,\ \delta_y,\ n)<0\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
N $\uparrow$	$\Psi_2(\gamma,\ \delta_y,\ n)>0\uparrow$	$\Psi_2(\gamma,\ \delta_y,\ n)<0\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$

观察表2可得如下结论:

1) 参数γ越大, 供应商k会制定较高的批发价格来响应X_i和X_j; 当$\Psi_1(\gamma,\ \delta_y,\ n) > 0$($\Psi_1(\gamma,\ \delta_y,\ n) < 0$)时, δ_y 越大, 供应商k会制定较高(低)的批发价格来响应X_i和X_j; 当$\Psi_2(\gamma,\ \delta_y,\ n) > 0$($\Psi_2(\gamma,\ \delta_y,\ n) < 0$)时, n越大, 供应商k 会制定较高(低)的批发价格来响应X_i和X_j.

2) 参数γ、δ_y以及n的值越大, 供应商k会制定较低的成本减少努力水平来响应X_i和X_j, 零售商i会制定较低的订货量来响应X_i和X_j.

3.2 两个零售商均不与供应商共享需求信息

当两个零售商均不与供应商共享需求信息时, 即策略(N, N). 供应商k没有获取来自零售商的任何需求预测信息, 根据期望需求来决策批发价格和生产成本减少努力水平. 因此, 供应商k的最优批发价格$w_k^{\mathrm{NN}*}$不包含零售商的需求预测信息, 两个零售商无法获取彼此的需求预测信息 [6]. 零售商i根据自己的需求预测信息X_i来决策订货量q_{ik}.

零售商i, i=1, 2, 在X_i下的优化问题为

$$\operatorname*{Max}_{q_{ik}} \mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_i\right] = \mathrm{E}\left\{P\sum_{k=1}^{n} y_k q_{ik} - \sum_{k=1}^{n} w_k y_k q_{ik} - nf|X_i\right\}. \tag{7}$$

供应商k, k=1, 2,. . . , n, 的优化问题为

$$\operatorname*{Max}_{w_k,e_k} \mathrm{E}\left[\pi_{s_k}\right] = \mathrm{E}\left\{\left[(w_k - c)\, y_k + e_k\right](q_{1k} + q_{2k}) - \frac{1}{2}\gamma e_k^2\right\}. \tag{8}$$

引理 2 在两个零售商均不与供应商供应需求信息情况下, 有以下结论:

1) 供应商k的最优批发价格和成本减少努力水平分别为

$$w_k^{\mathrm{NN}*} = \bar{w}_k, \tag{9}$$

$$e_k^{\mathrm{NN}*} = \bar{e}_k. \tag{10}$$

2) 零售商i的最优订货量为

$$q_{ik}^{\mathrm{NN}*} = \bar{q}_{ik} + f_{iki}^{\mathrm{NN}} X_i, \tag{11}$$

其中 $f_{iki}^{\mathrm{NN}} = \dfrac{1}{\mu\left(\delta_y^2 + n\right)(2\varepsilon + 3)}$.

引理2中的系数f_{iki}^{NN}表示零售商i对X_i的敏感系数且$f_{iki}^{\mathrm{NN}} > 0$. 观察引理2, 可知$f_{iki}^{\mathrm{NN}}$ 与ε、δ_y和n有关, 与γ无关, 并且f_{iki}^{NN}分别关于ε、δ_y和n递减. 也就是说, ε越小、δ_y越小、n越小, 零售商i将制定越高的订货量来响应X_i.

3.3 一个零售商与供应商共享另一个零售商不与供应商共享需求信息

当零售商1与供应商共享需求信息、零售商2不与供应商共享需求信息时, 即策略(S, N). 供应商k根据零售商1共享的X_1决策批发价格和生产成本减少努力水平. 因此, 供应商k的最优批发价格$w_k^{\mathrm{SN}*}$包含X_1不包含X_2. 零售商1共享的X_1会由$w_k^{\mathrm{SN}*}$泄露给零售商2, 零售商2对θ的估计为$\mathrm{E}\left[\theta|X_1,\ X_2\right]$. 然而, 零售商1无法获取到零售商2 的$X_2$, 零售商1对$\theta$的估计为$\mathrm{E}\left[\theta|X_1\right]$.

零售商1在X_1下的优化问题为

$$\operatorname*{Max}_{q_{1k}} \mathrm{E}\left[\pi_{r_1}|X_1\right] = \mathrm{E}\left\{P\sum_{k=1}^{n} y_k q_{1k} - \sum_{k=1}^{n} w_k y_k q_{1k} - nf|X_1\right\}. \tag{12}$$

零售商2在X_1和X_2下的优化问题为

$$\operatorname*{Max}_{q_{2k}} \mathrm{E}\left[\pi_{r_2}|X_1, X_2\right] = \mathrm{E}\left\{P\sum_{k=1}^{n} y_k q_{2k} - \sum_{k=1}^{n} w_k y_k q_{2k} - nf|X_1,\ X_2\right\}. \tag{13}$$

供应商k, k=1, 2,…, n, 在X_1下的优化问题为

$$\underset{w_k,e_k}{\mathrm{Max}}\,\mathrm{E}\left[\pi_{s_k}|X_i\right]=\mathrm{E}\left\{\left[\left(w_k-c\right)y_k+e_k\right]\left(q_{1k}+q_{2k}\right)-\frac{1}{2}\gamma e_k^2|X_i\right\}. \tag{14}$$

引理 3 零售商1与供应商共享、零售商2不与供应商共享需求信息下, 有以下结论:

1) 供应商k的最优批发价格以及最优成本减少努力水平为

$$w_k^{\mathrm{SN}*}=\bar{w}_k+\xi_{k1}^{\mathrm{SN}}X_1, \tag{15}$$

$$e_k^{\mathrm{SN}*}=\bar{e}_k+\zeta_{k1}^{\mathrm{SN}}X_1, \tag{16}$$

其中 $\xi_{k1}^{\mathrm{SN}}=\dfrac{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)-2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]}{\left(1+\varepsilon\right)R}$, $\zeta_{k1}^{\mathrm{SN}}=\dfrac{2\mu\left[\delta_y^2+(n-1)\right]}{\left(1+\varepsilon\right)R}$.

2) 零售商1和零售商2的最优订货量分别为

$$q_{1k}^{\mathrm{SN}*}=\bar{q}_{1k}+f_{1k1}^{\mathrm{SN}}X_1, \tag{17}$$

其中 $f_{1k1}^{\mathrm{SN}}=\dfrac{\gamma\mu\left[\delta_y^2+(n-1)\right]}{\left(1+\varepsilon\right)R}$.

$$q_{2k}^{\mathrm{SN}*}=\bar{q}_{2k}+f_{2k1}^{\mathrm{SN}}X_1+f_{2k2}^{\mathrm{SN}}X_2, \tag{18}$$

其中 $f_{2k1}^{\mathrm{SN}}=\dfrac{2\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\varepsilon+2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]-\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[2\delta_y^2-(n-1)\right]}{2\mu\left(\delta_y^2+n\right)\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)R}$, $f_{2k2}^{\mathrm{SN}}=\dfrac{1}{2\mu\left(\delta_y^2+n\right)\left(2+\varepsilon\right)}$.

引理3中系数ξ_{k1}^{SN}和ζ_{k1}^{SN}分别表示在策略(S, N)供应商k的最优决策对X_1的敏感系数. 系数f_{1k1}^{SN}表示零售商1对X_1的敏感系数. 系数f_{2k1}^{SN}和f_{2k2}^{SN} 分别表示零售商2对X_1和X_2的敏感系数.

观察引理3, 可知ξ_{k1}^{SN}、ζ_{k1}^{SN}、f_{1k1}^{SN}和f_{2k2}^{SN}关于ε 递减. 也就是说, 在策略(S, N)下, 随着ε减少, 供应商k制定较高的批发价格来响应X_1, 供应商k制定较高的成本减少努力水平来响应X_1. 两个零售商均会制定较高的订货量响应自己的需求预测信号. 零售商2是否制定较高的订货量来响应X_1 依赖于γ、δ_y和 N等参数取值. 在策略(S, N)下, γ、δ_y 和n等供应特征参数对敏感系数ξ_{k1}^{SN}、ζ_{k1}^{SN}、f_{1k1}^{SN}、f_{2k1}^{SN}和f_{2k2}^{SN}的影响见表3.

表 3 策略(S, N)下供应特征参数对敏感系数的影响

Table 3 Impact of supply characteristics on sensitivity coefficients under strategy (S, N)

供应特征参数	敏感系数						
	ξ_{k1}^{SN}		ζ_{k1}^{SN}	f_{1k1}^{SN}	f_{2k1}^{SN}		f_{2k2}^{SN}
$\gamma\uparrow$	$\uparrow$		$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$		–
$\delta_y\uparrow$	$\Psi_1(\gamma,\delta_y,n)>0\uparrow$	$\Psi_1(\gamma,\delta_y,n)<0\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\Psi_3(\gamma,\ \delta_y,\ n)>0\uparrow$	$\Psi_3(\gamma,\ \delta_y,\ n)<0\downarrow$	$\downarrow$
$n\uparrow$	$\Psi_2(\gamma,\ \delta_y,\ n)>0\uparrow$	$\Psi_2(\gamma,\ \delta_y,\ n)<0\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\Psi_4(\gamma,\ \delta_y,\ n)>0\uparrow$	$\Psi_4(\gamma,\ \delta_y,\ n)<0\downarrow$	$\downarrow$

观察表3可得如下结论:

1) 在策略(S, N)下, 供应商k的最优决策以及零售商1的最优决策关于X_1的敏感系数受γ、δ_y和n等取值的影响与策略(S, S) 的情形相似, 在此不作讨论.

2) 参数γ越大, 零售商2会制定较低的订货量来响应X_1, 而零售商2的最优订货量对X_2的敏感系数不受γ的影响, 这是因为策略(S, N)下, 供应商只依据X_1来决策最优生产成本减少努力水平; 当$\Psi_3(\gamma,\ \delta_y,\ n)>0$($\Psi_3(\gamma,\ \delta_y,\ n)<0$)时, δ_y 越大, 零售商2 会制定较高(低)的批发价格来响应X_1; 当$\Psi_4(\gamma,\ \delta_y,\ n)>0$($\Psi_4(\gamma,\ \delta_y,\ n)<0$) 时, n越大, 零售商2 会制定较高(低)的批发价格来响应X_1.

3) 参数δ_y和n的值越大, 零售商2会制定较低的订货量来响应X_2.

3.4 供应商和零售商的期望利润

根据引理1~引理3中结果, 可以计算不同垂直信息共享策略下供应商和零售商的期望利润见表4.

表 4　供应商和零售商的期望利润

Table 4 Expected profits of suppliers and retailers

策略	供应商	零售商
(S, S)	$\Pi_{s_k}^{\mathrm{SS}*}=\bar{\Pi}_{s_k}+\frac{4\gamma\mu^2H\sigma_\theta^2}{R^2(2+\varepsilon)}$	$\Pi_{r_i}^{\mathrm{SS}*}=\bar{\Pi}_{r_i}+\frac{2n\gamma^2\mu^4\mathrm{J}\sigma_\theta^2}{R^2(2+\varepsilon)}$
(N, N)	$\Pi_{s_k}^{\mathrm{NN}*}=\bar{\Pi}_{s_k}$	$\Pi_{r_i}^{\mathrm{NN}*}=\bar{\Pi}_{r_i}+\frac{n\sigma_\theta^2(\varepsilon+1)}{\left(\delta_y^2+n\right)(2\varepsilon+3)^2}$
(S, N)	$\Pi_{s_k}^{\mathrm{SN}*}=\bar{\Pi}_{s_k}+\frac{2\gamma\mu^2H\sigma_\theta^2}{(1+\varepsilon)R^2}$	$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*}=\bar{\Pi}_{r_1}+\frac{n\gamma^2\mu^4J\sigma_\theta^2}{(1+\varepsilon)R^2}$ $\Pi_{r_2}^{\mathrm{SN}*}=\bar{\Pi}_{r_2}+\frac{n\gamma^2\mu^4J\sigma_\theta^2}{(1+\varepsilon)R^2}+\frac{n\sigma_\theta^2\varepsilon}{4\left(\delta_y^2+n\right)(1+\varepsilon)(2+\varepsilon)}$
(N, S)	$\Pi_{s_k}^{\mathrm{NS}*}=\bar{\Pi}_{s_k}+\frac{2\gamma\mu^2H\sigma_\theta^2}{(1+\varepsilon)R^2}$	$\Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}=\bar{\Pi}_{r_1}+\frac{n\gamma^2\mu^4J\sigma_\theta^2}{(1+\varepsilon)R^2}+\frac{n\sigma_\theta^2\varepsilon}{4\left(\delta_y^2+n\right)(1+\varepsilon)(2+\varepsilon)}$ $\Pi_{r_2}^{\mathrm{NS}*}=\bar{\Pi}_{r_2}+\frac{n\gamma^2\mu^4J\sigma_\theta^2}{(1+\varepsilon)R^2}$

注: $H=3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]-\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2$, $J=\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2$, $\bar{\Pi}_{s_k}=\frac{2\gamma\mu^2H(a-c)^2}{R^2}$, $\bar{\Pi}_{r_i}=\frac{n\gamma^2\mu^4J(a-c)^2}{R^2}-nf$, k=1, 2,…, n, i=1, 2.

4　需求信息共享博弈分析

本节先研究没有单边支付契约下竞争零售商的均衡垂直信息共享策略. 随后, 研究供应商提供单边支付契约时, 完全信息共享实现的条件.

4.1　没有单边支付契约下零售商垂直信息共享决策

基于表4中的结果, 比较供应商k在不同信息共享策略下的期望利润, 可得结论.

定理 1　若$\gamma>\gamma_1$, 则$\Pi_{s_k}^{\mathrm{SS}*}>\Pi_{s_k}^{\mathrm{SN}*}\left(=\Pi_{s_k}^{\mathrm{NS}*}\right)>\Pi_{s_k}^{\mathrm{NN}*}>0$, 其中$\gamma_1=\dfrac{\delta_y^2+(n-1)}{3\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)}$.

定理1表明当努力成本系数满足条件$\gamma>\gamma_1$时, 零售商与供应商共享需求预测信息使得供应商的利润增加, 且当两个零售商均与供应商共享需求信息时, 供应商的利润最大. 即从供应商的角度来说, 希望能够获得来自两个零售商的需求信息.

从零售商的角度来看, 零售商是否愿意与供应商共享需求信息呢? 即零售商的垂直信息共享均衡决策如何?

基于表4的结果, 可知两竞争零售商的利润矩阵如下表5.

表 5 两个零售商的利润矩阵

Table 5　Profits Matrix of two Retailers

零售商1	零售商2	
	共享(Z_2=S)	不共享(Z_2=N)
共享(Z_1=S)	$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*}$, $\Pi_{r_2}^{\mathrm{SS}*}$	$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*}$, $\Pi_{r_2}^{\mathrm{SN}*}$
不共享(Z_1=N)	$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*}$, $\Pi_{r_2}^{\mathrm{SN}*}$	$\Pi_{r_1}^{\mathrm{NN}*}$, $\Pi_{r_2}^{\mathrm{NN}*}$

求解表5中的矩阵博弈, 可得如下结论.

定理 2　没有单边支付契约时, 存在如下两个阈值

$$\gamma_2=\frac{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right](\varepsilon+1)}{\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left\{3\delta_y^2+\left[4\delta_y^2+(n-1)\right]\varepsilon\right\}},\tag{19}$$

$$\gamma_3=\frac{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]}{\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[4\delta_y^2+(n-1)\right]},\tag{20}$$

使得:

1) 当$\gamma<\min\{\gamma_2,\ \gamma_3\}$时, 策略(S, S)是一个主导的均衡策略.

2) 当$\gamma > \max\{\gamma_2, \gamma_3\}$时, 策略(N, N)是一个主导的均衡策略.

3) 当$\gamma_3 < \gamma < \gamma_2$时, 存在两个均衡策略(S, N)和(N, S).

4) 当$\gamma < \gamma_3$时, 策略(S, S)是一个均衡策略.

5) 当$\gamma > \gamma_2$时, 策略(N, N)是一个均衡策略.

由定理2可知, 参数γ的取值直接影响着零售商垂直信息共享决策. 当γ较小(即$\gamma < \min\{\gamma_2, \gamma_3\}$)时, 无论竞争零售商是否与供应商共享需求信息, 零售商会选择与供应商共享需求信息. 当γ较大(即$\gamma > \max\{\gamma_2, \gamma_3\}$)时, 无论竞争零售商是否与供应商共享需求信息, 零售商不会选择与供应商共享需求信息. 此外, 存在两个阈值γ_2和γ_3, 当γ属于区域$(0, \gamma_3)$时, 两个零售商均选择与供应商共享需求信息; 当γ属于区域$(\gamma_2, +\infty)$ 时, 两个零售商均不会与供应商共享需求信息; 当γ属于区域(γ_3, γ_2)时, 只有一个零售商选择与供应商共享需求信息.

联合定理1和定理2可知, 供应商同时决策批发价格和生产成本减少努力水平来响应零售商的需求信息且当努力成本系数γ满足一定的条件(比如, $\gamma < \min\{\gamma_2, \gamma_3\}$)时, 零售商与供应商共享需求信息不仅提高了供应商的利润, 而且提高了零售商的利润, 即达到“双赢”的状态. 也就是说, 当只有零售商拥有需求信息且供应商努力成本系数较小(即$\gamma < \min\{\gamma_2, \gamma_3\}$)时, 供应商会同时决策生产成本减少努力水平和批发价格来响应零售商的需求信息.

下面分析参数δ_y、n和ε对阈值γ_2和γ_3的影响, 结果见下表6.

表 6 δ_y、n和ε对阈值γ_2和γ_3的影响

Table 6 Impacts of δ_y, n and ε on γ_2 and γ_3

参数	阈值			
	γ_2		γ_3	
$\varepsilon\uparrow$	$\downarrow$		–	
$\delta_y\uparrow$	$\Phi_1(\varepsilon, \delta_y, n) > 0 \uparrow$	$\Phi_1(\varepsilon, \delta_y, n) < 0 \downarrow$	$\downarrow$	
N $\uparrow$	$\Phi_2(\varepsilon, \delta_y, n) > 0 \uparrow$	$\Phi_2(\varepsilon, \delta_y, n) < 0 \downarrow$	$\Phi_3(\delta_y, n) > 0 \uparrow$	$\Phi_3(\delta_y, n) < 0 \downarrow$

观察表6, 可得如下结论:

1) ε越大, γ_2越小, γ_3不变. 也就是说, 需求预测误差越小, 策略(N, N)是一个均衡策略的区域变小, 策略(S, N)(或策略(N, S))是均衡策略的区域增大, 策略(S, S)是均衡策略的区域不变.

2) δ_y和n对均衡策略区域的影响由其他参数取值共同决定.

4.2 存在单边支付契约下零售商垂直信息共享决策

定理1的结果表明, 供应商获取了零售商的需求信息后, 可以使得自己的利润增加, 并且在获取所有的零售商(即两个零售商)的需求信息后, 利润最大. 然而, 根据定理2的结果, 零售商并不总是愿意与供应商共享需求信息. 下面研究供应商k提供费用m_k时, 什么情况下两个零售商均愿意向供应商k披露需求信息. 由于供应商是对称的, 供应商向每个零售商支付的最优费用是相同的, 即$m_k = m^*$.

为了分析方便, 先定义阈值$\varepsilon_1 = \dfrac{\psi_1}{\psi_2}$, 其中

$$\begin{aligned}\psi_1 =& 5\gamma^2\mu^4\left(\delta_y^2+n\right)^2\left[\delta_y^2+(n-1)\right] - 8\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)^2\left[\delta_y^2+(n-1)\right] + \\ & \left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right) - 2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}^2 - \\ & 2\gamma\mu^2\left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right) - 2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right],\end{aligned}$$

$$\psi_2 = 24\gamma^2\mu^4\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)^2\left[\delta_y^2+(n-1)\right] - 8\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2.$$

下面给出供应商k提供一定单边支付能够使两个零售商均与之共享需求信息的条件.

定理 3　当$m^* = \dfrac{\left\{\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+T\right\}\left\{2\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+R\right\}\sigma_\theta^2\varepsilon}{4\left(\delta_y^2+n\right)(\varepsilon+2)(\varepsilon+1)R^2}$且$\dfrac{1}{\varepsilon} > \varepsilon_1$时, 两个零售商均愿意与供应商共享需求信息.

定理3表明当参数满足$\dfrac{1}{\varepsilon} > \varepsilon_1$时, 供应商$k$支付$m^*$能够使两个零售商均与之共享需求预测信息, 即完全需求信息共享策略存在. 也就是说, 当参数满足一定的条件(即$\dfrac{1}{\varepsilon} > \varepsilon_1$)时, 供应商$k$可以通过与零售商签订单边支付契约的方式来获取零售商的需求信息.

5　数值算例

本节通过数值算例来研究参数ε、γ、δ_y和n 对m^*的影响. 给定$\mu=1$, 在$\gamma>\gamma_3$ 的基础上, 进一步假设$\gamma > \dfrac{1}{3\delta_y^2}$. 直接求$m^*$关于$\varepsilon$的一阶导数, 可得当$\varepsilon > \sqrt{2}$ 时, $\dfrac{\partial m^*}{\partial\varepsilon} < 0$; 当$\varepsilon < \sqrt{2}$, $\dfrac{\partial m^*}{\partial\varepsilon} > 0$. 因此, 给定$\varepsilon = 1$, 即需求预测误差不是太大. 此外, 考虑努力成本系数取值较大(即$\gamma=5$)、供应不确定程度较小(即$\delta_y=0.5$)和供应商数量较少(即$n=4$).

1) γ对m^*的影响

给定$n=4$, $\delta_y=0.5$, 经计算$\gamma > \dfrac{1}{3\delta_y^2}$, 得$\gamma > \dfrac{1}{3\delta_y^2} \approx 0.33$. 图1描述了$\gamma$ 以步长1从1增加到10时, m^*值的变化.

由图1可知, m^*关于γ递增, 即努力成本系数越大, 供应商需要支付更多的费用购买零售商的需求信息.

2) δ_y对m^*的影响

给定γ=5, n=4, 计算$\gamma > \dfrac{1}{3\delta_y^2}$, 可得$\delta_y > \tilde{\delta}_y \approx 0.26$. 图2描述的是$\delta_y$以步长0.1从0.5增加到2时, m^*的变化.

由图2可知, 存在一个阈值$\overline{\delta_y} \approx 0.8$, 当$\delta_y < \overline{\delta_y}$时, m^*关于δ_y递增; 当$\delta_y > \overline{\delta_y}$时, m^*关于δ_y递减. 也就是说, 当$\delta_y \approx 0.8$时, 供应商需要支付给零售商购买需求信息的费用最多.

3) n对m^*的影响

给定$\gamma=5$, $\delta_y=1$. 图3描述的是n以步长1从2增加到10, m^*的变化.

由图3可知, m^*关于n递减. 也就是说, 供应商数量越多, 供应商需要支付给零售商的费用越少.

图1~图3蕴含的信息有助于供应商决策购买零售商需求信息的费用.

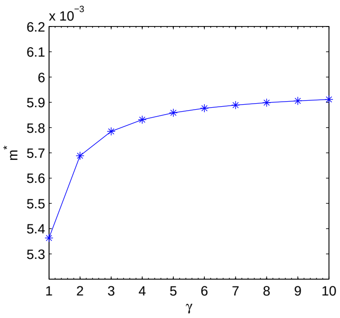

图 1　γ对m^*的影响

Fig. 1　Impact of γ on m^*

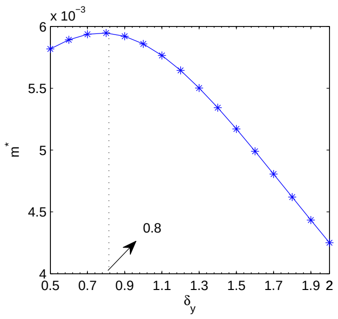

图 2　δ_y对m^*的影响

Fig. 2　Impact of δ_y on m^*

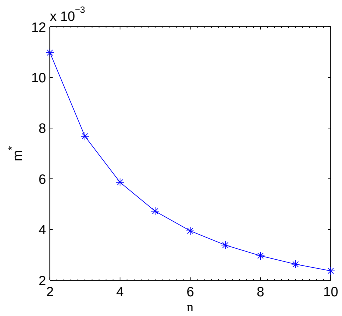

图 3　n对m^*的影响

Fig. 3　Impact of n on m^*

6　结束语

本文考虑由多个竞争供应商和两个竞争零售商构成的供应链, 供应商不仅通过决策批发价格, 而且决

策生产成本减少努力水平来响应零售商的需求预测信息. 两个零售商拥有需求预测信息, 决策是否向供应商披露需求预测信息. 在此供应链的决策环境下, 对零售商的垂直需求信息共享问题进行了研究. 研究表明, 努力成本系数越大, 供应商会制定更高的批发价格来响应零售商的需求预测信息. 供应不确定程度越高、供应商数量越多, 供应商如何调整批发价格响应零售商的需求信息依赖于其他参数的取值. 努力成本系数越大、供应不确定程度越高、供应商数量越多, 供应商会制定较低的成本减少努力水平来响应零售商需求预测信息, 零售商也会制定较低的订货量来响应自己的需求信息, 如何调整订货量响应竞争零售商需求信息则依赖于参数的取值和信息共享策略. 此外, 通过分析竞争零售商的垂直信息共享均衡发现, 存在两个阈值, 当努力成本系数介于这两个阈值之间时, 两个对称的零售商之间存在着不对称的垂直需求信息共享均衡. 当努力成本系数均小于这两个阈值时, 零售商愿意免费地向供应商披露其需求预测信息. 当努力成本系数均大于这两个阈值之间时, 零售商不会与供应商共享需求信息. 也就是说, 当零售商拥有需求信息时, 供应商采取生产成本减少努力对供应链的垂直需求信息共享的实现是非常有价值的, 在一定条件下可以使得供应商和零售商达到“双赢”的状态. 另外, 当努力成本系数、需求预测误差、供应不确定程度以及供应商数量等参数满足一定的条件时, 供应商能够通过向零售商支付一定的费用使两个零售商均采取垂直需求信息共享策略. 本文研究中所得到的结论不仅有利于零售商制定有效的信息共享决策, 而且有利于供应商制定成本减少策略.

参考文献:

[1] Holst A. Information technology(IT) worldwide spending forecast from 2005 to 2020 (in billion U.S. dollars). https://www.statista.com/statistics/203935/overall-it-spending-worldwide, 2019.

[2] Lee H L, Whang S. Information sharing in a supply chain. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2000, 1(1): 79–93.

[3] Grohskopf L A, Sokolow L Z, Broder K R, et al. Prevention and control of seasonal influenza with vaccines. Recommendations and Reports, https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/65/rr/rr6505a1.htm, 2016, 65(RR–5): 1–54.

[4] Manufacturing Cost Reduction. https://www.dehartconsulting.com/product-cost-reduction, 2019.

[5] Li L. Information sharing in a supply chain with horizontal competition. Management Science, 2002, 48(9): 1196–1212.

[6] Zhang H T. Vertical information exchange in a supply chain with duopoly retailers. Production and Operations Management, 2002, 11(4): 531–546.

[7] Qian Y, Chen J, Miao L, et al. Information sharing in a competitive supply chain with capacity constraint. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2012, 24(4): 549–574.

[8] Jain A, Sohoni M. Should firms conceal information when dealing with common suppliers. Naval Research Logistics, 2015, 62(1): 1–15.

[9] Anand K S, Goyal M. Strategic information management under leakage in a supply chain. Management Science, 2009, 55(3): 438–452.

[10] Kong G W, Rajagopalan S, Zhang H. Revenue sharing and information leakage in a supply chain. Management Science, 2013, 59(3): 556–572.

[11] Shamir N. Strategic information sharing between competing retailers in a supply chain with endogenous wholesale price. International Journal of Production Economics, 2012, 136(2): 352–365.

[12] Shamir N. Cartel formation through strategic information leakage in a distribution channel. Marketing Science, 2016, 36(1): 70–88.

[13] Tian L, Jiang B. Comment on “strategic information management under leakage in a supply chain”. Management Science, 2017, 63(12): 4258–4260.

[14] 张菊亮, 章祥荪. 供应商和销售商拥有部分信息的信息共享. 中国管理科学, 2012, 20(1): 109–116.
Zhang J L, Zhang X S. Information sharing in a supply chain with supplier and retailer’s partial information. Chinese Journal of Management Science, 2012, 20(1): 109–116. (in Chinese)

[15] Jiang L, Hao Z. Incentive-driven information dissemination in two-tier supply chains. Manufacturing and Service Operations Management, 2016, 18(3): 393–413.

[16] 张子辰, 雒兴刚. 考虑广告效应和信息共享的双渠道供应链分析. 系统工程学报, 2017, 32(4): 499–512.
Zhang Z C, Luo X G. Analysis of a dual-channel supply chain with advertising effect and information sharing. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(4): 499–512. (in Chinese)

[17] 李　波, 孙　鹏, 李庆华. 双渠道供应链中信息共享价值研究. 系统工程学报, 2015, 30(4): 530–538.
Li B, Sun P, Li Q H. Information sharing value in a dual-channel supply chain. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(4): 530–538. (in Chinese)

[18] 孙嘉轶, 滕春贤, 姚锋敏. 需求扰动下闭环供应链回收决策及协调策略. 系统工程学报, 2017, 32(5): 699–709.
Sun J Y, Teng C X, Yao F M. Adjusted recycling decision and coordination strategy in closed-loop supply chain under demand disruption. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(5): 699–709. (in Chinese)

[19] 高举红, 滕金辉, 侯丽婷, 等. 需求不确定下考虑竞争的闭环供应链定价研究. 系统工程学报, 2017, 32(1): 78–88.
Gao J H, Teng J H, Hou L T, et al. Pricing strategy of closed-loop supply chain considering competition under uncertain demand. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(1): 78–88. (in Chinese)

[20] Tang W, Girotra K.Using advance purchase discount contracts under uncertain information acquisition cost. Production and Operations Management, 2017, 26(8): 1553–1567.

[21] Ha A Y, Tian Q, Tong S. Information sharing in competing supply chains with production cost reduction. Manufacturing and Service Operations Management, 2017, 19(2): 246–262.

[22] Gupta S, Loulou R. Process innovation, product differentiation, and channel structure:strategic incentives in a duopoly. Marketing Science, 1998, 17(4): 301–316.

[23] Gilbert S M, Cvsa V. Strategic commitment to price to stimulate downstream innovation in a supply chain. European Journal of Operational Research, 2003, 150(3): 617–639.

[24] Heese H S, Swaminathan J M. Product line design with component commonality and cost-reduction effort. Manufacturing and Service Operations Management, 2006, 8(2): 206–219.

[25] Gilbert S M, Xia Y, Yu G. Strategic outsourcing for competing OEMs that face cost reduction opportunities. IIE Transactions, 2006, 38(11): 903–915.

[26] Iida T. Coordination of cooperative cost-reduction efforts in a supply chain partnership. European Journal of Operational Research, 2012, 222(2): 180–190.

[27] Bernstein F, Kok A G. Dynamic cost reduction through process improvement in assembly networks. Management Science, 2009, 55(4): 552–567.

[28] 黄　河, 何　青, 徐鸿雁. 考虑供应风险和生产成本不确定性的供应链动态决策研究. 中国管理科学, 2015, 23(11): 56–61.
Huang H, He Q, Xu H Y. Supply chain decisions with endeogenous effort to reduce supply uncertainty and unit production cost. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(11): 56–61. (in Chinese)

[29] Kim S H, Netessine S. Collaborative cost reduction and component procurement under information asymmetry. Management Science, 2013, 59(1): 189–206.

[30] Deo S, Corbett C J. Cournot competition under yield uncertainty: The case of the U.S. influenza vaccine market. Manufacturing and Service Operations Management, 2009, 11(4): 563–576.

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

[32] Yano C A, Lee H L. Lot sizing with random yields: A review. Operations Research, 1995, 43(2): 311–334.

[33] Li L. Cournot oligopoly with information sharing. The RAND Journal of Economics, 1985, 16(4): 521–536.

作者简介:

吴军建 (1986—), 男, 江西上饶人, 博士, 讲师, 供应链管理: Email: junjian.wu@outlook.com;

王海燕 (1966—), 男, 浙江诸暨人, 博士, 教授, 供应链和物流管理: Email: hywang@seu.edu.cn.

附录A　两供应商单零售商组成的供应链信息共享价值分析

两供应商和单零售商的决策顺序如下:

1) 供应商决策是否愿意获取零售商的需求信息. 在此, 令Z=S表示供应商愿意获取零售商的需求信息(即零售商与供应商共享需求信息), Z=N 表示供应商不愿意获取零售商的需求信息(即零售商不与供应商共享需求信息). 零售商与每个供应商均存在两种策略组合: 共享(Z=S)和不共享(Z=N). 因此, 零售商与两供应商之间存在四种策

略: (S, S)、(N, N)、(S, N)和(N, S). 策略(S, N)表示供应商1愿意获取零售商的需求信息, 供应商2 不愿意获取零售商的需求信息(即零售商与供应商1共享需求信息, 零售商不与供应商2共享需求信息).

2) 两个供应商同时决策批发价格和成本减少努力水平.

3) 零售商决策订货量.

由上面的决策过程分析, 可知这是一个多阶段博弈问题, 下面利用逆向法求解.

零售商在X下的优化问题为

$$\operatorname*{Max}_{q_k} \mathrm{E}\left[\pi_r|X\right]=\mathrm{E}\left\{\left(a+\theta-\sum_{k=1}^{2} y_k q_k\right)\sum_{k=1}^{2} y_k q_k-\sum_{k=1}^{2} w_k y_k q_k-2f|X\right\}. \tag{A1}$$

计算式(A1)中$\mathrm{E}\left[\pi_r|X\right]$关于$q_k$一阶导数,并令$\dfrac{\partial \mathrm{E}\left[\pi_r|X\right]}{\partial q_k}=0$, 化简可得

$$q_k=\frac{a+\mathrm{E}\left[\theta|X\right]-w_k}{2\mu\left(1+\delta_y^2\right)}-\frac{1}{1+\delta_y^2}q_{3-k}. \tag{A2}$$

进一步计算$\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}\left[\pi_r|X\right]}{\partial q_k \partial q_k}$和$\dfrac{\partial^2 \mathrm{E}\left[\pi_r|X\right]}{\partial q_k \partial q_{3-k}}$, 可得如下矩阵

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \mathrm{E}[\pi_r|X]}{\partial q_k \partial q_k} & \frac{\partial^2 \mathrm{E}[\pi_r|X]}{\partial q_k \partial q_{3-k}} \\ \frac{\partial^2 \mathrm{E}[\pi_r|X]}{\partial q_{3-k} \partial q_k} & \frac{\partial^2 \mathrm{E}[\pi_r|X]}{\partial q_{3-k} \partial q_{3-k}} \end{pmatrix}=-2\mu^2\begin{pmatrix} 1+\delta_y^2 & 1 \\ 1 & 1+\delta_y^2 \end{pmatrix}. \tag{A3}$$

由矩阵的知识可判断式(A3)中的矩阵$\boldsymbol{A}$是负定矩阵, 故目标函数$\mathrm{E}\left[\pi_r|X\right]$是关于$q_k$, k=1, 2, 是联合凹的. 解方程组(A2)可以得到零售商的最优订货量q_k^*为

$$q_k^*=\frac{\left(a+\mathrm{E}\left[\theta|X\right]\right)}{2\mu\left(2+\delta_y^2\right)}-\frac{\left(1+\delta_y^2\right)w_k}{2\mu\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}+\frac{w_{3-k}}{2\mu\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}. \tag{A4}$$

若供应商k愿意获取零售商的需求信息X(即零售商与供应商k共享需求信息), 则供应商k基于X决策批发价格和成本减少努力水平决策. 供应商k的优化问题为

$$\operatorname*{Max}_{w_k, e_k} \mathrm{E}\left[\pi_{s_k}|X\right]=\mathrm{E}\left\{\left[\left(w_k-c\right)y_k+e_k\right]q_k-\frac{1}{2}\gamma e_k^2|X\right\}. \tag{A5}$$

将式(A4)中的q_k^*代入上式(A5), 可得供应商k的最优批发价格以及最优成本减少努力水平满足如下一阶最优条件

$$\begin{aligned} w_k^*=&\frac{\left[2\gamma\delta_y^4\left(2+\delta_y^2\right)-\delta_y^2\frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}\right]\left(a+\mathrm{E}\left[\theta|X\right]\right)}{\left[4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}\right]\left(1+\delta_y^2\right)}+\frac{2\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)c}{\left[4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\left(1+\delta_y^2\right)\right]}+ \\ &\frac{\left[2\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}\right]\mathrm{E}\left[w_{3-k}^*|X\right]}{\left[4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}\right]\left(1+\delta_y^2\right)}, \end{aligned}$$

$$e_k^*=\frac{\left(a+\mathrm{E}\left[\theta|X\right]\right)}{2\mu\gamma\left(2+\delta_y^2\right)}-\frac{\left(1+\delta_y^2\right){w_k}^*}{2\mu\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}+\frac{w_{3-k}^*}{2\mu\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}.$$

若供应商k不愿意获取零售商的需求信息X(即零售商不与供应商k共享需求信息), 则供应商k的优化问题为

$$\operatorname*{Max}_{w_k, e_k} \mathrm{E}\left[\pi_{s_k}\right]=\mathrm{E}\left\{\left[\left(w_k-c\right)y_k+e_k\right]q_k-\frac{1}{2}\gamma e_k^2\right\}. \tag{A6}$$

将式(A4)中的q_k^*代入上式(A6), 可得供应商k的最优批发价格以及最优成本减少努力水平满足如下一阶最优条件

$$
{w_k}^* = \frac{\left[2\gamma\delta_y^4\left(2+\delta_y^2\right)-\delta_y^2\frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}\right]\left(a+\mathrm{E}\left[\theta|X\right]\right)}{\left[4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}\right]\left(1+\delta_y^2\right)} + \frac{2\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}{\left[4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\left(1+\delta_y^2\right)\right]}c + \frac{\left[2\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}\right]}{\left[4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}\right]\left(1+\delta_y^2\right)}\mathrm{E}\left[w_{3-k}^*\right],
$$

$$
e_k^* = \frac{a}{2\mu\gamma\left(2+\delta_y^2\right)} - \frac{\left(1+\delta_y^2\right){w_k}^*}{2\mu\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)} + \frac{w_{3-k}^*}{2\mu\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}.
$$

于是, 可求得四种策略(S, S), (N, N), (S, N)和(N, S)下供应商、零售商的最优决策以及相应的期望利润(见引理A1).

引理A1 四种组合策略下, 供应商、零售商的最优决策和相应的期望利润如下:

1) 策略(S, S)下, 供应商、零售商的最优决策和相应的期望利润为

$$
w_1^{\mathrm{SS}*} = w_2^{\mathrm{SS}*} = \bar{w} + \frac{VX}{(1+\varepsilon)T},\ e_1^{\mathrm{SS}*} = e_2^{\mathrm{SS}*} = \bar{e} + \frac{\left(1+\delta_y^2\right)X}{(1+\varepsilon)\mu T},\ q_1^{\mathrm{SS}*} = q_2^{\mathrm{SS}*} = \bar{q} + \frac{\gamma\left(1+\delta_y^2\right)X}{(1+\varepsilon)\mu T},
$$

$$
\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SS}*} = \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{SS}*} = \bar{\mathit{\Pi}}_s + \frac{\gamma\left(1+\delta_y^2\right)\sigma_\theta^2 K}{2T^2(1+\varepsilon)},\ \mathit{\Pi}_r^{\mathrm{SS}*} = \bar{\mathit{\Pi}}_r + \frac{2\gamma^2\left(2+\delta_y^2\right)\left(1+\delta_y^2\right)^2\sigma_\theta^2}{(1+\varepsilon)T^2}.
$$

2) 策略(N, N)下, 供应商、零售商的最优决策和相应的期望利润为

$$
w_1^{\mathrm{NN}*} = w_2^{\mathrm{NN}*} = \bar{w},\ e_1^{\mathrm{NN}*} = e_2^{\mathrm{NN}*} = \bar{e},\ q_1^{\mathrm{NN}*} = q_2^{\mathrm{NN}*} = \bar{q} + \frac{X}{2\mu\left(2+\delta_y^2\right)(1+\varepsilon)},
$$

$$
\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NN}*} = \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{NN}*} = \bar{\mathit{\Pi}}_s = \frac{\gamma\left(1+\delta_y^2\right)(a-c)^2K}{2T^2},\ \mathit{\Pi}_r^{\mathrm{NN}*} = \bar{\mathit{\Pi}}_r + \frac{\sigma_\theta^2}{2\left(2+\delta_y^2\right)(1+\varepsilon)}.
$$

3) 策略(S, N)或(N, S)下, 供应商、零售商的最优决策和相应的期望利润为

$$
w_1^{\mathrm{NS}*} = w_2^{\mathrm{SN}*} = \bar{w},\ w_2^{\mathrm{NS}*} = w_1^{\mathrm{SN}*} = \bar{w} + \frac{V\delta_y^2X}{\left(1+\delta_y^2\right)(1+\varepsilon)K},
$$

$$
e_1^{\mathrm{NS}*} = e_2^{\mathrm{SN}*} = \bar{e},\ e_2^{\mathrm{NS}*} = e_1^{\mathrm{SN}*} = \bar{e} + \frac{\delta_y^2X}{\mu(1+\varepsilon)K},
$$

$$
q_1^{\mathrm{NS}*} = q_2^{\mathrm{SN}*} = \bar{q} + \frac{\left[2\gamma\left(3+2\delta_y^2\right)\delta_y^2-\frac{1+\delta_y^2}{\mu^2}\right]X}{2\mu\left(1+\delta_y^2\right)(1+\varepsilon)K},\ q_2^{\mathrm{NS}*} = q_1^{\mathrm{SN}*} = \bar{q} + \frac{\gamma\delta_y^2X}{\mu(1+\varepsilon)K},
$$

$$
\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NS}*} = \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{SN}*} = \bar{\mathit{\Pi}}_s,\ \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{NS}*} = \mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SN}*} = \bar{\mathit{\Pi}}_s + \frac{\gamma\delta_y^4\sigma_\theta^2}{2\left(1+\delta_y^2\right)(1+\varepsilon)K},
$$

$$
\mathit{\Pi}_r^{\mathrm{SN}*} = \mathit{\Pi}_r^{\mathrm{NS}*} = \bar{\mathit{\Pi}}_r + \frac{\left[2\gamma\left(5+2\delta_y^2\right)\delta_y^2-\frac{1+\delta_y^2}{\mu^2}\right]\left[2\gamma\left(3+2\delta_y^2\right)\delta_y^2-\frac{1+\delta_y^2}{\mu^2}\right]\sigma_\theta^2+4\gamma^2\delta_y^4\left(1+\delta_y^2\right)^2\sigma_\theta^2}{4\left(1+\delta_y^2\right)K^2(1+\varepsilon)},
$$

其中 $K = 4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right) - \frac{\left(1+\delta_y^2\right)}{\mu^2}$, $T = 2\gamma\left(1+2\delta_y^2\right)\left(2+\delta_y^2\right) - \frac{1+\delta_y^2}{\mu^2}$, $V = 2\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right) - \frac{1+\delta_y^2}{\mu^2}$, $\bar{w} = \frac{Va}{T} + \frac{2\gamma\left(2+\delta_y^2\right)\left(1+\delta_y^2\right)c}{T}$, $\bar{e} = \frac{\left(1+\delta_y^2\right)(a-c)}{\mu T}$, $\bar{q} = \frac{\gamma\left(1+\delta_y^2\right)(a-c)}{\mu T}$, $\bar{\mathit{\Pi}}_s = \frac{\gamma\left(1+\delta_y^2\right)(a-c)^2K}{2T^2}$, $\bar{\mathit{\Pi}}_r = \frac{2\gamma^2\left(2+\delta_y^2\right)\left(1+\delta_y^2\right)^2(a-c)^2}{T^2} - 2f$.

下面基于引理A1的结果, 来分析两个供应商的信息获取博弈, 博弈矩阵见下表A1.

表 A1 两个供应商的利润矩阵

Table $A1$ Profits Matrix of two Suppliers

供应商1	供应商2	
	共享(Z_2=S)	不共享(Z_2=N)
共享(Z_1=S)	$\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SS}*}, \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{SS}*}$	$\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SN}*}, \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{SN}*}$
不共享(Z_1=N)	$\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NS}*}, \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{NS}*}$	$\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NN}*}, \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{NN}*}$

解上面的矩阵博弈, 可得如下引理A2.

引理A2　两个供应商的博弈均衡如下:

1) 当$\gamma > \frac{1+\delta_y^2}{4\mu^2\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}$时, 策略(S, S)是一个均衡策略.

2) 当$\gamma < \frac{1+\delta_y^2}{4\mu^2\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}$时, 策略(N, N)是一个均衡策略.

证明　由引理A1的结果, 可得

$$\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SN}*}-\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NN}*}=\frac{\gamma\delta_y^4\sigma_\theta^2}{2\left[4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{1+\delta_y^2}{\mu^2}\right]\left(1+\delta_y^2\right)(1+\varepsilon)},$$

$$\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SS}*}-\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NS}*}=\frac{\gamma\left[4\gamma\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{1+\delta_y^2}{\mu^2}\right]\left(1+\delta_y^2\right)\sigma_\theta^2}{2\left[2\gamma\left(1+2\delta_y^2\right)\left(2+\delta_y^2\right)-\frac{1+\delta_y^2}{\mu^2}\right]^2(1+\varepsilon)}.$$

因此, 当$\gamma > \dfrac{1+\delta_y^2}{4\mu^2\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}$时, $\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SN}*}>\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NN}*}$ 且$\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SS}*}>\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NS}*}$; 当$\gamma < \dfrac{1+\delta_y^2}{4\mu^2\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}$ 时, $\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SN}*}<\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NN}*}$且$\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{SS}*}<\mathit{\Pi}_{s_1}^{\mathrm{NS}*}$.

同理有, 当$\gamma > \dfrac{1+\delta_y^2}{4\mu^2\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}$时, $\mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{NS}*} > \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{NN}*}$ 且$\mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{SS}*} > \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{SN}*}$; 当$\gamma < \dfrac{1+\delta_y^2}{4\mu^2\delta_y^2\left(2+\delta_y^2\right)}$ 时, $\mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{NS}*} > \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{NN}*}$且$\mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{SS}*} < \mathit{\Pi}_{s_2}^{\mathrm{SN}*}$.　证毕.

引理A2结果表明两个供应商要么均获取零售商的需求信息, 要么均不获取零售商的需求信息(即零售商要么与所有的供应商共享需求信息, 要么与所有的供应商均不共享需求信息).

附录B 文中主要结果的证明

引理1的证明

计算式(2)中$\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]$关于$q_{ik}$的一阶导数, 令$\dfrac{\partial\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{ik}}=0$, 化简可得

$$q_{ik}^{\mathrm{SS}*}=\frac{\left(a+\mathrm{E}\left[\theta|X_1,X_2\right]-w_k\right)}{2\mu\left(1+\delta_y^2\right)}-\frac{1}{1+\delta_y^2}\sum_{l\neq k}^{n}q_{il}^{\mathrm{SS}*}-\frac{1}{2}\mathrm{E}\left[q_{jk}^{\mathrm{SS}*}|X_1,X_2\right]-\frac{1}{2\left(1+\delta_y^2\right)}\sum_{l\neq k}^{n}\mathrm{E}\left[q_{jl}^{SS*}|X_1,X_2\right].\quad\text{(B1)}$$

进一步计算$\dfrac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{ik}\partial q_{il}}$, 可得如下矩阵

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}\frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{i1}\partial q_{i1}} & \frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{i1}\partial q_{i2}} & \cdots & \frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{i1}\partial q_{in}}\\ \frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{i2}\partial q_{i1}} & \frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{i2}\partial q_{i2}} & \cdots & \frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{i2}\partial q_{in}}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{in}\partial q_{i1}} & \frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{in}\partial q_{i2}} & \cdots & \frac{\partial^2\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]}{\partial q_{in}\partial q_{in}}\end{pmatrix}=-2\mu^2\begin{pmatrix}\left(1+\delta_y^2\right) & 1 & \cdots & 1\\ 1 & \left(1+\delta_y^2\right) & \cdots & 1\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & 1 & \cdots & \left(1+\delta_y^2\right)\end{pmatrix}\quad\text{(B2)}$$

根据矩阵的知识可判断矩阵$\boldsymbol{B}$是负定矩阵. 于是, 可知目标函数$\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,X_2\right]$是关于$q_{ik}, k=1,2,\ldots,n$联合凹的. 解方程组(B1)可以得到$q_{ik}^{\mathrm{SS}*}$对$q_{jk}^{\mathrm{SS}*}$的最优响应函数为

$$q_{ik}^{\mathrm{SS}*}=\frac{a-w_k}{2\mu\delta_y^2}-\frac{\sum\limits_{k=1}^{n}\left(a-w_k\right)}{2\mu\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)}+\frac{\mathrm{E}\left[\theta|X_1,X_2\right]}{2\mu\left(\delta_y^2+n\right)}-\frac{1}{2}\mathrm{E}\left[q_{jk}^{\mathrm{SS}*}|X_1,X_2\right].\quad\text{(B3)}$$

由文献[33]的命题1, 可知式(B3)存在如下唯一的纳什–贝叶斯均衡解

$$q_{ik}^{\mathrm{SS}*}=\frac{a-w_k}{3\mu\delta_y^2}-\frac{\sum\limits_{k=1}^{n}(a-w_k)}{3\mu\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)}+\frac{1}{3\mu\left(\delta_y^2+n\right)(2+\varepsilon)}\left(X_1+X_2\right). \tag{B4}$$

将式(B4)中的$q_{ik}^{\mathrm{SS}*}$代入式(3), 可得供应商k的最优批发价格和成本减少努力水平满足如下一阶最优条件

$$w_k^{\mathrm{SS}*}=\frac{a+c}{2}-\frac{\sum\limits_{l\neq k}^{n}\left(a-w_l^{\mathrm{SS}*}\right)}{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]}+\frac{\delta_y^2}{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right](2+\varepsilon)}\left(X_1+X_2\right)-\frac{1}{2\mu}e_k^{\mathrm{SS}*}. \tag{B5}$$

$$e_k^{\mathrm{SS}*}=\frac{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\left(a-w_k^{\mathrm{SS}*}\right)}{3\gamma\mu\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)}-\frac{2\sum\limits_{l\neq k}^{n}\left(a-w_l^{\mathrm{SS}*}\right)}{3\gamma\mu\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)}+\frac{2}{3\gamma\mu\left(\delta_y^2+n\right)(2+\varepsilon)}\left(X_1+X_2\right). \tag{B6}$$

将式(B6)代入式(B5)并化简, 可得

$$\begin{aligned}w_k^{\mathrm{SS}*}=&\frac{\left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)-2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}a}{2\left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)-\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}+\frac{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)c}{2\left\{3k\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)-\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}-\\&\frac{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)\sum\limits_{l\neq k}^{n}\left(a-w_l^{\mathrm{SS}*}\right)-2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\sum\limits_{l\neq k}^{n}\left(a-w_l^{\mathrm{SS}*}\right)}{2\left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]-\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2\right\}}+\\&\frac{3\gamma\mu^2\delta_y^4\left(\delta_y^2+n\right)\left(X_1+X_2\right)-2\delta_y^2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\left(X_1+X_2\right)}{2\left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]-\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2\right\}(2+\varepsilon)}.\end{aligned} \tag{B7}$$

由文献[33]的命题1, 可知, 上面的方程组存在唯一的均衡解$w_k^{\mathrm{SS}*}$, $e_k^{\mathrm{SS}*}$. 将$w_k^{\mathrm{SS}*}$代入式(B4) 并化简, 可得$q_{ik}^{\mathrm{SS}*}$. 然后将$q_{ik}^{\mathrm{SS}*}$、$e_k^{\mathrm{SS}*}$ 和式$w_k^{\mathrm{SS}*}$相应地代入式(2)和式(3), 分别计算$\mathrm{E}\left[\pi_{r_i}|X_1,\ X_2\right]$和$\mathrm{E}\left[\pi_{s_k}|X_1,\ X_2\right]$关于$X_1$和$X_2$的期望, 可得$\Pi_{r_i}^{\mathrm{SS}*}$, $\Pi_{r_i}^{\mathrm{SS}*}$ 以及相应的$\Pi_{sc}^{\mathrm{SS}*}$. 证毕.

引理2的证明 与引理1的证明类似, 省略.

引理3的证明 与引理1的证明类似, 省略.

表2的证明

1) 分别计算ξ_{ki}^{SS}关于γ、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial\xi_{ki}^{\mathrm{SS}}}{\partial\gamma}=\frac{6\mu^2\left[(n-1)+\delta_y^2\right]^2(n+\delta_y^2)}{(2+\varepsilon)R^2}>0,$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial\xi_{ki}^{\mathrm{SS}}}{\partial\delta_y}=&-\frac{\delta_y\left\{-2\left[(n-1)+\delta_y^2\right]\left(-1+n+\delta_y^2\right)\right\}\left\{-4\delta_y+12\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)+6\mu^2\gamma\left[(n-1)+2\delta_y^2\right]\right\}}{(2+\varepsilon)R^2}-\\&\frac{\delta_y\left\{3\mu^2\gamma\delta_y^2\left(n+\delta_y^2\right)\right\}\left\{-4\delta_y+12\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)+6\mu^2\gamma\left[(n-1)+2\delta_y^2\right]\right\}}{(2+\varepsilon)R^2}+\\&\frac{\left\{-4\delta_y+6\mu^2\gamma\delta_y^3+6\mu^2\gamma\delta_y(n+\delta_y^2)\right\}}{(2+\varepsilon)R}=\frac{\Psi_1\left(\gamma,\ \delta_y,\ n\right)}{2+\varepsilon},\end{aligned}$$

$$\frac{\partial\xi_{ki}^{\mathrm{SS}}}{\partial n}=-\frac{3\mu^2\gamma\left[3\mu^2\gamma\delta_y^6+2\left(3n\mu^2\gamma-1\right)\delta_y^4+\left(3\mu^2\gamma n^2+4\right)\delta_y^2-2(n-1)^2\right]}{(2+\varepsilon)R^2}=\frac{\Psi_2\left(\gamma,\ \delta_y,\ n\right)}{2+\varepsilon}.$$

2) 分别计算ζ_{ki}^{SS}关于γ、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial\zeta_{ki}^{\mathrm{SS}}}{\partial\gamma}=-\frac{6\mu^3\left[(n-1)+\delta_y^2\right]\left[(n-1)+2\delta_y^2\right]\left(n+\delta_y^2\right)}{(2+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$\frac{\partial\zeta_{ki}^{\mathrm{SS}}}{\partial\delta_y}=-\frac{12\mu^3\gamma\delta_y\left[(2n-1)(n-1)+2\delta_y^4+4(n-1)\delta_y^2\right]}{(2+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$\frac{\partial\zeta_{ki}^{\mathrm{SS}}}{\partial n}=-\frac{6\mu^3\gamma\left[(n-1)^2+\delta_y^4+(2n-3)\delta_y^2\right]}{(2+\varepsilon)R^2}<0.$$

3) 分别计算f_{iki}^{SS}关于γ、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial f_{iki}^{\mathrm{SS}}}{\partial\gamma}=-\frac{2\mu\left[(n-1)+\delta_y^2\right]^2}{(2+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$\frac{\partial f_{iki}^{\mathrm{SS}}}{\partial\delta_y}=-\frac{6\mu^3\gamma^2\delta_y\left[(2n-1)(n-1)+2\delta_y^4+4(n-1)\delta_y^2\right]}{(2+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$\frac{\partial f_{iki}^{\mathrm{SS}}}{\partial n}=-\frac{3\mu^3\gamma^2\left[(n-1)^2+\delta_y^4+(2n-3)\delta_y^2\right]}{(2+\varepsilon)R^2}<0.$$

证毕.

表3的证明

1) 分别计算ξ_{k1}^{SN}关于γ、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial\xi_{k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial\gamma}=\frac{6\mu^2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2(n+\delta_y^2)}{(1+\varepsilon)R^2}>0,$$

$$\frac{\partial\xi_{k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial\delta_y}=-\frac{\left\{-2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+3\mu^2\gamma\delta_y^2\left(n+\delta_y^2\right)\right\}\left\{-4\delta_y+12\mu^2\gamma\delta_y\left(n+\delta_y^2\right)+6\mu^2\gamma\delta_y\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}{(1+\varepsilon)R^2}+$$
$$\frac{-4\delta_y+6\mu^2\gamma\delta_y^3+6\mu^2\gamma\delta_y(n+\delta_y^2)}{(1+\varepsilon)R}=\frac{\Psi_1(\gamma,\ \delta_y,\ n)}{1+\varepsilon},$$

$$\frac{\partial\xi_{k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial n}=-\frac{3\mu^2\gamma\left[3\mu^2\gamma\delta_y^6+2\left(3n\mu^2\gamma-1\right)\delta_y^4+\left(3\mu^2\gamma n^2+4\right)\delta_y^2-2(n-1)^2\right]}{(1+\varepsilon)R^2}=\frac{\Psi_2(\gamma,\ \delta_y,\ n)}{1+\varepsilon}.$$

2) 分别计算ζ_{k1}^{SN}关于γ、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial\zeta_{k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial\gamma}=-\frac{6\mu^3\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\left(n+\delta_y^2\right)}{(1+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$\frac{\partial\zeta_{k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial\delta_y}=-\frac{12\mu^3\gamma\delta_y\left[(2n-1)(n-1)+2\delta_y^4+4(n-1)\delta_y^2\right]}{(1+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$\frac{\partial\zeta_{k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial n}=-\frac{6\mu^3\gamma\left[(n-1)^2+\delta_y^4+(2n-3)\delta_y^2\right]}{(1+\varepsilon)R^2}<0.$$

3) 分别计算f_{1k1}^{SN}关于γ、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial f_{1k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial\gamma}=-\frac{2\mu\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2}{(1+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$\frac{\partial f_{1k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial\delta_y}=-\frac{6\mu^3\gamma^2\delta_y\left[(2n-1)(n-1)+2\delta_y^4+4(n-1)\delta_y^2\right]}{(1+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$\frac{\partial f_{1k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial n}=-\frac{3\mu^3\gamma^2\left[(n-1)^2+\delta_y^4+(2n-3)\delta_y^2\right]}{(1+\varepsilon)R^2}<0.$$

4) 分别计算f_{2k1}^{SN}关于γ、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial f_{2k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial\gamma}=-\frac{2\mu\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2}{(1+\varepsilon)R^2}<0,$$

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial f_{2k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial \delta_y} = & -\frac{\left\{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}\left\{-4y+12\mu^2\gamma\delta_y\left(n+\delta_y^2\right)+6\mu^2\gamma\delta_y\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)R^2}- \\
& \frac{\left\{2\varepsilon\mu^2\gamma\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\left(n+\delta_y^2\right)\right\}\left\{-4y+12\mu^2\gamma\delta_y\left(n+\delta_y^2\right)+6\mu^2\gamma\delta_y\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)R^2}- \\
& \frac{\left\{-\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}\left\{-4y+12\mu^2\gamma\delta_y\left(n+\delta_y^2\right)+6\mu^2\gamma\delta_y\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)R^2}+ \\
& \frac{4\delta_y+4\varepsilon\mu^2\gamma\delta_y\left[\delta_y^2+(n-1)\right]-4\mu^2\gamma\delta_y\left(n+\delta_y^2\right)+4\varepsilon\mu^2\gamma\delta_y\left(n+\delta_y^2\right)-2\mu^2\gamma\delta_y\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+y^2\right)R}- \\
& \frac{\delta_y\left(2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+2\varepsilon\mu^2\gamma\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\left(n+\delta_y^2\right)-\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right)}{\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)^2R} \\
= & \Psi_3\left(\gamma,\ \delta_y,\ n\right),
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial f_{2k1}^{\mathrm{SN}}}{\partial n} = & -\frac{\left\{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}\left\{-2+3\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)+3\mu^2\gamma\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)R^2}- \\
& \frac{\left\{2\varepsilon\mu^2\gamma\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\left(n+\delta_y^2\right)\right\}\left\{-2+3\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)+3\mu^2\gamma\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)R^2}- \\
& \frac{\left\{-\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}\left\{-2+3\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)+3\mu^2\gamma\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]\right\}}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)R^2}+ \\
& \frac{2+2\varepsilon\mu^2\gamma\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)+2\varepsilon\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)-\mu^2\gamma\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)R}- \\
& \frac{2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+2\varepsilon\mu^2\gamma\left[\delta_y^2+(n-1)\right]\left(n+\delta_y^2\right)-\mu^2\gamma\left(n+\delta_y^2\right)\left[2\delta_y^2+(n-1)\right]}{2\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)\mu\left(n+\delta_y^2\right)^2R} \\
= & \Psi_4\left(\gamma,\ \delta_y,\ n\right).
\end{aligned}
$$

证毕.

定理1的证明

由表4中的结果, 可得

$$
\Pi_{s_k}^{\mathrm{SN}}-\Pi_{s_k}^{\mathrm{NN}}=\frac{2\gamma\mu^2\left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]-\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2\right\}\sigma_\theta^2}{(1+\varepsilon)R^2}>0,
$$

$$
\Pi_{s_k}^{\mathrm{SS}}-\Pi_{s_k}^{\mathrm{NS}}=\frac{2\gamma\mu^2\left\{3\gamma\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]-\left[\delta_y^2+(n-1)\right]^2\right\}\varepsilon\sigma_\theta^2}{(2+\varepsilon)(1+\varepsilon)R^2}>0.
$$

经分析可得, 若$\gamma>\gamma_1$, 则$\Pi_{s_k}^{\mathrm{SS}}>\Pi_{s_k}^{\mathrm{NS}}=\Pi_{s_k}^{\mathrm{SN}}>\Pi_{s_k}^{\mathrm{NN}}>0$. 其中 $\gamma_1=\dfrac{\delta_y^2+(n-1)}{3\mu^2\delta_y^2\left(\delta_y^2+n\right)}$. 证毕.

定理2的证明

由表4中的结果, 可得

$$
\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{NN}*}=-\frac{\left\{T+\left[\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+T\right]\varepsilon\right\}\left[\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right](2\varepsilon+3)+(1+\varepsilon)R\right]}{\left(\delta_y^2+n\right)(2\varepsilon+3)^2(\varepsilon+1)R^2},
$$

$$
\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}=-\frac{n\left\{\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+T\right\}\left\{2\gamma\mu^2\left(\delta_y^2+n\right)\left[\delta_y^2+(n-1)\right]+R\right\}\sigma_\theta^2\varepsilon}{4\left(\delta_y^2+n\right)(\varepsilon+2)(\varepsilon+1)R^2},
$$

其中 $T=3\gamma\mu^2\delta_y^2\left[\delta_y^2+n\right]-2\left[\delta_y^2+(n-1)\right]$.

令$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{NN}*}=0$, 有$\gamma=\gamma_1$, 经分析, 可得a) 若$\gamma<\gamma_1$, 则$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{NN}*}>0$; b) 若$\gamma>\gamma_1$, 则$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*}<\Pi_{r_1}^{\mathrm{NN}*}$.

令$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}=0$, 有$\gamma=\gamma_3$, 经分析, 可得a) 若$\gamma<\gamma_3$, 则$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}>0$; b) 若$\gamma>\gamma_3$, 则$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*}<\Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}$.

于是, 解表5中的矩阵博弈, 可得:

1) 当$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*} > \Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}$且$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*} > \Pi_{r_1}^{\mathrm{NN}*}$, 即$\gamma < \min\{\gamma_2, \gamma_3\}$时, 策略(S, S)是一个主导的均衡策略.

2) 当$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*} < \Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}$且$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*} < \Pi_{r_1}^{\mathrm{NN}*}$, 即$\gamma > \max\{\gamma_2, \gamma_3\}$时, 策略(N, N)是一个主导的均衡策略.

3) 当$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*} < \Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}$且$\Pi_{r_2}^{\mathrm{NS}*} > \Pi_{r_2}^{\mathrm{NN}*}$, 即$\gamma_3 < \gamma < \gamma_2$时, 存在两个均衡策略(S, N) 和(N,S).

4) 当$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*} > \Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}$且$\Pi_{r_2}^{\mathrm{SS}*} > \Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*}$, 即$\gamma < \gamma_3$时, 策略(S, S)是一个的均衡策略.

5) 当$\Pi_{r_1}^{\mathrm{SN}*} < \Pi_{r_1}^{\mathrm{NN}*}$且$\Pi_{r_2}^{\mathrm{NS}*} < \Pi_{r_2}^{\mathrm{NN}*}$, 即$\gamma > \gamma_2$时, 策略(N, N)是一个的均衡策略. 证毕.

表6的证明

1) 分别计算γ_2关于ε、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial \gamma_2}{\partial \varepsilon} = -\frac{2\left[(n-1)+\delta_y^2\right]^2}{\mu^2\left(n+\delta_y^2\right)\left\{3\delta_y^2+\varepsilon\left[(n-1)+4\delta_y^2\right]\right\}^2} < 0,$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \gamma_2}{\partial \delta_y} &= -\frac{4\left(1+\varepsilon\right)\delta_y\left\{\varepsilon+n^2\left(3+4\varepsilon\right)-6\delta_y^2-8\varepsilon y^2+3\delta_y^4+4\varepsilon\delta_y^4+n\left[-3+6\delta_y^2+\varepsilon\left(-5+8\delta_y^2\right)\right]\right\}}{\mu^2\left(n+\delta_y^2\right)^2\left\{3\delta_y^2+\varepsilon\left[(n-1)+4\delta_y^2\right]\right\}^2} \\ &= \Phi_1\left(\varepsilon,\ \delta_y,\ n\right),\end{aligned}$$

$$\frac{\partial \gamma_2}{\partial n} = -\frac{2\left(1+\varepsilon\right)\left\{-3\delta_y^2+\varepsilon\left[1+n^2-5\delta_y^2+\delta_y^4+2n\left(-1+\delta_y^2\right)\right]\right\}}{\mu^2\left(n+\delta_y^2\right)^2\left\{3\delta_y^2+\varepsilon\left[(n-1)+4\delta_y^2\right]\right\}^2} = \Phi_2\left(\varepsilon,\ \delta_y,\ n\right).$$

2) 分别计算γ_3关于ε、δ_y和n的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial \gamma_3}{\partial \varepsilon} = 0,$$

$$\frac{\partial \gamma_3}{\partial \delta_y} = -\frac{4y\left[\left(4n-5\right)\left(n-1\right)+8\left(n-1\right)\delta_y^2+4\delta_y^4\right]}{\mu^2\left(n+\delta_y^2\right)^2\left[(n-1)+4\delta_y^2\right]^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \gamma_3}{\partial n} = -\frac{2\left[1+n^2-5\delta_y^2+\delta_y^4+2n\left(-1+\delta_y^2\right)\right]}{\mu^2\left(n+\delta_y^2\right)^2\left[(n-1)+4\delta_y^2\right]^2} = \Phi_3\left(\delta_y,\ n\right).$$

证毕.

定理3的证明

结合由定理1的证明过程, 可知要使两个零售商均愿意与供应商共享需求信息, 供应商k需提供的最小支付费用为m^*=$\dfrac{\Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*}}{n}$=$\dfrac{\Pi_{r_2}^{\mathrm{SN}*}-\Pi_{r_2}^{\mathrm{SS}*}}{n}$. 同时, m^*还应该满足条件$2m^* < \Pi_{s_k}^{\mathrm{SS}*}-\Pi_{s_k}^{\mathrm{NN}*}$. 因此, 策略(S, S)存在只有当参数满足$n\left(\Pi_{s_k}^{\mathrm{SS}*}-\Pi_{s_k}^{\mathrm{NN}*}\right)-2\left(\Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*}\right) > 0$.

由表4, 可得

$$\Lambda = n\left(\Pi_{s_k}^{\mathrm{SS}*}-\Pi_{s_k}^{\mathrm{NN}*}\right)-2\left(\Pi_{r_1}^{\mathrm{NS}*}-\Pi_{r_1}^{\mathrm{SS}*}\right) = \frac{n\sigma_\theta^2\psi_2-\psi_1 n\sigma_\theta^2\varepsilon}{2\left(\delta_y^2+n\right)\left(2+3\varepsilon+\varepsilon^2\right)R^2}.$$

令$\Lambda = 0$, 有$\psi_2 = \psi_1\varepsilon$, 经分析, 可得当$\dfrac{1}{\varepsilon} > \varepsilon_1 = \dfrac{\psi_1}{\psi_2}$时, 有$\Lambda > 0$. 证毕.