第 20 卷第 8 期　　管 理 科 学 学 报　　Vol.20 No.8
2017 年 8 月　　JOURNAL OF MANAGEMENT SCIENCES IN CHINA　　Aug. 2017

供应风险下双源采购批发单价拍卖最优设计①

李志鹏[1]，黄　河[1,2*]，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: 考虑多个具有供应风险和成本私有信息的潜在供应商，研究了供应商投标批发单价的最优双源采购拍卖机制设计. 首先，针对一般的采购商收益函数，求出了最优的订货量分配规则和供应商投标均衡，并分别与单源采购及对称信息对比，发现双源采购拍卖增加了采购商和供应商的期望利润，不对称信息对供应商有利但对采购商和供应链不利. 然后，分别针对报童及垄断环境，进一步分析了双源采购拍卖下的订货分散程度、信息价值和双源采购价值，发现，订货分散程度与供应风险及两个获胜者的利润率贡献相近程度正相关; 高成本获胜者比成本较低者索取更高的单位信息租金，导致不对称信息下的订货分散程度比对称信息下低; 供应风险越高或投标人数越多时，双源采购价值越大.

关键词: 采购拍卖; 供应风险; 双源采购; 不对称信息; 最优机制
中图分类号: F724.59　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1007-9807(2017)08-0039-11

0　引　言

采购拍卖(procurement auctions)，又称逆向拍卖或招标，是指多个潜在供应商对产品或服务进行竞价，采购商再根据竞价结果做出采购决策的机制. 由于交易中广泛存在不对称信息(比如生产成本信息)，逆向拍卖体现出了强大的价格发现功能，已成为目前最流行的采购机制之一. 而近年来，业务外包的发展和供应链全球化使企业的采购管理活动面临更多的不确定性，对采购拍卖机制的设计与执行提出了新的挑战. 一方面，企业在采购时往往面临不确定需求，这要求采购拍卖机制能够灵活调整订货数量. 目前很多逆向拍卖中的采购数量是事先确定的，不随投标结果变化，这往往不是最优的. 如经典的报童模型和垄断模型就表明，当需求随机或受售价影响时，订货数量应当与采购价格相关. 为了改进效率，由投标结果内生决定订货数量的拍卖机制近年来备受关注[1-4]. 其中，作为最简单的供应商竞争形式和采购商订货决策基准，投标批发单价的应用十分广泛[3,4]. 比如，中国移动常常在供应商投标批发单价后再决定实际采购数量(b2b.10086.cn)，美国的电力批发市场也普遍采用批发单价投标. 另一方面，供应风险的普遍存在[5,6]要求企业的采购拍卖机制具备风险应对功能. 无论是各类自然灾害(如海啸、台风、地震和火灾等)或人为因素(如恐怖袭击、工人罢工和政治动荡等)造成的供应链中断，还是产品的生产、存储、搬运和配送等过程本身就具有的产出不确定性，都对企业的经济利益造成重要影响. 如 2011 年日本大地震造成当地汽车零部件供应的全面瘫痪，丰田公司被迫关闭其所有在日工厂并遭受每日 7 300 万美元的巨额损失[7]. 作为最常见的风险应对工具，双源采购策略被许多企业广泛采用[8,9]. 如波音公司为了避免工人罢工造成供应中断，决定双

① 收稿日期: 2016-02-14; 修订日期: 2016-06-29.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471021; 71472017); 国家高层次人才特殊支持计划青年拔尖人才资助项目; 中央高校基本科研业务资助项目(2017CDJSK02XK06); 重庆市研究生科研创新资助项目(CYB15003).
通讯作者: 黄　河(1977—)，男，重庆人，博士，教授，博士生导师. Email: huanghe@cqu.edu.cn

源采购 787 客机的所有零部件[10]; 惠普为了减少 DeskJet 打印机的供应风险而同时从新加坡和温哥华进行采购[11]. 既往的采购拍卖研究大多只针对单源采购[1-4,12,13],而考虑了双源/多源采购的拍卖机制又主要针对生产规模不经济[14]、供应产能限制[15]、预留供应商[16]等原因,缺少对供应风险的考虑. 因此,在供应风险环境下,如何用逆向拍卖实现最优的双源采购是一个重要的科学问题.

基于以上采购现实和研究现状,研究当采购商面临多个具有生产成本私有信息和供应风险的潜在供应商时,如何设计最优的双源采购批发单价拍卖机制. 相较于传统的单源采购拍卖(只有一个获胜者),供应风险下的双源采购拍卖(可以有两个获胜者)具有全新的机制设计特征. 一方面,给定投标结果,采购商需要权衡采购成本与供应风险,为了降低采购成本,订货量应尽量集中于价格最低的供应商; 但为了分散供应风险,订货量又应尽量分散于价格最低和次低的两位供应商之间. 另一方面,给定采购商的上述考虑,供应商的投标行为将明显区别于单源采购拍卖或不考虑供应风险的双源采购拍卖,因为每个获胜者的订货数量会同时受到两个获胜者的批发价和可靠性的影响. 除了传统拍卖中获胜概率与事后利润之间的权衡,本文模型中的供应商需要考虑单位利润与订货数量这一对新的权衡.

在供应风险下研究双源/多源采购的既往文献中,绝大多数只考虑对称信息的情况[8,17,18]. 有少量新近文献在不对称信息下研究了相关的双源/多源采购机制设计[9,19-21]. Chaturvedi 和 Martínez-de-Albéniz[19]在两个维度不对称信息下探讨了最优的多源采购直接机制(direct mechanism)设计. 由于假设的一般性和分配问题的复杂性,最优的多源采购机制非常复杂,不易于理解和执行,这也是双源采购如此普遍的原因之一. 另外,出于商业保密等原因,现实中的供应商一般不愿意直接报告自己的真实成本,所以直接机制的应用非常少见. 与 Chaturvedi 和 Martínez-de-Albéniz[19]的研究不同,本文关注双源采购中的非直接投标行为,即批发单价投标行为. 在只有两个潜在供应商且可靠性为私有信息的情况下, Yang 等[9], Gurnani 等[20]和 Gümüs 等[21]分别研究了不同的双源采购机制. 其中 Yang 等[9]研究了最优双源采购合同设计. Gurnani 等[20]考虑了拍卖机制,但供应商的投标是一个支付函数而不是确定的价格; 而且由于只有一个供应商不可靠,该机制的均衡结果不出现双源采购的情况. Gümüs 等[21]考虑了供应商之间的单价竞争,但他们假设只有一位供应商有私有信息,且关注的是该供应商和采购商之间的信号博弈,而非采购商的机制设计问题. 与以上三篇文章不同,本文在一般的采购商收益函数和随机产出率分布下,研究如何通过批发单价投标,从多个具有成本私有信息的潜在供应商中选出至多两位获胜供应商进行采购.

1 模型描述

采购商向 $n \geqslant 3$ 个潜在供应商采购某产品用于销售. 在市场端,采购商投放 $Q \geqslant 0$ 单位产品可获得期望收益 $R(Q)$,其中 $R(0)=0$, $R'(\cdot) > 0$ 且 $R''(\cdot) < 0$. 许多常见市场结构下的采购商期望收益函数都满足此假设,如报童模型和垄断模型(详见第 3 节). 在供应端,由于生产、存储、搬运和配送等过程中的不确定性,供应商具有随机产出供应风险,给定订货量 Q_i,供应商 $i \in \{1,\cdots,n\}$ 只能成功交付其中的一定比例 $\rho_i \in [0,1]$. 产出率 $\{\rho_i\}_{i=1}^{n}$ 是独立同分布的随机变量,均值为 μ,标准差为 σ. 对供应商 i,每单位成功交付产品的成本 c_i 为其私有信息; 不妨设 $c_1 \leqslant c_2 \leqslant \cdots \leqslant c_n$. 所有供应商的成本 $\{c_i\}_{i=1}^{n}$ 在 $[\underline{c},\bar{c}]$ 上独立且服从于相同分布 $F(\cdot)$,密度函数为 $f(\cdot)$. 假设 $F(\cdot)$ 是对数凹函数,这是一个很多分布(如均匀分布、正态分布、指数分布等)都满足的常见假设,它保证了虚拟成本(virtual cost) $\psi(c)=c+F(c)/f(c)$ 为增函数这一正则性(regularity)条件[1]. 另外,假设 $\psi(\bar{c}) \leqslant R'(0)$ 以保证采购商一定会采购[1],且 $R'(\infty) \leqslant 0$ 以确保采购商的订货数量有限.

采购商通过如下拍卖机制实现双源采购以分散供应风险,事件发生顺序如图 1 所示. 首先,采购商公布订货量分配规则 $Q(\cdot)=(Q_1(\cdot),\cdots,Q_n(\cdot))$,规定了每个供应商 $i \in \{1,\cdots,n\}$ 在任意批发价投标向量 $\boldsymbol{w}=(w_1,\cdots,w_n)$(不妨设 $0 \leqslant$

$w_1 \leqslant \cdots \leqslant w_n \leqslant R'(0)$ 下的供货数量 $Q_i(w)$. 其中供货量严格为正的供应商至多有两个,称之为获胜供应商. 知晓分配规则后,所有供应商对各自的批发单价 w_i^* ($i \in \{1,\cdots,n\}$) 进行一次性密封投标,产生投标向量 $\boldsymbol{w}^* = (w_1^*,\cdots,w_n^*)$. 然后,采购商根据分配规则 $\boldsymbol{Q}(\cdot)$ 和投标向量 $\boldsymbol{w}^*$,确定至多两位获胜者及其订货量. 接着,随机产出实现,获胜供应商 i 以批发单价 w_i^* 交付 $\rho_i Q_i(\boldsymbol{w}^*)$ 件产品. 最后,采购商将所有成功交付的产品销往市场,获得销售收入.

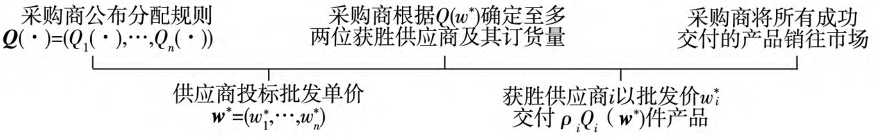


图 1　事件顺序

Fig. 1 Sequence of events

2　最优双源采购机制设计

先研究给定批发价时的双源采购决策,再研究供应商投标批发单价的双源采购拍卖最优机制设计②.

2.1　给定批发价时的双源采购决策

供应风险环境下,供应商的可靠性(随机产出率)和批发价格都会影响采购商的订货决策.由于随机产出率的对称性(独立同分布),给定批发价格 $0 \leqslant w_1 \leqslant \cdots \leqslant w_n \leqslant R'(0)$ 时,采购商只可能向价格最低的两位供应商订货,故其双源采购决策问题可表述为

$$\max_{Q_1 \geqslant 0, Q_2 \geqslant 0} \pi(Q_1, Q_2) \tag{1}$$

其中 $\pi(Q_1,Q_2) = \mathrm{E}_{\rho_1,\rho_2}\left[R\left(\sum_{i=1}^{2}\rho_i Q_i\right) - \sum_{i=1}^{2}\rho_i Q_i w_i\right]$ 为订货量为 (Q_1,Q_2) 时采购商的期望利润.

引理 1　$\pi(Q_1,Q_2)$ 是 Q_1 的凹函数和 (Q_1, Q_2) 的联合凹函数.

证明　$\pi(Q_1,Q_2)$ 对 Q_i ($i = 1,2$) 的二阶导和对 (Q_1,Q_2) 的混合偏导分别为

$$\frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_i^2} = \mathrm{E}\left[R''\left(\sum_{j=1}^{n}\rho_j Q_j\right)\rho_i^2\right] < 0$$

$$\frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_1 \partial Q_2} = \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_2 \partial Q_1} = \mathrm{E}\left[R''\left(\sum_{j=1}^{2}\rho_j Q_j\right)\rho_1\rho_2\right] < 0$$

其中 $\partial^2\pi/\partial Q_1^2 < 0$ 表明 $\pi(Q_1,Q_2)$ 是 Q_1 的凹函数. 为了证明 $\pi(Q_1,Q_2)$ 是 (Q_1,Q_2) 的联合凹函数,需证 $\pi(Q_1,Q_2)$ 的海森矩阵为负定,这等价于证明 $\partial^2\pi/\partial Q_1^2 < 0$ (已证明) 和

$$\mathrm{E}\left[-R''\left(\sum_{j=1}^{2}\rho_j Q_j\right)\rho_1^2\right]\mathrm{E}\left[-R''\left(\sum_{j=1}^{2}\rho_j Q_j\right)\rho_2^2\right] - \left(\mathrm{E}\left[-R''\left(\sum_{j=1}^{2}\rho_j Q_j\right)\rho_1\rho_2\right]\right)^2 > 0 \tag{2}$$

根据柯西-施瓦茨不等式(Cauchy-Schwarz inequality), $|\mathrm{E}[XY]|^2 \leqslant \mathrm{E}[|X|^2]\mathrm{E}[|Y|^2]$ 对任意随机变量 X 和 Y 成立,其中等号仅当存在实数 α 使 $\Pr\{\alpha X + Y = 0\} = 1$ 时成立. 现令

$$X = \sqrt{-R''\left(\sum_{j=1}^{2}\rho_j Q_j\right)} \times \rho_1$$

$$Y = \sqrt{-R''\left(\sum_{j=1}^{2}\rho_j Q_j\right)} \times \rho_2$$

易知不存在实数 α 使 $\Pr\{\alpha X + Y = 0\} = 1$,从而可得 $|\mathrm{E}[XY]|^2 < \mathrm{E}[|X|^2]\mathrm{E}[|Y|^2]$,即式(2).

证毕.

Burke 等[17]研究了与问题(1)类似的多源采购决策问题. 他们在需求服从均匀分布的报童模型下证明了采购商目标函数的凹性. 与之不同,本文针对双源采购这种常见的情形,在一般的采购商期望收益函数 $R(\cdot)$ 下证明了采购商目标函数的凹性. 引理 1 表明,问题(1)的库恩—塔克(K-T)条件就是最优订货决策的充要条件. 据此得到以下引理.

② 本节分析中,供应可靠性(或供应风险)以随机产出率的形式贯穿始终,但文章暂不对其进行量化,原因有二,1) 本节旨在机制设计与均衡求解,可靠性的量化并不影响相应的分析;2) 采购商的收益函数 $R(\cdot)$ 形式未定且函数内外都有随机产出率参数,故难以在事前对可靠性进行量化. 在第 3 节,文章将针对具体形式的 $R(\cdot)$,用随机产出率的均值和方差量化可靠性并分析其影响.

引理 2 记方程

$$\mathrm{E}[R'(\rho_1 Q_1)\rho_1] = \mu w_1 \tag{3}$$

的唯一解为 $Q_1 = Q^S(w_1)$，方程组

$$\mathrm{E}[R'(\sum_{j=1}^{2}\rho_j Q_j)\rho_i] = \mu w_i,\ i = 1,2 \tag{4}$$

的唯一解为 $(Q_1, Q_2) = (Q^D(w_1, w_2), Q^D(w_2, w_1))$. 则给定 w_1 和 w_2，采购商的最优双源采购订货数量为，当 $w_2 > \mathrm{E}_{\rho_1}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$ 时，

$$Q_1^*(w_1, w_2) = Q^S(w_1),\ Q_2^*(w_1, w_2) = 0;$$

当 $w_2 \leqslant \mathrm{E}_{\rho_1}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$ 时，

$$Q_1^*(w_1, w_2) = Q^D(w_1, w_2)$$
$$Q_2^*(w_1, w_2) = Q^D(w_2, w_1)$$

证明 问题(1)的 K-T 条件为

$$\mathrm{E}[R'(\sum_{j=1}^{2}\rho_j Q_j)\rho_i] = \mu w_i - \lambda_i$$
$$\lambda_i \geqslant 0,\ Q_i \geqslant 0,\ \lambda_i Q_i = 0,\ i = 1,2.$$

分情况讨论

(i) 若 $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$，则 $Q_i = 0$ 和 $\lambda_i = \mu[w_i - R'(0)] > 0$，与假设 $w_i \leqslant R'(0)$ 矛盾.

(ii) 若 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 > 0$，则 $Q_2 = 0$,

$$\lambda_2 = \mu\{w_2 - \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q_1)]\} > 0$$

且 $\mathrm{E}[R'(\rho_1 Q_1)\rho_1] = \mu w_1$(即式(3)). 因为 $R'(0) \geqslant w_1$, $R'(\infty) \leqslant 0$ 且 $R'(\cdot)$ 为减函数，所以存在唯一的内解 $Q_1 = Q^S(w_1)$.

(iii) 若 $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 = 0$，则 $Q_1 = 0$,

$$\lambda_1 = \mu\{w_1 - \mathrm{E}[R'(\rho_2 Q_2)]\} > 0$$

且 $\mathrm{E}[R'(\rho_2 Q_2)\rho_2] = \mu w_2$. 根据格兰(Gurland)不等式，对任意随机变量 X 和单调性相反的两个函数 $g_1(\cdot)$ 和 $g_2(\cdot)$，不等式

$$\mathrm{E}[g_1(X)g_2(X)] \leqslant \mathrm{E}[g_1(X)]\mathrm{E}[g_2(X)]$$

成立. 由此得到

$$\mu w_2 = \mathrm{E}[R'(\rho_2 Q_2)\rho_2] \leqslant \mathrm{E}[R'(\rho_2 Q_2)]\mathrm{E}[\rho_2] = \mu \mathrm{E}[R'(\rho_2 Q_2)]$$

而 $\lambda_1 > 0$ 又要求 $\mu w_1 > \mu\mathrm{E}[R'(\rho_2 Q_2)]$，推出 $w_2 < w_1$，与假设 $w_2 \geqslant w_1$ 矛盾.

(iv) 若 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$，则有 $Q_i \geqslant 0$ 和式(4). 先不考虑约束 $Q_i \geqslant 0$，由引理 1 可知式(4)存在唯一解. 根据对称性，将该解记为 $(Q_1, Q_2) = (Q^D(w_1, w_2), Q^D(w_2, w_1))$. 将解代回式(4)并分别对 w_1 和 w_2 求导，可得

$$\frac{\partial Q^D(w_i, w_j)}{\partial w_i} = \frac{\mu\mathrm{E}[R''(\rho_i Q_i + \rho_j Q_j)\rho_j^2]}{K} < 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial Q^D(w_i, w_j)}{\partial w_j} = \frac{\mu\mathrm{E}[R''(\rho_i Q_i + \rho_j Q_j)\rho_i\rho_j]}{-K} > 0 \tag{6}$$

其中 $i, j \in \{1, 2\}$, $i \neq j$, K 代表式(2)不等号左端的表达式. 式(4)在 $Q_2 = 0$ 时的临界条件为 $w_2 = \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$，而 $\partial Q_2/\partial w_2 \leqslant 0$，所以约束 $Q_2 \geqslant 0$ 等价于 $w_2 \leqslant \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$. 同理，约束 $Q_1 \geqslant 0$ 等价于 $w_1 \leqslant \mathrm{E}[R'(\rho_2 Q^S(w_2))]$，但它可由 $w_2 \leqslant \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$ 导出因而是松约束. 所以，情况(iv)的约束条件为 $w_2 \leqslant \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$.

总结上述四种情况的分析结果，即得式(1)的最优解. 证毕.

既往研究对最优双源采购策略的刻画，要么针对特殊的采购商期望收益函数(如 Burke 等[17]考虑需求为均匀分布的报童型期望收益)，要么关注特殊的随机产出分布(如 Chaturvedi 和 Martínez-de-Albéniz[19]在 0-1 型产出分布下刻画过). 与它们不同，引理 2 在采购商期望收益函数 $R(\cdot)$ 和随机产出分布都为一般的情况下刻画了采购商的最优双源采购决策. 结果表明，最优双源采购决策可以内生出最优单源采购的情况. 采购商是否进行双源采购，取决于其向最低价格供应商进行单源采购时的期望边际收益 $\mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$ 与次低价格 w_2 的大小关系，当 $w_2 \geqslant \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$ 时，采购商只向最低价格供应商进行单源采购；反之，则进行双源采购.

引理 3 若 $R'''(\cdot) \leqslant 0$，则给定 w_1 和 w_2，采购商的最优双源采购订货总量不低于最优单源采购订货量，即

$$Q_1^*(w_1, w_2) + Q_2^*(w_1, w_2) \geqslant Q^S(w_1)$$

证明 根据引理 2 的证明，当 $w_2 > \mathrm{E}[R'(\rho_1 \times Q^S(w_1))]$ 时，$Q_1^* + Q_2^* = Q^S(w_1)$. 故只需证明当 $w_2 \leqslant \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^S(w_1))]$ 时 $Q_1^* + Q_2^* \geqslant Q^S(w_1)$ 即可. 令

$$\begin{aligned} T &= \mathrm{E}[-R''(\rho_1 Q_1^* + \rho_2 Q_2^*)\rho_1^2] - \mathrm{E}[-R''(\rho_1 Q_1^* + \rho_2 Q_2^*)\rho_1\rho_2] \\ &= \mathrm{E}[-R''(\rho_1 Q_1^* + \rho_2 Q_2^*)\rho_1(\rho_1 - \rho_2)] \end{aligned}$$

由产出率的对称性可知互换ρ_1和ρ_2后T值不变，得$T=\mathrm{E}\left[-R''(\rho_2Q_1^*+\rho_1Q_2^*)\rho_2(\rho_2-\rho_1)\right]$，与前式相加得

$$2T=\mathrm{E}\left[(\rho_1-\rho_2)\left(R''(\rho_2Q_1^*+\rho_1Q_2^*)\rho_2-R''(\rho_1Q_1^*+\rho_2Q_2^*)\rho_1\right)\right]$$

在假设$R'''(\cdot)\leqslant 0$和均衡数量关系$Q_1^*\geqslant Q_2^*$下，上式期望符号内的表达式在$\rho_1\neq\rho_2$时恒为正，在$\rho_1=\rho_2$时为0. 因为$\Pr\{\rho_1\neq\rho_2\}>0$，故$T>0$，即$\mathrm{E}\left[-R''(\sum_{i=1}^{2}\rho_iQ_i)\rho_1^2\right]>\mathrm{E}\left[-R''(\sum_{i=1}^{2}\rho_iQ_i)\rho_1\rho_2\right]$.
从而，式(5) ~ 式(6) 表明

$$\left|\frac{\partial Q^{\mathrm{D}}(w_1,w_2)}{\partial w_2}\right|<\left|\frac{\partial Q^{\mathrm{D}}(w_2,w_1)}{\partial w_2}\right|$$

故当w_2从临界值$w_2=\mathrm{E}\left[R'(\rho_1Q^{\mathrm{S}}(w_1))\right]$开始减少时，$Q_2^*$的增加速度比$Q_1^*$的减少速度快，即$Q_1^*+Q_2^*$是递增的. 而$Q^{\mathrm{S}}(w_1)$不受$w_2$变化的影响，故当$w_2\leqslant\mathrm{E}\left[R'(\rho_1Q^{\mathrm{S}}(w_1))\right]$时，$Q_1^*+Q_2^*\geqslant Q^{\mathrm{S}}(w_1)$. 证毕.

2.2 双源采购批发单价拍卖设计与均衡求解

在 2.1 小节的基础上，本小节分析不对称信息下的双源采购拍卖设计. 与直接机制中要求供应商报告真实成本的做法不同，本文研究非直接的批发单价投标机制. 采购商的目标是设计最优分配规则来最大化自身期望利润; 供应商的目标是根据采购商公布的分配规则决定最优的批发单价投标来最大化自身期望利润. 通过机制设计理论的标准分析[22]，得到以下定理.

定理 1　如下分配规则$\boldsymbol{Q}(\cdot)$实现了最优的双源采购机制，$Q_i(w)=0$，$i=3,\cdots,n$;

$$Q_i(w)=Q_i^*(\psi(\beta^{-1}(w_1)),\psi(\beta^{-1}(w_2))),\quad i=1,2 \tag{7}$$

其中$\boldsymbol{w}=(w_1,\cdots,w_n)$为投标向量($w_1\leqslant\cdots\leqslant w_n$)，$\beta^{-1}(\cdot)$是供应商均衡投标策略

$$w_i^*=\beta(c_i)=c_i+\int_{c_i}^{\bar{c}}q(t)\,\mathrm{d}t/q(c_i)$$

的逆函数，

$$q(c)=(n-1)\left[\int_{\underline{c}}^{c}Q_2^*(\psi(x),\psi(c))\bar{F}^{n-2}(c)f(x)\,\mathrm{d}x+\int_{c}^{\bar{c}}Q_1^*(\psi(c),\psi(x))\bar{F}^{n-2}(x)f(x)\,\mathrm{d}x\right] \tag{8}$$

式(8) 为成本为c的供应商的期望订货数量.

证明　根据逆向归纳法，先分析给定分配规则时的投标均衡，再推导最优分配规则. 给定分配规则$\boldsymbol{Q}(\cdot)$，设$w_i^*=\beta(c_i)$为对称且递增的贝叶斯纳什投标均衡. 给定其他供应商都采用均衡策略，供应商i投$\beta(x_i)$时的期望利润为

$$u_i(x_i,c_i)=\mu q_i(x_i)\left[\beta(x_i)-c_i\right]$$

其中$q_i(x_i)=\mathrm{E}_{\boldsymbol{c}_{-i}}\left[Q_i(\beta(x_i),\boldsymbol{w}_{-i}^*)\right]$为期望订货数量. 分配规则$\boldsymbol{Q}(\cdot)$应满足供应商的个人理性(IR) 约束和激励相容(IC) 约束，即

(IR) $u_i(c_i,c_i)\geqslant 0,\forall i$;

(IC) $u_i(c_i,c_i)\geqslant u_i(x_i,c_i),\forall i,x_i$.

根据机制设计的标准分析[22]，(IR) 和(IC) 等价于以下三个条件

(i) $u_i(c_i,c_i)=u_i(\bar{c},\bar{c})+\mu\int_{c_i}^{\bar{c}}q_i(x)\,\mathrm{d}x$;

(ii) $q_i(c_i)$关于c_i单调不增;

(iii) $u_i(\bar{c},\bar{c})\geqslant 0$.

由条件(i) 和$u_i(c_i,c_i)$定义，可得供应商i的均衡投标策略为

$$\beta(c_i)=c_i+\left[u_i(\bar{c},\bar{c})/\mu+\int_{c_i}^{\bar{c}}q_i(x)\,\mathrm{d}x\right]/q_i(c_i)$$

采购商的目标是在$Q_i\geqslant 0$及(IR) 和(IC) 约束下最大化$\mathrm{E}_{\boldsymbol{c},\boldsymbol{\rho}}\left[R(\sum_{i=1}^{n}\rho_iQ_i)-\sum_{i=1}^{n}\rho_iQ_i\beta(c_i)\right]$. 代入$\beta(c_i)$的表达式并用条件(i) ~(iii) 替换(IR) 和(IC)，根据机制设计的标准分析[22]可得$u_i(\bar{c},\bar{c})=0$，且采购商的机制设计问题最终可表述为

$$\max_{Q_i\geqslant 0}\mathrm{E}_{\boldsymbol{\rho}}\left[R(\sum_{i=1}^{n}\rho_iQ_i)\right]-\mu\sum_{i=1}^{n}Q_i\psi(\beta^{-1}(w_i))$$

s.t. $Q_i(\boldsymbol{w})$关于w_i单调非增

由$\beta(\cdot)$和虚拟成本函数$\psi(\cdot)$的单调性可知$\psi(\beta^{-1}(w_1))\leqslant\ldots\leqslant\psi(\beta^{-1}(w_n))$，进而由引理 2 得到最优的双源采购分配规则如式(7) 所示. 易验证$Q_i(w)$满足“关于w_i单调非增”的约束条件. 最后，将投标均衡和最优分配规则代入$q_i(\cdot)$的定义，可得$q_i(\cdot)$由式(8) 给定，其中下标i可根据对称性略去. 证毕.

定理 1 刻画的双源采购批发单价拍卖机制与最优的双源采购直接机制是收益等价的，均衡时都是根据虚拟成本分配订货数量(即$Q_i^*(\psi(c_1),\psi(c_2))$，$i=1,2$). 但从实践的角度看，让供应商

投标批发单价比让供应商直接报告自己的真实成本(直接机制)更符合采购现实,也更易于被供应商接受.

上述双源采购拍卖机制中,采购商需要向两位获胜供应商支付信息租金,这使得采购商的订货决策相较于对称信息情况下产生了扭曲.那么,与对称信息情况相比,最优双源采购批发单价拍卖中采购商、供应商和供应链期望利润有何变化?

定理 2 与对称信息情况相比,不对称信息的存在增加了供应商的期望利润,降低了采购商和整条供应链的期望利润.

证明 在对称信息下,采购商按供应商成本价采购,因此供应商无利润,采购商利润就是供应链利润.此时,采购商的最优决策实现了供应链期望利润最大化,即为有效(efficient)策略.在不对称信息下,采购商按供应商的虚拟成本采购,该策略不再是有效的,所以供应链期望利润比对称信息下小.同时,两个获胜供应商都会攫取一定信息租金,因此有正的期望利润.供应链期望利润变小而供应商期望利润变大,意味着采购商期望利润变小. 证毕.

与定理 1 的证明类似,易求出单源采购拍卖机制的最优分配规则和投标均衡.

推论 1 单源采购批发单价拍卖机制中的最优分配规则为

$$Q_1 = Q^{S}(\psi(\beta_{S}^{-1}(w_1)))$$

$$Q_i = 0, i = 2, \cdots, n$$

其中 $\beta_{S}^{-1}(\cdot)$ 是供应商批发单价投标均衡 $w_i^{S} = \beta^{S}(c_i) = c_i + \int_{c_i}^{\bar{c}} q^{S}(t)\,\mathrm{d}t / q^{S}(c_i)$ 的逆函数,$q^{S}(c) = Q^{S}(\psi(c))\bar{F}^{n-1}(c)$ 为成本为 c 的供应商的期望订货数量.

根据引理 2,可知定理 1 中的双源采购机制可以内生出推论 1 中的单源采购结果.即,当 $\psi(\beta^{-1}(w_2)) < \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^{S}(\psi(\beta^{-1}(w_1))))]$ 时,采购商进行双源采购;反之,采购商只向价格最低的供应商进行单源采购.关于单源采购与双源采购中各方期望利润的比较,有以下定理.

定理 3 当 $R'''(\cdot) \leqslant 0$ 时,与最优单源采购机制相比,最优的双源采购批发单价拍卖机制实现了更高的采购商和供应商期望利润.

证明 由引理 2 的证明可知,当 $w_2 \geqslant \mathrm{E}[R'(\rho_1 \times Q^{S}(w_1))]$ 时,

$$\pi(Q_1^{*}, Q_2^{*}) = \pi(Q^{S}(w_1), 0)$$

当 $w_2 < \mathrm{E}[R'(\rho_1 Q^{S}(w_1))]$ 时,

$$\pi(Q_1^{*}, Q_2^{*}) > \pi(Q^{S}(w_1), 0)$$

即给定批发价格时,采购商在双源采购策略下的利润不低于其在单源采购策略下的利润.根据定理 1,将 w_1 和 w_2 分别替换成 $\psi(c_1)$ 和 $\psi(c_2)$ 并求期望,就得出采购商在最优双源采购批发单价拍卖中的期望利润要比最优单源采购机制下的大.记单个供应商在最优双源采购拍卖与最优单源采购机制中的期望利润分别为 U^{D} 与 U^{S},则

$$U^{D} - U^{S} = \frac{1}{n}\mathrm{E}\left[\sum_{i=1}^{2}\mu Q_i^{*}(\psi_1, \psi_2)\frac{F(c_i)}{f(c_i)}\right] - \frac{1}{n}\mathrm{E}\left[\mu Q_1^{S}(\psi_1)\frac{F(c_1)}{f(c_1)}\right]$$

$$\geqslant \frac{\mu}{n}\mathrm{E}\left[\left(Q_1^{*}(\psi_1, \psi_2) + Q_2^{*}(\psi_1, \psi_2) - Q^{S}(\psi_1)\right)\frac{F(c_1)}{f(c_1)}\right]$$

其中 $\psi_i = \psi(c_i)$.引理 3 表明

$$Q_1^{*}(\psi_1, \psi_2) + Q_2^{*}(\psi_1, \psi_2) \geqslant Q^{S}(\psi_1)$$

成立,故 $U^{D} \geqslant U^{S}$. 证毕.

相比于单源采购,双源采购允许采购商更好地协调供应风险和采购成本,因而对采购商有正的价值.另一方面,双源采购下的期望订货总量和单位信息租金均不低于单源采购,因而双源采购为供应商群体也带来正的价值,所以事前平摊到任一供应商身上的期望利润也比单源采购下高.定理 3 表明,在供应风险环境下,最优的双源采购批发单价拍卖机制比最优单源采购机制更有效,可提高供应链中各参与者的福利水平.定理 3 在不对称信息环境下解释了现实中大量企业愿意进行多源采购或参与多源供应的现象.

3 报童模型和垄断模型下的最优双源采购批发单价拍卖分析

为了进一步分析双源采购批发单价拍卖机制的性质,本节将其应用到具体的市场结构——报

童模型和垄断模型中，以讨论相关管理意义. 先考虑如下的报童模型，采购商以零售价格 r(外生常数) 将产品销往市场以满足随机需求 $D \sim \mathrm{U}[0,a]$[17]；不考虑缺货成本和产品残值[3]. 在此假设下，采购商期望收益函数为

$$R(Q) = r\mathrm{E}_D[\min\{D,Q\}] = rQ - rQ^2/(2a)$$

其中 $Q \in [0,a]$. 不失一般性，与 Burke 等[17]相同，忽略可销售数量高于需求上限的情况($Q > a$)，因为该情况只会在零售价格远高于采购价格时存在. 定义

$$s(w_i) = (r - w_i)/r$$

为供应商 i 贡献给采购商的利润率. 根据定理 1，记 $S_i = s(\psi(c_i))$ ($i = 1,2$) 为最优双源采购拍卖机制中成本第 i 低的供应商贡献给采购商的利润率. 另外，用参数

$$\theta = 1/(1 + CV^2)$$

表示可靠性水平，其中 $CV = \sigma/\mu$ 为产出率的变异系数，代表风险水平. 显然，产出率的均值 μ 越高或标准差 σ 越小，可靠性 θ (风险 CV) 就越高(低). 根据引理 2，得到以下推论.

推论 2　报童模型中，给定批发价时的最优双源采购订货决策为

$$Q_1^*(w_1,w_2) = \frac{a\theta s(w_1)}{\mu} - \frac{a\theta^2[s(w_2) - \theta s(w_1)]^+}{\mu(1-\theta^2)}$$

$$Q_2^*(w_1,w_2) = \frac{a\theta[s(w_2) - \theta s(w_1)]^+}{\mu(1-\theta^2)}$$

另一种常见的市场结构是垄断市场. 尽管现实中完全垄断的情况较少见，但由于专利保护和技术壁垒等原因，很多企业可以在短时期内形成市场垄断. 如苹果公司研发新产品时会购买大量的相关专利，以减缓跟随者和竞争者对同类产品的研发和上市进度，确保自身新产品发布后有足够的市场占有率. 本节考虑如下的垄断模型，采购商投放到市场上的产品数量 Q 会影响产品的销售价格 P，设逆需求函数为 $P = A - BQ$，其中 A 为市场潜力，B 为数量敏感性参数. 此时，采购商收益函数为 $R(Q) = PQ = AQ - BQ^2$. 与报童模型中类似，定义 $\tilde{s}(w_i) = (A - w_i)/A$，易得以下推论.

推论 3　垄断模型中，给定批发价时的最优双源采购订货决策为

$$Q_1^*(w_1,w_2) = \frac{A\theta\tilde{s}(w_1)}{2B\mu} - \frac{A\theta^2[\tilde{s}(w_2) - \theta\tilde{s}(w_1)]^+}{2B\mu(1-\theta^2)}$$

$$Q_2^*(w_1,w_2) = \frac{A\theta[\tilde{s}(w_2) - \theta\tilde{s}(w_1)]^+}{2B\mu(1-\theta^2)}$$

比较推论 2 与推论 3，得到下述定理.

定理 4　当 $r = A$ 和 $a = A/(2B)$ 时，报童模型与垄断模型等价.

证明　当 $r = A$ 和 $a = A/(2B)$ 时，报童模型和垄断模型中的采购商期望收益函数相同，由于所有其他假设也都相同，故两模型等价.　　证毕.

定理 4 表明，尽管报童模型和垄断模型对应现实中两类迥异的市场结构，两者在一定条件下是等价的. 由于 r 和 A 分别反映采购商在两模型中的获利能力((最高) 销售价格)，而 a 和 A/B 分别反映采购商在两模型中的市场容量(最高可能销售数量)，故条件 $r = A$ 和 $a = A/(2B)$ 分别从销售价格和销售数量两方面给出了两模型的等价条件. 本节余下部分只讨论报童模型，所有相关结论在垄断模型下都成立(只需用定理 4 的等价条件替换模型参数即可).

3.1　订货分散程度

用两个获胜供应商的订货数量之比 $d = Q_2(w)/Q_1(w)$ 来量化采购商的事后订货分散程度. 根据推论 2 与定理 1，易得

$$d = (\eta - \theta)^+/(1 - \theta\eta) \tag{9}$$

其中 $\eta = S_2/S_1 \in [0,1]$ 为两个获胜供应商贡献给采购商的利润率之比，它刻画了两个获胜供应商的利润率贡献相近程度. 式(9) 表明，当且仅当获胜供应商的利润率贡献相近程度 η 超过了供应可靠性水平 θ 时，采购商才会进行双源采购.

定理 5　报童模型下，采购商的事后订货分散程度 d 是利润率贡献相近程度 η 的增函数和可靠性水平 θ 的减函数.

证明　求 d 关于 η 和 θ 的一阶偏导数，得

$$\partial d/\partial\eta = (1 - \theta^2)I_{\eta>\theta}/(1 - \theta\eta)^2 \geqslant 0$$

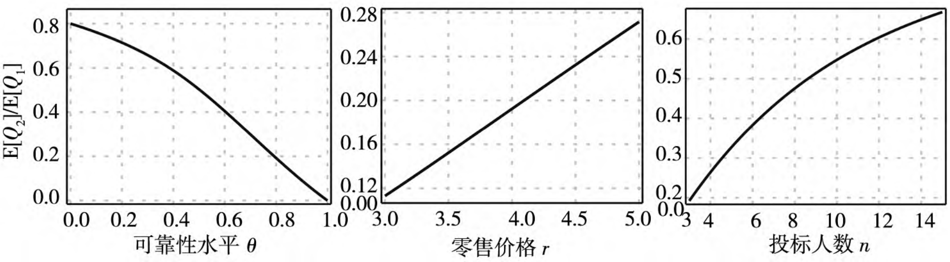
$$\partial d/\partial\theta = (\eta^2 - 1)I_{\eta>\theta}/(1 - \theta\eta)^2 \leqslant 0$$

证毕.

定理 5 表明，当采购商可从两个获胜供应商处获得的利润率越接近，或供应风险越高时，采购商的订货越分散. 另外，当供应可靠性 θ 降低时，采购商更加关心风险规避，从而供应商的利润率贡献相近程度对订货分散程度的影响变小(即

$\partial d/\partial\eta$ 关于 θ 递增). 类似地，当两个获胜供应商的利润率贡献很相近时，采购商会保持较高的订货分散程度以充分发挥双源采购的风险规避优势，从而对风险水平的变化反应更加迟钝. 极端情况下，当两供应商的成本相同(从而利润率贡献也相同，$\eta = 1$)时，采购商会平均分配订货数量而不再考虑供应风险的高低.

注意，式(9)中的订货分散程度是在给定供应商成本的情况下得到的(事后的). 由于供应商成本是私有信息，故有必要考察各参数对事前订货分散程度(即 $\mathrm{E}[Q_2]/\mathrm{E}[Q_1]$)的影响，相关结果见图 2. 从图 2 中可以看出，当可靠性 θ 越低、零售价格 r 越高或投标人数 n 越大时，事前订货分散程度越高，原因如下，可靠性变高时，风险分散的重要性减弱，采购商自然就更集中向低价供应商采购以降低采购成本. 给定批发价格，当零售价越高时，两获胜供应商的利润率贡献就越相近(即 η 越大)；给定零售价格，投标人数的增加会压低两获胜供应商的批发价格并缩小价格差异，同样也使利润率贡献越相近. 因此根据定理 5，零售价格和投标人数的增加都会增加事前订货分散程度.



注: 成本分布 $c \sim \mathrm{U}[1,2]$; 参数取值: 左: $n=3$, $r=4$; 中: $n=3$, $\theta=0.8$; 右: $r=4$, $\theta=0.8$.

图 2　参数对事前订货分散程度的影响

Fig. 2 Impacts of parameters on ex ante diversification degree

3.2　信息的价值

本节将与对称信息下的双源采购决策相比，以探讨信息不对称对采购商订货决策及各方利润的影响. 对称信息下，采购商按供应商成本价采购，最优订货量为 $Q_1^*(c_1, c_2)$ 和 $Q_2^*(c_1, c_2)$(引理 2). 分别将对称信息下的事后订货分散程度和利润率贡献相近程度记为 $d_0 = Q_2^*(c_1, c_2)/Q_1^*(c_1, c_2)$ 和 $\eta_0 = s(c_2)/s(c_1)$，得到以下定理.

定理 6　报童模型下，不对称信息降低了供应商的利润率贡献相近程度($\eta_0 \geqslant \eta$)和采购商的订货分散程度($d_0 \geqslant d$).

证明　由成本分布 $F(\cdot)$ 的对数凹性可知 $F(\cdot)/f(\cdot)$ 为增函数，据此易得 $\eta_0 - \eta \geqslant 0$. 因为 $\eta = \eta_0$ 时 $d = d_0$，而 d 又是 η 的增函数(定理 5)，故 $\eta \leqslant \eta_0$ 就意味着 $d \leqslant d_0$.　　证毕.

与对称信息下的双源采购决策相比，双源采购拍卖中的两个获胜供应商都会在批发单价投标中索取一部分信息租金. 成本越低的获胜者攫取的信息租金总额越高($u_i(c_i, c_i) = \mu\int_{c_i}^{\bar{c}} q_i(x)\,\mathrm{d}x$ 为 c_i 减函数)，这符合直觉. 但定理 6 表明，成本较高的获胜者索取的单位信息租金却要高于成本较低的获胜者，这放大了两位获胜供应商对采购商的利润率贡献差异，从而导致采购商进一步降低高成本获胜者的订货份额.

对称信息和不对称信息下采购商进行双源采购的条件分别是 $s(c_2) \geqslant \theta s(c_1)$ 和 $S_2 \geqslant \theta S_1$，其中后者是前者的充分非必要条件. 这说明，在一定概率 $p = \mathrm{E}_{c_1,c_2}[I_{s(c_2)\geqslant\theta s(c_1)} - I_{S_2\geqslant\theta S_1}]$ 下，采购商将在对称信息下双源采购而在不对称信息下单源采购，因而 p 表示被不对称信息减少的双源采购概率. 当供应商成本服从均匀分布 $c \sim \mathrm{U}[\underline{c}, \bar{c}]$ 时，可得 $p = (\gamma^n - \gamma_0^n)/\theta$，其中 $\gamma = [(1+\theta)/2 - z]^+/(1 - z)$，$\gamma_0 = (\theta - z)^+/(1 - z)$，$z = (r - \bar{c})/(r - \underline{c})$.

定理 7　报童模型下，当 $c \sim \mathrm{U}[\underline{c}, \bar{c}]$ 时，被不对称信息减少的双源采购概率 p 关于可靠性 θ 先增后减.

证明　将 $\partial\gamma/\partial\theta = (I_{(1+\theta)/2>z} - \gamma)/(1-\theta)$ 和 $\partial\gamma_0/\partial\theta = (I_{\theta>z} - \gamma_0)/(1-\theta)$ 代入 $\partial p/\partial\theta$，得

$$\frac{\partial p}{\partial \theta}=\frac{[(n-1)\theta+1](\gamma^{n-1}-\gamma_0{}^{n-1})}{\theta(1-\theta)}\times$$
$$\left[\frac{n}{(n-1)\theta+1}-\frac{1-\chi^n}{1-\chi^{n-1}}\times\frac{\gamma}{\theta}\right]$$

其中$\chi=\gamma_0/\gamma$. 用$\xi(\theta)$ 表示上式右端方括号内的式子. 因为$(1-\chi^n)/(1-\chi^{n-1})$ 为χ 在区间$(0,1)$上的增函数,且

$$\partial\chi/\partial\theta=(\gamma I_{\theta>z}-\gamma_0 I_{(1+\theta)/2>z})/[(1-\theta)\gamma^2]\geqslant 0$$
$$\partial(\gamma/\theta)/\partial\theta=(\theta I_{(1+\theta)/2>z}-\gamma)/[\theta^2(1-\theta)]\geqslant 0$$

易知 $\xi(\theta)$ 为 θ 的减函数. 根据洛必达法则(L'Hôpital's rule),可知 $\lim_{\theta\to 0}\xi(\theta)=n>0$ 和$\lim_{\theta\to 1}\xi(\theta)=1-n/(n-1)<0$. 因此,$\partial p/\partial\theta$ 在区间 $\theta\in(0,1)$上先增后减. 证毕.

定理 7 的机理如下. 当可靠性很低时,采购商在对称信息和不对称信息下都只进行双源采购(即 $p=0$). 随着可靠性的升高,采购商在对称信息下依然只进行双源采购,但在不对称信息下开始以一定概率进行单源采购,且该概率随着可靠性递增(定理 5). 此时,p 关于可靠性递增. 随着可靠性继续增加,采购商在对称信息下也开始以一定概率进行单源采购,且该概率的增加速度逐步接近并超过不对称信息下单源采购概率的增加速度,即 p 的增速放缓直至变为随着可靠性递减. 当供应趋于完全可靠时,采购商在对称信息和不对称信息下都以接近 1 的概率进行单源采购,此时 p 趋于 0. 定理 7 表明,不对称信息会影响采购商对单源采购或双源采购的选择,且这种影响在可靠性很高或很低时较小,在可靠性适中时较大.

3.3　双源采购的价值

与单源采购相比,双源采购具有两个效应,一方面,双源采购减弱了采购商对单个不可靠供应商的依赖,因而具有风险规避效应; 另一方面,双源采购纳入了一个成本较高的获胜供应商,增加了采购商的采购成本,因而具有成本抬升效应. 定理 3 表明,最优机制中,双源采购的风险规避效应总是强于成本抬升效应,因而双源采购对采购商总是具有正的价值. 定义 $V_D=(\Pi^D-\Pi^S)/\Pi^D$ 为双源采购的(相对)价值,其中 Π^D 和 Π^S 分别表示采购商在最优双源采购机制和最优单源采购机制中的期望利润. 报童模型下,易求得

$$\Pi^S=\frac{ar\theta}{2}\mathrm{E}[S_1^2]$$
$$\Pi^D=\frac{ar\theta}{2}\mathrm{E}_{c_1,c_2}\left[S_1^2+\frac{\max(0,S_2-\theta S_1)^2}{(1-\theta^2)}\right]$$

定理 8　报童模型下,双源采购的价值 V_D 关于供应风险(CV)递增; 当投标人数 $n\to\infty$ 时,V_D 收敛于$(1-\theta)/2$.

证明　首先考虑供应风险对 V_D 的影响. V_D 可被表述为 $V_D=\mathrm{E}[Y]/\mathrm{E}[S_1^2+Y]$,其中 $Y=[(S_2-\theta S_1)^+]^2/(1-\theta^2)$. 由 $\partial\theta/\partial CV<0$ 和 $\partial Y/\partial\theta=2(S_2-\theta S_1)^+(\theta S_2-S_1)/(1-\theta^2)^2\leqslant 0$,得到 $\partial Y/\partial CV\geqslant 0$,从而 $\partial\mathrm{E}[Y]/\partial CV\geqslant 0$. 又因为 V_D 关于 $\mathrm{E}[Y]$ 单调递增,所以 $\partial V_D/\partial CV\geqslant 0$. 然后,考虑 V_D 在 $n\to\infty$ 时的收敛性. 反复应用分部积分法,可得到

$$\Pi^S=\frac{ar\theta}{2}\{s^2(\underline{c})+\int_{\underline{c}}^{\bar{c}}\frac{\partial S_i}{\partial c_i}\bar{F}^n(c_i)\,\mathrm{d}c_i\}$$
$$\Pi^D=\frac{ar\theta}{1+\theta}\{s^2(\underline{c})+\int_{\underline{c}}^{\bar{c}}\frac{\partial S_i}{\partial c_i}\bar{F}^{n-1}(c_i)[\bar{F}(c_i)+\frac{n}{2}F(c_i)]\,\mathrm{d}c_i\}+\frac{ar\theta^2 n}{1-\theta^2}\int_{\underline{c}}^{\bar{c}}\int_{x_1(c_2)}^{c_2}\frac{\partial S_1}{\partial c_1}\frac{\partial S_2}{\partial c_2}\times\bar{F}^{n-1}(c_2)F(c_1)\,\mathrm{d}c_1\mathrm{d}c_2$$

其中 $x_1(c_2)=\max\{\underline{c},\psi^{-1}(\frac{\psi(c_2)-(1-\theta)r}{\theta})\}$. 因为$\lim_{n\to\infty}\bar{F}^n(c)=0$,显然有

$$\lim_{n\to\infty}\Pi^S=ar\theta s^2(\underline{c})/2$$

又根据斯托尔兹−切萨罗定理(Stolz-Cesàro theorem),有 $\lim_{n\to\infty}n\bar{F}^{n-1}(c)=0$,从而

$$\lim_{n\to\infty}\Pi^D=ar\theta s^2(\underline{c})/(1+\theta)$$

故 $\lim_{n\to\infty}V_D=(1-\theta)/2$. 证毕.

定理 8 表明,当供应风险变高时,风险分散变得更重要,从而双源采购的成本抬升效应被相对弱化,导致双源采购的价值变大. 当投标人数很大($n\to\infty$)时,采购商在单源采购和双源采购中的采购价格都趋于 $\underline{c}$. 此时双源采购只有风险规避效应而不再具有成本抬升效应,双源采购的价值趋于完全信息下双源采购的最大价值($(1-\theta)/2$). 除了上述收敛性质,通过数值分析观察了双源采购价值关于投标人数的单调性,如图 3 所

示,其中 $c \sim U[1,2]$, $r=3$, $\theta=0.6$.

图 3 表明,双源采购的价值随着投标人数的增加而增加. 这是因为竞标人数越多,采购商在单源采购和双源采购中的采购价格就越趋同,即双源采购的成本抬升效应越小. 图 3 还表明,不对称信息下双源采购的价值比对称信息下的小,原因是不对称信息下较高成本的获胜供应商索取的单位信息租金比低成本的获胜供应商高,从而加剧了双源采购的成本抬升效应.

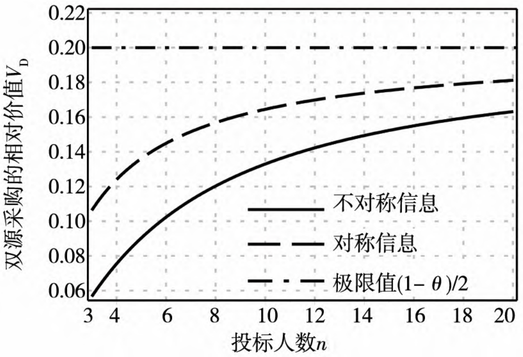


图 3 投标人数对双源采购价值的影响

Fig. 3 Impact of the number of bidders on the value of the dual-sourcing option

4 结束语

在采购实践中,采购商常常借助逆向拍卖机制来发现价格和遴选供应商,而供应风险的广泛存在又要求逆向拍卖具备风险应对功能. 在此背景下,研究了采购商如何设计最优的批发单价投标机制来从多个具有成本私有信息的不可靠供应商中选出至多两位获胜者进行双源采购. 在一般的采购商期望收益函数下,文章设计了最优的订货量分配规则,并导出了该规则下供应商的批发单价投标均衡. 文章发现,最优的双源采购批发单价拍卖机制可以内生出最优的单源采购情况,且采购商和供应商的期望利润都比最优的单源采购机制中高. 与完全信息情况相比,信息不对称对供应商有利但会损害采购商和整条供应链的利润. 将模型应用到具体的报童环境下,文章进一步发现,当供应风险越高或两个获胜供应商贡献给采购商的利润率越相近时,采购商的订货量分配将更加分散,双源采购相对于单源采购的价值也越大. 有趣的是,虽然成本较高的获胜供应商索取的信息租金总量更低,其批发单价投标中包含的单位信息租金却比成本较低的获胜供应商更高,这导致不对称信息下,采购商的订货分散程度、双源采购的概率和双源采购的相对价值都比对称信息下低. 另外,虽然报童模型和垄断模型分别对应现实中两种截然不同的市场结构,上述报童模型下的所有结论在垄断模型下依然成立,且在一定条件下两模型完全等价.

参 考 文 献:

[1] Duenyas I, Hu B, Beil D R. Simple auctions for supply contracts [J]. Management Science, 2013, 59(10): 2332-2342.

[2] 刘树人, 唐 沛, 黄颖娜. 网上拍卖销售与逆向拍卖采购下的库存管理 [J]. 中国管理科学, 2015, 23(11): 62-69.
Liu Shuren, Tang Pei, Huang Yingna. Inventory management with selling by internet auctionsand purchasing by reverse auctions [J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(11): 62-69. (in Chinese)

[3] Li C, Scheller-Wolf A. Push or pull? Auctioning supply contracts [J]. Production and Operations Management, 2011, 20(2): 198-213.

[4] 马 俊, 张 杰, 汪寿阳. 应用拍卖机制协调供应链 [J]. 管理科学学报, 2009, 12(5): 1-9.
Ma Jun, Zhang Jie, Wang Shouyang. Coordinate supply chain via auction mechanisms [J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(5): 1-9. (in Chinese)

[5] 黄 河, 申笑宇, 徐鸿雁. 考虑供应商流程改进的采购合同设计 [J]. 管理科学学报, 2015, 18(10): 38-55.
Huang He, Shen Xiaoyu, Xu Hongyan. Procurement contracts design in the presence of process improvement initiated by the supplier [J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(10): 38-55. (in Chinese)

[6] 潘 伟. 基于供应中断风险的模糊多目标订单分配模型 [J]. 管理科学学报, 2015, 18(3): 45-51.
Pan Wei. Fuzzy multi-objective order allocation model with supply disruption [J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(3): 45-51. (in Chinese)

[7] Liu M, Hossain S. Natural Disasters and Production Networks in the Asia and Pacific Region [R/OL]. 2013. http://www.asiapathways-adbi.org/2013/02/natural-disasters-and-production-networks-in-the-asia-and-pacific-region/.

[8] Wang Y, Gilland W, Tomlin B. Mitigating supply risk: Dual sourcing or process improvement? [J]. Manufacturing & Serv-

ice Operations Management, 2010, 12(3): 489-510.

[9] Yang Z, Aydin G, Babich V, et al. Using a dual-sourcing option in the presence of asymmetric information about supplier reliability: Competition vs. diversification [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2012, 14(2): 202-217.

[10] Gates D. Boeing to Duplicate Puget Sound Work for 787 [N/OL]. The Seattle Times, 2009. http://www.seattletimes.com/business/boeing-to-duplicate-puget-sound-work-for-787/.

[11] Chen J, Guo Z. Strategic sourcing in the presence of uncertain supply and retail competition [J]. Production and Operations Management, 2014, 23(10): 1748-1760.

[12] 李　军，刘树林. 基于 Cobb-Douglas 效用函数的多属性采购拍卖 [J]. 管理科学学报，2012，15(3): 54-60.
Li Jun, Liu Shulin. Multi-attribute procurement auctions based on Cobb-Douglas utility function [J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(3): 54-60. (in Chinese)

[13] 曾宪科，冯玉强. 逆向多属性拍卖投标策略及收益性分析 [J]. 管理科学学报，2015，18(9): 24-33.
Zeng Xianke, Feng Yuqiang. Bidding strategies and revenue analysis for reverse multi-attribute auction [J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(9): 24-33. (in Chinese)

[14] Tunca T I, Wu Q. Multiple sourcing and procurement process selection with bidding events [J]. Management Science, 2009, 55(5): 763-780.

[15] Gupta S, Chen W, Dawande M, et al. Optimal descending mechanisms for constrained procurement [J]. Production and Operations Management, 2015, 24(12): 1955-1965.

[16] Chaturvedi A, Beil D R, Martínez-de-Albéniz V. Split-award auctions for supplier retention [J]. Management Science, 2014, 60(7): 1719-1737.

[17] Burke G J, Carrillo J E, Vakharia A J. Sourcing decisions with stochastic supplier reliability and stochastic demand [J]. Production and Operations Management, 2009, 18(4): 475-484.

[18] Hu B, Kostamis D. Managing supply disruptions when sourcing from reliable and unreliable suppliers [J]. Production and Operations Management, 2015, 24(5): 808-820.

[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] Gurnani H, Gümüş M, Ray S, et al. Optimal procurement strategy under supply risk [J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2012, 29(1): 1-31.

[21] Gümüs M, Ray S, Gurnani H. Supply-side story: Risks, guarantees, competition, and information asymmetry [J]. Management Science, 2012, 58(9): 1694-1714.

[22] Krishna V. Auction Theory [M]. Brulington: Academic Press, 2009.

Optimal design of wholesale-price auctions for dual-sourcing with supply risks

LI Zhi-peng[1], *HUANG He*[1,2*], *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: Considering multiple potential suppliers with supply risk and private cost information, this paper studies the optimal design of dual-sourcing auctions where the suppliers bid the wholesale prices. Firstly, under a general buyer revenue function, the optimal allocation rule and suppliers' bidding equilibrium are derived, and the results are compared with the single-sourcing case and the symmetric information case, respectively. Comparisons show that both the buyer and suppliers gain more expected profits than under the optimal single-sourcing mechanism, and information asymmetry benefits suppliers but hurts the buyer and the entire supply chain. Then, in a newsvendor setting and a monopoly setting, the paper further analyzes the diversification degree of quantity allocation, the effects of information asymmetry, and the value of the dual-sourcing option. Results show that the diversification degree of quantity allocation increases with the supply risk and the homogeneity level of winners' profit-margin contributions to the buyer. The higher-cost winner charges a higher per unit information rent than the lower-cost winner does, which results in a lower diversification degree as compared with the symmetric information case. Moreover, when the supply risk or the number of bidders increases, the value of the dual-sourcing option increases.

Key words: procurement auction; supply risk; dual sourcing; asymmetric information; optimal mechanism