

# 基于报童模型的供应链产品质量控制机制研究<sup>①</sup>

曹裕<sup>1</sup>, 李青松<sup>1</sup>, 胡韩莉<sup>2\*</sup>

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 长沙理工大学经济与管理学院, 长沙 410114)

**摘要:** 研究由一个供应商和一个零售商组成的供应链, 建立存在质量不确定与检查错误下的报童模型, 比较分析检查机制、溯源机制以及组合机制(抽检-溯源)在分散式与集中式供应链中对零售商订购决策与质量控制效率的影响。结果表明, 在产品质量不确定性较高时, 无论在分散式还是集中式供应链中选择溯源机制对零售商更为有利, 但随着产品质量的提高, 在分散式供应链中组合机制会更优, 而在集中式供应链中检查机制更优; 检查精度、溯源成本、责任成本变化不会改变零售商利润随次品率变化的趋势, 且对零售商质量机制选择影响不显著; 在次品率较低时, 增加接收决策的次品率阈值可以增加零售商的利润, 而加大接收且溯源决策的阈值范围则会降低零售商的利润, 但在次品率较高时, 结论正好相反。

**关键词:** 质量控制; 检查机制; 溯源机制; 组合机制

**中图分类号:** F275      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2020)04-0110-117

## 0 引言

单周期报童决策问题已经有了广泛研究, 如带约束的报童问题、考虑行为决策的报童问题、供应链报童模型、以及需求具有外部性的多产品报童问题等<sup>[1]</sup>, 但这些研究均假设产品质量是合格的。事实上, 由于生产控制弱化、运输损坏、自然恶化、人为掺假等原因, 在采购中总会存在部分不合格的产品<sup>[2]</sup>。加之, 近年来越来越多的企业将产品设计与生产活动外包给供应商, 加剧了企业对产品质量控制的难度<sup>[3]</sup>, 因此全球范围内因质量问题导致的产品召回事件屡见不鲜, 如高田气囊召回事件、宜家抽屉柜召回事件、三星 NOTE7 手机召回事件等, 均给企业造成了巨大的损失, 甚至破产。为了减少销售不合格产品造成的损失, 对产品进行质量控制是必要的<sup>[4-5]</sup>。检查机制是企业进行质量控制最为直接的方式, 许多学者研

究了质量不确定下检查机制对供应商质量改进与订单分配的影响, 如 Starbird<sup>[6]</sup>、Hwang 等<sup>[7]</sup>、Lee 和 Li<sup>[8]</sup>、Hsu 等<sup>[9]</sup>、Babich 和 Tang<sup>[10]</sup> 等均运用博弈方法, 研究了由一个供应商与一个买方组成的供应链下的最优检查策略, 其中供应商决策产品质量水平, 买方决策检查精度。还有部分学者基于经济订货批量模型(economic order quantity, EOQ)研究检查机制对质量控制的影响, 如 Salameh 和 Jaber<sup>[11]</sup> 建立考虑检查机制的 EOQ 模型研究供应商的质量改进问题; Khan 等<sup>[12]</sup>、Zhou 等<sup>[13]</sup>、Al-Salamah<sup>[14]</sup> 则进一步建立检查存在错误的 EOQ 模型研究零售商的最优订购决策。上述研究中的检查均是 100% 的全检, 但在现实中, 由于检查是存在成本的, 且检查可能会破坏产品质量, 因此许多企业选择通过抽检的方式来预判整个批次产品的质量<sup>[15]</sup>。

① 收稿日期: 2018-04-02; 修订日期: 2019-01-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71972182; 71573281; 71802076); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50070); 中南大学创新驱动项目(2020CX050)。

通讯作者: 胡韩莉(1989—), 女, 湖南岳阳人, 博士, 讲师。Email: hanxi8991@sina.com

一些学者对抽检机制进行了研究. Fernández<sup>[16]</sup>研究了基于抽样计划与条件风险价值的成本优化方法; Duffuaa 和 El-Ga'aly<sup>[17]</sup>研究了抽检计划下的多目标优化问题,且假设抽检存在错误; Taleizadeh 和 Dehkordi<sup>[18]</sup>建立了考虑部分缺货与抽检策略的 EOQ 模型,得到了最优的订购数量与利润; Rezaei<sup>[19]</sup>建立存在次品的 EOQ 模型,研究两个次品阈值下的全检 - 抽检组合策略; Farooq 等<sup>[20]</sup>建立质量成本模型,研究由全检与抽检组合的四种检查策略; 张斌和华中生<sup>[21]</sup>提出一种供应链质量管理中抽检决策的非合作博弈模型,研究制造商的最优抽检方案; 毕军贤和赵定涛<sup>[15]</sup>研究抽样检验产品交易中买卖双方的质量检验博弈问题. 以上研究更多的站在单个企业的视角研究企业质量的改进问题,较少的从供应链视角探讨检查机制对整个供应链决策的影响.

尽管检查机制是实现产品质量控制的有效方式,但无论是全检还是抽检,都难以解决检查错误、责任明确等问题<sup>[10]</sup>,因此仍会出现如三聚氰胺事件等类似的由于检查不当造成的质量问题. 而随着互联网技术与无线电识别技术的发展,溯源机制开始被广泛运用. 研究表明,溯源系统是一个完整的生产信息记录和披露体系,能够通过供应链形成可靠且连续的信息流使产品具备可追溯性,帮助企业对产品生产动态进行实时控制和责任追查,从而增加企业的法律责任预期以提高生产投入和改善产品质量状况. 自 2015 年国务院办公厅印发《国务院办公厅关于加快推进重要产品追溯体系建设的意见》以来,全国各地纷纷建立追溯体系,如浙江省农产品质量安全追溯平台、上海市食品安全信息追溯平台等. 学术界也对溯源机制进行了探讨,目前主要集中于从消费者角度探究其对溯源产品的购买意愿,如 Dickinson 和 Bailey<sup>[22]</sup>对肉制品的可追溯性、生产透明度和质保特征进行的拍卖实验表明,消费者愿意主动为这些特征支付溢价. Cicia 和 Colantuoni<sup>[23]</sup>对 23 项研究的 88 个估计结果进行 Meta 分析,发现可追溯系统对食品市场具有积极作用. Stranieri 等<sup>[24]</sup>、Wang 等<sup>[25]</sup>的研究也得到了相似的结论.

直接探讨可追溯性对企业利润影响的研究目前仍然比较缺乏,主要以问卷调查为主. Stuller 和 Rickard<sup>[26]</sup>对美国加州部分瓜类种植和加工企业调查显示,可追溯系统带来的收益至少可以弥补其投入成本. Pouliot 和 Sumner<sup>[27]</sup>以美国部分农产品市场情况进行推算,农产品企业建立完整的可追溯系统在五年内的总回报是其成本的 1.7 倍. 仅有较少的学者研究溯源机制对企业质量改进的影响. Resende-Filho 等<sup>[28]</sup>研究由食品上游企业与下游企业构成的供应链,探讨基于溯源体系精确度的上游企业质量改进问题. 龚强和陈丰<sup>[29]</sup>分析了一个由下游销售者和上游农场组成的垂直供应链结构,考察了可追溯性对改善供应链中食品安全水平及对上下游企业利润的影响. Aiello 等<sup>[30]</sup>研究一条建立了溯源系统的食品供应链,运用数学随机规划方法评估溯源系统的运行效率.

由于检查机制与溯源机制各具优势,因此一些学者进一步探究了将溯源技术运用到检查机制中的质量控制方式,如 Starbird 和 Amanor-Boadu<sup>[31]</sup>、Kumar 等<sup>[32]</sup>建立一个供应商与一个买方组成的供应链研究检查策略对质量改进的影响,其中买方可以通过溯源技术确定产品失败的责任成本. 但是,上述研究在本质上仍是探讨检查机制的影响,仅是将溯源技术作为外部因素引入了研究,并未深入比较两种机制的效率,也未考虑溯源成本对决策的影响.

通过上述综述可知,尽管学者对检查、抽检与溯源机制进行了有益的研究,但是企业究竟选择何种机制进行质量控制仍是需要深入研究的问题,仅有少数学者比较研究了检查机制与溯源机制对产品质量的影响,如曹裕等<sup>[33]</sup>基于博弈模型,从买方视角比较研究了延期付款机制、检查机制与溯源机制在供应商掺假行为中的影响,但未考虑检查错误与买方的订购策略. 基于此,本研究拟从供应链的视角,建立考虑质量不确定、检查错误、溯源成本等因素的报童模型,比较研究检查与溯源机制对供应链质量改进与产品订购决策的影响,并在此基础上,设计一种由抽检与溯源相结合的组合机制,探究其在质量控制中的作用,分析

影响零售商质量机制选择的重要因素,以及不同机制的适用条件,以期为企业降低次品损失与优化供应链整体效率提供管理建议.

## 1 问题描述与符号定义

### 1.1 问题描述

基于报童模型的分析框架,研究由一个供应商( $s$ )和一个零售商( $r$ )组成的分散式与集中式供应链的质量控制问题,其中零售商为领导者,两者均是风险中性的. 在模型中,供应商的生产成本为  $c$ ,销售价格为  $w$ ,零售商在接收产品后,以  $p$  的价格销售给消费者. 参考 Kyparisis 和 Kou-lamas<sup>[34]</sup> 的研究,假设在价格  $p$  下,市场需求  $y$  是随机变量,其密度函数为  $f(y)$ ,累积分布函数为  $F(y)$ ,其中  $F(y)$  是满足非负、严格递增的函数,且  $F(0) = 0$ . 假设零售商只在一个周期的开始订购一次产品,订购量为  $Q$ . 与需求相比,当  $Q \geq$

$y$  时,零售商会产生库存,剩余的产品  $(Q - y)$  以  $s_v$  的价格处理掉;当  $Q < y$  时,零售商会产生缺货,但是考虑到研究的重点是不同质量控制机制的影响且缺货不会影响批次产品的质量不确定性,因此不会对供应链的决策产生本质影响,故而研究忽略缺货带来的影响.

假设生产  $Q$  单位的产品会有  $\bar{\theta}Q$  的次品,其中  $\bar{\theta} = 1 - \theta$  表示次品率,  $\theta \in [0, 1]$  为正品率,是随机变量,密度函数为  $h(\theta)$ ,累积分布函数为  $H(\theta)$ <sup>[35]</sup>. 为了简化计算,参考文献[19],假设  $\theta$  是服从  $[a, b]$  的均匀分布,即

$$h(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq \theta \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

则有,  $\mu_\theta = \int_a^b \theta h(\theta) d\theta, \bar{\mu}_\theta = 1 - \mu_\theta$ , 且  $a, b \in [0, 1]$ , 分别表示正品率变化的上限与下限. 假设  $w$  与次品率相关,设为  $w = a_0 - a_1 \bar{\theta}$ , 其中  $a_0$  为最大的单位批发价,  $a_1$  表示对次品率的敏感系数,表明次品率越高,零售商支付的批发价越低.

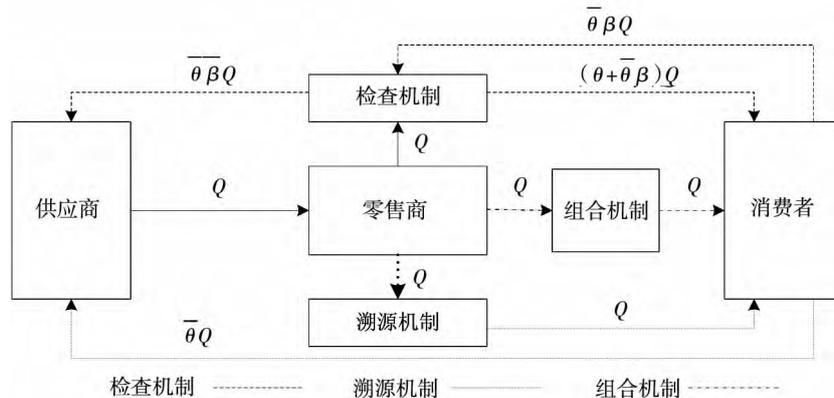


图1 质量机制流程图

Fig. 1 Flow chart of quality mechanism

为了降低次品带来的损失,零售商可以通过检查机制、溯源机制与组合机制三种方式对供应商的产品质量进行控制,过程如图1所示. 在检查机制下,零售商接收产品前对所有产品进行100%的检查,未通过检查的产品将会退还给供应商,通过检查的产品销售给消费者. 溯源机制则强调通过溯源技术,获取产品在供应链各环节的信息. 在该种机制下,零售商接收供应商提供的全部产品并销售给消费者,在消费者发现产品是次品时,零售商可以通过溯源信息判断产品责任,

此时所有的产品责任成本均由供应商承担. 同时,设计一种由抽检方式与溯源系统组合的质量控制机制. 在这种机制下,零售商通过抽样检查结果确定对该批次产品的处置结果,包括直接接收、接收且溯源、拒绝三种决策. 通过对三种机制的研究,重点关注以下问题: 何种机制对零售商更为有利? 影响各种质量控制机制效率的因素是什么? 在分散式与集中式供应链中机制的效用是否相同?

### 1.2 符号定义

表 1 符号与定义

Table 1 Notations and definition

符号	定义	符号	定义
$Q$	订购量	$c$	供应商的生产成本
$y$	市场需求	$p$	产品的零售价
$f(y)$	需求的密度函数	$h(\theta)$	次品率的密度函数
$F(y)$	需求的累积分布函数	$H(\theta)$	次品率的累积分布函数
$\bar{\theta}$	次品率, $\theta = 1 - \bar{\theta}$	$s_v$	零售商的处理价
$w$	供应商的批发价	$c_d$	供应商对次品的处理成本
$c_p$	次品被发现时产生的产品责任成本	$\bar{\beta}$	检查精度, $\beta = 1 - \bar{\beta}$
$c_{tr}$	单位溯源成本	$c_e$	单位检查成本
$\varepsilon$	零售商承担的溯源成本比率	$n$	抽检数量
$\bar{\theta}_{\min}, \bar{\theta}_{\max}$	批次产品的次品率阈值	$\alpha_1, \alpha_2$	抽样产品的次品率阈值

## 2 检查与溯源机制下的最优决策研究

### 2.1 检查机制

在检查机制下,零售商对所有产品  $Q$  进行逐个检查,检查成本与检查精度、订购量相关,设为  $I(Q) = c_e \bar{\beta} Q$  [36]. 未通过检查的产品会退回给供应商,供应商产生  $c_d$  的次品处理成本; 通过检查的产品则以  $p$  的价格销售给消费者. 实际上,在检查精度  $\bar{\beta}$  下,能够通过检查的产品比率为  $\lambda(\theta) = \theta + \bar{\beta}\bar{\theta}$ , 包括正品率  $\theta$  以及未被检查出来的次品率  $\bar{\beta}\bar{\theta}$ , 会有  $\bar{\beta}\bar{\theta}$  比率的产品退回给供应商. 因此,通过检查的产品数量为  $Z(\lambda) = \lambda(\theta) Q$ , 退回给

$$\begin{aligned} \Pi_r^{ins}(Q) &= p \int_a^b S(Z) h(\theta) d\theta + s_v \left[ \int_a^b \lambda(\theta) Q h(\theta) d\theta - \int_a^b S(Z) h(\theta) d\theta \right] - \\ &\quad \int_a^b w \lambda(\theta) Q h(\theta) d\theta - c_p \int_a^b \beta(1 - \theta) Q h(\theta) d\theta - c_e \bar{\beta} Q \end{aligned} \tag{1}$$

其中  $\mu_\theta = \int_a^b \theta h(\theta) d\theta$ ,  $\bar{\mu}_\theta = 1 - \mu_\theta$ ,  $E_\theta(\lambda) = \int_a^b \lambda(\theta) h(\theta) d\theta = \mu_\theta + \bar{\beta}\bar{\mu}_\theta$ . 在式(1)中,  $(p - s_v) \times \int_a^b S(Z) h(\theta) d\theta$  表示零售商的实际销售收入,  $(a_0 - s_v) E_\theta(\lambda) Q - a_1 Q \int_a^b \bar{\theta} \lambda(\theta) h(\theta) d\theta$  表示零售商的的实际销售成本,  $c_p \beta \bar{\mu}_\theta Q$  表示产品的责任成本,  $c_e \bar{\beta} Q$  表示检查成本.

对供应商而言,只需承担被检查出来的次品

供应商的产品数量为  $\bar{\beta}\bar{\theta}Q$ . 在需求是随机的情况下,零售商实际销售给消费者的产品数量为  $S(Z) = Z(\lambda) - \int_0^{Z(\lambda)} F(y) dy$ , 其中  $Z(\lambda)$  为实际流入市场的产品数量,则  $Z(\lambda) - S(Z)$  为未销售的产品数量,以  $s_v (< p)$  的价格进行处理.

由于检查存在缺陷,因此会有  $\bar{\beta}\bar{\theta}Q$  的次品通过检查. 假设次品均会被消费者发现,并产生  $c_p$  的单位产品责任成本,则总的责任成本为  $c_p \bar{\beta}\bar{\theta}Q$ , 包括对消费者的赔偿、召回费用等,在检查机制下,产品责任均由零售商承担. 进一步假设  $c_p > p - w$ , 即销售次品带来的损失会大于其带来的净收益,由此保证零售商倾向于改善产品质量的动因. 此时,零售商的期望利润为

的处理成本. 此时,供应商的期望利润为

$$\begin{aligned} \Pi_s^{ins}(Q) &= \int_a^b w \lambda(\theta, \beta) Q h(\theta) d\theta - cQ - c_d \int_a^b \bar{\beta}\bar{\theta} Q h(\theta) d\theta = \\ &\quad \left[ a_0 E_\theta(\lambda) - a_1 \int_a^b \bar{\theta} \lambda(\theta) h(\theta) d\theta - c - c_d \bar{\beta} \bar{\mu}_\theta \right] Q \end{aligned}$$

在上式中,  $a_0 E_\theta(\lambda) Q - a_1 Q \int_a^b \bar{\theta} \lambda(\theta) h(\theta) d\theta$  表示供应商的销售收入,  $cQ$  表示供应商的生产成本,  $c_d \bar{\beta} \bar{\mu}_\theta Q$  表示次品的处理成本.

根据上述零售商与供应商的利润函数,可以得到检查机制下集中式供应链的期望利润,用

$\Pi^{ins}(Q)$  表示,为

$$\begin{aligned} \Pi^{ins}(Q) &= \Pi_r^{ins}(Q) + \Pi_s^{ins}(Q) \\ &= (pE_\theta(\lambda) - c - c_p\beta\bar{\mu}_\theta - c_e\bar{\beta} - \\ &\quad c_d\bar{\beta}\bar{\mu}_\theta)Q - (p-s_v) \int_a^b \int_0^Z F(y)h(\theta) dyd\theta \end{aligned} \quad (2)$$

在检查机制中,零售商通过决定订购量  $Q$  来使其收益最大化,结果如命题 1 所示.

**命题 1** 1) 在零售商执行检查机制下,

$\Pi_r^{ins}(Q)$  是关于  $Q_d^{ins}$  的凹函数,  $\Pi(Q)$  是关于  $Q_c^{ins}$  的凹函数; 2) 在分散式供应链中,存在最优订购量  $Q_d^{ins*}$  满足

$$\int_a^b [(p-s_v)F(Z)(\theta+\bar{\theta}\beta) + a_1\bar{\beta}\bar{\theta}^2]h(\theta)d\theta = (p-a_0)E_\theta(\lambda) + a_1\bar{\mu}_\theta - c_p\beta\bar{\mu}_\theta - c_e\bar{\beta} \text{ 且}$$

$$p > \frac{a_0E_\theta(\lambda) - a_1\bar{\mu}_\theta + c_p\beta\bar{\mu}_\theta + c_e\bar{\beta}}{E_\theta(\lambda)}, \text{ 使 } \Pi_r^{ins}(Q)$$

达到最优; 3) 在集中供应链中,存在最优订购量  $Q_c^{ins*}$  满足

$$\int_a^b F(Z)(\theta+\bar{\theta}\beta)h(\theta)d\theta = \frac{pE_\theta(\lambda) - c - c_p\beta\bar{\mu}_\theta - c_e\bar{\beta} - c_d\bar{\beta}\bar{\mu}_\theta}{p-s_v}$$

且  $p > (c + c_p\beta\bar{\mu}_\theta + c_e\bar{\beta} + c_d\bar{\beta}\bar{\mu}_\theta) / E_\theta(\lambda)$ , 使  $\Pi(Q)$  达到最优.

证明见附录.

从命题 1 可知,无论是集中式还是分散式供应链下,零售商的最优订购量均受次品率、检查精度、责任成本、处理价格等因素的影响. 在集中式供应链下,订购量随次品率、检查成本、责任成本、次品处理成本的增加而降低,表明成本增加会使得零售商订购更少的产品.

### 2.2 溯源机制

溯源机制是采集记录产品生产、流通、消费等环节信息,实现来源可查、去向可追、责任可究的重要方式. 在供应链中,供应商与零售商分别记录产品在不同环节上的信息,将产品信息输入到标签中,消费者可以通过扫描标签中的二维码来查询产品的生产信息. 假设溯源标签的单位成本为  $c_{tr}$ ,由供应商与零售商共同承担,供应商承担  $(1-\varepsilon)c_{tr}Q$  的溯源成本,零售商承担  $\varepsilon c_{tr}Q$  的溯源成本,其中  $\varepsilon \in [0, 1]$  为溯源成本的分摊比例,表明零售商需承担更多的溯源成本.

在溯源机制下,零售商可以通过溯源机制追究供应商的产品质量责任,因此在消费者发现产品质量问题后所产生的责任成本均由供应商承担,单位产品的责任成本为  $c_p$ ,记为  $c_pQ \times \int_a^b \bar{\theta}h(\theta)d\theta$ . 在随机需求下,将会有  $S(Q) = Q - \int_0^Q F(y)dy$  的产品销售给消费者. 因此,零售商的期望利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_r^{tra}(Q) &= pS(Q) + s_v(Q - S(Q)) - \\ &\quad \int_a^b (a_0 - a_1\bar{\theta})dyQ - \varepsilon c_{tr}Q \\ &= (p-s_v)(Q - \int_0^Q F(y)dy) - \\ &\quad (a_0 - a_1\bar{\mu}_\theta)Q - s_vQ - \varepsilon c_{tr}Q \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $(p-s_v)(Q - \int_0^Q F(y)dy)$  表示零售商的销售收入,  $(a_0 - a_1\bar{\mu}_\theta)Q$  表示零售商的采购成本,  $s_vQ$  为处理成本,  $\varepsilon c_{tr}Q$  为溯源成本. 溯源机制下,供应商的期望利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_s^{tra}(Q) &= \int_a^b (a_0 - a_1\bar{\theta})dyQ - cQ - (1-\varepsilon)c_{tr}Q - \\ &\quad c_pQ \int_a^b \bar{\theta}h(\theta)d\theta \\ &= (a_0 - a_1\bar{\mu}_\theta - c - (1-\varepsilon)c_{tr} - c_p\bar{\mu}_\theta)Q \end{aligned}$$

其中  $(a_0 - a_1\bar{\mu}_\theta)Q$  表示供应商的销售收入,  $cQ$  表示供应商的生产成本,  $(1-\varepsilon)c_{tr}Q$  为溯源成本,  $c_p\bar{\mu}_\theta Q$  表示产品的责任成本.

用  $\Pi^{tra}(Q)$  表示溯源机制下集中式供应链的期望利润,包括供应商和零售商的期望利润之和,则有

$$\begin{aligned} \Pi^{tra}(Q) &= \Pi_r^{tra}(Q) + \Pi_s^{tra}(Q) \\ &= (p-c-c_{tr}-c_p\bar{\mu}_\theta)Q - (p-s_v) \int_0^Q F(y)dy \end{aligned} \quad (4)$$

计算溯源机制下分散式与集中式供应链的最优订购量,结果如命题 2 所示.

**命题 2** 1) 在零售商执行溯源机制下,  $\Pi_r^{tra}(Q)$  是关于  $Q_d^{tra}$  的凹函数,  $\Pi^{tra}(Q)$  是关于  $Q_c^{tra}$  的凹函数; 2) 在分散供应链中,存在最优订购量  $Q_d^{tra*}$  满足  $F(Q_d^{tra*}) = \frac{p-a_0+a_1\bar{\mu}_\theta-\varepsilon c_{tr}}{p-s_v}$  且

$p > a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta + \varepsilon c_{tr}$ , 使得  $\Pi_r^{tra}(Q)$  达到最优; 3) 在集中供应链下, 存在最优订购量  $Q_c^{tra*}$  满足  $F(Q_c^{tra*}) = \frac{p - c - c_p \bar{\mu}_\theta - c_{tr}}{p - s_v}$  且  $p > c + c_p \bar{\mu}_\theta + c_{tr}$ , 使得  $\Pi^{tra}(Q)$  达到最优; 4) 比较分散式与集中式的最优订购量可知, 当  $\bar{\mu}_\theta > \frac{a_0 - (1 - \varepsilon) c_{tr} - c}{c_p + a_1}$  时, 有  $Q_d^{tra*} > Q_c^{tra*}$ ; 反之,  $Q_d^{tra*} \leq Q_c^{tra*}$ .

证明见附录.

由命题2可知, 在分散式供应链下, 最优的订购量与产品责任成本无关, 会随着溯源成本的增加而下降, 表明过高的溯源成本会降低零售商的订购意愿. 同时还可知, 订购量会随着次品率的提高而增加 (即  $\partial F(Q_d^{tra*}) / \partial \bar{\mu}_\theta = a_1 / (p - s_v) > 0$ ), 表明在次品率较高时, 零售商的采购成本  $(a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta) Q$  会降低, 会使得其订购更多的产品. 在集中式供应链下, 最优订购量受责任成本、溯源成本的影响, 成本越高则订购量越低. 比较分散式与集中式的订购量发现, 订购量的大小取决于次品率、溯源成本与责任成本等因素的比较.

### 3 组合机制下的质量控制策略研究

#### 3.1 组合机制下的三种决策

结合检查与溯源机制的优点, 设计一种组合机制, 研究其对供应商产品质量的影响. 由于同时对产品进行检查与溯源会增加零售商的成本, 因此考虑使用抽检机制与溯源技术相结合的方式设计组合机制. 在组合机制中, 设置两个次品率阈值  $\bar{\theta}_{min}$  和阈值  $\bar{\theta}_{max}$ , 且  $\bar{\theta}_{min} < \bar{\theta}_{max}$ . 若  $\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min}$ , 则接收该批次产品; 若  $\bar{\theta}_{min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{max}$ , 则接收该批次产品, 但对所有产品进行溯源; 若  $\bar{\theta} > \bar{\theta}_{max}$ , 则拒绝该批次产品, 同时要求供应商提供一批没有次品的产品. 因此存在三种情况

1) 当  $\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min}$  时, 零售商接收所有产品  $Q$ , 以  $p$  的价格销售, 在随机需求下, 零售商的实际销售量为  $S(Q) = Q - \int_0^Q F(y) dy$ , 此时零售商与供应商的期望利润分别为

$$\begin{aligned} \Pi_r(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min}) &= pS(Q) + s_v(Q - S(Q)) - \\ &Q \int_a^b (a_0 - a_1 \bar{\theta}) h(\theta) d\theta - \int_a^b c_p \bar{\theta} Q h(\theta) d\theta = \\ &(p - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta) Q - (p - s_v) \int_0^Q F(y) dy - c_p \bar{\mu}_\theta Q \times \\ \Pi_s(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min}) &= (a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta) Q - cQ \end{aligned} \quad (5)$$

集中式供应链的期望利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min}) &= \Pi_r(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min}) + \\ &\Pi_s(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min}) \\ &= (p - c_p \bar{\mu}_\theta) Q - (p - s_v) \int_0^Q F(y) dy - cQ \end{aligned} \quad (6)$$

2) 当  $\bar{\theta}_{min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{max}$  时, 零售商接收所有产品  $Q$ , 但对所有产品进行溯源, 此时由于次品引起的产品责任成本均由供应商承担, 零售商与供应商的期望利润分别为

$$\begin{aligned} \Pi_r(Q | \bar{\theta}_{min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{max}) &= pS(Q) + s_v(Q - S(Q)) - \\ &Q \int_a^b (a_0 - a_1 \bar{\theta}) h(\theta) d\theta - \varepsilon c_{tr} Q \times \\ &= (p - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta) Q - (p - s_v) \int_0^Q F(y) dy - \varepsilon c_{tr} Q \times \\ \Pi_s(Q | \bar{\theta}_{min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{max}) &= (a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta) Q - \\ &cQ - (1 - \varepsilon) c_{tr} Q - c_p \bar{\mu}_\theta Q \end{aligned} \quad (7)$$

集中式供应链的期望利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi(Q | \bar{\theta}_{min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{max}) &= \\ \Pi_r(Q | \bar{\theta}_{min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{max}) &+ \Pi_s(Q | \bar{\theta}_{min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{max}) \\ &= (p - c - c_{tr} - c_p \bar{\mu}_\theta) Q - (p - s_v) \int_0^Q F(y) dy \end{aligned} \quad (8)$$

3) 当  $\bar{\theta} > \bar{\theta}_{max}$  时, 零售商拒绝该批次产品, 此时要求供应商提供一批没有次品的产品给零售商, 则采购成本为  $Q \int_a^b (a_0 - a_1 \bar{\theta}) h(\theta) d\theta = a_0 Q$ , 零售商与供应商的期望利润分别为

$$\begin{aligned} \Pi_r(Q | \bar{\theta} > \bar{\theta}_{max}) &= pS(Q) + s_v(Q - S(Q)) - a_0 Q \\ &= pQ - (p - s_v) \int_0^Q F(y) dy - a_0 Q \times \\ \Pi_s(Q | \bar{\theta} > \bar{\theta}_{max}) &= a_0 Q - cQ \end{aligned} \quad (9)$$

集中式供应链的期望利润函数为

$$\begin{aligned}
& \Pi(Q | \bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max}) \\
&= \Pi_r(Q | \bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max}) + \Pi_s(Q | \bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max}) \quad (10) \\
&= pQ - cQ - (p - s_v) \int_0^Q F(y) dy
\end{aligned}$$

求解组合机制下三种决策的最优订购量,结果如命题 3 所示.

**命题 3** 在组合机制下,期望利润函数均是关于订购量的凹函数,则可以得到如下结论

1) 在分散式供应链下,当  $\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\min}$  时,有

$$F(Q_d^{com1*}) = \frac{p - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta - c_p \bar{\mu}_\theta}{p - s_v} \text{ 且 } p > a_0 - a_1 \times \bar{\mu}_\theta + c_p \bar{\mu}_\theta; \text{ 当 } \bar{\theta}_{\min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\max} \text{ 时,有 } F(Q_d^{com2*}) = \frac{p - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta - (1 - \varepsilon) c_{tr}}{p - s_v} \text{ 且 } p > a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta + (1 - \varepsilon) c_{tr}; \text{ 当 } \bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max} \text{ 时,有 } F(Q_d^{com3*}) = \frac{p - a_0}{p - s_v};$$

2) 在集中式供应链下,当  $\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\min}$  时,有

$$F(Q_c^{com1*}) = \frac{p - c - c_p \bar{\mu}_\theta}{p - s_v} \text{ 且 } p > c + c_p \bar{\mu}_\theta; \text{ 当 } \bar{\theta}_{\min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\max} \text{ 时,有 } F(Q_c^{com2*}) = \frac{p - c - c_p \bar{\mu}_\theta - c_{tr}}{p - s_v} \text{ 且 } p > c + c_p \bar{\mu}_\theta + c_{tr}; \text{ 当 } \bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max} \text{ 时,有 } F(Q_c^{com3*}) = \frac{p - a_0}{p - s_v};$$

3) 比较三种决策下的最优订购量可知,当  $\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\min}$  与  $\bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max}$  时,有  $Q_d^{com1*} < Q_c^{com1*}$  和  $Q_d^{com3*} < Q_c^{com3*}$ ; 当  $\bar{\theta}_{\min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\max}$  时,且  $a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta > c +$

$\varepsilon c_{tr} + c_p \bar{\mu}_\theta$  时,有  $Q_d^{com2*} < Q_c^{com2*}$ .

证明见附录.

从命题 3 可知,次品率、溯源成本与责任成本是影响零售商订购量的主要变量,在直接接收或拒绝决策下,集中式供应链下的订购量要高于分散式供应链,而在接收且溯源决策下订购量的大小受采购成本、溯源成本与责任成本的影响.

### 3.2 基于抽检结果的最优决策

由于全部检查成本较高,因此通过抽检来估计整个批次的次品率,由此决定该批次产品是拒绝还是接收. 在产品  $Q$  中抽检  $n$  个产品,假设抽检产品中的次品数量为  $x$ ,是期望为  $\bar{\theta}n$  的随机变量. 抽检规则是:若  $x \leq \alpha_1 n$ ,则接收该批次产品;若  $\alpha_1 n < x \leq \alpha_2 n$ ,则接收该批次产品,并对所有产品进行溯源;若  $x > \alpha_2 n$ ,则拒绝该批次产品,其中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别表示抽检产品中次品率阈值. 但是,由于检查存在错误,在抽样产品中实际上被检查出来的次品数量为  $\bar{\beta}x$ ,因此,令  $\gamma_1 = P(\bar{\beta}x \leq \alpha_1 n)$ ,  $\gamma_2 = P(\bar{\beta}x \leq \alpha_2 n)$ ,则有

$$P(x) = \begin{cases} \gamma_1 = P(\bar{\beta}x \leq \alpha_1 n) & \text{接收} \\ \gamma_2 - \gamma_1 = P(\alpha_1 n < \bar{\beta}x \leq \alpha_2 n) & \text{接收且溯源} \\ 1 - \gamma_2 = P(\bar{\beta}x > \alpha_2 n) & \text{拒绝} \end{cases}$$

其中  $P(x)$  表示抽样的结果概率. 综合考虑式 (5) ~ 式 (10),可以得到组合机制下零售商和供应商的期望利润函数分别为

$$\begin{aligned}
\Pi_r^{com}(Q | \theta \sim U(a, b)) &= P(\bar{\beta}x \leq \alpha_1 n) \pi_r(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\min}) + P(\alpha_1 n < \bar{\beta}x \leq \alpha_2 n) \pi_r(Q | \bar{\theta}_{\min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\max}) + \\
& P(\bar{\beta}x > \alpha_2 n) \pi_r(Q | \bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max}) - c_d \bar{\beta}n = pQ - (a_0 - \gamma_2 a_1 \bar{\mu}_\theta) Q - (p - s_v) \times \\
& \int_0^Q F(y) dy - \gamma_1 c_p \bar{\mu}_\theta Q - (\gamma_2 - \gamma_1) \varepsilon c_{tr} Q - c_d \bar{\beta}n
\end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
\Pi_s^{com}(Q | \theta \sim U(a, b)) &= P(\bar{\beta}x \leq \alpha_1 n) \pi_s(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\min}) + P(\alpha_1 n < \bar{\beta}x \leq \alpha_2 n) \pi_s(Q | \bar{\theta}_{\min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\max}) + \\
& P(\bar{\beta}x > \alpha_2 n) \pi_s(Q | \bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max}) \\
&= (a_0 - \gamma_2 a_1 \bar{\mu}_\theta - c) Q - (\gamma_2 - \gamma_1) ((1 - \varepsilon) c_{tr} + c_p \bar{\mu}_\theta) Q
\end{aligned}$$

用  $\Pi^{com}(Q)$  表示组合机制下集中式供应链的期望利润,可以表示为

$$\begin{aligned}
\Pi^{com}(Q | \theta \sim U(a, b)) &= \Pi_r^{com}(Q | \theta \sim U(a, b)) + \Pi_s^{com}(Q | \theta \sim U(a, b)) \\
&= pQ - cQ - (p - s_v) \int_0^Q F(y) dy - (\gamma_2 - \gamma_1) c_{tr} Q - c_d \bar{\beta}n - \gamma_2 c_p \bar{\mu}_\theta Q
\end{aligned} \quad (12)$$

分别求解组合机制下,在分散式与集中式供应链中的零售商的最优订购量. 结果如命题4所示.

**命题4** 在组合机制下,  $\Pi_r^{com}(Q | \theta \sim U(a, b))$  是关于  $Q_d^{com}$  的凹函数,  $\Pi_r^{com}(Q | \theta \sim U(a, b))$  是关于  $Q_c^{com}$  的凹函数, 则有

1) 在分散式供应链下, 零售商存在最优的  $Q_d^{com*}$  满足  $F(Q_d^{com*}) = \frac{p - (a_0 - \gamma_2 a_1 \bar{\mu}_\theta) - \gamma_1 c_p \bar{\mu}_\theta - (\gamma_2 - \gamma_1) \varepsilon c_{tr}}{p - s_v}$  且  $p > (a_0 - \gamma_2 a_1 \bar{\mu}_\theta) + \gamma_1 c_p \bar{\mu}_\theta + (\gamma_2 - \gamma_1) \varepsilon c_{tr}$ , 使得  $\Pi_r^{com}(Q | \theta \sim U(a, b))$  达到最优; 2) 在集中式供应链下, 零售商存在最优订购量  $Q_c^{com*}$  满足  $F(Q_c^{com*}) = \frac{p - c - \gamma_2 c_p \bar{\mu}_\theta - (\gamma_2 - \gamma_1) c_{tr}}{p - s_v}$  且  $p > c + \gamma_2 c_p \bar{\mu}_\theta + (\gamma_2 - \gamma_1) c_{tr}$ , 使得  $\Pi_r^{com}(Q | \theta \sim U(a, b))$  达到最优; 3) 比较分散式与集中式供应链的最优订购量可得, 当  $\bar{\mu}_\theta > \frac{a_0 - c - (\gamma_2 - \gamma_1)(1 - \varepsilon) c_{tr}}{\gamma_2 a_1 + (\gamma_2 - \gamma_1) c_p}$  时, 有  $Q_d^{com*} > Q_c^{com*}$ ; 反之, 有  $Q_d^{com*} \leq Q_c^{com*}$ .

证明见附录.

命题4表明, 组合机制下的订购量主要受次品率、产品责任成本、溯源成本以及抽检结果的影响. 在分散式供应链中, 若  $\gamma_1 c_p < \gamma_2 a_1$ , 订购量随次品率的增加而增加; 责任成本与溯源成本越大, 则订购量越少; 若  $\varepsilon c_{tr} > c_p \bar{\mu}_\theta$ , 则直接接收的概率越大, 订购量越大; 若  $a_1 \bar{\mu}_\theta > \varepsilon c_{tr}$ , 表明接收且溯源的概率越大, 订购量越大. 在集中式供应链下, 次品率、责任成本与溯源成本越高, 订购量越少. 比较分散式与集中式的订购量可知, 其大小主要受溯源成本、责任成本与抽检结果的影响.

进一步比较溯源机制与组合机制下的订购量, 结果如命题5所示.

**命题5** 比较溯源与组合机制可知, 在分散式供应链中, 当  $\bar{\mu}_\theta > \frac{(1 - \gamma_2 + \gamma_1) \varepsilon c_{tr}}{(1 - \gamma_2) a_1 + \gamma_1 c_p}$  时,  $Q_d^{com*} < Q_d^{tra*}$ ; 反之, 则有  $Q_d^{com*} \geq Q_d^{tra*}$ ; 在集中式供应链

中,  $Q_c^{com*} \geq Q_c^{tra*}$  恒成立.

证明见附录.

从命题5可知, 在分散式供应链下, 溯源与组合机制的订购量会受次品率、溯源成本、责任成本以及抽检结果的影响, 订购量的临界条件取决于溯源成本、采购成本与责任成本之间的比值. 而在集中式供应链下, 组合机制的订购量是恒大于溯源机制的订购量的, 表明零售商在组合机制下会订购更多的产品.

### 4 数值分析

以上模型分别研究了检查机制、溯源机制和组合机制下的零售商最优决策. 下面将通过模型内相关参数进行赋值, 进一步分析并验证上述相关结论. 参考文献[19]与文献[35]对参数的设置, 设置参数如下: 1) 假设市场需求  $y$  的密度函数为  $f(y) = 1/1\ 000$ ; 2)  $p = 4.5$ ,  $a_0 = 2.0$ ,  $a_1 = 0.6$ ,  $c = 1.2$ ,  $s_v = 3.2$ ,  $c_e = 0.12$ ,  $c_d = 1.8$ ,  $c_p = 3.0$ ,  $c_{tr} = 0.10$ ,  $\varepsilon = 0.7$ ,  $\bar{\beta} = 0.9$ ; 3) 根据国家质量监督检验检疫总局公布的《2017年国家监督抽查产品质量状况的公告》可知, 2012年~2017年的产品抽查合格率分别为88.9%、92.3%、91.1%、91.6%、91.5%, 基于此, 假设  $\theta \sim U(0.85, 1)$ , 则有

$$h(\theta) = \begin{cases} 6.6 & 0.85 \leq \theta \leq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

根据上式的密度函数, 假设  $\bar{\theta}_{\min} = 0.04$ ,  $\bar{\theta}_{\max} = 0.09$ , 则组合机制下的次品率为

$$h(\theta)_{a \& n} = \begin{cases} 25 & 0.96 \leq \theta \leq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases};$$

$$h(\theta)_{a \& t} = \begin{cases} 20 & 0.91 \leq \theta \leq 0.96 \\ 0 & \text{其他} \end{cases};$$

$$h(\theta)_r = \begin{cases} 16.6 & 0.85 \leq \theta \leq 0.91 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}.$$

研究三种机制下, 次品率  $\bar{\mu}_\theta$  对零售商订购决策与利润的影响, 结果如图2、图3所示.

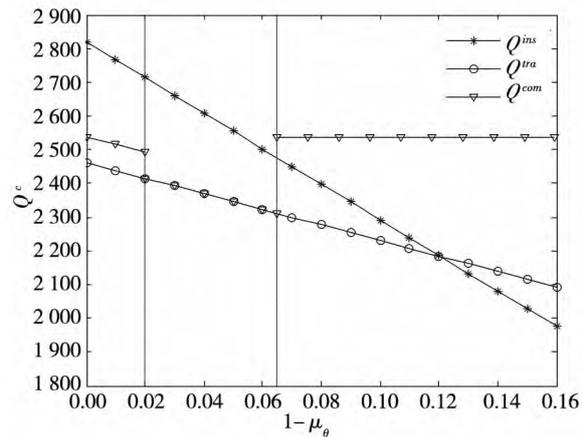
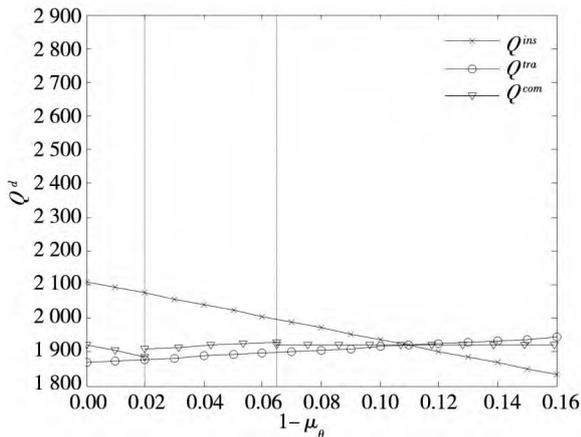


图2 分散式与集中式供应链下 Q 随  $\bar{\mu}_\theta$  的变化情况

Fig.2 The change of Q with  $\bar{\mu}_\theta$  in the decentralized and centralized supply chain

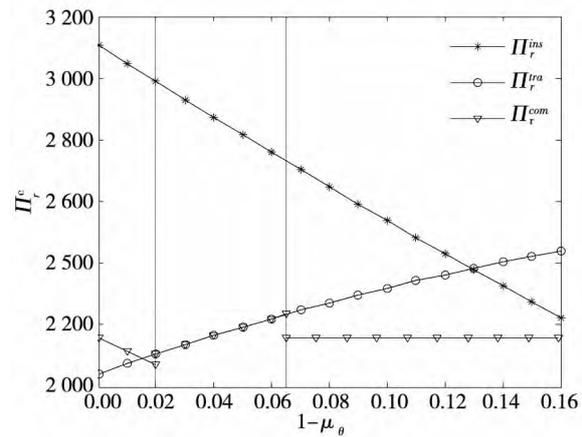
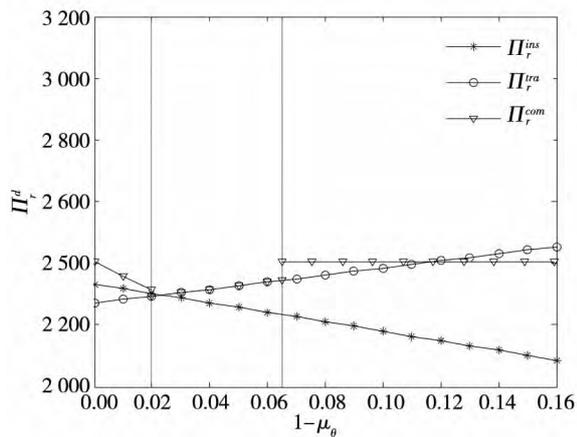


图3 分散式与集中式供应链下  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  的变化情况

Fig.3 The change of  $\Pi_r$  with  $\bar{\mu}_\theta$  in the decentralized and centralized supply chain

从图2可知,在整体上,集中式供应链中零售商会订购更多的产品. 在分散式供应链中,  $Q^{ins}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  的增加而下降,  $Q^{tra}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  的增加而上升,  $Q^{com}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  的增加呈现出先下降,后上升而后不变的趋势;而在集中式供应链中,  $Q^{ins}$ 、 $Q^{tra}$  均会随  $\bar{\mu}_\theta$  的增加而下降,  $Q^{com}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  的增加则呈现出先下降,后不变的趋势. 可见,在分散式供应链中,由于零售商不必承担次品损失,因此在  $\bar{\mu}_\theta$  上升时由于采购成本的下降,其会订购更多的产品;但在集中式供应链中,对整个供应链而言,次品率越高其造成的损失会越高,因此反而会降低订购量. 通过机制比较发现,在次品率较低时,检查机制下的订购量较高,但随着次品率的增加,在分散式供应链中溯源机制下更能激励零售商订购更多的产

品,在集中式供应链中组合机制更优.

从图3可知,无论在分散式还是集中式供应链中,均有  $\Pi_r^{ins}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  的增加而减小,  $\Pi_r^{tra}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  的增加而增加,  $\Pi_r^{com}$  则随  $\bar{\mu}_\theta$  的变化呈现出先下降,后上升,而后平稳的趋势. 在分散式供应链中,当  $\bar{\mu}_\theta \in (0, 0.02)$  时,组合机制更优;当  $\bar{\mu}_\theta \in (0.02, 0.065)$  时,溯源机制与组合机制均优于检查机制;当  $\bar{\mu}_\theta \in (0.065, 0.15)$  时,溯源机制会逐渐优于组合机制. 而在集中式供应链中,在  $\bar{\mu}_\theta$  较低时,均是检查机制更优,但随着  $\bar{\mu}_\theta$  的提高,溯源机制会更优. 比较来看,零售商实施检查机制时选择集中式供应链可以获得更多的收益,在分散式供应链中采取组合机制与溯源机制可以获得高于集中式供应链的收益.

上述分析是在确定了批次产品的次品率所处阈值范围后进行的,事实上,在现实中是难以预先了解某一批次产品的实际次品率的. 因此,采用抽样的方式确定是否接收或拒绝某一批次产品. 为了量化抽检过程,假设抽检产品中次品数量  $x$  低于  $\alpha_T n$  的概率服从二项分布,  $\alpha_T = \{\alpha_1, \alpha_2\}$ , 则有

$$P(x \leq \alpha_T n) = \sum_{k=0}^{\alpha_T n} \binom{n}{k} \bar{\theta}^k (1 - \bar{\theta})^{n-k}$$

由于随着样本数量  $n$  的增加,二项分布的计算会变得困难,因此为了简化计算,参考 Aiello 等<sup>[30]</sup> 的研究,采用正态分布来近似代表二项分布

$$X \sim N(\mu, \sigma) = N(n\bar{\theta}, \sqrt{n\bar{\theta}(1 - \bar{\theta})})$$

因此,抽样机制下不同决策的概率可以用  $t$  分布来计算

$$P(x) = P(x/\nu) = \int_{-\infty}^x \frac{\Gamma(\frac{\nu+1}{2})}{\Gamma(\frac{\nu}{2})} \frac{1}{\sqrt{\nu\pi}} \times$$

$$\frac{1}{(1 + \frac{t^2}{\nu})^{\frac{\nu+1}{2}}} dt$$

其中  $\nu$  表示自由度,且  $x = \alpha_T n$ . 由于在检查精度为  $\bar{\beta}$  下,零售商能够检查出来的次品数量为  $\bar{\beta}x$ , 因此,零售商直接接收该批次产品的实际概率为  $\gamma_1 = P(\bar{\beta}x \leq \alpha_1 n)$ ; 接收且溯源的概率为  $\gamma_2 - \gamma_1 = P(\bar{\beta}x \leq \alpha_2 n) - P(\bar{\beta}x \leq \alpha_1 n)$ ; 拒绝的概率为  $1 - \gamma_2 = 1 - P(\bar{\beta}x \leq \alpha_2 n)$ .

基于上述分析,进一步分析三种机制下不同参数变化对零售商订购量与利润的影响,参考 GB/T2828.1-2012 中关于抽样的具体标准,发现订购量在 1 201 ~ 3 200 范围时,抽样的数量为 50. 由此设置  $n = 50$ ,  $\alpha_1 = 0.010$ ,  $\alpha_2 = 0.035$ , 根据  $t$  分布计算公式,可进一步计算  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ , 由此分析不同参数对零售商决策的影响.

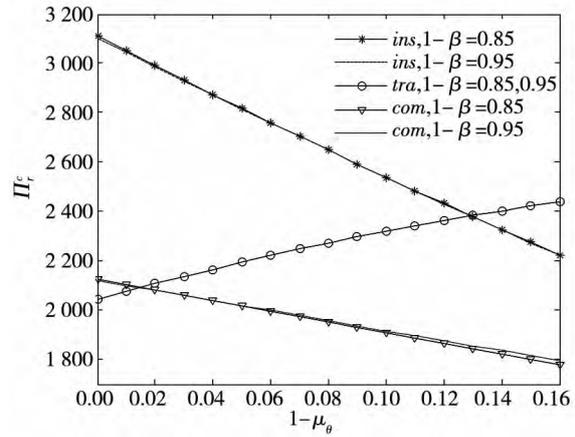
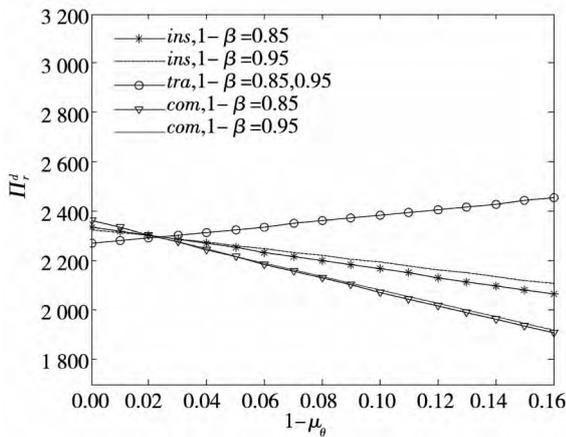


图 4 分散式与集中式供应链下  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  和  $\bar{\beta}$  的变化情况

Fig. 4 The change of  $\Pi_r$  with  $\bar{\mu}_\theta$  and  $\bar{\beta}$  in the decentralized and centralized supply chain

接下来分析不同参数对零售商利润的影响. 从图 4 可知,在分散式和集中式供应链中,均存在  $\Pi_d^{ins}$  和  $\Pi_c^{ins}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  增加而递减,  $\Pi_d^{tra}$  和  $\Pi_c^{tra}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  增加而递增,  $\Pi_d^{com}$  和  $\Pi_c^{com}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  增加而递减,且存在  $\Pi_d^{ins} < \Pi_c^{ins}, \Pi_d^{tra} > \Pi_c^{tra}, \Pi_d^{com} > \Pi_c^{com}$ . 可见,  $\bar{\beta}$  变化不会改变三种机制下  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  变化的趋势,但会影响检查与组合机制下的零售商利润. 在分散式供应链中,在检查和组合机制下,若  $\bar{\mu}_\theta$  较低,提高检查精度反而会降低零售商的利润,但不显著,而随着  $\bar{\mu}_\theta$  的增加,提高检查精度对零售商是有利

的,检查与组合机制下零售商的利润均会增加,且对检查机制的影响更为显著. 在集中式供应链中,检查精度的提高仅会提高组合机制下零售商的利润,但不显著. 可见,企业在采购高质量不确定性的产品时,提高检查精度是有利的. 此外还可知,在  $\bar{\mu}_\theta$  较低时,在分散式供应链中执行组合机制更优,在集中式供应链中执行检查机制更优,且集中式下的利润高于分散式,而随着  $\bar{\mu}_\theta$  的增加,溯源机制在分散式与集中式中均更优.

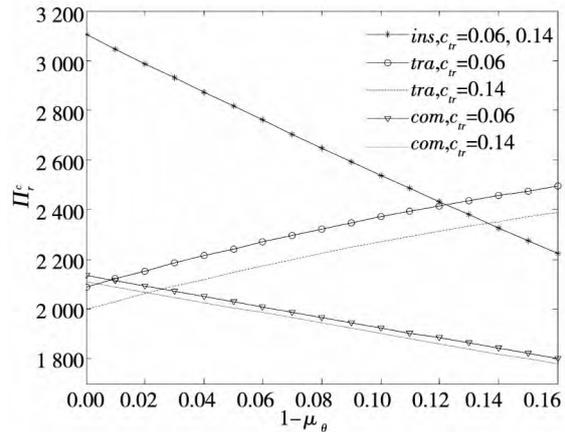
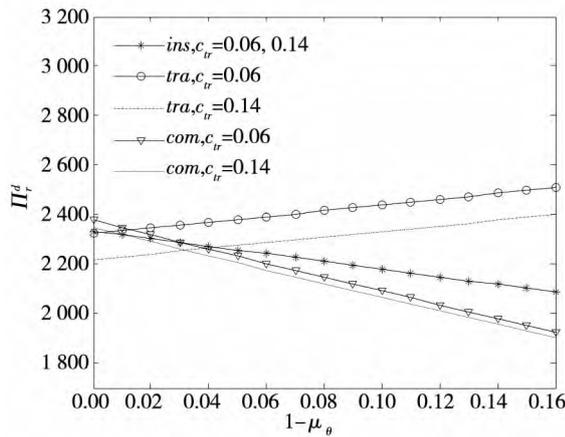


图5 分散式与集中式供应链下  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  和  $c_{tr}$  的变化情况

Fig. 5 The change of  $\Pi_r$  with  $\bar{\mu}_\theta$  and  $c_{tr}$  in the decentralized and centralized supply chain

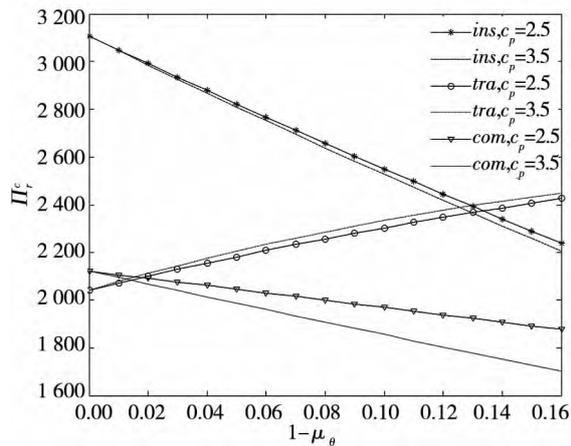
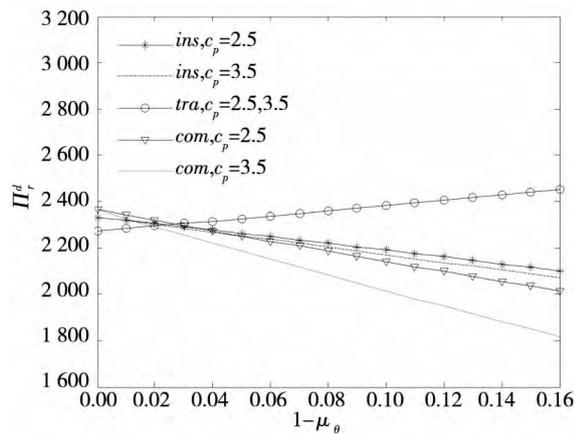


图6 分散式与集中式供应链下  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  和  $c_p$  的变化情况

Fig. 6 The change of  $\Pi_r$  with  $\bar{\mu}_\theta$  and  $c_p$  in the decentralized and centralized supply chain

从图5可知,  $c_{tr}$  变化不会改变分散式与集中式供应链下  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  变化的趋势, 但会影响溯源机制与组合机制下的零售商利润. 在分散式与集中式供应链中, 在  $c_{tr}$  变大时, 溯源机制与组合机制下的  $\Pi_r$  均会变小, 溯源机制下的变化更为显著, 表明溯源成本是影响溯源机制效率的重要原因, 现实中可以通过成本补贴方式激励零售商参与溯源体系建设. 比较分散式与集中式而言, 存在  $\Pi_d^{ins} < \Pi_c^{ins}, \Pi_d^{tra} > \Pi_c^{tra}, \Pi_d^{com} > \Pi_c^{com}$ , 且  $\Pi_d^{ins}$  与  $\Pi_d^{tra}$  随  $\bar{\mu}_\theta$  变化的更为平缓, 表明次品率在分散式供应链中对零售商利润的影响低于集中式供应链. 从机制选择来看, 在分散式供应链中, 若  $\bar{\mu}_\theta$  较小, 组合机制会更优, 随着  $\bar{\mu}_\theta$  的增加, 溯源机制会更优, 而在集中式供应链中, 随着  $\bar{\mu}_\theta$  的逐渐增加, 先是选择检查机制, 随后是溯源机制更优. 且

从总体来看, 集中式下的检查机制在  $\bar{\mu}_\theta$  较低时最优, 溯源机制在  $\bar{\mu}_\theta$  较高时最优.

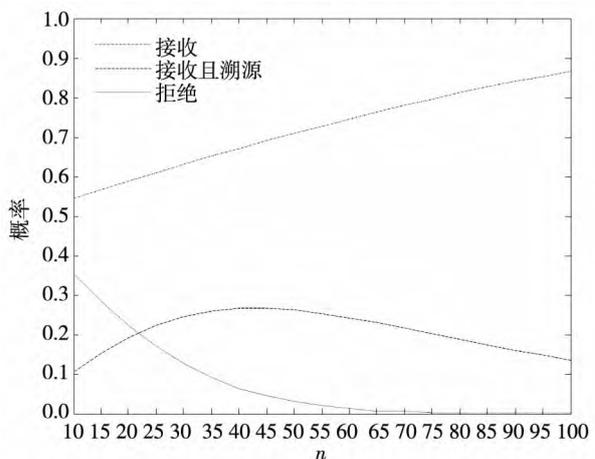


图7 概率随  $n$  的变化情况

Fig. 7 The change of probability with  $n$

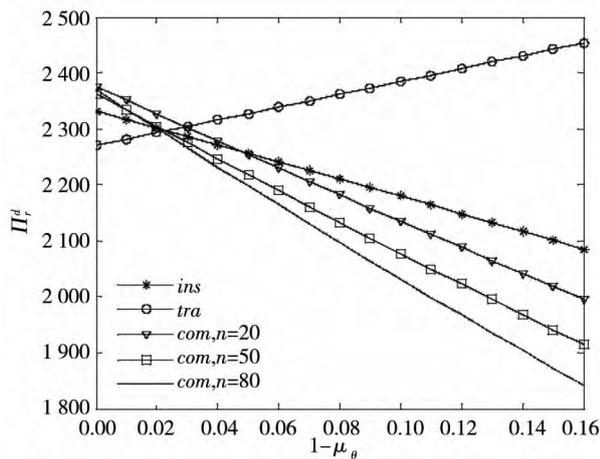


图8  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  和  $n$  的变化情况

Fig. 8 The change of  $\Pi_r$  with  $\bar{\mu}_\theta$  and  $n$

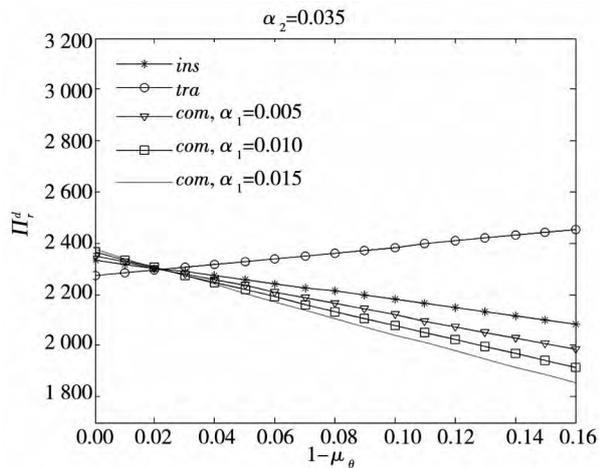


图9  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  和  $\alpha_1$  的变化情况

Fig. 9 The change of  $\Pi_r$  with  $\bar{\mu}_\theta$  and  $\alpha_1$

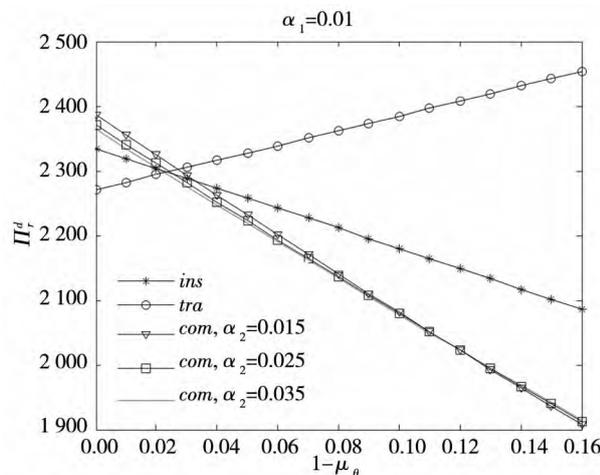


图10  $\Pi_r$  随  $\bar{\mu}_\theta$  和  $\alpha_2$  的变化情况

Fig. 10 The change of  $\Pi_r$  with  $\bar{\mu}_\theta$  and  $\alpha_2$

从图6可知,在分散式供应链中,随着  $c_p$  的

增加,检查机制与组合机制下的  $\Pi_r$  会下降,其中对组合机制下的利润影响更大,尤其在  $\bar{\mu}_\theta$  较大时其影响更为显著,对溯源机制没有影响. 在集中式供应链中,随着  $c_p$  的增加,检查机制与组合机制下的  $\Pi_r$  仍会下降,但在溯源机制中,零售商的利润会上升,原因在于在溯源机制下,所有的责任成本均由供应商承担,因此零售商会订购更多的产品,因此尽管责任成本上升,在溯源机制下零售商的利润仍然上升. 可见,溯源机制下可以帮助零售商规避由于销售次品带来的损失. 比较集中式与分散式供应链,仍可知检查机制在次品率较低时最优,随着次品率的增加,溯源机制会更优.

进一步分析抽检结果对零售商决策的影响. 从图7可知,随着  $n$  的增加,零售商选择直接接收该批次产品的概率是逐渐增加的,选择接收且溯源的概率呈现出先上升后下降的趋势,选择拒绝的概率是逐渐下降的. 表明在次品数量一定时,随着抽检数量的增加,会使得接收产品的概率上升,而当抽检数量足够大时,拒绝批次产品的概率将接近于0. 可见,抽检过多的产品对企业可能是不利的,会帮助掩盖次品在该批次产品中的影响,促使企业作出接收批次产品的决策. 从图8可知,在分散式供应链中,抽检越少的数量,对零售商更为有利,尤其在  $\bar{\mu}_\theta$  越高时,这种优势更为明显,说明在组合机制中,抽检更多的数量并不意味着更优. 此外,还对集中式供应链下零售商利润随  $\bar{\mu}_\theta$  和  $n$  变化的趋势进行了分析,发现  $n$  变化引起的  $\Pi_r$  的变化与分散式供应链中一致,且关于机制的选择也与上述分析相同,因此,文中不再赘述.

从图9和图10可知,在  $\bar{\mu}_\theta$  越低时,选择组合机制更优,而随着  $\bar{\mu}_\theta$  的增加,溯源机制会更优. 此外,在  $\bar{\mu}_\theta$  较低时,  $\alpha_1$  的增加可以增加组合机制下零售商的利润,而  $\alpha_2$  的增加则会降低零售商的利润;在  $\bar{\mu}_\theta$  较高时,结论正好相反. 表明在次品率较低时,由于次品造成的损失较少,因此选择直接接收产品对零售商更为有利,可以避免溯源成本的产生;但在次品率较高时,降低零售商直接接收产品的概率可以减少由于次品造成的损失,同时可以通过加大溯源概率增加零售商的利润. 同时也分析了集中式供应链下抽检次品率阈值  $\alpha_1$ 、

$\alpha_2$  与次品率  $\bar{\mu}_\theta$  对零售商决策的影响, 发现其变化与分散式中相同, 文中不再赘述.

## 5 结束语

研究一条由一个供应商和一个零售商组成的供应链, 建立质量不确定下的报童模型, 比较研究分散式与集中式供应链中检查机制、溯源机制以及组合机制对供应链质量改进与产品订购决策的影响, 以期为企业选择合适的质量控制方式提供管理建议. 主要结论如下.

(1) 次品率是影响零售商订购决策与质量机制选择的重要因素. 在分散式供应链中, 随着次品率的增加, 检查机制下的零售商订购量与利润会下降, 溯源机制下的订购量与利润会上升, 组合机制下的订购量与利润则呈现出先下降后上升, 而后趋于平稳的状态. 表明在产品质量不确定性较高时, 选择溯源机制对零售商更为有利, 但在产品质量不确定性较低时, 组合机制更优, 而检查机制的效率较为低下. 在集中式供应链中, 随着次品率的增加, 检查机制下的零售商订购量与利润会下降; 溯源机制下订购量会下降, 但利润会上升; 组合机制中, 利润呈现出先下降后上升, 而后趋于平稳的状态, 但订购量则呈现出先下降而后平稳的趋势. 对机制选择而言, 在次品率较高时, 无论在分散式还是集中式供应链中选择溯源机制对零售商更为有利, 但在次品率较低时, 在分散式供应链中组合机制会更优, 而在集中式供应链中检查机制更优. 可见, 推进国家重要产品的溯源体系的构建是必要的, 尤其是对如食品、药品等高质量风险的产品而言, 但是, 并不是所有产品都应建立溯源机制, 对质量较高的产品选择组合机制反而能降低成本, 对企业更为有利.

(2) 检查精度、溯源成本、责任成本变化不会改变零售商利润随次品率变化的趋势. 其中, 检

查精度仅会影响检查与组合机制的效率, 但受到次品率的影响, 在次品率较低时, 提高检查精度会使得零售商的利润下降, 但在次品率较高时, 提高检查精度对次品率是有利的. 提高溯源成本会降低溯源机制的效率, 但由于溯源机制下产品责任成本均由供应商承担, 在次品率较高时, 溯源机制仍优于检查与组合机制. 而提高产品责任成本会使得检查与组合机制下的分散式供应链中的零售商利润下降, 对溯源机制未有影响, 但会使得集中式供应链中溯源机制下的利润上升. 可见, 对零售商而言, 在面对质量不确定性较高的产品时, 提高检查精度是有利的, 而盲目提高检查精度并不一定有利, 同时, 对政府而言, 加大对质量问题的惩罚, 更能激励企业建立溯源机制.

(3) 进一步探究了抽检数量、次品率阈值对零售商决策的影响. 结果表明随着抽检数量的增加, 零售商接收该批次产品的概率会加大, 而在抽检数量足够大时, 拒绝产品的概率为 0. 此外, 还发现在次品率较低时, 增加直接接收产品的次品率阈值可以增加组合机制下零售商的利润, 而增加接收且溯源的次品率阈值则会降低零售商的利润; 在次品率较高时, 结论正好相反. 而提高检查精度则会降低零售商直接接收产品的概率. 可见, 在向高质量的供应商进行采购时, 放宽接收产品的概率对企业而言是有利的, 而在与质量不确定性高的供应商合作时, 应设置更为严格的接收条件, 适当放宽溯源接收的条件, 可提升企业的利润.

研究还存在一定的局限, 如没有考虑最优的抽检数量, 事实上抽检数量也是影响企业采购决策的重要变量, 可在未来的研究中进一步考虑. 此外, 也未考虑溯源的精度与广度, 现实中尽管溯源体系可以帮助明确责任, 但想要实现对产品的完整溯源是困难的, 受到溯源技术等诸多因素的影响, 因此, 溯源未必总是有效的, 未来可进一步考虑溯源边界等问题.

## 参考文献:

- [1] 周佳琪, 张人千. 交叉销售产品的报童模型与博弈分析[J]. 管理科学学报, 2015, 18(7): 59-69.  
Zhou Jiaqi, Zhang Renqian. Newsvendor model and game analysis of cross-selling products[J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(7): 59-69. (in Chinese)
- [2] Rahim M A, Ben-Daya M. Joint determination of production quantity, inspection schedule, and quality control for an imper-

- fect process with deteriorating products [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2001, 52(12): 1370–1378.
- [3] Nikoofal M E, Gümüş M. Quality at the source or at the end? Managing supplier quality under information asymmetry [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2018, 20(3): 498–516.
- [4] 李丽君, 黄小原, 庄新田. 双边道德风险条件下供应链的质量控制策略 [J]. *管理科学学报*, 2005, 8(1): 42–47.  
Li Lijun, Huang Xiaoyuan, Zhuang Xintian. Strategy of quality control in supply chain under double moral hazard condition [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(1): 42–47. (in Chinese)
- [5] 陈敬贤, 梁 樑. 外包环境下考虑产品质量的 OEM 采购战略决策 [J]. *管理科学学报*, 2018, 21(9): 38–49.  
Chen Jingxian, Liang Liang. OEM's sourcing strategy for quality in outsourcing [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2018, 21(9): 38–49. (in Chinese)
- [6] Starbird S A. Penalties, rewards, and inspection: Provisions for quality in supply chain contracts [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2001, 52(1): 109–115.
- [7] Hwang I, Radhakrishnan S, Su L. Vendor certification and appraisal: Implications for supplier quality [J]. *Management Science*, 2006, 52(10): 1472–1482.
- [8] Lee H H, Li C. Supplier quality management: Investment, inspection, and incentives [J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(2): 304–322.
- [9] Hsu J T, Hsu L F. An EOQ model with imperfect quality items, inspection errors, shortage backordering, and sales returns [J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 143(1): 162–170.
- [10] Babich V, Tang C S. Managing opportunistic supplier product adulteration: Deferred payments, inspection, and combined mechanisms [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2012, 14(2): 301–314.
- [11] Salameh M K, Jaber M Y. Economic production quantity model for items with imperfect quality [J]. *International Journal of Production Economics*, 2000, 64(1–3): 59–64.
- [12] Khan M, Jaber M Y, Bonney M. An economic order quantity (EOQ) for items with imperfect quality and inspection errors [J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 133(1): 113–118.
- [13] Zhou Y, Chen C, Li C, et al. A synergic economic order quantity model with trade credit, shortages, imperfect quality and inspection errors [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(2): 1012–1028.
- [14] Al-Salamah M. Economic production quantity in batch manufacturing with imperfect quality, imperfect inspection, and destructive and non-destructive acceptance sampling in a two-tier market [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 93: 275–285.
- [15] 毕军贤, 赵定涛. 抽样检验产品的质量检验博弈与诚信机制设计 [J]. *管理科学学报*, 2011, 14(5): 43–51.  
Bi Junxian, Zhao Dingtao. Quality inspection game and incentive mechanism for building trust in sampling inspection quality product trade [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2011, 14(5): 43–51. (in Chinese)
- [16] Fernández A J. Economic lot sampling inspection from defect counts with minimum conditional value-at-risk [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 258(2): 573–580.
- [17] Duffuaa S O, El-Ga'aly A. Impact of inspection errors on the formulation of a multi-objective optimization process targeting model under inspection sampling plan [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 80: 254–260.
- [18] Taleizadeh A A, Dehkordi N Z. Economic order quantity with partial backordering and sampling inspection [J]. *Journal of Industrial Engineering International*, 2017, 13(3): 1–15.
- [19] Rezaei J. Economic order quantity and sampling inspection plans for imperfect items [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 96: 1–7.
- [20] Farooq M A, Kirchain R, Novoa H, et al. Cost of quality: Evaluating cost-quality trade-offs for inspection strategies of manufacturing processes [J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 188: 156–166.
- [21] 张 斌, 华中生. 供应链质量管理中抽样检验决策的非合作博弈分析 [J]. *中国管理科学*, 2006, 14(3): 27–31.  
Zhang Bin, Hua Zhongsheng. Non-cooperation game analysis of sampling inspection in quality management of supply chain

- [J]. Chinese Journal of Management Science, 2006, 14(3): 27–31. (in Chinese)
- [22] Dickinson D L, Bailey D V. Meat traceability: Are US consumers willing to pay for it? [J]. Journal of Agricultural and Resource Economics, 2002, 27(2): 348–364.
- [23] Cicia G, Colantuoni F. Willingness to pay for traceable meat attributes: A meta-analysis [J]. International Journal on Food System Dynamics, 2010, 1(3): 252–263.
- [24] Stranieri S, Cavaliere A, Banterle A. Do motivations affect different voluntary traceability schemes? An empirical analysis among food manufacturers [J]. Food Control, 2017, 80: 187–196.
- [25] Wang J, Yue H L, Zhou Z N. An improved traceability system for food quality assurance and evaluation based on fuzzy classification and neural network [J]. Food Control, 2017, 79: 363–370.
- [26] Stuller Z J, Rickard B J. Traceability adoption by specialty crop producers in California [J]. Journal of Agribusiness, 2008, 26(2): 101–116.
- [27] Pouliot S, Sumner D A. Traceability, liability and incentives for food safety and quality [J]. American Journal of Agricultural Economics, 2008, 90(1): 15–27.
- [28] Resende-Filho M A, Hurley T M. Information asymmetry and traceability incentives for food safety [J]. International Journal of Production Economics, 2012, 139: 596–603.
- [29] 龚 强, 陈 丰. 供应链可追溯性对食品安全和上下游企业利润的影响 [J]. 南开经济研究, 2012, (6): 30–48.  
Gong Qiang, Chen Feng. The impact of the supply chain traceability on food safety and corporate profits [J]. Nankai Economic Studies, 2012, (6): 30–48. (in Chinese)
- [30] Aiello G, Enea M, Muriana C. The expected value of the traceability information [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 244(1): 176–186.
- [31] Starbird S A, Amanor-Boadu V. Contract selectivity, food safety, and traceability [J]. Journal of Agricultural and Resource Economics, 2007, 31(1): 14–26.
- [32] Kumar V, Ekwall D, Wang L. Supply chain strategies for quality inspection under a customer return policy: A game theoretical approach [J]. Entropy, 2016, 18(440): 1–20.
- [33] 曹 裕, 胡韩莉, 万光羽. 供应商掺假行为的博弈分析与机制选择 [J]. 运筹与管理, 2017, 26(7): 7–15.  
Cao Yu, Hu Hanli, Wan Guangyu. Game analysis and mechanism choices of supplier product adulteration behavior [J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(7): 7–15. (in Chinese)
- [34] Kyparisis G J, Koulamas C. The price-setting newsvendor problem with nonnegative linear additive demand [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 269(2): 695–698.
- [35] Lee C H, Rhee B D, Cheng T C E. Quality uncertainty and quality-compensation contract for supply chain coordination [J]. European Journal of Operational Research, 2013, 228(3): 582–591.

## Product quality control mechanism in supply chains based on newsvendor model

CAO Yu<sup>1</sup>, LI Qing-song<sup>1</sup>, HU Han-ti<sup>2\*</sup>

1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Economics & Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

**Abstract:** This paper studies a supply chain with one supplier and one buyer and explores the effects of in-

spection mechanism, traceability mechanism, and combination mechanism (sampling inspection and traceability) on product quality control based on newsvendor model considering quality uncertainty and inspection error in both the decentralized and centralized supply chain. It is found that when quality uncertainty is high, the traceability mechanism is more beneficial to retailers in both types of supply chains; however, with the improvement of product quality, the combination mechanism becomes better than the other two mechanisms in the decentralized supply chain, while the inspection mechanism is better in the centralized supply chain. It is also found that inspection accuracy, traceability cost, and responsibility cost will not affect the trend of the retailer's profit as the defective rate changes and have little effect on the retailer's selection of the quality control mechanism. When the defective rate is low, increasing the threshold of the defective rate of the directly-acceptance strategy may increase the retailer's profit whereas increasing the threshold of the defective rate of the acceptance and traceability strategy will decrease the retailer's profit; but when the defective rate is high, the conclusion is the opposite.

**Key words:** quality control; inspection mechanism; traceability mechanism; combined mechanism

附录

命题 1 证明

在检查机制的分散式供应链中, 由于  $\frac{\partial^2 \Pi_r^{ins}(Q, \beta)}{\partial Q^2} = -(p - s_v) \int_a^b f(Z) (\theta + \bar{\theta}\beta)^2 h(\theta) d\theta \leq 0$ , 因此  $\Pi_r^{ins}(Q)$  是关于  $Q$  的凹函数, 又因为  $\frac{\partial \Pi_r^{ins}(Q, \beta)}{\partial Q} = (p - s_v) (E_\theta(\lambda) - \int_a^b F(Z) (\theta + \bar{\theta}\beta) h(\theta) d\theta) - [(a_0 - s_v) E_\theta(\lambda) - a_1 \int_a^b \bar{\theta}\lambda(\theta) h(\theta) d\theta + c_p \beta \bar{\mu}_\theta + c_c \bar{\beta}] = 0$ , 可得  $\int_a^b [(p - s_v) F(Z) (\theta + \bar{\theta}\beta) + a_1 \bar{\beta} \bar{\theta}^2] h(\theta) d\theta = (p - a_0) E_\theta(\lambda) + a_1 \bar{\mu}_\theta - c_p \beta \bar{\mu}_\theta - c_c \bar{\beta}$ , 且需  $(p - a_0) E_\theta(\lambda) + a_1 \bar{\mu}_\theta - c_p \beta \bar{\mu}_\theta - c_c \bar{\beta} > 0$ , 因此  $p > \frac{a_0 E_\theta(\lambda) - a_1 \bar{\mu}_\theta + c_p \beta \bar{\mu}_\theta + c_c \bar{\beta}}{E_\theta(\lambda)}$ . 同理可证集中式供应链的订购量.

证毕.

命题 2 证明

在溯源机制的在分散式供应链中, 因为  $\frac{\partial^2 \Pi_r^{tra}(Q)}{\partial Q^2} = -(p - s_v) f(Q) \leq 0$ , 所以  $\Pi_r^{tra}(Q)$  是关于  $Q$  的凹函数, 又根据  $\frac{\partial \Pi_r^{tra}(Q)}{\partial Q} = (p - s_v) (1 - F(Q)) - (a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta - s_v) - \varepsilon c_{ir} = 0$ , 可得:  $F(Q_d^{tra*}) = \frac{p - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta - \varepsilon c_{ir}}{p - s_v}$ , 且只有当  $p > a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta + \varepsilon c_{ir}$  才有  $F(Q_d^{tra*}) > 0$ . 因此, 综上可得, 当  $p > a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta + \varepsilon c_{ir}$  时, 有  $F(Q_d^{tra*}) = \frac{p - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta - \varepsilon c_{ir}}{p - s_v}$ . 同理可证集中式供应链的订购量.

比较分散式与集中式供应链的最优订购量, 作差可得  $F(Q_d^{tra*}) - F(Q_c^{tra*}) = \frac{-a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta - \varepsilon c_{ir} + c + c_p \bar{\mu}_\theta}{p - s_v} > 0$ , 即当  $\bar{\mu}_\theta > \frac{a_0 - \varepsilon c_{ir} - c}{c_p + a_1}$  时, 有  $Q_d^{tra*} > Q_c^{tra*}$ ; 同理可证, 当  $\bar{\mu}_\theta \leq \frac{a_0 - \varepsilon c_{ir} - c}{c_p + a_1}$  时, 有  $Q_d^{tra*} \leq Q_c^{tra*}$ . 证毕.

命题 3 证明

当  $\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min}$  时, 在分散式供应链下, 根据  $\frac{\partial \Pi_r(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min})}{\partial Q} = (p - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta) - (p - s_v) F(Q) - c_p \bar{\mu}_\theta$  且  $\frac{\partial^2 \Pi_r(Q | \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{min})}{\partial Q^2} = -(p - s_v) f(Q) \leq 0$ , 有  $F(Q_d^{com1*}) = \frac{p - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta - c_p \bar{\mu}_\theta}{p - s_v}$  且  $p > a_0 - a_1 \bar{\mu}_\theta + c_p \bar{\mu}_\theta$ . 在集中式供

应链下,根据  $\frac{\partial \Pi(Q|\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\min})}{\partial Q} = (p - c - c_p \bar{\mu}_\theta) - (p - s_v) F(Q)$  且  $\frac{\partial^2 \Pi(Q|\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\min})}{\partial Q^2} = -(p - s_v) f(Q) \leq 0$ , 有  $F(Q_c^{com1*}) = \frac{p - c - c_p \bar{\mu}_\theta}{p - s_v}$  且  $p > c + c_p \bar{\mu}_\theta$ . 同理可证当  $\bar{\theta}_{\min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\max}$  与  $\bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max}$  时的订购量.

比较不同次品率阈值范围下的最优订购量,可得:当  $\bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\min}$  时,作差有  $F(Q_d^{com1*}) - F(Q_c^{com1*}) = \frac{c - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta}{p - s_v}$ , 因为  $c - a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta = c - w < 0$  恒成立,所以  $F(Q_d^{com1*}) < F(Q_c^{com1*})$ , 因为  $F(y)$  为非负、严格递增的函数,故有  $Q_d^{com1*} < Q_c^{com1*}$ ; 同理可证,当  $\bar{\theta} > \bar{\theta}_{\max}$  时,  $Q_d^{com3*} < Q_c^{com3*}$  成立; 当  $\bar{\theta}_{\min} < \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_{\max}$  时,作差有  $F(Q_d^{com2*}) - F(Q_c^{com2*}) = \frac{-a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta + \varepsilon c_{tr} + c + c_p \bar{\mu}_\theta}{p - s_v}$ , 即  $a_0 + a_1 \bar{\mu}_\theta > c + \varepsilon c_{tr} + c_p \bar{\mu}_\theta$  时,有  $Q_d^{com2*} < Q_c^{com2*}$ , 反之,有  $Q_d^{com2*} \geq Q_c^{com2*}$ . 证毕.

**命题 4 证明**

在组合机制的分散式供应链中,因为  $\frac{\partial^2 \Pi_r^{com}(Q|\theta \sim U(a,b))}{\partial Q^2} = -(p - s_v) f(Q) \leq 0$ , 因此  $\Pi_r^{com}(Q|\theta \sim U(a,b))$  是关于  $Q$  的凹函数, 又根据  $\frac{\partial \Pi_r^{com}(Q|\theta \sim U(a,b))}{\partial Q} = p - (a_0 - \gamma_2 a_1 \bar{\mu}_\theta) - (p - s_v) F(Q) - \gamma_1 c_p \bar{\mu}_\theta - (\gamma_2 - \gamma_1) \varepsilon c_{tr}$ , 可得零售商的最优订购量满足  $F(Q_d^{com*}) = \frac{p - (a_0 - \gamma_2 a_1 \bar{\mu}_\theta) - \gamma_1 c_p \bar{\mu}_\theta - (\gamma_2 - \gamma_1) \varepsilon c_{tr}}{p - s_v}$  且  $p > (a_0 - \gamma_2 a_1 \bar{\mu}_\theta) + \gamma_1 c_p \bar{\mu}_\theta + (\gamma_2 - \gamma_1) \varepsilon c_{tr}$ . 同理可证集中式供应链的订购量.

比较分散式与集中式供应链的最优订购量, 作差可得  $F(Q_d^{com*}) - F(Q_c^{com*}) = \frac{-(a_0 - \gamma_2 a_1 \bar{\mu}_\theta) + (\gamma_2 - \gamma_1) c_p \bar{\mu}_\theta + (\gamma_2 - \gamma_1) (1 - \varepsilon) c_{tr} + c}{p - s_v}$ , 即当  $\bar{\mu}_\theta > \frac{a_0 - c - (\gamma_2 - \gamma_1) (1 - \varepsilon) c_{tr}}{\gamma_2 a_1 + (\gamma_2 - \gamma_1) c_p}$  时,有  $Q_d^{com*} > Q_c^{com*}$ ; 同理可证,当  $\bar{\mu}_\theta \leq \frac{a_0 - c - (\gamma_2 - \gamma_1) (1 - \varepsilon) c_{tr}}{\gamma_2 a_1 + (\gamma_2 - \gamma_1) c_p}$  时,有  $Q_d^{com*} \leq Q_c^{com*}$ . 证毕.

**命题 5 证明**

在分散式供应链中,根据  $F(Q_{tra}^*) - F(Q_{com}^*) = \frac{[(1 - \gamma_2) a_1 + \gamma_1 c_p] \bar{\mu}_\theta - (1 - \gamma_2 + \gamma_1) \varepsilon c_{tr}}{p - s_v} > 0$ , 可得  $\bar{\mu}_\theta > \frac{(1 - \gamma_2 + \gamma_1) \varepsilon c_{tr}}{(1 - \gamma_2) a_1 + \gamma_1 c_p}$ , 因此当  $\bar{\mu}_\theta > \frac{(1 - \gamma_2 + \gamma_1) \varepsilon c_{tr}}{(1 - \gamma_2) a_1 + \gamma_1 c_p}$  时,有  $F(Q_{com}^*) < F(Q_{tra}^*)$ , 又知  $F(y)$  为非负、严格递增的函数,故有  $Q_{com}^* < Q_{tra}^*$ ; 同理可证,当  $\bar{\mu}_\theta \leq \frac{(1 - \gamma_2 + \gamma_1) \varepsilon c_{tr}}{(1 - \gamma_2) a_1 + \gamma_1 c_p}$  时,  $Q_{com}^* \geq Q_{tra}^*$ . 在集中式供应链下,根据  $F(Q_c^{tra*}) - F(Q_c^{com*}) = \frac{-(1 - \gamma_2) c_p \bar{\mu}_\theta - (1 - \gamma_2 + \gamma_1) \varepsilon c_{tr}}{p - s_v} < 0$  恒成立,因此,  $Q_c^{com*} > Q_c^{tra*}$  成立. 证毕.