第 37 卷第 5 期 系 统 工 程 学 报 Vol.37 No.5
2022 年 10 月 JOURNAL OF SYSTEMS ENGINEERING Oct. 2022

信息不对称下闭环供应链定价及协调契约

王竞竞[1,2], 许民利[1*], 邓亚玲[1]
(1. 中南大学商学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南财政经济学院工商管理学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 在零售商风险规避信息不对称的闭环供应链中, 研究了风险规避信息对闭环供应链定价和绩效的影响, 探讨了实现信息共享和协调闭环供应链的契约. 首先, 构建了集中决策模型, 对称信息下和不对称信息下的分散决策模型. 其次, 利用数学优化和逆向递推法对模型求解. 最后, 设计了不同信息结构下的协调契约. 研究结果表明, 风险规避的决策者会采取降低零售价格和增加回收价格的保守决策. 零售商有动机隐瞒自身高风险规避水平, 其隐瞒风险规避信息对制造商总是不利的. “收益共享+成本分担+转移支付”的组合契约能使零售商暴露真实的风险规避信息, 同时使闭环供应链达到协调.

关键词: 信息不对称; 风险规避; 协调契约; 闭环供应链
中图分类号: F274 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000−5781(2022)05−0617−15
doi: 10.13383/j.cnki.jse.2022.05.004

Pricing and coordination of the closed-loop supply chain under asymmetrical information

Wang Jingjing[12], **Xu Minli**[1*], **Deng Yaling**[1]
(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Business Administration, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410000, China)

Abstract: In the closed-loop supply chain (CLSC) with asymmetrical retailer risk-aversion information, this paper studied the effect of risk-aversion information on the pricing and performance, and explored the contract for information sharing and coordinating of the CLSC. Firstly, a centralized decision model, decentralized decision models with symmetrical and asymmetrical risk aversion information are established. Then, the mathematical optimization and backward induction method are used to solve those models. Finally, coordination contracts under different information structure are designed. The results show that decision makers of risk aversion will take a conservative decision of reducing the selling price and increasing the recycling price. The retailers may tend to conceal their high level of risk aversion. However, this concealment of information is always disadvantageous for the manufacturer. Therefore, the “revenue sharing + cost sharing + payment transformation” contract developed can expose the retailer’s true risk aversion level and coordinate the CLSC.

Key words: asymmetrical information; risk-averse; coordination contract; closed-loop supply chain

1 引 言

由于全球对环境恶化和自然资源短缺的认识, 近年来, 工业界将注意力转向二手产品再制造, 例如 Apple Inc., HP 等鼓励消费者通过其逆向渠道将旧产品回收, 并使废旧产品进入再制造处理过程[1]. 与生

收稿日期: 2019−07−28; 修订日期: 2020−11−09.
基金项目: 国家社会科学基金资助项目(19BGL099).
*通信作者

产新产品相比, 再制造成本相对较低, 有利于向预算较低的消费者扩展市场, 从而产生相对较高的利润率[2], 例如柯达, 施乐, IBM 等通过再制造获得可观的收益[3]. 再制造是闭环供应链的重要一环, 要实现闭环供应链的最佳途径是企业收回自己的产品, 并使用逆向物流计划来流通产品, 组件或材料, 以保留更多的嵌入式能源和资源[4]. 因此, 闭环供应链管理中面临着许多的挑战, 一方面, 正向供应链中产品需求不确定带来巨大损失, 例如, 2001 年第三季度, 需求增加, 耐克由于库存短缺损失了 1 亿美元[5], 而 2015 年, 宏观经济萎缩, 中国重卡销量减少了 26 [6]. 另一方面, 逆向供应链中回收产品数量和质量不确定使再制造中原材料的供应极不稳定, 例如戴尔的闭环供应链构建经验表明, 随机的回收数量和质量使公司对回收材料的采购管理尤其困难[7]. 在高度波动的市场需求和随机不确定的回收材料环境下, 将不确定风险因素纳入供应链的决策中引起了从业者的高度关注. 在面对风险时, 决策者并不总是理性的, 在对来自 90 个国家的 1 500 位高管进行调查之后, 麦肯锡的一份研究报告指出, 无论投资规模如何, 决策者都表现出极高的风险规避水平[8].

通常私人信息拥有者不愿意与其它参与者共同分享, 因此信息不对称经常发生[9]. 正如 Cachon[10]所述“在实践中, 完整的信息很少见, 鉴于大多数现代供应链的复杂性和地理范围, 至少有一家公司缺少另一家公司拥有的重要信息并不奇怪”. 在具有风险规避成员的供应链中, 决策者通常很难识别其他成员的风险规避程度, 他们会保护自身拥有的信息, 从而增加其他人对信息搜集和评估的难度[1], 这种情况下, 参与者之间的风险规避信息是不对称的. 在信息不对称的情形下, 有效的信息共享对于供应链的运营至关重要, 供应链的高效运行需要不同节点企业突破信息不对称性, 实现信息的有效传递和共享[12]. 一般情况下参与者会通过设计合适的契约菜单, 并根据私人信息拥有者的选择来推断其真实的信息. 而存在信息不对称时, 收益共享, 数量折扣等简单的契约将无法实现信息共享及协调供应链, 因此, 如何实现供应链的信息共享和协调是实践管理者面临的重要挑战.

基于以上分析, 基于不确定环境, 本文研究风险规避型制造商和零售商对闭环供应链决策的影响, 并致力于解决以下研究问题:

1) 风险规避态度如何影响正向供应链中产品的销售决策, 以及逆向供应链中旧产品的回收决策?

2) 不同的风险规避信息结构如何影响闭环供应链成员的决策?

3) 风险规避信息不对称时如何实现闭环供应链的信息共享和协调?

本文利用指数效用函数来度量风险规避型制造商和零售商的效用, 在零售商风险规避信息对称和不对称下, 分别构建制造商主导的两阶段闭环供应链博弈模型, 探讨风险规避和不对称信息对定价决策及契约的影响. 研究结果表明, 首先, “收益共享+成本分担+转移支付”的组合契约可以协调闭环供应链并实现信息共享; 其次, 有别于文献[13]中的零售商总是会假装成具有高风险规避程度, 从而通过减少设置的交易量来获得更高的期望利润, 文献[14]中的零售商总是会假装成具有低的风险规避程度, 从而使制造商降低批发价格来获得更高的期望利润等研究结论, 本文的研究表明, 在闭环供应链中零售商是否隐瞒自身的风险规避信息与其风险规避程度有关, 具有高风险规避程度时隐瞒信息是有利可图的, 而具有低风险规避程度时隐瞒信息会带来不利影响. 最后, 零售商的风险规避程度是私人信息对制造商总是不利的, 设计合适的契约可以使闭环供应链达到协调, 并使制造商能够区分零售商的真实风险规避信息.

与本文所研究问题相关的供应链文献主要有两方面: 1) 考虑决策者风险规避的供应链管理, 2) 信息不对称的闭环供应链管理. 以下将从这两方面对文献进行回顾.

首先, 在考虑决策者风险规避的供应链管理方面, 主要集中在对供应链成员的定价及协调契约的研究, 如 Liu 等[11] 探究具有风险规避成员双渠道供应链的定价策略, 研究表明风险规避下的最优价格低于风险中性情形. 代建生[15] 研究风险规避零售商实施销售努力的供应链协调, 发现销售努力的不可证实减小了供应链被协调的可能性. 代建生等[16]考虑风险厌恶零售商促销和定价下的供应链协调, 发现回购和成本分担机制不能协调供应链. 简惠云等[17]分析供应商和零售商风险规避下的供应链回购契约. Xie 等[18]研究风险规避供应链的质量投入与定价决策问题, 发现供应商主导下产品质量投入较高. Zhao 等[6]在逆向供应链中研究具有风险规避再制造商和零售商的定价及协调机制, 研究发现考虑规避风险的价格策略能为供应链

成员带来更高的效用. 陈宇科等[19]探讨具有风险规避零售商闭环供应链的协调机制, 结果表明收益共享-成本分担契约能够协调供应链并提高废旧产品回收量. 上述文献主要研究具有风险规避成员的正向供应链[11,15−18]和逆向供应链[6]中的定价及协调, 对风险规避闭环供应链的研究较少, 仅陈宇科等[19]研究随机需求下闭环供应链中风险规避零售商的影响. 与风险规避型正向供应链相比, 闭环供应链中决策者还面临废旧产品回收不确定性风险, 已有文献未考虑旧产品回收不确定以及制造商风险规避行为的影响, 故本文在需求和回收双随机不确定环境下, 研究闭环供应链的成员均具有风险规避行为时的最优决策及协调机制.

其次, 在信息不对称下闭环供应链的相关研究中, 主要集中在收益共享比例参数, 再制造成本, 回收规模, 回收率等信息不对称下的最优决策及协调研究, 如 Giovanni[20]研究收益共享比例参数信息不对称对闭环供应链协调的影响. 肖群等[21] 研究需求信息不对称对闭环供应链中两种生产模式的影响, 结果发现满足一定条件时, 信息共享会增加闭环供应链的总体利润. Zheng 等[22]针对旧产品回收量中回收规模及回收努力成本信息不对称, 研究逆向供应链的价格和回收决策, 研究表明不对称信息结构可能导致逆向供应链的渠道效率下降. 这些研究都是在决策者风险中性的前提下研究信息不对称对闭环供应链的最优决策及协调机制的影响, 而已有研究表明, 决策者并不总是理性的, 往往具有风险规避特性, 在这种情况下, 供应链成员可能会隐瞒自身的风险规避信息, 如文献[11, 13, 14]在正向供应链中研究了风险规避信息不对称对价格决策及协调机制的影响, 但已有文献都未对风险规避信息不对称的闭环供应链进行相关研究. 闭环供应链是正向供应链和逆向供应链的有机统一, 其结构相对单一的正向供应链更加复杂, 故本文研究不同的风险规避信息结构对闭环供应链最优决策及利润的影响. 此外, 基于信息共享对供应链运营的重要性, 本文还将探讨契约机制来识别决策者的真实风险规避信息及协调闭环供应链.

2　需求和回收不确定下闭环供应链定价模型

2.1　模型假设与参数说明

考虑由一个制造商和一个零售商构成的闭环供应链, 制造商负责产品的生产, 零售商负责产品的销售及旧产品的回收. Savaskan 等[23]的研究表明零售商负责回收渠道效率最高.

假设再制造产品和新产品的质量, 功能及价格完全一样. 事实上, 在再制造时, 制造商的做法之一是通过拆卸回收的产品获取原材料, 或者在新产品制造中重复使用某些功能组件[24], 例如 Apple 公司对从旧产品 iPhone 中提取再生锡生产的产品和原材料锡生产的产品进行无差别销售, 大多数消费者都不知道新购买的柯达一次性相机包含“再制造零件”(尽管包装上已经标明)[25]等. 类似的假设广泛用于 Savaskan 等[23], He[24]等的研究. 令产品批发价格为 ω, 零售价格为 $p_{\rm n}$, 回收商从消费者手中获取旧产品的回收价格为 $p_{\rm r}$, 制造商从回收商手中回收旧产品的回收转移价格为 A.

类似于 Hsieh 等[26]和 Modak 等[27]的研究, 假设产品的需求 D 是零售价格的线性函数, 且具有随机不确定性, 即 $D{=}a-bp_{\rm n}+\varepsilon$, 其中 $a\geqslant 0$为基础需求, $b\geqslant 0$为零售价格的敏感性系数, 随机变量 ε 刻画产品市场需求中的不确定因素, 在区间$[B_0,C_0]$内取值, 均值为 0, 方差为 σ_ε^2, 且 B_0,C_0 满足 $B_0\leqslant C_0$, $a-bp_{\rm n}+B_0\geqslant 0$, $a-bp_{\rm n}+C_0\geqslant 0$.

根据 Genc 等[28]的研究, 旧产品的回收量是回收价格的线性函数, 及根据孙浩等[29]和 Jena 等[30]的研究, 假设旧产品的回收量 N 具有随机不确定性且是回收价格的线性函数, 即 $N=\alpha+\beta p_{\rm r}+\xi$, 其中 $\alpha\geqslant 0$ 为基础回收量, $\beta\geqslant 0$ 为回收价格的敏感性系数, 随机变量 ξ 刻画回收中的不确定因素, 在区间$[B_{\rm r},C_{\rm r}]$内取值, 均值为 0, 方差为 σ_ξ^2, 且 $B_{\rm r},C_{\rm r}$ 满足 $B_{\rm r}\leqslant C_{\rm r}$, $\alpha+\beta p_{\rm r}+B_{\rm r}\geqslant 0$, $\alpha+\beta p_{\rm r}+C_{\rm r}\geqslant 0$, 且 ε 与 ξ 相互独立.

制造商生产新产品的成本为 $c_{\rm n}$, 生产再制造产品的成本为 $c_{\rm r}$, 生产单位再制造产品节约的成本为 $\varDelta=c_{\rm n}-c_{\rm r}$, 则 $\varDelta>0$, 如 HP 和 EPSON 通过再制造节省了 65 % 的成本[31], 回收废旧产品单位成本为 c_j.

由于回收产品的质量具有差异性, 并不是所有回收的旧产品都能用于再制造, 例如在对汽车零部件进行

再制造时, 再制造商需要检查回收的旧零件是否满足质量限制, 即能否再制造[32], 假设旧产品中可再制造的比率为 η, 不可再制造的旧产品的残值假设为零. 此外, 通常回收的数量会小于产品的需求, 例如柴油机, 重型设备和汽车的再制造等[33], 故假设制造商优先生产再制造产品, 供应不足的部分用新产品补充.

假设制造商和零售商具有风险规避特性, 用文献[34]中的指数效用函数来度量决策者的效用, 即 $U(\pi_i) = -\exp(-k_i\pi_i)$, 其中 $\pi_i, i \in \{\mathrm{m}, \mathrm{r}\}$表示需求和回收不确定下决策者 i 的随机收益, 风险规避水平为 k_i, $k_i \geqslant 0$, k_i 越小表示决策者的风险规避程度越小, 反之亦成立. 记 $\mathrm{E}[\pi_i]$, $\mathrm{Var}[\pi_i]$ 分别为随机收益 π_i 对应的期望收益和方差, 由文献[34]有, 决策者要使指数效用 $U(\pi_i)$ 最大等价于使均值–方差函数 $U_i = \mathrm{E}[\pi_i] - \frac{1}{2}k_i\mathrm{Var}[\pi_i]$ 最大.

供应链及其成员的随机利润函数记作 π_i^j, 效用函数记作 U_i^j, $i \in \{\mathrm{m}, \mathrm{r}, \mathrm{sc}\}$, $j \in \{\mathrm{NC}, \mathrm{NS}, \mathrm{NAS}\}$, 下标 $\mathrm{m}, \mathrm{r}, \mathrm{sc}$ 分别表示制造商、零售商及供应链, 上标 $\mathrm{NC}, \mathrm{NS}, \mathrm{NAS}$ 分别表示集中决策, 对称信息下的分散决策和不对称信息下的分散决策.

2.2 集中决策模型(NC 模型)

当制造商和零售商进行集中决策时, 他们构成“超组织”作为一个主体以闭环供应链的利润最大化为目标进行决策, 此时的博弈模型记作 NC 模型, 则闭环供应链的随机利润函数为

$$\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}}) = (p_{\mathrm{n}} - c_{\mathrm{n}})(a - bp_{\mathrm{n}} + \varepsilon) + (\mathit{\Delta}\eta - p_{\mathrm{r}} - c_{\mathrm{j}})(\alpha + \beta p_{\mathrm{r}} + \xi). \tag{1}$$

期望利润

$$\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right] = (p_{\mathrm{n}} - c_{\mathrm{n}})(a - bp_{\mathrm{n}}) + (\mathit{\Delta}\eta - p_{\mathrm{r}} - c_{\mathrm{j}})(\alpha + \beta p_{\mathrm{r}}). \tag{2}$$

由 Avinadav 等[34]的研究可知, 当制造商和零售商都是风险规避的决策者时, 闭环供应链的随机利润函数的方差与制造商和零售商的利润共享比例有关. 设零售商的利润共享比例为 θ, 则零售商的随机利润为 $\theta\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})$, 制造商的随机利润为$(1-\theta)\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})$, 具有风险规避成员闭环供应链的效用最大化决策模型为

$$\underset{p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}}, \theta}{\mathrm{Max}}\ U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}}) = \mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right] - \frac{1}{2}k_{\mathrm{m}}\mathrm{Var}\left[\theta\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right] - \frac{1}{2}k_{\mathrm{r}}\mathrm{Var}\left[(1-\theta)\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right]. \tag{3}$$

由文献[34]中的定理 1 知, 使效用最大化的利润共享比例为 $\theta = \frac{k_{\mathrm{m}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}$, 代入式(3) 决策模型转化为

$$\underset{p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}}}{\mathrm{Max}}\ U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}}) = \mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right] - \frac{1}{2}\frac{k_{\mathrm{r}}k_{\mathrm{m}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right]. \tag{4}$$

求解式(4)可得如下结论.

定理 1 集中决策下, 具有风险规避制造商和零售商的闭环供应链的最优价格为

$$p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}} = \frac{\sigma_\varepsilon^2 k_{\mathrm{r}}k_{\mathrm{m}}c_{\mathrm{n}} + (a+bc_{\mathrm{n}})(k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}})}{2b(k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}) + k_{\mathrm{r}}k_{\mathrm{m}}\sigma_\varepsilon^2},$$

$$p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}} = \frac{(\mathit{\Delta}\eta - c_{\mathrm{j}})(\beta(k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}) + k_{\mathrm{r}}k_{\mathrm{m}}\sigma_\xi^2) - \alpha(k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}})}{2\beta(k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}) + k_{\mathrm{r}}k_{\mathrm{m}}\sigma_\xi^2}.$$

推论 1 $p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}}$ 随着 $k_{\mathrm{r}}(k_{\mathrm{m}})$增加而减小, $p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}$ 随着 $k_{\mathrm{r}}(k_{\mathrm{m}})$增加而增加.

定理 1 及推论 1 表明, 集中决策下产品的最优零售价格和最优回收价格同时受制造商和零售商风险规避程度的影响, 且制造商和零售商的风险规避程度对最优价格决策的影响相同, 随着制造商(零售商)风险规避系数的增加, 即风险规避程度的增加, 最优零售价格减少, 这与 Xie 等[18]在正向供应链中的研究结论一致, 且最优回收价格增加. 在闭环供应链中, 风险规避的态度会使决策者进行决策时更加保守, 面对市场需求和回收数量的不确定性, 决策者不想冒险, 相反, 他们会减少零售价格来增加产品的需求, 增加回收价格以增加回收的旧产品数量, 从而获得更加稳定的收益, 而保守的价格决策对消费者有利.

2.3 对称信息下的分散决策模型(NS 模型)

当制造商和零售商进行分散决策时他们会以各自的利润最大化为目标进行决策, 零售商的风险规避程度是公有信息时的博弈模型称为对称信息下的分散决策模型, 记作 NS 模型, 假设该闭环供应链分散决策模型为 Stackelberg 博弈模型, 制造商为 Stackelberg 博弈的领导者, 零售商为跟随者. 零售商的随机利润函数为

$$\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})=(p_{\mathrm{n}}-\omega)(a-bp_{\mathrm{n}}+\varepsilon)+(A-p_{\mathrm{r}}-c_{\mathrm{j}})(\alpha+\beta p_{\mathrm{r}}+\xi),\tag{5}$$

则风险规避型零售商的效用最大化决策模型为

$$\underset{p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}}}{\mathrm{Max}}\ U_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})=\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{r}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right].\tag{6}$$

制造商随机利润函数为

$$\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NS}}(\omega,A)=(\omega-c_{\mathrm{n}})(a-bp_{\mathrm{n}}+\varepsilon)+(\varDelta\eta-A)(\alpha+\beta p_{\mathrm{r}}+\xi).\tag{7}$$

风险规避型制造商的效用最大化决策模型为

$$\underset{\omega,A}{\mathrm{Max}}\ U_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NS}}(\omega,A)=\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NS}}(\omega,A)\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{m}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NS}}(\omega,A)\right].\tag{8}$$

利用逆向递推法, 先对式(6)求解可得 $p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}}$, 代入式(8)并求解可得如下结论.

定理 2 零售商风险规避信息对称的分散决策下, 闭环供应链的最优价格为

$$p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}=\frac{\sigma_{\varepsilon}^{2}k_{\mathrm{r}}\omega^{\mathrm{NS}}+a+b\omega^{\mathrm{NS}}}{2b+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\varepsilon}^{2}},\ \ p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}=\frac{(A^{\mathrm{NS}}-c_{\mathrm{j}})(\beta+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\xi}^{2})-\alpha}{(2\beta+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\xi}^{2})},$$

其中 $\omega^{\mathrm{NS}}=\frac{(a-bc_{\mathrm{n}})(b+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\varepsilon}^{2})}{(2b+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\varepsilon}^{2})(2b+k_{\mathrm{m}}\sigma_{\varepsilon}^{2})-2b^{2}}+c_{\mathrm{n}}$, $A^{\mathrm{NS}}=\varDelta\eta-\frac{(\beta(\varDelta\eta-c_{\mathrm{j}})+\alpha)(\beta+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\xi}^{2})}{(2\beta+k_{\mathrm{m}}\sigma_{\xi}^{2})(2\beta+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\xi}^{2})-2\beta^{2}}$.

推论 2 ω^{NS} 随着 k_{r} 的增加而增加, 随着 k_{m} 的增加而减小; A^{NS} 随着 k_{r} 的增加而减小, 随着 k_{m} 的增加而增加; $p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}$ 随着 k_{r} 的增加而减小, 随着 k_{m} 的增加而减小; $p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}$ 随着 k_{r} 的增加而增加, 随着 k_{m} 的增加而增加.

定理 2 和推论 2 说明, 与集中决策情形及 Liu 等[11]在正向供应链中的研究一致, 零售商风险规避信息对称的分散决策下, 零售商和制造商的风险规避系数会对最优零售价格和回收价格产生相同的影响, 最优零售价格与零售商(制造商)风险规避系数负相关, 最优回收价格与零售商(制造商)风险规避系数正相关, 在考虑供应链风险的决策中, 零售商和制造商都会采取增加需求市场份额和回收数量的保守价格策略. 但值得注意的是, 最优批发价格与零售商风险规避系数正相关, 与制造商风险规避系数负相关, 最优回收转移价格与零售商风险规避系数负相关, 与制造商风险规避系数正相关, 即信息对称下, 制造商能够获得零售商的真实风险规避水平, 故当零售商的风险规避程度较高时, 制造商作为市场的主导者, 他预测零售商的保守价格策略后, 会制定更高的批发价格和更低的回收转移价格, 通过对零售商利润空间的挤压来获得更高的效用, 这也使得具有高风险规避程度的零售商会有隐瞒自身风险规避信息的动机.

推论 3 $p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}\geqslant p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}\leqslant p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}$.

推论 3 说明, 相比于对称信息的分散决策, 集中决策下的最优零售价格更低, 最优回收价格更高, 对消费者更有利.

2.4 不对称信息下的分散决策模型(NAS 模型)

当零售商的风险规避程度是私人信息时, 制造商和零售商进行分散决策博弈, 称为不对称信息下的分散决策模型, 记作 NAS 模型. 不对称信息下, Stackelberg 博弈中作为跟随者的零售商的反应函数并不会发生变化, 与对称信息下的分散决策一致. 此时零售商的风险规避系数对制造商来说是私人信息, 制造商的最优决策将会改变. 设零售商的风险规避系数 k_{r} 为随机变量, 为方便计算, 本文假设 k_{r} 为离散型随机变量, 在$(k_{\mathrm{rL}},k_{\mathrm{rH}})$中取值, 满足 $k_{\mathrm{rL}}\leqslant k_{\mathrm{rH}}$, 取值 k_{rL} 的概率为 $\Pr(k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rL}})=q$, 取值 k_{rH} 的概率

为 $\Pr(k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rH}})=1-q$, 且当 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rL}}$ 时, 称零售商为低风险规避的零售商, 当 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rH}}$ 时, 称零售商为高风险规避的零售商. 则制造商的期望利润函数为

$$\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A)\right]=q\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A,k_{\mathrm{rL}})\right]+(1-q)\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A,k_{\mathrm{rH}})\right], \tag{9}$$

其中

$$\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A,k_{\mathrm{rL}})\right]=(\omega-c_{\mathrm{n}})a+(\varDelta\eta-A)\alpha-b(\omega-c_{\mathrm{n}})p_{\mathrm{n}}(k_{\mathrm{rL}})+(\varDelta\eta-A)\beta p_{\mathrm{r}}(k_{\mathrm{rL}}),$$

$$\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A,k_{\mathrm{rH}})\right]=(\omega-c_{\mathrm{n}})a+(\varDelta\eta-A)\alpha-b(\omega-c_{\mathrm{n}})p_{\mathrm{n}}(k_{\mathrm{rH}})+(\varDelta\eta-A)\beta p_{\mathrm{r}}(k_{\mathrm{rH}}).$$

风险规避型制造商效用函数最大化决策模型为

$$\begin{aligned}\underset{\omega,A}{\mathrm{Max}}\ U_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A)&=\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A)\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{m}}\mathrm{Var}(\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A))\\&=q\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A,k_{\mathrm{rL}})\right]+(1-q)\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}(\omega,A,k_{\mathrm{rH}})\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{m}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NAS}}\right].\end{aligned} \tag{10}$$

类似定理 2, 利用逆向递推法, 先对式(6)求解可得 $p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}}$, 代入式(10)并求解可得如下结论.

定理 3 零售商风险规避信息不对称的分散决策下, 闭环供应链的最优价格为

$$\omega^{\mathrm{NAS}}=\frac{at_1t_2-qbt_2(a+c_{\mathrm{n}}(t_1-b))-(1-q)bt_1(a+c_{\mathrm{n}}(t_2-b))}{k_{\mathrm{m}}\sigma_{\varepsilon}^2t_1t_2+2qb(t_1-b)t_2+2(1-q)b(t_2-b)t_1}+c_{\mathrm{n}},$$

$$A^{\mathrm{NAS}}=\frac{(k_{\mathrm{m}}\varDelta\eta\sigma_{\xi}^2-\alpha)t_3t_4+q\beta t_4\{(c_{\mathrm{j}}+\varDelta\eta)(t_3-\beta)+\alpha\}+(1-q)\beta t_3\{(c_{\mathrm{j}}+\varDelta\eta)(t_4-\beta)+\alpha\}}{(2q\beta(t_3-\beta)t_4+2(1-q)\beta(t_4-\beta)t_3+k_{\mathrm{m}}\sigma_{\xi}^2t_3t_4},$$

$$p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NAS}}=\frac{\sigma_{\varepsilon}^2k_{\mathrm{r}}\omega^{\mathrm{NAS}}+a+b\omega^{\mathrm{NAS}}}{2b+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\varepsilon}^2},$$

$$p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NAS}}=\frac{(A^{\mathrm{NAS}}-c_{\mathrm{j}})(\beta+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\xi}^2)-\alpha}{(2\beta+k_{\mathrm{r}}\sigma_{\xi}^2)},$$

其中 $t_1=2b+k_{\mathrm{rL}}\sigma_{\varepsilon}^2, t_2=2b+k_{\mathrm{rH}}\sigma_{\varepsilon}^2, t_3=2\beta+k_{\mathrm{rL}}\sigma_{\xi}^2, t_4=2\beta+k_{\mathrm{rH}}\sigma_{\xi}^2$.

推论 4 ω^{NAS} 随着 k_{m} 的增加而减小; A^{NAS} 随着 k_{m} 的增加而增加; $p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NAS}}$ 随着 k_{r} 的增加而减小, 随着 k_{m} 的增加而减小; $p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NAS}}$ 随着 k_{r} 的增加而增加, 随着 k_{m} 的增加而增加.

推论 5 $p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NAS}}\geqslant p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}}, p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NAS}}\leqslant p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}$.

定理 3 和推论 4 说明, 零售商风险规避信息不对称的分散决策下, 零售商和制造商的风险规避系数对最优零售价格和最优回收价格的影响与信息对称情形下是一致的. 推论 5 说明, 相比于不对称信息的分散决策下, 集中决策下产品的最优零售价格更低, 旧产品的最优回收价格更高, 对消费者更有利.

推论 6 1) 若 $k_{\mathrm{r}}=k_{rH}$ 时, $\omega^{\mathrm{NAS}}\leqslant\omega^{\mathrm{NS}}, A^{\mathrm{NAS}}\geqslant A^{\mathrm{NS}}, p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NAS}}\leqslant p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}, p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NAS}}\geqslant p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}$;

2) 若 $k_{\mathrm{r}}=k_{rL}$ 时, $\omega^{\mathrm{NAS}}\geqslant\omega^{\mathrm{NS}}, A^{\mathrm{NAS}}\leqslant A^{\mathrm{NS}}, p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NAS}}\geqslant p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}, p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NAS}}\leqslant p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}$.

推论 6 说明, 不对称信息下, 当 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rL}}$, 即零售商是低风险规避决策者时, 由于制造商估计的零售商风险规避水平在$(k_{\mathrm{rL}},k_{\mathrm{rH}})$中取值, 则制造商会高估零售商的风险规避程度, 从而提高批发价格而降低回收转移价格, 对零售商反而不利. 当 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rH}}$, 即零售商是高风险规避决策者时, 制造商会低估零售商的风险规避程度, 从而降低批发价格而增加回收转移价格, 对零售商有利, 因此与 Wang 等[13]中的零售商总是会假装具有高的风险规避程度, 以及 Wei 等[14]中的零售商总是会假装具有低的风险规避程度不同, 本文的研究表明零售商会倾向于隐瞒自身的高风险规避特性, 从制造商的低的批发价格和高的回收转移价格策略中获利, 而低风险规避的零售商则向制造商宣告自己真实的信息更有利.

由推论 3 和推论 5 可知, 相比集中决策, 无论是在对称信息还是不对称信息下的分散决策, 零售商都会设置更高的零售价格和更低的回收价格, 且可以证明供应链的效用也更低. 此外, 由推论 2 和推论 6 可知,

当零售商具有高风险规避程度时, 他会隐瞒自身的风险规避信息以获得更高的效用, 而这对制造商总是不利的, 故以下在对称信息和不对称信息情形下分别设计基于“收益共享+成本分担+转移支付”的契约, 使闭环供应链协调, 且制造商能够通过零售商对契约的选择来获取他的真实风险规避信息.

3 协调契约的设计

3.1 对称信息下协调契约的设计

在闭环供应链中设计契约要同时协调正向和逆向供应链, 相对单一的正向供应链契约设计更为复杂, 基于文献[35]提出的协调供应链的 Parato 最优共享规则, 本节设计“收益共享+成本分担+转移支付”的契约来协调闭环供应链.

当零售商的风险规避程度是公共信息时, 制造商可以设计以下“收益共享+成本分担+转移支付”契约. 首先, 制造商生产产品并以价格 ω 向零售商批发产品, 以转移价格 A 从零售商手中回收旧产品. 其次, 零售商以价格 p_{n} 销售产品, 以价格 p_{r} 从消费者手中回收旧产品. 最后, 零售商将产品销售的收益与制造商共享, 共享系数为 ϕ, 制造商对零售商回收产品的成本进行分担, 分担系数也为 ϕ, 同时, 制造商和零售商执行单边支付 T. 该契约以下记为 $\{\phi,T,\omega,A\}$, 达成契约后, 零售商的随机利润函数为

$$\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})=(\phi p_{\mathrm{n}}-\omega)(a-bp_{\mathrm{n}}+\varepsilon)+(A-\phi p_{\mathrm{r}}-c_{\mathrm{j}})(\alpha+\beta p_{\mathrm{r}}+\xi)+T. \tag{11}$$

制造商的随机利润函数为

$$\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NC}}(\omega,A)=((1-\phi)p_{\mathrm{n}}+\omega-c_{\mathrm{n}})(a-bp_{\mathrm{n}}+\varepsilon)+(\varDelta\eta-A-(1-\phi)p_{\mathrm{r}})(\alpha+\beta p_{\mathrm{r}}+\xi)-T. \tag{12}$$

则有如下结论.

定理 4 当零售商的风险规避程度是公共信息时, 在具有风险规避制造商和零售商的闭环供应链中, 为使供应链达到协调, “收益共享+ 成本分担+转移支付” ω^*, A^*, ϕ^*, T^* 应满足以下条件

$$\begin{aligned}&\omega^*=\phi^*c_{\mathrm{n}},\ \ A=\phi^*\varDelta\eta+(1-\phi^*)c_{\mathrm{j}},\ \ \phi^*=\frac{k_{\mathrm{m}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}},\\&U_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}})-\frac{k_{\mathrm{m}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}})\leqslant T^*\leqslant\frac{k_{\mathrm{r}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}})-U_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NS}}(\omega^{\mathrm{NS}},A^{\mathrm{NS}}).\end{aligned}$$

此时, 零售商的效用函数为

$$U_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}})=\phi^*U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}})+T^*.$$

制造商的效用函数为

$$U_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NC}}(\omega^*,A^*)=(1-\phi^*)U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}})-T^*.$$

通过“收益共享+成本分担+转移支付”契约, 制造商和零售商在正向供应链中实现销售收益共享, 在逆向供应链中实现回收成本共担, 并通过单边支付来保证双方的效用高于分散决策下的效用. 执行契约后, 产品的最优零售价格、最优回收价格及供应链的效用与集中决策时一致, 从而能够协调闭环供应链.

3.2 不对称信息下协调契约的设计

通过前面的分析可知, 当零售商的风险规避程度为私有信息时, 零售商会隐瞒自身的高风险规避特性, 制造商可以设计基于“收益共享+成本分担+转移支付”的契约菜单($\{\phi_{\mathrm{L}},T_{\mathrm{L}},\omega_{\mathrm{L}},A_{\mathrm{L}}\}$,$\{\phi_{\mathrm{H}},T_{\mathrm{H}},\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}}\}$), 使闭环供应链达到协调, 并通过零售商对契约菜单的选择来暴露他真实的风险规避信息. 以下记 $U_{i,k}^{j}$ 表示在不同决策模式和零售商不同风险规避水平下供应链及成员的效用, 其中 $i\in\{\mathrm{m},\mathrm{r},\mathrm{sc}\}$, $j\in\{\mathrm{NC},\mathrm{NAS}\}$, $k\in\{\mathrm{L},\mathrm{H}\}$,其中 $\mathrm{m},\mathrm{r},\mathrm{sc}$ 分别表示制造商、零售商及供应链, NC,NAC 分别表示集中决策和不对称信息的分散决策, L,H 分别表示零售商的风险规避系数为 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rL}}$ 和 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rH}}$. $p_{n,k}^{j},p_{j,k}^{j}$, $j\in\{\mathrm{NC},\mathrm{NAS}\}$, $k\in\{\mathrm{L},\mathrm{H}\}$ 分别表示不同决策模式和零售商不同风险规避水平下的最优零售价格和最优回收价格, 由定

理1或者定理3计算可得.

由定理4知, 当零售商风险规避系数 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rL}}$ 时, 可建立基于低风险规避零售商的契约$\{\phi_{\mathrm{L}},T_{\mathrm{L}},\omega_{\mathrm{L}},A_{\mathrm{L}}\}$, 其参数应满足

$$\phi_{\mathrm{L}}=k_{\mathrm{m}}/(k_{\mathrm{rL}}+k_{\mathrm{m}}),\ \omega_{\mathrm{L}}=\phi_{\mathrm{L}}c_{\mathrm{n}},\ A_{\mathrm{L}}=\phi_{\mathrm{L}}\varDelta\eta+(1-\phi_{\mathrm{L}})c_{\mathrm{j}},$$

$$U_{r,\mathrm{L}}^{\mathrm{NAS}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NAS}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NAS}})-\phi_{\mathrm{L}}U_{sc\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})\leqslant T_{L}\leqslant(1-\phi_{\mathrm{L}})U_{\mathrm{sc,L}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})-U_{m,\mathrm{L}}^{\mathrm{NAS}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NAS}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NAS}}).$$

即供应链协调下零售商的效用函数为

$$U_{r,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})=\phi_{\mathrm{L}}U_{\mathrm{sc,L}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})+T_{\mathrm{L}}.$$

制造商的效用函数为

$$U_{m,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}(\omega_{\mathrm{L}},A_{\mathrm{L}})=(1-\phi_{\mathrm{L}})U_{\mathrm{sc,L}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})-T_{\mathrm{L}}.$$

同理, 当零售商风险规避系数 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rH}}$, 可建立基于高风险规避零售商的契约$\{\phi_{\mathrm{H}},T_{\mathrm{H}},\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}}\}$, 其参数应满足

$$\phi_{\mathrm{H}}=\{k_{\mathrm{m}}/(k_{\mathrm{rH}}+k_{\mathrm{m}}),\ \omega_{\mathrm{H}}=\phi_{\mathrm{H}}c_{\mathrm{n}},\ A_{\mathrm{H}}=\phi_{\mathrm{H}}\varDelta\eta+(1-\phi_{\mathrm{H}})c_{\mathrm{j}},$$

$$U_{r,\mathrm{H}}^{\mathrm{NAS}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NAS}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NAS}})-\phi_{\mathrm{H}}U_{\mathrm{sc,H}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}})\leqslant T_{\mathrm{H}}\leqslant(1-\phi_{\mathrm{H}})U_{\mathrm{sc,H}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}})-U_{m,\mathrm{H}}^{\mathrm{NAS}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NAS}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NAS}}).$$

即供应链协调下零售商的效用函数为 $U_{r,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}})=\phi_{\mathrm{H}}U_{\mathrm{sc,H}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}})+T_{\mathrm{H}}$, 制造商的效用函数为 $\widehat{U}_{m,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}(\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}})=(1-\phi_{\mathrm{H}})U_{\mathrm{sc,H}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}})-T_{\mathrm{H}}$.

制造商可以通过设计契约菜单($\{\phi_{\mathrm{L}},T_{\mathrm{L}},\omega_{\mathrm{L}},A_{\mathrm{L}}\},\{\phi_{\mathrm{H}},T_{\mathrm{H}},\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}}\}$)使供应链达到协调, 同时, 要使制造商能够区分零售商的风险规避信息, 进一步分析可得如下结论.

定理5 1) 若满足条件

$$\phi_{\mathrm{L}}U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})-\phi_{\mathrm{H}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{NC})\right]\right)\geqslant T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}},$$

则风险规避程度低的零售商会接受基于低风险规避值的契约$\{\phi_{\mathrm{L}},T_{\mathrm{L}},\omega_{\mathrm{L}},A_{\mathrm{L}}\}$.

2) 若满足条件

$$T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}\geqslant\phi_{\mathrm{L}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}})\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{rH}}\phi_{\mathrm{L}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}})\right]\right)-\phi_{\mathrm{H}}U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}),$$

则风险规避程度高的零售商会接受基于高风险规避值的契约$\{\phi_{\mathrm{H}},T_{\mathrm{H}},\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}}\}$.

3) 若满足条件

$$T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}\leqslant(1-\phi_{\mathrm{H}})U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})-(1-\phi_{\mathrm{L}})U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}),$$

$$T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}\geqslant(1-\phi_{\mathrm{H}})U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}})-(1-\phi_{\mathrm{L}})U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}),$$

则制造商不需要区分零售商的风险规避水平.

$\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}$ 和 $\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}$ 分别表示低风险规避的零售商选择契约$\{\phi_{\mathrm{H}},T_{\mathrm{H}},\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}}\}$时的最优零售价格和最优回收价格, 且

$$\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}=\frac{\sigma_{\varepsilon}^{2}k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}c_{\mathrm{n}}+(a+bc_{\mathrm{n}})}{2b+k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}\sigma_{\varepsilon}^{2}},\ \tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}=\frac{(\varDelta\eta-c_{\mathrm{j}})(\beta+k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}\sigma_{\xi}^{2})-\alpha}{2\beta+k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}\sigma_{\xi}^{2}}.$$

$\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}$ 和 $\tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}$ 分别表示低风险规避的零售商选择契约$\{\phi_{\mathrm{L}},T_{\mathrm{L}},\omega_{\mathrm{L}},A_{\mathrm{L}}\}$时的最优零售价格和最优回收价格, 且

$$\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}=\frac{\sigma_{\varepsilon}^{2}k_{\mathrm{rH}}\phi_{\mathrm{L}}c_{\mathrm{n}}+(a+bc_{\mathrm{n}})}{2b+k_{\mathrm{rH}}\phi_{\mathrm{L}}\sigma_{\varepsilon}^{2}},\ \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}=\frac{(\varDelta\eta-c_{\mathrm{j}})(\beta+k_{\mathrm{rH}}\phi_{\mathrm{L}}\sigma_{\xi}^{2})-\alpha}{2\beta+k_{\mathrm{rH}}\phi_{\mathrm{L}}\sigma_{\xi}^{2}}.$$

综上所述, 有如下结论.

定理6 基于"收益共享+成本分担+转移支付"的契约菜单($\{\phi_{\mathrm{L}},T_{\mathrm{L}},\omega_{\mathrm{L}},A_{\mathrm{L}}\},\{\phi_{\mathrm{H}},T_{\mathrm{H}},\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}}\}$)要使

闭环供应链协调并让制造商能够区分零售商的真实风险规避信息, 则契约参数需要满足以下条件

$$\phi_{\rm L}=\frac{k_{\rm m}}{k_{\rm rL}+k_{\rm m}},\ \phi_{\rm H}=\frac{k_{\rm m}}{k_{\rm rH}+k_{\rm m}},\ \omega_{\rm L}=\phi_{\rm L}c_{\rm n},\ \omega_{\rm H}=\phi_{\rm H}c_{\rm n},$$

$$A_{\rm H}=\phi_{\rm H}\varDelta\eta+(1-\phi_{\rm H})c_{\rm j},\ A_{\rm L}=\phi_{\rm L}\varDelta\eta+(1-\phi_{\rm L})c_{\rm j},$$

$$U_{r,{\rm L}}^{\rm NAS}(p_{n,{\rm L}}^{\rm NAS},p_{j,{\rm L}}^{\rm NAS})-\phi_{\rm L}U_{\rm sc,L}^{\rm NC}(p_{n,{\rm L}}^{\rm NC},p_{j,{\rm L}}^{\rm NC})\leqslant T_{\rm L}\leqslant(1-\phi_{\rm L})U_{\rm sc,L}^{\rm NC}(p_{n,{\rm L}}^{\rm NC},p_{j,{\rm L}}^{\rm NC})-U_{m,{\rm L}}^{\rm NAS}(p_{n,{\rm L}}^{\rm NAS},p_{j,{\rm L}}^{\rm NAS}),$$

$$U_{r,{\rm H}}^{\rm NAS}(p_{n,{\rm H}}^{\rm NAS},p_{j,{\rm H}}^{\rm NAS})-\phi_{\rm H}U_{\rm sc,H}^{\rm NC}(p_{n,{\rm H}}^{\rm NC},p_{j,{\rm H}}^{\rm NC})\leqslant T_{\rm H}\leqslant(1-\phi_{\rm H})U_{\rm sc,H}^{\rm NC}(p_{n,{\rm H}}^{\rm NC},p_{j,{\rm H}}^{\rm NC})-U_{m,{\rm H}}^{\rm NAS}(p_{n,{\rm H}}^{\rm NAS},p_{j,{\rm H}}^{\rm NAS}),$$

$$\max(y_1,y_2)\leqslant T_{\rm H}-T_{\rm L}\leqslant\min(x_1,x_2),$$

其中

$$x_1=\phi_{\rm L}U_{\rm sc,L}^{\rm NC}(p_{n,{\rm L}}^{\rm NC},p_{j,{\rm L}}^{\rm NC})-\phi_{\rm H}({\rm E}\left[\pi_{\rm sc}^{\rm NC}(\tilde{p}_{n,{\rm L}}^{\rm NC},\tilde{p}_{j,{\rm L}}^{\rm NC})\right]-\tfrac{1}{2}k_{\rm rL}\phi_{\rm H}{\rm Var}\left[\pi_{\rm sc}^{\rm NC}(\tilde{p}_{n,{\rm L}}^{\rm NC},\tilde{p}_{j,{\rm L}}^{\rm NC})\right],$$

$$y_1=\phi_{\rm L}\left({\rm E}\left[\pi_{\rm sc}^{\rm NC}(\tilde{p}_{n,{\rm H}}^{\rm NC},\tilde{p}_{j,{\rm H}}^{\rm NC})\right]-\tfrac{1}{2}k_{\rm rH}\phi_L{\rm Var}\left[\pi_{\rm sc}^{\rm NC}(\tilde{p}_{n,{\rm H}}^{\rm NC},\tilde{p}_{j,{\rm H}}^{\rm NC})\right]\right)-\phi_{\rm H}U_{\rm sc}^{\rm NC}(p_{n,{\rm H}}^{\rm NC},p_{j,{\rm H}}^{\rm NC}),$$

$$x_2=(1-\phi_{\rm H})U_{\rm sc,H}^{\rm NC}(p_{n,{\rm H}}^{\rm NC},p_{j,{\rm H}}^{\rm NC})-(1-\phi_{\rm L})U_{\rm sc,L}^{\rm NC}(\tilde{p}_{n,{\rm H}}^{\rm NC},\tilde{p}_{j,{\rm H}}^{\rm NC}),$$

$$y_2=(1-\phi_{\rm H})U_{\rm sc,H}^{\rm NC}(\tilde{p}_{n,{\rm L}}^{\rm NC},\tilde{p}_{j,{\rm L}}^{\rm NC})-(1-\phi_{\rm L})U_{\rm sc,L}^{\rm NC}(p_{n,{\rm L}}^{\rm NC},p_{j,{\rm L}}^{\rm NC}).$$

制造商通过设计“收益共享+成本分担+转移支付”契约菜单, 使得低风险规避的零售商选择基于低风险规避零售商契约$\{\phi_{\rm L},T_{\rm L},\omega_{\rm L},A_{\rm L}\}$的效用要高于基于高风险规避零售商契约$\{\phi_{\rm H},T_{\rm H},\omega_{\rm H},A_{\rm H}\}$的效用, 且高于分散决策下零售商的效用, 从而使得低的风险规避的零售商会选择基于低风险规避零售商契约$\{\phi_{\rm L},T_{\rm L},\omega_{\rm L},A_{\rm L}\}$, 同理高的风险规避的零售商会选择基于高风险规避零售商契约$\{\phi_{\rm H},T_{\rm H},\omega_{\rm H},A_{\rm H}\}$, 因此制造商可以通过零售商的选择准确区分零售商的真实风险规避信息.

4 数值分析

由于不同决策模式下最优价格决策的对比及敏感性分析在理论部分已经进行了阐述, 本节数值模拟作为理论模型结果的补充分析, 主要分析不同决策模式下供应链及成员的效用和协调契约参数的实证表现. 参考文献[32], 令 $a=200$, $b=1$, $\alpha=10$, $\beta=4$, $c_{\rm n}=60$, $\varDelta=40$, $\eta=0.8$, $c_{\rm j}=2$, 参考文献[22], 令 $\sigma_\xi^2=\sigma_\varepsilon^2=0.5$, 参考文献[13], 令 $k_{\rm m}=0.4$, $k_{\rm r}\in[0,1]$, 为符合本文的假设, 满足定理6的条件及使数值模型的结果变化在图中表现更明显, 以上基本参数的取值在文献的基础上进行了一些调整, 如提高了基础回收量, 再制造节约成本的值等. 此外, 为避免零售商风险规避水平取 $k_{\rm rL}$ 或者 $k_{\rm rH}$ 的可能性很大的极端情形, 本文取 $q=0.6$. 数值模拟结果如图 1～图 9 所示.

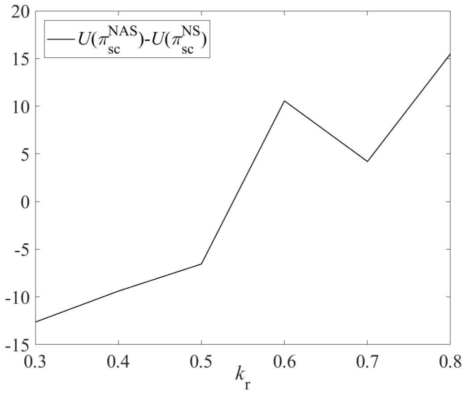

图 1 不同信息结构下供应链的效用差

Fig. 1 Utility difference of supply chain between symmetrical information and asymmetrical information

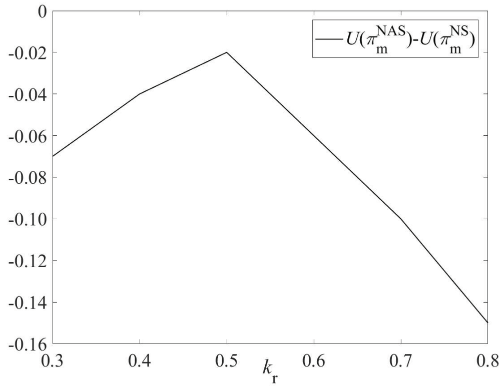

图 2 不同信息结构下制造商的效用差

Fig. 2 Utility difference of manufacturer between symmetrical information and asymmetrical information

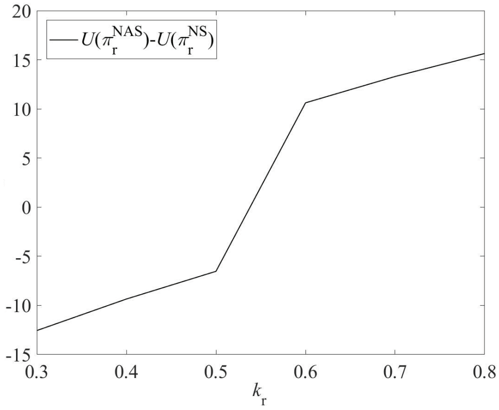

图 3　不同信息结构下零售商的效用差

Fig. 3　Utility difference of retailer between symmetrical information and asymmetrical information

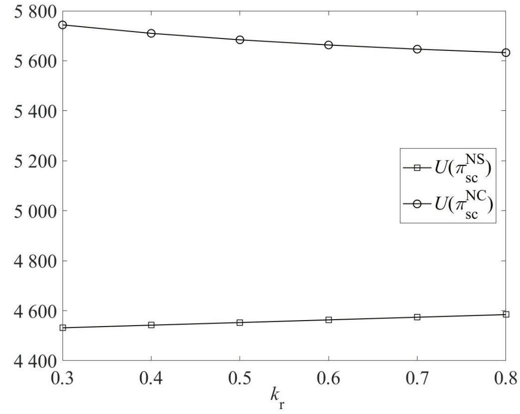

图 4　信息对称和协调契约下的供应链效用

Fig. 4　Supply chain's utility under symmetrical information and coordination contract

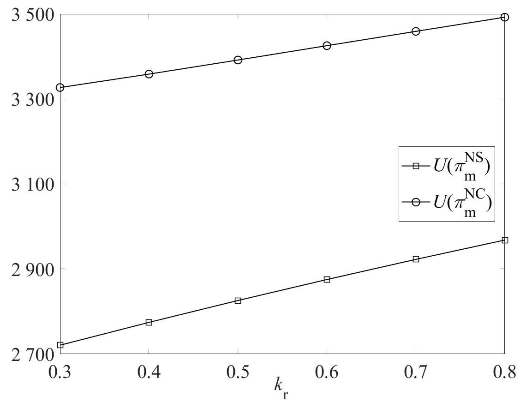

图 5　信息对称与协调契约下的制造商效用

Fig. 5　Manufacturer's utility under symmetrical information and coordination contract

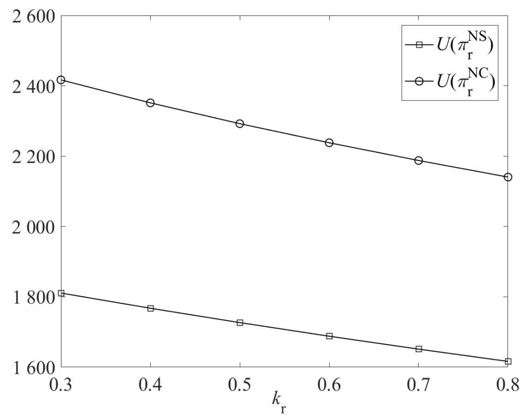

图 6　信息对称与协调契约下的零售商效用

Fig. 6　Retailer's utility under symmetrical information and coordination contract

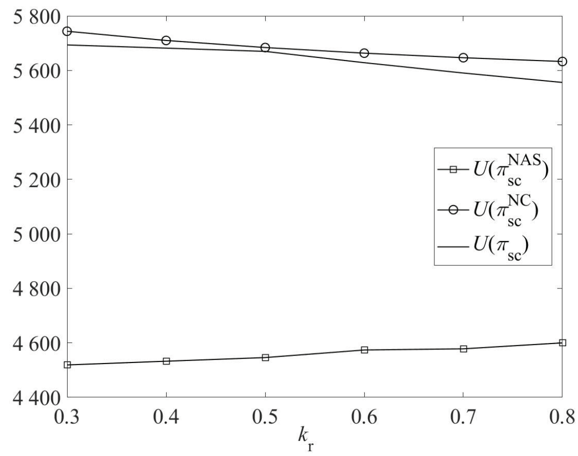

图 7　信息不对称与协调契约下的供应链效用

Fig. 7　Supply chain's utility under asymmetrical information and coordination contract

首先, 相比不对称信息情形, 从图 2 可以看出, 制造商在对称信息情形下的效用更高, 这说明零售商隐瞒风

险规避信息对制造商总是不利的. 从图 1 和图 3 可知, 当零售商的风险规避程度较低时, 零售商和供应链在对称信息情形下的效用更高, 此时, 零售商隐瞒风险规避信息对自身是不利的, 而当零售商的高风险规避程度较高时, 零售商和供应链在不对称信息情形下的效用更高, 此时, 零售商隐瞒风险规避信息对自身是有利可图的. 因此, 零售商有动机隐瞒自身高的风险规避特性.

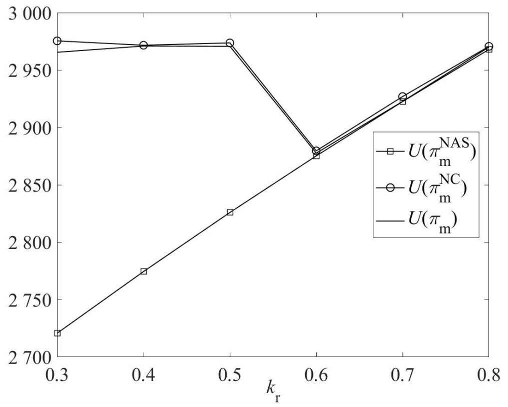

图 8　信息不对称与协调契约下的制造商效用

Fig. 8　Manufacturer's utility under asymmetrical information and coordination contract

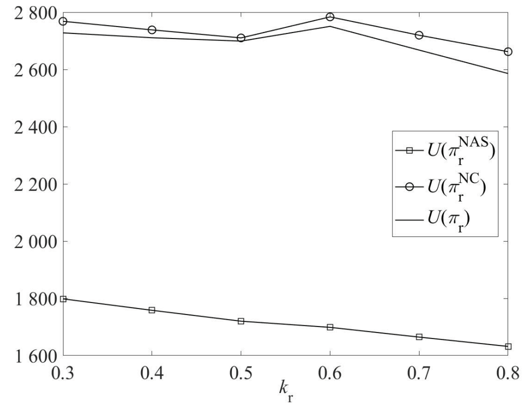

图 9　信息不对称与协调契约下的零售商效用

Fig. 9　Retailer's utility under asymmetrical information and coordination contract

其次, 由图 4 有 $U(\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}) > U(\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NS}})$, 由图 5 有 $U(\pi_m^{\mathrm{NC}}) > U(\pi_m^{\mathrm{NS}})$, 由图 6 有 $U(\pi_r^{\mathrm{NC}}) > U(\pi_r^{\mathrm{NS}})$ 即协调契约下制造商, 零售商及供应链的效用都显著增加, 且供应链的效用和集中决策一致. 这说明风险规避信息是公共信息时, 制造商设计"收益共享+成本分担+转移支付"契约能够使闭环供应链达到协调, 且随着零售商风险规避水平增加, 制造商的效用增加, 零售商的效用减少, 与定理 2 和推论 2 的结论分析一致.

最后, 当零售商风险规避信息是私人信息时, 制造商设计"收益共享+成本分担+转移支付"契约菜单. 达成合作后的制造商, 零售商及供应链的效用为 $U(\pi_k^{\mathrm{NC}}), k \in \{\mathrm{sc}, \mathrm{m}, \mathrm{r}\}$, 为进一步说明契约菜单能够区分零售商的真实风险规避信息, 增加对比项 $U(\pi_k), k \in \{\mathrm{sc}, \mathrm{m}, \mathrm{r}\}$ 表示低(高)风险规避零售商选择基于高(低)风险规避值的契约下制造商、零售商及供应链的效用, 结果如图 7～图 9 所示.

由图 7 有 $U(\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}) > U(\pi_{\mathrm{sc}}) > U(\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NAS}})$成立, 由图 8 有 $U(\pi_m^{\mathrm{NC}}) > U(\pi_m) > U(\pi_m^{\mathrm{NAS}})$ 成立, 由图 9 有 $U(\pi_r^{\mathrm{NC}}) > U(\pi_r) > U(\pi_r^{\mathrm{NAS}})$成立, 即在制造商设计的"收益共享+成本分担+转移支付"契约菜单中, 只有当低(高)的风险规避零售商在契约菜单中选择基于低(高)风险规避零售商的契约时, 制造商、零售商及供应链的效用最高, 且协调契约下供应链的效用和集中决策时一致. 这说明" 收益共享+成本分担+转移支付"契约菜单能够使闭环供应链达到协调, 且通过零售商的选择, 制造商能够准确区分零售商的真实风险规避信息.

5　结束语

在需求和回收不确定的闭环供应链中, 针对零售商风险规避信息对称和不对称下闭环供应链的定价及协调契约设计问题, 构建了三种情形下的闭环供应链决策模型, 分析和对比了不同模型下闭环供应链的最优价格和绩效, 设计了不同信息结构下的协调契约. 研究发现, 当制造商或者零售商变得更加风险规避时, 最优零售价格会减少, 最优回收价格会增加. 零售商风险规避信息不对称时, 风险规避程度高的零售商会向制造商隐瞒自身的风险规避水平, 风险规避程度低的零售商会向制造商宣告自身真实的风险规避水平. 制造商可以设计"收益共享+成本分担+转移支付"的组合契约实现信息共享并完成渠道协调.

本文的局限性在于仅考虑了零售商的风险规避信息结构, 事实上, 制造商也会隐藏自身拥有的信息, 未

来可以考虑制造商风险规避信息不对称的情形. 其次, 本文仅研究了供应链成员具有风险规避信息的最优决策问题, 供应链具有不同风险类型(风险规避, 风险中性, 风险偏好)成员的情形也是一个值得探讨的问题.

参考文献:

[1] Heydari J, Govindan K, Sadeghi R. Reverse supply chain coordination under stochastic remanufacturing capacity. International Journal of Production Economics, 2018, 202(8): 1–11.

[2] Kovach J J, Atasu A, Banerjee S. Salesforce incentives and remanufacturing. Production and Operations Management, 2018, 27(3): 516–530.

[3] Huang Y, Wang Z. Demand disruptions, pricing and production decisions in a closed-loop supply chain with technology licensing. Journal of Cleaner Production, 2018, 191(8): 248–260.

[4] Agrawal V V, Atasu A, Van Wassenhove L N. New opportunities for operations management research in sustainability. Manufacturing and Service Operations Management, 2019, 21(1): 1–12.

[5] Zhuo W, Shao L, Yang H. Mean-variance analysis of option contracts in a two-echelon supply chain. European Journal of Operational Research, 2018, 271(2): 535–547.

[6] Zhao S, Zhu Q. A risk-averse marketing strategy and its effect on coordination activities in a remanufacturing supply chain under market fluctuation. Journal of Cleaner Production, 2018, 171(1): 1290–1299.

[7] He Y. Supply risk sharing in a closed-loop supply chain. International Journal of Production Economics, 2016, 183(1): 39–52.

[8] Wu M, Zhu S X, Teunter R H. A risk-averse competitive newsvendor problem under the CVaR criterion. International Journal of Production Economics, 2014, 156(10): 13–23.

[9] Wei J, Govindan K, Li Y, et al. Pricing and collecting decisions in a closed-loop supply chain with symmetric and asymmetric information. Computers and Operations Research, 2015, 54(2): 257–265.

[10] Cachon G P. Supply chain coordination with contracts // Handbooks in Operations Research and Management Science, Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation. Amsterdam: Elsevier, 2003, 11: 227–239.

[11] Liu M, Cao E, Salifou C K. Pricing strategies of a dual-channel supply chain with risk aversion. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 90(6): 108–120.

[12] 李 凯, 李 伟, 安 岗. 基于不同研发模式的零售商需求信息分享策略. 系统工程学报, 2019, 34(2): 186–198.
Li K, Li W, An G. Retailer's demand information sharing strategy based on different R&D patterns. Journal of Systems Engineering, 2019, 34(2): 186–198. (in Chinese)

[13] Wang X, Guo H, Wang X. Supply chain contract mechanism under bilateral information asymmetry. Computers and Industrial Engineering, 2017, 113(11): 356–368.

[14] Wei Y, Choi T M. Mean-variance analysis of supply chains under wholesale pricing and profit sharing schemes. European Journal of Operational Research, 2010, 204(2): 255–262.

[15] 代建生. 销售努力下基于CVaR 的供应链协调. 系统工程学报, 2017, 32(2): 252–264.
Dai J S. Supply chain coordination with sales effort based on CVaR. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(2): 252–264. (in Chinese)

[16] 代建生, 樊晔坤. 风险厌恶零售商促销和定价下供应链的协调. 系统工程学报, 2019, 34(3): 395–408.
Dai J S, Fan Y K. Supply chain coordination with a risk-averse retailer exerting promotion and pricing decision. Journal of Systems Engineering, 2019, 34(3): 395–408. (in Chinese)

[17] 简惠云, 许民利. 风险规避下基于 Stackelberg 博弈的供应链回购契约. 系统工程学报, 2017, 32(6): 829–842.
Jian H Y, Xu M L. Supply chain buyback contract based on Stackelberg game with the assumption of risk-aversion. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(6): 829–842. (in Chinese)

[18] Xie G, Yue W, Wang S, et al. Quality investment and price decision in a risk-averse supply chain. European Journal of Operational Research, 2011, 214(2): 403–410.

[19] 陈宇科, 熊 龙, 董景荣. 基于均值-CVaR的闭环供应链协调机制. 中国管理科学, 2017, 25(2): 68–77.
Chen Y K, Xiong L, Dong J R. Closed-loop supply chain coordination mechanism based on mean-CVaR. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(2): 68–77. (in Chinese)

[20] De Giovanni P. Closed-loop supply chain coordination through incentives with asymmetric information. Annals of Operations Research, 2017, 253(1): 133–167.

[21] 肖 群, 马士华. 信息不对称对闭环供应链MTO和MTS模式的影响研究. 中国管理科学, 2016, 24(5): 139–148.
Xiao Q, Ma S H. The research on the effect of asymmetric information on MTO and MTS in closed-loop supply chain. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(5): 139–148. (in Chinese)

[22] Zheng B, Yang C, Yang J, et al. Pricing, collecting and contract design in a reverse supply chain with incomplete information. Computers and Industrial Engineering, 2017, 111(9): 109–122.

[23] Savaskan R C, Bhattacharya S, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. Management Science, 2004, 50(2): 239–252.

[24] He Q, Wang N, Yang Z, et al. Competitive collection under channel inconvenience in closed-loop supply chain. European Journal of Operational Research, 2019, 275(1): 155–166.

[25] Choi T, Li Y, Xu L. Channel leadership, performance and coordination in closed loop supply chains. International Journal of Production Economics, 2013, 146(1): 371–380.

[26] Hsieh C C, Lu Y T. Manufacturer's return policy in a two-stage supply chain with two risk-averse retailers and random demand. European Journal of Operational Research, 2010, 207(1): 514–523.

[27] Modak N M, Kelle P. Managing a dual-channel supply chain under price and delivery-time dependent stochastic demand. European Journal of Operational Research, 2019, 272(1): 147–161.

[28] Genc T S, De Giovanni P. Optimal return and rebate mechanism in a closed-loop supply chain game. European Journal of Operational Research, 2018, 269(2): 661–681.

[29] 孙 浩, 达庆利. 随机回收和有限能力下逆向供应链定价及协调. 系统工程学报, 2008, 23(6): 720–726.
Sun H, Da Q L. Pricing and coordination for the reverse supply chain with random collection quantity and capacity constraints. Journal of Systems Engineering, 2008, 23(6): 720–726. (in Chinese)

[30] Jena S K, Sarmah S P, Sarin S C. Joint-advertising for collection of returned products in a closed-loop supply chain under uncertain environment. Computers and Industrial Engineering, 2017, 113(11): 305–322.

[31] Han X, Yang Q, Shang J, et al. Optimal strategies for trade-old-for-remanufactured programs: receptivity, durability, and subsidy. International Journal of Production Economics, 2017, 193(11): 602–616.

[32] Bakal I S, Akcali E. Effects of random yield in remanufacturing with price-sensitive supply and demand. Production and Operations Management, 2006, 15(3): 407–420.

[33] Abbey J D, Geismar H N, Souza G C. Improving remanufacturing core recovery and profitability through seeding. Production and Operations Management, 2019, 28(3): 610–627.

[34] Avinadav T, Chernonog T, Perlman Y. Mergers and acquisitions between risk-averse parties. European Journal of Operational Research, 2017, 259(3): 926–934.

[35] Gan X, Sethi S P, Yan H. Coordination of supply chains with risk-averse agents. Production and Operations Management, 2004, 13(2): 135–149.

作者简介:

王竟竟(1987—), 女, 湖南娄底人, 博士生, 研究方向: 供应链管理, Email: wjj_188@csu.edu.cn;

许民利(1969—), 男, 湖南武冈人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 物流与供应链管理等, Email: xu_minli@163.com;

邓亚玲(1991—), 女, 湖北武汉人, 博士生, 研究方向: 供应链管理, Email: dengyl2016@126.com.

附录 1 推论 6 证明

证明 若 $k_{\rm r}=k_{\rm rH}$ 时, 即零售商是低风险规避决策者时, 此时对称信息下制造商的最优批发价格为

$$\omega_{k_{\rm rH}}^{\rm NS}=\frac{(a-bc_{\rm n})(b+k_{\rm rH}\sigma_\varepsilon^2)}{(2b+k_{\rm rH}\sigma_\varepsilon^2)(2b+k_{\rm m}\sigma_\varepsilon^2)-2b^2}+c_{\rm n},$$

最优回收转移价格为

$$A_{k_{\rm rH}}^{\rm NS}=\varDelta\eta-\frac{(\beta(\varDelta\eta-c_{\rm j})+\alpha)(\beta+k_{\rm rH}\sigma_\xi^2)}{(2\beta+k_{\rm m}\sigma_\xi^2)(2\beta+k_{\rm rH}\sigma_\xi^2)-2\beta^2},$$

而不对称信息下, 由 $\frac{\partial\omega^{\rm NAS}}{\partial k_{\rm rL}}\geqslant 0$, $\frac{\partial A^{\rm NAS}}{\partial k_{\rm rL}}\leqslant 0$ 知, $\omega^{\rm NAS}$ 关于 $k_{\rm rL}$ 单调递增, $A^{\rm NAS}$ 关于 $k_{\rm rH}$ 单调递减, 且 $k_{\rm rL}\leqslant k_{\rm rH}$, 则可得 $\omega^{\rm NAS}\leqslant\omega_{k_{\rm rH}}^{\rm NS}$, $A^{\rm NAS}\geqslant A_{k_{\rm rH}}^{\rm NS}$. 若 $k_{\rm r}=k_{\rm rL}$ 时, 即零售商是高风险规避决策者时, 同理可得 $\omega^{\rm NAS}\geqslant\omega_{k_{\rm rL}}^{\rm NS}$, $A^{\rm NAS}\leqslant A_{k_{\rm rL}}^{\rm NS}$.

产品的最优零售价格随着批发价格的增加而增加, 旧产品的最优回收价格随着回收转移价格的增加而增加, 由批发价格和回收转移价格之间的大小关系即可得最优零售价格和最优回收价格之间的大小关系. 证毕.

附录 2 定理 4 证明

证明 由文献 Gan 等[35]提出的 Parato 最优共享规则, 当且仅当零售商随机利润函数为 $\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})=\phi\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})+T$, 且制造商的随机利润函数为 $\pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NC}}(\omega,A)=(1-\phi)\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})-T$ 时, 均值–方差效用度量准则下, 具有风险规避制造商和零售商的供应链存在最优的 Parato 最优共享机制, 结合集中决策下的最优零售价格和最优回收价格表达式求解可得 $\omega^*=\phi c_{\mathrm{n}}$, $A^*=\phi\Delta\eta+(1-\phi)c_{\mathrm{j}}$, 此时, 供应链总体的效用函数为

$$U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})=\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{m}}\mathrm{Var}\left[(1-\phi)\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{r}}\mathrm{Var}\left[\phi\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right].$$

求解 $\underset{\phi}{\mathrm{Max}}\ U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})$, 可得使效用最大化的最优收益共享比例为 $\phi^*=\frac{k_{\mathrm{m}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}$, 且零售商的效用函数为

$$\begin{aligned}U_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})&=\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{r}}\mathrm{Var}\left(\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right)=\mathrm{E}\left[\phi^*\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})+T\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{r}}\mathrm{Var}\left[\phi^*\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})+T\right]\\&=\frac{k_{\mathrm{m}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2}\frac{k_{\mathrm{r}}k_{\mathrm{m}}}{(k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}})}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]\right)+T=\phi^*U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})+T.\end{aligned}$$

同理可得, 制造商的效用函数为 $U_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NC}}(\omega^*,A^*)=(1-\phi^*)U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})-T$.

进一步, 收益共享+成本分担+转移支付契约下, 分散决策时, 零售商的最优零售价格和最优销售价格决策模型为

$$\underset{p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}}}{\mathrm{Max}}\ U_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})=\frac{k_{\mathrm{m}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})+T,$$

等价于 $\underset{p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}}}{\mathrm{Max}}\ U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})$. 此时与集中决策决策模型一致, 最优零售价格和最优销售价格为 $p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}}, p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}$, 闭环供应链能够协调, 此外, 要使零售商和制造商接受该协调契约还需满足集中决策下的零售商和制造商的效用高于分散决策下的效用, 即

$$\frac{k_{\mathrm{r}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}\right)-T^*\geqslant U_{\mathrm{m}}^{\mathrm{NS}}\left(\omega^{\mathrm{NS}},A^{\mathrm{NS}}\right),$$

且 $\frac{k_{\mathrm{m}}}{k_{\mathrm{r}}+k_{\mathrm{m}}}U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NC}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}\right)+T^*\geqslant U_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}\left(p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}},p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}\right)$. 证毕.

附录 3 定理 5 证明

证明 1) 当零售商为低风险规避决策者时, 即 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rL}}$, 若零售商选择契约 $\{\phi_{\mathrm{H}},T_{\mathrm{H}},\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}}\}$, 零售商的效用函数为

$$\begin{aligned}\tilde{U}_{r,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})&=\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2}k_{r\mathrm{L}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]\\&=\mathrm{E}\left[\phi_{\mathrm{H}}\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})+T_{\mathrm{H}}\right]-\frac{1}{2}k_{r\mathrm{L}}\mathrm{Var}\left[\phi_{\mathrm{H}}\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})+T_{\mathrm{H}}\right]\\&=\phi_{\mathrm{H}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2}k_{r\mathrm{L}}\phi_{\mathrm{H}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})\right]\right)+T_{\mathrm{H}}.\end{aligned}$$

求解 $\underset{p_{\mathrm{r}},p_{\mathrm{n}}}{\mathrm{Max}}\tilde{U}_{r,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}},p_{\mathrm{r}})$, 可得该情形下的最优零售价格和最优回收价格, 记作 $\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}$, 类似定理 1 求解有

$$\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}=\frac{\sigma_{\varepsilon}^2k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}c_{\mathrm{n}}+(a+bc_{\mathrm{n}})}{2b+k_{rL}\phi_{\mathrm{H}}\sigma_{\varepsilon}^2},\ \ \tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}=\frac{(\Delta\eta-c_{\mathrm{j}})(\beta+k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}\sigma_{\xi}^2)-\alpha}{2\beta+k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}\sigma_{\xi}^2}.$$

则零售商的效用函数为

$$\tilde{U}_{r,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\right)=\phi_{\mathrm{H}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,L}^{NC},\tilde{p}_{j,L}^{NC}\right)\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}})\right]\right)+T_{\mathrm{H}},$$

制造商的效用函数为

$$\tilde{U}_{m,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}(\omega_{\mathrm{H}},A_{\mathrm{H}})=(1-\phi_{\mathrm{H}})U_{\mathrm{sc,H}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\right)-T_{\mathrm{H}},$$

则从零售商的角度来看, 当 $U_{r,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\geqslant\tilde{U}_{r,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}$ 时低的风险规避零售商会选择基于低风险规避者的契约, 即满足

$$\phi_{\mathrm{L}}U_{\mathrm{sc,L}}^{\mathrm{NC}}\left(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\right)-\phi_{\mathrm{H}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\right)\right]-\frac{1}{2}k_{\mathrm{rL}}\phi_{\mathrm{H}}\mathrm{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}},\tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\right)\right]\right)\geqslant T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}.$$

从制造商的角度来看, 当 $\tilde{U}_{m,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}} \geqslant U_{m,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}$ 时, 制造商不需要区分零售商的风险规避水平, 即满足

$$T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}} \leqslant (1-\phi_{\mathrm{H}}) U_{\mathrm{sc},\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\right)-(1-\phi_{\mathrm{L}}) U_{\mathrm{sc},\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\left(p_{n,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}, p_{j,\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\right).$$

2) 当零售商为高风险规避决策者时, 即 $k_{\mathrm{r}}=k_{\mathrm{rH}}$, 若零售商选择契约 $\{\phi_{\mathrm{L}}, T_{\mathrm{L}}, \omega_{\mathrm{L}}, A_{\mathrm{L}}\}$, 此时零售商的效用函数为

$$\begin{aligned}
\tilde{U}_{r,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}}) &= \mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2} k_{\mathrm{rH}} \operatorname{Var}\left[\pi_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right] \\
&= \mathrm{E}\left[\phi_{\mathrm{L}} \pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})+T_{\mathrm{L}}\right]-\frac{1}{2} k_{\mathrm{rH}} \operatorname{Var}\left[\phi_{\mathrm{L}} \pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})+T_{\mathrm{L}}\right] \\
&= \phi_{\mathrm{L}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right]-\frac{1}{2} k_{\mathrm{rH}} \phi_{\mathrm{L}} \operatorname{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}(p_{\mathrm{n}}, p_{\mathrm{r}})\right]\right)+T_{\mathrm{L}}
\end{aligned}$$

求解 $\underset{p_{\mathrm{r}}, p_{\mathrm{n}}}{\operatorname{Max}} \tilde{U}_{r,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}$ 可得最优零售价格和回收价格, 记作 $\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}$, 类似定理 1 求解有

$$\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}=\frac{\sigma_{\varepsilon}^{2} k_{\mathrm{rH}} \phi_{\mathrm{L}} c_{\mathrm{n}}+(a+b c_{\mathrm{n}})}{2 b+k_{\mathrm{rH}} \phi_{\mathrm{L}} \sigma_{\varepsilon}^{2}}, \ \ \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}=\frac{(\Delta \tau-c_{\mathrm{j}})(\beta+k_{\mathrm{rH}} \phi_{\mathrm{L}} \sigma_{\xi}^{2})-\alpha}{2 \beta+k_{\mathrm{rH}} \phi_{\mathrm{L}} \sigma_{\xi}^{2}},$$

则零售商效用函数

$$\tilde{U}_{r,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right)=\phi_{\mathrm{L}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right)\right]-\frac{1}{2} k_{\mathrm{rH}} \phi_{\mathrm{L}} \operatorname{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right)\right]\right)+T_{\mathrm{L}},$$

制造商效用函数

$$\tilde{U}_{m,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}(\omega_{\mathrm{L}}, A_{\mathrm{L}})=(1-\phi_{\mathrm{L}}) U_{\mathrm{sc},\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right)-T_{\mathrm{L}},$$

则从零售商的角度来看, 要使高的风险规避零售商选择基于高风险规避者的契约, 要满足 $U_{r,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}} \geqslant \tilde{U}_{r,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}$, 即

$$T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}} \geqslant \phi_{\mathrm{L}}\left(\mathrm{E}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right)\right]-\frac{1}{2} k_{\mathrm{rH}} \phi_{\mathrm{L}} \operatorname{Var}\left[\pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right)\right]\right)-\phi_{\mathrm{H}} U_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{NC}}\left(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right),$$

从制造商的角度来看, 当 $\tilde{U}_{m,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}} \geqslant U_{m,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}$ 时, 制造商不需要区分零售商的风险规避水平, 即

$$T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}} \geqslant (1-\phi_{\mathrm{H}}) U_{\mathrm{sc},\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\left(p_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, p_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right)-(1-\phi_{\mathrm{L}}) U_{\mathrm{sc},\mathrm{L}}^{\mathrm{NC}}\left(\tilde{p}_{n,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}, \tilde{p}_{j,\mathrm{H}}^{\mathrm{NC}}\right),$$

证毕.