

回收责任分担下闭环供应链奖惩机制研究

许海娟, 李芳, 闫斌灵

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为研究政府奖惩机制对闭环供应链决策的影响, 建立集中式决策模型, 以及仅由再制造商承担回收责任、再制造商分别和制造商及零售商分担回收责任的奖惩机制分散式决策模型, 通过博弈论分析法求得各均衡解, 并进行数值算例验证。研究表明: 分散式决策模型下新产品批发价和零售价相等; 仅由再制造商承担回收责任情况下的回收率大于制造商和零售商分担回收责任情况下的回收率, 且回收率随政府奖惩力度的提高而增大; 制造商、零售商与再制造商分担回收责任时, 利润增加, 制造商及零售商承担回收责任比例越大, 利润越高。

关键词: 奖惩机制; 回收责任分担; 闭环供应链

中图分类号: F 274

文献标志码: A

Reward and punishment mechanism of closed-loop supply chain under recycling responsibility-sharing

XU Haijuan, LI Fang, YAN Binling

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to study the influence of government reward and punishment mechanism on the decision-making of closed-loop supply chain, a centralized decision-making model and a decentralized decision-making model of reward and punishment mechanism were established. In the centralized model, remanufacturers were responsible for recycling, while in the decentralized model, remanufacturers share the responsibility of recycling with manufacturers and retailers respectively. The results show that the wholesale price and retail price of new products are equal in decentralized decision-making model. The recovery rate of remanufacturer under the responsibility of recycling is greater than that of manufacturer and retailer. The recovery rate increases with the increase of government rewards and punishments. When the manufacturer, retailer and remanufacturer share the recycling responsibility, the profit increases. The greater the proportion of responsibility for the manufacturer and retailer, the higher the profit.

Keywords: reward and punishment mechanism; recycling responsibility-sharing; closed-loop supply chain

收稿日期: 2020-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71840003); 上海市软科学研究重点项目 (19692104000)

第一作者: 许海娟 (1995-), 女, 硕士研究生。研究方向: 供应链管理。E-mail: xu20209420@163.com

通信作者: 李芳 (1966-), 女, 副教授。研究方向: 供应链管理、生产运作管理。E-mail: lifang2502@126.com

随着科技的发展，电器电子产品使用量越来越多，对废弃电器电子产品的回收处理成为人们日益关注的话题。近年来，世界各国对环境保护的重视程度日趋加大，政府和企业均加强对废弃电器电子产品回收再制造的研究^[1-3]。我国也根据国情，出台了一系列政策促进废弃电器电子产品回收处理企业的发展。

奖惩机制并非单一的正向激励或者单一的负向激励，而是政府设置废旧产品的最低回收率或回收数量的标准。若企业对废旧产品的回收情况达到政府所设置的最低标准，则政府对企业进行奖励；若企业对废旧产品的回收情况未达到政府所设置的最低标准，则对企业进行惩罚。相比较单一的奖励机制或单一的惩罚机制，奖惩机制能够最大限度地提高企业参与回收再制造的积极性，最大限度地降低政府的激励成本。我国的 WEEE 废旧品回收立法，就是一种典型的政府奖惩机制。目前，关于政府奖惩机制的闭环供应链研究，国内外学者进行了一些深入的探讨。

王哲等^[4]研究了政府规制对双责任双渠道的影响，探讨了“一征一补一减少”的政府政策对供应链决策的作用。张盼等^[5]研究了制造商依赖零售商回收的背景下，政府奖惩机制对供应链决策的影响。Ranjbar 等^[6]研究了在一个由制造商、零售商和第三方集成商组成的三层闭环供应链下，两个竞争性回收渠道（包括零售商收集和第三方收集）下的最优定价和收集决策。王银河等^[7]在消费者对不同产品的购买意愿下，研究新产品与制造品需求不确定下的闭环供应链系统，分析政府奖惩机制对供应链的影响。Chen 等^[8]研究了政府奖惩机制下供应链成员在绿色供应链管理中的行为，得出奖惩机制可以提高产品的回收率和绿色努力，当考虑奖惩机制下的分散渠道，制造商不能提供更高的转移价格时，制造商回收废旧产品被认为更有效。

但这些文献没有考虑闭环供应链成员在共同回收废弃电器电子产品时，当多方参与废旧产品回收工作时，回收责任对供应链的影响。

王文宾等^[9]研究了奖惩机制下，制造商与回收商分担固定投资成本对闭环供应链的影响，分析奖惩力度及分担比例与供应链决策的关系。王道平等^[10]基于政府对制造商碳排放实施奖惩机制，研究新产品和再造品差别定价下的闭环供应链问题，分析各变量对闭环供应链成员决策的影

响。Panda 等^[11]基于利润最大化原则，研究了制造商和分销商回收责任分担对闭环供应链的作用。易余胤等^[12]研究了政府奖惩机制对企业成员决策产量的影响，并提出如何基于政府奖惩机制对闭环供应链进行协调。Ying 等^[13]在双回收渠道背景下，研究正反渠道中零售商和制造商的双回收闭环供应链问题，指出制造商和回收商分担回收责任能使供应链决策达到最优的目的。石纯来等^[14]研究在有回收商参与下，闭环供应链在制造商规模不经济情形下，奖惩机制对合作策略产生的作用。Wang 等^[15]研究了制造商和回收商分担回收责任情况下，政府奖惩机制对废旧产品回收再制造的推动作用。

在产品的全生命周期中，制造商承担产品生产者的角色，在供应链中具有不可替代的地位，因此，对回收责任分担下制造商参与闭环供应链的研究必不可少。随着半导体技术的迅猛发展，处于流通终端、直接面向顾客的零售业出现了飞跃性的发展。像沃尔玛、家乐福、麦德龙等大型超市占据了大部分的日用品消费市场份额，而像苏宁、国美、京东等在全国拥有分店的大型电器零售商几乎垄断了家电销售市场。零售商在供应链中的地位上升，从而对渠道的决策权不断提高。因此，对回收责任分担下零售商参与的闭环供应链的研究显得尤为重要。

本文在上述文献的基础上，研究闭环供应链各成员企业回收责任分担下的政府奖惩机制，旨在探讨政府对哪些闭环供应链成员企业实施奖惩机制（即在企业成员间分配回收责任）对于闭环供应链提高回收率最有效。

1 模型描述与相关假设

闭环供应链系统如图 1 所示。在该系统中，制造商用原材料生产新产品，单位成本为 c_n ，批发价格为 w_n ，零售商的销售价格为 p_n 。再制造商从

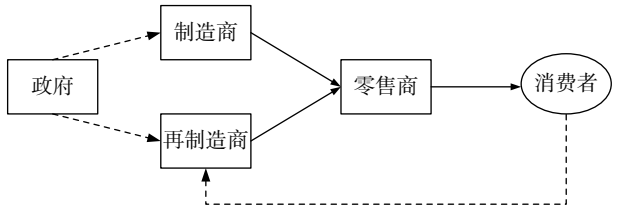


图 1 闭环供应链系统

Fig. 1 Closed-loop supply chain system

消费者手中回收废弃电器电子产品, 价格为 b , 并对回收来的废旧产品进行再制造, 其回收活动所需固定投资为 I , $I = \frac{m\tau^2}{2}$ ^[16], m 为回收难度系数, τ 为回收率。假设废旧产品全部可用于再制造, 且与制造商生产的新产品同质。用废旧产品再制造出的新产品单位成本为 c_r , 记 $\Delta = c_n - c_r > 0$, 表示用废旧产品再制造的制造优势, 且 $b < \Delta$ 。则用废旧产品再制造所得新产品的单位成本为 $c_m = c_n(1 - \tau) + c_r\tau = c_n - \Delta\tau$ 。再制造商的批发价格为 w_r , 零售商以 p_r 的价格销售给消费者。参考文献[17], 假设制造商的新产品需求函数为 $q_n = \phi_n - p_n + \mu p_r$, 再制造商的新产品需求函数 $q_r = \phi_r - p_r + \mu p_n$ 。式中: ϕ_n 和 ϕ_r 为制造商和再制造商的基本市场规模; μ 为两类产品的替代系数, 且 $0 \leq \mu \leq 1$ 。假设市场容量受回收再制造的影响可忽略不予考虑。

假设政府规定要达到的目标回收率为 τ_0 , 奖惩力度为 $k(k > 0)$ 。当回收率达到目标回收率时, 政府对成员进行奖励, 否则对其进行惩罚。

$$p_r^C = \frac{[(b - \Delta)^2 \mu - 2m](\mu^2 - 1)c_n - [(b - \Delta)^2 - 2m]\mu\phi_n + [2m + (b - \Delta)^2(\mu^2 - 2)]\phi_r}{2[(b - \Delta)^2 - 2m](\mu^2 - 1)}, \tau^C = \frac{(\Delta - b)(\mu c_n + \phi_r - c_n)}{2m - (b - \Delta)^2}$$

证明 由式(4)的海塞矩阵 $H = \begin{bmatrix} -2 & 2\mu & b - \Delta \\ 2\mu & -2 & \mu(\Delta - b) \\ b - \Delta & \mu(\Delta - b) & -\mu \end{bmatrix}$ 与函数凹的等价关系可得 $2m - (b - \Delta)^2 > 0$ 成立, 对目标函数求偏导可得 p_n^C ,

$$\pi^C = \frac{(\mu - 1)^2(1 + \mu)[(b - \Delta)^2(1 + \mu) - 4m]c_n^2 + [(b - \Delta)^2 - 2m](\phi_n^2 + 2\mu\phi_n\phi_r)}{4[(b - \Delta)^2 - 2m](\mu^2 - 1)} - \frac{[(b - \Delta)^2\mu^2 - 2m]\phi_r^2 + 2(\mu^2 - 1)c_n\{[(b - \Delta)^2 - 2m]\phi_n + [(b - \Delta)^2\mu - 2m]\phi_r\}}{4[(b - \Delta)^2 - 2m](\mu^2 - 1)}$$

接下来考虑分散式决策的几种模型, 这几种模型决策顺序相同。零售商作为闭环供应链的领导者, 首先根据自身利益做出决策, 再制造商和制造商再根据零售商的决策分别做出决策。

2.2 仅由再制造商承担回收责任模式(模型 R)

奖惩机制是政府为了使闭环供应链回收废弃电器电子产品达到一定的回收率而设置的。从欧盟生产者延伸责任制对废弃电器电子产品产业产生的影响可知, 政府通常会选择对进行废旧产品回收工作的制造商实施引导机制。因此, 下面研究政府只对再制造商实施奖惩机制下的闭环供应链模型, 则制造商、再制造商和零售商的决策分别为

2 闭环供应链模型建立

由模型描述与假设可知, 制造商、再制造商和零售商的利润目标函数分别为

$$\pi_m = (w_n - c_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) \quad (1)$$

$$\pi_r = (w_r - c_n + \Delta\tau - b\tau)(\phi_r - p_r + \mu p_n) - \frac{m\tau^2}{2} \quad (2)$$

$$\pi_p = (p_n - w_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) + (p_r - w_r)(\phi_r - p_r + \mu p_n) \quad (3)$$

接下来, 分别研究集中式决策模型, 以及仅再制造商承担回收责任、再制造商分别和制造商及零售商分担回收责任的奖惩机制分散式决策模型。

2.1 集中式决策模式(模型 C)

该模式下, 闭环供应链呈理想化状态, 其最大利润为

$$\max \pi^C(p_n, p_r, \tau) = (p_n - c_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) + (p_r - c_n + \Delta\tau - b\tau)(\phi_r - p_r + \mu p_n) - \frac{m\tau^2}{2} \quad (4)$$

命题 1 式(4)给出的函数为严格凹函数, 存在唯一解: $p_n^C = \frac{c_n(\mu^2 - 1) - \phi_n - \mu\phi_r}{2(\mu^2 - 1)}$,

p_r^C 和 τ^C 。证毕。

将 p_n^C , p_r^C 和 τ^C 代入到式(4)可得集中决策下的闭环供应链总利润为

$$\pi_m^R(w_n) = (w_n - c_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) \quad (5)$$

$$\pi_r^R(w_r, \tau) = (w_r - c_n + \Delta\tau - b\tau)(\phi_r - p_r + \mu p_n) - \frac{m\tau^2}{2} + k(\tau - \tau_0) \quad (6)$$

$$\pi_p^R(p_n, p_r) = (p_n - w_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) + (\phi_r - p_r + \mu p_n)(p_r - w_r) \quad (7)$$

为简化计算, 不妨设 $w_n = \alpha p_n (0 < \alpha < 1)$, $w_r = \beta p_r (0 < \beta < 1)$ 。由逆向归纳法可得

$$p_n^R = \frac{(\beta - 1)[2(1 - \alpha)\phi_n - (\alpha + \beta - 2)\mu\phi_r]}{4(1 - \alpha)(\beta - 1) + (\alpha + \beta - 2)^2\mu^2}$$

$$p_r^R = \frac{(\alpha - 1)[(2 - \alpha - \beta)\mu\phi_n - 2(\beta - 1)\mu\phi_r]}{4(1 - \alpha)(\beta - 1) + (\alpha + \beta - 2)^2\mu^2}$$

$$\tau^R = \frac{4k(1-\alpha)(\beta-1) + k(\alpha+\beta-2)^2\mu^2 + (\alpha-1)(b-\Delta)\{(\beta-\alpha)\mu\phi_n - [2-2\beta+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_r\}}{4m(1-\alpha)(\beta-1) + m(\alpha+\beta-2)^2\mu^2}$$

此时, 制造商、再制造商和零售商的利润分别为

$$\pi_m^R = \frac{(1-\beta)\{[2-2\alpha+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_n + (\beta-\alpha)\mu\phi_r\}}{[4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]^2} \cdot \{[4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]c_n + (\beta-1)[2(\alpha-1)\alpha\phi_n + \alpha(\alpha+\beta-2)\mu\phi_r]\}$$

$$\pi_r^R = \frac{k(k-2\tau_0m)}{2m} + \frac{(\alpha-1)\{(\alpha-\beta)\mu\phi_n + [2-2\beta+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_r\}}{2m[4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]^2} \cdot \{2k(b-\Delta)[4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2] - 2m[4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]c_n + [2(1-\alpha)(\beta-1)(b-\Delta)^2 - 2m\beta\mu(\beta-1)(\alpha+\beta-2) + (\alpha-1)(\alpha+\beta-2)(b-\Delta)^2\mu^2]\phi_r + (\alpha-1)[4m(1-\beta)\beta + (\alpha-\beta)(b-\Delta)^2\mu]\phi_n\}$$

$$\pi_p^R = \frac{(\alpha-1)(\beta-1)[(\alpha-1)\phi_n^2 + (\alpha+\beta-2)\mu\phi_n\phi_r + (\beta-1)\phi_r^2]}{4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2}$$

$$\pi_m^{RM}(w_n) = (w_n - c_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) + (1-\theta)k(\tau - \tau_0) \quad (8)$$

$$\pi_r^{RM}(w_r, \tau) = (w_r - c_n + \Delta\tau - b\tau)(\phi_r - p_r + \mu p_n) - \frac{m\tau^2}{2} + \theta k(\tau - \tau_0) \quad (9)$$

$$\pi_p^{RM}(p_n, p_r) = (p_n - w_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) + (p_r - w_r)(\phi_r - p_r + \mu p_n) \quad (10)$$

由逆向归纳法可得

$$p_n^{RM} = \frac{(\beta-1)[2(1-\alpha)\phi_n - (\alpha+\beta-2)\mu\phi_r]}{4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2}$$

$$p_r^{RM} = \frac{(\alpha-1)[(2-\alpha+\beta)\mu\phi_n - 2(\beta-1)\mu\phi_r]}{4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2}$$

$$\tau^{RM} = \frac{4(1-\alpha)(\beta-1)\theta k + (\alpha+\beta-2)^2\theta k\mu^2 + (\alpha-1)(b-\Delta)\{(\beta-\alpha)\mu\phi_n - [2-2\beta+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_r\}}{4m(1-\alpha)(\beta-1) + m(\alpha+\beta-2)^2\mu^2}$$

此时, 制造商、再制造商和零售商的利润分别为

$$\pi_m^{RM} = k(1-\theta) \left\{ \frac{\theta k}{m} - \tau_0 + \frac{(\alpha-1)(b-\Delta)\{(\beta-\alpha)\mu\phi_n - [2-2\beta+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_r\}}{4m(1-\alpha)(\beta-1) + m(\alpha+\beta-2)^2\mu^2} \right\} - \frac{(\beta-1)\{[2-2\alpha+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_n + (\beta-\alpha)\mu\phi_r\}}{[4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]^2} \cdot \{[4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]c_n + (\beta-1)[2(\alpha-1)\alpha\phi_n + \alpha(\alpha+\beta-2)\mu\phi_r]\}$$

$$\pi_r^{RM} = \frac{\theta k(\theta k - 2\tau_0m)}{2m} + \frac{(\alpha-1)\{(\alpha-\beta)\mu\phi_n + [2-2\beta+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_r\}}{2m[4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]^2} \cdot \left\{ [4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2][2k(b-\Delta)\theta + 2mc_n] + (\alpha-1)\{[(\alpha-\beta)(b-\Delta)^2 - 2m\alpha(\alpha+\beta-2)]\mu\phi_n + 2(1-\beta)[2m\alpha + (b-\Delta)^2] + (\alpha+\beta-2)(b-\Delta)^2\mu^2\}\phi_r \right\}$$

$$\pi_p^{RM} = \frac{(\alpha-1)(\beta-1)[(\alpha-1)\phi_n^2 + (\alpha+\beta-2)\mu\phi_n\phi_r + (\beta-1)\phi_r^2]}{4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2}$$

2.3 再制造商和制造商分担回收责任模式(模型RM)

接下来研究制造商和再制造商分担废弃电器电子产品回收责任, 即按一定比例分担废弃电器电子产品回收责任时, 政府奖惩机制和回收责任分担比例对闭环供应链成员决策的影响。假设再制造商承担的回收比例为 $\theta(0 < \theta < 1)$, 制造商承担的回收比例为 $1-\theta$, 则制造商、再制造商和零售商的决策分别为

2.4 再制造商和零售商分担回收责任模式(模型RP)

在闭环供应链中，零售商是重要的参与成员，从产品的销售工作中获得利润。考虑产品全生命周期，零售商可能会有必要承担废弃电器电子产品回收再制造的部分责任。在此考虑下，研究再制造商和零售商分担回收责任，按一定比例分担政府奖惩额度的模型。假设再制造商和零售商承担废旧产品回收责任比例分别为 $\theta(0 < \theta < 1)$ 和 $1-\theta$ ，则制造商、再制造商和零售商的决策分别为

$$\tau^{RP} = \frac{4(1-\alpha)(\beta-1)\theta k + (\alpha+\beta-2)^2\theta k\mu^2 + (\alpha-1)(b-\Delta)\{(\beta-\alpha)\mu\phi_n - [2-2\beta+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_r\}}{4m(1-\alpha)(\beta-1) + m(\alpha+\beta-2)^2\mu^2}$$

此时，制造商、再制造商和零售商的利润分别为

$$\begin{aligned} \pi_m^{RP} &= \frac{(1-\beta)\{[2-2\alpha+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_n + (\beta-\alpha)\mu\phi_r\}}{[4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]^2} \cdot \\ &\quad \{[4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]c_n + (\beta-1)[2(\alpha-1)\alpha\phi_n + \alpha(\alpha+\beta-2)\mu\phi_r]\} \\ \pi_r^{RP} &= \frac{\theta k(\theta k - 2\tau_0 m)}{2m} + \frac{(\alpha-1)\{(\alpha-\beta)\mu\phi_n + [2-2\beta+(\alpha+\beta-2)\mu^2]\phi_r\}}{2m[4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2]^2} \cdot \\ &\quad \left\{ [4(\alpha-1)(\beta-1) - (\alpha+\beta-2)^2\mu^2][2k(b-\Delta)\theta + 2mc_n] + \right. \\ &\quad \left. (\alpha-1)\left\{ [(\alpha-\beta)(b-\Delta)^2 - 2m\alpha(\alpha+\beta-2)]\mu\phi_n + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. [2(1-\beta)[2m\alpha + (b-\Delta)^2] + (\alpha+\beta-2)(b-\Delta)^2\mu^2]\phi_r \right\} \right\} \\ \pi_p^{RP} &= \frac{k(\theta-1)(m\tau_0 - k\theta)}{m} + \frac{(\alpha-1)}{4m(1-\alpha)(\beta-1) + m(\alpha+\beta-2)^2\mu^2} \cdot \\ &\quad \left\{ \phi_r[k(b-\Delta)(\theta-1)(2-2\beta+(\alpha+\beta-2)\mu^2) + m(\beta-1)^2\phi_r] + \right. \\ &\quad \left. \mu\phi_n[k(\alpha-\beta)(b-\Delta)(\theta-1) + m(\beta-1)(\alpha+\beta-2)\phi_r] + m(\alpha-1)(\beta-1)\phi_n^2 \right\} \end{aligned}$$

3 模型比较分析

3.1 均衡比较分析

以上通过对几种分散式决策进行分析，分别得出不同模型下的均衡解。对其进行比较，可得出以下命题。

命题2 $p_n^R = p_n^{RM} = p_n^{RP}$, $p_r^R = p_r^{RM} = p_r^{RP}$

由命题2可知，无论政府奖惩机制在闭环供应链中的分配额度是多少，零售商给定消费者两类新产品的零售价格都一样。这表明无论闭环供应链中哪一个成员受政府奖惩机制约束，产品零售价格始终保持不变，即消费者的权益不变，不受影响。

当零售商承担一部分回收责任时，一般都会认为零售商将提高零售价格。但若是零售商这么做，

$$\pi_m^{RP}(w_n) = (w_n - c_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \pi_r^{RP}(w_r, \tau) &= (w_r - c_n + \Delta\tau - b\tau)(\phi_r - p_r + \mu p_n) - \\ &\quad \frac{m\tau^2}{2} + \theta k(\tau - \tau_0) \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \pi_p^{RP}(p_n, p_r) &= (p_n - w_n)(\phi_n - p_n + \mu p_r) + \\ &\quad (p_r - w_r)(\phi_r - p_r + \mu p_n) + (1-\theta)k(\tau - \tau_0) \end{aligned} \tag{13}$$

由逆向归纳法可得

$$\begin{aligned} p_n^{RP} &= \frac{(\beta-1)[2(1-\alpha)\phi_n - (\alpha+\beta-2)\mu\phi_r]}{4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2} \\ p_r^{RP} &= \frac{(1-\alpha)[(\alpha+\beta-2)\mu\phi_n + 2(\beta-1)\mu\phi_r]}{4(1-\alpha)(\beta-1) + (\alpha+\beta-2)^2\mu^2} \end{aligned}$$

则会导致市场需求量减少。再制造商对废弃电器电子产品进行回收，对其利润公式进行分析可知，市场需求量减少时，其利润受损，回收废弃电器电子产品的积极性会下降，致使回收率降低。而零售商承担了部分废弃电器电子产品回收的责任，将可能面临政府的惩罚。此外，不受市场欢迎的产品，从长远角度看，不会给企业带来利益。从零售商自身利益角度出发，若降低销售价格，会使其利润下降。因此，零售商不会轻易降低零售价格，所以出现两类产品零售价不变的情况。

命题3 $\tau^R > \tau^{RM} = \tau^{RP}$

证明 $\tau^R - \tau^{RM} = \frac{k(1-\theta)}{m}$ ，由于 $0 < \theta < 1$ ，所以， $1-\theta > 0$ ，又 $k > 0$ ， $m > 0$ ，所以， $\frac{k(1-\theta)}{m} > 0$ ，故 $\tau^R >$

$$\tau^{\text{RM}} = \tau^{\text{RP}}.$$

由命题3可知,模型R的回收率高于模型RM和模型RP下的回收率。在闭环供应链中,再制造商对废弃电器电子产品进行回收再制造,制造商和零售商并未参与回收再制造的过程,与只对再制造商实行奖惩相比,政府对制造商和零售商采取奖惩机制,很难激发再制造商的回收积极性。因此,只对制造商采取奖惩机制引起的回收率高于另外两种情形。

命题4 $w_n^{\text{R}} = w_n^{\text{RM}} = w_n^{\text{RP}}$, $w_r^{\text{R}} = w_r^{\text{RM}} = w_r^{\text{RP}}$

证明 由于 $p_n^{\text{R}} = p_n^{\text{RM}} = p_n^{\text{RP}}$, $p_r^{\text{R}} = p_r^{\text{RM}} = p_r^{\text{RP}}$, $w_n = \alpha p_n$, $w_r = \beta p_r$, 故 $w_n^{\text{R}} = w_n^{\text{RM}} = w_n^{\text{RP}}$, $w_r^{\text{R}} = w_r^{\text{RM}} = w_r^{\text{RP}}$ 。

由命题4可知,无论政府奖惩额度如何分配,制造商和再制造商设定的产品批发价格都一样。这表明无论政府对闭环供应链中哪个成员采取奖惩机制,批发价格都保持不变。

当制造商和再制造商分担回收责任时,两者的批发价格不变,这是一个反直觉的结果。但若制造商和再制造商提高批发价格,则必会导致零售商提高零售价格,从而使市场需求量降低。由制造商和再制造商的利润公式可知,当市场需求量降低时,制造商和再制造商的利润将无法得到保证,那么再制造商回收废旧产品的积极性会相应降低,引起回收率降低,可能会面临政府的惩罚。因此,制造商和再制造商均不会盲目提高批发价格,故出现两类产品批发价格不变的情况。

3.2 基于回收率的闭环供应链协调

3.2.1 模型RM, RP下的闭环供应链协调

由上文可知,集中决策模型下,模型RM, RP下回收率相等,即 $\tau^{\text{RM}} = \tau^{\text{RP}}$ 。因此,要使模型RM, RP下回收率达到集中决策模型下水平,以保证闭环供应链达到基于回收率的协调的目的,需满足 $\tau^{\text{C}} = \tau^{\text{RM}} = \tau^{\text{RP}}$, 此时奖惩力度

$$k^{\text{RM}} = \frac{m(\Delta - B)}{\theta} \left\{ \frac{(\mu - 1)c_n + \phi_r}{2m - (b - \Delta)^2} + \frac{(\alpha - 1)[(\beta - \alpha)\mu\phi_n - (2 - 2\beta + (\alpha + \beta - 2)\mu^2)\phi_r]}{4m(1 - \alpha)(\beta - 1) + m(\alpha + \beta - 2)^2\mu^2} \right\}$$

即在模型RM和RP下奖惩力度为 k^{RM} 和 k^{RP} 时,回收率达到集中决策模型下的水平。

由 $\frac{\partial k^{\text{RM}}}{\partial m} = \frac{\partial k^{\text{RP}}}{\partial m} < 0$ 可知,当废弃电器电子产品回收难度系数增加时,政府奖惩力度会降低。该现象可以归结为,随着废旧产品回收难度的增加,回收成本将增加,利润下降,此时政府会降低对闭环供应链的投资,奖惩力度也随之降低。

3.2.2 模型R下闭环供应链协调

由上文可知模型R下要使回收率达到集中决策

$$k^{\text{R}} = m(\Delta - b) \left\{ \frac{(\alpha - 1)[(\beta - \alpha)\mu\phi_n - (2 - 2\beta + (\alpha + \beta - 2)\mu^2)\phi_r]}{4m(1 - \alpha)(\beta - 1) + m(\alpha + \beta - 2)^2\mu^2} + \frac{(\mu - 1)c_n + \phi_r}{(b - \Delta)^2 - 2m} \right\}$$

即在模型R下奖惩力度为 k^{R} 时,闭环供应链回收率达到集中决策模型下的水平。

由 $\frac{\partial k^{\text{R}}}{\partial m} < 0$ 可知,模型R下当废弃电器电子产品回收难度系数增加时,政府的奖惩力度会降低。

4 数值算例

下面通过算例讨论几种模型下闭环供应链各成员利润受各变量的影响,并进行数值仿真。以复印机行业为背景,设置产品的有关参数为: $c_n = 60$, $b = 30$, $\Delta = 50$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$, $\phi_n = 200$, $\phi_r = 100$, $m = 1\,200$, $k = 400$, $\tau_0 = 0.4$, $\theta = 0.5$, $\mu = 0.5$ 。所得结果如图2~7所示。

从图2可以看出,当奖惩力度大于0时,制造商在模型RM下的利润高于模型R和RP下的利润,即当制造商分担废弃电器电子产品回收责任时,其利润高于不分担回收责任下的利润。且制造商的利润在模型RM下随着奖惩力度的增大而增加,而在模型R和模型RP下无变化。这说明当制造商成为废旧产品回收责任的分担者时,其利润受到积极影响。这对政府有一定的启示,可以引导制造商参与废旧产品回收再制造工作,从而提高市场上废弃电器电子产品的回收率。

从图3可以看出,当奖惩力度大于0时,再制造商在模型R下的利润高于在模型RM和RP下的利润,即再制造商独自承担回收责任下的利润高于与其他成员分担回收责任下的利润。且再制造商的利润在模型R下随奖惩力度的增大而增加,且增速较快,而在模型RM和RP下增速较小,远低于模型R下的增速。这说明政府只对再制造商实施奖惩机制时,再制造商利润受奖惩力度影响较大。当废旧产品的回收率达到政府规定时,随着政府奖惩力度的加大,再制造商的积极性越高,其利润越高。而当再制造商和制造商或零售商共同承担回收责任时,其利润上升趋势较为缓慢。

从图4可以看出,当奖惩力度大于0时,零售商在模型RP下的利润高于在模型R和RM下的利

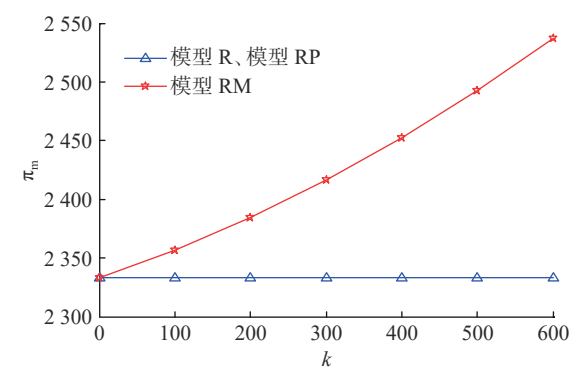


图2 分散模式下制造商利润随奖惩力度的变化

Fig. 2 Change of manufacturer's profit with rewards under decentralized mode

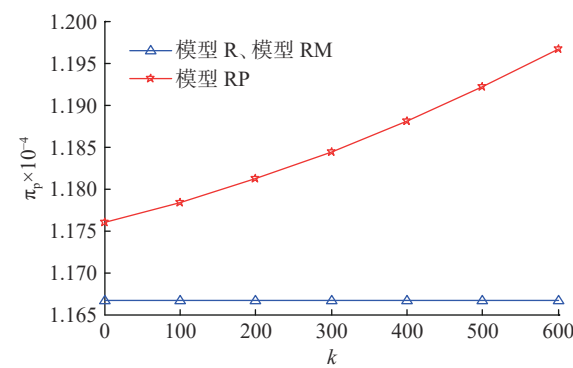


图4 分散模式下零售商利润随奖惩力度的变化

Fig. 4 Change of retailer's profit with rewards under decentralized mode

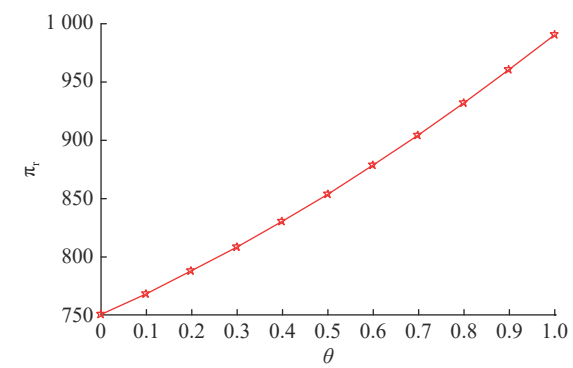


图6 模型RM, RP下再制造商利润随回收责任分担系数的变化

Fig. 6 Change of remanufacturer's profit with recycling responsibility-sharing rates under the model RM and RP

润,即当零售商分担废弃电器电子产品回收责任时,其利润高于不承担回收责任下的利润。且零售商利润在模型RP下随奖惩力度的加大而提高,而在模型R和RM下的利润则无变化。这说明当零售商成为废弃电器电子产品回收责任的分担者时,受政府奖惩机制引导作用的影响,其回收积极性提高,利润上升。

综合图2~4可知,若仅由再制造商承担回收

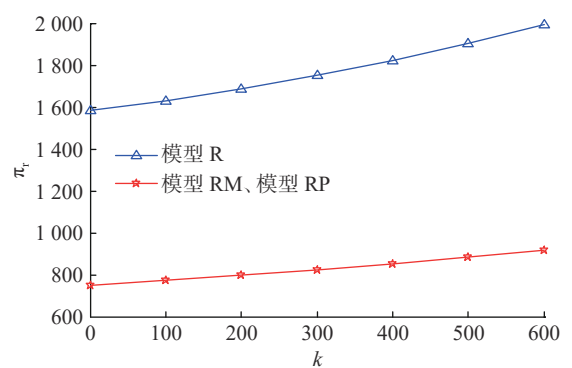


图3 分散模式下再制造商利润随奖惩力度的变化

Fig. 3 Change of remanufacturer's profit with rewards under decentralized mode

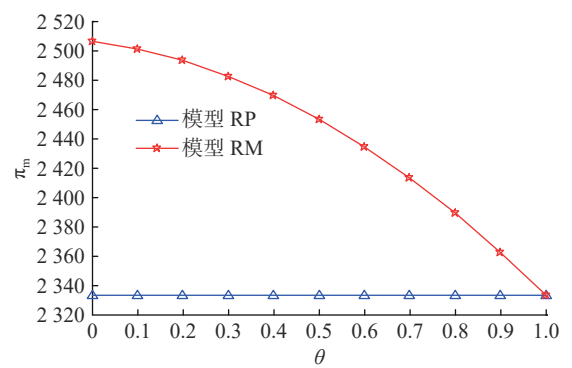


图5 模型RM, RP下制造商利润随回收责任分担系数的变化

Fig. 5 Change of manufacturer's profit with recycling responsibility-sharing rates under the model RM and RP

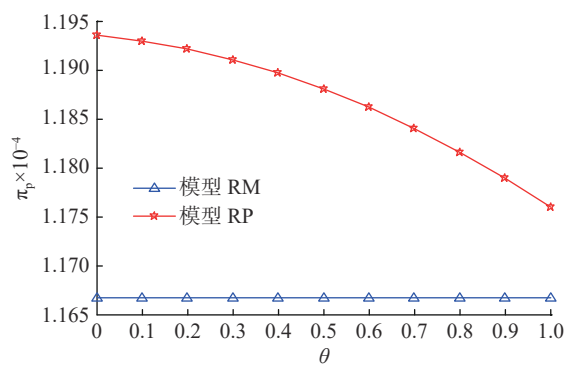


图7 模型RM, RP下零售商利润随回收责任分担系数的变化

Fig. 7 Change of retailer's profit with recycling responsibility-sharing rates under the model RM and RP

责任,其利润受到积极影响。当制造商和零售商分担回收责任时,其利润均高于不分担回收责任时的利润,且利润随政府奖惩力度的增大而提高。可见政府奖惩机制对闭环供应链各成员回收废弃电器电子产品这一行为起到了积极的引导作用。

从图5可以看出,模型RM下制造商利润大于模型RP下的利润,且当再制造商承担的回收比

例越大,即制造商承担的回收比例越小时,制造商利润越低。

从图6可以看出,在模型RM和RP下,当再制造商承担更多的回收责任时,其利润增加。

从图7可以看出,模型RP下的零售商利润高于模型RM下的利润。且在模型RP下,当再制造商承担的回收责任比例越大,即零售商承担的回收责任比例越小时,零售商利润越低。

综合图5~7可知,制造商(零售商)和再制造商一起承担回收责任时,制造商(零售商)承担回收比例越大,其利润越高,再制造商利润越低。

5 结束语

本文考虑了集中式决策模型,以及仅由再制造商承担回收责任、再制造商分别和制造商及零售商分担回收责任的奖惩机制分散式决策模型,得出不同模型下的均衡解,对闭环供应链进行了基于回收率的协调,并进行数值仿真,得出以下结论:

a. 仅由再制造商承担回收责任、制造商和零售商分担回收责任的奖惩机制模型下新产品批发价和零售价相等;制造商和零售商参与回收责任分担的闭环供应链废弃产品回收率相等且小于仅由再制造商承担回收责任下的回收率;与回收责任分担下的奖惩机制相比,仅由再制造商承担回收责任下的回收率最高,且回收率随奖惩力度的提高而提高。

b. 当制造商(零售商)和再制造商分担回收责任时,再制造商利润受损,另一方利润增加。且随着制造商(零售商)承担责任越大,制造商(零售商)利润越高。

c. 无论何种模型下,政府奖惩机制都对提高闭环供应链成员利润起到积极作用。

本文在研究过程中假设对回收的废弃电器电子产品均进行再制造,并且假设用废弃电器电子产品和原材料生产出的新产品无差异,而实际情况会有所差别。因此,在以后的研究中需要进一步放宽假设条件,使研究更加切合实际。

参考文献:

[1] LIU Z, TANG J, LI B Y, et al. Trade-off between remanufacturing and recycling of WEEE and the environmental implication under the Chinese Fund Policy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 97–109.

[2] 赵秀堃, 马亚璇, 李勇建. 基于供应链治理的国际生产者责任延伸制实施模式及政策启示研究[J]. *供应链管理*,

2020, 1(6): 22–33.

- [3] 谢海燕. 绿色发展下循环经济的现状及方向[J]. *宏观经济管理*, 2020(1): 14–21.
- [4] 王哲, 李帮义, 刘志, 等. 政府规制对双责任双渠道闭环供应链的影响[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(10): 2260–2268.
- [5] 张盼, 余莉婷, 熊中楷. 政府奖惩下闭环供应链中信息不对称时的最优合同设计[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(5): 89–100.
- [6] RANJBAR Y, SAHEBI H, ASHAYERI J, et al. A competitive dual recycling channel in a three-level closed loop supply chain under different power structures: pricing and collecting decisions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122623.
- [7] 王银河, 王旭. 随机需求和奖惩机制下的闭环供应链决策模型[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(10): 2927–2931.
- [8] CHEN C K, AKMALUL'ULYA M. Analyses of the reward-penalty mechanism in green closed-loop supply chains with product remanufacturing[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 210: 211–223.
- [9] 王文宾, 范玲玲, 周维明. 奖惩机制下回收投资成本分担对闭环供应链决策的影响研究[J]. *工业技术经济*, 2017, 36(6): 146–154.
- [10] 王道平, 李小燕, 张博卿. 考虑政府碳排放奖惩的差别定价闭环供应链协调策略研究[J]. *管理工程学报*, 2019, 33(1): 189–196.
- [11] PANDA S, MODAK N M, CÁRDENAS-BARRÓN L E. Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 188: 11–21.
- [12] 易余胤, 梁家密. 不确定需求下具奖惩机制的闭环供应链模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(9): 2040–2051.
- [13] YING P X, HUANG M, GUO L J, et al. Dual recycling channel decision in retailer oriented closed-loop supply chain for construction machinery remanufacturing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 137: 1393–1405.
- [14] 石纯来, 聂佳佳. 规模不经济下奖惩机制对闭环供应链制造商合作策略影响[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(3): 85–95.
- [15] WANG W B, ZHANG Y, LI Y Y, et al. Closed-loop supply chains under reward-penalty mechanism: retailer collection and asymmetric information[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 3938–3955.
- [16] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VAN WASSENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239–252.
- [17] FERRER G, SWAMINATHAN J M. Managing new and remanufactured products[J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 15–26.