

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.03.009

# 考虑产品绿色度的闭环供应链回收渠道选择研究

罗定提<sup>1,2</sup>, 王雪芊<sup>1</sup>, 罗子灿<sup>1</sup>, 童彩吟<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 商学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湘潭大学 商学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 在考虑产品绿色度的情形下, 研究了闭环供应链的回收渠道选择问题。以单一生产商为研究对象, 通过构建零售商回收和第三方回收商回收两种 Stackelberg 博弈模型, 得到两种模式下的最优产品价格、回收努力及成员利润, 并通过单调性分析和算例分析进行验证。结果表明: 两种回收模式下, 产品绿色度与最优零售价格和供应链总利润均成正比, 而与最优回收努力成反比; 第三方回收商的回收努力高于零售商, 而两种模式下零售价格的高低存在临界值; 当第三方回收成本节约率较低时, 生产商应选择零售商回收模式, 而当第三方回收成本节约率较高时, 生产商选择第三方回收商回收模式。

**关键词:** 零售商回收; 第三方回收商回收; 产品绿色度; 回收渠道选择; 闭环供应链

**中图分类号:** F274; F224 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2023)03-0059-07

**引文格式:** 罗定提, 王雪芊, 罗子灿, 等. 考虑产品绿色度的闭环供应链回收渠道选择研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(3): 59-65.

## Research on the Closed-Loop Supply Chain Recycling Channel Selection with Product Green Degree Taken into Consideration

LUO Dingti<sup>1,2</sup>, WANG Xueqian<sup>1</sup>, LUO Zican<sup>1</sup>, TONG Caiyin<sup>1</sup>

(1. Business School, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Business, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

**Abstract:** With the green degree of products taken into consideration, a research has been carried out on the selection of recycling channels in closed-loop supply chain. Taking a single manufacturer as the research object, based on the construction of two Stackelberg game models of retailer recycling and third-party recycling, results can be obtained of the optimal product price, recycling effort and member profits under the two models, to be verified by a monotonicity analysis and case analysis. The results show that under the two recycling modes, the green degree of products is in direct proportion to the optimal retail price and the total profit of the supply chain, but in inverse proportion to the optimal recycling effort; the recycling efforts of third-party recyclers are higher than those of retailers, with a critical value for the retail price under the two modes. When the third-party recycling cost saving rate is low, it is suggested that the manufacturer choose the retailer recycling mode. When the third-party recycling cost saving rate is high, it is advisable for the manufacturer to choose the third-party recycling mode.

**Keywords:** retailer recycling; third-party recycling; product green degree; recycling channel selection; closed-loop supply chain

收稿日期: 2022-06-13

基金项目: 湖南省社会科学成果评审委员会课题基金资助项目(XSP19YBC214); 株洲市社科基金资助项目(ZZSK2021078)

作者简介: 罗定提(1963-), 男, 湖南浏阳人, 湘潭大学教授, 博士, 主要研究方向为供应链管理, 技术创新管理,

E-mail: zzldt@21cn.com

## 1 研究背景

随着生活水平的不断提高, 公众的环保意识不断上升, 更多的消费者倾向于购买绿色度较高的产品, 绿色生产能力已经成为影响企业竞争力的重要因素。闭环供应链能实现废旧品的回收再利用, 可以有效减少污染排放和节约资源, 其核心理念是在实现经济效益的过程中关注社会和环境效益的同步提升, 所以绿色产品与其核心理念相适应。产品绿色度的提高有利于刺激消费者的需求, 减少环境污染, 树立良好的企业形象, 提高企业竞争力。基于上述背景, 闭环供应链成员间应如何进行合作, 才能在向社会提供更多更好的绿色产品的同时实现废旧产品的回收利用, 已经成为供应链成员们共同面临的现实问题。

近几年, 国内外学者对回收渠道选择及影响因素等问题进行了深入研究。R. C. Savaskan 等<sup>[1]</sup>通过构建以制造商为领导者的 Stackelberg 博弈, 讨论了如何选择反向渠道回收废旧产品的问题, 并指出零售商负责回收是最好的选择。Chu X. 等<sup>[2]</sup>构建了服务多个制造商的联合第三方回收商收集模式, 并认为制造商授权大规模 J3P (joint third-party) 收集二手产品是最佳的。Shi Y. 等<sup>[3]</sup>基于零售商、制造商和第三方物流服务提供商构成的再制造闭环供应链系统, 构建了 3 种不同的再制造回收模式, 通过分析 3 种模型的结果, 指出不同主体回收模式的选择是有所不同的。陈建华等<sup>[4]</sup>研究了奖惩机制下零售商主导的闭环供应链中各参与主体回收渠道的最优决策问题, 得出废旧产品回收价格系数与回收渠道竞争系数之比较小时, 制造商会选择制造商和第三方回收商这一混合回收渠道。孙朝苑等<sup>[5]</sup>分析了闭环供应链外部的碳交易政策和内部的广告宣传策略如何影响供应链回收渠道的选择。林贵华等<sup>[6]</sup>研究了政府补贴对闭环供应链回收渠道选择的影响, 并认为政府补贴越少, 决策者越倾向于选择零售商回收; 政府补贴越多, 决策者则越倾向于选择第三方回收商回收。

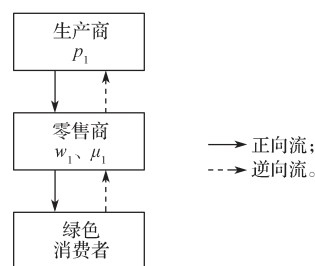
由于国家坚持绿色发展理念, 对产品的节能环保要求提高, 产品绿色度也影响了产品需求, 因此关于产品绿色度的研究受到了广泛关注。Liang Y. 等<sup>[7]</sup>分析了一个由制造商和零售商组成的绿色产品双渠道供应链, 同时引入搭便车服务和渠道差价作为调整渠道冲突的战略工具, 结果发现适当的搭便车服务和价格差异有利于决策者和供应链的绿色化。Wei G. X. 等<sup>[8]</sup>研究了具有非对称异质偏好的绿色供应链, 其中制造商不了解零售商的行为类型, 并得出非对称异质偏好会降低制造商决定的产品绿色度和批发

价格的结论。Miao X.<sup>[9]</sup>构建了一个由单个制造商和单个零售商组成的两级供应链, 并考虑了产品绿色度和销售努力程度, 以研究制造商和零售商是否应该采取绿色营销策略。余娜娜等<sup>[10]</sup>研究了基于产品绿色度的双渠道供应链协调问题, 并得出直销渠道价格和传统渠道价格都会随着产品绿色度的提高而上升的结论。吴江等<sup>[11]</sup>在考虑产品绿色度的同时引入了渠道销量敏感系数和网络渠道物流配送水平等因素, 研究了由一个制造商和一个零售商构成的双渠道供应链协调问题。

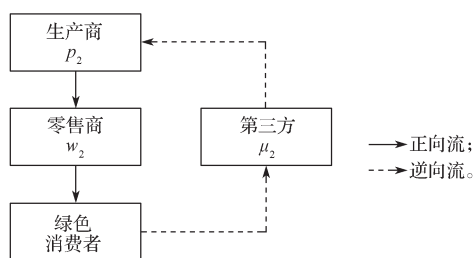
由以上分析可知, 虽然已有学者将产品绿色度纳入供应链管理研究之中, 但少有研究者在考虑产品绿色度的因素下, 针对闭环供应链回收渠道的选择问题进行研究。根据实际情况可知, 闭环供应链可以实现废旧品的回收再利用, 有效减少污染物排放, 回收渠道选择是其中的重要一环。此外, 当下消费者的环境保护意识逐渐增强, 产品绿色度也影响了产品需求, 而现有研究大多认为市场需求只受价格影响, 不符合消费者的真实心理。因此, 将产品绿色度与闭环供应链相结合具有理论和现实价值。因而, 本文引入产品绿色度, 以单一生产商为研究对象, 运用 Stackelberg 博弈方法, 构建零售商回收模式和第三方回收商回收模式两种闭环供应链模型, 分析产品绿色度对生产商回收渠道选择策略的影响, 为企业的绿色实践提供参考和借鉴。

## 2 问题描述及假设

本研究以单一生产商为研究对象, 与 R. C. Savaskan 等<sup>[1]</sup>的研究假设相同, 本文考虑的是单周期决策模型。其中生产商是 Stackelberg 模型的领导者, 零售商和第三方回收商作为跟随者。首先由生产商生产绿色产品, 而后以  $w$  的价格将产品销售给零售商, 零售商则以  $p$  的价格将产品销售给绿色消费者, 最后由零售商或者第三方回收商负责对绿色产品进行回收, 并将回收后的产品返还生产商进行再制造。两种回收模式的具体结构如图 1 所示。



a) 零售商回收



b) 第三方回收商回收

图1 闭环供应链模型结构示意图

Fig. 1 Closed-loop supply chain model

根据递推归纳法, 分别求解在两种回收渠道下产品的最优零售价、最优回收努力、最优需求量和最优利润。

### 2.1 模型符号说明

本文中采用的量符号及其意义如表1所示。

表1 模型符号说明

Table 1 Model symbol description

量符号	含义
$p$	绿色产品零售价格
$w$	绿色产品批发价格
$c$	绿色产品生产成本
$\alpha$	再制造成本节约率
$g$	产品绿色度
$\theta$	消费者支付意愿
$U$	消费产品获得的净效用
$Q$	产品的市场需求
$\mu$	回收努力
$b$	回收补贴
$\tau$	废旧品回收率
$\beta$	回收难度系数
$\gamma$	第三方回收商的回收成本节约率
$I$	废旧品回收过程中的投资
$M$	生产商利润
$R$	零售商利润
$P_3$	第三方回收商利润
$T$	供应链总利润
*	最优解

### 2.2 假设说明

**假设1** 生产商负责生产绿色产品, 绿色产品的绿色度  $g > 0$ 。产品的绿色度越高, 表示产品在生产过程、使用过程和回收过程中产生的危害越低, 即环保性较高。

**假设2** 绿色产品的批发价格和零售价格满足条件  $p > w > 0$ , 下角标1与2分别代表零售商回收情形与第三方回收商回收情形。

**假设3**  $Q(p, g)$  表示市场对绿色产品的需求, 且市场不存在信息不对称情况。

**假设4** 参数  $\tau$  表示产品回收率, 对废旧产品回

收过程的投资  $I$  是关于  $\tau$  的二次函数, 即  $I = \beta\tau^2$ <sup>[1]</sup>。其中  $\beta$  为回收废旧产品的回收难度系数,  $\tau$  和  $\beta$  均为外生变量, 且满足  $\beta > 0$ 、 $0 < \tau < 1$ , 投资中也包括回收商付给消费者的回收价格。

**假设5** 绿色产品的生产成本为  $c$ ,  $\alpha a$  为绿色产品回收后再制造所节约的成本, 同时为了使绿色生产有意义, 令  $g > 2c$ 。

**假设6** 为保证回收过程中生产商有利可图, 需满足  $0 < b < \alpha a$ 。

**假设7** 根据实际情况可知, 产品绿色度越高, 产品回收率和可利用率越高, 回收主体的回收积极性也越高。本文假设废旧品回收率  $\tau$  与产品绿色度呈线性关系, 即  $\tau = \mu g$ <sup>[12]</sup>,  $\mu$  为回收主体的回收努力。

## 3 模型构建

### 3.1 需求函数构建

假设每消费一单位绿色产品获得的效用为  $\theta g$ ,  $\theta$  服从  $[0, 1]$  上的均匀分布<sup>[13-14]</sup>。当生产商提供绿色产品时, 购买绿色产品给消费者带来的净效用为

$$U = \theta g - p. \quad (1)$$

$U > 0$  表示消费者愿意购买绿色产品, 从而绿色产品的需求函数为

$$\begin{cases} Q(p, g) = \int_p^1 f(\theta) d\theta = 1 - \frac{p}{g}, \\ \text{s.t. } p < g. \end{cases} \quad (2)$$

### 3.2 零售商回收——模型1

在零售商回收模式中, 生产商负责生产绿色产品, 并以  $w_1$  价格将产品批发给零售商, 零售商则以  $p_1$  的价格将产品销售给消费者, 而后对废旧绿色产品进行回收并交由生产商进行再制造。博弈顺序如下: 生产商首先决定批发价格  $w_1$ , 零售商依据前者的决策从而决定零售价格  $p_1$  和零售商的回收努力  $\mu_1$ 。此种情况下, 零售商的利润函数为

$$\begin{aligned} \max_{p_1, \mu_1} \Pi_{R_1} &= (p_1 - w_1 + b\tau)Q_1 - \beta\tau^2 = \\ &= (p_1 - w_1 + b\mu_1 g) \left(1 - \frac{p_1}{g}\right) - \beta\mu_1^2 g^2, \end{aligned} \quad (3)$$

生产商的利润函数为

$$\begin{aligned} \max_{w_1} \Pi_{M_1} &= (w_1 - c + \alpha a \tau - b\tau)Q_1 = \\ &= (w_1 - c + \alpha a \mu_1 g - b\mu_1 g) \left(1 - \frac{p_1}{g}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

由递推归纳法可得命题1。

**命题1** 在零售商回收模式下且回收难度系数满

足  $\max\left(\frac{bc\alpha}{4g}, \frac{b^2}{2g}, \frac{b^2+bc\alpha}{12g}\right) < \beta$  时, 产品的最优批发价格  $w_1^*$ 、最优零售价格  $p_1^*$ 、最优回收努力  $\mu_1^*$ 、最优需求量  $Q_1^*$  和供应链总利润  $\Pi_{\tau_1}^*$  如下:

$$\begin{cases} w_1^* = \frac{b(b(c-g)+2cg\alpha)-4g(c+g)\beta}{2bc\alpha-8g\beta}, \\ p_1^* = \frac{g((c+3g)\beta-bc\alpha)}{4g\beta-bc\alpha}, \\ \mu_1^* = \frac{b(c-g)}{2bcg\alpha-8g^2\beta}, \\ Q_1^* = \frac{(c-g)\beta}{bc\alpha-4g\beta}, \\ \max \Pi_{\tau_1}^* = \frac{\beta(c-g)^2(12g\beta-b(b+2c\alpha))}{4(bc\alpha-4g\beta)^2}. \end{cases}$$

**证明** 将式(3)对  $p_1$  和  $\mu_1$  求一阶偏导并令导数等于零所求得的式子, 分别代入生产商利润函数式(4), 并对式(4)的  $w_1$  求一阶偏导, 且令导数等于0, 可得最优批发价格  $w_1^*$  为

$$w_1^* = \frac{b(b(c-g)+2cg\alpha)-4g(c+g)\beta}{2bc\alpha-8g\beta}.$$

将  $w_1^*$  代入对  $p_1$  和  $\mu_1$  求一阶偏导并且令导数等于零所求得的式子, 可得最优零售价格和最优回收努力分别如下:

$$\begin{cases} p_1^* = \frac{g((c+3g)\beta-bc\alpha)}{4g\beta-bc\alpha}; \\ \mu_1^* = \frac{b(c-g)}{2bcg\alpha-8g^2\beta}. \end{cases}$$

将  $w_1^*$ 、 $p_1^*$  和  $\mu_1^*$  代入需求函数、式(3)和式(4)得到最优需求量、零售商和生产商的最优利润如下:

$$Q_1^* = \frac{(c-g)\beta}{bc\alpha-4g\beta}, \quad (5)$$

$$\max \Pi_{R_1}^* = \frac{(c-g)^2(4g\beta-b^2)\beta}{4(bc\alpha-4g\beta)^2}, \quad (6)$$

$$\max \Pi_{M_1}^* = \frac{(c-g)^2\beta}{8g\beta-2bc\alpha}. \quad (7)$$

将式(6)和式(7)相加, 可得零售商回收模式下的供应链总利润为

$$\max \Pi_{\tau_1}^* = \frac{(c-g)^2(12g\beta-b(b+2c\alpha))\beta}{4(bc\alpha-4g\beta)^2},$$

而零售商回收的最优解需满足  $0 < w_1^* \leq p_1^*$ ,  $0 < Q_1^*$ ,  $0 < \mu_1^* \leq 1$ ,  $0 < \Pi_{\tau_1}^*$ .

命题1证毕。

### 3.3 第三方回收商回收——模型2

在第三方回收商回收模式中, 生产商负责生产绿色产品, 并以  $w_2$  价格将产品批发给零售商, 零售商则以  $p_2$  的价格将产品销售给消费者, 由第三方回收商负责对产品进行回收并交由生产商进行再制造。博弈顺序如下: 首先由生产商决定批发价格  $w_2$ , 其次零售商依据前者的决策决定零售价格  $p_2$ , 最后第三方回收商决定回收努力  $\mu_2$ 。考虑现实情况, 由于第三方回收商的回收活动更专业, 因此相较于零售商回收, 第三方回收商回收会节约一定的回收成本, 故第三方回收模型下的回收成本为  $(1-\gamma)\beta\mu_2^2g^2$ 。其中  $0 < \gamma < 1$ ,  $\gamma$  越大, 节约的回收成本越多。此种情况下, 第三方回收商的利润函数为

$$\begin{aligned} \max_{\mu_2} \Pi_{R_3} &= b\tau Q - (1-\gamma)\beta\tau^2 = \\ & b\mu_2 g \left(1 - \frac{p_2}{g}\right) - (1-\gamma)\beta\mu_2^2 g^2, \end{aligned} \quad (8)$$

零售商的利润函数为

$$\max_{p_2} \Pi_{R_2} = (p_2 - w_2)Q = (p_2 - w_2) \left(1 - \frac{p_2}{g}\right), \quad (9)$$

生产商利润函数为

$$\begin{aligned} \max_{w_2} \Pi_{M_2} &= (w_2 - c + c\alpha\tau - b\tau)Q = \\ & (w_2 - c + c\alpha\mu_2 g - b\mu_2 g) \left(1 - \frac{p_2}{g}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

由递推归纳法可得命题2。

**命题2** 在第三方回收商回收模式下, 且回收难度系数满足  $\frac{b(c\alpha-b)}{4g(1-\gamma)} < \beta < \frac{b(3\gamma-1)(b+b\gamma-2c\alpha\gamma)}{12g\gamma^2(\gamma-1)}$  时, 产品的最优批发价格  $w_2^*$ 、最优零售价格  $p_2^*$ 、最优回收努力  $\mu_2^*$ 、最优需求量  $Q_2^*$  和供应链总利润  $\Pi_{\tau_2}^*$  分别为

$$\begin{cases} w_2^* = \frac{g(b(c\alpha-b)+2\beta(c+g)(\gamma-1))}{b(c\alpha-b)+4g\beta(\gamma-1)}, \\ p_2^* = \frac{g(b(c\alpha-b)+\beta(c+3g)(\gamma-1))}{b(c\alpha-b)+4g\beta(\gamma-1)}, \\ \mu_2^* = \frac{b(c-g)(\gamma-1)}{2g\gamma(b(b-c\alpha)+4g\beta(1-\gamma))}, \\ Q_2^* = \frac{(c-g)(\gamma-1)\beta}{b(b-c\alpha)+4g\beta(1-\gamma)}, \\ \max \Pi_{\tau_2}^* = \frac{b(c-g)(b(b-c\alpha)+4g\beta(\gamma-1)^2)}{2g\gamma^2(b(c\alpha-b)+4g(\gamma-1)\beta)^2}. \end{cases}$$

**证明** 将式(8)和式(9)分别对  $p_2$  和  $\mu_2$  求一阶偏导并且令导数等于0时所求得的式子, 分别代入生产商利润函数式(10)中, 然后对式(10)中的  $w_2$  求一阶偏导, 并令导数等于0, 可得最优批发价格  $w_2^*$  表达式为

$$w_2^* = \frac{g(b(c\alpha - b) + 2\beta(c + g)(\gamma - 1))}{b(c\alpha - b) + 4g\beta(\gamma - 1)}.$$

将  $w_2^*$  代入对  $p_2$  和  $\mu_2$  求一阶偏导并令导数等于0所求得的式子, 可以得到最优零售价和最优回收努力分别如下:

$$p_2^* = \frac{g(b(c\alpha - b) + \beta(c + 3g)(\gamma - 1))}{b(c\alpha - b) + 4g\beta(\gamma - 1)},$$

$$\mu_2^* = \frac{b(c - g)(\gamma - 1)}{2g\gamma(b(b - c\alpha) + 4g\beta(1 - \gamma))}.$$

将  $w_2^*$ 、 $p_2^*$  和  $\mu_2^*$  代入需求函数以及式(8)~(10), 得到最优需求量、第三方回收商、零售商和生产商的最优利润分别如下:

$$Q_2^* = \frac{(c - g)(\gamma - 1)\beta}{b(b - c\alpha) + 4g\beta(1 - \gamma)}, \quad (11)$$

$$\max \Pi_{P_3}^* = \frac{b^2(c - g)^2(\gamma - 1)^2(3\gamma - 1)\beta}{4\gamma^2(b(c\alpha - b) + 4g\beta(\gamma - 1))^2}, \quad (12)$$

$$\max \Pi_{R_2}^* = \frac{g\beta^2(c - g)^2(\gamma - 1)^2}{(b(b - c\alpha) + 4g\beta(1 - \gamma))^2}, \quad (13)$$

$$\max \Pi_{M_2}^* = \frac{(4\gamma g\beta(\gamma - 1) - b(b - c\alpha)(3\gamma - 1))}{2\gamma(b(c\alpha - b) + 4g\beta(\gamma - 1))^2} \cdot \frac{(c - g)^2(\gamma - 1)}{2\gamma(b(c\alpha - b) + 4g\beta(\gamma - 1))^2}. \quad (14)$$

将式(12)~(14)相加, 得第三方回收商回收模式下的供应链总利润为

$$\max \Pi_{T_2}^* = \frac{(c - g)^2(\gamma - 1)\beta}{4\gamma^2(b(c\alpha - b) + 4g\beta(\gamma - 1))^2} \cdot \frac{(12g\beta\gamma^2(\gamma - 1) - b(3\gamma - 1)(b + b\gamma - 2c\alpha\gamma))}{4\gamma^2(b(c\alpha - b) + 4g\beta(\gamma - 1))^2},$$

而第三方回收商回收的最优解需满足  $0 < w_2^* \leq p_2^*$ ,  $0 < Q_2^*$ ,  $0 < \mu_2^* \leq 1$ ,  $0 < \Pi_{T_2}^*$ .

命题2证毕。

### 4 最优解分析

由模型1和模型2已知最优解成立的条件, 综合分析可得:

$$\max \left( \frac{bca}{4g}, \frac{b^2}{2g}, \frac{b^2 + bca}{12g}, \frac{b(c\alpha - b)}{4g(1 - \gamma)} \right) < \beta < \frac{b(3\gamma - 1)(b + b\gamma - 2c\alpha\gamma)}{12g\gamma^2(\gamma - 1)},$$

因此, 以下推论只有在此区间内进行比较才有意义。

**推论1** 两种回收模式下的最优零售价格是关于  $g$  的增函数, 而两种回收模式下的最优回收努力则是关于  $g$  的减函数。

**证明** 将两种回收模式中的最优零售价格  $p_1^*$ 、 $p_2^*$  和最优回收努力  $\mu_1^*$ 、 $\mu_2^*$  分别对产品绿色度  $g$  求偏导数, 可得:

$$\frac{\partial p_1^*}{\partial g} = \frac{12g^2\beta^2 + b^2c^2\alpha^2 - bca\beta(c + 6g)}{(bca - 4g\beta)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial p_2^*}{\partial g} = \left[ b^2(b - c\alpha)^2 + 12g^2\beta^2(\gamma - 1)^2 + \beta b(\gamma - 1)(c + 6g)(c\alpha - b) \right] \cdot$$

$$(b(b - c\alpha) + 4g(1 - \gamma)\beta)^2 > 0;$$

$$\frac{\partial \mu_1^*}{\partial g} = -\frac{(b^2c^2\alpha + 4bg\beta(g - 2c))}{2g^2(bca - 4g\beta)^2} < 0;$$

$$\frac{\partial \mu_2^*}{\partial g} = \frac{b^2c(c\alpha - b)(\gamma - 1) + 4bg\beta(2c - g)(\gamma - 1)^2}{2g^2\gamma(b(b - c\alpha) + 4g(1 - \gamma)\beta)^2} < 0.$$

推论1说明, 两种回收模式下, 最优零售价格会随着产品绿色度的增加而提高, 而最优回收努力则会随着产品绿色度的增加而降低。该情况与现实相符, 产品绿色度的提升增加了消费者的购买意愿, 因此绿色产品需求量增加, 市场上出现供不应求的情形, 当处于卖方市场时, 生产商为了获取更多利润就会选择增加产品零售价格。而绿色度越高的产品更便于回收主体回收, 因此所要付出的回收努力会降低。

**推论2** 当  $0 < \gamma < \frac{b}{c\alpha}$  时, 第三方回收模式下的绿色产品零售价格高于零售商回收模式下的绿色产品零售价格; 当  $\frac{b}{c\alpha} < \gamma < 1$  时, 零售商回收模式下的绿色产品零售价格则高于第三方回收模式下的价格。

**证明** 因

$$p_2^* - p_1^* = \frac{b\beta g(c - g)(b - c\alpha\gamma)}{(bca - 4g\beta)(b(b - c\alpha) - 4g(\gamma - 1)\beta)},$$

由  $Q_1^* > 0$ , 可以得到  $(bca - 4g\beta) < 0$ ; 由  $Q_2^* > 0$ , 可以得到  $b(b - c\alpha) - 4g\beta(\gamma - 1) > 0$ , 故  $p_2^* - p_1^*$  的符号取决于  $(b - c\alpha\gamma)$  的符号。

推论2说明, 当第三方回收成本节约率高于临界

值时,与零售商回收情形相比,第三方回收商回收情形下闭环供应链的绿色产品零售价更高。因为回收成本降低可以降低生产商给予第三方的回收补贴,总成本降低会使得产品的批发价格降低,进而使得零售价格降低。这说明,较高的回收成本节约率更有利于消费者,并提升产品需求。

**推论 3** 第三方回收商回收情形下的回收努力高于零售商回收情形下的回收努力。

**证明** 因

$$\mu_2^* - \mu_1^* = \frac{(c-g)}{2g} \left( \frac{b-b\gamma}{b\gamma(c\alpha-b)+4g\beta\gamma(\gamma-1)} - \frac{2c\alpha}{4g\beta-c^2\alpha^2} \right) > 0,$$

由  $Q_2^* > 0$  可得,  $\gamma(b(c\alpha-b)+4g\beta(\gamma-1)) < 0$ , 又因为  $4g\beta-c^2\alpha^2 > 0$  且  $c-g > 0$ , 因此  $\mu_2^* - \mu_1^* > 0$ 。

推论 3 说明,第三方回收商的回收活动更为专业,因此第三方回收商的回收努力程度要高于零售商回收努力程度。

## 5 算例分析

由于所得的利润式较为复杂,因此本节采用算例分析的方式研究产品绿色度  $g$  对两种回收渠道下最优供应链总利润的影响,并得出相应的管理学启示。其中,  $M_1$  代表零售商回收的情况,  $M_2$  代表第三方回收商回收的情况,  $T$  代表供应链总利润。设定的基本参数及取值如表 2 所示,  $g$  的取值范围为 (2, 7)。

表 2 参数取值

Table 2 Parameter value table

参数	$\gamma$	$c$	$\alpha$	$\beta$	$b$
取值	0.2/0.8	0.7	0.8	0.3	0.5

图 2 为第三方回收商的回收成本节约率  $\gamma$  不同时,产品绿色度  $g$  的变化对最优供应链总利润  $T$  的影响曲线。由图 2 可以看出,产品绿色度的提升有助于供应链总利润的提升。这是因为绿色度的提高增加了产品的回收率,提升了产品的重复利用率,节约了生产商的生产成本,因此供应链总利润随绿色度的提高而上升。

从图 2 中还可以得出,当第三方回收商的回收成本节约率较低时,零售商回收模式下的供应链总利润高于第三方回收商回收模式下的供应链总利润,而当第三方回收商的回收成本节约率较高时,则第三方回收模式下的供应链总利润较高。这是因为第三方回收节约的回收成本越多,生产商付出的回收补贴越少,回收环节付出的总成本降低,生产商就会选择降低产品的批发价格,进而零售价格降低,产品的需求量相

应提升。这说明当第三方回收商的回收成本节约率较低时,生产商应选择零售商回收模式,反之则应选择第三方回收商回收模式。

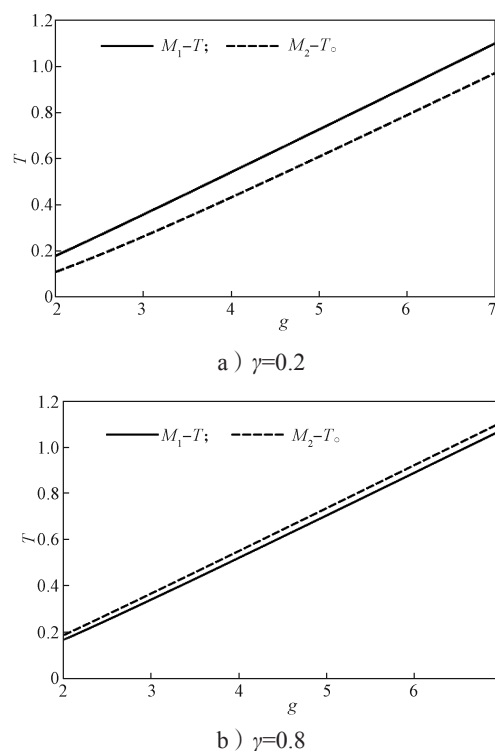


图 2  $g$  的变化对最优供应链总利润的影响曲线  
Fig. 2 Influence curves of changes in  $g$  on the optimal total supply chain profit

## 6 结论

本文以单一生产商为研究对象,研究了在考虑产品绿色度的情形下,闭环供应链的回收渠道选择问题。文章构建了零售商回收和第三方回收商回收的两种闭环供应链模型,分别讨论并比较了零售商回收模式和第三方回收商回收模式下的最优零售价格、最优回收努力和供应链总利润,并得出以下结论:

1) 在两种回收模式下,最优零售价格会随着产品绿色度的增加而提高,而最优回收努力则会随着产品绿色度的增加而降低。

2) 两种模式下零售价格的高低存在临界值,高于临界值时,零售商回收模式下的绿色产品零售价格高于第三方回收模式下的绿色产品零售价格。

3) 第三方回收商回收情形下的回收努力高于零售商回收情形下的回收努力。

4) 产品绿色度的提升有助于供应链总利润的提升,且当第三方回收成本节约率较低时,生产商应选择零售商回收模式,而当第三方回收成本节约率较高时,生产商选择第三方回收商回收模式。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] CHU X, ZHONG Q Y, LI X. Reverse Channel Selection Decisions with a Joint Third-Party Recycler[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(18): 5969-5981.
- [3] SHI Y, NIE J J, QU T, et al. Choosing Reverse Channels Under Collection Responsibility Sharing in a Closed-Loop Supply Chain with Re-Manufacturing[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, 26(2): 387-402.
- [4] 陈建华, 梅俊晓, 曹菁菁. 零售商主导闭环供应链混合回收渠道选择决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(3): 954-964.  
CHEN Jianhua, MEI Junxiao, CAO Jingjing. Decisionmaking of Hybrid Recycling Channels Selection for Closed-Loop Supply Chain with Dominant Retailer[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(3): 954-964.
- [5] 孙朝苑, 田思源. 碳交易政策和广告宣传对供应链回收渠道选择的影响[J]. *管理评论*, 2020, 32(12): 242-252.  
SUN Chaoyuan, TIAN Siyuan. The Impact of Carbon Trading Policy and Advertising on the Choice of Supply Chain Recycling Channels[J]. *Management Review*, 2020, 32(12): 242-252.
- [6] 林贵华, 单仁邦, 陈拼搏. 政府补贴下闭环供应链回收渠道的选择策略[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(4): 43-53.  
LIN Guihua, SHAN Renbang, CHEN Pingbo. Selection Strategies of Recycling Channels in Closed-Loop Supply Chain Under Government Subsidy[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(4): 43-53.
- [7] LIANG Y, SUN X C. Product Green Degree, Service Free-Riding, Strategic Price Difference in a Dual-Channel Supply Chain Based on Dynamic Game[J]. *Optimization*, 2022, 71(3): 633-674.
- [8] WEI G X, CHEN X, QIN X H. Product Greenness and Pricing Strategy of Supply Chain Incorporating Asymmetric Heterogeneous Preferences[J]. *IEEE Access*, 9: 11563-11584.
- [9] MIAO X. Green Marketing Strategies of Supply Chain and Incentive Contracts Considering Product Green Degree and Sales Effort[J]. *Scientific Journal of Economics and Management Research*, 2022, 4(1): 378-393.
- [10] 余娜娜, 王道平, 赵超. 考虑产品绿色度的双渠道供应链协调研究[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(4): 75-81.  
YU Nana, WANG Daoping, ZHAO Chao. Study on Coordination of Dual-Channel Supply Chain Considering Product Green Degree[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(4): 75-81.
- [11] 吴江, 杜亚倩, 张聊东. 考虑产品绿色度的双渠道供应链博弈分析与协调[J]. *系统科学与数学*, 2021, 41(8): 2276-2291.  
WU Jiang, DU Yaqian, ZHANG Liaodong. Game Analysis and Coordination of Double-Channel Products Supply Chain Considering Product Green Degree[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2021, 41(8): 2276-2291.
- [12] 邢光军, 李云云, 巩永华. 考虑消费者绿色偏好的闭环供应链定价决策研究[J]. *数学的实践与认识*, 2019, 49(1): 50-59.  
XING Guangjun, LI Yunyun, GONG Yonghua. Research on Pricing Decision of Closed-Loop Supply Chain Considering Consumers' Green Preference[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2019, 49(1): 50-59.
- [13] 罗子灿, 崔杰, 罗定提, 等. 零售商回收模式下收益共享契约和包装尺寸决策研究[J]. *包装学报*, 2020, 12(6): 59-69.  
LUO Zican, CUI Jie, LUO Dingti, et al. Revenue Sharing Contract and Packaging Size Decision Under Retailer Recycling Model[J]. *Packaging Journal*, 2020, 12(6): 59-69.
- [14] 许凤连, 罗子灿, 罗定提. 生产商回收下包装尺寸决策研究[J]. *包装学报*, 2019, 11(4): 53-61.  
XU Fenglian, LUO Zican, LUO Dingti. Study on Decision-Making of Package Size Under Manufacturer Recovery[J]. *Packaging Journal*, 2019, 11(4): 53-61.

(责任编辑: 申 剑)