

文章编号:1673-9469(2021)01-0105-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.01.016

零售商主导下不同回收模式的闭环供应链定价模型

曹庆奎^{1,2},袁雯慧¹,史红伟³,任向阳¹

(1. 河北工程大学 管理工程与商学院,河北 邯郸 056038;2. 廊坊师范学院 经济与管理学院,河北 廊坊 065000;
3. 中国水务投资有限公司,北京 100053)

摘要: 基于废旧电器电子产品(Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)特性,考虑了市场需求的不确定性,将需求模糊化处理,建立零售商主导下政府分别对制造商、零售商、第三方回收商实行奖惩政策的闭环供应链(Closed-Loop Supply Chain, CLSC)回收定价模型,运用博弈理论得出三种回收定价模型中各决策变量基于政府奖惩力度的变化。结果表明制造商回收模式下商品的批发价最低、废旧品回收率最高,制造商的收益远远大于零售商的收益,这为制造型企业的供应链管理提供了合理的建议。

关键词: 闭环供应链;定价;模糊理论;博弈论

中图分类号:F274

文献标识码:A

Pricing Models of Closed-loop Supply Chain with Different Recovery Modes under the Guidance of Retailers

CAO Qingkui^{1,2}, YUAN Wenhui¹, SHI Hongwei³, REN Xiangyang¹

(1. School of Management Engineering and Business, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2. Faculty of Economics and Management, Langfang Normal University, Langfang, Hebei 065000, China;
3. China Water Investment Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: Based on the product characteristics of waste electrical and electronic equipment (WEEE), considering the uncertainty of market demand, the demand is fuzzed, and a closed-loop supply chain (CLSC) is established under the guidance of retailers, in which the government implements reward and punishment policies for manufacturers, retailers and third-party recyclers respectively, and with the use of game theory, decision variables change based on government's rewards and punishments in the three recycling pricing models. The results show that the wholesale price of goods is the lowest and the recycling rate of waste products is the highest under the manufacturer recycling mode, and the manufacturer's revenue is far greater than the retailer's revenue, which provides reasonable suggestions for the supply chain management of manufacturing enterprises.

Key words: closed loop supply chain; pricing; fuzzy theory; game theory

随着经济的发展、科学技术的进步,当前人们越来越追求需求的个性化,这促使企业要生产更加多样化的产品以满足市场个性化的消费需求。然而,这也导致市场上各种产品的生命周期大大缩减,从而引起环境污染、资源浪费等问题。面对日益提升的环保要求,越来越多的企业已经将环

保作为提升企业核心竞争力的一种方式,许多企业已经开始对自己传统的供应链流程进行规划、整合,通过对市场上的废旧产品进行回收以达到环保的要求,这不仅可以给消费者提供更高质量的服务,还可以降低企业的生产成本,有利于企业的可持续发展。在这一背景下,闭环供应链

收稿日期:2020-10-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61375003)

作者简介:曹庆奎(1963-),男,河北唐山人,博士,教授,从事供应链管理、物流管理、系统优化决策方面的研究。

(Closed-Loop Supply Chain, CLSC)管理研究应运而生。CLSC是达成可持续发展的首要任务,由于资源短缺问题日益突出,CLSC研究已得到业内学者的广泛关注^[1-4]。当今厂商竞争激烈,产品生命周期缩减,市场需求存在不确定性,导致企业难以取得确切的需求数据,因此部分学者对CLSC中需求模糊现象进行了研究^[5-8]。目前电子产品生产数量和消费数量逐年提高,由于废旧电器电子产品具有两面性:一是通过简单翻新可以循环利用或者可以再加工其他产品;二是不处理或者不正确处理易对环境造成破坏,需要谨慎处理。因此如何对WEEE的回收量进行有效管理,减少废旧材料对环境的危害颇受学者关注^[9-14]。WEEE回收再利用是一个包含政府、企业以及消费者的多方面环境保护问题,政府引导刻不容缓^[15-21]。有关政府奖惩的研究已经成为CLSC管理领域的重要分支,但尚无考虑模糊需求下政府奖惩回收方的研究。本文结合需求的模糊性以及政府奖惩政策,运用Stackelberg博弈论求得零售商主导下政府奖惩制造商、零售商及第三方回收商模型中各变量的均衡解,分析了三种回收模式下供应链各决策变量随政府奖惩的变化情况,使政府奖惩机制的实行更具合理化。

1 问题描述与基本假设

1.1 问题描述

本文以一个由制造商、零售商、第三方回收商构成的三级CLSC模型为研究对象,结构如下图1所示。在正向物流中,制造商负责电子电器产品的生产以及对WEEE产品的再制造,制造商决定产品的批发价格。零售商负责电子电器产品的销售,根据制造商制定的批发价格决定零售价格。在逆向物流中,制造商、零售商、第三方都可以进行回收。政府对回收方制定最低回收门槛 τ_0 ,根据回收率 τ 对回收方进行奖惩。

模型中将市场需求量视为三角模糊变量,利用三角模糊变量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3), \beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ 取代市场需求函数,即模糊需求函数为 $D(P) = \alpha - \beta P$ 。 α 为产品的市场容量, β 为价格弹性。若 M 三角模糊数用有序三元组数 $\tilde{M} = (a, b, c)$ 表示,其中 a, c 分别代表 \tilde{M} 的下限和上限,那么隶属函数定义则为

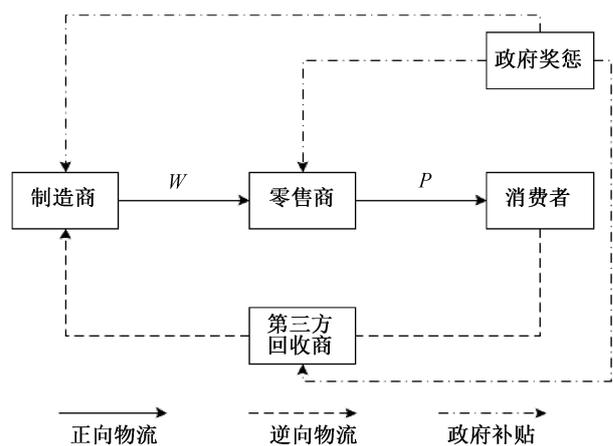


图1 政府奖惩下闭环供应链结构

Fig. 1 The structure of closed loop supply chain under government rewards and punishments

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & (a \leq x \leq b) \\ \frac{x-c}{b-c} & (b \leq x \leq c) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

若有 $b \neq 0$, 则有:

$$d\tilde{M} = \begin{cases} (da, db, dc), & d > 0 \\ (dc, db, da), & d < 0 \end{cases}$$

若有 $\tilde{M} = (a_1, b_1, c_1), \tilde{N} = (a_2, b_2, c_2)$ 两个三角模糊函数,则有:

$$\tilde{M} + \tilde{N} = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2)$$

$$\tilde{M} \times \tilde{N} = (a_1 a_2, b_1 b_2, c_1 c_2)$$

$\tilde{M} = (a, b, c)$ 三角模糊数的期望值 $E(x)$:

$$E(\tilde{M}) = \frac{\int_0^1 \left[\frac{L_{\tilde{M}}^{-1}(e) + R_{\tilde{M}}^{-1}(e)}{2} \right] de}{\int_0^1 e de} = \frac{e \int_0^1 \left[\frac{a(b-a)e + c + (b-c)e}{2} \right] de}{\int_0^1 e de} = \frac{a + 2b + c}{4}$$

其中 $e(0 < e \leq 1)$ 为隶属度变化区间内任意水平值, $L_{\tilde{M}}^{-1}(e), R_{\tilde{M}}^{-1}(e)$ 分别为 $L_{\tilde{M}}(e), R_{\tilde{M}}(e)$ 的反函数。

1.2 符号约定

W : 制造商单位产品的批发价格; P : 零售商单位产品的零售价格; C_m : 制造商单位产品的生产成本; C_r : 制造商单位产品的再制造成本; K : 政府对

回收方的奖惩系数; A :回收方提供给消费者的单位回收价; B :制造商委托回收方回收支付的单位回收价,即转移价格; τ :回收方的回收率; τ_0 :政府对回收方规定的产品最低回收率门槛; ξ :回收废旧产品的固定成本系数; π_i^j : $i = \{M, R\}$,其中 M 为制造商利润, R 为零售商。 $j = \{RM, RR, RMT\}$, RM 为制造商负责回收, RR 为零售商负责回收, RMT 为第三方负责回收。

1.3 基本假设

假设 1:政府制定奖惩政策是为了最大化地提高回收方的回收率,当 $\tau > \tau_0$ 时,表示政府对回收方实行奖励措施;当 $\tau < \tau_0$ 时,则表示政府对回收方进行罚款。 K 为政府提供的奖惩系数,政府对回收方的奖惩为 $K(\alpha - \beta P)(\tau - \tau_0)$ [1]。

假设 2:在 CLSC 中我们假设回收废弃产品的数量为 $\tau D(P)$,其中 $0 < \tau < 1$ 。回收废旧产品的成本包含两个部分:第一个部分为 $A\tau(\alpha - \beta P)$,表示基于回收价格而变化的回收成本;第二个部分为 $\xi\tau^2$,表示回收过程中发生的固定成本 [22]。

假设 3:单位再制造成本小于单位新产品制造成本,即 $C_m < C_r$ 。为确保回收和再制造活动的经济性使得 $B \leq C_m - C_r$ 。

假设 4:零售商是 Stackelberg 博弈的领导者,而制造商和第三方回收商都是博弈的追随者,均以自身利益最大化做决策。市场是完全开放的,博弈各方处于完全信息状态。

2 建立模型

2.1 零售商主导下制造商回收奖惩制造商模型

RM 模型中制造商为回收方,零售商作为 CLSC 的主导者,最先制定产品的单位零售价 P ,制造商依据 P 制定批发价 W 和回收率 τ 。此时利润函数为

$$\text{Max}E(\pi_M^{\text{RM}}) = (\alpha - \beta P)(W - C_m) + (C_m - C_r)(\alpha - \beta P)\tau + K(\alpha - \beta P)(\tau - \tau_0) -$$

$$W = \frac{2\zeta[E(\alpha) + E(\beta)C_m + \tau_0E(\beta)K] - H^2[E(\alpha) - E(\beta)P]E(\beta)}{4E(\beta)\zeta} \quad (5)$$

$$W_{\text{RM}}^* = \frac{8\zeta E(\alpha) + 8\zeta\tau_0 E(\beta)K - H^2 E^2(\beta)\tau_0 K - 3H^2 E(\beta)E(\alpha) + 8\zeta E(\beta)C_m - E^2(\beta)C_m H^2}{16\zeta E(\beta) - 4E^2(\beta)H^2} \quad (6)$$

$$\tau_{\text{RM}}^* = \frac{HE(\alpha) - HE(\beta)C_m - \tau_0 HE(\beta)K}{8\zeta - 2H^2 E(\beta)} \quad (7)$$

$$P_{\text{RM}}^* = \frac{3\zeta E(\alpha) - H^2 E(\alpha)E(\beta) + \zeta E(\beta)C_m + \zeta\tau_0 E(\beta)K}{4\zeta E(\beta) - H^2 E^2(\beta)}, H = (C_m - C_r - A + K) \quad (8)$$

$$A(\alpha - \beta P)\tau - \xi\tau^2 \quad (1)$$

$$\text{Max}E(\pi_R^{\text{RM}}) = (P - W)(\alpha - \beta P) \quad (2)$$

令 $P = W + m$ 并代入(1)式中对 W, τ 求一阶偏导。

$$\frac{\partial \pi_M^{\text{RM}}}{\partial W} = E(\alpha) + E(\beta)C_m - E(\beta)H\tau +$$

$$E(\beta)\tau_0 K - 2E(\beta)W$$

$$\frac{\partial \pi_M^{\text{RM}}}{\partial \tau} = H[E(\alpha) - E(\beta)P] - 2\zeta\tau$$

π_M^{RM} 关于 W 和 τ 的海塞矩阵为

$$H\pi_M^{\text{RM}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_M^{\text{RM}}}{\partial^2 W} & \frac{\partial^2 \pi_M^{\text{RM}}}{\partial W \partial \tau} \\ \frac{\partial^2 \pi_M^{\text{RM}}}{\partial \tau \partial W} & \frac{\partial^2 \pi_M^{\text{RM}}}{\partial^2 \tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2E(\beta) & -E(\beta)H \\ -E(\beta)H & -2\zeta \end{bmatrix}$$

$$|H_1| = -2E(\beta) < 0, \text{当 } 4E(\beta)\zeta - E^2(\beta)X^2 >$$

0 时,即 $K < \frac{2\sqrt{\zeta}}{\sqrt{E(\beta)}} - C_m + C_r + A$ 时, $|H_2| > 0$,海

塞矩阵是负定,可知(1)是凹函数,可以求得唯一

的最优解。令 $\frac{\partial \pi_M^{\text{RM}}}{\partial W} = 0, \frac{\partial \pi_M^{\text{RM}}}{\partial \tau} = 0$ 可得:

$$W = \frac{E(\alpha) + E(\beta)C_m - HE(\alpha) + \tau_0 E(\beta)K}{2E(\beta)} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{H[E(\alpha) - PE(\beta)]}{2\zeta} \quad (4)$$

将式(3)代入式(2)可得(式5)。

将式(5)代入式(2)对 P 求偏导可得制造商的最优批发价格为式(6)。

制造商的最优回收率为式(7)。

零售商的最优零售价为式(8)。

2.2 零售商主导下零售商回收奖惩零售商模型

RR 模型中零售商作为回收方,制造商需支付给零售商单位价格 B 以获得废旧商品。零售商首先决定零售价 P 和回收率 τ ,制造商为跟随者设定批发价 W 。此时利润函数为

$$\begin{aligned} \text{Max}E(\pi_M^{\text{RR}}) &= (\alpha - \beta P)(W - C_m) + \\ & (C_m - C_r)(\alpha - \beta P)\tau - B\tau(\alpha - \beta P) \quad (9) \\ \text{Max}E(\pi_R^{\text{RR}}) &= (\alpha - \beta P)(P - W) + (B - \\ & A)(\alpha - \beta P)\tau + K(\alpha - \beta P)(\tau - \tau_0) - \xi\tau^2 \end{aligned} \quad (10)$$

令 $P = W + m$ 并代入式(10)对 W 求偏导,并令 $\frac{\partial \pi_M^{\text{RR}}}{\partial W} = 0$ 可得:

$$W = \frac{E(\alpha) + E(\beta)C_m - Y\tau E(\beta)}{2E(\beta)} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)中对 P, τ 分别求偏导可得

$$\frac{\partial \pi_R^{\text{RR}}}{\partial \tau} = [E(\alpha) - PE(\beta)](2X + Y) - 4\zeta\tau,$$

$$\frac{\partial \pi_R^{\text{RR}}}{\partial P} = 3E(\alpha) + E(\beta)C_m - (2X +$$

$$Y)\tau E(\beta) + 2K\tau_0 E(\beta) - 4E(\beta)P$$

π_M^{RR} 关于 P 和 τ 的海塞矩阵为

$$H\pi_M^{\text{RR}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_M^{\text{RR}}}{\partial^2 P} & \frac{\partial^2 \pi_M^{\text{RR}}}{\partial P \partial \tau} \\ \frac{\partial^2 \pi_M^{\text{RR}}}{\partial \tau \partial P} & \frac{\partial^2 \pi_M^{\text{RR}}}{\partial^2 \tau} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -4E(\beta) & -E(\beta)(2X + Y) \\ -E(\beta)(2X + Y) & -4\zeta \end{bmatrix}$$

$|H_1| = -2E(\beta) < 0$, 当 $16E(\beta)\zeta - E^2(\beta)(2X + Y)^2 > 0$ 时, 即 $K < \frac{2\sqrt{\zeta}}{\sqrt{E(\beta)}} - \frac{1}{2}C_m + \frac{1}{2}C_r + 2A -$

$2B$ 时, $|H_2| > 0$, 海塞矩阵是负定, 得证式(9) 是凹函数, 可以求得唯一的最优解。令 $\frac{\partial \pi_R^{\text{RR}}}{\partial P} = 0, \frac{\partial \pi_R^{\text{RR}}}{\partial \tau} = 0$ 可得:

$$\tau = \frac{[E(\alpha) - PE(\beta)](2X + Y)}{4\zeta} \quad (12)$$

$$P = \frac{3E(\alpha) + E(\beta)C_m - (2X + Y)\tau E(\beta) + 2K\tau_0 E(\beta)}{4E(\beta)} \quad (13)$$

联立式(12)、式(13)得出制造商的最优批发价格为式(14)。

$$W_{\text{RR}}^* = \frac{16\zeta E(\alpha) - 4X^2 E(\alpha) E(\beta) - 6XYE(\alpha) E(\beta) - 2E(\alpha) E(\beta) Y^2 + 2Y^2 K\tau_0 E^2(\beta)}{32\zeta E(\beta) - 2E^2(\beta)(2X + Y)^2} + \frac{16\zeta E(\beta) C_m - 4X^2 E^2(\beta) C_m - 2XYE^2(\beta) C_m + 4XYK\tau_0 E^2(\beta)}{32\zeta E(\beta) - 2E^2(\beta)(2X + Y)^2} \quad (14)$$

$$P_{\text{RR}}^* = \frac{12\zeta E(\alpha) + 4\zeta E(\beta) C_m + 8K\tau_0 E(\beta) - E(\alpha) E(\beta)(2X + Y)^2}{16\zeta E(\beta) - (2X + Y)^2 E^2(\beta)} \quad (15)$$

注: $X = (B - A + K), Y = (C_m - C_r + B)$

零售商的最优回收率:

$$\tau_{\text{RR}}^* = \frac{[E(\alpha) - E(\beta)C_m - 2K\tau_0 E(\beta)](2X + Y)}{16\zeta - (2X + Y)^2 E(\beta)}$$

零售商的最优零售价为式(15)。

2.3 零售商主导下第三方回收奖惩第三方模型

RMT 模型中第三方回收商负责回收, 制造商需支付给第三方回收商单位价格 B 以获得废旧商品。零售商首先确定市场零售价 P , 然后制造商设定批发价 W , 第三方确定回收率 τ 。此时利润函数为

$$\text{Max}E(\pi_M^{\text{RMT}}) = (\alpha - \beta P)(W - C_m) + (C_m - C_r)(\alpha - \beta P)\tau - B\tau(\alpha - \beta P) \quad (16)$$

$$\text{Max}E(\pi_R^{\text{RMT}}) = (P - W)(\alpha - \beta P) \quad (17)$$

$$\text{Max}E(\pi_T^{\text{RMT}}) = (B - A)(\alpha - \beta P)\tau + K(\alpha - \beta P)(\tau - \tau_0) - \xi\tau^2 \quad (18)$$

对式(18)中 τ 求偏导, 并令 $\frac{\partial \pi_T^{\text{RMT}}}{\partial \tau} = 0$ 可得:

$$\tau = \frac{X[E(\alpha) - E(\beta)P]}{2\zeta} \quad (19)$$

令 $P = W + m$, 对式(17)中 W 求偏导, 并令

$\frac{\partial \pi_M^{\text{RMT}}}{\partial W} = 0$ 可得:

$$W = \frac{E(\alpha) + E(\beta)C_m - X\tau E(\beta)}{2E(\beta)} \quad (20)$$

将式(19)代入式(20)中可得

$$W = \frac{2\zeta E(\alpha) + E(\beta)C_m - XYE(\alpha)E(\beta) + E^2(\beta)XYP}{4E(\beta)\zeta} \quad (21)$$

将式(21)代入式(17)中对 P 求偏导, 并令

$\frac{\partial \pi_M^{\text{RMT}}}{\partial P} = 0$, 可得制造商的最优批发价格为

$$W_{\text{RMT}}^* = \frac{8\zeta E(\alpha) + 8\zeta E(\beta)C_m - 3E(\alpha)E(\beta)XY - E^2(\beta)XYC_m}{16E(\beta)\zeta - 4E^2(\beta)XY}$$

制造商的最优回收率为

$$\tau_{\text{RMT}}^* = \frac{X[E(\alpha) - E(\beta)C_m]}{8\zeta - 2E(\beta)XY}$$

零售商的最优零售价为

$$P_{RMT}^* = \frac{3\zeta E(\alpha) - E(\alpha)E(\beta)XY + \zeta E(\beta)C_m}{4E(\beta)\zeta - E^2(\beta)XY}$$

策有利于减少零售价和增加废旧品回收率,从而增加产品的需求量,制造商作为上游企业接到零售商的订单增加,其利润必然也随之增加。

引理 2、引理 3 表明:伴随政府奖惩力度的加大降低产品的销售价格,消费者可以从中获利,同时降低了制造商的批发价格,从而刺激零售商增加订购量。

3 模型分析

引理 1 表明:RM、RR 模式下,制造商的收益远远大于零售商的收益。主要因为政府实行奖惩政

引理 1 $\pi_M > \pi_R$

$$\begin{aligned} \pi_M^{RM} - \pi_R^{RM} &= \frac{E^2(\alpha)\zeta - 2\zeta E(\alpha)E(\beta)[K\tau_0 + C_m] + \zeta E^2(\beta)K^2\tau_0^2 + 2\zeta E^2(\beta)KC_m\tau_0 + \zeta E^2(\beta)C_m^2}{4E(\beta)[4\zeta - 2E(\beta)H^2]} > 0 \\ \pi_M^{RR} - \pi_R^{RR} &= \frac{[16\zeta + YE(\beta) - 4X^2E(\beta)]\zeta E^2(\alpha) + 16E^2(\beta)Kt_0(2\zeta Kt_0 - \zeta C_m - Kt_0)[XE(\beta)Kt_0 - 4](\zeta + 1)(Y + X^2) + 8E(\alpha)E(\beta)\zeta C_m(C_m - 4Kt_0)[4\zeta - XE(\beta)][1 + 8E(\beta)\zeta] + [4X^2E^3(\beta)C_m + 8Y^2E(\alpha)E^2(\beta)\zeta](4Kt_0 + C_m)}{E(\beta)[4E(\beta)X^2 + 4E(\beta)XY + E(\beta)Y^2 - 16\zeta]^2} > 0 \\ \pi_M^{RMT} - \pi_R^{RMT} &= \frac{[E(\alpha) - E(\beta)\zeta C_m]^2}{E(\beta)[4\zeta - XYE(\beta)]^2} > 0 \end{aligned}$$

引理 2 $W_{RMT}^* > W_{RR}^* > W_{RM}^*$

$$\begin{aligned} W_{RMT}^* - W_{RR}^* &= \frac{128\zeta^2 Kt_0 + [16H^2\zeta - 8Y^2\zeta - 16XY\zeta + H^2Y^2E(\beta) + 4H^2X^2E(\beta)][E(\alpha) - E(\beta)C_m]}{-4[-E(\beta)H^2 + 4\zeta][4E(\beta)X^2 + 4E(\beta)XY + E(\beta)Y^2 - 16\zeta]} + \\ &\quad \frac{(4X^2 + 5Y^2 + 12XY)H^2E^2(\beta)Kt_0 - (16H^2 + 32X^2 + 24Y^2 + 64XY)E(\beta)\zeta Kt_0}{-4[-E(\beta)H^2 + 4\zeta][4E(\beta)X^2 + 4E(\beta)XY + E(\beta)Y^2 - 16\zeta]} > 0 \\ W_{RR}^* - W_{RM}^* &= \frac{[XY^3E(\beta) - 4X^3YE(\beta) - 8Y^2][E(\alpha) - E(\beta)C_m] + (8X + 4Y)[4\zeta - XYE(\beta)]KYE(\beta)\tau_0}{4[4\zeta - XYE(\beta)][16\zeta - 4E(\beta)X^2 - 4E(\beta)XY - E(\beta)Y^2]} > 0 \end{aligned}$$

引理 3 $\frac{\partial W_{RM}^*}{\partial K} < 0, \frac{\partial W_{RR}^*}{\partial K} < 0, \frac{\partial W_{RMT}^*}{\partial K} < 0$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_{RM}^*}{\partial K} &= \frac{32\zeta^2\tau_0 + H^2E^2(\beta)(2C_m + H^2\tau_0)(1 - H) - 8\zeta E(\beta)[HE(\alpha) + \tau_0] + 4H\zeta E(\beta)(3H\tau_0 - 4C_m - 2K\tau_0)}{4[-E(\beta)H^2 + 4\zeta]^2} < 0 \\ \frac{\partial W_{RR}^*}{\partial K} &= \frac{(Y^4 + 4X^2Y^2 + 4X^2Y + 4XY^3 - 2KY^2)E(\beta)^2t_0 + (64X + 32Y - 16)[E(\beta)C_m + E(\alpha)]\zeta}{-[2XE(\beta) - 16\zeta + YE(\beta)]^2} + \\ &\quad \frac{(2Y^2 + 4XY^2 - 4X^2 - Y^3 - 4X^2Y)[E(\beta)C_m + E(\alpha)]E(\beta) - (16Y^2 + 32KY + 32XY)E(\beta)\zeta t_0}{-[2XE(\beta) - 16\zeta + YE(\beta)]^2} < 0 \\ \frac{\partial W_{RMT}^*}{\partial K} &= \frac{Y\zeta[E(\beta)C_m - E(\alpha)]}{[4\zeta - XYE(\beta)]^2} < 0 \end{aligned}$$

引理 4 $\tau_{RM}^* > \tau_{RR}^* > \tau_{RMT}^*$

$$\begin{aligned} \tau_{RM}^* - \tau_{RR}^* &= \frac{[256H^2 - 64(2X + Y)^2][E(\alpha)\zeta + E(\beta)\zeta C_m] + (1 - 2H)HE^2(\beta)(2X + Y)C_m}{2[16\zeta - (2X + Y)E(\beta)][4\zeta - E(\beta)H^2]} + \\ &\quad \frac{(16H + 32X + 16Y)E(\beta)\zeta K\tau_0 + (1 - 4H)H(2X + Y)E(\beta)K\tau_0 + 2H^2(2X + Y)E(\alpha)E(\beta)}{2[16\zeta - (2X + Y)E(\beta)][4\zeta - E(\beta)H^2]} > 0 \\ \tau_{RR}^* - \tau_{RMT}^* &= \frac{8YE(\alpha)\zeta + (4X^2 - XY^2)E(\alpha)E(\beta) + (XY - 8C_m)YE(\beta)}{2[4\zeta - XYE(\beta)][16\zeta - 4E(\beta)X^2 - 4E(\beta)XY - E(\beta)Y^2]} + \\ &\quad \frac{(4XY^2 + 8X^2)E^2(\beta)(K\tau_0 - 4X^3C_m) - (32X + 16Y)E(\beta)\zeta K\tau_0}{2[4\zeta - XYE(\beta)][16\zeta - 4E(\beta)X^2 - 4E(\beta)XY - E(\beta)Y^2]} > 0 \end{aligned}$$

引理 5 $\frac{\partial \tau_{RM}^*}{\partial K} > 0, \frac{\partial \tau_{RR}^*}{\partial K} > 0, \frac{\partial \tau_{RMT}^*}{\partial K} > 0$

$$\frac{\partial \tau_{RM}^*}{\partial K} = \frac{4\zeta[E(\alpha) - E(\beta)C_m] + (HC_m - \tau_0)H^2E^2(\beta) + H^2E(\beta)[E(\alpha) - E(\beta)K\tau_0] - 4E(\beta)\zeta\tau_0(H + K)}{2[4\zeta - E(\beta)H^2]^2} > 0$$

$$\frac{\partial \tau_{RR}^*}{\partial K} = \frac{32\zeta[E(\alpha) - E(\beta)C_m - 2E(\beta)K\tau_0 - E(\beta)\tau_0(2X + Y)] + 8E^2(\beta)\tau_0XY + (2X + Y)[8E^2(\beta)K\tau_0 + E^2(\beta)C_m - E(\alpha)E(\beta)] + 2E^2(\beta)\tau_0(4X^2 + Y^2)}{[2E(\beta)X - 16\zeta + E(\beta)Y]^2} > 0$$

$$\frac{\partial \tau_{RMT}^*}{\partial K} = \frac{2\zeta[E(\alpha) - E(\beta)C_m]}{[4\zeta - E(\beta)XY]^2} > 0$$

引理 4、引理 5 表明：在 RM 模式下，废旧产品的回收率最高。政府奖惩力度提升的同时，也增加了废旧产品的回收率，达到资源二次利用的效果。这表明奖惩机制的实施不仅对消费者有利，还能提高废旧电子产品的回购价和回收率、回收方的回收积极性以及环境效益。

4 算例验证

以上部分分别研究 RM、RR、RMT 三种情形，利用逆向归纳法得到了均衡解，并对三种均衡解进行了比较，为了检验以上结论的正确性，通过 MATLAB 7.0 对本文模型进行计算验证。假设 $C_m = 80, C_r = 40, \zeta = 8\ 000, A = 10, B = 12, \tau_0 = 0.5, \beta = (1, 2, 3), \alpha = (600, 800, 1\ 000)$ 。则期望 $E(\alpha) = (600 + 2 \times 800 + 1\ 000)/4 = 800, E(\beta) = (1 + 2 \times 2 + 3)/4 = 2$ 。由图 2、图 3 可知政府奖惩系数在各个模型下对制造商以及零售商的利润的影响。由图 4、图 5 可知政府奖惩系数对批发价格以及废旧产品回收率的影响。

图 2、图 3 表明：在 RM、RR、RMT 三种模式下，制造商与零售商的利润都呈现相同的变化趋势，即在 RM、RR 模式下，制造商与零售商的利润同呈现上升趋势，且 RR 模式下的上升幅度更为明显。在 RMT 模式下，制造商与零售商利润下降，随之政府奖惩系数增加，利润下降趋势愈加明显。且与其他两种模式差距拉大。

图 4 表明：RM、RR、RMT 模式下，产品的批发价格同呈下降趋势，并且 RM 模式下的批发价格下降幅度最大。相较于其他两种回收模式，RM 模式下的批发价格最低，RMT 模式下批发价格最高，伴随政府奖惩系数的提高，相较于另外两种回收模式，零售价之间的差距不断扩大。

图 5 表明：RM、RR、RMT 回收模式下，废旧产品的回收率都获得提升，在 RM 模式下的回收率提升最明显。相比其他两种回收模式，RM 模式下的废旧品回收率最高。这是因为回收方为了避免政府对企业的惩罚，会积极对产品进行回收，以获得政府的奖励。

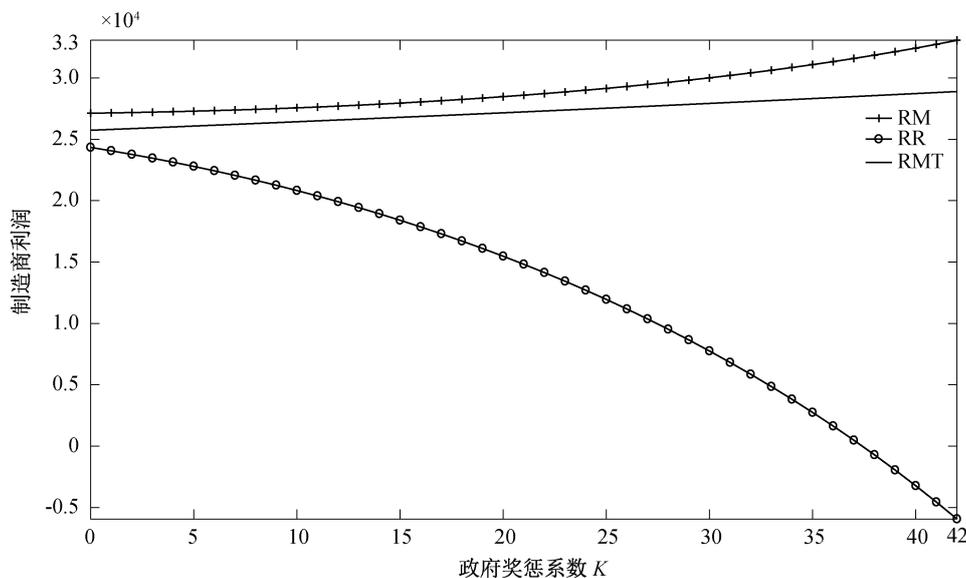


图 2 政府奖惩系数对制造商利润的影响

Fig. 2 The influence of government reward and punishment coefficient on manufacturer's profit

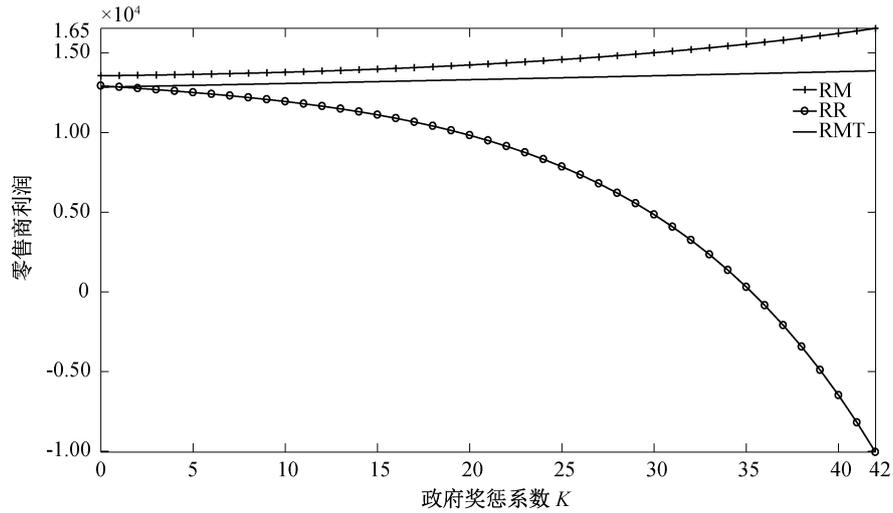


图 3 政府奖惩系数对零售商利润的影响

Fig. 3 The influence of government reward and punishment coefficient on Retailer's profit

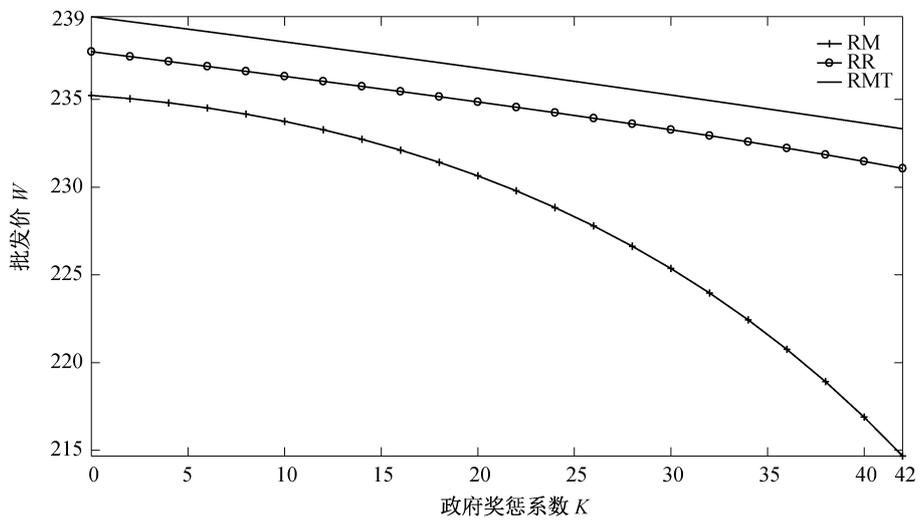


图 4 政府奖惩系数对批发价格的影响

Fig. 4 The influence of government reward and punishment coefficient on wholesale price

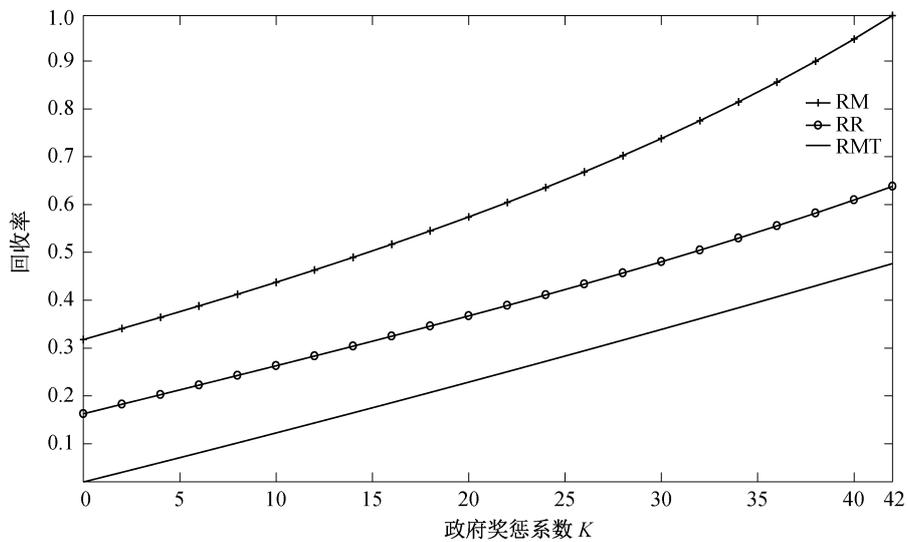


图 5 政府奖惩系数对废旧产品回收率的影响

Fig. 5 The influence of government reward and punishment coefficient on the recovery rate of waste products

5 结论

1) 在 RM 模式下, 产品的批发价格最低且废旧产品回收率最高。RM、RR、RMT 模式, 奖惩力度的提高可降低产品的批发价格和零售价格, 提高 WEEE 的回收率。在 RM 和 RR 模式下, WEEE 回收效率提高了, 回收比例的提高意味着制造商可以节约更多的生产成本, 制造商的利润是远远大于零售商的利润。

2) 供应链整体利润的大小受到政府奖惩系数的影响, 政府必须实行合理的奖惩力度, 才可以提高回收方的回收率, 使得无论是制造商、零售商还是第三方回收方均获得收益, 积极地参与到回收再制造活动中来。

需要指出的是, 本文在研究过程中仅考虑了需求的模糊性, 并且回收方的回收率假设都是相同的, 然而现实生活中的情况不仅如此。因此, 在今后的研究中需要进一步的限制条件, 使研究更加贴近实际。

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] LIU H, LEI M, DENG H, et al. A Dual Channel, Quality-based Price Competition Model for the WEEE Recycling Market with Government Subsidy[J]. *Omega*, 2016, 59: 290-302.
- [3] GAO J, HAN H, HOU L, et al. Pricing and Effort Decisions in a Closed-loop Supply Chain under Different Channel Power Structures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(20): 2043-2057.
- [4] RAD R S, NAHAVANDI N. A Novel Multi-objective Optimization Model for Integrated Problem of Green Closed Loop Supply Chain Network Design and Quantity Discount[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 1549-1565.
- [5] REZAPOUR S, FARAHANI R, FAHIMNIA B, et al. Competitive Closed-loop Supply Chain Network Design with Price-dependent Demands[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 93: 251-272.
- [6] 邓爱民, 潘再阳. 模糊需求下三级 CLSC 协调的收入共享契约研究[J]. *科技与管理*, 2010, 12(01): 72-75+93.
- [7] 桑圣举, 张强. 模糊需求环境下的供应链契约协调机制研究[J]. *山东大学学报: 工学版*, 2012, 42(03): 63-72.
- [8] 魏慕婧, 滕春贤, 孙嘉轶. 模糊环境下基于回收再利用闭环供应链定价决策[J]. *统计与决策*, 2014(21): 50-53.
- [9] KELLE P, SILVER. Forecasting the Returns of Reusable Containers[J]. *Journal Operations Management*, 1989, 8(1): 17-35.
- [10] 陈盼, 施晓清. 京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估[J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1976-1986.
- [11] 杨海超, 张盛, 蒋洪强, 等. 电子废弃物管理研究热点对比与可视化分析[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(2): 232-237.
- [12] 董芳雨. 我国城市居民电子废弃物回收发展前景预测——基于 GM(1, 1) 及灰色残差模型[J]. *财经界: 学术版*, 2013(10): 22-24.
- [13] 万凤娇, 于建红. 基于灰色马尔可夫链的电子废弃物回收量预测研究[J]. *物流技术*, 2014, 33(7): 113-115+172.
- [14] 赵迪, 宋小龙, 杨东, 等. 电子废弃物回收处理系统环境绩效评估方法及应用[J]. *生态经济*, 2020, 36(05): 182-187+207.
- [15] HEYDARI J, GOVINDAN K, JAFARI A. Reverse and Closed Loop Supply Chain Coordination by Considering Government Role[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 379-398.
- [16] SHU T, PENG Z Z, CHEN S, et al. Government Subsidy for Remanufacturing or Carbon Tax Rebate: Which Is Better for Firms and a Low-Carbon Economy[J]. *Sustainability*, 2017, 9(1): 156.
- [17] 易余胤, 梁家密. 奖惩机制下的闭环供应链混合回收模式[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(1): 215-223.
- [18] 王文宾, 丁军飞, 达庆利. 奖惩机制下闭环供应链的成本共担-利润共享契约[J]. *控制与决策*, 2019, 34(4): 843-850.
- [19] 李新然, 王奇琦. 政府补贴下考虑销售努力的闭环供应链研究[J]. *科研管理*, 2017, 38(8): 51-63.
- [20] 聂佳佳, 文宾, 吴庆. 奖惩机制对零售商负责回收闭环供应链的影响[J]. *工业工程与管理*, 2011, 16(2): 52-59.
- [21] 熊中楷, 黄德斌, 熊榆. 政府奖励条件下基于再制造的闭环供应链模式[J]. *工业工程*, 2011, 14(2): 1-5.
- [22] 甘信华, 袁潮清. 碳排放和回收奖惩政策约束下的闭环供应链决策[J]. *江苏科技大学学报: 自然科学版*, 2018, 32(6): 846-854.

(责任编辑 王利君)