

废旧快递包装回收最优激励策略研究

郑克俊, 邹小平

(广东科学技术职业学院 商学院, 广东 珠海 519090)

摘要: **目的** 针对快递包装物制造商、快递企业和消费者回收废旧快递包装的积极性不高、回收难等问题, 研究多方博弈下的废旧快递包装回收最优激励策略。**方法** 采用博弈论方法, 构建闭环供应链模型, 分别求出了快递企业的最优回收决策和政府的最优激励策略。**结果** 政府引入激励机制, 效果要明显好于不采取激励机制; 政府的激励力度对废旧快递包装供应链企业的利润、消费者剩余和社会总福利均有显著的影响, 存在使社会总福利最大化的最优激励力度 β^* 值。**结论** 最低回收利用率、消费者最低返还率和政府激励力度这3个指标是政府激励机制的最关键参数, 政府应当以使社会总福利最大时的激励力度值 β^* 为最优策略来建立激励机制, 这样既能使制造商和快递企业通过回收再利用来增加利润, 又能提高消费者参与回收的积极性, 增加社会总福利, 实现消费者、企业和社会共赢的良性发展目标。

关键词: 快递包装; Stackelberg 博弈; 回收再利用; 激励机制; 政府激励

中图分类号: F272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)23-0305-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.23.036

Optimal Incentive Strategy of Waste Express Packaging Recycling

ZHENG Ke-jun, ZOU Xiao-ping

(School of Business, Guangdong Polytechnic of Science and Technology, Guangdong Zhuhai 519090, China)

ABSTRACT: The work aims to study the optimal incentive strategy of waste express packaging recycling under multi-player game aiming at the problems of low enthusiasm and difficulty in recycling of waste express packaging by express packaging manufacturers, express enterprises and consumers. The method of game theory was adopted to construct a closed-loop supply chain model and obtain the optimal recycling decision of express enterprises and the optimal incentive strategy of the government. When the government introduced incentive mechanism, the effect was obviously better than that in the situation without incentive mechanism. The incentive strength of the government had a significant impact on the profits of waste express packaging supply chain enterprises, consumer surplus and total social welfare. There was an optimal incentive strength value β^* to maximize the total social welfare. The lowest recycling rate, the lowest return rate of consumers and the incentive strength of the government are the most critical parameters of the governmental incentive mechanism. The government should establish the incentive mechanism with the incentive strength value β^* when the total social welfare is the largest as the optimal strategy, which can not only enable manufacturers and express enterprises to increase profits through recycling, but also improve the enthusiasm of consumers to participate in recycling, thus increasing total social welfare and achieving the benign development goal of win-win for consumers, enterprises and society.

KEY WORDS: express packaging; Stackelberg game; recycling; incentive mechanism; governmental incentives

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 广东省教育厅重大科研项目(2017GWZDXM002); 广东省科技创新战略专项资金“攀登计划”项目 (pdjh2020a0964); 广东省教育厅科研项目 (2019GWTSCX026)

作者简介: 郑克俊 (1968—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为物流与供应链; 邹小平 (1979—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为物流管理。

2021 年全国快递业务量超过 1 085 亿件, 快递包装物废弃物也迅猛增长。2020 年包装废弃物大约 1 500 万 t^[1], 2025 年快递包装材料消耗量预计为 4 127.05 万 t^[2], 快递包装污染给环境带来巨大压力。为了实现我国快递包装的减量化、循环再利用和绿色化的治理目标, 国家发布了《关于协同推进快递业绿色包装工作的指导意见》和《关于加快推进快递包装绿色转型的意见》等政策文件, 鼓励社会各界开展各种形式的快递包装绿色化转型与治理。在国家政策推动下, 快递公司和互联网回收平台纷纷开展了回收再利用的有益尝试。京东、菜鸟、苏宁分别推出“青流箱”、“回箱计划”和“共享快递盒”等循环使用快递包装的行动计划, 互联网回收平台推出“爱回收”^[3]、“纸壳别跑”^[4]、“收纸拉”^[5]、“多收哥”^[6]等品牌的包装回收业务。国内外学者也纷纷建言献策, 提出了各种各样的促进快递包装物循环利用、减量化与绿色化的策略。

已有较多的文献分别对快递包装回收策略或者政府的回收激励机制进行研究, 提出了网络众包^[5]、政府补贴^[6-7]、专利保护^[8]、税费优惠^[9]、差别定价^[10]等回收模式或回收策略, 这些研究对政府制定促进快递包装物的回收政策发挥了积极的参谋作用。然而在现实生活中, 由于快递包装物再利用的价值并不是很高, 快递包装物的制造商、快递企业和消费者出于各自利益最大化的考虑, 缺乏回收的积极性^[11]。为了节约资源, 保护环境, 政府有必要制定相关的激励措施, 平衡企业、消费者和社会的利益。Liu 等^[12]研究了不同竞争情境下政府补贴的影响, Ji 等^[13]基于演化博弈理论, 研究了制造商和回收商之间交易过程中的动态博弈, 但上述研究均以废旧家电为研究对象, 且未考虑政府激励力度大小对决策各方的影响。丁灿等^[14]利用系统动力学方法, 对政府补贴、税收优惠政策以及企业自主设置回收返利金和环保宣传费用等措施进行政策模拟, 分别从政府和企业层面分析比较出快递包装回收的最优策略。张汉江等^[15]以政府作为决策主体, 构建 Stackelberg 主从博弈模型, 分析求解了各主体的最优决策。何海龙等^[16]采用博弈模型研究快递包装回收再利用激励问题, 认为政府可通过回收计划积分奖励等调动消费者参与积极性, 对激励和监管则需要适度。虽然这些研究均已经考虑了政府在快递包装回收中发挥的作用, 但对激励的力度较少涉猎。此外, 由于快递包装回收参与方之间存在利益上的矛盾和冲突, 采用博弈论的方法来寻求彼此之间的均衡是有效的。鉴于此, 文中引入政府激励力度因子, 结合快递包装回收成本高且回收经济价值低的特点, 在系统考虑消费者返还率、环境效益等因素的基础上构建快递包装回收的闭环供应链模型, 采用博弈论研究政府激励力度对快递包装物制造商、快递企业和消费者的影响, 希望对政府制定激励机制、以及快递包装制造商和

快递企业的制定回收策略提供决策支持。

1 建模

1.1 问题描述

文中建立由快递包装制造商、快递企业、消费者和政府相互关联的闭环供应链, 见图 1。

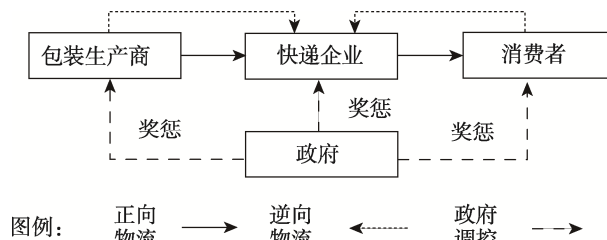


图 1 快递包装回收闭环供应链
Fig.1 Closed-loop supply chain of express packaging recycling

快递包装生产商使用原材料和部分可再利用的包装物生产新的快递包装物, 快递企业一方面将新的快递包装物销售给消费者使用, 同时也从消费者处回收部分可再利用的包装物交给包装生产商再利用, 而消费者则将可再利用的包装物按一定价格返还给快递企业。政府依据生产者责任延伸制和污染者付费的原则制定相关的奖惩标准, 对制造商、快递企业和消费者实施奖惩。

1.2 变量假设与参数说明

从现有研究^[1-3]看, 目前能回收再利用的快递包装物主要为纸箱。本文以回收快递纸箱为例建立模型, 基于信息对称和利益最大化进行决策。建模涉及变量和参数列表 1。

文中引入消费者返还率 α 作为决策变量, α 受回收价格 P_r 的影响, 参考文献[18-19], 假设 α 服从[0,1]均匀分布, 则 α 取值见式 (1)。

$$\alpha = \begin{cases} 0 & P_r \leq 0 \\ \frac{P_r}{P_{\max}} & 0 < P_r < P_{\max} \\ 1 & P_r \geq P_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

对式 (1) 解释: 如果 $P_r \leq 0$, 意味着消费者要无偿返还或者支付一定回收费用给快递企业才能将废弃包装物返还给快递企业, 消费者出于利益的考虑会选择直接废弃, 此时快递企业将无法获得回收资源, 因此 $\alpha = 0$; $P_r > 0$ 表示快递企业支付回收价格给消费者, 因为 α 服从[0,1]均匀分布, 所以 $\alpha = \frac{P_r}{P_{\max}}$; 当回收价

表 1 变量与参数说明
Tab.1 Description of variables and parameters

变量或参数	含义说明	单位
P_b	快递企业按价格 P_b 回收消费者的纸箱	
P_m	快递企业将回收的包装物以价格 P_m 卖给包装制造商，即转移价格	
P_w	快递包装的批发价格	元/件
P_r	快递包装的回收价格	
P_n	新快递包装的单位估价	
Q	快递包装潜在需求量 ^[17] $Q=a-b\times P_b$ 。其中 a 为市场总容量， b 为市场需求的销售价格敏感度， $a, b > 0$ 。	件
C_m	用新材料生产的快递包装物的单位制造成本	
C_r	通过回收再利用生产的快递包装物的单位制造成本	
C_c	回收再利用节省的单位成本 $C_c=C_m-C_r$, $C_m > C_r$	元/件
C_w	不可再利用的快递包装物处理成本	
C_a	快递企业销售快递包装物的单位运营成本	
C_b	快递企业回收快递包装物的单位运营成本， $0 < C_a < C_b$	
α	消费者返还率	
λ	所回收的快递包装物的再利用率	%
δ	包装制造商的回收再利用率， $\delta=a\cdot\lambda$	
β	政府的奖惩力度， $0\leq\beta\leq1$ ，或 $0\leq\beta\leq100\%$	
Π_m	包装制造商的利润	
Π_e	快递企业利润	
$F(a)$	消费者效用函数	
U_c	消费者剩余	
E_e	快递包装回收产生的边际环保效益	元
E_p	快递包装未回收产生的边际环境污染效益	
Π_E	环境效益	
Π_g	政府收益	
Π_s	社会总福利	

格达到消费者期望回收价格 $P_{\max}$ 时，消费者愿意全部返还包装物，此时 $\alpha=1$ 。

文中假设政府制定的奖惩规则是：政府划定快递包装制造商最低回收利用率为 δ_0 ，消费者最低返还率为 α_0 。当快递包装制造商实际回收率超过 δ_0 时，对超额部分奖励，否则惩罚，单位奖惩额度不超过 P_w ；当消费者实际返还率大于 α_0 时，对超额部分奖励，否则惩罚，单位奖惩额度不超过 P_b 。假设政府的奖惩力度为 β 。

1.3 模型构建

1.3.1 快递包装制造商利润函数 Π_m

Π_m 由 5 个部分构成，依次是快递包装物的批发

利润、回收再利用节约的成本、废弃处理成本、制造商支付给快递企业的转移成本和政府的奖惩，函数关系见式（2）。

$$\begin{aligned} \Pi_m = & (P_w - C_m)Q + (C_m - C_r)Q\alpha\lambda - (1 - \lambda)C_wQ\alpha - \\ & P_mQ\alpha + (\alpha\lambda - \delta_0)QP_w\beta \end{aligned} \tag{2}$$

1.3.2 快递企业利润函数 Π_e

Π_e 由两部分构成，依次是快递包装物的销售利润、回收利润，函数关系见式（3）。

$$\Pi_e = (P_b - P_w - C_a)Q + (P_m - P_r - C_b)Q\alpha \tag{3}$$

1.3.3 消费者效用函数 $F(\alpha)$

消费者效用是指快递包装给消费者带来的满足

程度。快递包装物具有保护快递物品的作用,为了避免在运输途中物品毁损,消费者寄递物品时愿意支付远高于包装物本身价格的销售价格,即快递包装具有较高效用,但快件寄达后,包装物的对消费者的效用几乎为零。因此,假设 $F(\alpha)$ 由三部分构成,依次为:消费者愿意支付超过快递包装物价格的差额、消费者返还包装物所获得的补偿、政府对消费者的奖惩金额,函数关系见式(4)。

$$F(\alpha) = (P_n - P_b) + P_r\alpha + (\alpha - \alpha_0)\beta P_b \quad (4)$$

1.3.4 消费者剩余 U_c

消费者剩余是指快递包装消费者在使用与返还一定数量的快递包装物时所获得的总金额与实际付出的总金额之差。考虑到快递包装的闭环流动以及政府奖惩的调控作用,根据模型假设,建立消费者剩余函数 $U_c = Q \int_0^1 F(\alpha) d\alpha$, 求解得到式(5)。

$$U_c = (P_n - P_b)Q + \frac{1}{2}P_rQ + \left(\frac{1}{2} - \alpha_0\right)\beta P_bQ \quad (5)$$

1.3.5 环境效益 Π_E

环境效益 Π_E 由两部分构成,依次是快递包装物回收后所产生的保护效益、未回收所产生的污染效益,函数关系见式(6)。

$$\Pi_E = E_cQ\alpha - (1 - \alpha)\beta E_pQ \quad (6)$$

1.3.6 政府效益 Π_g

政府效益 Π_g 由两部分构成,依次是政府激励快递包装制造商的总收益、政府激励消费者的总收益,函数关系见式(7)。其中,总收益为政府收取的罚金与政府支出的奖金的差额。

$$\Pi_g = (\delta_0 - \delta)\beta P_wQ + \left(\alpha_0 - \frac{1}{2}\right)\beta P_bQ \quad (7)$$

1.3.7 社会总福利 Π_s

社会总福利 Π_s 由 5 个部分构成,分别是消费者剩余、制造商利润、快递企业利润、环境效益和政府效益之和,见式(8)。

$$\Pi_s = U_c + \Pi_m + \Pi_e + \Pi_E + \Pi_g \quad (8)$$

2 模型求解

式(2)与式(3)构成 Stackelberg 博弈,快递包装物制造商是 Stackelberg 博弈的领导者,快递企业是跟随者。在政府采取激励机制条件下,制造商和快递企业均以自身利益最大化为目标进行决策,制造商确定支付给快递企业的最优转移价格,而快递企业则根据制造商的决策行为来确定快递包装最优回收价格。

2.1 快递企业最优回收决策

2.1.1 最优回收价格

文中采用逆向归纳法求解。将 $Q = a - bP_b$ 代入式(3),分别求快递企业利润函数 Π_e 对回收价格 P_r 的一阶、二阶导数,得:

$$\frac{d\Pi_e}{dP_r} = \frac{(P_m - P_b - 2P_r)(a - bP_b)}{P_{\max}} \quad (9)$$

$$\frac{d^2\Pi_e}{dP_r^2} = -\frac{2(a - bP_b)}{P_{\max}} \quad (10)$$

在式(10)中, $P_{\max} > 0$, $a - bP_b > 0$, 所以二阶导数 $\frac{d^2\Pi_e}{dP_r^2} < 0$, 故 Π_e 是关于 P_r 的凹函数,令一阶导数 $\frac{d\Pi_e}{dP_r} = 0$, 求得:

$$P_r = \frac{P_m - C_b}{2} \quad (11)$$

将(11)式代入(2)式,分别求制造商利润函数 Π_m 对转移价格 P_m 的一阶、二阶导数,得:

$$\frac{d\Pi_m}{dP_m} = \frac{[(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda + C_b - C_w - 2P_m](a - bP_b)}{2P_{\max}} \quad (12)$$

$$\frac{d^2\Pi_m}{dP_m^2} = -\frac{(a - bP_b)}{P_{\max}} \quad (13)$$

从式(13)看出二阶导数 $\frac{d^2\Pi_m}{dP_m^2} < 0$, 故 Π_m 是关于 P_m 的凹函数,令一阶导数 $\frac{d\Pi_m}{dP_m} = 0$, 求得最优转移价格:

$$P_m^* = \frac{(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda + C_b - C_w}{2} \quad (14)$$

将式(14)代入式(11),得到快递企业最优回收价格:

$$P_r^* = \frac{(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda - C_b - C_w}{4} \quad (15)$$

此外,将式(14)和式(15)分别代入式(2)、(3)、(5),得:

$$\Pi_m^* = \frac{[(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda + C_b + C_w]^2 (a - bP_b)}{8P_{\max}} + (P_w - C_m - \delta_0 P_w\beta)(a - bP_b) \quad (16)$$

$$\Pi_e^* = \frac{[(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda + C_b + C_w]^2 (a - bP_b)}{16P_{\max}} + (P_b - C_a - P_w)(a - bP_b) \quad (17)$$

$$U_c^* = \frac{1}{8}[(4 - 8\alpha_0)P_w\beta + (C_m - C_r + P_w\beta)\lambda - C_b - (1 - \lambda)C_w + 8P_n - 8P_b](a - bP_b) \quad (18)$$

2.1.2 推论

推论 1: 快递包装制造商的转移价格与快递企业的回收价格随政府激励力度的增大而增大,且转移价格的增加幅度大于回收价格的增加幅度。

证明: 在式 (14)、(15) 中, 分别对 P_m^* 、 P_r^* 关于激励力度 β 求一阶导数, 得:

$$\frac{dP_m^*}{d\beta} = \frac{P_w\lambda}{2}, \quad \frac{dP_r^*}{d\beta} = \frac{P_w\lambda}{4}, \quad \text{因为 } P_w > 0, \lambda > 0,$$

所以 $\frac{dP_m^*}{d\beta} > \frac{dP_r^*}{d\beta} > 0$, 即 P_m^* 、 P_r^* 均为关于 β 的增函数, 因此 P_m^* 、 P_r^* 随 β 的增大而增大, 且 P_m^* 增加幅度大于 P_r^* 增加的幅度。证毕。

推论 2: 政府激励机制导致转移价格 P_m^* 与回收价格 P_r^* 之差随激励力度增加而增加。

证明: 计算式 (14) 与式 (15) 之差, 得:

$$P_m^* - P_r^* = \frac{(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda + 3C_b - C_w}{4} \quad (19)$$

式 (19) 对激励力度 β 求一阶导数, 得:

$$\frac{d(P_m^* - P_r^*)}{d\beta} = \frac{P_w\lambda}{4} > 0, \quad \text{即 } P_m^* - P_r^* \text{ 是关于 } \beta \text{ 的增函数, 因此, } P_m^* - P_r^* \text{ 随 } \beta \text{ 的增大而增大。证毕。}$$

推论 3: 最低消费者返还率 α 在区间 $[0, \frac{P_w\lambda}{8P_b} + \frac{1}{2}]$ 时, 消费者剩余 U_c^* 为政府奖惩力度 β 的增函数; 当 α 在区间 $[\frac{P_w\lambda}{8P_b} + \frac{1}{2}, 1]$ 时, U_c^* 为 β 的减函数。

证明: 对 (18) 式求 β 的一阶导数得:

$$\frac{dU_c^*}{d\beta} = \frac{1}{8}[(4 - 8\alpha_0)P_b + P_w\lambda](a - bP_b)$$

$$\begin{aligned} \Pi_s^* = & \frac{1}{8}[(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda - C_r - C_w] + (P_w - C_m - C_a - E_p + P_n - P_b)(a - bP_b) + \\ & \frac{[C_b + C_w - (C_m - C_r + C_w + P_w\beta)][3C_b - C_w + (C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda](a - bP_b)\lambda}{16P_{\max}} + \\ & \frac{[E_p + E_c - C_w + (C_m - C_r + C_w)\beta][(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda - C_b - C_w]}{4P_{\max}} \end{aligned} \quad (20)$$

推论 5: 在可行域 H 内存在使社会总福利极大化的最优激励力度, 其中可行域 H 为:

$$H = \{\beta | 0 \leq \beta \leq 1, 0 < C_r < C_m, 0 < C_a < C_b, a - bP_b >$$

$$\frac{d\Pi_s}{d\beta} = \frac{(a - bP_b)P_w\lambda}{8P_{\max}} [(C_m - C_r + C_w + P_w\beta)\lambda - C_b - C_w + 2(E_c + E_p) + P_{\max}] \quad (21)$$

$$\frac{d^2\Pi_s}{d\beta^2} = -\frac{(a - bP_b)(P_w\lambda)^2}{8P_{\max}} \quad (22)$$

式 (22) 中分子分母均大于 0, 所以 $\frac{d^2\Pi_s}{d\beta^2} < 0$,

因此 Π_s 是关于 β 的凹函数。在 (21) 中, 令 $\frac{d\Pi_s}{d\beta} = 0$, 求得 β 最优值见式 (23)。

$$\beta^* = \frac{P_{\max} + (C_m - C_r)\lambda - (1 - \lambda)C_w - C_b + 2(E_c + E_p)}{P_w\lambda} \quad (23)$$

即当最优激励力度为 β^* 时, 社会总福利 Π_s 最大。证毕。

根据假设, $P_w > 0, P_b > 0, \lambda > 0, 0 \leq \alpha_0 \leq 1$, $a - bP_b > 0$ 。当 $0 \leq \alpha_0 \leq \frac{1}{2} \leq \frac{P_w\lambda}{8P_b} + \frac{1}{2}$ 时, $(4 - 8\alpha_0)P_b + P_w\lambda > 0$, 从而一阶导数 $\frac{dU_c^*}{d\beta} > 0$, U_c^* 为关于 β 的增函数, 所以, U_c^* 随 β 的增加而增加; 当 $\frac{P_w\lambda}{8P_b} + \frac{1}{2} \leq \alpha_0 \leq 1$ 时, $\frac{dU_c^*}{d\beta} < 0$, U_c^* 为关于 β 的减函数, U_c^* 随 β 增加而减少。证毕。

推论 4: 政府制定的最低回收再利用率 δ_0 越高, 快递包装制造商的利润 Π_m^* 越低。

证明: 对 (16) 式求 δ_0 的一阶导数, 得:

$$\frac{d\Pi_m^*}{d\delta_0} = -(a - bP_b)P_w\beta, \quad \text{由于 } P_w > 0, (a - bP_b) =$$

$Q > 0, \beta > 0$, 所以 $\frac{d\Pi_m^*}{d\delta_0} < 0$, 因此, Π_m^* 为关于 δ_0 的减函数, 即 Π_m^* 随 δ_0 增加而减少。证毕。

2.2 政府激励机制

为了鼓励制造商回收再利用快递包装物、鼓励消费者返还快递包装物, 政府按社会总福利最大化来制定激励方案, 达到实现提高资源利用率、减少环境污染的目标。

将式 (14)、(15) 代入式 (8), 汇总式 (2)、(3)、(5)、(7) 并化简, 求得社会总福利见式 (20)。

$0, P_{\max}, P_n, a, b, P_b, c_w, E_n, E_p, P_w, \lambda > 0\}$

证明: 在式 (20) 中分别求 Π_s 关于 β 的一阶和二阶导数, 得到式 (21) 和式 (22)。

3 算例分析

SF 快递公司与其包装物制造商 A 公司及消费者构成图 1 所示闭环供应链。根据上述博弈模型的计算结果, 采用 Matlab 作为计算工具, 通过计算, 比较和分析政府的激励力度对参与各方利益的影响, 以便作出最优决策。结合作者对快递包装回收现状的研究^[1-3], 参数设置见表 2。

3.1 政府激励力度对供应链决策的影响

根据式 (1)、(14) — (17), 计算结果见表 3。

表 2 算例参数
Tab.2 Example parameters

类别	符号	数值	单位
快递包装物制造商	P_w	6.5	元/件
	C_m	2.3	元/件
	C_r	1.2	元/件
	λ	75	%
	C_w	0.8	元/件
快递企业	P_b	7.5	元/件
	C_a	0.4	元/件
	C_b	1.2	元/件
政府	α_0	60	%
	δ_0	25	%
消费者	P_n	12	元/件
	$P_{\max}$	2	元/件
	a	100	件
	b	1 ^[19]	

表 3 政府激励力度与供应链决策相关参数之间的关系

Tab.3 Relationship between governmental incentive strength and relevant parameters of supply chain decision-making

β	$P_m / (\text{元} \cdot \text{件}^{-1})$	$P_r / (\text{元} \cdot \text{件}^{-1})$	$P_m - P_r / (\text{元} \cdot \text{件}^{-1})$	$\alpha / \%$	$\delta / \%$	$\Pi_e / \text{元}$	$\Pi_m / \text{元}$
0	0.91	-0.14	1.06	0.00	0	92.16	461.82
0.1	1.16	-0.02	1.18	-1.09	-0.82	103.34	469.14
0.2	1.40	0.10	1.30	5.00	3.75	116.00	479.44
0.3	1.64	0.22	1.42	11.09	8.32	130.15	492.70
0.4	1.89	0.34	1.54	17.19	12.89	145.78	508.94
0.5	2.13	0.47	1.67	23.28	17.46	162.90	528.15
0.6	2.38	0.59	1.79	29.38	22.03	181.51	550.33
0.7	2.69	0.71	1.91	35.47	26.60	201.60	575.48
0.8	2.86	0.83	2.03	41.56	31.17	223.17	603.60
0.9	3.11	0.95	2.15	47.66	35.74	246.23	634.69
1	3.35	1.08	2.28	53.75	40.31	270.78	668.75

根据表 3 中数据绘制 P_m 、 P_r 及 $P_m - P_r$ 与 β 关系见图 2, 可以看出, 转移价格 P_m 、回收价格 P_r 及二者之差 $P_m - P_r$ 均随政府激励力度 β 增加而增加, 从而验证了推论 1 和推论 2。

根据表 3 中数据绘制 α 、 δ 与 β 关系图见图 3, Π_e 、 Π_m 与 β 关系见图 4。从图 3、图 4 进一步发现, 消费

者返还率 α 、回收再利用率 δ 、快递企业利润 Π_e 、制造商利润 Π_m 也是随 β 增加而增加, 且当 $\beta \geq 0.2$ 时各参数对应值均大于 $\beta=0$ 时的对应值。这说明政府激励力度的增加对制造商、快递企业和消费者均产生正面影响, 这也证明了政府实施激励比不进行激励 ($\beta=0$) 效果要好得多。

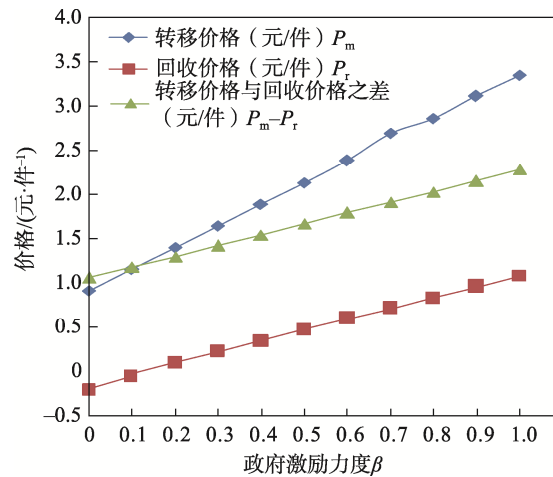


图 2 P_m 、 P_r 及 P_m-P_r 与 β 关系
Fig.2 Relationship between P_m 、 P_r 、 P_m-P_r and β

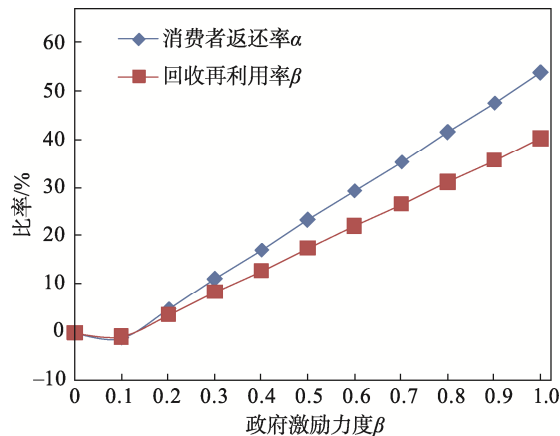


图 3 α 、 δ 与 β 关系
Fig.3 Relationship between α 、 δ and β

表 3 中 $\beta=0.1$ 时，出现了回收价格、消费者返还率和回收再利用率为负的情况，这恰好证实了政府

激励力度过低时，由于快递企业出于利益最大化考虑而不愿意回收快递包装，反而要求消费者支付费用返还快递包装物，所以消费者的返还率小于 0（这意味着消费者被强制要求返回，而消费者出于利益的考虑会选择直接废弃），而回收再利用率必然也小于 0，这种不可能发生的状况。

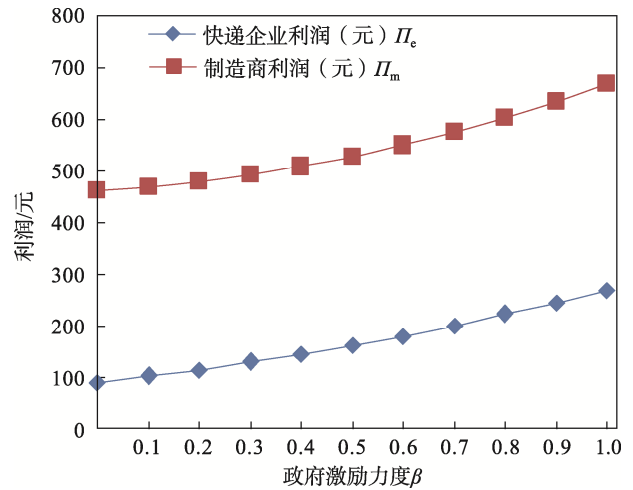


图 4 Π_e 、 Π_m 与 β 关系
Fig.4 Relationship between Π_e 、 Π_m and β

无论如何，只要政府采取激励措施，快递企业和制造商利润均随激励力度增加而增加。因此，提高政府的激励力度会提高制造商和快递企业回收积极性，有利于节约资源和减少环境污染。

3.2 政府的激励力度对消费者剩余的影响

根据式（18），计算出在不同的最低消费者返还率 α_0 状况下消费者剩余随政府激励力度的变化情况，见表 4。

表 4 消费者剩余变化情况
Tab.4 Changes in consumer surplus

β	α_0									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0	409.60	409.60	409.60	409.60	409.60	409.60	409.60	409.60	409.60	409.60
0.1	442.99	436.05	429.11	422.18	415.24	408.30	401.36	394.43	387.49	380.55
0.2	476.38	462.50	448.63	434.75	420.88	407.00	393.13	379.25	365.38	351.50
0.3	509.76	488.95	468.14	447.32	426.51	405.70	384.89	364.07	343.26	322.45
0.4	543.15	515.40	487.65	459.90	432.15	404.40	376.65	348.90	321.15	293.40
0.5	576.54	541.85	507.16	472.47	437.79	403.10	368.41	333.72	299.04	264.35
0.6	609.92	568.30	526.67	485.05	443.42	401.80	360.17	318.55	276.92	235.30
0.7	643.31	594.75	546.18	497.62	449.06	400.50	351.93	303.37	254.81	206.25
0.8	676.70	621.20	565.70	510.20	454.70	399.20	343.70	288.20	232.70	177.20
0.9	710.08	647.64	585.21	522.77	460.33	397.89	335.46	273.02	210.58	148.14
1	743.47	674.09	604.72	535.34	465.97	396.59	327.22	257.84	188.47	119.09

根据推论 3, 参数 $\frac{P_w \lambda}{8P_b} + \frac{1}{2} \approx 0.58$ 。

根据表 4 数据绘制不同最低消费者返还率状态下 U_c^* 与 β 关系见图 5。最低消费者返还率 α 取集合 $\{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5\}$ 的值时, U_c^* 会随着 β 的增加而增加; α 取集合 $\{0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$ 的值时, U_c^* 会随着 β 的增加而减少。而 α 拐点的理论值为 0.58, 这充分验证了推论 3 的结论。

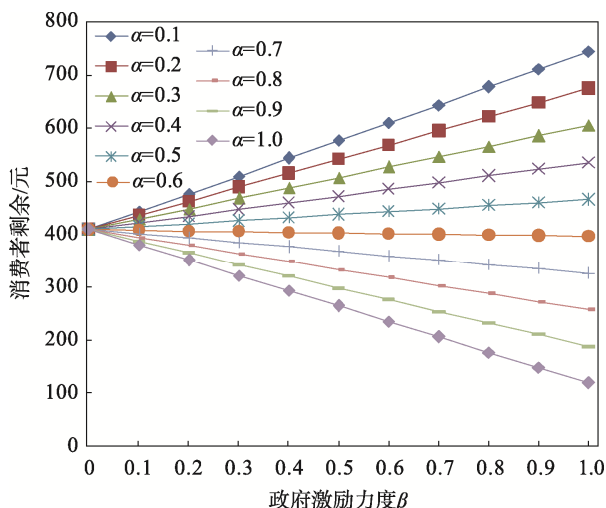


图 5 U_c^* 与 β 关系

Fig.5 Relationship between U_c^* and β

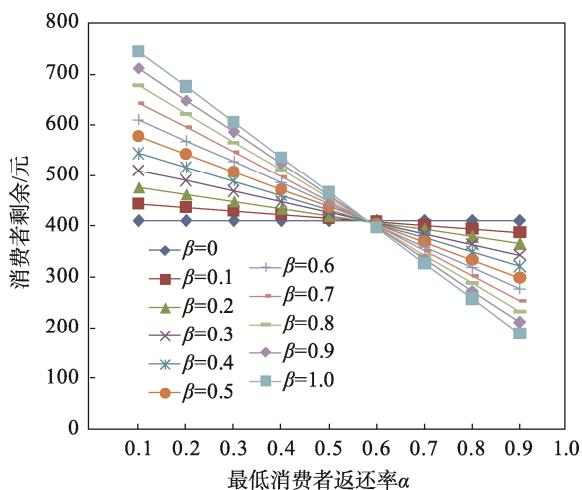


图 6 U_c^* 与 α 关系

Fig.6 Relationship between U_c^* and α

根据表 4 数据绘制在不同的政府激励力度 β 状态下最低消费者返还率 α 与消费者剩余 U_c^* 关系见图 6。从图 6 看出, 当政府激励力度 β 固定时, 政府规定的最低消费者返还率 α 越大, 则消费者剩余 U_c^* 越小。这也验证了推论 4 的结论。

由此可见, 政府选择合适的激励标准 β 值, 可使消费者剩余高于未引入激励机制的情形 ($\beta=0$), 有利于促进消费者积极返回快递包装物, 降低快递企业

回收包装物的难度。

3.3 政府激励力度对社会总福利的影响

假设 $E=0.2$ 元/件、 $N=0.55$ 元/件, 根据式 (20), 计算得出社会总福利随政府激励力度变化情况见表 5。

表 5 社会总福利随政府激励力度变化情况
Tab.5 Changes of total social welfare with governmental incentive strength

β	W_s /元
0	807.18
0.1	809.16
0.2	809.77
0.3	809
0.4	806.86
0.5	803.35
0.6	798.46
0.7	792.2
0.8	784.56
0.9	775.55
1	765.17

根据表 5 绘制社会总福利与 β 关系见图 7。不实施激励时 ($\beta=0$), 社会总福利为 807.18 元, 当 $0 < \beta < 0.2$ 时, 社会总福利随 β 增大而增加, 当 $0.2 < \beta < 1$ 时, 社会总福利随 β 增大而减小。存在一个最优的激励力度 β 值 (约等于 0.2), 使社会总福利达到最大值。从而验证了推论 5。

这也说明了适度的进行政府激励, 可以降低快递包装物对环境的影响, 也能促进快递包装的绿色发展。

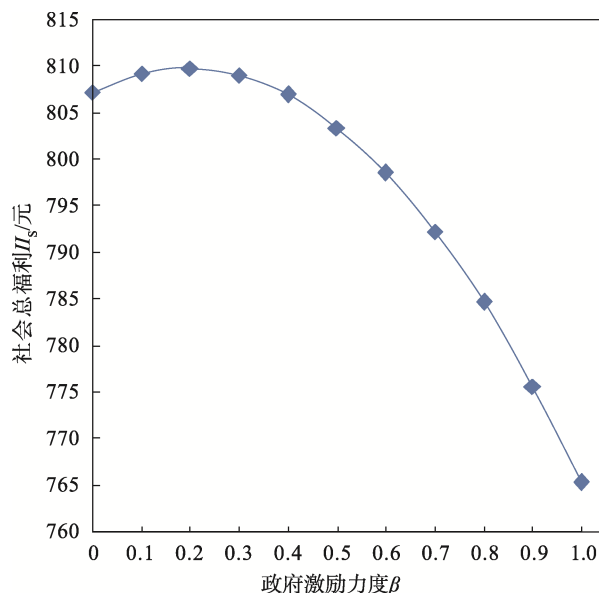


图 7 社会总福利与 β 关系

Fig.7 Relationship between total social welfare and β

4 结语

文中引入政府激励力度因子,通过模型推导以及算例分析得出以下结论。

1) 政府引入激励机制,效果要明显好于不采取激励机制。快递企业和制造商利润均随激励力度增加而增加,且都远大于政府不激励时的利润,因此,政府在宏观策略方面,应当积极主动的建立激励机制,激发制造商、快递企业和消费者的回收积极性。

2) 政府的激励力度 β 要适度。政府是以社会总福利最大化为目标,而企业和消费者分别以企业利润和消费者剩余最大化为目标,三者之间存在矛盾和冲突,在实践中必然相互博弈。当政府激励力度过大时,社会总福利反而会减少,不利于资源的节约和对环境的保护。因此,政府在微观策略方面,以社会总福利最大时的激励力度 β 值式(23)为标准来制定激励机制是最优策略。

3) 制造商最低回收利用率 δ_0 、消费者最低返还率 α_0 和政府激励力度 β 这3个指标的标准值是政府制定激励机制的最关键参数。在文中算例中 δ_0 、 α_0 和 β 最优值分别为25%、58%、20%,此时,政府的激励机制为:当快递包装制造商实际回收率超过25%时,政府对超额部分进行奖励,否则进行惩罚,奖惩额度为该包装物批发价格的20%;当消费者实际返还率大于58%时,政府对超额部分进行奖励,否则进行惩罚,奖惩额度为该包装物销售价格的20%。最低返还率 α_0 根据推论3确定,最低回收利用率 δ_0 则需要通过试算确定最优值,这也是确定激励机制关键参数的难点。

综上所述,政府采取科学合理的激励力度,不但可以使制造商和快递企业通过回收再利用来增加利润,而且可以提高消费者参与回收的积极性,增加社会总福利,实现消费者、企业和社会共赢的良性发展。

参考文献:

- [1] 郑克俊,迟青梅,张惠娴. 快递包装的“互联网+”回收模式创新及实施策略[J]. 物流技术, 2020, 39(2): 15-19.
ZHENG Ke-jun, CHI Qing-mei, ZHANG Hui-xian. Strategy for Innovation and Implementation of “Internet +” Recycling of Express Packages[J]. Logistics Technology, 2020, 39(2): 15-19.
- [2] 郑克俊,张惠娴,曾华声. 快递包装回收与再利用的激励机制[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(6): 117-123.
ZHENG Ke-jun, ZHANG Hui-xian, ZENG Hua-sheng. Incentive Mechanism of Express Package Recycling and Reuse[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(6): 117-123.
- [3] 郑克俊,迟青梅. 快递包装回收再利用的现状与问题[J]. 物流科技, 2019, 42(12): 50-53.
ZHENG Ke-jun, CHI Qing-mei. Current Situation and Problems of Recycling and Reuse of Express Packaging[J]. Logistics Sci-Tech, 2019, 42(12): 50-53.
- [4] 刘佳玺. “互联网+”背景下快递包装闭环供应链决策与协调研究[D]. 西安: 长安大学, 2021: 16-34.
LIU Jia-xi. Research on Decision and Coordination of Closed-Loop Supply Chain of Express Package under the Background of “Internet Plus”[D]. Xi'an: Changan University, 2021: 16-34.
- [5] 李正军,李恒. 政府管理下网络众包的快递包装回收模式创新[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 133-138.
LI Zheng-jun, LI Heng. Innovation of Express Package Recovery Mode Based on Network Crowdsourcing under Government Management[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 133-138.
- [6] 胡鑫. 政府规制下快递包装回收策略[J]. 物流技术, 2021, 40(3): 91-96.
HU Xin. Express Package Recycling Strategy under Government Regulation[J]. Logistics Technology, 2021, 40(3): 91-96.
- [7] 胡觉亮,钱聪丽,韩曙光. 政府奖惩机制下的快递包装回收问题研究[J]. 浙江理工大学学报(社会科学版), 2019, 42(3): 223-231.
HU Jue-liang, QIAN Cong-li, HAN Shu-guang. Research on Express Packaging Recovery under the Government Reward-Punishment Mechanism[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Social Sciences Edition), 2019, 42(3): 223-231.
- [8] 田立平,李璐璐,李文龙. 基于专利保护下闭环供应链的快递包装回收定价研究[J]. 工业工程, 2020, 23(1): 81-86.
TIAN Li-ping, LI Lu-lu, LI Wen-long. A Study of Recycling Pricing for Express Packaging Based on Patent Protection Closed-Loop Supply Chain[J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(1): 81-86.
- [9] 欧阳恋群,黄帝,丁建勋. 环境税费政策下快递包装材料回收利用的最优决策及社会福利分析[J]. 运筹与管理, 2021, 30(4): 54-60.
OUYANG Lian-qun, HUANG Di, DING Jian-xun. Optimal Decisions on the Cycle Utilization of Express Packaging Materials and Social Welfare Analysis under Environmental Tax Policy[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(4): 54-60.
- [10] 李璐璐,田立平,李东宁. 考虑差别定价和政府补贴

- 的快递包装回收策略研究[J]. 生态经济, 2020, 36(9): 204-209.
- LI Lu-lu, TIAN Li-ping, LI Dong-ning. Research on the Recycling Strategy of Express Packaging under the Government Subsidies Based on Patent Protection and Differential Pricing[J]. Ecological Economy, 2020, 36(9): 204-209.
- [11] 张俊杰. 网购时代下快递环保包装解决策略[J]. 包装工程, 2015, 36(20): 96-99.
- ZHANG Jun-jie. Solution Strategy of the Express Environmental Protection in the Online Shopping Era[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(20): 96-99.
- [12] LIU Hui-hui, LEI Ming, DENG Hong-hui, et al. A Dual Channel, Quality-Based Price Competition Model for the WEEE Recycling Market with Government Subsidy[J]. Omega, 2016, 59: 290-302.
- [13] JI Ping, MA Xin, LI Gang. Developing Green Purchasing Relationships for the Manufacturing Industry: An Evolutionary Game Theory Perspective[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 166: 155-162.
- [14] 丁灿, 段誉, 李晶. 基于系统动力学的快递包装资源化处理及政策模拟研究[J]. 西华大学学报(哲学社会科学版), 2022, 41(1): 102-113.
- DING Can, DUAN Yu, LI Jing. Research on Resource Processing and Policy Simulation of Express Packaging Based on System Dynamics[J]. Journal of Xihua University (Philosophy & Social Sciences), 2022, 41(1): 102-113.
- [15] 张汉江, 李聪颖, 姚琴, 等. 闭环供应链上的最优回收激励契约与政府补贴再制造政策的最优化[J]. 系统工程, 2014, 32(8): 74-79.
- ZHANG Han-jiang, LI Cong-ying, YAO Qin, et al. Optimal Recycling Incentive Contract on Closed-Loop Supply Chain and Optimization of Government Subsidy Policy of Remanufacturing[J]. Systems Engineering, 2014, 32(8): 74-79.
- [16] 何海龙, 李明琨. 有限管制下快递包装逆向物流三方博弈行为分析[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(1): 157-164.
- HE Hai-long, LI Ming-kun. A Tripartite Game Analysis on Reverse Logistics of Express Packaging under Restricted Control Policies[J]. Industrial Engineering and Management, 2021, 26(1): 157-164.
- [17] KANG Peng, SONG Guang-han, XU Ming, et al. Low-Carbon Pathways for the Booming Express Delivery Sector in China[J]. Nature Communications, 2021, 12: 450.
- [18] 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.
- [19] 钱聪丽. 闭环供应链视角下快递包装回收问题研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019: 19-30.
- QIAN Cong-li. Research on Express Packaging Recycling under the Perspective of Closed-Loop Supply Chain[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019: 19-30.

责任编辑: 曾钰婵