

# 基于绿色闭环供应链的低值可回收物 政府补贴研究

沈 笛

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年4月22日; 录用日期: 2024年5月21日; 发布日期: 2024年5月29日

## 摘 要

针对各类低值可回收物进行一刀切补贴的现状, 本文以制造商、第三方回收商和消费者组成的绿色闭环供应链为研究对象, 在政府补贴第三方回收商的情况下, 构建了同时考虑到经济因素和环境影响的低值可回收物社会效益模型。本文以废玻璃与废纸类为例, 通过理论证明和数值仿真验证模型的有效性, 结果表明: 政府补贴对不同种类的低值可回收物的影响程度不同, 应切合各类低值可回收物实际情况对其进行分类补贴。

## 关键词

低值可回收物, 政府补贴, 绿色闭环供应链, 决策

# Low Value Recyclables Based on a Green Closed-Loop Supply Chain Research on Government Subsidies

Di Shen

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2024; accepted: May. 21<sup>st</sup>, 2024; published: May. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In response to the current situation of providing comprehensive subsidies for various types of low value recyclables in Shanghai, this article takes a green closed-loop supply chain composed of manufacturers, third-party recyclers, and consumers as the research object. In the case of gov-

ernment subsidies for third-party recyclers, a social benefit model for low value recyclables is constructed that considers both economic and environmental factors. This article takes waste glass and paper as examples and verifies the effectiveness of the model through theoretical proof and numerical simulation. The results show that government subsidies have varying degrees of impact on different types of low value recyclable materials and should be classified and subsidized according to the actual situation of each type of low value recyclable material.

## Keywords

Low Value Recyclables, Government Subsidies, Green Closed-Loop Supply Chain, Decision-Making

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国经济迅速增长和居民消费水平持续提高,城市生活垃圾数量不断增加,严重威胁着国民生活环境。据《中国再生资源回收行业发展报告(2019)》统计:“废玻璃、塑料膜、废木料、废复合包装等低值可回收物在垃圾总量中占比 30%” [1]。回收利用这些被大量浪费的低价值可回收物不仅有利于环境保护,更有利于资源回收技术产业的发展[2]。国外对低值可回收物的处理经验比较丰富,比如在废玻璃方面,德国、比利时等国家废玻璃回收率高达 85% 以上,他们的补贴模式是废弃物产生者付费给回收者模式[3],更注重市场利润有利于回收产业的循环发展,而我国采用高成本低收益的政企合作模式,政府财政随着垃圾量的增加往往变得不堪重负,这也是在我国这一行业无法有效发展的直接原因[4]。所以,近几年我国各大城市对于低值可回收物的补贴政策还在探索阶段,比如上海市参照生活垃圾处置费用 221 元/t,对低值可回收物回收商采取“一刀切”的办法进行补贴[5],但该种补贴方式存在针对性不强的缺点。

近年来,国内外许多学者对政府补贴供应链管理的问题进行了研究,Rui [6]等建立了考虑消费者绿色偏好和政府补贴的供应链成员之间无合作模型和研发合作模型,并对其进行了对比分析。Yu [7]等研究了在政府补贴下,制造商的绿色产品生产决策问题。江世英,方鹏骞[8]在政府对制造商研发补贴背景下,对绿色制造商和零售商组成的二级绿色供应链进行了研究。温兴琦[9]等考虑消费者绿色偏好,构建了三种政府补贴策略模型,比较分析在相同的政府补贴支出条件下不同补贴策略的补贴效果。曹裕[10]等构建了制造商和零售商组成的二级绿色闭环供应链,比较分析了无政府补贴,政府补贴制造商和政府补贴消费者三种不同模型,并进一步探讨了零售商的风险规避策略对最优决策的影响。

上述文献大多是通过博弈论方法对问题进行数学建模,引入政府补贴或是其他影响因素讨论不同种类模型中供应最优决策的区别。本文基于上海市对各类低值可回收物进行一刀切补贴的现状,考虑政府补贴、低值可回收物的回收率、消费者环保意识等因素,构建了低值可回收物绿色闭环供应链,对整个绿色闭环供应链的回收和再制造过程进行分析,可以更好地完善政府对于低值可回收补贴的方式方法。

## 2. 模型描述与假设

### 2.1. 模型描述

本文以低值可回收物制造商、第三方回收商和消费者所组成的绿色闭环供应链为研究对象,如图 1 所示,低值可回收物制造商首先利用回收的旧料进行再生产,不足部分使用新材料,产品以价格  $p$  销售

给消费者，当产品使用寿命结束后，第三方回收商会以  $b$  的价格从消费者手中回收低值可回收物，并以  $a$  的价格卖给制造商进行再生产作业，循环往复以此形成了绿色闭环供应链，而政府会根据第三方回收商的回收率对其进行补贴。

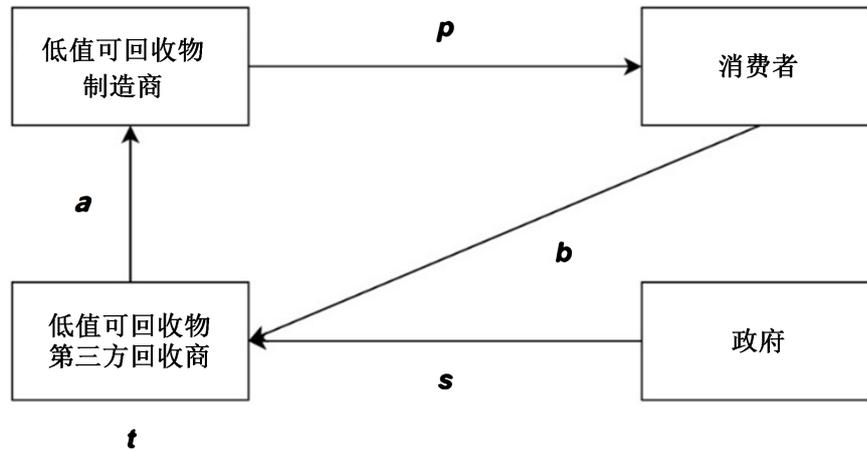


Figure 1. Flowchart of the Low value recyclable closed-loop supply chain  
图 1. 低值可回收物闭环供应链流程图

## 2.2. 模型假设

(1) 低值可回收物产品的需求函数为：

$$D = q - p + \theta$$

其中  $q$  为低值可回收物的市场容量， $\theta$  为消费者的环保意识系数，为确保市场需求非负，要求  $q - p > 0$ 。

(2) 制造商完全使用新材料生产的低值可回收物和使用包含回收材料生产的低值可回收物，同质且以相同价格、同一渠道进行销售。

(3)  $c_m$  为制造商用全新材料生产的单位成本， $c_r$  为制造商用回收材料生产的单位成本。根据现状，第三方回收商若没有政府的补贴将处于亏损状态，为保证所构建的闭环供应链模型具有现实的意义，需满足  $p \geq c_r + a > 0$ ， $p > c_m > 0$  且  $\Pi_r > 0$ 。而现实情况下，制造商往往更愿意用新材料而不是回收材料去生产，其原因就是成本更低，即  $c_m < c_r + a$ 。

(4) 第三方回收商的回收率为  $t$ ， $1 \geq t \geq 0$ 。根据 Savanskan [11] 等的研究，第三方回收商的回收投资成本为  $\frac{kt^2}{2}$ ， $k$  为低值可回收物的回收投资成本系数， $k > 0$ 。

(5) 关于环境的影响，低值可回收物的碳排放主要来源于制造与再制造过程。文献中通常假设生产单位再造品所产生的碳排放量小于生产单位新产品所产生的碳排放量[12]，可知生产过程中的环境影响与回收率呈负相关。假设整体绿色闭环供应链在生产/再生产过程中的环境成本为  $E = -tg(q - p + \theta)$ ，其中  $g$  为环境成本系数。

## 3. 模型建立与求解

在此模型中，政府以整个绿色闭环供应链的总体利润最大化为决策目标，并根据第三方回收商的回收率对其进行兜底补贴，保证第三方回收商不亏损，相关符号及变量名称见表 1。制造商的利润、第三方回收商的利润以及该绿色闭环供应链的环境成本分别为：

$$\Pi_m = (q - p + \theta)[p - c_m + t(c_m - c_r - a)] \quad (1)$$

**Table 1.** Related symbols and variable names  
**表 1.** 相关符号及变量名称

符号	变量名称	符号	变量名称
$p$	制造商的售价	$t$	回收率
$q$	市场容量	$k$	低值可回收物的回收投资成本系数
$D$	产品需求量	$s$	政府补贴系数
$\theta$	消费者环保意识系数	$E$	绿色闭环供应链的环境成本
$a$	制造商付给回收商的单位回收价	$g$	环境成本系数
$b$	回收商付给消费者的单位回收价	$\Pi_m$	制造商的利润
$c_m$	制造商用新材料生产的单位成本	$\Pi_r$	第三方回收商的利润
$c_r$	制造商用回收材料生产的单位成本	$\Pi_{\text{总}}$	总社会效益

$$\Pi_r = t(q - p + \theta)(a - b) - \frac{kt^2}{2} + st \quad (2)$$

$$E = -tg(q - p + \theta) \quad (3)$$

此时总利润值应为制造商和回收商的利润(不包括政府补贴)减去环境总成本以及政府补贴金额,式子如下:

$$\Pi_{\text{总}} = (q - p + \theta) \left[ p - c_m + t(c_m - c_r - b - g) \right] - \frac{kt^2}{2} + st \quad (4)$$

命题 1: 当满足  $2k - (b + g + c_r - c_m)^2 < 0$  时, 整体社会总利润函数为关于  $p$ 、 $t$  的严格凹函数。

证明: 因为:  $\frac{\partial^2 \Pi_{\text{总}}}{\partial p^2} = -2 < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \Pi_{\text{总}}}{\partial t^2} = -k < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \Pi_{\text{总}}}{\partial t \partial p} = b + g + c_r - c_m$ 。关于  $p$ 、 $t$  的海塞矩阵为:

$$\begin{pmatrix} -2 & b + g + c_r - c_m \\ b + g + c_r - c_m & -k \end{pmatrix}$$

当  $2k - (b + g + c_r - c_m)^2 < 0$  时, 该矩阵为负定矩阵, 且函数为严格凹函数  $\Pi_{\text{总}}$  取得最大值, 证毕。

对(4)分别求决策变量  $p$ 、 $t$  的一阶导数得到(5), (6)式:

$$\frac{\partial \Pi_{\text{总}}}{\partial p} = \theta + q - 2p + c_m - t(c_m - c_r - b - g) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\text{总}}}{\partial t} = (q - p + \theta)(c_m - c_r - b - g) - kt - s \quad (6)$$

使(5), (6)等于 0, 并且联立方程求得最优决策变量, 最终计算得到:

$$\begin{aligned} p^* &= (c_r - m + g + b)s + (q + \theta)c_r^2 + [(-2c_m + 2g + 2b)q - 2\theta c_m + (2g + 2b)\theta]c_r \\ &\quad + [c_m^2 + (-2g - 2b)c_m - k + g^2 + 2bg + b^2]q + \theta c_m^2 + [(-2g - 2b)\theta - k]c_m + \frac{(-k + g^2 + 2bg + b^2)\theta}{c_r^2} \\ &\quad + (-2c_m + 2g + 2b)c_r + c_m^2 + (-2g - 2b)c_m - 2k + g^2 + 2bg + b^2 \\ t^* &= \frac{2s + (q - c_m + \theta)r + (-m + g + b)q + c_m^2 + (-\theta - g - b)m + (g + b)\theta}{c_r^2 + (-2c_m + 2g + 2b)c_r + c_m^2 + (-2g - 2b)c_m - 2k + g^2 + 2bg + b^2} \end{aligned}$$

将  $p^*$ ,  $t^*$  代入(4)得到  $\Pi_{\text{总}}^*$ , 接着对  $s$  开二次导, 为保证所有结果为正, 需满足  $2k - (c_m - c_r - b - g)^2 < 0$ , 此时方程存在最大值。再根据  $\frac{\partial \Pi_{\text{总}}^*}{\partial s} = 0$  可以求得最优政府补贴系数  $s^*$ ,  $\Pi_{\text{总}}^*$  与  $s^*$  的表达式同上证明, 这里不再赘述。

$$\frac{\partial^2 \Pi_{\text{总}}^*}{\partial s^2} = \frac{2}{2k - (c_m - c_r - b - g)^2}$$

推论 1: 在政府角度考虑社会总利润最大化情况下, 政府补贴对最优决策影响如下:  $\frac{\partial t^*}{\partial s} > 0$ ,  $\frac{\partial p^*}{\partial s} < 0$ 。

证明:  $\frac{\partial t^*}{\partial s} = \frac{2}{2k - (g + c_r + b - c_m)^2} > 0$ ;  $\frac{\partial p^*}{\partial s} = \frac{g + c_r + b - c_m}{2k - (g + c_r + b - c_m)^2} < 0$ 。

绿色闭环供应链中的最优决策  $t^*$  与  $s$  呈正相关, 政府对第三方回收商提升回收补贴金额, 会提高第三方回收商的回收积极性; 最优决策  $p^*$  与  $s$  的呈负相关, 由于低值可回收物的回收价很低,  $b$  与  $a$  几乎相同, 所以大部分情况下  $g + c_r + b - c_m > 0$ , 随着政府补贴金额的升高, 第三方回收商的回收率也会增加, 制造商由此获得更低的成本, 更高的利润, 从而可以适当降低售价。由低值可回收的回收现状可知, 低值可回收物本身价值较低, 第三方回收商从消费者手中回收的金额  $b$  的值往往也不高, 甚至有废玻璃的  $b$  几乎为 0 的情况存在, 通常只有易拉罐与废纸板具有较高的回收价值, 所以大部分情况下  $p^*$  与  $s$  呈负相关。

推论 2: 在绿色闭环供应链中, 消费者环保意识系数对最优决策影响如下:  $\frac{\partial t^*}{\partial \theta} < 0$ ,  $\frac{\partial p^*}{\partial \theta} > 0$ 。

证明:  $\frac{\partial t^*}{\partial \theta} = \frac{g + c_r + b - c_m}{2k - (g + c_r + b - c_m)^2} < 0$ ,  $\frac{\partial p^*}{\partial \theta} = \frac{k - (g + c_r + b - c_m)^2}{2k - (g + c_r + b - c_m)^2} > 0$ , 随着消费者环保意识的提

升, 消费者可能会更倾向于将一些低值可回收物重复使用, 比如使用玻璃瓶培养绿植、将废织物裁剪当抹布使用, 导致低值可回收物的回收率降低。而消费者环保意识的提升会使制造商为提高产品的市场竞争力从而进行绿色研发, 让产品更加环保, 也导致了其价格的提升。

#### 4. 数值分析

为了验证该模型的有效性, 本节根据实地调研情况以及现有论文[13] [14], 以低值可回收物中的废玻璃和废纸为例, 对政府补贴系数对最优决策变量的影响进行数值仿真, 对相关参数赋值见表 2、表 3。这里  $s$  取[0, 30]。

Table 2. Assignment of parameters related to waste glass

表 2. 废玻璃相关参数赋值

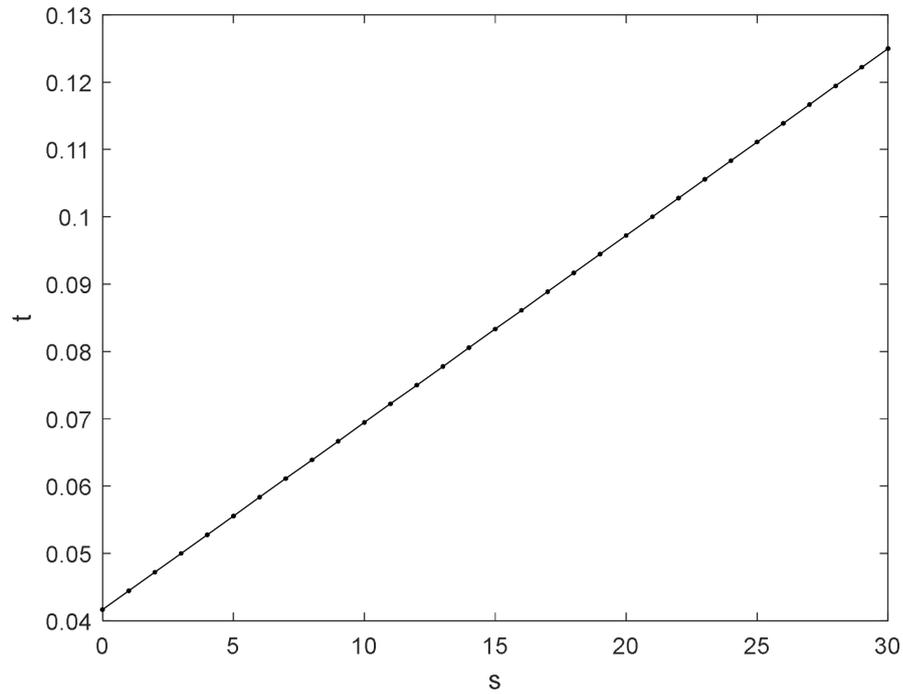
参数	$a$	$q$	$c_m$	$c_r$	$k$	$g$	$b$	$\theta$
赋值	5	50	20	16	90	26	0	-5

Table 3. Assignment of parameters related to waste paper

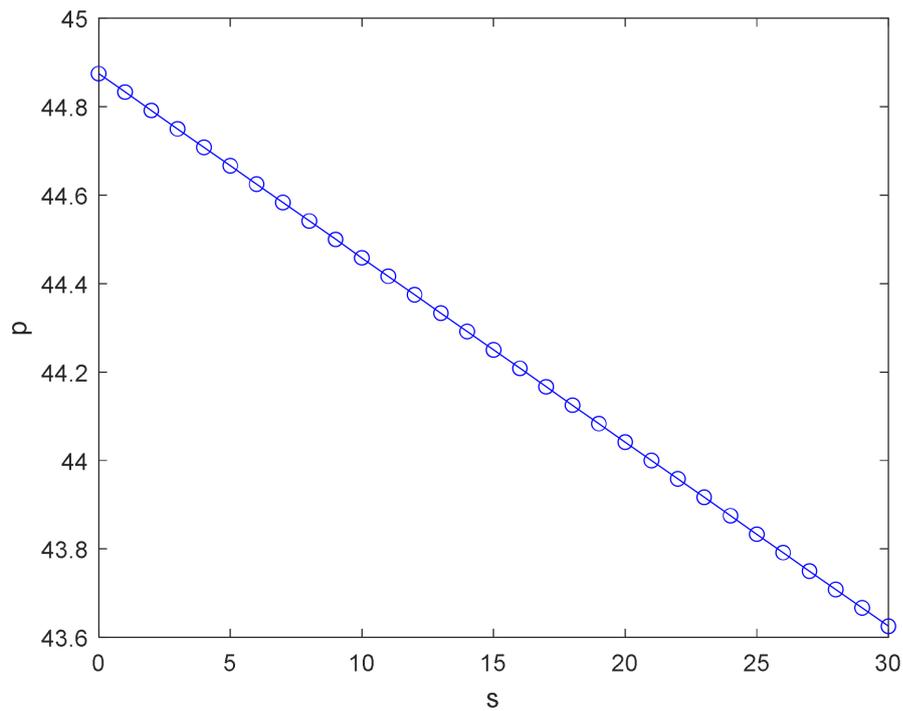
表 3. 废纸相关参数赋值

参数	$a$	$q$	$c_m$	$c_r$	$k$	$g$	$b$	$\theta$
赋值	15	50	21	16	100	29	10	1

在以上参数取值下，政府补贴对低值可回收物的中废玻璃的回收率、销售价格以及社会总利润的影响仿真结果如下图 2~7。



**Figure 2.** The impact of government subsidies on the recycling rate of waste glass  
**图 2.** 政府补贴金额对废玻璃回收率的影响



**Figure 3.** The impact of government subsidies on the sales price of waste glass  
**图 3.** 政府补贴金额对废玻璃销售价格的影响

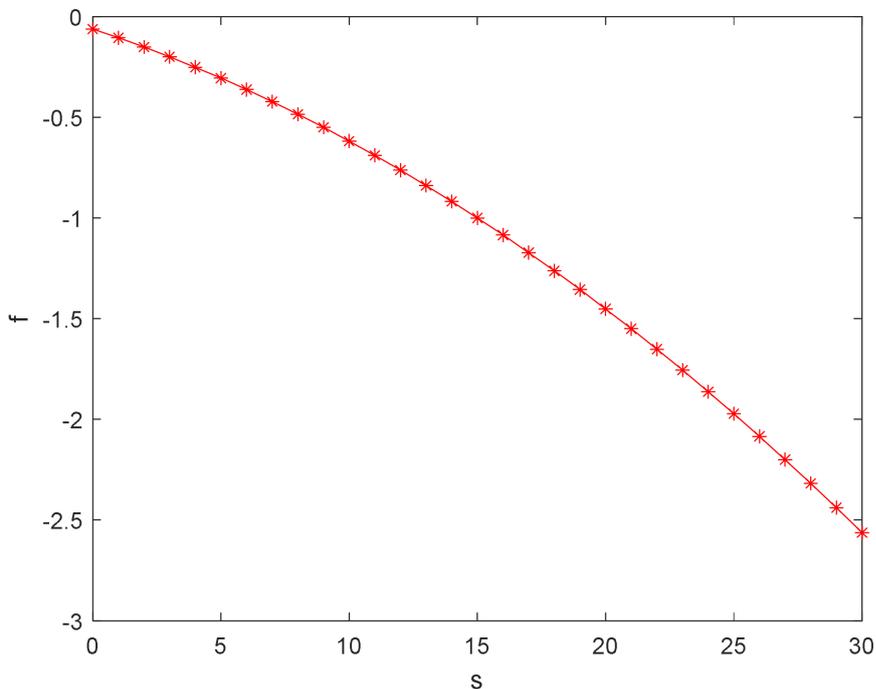


Figure 4. The impact of government subsidies on total social profits  
图 4. 政府补贴金额对社会总利润的影响

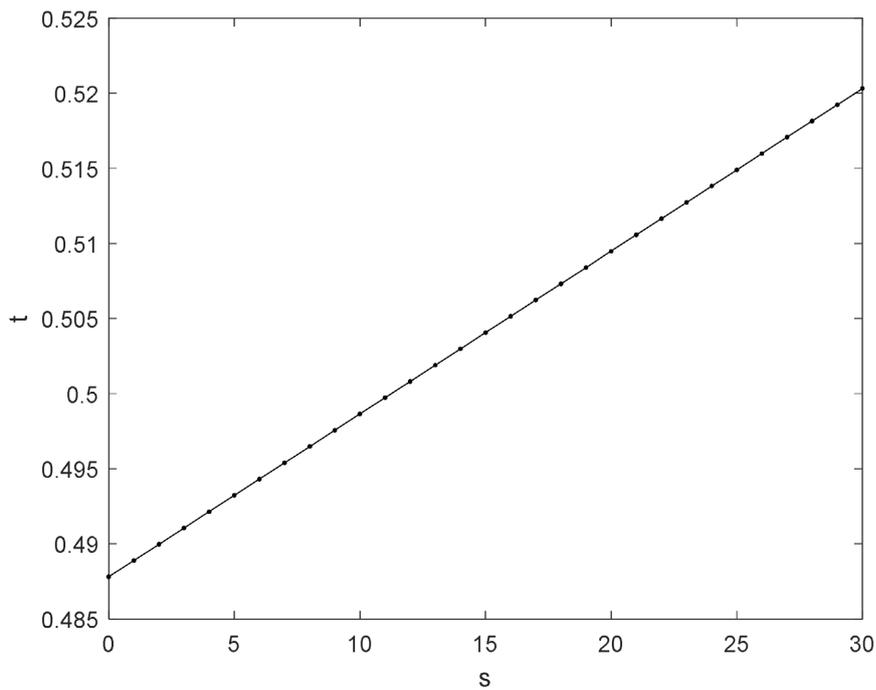
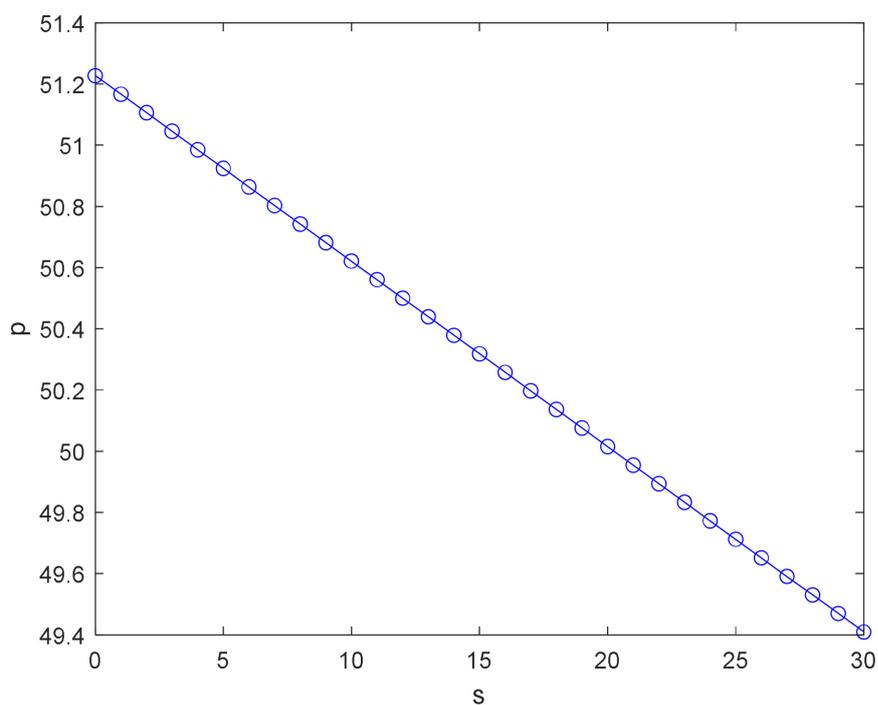


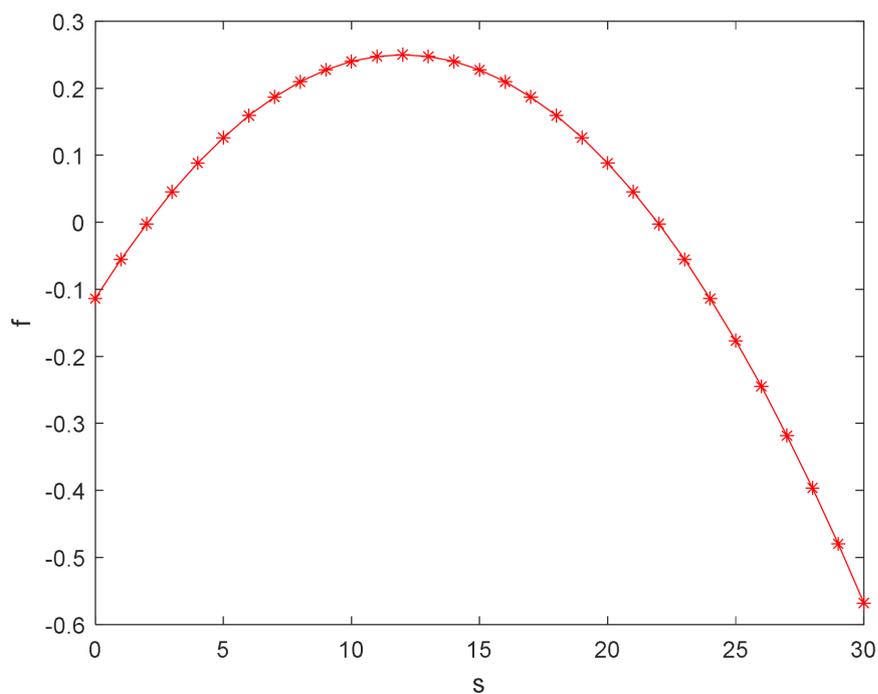
Figure 5. The impact of government subsidies on the recycling rate of waste paper  
图 5. 政府补贴金额对废纸回收率的影响

由图可知，随着政府补贴金额的增加，废玻璃与废纸的回收率也会随着增加，玻璃制品与纸制品的销售价格会随之降低，废玻璃的供应链的社会总效益也会随之降低，而废纸类的社会总效益则呈现先上

升后降低的趋势。这是由于废玻璃价格低廉且运输成本高，而废纸类价值较高，容易形成市场化的特点导致。



**Figure 6.** The impact of government subsidies on the sales price of waste paper  
**图 6.** 政府补贴金额对废纸销售价格的影响



**Figure 7.** The impact of government subsidies on total social profits  
**图 7.** 政府补贴金额对社会总利润的影响

综上所述, 政府补贴金额对不同种类的低值可回收物影响程度也不同。

## 5. 结束语

本文以低值可回收制造商、第三方回收商、消费者所组成的绿色闭环供应链, 从政府角度研究了补贴对整个闭环供应链以及社会总利润的影响, 并以低值可回收物中的废玻璃、废纸类为例进行数值仿真。研究表明: 政府补贴对不同种类的低值可回收物的影响程度不同, 政府有必要将低值可回收物的补贴政策进行逐一分类讨论, 以更好地完善现有的补贴体系。

## 参考文献

- [1] 徐扬, 刘猛, 孙冬石. 区块链驱动下低值可回收物资源化环境效益分析[J]. 物流科技, 2022, 45(9): 70-73+77.
- [2] 邱铤. 上海低价值可回收物收运服务标准化建设研究[J]. 商业经济, 2020(7): 35-37.
- [3] Malindzakova, M., Štofková, J. and Majernik, M. (2022) Economic–Environmental Performance of Reverse Logistics of Disposable Beverage Packaging. *Sustainability*, **14**, Article ID: 7544. <https://doi.org/10.3390/su14137544>
- [4] 杜欢政, 张挺, 刘飞仁. 低值可回收物补贴参照垃圾处置费“一刀切”合适吗? ——基于上海的验证[J]. 浙江工商大学学报, 2021(1): 111-124.
- [5] 杜欢政, 刘飞仁, 王云飞. 全过程成本下的城市低值废弃物补贴核算——以上海松江区为例[J]. 南通大学学报(社会科学版), 2019, 35(6): 34-41.
- [6] Dai, R., Zhang, J.X. and Tang, W. (2017) Cartelization or Cost-sharing? Comparison of Cooperation Modes in a Green Supply Chain. *Journal of Cleaner Production*, **156**, 159-173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.011>
- [7] Yu, Y., Han, X. and Hu, G. (2016) Optimal Production for Manufacturers Considering Consumer Environmental Awareness and Green Subsidies. *International Journal of Production Economics*, **182**, 397-408. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.09.014>
- [8] 江世英, 方鹏骞. 基于绿色供应链的政府补贴效果研究[J]. 系统管理学报, 2019, 28(3): 594-600.
- [9] 温兴琦, 程海芳, 蔡建湖, 卢超. 绿色供应链中政府补贴策略及效果分析[J]. 管理学报, 2018, 15(4): 625-632.
- [10] 曹裕, 寻静雅, 李青松. 基于不同政府补贴策略的供应链绿色努力决策比较研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(5): 108-118.
- [11] Savaskan, R.C., Bhattacharya, S. and Van Wassenhove, L. (2004) Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing. *Management Science*, **50**, 239-252. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1030.0186>
- [12] Cao, K.Y., He, P. and Liu, Z.X. (2020) Production and Pricing Decisions in a Dual-Channel Supply Chain under Remanufacturing Subsidy Policy and Carbon Tax Policy. *Journal of the Operational Research Society*, **71**, 1199-1215. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1605471>
- [13] 左乐. 城市生活垃圾处置设施的环境经济损益分析[J]. 绿色建筑, 2020, 12(4): 131-133.
- [14] 尉薛菲. 中国生活垃圾分类产业的经济分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国社会科学院, 2020.