

# 政府补贴下双回收渠道闭环供应链定价策略研究

赖小菊, 郑建国

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2023年11月9日; 录用日期: 2024年1月4日; 发布日期: 2024年1月15日

## 摘要

本文基于线上线下双回收渠道, 研究了政府补贴下的闭环供应链定价决策问题, 构建了由制造商、零售商、传统第三方回收商和“互联网+”回收平台组成的双回收渠道供应链模型, 其中传统第三方回收商负责离线渠道, “互联网+”回收平台负责在线渠道。“互联网+”回收平台负责在线渠道。我们考虑了三种政府补贴政策: 回收补贴、再制造补贴和复合补贴。结果表明, 政府补贴和回收质量水平的提高增加了制造商和回收商的利润、回收价格、回收数量; 零售商的利润和价格不受政府补贴政策和回收品质的影响; 政府倾向于实施再制造补贴政策, 该政策下的回收质量水平高于回收补贴政策下的回收质量水平。

## 关键词

回收质量水平, 政府补贴, 双重回收渠道, 闭环供应链

## Research on Pricing Strategy of Closed-Loop Supply Chain with Dual Recycling Channel under Government Subsidy

Xiaoju Lai, Jianguo Zheng

Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai

Received: Nov. 9<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 4<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 15<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Based on the recycling quality level, this paper investigates a closed-loop supply chain pricing decision problem with government subsidies, and constructs a dual recycling channel supply chain

**model consisting of a manufacturer, a retailer, a traditional third-party recycler, and an “Internet+” recycling platform. We consider three government subsidy policies: recycling subsidy, remanufacturing subsidy, and compound subsidy. We derive the optimal pricing decisions for manufacturers, retailers, and offline and online recyclers. The results show that government subsidies increase the profits of manufacturers and recyclers, recycling prices, buyback prices, and recycling quantities; retailers’ profits and pricing are not affected by government subsidy policies and the quality of recyclables; and the government prefers to implement a remanufacturing subsidy policy. The level of recycling quality under this policy is higher than that under the recycling subsidy policy.**

## Keywords

Recycling Quality Level, Government Subsidy, Dual Recycling Channel, Closed-Loop Supply Chain

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

闭环供应链集中在可以收集和回收原材料的行业,许多公司现在正在从事循环经济,以发展可持续的企业[1]。在电子行业,戴尔(Dell)、华为和柯达(Kodak)都建立了回收渠道。近年来,可再生资源的总量逐年增加,废旧电子产品的数量仍然居高不下。随着互联网技术的飞速发展,“互联网+”回收模式引发了一场新的“回收革命”。“互联网+”回收平台为消费者提供了新的回收渠道,缩短了回收商与消费者之间的空间距离,不仅增加了废物回收总量,而且提高了企业的经济效益,减少了对生态系统的污染。例如,爱回收平台拥有完善的质量评价体系和先进的加工技术,可以处理多种质量等级的旧产品。基于上述背景,本文构建了一个政府干预下线上和线下回收商之间竞争的闭环供应链模型,引入了废旧产品的质量水平,并采用博弈论方法研究了回收渠道竞争下闭环供应链成员的定价策略,探讨了供应链成员的最优定价决策和政府政策制定。

我们回顾了与本文相关的三个方面研究领域:政府监管、回收渠道和竞争环境。在考虑政府监管的定价研究方面,Cao等人研究了税收和补贴政策对再制造生产决策的影响[2]。Zhang等人基于社会福利最大化,研究了利润最大化的再制造生产的监管政策选择[3]。Wang等人进一步关注了制造商具有企业社会责任时,政府补贴和零售商公平对定价决策的影响[4]。Bai等人探讨了政府补贴在不同的在线回收模型中对供应链定价与服务质量的影响[5]。Guo等人探讨了电子商务环境下企业的最优生产决策和政府的补贴政策[6]。

在考虑回收渠道的定价研究方面,He等人构建了三种销售渠道,考虑政府补贴对再制造产品销售的影响,研究了新产品与再制造产品的定价问题[7]。Yang等人研究了线上进行销售与回收,线下提供服务的闭环供应链模型,得出最优的定价决策和最优服务水平决策[8]。Wang等人也考虑了手机制造商和运营商的公平问题对定价决策的影响[9]。Wen等人考虑了消费者偏好,分别得出第三方回收和第三方平台回收模式的最优定价及服务水平[10]。

在考虑竞争环境的定价研究方面,Tian等人通过构建对称和非对称市场模型,研究了两个存在竞争关系的制造商对回收模式决策的问题[11]。Zhang等人分析了零售商古诺双寡头博弈和Stackelberg博弈的竞争行为对闭环供应链决策的影响[12]。Ma等人对回收商竞争进行了分析,对比得出闭环供应链在不同情形下的竞争与合作关系[13]。Wang等人同样研究了制造商和再制造商的竞争,同时考察了政府法规对

竞争的影响[14]。

本文的研究与上述文献的不同之处在于, 我们引入了废旧产品质量水平, 考虑了不同类型的政府补贴, 同时将政府补贴设置为再制造补贴、再循环补贴和复合补贴政策三种类型, 同时考虑了再制造和再循环两个环节, 并将线上线下回收商竞争考虑在内, 探讨了在多种策略共同影响下闭环供应链的定价策略问题。

## 2. 模型描述与模型假设

本文研究了一个由制造商、零售商、传统第三方回收商和“互联网+”回收平台组成的闭环供应链模型。在这个模型中, 所有的回收活动都是根据回收产品的质量来定价的。为促进企业参与再制造, 政府对企业采取了三种补贴方式: 回收补贴政策(以下简称模型 S)、再制造补贴政策(以下简称模型 T)和复合补贴政策(以下简称模型 ST)。图 1~3 是三种补贴模式下的闭环供应链模型图。

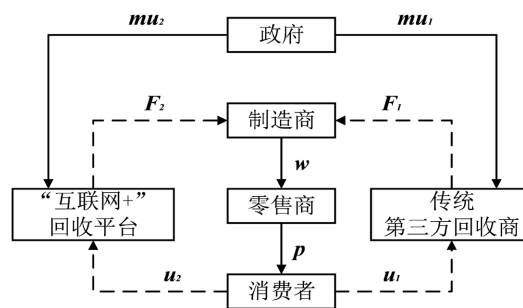


Figure 1. Model S  
图 1. 模型 S

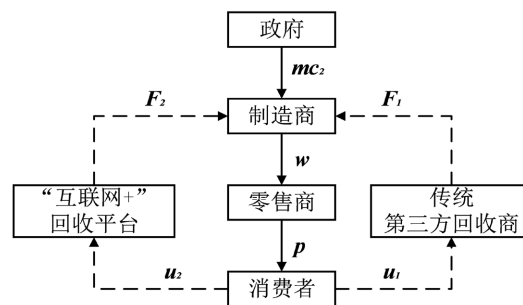


Figure 2. Model T  
图 2. 模型 T

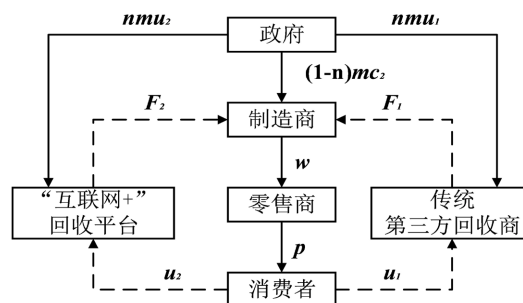


Figure 3. Model ST  
图 3. 模型 ST

## 2.1. 模型假设

**假设 1:** 制造商利用回收品进行再制造的单位成本要低于利用全新原材料进行生产的单位成本, 即  $0 < c_2 < c_1$ 。

**假设 2:** 第三方回收的废旧产品均能够用于再制造, 且生产的再制造产品与新产品在功能和质量上完全一致。

**假设 3:** 回收品的质量是不同的, 经过测试和分类, 其质量可以表示为  $q$ , 其中  $q \in (0,1)$ 。

**假设 4:** 制造商愿意支付给传统回收商的回购价格为  $g$ , 愿意支付给“互联网+”回收平台的回购价格为  $F$ , 假设  $g$  和  $F$  是关于回收品质量  $q$  的线性增函数, 即  $g = u_0 + \tau q$ ,  $F = u_0 + \varphi q$ 。其中  $u_0$  为回收基本价格,  $\varphi$  为质量价值系数, 反映回收质量对回收价格的影响程度。

**假设 5:** 假设再制造成本是旧产品质量的线性递减函数即  $c_2 = c_1 - \theta q$ , 其中  $\theta (\theta > 0)$  是再制造成本节约系数, 它代表了再生产品质量对再制造成本的影响。

**假设 6:**  $u_1$  是传统第三方回收商的回收价格;  $u_2$  是“互联网+”回收平台的回收价格, 主要取决于回收产品的质量水平。

**假设 7:** 回收的产品 100% 能够用于再制造, 不存在报废的情形, 即再制造量等于回收总量。鉴于各回收主体的回收数量与回收价格直接相关, 设  $k (k > 0)$  为基础回收量,  $h (h > 0)$  为消费者对回收价格的敏感系数, 则传统回收商和“互联网+”回收平台的平均回收量可分别表示为:  $G_1 = k + hu_1$ ,  $G_2 = h(u_2 - u_1)$ , 总回收量为  $G = k + hu_2$ 。

## 2.2. 闭环供应链模型构建

### 2.2.1. 补贴回收商模型(模型 S)

在政府补贴回收商模式下, 制造商、零售商、传统回收商和“互联网+”回收平台的利润表达式如下:

$$\pi_M^S = (\omega - c_1)D - gG_1 - FG_2 + (c_1 - c_2)G \quad (1)$$

$$\pi_R^S = (p - \omega)D \quad (2)$$

$$\pi_1^S = (g + mu_1 - u_1)G_1 \quad (3)$$

$$\pi_2^S = (F + mu_2 - u_2)G_2 \quad (4)$$

通过逆向归纳法, 在给定批发价、回购价和政府补贴系数下, 供应链各成员同时实现个体利润最大化。因为  $\frac{\partial^2 \pi_R^S}{\partial p^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \pi_1^S}{\partial u_1^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \pi_2^S}{\partial u_2^2} < 0$ , 故零售商的利润函数在零售价格  $p$  上是准凹的, 传统的第三方回收商的利润函数在回收价格  $u_1$  上是准凹的, 而“互联网+”回收平台的利润函数在回收价格  $u_2$  上是准凹的, 令  $\frac{\partial \pi_R^S}{\partial p} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_1^S}{\partial u_1} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_2^S}{\partial u_2} = 0$ , 进一步将  $p$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  代入, 令  $\frac{\partial \pi_M^S}{\partial \omega} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_M^S}{\partial g} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_M^S}{\partial \varphi} = 0$ , 再将  $\omega_s^*$ ,  $g_s^*$ ,  $F_s^*$  代入, 可以得到以下最优决策:

$$\omega_s^* = \frac{\alpha + \beta c_1}{2\beta} \quad (5)$$

$$\tau_s^* = \frac{-3k + 3km - 5hu_0 + 2hq\theta}{5hq} \quad (6)$$

$$g_s^* = \frac{-3k + 3km + 2hq\theta}{5h} \quad (7)$$

$$\varphi_s^* = \frac{-2k + 2km - 5hu_0 + 3hq\theta}{5hq} \quad (8)$$

$$F_S^* = \frac{-2k + 2km + 3hq\theta}{5h} \quad (9)$$

$$P_S^* = \frac{3\alpha + c_1\beta}{4\beta} \quad (10)$$

$$u_{1S}^* = \frac{4k - 4km - hq\theta}{5h(m-1)} \quad (11)$$

$$u_{2S}^* = \frac{-3k + 3km + 2hq\theta}{5h(1-m)} \quad (12)$$

$$\pi_M^{S*} = \frac{1}{40} \left[ \frac{5(\alpha - c_1\beta)^2}{\beta} + \frac{8(k - km + hq\theta)^2}{h(1-m)} \right] \quad (13)$$

$$\pi_R^{S*} = \frac{(\alpha - \beta c_1)^2}{16\beta} \quad (14)$$

$$\pi_1^{S*} = \frac{[k - km + hq\theta]^2}{25h(1-m)} \quad (15)$$

$$\pi_2^{S*} = \frac{[k - km + hq\theta]^2}{25h(1-m)} \quad (16)$$

$$G_S^* = \frac{2[k(1-m) + hq\theta]}{5(1-m)} \quad (17)$$

### 2.2.2. 补贴制造商模型(模型 T)

在政府补贴制造商模式下, 制造商、零售商、传统回收商和“互联网+”回收平台的利润表达式如下:

$$\pi_M^T = (\omega - c_1)D - gG_1 - FG_2 - [c_1 - c_2(1-m)]G \quad (18)$$

$$\pi_R^T = (p - \omega)D \quad (19)$$

$$\pi_1^T = (g - u_1)G_1 \quad (20)$$

$$\pi_2^T = (F - u_2)G_2 \quad (21)$$

通过逆向归纳法, 在给定批发价、回购价和政府补贴系数下, 供应链各成员同时实现个体利润最大化。因为  $\frac{\partial^2 \pi_R^T}{\partial p^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \pi_1^T}{\partial u_1^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \pi_2^T}{\partial u_2^2} < 0$ , 故零售商的利润函数在零售价格  $p$  上是准凹的, 传统的第三方回收商的利润函数在回收价格  $u_1$  上是准凹的, 而“互联网+”回收平台的利润函数在回收价格  $u_2$  上是准凹的, 令  $\frac{\partial \pi_R^T}{\partial p} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_1^T}{\partial u_1} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_2^T}{\partial u_2} = 0$ 。进一步将  $p$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  代入, 令  $\frac{\partial \pi_M^T}{\partial \omega} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_M^T}{\partial g} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_M^T}{\partial \varphi} = 0$ , 再将  $\omega_T^*$ ,  $g_T^*$ ,  $F_T^*$  代入, 可以得到以下最优决策:

$$\omega_T^* = \frac{\alpha + \beta c_1}{2\beta} \quad (22)$$

$$\tau_T^* = \frac{-3k - 5hu_0 + 2hq\theta + 2hm(c_1 - q\theta)}{5hq} \quad (23)$$

$$g_T^* = \frac{-3k + 2hq\theta + 2hm(c_1 - q\theta)}{5h} \quad (24)$$

$$\varphi_T^* = \frac{-2k - 5hu_0 + 3hq\theta + 3hm(c_1 - q\theta)}{5hq} \quad (25)$$

$$F_T^* = \frac{-4k + 6hq\theta + 6hm(c_1 - q\theta)}{10h} \quad (26)$$

$$p_T^* = \frac{3\alpha + c_1\beta}{4\beta} \quad (27)$$

$$u_{1T}^* = \frac{-4k + hq\theta + hm(c_1 - q\theta)}{5h} \quad (28)$$

$$u_{2T}^* = \frac{-3k + 2hq\theta + 2hm(c_1 - q\theta)}{5h} \quad (29)$$

$$\pi_M^{T*} = \frac{1}{40} \left\{ \frac{5(\alpha - c_1\beta)^2}{\beta} + \frac{8k^2}{h} + 16k[q\theta + m(c_1 - q\theta)] + 8h[q\theta + m(c_1 - q\theta)]^2 \right\} \pi_R^{T*} = \frac{(\alpha - \beta c_1)^2}{16\beta} \quad (30)$$

$$\pi_R^{T*} = \frac{(\alpha - \beta c_1)^2}{16\beta} \quad (31)$$

$$\pi_1^{T*} = \frac{[k + hq\theta + hm(c_1 - q\theta)]^2}{25h} \quad (32)$$

$$\pi_2^{T*} = \frac{[k + hq\theta + hm(c_1 - q\theta)]^2}{25h} \quad (33)$$

$$G_T^* = \frac{2[k + hq\theta + hm(c_1 - q\theta)]}{5(1-m)} \quad (34)$$

### 2.2.3. 复合补贴模型(模型 ST)

在政府复合补贴模式下, 制造商、零售商、传统回收商和“互联网+”回收平台的利润表达式如下:

$$\pi_M^{ST} = (\omega - c_1)D - gG_1 - FG_2 - [c_1 - c_2(1-n)(1-m)]G \quad (35)$$

$$\pi_R^{ST} = (p - \omega)D \quad (36)$$

$$\pi_1^{ST} = (g + mnu_1 - u_1)G_1 \quad (37)$$

$$\pi_2^{ST} = (F + mnu_2 - u_2)G_2 \quad (38)$$

通过逆向归纳法, 在给定批发价、回购价和政府补贴系数下, 供应链各成员同时实现个体利润最大化。因为  $\frac{\partial^2 \pi_R^{ST}}{\partial p^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \pi_1^{ST}}{\partial u_1^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \pi_2^{ST}}{\partial u_2^2} < 0$ , 故零售商的利润函数在零售价格  $p$  上是准凹的, 传统的第三方回收商的利润函数在回收价格  $u_1$  上是准凹的, 而“互联网+”回收平台的利润函数在回收价格  $u_2$  上是准凹的, 令  $\frac{\partial \pi_R^{ST}}{\partial p} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_1^{ST}}{\partial u_1} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_2^{ST}}{\partial u_2} = 0$ 。进一步将  $p, u_1, u_2$  代入, 令  $\frac{\partial \pi_M^{ST}}{\partial \omega} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_M^{ST}}{\partial g} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_M^{ST}}{\partial \varphi} = 0$ , 再将  $\omega_{ST}^*$ ,  $g_{ST}^*$ ,  $F_{ST}^*$  代入, 可以得到以下最优决策:

$$\omega_{ST}^* = \frac{\alpha + \beta c_1}{2\beta} \quad (39)$$

$$\tau_{ST}^* = \frac{-3k(1-mn) + h(-5u_0 + 2q\theta + 2m(1-n)(c_1 - q\theta))}{5hq} \quad (40)$$

$$g_{ST}^* = \frac{-3k(1-mn) + 2hq\theta + 2hm(1-n)(c_1 - q\theta)}{5h} \quad (41)$$

$$\varphi_{ST}^* = \frac{-2k(1-mn) + h(-5u_0 + 3q\theta + 3m(1-n)(c_1 - q\theta))}{5hq} \quad (42)$$

$$F_{ST}^* = \frac{-2k(1-mn) + 3hq\theta + 3hm(1-n)(c_1 - q\theta)}{5h} \quad (43)$$

$$p_{ST}^* = \frac{3\alpha + c_1\beta}{4\beta} \quad (44)$$

$$u_{1ST}^* = \frac{-4k(1-mn) + hq\theta + hm(1-n)(c_1 - q\theta)}{5h(1-mn)} \quad (45)$$

$$u_{2ST}^* = \frac{-3k(1-mn) + 2hq\theta + 2hm(1-n)(c_1 - q\theta)}{5h(1-mn)} \quad (46)$$

$$\pi_M^{ST*} = \frac{1}{40} \left[ \frac{5(\alpha - c_1\beta)^2}{\beta} + 16k[q\theta + m(1-n)(c_1 - q\theta)] + \frac{8k^2(1-mn)}{h} + \frac{8h[q\theta + m(1-n)(c_1 - q\theta)]^2}{1-mn} \right] \quad (47)$$

$$\pi_R^{ST*} = \frac{(\alpha - \beta c_1)^2}{16\beta} \quad (48)$$

$$\pi_1^{ST*} = \frac{[k(1-mn) + hq\theta + hm(1-n)(c_1 - q\theta)]^2}{25h(1-mn)} \quad (49)$$

$$\pi_2^{ST*} = \frac{[k(1-mn) + hq\theta + hm(1-n)(c_1 - q\theta)]^2}{25h(1-mn)} \quad (50)$$

$$G_{ST}^* = \frac{2[hq\theta + k(1-mn) + hm(1-n)(c_1 - q\theta)]}{5(1-mn)} \quad (51)$$

### 3. 模型比较与分析

本文将回收补贴模型、再制造补贴模型和复合补贴模型的均衡结果进行比较与分析, 确定个模型下产品的批发价格、销售价格、回购价格、回收价格、回收总量以及供应链各成员利润的大小关系。

**结论 1:** 无论政府采取何种补贴方式, 政府补贴系数和废旧产品的回收质量水平均不影响制造商的批发价格和零售商的零售价格。

证明:

$$\frac{\partial w_S^*}{\partial m} = \frac{\partial w_T^*}{\partial m} = \frac{\partial w_{ST}^*}{\partial m} = 0, \quad \frac{\partial w_S^*}{\partial \theta} = \frac{\partial w_T^*}{\partial \theta} = \frac{\partial w_{ST}^*}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial p_S^*}{\partial m} = \frac{\partial p_T^*}{\partial m} = \frac{\partial p_{ST}^*}{\partial m} = 0, \quad \frac{\partial p_S^*}{\partial \theta} = \frac{\partial p_T^*}{\partial \theta} = \frac{\partial p_{ST}^*}{\partial \theta} = 0$$

结论 1 表明: 政府的补贴方式和回收品的质量水平并不会对产品的批发零售价格产生任何影响。不考虑新产品与再制造产品的质量与功能差异时, 闭环供应链的正向环节并不会受到政府补贴系数和回收品质量水平的影响。

**结论 2:** 当政府补贴系数提高时, 回收价格、回购价格、回收数量和最优回收质量水平将随之提高;

证明:

$$\frac{\partial u_1^{S*}}{\partial m} = \frac{q\theta}{5(-1+m)^2} > 0, \quad \frac{\partial u_1^{T*}}{\partial m} = \frac{c_1 - q\theta}{5} > 0, \quad \frac{\partial u_1^{ST*}}{\partial m} = \frac{nq\theta + (1-n)(c_1 - q\theta)}{5(1-mn)^2} > 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2^{S*}}{\partial m} &= \frac{2q\theta}{5(-1+m)^2} > 0, \quad \frac{\partial u_2^{T*}}{\partial m} = \frac{c_1 - q\theta}{5} > 0, \quad \frac{\partial u_2^{ST*}}{\partial m} = \frac{2[nq\theta + (1-n)(c_1 - q\theta)]}{5(1-mn)^2} > 0 \\ \frac{\partial F_S^*}{\partial m} &= \frac{2k}{5h} > 0, \quad \frac{\partial F_T^*}{\partial m} = \frac{3(c_1 - q\theta)}{5} > 0, \quad \frac{\partial F_{ST}^*}{\partial m} = \frac{2kn + 3h(1-n)(c_1 - q\theta)}{5h} > 0 \\ \frac{\partial g_S^*}{\partial m} &= \frac{3k}{5h} > 0, \quad \frac{\partial g_T^*}{\partial m} = \frac{2(c_1 - q\theta)}{5} > 0, \quad \frac{\partial g_{ST}^*}{\partial m} = \frac{3kn + 2h(1-n)(c_1 - q\theta)}{5h} > 0 \\ \frac{\partial G_S^*}{\partial m} &= \frac{2hq\theta}{5(1-m)^2} > 0, \quad \frac{\partial G_T^*}{\partial m} = \frac{2h(c_1 - q\theta)}{5} > 0, \quad \frac{\partial G_{ST}^*}{\partial m} = \frac{nq\theta + (1-n)(c_1 - q\theta)}{5(1-mn)^2} > 0 \\ \frac{\partial \tau_S^*}{\partial m} &= \frac{3k}{5hq} > 0, \quad \frac{\partial \tau_T^*}{\partial m} = \frac{2(c_1 - q\theta)}{5q} > 0, \quad \frac{\partial \tau_{ST}^*}{\partial m} = \frac{3kn + 2h(1-n)(c_1 - q\theta)}{5hq} > 0 \\ \frac{\partial \varphi_S^*}{\partial m} &= \frac{2k}{5hq} > 0, \quad \frac{\partial \varphi_T^*}{\partial m} = \frac{3(c_1 - q\theta)}{5q} > 0, \quad \frac{\partial \varphi_{ST}^*}{\partial m} = \frac{2kn + 3h(1-n)(c_1 - q\theta)}{5hq} > 0 \end{aligned}$$

结论 2 表明, 政府补贴政策可以激励再生产和再制造活动。当企业获得更多的政府补贴时, 制造商愿意支付更高的回购价格以获得更多的二手产品用于再制造, 因此回收商愿意提高回收价格, 从消费市场回收更多的二手产品, 并提高回收质量以增加企业的收入。

**结论 3:** 在相同的政府补贴方式下, 制造商的回购价格与回收商的回收价格、回收量以及最优利润之间的关系是:  $F_S > g_S$ ,  $F_T > g_T$ ,  $F_{ST} > g_{ST}$ ;  $u_{1S}^* < u_{2S}^*$ ,  $u_{1T}^* < u_{2T}^*$ ,  $u_{1ST}^* < u_{2ST}^*$ ;  $\pi_1^{S*} = \pi_2^{S*}$ ,  $\pi_1^{T*} = \pi_2^{T*}$ ,  $\pi_1^{ST*} = \pi_2^{ST*}$ ;  $G_1^{S*} = G_2^{S*}$ ,  $G_1^{T*} = G_2^{T*}$ ,  $G_1^{ST*} = G_2^{ST*}$ 。

证明:

$$\begin{aligned} F_S - g_S &= \frac{k(1-m) + hq\theta}{5h} > 0, \quad F_T - g_T = \frac{k + h(1-m)q\theta + hmc_1}{5h} > 0 \\ F_{ST} - g_{ST} &= \frac{k(1-mn) + h(1-m(1-n))q\theta + hm(1-n)c_1}{5h} > 0; \\ u_{1S}^* - u_{2S}^* &= \frac{k(m-1) - hq\theta}{5h(1-m)} < 0, \quad u_{1T}^* - u_{2T}^* = -\frac{k + hq\theta + hm(c_1 - q\theta)}{5h} < 0 \\ u_{1ST}^* - u_{2ST}^* &= -\frac{5k(1-mn) + hq\theta + 3hm(1-n)(c_1 - q\theta)}{5h(1-mn)} < 0; \\ \pi_1^{S*} &= \pi_2^{S*}, \quad \pi_1^{T*} = \pi_2^{T*}, \quad \pi_1^{ST*} = \pi_2^{ST*}; \\ G_1^{S*} = G_2^{S*} &= \frac{k}{5} + \frac{hq\theta}{1-m}, \quad G_1^{T*} = G_2^{T*} = \frac{k + h + hm(c_1 - q\theta)}{5}, \\ G_1^{ST*} = G_2^{ST*} &= \frac{2[k(1-mn)hq\theta + k(1-mn) + hm(1-n)(c_1 - q\theta)]}{5(1-mn)} \end{aligned}$$

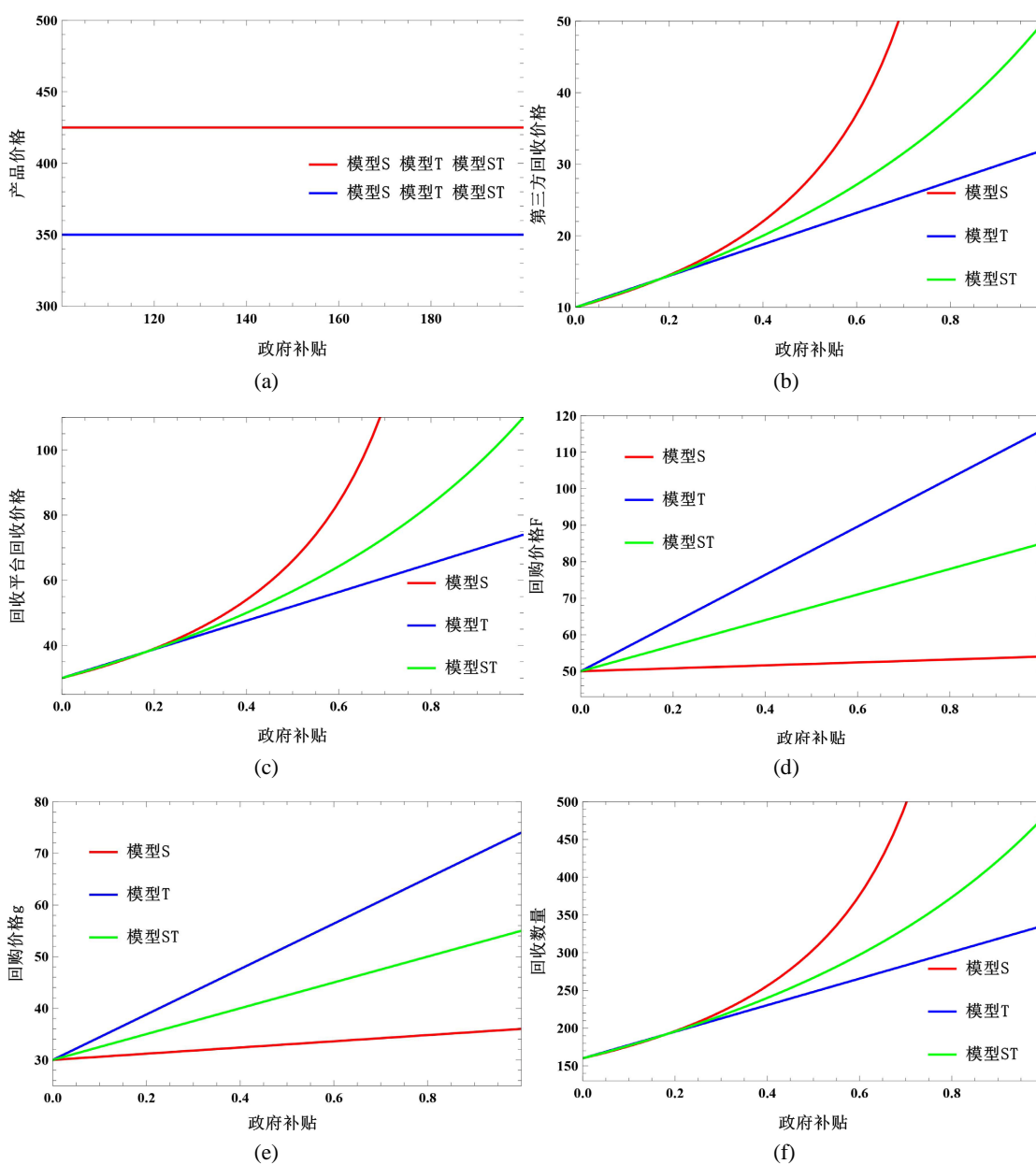
结论 3 认为线上和线下回收的差异会影响回收定价, 而“互联网+”回收平台能够以优质定价获得高质量的回收品, 但两者的回收量并不受这差异影响。

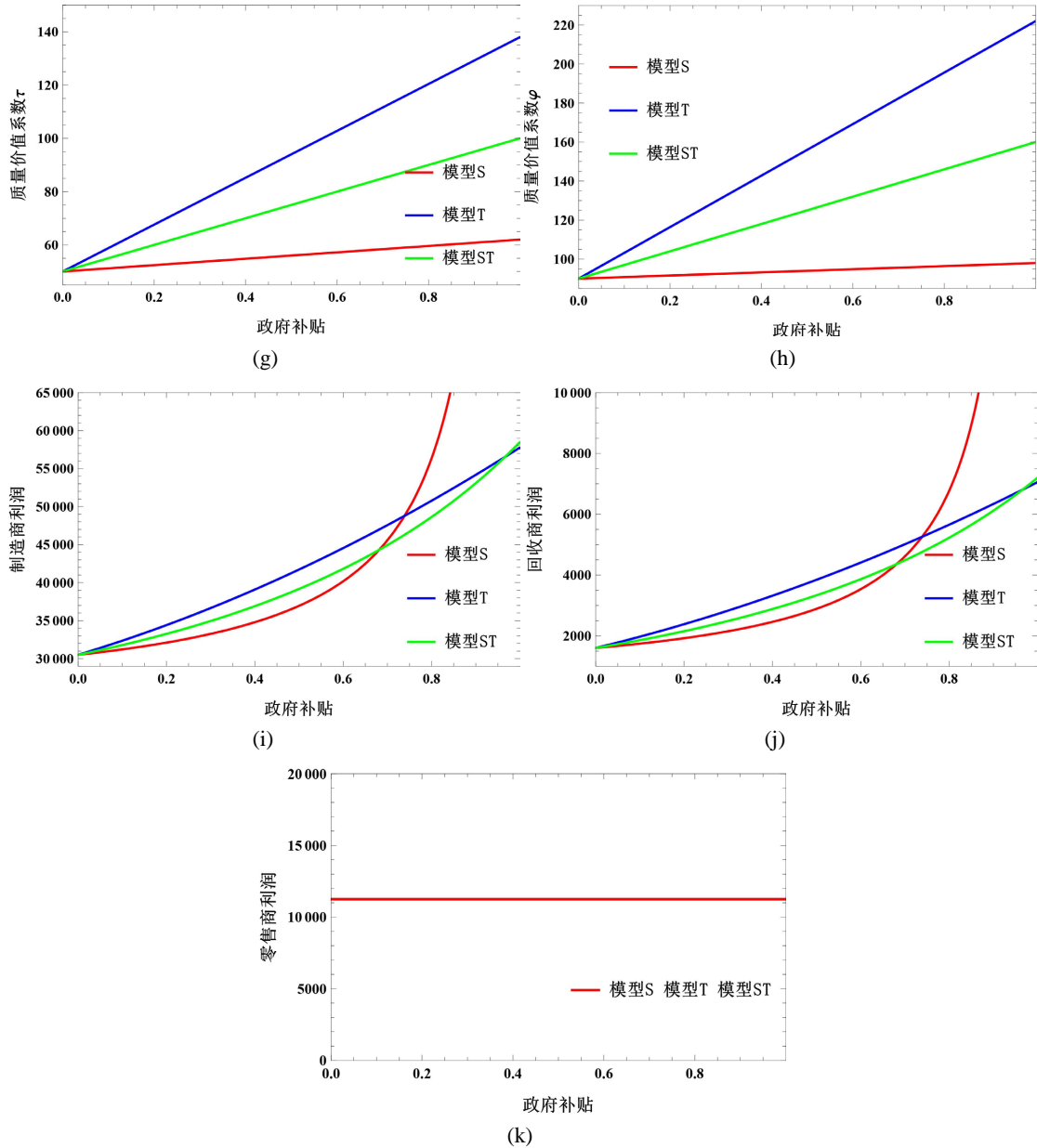
#### 4. 数值分析

为了更直观、准确地研究政府补贴系数对闭环供应链优化决策的影响, 对该模型进行了仿真分析。我们根据以下参数进行了模拟:  $u_0 = 5$ ,  $k = 40$ ,  $h = 4$ ,  $\theta = 35$ ,  $c_1 = 200$ ,  $\alpha = 1000$ ,  $\beta = 2$ ,  $\theta = 180$ ,  $n = 0.5$ ,  $m \in (0, 1)$ , 我们可以得到图 4。



如图 4(a)所示, 产品的批发和零售价格不随政府补贴系数的增加而变化, 表明政府对再制造和再循环部门的补贴不影响产品的销售部门, 也不影响产品的价格和市场需求。如图 4(b)~(h)所示, 政府补贴系数的增加提高了回收价格、回收数量、回收价格和质量价值系数, 表明政府补贴的增加可以提高回收价格、回收数量和回收价格, 促使企业提高回收价格, 获得更多更好质量的废旧产品, 有利于提高回收再制造链的效率, 促进可持续发展。此外, 当  $m > 2/11$  时, 回收补贴下的回收价格和回收量均较好。再制造补贴下的回购价格和回收质量水平总是较好的, 说明再制造补贴政策对提高回收质量具有较好的效果。图 4(i)~(k)表明, 随着政府补贴系数的增加, 制造商和回收商的利润呈上升趋势, 而零售商的利润没有变化; 政府实施回收补贴时, 制造商和回收商的利润波动幅度大于其他两种政策, 补贴效果更为突出, 而再制造补贴的效果更为平滑; 原因是政府补贴的增加可以直接增加闭环供应链节点企业的收入, 为回收和再制造提供激励。





**Figure 4.** The impact of government subsidy coefficient on related decision-making  
**图 4.** 政府补贴系数对相关决策的影响

### 5. 结论

本文通过引入废旧产品质量水平来刻画供应链回收再制造环节的回收质量, 分析比较了单一补贴政策 and 复合补贴政策在考虑回收产品质量水平时对供应链成员的批发价、销售价、回收量、回收价、回购价和利润的最优决策的影响, 结果表明: 政府补贴政策 and 回收质量水平对零售商没有直接影响, 对制造商的影响最大, 其次是回收商。再制造补贴政策直接刺激回收商以更高的价格回收更多的优质二手产品, 提高了消费者出售二手产品的意愿; 再制造补贴政策直接节省了制造商的生产成本, 制造商愿意提高回购价格以获取二手产品进行再制造, 进一步提高了回收商的回收意愿; 复合补贴政策兼顾了回收和再制造, 最优决策在回收补贴和再制造补贴之间, 回收价格、回收数量、回购价格、回收质量水平和利润均

呈稳定上升趋势。从总体上看, 政府更倾向于实施再制造补贴政策, 在这种补贴政策下, 每个决策不受政府补贴系数大小的约束, 总是呈现正相关关系, 闭环供应链的整体效率在这种政策下达到较高水平, 而回收质量水平总是高于回收补贴水平。政府补贴政策可以提高企业利润, 有助于提高回收质量水平, 促进回收再制造的可持续发展, 使全社会受益, 减少环境污染, 提高资源利用率。

本文的研究具有一定的局限性, 如假设市场需求是价格的线性函数, 将来可以考虑随机需求函数来研究闭环供应链的定价决策问题, 本研究没有区分新产品和再制造产品的质量和功能差异, 以及消费者对再制造产品的接受程度可以纳入未来的研究。

## 参考文献

- [1] Zhao, J., Wang, C. and Xu, L. (2019) Decision for Pricing, Service, and Recycling of Closed-Loop Supply Chains Considering Different Remanufacturing Roles and Technology Authorizations. *Computers & Industrial Engineering*, **132**, 59-73. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.019>
- [2] Cao, K., He, P. and Liu, Z. (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>
- [3] Zhang, X., Li, Q., Liu, Z., et al. (2021) Optimal Pricing and Remanufacturing Mode in a Closed-Loop Supply Chain of WEEE under Government Fund Policy. *Computers & Industrial Engineering*, **151**, Article ID: 106951. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106951>
- [4] Wang, Q., Li, B., Chen, B., et al. (2021) Implication of Take-Back and Carbon Emission Capacity Regulations on Remanufacturing in a Competitive Market. *Journal of Cleaner Production*, **325**, Article ID: 129231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129231>
- [5] Bai, S., Ge, L. and Zhang, X. (2022) Platform or Direct Channel: Government-Subsidized Recycling Strategies for WEEE. *Information Systems and E-Business Management*, **20**, 347-369. <https://doi.org/10.1007/s10257-021-00517-4>
- [6] Guo, J., Yu, H. and Gen, M. (2020) Research on Green Closed-Loop Supply Chain with the Consideration of Double Subsidy in E-Commerce Environment. *Computers & Industrial Engineering*, **149**, Article ID: 106779. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106779>
- [7] He, P., He, Y. and Xu, H. (2019) Channel Structure and Pricing in a Dual-Channel Closed-Loop Supply Chain with Government Subsidy. *International Journal of Production Economics*, **213**, 108-123. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.013>
- [8] Yang, L., Gao, M. and Feng, L. (2022) Competition versus Cooperation? Which Is Better in a Remanufacturing Supply Chain Considering Blockchain. *Transportation Research Part E*, **165**, Article ID: 102855. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102855>
- [9] Wang, N., Fan, Z.P. and Chen, X. (2019) Effect of Fairness on Channel Choice of the Mobile Phone Supply Chain. *International Transactions in Operational Research*, **28**, 2110-2138. <https://doi.org/10.1111/itor.12660>
- [10] Wen, D., Xiao, T. and Dastani, M. (2020) Channel Choice for an Independent Remanufacturer Considering Environmentally Responsible Consumers. *International Journal of Production Economics*, **232**, Article ID: 107941. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107941>
- [11] Tian, F., Soi, G. and Debo, L. (2019) Manufacturers' Competition and Cooperation in Sustainability: Stable Recycling Alliances. *Management Science*, **65**, 4451-4949. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2018.3178>
- [12] Zhang, Y. and Zhang, W. (2022) Optimal Pricing and Greening Decisions in a Supply Chain When Considering Market Segmentation. *Annals of Operations Research*, **324**, 93-130. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04663-x>
- [13] Ma, S., He, Y., Gu, R., et al. (2021) Sustainable Supply Chain Management Considering Technology Investments and Government Intervention. *Transportation Research Part E*, **149**, Article ID: 102290. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102290>
- [14] Wang, Y., Su, M., Shen, L., et al. (2021) Decision-Making of Closed-Loop Supply Chain under Corporate Social Responsibility and Fairness Concerns. *Journal of Cleaner Production*, **284**, Article ID: 125373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125373>