

# 政府差异化补贴下动力电池混合回收定价及渠道选择研究

柴霞, 徐琪

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2024年12月7日; 录用日期: 2025年1月3日; 发布日期: 2025年1月9日

## 摘要

在以制造商为主导的多渠道回收闭环供应链中, 考虑政府对制造商采取差异化补贴, 提出两种多渠道混合回收模式, 探讨不同回收模式下的回收价格定价及回收模式选择问题。结果发现: (1) 逆向供应链的回收模式选择不会影响正向供应链的销售决策, 动力电池的销售和回收是两个相对独立的业务。(2) 回收价格受到再制造比例、渠道竞争系数和消费者对回收价格敏感度系数的积极影响。(3) 分析得出制造商、零售商和第三方回收商在不同条件下的最优回收渠道选择策略。

## 关键词

补贴, 动力电池, 混合回收, 回收渠道, 再制造

# Research on Pricing and Channel Selection of Hybrid Recycling of Power Batteries under Differentiated Government Subsidies

Xia Chai, Qi Xu

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

Received: Dec. 7<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2025; published: Jan. 9<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Considering the government's differentiated subsidies to the manufacturer, in a multi-channel recycling closed-loop supply chain dominated by the manufacturer, two mixed recycling models are proposed to explore pricing strategies and selection of recycling modes under various recycling models. The findings are as follows: (1) The recycling model selection of the reverse supply chain

**will not affect the selling decision of the forward supply chain, as the sales and recycling of power batteries operate as two independent business sectors; (2) The recycling price is positively influenced by the proportion of remanufacturing, channel competition coefficient, and consumers' sensitivity to recycling prices; (3) Through analysis, we have derived optimal recycling channel selection strategies for manufacturers, retailers, and third-party recyclers under different scenarios.**

## Keywords

**Subsidy, Power Battery, Hybrid Recycling, Recycling Channels, Remanufacturing**

Copyright © 2025 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

作为全球最大的新能源汽车制造基地和市场,中国新能源汽车数量的快速增长伴随大量退役动力电池产生。到2030年,退役电池数量将占当年国内产量的30% [1],但国内规范化回收率不到25%。作为战略性、不可再生的稀缺资源,我国钴、锂矿资源储量有限,却有约75%的锂、钴用于动力电池制造,消耗量巨大。回收利用废弃电池可满足国内市场每年20%锂、25%钴和11%镍需求,减少对原材料进口的依赖[2]。除了巨大经济价值,废弃动力电池的回收再利用能够有效降低二氧化碳的排放量和金属开采的能源消耗。我国在动力电池回收利用政策探索中走在前列,但激励和约束机制还需加强。由于回收过程涉及环保和质量不确定性等多方因素影响,尽管回收市场广阔,但渠道选择、回收效率和再生产利用率仍不高等问题仍存在,部分退役电池流向非正规渠道,非正规回收渠道缺乏拆解和分解能力,也无相关资质与监管,存在较大的安全隐患和环境污染风险。

## 2. 文献综述

因而,推动完善退役动力电池回收利用是关系新能源汽车产业可持续发展的关键议题之一,其中回收定价和回收渠道选择是研究重点,与企业利益密切相关。针对废旧品回收渠道的研究十分丰富,单渠道回收研究最早来源于 Savaskan 等[3] [4]讨论,文章分析双边垄断制造商选择逆向渠道回收消费者二手产品的问题。接着,将研究扩展至一个制造商与两个零售商竞争的博弈模型,研究零售商之间竞争回收。田立平和王成功等[5] [6]构建政府、第三方回收商和消费者组成的动力电池回收模型,研究各利益主体在不同情境下的决策过程。如今闭环供应链回收再制造的多渠道回收模式亦是学者们研究热点。汪翼等[7]构建政府三种回收管制政策下的供应链决策模型,研究制造商和分销商共同承担废旧品回收责任对供应链成员的影响。刘慧慧等[8]刻画了具备拆解资质和无拆解资质两种回收处理途径和盈利模式,当期利润越高,回收价格和回收量均会提高。倪明[9]从不确定需求条件下双回收渠道角度分析渠道竞争系数对不同模式最优解的影响,抢先占据市场的回收商即使渠道竞争加剧但消费者对回收价格也并不敏感,因此回收商回收价相同且保持不变。公彦德等[10]比较分析双渠道和三渠道两种混合回收模式下闭环供应链定价和回收策略。陈建华等[11]研究由零售商主导的四种混合回收模式,探讨政府奖惩机制对供应链成员决策的影响。政府的激励措施能够提高企业的回收积极性,促进回收再利用[12] [13]。杨康康等[14]则扩展到3种政府管制对供应链各方的最优决策和电池回收率的变化。随着消费者低碳意识增强[15] [16],也会影响回收决策。有学者[17] [18]设计“碳税 + 补贴”的组合政策,征收低碳环保税管制同时给予回收补贴激励其回收。不同补贴对象也会对渠道成员定价决策产生影响[19] [20],动态调整补贴模式优于补

贴力度不变的静态模式[21]。

### 3. 模型描述与研究假设

本文考虑退役动力电池部分再利用的情况, 政府对制造商实施回收补贴, 根据退役动力电池质量水平实施差异化补贴。针对一个制造商、一个零售商和一个第三方回收商组成的动力电池闭环供应链, 信息对称, 所有参与者风险中性, 以利润最大化为目标进行决策, 研究两种混合回收模式下各供应链企业的定价和收益情况。回收模式如图 1 所示: 1) 零售商和第三方回收商共同回收; 2) 制造商、零售商和第三方回收商共同回收。在销售前端, 制造商利用新购入的原材料和回收拆解提取的金属材料生产动力电池, 零售商以批发价从制造商购买电池并售卖给消费者; 在回收后端, 三者都可选择参与回收业务。其中, 制造商以转移价格从零售商和回收商手中回购退役动力电池, 经前者检测分拣后判断是否可利用, 制造商可从再利用中获益。

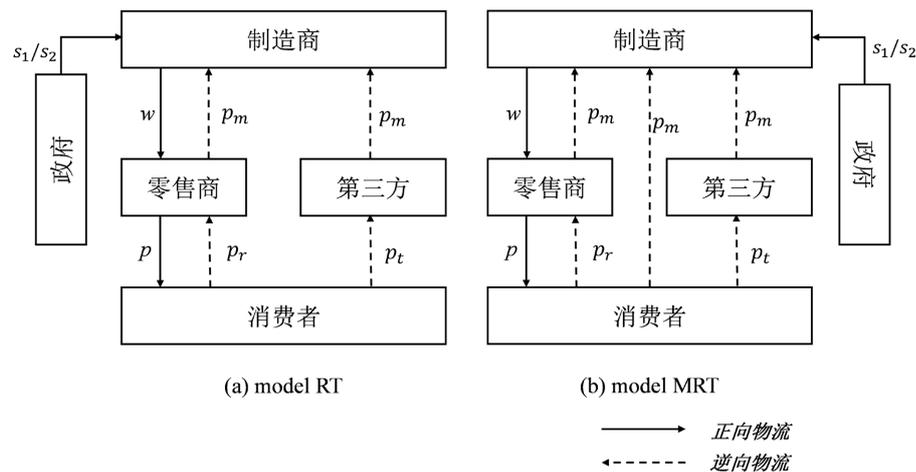


Figure 1. CLSC structure diagram under two PB recycling modes  
图 1. 两种 PB 回收模式下的 CLSC 结构图

为简化模型, 模型假设如下:

假设 1: 制造商对零售商和第三方拥有绝对的渠道权力, 是 Stackelberg 领导者。

假设 2: 参考 Savaskan, 利用新购入的材料还是从回收拆解获取的材料, 两种原材料所制造的电池无区别, 均以相同价格在市场销售。

假设 3: 动力电池的成本占到新能源汽车总成本的近 60%, 因此, 本文将动力电池的需求近似为新能源汽车的需求。市场需求是关于动力电池零售价的线性函数, 即  $d = \alpha - \beta p$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $\alpha > \beta p$ 。

假设 4: 回收渠道之间存在竞争。退役电池回收量和回收价格间的关系为:  $q_j = m_1 p_j - m_2 p_i$ ,  $j, i \in \{m, r, t\}$ ,  $j \neq i$ , 供应链回收总量  $q = q_m + q_r + q_t$ ,  $m_1 > 2m_2 > 0$ ,  $0 < m_2 < 1$ 。

假设 5: 不考虑电池回收方式和回收渠道, 退役电池可再利用的比例为  $k$  ( $k \in [0, 1]$ )。

假设 6: 为提高退役动力电池的回收量, 政府对制造商回收给予补贴。本文根据退役动力电池质量实施差异化补贴: 经检测若退役电池可再制造, 制造商可获得补贴  $s_1$ ; 若退役电池无法再制造, 将其再生利用, 即拆解提取稀有金属材料, 制造商可获得补贴  $s_2$ 。制造商可从拆解业务中销售金属材料获利, 单位获利用  $v$  表示,  $v < \Delta$ ,  $s_1 > s_2$ 。

假设 7: 为保证闭环供应链上各主体可获利和回收积极性, 有  $\Delta > p_m$ ,  $p_m > p_r$ ,  $p_m > p_t$ ,  $p > w$ 。参数和变量说明如表 1 所示。

**Table 1.** The meaning of symbols**表 1.** 符号含义

符号	符号说明	符号	符号说明
$d$	新能源汽车市场需求量	$w$	动力电池批发价格
$\beta$	产品市场的价格敏感系数	$p$	动力电池零售价格
$\alpha$	新能源汽车基本市场规模	$p_m$	制造商的回收价格
$c_m / c_r$	原材料/再生材料生产电池的单位成本	$p_r$	零售商的回收价格
$m_1$	消费者对回收价格的敏感系数	$p_t$	第三方回收商的回收价格
$m_2$	回收渠道之间的竞争系数	$q_j^z$	$z$ 模式下 $j$ 的回收量, $z = \{RT, MRT\}$
$s_1 / s_2$	再制造单位补贴/拆解单位补贴	$\pi_j^i$	模式 $i$ 下 $j$ 的利润
$k / (1-k)$	回收再利用、再制造比例/拆解比例	$\Delta$	单位回收效益, 再制造节约成本

## 4. 模型建立与分析

### 4.1. 零售商和第三方回收商共同回收模式(RT 回收模式)

制造商委托零售商和回收商对退役动力电池进行回收现实中已存在, 如岚图与格林美签订合作框架, 共建共享回收服务网点。在此模型中, 制造商未直接参与回收活动。首先, 制造商确定电池的批发价和回购价, 然后零售商和回收商根据纳什博弈做出共同决策。三者的目标函数如下:

$$\max_{(w, p_m)} \pi_m^{RT} = (w - c_m)d + (k\Delta - p_m)(q_r + q_t) + v(1-k)(q_r + q_t) + [ks_1 + (1-k)s_2](q_r + q_t) \quad (1)$$

$$\max_{(p, p_r)} \pi_r^{RT} = (p - w)d + (p_m - p_r)q_r \quad (2)$$

$$\max_{(p_t)} \pi_t^{RT} = (p_m - p_t)q_t \quad (3)$$

**命题 1** RT 回收模式下, 供应链成员的最优决策分别为:

$$w^{RT*} = \frac{\alpha + \beta c_m}{2\beta} \quad (4)$$

$$p_m^{RT*} = \frac{1}{2} [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2] \quad (5)$$

$$p^{RT*} = \frac{1}{4} \left( \frac{3\alpha}{\beta} + c_m \right) \quad (6)$$

$$p_r^{RT*} = \frac{m_1 [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]}{2(2m_1 - m_2)} \quad (7)$$

$$p_t^{RT*} = \frac{m_1 [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]}{2(2m_1 - m_2)} \quad (8)$$

证明: 利用逆向归纳法求解上述模型。对于函数(2)(3), 求  $p, p_r, p_t$  的一阶偏导数并等于零, 同时联立方程得最优解如下  $p = \frac{\alpha + w\beta}{2\beta}$ ,  $p_r = p_t = \frac{p_m m_1}{2m_1 - m_2}$ 。将  $p, p_r, p_t$  代入式(1), 对  $\pi_m^{RT}$  求关于  $w$  和  $p_m$  的海塞矩阵, 易证  $H_m$  负定。故存在唯一的  $w$  和  $p_m$  使得  $\pi_m^{RT}$  取得均衡解。计算式(1)关于  $w$  和  $p_m$  的一阶偏导数并令其等于 0, 解得  $w^{RT*}, p_m^{RT*}$ , 代入  $p, p_r, p_t$  可得到最优零售价格和最优回收价格。

将上述最优解代入式(1) (2) (3)得到 RT 回收模式下制造商、零售商和回收商的最优利润以及总回收量:

$$\begin{cases} \pi_m^{RT*} = \frac{1}{8} \left( \frac{(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta} + \frac{4m_1(m_1 - m_2)[v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]^2}{2m_1 - m_2} \right) \\ \pi_r^{RT*} = \frac{1}{4} \left( \frac{(\alpha - \beta c_m)^2}{4\beta} + \frac{m_1(m_1 - m_2)^2[v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]^2}{(2m_1 - m_2)^2} \right) \\ \pi_t^{RT*} = \frac{m_1(m_1 - m_2)^2[v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]^2}{4(2m_1 - m_2)^2} \end{cases} \quad (9)$$

$$q^{RT*} = \frac{2m_1(m_1 - m_2)[v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]}{2(2m_1 - m_2)} \quad (10)$$

**推论 1** 渠道竞争和再制造比例对最优决策和利润的影响有:

$$\begin{aligned} (1) \quad & \frac{\partial p_m^{RT*}}{\partial m_2} = 0, \frac{\partial p_t^{RT*}}{\partial m_2} = \frac{\partial p_r^{RT*}}{\partial m_2} > 0, \frac{\partial \pi_m^{RT*}}{\partial m_2} < 0, \frac{\partial \pi_r^{RT*}}{\partial m_2} = \frac{\partial \pi_t^{RT*}}{\partial m_2} < 0; \\ (2) \quad & \frac{\partial p_m^{RT*}}{\partial k} > 0, \frac{\partial p_t^{RT*}}{\partial k} = \frac{\partial p_r^{RT*}}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_m^{RT*}}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_r^{RT*}}{\partial k} = \frac{\partial \pi_t^{RT*}}{\partial k} > 0. \end{aligned}$$

推论 1 表明(1) 回收渠道竞争加剧会提高零售商和第三方的回收价格, 但对制造商的回购价格没有影响。供应链企业的利润均减少是因为两者间的竞争主要表现在回收价格上。随着可选择的回收渠道增多, 消费者倾向将废旧电池交给提供更高回收价格的企业。(2) 可再制造比例越大对消费者和供应链企业总是有利的, 能够鼓励制造商提高回收价格, 吸引更多的消费者出售退役电池, 从而带来更多的回收量, 制造商也可从政府获得更多补贴。现实中, 三元 523 和磷酸铁锂电池中锂、镍等高价金属化合物占成本的 51%。三元圈芯-811 型电池的回收价格最高达到 57,500 元一吨; 钴酸锂聚合物电池的价格平均每吨在 52,000 元左右, 回收价值非常高。

#### 4.2. 制造商、零售商和回收商三方混合回收(MRT 回收模式)

以此模式回收退役动力电池的企业例如特斯拉, 既依靠 4S 店回收退役动力电池还与上海华东汽车拆解有限公司、格林美签署回收协议。在此回收模式, 制造商直接参与回收活动。制造商先确定电池的批发价和回购价, 然后零售商和回收商根据纳什博弈做出共同决策, 决定零售价格和回收价格。三者的目标函数如下:

$$\max_{(w, p_m)} \pi_m^{MRT} = (w - c_m)d + (k\Delta - p_m)(q_m + q_r + q_t) + v(1-k)(q_m + q_r + q_t) + [ks_1 + (1-k)s_2](q_m + q_r + q_t) \quad (11)$$

$$\max_{(p, p_r)} \pi_r^{MRT} = (p - w)d + (p_m - p_r)q_r \quad (12)$$

$$\max_{(p_t)} \pi_t^{MRT} = (p_m - p_t)q_t \quad (13)$$

**命题 2** 在 MRT 回收模式下, 供应链成员的最优决策分别为:

$$w^{MRT*} = \frac{\alpha + \beta c_m}{2\beta} \quad (14)$$

$$p_m^{MRT*} = \frac{1}{2}[v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2] \quad (15)$$

$$p^{MRT*} = \frac{1}{4} \left( \frac{3\alpha}{\beta} + c_m \right) \quad (16)$$

$$p_r^{MRT*} = \frac{(m_1 + m_2) [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]}{2(2m_1 - m_2)} \quad (17)$$

$$p_i^{MRT*} = \frac{(m_1 + m_2) [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]}{2(2m_1 - m_2)} \quad (18)$$

证明: 与模型 RT 的证明类似, 故省略。将上述最优解代入式(11) (12) (13)得到制造商、零售商和回收商的最优利润以及总回收量:

$$\begin{cases} \pi_m^{MRT*} = \frac{1}{8} \left( \frac{(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta} + \frac{2m_1(4m_1 + m_2)(m_1 - 2m_2) [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]^2}{2m_1 - m_2} \right) \\ \pi_r^{MRT*} = \frac{1}{4} \left( \frac{(\alpha - \beta c_m)^2}{4\beta} + \frac{m_1(m_1 - 2m_2)^2 [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]^2}{(2m_1 - m_2)^2} \right) \\ \pi_i^{MRT*} = \frac{m_1(m_1 - 2m_2)^2 [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]^2}{4(2m_1 - m_2)^2} \end{cases} \quad (19)$$

$$q^{MRT*} = \frac{(4m_1 + m_2)(m_1 - 2m_2) [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]}{2(2m_1 - m_2)} \quad (20)$$

**推论 2 (1)**  $\frac{\partial p_m^{MRT*}}{\partial m_2} = 0, \frac{\partial p_i^{MRT*}}{\partial m_2} = \frac{\partial p_r^{MRT*}}{\partial m_2} > 0, \frac{\partial \pi_m^{MRT*}}{\partial m_2} < 0, \frac{\partial \pi_r^{MRT*}}{\partial m_2} = \frac{\partial \pi_i^{MRT*}}{\partial m_2} < 0;$

(2)  $\frac{\partial p_m^{MRT*}}{\partial k} > 0, \frac{\partial p_i^{MRT*}}{\partial k} = \frac{\partial p_r^{MRT*}}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_m^{MRT*}}{\partial k} > 0, \frac{\partial \pi_r^{MRT*}}{\partial k} = \frac{\partial \pi_i^{MRT*}}{\partial k} > 0。$

推论 2 表明, 在 MRT 回收模式中, 回收商的边际利润随着再制造比例的增加而增加, 随着回收渠道竞争系数的增加而减少, 说明再制造能刺激回收价格的上涨, 但竞争会损害企业的利润。

### 4.3. 两种回收模式比较分析

进一步, 讨论闭环供应链各主体在两种混合竞争回收模式下, 竞争系数和再制造比例等因素对回收价格、回收数量和企业利润的影响。

**推论 3** 两种不同回收模式下对闭环供应链回收的影响:

- (1)  $w^{MRT*} = w^{RT*}; p^{MRT*} = p^{RT*};$
- (2)  $p_m^{MRT*} = p_m^{RT*}, p_r^{MRT*} > p_r^{RT*}, p_i^{MRT*} > p_i^{RT*}。$

证明:

- (1) 比较两种回收模式的批发价格和零售价格, 推论 3(1)得证。
- (2) 比较两种回收模式的供应链参与企业的回收价格和利润, 因为

$$p_r^{MRT*} - p_r^{RT*} = \frac{2m_2 [v(1-k) + k\Delta + ks_1 + (1-k)s_2]}{2(2m_1 - m_2)} > 0, \text{ 同理可解得 } p_i^{MRT*} > p_i^{RT*}。 \text{ 推论 3(2)得证。}$$

推论 3 表明回收模式不会对正向供应链中动力电池的批发价和零售价产生影响, 逆向供应链的回收模式选择不会影响正向供应链的销售决策, 动力电池的销售和回收是两个相对独立的业务; 当制造商直接参与回收时, 两种回收模式下的回购价格相同, 是因为对于制造商来说, 零售商和第三方所扮演的角

色与消费者一样, 负责回收废旧电池。但也因为制造商的参与, 回收渠道激烈竞争迫使各回收企业提高回收价格来提升其竞争力。

**推论 4** 两种回收模式下补贴对回收价格及回收量的影响:

$$(1) \frac{\partial p_m^{RT^*}}{\partial s_1} = \frac{\partial p_m^{MRT^*}}{\partial s_1} > 0, \frac{\partial p_t^{RT^*}}{\partial s_1} = \frac{\partial p_r^{RT^*}}{\partial s_1} > \frac{\partial p_t^{RT^*}}{\partial s_2} = \frac{\partial p_r^{RT^*}}{\partial s_2} > 0;$$

$$\frac{\partial p_t^{MRT^*}}{\partial s_1} = \frac{\partial p_r^{MRT^*}}{\partial s_1} > \frac{\partial p_t^{MRT^*}}{\partial s_2} = \frac{\partial p_r^{MRT^*}}{\partial s_2} > 0。$$

$$(2) \text{ 当 } m_1 > \frac{13 + \sqrt{281}}{14} m_2, \frac{\partial q^{MRT^*}}{\partial s_1} > \frac{\partial q^{RT^*}}{\partial s_1} > 0, \frac{\partial q^{MRT^*}}{\partial s_2} > \frac{\partial q^{RT^*}}{\partial s_2} > 0;$$

反之,  $\frac{\partial q^{RT^*}}{\partial s_1} > \frac{\partial q^{MRT^*}}{\partial s_1} > 0, \frac{\partial q^{RT^*}}{\partial s_2} > \frac{\partial q^{MRT^*}}{\partial s_2} > 0。$

推论 4 反映了政府补贴对回收价格与回收量最优决策的影响, 得到以下结论: (1) 说明零售商和回收商的回收价格会随着补贴力度的增大而增大, 回收价格升高能够带来更多回收量, 制造商、零售商以及第三方回收商均受益于再制造和政府补贴。(2) 两种回收模式下, 回收量都与回收渠道竞争系数有关。如推论 3 所述, 新能源汽车的销售与回收是两个相对独立的业务, 政府补贴不影响正向供应链的销售决策。

**推论 5** 当(1)  $m_1 > \frac{\sqrt{41} + 5}{4} m_2, q^{MRT^*} > q^{RT^*}$ ; 反之, (2)  $q^{MRT^*} < q^{RT^*}$ 。

推论 5 表明两种回收模式下供应链总回收量的大小关系取决于渠道竞争系数与消费者回收价格敏感系数之间的关系, 回收价格对回收量的影响大于竞争对回收量的影响。当消费者对回收价格更为敏感时, 回收价格是影响回收量的主要因素。比较两种回收模式下的回收价格可知, MRT 模式下的回收价格总是高于 RT 模式的回收价格, 高价吸引更多的消费者; 当时, 竞争对回收量的影响远大于回收价格, 因此竞争激烈会抑制回收量的增长。

**推论 6** 对制造商而言, 其最优回收模式选择策略是:

$$(1) \text{ 当 } 0 < m_2 < \frac{\sqrt{41} - 5}{4} m_1 \text{ 时, } \pi_m^{MRT^*} > \pi_m^{RT^*}。 \text{ 制造商选择 MRT 回收模式最佳。}$$

$$(2) \text{ 当 } m_2 > \frac{\sqrt{41} - 5}{4} m_1 \text{ 时, } \pi_m^{MRT^*} < \pi_m^{RT^*}。 \text{ 制造商选择 RT 回收模式最佳。}$$

证明: 比较两种回收模式下制造商的利润  $\pi_m^{MRT^*} - \pi_m^{RT^*} = \frac{(Z_1 + Z_2)^2 (2m_1^2 - 5m_1m_2 + 2m_2^2)}{4(2m_1 - m_2)}$ , 计算分析得

到上述结果。

推论 6 表明, 两种回收模式下制造商利润的大小关系取决于渠道竞争程度与消费者回收价格敏感因素的关系。当电池回收渠道竞争激烈时, 竞争对利润的影响远大于回收价格, 会损害制造商利润, 制造商不会选择直接参与回收业务。当  $0 < m_2 < \frac{\sqrt{41} - 5}{4} m_1$  时, 根据推论 5, 制造商在 MRT 模式下回收量更多, 其利润最大; 反之, 制造商在 RT 回收模式下有最更大利润。

**推论 7** 对零售商而言, 其最优回收模式选择策略是:

$$(1) \text{ 当 } \frac{2}{3} m_1 < m_2 < m_1 \text{ 时, } \pi_r^{MRT^*} > \pi_r^{RT^*}。 \text{ 零售商选择 MRT 回收模式最佳。}$$

$$(2) \text{ 当 } 0 < m_2 < \frac{2}{3} m_1 \text{ 时, } \pi_r^{MRT^*} < \pi_r^{RT^*}。 \text{ 零售商选择 RT 回收模式最佳。}$$

证明与推论 6 类似, 故省略。

与推论 6 类似, 推论 7 表明两种回收模式下零售商利润的大小关系取决于渠道竞争与消费者回收价格敏感系数之间的关系。

**推论 8** 对回收商而言, 其最优回收模式选择策略是:

- (1) 当  $\frac{2}{3}m_1 < m_2 < m_1$  时,  $\pi_r^{MRT*} > \pi_r^{RT*}$ 。回收商选择 MRT 回收模式最佳。
- (2) 当  $0 < m_2 < \frac{2}{3}m_1$  时,  $\pi_r^{MRT*} < \pi_r^{RT*}$ 。回收商选择 RT 回收模式最佳。

证明与推论 6 类似, 故省略。

结合推论 6、7、8 可知, 零售商和回收商的最优回收策略完全一致。

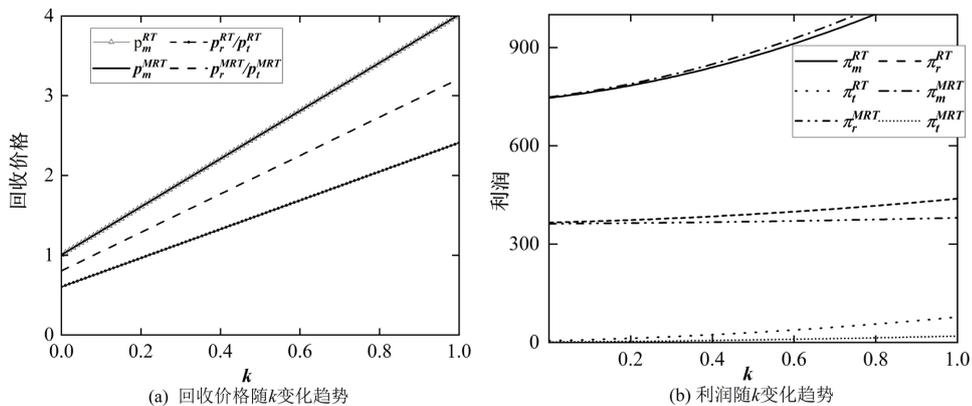
### 5. 算例分析

本节为了验证上述模型和分析结果的有效性和合理性, 通过数值算例, 参考前人文献设定参数, 探讨重要参数对两种回收模式下最优决策能力和盈利能力的影响。结合实际, 对数值分析的基本参数的设定如下:  $\alpha = 200, \beta = 4, c_m = 12, c_r = 4, m_1 = 30, m_2 = 10, k = 0.7, v = 2, s_1 = 0.03, s_2 = 0.01$ 。

新能源汽车常用的动力电池有三元锂电池、磷酸铁锂电池和钴锂电池。以这三种动力电池为例, 三元锂电池含有丰富的锂镍钴锰等高价金属化合物, 占成本的比例高达 51%, 回收价值极高。动力电池行业龙头企业宁德时代在其 2022 年 ESG 报告中披露, 其电池回收子公司已实现锂镍钴回收率分别高达 90% 以上。以宁德时代的锂、钴等贵金属回收数据为基础, 设定退役三元锂电池再制造比例最高, 钴锂电池次之, 磷酸铁锂电池最低,  $k$  值分别为 0.8、0.7、0.5。

#### 5.1. 再制造比例的影响

图 2 表明, 随着退役动力电池再制造比例的提高, 回收价格和利润均增加, 而再制造比例对制造商的回收价格没有影响。再制造具有较高的经济效益, 当退役动力电池中可再制造的比例提高时, 企业愿意支付更高价格回收电池。根据推论 3, MRT 回收模式零售商和第三方的回收价格高于 RT 模式。消费者对价格敏感, 因此对于消费者, 选择 MRT 模型都是最优的。

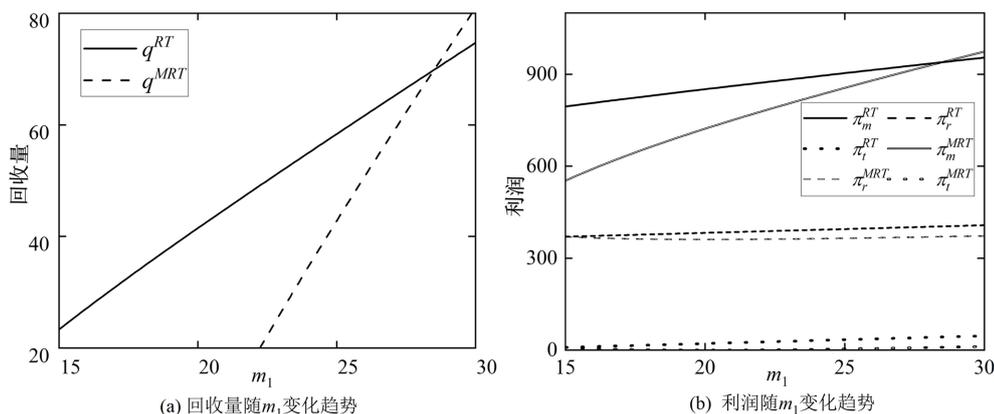


**Figure 2.** The impact of  $k$  on recycling price and profit under different recycling modes  
**图 2.** 不同回收模式下  $k$  对回收价格、利润的影响

#### 5.2. 消费者敏感度因素对回收价格的影响

图 3 为消费者对回收价格的敏感系数  $m_1$  变化对回收量和利润的影响。随着  $m_1$  的提高, 两种回收模式下回收量和利润的最优解变化趋势相同, 回收量、利润与回收价格敏感系数成正向关系。结合图 3(a)

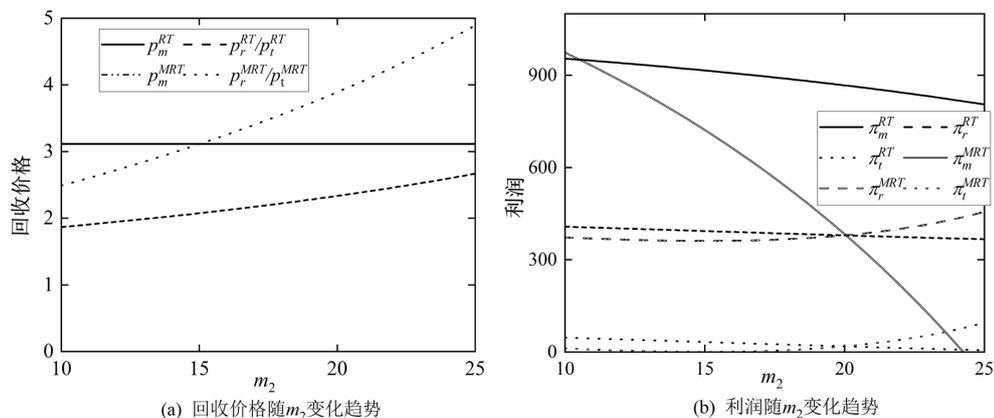
与推论 5 分析可知, MRT 回收模式下的总回收量先低于 RT 回收模式下的总回收量, 但随着  $m_1$  逐渐增大, 最终高于 RT 回收模式下的总回收量, 并且 MRT 模式下回收量涨幅最大。这表明, 多渠道可以促进退役动力电池的回收。制造商可从再制造的节省成本和补贴中获利, 这与回收量直接相关, 因此制造商在 MRT 回收模式的利润变化趋势与供应链回收量一致, 随着  $m_1$  的增大先低于再大于 RT 回收模式下的利润。



**Figure 3.** The impact of  $m_1$  on recycling volume and profit under different recycling modes  
**图 3.** 不同回收模式下  $m_1$  对回收量和利润的影响

### 5.3. 回收渠道竞争程度的影响

图 4 说明了回收环节的竞争程度对利润和回收价格的影响。随着回收企业数量的增加, 零售商和第三方尤其是第三方的收入直接受益于回收业务的扩张。因此, 零售商和第三方将积极提高回收价格, 以回收更多退役电池。另一方面, 制造商可以从退役电池的再制造或拆解中获利。推论 6~8 和图 4(b)总结了制造商、零售商和第三方的最佳回收模式的选择由渠道之间的竞争程度和消费者对回收价格的敏感度的大小关系决定。



**Figure 4.** The impact of  $m_2$  on recycling price and profit under different recycling modes  
**图 4.** 不同回收模式下  $m_2$  对回收价格、利润的影响

### 5.4. 补贴的影响

设定再制造比例  $k = 0.7$ , 图 5 为不同回收模式下差异化补贴对回收量的影响。差异化回收补贴与回

收量呈正向线性关系, 说明补充政府补贴是提高退役动力电池回收利用、促进低碳减排的有效手段。政府对厂商进行回收补贴, 后者可将部分补贴通过提高回收价格转化, 吸引消费者回收, 从而使回收量增长。此外, 图 5 表明再制造的边际补贴远高于拆解的边际补贴, 较高的再制造率意味着生产商从回收电池中获得更高的边际利润, 激励厂商投入技术提高电池可再制造程度, 获得更多的回收补贴, 增加利润。调查数据显示, 我国退役锂离子电池在 2022 年的回收量为 41.5 吨, 年均增长 75.8% [22]。其中, 磷酸铁锂电池是梯次利用的主力军, 而三元锂和钴酸锂等电池则被大规模地用于拆解提取稀有金属材料。再制造经济价值明显高于拆解再生利用, 废旧锂电池的再利用再制造程度提高会利于闭环供应链各主体的利润增长。这与我们研究得到的退役动力电池回收再利用比例越高, 利润也越高的结论一致。

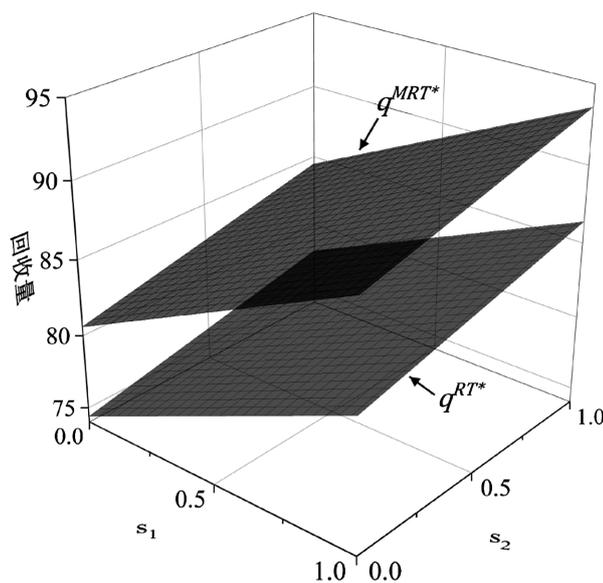


Figure 5. The impact of subsidy on recycling quantity under different recycling modes

图 5. 不同回收模式下补贴对回收价格、利润的影响

## 6. 结论与管理启示

本文研究了一个包含制造商、零售商和第三方回收商的闭环供应链, 提出两种多渠道回收模式, 分析差异化补贴下制造商主导的回收。通过逆向归纳法和数值算例, 比较不同模式下再制造比例、渠道竞争和消费者价格敏感度对回收价格、回收量和利润的影响, 并从消费者、企业 and 环境角度进行分析, 主要得到以下结论: (1) 动力电池的销售和回收是独立的, 回收模式不影响销售决策; (2) 无论何种回收模式, 回收补贴增大能够推动零售商和回收商提高回收价格, 进而增加回收量, 使所有环节受益; (3) 回收量受渠道竞争和消费者价格敏感度影响。当消费者对回收价格的敏感系数较大时, MRT 模式回收量最大; 当消费者对回收价格的敏感系数较小时, RT 模式回收量最大; (4) 对于价格敏感消费者, MRT 模式更优, 因为其回收价格更高, 带来更多价值; (5) 回收渠道竞争强度小时, 制造商偏好 MRT 回收模式, 而零售商和回收商偏好 RT 模式; 竞争强度大时, 制造商偏好 RT 模式, 而零售商和回收商偏好 MRT 模式。

鉴于以上研究结论, 得到管理启示如下: 回收环节是新能源汽车退役动力电池回收再制造关键节点, 政府应加快完善退役动力电池回收体系和政策标准; 鼓励企业参与动力电池回收利用标准体系修订, 促进回收体系建设规范化; 动力电池再利用再制造水平的提高利于供应链利润的增长, 这些需要不断完善和创新技术以提高回收利用率, 应支持生产企业、高校和科研院所等开展新能源蓄电池技术研发和创新,

共同推动动力电池回收利用的发展, 政府并予以相应的财政支持和税收优惠; 同时, 鼓励企业探索创新回收方法, 推动上下游联动发展。

## 基金项目

国家社会科学基金项目(21BGL014); 国家自然科学基金重点项目(71832001)。

## 参考文献

- [1] 刘光富, 林锦灿, 田婷婷. 新能源汽车动力电池报废量估算和资源潜力分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(1): 96-99.
- [2] 赵琼. 动力电池退役潮催热回收新赛道[N]. 中国能源报, 2024-03-18(003).
- [3] Savaskan, R.C., Bhattacharya, S. and Van Wassenhove, L.N. (2004) Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing. *Management Science*, **50**, 239-252. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1030.0186>
- [4] Savaskan, R.C. and Van Wassenhove, L.N. (2006) Reverse Channel Design: The Case of Competing Retailers. *Management Science*, **52**, 1-14. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0454>
- [5] 田立平, 李文龙. 第三方回收企业对闭环供应链的回收与定价策略研究[J]. 系统科学与数学, 2020, 40(11): 2082-2092.
- [6] 王成功, 刘娟娟. 考虑政府奖惩的动力电池回收利益相关者决策行为演化博弈分析[J]. 生态经济, 2023, 39(4): 205-213.
- [7] 汪翼, 孙林岩, 李刚, 等. 闭环供应链的回收责任分担决策[J]. 系统管理学报, 2009, 18(4): 378-384.
- [8] 刘慧慧, 黄涛, 雷明. 废旧电器电子产品双渠道回收模型及政府补贴作用研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(2): 123-131.
- [9] 倪明, 张族华, 郭军华, 等. 不确定需求条件下双渠道回收闭环供应链回收模式比较[J]. 系统工程, 2017, 35(2): 60-68.
- [10] 公彦德, 蒋雨薇. 闭环供应链混合回收模式定价及渠道选择研究[J]. 软科学, 2018, 32(5): 127-131+144.
- [11] 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.
- [12] 张保银, 汪波, 吴煜. 基于循环经济模式的政府激励与监督问题[J]. 中国管理科学, 2006(1): 136-141.
- [13] 王文宾, 达庆利. 再制造逆向供应链协调的奖励、惩罚及奖惩机制比较[J]. 管理工程学报, 2010, 24(4): 48-52+77.
- [14] 杨康康, 张文杰, 张钦红. 考虑梯次利用的动力电池回收激励政策研究[J]. 工业工程与管理, 2022, 27(2): 1-8.
- [15] Chen, C. and Ulya, M.A. (2019) Analyses of the Reward-Penalty Mechanism in Green Closed-Loop Supply Chains with Product Remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, **210**, 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.006>
- [16] Shao, Y., Deng, X., Qing, Q. and Wang, Y. (2018) Optimal Battery Recycling Strategy for Electric Vehicle under Government Subsidy in China. *Sustainability*, **10**, Article No. 4855. <https://doi.org/10.3390/su10124855>
- [17] 刘娟娟, 薛晶, 张为四. 政府碳税和补贴下的动力电池回收渠道契约协调[J]. 科技管理研究, 2022, 42(22): 160-168.
- [18] 夏西强, 李飏. 政府碳税与补贴政策对外包再制造影响研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(9): 105-115.
- [19] 赵敬华, 林杰. 不同补贴对象下的闭环供应链定价模型[J]. 管理工程学报, 2017, 31(1): 85-92.
- [20] 王珊珊, 秦江涛. 政府补贴下双渠道闭环供应链回收渠道的选择研究[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(10): 2756-2773.
- [21] 曹霞, 邢泽宇, 张路蓬. 政府规制下新能源汽车产业发展的演化博弈分析[J]. 管理评论, 2018, 30(9): 82-96.
- [22] 宋维东. 动力电池回收产业驶入快车道[N]. 中国证券报, 2023-06-02(A07).