

政府补贴与低碳偏好下动力电池回收工程闭环供应链博弈决策与优化研究

冯 敏*, 黄美琳

江西理工大学经济管理学院, 江西 赣州

收稿日期: 2026年8月11日; 录用日期: 2026年9月2日; 发布日期: 2026年9月14日

摘 要

在消费者低碳偏好日益增强、供应链管理决策优化需求凸显的背景下, 基于博弈决策理论构建电池制造商(模型M)、电池零售商(模型R)和第三方回收商(模型T)分别作为回收主体的动力电池回收工程闭环供应链模型, 探究政府补贴、消费者低碳偏好双重因素对供应链运营决策及效益的影响。研究表明: (1) 不同回收决策模型中, 供应链整体碳排放、制造商碳减排投资水平以及回收努力程度都随消费者低碳偏好的增加而提升; (2) 政府补贴与消费者低碳偏好共同调控供应链决策模型选择及利润表现, 在消费者低碳偏好较低及中等区间, 政府补贴提升可显著助推制造商回收模型利润增长, 该场景下最优决策为选取制造商回收模式; 在消费者低碳偏好较高区间, 无论政府补贴如何调整, 第三方回收模型的供应链整体利润均显著优于其他模型, 为最优管理决策方案。

关键词

动力电池回收工程, 政府补贴, 消费者低碳偏好, 闭环供应链, 博弈决策, 决策优化

Research on Game Decision and Optimization of Closed Loop Supply Chain for Power Battery Recycling Engineering under Government Subsidies and Low Carbon Preferences

Min Feng*, Meilin Huang

School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: August 11, 2026; accepted: September 2, 2026; published: September 14, 2026

*通讯作者。

文章引用: 冯敏, 黄美琳. 政府补贴与低碳偏好下动力电池回收工程闭环供应链博弈决策与优化研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(5): 1022-1035. DOI: 10.12677/mse.2026.155099

Abstract

Against the backdrop of growing consumer low-carbon preferences and prominent demands for optimization of supply chain management decisions, this paper constructs closed-loop supply chain models of power battery recycling project with battery manufacturers (Model M), battery retailers (Model R) and third-party recyclers (Model T) serving as recycling entities respectively based on game decision theory. It explores the impacts of two factors, namely government subsidies and consumer low-carbon preferences, on the operational decisions and benefits of the supply chain. The results show that: (1) In different recycling decision models, the overall carbon emissions of the supply chain, manufacturers' carbon emission reduction investment level and recycling effort all rise with the increase in consumer low-carbon preferences; (2) Government subsidies and consumer low-carbon preferences jointly regulate the selection of supply chain decision models and profit performance. When consumer low-carbon preferences are at low and medium levels, the increase of government subsidies can significantly boost the profit of the manufacturer-led recycling model, making this recycling mode the optimal choice. When consumer low-carbon preferences are high, the overall supply chain profit of the third-party recycling model is significantly higher than that of other models regardless of changes in government subsidies, which serves as the optimal management decision scheme.

Keywords

Power Battery Recycling Project, Government Subsidies, Consumer Low-Carbon Preference, Closed-Loop Supply Chain, Game Decision, Decision Optimization

Copyright © 2026 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“双碳”目标被纳入国家发展战略, 2025 年政府工作报告中明确提出“扩大内需、推动高质量发展、加快绿色转型”三大任务, 其中新能源汽车产业被列为绿色转型的关键领域¹。根据公安部统计数据, 截至 2025 年 6 月底, 全国新能源汽车保有量达 3689 万辆, 其中纯电动汽车保有量为 2553.9 万辆, 占新能源汽车总量的 69.23%。根据中国汽车工业协会官网给出的数据, 2025 年 7 月, 新能源汽车产销分别完成 124.3 万辆和 126.2 万辆², 同比分别增长 26.3%和 27.4%, 反映了我国新能源汽车产业的高速增长态势。由此, 作为新能源汽车核心部件的动力电池装机量也会持续攀升。然而动力电池具有特定使用寿命, 一般在 5~8 年左右, 这意味着未来几年我国将迎来动力电池退役高峰期, 退役动力电池数量将爆发式增长。退役动力电池若得不到妥善处理, 将会造成严重的资源浪费以及环境污染。在此背景下, 国家针对新能源汽车废旧动力电池问题出台相应政策措施, 其中包括颁布《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》、制定生产者责任延伸制度以及用政府补助的方式促使相关企业参与动力电池回收再利用等。在实践中, 有三种类型的动力电池回收模型: 第一种是电池制造商回收; 第二种是电池零售商回收; 第三种是第三方回收商回收。

与本文研究相关的文献主要包含政府补贴、消费者低碳偏好以及动力电池回收模型选择。

¹https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202503/content_7013163.htm?s_channel=5s_trans=7824452999

²http://www.caam.org.cn/chn/4/cate_30/con_5236878.html

第一是关于政府补贴的研究。政府补贴对象的选择一般为制造商、零售商以及第三方回收商。姚锋敏等[1]在政府补贴和零售商企业社会责任投入的背景下, 研究发现不论采取何种回收模式, 政府补贴均能提高各回收方的积极性和闭环供应链成员以及系统的总收益; 张川等[2]针对补贴对象分别引入闭环供应链协调机制, 并搭建相应模型, 对政府补贴对象的选择对最优决策的影响开展研究。且相关研究都指出政府补贴有助于缓解回收主体的经济压力[3]、增加供应链整体利润[4]、影响供应链主体做出不同的策略性选择[5]。上述研究主要聚焦于政府补贴在供应链中的作用以及补贴对象的选择, 但在电池制造商作为补贴对象的研究方面还有待深入。

第二是关于消费者低碳偏好的研究。相关研究指出随着环境问题愈发严重, 人们的环保意识增加[6], 具有低碳偏好的消费者更愿意为碳排放量低的产品支付溢价[7], 且消费者低碳偏好是影响电池制造商碳减排投资的关键参数之一[8]。黄晨星等[9]认为, 电池制造商与零售商通过销售和生产低碳产品所获得的盈利大部分来源于消费者低碳偏好的增加所带来的市场需求增加以及产品溢价; 张玲红等[10]在碳减排制造商和零售商的供应链中引入环保意识消费群体建立二级供应链模型, 发现消费者环保意识会促进企业进行减排投资, 建立有利于环保的良性循环供应链; 许民利等[11]利用不同消费者行为特征进行回收, 得出不同消费者环保意识会对不同类型的回收渠道合作策略产生不同的影响。综上所述, 上述文献主要探讨了消费者的购买偏好对供应链成员的生产销售决策、企业利润等造成的影响, 但从需求侧的角度刻画动力电池的市场需求量以及回收量的时候, 并没有加入消费者低碳偏好这一因素。

第三是有关动力电池回收模型选择的研究。范定祥等[12]对比分析了四种闭环供应链回收模型, 选出最优回收模型并引入了碳交易机制对模型进行了优化分析; Savaskan 等[13]讨论了如何选择反向渠道回收废旧产品的问题, 并通过研究以制造商为领导者的 Stackelberg 博弈, 对比不同回收模型最优决策并进行选择; 焦建玲等[14]构建了包含动力电池制造商、整车企业与第三方回收企业的博弈模型, 并结合碳排放影响对再生材料收益对最优回收模型选择进行了对比分析; 林贵华等人[15]研究针对单一制造商、零售商、第三方构成的回收供应链体系, 探讨了不同回收渠道模式特点并进行对比分析; 张川等[16]将同一制造商主导的闭环供应链中回收模型选择行为的探究引申到制造商主导的不同动力电池闭环供应链中去, 研究发现不同报废动力电池的市场价格会影响回收模型的选择。综上所述, 现有研究从多角度对动力电池回收模型选择展开探讨, 但多聚焦于供应链内部结构、成本收益等内部驱动因素对回收模型选择的影响, 对消费者低碳偏好以及政府补贴这类外部驱动因素考虑不足。

基于此, 本研究构建三种动力电池回收闭环供应链模型, 同时考虑政府补贴对象为电池制造商以及消费者低碳偏好对电池需求量和回收量的影响下, 运用 Stackelberg 博弈理论对三种模型进行求解并进行分析。本文的边际贡献: (1) 本文构建了包含政府补贴和消费者低碳偏好的多主体动力电池回收闭环供应链决策模型。该模型同时考虑了制造商的碳减排投资、不同回收主体的回收努力行为, 以及回收量、市场需求与碳排放之间的内在联系, 突破了传统闭环供应链模型仅关注经济利润的局限, 实现了经济效益与环境效益的综合考量。(2) 本文将政府补贴和消费者低碳偏好作为关键外生变量引入博弈过程, 揭示了其对供应链各成员决策的影响机理, 从而系统阐释了“政府引导”和“市场驱动”协同影响企业绿色转型的行为逻辑和内在动因。

2. 问题描述与假设

2.1. 问题描述

本文参考以往研究[17]考虑电池制造商(模型 M)、电池零售商(模型 R)、第三方回收(模型 T)分别作为回收主体的三种废旧动力电池回收模型。为简化模型本文假设存在单一的回收对象。制造商负责生产动力电池, 并投资绿色技术以实现减排; 零售商则负责销售电池。各回收主体存在明显的决策顺序, 因此

本文利用 Stackelberg 博弈理论描述动力电池闭环供应链各主体决策。

2.2. 模型假设

假设 1: 使用原材料生产的单位成本大于使用回收产品再制造生产的成本, 即 $C_m > C_d$ 。制造商可以依靠再制造降低成本提升利润。并且再制造过程可节约的单位成本为: $\Delta = C_m - C_d$ ($\Delta > 0$)。此外, 制造商支付单位转移价格为 α , 且 $\Delta > \alpha$, 这表明制造商进行再制造获得的单位利润大于需要支付的单位转移价格。动力电池的再制品在外观和性能上与新产品无异, 能够以相同价格进行售卖且碳排放量相等。以上假设均表明制造商进行再制造是利可图的。

假设 2: 本文参考以往研究, 用凸函数来表示回收成本以及制造商碳减排投资成本, 分别为:

$$C[A_i] = \frac{1}{2} h_i A_i^2; \quad C[e_m] = \frac{1}{2} r_m e_m^2 \quad (i = m, n, t)$$

其中, A_i 表示不同回收主体的回收努力水平, h_i 表示不同回收主体的回收成本系数。 m 代表制造商, n 代表零售商, t 表示第三方回收商。 e_m 表示制造商碳减排投资努力水平, r_m 表示制造商碳减排投资成本系数。

假设 3: 动力电池生产碳排放量随供应链成员碳减排努力变化, 表示为: $L = f_m e_m + y_i A_i$ ($i = m, n, t$)。

其中, f_m 表示制造商的减排努力水平对碳排放量的影响系数, y_i 表示不同回收主体的努力水平对碳排放量的影响系数 ($i = m, n, t$)。

假设 4: 参考文献[8]的研究假设, 产品市场需求不仅受到价格的影响, 还受到消费者环保意识的影响, 因此市场需求函数为 $D = a - bP + kL$ 。

假设 5: 动力电池回收量可表示为: $D_r = g + dP_i + kL$ ($i = m, n, t$)。其中 g 表示消费者自愿返还的动力电池数量[18], d 表示消费者对回收价格的敏感系数, P_i 表示不同回收模型给出的回收价格。

3. 模型建立与求解

3.1. 模型 M

模型 M 中, 制造商承担回收业务, 政府根据回收量给予补贴 s 。决策顺序为: 制造商先确定批发价格 W 、回收价格 P_m 、回收努力水平 A_m 以及碳减排投资水平 e_m , 然后零售商决定零售价格 P 。制造商以及零售商的利润函数如下:

$$\Pi_m^M = (w - c_m)D + (\Delta + s - p_m - c_r)D_r - \frac{r_m}{2} e_m^2 - \frac{h_m}{2} A_m^2 \quad (1)$$

$$\Pi_n^M = (p - w)D \quad (2)$$

命题 1: 在模型 M 中通过逆向求解法得到:

$$\text{最优批发价格: } W = \frac{a - g + bc_m + d(c_m + c_r - \Delta - s)}{2b + d} - \frac{2dh_m r_m \delta}{(2b + d)\beta}$$

$$\text{最优回收价格: } P_m = \frac{a - g - bc_m + 4b\Delta - 4bc_r + \Delta d - c_r d + 4bs + ds}{2(2b + d)} + \frac{4bh_m r_m \delta}{2(2b + d)\beta}$$

$$\text{最优碳减排努力水平: } e_m = -\frac{f_m h_m k \delta}{\beta}$$

$$\text{最优回收努力水平: } A_m = \frac{-kr_m y_m \delta}{\beta}$$

$$\text{最优零售价格: } P = \frac{3a - 3g + bc_m + 2dc_m - 3d\Delta + 3dc_r - 3ds}{2(2b + d)} - \frac{6dh_m r_m \delta}{2(2b + d)\beta}$$

$$\text{制造商最优利润: } \Pi_m^M = \frac{(g-a+bc_m+d(\Delta-c_r+s))^2}{4(2b+d)} - \frac{2h_m r_m \delta^2}{4(2b+d)\beta}$$

零售商最优利润:

$$\Pi_n^M = \frac{b(h_m(f_m^2 k^2(g-a+bc_m+\Delta d-dc_r+ds)+2adr_m-2bdc_m r_m)+k^2 r_m y_m^2(g-a+bc_m+d(\Delta-c_r+s)))}{4\beta^2}$$

$$\text{供应链整体碳排放量: } L = -\frac{k\gamma(f_m^2 h_m + y_m^2 r_m)}{\beta}$$

$$\text{注: } \beta = (2b+d)f_m^2 k^2 h_m - 4bdh_m r_m + (2b+d)k^2 y_m^2 r_m$$

$$\delta = 2ab+d(a-bc_m+2b(\Delta-c_r+s))$$

3.2. 模型 R

模型 R 中, 由零售商承担回收任务, 政府补贴制造商。决策顺序为: 制造商先确定批发价格 W 、碳减排投资水平 e_m , 然后零售商决定零售价格 P 、回收努力水平 A_n 以及回收价格 P_n 。制造商以及零售商的利润函数如下:

$$\Pi_m^R = (w-c_m)D + (\Delta+s-\alpha)D_r - \frac{r_m}{2}e_m^2 \quad (3)$$

$$\Pi_n^R = (P-w)D + (\alpha-P_n-c_r)D_r - \frac{h_n}{2}A_n^2 \quad (4)$$

命题 2: 在模型 R 中用逆向求解法可得:

$$W = \frac{2bd^2 h_n^2 (2ar_m + c_m(2br_m - f_m^2 k^2) + f_m^2 k^2 (\Delta - \alpha + s))}{b\gamma}$$

$$\text{最优批发价格: } + \frac{-2dh_n k^2 r_m (a(2b+d) + b(2bc_m + \theta_1 + dc_m)) y_n^2}{b\gamma}$$

$$+ \frac{(b+d)k^4 r_m (a + \theta_1 + bc_m) y_n^4}{b\gamma}$$

$$\text{最优碳减排努力水平: } e_m = \frac{df_m h_n k (-2dh_n \varepsilon_1 + k^2 (\varepsilon_1 + \theta_1) y_n^2)}{\gamma}$$

$$P = \frac{b^2 c_m r_m (-2dh_n + k^2 y_n^2)^2 + 2dk^2 r_m y_n^2 (-2adh_n + k^2 (a-g+d(c_m+c_r-2\alpha+s)) y_n^2)}{2\gamma}$$

$$\text{最优零售价格: } + \frac{b(2d^2 h_n^2 (6ar_m + f_m^2 k^2 (-2c_m + 3(\Delta - \alpha + s))) - 2dh_n k^2 r_m (6a - 3\Delta + \epsilon) y_n^2)}{2\gamma}$$

$$+ \frac{b(k^4 r_m (3a - 3g + \epsilon) y_n^4)}{2\gamma}$$

$$P_n = \frac{2dh_n^2 (f_m^2 k^2 (\varepsilon_1 - g - c_r d + d\alpha) + 4b(gr_m + dr_m c_r - d\alpha r_m))}{2\gamma}$$

$$\text{最优回收价格: } - \frac{2h_n k^2 r_m y_n^2 (2g(b+d) + d(bc_m - a + 6bc_r + 2dc_r - 2\alpha(3b+d)))}{2\gamma}$$

$$- \frac{k^4 r_m y_n^4 (g-a+b(c_m+4c_r-4\alpha)+\epsilon-2dc_m)}{2\gamma}$$

最优回收努力水平:

$$A_n = \frac{ky_n \left(ad \left(k^2 y_n^2 r_m - h_n f_m^2 k^2 - 2dh_n r_m \right) - r_m k^2 y_n^2 \left(-g2b + db(c_m + 2c_r - 2\alpha) + d\theta_1 \right) \right)}{\gamma} \\ + \frac{ky_n dh_n \left(-\theta_1 f_m^2 k^2 - 4gbr_m + b \left(f_m^2 k^2 (c_m - 2\Delta + 2\alpha - 2s) + 2dc_m r_m + 4dr_m c_r - 4d\alpha r_m \right) \right)}{\gamma} \\ \Pi_m^R = - \frac{4d^2 h_n^2 r_m b \left(4(\Delta - \alpha + s)(\alpha + g - c_r) - c_m(2a + c_m) \right)}{4\gamma} \\ - \frac{4f_m^2 k^2 h_n^2 (\Delta - \alpha + s) \left(d^3 (c_r - \alpha) + d^2 (-bc_m + b(\Delta - \alpha + s) + a - g) \right)}{4\gamma}$$

制造商最优利润:

$$- \frac{4a^2 d^2 h_n^2 r_m + y_n^4 k^4 r_m (a - g - bc_m - d(\Delta - c_r + s))^2}{4\gamma} \\ - \frac{8dy_n^2 k^2 h_n r_m (\Delta - \alpha + s)(b + d)(dc_r - d\alpha - \Delta)}{4\gamma} \\ - \frac{4dy_n^2 k^2 h_n r_m (a - bc_m)(g + d(\Delta - c_r + s) + bc_m - a)}{4\gamma}$$

零售商最优利润:

$$\Pi_n^R = \frac{b \left(2d^2 h_n^2 (2r_m(a - bc_m) + f_m^2 k^2 (\Delta - \alpha + s)) + 2dh_n r_m k^2 y_n^2 (a + bc_m + \varepsilon_2) - k^4 r_m y_n^4 \varepsilon_2 \right)}{4\gamma^2} \\ + \frac{d \left(8bdr_m h_n^2 (g - dc_r + d\alpha) + r_m k^4 y_n^4 \varepsilon_2 + k^2 \left(f_m^2 h_n^2 2d(\varepsilon_1 - g + dc_r - d\alpha) - 2h_n r_m y_n^2 (2(b + d)(\Delta - dc_r - d\alpha) + d(bc_m - a)) \right) \right)}{4\gamma^2} \\ - \frac{2h_n k^2 y_n^2 \left(-2dh_n r_m \theta_2 + f_m^2 k^2 dh_n (\varepsilon_1 + \theta) + r_m k^2 y_n^2 (d\theta_1 + \theta_2) \right)}{4\gamma^2}$$

$$\text{整体碳排放量: } L = \frac{-2kd^2 f_m^2 h_n^2 \varepsilon_1 + 2kdh_n r_m y_n^2 \theta_2}{\gamma} + \frac{k^3 y_n^4 r_m (d(a - 2b(c_m + c_r - \alpha) - \theta) + 2gb)}{\gamma}$$

$$\text{注: } \gamma = 2d^2 h_n^2 (f_m^2 k^2 - 4br_m) + 4d(2b + d)h_n k^2 r_m y_n^2 - 2(b + d)k^4 r_m y_n^4$$

$$\varepsilon_1 = a - bc_m + 2b(\Delta - \alpha + s)$$

$$\varepsilon_2 = g - a + bc_m + d(\Delta - c_r + s)$$

$$\theta_1 = -g + d(\Delta + c_r - 2\alpha + s)$$

$$\theta_2 = -2gb + d(-a + b(c_m + 2c_r - 2\alpha))$$

$$\epsilon = d(2c_m + \Delta + 3c_r - 4\alpha + s)$$

3.3. 模型 T

模型 T 中, 由第三方回收商承担回收任务, 政府补贴制造商。决策顺序为: 制造商先确定批发价格 W 以及碳减排投资水平 e_m , 然后零售商决定零售价格 P 、第三方回收商决定回收努力水平 A_i 以及回收价格 P_i 。制造商、零售商以及第三方回收商的利润函数如下:

$$\Pi_m^T = (w - c_m)D + (\Delta + s - \alpha)D_r - \frac{r_m}{2}e_m^2 \quad (5)$$

$$\Pi_n^T = (P - w)D \quad (6)$$

$$\Pi_t^T = (\alpha - P_t - c_r)D_r - \frac{h_t}{2}A_t^2 \quad (7)$$

命题 3: 在模型 T 中利用逆向求解法可得:

$$W = \frac{-2d^2h_t^2(2ar_m + 2c_mbr_m + f_m^2k^2(-c_m + \Delta - \alpha + s))}{\tau}$$

最优批发价格:

$$+ \frac{2dh_tr_mk^2y_t^2(2a - g + 2bc_m + dc_r - d\alpha) - k^4(a - g + bc_m + dc_r - d\alpha)}{\tau}$$

最优碳减排努力水平:

$$e_m = \frac{df_mh_tk(-2dh_t(a - bc_m + 2b(\Delta - \alpha + s)) + k^2y_t^2(a - g + bc_m + d(c_r - \alpha) + 2b(\Delta - \alpha + s)))}{\tau}$$

最优零售价格:

$$p = \frac{2d^2h_t^2(-6ar_m + f_m^2k^2(2c_m - 3(\Delta - \alpha + s)) - 2bc_mr_m)}{2\tau}$$

$$+ \frac{2dh_tk^2y_t^2r_m(6a - 3g + 2bc_m + 3dc_r - 3d\alpha) - r_mk^4y_t^4(3a - 3g + bc_m + 3dc_r - 3d\alpha)}{2\tau}$$

最优回收价格:

$$P_t = \alpha - c_r + \frac{h_t(\Delta - dc_r + d\alpha)}{k^2y_t^2 - 2dh_t}$$

$$+ \frac{dh_t^2f_mk^2(-2dh_t(a - bc_m + 2b(\Delta - \alpha + s)) + k^2y_t^2(a - g - bc_m + d(c_r - \alpha) + 2b(\Delta - \alpha + s)))}{\tau(k^2y_t^2 - 2dh_t)}$$

最优回收努力水平:

$$A_t = \frac{ky_t(g - dc_r + d\alpha)}{2dh_t - k^2y_t^2}$$

$$+ \frac{dk^3y_th_tf_m^2(-2dh_t(a - bc_m + 2b(\Delta - \alpha + s)) + k^2y_t^2(a - g - bc_m + d(c_r - \alpha) + 2b(\Delta - \alpha + s)))}{\tau(2dh_t - k^2y_t^2)}$$

制造商最优利润:

$$\Pi_m^T = \frac{4dh_tk^2(dh_tf_m^2(-a + g + bc_m + d(\alpha - c_r) - b(\Delta - \alpha + s))(\Delta - \alpha + s))}{4\tau}$$

$$+ \frac{4dh_tk^2r_my_t^2((a - bc_m)^2 - a(g + d(\alpha - c_r)) + (c_m + 2(\Delta - \alpha + s))(bg + d(\alpha - c_r)))}{4\tau}$$

$$- \frac{4r_md^2h_t^2((a - bc_m)^2 + 4b(g - d(\alpha - c_r))(\Delta - \alpha + s)) + r_mk^4y_t^4(-a + g + bc_m + d(\alpha - c_r))^2}{4\tau}$$

零售商最优利润:

$$\Pi_n^T = \frac{b(2d^2h_t^2(2r_m(a - bc_m) + f_m^2k^2(\Delta - \alpha + s)) + 2dh_tr_my_t^2k^2(-2a + g + 2bc_m - d(\alpha - c_r) + k^4r_my_t^4(a - g - bc_m + d(c_r - \alpha)))^2}{4\tau}$$

第三方回收商最优利润:

$$\Pi_t^T = \frac{h_t(2dh_t - k^2y_t^2)(4bdh_tr_m(\Delta - dc_r + d\alpha) + dh_tf_m^2k^2(a - g - bc_m + d(c_r - \alpha) + 2b(\Delta - \alpha + s)) - 2br_mk^2y_t^2(g + d(\alpha - c_r)))^2}{2\tau}$$

$$\text{碳减排总量: } L = \frac{2kd^2f_m^2h_t^2(a - bc_m + 2b(\Delta - \alpha + s)) + 2bkr_my_t^2(g + d(\alpha - c_r))(2dh_t - k^2y_t^2)}{\tau}$$

$$\text{注: } \tau = 2d^2 h_t^2 (f_m^2 k^2 - 4br_m) + 8bdr_m h_t y_t^2 k^2 - 2br_m k^4 y_t^4$$

4. 比较分析

根据 Stackelberg 博弈理论以及逆向求解法求得第三部分三种模型的最优决策, 考虑政府补贴以及消费者低碳偏好对最优决策的影响关系对比分析。

4.1. 三种模型的最优决策比较分析

4.1.1. 三种模型的动力电池零售价格以及批发价格比较分析

$$P^T > P^R > P^M, \quad W^T > W^M > W^R$$

模型 T 的零售价和批发价格最高, 是由于第三方进行回收时为保障自身利润会将成本通过制造商 - 零售商 - 消费者转移; 模型 R 的批发价格最低, 是由于当制造商承担回收任务时, 会将成本压力通过提升批发价格来缓解, 当零售商承担回收任务时, 通过抬高零售价格来缓解不够专业带来的成本压力, 且该成本压力不会向制造商传递。

4.1.2. 三种模型的动力电池回收价格比较分析

$$\text{前期 } P_m^M > P_t^T > P_n^R > 0, \quad \text{后期 } 0 > P_m^M > P_n^R > P_t^T$$

出现上述情况的原因是: 当消费者低碳偏好较低时, 制造商承担回收任务时, 可以通过减低生产成本来维持回收价格的高稳定; 零售商回收时由于回收成本高难以将回收价格抬升; 第三方回收时由于业务单一更容易将回收成本转嫁给消费者来提高回收价格; 当消费者低碳偏好较高时, 由于回收价值和成本的不对等出现成本倒挂, 回收主体会通过负价格将部分成本转移给消费者, 消费者也愿意通过支付一定价格回收动力电池从而避免对于环境的污染。

4.1.3. 三种模型的制造商碳减排投资水平比较分析

$$e_m^T > e_m^R > e_m^M$$

模型 T 的制造商碳减排投资水平最高而模型 M 的制造商碳减排投资水平最低, 是由于当第三方进行回收时, 其专业性会让回收成本降低, 可以更多让利给制造商进行碳减排投资; 而当制造商进行回收时回收成本会占用部分制造商对于碳减排的投资资源。

4.1.4. 三种模型的回收努力水平比较分析

$$A_t^T > A_n^R > A_m^M$$

由于第三方回收的专业性以及其利润与回收量回收价值有直接关系, 故本身就有内在动力去提升回收努力水平。而对于制造商来说, 其主要聚焦于生产回收只是辅助产业, 故在回收努力水平方面投资较少。

4.2. 政府补贴对于三种模型的均衡结果的敏感性比较分析

4.2.1. 政府补贴对批发价格和零售价格的敏感性比较分析

$$\frac{\partial w_m^T}{\partial s} > \frac{\partial w_m^M}{\partial s} > \frac{\partial w_m^R}{\partial s}, \quad \frac{\partial P^T}{\partial s} > \frac{\partial P^M}{\partial s} > \frac{\partial P^R}{\partial s}$$

由于政府补贴都是给制造商的, 在这种情况下, 政府补贴与回收量紧密相关, 第三方回收商承担回收任务时, 通过提高回收率让制造商多拿政府补贴更有动力调整批发价格并让利给零售商, 故零售价格

和批发价格对政府补贴的敏感性更高。

4.2.2. 政府补贴对回收价格的敏感性比较分析

$$\frac{\partial P_m^M}{\partial s} > 0, \quad \frac{\partial P_n^R}{\partial s} < 0, \quad \frac{\partial P_t^T}{\partial s} < 0$$

当制造商承担回收任务时, 政府补贴可以有效转化为对消费者回收意愿的价格激励, 尤其在消费者低碳偏好较低的时期, 政府补贴可以提高回收价格来激励消费者的回收行为, 但随着消费者低碳偏好的增强这种激励的边际效用减弱。而在模型 R 和模型 T 中, 会出现补贴增加, 回收价格却降低的情况, 且这种反向关系随着消费者低碳偏好的增强而显著强化, 这是由于政府补贴虽然能激励回收方扩大回收规模, 但可能通过压价来损害消费者利益, 尤其当消费者低碳偏好较高时, 这种损害更为明显, 在低碳偏好较强的时期或地区应当避免政府补贴的大幅变动或调整补贴对象来稳定回收价格。

4.2.3. 政府补贴对制造商碳减排投资水平以及回收主体的回收努力水平的敏感性比较分析

$$\frac{\partial e_m^T}{\partial s} > \frac{\partial e_m^M}{\partial s} > \frac{\partial e_m^R}{\partial s}, \quad \frac{\partial A_t^T}{\partial s} > \frac{\partial A_m^R}{\partial s} > \frac{\partial A_n^M}{\partial s}$$

第三方回收时候直接把控回收量, 而回收量对制造商能拿到的政府补贴有直接作用, 故第三方回收商承担回收任务时, 其回收努力水平关于政府补贴的敏感度最高; 第三方可以通过回收量助力制造商碳减排技术落地故模型 T 中制造商碳减排投资水平关于政府补贴的敏感度最高。制造商回收时, 回收投资受到压迫故关于政府补贴的敏感度最低, 零售商承担回收任务时, 与制造商碳减排投资水平关联度最低故而模型 R 的制造商碳减排投资水平与政府补贴的敏感度最低。

4.3. 消费者低碳偏好对三种模型均衡结果的敏感度影响关系比较分析

$$\frac{\partial P^s}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial W^s}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial P_t^s}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial e_m^s}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial A_t^s}{\partial k} > 0$$

上述表明无论何种回收渠道, 随着消费者低碳偏好的增强消费者愿意为低碳电池支付更多的溢价, 制造商和零售商捕捉到部分溢价, 会相应提高批发价格和零售价格, 而制造商作为碳减排的直接实施者, 捕捉到溢价后会提高碳减排投资来提高产品竞争力以迎合消费者的低碳需求, 同时回收方会通过提高回收努力来增强低碳形象, 促进电池回收量。当消费者低碳偏好较低时, 回收方需要通过提高回收价格来激励消费者交回废旧电池, 但由于此时消费者对低碳产品的支付意愿较低, 回收方的利润空间有限, 因此即使消费者低碳偏好很低也不会出现回收价格空高的情况; 当消费者低碳偏好较高时, 消费者的非经济动机成为了交回废旧电池的主要驱动力, 此时回收方不需要支付高的回收价格也可以获得足够的废旧电池回收量, 同时回收方会加大回收努力强化低碳形象, 契合消费者偏好, 因此回收价格会随着消费者低碳偏好的增加而降低。

5. 算例分析(数据仿真)

本章通过数值仿真验证上述比较分析。以上海市为例, 每套电池回收补贴 1000 元, 即 $s=1000$ 。经过调查可知, 退役电池的容量按 20 度计算, 每度 400 元回收, 因此, 本文设置转移价格为 8000 元。

由图 1 可得模型 T 中, 由于第三方回收商承担回收任务, 随着消费者低碳意识的增加, 对于动力电池回收后的绿色处理有了更高的要求, 故第三方需要投入更多的资源用于先进回收技术和处理技术的研发落地, 这些额外的投入会增加碳排放, 当消费者低碳意识较高时, 碳排放飙升速度明显, 反映模型 T 在响应消费者高低碳偏好时, 碳排放边际效应明显。模型 R 中, 由于消费者低碳意识的提升, 零

售商一方面通过低碳宣传和增大回收量来塑造绿色形象一方面为迎合消费者低碳需求可能在回收过程中强调绿色属性, 但由于其专业性不够会造成更多的碳排放。因其的业务中心和专业能力限制, 供应链整体碳排放增量可控, 但随着消费者低碳意识的增加各个环节的碳排放有所增加。模型 M 中, 由于制造商回收动力电池可用于在生产制造过程, 一定程度上可以抑制碳排放的增长, 但随着消费者低碳意识的增加, 为了迎合消费者, 制造商也会在技术研发以及生产改造上进行资源投入, 碳排放总量也随之增加。

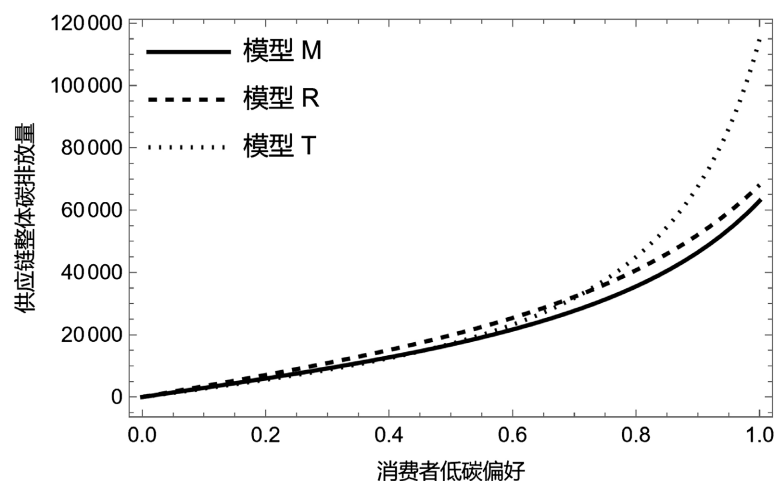


Figure 1. The impact of consumer low-carbon preferences on total carbon emissions in three model supply chains

图 1. 消费者低碳偏好对三种模型供应链整体碳排放量的影响

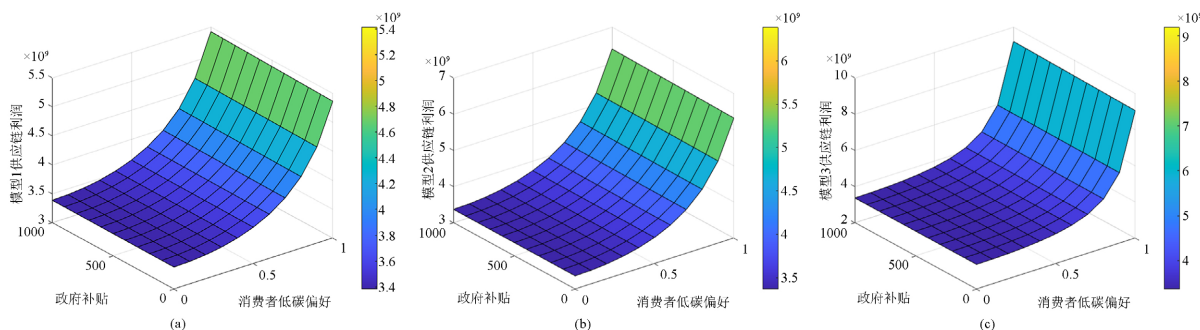


Figure 2. The impact of government subsidies and consumer low-carbon preferences on supply chain profits

图 2. 政府补贴、消费者低碳偏好对供应链利润的影响

图 2 展示了各模型在政府补贴和消费者低碳偏好的共同影响下, 其供应链整体利润的变化趋势。由图 2(a)可得当偏好较大时, 利润随补贴增长加速, 说明消费者低碳意识觉醒后, 补贴对利润的撬动作用更明显。当偏好较小时, 即使高补贴利润也较低, 说明市场需求不足时, 补贴效率很低。制造商可以通过“以旧换新”等活动来提升回收率。由图 2(b)可得偏好较低时, 补贴增长更能促进利润增加(敏感性更高); 当偏好较高时, 模型 R 的利润远高于模型 M 的利润, 故模型 R 更适配高低碳偏好市场。补贴超过一定阈值后利润增速放缓, 表明零售商回收能力受仓储、专业性等限制存在上限。由图 2(c)可得较高偏好+高补贴时利润比其他模型都高, 说明模型 T 实现了补贴与偏好的深度协同, 整合能力更强。且当消费者低碳偏好固定时, 政府补贴增加, 利润增加更明显, 这是由于第三方回收商的专业性会放大补贴效果。

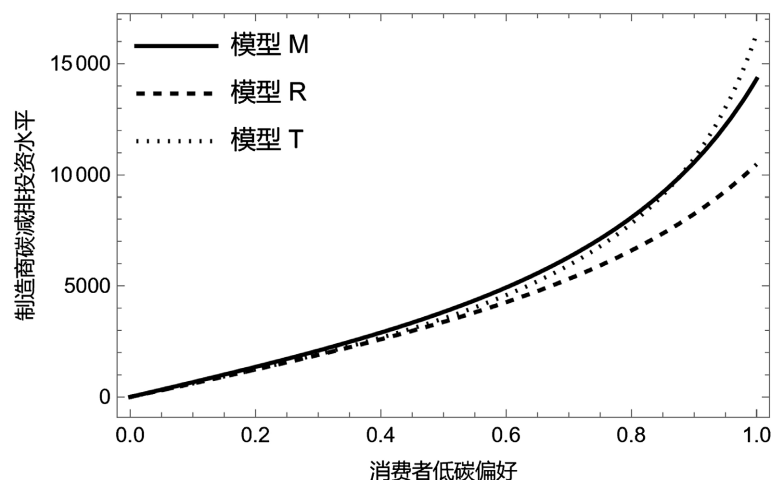


Figure 3. The impact of consumer low-carbon preferences on manufacturers' carbon reduction investment levels in three models

图 3. 消费者低碳偏好对三种模型的制造商碳减排投资水平的影响

图 3 展示了三种模型的制造商碳减排投资水平随消费者低碳偏好的增长而变化的趋势, 从图中可以看出, 随着消费者低碳偏好的提升三种模型的碳减排投资水平均上升。在消费者低碳偏好较低时各模型制造商碳减排投资水平差距较小, 偏好升高后, 第三方商由于其专业性更能推动制造商加大碳减排投资, 而制造商由于其承担回收任务能将回收减少的成本用于碳减排投资。

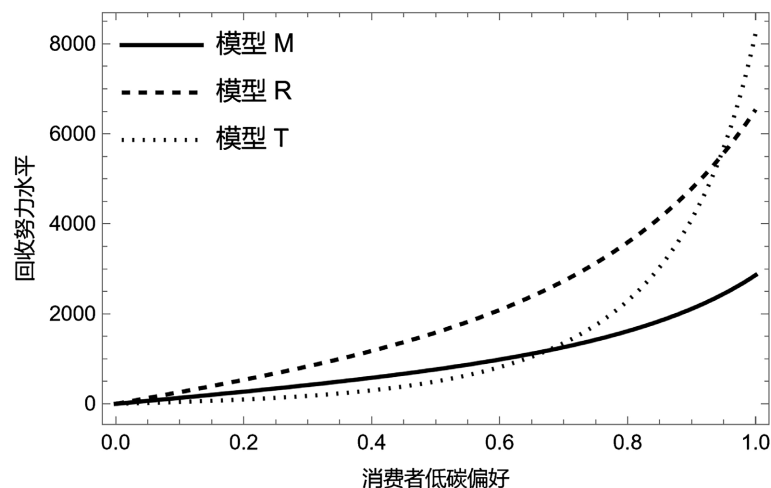


Figure 4. The impact of consumer low-carbon preferences on the recycling effort levels of three models

图 4. 消费者低碳偏好对三种模型的回收努力水平的影响

由图 4 可以看出随着消费者低碳偏好的增强, 三种模型的回收努力水平也越高, 即消费者越关注低碳回收, 供应链就越使劲回收, 但由于回收主体的不同, 其增长效率有所不同, 零售商由于接近消费者, 更能精准洞悉消费者低碳偏好变化从而在前中期处于高回收努力水平, 制造商其核心在于生成而非回收, 前期投入较少故而增长缓慢; 第三方回收商由于其专业性后期呈现爆发式增长, 前期由于需要构建回收网络而导致回收努力水平处于最低。

由图 5 中可以看出, 三种回收模型(模型 M、模型 R、模型 T)的整体利润对消费者低碳偏好的敏感性表现不同, 政府可以根据不同地区的消费者低碳偏好成都来指定补贴策略以及回收模型的选择。

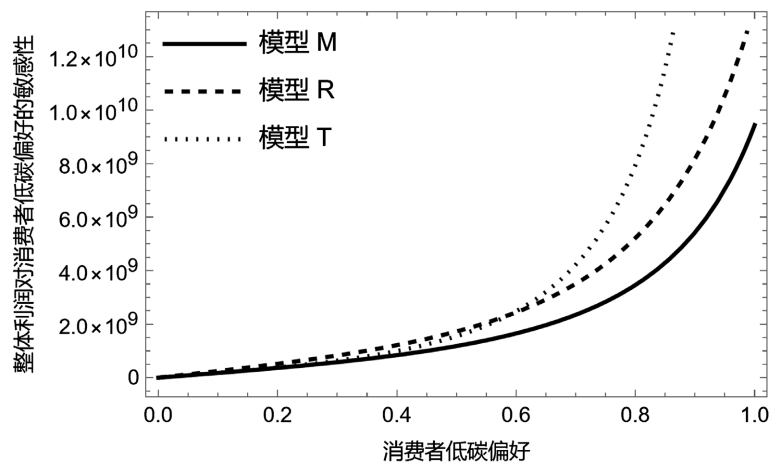


Figure 5. Sensitivity impact of consumer low-carbon preference on three models
图 5. 消费者低碳偏好对三种模型的敏感性影响

- (1) 消费者低碳偏好较低的地区(接近 0), 在图 5 中该区域三种模型的整体利润敏感性都较低, 对比可得模型 M 的敏感性相对较高而模型 T 的敏感性最低, 这表明模型 M 更为适应这些地区的市场环境。政府可以优先考虑选择模型 M 作为该地区的动力电池回收模型, 并通过一些初期引导政策配合模型 M 来逐步提升该地区的消费者低碳意识。
- (2) 消费者低碳偏好中等的地区(0.2~0.8), 在图 5 中该区域三种模型的敏感性都在上升, 但模型 M 的增长速度相对较快, 模型 R 次之, 模型 T 相对较慢, 这表明在消费者低碳偏好处于中等水平的地区, 模型 M 依然是较为合适的选择。政府可以继续支持模型 M 的应用, 并适当加大补贴政策力度, 进一步激发消费者的低碳消费行为。同时可以观察模型 R 的表现, 在细分市场时局部考虑使用模型 R。
- (3) 在消费者低碳偏好较高的地区(接近 1.0), 在图 5 中该区域, 模型 T 的敏感性增长迅速并超过了模型 M 和模型 R, 表现出最强的利润敏感性, 这表明在消费者低碳偏好较高的地区, 模型 T 能够更好地利用这种市场趋势, 实现更高的利润增长。政府在该地区应该着重考虑模型 T, 可以通过制定更严格的法规、提供更大的优惠政策等方式来推动模型 T 在这些地区的广泛应用, 同时也可以结合模型 M 和模型 R 的基础优势, 进行综合的回收策略设计。

6. 结论

本文分别构建电池制造商(模型 M)、电池零售商(模型 R)以及第三方回收商(模型 T)分别作为回收主体的三种回收模型, 考虑政府补贴以及消费者低碳偏好, 对模型求均衡解, 并通过数据仿真验证。

6.1. 研究结论

- (1) 不同回收模型下的碳排放具有区别性。第三方回收(模型 T)中随消费者低碳偏好的逐渐增强, 第三方为满足绿色处理需求进行技术投入的程度也随之增大, 碳排放呈现大幅度增长且边际效应更为明显; 零售商回收(模型 R)由于缺乏技术支撑, 在迎合消费者低碳偏好的过程中碳排放增加, 虽然整体增加的数量较为有限, 但各个步骤随着消费者的偏好程度的增强也会随之增多; 而制造商回收(模型 M)本身拥有技术条件, 在其重视自身的回收再利用的前提下减少部分碳排放, 但由于为了满足消费者需要产生的相应技术研发及生产改造的投入而导致总的碳排放量上升。总的来说出现了消费者低碳偏好越高, 碳排放越高的现象。供应链为满足高低碳偏好, 投入更多的资源反而推动了碳排放的增长, 导致“越绿色追求, 越排放增长”的悖论。

(2) 不同模型的供应链利润在政府补贴以及消费者低碳偏好的共同影响下呈现出动态变化。模型 M 中, 消费者低碳偏好较低时, 即使提升政府补贴力度, 利润增长仍受限; 当消费者低碳偏好较高时, 利润随着补贴增长而快速增长。模型 R 中, 消费者低碳偏好较低时, 利润随政府补贴的增长而显著提升; 消费者低碳偏好较高时模型 R 的利润远高于模型 M, 表明模型 R 更适配市场需求, 但当政府补贴超过阈值后, 零售商受到仓储能力、专业处理能力等限制, 利润增速放缓。模型 T 中在“高消费者低碳偏好+高政府补贴”组合下利润显著高于其他模型, 且当消费者低碳偏好固定时, 政府补贴增加带来的利润增长效果更为显著, 凸显了第三方专业回收能力对政府补贴效果的放大作用。

(3) 不同回收模型的制造商碳减排投资与回收努力水平都与消费者低碳偏好正相关。当消费者低碳偏好较低时, 各模型的制造商碳减排投资与回收努力水平差距较小; 而随着消费者低碳偏好的提升, 第三方回收商可以通过成本节省机制有效激励制造商进行碳减排投资, 零售商因贴近用户在前期的回收中表现更为积极, 制造商因前期投入较少、发展相对滞后, 需通过政府补贴来强化碳减排投资动力; 此外, 第三方回收商在前期聚焦回收网络的建设导致回收努力水平较低, 后期由于其专业性会导致回收努力水平呈现爆发式增长。政府需要结合各主体在不同阶段的特性, 实施差异化补贴, 推动供应链绿色行为的良性互动。

(4) 对不同区域消费群体的低碳偏好选择相应模型。低偏好的地区(0 附近), 选择模型 M, 并逐渐培养消费者低碳理念; 中等偏好的地区(0.2~0.8)继续推广模型 M, 同时关注模型 R 的使用; 高偏好的地区(0.8~1), 着重考虑模型 T, 并结合其他模型的优势, 综合考虑多种回收模型的设计。

6.2. 管理启示

结合本研究可得到一下管理启示:

(1) 政府可采用精细化补贴政策以发挥政府补贴的撬动作用。在低碳偏好较高的地方应侧重给予第三方回收模型更多的补贴, 体现第三方回收模型的优势和效用; 在低碳偏好的程度较低的地方, 则给予制造商回收模型更多的优惠补贴, 前期尽量拉伸消费者的环保意识。

(2) 政府应在确定范围内对补贴进行合理控制以防止补贴过度导致资源闲置。补贴政策要在确定低碳偏好的范围内结合不同回收模型的特点进行相应调整, 让补贴发挥出最高效的作用。

(3) 企业管理者与政府应关注供应链全周期状况以免出现“越绿色, 越高碳”的困境。不能片面地通过消费者低碳偏好去促进企业碳减排, 当消费者低碳偏好过高, 供应链相关企业会投入更多的资源来争夺绿色市场, 导致供应链整体碳排放的增加, 从而陷入“越绿色, 越高碳”的困境。

(4) 电池制造企业应加大低碳回收技术、电池再生技术等绿色技术的研发投入。鼓励企业与第三方回收平台合作, 进一步放大第三方回收商对于碳减排投资的促进作用。

由于本文在建立模型时假定市场需求为线性函数, 但是实际上更为复杂。因此在后续的研究中, 可以进一步考虑不同形式的非线性关系, 以便能够更真实地反映市场需求。

参考文献

- [1] 姚锋敏, 闫颖洛, 刘珊, 等. 政府补贴下考虑 CSR 投入的闭环供应链回收及定价决策[J]. 运筹与管理, 2021, 30(6): 69-76.
- [2] 张川, 陈宇潇. 政府补贴下考虑规模效应的动力电池梯次利用闭环供应链决策与协调[J]. 运筹与管理, 2021, 30(12): 72-77+91.
- [3] Zhang, M., Wu, W. and Song, Y. (2023) Study on the Impact of Government Policies on Power Battery Recycling under Different Recycling Models. *Journal of Cleaner Production*, 413, Article 137492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137492>
- [4] 武文琪, 张明. 补贴政策下动力电池闭环供应链定价与协调策略[J]. 工业工程与管理, 2024, 29(5): 147-158.

-
- [5] 陈宇科, 童欣. 政府补贴对动力电池再生利用技术创新的激励效应[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2024, 41(4): 68-83.
- [6] 武丹, 杨玉香. 考虑消费者低碳偏好的供应链减排微分博弈模型研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 126-137.
- [7] Krass, D., Nedorezov, T. and Ovchinnikov, A. (2013) Environmental Taxes and the Choice of Green Technology. *Production and Operations Management*, **22**, 1035-1055. <https://doi.org/10.1111/poms.12023>
- [8] Liu, J., Ke, H. and Tian, G. (2020) Impact of Emission Reduction Investments on Decisions and Profits in a Supply Chain with Two Competitive Manufacturers. *Computers & Industrial Engineering*, **149**, Article 106784. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106784>
- [9] 黄晨星, 朱小武, 熊波, 等. 零售商主导的低碳供应链竞争结构与决策分析[J]. 工业技术经济, 2025, 44(7): 36-45.
- [10] 张玲红, 刘方媛, 朱立龙, 等. 考虑零售商公平关切与广告努力水平的碳减排策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 138-148.
- [11] 许民利, 向泽华, 简惠云. 考虑消费者环保意识的 WEEE 双渠道回收模型[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 713-720.
- [12] 范定祥, 李重莲, 王晓蕾. 基于 Stackelberg 博弈的闭环供应链回收模式选择及其优化研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(4): 135-141.
- [13] 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>
- [14] 焦建玲, 潘正涛, 李晶晶. 考虑再利用的经济效益与排放效率的动力电池回收模式选择[J]. 中国管理科学, 2024, 32(11): 201-213.
- [15] 林贵华, 单仁邦, 陈拼搏. 政府补贴下闭环供应链回收渠道的选择策略[J]. 运筹与管理, 2020, 29(4): 43-53.
- [16] 张川, 田雨鑫, 崔梦雨. 电动汽车动力电池制造商混合渠道回收模式选择与碳减排决策[J]. 中国管理科学, 2024, 32(6): 184-195.
- [17] 李峰, 张丹露. 碳交易背景下考虑回收量补贴的动力电池回收决策研究[J]. 工业技术经济, 2025, 44(3): 56-66.
- [18] Tang, Y., Zhang, Q., Li, Y., Li, H., Pan, X. and Mclellan, B. (2019) The Social-Economic-Environmental Impacts of Recycling Retired EV Batteries under Reward-Penalty Mechanism. *Applied Energy*, **251**, Article 113313. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113313>