

回收竞争下考虑错误分类影响的动力电池定价策略研究

姚泽世

江苏大学管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2025年4月10日; 录用日期: 2025年4月24日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

对动力电池进行分类回收是企业提高资源利用率、增加利润的有效途径, 但分类回收容量标准、错误分类对回收过程的影响需要引起重视。针对企业除了自行回收退役的动力电池外, 还可能选择外包或与第三方竞争回收利用的问题, 通过构建制造商与第三方回收商竞争性分类回收的博弈论模型, 研究了分类回收容量标准和两类错误分类对动力电池回收定价和供应链决策影响。结果表明: (1) 虽然分类回收容量标准越高, 动力电池回收价格越低, 但对企业来说, 分类回收容量标准越高并不是越好; (2) 错误分类对回收渠道的利润有相反的影响, 企业可以通过与第三方回收商竞争性分类回收来控制错误比例, 从而优化其效率。

关键词

分类回收容量标准, 错误分类, 回收竞争, 梯次利用

Pricing Strategy for Power Batteries under Recycling Competition Considering the Impact of Misclassification

Zeshi Yao

School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Apr. 10th, 2025; accepted: Apr. 24th, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Classified recycling of power batteries serves as an effective approach for enterprises to enhance

resource utilization and increase profitability. However, the impact of classification thresholds and misclassification on the recycling process warrants significant attention. In addition to recycling retired power batteries in-house, enterprises may also outsource the process or engage in competitive recycling with third-party recyclers. This study constructs a game-theoretic model to examine the competitive classified recycling behavior between manufacturers and third-party recyclers. The model explores the influence of classification thresholds and two types of misclassification on battery recycling pricing and supply chain decision-making. The results indicate that: (1) although a higher classification threshold generally leads to a lower recycling price, it does not necessarily yield better outcomes for the enterprise; (2) misclassification has contrasting effects on the profitability of different recycling channels. By engaging in competitive classified recycling with third-party recyclers, enterprises can mitigate the misclassification rate and thereby improve overall efficiency.

Keywords

Classified Recycling Capacity Standard, Misclassification, Recycling Competition, Echelon Utilization

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

新能源汽车的快速升级和大量销售导致动力电池将面临大规模的, 由于动力电池难处理、高污染性, 动力电池已成为亟待解决的问题。回收动力电池进行梯次利用可以有效地实现资源再利用, 并通过节约成本实现经济效益。目前, 根据中国新能源汽车动力电池回收利用产业协同发展联盟(CABRCA)预测, 2024 年中国动力电池规模将达到 20.2 GWh, 2030 年电池规模将增至 148.7 GWh。然而, 许多回收公司即使回收大量的动力电池, 其盈利能力也很低, 甚至有些公司宣告破产, 例如桑顿新能源[1]。其主要原因是这些企业还采用传统回收方法: 直接再制造动力电池, 不考虑其容量进行梯次利用回收, 这种传统回收方式并不能充分利用动力电池的剩余价值。因此, 企业需要采用新的回收方式, 使动力电池的剩余价值最大化。动力电池的回收是否有效地再制造主要取决于动力电池容量。动力电池容量的不确定性在很大程度上增加了其梯次利用的难度, 并影响了再制造的成本和再制造的效率。由于近几年新能源汽车动力电池将大规模退役, 如果不考虑不同的容量水平, 回收后直接进行再制造, 那么动力电池的残值将无法得到充分利用, 造成资源浪费。如何提高动力电池的利用率, 是一个值得关注的重要问题。现有的研究侧重于大量回收、回收渠道的多样化[2][3], 而不是分类努力回收处理, 但动力电池循环经济的成功取决于其高效实施, 包括回收方式, 按类型和容量分类回收。对于动力电池, 根据其容量进行分类可以高效确定其再制造潜力, 其中再制造潜力是指与回收容量标准相比可用于再制造动力电池的容量状况。此外, 动力电池是高污染性和对时间、环境比较敏感的, 分类回收可以加速再制造过程, 以最大限度地提高其剩余价值。因此, 根据容量标准对动力电池进行分类后, 容量较高的动力电池将被梯次利用转售, 然后容量较低的进行回收利用再制造, 可以有效提高动力电池的利润。

关于错误分类的研究, 错误分类会影响动力电池的定价、生产和采购决策以及供应链整体效益。本文存在两种类型的错误分类: 一是将高质量产品错误地归为低质量, 二是将低质量产品错误地归为高质量。龙宇娟等[4][5]调查发现不同地区、不同回收企业的分类标准不统一, 在不同分类标准下, 动力电池

错误分类的可能性增大。例如,赵梦娜等[6]发现一个按照应用领域分类的回收企业将电动汽车电池简单归类为“动力电池”,当这些电池转移到另一个要求按化学成分分类的企业时,就增加了错误的可能性,从而增加成本,影响供应链利润。姚轶[7]以N公司为例,构建了回收质量不确定下的闭环供应链Stackelberg博弈模型,讨论了供应链成员采取集中决策和分散决策的两种情况,为研究错误分类对供应链效益的影响提供了一定的模型和理论基础。

此外,关于动力电池的回收,传统的回收模式有制造商回收[8]、零售商回收和第三方回收[9]或混合竞争回收[10]。而第三方回收企业与电池生产商、车企之间的合作关系可能相对不稳定,面临着市场竞争和价格波动的风险,导致定价相对较为复杂。近年来,随着科学技术的创新与发展,动力电池的回收模式日趋完善。梁喜等[11]综合考虑回收成本、处理成本、金属回收率、市场金属价格以及预期利润等因素,探讨了分类回收模式对定价的影响。张川等[12]应用博弈论研究了不同回收模式下的最优定价和决策,发现第三方回收模式是最有效的。付小勇等[13]构建了Stackelberg博弈模型,研究了生产商回收、车企回收、第三方回收、行业联盟回收之间不同集合竞争场景下的定价策略。结果表明,生产商始终愿意回收动力电池,电池的定价取决于生产商的回收单位成本和外包费用。

通过以上对国内外学者的研究进行整理和总结,发现已有的研究成果在各方面均有侧重,但从回收竞争的角度去研究错误分类对动力电池定价策略研究文献较少,且缺乏考虑错误分类如何影响动力电池的价格和供应链的利润,以及如何减少错误分类带来的成本。针对上述问题,本文基于博弈论,考虑了制造商和第三方竞争性分类回收。我们的研究讨论了以下问题:

- (1) 分类回收容量标准如何影响回收价格和销售价格?
- (2) 错误分类如何影响回收价格和销售价格?
- (3) 分类回收标准对供应链利润有何影响?

本文的研究考虑了存在竞争的情况下,分类回收容量标准和错误分类对制造商和第三方竞争性分类回收模式的影响。为了简化我们的分析并揭示有意义的见解,我们认为动力电池容量是均匀分布的,与动力电池容量相关的再制造成本和梯次利用成本是内生的。我们发现,对于所有回收商来说更高的分类回收容量标准和回收努力并不意味着更好的供应链利润。较高的分类回收容量标准和回收努力虽然降低了梯次利用成本和再制造成本,但也提高了收购价格,导致竞争性分类回收模式下供应链利润下降。而错误分类对制造商回收渠道和第三方回收渠道的利润产生相反的影响。此外,本文突出了第三方回收商参与回收竞争的影响。结果表明,第三方回收商参与回收竞争不会损害制造商的利润,并且可以减少错误分类对供应链利润的影响。这些发现为回收实践提供了管理见解。

2. 假设与模型描述

2.1. 概念模型描述

为了研究在动力电池容量分类标准下错误分类对供应链的影响,本文考虑一个由制造商和第三方回收商竞争性努力回收并分类的供应链。此外,在本研究中制造商和第三方都可以回收的动力电池并将电池容量较高进行梯次利用,同时制造商可以生产新的动力电池并再制造那些无法梯次利用的电池。

2.2. 基本假设

假设 1 退役动力电池容量 q 遵循均匀分布,即 $q \sim U[0,1]$ 。

由于退役的动力电池容量参差不齐,回收商根据容量对退役的动力电池进行分类。我们假设退役的动力电池容量是均匀分布的, $q \sim U[0,1]$ 。参考文献[14] [15],退役的动力电池分为两类:可用于梯次利用的和可用于再制造的,容量高于 q 可用于梯次利用,低于 q 可用于再制造。综上,可用于梯次利用的

退役动力电池数量为

$$r_1 = \int_q^1 r_i dq = (1-q)r_i$$

可用于再制造的退役动力电池数量为

$$r_2 = \int_0^q r_i dq = qr_i$$

假设 2 梯次利用或再制造的成本与其容量 q 呈负线性关系。

退役的动力电池容量会影响梯次利用成本和再制造成本。容量越高，梯次利用成本和再制造成本就越低。参考文献[16]，假设梯次利用成本为 $c_t = c_n - \delta_1 q$ ，再制造成本为 $c_z = c_n - \delta_2 q$ 。其中， c_n 是每单位新产品的生产成本， δ_1 和 δ_2 是退役动力电池容量对梯次利用或再制造成本的影响程度系数， $\delta_1 q$ 和 $\delta_2 q$ 表示退役动力电池梯次利用或再制造的成本优势，退役动力电池的容量越高，梯次利用或再制造的成本就越低。

第三方回收商缺乏再制造能力，所以无法梯次利用的动力电池必须由制造商再制造。在将退役的动力电池从第三方回收商转移到制造商的过程中，后者会给第三方回收商带来成本。除购置价格外，成本还包括固定单位付款(表示为 A)提供给第三方回收商，可视为第三方的单位利润。参考文献[17]，再制造成本由下式给出 $c_z = c_n - \delta_2 q - A$ ，其中 c_z 由容量分类标准 q 决定的，因为 A 对于 c_z 是一个外生变量，为了简化计算，可以合理地假设 $A=0$ 。因此，从第三方到制造商的转让价格为 p_2 再制造成本为 $c_z = c_n - \delta_2 q$ 。

假设 3 分类过程中有两种类型错误：类型 I 和类型 II。

回收商在按容量对退役的动力电池进行分类时，会因容量分类标准或分类过程的错误而造成分类错误即把可用于梯次利用的动力电池分类为可用于再制造，将可用于再制造的动力电池分类为可用于梯次利用，我们称上述这两种类型的错误分别是错误类型 I 和错误类型 II。假设错误类型 I 的比例为 x ，错误类型 II 的比例为 y ，其中 $0 \leq x < 1$ ， $0 \leq y < 1$ 。由于可供再制造的退役动力电池容量太低，当被错误归类为可梯次利用类别时无法利用时，该部件按残值处理 s 。其中 $\delta_1 q > \delta_2 q > s$ ；否则，回收的动力电池全部以残值处理，不进入回收。无论退役的动力电池容量如何，追求利润最大化的企业直接以相同的残值处置是不现实的。参考文献[18]，在错误分类的情况下，退役的动力电池分类后可用于梯次利用的产品数量为

$$R_1 = (1-x)r_1 = (1-x)(1-q)(\lambda p_j + k)$$

可用于再制造的数量为

$$R_2 = xr_1 + (1-y)r_2 = x(1-q)(\lambda p_j + k) + (1-y)q(\lambda p_j + k)$$

假设 4 市场需求是其自身销售价格与可替代产品的销售价格的一般线性需求函数。

由于可梯次利用的退役动力电池的价格低于新电池的价格，在一定程度上可梯次利用的退役动力电池会蚕食新电池的市场，从而影响产品的市场需求。市场上的新电池和可梯次利用的退役动力电池之间存在价格竞争。参考文献[19]，根据竞争性产品市场线性需求结构的现有假设，新电池和可梯次利用的退役动力电池的需求函数分别为 $D_z = h - \alpha p_z + \beta p_t$ 和 $D_t = h - \alpha p_t + \beta p_z$ 。其中， h 是市场容量， α 、 β 是新动力电池与可梯次利用的动力电池销售价格影响程度系数，其中 $\alpha > \beta > 0$ ，与其他竞争产品的价格变化相比，需求对自身产品的价格变化更为敏感，并且 p_z 和 p_t 分别是新电池和可梯次利用的退役动力电池的价格。

2.3. 符号说明

本文中用到的符号以及含义如表 1 所示。

Table 1. Key symbols and their meanings in the model
表 1. 符号及含义

符号	含义
c_n	新动力电池单位生产成本
c_t	可梯次利用动力电池单位成本
c_z	可再制造动力电池单位成本
q	容量分类标准
k	基本回收数量
δ_1	动力电池容量对可梯次利用电池成本的敏感系数
δ_2	动力电池容量对再制造电池成本的敏感系数
x	被错误归类为再制造的可梯次利用动力电池比例
y	被错误归类为可梯次利用的再制造动力电池比例
h	市场容量
α	回收价格弹性系数
β	交叉价格弹性系数
D_z	新动力电池市场需求量
D_t	可梯次利用动力电池市场需求量
p_1	制造商回收价格
p_2	第三方回收商回收价格
p_z	新动力电池销售价格
p_{t1}	制造商销售可梯次利用动力电池的价格
p_{t2}	第三方回收商销售可梯次利用动力电池的价格

3. 模型建立

在竞争性分类回收模式下，制造商除了生产新产品外，还以 p_1 的价格回收退役的动力电池，其中将较高容量的电池进行梯次利用以 p_{t1} 价格销售，将容量低于容量分类标准的退役动力电池进行再制造，以 p_z 的价格与新产品一起销售。同时，第三方回收商以 p_2 价格分类回收高于容量分类标准 q 的退役动力电池，处理后，将较高容量的电池进行梯次利用以 p_{t2} 价格销售，将容量低于容量分类标准的退役动力电池以 $p_2 + A$ 价格转移给制造商进行再制造，供应链流程图如图 1 所示。由于新电池与两款可梯次利用的翻新电池之间存在市场竞争，这三种产品的市场需求如下： $D_z = h - \alpha p_z + \beta p_{t1} + \beta p_{t2}$ 、 $D_{t1} = h - \alpha p_{t1} + \beta p_z + \beta p_{t2}$ 和 $D_{t2} = h - \alpha p_{t2} + \beta p_z + \beta p_{t1}$ 。

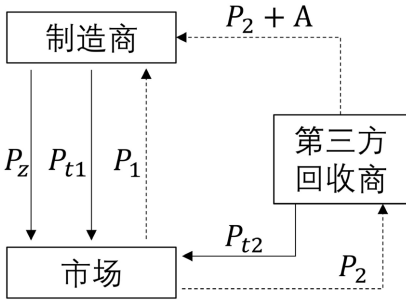


Figure 1. Conceptual model diagram
图 1. 概念模型图

在不考虑信息不对称的情况下，我们假设一个完全竞争的退役动力电池回收市场，同时假设制造商和第三方回收商回收水平一致，回收能力相同。在理性思维下，消费者更倾向于在双回收渠道逆向供应链中以更高的收购价格将动力电池出售给回收商，以获得更高的消费者净收益。因此，制造商和第三方回收商存在激烈的竞争。参考文献[20]，假设消费者愿意回收退役动力电池的负效用被指定为：

$$DU = \frac{k(r_z + r_T)}{b-a} + \frac{a(r_z^2 + r_T^2)}{2(a^2 - b^2)} + \frac{br_z r_T}{a^2 - b^2}$$

其中 r_z 、 r_T 分别表示制造商和第三方回收商回收的数量； k 是一个正常数，表示基本回收量； a 回收价格弹性系数，衡量消费者对回收价格的敏感； b 为交叉回收价格弹性系数，表示制造商回收渠道与第三方回收商渠道之间的可替代性； DU 表明，较高的负效用意味着消费者更不愿意进行回收； $r_z p_1 + r_T p_2$ 表示消费者因在退回需被回收的动力电池这一过程中的收益；用 S 表示的消费者剩余， $S = r_z p_1 + r_T p_2 - DU$ 。求解消费者的优化条件，以实现最大化 S ，即令 $\frac{dS}{dr_z} = 0$ ， $\frac{dS}{dr_T} = 0$ ，联立得 $r_z = k + ap_1 - bp_2$ ， $r_T = k - bp_1 + ap_2$ 。

则制造商回收退役动力电池的数量为 $r_z = k + ap_1 - bp_2$ 。第三方回收商回收退役动力电池的数量为 $r_T = k + ap_2 - bp_1$ 。

在制造商分类回收过程中，可用于梯次利用的 $r_{z1} = \int_q^1 r_z dq = (1-q)r_z$ ，可用于再制造的 $r_{z2} = \int_0^q r_z dq = qr_z$ 。在第三方回收商分类回收过程中，可用于梯次利用的 $r_{T1} = \int_q^1 r_T dq = (1-q)r_T$ ，可用于再制造的 $r_{T2} = \int_0^q r_T dq = qr_T$ 。在分类错误的情况下，对于制造商来说，分类后实际可用于梯次利用的动力电池数量为 $R_{z1} = (1-x)r_{z1}$ ，实际可用于再制造的动力电池数量为 $R_{z2} = xr_{z1} + (1-y)r_{z2}$ ，计算的错误类型II的数量为 yr_{z2} ，用单位残值 s 处理，导致总残值 $sy r_{z2}$ 。对于第三方回收商来说，分类后实际可用于梯次利用的动力电池数量 $R_{T1} = (1-x)r_{T1}$ ，实际可用于再制造的动力电池数量为 $R_{T2} = xr_{T1} + (1-y)r_{T2}$ 计算的错误类型II的数量为 yr_{T2} ，用单位残值 s 处理，导致总残值 $sy r_{T2}$ 。

制造商与第三方回收商在回收价格上的竞争具有相同的渠道力量。他们同时做出独立的决策，使自己的利润最大化，即纳什均衡。博弈过程为：制造商决定回收价格 p_1 ，制造商销售的可梯次利用的动力电池价格 p_{11} ，新电池价格 p_z ；同时，第三方回收商决定其回收价格 p_2 和第三方销售的可梯次利用的动力电池价格 p_{12} 。

在模式下，制造商的利润函数为：

$$\pi_z = (p_z - c_n)(D_z - R_{z2} - R_{T2}) + (p_z - c_z)(R_{z2} + R_{T2}) + (p_{11} - c_t)D_{11} - p_1 r_z - p_2 R_{T2} + sy r_{z2} \quad (1)$$

第三方回收商的利润函数为：

$$\pi_T = (p_{12} - c_t)D_{12} - p_2(R_{T1} + yr_{T2}) + sy r_{T2} \quad (2)$$

4. 数理分析与数值算例

闭环供应链决策中的博弈顺序为：

(1) 动力电池制造商和第三方回收商都为整个博弈过程中的领导者，以自身利益最大化为原则，决定回收价格 p_1 、 p_2 、 p_z 、 p_{11} 、 p_{12} ；

(2) 根据各个最优决策变量的确定，确定最优需求量 D_i 与回收量 r_i ；

通过逆向归纳法进行求解，得：

$$p_{12}^* = \frac{2h\alpha + (\alpha - \beta)[2(\alpha + \beta)c_n - q(2\alpha + \beta)\delta_1]}{4\alpha^2 - 4\alpha\beta - 2\beta^2}$$

$$\begin{aligned}
p_{t1}^* &= \frac{2h(2\alpha + \beta) + 2\alpha(2\alpha - \beta)c_n + q(-4\alpha^2 + 2\alpha\beta + \beta^2)\delta_1}{8\alpha^2 - 8\alpha\beta - 4\beta^2} \\
p_z^* &= \frac{2\alpha(2\alpha - \beta)c_n + (2\alpha + \beta)(2h - q\beta\delta_1)}{8\alpha^2 - 8\alpha\beta - 4\beta^2} \\
p_1^* &= \frac{b(1+M)[k(-1+M) + aqsy] + 2a(1-M)[-k + aqsy + (a-b)Mq\delta_2]}{(-1+M)[-4a^2 + b^2(1+M)]} \\
p_2^* &= \frac{2a^2qsy + a(1-M)(bqsy - 2k) - bk(1-M) + b(a-b)(1-M)Mq\delta_2}{(-1+M)[-4a^2 + b^2(1+M)]} \\
\pi_T^* &= \{qsy + [-1+x-q(-1+x+y)]p_2\}r_T + \frac{D_{t1}[2h\alpha - 2\alpha(\alpha - 2\beta)c_n + q(2\alpha^2 - 3\alpha\beta - \beta^2)\delta_1]}{4\alpha^2 - 4\alpha\beta - 2\beta^2} \\
\pi_Z^* &= \frac{(2\alpha + \beta)[2h - 2(\alpha - 2\beta)c_n - q\beta\delta_1]D_z}{8\alpha^2 - 8\alpha\beta - 4\beta^2} + \frac{D_{t1}\{2(2\alpha + \beta)[h - (\alpha - 2\beta)c_n] + q(4\alpha^2 - 6\alpha\beta - 3\beta^2)\delta_1\}}{8\alpha^2 - 8\alpha\beta - 4\beta^2} \\
&\quad + \{q\delta_2[x(1-q) + q(1-y)] - p_1 + qsy\}r_z + (q\delta_2 - p_2)[x(1-q) + q(1-y)]r_T \\
\text{其中, } M &= x - q(-1+x+y), \quad D_z^* = \frac{2(\alpha - \beta)(2\alpha + \beta)[h - (\alpha - 2\beta)c_n] + \beta(3\beta^2 + 5\alpha\beta - 6\alpha^2)\sigma_1q}{8\alpha^2 - 8\alpha\beta - 4\beta^2} \\
D_{t1}^{FC*} &= \frac{2(\alpha - \beta)(2\alpha + \beta)[h - (\alpha - 2\beta)c_n] + (4\alpha^3 - 6\alpha^2\beta - \alpha\beta^2 + \beta^3)\sigma_1q}{8\alpha^2 - 8\alpha\beta - 4\beta^2} \\
D_{t2}^* &= \frac{\alpha[2\alpha h - 2\alpha(\alpha - 2\beta)c_n + (2\alpha^2 - 3\alpha\beta - \beta^2)\sigma_1q]}{4\alpha^2 - 4\alpha\beta - 2\beta^2} \\
r_z^* &= \frac{k\{2a^2 + ab(1-q)(1-x) - b^2[q + (1-q)x]\} + qy[b(a+b)k + a(a-b)(2a+b)s] + (a-b)(2a^2 - b^2)[x - q(-1+x+y)]\sigma_2q}{4a^2 - b^2[1+x-q(-1+x+y)]} \\
r_T^* &= \frac{a\{2a^2qsy + a(2k - bqsy)[1-x+q(-1+x+y)] + b\{k(1-q)(1-x) + kqy - bqsy[1+x-q(-1+x+y)]\} - a(a-b)b[1-x+q(-1+x+y)][x-q(-1+x+y)]\sigma_2q\}}{[1-x+q(-1+x+y)]\{4a^2 - b^2[1+x-q(-1+x+y)]\}}
\end{aligned}$$

证明 对制造商利润函数式(1)进行求导, 制造商利润的海塞矩阵如下:

$$H = \begin{bmatrix} -2\alpha & 2\beta & 0 \\ 2\beta & -2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & -2a \end{bmatrix}$$

从上述矩阵得, 因为 $\alpha > \beta > 0$, 所以 $|H_1| = -2\alpha < 0$, $|H_2| = 4(\alpha^2 - \beta^2) > 0$, $|H_3| = -8a(\alpha^2 + \beta^2) < 0$

呈凹函数并且有极大值。因为 $\frac{\partial \pi_z}{\partial p_z} = h + (\alpha - \beta)c_n - 2\alpha p_z + \beta(2p_{t1} + p_{t2} + q\delta_1)$,

$$\frac{\partial \pi_z}{\partial p_{t1}} = h + (\alpha - \beta)c_n - 2\alpha p_{t1} + \beta p_{t2} + 2\beta p_z - q\alpha\delta_1,$$

$$\frac{\partial \pi_z}{\partial p_1} = -k + aqsy - 2ap_1 + b[1+x-q(-1+x+y)]p_2 + (-a+b)q[-x+q(-1+x+y)]\delta_2$$

对第三方回收商利润函数式(2)进行求导, 制造商利润的海塞矩阵如下:

$$H = \begin{bmatrix} -2\alpha & 0 \\ 0 & -2a[1-x+q(-1+x+y)] \end{bmatrix}$$

从上述矩阵, 因为 $\alpha > \beta > 0$, 所以 $|H_1| = -2\alpha < 0$, $|H_2| = 4[1-x+q(-1+x+y)]\alpha a > 0 (0 \leq q \leq 1)$ 呈凹函数并且有极大值。

从上述矩阵得, 因为 $\alpha > \beta > 0$, 所以 $|H_1| = -2\alpha < 0$, $|H_2| = 4(\alpha^2 - \beta^2) > 0$, $|H_3| = -8a(\alpha^2 + \beta^2) < 0$ 呈凹函数并且有极大值。

$$\frac{\partial \pi_z}{\partial p_z} = h + (\alpha - \beta)c_n - 2\alpha p_z + \beta(2p_{t1} + p_{t2} + q\delta_1)$$

$$\frac{\partial \pi_z}{\partial p_{t1}} = h + (\alpha - \beta)c_n - 2\alpha p_{t1} + \beta p_{t2} + 2\beta p_z - q\alpha\delta_1$$

$$\frac{\partial \pi_z}{\partial p_1} = -k + aqsy - 2ap_1 + b[1+x-q(-1+x+y)]p_2 + (-a+b)q[-x+q(-1+x+y)]\delta_2$$

$$\frac{\partial \pi_T}{\partial p_{t2}} = h + \beta(p_{t1} + p_z) + \alpha(c_n - 2p_{t2} - q\delta_1)$$

$$\frac{\partial \pi_T}{\partial p_2} = aqsy + (bp_1 - 2ap_2 - k)[1-x+q(-1+x+y)]$$

$$\text{令 } \frac{\partial \pi_T}{\partial p_{t2}} = 0, \frac{\partial \pi_z}{\partial p_{t1}} = 0, \frac{\partial \pi_z}{\partial p_z} = 0, \text{ 得 } p_{t2}^*, p_{t1}^*, p_z^*。$$

因为 $p_{t2}^* > 0$, 且 $2(\alpha + \beta)c_n - q(2\alpha + \beta)\delta_1 > 2(\alpha + \beta)(c_n - q\delta_1) > 0$, 所以 $4\alpha^2 - 4\alpha\beta - 2\beta^2 > 0$ 。

$$\text{令 } \frac{\partial \pi_z}{\partial p_1} = 0, \frac{\partial \pi_T}{\partial p_2} = 0, \text{ 得 } p_1^*, p_2^*。 \text{ 综上代入公式(1)(2), 得 } \pi_T^*, \pi_z^*。$$

引理 1 新电池和两类可梯次利用电池的价格与 q 呈负相关, 但与 x 和 y 无关。

证明:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_z^*}{\partial q} &= -\frac{\beta(2\alpha + \beta)\delta_1}{8\alpha^2 - 8\alpha\beta - 4\beta^2} < 0 \\ \frac{\partial p_{t1}^*}{\partial q} &= \frac{(-4\alpha^2 + 2\alpha\beta + \beta^2)\delta_1}{8\alpha^2 - 8\alpha\beta - 4\beta^2} < 0 \\ \frac{\partial p_{t2}^*}{\partial q} &= -\frac{(\alpha - \beta)(2\alpha + \beta)\delta_1}{4\alpha^2 - 4\alpha\beta - 2\beta^2} < 0 \end{aligned}$$

说明新电池价格与可梯次利用动力电池价格与容量分类标准 q 呈负相关。

$$\text{因为 } \frac{\partial p_z^*}{\partial x} = 0, \frac{\partial p_z^*}{\partial y} = 0, \frac{\partial p_{t1}^*}{\partial x} = 0, \frac{\partial p_{t1}^*}{\partial y} = 0, \frac{\partial p_{t2}^*}{\partial x} = 0, \frac{\partial p_{t2}^*}{\partial y} = 0,$$

所以新电池和两款可梯次利用动力电池的价格不受两类误差比例的影响。

引理 1 说明: 从等式中可以看出, 容量分类标准的水平反映了梯次利用成本 $c_t = c_n - \delta_1 q$ 和再制造成本 $c_z = c_n - \delta_2 q$ 优势的大小。更高的容量分类标准可以降低梯次利用或再制造的成本。相应地, 在竞争激烈的市场中, 新电池和可梯次利用动力电池的价格较低, 错误分类会导致可用于梯次利用和再制造的

动力电池数量发生变化，而不会影响新电池和可梯次利用动力电池的价格。

引理 2 制造商的回收价格 p_1^* 与 q 和 x 正相关，但与 y 负相关，第三方回收商的回收价格 p_2^* 与 q 和两类误差比例 x 、 y 正相关。

证明：为了回收价格和 q 、 x 、 y 更直观，我们采用数值仿真方法，假设 $a=0.5$ ， $b=0.2$ ， $h=0.8$ ， $k=0.1$ ， $\alpha=0.5$ ， $\delta_1=0.6$ ， $\delta_2=0.4$ ， $\beta=0.3$ ， $c_n=1$ ， $s=0.01$ 满足文中的所有建设与条件。

经计算得 $\frac{\partial p_1^*}{\partial q} > 0$ ， $\frac{\partial p_2^*}{\partial q} > 0$ ，说明随着容量分类标准 q 的提高，制造商和第三方回收商的收购价格上涨，如图 2 所示。

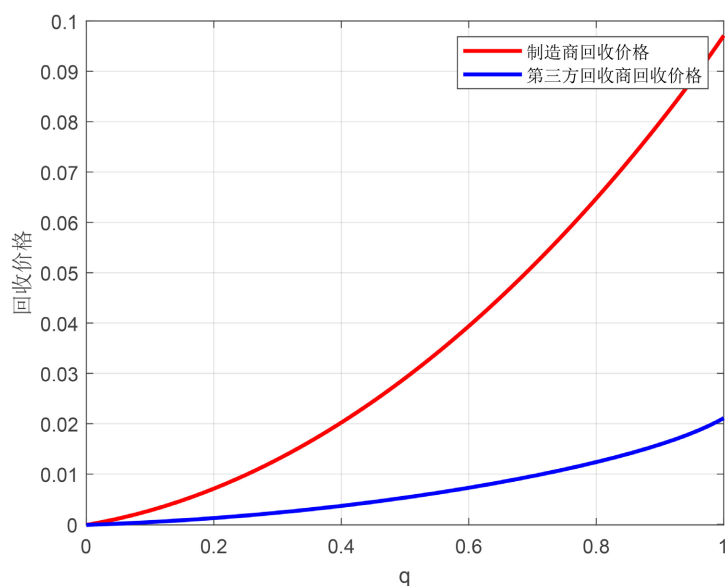


Figure 2. The impact of q on the acquisition price

图 2. q 对回收价格的影响

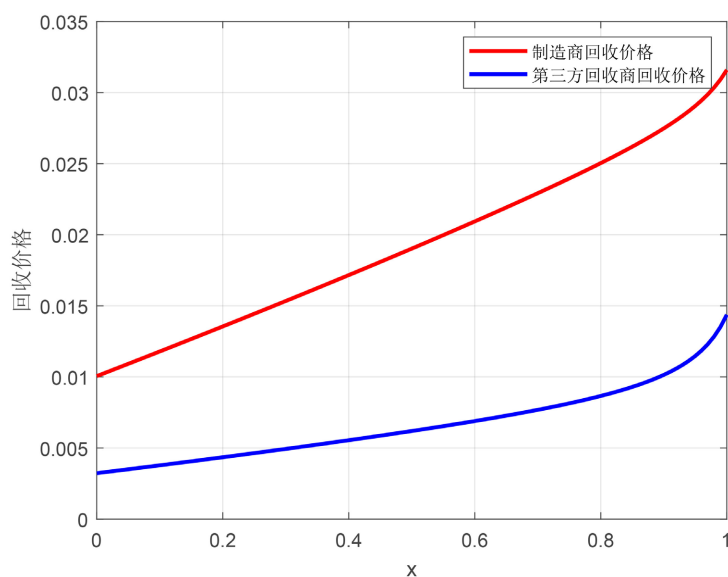


Figure 3. The impact of x on the acquisition price

图 3. x 对回收价格的影响

$\frac{\partial p_1^*}{\partial x} > 0$, $\frac{\partial p_1^*}{\partial y} < 0$, 制造商的回收价格 p_1^* 与 x 正相关, 但与 y 负相关, 如图 3、图 4 所示。

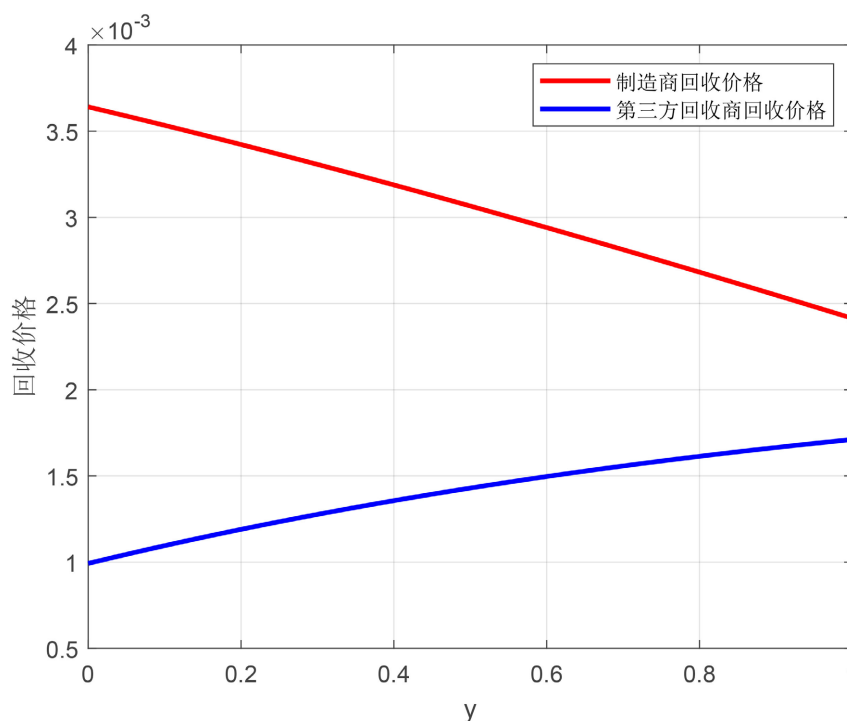


Figure 4. The impact of y on the acquisition price
图 4. y 对回收价格的影响

$\frac{\partial p_2^*}{\partial x} > 0$, $\frac{\partial p_2^*}{\partial y} > 0$, 制造商的回收价格 p_2^* 两类误差比例 x 和 y 正相关, 如图 3、图 4 所示。

引理 2 说明: 高容量分类标准会导致制造商、第三方回收商的回收价格增加; I 类错误比例的增加导致制造商和第三方回收商的回收价格上涨; II 类错误比例的增加还导致制造商回收价格增加, 第三方回收商回收价格减少。由此可见, 回收价格策略与回收渠道密切相关。

引理 3 制造商的利润与 q 负相关, 与 x 正相关, 与 y 负相关, 第三方回收商的利润与 q 负相关, 与 x 负相关, 与 y 正相关。

证明 从图 5 可以看出, 随着容量分类标准 q 的增加, 制造商和第三方回收商的利润减少, 如图 6 所示, 随着 x 的增加, 制造商的利润增加, 而第三方回收商的利润减少。随着 y 的增加, 制造商的利润减少, 第三方回收商的利润增加。

引理 3 说明: 第三方回收商参与回收竞争并不影响分类误差与回收商利润之间的关系。随着容量分类标准的提高, 制造商和第三方的利润都会减少。这背后的原因是, 在提高容量分类标准增加梯次利用成本优势的同时, 梯次利用产品的市场竞争导致价格下降, 从而导致双方利润减少。

由引理 1、2、3 可得推论 1 和 2, 即

推论 1

新电池和可梯次利用电池的销售价格与 q 呈负相关, 不受两种分类误差的影响。此外, 随着 q 的增加, 制造商与第三方回收商的回收价格也会增加。同时, 制造商的回收价格与 x 正相关、与 y 负相关, 而在第三方回收价格与 x 、 y 正相关。

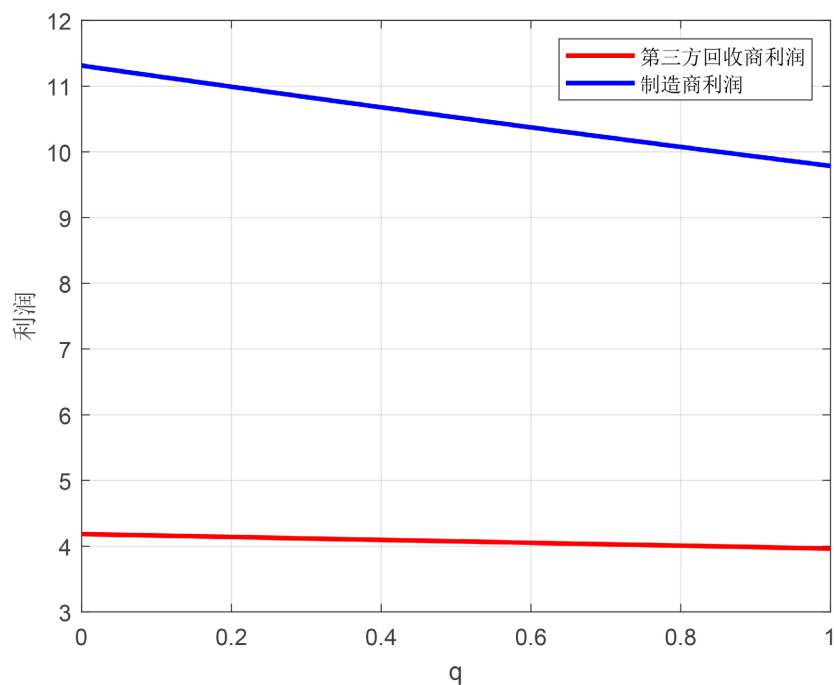


Figure 5. The differential impact of q on manufacturer profits and third-party recycler profits
图 5. q 分别对制造商和第三方回收商利润的影响

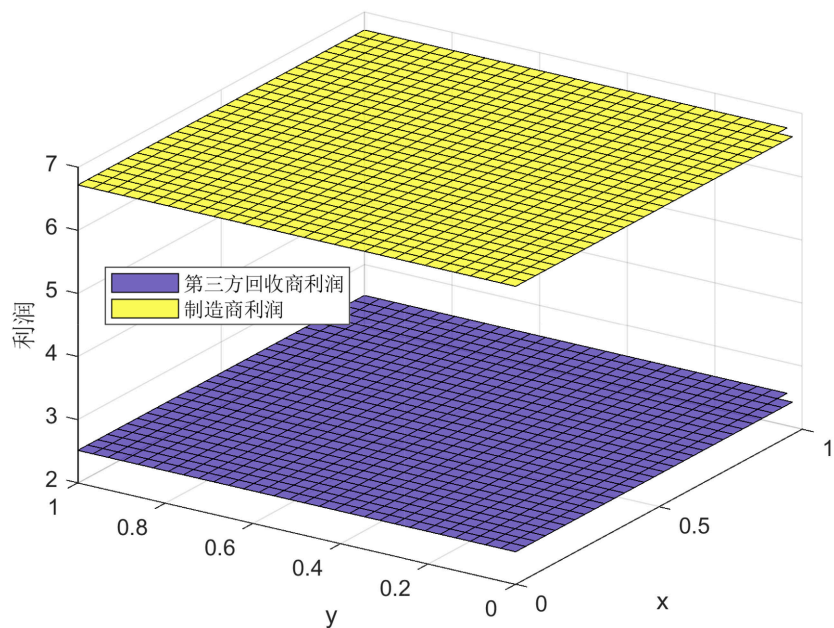


Figure 6. The differential effects of x (on manufacturers) and y (on third-party recyclers) on their respective profits
图 6. x 和 y 分别对制造商和第三方回收商利润的影响

根据引理 1，新电池和可梯次利用电池的价格与 q 负相关，并且不受分类错误比例的影响。根据引理 2 可知，分类回收容量标准越高，回收价格越高。随着 x 的增加，回收价格增加；但是，随着 y 的增加，制造商回收渠道下的回收价格降低，而第三方回收渠道下的回收价格增加。

推论 1 表明分类回收容量标准越高，(1) 再制造和梯次利用的成本优势越明显，新电池和可梯次利用

电池的价格越低。但是,也有例外,制造商在分类回收时,不会因为可梯次利用电池的存在而降低新电池的价格;(2) 收购价格越高。因此,回收者在分类时必须仔细考虑分类回收容量标准制定回收价格策略。从两类分类错误来看,(1) 分类错误主要影响再制造和可梯次利用电池的数量,不影响价格;(2) I 类错误比例的增加导致制造商和第三方回收商的回收价格上涨。II 类错误比例对回收价格水平的影响与回收渠道密切相关。

推论 2

制造商的利润随 x 的增加而增加,随 y 的增加而减少,而第三方回收商的利润变化则相反。

由引理 3 可知,分类错误比例对回收渠道利润的影响是一致的:即随着 x 的增加,制造商的利润增加,第三方回收商的利润减少。 y 越大,制造商的利润越小,第三方回收商的利润越大。

推论 2 强调, I 和 II 错误的比例对制造商和第三方回收商的利润有明显的影响。I 错误比例的增加会带来好处的同时对制造商的第三方利润产生不利影响。相反, II 错误比例的增加会以相反的方式影响制造商和第三方。通过控制这两种错误的比例,回收商可以调整供应链成员的绩效。在此模式下,有第三方竞争性参与分类回收,可以有效地减轻分类错误对供应链的影响。

5. 结语

对动力电池进行分类回收可以优化其剩余价值,而容量分类标准和错误分类会影响回收成本和价格以及供应链的利润。在这项研究中,我们考虑了一个由制造商和第三方回收商组成的供应链,以研究容量分类标准和错误分类对动力电池定价的影响。通过求解和分析我们的博弈论模型,我们得到了以下发现,以回答引言末尾提出的三个问题,并总结了该研究的贡献。其研究结论与管理启示如下:

1) 基于容量分类标准的产品定价策略和供应链利润

在定价策略(包括销售价格和回收价格)方面,对于采用竞争性分类回收模式(如宁德时代和邦普循环)的企业来说,高容量分类标准要求降低销售价格,提高回收价格。反之,如果容量分类标准低,则应提高销售价格,降低回收价格。但是,新动力电池的价格受市场竞争的影响,不受容量分类标准的影响。

就供应链利润而言,更高的容量分类标准并不一定更好。容量分类标准的提高会削弱供应链在竞争模式下的整体表现。这对仅生产动力电池(如比亚迪和国轩高科)或仅回收动力电池(如格林美和赣州豪鹏)企业来说比较好,但对宁德时代和邦普循环公司的情况恰恰相反。虽然宁德时代的竞争性分类回收模式一直优于其他分类回收模式,但高容量分类标准损害了渠道利润。因此,宁德时代和邦普循环可以设定低容量分类标准。

2) 错误分类的影响及对策

错误分类主要影响动力电池的回收价格,而不是销售价格。较高比例的 I 类错误需要设置更高的回收价格,而更高比例的 II 类错误要求制造商回收渠道的回收价格较低,第三方回收渠道的回收价格较高。为了减轻错误分类对供应链绩效的影响,一方面,企业可以通过增加对分类技术的投入来提高分类准确率。另一方面,公司可以引入第三方加入回收竞争,例如宁德时代公司允许邦普循环对其新能源汽车退役动力电池进行回收和分类。竞争的存在使得双方在分拣时更加谨慎,减少了错误分类对供应链利润的影响。

参考文献

- [1] 王海波, 林虹, 宋文龙, 等. 2024 年上半年中国电池行业运行情况[J]. 电池, 2024, 54(4): 445-449.
- [2] 王玥, 郑晓洪, 阮丁山, 等. 磷酸铁锂电池循环利用: 从基础研究到产业化[J]. 中国工程科学, 2024, 26(5): 234-247.

- [3] 孙嘉轶, 邵天琳, 滕春贤. 回收竞争下闭环供应链分类回收及共谋策略研究[J/OL]. 计算机集成制造系统, 1-25[2025-03-27].
<https://login.cnki.net/login/?returnUrl=http%3a%2f%2fkns.cnki.net%2fkcms%2fDetail%2fDetail.aspx%3fdoi%3d11.5946.TP.20231024.0849.002>
- [4] 龙宇娟, 庄越. 试论构建新能源汽车废旧锂电池回收利用体系[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(3): 98-102.
- [5] 周喜超, 王楠, 徐街明, 等. 磷酸铁锂电池管理技术及安全防护技术研究现状[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 9-17.
- [6] 赵梦娜, 刘勇, 马良. 不确定条件下新能源汽车动力电池回收网络模型及算法[J/OL]. 系统工程, 1-15[2025-03-27].
<https://login.cnki.net/login/?returnUrl=http%3a%2f%2fkns.cnki.net%2fkcms%2fDetail%2fDetail.aspx%3fdoi%3d43.1115.N.20241107.1052.004>
- [7] 姚轶. 回收质量不确定下动力电池闭环供应链定价与协调研究——以 N 公司为例[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2023.
- [8] 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.
- [9] 李晓冰, 王煜钧, 蒋炜. 考虑消费者异质性的动力电池回收闭环供应链定价决策[J]. 中国管理科学, 2025, 33(2): 279-291.
- [10] 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.
- [11] 梁喜, 苏玉婷, 胡鑫, 等. 考虑区块链及补贴的绿色闭环供应链定价与回收渠道选择[J/OL]. 系统工程, 1-26[2025-03-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1115.n.20250211.1424.004.html>
- [12] 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.
- [13] 付小勇, 朱庆华, 窦一杰. 回收竞争的逆向供应链回收渠道的演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2012, 21(4): 41-51.
- [14] Saha, S., Sarmah, S.P. and Moon, I. (2015) Dual Channel Closed-Loop Supply Chain Coordination with a Reward-Driven Remanufacturing Policy. *International Journal of Production Research*, **54**, 1503-1517.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1090031>
- [15] Wang, N., He, Q. and Jiang, B. (2019) Hybrid Closed-Loop Supply Chains with Competition in Recycling and Product Markets. *International Journal of Production Economics*, **217**, 246-258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.002>
- [16] Bhattacharya, R. and Kaur, A. (2015) Allocation of External Returns of Different Quality Grades to Multiple Stages of a Closed Loop Supply Chain. *Journal of Manufacturing Systems*, **37**, 692-702.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.01.004>
- [17] 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>
- [18] Gu, Q. and Tagaras, G. (2014) Optimal Collection and Remanufacturing Decisions in Reverse Supply Chains with Collector's Imperfect Sorting. *International Journal of Production Research*, **52**, 5155-5170.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2014.899720>
- [19] Tagaras, G. and Zikopoulos, C. (2008) Optimal Location and Value of Timely Sorting of Used Items in a Remanufacturing Supply Chain with Multiple Collection Sites. *International Journal of Production Economics*, **115**, 424-432.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.10.026>
- [20] Singh, N. and Vives, X. (1984) Price and Quantity Competition in a Differentiated Duopoly. *The RAND Journal of Economics*, **15**, 546-554. <https://doi.org/10.2307/2555525>