

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2023.06.003

工艺创新视角下动力电池逆向供应链的回收模式研究

王文宾, 张萌欣, 管 婕, 戚金钰

(中国矿业大学 经济管理学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 再制造动力电池工艺创新背景下, 研究动力电池逆向供应链的回收模式决策问题。分别构建动力电池生产商回收、新能源汽车制造商回收以及两者共同回收时的逆向供应链模型, 分析不同回收模式对再制造动力电池工艺创新水平、回收量和利润等的影响, 从而确定最佳的工艺创新水平和回收模式。研究表明: 1) NEV (新能源汽车) 制造商单独回收模式最不利于动力电池的回收和工艺创新, 两者共同回收且 PB (动力电池) 生产商回收的废旧电池比重为 0.67 时, 废旧电池回收量和工艺创新水平最高; 2) PB 生产商和 NEV 制造商的利润总是在对方负责回收时最低, 而当 PB 生产商回收比重大于 0.33 时, 两者均可在共同回收模式下实现利润最高; 3) 不论在何种回收模式下, 再制造动力电池工艺创新的投入成本系数和废旧电池回收难度越低, 工艺创新水平对成本节约的影响程度越高时, 废旧电池回收量、工艺创新水平以及逆向供应链的利润越高。

关键词: 工艺创新; 动力电池; 回收模式; 逆向供应链

中图分类号: F224

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2023)06-0024-11

A Recycling Mode of Power Battery Reverse Supply Chains from the Perspective of Process Innovation

WANG Wenbin, ZHANG Mengxin, GUAN Jie, QI Jinyu

(School of Economics and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: This paper studies the decision-making of recycling modes in power battery reverse supply chains under the background of process innovation in remanufacturing power batteries. The profit decision models of power battery manufacturer recycling, new energy vehicle manufacturer recycling and both recycling in reverse supply chains are established respectively. The effects of different recycling modes on the process innovation level, recycling amount and profit of remanufacturing power batteries are analyzed, so as to determine the optimal process innovation level and recycling mode. The study shows that: 1) recycling by NEV manufacturers is the most detrimental to the recycling and process innovation of power batteries, while when both recycling and the proportion of waste batteries recycled by PB producers is 0.67, the recycling amount of waste batteries and the level of process innovation are the highest; 2) the profit of PB producers and NEV manufacturers are always the lowest when the other party is responsible for recycling, but they can obtain the highest profit under the joint recycling mode when the recycling proportion of PB producers is greater than 0.33; 3) regardless of the recycling mode, the lower the input cost coefficient of remanufacturing power battery process innovation and the difficulty of recycling waste batteries and the higher the impact of process innovation level on cost savings, the higher the recycling amount of waste batteries, the level of process innovation and the profit of reverse supply chains.

Key words: process innovation; power battery; recycling mode; reverse supply chain

动力蓄电池回收再利用是促进汽车行业向绿色低碳转型的重大措施, 是落实汽车行业“碳达峰、碳中和”目标的有效途径^[1]。随着新能源汽车保有量的迅速增长, 动力电池的退役量也在逐步攀升。据

全球市场研究机构 TrendForce 预估, 到 2025 年, 动力电池报废量将达到 91 GWh。如此庞大规模的动力蓄电池退役, 若未能得到规范回收和再利用, 不仅会阻碍汽车产业转型升级, 更会造成严重的环

收稿日期: 2022-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71971210); 国家社会科学基金资助项目 (19BGL020, 19BRK018)

作者简介: 王文宾 (1979—), 男, 山东省人, 教授, 博士, 主要研究方向为逆向供应链、闭环供应链管理。

境污染和资源浪费^[2]。其次, 2021年起动力电池原材料价格持续大幅上涨, 使得动力电池回收再制造市场不断扩容, 而规范性却严重不足。因此, 研究动力电池回收再制造问题以加快废旧动力电池回收再利用产业的规范化发展已是迫在眉睫。

国内外学者对动力电池等电器电子产品回收有关的研究, 除部分关注回收政策外, 大部分集中在回收渠道领域, 即针对不同权力结构下的不同回收渠道问题进行探讨。如, Savaskan等^[3]研究3种回收模式, 即制造商回收、制造商联合零售商回收以及第三方回收下制造商的回收渠道选择问题。在此基础上, 诸多学者运用闭环供应链理论进行了拓展研究。公彦德等^[4]构建两类不同主体间混合回收的闭环供应链模型, 寻找最优混合回收模式; 夏西强等^[5]探究分类回收费用承担模式对回收渠道的影响, 发现分类回收可以同时增加回收商和处理商收益; Ma等^[6]针对闭环供应链系统分析不同合作模式对闭环供应链定价与回收决策的影响; 郑本荣等^[7]发现任何联盟形式下制造商的占优策略都是进入回收市场; 周兴建等^[8]研究发现区块链技术下的回收供应链模式效率高于传统回收模式。以上研究大多将产品回收视为整个闭环供应链中的一个环节, 着重于回收策略及产品定价等方面的研究, 针对动力电池回收再制造的逆向供应链的研究较少。而实践中, 宁德时代等车企已专门布局电池回收业务, 成立逆向供应链。因此, 以此现实问题为导向, 弥补研究空白为辅, 本文着眼于动力电池逆向供应链回收模式的研究。

受动力电池原材料价格上涨的影响, 动力电池回收成本随之增加。已有研究^[9]表明工艺创新可以提高企业的竞争力, 降低成本并吸引更多消费者, 提高企业盈利能力。因此, 如何通过工艺创新降低成本以形成成本优势是动力电池企业必须迅速拿下的战略制高点。对于工艺创新的研究, Hu等^[10]研究上游单独投资、下游单独投资、上下游合作或均独立进行降低生产成本创新的4种策略; 温小琴等^[11]研究消费者的质量意识水平和制造商的工艺创新能力对供应链的决策、利润以及消费者剩余的影响; 赵海霞等^[12]构建制造商是否进行工艺创新的竞争供应链模型, 采用动态博弈方法识别工艺创新实现供应链成员绩效改进的博弈均衡条件和占优均衡; Wang等^[13]将工艺创新引入动态差异博弈模型, 并使用控制策略研究企业产品和工艺创新中单一产品垄断投资的最佳研发组合。可以看出, 大多学者研

究的是普通供应链中的工艺创新行为, 而动力电池供应链具备技术壁垒高、回收量大、渠道多等特点, 与一般供应链适配度不高, 因此研究动力电池逆向供应链中的工艺创新行为具有一定的现实意义。

基于以上问题, 本文在动力电池 (power battery, PB) 生产商进行再制造动力电池工艺创新视角下, 研究动力电池逆向供应链的工艺创新水平决策以及回收模式选择问题。分别构建 PB 生产商回收、新能源汽车 (new energy vehicle, NEV) 制造商回收以及二者同时回收时的利润决策模型, 分析工艺创新和不同回收模式对逆向供应链的回收量、价格和利润等的影响。通过对比分析不同决策模型下的均衡解, 给出逆向供应链的最优工艺创新水平和回收模式, 进一步为动力电池供应链相关企业决策提供理论依据。

1 问题描述与基本假设

考虑由单个 PB 生产商和单个 NEV 制造商组成的逆向供应链。假设两者进行完全信息下的 Stackelberg 博弈。PB 生产商属于逆向供应链的领导者且进行再制造动力电池工艺创新^[2]。逆向供应链中, 回收模式有3种, 分别为 PB 生产商回收 (情形 P)、NEV 制造商回收 (情形 M) 以及两者同时回收 (情形 PM)。假设整个逆向供应链系统的回收与销售只讨论单周期的情况, 即产品的逆向回收和销售过程均在同一周期内完成^[7], 如图1所示。

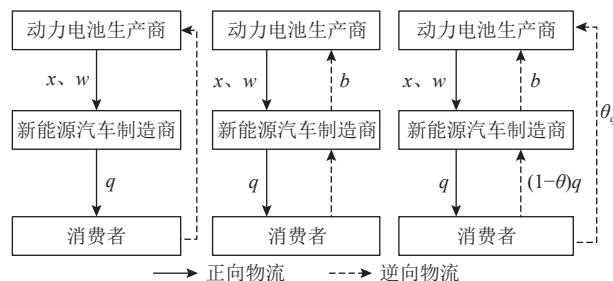


图1 3种回收模式下的逆向供应链结构

Figure 1 Structures of reverse supply chains under three recycling modes

本文假设如下。

1) 由于一辆新能源汽车装配一套动力电池, 因此新能源汽车生产量和动力电池订货量相同。本研究不考虑使用新材料生产动力电池的情形, 即动力电池均来自于回收再制造。为简化研究, 假设回收来的废旧电池均可进行再制造, 转化为新动力电池, 故回收废旧电池的数量与新能源汽车产量相同。

2) 定义 c_0 为 NEV 制造商除购买动力电池外的新能源汽车的单位生产成本, 则 NEV 制造商的新能源汽车单位生产成本为 $c_0 + w$ 。

3) 参考 Reimann 等^[14]的研究, 市场的逆需求函数为 $p = a - q$ 。其中, p 为新能源汽车价格; q 为新能源汽车的销售数量; a 为窒息价格, 即导致产品没有需求量时的最低价格。

4) PB 生产商进行再制造动力电池工艺创新的成本由固定成本和可变成本构成, 设固定成本为 $\frac{hx^2}{2}$ ^[15], 可变成本为 $c_r - rx$ 。其中, h 为进行再制造动力电池工艺创新的投入成本系数, 反映了工艺创新的难度; x 为创新水平; c_r 为创新前的再制造单位可变成本; rx 为进行再制造动力电池工艺创新减少的单位生产成本; r 为创新水平对成本节约的影响程度, 反映了工艺创新对于降低成本的效率。

5) 参考 Savaskan 等^[16]对回收投资的研究假设, 回收成本是关于回收量 q 的二次函数 $I = \frac{kq^2}{2}$ 。即回收量越高, 需要投入的机器、管理等固定生产经营成本随之升高。 k 为废旧动力电池回收的难度系数, $k > 0$ 。

本文模型涉及符号如表 1 所示。其中下标 p、m 和 t 分别表示 PB 生产商、NEV 生产商和供应链整体, 上标 $i = P, M, PM$ 分别表示 PB 生产商回收、NEV 制造商回收和两者同时回收模式。

2 模型建立

本文分别在 PB 生产商主导的 3 种不同回收模式下构建相应的利润决策模型, 并对均衡结果进行比较分析, 从而得出最优的回收策略与不同回收渠道下的最优工艺创新水平、生产量等决策。

2.1 PB 生产商负责回收的决策模型 (情形 P)

在 P 模型中, PB 生产商承担废旧动力电池的回收工作。此时, PB 生产商的成本包括回收成本和再制造工艺创新成本。故 PB 生产商的利润函数为

$$\max_{w, x} \pi_p^P = (w - c_r + rx)q - \frac{hx^2}{2} - \frac{kq^2}{2}。 \quad (1)$$

NEV 制造商的利润函数为

$$\max_q \pi_m^P = (a - q - w - c_0)q。 \quad (2)$$

博弈顺序如下: PB 生产商作为主导者优先决策工艺创新水平 x 和批发价 w , 随后, NEV 制造商决策汽车产量 q 。

表 1 符号及其含义说明

Table 1 Symbols and their descriptions

符号	含义
w	动力电池批发价格 (PB 生产商的决策变量)
q	新能源汽车产量 (与废旧动力电池回收量相同, NEV 制造商的决策变量)
x	工艺创新水平 (PB 生产商的决策变量)
p	新能源汽车零售价格
a	新能源汽车窒息价格
b	废旧动力电池回购价
k	废旧动力电池回收的难度系数
h	再制造动力电池工艺创新的投入成本系数
c_r	工艺创新前的再制造单位可变成本
c_0	除购买动力电池外的新能源汽车的单位生产成本
r	工艺创新对成本节约的影响程度
θ	PB 生产商回收废旧电池的比例 ($0 < \theta < 1$)
I	废旧动力电池的回收成本
π	利润

命题 1 当相关参数满足 $(4 + k)h - r^2 > 0$ 时, 模型存在唯一解, 采用逆向归纳法可求得相关均衡结果如表 2 第 2 列所示。

证明 根据逆向归纳法, 首先, 由于 $\frac{\partial^2 \pi_m^P}{\partial (q^P)^2} = -2 - k < 0$, 即 NEV 制造商的利润函数关于新能源汽车产量是严格凹函数, 故式 (2) 有最优解, 令 $\frac{\partial \pi_m^P}{\partial q^P} = 0$, 得

$$q^P = \frac{a - c_r + rx - c_0}{2 + k}。 \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (1) 中, 分别对 w^P 和 x^P 求一阶偏导和二阶偏导, 得

$$\frac{\partial \pi_p^P}{\partial w^P} = \frac{\partial w^P}{\partial w^P} = \frac{a - 2w - c_0 - rx + c_r}{2} - \frac{k(w - a + c_0)}{4};$$

$$\frac{\partial \pi_p^P}{\partial x^P} = \frac{(a - w - c_0)r}{2} - hx;$$

$$\frac{\partial^2 \pi_p^P}{\partial (w^P)^2} = -1 - \frac{k}{4};$$

$$\frac{\partial^2 \pi_p^P}{\partial (x^P)^2} = -h。$$

可得海赛矩阵

$$H = \begin{bmatrix} -1 - \frac{k}{4} & -\frac{r}{2} \\ -\frac{r}{2} & -h \end{bmatrix}。$$

若使 PB 生产商的利润函数是关于 w^p 和 x^p 的联合凹函数, 需满足 $(4+k)h-r^2>0$ 。根据一阶偏导为零的条件, 联立可求得最优再制造动力电池批发价 w^{p*} 和最优工艺创新水平 x^{p*} 。进一步, 将 w^{p*} 和 x^{p*} 代入到式 (3) 中, 可得到最优新能源汽车产量 q^{p*} 。最后将 w^{p*} 、 x^{p*} 和 q^{p*} 分别代入到式 (1) 和式 (2) 中, 可求得 PB 生产商回收时的 PB 生产商和 NEV 制造商的利润。

由于 NEV 制造商回收以及两者同时回收时的求解过程和 PB 生产商回收时相同, 下文不再证明。

2.2 NEV 制造商负责回收的决策模型 (情形 M)

在 M 模型中, NEV 制造商负责废旧动力电池的回收工作, 如宝马、大众就是典型例子。此时, PB 生产商以回购价 b 购买 NEV 制造商回收的废旧动力电池进行再制造, 其利润函数为

$$\max_{w,x} \pi_p^M = (w - b - c_r + rx)q - \frac{hx^2}{2}. \quad (4)$$

对于负责回收的 NEV 制造商而言, 其收益来源包括两部分: 一部分是将新能源汽车以价格 p 出售给消费者获利; 另一部分则是将从消费者手中回收来的废旧动力电池, 以价格 b 转移给 PB 生产商从而获得差额。因此, NEV 制造商的利润函数为

$$\max_q \pi_m^M = (a - q - w - c_0)q + bq - \frac{kq^2}{2}. \quad (5)$$

命题 2 当相关参数满足 $2(2+k)h-r^2>0$ 时, 模型存在唯一解, 求得相关均衡结果如表 2 第 3 列所示。

2.3 PB 生产商和 NEV 制造商同时回收的决策模型 (情形 PM)

在该模型中, PB 生产商和 NEV 制造商均付出一定回收成本进行废旧动力电池的回收工作。如上汽集团与宁德时代进行战略合作, 共同推进新能源汽车动力电池回收再利用。PB 生产商和 NEV 制造商回收的废旧动力电池数量分别为 θq 和 $(1-\theta)q$ 。此时, PB 生产商的利润函数可以表示为进行废旧动力电池再制造的利润, 减去再制造工艺创新成本、废旧电池回收成本与回购 NEV 制造商回收的废旧动力电池产生的成本, 即

$$\max_{w,x} \pi_p^{PM} = (w - c_r + rx)q - \frac{hx^2}{2} - \frac{k(\theta q)^2}{2} - b(1-\theta)q. \quad (6)$$

NEV 制造商的利润函数为销售新能源汽车的利润与出售给 PB 生产商的废旧动力电池收益之和, 再减去回收成本, 即

$$\max_q \pi_m^{PM} = (a - q - w - c_0)q - \frac{k[(1-\theta)q]^2}{2} + b(1-\theta)q. \quad (7)$$

命题 3 当相关参数满足 $2h[2+k(1-\theta)^2]+hk\theta^2-r^2>0$ 时, 模型存在唯一解, 求得相关均衡结果如表 2 第 4 列所示。

表 2 不同决策模型下的均衡结果¹⁾

Table 2 Equilibrium results under different decision-making models

参数	PB 生产商回收 ($i=P$)	NEV 制造商回收 ($i=M$)	同时回收 ($i=PM$)
q^{i*}	$\frac{\Delta_1 h}{(4+k)h-r^2}$	$\frac{\Delta_1 h}{2(2+k)h-r^2}$	$\frac{\Delta_1 h}{2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2}$
x^{i*}	$\frac{\Delta_1 r}{(4+k)h-r^2}$	$\frac{\Delta_1 r}{2(2+k)h-r^2}$	$\frac{\Delta_1 r}{2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2}$
w^{i*}	$\frac{(2\Delta_3+k\Delta_2)h-\Delta_2 r^2}{(4+k)h-r^2}$	$\frac{(2+k)(\Delta_3+2b)h-(\Delta_2+b)r^2}{2(2+k)h-r^2}$	$\frac{[\Delta_3+2b(1-\theta)][2+k(1-\theta)^2]h+[\Delta_2+b(1-\theta)](hk\theta^2-r^2)}{2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2}$
p^{i*}	$\frac{[a(3+k)+\Delta_4]h-ar^2}{(4+k)h-r^2}$	$\frac{[a(3+2k)+\Delta_4]h-ar^2}{2(2+k)h-r^2}$	$\frac{\{a[3+k\theta^2+2k(1-\theta)^2]+\Delta_4\}h-ar^2}{2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2}$
π_p^*	$\frac{\Delta_1^2 h}{2[(4+k)h-r^2]}$	$\frac{\Delta_1^2 h}{2[2(2+k)h-r^2]}$	$\frac{\Delta_1^2 h}{2[2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2]}$
π_m^*	$\frac{\Delta_1^2 h^2}{[(4+k)h-r^2]^2}$	$\frac{\Delta_1^2 h^2(2+k)}{2[2(2+k)h-r^2]^2}$	$\frac{\Delta_1^2 h^2[2+k(1-\theta)^2]}{2[2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2]^2}$
π_t^*	$\frac{\Delta_1^2 h[(6+k)h-r^2]}{2[(4+k)h-r^2]^2}$	$\frac{\Delta_1^2 h[(6+3k)h-r^2]}{2[2(2+k)h-r^2]^2}$	$\frac{\Delta_1^2 h\{[6+3k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2\}}{2[2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2]^2}$

1) $\Delta_1 = a - c_r - c_0$; $\Delta_2 = a - c_0$; $\Delta_3 = a - c_0 + c_r$; $\Delta_4 = c_0 + c_r$; Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、 Δ_4 均大于 0。

3 模型性质分析

本节首先对 PB 生产商回收、NEV 制造商回收以及二者共同回收这 3 种模式下的均衡结果比较分析, 得出最优的回收策略。其后, 分析电池回收比

例和工艺创新相关参数对逆向供应链的回收量、工艺创新水平和利润等的影响, 得到不同回收模式下最佳的回收比例分配和工艺创新决策。

3.1 不同回收模式下的均衡结果比较

命题 4 3 种情形下的均衡结果比较如表 3 所示。

表 3 3 种情形下的均衡结果比较

Table 3 Comparison of equilibrium results in three cases

PB 生产商的回收比重	废旧电池回收量	工艺创新水平	新能源汽车价格
$0 < \theta < 0.33$	$q^{P^*} > q^{PM^*} > q^{M^*}$	$x^{P^*} > x^{PM^*} > x^{M^*}$	$p^{P^*} < p^{PM^*} < p^{M^*}$
$0.33 \leq \theta < 1$	$q^{PM^*} \geq q^{P^*} > q^{M^*}$	$x^{PM^*} \geq x^{P^*} > x^{M^*}$	$p^{PM^*} \leq p^{P^*} < p^{M^*}$

证明 根据表 2 中的均衡结果, q^* 和 x^* 在 3 种情形下的分子都相同, 而分母 $(4+k)h-r^2 < 2(2+k)h-r^2$, 故 $q^{P^*} > q^{M^*}$, $x^{P^*} > x^{M^*}$ 。对于 p^* , $p^{P^*}-p^{M^*}=-k(a-\Delta_4)h^2 < 0$, 故 $p^{P^*} < p^{M^*}$ 。比较 q^{M^*} 与 q^{PM^*} 的大小, 二者分子相同, 分母相减: $[2(2+k)h-r^2]-[2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2]$, 得 $hk\theta(4-3\theta) > 0$ (其中, $0 < \theta < 1$), 故 $q^{PM^*} > q^{M^*}$ 。同理得 $x^{PM^*} > x^{M^*}$, $p^{PM^*} < p^{M^*}$ 。进一步比较 q^{P^*} 与 q^{PM^*} 、 x^{P^*} 与 x^{PM^*} 、 p^{P^*} 与 p^{PM^*} 的大小。

当 $0.33 < \theta \leq 1$ 时, $\pi_p^{PM^*} > \pi_p^{P^*} > \pi_p^{M^*}$ 。
2) 当 $0 \leq \theta \leq 0.86$ 时, $\pi_m^{PM^*} \geq \pi_m^{M^*} > \pi_m^{P^*}$; 当 $0.86 < \theta \leq 1$ 时, $\pi_m^{M^*} > \pi_m^{PM^*} > \pi_m^{P^*}$ 。
3) 当 $0 \leq \theta \leq 0.18$ 时, $\pi_t^{P^*} \geq \pi_t^{PM^*} > \pi_t^{M^*}$; 当 $0.18 < \theta \leq 1$ 时, $\pi_t^{PM^*} > \pi_t^{P^*} > \pi_t^{M^*}$ 。

证明 1) 首先比较 $\pi_p^{P^*}$ 与 $\pi_p^{PM^*}$ 大小, 两者分子相同, 而分母 $(4+k)h-r^2 < 2(2+k)h-r^2$, 故 $\pi_p^{P^*} > \pi_p^{PM^*}$ 。比较 $\pi_p^{M^*}$ 与 $\pi_p^{PM^*}$ 大小, 二者分子相同, 分母相减: $[2(2+k)h-r^2]-[2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2]$, 得 $hk\theta(4-3\theta) > 0$, (其中, $0 < \theta < 1$), 故 $\pi_p^{M^*} < \pi_p^{PM^*}$ 。比较 $\pi_p^{P^*}$ 与 $\pi_p^{PM^*}$ 大小:

$$p^{P^*}-p^{PM^*}=\frac{kh^2(a-\Delta_4)(1-\theta)(3\theta-1)}{[(4+k)h-r^2][2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2]}。$$

当 $0 < \theta < 0.33$ 时, $p^{P^*} < p^{PM^*}$, $x^{P^*} > x^{PM^*}$, $q^{P^*} > q^{PM^*}$;
当 $0.33 \leq \theta < 1$ 时, $p^{P^*} \geq p^{PM^*}$, 同理 $x^{P^*} \leq x^{PM^*}$, $q^{P^*} \leq q^{PM^*}$ 。

$$\pi_p^{P^*}-\pi_p^{PM^*}=\frac{\Delta_1^2kh^2(\theta-1)(3\theta-1)}{[(4+k)h-r^2][2[2+k(1-\theta)^2]h+hk\theta^2-r^2]}\geq 0。$$

即 $3\theta-1 \leq 0$, 故 $0 < \theta \leq 0.33$ 时, $\pi_p^{P^*} \geq \pi_p^{PM^*}$ 。命题 5 第 2)、3) 的证明与第 1) 的证明类似, 故此省略。

命题 4 表明如下。

1) 相比于 PB 生产商回收和两者共同回收情形, NEV 制造商负责回收情形下的废旧电池回收量和工艺创新水平最低, 即 NEV 制造商回收模式最不利于动力电池回收和工艺创新。这是因为 NEV 制造商回收后无法直接再制造, 只能转卖给 PB 生产商赚取差额利润, 使得 PB 生产商回收成本增加, 抑制了其回收及工艺创新的意愿。

命题 5 表明, PB 生产商和 NEV 制造商的利润总是在对方负责回收时最低, 而何时利润最高取决于 PB 生产商回收的废旧电池比重。以 PB 生产商为例, 其利润总是在 NEV 制造商回收时最低; 当回收的废旧电池比重低于 0.33 时, PB 生产商回收时其利润高于两者共同回收时的利润; 比重超过 0.33 时, 两者共同回收时其利润高于 PB 生产商回收时的利润。这是因为, 对方负责回收时自己无法获得回收利润, 而 PB 生产商和 NEV 制造商都参与回收时, 若无合适的回收比重分配, 会导致两者产生分歧, 作出不利于双方的决策, 从而损害利润。显然两者进行恰当合作均能获得更高的利润。

2) 使废旧电池回收量和工艺创新水平最高的最优回收结构取决于 PB 生产商回收的废旧电池比重。当同时回收情形下 PB 生产商回收的废旧电池比重低于 0.33 时, 废旧电池的回收量和工艺创新水平在 PB 生产商回收时最高, 且新能源汽车价格最低; 当两者同时回收情形下, PB 生产商回收的废旧电池比重超过 0.33 时, 废旧电池的回收量和工艺创新水平在两者共同回收时最高, 且新能源汽车价格在此时最低。

由命题 4 和命题 5 可知, 首先应尽量避免 NEV 制造商独自回收; 其次, 两者共同回收下适当的回

命题 5 1) 当 $0 \leq \theta \leq 0.33$ 时, $\pi_p^{P^*} \geq \pi_p^{PM^*} > \pi_p^{M^*}$;

收比重分配更有助于提高供应链的回收量和工艺创新水平。因此, 需要进一步合理分配回收比重, 强化 PB 生产商和 NEV 制造商的合作。

3.2 参数敏感性分析

本节将分析回收废旧电池比例 (θ)、再制造动力电池工艺创新的投入成本系数 (h)、工艺创新水平对成本节约的影响程度 (r) 以及废旧动力电池回收难度 (k) 4 个参数对不同回收模式下逆向供应链回收量、工艺创新水平、利润等的影响。

命题 6 1) 当 $0 < \theta \leq 0.67$ 时, $\frac{\partial \pi_p^{PM*}}{\partial \theta} \geq 0$; 当 $0.67 < \theta < 1$ 时, $\frac{\partial \pi_p^{PM*}}{\partial \theta} < 0$ 。

2) 当 $0 < \theta \leq 0.48$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{PM*}}{\partial \theta} \geq 0$; 当 $0.48 < \theta < 1$ 时, $\frac{\partial \pi_m^{PM*}}{\partial \theta} < 0$ 。

3) 当 $0 < \theta \leq 0.59$ 时, $\frac{\partial \pi_t^{PM*}}{\partial \theta} \geq 0$; 当 $0.59 < \theta < 1$ 时, $\frac{\partial \pi_t^{PM*}}{\partial \theta} < 0$ 。

证明 $\frac{\partial \pi_p^{PM*}}{\partial \theta} = \frac{-\Delta_1^2 kh^2(3\theta - 2)}{\{2[2 + k(1 - \theta)^2]h + hk\theta^2 - r^2\}^2} > 0$ 。

要使 $\frac{\partial \pi_p^{PM*}}{\partial \theta} \geq 0$, 则需 $0 < \theta \leq 0.67$ 。而 NEV 制造商的利润与供应链整体的利润较为复杂, 不易求导, 可根据图像求极值点, 图像证明如图 2 所示。

由命题 6 可知, 在两者共同回收情形下, PB 生产商、NEV 制造商和供应链整体的利润都随 PB 生产商回收比重的增加先增后减, 三者的利润分别在 PB 生产商回收的废旧电池比重为 0.67、0.48 和 0.59 时, 达到高峰。并且, 从供应链整体的角度考虑, 两者共同回收时, PB 生产商回收的废旧电池比重为 0.59 时, 可以实现整个供应链系统的利润最大化。这是因为两者共同回收时往往需要合理的回收比例分配, 某一方回收比重过大或者过小都不利于整体供应链的决策。

命题 7 当 $0 < \theta \leq 0.67$ 时, $\frac{\partial q^{is}}{\partial \theta} \geq 0$, $\frac{\partial x^{is}}{\partial \theta} \geq 0$, $\frac{\partial p^{is}}{\partial \theta} \leq 0$ 。

证明 $\frac{\partial q^{is}}{\partial \theta} = \frac{-2\Delta_1 kh^2(3\theta - 2)}{\{2[2 + k(1 - \theta)^2]h + hk\theta^2 - r^2\}^2} > 0$ 。

若使 $\frac{\partial q^{is}}{\partial \theta} \geq 0$, 则需 $0 < \theta \leq 0.67$ 。同样地, $0 < \theta \leq 0.67$ 时,

$\frac{\partial x^{is}}{\partial \theta} = \frac{-2arkh(3\theta - 2)}{\{2[2 + k(1 - \theta)^2]h + hk\theta^2 - r^2\}^2} \geq 0$;

$\frac{\partial p^{is}}{\partial \theta} = \frac{2\Delta_1 kh^2(3\theta - 2)}{\{2[2 + k(1 - \theta)^2]h + hk\theta^2 - r^2\}^2} \leq 0$ 。

由命题 7 可知, 两者共同回收情形下, 当 PB 生产商回收的废旧电池比重不超过 0.67 时, 废旧电池回收量和工艺创新水平会随 PB 生产商回收比重的增加而增加, 而新能源汽车销售价格会随其增加而降低。这是因为, PB 生产商作为主导方, 其直接回收再制造可以避免因 NEV 制造商赚取中间价而导致的回收成本升高, 因此 PB 生产商回收比重稍大有助于促进回收量和工艺创新投入。但如果 PB 生产商回收比重过大, 不仅会使自身负担过重, 还会因为 NEV 制造商已经投入回收固定成本而抑制 NEV 制造商的回收意愿。

由命题 6 和命题 7 可知, PB 生产商和 NEV 制造商共同回收可以使两者及其供应链整体获得更高的利润。因此, 应尽量采取共同回收模式, 且 PB 生产商可以承担相对更多的回收责任, 但不超过 0.67, 以此实现整个供应链系统的利润最大化。

命题 8 $\frac{\partial q^{is}}{\partial h} < 0$, $\frac{\partial x^{is}}{\partial h} < 0$, $\frac{\partial \pi^{is}}{\partial h} < 0$, $\frac{\partial w^{is}}{\partial h} > 0$, $\frac{\partial p^{is}}{\partial h} > 0$ 。

证明 以情形 P 为例, 由表 2 中的均衡结果可得:

$\frac{\partial q^{P*}}{\partial h} = \frac{-\Delta_1 r^2}{[(4 + k)h - r^2]^2} < 0$;

$\frac{\partial x^{P*}}{\partial h} = \frac{-(4 + k)\Delta_1 r}{[(4 + k)h - r^2]^2} < 0$;

$\frac{\partial \pi_p^{P*}}{\partial h} = \frac{-\Delta_1^2 r^2}{2[(4 + k)h - r^2]^2} < 0$;

$\frac{\partial \pi_m^{P*}}{\partial h} = \frac{-2\Delta_1^2 r^2 h}{[(4 + k)h - r^2]^3} < 0$;

$\frac{\partial w^{P*}}{\partial h} = \frac{\partial p^{P*}}{\partial h} = \frac{\Delta_1 r^2}{[(4 + k)h - r^2]^2} > 0$ 。

命题 8 表明, 随着再制造动力电池工艺创新的投入成本系数的增加, 再制造动力电池批发价格和新能源汽车的价格提高, 而废旧动力电池回收量、工艺创新水平以及 PB 生产商和 NEV 制造商的利润会降低。这是因为工艺创新研发难度增加, 即研发成本增加, PB 生产商考虑以较低工艺创新水平来节约研发成本。较低的工艺创新水平使得单位可变成成本较高, 因此 PB 生产商减少再制造动力电池数量, 提高批发价格。相应地, NEV 制造商也会

提高新能源汽车价格。最终, PB 生产商和 NEV 制造商的利润均降低。

命题 9 $\frac{\partial q^{is}}{\partial r} > 0$, $\frac{\partial x^{is}}{\partial r} > 0$, $\frac{\partial \pi^{is}}{\partial r} > 0$, $\frac{\partial w^{is}}{\partial r} < 0$, $\frac{\partial p^{is}}{\partial r} < 0$ 。

证明 以情形 P 为例, 由表 2 中的均衡结果可得

$$\frac{\partial q^{P*}}{\partial r} = \frac{2\Delta_1 hr}{[(4+k)h-r^2]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial x^{P*}}{\partial r} = \frac{\Delta_1[(4+k)h+r^2]}{[(4+k)h-r^2]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial \pi_p^{P*}}{\partial r} = \frac{\Delta_1^2 hr}{[(4+k)h-r^2]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial \pi_m^{P*}}{\partial r} = \frac{4\Delta_1^2 rh}{[(4+k)h-r^2]^3} > 0;$$

$$\frac{\partial w^{P*}}{\partial r} = \frac{-4\Delta_1 rh}{[(4+k)h-r^2]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial p^{P*}}{\partial r} = \frac{-2\Delta_1 rh}{[(4+k)h-r^2]^2} < 0。$$

命题 9 表明, 随着工艺创新对成本节约的影响程度的提高, 再制造动力电池的回收量、工艺创新水平以及 PB 生产商和 NEV 制造商的利润会提高, 而再制造动力电池的批发价格与新能源汽车的销售价格降低。显然, 工艺创新水平对成本节约的影响程度越高, 代表投入相同的工艺创新水平可以减少更多成本, PB 生产商更愿意进行工艺创新来缩减成本, 故会增加废旧动力电池的回收数量以进行再制造, 成本降低使得 PB 生产商和 NEV 制造商均降价。

命题 10 $\frac{\partial q^{is}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial x^{is}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi^{is}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial w^{is}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial p^{is}}{\partial k} > 0$ 。

证明 以情形 P 为例, 由表 2 中的均衡结果可得

$$\frac{\partial q^{P*}}{\partial k} = \frac{-\Delta_1 h^2}{[(4+k)h-r^2]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial x^{P*}}{\partial k} = \frac{-\Delta_1 hr}{[(4+k)h-r^2]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial \pi_p^{P*}}{\partial k} = \frac{-\Delta_1^2 h^2}{2[(4+k)h-r^2]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial \pi_m^{P*}}{\partial k} = \frac{-2\Delta_1^2 h^3}{[(4+k)h-r^2]^3} < 0;$$

$$\frac{\partial w^{P*}}{\partial k} = \frac{2\Delta_1 h^2}{[(4+k)h-r^2]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial p^{P*}}{\partial k} = \frac{\Delta_1 h^2}{[(4+k)h-r^2]^2} > 0。$$

由命题 10 可知, 随着废旧动力电池回收难度的增加, 再制造动力电池的回收量、工艺创新水平以及 PB 生产商和 NEV 制造商的利润降低, 再制造动力电池的批发价格与新能源汽车的销售价格升高。废旧动力电池回收越难, 付出同等努力下的回收量越少, PB 生产商无法获得再制造工艺创新的规模效益, 因此会降低工艺创新水平以节约研发投入成本。回收成本的增加与工艺创新水平的降低使得 PB 生产商的再制造成本大大增加, 故会提升价格。

命题 8~10 表明, 再制造动力电池工艺创新的投入成本系数和废旧动力电池回收难度越低, 而工艺创新水平对成本节约的影响程度越高时, 再制造动力电池的回收量、工艺创新水平以及 PB 生产商和 NEV 制造商的利润越高, 再制造动力电池的批发价格与新能源汽车的销售价格越低。

PB 生产商可以在工艺创新难度和回收难度较小, 且工艺创新对成本节约的效率较高时, 加大工艺创新投入, 以此提高回收量, 获得更高的利润。

4 算例分析

本节将通过数值仿真对以上主要结论进行分析及验证。首先分析 3 种回收策略对闭环供应链均衡结果及成员利润的影响; 其次从 PB 生产商的再制造动力电池工艺创新投入成本系数以及工艺创新水平对成本节约的影响程度这两个角度, 分析 PB 生产商的再制造工艺创新行为对闭环供应链最优决策的影响。在满足理论模型假设条件的基础上, 参考文献 [15] 的研究, 令参数 $a = 100$, $c_0 = 8$, $c_r = 7$, $h = 5$, $b = 2$, $r = 2$, $k = 6$ 。

3 种回收情形下模型均衡解的取值结果如表 4 所示, 其中同时回收情形下 PB 生产商回收的废旧电池比重为 0.5。

由表 4 数据可知, $\theta = 0.5$ 时, 同时回收下的废旧电池回收量、工艺创新水平, 以及 PB 生产商利润、NEV 制造商利润和供应链整体的利润更高, 且新能源汽车销售价格更低, 这与命题 4、5 一致。

表 4 3 种情形下的最优决策和利润比较

Table 4 Comparison of the optimal decision and profit in three cases

参数	PB 生产商回收 ($i=P$)	NEV 制造商回收 ($i=M$)	同时回收 ($i=PM$)
q^{i*}	9.239	5.592	11.040
x^{i*}	3.696	2.237	4.416
w^{i*}	73.522	49.263	54.364
p^{i*}	90.761	94.408	88.961
π_p^*	392.663	237.664	469.156
π_m^*	85.362	125.087	213.253
π_t^*	478.025	362.751	682.409

图 2 表明如下结果。1) PB 生产商、NEV 制造商和供应链整体的利润都随 PB 生产商回收废旧电池比例的增加先增后减, 三者的利润分别在 PB 生产商回收比例为 0.67、0.48 和 0.59 时达到高峰。2) 相比于 PB 生产商和 NEV 制造商单独回收, 两者共同回收情形下的 PB 生产商、NEV 制造商和供应链整体的利润最高, 且在 PB 生产商回收的废旧电池比重为 0.59 时, 可以实现整个供应链系统的利润最大化。验证了命题 6 的研究结果。3) PB 生产商、NEV 制造商和供应链整体的利润分别在 $0.33 < \theta < 1$ 、 $0 < \theta < 0.86$ 和 $0.18 < \theta < 1$ 区间内两者共同回收的利润高于单独回收利润, 这验证了命题 5 的相关研究结果。同时, 可推理得到, 当 $0.33 < \theta < 0.86$ 时, PB 生产商、NEV 制造商以及供应链整体均可在共同回收模式下实现利润最高。

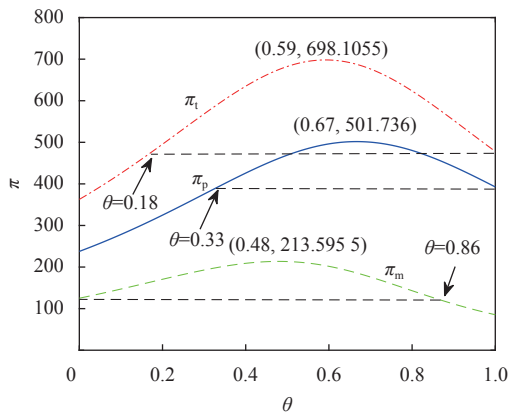


图 2 利润随 PB 生产商回收废旧电池的比的变化趋势
Figure 2 Profit changes with the recycling proportion of waste batteries by PB producer

图 3 分析参数的变化对 3 种情形下均衡回收量、工艺创新水平以及新能源汽车价格的影响。随 PB 生产商回收废旧电池比例的增加, 废旧电池回收量和工艺创新水平都呈现先上升后下降的趋势, 而新

能源汽车价格则先下降后上升, 拐点均在 $\theta = 0.67$ 处, 这也验证了命题 7。

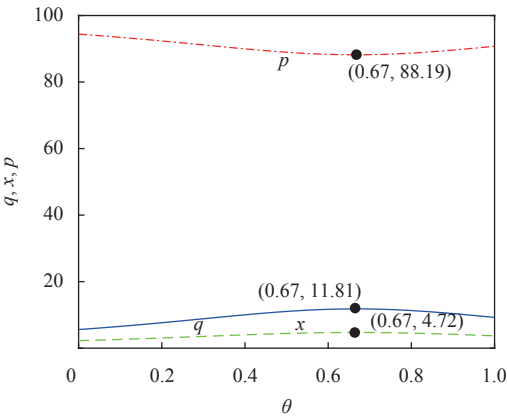


图 3 废旧电池回收数量、工艺创新水平和新能源汽车价格随回收比例的变化趋势
Figure 3 Changes of waste battery recycling amount, process innovation level and NEV price with the recycling proportion

图 4~6 反映了工艺创新投入成本系数的变化对供应链中均衡回收量、工艺创新水平与利润的影响。首先, 若工艺创新投入成本系数增加, 即工艺创新难度增加, 则供应链的均衡废旧电池回收量、工艺创新水平、PB 生产商利润和 NEV 制造商利润均下降, 这验证了命题 8。但当工艺创新难度增加到一定程度时, 3 种回收模式下回收量、工艺创新水平以及利润的差值越来越小并逐渐趋于收敛, 说明工艺创新难度较小时, 3 种回收模式之间的回收量、工艺创新水平和利润差距较为明显; 难度较大时, 3 种回收模式差别不大。

图 7~9 表明, 随着工艺创新对成本节约影响程度的增加, 即工艺创新对成本节约的效率提高, 供应链的均衡回收量、工艺创新水平以及利润均呈

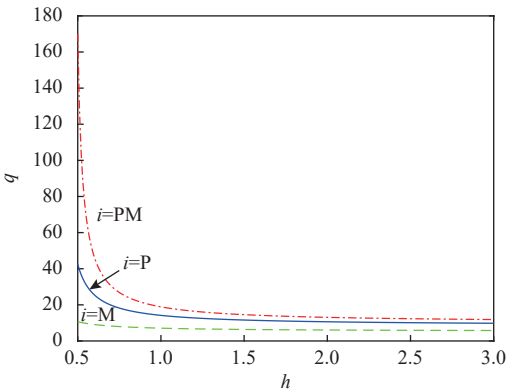


图 4 工艺创新投入成本系数对回收量的影响
Figure 4 Influence of input cost coefficient of process innovation on recycling amount

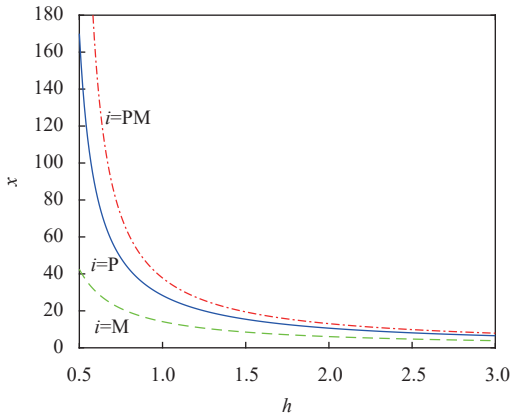


图 5 工艺创新投入成本系数对工艺创新水平的影响

Figure 5 Influence of input cost coefficient of process innovation on process innovation level

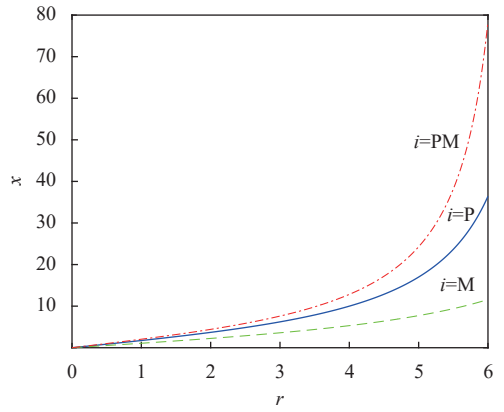


图 8 工艺创新对成本节约的影响程度对工艺创新水平的影响

Figure 8 Influence of the effect degree of process innovation on cost savings on process innovation level

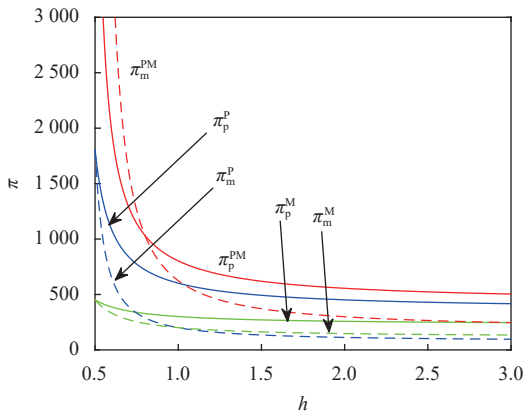


图 6 工艺创新投入成本系数对 PB 生产商和 NEV 制造商利润的影响

Figure 6 Influence of input cost coefficient of process innovation on the profit of PB producers and NEV manufacturers

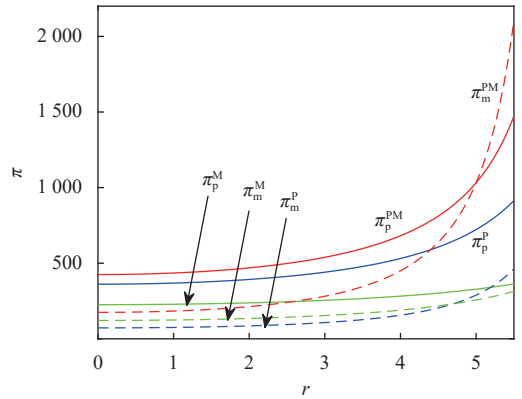


图 9 工艺创新对成本节约的影响程度对 PB 生产商和 NEV 制造商利润的影响

Figure 9 Influence of the effect degree of process innovation on cost savings on the profit of PB producers and NEV manufacturers

本节约影响程度较大时，两者共同回收情形下的回收量、工艺创新水平和利润的优势最明显。这验证且延伸了命题 9 的相关研究。

5 结语

本文在考虑主导方 PB 生产商进行再制造动力电池工艺创新行为的视角下，分别建立 PB 生产商回收、NEV 制造商回收以及两者同时回收 3 种情形下的决策模型，对比分析逆向供应链在不同回收模式下的最优决策变化，探讨了 PB 生产商的再制造工艺创新行为对供应链回收量、价格与利润的影响，得到以下主要结论。

1) 不论在哪种回收模式下，再制造动力电池工艺创新的投入成本系数和废旧电池回收难度越低，工艺创新水平对成本节约的影响程度越高时，废旧

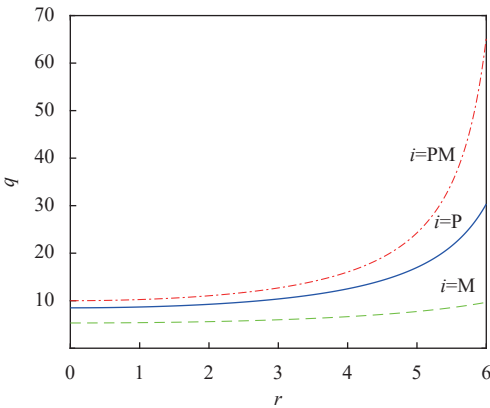


图 7 工艺创新对成本节约的影响程度对回收量的影响

Figure 7 Influence of the effect degree of process innovation on cost savings on recycling amount

现上升趋势，且 3 种回收模式下的均衡回收量、工艺创新水平和利润差距越来越大。当工艺创新对成

电池回收量、工艺创新水平以及 PB 生产商和 NEV 制造商的利润越高, 且再制造动力电池的批发价格与新能源汽车价格越低。

2) 对比 3 种回收模式, NEV 制造商单独回收最不利于废旧电池回收和工艺创新, 两者共同回收且 PB 生产商回收的废旧电池比重为 0.67 时, 废旧电池回收量和工艺创新水平最高。

3) PB 生产商和 NEV 制造商的利润总是在对方负责回收时最低; 而当 $0.33 < \theta < 0.86$ 时, PB 生产商、NEV 制造商以及供应链整体均可在共同回收模式下实现利润最高; 当 PB 生产商回收比重稍大 ($\theta = 0.59$) 时可以实现供应链整体利润的最优。

4) 相比于单独回收模式, 回收比例分配合理的两者共同回收模式对供应链成员利润和整体利润来说均更有利。进一步, 当工艺创新的投入成本系数较小, 工艺创新对成本节约影响程度较大时, 两者共同回收模式的优势更明显。

此外, 在废旧动力电池回收再制造过程中, PB 生产商可以进行工艺创新来节约成本, 提高利润。建议 PB 生产商在再制造动力电池工艺创新难度和废旧电池回收难度较低、工艺创新水平对成本节约的影响程度较高情况下, 提高工艺创新水平。在废旧动力电池回收模式选择上, PB 生产商和 NEV 制造商共同回收可以有效促进回收和工艺创新, 获得更高利润并实现系统利润最大化。这对动力电池供应链中 PB 生产商和 NEV 制造商相关决策具有重要实践意义。

本研究主要关注的是动力电池再制造过程, 其中 PB 生产商进行再制造动力电池工艺创新的目的是节约成本。未来研究可以考虑正向和逆向供应链中的多个主体通过工艺创新实现碳减排的问题; 其次, 政府政策、消费者低碳偏好、工艺创新技术溢出, 以及供应链成员竞争行为亦会对供应链决策产生较大影响, 今后可考虑进一步丰富这些方面的研究。

参考文献:

- [1] LI Z, LI Y, PAN W, et al. Study on the technical and economic feasibility of echelon use of waste power batteries used in new energy vehicles in China[C/OL].// 2021 5th International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Science (AEECS 2021). (2021-03-24). Shanghai: E3S web of Conference, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124501011>.
- [2] 谢家平, 李璟, 杨非凡, 等. 新能源汽车闭环供应链的多级契约决策优化[J]. 管理工程学报, 2020, 34(2): 180-193.

- XIE Jiaping, LI Jing, YANG Feifan, et al. Decision-making and coordination optimized for multi-stage closed-loop supply chain of new energy vehicle[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2020, 34(2): 180-193.
- [3] SAVASKAN R C, WASSENHOVE L. Reverse channel design: the case of competing retailers[J]. *Operations Research*, 2006, 46(6): 621-624.
- [4] 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.
GONG Yande, JIANG Yuwei. Research on pricing and channel selection of hybrid recycling mode in closed-loop supply chain[J]. *Soft Science*, 2018, 32(5): 127-131, 144.
- [5] 夏西强, 路梦圆, 陈彪, 等. 分类回收费用承担模式对回收渠道影响及协调机制研究[J/OL]. 中国管理科学, 2022: (2022-10-27). DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0881.
XIA Xiqiang, LU Mengyuan, CHEN Biao, et al. Research on the impact of the classification recycling expenses bearing mode on the recovery channels and the coordination mechanism[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022: (2022-10-27). DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0881.
- [6] MA Z, ZHANG N, DAI Y, et al. Managing channel profits of different cooperative models in closed-loop supply chains[J]. *Omega*, 2016, 59: 251-262.
- [7] 郑本荣, 杨超, 杨珺. 回收渠道竞争下制造商的战略联盟策略选择[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(6): 1479-1491.
ZHENG Benrong, YANG Chao, YANG Jun. Manufacturer's optimal alliance strategy in closed loop supply chains in the presence of competing recycling channels[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2018, 38(6): 1479-1491.
- [8] 周兴建, 黎继子, 李菲, 等. 基于 Blockchain 的新能源汽车动力电池回收供应链模式[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(4): 1386-1398.
ZHOU Xingjian, LI Jizi, LI Fei, et al. Recycling supply chain mode of new energy vehicle power battery based on blockchain technology[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(4): 1386-1398.
- [9] DEBABRATA G, JANAT S, SANJEEV S. Product greening and pricing strategies of firms under green sensitive consumer demand and environmental regulations[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 290: 491-520.
- [10] HU J, HU Q, XIA Y. Who should invest in cost reduction in supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 207: 1-18.
- [11] 温小琴, 胡奇英. 基于质量意识和工艺创新的供应链质量决策[J]. 管理科学学报, 2018(2): 80-90.
WEN Xiaoqin, HU Qiying. Quality choice in a supply chain based on quality consciousness and process innovation[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2018(2): 80-90.
- [12] 赵海霞, 艾兴政. 竞争供应链环境下基于成本降低的流程创新选择[J]. 管理学报, 2018, 15(10): 1072-1080.
ZHAO Haixia, AI Xingzheng. The process innovation of competing supply chains under cost reduction[J]. *Chinese Journal of*

Management, 2018, 15(10): 1072-1080.

- [13] WANG L, WU Y, HU S. Make-to-order supply chain coordination through option contract with random yields and overconfidence [J/OL]. International Journal of Production Economics, 2021, 242: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108299>.
- [14] REIMANN M, XIONG Y, ZHOU Y. Managing a closed-loop supply chain with process innovation for remanufacturing[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 276(2): 510-518.
- [15] 郭春香, 万科, 黄海珍. 消费者细分下考虑差别权重补贴的闭

环供应链定价研究 [J]. 工业工程, 2022, 25(3): 28-38.

- GUO Chunxiang, WAN Ke, HUANG Haizhen. A research on closed-loop supply chain pricing considering differential weight subsidy under consumer segmentation[J]. Industrial Engineering Journal, 2022, 25(3): 28-38.
- [16] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VAN WASSENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.

(责任编辑: 刘敏仪)

(上接第 23 页)

- [6] XU X, TAO R. Study on supply chain pricing strategy of government-subsidized manufacturers[C]//2021 5th Annual International Conference on Data Science and Business Analytics (ICDSBA). New York: IEEE, 2021: 554-559.
- [7] GONG B, XIA X, CHEN J. Supply-chain pricing and coordination for new energy vehicles considering heterogeneity in consumers' low carbon preference[J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1306.
- [8] 杨茜, 许茂增. 制造商主导下的不同双渠道零售商渠道定价策略与渠道选择 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1): 307-324.
- YANG Xi, XU Maozeng. Channel pricing strategy and channel selection of different dual channel retailers under the leadership of manufacturers[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2022, 28(1): 307-324.
- [9] ZHANG Y, HEZARKHANI B. Competition in dual-channel supply chains: the manufacturers' channel selection[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 291(1): 244-262.
- [10] 李思凝, 陈凯. 竞争环境下新能源汽车嵌入技术服务的定价策略 [J]. 系统管理学报, 2020, 29(3): 561-572.
- LI Sining, CHEN Kai. Pricing strategy for embedded technolo-

gy services of new energy vehicles in a competitive environment[J]. Journal of System Management, 2020, 29(3): 561-572.

- [11] 谢家平, 李璟, 杨非凡, 等. 新能源汽车闭环供应链的多级契约决策优化 [J]. 管理工程学报, 2020, 34(2): 180-193.
- XIE Jiaping, LI Jing, YANG Feifan, et al. Optimization of multi-level contract decision-making in closed-loop supply chain of new energy vehicles[J]. Journal of Management Engineering, 2020, 34(2): 180-193.
- [12] ZHANG W, LIU H, CHEN Y, et al. Research on the supervision mechanism of new energy time-sharing rental vehicles in the background of carbon peak[J/OL]. Science Progress, 2022, 105 (1) : (2022-02-22). <https://doi.org/10.1177/00368504221075480>.
- [13] SONG Y, HUA X. Innovation path of leasing trade under smart logistics technology by big data analysis[J/OL]. Mobile Information Systems, 2021: (2021-09-28). <https://doi.org/10.1155/2021/8347904>
- [14] YU Y, DONG Y, GUO X. Pricing for sales and per-use rental services with vertical differentiation[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 270(2): 586-598.

(责任编辑: 刘敏仪)