



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION

## 碳限额与交易政策下电动汽车动力电池制造商梯次利用决策

张川, 田雨鑫, 李灿灿

引用本文:

张川, 田雨鑫, 李灿灿. 碳限额与交易政策下电动汽车动力电池制造商梯次利用决策[J]. *控制与决策*, 2024, 39(6): 2051–2059.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1506>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略

Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1763–1770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1536>

#### 不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

#### 风险规避制造商市场入侵策略

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

*控制与决策*. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

#### 考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策

Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1102>

#### 考虑成员企业风险态度的制造商资金约束闭环供应链定价与回收决策

Pricing and recycling decisions of a closed-loop supply chain considering participators' risk attitudes and manufacturer capital constraint

*控制与决策*. 2021, 36(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1305>

# 碳限额与交易政策下电动汽车动力电池制造商 梯次利用决策

张川<sup>†</sup>, 田雨鑫, 李灿灿

(东北大学工商管理学院, 沈阳 110169)

**摘要:** 随着我国电动汽车保有量迅速增长, 大量退役动力电池亟需回收和利用. 对此, 研究碳限额与交易政策下电动汽车动力电池制造商开展梯次利用业务决策. 针对由一个动力电池制造商、一个零售商和一个梯次利用商组成的闭环供应链, 分别构建制造商不开展和开展梯次利用业务两种模式下闭环供应链模型. 用 Stackelberg 博弈理论求得均衡解, 通过理论比较和数值分析探究关键参数对最优决策和制造商模式选择的影响. 研究发现, 制造商最优碳减排水平随碳交易价格增加而增加, 随碳减排成本系数增加而降低, 随消费者低碳偏好系数增加而增加. 制造商开展梯次利用业务并非总是最好选择, 需满足以下条件: 1) 可梯次利用比例高于一定阈值; 2) 制造商为开展梯次业务而投入的成本小于一定阈值; 3) 制造商梯次利用单位收益高于一定阈值且梯次利用商梯次利用单位收益低于一定阈值.

**关键词:** 碳限额与交易政策; 动力电池; 梯次利用; 碳减排; 闭环供应链

中图分类号: F274

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1506

引用格式: 张川, 田雨鑫, 李灿灿. 碳限额与交易政策下电动汽车动力电池制造商梯次利用决策[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 2051-2059.

## Echelon utilization decision of an EV power battery manufacturer under carbon cap-and-trade policy

ZHANG Chuan<sup>†</sup>, TIAN Yu-xin, LI Can-can

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** The rapid growth of electric vehicles (EVs) in China has led to a critical need to recycle and utilize retired power batteries at a large scale. This paper studies the echelon utilization decision of EV power battery manufacturers under the carbon cap-and-trade policy. Two closed-loop supply chain models are constructed for the supply chain comprising a power battery manufacturer, retailer, and echelon utilization enterprise. These models differ based on whether the manufacturer is engaged in utilization business or not. The Stackelberg game theory is employed to solve the models, explore the impact of key parameters on the optimal decision, and conclude the manufacturer's mode selection through theoretical comparison and numerical analysis. The results show that the optimal carbon emission reduction level of the manufacturer increases with the increase of carbon transaction price, and decreases with the increase of carbon emission reduction cost coefficient, and increases with the increase of consumer low-carbon preference coefficient. Establishing an echelon utilization business is not always the best strategy for the manufacturer. They need to meet the following conditions: 1) A higher proportion of echelon utilization; 2) A lower cost invested by the manufacturer to carry out the echelon operation; 3) A higher unit revenue of the manufacturer's echelon utilization with a lower unit revenue of the echelon utilization enterprise.

**Keywords:** carbon cap-and-trade policy; power battery; echelon utilization; carbon emission reduction; closed loop supply chain

收稿日期: 2022-08-23; 录用日期: 2023-06-16.

基金项目: 国家社会科学基金项目(19GBL229).

责任编辑: 梁樑.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: czhang@mail.neu.edu.cn.

\*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

## 0 引言

近年来,中国为实现“碳中和、碳达峰”绿色发展目标大力推广电动汽车.自2015年以来,我国电动汽车产销量连续5年居世界首位.2021年,我国电动汽车销量超过350万辆,市场份额飙升至13.4%<sup>[1]</sup>,预计2030年有望达到8000万辆<sup>[2]</sup>.尽管电动汽车具有节能环保等优点,但其核心部件动力电池的生产会排放大量二氧化碳,这与电动汽车推广初衷背道而驰.据孙逢春院士估算,生产一辆燃油汽车碳排放量是9.2吨,生产一辆三元锂电池汽车碳排放量为14.6吨,而生产一辆磷酸铁锂电池汽车则达14.7吨<sup>[3]</sup>.Kallitsis等<sup>[4]</sup>表示,生产每千瓦时动力电池将产生13.85~157.44千克二氧化碳.目前,主流动力电池制造企业已在其产业链上实行了碳减排措施,如宁德时代在采购过程中把物料碳排放量作为首要考虑因素,不断提高对其供应商在材料减碳方面的要求.政府的碳限额与交易政策规定了动力电池制造商碳配额:若碳排放超出配额,则制造商须额外购买配额;若碳排放低于配额,则制造商可在碳交易所出售多余配额获利,这有效地降低了制造商碳排放<sup>[5]</sup>.此外,“低碳标识”愈发成为人们选购商品时重要考虑因素,这种意识对产品需求和企业利润产生了一定的影响<sup>[6]</sup>,碳减排能够增加产品需求.然而,动力电池制造商实施碳减排技术需付出成本,权衡该技术带来的收益与成本是制造商需要考虑的一个因素.

动力电池需求量随电动汽车产销量水涨船高,致使未来动力电池退役量巨大,如何有效回收利用大规模退役动力电池是电动汽车产业发展的一大痛点.据2019年工信部发布的《新能源汽车动力蓄电池回收利用调研报告》,我国动力电池累计配套量超131GWh,其规模居世界第一.按动力电池正常寿命是5~8年估算,预计2025年其退役量达78万吨<sup>[7]</sup>.动力电池属于易燃易爆危险化学品,内部含有大量重金属和有毒电解质,若不能有效回收,则会带来严重的安全和环境污染问题;其中的镍、锂、钴等贵金属若不能再利用,则会造成严重的资源浪费和经济损失.与普通电池不同,动力电池退役后可进行梯次利用,这是极大发挥退役动力电池价值的有效途径.所谓梯次利用是指当动力电池剩余电量低于70%时,通过拆解和重组技术,可将其用于储能、供电调节、低速电动车等领域,进而促进资源有效利用.据预测,2025年我国年新增梯次利用潜在规模将达33.6GWh<sup>[8]</sup>,可见,梯次利用具有巨大的市场潜力.据2021年工信部《新能源汽车动力蓄电池梯次

利用管理办法》,我国鼓励动力电池生产企业参与退役动力电池回收及梯次利用,因为制造商了解自己产品,其开展梯次利用业务具有技术与成本优势.然而,制造商开展梯次利用业务需要大量成本投入(如设备和技术等),且制造商和梯次利用企业在动力电池回收和梯次利用方面存在竞争.基于此,本文研究碳限额与交易政策下动力电池制造商开展梯次利用业务的条件.

与本文最相关的文献包括碳限额与交易政策下闭环供应链运营和回收模式选择两方面.在碳限额与交易政策下闭环供应链运营方面,Cao等<sup>[9]</sup>通过求解分析碳减排闭环供应链博弈模型,给出了碳减排成本系数、碳交易价格、碳限额与最优决策和利润之间关系.Cheng等<sup>[10]</sup>探究了碳限额、碳补贴和复合碳减排政策对需求不确定型闭环供应链网络均衡决策的影响.Taleizadeh等<sup>[11]</sup>研究了碳限额交易政策下两种再制造情景的再制造特征对碳减排、质量改进和供应链绩效的影响.Yang等<sup>[12]</sup>研究了碳限额交易监管下的再制造闭环供应链,其中回收操作可以由制造商、零售商或第三方执行,他们发现再制造可以有效提高制造商和零售商碳减排水平和利润.Chen等<sup>[13]</sup>研究碳限额交易政策下再制造企业生产和减排投资决策,并分析了减排投资对社会福利各因素的影响.Dou等<sup>[14]</sup>分别讨论碳税政策下制造商、零售商和第三方回收时的决策、环境和经济绩效,并分析了碳排放相关因素的影响.Wang等<sup>[15]</sup>在碳限额交易机制基础上,建立了考虑碳减排投资和3种不同回收模式的集中和分散决策模型,研究发现在满足一定条件下,从碳减排、回收量和利润的角度看,制造商进行回收的模式为最佳.Zhang等<sup>[16]</sup>针对由高排放和低排放两类制造商、多个需求市场和一个碳交易中心组成的闭环供应链,研究了在碳限额交易政策下企业生产与碳减排策略.Zhang等<sup>[17]</sup>考虑新产品和再制品价格差异及消费者低碳偏好,构建了碳限额交易政策下进行碳减排技术投入、回收再制造、同时进行碳减排技术和回收再制造3种模式的闭环供应链模型.

在闭环供应链回收模式选择方面,Miao等<sup>[18]</sup>比较了再制造中以旧换新对3种闭环供应链交易决策模式的影响,包括集中回收模式、零售商回收模式和制造商回收模式.Chen等<sup>[19]</sup>考虑废旧产品的管理成本和材料回收利用成本等因素,构建了由单一制造商和单一零售商组成的闭环供应链系统,给出选择不同回收模式的条件.Tang等<sup>[20]</sup>以北京市为例研究了政府奖惩机制下动力电池的3种单一回收渠道模式和3

种竞争性双回收渠道模式,得到以社会总福利最大化为目标的最优回收模式。Wang等<sup>[21]</sup>考虑回收市场与新产品市场的竞争,讨论了制造商不参与回收业务、制造商选择自行回收和制造商将回收业务外包给零售商3种情况下的最优定价策略。Zhang等<sup>[22]</sup>研究了零售商负责回收和制造商负责回收的两种回收模式下,闭环供应链中制造商分享需求预测信息对供应链成员利润的影响。Xie等<sup>[23]</sup>针对由动力电池生产商、整车制造商和零售商组成的三级闭环供应链,分别在单回收渠道和双回收渠道两种模式下,对分散决策、集中决策和有共享契约协调决策情形求解各企业最优定价策略和利润。Zhang等<sup>[24]</sup>在奖罚机制下构建6种回收模式,包括电动汽车制造商、电动汽车零售商、第三方企业及其两两合作伙伴的回收活动,分析得出制造商与零售商之间的伙伴关系可以实现最高的实际回收率和总福利。Sun等<sup>[25]</sup>研究了碳交易政策、动力电池续航能力和广告效应对制造商回收、零售商回收和混合回收的回收渠道选择的影响。Li<sup>[26]</sup>研究由电动汽车制造商、零售商和第三方回收商组成的电动汽车动力电池供应链,比较了3种双渠道回收模式(制造商和零售商回收、制造商和第三方回收、零售商和第三方回收)的最优定价和回收决策。Zhang等<sup>[27]</sup>研究了碳限额与交易政策下无梯次利用业务的动力电池制造商4种混合回收模式选择和碳减排问题。Jiao等<sup>[28]</sup>构建了回收、梯级利用和材料再生利用技术路线下以不同主体为回收者的Stackelberg博弈模型,探讨再生材料收益对回收模式选择和闭环供应链碳排放的影响。Zhang等<sup>[29]</sup>研究由零售商、梯次利用商、电池回收商中的一方或多方参与回收的4种模式,分析了回收竞争强度、制造商碳减排水平对各方回收决策的影响。

通过梳理上述文献发现,现有研究大多围绕碳限额交易政策对碳减排的影响及一般废旧产品回收和再制造,为构建碳限额与交易政策下动力电池回收与梯次利用提供了理论和方法。然而,退役动力电池无法通过再制造达到可用动力电池质量标准,只能进行梯次利用或者拆解来提取制造新动力电池的原材料,其生产和回收利用上有别于传统闭环供应链。

本文针对由一个动力电池制造商、一个零售商和一个梯次利用商组成的闭环供应链,在碳限额与交易政策下,考虑消费者低碳偏好,分别构建制造商不开展和开展梯次利用业务两种模式下闭环供应链模型,用Stackelberg博弈理论求解模型。通过灵敏度分析探究关键参数对最优决策的影响,采用最优利润

比较分析制造商回收模式选择决策。研究发现,制造商最优碳减排水平随碳交易价格增加而增加,随碳减排成本系数增加而降低,随消费者低碳偏好系数增加而增加。制造商开展梯次利用业务需要满足以下条件:1)可梯次利用比例高于一定阈值;2)制造商为开展梯次业务而投入的成本小于一定阈值;3)制造商梯次利用单位收益高于一定阈值且梯次利用商梯次利用单位收益低于一定阈值。

本文贡献如下:

首先,现有关于梯次利用的定量研究相对有限,缺少对动力电池制造商应在什么条件下开展梯次利用业务的问题研究,本文弥补了该研究空白。

其次,现有动力电池回收利用研究大多假设所回收的电池均可梯次利用或全部直接拆解提取原料<sup>[20,25]</sup>,而实际中回收来的退役动力电池质量参差不齐,只有部分能梯次利用。本文研究基于际现实场景,即回收的退役动力电池部分可梯次利用。

最后,碳限额交易政策对产品定价和减排决策有很大影响,将该政策应用于电动汽车行业是大势所趋,是不可忽视的现实背景。然而,目前缺乏对该碳政策下电动汽车动力电池闭环供应链运营的探讨,也缺乏对该政策下动力电池制造商梯次利用决策的研究。此外,动力电池需求受消费者低碳意识影响,本文将需求定义为碳减排水平的函数,这在以往动力电池回收模式选择研究中鲜有考虑。

## 1 问题描述、符号说明和假设

### 1.1 问题描述

本文研究由一个动力电池制造商(主导者)、一个零售商和一个梯次利用商组成的闭环供应链,正向链中制造商可使用新购原材料或从报废动力电池中提取的再生材料生产动力电池,然后通过零售商销售给客户。逆向链中零售商和梯次利用商从顾客手中回收退役动力电池。动力电池制造商开展梯次利用业务具有技术和成本优势,但考虑到开展该业务的成本投入及梯次利用企业的竞争,制造商需要决策应在什么条件下开展梯次利用业务。同时,动力电池制造过程会产生大量碳排放,在碳限额与交易政策下制造商不得不实施碳减排策略,以提高产品绿色度,增加产品需求,在碳交易市场获利,但投入碳减排技术也带来一定成本。鉴于此,本文构建两种模式,如图1所示。

1) 模式T: 制造商不开展梯次利用业务。零售商将其回收的退役动力电池转移给梯次利用商,梯次利用商将可梯次利用动力电池加工成梯次利用产品进行销售,并负责从梯次利用消费者处回收梯次利用后

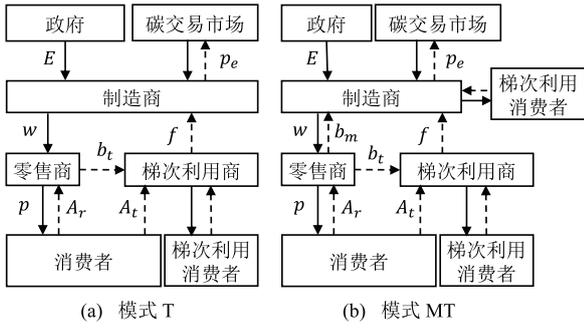


图1 两种模式下闭环供应链系统结构示意图

的报废电池. 最后, 梯次利用商将不可梯次利用动力电池和梯次利用后的报废电池转移给制造商提取原料以制造新电池.

2) 模式MT: 制造商开展梯次利用业务. 零售商将其回收的退役动力电池转移给制造商, 制造商可将梯次利用动力电池加工成梯次利用产品进行销售, 并负责从其梯次利用消费者处回收梯次利用后的报废电池, 同不可梯次利用退役动力电池一起提取原料以制造新电池. 梯次利用商回收的退役动力电池仅供自己梯次利用业务使用, 其处理过程与T模式类似. 目前, 比亚迪、宁德时代等龙头动力电池制造企业参与梯次利用, 属于MT模式.

1.2 符号说明与基本假设

表1为本文涉及的符号. 其中:  $i \in \{T, MT\}$  分别表示T和TM两种模式;  $j \in \{m, r, t\}$  分别表示动力电池制造商、零售商和梯次利用商.

本文假设如下:

1) 类似Savaskan等<sup>[30]</sup>, 制造商用新材料和再生材料生产的动力电池在质量上无差异, 在同一市场同价销售.

2) 参考Bai等<sup>[31]</sup>, 动力电池需求是关于零售价格和碳减排水平的线性函数, 即  $D = \alpha - \beta p + \delta e$ , 其中  $D, \alpha, \beta, \delta > 0$ .

3) 制造商碳减排投资成本是碳减排水平的二次函数<sup>[32]</sup>, 即  $C(e) = \frac{1}{2}\mu e^2$ . 由于制造商碳减排技术是一次性投资, 假设  $\mu$  相对于其他参数足够大.

4) 零售商回收量为  $Q_r = k + hA_r - \theta A_t$ , 梯次利用商回收量为  $Q_t = k + hA_t - \theta A_r$ , 其中  $h > \theta > 0$ .

5) 据《新能源汽车动力蓄电池梯次利用管理办法》<sup>[33]</sup>, 梯次利用仅用于发电储能, 其收益与旧电池剩余电量正相关<sup>[34]</sup>, 即  $v = \eta \tilde{L}$ . 其中:  $\tilde{L}$  为剩余电量, 服从均值为  $\mu_L$ 、标准差为  $\sigma_L^2$  的正态分布;  $\eta (\eta > 0)$  为相关系数. 每块退役动力电池期望净收益为  $V = \eta \mu_L$ . 在模式MT中,  $V_m = V - C_{mt}, V_t = V - C_{tt}$ , 且  $V_m$  和  $V_t$  间无明确大小关系.

表1 符号说明

| 符号        | 描述                    |                                   |
|-----------|-----------------------|-----------------------------------|
| $c_m$     | 制造商用新材料生产动力电池的单位成本    |                                   |
| $c_r$     | 制造商用再生材料生产动力电池的单位成本   |                                   |
| $\Delta$  | 制造商用再生材料生产动力电池的单位成本节约 |                                   |
| $p_e$     | 单位碳交易价格               |                                   |
| $E$       | 碳配额                   |                                   |
| $e_0$     | 生产单位动力电池初始碳排放量        |                                   |
| $F_{mt}$  | 制造商从事梯次利用业务投入成本       |                                   |
| $V_m$     | 制造商从事梯次利用业务的单位收益      |                                   |
| $V_t$     | 梯次利用商从事梯次利用业务的单位收益    |                                   |
| $\lambda$ | 退役动力电池中可梯次利用比例        |                                   |
| $\alpha$  | 动力电池潜在市场需求            |                                   |
| $k$       | 零回收价格时消费者自愿返还退役动力电池数量 |                                   |
| $\beta$   | 消费者动力电池需求对零售价格的敏感系数   |                                   |
| $\delta$  | 消费者低碳偏好系数             |                                   |
| $\mu$     | 制造商碳减排成本系数            |                                   |
| $h$       | 消费者动力电池返还数量对回收价格的敏感系数 |                                   |
| $\theta$  | 零售商和梯次利用商间的动力电池回收竞争系数 |                                   |
| $C_{mt}$  | 制造商制造梯次利用品的单位生产成本     |                                   |
| $C_{tt}$  | 梯次利用商制造梯次利用品的单位生产成本   |                                   |
| <hr/>     |                       |                                   |
| $w$       | 动力电池批发价格              |                                   |
| $p$       | 动力电池零售价格              |                                   |
| $e$       | 制造商碳减排水平              |                                   |
| 决策变量      | $A_r$                 | 零售商向消费者回收退役动力电池的单位价格              |
|           | $A_t$                 | 梯次利用商向消费者回收退役动力电池的单位价格            |
|           | $b_t$                 | 梯次利用商向零售商回收退役动力电池的单位价格            |
|           | $b_m$                 | 制造商向零售商回收退役动力电池的单位价格              |
|           | $f$                   | 制造商向梯次利用商回收与整块动力电池等量的报废梯次利用产品单位价格 |
| <hr/>     |                       |                                   |
| 函数        | $D$                   | 动力电池市场需求                          |
|           | $Q_r$                 | 零售商从消费者手中回收退役动力电池数量               |
|           | $Q_t$                 | 梯次利用商从消费者手中回收退役动力电池数量             |
|           | $\Pi_j^i$             | 模式 <i>i</i> 时主体 <i>j</i> 的利润      |

6) 制造商利用再生材料生产动力电池的单位成本节约为  $\Delta = c_m - c_r > 0$ . 为保证退役动力电池回收和梯次利用过程存在经济意义, 假设  $b_t > A_r$  (T模式),  $b_m > A_r$  (MT模式),  $\Delta > f, \lambda V_t - b_t + f > 0, \lambda V_t - A_t + f > 0$  且  $A_r$  和  $A_t$  间无明确大小关系.

2 模型建立与求解

2.1 制造商不开展梯次利用业务(T模式)

T模式下, 制造商先决策  $w, e$  和  $f$ , 随后梯次利用商决策  $b_t$  和  $A_t$ , 最后零售商决策  $p$  和  $A_r$ . 各成员利润函数为

$$\Pi_m^T = (w - c_m)D + (\Delta - f)(Q_r + Q_t) - p_e[(e_0 - e)D - E] - \frac{1}{2}\mu e^2, \tag{1}$$

$$\Pi_r^T = (p - w)D + (b_t - A_r)Q_r, \tag{2}$$

$$\Pi_t^T = \lambda V_t(Q_r + Q_t) - A_t Q_t - b_t Q_r + f(Q_r + Q_t). \tag{3}$$

其中:  $D = \alpha - \beta p + \delta e$ ,  $Q_r = k + hA_r - \theta A_t$ ,  $Q_t = k + hA_t - \theta A_r$ .

**命题1** 对于模式T, 当满足条件  $(p_e \beta + \delta)^2 - 4\beta\mu < 0$  时, 制造商、零售商和梯次利用商的最优决策和利润分别为

$$w^{T*} = \frac{(\delta + \beta p_e)[c_m \delta + p_e(\alpha + \delta e_0)] + 2\mu[M - 2\alpha]}{(\delta + \beta p_e)^2 - 4\beta\mu},$$

$$e^{T*} = \frac{(\delta + \beta p_e)M}{4\beta\mu - (\delta + \beta p_e)^2},$$

$$f^{T*} = \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{k}{\theta - h} - \lambda V_t \right),$$

$$p^{T*} = \frac{(p_e \beta + \delta)[c_m \delta + p_e(\alpha + e_0 \delta)] + \mu[M - 4\alpha]}{(p_e \beta + \delta)^2 - 4\beta\mu},$$

$$A_r^{T*} = \frac{h^2(\lambda V_t + \Delta) + \theta[k - (\lambda V_t + \Delta)\theta] - 7hk}{8h(h - \theta)},$$

$$b_t^{T*} = \frac{1}{4} \left( \lambda V_t + \Delta + \frac{3k}{\theta - h} \right),$$

$$A_t^{T*} = \frac{1}{4} \left( \lambda V_t + \Delta + \frac{3k}{\theta - h} \right),$$

$$\Pi_m^{T*} = \frac{2p_e E[(p_e \beta + \delta)^2 - 4\beta\mu] - \mu M^2 + (3h + \theta)[(h - \theta)(\Delta + \lambda V_t) + k]^2}{2(p_e \beta + \delta)^2 - 8\beta\mu},$$

$$\Pi_r^{T*} = \frac{\beta\mu^2[\alpha - \beta(c_m + e_0 p_e)]^2 + [(h - \theta)(\Delta + \lambda V_t) + k]^2}{[(\delta + \beta p_e)^2 - 4\beta\mu]^2 + 64h},$$

$$\Pi_t^{T*} = \frac{(3h + \theta)[(h - \theta)(\Delta + \lambda V_t) + k]^2}{32h(h - \theta)},$$

其中  $M = \alpha - \beta(c_m + e_0 p_e)$ .

**推论1**  $\frac{\partial f^{T*}}{\partial V_t} < 0$ ,  $\frac{\partial b_t^{T*}}{\partial V_t} > 0$ ,  $\frac{\partial A_r^{T*}}{\partial V_t} > 0$ ,  $\frac{\partial A_t^{T*}}{\partial V_t} > 0$ .

由推论1可知, 在T模式下, 单位梯次利用收益增加意味着梯次利用商每生产一单位梯次产品能获得更多利润, 梯次利用商将提高给零售商和消费者的回收价格以回收更多退役电池. 相应地, 梯次利用后给制造商的报废电池数量也增加, 由供需关系知, 报废电池供给增加使得制造商支付给梯次利用商的回收价降低.

### 2.2 制造商开展梯次利用业务(MT模式)

MT模式下, 制造商先决策  $w$ 、 $e$ 、 $f$  和  $b_m$ , 随后零售商和梯次利用商同时决策  $p$ 、 $A_t$  和  $A_r$ . 各成员利润

函数为

$$\Pi_m^{MT} = (w - c_m)D + \Delta(Q_r + Q_t) - fQ_t - b_m Q_r - F_{mt} + \lambda V_m Q_r - p_e[(e_0 - e)D - E] - \frac{1}{2}\mu e^2, \tag{4}$$

$$\Pi_r^{MT} = (p - w)D + (b_m - A_r)Q_r, \tag{5}$$

$$\Pi_t^{MT} = \lambda V_t Q_t - A_t Q_t + fQ_t. \tag{6}$$

其中:  $D = \alpha - \beta p + \delta e$ ,  $Q_r = k + hA_r - \theta A_t$ ,  $Q_t = k + hA_t - \theta A_r$ .

**命题2** 对于模式MT, 当满足条件  $(p_e \beta + \delta)^2 - 4\beta\mu < 0$  时, 制造商、零售商和梯次利用商的最优决策和利润分别为

$$w^{MT*} = \frac{(\delta + \beta p_e)[c_m \delta + p_e(\alpha + \delta e_0)] + 2\mu[M - 2\alpha]}{(\delta + \beta p_e)^2 - 4\beta\mu},$$

$$b_m^{MT*} = \frac{1}{2} \left( \lambda V_m + \Delta + \frac{k}{\theta - h} \right),$$

$$e^{MT*} = \frac{(\delta + \beta p_e)M}{4\beta\mu - (\delta + \beta p_e)^2},$$

$$f^{MT*} = \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{k}{\theta - h} - \lambda V_t \right),$$

$$p^{MT*} = \frac{(p_e \beta + \delta)[c_m \delta + p_e(\alpha + e_0 \delta)] + \mu[M - 4\alpha]}{(p_e \beta + \delta)^2 - 4\beta\mu},$$

$$A_r^{MT*} = \frac{(\theta - h) \left[ \frac{2h^2(\lambda V_m + \Delta) + h\theta(\lambda V_t + \Delta) - 2k(2h + \theta)}{8h^2 - 2\theta^2} \right] + k(2h^2 + h\theta)}{(\theta - h)},$$

$$A_t^{MT*} = \frac{(\theta - h) \left[ \frac{2h^2(\lambda V_t + \Delta) + h\theta(\lambda V_m + \Delta) - k(3h + 2\theta)}{8h^2 - 2\theta^2} \right] + 3kh^2}{(\theta - h)},$$

$$\Pi_m^{MT*} = \frac{\beta\mu M p_e [(\delta + \beta p_e)N - 4\beta e_0 \mu] + p_e E - F_{mt} + \frac{h\Delta[(h - \theta)(2\Delta + \lambda V_m + \lambda V_t) + 2k]}{4h - 2\theta} + \frac{h\lambda V_m S}{8h^2 - 2\theta^2} - \frac{2\beta\mu M [p_e(\delta + \beta p_e)N - 2\mu W] + \mu(\delta + \beta p_e)^2 M^2}{2[(\delta + \beta p_e)^2 - 4\beta\mu]^2} + \frac{hR[(h - \theta)(\lambda V_t - \Delta) + k] - hS[(h - \theta)(\Delta + \lambda V_m) - k]}{4(h - \theta)(4h^2 - \theta^2)}}{[(\delta + \beta p_e)^2 - 4\beta\mu]^2} + p_e E - F_{mt} + \frac{h\Delta[(h - \theta)(2\Delta + \lambda V_m + \lambda V_t) + 2k]}{4h - 2\theta} + \frac{h\lambda V_m S}{8h^2 - 2\theta^2} - \frac{2\beta\mu M [p_e(\delta + \beta p_e)N - 2\mu W] + \mu(\delta + \beta p_e)^2 M^2}{2[(\delta + \beta p_e)^2 - 4\beta\mu]^2} + \frac{hR[(h - \theta)(\lambda V_t - \Delta) + k] - hS[(h - \theta)(\Delta + \lambda V_m) - k]}{4(h - \theta)(4h^2 - \theta^2)},$$

$$\Pi_r^{MT*} = \Pi_t^{MT*} + \frac{\beta\mu^2 M^2}{[(p_e \beta + \delta)^2 - 4\beta\mu]^2},$$

$$\Pi_t^{MT*} = \frac{hR^2}{4(\theta^2 - 4h^2)^2}.$$

其中:  $M = \alpha - \beta(c_m + e_0 p_e)$ ,  $N = \alpha - \beta c_m + \delta e_0$ ,  $W = \alpha - \beta c_m + \beta e_0 p_e$ ,  $S = \theta[k - h(\Delta + \lambda V_t)] + 2h[k + h(\Delta + \lambda V_m)] - \theta^2(\Delta + \lambda V_m)$ ,  $R = \theta[k - h(\Delta + \lambda V_m)] + 2h[k + h(\Delta + \lambda V_t)] - \theta^2(\Delta + \lambda V_t)$ .

**推论2**  $\frac{\partial f^{MT*}}{\partial V_t} < 0$ ,  $\frac{\partial b_m^{MT*}}{\partial V_t} = 0$ ,  $\frac{\partial A_r^{MT*}}{\partial V_t} > 0$ ,  $\frac{\partial A_t^{MT*}}{\partial V_t} > 0$ .

由推论2可知,在MT模式下,梯次利用商单位梯次利用产品收益增加,意味着相对于制造商而言其梯次利用业务竞争力提高.因此,梯次利用商将提高给消费者的回收价格以回收更多退役电池.由于逆向链竞争,零售商给消费者的回收价格也增加,而制造商给零售商的退役电池转移价格保持不变.此外,由于梯次利用后给制造商的报废电池数量增加,由供需关系知,报废电池供给增多使制造商降低支付给梯次利用商的回收价.

**推论3**  $\frac{\partial f^{MT*}}{\partial V_m} = 0$ ,  $\frac{\partial b_m^{MT*}}{\partial V_m} > 0$ ,  $\frac{\partial A_r^{MT*}}{\partial V_m} > 0$ ,  $\frac{\partial A_t^{MT*}}{\partial V_m} > 0$ .

由推论3可知,在MT模式下,制造商单位梯次利用收益增加意味着其梯次利用盈利能力更强,相对于梯次利用商更具竞争优势.因此,制造商将提高给零售商回收的价格,进而提高零售商给消费者的回收价格以回收更多退役电池.由于逆向链竞争,梯次利用商给消费者的回收价格增加以维持其生产的梯次产品数量,梯次利用商给制造商的报废电池数量无明显变化,所以制造商支付给梯次利用商的回收价格不变.

### 3 不同模式均衡结果分析

由第2节计算结果得到如下推论.

**推论4**  $w^{T*} = w^{MT*} = w^*$ ,  $p^{T*} = p^{MT*} = p^*$ ,  $e^{T*} = e^{MT*} = e^*$ ,  $f^{T*} = f^{MT*} = f^*$ ,  $b_t^{T*} < b_m^{MT*}$ .

由推论4可知,无论动力电池制造商是否开展梯次利用业务,正向链中的最优批发价格、销售价格和碳减排水平均相同,这是因为梯次利用活动只发生在逆向链中.此外,制造商在两种模式下给梯次利用商的退役动力电池回收价格是相同的,而模式MT中制造商给零售商的回购价格要高于模式T中梯次利用商给零售商的回购价格.

**推论5** 1)  $\frac{\partial e^*}{\partial \delta} > 0$ ,  $\frac{\partial w^*}{\partial \delta} > 0$  ( $\delta > \max[0, \delta_1]$ ),  $\frac{\partial p^*}{\partial \delta} > 0$  ( $\delta > \max[0, \varepsilon_1]$ ). 2)  $\frac{\partial e^*}{\partial \mu} < 0$ . 3) 当  $\frac{\delta}{\beta} < p_e < p_{e \max}$  时,  $\frac{\partial w^*}{\partial \mu} > 0$ ; 当  $0 < p_e \leq \frac{\delta}{\beta}$  时,  $\frac{\partial w^*}{\partial \mu} \leq 0$ . 4) 当  $\frac{3\delta}{\beta} < p_e < p_{e \max}$  时,  $\frac{\partial p^*}{\partial \mu} > 0$ ; 当

$0 < p_e < \frac{3\delta}{\beta}$  时,  $\frac{\partial p^*}{\partial \mu} \leq 0$ . 其中

$$\delta_1 = \frac{2\mu - p_e^2\beta - 2\sqrt{\mu^2 - p_e^2\beta\mu}}{p_e}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{3\mu - p_e^2\beta - \sqrt{9\mu^2 - 4p_e^2\beta\mu}}{p_e}$$

$p_{e \max} =$

$$\min \left\{ \frac{\alpha - c_m\beta}{e_0\beta}, \frac{(2\beta e_0\mu - \alpha\delta - \beta c_m\delta - \delta^2 e_0)}{2\beta(\alpha + \delta e_0)} + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} \sqrt{\frac{J}{\beta^2(\alpha + \delta e_0)^2}}, 2\sqrt{\frac{\mu}{\beta} - \frac{\delta}{\beta}} \right\},$$

$$J = \alpha^2(8\beta\mu + \delta^2) + e_0^2(\delta^2 - 2\beta\mu)^2 + 2\alpha\delta e_0(2\beta\mu + \delta^2) + \beta c_m[\beta\delta^2 c_m + 4\beta\mu(2\alpha + \delta e_0) - 2\delta^2(\alpha + \delta e_0)].$$

推论5的1)表明,当消费者低碳偏好系数高于一定阈值且增大时,制造商每减排一单位碳将带来更多需求,因此制造商应提高碳减排水平.根据供需关系,产品需求增加,相应地,零售价和批发价提高.推论5的2)~4)表明,碳减排成本系数增大,意味着制造商每降低一单位碳排放将产生更多成本,因此制造商降低碳减排水平,导致生产中碳排放总量增加,制造商可能需要在碳市场上购买碳配额.当碳交易价格高于某一阈值时,制造商需要付出较大的碳交易成本,这抑制了产品生产,导致产品供给减少,根据供需关系,零售价和批发价提高;当碳交易价格低于某一阈值时,碳交易成本相对较低,对制造商而言超量碳排放代价较低,可能会通过降低批发价来刺激需求,活跃市场,维持自身利润.

**推论6** 1)  $\frac{\partial f^{T*}}{\partial \lambda} < 0$ ,  $\frac{\partial b_t^{T*}}{\partial \lambda} > 0$ ,  $\frac{\partial A_r^{T*}}{\partial \lambda} > 0$ ,  $\frac{\partial A_t^{T*}}{\partial \lambda} > 0$ ; 2)  $\frac{\partial f^{MT*}}{\partial \lambda} < 0$ ,  $\frac{\partial b_t^{MT*}}{\partial \lambda} > 0$ ,  $\frac{\partial A_r^{MT*}}{\partial \lambda} > 0$ ,  $\frac{\partial A_t^{MT*}}{\partial \lambda} > 0$ .

由推论6可知,无论何种模式,可梯次利用比例增加均意味着生产每单位梯次利用产品获得的收益增加.参与梯次产品生产的成员(制造商/梯次利用商)将通过提高给下游或者消费者的回收价来增加退役电池回收量.同样,由于梯次利用后给制造商的报废电池数量增加,由供需关系知,制造商支付给梯次利用商的回收价降低.

**推论7** 1) 当  $F_{mt} > F_0$  时,  $\Pi_m^{T*} > \Pi_m^{MT*}$ , 即制造商不开展梯次利用业务; 2) 当  $0 < F_{mt} < F_0$  时,  $\Pi_m^{T*} < \Pi_m^{MT*}$ , 即制造商开展梯次利用业务. 其中

$$F_0 =$$

$$\frac{1}{16} \left\{ \frac{4k^2}{h-\theta} + \frac{k^2}{h} - \frac{2h^2\lambda^2(V_m - V_r)^2}{2h+\theta} - \frac{\theta^2(\Delta + \lambda V_r)^2}{h} + \frac{2[h(2\Delta + \lambda V_m + \lambda V_r) - 2k]^2}{2h-\theta} - 6k(\Delta + \lambda V_r) + \frac{2\theta(\Delta + \lambda V_r)[h(\Delta + \lambda V_r) - k]}{h} + h(5\Delta^2 + 4\lambda^2 V_m^2 + 8\Delta\lambda V_m + \lambda^2 V_r^2 + 2\Delta\lambda V_r) \right\}.$$

由推论7可知, 制造商开展梯次利用业务并不一定总是最好的选择. 当制造商从事梯次利用业务投入成本大于阈值  $F_0$  时, T 模式下制造商最优利润高于 MT 模式, 制造商则不开展梯次利用业务; 当从事梯次利用业务投入成本小于阈值  $F_0$  时, MT 模式下制造商最优利润高于 T 模式, 制造商则选择开展梯次利用业务. 阈值  $F_0$  主要与可梯次利用比例、制造商梯次利用单位收益和梯次利用商生产梯次利用产品的单位收益有关, 后文还会具体分析.

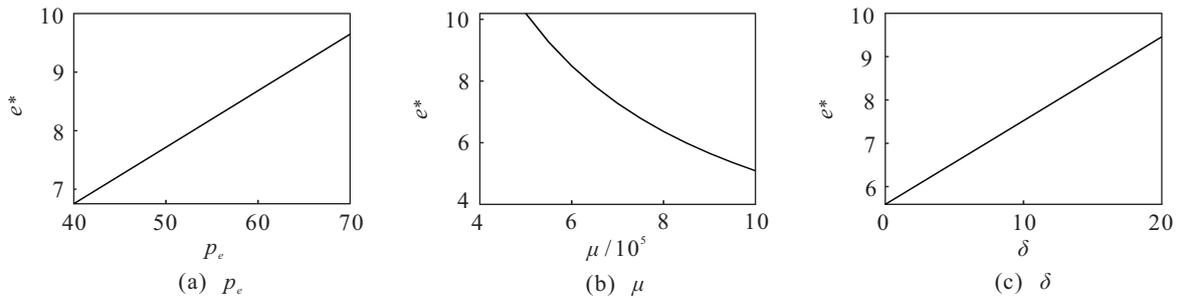


图2 不同参数与  $e^*$  之间的关系

2) 分析碳减排成本系数  $\mu$  的影响.

如图2(b)所示. 碳减排成本系数增大, 意味着制造商每降低一单位碳排放需要投入更多成本. 为控制成本, 制造商会降低碳减排水平, 甚至宁愿从碳市场购买碳配额, 所以制造商最优碳减排量降低, 这与推论5的2)一致.

3) 分析消费者低碳偏好系数  $\delta$  的影响.

如图2(c)所示. 消费者低碳偏好系数增大, 意味着制造商每降低一单位碳排放会吸引更多消费者购买产品, 这样制造商更有动力降低碳减排水平, 这与

### 4 数值分析

利用 Matlab 进行数值仿真. 参考 Tang 等<sup>[20]</sup> 和碳市场行情, 设定参数初始值为:  $\alpha = 3 \times 10^5$ ,  $\beta = 0.5$ ,  $c_m = 137000$ ,  $c_r = 125000$ ,  $\Delta = 12000$ ,  $k = 0$ ,  $h = 1.4$ ,  $\theta = 0.5$ ,  $V_t = 18000$ ,  $V_m = 27000$ ,  $\lambda = 0.5$ ,  $p_e = 58$ ,  $\delta = 15$ ,  $\mu = 6 \times 10^5$ ,  $e_0 = 12$ ,  $E = 8 \times 10^5$ ,  $F_{mt} = 2 \times 10^7$ .

#### 4.1 不同参数对动力电池制造商碳减排决策影响

从均衡结果分析可知, 无论哪种模式, 正向供应链所涉及的最优碳减排决策相同, 因此设  $e^* = e^{T^*} = e^{MT^*}$ .

1) 分析碳交易价格  $p_e$  的影响.

如图2(a)所示. 碳交易价格增加, 意味着多排放一单位碳的惩罚或多减排一单位碳的收益增加, 为减少购碳成本或出售更多配额获利, 制造商会加大碳减排.

推论5的1)一致.

#### 4.2 不同参数对动力电池制造商开展梯次利用业务决策的影响

1) 分析可梯次利用比例  $\lambda$  的影响.

如图3(a)所示. 两种模式下, 制造商最优利润均随可梯次利用动力电池比例  $\lambda$  的增加而增加.  $\lambda$  增加意味着有更多比例退役动力电池用于制造梯次产品, 而使用后的梯次产品和不可梯次利用电池均转卖给制造商以拆解提取原材料, 进而产生更多材料再次利用的价值.

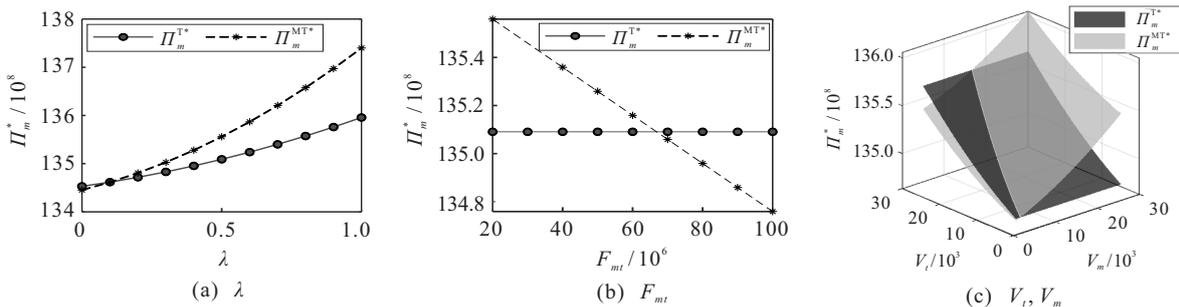


图3 不同参数与  $\Pi_m^*$  之间的关系

当 $\lambda$ 过低时(图3(a)中 $\lambda \leq 0.1$ 的部分),制造商生产梯次产品的收入可能无法覆盖为开展梯次利用业务而投入的成本(如设备折旧和人力等),因此,制造商会选择不开展梯次利用业务,即T模式;反之(图3(a)中 $\lambda > 0.1$ 的部分),制造商会选择开展梯次利用业务,即MT模式.现实中,三元锂电池可梯次利用率很低,对这类产品制造商不适合开展梯次利用业务;而磷酸铁锂电池可梯次利用率高,对这类产品制造商可开展梯次利用业务.

2) 分析制造商从事梯次利用业务所投入成本 $F_{mt}$ 的影响.

如图3(b)所示.随着制造商开展梯次利用业务投入成本 $F_{mt}$ 增加,MT模式下制造商最优利润降低,而由于T模式制造商无梯次利用业务,T模式下制造商最优利润不变.当 $F_{mt}$ 小于一定阈值时(图3(b)中 $F_{mt} \leq 6.8 \times 10^7$ 的部分),MT模式下制造商最优利润大于T模式下制造商最优利润,制造商选择开展梯次利用业务,即MT模式;反之(图3(b)中 $F_{mt} > 6.8 \times 10^7$ 的部分),制造商选择不开展梯次利用业务,即T模式.上述结果与推论7一致.

3) 联合分析制造商梯次利用单位收益 $V_m$ 和梯次利用商梯次利用单位收益 $V_t$ 的影响.

如图3(c)所示.当梯次利用商梯次利用单位收益 $V_t$ 增加时,无论是T模式还是MT模式,制造商最优利润均增加,且T模式下增加幅度大于MT模式下增加幅度.在MT模式下,制造商最优利润随着制造商梯次利用单位收益 $V_m$ 增加而明显增加.两种模式下制造商最优利润大小关系受到 $V_t$ 和 $V_m$ 的共同影响:当 $V_m$ 较大而 $V_t$ 较小时,制造商选择MT模式.

## 5 结论

针对由制造商、零售商和梯次利用商组成的动力电池闭环供应链,本文在碳限额与交易政策下构建了制造商不开展和开展梯次利用业务两种情形下的博弈模型,并进行了求解分析.所得管理启示如下:

1) 当开展梯次利用业务投入成本大于某一阈值时,动力电池制造商应采取保守策略,不开展梯次利用活动.2) 当碳交易价格较小时,制造商应提高批发价格;反之,制造商应降低批发价格.3) 动力电池制造商选择开展梯次利用业务时,零售商可以“搭便车”获得更多收益,此时,零售商应积极与动力电池制造商合作,回收更多动力电池给制造商进行梯次利用.4) 从梯次利用商角度,无论哪种模式下,当其梯次利用技术更成熟时,梯次利用过程中的单位收益更高,有利于动力电池梯次利用闭环供应链发展.因此,

梯次利用商应加大技术研发,不断优化梯次利用技术.5) 动力电池制造商在开展梯次利用业务前应先重点加大梯次利用技术研发,对自身相对于梯次利用商是否具备梯次利用技术优势做出评估后再做出开展梯次利用业务的决定.

本文进一步丰富了碳限额与交易下动力电池闭环供应链运营策略和梯次利用相关研究,为动力电池回收利用决策提供了有意义的参考,有助于我国新能源汽车动力电池回收利用体系的建立与完善.然而,考虑到市场和政策环境的复杂性,未来还可以研究多个梯次利用商参与动力电池回收的情形.此外,未来也可以研究碳税、回收奖励和补贴等其他政策对动力电池闭环供应链运营决策和政府碳政策设计的影响.

## 参考文献(References)

- [1] 中国汽车工业协会. 产业运行|2021年汽车工业经济运行情况[EB/OL]. (2022-01-12)[2022-05-13]. [http://www.caam.org.cn/chn/4/cate\\_154/con\\_5235337.html](http://www.caam.org.cn/chn/4/cate_154/con_5235337.html).
- [2] 科技工作者之家. 规范退役动力电池回收再利用,应对碳达峰[EB/OL]. (2021-06-10)[2022-05-13]. <https://www.scimall.org.cn/article/detail?id=5613417>.
- [3] 姚美娇. 动力电池企业主动降碳成趋势[N]. 中国能源报, 2022-02-14(8).
- [4] Kallitsis E, Korre A, Kelsall G, et al. Environmental life cycle assessment of the production in China of lithium-ion batteries with nickel-cobalt-Manganese cathodes utilising novel electrode chemistries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120067.
- [5] Zhao D, Ji S F. The optimal emission-reduction investment strategy in supply chains under multiple carbon policies[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018, 23(4): 53-61.
- [6] Liu Z, Anderson T D, Cruz J M. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 218(3): 602-613.
- [7] 钜大. 动力电池的寿命一般是多长?[EB/OL]. (2019-12-05)[2022-05-13]. <http://www.juda.cn/news/113127.html>.
- [8] Cnesa 储能研究. 动力电池回收再利用产业研究[EB/OL]. (2022-05-31)[2022-08-23]. <http://www.esresearch.com.cn/#/resReport/RspeDetail>.
- [9] Cao X Y, Qin Y H, Xu Z F, et al. Carbon reduction strategy and coordination on closed-loop supply chain under the restriction of carbon cap and trade carbon[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(11): 57-66.
- [10] Cheng F X, Yuan M, Sun L C, et al. Equilibrium decision research of closed-loop supply chain network with compound carbon emission reduction policy[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(4): 483-496.

- [11] Taleizadeh A A, Alizadeh-Basban N, Niaki S T A. A closed-loop supply chain considering carbon reduction, quality improvement effort, and return policy under two remanufacturing scenarios[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 1230-1250.
- [12] Yang L, Hu Y J, Huang L J. Collecting mode selection in a remanufacturing supply chain under cap-and-trade regulation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(2): 480-496.
- [13] Chen Y Y, Li B Y, Bai Q G, et al. Research on production and emission reduction investment decisions of the remanufacturing enterprise under carbon trading environment[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(3): 695-703.
- [14] Dou G W, Cao K Y. A joint analysis of environmental and economic performances of closed-loop supply chains under carbon tax regulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 146: 106624.
- [15] Wang Z R, Wu Q H. Carbon emission reduction and product collection decisions in the closed-loop supply chain with cap-and-trade regulation[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(14): 4359-4383.
- [16] Zhang G T, Wang G Q, Zhao X Y, et al. Production and carbon trading strategy of closed-loop supply chain network under cap-and-trade system[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(1): 97-108.
- [17] Zhang L R, Yang Z F, Cheng C Q. Selection of emission reduction strategy for closed-loop supply chain under carbon cap-and-trade policy[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2022, 36(1): 172-180.
- [18] Miao Z W, Fu K, Xia Z Q, et al. Models for closed-loop supply chain with trade-ins[J]. *Omega*, 2017, 66: 308-326.
- [19] Chen J, Tian D G. Selection of the recycling mode based on closed-loop supply chain model[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(1): 88-97.
- [20] Tang Y Y, Zhang Q, Li Y M, et al. Recycling mechanisms and policy suggestions for spent electric vehicles' power battery—A case of Beijing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 388-406.
- [21] Wang N M, He Q D, Jiang B. Hybrid closed-loop supply chains with competition in recycling and product markets[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 217: 246-258.
- [22] Zhang P, Lei M Y. Demand information sharing of the manufacturer and reverse channel design in closed-loop supply chains[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(2): 232-243.
- [23] Xie J P, Li J, Yang F F, 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.
- [24] Zhang Q, Tang Y Y, Bunn D, et al. Comparative evaluation and policy analysis for recycling retired EV batteries with different collection modes[J]. *Applied Energy*, 2021, 303: 117614.
- [25] Sun Q Q, Chen H, Long R Y, et al. Comparative evaluation for recycling waste power batteries with different collection modes based on Stackelberg game[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 312: 114892.
- [26] Li X. Collection mode choice of spent electric vehicle batteries: Considering collection competition and third-party economies of scale[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1-14.
- [27] Zhang C, Tian Y X, Han M H. Recycling mode selection and carbon emission reduction decisions for a multi-channel closed-loop supply chain of electric vehicle power battery under cap-and-trade policy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 375: 134060.
- [28] Jiao J J, Pan Z T, Li J J. Selection of power battery recycling model considering economic benefits of reuse and emission efficiency[J]. *Chinese Journal of Management Science*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn 1003-207x.2021.2731.
- [29] Zhang C, Li H, Tian Y X. Manufacturer's carbon abatement strategy and selection of spent power battery collecting mode based on echelon utilization and cap-and-trade policy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 177: 109079.
- [30] 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.
- [31] Bai Q G, Xu J T, Zhang Y Y. Emission reduction decision and coordination of a make-to-order supply chain with two products under cap-and-trade regulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 119: 131-145.
- [32] Jones R, Mendelson H. Information goods vs. industrial goods: Cost structure and competition[J]. *Management Science*, 2011, 57(1): 164-176.
- [33] 中国产业经济信息网. 《新能源汽车动力蓄电池梯次利用管理办法》出台 [EB/OL]. (2021-09-05) [2022-05-07], <http://www.cinic.org.cn/xw/zcdt/1149049.html?from=groupmessage>.
- [34] Li X. Research on recovery decision of power battery closed-loop supply chain for electric passenger cars under different policies[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020: 41-42.

## 作者简介

张川(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事可持续运营管理与供应链管理、数据驱动运营管理等研究, E-mail: czhang@mail.neu.edu.cn;

田雨鑫(1994—), 男, 博士生, 从事数据驱动物流与供应链管理、机器学习、大数据挖掘与预测等研究, E-mail: neu.tianyuxin.2013@gmail.com;

李灿灿(1993—), 女, 硕士生, 从事可持续运营管理、供应链管理等研究, E-mail: 13107688269@163.com.