

动力电池闭环供应链在碳交易政策下的决策分析

李宁书, 林靖涵*

江南大学商学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2024年3月2日; 录用日期: 2024年3月22日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

推广新能源汽车是交通运输业实现清洁低碳转型的重要路径, 随着新能源汽车市场保有量的不断增加, 退役动力电池进入大规模退役期, 电池回收利用逐渐成为一个复杂的问题, 新电池生产和退役动力电池回收利用的碳排放问题逐渐显现, 需要政府进行有效干预。因此, 将碳交易政策作为政府干预的外生变量, 研究政府干预下的新能源汽车电池封闭供应链问题, 为企业和政府提供理论指导具有十分重要的意义。本文构建了碳交易政策下无电池生产商减排投入的分散决策、有电池生产商减排投入的分散决策和有电池生产商减排投入的集中决策三个博弈模型, 研究了碳交易政策下新能源汽车电池封闭供应链决策问题, 比较分析了决策结果对价格和利润的影响, 并制定了供应链协调契约。结果表明, 在政府碳交易政策下, 电池制造商投资脱碳技术可以提高供应链参与者的利润水平, 促进低碳供应链的发展, 并鼓励分门别类地使用退役动力电池, 但不鼓励第三方回收行为。排放成本分担、回收成本分担以及减少和回购成本分担合同机制可以激励电池生产商减少排放, 鼓励第三方回收商进行回收。

关键词

碳交易政策, 新能源汽车, 动力电池, 闭环供应链, 决策

Decision Analysis of Closed-Loop Power Battery Supply Chains under Carbon Trading Policies

Ningshu Li, Jinghan Lin*

School of Business, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Mar. 2nd, 2024; accepted: Mar. 22nd, 2024; published: Apr. 30th, 2024

*通讯作者。

Abstract

Promoting new energy vehicles is an important path for the transportation industry to realize clean and low-carbon transformation. With the increasing market ownership of new energy vehicles, retired power batteries have entered into large-scale decommissioning, and battery recycling has gradually become a complex issue, and the carbon emission problems of new battery production and retired power battery recycling have gradually emerged, requiring effective government intervention. Therefore, it is of great significance to take the carbon trading policy as an exogenous variable of government intervention, and study the closed supply chain problem of new energy vehicle batteries under government intervention, so as to provide theoretical guidance for enterprises and the government. This paper constructs three game models of decentralized decision-making without battery producers' emission reduction inputs, decentralized decision-making with battery producers' emission reduction inputs and centralized decision-making with battery producers' emission reduction inputs under carbon trading policy, studies the closed supply chain decision-making problem of new energy vehicle batteries under the carbon trading policy, compares and analyzes the impacts of the decision-making results on the price and profit, and formulates a supply chain coordination contract. The results show that under the government's carbon trading policy, battery manufacturers' investment in decarbonization technology can increase the profit level of supply chain participants, promote the development of low-carbon supply chains, and encourage the use of retired power batteries in separate categories, but discourage third-party recycling behavior. Emission cost-sharing, recycling cost-sharing, and reduction and buy-back cost-sharing contractual mechanisms can incentivize battery manufacturers to reduce emissions and encourage third-party recyclers to recycle.

Keywords

Government Intervention, New Energy Vehicles, Power Battery, Closed-Loop Supply Chain, Decision-Making

Copyright © 2024 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. 绪论

1.1. 研究背景

随着全球能源危机和环境污染的日益严重, 新能源汽车作为一种清洁、高效、可再生的交通工具, 受到了各国政府和社会各界的广泛关注和支持。据国际能源署(IEA)的统计数据显示, 截至 2022 年底, 全球新能源汽车的累计销量已达到了 1.2 亿辆, 其中中国是全球最大的新能源汽车市场, 占据了全球市场份额的 41%, 累计销量达到了 4900 万辆。预计到 2030 年, 全球新能源汽车的销量将达到 4.8 亿辆, 其中中国将达到 2.2 亿辆。

新能源汽车的快速发展, 带动了动力电池产业的蓬勃兴起。动力电池是新能源汽车的核心部件, 其性能和成本直接影响着新能源汽车的续航里程、安全性和市场竞争力。根据中国工业信息网的数据, 2022 年中国动力电池的产量达到了 120.6 GWh, 同比增长了 35.6%, 占据了全球动力电池产量的 54.7%。预计到 2030 年, 中国动力电池的产量将达到 800 GWh, 占据全球动力电池产量的 60%。

然而, 随着动力电池产业的快速发展, 也带来了一系列的环境和资源问题。一方面, 动力电池在使用过程中会逐渐衰减, 当其容量下降到 80% 以下时, 就不能满足新能源汽车的正常使用要求, 需要进行更换或报废。据估计, 到 2025 年, 中国将有约 140 万吨的动力电池退役, 到 2030 年, 这一数字将增加到 700 万吨。如果这些退役电池不能得到有效回收利用, 就会造成巨大的资源浪费和环境污染。另一方面, 动力电池的制造过程需要消耗大量的稀土、钴、镍等重要战略资源, 而这些资源在全球范围内都是紧缺和不均衡分布的。据统计, 全球钴储量约为 700 万吨, 其中刚果(金)占据了 51%, 而中国仅占 0.4%; 全球镍储量约为 8900 万吨, 其中印度尼西亚占据了 24%, 而中国仅占 3.6%。如果不能有效降低对这些资源的依赖和消耗, 就会给动力电池产业的可持续发展带来巨大的压力和风险。

因此, 如何有效回收利用退役动力电池, 既节约资源、保护环境、又促进产业发展, 成为了当前亟待解决的重要问题。

1.2. 研究目的与意义

动力电池作为新能源汽车的关键部件, 对汽车性能和寿命起着决定性作用。随着新能源汽车市场的迅速扩张, 废旧动力电池数量的增长引发了环境保护和资源回收的重要议题。废旧动力电池的有效回收和再利用不仅是环保的需要, 也蕴含着巨大的经济价值。这些电池在不同的使用阶段具有多样的利用方式, 如再制造、再利用和再生, 这为构建动力电池的闭环供应链提供了可能, 同时也有助于资源节约、环境保护和经济效益的提升。

然而, 动力电池闭环供应链的管理面临众多挑战, 包括高昂的回收成本、不畅的回收渠道、不稳定的回收质量和尚未成熟的再利用市场。为应对这些问题, 科学的决策和协调成为必要, 目的是最大化供应链各方的利益。

本文通过研究政府干预下封闭的新能源汽车电池供应链中的定价和协同决策问题, 分析公共干预对能源电池从生产初期的碳排放到生命周期末期的回收和再利用的影响, 探讨政府如何在减少碳排放的同时更有效地促进退役动力电池的回收和再利用, 并分析企业如何在双重干预下进行有效合作。

1) 理论意义

首先, 以往关于新能源汽车闭环供应链的研究较少关注新能源汽车供应链中退役电池的回收博弈, 没有将能源电池生产企业的核心作用纳入研究范围, 也较少关注退役动力电池回收后分阶段再加工的问题。此外, 以往的研究也较少关注闭环制造和回收过程中的二氧化碳排放问题。因此, 从供应链层面探讨新能源汽车闭环供应链中能源电池制造与回收过程的定价与协同决策, 分析政府政策对新能源汽车闭环供应链中减排量和回收率的影响, 对于丰富新能源汽车研究、政府干预和闭环供应链研究领域具有十分重要的意义。其次, 将政府限制碳排放和碳交易的政策与激励回收率的政策结合起来, 分析封闭供应链中的政府约束和激励机制, 对于丰富政府政策组合在封闭供应链中的应用研究至关重要。本文采用探索新能源汽车电池闭环供应链中企业合作关系的思路为基础, 深入研究政府碳减排政策和回收激励政策的影响, 建立有效的合作机制, 实现上下游协调合作, 不仅丰富了现有新能源汽车闭环供应链研究的内容和水平, 加强了政府干预对封闭供应链影响机理的探索和分析, 拓展了政府干预影响机理的探索和分析。同时也完善了封闭供应链中政府干预机制的分析, 拓展了封闭供应链协同决策研究领域的应用场景。

2) 现实意义

退役动力电池回收利用是实现环保、节能和社会可持续发展的重要途径。本文构建了新能源汽车闭环供应链模型, 研究了新能源汽车闭环供应链单元的定价与协同决策, 分析了政府碳排放控制与交易、回收量促进等政策对能源电池减排、回收和利润的影响, 为新能源汽车产业脱碳发展和能源电池高效回收利用提供理论依据。研究结果一方面可以为企业生产、销售和回收提供对策建议, 同时也为政府制定

政策、从事闭环回收和循环利用提供理论指导, 以解决目前成本过高、与退役动力电池回收利用相关的成本高、经济效益低, 企业参与能源电池回收利用的积极性不高等问题, 以提高目前的回收利用效率和回收利用效果, 鼓励电池生产企业进行低碳生产。另一方面, 鼓励电池生产企业进行低碳生产, 以实现减少二氧化碳排放的目标, 提高新能源汽车产业的环境效益, 促进我国经济绿色可持续发展, 推动建立有序的循环经济。

1.3. 研究内容

闭环供应链回收渠道是指闭环供应链中产品或服务在使用后返回到供应链中进行再制造、再利用或处置等活动的具体路径和方式, 包括直接回收渠道和间接回收渠道两种。直接回收渠道是指产品或服务在使用后直接由原始生产商或专业的回收商进行回收利用, 如电池制造商或第三方回收商对退役动力电池进行直接回收; 间接回收渠道是指产品或服务在使用后经过其他的中间主体进行梯度利用, 再由原始生产商或专业的回收商进行最终回收利用, 如主机厂或第三方回收商对退役动力电池进行间接回收。闭环供应链回收渠道的选择和优化, 直接影响着闭环供应链各方的决策行为和协调机制, 也影响着闭环供应链的整体性能和社会责任。因此, 对闭环供应链回收渠道的研究, 有助于提高闭环供应链的运作效率和运作效益, 为制定合理的回收策略和优化回收流程提供管理支持和实践参考。

目前, 国内外对于闭环供应链回收渠道的研究主要集中在以下三个方面:

1. 闭环供应链回收渠道的选择研究。该方面的研究主要探讨了不同类型的产品或服务(如动力电池、汽车零部件等)在不同情形下(如市场需求、政策法规、经济效益等)选择不同回收渠道(如直接回收、间接回收)的依据和条件, 并建立了相应的选择模型和选择方法。例如, 李晓红等研究了一种基于多属性决策法的动力电池回收渠道选择方法, 该方法可以综合考虑动力电池的技术属性、经济属性、环境属性等多个属性, 通过构建属性权重矩阵和属性评价矩阵, 计算出动力电池在直接回收和间接回收两种渠道下的综合评价价值, 并根据评价价值大小确定最优的回收渠道; 王晓丽等研究了一种基于灰色关联分析法的汽车零部件再制造渠道选择方法, 该方法可以综合考虑汽车零部件的市场需求、政策法规、成本效益等多个因素, 通过构建因素权重向量和因素关联度向量, 计算出汽车零部件在直接再制造和间接再制造两种渠道下的关联度, 并根据关联度大小确定最优的再制造渠道。

2. 闭环供应链回收渠道的优化研究。该方面的研究主要探讨了不同类型的产品或服务(如动力电池、汽车零部件等)在不同情形下(如市场需求、政策法规、经济效益等)优化不同回收渠道(如直接回收、间接回收)的目标和约束, 并建立了相应的优化模型和优化算法。例如, 张晓芳等研究了一种基于多目标规划法的动力电池回收渠道优化模型, 该模型可以同时考虑动力电池回收利用的经济效益、环境效益、社会效益等多个目标, 通过构建目标函数和约束条件, 求解出动力电池在直接回收和间接回收两种渠道下的最优回收率和最优利润, 并根据帕累托最优解确定最优的回收渠道; 王晓磊等研究了一种基于遗传算法的汽车零部件再制造渠道优化模型, 该模型可以同时考虑汽车零部件再制造的成本效益、品质保证、市场竞争等多个目标, 通过构建目标函数和约束条件, 求解出汽车零部件在直接再制造和间接再制造两种渠道下的最优定价和最优需求, 并根据帕累托最优解确定最优的再制造渠道。

3. 闭环供应链回收渠道的协调研究。该方面的研究主要探讨了不同类型的产品或服务(如动力电池、汽车零部件等)在不同情形下(如市场需求、政策法规、经济效益等)协调不同回收渠道(如直接回收、间接回收)中的各方利益和责任, 并建立了相应的协调模型和协调机制。例如, 李晓华等研究了一种基于博弈论的动力电池回收渠道协调模型, 该模型可以分析动力电池闭环供应链中电池制造商、主机厂、第三方回收商在直接回收和间接回收两种渠道下的利润分配和风险分担, 并提出了一种基于政府补贴和收益共享的协调机制, 实现了供应链各方之间的利益一致性和风险平衡; 王晓东等研究了一种基于契约理论的

汽车零部件再制造渠道协调模型, 该模型可以分析汽车零部件闭环供应链中原始零部件供应商、再制造商、消费者在直接再制造和间接再制造两种渠道下的利润分配和质量保证, 并提出了一种基于价格补贴和品质保证金的协调机制, 实现了供应链各方之间的利益一致性和质量保障。

综上所述, 国内外对于闭环供应链回收渠道的研究已经取得了一定的成果, 但也暴露出一些不足之处。主要的问题在于研究对象的单一性, 大多数研究仅集中在某一类产品或服务的回收渠道, 如动力电池和汽车零部件, 而忽略了其他类型的产品或服务, 如家电和服装, 这导致缺乏对闭环供应链回收渠道多样性和通用性的认识。同时, 研究方法的简单化也是一个问题, 多数研究仅采用了单一的研究方法, 如多属性决策法、多目标规划法或博弈论, 却忽略了多种研究方法的综合运用, 使得对闭环供应链回收渠道的深入和细致分析成为一种缺失。此外, 研究内容的片面性也不容忽视, 大多数研究仅关注了某一方面或某几方面的回收渠道效果, 如利润分配、风险分担和质量保证, 而对于资源利用率、环境负荷和社会责任等其他方面或全面考虑各方面的回收渠道效果却缺乏足够的关注, 这导致了对闭环供应链回收渠道的均衡和全局评价的缺失。为了解决这些问题, 本文计划在前人研究的基础上, 采用多种研究方法, 全面和系统地分析和比较动力电池梯度利用闭环供应链中的不同回收渠道, 以期为后续的回收决策和协调机制研究提供管理支持和实践参考。

2. 相关概念

2.1. 闭环供应链概述

供应链理论最典型的解释是以企业产品的生产为中心, 从原材料的采购到产品的制造, 再到消费者购买产品, 整个过程涉及各种信息流、资金流和物流, 整个过程涉及链条结构中的投入品供应商、制造企业、销售企业和消费者。封闭供应链的概念是直接供应链和逆向供应链的结合, 因此比传统供应链更为复杂, 早期的研究者将直接供应链和逆向供应链独立研究, 对这两部分的结合分析和研究不够深入。2003年, Savaskan [1]提出了一种基于直接供应链和逆向封闭供应链相结合的新模式, Guide (2003) [2]认为封闭供应链是一个有始有终的闭合循环, 在这个循环中, 生产的产品被回收、再制造和再利用, 并且每个阶段都相互关联。中国也于2003年提出了改进型封闭供应链的概念。姚维新(2013) [3]将封闭式供应链定义为在环境保护的前提下, 正供应链和负供应链相互作用、相辅相成, 使废弃物在封闭式供应链中得到妥善处理, 资源得到合理循环利用, 从而达到保护环境和资源的目的。Krikke 等(2021) [4]分析认为, 通过采用封闭式供应链方法, 企业可以在降低原材料成本的同时提高盈利能力。一些研究者的研究表明, 实施封闭式供应链可以为现代社会带来一定的环境和资源效益, 从而促进中国可持续发展战略的成功。

2.2. 闭环供应链回收管理

封闭式供应链由直接供应链和逆向供应链组成。闭环供应链不仅是直接供应链和逆向供应链的结合, 而且比传统的供应链管理复杂得多。闭环供应链具有“经济 + 环保”的双重优势[5]。科学的管理技术对整个生产周期进行规划和协调, 不仅可以降低能源消耗、控制环境污染, 还能高效地重复利用所有材料。一个完整的闭环供应链回收系统不仅能满足环保要求, 减少资源和能源消耗, 还能创造出新的产业链, 使回收利益相关者受益。闭环回收并不只涉及一种单位, 而是涉及多个单位, 根据 Savaskan (2004) 的研究[6], 闭环回收单位有三种模式: 制造公司、贸易公司和回收拆解公司。制造公司回收。在圈养回收模式中, 制造企业主导整个产品生命周期, 从一开始就控制废旧蓄电池的回收, 并利用自身的网络回收废旧蓄电池, 不仅提高了废旧蓄电池的回收效率, 还逐步提高了产品质量和生产技术。销售企业回收。零售商不仅要销售产品, 还要主动展开电动汽车电池的回收工作。在这个过程中, 经销商可以直接与消费者合作, 使回收过程更加高效便捷。回收和拆解公司回收。利用专业回收商和拆解商建立回收网络,

使回收商和拆解商、贸易商和生产企业相辅相成, 回收商和拆解商可以同时为多家生产企业服务, 形成规模经济。

3. 碳交易政策下闭环供应链合作决策研究

碳交易政策的实施也意味着新能源汽车行业必须采取措施减少碳排放。在新能源汽车电池供应链封闭的情况下, 在最初的电池制造过程中投资减排是实现脱碳目标的有效途径[7]。一旦能源电池达到使用寿命, 报废电池可根据其质量水平进行分类。质量好的报废电池可作为清洁储能设备使用, 在不同场景下可继续供电; 而质量差、剩余容量较小的报废电池则可拆卸回收, 提取贵金属等原材料, 然后进行再加工, 在回收过程中会产生一定量的二氧化碳排放。在此背景下, 本章以电池生产商、汽车制造商和第三方回收商的二级闭环供应链为研究对象[8], 同时考虑报废电池质量对回收价格的影响, 以及电池生产商的减排水平对新能源汽车需求的影响, 建立博弈模型, 求解三种情况下企业的定价决策和利润水平, 并比较均衡结果。

3.1. 问题描述与模型假设

本章所研究的新能源汽车闭环供应链由单一电池生产商、单一乘用车制造商和单一第三方回收商组成, 形成正向和逆向链接的闭环。

3.1.1. 问题描述

在新能源汽车闭环供应链系统的正向销售渠道中, 电池生产商处于主导地位进行动力电池与储能电池的制造与销售, 并对回购的低质量退役电池进行再制造, 同时研发低碳技术对电池制造与再制造过程进行减排, 乘用车制造商作为跟随者负责利用动力电池进行新能源汽车的生产与销售[9]。在逆向回收渠道中, 第三方回收商作为跟随者负责从新能源汽车消费市场回收退役电池, 处理分类后对退役电池进行梯次利用。在碳交易市场, 电池生产商可根据政府分配的免费碳排放配额 E_g 进行碳交易, 若实际碳排放量超出碳配额约束, 则需购买额度; 相反, 若实际碳排放量低于碳配额约束, 则可以出售多余额度来获取收益。闭环供应链的运作流程见图 1。

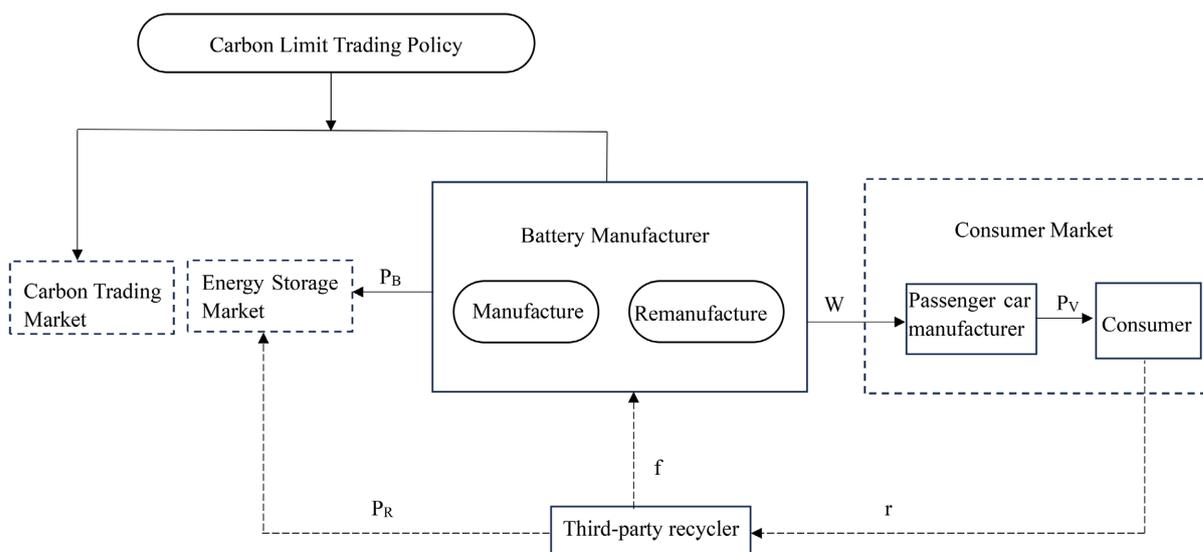


Figure 1. Operation process of closed-loop supply chain of new energy vehicles under carbon trading policy

图 1. 碳交易政策下新能源汽车闭环供应链运作流程

在新能源汽车闭环供应链系统中, 决策主体间进行博弈, 即电池生产商首先决策动力电池批发价格 W 、储能电池销售价格 P_B 、最大单位回购价格 u 和减排水平 e , 其次乘用车制造商根据电池生产商的决策结果决定新能源汽车销售价格 P_V , 第三方回收决定梯次利用电池销售价格 P_R 和单位回收利润率 s , 具体决定顺序, 见图 2。

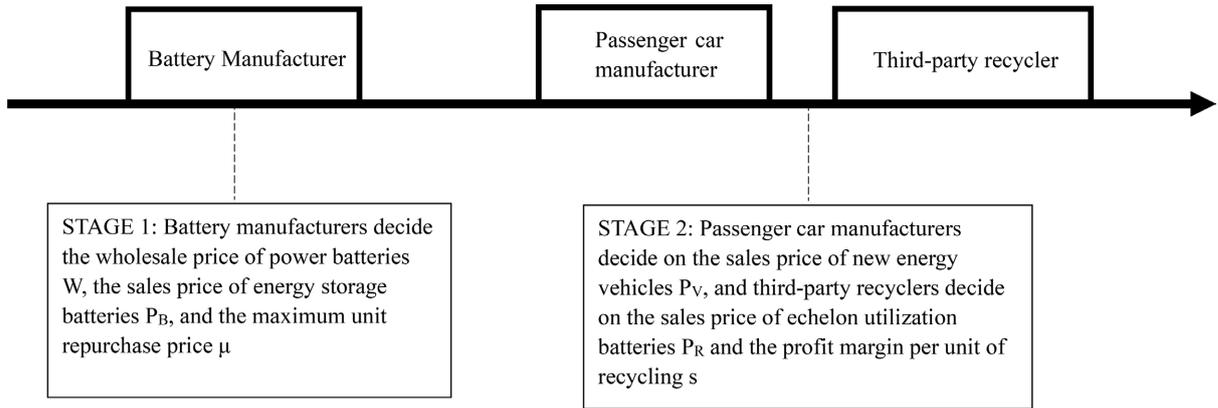


Figure 2. Decision sequence of closed-loop supply chain of new energy vehicles
图 2. 新能源汽车闭环供应链决策顺序

上述决策变量和其他参数解释, 详见表 1 决策变量及其他参数说明。

Table 1. Decision variables and other parameters

表 1. 决策变量及其他参数说明

决策变量	含义
电池生产商决策变量	W 动力电池批发价格
	P_B 储能电池销售价格
	u 最大单位回购价格
乘用车制造商决策变量	P_V 新能源汽车销售价格
第三方回收商决策变量	P_R 梯次利用电池销售价格
	s 第三方回收商在回收过程中的单位利润率
电池生产商参数	c_n 单位新制造电池生产成本
	c_r 单位再制造电池生产成本
	e_n 单位新制造过程碳排放
	e_r 单位再制造过程碳排放
	P_e 碳交易价格
	E_g 政府分配的免费碳排放配额
	k 减排成本系数
	β 消费者对碳减排的敏感系数
	E 生产过程实际碳排放量
	e 单位减排水平
f 回购价格	

续表

	D_B	储能电池市场需求量
	B	储能电池市场规模
	Q_M	可被再制造的退役动力电池数量
乘用车制造商参数	γ	新能源汽车消费者对销售价格的敏感系数
	D_V	新能源汽车市场需求量
	A	洗呢能源汽车市场规模
第三方回收商参数	φ	储能市场对梯次利用电池的消费偏好系数
	D_R	梯次利用电池市场需求量
	$Q(x)$ 或 Q	退役动力电池回收量
	q_0	市场中退役动力电池基本可回收量
	λ	消费者对回收价格的敏感系数
其他参数	x	退役动力电池质量
	θ_1	减排成本共担契约下乘用车制造商减排成本共担比例
	θ_2	回收成本共担契约下乘用车制造商减排成本共担比例
	θ_3	减排 - 回收成本共担契约下乘用车制造商减排 - 回购成本共担比例
	π_i	$i = S, M, R, SC$ 分别表示电池生产商、乘用车制造商及供应链整体利润

用上标商标 0, d , c , s_1 , s_2 , s_3 分别表示电池生产商无减排投入分散决策情形、电池生产商减排投入分散决策情形、电池生产商减排投入集中决策情形、减排成本共担合作决策情形、回收成本共担合作决策情形、减排 - 回购成本决策情形。

3.1.2. 模型假设

为方便分析, 本章做出如下基本假设:

假设 1: 电池生产商、乘用车制造商和第三方回收商共享市场信息, 各决策者均为风险中性, 为聚焦于碳交易政策对供应链决策影响机理的研究, 本章仅对单周期闭环供应链进行研究。

假设 2: 销售过程中, 新能源汽车需求量受新能源汽车销售价格影响, 与销售价格 P_V 线性负相关, 假设新制造与再制造的动力电池性能上无明显差异并销往同一市场, 新能源汽车需求量为 $D_V = A - \gamma P_V$, AA 为新能源汽车市场潜在需求, $\gamma > 0$ 为消费者敏感系数。

假设 3: 储能市场根据发电侧配置储能需求, 对新储能电池和梯次利用电池具有不同的支付意愿, 假设储能市场对新电池的支付意愿 σ 服从 $[0, B]$ 的均匀分布, 支付梯次利用电池的意愿为 $\varphi\sigma$, $\varphi \in (0, 1)$ 表示对梯次利用电池的消费偏好系数, 由此可得购买单位新储能电池和梯次利用电池的效用函数为 $U_B = \sigma - P_B$, $U_R = \varphi\sigma - P_R$, 进一步得到新储能电池和梯次利用电池的需求函数为

$$D_B = B - \frac{P_B - P_R}{1 - \varphi}, \quad D_R = B - \frac{P_B - P_R}{1 - \varphi}.$$

假设 4: 回收过程中, 电池生产商首先确定从第三方回收商处回购低质量退役动力电池的价格 f , 参考杨晋瑶等的假设, 假设电池生产商的回购价格是退役动力电池质量的线性增函数, 即 $f = ux$, $x \in (0, 1)$ 为退役电池质量系数, 其值越大表示动力电池损耗程度越低, 退役动力电池质量越好, u 是电池

生产商愿意支付的最大单位回购价格, 表示退役电池质量越高, 电池生产商愿意支付的回购价格越高。随后第三方回收商结合电池生产商决策进行回收价格差别定价 r , 满足 $r = (1-s)f$, s 表示第三方回收商在回收过程中的单位利润率。

假设 5: 退役动力电池回收数量是回收价格的线性增函数, 即 $Q(x) = q_0 + \lambda r$, 其中 $q_0 > 0$ 表示新能源汽车消费市场中退役动力电池基本可回收量, λ 表示消费者对回收价格的敏感系数。经过第三方回收商处理分类后, 用于分解再制造的退役动力电池数量为 $Q_M = (1-x)Q(x)$ 。

假设 6: 电池生产商生产新电池与再制造电池的成本分别为 c_n, c_r , 满足关系 $c_r = (1-x)c_n$, 碳排放量分别为 e_n, e_r , 其中 $e_r = (1-x)e_n$, 表示退役电池质量越高, 再制造成本越低、碳排放量越少。

假设 7: 为保证新能源汽车闭环供应链中电池生产商、乘用车制造商和第三方回收商均可获得收益, 假设闭环供应链中各主体决策过程满足关系 $P_V > W > P_B > P_R > c_n > c_r > P_e$ 。

3.2. 碳交易政策下闭环供应链决策

3.2.1. 电池生产商无减排投入分散决策

在此情形下, 电池生产商进行电池的新制造与再制造, 将动力电池销售给乘用车制造商, 将储能电池销往储能市场[10], 乘用车制造商利用动力电池制造新能源汽车并销售, 新能源汽车市场需求仅受销售价格影响, 第三方回收商对退役电池进行回收并进行分类处理。电池生产商、乘用车制造商及第三方回收商利润为

$$\pi_S^0 = WD_V - c_n(D_V + D_B - Q_M) + P_B D_B - fQ_M - c_r Q_M - P_e(E - E_g) \quad (3.1)$$

$$\pi_M^0 = (P_V - W)D_V \quad (3.2)$$

$$\pi_R^0 = fQ_M + P_R D_R - rQ(x) \quad (3.3)$$

电池生产商、乘用车制造商和第三方回收商以各自利润最大化为原则进行博弈, 决策顺序为: 电池生产商先决定动力电池批发价格 W 、储能电池销售价格 P_B 和最大单位回购价格 u , 随后乘用车制造商根据电池生产商决策结果决定新能源汽车销售价格 P_V , 第三方回收商决定梯次利用电池销售价格 P_R 和单位回收利润率 s 。

采用逆向归纳法, 首先求解乘用车制造商的最有新能源销售价格 $\frac{\partial \pi_M^0}{\partial P_V} = A + \gamma W - \gamma P_V$, 由于 $\frac{\partial^2 \pi_M^0}{\partial P_V^2} = -2\gamma < 0$, 因此 π_M^0 是关于 P_V 开口向下的二次函数, 令 $\frac{\partial^2 \pi_M^0}{\partial P_V^2} = 0$, 得到 $P_V^* = \frac{A + \gamma W}{2\gamma}$ 。

其次求解第三方回收商最优梯次利用电池销售价格和最优单位回收率, 求解 π_R^0 关于 P_R 与 s 的一阶导数为 $\frac{\partial \pi_R^0}{\partial P_R} = \frac{P_B}{1-\varphi} - \frac{2P_R}{\varphi(1-\varphi)}$, $\frac{\partial \pi_R^0}{\partial s} = -\lambda u^2 x^2 (1-x) + q_0 x u + 2\lambda u^2 x^2 - 2\lambda u^2 x^2 s$, 由于 $\frac{\partial^2 \pi_R^0}{\partial P_R^2} = \frac{2}{\varphi(1-\varphi)} < 0$,

$\frac{\partial^2 \pi_R^0}{\partial s^2} = -2\lambda u^2 x^2 < 0$, 即 π_R^0 是关于 P_R 与 s 的开口向下二次函数, 令 $\frac{\partial \pi_R^0}{\partial P_R} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_R^0}{\partial s} = 0$ 得到最优梯次利

用电池销售价格为 $P_R^* = \frac{\varphi}{2} P_B$ 和最优单位回收率 $s^* = \frac{1+x}{2} + \frac{q_0}{2\lambda u x}$ 。

将 P_V^*, P_R^*, s^* 代入式(3.1)中, 得到 π_S^0 关于 W, P_B 与 u 的一阶导数为: $\frac{\partial \pi_S^0}{\partial W} = \frac{A + \gamma c_n + \gamma P_e e_n}{2} - \gamma W$,

$\frac{\partial \pi_S^0}{\partial P_B} = \frac{(2-\varphi)(c_n + P_e e_n)}{2(1-\varphi)} + B - \frac{2-\varphi}{1-\varphi} P_B$, $\frac{\partial \pi_S^0}{\partial u} = -\frac{q_0(1-x)}{2} - \lambda u x^2 (1-x)^2 + \frac{(c_n + P_e e_n)\lambda x^2 (1-x)^2}{2}$, 由于

$\frac{\partial^2 \pi_S^0}{\partial W} = -\gamma < 0$, $\frac{\partial^2 \pi_S^0}{\partial P_B^2} = -\frac{(2-\varphi)}{1-\varphi} < 0$, $\frac{\partial^2 \pi_S^0}{\partial u^2} = -\lambda x^2 (1-x)^2 < 0$, 即 π_S^0 是关于 W 、 P_B 与 s 的开口向下二次函数, 令 $\frac{\partial \pi_S^0}{\partial W} = 0$, $\frac{\partial \pi_S^0}{\partial P_B} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_S^0}{\partial u} = 0$, 得到最优的动力电池批发价格、储能电池销售价格和最大单位回购价格为:

$$W^{0*} = \frac{A + \gamma(c_n + P_e e_n)}{2\gamma} \tag{3.4}$$

$$P_B^{0*} = \frac{(2-\varphi)(c_n + P_e e_n) + 2B(1-\varphi)}{2(2-\varphi)} \tag{3.5}$$

$$u^{0*} = \frac{(c_n + P_e e_n)x(1-x)\lambda - q_0}{2x(1-x)\lambda} \tag{3.6}$$

将(3.4)代入 P_V^{0*} 的表达式, 得到

$$P_V^{0*} = \frac{3A + \gamma(c_n + P_e e_n)}{4\gamma} \tag{3.7}$$

将(3.5)代入 P_R^{0*} 的表达式, 得到

$$P_R^{0*} = \frac{(2-\varphi)\varphi(c_n + P_e e_n) + 2\varphi B(1-\varphi)}{4(2-\varphi)} \tag{3.8}$$

将(3.6)代入 s^{0*} 的表达式, 得到

$$s^{0*} = \frac{1+x}{2} + \frac{q_0(1-x)}{(c_n + P_e e_n)x(1-x)\lambda - q_0} \tag{3.9}$$

因此, 新能源汽车市场需求量为 $D_V^{0*} = \frac{A - \gamma(c_n + P_e e_n)}{4}$, 储能电池需求为

$$D_B^{0*} = \frac{2B(1-\varphi) - (2-\varphi)(c_n + P_e e_n)}{4(1-\varphi)}, \text{ 梯次利用电池需求量为 } D_R^{0*} = \frac{2B(1-\varphi) - (2-\varphi)(c_n + P_e e_n)}{4(1-\varphi)(2-\varphi)}, \text{ 退役电}$$

$$\text{池回收量 } Q^{0*} = \frac{q_0 + (c_n + P_e e_n)x(1-x)\lambda}{4}.$$

电池生产商、乘用车制造商、第三方回收商及供应链整体利润如下:

$$\begin{aligned} \pi_S^{0*} = & \frac{A^2 - \gamma^2(c_n + P_e e_n)^2}{8\gamma} - \frac{(c_n + P_e e_n)A - \gamma(c_n + P_e e_n)^2}{4} + \frac{4B^2(1-\varphi)^2 - (2-\varphi)^2(c_n + P_e e_n)^2}{8(1-\varphi)(2-\varphi)} \\ & - \frac{(c_n + P_e e_n)^2 x^2 (1-x)^2 \lambda^2 - q_0^2}{8\lambda} - \frac{2B(c_n + P_e e_n)(1-\varphi) - (2-\varphi)(c_n + P_e e_n)^2}{4(1-\varphi)} \end{aligned} \tag{3.10}$$

$$+ \frac{q_0(c_n + P_e e_n)x(1-x) + (c_n + P_e e_n)^2 x^2 (1-x)^2 \lambda^2}{4} + P_e E_g$$

$$\pi_M^{0*} = \frac{[A - \gamma(c_n + P_e e_n)]^2}{16\gamma} \tag{3.11}$$

$$\pi_R^{0*} = \frac{(c_n + P_e e_n)^2 x^2 (1-x)^2 \lambda^2 - q_0^2}{16\gamma} - \frac{q_0^2 + q_0 (c_n + P_e e_n) x(1-x) \lambda}{8\lambda} + \frac{4B(1-\varphi)(2-\varphi)\varphi(c_n + P_e e_n) + (2-\varphi)^2 \varphi (c_n + P_e e_n)^2 + 4\varphi B^2(1-\varphi)}{16(1-\varphi)(2-\varphi)^2} \quad (3.12)$$

$$\pi_{SC}^{0*} = \frac{3A^2 - \gamma^2 (c_n + P_e e_n)^2 - 2\gamma(c_n + P_e e_n)}{16\gamma} - \frac{(c_n + P_e e_n)A - \gamma(c_n + P_e e_n)^2}{4} - \frac{(c_n + P_e e_n)^2 x^2 (1-x)^2 \lambda^2 - q_0^2}{16\lambda} - \frac{q_0^2 + q_0 (c_n + P_e e_n) x(1-x) \lambda}{8\lambda} - \frac{2B(c_n + P_e e_n)(1-\varphi) - (2-\varphi)(c_n + P_e e_n)^2}{4(1-\varphi)} + \frac{4B^2(1-\varphi)^2 - (2-\varphi)^2 (c_n + P_e e_n)^2}{8(1-\varphi)(2-\varphi)} + \frac{4B(1-\varphi)(2-\varphi)\varphi(c_n + P_e e_n) + (2-\varphi)^2 \varphi (c_n + P_e e_n)^2 + 4\varphi B^2(1-\varphi)}{16(1-\varphi)(2-\varphi)^2} \quad (3.13)$$

通过对退役动力电池质量和碳交易价格进行求导分析, 得到相关参数对电池生产商无减排投入分散决策情形下均衡结果和利润的影响。

推论 3.1 电池生产商无减排投入分散决策情形下, 动力电池批发价格、储能电池销售价格、新能源汽车销售价格、梯次利用电池销售价格及乘用车制造商利润与退役动力电池质量 x 无关。当退役动力电池质量 $x \in (0, 1/2)$ 时电池生产商愿意支付的最大单位回购价格和电池生产商利润与退役动力电池质量正相关, 第三方回收商利润和供应链整体利润与退役动力电池质量负相关。退役动力电池质量 $x \in (1/2, 1)$ 时电池生产商愿意支付的最大单位回购价格和电池生产商利润与退役动力电池负相关, 第三方回收商利润和供应链整体利润与退役动力电池质量正相关。

证明: 对 W^{0*} 、 P_B^{0*} 、 u^{0*} 、 P_V^{0*} 、 P_R^{0*} 、 s^{0*} 、 π_S^{0*} 、 π_M^{0*} 、 π_R^{0*} 、 π_{SC}^{0*} 分别求解关于 x 的一阶偏导数可得:

$$\frac{\partial W^{0*}}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial P_B^{0*}}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial P_V^{0*}}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial P_R^{0*}}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial s^{0*}}{\partial x} = \frac{1}{2} + \frac{-(c_n + P_e e_n)x(1-x)\lambda + q_0 - (c_n + P_e e_n)(1-2x)\lambda}{[(c_n + P_e e_n)x(1-x)\lambda - q_0]^2} < 0,$$

$$\frac{\partial u^{0*}}{\partial x} = \frac{1-2x}{4x^2(1-x)^2}, \quad \frac{\partial \pi_M^{0*}}{\partial x} = 0。$$

$$\text{当 } 0 < x < 1/2 \text{ 时, } \frac{\partial u^{0*}}{\partial x} = \frac{1-2x}{4x^2(1-x)^2} > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_S^{0*}}{\partial x} = \left[\frac{3(c_n + P_e e_n)^2 (2x - 6x^2 + 4x^3) \lambda}{8\lambda} + \frac{q_0 (c_n + P_e e_n) (1-2x)}{4} \right] > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_R^{0*}}{\partial x} = \frac{(c_n + P_e e_n)^2 (2x - 6x^2 + 4x^3) \lambda - 2q_0 (c_n + P_e e_n) (1-2x)}{16} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_{SC}^{0*}}{\partial x} = - \left[\frac{(c_n + P_e e_n)^2 (2x - 6x^2 + 4x^3) \lambda + 2q_0 (c_n + P_e e_n) (1-2x)}{16} \right] > 0。$$

推论 3.1 证毕。

推论 3.1 表明, 在电池生产商未投入减排技术时, 动力电池批发价格、储能电池销售价格、新能源汽车销售价格和梯次利用电池销售价格不受退役动力电池质量影响[11]。其次, 当退役动力电池质量低于

平均水平时, 回收价格和回收数量随着退役动力电池质量的增加而增加, 但高于平均水平时, 回收价格和回收数量随着退役动力电池质量的增加而减少, 因此第三方回收商在进行退役动力电池回收时, 要结合回收质量及时调整回收策略[12]。

推论 3.2 电池生产商无减排投入分散决策情形下, 动力电池批发价格、储能电池销售价格、最大单位回购价格、新能源汽车销售价格、梯次利用电池销售价格随着碳交易价格 P_e 的增大而增大, 但是第三方回收商单位回收利润率随着碳交易价格 P_e 的增加。

$$\text{证明, 对于对 } W^0, P_B^0, u^0, P_V^0, P_R^0, s^0 \text{ 分别求解关于 } P_e \text{ 的一阶偏导数可得: } \frac{\partial W^0}{\partial P_e} = \frac{e_n}{2} > 0, \\ \frac{\partial P_B^0}{\partial P_e} = \frac{e_n}{2} > 0, \quad \frac{\partial u^0}{\partial P_e} = \frac{e_n}{2} > 0, \quad \frac{\partial P_V^0}{\partial P_e} = \frac{e_n}{4} > 0, \quad \frac{\partial P_R^0}{\partial P_e} = \frac{e_n}{4} > 0, \quad \frac{\partial s^0}{\partial P_e} = \frac{-x(1-x)\lambda e_n}{[(c_n + P_e e_n)x(1-x)\lambda - q_0]^2} < 0.$$

推论 3.2 证毕。

推论 3.2 表明, 在电池生产商无减排投入分散决策情形下, 提高碳交易价格能够促进退役动力电池回收和推动碳减排。碳交易价格的上升促使电池生产商加大回收进行再制造, 进而提高碳减排获得更多的剩余碳排放权, 相应地第三方回收商降低回收价格的利润率来回收更多的退役动力电池, 提高经济收入, 退役动力电池回收量相应提升, 同时从关系式 $\frac{\partial P_R^0}{\partial P_e} = \frac{e_n}{4} > \frac{(1-x)e_n}{4} = \frac{\partial f^0}{\partial P_e} > 0$ 中可以发现, 梯次利用电池销售价格受碳交易价格影响的变化幅度大于回收价格的变化幅度, 从而梯次利用电池的市场需求会有所降低, 提高碳交易价格不利于第三方回收商对退役动力电池进行梯次利用[13]。此时, 碳交易政策对供应链主体的利益调控是抑制碳排放的关键渠道, 电池生产商作为碳交易政策执行链中主要接受者[14], 其受到碳交易政策的影响不可避免地会传递给闭环供应链下一环节的成员, 即乘用车制造商和第三方回收商, 因此决策结果也相应地发生变化。

3.2.2. 电池生产商减排投入分散决策

在此情形下, 电池生产商除了负责电池的新制造、再制造与销售以外, 还需独立承担减排成本, 碳减排成本 $c(e)$ 与生产单位电池减排量 e 的关系可表示为 $c(e) = \frac{ke^2}{2}$, k 表示减排成本系数。引入减排技术后, 生产新电池单位碳排放量表示为 $e_n - e$, 相应的在制造电池单位碳排放量为 $(1-k)(e_n - e)$ 。受到减排收入的影响, 新能源汽车的市场需求变为 $D_V = A - \gamma P_V + \beta e$, $0 < \beta < 1$ 表示需求对碳排放的敏感系数。此时电池生产商、乘用车制造商及第三方回收商利润为:

$$\pi_S^d = WD_V - c_n(D_V + D_B - Q_M) + P_B D_B - fQ_M - c_r Q_M - P_e(E - E_g) - \frac{ke^2}{2} \tag{3.14}$$

$$\pi_M^d = (P_V - W)D_V \tag{3.15}$$

$$\pi_R^d = fQ_M + P_B D_B - rQ(x) \tag{3.16}$$

根据逆推法, 求解给定 W 条件下, 乘用车制造商利润 π_M^d 关于 P_V 的一阶导数为:

$$\frac{\partial \pi_M^d}{\partial P_e} = A + \gamma W + \beta e - 2\gamma P_V, \text{ 由于 } \frac{\partial^2 \pi_M^d}{\partial P_V^2} = -2\gamma < 0, \text{ 因此 } \pi_M^d \text{ 是关于 } P_V \text{ 开口向下的二次函数。令 } \frac{\partial \pi_M^d}{\partial P_V} = 0,$$

$$\text{得到 } P_V^d = \frac{A + \gamma W + \beta e}{2\gamma}.$$

其次求解第三方回收商最优梯次利用电池销售价格和最优单位回收率, 求解 π_R^d 关于 P_R 与 s 的一阶导

数为: $\frac{\partial \pi_R^d}{\partial P_R} = \frac{P_B}{1-\varphi} - \frac{2P_R}{\varphi(1-\varphi)}$, $\frac{\partial \pi_R^d}{\partial S} = -\lambda u^2 x^2 (1-x) + q_0 x u + 2\lambda u^2 x^2 s$, 由于 $\frac{\partial^2 \pi_R^d}{\partial P_R^2} = -\frac{2}{\varphi(1-\varphi)} < 0$, $\frac{\partial^2 \pi_R^d}{\partial S^2} = -2\lambda u^2 x^2 < 0$, 即 π_R^d 关于 P_R 与 s 的开口向下二次函数, 令 $\frac{\partial \pi_R^d}{\partial P_R} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_R^d}{\partial S} = 0$, 得到最优梯次利

用电池销售价格为 $P_R^{d*} = \frac{\varphi}{2} P_B$ 和最优单位回收利润率 $s^{d*} = \frac{1+x}{2} + \frac{q_0}{2\lambda u x}$ 。

将 P_V^{d*} 、 P_R^{d*} 和 s^{d*} 代入式(3.14)中, 得到 π_s^d 关于 W 、 P_B 与 u 的一阶导数为:

$$\frac{\partial \pi_s^d}{\partial W} = \frac{A + \beta e + \gamma c_n + \gamma P_e (e_n - e)}{2} - \gamma W, \quad \frac{\partial \pi_s^d}{\partial P_B} = \frac{(2-\varphi)(c_n + P_e (e_n - e))}{2(1-\varphi)} + B - \frac{2-\varphi}{1-\varphi} P_B,$$

$$\frac{\partial \pi_s^d}{\partial u} = -\frac{q_0(1-x)x}{2} - \lambda u x^2 (1-x)^2 + \frac{(c_n + P_e (e_n - e))\lambda x^2 (1-x)^2}{2}, \text{ 由于 } \frac{\partial^2 \pi_s^d}{\partial W^2} = -\gamma < 0, \quad \frac{\partial^2 \pi_s^d}{\partial P_B^2} = -\frac{2-\varphi}{1-\varphi} < 0,$$

$$\frac{\partial^2 \pi_s^d}{\partial u^2} = -\lambda x^2 (1-x)^2 < 0, \text{ 即 } \pi_s^d \text{ 是关于 } W、P_B \text{ 与 } s \text{ 的开口向下二次函数, 令 } \frac{\partial \pi_s^d}{\partial W} = 0, \quad \frac{\partial \pi_s^d}{\partial P_B} = 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_s^d}{\partial u} = 0,$$

得到最优的动力电池批发价格、储能电池销售价格和最大单位回购价格为:

将(3.17)代入 P_V^{0*} 的表达式, 得到

$$P_V^{d*} = \frac{3(A + \beta e) + \gamma(c_n + P_e (e_n - e))}{4\gamma} \tag{3.20}$$

将(3.17)代入 P_R^{0*} 的表达式, 得到

$$P_R^{d*} = \frac{(2-\varphi)\varphi(c_n + P_e (e_n - e)) + 2\varphi B(1-\varphi)}{4(2-\varphi)} \tag{3.21}$$

将(3.19)代入 P_V^{0*} 的表达式, 得到

$$S^{d*} = \frac{1+x}{2} + \frac{q_0(1-x)}{(c_n + P_e (e_n - e))x(1-x)\lambda - q_0} \tag{3.22}$$

因此, 新能源汽车市场需求量为 $D_V^{d*} = \frac{A + \beta e - \gamma(c_n + P_e (e_n - e))}{4}$, 储能电池需求为

$$D_B^{d*} = \frac{2B(1-\varphi) - (2-\varphi)(c_n + P_e (e_n - e))}{4(1-\varphi)}, \text{ 梯次利用电池需求量为 } D_R^{d*} = \frac{2B(1-\varphi) + (2-\varphi)(c_n + P_e (e_n - e))}{4(1-\varphi)(2-\varphi)},$$

$$Q^{d*} = \frac{q_0 + (c_n + P_e (e_n - e))x(1-x)\lambda}{4}。$$

电池生产商、乘用车制造商、第三方回收商及供应链整体利润如下:

$$\begin{aligned} \pi_s^{d*} &= \frac{(A + \beta e)^2 - \gamma^2 (c_n + P_e e_n)^2}{8\gamma} - \frac{(c_n + P_e (e_n - e))(A + \beta e) - \gamma(c_n + P_e e_n)^2}{4} \\ &+ P_e E_g - \frac{ke^2}{2} + \frac{4B^2(1-\varphi)^2 - (2-\varphi)^2 (c_n + P_e e_n)^2}{8(1-\varphi)(2-\varphi)} \\ &- \frac{2B(c_n + P_e (e_n - e))(1-\varphi) - (2-\varphi)(c_n + P_e (e_n - e))^2}{8\lambda} - \frac{(c_n + P_e (e_n - e))^2 x^2 (1-x)^2 \lambda^2 - q^2}{4(1-\varphi)} \\ &+ \frac{q_0(c_n + P_e (e_n - e))x(1-x) + (c_n + P_e e_n)^2 x^2 (1-x)^2 \lambda^2}{4} \end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\pi_M^d = \frac{[(A + \beta e) - \gamma(c_n + P_e e_n)]^2}{16\gamma} \tag{3.24}$$

$$\begin{aligned} \pi_R^d = & \frac{(c_n + P_e(e_n - e))^2 x^2 (1-x)^2 \lambda^2 - q_0^2}{16\gamma} - \frac{q_0^2 + (c_n + P_e(e_n - e))x(1-x)\lambda q_0}{8\lambda} \\ & + \frac{4B(1-\varphi)(2-\varphi)\varphi(c_n + P_e(e_n - e)) + (2-\varphi)^2 \varphi(c_n + P_e(e_n - e))^2 + 4\varphi B^2(1-\varphi)}{16(1-\varphi)(2-\varphi)^2} \end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned} \pi_{SC}^d = & \frac{3(A + \beta e)^2 - \gamma^2(c_n + P_e(e_n - e))^2 - 2\gamma(c_n + P_e(e_n - e))}{16\gamma} + P_E E_g \\ & - \frac{ke^2}{2} - \frac{(c_n + P_e(e_n - e))(A + \beta e) - \gamma(c_n + P_e(e_n - e))^2}{4} + \frac{4B^2(1-\varphi)^2 - (2-\varphi)^2(c_n + P_e(e_n - e))^2}{8(1-\varphi)(2-\varphi)} \\ & - \frac{2B(c_n + P_e(e_n - e))(1-\varphi) - (2-\varphi)(c_n + P_e(e_n - e))^2}{16\lambda} - \frac{q_0^2 + (c_n + P_e(e_n - e))x(1-x)\lambda q_0}{8\lambda} \\ & + \frac{4B(1-\varphi)(2-\varphi)\varphi(c_n + P_e(e_n - e)) + (2-\varphi)^2 \varphi(c_n + P_e(e_n - e))^2 + 4\varphi B^2(1-\varphi)}{4(1-\varphi)} \\ & - \frac{(c_n + P_e(e_n - e))^2 x^2 (1-x)^2 \lambda^2 - q_0^2}{16\lambda} \end{aligned} \tag{3.26}$$

进一步求解得到 π_s^d 关于 e 的一阶导数为: $\frac{\partial \pi_s^d}{\partial e} = G_1 e^2 - H_1 e - \frac{k}{2} e^2$, 其中

$$G_1 = \frac{\beta^2(1-\varphi) + 2\beta\gamma(1-\varphi) + P_e^2\gamma^2(1-\varphi) + \gamma(2-\varphi)P_e^2 + P_e^2x^2(1-x)^2\lambda\gamma(1-\varphi)}{8(1-\varphi)},$$

$$H_1 = \frac{c_n(\beta + \gamma P_e)}{4} + \frac{(2-\varphi)P_e c_n}{4(1-\varphi)} + \frac{P_e c_n x^2(1-x)^2 \lambda}{4} + \frac{q_0 x P_e}{4},$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_s^d}{\partial e^2} = 2G_1 e^2 - H_1 e - \frac{k}{2} e^2$, 因此 π_s^d 是关于

e 的开口向下二次函数, 因此令 $\frac{\partial \pi_s^d}{\partial e} = 0$ 得到 $e^{d*} = \frac{H_1}{2G_1 - k}$ 。

通过对碳减排水平、碳交易价格和退役动力电池质量的求导分析, 得到相关参数对电池生产商分散决策情形下均衡结果、最优利润和减排水平的影响。

推论 3.3: 在电池生产商减排投入分散决策情形下, 动力电池批发价格、储能电池销售价格、新能源汽车批发价格、梯次利用电池销售价格随着电池生产商减排水平 e 的增加而减小, 但第三方回收商单位回收利润率、电池生产商利润、乘用车制造商利润、第三方回收商利润及供应链整体利润随着电池生产商减排水平 e 的增加而增加。

证明过程与推论 3.1 类似, 此处不再赘述。

推论 3.3 表明, 在电池生产商减排投入分散决策情形下, 电池生产商能够通过提升碳减排水平来提高企业利润, 这是由于减排投入的增加导致电池生产商减排成本增加, 但为保障利润收入, 电池生产商可以相应地降低动力电池批发价格和储能电池销售价格以增加电池的销售量。相应地, 乘用车制造商基于电池生产商的决策也降低了新能源汽车销售价格, 同时电池生产商降低回购价格以减少回购成本, 第三方回收商降低梯次利用电池销售价格以增加梯次利用电池销售量, 且通过提升单位回收利润率来降低回收价格, 减少回收成本, 维持收益。因此, 在利润导向的市场机制下[15], 碳

交易政策刺激着碳减排投入的增加, 供应链成员企业的利润会呈现上升的趋势, 政策影响的传递在闭环供应链中表现以价格为变量的形式, 表现在动力电池生产环节到回收环节的主体间的逐次渗透与传递[16]。

推论 3.4 电池生产商减排投入分散决策情形下, 电池生产商减排水平 e 随着碳交易价格 P_e 的增加而增加, 随着退役动力电池质量 x 的增加而增加。

证明: e^{d^*} 分别对 P_e 和 x 求一阶导数:

$$\frac{\partial e^{d^*}}{\partial P_e} = \frac{\frac{\gamma c_n(1-\varphi) + (2-\varphi) + q_0 x(1-\varphi)}{4(1-\varphi)}(2G_1 - k) - 2 \frac{\gamma^2 P_e(1-\varphi) + \gamma P_e(2-\varphi) + \lambda P_e(1-\varphi)^2 \gamma x^2(1-x)^2}{4\gamma(1-\varphi)}}{[2G_1 - k]^2} > 0,$$

$$\frac{\partial e^{d^*}}{\partial x} = \frac{(2x - 6x^2 + 4x^3)\lambda P_e(c_n - P_e)}{4(2G_1 - k)} > 0.$$

推论 3.4 证毕。

推论 3.4 表明, 在电池生产商减排投入分散决策情形下, 碳减排技术投入是碳交易政策发挥效能的关键渠道, 提高碳交易价格可以激励电池生产商提升碳减排量。此外, 退役动力电池质量越高[17], 电池生产商碳减排量越高, 这是由于退役动力电池质量的提升会导致回收量的增加, 用于再制造的退役动力电池数量相应增加。虽然退役动力电池质量越好, 再制造环节的碳排放量越少, 但再制造电池数量随质量增加的幅度大于再制造碳排放随质量减少的幅度[18], 再制造环节的碳排放量整体仍呈现上升趋势, 因此电池生产商仍需要加大减排投入。

3.2.3. 电池生产商减排投入集中决策

在此情形下, 闭环供应链作为一个整体进行新能源汽车销售价格、储能电池销售价格、梯次利用电池销售价格、单位回收利润率决策, 则供应链整体利润为:

$$\pi_{SC}^C = P_V D_V - c_n(D_V + D_B - Q_M) + P_B D_B - c_r Q_M - P_e(E - E_g) - \frac{ke^2}{2} + P_R D_R - rQ(x) \quad (3.27)$$

$$\pi_{SC}^C \text{ 分别对 } P_V, P_B, P_R, s \text{ 求一阶导数为: } \frac{\partial \pi_{SC}^C}{\partial P_V} = (c_n + P_e(e_n - e))\gamma + A + \beta e - 2\gamma P_V,$$

$$\frac{\partial \pi_{SC}^C}{\partial P_B} = \frac{-(c_n + P_e(e_n - e))}{1-\varphi} + B - \frac{2}{1-\varphi} P_B + \frac{2}{1-\varphi} P_R, \quad \frac{\partial \pi_{SC}^C}{\partial P_R} = \frac{-(c_n + P_e(e_n - e))}{1-\varphi} + \frac{2}{1-\varphi} P_B - \frac{2}{\varphi(1-\varphi)} P_R,$$

$$\frac{\partial \pi_{SC}^C}{\partial S} = -(c_n + P_e(e_n - e))(1-x)xu\lambda + uxq_0 + 2\lambda u^2 x^2 - 2\lambda u^2 x^2 s. \text{ 由于 } \frac{\partial^2 \pi_{SC}^C}{\partial S^2} = -2\lambda u^2 x^2 < 0. \text{ 因此 } \pi_{SC}^C \text{ 关于 } P_V$$

和 s 的开口向下二次函数, 因此令 $\frac{\partial \pi_{SC}^C}{\partial P_V} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_{SC}^C}{\partial S}$ 得到电池生产商减排投入集中决策情形下最优新能源汽车销售价格和单位回收利润率决策:

$$P_B^{C^*} = \frac{A + \beta e + \gamma(c_n + P_e(e_n - e))}{2\gamma} \quad (3.28)$$

$$S^{C^*} = \frac{q_0 - (c_n + P_e(e_n - e))(1-x)\lambda}{2\lambda ux} \quad (3.29)$$

此外 π_{SC}^C 关于 P_B 和 P_R 的矩阵 $H_{(P_B, P_R)}^C = \begin{bmatrix} -\frac{2}{1-\varphi} & \frac{2}{1-\varphi} \\ +\frac{2}{1-\varphi} & -\frac{2}{\varphi(1-\varphi)} \end{bmatrix}$ 。由于 $\frac{\partial^2 \pi_{SC}^C}{\partial P_B^2} = -\frac{2}{1-\varphi} < 0$,

$\frac{\partial^2 \pi_{SC}^C}{\partial P_R^2} = -\frac{2}{\varphi(1-\varphi)} < 0$, 且 $\begin{bmatrix} -\frac{2}{1-\varphi} & \frac{2}{1-\varphi} \\ +\frac{2}{1-\varphi} & -\frac{2}{\varphi(1-\varphi)} \end{bmatrix} > 0$, $H_{(P_B, P_R)}^C$ 为负定矩阵, π_R^0 是关于 P_B 和 P_R 的联合凹函

数, 令 $\frac{\partial \pi_{SC}^C}{\partial P_B} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_{SC}^C}{\partial P_R} = 0$, 得到电池生产商减排投入集中决策情形下最优储能电池销售价格和梯次利用电池销售价格:

$$P_B^{C^*} = \frac{(c_n + P_e(e_n - e)) + B}{2} \tag{3.30}$$

$$P_B^{C^*} = \frac{\varrho}{2} B \tag{3.31}$$

因此, 新能源汽车市场需求量为 $D_V^{C^*} = \frac{A + \beta e - \gamma(c_n + P_e e_n - e)}{4}$, 储能电池需求为

$$D_B^{C^*} = \frac{B(1-\varphi) - (c_n + P_e e_n - e)}{2(1-\varphi)}, \text{ 梯次利用电池需求量为 } D_R^{C^*} = \frac{(c_n + P_e e_n - e)}{2(1-\varphi)},$$

$$Q^{C^*} = \frac{B(1-\varphi) - (c_n + P_e e_n - e)}{2 - (1-\varphi)}。$$

供应链整体利润为:

$$\begin{aligned} \pi_{SC}^{C^*} = & \frac{(A + \beta e)^2 - \gamma^2(c_n + P_e(e_n - e))^2}{8\gamma} - \frac{(c_n + P_e(e_n - e))(A + \beta e) - \gamma(c_n + P_e(e_n - e))^2}{4} \\ & - \frac{ke^2}{2} + P_e E_g + \frac{q_0(c_n + P_e(e_n - e))x(1-x) + (c_n + P_e(e_n - e))^2 x^2(1-x)^2 \lambda^2}{2} \\ & + \frac{B\varphi(c_n + P_e(e_n - e))}{2(1-\varphi)} - ux \left[\frac{q_0 + (c_n + P_e(e_n - e))x(1-x)\lambda}{2} \right] \\ & + \frac{q_0^2 - (c_n + P_e(e_n - e))^2 x^2(1-x)^2 \lambda^2}{4\lambda} + \frac{(4B\varphi - 2B - \varphi)(c_n + P_e(e_n - e)) + (c_n + P_e(e_n - e))^2 + B^2(1-\varphi)}{4(1-\varphi)} \end{aligned} \tag{3.32}$$

3.2.4. 结果分析

对比电池生产商无减排投入分散决策和电池生产商减排投入分散决策、电池生产商减排投入集中决策三种情形下的最优动力电池批发价格、储能电池销售价格、新能源汽车销售价格、梯次利用电池销售价格、最大单位回购价格、第三方回收商在回收过程中的单位利润率及最优利润, 进而探究在政府碳交易政策下电池生产商投入减排技术是否对新能源汽车闭环供应链有利[19], 从而为企业决策提供参考。

命题 3.1 电池生产商无减排投入分散决策和电池生产商减排投入分散决策情形下的均衡结果及利润之间的关系为: $W^{0^*} > W^{d^*}$, $P_B^{0^*} > P_B^{d^*}$, $u^{0^*} > u^{d^*}$, $P_V^{0^*} > P_V^{d^*}$, $P_R^{0^*} > P_R^{d^*}$, $s^{0^*} < s^{d^*}$, $\pi_S^{0^*} < \pi_S^{d^*}$, $\pi_M^{0^*} < \pi_M^{d^*}$, $\pi_R^{0^*} > \pi_R^{d^*}$, $\pi_{SC}^{0^*} < \pi_{SC}^{d^*}$ 。

证明: 对比电池生产商无减排投入分散决策和电池生产商减排投入分散决策情形下的最优动力电池批发价格、储能电池销售价格、新能源汽车销售价格、梯次利用电池销售价格、最大单位回购价格、第

三方回收商在回收过程中的单位利润率及最优利润, 得到 $\Delta W_1^* = W^{0^*} - W^{d^*} = \frac{(P_e \gamma - \beta)}{2} > 0$,

$$\Delta P_{B1}^* = P_B^{0^*} - P_B^{d^*} = \frac{P_e e}{2} > 0, \quad \Delta u_1^* = u^{0^*} - u^{d^*} = \frac{P_e e}{2} > 0, \quad \Delta P_{V1}^* = P_V^{0^*} - P_V^{d^*} = \frac{(P_e \gamma - 3\beta)e}{4\gamma} > 0,$$

$$\Delta P_{R1}^* = P_R^{0^*} - P_R^{d^*} = \frac{P_e e}{4} > 0, \quad \Delta s_1^* = s^{0^*} - s^{d^*} = \frac{-P_e e x(1-x)\lambda}{\left[(c_n + P_e e_n - e)x(1-x)\lambda - q_0 \right] \left[(c_n + P_e e_n)x(1-x)\lambda - q_0 \right]} < 0,$$

$$\Delta s_{M1}^* = \pi_M^{0^*} - \pi_M^{d^*} < 0, \quad \Delta \pi_{R1}^* = \pi_R^{0^*} - \pi_R^{d^*} > 0, \quad \Delta \pi_{SC1}^* = \pi_{SC}^{0^*} - \pi_{SC}^{d^*} < 0.$$

命题 3.1 证毕。

命题 3.1 表明, 相较于电池生产商无减排投入分散决策情形, 电池生产商减排投入情形下的动力电池批发价格、储能电池销售价格、新能源汽车销售价格、梯次利用电池销售价格和最大单位回购价格更低, 新能源汽车需求量、储能电池需求量和梯次利用电池需求量更高, 退役动力电池回收量更低。这说明电池生产商减排投入能够刺激新能源汽车消费市场和储能市场的消费需求。此时, 电池生产商通过减少回购价格以此减少电池再制造量, 减少回收过程中的成本支出, 减轻投入碳减排技术后总成本增加造成的影响。与此同时, 第三方回收商为保障自身收益会实行提高回收价格, 并且降低梯次利用电池销售价格以扩大梯次利用电池需求量, 导致利润较减排投入前更低。此外, 电池生产商加大投入减排技术, 扩大了电池产品和新能源汽车的市场空间, 减排投入成本被市场空间扩大所带来的利润增长抵消, 整体效益提升。由此可见, 电池生产商减排投入有助于实现碳交易政策下新能源汽车闭环供应链利润增加, 推动新能源汽车闭环供应链低碳化发展。

命题 3.2 电池生产商减排投入分散决策和电池生产商减排投入集中决策情形下的均衡结果及利润之间的关系为: $P_V^{d^*} > P_V^c, P_B^{d^*} < P_B^c, P_R^{d^*} \left\langle P_R^c, s^{d^*} \right\rangle s^c, \pi_{SC}^{d^*} < \pi_{SC}^c$ 。

证明: 对比电池生产商减排投入分散决策和电池生产商减排投入集中决策情形下的最优新能源汽车销售价格、储能电池销售价格、梯次利用电池销售价格、单位回收利润率及供应链总利润可得:

$$\Delta P_{V2}^* = P_V^{d^*} - P_V^c = \frac{A + \beta e - \gamma(c_n + P_e(e_n - e))}{4\gamma} > 0, \quad \Delta P_{B2}^* = P_B^{d^*} - P_B^c = \frac{-B\varphi}{2(2-\varphi)} < 0,$$

$$\Delta P_{R2}^* = P_R^{d^*} - P_R^c = \frac{(2-\varphi)\varphi(c_n + P_e(e_n - e)) - 2B\varphi^2}{4(2-\varphi)} < 0$$

$$\Delta s_2^* = s^{d^*} - s^c = \frac{1+x}{2} + \frac{q_0(1-x) + \left[(c_n + P_e(e_n - e))x(1-x)\lambda - q_0 \right]^2}{2\lambda u x \left[(c_n + P_e(e_n - e))x(1-x)\lambda - q_0 \right]} > 0, \quad \text{同理可得}$$

$$\Delta \pi_{SC2}^* = \pi_{SC}^{d^*} - \pi_{SC}^c < 0$$

命题 3.2 证毕。

命题 3.2 表明电池生产商有减排投入时, 分散决策下的最优新能源汽车销售价格和单位回收利润率高于集中决策情形下的水平, 而储能电池销售价格、梯次利用电池销售价格和最优供应链总利润低于集中决策情形下的水平。这是受到了双重边际化效应的影响, 由于分散决策下供应链成员均以自身利益最大化为目标, 乘用车制造商提高新能源汽车的销售价格而电池生产商减小储能电池销售价格, 第三方回收商也降低了梯次利用电池销售价格, 均是在未考虑供应链的整体利益的情况下做出改进自身利益的努力。为改善供应链效益, 使其利润达到集中决策水平, 可设计契约机制促进新能源汽车动力电池闭环供

应链成员的有效合作。

4. 结论

新能源汽车作为迅速发展的产业之一, 为改善交通运输环境提供了新的契机, 作为新能源汽车的核心零部件, 大量动力电池逐渐进入退役期。本文为解决企业间缺乏有效合作和回收积极性不足导致退役回收利用效率低下的问题, 考虑动力电池制造与再制造环节的碳排放问题, 构建政府碳交易政策下新能源汽车闭环供应链模型, 并在此模型上进一步考虑政府回收率激励政策, 利用优化理论和博弈理论研究政府双重干预对新能源闭环供应链合作决策的影响。本文主要研究结论总结如下:

1) 电池生产商加大减排投入有助于提高新能源汽车闭环供应链的低碳化水平并推动退役动力电池梯次利用, 但不利于退役动力电池回收。退役动力电池质量低于一定阈值时, 回收数量随着电池质量的增加而增加; 高于一定阈值时, 回收数量随着退役动力电池质量的增加而减少, 电池生产商与第三方回收商的利润随着退役动力电池质量也呈现相同的趋势。此外, 退役动力电池质量越高, 新能源汽车闭环供应链减排水平就越高。

2) 政府适当提高碳交易价格有利于推进退役动力电池回收及新能源汽车闭环供应链减排、提高供应链整体效益, 但不利于退役动力电池梯次利用。政府实施回收率激励机制能够有效推动退役动力电池的回收, 且政府提高回收率奖励水平, 还有助于提升新能源汽车闭环供应链碳减排水平, 但会造成第三方回收商利润下降。

参考文献

- [1] Guide, V.D.R, Harrison, T.P. and Van Wassenhove, L.N. (2003) The Challenge of Closed-Loop Supply Chains. *Interfaces*, **33**, 3-6. <https://doi.org/10.1287/inte.33.6.3.25182>
- [2] Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J.M. and Van Wassenhove, L.N. (2001) Design of Closed Loop Supply Chains: A Production and Return Network for Refrigerators. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), Rotterdam.
- [3] Savaskan, R.C. (2000) Management of Closed-Loop Supply Chains for Recoverable Products. Thesis, Institut Européen d'Administration des Affaires, France.
- [4] Tang, Y., Zhang, Q., Li, Y., et al. (2018) Recycling Mechanisms and Policy Suggestions for Spent Electric Vehicles' Power Battery—A Case of Beijing. *Journal of Cleaner Production*, **186**, 388-406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.043>
- [5] Wang, W., Fan, L., Ma, P., et al. (2017) Reward-Penalty Mechanism in a Closed-Loop Supply Chain with Sequential Manufacturers' Price Competition. *Journal of Cleaner Production*, **168**, 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.104>
- [6] Wang, W., Fan, L., Ma, P., Zhang, P. and Lu, Z. (2017) Reward-Penalty Mechanism in a Closed-Loop Supply Chain with Sequential Manufacturers' Price Competition. *Journal of Cleaner Production*, **168**, 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.104>
- [7] 陈小长. 新能源汽车动力电池回收模式探究[J]. 时代汽车, 2023(15): 74-76.
- [8] 工业和信息化部, 节能与综合利用司. 新能源汽车动力蓄电池回收利用调研报告[R]. 2019.
- [9] 龚循飞, 罗锋, 邓建明, 等. 深度神经网络与卡尔曼滤波融合估算动力电池 SOH 的方法[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(15): 23-27.
- [10] 韩帅帅, 邓毅, 侯贵光, 等. 废旧动力锂电池回收利用的国际经验及借鉴意义[J]. 环境保护, 2023, 51(Z3): 83-86.
- [11] 楼高翔, 雷鹏, 马海程, 等. 不同回收补贴政策下新能源汽车动力电池闭环供应链运营决策研究[J]. 管理学报, 2023, 20(2): 267-277.
- [12] 倪祥祥. 新能源汽车电池对环境污染以及危害的探究[J]. 时代汽车, 2023(14): 106-108.
- [13] 王韵, 赵觉理. 韩媒: 美《通胀削减法案》难将中国挤出供应链[N]. 环球时报, 2022-09-21(003).
- [14] 杨丽丽, 郭加会, 李培欣, 等. 三元锂动力电池回收利用技术的全生命周期评价[J]. 广东化工, 2023, 50(13): 59-61.

- [15] 杨梓. 全球动力电池市场比拼加剧[N]. 中国能源报, 2023-08-14(015).
- [16] 姚卫新. 电子商务环境下闭环供应链的原子模型研究[J]. 管理科学, 2003(1): 65-68.
- [17] 伊辉勇, 刘佳. 碳交易政策下动力电池闭环供应链定价决策[J/OL]. 计算机集成统: 1-18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220517.1717.035.html>, 2024-04-29.
- [18] 袁开福, 文姝, 吴光强, 等. BaaS 模式下考虑梯级利用的动力电池供应链定价决策[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230410.1318.010.html>, 2024-04-29.
- [19] 郑雪芹. 整车企业自产电池能否改变供应链格局? [J]. 汽车纵横, 2022(7): 82-84.