

基于区块链的闭环供应链定价及回收策略

林慧婷, 林 杨

(福建师范大学经济学院, 福州 350000)

摘要: 考虑区块链技术下新能源汽车闭环供应链定价及回收决策问题, 构建制造商和零售商回收模式下链上成员 Stackelberg(斯塔克尔伯格)博弈模型。结果表明, 随着消费者对绿色产品偏好提升, 碳减排努力、链上成员利润及社会福利等均增长; 提高梯次利用比例将增加零售商回收模式下零售商利润、两种回收模式下制造商利润及社会福利, 尤其引入区块链及制造商回收对社会福利影响显著; 采用区块链单位成本满足一定阈值时, 采用区块链有利于提升需求量和碳减排努力。

关键词: 闭环供应链; 区块链; 非合作博弈; 定价; 回收策略

中图分类号: F274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)08-0109-08

交通工具的绿色转型对实现“双碳”目标具有重要影响。为缓解环境污染、能源危机等问题, 新能源汽车已成为未来汽车行业的发展方向^[1]。2021年8月, 五部门联合印发《新能源汽车动力蓄电池梯次利用管理办法》, 旨在鼓励动力蓄电池企业积极参与废旧动力蓄电池回收及梯次利用。退役动力电池再利用方式包括梯次利用和再生利用。当动力电池剩余容量衰减到60%~80%时, 经拆解重组后可用于储能电站、通信基站和低速电动车等领域; 当动力电池剩余容量为20%~60%时, 可将其分解成电池单元, 重组后用在用户端或微电网。这些应用均属于梯次利用。而当动力电池剩余容量衰减到20%以下, 无法梯次利用^[2]。

根据欧洲运输与环境联合会(T&E)的数据, 电池生产的碳排在电动汽车全生命周期碳排放中占据60%以上。电池制造过程对环境造成一定影响, 且新能源汽车的生产流程复杂、产品溯源困难, 引发消费者对其环保性的质疑。区块链以其去中心化、可追溯、不可篡改、公开透明等特点而著称^[3]。在动力电池回收中, 区块链技术可发挥重要功能: ①去中心化意味着无单一管理实体, 供应链成员共同验证、记录交易, 减少潜在不当操纵或错误风险; ②多方共同监督验证动力电池回收行为, 杜绝潜在滥用行为; ③其可追溯性保证了动力电池历史活动(生产、维护和回收)可追踪, 助力监管机构和利益

相关者审核和监控回收过程以确保合规; ④提供精准电池信息, 协助回收商快速定位有价值回收资源, 减少收集成本^[4]; 制造商精确追踪每车每零部件来源, 提高废旧电池处理效率, 降低再制造成本; 消费者也可验证新能源汽车历史记录, 提升对新能源汽车的绿色信任感^[5]。但是, 采用区块链并不总是有利于供应链。区块链的使用需要耗费一定的成本, 这也是限制区块链发展的重要原因之一。

目前, 关于闭环供应链回收模式的研究大体可以分成单渠道回收和混合回收模式。范定祥等^[6]探讨由制造商、零售商、线上和线下回收商不同主体参与的闭环供应链回收模式, 发现由线上和线下回收商、零售商、制造商组成的多主体回收模式能够使供应链整体利润最大化。Zhang等^[7]比较了六种回收模式, 包括电动汽车制造商、电动汽车零售商、第三方企业及其成对合作伙伴等参与者, 发现制造商和零售商的合作关系可以使回收率和总福利最优。Gu等^[8]研究了政府补贴对退役动力电池梯级利用的影响。王珊珊和秦江涛^[9]考虑了政府补贴, 对比分析制造商回收、零售商回收及制造商和零售商双渠道回收模式下供应链的最优决策, 发现当回收价格敏感系数较小时, 应选择制造商回收模式。杨康康等^[10]考虑了退役电池的梯次利用及再生拆解, 分析比较了无政府干预、政府补贴机制、政府奖惩机制三种情况下供应链的最优决策。Sun等^[11]

收稿日期: 2024-01-18

基金项目: 国家社科基金一般项目(19BGL092)

作者简介: 林慧婷(2000—), 女, 福建漳州人, 硕士研究生, 研究方向为供应链管理、决策优化; 林杨(1983—), 男, 福建福州人, 博士, 副教授, 研究方向为供应链优化、博弈论。

分析了制造商回收、零售商回收及混合回收下碳交易政策、动力电池续航能力和广告效应对回收渠道选择的影响。楼高翔等^[12]探究无补贴政策、按回收量补贴政策和按回收电池容量补贴政策三种政策对新能源汽车动力电池回收率及供应链运营决策的影响。王麒翔等^[13]研究回收目标责任下制造商和零售商的再制造策略问题,分析不同模式对再制造绩效、环境及社会效益的影响。李登峰等^[14]考虑政府对制造商实施押金退还政策,建立非合作-合作两型博弈分析零售商和回收商两条回收渠道的闭环供应链回收竞争和利润分配问题。唐娟等^[15]考虑制造商承担企业社会责任并委托零售商回收废旧产品,研究 Nash 讨价还价下的收益共享契约和两部定价契约对闭环供应链的协调作用。李文川等^[16]探究碳交易政策和公平偏好对双渠道闭环供应链定价决策的影响,发现公平关切会降低企业利润,且信息不对称时对企业利润影响更为显著。

近年来,许多学者研究区块链技术的应用及其对供应链管理的影响。Choi^[17]探究基于区块链技术的销售平台中奢侈品定价决策问题,揭示了采用区块链技术的销售平台优于其他模式的条件。孙中苗等^[18]将顾客分为忠诚顾客和一般顾客,考虑区块链对辨识产品真伪的时间成本和验证效果等,研究供应链最优定价决策。Xu 和 Dong^[19]考虑了消费者对绿色产品估值的不确定性,研究政府补贴下产品定价及绿色投资策略,探讨供应链中采用区块链的条件。Zhang 等^[20]构建了制造商直销和零售渠道销售产品的双渠道供应链,研究区块链的采用条件,发现在一定条件下供应链成员采用区块链可以提升双渠道供应链的性能。Xing 和 Yao^[4]研究基于区块链的新能源汽车动力电池回收策略,并认为回收成本较高时,制造商和零售商都应该采用区块链。张令荣等^[5]构建了区块链应用前后政府进行减排技术投入补贴和低碳产品补贴四种情境下的博弈模型,对比分析不同情境下的需求量、碳减排率及社

会福利。梁喜和肖金凤^[21]在网上直销、网上分销双渠道供应链结构中,引入消费者对产品检验与评估需要时间及检验结果为假的概率敏感系数、区块链单位验证费等参数,对比区块链技术应用前后供应链的定价决策与渠道选择。梁喜和胡鑫^[22]考虑零售商回收和第三方回收两种回收模式,对比分析区块链技术对绿色供应链定价决策的影响。吴小勇和南江霞^[23]在低碳供应链中引入区块链技术,采用合作博弈方法探究合作情形下两个竞争制造商的最优产量、减排策略及制造商收益分配情况,发现区块链运营成本较高会减弱制造商进入平台的积极性。

综上,诸多学者对闭环供应链回收问题开展了大量研究,涉及不同回收主体、政府干预、梯次利用及再生拆解等不同策略,并考虑碳减排率、产品真伪辨识、供应链成员公平偏好等因素,对闭环供应链优化问题进行深入分析。区块链技术的兴起为闭环供应链管理带来了新的视角。部分学者将区块链与供应链结合,探究区块链溯源特性对供应链定价决策的影响,研究供应链中应用区块链的条件。然而,将区块链应用于新能源动力电池回收领域的研究尚显匮乏,且较少涉及区块链对绿色供应链、产品回收决策的影响。鉴于此,在制造商回收、零售商回收两种不同回收模式的闭环供应链中,综合考虑区块链在正向供应链中对需求量的影响及在逆向供应链中对动力电池收集成本和再制造成本的影响,引入消费者绿色偏好度、退役电池梯次利用率、收集成本和再制造动力电池单位成本折扣系数等参数,构建考虑区块链的闭环供应链上成员的 Stackelberg(斯塔克尔伯格)博弈,探析区块链应用前后不同回收模式对供应链优化决策的影响,为绿色供应链相关参与者提供决策参考。

1 问题描述与假设

考虑由一个新能源汽车制造商和一个零售商组成的闭环供应链。正向供应链中,制造商以批发价 w 出售产品,零售商再以零售价 p_n 销售。相关符号释义如表 1 所示。

表 1 符号及其含义

符号	含义	符号	含义
p_c/p_r	制造商/零售商单位回收价格(决策变量)	c_b	采用区块链技术单位成本
w/p_n	单位批发/零售价格(决策变量)	F	单渠道单位收集成本
e	制造商生产绿色产品投入的减排努力(决策变量)	λ	消费者对绿色产品价值的信任度
θ	委托收集价格(决策变量)	β	消费者对绿色产品的偏好度
A	单渠道免费回收数量	h	再制造动力电池单位成本折扣系数, $h \in (0, 1)$
ξ	回收价格敏感系数	k	收集成本折扣系数, $k \in (0, 1)$
p_s	退役电池梯次利用单位利润	g	制造商减排努力成本系数
D_l	新能源汽车需求量, $l \in \{1, 2\}$ 分别代表区块链应用前/后	Q_i	回收数量, $i \in \{M, R\}$ 分别代表制造商回收和零售商回收
a	潜在市场规模	c_n/c_0	使用原材料/再制造动力电池生产新能源汽车单位成本
b	消费者对价格的敏感系数		

参考张令荣等^[5],市场需求与产品价格呈负相关,与消费者绿色产品偏好度及制造商生产绿色产品投入的减排努力呈正相关。未采用区块链技术时,因信息透明度和真实性不足,消费者对产品的绿色度存疑。令需求函数为 $D_1 = a - bp_n + \lambda\beta e$, 其中 $\lambda \in (0, 1)$ 。区块链技术赋能后,消费者能更为准确地了解产品的绿色水平,对产品环保属性的信任增加有助于提升销量,故令 $\lambda = 1$, 即 $D_2 = a - bp_n + \beta e$ 。

逆向供应链中,依次考虑制造商、零售商为回收主体。制造商单渠道回收数量 $Q_M = A + \xi p_c$, 零售商单渠道回收数量 $Q_R = A + \xi p_r$ 。回收收益来自两部分,一是废旧电池再制造所节约的成本;二是退役电池梯次利用的收益。退役电池梯次利用的单位净利润 $p_s = \mu s$, 其中 μ 为退役电池可梯次利用的比例, s 为单位退役电池梯次利用的净利润。

引入区块链对回收行为具有成本降低效应。区块链的建立优化了回收流程中的信息交换和验证,从而减少处理、核实和追踪成本。即采用区块链技术后,制造商可降低单位再制造成本;回收商可降低收集成本。参考 Sun 等^[11],未采用区块链时制造商生产新能源汽车平均单位成本 $c_1 = c_n(1 - Q_i/D_i) + c_0 Q_i/D_i$ 。采用区块链后,制造商生产新能源汽车平均单位成本 $c_2 = c_n(1 - Q_i/D_i) + hc_0 Q_i/D_i$ 。

社会福利 SW 由生产者剩余、消费者剩余和环境改善三部分组成,即 $SW = \pi_M + \pi_R + CS + \pi_E$, 其中消费者剩余 $CS = \int_{p_n^{\min}}^{p_n^{\max}} D_1 dp_n = \frac{D_1^2}{2b}$ ^[24], 环境改善 $\pi_E = eD_1$ 。

为使模型存在最优解具有研究意义,需满足以

$$\text{下条件: } \begin{cases} -4bg + \beta^2 \lambda^2 < 0 \\ -4bg + \beta^2 < 0 \\ a - b(2c_b + c_n) > 0 \\ -3A + \xi(c_n - c_0 - F + \mu s) > 0 \end{cases} .$$

2 模型构建与求解

2.1 不采用区块链的零售商回收(RN 模型)

新能源汽车制造商确定批发价格 w 、委托收集价格 θ 及制造商生产绿色产品投入的减排努力 e 。零售商确定零售价格 p_n 及单位回收价格 p_r 。新能源汽车制造商和零售商的利润函数分别为

$$\pi_M^{\text{RN}} = (w - c_1)D_1 + Q_R(p_s - \theta) - \frac{1}{2}ge^2 \quad (1)$$

$$\pi_R^{\text{RN}} = (p_n - w)D_1 + (\theta - p_r - F)Q_R \quad (2)$$

采用逆向归纳法依次求解式(1)和式(2)可得制造商和零售商的最优决策,进而得到最优需求量、回收量、最优利润、消费者剩余及社会福利。RN 模型的最优决策、需求量和回收量如表 2 所示,最优系统利润及社会福利如表 3 所示。

2.2 采用区块链的零售商回收(RW 模型)

采用区块链后,零售商回收时新能源汽车制造商和零售商的利润函数分别为

$$\pi_M^{\text{RW}} = (w - c_2 - c_b)D_2 + Q_R(p_s - \theta) - \frac{1}{2}ge^2 \quad (3)$$

$$\pi_R^{\text{RW}} = (p_n - w - c_b)D_2 + (\theta - p_r - kF)Q_R \quad (4)$$

采用逆向归纳法依次求解式(3)和式(4)可得制造商和零售商的最优决策结果。RW 模型的最优结果如表 2 和表 3 所示。

2.3 不采用区块链技术的制造商回收(MN 模型)

新能源汽车制造商确定批发价格 w 、单位回收价格 p_c 及制造商生产绿色产品投入的减排努力 e 。零售商确定零售价格 p_n 。新能源汽车制造商和零售商的利润函数分别为

$$\pi_M^{\text{MN}} = (w - c_1)D_1 + Q_M(p_s - p_c - F) - \frac{1}{2}ge^2 \quad (5)$$

$$\pi_R^{\text{MN}} = (p_n - w)D_1 \quad (6)$$

采用逆向归纳法依次求解式(5)和式(6),可得制造商和零售商的最优决策结果。MN 模型的最优结果如表 2 和表 3 所示。

2.4 采用区块链技术的制造商回收(MW 模型)

采用区块链后,制造商回收时新能源汽车制造商和零售商的利润函数分别为

$$\pi_M^{\text{MW}} = (w - c_2 - c_b)D_2 + Q_M(p_s - p_c - kF) - \frac{1}{2}ge^2 \quad (7)$$

$$\pi_R^{\text{MW}} = (p_n - w - c_b)D_2 \quad (8)$$

采用逆向归纳法依次求解式(7)和式(8),可得制造商和零售商的最优决策结果。MW 模型的最优结果如表 2 和表 3 所示。

3 结果与讨论

3.1 最优结果

不同模式下供应链的最优决策、需求量和回收量如表 2 所示,最优系统利润及社会福利如表 3 所示。

3.2 比较分析

对四种模型最优结果进行对比分析,得到如下推论。

表 2 四种模型的最优决策、需求量和回收量

变量	RN 模式	RW 模式	MN 模式	MW 模式
w	$c_n + \frac{2(a-bc_n)g}{4bg-\beta^2\lambda^2}$	$c_b + c_n + \frac{2g[a-b(2c_b+c_n)]}{4bg-\beta^2}$	$c_n + \frac{2(a-bc_n)g}{4bg-\beta^2\lambda^2}$	$c_b + c_n + \frac{2g[a-b(2c_b+c_n)]}{4bg-\beta^2}$
p_n	$c_n + \frac{3(a-bc_n)g}{4bg-\beta^2\lambda^2}$	$2c_b + c_n + \frac{3[a-b(2c_b+c_n)]g}{4bg-\beta^2}$	$c_n + \frac{3(a-bc_n)g}{4bg-\beta^2\lambda^2}$	$2c_b + c_n + \frac{3[a-b(2c_b+c_n)]g}{4bg-\beta^2}$
p_r	$\frac{-3A + \xi(c_n - c_0 - F + \mu s)}{4\xi}$	$\frac{-3A + \xi(c_n - c_0 h - Fk + \mu s)}{4\xi}$	—	—
θ	$\frac{-A + \xi(c_n - c_0 + F + \mu s)}{2\xi}$	$\frac{-A + \xi(c_n - c_0 h + Fk + \mu s)}{2\xi}$	—	—
p_c	—	—	$\frac{-A + \xi(c_n - c_0 - F + \mu s)}{2\xi}$	$\frac{-A + \xi(c_n - c_0 h - Fk + \mu s)}{2\xi}$
e	$\frac{(a-bc_n)\beta\lambda}{4bg-\beta^2\lambda^2}$	$\frac{[a-b(2c_b+c_n)]\beta}{4bg-\beta^2}$	$\frac{(a-bc_n)\beta\lambda}{4bg-\beta^2\lambda^2}$	$\frac{[a-b(2c_b+c_n)]\beta}{4bg-\beta^2}$
Q	$\frac{A + \xi(c_n - c_0 - F + \mu s)}{4}$	$\frac{A + \xi(c_n - c_0 h - Fk + \mu s)}{4}$	$\frac{A + \xi(c_n - c_0 - F + \mu s)}{2}$	$\frac{A + \xi(c_n - c_0 h - Fk + \mu s)}{2}$
D	$\frac{b(a-bc_n)g}{4bg-\beta^2\lambda^2}$	$\frac{bg[a-b(2c_b+c_n)]}{4bg-\beta^2}$	$\frac{b(a-bc_n)g}{4bg-\beta^2\lambda^2}$	$\frac{b[a-b(2c_b+c_n)]g}{4bg-\beta^2}$

表 3 不同模型的最优系统利润及社会福利

模型	系统利润及社会福利
RN	$\pi_M^{RN} = \frac{(A + \xi F_1)^2}{8\xi} + \frac{gF_2(a-bc_n)}{2}$
	$\pi_R^{RN} = bF_2^2 g^2 + \frac{(A + \xi F_1)^2}{16\xi}$
	$SW^{RN} = bF_2^2 g(\frac{3g}{2} + \beta\lambda) + \frac{3(A + \xi F_1)^2}{16\xi} + \frac{gF_2(a-bc_n)}{2}$
RW	$\pi_M^{RW} = \frac{(A + \xi F_3)^2}{8\xi} + \frac{gF_4[a-b(2c_b+c_n)]}{2}$
	$\pi_R^{RW} = bF_4^2 g^2 + \frac{(A + \xi F_3)^2}{16\xi}$
	$SW^{RW} = bF_4^2 g(\frac{3g}{2} + \beta) + \frac{3(A + \xi F_3)^2}{16\xi} + \frac{gF_4[a-b(2c_b+c_n)]}{2}$
MN	$\pi_M^{MN} = \frac{(A + \xi F_1)^2}{4\xi} + \frac{gF_2(a-bc_n)}{2}$
	$\pi_R^{MN} = bF_2^2 g^2$
	$SW^{MN} = bF_2^2 g(\frac{3g}{2} + \beta\lambda) + \frac{(A + \xi F_1)^2}{4\xi} + \frac{gF_2(a-bc_n)}{2}$
MW	$\pi_M^{MW} = \frac{(A + \xi F_3)^2}{4\xi} + \frac{gF_4[a-b(2c_b+c_n)]}{2}$
	$\pi_R^{MW} = bF_4^2 g^2$
	$SW^{MW} = bF_4^2 g(\frac{3g}{2} + \beta) + \frac{(A + \xi F_3)^2}{4\xi} + \frac{gF_4[a-b(2c_b+c_n)]}{2}$

注： $c_n - c_0 - F + \mu s = F_1$ ； $\frac{a-bc_n}{4bg-\beta^2\lambda^2} = F_2$ ； $c_n - c_0 h - Fk + \mu s = F_3$ ； $\frac{a-b(2c_b+c_n)}{4bg-\beta^2} = F_4$ 。

命题 1 需求量、批发价、零售价、制造商生产绿色产品投入的减排努力、制造商和零售商的利润、消费者剩余、社会福利均随着消费者对绿色产品偏好度 β 的增加而增加，且两种回收模式增幅相同。

证明：对消费者对绿色产品偏好度 β 求需求量、批发价、零售价、制造商生产绿色产品投入的减排努力、制造商和零售商的利润、消费者剩余、社会福

利的偏导，易证：证： $\frac{\partial D^{RN}}{\partial \beta} = \frac{\partial D^{MN}}{\partial \beta} > 0$ ； $\frac{\partial D^{RW}}{\partial \beta} = \frac{\partial D^{MW}}{\partial \beta} > 0$ ； $\frac{\partial w^{RN}}{\partial \beta} = \frac{\partial w^{MN}}{\partial \beta} > 0$ ； $\frac{\partial w^{RW}}{\partial \beta} = \frac{\partial w^{MW}}{\partial \beta} > 0$ ； $\frac{\partial p_n^{RN}}{\partial \beta} = \frac{\partial p_n^{MN}}{\partial \beta} > 0$ ； $\frac{\partial p_n^{RW}}{\partial \beta} = \frac{\partial p_n^{MW}}{\partial \beta} > 0$ ； $\frac{\partial e^{RN}}{\partial \beta} = \frac{\partial e^{MN}}{\partial \beta} > 0$ ； $\frac{\partial e^{RW}}{\partial \beta} = \frac{\partial e^{MW}}{\partial \beta} > 0$ ； $\frac{\partial \pi_M^{RN}}{\partial \beta} = \frac{\partial \pi_M^{MN}}{\partial \beta} > 0$ ；

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_M^{RW}}{\partial \beta} = \frac{\partial \pi_M^{MW}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial \pi_R^{RN}}{\partial \beta} = \frac{\partial \pi_R^{MN}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial \pi_R^{RW}}{\partial \beta} = \frac{\partial \pi_R^{MW}}{\partial \beta} > 0; \\ 0; \frac{\partial CS^{RN}}{\partial \beta} = \frac{\partial CS^{MN}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial CS^{RW}}{\partial \beta} = \frac{\partial CS^{MW}}{\partial \beta} > 0; \\ \frac{\partial SW^{RN}}{\partial \beta} = \frac{\partial SW^{MN}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial SW^{RW}}{\partial \beta} = \frac{\partial SW^{MW}}{\partial \beta} > 0. \end{aligned}$$

命题1表明,消费者对绿色产品偏好度 β 的增加对供应链成员利润及社会福利具有积极影响。消费者对绿色产品偏好度 β 的增加有助于提高需求量,促进动力电池产业利润及社会福利的提升。由于 β 只与正向供应链中需求量直接相关,与逆向供应链决策变化及收益无关,故制造商回收和零售商回收两种模式增幅相等。

命题2 退役电池可梯次利用比例 μ 的提高将导致零售商回收模式下零售商利润、两种回收模式下制造商利润及社会福利的提高,且采用区块链及制造商回收能使制造商利润及社会福利增幅更大。

证明:因 $-3A + \xi(c_n - c_0 - F + \mu s) > 0$ 且 $h \in (0, 1), k \in (0, 1)$,故 $F_3 > F_1 > 0$ 。对零售商回收模式下零售商利润、两种回收模式下制造商利润及社会福利求退役电池可梯次利用比例 μ 的偏导,易证: $\frac{\partial \pi_R^{RN}}{\partial \mu} = \frac{1}{8}s(A + \xi F_1) > 0; \frac{\partial \pi_R^{RW}}{\partial \mu} = \frac{1}{8}s(A + \xi F_3) > 0; \frac{\partial \pi_M^{RN}}{\partial \mu} = \frac{1}{4}s(A + \xi F_1) > 0; \frac{\partial \pi_M^{RW}}{\partial \mu} = \frac{1}{4}s(A + \xi F_3) > 0; \frac{\partial \pi_M^{MN}}{\partial \mu} = \frac{1}{2}s(A + \xi F_1) > 0; \frac{\partial \pi_M^{MW}}{\partial \mu} = \frac{1}{2}s(A + \xi F_3) > 0; \frac{\partial SW^{RN}}{\partial \mu} = \frac{3}{8}s(A + \xi F_1) > 0; \frac{\partial SW^{RW}}{\partial \mu} = \frac{3}{8}s(A + \xi F_3) > 0; \frac{\partial SW^{MN}}{\partial \mu} = \frac{1}{2}s(A + \xi F_1) > 0; \frac{\partial SW^{MW}}{\partial \mu} = \frac{1}{2}s(A + \xi F_3) > 0$ 。

命题2表明,退役电池可梯次利用比例的提高有利于提高制造商和回收商的收益及社会福利。应用区块链对闭环供应链回收优化及利益分配存在影响。因区块链的透明度和可追溯性使得回收过程更高效,有助于优化回收流程和提高资源利用效率。无论是否采用区块链技术,制造商回收都能使制造商的利润及社会福利增幅更大。制造商回收能够直接控制资源再利用,并在回收过程中降低成本,从而对制造商利润和社会福利产生更显著的正面影响。

命题3 采用区块链技术后,零售商回收模式下零售商利润、两种回收模式下制造商利润及社会福利均随着再制造动力电池成本折扣系数 h 和收集

成本折扣系数 k 的减小而增大,且制造商回收时制造商利润及社会福利增幅更大。

证明:对零售商回收模式下零售商利润、两种回收模式下制造商利润及社会福利求再制造动力电池成本折扣系数 h 和收集成本折扣系数 k 的偏导,易证: $\frac{\partial \pi_R^{RW}}{\partial h} = -\frac{c_0(A + \xi F_3)}{8} < 0; \frac{\partial \pi_M^{RW}}{\partial h} = -\frac{c_0(A + \xi F_3)}{4} < 0; \frac{\partial \pi_M^{MW}}{\partial h} = -\frac{c_0(A + \xi F_3)}{2} < 0; \frac{\partial \pi_R^{RW}}{\partial k} = -\frac{F(A + \xi F_3)}{8} < 0; \frac{\partial \pi_M^{RW}}{\partial k} = -\frac{F(A + \xi F_3)}{4} < 0; \frac{\partial \pi_M^{MW}}{\partial k} = -\frac{F(A + \xi F_3)}{2} < 0; \frac{\partial SW^{RW}}{\partial h} = -\frac{3c_0(A + \xi F_3)}{8} < 0; \frac{\partial SW^{MW}}{\partial h} = -\frac{c_0(A + \xi F_3)}{2} < 0; \frac{\partial SW^{RW}}{\partial k} = -\frac{3F(A + \xi F_3)}{8} < 0; \frac{\partial SW^{MW}}{\partial k} = -\frac{F(A + \xi F_3)}{2} < 0$ 。

命题3表明,应用区块链技术后,再制造成本与收集成本折扣系数的变化共同影响了供应链中各方的利润和社会福利增长。区块链技术的应用增强了回收过程的透明度和效率。再制造动力电池成本折扣系数和收集成本折扣系数的减小使得制造商和回收商在回收过程中的成本降低,促进利润的提升。制造商回收时,由于直接控制资源再利用和降低成本的能力,其利润和社会福利增幅更大。

命题4 当 $c_b < \frac{(-a + bc_n)\beta(-1 + \lambda^2)}{2b(4bg - \beta^2\lambda^2)}$ 时,有 $D^{RW} > D^{RN}, D^{MW} > D^{MN}$; 当 $c_b < \frac{2(a - bc_n)g(1 - \lambda^2)}{4bg - \beta^2\lambda^2}$ 时,有 $w^{RW} > w^{RN}, w^{MW} > w^{MN}$; 当 $c_b < \frac{(-a + bc_n)(-1 + \lambda)(4bg + \beta^2\lambda)}{2b(4bg - \beta^2\lambda^2)}$ 时, $e^{RW} > e^{RN}, e^{MW} > e^{MN}; Q^{RW} > Q^{RN}; Q^{MW} > Q^{MN}$ 。

证明: $D^{RW} - D^{RN} = D^{MW} - D^{MN} = bg \left[\frac{-a + b(2c_b + c_n)}{-4bg + \beta^2} + \frac{a - bc_n}{-4bg + \beta^2\lambda^2} \right]$ 。求解 $bg \left[\frac{-a + b(2c_b + c_n)}{-4bg + \beta^2} + \frac{a - bc_n}{-4bg + \beta^2\lambda^2} \right] > 0$ 可得 $c_b < \frac{(-a + bc_n)\beta(-1 + \lambda^2)}{2b(4bg - \beta^2\lambda^2)}$ 。其他证明同。

命题4表明,无论何种回收模式,当采用区块链的单位成本满足一定阈值时,采用区块链时需求量、批发价、制造商生产绿色产品投入的减排努力均大于不采用区块链。采用区块链时回收量始终

大于不采用区块链时的回收量。这是因为采用区块链后,溯源系统的信息共享能使消费者对绿色产品价值的信任度增加,制造商会提高产品绿色度来提升需求量,并通过提高批发价来平衡减排努力成本。同时,采用区块链可减少退役电池收集成本和再制造成本,制造商会提高回收价格或委托收集价格,以促进回收。

命题5 无论是否采用区块链,制造商回收能使回收量、制造商利润及社会福利最大化。

$$\begin{aligned} \text{证明: } Q^{\text{MN}} - Q^{\text{RN}} &= \frac{A + (c_n - c_0 - F + \mu s)\xi}{4} > 0; \\ Q^{\text{MW}} - Q^{\text{RW}} &= \frac{A + (c_n - c_0 h - Fk + \mu s)\xi}{4} > 0; \pi_{\text{M}}^{\text{MN}} - \pi_{\text{M}}^{\text{RN}} \\ &= \frac{(A + \xi F_1)^2}{8\xi} > 0; \pi_{\text{M}}^{\text{MW}} - \pi_{\text{M}}^{\text{RW}} = \frac{(A + \xi F_3)^2}{8\xi} > 0; \\ \text{SW}^{\text{MN}} - \text{SW}^{\text{RN}} &= \frac{(A + \xi F_1)^2}{16\xi} > 0; \text{SW}^{\text{MW}} - \text{SW}^{\text{RW}} = \\ &= \frac{(A + \xi F_3)^2}{16\xi} > 0. \end{aligned}$$

命题5表明,制造商回收有助于回收量及社会福利的提高。相较于零售商回收,制造商回收减少中间渠道,消费者所获得的回收价格较高,回收意愿较大,从而对制造商利润和社会福利产生积极影响。

4 数值分析

通过数值仿真验证消费者对绿色产品的偏好度、梯次利用比例对供应链成员利润及社会福利的影响。2022年特斯拉汽车交付量达到131万辆。以特斯拉Model S为例,其电池容量为85 kWh/辆。而2022年宁德时代动力电池系统价格约为0.98元/Wh。因此,假设动力电池的单位生产成本为 $85 \times 0.98 \times 1\,000 = 83\,300$ 元。再制造动力电池成本是新动力电池生产成本的70%,且新能源汽车电池成本占整车成本的30%~40%。参考上述数据及有关文献,给予各参数赋值如下: $\mu = 0.5, s = 27\,000, a = 1\,310\,000, b = 1.6, F = 1\,500, A = 250, \xi = 3.2, \lambda = 0.5, \beta = 2, h = 0.9, k = 0.8, g = 5, c_n = 238\,000, c_0 = 166\,600, c_b = 4\,000$ 。

4.1 消费者对绿色产品的偏好度 β 对供应链的影响

为确保需求量非负,需满足 $4bg - \beta^2 \geq 0$ 。研究 $\beta \in [0, 5]$ 时,消费者对绿色产品的偏好度 β 对供应链成员利润及社会福利的影响。如图1所示,制造商、零售商的利润随着消费者对绿色产品偏好度 β 的增加而增加。随着 β 的增加,产品绿色度对需求

量的影响逐渐增大,制造商为提高收益会付出更多的减排努力,导致需求量、批发价、零售价的增加,对制造商和零售商的利润产生积极影响。采用区块链后,消费者绿色信任度 λ 为1,产品绿色度对需求量的促进效果更大。当引入区块链技术带来的收益大于产生的成本时,引入区块链后制造商和零售商的利润大于未引入区块链模式。具体而言,零售商回收时,当 $0.622 < \beta < 5$,引入区块链技术可使制造商和零售商的利润均增加;制造商回收时,当 $0.765 < \beta < 5$,引入区块链技术可使制造商和零售商的利润均增加。值得注意的是引入区块链后,制造商自行回收可使自身利润最大,而零售商回收时利润最大。这是因为制造商和零售商引入区块链后退役电池收集成本的降低可以抵消一部分区块链的引入成本,导致利润增加。因此,引入区块链技术后制造商和零售商为了自身利益都更愿意自行回收。

图2表明社会福利随着消费者对绿色产品的偏好度 β 的增加而增加。随着消费者对绿色产品偏好 β 提升,需求量、批发价、零售价、制造商生产绿色产品投入的减排努力、制造商和零售商的利润均增长,从而促进社会福利的增加。采用区块链技术后,当消费者对绿色产品的偏好度 β 大于一定阈值时,动力电池产业利润、环境改善和消费者剩余均大于未采用区块链模式,此时,采用区块链技术更有利。具体而言,零售商回收时,当 $0.308 < \beta < 5$,

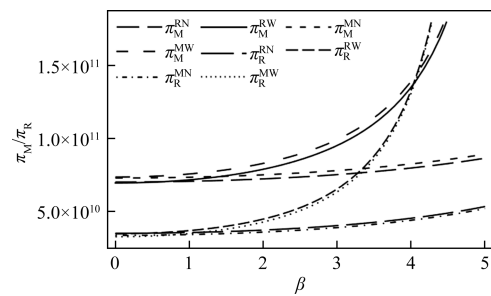


图1 β 对制造商和零售商利润的影响

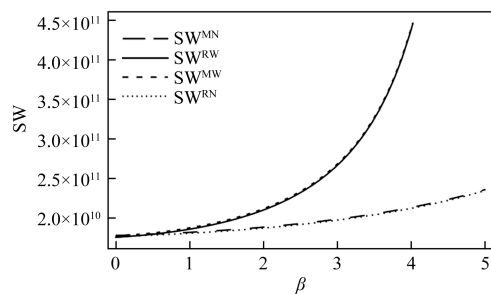


图2 β 对社会福利的影响

为实现社会福利最大化应引入区块链技术;制造商回收时,当 $0.188 < \beta < 5$,为实现社会福利最大化应引入区块链技术。

4.2 梯次利用比例 μ 对供应链的影响

如图3和图4所示,随着梯次利用比例的提高,零售商回收模式下零售商利润、两种回收模式下制造商利润及社会福利也相应提高,且采用区块链及制造商回收能使制造商利润及社会福利增幅更大。这是由于梯次利用比例较低时,回收废旧电池所获得的收益较少,制造商愿意付出的回收价格也较低。随着梯次利用比例的提高,回收相等数量的电池制造商可获得更多的收益,因此制造商会提高回收价格/委托收集价格,将一部分的利润退让给消费者以促进回收,导致回收商利润和社会福利增加。不同回收模式下,采用区块链技术后梯次利用比例对社会福利的促进作用更为显著。作为供应链的领导者,制造商自主回收减少中间渠道,降低成本且回收数量较多,从而对制造商利润和社会福利产生更显著的正面影响。

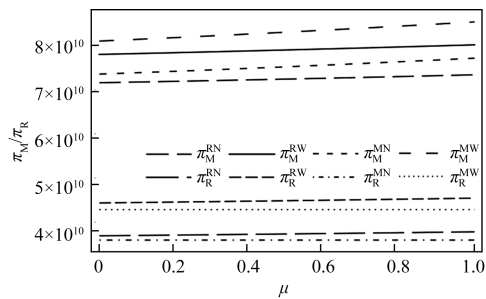


图3 μ 对制造商和零售商利润的影响

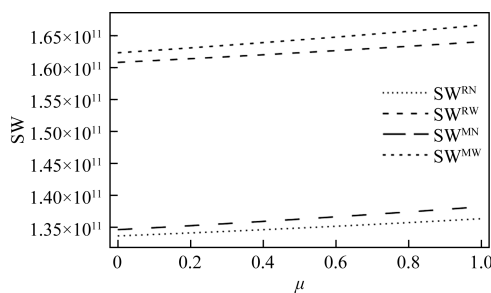


图4 μ 对社会福利的影响

5 结论

综合考虑区块链在正向供应链中对需求量的影响和在逆向供应链中对收集成本和再制造动力电池成本的影响,建立基于新能源汽车制造商及零售商的 Stackelberg 模型,研究闭环供应链的定价策略及回收策略。

需求量、批发价、零售价、制造商生产绿色产品投入的减排努力、制造商和零售商的利润、消费者剩余、社会福利均随着消费者对绿色产品偏好度 β 的增大而增大,且两种回收模式增幅相同。零售商回收模式下零售商利润、两种回收模式下制造商利润及社会福利均随着退役电池可梯次利用比例的增加而增加,尤其采用区块链及制造商回收能使其对制造商利润和社会福利的影响更显著。采用区块链技术后,零售商回收模式下零售商利润、两种回收模式下制造商利润及社会福利均随着再制造动力电池成本折扣系数和收集成本折扣系数的减小而增大,且制造商回收时制造商利润及社会福利增幅更大。当采用区块链技术的单位成本满足一定阈值时,采用区块链时需求量、批发价、制造商生产绿色产品投入的减排努力均大于不采用区块链。

绿色信任度是影响消费者购买绿色低碳产品的重要因素,供应链参与方应脚踏实地践行社会责任,加强绿色产品宣传力度,通过建设区块链平台等方式,提高企业信息透明度,进而增加自身收益。作为供应链的领导者,新能源汽车制造商要承担废旧电池回收的主体责任。未采用区块链时,制造商需加大对绿色产品各方面的宣传,从而提高消费者对绿色产品的信任度,增加需求量。采用区块链后,制造商应充分利用区块链来提高再制造动力电池成本折扣系数和收集成本折扣系数,以提高动力电池产业利润及社会福利。零售商参与回收过程能使自身利润增大,故零售商需要加大宣传力度以扩大自身回收的优势,并提高对退役电池回收过程监管,从而提高退役电池回收的数量和质量,努力提高退役电池梯次利用率,促进自身收益的增长。

本文从制造商占主导的角度分析区块链技术对闭环供应链定价及渠道选择的影响,在未来研究中还可进一步拓展,如从零售商占供应链的主导地位的角度分析或者考虑制造商和零售商双渠道回收模式。

参考文献

- [1] LI J Z, KU Y Y, LIU C L, et al. Dual credit policy: promoting new energy vehicles with battery recycling in a competitive environment? [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118456.
- [2] 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.
- [3] SABERI S, KOUHIZADEH M, SARKIS J, et al. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57 (7): 2117-2135.
- [4] XING P, YAO J Z. Power battery echelon utilization and recycling strategy for new energy vehicles based on blockchain technology[J]. Sustainability, 2022, 14 (19): 11835.
- [5] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31 (10): 49-60.
- [6] 范定祥, 李重莲, 王晓蕾. 基于 Stackelberg 博弈的闭环供应链回收模式选择及其优化研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30 (4): 135-141.
- [7] ZHANG Q, TANG Y Y, DEREK B, et al. Comparative evaluation and policy analysis for recycling retired EV batteries with different collection modes[J]. Applied Energy, 2021, 303: 117614.
- [8] GU X Y, ZHOU L, HUANG H F, et al. Electric vehicle battery secondary use under government subsidy: a closed-loop supply chain perspective [J]. International Journal of Production Economics, 2021, 234: 108035.
- [9] 王珊珊, 秦江涛. 政府补贴下双渠道闭环供应链回收渠道的选择研究[J]. 系统科学与数学, 2022, 42 (10): 2756-2773.
- [10] 杨康康, 张文杰, 张钦红. 考虑梯次利用的动力电池回收激励政策研究[J]. 工业工程与管理, 2022, 27 (2): 1-8.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王麒麟, 李帮义, 陈白雪, 等. 回收目标责任制下制造商与零售商的再制造策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43 (8): 2352-2371.
- [14] 李登峰, 魏骊晓, 李梦祺. 押金返还制造商的闭环供应链双渠道回收竞争与利润分配的非合作-合作两型博弈方法[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43 (11): 3241-3264.
- [15] 唐娟, 李帮义, 龚本刚, 等. 考虑企业社会责任的零售商回收型闭环供应链决策与协调研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31 (11): 228-237.
- [16] 李文川, 周清宁, 涂文君. 碳交易背景下考虑公平关切的双渠道闭环供应链定价决策[J]. 科技和产业, 2023, 23 (23): 1-9.
- [17] CHOI T M. Blockchain-technology-supported platforms for diamond authentication and certification in luxury supply chains [J]. Transportation Research Part E, 2019, 128: 17-29.
- [18] 孙中苗, 徐琪, 史保莉. 区块链技术驱动下不同消费者类型的供应链最优定价决策[J]. 管理学报, 2021, 18 (9): 1382-1391.
- [19] XU J, DONG Y G. Pricing and greenness investment for green products with government subsidies: when to apply blockchain technology? [J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2022, 51: 101108.
- [20] ZHANG T Y, DONG O W, CHEN X F, et al. The impacts of blockchain adoption on a dual-channel supply chain with risk-averse members[J]. Omega, 2023, 114: 102747.
- [21] 梁喜, 肖金凤. 基于区块链和消费者敏感的双渠道供应链定价与渠道选择[J]. 中国管理科学, 2023, 31 (5): 29-38.
- [22] 梁喜, 胡鑫. 考虑区块链和产品回收的绿色供应链定价决策[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29 (11): 3851-3868.
- [23] 吴小勇, 南江霞. “区块链+碳市场”下竞争制造商合作减排策略研究[J]. 系统科学与数学, 2023, 43 (12): 3273-3298.
- [24] PANDA S, MODAK N, BASU M, et al. Channel coordination and profit distribution in a social responsible three-layer supply chain [J]. International Journal of Production Economics, 2015, 168: 224-233.

Pricing and Recovery Strategy of Closed-Loop Supply Chain Based on Blockchain

LIN Huiting, LIN Yang

(School of Economics, Fujian Normal University, Fuzhou 350000, China)

Abstract: Considering the closed-loop supply chain pricing and recycling decision problem of new energy vehicles under blockchain technology, a Stackelberg game model was constructed for the on-chain members under the recycling modes of manufacturers and retailers. The results show that as consumers' preference for green products increases, carbon emission reduction efforts, profits of chain members, and social welfare increase. Increasing the proportion of ladder utilization will increase retailers' profits under the retailer recycling mode, manufacturers' profits under the two recycling modes, and social welfare, and in particular, the introduction of blockchain and manufacturers' recycling has a significant impact on social welfare. Adopting blockchain is conducive to increasing the quantity of demand and carbon emission reduction efforts when the unit cost of blockchain adoption meets a certain threshold value.

Keywords: closed-loop supply chain; blockchain; non-cooperative game; pricing; recovery strategy