

产业发展

碳交易机制下考虑信息偏差行为的动力 电池闭环供应链回收模式选择研究

李向东^{1,2}, 王俊力¹, 吴新坤¹, 耿立校¹

(1. 河北工业大学经济管理学院, 天津 300401; 2. 国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要: 从闭环供应链视角, 考虑动力电池生产商的碳排放信息偏差, 以及新能源汽车制造商和第三方回收商的运营成本信息偏差, 构建三种闭环供应链回收模式的 Stackelberg 博弈模型。通过算例比较不同回收模式下的信息偏差行为、主体利润及总利润。研究发现: 碳排放和运营成本的偏差与各主体及供应链总利润直接相关; R/T-M 模式下供应链整体利润最大, 现实应优先考虑该模式; 随着碳交易价格上升, 各主体利润和供应链总利润呈先降后升趋势。

关键词: 闭环供应链; 碳交易机制; 信息不对称; 回收模式

中图分类号: F274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)04-0093-09

2024 年《政府工作报告》强调大力推进现代化产业体系建设, 以加快发展新质生产力为主要目标。中共中央政治局在第十一次集体学习中, 进一步明确绿色发展是高质量发展的底色, 并指出新质生产力本身即是绿色生产力。绿色生产力促进了低碳可持续经济的发展, 为企业在碳排放交易体系内提供了降低闭环供应链运营成本及增强市场竞争力的契机。然而, 企业在运营过程中存在的信息不对称会削弱市场的公平竞争, 降低透明度。市场参与者可能有意或无意地传播不准确或误导性信息, 产生信息偏差行为, 导致市场信号扭曲和资源配置效率降低, 并可能加剧不公平竞争, 最终对实现低碳可持续发展造成不利影响。当前, 新能源汽车产业快速发展, 2024 年第一季度, 新能源汽车产销分别完成 211.5 万辆和 209 万辆, 同比分别增长 28.2% 和 31.8%^[1]。这一增长趋势对闭环供应链提出了更高的要求。作为新能源汽车核心部件的动力电池, 其回收和再利用问题变得尤为重要。闭环供应链在废旧动力电池的回收和再利用过程中发挥着关键作用, 它通过提升循环利用效率, 对增强社会经济效益具有显著影响。

目前对闭环供应链的优化和管理, 已成为政府、企业和学者共同关注的焦点, 主要体现在闭环供应链信息偏差行为和回收模式选择研究上。现有文献主要从成本和碳排放两个维度探讨了信息不对称现象及其导致的信息偏差行为, 对供应链管理产生了显著的影响。Ozer 和 Raz^[2] 发现, 在生产成本信息不对称的情况下, 小型供应商保留其成本信息可以为大型供应商带来利益。这种信息保留行为可能引起信息偏差, 即市场参与者基于不完整或误导性信息做出决策。赵京彪等^[3] 发现, 双边成本信息不对称对隐瞒信息的决策者和整个供应链整体更有利, 但会损害其他不隐瞒成本信息的决策者利润。王竟竟等^[4] 在讨论零售商风险规避信息不对称的闭环供应链中, 发现其隐瞒风险规避信息对制造商总是不利的。张盼等^[5] 针对零售商回收成本信息不对称的情况, 研究了制造商如何设计最优激励合同以降低信息偏差, 提高供应链效率。Yang 等^[6] 和杨磊等^[7] 均聚焦于制造商主导的供应链中, 成员间的碳信息不对称及其对供应链绩效的影响。这些研究指出, 信息不对称可能导致供应链成员采取不利于环境的策略, 从而产生碳排放信息偏差。

收稿日期: 2024-08-20

基金项目: 国家社会科学基金(18BGL012); 河北省社会科学基金(HB23GL024); 2023 年度河北省社会科学创新发展研究课题(20230203020)

作者简介: 李向东(1969—), 男, 河北承德人, 博士, 教授, 研究方向为创新管理、供应链管理; 王俊力(1997—), 男, 山西太原人, 博士研究生, 研究方向为供应链管理; 吴新坤(2002—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为供应链管理; 通信作者 耿立校(1976—), 男, 河北石家庄人, 博士, 副教授, 研究方向为大数据与智能决策。

张令荣等^[8]在碳配额交易政策下,分析了不同权力结构下制造商的信息不对称问题,尤其是零售商主导时,制造商可能倾向于低报回收难度和高报碳排放量,这种信息偏差行为对供应链绩效产生负面影响。现有文献主要探讨了信息不对称现象,体现了信息偏差行为对供应链管理决策和绩效的潜在影响。闭环供应链运营管理中有关废旧动力电池回收模式的选择与比较,一直受到学术界的广泛关注。王成功和刘娟娟^[9]构建动力电池回收参与模型,基于演化博弈分析政府、回收商和消费者在不同情境下的决策过程及影响因素。胡文婕等^[10]在提出单渠道回收退役动力电池的基础之上拓展出两种双渠道回收模型,并分析不同模式下关键参数对均衡结果的影响。张川等^[11]进一步研究了碳配额交易下电池制造商的回收模式与碳减排策略,提出了四种混合回收模式。范定祥等^[12]综合了多方参与者,比较了四种回收模式,并引入碳交易机制优化最佳回收模式。

综上,现有研究主要关注动力电池回收如何影响闭环供应链回收主体的运营决策,尽管部分研究已经考虑单一信息偏差对回收模式选择的影响,但在多种信息偏差并存的现实情境中,动力电池回收模式的选择仍未得到充分探讨。由于废旧动力电池回收过程的复杂性,新能源汽车制造商(new energy vehicle manufacturers, NEVM)和第三方回收商(third-party collector, TPC)的运营成本信息通常为各自的私有信息,动力电池生产商很难对其进行较准确地观测。基于此,本文同时考虑闭环供应链中动力电池生产商(power battery manufacturer, PBM)新产品单位碳排放量和 NEVM、TPC 运营成本信息偏差行为,构建由 PBM、NEVM 和 TPC(将三者统称为“回收主体”)组成的三种 Stackelberg 博弈模型,通过比较回收主体间的信息偏差指标及各回收模式的主体利润、总利润来选择最佳回收模式,并进行数值算例验证模型的正确性以及模型中的重要参数进行分析,为企业决策提供理论依据。

1 问题描述与模型假设

1.1 问题描述

以单 PBM、单 NEVM 组成的闭环供应链为研究对象,同时考虑 TPC 进行废旧品的辅助回收,根据闭环供应链中逆向回收环节的回收主体和对应的回收渠道差异,从而构建以下三种不同的闭环供应链回收模式。其中,政府一个周期内会给 PBM 分配一定数量的碳排放配额(Chinese emission allowances, CEA)^[8],PBM 可以在 CEA 交易市场选择

出售或者购买 CEA,最终以相对较低的成本实现控排目标。PBM 既负责新产品的生产,又负责将回收回来的废旧动力电池进行再制造;NEVM 在销售产品的同时,还负责回收废旧动力电池;TPC 依托回收平台或者线下建立实体店进行废旧动力电池的回收。

考虑信息具有偏差的情况下,运营成本信息是 NEVM 和 TPC 的私有信息^[5],新产品单位碳排放量是 PBM 的私有信息^[8]。为了实现自身利益最大化,回收主体会通过信息偏差行为调整其公开的私有信息,使得其他闭环供应链主体在博弈过程中偏离最优决策,从而使自己尽可能获得更多利润。

模式 1:回收活动由 NEVM 负责从消费者手中回收废旧动力电池,并制定相应的直接回收价格,然后再以间接价格出售给 PBM,最终由 PBM 对废旧动力电池进行再制造,即 R-M 模式。

模式 2:回收活动由 TPC 负责从消费者手中回收废旧动力电池,然后再转售给 PBM,对废旧动力电池进行再制造,即 T-M 模式。

模式 3:回收活动由 NEVM、TPC 共同负责从消费者手中回收废旧动力电池,二者之间是相互竞争的关系,然后以不同的间接价格转售给 PBM,对废旧动力电池进行再制造,即 R/T-M 模式。

1.2 相关参数说明

本文涉及的相关参数与说明如表 1 所示。

1.3 基本假设

对各回收模式进行建模分析所做的模型假设如下。

(1)闭环供应链仅考虑单周期情况。供应链中除了 NEVM 和 TPC 的运营成本和 PBM 的新产品单位碳排放量信息,其他均为对称信息。再制造产品无法满足市场需求,会有新产品流入市场中。

(2)在正向供应链中,再制造产品和新产品不构成竞争市场,考虑到生产技术成熟,再制品和新产品的外观、性能无差异,所以二者的批发价 w 和零售价 p 均相同。例如,Apple 公司对由回收旧 iPhone 提取的再生锡制造的产品和使用原材料锡制造的产品进行无差别销售^[13]。市场需求 Q 与产品零售价格线性相关^[7],将市场需求设定为 $Q=a-bp$ 。

(3)在逆向供应链中,NEVM 和 TPC 由于信息不对称现象对公布的单位运营成本引入偏差,若 $\beta, \gamma, \lambda < 1$ 则表示“负偏差”,即企业给出的单位运营成本/碳排放量低于实际水平;若 $\beta, \gamma, \lambda = 1$ 则表示“零偏差”,即企业给出的单位运营成本/碳排放量与实际水平相等;若 $\beta, \gamma, \lambda > 1$ 则表示“正偏差”,即企业给出的单位运营成本/碳排放量高于实际水平。

表 1 相关参数说明

相关参数	说明	相关参数	说明
E	碳配额总量	G_r	NEVM 废旧动力电池的回收量
t	碳交易价格	G_t	TPC 废旧动力电池的回收量
σ	PBM 生产再造品的单位碳排放量节约额度, $\sigma > 0$	μ_0	基础回收量, $\mu_0 > 0$
Q	市场需求, $Q > 0$	μ_1	消费者对回收价格的敏感系数, $\mu_1 > 0$
a	市场潜在需求, $a > 0$	μ_2	NEVM 与 TPC 的竞争系数, $\mu_2 > 0$
b	市场需求对价格的敏感性, $b > 0$	C_n	PBM 新产品的生产成本
ω	动力电池批发价格	C_r	PBM 再制造产品的生产成本
p	动力电池零售价格	b_r	NEVM 从消费者手中回收废旧动力电池的直接价格
C_{rr}	信息对称情况下 NEVM 的实际单位运营成本	b_t	TPC 从消费者手中回收废旧动力电池的直接价格
C_{tt}	信息对称情况下 TPC 的实际单位运营成本	b_{mr}	PBM 从 NEVM 处回收废旧动力电池的间接价格
β	NEVM 的运营成本偏差指标, $\beta > 0$	b_{mt}	PBM 从 TPC 处回收废旧动力电池的间接价格
γ	TPC 的运营成本偏差指标, $\gamma > 0$	π_j^i	回收模式为 i 时, 闭环供应链成员 j 的公开利润函数。 $i = 1, 2, 3$ 分别表示 R-M 模式、T-M 模式、R/T-M 模式, $j = 1, 2, 3$ 分别表示 PBM、NEVM 和 TPC
e	PBM 公布的新产品单位碳排放量	φ_j^i	回收模式为 i 时, 闭环供应链成员 j 的实际利润函数
λ	碳排放量偏差指标	π_i	回收模式为 i 时, 闭环供应链的总收益

(4)在 R-M 和 T-M 模式下, $G_r = \mu_0 + \mu_1 b_r$ 、 $G_t = \mu_0 + \mu_1 b_t$; 在 R/T-M 模式下, 因为 NEVM 和 TPC 之间是竞争关系, 所以各自的回收量分别为 $G_r = \mu_0 + \mu_1 b_r - \mu_2 b_t$ 、 $G_t = \mu_0 + \mu_1 b_t - \mu_2 b_r$ 。

(5)在 PBM 企业实际生产产品时, 政府会事先分配给 PBM 的碳配额总量 E 。为保证 PBM 和 NEVM 在废旧动力电池回收中可以获得利润, 所以有 $p > \omega > C_n > C_r + b_{mr} > b_{mr} > b_r + \beta C_{rr}$, $p > \omega > C_n > C_r + b_{mt} > b_{mt} > b_t + \gamma C_{tt}$ 。

2 模型建立及求解

接下来分析三种闭环供应链回收模式的 Stackelberg 博弈过程和结果, 并进一步讨论各回收模式的利润问题。在闭环供应链的各主体回收的决策过程中, PBM 是领导者, NEVM 和 TPC 是追随者, 三者均为风险中性且完全理性的, 都按照自身利益最大化进行有关决策。

2.1 R-M 模式

在 R-M 模式下, PBM 作为供应链领导者, 首先确定碳排放量偏差指标 λ , 并公开新产品单位碳排放量 e , 接着根据已知信息, 制定新产品和再制造产品的批发价格 ω 以及从 NEVM 处回收废旧动力电池的间接价格 b_{mr} 。NEVM 作为跟随者, 后决定运营成本偏差指标 β , 同时公布回收废旧动力电池的单位运营成本 C_{rr} , 然后制定相应产品的零售价格 p 和废旧动力电池的回收价 b_r 。则该模式下的 Stackelberg 博弈模型可以描述为: PBM 公开的利润函数 π_1^1 为 $(\omega - b_{mr} - C_r)G_r + (\omega - C_n)(Q - G_r) + t(E - \lambda eQ + \sigma G_r)$, NEVM 公开的利润函数为 $\pi_1^2 = (p - \omega)(a - bp) + (b_{mr} - \beta C_{rr} - b_r)G_r$, 闭环供应链的总

利润为 $\pi_1 = \pi_1^1 + \pi_1^2$ 。

根据逆向求解法, 得到供应链回收主体的博弈均衡解、最优利润情况如表 2 所示。

定理 1: 当 PBM 和 NEVM 给出的单位运营成本/碳排放量与实际水平相等时, PBM 和 NEVM 的最优决策为 $(\omega_1^*, b_{mr1}^*, p_1^*, b_{r1}^*)$, PBM、NEVM 以及供应链整体的利润分别是 $(\pi_1^{1*}, \pi_1^{2*}, \pi_1^*)$ 。

证明: 将 $\lambda = \beta = 1$ 代入表 2, 可得 $\omega_1^*, b_{mr1}^*, p_1^*, b_{r1}^*, \pi_1^{1*}, \pi_1^{2*}, \pi_1^*$ 。

2.2 T-M 模式

在 T-M 模式下, PBM 作为领导者, 首先确定碳排放量偏差指标 λ , 公开新产品单位排放量 e , 然后根据已知信息确定产品批发价格 ω 以及从 TPC 处回收废旧动力电池的间接价格 b_{mt} 。然后 TPC 后决定运营成本偏差指标 γ , 同时公布回收废旧动力电池的单位运营成本 C_{tt} , 并制定废旧动力电池的回收价 b_t , 同时 NEVM 制定相应产品的零售价格 p 。则该模式下的 Stackelberg 博弈模型可以描述为: PBM 公开的利润函数为 $\pi_2^1 = (\omega - b_{mt} - C_r)G_t + (\omega - C_n)(Q - G_t) + t(E - \lambda eQ + \sigma G_t)$, NEVM 公开的利润函数为 $\pi_2^2 = (p - \omega)(a - bp)$, TPC 公开的利润函数为 $\pi_2^3 = (b_{mt} - \gamma C_{tt} - b_t)G_t$, 闭环供应链的总利润为 $\pi_2 = \pi_2^1 + \pi_2^2 + \pi_2^3$ 。

根据逆向求解法, 表 2 展示了供应链回收主体的博弈均衡解和最优利润情况。

定理 2: 当 PBM 和 TPC 给出的单位运营成本/碳排放量与实际水平相等时, PBM、NEVM 和 TPC 的最优决策为 $(\omega_2^*, b_{mt1}^*, p_3^*, b_{t1}^*)$, PBM、NEVM、TPC 和供应链整体的利润分别为 $(\pi_2^{1*}, \pi_2^{2*}, \pi_2^*)$ 。

π_2^* , π_2^*)。

证明:将 $\lambda = \gamma = 1$ 代入表 2, 可得 ω_2^* , b_{m1}^* , p_2^* , b_{t1}^* , π_2^{*1} , π_2^{*2} , π_2^{*3} , π_2^* 。

2.3 R/T-M 模式

在 R/T-M 模式下, PBM 作为领导者, 首先确定碳排放量偏差指标 λ , 公开新产品单位排放量 e , 然后根据已知信息确定产品批发价格 ω 以及从 NEVM、TPC 处回收废旧动力电池的间接价格 b_{mr} , b_{mt} 。然后 NEVM 和 TPC 决定各自的 β, γ , 同时公布各自回收废旧动力电池的 C_{rr}, C_{tt} , 并制定各自废旧动力电池的回收价 b_r, b_t , 同时 NEVM 制定相应产品的零售价格 p 。则该模式下的 Stackelberg 博弈模型可以描述为: PBM 的公开利润为 $\pi_3^1 = (\omega - b_{mr} - C_r)G_r + (\omega - b_{mt} - C_t)G_t + (\omega - C_n)(Q - G_r - G_t) + t[E - \lambda eQ + \sigma(G_r + G_t)]$, NEVM 的公开利润为 $\pi_3^2 = (p - \omega)(a - bp) + (b_{mr} - \beta C_{rr} - b_r)G_r$, TPC 的公开利润为 $\pi_3^3 = (b_{mt} - \gamma C_{tt} - b_t)G_t$, 闭环供应链的总利润为 $\pi_3 = \pi_3^1 + \pi_3^2 + \pi_3^3$ 。

表 2 中详细列出了供应链回收主体的博弈均衡解以及他们的最大利润。

定理 3:当 PBM、NEVM 和 TPC 给出的单位运营成本/碳排放量与实际水平相等时, PBM、NEVM 和 TPC 的最优决策为 $(\omega_3^*, b_{mt2}^*, b_{mr2}^*, p_4^*)$ 和 (b_{t2}^*, b_{r2}^*) , PBM、NEVM、TPC 和供应链整体的利润分别为 $(\pi_3^{*1}, \pi_3^{*2}, \pi_3^{*3}, \pi_3^*)$ 。

证明:将 $\lambda = \beta = \gamma = 1$ 代入表 2, 可得 ω_3^* , b_{mt2}^* , b_{mr2}^* , p_4^* , b_{t2}^* , b_{r2}^* , π_3^{*1} , π_3^{*2} , π_3^{*3} , π_3^* 。

3 三种闭环供应链不同回收模式的比较

接下来综合考虑不同回收模式下回收主体各自的信息偏差行为对自身利润和供应链总利润的影响, 同时分析碳交易价格对回收主体的利润影响, 最后比较分析各回收模式的利润函数进而得出闭环供应链最佳回收模式。可得到如下定理。

定理 4:对于 PBM 而言, 各回收模式中其利润受 λ, β, γ 取值的影响, λ 始终对其利润产生不利影响。当 $\beta, \gamma > 1$ 时, 有 $\pi_2^1 > \pi_3^1 > \pi_1^1$; 反之, 则有 $\pi_3^1 > \pi_2^1, \pi_3^1 > \pi_1^1$ 。

由定理 4 可知, 对于三种模式 PBM 的利润 $\pi_1^1, \pi_2^1, \pi_3^1$ 的相对大小受 β 和 γ 具体取值的影响。当 NEVM 和 TPC 给出的单位运营成本均高于实际水平, T-M 模式的 PBM 利润最大, 其次是 R/T-M 模式的利润, 利润最小的是 R-M 模式。原因在于当二者运营成本为“正偏差”时, 会通过提高运

营成本来增加自己在供应链中的话语权。在 T-M 模式(或 R-M 模式)下, TPC(或 NEVM)作为唯一的回收主体, 通过提供较高的单位运营成本信息, 可以争取到更高的间接回收价格, 从而在与 PBM 的交易中获得更高的利润。而在 R/T-M 模式下, 多方参与回收使市场竞争激烈, PBM 可以利用这种竞争关系来压低回收成本, 从而提高自己的利润, 即 $\pi_3^1 > \pi_2^1, \pi_3^1 > \pi_1^1$ 。此外, 在 R/T-M 模式下, 多方参与的供应链提供了更多的协调和优化机会。回收主体之间的合作, 能够促进更高效的回收策略与技术的开发, 提升资源的利用效率, 实现利润最大化。

定理 5:对于 NEVM 而言, 各回收模式下 NEVM 利润大小有: $\pi_1^2 > \pi_2^2, \pi_3^2 > \pi_2^2$, 且 π_1^2 与 π_3^2 的相对大小受 λ, β 和 γ 具体取值的影响。

由定理 5 可知, R-M 模式和 R/T-M 模式的 NEVM 利润均大于 T-M 模式的利润。在 R-M 模式和 R/T-M 模式中, NEVM 直接参与回收过程, 使其更好地控制回收成本和回收效率, 从而提高利润。相比 T-M 模式中不直接参与回收, NEVM 无法完全控制这些因素, 导致其利润下降。同时, 参与回收活动使 NEVM 有机会扩展其业务范围, 提供与电池回收相关的增值服务, 不仅可以作为额外的收入来源, 还可以增强客户忠诚度和满意度, 从而间接提高 NEVM 的利润。

定理 6:对于 TPC 而言, 当 $\beta \neq \gamma$ 时, 各回收模式下 TPC 利润大小有: $\pi_3^3 > \pi_2^3$; 当 $\beta = \gamma$ 时, 则 $\pi_2^3 > \pi_3^3$ 。

由定理 6 可知, 当 NEVM 和 TPC 的运营成本偏差指标不相同, R/T-M 模式的 TPC 利润大于 T-M 模式的利润。这是由于二者在回收市场中采取了不同的竞争策略, 比如 NEVM 给出的单位运营成本高于实际水平来提高间接回收价格, 从而获得更高的利润, 而 TPC 给出的单位运营成本低于实际水平来保持市场竞争力, 以吸引更多的废旧电池供应。在 R/T-M 模式下, 这种策略差异导致 TPC 在与 NEVM 的竞争中获得优势, 从而获得更高的利润。此外, R/T-M 模式下, 信息偏差行为的存在导致 TPC 无法准确预测 NEVM 的行为和市场反应, 为了更好地适应市场变化, TPC 在会采取更为灵活的策略, 最终获得更高的利润。考虑到二者运营成本偏差指标相等的概率较小, 可以忽略, 因此, 相较于 T-M 模式, 闭环供应链各主体均参与回收的 R/T-M 模式中 TPC 利润收益更大。

表2 R-M 模式、模式 T-M 模式和 R/T-M 模式的均衡最优解

参数	R-M 模式	T-M 模式	R/T-M 模式
τ	$[(\epsilon\lambda t + C_n)b + a](2b)^{-1}$	$[(\epsilon\lambda t + C_n)b + a](2b)^{-1}$	$[(\epsilon\lambda t + C_n)b + a](2b)^{-1}$
p	$[(\epsilon\lambda t + C_n)b + 3a](4b)^{-1}$	$[(\epsilon\lambda t + C_n)b + 3a](4b)^{-1}$	$[(\epsilon\lambda t + C_n)b + 3a](4b)^{-1}$
b_{mr}	$[(\beta C_{rr} + \sigma t + C_n - C_r)\mu_1 - \mu_0](2\mu_1)^{-1}$		$(2\mu_1 - 2\mu_2)^{-1} \{A_1 + 2\beta C_{rr}\} \mu_1 + [A_1 + 2(C_r - \sigma t - C_n)]\mu_2 - \mu_0$
b_{mt}		$[(\gamma C_{tt} + \sigma t + C_n - C_r)\mu_1 - \mu_0](2\mu_1)^{-1}$	$(2\mu_1 - 2\mu_2)[(C_1 + 2\gamma C_{tt})\mu_1 + (-C_1 - 2\gamma C_{tt})\mu_2 - \mu_0]$
b_r	$[(-\beta C_{rr} + \sigma t + C_n - C_r)\mu_1 - 3\mu_0](4\mu_1)^{-1}$		$\{[(2C_1 - 4A_1)\mu_2 - 12\mu_0]\mu_1^3 - 3\mu_2 \left[\left(\frac{2}{3}C_1 + \frac{1}{3}A_1 \right) \mu_2 - \frac{2\mu_0}{3} \right] \mu_1^2 - [(C_1 - A_1)\mu_2 - 7\mu_0]\mu_2^2 \mu_1 + [C_1\mu_2 - \mu_0]\mu_2^3 + 4A_1\mu_1^4\} (8\mu_1 G_1)^{-1}$
b_t		$[(-\gamma C_{tt} + \sigma t + C_n - C_r)\mu_1 - 3\mu_0](4\mu_1)^{-1}$	$2C_1\mu_1^3 + [(A_1 - 2C_1)\mu_2 - 6\mu_0]\mu_1^2 - \left\{ 2\mu_2 \left[\left(\frac{1}{2}C_1 + \frac{1}{2}A_1 \right) \mu_2 - \frac{1}{2}\mu_0 \right] \mu_1 + \mu_2^2(C_1\mu_2 + 3\mu_0) \right\} (4G_1)^{-1}$
π_1^1	$\{[A_2^2 b^2 + a^2 + (A_3 t + A_4 C_n - 2\mu_0 A_5)b]\mu_1 + bA_1^2 \mu_1^2 + b\mu_0^2\} (8b\mu_1)^{-1}$	$[A_2^2 b^2 + a^2 + (A_3 t + A_4 C_n - 2\mu_0 A_5 + \gamma C_{tt} - \beta C_{rr})]b\mu_1 + (bC_1^2 \mu_1^2 + \mu_0^2 b)(8\mu_1 b)^{-1}$	$\{[8\sigma^2 t^2 - 8\sigma(-A_1 - C_1)t + 8C_n^2 + I_4 C_n + 8C_r^2 + (-I_4 - 16C_r C_r + 4\gamma^2 C_{tt}^2 + 4\beta^2 C_{rr}^2 \mu_1^2 + (I_6 \mu_2 + I_7 t + I_8 C_n - 8\mu_0 I_9) \mu_1^4 + I_{10} \mu_1^3 + 16 \left(\frac{-C_1(2A_1 - C_1)\mu_2^2}{16} + I_{14} \mu_2 - \frac{3\mu_0^2}{16} \right) \mu_2^2 \mu_1 - 16\mu_2 \left(I_{11} \mu_2^2 + I_{12} \mu_0 \mu_2 - \frac{\mu_0^2}{4} \right) \mu_1^2 - (-C_1 \mu_2 + \mu_0)^2 \mu_2^2] b + (2\mu_1 G_1 a^2 + 2G_1 \mu_1 b^2 A_2^2) (16G_1 \mu_1 b)^{-1}$
π_2^2	$\{A_2^2 b^2 + a^2 + [(A_3 - 8E)t - 2\mu_0 A_5 + A_4 C_n]b\mu_1 + b\mu_0^2 + b[A_1 + (-\beta + 1)C_{rr}][3(\beta - 1)C_{rr} + A_2]\mu_1^2\} (16b\mu_1)^{-1}$	$[(-\epsilon\lambda t - C_n)b + a]^2 (16b)^{-1}$	$[16A_1^2 \mu_1^6 + J_4 \mu_1^5 + (J_5 \mu_2^2 + 16J_6 + 16\mu_0^2)\mu_1^4 + 32\mu_2 \left(-\frac{1}{8}(-5A_1 C_1 \mu_2^2) + J_8 \mu_2 + \frac{\mu_0^2}{2} \right) \mu_1^3 - 4\mu_2^2 (J_9 \mu_2^2 + 3\mu_0(A_1 - C_1)\mu_2 + \mu_0^2)\mu_1^2 - 8J_{11} \mu_2^3 \mu_1 + \mu_2^2 (-C_1 \mu_2 + \mu_0)^2] b + 16 \left[A_2^2 \left(-\frac{\mu_2^2}{2} + \mu_1^6 \right)^2 \mu_1 b^2 \right] + 16J_{13}^2 a^2 \mu_1 (64J_1)^{-1}$
π_3^3		$[(-\gamma C_{tt} + \sigma t + C_n - C_r)\mu_1 - \mu_0]^2 (16\mu_1)^{-1}$	$[(-2C_1)\mu_1^2 + (A_1 \mu_2 - 2\mu_0)(\mu_1 + \mu_2)]^2 (32K_1)^{-1}$

注: $A_1 = -\beta C_{rr} + \sigma t + C_n - C_r$, $A_2 = t\epsilon\lambda + C_n$, $A_3 = -2\epsilon\lambda a + 2\sigma\mu_0 + 8E$, $A_4 = -2a + 2\mu_0$, $A_5 = C_r + \beta C_{rr}$, $C_1 = -\gamma C_{tt} + \sigma t + C_n - C_r$, $D_1 = -2\gamma C_{tt} + 2b_{mt}$; $D_2 = (-\beta C_{rr} + b_{mr})\mu_2 - 2\mu_0$; $D_3 = (\gamma C_{tt} - b_{mt})\mu_2 - \mu_0$, $G_1 = (-\mu_1 + \mu_2)(-2\mu_1^2 + \mu_2^2)$, $I_4 = -8\beta C_{rr} - 8\gamma C_{tt} - 16C_r$, $I_5 = 8\beta C_{rr} + 8\gamma C_{tt}$, $I_6 = -12\sigma^2 t^2 + 12\sigma(\beta C_{rr} + \gamma C_{tt} - 2C_n + 2C_r)t - 12C_n^2 + (12\beta C_{rr} + 12\gamma C_{tt} + 24C_r)C_n - 12C_r^2 + (-12\beta C_{rr} - 12\gamma C_{tt})C_r - 4\beta^2 C_{rr}^2 - 4\beta C_{rr}\gamma C_{tt} - 4\beta^2 C_{rr}^2$, $I_7 = -8\lambda\epsilon a + 16\mu_0\sigma + 32E$, $I_8 = 16\mu_0 - 8a$; $I_9 = \beta C_{rr} + \gamma C_{tt} + 2C_r$, $I_{10} = \left[-3\sigma^2 t^2 + 4 \left(\gamma C_{tt} + \frac{\beta C_{rr}}{2} - \frac{3C_n}{2} + \frac{3C_r}{2} \right) \sigma - 3C_n^2 + (2\beta C_{rr} + 4\gamma C_{tt} + 6C_r)C_n - 3C_r^2 + (-2\beta C_{rr} - 4\gamma C_{tt})C_r - 4\gamma^2 C_{tt}^2 + 4\beta C_{rr}\gamma C_{tt} - 3\beta^2 C_{rr}^2 \right] \mu_2^2 + [(8\lambda\epsilon a - 8\mu_0\sigma - 32E)t + (-8\mu_0 + 8a)C_n + 4\mu_0(\beta C_{rr} + \gamma C_{tt} + 2C_r)]\mu_2 + 8\mu_0^2$, $I_{11} = -\frac{9\sigma^2 t^2}{16} + (40\gamma C_{tt} + 32\beta C_{rr} - 72C_n + 72C_r)\sigma - \frac{9C_n^2}{16} + \left(\frac{5\beta_2 C_{tt}}{8} + \frac{\beta_1 C_{rr}}{2} + \frac{9C_r}{8} \right) C_n - \frac{9C_r^2}{16} + \left(-\frac{5\gamma C_{tt}}{8} - \frac{\beta C_{rr}}{2} \right) C_r - \frac{\gamma^2 C_{tt}^2}{4} - \frac{\beta C_{rr}\gamma C_{tt}}{8} - \frac{3\beta^2 C_{rr}^2}{16}$, $I_{12} = \left(-\frac{\lambda\epsilon a}{4} + \frac{7\mu_0\sigma}{8} + E \right) t + \left(-\frac{a}{4} + \frac{7\mu_0}{8} \right) C_n - \left(2aC_{tt} + \frac{3\beta C_{rr}}{2} + \frac{7C_r}{2} \right)$, $J_1 = \mu_1(2\mu_1^2 - \mu_2^2)b$, $J_4 = -16A_1 C_1 \mu_2 + (-32a + 32\mu_0)C_n + (-32a\epsilon\lambda + 32\mu_0\sigma)t - 32\mu_0(C_{rr}\beta + C_r)$, $J_5 = 20C_n^2 + (8C_1 - 48A_1)C_n - 40\sigma^2 t^2 - 8\sigma(6A_1 - C_1)t - 20C_r^2 + (-48A_1 - 8C_1)C_r + 4\gamma^2 C_{tt}^2$, $J_6 = \mu_0(-\beta C_{rr} + \gamma C_{tt})\mu_2$, $J_8 = \left(a - \frac{5\mu_0}{4} \right) C_n + \left(a\epsilon\lambda - \frac{5\mu_0\sigma}{4} \right) t + \frac{\mu_0}{4}(4\beta C_{rr} + \gamma C_{tt} + 5C_r)$; $J_9 = \left(\gamma C_{tt} + \frac{\sigma}{2} - \frac{3\beta C_{rr}}{2} + \frac{C_n}{2} - \frac{C_r}{2} \right) \left(\gamma C_{tt} - \frac{5\sigma}{2} + \frac{3\beta C_{rr}}{2} - \frac{5C_n}{2} + \frac{5C_r}{2} \right)$, $J_{11} = -\frac{3}{4}A_1 C_1 \mu_2^2 + \left[\left(a - \frac{5\mu_0}{4} \right) C_n + \left(a\epsilon\lambda - \frac{5\mu_0\sigma}{4} \right) t + \mu_0(3\beta C_{rr} + 2\gamma C_{tt} + 5C_r) \right] \mu_2 + \frac{\mu_0^2}{2}$, $J_{13} = -\frac{\mu_2^2}{2} + \mu_1^2$, $K_1 = (2\mu_1^2 - \mu_2^2)\mu_1$.

定理 7:对于闭环供应链整体而言,对于三种模式下供应链整体的利润 π_1 、 π_2 、 π_3 的相对大小存在以下关系:当 $\lambda \geq 1$ 且 $\gamma > 1$ 时, $\pi_2 > \pi_3 > \pi_1$;反之, $\pi_3 > \pi_2$ 、 $\pi_3 > \pi_1$, 此时 π_1 、 π_2 的相对大小受 λ 、 β 和 γ 具体取值的影响。

由定理 7 可知,当 PBM 给出的碳排放量不低于实际水平的同时 NEVM 和 TPC 给出的单位运营成本高于实际水平时,T-M 模式的供应链总利润最大,其次是 R/T-M 模式,利润最小的是 R-M 模式,其余情况均有 R/T-M 模式的闭环供应链总利润大于其余两种模式的总利润。当 NEVM 和 TPC 给出的信息都存在偏差时,会在短期内造成市场信号的扭曲。然而,在 R/T-M 模式下,由于所有主体都参与回收,这种扭曲可以通过供应链内部的沟通和协调来纠正,从而有助于维持市场信号的准确性,促进供应链的整体利益。此外,由于 R/T-M 模式中所有主体都参与回收,风险和收益在供应链中被分散,有助于减少任何单一主体的潜在损失,并且可以通过多方协作来实现收益最大化,故 R/T-M 模式利润最大。

4 数值仿真分析

为了更直观地展示和验证文中的结论,运用 Matlab R2022b 软件对相关参数进行算例分析。在满足模型假设条件下,不失一般性,按照限定条件选定参数,借鉴张令荣等^[8]、聂佳佳等^[14]的参数赋值思想,假定 $C_n = C_r = 100$, $C_t = 40$, $C_{tr} = 150$, $\mu_0 = 20$, $\mu_1 = 1.1$, $\mu_2 = 1.0$, $a = 2500$, $b = t = 5$, $E = 500$, $e = 20$, $\sigma = 6$ 。

4.1 不同回收模式下各回收主体利润变化的灵敏度

在 PBM 碳排放量偏差指标 λ 、NEVM 运营成本偏差指标 β 和 TPC 运营成本偏差指标 γ 变化的情况下,对三种闭环供应链回收模式下各主体利润以及供应链整体利润进行数值仿真分析。

首先,通过仿真验证了不同回收模式下偏差指标对 PBM 利润变化的影响,如表 3 所示。随着碳排放量偏差指标 λ 增大,PBM 利润呈下降趋势,PBM 利润会运营成本偏差指标 γ 和 β 的变化而发生动态变化,具体来说:当 γ 增大时,R-M 模式中的 PBM 利润不发生变化,T-M 模式中 PBM 利润会增加,但 R/T-M 模式中 PBM 利润会降低;当 β 增大时,T-M 模式中的 PBM 利润不发生变化,在 R-M 和 R/T-M 模式中 PBM 的利润均降低。基于以上发现,可以得出结论:若 PBM 给出的排放量高于实际水平,将导致其在碳交易市场上面临更高的碳排

放成本。具体而言,PBM 需支付额外的碳排放费用或购买更多碳配额以满足合规要求,这不仅增加了企业的生产成本,还对其盈利能力产生负面影响,进而损害企业的经济利益。

其次,验证了不同回收模式下偏差指标对 NEVM 利润变化的影响,如表 4 所示。NEVM 的利润随着碳排放量偏差指标 λ 增大而减小,可知 PBM 给出的排放量高于实际水平同样会损害 NEVM 的利润。当 β 增大时,R-M 和 R/T-M 模式中的 NEVM 利润均会下降,T-M 模式中 NEVM 利润保持不变。这表明在 NEVM 直接参与回收的模式中,TPC 给出的单位运营成本高于实际水平会增

表 3 不同回收模式下 PBM 利润变化

NEVM 运营成本 偏差指标 β	TPC 运营成本 偏差指标 γ	PBM 碳排放量偏差指标 λ	
		$\lambda_1 = 0.5$	$\lambda_1 = 1.5$
$\beta_1 = 0.5$	$\gamma_1 = 0.5$	$\pi_1^1 = 79\ 528$ $\pi_2^1 = 79\ 214$ $\pi_3^1 = 81\ 473$	$\pi_1^1 = 42\ 028$ $\pi_2^1 = 41\ 714$ $\pi_3^1 = 43\ 973$
	$\gamma_1 = 1.5$	$\pi_1^1 = 79\ 528$ $\pi_2^1 = 80\ 939$ $\pi_3^1 = 80\ 585$	$\pi_1^1 = 42\ 028$ $\pi_2^1 = 43\ 439$ $\pi_3^1 = 43\ 085$
$\beta_1 = 1.5$	$\gamma_1 = 0.5$	$\pi_1^1 = 79\ 303$ $\pi_2^1 = 79\ 214$ $\pi_3^1 = 80\ 776$	$\pi_1^1 = 41\ 803$ $\pi_2^1 = 41\ 714$ $\pi_3^1 = 43\ 276$
	$\gamma_1 = 1.5$	$\pi_1^1 = 79\ 303$ $\pi_2^1 = 80\ 939$ $\pi_3^1 = 80\ 012$	$\pi_1^1 = 41\ 803$ $\pi_2^1 = 43\ 439$ $\pi_3^1 = 42\ 512$

表 4 不同回收模式下 NEVM 利润变化

NEVM 运营成本 偏差指标 β	TPC 运营成本 偏差指标 γ	PBM 碳排放量偏差指标 λ	
		$\lambda_2 = 0.5$	$\lambda_2 = 1.5$
$\beta_2 = 0.5$	$\gamma_2 = 0.6$	$\pi_1^2 = 38\ 514$ $\pi_2^2 = 38\ 281$ $\pi_3^2 = 38\ 568$	$\pi_1^2 = 19\ 734$ $\pi_2^2 = 19\ 531$ $\pi_3^2 = 19\ 818$
	$\gamma_2 = 1.2$	$\pi_1^2 = 38\ 514$ $\pi_2^2 = 38\ 281$ $\pi_3^2 = 39\ 046$	$\pi_1^2 = 19\ 734$ $\pi_2^2 = 19\ 531$ $\pi_3^2 = 20\ 296$
$\beta_2 = 1.5$	$\gamma_2 = 0.6$	$\pi_1^2 = 38\ 401$ $\pi_2^2 = 38\ 281$ $\pi_3^2 = 38\ 282$	$\pi_1^2 = 19\ 651$ $\pi_2^2 = 19\ 531$ $\pi_3^2 = 19\ 532$
	$\gamma_2 = 1.2$	$\pi_1^2 = 38\ 401$ $\pi_2^2 = 38\ 281$ $\pi_3^2 = 38\ 395$	$\pi_1^2 = 19\ 651$ $\pi_2^2 = 19\ 531$ $\pi_3^2 = 19\ 645$

加 NEVM 的回收成本,从而影响其利润,反之,这种影响则不存在。

再次,验证了不同回收模式下偏差指标对 TPC 利润变化的影响,如表 5 所示。研究发现,随着 γ 和 β 的增加,TPC 的利润呈动态变化。具体而言,当 β 与 γ 不相等时,在单一回收模式(T-M 模式)中,TPC 的利润低于混合回收模式(R/T-M 模式)中的利润;当 β 等于 γ 时,即运营成本偏差指标一致时,TPC 在两种模式下的利润比较呈现相反的结果。这表明在信息具有偏差的情况下,供应链结构的多样性显著影响 TPC 的利润,单一回收模式与混合回收模式对 TPC 利润的影响存在显著差异。此外,设计废旧动力电池回收策略时,必须综合考虑回收模式的经济效益和运营成本的不确定性,以优化供应链的利润分配和风险。

最后,由表 6 可知,碳排放量偏差指标 λ 的增加与供应链整体利润的下降呈正相关。在 $\lambda \geq 1, \gamma \geq 1, \beta \geq 1$, T-M 模式的供应链总利润最大,而 R-M 模式的总利润最小,R/T-M 模式的总利润介于两者之间。反之,R/T-M 模式的供应链总利润始终高于 R-M 和 T-M 模式。该结果解释了信息偏差行为的成本

表 5 不同回收模式下 TPC 利润变化

TPC 运营成本 偏差指标 γ	NEVM 运营成本偏差指标 β		
	$\beta_3 = 0.5$	$\beta_3 = 1.0$	$\beta_3 = 2$
$\gamma_3 = 0.5$	$\pi_3^3 = 75.696$	$\pi_3^3 = 75.696$	$\pi_3^3 = 75.696$
	$\pi_3^3 = 5.316$	$\pi_3^3 = 294.368$	$\pi_3^3 = 2195.896$
$\gamma_3 = 1.0$	$\pi_3^3 = 120.227$	$\pi_3^3 = 120.227$	$\pi_3^3 = 120.227$
	$\pi_3^3 = 545.996$	$\pi_3^3 = 72.504$	$\pi_3^3 = 448.944$
$\gamma_3 = 2$	$\pi_3^3 = 2\,529.602$	$\pi_3^3 = 2\,529.602$	$\pi_3^3 = 2\,529.602$
	$\pi_3^3 = 5\,581.691$	$\pi_3^3 = 3\,583.111$	$\pi_3^3 = 909.379$

表 6 不同回收模式下闭环供应链总利润变化

NEVM 运营成本 偏差指标 β	TPC 运营成本 偏差指标 γ	PBM 碳排放量偏差指标 λ	
		$\lambda_1 = 0.5$	$\lambda_1 = 1.5$
$\beta_1 = 0.5$	$\gamma_1 = 0.5$	$\pi_1 = 118\,042$	$\pi_1 = 61\,792$
		$\pi_2 = 117\,571$	$\pi_2 = 61\,321$
	$\gamma_1 = 1.5$	$\pi_1 = 118\,042$	$\pi_1 = 61\,792$
		$\pi_2 = 117\,571$	$\pi_2 = 63\,908$
$\beta_1 = 1.5$	$\gamma_1 = 0.5$	$\pi_1 = 117\,704$	$\pi_1 = 61\,454$
		$\pi_2 = 117\,571$	$\pi_2 = 61\,321$
	$\gamma_1 = 1.5$	$\pi_1 = 117\,704$	$\pi_1 = 61\,454$
		$\pi_2 = 117\,571$	$\pi_2 = 63\,908$
		$\pi_3 = 119\,518$	$\pi_3 = 62\,376$

效应,当 PBM 给出的排放量高于实际水平时,会引发更高的碳排放成本或在回收过程中产生额外费用,进而增加回收成本,影响供应链的整体利润。

4.2 碳交易价格灵敏度

根据上文的分析,R/T-M 模式相较于 R-M 和 T-M 模式,在供应链总利润及各回收主体利润方面均表现优势。因此,将闭环供应链整体利润最大化作为目标,在供应链回收主体偏差指标确定时,进一步探究碳交易价格与价格、利润之间的关系,均以 R/T-M 模式为例。

随着碳交易价格的上升,PBM 制定的批发价 w 、废旧动力电池回收价 b_{mr} 、 b_{mt} 以及 NEVM 制定的零售价 p 均呈增加趋势。如图 1 所示。这是因为当碳交易价格上升时,PBM 所承担的碳排放成本亦随之增长。在生产成本和单位产品碳排放量恒定的情况下,PBM 通过调整批发价格以保持利润率稳定性。批发价格的上调导致零售价格相应上升,从而在整个供应链中传递成本增加的影响;同时,碳交易价格的上升,驱动 PBM 优化其产品组合,优先考虑再造产品,以实现碳排放量的减少。这种策略不仅降低了与生产相关的碳排放成本,而且通过提升废旧动力电池的回收价格,进一步激发 NEVM 和 TPC 在废旧电池回收方面的参与度。对比图 1 中不同价格与碳交易价格变化的关系,可以发现批发价 w 的斜率显著高于其他价格,说明其对碳交易价格变动的高度敏感性。相反,其他三个价格的图像比较平缓,表明这些价格对于碳交易价格的波动具有较低敏感度。该现象表明,在供应链中批发价的调整对碳交易价格的响应最为迅速,而其他价格则显示出相对稳定的调整趋势。

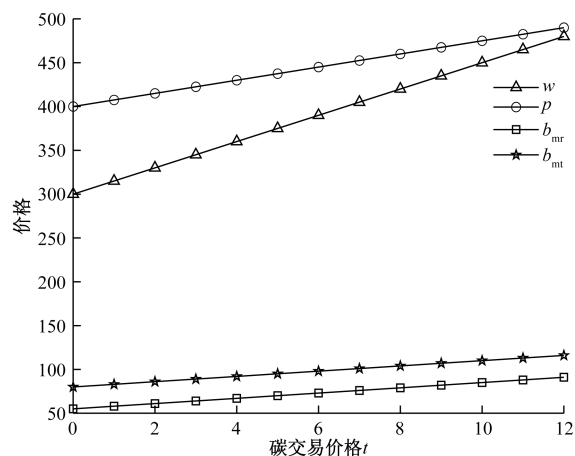


图 1 碳交易价格对零售、批发等价格的影响

如图 2 所示,随着碳交易价格的增长,PBM 和 NEVM 的利润经历了先下降后上升的转变,而 TPC 的利润则呈现持续下降的趋势。这是因为当碳交易价格在一定范围上升时,PBM 的碳排放成本增加,导致自身利润减少;当碳交易价格超过某一数值时,PBM 会通过提高产品的批发价格来提高自身的利润,同时会扩大废旧动力电池的回收量来控制碳排放量,进而控制碳排放成本。NEVM 的利润在初始阶段受到批发价格上升的负面影响,但随后通过提高零售价格实现利润增长。与此同时,TPC 由于其在供应链中的位置,对碳交易价格的上升反应更为直接,导致其利润持续降低,这反映不同供应链主体在价格调整 and 成本控制策略上的差异性。

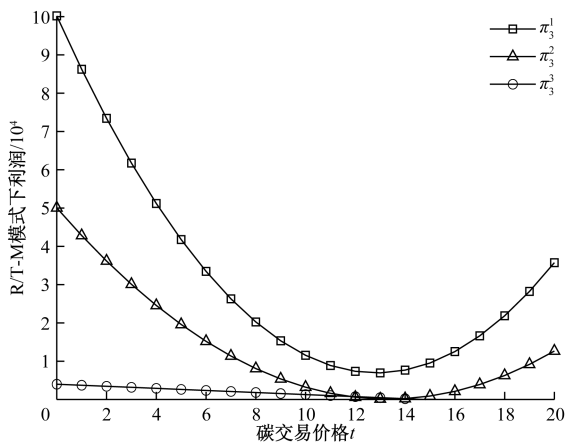


图 2 碳交易价格对 PBM、NEVM 和 TPC 利润的影响

如图 3 所示,闭环供应链的整体利润随着碳交易价格的上升而表现先降后升的趋势。在碳交易价格上升初期,碳排放成本的增加导致供应链总利润下降。然而,当碳交易价格达到某一临界点时,PBM 和 NEVM 的利润增长速度超越了 TPC 利润的减少速度,促使供应链总利润逐步恢复增长。在不同回收模式下,R/T-M 模式展现最高的总利润 π_3 ,当碳交易价格趋近于 0 时,R-M 模式在碳交易价格较低时的总利润 π_1 最低。随着碳交易价格的上升,T-M 模式的总利润 π_2 逐渐降至最低水平,揭示不同回收模式在适应市场变化和成本控制策略上的差异性。

5 结论

本文基于 Stackelberg 博弈理论,针对闭环供应链中回收模式的复杂性,研究了碳交易机制下回收模式选择与信息偏差行为,得出如下结论。

(1)动力电池生产商和废旧动力电池直接回收商的信息偏差行为对供应链回收主体及整体利润

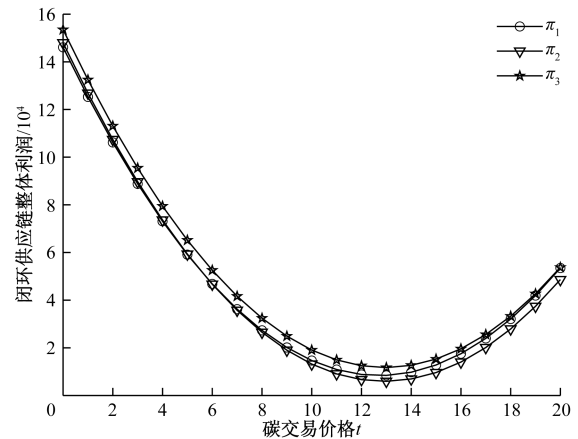


图 3 碳交易价格对闭环供应链总利润的影响

产生显著的负面影响。研究发现,这些行为不仅削弱了各主体的利润,而且对整个供应链的稳定性和效率构成潜在威胁。具体而言,无论哪种回收模式,随着动力电池生产商碳排放量偏差指标增大,各主体的均衡利润及供应链总利润均会下降;各主体的利润以及供应链总利润都会随着运营成本偏差指标 γ 和 β 的变化而发生动态变化。

(2)R/T-M 模式是废旧动力电池企业在面临不同回收渠道的权衡决策结果。本文探讨了供应链回收主体存在信息偏差行为时,不同回收模式对闭环供应链总利润的影响。回收主体企业可以选择 R/T-M 模式,进而提升企业利润和回收市场参与度。同时,回收主体企业应警惕过度依赖单一回收渠道(R-M 模式或 T-M 模式)所带来的风险,确保在市场不稳定时能够有效应对,从而实现长期的可持续发展。

(3)碳交易价格的上升对动力电池的定价策略和供应链利润产生复杂影响。研究认为,在碳交易价格上升的情况下,动力电池生产商制定的批发价、废旧动力电池回收价以及新能源汽车制造商制定的零售价均呈增加趋势;动力电池生产商和新能源汽车制造商的利润呈现出先减少后增加的非线性趋势,而第三方回收商的利润则持续下降。这一结果突出了碳交易市场在推动绿色供应链管理中的双重作用,即既能够通过激励机制促进环保行为的实施,又可能对供应链成员的利润构成挑战。

根据研究结论得出以下管理启示。

(1)新能源汽车制造商与第三方回收商应构建一个以增强信息透明度和促进环保行为为目标的开放合作体系,以平衡动力电池生产商的信息优势。通过加强双方间的沟通与协作,有效降低由信

息偏差引起的供应链风险,并推动供应链的可持续发展。同时,利用数字化工具来提供详尽的回收信息,保障消费者的知情权,增强消费者的环保责任感和参与度,促进形成以环保意识、循环经济、绿色消费、健康生活为核心的新绿色生活方式,支持实现更广泛的社会经济可持续发展目标。

(2)动力电池生产商需采取措施避免信息偏差行为,防止对企业利润及供应链整体收益造成损害。供应链中的回收参与者应深化应用先进的信息技术与供应链管理技术,例如通过数字化供应链管理系统来优化资源配置,减少信息不对称现象,促进生产力的质的提升,为经济与社会的可持续发展奠定基础。

(3)建立完善的碳信息披露激励约束机制,促进碳排放的降低,加强信息公开的“规范性和时效性”,以推动企业自主披露其碳排放数据和相关减排措施,从而提升披露内容的质量和可靠性。同时,在推动数字化供应链建设的同时,利用其宏观调控能力来影响碳交易价格,确保价格波动保持在一个合理的范围内,实现经济效益和降低碳排放量的双重目标。在推动环保发展的过程中,还需加强绿色要素保障能力,包括环境政策、技术创新、资金支持和人才培养等方面的有效配合,以数字经济为驱动力,引导企业和社会各界在决策时优先考虑环境和社会利益,为经济社会的可持续发展提供坚实基础。

参考文献

- [1] 中国汽车工业协会. 2024年3月汽车工业产销情况简析 [EB/OL]. [2024-08-02]. http://www.caam.org.cn/chn/5/cate_39/con_5236394.html.
- [2] OZER O, RAZ G. Supply chain sourcing under asymmet-

- ric information[J]. *Production and Operations Management*, 2011, 20(1): 92-115.
- [3] 赵京彪, 曲朋朋, 周岩. 考虑成本信息不对称的闭环供应链网络均衡[J]. *系统工程学报*, 2022, 37(6): 749-765.
- [4] 王竟竟, 许民利, 邓亚玲. 信息不对称下闭环供应链定价及协调契约[J]. *系统工程学报*, 2022, 37(5): 617-631.
- [5] 张盼, 余莉婷, 熊中楷. 政府奖惩下闭环供应链中信息不对称时的最优合同设计[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(5): 89-100.
- [6] YANG L, JI J, ZHENG C. Impact of asymmetric carbon information on supply chain decisions under low-carbon policies[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016, 2016(6): 1-16.
- [7] 杨磊, 郑晨诗, 纪静娜. 碳信息不对称下的供应链谎报决策与协调研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(4): 111-120.
- [8] 张令荣, 刘笑言, 王锋, 等. 碳配额交易政策下闭环供应链谎报决策与协调研究[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(4): 196-205.
- [9] 王成功, 刘娟娟. 考虑政府奖惩的动力电池回收利益相关者决策行为演化博弈分析[J]. *生态经济*, 2023, 39(4): 205-213.
- [10] 胡文婕, 周佳, 马成霖, 等. 双渠道退役动力电池回收闭环供应链模式选择[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(8): 2572-2595.
- [11] 张川, 田雨鑫, 崔梦雨. 电动汽车动力电池制造商混合渠道回收模式选择与碳减排决策[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(6): 184-195.
- [12] 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.
- [13] CHOI T, LI Y, XU L. Channel leadership, performance and coordination in closed loop supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 146(1): 371-380.
- [14] 聂佳佳, 王拓, 赵映雪, 等. 碳排放约束下再制造闭环供应链回收策略[J]. *管理工程学报*, 2015, 29(3): 249-256.

Research on the Selection of Power Battery Closed-loop Supply Chain Recycling Models Considering Information Bias Behavior under Carbon Trading Mechanisms

LI Xiangdong^{1,2}, WANG Junli¹, WU Xinkun¹, GENG Lixiao¹

(1. School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. National Engineering Research Center for Technological Innovation Method and Tool, Tianjin 300401, China)

Abstract: From the perspective of a closed-loop supply chain, the information bias related to carbon emissions from lithium-ion battery manufacturers and operational cost discrepancies among new energy vehicle manufacturers and third-party recyclers was examined by constructing a Stackelberg game model encompassing three distinct recycling modes. Through numerical examples, the behavior of information biases, individual profits and total profits across these recycling modes was analyzed. The findings indicate that both carbon emission biases and operational cost discrepancies are directly correlated with the individual profits and overall profitability of all stakeholders within the supply chain. Notably, the R/T-M mode yields the highest total profit and should be prioritized in practical applications. Furthermore, as carbon trading prices increase, there is an observable trend where profits for all parties initially decline before subsequently rising.

Keywords: closed-loop supply chains; carbon trading mechanisms; asymmetric information; recycling model