

# 新能源汽车供应链上下游联合减排协调研究

陈 艳,武亚倩\*

(青岛理工大学 管理工程学院,山东 青岛 266520)

**摘要:**“双碳”目标成为战略目标后,作为汽车行业碳减排先锋产品的新能源汽车,如何实现其产业链碳排放量的进一步降低,值得深入探讨。文章对新能源汽车供应链上下游联合减排的协调问题进行研究,构建由动力电池供应商、整车制造商、汽车经销商组成的微分博弈模型,分析分散决策、集中决策、单边成本分担契约决策下的均衡解,最后选择双边成本分担契约协调供应链。研究表明,消费者的低碳偏好在新能源汽车供应链减排中可以发挥正向的市场驱动作用;双边成本分担契约可有效推动联合减排,提升供应链成员相关减排行为的努力程度,从而提高供应链减排效率;双边成本分担契约可以协调供应链,达到集中决策下供应链总利润的水平,实现供应链中各成员利润的帕累托改进。

**关键词:**新能源汽车;微分博弈;联合减排;成本分担

**中图分类号:**F272      **文献标识码:**A      **文章编号:**1008-9659(2026)01-0020-13

随着低碳经济的发展,我国提出“2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和”的“双碳”目标。汽车行业作为二氧化碳排放量最高的行业之一,计划于2028年实现碳达峰。随后,更符合低碳要求的新能源汽车数量快速增加。但在新能源汽车的供应链中,上游高能耗、高排放的汽车材料生产流程碳排放量占比较大,这也意味着减排空间巨大,因此上游零部件供应商的碳减排行为值得关注。尤其是与燃油汽车相比,新能源汽车使用环节的碳排放量大幅降低的原因是以电池的放电反应作为动力来源。但电池从原材料开采到制造再到报废均有大量碳排放,且新能源汽车的动力电池使用寿命仅为5~8年<sup>[1]</sup>。随着锂电池容量的衰退,汽车续航能力在使用过程中将逐渐变差,若在汽车的使用周期内更换电池,需求的上升将会导致电池生产制造环节的碳排放量增加。中国汽车技术研究中心数据显示,预计到2025年,中国废旧动力电池退役量将达78万吨<sup>[2]</sup>,废旧电池的回收再制造刻不容缓。为降低碳排放量,宁德时代收购广东邦普循环,构建电池生产-使用-梯次利用-回收与资源再生的产业闭环,预计在2042年实现五成电池制造使用回收锂。远景动力通过实现电池极片的配方改进和研制低温电解液等技术突破,应对锂电池在寒冷条件下能量快速下降的问题,提升能量利用率。因此,若要实现新能源汽车供应链碳排放量的进一步降低,动力电池供应商对电池的回收再制造和对高性能电池进行研发尤为重要,电池制造企业的生产成本也会相应增加。另外,从目前新能源汽车消费市场的实际情况来看,消费者的环保意识正在提升,逐渐对更加绿色低碳的新能源汽车产生一定的偏好,且对电动汽车的续航以及电池性能等方面颇为关注。经销商对新能源汽车的绿色宣传也会影响销量进而增强电池供应商和制造商的减排意愿,从而影响产品的碳排放量。

综上所述,供应链中上下游企业的协同合作是非常重要的减排途径,文章设计以动力电池生产企业为代表的供应商、新能源整车制造商、经销商组成的三级供应链,研究如何运用供应链的协调功能,促进上下游企业间的合作,推动新能源汽车供应链联合减排,以便在提升新能源汽车碳减排量的同时,增加整个供应

[收稿日期]2024-12-18

[修回日期]2025-02-23

[基金项目]国家社会科学基金重大项目(21&ZD100);山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MA028);山东省研究生优质课程项目(SDYKC2023089)。

[作者简介]陈 艳(1975-),女,教授,主要从事物流与供应链管理、海洋经济与管理方面研究,E-mail:Chenyan0714@126.com.

\* [通讯作者]武亚倩(1995-),女,硕士研究生,主要从事物流与供应链管理、制造工程管理方面研究,E-mail:364958142@qq.com.

链和供应链成员企业的个体利润,实现帕累托优化。另外,考虑到碳排放量的减少是一个长期动态的变化过程,微分博弈作为一种动态分析工具,能够刻画碳减排量变化状态。因此,文章利用微分博弈构建4种不同决策下的联合减排模型,求解均衡决策,对比分析后选择双边成本分担契约进行供应链协调,旨在为新能源汽车供应链的长期减排提供理论支撑和实践参考,推动汽车行业尽快实现碳达峰目标。

## 1 文献综述

自各国倡导低碳经济以来,学者们对供应链减排问题的研究热度只增不减。在联合减排领域,徐春秋等人<sup>[3]</sup>构建由零售商和制造商组成的二级供应链,考虑产品减排量受制造商减排努力影响以及多周期连续生产时的动态变化特征,研究了3种联合减排的微分博弈模型。姜跃等人<sup>[4]</sup>从动态角度研究协同状态和非协同状态下的三级供应链减排问题,通过算例分析讨论了各参数对产品减排量的影响。朱晨等人<sup>[5]</sup>研究单独实行碳交易政策和“碳交易+碳税”政策两种情境下的制造商和零售商联合减排,证明混合碳政策能够长时间激励制造商为低碳努力,提升产品的低碳商誉及供应链决策模式会影响混合碳政策的实施效果。张娜等人<sup>[6]</sup>通过建立二级供应链模型研究发现,系统成员风险规避特性不利于制造商和零售商的联合碳减排,且对系统成员自身效用具有负效应。零售商分担减排成本行为对制造商有益但会对自身产生负效应。可以发现,上述研究多是针对制造商和零售商组成的二级供应链的减排研究,鲜有研究将供应商的减排行为考虑在内。在供应链协调领域,成本分担契约是重要的协调方式。Liu等人<sup>[7]</sup>研究消费者低碳参考水平对产品低碳商誉和碳减排的影响,并提出了双边成本分担的协调机制。花均南等人<sup>[8]</sup>研究绿色农产品三级供应链协调问题,将市场随机需求纳入考虑因素之中,并且引入产品绿色度、绿色研发成本参数,发现合理比例的收益共享和成本共担可使各个绿色供应链成员达到共赢。刘丽等人<sup>[9]</sup>研究三级绿色供应链的协调问题,但其引入价格加成系数,在证明双边成本分担契约可以完全协调绿色供应链,且契约成立条件和协调性与价格加成系数有关的同时,给出投资策略。Ghosh等人<sup>[10]</sup>指出,成本分担契约在提高产品绿色度的同时也能提升供应链绩效,为企业进行绿色投资提供了理论支持。柴强飞等人<sup>[11]</sup>在碳交易政策下构建存在碳规制差异的两级供应链,研究表明碳规制差异下成本分担契约无法实现供应链协调,而采用收益共享契约可以实现协调。姚锋敏等人<sup>[12]</sup>基于零售商决策、合作决策两种环境责任分担模式,构建制造商与零售商联合分担环境责任的供应链博弈模型,分析渠道权力和环境责任成本分担对供应链运作协调的影响。虽然部分供应链协调采用了双边成本分担契约,但是未涉及供应商技术创新和回收再制造两项成本需要分担的情况。在有关汽车供应链的研究中,贺裕雁等人<sup>[13]</sup>研究发现,政府实施碳交易政策时,随着碳交易价格的上涨,在消费者对新车需求降低的同时,会增加对环保再制造汽车的需求,这对企业通过“以旧换再”的策略来实现绿色发展有正效应。黄辉等人<sup>[14]</sup>研究了政府补贴下的双向双渠道闭环供应链定价问题,发现在政府不进行补贴或政府将补贴用于制造商和零售商的产品回收时,新能源汽车的进价和销售价格相对较低。于晓辉等人<sup>[15]</sup>分析在补贴退坡与双积分政策下汽车供应链中的生产决策,发现双积分政策能在补贴降低后保证车企继续提高研发努力水平,使车企与分销商的利润获得帕累托改进。卢超等人<sup>[16]</sup>通过两个汽车制造商和一个汽车经销商组成的两级供应链对汽车供应链的决策优化问题进行研究,考虑消费者同时受到汽车价格、低碳偏好和续航等因素的影响。刘丛等人<sup>[17]</sup>在考虑消费者技术偏好、积分交易价格和技术创新成本等多种因素影响供应链成员创新行为的基础上,探讨了成本分担契约、收益共享契约对创新水平及供应链成员利润的影响。以上研究大多考虑政策、消费者偏好等对供应链生产决策、汽车价格的影响,尚未对如何提高新能源汽车供应链中的碳减排量进行研究。

通过梳理以上文献发现,以往对于联合减排的研究大多为二级供应链且多数针对制造商和零售商,尚未有研究针对动力电池供应商、新能源汽车整车制造商、经销商组成的三级供应链展开。大多成本分担契约仅对双方单项成本进行分担。文章将动力电池供应商减排行为细分为回收再制造技术的应用和对高性能电池研发的技术创新投资水平,更符合行业的现实情境。供应链中的碳排放量是一个动态变化的过程,微分博弈作为一种动态分析工具,能够充分考虑时间因素,准确刻画供应链各主体在减排过程中的行为和决策。因此,文章设计新能源汽车三级供应链,构建分散决策、集中决策、单边成本分担契约以及双边成本分担契约4个决策模型,研究上下游企业联合减排的协调合作问题,分析供应链成员企业的不同决策模式对

新能源汽车供应链减排效果和供应链运营效率的影响,证明双边成本分担契约能够协调供应链。

## 2 问题描述与模型假设

### 2.1 问题描述

文章研究由动力电池供应商(以下简称“供应商”)、新能源汽车整车制造商(以下简称“制造商”)和新能源汽车经销商(以下简称“经销商”)组成的新能源汽车三级供应链的联合减排问题。制造商作为供应链的核心企业,根据政策要求和实际情况,制定所生产新能源汽车的低碳水平,经销商配合进行低碳宣传。为了实现供应链减排目标,通过供应链的协调功能来推动供应商进行技术创新投资和回收再制造。文章将设计供应链成员分散决策、核心企业(制造商)单边成本分担的契约模型、集中决策以及双边成本分担契约模型,分析不同的决策模式对供应链成员联合减排的均衡策略、供应链利润以及产品碳减排量的影响。供应链减排模型如图1所示。

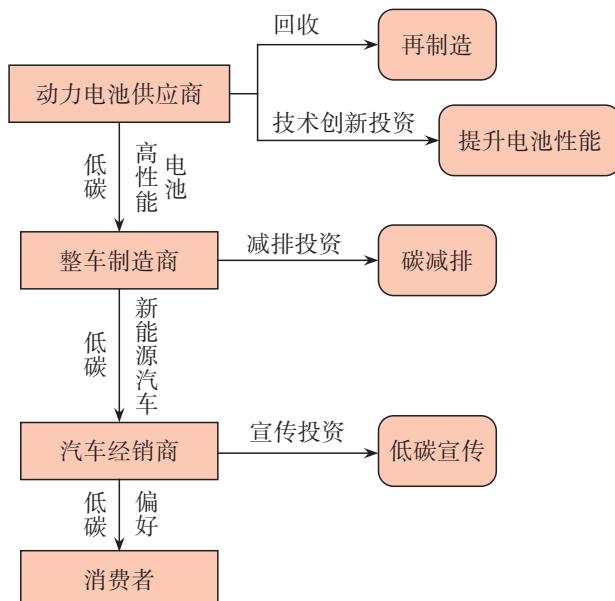


图1 供应链减排模型

在该决策过程中,首先由整车制造商确定新能源汽车的碳减排量( $x$ )以及自身的减排努力程度( $E_M(t)$ ),然后供应商确定技术创新水平( $\theta(t)$ )和回收努力水平( $\gamma(t)$ )、经销商确定低碳宣传努力程度( $E_R(t)$ )。

### 2.2 模型假设

**假设1** 借鉴文献[3],假设企业各项相关减排行为的成本是关于其行为努力程度的凸函数, $t$ 时刻,供应商的技术创新投入成本为 $\frac{k}{2}\theta^2(t)$ ,回收成本为 $\frac{h}{2}\gamma^2(t)$ ,制造商的减排成本为 $\frac{l}{2}E_M^2(t)$ ,经销商的低碳宣传成本为 $\frac{n}{2}E_R^2(t)$ .其中, $k$ 、 $h$ 、 $l$ 、 $n > 0$ ,分别代表相应的成本系数。

**假设2** 借鉴文献[5],假设全新材料生产动力电池和再制造技术生产动力电池的单位成本分别为 $C_c$ 和 $C_r$ .由于再制造动力电池具有成本优势,供应商实施回收再制造后节约的单位成本为 $C_c - C_r = \pi_n > 0$ .

**假设3** 最终产品的碳减排量由动力电池供应商的技术创新水平、回收努力程度以及制造商的减排努力程度来决定。假设 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\phi$ 分别表示动力电池供应商的技术创新水平、回收努力水平和制造商减排努力程度对产品减排量的影响系数, $\omega$ 代表供应链产品减排量的自然衰退率。初始时刻 $x(0) = x_0 \geq 0$ ,则产品减排量的变化过程为

$$\dot{x}(t) = \alpha\theta(t) + \beta\gamma(t) + \phi E_M(t) - \omega x(t) \quad (1)$$

**假设4** 假设产品的碳减排量和经销商低碳宣传努力程度决定低碳新能源汽车的市场需求量,则 $t$ 时刻的产品需求量为

$$D(x(t), E_R(t)) = d + \eta x(t) + \sigma E_R \quad (2)$$

其中,  $d > 0$  为不进行减排和低碳宣传时市场潜在低碳新能源车需求量,  $\eta > 0$  为产品的碳减排量对市场需求的影响系数,  $\sigma > 0$  为经销商低碳宣传对市场需求的影响系数。参考文献[18]~[19]的研究,可以将供应商再制造的废旧产品数量表示为  $D_1(t) = \mu\gamma(t)$ . 其中,  $\mu > 0$  为回收努力对再制造产品数量的影响系数。

**假设5** 设供应商的边际利润为  $\pi_s$ , 制造商边际利润为  $\pi_m$ , 经销商的边际利润为  $\pi_r$ , 其目标函数在无限时间下的利润最大化, 贴现率均为  $\rho$  ( $\rho > 0$ ).

### 3 模型分析

文章构建供应链成员的不同决策模型, 包括分散决策模型、集中决策模型以及引入单边成本分担契约和双边成本分担契约的模型。研究不同的决策模式和不同的成本分担契约对供应链成员联合减排的影响, 并比较得出协调效果更好的契约模式。基于以上假设, 供应商、制造商和经销商的利润泛函为

$$J_s^H(x,t) = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_s D(x(t), E_R(t)) + \mu\gamma(t)\pi_n - \frac{1}{2}k\theta^2(t) - \frac{1}{2}h\gamma^2(t) \right] dt \quad (3)$$

$$J_m^H(x,t) = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_m D(x(t), E_R(t)) - \frac{1}{2}lE_m^2(t) \right] dt \quad (4)$$

$$J_r^H(x,t) = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_r D(x(t), E_R(t)) - \frac{1}{2}nE_r^2(t) \right] dt \quad (5)$$

#### 3.1 分散决策(模型H)

在实际的新能源汽车供应链减排过程中, 动力电池供应商、整车制造商和汽车经销商作为相互独立的企业, 在追求自身利益最大化的目标下, 常采用分散决策。各自的目标是在无限时间内找到最优决策, 使利润函数取得最优值。此时, 供应商、制造商和经销商的最优决策问题分别为

$$\max_{\theta, \gamma} J_s^H = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_s(d + \eta x + \sigma E_R) + \mu\gamma\pi_n - \frac{1}{2}k\theta^2 - \frac{1}{2}h\gamma^2 \right] dt \quad (6)$$

$$\max_{E_R} J_r^H = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_r(d + \eta x + \sigma E_R) - \frac{1}{2}nE_r^2 \right] dt \quad (7)$$

$$\max_{E_m} J_m^H = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_m(d + \eta x + \sigma E_R) - \frac{1}{2}lE_m^2 \right] dt \quad (8)$$

供应商的利润=单位利润×需求+再制造节约的成本-技术创新成本-回收成本; 制造商的利润=单位利润×需求-减排成本; 经销商的利润=单位利润×需求-低碳宣传成本。

**命题1** 在分散决策下, 供应链均衡解如下:

(1) 新能源汽车减排水平的最优轨迹为

$$x^{H*}(t) = \left( x_0 + \frac{B}{A} \right) e^{At} - \frac{B}{A}$$

即

$$x^{H*}(t) = \left[ x_0 - \frac{\alpha^2 \eta \pi_s l h + \eta \pi_m \phi^2 h k + \beta \mu \pi_n l k (\rho + \omega) + \eta \pi_s \beta^2 l k}{(\rho + \omega) l h k \omega} \right] e^{-\omega t} + \frac{\alpha^2 \eta \pi_s l h + \eta \pi_m \phi^2 h k + \beta \mu \pi_n l k (\rho + \omega) + \eta \pi_s \beta^2 l k}{(\rho + \omega) l h k \omega}$$

(2) 供应商、制造商和经销商的最优策略为

$$\theta^{H*} = \frac{\eta \pi_s \alpha}{(\rho + \omega) k}, \gamma^{H*} = \frac{\mu \pi_n}{h} + \frac{\eta \pi_s \beta}{(\rho + \omega) h}, E_R^{H*} = \frac{\pi_r \sigma}{n}, E_m^{H*} = \frac{\eta \pi_m \phi}{(\rho + \omega) l}$$

(3) 供应商、制造商和经销商的长期最优利润值为

$$J_s^{H*}(x,t) = e^{-\rho t}(a_1 x + b_1), J_r^{H*}(x,t) = e^{-\rho t}(a_2 x + b_2), J_m^{H*}(x,t) = e^{-\rho t}(a_3 x + b_3)$$

即

$$J_s^{H*} = e^{-\rho t} \left\{ \frac{\eta \pi_s x}{\rho + \omega} + \frac{\pi_s}{\rho} \left( d + \frac{\pi_r \sigma^2}{n} \right) + \frac{(a_1 \beta + \mu \pi_n)^2}{2h\rho} + \left[ \frac{a_1 \alpha^2}{2k} + \frac{a_3 \phi^2}{l} \right] \frac{a_1}{\rho} \right\}$$

$$J_R^{H*} = \ell^{-pt} \left\{ \frac{\eta \pi_R x}{\rho + \omega} + \frac{\pi_R d}{\rho} + \frac{\pi_R^2 \sigma^2}{2n\rho} + \left[ \frac{\alpha^2 a_1}{k} + \frac{\beta(\mu \pi_n + \beta a_1)}{h} + \frac{\phi^2 a_3}{l} \right] \frac{a_2}{\rho} \right\}$$

$$J_M^{H*} = \ell^{-pt} \left\{ \frac{\eta \pi_M x}{\rho + \omega} + \frac{\pi_M}{\rho} \left( d + \frac{\pi_R \sigma^2}{n} \right) + \left[ \frac{\alpha^2 a_1}{k} + \frac{\beta(\beta a_1 + \mu \pi_n)}{h} + \frac{a_3 \phi^2}{2l} \right] \frac{a_3}{\rho} \right\}$$

**推论1**  $\theta^H, \gamma^H, E_R^H, E_M^H$  与相关影响系数的关系如下:

$$\frac{\partial \theta^H}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial \theta^H}{\partial \eta} > 0, \frac{\partial \gamma^H}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \gamma^H}{\partial \eta} > 0, \frac{\partial E_R^H}{\partial \sigma} > 0, \frac{\partial E_M^H}{\partial \phi} > 0, \frac{\partial E_M^H}{\partial \eta} > 0$$

由推论1可知,  $\alpha$  较大代表供应商的技术创新水平对产品减排量影响较大, 能够刺激供应商增加技术创新投资, 减少动力电池生产过程中的二氧化碳排放量; 同样,  $\beta$  较大代表供应商的回收努力水平对产品减排量影响较大, 能够刺激供应商增加回收投资; 参数  $\phi$  较大, 即制造商的减排努力水平对产品减排量影响较大时, 可以刺激制造商增加减排投资, 以增加产品的减排量; 较大的参数  $\sigma$  意味着经销商对产品的低碳宣传行为对市场需求有较大的影响力, 这会刺激经销商增加宣传投资, 以提高市场需求量;  $\eta$  较大则表示产品减排量对市场需求的影响较大, 即消费者的低碳偏好较强时, 决策者为了增强竞争力, 会增加上述各项投资。

**推论2** 由命题1中的均衡策略可知供应商的技术创新水平和回收努力程度。制造商的减排努力程度和经销商的低碳宣传努力程度与其各自的边际利润成正相关。需要说明的是, 供应商的回收再制造行为使得再制造节约的成本与供应商的边际利润共同影响供应商的回收努力程度。另外, 当贴现率、自然衰退率以及各项成本系数上升时, 各项努力水平不断减弱。而随着消费者对减排量的敏感度不断上升, 动力电池供应商的技术创新努力水平和回收努力水平会持续提高; 当消费者对低碳宣传的敏感度上升时, 经销商的低碳宣传努力程度也会随之提升。

因此, 消费者受产品减排量和低碳宣传的影响越大, 供应链成员减排行为和对低碳产品的宣传积极性越高, 增加产品减排和低碳产品宣传相关投资的意愿越强, 获取的利润也越高。若相关减排行为以及低碳宣传的成本系数过高, 则意味着成本较高, 将会对供应链成员产生负面影响。此时可以通过内部成员间的成本分担或外部激励等进行一定干预, 以实现帕累托改进。

### 3.2 集中决策(模型C)

在协同状态下, 动力电池供应商、新能源车制造商、汽车经销商作为一个整体, 共同决策供应商的技术创新水平  $\theta$  和回收努力程度  $\gamma$ 、制造商的减排努力程度  $E_M$ 、经销商的低碳宣传努力程度  $E_R$ , 且以供应链系统的利润最大化为一致目标。假设贴现率均为  $\rho > 0$ , 集中决策下供应链的最优决策问题为

$$\max_{\theta, \gamma, E_M, E_R} J_{SC}^C = \int_0^\infty \ell^{-pt} \left[ (\pi_s + \pi_M + \pi_R)(d + \eta x + \sigma E_R) + \mu \gamma \pi_n \right] dt \quad (9)$$

**命题2** 在协同状态下, 供应链均衡解如下:

(1) 新能源汽车减排水平的最优轨迹为

$$x^C(t) = \left( x_0 + \frac{B}{A} \right) \ell^{At} - \frac{B}{A}$$

即

$$x^C(t) = \left[ x_0 - \frac{h\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S)(l\alpha^2 + k\phi^2) + kl\beta^2\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + kl\beta\mu\pi_n(\rho + \omega)}{hkl\omega(\rho + \omega)} \right] \ell^{-\omega t} + \frac{h\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S)(l\alpha^2 + k\phi^2) + kl\beta^2\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + kl\beta\mu\pi_n(\rho + \omega)}{hkl\omega(\rho + \omega)}$$

(2) 供应商、制造商和经销商的最优策略为

$$\theta^{C*} = \frac{\alpha\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S)}{k(\rho + \omega)}, \gamma^{C*} = \frac{\beta\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + \mu\pi_n(\rho + \omega)}{h(\rho + \omega)}$$

$$E_M^{C*} = \frac{\phi\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S)}{l(\rho + \omega)}, E_R^{C*} = \frac{(\pi_M + \pi_R + \pi_S)\sigma}{n}$$

(3) 供应链的长期最优点利润值为

$$J_{SC}^{C^*}(x,t) = \ell^{-\rho t} (a_c x + b_c)$$

即

$$J_{SC}^{C^*} = \ell^{-\rho t} \left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\pi_M + \pi_R + \pi_S)}{\rho} + \frac{(\pi_M + \pi_R + \pi_S)^2 \sigma^2}{2n\rho} + \frac{\eta^2 (\pi_M + \pi_R + \pi_S)^2 (hl\alpha^2 + kl\beta^2 + hk\varphi^2)}{2hkl\rho(\rho + \omega)^2} \\ + \frac{x\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S)}{\rho + \omega} + \frac{\mu\pi n [2\beta\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + \mu\pi n(\rho + \omega)]}{2h\rho(\rho + \omega)} \end{array} \right\}$$

**推论3** 由命题2可知,集中决策下供应链成员的决策受供应链总边际利润( $\pi_M + \pi_R + \pi_S$ )的影响。

(1) 比较命题1和命题2,可得 $\theta^{C^*} > \theta^{H^*}, \gamma^{C^*} > \gamma^{H^*}, E_R^{C^*} > E_R^{H^*}, E_M^{C^*} > E_M^{H^*}$ ,即集中决策下的各项努力水平大于分散决策。

(2) 计算集中决策下和分散决策下的供应链总利润,可得

$$J_{SC}^{C^*} - (J_S^{H^*} + J_R^{H^*} + J_M^{H^*}) = \frac{1}{2hk \ln \rho \omega (\rho + \omega)^2} \left( \begin{array}{l} k \ln \beta^2 \eta^2 (\pi_M + \pi_R) (2(\pi_M + \pi_R + \pi_S) \rho + (\pi_M + \pi_R) \omega) \\ + h \left( kn \eta^2 (\pi_R + \pi_S) \varphi^2 (2(\pi_M + \pi_R + \pi_S) \rho + (\pi_R + \pi_S) \omega) + l(k(\pi_M + \pi_S)^2 \sigma^2 \omega (\rho + \omega)^2) \right. \\ \left. + n\alpha^2 \eta^2 (\pi_M + \pi_R) (2(\pi_M + \pi_R + \pi_S) \rho + (\pi_M + \pi_R) \omega) \right) \end{array} \right) > 0$$

即 $J_{SC}^{C^*} > J_S^{H^*} + J_R^{H^*} + J_M^{H^*}$ .

集中决策模式下供应链的总利润大于分散化决策模式下各成员相加的总利润,这意味着实现供应链协同既有利于成员的各项努力水平,也有利于提高供应链的总利润。因此,供应链成员间应当加强合作,实现供应链协调,提升产品减排量的同时提高供应链利润。

### 3.3 单边成本分担契约(模型X)

考虑到供应商的技术创新、回收再制造以及经销商的低碳宣传行为对产品减排十分重要。为进一步提升供应链碳减排水平,参考文献[3]的研究,在模型H的基础上引入成本分担契约。在模型X中,供应商、制造商和经销商独立决策,目标是使各自的利润最大化。首先,由制造商决定减排努力程度( $E_M^X(x)$ )和为供应商、经销商分担成本的比例。然后,供应商和经销商决策自身的技术创新水平( $\theta(t)$ )、回收努力程度( $\gamma(t)$ )和低碳宣传努力程度( $E_R(t)$ )。本模型与模型H的区别是,为了激励供应商和经销商,制造商为供应商分担一部分技术创新成本(比例为 $k_1$ )和回收成本(比例为 $k_2$ ),为经销商分担一部分低碳宣传成本(比例为 $k_3$ )。假设贴现率均为 $\rho > 0$ ,供应商、制造商和经销商的最优决策问题分别为

$$\max_{\theta, \gamma} J_S^X = \int_0^\infty \ell^{-\rho t} \left[ \pi_s (d + \eta x + \sigma E_R) + \mu \gamma \pi_n - \frac{1}{2} (1 - k_1) k \theta^2 - \frac{1}{2} (1 - k_2) h \gamma^2 \right] dt \quad (10)$$

$$\max_{E_R} J_R^X(x, t) = \int_0^\infty \ell^{-\rho t} \left[ \pi_R (d + \eta x + \sigma E_R) - \frac{1}{2} (1 - k_3) n E_R^2 \right] dt \quad (11)$$

$$\max_{E_M, k_1, k_2, k_3} J_M^X = \int_0^\infty \ell^{-\rho t} \left[ \pi_M (d + \eta x + \sigma E_R) - \frac{1}{2} l E_M^2(t) - \frac{1}{2} k_1 k \theta^2(t) - \frac{1}{2} k_2 h \gamma^2(t) - \frac{1}{2} k_3 n E_R^2(t) \right] dt \quad (12)$$

供应商的利润=单位利润×需求+再制造节约的成本 $-(1 - k_1)$ 技术创新成本 $-(1 - k_2)$ 回收成本;制造商的利润=单位利润×需求-减排成本 $-k_1$ 技术创新成本 $-k_2$ 回收成本 $-k_3$ 低碳宣传成本;经销商的利润=单位利润×需求 $-(1 - k_3)$ 低碳宣传成本。

**命题3** 在模型X中,供应链均衡解如下:

(1) 新能源汽车减排水平的最优轨迹为

$$x^X(t) = \left( x_0 + \frac{B^X}{A^X} \right) \ell^{A^X t} - \frac{B^X}{A^X}$$

即

$$\begin{aligned} x^{X*}(t) = & \left( x_0 - \frac{\alpha^2 \eta (2\pi_M + \pi_S)}{2k(\rho + \omega)\omega} + \frac{\eta \pi_M \phi^2}{l(\rho + \omega)\omega} + \frac{\beta^2 \eta (2\pi_M + \pi_S)}{2h(\rho + \omega)\omega} + \frac{\beta \mu \pi_n}{2h\omega} \right) e^{-\omega t} \\ & + \frac{\alpha^2 \eta (2\pi_M + \pi_S)}{2k(\rho + \omega)\omega} + \frac{\eta \pi_M \phi^2}{l(\rho + \omega)\omega} + \frac{\beta^2 \eta (2\pi_M + \pi_S)}{2h(\rho + \omega)\omega} + \frac{\beta \mu \pi_n}{2h\omega} \end{aligned}$$

(2) 供应商、制造商和经销商的最优策略为

$$\begin{aligned} \theta^{X*} &= \frac{\alpha \eta (2\pi_M + \pi_S)}{2k(\rho + \omega)}, \gamma^{X*} = \frac{\beta \eta (2\pi_M + \pi_S) + \mu \pi_n (\rho + \omega)}{2h(\rho + \omega)}, E_R^{X*} = \frac{\sigma (2\pi_M + \pi_R)}{2n}, E_M^{X*} = \frac{\eta \pi_M \phi}{l(\rho + \omega)}, \\ k_1^{X*} &= \frac{2\pi_M - \pi_S}{2\pi_M + \pi_S}, k_2^{X*} = \frac{\beta \eta (2\pi_M - \pi_S) - \mu \pi_n (\rho + \omega)}{\beta \eta (2\pi_M + \pi_S) + \mu \pi_n (\rho + \omega)}, k_3^{X*} = \frac{2\pi_M - \pi_R}{2\pi_M + \pi_R} \end{aligned}$$

(3) 供应商、制造商和经销商的长期最优利润值为

$$J_S^{X*}(x, t) = e^{-pt}(a_4 x + b_4), J_R^{X*}(x, t) = e^{-pt}(a_5 x + b_5), J_M^{X*}(x, t) = e^{-pt}(a_6 x + b_6)$$

即

$$\begin{aligned} J_S^{X*} &= e^{-pt} \left[ \frac{\eta \pi_S x}{\rho + \omega} + \frac{\pi_S d}{\rho} + \frac{(2\pi_M + \pi_R) \pi_S \sigma^2}{2n\rho} + \frac{(a_4 \beta + \mu \pi_n)(2a_6 \beta + a_4 \beta + \mu \pi_n)}{4h\rho} + \frac{(2a_6 + a_4) \alpha^2 a_4}{4k\rho} + \frac{\phi^2 a_4 a_6}{l\rho} \right] \\ J_R^{X*} &= e^{-pt} \left\{ \frac{\eta \pi_R x}{\rho + \omega} + \frac{\pi_R d}{\rho} + \frac{(2\pi_M + \pi_R) \pi_R \sigma^2}{4n\rho} + \left[ \frac{(2a_6 + a_4) \alpha^2}{2k} + \frac{\beta (2a_6 \beta + \beta a_4 + \mu \pi_n)}{2h} + \frac{\phi^2 a_6}{l} \right] \frac{a_5}{\rho} \right\} \\ J_M^{X*} &= e^{-pt} \left\{ \frac{\eta \pi_M x}{\rho + \omega} + \frac{\pi_M d}{\rho} + \frac{(2\pi_M + \pi_R)^2 \sigma^2}{8n\rho} + \frac{(2a_6 + a_4)^2 \alpha^2}{8k\rho} + \frac{(2a_6 \beta + a_4 \beta + \mu \pi_n)^2}{8h\rho} + \frac{\phi^2 a_6^2}{2l\rho} \right\} \end{aligned}$$

**推论4** 比较分散决策、集中决策和单边成本分担契约模型,可得:

$$\text{当 } \pi_M \geq \frac{\pi_S}{2}, \beta \eta (2\pi_M - \pi_S) > \mu \pi_n (\rho + \omega), \pi_M \geq \frac{\pi_R}{2} \text{ 时, 存在最优的 } k_1^*, k_2^*, k_3^*;$$

$$\theta^{C*} > \theta^{X*} > \theta^{H*}, \gamma^{C*} > \gamma^{X*} > \gamma^{H*}, E_R^{C*} > E_R^{X*} > E_R^{H*}, E_M^{C*} > E_M^{X*} > E_M^{H*}$$

$$J_S^{X*} > J_S^{C*}, J_R^{X*} > J_R^{C*}, J_M^{X*} > J_M^{C*}, J_{SC}^{C*} > J_S^{X*} + J_M^{X*} + J_R^{X*} > J_S^{H*} + J_M^{H*} + J_R^{H*}$$

由推论4可知,当  $\pi_M \geq \frac{\pi_S}{2}$  时,制造商愿意为供应商分担技术创新成本;当  $\beta \eta (2\pi_M - \pi_S) > \mu \pi_n (\rho + \omega)$  时,制造商愿意为供应商分担回收成本;当  $\pi_M \geq \frac{\pi_R}{2}$  时,制造商愿意为经销商分担低碳宣传成本。

因此,在一定条件下,制造商愿意为供应链中其他企业分担部分成本。与分散决策相比,单边成本分担契约模式中供应链成员的各项努力水平较高,与集中决策相比则较低。说明在单边成本契约模式下,制造商对供应商和经销商的成本分担,激励了供应商的技术创新、回收制造努力,经销商的低碳宣传努力以及自身的减排努力,但激励效果有限。因此,虽然单边成本分担契约能够增加供应链成员各自的利润,但供应链的总利润小于集中决策下的水平。

### 3.4 双边成本分担契约(模型Y)

本模型在模型X的基础上进行改进,将核心企业的单边成本分担改为双边成本分担,提升供应链成员的联合减排效率和利润。在此模型中,制造商为供应商分担一部分技术创新成本(比例为  $k_1$ )和回收成本(比例为  $k_2$ ),为经销商分担一部分低碳宣传成本(比例为  $k_3$ )。同时,供应商和经销商为制造商分担一部分减排成本(比例分别为  $k_4$  和  $k_5$ )。假设贴现率均为  $\rho > 0$ ,供应商、制造商和经销商的最优决策问题分别为

$$\max_{\theta, \gamma, k_4} J_S^Y = \int_0^\infty e^{-pt} \left[ \pi_S (d + \eta x + \sigma E_R) + \mu \gamma(t) \pi_n - \frac{1}{2} (1 - k_1) k \theta^2(t) - \frac{1}{2} (1 - k_2) h \gamma^2(t) - \frac{1}{2} k_4 l E_M^2(t) \right] dt \quad (13)$$

$$\max_{E_R, k_5} J_R^Y = \int_0^\infty e^{-pt} \left[ \pi_R (d + \eta x + \sigma E_R) - \frac{1}{2} (1 - k_3) n E_R^2(t) - \frac{1}{2} k_5 l E_M^2(t) \right] dt \quad (14)$$

$$\max_{E_M, k_1, k_2, k_3} J_M^Y = \int_0^\infty e^{-pt} \left[ \pi_M (d + \eta x + \sigma E_R) - \frac{1}{2} (1 - k_4 - k_5) l E_M^2(t) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} k_1 k \theta^2(t) - \frac{1}{2} k_2 h \gamma^2(t) - \frac{1}{2} k_3 n E_R^2(t) \right] dt \quad (15)$$

供应商的利润=单位利润×需求+再制造节约的成本 $-(1-k_1)$ 技术创新成本 $-(1-k_2)$ 回收成本 $-k_4$ 制造商减排成本;制造商的利润=单位利润×需求 $-(1-k_4-k_5)$ 制造商减排成本 $-k_1$ 技术创新成本 $-k_2$ 回收成本 $-k_3$ 低碳宣传成本;经销商的利润=单位利润×需求 $-(1-k_3)$ 低碳宣传成本 $-k_5$ 制造商减排成本。

**命题4** 在模型Y中,供应链均衡解如下:

(1)新能源汽车减排水平的最优轨迹为

$$x^{Y*}(t) = \left( x_0 + \frac{B^Y}{A^Y} \right) e^{At} - \frac{B^Y}{A^Y}$$

即

$$\begin{aligned} x^{Y*}(t) = & \left( x_0 - \frac{h\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S)(l\alpha^2 + k\phi^2) + kl\beta(\beta\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + \mu\pi_n(\rho + \omega))}{hkl\omega(\rho + \omega)} \right) e^{-\omega t} \\ & + \frac{h\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S)(l\alpha^2 + k\phi^2) + kl\beta[\beta\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + \mu\pi_n(\rho + \omega)]}{hkl\omega(\rho + \omega)} \end{aligned}$$

(2)供应商、制造商和经销商的最优策略为

$$\theta^{Y*} = \frac{\eta\pi_S\alpha}{k(1-k_1)(\rho + \omega)}, \gamma^{Y*} = \frac{\beta\eta\pi_S}{h(1-k_2)(\rho + \omega)} + \frac{\mu\pi_n}{h(1-k_2)}, E_R^{Y*} = \frac{\pi_R\sigma}{(1-k_3)n}, E_M^{Y*} = \frac{\eta\pi_M\phi}{(1-k_4-k_5)l(\rho + \omega)}$$

(3)供应商、制造商和经销商的长期最优利润值为

$$\begin{aligned} J_S^{Y*}(x,t) &= \ell^{-pt}(a_7x + b_7), J_R^{Y*}(x,t) = \ell^{-pt}(a_8x + b_8), J_M^{Y*}(x,t) = \ell^{-pt}(a_9x + b_9) \\ J_S^{Y*} &= \ell^{-pt} \left\{ \frac{\pi_S\eta x}{\rho + \omega} + \left( \frac{\alpha^2}{k - kk_1} + \frac{\beta^2}{h - hk_2} \right) \frac{\eta^2\pi_S^2}{2\rho(\rho + \omega)^2} + \frac{\eta\pi_S}{\rho(\rho + \omega)} \left[ \frac{\beta\mu\pi_n}{h - hk_2} + \frac{\eta\pi_M\varphi^2}{(1 - k_4 - k_5)l(\rho + \omega)} \right] \right\} \\ &+ \frac{\mu^2\pi n^2}{2h(1 - k_2)\rho} + \frac{\pi_S}{\rho} \left( d + \frac{\pi_R\sigma^2}{n - k_3n} \right) - \frac{k_4\eta^2\pi_M^2\varphi^2}{2(-1 + k_4 + k_5)^2l\rho(\rho + \omega)^2} \\ J_R^{Y*} &= \ell^{-pt} \left\{ \frac{\pi_R\eta x}{\rho + \omega} + \left( \frac{\alpha^2}{k - kk_1} + \frac{\beta^2}{h - hk_2} \right) \frac{\eta^2\pi_S\pi_R}{\rho(\rho + \omega)^2} + \frac{\eta\pi_R}{\rho(\rho + \omega)} \left[ \frac{\beta\mu\pi n}{(h - hk_2)} + \frac{\eta\pi_M\varphi^2}{(1 - k_4 - k_5)l(\rho + \omega)} \right] \right\} \\ &+ \frac{\pi_R}{\rho} \left( d + \frac{\pi_R\sigma^2}{2n - 2k_3n} \right) - \frac{k_5\eta^2\pi_M^2\varphi^2}{2(-1 + k_4 + k_5)^2l\rho(\rho + \omega)^2} \\ J_M^{Y*} &= \ell^{-pt} \left\{ \frac{\pi_M\eta x}{\rho + \omega} + \left( d + \frac{\pi_R\sigma^2}{n - k_3n} \right) \frac{\pi_M}{\rho} + \frac{\alpha^2\eta^2\pi_M\pi_S}{(k - kk_1)\rho(\rho + \omega)^2} + \frac{\eta^2\pi_M^2\varphi^2}{2(1 - k_4 - k_5)l\rho(\rho + \omega)^2} - \frac{k_3\pi_R^2\sigma^2}{2(-1 + k_3)^2n\rho} \right\} \\ &- \frac{k_1\alpha^2\eta^2\pi_S^2}{2k(-1 + k_1)^2\rho(\rho + \omega)^2} - \frac{[\beta\eta\pi_S + \mu\pi_n(\rho + \omega)][\beta\eta(2(-1 + k_2)\pi_M + k_2\pi_S) + k_2\mu\pi_n(\rho + \omega)]}{2h(-1 + k_2)^2\rho(\rho + \omega)^2} \end{aligned}$$

$$J_S^{Y*} + J_R^{Y*} + J_M^{Y*} =$$

$$\ell^{-pt} \left\{ \frac{1}{2hk\ln\rho(\rho + \omega)^2} \left[ k \ln(\beta\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + \mu\pi_n(\rho + \omega))^2 + h(\pi_M + \pi_R + \pi_S) \right. \right. \\ \left. \left. + (kn\eta^2(\pi_M + \pi_R + \pi_S)\varphi^2 + l(n\alpha^2\eta^2(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + k(\pi_M + \pi_R + \pi_S)\sigma^2(\rho + \omega)^2) \right. \right. \\ \left. \left. + 2kn(\rho + \omega)(x\eta\rho + d(\rho + \omega))) \right] \right\}$$

**推论5** 比较集中决策和双边成本分担契约模型。

$$\text{求解 } \theta^{Y*} = \theta^{SC*}, \gamma^{Y*} = \gamma^{SC*}, E_R^{Y*} = E_R^{SC*}, E_M^{Y*} = E_M^{SC*}, \text{ 当 } k_1 = \frac{\pi_M + \pi_R}{\pi_M + \pi_R + \pi_S}, k_2 = \frac{\beta\eta(\pi_M + \pi_R)}{\beta\eta(\pi_M + \pi_R + \pi_S) + \mu\pi_n(\rho + \omega)},$$

$$k_3 = \frac{\pi_M + \pi_S}{\pi_M + \pi_R + \pi_S}, k_4 + k_5 = \frac{\pi_R + \pi_S}{\pi_M + \pi_R + \pi_S} \text{ 时, 可以达成 } x^{Y*}(t) - x^{C*}(t) = 0, J_{SC}^{C*} - (J_S^{Y*} + J_R^{Y*} + J_M^{Y*}) = 0, \\ (J_S^{Y*} + J_R^{Y*} + J_M^{Y*}) - (J_S^{H*} + J_R^{H*} + J_M^{H*}) = 0.$$

以上推论表明,使用双边成本分担契约协调后,供应链成员均衡策略的最优解、产品减排量以及供应链整体利润均能实现集中决策下的水平。

**推论6** 双边成本分担契约模型中,供应链成员企业为其他成员分担成本的比例与自身边际利润成正相关。 $\pi_n$ 为电池供应商生产再制造电池比全新电池节约的生产成本,其与制造商分担回收制造成本的比例呈负相关。

上述推论表明,在使用双边成本分担契约进行协调后,制造商的边际利润越大,为供应商和经销商分担成本的比例越高;供应商和经销商边际利润的值越大,为制造商分担碳减排成本的比例越高;再制造动力电池的成本越高,制造商分担回收制造成本的比例越大。

为使供应链中的各成员都自愿接受双边成本分担契约,各自在双边成本分担契约下的利润均不应低于在分散决策模型下的利润,即  $J_S^{Y^*} \geq J_S^{H^*}, J_R^{Y^*} \geq J_R^{H^*}, J_M^{Y^*} \geq J_M^{H^*}$ . 对于供应商和经销商分担制造商减排成本的比例,参考文献[9]的研究,令  $k_4 = k_5 = \frac{\pi_R + \pi_S}{2(\pi_M + \pi_R + \pi_S)}$ . 由于难以直接判定分散决策和双边成本分担契约模型下各成员企业的利润函数之差是否大于0,将在下一节用赋值法求解,进行验证。

#### 4 数值分析

对以上推论进行验证,分析产品减排量的最优轨迹,比较不同决策下的供应链利润,证明双边成本分担契约的可行性。通过借鉴文献[5]和文献[9]的参数设置,结合本研究现实背景对参数进行赋值。设定  $\pi_S = 5$ ,  $\pi_M = 8$ ,  $\pi_R = 6$ ,  $\pi_n = 6$ ,  $k = 8$ ,  $l = 18$ ,  $n = 12$ ,  $h = 16$ ,  $\alpha = 1.5$ ,  $\beta = 3$ ,  $\phi = 6$ ,  $d = 1200$ ,  $\mu = 1.5$ ,  $\eta = 4$ ,  $\gamma = 4$ ,  $\sigma = 6$ ,  $\omega = 0.3$ ,  $\rho = 0.8$ .

##### 4.1 模型数值对比

由表1可知,模型C中均衡策略的值大于模型H和模型X中相应的均衡策略值,但与Y契约下的均衡策略值相同。比较模型X与模型H可得出,供应商的技术创新水平、回收努力程度以及经销商的低碳宣传努力程度均近乎实现了翻倍增长,而制造商的减排努力程度仅提高了50%左右;Y契约与模型H比较可得,供应商的技术创新水平、回收努力程度以及经销商低碳宣传努力程度、制造商减排努力程度的相应值均提高了2~3倍。由此可知,仅依靠制造商进行单边成本分担的模型X激励作用有限,上下游企业进行双边成本分担的Y契约可以真正提升新能源汽车供应链企业联合减排的合作积极性。

表1 不同决策模型下的均衡策略对比

| 均衡策略     | 模型H    | 模型C     | 模型X    | 模型Y     |
|----------|--------|---------|--------|---------|
| $\theta$ | 3.4091 | 12.9545 | 7.1591 | 12.9545 |
| $\gamma$ | 3.6903 | 13.2358 | 7.2997 | 13.2358 |
| $E_R$    | 3.0000 | 9.5000  | 5.5000 | 9.5000  |
| $E_M$    | 6.0606 | 23.0303 | 9.6970 | 23.0303 |
| $k_1$    |        |         | 0.5238 | 0.7368  |
| $k_2$    |        |         | 0.4945 | 0.7212  |
| $k_3$    |        |         | 0.4545 | 0.6842  |
| $k_4$    |        |         |        | 0.2895  |
| $k_5$    |        |         |        | 0.2895  |

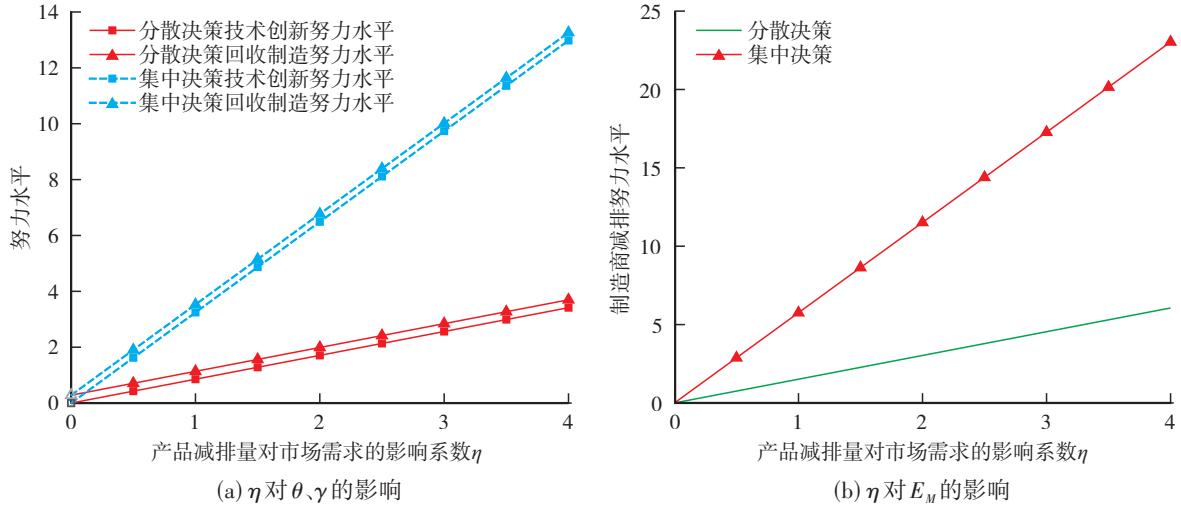
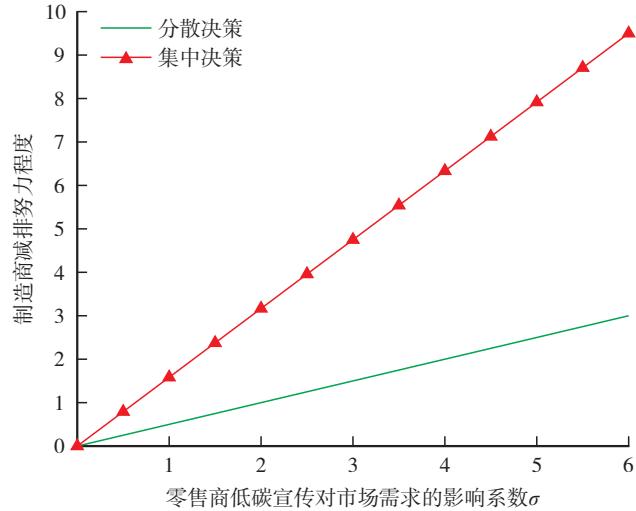
由表2可知,在文章的双边成本分担模型(Y)和分散模型(H)中各成员获得的利润之差为  $J_S^{Y^*} - J_S^{H^*} = \ell^{-\rho}(8301.4) > 0$ ,  $J_M^{Y^*} - J_M^{H^*} = \ell^{-\rho}(12984.5) > 0$ ,  $J_R^{Y^*} - J_R^{H^*} = \ell^{-\rho}(10714.5) > 0$ , 可以满足推论4中  $J_S^{Y^*} \geq J_S^{H^*}$ ,  $J_R^{Y^*} \geq J_R^{H^*}$ ,  $J_M^{Y^*} \geq J_M^{H^*}$  的条件,即供应链中各成员能够接受双边成本分担契约,从而消除供应链成员单独决策所产生的双重边际效应,实现帕累托改进。

表2 模型Y与模型H的供应链绩效对比

| 供应链绩效   | H模型                       | Y模型                       | 模型Y-H                     |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $J_S^*$ | $\ell^{-\rho_l}(13636.2)$ | $\ell^{-\rho_l}(21937.6)$ | $\ell^{-\rho_l}(8301.4)$  |
| $J_M^*$ | $\ell^{-\rho_l}(21037.7)$ | $\ell^{-\rho_l}(34022.2)$ | $\ell^{-\rho_l}(12984.5)$ |
| $J_R^*$ | $\ell^{-\rho_l}(16504.1)$ | $\ell^{-\rho_l}(27218.6)$ | $\ell^{-\rho_l}(10714.5)$ |

#### 4.2 消费者低碳偏好对最优决策的影响

由推论1可知,经销商的宣传努力与消费者的低碳偏好有关。图2表明,供应商的技术创新努力水平、回收制造努力水平以及制造商的减排努力程度均会随着消费者低碳偏好的提高而增加。图3表明,经销商的宣传努力程度同样会随着消费者低碳偏好的提高而增加。因此,由图2和图3可知,供应链成员相关减排行为的努力程度与消费者的低碳偏好呈正相关。另外,集中决策情形下供应商的技术创新努力水平、回收制造努力水平、制造商的减排努力程度、经销商的宣传努力程度始终高于分散决策情形下的相应水平。

图2  $\eta$  对技术创新努力水平、回收制造努力水平、减排努力水平的影响图3  $\sigma$  对宣传努力水平的影响

#### 4.3 新能源汽车供应链状态变量最优轨迹和利润分析

将参数代入关于产品减排量的动态方程中,取 $t \in [0, 30]$ ,绘制不同决策模式下产品减排量的时间轨迹,得到图4。由图4可知,产品减排量在不同的决策模式下均随时间的变化而增加,时间趋于无穷时,产品的减排量将趋于稳定。其中,集中决策、双边成本分担契约与分散决策、单边成本分担决策相比,产品减排量的增加趋势更加陡峭,即减排效率更高。另外,稳态值不随初始值 $x_0$ 的变化而变化,且恒有 $x^Y(t) = x^C(t) >$

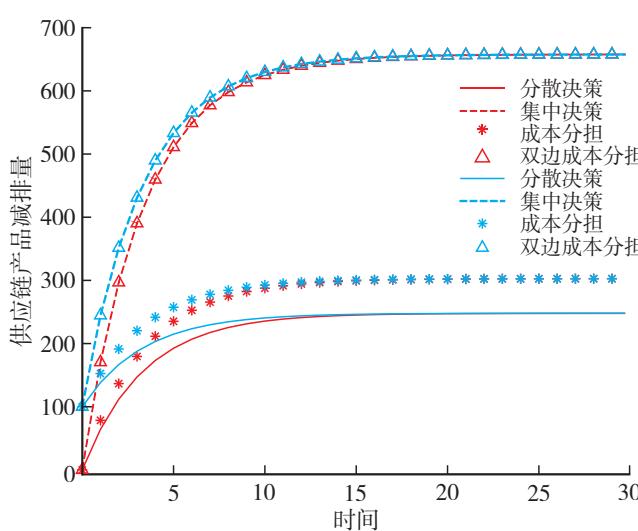


图4 产品减排量的最优轨迹

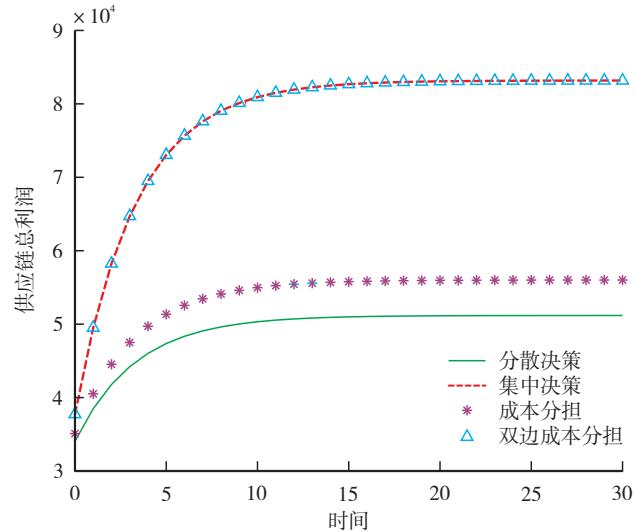


图5 不同决策下的供应链总利润

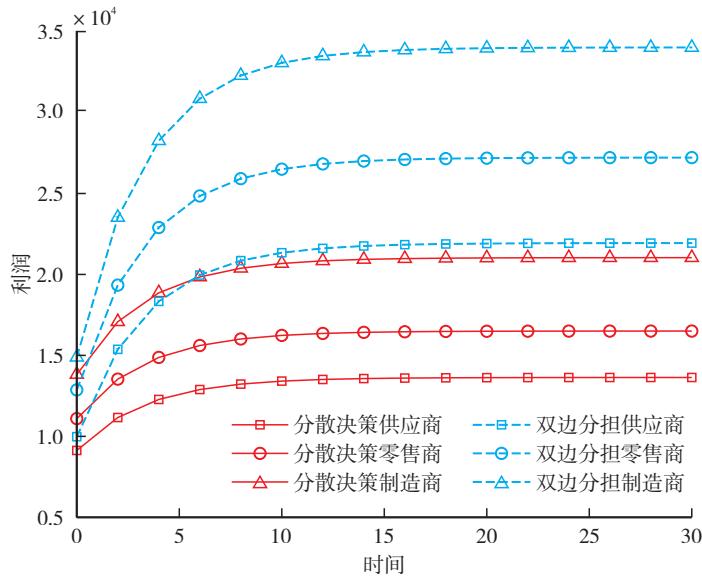


图6 不同决策下供应链成员利润

$x^{X*}(t) > x^{H*}(t)$ , 说明双边成本分担契约能够显著提高分散决策下产品的减排量,降低新能源汽车制造过程中的碳排放量。

由图5可知,供应链总利润先在一段时间内不断增加,后随着时间趋于无穷而呈现一种稳态。另外,集中决策、双边成本分担契约下的供应链总利润更多,利润的增长速度更快,而且利润攀升趋势的持续时间更长。

由图6可知,对于新能源汽车供应链中各成员企业的利润在双边成本分担契约下的值均大于分散决策,这与表2所得出的结论一致。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

文章借助微分博弈,针对由电池供应商、整车制造商和汽车经销商组成的三级供应链,研究如何通过上下游企业联合减排实现新能源汽车供应链的低碳化发展。通过构建分散决策模式、集中决策模式、单边成本分担契约三种情形下的微分博弈模型,求解其均衡策略,得出最优解和减排量的最优轨迹。最后设计了双边成本分担契约,运用数值仿真进行验证、分析。得出以下结论:

(1)与分散决策和单边成本分担契约模式相比,集中决策下动力电池供应商的技术创新水平、回收努力

程度、新能源汽车制造商的减排努力程度、经销商的低碳宣传努力程度以及新能源汽车减排量和供应链利润均最高,说明集中决策能够同时实现新能源汽车供应链经济和环保最优,达到帕累托最优状态。

(2)单边成本分担契约可以使供应链的减排量和企业的利润实现提升,但无法达到集中决策时的水平。双边成本分担契约使供应链的减排量和供应链总利润达到集中决策下的效果,同时提高了供应链中个体的利润。这证明双边成本分担契约对动力电池供应商的技术创新水平、回收努力程度,制造商的减排努力程度以及经销商的低碳宣传努力程度均有激励作用,且能够消除利润的双重边际效应,实现供应链的帕累托改进。

(3)产品减排量的最优轨迹随着时间的增长单调递增并渐趋稳态,且不受初始减排量的影响。在集中决策、双边成本分担契约下的减排效率最高,对产品碳减排量的提升最快。

(4)生产单位再制造动力电池的成本与制造商分担回收再制造成本的比例呈正相关。即供应商回收再制造动力电池的成本越高,制造商分担回收再制造成本的比例应该越大。

(5)供应商电池技术创新、回收再制造以及制造商的减排努力与消费者的低碳偏好呈正相关,证明消费者对低碳产品偏好的大小能够对供应链成员企业的决策产生影响。充分发挥新能源汽车经销商的低碳宣传能力,对消费者低碳偏好进行正向激发,能够推动新能源汽车供应链中的企业参与联合减排,自愿增加减排投资,降低二氧化碳排放量。

## 5.2 展望

作为新能源汽车的上游供应商,电池制造企业应当积极通过技术创新和回收再制造等方式生产绿色低碳的动力电池。车企作为供应链中的核心企业,不仅要重视自身生产制造过程中的碳减排,还要自发选择更加环保的原材料。同时还应发挥主导作用,联合上游供应商进行战略合作,通过提供成本分担支持或签订低碳动力电池优先购买协议等方式增强动力电池制造企业的减排积极性。车企对回收再制造成本的分担比例应当根据再制造电池的成本进行调整,成本较高时提高分担比例,为回收再制造动力电池的发展提供实际支持。同时,车企可以与下游汽车经销商进行低碳宣传合作,给予购车折扣或低碳版新能源汽车的优先提车权等。充分发挥供应链的协调作用,减少环境污染,推动新能源汽车行业早日实现“双碳”目标。

本研究还存在一些局限和不足,需要进一步完善。例如,文章仅考虑了供应链内部的协调问题,在政府补贴或者其他低碳政策下供应链如何实现协调仍值得深入研究。又如,文章仅针对由一个供应商、一个制造商和一个经销商组成的供应链展开研究,若要进一步丰富研究,可考虑电池供应商众多的竞争情形或新能源汽车整车制造商自研动力电池的情况。

## 参考文献:

- [1] 汤静娴,刘同.新能源汽车电池回收再制造策略研究[J].时代汽车,2023,(22):138-140.
- [2] 丁军飞.回收成本分担下新能源汽车动力电池闭环供应链决策与协调[J].工业工程与管理,2025,30(01):63-74.
- [3] 徐春秋,赵道致,原白云,等.上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J].管理科学学报,2016,19(02):53-65.
- [4] 姜跃,韩水华,赵洋.低碳经济下三级供应链动态减排的微分博弈分析[J].运筹与管理,2020,29(12):89-97.
- [5] 朱晨,马静,李翠.混合碳政策下的供应链联合减排决策与优化[J].系统管理学报,2024,33(05):1204-1217.
- [6] 张娜,张克勇.碳限额下考虑风险规避的低碳供应链联合减排决策研究[J].工程数学学报,2023,40(04):576-590.
- [7] LIU L, LI F. Differential Game Modelling of Joint Carbon Reduction Strategy and Contract Coordination based on Low-carbon Reference of Consumers[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277:123798.
- [8] 花均南,丁显博.随机需求下绿色农产品三级供应链协调[J].工业工程,2020,23(03):51-58.
- [9] 刘丽,韩同银,金浩.成本分担机制下考虑品牌商誉的三级绿色供应链微分博弈[J].控制与决策,2024,39(02):659-668.
- [10] GHOSH D, SHAH J. Supply Chain Analysis under Green Sensitive Consumer Demand and Cost Sharing Contract[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164:319-329.
- [11] 柴强飞,孙明耀,陈信同.碳交易政策下考虑碳规制差异的供应链协调研究[J].工业工程与管理,2025,30(02):54-63.
- [12] 姚峰敏,闫颖洛,张晓莉,等.考虑环境责任分担的供应链绿色设计决策及协调[J].管理学报,2025,22(01):156-166.
- [13] 贺裕雁,黄龙成,洪振挺,等.碳配额交易下考虑“以旧换再”的汽车供应链决策及协调研究[J].数学的实践与认识,2024,54(12):73-89.
- [14] 黄辉,周祥,张娟.政府补贴下的新能源车双向双渠道闭环供应链的定价[J].系统工程,2020,38(04):69-77.

- [15] 于晓辉,叶兆兴,李敏. 补贴退坡—双积分政策下两级供应链生产决策优化分析[J]. 运筹与管理,2021,30(03):42–49.
- [16] 卢超,王倩倩,陈强.“双积分”政策下考虑价格—减排和续航的汽车供应链协调[J]. 系统工程理论与实践,2021,41(10):2595–2608.
- [17] 刘丛,刘洁,邵路路,等.“双积分”政策下新能源汽车制造商激励供应商创新的契约选择研究[J]. 管理学报,2022,19(06):928–937.
- [18] BAKAL I S, AKCALI E. Effects of Random Yield in Remanufacturing with Price-sensitive Supply and Demand [J]. Production and Operations Management, 2006, 15(03):407–420.
- [19] MA D, QIN H, HU J. Achieving Triple Sustainability in Closed-loop Supply Chain: The Optimal Combination of Online Platform Sales Format and Block Chain-enabled Recycling[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 174:108763.

## Research on the Coordination of the Upstream and Downstream Joint Emission Reduction of New Energy Vehicles Supply Chain

CHEN Yan,WU Ya-qian\*

(College of Management and Engineering, Qingdao University of Technology,  
Qingdao, Shandong, 266520, China)

**Abstract:** After the dual carbon goals have become strategic targets, it is worth in-depth exploration on how to further reduce the carbon emissions of the industrial chain of new energy vehicles, which are the pioneers of carbon reduction in the automotive industry. This paper studies the coordination problem of joint carbon reduction in the upstream and downstream of the new energy vehicle supply chain, constructs a differential game model composed of battery suppliers, vehicle manufacturers and car dealers, analyzes the equilibrium solutions under decentralized decision-making, centralized decision-making and unilateral cost-sharing contract decision-making, and finally selects the bilateral cost-sharing contract to coordinate the supply chain. The research shows that consumers' low-carbon preferences can play a positive market-driven role in the carbon reduction of the new energy vehicle supply chain; The bilateral cost-sharing contract can effectively promote joint carbon reduction, enhance the efforts of supply chain members in related carbon reduction behaviors, and thereby improve the carbon reduction efficiency of the supply chain; The bilateral cost-sharing contract can coordinate the supply chain and reach the level of total supply chain profit under centralized decision-making, achieving Pareto improvement in the profits of each member of the supply chain.

**Keywords:** New energy vehicles; Differential game; Joint emission reduction; Cost sharing