

# 碳限额交易机制下动力电池定价与碳减排决策

武文琪, 张 明\*

(中国矿业大学经济管理学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 选择合适的回收模式是实现退役动力电池高效回收的关键, 本研究构建了动力电池制造商主导的, 与整车制造商及第三方回收商组成的电动汽车动力电池闭环供应链, 探究碳限额交易机制下单渠道垄断回收、混合回收和联盟回收模式下的供应链成员最优决策, 并对比不同回收模式下的供应链利润和回收率, 通过数值分析进一步分析了回收渠道竞争、消费者环保意识、碳配额和碳价对供应链利润和回收率的影响. 研究表明, 动力电池回收供应链最优决策受碳限额交易机制和回收模式的影响, 渠道联盟回收模式下的供应链利润和回收率优于单渠道垄断回收和混合回收; 碳限额交易机制改善了供应链利润, 表现在碳配额和碳价的上升均有利于供应链利润的增加, 而碳价的上升导致回收率表现不佳; 渠道间竞争程度的加剧不利于供应链利润和回收率的增长, 而消费者环境意识的提高将推动供应链利润和回收率的增长. 本研究为碳限额交易机制下动力电池回收模式的选择及减排决策提供理论支持.

**关键词:** 动力电池; 闭环供应链; 回收模式; 碳限额交易机制

中图分类号: F205 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2026)01-0110-18

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2026.01.008

## Power battery pricing and carbon emission reduction strategy under the carbon cap-and-trade mechanism

Wu Wenqi, Zhang Ming\*

(School of Economics and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Choosing the appropriate recycling model is the key to achieving standardized recycling of retired power batteries. This paper constructs a closed-loop supply chain led by a power battery manufacturer and composed of a vehicle manufacturer and third-party recycler, to explore the optimal decisions of supply chain members under the carbon cap-and-trade mechanism, and to compare the supply chain profits and recycling rates of single-channel recycling, mixed recycling, and alliance recycling models. The impacts of channel competition intensity, carbon quota, and carbon price on supply chain performance are further analyzed. Results show that the supply chain decisions are affected by the carbon cap-and-trade mechanism and recycling models. Moreover, the supply chain profits and recycling rates of the alliance recycling model are better than those of the other models. The carbon cap-and-trade mechanism improves the supply chain profits. Specifically, an increase of carbon quota and carbon price is conducive to the increase of the supply chain profit, while the increase of carbon price leads to poor recycling rate. The intensified competition among channels is not conducive to the growth of supply chain profits and recycling rates, while the increase in consumer environmental awareness will promote them. This study provides theoretical support for selecting and improving power battery recycling models under the carbon cap-and-trade mechanism.

**Key words:** power battery; closed-loop supply chain; recycling model; carbon cap-and-trade mechanism

收稿日期: 2023-06-22; 修订日期: 2024-07-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72174195).

\*通信作者

## 1 引言

全球气候不断恶化背景下, 作为世界上最大的碳排放国, 中国提出“双碳”目标来表征碳减排决心<sup>[1]</sup>. 交通部门约占碳排放总量的四分之一, 电动汽车被认为是减少交通部门二氧化碳的必要手段. 因此, 我国推行了一系列利好政策推动电动汽车产业发展<sup>[2,3]</sup>. 作为电动汽车的核心部件, 动力电池装机量迅猛增长, 占据了全世界装机量的一半以上, 动力电池生产的关键金属资源, 如镍、钴、锂等, 对外依存度高达70%<sup>[4]</sup>. 以镍元素为代表的动力电池关键金属, 供需矛盾日益加剧, 而如果含镍废旧动力电池能够完全回收利用, 可以弥补制造电动汽车动力电池近三分之一的需求<sup>[5]</sup>. 截止到2023年, 中国电动汽车动力电池规范化回收率不足25%. 在此背景下, 电动汽车退役动力电池的回收与再利用问题已引起社会和学者的广泛关注<sup>[6]</sup>. 为了实现“双碳”目标, 各国政府相继出台了一系列碳排放政策<sup>[7,8]</sup>. 碳限额交易机制结合了政府与市场限制企业碳排放, 被普遍认为是激励企业进行碳减排的有效手段<sup>[5]</sup>. 例如, Szasz<sup>[9]</sup>使用固定效应面板模型来估计十种不同的州级气候政策对美国各州能源相关的二氧化碳的影响, 探究哪种政策在减少化石燃料使用方面最有效. 结果发现, 碳限额交易政策在减少化石燃料使用方面比其它政策更有效. 在碳限额交易机制下, 企业首先免费获得一些数量的排放许可, 然后企业可以灵活地购买不足的许可或在每个时期结束时出售多余的许可. 与碳税相比, 碳限额交易机制为企业提供了通过低碳生产赚取额外利润的可能性, 鉴于再制造的碳减排优势, 碳限额交易机制成为可以促进再制造的有效政策<sup>[10]</sup>. 动力电池制造是高能耗行业, 材料获取和制造过程的能耗是发动机的30倍左右, 会释放大量温室气体, 若能对废旧的动力电池进行再次利用, 对应的汽车每公里碳排放量将分别下降22 g和4 g, 进而显著降低碳排放量. 以特斯拉、宝马等为代表的整车制造企业将减碳作为电动汽车闭环供应链决策的重点考察因素, 宝马集团要求动力电池制造商宁德时代在生产环节实现碳中和, 例如, 在生产过程中必须使用“绿电”. 特斯拉则通过碳排放权交易扭转亏损危机. 总之, 碳额度是企业生产的必要资源, 碳限额交易机制势必影响企业的生产决策.

碳限额交易机制对企业决策的影响来看, 企业消极碳减排决策下, 可以节省碳减排成本, 但需要在碳市场购买碳排放额, 影响企业的经济效益; 碳减排会增加企业的运营成本, 但节省的碳排放可以在碳市场交易获得利润, 同时由于产品碳排放的降低, 会吸引具有低碳偏好的消费者消费, 增加产品销量, 并提高企业的社会声誉<sup>[11]</sup>. 从长期来看, 如何进行碳减排决策以达到最优经济效益和社会效益, 是企业重点关心的问题<sup>[12]</sup>. 碳限额交易机制下供应链运作与决策已经得到广泛的研究<sup>[13-15]</sup>, Chai 等<sup>[16]</sup>发现碳限额交易机制对普通市场和绿色市场的再制造都有价值. Chai等<sup>[17]</sup>探究了政府补贴政策对闭环供应链中再制造的影响, 并发现碳限额交易机制在推进再制造中的作用与补贴政策作用相当或优于补贴政策. Wang等<sup>[18]</sup>研究了不确定碳价下碳限额交易机制对制造商减排投资、供应链绩效和社会福利的影响, 并设置了协调动态随机供应链的收入和成本共担合同. 结果表明, 供应链的减排水平会随着碳价的增加而降低其不确定性, 且碳排放越高的供应受到碳价波动的影响更小. Yang等<sup>[19]</sup>探究了碳限额交易机制下再制造的价值以及回收模式选择, 并发现再制造可以有效提高碳减排水平以及制造商和零售商的利润, 较低的碳价和较高的碳强度都会导致更多的碳排放.

鉴于动力电池回收广阔的市场和政府政策的引导, 一大批企业纷纷投入动力电池回收工作, 涉足动力电池回收的企业已超过两万家. 在废弃产品回收市场发展初期, 合理的回收模式是提高正规渠道动力电池回收率的重要着力点, 随着市场经济的不断发展与推动, 目前我国动力电池回收服务在回收市场上逐渐形成了动力电池生产商、整车制造商、第三方回收商三种回收渠道. 动力电池制造商通过成立子公司、收购回收处理企业、合作等方式布局回收网络, 该渠道的代表企业有宁德时代、国轩高科等. 整车制造商运用经销服务网络进行回收, 如宝马集团、北汽集团. 第三方回收商自主建立回收网络完成回收, 代表企业有格林美、天奇科技、光华股份等. 国轩高科作为动力电池生产企业为大众提供动力电池, 大众和国轩高科均布局了动力

电池回收网络,形成动力电池制造商与整车制造商混合回收.亿纬锂能是小鹏汽车的动力电池供应商,亿纬锂能、小鹏汽车和广东博益都布局了回收工作,成为动力电池制造商、整车制造商和第三方回收商混合回收的案例.宁德时代已与北京奔驰强强联合,构建“电池企业-车企”上下游动力电池闭环回收体系.宁德时代与第三方回收企业广东邦普联合布局,助力关键材料的内部循环,提高供应链成本优势.整车制造商宝马集团与第三方回收商华友循环共同打造动力电池闭环回收与梯次利用的合作模式.梅赛德斯-奔驰与电池生产商宁德时代、第三方回收企业格林美签署合作备忘录,共同打造动力电池回收闭环.

回收模式的选择与比较一直都是供应链管理中被广泛研究的主题之一,从Savaskan等<sup>[20]</sup>建立的经典回收模型开始,已经涌现了一系列文献来揭示回收模式的间接影响.在单渠道垄断回收情形下,Savaskan和Van Wassenhove<sup>[21]</sup>研究了制造商直接回收与零售商间接回收的策略选择,并发现直接回收的供应链利润由回收规模决定而间接回收的利润由零售商之间的竞争驱动.Giovanni和Zaccour<sup>[22]</sup>考虑了一个两周期的供应链模型,探讨了制造商回收、零售商回收、第三方回收商回收的影响,研究发现环境和运营表现是制造商选择是否回收外包的决定因素.混合回收模式下供应链决策也得到了广泛的讨论,公等<sup>[23]</sup>就混合回收模式选择进行了进一步比较,并发现回收模式的选择与回收竞争程度相关,在回收竞争程度较高时,制造商与销售商混合回收最优,但回收竞争较低时,制造商、销售商和第三方三者混合回收最优.He等<sup>[24]</sup>研究了集中回收和混合回收两种回收模式回收便捷性对回收率的影响,发现回收竞争并没有提高回收效率.Wang等<sup>[25]</sup>考虑了消费者的渠道偏好,比较分析了“零售商+第三方回收商”和“制造商+第三方回收商”两种混合回收模式,发现消费者对第三方回收渠道偏好的增加会降低零售商或制造商的回收量和利润.就碳限额交易机制下回收模式的选择而言,当第三方回收商回收的碳排放小于零售商回收的碳排放时,再制造商会选择第三方回收商回收,否则再制造商会选择零售商回收.

综上所述,现有研究对碳限额交易机制的有效性、碳限额交易机制下供应链决策进行了研究,但碳限额交易机制对动力电池供应链回收决策的影响得到较少关注.此外,大量文献主要考虑了单渠道垄断回收,少数考虑了渠道混合回收,但是越来越多的企业建立回收联盟进行回收,如动力电池制造商宁德时代和第三方回收商格林美,联盟回收模式与单渠道垄断回收和混合回收模式下供应链决策的对比仍存在研究空白.受上述研究的启发,本研究利用Stackelberg博弈理论,建立了动力电池回收闭环供应链模型.本研究旨在回答以下问题:1)在碳限额交易机制下,不同回收模式的供应链定价与碳减排决策、供应链利润和回收率有何差异,哪种回收模式下供应链表现更优?2)碳限额交易机制在不同回收模式中的影响有何异同,动力电池制造商如何在碳限额交易机制条件下权衡当前的减排投资和未来利润?3)碳配额和碳交易价格的不确定性对渠道成员利润有何影响?研究发现,不同回收模式下的动力电池零售价格、回收价格、转移支付价格、碳减排水平、供应链利润和回收率存在差异;联盟回收模式下的供应链利润和回收率表现更优;较高的碳配额下供应链利润更高,较高的碳价虽然有利于供应链利润的增加,但对回收率产生不利的影响.

## 2 问题描述及基本假设

### 2.1 问题描述

本研究构建了碳限额交易机制下,由动力电池制造商主导的,与整车制造商和第三方回收商构成的闭环供应链模型.正向供应链中,电池制造商生产动力电池并批发给整车制造商.整车制造商从电池制造商处购买动力电池,生产电动汽车并销售给消费者.在逆向供应链中,回收商对退役动力电池进行回收,回收后由动力电池制造商或者合作的综合利用企业对剩余容量和充放电效率进行评估后,合格的退役动力电池进行梯次利用并获得经济效益,不合格的废弃电池提取有价值的材料.当同时存在整车制造商或第三方回收商同时进行回收,形成混合回收模式.由于退役动力电池回收利润较低、渠道成本高,动力电池制造商会委托第三方或整车制造商进行回收,从而形成渠道联盟模式.最终形成了单渠道垄断回收,混合回收和渠道联盟回收三种类型.如图1所示,共包含七种回收模式:一是电池制造商自建回收渠道进行回收,二是整车制造商

进行回收, 三是第三方回收商回收, 四是第三方回收商与整车制造商混合回收, 五是电池制造商与整车制造商建立回收联盟, 六是电池制造商与第三方回收商建立回收联盟, 七是集中决策。

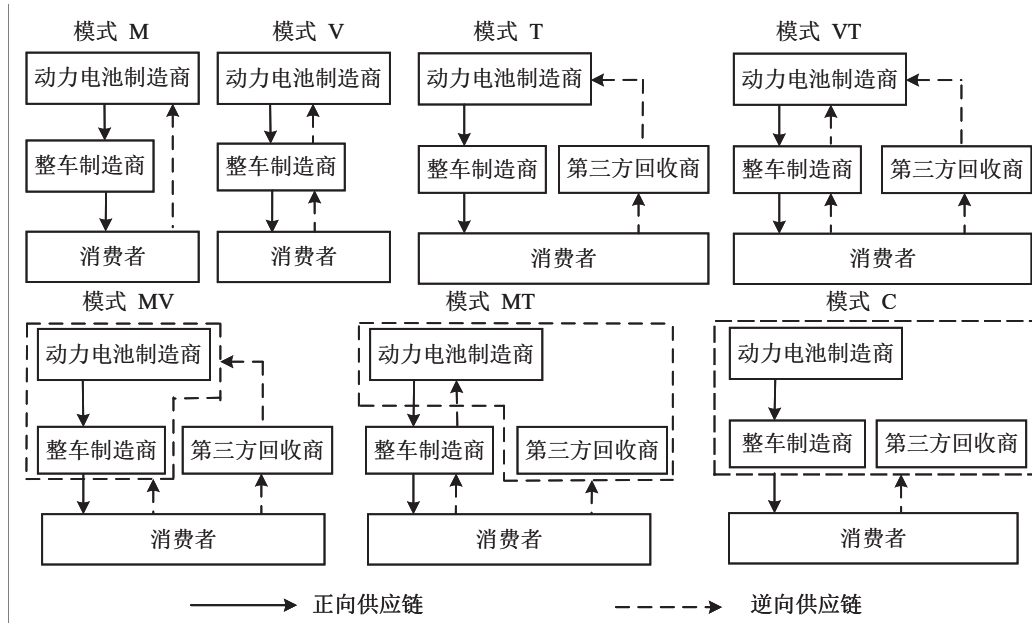


图 1 回收模式示意图

Fig. 1 Recycling model diagram

### 2.2 模型假设

电动汽车电池回收闭环供应链中各主体都是完全理性和风险中性的, 身处完全信息条件下, 根据其最大预期利润做出最优决策。

动力电池在生产、运输与销售过程中都会产生一定的温室气体, 但碳排放主要在生产过程中产生<sup>[26]</sup>, 因此, 本研究假定只有动力电池制造商受到碳排放规制限制。政府分配给动力电池制造商的初始碳排放额为  $E$ , 动力电池制造商可以在碳交易市场购买或出售碳排放额, 单位碳排放量的价格为外生变量, 由碳市场决定。单位动力电池生产的初始碳排放为  $e$ , 动力电池制造商进行碳减排投资后单位动力电池的碳减排率为  $l$ , 参照已有研究<sup>[27,28]</sup>, 减排投资额与碳减排水平的关系为  $\frac{1}{2}hl^2$ ,  $h$  表示碳减排成本系数。单位动力电池的碳排放量固定, 总排放量是需求量的线性函数。

动力电池制造商生产能力充足, 能够满足市场的需求。由于动力电池成本约占电动汽车总成本的 40%, 因此动力电池需求等于电动汽车的需求。由于消费者具有不同程度的低碳偏好, 动力电池的销量与价格有关, 也与碳排放水平相关, 参照 Savaskan 等<sup>[20]</sup> 并结合 Ma 等<sup>[29]</sup> 的研究, 动力电池的市场需求为  $D(p) = \phi - \theta p + \rho l$ , 其中  $\phi$  表示市场潜在需求,  $\theta$  表示价格敏感系数,  $\phi, \theta > 0$ , 且均为常数,  $\rho$  表示市场需求对单位动力电池碳减排水平  $l$  的弹性系数。

影响消费者返还退役动力电池的主要因素是回收价格和回收便利性<sup>[30]</sup>, 动力电池回收量可以表示为  $Q_i = a + br_i - \delta_x r_j (i, j = m, v, t, mv, mt, c \text{ 且 } i \neq j)$ , 其中  $a$  表示消费者自愿返还的退役动力电池数量, 该数量取决于消费者的环保意识<sup>[31]</sup>。  $b$  表示消费者对回收价格的敏感系数,  $\delta_x$  表示渠道竞争系数,  $x=1$  表示整车制造商与第三方回收商的竞争程度,  $x=2$  表示电池制造商与整车制造商联盟与第三方回收商竞争程度,  $x=3$  表示电池制造商与第三方回收商联盟与整车制造商竞争程度, 不同回收渠道的竞争强度存在差异, 取决于其回收的便利性。基于现实中不同回收渠道与消费者之间的距离,  $\delta_3 > \delta_1 > \delta_2$ 。根据 Savaskan 等<sup>[20]</sup> 的研究, 动力电池的回收成本表示为  $I = A_y Q_i + k Q_i^2$ , 其中  $k$  表示回收商回收单位退役动力电池需要付出的营销等努力成本,  $A$  表示回收单位退役动力电池付出的网络建设、暂存、装卸和运输等固定成本。由于整车制造商可以通过现有的销售网络进行回收, 其回收成本最低。第三方回收商比整车制造

商更靠近消费者,回收网络更健全,因此动力电池制造商回收成本最高,第三方回收商回收成本次之<sup>[32-34]</sup>,即 $A_m > A_t > A_v$ .

回收后的动力电池首先进行梯次利用,然后拆解处理、提取原料、循环利用.借鉴Li等<sup>[35]</sup>的研究,回收单位退役动力电池的收益由梯次利用收益和再制造成本节约两部分组成 $\Delta = c_m - c_r + \eta\tilde{V}$ ,其中 $c_m$ 表示用原材料制造单位动力电池的成本, $c_r$ 表示由回收材料制造单位动力电池的成本, $c_m > c_r$ ,即通过循环利用材料生产的动力电池能够节约成本. $\eta$ 表示单位动力电池梯次利用所获收益, $\tilde{V}$ 表示单位退役动力电池的平均剩余容量,服从均值为 $\mu$ ,方差为 $\sigma^2$ 的正态分布.单位退役动力电池循环利用节省的碳排放量为 $E_R$ .那么,由动力电池回收节省的碳交易成本为 $sE_R$ ,其中 $s$ 表示每吨碳排放的价格.

基于以上假设,本研究将构建不同回收模式下各主体的利润函数,求解并对比不同回收模式决策变量的最优解和供应链表现,为相关企业回收模式的选择和定价与碳减排决策提供建议,使企业提高回收率并得到更大的收益.在以下分析中,上标 $i \in \{M, V, T, VT, MV, MT, C\}$ 分别表示回收模式;下标 $j \in \{m, v, t, mv, mt\}$ 分别表示回收主体,本研究中所用的符号、含义及其单位汇总如表1所示.

表 1 符号汇总及含义说明  
Table 1 Symbol summary and meaning description

符号	定义	单位	符号	定义	单位
$c_m$	使用原材料生产单位动力电池的成本	元/组	$c_r$	使用回收材料再生产单位动力电池的成本	元/组
$\eta$	单位动力电池梯次利用的净利润	元/组	$\Delta$	单位退役动力电池再利用的净收益	元/组
$\theta$	消费者对动力电池零售价格的敏感系数	组/(元/组)	$a$	消费者自愿返还的退役动力电池数量	组
$E$	政府分配给动力电池制造商的碳排放额	t	$E_R$	单位退役动力电池循环利用节省的碳排放量	t
$k$	回收单位退役动力电池的努力成本	元/组	$A$	回收单位退役动力电池的固定成本	元/组
$e$	单位动力电池生产的初始碳排放	t	$\rho$	市场需求对碳减排率的弹性系数	组
$s$	每吨碳排放的价格	元/t	$h$	碳减排成本系数	元
$b$	消费者对回收价格的敏感系数	组/(元/组)	$\delta_x$	渠道竞争系数	组/(元/组)
$\phi$	市场潜在需求量	组	$D(p)$	市场上的动力电池的需求	组
$e_i$	回收过程的碳排放, $i = m, v, t$	t	$t$	转移支付价格	元/组
$p$	零售价格	元/组	$w$	批发价格	元/组
$l$	单位动力电池的碳减排水平	%	$r_j^i$	回收模式 $i$ 中成员 $j$ 的回收价格	元/组
$\Pi_j^i$	回收模式 $i$ 中回收主体 $j$ 的利润函数	元	$R^i$	第 $i$ 种回收模式下的回收率	%

### 3 模型构建

根据以上模型假设,电池制造商在电动汽车动力电池闭环供应链中决定了动力电池的生产和回收价格,为Stackelberg博弈的领导者.根据Stackelberg博弈原理,电池制造商首先做出决策,整车制造商和第三方回收商作为跟随者,在电池制造商做出决策后观察动力电池制造商的决策并根据Nash博弈原理制定自身决策.

#### 3.1 单渠道垄断回收

##### 1) 电池制造商回收模式(模式M)

动力电池制造商作为电池回收主体,具有再制造优势,该回收模式的代表性企业为宁德时代.该回收模式的决策顺序:动力电池制造商首先决定单位动力电池的批发价格 $w$ 和碳减排水平 $l$ ,整车制造商根据电池制造商的决策决定电动汽车的零售价格 $p$ .在逆向供应链中,电池制造商决定退役动力电池回收价格 $r_m$ .在该回收模式下,电池制造商和整车制造商利润最大化问题分别表示为

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_m^M = & (\phi - \theta p + \rho l)(w - c_m - es + esl) - \frac{1}{2}hl^2 + Es + \\ & (a + br_m)(\Delta - r_m - A_m + sE_R) - k(a + br_m)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Max } \Pi_v^M = (p - w)(\phi - \theta p + \rho l). \quad (2)$$

##### 2) 整车制造商回收模式(模式V)

整车制造商处于产业链中心,可以利用其经销网络实现回收工作的增效降本,该回收模式的代表企业为

宝马集团. 宝马已经建立了电池的溯源体系, 直到电池生命周期末端宝马将负责动力电池的回收. 该回收模式的决策顺序为: 动力电池制造商首先决定单位动力电池的批发价格 $w$ 和碳减排水平 $l$ , 整车制造商根据电池制造商的决策决定电动汽车的零售价格 $p$ . 在逆向供应链中, 电池制造商设定动力电池回收转移支付价格 $t$ , 然后整车制造商决定动力电池回收价格 $r_v$ . 在该模式下, 电池制造商和整车制造商利润最大化问题分别表示为

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_m^V &= (\phi - \theta p + \rho l)(w - c_m - es + esl) - \\ &\quad \frac{1}{2}hl^2 + Es + (a + br_v)(\Delta - t + sE_R), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_v^V &= (p - w)(\phi - \theta p + \rho l) + \\ &\quad (a + br_v)(t - r_v - A_v) - k(a + br_v)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

### 3) 第三方回收商回收(模式T)

第三方回收商作为专业的电池回收主体, 自主建立回收网络, 该模式以格林美为回收代表. 该回收模式的决策顺序为: 动力电池制造商首先决定单位动力电池的批发价格 $w$ 和碳减排水平 $l$ , 整车制造商根据电池制造商的决策决定电动汽车的零售价格 $p$ . 在逆向回收过程中, 动力电池制造商规定动力电池回收转移支付价格 $t$ , 然后, 第三方回收商确定动力电池回收价格 $r_t$ . 在该模式下, 电池制造商、整车制造商和第三方回收商利润最大化问题分别表示为

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_m^T &= (\phi - \theta p + \rho l)(w - c_m - es + esl) - \\ &\quad \frac{1}{2}hl^2 + Es + (a + br_t)(\Delta - t + sE_R), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{Max } \Pi_v^T = (p - w)(\phi - \theta p + \rho l), \quad (6)$$

$$\text{Max } \Pi_t^T = (a + br_t)(t - r_t - A_t) - k(a + br_t)^2. \quad (7)$$

## 3.2 整车制造商和第三方回收商混合回收(模式VT)

在动力电池制造商同时委托整车制造商和第三方回收商进行回收时, 存在整车制造商和第三方回收商混合回收模式. 例如比亚迪与格林美分别建立回收网络进行回收. 该模式决策顺序为: 动力电池制造商首先决定单位动力电池的批发价格 $w$ 和碳减排水平 $l$ , 整车制造商根据电池制造商的决策决定电动汽车的零售价格 $p$ . 在逆向供应链中, 动力电池制造商设定转移支付价格 $t$ , 然后, 整车制造商和第三方回收商分别决定电池回收价格 $r_v$ 和 $r_t$ . 在回收该模式下, 动力电池制造商、整车制造商和第三方回收商利润最大化问题分别表示为

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_m^{VT} &= (\phi - \theta p + \rho l)(w - c_m - es + esl) - \\ &\quad \frac{1}{2}hl^2 + Es + [2a + (b - \delta)(r_v + r_t)](\Delta - t + sE_R), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{Max } \Pi_v^{VT} = (p - w)(\phi - \theta p + \rho l) + (t - r_v - A_v)(a + br_v - \delta r_t) - k(a + br_v - \delta r_t)^2, \quad (9)$$

$$\text{Max } \Pi_t^{VT} = (t - r_t - A_t)(a + br_t - \delta r_v) - k(a + br_t - \delta r_v)^2. \quad (10)$$

## 3.3 联盟回收

### 1) 电池制造商与整车制造商联盟回收模式(模式MV)

电池制造商作为动力电池的“摇篮”和“坟墓”, 具有联盟选择权, 且联盟对象对供应链效率十分重要. 2018年, 上汽集团与宁德时代达成战略合作, 共同推进动力电池回收再利用, 形成电池制造商与整车制造商联盟回收模式. 该模式决策顺序为: 联盟首先决定零售价格 $p$ 和碳减排水平 $l$ . 在逆向供应链中, 联盟决定转

移支付价格 $t$ 和回收价格 $r_{mv}$ , 随后第三方回收商决定回收价格 $r_t$ . 在该模式下, 回收联盟和第三方回收商利润最大化问题分别表示为

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_{mv}^{MV} &= (p - c_m - es + esl)(\phi - \theta p + \rho l) - \\ &\quad \frac{1}{2}hl^2 + Es + (\Delta - r_{mv} + sE_R - A_v)(a + br_{mv} - \delta r_t) + \\ &\quad (\Delta - t + sE_R)(a + br_t - \delta r_{mv}) - k(a + br_{mv} - \delta r_t)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{Max } \Pi_t^{MV} = (t - r_t - A_t)(a + br_t - \delta r_{mv}) - k(a + br_t - \delta r_{mv})^2. \quad (12)$$

## 2) 电池制造商与第三方回收商联盟(模式MT)

2021年, 宁德时代携手邦普循环建设宜昌邦普全链条一体化产业园, 形成电池制造商与第三方回收商联盟回收模式. 该模式决策顺序为: 回收联盟决定批发价格 $w$ 和碳减排水平 $l$ , 整车制造商决定零售价格 $p$ . 在逆向供应链中, 回收联盟决定转移支付价格 $t$ 和联盟回收价格 $r_{mt}$ , 整车制造商决定回收价格 $r_v$ . 在该模式下, 回收联盟和整车制造商利润最大化问题分别表示为

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_{mt}^{MT} &= (w - c_m - es + esl)(\phi - \theta p + \rho l) - \\ &\quad \frac{1}{2}hl^2 + Es + (\Delta - r_{mt} + sE_R - A_t)(a + br_{mt} - \delta r_v) + \\ &\quad (\Delta - t + sE_R)(a + br_v - \delta r_{mt}) - k(a + br_{mt} - \delta r_v)^2, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_v^{MT} &= (p - w)(\phi - \theta p + \rho l) + \\ &\quad (t - r_v - A_v)(a + br_v - \delta r_{mt}) - k(a + br_v - \delta r_{mt})^2. \end{aligned} \quad (14)$$

## 3) 集中决策(模式C)

集中决策模型提供了一个基准情形来比较分散模型的供应链利润和逆向供应链表现, 如梅赛德斯奔驰与电池生产商宁德时代、电池回收企业格林美签署合作备忘录, 共同打造动力电池回收闭环. 供应链企业共同决定动力电池的价格 $p$ 、碳减排水平 $l$ 及回收价格 $r_c$ . 在该模式下, 回收联盟利润最大化问题表示为

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_c^C &= (p - c_m - es + esl)(\phi - \theta p + \rho l) - \\ &\quad \frac{1}{2}hl^2 + Es + (\Delta - r_c + sE_R - A_v)(a + br_c) - k(a + br_c)^2. \end{aligned} \quad (15)$$

# 4 结果与讨论

设定以上参数后, 本研究将对所有模式下决策变量的最优解进行分析比较(具体计算过程见附录A). 表2、表B1和表B2(附录B)分别对所有模式下正向和逆向供应链最优定价和碳减排决策进行了汇总.

## 4.1 正向供应链最优决策变量分析

**命题 1** 正向供应链中批发价格满足:  $w^{M*} = w^{V*} = w^{T*} = w^{VT*} = w^{MT*}$ , 零售价格满足:  $p^{M*} = p^{V*} = p^{T*} = p^{VT*} = p^{MT*} > p^{MV*} = p^{C*}$ , 动力电池制造商碳减排水平满足:  $l^{MV*} = l^{C*} > l^{M*} = l^{V*} = l^{T*} = l^{VT*} = l^{MT*}$ .

由命题1可知, 正向供应链中动力电池价格和碳减排水平会决策受到回收模式的影响. 批发价格由电池制造商决定, 而动力电池的批发价格只受到原材料生产成本、市场需求对碳减排的弹性系数、潜在市场需求、碳减排成本系数、碳价和初始碳排放的影响, 这些因素不会因回收模式的不同而变化. 零售价格与生产成本、市场对碳减排率的弹性系数、潜在市场需求、碳减排的成本系数、初始碳排放、消费者对零售价格的敏感系数和碳价相关. 对比不同回收模式下的零售价格, 电池制造商与整车制造商联盟模式以及集中决策

情形下的零售价格低于其它回收模式. 在这两种回收模式下, 电池制造商与整车制造商共同决定电池的零售价格, 为提高动力电池销量, 电池制造商和整车制造商可能会联合降低销售价格. 动力电池减排水平受市场需求对碳减排弹性系数、消费者对零售价格的敏感系数、初始碳排放水平、生产成本、市场需求和碳价的影响. 动力电池制造商与整车制造商联盟回收模式和集中决策模式的最优碳减排水平显著优于其他回收模式, 这是因为这两种模式下的最优零售价格更低, 进而导致市场需求量增加, 碳减排的收益更高.

**命题 2**  $\frac{\partial p^*}{\partial h} > 0, \frac{\partial w^*}{\partial h} > 0, \frac{\partial l^*}{\partial h} < 0, \frac{\partial \Pi^*}{\partial h} < 0; \frac{\partial p^*}{\partial e} > 0, \frac{\partial w^*}{\partial e} > 0, \frac{\partial l^*}{\partial e} < 0, \frac{\partial \Pi^*}{\partial e} < 0; \frac{\partial p^*}{\partial s} < 0, \frac{\partial w^*}{\partial s} < 0, \frac{\partial l^*}{\partial s} > 0, \frac{\partial \Pi^*}{\partial s} > 0; \frac{\partial p^*}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial w^*}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial l^*}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial \Pi^*}{\partial \rho} < 0.$

由命题2可知, 动力电池制造商的碳减排水平 $l^*$ 和供应链利润 $\Pi^*$ 随着碳减排成本的增加而下降, 动力电池批发价格 $w^*$ 和零售价格 $p^*$ 随着碳减排成本的增加而上升; 动力电池制造商的碳减排水平 $l^*$ 和供应链利润 $\Pi^*$ 随着单位动力电池碳排放量的增加而下降, 动力电池批发价格 $w^*$ 和零售价格 $p^*$ 随着单位动力电池碳排放量的增加而上升; 动力电池制造商的碳减排水平 $l^*$ 和供应链利润 $\Pi^*$ 随着单位碳排放权交易价格的增加而上升, 动力电池批发价格 $w^*$ 和零售价格 $p^*$ 随着单位碳排放权交易价格的增加而下降. 可以看出碳减排成本系数的增加会降低单位动力电池的碳减排水平, 提高动力电池的批发价格和零售价格, 降低供应链整体利润. 这是因为动力电池碳减排成本增加会提高动力电池生产成本, 批发价格和零售价格随之上升, 降低企业减排的积极性. 碳减排水平减低, 市场份额缩小, 导致供应链整体利润下降. 生产单位动力电池的初始碳排放增加导致动力电池制造商购买碳排放额度的成本增加, 生产成本随之增加, 再制造节约成本也随之下降, 导致动力电池制造商提高批发价格获取利润, 进而导致更高的零售价格, 市场份额缩小, 供应链整体利润下降. 较高的碳价促使企业减少碳排放额度的购买来降低生产成本, 另一方面可以使企业将多余的额度售卖以获取利润, 从而激励动力电池制造商提高减排水平, 同时降低了生产成本, 批发价格和零售价格下降, 市场份额上升, 供应链利润随之上升. 因此, 动力电池碳减排成本的下降, 单位动力电池初始碳排放量的下降以及碳价的上升均有利于供应链福利的增加. 政府可以通过提供奖励、减税政策等方式来鼓励低碳电池技术的发展和缓解企业低碳生产成本, 以此促进单位动力电池初始碳排放量的下降.

表 2 不同回收模式下正向供应链最优定价

Table 2 Optimal pricing of forward supply chain under different recycling models

回收模式	$w^*$	$p^*$	$l^*$
模式M	$\frac{(c_m+es)\rho^2-2(\theta c_m+\theta es+\phi)h+es[(\phi+\theta c_m)\rho+(\phi+\rho)es]}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{c_m\rho^2+es[(\phi+\rho)\theta es+(\rho-h)\phi+\rho^2]+\theta c_m(eps-h)-3\phi h}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{(\rho+\theta es)(\theta c_m-\phi+\theta es)}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$
模式V	$\frac{(c_m+es)\rho^2-2(\theta c_m+\theta es+\phi)h+es[(\phi+\theta c_m)\rho+(\phi+\rho)es]}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{c_m\rho^2+es[(\phi+\rho)\theta es+(\rho-h)\phi+\rho^2]+\theta c_m(eps-h)-3\phi h}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{(\rho+\theta es)(\theta c_m-\phi+\theta es)}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$
模式T	$\frac{(c_m+es)\rho^2-2(\theta c_m+\theta es+\phi)h+es[(\phi+\theta c_m)\rho+(\phi+\rho)es]}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{c_m\rho^2+es[(\phi+\rho)\theta es+(\rho-h)\phi+\rho^2]+\theta c_m(eps-h)-3\phi h}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{(\rho+\theta es)(\theta c_m-\phi+\theta es)}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$
模式VT	$\frac{(c_m+es)\rho^2-2(\theta c_m+\theta es+\phi)h+es[(\phi+\theta c_m)\rho+(\phi+\rho)es]}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{c_m\rho^2+es[(\phi+\rho)\theta es+(\rho-h)\phi+\rho^2]+\theta c_m(eps-h)-3\phi h}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-2h\theta+\rho^2}$	$\frac{(\rho+\theta es)(\theta c_m-\phi+\theta es)}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$
模式MV	$\frac{(c_m+es)\rho^2-2(\theta c_m+\theta es+\phi)h+es[(\phi+\theta c_m)\rho+(\phi+\rho)es]}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{c_m\rho^2+es[(\phi+\rho)\theta es+(\rho-h)\phi+\rho^2]+\theta c_m(eps-h)-\phi h}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{(\rho+\theta es)(\theta c_m-\phi+\theta es)}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-2\theta h+\rho^2}$
模式MT	$\frac{(c_m+es)\rho^2-2(\theta c_m+\theta es+\phi)h+es[(\phi+\theta c_m)\rho+(\phi+\rho)es]}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{c_m\rho^2+es[(\phi+\rho)\theta es+(\rho-h)\phi+\rho^2]+\theta c_m(eps-h)-3\phi h}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{(\rho+\theta es)(\theta c_m-\phi+\theta es)}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$
模式C	$\frac{(c_m+es)\rho^2-2(\theta c_m+\theta es+\phi)h+es[(\phi+\theta c_m)\rho+(\phi+\rho)es]}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-4\theta h+\rho^2}$	$\frac{c_m\rho^2+es[(\phi+\rho)\theta es+(\rho-h)\phi+\rho^2]+\theta c_m(eps-h)-3\phi h}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-2h\theta+\rho^2}$	$\frac{(\rho+\theta es)(\theta c_m-\phi+\theta es)}{\theta^2 e^2 s^2+2\theta eps-2\theta h+\rho^2}$

### 4.2 逆向供应链最优决策变量分析

**命题 3** 逆向供应链中回收价格满足:  $r^{C^*} > r^{MT^*} > r^{M^*} > r^{MV^*} > r^{VT^*} > r^{V^*} > r^{T^*}$ , 转移支付价格满足:  $t^{T^*} > t^{VT^*} > t^{MV^*} > t^{V^*} > t^{MT^*}$ .

由命题3可知, 集中决策回收模式和整车制造商与第三方回收商联盟回收模式的回收价格明显高于其它回收模式. 回收价格由消费者环境意识、消费者对回收价格敏感系数、梯次利用净利润、回收单位动力电池的碳减排量、碳价及回收成本共同决定. 集中决策回收模式凭借整车制造商的回收成本优势, 导致回收价格比其它回收模式更高. 单渠道回收模式中, 动力电池制造商回收模式直接从消费者手中回收, 省略代理商, 导致其回收价格比其他单渠道回收模式高. 整车制造商的回收成本比第三方回收商更低, 因而其回收价格也更高. 转移支付价格与回收固定成本、消费者环境意识、梯次利用净收益、消费者对回收价格的敏感系数、单位动力电池回收的碳减排量、消费者对回收价格的敏感系数及碳价相关. 其中回收固定成本因回收模

式的不同而有所变化,对比不同回收模式,第三方回收模式回收成本较高,为了提高其回收积极性,其获得的转移支付价格最高.而整车制造商与第三方回收商混合回收模式下,由于竞争导致两者的回收价格更高,因而动力电池制造商支付的转移支付价格更高.

**命题 4** 不同回收模式的供应链利润关系满足:  $\Pi^{MV*} > \Pi^{C*} > \Pi^{MT*} > \Pi^{VT*} > \Pi^{M*} > \Pi^{V*} > \Pi^{T*}$ , 回收率满足:  $R^{MT*} > R^{M*} > R^{VT*} > R^{MV*} > R^{V*} > R^{C*} > R^{T*}$ .

由命题4可知,相比于模式,动力电池制造商与整车制造商联盟回收模式供应链利润显著高于其它回收模式,这表明联盟回收模式比单渠道垄断回收和混合回收模式更优.动力电池制造商与整车制造商联盟在正向供应链中通过直销降低销售价格,从而增加销量,在逆向供应链中借助整车制造商的回收网络提高回收数量从而提高回收利润.由于动力电池制造商与第三方回收商联盟回收模式正向供应链零售价格较高,因而销量较低,而逆向供应链回收价格相对较高,因此其回收数量较高,从而其回收率最高.可以看出渠道间联盟可以充分利用整车制造商的回收网络从而使供应链利润更优.

### 4.3 参数的敏感性分析

基于第三节的分析结果,本节将对渠道竞争系数、消费者环境意识、碳配额和碳价进行敏感性分析.本研究参照已有文献并通过市场调研,对参数进行赋值,各参数的取值如表3所示.

表 3 参数取值

Table 3 Parameter values

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
$\phi$	300 000	$A_t$	350	$\delta_v$	0.49	$\delta_{mt}$	0.48
$\theta$	1.1	$k$	0.1	$\delta_t$	0.47	$\delta_m$	0.46
$c_m$	14 349	$E_R$	0.017	$A_m$	400	$e$	0.5
$b$	1.1	$E$	13.65	$A_v$	300	$\Delta$	29 349
$\delta_{mv}$	0.5	$\rho$	15	$s$	56.75	$h$	10
$e_m$	0.001	$e_v$	0.000 6	$e_t$	0.000 8		

假设电动汽车市场需求为300 000,参考Zhang等<sup>[36]</sup>的研究,消费者对动力电池的价格敏感性系数为1.6.以畅销车型比亚迪宋为例,其电池容量为59kW·h,退役电池还有80%的剩余容量.梯级利用的平均盈利能力为304元/kW·h<sup>[33]</sup>,因此,每单位电动汽车电池梯次利用率的盈利能力为59×0.8×304=14 349元,使用原材料的制造成本为82 000元,将回收的电池再制造成新电池的单位成本为67 000元.因此,每单位废弃电池回收后的总收益为29 349元.消费者对回收价格的敏感系数为1.1,消费者对竞争价格敏感系数 $\delta_{mv} = 0.5$ ,  $\delta_v = 0.49$ ,  $\delta_{mt} = 0.48$ ,  $\delta_t = 0.47$ ,  $\delta_m = 0.46$ .参照郑等<sup>[37]</sup>的研究,电池制造商、整车制造商及第三方回收商的回收成本分别为 $A_m=400$ 元,  $A_v=300$ 元,  $A_t=350$ 元,回收难度系数为1.1.参照Chen等<sup>[38]</sup>的研究,单位动力回收可以节省的碳排放为17 kg,初始碳排放为91.21 kg,回收过程的碳排放为 $e_m=0.001$ ,  $e_v=0.000 6$ ,  $e_t=0.000 8$ .企业获得政府免费的碳配额为上年碳排放的50%左右,因此 $E$ 的取值为13 650 kg.

#### 1) 回收渠道竞争系数和消费者环境意识

**命题 5** 消费者环境意识越高,渠道竞争系数越小,供应链利润和回收率越高;与此相反,消费者环境意识越低,渠道竞争系数越大,供应链利润和回收率越低.

研究存在渠道回收竞争的有三种回收模式,分别为模式VT,模式MV,模式MT,因此本研究只对这三种模式下的渠道竞争进行分析.其中横轴为消费者环境保护意识,纵轴为渠道竞争系数,颜色的变化表示供应链利润,且红色表示的利润最高,蓝色表示利润最低,右侧柱形图表示不同颜色对应的供应链利润和回收率.由图2和图3可以看出,在其它参数不变的情况下,保持纵坐标不变,随着消费者环境意识的增加,供应链利润和回收率增加;同理,保持供应链横轴保持不变,随着渠道竞争系数的增加,供应链利润和回收率减小.命题5表明消费者环境意识的提高和渠道竞争程度减小会有利于动力电池回收供应链利润和回收率的增加.

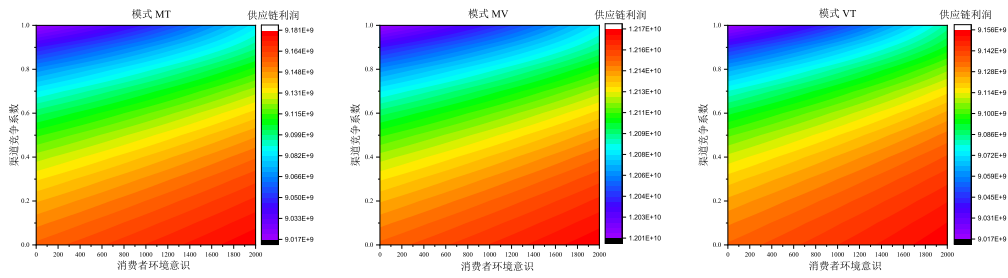


图 2 渠道竞争系数和消费者环境意识对供应链利润的影响

Fig. 2 The influences of channel competition coefficient and consumer environmental awareness on supply chain profit

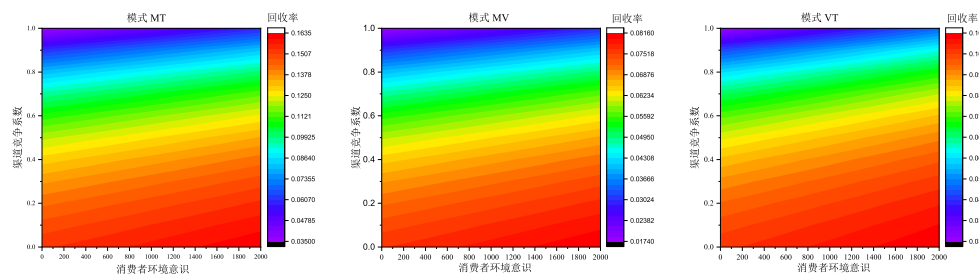


图 3 渠道竞争系数和消费者环境意识对回收率的影响

Fig. 3 The influences of channel competition coefficient and consumer environmental awareness on recycling rate

### 2) 碳配额与碳定价

**命题 6** 碳限额交易机制改善了动力电池回收供应链利润, 表现在保持碳价不变, 随着碳配额的增加, 供应链利润上升, 同理保持碳配额不变, 随着碳价的上升, 供应链利润增加. 这表明碳配额和碳价的增加均有利于动力电池回收闭环供应链利润的增长. 然而, 随着碳价的增长, 回收率降低.

图4分析了碳配额与碳价对动力电池闭环供应链利润和回收率的影响. 其中横轴表示碳价, 纵轴表示碳配额, 颜色的变化表示供应链利润, 右侧柱形图表示不同颜色对应的供应链利润. 2023年现有碳价为54.74元/t, 因此本研究将横轴的变化范围限定在0~200, 现阶段企业的碳配额为企业上一年排放的90%左右, 根据表2数据测算出碳排放总量的50%~100%变化范围为纵轴取值. 碳限额交易机制对企业决策的影响与碳价密切相关, 当碳价不确定性更低或价格更高时, 企业减排是更有利的, 因为减少碳排放帮助企业通过交易剩余碳额度获取更多的利润或节省购买碳额度的成本. 例如特斯拉在过去五年通过售卖碳额度获得了33亿美元的利润. 相反, 如果未来许可价格较低, 由于来自碳交易的收入减少或碳减排的收益减少, 企业会降低减排水平. 例如通用汽车预计于2030年完全转向无排放汽车, 尽管它多年来一直向特斯拉购买碳排放额度, 但由于碳价的不确定性, 通用汽车会不断调整无排放汽车的比例以权衡当前的碳减排投资与未来不确定的碳交易利润.

由于回收率不受碳配额的影响, 因此本研究只分析碳价对回收率的影响. 为了保持结果的稳健性, 本研究对消费者对动力电池零售价格和回收价格高敏感性和低敏感性情形下的结果分别进行讨论. 如图5所示, 随着碳价上升, 无论消费者对动力电池零售价格和回收价格的敏感性如何, 回收率均随着碳价的增长而下降. 这可能是由于动力电池制造商增加碳减排投资, 正向供应链市场份额增加, 逆向供应链回收量保持不变, 导致回收率降低. 因此, 对政府来说, 应当将碳交易价格控制在合理范围内, 为动力电池回收提供有效的价格激励信号.

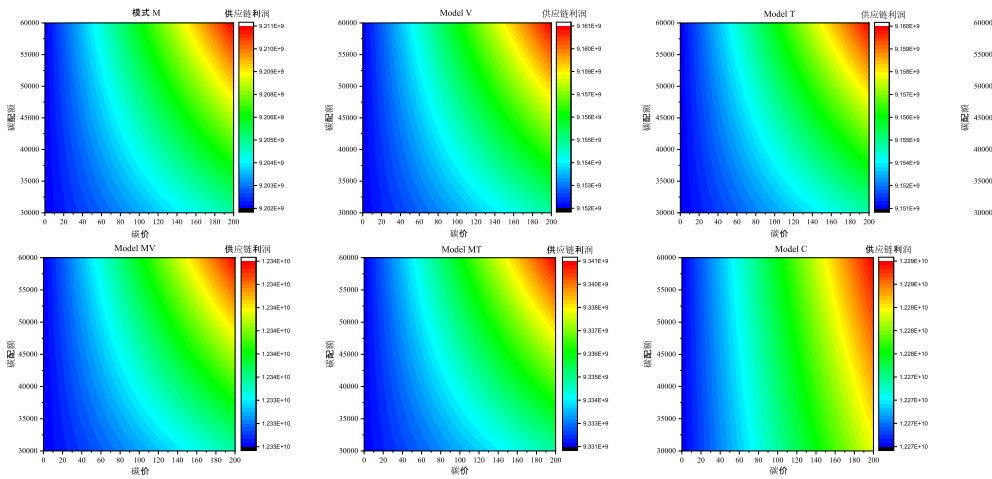


图 4 碳配额与碳定价对供应链利润的影响

Fig. 4 The impacts of carbon quota and carbon pricing on supply chain profits

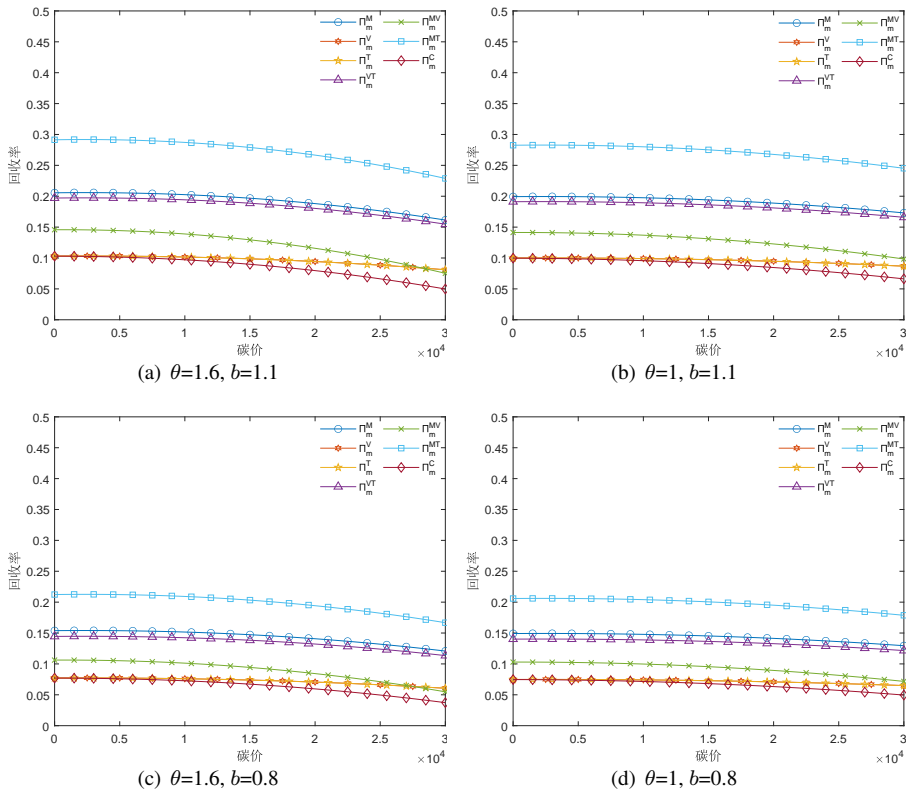


图 5 碳定价对回收率的影响

Fig. 5 Impacts of carbon pricing on recycling rates

3) 模型扩展

(a) 扩展 1

在第二节中, 假设 2 指出碳排放主要在生产过程. 在实际中, 也存在一些情况, 即回收过程中也存在碳排放, 且  $e_m > e_t > e_v$ . 在此情况下, 通过比较供应链最优决策变量、供应链利润和回收率, 以获得更多的管理见解. 结果表明, 以上研究结论在新模型中是稳健的, 特别是主要结论仍然一致, 即联盟回收模式零售价格、碳减排率、回收价格、供应链利润和回收率表现比单渠道垄断回收和混合回收模式更优, 且碳限额交易机制下供应链利润上升, 但回收率下降.

### (b) 扩展2

考虑到一些整车制造商在回收市场中逐渐占据主导地位, 如宝马集团直接从矿产企业购买动力电池原材料, 原材料交付给动力电池制造商宁德时代生产电芯, 宝马将电芯在自己的工厂组装电池并进行装车. 回收中, 宝马将动力电池回收工作委托给华友循环进行梯次利用和拆解回收, 并将锂、钴、镍等原材料投入电池的生产流程. 在本节, 假设整车制造商占据主导地位, 建立模型并求解决策变量、供应链利润和回收率, 得到的结果依然稳健, 但动力电池制造商主导权力结构下的回收价格、供应链利润和回收率优于整车制造商主导的供应链.

## 5 结束语

本研究构建了电动汽车废旧动力电池不同回收模式, 并将退役动力电池梯次利用过程考虑在内, 分析不同回收模式下动力电池生产商主导闭环供应链主体决策, 对比回收模式对供应链总利润和回收率的影响. 此外, 本研究还进一步分析了碳限额交易机制对供应链决策、供应链利润及回收率的影响, 主要结论可以概括: 动力电池制造商与整车制造商联盟回收模式的供应链整体利润最优, 动力电池制造商与第三方回收商联盟回收模式的回收率最优, 且联盟回收模式显著优于单渠道垄断回收和竞争回收模式. 渠道间竞争程度的加剧导致供应链利润和回收率下降, 消费者环境意识的增强将有利于供应链利润和回收率的增长. 供应链利润随着碳价和碳配额的增加而上升, 而回收率随着碳价的增长而下降. 由结论可知渠道间应加强合作, 共建共享回收渠道有利于推动废旧动力电池回收工作, 进一步增强消费者的环境意识, 鼓励和支持企业低碳技术研发并将碳配额和碳交易价格控制在合理范围内, 为电动汽车电池回收提供积极有力的信号. 由于动力电池制造企业碳减排水平决策可能受到补贴、奖惩等政策的影响, 因此, 同时考虑碳限额交易机制与补贴等其它政策的共同影响是本研究未来可拓展的方向.

### 参考文献:

- [1] Xu X, Yang Y, Ji T. The effects of cap-and-trade regulation and sales effort on supply chain coordination. *Annals of Operations Research*, 2025, 349(2): 1441–1469.
- [2] Cano Z P, Banham D, Ye S, et al. Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*, 2018, 3(4): 279–289.
- [3] 贾俊秀, 赵学科. 政府补贴下电动汽车供应链电池续航能力及回收策略. *系统工程学报*, 2022, 37(3): 330–343.  
Jia J X, Zhao X K. Battery endurance and recycling strategies of a new energy vehicle supply chain under government subsidies. *Journal of System Engineering*, 2022, 37(3): 330–343. (in Chinese)
- [4] El Ouardighi F, Sim J, Kim B. Pollution accumulation and abatement policies in two supply chains under vertical and horizontal competition and strategy types. *Omega-International Journal of Management Science*, 2021, 98: 102108.
- [5] Zhang C, Chen Y, Tian Y. Collection and recycling decisions for electric vehicle end-of-life power batteries in the context of carbon emissions reduction. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 175: 108869.
- [6] Gu X, Zhou L, Huang H, et al. Electric vehicle battery secondary use under government subsidy: A closed-loop supply chain perspective. *International Journal of Production Economics*, 2021, 234: 108035.
- [7] 楼高翔, 雷 鹏, 马海程, 等. 不同回收补贴政策下电动汽车动力电池闭环供应链运营决策研究. *管理学报*, 2023, 20(2): 267–277.  
Lou G X, Lei P, Ma H C, et al. Research on operation decision of closed-loop supply chain of new energy vehicle power battery under different recycling subsidy policies. *Chinese Journal of Management*. 2023, 20(2): 267–277. (in Chinese)
- [8] 孙嘉轶, 杨 露, 滕春贤. 政府补贴与股权合作下低碳闭环供应链决策与协调. *系统工程学报*, 2023, 38(4): 540–554.  
Sun J Y, Yang L, Teng C X. Decision and coordination of low-carbon closed-loop supply chain considering government subsidies and equity cooperation. *Journal of System Engineering*, 2023, 38(4): 540–554. (in Chinese)
- [9] Chen Y, Wang C, Nie P, et al. A clean innovation comparison between carbon tax and cap-and-trade system. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 29: 100483.

- [10] Xu X, Zhang W, He P, et al. Production and pricing problems in make-to-order supply chain with cap-and-trade regulation. *Omega-International Journal of Management Science*, 2017, 66: 248–257.
- [11] Xu X, Chen Y, He P, et al. The selection of marketplace mode and reselling mode with demand disruptions under cap-and-trade regulation. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(8): 2738–2757.
- [12] Shi Y, Zhang Z, Tiwari S, et al. Pricing and replenishment strategy for a perishable product under various payment schemes and cap-and-trade regulation. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 174: 103129.
- [13] Dobos I. The effects of emission trading on production and inventories in the Arrow-Karlin model. *International Journal of Production Economics*, 2005, 93-94: 301–308.
- [14] Barrieu P, Fehr M. Market-consistent modeling for cap-and-trade schemes and application to option pricing. *Operations Research*, 2014, 62(2): 234–249.
- [15] Bai Q, Xu J, Zhang Y. Emission reduction decision and coordination of a make-to-order supply chain with two products under cap-and-trade regulation. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 119: 131–145.
- [16] Chai Q, Xiao Z, Lai K, et al. Can carbon cap and trade mechanism be beneficial for remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 2018, 203: 311–321.
- [17] Chai Q, Sun M, Lai K, et al. The effects of government subsidies and environmental regulation on remanufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 178: 109126.
- [18] Wang X, Sethi S P, Chang S. Pollution abatement using cap-and-trade in a dynamic supply chain and its coordination. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 158: 102592.
- [19] Yang L, Hu Y, Huang L. Collecting mode selection in a remanufacturing supply chain under cap-and-trade regulation. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(2): 480–496.
- [20] Savaskan R C, Bhattacharya S, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management Science*, 2004, 50(2): 239–252.
- [21] Savaskan R C, Van Wassenhove L N. Reverse channel design: The case of competing retailers. *Management Science*, 2006, 52(1): 1–14.
- [22] De Giovanni P. A joint maximization incentive in closed-loop supply chains with competing retailers: The case of spent-battery recycling. *European Journal of Operational Research*, 2018, 268(1): 128–147.
- [23] 公彦德, 蒋雨薇, 达庆利. 不同混合回收模式和权力结构的逆向供应链决策分析. *中国管理科学*, 2020, 28(10): 131–143.  
Gong Y D, Jiang Y W, Da Q L. Decision analysis of reverse supply chain with different mixture recycling modes and power structures. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(10): 131–143. (in Chinese)
- [24] Shi J, Chen W, Verter V. The joint impact of environmental awareness and system infrastructure on e-waste collection. *European Journal of Operational Research*, 2023, 310(2): 760–772.
- [25] Wang N, Song Y, He Q, et al. Competitive dual-collecting regarding consumer behavior and coordination in closed-loop supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 144: 106481.
- [26] Wu W, Cong N, Zhang X, et al. Life cycle assessment and carbon reduction potential prediction of electric vehicles batteries. *Science of the Total Environment*, 2023, 903: 166620.
- [27] Guo Y, Wang M, Yang F. Joint emission reduction strategy considering channel inconvenience under different recycling structures. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169: 108159.
- [28] Anand K S, Giraud-Carrier F C. Pollution regulation of competitive markets. *Management Science*, 2020, 66(9): 4193–4206.
- [29] Ma J, Tian Y, Xu T, et al. Dynamic game study of multi-channel supply chain under cap-and-trade regulation. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2022, 160: 112131.
- [30] 张维月, 刘晨光, 李芳, 等. 渠道权力结构和回收方式对闭环供应链的影响. *系统工程学报*, 2021, 36(4): 495–508.  
Zhang W Y, Liu C G, Li F, et al. Impacts of channel power structures and collection modes on the closed-loop supply chain. *Journal of System Engineering*, 2021, 36(4): 495–508. (in Chinese)
- [31] Tang Y, Zhang Q, Liu B, et al. What influences residents' intention to participate in the electric vehicle battery recycling: Evidence from China. *Energy*, 2023, 276: 127563.
- [32] Tang Y, Zhang Q, Li Y, et al. Recycling mechanisms and policy suggestions for spent electric vehicles' power battery: A case of Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 388–406.
- [33] Tang Y, Zhang Q, Li Y, et al. The social-economic-environmental impacts of recycling retired EV batteries under reward-penalty mechanism. *Applied Energy*, 2019, 251: 113313.

- [34] 焦建玲, 潘正涛, 李晶晶. 考虑再利用的经济效益与排放效率的动力电池回收模式选择. 中国管理科学, 2024, 32(11): 201-213.  
Jiao J L, Pan Z T, Li J J. Selection of power battery recycling model considering economic benefits of reuse and emission efficiency. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(11): 201-213. (in Chinese)
- [35] Li X, Mu D, Du J, et al. Game-based system dynamics simulation of deposit-refund scheme for electric vehicle battery recycling in China. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 157: 104788.
- [36] Zhang M, Wu W, Song Y. Study on the impact of government policies on power battery recycling under different recycling models. Journal of Cleaner Production, 2023, 413: 137492.
- [37] 郑本荣, 杨超, 刘丛. 成本分摊对制造商回收闭环供应链的影响. 系统工程理论与实践, 2017, 37(9): 2344-2354.  
Zheng B R, Yang C, Liu C. The effect of cost sharing on manufacturer collecting closed loop supply chain. Systems Engineering: Theory & Practice, 2017, 37(9): 2344-2354. (in Chinese)
- [38] Chen Q, Lai X, Gu H, et al. Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China. Journal of Cleaner Production, 2022, 369: 133342.

### 作者简介:

武文琪 (1997—), 女, 山东泰安人, 博士生, 研究方向: 能源与环境政策、供应链管理, Email: wuwenqicumt@163.com;  
张明 (1980—), 男, 山东滨州人, 博士, 教授, 研究方向: 能源与环境系统工程, Email: zhangmingdlut@163.com.

### 附录A 最优决策求解

#### 1) 回收模式M最优决策求解

采用逆向归纳法求解, 整车制造商首先做出反应, 可以得到零售价格 $p^M$ 的反应函数为

$$p^M = \frac{\phi + \theta w + \rho l}{2\theta}, \quad (16)$$

将其代入到动力电池制造商的决策函数中, 可以得到 $\Pi_m^M$ 关于 $w$ ,  $r_m^M$ 和 $l^M$ 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H}_1(w, r_m, l) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial w \partial r_m} & \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial w \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial r_m \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial r_m^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial r_m \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial l \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial l \partial r_m} & \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial l^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\theta & 0 & \frac{\rho - \theta es}{2} \\ 0 & -2b - 2kb^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\theta es + \rho)^2}{4\theta} - h \end{bmatrix}, \quad (17)$$

由一阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_1(w, r_m, l)|_1 < 0$ , 二阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_1(w, r_m, l)|_2 > 0$ , 三阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_1(w, r_m, l)|_3 < 0$ , 可以判定 $\Pi_m^M$ 的海塞矩阵是关于 $w^M$ ,  $r_m^M$ 和 $l^M$ 的负定矩阵, 由此可得 $w^{M*}$ ,  $r_m^{M*}$ 和 $l^{M*}$ 为唯一最优解. 由 $\frac{\partial \Pi_m^M}{\partial w} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_m^M}{\partial r_m^M} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_m^M}{\partial l} = 0$ , 可以得到批发价格 $w^{M*}$ 、回收价格 $r_m^{M*}$ 和碳减排水平 $l^{M*}$ 的最优解分别为

$$w^{M*} = \frac{c_m \rho^2 - 2\phi h + e \rho^2 s - 2\theta c_m h + \theta \phi e^2 s^2 + \theta e^2 \rho s^2 - 2\theta e h s + \phi e \rho s + \theta c_m e \rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e \rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (18)$$

$$r_m^{M*} = -\frac{a - b(\Delta - A + E_R s) + 2abk}{2b(1 + bk)}, \quad (19)$$

$$l^{M*} = \frac{(\rho + \theta es)(\theta c_m - \phi + \theta es)}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e \rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (20)$$

将最优解代入到零售价格的反应函数, 可以得到零售价格的最优解为

$$p^{M*} = \frac{c_m \rho^2 - 3\phi h + e \rho^2 s - \theta c_m h + \theta \phi e^2 s^2 + \theta e^2 s^2 \rho - \theta e h s + \phi e \rho s + \theta c_m e \rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e \rho s - 4\theta h + \rho^2}. \quad (21)$$

#### 2) 回收模式V最优决策求解

采用逆向归纳法求解, 整车制造商首先做出反应, 可以得到零售价格 $p^V$ 和整车制造商回收价格 $r_v^V$ 的反应函数分别为

$$p^V = \frac{\phi + \theta w + \rho l}{2\theta}, \quad (22)$$

$$r_v^V = -\frac{a + b(A - t) + 2abk}{2kb^2 + 2b}, \quad (23)$$

将其代入到动力电池制造商的决策函数,可以得到 $\Pi_m^V$ 关于 $w, t^V$ 和 $l^V$ 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H}_2(w, t, l) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial w \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial w \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial t \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial t \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial l \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial l \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_m^V}{\partial l^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\theta & 0 & \frac{\rho - \theta es}{2} \\ 0 & \frac{-b}{bk+1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\theta es + \rho)^2}{4\theta} - h \end{bmatrix}, \quad (24)$$

由一阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_2(w, t, l)|_1 < 0$ , 二阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_2(w, t, l)|_2 > 0$ , 三阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_2(w, t, l)|_3 < 0$ , 可以判定 $\Pi_m^V$ 的海塞矩阵是关于 $w^V, t^V$ 和 $l^V$ 的负定矩阵, 由此可得 $w^{V*}, t^{V*}$ 和 $l^{V*}$ 为唯一最优解. 由 $\frac{\partial \Pi_m^V}{\partial w} = 0, \frac{\partial \Pi_m^V}{\partial t} = 0, \frac{\partial \Pi_m^V}{\partial l} = 0$ , 可以得到批发价格 $w^{V*}$ 、转移支付价格 $t^{V*}$ 和碳减排水平 $l^{V*}$ 的最优解分别为

$$w^{V*} = \frac{cm\rho^2 - 2\phi h + e\rho^2 s - 2\theta cm h + \theta\phi e^2 s^2 + \theta e^2 \rho s^2 - 2\theta ehs + \phi e\rho s + \theta cm e\rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e\rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (25)$$

$$t^{V*} = \frac{Ab - a + \Delta b + E_R bs}{2b}, \quad (26)$$

$$l^{V*} = \frac{(\rho + \theta es)(\theta cm - \phi + \theta es)}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e\rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (27)$$

将最优解代入到零售价格和制造商回收价格的反应函数, 可以得到零售价格和整车制造商回收价格的最优解分别为

$$p^{V*} = \frac{cm\rho^2 - 3\phi h + e\rho^2 s - \theta cm h + \theta\phi e^2 s^2 + \theta e^2 s^2 \rho - \theta ehs + \phi e\rho s + \theta cm e\rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e\rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (28)$$

$$r_v^{V*} = -\frac{3a + Ab - \phi b - E_R bs + 4abk}{4b(bk + 1)}. \quad (29)$$

### 3) 回收模式T最优决策求解

采用逆向归纳法求解, 第三方回收商和整车制造商首先做出反应, 可以得到整车制造商零售价格 $p^T$ 和第三方回收商回收价格 $r_t^T$ 的反应函数分别为

$$p^T = \frac{\phi + \theta w + \rho l}{2\theta}, \quad (30)$$

$$r_t^T = -\frac{a + b(A - t) + 2abk}{2kb^2 + 2b}, \quad (31)$$

将其代入到动力电池制造商的决策函数, 可以得到 $\Pi_m^T$ 关于 $w, t$ 和 $l$ 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H}_3(w, t, l) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial w \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial w \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial t \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial t \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial l \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial l \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_m^T}{\partial l^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\theta & 0 & \frac{\rho - \theta es}{2} \\ 0 & \frac{-b}{bk+1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\theta es + \rho)^2}{4\theta} - h \end{bmatrix}, \quad (32)$$

由一阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_3(w, t, l)|_1 < 0$ , 二阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_3(w, t, l)|_2 > 0$ , 三阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_3(w, t, l)|_3 < 0$ , 可以判定 $\Pi_m^T$ 的海塞矩阵是关于 $w^T, t^T$ 和 $l^T$ 的负定矩阵, 由此可得 $w^{T*}, t^{T*}$ 和 $l^{T*}$ 为唯一最优解. 由 $\frac{\partial \Pi_m^T}{\partial w} = 0, \frac{\partial \Pi_m^T}{\partial t} = 0, \frac{\partial \Pi_m^T}{\partial l} = 0$ , 可以得到批发价格 $w^{T*}$ 、转移支付价格 $t^{T*}$ 和碳减排水平 $l^{T*}$ 的最优解分别为

$$w^{T*} = \frac{cm\rho^2 - 2\phi h + e\rho^2 s - 2\theta cm h + \theta\phi e^2 s^2 + \theta e^2 \rho s^2 - 2\theta ehs + \phi e\rho s + \theta cm e\rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e\rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (33)$$

$$t^{T*} = \frac{Ab - a + \Delta b + E_R bs}{2b}, \quad (34)$$

$$l^{T*} = \frac{(\rho + \theta es)(\theta cm - \phi + \theta es)}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e\rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (35)$$

将最优解代入到零售价格和第三方回收商回收价格的反应函数, 可以得到零售价格和第三方回收商回收价格的最优解分别为

$$p^{T*} = \frac{cm\rho^2 - 3\phi h + e\rho^2 s - \theta cm h + \theta\phi e^2 s^2 + \theta e^2 s^2 \rho - \theta ehs + \phi e\rho s + \theta cm e\rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e\rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (36)$$

$$r_t^{T*} = -\frac{3a + Ab - \phi b - E_R bs + 4abk}{4b(bk + 1)}. \quad (37)$$

## 4) 回收模式VT最优决策求解

采用逆向归纳法求解, 第三方回收商和整车制造商首先做出反应, 可以得到零售价格 $p^{\text{VT}}$ 、整车制造商回收价格 $r_v^{\text{VT}}$ 和第三方回收商回收价格 $r_t^{\text{VT}}$ 的反应函数分别为

$$p^{\text{VT}} = \frac{\phi + \theta w + \rho l}{2\theta}, \quad (38)$$

$$r_v^{\text{VT}} = -\frac{a + (A-t)(b - \frac{\delta(\delta+2\delta bk)}{2kb^2+2b}) + \frac{\delta(a+b(A-t)+2abk)}{2kb^2+2b} + 2k(b - \frac{\delta(\delta+2\delta bk)}{2kb^2+2b})(a + \frac{\delta(a+b(A-t)+2abk)}{2kb^2+2b})}{2b + 2k(b - \frac{\delta(\delta+2\delta bk)}{2kb^2+2b})^2 - \frac{2\delta(\delta+2\delta bk)}{2kb^2+2b}}, \quad (39)$$

$$r_t^{\text{VT}} = -\frac{a - \delta r_v + b(A-t) + 2bk(a - \delta r_v)}{2kb^2 + 2b}, \quad (40)$$

将其代入到动力电池制造商的决策函数, 可以得到 $\Pi_m^{\text{VT}}$ 关于 $w$ ,  $t$ 和 $l$ 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H}_4(w, t, l) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial w \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial w \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial t \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial t \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial l \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial l \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial l^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\theta & 0 & \frac{\rho - \theta es}{2} \\ 0 & \frac{\delta^4 + 2\delta^3 b - 7\delta^2 b^2 - 4\delta b^2 + 8b^4}{2b\delta^2 - 4b^3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\theta es + \rho)^2}{4\theta} - h \end{bmatrix}, \quad (41)$$

由一阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_4(w, t, l)|_1 < 0$ , 二阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_4(w, t, l)|_2 > 0$ , 三阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_4(w, t, l)|_3 < 0$ , 可以判定 $\Pi_m^{\text{VT}}$ 的海塞矩阵是关于 $w^{\text{VT}}$ ,  $t^{\text{VT}}$ 和 $l^{\text{VT}}$ 的负定矩阵, 由此可得由此可得 $w^{\text{VT}*}$ ,  $t^{\text{VT}*}$ 和 $l^{\text{VT}*}$ 为唯一最优解. 由 $\frac{\partial \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial w} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_m^{\text{VT}}}{\partial l} = 0$ , 可以得到批发价格 $w^{\text{VT}*}$ 、转移支付价格 $t^{\text{VT}*}$ 和碳减排水平 $l^{\text{VT}*}$ 的最优解分别为

$$w^{\text{VT}*} = \frac{cm\rho^2 - 2\phi h + e\rho^2 s - 2\theta cm h + \theta\phi e^2 s^2 + \theta e^2 \rho s^2 - 2\theta e h s + \phi e \rho s + \theta c m e \rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e \rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (42)$$

$$t^{\text{VT}*} = \frac{A + \Delta + E_R s}{2}, \quad (43)$$

$$l^{\text{VT}*} = \frac{(\rho + \theta es)(\theta c m - \phi + \theta es)}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e \rho s - 4\theta h + \rho^2}, \quad (44)$$

将最优解代入到零售价格、整车制造商回收价格和第三方回收价格的反应函数, 可以得到零售价格、整车制造商回收价格和第三方回收商回收价格的最优解分别为

$$p^{\text{VT}*} = \frac{cm\rho^2 - 3\phi h + e\rho^2 s - \theta c m h + \theta\phi e^2 s^2 + \theta e^2 s^2 \rho - \theta e h s + \phi e \rho s + \theta c m e \rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e \rho s - 4h\theta + \rho^2}, \quad (45)$$

$$r_v^{\text{VT}*} = \frac{2b^2(\Delta - A + E_R s)[\delta(-2\delta^2 bk^2 - \delta^2 k - 2\delta b^2 k^2 - 3\delta bk - \delta + 2b^3 k^2 + 3b^2 k + b) + 2b^2(b^2 k^2 + 4bk + 2)]}{[16b^4(bk + 1)^2 - 2b\delta^2(2bk + 1) + k(-2k^2\delta^2 b - \delta^2 + 2kb^2 + 2b^2)]}, \quad (46)$$

$$R^{\text{VT}*} = \frac{(\Delta - A + E_R s)\{-4\delta^3 bk + b^2[k^2(4b^3 - 4\delta^3 - 4\delta^2 b + 4\delta b^2) + 4k(2b^2 - \delta^2) + 6\delta bk + 4b + 2\delta] - \delta^2(\delta + b)\}}{4(4\delta^4 b^2 k^3 + 4\delta^4 bk^2 + \delta^4 k - 8\delta^2 b^4 k^3 - 16\delta^2 b^3 k^2 - 10\delta^2 b^2 k - 2\delta^2 b + 4b^4 k^3 + 12b^5 k^2 + 12b^4 k + 4b^3)}. \quad (47)$$

## 5) 回收模式MV最优决策求解

采用逆向归纳法求解, 第三方回收商和联盟先确定回收价格, 可以得到第三方回收商和联盟回收价格的反应函数为

$$r_t^{\text{MV}} = -\frac{a - \delta r_{mv} + b(A-t) + 2bk(a - \delta r_{mv})}{2kb^2 + 2b}, \quad (48)$$

$$r_{mv}^{\text{MV}} = \frac{b(a + \frac{\delta(\Delta - t + E_R s)}{2} + \frac{\delta(a + Ab - bt)}{2b} + \frac{(\delta^2 - 2b^2)(\Delta - A - E_R s)}{2b})}{\delta^2 - 2b^2}, \quad (49)$$

将其代入到回收联盟的决策函数, 可以得到 $\Pi_{mv}^{\text{MV}}$ 关于 $p$ ,  $t$ 和 $l$ 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H}_5(p, t, l) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial p \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial p \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial t \partial p} & \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial t \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial l \partial p} & \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial l \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_{mv}^{\text{MV}}}{\partial l^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\theta & 0 & \rho - \theta es \\ 0 & \frac{-2b^2(\delta^2 - b^2)}{\delta^2 - 2b^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\theta es + \rho)^2}{4\theta} - h \end{bmatrix}, \quad (50)$$

由一阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_5(p, t, l)|_1 < 0$ , 二阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_5(p, t, l)|_2 > 0$ , 三阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_5(p, t, l)|_3 < 0$ , 可以判定 $\Pi_{mv}^{MV}$ 的海塞矩阵是关于 $p^{MV}$ ,  $t^{MV*}$ 和 $l^{MV*}$ 的负定矩阵, 由此可得 $p^{MV*}$ ,  $t^{MV*}$ 和 $l^{MV*}$ 为唯一最优解, 由 $\frac{\partial \Pi_{mv}^{MV}}{\partial p} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_{mv}^{MV}}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_{mv}^{MV}}{\partial l} = 0$ , 可以得到零售价格 $p^{MV*}$ 、转移支付价格 $t^{MV*}$ 和碳减排水平 $l^{MV*}$ 的最优解分别为

$$p^{MV*} = \frac{c_m \rho^2 - \phi h + e \rho^2 h - \theta c_m h + \theta \phi e^2 s^2 - \theta e h s + \phi e \rho s + \theta c_m e \rho s + \theta e^2 \rho s^2}{\theta^2 e^2 s^2 + 2 \theta e \rho s - 2 \theta h + \rho^2}, \quad (51)$$

$$t^{MV*} = \frac{A + \Delta + E_R s}{2}, \quad (52)$$

$$l^{MV*} = \frac{(\rho + \theta e s)(\theta c_m - \phi + \theta e s)}{\theta^2 e^2 s^2 + 2 \theta e \rho s - 2 \theta h + \rho^2}, \quad (53)$$

将最优解代入到反应函数, 得到第三方回收商和回收联盟的最优回收价格分别为

$$r_t^{MV*} = \frac{\Delta b - 2Ab - A\delta + \delta\Delta + E_R \delta s + E_R b s - 2Ab^2 k + \Delta b^2 k + E_R b^2 k - 2A\delta b k + 2\delta\Delta b k + 2E_R \delta b k s}{-4\delta^2 b k^2 - 2\delta^2 k + 4b^3 k^2 + 8b^2 k + 4b}, \quad (54)$$

$$r_{mv}^{MV*} = \frac{b(2\Delta - 2A + 2E_R s - 2A\delta k + \delta\Delta k - 2Abk + 2\Delta b k + E_R \delta k s + 2E_R b k s)}{-4\delta^2 b k^2 - 2\delta^2 k + 4b^3 k^2 + 8b^2 k + 4b}. \quad (55)$$

#### 6) 回收模式MT最优决策求解

采用逆向归纳法求解, 整车制造商先确定零售价格和回收价格, 联盟先确定回收价格, 可以得到零售价格 $p^{MT}$ 、整车制造商回收价格 $r_v^{MT}$ 和联盟回收价格 $r_{mt}^{MT}$ 的反应函数分别为

$$p^{MT} = \frac{\phi + \theta w + l \rho}{2\theta}, \quad (56)$$

$$r_v^{MT} = \frac{-[a - \delta r_{mt} + b(A - t) + 2bk(a - \delta r_{mt})]}{2kb^2 + 2b}, \quad (57)$$

$$r_{mt}^{MT} = \frac{b(a + \frac{\delta(\Delta - t + E_R s)}{2} + \frac{\delta(a + Ab - bt)}{2b} + \frac{(\delta^2 - 2b^2)(\Delta - A - E_R s)}{2b})}{\delta^2 - 2b^2}, \quad (58)$$

将其代入到回收联盟的决策函数, 可以得到 $\Pi_{mt}^{MT}$ 关于 $w^{MT}$ ,  $t^{MT}$ 和 $l^{MT}$ 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H}_6(w, t, l) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial w \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial w \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial t \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial t \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial l \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial l \partial t} & \frac{\partial^2 \Pi_{mt}^{MT}}{\partial l^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\theta & 0 & \rho - \theta e s \\ 0 & \frac{-2b(\delta^2 - b^2)}{\delta^2 - 2b^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\theta e s + \rho)^2}{4\theta} - h \end{bmatrix}, \quad (59)$$

由一阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_6(w, t, l)|_1 < 0$ , 二阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_6(w, t, l)|_2 > 0$ , 三阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_6(w, t, l)|_3 < 0$ , 可以判定 $\Pi_{mt}^{MT}$ 的海塞矩阵是关于 $w^{MT}$ ,  $t^{MT}$ 和 $l^{MT}$ 的负定矩阵, 由此可得 $w^{MT*}$ ,  $t^{MT*}$ 和 $l^{MT*}$ 为唯一最优解, 由 $\frac{\partial \Pi_{mt}^{MT}}{\partial w} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_{mt}^{MT}}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_{mt}^{MT}}{\partial l} = 0$ , 可以得到零售价格 $w^{MT*}$ 、转移支付价格 $t^{MT*}$ 和碳减排水平 $l^{MT*}$ 的最优解分别为

$$w^{MT*} = \frac{c_m \rho^2 - \phi h + e \rho^2 h - \theta c_m h + \theta \phi e^2 s^2 - \theta e h s + \phi e \rho s + \theta c_m e \rho s + \theta e^2 \rho s^2}{\theta^2 e^2 s^2 + 2 \theta e \rho s - 2 \theta h + \rho^2}, \quad (60)$$

$$t^{MT*} = \frac{b(2\Delta - 2A + 2E_R s - 2A\delta k + \delta\Delta k - 2Abk + 2\Delta b k + E_R \delta k s + 2E_R b k s)}{-4\delta^2 b k^2 - 2\delta^2 k + 4b^3 k^2 + 8b^2 k + 4b}, \quad (61)$$

$$l^{MT*} = \frac{(\rho + \theta e s)(\theta c_m - \phi + \theta e s)}{\theta^2 e^2 s^2 + 2 \theta e \rho s - 4 \theta h + \rho^2}, \quad (62)$$

将最优解代入到反应函数, 得到零售价格、整车制造商和回收联盟的最优回收价格分别为

$$p^{MT*} = \frac{c_m \rho^2 - 3\phi h + e \rho^2 s - \theta c_m h + \theta \phi e^2 s^2 + \theta e^2 s^2 \rho - \theta e h s + \phi e \rho s + \theta c_m e \rho s}{\theta^2 e^2 s^2 + 2 \theta e \rho s - 4 \theta h + \rho^2}, \quad (63)$$

$$r_v^{MT*} = \frac{\Delta b - 2Ab - A\delta + \delta\Delta + E_R \delta s + E_R b s - 2Ab^2 k + \Delta b^2 k + E_R b^2 k - 2A\delta b k + 2\delta\Delta b k + 2E_R \delta b k s}{-4\delta^2 b k^2 - 2\delta^2 k + 4b^3 k^2 + 8b^2 k + 4b}, \quad (64)$$

$$r_{mt}^{MT} = \frac{b(2\Delta - 2A + 2E_R s - 2A\delta k + \delta\Delta k - 2Abk + 2\Delta b k + E_R \delta k s + 2E_R b k s)}{-4\delta^2 b k^2 - 2\delta^2 k + 4b^3 k^2 + 8b^2 k + 4b}. \quad (65)$$

7) 回收模式C最优决策求解

$\Pi_C^C$ 关于 $p, r_c, l$ 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H}_7(w, r_c, l) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial p \partial r_c} & \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial p \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial r_c \partial p} & \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial r_c^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial r_c \partial l} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial l \partial p} & \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial l \partial r_c} & \frac{\partial^2 \Pi_m^C}{\partial l^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\theta & 0 & \rho - \theta es \\ 0 & -2b & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\theta es + \rho)^2}{4\theta} - h \end{bmatrix}, \quad (66)$$

由一阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_7(p, r_c, l)|_1 < 0$ , 二阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_7(p, r_c, l)|_2 > 0$ , 三阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_7(p, r_c, l)|_3 < 0$ , 可以判定 $\Pi_C^C$ 的海塞矩阵是关于 $w^C, r_c^C$ 和 $l^C$ 的负定矩阵, 由此可得 $w^{C*}, r_c^{C*}$ 和 $l^{C*}$ 为唯一最优解。由 $\frac{\partial \Pi_C^C}{\partial p} = 0, \frac{\partial \Pi_C^C}{\partial r_c} = 0, \frac{\partial \Pi_C^C}{\partial l} = 0$ , 可以得到零售价格、回收价格和碳减排水平的最优解分别为

$$p^{C*} = \frac{c_m \rho^2 - \phi h + e \rho^2 h - \theta c_m h + \theta \phi e^2 s^2 - \theta e h s + \phi e \rho s + \theta c_m e \rho s + \theta e^2 \rho s^2}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e \rho s - 2\theta h + \rho^2}, \quad (67)$$

$$r_c^{C*} = -\frac{a - b(\Delta - A + E_R s) + 2abk}{2b(1 + bk)}, \quad (68)$$

$$l^{C*} = \frac{(\rho + \theta es)(\theta c_m - \phi + \theta es)}{\theta^2 e^2 s^2 + 2\theta e \rho s - 2\theta h + \rho^2}. \quad (69)$$

附录B 逆向供应链最优定价

表 B1 不同回收模式逆向供应链最优定价

Table B1 Optimal pricing of reverse supply chain with different recycling models

	$r_m^*$	$t^*$
模式M	$-\frac{a-b(\Delta-A+E_R s)+2abk}{2b(1+bk)}$	
模式V		$\frac{Ab-a+\Delta b+E_R bs}{2b}$
模式T		$\frac{Ab-a+\Delta b+E_R bs}{2b}$
模式VT		$\frac{A+\Delta+E_R s}{2}$
模式MV	$\frac{b(2\Delta-2A+2E_R s-2A\delta k+\delta\Delta k-2Abk+2\Delta bk+E_R \Delta ks+2E_R bks)}{-4\delta^2 bk^2-2\delta^2 k+4b^3 k^2+8b^2 k+4b}$	$\frac{A+\Delta+E_R s}{2}$
模式MT	$\frac{b(2\Delta-2A+2E_R s-2A\delta k+\delta\Delta k-2Abk+2\Delta bk+E_R \Delta ks+2E_R bks)}{-4\delta^2 bk^2-2\delta^2 k+4b^3 k^2+8b^2 k+4b}$	$\frac{A+\Delta+E_R s}{2}$
模式C	$-\frac{[a-b(\Delta-A+E_R s)+2abk]}{2b(1+bk)}$	

表 B2 不同回收模式逆向供应链最优定价

Table B2 Optimal pricing of reverse supply chain with different recycling models

	$r_v^*$	$r_t^*$
模式V	$-\frac{(3a+Ab-\phi b-E_R bs+4abk)}{4b(bk+1)}$	
模式VT	$\frac{2b^2(\Delta-A+E_R s)(bk+1)(-2\delta^3 bk^2-\delta^3 k-2\delta^2 b^2 k^2-3\delta^2 bk-\delta^2+2\delta b^3 k^2+3\delta b^2 k+\delta b+2b^4 k^2+4b^3 k+2b^2)}{16b^4(bk+1)^3-2b\delta^2(2bk+1)(bk+1)+k(bk+1)(-2k^2\delta^2 b-\delta^2+2kb^2+2b^2)^2}$	
模式MV	$\frac{b(2\Delta-2A+2E_R s-2A\delta k+\delta\Delta k-2Abk+2\Delta bk+E_R \Delta ks+2E_R bks)}{-4\delta^2 bk^2-2\delta^2 k+4b^3 k^2+8b^2 k+4b}$	
模式MT	$\frac{\Delta b-2Ab-A\delta+\delta\Delta+E_R \delta s+E_R bs-2Ab^2 k+\Delta b^2 k+E_R b^2 k-2A\delta bk+2\delta\Delta bk+2E_R \delta bks}{-4\delta^2 bk^2-2\delta^2 k+4b^3 k^2+8b^2 k+4b}$	
模式C	$-\frac{[a-b(\Delta-A+E_R s)+2abk]}{2b(1+bk)}$	
模式T	$-\frac{(3a+Ab-\Delta b-E_R bs+4abk)}{4b(bk+1)}$	
模式VT	$\frac{(\Delta-A+E_R s)(-4\delta^3 b^2 k^2-4\delta^3 bk-\delta^3-4\delta^2 b^3 k^2-4\delta^2 b^2 k-\delta^2 b+4\delta b^4 k^2+6\delta b^3 k+2\delta b^2+4b^5 k^2+8b^4 k+4b^3)}{4(4\delta^4 b^2 k^3+4\delta^4 bk^2+\delta^4 k-8\delta^2 b^4 k^3-16\delta^2 b^3 k^2-10\delta^2 b^2 k-2\delta^2 b+4b^4 k^3+12b^5 k^2+12b^4 k+4b^3)}$	
模式MV	$\frac{\Delta b-2Ab-A\delta+\delta\Delta+E_R \delta s+E_R bs-2Ab^2 k+\Delta b^2 k+E_R b^2 k-2A\delta bk+2\delta\Delta bk+2E_R \delta bks}{-4\delta^2 bk^2-2\delta^2 k+4b^3 k^2+8b^2 k+4b}$	
模式MT	$\frac{b(2\Delta-2A+2E_R s-2A\delta k+\delta\Delta k-2Abk+2\Delta bk+E_R \Delta ks+2E_R bks)}{-4\delta^2 bk^2-2\delta^2 k+4b^3 k^2+8b^2 k+4b}$	
模式C	$-\frac{[a-b(\Delta-A+E_R s)+2abk]}{2b(1+bk)}$	