

“双碳”目标下考虑低碳消费偏好的低值可回收物绿色生产模式选择

冯章伟^{1,2}, 庞诗祺¹

(1. 宁波大学商学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学商帮经济与文化智能计算实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要:为应对碳减排政策或降低生产成本, 制造商在生产低值产品阶段有两种绿色生产模式可供选择: 仅选择再制造模式或进一步增加碳减排技术投入。基于此, 构建一个由单个制造商、零售商和第三方回收商以及消费者组成的闭环供应链, 制造商是领导者, 选择绿色生产模式, 消费者对碳减排存在偏好, 研究碳税政策下制造商的决策和模式选择。分别研究碳配额交易政策下和考虑消费者对于再制造产品存在偏好情景下制造商的决策和模式选择。结果显示: (1) 在同一种碳减排政策下, 只要碳减排技术投资存在收益, 制造商就会选择碳减排模式; (2) 若再制造模式在碳配额交易政策下, 而碳减排模式在碳税政策下并且碳减排成本系数较大, 制造商会选择再制造模式。此外, 在碳税政策下, 当消费者对于再制造产品也存在偏好并且较大时, 制造商选择再制造模式; 否则, 制造商选择碳减排模式。

关键词:碳税政策; 碳配额交易政策; 消费者偏好; 碳减排; 再制造

中图分类号:F224; C931.1 **文献标志码:**A

引用格式:冯章伟, 庞诗祺. “双碳”目标下考虑低碳消费偏好的低值可回收物绿色生产模式选择[J]. 山东大学学报(理学版), 2025, 60(6): 103-113.

Green production mode selection of low-value recyclable products considering low-carbon consumption preferences under “Dual Carbon” goals

FENG Zhangwei^{1,2}, PANG Shiqi¹

(1. School of Business, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Merchants' Guild Economics and Cultural Intelligent Computing Laboratory of Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: To comply with carbon reduction policies or reduce production costs, manufacturers of low-value products can adopt two green production strategies: remanufacturing alone or remanufacturing with additional carbon emission reduction (CER) technology investment. This paper develops a closed-loop supply chain (CLSC) model consisting of a manufacturer, retailer, third-party recycler, and carbon-conscious consumers. We analyze the manufacturer's optimal production strategy under carbon tax policy, then extend the study to cap-and-trade policy and scenarios incorporating consumer preferences for remanufactured products. Key findings indicate: (1) Under uniform carbon policy, manufacturers consistently prefer CER-integrated remanufacturing when the technology investment proves profitable; (2) In hybrid policy scenarios where standard remanufacturing operates under cap-and-trade while CER remanufacturing falls under carbon tax, manufacturers choose conventional remanufacturing when CER costs exceed a threshold; (3) Under carbon tax, significant consumer preference for remanufactured products leads manufacturers to select standard remanufacturing, otherwise CER remanufacturing is preferred. These results provide operational guidance for manufacturers navigating carbon-regulated markets.

Key words: carbon tax policy; carbon cap-and-trade policy; consumers' preference; carbon reduction; remanufacturing

0 引言

超额碳排放导致气候异常和可持续发展问题已成为全球社会经济发展的最重要议题之一, 绿色金融手

收稿日期: 2024-05-31; 网络出版时间: 2025-04-30 10:14:38

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72202110); 宁波大学“南帮经济与文化”智能计算实验室中心课题(MGECICL2025T13)

第一作者: 冯章伟(1990—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 研究方向为物流与供应链管理、平台经济与数智治理。

E-mail: fengzhangwei@nbu.edu.cn

段(如建立碳排放权交易市场、制定合理的碳税政策等)作为应对“碳达峰、碳中和”的重要手段受到各国政府重视。2020年9月,中国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标。由于碳限额与交易政策在减排效果、市场机制、公平性和国际接轨方面具有优势,是当前碳税政策的有效补充和拓展。未来碳限额与交易政策将发挥更大作用,是实现碳减排和“双碳”目标的必然选择^[1]。截至2024年底,全国碳排放权交易市场配额累计成交量6.3亿吨,累计成交额430.33亿元。2021年至今,中国制造业的能耗总量以及碳排放总量占比超过1/3,是电力之外第二大碳排放来源。要实现“双碳”目标,除了大力发展清洁能源和降低电力行业的碳排放外,制造业的“碳中和”转型发展,是实现碳减排的重中之重。据《中国能源发展报告2024》显示,在未来5至10年内,碳减排潜力最大的依旧是生产环节,尤其是高耗能制造业。在政策支持和产业实践下,越来越多的消费者涌现出对于碳减排的偏好,特别是对于低值可回收物产品(如废纸张、废塑料等)与电子电器产品的低碳偏好^[2-3]。有别于传统的再制造过程带来的生产成本节省,碳减排投资主要针对生产过程中的二氧化碳等气体排放的监管和减排设备的采购,在未来碳配额限制的要求下具有竞争优势^[4]。

为应对“双碳”目标约束下的碳减排问题,政府采取以碳税和碳配额交易为主的碳排放政策^[5-6]。很多学者对单一碳减排政策或2种碳减排政策比较展开研究^[7-10],Hasan等^[7]在碳税和碳排放总量管制的碳限制法规下,建立了3个优化库存水平和绿色技术投资的模型。结果表明,在碳限制下,企业利润和碳减排总量与绿色技术投入成正比,需求随着绿色技术的推广而增加。刘碧玉等^[8]针对无碳排放约束、实施碳税以及碳配额交易政策3种情形,分别构建了由制造商和被授权再制造商组成的博弈模型,研究碳排放政策对企业运营决策的影响。司冰倩等^[2]基于制造商主导和消费者低碳偏好,分别构建碳税和碳限额与交易模型,研究制造商生产定价和减排问题,重点比较制造商利润随各种政策变量的变化关系。Ghosh等^[3]考虑了政府强制性限额与交易监管下的排放敏感随机需求和消费者的低碳偏好,分析了一个两级供应链模型。结果表明,当消费者的低碳偏好较高且产品的初始排放较低时,引入双渠道策略是利可图的。

近年,结合企业环境责任或环境成本、政府碳税/补贴、消费者行为等机制或行为视角的相关研究涌现。比如,Atasu等^[11-12]从闭环供应链运作效率和每个利益相关者的角度,研究了环境成本对废弃电器电子产品回收法律和闭环供应链各成员的利润影响。在此基础上,为研究制造商对于环境成本的支付意愿即环境责任行为在闭环供应链中的影响,Liu等^[13]将其刻画到回收渠道的选择中,Feng等^[14]将其刻画到第三方再制造模式的选择中,并研究了环境责任行为对制造商利润的影响机理。除政府碳税政策的研究外,也有学者研究碳税-补贴联合机制对于闭环供应链的作用机制^[15]。结合消费者行为的闭环供应链研究主要集中在绿色消费者及其偏好、低碳偏好、再制造产品偏好、策略购买行为等。Feng等^[14]、Atasu等^[16]、Chen等^[17]均考虑了绿色消费者愿意花更多的偏好在环境价值,而普通消费者仍然认为再制造产品的性能低于新产品。研究显示,拥有强烈绿色偏好的绿色消费者更倾向于购买再制造产品。

综上所述,现有的供应链管理和碳减排政策相结合的研究主要集中在一般供应链的碳减排决策^[18-19]或不同碳减排政策下的闭环供应链回收渠道与领导力、再制造决策、定价决策等^[9]。虽然也有文章在闭环供应链研究碳减排投资及其决策^[10,20-21],但比较闭环供应链中的碳减排和再制造的研究较少,尤其是考虑消费者低碳偏好和再制造产品偏好。因此,本文构建了一个由单个制造商、零售商和第三方回收商以及消费者组成的低值可回收物闭环供应链,制造商是领导者,选择绿色生产模式(“再制造”模式或“再制造—碳减排”模式),考虑消费者对碳减排和再制造均存在偏好的情况下,研究碳税/碳配额交易政策下制造商的决策和模式选择。

1 模型描述与假设

1.1 系统描述

构建一条由单个制造商、零售商和第三方回收商(third-party recycler, 3PR)组成的闭环供应链,制造商是领导者,生产新产品和再制造产品并批发给零售商,由其销售产品给消费者,3PR负责回收消费者手中的废旧产品并由制造商回购。制造商在生产低值产品阶段可选择仅再制造模式或进一步增加碳减排技术投入。闭环供应链如图1所示。

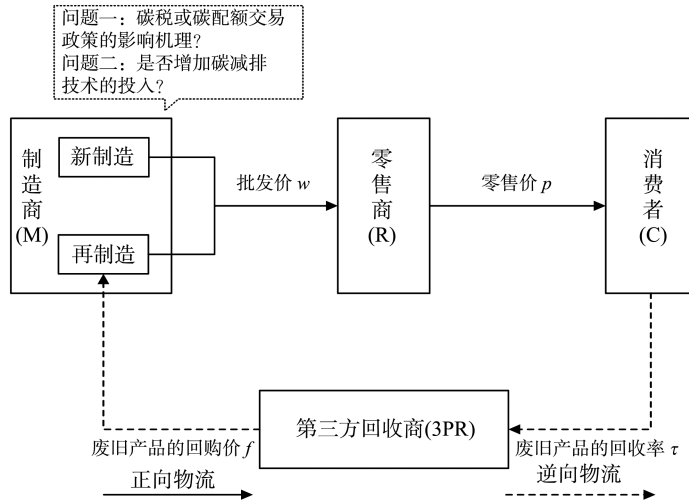


图1 闭环供应链经济结构

Fig.1 Economic structure of the closed-loop supply chain

1.2 模型中的符号说明

文中所用符号说明见表1。

表1 模型中的符号说明
Table 1 Notation in the model

符号	含义	符号	含义
λ	回收成本的规模系数	γ	消费者的低碳偏好
c_n	新产品的单位生产成本	τ	回收率,且 $0 \leq \tau \leq 1$
c_r	再制造产品的单位生产成本	w	批发价
f	制造商单位回购费用	p	零售价,且 $p > w$
Δ	单个产品的节省费用, $\Delta = c_n - (c_r + f) > 0$	e_n	碳减排量,且 $e_n < e_0$
e_0	初始碳排放量	D	需求函数
η	碳减排成本的规模系数	π_i^j	企业 i 在 j 模式的利润函数, $i = \{M, R, 3PR\}$, $j = \{Rt, Rc, Tt, Tc\}$
t	单位产品碳税	P_e	单位碳交易费用
α	潜在的市场总需求	E	碳配额
β	零售价敏感系数	δ	消费者对再制造产品的偏好

1.3 基本假设

假设1 据厦门市低值可回收物分拣中心显示,废弃塑料经过智能分选、压缩打包后成为再生塑料颗粒,可用于制造衣服、玩具等生活用品,其质量与原生塑料制品无异;废玻璃分选后加工成建筑材料,如玻璃砖、玻璃纤维等,其强度、耐用性与原生玻璃制品相同。因此,假设塑料类、玻璃类等低值可回收物的回收后再制造产品与新产品是同质的^[22]。

假设2 因为低值可回收产品非常多且不影响品质,考虑3PR从消费者中的回收价格忽略不计,参考文献^[14, 20, 23],构建与回收率相关的二次成本函数,包括回收费用、分拣中心租金和分拣成本等,即 $\lambda\tau^2/2$, $0 \leq \tau \leq 1$ 。

假设3 虽然制造商生产新产品和再制造产品同质,但是低值可回收物原料的获取成本较低、生产工艺成熟、数量较多且能够形成规模经济效应,因此,假设 $\Delta = c_n - (c_r + f) > 0$,其中 c_n 和 c_r 分别为新产品和再制造产品单位生产成本, f 为制造商回购费用且为外生, Δ 为单位节省费用^[23]。

假设4 制造商开发和推广碳减排需要投入一定的研发、设备制造和安装以及能效技术改进等成本。类似于回收成本,假设投入碳减排成本 $\eta e_n^2/2$,能够带来碳减排量 e_n , $e_n < e_0$,则 $e_0 - e_n$ 表示减排后的碳排放量^[21, 24]。

假设5 消费者对于制造商做出的减排标识存在感知,能够增加消费者对于产品的偏好和需求。数据显示,产品包装上引入碳减排标识,明确标注碳排放数据或环保材料使用情况,如采用轻量化材料、可循环设

计等,并在包装上展示碳足迹信息,能够增加消费者 10%~50% 的购买偏好。因此,假设 $D = \alpha - \beta p + \gamma e_n^{[21]}$, γ 可理解为消费者的碳减排偏好;否则, $D = \alpha - \beta p$ 。

2 碳税政策下的闭环供应链模型构建、求解与分析

情景 1 只考虑再制造,不考虑碳减排(Rt)

制造商、零售商和 3PR 的利润函数分为:

$$\pi_M^{Rt} = (w - c_n + \Delta) \cdot \tau D + (w - c_n) \cdot (1 - \tau) D - t e_0 \cdot D, \quad (1)$$

$$\pi_R^{Rt} = (p - w) \cdot D, \quad (2)$$

$$\pi_{3PR}^{Rt} = f \cdot \tau D - \lambda \tau^2 / 2, \quad (3)$$

其中, $t e_0 \cdot D$ 是制造商缴纳的碳税, $\lambda \tau^2 / 2$ 是 3PR 的回收成本。

博弈顺序如下:(1) 制造商决定产品的批发价格 w ; (2) 零售商决定产品的零售价格 p ; (3) 在观察到制造商和零售商的决策后, 3PR 决定回收率 τ 。结合利润函数和博弈顺序, 由逆向归纳法可求得情景 1 下的最优解。

引理 1 假设 $\Delta < \Delta_1$ 且 $t < (\alpha - \beta c_n) / (\beta e_0)$ 。均衡决策为

$$w^{Rt*} = (\alpha M - N_1 \lambda) / (\beta M), \quad p^{Rt*} = (\alpha + \beta w^{Rt*}) / (2\beta), \quad \tau^{Rt*} = f(\alpha - \beta p^{Rt*}) / \lambda。$$

进一步地, 均衡需求和利润为

$$D^{Rt*} = N_1 \lambda / (2M), \quad \pi_M^{Rt*} = N_1^2 \lambda / (4\beta M), \quad \pi_R^{Rt*} = N_1^2 \lambda^2 / (4\beta M^2), \quad \pi_{3PR}^{Rt*} = N_1^2 \lambda f^2 / (8M^2)。$$

假设 $\Delta < \Delta_1$ 且 $t < (\alpha - \beta c_n) / (\beta e_0)$ 保证了均衡解的存在性、非负性和唯一性。由引理 1 可知, 制造商和零售商以及 3PR 均随着单位产品碳税 t 的增加而利润递减, 即 $\partial \pi_M^{Rt*} / \partial t < 0$, $\partial \pi_R^{Rt*} / \partial t < 0$, $\partial \pi_{3PR}^{Rt*} / \partial t < 0$ 。这意味着碳税增加了各主体以及整条供应链的成本, 压缩了供应链各成员的利润, 但是, 潜在的社会福利和循环效益是否增加有待进一步验证。在现实中, 欧盟碳的边境调节机制对高碳排放进口产品征收碳税, 压缩了高碳国优势企业的利润, 从而影响供应链的持续稳定。

情景 2 既考虑再制造, 又考虑碳减排(Tt)

制造商、零售商和 3PR 的利润函数分别为:

$$\pi_M^{Tt} = (w - c_n + \Delta) \cdot \tau D + (w - c_n) \cdot (1 - \tau) D - t(e_0 - e_n) \cdot D - \eta e_n^2 / 2, \quad (4)$$

$$\pi_R^{Tt} = (p - w) \cdot D, \quad (5)$$

$$\pi_{3PR}^{Tt} = f \cdot \tau D - \lambda \tau^2 / 2。 \quad (6)$$

博弈顺序如下:(1) 制造商决定产品的批发价格 w 和碳减排水平 e_n ; (2) 零售商决定产品的零售价格 p ; (3) 在观察到制造商和零售商的决策后, 3PR 决定回收率 τ 。结合利润函数和博弈顺序, 由逆向归纳法可求得情景 2 下的最优解。

引理 2 假设 $\Delta < \Delta_2$, $t < (\alpha - \beta c_n) / (\beta e_0)$ 和 $\eta > \eta_1$ 。均衡决策为

$$w^{Tt*} = [\alpha O_1 - N_2 \lambda (2\beta \eta - t\beta \gamma - \gamma^2)] / (\beta O_1), \quad e_n^{Tt*} = N_1 \lambda (t\beta + \gamma) / O_1,$$

$$p^{Tt*} = (\alpha + \beta w^{Tt*} + \gamma e_n^{Tt*}) / (2\beta), \quad \tau^{Tt*} = [f(\alpha - \beta p^{Tt*} + \gamma e_n^{Tt*})] / \lambda。$$

进一步地, 均衡需求和利润为

$$D^{Tt*} = (N_1 \eta f \beta) / O_1, \quad \pi_M^{Tt*} = (N_1^2 \eta \lambda) / (2O_1), \quad \pi_R^{Tt*} = (\beta N_1^2 \eta^2 \lambda^2) / (O_1^2), \quad \pi_{3PR}^{Tt*} = (N_1^2 \eta^2 \lambda f^2 \beta^2) / (2O_1^2)。$$

类似于引理 1, 假设 $\Delta < \Delta_2$, $t < (\alpha - \beta c_n) / (\beta e_0)$ 和 $\eta > \eta_1$ 保证了均衡解的存在性、非负性和唯一性。由引理 1、2, 可以得到特例情形下闭环供应链各成员的选择或偏好(即推论 1、2 以及命题 1)。

推论 1 当所有原材料均为回收的(即 $\tau = 1$)且没有碳减排时, 均衡利润为

$$\pi_M^{Rt*} |_{\tau=1} = (N_1 + \Delta \beta)^2 / (8\beta), \quad \pi_R^{Rt*} |_{\tau=1} = (N_1 + \Delta \beta)^2 / (16\beta), \quad \pi_{3PR}^{Rt*} |_{\tau=1} = [f(N_1 + \Delta \beta) - 2\lambda] / 4。$$

推论 2 当所有原材料均为新的(即 $\tau = 0$)且有碳减排时, 均衡利润为

$$\pi_M^{Tt*} |_{\tau=0} = N_1^2 \eta / \{2[4\beta \eta - (t\beta + \gamma)^2]\}, \quad \pi_R^{Tt*} |_{\tau=0} = \beta N_1^2 \eta^2 / [4\beta \eta - (t\beta + \gamma)^2]^2, \quad \pi_{3PR}^{Tt*} |_{\tau=0} = 0。$$

特别地, 本文未考虑当所有原材料均为新的(即 $\tau = 0$)且没有碳减排的情况, 因此此特例相当于制造商

既不从事再制造也没投入碳减排,与情景1的假设相悖,当所有原材料均为回收的(即 $\tau=1$)且有碳减排的特例会显著优于推论1的结论,因此也未被考虑。

由推论1可知,在当所有原材料均为回收且没有碳减排的情况下,随着回收成本的规模系数降低,3PR的利润会增加,即 $\partial\pi_{3PR}^{Ri*}|_{\tau=1}/\partial\lambda=-\lambda/2<0$ 。结合引理1、2以及推论1、2可知,提高回收规模效应或降低回收成本有利于3PR降本增效,进一步促进碳减排。政府在出台相应的碳减排政策之前,一方面,可以加强公益广告或政策的宣传帮助3PR提高回收规模效应,另一方面,可以提供相应的回收补贴或减税等措施帮助3PR降低回收成本,间接地促进碳减排。

由推论1、2的比较可得命题1。

命题1 当 $\Delta>\Delta_3$ 时,制造商和零售商能够达成一致选择或偏好仅再制造模式;当 $\Delta<\Delta_4$ 时,制造商和零售商能够达成一致选择或偏好仅碳减排模式;否则,其不能达成一致偏好同一种模式。

命题1显示,对于只有单一绿色生产模式(仅再制造或仅碳减排技术投入),主要取决于单位再制造产品的节约成本 Δ ,具体地,当单位节约成本越高,仅再制造模式越受益(即当 $\Delta>\Delta_3$ 时, $\pi_M^{Ri*}|_{\tau=1}>\pi_M^{Ti*}|_{\tau=0}$ 和 $\pi_R^{Ri*}|_{\tau=1}>\pi_R^{Ti*}|_{\tau=0}$),这与现实一致。现实中,单位节约成本高度依赖于回收数量、再制造工艺、设备投入等。过去,低值可回收物作为废弃物占比较大的组成部分,因其经济价值低、产生来源分散、回收利用较难,成为废旧物资回收利用的最大短板。2022年12月,位于厦门的全国首个低值可回收物分拣中心正式开启,打通了垃圾源头分类与末端利用的堵点,探索出上下游有效衔接、垃圾分类收运与资源利用有效协调的低值可回收物处理模式。截至2024年6月,分拣中心累计回收处理低值可回收物24735吨,助力节约近2.5万吨石油。因此,各地政府要积极引导企业建立低值可回收物分拣中心,通过政策支持提高低值可回收物的单位节约成本,创造更大的商业价值。但是,在碳税政策推广下,如果制造商在选择再制造模式的基础上决策是否增加碳减排投入投资,在现实中需要考虑更多的因素,如资金约束、投资过高、边际收益过低等,其动机见命题2、3。

命题2 当 $\lambda<f<2\lambda$ 且 $\eta>\eta_2$ 时,增加碳减排投入投资能促进需求(即 $D^{Ti*}>D^{Ri*}>0$);否则,增加碳减排投入投资不能促进需求或没有需求(即 $\max\{0,D^{Ti*}\}\leq D^{Ri*}$)。

命题3 当 $\eta>\eta_1$ 时,增加碳减排投入投资有意义(即 $\pi_M^{Ti*}>\pi_M^{Ri*}>0$, $\pi_R^{Ti*}>\pi_R^{Ri*}>0$ 和 $\pi_{3PR}^{Ti*}>\pi_{3PR}^{Ri*}>0$);否则,增加碳减排投入投资没有意义(即 $\pi_M^{Ri*}>0>\pi_M^{Ti*}$, $\pi_R^{Ri*}>0>\pi_R^{Ti*}$ 和 $\pi_{3PR}^{Ri*}>0>\pi_{3PR}^{Ti*}$)。

由命题2、3可知,在碳税政策下,只要碳减排成本的规模系数不是太小,即碳减排技术投资有利可图,制造商就会在再制造模式的基础上选择碳减排技术。现实中,已有企业将再制造与碳减排技术融合一起,即使面对碳税或碳配额交易政策,也能从中获益,并且随着宏观政策的改变收益逐渐增大。比如,利用低值可回收塑料作为原材料,通过再制造技术和碳减排工艺,生产出可用于建筑行业的低碳再生塑料建材,如塑料砖、墙板、地板等。数据显示,目前约80%的低值可回收塑料可进行回收再利用。在一定条件下,碳减排成本的规模系数越高,即投资有效性提高,会带来需求的增长和整条供应链利润的增长,实现制造商、零售商、3PR的“多赢”局面,因此,在碳税政策下采取碳减排投资是可取且必要的。政府也可以制定相应的激励政策,鼓励企业投资碳减排技术,并提供技术和资金支持,帮助企业技术改革或产业升级,进而推动需求增加和企业利润增长。

但是,在碳配额交易政策下,这个结论是否具有鲁棒性?此外,目前消费者只对碳减排存在偏好,如果消费者对于再制造产品也存在偏好,是否会有新的管理启示?为此,本文将构建2个扩展模型:考虑碳配额交易政策和考虑消费者对于再制造产品的偏好。在此基础上,研究碳配额交易政策或消费者对于再制造产品的偏好对投资策略的影响机理。

3 扩展模型与均衡分析

扩展模型1 考虑碳配额交易政策

相较于由政府定价的碳税政策,因缺乏市场调节,企业减排动力依赖于碳价水平。引入碳配额交易这一市场机制,企业可买卖配额,减排成本低的企业可出售配额获利,激励企业主动减排,更具灵活性。因此,在

扩展模型中考虑碳配额交易政策。类似于基本模型,在扩展模型1中考虑情景3(只考虑再制造,不考虑碳减排)和情景4(既考虑再制造,又考虑碳减排)。具体地,在情景3下,将制造商利润函数中的碳税由 $t e_0 \cdot D$ 变化为碳交易额 $P_e \cdot (e_0 \cdot D - E)^+$,需求、零售商和3PR的利润函数以及博弈顺序与情景1一致。情景4下,将制造商利润函数中的碳税由 $t(e_0 - e_n) \cdot D + \eta e_n^2 / 2$ 改为碳配额交易 $[(e_0 - e_n) \cdot D - E]^+ \cdot P_e + \eta e_n^2 / 2$,需求、零售商和3PR的利润函数以及博弈顺序与情景2一致。通过逆向归纳法得到情景3、4下的均衡解,见附录2中的引理3、4。

由此,得到碳配额交易政策下制造商增加碳减排投入的动机和碳减排政策的影响机理。

命题4 当 $\eta > \eta_3$ 时,碳减排投入投资有意义,即 $\pi_M^{Tc*} > \pi_M^{Rc*} > 0$, $\pi_R^{Tc*} > \pi_R^{Rc*} > 0$, $\pi_{3PR}^{Tc*} > \pi_{3PR}^{Rc*} > 0$;否则,碳减排投入投资没有意义,即 $\pi_M^{Rc*} > 0 > \pi_M^{Tc*}$, $\pi_R^{Rc*} > 0 > \pi_R^{Tc*}$, $\pi_{3PR}^{Rc*} > 0 > \pi_{3PR}^{Tc*}$ 。

命题5 当单位碳交易费用较高但是碳配额较多,即 $P_e > t$ 且 $E > E_1$ 时,或者单位碳交易费用较低,即 $P_e < t$ 时,制造商更受益于碳配额交易政策,即 $\pi_M^{Rc*} > \pi_M^{Tc*}$;否则,将更受益于碳税政策。但是,零售商和3PR的碳减排偏好与制造商相反。

命题4相对于命题3的结论具有鲁棒性,即只要在碳减排技术投资有利可图时,制造商、零售商和3PR达成一致选择或偏好碳减排技术。命题5显示,当单位碳交易费用较高但是碳配额较多时,或者单位碳交易费用较低时,意味碳配额交易政策的成本更低,因此,制造商更受益于碳配额交易政策;否则,更受益于碳税政策。但是,一方面,由于引理2、4无法直观地进行比较和发现结论,另一方面,更多参数的影响机理无法在命题5中展示。因此,本文需要数值仿真进行算例和分析。为了尽可能满足现实情况,首先,给定所有参数默认值: $\alpha = 1, \gamma = 0.5, c_n = 0.4, \Delta = 0.1, \eta = [4, 7, 10], e_0 = 0.2, t = 0.15, \lambda = 1.2, f = 0.2, P_e = 0.12, E = 0.2, \beta \in [0.2, 0.4]$,参数默认值满足所有假设。

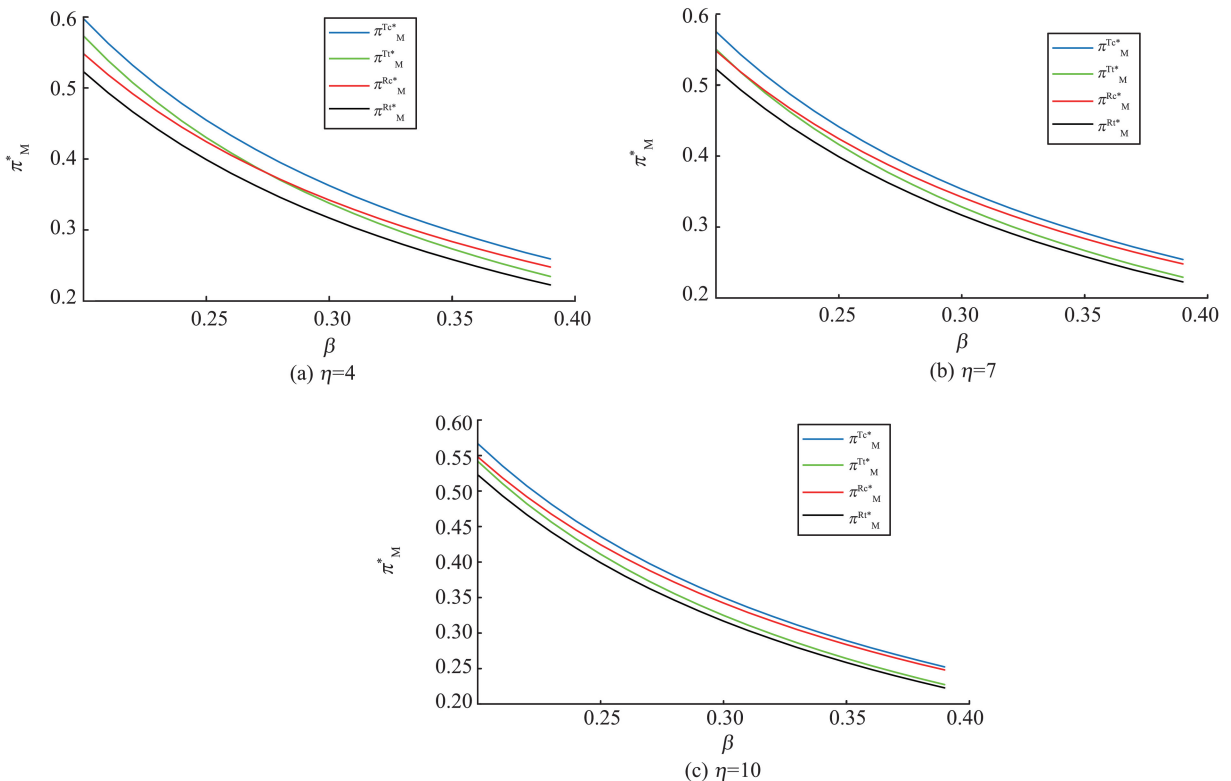


图2 不同碳减排成本的规模系数下制造商利润受零售价敏感系数的影响

Fig.2 Impact of the retail price sensitivity coefficient on manufacturer profits under varying scale factors of carbon emission reduction costs

图2验证了命题3、4的结论,即在同一种碳减排政策下,只要碳减排技术投资存在收益则对于再制造模式就是有利可图的,即 $\pi_M^{Tc*} > \pi_M^{Rc*}$ 和 $\pi_M^{Tt*} > \pi_M^{Rt*}$ 。由图2(a)可知,再制造模式在一定条件下也是可以优于再制造+碳减排模式的,但是需要满足以下条件:(1)再制造模式在碳配额交易政策下;(2)碳减排模式在碳税政策下并且碳减排成本系数较大。如果制造商面对的只有一种碳减排政策,只要实施碳减排技术带来的收

益超过其投资的成本,即有利可图,所以制造商在“双碳”政策的情景下应该选择碳减排投资而非再制造模式的投入。作为制定碳减排政策的政府,可以制定碳减排政策来引导制造商选择政府所期望的模式。比如,政府希望制造商选择碳减排技术投入时,则应该制定单一的碳减排政策并且通过一定手段(如财政补贴、减税等)帮助其减少该技术的投入成本。此外,在刚开始征收碳税或设定碳配额时,政府设置的税率和碳配额费用不能太高,然后分阶段逐步提升,避免企业在初期转型阶段就没有动机参与碳减排投资。

扩展模型2 考虑消费者对于再制造产品的偏好

仅再制造模式下,消费者对于再制造产品的标识存在偏好,此时需求为 $D = \alpha - \beta p + \delta \tau$, $0 < \delta < 1$ 表示消费者对于再制造产品的偏好程度。利润函数和博弈顺序与基本模型一致,在获得均衡解和均衡利润的基础上,直接进行数值分析,默认参数值也与基本模型一致, $\delta \in [0.4, 0.5, 0.6]$ 。图3展示了制造商利润与相关参数的敏感性分析及比较。

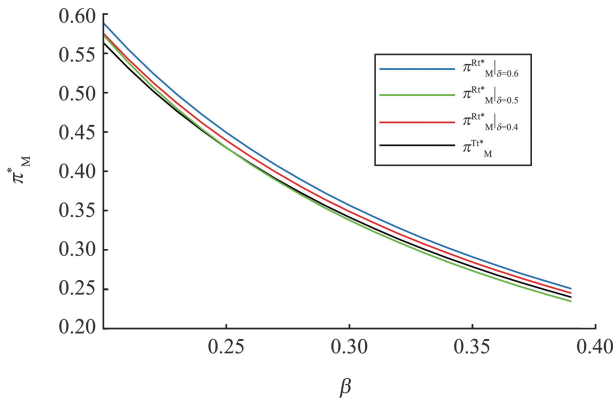


图3 制造商利润与消费者对再制造产品的偏好和零售价敏感系数的敏感性分析
Fig.3 Sensitivity analysis of manufacturer profits with respect to consumers' preference for remanufactured products and retail price sensitivity coefficient

当消费者对于再制造产品也存在偏好时,在碳税政策下,再制造模式和碳减排模式的选择偏好与消费者对于模式选择的偏好、价格敏感系数密切相关,具体地,当消费者对于再制造产品较大时(如 $\delta = 0.6$)或者处于同等偏好水平时(如 $\delta = 0.5$),制造商的模式选择与消费者对于再制造产品的偏好一致。但是,当消费者对于再制造产品的偏好较小时(如 $\delta = 0.4$),制造商的模式选择与价格敏感系数相关。现实中,再制造产品和经过碳减排的产品的标识很重要,尤其是消费者对于这2种产品均具有偏好时,并且消费者同等偏好水平时,再制造标识对于制造商的利润贡献要高于碳减排标识。未来,制造商应该充分观测和了解消费者的偏好,以此来制定更加合理的绿色生产模式。作为制定碳减排政策的政府,在引导制造商选择符合社会责任或时代需要的绿色生产模式时,合理的政策宣传、消费者价值观构建至关重要。长远来看,可以考虑在消费端征收适当的碳税,而不能一味地向企业征收高额碳税,通过直接价格信号传导给消费者,保证企业生产的动机。

4 结论

为应对“碳中和、碳达峰”目标,碳减排政策如碳税和碳配额交易政策应运而生,闭环供应链中的制造商为寻找缴纳碳税/碳交易费用和碳减排成本之间的平衡点,可以选择只投入再制造或在投入再制造的基础上再投入碳减排,以此探索碳税/碳配额交易政策下制造商投入碳减排的动机,研究结论如下:

- (1) 对于制造商只有单一绿色生产模式(仅再制造或仅碳减排技术投入)的抉择时,它取决于单位再制造产品的节约成本,只有当单位节约成本越高,仅再制造模式越受益;
- (2) 在单一的碳减排政策下(即碳税或碳配额交易政策),只要碳减排技术投资存在收益,制造商就会在再制造模式的基础上选择碳减排技术;
- (3) 再制造模式在一定条件下也是可以优于再制造+碳减排模式的。实现该条件在于:第一,再制造模式在碳配额交易政策下;第二,碳减排模式在碳税政策下并且碳减排成本系数较大;
- (4) 在碳税政策下,再制造模式和

碳减排模式的选择偏好与消费者对于模式选择的偏好、价格敏感系数密切相关,具体地,只有当消费者对于再制造产品较大时或者对于再制造产品较小时,制造商的模式选择与消费者对于再制造产品的偏好一致。

本文着重探索碳税/碳配额交易政策下制造商投入碳减排,因而在其他方面做了很多假设简化模型。另外,新产品和再制造产品高度同质化的产品不一定均为“低值可回收物”,为增强研究的深度和广度,可以考虑大型工业设备、办公设备等废旧产品。未来,如果以高价值可回收物为研究对象,可以考虑再制造产品与新产品是异质的。

参考文献:

- [1] HE X H, JIANG J X, HU W F. Cross effects of government subsidies and corporate social responsibility on carbon emissions reductions in an omnichannel supply chain system[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 175:108872.
- [2] 司冰倩,文凤. 低碳偏好下制造商的碳政策选择研究[J]. *科技管理研究*, 2021, 3:179-186.
SI Bingqian, WEN Feng. Research on carbon policy choice of manufacturer under low carbon preference[J]. *Science and Technology Management Research*, 2021, 3:179-186.
- [3] GHOSH S K, SEIKH M R, CHAKRABORTTY M. Analyzing a stochastic dual-channel supply chain under consumers' low carbon preferences and cap-and-trade regulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 149:106765.
- [4] LI D, SHEN B. An analysis in production strategies with emissions cap regulation in global trade: production transfer versus remanufacturing[J]. *Annals of Operations Research*, 2023; <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05407-1>.
- [5] 吕宝龙,张桂涛,刘阳,等. 考虑碳税和产品绿色度的闭环供应链网络 Nash 博弈均衡模型[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(1):59-69.
LV Baolong, ZHANG Guitao, LIU Yang, et al. Nash game equilibrium model of the closed-loop supply chain network considering carbon tax mechanism and product green degree[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(1):59-69.
- [6] 李彪,夏西强,李秋月. 碳配额下碳交易对碳减排效应的影响及协调机制研究[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(8):250-261.
LI Biao, XIA Xiqiang, LI Qiuyue. Research on the influence of carbon trading on carbon emission reduction effect and coordination mechanism under carbon quotas[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(8):250-261.
- [7] HASAN M R, ROY T C, DARYANTO Y, et al. Optimizing inventory level and technology investment under a carbon tax, cap-and-trade and strict carbon limit regulations[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 25:604-621.
- [8] 刘碧玉,杨海东,柯迪. 专利授权下碳排放政策对制造商/再制造商运营决策的影响[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(5):198-208.
LIU Biyu, YANG Haidong, KE Di. Effects of carbon emission regulations on operations decisions of manufacturers/remanufacturers with patent licensing[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(5):198-208.
- [9] SUN H X, YANG J. Optimal decisions for competitive manufacturers under carbon tax and cap-and-trade policies[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156:107244.
- [10] LUO R L, ZHOU L, SONG Y, et al. Evaluating the impact of carbon tax policy on manufacturing and remanufacturing decisions in a closed-loop supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 245:108408.
- [11] ATASU A, VANWASSENHOVE L N. An operations perspective on product take-back legislation for E-waste: theory, practice, and research needs[J]. *Production and Operations Management*, 2012, 21(3):407-422.
- [12] ATASU A, ÖZDEMİR Ö, VAN WASSSENHOVE L N. Stakeholder perspectives on E-waste take-back legislation[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(2):382-396.
- [13] LIU Y Z, XIAO T J. Pricing and collection rate decisions and reverse channel choice in a socially responsible supply chain with green consumers[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2020, 67(2):483-495.
- [14] FENG Z W, XIAO T J, ROBB D J. Environmentally responsible closed-loop supply chain models with outsourcing and authorization options[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278:123791.
- [15] 夏西强,李彪. 政府碳税与补贴政策对外包再制造影响研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(9):105-115.
XIA Xiqiang, LI Biao. A study on the impact of government carbon tax and subsidy policies on outsourced remanufacturing[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(9):105-115.
- [16] ATASU A, SARVARY M, VAN WASSSENHOVE L N. Remanufacturing as a marketing strategy[J]. *Management Science*,

2008, 54(10):1731-1746.

- [17] CHEN T B, CHAI L T. Attitude towards the environment and green products: consumers' perspective[J]. Management Science and Engineering, 2010, 4(2):27-39.
- [18] 唐书传,刘云志,肖条军. 考虑社会责任的供应链定价与碳减排决策[J]. 中国管理科学, 2020, 28(4):99-108.
TANG Shuchuan, LIU Yunzhi, XIAO Tiaojun. Pricing and carbon emission reduction decisions in a socially responsible supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(4):99-108.
- [19] 王一雷,朱庆华. 不同碳排放权配置方式下供应链长期碳减排决策研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(7):2085-2101.
WANG Yilei, ZHU Qinghua. Long-term emission reduction decisions of a supply chain under different carbon emission permit allocation rules[J]. Systems Engineering-Theory & Practice[J]. China Industrial Economics, 2023, 43(7):2085-2101.
- [20] 王红春,卢意,宫子琪. 考虑碳税和碳减排专利的逆向供应链碳减排策略及协调[J]. 物流技术, 2023, 42(11):95-104.
WANG Hongchun, LU Yi, GONG Ziqi. Carbon reduction strategy and coordination in reverse supply chain considering carbon tax and carbon reduction patent[J]. Logistics Technology, 2023, 42(11):95-104.
- [21] FENG Z W, LUO N, SHALPEGIN T, et al. The influence of carbon emission reduction instruments on blockchain technology adoption in recycling batteries of the new energy vehicles[J]. International Journal of Production Research, 2024, 62(3):891-908.
- [22] XU L, WANG C X. Sustainable manufacturing in a closed-loop supply chain considering emission reduction and remanufacturing[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 131:297-304.
- [23] 郭婷婷,李娜. 规模不经济下考虑企业社会责任投入的闭环供应链回收渠道选择[J]. 山东大学学报(理学版), 2024, 59(9):42-55.
GUO Tingting, LI Na. Selection of recycling channels in closed-loop supply chain considering corporate social responsibility investment under diseconomies of scale[J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2024, 59(9):42-55.
- [24] 姜力文,唐金环,饶卫振,等. 碳中和视角下奖惩机制对逆向供应链碳减排与回收价格的影响[J]. 管理工程学报, 2024, 38(2):121-138.
JIANG Liwen, TANG Jinhuan, RAO Weizhen, et al. Effect of reward and punishment mechanism on carbon emission reduction and recovery price in reverse supply chain from the perspective of carbon neutrality[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2024, 38(2):121-138.

(编辑:祁业卿)

附录 A

引理 1 的证明

首先,对式(3)关于 τ 求二阶导数,可得 $\partial^2 \pi_{3PR}^{Rt} / \partial \tau^2 = -\lambda < 0$, 即二阶导数为负,存在唯一均衡解。对其关于 τ 求一阶导方程并令其为 0, 即 $\partial \pi_{3PR}^{Rt} / \partial \tau = 0$, 可得 $\tau(p)$ 。其次,将 $\tau(p)$ 代入式(2)求其关于 p 的二阶导数,可得 $\partial^2 \pi_R^{Rt} / \partial p^2 = -2\beta < 0$, 即二阶导数为负,存在唯一均衡解。对其关于 p 求一阶导方程并令其为 0, 即 $\partial \pi_R^{Rt} / \partial p = 0$, 可得 $p(w)$ 。最后,将 $p(w)$ 代入式(1)求其关于 w 的二阶导数,可得 $\partial^2 \pi_M^{Rt} / \partial w^2 = -\beta M / (2\lambda)$, 当 $\Delta < 2\lambda / (f\beta)$ 时, $\partial^2 \pi_M^{Rt} / \partial w^2 < 0$, 即二阶导数为负,存在唯一均衡解。对其关于 w 求一阶导方程并令其为 0, 即 $\partial \pi_R^{Rt} / \partial w = 0$, 可得 w^{Rt*} 。进一步地,可得 p^{Rt*} 和 τ^{Rt*} , 以及 D^{Rt*} , π_M^{Rt*} , π_R^{Rt*} 和 π_{3PR}^{Rt*} 。令 $w^{Rt*} - c_n = 0$ 求关于 Δ 的阈值可得 Δ_1 , 进一步地,当 $\Delta < \Delta_1$ 时, $w^{Rt*} - c_n > 0$; 否则, $w^{Rt*} - c_n \leq 0$ 。

进一步地,由 $\beta, e_0, \lambda, f, N_1, M > 0$ 可知, $\partial \pi_M^{Rt*} / \partial t = -e_0 \lambda N_1 / (2M) < 0$, $\partial \pi_R^{Rt*} / \partial t = -e_0 \lambda^2 N_1 / (2M^2) < 0$, $\partial \pi_{3PR}^{Rt*} / \partial t = -\beta e_0 \lambda f^2 N_1 / (4M^2) < 0$ 。

引理 2 的证明

首先,对式(6)关于 τ 求二阶导数,可得 $\partial^2 \pi_{3PR}^{Tt} / \partial \tau^2 = -\lambda < 0$, 即二阶导数为负,存在唯一均衡解。对其关于 τ 求一阶导方程并令其为 0 即 $\partial \pi_{3PR}^{Tt} / \partial \tau = 0$, 可得 $\tau(p, e_n)$ 。其次,将 $\tau(p, e_n)$ 代入式(5)求其关于 p 的二阶导数,可得 $\partial^2 \pi_R^{Tt} / \partial p^2 = -2\beta < 0$, 即二阶导数为负,存在唯一均衡解。对其关于 p 求一阶导方程并令其为 0 即 $\partial \pi_R^{Tt} / \partial p = 0$, 可得 $p(w, e_n)$ 。最后,将 $p(w, e_n)$ 代入式(4)求其关于 (w, e_n) 的海森矩阵为

$$|\mathbf{H}| = \begin{pmatrix} \frac{\beta M}{2\lambda} & \frac{f\beta\gamma\Delta+t\beta\lambda-\gamma\lambda}{2\lambda} \\ \frac{f\beta\gamma\Delta+t\beta\lambda-\gamma\lambda}{2\lambda} & t\gamma-\eta+\frac{f\gamma^2\Delta}{2\lambda} \end{pmatrix},$$

其中, $|\mathbf{H}|_1 = -\beta M/(2\lambda)$, $|\mathbf{H}|_2 = O_1/(4\lambda)$, 只有当 $\Delta < 2\lambda/(f\beta)$ 和 $\eta > \eta_1$ 时, $|\mathbf{H}|_1 < 0$ 和 $|\mathbf{H}|_2 > 0$, 即 $\pi_M^{Tt*}(w, e_n)$ 关于 (w, e_n) 负定, 存在唯一均衡解。求 $\pi_M^{Tt*}(w, e_n)$ 关于 (w, e_n) 的一阶导数方程组并令其为 0, 联解式 $\partial\pi_M^{Tt*}(w, e_n)/\partial w = 0$ 和 $\partial\pi_M^{Tt*}(w, e_n)/\partial e_n = 0$ 可得 w^{Tt*} 和 e_n^{Tt*} 。进一步地, 可得 p^{Tt*} 和 τ^{Tt*} , 以及 D^{Tt*} , π_M^{Tt*} , π_R^{Tt*} 和 π_{3PR}^{Tt*} 。

令 $w^{Tt*} - c_n = 0$ 求关于 Δ 的阈值可得 Δ_2 , 进一步地, 当 $\Delta < \Delta_2$ 时, $w^{Tt*} - c_n > 0$; 否则, $w^{Tt*} - c_n \leq 0$ 。

命题 1 的证明

令 $\pi_M^{Rt*}|_{\tau=1} - \pi_M^{Tt*}|_{\tau=0} = 0$ 求关于 Δ 的临界值可得 Δ_3 , 进一步地, 当 $\Delta > \Delta_3$ 时, $\pi_M^{Rt*}|_{\tau=1} > \pi_M^{Tt*}|_{\tau=0}$; 否则, $\pi_M^{Rt*}|_{\tau=1} \leq \pi_M^{Tt*}|_{\tau=0}$ 。类似地, 当 $\Delta > \Delta_4$ 时, $\pi_R^{Rt*}|_{\tau=1} > \pi_R^{Tt*}|_{\tau=0}$; 否则, $\pi_R^{Rt*}|_{\tau=1} \leq \pi_R^{Tt*}|_{\tau=0}$ 。显然 $\Delta_3 > \Delta_4$ 。

命题 2 的证明

由引理 1、2, 求 $D^{Tt*} - D^{Rt*} = 0$ 关于 η 的阈值, 可以得到 η_2 。进一步地, 当 $\eta > \eta_2$ 时, $D^{Tt*} > D^{Rt*} > 0$; 当 $\eta_1 < \eta \leq \eta_2$ 时, $0 < D^{Tt*} < D^{Rt*}$; 当 $\eta \leq \eta_1$ 时, $D^{Tt*} < 0 < D^{Rt*}$ 。令 $\eta_2 - \eta_1 = 0$ 求关于 f 的临界值可得 2λ 。进一步地, 只有当 $\lambda < f < 2\lambda$ 时, 才有 $\eta_2 - \eta_1 > 0$ 。

命题 3 的证明

由引理 1 和 2, 可得

$$\begin{aligned} \pi_R^{Tt*} - \pi_R^{Rt*} &= N_1^2 \lambda^2 (2\beta\eta M + O_1) (t\beta + \gamma)^2 \lambda / (4\beta O_1^2 M^2), \\ \pi_M^{Tt*} - \pi_M^{Rt*} &= N_1^2 \lambda (t\beta + \gamma)^2 \lambda / (4\beta O_1^2 M), \\ \pi_{3PR}^{Tt*} - \pi_{3PR}^{Rt*} &= N_1^2 \lambda f^2 (2\beta\eta M + O_1) (t\beta + \gamma)^2 \lambda / (8O_1^2 M^2). \end{aligned}$$

进一步地, 只要满足 $\eta > \eta_1$ 时, $\pi_M^{Tt*} > \pi_M^{Rt*} > 0$, $\pi_R^{Tt*} > \pi_R^{Rt*} > 0$ 和 $\pi_{3PR}^{Tt*} > \pi_{3PR}^{Rt*} > 0$; 否则, $\pi_M^{Tt*} > 0 > \pi_M^{Rt*}$, $\pi_R^{Rt*} > 0 > \pi_R^{Tt*}$ 和 $\pi_{3PR}^{Rt*} > 0 > \pi_{3PR}^{Tt*}$ 。

引理 3 和 4 证明与引理 1 和 2 的证明类似, 故省略。

命题 4 的证明与命题 3 的证明类似, 故省略。

命题 5 的证明

由引理 1 和 3 可得

$$\begin{aligned} \pi_M^{Rc*} - \pi_M^{Rt*} &= (N_2 + N_1) \lambda (N_2 - N_1) / (4\beta M) + EP_e, \\ \pi_R^{Rc*} - \pi_R^{Rt*} &= (N_2 + N_1) \lambda^2 (N_2 - N_1) / (4\beta M^2), \\ \pi_{3PR}^{Rc*} - \pi_{3PR}^{Rt*} &= (N_2 + N_1) \lambda f^2 (N_2 - N_1) / (8M^2), \end{aligned}$$

而 $N_2 - N_1 = e_0 \beta (-P_e + t)$ 。因此, 当 $P_e > t$ 时, $\pi_R^{Rc*} - \pi_R^{Rt*} < 0$, $\pi_{3PR}^{Rc*} - \pi_{3PR}^{Rt*} < 0$; 否则, $\pi_R^{Rc*} - \pi_R^{Rt*} \geq 0$, $\pi_{3PR}^{Rc*} - \pi_{3PR}^{Rt*} \geq 0$ 。对于制造商, 当 $P_e < t$ 时, $\pi_M^{Rc*} - \pi_M^{Rt*} > 0$ 。当 $P_e \geq t$ 时, 令 $\pi_M^{Rc*} - \pi_M^{Rt*} = 0$ 关于 E 可得 E_1 。进一步地, 当 $E > E_1$ 时, $\pi_M^{Rc*} - \pi_M^{Rt*} > 0$, 否则, $\pi_M^{Rc*} - \pi_M^{Rt*} \leq 0$ 。

附录 B

引理 3 假设 $\Delta < \Delta_5$ 和 $P_e < (\alpha - \beta c_n) / (\beta e_0)$ 。均衡决策为

$$\begin{aligned} w^{Rc*} &= (\alpha M - N_2 \lambda) / (\beta M), \\ p^{Rc*} &= (\alpha + \beta w^{Rc*}) / (2\beta), \\ \tau^{Rc*} &= f(\alpha - \beta p^{Rc*}) / \lambda. \end{aligned}$$

进一步地, 均衡需求和利润为

$$\begin{aligned} D^{Rc*} &= N_2 \lambda / (2M), \\ \pi_M^{Rc*} &= (N_2^2 \lambda) / (4\beta M) + EP_e, \end{aligned}$$

$$\pi_R^{Rc*} = N_2^2 \lambda^2 / (4\beta M^2),$$

$$\pi_{3PR}^{Rc*} = N_2^2 \lambda f^2 / (8M^2)。$$

引理 4 假设 $\Delta < \Delta_6$ 和 $\eta > \eta_3$ 。均衡决策为

$$e_n^{Tc*} = N_2 \lambda (P_e \beta + \gamma) / O_2,$$

$$w^{Tc*} = [\alpha O_2 - N_2 \lambda (2\beta \eta - P_e \beta \gamma - \gamma^2)] / (\beta O_2),$$

$$p^{Tc*} = (\alpha + \beta w^{Tc*} + \gamma e_n^{Tc*}) / (2\beta),$$

$$\tau^{Tc*} = f(\alpha - \beta p^{Tc*} + \gamma e_n^{Tc*}) / \lambda。$$

进一步地,均衡需求和利润为

$$D^{Tc*} = N_2 \eta f \beta / O_2,$$

$$\pi_M^{Tc*} = (N_2^2 \eta \lambda) / (2O_2) + EP_e,$$

$$\pi_R^{Tc*} = (\beta N_2^2 \eta^2 \lambda^2) / O_2^2,$$

$$\pi_{3PR}^{Tc*} = N_2^2 \eta^2 \lambda f^2 \beta^2 / (2O_2^2)。$$

附录 C

表 B1 引理或命题中的阈值和缩写
Table B1 Thresholds and abbreviations in lemmas or propositions

	阈值	缩写
引理 1	$\Delta_1 = \frac{2\lambda}{f\beta} \left[1 - \frac{N_1}{2(\alpha - \beta c_n)} \right]$	$N_1 = \alpha - (c_n + e_0 t) \beta > 0$ $M = 2\lambda - f\beta \Delta > 0$
引理 2	$\Delta_2 = \frac{2\lambda}{f\beta} \left[1 - \frac{(t\beta + \gamma)^2}{4\beta\eta} - \frac{N_1(2\beta\eta - t\beta\gamma - \gamma^2)}{4\beta\eta(\alpha - \beta c_n)} \right], \quad \eta_1 = (t\beta + \gamma)^2 \lambda / (2\beta M)$	$O_1 = 2\beta \eta M - (t\beta + \gamma)^2 \lambda > 0$
命题 1	$\Delta_3 = \frac{4\eta N_1}{\sqrt{4\beta\eta} \sqrt{4\beta\eta - (t\beta + \gamma)^2}} - \frac{N_1}{\beta}, \quad \Delta_4 = \frac{4\eta N_1}{4\beta\eta - (t\beta + \gamma)^2} - \frac{N_1}{\beta}$	—
命题 2	$\eta_2 = \frac{(t\beta + \gamma)^2 \lambda^2}{2\beta M(f - \lambda)}$	—
引理 3	$\Delta_5 = \frac{2\lambda}{f\beta} \left[1 - \frac{N_2}{2(\alpha - \beta c_n)} \right]$	$N_2 = \alpha - (c_n + e_0 P_e) \beta > 0$
引理 4	$\Delta_6 = \frac{2\lambda}{f\beta} \left[1 - \frac{(P_e \beta + \gamma)^2}{4\beta\eta} - \frac{N_1(2\beta\eta - P_e \beta \gamma - \gamma^2)}{4\beta\eta(\alpha - \beta c_n)} \right], \quad \eta_3 = \frac{(P_e \beta + \gamma)^2 \lambda}{2\beta M}$	$O_2 = 2\beta \eta M - (P_e \beta + \gamma)^2 \lambda > 0$
命题 5	$E_1 = \frac{(P_e - t) e_0 \beta (N_2 + N_1) \lambda}{4\beta M P_e}$	—