

全渠道零售下二级闭环供应链的回收模式选择与减排策略

柏庆国,刘世豪,张颖,徐健腾*

(曲阜师范大学管理学院,山东日照276826)

摘要:研究由一个制造商和一个零售商组成的闭环供应链在全渠道零售模式下的回收渠道选择与低碳减排问题。考虑到受碳税政策规制的制造商通过投资减排技术来降低碳排放,量化全渠道零售模式下受销售价格和减排技术水平影响的需求函数。构建制造商回收和零售商回收情形下的全渠道闭环供应链博弈模型,分别求解相应的联合定价和与减排策略。进一步与无减排技术投入情形下闭环供应链的最优策略进行比较,得出制造商在全渠道零售模式下进行减排技术投入能够改善闭环供应链系统的利润和环境绩效。最后通过数值算例进一步分析不同回收方式、减排技术水平投入以及碳税政策对供应链决策的影响。研究发现,与零售商回收产品情形相比,制造商负责回收产品能够使得全渠道零售模式下闭环供应链获得更高利润同时产生更少的碳排放;适当提高碳税不仅可以提升制造商减排投入的积极性,还能提高旧产品的回收率。

关键词:闭环供应链;全渠道零售;减排技术;博弈分析

中图分类号:F224; F272 **文献标志码:**A

引用格式:柏庆国,刘世豪,张颖,等.全渠道零售下二级闭环供应链的回收模式选择与减排策略[J].山东大学学报(理学版),2025,60(6):18-30.

Recycling model selection and emission reduction strategies of a two-echelon closed-loop supply chain in omni-channel retailing

BAI Qingguo, LIU Shihao, ZHANG Ying, XU Jianteng*

(School of Management, Qufu Normal University, Rizhao 276826, Shandong, China)

Abstract: This paper examines the choice of recycling channels and low carbon emissions reduction in a closed-loop supply chain consisting of a manufacturer and a retailer in an omni-channel retail model. A demand function influenced by sales price and level of abatement technology under the omni-channel retail model was quantified, taking into account that manufacturers regulated by carbon tax policies reduce carbon emissions by investing in abatement technology. An omni-channel closed-loop supply chain game model is constructed for the manufacturer-recycling and retailer-recycling scenarios, and the corresponding joint pricing and abatement strategies are solved separately. The optimal strategy for the closed-loop supply chain is then compared with that of the closed-loop supply chain without technological inputs, and it is concluded that manufacturers' technological inputs can improve the profitability and environmental performance of the closed-loop supply chain system under the omni-channel retail model. Finally, numerical examples are used to further analyse the impact of different recycling methods, emission reduction technology levels and carbon tax policies on supply chain decisions. It is found that manufacturers are responsible for recycling their products, resulting in higher profits and lower carbon emissions in the closed-loop supply chain of the omni-channel retail model than if retailers were to recycle their products; an appropriate increase in the carbon tax would not only increase the incentive for manufacturers to invest in reducing emissions, but would also increase the recycling rate of used products.

Key words: closed-loop supply chain; omni-channel retailing; sustainability technology; game analysis

0 引言

随着碳排放量的增加,全球变暖及环境恶化日益严重。面对气候变化危机,我国作为碳排放大国,减排

收稿日期:2024-07-10;网络出版时间:2025-04-21 15:14:40

基金项目:国家自然科学基金资助项目(72271141);山东省高等学校青创科技团队资助项目(2021RW024);山东省人文社会科学课题项目(2024-QNRC-43)

第一作者:柏庆国(1979—),男,教授,博士生导师,研究方向为可持续供应链管理. E-mail:hustbaiqg@163.com

*通信作者:徐健腾(1981—),女,教授,硕士生导师,博士,研究方向为可持续运营管理. E-mail:jiantengxu@163.com

任务严峻,更需要有效的减排政策作为支撑。碳税作为一种向低碳经济过渡的基本工具^[1],已在美国、加拿大和日本等多国得到广泛实施,可有效提高供应链成员企业的减排意愿。但对碳排放实现有效管理不能仅仅依赖于政府的监管,更需要加强企业对碳排放的重视。在政府号召下,低碳减排逐渐成为各个行业的共识。主流的低碳生产方式有再制造和投入减排技术2种,其中再制造利用旧产品产生附加值提高环境和经济效率,减排技术通过降低用能成本提升低碳市场竞争力。在家电行业中,海尔、格力、美的等企业已经广泛开展废旧产品回收业务,并在生产中应用减排技术开发设计节能产品^[2],在降低碳减排的同时减少成本,提高资源利用效率,赢得了可持续发展的主动权。

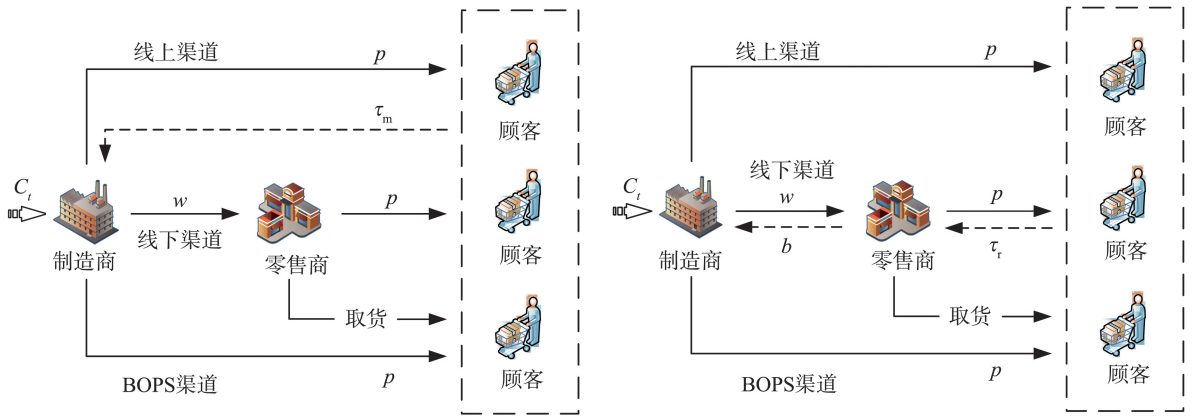
打造低碳供应链,既是提升企业竞争力,实现环境、经济和社会效益协调优化的有效途径,又是推动整个产业链实现共赢和绿色发展的重要内容。2017年10月,国务院办公厅发布的《关于积极推进供应链创新与应用的指导意见》明确了要大力倡导和构建绿色供应链。2018年4月,商务部、生态环境部等8部门联合印发《关于开展供应链创新与应用试点的通知》,将构建绿色供应链列为重点任务,引导地方和企业践行绿色发展理念,促进生态环境质量改善。因此,低碳减排约束下的供应链管理不仅是企业战略性推动可持续发展的必要手段,更是助力全球气候治理和碳中和目标实现的关键机制,受到学术界的广泛关注。现有研究中,回收工作一般由制造商、零售商或者第三方企业负责,Hong等^[3]分析比较了3种回收方式的优劣,并建立了协调机制。王晓迪等^[4]则研究了网络平台作为第三方进行回收的新模式。闻卉等^[5]考虑了双渠道闭环供应链,分析不同渠道权力结构对其定价与协调决策的影响。Zhou等^[6]系统梳理和总结了碳税政策下的供应链管理。Luo等^[7]采用博弈论方法探讨了碳税政策下闭环供应链的再制造决策问题。焦建玲等^[8]以制造商负责回收的闭环供应链模型为研究对象,讨论了碳税政策和消费者偏好对最优决策的影响。在供应链的减排技术投入方面,学者们主要从碳政策、政府补贴等方面进行了相关探讨。Yenipazarli^[9]研究了碳税对减排投入和环境成本的影响,Yuan等^[10]同时考虑了再制造和减排投入2种低碳生产方式。He等^[11]考虑到消费者对碳排放和交货时间的双重敏感,分析了决策者的最优减排决策问题。Ding等^[12]比较分析了不同环境下碳税和回收立法对消费者和环境的影响。Jung等^[13]和李凤等^[14]则考虑政府补贴,研究了企业减排技术投入和社会福利问题。但在碳政策下同时考虑回收再制造和减排技术投入的研究较少。

与此同时,大数据和电子商务快速发展、消费者需求日益多样化为零零售渠道升级提供了契机,新零售应运而生^[15]。其中,线上下单门店自提(BOPS)零售模式充分结合了线上渠道和线下门店的优势,更好协调了不同渠道与消费者之间的关系^[16]。因此,众多学者纷纷将目光聚焦于此,其中多数研究侧重于是否选择BOPS模式、渠道整合以及供应链成员决策等方面。Gao等^[17]研究了零售商实施BOPS模式对其线下门店运营的影响,发现BOPS模式为消费者提供优质服务的同时也会刺激消费者购买门店的其他产品,产生交叉销售额。邱菊等^[18]讨论了传统双渠道模型何时采取BOPS策略。江玉庆等^[19]研究了实施BOPS模式对产品定价、渠道需求以及零售商收益的影响。孔瑞晓等^[20]分析了BOPS全渠道供应链的定价和服务联合决策。刘斌等^[21]则针对不同BOPS销量整合模式对供应链的定价和服务策略进行了讨论,并利用服务成本共担机制对供应链进行协调。

综上所述,现有文献中对于闭环供应链模型的构建,绝大多数文献以正向单渠道或者双渠道模型为研究对象,没有考虑到全渠道零售。很少有学者能够在碳政策约束下同时考虑回收再制造和低碳减排等因素,但在新零售时代下,可持续发展的要求使供应链运营决策面临着重大机遇和挑战。因此,本文在全渠道零售模式下考虑了由一个制造商和一个零售商构成的闭环供应链。在该供应链中,产品的加工是产生碳排放的主要环节,此时制造商通过投资减排技术来降低供应链的碳排放。针对该供应链,本文首先构建了不同回收主体下的全渠道闭环供应链模型,求得了相应的均衡策略。然后,进一步考虑制造商不进行减排投资的情形,并将其与减排投资的情形进行比较。最后利用数值算例验证并完善了理论分析结果。本文创新点主要有:(1)将BOPS、产品回收和低碳减排同时考虑进二级供应链中,利用Stackelberg博弈方法分析并求得了供应链均衡策略的解析式;(2)将多渠道供应链拓展到考虑BOPS服务的全渠道闭环供应链,通过构建不同回收主体下的博弈优化模型,系统分析了全渠道零售环境下的回收模式选择策略;(3)对碳税下制造商投资减排技术和不进行投资减排技术的情形进行比较,探讨了低碳减排对全渠道闭环供应链运营绩效的影响,给出全渠道闭环供应链实现经济和环境绩效同时改进的条件。

1 问题描述与符号假设

在碳税政策下,考虑由一个制造商和一个零售商构成的闭环供应链,其中制造商生产具有公开碳排放的产品,并对回收的废旧产品进行再制造。假设再制造产品与新产品在销售市场上完全相同。产品以相同的价格 p 通过 3 条不同渠道进行销售:线上直销渠道,即消费者直接在制造商的线上销售平台下单,由制造商直接邮寄给消费者;BOPS 渠道,即消费者通过线上销售平台下单并支付后去零售商实体门店取货。由于客户来店时往往会进行额外购买,零售商将获得额外的利润 γD_2 ^[17];线下销售渠道,即消费者直接去零售商的线下门店进行购买。图 1 展示了全渠道闭环供应链在碳税约束下的运作情况。



(a) 制造商回收

(b) 零售商回收

图 1 碳税政策下全渠道闭环供应链模型

Fig.1 Omni-channel closed-loop supply chain model under carbon tax policy

废旧产品的回收率为 τ , τ_m 和 τ_r 分别表示制造商和零售商的回收率,回收成本 I 是回收率的凸函数,即 $I=C_i\tau^2/2+A\tau D$,其中 C_i 为规模参数。当零售商负责废旧产品回收工作时,制造商需要向其支付单位价格 b 购买废旧产品。新产品的单位生产成本为 c_n ,再制造产品的生产成本为 c_r ,为了使再制造生产有利可图,再制造产品的单位成本节为 $\Delta=c_n-c_r>0$,即再制造产品的生产成本低于新产品的生产成本。

碳排放的产生主要集中在产品的制造过程,生产过程中的初始单位碳排放量为 e_0 ,再制造过程的单位碳排放量节省率为 θ ,即再制造产品生产过程的单位碳排放量为 $(1-\theta)e_0$ 。根据碳税政策,制造商必须为每单位排放量缴纳单位税 C_i 。制造商在生产阶段投入的减排技术水平为 e ,由于投资成本相对于技术水平呈递减趋势,投资成本可表示为 $C_e e^2/2$,其中 C_e 为减排投资参数。

产品的市场需求同时受到销售价格和减排技术水平的双重影响,线上直销、BOPS 及线下销售 3 个不同渠道的需求函数表达式分别为 $D_i=\lambda_i d-\alpha p+\beta e$ ($i=1,2,3$),其中 d 是市场基本需求,渠道规模系数 λ_i 满足 $\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3=1$, α 和 β 分别是价格和减排技术水平影响市场需求的弹性系数。

由于回收数量越多的产品需要更高的回收成本,本文假设回收成本参数 C_i 满足 $C_i > \max\left\{\frac{\alpha C_e H_1}{9(\beta+\alpha C_i)^2}, \frac{18\alpha^2 C_e (b-A)(\Delta-A+\theta C_i e_0)}{8\alpha C_e -9(\beta+\alpha C_i)^2}\right\}$,其中 $H_1=8C_i-9\alpha m^2$ 。

2 模型构建与求解

2.1 制造商回收模型

本小节建立一个制造商负责回收废旧产品的全渠道闭环供应链模型。通过上下游企业的追随关系,由销售主体制定价格策略,实现供应链成员利润的均衡。假设制造商是 Stackelberg 博弈的领导者,零售商是追随者,其决策顺序为:制造商首先决策减排水平 e^{M^c} 、批发价格 w^{M^c} 和回收率 τ^{M^c} ;零售商根据制造商的决

策信息,确定最优的销售价格 p^{M-e} 。基于以上假设,制造商和零售商的利润函数分别为

$$\Pi_r^{M-e} = (p-w)D_3 + \gamma D_2, \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \Pi_m^{M-e} = & p(D_1 + D_2) + wD_3 - C_l[e_0 - (1-\theta)\tau e_0 - e](D_1 + D_2 + D_3) - \frac{1}{2}C_e e^2 \\ & - [\tau c_r + (1-\tau)c_n](D_1 + D_2 + D_3) - \left[\frac{1}{2}C_l \tau^2 + A\tau(D_1 + D_2 + D_3)\right]. \end{aligned} \tag{2}$$

制造商在生产和再制造阶段产出的总碳排放量表示为

$$J_m^{M-e} = [e_0 - (1-\theta)\tau e_0 - e](D_1 + D_2 + D_3). \tag{3}$$

结论 1 当制造商在生产阶段投入减排技术且负责废旧产品回收时,存在唯一最优解使制造商和零售商利润最大。

$$e^{M-e} = \frac{(\beta + \alpha C_l) C_l H_0}{\alpha C_e H_1 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l}, \tag{4}$$

$$\tau^{M-e} = \frac{\alpha m C_e H_0}{\alpha C_e H_1 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l}, \tag{5}$$

$$w^{M-e} = \left(\frac{\alpha}{\beta} - \frac{6(\beta + \alpha C_l) C_l}{\alpha H_1}\right) e^{M-e} - \frac{2C_l H_0}{3\alpha H_1} + \frac{(2-3\lambda_3)d + 3\alpha\gamma}{3\alpha}, \tag{6}$$

$$p^{M-e} = \left(\frac{\alpha}{\beta} - \frac{3(\beta + \alpha C_l) C_l}{\alpha H_1}\right) e^{M-e} - \frac{C_l H_0}{3\alpha H_1} + \frac{d}{3\alpha}, \tag{7}$$

其中, $m = \Delta - A + C_l(1-\theta)e_0$, $H_0 = (5-6\lambda_3)d + 3\alpha\gamma - 9\alpha(c_n + C_l e_0)$ 。

证明 根据逆向归纳法,先对零售商的利润函数,即式(1)求关于 p 的导数,得到

$$\frac{\partial \Pi_r^{M-e}}{\partial p} = \lambda_3 d + \beta e - \alpha(2p - w + \gamma). \tag{8}$$

由 $\frac{\partial^2 \Pi_r^{M-e}}{\partial p^2} = -2\alpha < 0$ 可知, Π_r^{M-e} 是关于 p 的严格凹函数。令 $\frac{\partial \Pi_r^{M-e}}{\partial p} = 0$, 得到零售价格的反应函数为

$$p = \frac{\lambda_3 d + \alpha w + \beta e - \alpha\gamma}{2\alpha}. \tag{9}$$

将式(9)代入式(2),得到 Hessian 矩阵为

$$\mathbf{H}^{M-e} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial e \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial \tau \partial w} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial w \partial e} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial e^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial \tau \partial e} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial w \partial \tau} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial e \partial \tau} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{M-e}}{\partial \tau^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\alpha & \frac{\beta - \alpha C_l}{2} & \frac{3\alpha m}{2} \\ \frac{\beta - \alpha C_l}{2} & \frac{\beta(\beta - \alpha C_l)}{\alpha} - C_e & \frac{3\beta m}{2} \\ \frac{3\alpha m}{2} & \frac{3\beta m}{2} & -C_l \end{pmatrix}. \tag{10}$$

利用回收成本参数的假设条件,可知矩阵 \mathbf{H}^{M-e} 负定,从而 Π_m^{M-e} 是关于 (w, e, τ) 的联合凹函数。联立方

程 $\frac{\partial \Pi_m^{M-e}}{\partial w} = 0$, $\frac{\partial \Pi_m^{M-e}}{\partial e} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_m^{M-e}}{\partial \tau} = 0$, 可得到制造商的最优决策:

$$e^{M-e} = \frac{(\beta + \alpha C_l) C_l H_0}{\alpha C_e H_1 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l}, \tag{11}$$

$$\tau^{M-e} = \frac{\alpha m C_e H_0}{\alpha C_e H_1 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l}, \tag{12}$$

$$w^{M-e} = \left(\frac{\alpha}{\beta} - \frac{6(\beta + \alpha C_l) C_l}{\alpha H_1}\right) e^{M-e} - \frac{2C_l H_0}{3\alpha H_1} + \frac{(2-3\lambda_3)d + 3\alpha\gamma}{3\alpha}. \tag{13}$$

结论 1 给出了全渠道闭环供应链在制造商回收情形下成员的最优决策解析式。将公式(11)~(13)代入式(1)、(2),可进一步得到零售商和制造商的最优利润为

$$\Pi_r^{M-e*} = (\lambda_2 - \lambda_3) \gamma d + \frac{[\tau^{M-e} C_l - m(1-3\lambda_3)d]^2}{9\alpha m^2}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Pi_m^{M-e*} = & \frac{[md - \tau^{M-e} C_l][m(1-3\lambda_3)d + 2\tau^{M-e} C_l]}{9\alpha m^2} - \frac{\tau^{M-e} C_l (c_n + C_l e_0)}{m} + \frac{C_l (\tau^{M-e})^2}{2} \\ & - \frac{[m(1-3\lambda_3)d - \tau^{M-e} C_l][m(2d - 3\lambda_3 d + 3\alpha\gamma) - 2\tau^{M-e} C_l]}{9\alpha m^2} + \frac{[\tau^{M-e} C_l (\beta + \alpha C_l)]^2}{2\alpha^2 m^2 C_e}. \end{aligned} \quad (15)$$

类似地,将公式(11)~(13)代入公式(3),可得制造商在生产 and 再制造阶段的碳排放总量为

$$J_m^{M-e} = \frac{\tau^{M-e} e_0 C_l (1 - \theta \tau^{M-e})}{m} - \frac{(\beta + \alpha C_l) (\tau^{M-e} C_l)^2}{\alpha C_e m^2}. \quad (16)$$

在上述模型的基础上,进一步考虑了制造商负责回收但无减排技术投入的情形,以阐明减排技术投入对供应链运营管理的影响。

结论 2 当制造商在生产阶段不投入减排技术且负责废旧产品回收时,存在唯一最优解使制造商和零售商利润最大。

$$\tau^M = \frac{mH_0}{H_1}, \quad (17)$$

$$w^M = \frac{(2-3\lambda_3)d + 3\alpha\gamma}{3\alpha} - \frac{2C_l H_0}{3\alpha H_1}, \quad (18)$$

$$p^M = \frac{d}{3\alpha} - \frac{C_l H_0}{3\alpha H_1}. \quad (19)$$

证明 与结论 1 的证明思路类似,同样需要先对零售商的利润函数,即式(1)求关于 p 的导数得到

$$\frac{\partial \Pi_r^M}{\partial p} = \lambda_3 d - \alpha(2p - w + \gamma). \quad (20)$$

由 $\frac{\partial^2 \Pi_r^M}{\partial p^2} = -2\alpha < 0$ 可知, Π_r^M 是关于 p 的严格凹函数。令 $\frac{\partial \Pi_r^M}{\partial p} = 0$, 得到零售价格的反应函数为

$$p = \frac{\lambda_3 d + \alpha w - \alpha\gamma}{2\alpha}. \quad (21)$$

将公式(21)代入制造商的利润函数公式(2)中,得到其 Hessian 矩阵为

$$\mathbf{H}^M = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial \tau \partial w} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial w \partial \tau} & \frac{\partial^2 \Pi_m^M}{\partial \tau^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\alpha & -\frac{3\alpha m}{2} \\ -\frac{3\alpha m}{2} & -C_l \end{pmatrix}. \quad (22)$$

根据矩阵 \mathbf{H}^M 负定,可知 Π_m^M 是关于 (w, τ) 的联合凹函数。联立方程 $\frac{\partial \Pi_m^M}{\partial w} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_m^M}{\partial \tau} = 0$, 可得到制造商的最优决策

$$\tau^M = \frac{mH_0}{H_1}, \quad (23)$$

$$w^M = \frac{(2-3\lambda_3)d + 3\alpha\gamma}{3\alpha} - \frac{2C_l H_0}{3\alpha H_1}. \quad (24)$$

将公式(23)、(24)代入式(21),可得零售商的最优零售价格。

结论 2 给出了全渠道闭环供应链在制造商不进行减排投资情形下各成员的最优决策解析式。由结论 2 可进一步得到零售商最优利润、制造商最优利润和碳排放总量分别为

$$\Pi_r^{M*} = (\lambda_2 - \lambda_3) \gamma d + \frac{[\tau^M C_l - m(1-3\lambda_3)d]^2}{9\alpha m^2}, \quad (25)$$

$$\Pi_m^{M*} = \frac{[md - \tau^M C_l][m(1 - 3\lambda_3)d + 2\tau^M C_l]}{9\alpha m^2} - \frac{\tau^M C_l(c_n + C_l e_0)}{m} + \frac{C_l(\tau^M)^2}{2} - \frac{[m(1 - 3\lambda_3)d - \tau^M C_l][m(2d - 3\lambda_3 d + 3\alpha\gamma) - 2\tau^M C_l]}{9\alpha m^2}, \quad (26)$$

$$J_m^{M*} = \frac{\tau^M e_0 C_l (1 - \theta \tau^M)}{m}. \quad (27)$$

2.2 零售商回收模型

本节建立一个零售商负责回收废旧产品的全渠道闭环供应链模型,其决策顺序为:制造商首先决策减排水平 e^{R-e} 和批发价格 w^{R-e} ;零售商根据制造商的决策信息,确定最优的销售价格 p^{R-e} 和回收率 τ^{R-e} 。基于以上假设,制造商和零售商的利润函数分别为

$$\Pi_r^{R-e} = (p - w)D_3 + \gamma D_2 + b\tau(D_1 + D_2 + D_3) - \left[\frac{1}{2} C_l \tau^2 + A\tau(D_1 + D_2 + D_3) \right], \quad (28)$$

$$\Pi_m^{R-e} = p(D_1 + D_2) + wD_3 - C_l[e_0 - (1 - \theta)\tau e_0 - e](D_1 + D_2 + D_3) - \frac{1}{2} C_e e^2 - [\tau c_r + (1 - \tau)c_n](D_1 + D_2 + D_3) - b\tau(D_1 + D_2 + D_3). \quad (29)$$

生产和再制造阶段产出的总碳排放量表示为

$$J_m^{R-e} = [e_0 - (1 - \theta)\tau e_0 - e](D_1 + D_2 + D_3). \quad (30)$$

结论 3 当制造商在生产阶段投入减排技术,零售商负责废旧产品回收时,存在唯一最优解使制造商和零售商利润最大。

$$e^{R-e} = \frac{(\beta + \alpha C_l)[C_l H_0 - 9\alpha(b - A)^2(1 - 3\lambda_3)d]}{\alpha C_e H_2 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l}, \quad (31)$$

$$\tau^{R-e} = \frac{\alpha C_e (b - A) H_0}{[\alpha C_e H_2 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l] C_l}, \quad (32)$$

$$w^{R-e} = \left(\frac{\alpha}{\beta} - \frac{3(\beta + \alpha C_l)[2C_l - 9\alpha(b - A)^2]}{\alpha H_2} \right) e^{R-e} + \frac{(2 - 3\lambda_3)d + 3\alpha\gamma}{3\alpha} - \frac{[2C_l - 9\alpha(b - A)^2][C_l H_0 - 9\alpha(b - A)^2(1 - 3\lambda_3)d]}{3\alpha C_l H_2}, \quad (33)$$

$$p^{R-e} = \left(\frac{\alpha}{\beta} - \frac{3(\beta + \alpha C_l) C_l}{\alpha H_2} \right) e^{R-e} + \frac{d}{3\alpha} - \frac{C_l H_0 - 9\alpha(b - A)^2(1 - 3\lambda_3)d}{3\alpha H_2}, \quad (34)$$

其中 $H_2 = 8C_l - 18\alpha(b - A)m$ 。

证明 根据逆向归纳法,先对零售商的利润函数,即式(28)求关于 (p, τ) 的导数,得到

$$\frac{\partial \Pi_r^{R-e}}{\partial p} = \lambda_3 d + \beta e - \alpha[2p - w + \gamma + 3(b - A)\tau], \quad (35)$$

$$\frac{\partial \Pi_r^{R-e}}{\partial \tau} = (b - A)(d - 3\alpha p + 3\beta e) - C_l \tau. \quad (36)$$

通过求解二阶导数,得到其 Hessian 矩阵为

$$H_1^{R-e} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_r^{R-e}}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \Pi_r^{R-e}}{\partial \tau \partial p} \\ \frac{\partial^2 \Pi_r^{R-e}}{\partial p \partial \tau} & \frac{\partial^2 \Pi_r^{R-e}}{\partial \tau^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\alpha & -3\alpha(b - A) \\ -3\alpha(b - A) & -C_l \end{pmatrix}. \quad (37)$$

故零售商利润函数 Π_r^{R-e} 的 Hessian 矩阵 H_1^{R-e} 负定,联立 $\frac{\partial \Pi_r^{R-e}}{\partial p} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_r^{R-e}}{\partial \tau} = 0$ 可得到零售价格和回收率的反应函数

$$p = \frac{(\lambda_3 d + \alpha w - \beta e - \alpha \gamma) C_l - 3\alpha (b-A)^2 (d + \beta e)}{\alpha [2C_l - 9\alpha (b-A)^2]}, \quad (38)$$

$$\tau = \frac{(b-A) [(2-3\lambda_3) d - 3\alpha w + 3\beta e + 3\alpha \gamma]}{2C_l - 9\alpha (b-A)^2}. \quad (39)$$

将式(38)、(39)代入式(29),得到制造商利润函数的 Hessian 矩阵

$$\mathbf{H}_2^{\text{R-e}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{R-e}}}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{R-e}}}{\partial w \partial e} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{R-e}}}{\partial w \partial e} & \frac{\partial^2 \Pi_m^{\text{R-e}}}{\partial e^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-2\alpha C_l [4C_l - 9\alpha (b-A) m]}{[2C_l - 9\alpha (b-A)^2]^2} & \frac{C_l h_1}{[2C_l - 9\alpha (b-A)^2]^2} \\ C_l h_1 & \frac{2\beta C_l h_2}{[2C_l - 9\alpha (b-A)^2]^2} \end{pmatrix}, \quad (40)$$

其中,

$$h_1 = 2C_l(\beta - 3\alpha C_l) + 9\alpha (b-A)^2(\beta + 3\alpha C_l) - 18\alpha \beta (b-A)(\Delta - b + \theta C_l e_0),$$

$$h_2 = 2C_l(\beta + 3\alpha C_l) - 9\alpha (b-A)^2(2\beta + 3\alpha C_l) + 9\alpha \beta (b-A)(\Delta - b + \theta C_l e_0).$$

类似地,利用回收成本参数假设条件,可知矩阵 $\mathbf{H}_2^{\text{R-e}}$ 为负定矩阵。联立 $\frac{\partial \Pi_m^{\text{R-e}}}{\partial w} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_m^{\text{R-e}}}{\partial e} = 0$,进一步可得制造商的最优决策。将其表达式代入式(38)、(39),得出零售商的最优策略。

结论3给出了全渠道闭环供应链在零售商回收情形下成员的最优决策解析式。将式(31)~(34)代入式(28)、(29),可得零售商和制造商的最优利润为

$$\Pi_r^{\text{R-e}*} = (\lambda_2 - \lambda_3) \gamma d + \frac{[\tau^{\text{R-e}} C_l - (b-A)(1-3\lambda_3)d]^2 (\tau^{\text{R-e}})^2 C_l}{9\alpha (b-A)^2} - \frac{(\tau^{\text{R-e}})^2 C_l}{2} + (1-3\lambda_3)d(b-A)\tau^{\text{R-e}}, \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \Pi_m^{\text{R-e}*} &= \frac{[(b-A)d - \tau^{\text{R-e}} C_l][(b-A)(1-3\lambda_3)d + 2\tau^{\text{R-e}} C_l]}{9\alpha (b-A)^2} \\ &\quad - \frac{[(b-A)(1-3\lambda_3)d - \tau^{\text{R-e}} C_l][(b-A)(2d - 3\lambda_3 d + 3\alpha \gamma) - 2\tau^{\text{R-e}} C_l]}{9\alpha (b-A)^2} \\ &\quad + \frac{\tau^{\text{R-e}} [(b-A)(1-3\lambda_3)d - \tau^{\text{R-e}} C_l]}{(b-A)} - \frac{\tau^{\text{R-e}} C_l [(c_n + C_l e_0) - m\tau^{\text{R-e}}]}{(b-A)} + \frac{[\tau^{\text{R-e}} C_l (\beta + \alpha C_l)]^2}{2\alpha^2 (b-A)^2 C_e}. \end{aligned} \quad (42)$$

进一步,制造商在生产和再制造阶段的碳排放总量化简为

$$J_m^{\text{R-e}*} = \frac{\tau^{\text{R-e}} e_0 C_l (1 - \theta \tau^{\text{R-e}})}{(b-A)} - \frac{(\beta + \alpha C_l) (\tau^{\text{R-e}} C_l)^2}{\alpha C_e (b-A)^2}. \quad (43)$$

对于零售商负责回收的情形,考虑一个制造商不进行减排技术投入的闭环供应链模型。利用逆向归纳法,得到供应链成员的最优决策如下。

结论4 当制造商在生产阶段不投入减排技术,零售商负责废旧产品回收时,存在唯一最优解使制造商和零售商利润最大。

$$\tau^{\text{R}} = \frac{(b-A) [C_l H_0 - 9\alpha (b-A)^2 (1-3\lambda_3) d]}{C_l H_1}, \quad (44)$$

$$w^{\text{R}} = \frac{(2-3\lambda_3) d + 3\alpha \gamma}{3\alpha} - \frac{[2C_l - 9\alpha (b-A)^2] [C_l H_0 - 9\alpha (b-A)^2 (1-3\lambda_3) d]}{3\alpha C_l H_2}, \quad (45)$$

$$p^{\text{R}} = \frac{d}{3\alpha} - \frac{C_l H_0 - 9\alpha (b-A)^2 (1-3\lambda_3) d}{3\alpha H_2}. \quad (46)$$

证明 根据逆向归纳法,先对零售商的利润函数,即公式(28)求关于 (p, τ) 的导数,得到

$$\frac{\partial \Pi_r^{\text{R}}}{\partial p} = \lambda_3 d - \alpha [2p - w + \gamma + 3(b-A)\tau], \quad (47)$$

$$\frac{\partial \Pi_r^{\text{R}}}{\partial \tau} = (b-A)(d - 3\alpha p) - C_l \tau. \quad (48)$$

通过求解二阶导数,得到其 Hessian 矩阵为

$$H_1^R = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_r^R}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \Pi_r^R}{\partial \tau \partial p} \\ \frac{\partial^2 \Pi_r^R}{\partial p \partial \tau} & \frac{\partial^2 \Pi_r^R}{\partial \tau^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\alpha & -3\alpha(b-A) \\ -3\alpha(b-A) & -C_l \end{pmatrix}. \quad (49)$$

故零售商利润函数 Π_r^R 的 Hessian 矩阵 H_1^R 负定, 联立 $\frac{\partial \Pi_r^R}{\partial p} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_r^R}{\partial \tau} = 0$ 可得到零售价格和回收率的反应函数

$$p = \frac{(\lambda_3 d + \alpha w - \alpha \gamma) C_l - 3\alpha(b-A)^2 d}{\alpha[2C_l - 9\alpha(b-A)^2]}, \quad (50)$$

$$\tau = \frac{(b-A)[(2-3\lambda_3)d - 3\alpha w + 3\alpha \gamma]}{2C_l - 9\alpha(b-A)^2}. \quad (51)$$

将式(50)、(51)代入式(29), 得到制造商利润函数求关于 w 的导数 $\frac{\partial \Pi_m^R}{\partial w}$ 并令 $\frac{\partial \Pi_m^R}{\partial w} = 0$ 得到批发价格的反应函数

$$w^R = \frac{(2-3\lambda_3)d + 3\alpha \gamma}{3\alpha} - \frac{[2C_l - 9\alpha(b-A)^2][C_l H_0 - 9\alpha(b-A)^2(1-3\lambda_3)d]}{3\alpha C_l H_2}. \quad (52)$$

由式(52)可得制造商的最优决策, 代入式(50)、(51), 得到零售商的最优策略。由结论 4 可进一步得到零售商最优利润、制造商最优利润和碳排放总量分别为

$$\Pi_r^{R*} = (\lambda_2 - \lambda_3) \gamma d + \frac{[\tau^R C_l - (b-A)(1-3\lambda_3)d]^2}{9\alpha(b-A)^2} - \frac{(\tau^R)^2 C_l}{2} + (1-3\lambda_3)d(b-A)\tau^R, \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \Pi_m^{R*} = & \frac{[(b-A)d - \tau^R C_l][(b-A)(1-3\lambda_3)d + 2\tau^R C_l]}{9\alpha(b-A)^2} \\ & - \frac{[(b-A)(1-3\lambda_3)d - \tau^R C_l][(b-A)(2d - 3\lambda_3 d + 3\alpha \gamma) - 2\tau^R C_l]}{9\alpha(b-A)^2} \\ & + \frac{\tau^R[(b-A)(1-3\lambda_3)d - \tau^R C_l]}{(b-A)} - \frac{\tau^R C_l[(c_n + C_l e_0) - m\tau^R]}{(b-A)}, \end{aligned} \quad (54)$$

$$J_m^{R*} = \frac{\tau^R e_0 C_l (1 - \theta \tau^{R-e})}{(b-A)}. \quad (55)$$

2.3 与无减排技术情形的比较

本节分别在制造商负责回收和零售商负责回收 2 种模型下, 制造商进行减排技术投入对全渠道闭环供应链系统运营策略的影响。

推论 1 制造商负责回收时比较有减排技术投入 2 个模型的结果, 得出以下结论:

- (1) $w^{M-e} < w^M, p^{M-e} < p^M, \tau^{M-e} > \tau^M$ 。
- (2) $\Pi_m^{M-e*} > \Pi_m^{M*}, \Pi_r^{M-e*} > \Pi_r^{M*}$ 。
- (3) 对于给定的减排技术水平, 存在一个阈值 e^{t1} , 当 $e^{M-e} > e^{t1}$ 时, $J_m^{M-e} < J_m^M$; 否则 $J_m^{M-e} \geq J_m^M$, 其中

$$e^{t1} = \frac{9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l e_0 H_1}{\alpha C_e H_1^2 + 9(\beta + \alpha C_l) m \theta e_0 [2\alpha C_e H_1 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l]}.$$

证明 对制造商负责回收时有无减排技术投入情形的批发价格进行作差比较, 可得

$$w^{M-e} - w^M = \left(\frac{\alpha}{\beta} - \frac{6(\beta + \alpha C_l) C_l}{\alpha H_1} \right) e^{M-e} < 0, \quad (56)$$

故 $w^{M-e} < w^M$ 。同理可证 $p^{M-e} < p^M, \tau^{M-e} > \tau^M$ 。

定义函数

$$F(x) = \frac{[md - xC_l][m(1-3\lambda_3)d + 2xC_l]}{9\alpha(\Delta - A + \theta C_l e_0)^2} - \frac{xC_l(c_n + C_l e_0)}{m} + \frac{C_l x^2}{2} - \frac{[m(1-3\lambda_3)d - xC_l][m(2d - 3\lambda_3 d + 3\alpha \gamma) - 2xC_l]}{9\alpha m^2}, \quad (57)$$

则 $\Pi_m^{M^*} = F(\tau^M)$, $\Pi_m^{M-e^*} = F(\tau^{M-e}) + \frac{[\tau^{M-e} C_l(\beta + \alpha C_l)]^2}{2\alpha^2 C_e m^2}$ 。由于 $0 < \tau^M < \tau^{M-e} < 1$, 根据 $F(x)$ 的函数性质可知 $F(\tau^{M-e}) > F(\tau^M)$ 。又 $\frac{[\tau^{M-e} C_l(\beta + \alpha C_l)]^2}{2\alpha^2 C_e m^2} > 0$, 可得 $\Pi_m^{M-e^*} > \Pi_m^{M^*}$ 。同理可求得 $\Pi_r^{M-e^*} > \Pi_r^{M^*}$ 。

定义函数

$$J_1(e) = J_m^M - J_m^{M-e} = -\frac{C_l e_0 (\tau^{M-e} - \tau^M) [1 - \theta(\tau^{M-e} + \tau^M)]}{m} + \frac{(\beta + \alpha C_l) C_l^2 (\tau^{M-e})^2}{\alpha C_l m^2} \quad (58)$$

根据 $\tau^M = \left(1 - \frac{9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l}{\alpha C_e H_1}\right) \tau^{M-e}$, 可得

$$\frac{\partial J_1(e)}{\partial e} = \frac{2C_e \alpha}{\beta + \alpha C_l} e^+ + \frac{9\theta e_0 m [9C_l(\beta + \alpha C_l)^2]}{H_1^2} e^+ + \frac{9C_l e_0 (\beta + \alpha C_l)}{H_1} \left[1 + \frac{9\theta m (\beta + \alpha C_l)}{H_1} e - \frac{2C_e m \alpha \theta}{C_l (\beta + \alpha C_l)} e\right]。$$

在 $e=0$ 时, $\frac{\partial J_1(e)}{\partial e} = \frac{9C_l e_0 (\beta + \alpha C_l)}{H_1} > 0$; 在 e 取无穷时, $\frac{\partial J_1(e)}{\partial e} < 0$ 。又因为在 $e=0$ 时, $J_1(0) > 0$, 根据二次函数的性质, 一定存在一个阈值 e^{t_1} 满足 $J_1(e^{t_1}) = 0$ 。通过计算, 该阈值为

$$e^{t_1} = \frac{9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l e_0 H_1}{\alpha C_e H_1^2 + 9(\beta + \alpha C_l) m \theta e_0 [2\alpha C_e H_1 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l]}。$$

当减排技术水平 $e^{M-e} < e^{t_1}$ 时, $J_m^{M-e} > J_m^M$; 否则 $J_m^{M-e} \geq J_m^M$ 。

由推论 1 可知, 与制造商进行减排技术投入的供应链模型相比, 无减排投入的供应链会设定更高的批发价格和零售价格。制造商负责回收时, 减排技术的投入可以提升供应链的绩效水平, 提高废旧产品的回收率, 同时零售商和制造商利润也均有所提升。当制造商的减排技术投入大于阈值 e^{t_1} 时, 其生产过程的碳排放量可有效减少, 实现低碳生产。

推论 2 零售商负责回收时比较有无减排技术投入两个模型的结果, 得出以下结论:

- (1) $w^{R-e} < w^R$, $p^{R-e} < p^R$, $\tau^{R-e} > \tau^R$ 。
- (2) $\Pi_m^{R-e^*} > \Pi_m^{R^*}$, $\Pi_r^{R-e^*} > \Pi_r^{R^*}$ 。
- (3) 对于给定的减排技术水平, 存在一个阈值 e^{t_2} , 当 $e^{R-e} > e^{t_2}$ 时, $J_m^{R-e^*} < J_m^{R^*}$; 否则 $J_m^{R-e^*} \geq J_m^{R^*}$ 。其中 $e^{t_2} = \frac{9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l e_0 H_2}{\alpha C_e H_2^2 + 9(\beta + \alpha C_l) m \theta e_0 [2\alpha C_e H_1 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l]}。$

证明 与推论 1 的证明思路相似, 同样定义一个函数 $G(x)$ 。

$$G(x) = \frac{[(b-A)d - xC_l][(b-A)(1-3\lambda_3)d + 2xC_l]}{9\alpha(b-A)^2} - \frac{[(b-A)(1-3\lambda_3)d - xC_l][(b-A)(2d-3\lambda_3d + 3\alpha\gamma) - xC_l]}{9\alpha(b-A)^2} + \frac{x[(b-A)(1-3\lambda_3)d - xC_l]}{(b-A)} - \frac{xC_l[(c_n + C_l e_0) - mx]}{(b-A)} \quad (59)$$

则 $\Pi_m^{R^*} = G(\tau^R)$, $\Pi_m^{R-e^*} = G(\tau^{R-e}) + \frac{[\tau^{R-e} C_l(\beta + \alpha C_l)]^2}{2\alpha^2 (b-A)^2 C_e}$ 。由于 $0 < \tau^R < \tau^{R-e} < 1$, 根据 $G(x)$ 的函数性质可知 $G(\tau^{R-e}) > G(\tau^R)$ 。又 $\frac{[\tau^{R-e} C_l(\beta + \alpha C_l)]^2}{2\alpha^2 (b-A)^2 C_e} > 0$, 可得 $\Pi_m^{R-e^*} > \Pi_m^{R^*}$ 。同理可求得 $\Pi_r^{R-e^*} > \Pi_r^{R^*}$ 。

与推论 1 的证明类似, 定义函数 $J_2(e)$

$$J_2(e) = J_m^R - J_m^{R-e} = -\frac{C_l e_0 (\tau^{R-e} - \tau^R) [1 - \theta(\tau^{R-e} + \tau^R)]}{b-A} + \frac{(\beta + \alpha C_l) C_l^2 (\tau^{R-e})^2}{\alpha C_l (b-A)^2} \quad (60)$$

根据 $\tau^R = \left(1 - \frac{9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l}{\alpha C_e H_2}\right) \tau^{R-e}$ 和二次函数的性质, 一定存在一个阈值 e^{t_2} 满足 $J_2(e^{t_2}) = 0$, 通过计算, 该

阈值为 $e^{t_2} = \frac{9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l e_0 H_2}{\alpha C_e H_2^2 + 9(\beta + \alpha C_l) m \theta e_0 [2\alpha C_e H_1 - 9(\beta + \alpha C_l)^2 C_l]}。$ 当减排技术水平 $e^{R-e} > e^{t_2}$ 时, $J_m^{R-e^*} < J_m^{R^*}$; 否则

$J_m^{R-e^*} \geq J_m^{R^*}$ 。

推论 2 表明零售商负责回收时,制造商的减排技术投入同样可以提升供应链的绩效水平。制造商进行减排技术投入后,产品的批发价格和零售价格均低于无减排投入的情形。从模型本身分析,制造商的减排技术投入使需求上升,激发了零售商回收旧产品的积极性,产品回收率上升。因此零售商和制造商利润均随着减排技术的投入得到提升。当制造商的减排技术投入大于阈值 e^2 时,其生产过程的碳排放总量可有效减少,在保证利润提高的同时实现供应链的可持续生产与运营。

3 数值分析

由于均衡解的表达式比较复杂,为便于观察和理解供应链成员风险厌恶程度以及回收率对全渠道闭环供应链的影响,下面将通过算例分析验证理论结果。在满足上文约束条件的基础上,参考以往文献,假设市场的基本需求为 $d=250$,线上直销渠道的规模系数为 $\lambda_1=0.5$,BOPS 渠道的规模系数为 $\lambda_2=0.2$ 。其他参数分别取值为: $\alpha=0.85$, $\beta=0.4$, $c_r=25$, $c_n=50$, $\gamma=0.2$, $\theta=0.5$, $e_0=5$, $b=20$, $A=15$, $C_c=120$, $C_1=1\ 200$ 和 $C_t=2.5$ 。不同模型下供应链成员的最优决策、利润及碳排放量如表 1 所示。

表 1 不同模型下的最优策略

Table 1 Optimal strategies for different models

模型	批发价格	零售价格	回收率	减排水平	零售商利润值	制造商利润值	碳排放总量
M	68.014	78.024	0.691	—	83.623	992.046	167.004
M-e	64.753	76.720	0.758	1.387	120.844	1 097.452	96.159
R	75.041	80.109	0.191	—	53.161	868.101	206.828
R-e	72.721	79.113	0.211	1.231	75.134	951.715	161.681

由表 1 可知,无论是制造商还是零售商负责产品回收工作,减排技术的投入均会使产品的批发价格和零售价格下降,废旧产品的回收率上升。其原因在于,减排技术投入在降低售价的同时也扩大了市场基本需求,使供应链各成员的利润得到提升,进而对回收方的工作效率起到了激励效果。这与推论 1、2 的结果一致,制造商进行减排投资有利于供应链效益提升以及实现可持续发展。此外,从表 1 还可知,当投资减排技术时,与制造商回收模式相比,零售商回收模式下产品的销售价格更高。

下面进一步考虑当碳税 $C_t \in [2, 3]$ 时,不同回收渠道模型中的各决策变量最优值、成员利润函数以及碳排放量的变化。结果如图 2—3 所示。

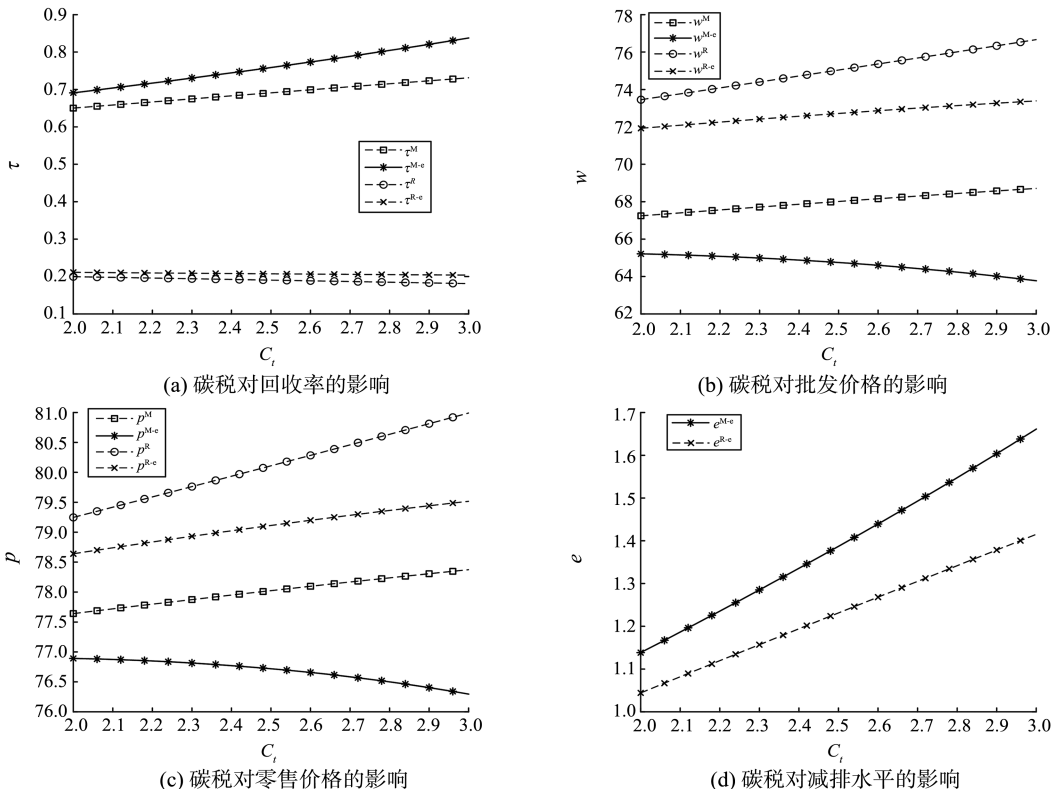


图 2 碳税对供应链成员最优决策的影响

Fig.2 Impact of carbon tax on the optimal decision-making of supply chain members

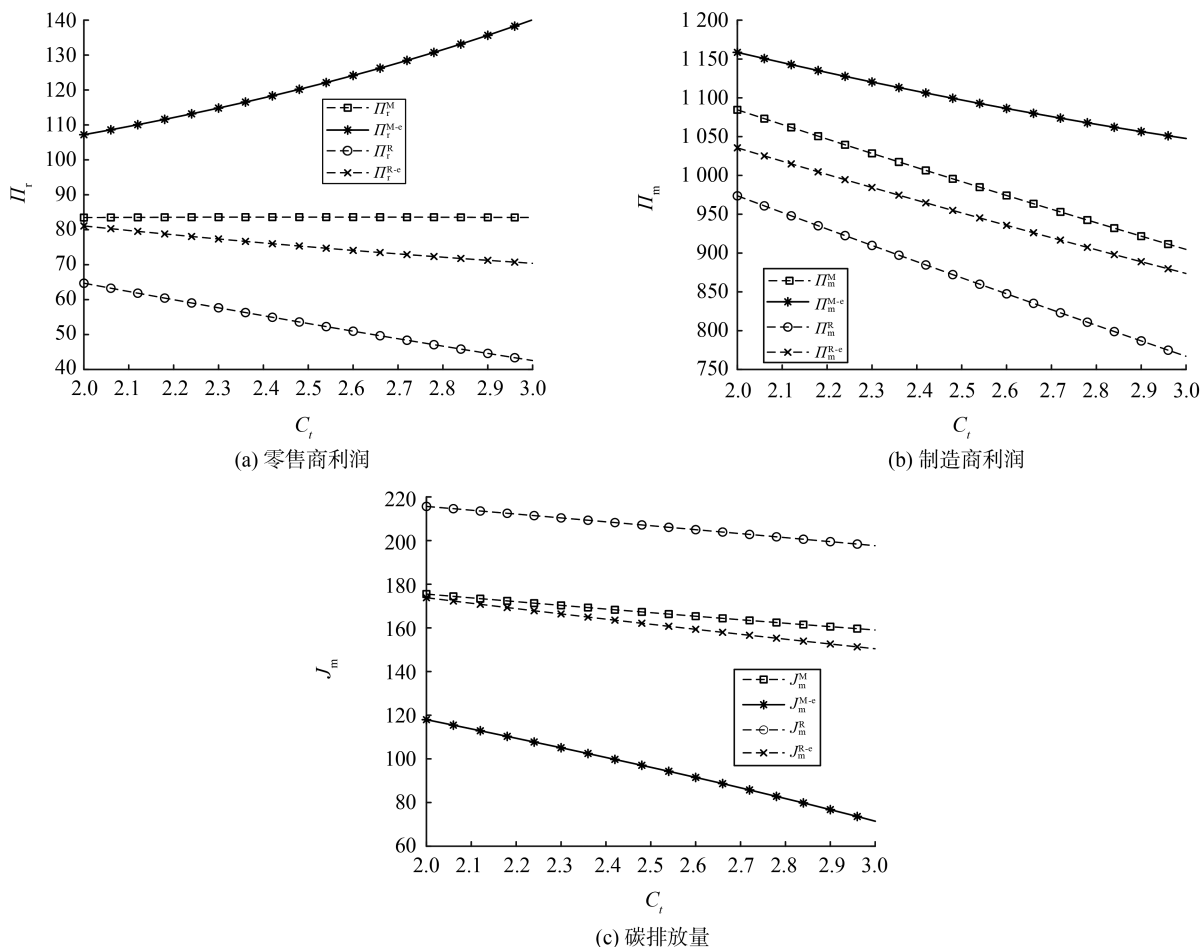


图3 碳税对供应链成员利润及碳排放量的影响

Fig.3 Impact of a carbon tax on the profits and carbon emissions of supply chain members

由图2可知,当制造商负责回收时,废旧产品的回收率随着碳税税率的提高而提高;当零售商负责回收时,回收率随着碳税税率的提高而降低。制造商回收模型的回收率要明显高于零售商回收模型。当制造商进行减排投入后,2种回收方式下的回收率均有所提升,其中制造商回收模型的提升幅度更为明显。批发价格和零售价格随碳税变化而变化的趋势大致相同,且二者均在零售商负责回收时定价较高。仅当制造商负责回收且进行减排投入时,批发价格和零售价格随着碳税税率的提高而降低。减排水平随碳税的提高呈递增趋势,制造商负责回收时的减排水平高于零售商负责回收时。这说明碳税税率提高使制造商的生产费用增加,减排需求增强,进而促进了减排水平的提升。

零售商利润和制造商利润的变化趋势如图3(a)、(b)所示。仅在制造商负责回收且进行减排投入时,零售商利润随碳税的提高而提高,其他情形下双方利润均随碳税的提高而下降。制造商进行减排技术投入有助于提升供应链的效益。由图3(c)可知,提高碳税税率或者进行减排投入都可以有降低生产过程中排放的二氧化碳总量,实现低碳生产的目标。

令 $\beta \in [0, 1]$, 其他参数保持不变。图4展示了市场需求影响系数对减排技术水平、供应链成员利润以及碳排放量的影响。无论由制造商回收还是零售商回收,减排技术水平以及制造商和零售商利润均随着市场需求影响系数的增加而增大。同时制造商的碳排放量也随之降低。因此政府应引导消费者的低碳偏好,进而提升产品的碳减排水平,实现对生产过程中碳排放量的有效控制。

因此,对全渠道闭环供应链而言,制造商负责回收且进行减排投入是相比之下更优的运营方案。提高碳税确实有助于低碳减排的实现,但也会降低供应链成员的利润。对政府而言,应合理制定碳税税率,并对低碳产品进行宣传推广。

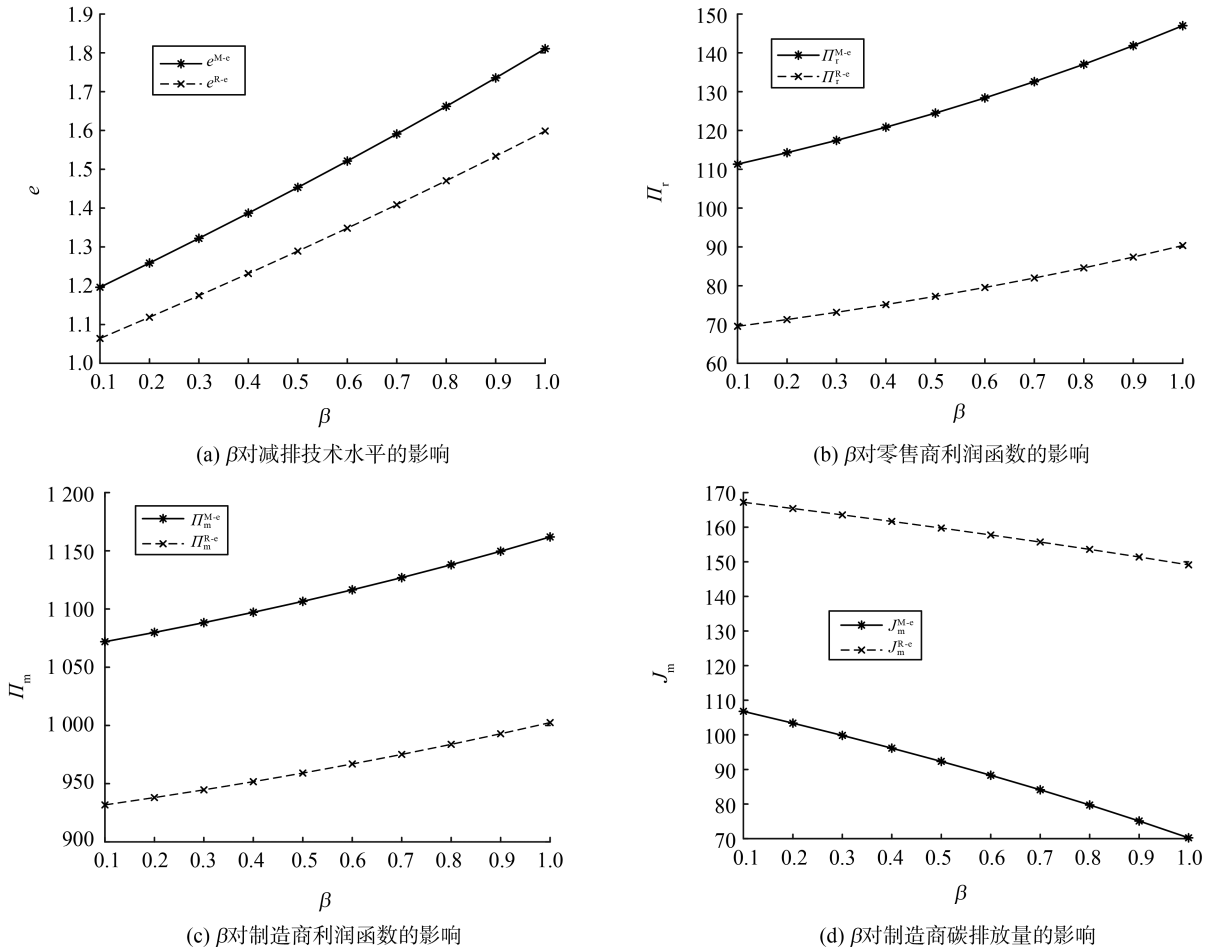


图 4 β 对供应链成员利润及碳排放量的影响

Fig.4 Impact of β on the bottom line and carbon emissions of supply chain members

4 结论

本文在碳税政策下构建了一个由制造商主导的 BOPS 全渠道闭环供应链模型。首先求解制造商回收和零售商回收 2 个供应链模型的最优定价与减排决策,并与无减排投入的情形进行对比分析。然后进一步讨论了不同回收方、减排技术水平投入以及碳税政策对供应链决策的影响。基于上述研究和分析,得出以下结论和启示:碳税政策下,制造商进行减排技术投入不仅可以提高产品回收率、降低产品销售价格,还可以提高零售商和制造商的利润、减少制造商生产过程的碳排放量;随着碳税的增加,制造商的减排技术水平以及逆向供应链的回收率也会增加,即适当提高碳税可以提升制造商的减排积极性和回收方的回收效率;当制造商进行减排技术投入时,与制造商回收模式相比,零售商回收模式下产品的销售价格更高。

本文假设了各渠道的销售价格相同,但现实中还存在很多不同渠道差别化定价的情形,因此有必要在今后研究考虑差别化定价对全渠道零售运营的影响。本文在全渠道零售模式基础上考虑线上渠道与实体销售渠道属于不同企业的情形,然而在实际中,很多企业都是基于单一 BOPS 模式运营,因此,低碳减排对这 2 种全渠道零售运营绩效的影响与比较,也是今后的一个研究重点。此外,本文仅考虑了确定性需求下的情形,需求不确定性对全渠道零售运营会产生什么样的影响也将是今后的一个研究方向。

参考文献:

[1] WESSEH K P, LIN B. Environmental policy and 'double dividend' in a transitional economy[J]. Energy Policy, 2019, 134: 110947.

[2] KUMAR A, JAIN V, KUMAR S. A comprehensive environment friendly approach for supplier selection[J]. Omega, 2014,

42(1):109-123.

- [3] HONG Xianpei, XU Lei, DU Peng, et al. Joint advertising, pricing and collection decisions in a closed-loop supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 167:12-22.
- [4] 王晓迪,王玉燕,李璟. 公平关切下网络平台主导的 E-闭环供应链决策及协调模型[J]. *系统管理学报*, 2019, 28(5):964-972.
WANG Xiaodi, WANG Yuyan, LI Jing. Decision and coordination model of E-CLSC dominant by network platform considering fairness concerns[J]. *Journal of Systems & Management*, 2019, 28(5):964-972.
- [5] 闻卉,郑本荣,曹晓刚,等. 不同渠道权力结构下的双渠道闭环供应链定价与协调决策[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(6):65-74.
WEN Hui, ZHENG Benrong, CAO Xiaogang, et al. Pricing and coordination of DUAL channel closed-loop supply chain with different channel power structure[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(6):65-74.
- [6] ZHOU Xiaoyang, WEI Xiaoya, LIN Jun, et al. Supply chain management under carbon taxes: A review and bibliometric analysis[J]. *Omega*, 2021, 98:102295.
- [7] LUO Ruiling, ZHOU Li, SONG Yang, 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.
- [8] 焦建玲,汪耘欣,李兰兰. 碳税政策对考虑消费者偏好的闭环供应链影响[J]. *软科学*, 2016, 30(2):107-111.
JIAO Jianling, WANG Yunxin, LI Lanlan. The impact of carbon tax policy on a CLSC taking consumer preferences into consideration[J]. *Soft Science*, 2016, 30(2):107-111.
- [9] YENIPAZARLI A. Incentives for environmental research and development: consumer preferences, competitive pressure and emissions taxation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(2):757-769.
- [10] YUAN Kaifu, DONG Hui. Pricing and decision of carbon emission reduction for closed-loop supply chain considering carbon trading mechanism[J]. *Ecological Economy*, 2019, 15(1):39-44.
- [11] HE Ping, WANG Zheng, SHI V, et al. The direct and cross effects in a supply chain with consumers sensitive to both carbon emissions and delivery time[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 292(1):172-183.
- [12] DING Junfei, CHEN Weida, WANG Wenbin. Production and carbon emission reduction decisions for remanufacturing firms under carbon tax and take-back legislation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 143:106419.
- [13] JUNG S H, FENG T J. Government subsidies for green technology development under uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 286(2):726-739.
- [14] 李凤,程春龙,郭焯锋. 考虑零售商企业社会责任的低碳供应链政府补贴策略[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2024, 59(1):85-99.
LI Feng, CHENG Chunlong, GUO Yefeng. Government subsidy strategy of low carbon supply chain considering retailers' corporate social responsibility[J]. *Journal of Shandong University(Natural Science)*, 2024, 59(1):85-99.
- [15] 周永务,李斐. 新零售运营管理面临的问题与挑战[J]. *系统管理学报*, 2022, 31(6):1041-1055.
ZHOU Yongwu, LI Fei. Problems and challenges by new retail operation management[J]. *Journal of Systems & Management*, 2022, 31(6):1041-1055.
- [16] SHI Xiutian, DONG Ciwei, Cheng T C E. Does the buy-online-and-pick-up-in-store strategy with pre-orders benefit a retailer with the consideration of returns? [J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 206:134-145.
- [17] GAO Fei, SU Xuanming. Omni-channel retail operations with buy-online-and-pick-up-in-store[J]. *Management Science*, 2017, 63(8):2478-2492.
- [18] 邱菊,赵菊,房晓艺,等. 基于第三方物流服务定价的零售商 BOPS 策略研究[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(3):169-177.
QIU Ju, ZHAO Ju, FANG Xiaoyi, et al. Analysis of a retailer's BOPS strategy based on endogenous prices of third-party logistics services[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(3):169-177.
- [19] 江玉庆,刘利平,刘帆. BOPS 模式下基于成本共担契约的供应链协调策略[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3):690-700.
QIU Ju, JIANG Yuqing, LIU Liping, LIU Fan. Coordination strategy for supply chain with a cost sharing contract under BOPS mode[J]. *Control and Decisions*, 2022, 37(3):169-177.
- [20] 孔瑞晓,官振中,罗利. 基于 BOPS 的全渠道供应链结构研究[J]. *管理学报*, 2019, 16(7):1072-1080.
KONG Ruixiao, GUAN Zhenzhong, LUO Li. Research on omni-channel supply chain structure with BOPS[J]. *Chinese Journal of Management*, 2019, 16(7):1072-1080.
- [21] 刘斌,顾琼琼,石苗青. 考虑价格和服务联合决策的双渠道供应链 BOPS 模式选择[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(11):135-141.
LIU Bin, GU Qiongqiong, SHI Miaoqing. Choice of BOPS mode for dual channel supply chain considering joint decision on price and service[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(11):135-141.