

考虑政府补贴和企业社会责任的闭环供应链 减排决策研究

何建佳, 张鑫月, 王骁鹏, 向子威

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 在政府给予减排补贴、制造商实施减排、零售商投入企业社会责任(CSR)的制造商领导的闭环供应链中, 讨论了零售商、第三方回收商进行回收时供应链的减排决策。通过 Nash 博弈、Stackelberg 博弈分析并比较了不同回收形式对闭环供应链决策的影响, 并通过 Matlab 算例仿真验证了结果的准确性。研究表明: 两种回收模式下, 随着零售商 CSR 投入水平的增加, 减排水平、回收率、供应链成员利润及供应链整体利润(效用)都会提升; 两种回收模式下, 随着政府减排补贴系数增加, 减排水平、回收率、供应链成员利润及供应链整体利润(效用)都会提升; 在政府给予减排补贴、零售商投入 CSR 下, 供应链中零售商从事回收活动的效用总是优于第三方回收的效用。

关键词: 政府补贴; 企业社会责任; 闭环供应链; 减排决策; Stackelberg 博弈

中图分类号: F 252 **文献标志码:** A

Emission reduction decision of closed-loop supply chain considering government subsidy and corporate social responsibility

HE Jianjia, ZHANG Xinyue, WANG Yaopeng, XIANG Ziwei

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the closed-loop supply chain led by manufacturers where the government provides emission reduction subsidies, manufacturers implement emission reduction measures, and retailers invest in corporate social responsibility (CSR), the emission reduction decisions in the supply chain when retailers and third-party recyclers perform recycling were discussed. The impact of different recycling forms on the closed-loop supply chain decisions was analyzed and compared using Nash and Stackelberg games, and the accuracy of the results was verified through Matlab simulation. The results show that under both recycling modes, as the level of CSR investment by retailers increases, the emission reduction level, recycling rate, profits of supply chain members, and overall profit (utility) of the supply chain will all increase. Besides, under both recycling modes, as the government emission reduction subsidy coefficient increases, the emission reduction level, recycling rate, profits of supply chain members, and overall profit (utility) of the supply chain will all increase. In the case of

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71871144); 上海理工大学科技发展项目(2020KJFZ046)

第一作者: 何建佳(1981-), 男, 教授. 研究方向: 管理科学、供应链管理. E-mail: hejianjia@usst.edu.cn

通信作者: 王骁鹏(1990-), 男, 讲师. 研究方向: 企业社会责任. E-mail: Peterwang0531@163.com

government emission reduction subsidies and retailer investment in CSR, the utility of retailers engaging in recycling activities in the supply chain is always superior to that of third-party recyclers.

Keywords: *government subsidy; CSR; closed-loop supply chain; reduction decision; Stackelberg game*

粗放的经济发展模式势必导致环境的恶化，过去的 10 年，每年温室气体排放增长接近 1.5%。为此，各国积极应对碳排放问题，采取了一系列措施，中国也在第七十五届联合国大会上作出“碳达峰、碳中和”的承诺。随着政府相关环境法规的相继出台，企业、消费者的环保意识不断增强，企业愈发重视自身企业社会责任(CSR)水平，消费者也更加倾向于购买可持续消费的绿色产品^[1]。在此背景下，原有的传统供应链与回收、筛选、再处理等逆向流程相结合，构成了一个新的闭环结构，即为闭环供应链^[2]。在闭环供应链中，企业、消费者和第三方主体不再只关注原先的生产、销售、消费等经济活动，对废旧品的回收利用等碳减排措施也给予了更多关注。对于闭环供应链碳减排问题，政府通过补贴机制引导闭环供应链对废旧产品回收再制造，是碳减排的“指挥棒”^[3]；制造商积极承担 CSR，更容易产生品牌效应，通过获得消费者认可，增加废旧产品回收再制造比率，是碳减排的“润滑油”^[4]。然而，同时考虑政府投入、企业 CSR 水平及碳减排的多主体闭环供应链的“黑箱”目前尚未打开，如下问题亟待研究：如何根据政府补贴制定合理的减排策略？CSR 的投资应该控制在何种水平？何种回收渠道对供应链更佳？综上所述，在闭环供应链的研究中，同时考虑政府补贴、企业 CSR 投入、碳减排等因素，对比研究零售商、第三方回收时的闭环供应链减排决策具有一定的理论与现实意义。

本文聚焦于两类研究：一是供应链上的 CSR 问题研究；二是闭环供应链中的碳减排研究。CSR 是企业对其利益相关者承担社会及道德方面责任的行为。近年来，社会各界加大了对 CSR 的关注，学术界也逐渐在供应链视角下对 CSR 展开丰富的研究，主要集中于仅考虑 CSR^[5]、考虑碳约束下的 CSR^[6]，以及考虑多主体 CSR^[7] 的供应链决策和协调。针对不同的 CSR 投入形式，Biswas 等^[8] 在绿色供应链中研究发现零售商投入

CSR 时效果最佳，对供应链最有利。Chai 等^[9] 研究具有 CSR 的双寡头供应链中批发定价与演化稳定策略，得出零售商合理投入 CSR 时能达到自身、制造商和消费者三赢的效果。而在多主体 CSR 投入的供应链中则更加复杂，会受到广告效应^[10]、商业声誉^[11] 等内部因素的影响。基于此，学者们进一步研究了制造主导^[12]、低碳主导^[13] 的多主体 CSR 投入下供应链的最优决策及整合协调问题。然而，上述研究仍偏向于企业 CSR 行为对供应链决策的研究，虽有学者将 CSR 引入闭环供应链研究减排决策，但也未考虑政府补贴；而将政府补贴引入 CSR 的研究却并没有考虑闭环供应链减排的情形。因此，本文在政府提供补贴的闭环供应链中研究零售商履行 CSR 行为对减排决策的影响。

闭环供应链减排的研究主要集中于考虑多种要素的闭环供应链决策和协调研究。Li 等^[14-15] 综合考虑了价格竞争、碳减排水平和低碳推广努力等因素，并将碳减排水平和低碳宣传努力等因素纳入模型；邢恩凤等^[16] 考虑了资源、产品、碳排放权的三维交易模式；王娜等^[17] 考虑了碳税和再制造专利保护两个因素。除上述内部要素，学者们也注意到了收益共享^[18]、政府规制^[19] 等外部因素的影响。上述研究对考虑碳减排的闭环供应链决策与协调问题进行了探讨，但在实施碳减排时不可避免地会遇到诸多难题，如资金匮乏、技术落后等。而政府补贴作为激励企业减排的有效措施，对减排具有一定的推进作用，对供应链决策也产生了影响。对于上述问题，学者们分别研究了单纯补贴^[20]、碳税^[21] 及无补贴自主创新^[22] 对闭环供应链的影响。而现有的考虑碳减排的闭环供应链研究，大多没有同时考虑政府补贴和企业 CSR 行为对闭环供应链减排决策的影响。

综上所述，虽然现有的文献在供应链 CSR 和闭环供应链碳减排方面取得了丰硕的成果，但是鲜有文献在政府补贴下，考虑将 CSR 引入闭环供应链中研究企业减排决策问题。虽然梁喜等^[23] 在闭环供应链减排中引入了企业 CSR 行为，主要

考量不同成员进行 CSR、不同主体进行回收时闭环供应链的决策, 但并未考虑政府对企业减排的补贴。虽然林志炳等^[24]将政府作为参与者构建了三阶段博弈模型, 探究零售商投入 CSR 对供应链中减排决策、政府补贴效果的影响, 但并未从闭环供应链的视角进行研究, 且其研究的是 CSR 行为对政府补贴效率的影响, 这与本文将政府补贴纳入研究减排决策是不同的。鉴于此, 本文构建制造商、零售商和第三方构成的闭环供应链模型, 对比分析了零售商回收、第三方回收时的供应链最优决策效果, 研究政府补贴、CSR 投入水平、碳减排成本系数对闭环供应链决策的影响, 以为闭环供应链成员回收与减排决策提供参考。

1 问题描述与模型假设

1.1 问题描述

考虑制造商领导、零售商和第三方回收商跟随的闭环供应链。由于政府相关政策要求及消费者的低碳偏好, 制造商在生产过程中进行减排。减排必须付出一定成本, 为此, 政府会给予制造商相应的补贴。而零售商更接近消费者, 往往会投入 CSR 来刺激消费。针对零售商和第三方回收商两种不同回收渠道下的供应链决策问题, 本文用消费者剩余对 CSR 进行刻画, 且成员间的交易采用批发价格契约。政府给予制造商补贴 s , 制造商以批发价 w 将产品销售给零售商, 零售商以零售价 p 销售给顾客。而制造商以单位转移支付 B 从零售商或第三方手中回收废旧品, 闭环供应链形成, 其结构如图 1 所示。

1.2 模型假设

在不影响一般性的前提下, 本文对模型作出如下几点假设:

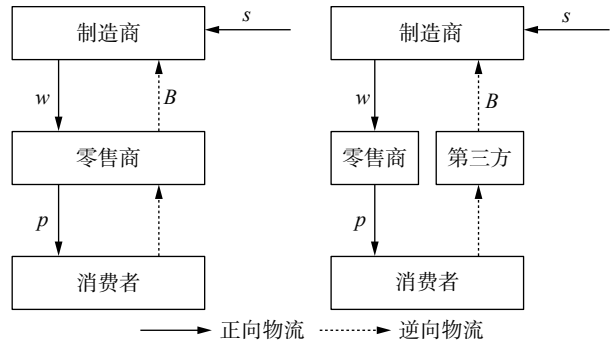


图 1 闭环供应链结构

Fig. 1 Closed-loop supply chain structure

假设 1 产品的市场需求函数表示为

$$d = a - p + \lambda e$$

式中: a 为潜在需求; p 为零售价; $e(e>0)$ 为制造商的减排水平; λ 为消费者低碳偏好系数, $\lambda>0$ 。

假设 2 制造商的减排成本、减排水平满足

$$c(e) = \frac{1}{2}ke^2$$

式中, k 表示减排成本系数, $k>0$ 。为表示减排投资的昂贵和最优决策的存在, 本文假设 $k>\lambda^2$ 。

假设 3 为了鼓励制造商进行碳减排, 政府会依据制造商的减排投入给予一定的财政补贴。参照减排成本表达式, 政府补贴可以表示为 $\frac{1}{2}ske^2$ 。为了保证模型成立, 假设 $s<\frac{k}{2}$ 。

假设 4 借鉴林欢等^[18]的研究, 取用 CSR 水平刻画消费者剩余。消费者剩余表示为

$$\sigma = \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} dd p = \frac{1}{2}d^2 = \frac{1}{2}(a - p + \lambda e)^2$$

式中, $p_{\max}$, $p_{\min}$ 分别表示零售价的最高和最低值。

零售商投入的 CSR 表示为

$$\theta_{\sigma} = \frac{1}{2}\theta(a - p + \lambda e)^2$$

式中, θ 表示零售商 CSR 的投入水平, $0 \leq \theta \leq 1$ 。 $\theta=0$ 表示零售商渴求经营利润的最大化; $\theta=1$ 表示零售商渴求社会福利的最大化。

假设 5 $\Delta=c_n-c_r$ 表示制造商利用废旧品节约的成本, c_n 和 c_r 分别表示新产品和再制品的生产成本, $c_n>c_r$ 。回收努力成本表示为 $I\tau^2$, 其中: τ 为回收率, $\tau>0$; I 为回收努力成本对回收率的敏感系数, $I>0$ 。

假设 6 为了保证废旧品回收再利用的动力, 需要确保制造商进行废旧品回收时是有利可图的, 本文假设 $\Delta>B$ 。市场上的信息是完全对称的, 闭环供应链中的成员是风险中立。

2 模型建立与求解

2.1 零售商回收情形(R)

在零售商回收情形下, 政府按系数 s 给予制造商减排研发补贴。供应链中的决策顺序为: 制造商率先制定产品的批发价 w 和减排水平 e , 零售商再确定产品的零售价格 p 和废旧品回收率 τ 。各成员的利润函数 π 分别为

$$\pi_m^R=(w-c_n)D+(\Delta-B)\tau D-\left(\frac{k}{2}-s\right)e^2=\\[w-c_n+(\Delta-B)\tau](a-p+\lambda e)-\left(\frac{k}{2}-s\right)e^2 \quad (1)$$

$$\pi_r^R=(p-w+B\tau)D-I\tau^2=(p-w+B\tau)(a-p+\lambda e)-I\tau^2 \quad (2)$$

式中：上标 R，T 分别代表零售商、第三方回收商进行废旧品回收的情形；下标 m，r，t，g 分别代表制造商、零售商、第三方和供应链，下同。

零售商投入 CSR 时的效用函数 v 为

$$v_r^R=\pi_r^R+\frac{\theta}{2}D^2=(p-w+B\tau)(a-p+\lambda e)-I\tau^2+\frac{\theta}{2}(a-p+\lambda e)^2 \quad (3)$$

$$v_g^R=\pi_m^R+v_r^R \quad (4)$$

$$H_1=\begin{bmatrix} \frac{4I(B^2-4I+2I\theta)+4IB(\Delta-B)}{(B^2-4I+2I\theta)^2} \\ -2I\lambda(B^2-4I+2I\theta)-4I\lambda B(\Delta-B) \\ \frac{4I(B^2-4I+2I\theta)+4IB(\Delta-B)}{(B^2-4I+2I\theta)^2} \end{bmatrix}$$

而 $|H_1|=\frac{(k-2s)(4I-2I\theta-B\Delta)-I\lambda^2}{(B^2-4I+2I\theta)^4}$ ， $(4I-2I\theta-B\Delta)-I\lambda^2>0$ 时， π_m^R 是关于 w ， e 的凹函数，存在最优解。

代入式 (1)~(4),可得到闭环供应链各方最大利润及最大效用为

$$\pi_m^{R*}=\frac{-I(k-2s)(a-c_n)^2}{2(I\lambda^2-4Ik+8Is+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)}\\ \pi_r^{R*}=\frac{-I(k-2s)^2(a-c_n)^2(B^2-4I+4I\theta)}{4(I\lambda^2-4Ik+8Is+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)^2}\\ v_r^{R*}=\frac{-I(k-2s)^2(a-c_n)^2(B^2-4I+2I\theta)}{4(I\lambda^2-4Ik+8Is+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)^2}\\ v_g^{R*}=\frac{-I(k-2s)(a-c_n)^2[2I\lambda^2+(2\Delta B+6I\theta+B^2-12I)(k-2s)]}{4(I\lambda^2-4Ik+8Is+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)^2}$$

零售商回收情形下的均衡结果和利润可表示为

$$\tau^{R*}=\frac{-B(k-2s)(a-c_n)}{2\phi_1}\\ w^{R*}=\frac{a+c_n}{2}+\frac{(a-c_n)[B(k-2s)(\Delta-B)-I\lambda^2]}{2\phi_1}\\ p^{R*}=a+\frac{I(a-c_n)(k-\lambda^2-2s)}{\phi_1}$$

命题 1 当 $(4I-2I\theta-B\Delta)-I\lambda^2>0$ 时，零售商回收情形下的最优均衡策略为

$$w^{R*}=\frac{a+c_n}{2}+\frac{(a-c_n)[B(k-2s)(\Delta-B)-I\lambda^2]}{2(I\lambda^2-4Ik+8Is+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)}\\ e^{R*}=\frac{-I\lambda(a-c_n)}{I\lambda^2-4Ik+8Is+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s}\\ p^{R*}=a+\frac{I(a-c_n)(k-\lambda^2-2s)}{I\lambda^2-4Ik+8Is+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s}\\ \tau^{R*}=\frac{-B(k-2s)(a-c_n)}{2(I\lambda^2-4Ik+8Is+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)}$$

证明 由 $\frac{\partial^2 v_r}{\partial p^2}=-2+\theta<0$ ， $\frac{\partial^2 v_r}{\partial \tau^2}=-2I<0$ 可知， v_r^R 是关于 p ， τ 的凹函数，存在最优解。代入式(1)求解关于 w ， e 的二阶(偏)导数，得到海塞矩阵 H_1 为

$$\begin{bmatrix} \frac{-2I\lambda(B^2-4I+2I\theta)-4I\lambda B(\Delta-B)}{(B^2-4I+2I\theta)^2} \\ 4IB\lambda^2(\Delta-B)-(k-2s)(B^2-4I+2I\theta)^2 \\ \frac{-2I\lambda(B^2-4I+2I\theta)-4I\lambda B(\Delta-B)}{(B^2-4I+2I\theta)^2} \end{bmatrix}\\ e^{R*}=\frac{-I\lambda(a-c_n)}{\phi_1}\\ \pi_m^{R*}=\frac{-I(k-2s)(a-c_n)^2}{2\phi_1}\\ v_g^{R*}=\frac{-I(k-2s)(a-c_n)^2\psi_1}{4\phi_1^2}\\ \pi_r^{R*}=\frac{-I(k-2s)^2(a-c_n)^2(B^2-4I+4I\theta)}{4\phi_1^2}\\ v_r^{R*}=\frac{-I(k-2s)^2(a-c_n)^2(B^2-4I+2I\theta)}{4\phi_1^2}$$

其中： $\varphi_1=I\lambda^2+(\Delta B+2I\theta-4I)(k-2s)$ ， $\psi_1=2I\lambda^2+(2\Delta B+6I\theta+B^2-12I)(k-2s)$ 。

性质1 a. $\frac{\partial e^{R*}}{\partial \theta}>0$; $\frac{\partial \tau^{R*}}{\partial \theta}>0$;当 $\lambda>\sqrt{\frac{B(k-2s)(\Delta-B)}{I}}$ 时， $\frac{\partial w^{R*}}{\partial \theta}>0$ ，当 $\lambda\leq\sqrt{\frac{B(k-2s)(\Delta-B)}{I}}$ 时， $\frac{\partial w^{R*}}{\partial \theta}\leq 0$ ；当 $\lambda>\sqrt{k-2s}$ 时， $\frac{\partial p^{R*}}{\partial \theta}>0$ ，当 $\lambda\leq\sqrt{k-2s}$ 时， $\frac{\partial p^{R*}}{\partial \theta}\leq 0$ 。b. $\frac{\partial \pi_m^{R*}}{\partial \theta}>0$; $\frac{\partial v_r^{R*}}{\partial \theta}>0$; $\frac{\partial v_g^{R*}}{\partial \theta}>0$ ；当 $\lambda\leq\frac{(\Delta-B)B}{2\theta}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{R*}}{\partial \theta}\geq 0$ ，当 $I>\frac{(\Delta-B)B}{2\theta}$ ， $\lambda>\sqrt{\frac{(k-2s)(2I\theta+B^2-\Delta B)}{I}}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{R*}}{\partial \theta}>0$ ， $\lambda\leq\sqrt{\frac{(k-2s)(2I\theta+B^2-\Delta B)}{I}}$ 时， $\frac{\partial \pi_r^{R*}}{\partial \theta}\leq 0$ 。

证明

$$\frac{\partial p^{R*}}{\partial \theta} = \frac{-2I^2(a-c_n)(k-2s)(k-2s-\lambda^2)}{\phi_1^2}$$

$$\frac{\partial e^{R*}}{\partial \theta} = \frac{2\lambda I^2(a-c_n)(k-2s)}{\phi_1^2} > 0$$

$$\frac{\partial w^{R*}}{\partial \theta} = \frac{I(a-c_n)(k-2s)[I\lambda^2 - B(\Delta - B)(k-2s)]}{\varphi_1^2}$$

$$\frac{\partial \pi_m^{R*}}{\partial \theta} = \frac{I^2(k-2s)^2(a-c_n)^2}{\varphi_1^2} > 0$$

$$\frac{\partial \tau^{R*}}{\partial \theta} = \frac{BI(a-c_n)(k-2s)^2}{\phi_1^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{R*}}{\partial \theta} = \frac{-I^2(k-2s)^2(a-c_n)^2[I\lambda^2 + (k-2s)(\Delta B - B^2 - 2I\theta)]}{\phi_1^3}$$

$$\frac{\partial v_r^{R*}}{\partial \theta} = \frac{-I^2(k-2s)^2(a-c_n)^2[I\lambda^2 + (k-2s)(\Delta B + 4I - 2B^2 - 2I\theta)]}{\phi_1^3} > 0$$

$$\frac{\partial v_g^{R*}}{\partial \theta} = \frac{-I^2(k-2s)^2(a-c_n)^2[I\lambda^2 + (k-2s)(12I - \Delta B - 2B^2 - 6I\theta)]}{2\phi_1^3} > 0$$

性质1表明,零售商进行回收时,政府给予减排补贴,零售商投入CSR的闭环供应链中,随着零售商CSR投入水平的提高,制造商减排水平、废旧品回收率、制造商利润、零售商效用及供应链总效用随之增加。而产品批发价和零售价在消费者低碳偏好系数较高时会提升,否则会降低。而零售商的利润在回收成本对回收率的敏感系数较低或者消费者低碳偏好系数较高时增加,在回收成本对回收率的敏感系数较高且消费者低碳偏好系数较低时降低。

性质2 a. $\frac{\partial e^{R*}}{\partial s} > 0$; $\frac{\partial \tau^{R*}}{\partial s} > 0$; 当 $I > \frac{(2\Delta - B)B}{2(2-\theta)}$ 时,

$\frac{\partial w^{R*}}{\partial s} > 0$, 当 $I \leq \frac{(2\Delta - B)B}{2(2-\theta)}$ 时, $\frac{\partial w^{R*}}{\partial s} \leq 0$; 当 $I >$

$\frac{\Delta B}{3-\theta}$ 时, $\frac{\partial p^{R*}}{\partial s} > 0$, 当 $I \leq \frac{\Delta B}{3-\theta}$ 时, $\frac{\partial p^{R*}}{\partial s} \leq 0$;

b. $\frac{\partial \pi_m^{R*}}{\partial s} > 0$; $\frac{\partial \pi_r^{R*}}{\partial s} > 0$; $\frac{\partial v_r^{R*}}{\partial s} > 0$; $\frac{\partial v_g^{R*}}{\partial s} > 0$ 。

证明 同性质1,此处省略。

性质2表明,在政府给予制造商减排补贴、零售商履行CSR的闭环供应链中,零售商进行回收时,随着补贴系数的增加,减排水平、回收率、制造商利润、零售商利润、零售商效用及供

应链总效用随之增加。而产品批发价、零售价在回收成本对回收率的敏感系数较高时增加,否则降低。

2.2 第三方回收情形(T)

第三方回收情形下,政府按系数 s 给予制造商减排研发补贴。供应链的博弈顺序为:制造商率先确定产品的批发价 w 和减排水平 e ,接着零售商和第三方再分别确定产品的零售价 p 和回收率 τ 。则各成员的利润函数分别为

$$\pi_m^T = (w - c_n)D + (\Delta - B)\tau D - \left(\frac{k}{2} - s\right)e^2 =$$

$$[w - c_n + (\Delta - B)\tau](a - p + \lambda e) - \left(\frac{k}{2} - s\right)e^2 \quad (5)$$

$$\pi_r^T = (p - w)D = (p - w)(a - p + \lambda e) \quad (6)$$

$$\pi_t^T = B\tau D - I\tau^2 = \tau B(a - p + \lambda e) - I\tau^2 \quad (7)$$

零售商投入CSR时的效用函数为

$$v_r^T = \pi_r^T + \frac{\theta}{2}D^2 =$$

$$(p - w)(a - p + \lambda e) + \frac{\theta}{2}(a - p + \lambda e)^2 \quad (8)$$

$$v_g^T = \pi_m^T + \pi_t^T + v_r^T \quad (9)$$

命题2 当 $(4I - 2I\theta - B\Delta + B^2) - I\lambda^2 > 0$ 时,零售商回收情形下的最优均衡策略为

$$w^{T*} = a + \frac{I(a-c_n)[(2-\theta)(k-2s)-\lambda^2]}{-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s}$$

$$e^{T*} = \frac{-I\lambda(a-c_n)}{-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s}$$

$$p^{T*} = a + \frac{I(a-c_n)(k-\lambda^2-2s)}{-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s}$$

$$\tau^{T*} = \frac{-B(k-2s)(a-c_n)}{2(-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)}$$

证明 由 $\frac{\partial^2 v_r}{\partial p^2} = -2 + \theta < 0$, $\frac{\partial^2 \pi_t}{\partial \tau^2} = -2I < 0$ 可

知, v_r^T, π_t^T 是关于 p, τ 的凹函数, 存在最优解。

代入式(5)求解关于 w, e 的二阶(偏)导数, 得到

海塞矩阵 H_2 为

$$\boldsymbol{H}_2 = \begin{bmatrix} \frac{4I(\theta-2)+2B(\Delta-B)}{2I(\theta-2)^2} & \frac{-2I\lambda(\theta-2)-2B\lambda(\Delta-B)}{2I(\theta-2)^2} \\ \frac{-2I\lambda(\theta-2)-2B\lambda(\Delta-B)}{2I(\theta-2)^2} & \frac{2B\lambda^2(\Delta-B)-2I(k-2s)(\theta-2)^2}{2I(\theta-2)^2} \end{bmatrix}$$

而 $|\boldsymbol{H}_2| = \frac{(k-2s)(4I-2I\theta-B\Delta+B^2)-I\lambda^2}{4I^2(\theta-2)^4}$, 当 $|\boldsymbol{H}_2| > 0$, 即 $(4I-2I\theta-B\Delta+B^2)-I\lambda^2 > 0$ 时, π_m^T 是关

于 w, e 的凹函数, 存在最优解。
代入式 (5)~(9), 可得到闭环供应链各方最大利润及最大效用为

$$\begin{aligned} \pi_m^{T^*} &= \frac{-I(k-2s)(a-c_n)^2}{2(-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)} \\ \pi_r^{T^*} &= \frac{-I^2(k-2s)^2(a-c_n)^2(\theta-1)}{(-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)^2} \\ \pi_t^{T^*} &= \frac{IB^2(k-2s)^2(a-c_n)^2}{4(-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)^2} \\ v_r^{T^*} &= \frac{-I^2(k-2s)^2(a-c_n)^2(\theta-2)}{2(-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)^2} \\ v_g^{T^*} &= \frac{-I(k-2s)(a-c_n)^2[2I\lambda^2+(2\Delta B+6I\theta-12I-3B^2)(k-2s)]}{4(-4Ik+8Is-B^2k+2B^2s+I\lambda^2+\Delta Bk-2\Delta Bs+2I\theta k-4I\theta s)^2} \end{aligned}$$

第三方回收情形下的均衡结果和利润可表示为

$$\begin{aligned} \tau^{T^*} &= \frac{-B(k-2s)(a-c_n)}{2\phi_2} \\ w^{T^*} &= a + \frac{I(a-c_n)[(2-\theta)(k-2s)-\lambda^2]}{\phi_2} \\ \pi_r^{T^*} &= \frac{-I^2(k-2s)^2(a-c_n)^2(\theta-1)}{\phi_2^2} \\ p^{T^*} &= a + \frac{I(a-c_n)(k-\lambda^2-2s)}{\phi_2} \\ \pi_m^{T^*} &= \frac{-I(k-2s)(a-c_n)^2}{2\phi_2} \\ \pi_t^{T^*} &= \frac{IB^2(k-2s)^2(a-c_n)^2}{4\phi_2^2} \\ e^{T^*} &= \frac{-I\lambda(a-c_n)}{\phi_2} \\ v_r^{T^*} &= \frac{-I^2(k-2s)^2(a-c_n)^2(\theta-2)}{2\phi_2^2} \\ v_g^{T^*} &= \frac{-I(k-2s)(a-c_n)^2\psi_2}{4\phi_2^2} \end{aligned}$$

其中, $\phi_2 = I\lambda^2 + (\Delta B + 2I\theta - 4I - B^2)(k - 2s)$, $\psi_2 = 2I\lambda^2 + (2\Delta B + 6I\theta - 12I - 3B^2)(k - 2s)$ 。

性质 3 a. $\frac{\partial e^{T^*}}{\partial \theta} > 0; \frac{\partial \tau^{T^*}}{\partial \theta} > 0$; 当 $\lambda > \sqrt{\frac{B(k-2s)(\Delta-B)}{I}}$ 时, $\frac{\partial w^{T^*}}{\partial \theta} > 0$, 当 $\lambda \leq \sqrt{\frac{B(k-2s)(\Delta-B)}{I}}$ 时, $\frac{\partial w^{T^*}}{\partial \theta} \leq 0$; 当 $\lambda > \sqrt{k-2s}$

时, $\frac{\partial p^{T^*}}{\partial \theta} > 0$, 当 $\lambda \leq \sqrt{k-2s}$ 时, $\frac{\partial p^{T^*}}{\partial \theta} \leq 0$; b. $\frac{\partial \pi_m^{T^*}}{\partial \theta} > 0; \frac{\partial \pi_t^{T^*}}{\partial \theta} > 0; \frac{\partial v_r^{T^*}}{\partial \theta} > 0; \frac{\partial v_g^{T^*}}{\partial \theta} > 0$; 当 $I \leq \frac{(\Delta-B)B}{2\theta}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{T^*}}{\partial \theta} \geq 0$, 当 $I > \frac{(\Delta-B)B}{2\theta}$ 时, $\lambda > \sqrt{\frac{(k-2s)(2I\theta+B^2-\Delta B)}{I}}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{T^*}}{\partial \theta} > 0$, $\lambda \leq \sqrt{\frac{(k-2s)(2I\theta+B^2-\Delta B)}{I}}$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{T^*}}{\partial \theta} \leq 0$ 。

性质 3 表明, 在政府给予减排补贴、零售商履行 CSR 的供应链中, 第三方回收商进行回收时, 随着零售商 CSR 投入的增加, 减排水平、回收率、制造商利润、第三方利润、零售商效用及供应链总效用随之增加。消费者低碳偏好系数较高时, 批发价和零售价会提升。而零售商的利润与回收成本对回收率的敏感系数、消费者低碳偏好系数有关, 敏感系数较低或低碳偏好系数较高时会提升, 而在敏感系数较高且低碳偏好系数较低时则会降低。

性质 4 a. $\frac{\partial e^{T^*}}{\partial s} > 0; \frac{\partial \tau^{T^*}}{\partial s} > 0$; 当 $I > \frac{B(\Delta-B)}{2-\theta}$ 时, $\frac{\partial w^{T^*}}{\partial s} > 0$, 当 $I \leq \frac{B(\Delta-B)}{2-\theta}$ 时, $\frac{\partial w^{T^*}}{\partial s} \leq 0$; 当 $I > \frac{B(\Delta-B)}{3-2\theta}$ 时, $\frac{\partial p^{T^*}}{\partial s} > 0$, 当 $I \leq \frac{B(\Delta-B)}{3-2\theta}$ 时, $\frac{\partial p^{T^*}}{\partial s} \leq 0$; b. $\frac{\partial \pi_m^{T^*}}{\partial s} > 0; \frac{\partial \pi_r^{T^*}}{\partial s} > 0; \frac{\partial \pi_t^{T^*}}{\partial s} > 0; \frac{\partial v_r^{T^*}}{\partial s} > 0; \frac{\partial v_g^{T^*}}{\partial s} > 0$ 。

性质 4 表明, 在政府给予减排补贴、零售商履行 CSR 的供应链中, 第三方回收商进行回收时, 随着补贴系数的增加, 减排水平、回收率、制造商利润、零售商利润、第三方利润、零售商效用及供应链总效用随之增加。而产品批发价、零售价在回收成本对回收率的敏感系数较高时增加, 否则降低。

3 不同回收模式供应链系统对比分析

基于零售商回收和第三方回收两种模式的结果, 对两种回收模式进行分析, 可得如下命题:

命题 3 a. $e^{T^*} < e^{R^*}$, $\tau^{T^*} < \tau^{R^*}$. b. 当 $\lambda > \sqrt{B(\Delta-B)(k-2s)/I}$ 时, $w^{T^*} < w^{R^*}$; 当 $\lambda \leq \sqrt{B(\Delta-B)(k-2s)/I}$ 时, $w^{T^*} \geq w^{R^*}$. c. 当 $\lambda > \sqrt{k-2s}$ 时, $p^{T^*} < p^{R^*}$; 当 $\lambda \leq \sqrt{k-2s}$ 时, $p^{T^*} \geq p^{R^*}$.

证明

$$w^{T^*} - w^{R^*} = \frac{B^2(k-2s)(a-c_n)[B(\Delta-B)(k-2s)-I\lambda^2]}{\phi_1\phi_2}$$
$$\frac{e^{T^*}}{e^{R^*}} = \frac{\tau^{T^*}}{\tau^{R^*}} = \frac{\phi_1}{\phi_2} < 1$$
$$p^{T^*} - p^{R^*} = \frac{IB^2(k-2s)(a-c_n)(k-2s-\lambda^2)}{\phi_1\phi_2}$$

命题 3 表明: a. 在政府给予减排补贴、零售商履行 CSR 的供应链中, 相较于第三方回收情形, 制造商减排水平、回收率总在零售商回收时更高。这是因为零售商接近市场, 更了解消费者。例如, 苏宁借助临近消费者市场的优势, 在其门店积极设置“以旧换新”活动, 帮助制造商进行废旧品应回收。因此, 从提高减排水平和废旧品回收率的角度, 零售商应积极进行废旧产品回收。b. 当消费者低碳偏好系数较高时, 产品批发价在零售商回收时更高; 反之, 批发价则在第三方回收时更高。c. 当低碳偏好系数较高时, 产品零售价在零售商回收时更高; 反之, 则在第三方回收时更高。这是因为消费者低碳偏好较高时, 产品价格提高不会显著影响需求, 零售商会采取提升价格来增益。

命题 4 $\pi_m^{T^*} < \pi_m^{R^*}$

证明 $\frac{\pi_m^{T^*}}{\pi_m^{R^*}} = \frac{\phi_1}{\phi_2} < 1$

命题 4 表明, 在政府给予减排补贴、零售商履行 CSR 的供应链中, 制造商利润于零售商回收

时更高。这是因为零售商更接近于消费市场, 具有一定的回收优势, 为制造商节约更多成本。制造商更积极投入减排研发, 提升减排水平, 扩大产品市场需求。此时, 市场可回收物数量也会提升, 形成良性循环, 进而促进了制造商利润的提升。

4 算例分析

为了对上文的性质、命题进行验证, 进一步研究相关管理启示, 本文使用 Matlab 2017a 实施算例分析, 通过对其余变量进行赋值, 分析 CSR 投入水平和减排研发的补贴系数 s 对零售商投入 CSR 模式下各回收情形下主体决策和利润的影响。为了保证供应链成员目标函数的凹性, 本文将各参数赋值为: $a = 1\,000$, $\lambda = 1$, $k = 100$, $s = 30$, $I = 80$, $\Delta = 15$, $B = 10$, $\theta = 0.5$, $c_n = 35$, $c_r = 20$ 。

4.1 θ 对不同回收情形下最优决策及利润的影响

本文选取零售商 CSR 投入水平 θ 作为影响变量, 分析其对不同回收情形下供应链各成员最优决策及利润的影响。在其他系数不变的情况下, 令 $\theta \in [0.2, 0.6)$ 。

4.1.1 θ 对不同回收情形下最优决策的影响

由图 2 和图 3 可知, 随着 CSR 投入水平 θ 的提升, 两种模式下, 批发价、零售价均会降低。且相较于第三方回收, 零售商进行回收时价格更低。由图 4 和图 5 可知, 随着 CSR 投入水平的提升, 两种回收模式下, 减排水平和回收率均会提升, 且零售商高于第三方。由于本文赋值满足相关条件, 这与性质 1, 3 及命题 3 相符。

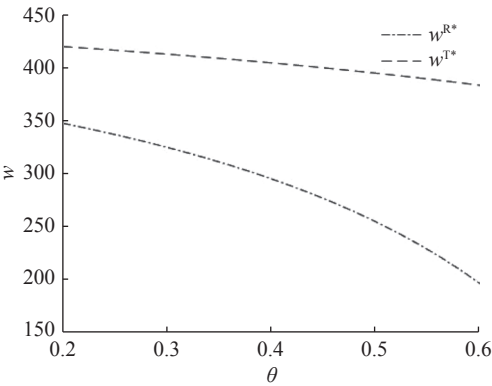


图 2 投入水平对批发价的影响

Fig.2 Impact of input levels on wholesale prices

图 2~5 进一步表明, 零售商的 CSR 意识较强时, 会更加地去关注消费者剩余, 也会降低零售

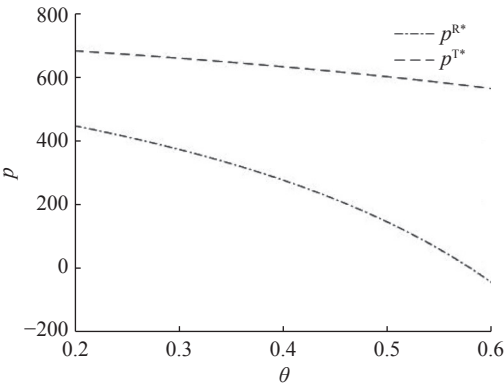


图 3 投入水平对零售价的影响

Fig. 3 Impact of input levels on retail prices

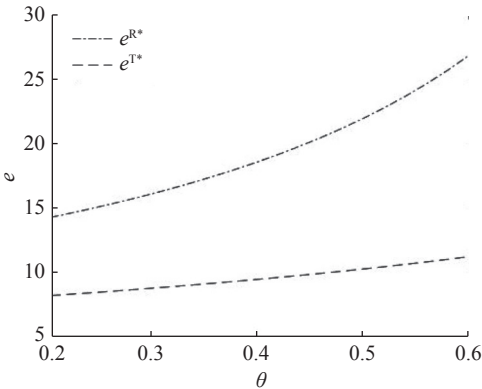


图 4 投入水平对减排水平的影响

Fig. 4 Impact of input levels on emission reduction levels

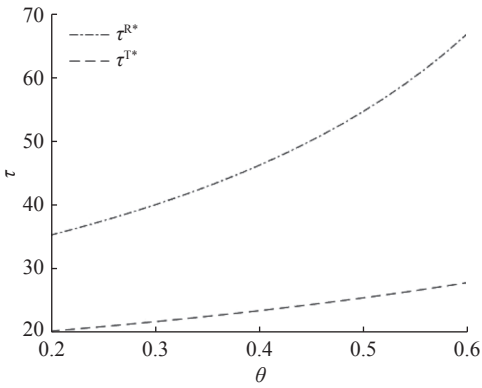


图 5 投入水平对回收率的影响

Fig. 5 Impact of input levels on recovery rates

价来履行 CSR，促发消费者的购买，而制造商也会采取降低批发价的方式来进一步获利。零售商 CSR 行为激励了制造商减排以及零售商和第三方的回收。而零售商回收模式下，供应链中减排水平和回收率都更高。

4.1.1.2 θ 对不同回收情形下利润(效用)的影响

由图 6~9 可知，随着 CSR 投入水平 θ 的提升，两种回收模式下，制造商、第三方利润、零售商效用和供应链效用均增加，且在零售商进行

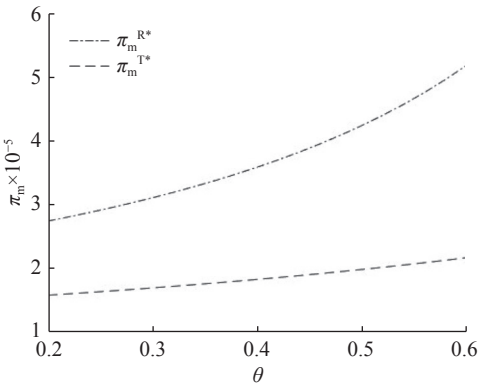


图 6 投入水平对制造商利润的影响

Fig. 6 Impact of input levels on manufacturers' profits

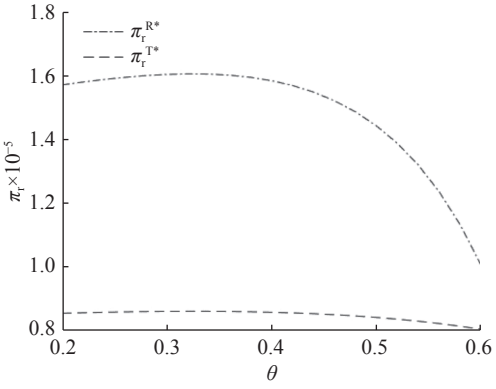


图 7 投入水平对零售商利润的影响

Fig. 7 Impact of input level on retailer profits

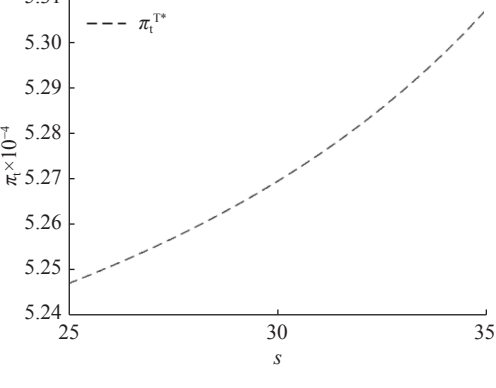


图 8 投入水平对第三方利润的影响

Fig. 8 Impact of input levels on third-party profits

回收时更佳。而从图 7 可以看出，在假设的参数下，零售商利润降低，且零售商回收下所获效用总高于第三方回收。这进一步论证了性质 1、3 和命题 4 的正确性。

图 6~9 进一步表明，零售商的 CSR 行为会给供应链中成员企业带来益处，会提高制造商、第三方利润以及供应链总效用，因此，零售商应当积极履行 CSR。例如京东为改善贫困地区生活，发挥产业互联网能力，长期致力于扶助贫困地区

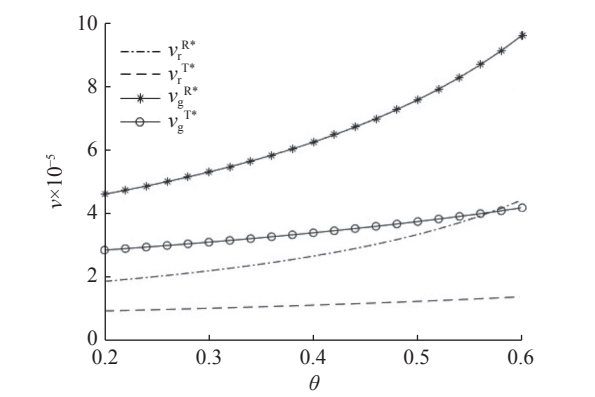


图 9 投入水平对零售商(供应链)效用的影响

Fig. 9 Impact of input levels on retailer (supply chain) utility

脱贫致富。然而过高的 CSR 投入会给零售商自身利润造成侵害, 因此, 零售商在投入 CSR 行为时更要考虑自身利益, 避免过度投入导致自身的损失。

4.2 s 对不同回收情形下最优决策及利润的影响

选取政府减排研发补贴系数 s 作为影响变量, 分析其对不同回收情形下供应链各成员最优决策及利润的影响。在其他系数不变的情况下, 令 $s \in [25, 35]$ 。

4.2.1 s 对不同回收情形下最优决策的影响

由图 10 和 11 可知, 随着政府减排补贴系数 s 的提升, 产品的批发价、零售价提升, 而第三方回收时的批发价、零售价远超过零售商回收时的价格。从图 12 和 13 可知, 随补贴率的增加, 减排水平、零售商和第三方回收率均会提升, 且在零售商回收情形下总是优于第三方回收情形下的。这进一步论证了性质 2, 4 和命题 3 的正确性。

图 10~13 进一步表明, 无论是何种回收模式, 政府减排补贴都会提升供应链中的减排水平和废旧品回收率, 这无疑是有利于供应链持续发展的。但是在政府补贴下, 产品批发价、零售价并不总是降低的。产品价格居高不下的原因是在回收成本较高时, 通过回收行为节约的成本会减少, 制造商、零售商会通过提升价格来弥补自身收益的减少。另外, 政府给予补贴使得减排水平提升, 消费者购买意愿增加, 需求变多, 这也是价格提升的原因之一。

4.2.2 s 对不同回收情形下利润(效用)的影响

由图 14~17 可知, 随着政府减排补贴系数 s 的提升, 制造商利润、零售商利润、第三方利润以及零售商(供应链)效用均会增加, 且在零售商回收情形下总是优于第三方回收情形下的。这进

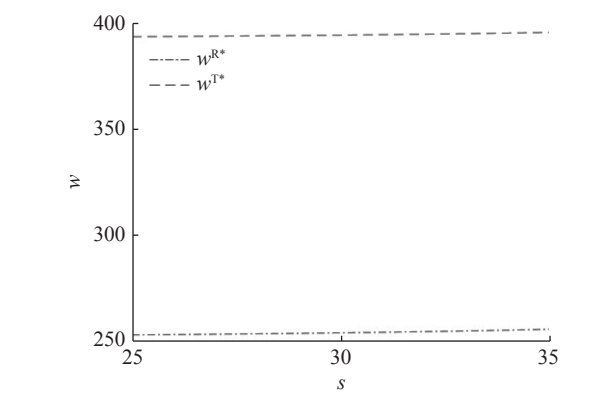


图 10 补贴系数对批发价的影响

Fig. 10 Impact of subsidy coefficients on wholesale prices

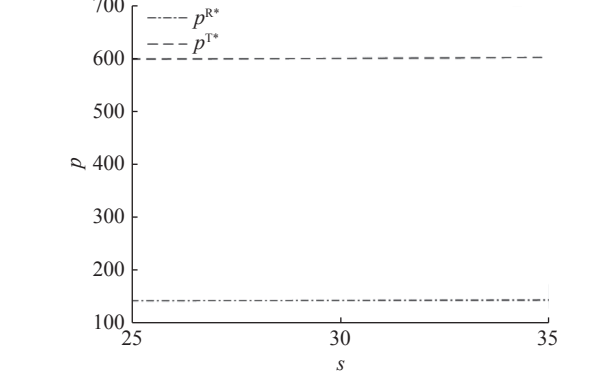


图 11 补贴系数对零售价的影响

Fig. 11 Impact of subsidy coefficients on retail prices

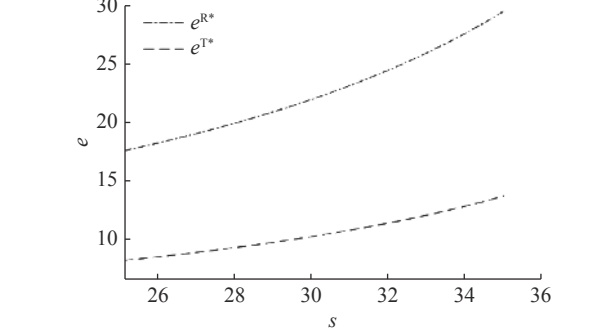


图 12 补贴系数对减排水平的影响

Fig. 12 Impact of subsidy coefficients on emission reduction levels

一步论证了性质 2, 4 和命题 4 的正确性。

图 14~17 进一步表明, 无论是何种回收模式, 政府减排补贴都会提升供应链中各成员的利润和零售商(供应链)效用, 这对供应链系统是有利的。这是因为政府的补贴降低了制造商的减排成本, 使其更有动力展开减排, 由此导致整个供应链受益。因此, 政府应该提供减排补贴, 鼓励制造商积极减排, 为供应链的持续发展提供保障。

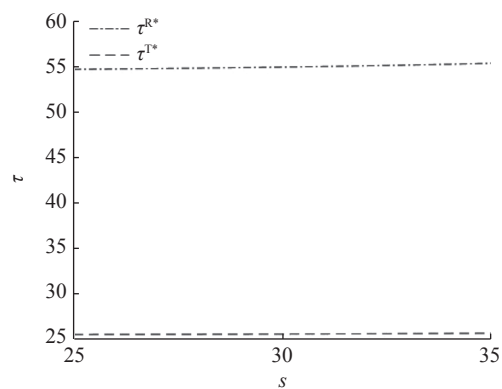


图 13 补贴系数对回收率的影响

Fig. 13 Impact of subsidy coefficients on recovery rates

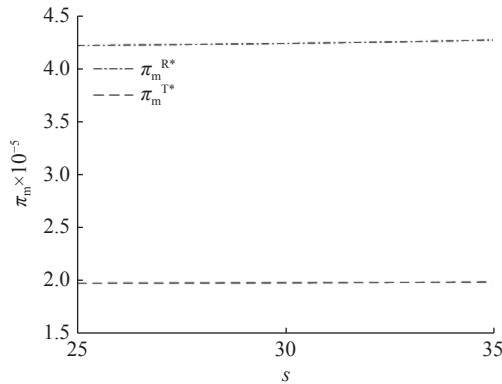


图 14 补贴系数对制造商利润的影响

Fig. 14 Impact of subsidy coefficients on manufacturers' profits

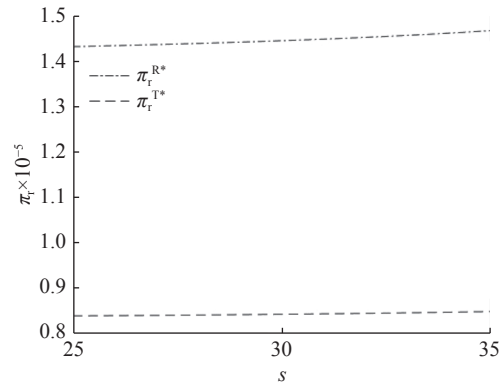


图 15 补贴系数对零售商利润的影响

Fig. 15 Impact of subsidy coefficients on retailer profits

4.3 θ 和 s 对不同回收情形下最优决策及利润的影响

进一步研究零售商 CSR 投入水平 θ 和政府减排补贴系数 s 共同对于供应链决策及利润的影响, 在其他系数不变的情况下, 令 $\theta \in [0.2, 0.6)$, $s \in [25, 35]$ 。

4.3.1 θ 和 s 对不同回收情形下最优决策的影响

由图 18 和 19 可以看出, 在零售商 CSR 投入

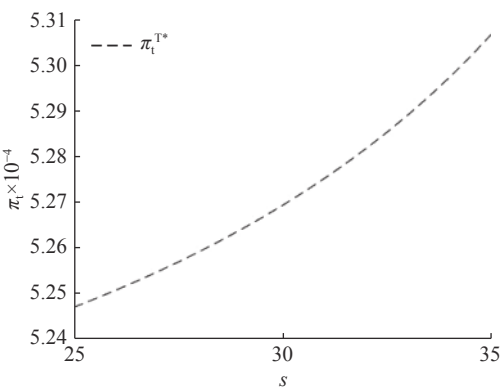


图 16 补贴系数对第三方利润的影响

Fig. 16 Impact of subsidy coefficients on third-party profits

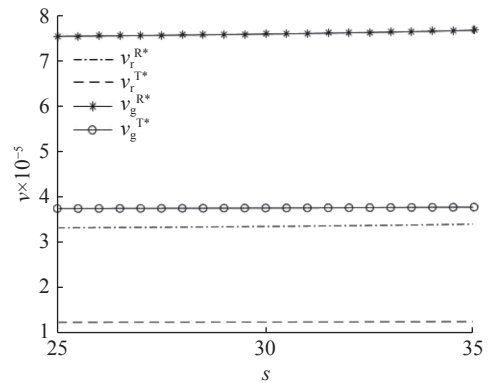


图 17 补贴系数对零售商(供应链)效用的影响

Fig. 17 Impact of subsidy coefficients on retailer (supply chain) utility

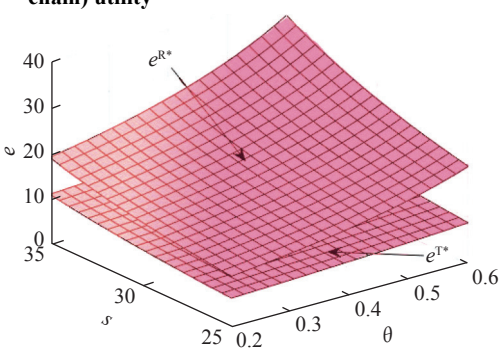


图 18 投入水平和补贴系数对减排水平的影响

Fig. 18 Impact of input levels and subsidy coefficients on emission reduction levels

水平 θ 和政府减排补贴系数 s 共同增加时, 减排水平和回收率均是提升的, 且在零售商回收模式下更优。这说明零售商 CSR 行为和政府减排补贴对减排水平和回收率有利, 即有利于供应链可持续发展。因此, 零售商应该努力践行 CSR。例如, 苏宁积极投身公益事业, 疫情期间, 第一时间成立防疫领导小组拨付专项基金用于急需物资捐助, 发挥全球供应链资源优势, 筹备并及时捐赠

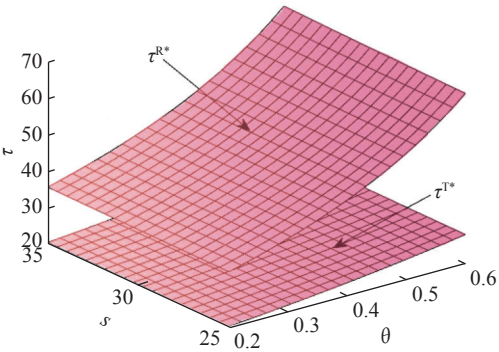


图 19 投入水平和补贴系数对回收率的影响

Fig. 19 Impact of input levels and subsidy coefficients on recovery rates

前方亟需的防疫物资。而政府要对积极减排的制造商给予补助以提升其减排水平。另外，零售商的 CSR 行为会使其声誉增加，促进消费者的购买，一定程度上促进了回收率的提升。而且零售商由于更接近消费者，所以其回收率高于第三方。为此，第三方企业应当做好相关工作，努力接近消费者，促进自身回收市场发展，降低回收成本。

4.3.2 θ 和 s 对不同回收情形下供应链效用的影响

由图 20 可见，零售商 CSR 投入水平 θ 和政府补贴系数 s 共同增加时供应链系统总效用增加，而零售商回收模式下的利润总是高于第三方回收的，说明零售商 CSR 行为和政府减排补贴对供应链有利。因此，零售商应当积极从事 CSR 行为并展开废旧品回收。而政府则应全面发挥财政补贴的导向作用，对有减排意愿却资金匮乏的制造商加大补贴力度，激励其积极采取减排措施，从而实现供应链的稳定发展和环境保护目标。而第三方回收企业应当投入回收技术研究，有效降低回收成本，提升自身竞争力，并与制造商、零售商

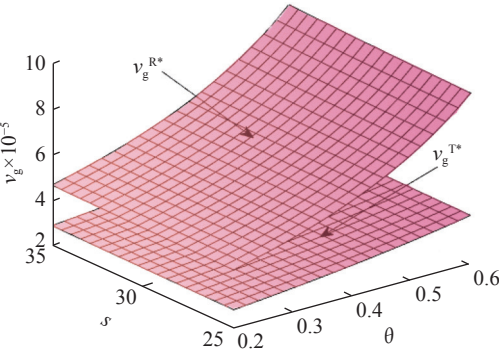


图 20 投入水平和补贴系数对供应链效用的影响

Fig. 20 Impact of input levels and subsidy coefficients on supply chain utility

形成合作联盟，提升供应链收益，为可持续发展事业贡献力量。

5 结 论

在零售商、第三方两种不同回收模式下，对比分析了零售商 CSR、政府补贴对供应链决策及利润的影响。结果显示：a. 两种回收模式下，随着零售商 CSR 投入水平提升，制造商减排、回收率、供应链成员利润及系统整体利润(效用)都会提升。产品零售价还会受到低碳偏好系数、减排成本系数、政府补贴系数和回收成本对回收率的敏感系数的影响，但是零售商自身利润可能因为 CSR 投入受到侵害。b. 两种回收模式下，政府减排补贴系数增加，制造商减排、废旧品回收、供应链各成员利润及供应链系统整体利润(效用)都会提升。但是产品批发价、零售价还会受回收成本对回收率的敏感系数和 CSR 投入水平的影响。c. 在政府减排补贴，零售商投入 CSR 下，无论是从降低产品零售价格、提升减排水平、提升废旧品回收率，还是从增加供应链成员利润及供应链整体利润(效用)的角度，零售商从事回收活动总是优于第三方回收的。

根据上述结论得出以下几条管理建议：a. 对于制造商，应积极投入减排，并向政府申请有关减排补贴，以此来提升减排技术增加消费者需求，使得整个供应链收益增加，提高所在供应链的稳定性，为“碳中和”目标的达成贡献力量。制造商还应当携手零售商做好废旧品的回收工作，在节约成本、增加收益的同时减少资源消耗和环境污染。b. 对于零售商，应积极履行社会责任，提高声誉，以此来增加自身和供应链系统利润。例如京东在扶贫、提供就业等方面积极投入吸引了消费者的青睐。零售商更应该积极投入到废旧品回收中去，争取降低回收成本，为自身增加收益的同时提升整个供应链的利润，实现供应链的可持续发展。c. 对于第三方，应该不断提升回收水平，以降低回收成本，提升自身及供应链的竞争力。例如爱回收与小米、华为等展开合作，并不断提升自身专业性，让回收更高效、安全。d. 对于政府，应当设置一定的减排补贴对积极减排但是资金匮乏的制造商给予帮助，以此来实现经济 and 环境的和谐发展，力求早日实现“碳中和”目

标。e. 对于消费者，应该形成低碳消费习惯，优先购买低碳产品，并且积极参与制造商、零售商等进行的回收活动，为可持续发展贡献个人力量。

本文主要分析的是在确定市场需求下政府补贴减排、零售商投入企业社会责任的供应链决策问题。因此，后续的研究可以考虑在随机需求下，政府多种补贴情况和供应链中多方投入企业社会责任的闭环供应链回收决策问题。

参考文献：

[1] 孙瑾, 陈晨, 陆娟. 资源稀缺对消费者绿色产品偏好的影响研究 [J]. *外国经济与管理*, 2023, 45(2): 82–99.

[2] 周晓阳, 陈可欣, 温浩宇, 等. 政府补贴下考虑零售商不同竞争行为的闭环供应链决策及合同选择 [J]. *中国管理科学*, 2022, 30(3): 176–188.

[3] GUO J Q, HE L, GEN M. Optimal strategies for the closed-loop supply chain with the consideration of supply disruption and subsidy policy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128: 886–893.

[4] SERVAES H, TAMAYO A. The impact of corporate social responsibility on firm value: the role of customer awareness[J]. *Management Science*, 2013, 59(5): 1045–1061.

[5] PANDA S, MODAK N M, CÁRDENAS-BARRÓN L E. Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 188: 11–21.

[6] SHU T, LIU Q, CHEN S, et al. Pricing decisions of CSR closed-loop supply chains with carbon emission constraints[J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4430.

[7] HOSSEINI-MOTLAGH S M, NOURI M, PAZARI P. Coordination of promotional effort, corporate social responsibility and periodic review replenishment decisions in a two-echelon socially responsible supply chain[J]. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2018, 11(3): 60–83.

[8] BISWAS I, RAJ A, SRIVASTAVA S K. Supply chain channel coordination with triple bottom line approach[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 115: 213–226.

[9] CHAI C C, XIAO T J. Wholesale pricing and evolutionarily stable strategy in duopoly supply chains with social responsibility[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2019, 28(1): 110–125.

[10] 许民利, 郭爽, 简惠云. 考虑企业社会责任和广告效应的闭环供应链决策 [J]. *管理学报*, 2019, 16(4): 615–623.

[11] 杨明歌, 李莹, 梁小珍. 基于微分博弈的供应链企业社会责任管理 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2022, 28(6): 1022–1037.

[12] 林志炳, 陈莫凡, 段梦媛. 考虑需求扰动及企业社会责任行为的绿色供应链决策 [J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(2): 638–649.

[13] 林欢, 马骋, 孙琦, 等. 企业社会责任下碳减排优化策略与协调机制研究 [J]. *运筹与管理*, 2021, 30(1): 29–35.

[14] LI H, WANG C X, SHANG M, et al. Pricing, carbon emission reduction, low-carbon promotion and returning decision in a closed-loop supply chain under vertical and horizontal cooperation[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(11): 1332.

[15] LI H, WANG C X, SHANG M, et al. Cooperative decision in a closed-loop supply chain considering carbon emission reduction and low-carbon promotion[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2019, 38(1): 143–153.

[16] 邢恩凤, 史成东, 闫秀霞, 等. 三维交易模式下企业协同低碳减排研究 [J]. *中国管理科学*, 2020, 28(3): 174–181.

[17] 王娜, 张玉林. 专利保护下闭环供应链碳减排及协调决策 [J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1378–1388.

[18] 王道平, 李小燕, 张博卿. 考虑政府碳排放奖惩的差别定价闭环供应链协调策略研究 [J]. *管理工程学报*, 2019, 33(1): 189–196.

[19] 李新军, 陈美娜, 达庆利. 碳交易视角下政府管制的汽车制造企业闭环供应链优化决策 [J]. *管理评论*, 2020, 32(5): 269–279.

[20] WANG Y Y, FAN R J, SHEN L, et al. Recycling decisions of low-carbon e-commerce closed-loop supply chain under government subsidy mechanism and altruistic preference[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120883.

[21] 曹细玉, 张杰芳. 碳减排补贴与碳税下的供应链碳减排决策优化与协调 [J]. *运筹与管理*, 2018, 27(4): 57–61.

[22] 李冬冬, 杨晶玉. 基于政府补贴的企业最优减排技术选择研究 [J]. *中国管理科学*, 2019, 27(7): 177–184.

[23] 梁喜, 魏光何. 不同 CSR 投入下闭环供应链回收与减排决策 [J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(12): 3991–4008.

[24] 林志炳, 鲍蕾. 企业社会责任对供应链减排决策及政府补贴效率的影响研究 [J]. *中国管理科学*, 2021, 29(11): 111–121.

(编辑：丁红艺)