

控制与决策

Control and Decision

双重补贴下考虑低碳商誉的供应链决策和协调

朱晨, 马静, 李翠

引用本文:

朱晨, 马静, 李翠. 双重补贴下考虑低碳商誉的供应链决策和协调[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3261–3270.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0121>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略

Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy

控制与决策. 2021, 36(7): 1763–1770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1536>

大数据服务商参与下供应链联合减排的动态协调策略

Dynamic coordination strategy of joint emission reduction in supply chain involving big data service provider

控制与决策. 2021, 36(8): 2013–2022 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1560>

考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策

Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility

控制与决策. 2021, 36(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1102>

不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

控制与决策. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior

控制与决策. 2021, 36(7): 1723–1731 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

双重补贴下考虑低碳商誉的供应链决策和协调

朱晨, 马静[†], 李犇

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 考虑低碳和回收补贴政策, 对供应链中上游制造商碳减排和再制造, 下游零售商低碳宣传共同提高产品低碳商誉的现实问题展开分析. 将低碳商誉水平作为状态变量, 构建非协同和协同情形下的微分博弈模型. 通过对比分析, 设计利润共享-低碳宣传成本共担的协调机制. 研究表明: 各情形下的低碳商誉水平都会随着时间逐渐达到稳定状态; 双重补贴不仅能够激励制造商的低碳行为, 还能有效提高产品低碳商誉和成员绩效, 但是不会影响零售商的低碳宣传水平; 非协同情形导致供应链效率的损失, 协调时保持低碳宣传成本分担比例高于利润分享比例可有效改善低碳商誉水平. 此外, 制造商适当提高其成本分担比例有利于成员利润的改善.

关键词: 碳减排; 再制造; 微分博弈; 补贴政策; 低碳商誉

中图分类号: F274 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0121

引用格式: 朱晨, 马静, 李犇. 双重补贴下考虑低碳商誉的供应链决策和协调[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3261-3270.

Decisions and coordination of supply chain considering low-carbon reputation and dual subsidy policies

ZHU Chen, MA Jing[†], LI Jiangu

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Under the context of low-carbon, upstream manufacturers and downstream retailers work together to improve the low-carbon reputation. Considering low-carbon and recycling subsidies, differential game models are constructed under decentralized and centralized cases by taking the level of low-carbon reputation as a state variable. Through comparison analysis, a profit-expense sharing contract is designed to improve the efficiency of the supply chain. The result shows that, 1) In each case, the level of low-carbon reputation increases with time and gradually reaches a stable state. 2) Dual subsidy policies not only encourage the manufacturer's low-carbon behaviors, but also contribute to the low-carbon reputation and member's profit. However, the retailer's low carbon publicity level will not be affected. 3) The decentralized case leads to the loss of supply chain efficiency, and keeping the manufacturer's profit-sharing ratio lower than the cost-sharing ratio can improve low-carbon reputation after coordination. In addition, the manufacturer sharing more low-carbon publicity costs can improve the profits of supply chain members when meeting conditions.

Keywords: carbon emission reduction; remanufacturing; differential game; subsidy policy; low-carbon reputation

0 引言

近年来, 全球变暖等气候污染问题给社会发展带来了严重的危害, 各国达成共识并严格控制二氧化碳等温室气体的排放. 根据报告显示, 我国2018年碳排放强度只有2005年的54.2%, 并计划在“十四五”期间继续加强碳排放管控. 随着“碳达峰”和“碳中和”目标的提出, 低碳发展成为未来我国经济发展关注的重点. 在新发展阶段, 供应链是培育我国经济增长新

动能的重要领域, 而供应链中的采购、生产和运输活动是碳排放的主要来源^[1]. 因此, 如何实现供应链低碳发展是企业 and 政府亟需解决的重要问题.

为了应对严峻的低碳挑战, 投入低碳技术进行碳减排和回收再利用废旧产品是两种主要减排方式^[2-3]. 为了更好地实现减排效果, 企业往往会同时采用上述两种方式. 如格力公司不仅投入研发低碳技术和使用节能生产设备, 还建立了绿色再生再制造

收稿日期: 2022-01-17; 录用日期: 2022-05-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72174086); 国家社会科学基金项目(20ZDA092).

责任编委: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: majing5525@126.com.

基地. 企业通过低碳技术和回收再制造能够有效控制碳排放,但是需要大量资金的投入,导致其运营成本大幅提高. 因此,政府通常会设立各类补贴政策激励企业的碳减排行为. 如我国颁布的《废弃电器电子产品处理基金补贴标准》和《节能减排补助资金管理暂行办法》等文件明确规定了对企业回收再制造和碳减排行为进行补贴. 本文正是立足这样的现实政策背景,考虑了低碳和回收补贴政策,即双重补贴政策.

与此同时,随着低碳偏好的逐渐增强^[4-5],消费者更倾向于购买低碳产品. 为了让消费者更好地了解产品的低碳信息,不仅需要制造商在生产环节付出减排努力,还需要零售商通过低碳宣传进一步塑造和提高产品的低碳商誉水平,以此引导低碳购买行为. 如格力生产出低碳家电后,苏宁等零售商会积极宣传其低排放和高能效的特点. 这种上下游企业共同努力提高产品低碳商誉的联合减排模式,在低碳供应链中普遍存在. 目前,无论是政府补贴政策,还是供应链联合减排模式,均是实现供应链低碳发展的重要途径. 将两者结合展开研究,对于促进我国供应链低碳发展具有重要参考和现实意义. 此外,考虑到企业经营往往跨越多个周期,且产品低碳商誉的形成是一个长期过程. 因此,考虑双重补贴政策,本文借助微分博弈从动态视角研究供应链中上下游企业通过碳减排、回收再制造和低碳宣传共同提高产品低碳商誉水平的现实问题,旨在为政府政策制定和低碳供应链发展提供理论依据和科学参考.

与本文相关的文献主要有两类,一类是政府补贴政策下的低碳供应链研究,多集中于低碳补贴政策对企业减排决策的影响. Cheng等^[6]研究了低碳门槛补贴政策对汽车行业中企业不同减排和生产策略的影响. Li等^[7]分析了固定绿色技术补贴和按照减排量补贴方式对企业低碳技术投入和总碳减排量的影响. Cao等^[8]研究了碳交易政策和低碳补贴对制造商生产和碳减排水平的影响. 此外,部分学者讨论了再制造补贴对企业减排决策的影响. Zhu等^[9]比较了再制造补贴和碳税政策对供应链中新产品和再制品需求和碳排放量的影响. Wang等^[10]研究了再制造补贴和利他主义偏好对低碳闭环供应链决策的影响,发现政府补贴能够提高供应链整体运行效率和社会总剩余. Wang等^[11]分析了碳交易政策、再制造补贴和惩罚政策对多周期供应链系统中碳排放策略和利润的影响,发现制造商可从再制造补贴政策中获益,而碳交易价格的提高会损害其利润. 以上文献侧重于研究政府单一补贴政策对供应链减排决策的影响,

虽然部分文献^[8-9,11]将补贴政策与其他政策相结合,但是均未能同时考虑双重补贴政策和企业不同的减排方式. 另一类与本文相关的研究是供应链中上下游企业的联合减排决策. 基于微分博弈方法,部分学者考虑将碳减排量作为状态变量. 其中,赵道致等^[12]分析二级供应链中的动态联合减排问题,得到了产品碳排放量的最优轨迹. 王道平等^[13]研究了政府补贴对集中和分散情形下供应商和制造商联合减排的影响. Wang等^[14]考虑碳交易政策和低碳偏好,分析了不同合作模式下的供应链微分博弈最优解. 与上述文献不同,本文将产品商誉作为状态变量展开分析. 叶欣等^[15]讨论了双渠道供应链中上下游联合减排的均衡解,发现产品商誉轨迹随时间变化呈现多变性. 进一步地,徐春秋等^[16]将低碳商誉水平作为状态变量,构建了政府不同参与模式下的模型来分析不同干预方式对制造商减排和零售商低碳宣传的影响. Liu等^[17]研究了消费者低碳参考水平对产品低碳商誉和碳减排的影响. 在供应链上下游联合减排研究中,少数文献关注了低碳商誉水平的动态变化过程^[16-17]以及政府低碳补贴政策^[13,16],但是均没有考虑政府再制造补贴政策以及企业再制造对低碳商誉水平的影响.

通过文献梳理,目前关于补贴政策和联合减排的研究取得了丰硕的成果,然而,暂未有文献将双重补贴政策和产品低碳商誉的动态变化同时纳入低碳供应链中,在动态框架中研究供应链上下游企业的联合减排问题. 与现有文献相比,本文内容为: 1) 从供应链实际出发,不仅考虑制造商同时实施碳减排和回收再制造,还考虑政府双重补贴政策的影响; 2) 将低碳商誉水平作为状态变量,考虑制造商碳减排和再制造、零售商低碳宣传对低碳商誉的影响; 3) 从动态角度研究低碳供应链中上下游企业的协调问题,并给出协调参数的合理区间.

1 问题描述和基本假设

图1为由一个主导制造商和一个零售商组成的

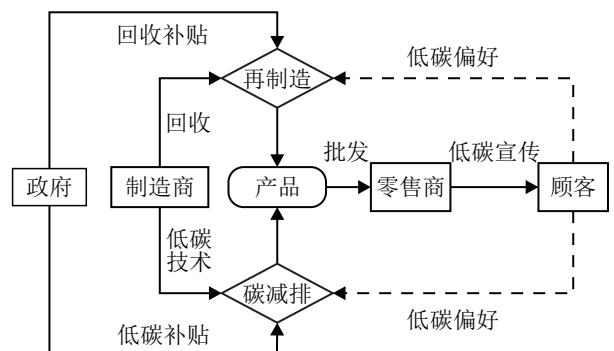


图1 双重补贴规制下的供应链模型

二级供应链系统. 在双重补贴政策 and 顾客低碳偏好的影响下, 上游制造商通过低碳技术回收再制造来减少生产过程的碳排放. 此外, 为了进一步提升产品的低碳商誉水平和引导顾客低碳消费, 下游零售商对产品进行低碳宣传. 同时提出以下假设.

假设 1 再制品通过处理技术可达到与全新产品相同的质量和性能^[2], 两者以相同的价格批发和出售. 假设产品批发价格为 W , 零售商销售价格为 P . 不失一般性, 假设 W 和 P 均为常数^[14,16], 其原因为: 消费者通过互联网很容易获取产品价格信息, 盲目地自主定价会使得企业失去市场竞争力, 企业往往会被动接受市场价格, 自主调整空间较少.

假设 2 假设生产单位新产品和再制品的成本分别为 C_n 和 C_r , 满足 $C_n > C_r$ ^[2]. 为了简化计算结果, 制造商回收单位废旧产品节约的边际成本可表示为

$$\pi_1 = C_n - C_r > 0,$$

批发单位产品获得的边际利润可表示为

$$\pi_2 = W - C_n > 0,$$

零售商出售单位产品获得的边际利润可表示为

$$\pi_3 = P - W > 0,$$

其中 $\pi_i (i = 1, 2, 3)$ 均为常数. 此外, 根据政府补贴政策, 政府对制造商回收再制造单位废旧产品给予 B 的补贴, 对制造商单位碳减排量给予 B_1 的补贴.

假设 3 借鉴成本的凸性特征^[18], 假设制造商的碳减排成本为 $kE^2(t)/2$. 其中: k 为碳减排成本系数, $E(t)$ 为制造商在 t 时刻的碳减排量. 制造商的回收成本为 $s\tau^2(t)/2$. 其中: s 为回收成本系数, $\tau(t)$ 为制造商在 t 时刻的回收努力程度. 零售商的低碳宣传成本为 $he^2(t)/2$. 其中: h 为宣传努力成本系数, $e(t)$ 为零售商在 t 时刻的低碳宣传努力程度.

假设 4 考虑到制造商的碳减排、回收和零售商低碳宣传行为均有利于提升产品低碳商誉水平, 结合 Nerlove-Arrow 商誉模型^[19], 低碳商誉水平的动态变化过程可刻画为

$$\dot{g}(t) = \alpha E(t) + \beta \tau(t) + \gamma e(t) - \delta g(t). \quad (1)$$

其中: $g(t)$ 为低碳商誉水平, $\alpha > 0$ 为制造商碳减排对低碳商誉水平的影响系数, $\beta > 0$ 为制造商回收努力程度对低碳商誉水平的影响系数, $\gamma > 0$ 为零售商低碳宣传努力程度对低碳商誉水平的影响系数, $\delta > 0$ 为低碳商誉水平的自然衰减系数. 假设初始时刻的低碳商誉水平为 $g(0) = a$.

假设 5 除价格外, 碳减排、回收再制造和低碳宣传均会通过改变低碳商誉水平而间接影响产品的需求^[17]. 假设需求函数是关于产品价格和低碳商誉水平的线性函数^[20], 可表示为

$$D(t) = Q - P(t) + bg(t),$$

其中 $P(t)$ 为固定常数. 因此以 $\mu = Q - P > 0$ 表征初始时刻的产品需求量. 需求函数可改写为

$$D(t) = \mu + bg(t),$$

其中 $b > 0$ 为消费者对低碳商誉水平的敏感系数, 反映了消费者的低碳偏好程度.

假设 6 参考文献^[21], 假设废旧产品回收数量为关于制造商回收努力的线性函数, 即

$$D_1 = \tau(t)\theta,$$

其中 $\theta > 0$ 为回收努力影响系数. 该函数表明制造商回收努力程度越高, 其回收的废旧产品数量越多.

2 模型求解与分析

2.1 非协同情形(情形 L)

供应链实践中, 供应链成员往往独立决策, 追求自身利益最大化. 首先构建了非协同情形下的微分博弈模型, 遵循 Stackelberg 博弈, 决策过程中制造商首先确定自身的碳减排量和回收努力程度, 然后零售商决定其低碳宣传努力程度. 以下标 m 和 r 分别表示制造商和零售商, 上标 L 表示非协同情形. 制造商和零售商的目标是在连续时间内找到最优决策使得利润函数贴现值最大化. 假设贴现率均为 $\rho > 0$, 两者的利润泛函可表示为

$$\max_{\tau, E} J_m^L = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ D(t)\pi_2 + \theta\tau(t)(\pi_1 + B) + B_1 E(t) - \frac{1}{2}s\tau^2(t) - \frac{1}{2}kE^2(t) \right\} dt, \quad (2)$$

$$\max_e J_r^L = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ D(t)\pi_3 - \frac{1}{2}he^2(t) \right\} dt. \quad (3)$$

其中: 制造商利润由产品批发收入、再制造节约的成本、政府补贴以及回收、碳减排成本构成, 零售商利润由产品销售收入以及低碳宣传成本构成.

命题 1 情形 L 下, 供应链均衡解如下.

1) 低碳商誉水平的最优轨迹为

$$g^{L*}(t) = e^{-\delta t} \left(a - \frac{A}{\delta} \right) + g^L,$$

其中

$$g^L = \frac{\alpha^2 b \pi_2}{k \delta (\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k \delta} + \frac{\theta \beta (\pi_1 + B)}{\delta s} + \frac{\beta^2 b \pi_2}{s \delta (\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 b \pi_3}{h \delta (\rho + \delta)}.$$

2) 制造商和零售商最优解为

$$E^L = \frac{\alpha b \pi_2}{k(\rho + \delta)} + \frac{B_1}{k},$$

$$e^L = \frac{\gamma b \pi_3}{h(\rho + \delta)},$$

$$\tau^L = \frac{\theta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta b \pi_2}{s(\rho + \delta)}.$$

3) 制造商和零售商的最优利润为

$$J_r^L = e^{-\rho t}(z_1^*g + u_1^*),$$

$$J_m^L = e^{-\rho t}(z_2^*g + u_2^*).$$

其中

$$z_1^* = \frac{b\pi_3}{\rho + \delta},$$

$$z_2^* = \frac{b\pi_2}{\rho + \delta},$$

$$u_1^* = \frac{\mu\pi_3}{\rho} - \frac{\gamma^2}{2h\rho} \left(\frac{b\pi_3}{\rho + \delta} \right)^2 + \frac{b\pi_3}{\rho(\rho + \delta)} \times$$

$$\left[\frac{\alpha^2 b\pi_2}{k(\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\theta\beta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta^2 b\pi_2}{s(\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 b\pi_3}{h(\rho + \delta)} \right],$$

$$u_2^* = \frac{\mu\pi_2}{\rho} + \frac{\theta}{\rho} \left[\frac{\theta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta b\pi_2}{s(\rho + \delta)} \right] (\pi_1 + B) +$$

$$\frac{B_1}{\rho} \left(\frac{\alpha b\pi_2}{k(\rho + \delta)} + \frac{B_1}{k} \right) - \frac{s}{2\rho} \left[\frac{\theta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta b\pi_2}{s(\rho + \delta)} \right]^2 - \frac{k}{2\rho} \left(\frac{\alpha b\pi_2}{k(\rho + \delta)} + \frac{B_1}{k} \right)^2 +$$

$$\frac{b\pi_2}{\rho(\rho + \delta)} \left[\frac{\alpha^2 b\pi_2}{k(\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\theta\beta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta^2 b\pi_2}{s(\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 b\pi_3}{h(\rho + \delta)} \right].$$

证明 运用逆向推导法进行求解,根据最优控制理论和贝尔曼动态规划理论,省略时间 t ,根据式(3)构建零售商的最优HJB方程为

$$\rho V_r^L = \max_e \left\{ (\mu + bg)\pi_3 - \frac{1}{2}he^2 + \frac{\partial V_r^L}{\partial g}(\alpha E + \beta\tau + \gamma e - \delta g) \right\}. \quad (4)$$

其中 V_r^L 为情形 L 下零售商的最优值函数,表示零售商长期利润由当前时期的直接收益和低碳商誉水平变化产生的间接收益构成.由式(4)得到

$$\frac{\partial^2 \rho V_r^L}{\partial e^2} = -h < 0,$$

因此式(4)为凹函数,存在最大值.根据一阶最优性条件得到零售商的最优反应函数为

$$e^L = \frac{\gamma}{h} \frac{\partial V_r^L}{\partial g}. \quad (5)$$

然后构建制造商的最优HJB方程为

$$\rho V_m^L = \max_{\tau, E} \left\{ (\mu + bg)\pi_2 + \theta\tau(\pi_1 + B) + B_1 E - \frac{1}{2}s\tau^2 - \frac{1}{2}kE^2 + \frac{\partial V_m^L}{\partial g}(\alpha E + \beta\tau + \gamma e - \delta g) \right\}. \quad (6)$$

其中 V_m^L 为情形 L 下制造商的最优值函数,表示制造

商长期利润由当前时期的直接收益和低碳商誉水平变化产生的间接收益构成.将式(5)代入(6),可求解目标函数关于变量 τ, E 的海塞矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} -k & 0 \\ 0 & -s \end{bmatrix}.$$

易证明式(6)为关于其变量的凹函数,根据一阶最优性条件得到制造商的最优决策为

$$E^L = \frac{\alpha}{k} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} + \frac{B_1}{k},$$

$$\tau^L = \frac{\theta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta}{s} \frac{\partial V_m^L}{\partial g}. \quad (7)$$

将式(5)和(7)代入式(4)和(6),得到

$$\rho V_r^L = (\mu + bg)\pi_3 - \frac{\gamma^2}{2h} \left(\frac{\partial V_r^L}{\partial g} \right)^2 + \frac{\partial V_r^L}{\partial g} \left(\frac{\alpha^2}{k} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} + \frac{\theta\beta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\beta^2}{s} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} + \frac{\gamma^2}{h} \times \frac{\partial V_r^L}{\partial g} - \delta g \right), \quad (8)$$

$$\rho V_m^L = (\mu + bg)\pi_2 + \theta \left[\frac{\theta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta}{s} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} \right] \times (\pi_1 + B) - \frac{1}{2}s \left(\frac{\theta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta}{s} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} \right)^2 + B_1 \left(\frac{\alpha}{k} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} + \frac{B_1}{k} \right) - \frac{1}{2}k \left(\frac{\alpha}{k} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} + \frac{B_1}{k} \right)^2 + \frac{\partial V_m^L}{\partial g} \left(\frac{\alpha^2}{k} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\theta\beta(\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta^2}{s} \times \frac{\partial V_m^L}{\partial g} + \frac{\gamma^2}{h} \frac{\partial V_r^L}{\partial g} - \delta g \right). \quad (9)$$

根据式(8)和(9)的结构特点,制造商和零售商的值函数关于 g 的线性解析式可分别假设为

$$V_r^L = z_1 g + u_1,$$

$$V_m^L = z_2 g + u_2.$$

对 g 求偏导,得到

$$\frac{\partial V_r^L}{\partial g} = z_1,$$

$$\frac{\partial V_m^L}{\partial g} = z_2.$$

然后通过待定系数法可求得各系数的值.成员的最优值函数分别为

$$V_r^L = z_1^* g + u_1^*,$$

$$V_m^L = z_2^* g + u_2^*. \quad (10)$$

将式(10)代入(5)和(7),得到命题1中零售商和制造商的最优解.将最优解代入状态转移方程(1),得到

$$\dot{g}(t) = \frac{\alpha^2 b \pi_2}{k(\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\theta \beta (\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta^2 b \pi_2}{s(\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 b \pi_3}{h(\rho + \delta)} - \delta g(t).$$

令

$$A = \frac{\alpha^2 b \pi_2}{k(\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\theta \beta (\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta^2 b \pi_2}{s(\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 b \pi_3}{h(\rho + \delta)},$$

根据初始低碳商誉水平 $g(0) = a$, 得到低碳商誉的最优轨迹 $g^{L*}(t)$ (下文命题2和命题5证明类似, 限于篇幅不再赘述). \square

2.2 协同情形(情形C)

构建协同情形下的微分博弈模型, 该情形下制造商和零售商不再追求自身利益的最大化, 而是联合起来从供应链整体出发实现其利润最大化, 可视为集中决策情形. 以上标 C 表示协同情形, 供应链成员的目标是在连续时间内找到最优决策使得供应链整体利润函数贴现值最大化. 假设贴现率同样为 $\rho > 0$, 供应链的利润泛函为

$$\max_{\tau, E, e} J^C = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ D(t)(\pi_2 + \pi_3) + (\pi_1 + B)\theta\tau(t) + B_1 E(t) - \frac{1}{2} s \tau^2(t) - \frac{1}{2} k E^2(t) - \frac{1}{2} h e^2(t) \right\} dt.$$

命题2 情形C下, 供应链均衡解如下.

1) 低碳商誉水平的最优轨迹为

$$g^{C*}(t) = e^{-\delta t} \left(a - \frac{A1}{\delta} \right) + g^C,$$

其中

$$g^C = \frac{\alpha^2 b (\pi_2 + \pi_3)}{k \delta (\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k \delta} + \frac{\theta \beta (\pi_1 + B)}{s \delta} + \frac{\beta^2 b (\pi_2 + \pi_3)}{s \delta (\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 b (\pi_2 + \pi_3)}{h \delta (\rho + \delta)}.$$

2) 供应链成员最优解为

$$e^C = \frac{\gamma b (\pi_2 + \pi_3)}{h (\rho + \delta)},$$

$$E^C = \frac{\alpha b (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \frac{B_1}{k},$$

$$\tau^C = \frac{\theta (\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)}.$$

3) 供应链整体最优利润为

$$J^C = e^{-\rho t} (z_3^* g + u_3^*).$$

其中

$$z_3^* = \frac{b (\pi_2 + \pi_3)}{\rho + \delta},$$

$$u_3^* = \frac{\mu (\pi_2 + \pi_3)}{\rho} + \frac{\theta}{\rho} \left[\frac{\theta (\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)} \right] \times (\pi_1 + B) + \frac{B_1}{\rho} \left(\frac{\alpha b (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \frac{B_1}{k} \right) - \frac{s}{2\rho} \left[\frac{\theta (\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)} \right]^2 - \frac{k}{2\rho} \left(\frac{\alpha b (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \frac{B_1}{k} \right)^2 - \frac{\gamma^2}{2h\rho} \left(\frac{b (\pi_2 + \pi_3)}{\rho + \delta} \right)^2 + \frac{b (\pi_2 + \pi_3)}{\rho (\rho + \delta)} \times \left[\frac{\alpha^2 b (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\theta \beta (\pi_1 + B)}{s} + \frac{\beta^2 b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 b (\pi_2 + \pi_3)}{h (\rho + \delta)} \right].$$

2.3 对比分析

通过比较命题1与命题2的结论, 得到以下命题.

命题3 1) 无限时长内, 非协同/协同情形下的低碳商誉水平是全局稳定的. 2) 协同情形下碳减排量、回收努力以及低碳宣传水平均高于非协同情形. 3) 两种情形下碳减排量(回收努力程度)与低碳补贴(回收补贴)呈正相关, 且低碳宣传水平与政府的双重补贴均无关. 4) 当低碳商誉水平达到稳态时, 协同情形下供应链总利润优于非协同情形下供应链总利润.

证明 由于自然衰减系数 $\delta > 0$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e^{-\delta t} = 0$, 两种情形下的低碳商誉水平分别为

$$g^{L*}(t = \infty) = g^L,$$

$$g^{C*}(t = \infty) = g^C,$$

命题3的1)得证.

$$E^C - E^L = \frac{\alpha b \pi_3}{k (\rho + \delta)} > 0,$$

$$\tau^C - \tau^L = \frac{\beta b \pi_3}{s (\rho + \delta)} > 0,$$

$$e^C - e^L = \frac{\gamma b \pi_2}{h (\rho + \delta)} > 0,$$

命题3的2)得证. 命题3的3)求偏导易得, 不再赘述.

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 非协同情形下供应链整体利润为

$$J^L = J_m^L + J_r^L = z_2^* g^L + u_2^* + z_1^* g^L + u_1^*,$$

协同情形下供应链整体利润为

$$J^C = z_3^* g^C + u_3^*,$$

作差得到 $J^C > J^L$. \square

命题4 无限时长内, 协同情形下的低碳商誉 g^C 优于非协同情形下的低碳商誉 g^L , 且两种情形间的低碳商誉水平差异与两种补贴政策均无关.

证明 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 情形L和情形C中的低碳商誉稳定值分别为 g^L 和 g^C , 作差得到

$$g^C - g^L = \frac{\alpha^2 b \pi_3}{k \delta (\rho + \delta)} + \frac{\beta^2 b \pi_3}{s \delta (\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 b \pi_2}{h \delta (\rho + \delta)} > 0,$$

可发现结果与政府补贴 B 和补贴 B_1 均无关. \square

命题3和命题4表明: 1) 非协同情形下存在双重边际效应, 供应链的整体效率处于较低水平; 2) 补贴政策虽然可有效激励制造商减排和回收行为, 但是均不会影响零售商的低碳宣传水平; 3) 两种情形间的低碳商誉水平差异不会受到政府补贴规制的影响, 因此仅靠政府补贴难以有效改善非协同情形下的供应链运作效率, 必须建立相应的供应链协调机制.

3 协调机制情形(情形Z)

利润共享-成本共担机制是供应链常用的一种协调手段^[17], 本文同样借鉴其思想进行供应链协调, 设计了利润共享-低碳宣传成本共担的协调方式. 零售商低碳宣传可有效提高产品低碳商誉水平, 因此制造商愿意承担部分零售商低碳宣传成本, 假设制造商承担低碳宣传成本的比例为 σ . 与此同时, 制造商和零售商以 φ 和 $1 - \varphi$ 的比例共同分享产品销售总利润 $[\mu + bg(t)](\pi_2 + \pi_3)$. 协调后, 零售商和制造商的利润泛函为

$$\begin{aligned} \max_{\tau, E} J_m^Z &= \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ \varphi[\mu + bg(t)](\pi_2 + \pi_3) + \theta \tau(t) \times \right. \\ &\quad \left. (\pi_1 + B) + B_1 E(t) - \frac{1}{2} s \tau^2(t) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} k E^2(t) - \frac{1}{2} \sigma h e^2(t) \right\} dt, \\ \max_e J_r^Z &= \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ (1 - \varphi)[\mu + bg(t)](\pi_2 + \pi_3) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} (1 - \sigma) h e^2(t) \right\} dt. \end{aligned}$$

命题5 情形Z下, 供应链均衡解如下.

1) 低碳商誉水平的最优轨迹为

$$g^{Z*}(t) = e^{-\delta t} \left(a - \frac{A2}{\delta} \right) + g^Z,$$

其中

$$g^Z = \frac{\alpha^2 b \varphi (\pi_2 + \pi_3)}{k \delta (\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k \delta} + \frac{\theta \beta (\pi_1 + B)}{\delta s} + \frac{\beta^2 \varphi b (\pi_2 + \pi_3)}{s \delta (\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 (1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{h \delta (1 - \sigma) (\rho + \delta)}.$$

2) 供应链成员最优解为

$$E^Z = \frac{\alpha b \varphi (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \frac{B_1}{k},$$

$$e^Z = \frac{\gamma (1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{h (1 - \sigma) (\rho + \delta)},$$

$$\tau^Z = \frac{\theta (\pi_1 + B)}{s} + \frac{\varphi \beta b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)}.$$

3) 制造商和零售商的最优利润为

$$J_r^Z = e^{-\rho t} (z_4^* g + u_4^*),$$

$$J_m^Z = e^{-\rho t} (z_5^* g + u_5^*).$$

其中

$$z_4^* = \frac{(1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{\rho + \delta},$$

$$z_5^* = \frac{\varphi b (\pi_2 + \pi_3)}{\rho + \delta},$$

$$\begin{aligned} u_4^* &= \frac{(1 - \varphi) \mu (\pi_2 + \pi_3)}{\rho} - \frac{\gamma^2 (1 - \sigma)}{2 h \rho} \times \\ &\quad \left[\frac{(1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{(1 - \sigma) (\rho + \delta)} \right]^2 + \frac{(1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{\rho (\rho + \delta)} \times \\ &\quad \left[\frac{\alpha^2 b \varphi (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\theta \beta (\pi_1 + B)}{s} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta^2 \varphi b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 (1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{h (1 - \sigma) (\rho + \delta)} \right], \end{aligned}$$

$u_5^* =$

$$\begin{aligned} &\frac{\varphi \mu (\pi_2 + \pi_3)}{\rho} + \frac{\theta}{\rho} \left[\frac{\theta (\pi_1 + B)}{s} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\varphi \beta b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)} \right] (\pi_1 + B) + \frac{B_1}{\rho} \left[\frac{\alpha b \varphi (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \right. \\ &\quad \left. \frac{B_1}{k} \right] - \frac{s}{2 \rho} \left[\frac{\theta (\pi_1 + B)}{s} + \frac{\varphi \beta b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)} \right]^2 - \\ &\quad \frac{k}{2 \rho} \left[\frac{\alpha b \varphi (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \frac{B_1}{k} \right]^2 - \\ &\quad \frac{\gamma^2 \sigma}{2 h \rho} \left[\frac{(1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{(1 - \sigma) (\rho + \delta)} \right]^2 + \frac{\varphi b (\pi_2 + \pi_3)}{\rho (\rho + \delta)} \times \\ &\quad \left[\frac{\alpha^2 b \varphi (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} + \frac{\alpha B_1}{k} + \frac{\theta \beta (\pi_1 + B)}{s} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta^2 \varphi b (\pi_2 + \pi_3)}{s (\rho + \delta)} + \frac{\gamma^2 (1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{h (1 - \sigma) (\rho + \delta)} \right]. \end{aligned}$$

命题6 1) 当满足 $\frac{\pi_2}{\pi_2 + \pi_3} < \varphi < \frac{\pi_2 + \sigma \pi_3}{\pi_2 + \pi_3}$ 时, 供应链均衡解较协调前得到提高; 2) 碳减排量和回收努力程度与 φ 呈正相关, 低碳宣传努力程度与 σ 呈正相关, 与 φ 呈负相关; 3) 协调后的减排量和回收努力程度始终低于协同情形, 当满足 $\sigma > \varphi$ 时, 协调后的低碳宣传水平优于协同情形的最优解.

证明

$$\tau^Z - \tau^L = \frac{\beta b [\varphi (\pi_2 + \pi_3) - \pi_2]}{s (\rho + \delta)},$$

$$E^Z - E^L = \frac{\alpha b [\varphi (\pi_2 + \pi_3) - \pi_2]}{k (\rho + \delta)} > 0,$$

$$e^Z - e^L = \frac{\gamma (1 - \varphi) b (\pi_2 + \pi_3)}{h (1 - \sigma) (\rho + \delta)} - \frac{\gamma b \pi_3}{h (\rho + \delta)},$$

易证命题6的1). 求偏导

$$\frac{\partial E^Z}{\partial \varphi} = \frac{\alpha b (\pi_2 + \pi_3)}{k (\rho + \delta)} > 0,$$

$$\frac{\partial \tau^Z}{\partial \varphi} = \frac{\beta b(\pi_2 + \pi_3)}{s(\rho + \delta)} > 0,$$

$$\frac{\partial e^Z}{\partial \sigma} = \frac{\gamma(1 - \varphi)b(\pi_2 + \pi_3)}{[h(1 - \sigma)(\rho + \delta)]^2} > 0,$$

命题6的2)得证.

$$\tau^Z - \tau^C = \frac{(\varphi - 1)\beta b(\pi_2 + \pi_3)}{s(\rho + \delta)} < 0,$$

$$E^Z - E^C = \frac{\alpha b(\varphi - 1)(\pi_2 + \pi_3)}{k(\rho + \delta)} < 0,$$

$$e^Z - e^C = \frac{\gamma(\sigma - \varphi)b(\pi_2 + \pi_3)}{h(1 - \sigma)(\rho + \delta)},$$

当 $\sigma > \varphi$ 时, $e^Z > e^C$. □

命题6表明: 1) 制造商利润分享比例 φ 的提高能够有效促进其碳减排和回收行为, 但是会降低零售商的低碳宣传积极性, 若提高制造商成本分担比例 σ , 则能够有效提高零售商的低碳宣传水平; 2) 通过调整协调机制中的参数, 可使得协调后的零售商低碳宣传努力程度优于协同情形下的水平.

命题7 1) 给定利润分享比例 φ , 保持低碳宣传成本分担比例 σ 高于利润分享比例 φ 可有效改善协调后的低碳商誉水平; 2) 当满足 $\sigma < \frac{3\delta\varphi + 2\rho\varphi - \delta}{\delta\varphi + 2\rho\varphi + \delta}$ 时, 供应链成员利润与成本分担系数 σ 正相关, 在此范围内增大成本分担比例可实现成员利润的改善.

证明 给定利润分享比例 φ , 取成本分担比例 σ_1 和 σ_2 , 记作协调机制1和协调机制2, 其中 $\sigma_1 < \varphi < \sigma_2$. 两种协调机制下的碳减排量和回收努力程度相同, 低碳宣传努力分别为

$$e^1 = \frac{\gamma(1 - \varphi)b(\pi_2 + \pi_3)}{h(1 - \sigma_1)(\rho + \delta)},$$

$$e^2 = \frac{\gamma(1 - \varphi)b(\pi_2 + \pi_3)}{h(1 - \sigma_2)(\rho + \delta)}.$$

由于 $e^1 < e^C < e^2$, 可得协调机制2下的低碳商誉水平更优, 命题7的1)得证. 求利润关于 σ 的偏导, 得到

$$\frac{\partial J_r^Z}{\partial \sigma} = \frac{\gamma^2 b^2 (\pi_2 + \pi_3)^2 (1 - \varphi)^2 (2\rho + \delta)}{2h\delta(\rho + \delta)^2 (1 - \sigma)^2} > 0,$$

$$\frac{\partial J_m^Z}{\partial \sigma} =$$

$$(\gamma^2 b^2 (\pi_2 + \pi_3)^2 (1 - \varphi) (3\delta\varphi + 2\rho\varphi - \delta - \delta\sigma - \delta\sigma\varphi - 2\rho\sigma\varphi)) / (2h\delta(\rho + \delta)^2 (1 - \sigma)^3).$$

当 $\sigma < \frac{3\delta\varphi + 2\rho\varphi - \delta}{\delta\varphi + 2\rho\varphi + \delta}$ 时, 得到 $\frac{\partial J_m^Z}{\partial \sigma} > 0$, 命题7的2)得证. □

命题7表明, 协调时保持制造商成本分担比例高于利润分享比例可有效改善低碳商誉水平. 此外, 当满足一定条件时, 制造商提高其成本分担比例有利于成员利润的改善. 为了使得供应链成员愿意接受协

调机制, 比例参数 σ 和 φ 还需满足 $J_r^Z > J_r^L, J_m^Z > J_m^L$, 具体大小由成员的谈判能力决定.

4 数值分析

本节借助数值分析对比3种情形下供应链成员的均衡解, 并对重要参数进行了敏感性分析. 对各参数赋值如下: $\pi_1 = 5, \pi_2 = 6, \pi_3 = 10, k = 30, s = 40, h = 40, \alpha = 3, \beta = 2, \gamma = 4, \theta = 20, \mu = 10, b = 4, \rho = 0.9, \delta = 1, B = 5, B_1 = 20, a = 10$. 根据所给参数, 取3组比例参数 $\sigma = 0.42, \varphi = 0.43$ (协调情形1), $\sigma = 0.42, \varphi = 0.45$ (协调情形2), $\sigma = 0.5, \varphi = 0.43$ (协调情形3). 表1为各情形下的均衡解.

表1 不同情形下的均衡解

	非协同情形	协同情形	协调情形1	协调情形2	协调情形3
碳减排量	1.93	4.03	2.12	2.18	2.12
回收努力程度	5.63	6.68	5.72	5.76	5.72
低碳宣传努力	2.1	3.36	3.31	3.2	3.84
制造商利润	1146.12	-	1295.54	1335.2	1298.44
零售商利润	1030.3	-	1096.24	1055.21	1153.19
供应链总利润	2176.42	3159.3	2391.78	2390.41	2451.63
低碳商誉水平	25.47	38.947	31.04	30.84	33.153

由表1可见: 1) 非协同情形下的碳减排量、回收努力程度和低碳宣传努力程度均低于协同情形. 2) 协调后, 供应链成员利润和低碳商誉得到显著改善. 3) 比较协调情形1与协调情形2, 可发现制造商利润分享比例 φ 的提高能够促进其碳减排和回收行为, 但是会降低零售商低碳宣传的积极性. 4) 比较协调情形1与协调情形3, 可发现制造商成本分担比例 σ 的提高可促进零售商的低碳宣传行为. 此外, 由于宣传成本分担系数满足 $\sigma_3 > \varphi > \sigma_1$, 可发现协调情形3下的低碳商誉水平更优, 验证了命题7的正确性. 5) 对比3种协调机制, 可发现协调机制3中利润改善效果和低碳商誉水平均更优, 因此在协调时制造商不应追求过高的利润分享比例, 主动承担零售商的低碳宣传成本也能够获得更优的协调效果.

下面对重要参数进行敏感性分析. 首先分析低碳商誉敏感系数对低碳商誉水平的影响. 以非协同情形为例, 如图2所示, 低碳商誉水平 g 均随着时间变化而提升, 并逐渐达到稳定状态, 这是因为低碳商誉水平是衡量产品满足消费者低碳偏好的一个重要指标, 供应链成员会有意识通过努力提高低碳商誉水平, 以此获得更多的利润. 当商誉敏感系数 b 增大时, 产品的低碳商誉水平稳定值增加, 表明消费者低碳偏好的增加有利于提高产品的低碳商誉水平.

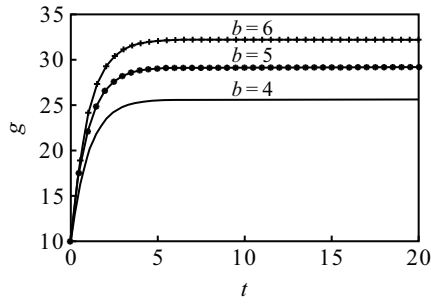


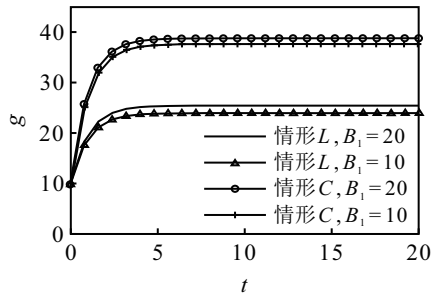
图2 不同 b 下低碳商誉演化轨迹

表2为不同 b 下的供应链均衡解和利润. 由表2可见, 商誉敏感系数的提高不仅利于供应链成员的低碳行为, 且使得成员利润水平增加, 因此较高的低碳商誉敏感性能够实现供应链成员利润和环境的双赢. 政府要加强公民低碳教育以提高消费者环保意识和低碳偏好, 以此激励供应链中企业的低碳行为.

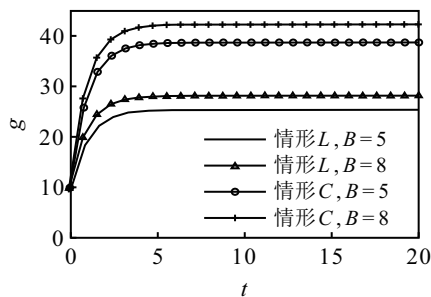
表2 不同 b 下的均衡解及利润

变量	$b = 4$	$b = 5$	$b = 6$
碳减排量	1.93	2.25	2.56
回收努力程度	5.63	5.79	5.94
低碳宣传努力程度	2.11	2.63	3.15
制造商利润	1 146.12	1 382.07	1 654.45
零售商利润	1 030.3	1 403.6	1 833.19

接着分析双重补贴对低碳商誉以及成员利润的影响. 如图3所示, 可见低碳和回收补贴的增加均能够有效地提高低碳商誉水平. 这是因为补贴的提高使得制造商碳减排和回收的边际收益提高, 进而导致低碳商誉水平的提高. 此外, 通过比较不同补贴值下的低碳商誉稳定值, 可以发现非协同和协同情形



(a) 低碳补贴

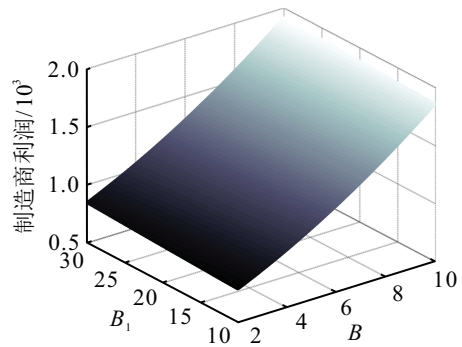


(b) 回收补贴

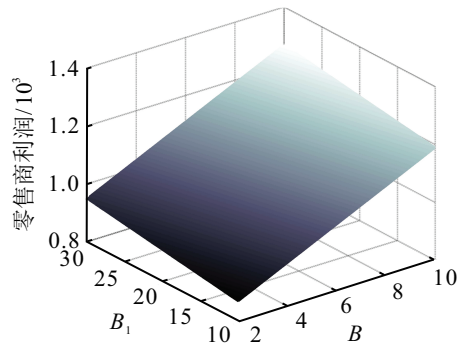
图3 政府不同补贴下低碳商誉水平演化轨迹

间的低碳商誉水平差异与政府补贴大小无关. 因此, 虽然政府补贴的增加可提高产品低碳商誉水平, 但是无法弥补非协同情形造成的供应链效率损失, 这也侧面表明了建立供应链协调机制的重要性.

图4为双重补贴对成员利润的影响. 由图4可见, 低碳和回收补贴的增加利于成员利润的提高. 虽然补贴政策只针对上游制造商的碳减排和回收行为, 并没有给予零售商补贴, 但是补贴的增加使得产品低碳商誉得到提高, 进而间接影响了零售商的利润水平. 因此, 政府的双重补贴政策不仅利于产品低碳商誉水平的提升, 且使得供应链成员的利润得到改善.



(a) 制造商利润



(b) 零售商利润

图4 政府补贴对供应链利润的影响

最后分析协调参数对低碳商誉的影响. 如图5所示, 可见协调情形下的低碳商誉水平与利润分享比例 φ 呈负相关, 与成本分担比例 σ 呈正相关. 因此设定较低的利润分享比例和较高的成本分担比例可使得协调后的低碳商誉保持较高的水平.

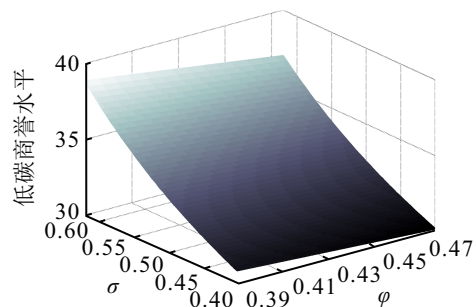


图5 协调参数对低碳商誉水平的影响

图6为 $\varphi = 0.43$ 时, 供应链成员利润随成本分担比例 σ 的变化情况. 由图6可见, 零售商利润随着成本分担比例的增大而增大, 而制造商利润呈现先增后减的变化趋势, 在 $\sigma = 0.482$ 时取得最大值. 当 σ 继续增大时, 制造商利润开始降低. 因此, 当协调参数满足一定条件时, 即使制造商不提高其利润分享比例, 通过增大低碳宣传成本分担比例也能够有效改善供应链成员利润. 在谈判过程中, 主导制造商不应一味地追求过高的利润分享比例, 而是应主动分担低碳宣传成本, 引导零售商共同努力以实现共赢.

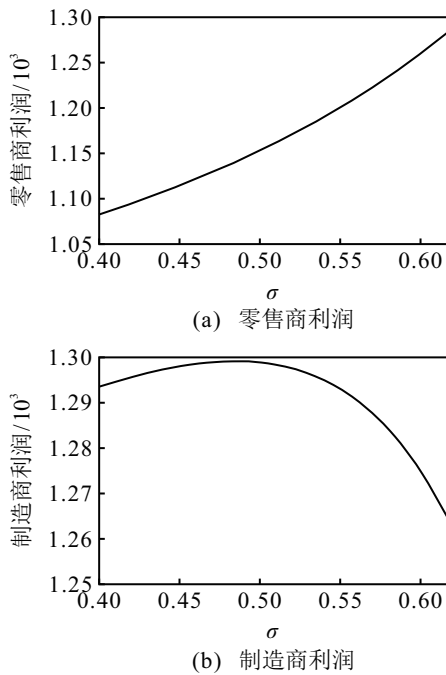


图6 供应链成员利润随成本分担比例 σ 的变化情况

5 结论

低碳背景下, 考虑政府低碳和回收补贴, 借助微分博弈研究供应链中上下游企业共同提高产品低碳商誉的动态决策问题. 通过对比分析非协同情形下的供应链均衡解, 设计了利润共享-低碳宣传成本共担的协调机制, 主要得到以下结论.

1) 各情形下的低碳商誉水平均随着时间增加而达到稳定状态. 其中, 协同情形下的低碳商誉水平始终是最优的, 非协同情形下的低碳商誉可通过利润共享-低碳宣传成本共担的协调机制得到改善;

2) 政府低碳和回收补贴的增加不仅能够激励制造商的碳减排和再制造行为, 还能够有效提高低碳商誉水平和成员绩效, 但是不会影响零售商的低碳宣传水平;

3) 协调时, 保持制造商低碳宣传成本分担比例高于利润分享比例可有效改善低碳商誉水平. 此外, 制造商适当提高其成本分担比例有利于成员利润的改

善.

管理启示如下:

1) 供应链实践中, 制造商和零售商往往独立决策, 使得低碳商誉和利润处于较低水平. 因此供应链成员要建立合理的协调机制, 积极达成合作;

2) 为了更好地实现协调, 制造商应主动分担零售商的低碳宣传成本, 引导供应链成员共同努力以提高产品低碳商誉;

3) 政府要不断完善已有的补贴制度, 如考虑对零售商低碳宣传进行补贴以提高其低碳宣传水平, 从而更好地促进低碳消费;

4) 政府要加强公民低碳教育以提高其环保和低碳意识, 以此激励供应链中企业的低碳行为.

参考文献(References)

- [1] Mota B, Gomes M I, Carvalho A, et al. Sustainable supply chains: An integrated modeling approach under uncertainty[J]. *Omega*, 2018, 77: 32-57.
- [2] Savaskan R C, Bhattacharya S, van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [3] Ilgin M A, Gupta S M. Environmentally conscious manufacturing and product recovery: A review of the state of the art[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(3): 563-591.
- [4] Vanclay J K, Shortiss J, Aulsebrook S, et al. Customer response to carbon labelling of groceries[J]. *Journal of Consumer Policy*, 2011, 34(1): 153-160.
- [5] Liu Z, Anderson T D, Cruz J M. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 218(3): 602-613.
- [6] Cheng F, Chen T, Chen Q. Cost-reducing strategy or emission-reducing strategy? The choice of low-carbon decisions under price threshold subsidy[J]. *Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 157: 102560.
- [7] Li Z M, Pan Y C, Yang W, et al. Effects of government subsidies on green technology investment and green marketing coordination of supply chain under the cap-and-trade mechanism[J]. *Energy Economics*, 2021, 101: 105426.
- [8] Cao K Y, Xu X P, Wu Q, et al. Optimal production and carbon emission reduction level under cap-and-trade and low carbon subsidy policies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167(20): 505-513.
- [9] Zhu X X, Ren M L, Chu W, et al. Remanufacturing subsidy or carbon regulation? An alternative toward

- sustainable production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 117988.
- [10] 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.
- [11] Wang X Y, Han S Q. Optimal operation and subsidies/penalties strategies of a multi-period hybrid system with uncertain return under cap-and-trade policy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 150: 106892.
- [12] 赵道致, 原白云, 徐春明. 低碳供应链纵向合作减排的动态优化[J]. *控制与决策*, 2014, 29(7): 1340-1344.
(Zhao D Z, Yuan B Y, Xu C M. Dynamic optimization about vertical cooperation on carbon emissions reduction in low-carbon supply chain[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(7): 1340-1344.)
- [13] 王道平, 王婷婷, 张博卿. 基于微分博弈的供应链合作减排和政府补贴策略[J]. *控制与决策*, 2019, 34(8): 1733-1744.
(Wang D P, Wang T T, Zhang B Q. Reduce emissions in cooperation and government subsidies strategies in supply chain based on differential game[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(8): 1733-1744.)
- [14] Wang Y L, Xu X, Zhu Q H. Carbon emission reduction decisions of supply chain members under cap-and-trade regulations: A differential game analysis[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 162: 107711.
- [15] 叶欣, 周艳菊. 考虑商誉的双渠道供应链动态定价与联合减排策略[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(2): 117-128.
(Ye X, Zhou Y J. Dynamic pricing and joint emission reduction strategies in a dual-channel supply chain considering goodwill[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(2): 117-128.)
- [16] 徐春秋, 王芹鹏. 考虑政府参与方式的供应链低碳商誉微分博弈模型[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(8): 35-44.
(Xu C Q, Wang Q P. Differential game models of low carbon reputation considering government participation in supply chain[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(8): 35-44.)
- [17] Liu L, Li F T. Differential game modelling of joint carbon reduction strategy and contract coordination based on low-carbon reference of consumers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123798.
- [18] Zhang J, Gou Q L, Liang L, et al. Ingredient branding strategies in an assembly supply chain: Models and analysis[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(23/24): 6923-6949.
- [19] Nerlove M, Arrow K J. Optimal advertising policy under dynamic condition[J]. *Economica*, 1962, 29(114): 129-142.
- [20] André F J, Sokri A, Zaccour G. Public disclosure programs vs. traditional approaches for environmental regulation: Green goodwill and the policies of the firm[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 212(1): 199-212.
- [21] Bakal I S, Akcali E. Effects of random yield in remanufacturing with price-sensitive supply and demand[J]. *Production and Operations Management*, 2009, 15(3): 407-420.

作者简介

朱晨(1996—), 男, 博士生, 从事供应链碳减排、闭环供应链等研究, E-mail: zhuchen@nuaa.edu.cn;

马静(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 从事供应链运作与管理等研究, E-mail: majing5525@126.com;

李攀(1997—), 男, 博士生, 从事供应链管理的研究, E-mail: lijian-g-cem@nuaa.edu.cn.