

控制与决策

Control and Decision

不同权力结构下供应链减排策略随机微分博弈

徒君, 高凤阳, 黄敏

引用本文:

徒君,高凤阳,黄敏. 不同权力结构下供应链减排策略随机微分博弈[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 291–300.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0368>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[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>

[模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型](#)

Modeling green supply chain games considering retailer's risk preference in fuzzy environment

控制与决策. 2021, 36(3): 711–723 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0646>

[考虑成员企业风险态度的制造商资金约束闭环供应链定价与回收决策](#)

Pricing and recycling decisions of a closed-loop supply chain considering participators' risk attitudes and manufacturer capital constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1305>

[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>

[风险规避制造商市场入侵策略](#)

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

控制与决策. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

不同权力结构下供应链减排策略随机微分博弈

徒君^{1†}, 高凤阳¹, 黄敏²

(1. 辽宁工程技术大学理学院, 辽宁阜新 123000; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 在由单个制造商和单个零售商构成的低碳供应链中, 制造商与零售商之间不同的权力结构决定着他们的减排策略与博弈方式. 同时, 低碳产品商誉与需求受到制造商与零售商减排策略及随机因素的长期动态影响. 在不同的权力结构下, 对制造商减排努力策略与零售商宣传努力策略进行随机微分博弈分析; 在集中式决策基础上, 分别构建制造商主导与零售商主导的 Stackelberg 博弈、无主导 Nash 博弈模型, 求解模型并对结果进行理论分析与数值实验. 研究发现: 相较于自己作为主导者, 对方作为主导者会促使制造商或零售商做出更大的减排努力或宣传努力; 与有主导者的供应链相比, 无主导者的供应链可能实现更大的低碳产品商誉; 制造商作为主导者能够提升低碳产品商誉与需求以及供应链总利润. 随机因素促使制造商和零售商分别提高了减排努力和宣传努力以及低碳产品商誉.

关键词: 低碳供应链; 随机微分博弈; 权力结构; 减排努力; 宣传努力

中图分类号: O225

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0368

引用格式: 徒君, 高凤阳, 黄敏. 不同权力结构下供应链减排策略随机微分博弈 [J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 291-300.

Stochastic differential game of supply chain emission reduction strategies under different power structures

TU Jun^{1†}, GAO Feng-yang¹, HUANG Min²

(1. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In a low-carbon supply chain consisting of a single manufacturer and a single retailer, the different power structures between the manufacturer and the retailer determine their emission reduction strategies and the game ways. At the same time, the goodwill and demand for low carbon products are influenced by the long-term dynamics of the manufacturer's and the retailer's abatement strategies and stochastic factors. Stochastic differential game analysis of the manufacturer's abatement effort strategies and the retailer's promotional effort strategies under different power structures is conducted. On the basis of centralized decision-making, the manufacturer-dominated and the retailer-dominated Stackelberg game and non-dominant Nash game models are constructed respectively, and the models are solved and the results are analyzed theoretically and numerically. The study finds that the other party's dominant role will prompt the manufacturer or the retailer to make greater emission reduction effort or promotion effort than their own as the dominant player. A supply chain without a leader may achieve greater goodwill for low-carbon products than a supply chain with a leader. The manufacturer as the leader can increase the goodwill and demand for low carbon products and total profit of the supply chain. Random factors drive the manufacturer and the retailer to increase their emission reduction effort and promotion effort, and low-carbon product goodwill.

Keywords: low-carbon supply chain; stochastic differential game; power structure; emission reduction effort; promotion effort

0 引言

低碳供应链减排策略的研究日益受到学界与业界的重视. 在低碳供应链中, 制造商可以通过加大研

发投入, 生产出绿色度更高的产品, 而零售商可以通过加大广告投入, 提高消费者的低碳理念, 使得消费者更倾向于购买低碳产品^[1-2]. 然而, 作为独立的经济

收稿日期: 2022-03-10; 录用日期: 2022-07-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51704140); 辽宁省自然科学基金项目(2021-MS-340); 辽宁省教育厅基金项目(LJKZ0347).

[†]通讯作者. E-mail: tovegar@126.com.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

人,制造商和零售商总是以自身利益最大化为目标做出减排策略^[3-4],这种做法对低碳供应链可能是不利的.因此,在博弈框架下研究制造商和零售商的减排策略具有重要价值.

在低碳供应链中,制造商和零售商之间的不同权力结构对供应链成员的减排策略产生重要影响.依赖于制造商与零售商之间的地位与关系,供应链形成了制造商主导模式^[5-6]、零售商主导模式^[7-8]以及多元主导模式^[9-10].因此,需要探讨不同的供应链权力结构即不同主导模式对供应链减排决策的影响.

针对制造商减排努力对低碳产品需求与商誉的长期动态影响,现有研究基于微分博弈理论对供应链减排策略进行了探讨.文献[11]考虑了低碳供应链中制造商的减排努力对产品减排量的动态影响.文献[12]针对制造商减排努力对减排量的动态影响,构建了消费者低碳偏好下的微分博弈模型.文献[13]建立了考虑制造商减排努力滞后性的微分博弈模型.文献[14]考虑供应商减排努力与制造商减排努力对低碳产品需求的共同影响,构建了Stackelberg博弈模型.文献[15]考虑到低碳产品减排量由供应商减排努力、制造商减排努力与零售商促销努力共同决定,建立了一个三级供应链微分博弈模型.

针对制造商减排努力与零售商促销努力对低碳产品商誉的共同影响,文献[16]建立了政府不同参与方式下的微分博弈模型;文献[17]建立了双渠道低碳供应链的微分博弈模型,探讨不同渠道结构下供应链成员的最优均衡策略.

需要指出,低碳产品市场需求不仅受到减排努力和宣传努力的共同影响,同时受到经济环境与消费理念等不确定因素的影响,具有随机性^[18-19].例如,零售商广告努力的产出具有随机性^[20-21],研发团队技术创新努力的产出具有随机性^[22],闭环供应链中制造商回收努力的产出具有随机性^[23].因此,考虑减排努力和宣传努力产出的随机性是十分必要的.文献[19]考虑了消费者低碳产品偏好下的随机需求.本文同时考虑制造商减排努力与零售商宣传努力对低碳产品需求的随机动态影响.

低碳供应链权力结构对减排策略的影响也引起了学者的注意.文献[24]探讨了3种不同供应链结构对制造商创新努力的影响;文献[25]分析了供应链3种权力结构对政府上限管制下制造商低碳策略的影响.以上研究均仅探讨了不同供应链权力结构对制造商努力的影响,没有涉及零售商宣传努力.不同于上述研究,本文探讨制造商减排努力与零售商宣传努

力在不同权力结构下的决策问题.特别地,本文基于随机微分博弈研究供应链不同主导模式和随机动态性对制造商和零售商减排决策的共同影响.

本文的创新工作包括两个方面:1)针对制造商减排努力与零售商宣传努力产出的随机性与动态性,开展低碳供应链减排决策的随机微分博弈分析;2)考虑低碳供应链不同权力结构,建立制造商主导、零售商主导和无主导者模式下供应链减排策略,揭示不同主导模式对供应链减排策略的影响.

本文的结构如下:第1节进行了问题描述与模型假设,给出了3种主导模式下的决策时序;第2节给出了集中式决策下的最优结果,得到了供应链表现的基准;第3节在分散式决策下,分别给出制造商主导的Stackelberg博弈、零售商主导的Stackelberg博弈与无主导Nash博弈下的供应链减排策略;第4节和第5节分别从理论与数值两方面对不同主导模式下均衡结果进行对比分析;第6节给出本文结论.

1 问题描述

本文的研究对象为一个双层低碳供应链,其由一个制造商和一个零售商组成.制造商和零售商分别可作出减排努力和宣传努力以促进低碳产品消费^[16].制造商的减排努力可以体现在两个方面:一方面,制造商可以采用技术革新和运营流程改善等减排手段降低产品生产过程中的碳排放量^[13];另一方面,制造商可以通过加大研发、突破关键技术等绿色创新手段生产出更加低碳的产品^[21];考虑到制造商在这两方面的减排努力均会对低碳产品产生长期动态影响,为简化模型表达且不失一般性,本文对制造商这两方面努力不加以区分,统一地用 $E_1(t)$ 表示 t 时刻制造商减排努力.

与此同时,零售商宣传努力主要体现为通过广告等方式加大对低碳产品的宣传,提高产品的知名度^[11,26].例如,可以提高产品节能信息的曝光度以促进电商平台消费者的绿色消费行为^[27].事实上,与传统产品相比,低碳产品由于市场覆盖率与价格等因素往往更难为消费者认知与认可.因此,宣传努力对扩大低碳产品的消费更加重要.本文使用 $E_2(t)$ 表示 t 时刻零售商的宣传努力.

参考制造企业绿色商誉的定义^[28],本文引入低碳产品商誉.低碳产品在长期销售过程中逐渐积累了商誉,其主要受到减排努力和宣传努力以及随机因素等影响.同时,产品商誉随着时间会自然衰减,产品商誉的高低代表着消费者对产品的认可程度.产品商誉的提升能够提高市场需求并给供应链带来更多

利润. 用 $\tau(t)$ 表示 t 时刻产品商誉, 并将其变化过程利用伊藤公式^[23]刻画为

$$\begin{aligned} d\tau(t) &= [\gamma_1 E_1 + \gamma_2 E_2 - \delta\tau(t)]dt + \sigma\sqrt{\tau(t)}dz(t), \\ \tau(0) &= \tau_0. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: γ_1 和 γ_2 分别为减排努力与宣传努力对产品商誉的边际影响系数, δ 为产品商誉的衰减率, σ 为随机因素对产品商誉的影响系数, $z(t)$ 为标准维纳过程.

考虑消费者对低碳产品商誉的偏好和零售商宣传努力的共同影响, 定义 t 时刻低碳产品市场需求为 $D(t) = \alpha + \beta E_2(t) + \theta\tau(t)$. 其中: α 为低碳产品基础需求, β 为宣传努力的边际影响系数, θ 为消费者对低碳产品商誉的偏好系数. θ 越大表明消费者对低碳产品商誉越偏好, 低碳产品市场需求也就越大. 为了简洁性, 下文在公式符号书写中省略时间 t .

制造商做出减排努力会给她带来成本, 例如制造商需投资于减排设备和减排技术以减少生产过程的碳排放. 不失一般性, 考虑减排努力成本的凸性特征, 将其表示为 $C_1 = k_1 E_1^2/2$, 其中 k_1 表示减排努力成本系数, $k_1 > 0$. 零售商做出宣传努力会给她带来成本, 例如零售商需投资于低碳产品广告与环保公益广告以提高低碳产品的知名度. 类似地, 假设宣传努力成本为 $C_2 = k_2 E_2^2/2$, 其中 k_2 表示宣传努力成本系数, $k_2 > 0$.

假设每销售单位产品给制造商和零售商带来的收益分别为 r_1 和 r_2 , 不失一般性, 令制造商的单位制造成本与零售商单位宣传成本均为零. 本文研究无限时间区间内制造商与零售商的利润最大化问题, 假设双方具有相同的贴现因子 $\rho, \rho > 0$.

考虑低碳供应链中制造商与零售商构成的3类不同权力结构, 即制造商为主导者、零售商为主导者和无主导者, 分别研究制造商主导的Stackelberg博弈、零售商主导的Stackelberg博弈、无主导Nash博弈下的联合减排策略.

在制造商主导的Stackelberg博弈中, 制造商对零售商宣传努力成本进行分担^[29], 记分担比例为 $x_1, 0 < x_1 < 1$. 作为主导者, 制造商首先决策减排努力和成本分担比例, 作为追随者的零售商随后决策宣传努力. 在零售商主导的Stackelberg博弈中, 零售商对制造商减排努力成本进行分担, 记分担比例为 $x_2, 0 < x_2 < 1$. 作为主导者, 零售商首先决策宣传努力和成本分担比例, 作为追随者的制造商随后决策减排努力. 在无主导Nash博弈中, 制造商对零售商宣传努力成本进行分担且分担比例外生, 制造商和零售商同时做出自己的努力决策.

为了方便表达, 文中公式下标“0”“1”和“2”分别表示供应链、制造商与零售商, 公式上标“c”“ms”“rs”“n”和“*”分别表示集中式决策、制造商主导的Stackelberg博弈、零售商主导的Stackelberg博弈、无主导Nash博弈以及最优决策结果. 3类主导模式下的决策时序如图1所示.

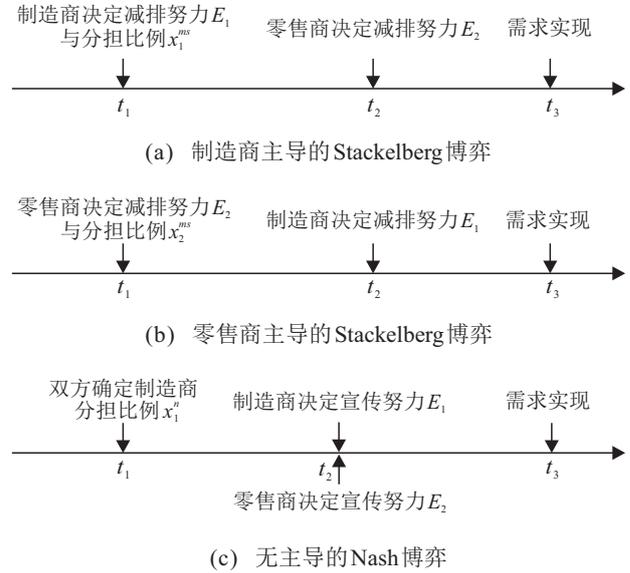


图1 决策时序图

2 集中式决策

在集中式决策下, 制造商和零售商是利益共同体, 联合决策减排努力与宣传努力, 以最大化低碳供应链的目标泛函

$$J_0^c(\tau, t) = \max_{E_1^c, E_2^c} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[(r_1 + r_2)D - \frac{1}{2}k_1(E_1^c)^2 - \frac{1}{2}k_2(E_2^c)^2 \right] dt. \quad (2)$$

为了得到减排努力和宣传努力的反馈均衡策略, 采用Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB)方程进行求解. 考虑到动态参数条件下求解的困难, 假设模型中的参数都与时间无关, 所得结果见如下命题.

命题1 在集中式决策下, 制造商最优减排努力为

$$E_1^{c*} = \frac{2\theta\gamma_1(r_1 + r_2)}{Ak_1},$$

零售商最优宣传努力为

$$E_2^{c*} = \frac{(r_1 + r_2)(\beta A + 2\theta\gamma_2)}{Ak_2},$$

其中 $A = 2\delta + 2\rho - \sigma^2$. 低碳供应链的最优值函数为

$$\begin{aligned} V_0^{c*}(\tau) &= \frac{2\theta(r_1 + r_2)}{A}\tau + \frac{\alpha(r_1 + r_2)}{\rho} + \\ &\frac{(r_1 + r_2)^2}{\rho A^2} \left[\frac{2\theta^2\gamma_1^2}{k_1} + \frac{(\beta A + 2\theta\gamma_2)^2}{2k_2} \right]. \end{aligned}$$

命题1表明, 在集中式决策下, 减排努力和宣传

努力均随着消费者的低碳产品商誉偏好系数 θ 递增.消费者对低碳产品商誉越偏好,越能激发制造商和零售商做出更大的努力.制造商减排努力随其对商誉的边际影响系数 γ_1 递增,且随着努力成本系数 k_1 递减.减排努力对产品商誉提升效果越明显,制造商越愿意做出更大的减排努力.然而,努力成本的提高驱使制造商降低了减排努力.此外,制造商减排努力也随着自身边际收益 r_1 和随机扰动 σ 递增.产品边际收益的提升、市场波动性的增大都会促使制造商提高减排努力.命题1还表明,宣传努力对产品商誉提升效果越明显,零售商越愿意做出更大的宣传努力,而努力成本的提高会抑制零售商宣传努力.

为了进一步研究集中式决策下产品商誉的统计特性,下面对商誉的期望和方差进行刻画与分析,所得结果如下.

命题2 在集中式决策下,产品商誉期望为

$$E(\tau^{c*}) = e^{-\delta t}(\tau_0 - G^{c*}\delta^{-1}) + G^{c*}\delta^{-1},$$

方差为

$$D(\tau^{c*}) =$$

$$\frac{\sigma^2}{2\delta^2}[(G^{c*} - 2\tau_0\delta)e^{-2\delta t} - 2(G^{c*} - \tau_0\delta)e^{-\delta t} + G^{c*}],$$

其中 $G^{c*} = \gamma_1 E_1^{c*} + \gamma_2 E_2^{c*}$.

商誉期望极限为 $\lim_{t \rightarrow \infty} E(\tau^{c*}) = G^{c*}\delta^{-1}$,方差极限为 $\lim_{t \rightarrow \infty} D(\tau^{c*}) = \frac{G^{c*}\sigma^2}{2\delta^2}$,且它们都随着 σ 递增,随着 δ 递减.

命题2表明,无论是产品商誉期望的极限还是方差的极限均随着减排努力和宣传努力递增.供应链成员越努力,产品的商誉越大.联想到消费者商誉偏好系数对努力程度的正向影响,消费者对低碳商誉越偏好,低碳产品商誉越大.注意到,商誉期望极限与方差极限均随着商誉衰减率递减,这是直观的.此外,商誉期望极限与方差极限均随着商誉随机扰动递增,这是容易理解的.此时,减排努力和宣传努力的增大提升了产品商誉期望与方差.

集中式决策下的最优结果构成了低碳供应链表现的基准,并为分散式决策下供应链的决策效果提供参考基础.下面将在分散式决策下研究供应链的减排决策.

3 分散式决策

3.1 制造商主导的Stackelberg博弈

在分散式决策中,制造商与零售商为追求自身利益最大化而独自做出决策.本节考虑制造商处于主导地位,制造商首先决定减排努力 E_1^{ms} 以及分担零

售商宣传努力成本的比例 x_1^{ms} ,其后零售商决定宣传努力 E_2^{ms} .在制造商主导下的Stackelberg博弈下,制造商的目标泛函为

$$J_1^{ms} = \max_{E_1^{ms}, x_1^{ms}} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [r_1 D - C_1(E_1^{ms}) - x_1^{ms} C_2(E_2^{ms})] dt, \quad (3)$$

零售商的目标泛函为

$$J_2^{ms} = \max_{E_2^{ms}} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [r_2 D - (1 - x_1^{ms}) C_2(E_2^{ms})] dt. \quad (4)$$

基于逆向归纳法,利用HJB方程进行求解,所得结果如下.

命题3 在制造商主导的Stackelberg博弈下,制造商最优减排努力和零售商最优宣传努力分别为

$$E_1^{ms*} = \frac{2\theta\gamma_1 r_1}{Ak_1}, \quad E_2^{ms*} = \frac{\beta r_2 + \gamma_2 \frac{2\theta r_2}{A}}{k_2(1 - x_1^{ms*})},$$

制造商成本分担比例为

$$x_1^{ms*} = \frac{2r_1 - r_2}{2r_1 + r_2}.$$

制造商的最优值函数为

$$V_1^{ms*}(\tau) = \frac{2\theta r_1}{A} \tau + \frac{\alpha r_1}{\rho} + \frac{2r_1^2 \theta^2 \gamma_1^2}{\rho k_1 A^2} + \frac{r_2(2r_1 - 2r_1 x_1^{ms*} - r_2 x_1^{ms*})(\beta A + 2\theta \gamma_2)^2}{2\rho k_2(1 - x_1^{ms*})^2 A^2},$$

零售商的最优值函数为

$$V_2^{ms*}(\tau) = \frac{2\theta r_2}{A} \tau + \frac{\alpha r_2}{\rho} + \frac{4r_1 r_2 \theta^2 \gamma_1^2}{\rho k_1 A^2} + \frac{r_2^2(\beta A + 2\theta \gamma_2)^2}{2\rho k_2(1 - x_1^{ms*}) A^2}.$$

由命题3可以看到,在制造商主导的Stackelberg博弈下,减排努力和宣传努力均随着消费者的低碳产品商誉偏好系数递增.消费者对低碳产品商誉的偏好能够提升市场需求,因而激发了制造商更多的减排努力和零售商更多的宣传努力.命题3同时表明:宣传努力随着制造商成本分担比例递增.制造商越愿意分担零售商努力成本,零售商越愿意多做努力.容易看出,制造商的成本分担比例 x_1^{ms*} 随着 r_1 递增.又由 $\frac{dx_1^{ms*}}{dr_2} = \frac{-4r_1}{(2r_1 + r_2)^2} < 0$ 可知,成本分担比例随着 r_2 递减.这表明,产品销售使制造商获益越大,制造商越愿意分担零售商努力成本;产品销售使零售商获益越大,制造商越不愿意进行成本分担,因为此时零售商已经做出了足够大的宣传努力,无须再对其给予过多的激励.

命题4 在制造商主导的Stackelberg博弈下,产

品商誉期望为

$$E(\tau^{ms*}) = e^{-\delta t}(\tau_0 - G^{ms*}\delta^{-1}) + G^{ms*}\delta^{-1},$$

方差为

$$D(\tau^{ms*}) = \frac{(G^{ms*} - 2\tau_0\delta)\sigma^2}{2\delta^2} e^{-2\delta t} - \frac{(G^{ms*} - \tau_0\delta)\sigma^2}{\delta^2} e^{-\delta t} + \frac{G^{ms*}\sigma^2}{2\delta^2},$$

其中 $G^{ms*} = \frac{2\theta r_1 \gamma_1^2}{Ak_1} + \gamma_2 \frac{\beta A r_2 + 2\theta r_2 \gamma_2}{Ak_2(1 - x_1^{ms*})}$. 商誉期望极限为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(\tau^{ms*}) = G^{ms*}\delta^{-1},$$

方差极限为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} D(\tau^{ms*}) = \frac{G^{ms*}\sigma^2}{2\delta^2}.$$

命题4表明,产品商誉期望极限与方差极限均随着制造商的成本分担比例 x_1^{ms*} 递增. 得容易理解,制造商的成本分担激励了零售商做出了更大的宣传努力,同时,制造商的减排努力没有发生改变,因此,产品商誉得以提升. 需要注意的是,由于随机扰动存在,造成了产品商誉波动性增加.

3.2 零售商主导的Stackelberg博弈

本节考虑零售商处于主导地位,零售商首先决定宣传努力 E_2^{rs} 以及分担制造商减排努力成本的比例 x_2^{rs} , 其后制造商决定减排努力 E_1^{rs} .

在零售商主导的Stackelberg博弈下,零售商的目标泛函为

$$J_2^{rs} = \max_{E_2^{rs}, x_2^{rs}} \int_0^\infty e^{-\rho t} [r_2 D - C_2(E_2^{rs}) - x_2^{rs} C_1(E_1^{rs})] dt, \tag{5}$$

制造商的目标泛函为

$$J_1^{rs} = \max_{E_1^{rs}} \int_0^\infty e^{-\rho t} [r_1 D - (1 - x_2^{rs}) C_1(E_1^{rs})] dt. \tag{6}$$

基于逆向归纳法,利用HJB方程进行求解,所得结果如下.

命题5 在零售商主导的Stackelberg博弈下,制造商最优减排努力和零售商最优宣传努力为

$$E_1^{rs*} = \frac{2\theta r_1 \gamma_1}{Ak_1(1 - x_2^{rs*})}, E_2^{rs*} = \frac{r_2(\beta A + 2\theta \gamma_2)}{Ak_2},$$

零售商成本分担比例为

$$x_2^{rs*} = \frac{2r_2 - r_1}{2r_2 + r_1}.$$

制造商最优值函数为

$$V_1^{rs*} = \frac{2\theta r_1}{A} \tau + \frac{\alpha r_1}{\rho} + \frac{2r_1^2 \theta^2 \gamma_1^2}{\rho k_1 A^2 (1 - x_2^{rs*})} +$$

$$\frac{r_1 r_2 (\beta A + 2\theta \gamma_2)^2}{\rho k_2 A^2},$$

零售商最优值函数为

$$V_2^{rs*} = \frac{2\theta r_2}{A} \tau + \frac{\alpha r_2}{\rho} + \frac{r_2^2 (\beta A + 2\theta \gamma_2)^2}{2\rho k_2 A^2} + \frac{2r_1 \theta^2 \gamma_1^2 (2r_2 - 2r_2 x_2^{rs*} - r_1 x_2^{rs*})}{\rho k_1 A^2 (1 - x_2^{rs*})^2}.$$

由命题5可以看到,减排努力随着零售商成本分担比例递增. 零售商越愿意分担制造商努力成本,制造商越愿意多做努力. 容易看出,零售商的成本分担比例 x_2^{rs*} 随着 r_2 递增. 又由 $\frac{dx_2^{rs*}}{dr_1} = \frac{-4r_2}{(2r_2 + r_1)^2} < 0$ 可知,成本分担比例随着 r_1 递减. 注意到 r_1 的增大使得制造商在单位产品的销售中获得更大的收益,此时,制造商愿意做出更大的减排努力. 因此,零售商无须对制造商努力成本进行过多的分担. 相应地,单位产品销售使零售商获得更大的收益时,零售商将会提升成本分担比例.

命题6 在零售商主导的Stackelberg博弈下,产品商誉期望为

$$E(\tau^{rs*}) = e^{-\delta t}(\tau_0 - G^{rs*}\delta^{-1}) + G^{rs*}\delta^{-1},$$

方差为

$$D(\tau^{rs*}) = \frac{(G^{rs*} - 2\tau_0\delta)\sigma^2}{2\delta^2} e^{-2\delta t} - \frac{(G^{rs*} - \tau_0\delta)\sigma^2}{\delta^2} e^{-\delta t} + \frac{G^{rs*}\sigma^2}{2\delta^2},$$

其中 $G^{rs*} = \gamma_1 \frac{2\theta r_1 \gamma_1}{Ak_1(1 - x_2^{rs*})} + \frac{r_2 \gamma_2 (\beta A + 2\theta \gamma_2)}{Ak_2}$. 商誉期望极限为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(\tau^{rs*}) = G^{rs*}\delta^{-1},$$

方差极限为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} D(\tau^{rs*}) = \frac{G^{rs*}\sigma^2}{2\delta^2}.$$

命题6表明,产品商誉期望极限与方差极限均随着零售商的成本分担比例 x_2^{rs*} 递增. 零售商的成本分担激励了制造商做出更大的减排努力,同时零售商的宣传努力没有发生改变,因此,产品商誉得以提升.

3.3 无主导Nash博弈

上文探讨了不同主导者下的Stackelberg博弈模型,本节考虑供应链中不存在主导者,制造商与零售商具有同等地位. 在无主导Nash博弈下,制造商与零售商同时做出决策. 制造商决定减排努力 E_1^n , 零售商决定宣传努力 E_2^n . 此外,考虑制造商对零售商的宣传努力成本进行分担,分担比例 x_1^n 是外生的,事先由双方通过谈判确定.

在无主导Nash博弈下,制造商的目标泛函为

$$J_1^n = \max_{E_1^n} \int_0^\infty e^{-\rho t} [r_1 D - C_1(E_1^n) - x_1^n C_2(E_2^n)] dt, \quad (7)$$

零售商的目标泛函为

$$J_2^n = \max_{E_2^n} \int_0^\infty e^{-\rho t} [r_2 D - (1 - x_1^n) C_2(E_2^n)] dt. \quad (8)$$

命题7 在无主导Nash博弈下,制造商最优减排努力为

$$E_1^{n*} = \frac{2\theta\gamma_1 r_1}{Ak_1},$$

零售商最优宣传努力为

$$E_2^{n*} = \frac{r_2(\beta A + 2\theta\gamma_2)}{Ak_2(1 - x_1^n)}.$$

制造商的最优值函数为

$$V_1^{n*}(\tau) = \frac{r_2(2r_1 - 2r_1 x_1^n - r_2 x_1^n)(\beta A + 2\theta\gamma_2)^2}{2\rho k_2(1 - x_1^n)^2 A^2} + \frac{2\theta r_1}{A} \tau + \frac{\alpha r_1}{\rho} + \frac{2r_1^2 \theta^2 \gamma_1^2}{\rho k_1 A^2},$$

零售商的最优值函数为

$$V_2^{n*}(\tau) = \frac{2\theta r_2}{A} \tau + \frac{\alpha r_2}{\rho} + \frac{4r_1 r_2 \theta^2 \gamma_1^2}{\rho k_1 A^2} + \frac{r_2^2(\beta A + 2\theta\gamma_2)^2}{2\rho k_2(1 - x_1^n)^2 A^2}.$$

命题7表明,在无主导Nash博弈下,减排努力是固定的,而宣传努力随着外生的成本分担比例 x_1^n 递增.这表明,制造商对零售商较小比例的努力成本分担难以激励零售商做出更多的宣传努力.当成本分担比例较大时,宣传努力会迅速增大.特别地,当成本分担比例趋向于1时,零售商做出极大的宣传努力.制造商愿意完全承担零售商的努力成本自然会促使零售商做出足够大的宣传努力.然而,此时的宣传努力对制造商乃至整个供应链可能是不利的.

命题8 在无主导Nash博弈下,产品商誉期望为

$$E(\tau^{n*}) = e^{-\delta t}(\tau_0 - G^{n*} \delta^{-1}) + G^{n*} \delta^{-1},$$

方差为

$$D(\tau^{n*}) = \frac{(G^{n*} - 2\tau_0 \delta) \sigma^2}{2\delta^2} e^{-2\delta t} - \frac{(G^{n*} - \tau_0 \delta) \sigma^2}{\delta^2} e^{-\delta t} + \frac{G^{n*} \sigma^2}{2\delta^2},$$

其中 $G^{n*} = \frac{2\theta r_1 \gamma_1^2}{Ak_1} + \frac{r_2 \gamma_2 (\beta A + 2\theta\gamma_2)}{Ak_2(1 - x_1^n)}$. 商誉期望极限为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(\tau^{n*}) = G^{n*} \delta^{-1},$$

方差极限为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} D(\tau^{n*}) = \frac{G^{n*} \sigma^2}{2\delta^2}.$$

命题8表明,在无主导Nash博弈下,产品商誉期望和方差均随着制造商成本分担比例递增,这与制造商主导的Stackelberg博弈下的结论是相同的.不同的

是,此处的成本分担比例是外生的.一个过大的成本分担比例将导致一个对供应链不利的产品商誉.

4 结果分析

为了研究不同主导模式对减排策略以及产品商誉的影响,本节从理论上对比了集中式决策、制造商主导的Stackelberg博弈、零售商主导的Stackelberg博弈、无主导Nash博弈下减排努力与宣传努力以及成本分担比例.为了确保成本分担比例非负,假设 $2r_2 > r_1 > r_2/2$.

由命题1、命题3、命题5以及命题7可以看出,制造商在集中式决策下做出最大减排努力,在零售商主导Stackelberg博弈下做出第2大的减排努力,而在自身主导的Stackelberg博弈和无主导Nash博弈下做出相同的减排努力.这表明,在零售商主导的Stackelberg博弈下,零售商对减排努力成本的分担促使制造商提高了减排努力.因此,零售商作为主导者对提升减排努力有利.此外,由于Nash博弈下零售商不对减排努力成本进行分担,制造商减排努力与其自己主导的Stackelberg博弈下一致.

上述4个命题还表明,零售商在两类Stackelberg博弈下的宣传努力均低于集中式决策下的宣传努力.进一步,无主导Nash博弈下的宣传努力是否高于集中式决策下的宣传努力取决于外生的成本分担比例 x_1^n .当 x_1^n 趋向于0时,宣传努力逐渐逼近零售商主导的Stackelberg博弈下的结果;当 x_1^n 趋向于1时,零售商做出比集中式决策下更多的宣传努力.这表明,在制造商主导的Stackelberg博弈下,制造商对宣传努力成本的分担促使零售商提高宣传努力.从而,制造商作为主导者对提升零售商宣传努力有利.

推论1 相较于自己作为主导者,制造商或零售商在对方主导的Stackelberg博弈下需做出更大的减排努力或宣传努力.

由命题3和命题5可以看出,在制造商主导的Stackelberg博弈下,制造商对零售商的成本分担比例与零售商主导的Stackelberg博弈下零售商对制造商的成本分担比例具有对称结构.在两类Stackelberg博弈下制造商与零售商具有对称的权力结构,并且分别分担对方的努力成本.

推论2 两类Stackelberg博弈下产品商誉总是低于集中式决策.当成本分担比例 x_1^n 小于 Ω 时,集中式决策下产品商誉达到最大;反之,无主导Nash博弈下产品商誉达到最大.其中

$$\Omega = 1 - \frac{k_1 r_2 \gamma_2 (\beta A + 2\theta\gamma_2)}{k_1 \gamma_2 (r_1 + r_2) (\beta A + 2\theta\gamma_2) + 2\theta k_2 r_2 \gamma_1^2}.$$

推论2表明,与集中式决策相比,Stackelberg博弈总是降低了产品商誉的期望,且这一点不依赖于谁是主导者.在Stackelberg博弈下,由于双重边际效应,制造商和零售商分别降低了自身努力.集中式决策下产品商誉并不总是最大的,这依赖于无主导Nash博弈下制造商对零售商宣传努力成本分担比例 x_1^* .当分担比例较小时(小于 Ω),产品商誉在集中式决策下达到最大.相反地,当分担比例较大时(大于 Ω),产品商誉在无主导Nash博弈下达到最大.此时,制造商对零售商过度的成本分担会使零售商做出超过系统最优的宣传努力,从而导致产品商誉增大,尽管这可能对整个供应链不利.总之,可认为无主导者的供应链可能实现更大的产品商誉.

下面分析制造商或零售商作为主导者对供应链表现的影响.为便于比较且不失一般性,假设 $r_1 = r_2 = r, k_1 = k_2 = k$ 和 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$.所得结果如下.

推论3 与零售商主导的Stackelberg博弈相比,制造商主导的Stackelberg博弈实现了更大的产品期望商誉、需求与供应链总利润.

推论3表明,制造商作为主导者能够促进低碳产品消费并提升供应链利润.与零售商主导的Stackelberg博弈相比,在制造商主导的Stackelberg博弈下,零售商做出了更大的宣传努力而制造商做出了更小的减排努力.这意味着主导者能够引导追随者做出更大的努力.然而,与零售商作为主导者对制造商减排努力的提升相比,制造商作为主导者能够更大幅度地提升零售商的宣传努力.

注意到,在无主导Nash博弈下,产品商誉期望的极限与方差的极限随着制造商对零售商努力成本分担比例递增(命题8).因此,相较于制造商主导的Stackelberg博弈,当制造商对零售商成本分担比例小于 x_1^{ms*} (命题3)时,无主导的Nash博弈降低了产品商誉,反之,无主导Nash博弈将提高产品商誉.这说明在无主导Nash博弈下恰当的成本分担比例有利于促进低碳产品消费.

5 数值分析

本节利用数值实验研究产品商誉与市场需求、制造商与零售商的利润在不同权力结构下的表现.在满足理论模型部分基本假设基础上,设置相关参数如下: $k_1 = 2, k_2 = 10, r_1 = 6, r_2 = 5, \alpha = 1, \beta = 2, \gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3, \delta = 1, \theta = 3, \rho = 0.5, \sigma = 0.3$.考虑到无主导Nash博弈下制造商对零售商成本分担比例是外生的,分别令其取6/11和2/11.图2~图4分别给

出了产品商誉、制造商利润、零售商利润在不同权力结构下的演化轨迹.

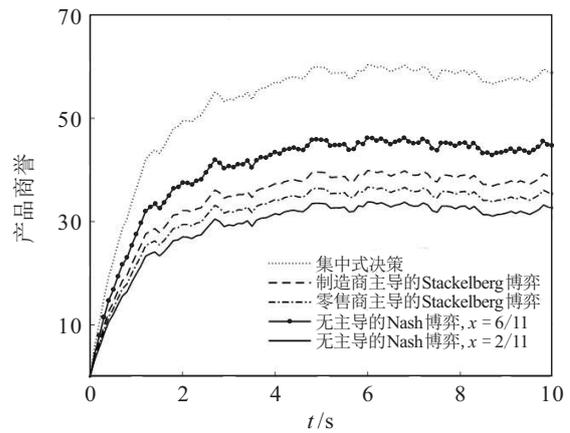


图2 不同权力结构下的低碳产品商誉

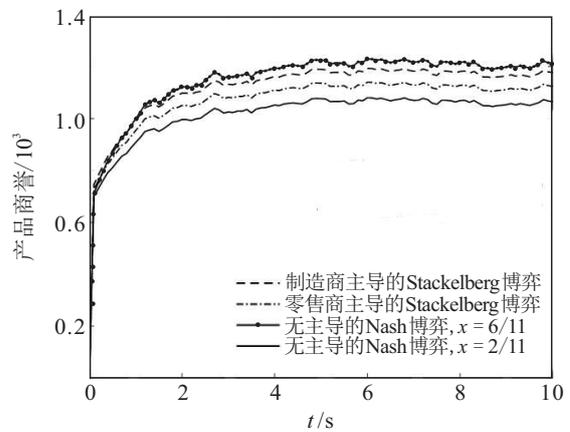


图3 不同权力结构下的制造商利润

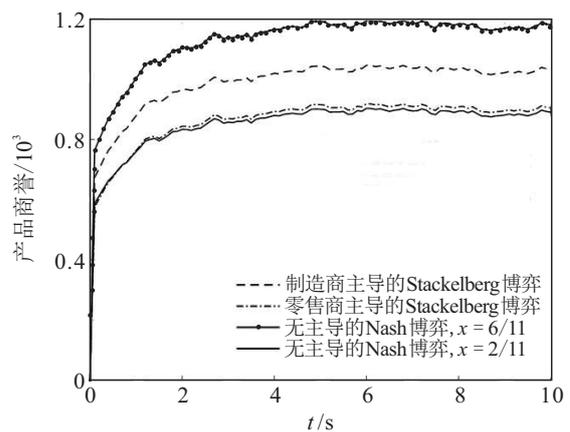


图4 不同权力结构下的零售商利润

图2表明,在不同权力结构下,产品商誉随时间均体现出先急速上升再趋于平稳的态势.由于随机因素的存在,产品商誉不会达到稳定状态,而是围绕其期望上下波动.这意味着随机因素对产品商誉的影响不依赖于供应链权力结构.图2同时表明,集中式决策下产品商誉最大.当供应链存在主导者时,制造商主导Stackelberg博弈下产品商誉高于零售商主导Stackelberg博弈.当不存在主导者时,Nash博弈下

的产品商誉可能高于或低于 Stackelberg 博弈. 制造商通过提高成本分担比例促进零售商增加宣传力度, 使得产品商誉得以提高. 当制造商的成本分担比例能够被恰当选择时, 无主导 Nash 博弈比有主导的 Stackelberg 博弈更能提高产品商誉.

图3表明, 制造商利润在不同权力结构下均随时间先急速上升后趋于平稳, 同时, 随机因素导致制造商利润上下波动. 当供应链存在主导者时, 制造商主导的 Stackelberg 博弈使其能够获得比零售商主导的 Stackelberg 博弈更大的利润. 这表明能够主导供应链对制造商是有利的. 然而, 当供应链不存在主导者时, 制造商不同的成本分担比例可以使其获得比 Stackelberg 博弈下更高或更低的利润. 当制造商成本分担比例为6/11时, 制造商获得4种情景下最大的利润; 而当制造商成本分担比例为2/11时, 制造商获得4种情景下最小的利润. 这意味着, 无主导 Nash 博弈下制造商恰当的成本分担比例对其是有利的.

图4表明, 零售商利润在不同权力结构下均随时间先急速上升后趋于平稳, 同时, 随机因素导致零售商利润上下波动. 当供应链存在主导者时, 制造商主导的 Stackelberg 博弈使零售商能够获得比其自身主导的 Stackelberg 博弈更大的利润, 这表明零售商的主导地位对其是不利的. 出现这一现象的原因在于, 当零售商主导供应链时, 零售商需要分担制造商减排努力成本. 结合图3可以看到, 制造商与零售商都青睐制造商主导的 Stackelberg 博弈. 当不存在主导者时, 制造商不同的成本分担比例可以使零售商获得比 Stackelberg 博弈下更高或更低的利润. 特别地, 当制造商成本分担比例为6/11时, 零售商获得4种情景下最大的利润; 而当制造商成本分担比例为2/11时, 零售商获得4种情景下最小的利润. 这意味着, 无主导 Nash 博弈下制造商过低的成本分担比例将对零售商不利.

综合图3与图4, 当制造商成本分担比例为6/11时, 无主导 Nash 博弈下供应链总利润达到最大, 制造商主导的 Stackelberg 博弈次之, 且高于零售商主导的 Stackelberg 博弈; 而成本分担比例为2/11时, Nash 博弈下供应链总利润达到最小. 因此, Nash 博弈能否实现更大的利润依赖于制造商的成本分担比例.

接下来研究无主导 Nash 博弈下制造商成本分担比例对供应链总利润的影响, 结果如图5所示. 图5表明, 在无主导 Nash 博弈下, 制造商的成本分担比例对供应链总利润的影响不是单调的, 存在一个最优的成本分担比例值使得供应链总利润最大. 当成本分担比例低于这个最优值时, 供应链总利润随着成本分担比例递增; 当成本分担比例高于这个最优值时, 供应

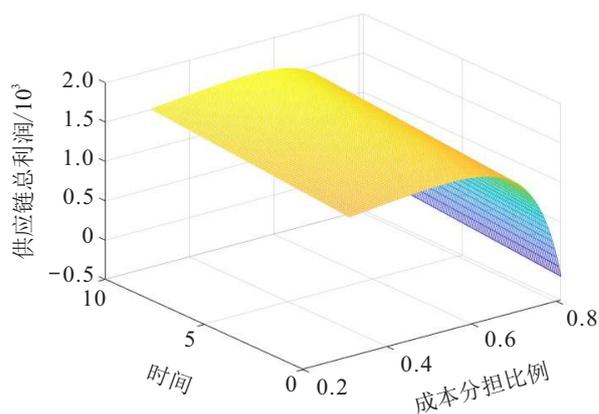


图5 无主导 Nash 博弈下的供应链总利润

链总利润随着成本分担比例递减. 特别地, 当成本分担比例较大时, 例如接近0.8, 供应链总利润随着成本分担比例急剧下降, 并可能出现负值. 出现这一现象的原因在于, 过高的成本分担比例导致零售商过高的宣传力度, 给供应链带来了过高的宣传努力成本, 这对供应链是不利的.

6 结论

本文基于随机微分博弈对供应链成员的减排策略展开了研究. 首先给出集中式决策下减排努力和宣传努力的最优决策并作为供应链表现基准. 在分散式决策下, 分别构建制造商主导的 Stackelberg 博弈、零售商主导的 Stackelberg 博弈、无主导 Nash 博弈下的随机微分博弈模型, 基于 HJB 方程进行模型求解, 得到减排努力与宣传努力的最优策略, 并利用理论分析与数值实验对比不同权力结构下的均衡结果.

研究发现: 制造商作为主导者可以促使零售商做出更大的宣传力度, 零售商作为主导者可以促使制造商做出更大的减排努力. 无主导 Nash 博弈下产品商誉依赖于成本分担比例, 与有主导者的供应链相比, 无主导者的供应链可能实现更大的产品商誉. 相比于零售商主导的 Stackelberg 博弈, 制造商主导的 Stackelberg 博弈可以实现更大的产品期望商誉、需求与供应链总利润. 为应对随机因素的扰动, 制造商和零售商分别提高了减排努力和宣传力度, 产品商誉因此得以提升. 本文假设产品市场价格是外生的, 下一步研究可考虑价格内生. 此外, 不同权力结构下供应链减排的协调与合作也可进一步探讨.

参考文献(References)

- [1] 张玲红, 刘方媛, 朱立龙, 等. 考虑零售商公平关切与广告努力水平的碳减排策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 138-148.
(Zhang L H, Liu F Y, Zhu L L, et al. The optimal

- carbon emission reduction strategy with retailer's fairness concern and advertising effort level[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(4): 138-148.)
- [2] Xia J, Niu W J. Carbon-reducing contract design for a supply chain with environmental responsibility under asymmetric information[J]. *Omega*, 2021, 102: 102390.
- [3] Yang J H, Long R Y, Chen H, et al. A comparative analysis of express packaging waste recycling models based on the differential game theory[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105449.
- [4] 王玉燕, 于兆青, 申亮. 电商平台资金约束下电商闭环供应链的回收决策研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(3): 154-164.
(Wang Y Y, Yu Z Q, Shen L. Recycling decisions of E-commerce closed-loop supply chain under capital constraint of E-commerce platform[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(3): 154-164.)
- [5] 杨惠霄, 欧锦文. 收入共享与谈判权力对供应链碳减排决策的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(9): 2379-2390.
(Yang H X, Ou J W. The effect of revenue sharing and bargaining power on carbon emission reduction in a supply chain[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2020, 40(9): 2379-2390.)
- [6] 王玉燕, 苏梅, 王晓迪. 政府奖励机制下闭环供应链的利他关切性决策[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(11): 105-116.
(Wang Y Y, Su M, Wang X D. Altruistic decision-making of closed-loop supply chain under government incentive mechanism[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(11): 105-116.)
- [7] Wang Y Y, Yu Z Q, Jin M Z, et al. Decisions and coordination of retailer-led low-carbon supply chain under altruistic preference[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 293(3): 910-925.
- [8] 刘名武, 吴开兰, 付红, 等. 消费者低碳偏好下零售商主导供应链减排合作与协调[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(12): 3109-3117.
(Liu M W, Wu K L, Fu H, et al. Cooperation on carbon emission reduction in a retailer-led supply chain with consumer's low-carbon preference[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(12): 3109-3117.)
- [9] 公彦德, 达庆利. 闭环供应链主导模式与物流模式的组合研究[J]. *管理科学学报*, 2015, 18(10): 14-25.
(Gong Y D, Da Q L. Research on combinations of closed-loop supply chain dominant mode and logistics mode[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, 18(10): 14-25.)
- [10] 王玉燕, 申亮. 回收处理基金下闭环供应链的多元化主导模式[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(10): 2526-2541.
(Wang Y Y, Shen L. Diversified dominant modes of closed-loop supply chain under the recycling fund[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2018, 38(10): 2526-2541.)
- [11] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(2): 53-65.
(Xu C Q, Zhao D Z, Yuan B Y, et al. Differential game model on joint carbon emission reduction and low-carbon promotion in supply chains[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 53-65.)
- [12] Xia L J, Bai Y W, Ghose S, et al. Differential game analysis of carbon emissions reduction and promotion in a sustainable supply chain considering social preferences[J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 310(1): 257-292.
- [13] 陈东彦, 黄春丽. 滞后效应影响下低碳供应链减排投入与零售定价[J]. *控制与决策*, 2018, 33(9): 1686-1692.
(Chen D Y, Huang C L. Carbon emissions reduction and retail pricing strategies in a low-carbon supply chain with lag effect[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(9): 1686-1692.)
- [14] Zu Y F, Chen L H, Fan Y. Research on low-carbon strategies in supply chain with environmental regulations based on differential game[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 527-546.
- [15] 姜跃, 韩水华, 赵洋. 低碳经济下三级供应链动态减排的微分博弈分析[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(12): 89-97.
(Jiang Y, Han S H, Zhao Y. Differential game analysis of dynamic carbon emission reduction strategy of three-echelon supply chain under low-carbon economy[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(12): 89-97.)
- [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] 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.)
- [18] 柏庆国, 徐健腾. 碳政策下分布式鲁棒优化模型的生产与减排策略[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(7):

- 1696-1709.
(Bai Q G, Xu J T. Joint production and emission reduction decisions for the distributionally robust optimization problem under carbon regulations[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(7): 1696-1709.)
- [19] 杨惠霄, 骆建文. 碳税政策下的供应链减排决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3092-3102.
(Yang H X, Luo J W. Emission reduction in a supply chain with carbon tax policy[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(12): 3092-3102.)
- [20] Kennedy A P, Sethi S P, Siu C C, et al. Cooperative advertising in a dynamic three-echelon supply chain[J]. *Production and Operations Management*, 2021, 30(11): 3881-3905.
- [21] Bensoussan A, Chen S K, Chutani A, et al. Feedback stackelberg—Nash equilibria in mixed leadership games with an application to cooperative advertising[J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2019, 57(5): 3413-3444.
- [22] Yin S, Li B Z. Transferring green building technologies from academic research institutes to building enterprises in the development of urban green building: A stochastic differential game approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 39: 631-638.
- [23] 马德青, 胡劲松. 零售商具相对公平的闭环供应链随机微分博弈模型[J]. *管理学报*, 2018, 15(3): 467-474.
(Ma D Q, Hu J S. Stochastic differential game model of closed-loop supply chain with retailer's relatively fairness[J]. *Chinese Journal of Management*, 2018, 15(3): 467-474.)
- [24] Ghosh D, Shah J. A comparative analysis of greening policies across supply chain structures[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135(2): 568-583.
- [25] Zhang S Y, Wang C X, Yu C, et al. Governmental cap regulation and manufacturer's low carbon strategy in a supply chain with different power structures[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 134: 27-36.
- [26] 王玉燕, 梁佳平, 申亮, 等. 电商平台公平关切下低碳 E-CLSC 的决策研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(4): 115-125.
(Wang Y Y, Liang J P, Shen L, et al. Research on the decision-making of low-carbon E-CLSC under fairness concern of E-commerce platform[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(4): 115-125.)
- [27] 王兆华, 陆彬, 王博, 等. 节能信息曝光度对绿色消费行为影响的实证分析——来自电商数据平台大规模文本数据的判据[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(1): 241-251.
(Wang Z H, Lu B, Wang B, et al. The impact of energy-saving information exposure on green consumption behavior—An empirical study of large-scale text data from E-commerce data platforms[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(1): 241-251.)
- [28] Lundgren T. A real options approach to abatement investments and green goodwill[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2003, 25(1): 17-31.
- [29] 王玉燕, 苏梅, 申亮, 等. 电商闭环供应链中的“让利”公平关切回收决策研究[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(12): 87-97.
(Wang Y Y, Su M, Shen L, et al. Recovery decision of altruistic fairness concern on E-commerce closed-loop supply chain[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(12): 87-97.)

作者简介

徒君(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事供应链机制设计的研究, E-mail: tovegar@126.com;

高凤阳(1997—), 男, 硕士生, 从事微分博弈的研究, E-mail: 101941336@qq.com;

黄敏(1968—), 女, 教授, 博士, 从事物流与供应链管理的研究, E-mail: mhuang@mail.neu.edu.cn.