



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION

碳交易政策下基于技术投资的供应链纵向合作动态减排研究

王道平, 常敬雅, 郝玫

引用本文:

王道平, 常敬雅, 郝玫. 碳交易政策下基于技术投资的供应链纵向合作动态减排研究[J]. *控制与决策*, 2024, 39(5): 1654–1664.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.2030>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

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>

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>

损失厌恶下考虑参照利润效应的供应链决策模型

Decision model of supply chain considering reference profit under loss aversion

控制与决策. 2020, 35(11): 2810–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0094>

碳交易政策下基于技术投资的供应链 纵向合作动态减排研究

王道平[†], 常敬雅, 郝 玫

(北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 在碳交易政策背景下,以投资碳减排技术的制造商和投资区块链技术的零售商组成的供应链为研究对象,建立基于技术投资的集中决策模型、分散决策模型和纵向合作决策模型,运用微分博弈的方法研究供应链的技术投资决策与纵向合作策略问题,并设计双向成本分担契约来协调供应链. 研究表明:只有当零售商的边际利润满足一定条件时,零售商才会选择与制造商纵向合作,且碳交易政策的存在会使纵向合作的条件变得更加严格;纵向合作能够实现供应链“减排增效”的双重红利;当碳交易价格高于某一阈值时,消费者绿色偏好和绿色信息敏感度的增加会降低供应链成员的技术投资水平;在一定条件下,双向成本分担契约能够完全协调供应链.

关键词: 碳交易政策; 碳减排技术投资; 区块链技术投资; 纵向合作; 动态减排

中图分类号: F274 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2030

引用格式: 王道平,常敬雅,郝玫. 碳交易政策下基于技术投资的供应链纵向合作动态减排研究[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1654-1664.

Research on dynamic emission reduction of supply chain vertical cooperation based on technology investment under carbon trading policy

WANG Dao-ping[†], CHANG Jing-ya, HAO Mei

(School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In the context of carbon trading policy, a supply chain consisting of manufacturers who invest in carbon emission reduction technology and retailers who invest in blockchain technology is used as the research object. A centralized decision model, a decentralized decision model and a vertical cooperation decision model based on technology investment are developed, and a differential game approach is applied to study the problem of technology investment decision and the vertical cooperation strategy of the supply chain, and a two-way cost-sharing contract is designed to coordinate the supply chain. The results show that: Retailers will choose to cooperate with manufacturers only when their marginal profits meet certain conditions, and the existence of carbon trading policies will make the conditions for vertical cooperation more stringent; Vertical cooperation can achieve the double dividend of “emission reduction and efficiency enhancement” in the supply chain; When the price of carbon trading is higher than a certain threshold, consumers’ green preferences and green information sensitivity will not be affected; When the price of carbon trading is above a certain threshold, the increase in consumer green preferences and green information sensitivity will reduce the level of technology investment by supply chain members; Under certain conditions, two-way cost-sharing contracts can fully coordinate the supply chain.

Keywords: carbon trading policy; carbon emission reduction technology investment; blockchain technology investment; vertical cooperation; dynamic emission reduction

0 引言

近年来,全球气候变暖问题受到了世界各国政府的密切关注. 习近平主席明确表示,中国将力争于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的“双

碳”目标. 作为实现我国“双碳”目标的重要政策工具,碳交易政策将发挥巨大的市场作用. 在国家“双碳”目标和碳交易政策的双重导向下,企业纷纷投入到碳减排的行列中,而实现企业碳减排的最根本途径

收稿日期: 2022-11-23; 录用日期: 2023-06-25.

责任编辑: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: dpwang@ustb.edu.cn.

*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.

是对碳减排技术的投资与创新^[1-2]。例如,华为投资使用光伏发电技术代替传统的火力发电,每年可为华为企业节约8%的总用电量。与此同时,随着消费者环保意识的不断提升,越来越多的消费者倾向于购买绿色产品^[3]。然而在现实生活中,消费者并不能直接获取产品的碳排放量、碳减排水平等绿色质量信息,因此不少企业开始投资信息披露技术,主动地向消费者披露产品的绿色质量信息^[4]。其中,区块链因其具有去中心化、无法篡改和实时性等特点而被企业广泛应用^[5]。例如,2018年,比亚迪作为全球领先的新能源汽车制造商,借由唯链“雷神区块链”所提供的精准数据和控制服务,使企业和终端用户均从中获益。可见,区块链技术可以助力碳减排技术的创新与应用,这两种技术的联合能够为供应链企业向绿色转型发展赋能。因此,在上述现实背景下,研究制造商碳减排技术投资和零售商区块链技术投资对促进我国供应链的绿色可持续发展具有重要的参考价值和现实意义。

与本文相关的文献综述主要有两类:一类是技术投资对供应链运营决策方面的影响;另一类是在碳交易政策背景下供应链动态减排和纵向合作的相关研究。目前,关于供应链技术投资的研究主要包括碳减排技术投资和区块链技术投资。关于碳减排技术投资方面,Saberi等^[6]和Li等^[7]的研究均发现,投资应用碳减排技术会降低企业生产过程中二氧化碳的排放量。王珊珊等^[8]指出,采用碳减排技术的企业可以获得更高的市场竞争力。从供应链协调角度出发,张云丰等^[9]研究了碳减排技术投资对产品碳排放量的影响,并通过设计协调契约引导供应链企业双领域合作。关于区块链技术投资方面,张令荣等^[10]探讨了区块链技术的应用对低碳供应链企业运营决策的影响,结果表明政府投资建设区块链平台能够有效提高企业减排的积极性。Babich等^[11]发现,供应链企业使用区块链技术能够向下游消费者披露更多有价值的产品信息。刘亮等^[12]指出,投资区块链技术能够抑制供应商的谎报行为。Xu等^[13]考虑了制造商和零售商同时进行技术投资的供应链联合减排问题,本文正是在该项研究的基础上进行更加深入的探索,与其不同之处是,本文考虑了碳交易政策在企业技术投资过程中的影响作用以及企业技术投资的滞后性。

在绿色发展背景下,碳交易机制对供应链减排产生的影响受到学术界的广泛关注。Benjaafar等^[14]首次将碳排放因素纳入供应链系统,发现碳交易机制能够改变供应链的成本结构。企业的碳减排行为为一

个长期且动态的过程^[15-16],已有学者对碳交易政策下企业的长期碳减排决策展开了研究。如魏守道^[17]发现,只有企业采取碳减排措施才能有效降低产品的碳排放量,而政府的碳交易制度只能起到宏观监督的作用,并不能从本质上降低碳排放。刘名武等^[18]在碳交易政策下,建立了供应链低碳减排技术投入的动态优化模型,推导出实现减排和收益双赢的低碳技术特征条件。此外,部分学者对碳交易政策下供应链成员的纵向合作进行了相关研究。如陈静等^[19]构建了以制造商为主导的纵向合作减排微分博弈模型,发现纵向向下合作时供应链成员所获得的利润比纵向向上合作时更高。Zhou等^[20]和向小东等^[21]将产品需求构建成关于碳减排量的动态方程,进而研究了供应商和制造商的长期纵向合作减排问题。Liu等^[22]比较分析了碳交易政策下成本共担契约与两部定价契约对供应链成员的激励作用。与Liu等^[22]的研究相比,本文在考虑碳交易政策下供应链成员纵向合作减排的基础上,着重研究企业的技术投资对供应链减排的长期影响。

综上,本文从动态角度出发,在碳交易政策背景下,考虑制造商投资碳减排技术以降低生产过程中产生的碳排放,同时还考虑零售商投资区块链技术以进行产品绿色质量信息披露,将这两种不同的技术投资应用到同一供应链中,研究供应链的技术投资决策和纵向合作策略问题,同时设计双向成本分担契约协调供应链,并分析碳交易政策等因素对供应链成员决策和利润的影响,力求为供应链合作减排策略的选择和碳交易政策的制定提供科学决策依据。

1 问题描述与模型假设

本文研究由制造商 M 和零售商 R 组成的两级供应链。其中:制造商通过投资碳减排技术来代替传统技术,减少生产过程中的碳排放,实现绿色生产;零售商通过投资区块链技术,将产品的绿色质量信息传递给消费者,从而吸引具有环保意识的消费者购买。此外,政府为促进“双碳”目标的早日实现,对制造商实施碳交易政策。

本文的模型参数及含义如表1所示。

本文提出的假设如下:

假设1 产品市场需求的增加会提高碳排放,而制造商对碳减排技术的投资会降低碳排放^[23]。此外,碳排放是一个随时间变化的动态过程^[24],其能够被自然界吸收,因此碳排放会存在自然衰减的现象, t 时刻的碳排放为

$$\dot{X}(t) = \phi D(t) - \theta_M E_M(t) - \beta X(t). \quad (1)$$

表1 模型参数含义

参数	含义
M_M, M_R	制造商和零售商的边际利润
$E_M(t)$	t 时刻制造商的碳减排技术投资水平
$B_R(t)$	t 时刻零售商的区块链技术投资水平
$X(t)$	t 时刻制造商生产过程中产生的碳排放
$G(t)$	t 时刻产品的绿色商誉
$D(t)$	t 时刻产品的市场需求
$F(t)$	t 时刻制造商所获得的碳交易收益或支出
$C_M(t)$	t 时刻制造商的碳减排技术投资成本
$C_R(t)$	t 时刻零售商的区块链技术投资成本
λ_M	碳减排技术投资对市场需求的的影响系数
λ_R	区块链技术投资对市场需求的的影响系数
η_M	制造商的碳减排技术投资成本系数
η_R	零售商的区块链技术投资成本系数
X_0	碳排放的初始值 ($X(0) = X_0$)
G_0	绿色商誉的初始值 ($G(0) = G_0$)
D_0	产品的初始市场需求 ($D(0) = D_0$)
β	碳排放随着时间增加的自然衰减系数
θ_M	碳减排技术投资水平对碳排放的影响系数
θ_R	区块链技术投资水平对绿色商誉影响系数
μ	绿色商誉随着时间增加的自然衰减系数
ρ	贴现因子
e_0	碳配额
P_c	碳交易价格
ϕ	单位产品的碳排放
Π_M, Π_R, Π_T	制造商、零售商和供应链的最优利润
W_M, W_R, W_T	制造商、零售商和供应链的最优利润值

假设2 零售商通过投资区块链技术,有选择地向消费者披露产品的绿色质量信息,这些绿色质量信息能够提升产品良好的绿色形象,有利于增加产品的绿色商誉. 随着时间的推移和消费者的遗忘,绿色商誉也存在自然衰减特征, t 时刻产品的绿色商誉为

$$\dot{G}(t) = \theta_R B_R(t) - \mu G(t). \quad (2)$$

假设3 绿色商誉和碳排放会正向影响产品的市场需求^[25]. 制造商对碳减排技术的投资可以吸引绿色环保型消费者购买;零售商通过投资区块链技术向消费者传递产品的绿色质量信息,同样有利于增加消费者对产品的青睐. 因此, t 时刻产品的市场需求可表示为

$$X^{C*} = X_\infty^{C*} + \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu} (G_0 - G_\infty^{C*}) e^{-\mu t} + \left[X_0 - X_\infty^{C*} - \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu} (G_0 - G_\infty^{C*}) \right] e^{-(\phi + \beta)t},$$

$$X_\infty^{C*} = \frac{P_c(-\mu(\mu + \rho)\eta_R(\theta_M - \phi\lambda_M)^2 - \phi^2\eta_M(\theta_R + \mu\lambda_R)(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R))}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R} - \frac{(\mu(\mu + \rho)\eta_R(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)(\theta_M - \phi\lambda_M) - (\beta + \rho)\phi\eta_M(\theta_R + \mu\lambda_R)(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R))(M_M + M_R)}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R}. \quad (9)$$

$$D(t) = G(t) - X(t) + \lambda_M E_M(t) + \lambda_R B_R(t). \quad (3)$$

假设4 在碳交易市场上,制造商买入和售出碳排放权的价格均为 P_c ($P_c > 0$),且政府会在碳交易政策实施初期向制造商分配碳配额 e_0 ,因此, t 时刻制造商在碳交易市场中获得的碳交易收益或支出^[26-27]为

$$F(t) = P_c(e_0 - X(t)). \quad (4)$$

假设5 正如大量关于动态技术投资的文献所述^[28-29],碳减排技术投资成本和区块链技术投资成本均为凸函数,因此, t 时刻制造商和零售商的技术投资成本为

$$C_M(t) = \frac{\eta_M}{2} E_M^2(t), C_R(t) = \frac{\eta_R}{2} B_R^2(t). \quad (5)$$

为方便书写,下文有关符号中省略参数 t .

2 模型建立及求解

2.1 基于技术投资的集中决策模型

在集中决策下,供应链成员以供应链系统利润最大化为目标采取行动,共同决策碳减排技术投资水平 E_M 和区块链技术投资水平 B_R . 此时,整个供应链系统的决策目标为

$$\Pi_T^C = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[(M_M + M_R)(G^C - X^C + \lambda_M E_M^C + \lambda_R B_R^C) - \frac{\eta_M}{2} (E_M^C)^2 - \frac{\eta_R}{2} (B_R^C)^2 + P_c(e_0 - X^C) \right] dt. \quad (6)$$

命题1 集中决策的均衡结果如下:

1) 制造商的最优碳减排技术投资水平和零售商的最优区块链技术投资水平为

$$E_M^{C*} = \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M) + (\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)(M_M + M_R)}{(\beta + \rho + \phi)\eta_M}, \quad (7)$$

$$B_R^{C*} = \frac{(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)(-\phi P_c + (\beta + \rho)(M_M + M_R))}{(\mu + \rho)(\beta + \rho + \phi)\eta_R}. \quad (8)$$

2) 碳排放的最优轨迹和稳态值为

3) 绿色商誉的最优轨迹和稳态值为

$$G^{C*} = G_{\infty}^{C*} + (G_0 - G_{\infty}^{C*})e^{-\mu t},$$

$$G_{\infty}^{C*} = \frac{\theta_R(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)(-\phi P_c + (\beta + \rho)(M_M + M_R))}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \rho + \phi)\eta_R}. \quad (10)$$

4) 供应链系统的最优利润为

$$\Pi_T^{C*} = e^{-\rho t} W_T^{C*}(X^C, G^C) = e^{-\rho t}(c_1 X^{C*} + c_2 G^{C*} + c_3). \quad (11)$$

推论1 集中决策下零售商的最优区块链技术投资水平随消费者绿色信息敏感度的变化规律为:

- 1) 当 $0 < P_c < \frac{(\beta + \rho)(M_M + M_R)}{\phi}$ 时, $\frac{\partial B_R^{C*}}{\partial \lambda_R} > 0$;
- 2) 当 $P_c \geq \frac{(\beta + \rho)(M_M + M_R)}{\phi}$ 时, $\frac{\partial B_R^{C*}}{\partial \lambda_R} \leq 0$.

由推论1可知,当碳交易价格高于阈值 $(\beta + \rho)(M_M + M_R)/\phi$ 时,消费者绿色信息敏感度会对零售商的区块链技术投资水平产生负向影响.这是因为:消费者绿色信息敏感度增加会直接或间接地增加产品的市场需求,进而增加碳排放;而在集中决策下,供应链成员都以供应链系统利润最大化为目标,为了使供应链系统能够从碳交易市场中获得更多收益或减少较多的支出,零售商会减少对区块链技术的投资力度,从而减少产品绿色质量信息的披露以降低碳排放.

推论2 集中决策下制造商的最优碳减排技术投资水平随消费者绿色偏好的变化规律为:

- 1) 当 $0 < P_c < \frac{(\beta + \rho)(M_M + M_R)}{\phi}$ 时, $\frac{\partial E_M^{C*}}{\partial \lambda_M} > 0$;
- 2) 当 $P_c \geq \frac{(\beta + \rho)(M_M + M_R)}{\phi}$ 时, $\frac{\partial E_M^{C*}}{\partial \lambda_M} \leq 0$.

由推论2可知,当碳交易价格高于阈值 $(\beta + \rho)(M_M + M_R)/\phi$ 时,消费者绿色偏好会对制造商的碳减排技术投资水平产生负向影响,这与武丹等^[3]所得到的“较高的消费者绿色偏好能够激励企业碳减排”的结论不同.这是因为,当碳交易价格较高时,消费者绿色偏好的增加会提高制造商碳交易过程中高成本支出的风险,从而打击制造商碳减排的积极性.因此,为了降低碳排放,制造商会选择减少对碳减排技术的投资力度以降低产品的市场需求,但这样的行为是万万不可取的,我国实现“双碳”目标的关键是用绿色技术替代传统技术,要减少碳排放,而不是减少生产力.

2.2 基于技术投资的分散决策模型

在分散决策下,制造商和零售商是平等的伙伴关系,均以各自利润最大化为目标依次进行决策,其决策变量为制造商的碳减排技术投资水平 E_M 和零售商的区块链技术投资水平 B_R . 此时,制造商和零售商的决策目标为

$$\Pi_M^D = \max \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [M_M(G^D - X^D + \lambda_M E_M^D + \lambda_R B_R^D) - \frac{\eta_M}{2}(E_M^D)^2 + P_c(e_0 - X^D)] dt, \quad (12)$$

$$\Pi_R^D = \max \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [M_R(G^D - X^D + \lambda_M E_M^D + \lambda_R B_R^D) - \frac{\eta_R}{2}(B_R^D)^2] dt. \quad (13)$$

命题2 分散决策的均衡结果如下:

1) 制造商的最优碳减排技术投资水平和零售商的最优区块链技术投资水平为

$$E_M^{D*} = \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M) + (\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)M_M}{(\beta + \rho + \phi)\eta_M}, \quad (14)$$

$$B_R^{D*} = \frac{(\beta + \rho)(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)M_R}{(\mu + \rho)(\beta + \rho + \phi)\eta_R}. \quad (15)$$

2) 碳排放的最优轨迹和稳态值为

$$X^{D*} = X_{\infty}^{D*} + \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu}(G_0 - G_{\infty}^{D*})e^{-\mu t} + \left[X_0 - X_{\infty}^{D*} - \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu}(G_0 - G_{\infty}^{D*}) \right] e^{-(\phi + \beta)t},$$

$$X_{\infty}^{D*} = \frac{(\beta + \rho)\phi\eta_M(\theta_R + \mu\lambda_R)(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)M_R}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R} + \frac{\mu(\mu + \rho)P_c\eta_R(\theta_M - \phi\lambda_M)^2}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R} + \frac{\mu(\mu + \rho)\eta_R(\eta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)(\theta_M - \phi\lambda_M)M_M}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R}. \quad (16)$$

3) 绿色商誉的最优轨迹和稳态值为

$$G^{D*} = G_{\infty}^{D*} + (G_0 - G_{\infty}^{D*})e^{-\mu t},$$

$$G_{\infty}^{D*} = \frac{(\beta + \rho)\theta_R(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)\Pi_R}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \rho + \phi)\eta_R}. \quad (17)$$

4) 制造商和零售商的最优利润为

$$\Pi_M^{D*} = e^{-\rho t} W_M^{D*}(X^D, G^D) = e^{-\rho t}(d_1 X^{D*} + d_2 G^{D*} + d_3), \quad (18)$$

$$\Pi_R^{D*} = e^{-\rho t} W_R^{D*}(X^D, G^D) = e^{-\rho t}(a_1 X^{D*} + a_2 G^{D*} + a_3). \quad (19)$$

推论3 分散决策下供应链成员的最优技术投

资水平随相关参数的变化规律为:

- 1) 当 $0 < P_c < \frac{(\beta + \rho)M_M}{\phi}$ 时, $\frac{\partial E_M^{D*}}{\partial \lambda_M} > 0$; 且当 $P_c \geq \frac{(\beta + \rho)M_M}{\phi}$ 时, $\frac{\partial E_M^{D*}}{\partial \lambda_M} \leq 0$.
- 2) $\frac{\partial B_R^{D*}}{\partial \lambda_R} > 0$.

根据推论3得知,当碳交易价格大于阈值 $(\beta + \rho)M_M/\phi$ 时,制造商的碳减排技术投资水平会随着消费者绿色偏好的增加而降低,此原因与推论2中的结论一致.此外,消费者绿色信息敏感度会对零售商的区块链技术投资水平产生正向影响.由此说明,当消费者绿色信息敏感度增加时,零售商应加大对区块链技术的投资力度,向消费者披露更多的产品绿色质量信息,促进消费者购买.

2.3 基于技术投资的纵向合作决策模型

作为供应链的上下游企业,制造商与零售商之间的合作减排被视为纵向合作减排.借鉴胡劲松等^[30]的研究发现,采用供应链下游企业对上游企业进行成本分担的纵向合作方式有利于实现合作企业双方的互利共赢.在本文的纵向合作中,零售商是主导者,制造商是跟随者.其中,零售商主动分担制造商的部分碳减排技术投资成本,以促进制造商对碳减排技术的投资.在此决策下,供应链成员的博弈顺序为:零售商首先确定其区块链技术投资水平 B_R 和对制造商碳减排技术投资成本的分担比例 α ; 然后,制造商根

$$X^{S*} = X_\infty^{S*} + \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu} (G_0 - G_\infty^{S*}) e^{-\mu t} + \left[X_0 - X_\infty^{S*} - \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu} (G_0 - G_\infty^{S*}) \right] e^{-(\phi + \beta)t},$$

$$X_\infty^{S*} = \frac{-\mu(\mu + \rho)P_c\eta_R(\theta_M - \phi\lambda_M)^2 + 2(\beta + \rho)\phi\eta_M(\theta_R + \mu\lambda_R)(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)M_R}{2\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R} - \frac{\mu(\mu + \rho)\eta_R(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)(\theta_M - \phi\lambda_M)(M_M + 2M_R)}{2\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R}. \quad (25)$$

3) 绿色商誉的最优轨迹和稳态值为

$$G^{S*} = G_\infty^{S*} + (G_0 - G_\infty^{S*})e^{-\mu t},$$

$$G_\infty^{S*} = \frac{(\beta + \rho)\theta_R(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)M_R}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \rho + \phi)\eta_R}. \quad (26)$$

4) 制造商和零售商的最优利润为

$$\Pi_M^{S*} = e^{-\rho t} W_M^{S*}(X^S, G^S) = e^{-\rho t} (s_1 X^{S*} + s_2 G^{S*} + s_3), \quad (27)$$

$$\Pi_R^{S*} = e^{-\rho t} W_R^{S*}(X^S, G^S) = e^{-\rho t} (b_1 X^{S*} + b_2 G^{S*} + b_3). \quad (28)$$

推论4 只有满足 $M_R > \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M)}{2(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)} + \frac{M_M}{2}$ 的条件时,零售商才愿意与制造商纵向合作;且零售商的边际利润 M_R 会对分担比例 α 产生正向影响,而制造商的边际利润 M_M 和碳交易价格 P_c 会对分担比例 α 产生负向影响.

由推论4可知,在碳交易政策背景下,当满足 M_R

据零售商的决策决定其碳减排技术投资水平 E_M . 此时,制造商和零售商的决策目标为

$$\Pi_M^S = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[M_M(G^S - X^S + \lambda_M E_M^S + \lambda_R B_R^S) - (1 - \alpha) \frac{\eta_M}{2} (E_M^S)^2 + P_c(e_0 - X^S) \right] dt, \quad (20)$$

$$\Pi_R^S = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[M_R(G^S - X^S + \lambda_M E_M^S + \lambda_R B_R^S) - \frac{\eta_R}{2} (B_R^S)^2 - \alpha \frac{\eta_M}{2} (E_M^S)^2 \right] dt. \quad (21)$$

命题3 纵向合作决策的均衡结果如下:

1) 制造商的最优碳减排技术投资水平、零售商的最优区块链技术投资水平和分担比例分别为

$$E_M^{S*} = \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M) + (\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)(M_M + 2M_R)}{2(\beta + \rho + \phi)\eta_M}, \quad (22)$$

$$B_R^{S*} = \frac{(\beta + \rho)(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)M_R}{(\mu + \rho)(\beta + \rho + \phi)\eta_R}, \quad (23)$$

$$\alpha^* = \frac{P_c(-\theta_M + \phi\lambda_M) - (\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)(M_M - 2M_R)}{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M) + (\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)(M_M + 2M_R)}. \quad (24)$$

2) 碳排放的最优轨迹和稳态值为

$$X^{S*} = X_\infty^{S*} + \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu} (G_0 - G_\infty^{S*}) e^{-\mu t} + \left[X_0 - X_\infty^{S*} - \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu} (G_0 - G_\infty^{S*}) \right] e^{-(\phi + \beta)t},$$

$$X_\infty^{S*} = \frac{-\mu(\mu + \rho)P_c\eta_R(\theta_M - \phi\lambda_M)^2 + 2(\beta + \rho)\phi\eta_M(\theta_R + \mu\lambda_R)(\theta_R + (\mu + \rho)\lambda_R)M_R}{2\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R} - \frac{\mu(\mu + \rho)\eta_R(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)(\theta_M - \phi\lambda_M)(M_M + 2M_R)}{2\mu(\mu + \rho)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)\eta_M\eta_R}.$$

$> \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M)}{2(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)} + \frac{M_M}{2}$ 条件时,零售商会选择分担制造商的碳减排技术投资成本,且分担比例会随着零售商边际利润的增加而增加,随着制造商边际利润的增加而减少.这意味着:当制造商自身盈利能力水平较高时,不需要零售商分担其较多的碳减排技术投资成本,制造商也能达到较高的利润水平;而当零售商自身盈利能力较强时,零售商更愿意对制造商的碳减排技术投资成本进行分担,从而获得更高的利润.与陈静等^[19]的研究相比,本文发现当没有碳交易政策时 ($P_c = 0$),零售商愿意与制造商纵向合作的条件为 $M_R > M_M/2$,说明碳交易政策的实施会使零售商与制造商纵向合作的条件变得更为严格.

3 比较分析

本节在上述理论结果的基础上,对集中决策、分散决策和纵向合作决策下供应链的最优决策和利润

进行比较分析.

命题4 3种决策下, 零售商的最优区块链技术投资水平和制造商的最优碳减排技术投资水平的关系为:

1) 当 $0 < P_c < \frac{(\beta + \rho)M_M}{\phi}$ 时, $B_R^{C*} > B_R^{S*} = B_R^{D*}$; 当 $\frac{(\beta + \rho)M_M}{\phi} \leq P_c < \frac{(\beta + \rho)(M_M + M_R)}{\phi}$ 时, $B_R^{S*} = B_R^{D*} \geq B_R^{C*}$.

2) 当 $M_R > \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M)}{2(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)} + \frac{M_M}{2}$ 时, $E_M^{C*} > E_M^{S*} > E_M^{D*}$; 当 $M_R \leq \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M)}{2(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)} + \frac{M_M}{2}$ 时, $E_M^{C*} > E_M^{S*} = E_M^{D*}$.

由命题4可知, 集中决策下, 制造商的碳减排技术投资水平最高, 而零售商的区块链技术投资水平并不总是最高的, 这与刘丽等^[29]“集中决策下供应链成员的技术投资水平最高”的结论不一致. 这是因为, 本文在刘丽等^[29]研究的基础上进一步考虑了碳交易政策对企业技术投资决策的影响作用. 在集中决策下供应链成员形成了一个利益共同体, 当碳交易价格较高时, 零售商为了降低供应链在碳交易市场中的支出, 会适当减少对产品绿色质量信息的披露. 由于碳交易政策在纵向合作决策下只作用于制造商, 供应链成员间的纵向合作对零售商的区块链技术投资水平并没有影响.

命题5 3种决策下绿色商誉稳态值的关系为:

1) 当 $0 < P_c < \frac{(\beta + \rho)M_M}{\phi}$ 时, $G_\infty^{C*} > G_\infty^{S*} = G_\infty^{D*}$;
2) 当 $\frac{(\beta + \rho)M_M}{\phi} \leq P_c < \frac{(\beta + \rho)(M_M + M_R)}{\phi}$ 时, $G_\infty^{S*} = G_\infty^{D*} \geq G_\infty^{C*}$.

由命题5可知, 在不同决策下, 绿色商誉之间的大小关系取决于碳交易价格的高低. 当碳交易价格低于阈值 $(\beta + \rho)M_M/\phi$ 时, 集中决策下的绿色商誉最高; 而当碳交易价格高于阈值时, 集中决策下绿色商誉最低. 此外, 供应链成员间的纵向合作对绿色商誉没有影响. 绿色商誉仅由零售商的区块链技术投资水平决定, 当零售商区块链技术投资水平较高时, 消费者能够接触到更多的产品绿色质量信息, 增加了环保型消费者对产品的好感, 从而提高了绿色商誉; 而当零售商区块链技术投资水平较低时, 企业与消费者之间没有良好的信息交互环境, 消费者能够得知的产品绿色质量信息很少, 导致绿色商誉较低.

命题6 3种决策下碳排放稳态值的关系为:

1) 当 $M_R > \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M)}{2(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)} + \frac{M_M}{2}$ 时, $X_\infty^{S*} < X_\infty^{D*}$;

2) 当 $M_R \leq \frac{P_c(\theta_M - \phi\lambda_M)}{2(\theta_M + (\beta + \rho)\lambda_M)} + \frac{M_M}{2}$ 时, $X_\infty^{S*} = X_\infty^{D*}$.

由命题6可知: 纵向合作决策下的碳排放始终低于分散决策, 这是因为供应链成员间的纵向合作可以促进制造商的碳减排技术投资, 但对零售商的区块链技术投资没有影响; 而集中决策下的碳排放与其他两种决策下碳排放的关系尚不确定. 其原因是, 集中决策下制造商的碳减排技术投资水平总是最高的, 而当碳交易价格较小时, 集中决策下零售商的区块链技术投资水平也是最高的, 此时产品的市场需求量最高, 因此碳排放可能高于其他两种决策; 但当碳交易价格较高时, 集中决策下区块链技术投资水平最低, 这使得该决策下的碳排放可能最低. 说明供应链成员间完全合作的方式可能无法减少碳排放, 但纵向合作的方式一定会减少碳排放.

命题7 不同决策下最优利润值的关系如下:

$$W_M^{S*} > W_M^{D*}, W_R^{S*} > W_R^{D*}, W_T^{C*} > W_M^{S*} + W_R^{S*}.$$

根据命题7可知, 集中决策下供应链总利润最高, 且与分散决策相比, 纵向合作决策既能提高供应链各成员的利润, 又能增加供应链的总利润, 说明纵向合作能够实现帕累托改进. 此外, 结合命题5的结论可知, 供应链成员间的纵向合作虽然对绿色商誉没有影响, 但是能通过降低碳排放提高供应链绩效, 实现供应链“减排增效”的双重红利. 由此说明, 为了供应链利润的增长和可持续发展, 政府应制定相应政策以促进企业合作. 此外, 鉴于纵向合作策略不能完全协调供应链, 本文考虑通过双向成本分担契约来实现供应链的完全协调.

4 双向成本分担契约

根据上一节的分析可知, 纵向合作情形下企业的技术投资水平仍低于集中决策. 因此, 受文献^[29]的启发, 本节通过设计双向成本分担契约来实现供应链的完全协调. 在双向成本分担契约下, 零售商与制造商首先共同协商决定各自的成本分担比例, 即零售商分担 τ_R 比例的制造商碳减排技术投资成本, 同时制造商分担 τ_M 比例的零售商的区块链技术投资成本; 然后, 基于供应链成员确定的双向成本分担比例, 零售商作为领导者先确定区块链技术投资水平 B_R , 制造商作为跟随者再决定碳减排技术投资水平 E_M . 此时, 制造商和零售商的决策目标为

$$\begin{aligned} \Pi_M^I = & \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[M_M(G^I - X^I + \lambda_M E_M^I + \lambda_R B_R^I) - \right. \\ & \left. (1 - \tau_R) \frac{\eta_M}{2} (E_M^I)^2 - \tau_M \frac{\eta_R}{2} (B_R^I)^2 + \right. \end{aligned}$$

$$P_c(e_0 - X^I)]dt, \tag{29}$$

$$\begin{aligned} \Pi_R^I = & \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[M_R(G^I - X^I + \lambda_M E_M^I + \right. \\ & \left. \lambda_R B_R^I) - (1 - \tau_M) \frac{\eta_R}{2} (B_R^I)^2 - \tau_R \frac{\eta_M}{2} (E_M^I)^2 \right] dt. \end{aligned} \tag{30}$$

命题8 双向成本分担契约的均衡结果如下:

$$\begin{aligned} X^{I*} = & X_\infty^{I*} + \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu} (G_0 - G_\infty^{I*}) e^{-\mu t} + \left[X_0 - X_\infty^{I*} - \frac{\phi}{\phi + \beta - \mu} (G_0 - G_\infty^{I*}) \right] e^{-(\phi + \beta)t}, \\ X_\infty^{I*} = & \frac{(\theta_M - \phi \lambda_M) (P_c(\theta_M - \phi \lambda_M) + (\theta_M + (\beta + \rho) \lambda_M) M_M)}{\eta_M(-1 + \tau_R)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)} + \frac{(\beta + \rho) \phi (\theta_R + \mu \lambda_R) (\theta_R + (\mu + \rho) \lambda_R) M_R}{\mu(\mu + \rho) \eta_R(1 - \tau_M)(\beta + \phi)(\beta + \rho + \phi)}. \end{aligned} \tag{33}$$

3) 绿色商誉的最优轨迹和稳态值为

$$\begin{aligned} G^{I*} = & G_\infty^{I*} + (G_0 - G_\infty^{I*}) e^{-\mu t}, \\ G_\infty^{I*} = & \frac{(\beta + \rho) \theta_R (\theta_R + (\mu + \rho) \lambda_R) M_R}{\mu(\mu + \rho)(\beta + \rho + \phi) \eta_R(1 - \tau_M)}. \end{aligned} \tag{34}$$

4) 制造商和零售商的最优利润为

$$\begin{aligned} \Pi_M^{I*} = & e^{-\rho t} W_M^{I*}(X^I, G^I) = \\ & e^{-\rho t} (f_1 X^{I*} + f_2 G^{I*} + f_3), \end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned} \Pi_R^{I*} = & e^{-\rho t} W_R^{I*}(X^I, G^I) = \\ & e^{-\rho t} (h_1 X^{I*} + h_2 G^{I*} + h_3). \end{aligned} \tag{36}$$

推论5 在 $0 < P_c < \frac{(\beta + \rho) M_M}{\phi}$ 的前提下, 当双向成本分担比例 (τ_R, τ_M) 满足以下条件时, 双向成本分担契约可以完全协调供应链:

$$\begin{aligned} \tau_M = & \frac{-\phi P_c + (\beta + \rho) M_M}{-\phi P_c + (\beta + \rho)(M_M + M_R)}, \\ \tau_R = & \frac{(\theta_M + (\beta + \rho) \lambda_M) M_R}{P_c(\theta_M - \phi \lambda_M) + (\theta_M + (\beta + \rho) \lambda_M)(M_M + M_R)}. \end{aligned}$$

由推论5可知, 当碳交易价格低于阈值 $(\beta + \rho) M_M / \phi$ 时, 双向成本分担契约能够实现供应链完全协调. 此外, 由于碳减排技术投资水平和区块链技术投资水平均可达到集中决策水平, 碳排放和绿色商誉的时间轨迹与集中决策相同, 由此说明, 双向成本分担契约下的供应链整体利润可以达到集中决策水平. 进一步, 要使供应链成员均能接受该契约, 则需要保证供应链成员在双向成本分担契约下的利润均不小于分散决策下的利润, 即存在 τ_M 和 τ_R , 使得 $\Pi_M^{I*} \geq \Pi_M^{D*}, \Pi_R^{I*} \geq \Pi_R^{D*}$. 但这两种决策下的利润函数较为复杂, 难以直接比较, 因此, 本文将在数值算例部分, 通过赋值的方法对上述条件进行求解分析.

5 数值算例分析

为了能够更加直观地分析关键因素对碳排放、绿色商誉和企业利润的影响, 本文利用 Matlab 软件分别对上述4种微分博弈决策模型进行算例分析. 参

1) 制造商的最优碳减排技术投资水平和零售商的最优区块链技术投资水平为

$$E_M^{I*} = \frac{P_c(\theta_M - \phi \lambda_M) + (\theta_M + (\beta + \rho) \lambda_M) M_M}{(\beta + \rho + \phi) \eta_M(1 - \tau_R)}, \tag{31}$$

$$B_R^{I*} = \frac{(\beta + \rho)(\theta_R + (\mu + \rho) \lambda_R) M_R}{(\mu + \rho)(\beta + \rho + \phi) \eta_R(1 - \tau_M)}. \tag{32}$$

2) 碳排放的最优轨迹和稳态值为

考文献[19]和[21], 对模型中的各参数赋值如下: $\rho = 0.1, \phi = 4, M_M = 4, M_R = 4, \theta_M = 5, \theta_R = 4, \beta = 0.1, \mu = 0.1, \lambda_M = 0.5, \lambda_R = 0.6, \eta_M = 1, \eta_R = 1, e_0 = 100, P_c = 0.1$. 同时, 根据推论4可知, 上述参数设定满足 $M_R > \frac{P_c(\theta_M - \phi \lambda_M)}{2(\theta_M + (\beta + \rho) \lambda_M)} + \frac{M_M}{2}$, 因此, 本算例分析是在零售商愿意与制造商纵向合作的前提下进行的.

5.1 碳排放和绿色商誉的轨迹分析

保持其他参数不变, 碳排放初始值和绿色商誉初始值分别取 $X_0 = 100$ 和 $250, G_0 = 100$ 和 250 , 可得3种决策下绿色商誉和碳排放的时间演化轨迹, 如图1和图2所示. 由图1可知, 绿色商誉的时间演化轨迹与绿色商誉初始值有关, 较高的初始绿色商誉会随时间而衰减, 较低的初始商誉会随时间而提高, 但最终都会收敛至稳态水平, 且绿色商誉的稳态值与绿色商誉的初始值无关, 只与公司选择的运营决策模式相关.

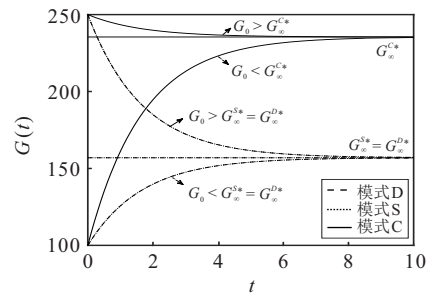


图1 绿色商誉的时间轨迹

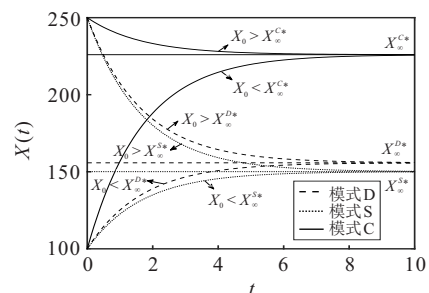


图2 碳排放的时间轨迹

由图2可知,在上述参数设置下,集中决策的碳排放水平最高,分散决策次之,纵向合作决策最低,且无论碳排放初始值大小如何,碳排放最终均趋近其稳态值.集中决策下制造商的碳减排技术投资水平和绿色商誉都是最高的,因此,集中决策下产品的市场需求也是最大的,在此情况下制造商需要生产更多的产品以满足消费者的需求,而产量的增加势必会导致生产过程中产生的碳排放增多,这使得集中决策下的碳排放水平最高.此外,纵向合作决策下的碳排放最低,说明纵向合作的方式能够有效降低供应链企业的碳排放,促进供应链绿色可持续发展.

5.2 利润轨迹分析

由图3可知,在两种不同决策下,零售商的利润会随时间逐渐增加至稳态水平,而制造商的利润却会随时间逐渐减少至稳态水平.这是因为制造商在生产过程中产生的碳排放会逐渐增加至其稳态值,而在碳配额固定的前提下,两种决策下的碳排放始终高于碳配额,所以制造商在碳交易市场中需要购买其

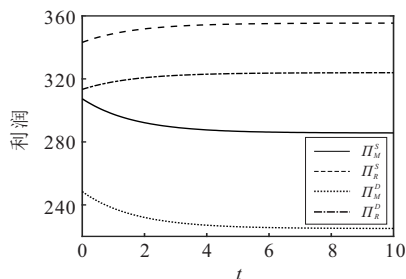


图3 供应链成员利润时间轨迹

他企业多余的碳排放权,可见在碳排放逐渐增加的过程中,制造商需要付出更多的碳交易成本和碳减排技术投资成本,直至碳排放水平稳定.

由图4可以看出,3种决策下供应链总利润均呈先下降后平稳的变化趋势,这是由于在供应链总利润趋于稳定前,不同决策下制造商利润的减少量高于零售商利润的增加量,致使总利润下降.此外,虽然集中决策下的碳排放最高,但此决策下产品的市场需求和绿色商誉也是最大的,因此,集中决策下的供应链整体利润总是最高的.而在同一时刻,纵向合作决策下供应链的总利润远高于分散决策.其原因是,纵向合作可以增加供应链成员双方的信任度,促使制造商和零售商为供应链总体利润的提升付出更多努力,进而提高供应链的整体效率和抗风险能力,这恰恰说明了企业之间纵向合作的重要性.

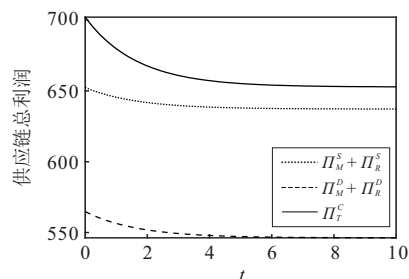


图4 供应链总利润时间轨迹

5.3 碳交易政策分析

在碳交易政策下,碳交易价格的变化对绿色商誉、碳排放和供应链总利润时间轨迹的影响如图5~图7所示.

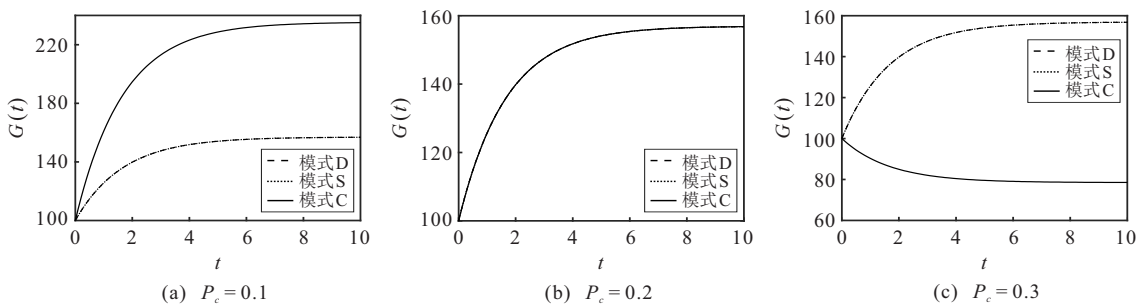


图5 碳交易价格 P_c 对绿色商誉时间轨迹的影响

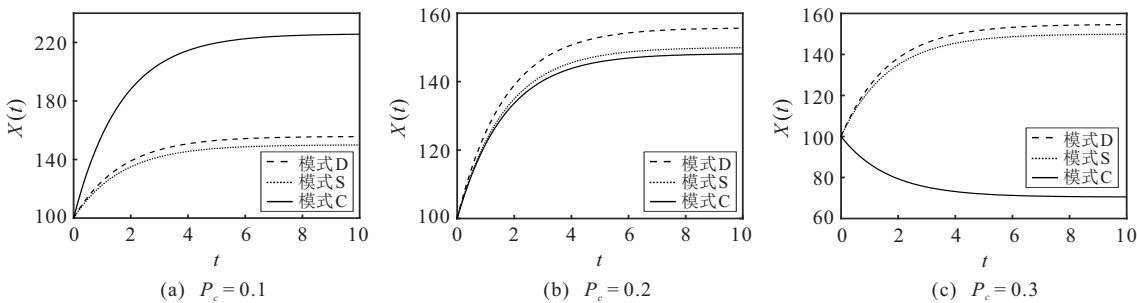


图6 碳交易价格 P_c 对碳排放时间轨迹的影响

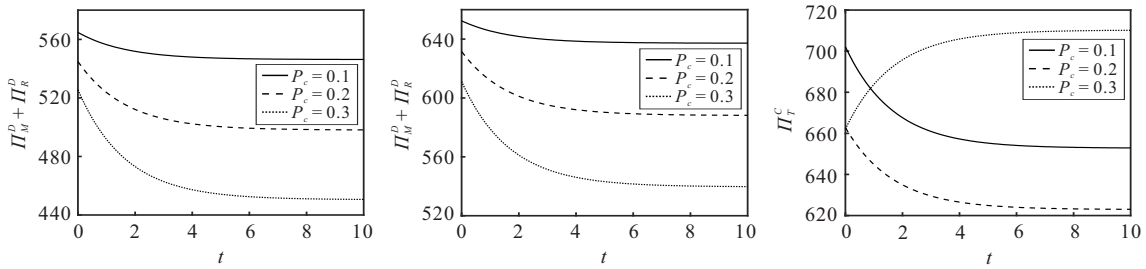


图7 碳交易价格 P_c 对供应链总利润时间轨迹的影响

由图5可以看出,当 $t \rightarrow \infty$ 时,无论碳交易价格如何变化,始终有 $G^{D*} = G^{S*} = 156.952$,而集中决策下的绿色商誉会随着碳交易价格的增加逐渐降低,甚至低于其他两种决策.此外,在图5(c)中,集中决策下绿色商誉时间轨迹的变化趋势与图5(a)和(b)中完全相反.原因是,当 $P_c = 0.3$ 时, $G_{\infty}^{C*} = 78.476$,此时绿色商誉的稳态值低于初始值,而其他两种碳交易价格下的绿色商誉稳态值高于初始值,所以会呈现出不同的变化趋势.

由图6可知,随着碳交易价格的增加,3种决策下的碳排放均降低.这意味着,提高碳交易价格有助于降低供应链企业的碳排放,尤其对集中决策下的碳排放影响效果最为明显.其原因是,随着碳交易价格的增加,集中决策下的绿色商誉大幅降低,消费者了解到的产品绿色质量信息较少,所以对产品的购买力下降,致使制造商减少了产量,从而降低了碳排放.但是,为了减少碳排放而降低产品产量的行为不利于市场经济的发展,因此政府应制定合理的碳交易政策,正向引导市场经济有序高质量运转.

由图7可知,分散决策和纵向合作决策下供应链总利润会随碳交易价格的增加而减少,说明过高的碳交易价格不利于这两种决策下供应链总体绩效的增加.而在集中决策下,供应链总利润随着碳交易价格的变化呈先减少后增加的“U”型变化趋势.这是因为随着碳交易价格的增加,集中决策下的碳排放逐渐降低,当碳交易价格增幅较小时,集中决策下的碳排放虽在减少但仍高于碳配额,此时碳交易价格的增加会使供应链企业的碳交易支出成本变高,致使供应链总利润降低;而当碳交易价格增幅较大时,碳排放会逐渐减少至低于碳配额,此时供应链企业能够在碳交易市场中出售多余的碳排放权,因而较高的碳交易价格能够使供应链在碳交易市场获得较高的收益.

5.4 双向成本分担契约的协调效果

由图8可知,两种不同决策下供应链成员的利润差值始终大于零,且其会随着时间逐渐减小至稳定水平.其中,制造商的利润差值随着时间降低的幅度

较为明显,这是因为在双向成本分担契约下,随着供应链成员技术投资水平的增加,产品的市场需求和碳排放量均增加,此时制造商需要承担较高的碳交易成本,所以制造商的利润会随着时间逐渐减少,直至碳排放水平稳定.

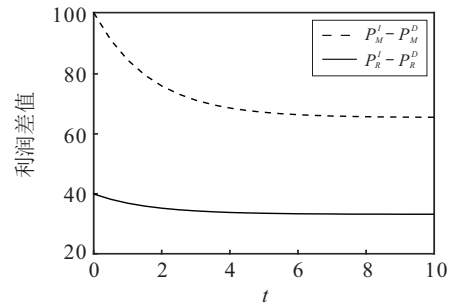


图8 不同决策下供应链成员利润差值的时间轨迹

由图9可知:制造商的利润差值随着零售商成本分担比例的增加而增加,随着制造商成本分担比例的增加有“由正到负”逐渐减少的变化趋势;而无论双向成本分担比例如何变化,零售商的利润差值始终为正.这说明双向成本分担契约对于零售商而言始终是有利的;而当制造商成本分担比例较大时,双向成本分担契约下制造商的利润低于分散决策,此时制造商无法接受双向成本分担契约,因而在此契约下,制造商所承担的成本分担比例不宜过高.

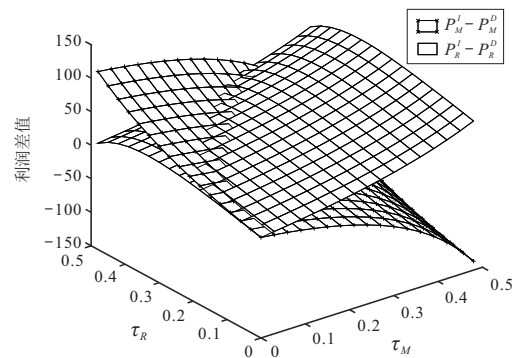


图9 双向成本分担比例对供应链成员利润差值的影响

6 结论与启示

本文在碳交易政策下,将碳排放和绿色商誉融入到产品市场需求的动态方程中,运用微分博弈的方

法,求解了不同决策下供应链的最优技术投资水平、最优利润以及碳排放和绿色商誉的最优轨迹,并设计了双向成本分担契约来协调供应链. 主要研究结论如下: 1) 只有当零售商的边际利润满足一定条件时,零售商才会选择与制造商纵向合作,且纵向合作能够实现供应链“减排增效”的双重红利;碳交易政策的存在会使供应链成员间愿意纵向合作的条件变得更加严格. 2) 当碳交易价格高于某一阈值时,消费者绿色偏好和绿色信息敏感度的增加会降低供应链成员的技术投资水平. 3) 集中决策下的区块链技术水平与绿色商誉并不总是最高的,这取决于碳交易价格的高低;当碳交易价格满足一定条件时,双向成本分担契约能够实现供应链的完全协调.

根据上述结论,针对政府、企业和消费者做出如下管理启示: 1) 政府应合理控制碳交易价格,同时可以通过增加对合作企业减排成本的补贴或降低合作企业的所得税和增值税等税收优惠方式,增强企业间的合作意愿; 2) 企业应遵循绿色转型的市场规律,不能为了减少碳排放而降低生产能力,而应尽可能地应用绿色技术替代传统技术,利用更多的科技手段减污降碳; 3) 消费者的主观意识会对企业碳减排行为产生较大影响,消费者应主动树立绿色消费观念,让绿色消费蔚然成风.

在碳交易政策下,供应链中信息非对称的现象普遍存在,供应链实际运作中“完全信息”的假设很难满足,因此,未来将考虑研究在制造商和零售商信息非对称情况下的合作减排问题. 此外,模型中仅考虑了由单个制造商和零售商组成的供应链,而实际的供应链往往由多个成员构成,其合作关系更为复杂,因此,未来可以考虑在这方面进行拓展.

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] Yi Y X, Wang Y Y, Fu C Y, et al. Taxes or subsidies to promote investment in green technologies for a supply chain considering consumer preferences for green products[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 171: 108371.
(Wu D, Yang Y X. Study on the differential game model for supply chain with consumers' low carbon preference[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(4): 126-137.)
- [3] 武丹, 杨玉香. 考虑消费者低碳偏好的供应链减排微分博弈模型研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(4): 126-137.
(Wu D, Yang Y X. Study on the differential game model for supply chain with consumers' low carbon preference[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(4): 126-137.)
- [4] Jeon H. Licensing and information disclosure under asymmetric information[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(1): 314-330.
- [5] 谭春桥, 杨慧娟, 易文桃. 基于纳什谈判的共享经济区块链网络PoS共识传播博弈分析[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 219-229.
(Tan C Q, Yang H J, Yi W T. Game analysis for PoS incentive consensus propagation in sharing economy blockchain network based on Nash negotiation[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(1): 219-229.)
- [6] Saberi S, Cruz J M, Sarkis J, et al. A competitive multiperiod supply chain network model with freight carriers and green technology investment option[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 266(3): 934-949.
- [7] 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.
- [8] 王珊珊, 张李浩, 范体军. 基于碳减排技术的竞争供应链投资均衡策略研究[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(6): 73-82.
(Wang S S, Zhang L H, Fan T J. Equilibrium strategies of carbon reduction technology adoption in competitive supply chains[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(6): 73-82.)
- [9] 张云丰, 尚钱龙, 龚本刚, 等. 碳标签制度下三级供应链定价与碳减排决策[J]. *系统工程学报*, 2022, 37(2): 242-262.
(Zhang Y F, Shang Q L, Gong B G, et al. Pricing and carbon emission reduction decisions in three-echelon supply chain under carbon labelling system[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2022, 37(2): 242-262.)
- [10] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(10): 49-60.
(Zhang L R, Peng B, Cheng C Q. Research on government subsidy strategy of low-carbon supply chain based on block-chain technology[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(10): 49-60.)
- [11] Babich V, Hilary G. OM forum—Distributed ledgers and operations: What operations management researchers should know about blockchain technology[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2020, 22(2): 223-240.
- [12] 刘亮, 李斧头. 考虑零售商风险规避的生鲜供应链区块链技术投资决策及协调[J]. *管理工程学报*, 2022, 36(1): 159-171.
(Liu L, Li F T. Investment decision and coordination of blockchain technology in fresh supply chain considering retailers' risk aversion[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2022, 36(1): 159-171.)
- [13] Xu X P, Zhang M Y, Dou G W, et al. Coordination of a supply chain with an online platform considering green

- technology in the blockchain era[J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(11): 3793-3810.
- [14] Benjaafar S, Li Y Z, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 99-116.
- [15] 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.
(Tu J, Gao F Y, Huang M. Stochastic differential game of supply chain emission reduction strategies under different power structures[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(1): 291-300.)
- [16] Xu X P, Zhang W, He P, et al. Production and pricing problems in make-to-order supply chain with cap-and-trade regulation[J]. *Omega*, 2017, 66: 248-257.
- [17] 魏守道. 碳交易政策下供应链减排研究的微分博弈研究[J]. *管理学报*, 2018, 15(5): 782-790.
(Wei S D. Differential game analysis on supply chain's strategy of carbon emission reduction R & D under carbon trading policy[J]. *Chinese Journal of Management*, 2018, 15(5): 782-790.)
- [18] 刘名武, 万谧宇, 付红. 碳交易和低碳偏好下供应链低碳技术选择研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(1): 152-162.
(Liu M W, Wan M Y, Fu H. Low-carbon technology selection for supply chain under cap and trade mechanism with low-carbon preference[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(1): 152-162.)
- [19] 陈静, 赵灿红, 高歌, 等. 碳限额及交易背景下双渠道供应链纵向合作动态减排研究[J]. *中国管理科学*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0571.
(Chen J, Zhao C H, Gao G, et al. Research on dynamic emission reduction of vertical cooperation in dual-channel supply chain under carbon cap and trade policy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0571.)
- [20] Zhou Y J, Ye X. Differential game model of joint emission reduction strategies and contract design in a dual-channel supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 592-607.
- [21] 向小东, 李翀. 三级低碳供应链联合减排及宣传促销微分博弈研究[J]. *控制与决策*, 2019, 34(8): 1776-1788.
(Xiang X D, Li C. Differential game models for joint carbon emission reduction and promotion in three-echelon low carbon supply chain[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(8): 1776-1788.)
- [22] 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.
- [23] Liu G W, Yang H F, Dai R. Which contract is more effective in improving product greenness under different power structures: Revenue sharing or cost sharing?[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 148: 106701.
- [24] Bencheikroun H, Martín-Herrán G. The impact of foresight in a transboundary pollution game[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(1): 300-309.
- [25] Zhou Y J, Ye X. Differential game model of joint emission reduction strategies and contract design in a dual-channel supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 592-607.
- [26] 刁心薇, 曾珍香, 孙丞. 混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略[J]. *控制与决策*, 2021, 36(7): 1763-1770.
(Diao X W, Zeng Z X, Sun C. Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(7): 1763-1770.)
- [27] Wang W H, Ma D Q, Hu J S. Dynamic carbon reduction and marketing strategies with consumers' environmental awareness under cap-and-trade regulation[J]. *Sustainability*, 2022, 14(16): 10052.
- [28] Ma S G, He Y, Gu R, et al. Sustainable supply chain management considering technology investments and government intervention[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 149: 102290.
- [29] 刘丽, 韩同银, 金浩. 成本分担机制下考虑品牌商誉的三级绿色供应链微分博弈研究[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 659-668.
(Liu L, Han T Y, Jin H. Differential game study of three-level green supply chain considering brand goodwill under cost sharing mechanism[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(2): 659-668.)
- [30] 胡劲松, 刘玉红, 马德青. 食品安全危机预测下食品供应链动态策略制定及协调[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(5): 116-131.
(Hu J S, Liu Y H, Ma D Q. Research on food supply chain dynamic strategy formulation and coordination under the prediction of food safety crisis[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(5): 116-131.)

作者简介

王道平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、知识管理等研究, E-mail: dpwang@ustb.edu.cn;

常敬雅(1995—), 女, 博士生, 从事供应链管理的研究, E-mail: 17862800725@163.com;

郝玫(1979—), 女, 讲师, 博士, 从事文本挖掘、电子口碑等研究, E-mail: haomei@manageustb.edu.cn.