



# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 政府补贴下考虑持股合作战略的供应链减排动态协调方法

王道平, 常敬雅

引用本文:

王道平,常敬雅. 政府补贴下考虑持股合作战略的供应链减排动态协调方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(4): 1370–1378.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1250>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [政府补贴和增值税退税政策的闭环供应链决策](#)

Closed-loop supply chain decisions under government subsidies and VAT rebates  
*控制与决策*. 2021, 36(11): 2771–2782 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0356>

#### [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>

#### [考虑扶贫偏好的三级农产品供应链决策及协调](#)

Decision making and contract coordination of three-level agricultural products supply chain with consumer poverty alleviation preference  
*控制与决策*. 2020, 35(11): 2589–2598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0201>

#### [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>

# 政府补贴下考虑持股合作战略的供应链减排动态协调方法

王道平<sup>†</sup>, 常敬雅

(北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083)

**摘要:** 在政府补贴政策下, 将持股合作战略引入供应链减排决策中, 运用微分博弈理论研究供应链的最优决策和动态协调问题. 构建集中式决策模型和持股合作前后的分散式决策模型, 并分析持股比例和消费者低碳偏好对供应链最优决策、利润和政府补贴政策的影响. 研究表明: 持股合作战略会替代一部分政府补贴政策的作用, 且供应链成员合作越密切, 政府补贴效果越好. 随着持股比例的增加, 供应链总利润呈现“U”型变化, 只有当持股比例满足一定条件时, 供应链成员才愿意选择持股合作, 且持股合作战略的实施能够实现供应链协调. 消费者低碳偏好的提高会对企业减排产生激励作用, 而政府作为政策的制定者不受消费者低碳偏好的影响.

**关键词:** 政府补贴; 持股合作战略; 供应链减排; 动态协调; 微分博弈

中图分类号: F274 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1250

引用格式: 王道平, 常敬雅. 政府补贴下考虑持股合作战略的供应链减排动态协调方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1370-1378.

## Research on dynamic coordination of supply chain emission reduction considering shareholding cooperation strategy under government subsidy

WANG Dao-ping<sup>†</sup>, CHANG Jing-ya

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

**Abstract:** Under the government subsidy policy, this paper introduces shareholding cooperation strategy into the supply chain emission reduction decision, and applies differential game theory to study the optimal decision and dynamic coordination of the supply chain. A centralised decision model and a decentralised decision model before and after the shareholding partnership are constructed, and the effects of the shareholding ratio and consumers' low-carbon preferences on the optimal decision, profit and government subsidy policy are analysed. The results of the study show that the shareholding strategy replaces part of the government subsidy policy, and the closer the supply chain members cooperate, the more effective the government subsidy is. As the shareholding ratio increases, the total profit of the supply chain changes in a “U” shape, and only when the shareholding ratio meets certain conditions are supply chain members willing to choose shareholding cooperation, and the implementation of shareholding cooperation strategy can achieve supply chain coordination. The government, as the policy maker, is not influenced by consumers' preference for low carbon emissions.

**Keywords:** government subsidy; shareholding cooperation strategy; supply chain emission reduction; dynamic coordination; differential game

## 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. 2021年6月, 在中、法、德三国领导人视频峰会上, 习近平主席明确表示, 中国将力争于2030年前实现二氧化碳排放达到峰值、2060年前实现碳

中和. 这意味着中国作为世界上最大的发展中国家, 将完成最高碳排放强度的降幅, 并以全球历史上历时最短的时间实现碳达峰到碳中和的“双碳”目标. 为了有效推动“双碳”工作的进展, 我国陆续出台了减排补贴政策. 如2021年重庆市涪陵区政府为降耗

收稿日期: 2022-07-13; 录用日期: 2023-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871017).

责任编委: 樊治平.

<sup>†</sup>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.

减排项目提供了不超过10%的设备投入成本补贴;2022年上海徐汇区政府对实施节能技改的企业给予了20%的减排投入成本补贴。另一方面,随着消费者低碳意识的不断提升,越来越多的消费者倾向于购买低碳产品<sup>[1]</sup>。在政府补贴政策 and 消费者低碳意识的双重导向下,企业纷纷投入到减排的行列中。制造商通过投资改进减排技术来减少生产过程中二氧化碳的排放,制造低碳产品。同时,零售商会通过低碳宣传的方式(如广告宣传、制作低碳产品宣传海报等)提高消费者的低碳意识,引导消费者购买低碳产品。如格力推出节能空调后,苏宁和国美等零售商会大力宣传格力空调节能减排的特点,提升消费者的购买欲。

在实际情况下,减排技术的高壁垒往往会导致制造企业的减排成本居高不下,不利于消费市场的可持续发展,因此,越来越多的企业选择采用能够降低减排成本、提高供应链企业在绿色发展中整体竞争优势的持股合作战略<sup>[2]</sup>。如格力集团在政府减排补贴的政策扶持下,生产环保节能型家电,同时格力的分销商京海互联选择对格力集团进行持股投资,持股比例达到了6.47%。本文正是立足于此背景,在政府补贴政策下,将上下游企业的持股合作战略引入供应链减排决策中,研究供应链协调问题,这既能够为后续政府补贴政策下企业合作减排的相关研究提供理论价值,又能够为企业持股合作战略的选择和政府补贴政策的制定提供科学决策依据。

与本文相关的文献综述主要有两类:一类是持股合作战略对供应链运营决策的影响,另一类是政府补贴政策下关于供应链减排和动态协调的研究。由于供应链中的企业是一个利益共同体,为了提升供应链的整体收益和抗风险能力,企业间通常会建立股权合作关系<sup>[3]</sup>。不少学者研究了股权投资对供应链运营产生的影响,如Fu等<sup>[4-5]</sup>研究发现当下游企业投资持有上游企业的股权时,供应链整体绩效会得到提升。Chen等<sup>[6]</sup>、Xiao等<sup>[7]</sup>和Fan等<sup>[8]</sup>均发现股权合作战略可协调供应链,提高了供应链整体利润。Tan等<sup>[9]</sup>研究了供应链的融资问题,结果表明,在一定条件下,持股组合融资策略能够有效提高供应链成员的利润。此外,有专家学者经研究发现,持股合作战略的实施能够提高企业的抗风险能力,如Zhang等<sup>[10]</sup>考虑了闭环供应链的价值创造情况,发现股权投资有利于提升企业间的信任并降低企业的经营风险。Liu等<sup>[11]</sup>分析了持股型供应链的最优运营决策,发现供应链成员实施持股合作战略能够有效降低供应链的整体风险。

由于企业对减排活动的投入会增加其生产运营成本,降低企业减排的积极性,为此,政府出台了多种优惠政策来激励企业进行减排活动。其中,政府补贴是公认有效的措施<sup>[12-13]</sup>。此外,企业的减排行为是一个长期且动态的过程<sup>[14]</sup>,而以往传统的静态研究方法无法解决现实情况下企业减排行为滞后的问题。因此,本文通过构建微分博弈模型,从长期发展角度研究政府补贴下供应链企业的减排行为具有实际意义。Yang等<sup>[15]</sup>和Zu等<sup>[16]</sup>研究发现政府补贴和消费者的环保意识均有助于提高制造商的长期减排投入。He等<sup>[17]</sup>对比了不同政府补贴情形下的动态优化模型,发现政府不同的补贴政策均能够促进企业减排。与此同时,一些学者在研究企业减排问题时,还考虑了产品的低碳商誉,如Xu等<sup>[18]</sup>在政府不同补贴政策下,探讨了制造商与零售商合作减排过程中低碳商誉随时间的变化情况。Liu等<sup>[19]</sup>和Zhang等<sup>[20]</sup>分别探讨了消费者低碳偏好和低碳参考水平对产品低碳商誉产生的长期影响。此外,部分学者还研究了在政府补贴政策下供应链的动态协调问题。Xia等<sup>[21]</sup>从长期角度分析了供应链成员的减排策略,并提出了制造商与零售商的合作契约。Zhu等<sup>[22]</sup>研究发现在政府补贴政策下,供应链成员间的成本分担契约能够实现供应链协调。

上述文献从静态角度分析了持股合作战略对供应链运营产生的影响,并从动态角度对政府补贴下供应链减排和协调问题展开了研究,然而,鲜有文献将持股合作战略纳入供应链减排的动态协调研究。在实际情况下,企业间的持股合作是一个长期、动态的过程,即当前选择的持股合作战略会持续影响企业后续运营决策。因此,本文从长期角度出发,研究政府补贴下供应链成员间的持股合作战略更加符合现实状况。基于上述背景,本文借助微分博弈理论,在政府补贴政策下考虑引入持股合作战略,通过构建持股合作前后的分散式决策模型和集中式决策模型,研究供应链的最优决策和动态协调问题,并分析持股比例和消费者低碳偏好对供应链最优决策、供应链利润以及政府补贴政策产生的长期影响,致力为企业持股合作战略的选择和政府补贴政策的制定提供参考。

## 1 问题描述与模型假设

本文以实施减排的制造商 $M$ 和进行低碳宣传的零售商 $R$ 组成的供应链为研究对象。其中:制造商通过投入资金来改善减排技术,制造低碳产品;零售商通过广告、制作海报等方式对低碳产品进行宣传,吸引消费者购买。此外,政府作为宏观经济的调控者,会

对制造商的减排成本和零售商的低碳宣传成本提供补贴,以激励供应链企业减排。

本文考虑将持股合作战略引入供应链运营决策中,当零售商与制造商达成持股合作关系后,零售商的股权投资能够降低制造商的减排成本,从而扩大制造商的生产规模,提高生产效率。其中,零售商对制造商减排成本的持股比例为 $\sigma$ (为了保持制造商的独立性,避免零售商对制造商控股,假设 $0 < \sigma < 50\%$ )。依据股权协议,零售商可参与制造商的利润分红,零售商的分红比例等于其持股比例 $\sigma$ <sup>[23]</sup>。

本文涉及的参数及其含义如表1所示。

表1 模型参数及其含义

参数	含义
$M_M$	制造商的边际利润
$M_R$	零售商的边际利润
$E_M(t)$	$t$ 时刻制造商的减排努力水平
$E_R(t)$	$t$ 时刻零售商的低碳宣传努力水平
$G(t)$	$t$ 时刻产品的低碳商誉
$D(t)$	$t$ 时刻产品的市场需求
$\lambda_M(t)$	$t$ 时刻政府对制造商减排成本的补贴率
$\lambda_R(t)$	$t$ 时刻政府对零售商低碳宣传成本的补贴率
$\eta_M$	制造商的减排成本系数
$\eta_R$	零售商的低碳宣传成本系数
$G_0$	产品低碳商誉的初始值
$\alpha$	减排努力水平对产品低碳商誉的影响系数
$\tau$	低碳宣传努力水平对产品低碳商誉的影响系数
$\beta$	产品低碳商誉随着时间增加的自然衰减系数
$d_0$	产品的初始市场需求
$\theta$	产品低碳商誉对市场需求的的影响系数
$\rho$	贴现因子
$\sigma$	零售商对制造商的持股比例(亦指分红比例)
$\Pi_M$	制造商的最优利润
$\Pi_R$	零售商的最优利润
$\Pi_T$	供应链的最优利润
$\Pi_A$	政府的最优利润
$W_M$	制造商的最优利润值
$W_R$	零售商的最优利润值
$W_T$	供应链的最优利润值
$W_A$	政府的最优利润值

本文主要提出如下假设。

**假设1** 制造商通过投资改进减排技术、生产低碳产品以及零售商宣传低碳产品的方式均能够影响产品的低碳商誉,且产品低碳商誉的初始值 $G(0)=G_0$ 。随着时间的推移,产品的低碳商誉变化存在自然衰减的特征<sup>[24]</sup>,其变化过程为

$$\dot{G}(t) = \alpha E_M(t) + \tau E_R(t) - \beta G(t), \quad (1)$$

其中 $\alpha > 0$ 和 $\tau > 0$ 表示制造商的减排努力和零售商的低碳宣传努力均对产品的市场需求产生正向影响。

**假设2** 由于消费者具有低碳意识,制造商的减排努力和零售商的低碳宣传努力均会通过产品的低碳商誉间接影响产品的市场需求<sup>[25]</sup>。在不考虑产品的市场需求受价格等其他因素影响的情况下, $t$ 时刻产品的市场需求表示为

$$D(t) = d_0 + \theta G(t). \quad (2)$$

其中: $d_0 > 0$ 为初始状态下消费者对产品的需求, $\theta > 0$ 为产品低碳商誉会对产品的市场需求产生正向影响。

**假设3** 制造商的减排成本和零售商的低碳宣传成本均为各自努力水平的凸函数<sup>[26]</sup>,因此, $t$ 时刻制造商的减排成本和零售商的低碳宣传成本为

$$C_M(E_M(t)) = \frac{\eta_M}{2} E_M^2(t), \quad C_R(E_R(t)) = \frac{\eta_R}{2} E_R^2(t). \quad (3)$$

其中: $\eta_M > 0$ 为制造商的减排努力会提高制造商的减排成本, $\eta_R > 0$ 为零售商的低碳宣传努力会提高零售商的低碳宣传成本。

**假设4** 供应链成员在完全信息对称的情况下进行决策,制造商和零售商在任意时刻均具有相同的贴现因子 $\rho$ ,其中 $\rho > 0$ 为供应链成员均追求长期利润最大化的决策目标。

为了便于书写,下文有关符号中省略参数 $t$ 。

## 2 模型建立和求解

### 2.1 集中式决策模型(C)

集中式决策模型下,政府首先决策对制造商的减排成本补贴率 $\lambda_M$ 和零售商的低碳宣传成本补贴率 $\lambda_R$ ,在此基础上,供应链成员作为一个整体,以供应链总体利润最大化为目标采取行动,共同决策制造商的减排努力水平 $E_M$ 和零售商的低碳宣传努力水平 $E_R$ 。此时,整个供应链的决策目标为

$$\begin{aligned} \Pi_T^C(G^C) = & \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ (M_M + M_R)(d_0 + \theta G^C) - \right. \\ & \left. (1 - \lambda_M^C) \frac{\eta_M}{2} (E_M^C)^2 - (1 - \lambda_R^C) \frac{\eta_R}{2} (E_R^C)^2 \right] dt, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\Pi_A^C(G^C) = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ (M_M + M_R)(d_0 + \theta G^C) - \frac{\eta_M}{2} (E_M^C)^2 - \frac{\eta_R}{2} (E_R^C)^2 \right] dt. \quad (5)$$

**命题1** 集中式决策模型的均衡结果如下。

1) 制造商的最优减排努力水平和零售商的最优低碳宣传努力水平为

$$\begin{aligned} E_M^{C*} &= \frac{\alpha \theta (M_M + M_R)}{(\beta + \rho)(\eta_M - \eta_M \lambda_M^{C*})}, \\ E_R^{C*} &= \frac{\theta \tau (M_M + M_R)}{(\beta + \rho)(\eta_R - \eta_R \lambda_R^{C*})}; \end{aligned}$$

2) 政府对制造商和零售商的最优补贴率为

$$\lambda_M^{C*} = \lambda_R^{C*} = 0;$$

3) 产品低碳商誉的最优轨迹和稳态值为

$$\begin{aligned} G^{C*} &= G_s^{C*} + (G_0 - G_s^{C*})e^{-\rho t}, \\ G_s^{C*} &= \frac{\theta(\tau^2 \eta_M + \alpha^2 \eta_R)(M_M + M_R)}{\beta(\beta + \rho)\eta_M \eta_R}; \end{aligned}$$

4) 供应链系统和政府的最优利润为

$$\Pi_T^{C*} = e^{-\rho t} W_T^{C*}(G^C) = e^{-\rho t}(t_1 G^{C*} + t_2),$$

$$\Pi_A^{C*} = e^{-\rho t} W_A^{C*}(G^C) = e^{-\rho t}(l_1 G^{C*} + l_2).$$

### 2.2 无持股合作的分散式决策模型(N)

在无持股合作的分散式决策模型下, 制造商与零售商是平等的伙伴关系, 供应链成员均以各自利润最大化为决策目标. 博弈的顺序如下: 政府首先制定对供应链成员的补贴率  $\lambda_M$  和  $\lambda_R$ , 制造商和零售商在得知政府补贴率后依次采取行动, 制造商决策减排努力水平  $E_M$ 、零售商决策低碳宣传努力水平  $E_R$ . 此时, 制造商、零售商和政府的决策目标为

$$\Pi_M^N(G^N) = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} [M_M(d_0 + \theta G^N) - (1 - \lambda_M^N) \frac{\eta_M}{2} (E_M^N)^2] dt, \quad (6)$$

$$\Pi_R^N(G^N) = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} [M_R(d_0 + \theta G^N) - (1 - \lambda_R^N) \frac{\eta_R}{2} (E_R^N)^2] dt, \quad (7)$$

$$\Pi_A^N(G^N) = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} [(M_M + M_R)(d_0 + \theta G^N) - \frac{\eta_M}{2} (E_M^N)^2 - \frac{\eta_R}{2} (E_R^N)^2] dt. \quad (8)$$

**命题2** 无持股合作的分散式决策模型的均衡结果如下.

1) 制造商的最优减排努力水平和零售商的最优低碳宣传努力水平为

$$E_M^{N*} = \frac{\alpha \theta M_M}{(\beta + \rho)(\eta_M - \eta_M \lambda_M^{N*})},$$

$$E_R^{N*} = \frac{\theta \tau M_R}{(\beta + \rho)(\eta_R - \eta_R \lambda_R^{N*})}.$$

2) 政府对制造商和零售商的最优补贴率为

$$\lambda_M^{N*} = \frac{M_R}{M_M + M_R}, \quad \lambda_R^{N*} = \frac{M_M}{M_M + M_R}. \quad (9)$$

3) 产品低碳商誉的最优轨迹和稳态值为

$$G^{N*} = G_s^{N*} + (G_0 - G_s^{N*})e^{-\rho t},$$

$$G_s^{N*} = \frac{\theta(\alpha^2 \eta_R M_M + \tau^2 \eta_M M_R)}{\beta(\beta + \rho)\eta_M \eta_R}.$$

4) 制造商、零售商和政府的最优利润为

$$\Pi_M^{N*} = e^{-\rho t} W_M^{N*}(G^N) = e^{-\rho t}(s_1 G^{N*} + s_2),$$

$$\Pi_R^{N*} = e^{-\rho t} W_R^{N*}(G^N) = e^{-\rho t}(a_1 G^{N*} + a_2),$$

$$\Pi_A^{N*} = e^{-\rho t} W_A^{N*}(G^N) = e^{-\rho t}(b_1 G^{N*} + b_2).$$

### 2.3 持股合作的分散式决策模型(S)

在无持股合作的情形下, 供应链往往会出现双重边际效应. 为此, 本文考虑企业间实施持股合作战略来达到协调供应链的效果. 借鉴 Fu 等<sup>[4-5]</sup>的研究, 考虑零售商对制造商的减排成本进行持股投资, 即零售商投资持有  $\sigma$  比例的制造商减排成本; 同时, 制造商

给予零售商利润分红, 即零售商能够获得  $\sigma$  比例的制造商利润. 此时, 政府、制造商和零售商组成了一个三阶段博弈, 博弈顺序为政府先决策对供应链成员的补贴率  $\lambda_M$  和  $\lambda_R$ , 然后制造商决策其减排努力水平  $E_M$ , 再由零售商决策其低碳宣传努力水平  $E_R$ . 此时, 制造商、零售商和政府的决策目标为

$$\Pi_M^S(G^S) = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} [(1 - \sigma)(M_M(d_0 + \theta G^S) - (1 - \lambda_M^S - \sigma) \frac{\eta_M}{2} (E_M^S)^2)] dt, \quad (10)$$

$$\Pi_R^S(G^S) = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} (M_R(d_0 + \theta G^S) + \sigma \left[ \begin{aligned} &M_M(d_0 + \theta G^S) \\ &- (1 - \lambda_M^S - \sigma) \frac{\eta_M}{2} (E_M^S)^2 \end{aligned} \right] - (1 - \lambda_R^S) \frac{\eta_R}{2} (E_R^S)^2 - \sigma \frac{\eta_M}{2} (E_M^S)^2) dt, \quad (11)$$

$$\Pi_A^S(G^S) = \max \int_0^\infty e^{-\rho t} [(M_M + M_R)(d_0 + \theta G^S) - \frac{\eta_M}{2} (E_M^S)^2 - \frac{\eta_R}{2} (E_R^S)^2] dt. \quad (12)$$

**命题3** 持股合作的分散式决策模型的均衡结果如下.

1) 制造商的最优减排努力水平和零售商的最优低碳宣传努力水平为

$$E_M^{S*} = \frac{\alpha \theta M_M}{(\beta + \rho)\eta_M(-1 + \sigma + \lambda_M^{S*})},$$

$$E_R^{S*} = \frac{\theta \tau (\sigma M_M + M_R)}{(\beta + \rho)(\eta_R - \eta_R \lambda_R^{S*})}.$$

2) 政府对制造商和零售商的最优补贴率为

$$\lambda_M^{S*} = 1 - \sigma - \frac{M_M}{M_M + M_R},$$

$$\lambda_R^{S*} = 1 - \frac{\sigma M_M + M_R}{M_M + M_R}.$$

3) 产品低碳商誉的最优轨迹和稳态值为

$$G^{S*} = G_s^{S*} + (G_0 - G_s^{S*})e^{-\rho t},$$

$$G_s^{S*} = \frac{\tau^2 \theta \eta_M (\sigma M_M + M_R) (1 - \sigma - \lambda_M^{S*})}{\beta \eta_R \eta_M (\beta + \rho) (1 - \lambda_R^{S*}) (1 - \sigma - \lambda_M^{S*})} + \frac{\alpha^2 \theta M_M \eta_R (1 - \lambda_R^{S*})}{\beta \eta_R \eta_M (\beta + \rho) (1 - \lambda_R^{S*}) (1 - \sigma - \lambda_M^{S*})}.$$

4) 制造商和零售商的最优利润为

$$\Pi_M^{S*} = e^{-\rho t} W_M^{S*}(G^S) = e^{-\rho t}(m_1 G^{S*} + m_2),$$

$$\Pi_R^{S*} = e^{-\rho t} W_R^{S*}(G^S) = e^{-\rho t}(n_1 G^{S*} + n_2),$$

$$\Pi_A^{S*} = e^{-\rho t} W_A^{S*}(G^S) = e^{-\rho t}(k_1 G^{S*} + k_2).$$

**推论1** 1) 制造商的减排努力水平、产品的低碳商誉和供应链成员的利润均与  $\eta_M$  呈负相关, 与  $\alpha$  呈正相关; 2) 零售商的低碳宣传努力水平、产品的低碳商誉和供应链成员的利润均与  $\eta_R$  呈负相关, 与  $\tau$  呈正相关; 3) 制造商的减排努力水平、零售商的低碳宣

传努力水平、产品的低碳商誉和供应链成员的利润均与 $\theta$ 呈正相关。

由推论1可知,在制造商减排效率和零售商低碳宣传效率较高时,供应链企业应加大对减排技术的投入和对低碳产品的宣传力度,从而有效地提高企业利润,达到“事半功倍”的效果。此外,消费者低碳意识的提升同样会实现供应链“减排增绩”的双重红利。政府可通过宣传、教育和普及活动等方式,提高消费者的低碳环保意识,引导消费者购买低碳产品,促进企业减排。

**推论2** 在持股合作决策情形下,政府对制造商的减排成本补贴率 $\lambda_M$ 和对零售商的低碳宣传成本补贴率 $\lambda_R$ ,随制造商边际利润 $M_M$ 、零售商边际利润 $M_R$ 和时间的变化规律如下:1)  $\frac{\partial \lambda_M^{S*}}{\partial M_M} < 0, \frac{\partial \lambda_M^{S*}}{\partial M_R} > 0;$   
 $\frac{\partial \lambda_R^{S*}}{\partial M_M} > 0, \frac{\partial \lambda_R^{S*}}{\partial M_R} < 0;$ 2)  $\lambda_M^{S*}$ 和 $\lambda_R^{S*}$ 均与时间无关。

推论2表明,当制造商的边际利润较高时,政府会降低对制造商的减排成本补贴率。这是由于当企业自身的盈利能力较强时,企业通过自身运营便能够获得较高的利润,政府会降低对企业的补贴力度。另一方面,当零售商的边际利润较高时,政府为了调节市场经济的均衡发展,会适当增加对制造商的补贴力度,从而提高其利润,减少制造商与零售商间的利润差距。同样,政府对零售商的低碳宣传成本补贴率随企业边际利润变化的原因与之相似。此外,政府对供应链企业的补贴率不会因时间的推移而发生改变,因为政府补贴政策主要是根据企业的盈利能力和经营策略等方面综合考虑制定,不会受时间因素的影响。

### 3 比较分析

本节在上述理论结果的基础上,比较分析3种决策情形下的供应链最优决策、供应链利润和政府补贴政策。

**推论3** 比较3种决策情形下,政府分别对制造商和零售商的补贴率的关系,得到 $\lambda_M^{C*} < \lambda_M^{S*} < \lambda_M^{N*},$   
 $\lambda_R^{C*} < \lambda_R^{S*} < \lambda_R^{N*}, \frac{\partial \lambda_M^{S*}}{\partial \sigma} < 0, \frac{\partial \lambda_R^{S*}}{\partial \sigma} < 0.$

推论3表明:政府对制造商和零售商的补贴率在无持股合作的决策情形下最高,在持股合作的决策情形下次之,在集中式决策情形下最低。这是由于政府制定补贴政策的根本目的是促进上游制造商减排以及下游零售商低碳宣传,而在集中式决策情形下,无需政府提供补贴,企业会自觉按照最优产出原则,制定最优的减排投入水平。另一方面,政府会降低对持股合作企业的补贴力度,这是因为持股合作战略会替代一部分政府补贴的作用。此外,政府对制造商和零售商的补贴效果与供应链企业持股合作的程度相关,

合作越密切,政府补贴效果越好。

**推论4** 比较3种决策情形下,制造商减排努力水平、零售商低碳宣传努力水平和产品低碳商誉的关系,得到 $E_M^{N*} = E_M^{S*} = E_M^{C*}, E_R^{N*} = E_R^{S*} = E_R^{C*}, G^{N*} = G^{S*} = G^{C*}.$

由推论4可知,在政府补贴政策下有无持股合作这两种方式均可使得供应链成员决策达到理想状态下的最优水平。结合推论3可知,政府对制造商和零售商的补贴率在无持股合作的决策情形下最高,表明在此情形下政府补贴政策对制造商减排和零售商低碳宣传的激励作用最强,此时,供应链成员仅靠政府补贴的激励便能够使得供应链决策达到最优水平。在持股合作的决策情形下,政府对供应链成员的补贴率虽然不是最高的,但是,持股合作战略会替代一部分政府补贴的作用,在此决策情形下供应链成员会受到政府补贴政策和持股合作战略的双重激励,从而使得供应链决策达到最优水平。由此可见,政府应针对企业不同的经营策略制定相应的补贴政策,从而达到既激励企业减排又减少政府经济支出的目的。

**推论5** 在零售商投资持股制造商的情况下,制造商和零售商可接受的持股比例区间为 $(\sigma_2, \sigma_1)$ 。其中

$$\sigma_1 = \frac{2\theta^2\beta(\beta+\rho)^2d_0\eta_M\eta_R(\rho M_M - M_R)}{2\beta\theta^2(\beta+\rho)^2d_0\eta_M\eta_R M_M + A} + \frac{\beta(\alpha^2\eta_R(\rho M_M - 2M_R) + \tau^2\eta_M(2\rho M_M - M_R))}{2\beta\theta^2(\beta+\rho)^2d_0\eta_M\eta_R M_M + A} \times \frac{(M_M + M_R)}{2\beta\theta^2(\beta+\rho)^2d_0\eta_M\eta_R M_M + A},$$

$$\sigma_2 = \frac{\beta^2(-1+\rho)M_R}{2\beta(\beta+\rho)^2d_0\eta_M\eta_R M_M + A} \times \frac{(2(\beta+\rho)^2d_0\eta_M\eta_R + (\tau^2\eta_M + 2\alpha^2\eta_R)(M_M + M_R))}{2\beta(\beta+\rho)^2d_0\eta_M\eta_R M_M + A},$$

$$A = \tau^2\eta_M M_M(\beta M_M + (\beta + 2\rho)M_R) + \alpha^2\eta_R(2\rho M_M^2 - \beta M_M M_R - \beta M_R^2).$$

### 4 算例分析

本文利用Matlab分别对上述3种微分博弈决策模型进行算例分析。参见文献[27]和文献[28],对模型中的各参数赋值如下: $d_0 = 50, \alpha = 1, \tau = 1, \beta = 0.6, \rho = 0.6, M_M = 8, M_R = 6, \eta_M = 12, \eta_R = 10, G_0 = 0, \theta = 4, \sigma = 0.3, t = 7.$

#### 4.1 产品低碳商誉轨迹分析

由推论4可知,3种不同决策情形下的产品低碳商誉相等。因此,本节选取持股合作决策情形下的产品低碳商誉进行分析。图1为产品低碳商誉随 $G_0$ 变

化的时间轨迹. 保持其他参数不变, 产品低碳商誉的初始值分别取  $G_0=5$ 、 $G_0=10$ 、 $G_0=20$  和  $G_0=25$ . 由图1可见, 产品低碳商誉的时间演化轨迹与产品低碳商誉的初始值有关, 当初始值较高时, 产品的低碳商誉会随时间衰减; 当初始值较低时, 产品的低碳商誉会随时间提高. 然而, 无论初始值取何值, 产品的低碳商誉最终均会收敛至稳态水平, 且产品低碳商誉的稳态值与产品低碳商誉的初始值无关.

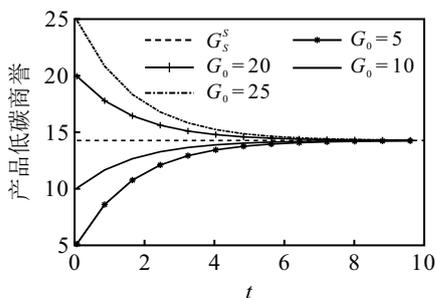


图1 产品低碳商誉随  $G_0$  变化的时间轨迹

图2为产品低碳商誉随  $\beta$  变化的时间轨迹. 保持其他参数不变的情况下, 分别取  $\beta=0.4$  和  $\beta=0.8$ . 由图2可见, 产品的低碳商誉和产品低碳商誉的稳态值均随着  $\beta$  的减小而提高, 且产品低碳商誉的变化趋势不会受  $\beta$  取值的影响, 始终会随着时间的增加而增大, 并最终趋于稳态值. 结合图1和图2可知, 产品低碳商誉的自然衰减率越高, 产品的低碳商誉越低, 此时, 可通过增加产品低碳商誉初始值的方式来提高产品的低碳商誉.

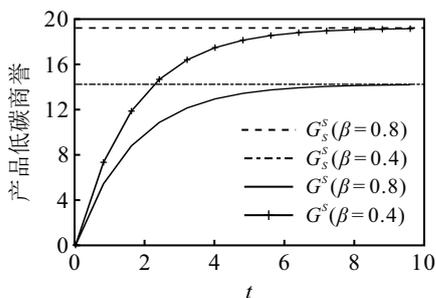


图2 产品低碳商誉随  $\beta$  变化的时间轨迹

#### 4.2 利润轨迹分析

图3为3种决策情形下供应链总利润的时间轨迹. 由图3可见, 在3种决策情形下, 供应链的总利润均随着时间的增加而增大, 并最终趋于稳定状态. 在同一时刻, 集中式决策情形下供应链的总利润始终保持最高, 是企业理想状态下的决策目标. 此外, 相较于无持股合作情形, 供应链成员的整体利润在有持股合作情形下更高. 这是由于供应链成员选择实施持股合作战略后, 企业间可承担彼此的运营风险并增加双方的信任度, 促使制造商和零售商为供应链总体利润的提升付出更多的努力, 从而达到供应链协调的目

的. 从企业的长期发展角度来看, 企业间应积极建立持股合作关系, 提高合作双方的利润和企业的抗风险能力, 谋求企业共同发展.

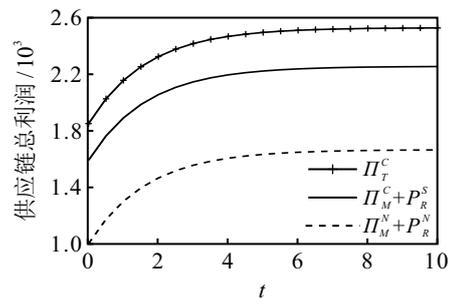


图3 3种决策情形下供应链总利润的时间轨迹

在持股合作前后的两种决策情形下, 制造商和零售商的利润随时间变化的轨迹如图4所示. 由图4可见, 无论企业间是否选择实施持股合作战略, 制造商和零售商的利润均会随着时间的增加而增大. 当企业间选择实施持股合作战略, 即满足  $\sigma \in (\sigma_2, \sigma_1)$  的条件时, 制造商的获利在短期内会比无持股合作情形下高, 但是, 随着时间的增加会逐渐低于无持股合作情形. 同一时刻, 当  $\sigma = 0.3 \in (\sigma_2, \sigma_1)$  时, 持股合作情形下零售商的利润始终高于无持股合作情形. 结合图3结论可知, 从长期角度来看, 持股合作战略的实施对于提升供应链整体利润是有利的, 且零售商更愿意选择对制造商进行持股投资, 以提高自身的收益, 但是, 制造商会因为自身利润的下降而选择拒绝与零售商合作. 因此, 供应链成员只有制定合理的持股比例, 才能保证企业间持股合作战略的顺利实施, 这与推论5的结论一致.

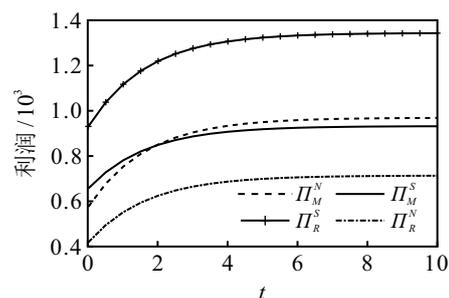


图4 持股合作前后决策情形下利润的时间轨迹

图5为不同持股比例下制造商利润差值的时间轨迹. 由图5可见, 当持股比例较小时, 随着时间的推移, 制造商间的利润差值会逐渐减小, 并最终趋于稳定; 当持股比例较大时, 持股合作后制造商的利润与无持股合作时制造商利润的差值有“由正到负”的趋势. 这是由于随着持股比例的增加, 零售商所获得的分红比例相应地也在增加, 此时, 制造商按照分红比例分享给零售商的收益额大于零售商对其减排成本的投资额. 由此可见, 只有制定合理的持股比例时, 持

股合作战略的实施才有利于提高制造商的利润,否则只能适得其反.

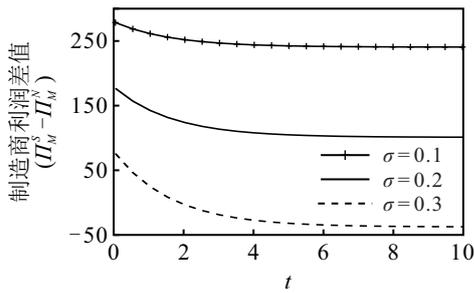


图5 不同持股比例下制造商利润差值的时间轨迹

图6为不同持股比例下零售商利润差值的时间轨迹. 由图6可见, 在设定的3种持股比例下, 零售商利润的差值均大于0, 且随着时间的增加, 零售商利润的差值在逐渐增大并最终趋于稳定. 在同一时刻, 持股比例越大, 零售商的利润差值越大, 表明在实施持股合作战略后, 零售商获得制造商利润分红的增加量大于其自身收益的减少量, 且持股比例越高, 零售商利润的增加量越大. 结合图5可知, 持股合作战略对于零售商利润的提升是更有利的. 其原因是, 在供应链成员博弈的过程中, 制造商处于主导地位, 而零售商是跟随者, 制造商具有更强的议价能力, 所以零售商会更愿意通过持股合作的方式来提高自身利润.

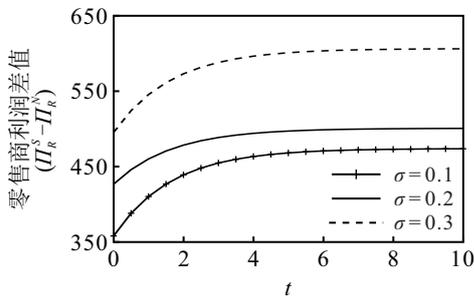


图6 不同持股比例下零售商利润差值的时间轨迹

### 4.3 持股比例对政府补贴率的影响分析

图7为持股比例σ对政府补贴率的影响. 由图7可见, 随着持股比例的增加, 政府对供应链成员的补贴率均减少, 表明企业间实施持股合作战略, 有利于降低政府对供应链成员的补贴力度, 且持股比例越大, 政府补贴效果越好, 这与推论3的结论是一致的.

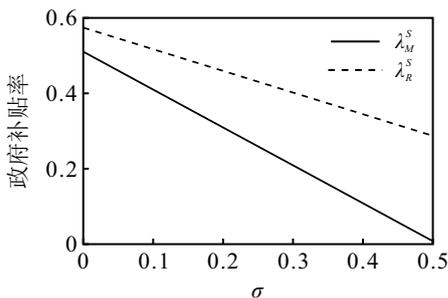


图7 持股比例σ对政府补贴率的影响

图8为持股比例σ对政府补贴率差值的影响. 由图8可见, 在无持股合作情形下, 政府对供应链成员的补贴率均高于持股合作情形, 且政府对制造商减排成本补贴率的差值大于政府对零售商低碳宣传成本补贴率的差值, 这是由于供应链成员持股合作后, 零售商分担了一部分制造商的减排成本, 这与政府补贴政策起到了相同的作用, 持股合作战略的实施会更加有利于减少政府对制造商减排成本的补贴率. 因此, 政府可制定相应政策鼓励企业间的合作, 以达到既促进企业减排又减少政府财政支出的“一箭双雕”的效果.

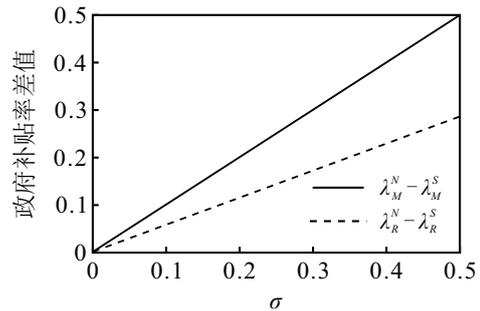


图8 持股比例σ对政府补贴率差值的影响

### 4.4 持股合作决策情形下关键参数敏感性分析

表2为不同持股比例下供应链成员选择持股合作后的均衡结果. 由表2可见, 政府对供应链成员的补贴率会随着持股比例的增加而降低, 表明持股合作战略的实施有利于减少政府对供应链成员的补贴力度. 随着持股比例的增加, 供应链成员各自的利润和供应链总利润却呈现出不同的变化趋势, 即零售商的利润随着持股比例的增加而增加, 制造商的利润随着持股比例的增加而减少, 而供应链总利润随着持股比例的增加呈现先增加后减少的“U”型变化趋势. 表明企业间只有制定最优的持股比例, 才有助于供应链总利润的提升. 企业应根据合作双方的实际运营状况制定适合企业长期发展的持股合作战略, 从而有效地提高供应链整体绩效, 实现供应链协调.

表3为不同消费者低碳偏好下的供应链均衡结果. 由表3可见, 政府对供应链成员的补贴率不受消费者低碳偏好的影响. 制造商的减排努力水平、零售商的低碳宣传努力水平、产品的低碳商誉、产品的市场需求、供应链成员各自的利润以及供应链总利润均会随着消费者低碳偏好的增加而增加, 表明政府作为补贴政策的制定者, 不会受消费者低碳偏好的影响, 且消费者低碳偏好的增加有利于激励企业减排, 并使得产品的低碳商誉、产品的市场需求和各自利润均得到提升. 由此可见, 政府应大力普及温室气体的危害, 加强消费者的低碳环保意识, 促进企业减排.

表2 持股比例 $\sigma$ 敏感性分析

项目	$\sigma=0.1$	$\sigma=0.2$	$\sigma=0.3$	$\sigma=0.4$	$\sigma=0.5$
制造商的减排努力水平	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89
零售商的低碳宣传努力水平	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
产品的低碳商誉	14.26	14.26	14.26	14.26	14.26
政府对制造商减排成本补贴率	0.43	0.33	0.23	0.13	0.03
政府对零售商低碳宣传成本补贴率	0.51	0.46	0.4	0.34	0.29
产品的市场需求	54.26	54.26	54.26	54.26	54.26
制造商利润	1 101.53	1 078.03	934.53	801.02	667.52
零售商利润	1 176.33	1 204.34	1 312.35	1 420.36	1 528.37
供应链总利润	2 277.86	2 282.37	2 246.88	2 221.38	2 195.89

表3 消费者低碳偏好 $\theta$ 敏感性分析

项目	$\theta=1$	$\theta=2$	$\theta=3$	$\theta=4$	$\theta=5$
制造商的减排努力水平	0.97	1.94	2.92	3.89	4.86
零售商的低碳宣传努力水平	1.17	2.33	3.50	4.67	5.83
产品的低碳商誉	3.56	7.13	10.69	14.26	17.82
政府对制造商减排成本补贴率	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
政府对零售商低碳宣传成本补贴率	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
产品的市场需求	53.56	57.13	60.69	64.26	67.82
制造商利润	495.91	583.63	729.84	803.44	1 197.70
零售商利润	738.646	853.09	1 044.44	1 115.71	1 656.79
供应链总利润	1 234.56	1 436.72	1 774.28	1 919.15	2 854.49

## 5 结论

本文在政府补贴政策下,将持股合作战略引入供应链减排决策中,运用微分博弈理论研究供应链最优决策和动态协调问题.通过构建集中式决策模型、持股合作前后的分散式决策模型,求解了不同模型中制造商的最优减排决策、零售商的最优低碳宣传决策、政府对供应链成员的最优补贴率、产品低碳商誉的最优轨迹和企业的最优利润水平.通过对3种决策模型下的求解结果进行分析,得到如下结论:1)当供应链成员选择实施持股合作战略时,政府会降低对供应链成员的补贴力度,表明持股合作战略会替代一部分政府补贴政策的作用,且供应链成员间的合作越紧密,政府的补贴效果越好.此外,当供应链企业自身盈利能力较强时,政府也会减少对企业的补贴力度.2)在持股合作情形下,供应链成员各自的利润会受持股比例的影响呈现出不同的变化趋势,致使供应链总利润呈现“U”型变化.与此同时,只有当持股比例满足一定条件时,供应链成员才愿意选择持股合作,且持股合作战略的实施能够实现供应链协调.3)政府作为补贴政策的制定者,不会受消费者低碳偏好的影响;当供应链成员选择持股合作时,消费者的低碳偏好越高,企业的减排力度越大.此外,制造商减排效率和零售商低碳宣传效率的增加,有利于提高产品的低碳商誉和供应链成员的利润.

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)政府可通过干预企业间合作的方式,

制定更多有利于促成企业合作的政策,使得企业更加紧密地合作,从而减少政府用于宏观调控上的支出,并有效提高企业的利润,使得合作企业实现“互利共赢”.2)从企业的长期发展角度来看,企业间应积极建立持股合作关系,并根据合作双方实际的经营情况制定最优的持股比例,使得供应链企业能够通过持股合作的方式,提高自身的利润和抗风险能力.3)站在消费者的角度,消费者应主动树立绿色消费观念,令绿色消费蔚然成风,助力经济社会可持续发展.同时,政府和供应链企业可通过宣传、引导等方式,加强消费者的低碳环保意识,激励消费者为我国绿色低碳产业的发展奉献力量.

在政府补贴政策下,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”对称的假设很难满足,因此,未来将考虑研究制造商与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,而实际情况下的供应链往往由多个成员构成,其合作关系远比此复杂,未来可考虑在这方面进行拓展.

## 参考文献(References)

- [1] Jiang Y C, Liu C. Research on carbon emission reduction and blockchain investment under different dual-channel supply chains[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(43): 65304-65321.
- [2] Fan W P, Wang X P, Liu M W, et al. The impact of vertical shareholding among enterprises on supply chain decisions under different emission reduction contracts[J].

- Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2021, 35(1): 189-200.
- [3] Child J, Faulkner D, Tallman S B. Cooperative strategy[M]. New York: Oxford University Press, 2005: 33-70.
- [4] Fu H, Ma Y K, Cai X Q. Downstream firm's investment with equity holding in decentralized assembly systems[J]. Omega, 2018, 75: 27-56.
- [5] Fu H, Ma Y K. Optimization and coordination of decentralized supply chains with vertical cross-shareholding[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 132: 23-35.
- [6] Chen J G, Hu Q Y, Song J S. Effect of partial cross ownership on supply chain performance[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258(2): 525-536.
- [7] Xiao W, Li K, Fu H. Quality investment in a decentralized assembly system with backward shareholding[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 242: 1-17.
- [8] Fan W P, Wang X P, Liu M W, et al. Supply chain coordination optimization of retailer's equity holdings in manufacturer's carbon-reducing investment[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2021, 41(9): 2316-2326.
- [9] Tan L P, Song P, Yang Q F. Equilibrium of low carbon supply chain finance decision with stochastic demand under shareholding strategy[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(8): 117-126.
- [10] Zhang S, Meng Q C. Closed-loop supply chain value creation under retailer holding equity of manufacturer[J]. Soft Science, 2020, 34(4): 119-126.
- [11] Liu Y, Mu Y P. Optimal ordering policy and pricing strategy for holding supply chain based on bargaining model[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(6): 160-167.
- [12] 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: 1-26.
- [13] Li B, Geng Y, Xia X Q, et al. The impact of government subsidies on the low-carbon supply chain based on carbon emission reduction level[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(14): 1-16.
- [14] Wang W, Hao S J, He W, et al. Carbon emission reduction decisions in construction supply chain based on differential game with government subsidies[J]. Building and Environment, 2022, 222: 1-16.
- [15] Yang Y X, Xu X. A differential game model for closed-loop supply chain participants under carbon emission permits[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 135(9): 1077-1090.
- [16] 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.
- [17] He W, Yang Y B, Wang W, et al. Empirical study on long-term dynamic coordination of green building supply chain decision-making under different subsidies[J]. Building and Environment, 2022, 208: 1-21.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Zhang Z Y, Yu L Y. Dynamic optimization and coordination of cooperative emission reduction in a dual-channel supply chain considering reference low-carbon effect and low-carbon goodwill[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(2): 539.
- [21] Xia X Q, Ruan J H, Juan Z R, et al. Upstream-downstream joint carbon reduction strategies based on low-carbon promotion[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(7): 1351.
- [22] Zhu C, Ma J, Li J. Decisions and coordination of the supply chain considering low-carbon reputation and dual subsidy policies[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0121.
- [23] Wang W L, Zhen Y, Zhang Q H. Supply chain internal financing for capital-constrained suppliers: Equity financing vs. debt financing[J]. Journal of Management Sciences in China, 2020, 23(5): 89-101.
- [24] Plambeck E L. Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management[J]. Energy Economics, 2012, 34(3): 64-74.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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(20): 592-607.
- [28] Sinayi M, Rasti-Barzoki M. A game theoretic approach for pricing, greening, and social welfare policies in a supply chain with government intervention[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 1443-1458.

#### 作者简介

王道平(1964—),男,教授,博士生导师,从事供应链管理和知识管理等研究, 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.