

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2024.12.004

碳交易机制下基于互惠的 供应链广告合作与减排成本分担契约^①

石 平, 韩 坤, 后 锐^{*}
(广东工业大学管理学院, 广州 510520)

摘要:以两级低碳供应链为研究对象, 制造商进行碳减排, 零售商进行广告宣传, 在碳交易机制下构建博弈模型研究低碳供应链上下游企业间的减排与广告决策, 将互惠引入低碳供应链的策略互动过程中开展相应的优化决策与协调机制研究. 研究发现: 1) 在互惠系数的合理取值范围内, 无论制造商互惠偏好程度如何, 通过广告合作-减排成本分担组合契约可以使低碳供应链实现完美协调. 当制造商为高度的利他偏好者时, 仅需通过广告合作契约就可以实现低碳供应链的完美协调; 制造商非高度的利他偏好者时, 单一的广告合作契约只能在一定程度上缓解低碳供应链的双重边际效应, 无法实现完美协调. 2) 低碳供应链在双向合作模式下将获得最高的利润, 也产生最多的碳排放, 并且供应链整体利润和碳排放总量均与互惠系数无关; 单一广告合作模式下, 供应链整体利润和碳排放总量均随互惠系数的增大而增大; 无合作情形下, 供应链整体利润随互惠系数增大而增大, 碳排放总量随互惠系数增大而降低, 制造商的互惠偏好既有利于经济目标, 也有利于环境目标. 3) 无论采用何种合作模式, 碳排放总量均随消费者低碳偏好和广告影响系数的增大呈先增后减的变化趋势. 当消费者低碳偏好较低或广告影响系数较小时, 双向合作模式下的碳排放量最多, 并且随着消费者低碳偏好或广告影响系数的增大, 双向合作模式下的碳排放总量将率先达峰然后急剧下降.

关键词: 低碳供应链; 供应链协调; 碳减排; 广告合作; 减排成本分担

中图分类号: F274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2024)12-0057-25

0 引 言

气候变化问题是人类生存与发展面临的重大挑战, 低碳发展已成为全球共识和大势所趋. 2020 年 9 月 22 日, 我国在第 75 届联合国大会上向国际社会作出庄严承诺: 中国碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和. 碳交易机制是目前采用较广也较为有效的一种碳减排政策. 生态环境部印发的《碳排放权交易管理办法

(试行)》自 2021 年 2 月起施行, 纳入全国碳交易市场管理的主体覆盖年度温室气体排放量达到 2.6 万 t 二氧化碳当量及以上的重点排放单位, 以后将逐步分阶段扩大覆盖范围. 碳排放权交易是一种可交易的配额制度, 以政府部门分配碳排放配额为基础. 生态环境部根据国家温室气体排放控制要求, 综合考虑经济增长、产业结构调整、能源结构优化、大气污染物排放协同控制等因素, 制定碳排放配额总量确定与分配方案. 在碳交易

① 收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2023-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71801053; 72072041; 71902041); 广东省哲学社会科学规划项目(GD24XGL015; GD24YGL36); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515030111; 2023A1515011059); 广州市基础研究计划基础与应用基础研究项目(2025A04J3858).

通讯作者: 后 锐(1976—), 男, 河南桐柏人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: hour@gdut.edu.cn

机制下,政府为企业设定碳排放限额,企业碳排放超出限额时需购买碳排放权以满足碳排放约束,企业碳排放权有剩余时可出售获利^[1,2].碳排放约束已成为或即将成为许多企业的现实经营环境.

将碳排放约束引入供应链运营研究中,文献[3~5]做了开创性的工作.在此基础上,Du等^[6]提出一种由碳排放权供应商与碳排放权依赖型企业组成的新型供应链,并基于报童模型分析供应链双方的博弈过程.周艳菊等^[7]进一步研究由低碳服务提供商与碳排放权依赖型制造商组成的供应链的产量决策、碳减排水平选择以及收益分配问题.Gao和Souza^[8]则考虑企业既可以自主减排,也可以向非政府组织购买碳补偿,发现虽然在大多数情况下非政府组织应该尽可能降低碳价格,但在某些情况下,溢价策略在推广低碳产品方面更为有效.陈晓红等^[9]在碳交易机制下建立制造商主导的Stackelberg博弈模型,分析了碳交易价格对碳排放的影响.楼高翔等^[10]、张新华等^[11]、Xu等^[12]在碳交易机制下对供应链碳减排投资策略进行了分析.杨磊等^[13]、Ji等^[14]、Zhang等^[15]则构建博弈模型对双渠道供应链的定价与减排决策进行了研究.王文利和程天毓^[16]利用演化博弈分析了制造商减排与零售商低碳营销的演化稳定策略.Gopalakrishnan等^[17]则采用合作博弈推导出一个碳足迹平衡的方案,在供应链成员企业间合理分配碳排放总量.He等^[18]构建博弈模型分析了消费者碳排放与交货时间的双重敏感性对低碳供应链决策和利润的影响.随后,张云丰等^[19]进一步以制造商、运输商及零售商组成的三级供应链为研究对象,构建博弈模型对比分析无合作、单领域合作、双领域合作三种模式下的定价与碳减排决策.

关于低碳供应链的契约协调问题,Yang等^[20]研究发现收益共享契约可以使低碳供应链成员企业实现双赢的效果.Bai等^[21]在碳交易机制下提出收益-促销成本分担契约和两部定价契约以协调两级易腐品供应链.随后,He等^[22]研究了低碳供应链的成本分担契约设计问题.Liu和Li^[23]进一步提出了双边成本分担契约以协调供应链碳减排与广告决策.Shi等^[24]则以资金约束型供应商和零售商组成的低碳供应链为研究对象,分析采购承诺契约对经济与环境绩效的协调

效果.此外,樊文平等^[25]发现零售商持股制造商减排投资可以同时提升经济与环境绩效.在此基础上,夏良杰等^[26]、Xia等^[27]进一步研究了交叉持股对低碳供应链减排与定价决策以及利润的影响,研究发现交叉持股可以提高碳减排水平,并在一定条件下可以实现低碳供应链协调.关于政府补贴情形下的低碳供应链减排决策与协调问题,王婷婷和王道平^[28]、徐春秋和王芹鹏^[29]、贺勇等^[30]对此进行了专门研究.

通过回顾上述文献可以发现,学者们主要采用报童模型、博弈论与机制设计等方法研究低碳供应链企业间如何就减排决策展开博弈以及如何设计契约机制以激励供应链成员积极参与减排.但是,上述文献均是基于“经济人”假设,以个体利益最大化为决策目标开展低碳供应链优化决策与协调机制研究.传统运营理论已基本能够胜任对不含人系统进行理论分析的任务,但是由于人是供应链系统的关键要素,因此供应链理论能否在实践中成功实施很大程度上依赖于人的因素^[31-33].越来越多的行为经济学研究对“经济人”假设提出了质疑,行为因素往往会导致企业运营实践偏离“经济人”假设下计算出来的理论最优值,基于“经济人”假设无法很好地解决现实中低碳供应链优化决策与协调机制设计问题.大量的行为经济学实验,比如最后通牒博弈、信任博弈、礼物交换博弈等一系列博弈实验均证实人具有互惠行为,互惠指个体在决策时不仅关心自身的收益,还会关注他人的收益,以善意回报对方的善意,并以恶意报复对方的恶意,即“投桃报李,以牙还牙”^[34-38].互惠行为会影响供应链系统绩效和契约协调的有效性,使得一些在理论上被证明可以实现供应链协调的经典契约在实践中却往往达不到理想的效果,而传统运营理论中被认为不能实现供应链协调的简单批发价格契约却能在一定的条件下实现供应链协调的效果^[36,37].

互惠在供应链运营优化与协调研究中尚未得到足够关注,仅有少量相关研究文献.Du等^[36]研究互惠对供应链成员决策和协调的影响,发现在一定的条件下只需通过简单的批发价格契约就能实现供应链协调.随后,Zhang等^[37]提出一个新的基于互惠的分配博弈框架研究零售商的互惠行为对定价决策的影响,发现零售商的互惠行为有

助于缓解供应链双重边际效应. Xia 等^[38]首次将互惠引入低碳供应链中分析互惠对供应链减排与定价决策以及供应链效率的影响,但是该文尚未涉及供应链协调问题的研究,也未考虑零售商的广告决策. 翟佳等^[39]则利用鲁棒优化方法研究了互惠偏好下的供应链协调问题,给出了基于回购契约的鲁棒协调策略. Wang 等^[40]进一步以零售商主导型供应链为研究对象,构建博弈模型对比分析集中式决策、无互惠偏好的分散式决策、有互惠偏好的分散式决策三种情形下供应链各方的决策和利润,提出了考虑互惠偏好的成本分担契约以协调零售商主导型供应链.

将碳减排引入供应链中开展相应的优化决策与协调机制研究,以及在供应链决策与协调的研究中考虑行为因素的影响,均为当前供应链管理学界研究的前沿和热点. 虽然近年来已出现少量文献开始将互惠行为引入供应链研究中,但是低碳供应链涉及碳减排决策,不仅要协调订货与定价等传统决策变量,还要协调碳减排,既要协调经济目标,还要协调环境目标. 此外,在实施低碳战略的过程中,要想使低碳产品得到最大程度的推广,广告宣传必不可少. 制造商的碳减排使消费者购买低碳产品成为可能,零售商的广告宣传则有利于引导消费者购买低碳产品,只有两者紧密配合才能高效地将低碳产品传递到终端消费者手中. 低碳供应链上下游企业间的减排与广告决策交互影响,在经济交往中“投桃报李、以牙还牙”的互惠行为将会直接影响到低碳供应链的运营决策和契约协调的有效性. 基于上述分析,本文在碳交易机制下构建博弈模型研究低碳供应链上下游企业间的减排与广告决策,将互惠引入低碳供应链的策略互动过程中开展相应的优化决策与协调机制研究.

1 问题描述与符号说明

本文以一个制造商和一个零售商组成的两级低碳供应链为研究对象,制造商进行碳减排,零售商对低碳产品进行广告宣传,分别考虑供应链主导方具有互惠偏好与不具有互惠偏好的情形进行

分析. 为降低碳排放,制造商通过优化生产工艺流程、升级改造设施设备、使用清洁能源、采用碳捕获与封存(CCS)技术等降低产品生产过程中的碳排放. 由于零售商销售过程中的碳排放相对制造商生产过程中的碳排放而言较低,本文忽略零售商的碳排放,产品碳足迹主要为生产过程中的碳排放. 在实施低碳化战略的过程中,要想使低碳产品得到最大程度的推广,广告宣传必不可少. 在广告策略上,零售商通过向消费者讲解推荐、设立低碳产品专区、大量的日常海报和店面陈设等方式,引导消费者进行低碳消费. 制造商的碳减排使消费者购买低碳产品成为可能,而零售商的广告宣传则有利于引导消费者购买低碳产品,只有两者紧密配合才能高效地将低碳产品传递到终端消费者手中.

作为低碳供应链主导方的制造商率先确定碳减排水平 E 并承担减排成本 C_M , 作为跟随者的零售商在观察到制造商的决策后确定广告投入 A 并承担广告费用 C_R . 在无任何合作的情形下,低碳供应链成员独立决策,制造商独自承担碳减排成本,零售商独自承担广告费用. 在合作的情形下,制造商与零售商之间通过减排成本分担契约或(和)广告合作契约进行合作减排或(和)广告合作. 低碳供应链上下游企业间的减排与广告决策交互影响,在经济交往中“投桃报李、以牙还牙”的互惠行为将直接影响到低碳供应链上下游企业的运营决策和契约协调的有效性. 碳交易机制下基于互惠的供应链广告合作与减排成本分担模型如图 1 所示,其中广告费用分担比例为 μ_1 , 碳减排成本分担比例为 μ_2 , $0 < \mu_1, \mu_2 < 1$.

假设制造商生产单位产品的边际利润为 ρ_M , 零售商销售单位产品的边际利润为 ρ_R . 产品市场需求同时受碳减排水平和广告投入影响,参考 Bai 等^[21]、He 等^[22]、Zhou 等^[41]的处理方式,将低碳产品的市场需求函数形式刻画为

$$D = D_0 + kE + tA \quad (1)$$

其中 D_0 表示制造商无减排且零售商无广告宣传时的基础市场需求; k 表示消费者低碳偏好; t 表示广告对市场需求的影响系数; E 表示碳减排水平; A 表示广告投入. 上述变量和参数均为非负实数.

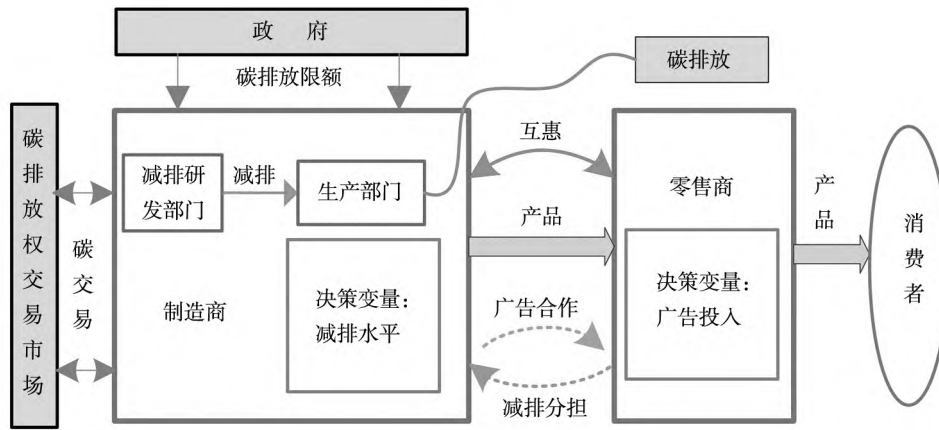


图 1 碳交易机制下基于互惠的供应链广告合作与减排成本分担模型示意图

Fig. 1 Co-op advertising and emission reduction cost-sharing model of supply chain with reciprocal behavior under cap-and-trade regulation

参考文献[21~23, 28, 29, 38, 41]的处理方式,将广告费用设为 $C_R = \frac{1}{2}\eta_1 A^2$,将碳减排成本形式刻画为 $C_M = \frac{1}{2}\eta_2 E^2$, η_1 、 η_2 分别是广告成本系数和碳减排成本系数,均为非负实数.考虑到制造商的减排成本为一次性投入,参照杨磊等^[13]、Ji 等^[14]、Zhang 等^[15]的处理方式,本文将碳减排成本系数 η_2 设定为一个相对其他参数而言较大的数.

e_m 表示政府给企业设定的碳排放限额,企业在生产运营活动中产生的碳排放量超出限额时需购买碳排放权以满足碳排放约束,企业碳排放权

有剩余时可出售获利,单位碳排放权的交易价格为 P_e . E_m 为制造商未进行减排时单位产品的初始碳排放量. θ_m 为互惠系数,反映了低碳供应链主导方对供应链伙伴收益的关注程度.本文参考文献[37, 38, 42~44]的处理方式,将互惠系数的取值范围设定为 $[-1, 1]$. $\theta_m = 0$ 表示供应链主导方只关注自身的收益; $\theta_m \neq 0$ 表示供应链主导方具有互惠偏好,在关注自身收益的同时也关注供应链伙伴的收益状况, $\theta_m > 0$ 表示供应链主导方对供应链伙伴表现出“投桃报李”的积极互惠行为,而 $\theta_m < 0$ 则表示供应链主导方对供应链伙伴表现出“以牙还牙”的消极互惠行为.

本文用到的符号及其含义见表 1.

表 1 符号及其含义

Table 1 Notations and their meanings

符号	含义
E	碳减排水平
η_2	碳减排成本系数
C_M	碳减排成本
μ_2	碳减排成本分担比例
A	广告投入
η_1	广告成本系数
C_R	广告费用
μ_1	广告费用分担比例
ρ_M	制造商生产单位产品的边际利润
ρ_R	零售商销售单位产品的边际利润
D_0	既无减排又无广告宣传时的基础市场需求
k	消费者低碳偏好
t	广告对市场需求的影响系数

续表 1

Table 1 Continues

符号	含义
D	低碳产品的市场需求
e_m	政府给企业设定的碳排放限额
P_c	单位碳排放权的交易价格
E_m	制造商未进行减排时单位产品的碳排放量
θ_m	互惠系数, $\theta_m \in [-1, 1]$, 反映供应链主导方对供应链伙伴收益的关注程度
U_M	低碳供应链主导方制造商具有互惠偏好时的效用函数
A^{xxx}	不同情形下的广告投入, 上标“xxx”中, 第一个“x”表示制造商是否具有互惠偏好, 第二个“x”表示上下游企业之间是否进行广告合作, 第三个“x”表示上下游企业之间是否进行减排合作; “c”表示肯定, “n”表示否定; 上标为“*”表示集中决策模式
E^{xxx}	不同情形下的碳减排水平
Π_i^{xxx}	不同情形下的利润, 下标 $i = R, M, SC$ 分别代表零售商、制造商和供应链

2 集中式决策模型

本节对集中决策模式进行分析, 为后续分散式决策情形的分析提供基准模型. 集中式决策的目标是使低碳供应链整体利润最大化, 在集中决策模式下低碳供应链上下游企业合作形成“超组织”联盟, 同时做出整体最优的广告与减排决策. 低碳供应链整体利润函数为

$$\Pi_{sc}(A, E) = D(\rho_R + \rho_M) - C_R - C_M + e_m P_c - (E_m - E) D P_c \quad (2)$$

根据上述利润函数可以得到命题 1.

命题 1 当制造商和零售商的边际利润之和 $\rho_M + \rho_R > \frac{E_m P_c \eta_2 - (E_m k + D_o) P_c^2}{\eta_2 - k P_c}$ 时, 集中决策模式下的最优广告和减排水平分别为

$$A^* = \frac{(D_0 + E_m k) t P_c^2 - [\eta_2 E_m + (\rho_R + \rho_M) k] t P_c + (\rho_R + \rho_M) \eta_2 t}{\eta_1 \eta_2 - 2 \eta_1 P_c k - t^2 P_c^2},$$

$$E^* = \frac{[(D_0 - E_m k) \eta_1 + t^2 (\rho_M + \rho_M)] P_c + k \eta_1 (\rho_M + \rho_M) - E_m t^2 P_c^2}{\eta_1 \eta_2 - 2 \eta_1 k P_c - t^2 P_c^2};$$

当制造商和零售商的边际利润之和满足 $\frac{P_c (E_m t^2 + E_m k \eta_1 - D_o \eta_1)}{t^2 P_c + k \eta_1} < \rho_M + \rho_R < \frac{E_m P_c \eta_2 - (E_m k + D_o) P_c^2}{\eta_2 - k P_c}$ 时, 制造商会进行碳减排, 但零售商不会进行广告宣传; 当制造商和零售商的

边际利润之和 $\rho_M + \rho_R < \frac{P_c (E_m t^2 + E_m k \eta_1 - D_o \eta_1)}{t^2 P_c + k \eta_1}$ 时, 制造商不会进行碳减排, 零售商也不会进行广告宣传.

证明 对式 (2) 求关于 A 和 E 的一阶偏导数, 得到

$$\partial \Pi_{sc} / \partial A = t(\rho_R + \rho_M) - \eta_1 A - (E_m - E) t P_c \quad (3)$$

$$\partial \Pi_{sc} / \partial E = k(\rho_R + \rho_M) - \eta_2 E + (tA + kE + D_0) \times P_c - (E_m - E) k P_c \quad (4)$$

通过判断该多元函数的 Hessian 矩阵可以得到, 在满足 $-\eta_1(2kP_c - \eta_2) > t^2 P_c^2$ 的条件下, 存在唯一确定的 A^* 和 E^* 使低碳供应链整体的利润函数取得极大值 Π_{sc}^* . 令式 (3) 和式 (4) 等于 0, 求得 A^* 和 E^* 分别为

$$A^* = \frac{(D_0 + E_m k) t P_c^2 - [\eta_2 E_m + (\rho_R + \rho_M) k] t P_c + (\rho_R + \rho_M) \eta_2 t}{\eta_1 \eta_2 - 2 \eta_1 P_c k - t^2 P_c^2} \quad (5)$$

$$E^* = \frac{[(D_0 - E_m k) \eta_1 + t^2 (\rho_M + \rho_M)] P_c + k \eta_1 (\rho_M + \rho_M) - E_m t^2 P_c^2}{\eta_1 \eta_2 - 2 \eta_1 k P_c - t^2 P_c^2} \quad (6)$$

由可行性条件 $-\eta_1(2kP_c - \eta_2) > t^2 P_c^2$ 得到 $\eta_1 \eta_2 - 2 \eta_1 P_c k - t^2 P_c^2 < 0$. 另外, 如前文所述碳减排成本系数是一个相对其他参数而言较大的数, 故 $\eta_2 - k P_c > 0$. 因此, 由 $A > 0$, $E > 0$ 可以分别

求得 $\rho_M + \rho_R > \frac{E_m P_c \eta_2 - (E_m k + D_o) P_c^2}{\eta_2 - k P_c}$, $\rho_M + \rho_R >$

$\frac{P_c (E_m t^2 + E_m k \eta_1 - D_o \eta_1)}{t^2 P_c + k \eta_1}$. 通过将上述两个边界条件

进行对比分析可以发现 $\frac{E_m P_c \eta_2 - (E_m k + D_o) P_c^2}{\eta_2 - k P_c} >$

$\frac{P_c (E_m t^2 + E_m k \eta_1 - D_o \eta_1)}{t^2 P_c + k \eta_1}$. 因此, 当 $\rho_M + \rho_R >$

$\frac{E_m P_c \eta_2 - (E_m k + D_o) P_c^2}{\eta_2 - k P_c}$ 时, $A^* > 0$, $E^* > 0$; 当

$$\Pi_{SC}^* = \frac{\left((-E_m^2 k^2 + (-2 D_0 E_m + 4 e_m) k - D_0^2) P_c^2 + ((2 D_0 E_m - 2 e_m) \eta_2 + 2 k (\rho_R + \rho_M) (D_0 + k E_m)) P_c - (\rho_R + \rho_M) \times \right. \\ \left. (2 D_0 \eta_2 + k^2 (\rho_R + \rho_M)) \eta_1 + t^2 (2 P_c^3 e_m - E_m^2 P_c^2 \eta_2 + 2 E_m \eta_2 (\rho_R + \rho_M) P_c - \eta_2 (\rho_R + \rho_M)^2) \right)}{(4 k P_c - 2 \eta_2) \eta_1 + 2 t^2 P_c^2} \quad (7)$$

推论 1 在集中决策模式下, 最优广告投入 A^* 和最优减排水平 E^* 均随制造商与零售商边际利润之和 $(\rho_R + \rho_M)$ 、消费者低碳偏好 k 、广告对市场的影响系数 t 、基础市场需求 D_0 的增大而增大, 随广告成本系数 η_1 、减排成本系数 η_2 的增大而降低.

证明 由式(5)和式(6)可求得 A^* 和 E^* 关于 $(\rho_R + \rho_M)$ 的一阶偏导数

$$\partial A^* / \partial (\rho_R + \rho_M) = -\frac{(\eta_2 - k P_c) t}{t^2 P_c^2 + 2 k P_c \eta_1 - \eta_1 \eta_2} > 0$$

$$\partial E^* / \partial (\rho_R + \rho_M) = -\frac{t^2 P_c + k \eta_1}{t^2 P_c^2 + 2 k P_c \eta_1 - \eta_1 \eta_2} > 0$$

故 A^* 和 E^* 均随着 $(\rho_R + \rho_M)$ 的增大而增大, 推论 1 其他结论的证明过程与此类似, 不再赘述.

证毕.

推论 2 在集中决策模式下, 当 $\rho_R + \rho_M \geq E_m P_c$ 时, 低碳供应链整体利润 Π_{SC}^* 随着 $(\rho_R + \rho_M)$ 的增大而增大; 当 $\rho_R + \rho_M < E_m P_c$ 时, 只有当基础市场需求 D_0 满足 $D_0 \geq \frac{(\rho_m + \rho_R - P_c)(k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{\eta_1 (k P_c - \eta_2)}$ 时, 低碳供应链整体利润 Π_{SC}^* 才会随着 $(\rho_R + \rho_M)$ 的增大而增大.

证明 由式(7)求出集中决策模式下低碳供应链整体利润 Π_{SC}^* 关于 $(\rho_R + \rho_M)$ 的一阶偏导数并令其等于 0, 可以得到 $D_0 = \frac{(\rho_m + \rho_R - E_m P_c)(k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{\eta_1 (k P_c - \eta_2)}$. 由于 η_2 是一个比其他

$$\frac{P_c (E_m t^2 + E_m k \eta_1 - D_o \eta_1)}{t^2 P_c + k \eta_1} < \rho_M + \rho_R <$$

$$\frac{E_m P_c \eta_2 - (E_m k + D_o) P_c^2}{\eta_2 - k P_c} \text{ 时, } A^* < 0, E^* > 0; \text{ 当 } \rho_M + \rho_R <$$

$$\frac{P_c (E_m t^2 + E_m k \eta_1 - D_o \eta_1)}{t^2 P_c + k \eta_1} \text{ 时, } A^* < 0, E^* < 0.$$

证毕.

根据命题 1, 将式(5)和式(6)代入式(2)中, 得到集中决策模式下低碳供应链整体利润为

参数要大得多的数, 故 $k P_c - \eta_2 < 0$. 当 $\rho_R + \rho_M \geq E_m P_c$ 时, $\frac{(\rho_m + \rho_R - E_m P_c)(k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{\eta_1 (k P_c - \eta_2)} \leq 0$, 故

$D_0 \geq \frac{(\rho_m + \rho_R - E_m P_c)(k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{\eta_1 (k P_c - \eta_2)}$ 恒成立. 即

$\partial \Pi_{SC}^* / \partial (\rho_R + \rho_M) \geq 0$ 恒成立, 此时低碳供应链整体利润 Π_{SC}^* 随着制造商与零售商边际利润之和 $(\rho_R + \rho_M)$ 的增大而增大; 当 $\rho_R + \rho_M < E_m P_c$ 时, 要使得 $\partial \Pi_{SC}^* / \partial (\rho_R + \rho_M) \geq 0$, 则基础市场需求 D_0 必须满足 $D_0 \geq \frac{(\rho_m + \rho_R - E_m P_c)(k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{\eta_1 (k P_c - \eta_2)}$.

因此, 当 $\rho_R + \rho_M < E_m P_c$ 时, 只有当基础市场需求 D_0 满足 $D_0 \geq \frac{(\rho_m + \rho_R - E_m P_c)(k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{\eta_1 (k P_c - \eta_2)}$,

低碳供应链整体利润 Π_{SC}^* 才会随着 $(\rho_R + \rho_M)$ 的增大而增大. 证毕.

推论 1 和推论 2 表明: 在集中决策模式下, 当消费者具有较强的低碳偏好或者广告对市场的影响较显著时, 制造商和零售商会自发地提高碳减排水平和加大广告投入; 当低碳供应链系统的碳减排水平和广告投入越高时, 供应链系统整体利润也将越高. 值得注意的是, 制造商和零售商边际利润的提高并不一定会带来低碳供应链整体利润的提升, 只有当制造商和零售商的边际利润之和高于碳交易价格与初始碳排放量之积时, 低碳供应链成员企业的边际利润与供应链整体利润之间才具有正相关关系; 反之, 当制造商和零售商的

边际利润之和小于碳交易价格与初始碳排放量之积时, 低碳供应链整体利润只有在基础市场需求足够大的条件下才会与低碳供应链成员企业的边际利润成正相关关系。

上述发现揭示的管理启示是: 在商业实践中, 为促进低碳产品的销售, 推动低碳供应链健康稳定发展, 低碳供应链企业既要注重引导消费者的低碳偏好, 也要注重提升广告宣传的效果。此外, 低碳供应链成员企业一味地追求自身边际利润的提升并不总是可取的, 企业进行决策时要充分考虑产品的基础市场需求, 否则追求边际利润提升所带来的效果可能适得其反。从政府层面来看, 通过提升社会公众的低碳意识能够有效地促进企业碳减排水平的提高。

3 制造商具有互惠偏好的分散式决策模型

本节考虑作为低碳供应链主导方的制造商具有互惠偏好, 供应链上下游企业间进行 Stackelberg 博弈, 分别在以下几种情形下进行分析。

3.1 既无广告合作又无减排成本分担

低碳供应链上下游企业之间既无广告合作又无减排成本分担情形下, 零售商独自承担广告费用, 制造商独自承担碳减排成本。此时, 零售商和制造商的利润函数分别如下

$$\Pi_R(A) = D\rho_R - C_R \quad (8)$$

$$\Pi_M(E) = D\rho_M - C_M + e_m P_c - (E_m - E) D P_c \quad (9)$$

当低碳供应链主导方制造商具有互惠偏好时, 制造商进行决策时不仅关心自身的收益, 还会关注零售商的收益。考虑互惠偏好时的企业效用函数包括自身收益产生的效用和心理互惠支付效用两部分。参考文献[37, 38, 42~44]的处理方

$$\Pi_R^{cn} = \frac{2\eta_1 \rho_R [(E_m P_c - \rho_R \theta_m - \rho_M) k^2 + D_0 k P_c - D_0 \eta_2] - \rho_R^2 t^2 \eta_2}{\eta_1 (4k P_c - 2\eta_2)} \quad (13)$$

$$\Pi_M^{cn} = \frac{\{[-E_m^2 k^2 + (-2 D_0 E_m + 4 e_m) k - D_0^2] P_c^2 + [2 E_m k^2 \rho_M + 2 D_0 \rho_M k + 2 \eta_2 (D_0 E_m - e_m)] P_c + (\rho_R^2 \theta_m^2 - \rho_M^2) k^2 - 2 D_0 \eta_2 \rho_M\} \eta_1^2 - 2[(D_0 + E_m k) P_c^2 + (-k \rho_M - \eta_2 E_m) P_c + \eta_2 \rho_M] t^2 \eta_1 \rho_R - t^4 P_c^2 \rho_R^2}{(4k P_c - 2\eta_2) \eta_1^2} \quad (14)$$

式, 将制造商的效用函数形式刻画为

$$U_M(E) = D\rho_M - C_M + e_m P_c - (E_m - E) \times DP_c + \theta_m (D\rho_R - C_R) \quad (10)$$

通过该情形下供应链上下游企业间 Stackelberg 博弈模型的求解可以得到命题 2。

命题 2 低碳供应链上下游企业之间既无广告合作又无减排成本分担情形下的最优广告和减排水平分别为

$$A^{cn} = \frac{t\rho_R}{\eta_1}$$

$$E^{cn} = \frac{[(E_m k - D_0) P_c - k(\rho_R \theta_m + \rho_M)] \eta_1 - t^2 P_c \rho_R}{\eta_1 (2k P_c - \eta_2)}$$

证明 采用逆向归纳法进行求解, 由式(8)可求得零售商利润函数 $\Pi_R(A)$ 关于 A 的二阶导数 $\partial^2 \Pi_R / \partial A^2 = -\eta_1 < 0$, 因此 $\Pi_R(A)$ 是关于 A 的严格凹函数, 再求 $\Pi_R(A)$ 关于 A 的一阶导数 $\partial \Pi_R / \partial A = \rho_R t - \eta_1 (1 - \mu_1) A$, 令其等于 0, 可求得既无广告合作又无减排成本分担情形下零售商的最优广告水平为

$$A^{cn} = \frac{t\rho_R}{\eta_1} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)并对 E 求二阶导数得到 $\partial^2 U_M / \partial E^2 = 2k P_c - \eta_2$, 由于 η_2 比其他参数大得多, 故 $\partial^2 U_M / \partial E^2 < 0$, 因此 U_M 是关于 E 的严格凹函数。求 U_M 关于 E 的一阶导数并令其等于 0, 可以得到既无广告合作又无减排成本分担情形下制造商的最优减排水平为

$$E^{cn} = \frac{[(E_m k - D_0) P_c - k(\rho_R \theta_m + \rho_M)] \eta_1 - t^2 P_c \rho_R}{\eta_1 (2k P_c - \eta_2)} \quad (12)$$

证毕。

根据命题 2, 将式(11)和式(12)分别代入式(8)和式(9)可以得到既无广告合作又无减排成本分担情形下零售商利润、制造商利润以及供应链整体利润分别为

$$\Pi_{SC}^{cn} = \frac{\{[-E_m^2 k^2 + (-2D_0 E_m + 4e_m)k - D_0^2]P_c^2 + [2E_m(\rho_M + \rho_R)k^2 + 2D_0(\rho_M + \rho_R)k + 2\eta_2(E_m D_0 - e_m)]P_c + [(\theta_m - 2)\rho_R - \rho_M] \times (\rho_R \theta_m + \rho_M)k^2 - 2\eta_2 D_0(\rho_M + \rho_R)\} \eta_1^2 - 2t^2[(D_0 + kE_m)P_c^2 - (k\rho_M + \eta_2 E_m)P_c + \eta_2(\rho_M + \frac{1}{2}\rho_R)]\rho_R \eta_1 - t^4 \rho_R^2 P_c^2}{(4kP_c - 2\eta_2)\eta_1^2} \quad (15)$$

推论 3 低碳供应链上下游企业之间既无广告合作又无减排成本分担的情形下,零售商最优广告投入 A^{cn} 和制造商最优减排水平 E^{cn} 都会随着零售商边际利润 ρ_R 以及广告对市场需求的影响系数 t 的增大而提升,制造商最优减排水平 E^{cn} 也会受到制造商边际利润 ρ_M 、互惠系数 θ_m 以及基础市场需求 D_0 的正向影响。但是,零售商最优广告投入 A^{cn} 随广告成本系数 η_1 的增大而降低,制造商最优减排水平 E^{cn} 也会随广告和减排成本系数 η_1 、 η_2 的增大而降低。此外,零售商利润 Π_R^{cn} 与制造商互惠系数 θ_m 、基础市场需求 D_0 和广告影响系数 t 呈现出正相关关系。

证明 由式(11)和式(12)可求得零售商最优广告投入 A^{cn} 、制造商最优减排水平 E^{cn} 关于 ρ_R 、 ρ_M 、 t 、 θ_m 、 D_0 的一阶偏导数分别为 $\frac{\partial A^{cn}}{\partial \rho_R} = \frac{t}{\eta_1}$ 、 $\frac{\partial E^{cn}}{\partial \rho_R} = \frac{k\theta_m \eta_1 + t^2 P_c}{\eta_1(\eta_2 - 2kP_c)}$ 、 $\frac{\partial E^{cn}}{\partial \rho_M} = \frac{k}{(\eta_2 - 2kP_c)}$ 、 $\frac{\partial A^{cn}}{\partial t} = \frac{\rho_R}{\eta_1}$ 、 $\frac{\partial E^{cn}}{\partial t} = \frac{2tP_c \rho_R}{(\eta_2 - 2kP_c)\eta_1}$ 、 $\frac{\partial E^{cn}}{\partial \theta_m} = \frac{k\rho_R}{\eta_2 - 2kP_c}$ 和 $\frac{\partial E^{cn}}{\partial D_0} = \frac{P_c}{\eta_2 - 2kP_c}$ 。由命题 2 的证明过程可知 $\eta_2 - 2kP_c > 0$, 因此上述一阶偏导数全部大于 0。再由式(11)和式(12)求得 A^{cn} 和 E^{cn} 关于 η_1 和 η_2 的一阶偏导数分别为 $\frac{\partial A^{cn}}{\partial \eta_1} = -\frac{t\rho_R}{\eta_1^2}$ 、 $\frac{\partial E^{cn}}{\partial \eta_1} = \frac{t^2 P_c \rho_R}{\eta_1^2(2kP_c - \eta_2)}$ 、 $\frac{\partial E^{cn}}{\partial \eta_2} = \frac{[(kE_m - D_0)P_c - k(\rho_R \theta_m + \rho_M)]\eta_1 - t^2 P_c \rho_R}{\eta_1(2kP_c - \eta_2)^2}$ 。根据 $E > 0$, 由式(12)可求得 $[(kE_m - D_0)P_c - k(\rho_R \theta_m + \rho_M)]\eta_1 - t^2 P_c \rho_R < 0$, 因此 $\partial A^{cn}/\partial \eta_1$ 、 $\partial E^{cn}/\partial \eta_1$ 、 $\partial E^{cn}/\partial \eta_2$ 均小于 0。由式(13)可以求得 Π_R^{cn} 关于 θ_m 、 D_0 和 t 的一阶偏导数 $\partial \Pi_R^{cn}/\partial \theta_m > 0$ 、 $\partial \Pi_R^{cn}/\partial D_0 > 0$ 、 $\partial \Pi_R^{cn}/\partial t > 0$, 因此 Π_R^{cn} 随着 θ_m 、 D_0 和 t 的增大而

增大。

证毕。

推论 3 表明:在低碳供应链上下游企业之间既无广告合作又无减排成本分担的情形下,制造商边际利润的提升会促使其提高碳减排水平,但零售商边际利润的变化除了会改变零售商的广告投入外,也会对制造商的碳减排水平造成影响。当广告宣传效果显著时,零售商会借此机会加大广告投入以获取更多的收益。此外,低碳供应链主导方具有积极的互惠偏好时,供应链的碳减排水平将会提高,同时下游零售商的利润也会随之增加。当产品的基础市场需求规模扩大时,零售商的订货量将会增加,而这又将为上游制造商带来更多的收入,因此制造商将会更加愿意提高碳减排水平。

3.2 有广告合作无减排成本分担

低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担情形下,制造商和零售商进行广告合作,共同分担广告费用,而制造商将独自承担碳减排成本。制造商分担广告费用的比例为 μ_1 , $0 < \mu_1 < 1$ 。此时,零售商的利润函数、制造商的利润函数、制造商的效用函数分别如下

$$\Pi_R(A) = D\rho_R - (1 - \mu_1)C_R \quad (16)$$

$$\Pi_M(E, \mu_1) = D\rho_M - C_M - \mu_1 C_R + e_m P_c - (E_m - E)D P_c \quad (17)$$

$$U_M(E, \mu_1) = D\rho_M - C_M - \mu_1 C_R + e_m P_c - (E_m - E)D P_c + \theta_m [D\rho_R - (1 - \mu_1)C_R] \quad (18)$$

通过该情形下供应链上下游企业间 Stackelberg 博弈模型的求解可以得到命题 3。

命题 3 低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担情形下的最优广告投入 A^{ccn} 、最优减排水平 E^{ccn} 以及制造商分担广告费用的比例 μ_1 分别为

$$A^{ccn} = \frac{\{2(D_0 + kE_m)P_c^2 + 2[(-\rho_M - \rho_R)k - \eta_2]P_c + [(\theta_m + 1)\rho_R + 2\rho_M]\eta_2\}t}{2\eta_1\eta_2 - 2t^2P_c^2 - 4kP_c\eta_1} \quad (19)$$

$$E^{cen} = \frac{2t^2 P_c^2 E_m + \{2(E_m k - D_0)\eta_1 - [(\theta_m + 1)\rho_R + 2\rho_M]t^2\}P_c - 2k\eta_1(\rho_R\theta_m + \rho_M)}{2t^2 P_c^2 + 4kP_c\eta_1 - 2\eta_1\eta_2} \quad (20)$$

$$\mu_1 = \frac{2[(D_0 + kE_m)\eta_1 + t^2\rho_R]P_c^2 - 2\eta_1(k\rho_M - k\rho_R + \eta_2 E_m)P_c + [(\theta_m - 1)\rho_R + 2\rho_M]\eta_1\eta_2}{\{2(D_0 + kE_m)P_c^2 - (k\rho_M + k\rho_R + \eta_2 E_m)P_c + [(\theta_m + 1)\rho_R + 2\rho_M]\eta_2\}\eta_1} \quad (21)$$

当基础市场需求 $D_0 < D_{01}$ 或 $D_0 > D_{04}$ 时,互惠系数的合理取值区间为 $[-1, 1]$; 当基础市场需求 $D_0 = D_{01}$ 时,互惠系数的合理取值区间为 $[-1, 1)$; 当基础市场需求 $D_{01} < D_0 \leq D_{02}$ 时,互惠系数的合理取值区间为 $[-1, \theta_{m2})$; 当基础市场需求 $D_{02} < D_0 < D_{03}$ 时,互惠系数的合理取值区间为 $[-1, \theta_{m2}) \cup (\theta_{m1}, 1]$; 当基础市场需求 $D_{03} \leq D_0 < D_{04}$ 时,互惠系数的合理取值区间为 $(\theta_{m1}, 1]$; 当基础市场需求 $D_0 = D_{04}$ 时,互惠系数的合理取值区间为 $(-1, 1]$. 其中

$$D_{01} = -\frac{(kP_c - \eta_2)(E_m P_c - \rho_M - \rho_R)}{P_c^2}$$

$$D_{02} =$$

$$\frac{\{-kE_m P_c^2 + [\eta_2 E_m + k(\rho_M - \rho_R)]P_c - \eta_2 \rho_M\}\eta_1 - t^2 P_c^2 \rho_R}{\eta_1 P_c^2}$$

$$D_{03} = \frac{-kE_m P_c^2 + (k(\rho_M + \rho_R) + \eta_2 E_m)P_c - \eta_2 \rho_M}{P_c^2}$$

$$D_{04} = \frac{-(kP_c - \eta_2)(E_m P_c - \rho_M + \rho_R)\eta_1 - t^2 P_c^2 \rho_R}{\eta_1 P_c^2}$$

$$\theta_{m1} = \frac{[(-2kE_m - 2D_0)P_c^2 + (2\eta_2 E_m + 2k(\rho_M - \rho_R))P_c]\eta_1}{\eta_1 \eta_2 \rho_R}$$

$$\frac{(2\rho_M - \rho_R)\eta_2 \eta_1 - 2t^2 P_c^2 \rho_R}{\eta_1 \eta_2 \rho_R}$$

$$\theta_{m2} = \frac{[(-2kE_m - 2D_0)P_c^2 + (2\eta_2 E_m + 2k(\rho_M + \rho_R))P_c]\eta_1}{\eta_2 \rho_R}$$

$$\frac{(2\rho_M + \rho_R)\eta_2 \eta_1}{\eta_2 \rho_R}$$

证明 采用逆向归纳法进行求解,由式(16)可判断 $\Pi_R(A)$ 是关于 A 的严格凹函数,再求 $\Pi_R(A)$ 关于 A 的一阶导数并令其等于 0,可求得低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担情形下零售商的最优广告水平为

$$A^{cen} = \frac{t \rho_R}{(1 - \mu_1)\eta_1} \quad (22)$$

将式(22)代入式(18)中,可以判定式(18)对应的 Hessian 矩阵为负定矩阵,因此制造商的效用 $U_M(E, \mu_1)$ 是关于 E 和 μ_1 的联合凹函数. 求 $U_M(E, \mu_1)$ 关于 E 和 μ_1 的一阶偏导数为

$$\frac{\partial U_M}{\partial \mu_1} = \frac{\left[\frac{(\theta_m + 1)\rho_R}{2} + (E - E_m)P_c + \rho_M\right]\mu_1 t^2 \rho_R}{(\mu_1 - 1)^3 \eta_1} + \frac{\left[\frac{(1 - \theta_m)\rho_R}{2} + (E_m - E)P_c - \rho_M\right]t^2 \rho_R}{(\mu_1 - 1)^3 \eta_1} \quad (23)$$

$$\frac{\partial U_M}{\partial E} = k\rho_M - \eta_2 E + \left(-\frac{t^2 \rho_R}{\eta_1(\mu_1 - 1)} + Ek + D_0\right)P_c - (E_m - E)kP_c + \theta_m k\rho_R \quad (24)$$

令式(23)和式(24)等于 0,可求得驻点 (E^{cen}, μ_1) . 又因为 $0 < \mu_1 < 1$,通过对 μ_1 表达式分子和分母作差可得 μ_1 表达式分子恒小于分母,因此 $\mu_1 < 1$ 恒成立. 通过对式(21)大于 0 进行求解可以得到,当 $\theta_m > \theta_{m1}$ 或 $\theta_m < \theta_{m2}$ 时 $\mu_1 > 0$ 成立,此时因 $\theta_{m1} - \theta_{m2} = \frac{2\eta_1 \eta_2 - 2t^2 P_c^2 - 4kP_c}{\eta_1 \eta_2} > 0$,故 $\theta_{m2} < \theta_{m1}$. 接着将 θ_{m1}, θ_{m2} 与前文所设定的互惠系数取值范围 $[-1, 1]$ 的边界值 -1 和 1 进行比较,可分为以下 9 种情形进行讨论:1) $\theta_{m1} > \theta_{m2} > 1$; 2) $\theta_{m1} > \theta_{m2} = 1$; 3) $\theta_{m1} > 1 > \theta_{m2} > -1$; 4) $\theta_{m1} = 1 > \theta_{m2} > -1$; 5) $1 > \theta_{m1} > \theta_{m2} > -1$; 6) $1 > \theta_{m1} > \theta_{m2} = -1$; 7) $1 > \theta_{m1} > -1 > \theta_{m2}$; 8) $1 > \theta_{m1} = -1 > \theta_{m2}$; 9) $-1 > \theta_{m1} > \theta_{m2}$. 分别对上述不等式进行求解可得到不同基础市场需求取值区间内满足 $\mu > 0$ 的 θ_m 取值区间. 证毕.

将式(19)~式(21)代入式(16)和式(17)中,可以得到低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担情形下零售商、制造商以及供应链整体的利润分别为

$$\Pi_R^{ccn} = \frac{\rho_R((2(D_0 + E_m k) P_c^2 + 2((\eta_2 E_m - (\rho_R \theta_m + \rho_M) k) - \eta_2((\theta_m + 1) \rho_R + 2 \rho_M)) t^2 + 4(k(D_0 + k E_m) P_c - (\rho_R \theta_m + \rho_M) k^2 - D_0 \eta_2) \eta_1))}{4 t^2 P_c^2 + 8 k P_c \eta_1 - 4 \eta_1 \eta_2} \quad (25)$$

$$\Pi_M^{ccn} = \frac{\left(8 t^2 P_c^3 e_m + (-4(D_0 \rho_R + k \rho_R E_m + \eta_2 E_m^2) t^2 - 4 \eta_1 (k^2 E_m^2 + (2 D_0 E_m - 4 e_m) k + D_0^2)) P_c^2 + (((2 \theta_m^2 + 2) \rho_R^2 + 4 \rho_R \rho_M) k + 4 E_m (\rho_R + 2 \rho_M) \eta_2) t^2 + \right. \\ \left. 8 \eta_1 (E_m k^2 \rho_M + D_0 k \rho_M + \eta_2 (E_m D_0 - e_m)) P_c + ((\theta_m + 1) \rho_R + 2 \rho_M) ((\theta_m - 1) \rho_R - 2 \rho_M) \eta_2 t^2 - 4(2 D_0 \eta_2 \rho_M + k^2 (\rho_M^2 - \rho_R^2 \theta_m^2)) \eta_1 \right)}{8 t^2 P_c^2 + 16 k P_c \eta_1 - 8 \eta_1 \eta_2} \quad (26)$$

$$\Pi_{SC}^{ccn} = \frac{\left(8 t^2 P_c^3 e_m + (-4 E_m^2 k^2 + 8(2 e_m - D_0 E_m) k - 4 D_0^2) \eta_1 - 4 E_m^2 t^2 \eta_2 \right) P_c^2 + ((8 E_m (\rho_M + \rho_R) k^2 + 8 D_0 (\rho_M + \rho_R) k + 8 \eta_2 (D_0 E_m - e_m)) \eta_1 + 2(\rho_R^2 \times \\ (\theta_m - 1)^2 k + 4 E_m \eta_2 (\rho_M + \rho_R)) t^2) P_c + (4((\theta_m - 2) \rho_R - \rho_M) (\rho_R \theta_m + \rho_M) k^2 - 8 D_0 \eta_2 (\rho_M + \rho_R)) \eta_1 + ((\theta_m - 3) \rho_R - 2 \rho_M) \eta_2 t^2 ((\theta_m + 1) \rho_R + 2 \rho_M))}{8 t^2 P_c^2 + 16 k P_c \eta_1 - 8 \eta_1 \eta_2} \quad (27)$$

推论 4 低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担情形下,零售商最优广告投入 A^{ccn} 和制造商最优减排水平 E^{ccn} 都会随着零售商和制造商边际利润 ρ_R 、 ρ_M 以及互惠系数 θ_m 和基础市场需求 D_0 的增大而提高;制造商分担广告费用的比例 μ_1 随其互惠偏好程度 θ_m 的增大而增大;零售商利润 Π_R^{ccn} 随着制造商互惠偏好程度 θ_m 、基础市场需求 D_0 以及广告影响系数 t 的增大而增大。

证明 证明过程与推论 3 类似,此处不再赘述。

推论 4 表明,与既无广告合作又无减排成本分担情形类似,低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担时,零售商的广告投入与制造商的减排水平都随着零售商边际利润的增大而提升,并且具有积极互惠偏好的制造商其减排水平也会越高。但不同的是,在有广告合作无减排成本分担情形下,下游零售商的广告投入也会受到上游制造商边际利润的影响。并且,制造商积极的互惠行为将会促使零售商加大对低碳产品的广告宣传力度。此外,推论 4 也表明低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担情形下,制造商分担零售商广告费用的比例与其互惠偏好成正相关关系,当制造商具有较强的互惠偏好时,将会分担更多的广告费用,而零售商的利润也会因此得到提高。

将既无广告合作又无减排成本分担以及有广告合作无减排成本分担两种情形与集中决策模式

进行比较可以得到结论 1。

结论 1 当 $\rho_M + \rho_R > \frac{E_m P_c \eta_2 - (E_m k + D_0) P_c^2}{\eta_2 - k P_c}$

时,集中决策模式、既无广告合作又无减排成本分担、有广告合作无减排成本分担三种不同情形下的均衡结果对比情况如表 2 所示。

证明 $A^* - A^{ccn} = \frac{t \eta_2 \rho_R (\theta_m - 1)}{(4 k P_c - 2 \eta_2) \eta_1 + 2 t^2 P_c^2} >$

0, 故 $A^* > A^{ccn}$. $A^{ccn} - A^{cnn} = \frac{\rho_R t \mu_1}{\eta_1 (1 - \mu_1)}$, 因 $0 < \mu_1 < 1$, 故 $A^{ccn} > A^{cnn}$. 因此, $A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$. 结论 1 后续证明与此类似,此处不再赘述。证毕。

结论 1 表明:低碳供应链上下游企业之间的广告合作必然会增加广告投入,提升制造商和供应链整体利润。当基础市场需求较大时,较之既无广告合作又无减排成本分担情形,低碳供应链上下游企业之间通过广告合作的方式将会使得广告投入和减排水平均有所提高,能在一定程度上缓解低碳供应链的双重边际效应,这就说明低碳供应链上下游企业之间的广告合作能提升低碳供应链的效率。但是,需要注意的是,当基础市场需求较小时,有广告合作无减排成本分担情形下的减排水平和零售商利润反而要低于既无广告合作又无减排成本分担情形。

当基础市场需求 $D_0 < D_{01}$ 或者 $D_0 > D_{02}$ 时,将互惠系数 $\theta_m = 1$ (此时供应链主导方为高度的利他偏好者)代入有广告合作无减排成本分担情形下 A^{ccn} 、 E^{ccn} 和 Π_{SC}^{ccn} 的表达式,可以得到结论 2。

表 2 不同情形下的均衡结果对比

Table 2 Comparison of equilibrium results in different situations

基础市场需求	互惠系数	广告投入	碳减排水平	零售商利润	制造商利润	供应链整体利润
$D_0 < D_{01}$	$\theta_m \in [-1, 1)$	$A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* > E^{cnn} > E^{ccn}$	$\Pi_R^{ccn} < \Pi_R^{cnn}$	$\Pi_M^{cnn} > \Pi_M^{ccn}$	$\Pi_{SC}^* > \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
	$\theta_m = 1$	$A^* = A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* = E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* = \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
$D_0 = D_{01}$	$\theta_m \in [-1, 1)$	$A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* > E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* > \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
$D_{01} < D_0 \leq D_{02}$	$\theta_m \in [-1, \theta_{m2})$	$A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* > E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* > \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
$D_{02} < D_0 < D_{03}$	$\theta_m \in [-1, \theta_{m2})$	$A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* > E^{cnn} > E^{ccn}$	$\Pi_R^{cnn} > \Pi_R^{ccn}$		$\Pi_{SC}^* > \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
	$\theta_m \in (\theta_{m1}, 1)$	$A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* > E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* > \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
	$\theta_m = 1$	$A^* = A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* = E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* = \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
$D_{03} \leq D_0 < D_{04}$	$\theta_m \in (\theta_{m1}, 1)$	$A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* > E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* > \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
	$\theta_m = 1$	$A^* = A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* = E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* = \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
$D_0 = D_{04}$	$\theta_m \in [-1, 1)$	$A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* > E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* > \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
$D_0 > D_{04}$	$\theta_m \in [-1, 1)$	$A^* > A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* > E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* > \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$
	$\theta_m = 1$	$A^* = A^{ccn} > A^{cnn}$	$E^* = E^{cnn} > E^{ccn}$			$\Pi_{SC}^* = \Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{ccn}$

结论 2 当低碳供应链主导方为高度的利他偏好者时,供应链上下游企业之间仅需通过广告合作契约就可以实现低碳供应链的完美协调。

证明 将互惠系数 $\theta_m = 1$ 代入 A^{con} 、 E^{cn} 和 Π_{SC}^{cn} , 可得到 $A^{cn} = A^*$ 、 $E^{cn} = E^*$ 和 $\Pi_{SC}^{cn} = \Pi_{SC}^*$. 证毕。

3.3 既有广告合作又有减排成本分担

低碳供应链上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担的情形下,零售商与制造商共同分担广告费用和减排成本,制造商分担广告费用的比例为 μ_1 , 零售商分担碳减排成本的比例为 μ_2 , 并且 $0 < \mu_1 < 1$ 、 $0 < \mu_2 < 1$. 此时,零售商的利润函数、制造商的利润函数以及制造商的效用

函数分别如下

$$\Pi_R(A) = D\rho_R - (1 - \mu_1)C_R - \mu_2C_M \quad (28)$$

$$\Pi_M(E) = D\rho_M - (1 - \mu_2)C_M + e_mP_c - (E_m - E)DP_c - \mu_1C_R \quad (29)$$

$$U_M(E) = D\rho_M - (1 - \mu_2)C_M + e_mP_c - (E_m - E)DP_c - \mu_1C_R + \theta_m[D\rho_R - (1 - \mu_1)C_R - \mu_2C_M] \quad (30)$$

通过该情形下低碳供应链上下游企业间 Stackelberg 博弈模型的求解可以得到命题 4.

命题 4 当制造商分担广告费用的比例 μ_1 、零售商分担减排成本的比例 μ_2 满足如下条件时,通过广告合作-减排成本分担组合契约可以使低碳供应链实现完美协调

$$\mu_1 = \frac{[(D_0 + kE_m)\eta_1 + t^2\rho_R]P_c^2 - \eta_1[(\rho_M - \rho_R)k + \eta_2E_m]P_c + \eta_1\eta_2\rho_M}{\eta_1\{(D_0 + kE_m)P_c^2 - [\eta_2E_m + (\rho_R + \rho_M)k]P_c + \eta_2(\rho_R + \rho_M)\}} \quad (31)$$

$$\mu_2 = \frac{(\eta_1\eta_2 - t^2P_c^2 - 2kP_c\eta_1)k\rho_R}{\{-t^2P_c^2E_m + [(D_0 - kE_m)\eta_1 + t^2(\rho_R + \rho_M)]P_c + k\eta_1(\rho_R + \rho_M)\}\eta_2} \quad (32)$$

此时,互惠系数的合理取值区间为 $(\theta_{m3}, 1]$, 其中

$$\theta_{m3} = \frac{t^2(k\rho_R - \eta_2E_m)P_c^2 + k\eta_1\eta_2\rho_M}{(t^2P_c^2 + 2kP_c\eta_1 - \eta_1\eta_2)k\rho_R} + \frac{\{[(D_0 - kE_m)\eta_1 + t^2(\rho_R + \rho_M)]\eta_2 + 2k^2\rho_R\eta_1\}P_c}{(t^2P_c^2 + 2kP_c\eta_1 - \eta_1\eta_2)k\rho_R} < 0$$

证明 由式(28)和式(30)求出既有广告合作又有减排成本分担情形下的最优广告投入和最

优减排水平分别为

$$A^{ccc} = \frac{\rho_R t}{\eta_1 (1 - \mu_1)} \quad (33)$$

$$E^{ccc} = \frac{t^2 P_c \rho_R - (\mu_1 - 1) \eta_1 (\theta_m k \rho_R + D P_c - k E_m P_c + k \rho_M)}{(\mu_1 - 1) [(-\mu_2 \theta_m + \mu_2 - 1) \eta_2 + 2 k P_c] \eta_1} \quad (34)$$

式中 $1 - \frac{1}{\mu_2} < \theta_m \leq 1$. 令 $A^{ccc} = A^*$ 、 $E^{ccc} = E^*$ 即可求得低碳供应链实现完美协调时的分担比例 μ_1 和 μ_2 . 将 μ_2 代入约束条件 $1 - \frac{1}{\mu_2} < \theta_m \leq 1$ 中,

即可求得互惠系数的合理取值区间为

$$\frac{\{[(D_0 - k E_m) \eta_1 + t^2 (\rho_R + \rho_M)] \eta_2 + 2 k^2 \rho_R \eta_1\} P_c}{(t^2 P_c^2 + 2 k P_c \eta_1 - \eta_1 \eta_2) k \rho_R} +$$

$$\frac{t^2 (k \rho_R - \eta_2 E_m) P_c^2 + k \eta_1 \eta_2 \rho_M}{(t^2 P_c^2 + 2 k P_c \eta_1 - \eta_1 \eta_2) k \rho_R} < \theta_m \leq 1 \quad \text{证毕.}$$

将式(31) ~ 式(34)代入式(28)和式(29)中,可以得到低碳供应链上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担情形下零售商、制造商以及供应链整体的利润分别为

$$\Pi_R^{ccc} = \frac{\rho_R ((k(3 D_0 + k E_m) P_c - 2 D_0 \eta_2 - (\rho_R + \rho_M) k^2) \eta_1 + t^2 (D_0 P_c^2 + P_c \eta_2 E_m - \eta_2 (\rho_R + \rho_M)))}{(4 k P_c - 2 \eta_2) \eta_1 + 2 t^2 P_c^2} \quad (35)$$

$$\Pi_M^{ccc} = \frac{\left((2 t^2 P_c^3 e_m + ((-E_m^2 k^2 + (-2 D_0 E_m + 4 e_m) k - D_0^2) \eta_1 - t^2 (D_0 \rho_R + \eta_2 E_m^2)) P_c^2 + ((\rho_R + 2 \rho_M) k^2 E_m + (2 \rho_M - \rho_R) D_0 k + 2 (D_0 E_m - e_m) \eta_2) \eta_1 + t^2 \eta_2 E_m (2 \rho_M + \rho_R)) P_c - ((\rho_M + \rho_R) k^2 + 2 D_0 \eta_2) \eta_1 + t^2 \eta_2 (\rho_M + \rho_R) \rho_M \right)}{(4 k P_c - 2 \eta_2) \eta_1 + 2 t^2 P_c^2} \quad (36)$$

$$\Pi_{SC}^{ccc} = \frac{\left(((-E_m^2 k^2 + (-2 D_0 E_m + 4 e_m) k - D_0^2) P_c^2 + (2 D_0 E_m - 2 e_m) \eta_2 + 2 k (\rho_R + \rho_M) (D_0 + k E_m)) P_c - (\rho_R + \rho_M) \right) (2 D_0 \eta_2 + k^2 (\rho_R + \rho_M)) \eta_1 + t^2 (2 P_c^3 e_m - E_m^2 P_c^2 \eta_2 + 2 E_m \eta_2 (\rho_R + \rho_M) P_c - \eta_2 (\rho_R + \rho_M)^2)}{(4 k P_c - 2 \eta_2) \eta_1 + 2 t^2 P_c^2} \quad (37)$$

通过对比式(7)和式(37)可知,低碳供应链上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担情形下的供应链整体利润与集中决策模式一致. 因此,无论低碳供应链主导方是否具有互惠偏好,通过广告合作-减排成本分担组合契约可以提升制造商的碳减排水平和零售商的广告投入,并且当制造商分担广告费用的比例 μ_1 和零售商分担碳减排成本的比例 μ_2 满足一定的条件时,可以实现低碳供应链的完美协调. 除此之外,在既有广告合作又有减排成本分担情形下,制造商和零售商的广告费用和碳减排成本分担比例与上下游企业的边际利润、消费者低碳偏好以及广告对市场需

求的影响系数均有关,但是与制造商的互惠偏好程度无关.

为保证低碳供应链上下游企业之间广告合作-减排成本分担组合契约的实施,必须满足约束 $\Pi_R^{ccc} > \Pi_R^{ccn}$ 、 $\Pi_M^{ccc} > \Pi_M^{ccn}$, 由此可以进一步得到命题5.

命题5 1) 当 $\theta_m < \underline{\theta_m}$ 时, $\Pi_R^{ccc} > \Pi_R^{ccn}$, $\Pi_M^{ccc} < \Pi_M^{ccn}$; 2) 当 $\theta_m > \overline{\theta_m}$ 时, $\Pi_R^{ccc} < \Pi_R^{ccn}$, $\Pi_M^{ccc} > \Pi_M^{ccn}$; 3) 当 $\underline{\theta_m} < \theta_m < \overline{\theta_m}$ 时, 有 $\Pi_R^{ccc} > \Pi_R^{ccn}$ 、 $\Pi_M^{ccc} > \Pi_M^{ccn}$.

$$\text{其中 } \underline{\theta_m} = \sqrt{\frac{4 \eta_1 (E_m P_c - \rho_M) k^2 - 2 P_c [-2 t^2 E_m P_c + (2 \rho_M + \rho_R) t^2 + 2 D_0 \eta_1] k + t^2 \eta_2 \rho_R}{\rho_R (2 k t^2 P_c + 4 k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}}$$

$$\overline{\theta_m} = \frac{2 \eta_1 (E_m P_c - \rho_M + \rho_R) k^2 - 2 P_c [D_0 \eta_1 - t^2 (E_m P_c - \rho_M)] k + t^2 \eta_2 \rho_R}{\rho_R (2 k t^2 P_c + 4 k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}$$

命题4和命题5表明:在既有广告合作又有

减排成本分担的情形下,当制造商的互惠偏好程

度 $\theta_m < \bar{\theta}_m$ 时,零售商将从制造商的互惠行为中获益;当制造商的互惠偏好程度 $\theta_m > \bar{\theta}_m$ 时,制造商的互惠行为将会给其带来更多的收益,但零售商并不一定能从制造商的互惠行为中获益;当 $\theta_m < \bar{\theta}_m < \bar{\theta}_m$ 时,制造商的互惠行为将会给其自身以及下游零售商带来更多的收益,从而实现双赢。

上述结果揭示的管理启示是:相比于仅有广告合作的情形,低碳供应链上下游企业之间的双向成本分担形式更值得提倡。当制造商的互惠偏好程度适中,通过广告合作-减排成本分担组合契约的实施,低碳供应链的广告投入、碳减排水平、各成员企业以及供应链整体的利润均会提升,整个低碳供应链系统将会实现 Pareto 改进。为确保低碳供应链上下游企业之间广告合作-减排成本分担组合契约的顺利实施,作为供应链主导方的制造商在经济交往中对合作伙伴应当表现出适中的善意,一方面可以使得合作伙伴能从其互惠行为中获益,另一方面又可以保证自身利益不受损害。然而,对于跟随者零售商来说,应根据上游制造商的互惠程度择机选择接受或拒绝这种合作形式。

4 模型对比分析

本节将在低碳供应链上下游企业之间不同合作模式下分别考虑供应链主导方具有互惠偏好与不具有互惠偏好的情形,对各种不同情形下的均衡结果进行对比分析。低碳供应链上下游企业之间不同合作模式下制造商不具有互惠偏好的均衡结果等价于互惠系数 $\theta_m = 0$ 的特例。通过对比分析,可以得到结论3和结论4。

结论3 在互惠系数的合理取值区间内,当 $\theta_m > 0$ 时,有 $E^{cnn} > E^{nnn}$ 、 $E^{ccn} > E^{ncn}$ 、 $A^{cnn} = A^{nnn}$ 、 $A^{ccn} > A^{ncn}$;当 $\theta_m < 0$ 时,有 $E^{cnn} < E^{nnn}$ 、 $E^{ccn} < E^{ncn}$ 、 $A^{cnn} = A^{nnn}$ 、 $A^{ccn} < A^{ncn}$ 。

证明 将 E^{cnn} 与 E^{nnn} 作差得到 $\Delta E_1 = E^{cnn} - E^{nnn} = \frac{k\rho_R\theta_m}{\eta_2 - 2kP_c}$,可知当制造商互惠系数 θ_m 取负时, $\Delta E_1 < 0$,此时 $E^{cnn} < E^{nnn}$;当制造商互惠系数 θ_m 取正时, $\Delta E_1 > 0$,此时 $E^{cnn} > E^{nnn}$ 。将 E^{ccn} 与 E^{ncn} 作

差得到 $\Delta E_2 = E^{ccn} - E^{ncn} = \frac{\rho_R\theta_m(t^2P_c + 2k\eta_1)}{2\eta_1\eta_2 - 2t^2P_c^2 - 4kP_c\eta_1}$,与 ΔE_1 类似,当制造商互惠系数 θ_m 取负时, $\Delta E_2 < 0$,此时 $E^{ccn} < E^{ncn}$;当制造商互惠系数 θ_m 取正时, $\Delta E_2 > 0$,此时 $E^{ccn} > E^{ncn}$ 。 $e_m = 5\,000$ 表达式中不含互惠系数 θ_m ,因此无论 θ_m 取何值始终有 $A^{cnn} = A^{nnn}$ 。将 A^{cnn} 与 A^{ncn} 作差得到 $\Delta A_2 = A^{cnn} - A^{ncn} = \frac{\rho_R\theta_m t\eta_2}{2\eta_1\eta_2 - 2t^2P_c^2 - 4kP_c\eta_1}$,可知当制造商互惠系数 θ_m 取正时, $\Delta A_2 > 0$,此时 $A^{cnn} > A^{ncn}$;当制造商互惠系数 θ_m 取负时, $\Delta A_2 < 0$ 此时 $A^{cnn} < A^{ncn}$ 。证毕。

结论3表明,低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担情形下,具有积极互惠偏好的制造商将会提高其碳减排水平,零售商也会加大其广告投入。而在低碳供应链上下游企业之间既无广告合作又无减排成本分担的情形下,具有积极互惠偏好的制造商将会提高其碳减排水平,但零售商并不会增加广告投入。当低碳供应链主导方制造商具有消极的互惠偏好时,结论正好相反。为确保自身利益不受损害,具有消极互惠偏好的制造商在与供应链伙伴合作的过程中总是表现出自私自利的一面,尽可能地压缩碳减排成本,导致产品碳减排水平不高。而零售商也会降低广告投入,从而造成恶性循环,导致低碳产品市场萎缩。

结论4 低碳供应链上下游企业之间既无广告合作又无减排成本分担情形下,在互惠系数的合理取值区间内,当 $\theta_m > 0$ 时,有 $\Pi_R^{cnn} > \Pi_R^{nnn}$ 、 $\Pi_{SC}^{cnn} > \Pi_{SC}^{nnn}$ 、 $\Pi_R^{ccn} > \Pi_R^{ncn}$ 、 $\Pi_{SC}^{ccn} > \Pi_{SC}^{ncn}$;当 $\theta_m < 0$ 时,有 $\Pi_R^{cnn} < \Pi_R^{nnn}$ 、 $\Pi_{SC}^{cnn} < \Pi_{SC}^{nnn}$ 、 $\Pi_R^{ccn} < \Pi_R^{ncn}$ 、 $\Pi_{SC}^{ccn} < \Pi_{SC}^{ncn}$ 。无论 θ_m 取何值,恒有 $\Pi_M^{cnn} < \Pi_M^{nnn}$ 、 $\Pi_M^{ccn} < \Pi_M^{ncn}$ 。

证明 将 Π_R^{cnn} 与 Π_R^{nnn} 、 Π_{SC}^{cnn} 与 Π_{SC}^{nnn} 作差得到

$$\Delta \Pi_{R1} = \Pi_R^{cnn} - \Pi_R^{nnn} = \frac{k^2 \rho_R^2 \theta_m}{\eta_2 - 2kP_c}$$

$$\Delta \Pi_{SC1} = \Pi_{SC}^{cnn} - \Pi_{SC}^{nnn} = \frac{\rho_R^2 k^2 \theta_m (\theta_m - 2)}{4kP_c - 2\eta_2}$$

当制造商互惠系数 θ_m 取负时,有 $\Delta \Pi_{R1} < 0$ 、 $\Delta \Pi_{SC1} < 0$,即 $\Pi_R^{cnn} < \Pi_R^{nnn}$ 、 $\Pi_{SC}^{cnn} < \Pi_{SC}^{nnn}$;当制造商

互惠系数 θ_m 取正时,有 $\Delta \Pi_{R1} > 0$ 、 $\Delta \Pi_{SC1} > 0$, 即 $\Pi_R^{enn} > \Pi_R^{nnn}$ 、 $\Pi_{SC}^{enn} > \Pi_{SC}^{nnn}$ 。

将 Π_R^{enn} 与 Π_R^{nen} 、 Π_{SC}^{enn} 与 Π_{SC}^{nen} 作差得到

$$\Delta \Pi_{R2} = \frac{\rho_R^2 \theta_m (2 P_c t^2 k + 4 k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{4 \eta_1 \eta_2 - 8 k P_c \eta_1 - 4 t^2 P_c^2}$$

$$\Delta \Pi_{SC2} = \frac{\rho_R^2 \theta_m (\theta_m - 2) (2 P_c t^2 k + 4 k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{16 k P_c \eta_1 + 8 t^2 P_c^2 - 8 \eta_1 \eta_2}$$

当制造商互惠系数 θ_m 取负时,有 $\Delta \Pi_{R2} < 0$ 、 $\Delta \Pi_{SC2} < 0$, 即 $\Pi_R^{enn} < \Pi_R^{nen}$ 、 $\Pi_{SC}^{enn} < \Pi_{SC}^{nen}$; 当制造商互惠系数 θ_m 取正时,有 $\Delta \Pi_{R2} > 0$ 、 $\Delta \Pi_{SC2} > 0$, 即 $\Pi_R^{enn} > \Pi_R^{nen}$ 、 $\Pi_{SC}^{enn} > \Pi_{SC}^{nen}$ 。

将 Π_M^{enn} 与 Π_M^{nnn} 、 Π_M^{enn} 与 Π_M^{nen} 作差得到

$$\Delta \Pi_{M1} = \Pi_M^{enn} - \Pi_M^{nnn} = \frac{\rho_R^2 k^2 \theta_m^2}{4 k P_c - 2 \eta_2}$$

$$\Delta \Pi_{M2} = \Pi_M^{enn} - \Pi_M^{nen} = \frac{\rho_R^2 \theta_m^2 (2 P_c t^2 k + 4 k^2 \eta_1 + t^2 \eta_2)}{16 k P_c \eta_1 + 8 t^2 P_c^2 - 8 \eta_1 \eta_2}$$

可以看到无论 θ_m 取正值或负值,恒有 $\Pi_M^{enn} < \Pi_M^{nnn}$ 、 $\Pi_M^{enn} < \Pi_M^{nen}$ 。证毕。

结论 4 表明,无论低碳供应链上下游企业之间是否进行广告合作,当制造商具有积极的互惠

偏好时,零售商以及供应链系统都将会从制造商的积极互惠行为中获益。然而,当制造商具有消极的互惠偏好时,这不仅会侵害零售商以及供应链系统的收益,还会使得制造商自身收益也遭受损失。

5 环境影响分析

考虑到低碳供应链上下游企业之间采用不同的合作模式产生的碳排放量也会不一样,本节将采用碳排放总量来衡量低碳供应链上下游企业之间采用不同的合作模式所带来的环境影响,用 S 表示碳排放总量

$$S = D(E_m - E) \quad (38)$$

将低碳供应链上下游企业之间不同合作模式下的均衡解依次代入式 (38),可以得到不同合作模式下的碳排放总量,由此得到命题 6。

命题 6 低碳供应链上下游企业之间既无广告合作又无减排成本分担、有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担三种情形下的碳排放总量分别为

$$S^{enn} = \frac{\{[(E_m P_c + \rho_R \theta_m + \rho_M)k + P_c D_0 - \eta_2 E_m] \eta_1 + t^2 P_c \rho_R\} \{[(E_m P_c - \rho_R \theta_m - \rho_M)k^2 + k P_c D_0 - \eta_2 D_0] \eta_1 + t^2 \rho_R (k P_c - \eta_2)\}}{\eta_1^2 (2 k P_c - \eta_2)^2} \quad (39)$$

$$S^{cen} = \frac{\left((2k(D_0 + kE_m)P_c + 2(-\rho_R\theta_m - \rho_M)k^2 - 2D_0\eta_2)\eta_1 - ((\rho_R(\theta_m - 1)k - 2\eta_2E_m)P_c + ((\theta_m + 1)\rho_R + 2\rho_M)\eta_2)t^2 \right) \left(((D_0 + kE_m)P_c + k(\rho_R\theta_m + \rho_M) - \eta_2E_m)\eta_1 + P_c t^2 \left(\frac{1}{2}(\theta_m + 1)\rho_R + \rho_M \right) \right)}{(t^2 P_c^2 + 2kP_c\eta_1 - \eta_1\eta_2)^2} \quad (40)$$

$$S^{ccc} = \frac{\left((2k(D_0 + kE_m)P_c + 2(-\rho_R\theta_m - \rho_M)k^2 - 2D_0\eta_2)\eta_1 - ((\rho_R(\theta_m - 1)k - 2\eta_2E_m)P_c + ((\theta_m + 1)\rho_R + 2\rho_M)\eta_2)t^2 \right) \left(((D_0 + kE_m)P_c + k(\rho_R\theta_m + \rho_M) - \eta_2E_m)\eta_1 + P_c t^2 \left(\frac{1}{2}(\theta_m + 1)\rho_R + \rho_M \right) \right)}{(t^2 P_c^2 + 2kP_c\eta_1 - \eta_1\eta_2)^2} \quad (41)$$

6 数值分析

由于上节低碳供应链上下游企业之间不同合作模式下的碳排放总量的表达式极为复杂,通过数学推导的方式进行影响机理分析和对比分析具有一定的难度。因此,本节将通过数值分析的方法在验证模型科学性和有效性的同时进一步分析碳

配额与碳交易价格的影响,并且试图发现一些在理论建模分析过程中尚未发现的规律。在满足约束条件的前提下,不失一般性,给定低碳供应链参数分别为: $k=10$ 、 $t=5$ 、 $\rho_R=200$ 、 $\rho_M=250$ 、 $\eta_1=50$ 、 $\eta_2=1\,000$ 、 $P_c=10$ 、 $E_m=20$ 、 $e_m \in [2\,000, 5\,000]$ 。在有广告合作无减排成本分担情形下,由于互惠系数的合理取值范围会随着基础市场需求的变化而变化,考虑到互惠系数合理取值范围

的变化并不会影响到均衡结果的内在变化机理. 为简化分析过程并突出研究重点, 将基础市场需求设定为 $D_0 = 100$ ($D_{03} < D_0 < D_{04}$).

6.1 模型验证

不同情形下的广告投入、减排水平、零售商利润、制造商利润以及供应链整体利润与互惠系数之间的关系如图2~图6所示. 考虑到集中决策模式下的均衡解与低碳供应链上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担情形相一致, 故此处不重复分析. 为保持图形的完整性, 将不同合作模式下的均衡解及相应的利润在互惠系数取值区间内全部绘出, 点线部分表示该情形在此互惠系数区间内不存在.

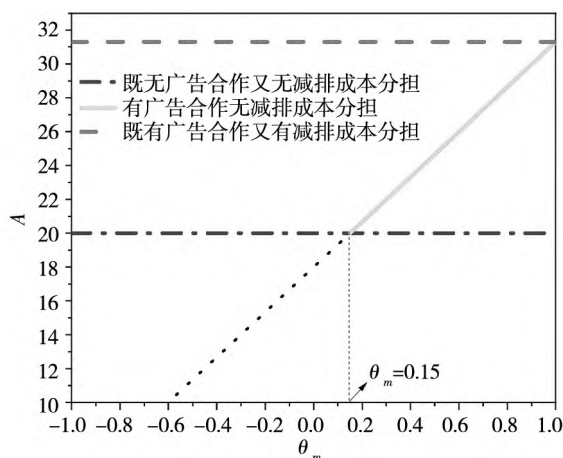


图2 广告投入与互惠系数之间的关系

Fig. 2 Relationship between A and θ_m

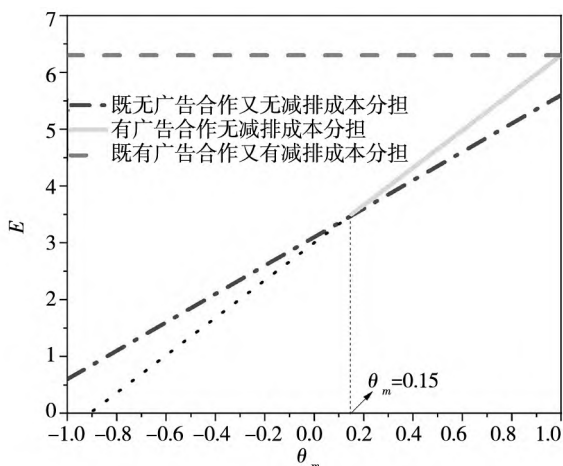


图3 碳减排水平与互惠系数之间的关系

Fig. 3 Relationship between E and θ_m

从图2和图3可以看出, 当 $\theta_m > \theta_{m1} = 0.15$ 时, 有广告合作无减排成本分担情形下的广告投

入和碳减排水平都会高于既无广告合作又无减排成本分担情形. 这就说明, 当制造商互惠偏好程度较高时, 低碳供应链上下游企业之间通过广告合作能够有效地提高碳减排水平和广告投入. 但是, 当制造商互惠偏好程度较低时, 低碳供应链上下游企业之间的广告合作反而对低碳供应链是有害的, 此时广告合作将无法实施. 也就是说当制造商互惠偏好程度较低时, 低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担的情形不存在.

从图4和图5可以看出, 当 $\theta_m > \theta_{m1} = 0.15$ 时, 有广告合作无减排成本分担情形下的零售商利润高于既无广告合作又无减排成本分担情形. 然而, 制造商利润刚好相反, 制造商在广告合作情形下的利润要低于非广告合作情形, 并且这种差距会随着制造商互惠偏好程度的增强而扩大. 这就表明, 通过广告合作的方式, 作为供应链主导方的制造商互惠偏好程度越高, 越是愿意牺牲自己的利益让利于供应链合作伙伴. 当 $\theta_{m1} < \theta_m < \theta_m$ ($\theta_{m1} = 0.15, \theta_m = 0.22$) 时, 既有广告合作又有减排成本分担情形下的零售商利润最高、制造商利润最低. 当 $\theta_m > \theta_m = 0.22$ 时, 制造商在既有广告合作又有减排成本分担情形下的利润要高于有广告合作无减排成本分担情形, 此时制造商期望零售商能够进行碳减排合作; 当 $\theta_m < \theta_m < \theta_m$ ($\theta_m = 0.22, \theta_m = 0.52$) 时, 无论零售商的利润还是制造商的利润, 在既有广告合作又有减排成本分担情

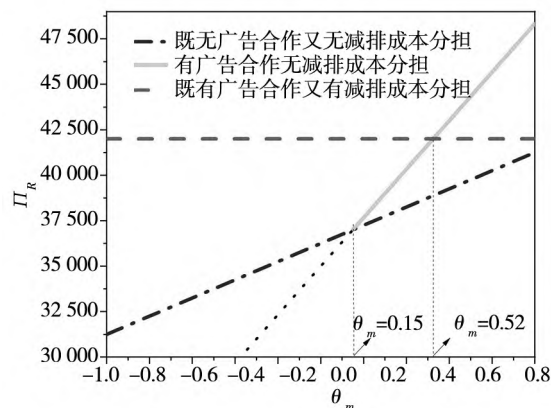


图4 零售商利润与互惠系数之间的关系

Fig. 4 Relationship between Π_R and θ_m

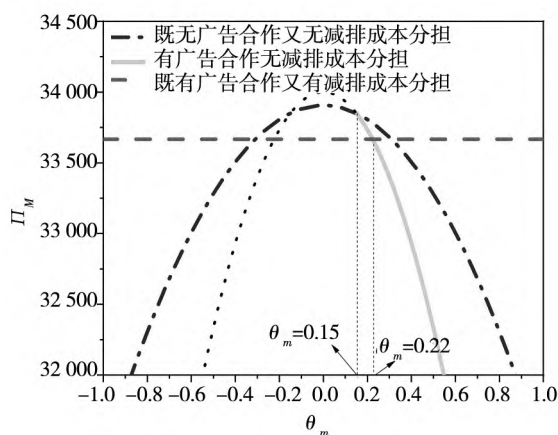


图5 制造商利润与互惠系数之间的关系

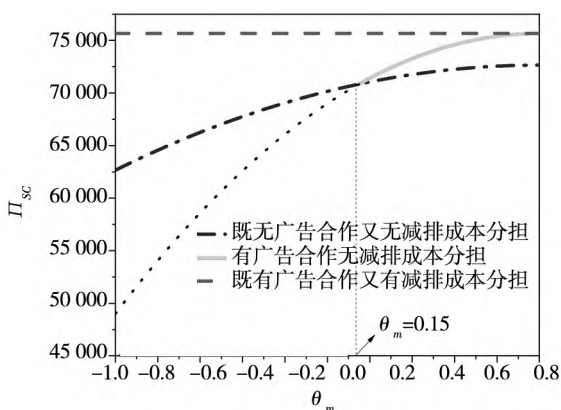
Fig. 5 Relationship between Π_M and θ_m 

图6 供应链整体利润与互惠系数之间的关系

Fig. 6 Relationship between Π_{SC} and θ_m

形下均要高于有广告合作无减排成本分担情形,此时制造商和零售商双方都更倾向于在碳减排和广告上进行双向合作.当 $\theta_m > \bar{\theta}_m = 0.52$ 时,零售商在既有广告合作又有减排成本分担情形下的利润要低于有广告合作无减排成本分担情形,此时零售商并不希望与制造商进行碳减排合作.

由图6可以看出,无论低碳供应链上下游企业之间是否进行广告或者减排合作,作为供应链主导方的制造商互惠偏好程度越高,供应链系统的利润也会越高.这就表明,低碳供应链主导方的互惠偏好有利于供应链效率的提升.另外,从图6还可以看出,无论制造商互惠偏好程度如何,从低碳供应链整体的角度来看,上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担的合作方式始终是最优的.

结合图2、图3和图6可以发现,无论制造商

互惠偏好程度如何,低碳供应链上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担情形下的减排水平、广告投入、供应链整体利润与集中决策模式相一致,也就是说通过广告合作-减排成本分担组合契约可以使低碳供应链实现完美协调.结合结论1,在一定的基础市场需求取值区间内,当互惠系数 $\theta_m = 1$ (供应链主导方为高度的利他偏好者)时,低碳供应链上下游企业之间有广告合作无减排成本分担情形下的碳减排水平、广告投入、供应链整体利润与集中决策模式相一致.也就是说,当供应链主导方为高度的利他偏好者时,低碳供应链上下游企业之间仅需通过广告合作契约就可以实现低碳供应链的完美协调.然而,当供应链主导方并非高度的利他偏好者时,通过单一的广告合作契约只能在一定程度上缓解低碳供应链的双重边际效应,但无法实现低碳供应链的完美协调.

6.2 低碳配额下碳交易价格对供应链成员决策的影响

取碳配额 $e_m = 2\,000$ 时,碳交易价格对广告投入、碳减排水平、零售商利润、制造商利润、供应链整体利润的影响分别如图7~图11所示.

由图7可以看出,在既无广告合作又无减排成本分担情形下广告投入不受碳交易价格影响.而在有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下的广告投入均随着碳交易价格的上升而呈现下降趋势,并且在既有广告合作又有减排成本分担情形下的广告投入始终最高.当碳交易价格上升到某一临界值后,有广告合作无减排成本分担情形下的广告投入将会低于既无广告合作又无减排成本分担情形,因此制造商将会拒绝与零售商进行广告合作,此时低碳供应链上下游企业之间的广告合作关系破裂,转变为既无广告合作又无减排成本分担情形.除此之外不难发现,在有广告合作无减排成本分担情形下,制造商互惠系数 θ_m 越大零售商广告投入也越大,这说明上游制造商善意的互惠行为能够激励下游零售商加大广告投入,与前文研究结论一致.

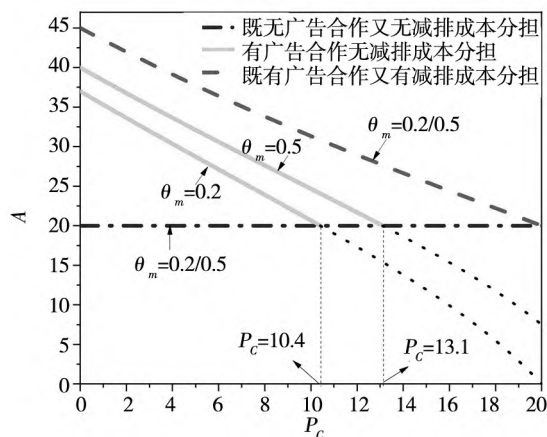


图7 低碳配额下碳交易价格对广告投入的影响

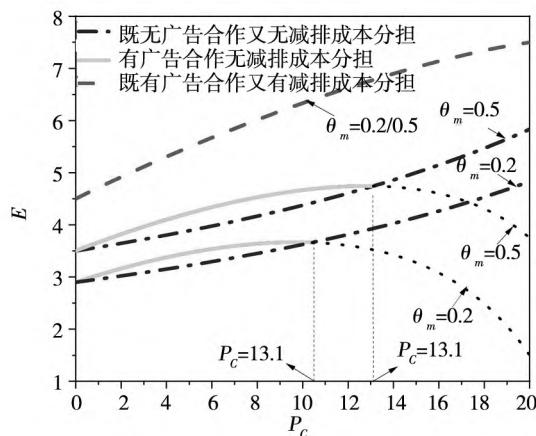
Fig. 7 Effects of P_c on A (LCQ)

图8 低碳配额下碳交易价格对碳减排水平的影响

Fig. 8 Effects of P_c on E (LCQ)

由图8可以看出,既无广告合作又无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下的碳减排水平均随着碳交易价格的上升而呈现上升趋势,并且在既有广告合作又有减排成本分担情形下的碳减排水平始终最高。然而,有广告合作无减排成本分担情形下的碳减排水平随着碳交易价格的上升呈现出先上升后下降的变化规律。与广告投入类似,当碳交易价格上升到某一临界值后,有广告合作无减排成本分担情形下的碳减排水平将会低于既无广告合作又无减排成本分担情形,因此制造商将会拒绝与零售商进行广告合作,此时低碳供应链上下游企业之间的广告合作关系破裂,转变为既无广告合作又无减排成本分担情形。

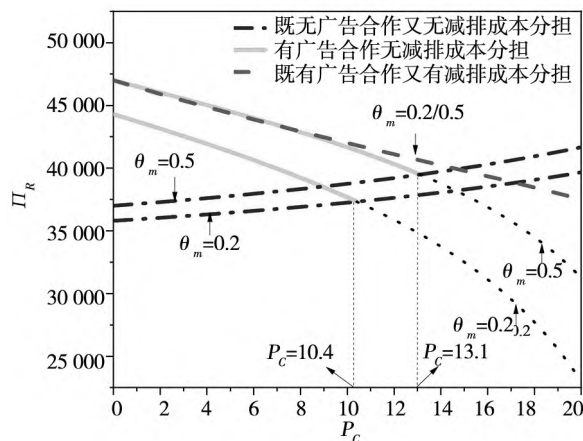


图9 低碳配额下碳交易价格对零售商利润的影响

Fig. 9 Effects of P_c on Π_R (LCQ)

由图9可以看出,既无广告合作又无减排成本分担情形下的零售商利润随着碳交易价格的上升而呈现缓慢上升趋势,有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下的零售商利润随着碳交易价格的上升而缓慢下降。当碳交易价格较低时,有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下的零售商利润相近。当碳交易价格较高时,有广告合作无减排成本分担情形下的零售商利润将会低于既有广告合作又有减排成本分担情形,并且随着碳交易价格的上升,两者之间的差距也将逐渐扩大。

由图10可以看出,当政府给制造商设定的碳排放限额较低时,制造商利润随碳交易价格的上升而迅速降低。造成该现象的原因:由于政府给制造商设定的碳排放限额较低,制造商通过投资减排仍达不到政府碳限额的要求,需要从碳交易市场购买碳排放权以满足碳排放约束,碳交易价格越高,制造商购买碳排放权所付出的成本也越高,因此制造商利润将随着碳交易价格的上升而迅速降低。结合图9~图11可以发现,当政府给制造商设定的碳排放限额较低时,随着碳交易价格的上升,制造商的利润迅速降低,而零售商的利润缓慢下降或缓慢上升,两种效应叠加在一起,最终导致供应链整体利润随着碳交易价格的上升而呈现下降的趋势。由图11还可以发现,无论碳交易价

格如何变化,既有广告合作又有减排成本分担情形下的供应链整体利润始终最大.其原因在于,低碳供应链上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担情形下总是存在相应的 μ_1 和 μ_2 使供应链决策与集中决策模式相一致,实现低碳供应链的完美协调.

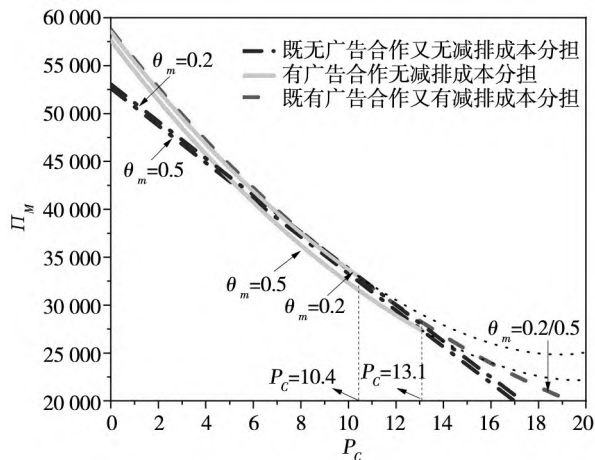


图 10 低碳配额下碳交易价格对制造商利润的影响

Fig. 10 Effects of P_c on Π_M (LCQ)

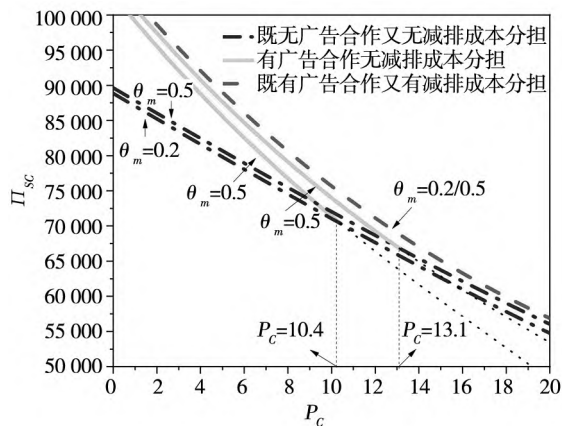


图 11 低碳配额下碳交易价格对供应链整体利润的影响

Fig. 11 Effects of P_c on Π_{SC} (LCQ)

6.3 高碳配额下碳交易价格对供应链成员决策的影响

取碳配额 $e_m = 5\,000$ 时,碳交易价格对制造商利润以及供应链整体利润的影响分别如图12~图13所示.由于广告投入、碳减排水平以及零售商利润均与碳配额无关,因此高碳配额下碳交易价格对广告投入、碳减排水平、零售商利润的影响与图7~图9保持一致.

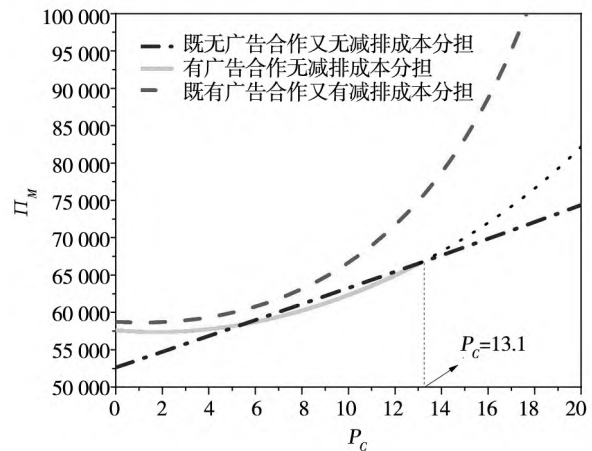


图 12 高碳配额下碳交易价格对制造商利润的影响

Fig. 12 Effects of P_c on Π_M (HCQ)

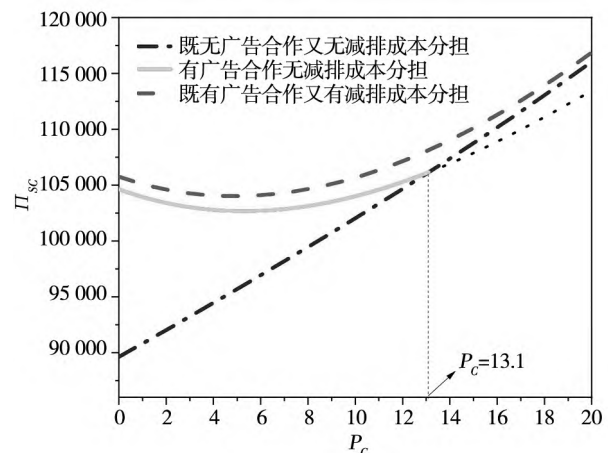


图 13 高碳配额下碳交易价格对供应链整体利润的影响

Fig. 13 Effects of P_c on Π_{SC} (HCQ)

由图12可以看出,当政府给制造商设定的碳排放限额较高时,制造商利润将随着碳交易价格的上升而呈现上升趋势.该现象背后的原因是:由于政府给制造商设定的碳排放限额较高,制造商通过投资减排在满足碳排放约束的前提下还有碳排放权剩余,此时制造商可以将剩余的碳排放权在碳交易市场出售获利,碳交易价格越高,制造商出售剩余碳排放权获利也越高,因此制造商利润将随着碳交易价格的上升而呈现上升趋势.结合图12和图13可以发现,当政府给制造商设定的碳排放限额较高时,随着碳交易价格的上升,制造商的利润在三种不同情形下均呈现上升趋势.而由于零售商利润与碳配额无关,因此高碳配额下零售商利润随碳交易价格的变化与图9保持一致.由图9可以看出,零售商的利润在既无广告合

作又无减排成本分担情形下呈现缓慢上升趋势,在有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下呈现缓慢下降趋势。上述两种效应叠加在一起,最终导致既无广告合作又无减排成本分担情形下的供应链整体利润随着碳交易价格的上升而呈现上升趋势,有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下的供应链整体利润随着碳交易价格的上升而呈现出先降后升的趋势。由图 13 同样可以发现,当政府给制造商设定的碳排放限额较高时,无论碳交易价格高还是低,既有广告合作又有减排成本分担情形下的供应链整体利润始终最大。其原因在于,低碳供应链上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担情形下总是存在相应的 μ_1 和 μ_2 使供应链决策与集中决策模式相一致,能实现低碳供应链的完美协调。

结合 6.2 节和 6.3 节的分析可以发现:1) 无论政府给制造商设定的碳排放限额是高还是低,当碳交易价格较低时,制造商和零售商都更愿意选择既有广告合作又有减排成本分担的合作模式,在该合作模式下的广告投入、减排水平、供应链成员利润以及供应链整体利润都最高;2) 无论政府给制造商设定的碳排放限额是高还是低,碳交易价格的上升均会促进制造商碳减排水平的提升。该现象背后的原因是,当政府给制造商设定的碳排放限额较高时,制造商提升减排水平可以获得更多的碳排放权剩余,碳交易价格越高,制造商通过外部碳交易市场出售剩余碳排放权获得的收益也越高;当政府给制造商设定的碳排放限额较低时,制造商也将会提升碳减排水平,从而避免花费较高的成本从外部碳交易市场购买碳排放权以满足碳排放约束。

6.4 环境影响分析

本节通过数值分析的方法研究不同情形下的环境影响。首先,分析低碳供应链上下游企业之间不同合作模式下的碳排放总量与互惠系数之间的关系,如图 14 所示。

结合图 6 和图 14 可以看出,既有广告合作又有减排成本分担的情形下,低碳供应链系统在获得最高利润的同时,也将产生最多的碳排放量,并且无论是供应链整体利润还是碳排放总量均与互惠系数无关。有广告合作无减排成本分担情形下

的供应链整体利润和碳排放总量均随着互惠系数的增大而增大,并且当互惠系数 $\theta_m = 1$ 时,低碳供应链系统在获得最大利润的同时,也将产生最多的碳排放量。既无广告合作又无减排成本分担情形下的供应链整体利润随着互惠系数的增大而增大,而碳排放总量却随着互惠系数的增大而降低。也就是说,在既无广告合作又无减排成本分担的情形下,低碳供应链主导方的互惠偏好既有利于供应链的经济目标,也有利于供应链的环境目标。

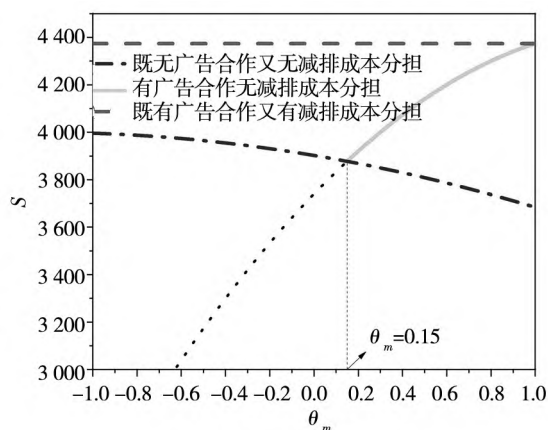


图 14 碳排放总量与互惠系数的关系

Fig. 14 Relationship between S and θ_m

然后,分析不同情形下的消费者低碳偏好和广告影响系数对供应链碳排放总量的影响,如图 15 和图 16 所示。

由图 15 和图 16 可以看出,无论低碳供应链上下游企业之间采用何种合作方式,碳排放总量均随消费者低碳偏好的提高或广告影响系数的增大而呈现出先增后减的变化趋势。当消费者低碳偏好较低或广告影响系数较小时,既有广告合作又有减排成本分担情形下的碳排放最多,并且随着消费者低碳偏好或广告影响系数的增大,该合作模式下的碳排放总量将率先达到峰值然后急剧下降。

随着消费者低碳意识的不断提升以及低碳产品广告效果愈发显著,将会有越来越多的消费者选择低碳产品,这将使得低碳产品的销售量不断上升,因此短期内碳排放总量也会随之上升。与此同时,随着制造商碳减排水平的不断提高,碳排放总量达峰后将迅速下降。当制造商通过出售低碳产品或出售碳排放权获得的边际收益与碳减排投资的边际成本相一致时,制造商将在获得最大利润的同时也最大限度地降低对环境的负面影响。

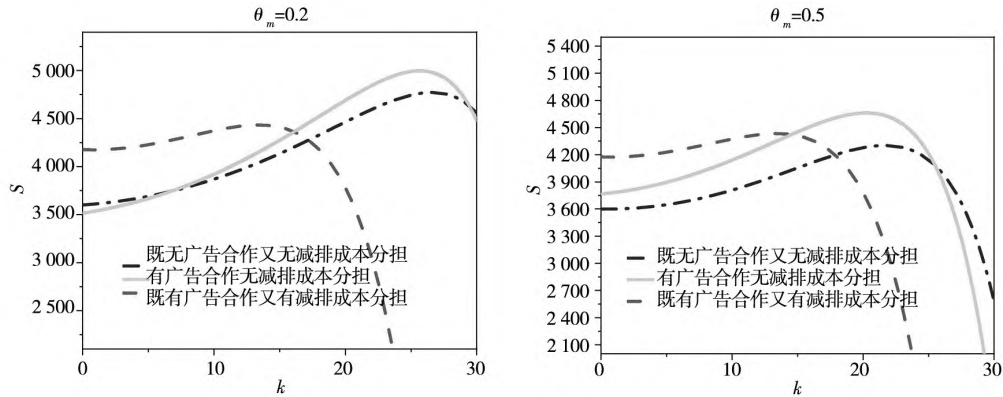


图 15 消费者低碳偏好对碳排放总量的影响

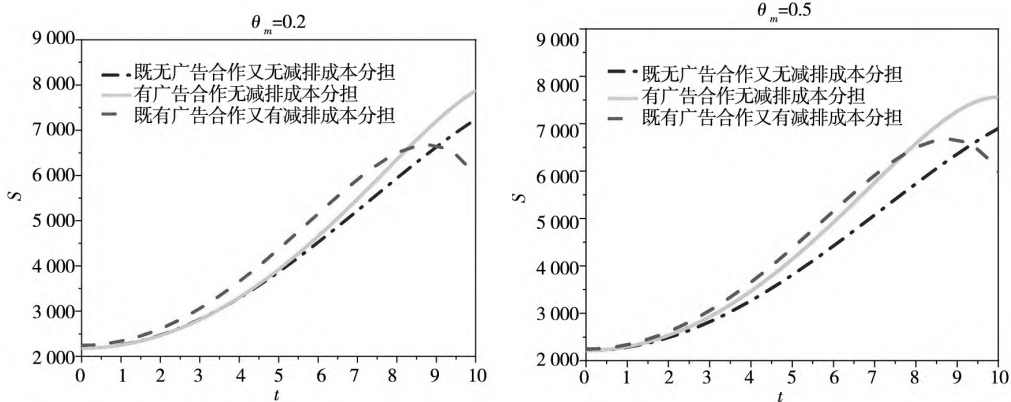
Fig. 15 Effects of k on S 

图 16 广告影响系数对碳排放总量的影响

Fig. 16 Effects of t on S

上述发现揭示的管理启示是:从政府的角度来看,要想降低企业生产经营活动对环境的负面影响,加强对社会公众碳生活方式的宣传引导,不断提升社会公众的低碳意识是个不错的选择;从企业的角度来看,在降低产品碳排放的同时,加大广告

投入、提升低碳产品广告宣传的效果将有利于促进低碳产品的销售,推动低碳供应链健康稳定发展。

下面分析低碳供应链上下游企业之间不同合作模式下碳交易价格对碳排放总量的影响,如图 17 所示。

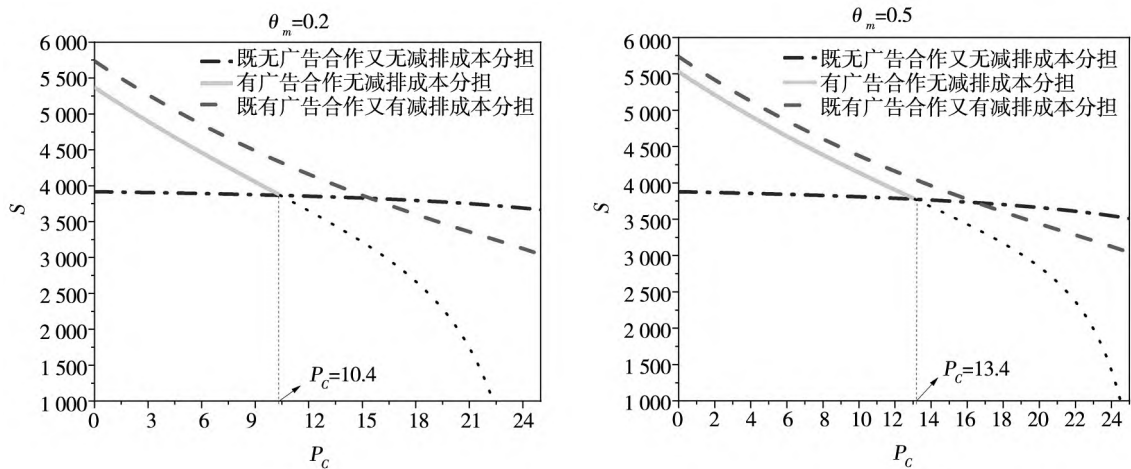


图 17 碳交易价格对碳排放总量的影响

Fig. 17 Effects of P_c on S

由图 17 可以看出随着碳交易价格 P_c 的上升,既无广告合作又无减排成本分担情形下的碳排放总量缓慢降低,而有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下的碳排放总量均快速下降。当碳交易价格较低时,低碳供应链上下游企业之间既有广告合作又有减排成本分担情形下的碳排放总量最高,有广告合作无减排成本分担情形次之,既无广告合作又无减排成本分担情形下的碳排放总量最低。当碳交易价格超过某一临界值之后,制造商将会拒绝与零售商进行广告合作,此时低碳供应链上下游企业之间的广告合作关闭破裂,转变为既无广告合作又无减排成本分担情形。当碳交易价格足够高时,既无广告合作又无减排成本分担情形下的碳排放总量最高,而既有广告合作又有减排成本分担情形下的碳排放总量较低。

7 结束语

碳排放约束已成为或即将成为许多企业的现实经营环境,如何在降低产品碳排放的同时,促进低碳产品的销售,推动低碳供应链健康稳定发展成为众多企业面临的重要决策问题。本文以一个制造商和一个零售商组成的两级低碳供应链为研究对象,制造商进行碳减排,零售商对低碳产品进行广告宣传,在碳交易机制下构建博弈模型研究低碳供应链上下游企业间的减排与广告决策,并且将互惠引入低碳供应链的策略互动过程中开展相应的优化决策与协调机制研究,得到以下主要研究结论。

1) 制造商和零售商边际利润的提高并不一定会带来低碳供应链整体利润的提升,只有当制造商和零售商的边际利润之和高于碳交易价格与初始碳排放量之积时,低碳供应链成员企业的边际利润与供应链整体利润之间才具有正相关关系。反之,当制造商和零售商的边际利润之和小于碳交易价格与初始碳排放量之积时,低碳供应链整体利润只有在基础市场需求足够大的条件下才会与低碳供应链成员企业的边际利润成正相关关系。因此,低碳供应链成员企业一味地追求自身边

际利润的提升并不总是可取的,在决策时要充分考虑产品的基础市场需求,否则追求边际利润提升所带来的效果可能适得其反。

2) 当制造商互惠偏好程度较低时,低碳供应链上下游企业之间的广告合作对低碳供应链是有害的,此时广告合作将无法实施。当制造商互惠偏好程度较高时,较之既无广告合作又无减排成本分担情形,低碳供应链上下游企业之间通过广告合作的方式将会使广告投入和碳减排水平均有提升,也会给零售商和供应链系统带来更多的利润,在一定程度上缓解低碳供应链的双重边际效应。需要注意的是,制造商利润的变化情况取决于其互惠偏好程度,当制造商互惠偏好程度较高时,制造商进行广告合作反而会给其利润造成损害。

3) 无论制造商互惠偏好程度如何,通过广告合作-减排成本分担组合契约可以使低碳供应链实现完美协调。当供应链主导方为高度的利他偏好者时,低碳供应链上下游企业之间仅需通过广告合作契约就可以实现完美协调。当供应链主导方并非高度的利他偏好者时,通过单一的广告合作契约只能在一定程度上缓解低碳供应链的双重边际效应,无法实现低碳供应链的完美协调。

4) 当政府设定较低的碳排放限额时,随着碳交易价格的上升,三种不同情形下制造商的利润均会迅速降低,而零售商的利润缓慢下降或缓慢上升,两种效应叠加在一起,最终导致供应链整体利润呈现下降趋势。当政府给设定较高的碳排放限额时,随着碳交易价格的上升,三种不同情形下制造商的利润均呈现上升趋势,而零售商的利润在既无广告合作又无减排成本分担情形下呈现缓慢上升趋势,在有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下呈现缓慢下降趋势,两种效应叠加在一起,最终导致既无广告合作又无减排成本分担情形下的供应链整体利润呈现上升趋势,有广告合作无减排成本分担、既有广告合作又有减排成本分担两种情形下的供应链整体利润呈现出先降后升的趋势。需要注意的是,无论政府设定的碳排放限额是高还是低,也无论碳交易价格如何变化,既有广告合作又有减排成本分担情形下的供应链整体利润始终最大。

5) 低碳供应链在双向合作模式下将获得最高的利润, 也产生最多的碳排放, 并且供应链整体利润和碳排放总量均与互惠系数无关. 单一广告合作模式下, 供应链整体利润和碳排放总量均随互惠系数的增大而增大. 无合作情形下, 供应链整体利润随互惠系数增大而增大, 碳排放总量随互惠系数增大而降低, 也就是说, 制造商的互惠偏好既有利于经济目标, 也有利于环境目标.

6) 无论低碳供应链上下游企业之间采用何种合作模式, 碳排放总量均随消费者低碳偏好的提高或广告影响系数的增大而呈现出先增后减的变化趋势. 当消费者低碳偏好较低或广告影响系数较小时, 双向合作模式下的碳排放量最多, 并且

随着消费者低碳偏好或广告影响系数的增大, 双向合作模式下的碳排放总量将率先达到峰值然后急剧下降.

本研究工作未来可以从以下几个方面进行拓展: 首先, 由于碳减排、广告投放、互惠行为、市场需求都是动态现象, 因此从动态演化的视角将互惠引入低碳供应链的长期博弈和策略互动过程中开展相应的研究将更加贴近现实; 其次, 现实生活中决策者可能同时受到多种行为因素的影响, 未来可以考虑多种行为因素的组合影响或交叉影响; 最后, 商业实践中供应链渠道结构、竞争模式日新月异, 可以通过扩展供应链结构的复杂性来展开更为深入的研究.

参 考 文 献:

- [1] 王 梅, 周 鹏. 碳排放权分配对碳市场成本有效性的影响研究[J]. 管理科学学报, 2020, 23(12): 1-11.
Wang Mei, Zhou Peng. Assessing the impact of emission permit allocation on the cost effectiveness of carbon market[J]. Journal of Management Sciences in China, 2020, 23(12): 1-11. (in Chinese)
- [2] 朱帮助, 黄丽清, 江民星, 等. 配额分配对跨期碳市场有效性的影响研究[J]. 管理科学学报, 2022, 25(9): 52-65.
Zhu Bangzhu, Huang Liqing, Jiang Minxing, et al. The impact of permit allocation on intertemporal carbon market efficiency[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(9): 52-65. (in Chinese)
- [3] 陈 剑. 低碳供应链管理研究[J]. 系统管理学报, 2012, 21(6): 721-728.
Chen Jian. Study on supply chain management in a low-carbon era[J]. Journal of Systems & Management, 2012, 21(6): 721-728. (in Chinese)
- [4] Benjaafar S, Li Y, 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.
- [5] Cachon G P. Retail store density and the cost of greenhouse gas emissions[J]. Management Science, 2014, 60(8): 1907-1925.
- [6] Du S, Ma F, Fu Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system[J]. Annals of Operations Research, 2015, 228(1): 135-149.
- [7] 周艳菊, 吴界朋, 陈晓红, 等. 低碳经济下嵌入式低碳服务机制设计研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(5): 1193-1204.
Zhou Yanju, Wu Jiepeng, Chen Xiaohong, et al. Embedded low-carbon service mechanism design with low-carbon economy[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2016, 36(5): 1193-1204. (in Chinese)
- [8] Gao F, Souza G. Carbon offsetting with eco-conscious consumers[J]. Management Science, 2022, 68(11): 7879-7897.
- [9] 陈晓红, 曾祥宇, 王傅强. 碳限额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(10): 2562-2571.
Chen Xiaohong, Zeng Xiangyu, Wang Fuqiang. Impacts of carbon trading price on carbon emission in supply chain under the cap-and-trade system[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2016, 36(10): 2562-2571. (in Chinese)
- [10] 楼高翔, 张洁琼, 范体军, 等. 非对称信息下供应链减排投资策略及激励机制[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 42-52.

- Lou Gaoxiang, Zhang Jieqiong, Fan Tijun, et al. Supply chain's investment strategy of emission reducing and incentive mechanism design under asymmetric information[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 42–52. (in Chinese)
- [11] 张新华, 甘冬梅, 黄守军, 等. 考虑收益下限的火力发电商碳减排投资策略[J]. 管理科学学报, 2019, 22(11): 69–81.
- Zhang Xinhua, Gan Dongmei, Huang Shoujun, et al. Investment strategy of carbon emission reduction of coal-fired power firms considering revenue floors[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(11): 69–81. (in Chinese)
- [12] Xu X, He P, Xu H, et al. Supply chain coordination with green technology under cap-and-trade regulation[J]. International Journal of Production Economics, 2017, (183): 433–442.
- [13] 杨磊, 张琴, 张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. 管理科学学报, 2017, 20(11): 75–87.
- Yang Lei, Zhang Qin, Zhang Zhiyong. Channel selection and carbon emissions reduction policies in supply chains with the cap-and-trade scheme[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(11): 75–87. (in Chinese)
- [14] Ji J, Zhang Z, Yang L. Carbon emission reduction decisions in the retail-/dual-channel supply chain with consumers' preference[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, (141): 852–867.
- [15] Zhang L H, Yao J, Xu L. Emission reduction and market encroachment: Whether the manufacturer opens a direct channel or not? [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, (269): 121932.
- [16] 王文利, 程天毓. 碳交易背景下供应链运营决策的演化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(5): 1272–1281.
- Wang Wenli, Cheng Tianyu. Evolutionary game analysis of supply chain operations decision under the background of carbon trading[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2021, 41(5): 1272–1281. (in Chinese)
- [17] Gopalakrishnan S, Granot D, Granot F, et al. Incentives and emission responsibility allocation in supply chains[J]. Management Science, 2021, 67(7): 4172–4190.
- [18] He P, Wang Z, Shi V, et al. The direct and cross effects in a supply chain with consumers sensitive to both carbon emissions and delivery time[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 292(1): 172–183.
- [19] 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 Yunfeng, Shang Qianlong, Gong Bengang, 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. (in Chinese)
- [20] Yang L, Zhang Q, Ji J. Pricing and carbon emission reduction decisions in supply chains with vertical and horizontal cooperation[J]. International Journal of Production Economics, 2017, (191): 286–297.
- [21] Bai Q, Chen M, Xu L. Revenue and promotional cost-sharing contract versus two-part tariff contract in coordinating sustainable supply chain systems with deteriorating items[J]. International Journal of Production Economics, 2017, (187): 85–101.
- [22] He P, He Y, Shi C, et al. Cost-sharing contract design in a low-carbon service supply chain[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, (139): 106160.
- [23] Liu L, Li F. 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.
- [24] Shi J, Liu D, Du Q, et al. The role of the procurement commitment contract in a low-carbon supply chain with a capital-constrained supplier[J]. International Journal of Production Economics, 2023, (255): 108681.
- [25] 樊文平, 王旭坪, 刘名武, 等. 零售商持股制造商减排投资的供应链协调优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(9): 2316–2326.
- Fan Wenping, Wang Xuping, Liu Mingwu, 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. (in Chinese)
- [26] 夏良杰, 孔清逸, 李友东, 等. 考虑交叉持股的低碳供应链减排与定价决策研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29

- (4): 70–81.
- Xia Liangjie, Kong Qingyi, Li Youdong, et al. Emission reduction and pricing strategies of a low-carbon supply chain considering cross-shareholding[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(4): 70–81. (in Chinese)
- [27] Xia Q, Zhi B, Wang X. The role of cross-shareholding in the green supply chain: Green contribution, power structure and coordination[J]. International Journal of Production Economics, 2021, (234): 108037.
- [28] 王婷婷, 王道平. 政府补贴下供应链合作减排与低碳宣传的动态协调策略[J]. 运筹与管理, 2020, 29(8): 52–61.
- Wang Tingting, Wang Daoping. Dynamic coordination strategy of cooperation on carbon emission reduction and low carbon propaganda in supply chain under government subsidy[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(8): 52–61. (in Chinese)
- [29] 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 Chunqiu, Wang Qinpeng. Differential game models of low carbon reputation considering government participation in supply chain[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(8): 35–44. (in Chinese)
- [30] 贺 勇, 陈志豪, 廖 诺. 政府补贴方式对绿色供应链制造商减排决策的影响机制[J]. 中国管理科学, 2022, 30(6): 87–98.
- He Yong, Chen Zhihao, Liao Nuo. The impact mechanism of government subsidy approach on manufacturer's decision-making in green supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(6): 87–98. (in Chinese)
- [31] 刘作仪, 查 勇. 行为运作管理: 一个正在显现的研究领域[J]. 管理科学学报, 2009, 12(4): 64–74.
- Liu Zuoyi, Zha Yong. Behavioral operations management: An emerging research field[J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(4): 64–74. (in Chinese)
- [32] Katok E, Wu D Y. Contracting in supply chains: A laboratory investigation[J]. Management Science, 2009, 55(12): 1953–1968.
- [33] Croson R, Schultz K, Siemsen E, et al. Behavioral operations: The state of the field[J]. Journal of Operations Management, 2013, 31(1): 1–5.
- [34] Sobel J. Interdependent preferences and reciprocity[J]. Journal of Economic Literature, 2005, 43(2): 392–436.
- [35] Falk A, Fischbacher U. A theory of reciprocity[J]. Games and Economic Behavior, 2006, 54(2): 293–315.
- [36] Du S, Nie T, Chu C, et al. Reciprocal supply chain with intention[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 239(2): 389–402.
- [37] Zhang Y, Li J, Gou Q. An allocation game model with reciprocal behavior and its applications in supply chain pricing decisions[J]. Annals of Operations Research, 2017, 258(2): 347–368.
- [38] Xia L, Guo T, Qin J, et al. Carbon emission reduction and pricing policies of a supply chain considering reciprocal preferences in cap-and-trade system[J]. Annals of Operations Research, 2018, 268(1–2): 149–175.
- [39] 翟 佳, 于 辉, 王 宇, 等. 互惠利他偏好下的供应链鲁棒协调策略[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(8): 2070–2079.
- Zhai Jia, Yu Hui, Wang Yu, et al. Robust coordination of supply chain with preference of reciprocity and altruism[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2019, 39(8): 2070–2079. (in Chinese)
- [40] Wang Y, Yu Z, Jin M, 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.
- [41] Zhou Y, Bao M, Chen X, et al. Co-op advertising and emission reduction cost sharing contracts and coordination low-carbon supply chain based on fairness concerns[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, (133): 402–413.
- [42] 丁军飞, 陈伟达, 付帅帅. 规模不经济下互惠偏好对闭环供应链的影响研究[J]. 管理工程学报, 2022, 36(1): 194–204.
- Ding Junfei, Chen Weida, Fu Shuaishuai. The impact of reciprocal preferences on closed-loop supply chain with diseconomies of scale[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2022, 36(1): 194–204. (in Chinese)

- [43] Yang M, Gong X. Optimal decisions and Pareto improvement for green supply chain considering reciprocity and cost-sharing contract[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(23): 29859 – 29874.
- [44] Loch C, Wu Y. Social preferences and supply chain performance: An experimental study[J]. Management Science, 2008, 54(11): 1835 – 1849.

Co-op advertising and carbon emission reduction cost-sharing contracts in coordinating supply chain with reciprocal behavior under cap-and-trade regulation

SHI Ping, HAN Kun, HOU Rui*

School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China

Abstract: This paper integrates manufacturers' carbon emission reduction and retailers' low-carbon advertising into the analysis framework and introduces reciprocity into the strategies interactions of the low-carbon supply chain. By constructing and solving game-theoretic models, this paper tries to carry out the optimization decision-making and coordination mechanisms research. The results show that: 1) Regardless of the manufacturer's reciprocal preference, the low-carbon supply chain can be perfectly coordinated through a combined contract of co-op advertising and carbon emission reduction cost-sharing. When the manufacturer has a highly altruistic preference, the low-carbon supply chain can be perfectly coordinated through the co-op advertising contract. When the manufacturer does not have a highly altruistic preference, the co-op advertising contract can only mitigate the double marginal effects but cannot achieve perfect coordination. 2) Under the two-way cooperation mode, the low-carbon supply chain generates the most carbon emissions while obtaining the highest profit. Both the overall profit and total carbon emissions are independent of the reciprocity coefficient. Under the advertising cooperation mode, both the overall profit of the supply chain and the total amount of carbon emissions increase as the reciprocity coefficient increases. Without any cooperation, the overall profit of the supply chain increases with the reciprocity coefficient, while the total carbon emissions decrease with the reciprocity coefficient. The reciprocal preference of the manufacturer is not only conducive to economic goals but also conducive to environmental goals. 3) No matter which cooperation mode is adopted, the total carbon emissions will first increase and then decrease with consumers' low-carbon preference and advertising influence coefficient. When consumers' low-carbon preference or advertising influence coefficient is small, the carbon emissions under the two-way cooperation mode are the highest. As consumers' low-carbon preference or advertising influence coefficient increases, total carbon emissions under the two-way cooperation mode will first reach a peak and then decline sharply.

Key words: low-carbon supply chain; supply chain coordination; carbon emission reduction; co-op advertising; emission reduction cost-sharing