

引用格式:张玉豪,张涛. 碳交易和绿色补贴政策下的低碳供应链最优决策与协调[J]. 技术经济, 2024, 43(4): 159-176.

ZHANG Yuhao, ZHANG Tao. Optimal decisions and coordination of low-carbon supply chain under cap-and-trade regulation and government subsidy[J]. Journal of Technology Economics, 2024, 43(4): 159-176

碳交易和绿色补贴政策下的低碳供应链 最优决策与协调

张玉豪^{1,2}, 张涛^{2,3}

(1. 江苏科技大学商学院, 苏州 215600; 2. 上海财经大学信息管理与工程学院, 上海 200433;

3. 上海财经大学上海市金融信息技术研究重点实验室, 上海 200433)

摘要: 考虑政府的碳交易管制和绿色补贴政策, 针对由政府、单个制造商和单个零售商组成的三级低碳供应链, 运用博弈理论建立了政府主导下的三阶段 Stackelberg 博弈模型和集中决策模型。重点分析了消费者绿色偏好、碳交易价格和减排成本系数对低碳供应链最优决策和社会福利的影响。利用两部收费契约和低价促销策略分别对所建模型进行了协调研究, 并利用数值算例对文中结论进行了验证。研究发现: 较强的消费者绿色偏好有利于提高产品的绿色度、渠道成员的利润和供应链的社会福利; 产品的绿色度和供应链的社会福利水平在集中决策模型下最高; 政府的最优绿色投资补贴率在消费者绿色偏好程度较强时降低而在碳减排难度较大时上升; 在参数满足一定条件下, 两部收费契约和低价促销策略可实现低碳供应链的完美协调。

关键词: 碳交易管制; 绿色补贴; Stackelberg 博弈; 社会福利; 两部收费契约

中图分类号: F274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-980X(2024)04-0159-18

DOI: 10.12404/j.issn.1002-980X.J23091919

一、引言

当今全球温室效应和环境污染问题受到了众多国家和地区的密切关注, 二氧化碳被认为是造成温室效应的主要气体^[1]。为积极应对气候变化, 控制和减少碳排放实现经济和环境的可持续发展已成为各国共识。许多国家制定了碳管制政策以控制碳排放量, 包括碳限额、碳税和碳交易政策^[2]。我国作为碳排放大国一直致力于推进产业结构转型升级, 构建低碳循环经济。从2013年起, 我国相继建立了8个碳交易试点, 2020年9月我国提出了“双碳”目标, 即力争在2030年实现碳达峰, 2060年实现碳中和^[3], 并于2021年2月起施行《碳排放权交易管理办法(试行)》进一步规范碳交易市场。企业是市场经济的核心组成部分和碳管制政策的主要实施对象。因此, 如何应对碳管制政策对企业运营管理的影响是一个重要研究课题。

许多国家和地区已实施了碳交易政策, 例如欧盟国家、美国、韩国、日本、印度等。碳交易管制是基于市场机制通过控制碳排放总量对经济主体行为干预的一种政策工具, 其流程为政府部门首先给予企业一定的碳排放额度, 然后企业根据自身碳排放情况可在碳交易市场出售或买入碳排放权^[4]。关于碳交易政策下的低碳供应链最优决策研究逐渐丰富^[5-6]。张李浩等^[7]在考虑碳交易机制和碳减排技术投资下, 利用报童模型研究了制造商不同策略下的供应链成员收益模型。邹浩等^[8]基于碳交易机制, 考虑制造商的风险规避和公平关切行为, 构建了制造商双重行为偏好下的低碳供应链定价决策模型。研究表明制造商的双重行为偏好会降低制造商的减排积极性, 使得减排率低于单行为偏好决策情形。

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 上海市自然科学基金“面向文化新媒体智能推荐的多源异构大数据深度挖掘方法研究”(19ZR1417200); 上海市科学技术委员会资助项目“科技创新行动计划”(20511101403); 教育部人文社会科学研究规划基金“基于多源网络数据的文化新媒体用户行为深度挖掘方法研究”(19YJA630116)

作者简介: 张玉豪, 博士, 江苏科技大学商学院讲师, 研究方向: 低碳供应链管理; (通信作者) 张涛, 博士, 上海财经大学信息管理与工程学院教授, 博士研究生导师, 研究方向: 供应链建模和优化, 生产计划与调度。

随着消费者环保意识的逐渐增强,绿色产品的市场需求日益增长。根据美国化学品理事会(American Chemical Council)调查表明 72% 的消费者具有购买绿色低碳产品的意愿^[9]。这也促使企业积极开展绿色供应链管理以提高自身竞争优势。一些文献在碳交易机制下讨论了消费者低碳偏好对制造商碳减排决策的影响。Yu 等^[10]研究了消费者绿色偏好和政府补贴对制造商的绿色投资决策和绩效的影响。结果表明随着消费者环保意识的提高,产品的绿色度和产量会上升。郭军华等^[11]在考虑碳限额交易政策和消费者低碳偏好下,针对由两个制造商和一个零售商组成的二级供应链分析了碳限额和消费者绿色偏好对供应链最优决策的影响。Ji 等^[12]在考虑制造商的两种减排策略情景下,分析了碳交易管制和消费者低碳偏好对零售商主导的 Stackelberg 博弈模型最优决策的影响。结果发现供应链上下游联合减排能增加渠道成员利润,消费者低碳偏好有利于零售商提高低碳促销努力水平。另有一些学者将碳交易政策引入到闭环供应链中,探究了碳交易政策和再制造对企业碳减排决策和绩效水平的联合影响^[13-14]。上述文献主要分析了碳管制政策对低碳供应链最优决策的影响并得到了较为丰富的研究成果,但均未考虑政府的绿色补贴政策,同时也未对低碳供应链的协作问题进行讨论。区别于上述文献,本文同时考虑政府的碳管制和绿色补贴政策,并将消费者的绿色偏好行为纳入政府主导的三级低碳供应链中进行建模求解,进而对所建博弈模型进行协调研究。

在实践中,仅依靠碳交易管制并不能持续高效的降低碳排放,而绿色技术的广泛应用可助力碳管制政策的运作效率^[15]。为推进绿色生产技术的快速普及,政府会对企业的绿色投资成本进行补贴。例如,我国国家发展和改革委员会和科技部为重要清洁能源技术的研发提供资金支持;美国能源部为加快清洁能源技术的商业应用而设立了贷款项目以鼓励企业进行绿色转型升级^[16]。此外,在 2008 年格力投资超过 10 亿资金用于空调的绿色低碳技术研发;Dell、HP、Chrysler、Xerox 等国际领先企业利用清洁能源和低碳技术降低生产制造过程的碳排放,同时满足消费者的低碳消费需求。因此,探讨政府的绿色补贴政策对企业运营决策的影响显得至关重要。

较多学者研究了政府绿色补贴下绿色供应链的最优决策。Song 等^[17]针对由一个公平关切型制造商和一个零售商组成的双渠道绿色供应链,考虑政府补贴政策下构建了零售商主导的 Stackelberg 博弈模型,重点分析了制造商的公平关切对产品绿色度和成员绩效水平的影响。Yi 等^[18]探讨了政府的绿色补贴和碳税对一个二级低碳供应链的绿色技术投资决策的影响。研究结果表明补贴政策比碳税政策更有利于提高企业的碳减排水平。Bian 等^[19]分别讨论了政府的制造商补贴和对消费者补贴政策对产品定价策略、减排决策和社会福利的影响。研究表明相比政府的制造商补贴政策,政府对消费者补贴会产生较多的碳排放和社会福利。缪文清和沈炳良^[20]基于碳交易和补贴机制下,研究了一个二级供应链中普通产品和低碳产品竞争的差别定价策略,并通过一个算例验证了碳交易和补贴机制的有效性。贺勇等^[21]探讨了政府分别依据碳减排研发和单位产品减排量补贴方式下的制造商自主研发减排和外包减排决策问题。研究表明政府绿色补贴对减排效果和供应链利润具有显著影响。此外,少数学者同时将碳交易机制和补贴政策纳入低碳供应链中进行研究。王辉等^[22]在考虑碳交易背景下构建了无政府补贴、补贴制造商、补贴零售商和分别补贴制造商和零售商的四种补贴博弈模型,并探讨了不同补贴模式下低碳供应链企业的减排努力决策和社会福利差异。

上述文献基于不同的低碳供应链框架,主要分析了政府的补贴政策对低碳供应链最优决策和社会福利的影响,然而绝大多数文献仅将政府的绿色补贴率视为模型外生变量,同时未涉及到绿色补贴政策下低碳供应链的协作研究。尽管部分学者探究了低碳供应链的契约协调,但对政府作为博弈主导者的低碳供应链协作问题讨论较为缺乏^[23-24]。鉴于此,本文将政府的绿色补贴系数视为模型决策变量,并运用契约协调理论对碳交易和政府补贴政策下的低碳供应链进行优化。

针对现有文献的研究不足,本文基于政府的碳交易和绿色补贴政策,运用 Stackelberg 博弈理论构建不同渠道势力结构下的三阶段博弈模型和两阶段集中决策模型,并利用逆序归纳法求得最优均衡解。重点分析了消费者绿色偏好、碳交易价格、减排成本系数对渠道成员的定价策略、减排决策、利润和供应链社会福利水平的影响。本文的创新性主要体现在将政府的绿色补贴参数作为博弈模型的决策变量,并同时探讨了碳交易机制、政府补贴和消费者绿色偏好对低碳供应链经济、环境和社会绩效水平的联合影响。此外,利用两

部收费契约和低价促销策略分别对两种 Stackelberg 博弈模型进行协调研究。本文的研究结论和管理启示可为政府部门制定补贴政策 and 低碳供应链的运营决策提供建议和理论依据。

二、问题描述与模型假设

基于碳交易管制和政府绿色补贴政策,本文构建了由政府、一个制造商和一个零售商组成的三级低碳供应链。为激励制造商采用绿色技术进行绿色生产,政府承担制造商的部分绿色投资成本。制造商将绿色产品批发给下游零售商,零售商出售绿色产品以满足消费者的市场需求。政府的决策目标为实现社会福利最大化,其作为财政干预者拥有优先决策权。根据不同渠道权力结构建立三阶段制造商领导的 Stackelberg 模型(MS 模型)和三阶段零售商领导的 Stackelberg 模型(RS 模型)。此时,政府与渠道成员间的博弈构成完美信息下的三阶段 Stackelberg 博弈过程。低碳供应链结构如图 1 所示。

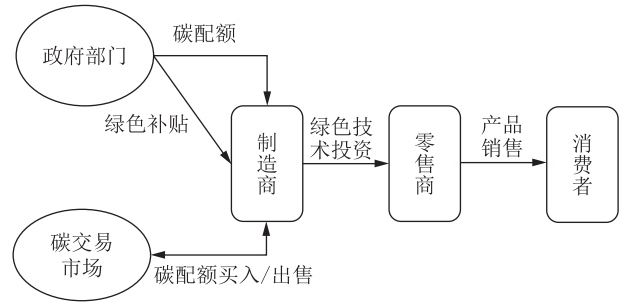


图 1 低碳供应链结构

(一) 符号说明

本文的重要符号说明如表 1 所示。

表 1 模型符号及其含义

q : 产品的市场需求
α : 产品的潜在市场需求
w : 单位产品的批发价格
p : 单位产品的零售价格
β : 产品需求的价格敏感系数
e_0 : 未减排时单位产品的碳排放量
λ : 单位产品的绿色度, $\lambda = \Delta e / e_0, \lambda \in (0, 1)$
θ : 消费者对产品绿色度的敏感系数, $\theta \in (0, 1)$, θ 越大表明消费者的绿色偏好程度越高
c : 单位产品的生产成本
k : 制造商的绿色投资成本系数, k 越大表明制造商的碳减排难度越大
δ : 政府对制造商的绿色投资补贴率
b : 单位碳排放权的交易价格
G : 政府给予的碳配额
π_i^j : 渠道成员的利润, $i \in \{m, r\}$, $j \in \{MS, RS, C\}$, 其中 m, r 分别为制造商和零售商; MS、RS、C 分别为政府主导下的两阶段 Stackelberg 博弈模型和集中决策模型
SW^j : 不同模型下的社会福利水平

(二) 模型假设

(1) 政府作为财政干预者拥有比渠道成员更强的渠道权力,其为低碳供应链的主导者。此外,当制造商的渠道权力强于零售商时所建立的模型为 MS 博弈模型,而当零售商的渠道权力强于制造商时所建立的模型为 RS 博弈模型。

(2) 在碳交易管制下,单位碳排放权的交易价格为模型的外生变量,其由碳交易市场决定。假设单位碳排放权的出售和购买价格相同。根据制造商的碳排放历史数据和政府对企业的碳排放量要求,政府给予企业固定的碳排放配额,企业根据自身的碳排放情况可在碳交易市场中购买或出售碳排放权^[1,4]。

(3) 绿色投资成本为制造商的一次性投入。制造商的绿色投资成本与产品绿色度呈二次方关系,即 $I = k\lambda^2/2$,这表明企业的绿色投资符合边际效用递减规律^[7,12]。

(4) 单位产品的碳排放量为一定常数,故制造商的碳排放量是产品市场需求的线性增函数^[14,19]。

(5) 绿色产品的市场需求同时依赖于产品的零售价格和绿色度,产品市场需求是产品零售价格的减函数且为产品绿色度的增函数,即 $q = \alpha - \beta p + \theta \lambda$ 。为简化模型令 $\beta = 1$,此假设不会改变文中的基本结论^[4,6]。

(6) 为保证各模型存在最优解和各渠道成员的利润为正值, 模型参数需满足 $\alpha > \beta w, w > c + be_0, k > \frac{(\theta + be_0)^2}{(1 - \delta)}$, 类似的假设常见于供应链管理文献中^[15,19]。

基于以上假设和条件, 零售商和制造商的利润方程分别为

$$\text{Max } \pi_r(p) = (p - w)q \tag{1}$$

$$\text{Max } \pi_m(w, \lambda) = (w - c)q - \frac{k\lambda^2}{2}[1 - \delta] - b((1 - \lambda)e_0q - G) \tag{2}$$

三、模型构建与分析

本节主要构建政府主导下的两种三阶段 Stackelberg 博弈模型和集中决策模型并对其求解分析。

(一) MS 模型

本节建立三阶段 MS 博弈模型。此模型的决策顺序如下:

- (1) 政府首先确定最优绿色投资补贴率以实现社会福利最大化。
- (2) 根据政府的最优绿色投资补贴率, 制造商确定产品的批发价格和绿色度。
- (3) 零售商根据制造商的决策信息制定产品的最优零售价格。

不失一般性, 利用逆向归纳法可求得三阶段 Stackelberg 博弈模型的最优均衡解。

命题 1: MS 模型存在唯一最优解使得各渠道成员的利润和社会福利水平最大化。

(1) 政府未确定最优绿色投资补贴率时, 低碳供应链的最优决策为。

$$\begin{cases} w^{\text{MS}} = \frac{2k(-1 + \delta)(c + be_0 + \alpha) + [c\theta + be_0(\alpha + \theta)](be_0 + \theta)}{4k(\delta - 1) + (\theta + be_0)^2} \\ p^{\text{MS}} = \frac{k(-1 + \delta)(c + be_0 + 3\alpha) + [c\theta + be_0(\alpha + \theta)](be_0 + \theta)}{4k(\delta - 1) + (\theta + be_0)^2} \\ \lambda^{\text{MS}} = \frac{(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{4k(\delta - 1) + (\theta + be_0)^2} \end{cases} \tag{3}$$

则零售商和制造商的利润分别为

$$\pi_r^{\text{MS}} = \frac{k^2(c + be_0 - \alpha)^2(1 - \delta)^2}{[4k(\delta - 1) + (\theta + be_0)^2]^2} \tag{4}$$

$$\pi_m^{\text{MS}} = \frac{2b^3e_0^2G - k(c - \alpha)^2(1 - \delta) + b^2e_0(e_0k(\delta - 1) + 4G\theta) + 2b\{(c - a)e_0k(\delta - 1) + G(\theta^2 - 4k(1 - \delta))\}}{2[4k(\delta - 1) + (\theta + be_0)^2]} \tag{5}$$

(2)、补贴率时, 低碳供应链的最优决策为

$$\begin{cases} w^{\text{MS}*} = \frac{7(be_0 + \theta)[c\theta + be_0(\alpha + \theta)] - 8k(c + be_0 + \alpha)}{7(\theta + be_0)^2 - 16k} \\ p^{\text{MS}*} = \frac{7(be_0 + \theta)[c\theta + be_0(\alpha + \theta)] - 4k(c + be_0 + 3\alpha)}{7(\theta + be_0)^2 - 16k} \\ \lambda^{\text{MS}*} = \frac{7(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{7(be_0 + \theta)^2 - 16k} \end{cases} \tag{6}$$

各渠道成员的利润和最优社会福利水平分别为

$$\pi_r^{\text{MS}*} = \frac{16k^2(c + be_0 - \alpha)^2}{[7(\theta + be_0)^2 - 16k]^2} \tag{7}$$

$$\pi_m^{MS*} = \frac{7b^3e_0^2G - 2k(c - \alpha)^2 - 2b^2e_0(e_0k - 7G\theta) + b(4e_0k\alpha - 4ce_0k + 7G\theta^2 - 16Gk)}{7(\theta + be_0)^2 - 16k} \quad (8)$$

$$SW^{MS*} = bG + \frac{7k(c + be_0 - \alpha)^2}{2[16k - 7(be_0 + \theta)^2]} \quad (9)$$

证明 1: 首先从博弈的第三阶段开始, 求零售商利润方程 π_r^{MS} 关于零售价格 p^{MS} 的二阶导数为 $\frac{\partial^2 \pi_r^{MS}}{\partial (p^{MS})^2} = -2$, 故 π_r^{MS} 是 p^{MS} 的二阶凹函数, 令 $\frac{\partial \pi_r^{MS}}{\partial p^{MS}} = w^{MS} + \alpha + \theta\lambda^{MS} - 2p^{MS} = 0$ 可得零售商的最优反应方程为

$$p^{MS} = \frac{1}{2}(w^{MS} + \alpha + \theta\lambda^{MS}) \quad (10)$$

将式(10)代入 π_m^{MS} 中并分别求其关于批发价格 w^{MS} 和产品绿色度 λ^{MS} 的一阶导数得:

$$\frac{\partial \pi_m^{MS}}{\partial w^{MS}} = \frac{1}{2}[c + \alpha + \theta\lambda^{MS} + be_0(1 - \lambda^{MS}) - 2w^{MS}] \quad (11)$$

$$\frac{\partial \pi_m^{MS}}{\partial \lambda^{MS}} = \frac{1}{2}[2k\delta\lambda^{MS} + (w^{MS} - c)\theta - 2k\lambda^{MS} - be_0(w^{MS} - \alpha + \theta - 2\theta\lambda^{MS})] \quad (12)$$

则 π_m^{MS} 关于 w^{MS} 和 λ^{MS} 的 Hessian 矩阵为

$$H_m^{MS} = \begin{bmatrix} -1 & \frac{\theta - be_0}{2} \\ \frac{\theta - be_0}{2} & -k(1 - \delta) + be_0\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

上述 Hessian 矩阵的一阶主子式的行列式为负, 二阶主子式的行列式为 $4k(1 - \delta) - (\theta + be_0)^2 > 0$, 故 π_m^{MS} 为负定矩阵且是 w^{MS} 和 λ^{MS} 的联合凹函数。则制造商的最优决策可由 $\frac{\partial \pi_m^{MS}}{\partial w^{MS}} = \frac{\partial \pi_m^{MS}}{\partial \lambda^{MS}} = 0$ 得:

$$w^{MS} = \frac{7(be_0 + \theta)[be_0(\alpha + \theta) + \theta c] - 8k(c + be_0 + \alpha)}{7(\theta + be_0)^2 - 16k} \quad (14)$$

$$\lambda^{MS} = \frac{(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{4k(\delta - 1) + (\theta + be_0)^2} \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入零售商的最优反应方程中得:

$$p^{MS} = \frac{[c\theta + be_0(\alpha + \theta)](be_0 + \theta) - (ck + be_0k + 3k\alpha)(1 - \delta)}{4k(\delta - 1) + (\theta + be_0)^2} \quad (16)$$

政府确定绿色投资补贴率以实现社会福利最大化。根据文献[25], 社会福利包括消费者剩余、生产者剩余和政府的财政补贴支出三部分, 其中消费者剩余等于 $CS = q^2/2\beta$, 生产者剩余为低碳供应链的总利润。则社会福利方程为

$$SW^{MS} = \frac{(q^{MS})^2}{2\beta} + \pi_m^{MS} + \pi_r^{MS} - \frac{k\delta^{MS}(\lambda^{MS})^2}{2} \quad (17)$$

求 SW^{MS} 关于 δ^{MS} 的一阶导数为

$$\frac{\partial SW^{MS}}{\partial \delta^{MS}} = \frac{k^2(c + be_0 - \alpha)^2(7\delta - 3)(be_0 + \theta)^2}{[4k(-1 + \delta) + (\theta + be_0)^2]^3} \quad (18)$$

由式(18)可知, 当 $\delta = \frac{3}{7}$ 时 SW^{MS} 达到最大值。将 $\delta^* = \frac{3}{7}$ 代入式(14)~式(16)中可得 MS 模型的最优均衡解。命题 1 表明 MS 模型存在唯一的最优绿色投资补贴率使得各渠道成员的利润和社会福利水平最大且为固定常数。

命题 2 : 政府未确定最优绿色投资补贴率时, 当 $be_0 < \theta$ 时, $\frac{\partial w^{MS}}{\partial \delta} > 0$, $\frac{\partial p^{MS}}{\partial \delta} > 0$; 当 $\theta < be_0 < 3\theta$ 时, $\frac{\partial w^{MS}}{\partial \delta} < 0$, $\frac{\partial p^{MS}}{\partial \delta} > 0$; 当 $be_0 > 3\theta$ 时, $\frac{\partial w^{MS}}{\partial \delta} < 0$, $\frac{\partial p^{MS}}{\partial \delta} < 0$ 。 $\frac{\partial \lambda^{MS}}{\partial \delta} > 0$, $\frac{\partial \pi_r^{MS}}{\partial \delta} > 0$, $\frac{\partial \pi_m^{MS}}{\partial \delta} > 0$ 。

证明 2: 分别求式(14)~式(16)关于 δ 的一阶导数得: $\frac{\partial w^{MS}}{\partial \delta} = \frac{2k(c + be_0 - \alpha)(be_0 - \theta)(be_0 + \theta)}{[4k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2}$, $\frac{\partial p^{MS}}{\partial \delta} = \frac{k(c + be_0 - \alpha)(be_0 - 3\theta)(be_0 + \theta)}{[4k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2}$, $\frac{\partial \lambda^{MS}}{\partial \delta} = \frac{4k(\alpha - be_0 - c)(be_0 + \theta)}{[4k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2} > 0$, $\frac{\partial \pi_r^{MS}}{\partial \delta} = \frac{2k^2(c + be_0 - \alpha)^2(\delta - 1)(be_0 + \theta)^2}{[4k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^3} > 0$, $\frac{\partial \pi_m^{MS}}{\partial \delta} = \frac{k(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)^2}{2[4k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2} > 0$ 。

命题 2 表明当消费者的绿色偏好程度较强 ($be_0 < \theta$) 时, 产品的最优批发和零售价格均随绿色补贴率的上升而上升; 当消费者的绿色偏好程度较弱 ($be_0 > 3\theta$) 时, 产品的最优批发和零售价格均随绿色补贴率的上升而下降, 这主要因为政府绿色补贴率的上升会激励制造商提高产品的绿色度, 而较强的消费者绿色偏好程度有利于扩大产品的市场需求, 各渠道成员为了获取更多利润从而提高产品的最优渠道价格。此外, 政府绿色补贴率的上升使得制造商的产品定价能力增强, 而当消费者的绿色偏好程度较低时, 制造商倾向于降低产品的批发价格来提高产品销量, 零售商也会降低产品售价从而采取“薄利多销”的策略提高利润。

命题 3 :

(1) 当 $\theta \in \left(\frac{8k - 7b^2e_0^2 - 4\sqrt{k(4k - 7b^2e_0^2)}}{7be_0}, \frac{8k - 7b^2e_0^2 + 4\sqrt{k(4k - 7b^2e_0^2)}}{7be_0} \right)$ 且 $4k > 7b^2e_0^2$ 时, $\frac{\partial w^{MS*}}{\partial \theta} = \frac{7(c + be_0 - \alpha)[7be_0(be_0 + \theta)^2 - 16k\theta]}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} > 0$, 否则 $\frac{\partial w^{MS*}}{\partial \theta} < 0$ 。 $\frac{\partial w^{MS*}}{\partial k} = \frac{56(\alpha - c - be_0)(be_0 - \theta)(be_0 + \theta)}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2}$, 故当 $0 < \theta < be_0$ 时, $\frac{\partial w^{MS*}}{\partial k} > 0$; 当 $\theta > be_0$ 时, $\frac{\partial w^{MS*}}{\partial k} < 0$ 。

(2) 当 $\theta \in \left(\frac{12k - 7b^2e_0^2 - 4\sqrt{9k^2 - 7b^2e_0^2k}}{7be_0}, \frac{12k - 7b^2e_0^2 + 4\sqrt{9k^2 - 7b^2e_0^2k}}{7be_0} \right)$ 时, $\frac{\partial p^{MS*}}{\partial \theta} = \frac{7(c + be_0 - \alpha)[7(be_0 + \theta)^2 - 24k\theta - 8kbe_0]}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} > 0$, 否则 $\frac{\partial p^{MS*}}{\partial \theta} < 0$ 。 $\frac{\partial p^{MS*}}{\partial k} = \frac{28(\alpha - c - be_0)(be_0 - 3\theta)(be_0 + \theta)}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2}$, 当 $0 < \theta < be_0/3$ 时, $\frac{\partial p^{MS*}}{\partial k} > 0$; 当 $\theta > be_0/3$ 时, $\frac{\partial p^{MS*}}{\partial k} < 0$ 。

(3) $\frac{\partial \lambda^{MS*}}{\partial \theta} > 0$, $\frac{\partial \pi_r^{MS*}}{\partial \theta} > 0$, $\frac{\partial \pi_m^{MS*}}{\partial \theta} > 0$; $\frac{\partial \lambda^{MS*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_r^{MS*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_m^{MS*}}{\partial k} < 0$ 。

证明 3:

分别求 MS 模型的最优均衡解和渠道成员的最优利润关于 θ 和 k 的一阶导数得:

$$\frac{\partial \lambda^{MS*}}{\partial \theta} = \frac{7(\alpha - c - be_0)[16k + 7(be_0 + \theta)^2]}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{MS*}}{\partial \theta} = \frac{448k^2(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^3} > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_m^{MS*}}{\partial \theta} = \frac{28k(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} > 0; \quad \frac{\partial \lambda^{MS*}}{\partial k} = \frac{112(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_r^{MS*}}{\partial k} = \frac{224k(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)^2}{[-16k + 7(be_0 + \theta)^2]^3} < 0, \quad \frac{\partial \pi_m^{MS*}}{\partial k} = -\frac{14(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)^2}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} < 0。$$

由命题 3 的(1)、(2)可知, 在 MS 模型中, 产品的最优批发和零售价格随消费者绿色偏好程度的变化上升或下降, 这与消费者绿色偏好程度强弱和碳交易价格的高低密切相关。此外, 当消费者的绿色偏好程度

较低时,产品的最优渠道价格随绿色投资成本系数的增大而上升;反之,产品的最优渠道价格随绿色投资成本系数的增大而下降。由命题 3 的(3)可知,随着消费者绿色偏好程度的增强,产品绿色度和各渠道成员的利润均上升,但较大的绿色投资成本系数不利于产品绿色度和渠道成员利润的提高。随着消费者环保意识的增强,制造商会积极提高产品绿色度以吸引更多的消费者,从而产品的市场需求和各渠道成员的利润上升。当制造商的碳减排难度较大时,其会降低碳减排努力水平导致产品绿色度下降,继而产品的市场需求和各渠道成员的利润均降低。

(二) RS 模型

本节建立三阶段 RS 博弈模型。此模型的决策顺序如下:

- (1) 政府首先确定绿色投资补贴率以实现社会福利的最大化。
 - (2) 零售商确定产品的最优零售价格。
 - (3) 制造商根据绿色投资补贴率和零售价格确定产品的最优绿色度和批发价格。
- 利用逆向归纳法可求得此博弈模型的最优均衡解。

命题 4: RS 模型存在唯一最优解使得各渠道成员的利润和社会福利水平最大。

(1) 政府未确定最优绿色投资补贴率时,低碳供应链的最优决策为

$$\begin{cases} w^{\text{RS}} = \frac{b^3 e_0^3 - (3ck + k\alpha)(1 - \delta) + 2c\theta^2 + b^2 e_0^2(c + \alpha + 3\theta) + b e_0[\theta(3c + \alpha + 2\theta) - 3k(1 - \delta)]}{2[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]} \\ p^{\text{RS}} = \frac{\alpha\theta^2 + c\theta(be_0 + \theta) + b^2 e_0^2(2\alpha + \theta) + b e_0\theta(3\alpha + \theta) - (ck + be_0k + 3k\alpha)(1 - \delta)}{2[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]} \\ \lambda^{\text{RS}} = \frac{(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{2[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]} \end{cases} \quad (19)$$

零售商和制造商的利润分别为

$$\pi_r^{\text{RS}} = \frac{k(c + be_0 - \alpha)^2(\delta - 1)}{4[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]} \quad (20)$$

$$\pi_m^{\text{RS}} = \frac{8b^3 e_0^2 G - k(c - \alpha)^2(1 - \delta) + b^2 e_0[16G\theta - e_0k(1 - \delta)] + 2b\{e_0k(\alpha - c)(1 - \delta) + 4G[\theta^2 - 2k(1 - \delta)]\}}{8[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]} \quad (21)$$

(2) 政府确定最优绿色投资补贴率时,低碳供应链的最优决策为

$$\begin{cases} w^{\text{RS}*} = \frac{2(c + be_0)(b^2 e_0^2 - 3k) + 4b^2 e_0^2 \alpha - 2k\alpha + 3be_0(3c + 3be_0 + \alpha)\theta + (7c + 7be_0 - \alpha)\theta^2}{6(be_0 + \theta)^2 - 8k} \\ p^{\text{RS}*} = \frac{2(2c + \alpha)\theta^2 - b^3 e_0^3 - 2k(c + 3\alpha) + b^2 e_0^2(7\alpha + 3\theta - c) + b e_0[\theta(3c + 9\alpha + 4\theta) - 2k]}{6(be_0 + \theta)^2 - 8k} \\ \lambda^{\text{RS}*} = \frac{5(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{6(be_0 + \theta)^2 - 8k} \end{cases} \quad (22)$$

各渠道成员的利润和社会福利水平分别为

$$\pi_r^{\text{RS}*} = \frac{(c + be_0 - \alpha)^2[2k + (be_0 + \theta)^2]}{4[4k - 3(be_0 + \theta)^2]} \quad (23)$$

$$\pi_m^{\text{RS}*} = \frac{1}{24} \left[24bG + 2be_0(\alpha - c) - (\alpha - c)^2 - b^2 e_0^2 + \frac{10k(c + be_0 - \alpha)^2}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \right] \quad (24)$$

$$SW^{\text{RS}*} = \frac{1}{24} \left[24bG + 2be_0(\alpha - c) - (\alpha - c)^2 - b^2 e_0^2 + \frac{25k(c + be_0 - \alpha)^2}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \right] \quad (25)$$

证明 4: 不失一般性, 令 $p^{RS} = w^{RS} + m$, 其中 m 为零售商的边际利润。首先从博弈的第三阶段开始, 分别求制造商利润方程 π_m^{RS} 关于产品批发价格 w^{RS} 和产品绿色度 λ^{RS} 的一阶导数得:

$$\frac{\partial \pi_m^{RS}}{\partial w^{RS}} = \alpha + \theta \lambda^{RS} + be_0(1 - \lambda^{RS}) + c - m - 2w^{RS} \quad (26)$$

$$\frac{\partial \pi_m^{RS}}{\partial \lambda^{RS}} = \theta(w^{RS} - c) - k\lambda^{RS}(1 - \delta) - be_0(m + w^{RS} + \theta - \alpha - 2\theta\lambda^{RS}) \quad (27)$$

则 π_m^{RS} 关于 w^{RS} 和 λ^{RS} 的 Hessian 矩阵为

$$H_{RS}^M = \begin{bmatrix} -2 & \theta - be_0 \\ \theta - be_0 & 2be_0\theta - k(1 - \delta) \end{bmatrix} \quad (28)$$

上述 Hessian 矩阵的一阶主子式的行列式为负, 二阶主子式的行列式为 $2k(1 - \delta) - (be_0 + \theta)^2 > 0$, 则表明 π_m^{RS} 为负定矩阵且是 w^{RS} 和 λ^{RS} 的联合凹函数, 则令 $\frac{\partial \pi_m^{RS}}{\partial w^{RS}} = \frac{\partial \pi_m^{RS}}{\partial \lambda^{RS}} = 0$, 可得制造商的最优决策为

$$w^{RS} = \frac{(c + be_0 - m + \alpha)[2be_0\theta - k(1 - \delta)] - (be_0 - \theta)[c\theta + be_0(m - \alpha + \theta)]}{2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2} \quad (29)$$

$$\lambda^{RS} = \frac{(c + be_0 + m - \alpha)(be_0 + \theta)}{2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2} \quad (30)$$

将式(29)和式(30)代入 π_r^{RS} 中并求其关于 m 的一阶导数为

$$\frac{\partial \pi_r^{RS}}{\partial m} = \frac{k(c + be_0 + 2m - \alpha)(1 - \delta)}{2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2} \quad (31)$$

其二阶导数为 $\frac{\partial^2 \pi_r^{RS}}{\partial m^2} = \frac{2k(1 - \delta)}{2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2} < 0$ 。故令 $\frac{\partial \pi_r^{RS}}{\partial m} = 0$ 可得零售商的最优边际利润为 $m^* =$

$\frac{1}{2}(\alpha - c - be_0)$ 。将 m^* 代入式(29)和式(30)中, 则政府未确定最优绿色投资补贴率时, 低碳供应链的最优决策为

$$\begin{cases} w^{RS*} = \frac{b^3e_0^3 - k(3c + \alpha + 3be_0)(1 - \delta) + 2c\theta^2 + b^2e_0^2(c + \alpha + 3\theta) + be_0\theta(3c + \alpha + 2\theta)}{2[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]} \\ p^{RS*} = \frac{(ck + be_0k + 3k\alpha)(-1 + \delta) + \alpha\theta^2 + \theta c(be_0 + \theta) + b^2e^2(2\alpha + \theta) + be_0\theta(3\alpha + \theta)}{2[2k(\delta - 1) + (be + \theta)^2]} \\ \lambda^{RS*} = \frac{(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{2[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]} \end{cases} \quad (32)$$

将式(32)分别代入 π_r^{RS} 和 π_m^{RS} 中, 可得未考虑政府最优绿色投资补贴率下各渠道成员的最优利润。RS 模型的社会福利水平方程为

$$SW^{RS} = \frac{(q^{RS})^2}{2\beta} + \pi_r^{RS} + \pi_m^{RS} - \frac{\delta k(\lambda^{RS})^2}{2} \quad (33)$$

求 SW^{RS} 关于政府绿色投资补贴率 δ 的一阶导数得:

$$\frac{\partial SW^{RS}}{\partial \delta^{RS}} = \frac{k(c + be_0 - \alpha)^2 (be_0 + \theta)^2 [k(5\delta - 3) + (be_0 + \theta)^2]}{4[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^3} \quad (34)$$

由式(34)可知, 当 $\delta^{RS} < \frac{3k - (be_0 + \theta)^2}{5k}$ 时, $\frac{\partial SW^{RS}}{\partial \delta} > 0$; 当 $\delta^{RS} > \frac{3k - (be_0 + \theta)^2}{5k}$ 时, $\frac{\partial SW^{RS}}{\partial \delta} < 0$, 故当

$\delta^{RS*} = \frac{3k - (be_0 + \theta)^2}{5k}$ 时可使 SW^{RS} 最大化。将 $\delta^* = \frac{3k - (be_0 + \theta)^2}{5k}$ 代入式(32)和式(33)中可得各渠道成

员的最优决策和社会福利水平。故命题 4 得证。

命题 5: 在 RS 模型中, 政府的最优绿色投资补贴率是消费者绿色偏好程度的单调减函数, 同时为绿色投资成本系数的单调增函数。即 $\frac{\partial \delta^*}{\partial \theta} = -\frac{2(be_0 + \theta)}{5k} < 0$, $\frac{\partial \delta^*}{\partial k} = \frac{(be_0 + \theta)^2}{5k^2} > 0$ 。

命题 5 表明随着消费者对绿色产品偏好程度越强, 政府对制造商的绿色投资补贴率越低, 此时政府对制造商低碳减排的财政干预力度减弱; 当制造商的碳减排难度较大时, 为促使制造商积极进行绿色投资研发, 政府会提高对制造商的绿色投资补贴率, 此时政府对制造商低碳减排的财政干预力度增强。

命题 6: 政府未确定最优绿色投资补贴率情景下, 当 $0 < be_0 < \theta$ 时, $\frac{\partial w^{RS}}{\partial \delta} > 0$, $\frac{\partial p^{RS}}{\partial \delta} > 0$; 当 $be_0 > \theta$ 时, $\frac{\partial w^{RS}}{\partial \delta} < 0$, $\frac{\partial p^{RS}}{\partial \delta} < 0$; $\frac{\partial \lambda^{RS}}{\partial \delta} > 0$, $\frac{\partial \pi_r^{RS}}{\partial \delta} > 0$, $\frac{\partial \pi_m^{RS}}{\partial \delta} > 0$ 。

证明 6: 分别求最优均衡解和渠道成员的利润关于 δ 的一阶导数得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w^{RS}}{\partial \delta} &= \frac{k(c + be_0 - \alpha)(be_0 - \theta)(be_0 + \theta)}{2[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2}, \quad \frac{\partial p^{RS}}{\partial \delta} = \frac{k(c + be_0 - \alpha)(be_0 - \theta)(be_0 + \theta)}{2[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2}, \quad \frac{\partial \lambda^{RS}}{\partial \delta} = \\ &= \frac{k(\alpha - c - be_0)(be_0 + \theta)}{[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{RS}}{\partial \delta} = \frac{k(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)^2}{4[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_m^{RS}}{\partial \delta} = \\ &= \frac{k(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)^2}{8[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^2} > 0. \end{aligned}$$

命题 6 表明在 RS 模型中, 绿色产品的市场需求随消费者绿色偏好程度的上升而增加, 此时渠道成员会提高产品的渠道价格以获取更多利润; 而当消费者绿色偏好程度较弱时, 绿色产品的市场需求降低, 为提高产品的市场销量, 渠道成员会降低产品的渠道价格。此外, 随着政府绿色投资补贴率的上升, 产品绿色度和各渠道成员的利润水平都会升高。

命题 7:

$$(1) \text{ 当 } \theta \in \left\{ \frac{2[k - \sqrt{k(k - 3b^2e_0^2)}]}{3be_0} - be_0, \frac{2[k + \sqrt{k(k - 3b^2e_0^2)}]}{3be_0} - be_0 \right\} \text{ 且 } k > 3b^2e_0^2 \text{ 时, } \frac{\partial w^{RS*}}{\partial \theta} = \frac{\partial p^{RS*}}{\partial \theta} = \frac{5(c + be_0 - \alpha)[3be_0(be_0 + \theta)^2 - 4k\theta]}{2[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \text{ 否则 } \frac{\partial w^{RS*}}{\partial \theta} = \frac{\partial p^{RS*}}{\partial \theta} < 0.$$

$$(2) \frac{\partial w^{RS*}}{\partial k} = \frac{\partial p^{RS*}}{\partial k} = \frac{5(\alpha - c - be_0)(be_0 - \theta)(be_0 + \theta)}{[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2}. \text{ 当 } 0 < \theta < be_0 \text{ 时, } \frac{\partial w^{RS*}}{\partial k} = \frac{\partial p^{RS*}}{\partial k} > 0; \text{ 当 } \theta > be_0 \text{ 时, } \frac{\partial w^{RS*}}{\partial k} = \frac{\partial p^{RS*}}{\partial k} < 0.$$

$$(3) \frac{\partial \lambda^{RS*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \pi_r^{RS*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \pi_m^{RS*}}{\partial \theta} > 0; \frac{\partial \lambda^{RS*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial \pi_r^{RS*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial \pi_m^{RS*}}{\partial k} < 0.$$

证明 7: 分别求产品绿色度和各渠道成员利润对 θ 和 k 的一阶导数得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda^{RS*}}{\partial \theta} &= \frac{5(\alpha - c - be_0)[4k + 3(be_0 + \theta)^2]}{2[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{RS*}}{\partial \theta} = \frac{5k(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)}{[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \\ \frac{\partial \pi_m^{RS*}}{\partial \theta} &= \frac{5k(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)}{2[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \quad \frac{\partial \lambda^{RS*}}{\partial k} = \frac{40(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{[8k - 6(be_0 + \theta)^2]^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_r^{RS*}}{\partial k} = \\ &= -\frac{5(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)^2}{2[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_m^{RS*}}{\partial k} = -\frac{5(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)^2}{4[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} < 0. \end{aligned}$$

由于命题 7 的分析与命题 3 类似, 故不再赘述。

命题 8: $\frac{\partial SW^{MS*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial SW^{RS*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial SW^{MS*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial SW^{RS*}}{\partial k} < 0。$

证明 8: 分别求两种 Stackelberg 博弈模型的社会福利水平对 θ 和 k 的一阶导数得:

$$\frac{\partial SW^{MS*}}{\partial \theta} = \frac{49k(c + be_0 - \alpha)^2 (be_0 + \theta)}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \frac{\partial SW^{MS*}}{\partial k} = -\frac{49(c + be_0 - \alpha)^2 (be_0 + \theta)^2}{2[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} < 0,$$

$$\frac{\partial SW^{RS*}}{\partial \theta} = \frac{25k(c + be_0 - \alpha)^2 (be_0 + \theta)}{4[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} > 0, \frac{\partial SW^{RS*}}{\partial k} = -\frac{25(c + be_0 - \alpha)^2 (be_0 + \theta)^2}{8[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} < 0。$$

命题 8 表明供应链的社会福利水平随消费者绿色偏好程度的增强而上升, 随碳减排成本系数的增大而下降。

(三) 集中决策模型

在集中决策模型中, 制造商和零售商作为一个利益整体进行集中决策, 此时的最优决策为全局最优解。低碳供应链的利润方程为

$$\text{Max } \pi^c(p^c, \lambda^c) = (p^c - c)q - \frac{k}{2}(1 - \delta)(\lambda^c)^2 - b[(1 - \lambda^c)e_0q - G] \quad (35)$$

命题 9: 当 $k > (be_0 + \theta)^2 / 2(1 - \delta)$ 时, 集中决策模型存在唯一最优解使得低碳供应链的利润最大化。

(1) 政府未确认最优绿色投资补贴率时, 低碳供应链的最优决策为

$$p^c = \frac{(c + be_0 + \alpha) - k(1 - \delta) + [c\theta + be_0(\alpha + \theta)](be_0 + \theta)}{2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2},$$

$$\lambda^c = \frac{(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2} \quad (36)$$

此时低碳供应链的利润为

$$\pi^c = (2b^3e_0^2G - k(c - \alpha)^2(1 - \delta) - b^2e_0[e_0k(1 - \delta) - 4G\theta] + 2b\{e_0k(a - c)(1 - \delta) - G[2k(1 - \delta) - \theta^2]\} \{2[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]\}^{-1} \quad (37)$$

(2) 政府确认最优绿色投资补贴率时, 低碳供应链的最优决策为

$$\begin{cases} p^{c*} = \frac{3(be_0 + \theta)[c\theta + be_0(\alpha + \theta)] - 2k(c + be_0 + \alpha)}{3(be_0 + \theta)^2 - 4k} \\ \lambda^{c*} = \frac{3(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{3(be_0 + \theta)^2 - 4k} \end{cases} \quad (38)$$

此时低碳供应链的利润和社会福利水平分别为

$$\pi^{c*} = bG + \frac{k(c + be_0 - \alpha)^2}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \quad (39)$$

$$SW^{c*} = bG + \frac{3k(c + be_0 - \alpha)^2}{8k - 6(be_0 + \theta)^2} \quad (40)$$

证明 9: 求 π^c 关于零售价格 p^c 和产品绿色度 λ^c 的 Hessian 矩阵为

$$H^c = \begin{bmatrix} -2 & \theta - be_0 \\ \theta - be_0 & k\delta + 2be_0\theta - k \end{bmatrix} \quad (41)$$

上述 Hessian 矩阵的一阶主子式的行列式为负, 二阶主子式的行列式为 $2k(1 - \delta) > (be_0 + \theta)^2$, 故 H^c 为负定矩阵且是 p^c 和 λ^c 的联合凹函数。令 $\frac{\partial \pi^c}{\partial p^c} = \frac{\partial \pi^c}{\partial \lambda^c} = 0$ 得:

$$\begin{cases} p^c = \frac{3(be_0 + \theta)[c\theta + be_0(\alpha + \theta)] - 2k(c + be_0 + \alpha)}{3(be_0 + \theta)^2 - 4k} \\ \lambda^c = \frac{(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2} \end{cases} \quad (42)$$

将式(42)代入式(35)和消费者剩余方程中可得集中决策模型的社会福利水平为

$$SW^c = \frac{(q^c)^2}{2\beta} + \pi^c - \frac{k\delta^c(\lambda^c)^2}{2} \quad (43)$$

求 SW^c 关于政府绿色投资补贴率 δ 的一阶导数得:

$$\frac{\partial SW^c}{\partial \delta} = \frac{k^2(c + be_0 - \alpha)^2(3\delta - 1)(be_0 + \theta)^2}{[2k(\delta - 1) + (be_0 + \theta)^2]^3} \quad (44)$$

由式(44)可知,当 $\delta < \frac{1}{3}$ 时, $\frac{\partial SW^c}{\partial \delta} > 0$; 当 $\delta = \frac{1}{3}$ 时, $\frac{\partial SW^c}{\partial \delta} = 0$; 当 $\delta > \frac{1}{3}$ 时, $\frac{\partial SW^c}{\partial \delta} < 0$, 故最优绿色投资补贴率为 $\delta^c = \frac{1}{3}$ 。将 $\delta^c = \frac{1}{3}$ 代入式(42)和式(43)中可得集中决策模型的最优决策、利润和社会福利水平。故命题 9 得证。

命题 10: $SW^{MS*} < SW^{RS*} < SW^{C*}$ 。

证明 10:

$$\begin{cases} SW^{C*} - SW^{RS*} = \frac{(c + be_0 - \alpha)^2[5k - (be_0 + \theta)^2]}{8[4k - 3(be_0 + \theta)^2]} > 0 \\ SW^{RS*} - SW^{MS*} = \frac{(c + be_0 - \alpha)^2(be_0 + \theta)^2[51k - 7(be_0 + \theta)^2]}{8[4k - 3(be_0 + \theta)^2][16k - 7(be_0 + \theta)^2]} > 0 \end{cases} \quad (45)$$

故命题 10 得证。

由命题 10 可知,集中决策模型下的社会福利水平最高,MS 模型下的社会福利水平最低,这表明渠道成员进行联合决策可提高供应链的运营绩效。在三阶段 Stackelberg 博弈模型中,由于渠道成员的分散决策导致双重边际化效应,此时供应链的运作效率降低,社会福利水平也随之降低。此外,RS 模型的最优社会福利水平大于 MS 模型的社会最优福利水平,这表明零售商拥有比制造商更强的渠道权力时有利于提高低碳供应链的社会福利。

四、契约协调

本节采用两部收费契约和基于两部收费契约改进的低价促销策略分别对上述两种 Stackelberg 博弈模型进行协调。根据契约协调原理,当不同权力结构下 Stackelberg 博弈模型的最优决策与集中决策的最优决策相同时则实现了供应链的完美协调。

(一) 两部收费契约

本小节利用两部收费契约对三阶段 MS 博弈模型进行协调。在两部收费契约中,制造商首先给与零售商一个较低的产品批发价格 w^{TP} , 作为对制造商的利润补偿,零售商给予制造商一个转移支付费用 F 。在个人追求利润最大化情景下,只有协调后各渠道成员的利润水平不小于协调前的利润水平时,契约才能顺利实施。此时,政府的最优绿色投资补贴率与集中决策模型中的最优绿色投资补贴率一致,即 $\delta^{TP} = \delta^c = \frac{1}{3}$,

MS 博弈模型协调的条件为

$$\begin{cases} \lambda^{TP} = \lambda^c, p^{TP} = p^c \\ \pi_r^{TP} \geq \pi_r^{MS} \\ \pi_m^{TP} \geq \pi_m^{MS} \end{cases} \quad (46)$$

其中:

$$\pi_r^{TP} = (p^{TP} - w^{TP})(\alpha - p^{TP} + \theta\lambda^{TP}) - F^{TP} \tag{47}$$

$$\pi_m^{TP} = (w^{TP} - c)(\alpha - p^{TP} + \theta\lambda^{TP}) - \frac{k}{2}(\lambda^{TP})^2(1 - \delta) - b[(1 - \lambda)e_0q - G] + F^{TP} \tag{48}$$

命题 11:

当 $w^{TP} = \frac{3(be_0 + \theta)[c\theta + be_0(\alpha + \theta)] - 4ck - 4be_0k}{3(be_0 + \theta)^2 - 4k}$,

且 $F^{TP} \in \{F_{min}, F_{max}\} = \left(\frac{k(c + be_0 - \alpha)^2(3b^4e_0^4 + 12b^3e_0^3\theta + 18b^2e_0^2\theta^2 + 12be_0\theta^3 + 3\theta^4 - 32k^2)}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2[4k - 3(be_0 + \theta)^2]}, 4k^2 \right.$

$\left. (c + be_0 - \alpha)^2 \left\{ \frac{1}{[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} - \frac{4}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} \right\} \right)$ 时,两部收费契约可实现渠道成员间的帕累托改进。

证明 11: 将 $\delta^{TP} = \frac{1}{3}$, $\lambda^{TP} = \frac{3(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{3(be_0 + \theta)^2 - 4k}$ 代入 π_r^{TP} 中并求其关于 p^{TP} 的一阶导数:

$$p^{TP} = \frac{1}{2} \left[w + \alpha - \frac{3(c + be_0 - \alpha)\theta(be_0 + \theta)}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \right].$$

令 $p^{TP} = p^c$ 得 $w^{TP} = \frac{3(be_0 + \theta)[c\theta + be_0(\alpha + \theta)] - 4ck - 4be_0k}{3(be_0 + \theta)^2 - 4k}$ 。根据上述条件可求得:

$$\pi_r^{TP} = \frac{4k^2[c + b - 4k(c + be_0) - \alpha]^2}{\{4k - 3[b - 4k(c + be_0) + \theta]^2\}^2} - F^{TP} \tag{49}$$

$$\pi_m^{TP} = bG - \frac{4k^2[c + b - 4k(c + be_0) - \alpha]^2}{\{4k - 3[b - 4k(c + be_0) + \theta]^2\}^2} + \frac{k[c + b - 4k(c + be_0) - \alpha]^2}{4k - 3[b - 4k(c + be_0) + \theta]^2} + F^{TP} \tag{50}$$

为让契约顺利实施,协调后的渠道成员利润需满足 $\pi_r^{TP} \geq \pi_r^{MS}$, $\pi_m^{TP} \geq \pi_m^{MS}$, 则有:

$$F^{TP} \in \left(\frac{k(c + be_0 - \alpha)^2(3b^4e_0^4 + 12b^3e_0^3\theta + 18b^2e_0^2\theta^2 + 12be_0\theta^3 + 3\theta^4 - 32k^2)}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2[4k - 3(be_0 + \theta)^2]}, 4k^2(c + be_0 - \alpha)^2 \times \left\{ \frac{1}{[4k - 3(be_0 + \theta)^2]^2} - \frac{4}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2} \right\} \right).$$

同时 $4k > 3(be_0 + \theta)^2$ 时,

$$F_{max}^{TP} - F_{min}^{TP} = \frac{k(c + be_0 - \alpha)^2 \{7b^4e_0^4 + 28b^3e_0^3\theta + 7\theta^4 + 28be_0\theta^3 + 42b^2e_0^2\theta^2 + 8k[8k - 3(be_0 + \theta)^2]\}}{[16k - 7(be_0 + \theta)^2]^2[4k - 3(be_0 + \theta)^2]} > 0.$$

则存在 F^{TP} 可实现低碳供应链的完美协调。命题 11 得证。

(二) 低价促销策略

本小节利用基于两部收费契约改进的低价促销策略对三阶段 RS 博弈模型进行协调,用 LP 代表低碳促销策略。在此策略中,零售商以制造商给出的批发价格 w^{LP} 出售产品,制造商获取全部销售收益,同时为补偿零售商的渠道利润,制造商给予零售商一个转移支付费用 F^{LP} [26]。此时 RS 模型和集中决策模型中的政府绿色投资补贴率相同,即 $\delta^{LP} = \delta^c = \frac{1}{3}$, 则渠道成员实现帕累托改进需满足的条件为

$$\begin{cases} \lambda^{LP} = \lambda^c \\ \pi^{LP} - F^{RS} \geq \pi_m^{RS} \\ F^{RS} \geq \pi_r^{RS} \end{cases} \tag{51}$$

在低价促销策略下,制造商和零售商的利润方程分别为

$$\pi^{\text{LP}} = (w^{\text{LP}} - c)q^{\text{LP}} - \frac{1}{2}k\lambda^2(1 - \delta) - b[(1 - \lambda^{\text{LP}})e_0q^{\text{LP}} - G] \quad (52)$$

$$\pi_m^{\text{LP}} = \pi^{\text{LP}} - F^{\text{LP}}, \pi_r^{\text{LP}} = F^{\text{LP}} \quad (53)$$

其中: $q^{\text{LP}} = \alpha - w^{\text{LP}} + \theta\lambda^{\text{C}}$ 。

命题 12: 当 $F^{\text{LP}} \in \left\{ \frac{(c + be_0 - \alpha)^2[2k + (be_0 + \theta)^2]}{4[4k - 3(be_0 + \theta)^2]}, \frac{(c + be_0 - \alpha)^2[6k - (be_0 + \theta)^2]}{8[4k - 3(be_0 + \theta)^2]} \right\}$ 且 $2k > 3(be_0 + \theta)^2$ 时,低价促销策略可实现 RS 博弈模型的完美协调。

证明 12: 低价促销策略下的政府最优绿色投资补贴率与集中决策模型下的政府最优绿色投资补贴率一致,即 $\delta^{\text{LP}} = \frac{1}{3}$,将 λ^{C} 代入 π^{LP} 中并求其关于 w^{LP} 的一阶导数为

$$\frac{\partial \pi^{\text{LP}}}{\partial w^{\text{LP}}} = a + c + be_0 \left[1 + \frac{3(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \right] - 2w^{\text{LP}} - \frac{3(c + be_0 - \alpha)\theta(be_0 + \theta)}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \quad (54)$$

其相应的二阶导数为 $\frac{\partial^2 \pi^{\text{LP}}}{\partial (w^{\text{LP}})^2} = -2 < 0$,这表明 π^{LP} 是 w^{LP} 的严格凹函数。令 $\frac{\partial \pi^{\text{LP}}}{\partial w^{\text{LP}}} = 0$ 得:

$$w^{\text{LP}} = \frac{1}{2} \left\{ a + c + be_0 \left[1 + \frac{3(c + be_0 - \alpha)(be_0 + \theta)}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \right] - m - \frac{3(c + be_0 - \alpha)\theta(be_0 + \theta)}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \right\} \quad (55)$$

低价促销策略下低碳供应链的总利润为

$$\pi^{\text{LP}} = bG + \frac{k(c + be_0 - \alpha)^2}{4k - 3(be_0 + \theta)^2} \quad (56)$$

由 $\pi^{\text{LP}} - F^{\text{LP}} \geq \pi_m^{\text{RS}}, F^{\text{LP}} \geq \pi_r^{\text{RS}}$ 得:

$$F^{\text{LP}} \in \{F_{\min}^{\text{LP}}, F_{\max}^{\text{LP}}\} \in \left\{ \frac{(c + be_0 - \alpha)^2[2k + (be_0 + \theta)^2]}{4[4k - 3(be_0 + \theta)^2]}, \frac{(c + be_0 - \alpha)^2[6k - (be_0 + \theta)^2]}{8[4k - 3(be_0 + \theta)^2]} \right\} \quad (57)$$

当 $2k > 3(be_0 + \theta)^2$ 时可确保 $F_{\max}^{\text{LP}} - F_{\min}^{\text{LP}} = \frac{(c + be_0 - \alpha)^2[2k - 3(be_0 + \theta)^2]}{8[4k - 3(be_0 + \theta)^2]} > 0$,此时存在 F^{LP} 可实现

渠道成员间的帕累托改进。

五、数值仿真

本节运用数值仿真分析模型重要参数对低碳供应链最优策略、利润和社会福利水平的影响。参考文献 [12-13],模型参数的取值为: $\alpha = 50, c = 5, e_0 = 1, k \in [700, 900], G \in [1, 10], \theta \in [1, 10], b \in [1, 10]$ 。为方便行文分析,本节不再考虑各模型参数的量纲。

(一) 消费者绿色偏好程度对最优决策和绩效的影响

图 2 描述了消费者绿色偏好程度对各模型最优决策和利润水平的影响。由图 2 可知,①各模型中渠道成员的最优渠道价格、产品绿色度、渠道成员利润水平和供应链利润水平均随消费者绿色偏好程度的增强而上升。另较强的消费者绿色偏好会促使制造商增加碳减排投资进而提高产品绿色度,但由于绿色投资成本的上升,制造商和零售商均会提高产品的渠道价格。此时,由于产品销量提升带来的利润增加大于绿色投资成本的增加,故各渠道成员的利润会上升。②由图 1(a)和(b)可知,最优零售价格在集中决策模型中取得最小值,而在 MS 模型中取得最大值,同时产品的最优批发价格在 RS 模型中较低。当制造商拥有的渠道权力大于零售商时,其为了获取较高的边际利润而制定较高的批发价格,这导致零售商也会提高产品的零售价格。在 RS 模型中,由于零售商的渠道权力大于制造商,其较强的讨价还价能力可迫使制造商降低产品的批发价格,继而零售

商会制定较低的零售价格以扩大产品的市场需求。此外,随着消费者绿色偏好程度的增强,拥有较强渠道势力的零售商会激励制造商提高产品绿色度以增加产品销量从而享受更多的“搭便车”服务。

如图 2(c) 所示,RS 模型的最优产品绿色度相比 MS 模型较高,而集中决策模型中的产品绿色度最高。这表明集中决策下的碳减排努力水平最高,而 MS 模型下的碳减排努力最低。由图 2(d)和图 2(e)可知,零

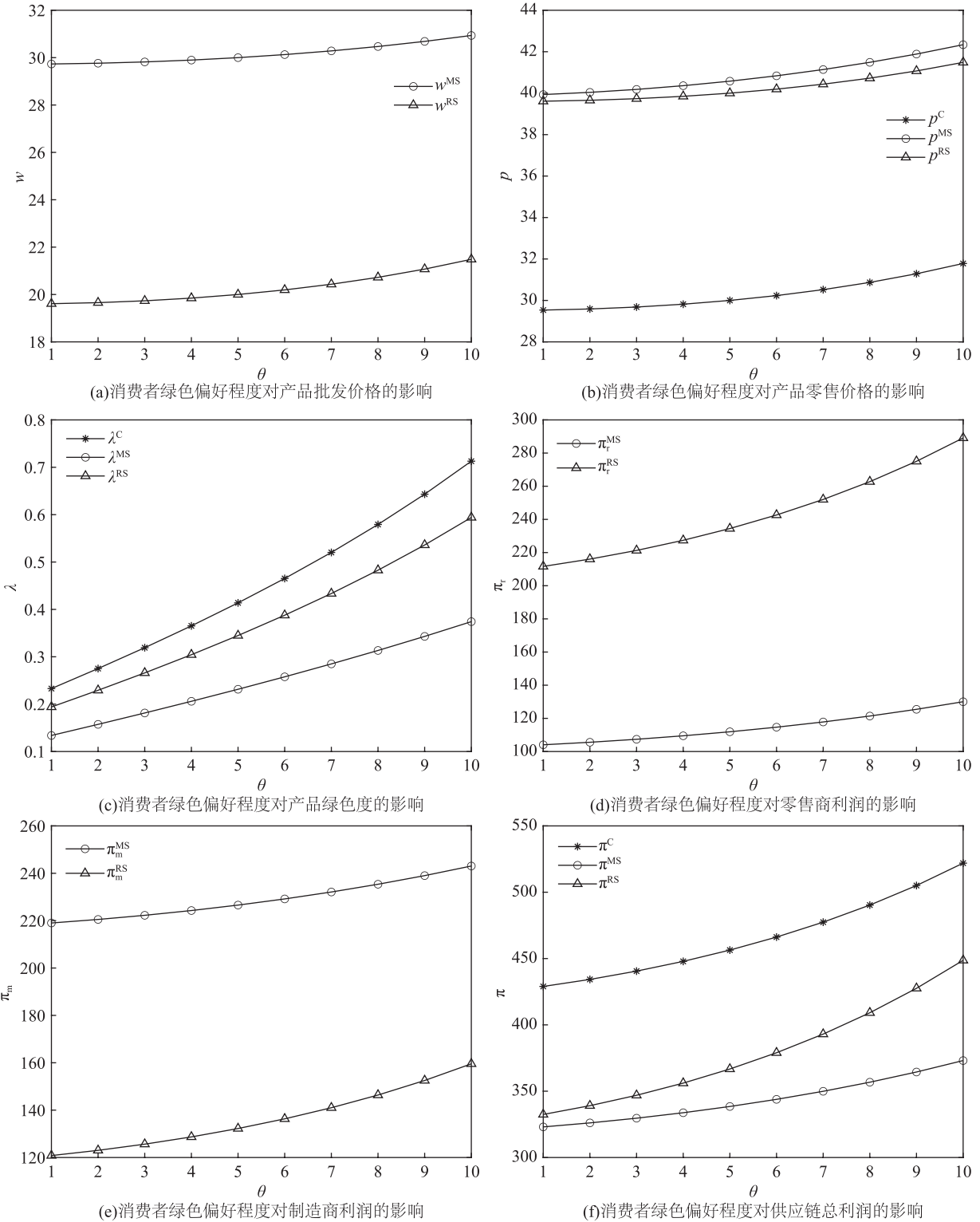


图 2 θ 对最优决策和绩效水平的影响 ($k = 800, G = 3, \theta = b = 5$)

售商的利润在 RS 模型中较高,而制造商的利润在 MS 模型中较高,这表明渠道成员较强的渠道势力可为其谋取更多利益。同时,集中决策模型的总利润水平最高,MS 模型的总利润水平最低。因此,从经济绩效角度来说,RS 模型优于 MS 模型。由于非合作博弈通常会产生双重边际效应,这使得非合作情景下的供应链运营效率低于集中决策模型,故集中决策模型的绩效水平最高。

(二) 模型参数对低碳供应链社会福利的影响

图 3 描述了重要参数对不同模型中社会福利水平的影响。由图 3(a) 可知,各模型下的社会福利水平随消费者绿色偏好程度的增强而上升,这表明较强的消费者环保意识有利于提高社会福利。由图 3(b) 可知,社会福利水平随绿色投资成本系数的增大而降低,这说明较高的绿色投资成本系数不利于渠道成员的利润增加和环境保护,从而造成社会福利水平的损失。图 3(c) 表明碳交易价格越高,社会福利水平越低。这是因为较高的碳交易价格造成制造商的运营成本增加损害制造商的利益进而导致社会福利水平降低。由图 3(d) 可知,各模型下的社会福利水平均是碳配额的单调增函数,这表明宽松的碳管制政策有利于提高社会福利水平,其主要原因为较高的碳配额有利于激励制造商积极进行绿色投资以提高产品绿色度扩大产品市场份额,从而提高利润水平。另外,碳减排后的碳配额盈余可在碳交易市场进行出售从而增加制造商的利润。因此,碳排放的减少和渠道成员利润的增加均有利于提高社会福利水平。由图 3 可知,随着各参数的变化,集中决策模型下的社会福利水平最高,而 MS 模型下的社会福利水平最低,这表明当制造商拥有较强的渠道权力时不利于整个供应链社会福利水平的提高。

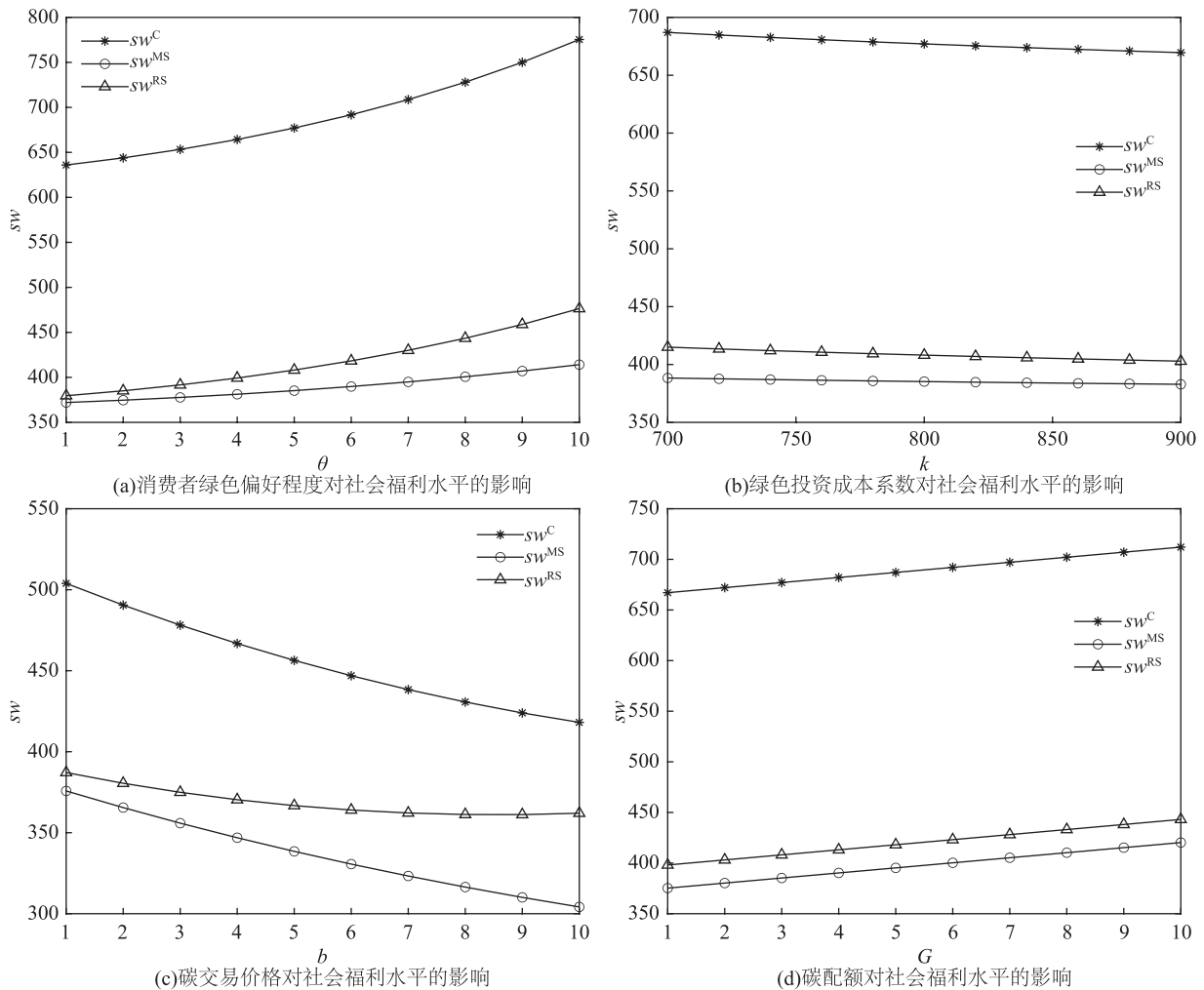


图 3 各模型参数对最优社会福利水平的影响

(三) 模型参数对契约协调区间的影响

图 4 描述了消费者绿色偏好程度和碳交易价格对两种契约协调区间的影响。由图 4(a) 和图 4(b) 可知,随着消费者绿色偏好程度的增强,经两部收费契约协调后的转移支付区间变化较小且最大和最小转移支付均上升,而随着碳交易价格的提高,最大和最小转移支付均先减小而增大。由图 4(c) 和图 4(d) 可知,经低价促销策略协调后的转移支付区间随消费者绿色偏好程度的增强逐渐变小且最大和最小转移支付均增大,而较高的碳交易价格会使协调区间变小且最大和最小转移支付均下降。以上结果表明消费者绿色偏好程度和碳交易价格对两部收费契约的协调区间大小影响较弱,但其会较大幅度缩小低价促销策略的协调区间从而不利于渠道成员实现帕累托改进。

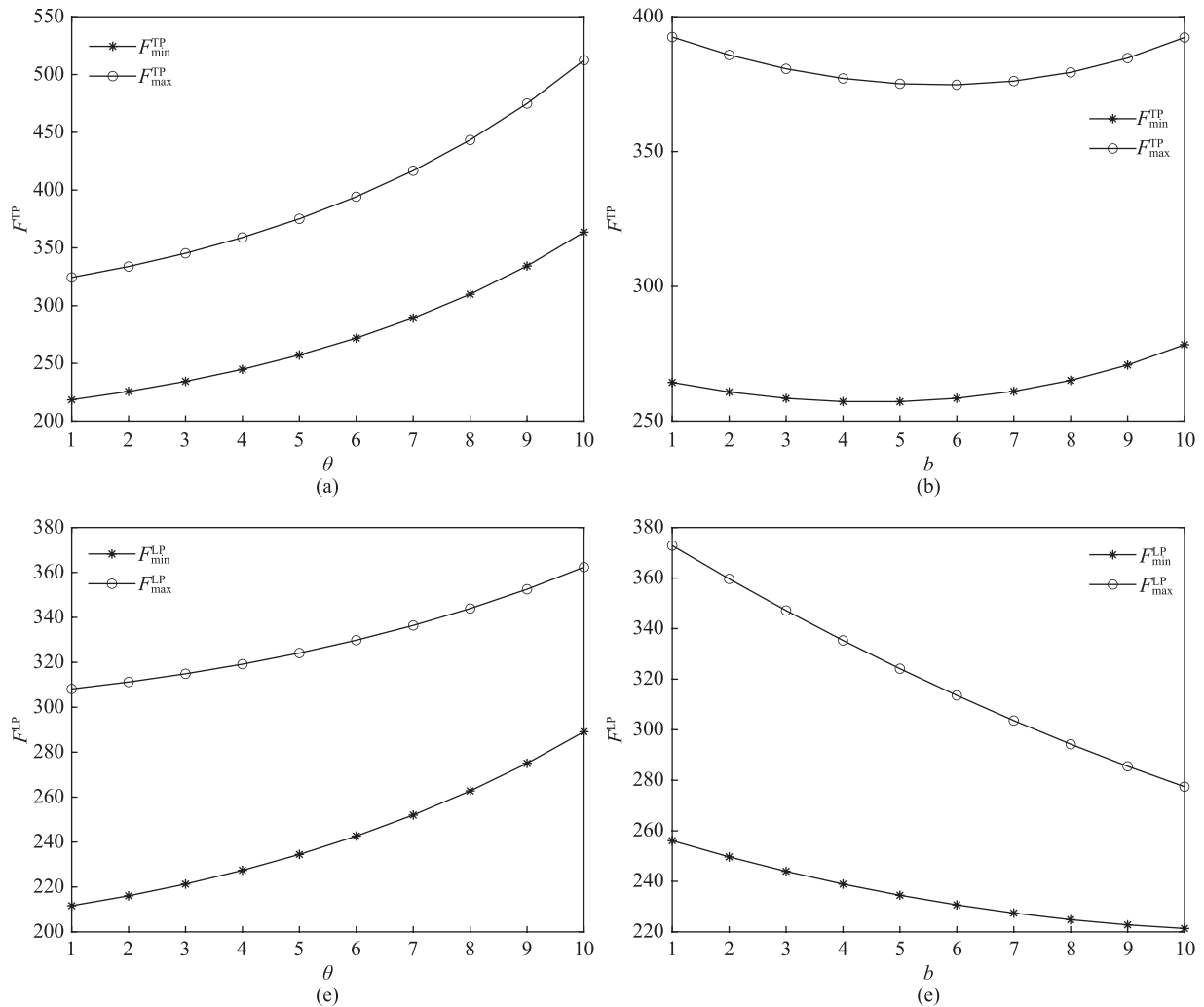


图 4 θ 和 b 对契约协调区间的影响

六、结论与启示

本文在考虑政府的碳交易管制和绿色补贴政策下,构建了不同权力结构下的三阶段 Stackelberg 博弈模型和集中决策模型。将政府的绿色投资补贴率作为决策变量,重点分析了消费者绿色偏好、碳交易价格和减排成本系数对低碳供应链最优定价、减排决策、利润和社会福利水平的影响,随后利用两部收费契约和低价促销策略分别对三阶段 Stackelberg 博弈模型进行了协作研究进而实现了渠道成员间的帕累托改进,最后运用数值算例对文中结论和契约协调的有效性进行了验证。主要研究结果和管理启示如下。

(1) 随着政府绿色投资补贴率的提高,低碳产品的最优渠道价格均会降低从而有利于提高消费者剩余。

政府的绿色投资补贴率越高,产品的绿色度、渠道成员和低碳供应链的利润水平越高,故政府的绿色补贴有利于提高低碳供应链的环境和经济效益。此外,消费者绿色偏好程度的增强有利于提高产品绿色度、渠道成员利润水平和社会福利水平,而其对最优产品渠道价格的影响趋势取决于相关参数的取值范围。

(2)集中决策模型下产品的最优零售价格最低且绿色度最高,而 MS 模型中产品的最优零售价格最高且绿色度最低。此外,集中决策模型下的低碳供应链利润和社会福利水平最高,而 MS 模型下的低碳供应链利润和社会福利水平最低,这表明 RS 模型的社会福利水平总是高于 MS 模型,故零售商拥有比制造商更强的渠道权力时有利于提高低碳供应链的经济和社会效益。

(3)对于政府部门而言,当消费者的绿色偏好程度较强时,政府的绿色投资补贴率应适当降低,即政府需降低对企业碳减排投资的财政干预力度;而当制造商的碳减排难度较大时,政府应适当提高绿色投资补贴率,即政府需加强对企业碳减排投资的财政干预力度,这有利于提高社会福利水平。因此,政府需通过多种途径进行宣传教育,加强消费者的环境保护意识和,引领消费者购买低碳产品从而创造更多的环境和经济效益。此外,在碳交易管制下,政府初期可赋予企业较高的碳配额,这有利于激励其加大低碳减排力度。

(4)对于制造企业而言,当政府实施绿色投资补贴时,制造商应适当降低产品的批发价格和增加碳减排投资,这有利于提高自身的绩效水平。当低碳减排难度较大时,企业可通过联合上下游企业或横向合作建立减排联盟以降低研发成本,这不仅有利于绿色技术的顺利研发并降低企业的碳减排投资风险。消费者绿色偏好程度对产品定价的影响会受到其他因素的约束,如碳交易价格和绿色投资成本系数。因此,企业在产品定价时应考虑消费者的绿色行为偏好、碳交易市场的供需情况以及自身的碳减排效率来进行综合决策。

(5)两部收费契约和低价促销策略可分别实现两种 Stackelberg 模型的帕累托改进,消费者绿色偏好程度和碳交易价格对实现供应链的契约协调区间有较大影响。较高的消费者绿色偏好程度总是能提高制造商的转移支付。此外,在不同契约中碳交易价格对制造商转移支付和协调区间大小的影响不尽相同。

未来可从以下方面进行拓展研究,本文假设产品的市场需求是确定的,但在商业实践中受各种因素影响导致产品的市场需求是随机的,故可研究随机需求情景下低碳供应链的最优决策。供应链节点企业通常拥有私有信息,故可考虑渠道成员间的信息不对称问题,如制造商的碳减排成本信息不对称等。此外,考虑渠道成员的社会行为偏好,如风险规避和公平关切行为对低碳供应链决策的影响也是值得研究的方向。

参考文献:

- [1] YANG H, CHEN W. Retailer-driven carbon emission abatement with consumer environmental awareness and carbon tax: Revenue-sharing versus Cost-sharing[J]. *Omega*, 2018, 78: 179-191.
- [2] BENJAFFAR 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.
- [3] 胡斌, 刘峥, 郭杭鑫, 等. 政府督促和碳交易机制下碳减排与定价优化研究[J]. *工程管理科技前沿*, 2022, 41(3): 83-89.
- [4] XU X, 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.
- [5] 张川, 马慧敏, 郭振. 碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的供应链减排及融资策略[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3271-3278.
- [6] YANG M. Green investment and e-commerce sales mode selection strategies with cap-and-trade regulation [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 177: 109036.
- [7] 张李浩, 董款, 张荣. 基于碳配额交易和减排技术的供应链策略选择[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(1): 63-72.
- [8] 邹浩, 秦进, 杨鹏, 等. 碳交易下考虑双重行为偏好的低碳供应链定价决策[J/OL]. *计算机集成制造系统*: 1-23[2024-04-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20230506.1558.008.html>.
- [9] JUNG S H, FENG T. Government subsidies for green technology development under uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 286(2): 726-739.
- [10] YU Y, HAN X, HU G. Optimal production for manufacturers considering consumer environmental awareness and green subsidies[J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 182: 397-408.
- [11] 郭军华, 孙林洋, 张诚, 等. 碳限额交易政策下考虑消费者低碳偏好的供应链定价与协调[J]. *工业工程与管理*, 2020, 25(2): 134-145.
- [12] ZHANG J N, YANG Z Y, 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.

- [13] 夏西强, 路梦圆, 郭磊. 碳交易下碳配额分配方式对制造/再制造影响研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(11): 3001-3015.
- [14] 张令荣, 杨子凡, 程春琪. 碳配额交易政策下闭环供应链的减排策略选择[J]. 管理工程学报, 2022, 36(1): 172-180.
- [15] WANG Z, WU Q. Carbon emission reduction and product collection decisions in the closed-loop supply chain with cap-and-trade regulation[J]. International Journal of Production Research, 2020, 59(14): 4359-4383.
- [16] DONG C, SHEN B, CHOW P S, et al. Sustainability investment under cap-and-trade regulation[J]. Annals of Operations Research, 2014, 240(2): 509-531.
- [17] SONG L, XIN Q, CHEN H, et al. Optimal decision-making of retailer-led dual-channel green supply chain with fairness concerns under government subsidies[J]. Mathematics, 2023, 11(2): 284.
- [18] YI Y, WANG Y, FU C 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.
- [19] BIAN J, ZHANG G, ZHOU G. Manufacturer vs. consumer subsidy with green technology investment and environmental concern[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 287(3): 832-843.
- [20] 缪文清, 沈炳良. 碳交易及补贴机制下供应链差别定价研究[J]. 技术经济, 2020, 39(9): 51-60.
- [21] 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.
- [22] 王辉, 甘玮, 王翔, 等. 碳限额及交易下同时考虑制造商和零售商的中小企业低碳供应链补贴策略[J]. 科技管理研究, 2023, 43(8): 193-202.
- [23] 刘俊华, 黄悦, 王福. 基于联合减排与销售努力的三级低碳供应链成本分担契约选择[J]. 商业研究, 2022(1): 123-132.
- [24] 孙嘉轶, 杨露, 滕春贤. 政府补贴与股权合作下低碳闭环供应链决策与协调[J]. 系统工程学报, 2023, 38(4): 540-554.
- [25] PAL R, SAHA B. Pollution tax, partial privatization and environment[J]. Resource and Energy Economics, 2015, 40: 19-35.
- [26] GAO J, HAN H, HOU L, et al. Pricing and effort decisions in a closed-loop supply chain under different channel power structures[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2043-2057.

Optimal Decisions and Coordination of Low-carbon Supply Chain under Cap-and-trade Regulation and Government Subsidy

Zhang Yuhao^{1, 2}, Zhang Tao^{2, 3}

(1. School of Business, Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou 215600, China;

2. School of Information Management and Engineering, Shanghai University of Finance and Economics,

Shanghai 200433, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Financial Information Technology,

Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China)

Abstract: Three-stage Stackelberg game models and one centralized decision model was established to considered the cap-and-trade regulation and government green subsidy policies in a three-level low-carbon supply chain, which composed of the government, one manufacturer and one retailer. The influences of the consumer's green preference, carbon trading price, carbon reduction cost coefficient on the optimal decisions and social welfare associated with different game models are analyzed. In addition, the proposed game models are coordinated by using two-part tariff contract and low-price promotion strategy respectively. Numerical examples are conducted to verify the derived conclusions. The results indicate that strong consumer green preference is beneficial for improving product greenness, channel members' profits, and the whole supply chain's social welfare. The greenness of the product and social welfare are highest under the centralized decision model. The optimal green investment subsidy rate of the government decreases with consumer green preference and increases with carbon emission reduction. When the parameter values satisfy the certain conditions, the perfect coordination of the low-carbon supply chain can be achieved by means of two-part tariff contract and low-price promotion strategy.

Keywords: cap-and-trade regulation; green subsidy; stackelberg game; social welfare; two-part tariff contract