

碳交易下考虑公平关切的低碳供应链决策与协调研究

林 粤, 王志宏*

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2025年10月19日; 录用日期: 2025年11月20日; 发布日期: 2025年11月27日

摘 要

基于碳限额与交易政策, 研究了零售商公平关切行为对低碳供应链运作的影响, 发现: 1) 零售商公平关切程度的增强, 会降低制造商的减排水平与零售商的广告投入, 并推高产品零售价格, 从而导致市场需求萎缩, 并最终损害制造商及供应链系统的利润。2) 收益共享 - 成本共担契约在一定参数条件下能够有效协调供应链, 实现环境效益与经济效益的双赢。3) 消费者低碳偏好增强和碳交易价格提高, 均能激励制造商增加减排投入。

关键词

碳限额与交易机制, 公平关切, 协调, Stackelberg博弈

Research on the Decision and Coordination of Low-Carbon Supply Chain with Fairness Concerns under Carbon Cap-and-Trade Mechanism

Yue Lin, Zhihong Wang*

Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai

Received: October 19, 2025; accepted: November 20, 2025; published: November 27, 2025

Abstract

Under the carbon cap-and-trade policy, this study investigates the impact of retailers' fairness con-
*通讯作者。

文章引用: 林粤, 王志宏. 碳交易下考虑公平关切的低碳供应链决策与协调研究[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(6): 25-37.
DOI: 10.12677/orf.2025.156254

cerns on the operation of a low-carbon supply chain. Findings reveal that: 1) Stronger retailer's fairness concerns lower the manufacturer's emission reduction level and the retailer's advertising efforts, raise the retail price, thereby shrink market demand, and finally damage the profits of both the manufacturer and the supply chain. 2) A revenue-sharing and cost-sharing contract can effectively coordinate the supply chain under certain parameter conditions, achieving a win-win outcome for both environmental and economic benefits. 3) Stronger consumer's low-carbon preference and higher carbon trading price both encourage manufacturer to increase carbon reduction investments.

Keywords

Carbon Cap-and-Trade Mechanism, Fairness Concerns, Coordination, Stackelberg Game Theory

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气候变暖等严峻问题使得低碳发展理念已成为全球共识。2020年9月,习近平主席在联合国大会上宣布我国力争于2030年前实现碳达峰,努力争取2060年前实现碳中和。在此目标指引下,全国统一的碳排放权交易市场于2021年7月正式启动上线交易。在该机制下,企业面临碳排放约束,超出限定额度则需从市场购入,若有盈余可出售以增加收益[1]。同时,低碳消费趋势的兴起,也从市场需求侧进一步强化了企业低碳转型的必要性与紧迫性。然而,在低碳供应链实践中,权力失衡容易导致弱势企业对利润的公平性产生担忧,即公平关切[2]。典型案例如2007年浪莎集团因定价不公而终止与沃尔玛的合作,可见供应链成员的公平关切不容忽视。

鉴于此,在碳限额与交易政策下,考虑供应链上下游企业均进行低碳投资,本文旨在研究公平关切行为对低碳供应链运作的影响机制,并设计合理的契约方案以实现供应链的协调。

2. 文献综述

与本文相关的研究文献是碳交易政策下低碳供应链定价、减排决策及协调机制研究。例如,Xu等[3]构建了由减排制造商和零售商组成的二级供应链,研究了供应链的最优生产、定价与减排决策,并探讨了批发价合同和成本分摊合同在供应链协调中的作用。Tat等[4]构建了一种具有弹性的碳限额与交易机制,研究了供应链最优的碳配额量及可持续性策略,并提出了结合寄售与零批发价格的组合契约以协调供应链。张玉豪等[5]构建了政府主导的三级低碳供应链,研究了两种权力结构下供应链的最优定价、减排决策与协调问题。邹浩等[6]研究了制造商公平关切时供应链最优的定价与减排决策,发现成本共担契约对成员利润具有帕累托改进效果。石平等[7]考虑制造商互惠行为,研究了供应链最优的减排与广告策略,并设计了广告合作-减排成本分担契约以协调供应链。与上述文献不同,本文结合碳限额与交易政策,考虑制造商和零售商均进行低碳投资,针对弱势地位的零售商的公平关切行为展开分析并进一步提出协调策略。

3. 模型建立与求解

3.1. 模型描述与假设

制造商按照订单生产产品且单位生产成本为 c ,零售商负责产品销售。政府为制造商设定的碳限额为

G , 若超出该额度则需购买反之可出售, 假设单位碳排放权的价格 b 为外生变量。假设单位产品初始碳排放量为 e_0 , 为控制总排放量, 制造商投入减排技术, 投资成本为 $c(e) = \frac{1}{2}ke^2$, k 代表减排投资成本系数, 减排后产品的单位碳排放量为 $e_0 - e$ 。为促进低碳销售, 零售商投入广告宣传活动, 投资成本 $c(s) = \frac{1}{2}\eta s^2$, η 代表广告宣传投资成本系数。在 Stackelberg 博弈中, 制造商作为领导者, 先决定产品的批发价格 w 和减排水平 e , 零售商随后决定产品的零售价格 p 和广告宣传水平 s 。参考张玲红等[8]的研究, 市场需求 $q = a - \beta p + \theta e + \gamma s$ 。其中 a 为市场基础容量, $a > 0$, β 为价格影响系数, $\beta > 0$, θ 为消费者低碳偏好系数, $\theta > 0$, γ 为广告宣传影响系数, $\gamma > 0$ 。

为便于后续模型的描述, 使用 π 、 u 分别表示利润函数与效用函数, 下标 m 、 r 、 sc 分别表示制造商、零售商和供应链整体, 上标 C 、 ND 、 FD 、 FC 分别表示集中决策模型, 零售商公平中性分散决策模型、零售商公平关切分散决策模型以及协调模型。

3.2. 零售商公平中性分散决策

ND 模式下, 制造商和零售商的利润函数分别为:

$$\pi_m^{ND} = (w^{ND} - c)q^{ND} - b[(e_0 - e)q^{ND} - G] - \frac{1}{2}k(e^{ND})^2 \quad (1)$$

$$\pi_r^{ND} = p^{ND}q^{ND} - \frac{1}{2}\eta(s^{ND})^2 \quad (2)$$

命题 1: 在 ND 模型中, 产品的最优批发价格、减排水平、零售价格、广告宣传水平分别为

$$w^{ND*} = \frac{[a - \beta(c + be_0)][2k\beta\eta - k\gamma^2 - b\beta\eta(b\beta + \theta)]}{\beta[4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2]} + c + be_0, \quad e^{ND*} = \frac{\eta(b\beta + \theta)[a - \beta(c + be_0)]}{4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2},$$

$$p^{ND*} = \frac{[a - \beta(c + be_0)][3k\beta\eta - k\gamma^2 - b\beta\eta(b\beta + \theta)]}{\beta[4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2]} + c + be_0, \quad s^{ND*} = \frac{k\gamma[a - \beta(c + be_0)]}{4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2}。$$

利用逆向推导, 根据式(2), 计算 π_r^{ND} 关于 p^{ND} 、 s^{ND} 的 Hessian 矩阵, 求得 $H^{ND}(p^{ND}, s^{ND}) = \begin{bmatrix} -2\beta & \gamma \\ \gamma & -\eta \end{bmatrix}$ 。

当 $2\beta\eta - \gamma^2 > 0$, $H^{ND}(p^{ND}, s^{ND})$ 负定且是 p^{ND} 和 s^{ND} 的联合凹函数。联立 $\frac{\partial \pi_r^{ND}}{\partial p^{ND}} = \frac{\partial \pi_r^{ND}}{\partial s^{ND}} = 0$, 求得

$$p^{ND} = w + \frac{\eta(a + e\theta - \beta w)}{2\beta\eta - \gamma^2}, \quad s^{ND} = \frac{r(a + e\theta - \beta w)}{2\beta\eta - \gamma^2}。代入式(1), 求 π_m^{ND} 关于 w^{ND} 和 e^{ND} 的 Hessian 矩阵, 求$$

$$得 H^{ND}(w^{ND}, e^{ND}) = \begin{bmatrix} -\frac{2\eta\beta^2}{2\beta\eta - \gamma^2} & \frac{\beta\eta(\theta - b\beta)}{2\beta\eta - \gamma^2} \\ \frac{\beta\eta(\theta - b\beta)}{2\beta\eta - \gamma^2} & \frac{2b\beta\eta\theta}{2\beta\eta - \gamma^2} - k \end{bmatrix}, \quad 当 \frac{\eta\beta^2[4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2]}{(2\beta\eta - \gamma^2)^2} > 0, \quad 可知$$

$H^{ND}(w^{ND}, e^{ND})$ 负定且是 w^{ND} 和 e^{ND} 的联合凹函数。联立 $\frac{\partial \pi_m^{ND}}{\partial w^{ND}} = \frac{\partial \pi_m^{ND}}{\partial e^{ND}} = 0$, 求得 w^{ND*} 和 e^{ND*} 。再将 w^{ND*} 和 e^{ND*} 带入 p^{ND} 和 s^{ND} 中, 得到 p^{ND*} 和 s^{ND*} 。证毕。

将以上代入 $q^{ND*} = a - \beta p^{ND*} + \theta e^{ND*} + \eta s^{ND*}$ 、式(1)、式(2)和 $\pi_{sc}^{ND*} = \pi_r^{ND*} + \pi_m^{ND*}$, 求得:

$$\begin{cases} q^{ND*} = \frac{k\beta\eta[a - \beta(c + be_0)]}{4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2} \\ \pi_m^{ND*} = bG + \frac{k\eta[a - \beta(c + be_0)]^2}{2[4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2]} \\ \pi_r^{ND*} = \frac{\eta k^2[a - \beta(c + be_0)]^2(2\beta\eta - \gamma^2)}{2[4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2]^2} \\ \pi_{sc}^{ND*} = bG + \frac{k\eta[a - \beta(c + be_0)]^2[6k\beta\eta - 3k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2]}{2[4k\beta\eta - 2k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2]^2} \end{cases}$$

3.3. 零售商公平关切分散决策

因零售商属于劣势方, 考虑其公平关切行为。参考杜少甫等[9]的研究, 零售商的效用函数为: $u_r = \pi_r - \lambda(\pi_m - \pi_r)$, 其中 $\lambda \in (0,1)$ 。FD 模型下, 制造商与零售商的利润函数、零售商效用函数分别为:

$$\pi_m^{FD} = (w^{FD} - c)q^{FD} - b[(e_0 - e)q^{FD} - G] - \frac{1}{2}k(e^{FD})^2 \quad (3)$$

$$\pi_r^{FD} = p^{FD}q^{FD} - \frac{1}{2}\eta(s^{FD})^2 \quad (4)$$

$$u_r^{FD} = \pi_r^{FD} - \lambda(\pi_m^{FD} - \pi_r^{FD}) \quad (5)$$

命题 2: 在 FD 模型中, 产品的最优批发价格、减排水平、零售价格、广告宣传水平分别为

$$\begin{aligned} w^{FD*} &= \frac{(1+\lambda)[a - \beta(c + be_0)][2k\beta\eta - k\gamma^2 - b\beta\eta(b\beta + \theta)]}{\beta[(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2]} + c + be_0, \\ e^{FD*} &= \frac{\eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)[a - \beta(c + be_0)]}{(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2}, \\ p^{FD*} &= \frac{[a - \beta(c + be_0)][(3k\beta\eta - k\gamma^2)(1+2\lambda) - b\beta\eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)]}{\beta[(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2]} + c + be_0, \\ s^{FD*} &= \frac{k\gamma(1+2\lambda)[a - \beta(c + be_0)]}{(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2}. \end{aligned}$$

利用逆向推导, 根据式(5), 计算 u_r^{FD} 关于 p^{FD} 、 s^{FD} 的 Hessian 矩阵, 求得

$$H^{FD}(p^{FD}, s^{FD}) = (1+\lambda)^2 \begin{bmatrix} -2\beta & \gamma \\ \gamma & -\eta \end{bmatrix}. \text{ 当 } 2\beta\eta - \gamma^2 > 0, H^{FD}(p^{FD}, e^{FD}) \text{ 负定且是 } p^{FD} \text{ 和 } e^{FD} \text{ 的联合凹函数。}$$

$$\text{联立 } \frac{\partial u_r^{FD}}{\partial p^{FD}} = \frac{\partial u_r^{FD}}{\partial e^{FD}} = 0, \text{ 求得 } p^{FD} = \frac{(\beta\eta - \gamma^2)\{w + [2w - c - b(e_0 - e)\lambda]\} + \eta(a + e\theta)(1+\lambda)}{(2\beta\eta - \gamma^2)(1+\lambda)},$$

$$s^{FD} = \frac{\gamma(a + e\theta)(1+\lambda) + \beta\gamma\{\lambda[c + b(e_0 - e) - 2w] - w\}}{(2\beta\eta - \gamma^2)(1+\lambda)}. \text{ 代入式(3), 求 } \pi_m^{FD} \text{ 关于 } w^{FD} \text{ 和 } e^{FD} \text{ 的 Hessian 矩阵,}$$

求得 $H^{FD}(w^{FD}, e^{FD}) = \begin{bmatrix} -\frac{2\beta^2\eta(1+2\lambda)}{(2\beta\eta-\gamma^2)(1+\lambda)} & \frac{\beta\eta[\theta(1+\lambda)-b\beta(1+3\lambda)]}{(2\beta\eta-\gamma^2)(1+\lambda)} \\ \frac{\beta\eta[\theta(1+\lambda)-b\beta(1+3\lambda)]}{(2\beta\eta-\gamma^2)(1+\lambda)} & \frac{2b\beta\eta[\theta(1+\lambda)-b\beta\lambda]}{(2\beta\eta-\gamma^2)(1+\lambda)} - k \end{bmatrix}$, 当 $\frac{\eta\beta^2[(4k\beta\eta-2k\gamma^2)(1+2\lambda)-\eta(1+\lambda)(b\beta+\theta)^2]}{(1+\lambda)(2\beta\eta-\gamma^2)^2} > 0$, 可知 $H^{FD}(w^{FD}, e^{FD})$ 负定且是 w^{FD} 和 e^{FD} 的联合凹函数。

联立 $\frac{\partial \pi_m^{FD}}{\partial w^{FD}} = \frac{\partial \pi_m^{FD}}{\partial e^{FD}} = 0$, 求得 w^{FD*} 和 e^{FD*} 。再将 w^{FD*} 和 e^{FD*} 带入 p^{FD} 和 s^{FD} 中, 得到 p^{FD*} 和 s^{FD*} 。证毕。

将以上代入 $q^{FD*} = a - \beta p^{FD*} + \theta e^{FD*} + \eta s^{FD*}$ 、式(3)、式(4)、 $\pi_{sc}^{FD*} = \pi_r^{FD*} + \pi_m^{FD*}$ 和式(5), 求得:

$$\begin{cases} q^{FD*} = \frac{k\beta\eta(1+2\lambda)[a - \beta(c + be_0)]}{(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2} \\ \pi_m^{FD*} = bG + \frac{k\eta(1+\lambda)[a - \beta(c + be_0)]^2}{2[(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2]} \\ \pi_r^{FD*} = \frac{\eta k^2(1+6\lambda+8\lambda^2)[a - \beta(c + be_0)]^2(2\beta\eta - \gamma^2)}{2[(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2]^2} \\ \pi_{sc}^{FD*} = bG + \frac{k\eta[a - \beta(c + be_0)]^2[(6k\beta\eta - 3k\gamma^2)(1+2\lambda)^2 - \eta(1+\lambda)^2(b\beta + \theta)^2]}{2[(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2]^2} \\ u_r^{FD*} = \frac{k\eta(1+\lambda)[a - \beta(c + be_0)]^2[(2k\beta\eta - k\gamma^2)(1+2\lambda)^2 - \eta\lambda(1+\lambda)^2(b\beta + \theta)^2]}{2[(4k\beta\eta - 2k\gamma^2)(1+2\lambda) - \eta(1+\lambda)(b\beta + \theta)^2]^2} - \lambda bG \end{cases}$$

3.4. 均衡解对比分析

推论 1: 当零售商公平关切时, 制造商的减排水平、零售商的广告宣传水平以及市场需求均低于公平中性时的水平且与零售商公平关切程度负相关。

证明: $e^{FD*} < e^{ND*}$, $\frac{\partial e^{FD*}}{\partial \lambda} < 0$; $s^{FD*} < s^{ND*}$, $\frac{\partial s^{FD*}}{\partial \lambda} < 0$; $q^{FD*} < q^{ND*}$, $\frac{\partial q^{FD*}}{\partial \lambda} < 0$ 。

推论 1 表明, 零售商的公平关切行为会抑制其广告宣传积极性, 且抑制作用随关切程度提高而增强。当制造商考虑到这一行为, 其最优策略是降低减排投资。这导致产品低碳吸引力下降, 最终整体市场需求缩减。

推论 2: 当零售商公平关切时, 制造商的利润与供应链整体利润均低于公平中性时的水平且与零售商公平关切程度负相关。

证明: $\pi_m^{FD*} < \pi_m^{ND*}$, $\frac{\partial \pi_m^{FD*}}{\partial \lambda} < 0$; $\pi_{sc}^{FD*} < \pi_{sc}^{ND*}$, $\frac{\partial \pi_{sc}^{FD*}}{\partial \lambda} < 0$ 。

推论 2 表明, 零售商的公平关切行为不利于制造商的利润, 从而降低了供应链整体利润。结合推论 1, 如何提出一个合理的契约方案, 以解决该供应链低碳程度受阻及经济效率损失的问题是供应链成员均需关注的问题。

由于 FD 模式下的批发价格、零售价格以及零售商利润是关于 λ 的复杂函数, 且 ND 与 FD 模式下零售商的利润难以比较, 后文采用数值分析法进行补充。

4. 供应链协调

4.1. 集中决策

C 模式下, 零售商和制造商作为整体共同决策, 供应链整体利润如下:

$$\pi_{sc}^C = (p^C - c)q^C - b[(e_0 - e^C)q^C - G] - \frac{1}{2}k(e^C)^2 - \frac{1}{2}\eta(s^C)^2 \quad (6)$$

命题 3: 在 C 模型中, 产品的最优减排水平、广告宣传水平以及零售价格分别为

$$e^{C*} = \frac{\eta(b\beta + \theta)[a - \beta(c + be_0)]}{2k\beta\eta - k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2}, \quad s^{C*} = \frac{k\gamma[a - \beta(c + be_0)]}{2k\beta\eta - k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2},$$

$$p^{C*} = \frac{\eta[k - b(b\beta + \theta)][a - \beta(c + be_0)]}{2k\beta\eta - k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2} + c + be_0.$$

求 π^{C*} 关于 p^C 、 e^C 和 s^C 的 Hessian 矩阵, 求得 $H^C(p^C, e^C, s^C) = \begin{bmatrix} -2\beta & \theta - b\beta & \gamma \\ \theta - b\beta & 2b\theta - k & b\gamma \\ \gamma & b\gamma & -\eta \end{bmatrix}$ 。当二阶行列

式 $2k\beta - (b\beta + \theta)^2 > 0$ 且三阶行列式 $-[2k\beta\eta - k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2] < 0$, $H^C(p^C, e^C, s^C)$ 负定且是 p^C 、 e^C 和

s^C 的联合凹函数。联立 $\frac{\partial \pi^C}{\partial p^C} = \frac{\partial \pi^C}{\partial e^C} = \frac{\partial \pi^C}{\partial s^C} = 0$, 求得 p^{C*} 、 e^{C*} 和 s^{C*} 。证毕。

将以上代入 $q^{C*} = a - \beta p^{C*} + \theta e^{C*} + \eta s^{C*}$ 、式(6)和 $\pi_{sc}^{C*} = \pi_r^{C*} + \pi_m^{C*}$, 求得:

$$\begin{cases} q^{C*} = \frac{k\beta\eta[a - \beta(c + be_0)]}{2k\beta\eta - k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2} \\ \pi_{sc}^{C*} = bG + \frac{k\eta[a - \beta(c + be_0)]^2}{2[2k\beta\eta - k\gamma^2 - \eta(b\beta + \theta)^2]^2} \end{cases}$$

推论 3: 集中决策下产品的减排水平与供应链整体利润高于分散决策。

证明: $e^{C*} > e^{ND*} > e^{FD*}$, $\pi_{sc}^{C*} > \pi_{sc}^{ND*} > \pi_{sc}^{FD*}$ 。

推论 3 表明, 分散决策会阻碍供应链的低碳化进程, 以集中决策模式为标杆设计契约, 可同时促进产品的低碳水平及供应链整体利润。

4.2. 收益共享 - 成本共担契约

本节采用收益共享 - 成本共担契约来协调供应链, 具体为: 首先, 制造商设定一个较低的批发价格 w^{FC} 以增进零售商的订单量, 同时零售商按比例 $\varphi (0 < \varphi < 1)$ 与制造商分享销售收入; 其次, 为激励零售商采用与集中决策下的广告推广水平, 制造商按比例 $\delta (0 < \delta < 1)$ 分担广告宣传成本。FC 模式下, 制造商和零售商的利润函数、零售商的效用函数分别为:

$$\pi_m^{FC} = (w^{FC} - c + \varphi p^{FC})q^{FC} - b[(e_0 - e)q^{FC} - G] - \frac{1}{2}k(e^{FC})^2 - \frac{1}{2}\delta\eta(s^{FC})^2 \quad (7)$$

$$\pi_r^{FC} = [(1 - \varphi)p^{FC} - w^{FC}][a - \beta p^{FC} + \theta e^{FC} + \gamma s^{FC}] - \frac{1}{2}\eta(1 - \delta)(s^{FC})^2 \quad (8)$$

$$u_r^{FC} = \pi_r^{FC} - \lambda(\pi_m^{FC} - \pi_r^{FC}) \quad (9)$$

为确保该契约顺利执行, 制造商和零售商的利润, 零售商的效用需满足如下条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \pi_m^{FC*} \geq \pi_m^{FD*} \\ \pi_r^{FC*} \geq \pi_r^{FD*} \\ u_r^{FC*} \geq u_r^{FD*} \end{cases} \quad (10)$$

命题 4: 当参数满足 $w^{FC*} = \frac{(1-\delta)\{(c+be_0)[2k\beta\eta-k\gamma^2+\eta\theta(b\beta+\theta)]+ab\eta(b\beta+\theta)\}}{2k\beta\eta-k\gamma^2-\eta(b\beta+\theta)^2}$ 且

$\delta = \varphi \in \{\delta_{\min}, \delta_{\max}\}$ 时, 收益共享 - 成本共担能够有效协调零售商公平关切时的低碳供应链。其中,

$$\delta_{\min} = \frac{(2k\beta\eta-k\gamma^2)(1+\lambda)+2\eta\lambda(b\beta+\theta)^2}{(4k\beta\eta-2k\gamma^2)(1+2\lambda)-\eta(1+\lambda)(b\beta+\theta)^2},$$

$$\delta_{\max} = \frac{3(1+\lambda)(2k\beta\eta-k\gamma^2)^2(1+2\lambda)^2-\lambda(1+\lambda)(4+9\lambda)\eta^2(b\beta+\theta)^4+\eta(2k\beta\eta-k\gamma^2)(2+3\lambda)(5\lambda^2-1)(b\beta+\theta)^2}{(1+2\lambda)[(4k\beta\eta-2k\gamma^2)(1+2\lambda)-\eta(1+\lambda)(b\beta+\theta)^2]^2}。$$

证明: 为与集中决策保持一致, 令 $e^{FC*} = e^{C*}$ 、 $s^{FC*} = s^{C*}$ 且 $p^{FC*} = p^{C*}$, 求得参数需满足:

$$\delta = \varphi$$

$$w^{FC*} = \frac{(1-\delta)\{(c+be_0)[2k\beta\eta-k\gamma^2+\eta\theta(b\beta+\theta)]+ab\eta(b\beta+\theta)\}}{2k\beta\eta-k\gamma^2-(b\beta+\theta)^2}$$

将 e^{FC*} 、 s^{FC*} 、 p^{FC*} 和 w^{FC*} 代入式(7)、式(8)和 $\pi_{sc}^{FC*} = \pi_m^{FC*} + \pi_r^{FC*}$, 可得收益共享 - 成本分担契约下零售商、制造商和供应链系统利润分别为:

$$\pi_m^{FC*} = bG + \frac{k\eta[a-\beta(c+be_0)]^2[k\delta(2\beta\eta-\gamma^2)-\eta(b\beta+\theta)^2]}{2[2k\beta\eta-k\gamma^2-\eta(b\beta+\theta)^2]^2}$$

$$\pi_r^{FC*} = \frac{\eta k^2[a-\beta(c+be_0)]^2(1-\delta)(2\beta\eta-\gamma^2)}{2[2k\beta\eta-k\gamma^2-\eta(b\beta+\theta)^2]^2}$$

$$\pi_{sc}^{FC*} = bG + \frac{k\eta[a-\beta(c+be_0)]^2}{2[2k\beta\eta-k\gamma^2-\eta(b\beta+\theta)^2]^2}$$

接着, 将 π_m^{FC*} 和 π_r^{FC*} 代入式(9)。最后, 令式(10)成立, 可计算得到 δ 的取值范围。证毕。

5. 数值分析

首先, 本节对文中结论及契约有效性进行验证。此外, 考虑到消费者低碳偏好程度及碳交易价格是影响减排决策及利润函数的重要因素, 本节采用数值模拟方法进行分析。参考 Ji 等[10]的研究, 结合本文的约束条件, 参数取值为: $a=500$, $c=5$, $e_0=5$, $\beta=5$, $\theta \in [0,10]$, $\gamma=4$, $k=500$, $\eta=100$, $\lambda \in (0,1)$, $b \in [0,8]$, $G=200$ 。

5.1. 零售商公平关切程度对均衡解的影响分析

本小节设 $\theta = 4$, $b = 4$ 。首先, 根据参数取值得到分散决策下零售商公平中性时供应链的均衡解, 见表 1。

Table 1. Supply chain equilibrium solution under decentralized decision-making with fairness-neutral retailer

表 1. 分散决策下零售商公平中性时供应链的均衡解

决策模式	e	s	w	p	q	π_r	π_m	π_{sc}
ND	0.9715	0.8096	60.946	81.185	101.20	2015.44	4594.93	6610.38

其次, 分析分散决策下零售商公平关切程度对供应链均衡解的影响, 见表 2。

Table 2. Impact of retailer's degree of fairness concerns on supply chain equilibrium solutions

表 2. 零售商的公平关切程度对供应链均衡解的影响

λ	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
e^{FD*}	0.8860	0.7803	0.7174	0.6759	0.6463
w^{FD*}	57.780	53.869	51.547	50.008	48.914
s^{FD*}	0.8054	0.8003	0.7972	0.7952	0.7937
p^{FD*}	81.218	81.258	81.282	81.298	81.309
q^{FD*}	100.67	100.03	99.65	99.396	99.215
π_r^{FD*}	2349.79	2707.73	2931.33	3078.45	3182.60
$\pi_r^{FD*} - \pi_r^{ND*}$	311.73	692.29	915.88	1063.01	1167.16
u_r^{FD*}	2133.81	2365.70	2595.67	2825.23	3054.74
π_m^{FD*}	4277.53	3847.85	3602.63	3440.20	3324.68
$\pi_m^{FD*} - \pi_m^{ND*}$	-334.18	-747.08	-992.30	-1154.73	-1270.26
π_{sc}^{FD*}	6587.93	6555.58	6533.96	6518.65	6507.28

由表 2 中决策和需求行可知, 零售商的公平关切程度越强, 均衡状态下产品批发价格越低, 且低于公平中性时的水平, 制造商的减排水平和零售商的广告宣传水平不断下降, 且低于公平中性时的水平, 而产品的零售价格不断增加, 且高于公平中性时的水平, 市场需求受到产品价格上升及低碳吸引力减弱的不利影响而不断下降, 且低于公平中性时的水平。以上进一步验证了推论 1 中的结论。

由表 1、表 2 中利润行可知, 零售商的公平关切程度越强, 均衡状态下其自身的利润不断提高, 且高于公平中性时的水平。相反地, 制造商的利润和供应链整体利润持续下降, 且低于公平中性时的水平。以上进一步验证了推论 2 中的结论。

5.2. 收益共享 - 成本共担契约有效性验证

本小节设 $\theta = 4$, $b = 4$, 对收益共享 - 成本共担契约协调性进行验证。首先, 根据参数取值得到集中决策模式下供应链的均衡解, 见表 3。

Table 3. Equilibrium solutions of the supply chain under centralized decision-making and decentralized decision-making considering retailer's fairness concerns

表 3. 集中决策与考虑零售商公平关切的分散决策下的供应链的均衡解

决策模式	e	s	p	q	π_{sc}
C	2.0718	1.7265	59.876	215.82	8893.06

其次，设零售商公平关切程度 $\lambda = 0.3$ ，验证收益共享 - 成本共担契约的协调性，见表 4。

Table 4. Coordination of revenue-sharing and cost-sharing contract

表 4. 收益共享 - 成本共担契约的协调

$\delta = \varphi$	0.44958	0.50000	0.55000	0.60000	0.65678
e^{FC*}	2.0718	2.0718	2.0718	2.0718	2.0718
w^{FC*}	9.199	8.356	7.521	6.685	5.734
s^{FC*}	1.7265	1.7265	1.7265	1.7265	1.7265
p^{FC*}	59.876	59.876	59.876	59.876	59.876
q^{FC*}	215.82	215.82	215.82	215.82	215.82
π_r^{FC*}	5045.24	4583.09	4124.78	3666.47	3146.01
$\pi_r^{FC*} - \pi_r^{FD*}$	2337.51	1875.35	1417.04	958.74	438.28
$u_r^{FC*} - u_r^{FD*}$	3038.78	2299.32	1566.03	832.74	0.01
π_m^{FC*}	3847.81	4309.97	4768.28	5226.59	5747.05
$\pi_m^{FC*} - \pi_m^{FD*}$	-0.04	462.12	920.43	1378.74	1899.20
π_{sc}^{FC*}	8893.06	8893.06	8893.06	8893.06	8893.06

结合表 1 和表 3 可知，集中决策时的产品的低碳水平及供应链整体利润均优于表 1 中的相关指标，这进一步论证了推论 3 中的结论。

由表 4 可知，当满足 $\delta = \varphi = \{0.44958, 0.65678\}$ 且 $w^{FC*} = \frac{3025(1-\delta)}{181}$ 时，制造商的低碳水平达到 2.0718，零售商的低碳推广水平达到 1.7265，零售价格为 59.876，市场需求为 215.82，供应链整体利润达到 8893.06，均与集中决策相同。此时，制造商的利润与零售商的效用均比协调前的水平更高，这表明收益共享 - 成本共担契约在特定参数范围内可对存在公平关切零售商的低碳供应链进行协调，这与命题 4 的论证一致。

5.3. 消费者低碳偏好对减排决策及利润的影响

本小节设 $b = 4$ ，探究消费者低碳偏好 θ 的变化对减排决策及供应链成员利润的影响。

由图 1~3 可知，随着消费者低碳偏好程度 θ 增强，制造商采取的最优减排水平不断提高，零售商和制造商的最优利润均不断增大。这是因为，消费者低碳意识越强，意味着低碳需求越高，制造商减排的动机也就越强。此外，由供应链成员利润双双增长可知，消费者低碳偏好程度增强的市场需求信号，既能促使制造商加大减排投资，也为供应链创造了新的经济效益增长点。

5.4. 碳交易价格对减排决策及利润的影响

本小节设 $\theta = 4$ ，探究碳交易价格 b 的变化对减排决策及供应链成员利润的影响。

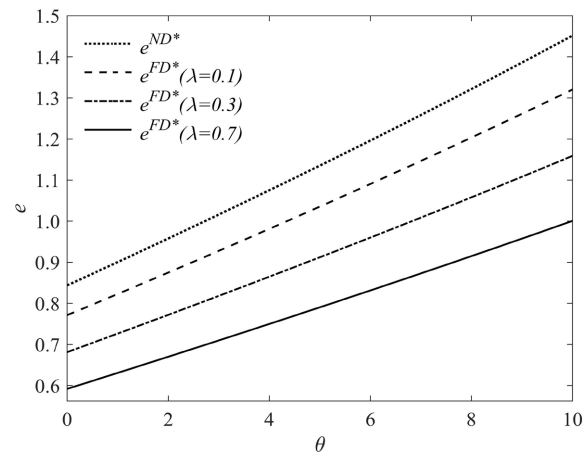


Figure 1. Effect of consumer's low-carbon preference on emission reduction level

图 1. 消费者低碳偏好对减排水平的影响

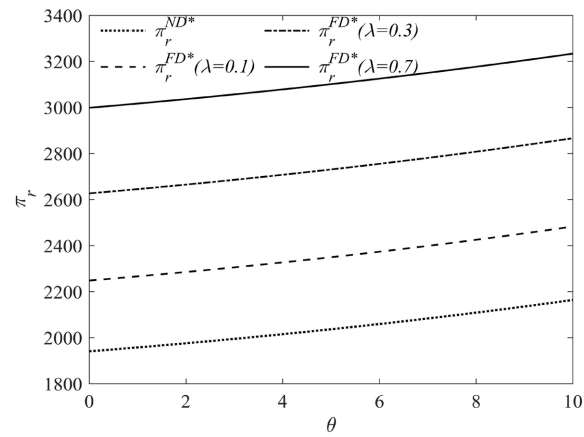


Figure 2. Effect of consumer's low-carbon preference on retailer's profit

图 2. 消费者低碳偏好对零售商利润的影响

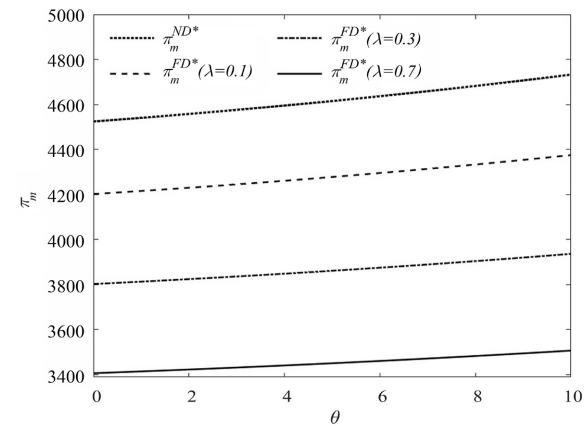


Figure 3. Effect of consumer's low-carbon preference on manufacturer's profit

图 3. 消费者低碳偏好对制造商利润的影响

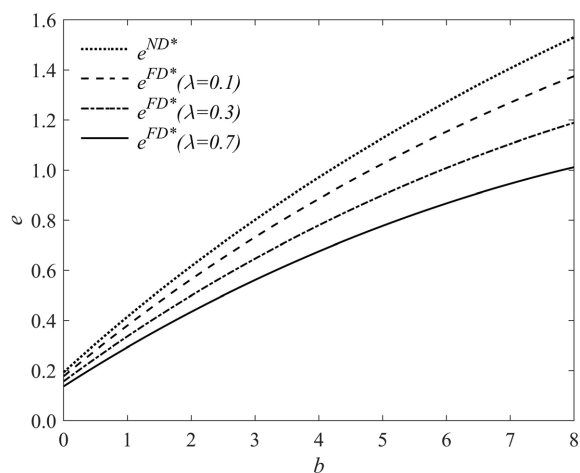


Figure 4. Effect of carbon trading price on emission reduction level

图 4. 碳交易价格对低碳减排水平的影响

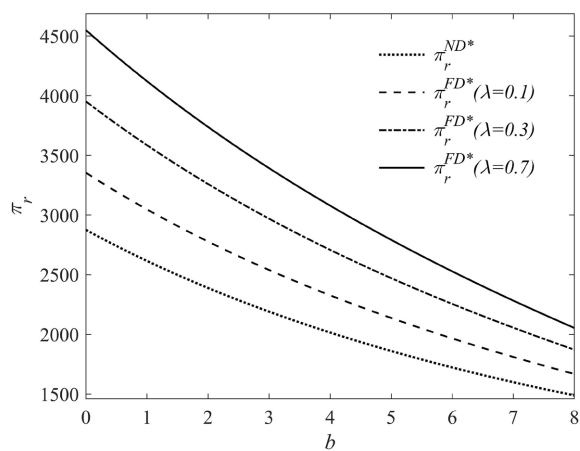


Figure 5. Effect of carbon trading price on retailer's profit

图 5. 碳交易价格对零售商利润的影响

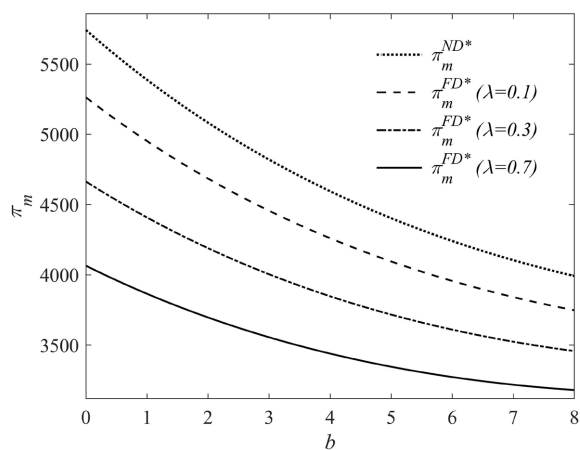


Figure 6. Effect of carbon trading price on manufacturer's profit

图 6. 碳交易价格对制造商利润的影响

由图 4~6 可知, 随着碳交易价格 b 增强, 均衡时制造商采取的最优减排水平不断提高, 但零售商和制造商的利润不断下降。这是因为, 在碳限额与交易管制下, 当企业的碳排放总量小于给定额度时, 企业可将多余配额出售以获利, 反之, 当碳排放总量大于给定额度时, 企业需要购买超出的额度, 导致成本增加。因此, 制造商有动机降低产品的碳排放。此外, 碳交易价格越高, 则碳排放代价越高, 制造商的利润不断下滑, 零售商的利润也受到抑制作用。

6. 结论与管理启示

本文探讨了碳限额与交易机制下制造商主导时零售商公平关切行为的影响机制, 在此基础上提出了相应的协调策略, 并进一步探讨了消费者低碳偏好和碳交易价格对减排决策及利润的影响, 发现:

1) 零售商公平关切会抑制自身广告宣传的积极性并促使其提高产品的零售价格, 当制造商考虑到这一行为时, 为实现自身利润的最大化, 将降低产品的低碳水平并下调产品的批发价格以促进销量, 最终市场需求减小。

2) 尽管零售商的公平关切能够实现自身利润的增长, 但损害制造商的利润, 导致供应链的双重边际问题进一步恶化。

3) 集中决策下产品的减排水平及供应链整体利润优于分散决策, 收益共享 - 成本共担契约在特定条件下可实现供应链的有效协调。

4) 消费者低碳偏好程度增强和碳交易价格提高, 均能推动制造商提高减排水平。然而, 它们对供应链成员及系统整体利润的影响不同: 消费者低碳偏好程度的增强有积极作用, 而碳交易价格的提高则有消极作用。

根据以上结论, 本文提出如下管理启示:

1) 政府应科学调控碳价, 在推动减排的同时, 也要保证企业的盈利空间。同时, 政府可借助公共传播渠道强化低碳生活宣传, 提升公众环保意识, 进而激活市场需求, 促进企业推进低碳转型, 最终达成经济发展与生态保护的双重目标。

2) 居于主导地位的制造商应主动设计合理的收益共享 - 成本共担契约, 以推动供应链合作共赢。相对弱势的零售商则需理性对待公平关切行为, 避免因过度强调公平而错失与核心制造商的合作机会。积极推进上述合作契约, 将有助于提升产品减排效果, 拓展市场空间, 实现环保效益与经济效益的协同提升。

7. 研究展望

本文在碳限额与交易背景下, 考察了制造商主导型低碳供应链中零售商公平关切行为的影响及协调方案, 但仍存在一定局限。未来可以从以下方面研究: 1) 由于减排研发的投入资金往往较大, 可进一步引入制造商的公平偏好或风险偏好。2) 考虑市场需求随机或碳交易价格波动, 研究不确定性环境下低碳供应链主体存在公平关切时的决策及协调问题。3) 结合信息不对称, 研究低碳供应链主体存在公平关切时的激励与监督问题。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Fehr, E. and Schmidt, K.M. (1999) A Theory of Fairness, Competition, and Cooperation. *The Quarterly Journal of Economics*, **114**, 817-868. <https://doi.org/10.1162/003355399556151>
- [3] Xu, X., He, P., Xu, H. and Zhang, Q. (2017) Supply Chain Coordination with Green Technology under Cap-And-Trade Regulation. *International Journal of Production Economics*, **183**, 433-442. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.029>

-
- [4] Tat, R., Heydari, J. and Mlinar, T. (2023) Supply Chain Coordination: The Application of Consignment and Zero Wholesale Price Contracts under Customized Cap-And-Trade and Consumers' Environmental Awareness. *International Journal of Retail & Distribution Management*, **51**, 1388-1412. <https://doi.org/10.1108/ijrdm-11-2022-0481>
- [5] 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.
- [6] 邹浩, 兰建华, 杨鹏, 等. 碳交易下考虑公平关切的低碳供应链定价及协调机制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(5): 1816-1827.
- [7] 石平, 韩坤, 后锐. 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[J]. 管理科学学报, 2024, 27(12): 57-81.
- [8] 张玲红, 刘方媛, 朱立龙, 等. 考虑零售商公平关切与广告努力水平的碳减排策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 138-148.
- [9] 杜少甫, 杜婵, 梁樑, 等. 考虑公平关切的供应链契约与协调[J]. 管理科学学报, 2010, 13(11): 41-48.
- [10] Ji, J., Zhang, Z. and Yang, L. (2017) Carbon Emission Reduction Decisions in the Retail-/Dual-Channel Supply Chain with Consumers' Preference. *Journal of Cleaner Production*, **141**, 852-867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.135>