

碳税政策下制造商碳标签选择策略

刘名武^{1,2}, 樊宝丹¹, 邹梓琛¹

(1.重庆交通大学经济与管理学院, 重庆 400074; 2.重庆口岸物流管理与航运经济研究中心, 重庆 400074)

摘要:研究制造商和零售商组成的两级低碳供应链,构建 Stackelberg 博弈模型并运用逆向归纳法进行求解,在碳税政策下分析消费者环境偏好水平和质疑程度对制造商的均衡决策和碳标签选择的影响。研究表明:(1) 消费者的环境偏好水平和质疑程度对产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力水平均具有正向作用。(2) 当消费者的质疑程度较低时,制造商选择自贴标签;当消费者的质疑程度较高时,制造商选择认证标签。在碳税政策下,制造商偏好自贴标签以弥补碳税带来的成本损失,而零售商无需付出额外成本跟随制造商做出碳标签选择。(3) 在碳税政策下,只有在消费者的环境意识、碳税税率和减排难度系数均较高时,制造商才会主动选择认证标签,否则自贴标签策略更优。

关键词:低碳供应链;自贴标签;认证标签;碳税政策

中图分类号:F273 **文献标志码:**A

引用格式:刘名武,樊宝丹,邹梓琛. 碳税政策下制造商碳标签选择策略[J]. 山东大学学报(理学版),2025,60(6):89-102.

Manufacturers' carbon label strategy selection with consideration of carbon tax policy

LIU Mingwu^{1,2*}, FAN Baodan¹, ZOU Zichen¹

(1. School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Research Center of Port Logistics Management and Shipping Economics, Chongqing 400074, China)

Abstract: This study investigates a two-tier low-carbon supply chain consisting of manufacturers and retailers. A Stackelberg game model is constructed, and backward induction method is applied for solution. Under the carbon tax policy, the study analyzes the impact of consumer environmental preference level and skepticism on manufacturers' equilibrium decision-making and carbon label selection. The research results indicate: (1) Consumer environmental preference levels and degrees of skepticism exert positive influences on the low-carbon attributes of products, wholesale prices, retail prices, and promotional efforts intensity. (2) When consumers have low levels of doubt, manufacturers choose to self label; When consumers have a high level of doubt, manufacturers choose certification labels. Under the carbon tax policy, manufacturers prefer to self label to compensate for the cost loss caused by the carbon tax, while retailers do not need to pay additional costs to follow manufacturers in making carbon label choices. (3) Under the carbon tax policy, manufacturers would only actively choose certification labels when consumers' environmental awareness is high, carbon tax rates, and emission reduction difficulty coefficients are high, otherwise the self labeling strategy is better.

Key words: low-carbon supply chain; self-labeling; certification label; carbon tax policy

0 引言

为应对全球气候变暖引发的极端环境气候问题,不少国家先后制定了严格的碳税、碳配额、碳交易等碳排放管制政策^[1]。碳税政策有利于降低企业碳排放水平,在经济发展和环境保护之间实现有限平衡^[2],但

收稿日期:2023-08-02; 网络出版时间:2024-09-13 10:38:48

基金项目:国家社科基金后期资助项目(21FGLB052); 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX1325); 重庆市教委科学技术重点项目(KJZD-K202300714)

第一作者:刘名武(1979—),男,教授,博士生导师,博士,研究方向为供应链管理. E-mail:liumingwu2007@aliyun.com

也增大了企业进行低碳减排的难度和成本。在碳管制政策、消费者环境意识及企业主动求变的多重驱动下,企业更加注重低碳产品的标识并对不同环境标准的低碳产品贴上碳标签,激励消费者低碳消费选择^[3]。当前,碳标签认定主要有2种形式,一是企业对产品碳排放水平进行自我声明,称为“自贴标签”,但是消费者对企业自贴标签的信任度普遍较低^[4]。二是碳标签由政府或认证机构对企业产品低碳水平认证,称为“认证标签”。在政府和行政部门对碳标签大力扶持下,多家企业选择认证标签进入市场,表明消费者对认证标签的信任度较高^[5-6]。基于此,本文研究以下问题:碳标签的竞争性及其消费者质疑差异性如何影响消费者的购买决策、零售商的绿色促销努力决策和制造商的碳标签选择策略?消费者对碳标签的绿色偏好、产品的低碳标准、低碳减排难度等重要因素,对供应链最优策略有何影响?考虑碳税政策约束,能否提高低碳产品属性及其供应链成员在不同标签策略下的利润敏感性?

碳标签作为标识产品碳排放量的信息工具,可以提高消费者的环保意识^[7]。英国 Carbon Trust 最先通过制定碳标签产品的最低标准来推动低碳消费^[8],提高消费者对碳标签的关注^[9]。由于信息不对称,不同碳标签将会影响消费者的决策。对此,Cho 等^[10]在信息模糊下,考虑碳标签对产品评价和消费者购买决策的影响。Murali 等^[11]在对称和非对称信息中研究消费者低碳意识对碳标签策略选择的影响。Fan 等^[12]研究在不完全知情消费者存在的情况下,考虑制造商如何制定碳标签的标准。Fischer 等^[13]在完全竞争模型中比较了非政府组织和行业之间的碳标签标准对环境效应的影响,进一步将碳标签的种类从二元标签拓宽到多层标签。Nadar 等^[15]在双寡头垄断情况下,考虑企业成本和供应链结构的双层碳标签比单层碳标签更有用。杨德艳等^[16]研究发现消费者对碳标签的质疑差异将会影响制造商的标签策略选择。赵连霞等^[17]则重点研究市场监管对双寡头竞争制造商生态标签策略的影响。曹裕等^[18]研究制造商和零售商的成本分担契约对绿色供应链决策及环境标签策略选择问题。上述研究较多侧重在信息不对称的环境责任角度下,考虑消费者感知价值对碳标签策略选择和标准制定的影响或碳标签认证机构间的竞争博弈机制研究,较少考虑消费者低碳偏好水平和碳标签质疑差异对制造商标签选择策略的影响。本文考虑消费者碳标签不同质疑程度和下游主体的绿色努力,将产品的信任属性与环境属性相结合,研究供应链成员的最优决策和制造商的碳标签策略选择。

碳税政策的实施可以促使企业向低碳转型,采用更加环保的生产技术和清洁能源,减少对环境的负面影响^[19]。低碳供应链的发展不仅依靠制造商和零售商的努力,还需要政府政策引导企业选择低碳运营策略^[20]。在碳税政策下,张金泉等^[21]从政府、企业、消费者3个层面研究制造商和零售商低碳生产和低碳营销的策略选择。王君等^[22]研究供应链成员长视与短视行为策略选择问题。徐舒婷等^[23]在碳税政策下,研究信息是否公开与产品升级减排对制造商策略选择的影响。Xu 等^[24]研究2个竞争性企业在是否实施碳税政策情形下的供应链定价决策和生产策略问题。周艳菊等^[25]研究碳税政策对供应链成员的定价策略和社会福利产生的影响。曹细玉等^[26]探讨碳税政策和碳减排技术创新投入补贴比例对最优碳排放量和最优订货量的影响。程永伟等^[27]研究不同的碳税模式对供应链定价、性能和利润等方面的影响。Zhou 等^[28]探讨了实施碳税政策对供应链成员定价和社会福利的影响。Xu 等^[29]分析了相互竞争的制造商和零售商与政府之间的三方博弈,探讨了碳税政策对供应链的影响。杨玉香等^[30]比较单一比例碳税政策和超额累进碳税政策,分析2种碳税政策下闭环供应链网络各成员企业的均衡条件。上述研究考虑的更多是碳税政策对供应链定价、利润和社会福利等影响,本文从制造商生产产品的低碳属性和标签质疑角度出发,研究碳税政策在不同的标签策略下对供应商最优策略及制造商利润的影响。

综上所述,本文建立一个制造商和零售商组成的低碳供应链,考虑消费者碳标签不同质疑程度,将碳标签产品的环境属性与信任属性相结合,将政府碳税政策与碳标签认证相结合,构建有无碳税政策下制造商自贴标签和认证标签选择策略的4个博弈模型,讨论碳税政策对制造商碳标签策略及利润的影响,进一步分析制造商碳标签选择策略对零售商利润的影响。

1 问题描述与模型假设

碳税政策下,本文构建一个由占主导地位的制造商和处于跟随地位的零售商组成的两级低碳供应链,制造商生产一种低碳产品批发给零售商,零售商再将产品销售给消费者。制造商先确定产品的低碳水平 g ,再

决定批发价格 w , 接下来, 零售商决定自身促销努力水平 t 和零售价格 p ; 最后, 制造商根据消费者质疑程度和环境偏好水平考虑自贴标签 (S) 或认证标签 (E) 的选择策略。模型符号及定义见表 1, 进一步假设如下。

表 1 符号及定义

Table 1 Symbols and definition

符号	定义	符号	定义
c	产品的单位生产成本	β	认证成本难度系数
w	产品的批发价格	λ	单位碳排放量政府收取的碳税
p	产品的市场零售价格	η	制造商生产低碳产品的碳排放总量
g	产品的低碳水平	M	标识制造商
α	制造商生产低碳产品的难度系数	R	标识零售商
t	零售商的促销努力水平	S	标识自贴标签
k	消费者的环境偏好水平	E	标识认证标签
s	消费者对碳标签的质疑程度	r	标识无碳税政策
E_0	单位产品的初始碳排放总量	τ	标识碳税政策

假设 1 制造商生产低碳产品的单位生产成本为 c , 除了单位生产成本以外还会投入一定成本进行低碳研发, 这些成本主要包括采购低碳材料、使用低碳工艺等。参考 Nadar 等^[15] 假设单位产品的低碳水平为 $g_i^j (0 < g_i^j < 1)$, 定义为每个产品相对于传统产品的排放量减少百分比, 其中 $i = S, E$ 分别表示自贴标签策略和认证标签策略, $j = r, \tau$ 分别表示标识无碳税政策和标识碳税政策。因此, 制造商实现低碳水平为 g_i^j 的碳减排成本为 $\alpha g_i^j / 2$, α 表示制造商减排的技术难度系数。

假设 2 零售商对低碳产品进行宣传会产生一定的促销努力成本。参考曹裕^[18]、Nouri^[31] 等研究, 假设零售商投入水平为 t 的促销努力来进行低碳产品宣传, 并且产生 $t^2 / 2$ 的促销努力成本。

假设 3 曹裕等^[18] 研究表明, 消费者需求与产品的价格、低碳水平和促销努力水平呈现线性相关。假设市场规模为 1, 消费者需求函数为 $D_i = 1 - p + k(1 - s)g_i^j + t$, 参考 Ghosh 等^[5] 的研究, 消费者价格敏感性系数标准化为 1, $k \in (0, 1)$ 表示消费者的环境偏好水平, $s \in (0, 1)$ 表示消费者对碳标签的质疑程度, D_i 表示不同碳标签策略 $i \in \{S, E\}$ 下消费者对低碳产品的市场需求。

假设 4 自贴标签策略下, 制造商产品的低碳水平为 g_S , 消费者对自贴标签的质疑程度 $s \in (0, 1)$, 消费者需求函数为 $D_S = 1 - p + k(1 - s)g_S + t$; 认证标签策略下, 制造商产品的低碳水平为 g_E , 消费者对认证标签的质疑程度 $s = 0$, 消费者需求函数为 $D_E = 1 - p + kg_E + t$ 。制造商选择认证标签会产生一定的认证费用, 包括认证申请费, 认证注册费等^[32], 现有研究将认证成本设置成与产品低碳水平相关的二次函数。假设制造商选择认证标签成本为 $\beta g_E^2 / 2$, 其中 β 表示认证难度系数。

假设 5 制造商生产单位产品的初始碳排放总量为 E_0 , 相对于普通产品的单位碳排放比为 1, 低碳产品的单位碳排放比为 $g (0 \leq g \leq 1)$ 。因此制造商生产每单位产品的碳排放总量为 $E_0(1 - g)$, 此时, 制造商碳排放总量为 $\eta = E_0(1 - g)D_i$ ^[24]。参考文献[23], 碳税政策下, 政府对制造商单位碳排放量收取的碳税为 $\lambda (\lambda > 0)$ 。

2 最优决策分析

本节在无碳税政策约束和存在碳税政策约束的 2 种场景下, 分别在自贴标签和认证标签下构建制造商碳标签策略选择模型, 求解并分析供应链成员在不同标签下的均衡决策, 为讨论制造商在有/无碳税政策进行碳标签选择决策提供依据。

2.1 无碳税政策下的最优决策

2.1.1 自贴标签下的均衡决策

制造企业在生产过程中无碳税约束, 在自贴标签策略下 (S 标签), 制造商按照期望利润最大化生产低碳产品 (用上角标 r 表示)。由于碳减排创新技术的投入有利于制造商减少碳排放, 为便于分析, 只考虑制造商碳减排创新技术的投入成本, 而不考虑其他因素。此时, 制造商和零售商的利润函数如下:

$$\Pi_{SM}^r = (w - c)(1 - p + k(1 - s)g_S^r + t) - \alpha g_S^r / 2, \tag{1}$$

$$\Pi_{SR}^r = (p-w)(1-p+k(1-s)g_s^r+t) - t^2/2. \quad (2)$$

在制造商自贴标签策略下,制造商先决策产品的批发价格 w 和低碳水平 g ,然后零售商确定市场的零售价格 p 和促销努力水平 t 。采用逆向归纳法,结果见定理1。

定理1 自贴标签策略下,供应链的均衡决策以及供应链企业最优利润分别为

$$w_s^{r*} = \frac{\alpha(1+c) - k^2(1-s)^2c}{2\alpha - k^2(1-s)^2}, \quad g_s^{r*} = \frac{k(1-s)(1-c)}{2\alpha - k^2(1-s)^2}, \quad p_s^{r*} = \frac{2\alpha - k^2(1-s)^2c}{2\alpha - k^2(1-s)^2}, \quad t_s^{r*} = \frac{\alpha(1-c)}{2\alpha - k^2(1-s)^2},$$

$$\Pi_{SM}^{r*} = \frac{\alpha(1-c)^2}{4\alpha - 2k^2(1-s)^2}, \quad \Pi_{SR}^{r*} = \frac{\alpha^2(1-c)^2}{2(2\alpha - k^2(1-s)^2)^2}.$$

定理1表明,在无碳税条件下,制造商实施自贴标签策略,随着低碳产品生产难度系数增大,产品的低碳水平呈下降趋势。当消费者的环境偏好水平越高时,供应链整体利润水平上升,且产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力随着单位产品生产成本的增加而降低,表明低碳产品的单位成本、生产低碳产品的难度系数以及消费者对环境的偏好对低碳供应链的决策起着至关重要的作用。因此,企业需要采取更多措施来鼓励和支持低碳产品的生产和销售。

命题1 自贴标签策略下,供应链均衡决策与消费者环境偏好水平和质疑程度的关系如下:

$$(1) \frac{\partial g_s^{r*}}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial w_s^{r*}}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial p_s^{r*}}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial t_s^{r*}}{\partial k} > 0;$$

$$(2) \frac{\partial g_s^{r*}}{\partial s} > 0, \quad \frac{\partial w_s^{r*}}{\partial s} > 0, \quad \frac{\partial p_s^{r*}}{\partial s} > 0, \quad \frac{\partial t_s^{r*}}{\partial s} > 0;$$

$$(3) \frac{\partial \Pi_{SM}^{r*}}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial \Pi_{SR}^{r*}}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial \Pi_{SM}^{r*}}{\partial s} < 0, \quad \frac{\partial \Pi_{SR}^{r*}}{\partial s} < 0.$$

命题1表明,无碳税政策下,消费者的环保意识越强,产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力水平越高;同样消费者的质疑程度越高,在一定程度上促使制造商对产品制定较高碳标准水平且零售商着重宣传的低碳产品,提高促销努力水平,进而带动产品的批发价格和零售价格。总之,无论是提高消费者对低碳产品的敏感性还是降低消费者的质疑度均能够促进制造商生产更加环保的产品,刺激零售商以更高的价格售出,以获取更大的利润。

消费者的环境偏好水平对制造商和零售商的利润具有正影响,即消费者对产品的低碳水平敏感性越强,其利润越大;而消费者对产品的质疑程度对制造商和零售商的利润均具有负影响,即消费者对碳标签的质疑程度越大,自贴标签的难度也会越大,对制造商和零售商的整体利益损害越大。因此,提高消费者的环境偏好和降低质疑程度均能够提高制造商在选择自贴标签策略时的利润。

2.1.2 认证标签下的均衡决策

制造商选择认证标签,通过政府或认证机构对其产品低碳水平进行认证。制造商和零售商的非合作博弈模型时序为:制造商以利润最大化目标先决策最优的 w 和 g ,零售商再决策其最优的 p 和 t ,制造商和零售商的利润函数分别为

$$\Pi_{EM}^r = (w-c)(1-p+kg_E^r+t) - \alpha g_E^{r2}/2 - \beta g_E^{r2}/2 \quad (3)$$

$$\Pi_{ER}^r = (p-w)(1-p+kg_E^r+t) - t^2/2 \quad (4)$$

定理2 认证标签策略下,供应链的均衡决策以及企业最优利润分别为

$$g_E^{r*} = \frac{k(1-c)}{2\alpha + 2\beta - k^2}, \quad w_E^{r*} = \frac{(1+c)(\alpha + \beta) - k^2c}{2\alpha + 2\beta - k^2}, \quad p_E^{r*} = \frac{2(\alpha + \beta) - k^2c}{2\alpha + 2\beta - k^2}, \quad t_E^{r*} = \frac{(\alpha + \beta)(1-c)}{2\alpha + 2\beta - k^2},$$

$$\Pi_{EM}^{r*} = \frac{(\alpha + \beta)(1-c)^2}{4\alpha + 4\beta - 2k^2}, \quad \Pi_{ER}^{r*} = \frac{(\alpha + \beta)^2(1-c)^2}{2(2\alpha + 2\beta - k^2)^2}.$$

认证标签策略下,消费者的环境偏好水平与产品的低碳水平、制造商的批发价格、零售商的市场零售价格和促销努力水平均呈正比。当消费者的环保意识增强时,政府会提高产品的低碳水平,而选择认证标签的制造商为了达到政府制定的低碳认证标准,会加大对于低碳产品的生产投入,生产更具有低碳环保的产品,此时制造商生产成本和批发价均有所提高,零售商为了获得市场对低碳产品做出宣传努力,刺激消费者的需求,进一步提高了零售价格。

命题 2 认证标签策略下,供应链均衡决策与认证标签的认证难度系数关系如下:

$$\frac{\partial g_E^*}{\partial \beta} < 0, \quad \frac{\partial w_E^*}{\partial \beta} < 0, \quad \frac{\partial p_E^*}{\partial \beta} < 0, \quad \frac{\partial t_E^*}{\partial \beta} < 0, \quad \frac{\partial \Pi_{EM}^*}{\partial \beta} < 0, \quad \frac{\partial \Pi_{ER}^*}{\partial \beta} < 0.$$

命题 2 表明,当制造商选择认证标签时,认证难度系数与产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力水平呈反比。当认证标签的认证难度过大时,制造商偏好于成本较低的自贴标签,制造商降低低碳产品的价格以弥补消费者对自贴标签策略的质疑性和不确定性,提高消费者对自贴标签的包容度,自贴标签占据市场主要竞争力,导致制造商和零售商的利润降低,因此合理控制碳标签的认证标准,有利于提升低碳供应链主体利润最优。

2.2 碳税政策下的最优决策

2.2.1 自贴标签下的均衡决策

碳税是指对企业生产过程中的二氧化碳排放量征税,即在碳税的外部约束下(用上角标 τ 表示),研究制造商的碳标签选择策略。在自贴标签策略下,供应链的决策顺序为制造商先决策产品的批发价格和低碳水平,零售商再决策产品的零售价格和促销努力水平,同样采用逆向求解法求解。

$$\Pi_{SM}^{\tau} = (w - c - \lambda E_0(1 - g_s^{\tau})) (1 - p + k(1 - s)g_s^{\tau} + t) - \alpha g_s^{\tau 2} / 2, \quad (5)$$

$$\Pi_{SR}^{\tau} = (p - w) (1 - p + k(1 - s)g_s^{\tau} + t) - t^2 / 2. \quad (6)$$

定理 3 碳税政策约束且自贴标签策略下,供应链的均衡决策以及企业最优利润分别为

$$w_s^{\tau*} = \frac{\alpha(1+c) - k^2(1-s)^2(\lambda E_0 + c) - \lambda E_0 k(1-s)(\lambda E_0 + c + 1) - \lambda^2 E_0^2 + \lambda E_0 \alpha}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2},$$

$$g_s^{\tau*} = \frac{(\lambda E_0 + k(1-s))(1-c - \lambda E_0)}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2}, \quad p_s^{\tau*} = \frac{2\alpha - k^2(1-s)^2(\lambda E_0 + c) - \lambda E_0 k(1-s)(\lambda E_0 + c + 1) - \lambda^2 E_0^2}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2},$$

$$t_s^{\tau*} = \frac{\alpha(1-c - \lambda E_0)}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2}, \quad \Pi_{SM}^{\tau*} = \frac{\alpha(\lambda E_0 + c - 1)^2}{4\alpha - 2k^2(1-s)^2 - 4\lambda E_0 k(1-s) - 2\lambda^2 E_0^2},$$

$$\Pi_{SR}^{\tau*} = \frac{\alpha^2(\lambda E_0 + c - 1)^2}{2(2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2\lambda E_0 k(1-s) - \lambda^2 E_0^2)^2}.$$

碳税政策下,当制造商采用自贴标签策略时,消费者环境偏好与产品的低碳水平和促销努力水平呈正相关,这种关联性导致了制造商批发价格及零售商零售价格的上升。同样地,消费者对自贴标签的质疑程度与产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力也具有积极作用。因此,提高消费者的环境偏好水平有利于提高制造商和零售商的利润,提高消费者的质疑程度却不利于制造商和零售商的利润。

命题 3 碳税政策约束且自贴标签策略下,供应链均衡决策与碳税税率的关系如下:

$$(1) \frac{\partial g_s^{\tau*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial w_s^{\tau*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial p_s^{\tau*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial t_s^{\tau*}}{\partial \lambda} > 0, \quad \frac{\partial \Pi_{SM}^{\tau*}}{\partial \lambda} < 0, \quad \frac{\partial \Pi_{SR}^{\tau*}}{\partial \lambda} < 0;$$

$$(2) \text{当 } 0 < \frac{1-c}{\lambda} < E_0 \text{ 时, } \frac{\partial \Pi_{SM}^{\tau*}}{\partial E_0} > 0, \quad \frac{\partial \Pi_{SR}^{\tau*}}{\partial E_0} > 0; \text{当 } E_0 < \frac{1-c}{\lambda} < 1 \text{ 时, } \frac{\partial \Pi_{SM}^{\tau*}}{\partial E_0} < 0, \quad \frac{\partial \Pi_{SR}^{\tau*}}{\partial E_0} < 0.$$

命题 3 表明,在自贴标签策略下,政府对制造商征收碳税时,碳税税率与产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力水平正向相关。对制造商征收碳税会增加产品单位生产成本,为使单位产品的边际利润维持在一定水平,制造商上调批发价格,零售商随之上调市场零售价格,零售商为扩大市场覆盖率,会加大产品宣传力度;然而制造商和零售商的利润随着 λ 的增加和减少,这是因为制造商提高低碳产品价格所带来的收益不足以弥补征收碳税和减排的成本,因此导致利润降低,对零售商而言, λ 越大,产品低碳属性越强,零售商的宣传推广越大,碳标签选择之间的竞争也变得更加激烈,零售商所获取利润不足以弥补市场份额的减少,利润随之下降。

自贴标签策略下,当碳排放量较低时,对制造商和零售商的利润产生积极影响。对制造商而言,碳排放量较低表明生产过程中的能耗和环境成本得到优化,减少了制造商在遵守环保法规和碳标准方面的成本以及生产过程的直接成本,进而提升盈利能力。对零售商来说,低碳排放产品因其符合消费者对环境和社会责任的关注而具有显著吸引力。低碳产品增强零售商的品牌形象和市场竞争能力,进而促进销售额和利润的增

长。同时,随着消费者的环保意识不断增强,碳排放较低的产品更受消费者青睐,有助于进一步扩大市场份额和供应链利润。

2.2.2 认证标签下的均衡决策

碳税政策下,制造商选择认证标签策略时(用上角标 τ 来表示),供应链的决策顺序为制造商作为主导者首先决策 w 和 g ,零售商作为跟随者决策 p 和 t ,制造商和零售商的利润函数分别为

$$\Pi_{EM}^{\tau} = (w - c - \lambda E_0(1 - g_E^{\tau})) (1 - p + kg_E^{\tau} + t) - \alpha g_E^{\tau 2} / 2 - \beta g_E^{\tau 2} / 2, \quad (7)$$

$$\Pi_{ER}^{\tau} = (p - w) (1 - p + kg_E^{\tau} + t) - t^2 / 2. \quad (8)$$

定理 4 碳税政策约束且认证标签策略下,供应链的均衡决策以及企业最优利润分别为

$$w_E^{\tau*} = \frac{(\alpha + \beta)(1 + c) - k^2(\lambda E_0 + c) - \lambda E_0 k(\lambda E_0 + c + 1) - \lambda^2 E_0^2 + \lambda E_0(\alpha + \beta)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2},$$

$$g_E^{\tau*} = \frac{(1 - c - \lambda E_0)(\lambda E_0 + k)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2}, \quad p_E^{\tau*} = \frac{2(\alpha + \beta) - k^2(\lambda E_0 + c) - \lambda E_0 k(\lambda E_0 + c + 1) - \lambda^2 E_0^2}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2},$$

$$t_E^{\tau*} = \frac{(\alpha + \beta)(1 - c - \lambda E_0)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2}, \quad \Pi_{EM}^{\tau*} = \frac{(\alpha + \beta)(1 - c - \lambda E_0)^2}{4(\alpha + \beta) - 2k^2 - 4\lambda E_0 k - 2\lambda^2 E_0^2},$$

$$\Pi_{ER}^{\tau*} = \frac{(\alpha + \beta)^2(1 - c - \lambda E_0)^2}{2[2(\alpha + \beta) - k^2 - 2\lambda E_0 k - \lambda^2 E_0^2]^2}.$$

定理 4 可得,与自贴标签类似地,在碳税政策下制造商选择认证标签时消费者的环境偏好水平对产品的低碳水平、批发价格、零售价格、促销努力水平均具有积极作用。随着消费者环境偏好的增强,制造商倾向于低碳产品以适应市场需求,零售商为吸引更多关注环保的消费者,会加大促销,如加强低碳宣传和参与公益活动等。总体而言,在认证标签策略下,虽存在碳税政策约束,供应链企业应关注消费者的环境偏好水平,并采取相应的措施来应对市场变化和满足消费者需求,以便于制造商在市场竞争中取得优势,实现长期可持续发展。

命题 4 碳税政策约束且认证标签策略下,供应链均衡决策与消费者环境偏好水平和碳税税率的关系如下:

- (1) $\frac{\partial g_S^{\tau*}}{\partial \lambda} > 0$, $\frac{\partial w_S^{\tau*}}{\partial \lambda} > 0$, $\frac{\partial p_S^{\tau*}}{\partial \lambda} > 0$, $\frac{\partial t_S^{\tau*}}{\partial \lambda} > 0$, $\frac{\partial \Pi_{SM}^{\tau*}}{\partial \lambda} < 0$, $\frac{\partial \Pi_{EM}^{\tau*}}{\partial \lambda} < 0$;
- (2) 当 $0 < \frac{1-c}{\lambda} < E_0$ 时, $\frac{\partial \Pi_{ER}^{\tau*}}{\partial E_0} > 0$, $\frac{\partial \Pi_{EM}^{\tau*}}{\partial E_0} > 0$; 当 $E_0 < \frac{1-c}{\lambda} < 1$ 时, $\frac{\partial \Pi_{ER}^{\tau*}}{\partial E_0} < 0$, $\frac{\partial \Pi_{EM}^{\tau*}}{\partial E_0} < 0$ 。

命题 4 表明,碳税税率对产品的低碳水平、促销努力水平、批发价格和零售价格具有积极作用,因此提高碳税税率有利于提高产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力水平;碳税税率对制造商和零售商的利润具有消极作用,降低碳税税率有利于提高制造商和零售商的利润。因为消费者环境偏好水平越强会带动政府提高产品的认证水平,制造商生产更加环保的产品以满足政府的认证标准,随着消费者环境偏好水平的增强,公众逐渐接受一个较高的碳税税率;而当消费者的环境意识普遍较低时,实施较高的碳税税率无疑会损害制造商和零售商的利润。

在碳税政策下,产品的初始碳排放量对制造商和零售商的利润具有重要影响。这一影响机制与“自贴标签”现象存在显著的相似性,当产品的初始碳排放量维持在较低水平时,能够为公众展示制造商积极承担环保责任,从而吸引具有环境偏好的消费者,把制造商树立的正面形象转化为市场份额的增加和消费者忠诚度的提高,进而促进利润的增长。反之,当产品的初始碳排放量较高时,这往往与负面的社会和环境相联系,引发消费者和公众的关注与抵制。在碳税政策日益严格的背景下,高碳排放产品还可能面临额外的税收负担,从而进一步挤压制造商和零售商的利润空间。

3 无碳税和碳税政策下的最优碳标签策略分析

针对无碳税政策和碳税政策不同背景下,对自贴标签和认证标签策略下的最优决策和最优利润进行比较分析,考虑消费者对低碳产品的质疑水平不同,以下分析制造商碳标签策略,有:

命题 5 无碳税政策下,比较制造商选择自贴标签和认证标签下的供应链均衡决策,有如下结论:

$$g_S^{r*} < g_E^{r*}, \quad w_S^{r*} < w_E^{r*}, \quad p_S^{r*} < p_E^{r*}, \quad t_S^{r*} < t_E^{r*}。$$

命题5表明,在无碳税政策下,制造商选择认证标签下产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力水平均高于自贴标签。这是因为制造商可能存在的碳标签欺诈等行为,导致消费者对制造商自贴标签的产品信任度降低,相反制造商选择认证标签更具有权威性,在认证标签策略下,制造商遵守政府或行业组织的碳标签标准进行产品的生产,标准化生产确保了产品低碳水平,显著提高消费者的购买意愿,进一步刺激市场需求。伴随着批发价格和零售价格的上涨,零售商为了获取更大的市场份额,零售商加大了对低碳产品的宣传力度。

命题6 碳税政策约束下,比较制造商自贴标签和认证标签策略下的供应链均衡决策,有如下结论:

- (1) $g_S^{r*} < g_E^{r*}, p_S^{r*} < p_E^{r*}, t_S^{r*} < t_E^{r*}$;
- (2) 当 $0 < s < \min\{w_3, 1\}$ 时,有 $w_S^{r*} > w_E^{r*}$; 当 $\max\{w_3, 0\} < s < 1$ 时,有 $w_S^{r*} < w_E^{r*}$ 。

其中, $w_3 = \frac{\sqrt{\lambda^6 E_0^6 + 4\lambda^5 E_0^5 k + X - 4\lambda^3 E_0^3 k(\alpha + 2\beta - k^2) + Y - 4\lambda E_0 \alpha k^3 + 4k^2 \alpha(\alpha + \beta) + \lambda^3 E_0^3 - Z + \lambda^3 E_0^3}}{2k(\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2 - \lambda E_0 k)}$,

$$X = 6 \left(k^2 - \frac{2\beta}{3} \right) \lambda^4 E_0^4, \quad Y = [k^4 - (8\alpha + 4\beta)k^2 + 4\beta(\alpha + \beta)] \lambda^2 E_0^2, \quad Z = k(2\alpha + 2\beta - 2\lambda^2 E_0^2)。$$

命题6表明,在碳税政策下,消费者的环境偏好越强,在认证标签策略下更能激励制造商提高产品的低碳水平。当制造商产品的单位生产成本提高,批发价格也会提高,零售商通过提高销售价格回应消费者低碳水平的提高,碳税越高也会刺激供应链相关企业做出减排努力和促销努力。最后,当消费者的质疑程度较低时,制造商选择自贴标签要比选择认证标签的批发价格高,而消费者的质疑程度较高时,制造商选择认证标签的批发价格较高。

命题7 比较有碳税政策下制造商选择自贴标签和认证标签时的供应链企业利润,可得到如下结论:

- (1) 在无碳税政策下,当 $0 < s < 1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}}$ 时,有 $\Pi_{SM}^{r*} > \Pi_{EM}^{r*}$, 此时制造商选择自贴标签策略; 且有 $\Pi_{SR}^{r*} > \Pi_{ER}^{r*}$, 即自贴标签策略有利于零售商利润的提高;

当 $1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}} < s < 1$ 时,有 $\Pi_{SM}^{r*} < \Pi_{EM}^{r*}$, 此时制造商选择认证标签策略; 且有 $\Pi_{SR}^{r*} < \Pi_{ER}^{r*}$, 即认证标签策略有利于零售商利润的提高。

- (2) 在碳税政策下,当 $0 < s < \frac{\lambda E_0 + k}{k} \left(1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}} \right)$ 时,有 $\Pi_{SM}^{r*} > \Pi_{EM}^{r*}$, 此时制造商选择自贴标签策略; 且有 $\Pi_{SR}^{r*} > \Pi_{ER}^{r*}$, 此时自贴标签策略有利于零售商利润的提高;

当 $\frac{\lambda E_0 + k}{k} \left(1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}} \right) < s < 1$ 时,有 $\Pi_{SM}^{r*} < \Pi_{EM}^{r*}$, 此时制造商选择认证标签策略; 且有 $\Pi_{SR}^{r*} < \Pi_{ER}^{r*}$, 此时认证标签策略有利于零售商利润的提高。

- (2) 在碳税政策下,当 $0 < s < \frac{\lambda E_0 + k}{k} \left(1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}} \right)$ 时,有 $\Pi_{SM}^{r*} > \Pi_{EM}^{r*}$, 此时制造商选择自贴标签策略; 且有 $\Pi_{SR}^{r*} > \Pi_{ER}^{r*}$, 此时自贴标签策略有利于零售商利润的提高;

当 $\frac{\lambda E_0 + k}{k} \left(1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}} \right) < s < 1$ 时,有 $\Pi_{SM}^{r*} < \Pi_{EM}^{r*}$, 此时制造商选择认证标签策略; 且有 $\Pi_{SR}^{r*} < \Pi_{ER}^{r*}$, 此时认证标签策略有利于零售商利润的提高。

根据命题7可得,在无碳税政策下,当消费者对碳标签质疑度较低时,制造商选择自贴标签可以获得更高的利润,此时制造商采用自贴标签,当消费者对碳标签质疑度较高时,制造商则选择认证标签以获得更高的利润。如图1所示,这是因为消费者更青睐质疑程度较低的自贴标签产品,消费者无需承担选择认证标签下的认证费用,成本降低直接影响制造商的碳标签选择。零售商跟随制造商做出碳标签选择,即在消费者质疑程度较低时,自贴标签策略有利于零售商利润的提高,当消费者对认证标签的质疑程度相对较高时,零售商则偏向于认证标签;在碳税政策下,当消费者的质疑程度较低时,制造商选择成本较低的自贴标签就能达到市场信任,零售商跟随制造商的决策也选择自贴标签;当质疑程度较高时制造商和零售商则选择认证标签。对比无碳税政策下,制造商选择自贴标签的阈值明显增大,这是因为对制造商征收碳税促使其加大减排力度,生产更具有低碳属性的产品,此时消费者对市场产品信任度增强,制造商完全可以选择成本较低的自贴标签以增加利润。当质疑程度较高时制造商和零售商都会选择认证标签,这是因为当消费者的整体质疑程度较高,说明消费者对低碳产品存在高度不信任,此时,供应链成员选择信任度较高的认证标签会使其获得更高的利润。

根据命题7可得,在无碳税政策下,当消费者对碳标签质疑度较低时,制造商选择自贴标签可以获得更高的利润,此时制造商采用自贴标签,当消费者对碳标签质疑度较高时,制造商则选择认证标签以获得更高的利润。如图1所示,这是因为消费者更青睐质疑程度较低的自贴标签产品,消费者无需承担选择认证标签下的认证费用,成本降低直接影响制造商的碳标签选择。零售商跟随制造商做出碳标签选择,即在消费者质疑程度较低时,自贴标签策略有利于零售商利润的提高,当消费者对认证标签的质疑程度相对较高时,零售商则偏向于认证标签;在碳税政策下,当消费者的质疑程度较低时,制造商选择成本较低的自贴标签就能达到市场信任,零售商跟随制造商的决策也选择自贴标签;当质疑程度较高时制造商和零售商则选择认证标签。对比无碳税政策下,制造商选择自贴标签的阈值明显增大,这是因为对制造商征收碳税促使其加大减排力度,生产更具有低碳属性的产品,此时消费者对市场产品信任度增强,制造商完全可以选择成本较低的自贴标签以增加利润。当质疑程度较高时制造商和零售商都会选择认证标签,这是因为当消费者的整体质疑程度较高,说明消费者对低碳产品存在高度不信任,此时,供应链成员选择信任度较高的认证标签会使其获得更高的利润。

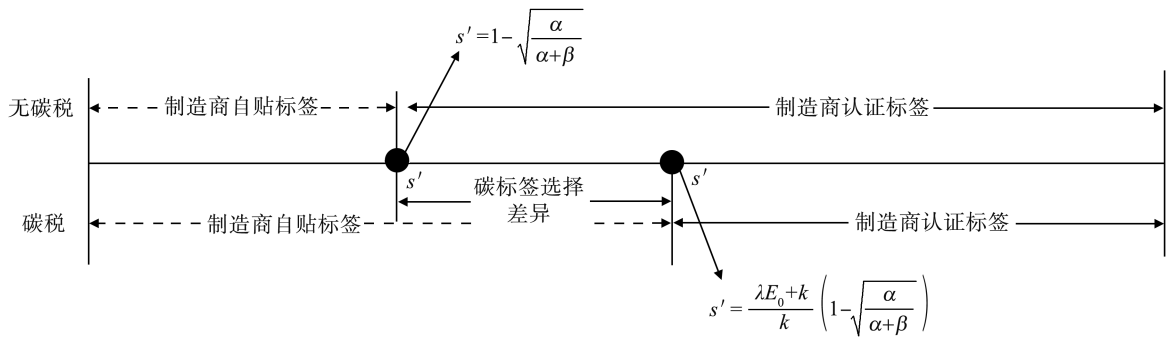


图1 制造商在有/无碳税政策下的碳标签策略选择

Fig.1 Manufacturers' choice of carbon label strategies with or without carbon tax policies

4 算例分析

上述理论部分主要是分析比较有无碳税政策制造商在自贴标签和认证标签下的均衡决策、最优利润以及消费者不同质疑程度对均衡决策和制造商与零售商最优利润的影响进行了初步的研究。为了获得更多的管理启示,更好地说明问题和确保数据的真实性,本小节采用数值分析的形式进行下一步的探讨。

4.1 消费者质疑程度对制造商最优利润及标签选择的影响

为了进一步检验模型结论的合理性,本节采用数值算例分析方法,比较制造商自贴和认证2种碳标签策略下,消费者质疑程度对制造商最优利润的影响,在本文第二节假设的基础上,参考文献[14]、[16]和[23],根据研究假设、前提条件并反复试算,模型参数赋值如下: $c=0.3, \alpha=0.2, \beta=0.1, k=0.5, \lambda=0.2, E_0=0.4$, s 的取值范围 $0 < s < 1$ 。

图2、3表示制造商的最优利润随着消费者质疑程度的变化趋势。无碳税政策约束下,制造商选择自贴标签的最优利润随着消费者的质疑程度的增大而不断减小,认证标签下制造商的利润基本保持不变。当 $s < 0.185$ 时,此时消费者的质疑程度较低,制造商采用自贴标签;当 $s = 0.185$ 时,制造商和零售商选择自贴标签和选择认证标签的利润相等;当 $s > 0.185$ 时,消费者的质疑程度越来越高,制造商采用认证标签更有利。同比分析,碳税政策下,制造商选择自贴标签的最优利润随着消费者质疑程度的增大而减小,然后整体利润却明显增大。当 $s < 0.23$ 时,制造商采用自贴标签;当 $s > 0.23$ 时制造商选择认证标签。因此,对比有无碳税政策可得,制造商在碳税政策下选择自贴标签的阈值扩大且利润明显提高。这是因为实施碳税政策更加严格规范制造商的碳减排,虽然增加制造商的碳排成本,但制造商会更加偏好自贴标签弥补碳税带来的成本损失,而零售商“搭便车”无需付出更多的努力促销低碳产品,跟随制造商做出碳标签选择策略,可见,当消费者碳标签质疑在一定阈值内时,碳税政策可以有效弥补自贴标签与认证标签之间的差异。

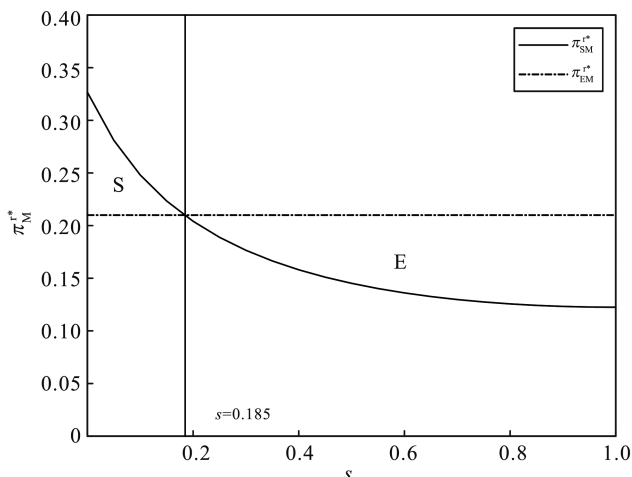


图2 无碳税政策下制造商最优利润与质疑度的关系

Fig.2 Relationship between optimal profits and skepticism of carbon free tax policy manufacturers

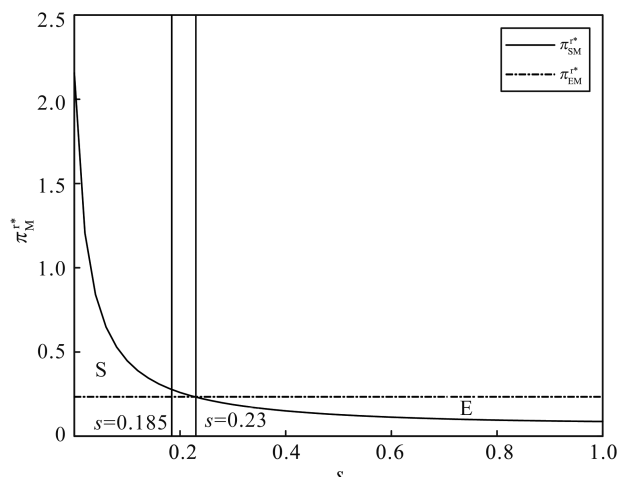


图3 碳税政策制造商最优利润与质疑度的关系

Fig.3 Relationship between optimal profit and skepticism of carbon tax policy manufacturers

4.2 碳税税率和消费者环境偏好水平对供应链利润及制造商标签选择影响

为了进一步检验模型结论的合理性,本节采用数值算例分析方法,比较制造商自贴和认证标签碳标签策略下,碳税税率和消费者环境偏好水平对供应链利润及制造商标签选择影响。根据研究假设、前提条件并反复试算,模型参数赋值如下: $c=0.3, \beta=0.1, s=0.5, E_0=0.4, 0 < k < 0.4$ 。

图4展示了当碳税税率较低时,制造商在自贴标签和认证标签策略下的利润随消费者环境水平的变化趋势图像。可以观察到无论有无碳税政策,随着消费者环境偏好增强,制造商的最优利润呈现逐渐增加的趋势,且制造商在认证标签下的利润高于自贴标签;研究结果显示,在碳税税率较低且消费者对碳标签的质疑度恒定下,提高消费者的环境偏好水平能够显著提升制造商的最优利润。图5展示碳税税率较高时,制造商在自贴标签和认证标签策略下的利润随消费者环境偏好水平的变化趋势图像。从图中可以看出制造商的利润随消费者环境偏好水平的提高而增加,然而在高碳税率下制造商最优利润的增长速度明显下降,高碳税率导致制造商碳排放成本增大,制造商在面临高额碳税的压力下,本应提升产品的低碳性能以弥补碳税负担。然而,在碳税和消费者质疑的双重压力下,质疑度较低的认证标签策略成为制造商的最优策略。对比分析可得,当税率较低时,尤其是消费者对环境处于中性偏好时,低碳产品生产难度较低,碳税前后利润相差较小;在高税率高生产难度下,碳税前后利润相差较大。可见,碳税以及碳标签披露难度对制造商碳标签选择具有重要影响,同时也会导致低碳供应链利润的变动。

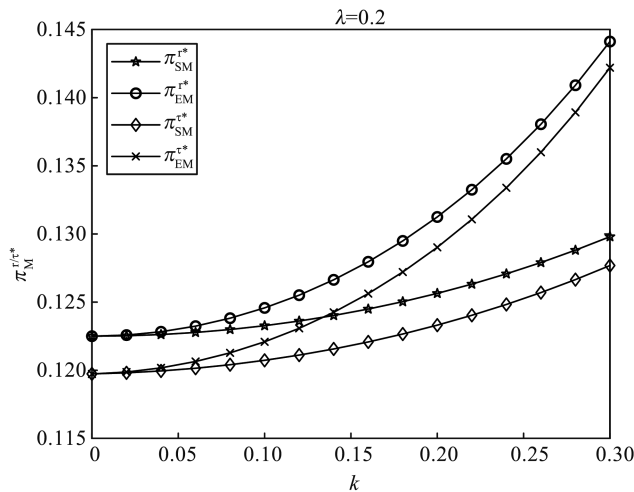


图4 无碳税政策供应链最优利润随环境偏好的变化趋势
Fig.4 Trend of optimal profit in the SC under the carbon free tax policy changing with environmental preference

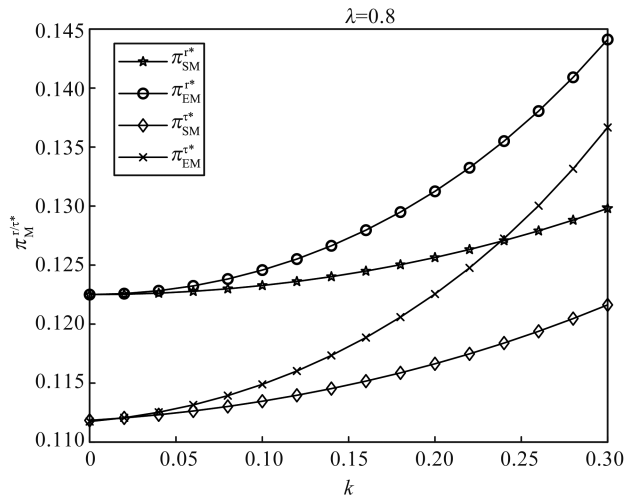


图5 碳税政策供应链最优利润随环境偏好的变化趋势
Fig.5 Trend of optimal profit in the SC of carbon tax policy changing with environmental preference

5 结语

本文考虑消费者对自贴碳标签和认证碳标签的不同质疑程度,探讨在不同碳标签策略下消费者的环境偏好和质疑程度对产品的低碳水平、批发价格、零售价格和促销努力水平的影响,进一步研究碳税政策如何影响制造商的碳标签选择策略以及对供应链企业利润的影响。研究表明:

(1) 消费者的环境偏好水平和碳标签的质疑程度对产品的低碳水平、批发价格、零售价格、促销努力水平呈正相关,消费者碳标签质疑度对制造商的利润呈负相关。这是因为消费者的环保意识的增强激励制造商做出低碳努力,虽然会增大产品成本,但是消费者倾向于选择更加值得信任的低碳产品,能够弥补一部分的低碳成本和认证成本,制造商的整体利润随着消费者环境偏好水平的提高而增大;对于零售商而言,消费者的需求增加导致零售价格提高,供应链整体的利润也在提高。

(2) 消费者的质疑程度较低时制造商选择自贴标签;而消费者对碳标签的质疑程度较高时,为了提高产品的可信度和市场竞争力,制造商则采用认证标签,零售商无需付出额外成本跟随制造商做出碳标签选择;在实施碳税政策后,制造商为了提高产品的低碳水平做出减排努力,以生产符合低碳标准的产品弥补碳税带来的成本损失,制造商选择成本较低自贴标签的阈值明显增大以获取利润的最大化。

(3)在碳税税率较低和减排成本系数较小时,随着消费者环境偏好水平的增强,在碳税政策下制造商选择认证标签策略的利润高于自贴标签,认证标签是制造商的最优选择。这是提高对制造商的碳税税率导致其碳排放成本上升,制造商本应生产低碳生产水平更高的产品以减少缴纳高额的碳税,现实却是碳排放量持续上升,制造商又面临消费者的质疑,此时认证标签有利于供应链企业利润的提高。

根据本文研究结论,提出3点管理学启示:

(1)在碳标签制度实施过程中,政府应发挥主导作用,采取措施来推动环境保护意识并加强碳标签制度的影响力。首先,政府应加大对环保意识的宣传力度,通过各种渠道提高公众认知。其次,政府应加快培养具有专业资质的第三方认证机构,确保碳标签的准确性和可靠性。此外,政府还可以通过多种渠道开展碳标签宣传教育,让更多的企业和消费者了解碳标签的意义和作用。为了激励企业积极参与碳标签认证,政府可以给予贴标企业政策支持,如提供贷款优惠、减税降费等,降低企业的经济负担,同时提高企业的利润留成,激发企业低碳转型的积极性,鼓励企业设置低碳消费专区推广应用碳标签,让消费者掌握更多低碳消费信息,引导消费者认可碳标签后更直观地选择更绿色、更具有可持续消费理念的低碳产品,打造更加值得信赖的低碳消费市场。

(2)对于制造商而言,碳标签显示了企业降低碳排放的决心和行动,树立起了企业负责任的良好形象,成为低碳社会道德规范的组成部分。制造商应主动提高产品的低碳水平做出减排努力,生产更符合认证标准的产品来减少成本提高供应链利润,根据市场环境选择合适的碳标签策略实现自身利润最大化。而零售商应该主动承担市场宣传努力的成本,对低碳产品做出最大化的宣传努力,与制造商协调实现供应链利润最大化。

(3)为了解决消费者对碳标签的质疑差异和环境偏好问题,并提高标签认可度和低碳意识,首先,制造商应确保碳标签信息的透明度和准确性,以便消费者能够清楚地了解产品的碳排放;其次,制造商可以在产品包装、广告和营销活动中强调低碳理念,建立低碳品牌形象;最后,制造商可以与其他国家和地区的低碳产业进行交流与合作,共同推动低碳技术的发展和消费者创新对碳标签的认可。

本文考虑一个制造商和一个零售商组成的供应链,仅仅考虑了在一个渠道中消费者的环境偏好水平和质疑程度对制造商碳标签选择策略的影响,未来应研究多渠道或者多产品竞争的低碳供应链碳标签选择问题。

参考文献:

- [1] XU S, FANG L, GOVINDAN K. Energy performance contracting in a supply chain with financially asymmetric manufacturers under carbon tax regulation for climate change mitigation[J]. *Omega*, 2022, 106:102535.
- [2] ZHOU X Y, WEI X Y, LIN J, et al. Supply chain management under carbon taxes: a review and bibliometric analysis[J]. *Omega*, 2021, 98:102295.
- [3] 刘雯雯,胡振华. 市场自治与低碳认证情形下企业低碳生产行为研究[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(4):232-239.
LIU Wenwen, HU Zhenhua. Enterprises' low carbon production behavior in the case of market autonomy and low carbon certification[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(4):232-239.
- [4] LI Q W, LONG R Y, CHEN H. Empirical study of the willingness of consumers to purchase low-carbon products by considering carbon labels: a case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161:1237-1250.
- [5] GHOSH D, SHAH J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164:319-329.
- [6] MEIS-HARRIS J, KLEMM C, KAUFMAN S, et al. What is the role of eco-labels for a circular economy? a rapid review of the literature[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 306:127134.
- [7] 程发新,袁猛,孙立成,等. 复合碳减排政策下闭环供应链网络均衡决策[J]. *系统工程学报*, 2019, 34(4):483-496.
CHENG Faxin, YUAN Meng, SUN Licheng, et al. Equilibrium decision research of closed-loop supply chain network with compound carbon emission reduction policy[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2019, 34(4):483-496.
- [8] 刘琦. “双碳”目标下碳税开征的理论基础与制度构建[J]. *华中科技大学学报(社会科学版)*, 2022, 36(2):108-116.
LIU Qi. Theoretical basis and institutional design of carbon tax under the “double carbon” target[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition)*, 2022, 36(2):108-116.
- [9] EMBERGER-KLEIN A, MENRAD K. The effect of information provision on supermarket consumers' use of and preferences for carbon labels in Germany[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172:253-263.
- [10] CHO Y N, TAYLOR C R. The role of ambiguity and skepticism in the effectiveness of sustainability labeling[J]. *Journal of*

- Business Research, 2020, 120:379-388.
- [11] MURALI K, LIM M K, PETRUZZI N C. The effects of ecolabels and environmental regulation on green product development[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2019, 21(3):519-535.
- [12] FAN T J, SONG Y, CAO H, et al. Optimal eco-labeling strategy with imperfectly informed consumers[J]. Industrial Management & Data Systems, 2019, 119(6):1166-1188.
- [13] FISCHER C, LYON T P. Competing environmental labels[J]. Journal of Economics & Management Strategy, 2014, 23(3):692-716.
- [14] SINAYI M, RASTI-BARZOKI M. A game theoretic approach for pricing, greening, and social welfare policies in a supply chain with government intervention[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196:1443-1458.
- [15] NADAR E, ERTÜRK M S. Eco-design of eco-labels with coarse grades[J]. Omega, 2021, 99:102-209.
- [16] 杨德艳,余云龙,冯章伟. 消费者质疑行为下环境责任型制造商生态标签选择策略[J]. 中国管理科学,2023,31(9):73-82.
YANG Deyan, YU Yunlong, FENG Zhangwei. Ecolabel selection strategy of environmentally responsible manufacturer with consumer skepticism behavior[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(9):73-82.
- [17] 赵连霞,王芳晴,张小峰,等. 市场监管环境下考虑生态标签欺诈的双寡头竞争策略[J]. 管理学报,2020,17(12):1865-1872.
ZHAO Lianxia, WANG Fangqing, ZHANG Xiaofeng, et al. Doupoly competition strategies considering eco-label fraud under market supervision environment[J]. Chinese Journal of Management, 2020, 17(12):1865-1872.
- [18] 曹裕,胡韩莉,李青松. 成本分担契约下绿色供应链的环境标签策略选择研究[J]. 中国管理科学,2022,30(10):119-129.
CAO Yu, HU Hanli, LI Qingsong. Environmental labeling strategy selection of green supply chain under cost sharing contract [J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(10):119-129.
- [19] 夏西强,徐春秋. 政府碳税与补贴政策对低碳供应链影响的对比研究[J]. 运筹与管理,2020,29(11):112-120.
XIA Xiqiang, XU Chunqiu. A comparative study of the impact of government carbon tax and subsidy policy on low-carbon supply chain[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(11):112-120.
- [20] 张会臣,韩小雅. 碳税政策下考虑消费者环保意识的再制造系统优化策略[J]. 运筹与管理,2024,33(4):63-69.
ZHANG Huichen, HAN Xiaoya. Optimization strategies of remanufacturing system considering consumers' environmental awareness under carbon tax policy[J]. Operations Research and Management Science, 2024, 33(4):63-69.
- [21] 张金泉,温素彬,李慧,等. 低碳经济下供应链运营决策的演化博弈分析——基于政府-企业-消费者的协同作用视角[J]. 运筹与管理,2024,33(5):77-83.
ZHANG Jinquan, WEN Subin, LI Hui, et al. Evolutionary Game analysis of supply chain operations decision under the background of low-carbon economy—based on the perspective of government-enterprise-consumer synergy [J]. Operations Research and Management Science, 2024, 33(5):77-83.
- [22] 王君,程先学,蒋雨珊,等. 碳税政策下考虑参考碳排放的供应链成员行为选择研究[J]. 中国管理科学,2021,29(7):128-138.
WANG Jun, CHENG Xianxue, JIANG Yushan, et al. Behavior selection of supply chain members considering reference carbon emission under carbon tax policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(7):128-138.
- [23] 许舒婷,繆朝炜,檀哲,等. 碳税制度下企业产品升级及信息披露策略研究[J]. 管理工程学报,2020,34(2):224-230.
XU Shuting, MIAO Chaowei, TAN Zhe, et al. Product upgrading and information disclosure decisions in the context of carbon tax[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(2):224-230.
- [24] CHEN X, HAO G. Sustainable pricing and production policies for two competing firms with carbon emissions tax [J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(21):6408-6420.
- [25] 周艳菊,胡凤英,周正龙. 碳税政策下制造商竞争的供应链定价策略和社会福利研究[J]. 中国管理科学,2019,27(7):94-105.
ZHOU Yanju, HU Fengying, ZHOU Zhenglong. Pricing strategy and social welfare in supply chain with competing manufacturers based on carbon tax policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(7):94-105.
- [26] 曹细玉,张杰芳. 碳减排补贴与碳税下的供应链碳减排决策优化与协调[J]. 运筹与管理,2018,27(4):57-61.
CAO Xiyu, ZHANG Jiefang. Carbon reduction optimization and coordination of supply chain under carbon reduction subsidy and carbon tax[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(4):57-61.
- [27] 程永伟,穆东. 供应链的碳税模式及最优税率[J]. 系统管理学报,2016,25(4):752-758.
CHENG Yongwei, MU Dong. Carbon tax modes and the optimal tax in the supply chains [J]. Journal of Systems & Management, 2016, 25(4):752-758.

- [28] ZHOU Y J, HU F Y, ZHOU Z L. Pricing decisions and social welfare in a supply chain with multiple competing retailers and carbon tax policy[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 190:752-777.
- [29] XU C Y, WANG C X, HUANG R B. Impacts of horizontal integration on social welfare under the interaction of carbon tax and green subsidies[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 222:107506.
- [30] 杨玉香,管倩,张宝友,等. 碳税政策下闭环供应链网络均衡分析[J]. 中国管理科学,2022,30(1):185-195.
YANG Yuxiang, GUAN Qian, ZHANG Baoyou, et al. Closed-loop supply chain network equilibrium analysis under carbon tax policies[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(1):185-195.
- [31] NOURI M, HOSSEINI-MOTLAGH S M, NEMATOLLAHI M, et al. Coordinating manufacturer's innovation and retailer's promotion and replenishment using a compensation-based wholesale price contract[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 198:11-24.
- [32] BRACH S, WALSH G, SHAW D. Sustainable consumption and third-party certification labels: consumers' perceptions and reactions[J]. European Management Journal, 2018, 36(2):254-265.

(编辑:祁业卿)

附录:

定理 1 的证明

根据逆向归纳法,对式(2)中的 p 和 t 求一阶偏导数分别为

$$\frac{\partial}{\partial p} \Pi_{SR}^r(p, t) = 1 - 2p + k(1-s)g_s^r + t + w, \quad (\text{A-1})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \Pi_{SR}^r(p, t) = p - w - t. \quad (\text{A-2})$$

根据式(A-1)、(A-2)关于 p 和 t 的 Hessian 矩阵为 $\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = 1 > 0$, 为负定的。即 $\Pi_{SR}^r(p, t)$ 关于 p 和 t 是凹的。 p 和 t 存在最优解,令式(A-1)、(A-2)为 0 可得

$$p_s^r(w, g_s^r) = \frac{1 + k(1-s)g_s^r + t + w}{2}, \quad (\text{A-3})$$

$$t_s^r(w, g_s^r) = p - w. \quad (\text{A-4})$$

将式(A-3)代入到式(A-2)中,令其为 0,可得

$$t_s^r(w, g_s^r) = 1 + k(1-s)g_s^r - w. \quad (\text{A-5})$$

将式(A-5)代入到式(A-1)中,令其为 0,可得

$$p_s^r(w, g_s^r) = 1 + k(1-s)g_s^r. \quad (\text{A-6})$$

将(A-6)和(A-5)代入到式(1)中,对 w 求一阶偏导和二阶偏导,可得

$$\frac{\partial}{\partial w} \Pi_{SM}^r = (w - c)(1 + k(1-s)g_s^r - w) - \frac{\alpha}{2}g_s^{r2}, \quad (\text{A-7})$$

$$\frac{\partial^2}{\partial w^2} \Pi_{SM}^r = -2. \quad (\text{A-8})$$

因此,根据对 w 的二阶偏导结果小于 0 可得, g 存在最优均衡解。令 w 的一阶偏导为 0,可得

$$w_s^r(g) = \frac{1 + k(1-s)g + c}{2}, \quad (\text{A-9})$$

$$p_s^r(g) = 1 + k(1-s)g, \quad (\text{A-10})$$

$$t_s^r(g) = \frac{1 + k(1-s)g - c}{2}. \quad (\text{A-11})$$

将 $w_s^r(g)$ 、 $p_s^r(g)$ 和 $t_s^r(g)$ 代入到式(1)中,得到 $\Pi_{SM}^r(g)$ 。 $\Pi_{SM}^r(g)$ 关于 g 的一阶和二阶偏导数为

$$\frac{\partial}{\partial g_s^r} \Pi_{SM}^r(g) = \frac{(k^2(1-s)^2 - 2\alpha)g}{2} + \frac{k(1-s)(1-c)}{2}, \quad (\text{A-12})$$

$$\frac{\partial}{\partial g_s^r} \Pi_{SM}^r(g) = \frac{k^2(1-s)^2 - 2\alpha}{2} < 0.$$

因此,令 $\Pi_{SM}^r(g)$ 关于 g 的一阶偏导为 0, 可得

$$g_s^{r*} = \frac{k(1-s)(1-c)}{2\alpha - k^2(1-s)^2} \tag{A-13}$$

将 g_s^{r*} 分别代入到 $w_s^r(g)$ 、 $p_s^r(g)$ 和 $t_s^r(g)$ 可得

$$w_s^{r*} = \frac{\alpha(1+c) - k^2(1-s)^2c}{2\alpha - k^2(1-s)^2}, \quad p_s^{r*} = \frac{2\alpha - k^2(1-s)^2c}{2\alpha - k^2(1-s)^2}, \quad t_s^{r*} = \frac{\alpha(1-c)}{2\alpha - k^2(1-s)^2}$$

将 g_s^{r*} 、 w_s^{r*} 、 p_s^{r*} 、 t_s^{r*} 分别带入到 (A-1) 和 (A-2) 中, 求得制造商和零售商的最优利润:

$$\Pi_{SM}^{r*} = \frac{\alpha(1-c)^2}{4\alpha - 2k^2(1-s)^2}, \quad \Pi_{SR}^{r*} = \frac{\alpha^2(1-c)^2}{2(2\alpha - k^2(1-s)^2)^2}$$

命题 4 的证明

制造商和零售商分别在自贴标签和认证标签下的最优利润函数分别为

$$\Pi_{SM}^{r*} = \frac{\alpha(1-c)^2}{4\alpha - 2k^2(1-s)^2}, \quad \Pi_{EM}^{r*} = \frac{(\alpha+\beta)(1-c)^2}{4\alpha + 4\beta - 2k^2}$$

在条件 $0 < k < 1$, $0 < c < p < 1$, $0 < k^2(1-s)^2 < 1$, $\alpha + \beta > \frac{k^2}{2}$ 下,

$$\frac{\Pi_{SM}^{r*}}{\Pi_{EM}^{r*}} = \frac{\alpha(4\alpha + 4\beta - 2k^2)}{(4\alpha - 2k^2(1-s)^2)(\alpha + \beta)}$$

当 $0 < s < 1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}}$, $\Pi_{SM}^{r*} > \Pi_{EM}^{r*}$; $1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}} < s < 1$, $\Pi_{SM}^{r*} < \Pi_{EM}^{r*}$ 。由于

$$\Pi_{SR}^{r*} = \frac{\alpha^2(1-c)^2}{2(2\alpha - k^2(1-s)^2)^2}, \quad \Pi_{ER}^{r*} = \frac{(\alpha + \beta)^2(1-c)^2}{2(2\alpha + 2\beta - k^2)^2}$$

所以, $\frac{\Pi_{SR}^{r*}}{\Pi_{ER}^{r*}} = \frac{(2(\alpha + \beta) - k^2)^2 \alpha^2}{(\alpha + \beta)^2 (2\alpha - F)^2}$, 其中 $0 < F = k^2(1-s)^2 < 1$, $\sqrt{\frac{\Pi_{SR}^{r*}}{\Pi_{ER}^{r*}}} = \frac{(2(\alpha + \beta) - k^2) \alpha}{(\alpha + \beta)(2\alpha - F)}$ 。

当 $0 < s < 1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}}$ 时, 有 $\Pi_{SR}^{r*} > \Pi_{ER}^{r*}$; 当 $1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha + \beta}} < s < 1$ 时, 有 $\Pi_{SR}^{r*} < \Pi_{ER}^{r*}$ 。证毕。

命题 7 的证明

以比较消费者的环境偏好水平为例, 在下述条件下,

$$0 < k < 1, \quad 0 < c < p < 1, \quad 0 < k^2(1-s)^2 < 1, \quad \alpha + \beta > \frac{\lambda^2 E_0^2 + 2\lambda E_0 k + k^2}{2},$$

$$g_s^{\tau*} = \frac{(\lambda E_0 + k(1-s))(1-c - \lambda E_0)}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2}, \quad g_E^{\tau*} = \frac{(1-c - \lambda E_0)(\lambda E_0 + k)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2}$$

有 $g_s^{\tau*} - g_E^{\tau*} = -(1-c - \lambda E_0) \left(\frac{(\lambda E_0 + k)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2} + \frac{(\lambda E_0 + k(1-s))}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2} \right) < 0$ 成立。

令 $f_1 = \frac{\lambda E_0 + k}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2}$, 求得 f_1 关于 k 的一阶导数 $\frac{\partial f_1}{\partial k} = \frac{2(\alpha + \beta) + k^2 + 2k\lambda E_0 + \lambda^2 E_0^2}{(2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2)^2} > 0$, 表明 f_1 随着 k

的增大而增大, 因此 $f_{1\min} = f_1(k=0) = \frac{\lambda E_0}{2(\alpha + \beta) - \lambda^2 E_0^2}$, 有 $g_s^{\tau*} - g_E^{\tau*} = -(1-c - \lambda E_0) \left(\frac{(\lambda E_0 + k)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2} \right) \leq$

$\frac{\lambda E_0}{2(\alpha + \beta) - \lambda^2 E_0^2} < 0$ 成立。因此 $g_s^{\tau*} < g_E^{\tau*}$ 。

由于 $p_s^{\tau*} = (2\alpha - k^2(1-s)^2(\lambda E_0 + c) - \lambda E_0 k(1-s)(\lambda E_0 + c + 1) - \lambda^2 E_0^2) / (2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2)$,

$$p_E^{\tau*} = \frac{2(\alpha + \beta) - k^2(\lambda E_0 + c) - \lambda E_0 k(\lambda E_0 + c + 1) - \lambda^2 E_0^2}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2}$$

有 $p_s^{\tau*} - p_E^{\tau*} = -(1-c - \lambda E_0) \left(\frac{k(\lambda E_0 + k)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2} + \frac{(\lambda E_0 k(1-s) + k^2(1-s)^2)}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2} \right) < 0$ 成立。

$$\text{令 } f_2 = \frac{k(\lambda E_0 + k)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2}, \text{ 求得 } f_2 \text{ 关于 } k \text{ 的一阶导数 } \frac{\partial f_2}{\partial k} = \frac{4k(\alpha + \beta) + \lambda E_0(2\alpha + 2\beta - k^2) - 2k\lambda^2 E_0^2 - \lambda^3 E_0^3}{(2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2)^2} > 0,$$

表明 f_2 随着 k 的增大而增大, 因此 $f_{2\min} = f_2(k=0) = 0$, 有 $p_s^* - p_E^* = -(1-c-\lambda E_0) \frac{k(\lambda E_0 + k)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2} < 0$ 成立。因此 $p_s^* < p_E^*$ 。

由于 $t_s^* = \frac{\alpha(1-c-\lambda E_0)}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2}$, $t_E^* = \frac{(\alpha + \beta)(1-c-\lambda E_0)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2}$, 有 $t_s^* - t_E^* = -(1-c-\lambda E_0) \left(\frac{\alpha + \beta}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2} + \frac{\alpha}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2} \right) < 0$ 成立。

$$\text{令 } f_3 = \frac{\alpha + \beta}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2}, \text{ 求得 } f_3 \text{ 关于 } k \text{ 的一阶导数 } \frac{\partial f_3}{\partial k} = \frac{2(\alpha + \beta)(\lambda E_0 + k)}{(2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2)^2} > 0, \text{ 表明 } f_3 \text{ 随着 } k$$

的增大而增大, 因此 $f_{3\min} = f_3(k=0) = \frac{\alpha + \beta}{2(\alpha + \beta) - \lambda^2 E_0^2}$, 有 $t_s^* - t_E^* = -(1-c-\lambda E_0) \frac{\alpha + \beta}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2} < \frac{\alpha + \beta}{2(\alpha + \beta) - \lambda^2 E_0^2} < 0$ 成立。因此 $t_s^* < t_E^*$ 。

$$w_s^* = \frac{\alpha(1+c) - k^2(1-s)^2(\lambda E_0 + c) - \lambda E_0 k(1-s)(\lambda E_0 + c + 1) - \lambda^2 E_0^2 + \lambda E_0 \alpha}{2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2},$$

$$w_E^* = \frac{(\alpha + \beta)(1+c) - k^2(\lambda E_0 + c) - \lambda E_0 k(\lambda E_0 + c + 1) - \lambda^2 E_0^2 + \lambda E_0(\alpha + \beta)}{2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2},$$

$$w_s^* - w_E^* = \frac{(1-c-\lambda E_0)((-k^3\lambda E_0 + (\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2)k^2)s^2 + (k^3\lambda E_0 - (2\alpha + 2\beta - 2\lambda^2 E_0^2)k^2 + \lambda^3 E_0^3 k)s + \beta k^2 - \lambda^2 E_0^2 \beta)}{(2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2)(2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2)},$$

$$\text{令 } w_1 = \frac{(1-c-\lambda E_0)((-k^3\lambda E_0 + (\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2)k^2)s^2 + (k^3\lambda E_0 - (2\alpha + 2\beta - 2\lambda^2 E_0^2)k^2 + \lambda^3 E_0^3 k)s + \beta k^2 - \lambda^2 E_0^2 \beta)}{(2\alpha - k^2(1-s)^2 - 2k\lambda E_0(1-s) - \lambda^2 E_0^2)(2(\alpha + \beta) - k^2 - 2k\lambda E_0 - \lambda^2 E_0^2)}, \frac{\partial w_1}{\partial s} > 0,$$

不妨设

$$f_4 = (-k^3\lambda E_0 + (\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2)k^2)s^2 + (k^3\lambda E_0 - (2\alpha + 2\beta - 2\lambda^2 E_0^2)k^2 + \lambda^3 E_0^3 k)s + \beta k^2 - \lambda^2 E_0^2 \beta,$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial s} = 2(-k^3\lambda E_0 + (\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2)k^2)s + (k^3\lambda E_0 - (2\alpha + 2\beta - 2\lambda^2 E_0^2)k^2) + \lambda^3 E_0^3 k > 0,$$

$f_4(s)$ 与 $\frac{\partial w_1}{\partial s}$ 具有相同的单调性, 此时 $f_4(s)$ 的图像与横坐标有两个交点, 分别是

$$w_2 = - \frac{\sqrt{\lambda^6 E_0^6 + 4\lambda^5 E_0^5 k + 6\left(k^2 - \frac{2\beta}{3}\right)\lambda^4 E_0^4 - 4\lambda^3 E_0^3 k(\alpha + 2\beta - k^2) + (k^4 - (8\alpha + 4\beta)k^2 + 4\beta(\alpha + \beta))\lambda^2 E_0^2 - 4\lambda E_0 \alpha k^3 + 4k^2 \alpha(\alpha + \beta)}}{2k(\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2 - \lambda E_0 k)}$$

$$\frac{\lambda^3 E_0^3 - k(2\alpha + 2\beta - 2\lambda^2 E_0^2) + \lambda^3 E_0^3}{2k(\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2 - \lambda E_0 k)}$$

$$w_3 = \frac{\sqrt{\lambda^6 E_0^6 + 4\lambda^5 E_0^5 k + 6\left(k^2 - \frac{2\beta}{3}\right)\lambda^4 E_0^4 - 4\lambda^3 E_0^3 k(\alpha + 2\beta - k^2) + (k^4 - (8\alpha + 4\beta)k^2 + 4\beta(\alpha + \beta))\lambda^2 E_0^2 - 4\lambda E_0 \alpha k^3 + 4k^2 \alpha(\alpha + \beta)}}{2k(\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2 - \lambda E_0 k)}$$

$$+ \frac{\lambda^3 E_0^3 - k(2\alpha + 2\beta - 2\lambda^2 E_0^2) + \lambda^3 E_0^3}{2k(\alpha + \beta - \lambda^2 E_0^2 - \lambda E_0 k)}.$$

假设 $0 < s < 1$, 由于 $w_2 < 0$, 与假设相矛盾, 故不予讨论。因此当 $0 < s < w_3$ 时, $w_s^* - w_E^* > 0$, 即 $w_s^* > w_E^*$; 当 $w_3 < s < 1$ 时, $w_s^* - w_E^* < 0$, 即 $w_s^* < w_E^*$ 。