

政府补贴和企业履责下平台供应链定价与减排研究

徐兵,杨素芬

(南昌大学公共政策与管理学院,江西 南昌 330031)

摘要:针对单个制造商单个平台组成的供应链,假定制约商实施减排策略、平台履行企业社会责任(corporate social responsibility, CSR),政府分别基于制造商减排研发成本和基于低碳产量进行补贴,平台供应链分别采取批发模式和代理模式,构建4种组合情形下制造商与平台之间的Stackelberg博弈模型,求解供应链最优定价和减排决策;基于对比分析研究政府最优补贴策略和平台供应链最优销售模式;通过数值仿真分析两种补贴方式下补贴系数、消费者低碳偏好、平台履行CSR以及低碳推广努力对供应链决策和社会福利等的影响。研究表明:碳减排水平、制造商及供应链总利润、环境改善程度和社会福利水平在代理模式下均高于批发模式;在批发模式下,低碳产品零售价格及平台利润更高。基于产量的补贴策略有利于提高制造商利润,而基于成本的补贴策略对平台利润更有利;从提高碳减排水平、环境改善程度和社会福利水平维度看,政府采用基于减排研发成本的补贴策略最优,但在产量补贴方式模式下社会福利水平提升更显著。

关键词:政府补贴;碳减排;平台销售模式;Stackelberg模型;企业社会责任

中图分类号:F273; F224 **文献标志码:**A

引用格式:徐兵,杨素芬. 政府补贴和企业履责下平台供应链定价与减排研究[J]. 山东大学学报(理学版),2025,60(6):1-17.

Research on pricing and carbon emission reduction of platform supply chain under government subsidy and corporate social responsibility

XU Bing, YANG Sufen

(School of Public Policy and Administration, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China)

Abstract: Considering the supply chain composed of a single manufacturer and a single platform, where the manufacturer implements the emission reduction strategies and the platform fulfills CSR (corporate social responsibility), the Stackelberg game models between manufacturer and platform are built under four combination cases that the government subsidizes the manufacturer based on the R&D cost for emission reduction and based on the low-carbon production, and the platform supply chain adopts the wholesale mode and the agency mode, respectively, together with the optimal pricing and emission reduction decisions of the supply chain by solving the models. Based on comparative analysis, the optimal subsidy strategy of the government and the optimal sales model of the platform supply chain are obtained. Through numerical simulation, we analyze the impacts of the subsidy coefficient, consumers' low-carbon preference, platforms' fulfillment of CSR, and low-carbon promotional efforts on the supply chain's decision-making and social welfare under the two subsidy modes. The research shows that: the level of carbon emission reduction, the total profit of manufacturers and supply chain, the degree of environmental improvement and the level of social welfare are higher in the agency mode than in the wholesale mode. In the wholesale model, the retail price of low-carbon products and platform profits are higher. The subsidy strategy based on the low-carbon production is more conducive to increasing manufacturers' profits, while the strategy based on emission reduction cost is more favorable to platforms' profits. From the dimensions of improving the level of carbon emission reduction, the degree of environmental improvement and the level of social welfare, the subsidy strategy based on the R&D cost is optimal strategy of government, and the improvement of the level of social welfare is more significant under the subsidy strategy based on the low-carbon production.

Key words: government subsidies; carbon emission reduction; platform sales mode; stackelberg model; corporate social responsibility

收稿日期:2023-09-20; 网络出版时间:2025-01-14 07:27:15

基金项目:国家自然科学基金项目(72161028); 江西省社会科学基金项目(23GL06); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(17JD790012)

第一作者:徐兵(1972—),男,教授,博士,研究方向为物流与供应链管理. E-mail:xu_bing99@sina.com

0 引言

为提高企业减排积极性,政府出台补贴、税收优惠、政府优先采购等多种激励政策。其中,政府补贴能够直接降低企业生产成本和消费者购买成本,从而促进生产企业加大减排投资,推动消费者绿色低碳消费。政府补贴包括研发成本补贴和基于产量的补贴等形式。研发成本补贴按照企业研发成本的一定比率给与企业补贴。基于产量的补贴则是政府按照单位产品对生产者给与一定的补贴。为实现平台供应链减排目标,制造商需加大减排技术研发投入,电商平台也要进行低碳宣传和推广低碳产品,提升市场需求。同时,平台还可以通过关注利益相关者福利承担社会责任,履行有关环境和社会道德义务。实践中,平台型供应链的销售模式对减排与定价决策具有较大影响。现实中,批发和代理模式是2种常见销售模式,各有优劣,所以企业对销售模式选择不会完全一致。批发模式是平台通过开设自营店和自建物流等独有优势进行销售,代理模式是制造商进驻平台通过官方旗舰店进行销售。政府补贴对企业履行企业社会责任具有正向激励作用。

本文研究涉及3个方面:电商平台的销售模式选择;考虑企业社会责任(corporate social responsibility, CSR)的供应链碳减排;政府低碳补贴策略的抉择及影响。杨磊等^[1]、He等^[2]、孙书省等^[3]及卞亦文等^[4]研究了在传统渠道存在的情况下引入电商平台销售后的模式选择问题;栾新风等^[5]、方德斌等^[6]及曹裕等^[7]研究了制造商直销与电商平台销售渠道同时存在的情形;基于电商平台不同销售渠道,考虑不同因素对供应链决策的影响和销售模式选择问题,Wei等^[8]通过考虑竞争制造商的主导关系、平台推荐费和产品可替代程度及市场差异等因素,研究如何选择最优的平台销售模式;聂佳佳等^[9]探究制造商在生产成本线性和规模不经济下对线上销售模式的选择问题;李晓静等^[10]建立2个供应商与两个平台的交叉竞争模型,研究供应链决策行为及平台竞争对销售渠道选择的影响;魏杰等^[11]研究了不同销售模式下制造商和平台的退款保证策略及其对制造商销售模式选择的影响;王文宾等^[12]针对同时选择批发和代理两种模式下,研究供应链决策问题和收益共享契约设计问题;赵菊等^[13]基于存在代理和批发两种模式的混合电商平台,考虑供应商价格和服务竞争,建立4种动态博弈模型,研究2种市场竞争因素对供应商均衡策略和销售模式选择的影响。但文献[10-13]未涉及产品低碳减排因素,只是建模分析线上线下渠道竞争与决策。Liu等^[14]针对碳限额交易的背景下,考虑市场和转售单一模式,研究制造商减排投资决策对平台销售模式选择的影响。Xu等^[15]研究了市场和转售两种模式下制造商定价及碳减排决策,考虑跨渠道溢出效应对销售模式选择的影响。文献[14-15]与本文低碳减排的研究主体相关,但没有进一步分析平台的CSR投入和低碳宣传行为。

考虑CSR的供应链碳减排研究文献,将供应链CSR分为3类:将其嵌入到企业同时追求利润最大化和社会福利水平最大化的双重目标函数中;从成本投入的角度将CSR刻画为内生性投资行为^[16-17];将CSR刻画为对消费者剩余的关注,以外生化视角研究供应链成员履行CSR的决策及协调问题,如Biswas等^[18]考虑消费者低碳偏好,研究企业社会责任对绿色供应链绩效的影响;梁喜等^[19]在碳总量与交易机制下研究闭环供应链中CSR投入水平、碳减排成本系数和低碳推广成本系数对在回收决策、供应链利润和社会福利的影响;何建佳等^[20]研究不同权力结构、零售商CSR水平对供应链利润、碳减排水平和回收率的影响。文献[17-20]研究了履行企业社会责任对产品定价和碳减排水平、供应链利润等绩效的影响,但没有涉及平台供应链及政府低碳补贴策略。

政府低碳补贴策略的抉择方面,Wang等^[21]研究政府补贴对低碳电商闭环供应链的影响,认为政府补贴可以提高系统效率和社会盈余;曹裕等^[22]指出,为了达到最有效的碳减排效果,政府应根据供应链碳减排的效果选择不同的补贴模式并确定合适的补贴比例。政府补贴的主要对象为制造商,同时也涉及到零售商和消费者。在考虑政府补贴方式对供应链的影响方面,温兴琦等^[23]研究绿色度补贴、生产成本补贴和研发成本补贴等政策对定价和绿色度决策的影响;贺勇等^[24]考虑制造商自主和外包减排,研究减排研发补贴和产品减排量补贴对制造商减排途径选择的影响;张福安等^[25]研究碳减排补贴和以旧换再补贴对闭环供应链决策和环境效益的影响。

上述文献未涉及政府不同补贴方式的效果分析,特别未考虑其对履行CSR的平台型供应链销售模式选

择的影响,更未涉及“低碳补贴+销售模式”不同组合下的碳减排和定价决策,这些是本研究解决的问题。本文构建一个由制造商和平台构成的两级供应链系统,考虑平台批发与代理2种模式以及政府基于制造商减排研发成本进行补贴和基于低碳产量进行补贴两种补贴方式,建立 Stackelberg 博弈模型分析制造商最优碳减排和平台低碳服务决策。本文研究动机是分析政府补贴如何推动低碳产品产销及平台型供应链运作,从而解决3个实践问题:政府确定了补贴方式后,供应链各成员的最优决策、碳减排和销售模式选择问题;政府从经济、社会、环境等不同维度综合考虑的最优低碳补贴方式选择;不同的低碳补贴策略对供应链成员、消费者和环境的影响。

1 模型假设

考虑由单个制造商 M、单个电商平台 P 组成的两级供应链,其中制造商为主导者,销售平台为追随者,制造商进行碳减排研发投入,平台承担低碳推广和以消费者效用刻画的企业社会责任。本文假设不考虑实体零售带来的渠道竞争,决策双方完全理性且信息对称。供应链采取批发模式时,制造商先决定批发价和碳减排水平,平台企业购进产品并决定销售价和低碳推广服务水平;供应链采取代理模式时,制造商先决定产品销售价和减排水平,平台决定低碳推广服务水平,并按照商定的佣金比例收取佣金,如图1所示,图中 s 指平台低碳服务水平, p 指产品销售价格, t 指平台佣金参数。政府对制造商进行补贴,可采取基于制造商研发成本的补贴和基于产量的补贴2种补贴方式,并将补贴率作为参数^[18-22]。

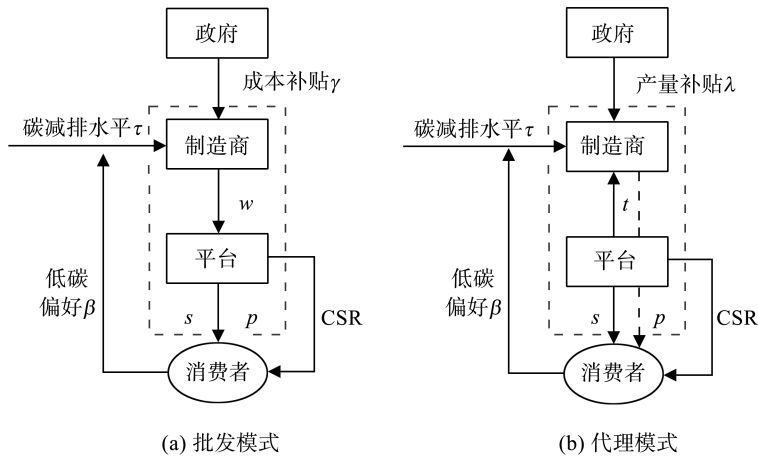


图1 批发模式和代理模式下供应链结构图

Fig.1 Supply chain structure under Wholesales mode and Agency mode

假设 1 低碳产品市场需求不仅与产品价格有关,还受产品碳减排水平 τ_j^i 和平台低碳服务水平 s_j^i 的正向影响。参考文献[19],设市场需求为

$$\bar{q} = d - p_j^i + \beta \tau_j^i + \eta s_j^i, \tag{1}$$

其中, d 为线上销售市场潜在需求量, p_j^i 表示的是在 i 种补贴方式下 j 种平台销售模式的单位产品价格, $i \in \{c, q\}$, c, q 分别表示基于成本的补贴方式和基于产量的补贴方式, $j \in \{w, \alpha\}$, w, α 分别表示平台批发模式和代理模式, β 是消费者对低碳产品的偏好程度, η 为平台低碳推广服务水平对需求的影响因子。

假设 2 通过分析发现成本系数对碳减排和利润的影响总是呈负相关^[26]。为便于分析,本文假定成本系数为1,并且不考虑制造商的生产成本。由于碳减排水平边际成本递增,假定制造商减排研发成本与碳减排水平呈二次函数 $C(\tau) = \tau^2$ 。平台通过大数据预测分析消费者偏好,提供精准的营销广告和针对性服务(如传递产品低碳信息的推广、订单和物流等服务),其成本的增加具有规模不经济性,设为 $C(s) = s^2$,并且不考虑平台的销售成本。

假设 3 将平台投入企业社会责任刻画为对消费者剩余的关注,参考 Panda 等^[27]的研究,消费者剩余被认为是可持续性和企业社会责任的体现,可表示为

$$CS = \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} \bar{q} dp = \bar{q}^2 / 2 = (d - p + \beta \tau + \eta s)^2 / 2. \tag{2}$$

平台企业社会责任是对消费者剩余的关注,目标函数为 $V_p = \pi_p + \theta CS$, $0 < \theta < 1$ 。

假设 4 参考文献[20-21,28]政府对制造商进行补贴:依据生产中的减排研发成本进行补贴,补贴支出为 $GS^c = \gamma\tau^2$, γ 为减排研发补贴系数;依据销售中的低碳产量进行补贴,补贴支出为 $GS^a = \lambda q$,其中 λ 为低碳产量补贴系数。

假设 5 借鉴相关研究^[9,26],社会福利函数可以表示为制造商和平台的利润 $PS = (\pi_m + \pi_p)$ 加上消费者剩余 $CS = q^2/2$ 和环境改善 $EI = \tau q$,减去政府补贴支出 GS ,即

$$SW = \pi_m + \pi_p + CS - GS + EI = (p + \tau)(d - p + \beta\tau + \eta s) - \tau^2 - s^2 + \frac{1}{2}(d - p + \beta\tau + \eta s)^2. \quad (3)$$

本文涉及的相关符号及其含义见表 1。

表 1 模型符号说明
Table 1 Model symbol description

符号及范围	含义
$d > 0$	线上销售市场潜在需求
$p > 0$	产品销售价格
$0 < \beta < 1$	消费者低碳偏好程度
$\tau > 0$	制造商碳减排水平
$0 < \eta < 1$	平台低碳服务水平对需求的影响因子
$s > 0$	平台低碳服务水平
$0 < \theta < 1$	平台履责水平
$0.01 < t < 0.2$	平台佣金费率 ^[10]
$\gamma(\lambda) \in (0, 1)$	基于减排研发成本(低碳产量)的补贴率
π_i	$i = m, p$ 分别表示制造商和平台利润
V_p	平台兼顾经济利润和社会责任的效用函数 $V_p = \pi_p + \theta CS$
GS	政府补贴支出
EI	环境改善程度, $EI = \tau q$
SW	社会福利函数,由厂商利润、消费者剩余、环境改善和政府补贴支出构成

2 模型的建立与求解

2.1 平台批发模式和基于研发成本补贴下平台型供应链决策模型

平台批发模式和政府采取基于研发成本补贴时,制造商与平台进行 Stackelberg 博弈,对应 2 层规划模型:

$$\begin{aligned} \max_{w_w^c > 0, \tau_w^c > 0} \pi_m^{wc}(w_w^c, \tau_w^c) &= w_w^c(d - p_w^c + \beta\tau_w^c + \eta s_w^c) - (1 - \gamma)(\tau_w^c)^2, \\ \text{s.t. } \max_{p_w^c > w_w^c, s_w^c > 0} V_p^{wc}(p_w^c, s_w^c) &= (p_w^c - w_w^c)(d - p_w^c + \beta\tau_w^c + \eta s_w^c) - (s_w^c)^2 + \frac{\theta}{2}(d - p_w^c + \beta\tau_w^c + \eta s_w^c)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

定理 1 平台批发模式和基于研发成本补贴下,低碳产品的最优批发价和零售价为

$$w_w^{c*} = \frac{d(4 - \eta^2 - 2\theta)(1 - \gamma)}{2(1 - \gamma)(4 - \eta^2 - 2\theta) - \beta^2}, \quad p_w^{c*} = \frac{d(6 - \eta^2 - 4\theta)(1 - \gamma)}{2(1 - \gamma)(4 - \eta^2 - 2\theta) - \beta^2},$$

制造商最优碳减排水平和平台低碳推广服务水平为

$$\tau_w^{c*} = \frac{d\beta}{2(1 - \gamma)(4 - \eta^2 - 2\theta) - \beta^2}, \quad s_w^{c*} = \frac{d\eta(1 - \gamma)}{2(1 - \gamma)(4 - \eta^2 - 2\theta) - \beta^2}.$$

2.2 平台代理模式和基于研发成本补贴下平台型供应链决策模型

平台代销模式和政府采取基于研发成本补贴时,制造商与平台进行 Stackelberg 博弈,对应 2 层规划模型:

$$\begin{aligned} \max_{p_a^c > 0, \tau_a^c > 0} \pi_m^{ac}(p_a^c, \tau_a^c) &= (1 - t)p_a^c(d - p_a^c + \beta\tau_a^c + \eta s_a^c) - (1 - \gamma)(\tau_a^c)^2, \\ \text{s.t. } \max_{s_a^c > 0} V_p^{ac}(s_a^c) &= tp_a^c(d - p_a^c + \beta\tau_a^c + \eta s_a^c) - (s_a^c)^2 + \frac{\theta}{2}(d - p_a^c + \beta\tau_a^c + \eta s_a^c)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

定理 2 平台代理模式和基于研发成本补贴下,低碳产品的最优零售价、制造商最优碳减排水平和平台低碳推广服务水平为

$$p_a^{c*} = \frac{d(1-\gamma)(2-\theta\eta^2)}{(1-\gamma)(2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)-\beta^2(1-t)},$$

$$\tau_a^{c*} = \frac{d\beta(1-t)}{(1-\gamma)(2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)-\beta^2(1-t)},$$

$$s_a^{c*} = \frac{d\eta(1-\gamma)(t+\theta-t\eta^2\theta)}{(1-\gamma)(2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)-\beta^2(1-t)}.$$

2.3 平台批发模式和基于低碳产品产量补贴下平台型供应链决策模型

平台批发模式和政府采取基于低碳产品产量补贴时,制造商与平台进行 Stackelberg 博弈,对应 2 层规划模型:

$$\max_{w_w^q > 0, \tau_w^q > 0} \pi_m^{wq}(w_w^q, \tau_w^q) = (w_w^q + \lambda)(d - p_w^q + \beta\tau_w^q + \eta s_w^q) - (\tau_w^q)^2,$$

$$\text{s.t. } \max_{p_w^q > w_w^q, s_w^q > 0} V_p^{wq}(p_w^q, s_w^q) = (p_w^q - w_w^q)(d - p_w^q + \beta\tau_w^q + \eta s_w^q) - (s_w^q)^2 + \frac{\theta}{2}(d - p_w^q + \beta\tau_w^q + \eta s_w^q)^2. \quad (6)$$

定理 3 平台批发模式和基于产品产量补贴下,低碳产品的最优批发价和最优零售价为:

$$w_w^{q*} = \frac{(d-\lambda)(4-\eta^2-2\theta) + \lambda\beta^2}{2(4-\eta^2-2\theta) - \beta^2}, \quad p_w^{q*} = \frac{(\beta^2 + \eta^2 - 2)\lambda + d(6 - \eta^2 - 4\theta)}{2(4 - \eta^2 - 2\theta) - \beta^2},$$

制造商最优碳减排水平和平台低碳推广服务水平为

$$\tau_w^{q*} = \frac{\beta(d+\lambda)}{2(4-\eta^2-2\theta) - \beta^2}, \quad s_w^{q*} = \frac{(d+\lambda)\eta}{2(4-\eta^2-2\theta) - \beta^2}.$$

2.4 平台代理模式和基于低碳产品产量补贴下平台型供应链决策模型

平台代销模式和政府采取基于低碳产品产量补贴时,制造商与平台进行 Stackelberg 博弈,对应两层规划模型:

$$\max_{p_a^q > 0, \tau_a^q > 0} \pi_m^{aq}(p_a^q, \tau_a^q) = [(1-t)p_a^q + \lambda](d - p_a^q + \beta\tau_a^q + \eta s_a^q) - (\tau_a^q)^2,$$

$$\text{s.t. } \max_{s_a^q > 0} V_p^{aq}(s_a^q) = t p_a^q (d - p_a^q + \beta\tau_a^q + \eta s_a^q) - (s_a^q)^2 + \frac{\theta}{2}(d - p_a^q + \beta\tau_a^q + \eta s_a^q)^2. \quad (7)$$

定理 4 平台代理模式和基于低碳产品产量补贴下,低碳产品的最优零售价、制造商最优减排水平和平台低碳推广服务水平为

$$p_a^{q*} = \frac{[2\beta^2(1-t) - (2-\theta\eta^2)(2-t\eta^2)]\lambda + 2d(1-t)(2-\theta\eta^2)}{2(1-t)[(2-\theta\eta^2)(2-t\eta^2) + \beta^2(1-t)]},$$

$$\tau_a^{q*} = \frac{\beta[\lambda(2-t\eta^2) + 2d(1-t)]}{2[(2-\theta\eta^2)(2-t\eta^2) + \beta^2(1-t)]},$$

$$s_a^{q*} = \frac{\eta[t(1-t)\beta^2 - (t-\theta)(2-t\eta^2)]\lambda + 2d(1-t)(t+\theta-t\theta\eta^2)}{2(1-t)[(2-\theta\eta^2)(2-t\eta^2) + \beta^2(1-t)]}.$$

2.5 均衡结果与参数敏感性分析

不同情形下均衡结果如表 2 所示。

表 2 均衡结果比较分析

Table 2 Comparative analysis of equilibrium results

变量	研发成本补贴(c)		低碳产量补贴(q)	
	批发模式(w)	代理模式(a)	批发模式(w)	代理模式(a)
τ^*	$\frac{d\beta}{2B}$	$\frac{d\beta(1-t)}{C}$	$\frac{\beta(d+\lambda)}{2A}$	$\frac{\beta[\lambda(2-\alpha\eta^2) + 2d(1-t)]}{2D}$
\bar{q}^*	$\frac{d(1-\gamma)}{B}$	$\frac{d(1-\gamma)(2-t\eta^2)}{C}$	$\frac{d+\lambda}{A}$	$\frac{(2-t\eta^2)[(2-t\eta^2)\lambda + 2d(1-t)]}{2(1-t)D}$
π_m^*	$\frac{d^2(1-\gamma)}{2B}$	$\frac{d^2(1-\gamma)(1-t)}{C}$	$\frac{(d+\lambda)^2}{2A}$	$\frac{[\lambda(2-t\eta^2) + 2d(1-t)]^2}{4(1-t)D}$

续表

变量	研发成本补贴(c)		低碳产量补贴(q)	
	批发模式(w)	代理模式(a)	批发模式(w)	代理模式(a)
EI*	$\frac{d^2(1-t)\beta}{2B^2}$	$\frac{d^2\beta(1-\gamma)(1-t)(2-t\eta^2)}{C^2}$	$\frac{\beta(d+\lambda)^2}{2A^2}$	$\frac{\beta(2-t\eta^2)[\lambda(2-t\eta^2)+2d(1-t)]^2}{4(1-t)d^2}$
SW*	$\frac{d^2[(14-3\eta^2-8\theta)(1-\gamma)^2+\beta(2-2\gamma-\beta)]}{4B^2}$	$\frac{d^2(1-\gamma)\{(\gamma-1)[t\theta\eta^2(2-\theta\eta^2)(2-t\eta^2)-3t\theta\eta^2+t\eta^2(t+1)+\theta\eta^2(\theta+1)-4]- (1-t)^2\beta\}}{C^2}$	$\frac{(d+\lambda)^2[6A+\beta^2+4(\beta-\theta)]}{8A^2}$	$\frac{\{(2-t\eta^2)[(2\theta-t)\eta^2-2\beta-2]-2(\beta^2+1)\}E^2+4(1-t)[(2-t\eta^2+t)\beta^2\lambda+2t(2-\theta\eta^2)]E+2t^2(1-t)^2(\beta^2\lambda-2\theta\eta^2+4)^2}{8(1-t)^2d^2}$

注:*表示各情形下的最优值。

其中,

$$A=4-\eta^2-2\theta-\frac{1}{2}\beta^2>0,$$

$$B=(4-\eta^2-2\theta)(1-\gamma)-\frac{1}{2}\beta^2>0,$$

$$C=(1-\gamma)(2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)-\beta^2(1-t)>0,$$

$$D=(2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)-\beta^2(1-t)>0,$$

$$E=(2-t\eta^2)\lambda+2d(1-t)>0.$$

可见,制造商在2种销售模型下的利润大小与参数取值相关。

- 性质 1 (1) $\frac{\partial w_j^c}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial w_j^q}{\partial \lambda}<0, \frac{\partial p_j^c}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial p_j^q}{\partial \lambda}<0, \frac{\partial \tau_j^c}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial \tau_j^q}{\partial \lambda}>0, \frac{\partial s_j^c}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial s_j^q}{\partial \lambda}>0;$
- (2) $\frac{\partial \bar{q}_j^c}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial \bar{q}_j^q}{\partial \lambda}>0, \frac{\partial \pi_m^{jc}}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial \pi_m^{jq}}{\partial \lambda}>0, \frac{\partial \pi_p^{jc}}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial \pi_p^{jq}}{\partial \lambda}>0;$
- (3) $\frac{\partial CS_j^c}{\partial \lambda}>0, \frac{\partial CS_j^q}{\partial \lambda}>0, \frac{\partial EI_j^c}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial EI_j^q}{\partial \lambda}>0, \text{当 } \gamma < \bar{\gamma} \text{ 时, } \frac{\partial SW_j^c}{\partial \gamma}>0, \frac{\partial SW_j^q}{\partial \lambda}>0.$

由性质 1 可知,无论何种补贴方式下,随着政府补贴系数的增强,低碳产品碳减排水平和平台低碳推广服务水平、制造商和平台利润均呈现上升趋势,环境改善程度和消费者剩余也呈增长态势。在减排研发补贴下,产品的批发价格和零售价格会随补贴系数增加而提高,但在产量补贴下,产品批发价格和零售价格随之增加而降低。在减排成本补贴下,当补贴系数满足小于某一阈值的条件时,社会福利水平均为增长态势。

这表明政府通过补贴研发成本能够使制造商进行新一轮技术研发和创新,以提高碳减排水平,消费者愿意付出更高的价格,平台愿意大力宣传低碳信息,能够带来需求增长并提高供应链各主体利润。与政府产量补贴有利于降低销售价格的规律不同,减排研发下产品批发和零售价格均增长的原因是高补贴率减轻研发压力提高碳减排水平的同时,迎合了消费者低碳偏好,从而抬高了消费者意愿价格,这与产量补贴制造商可以采取薄利多销的策略不同。两种补贴方式均对提高供应链利润、碳减排水平和环境改善有正向影响,但对消费者来说,产量补贴相较研发补贴能够降低产品价格。

- 性质 2 (1) $\frac{\partial w_j^{i*}}{\partial \theta}>0, \frac{\partial p_w^{i*}}{\partial \theta}<0, \frac{\partial p_a^{i*}}{\partial \theta}>0, \frac{\partial \tau_j^{i*}}{\partial \theta}>0, \frac{\partial s_j^{i*}}{\partial \theta}>0;$
- (2) $\frac{\partial \bar{q}_j^{i*}}{\partial \theta}>0, \frac{\partial \pi_m^{ii*}}{\partial \theta}>0, \frac{\partial \pi_p^{ii*}}{\partial \theta}>0;$
- (3) $\frac{\partial CS_j^{i*}}{\partial \theta}>0, \frac{\partial EI_j^{i*}}{\partial \theta}>0, \frac{\partial SW_j^{i*}}{\partial \theta}>0.$

性质 2 表明,无论平台采取何种销售模式,提高履行 CSR 水平均能提高低碳产品的批发价格、碳减排水平、平台低碳推广服务水平和制造商利润,对社会总福利水平有正向影响。这表明,平台更加关注消费者利益时,不仅能够刺激需求,给供应链带来更多的减排意愿和利润,也能在环境和社会福利方面做出改善。当

平台转销时,随平台履行 CSR 程度越高,意味着平台更关注消费者剩余,此时低碳产品零售价格将降低,对消费者来说更为有益。而当平台代销时,低碳产品零售价格随平台履责水平的提高而提高,这是由于一方面平台提高 CSR 投入会导致成本增加,因此会提高零售价格以弥补损失,然而消费者价格的上升并不会显著影响需求,因为 CSR 水平的提高使碳减排水平大幅提高,消费者愿意购买具有低碳属性的产品,缓解了价格提升对需求的影响,所以平台履责水平提高对供应链系统和消费者剩余、环境改善均是有益的。

Panda 等^[27]认为一般情况下零售商 CSR 提升会导致产品绿色水平和价格降低。本文从不同销售模式的角度,研究表明代销模式下平台履行 CSR 水平提高会导致价格上涨,但是不会影响市场需求,反而能带来增长,这与林志炳^[29]研究绿色研发效率或潜在需求较高时零售价格会随之提高的结论有相似性。然而,平台销售模式下,履行企业社会责任导致低碳产品价格下降,但履行 CSR 能有效提高供应链利润、改善环境和提升消费者效用^[30]。

性质 3 (1) $\frac{\partial w_j^{i*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial p_j^{i*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial s_j^{i*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \tau_j^{i*}}{\partial \beta} > 0;$
 (2) $\frac{\partial \bar{q}_j^{i*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \pi_m^{ji*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \pi_p^{ji*}}{\partial \beta} > 0;$
 (3) $\frac{\partial CS_j^{i*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial EI_j^{i*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial SW_j^{i*}}{\partial \beta} > 0。$

性质 3 表明,随着消费者低碳偏好程度的增加,低碳产品的批发及零售价格、制造商碳减排水平和平台低碳推广水平均有所上升,制造商和平台利润、环境改善程度和社会福利水平均随之提高。

从供应链利润的角度看,消费者对产品低碳属性的偏好增强时,愿意为低碳产品付出更高的价格,制造商在生产时将进行技术创新以减少碳排放,平台在销售端提高低碳推广服务水平,以此刺激低碳产品市场需求,从而使供应链各方利润增加;低碳偏好的增强提高了碳减排水平和低碳产品产量,带来更高的环境改善和消费者剩余,从而增加社会福利水平,不仅有利于提高供应链经济利润,对实现环境和社会福利目标也有正向影响。

3 减排决策与低碳补贴策略的效果对比

首先,在给定制造商同种销售模式下,对政府的不同补贴方式下最优决策和减排效果、社会福利和环境改善进行比较;其次,在给定同种补贴方式下,对制造商两种线上销售模式的减排效果和利润水平等进行对比。为了对比不同补贴策略的效果,以相同的政府补贴支出为前提进行均衡比较分析^[20-21]。

3.1 给定销售模式不同种补贴方式下减排与运营决策对比

当政府依据减排研发进行补贴时,政府补贴支出总额为 $GS_w^c = \frac{\gamma_w d^2 \beta^2}{4B^2}$,当政府依据低碳产量进行补贴时,政府补贴支出总额为 $GS_w^s = \frac{\lambda_w (\lambda_w + d)}{2A}$ 。假设已知政府减排研发补贴 γ 的值,易知相同政府补贴额度下

低碳产量补贴 λ 的值。因此 $GS_w^c = GS_w^s$ 时,取非负根可得 $\lambda_w = \frac{d(f_w(\gamma_w) - B)}{2B}$,其中 $f_w(\gamma_w) = \sqrt{B^2 + \gamma_w \beta^2 A}$ 。

同理可求 $\lambda_a = \frac{d(1-t)(f_a(\gamma_a) - C)}{(2-t\eta^2)C}$,其中 $f_a(\gamma_a) = \sqrt{C^2 + 2\gamma_a \beta^2 (1-t)D}$ 。将 $\lambda_j(\gamma_j)$ 代入模型均衡策略中可得以

下命题:

命题 1 (1) $\tau_j^c > \tau_j^s$; (2) $w_j^c > w_j^s, p_j^c > p_j^s$; (3) 当 $\gamma_w < \frac{1}{2}$ 时, $s_w^c > s_w^s$; 当 $\gamma_a > \frac{(2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2) - \beta^2(1-t)}{(2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2) + \beta^2(1-t)}$ 时, $s_a^c > s_a^s$ 。

命题 1 表明,在给定制造商的情况下,政府不同补贴方式下供应链定价和碳减排水平大小排序与平台履责水平、消费者低碳偏好程度和低碳推广努力对需求的影响因子等外生参数的取值无关。在减排研发成本补贴下碳减排水平、产品批发价格和零售价格均高于产量补贴。如果以环境目标为政府补贴依据,则研发

成本补贴的效果是最佳的,此时政府更偏好采取研发成本补贴。政府补贴系数的变化不影响碳减排水平和定价排序,但对平台低碳推广水平排序有影响,当批发模式下减排研发系数满足 $\gamma_w > \frac{1}{2}$ 或代理模式下研发系数高于阈值时,产量补贴效果优于减排补贴。命题1的证明见附录。

命题2 (1) 当 $\gamma_w > \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\beta^2}{2A + \beta^2} \right)$ 时, $\pi_m^{wc*} < \pi_m^{wq*}$; 当 $\gamma_a < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\beta^2(1-t)}{D + \beta^2(1-t)} \right)$ 时, $\pi_m^{ac*} < \pi_m^{aq*}$;

(2) 当 $\gamma_w < \frac{3A}{4A + \beta^2}$ 时, $\pi_p^{wc*} > \pi_p^{wq*}$ 时, $CS_w^{c*} > CS_w^{q*}$; 当 $\gamma_a < \frac{3D}{4D + 2\beta^2(1-t)}$ 时, $\pi_p^{ac*} > \pi_p^{aq*}$, $CS_a^{c*} > CS_a^{q*}$;

(3) $EI_j^c > EI_j^q$ 。

命题2表明,在给定销售模式下,当政府补贴系数在某范围内时,产量补贴政策更有利于提高制造商利润,否则相反;因为研发成本补贴下平台利润和消费者剩余更高,所以政府和企业的偏好可能不一致。命题2的证明见附录。

由上述结论,减排研发补贴下碳减排水平更高,有利于提高低碳产品产量和市场价格,因此平台利润和消费者剩余相较之下更高,虽然研发补贴使企业的碳减排意愿更强,制造商定价和产量增加,销售利润更高,但是由于研发成本的负担逐渐增大,政府补贴不足以抵消增加的部分,因此该补贴方式下制造商利润低于产量补贴政策。如果以消费者剩余和环境改善程度作为政府补贴的依据,考虑补贴系数在合理范围内时,减排研发补贴均是最好的策略。

结合命题1、2,当制造商线上销售低碳产品时,通过比较碳减排水平和环境改善程度发现,依据减排研发成本补贴制造商时碳减排效果更好,环境改善程度更高。

从供应链成员利润变化可以看出,对于制造商来说,当政府补贴高于阈值时低碳产量补贴对产品制造商的激励作用更强,而对于平台来说,在补贴系数在一定范围内,依据减排研发成本补贴是平台利润最大化的理想方式。对于消费者,政府研发成本补贴制造商时,产品销售价格较高且补贴水平较高时平台推广服务水平较差。如果以消费者剩余和环境改善程度作为政府补贴策略的评价依据,则减排研发补贴是较好的策略。因此,可以采取综合补贴形式(如“研发补贴+产量补贴”)来协调各方。

3.2 给定补贴方式不同销售模式下减排与利润对比

考虑政府依据减排研发成本和低碳产量进行补贴时,对制造商选择平台批发和代理销售产生的减排效果进行比较分析。

命题3 (1) 当 $2(2 - \theta\eta^2)(\gamma - 1) + \beta^2 > 0$ 时, $\tau_w^{c*} < \tau_a^{c*}$, $\pi_m^{wc*} < \pi_m^{ac*}$;

(2) 当 $4 - 2\theta\eta^2 - \beta^2 > 0$ 时, $\tau_w^{q*} < \tau_a^{q*}$, $\pi_m^{wq*} < \pi_m^{aq*}$ 。

由命题3可知,在给定政府补贴系数时,当参数满足一定条件下,无论哪种补贴方式下,低碳产品代理模式下的碳减排效果和制造商利润均高于批发模式下的碳减排效果和利润水平(但当条件不满足时,结论不成立)。原因可能是由于代理模式下制造商参与定价,低碳推广所带来的价格增加,也更能迎合消费者的低碳需求,因此提高碳减排积极性,从而提高制造商减排意愿,同时刺激具有低碳偏好的消费者,扩大市场需求,进而增加制造商利润。

4 数值仿真分析

进一步通过 MATLAB 数值仿真,分析政府补贴策略对供应链决策的影响。取定参数^[21,23]: $d = 12$, $\beta = 0.4$, $\eta = 0.5$, $\theta = 0.1$, $t = 0.1$ 。 γ_j 在 0.05~0.75 范围内取值满足均衡解存在条件,由 $GS_j^{c*} = GS_j^{q*}$ 计算得到 λ_j , 分析补贴系数和政府补贴支出相同下不同销售模式变化如图2所示。

由图2可知,随着政府补贴系数的增加,政府补贴支出逐渐增加,且平台代理模式下政府支出对补贴系数变化更敏感。由 $GS_j^{c*} = \gamma_j \tau_j^{c*2}$ 可知:相同政府补贴支出下补贴系数与碳减排水平成反比,在相同政府支出的条件下,平台代理销售模式中的补贴系数低于批发模式。例如,取 $GS_w^{c*} = GS_a^{c*} = 1$ 时, $\gamma_w = 0.50 > \gamma_a = 0.33$, 也说明此时该模式下碳减排水平最高。

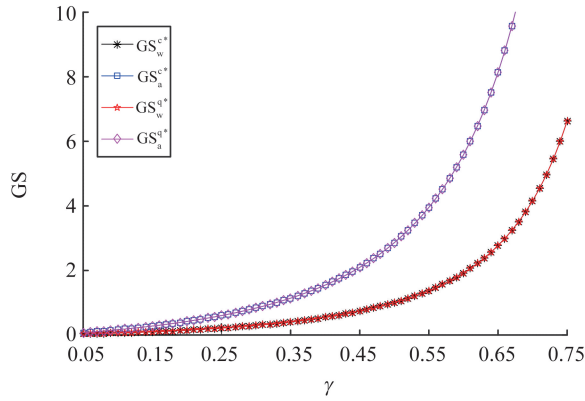


图2 政府补贴系数对支出的影响

Fig.2 Influence of government subsidy coefficient on expenditure

4.1 同种销售模式下政府补贴系数变化的影响

在同种销售模式政府补贴支出相同的前提下,探讨基于减排研发成本补贴和基于产量补贴2种方式下,政府补贴系数变化对供应链最优定价与碳减排决策、各成员利润和环境改善程度、社会福利水平的影响如图3—6所示。

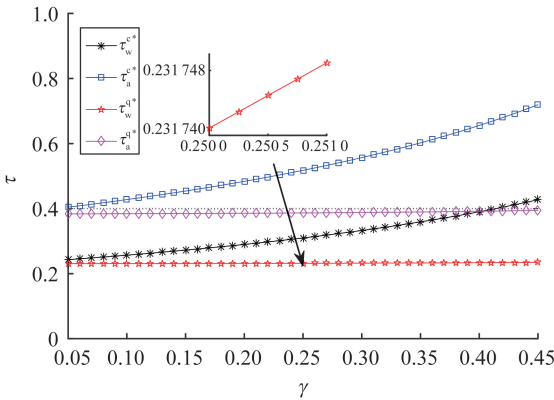


图3 同种销售模式下政府补贴系数对碳减排水平的影响
Fig.3 The influence of government subsidy coefficient on carbon emission reduction under same mode

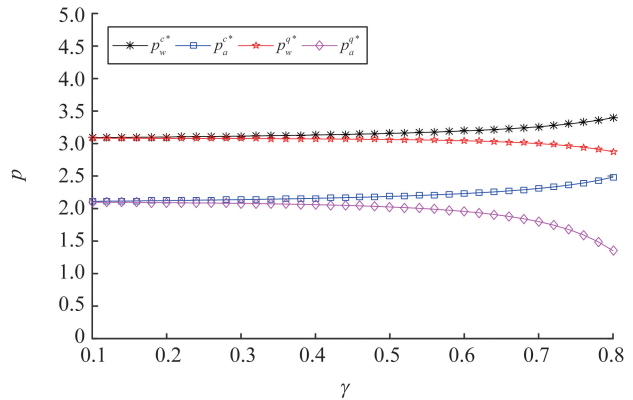
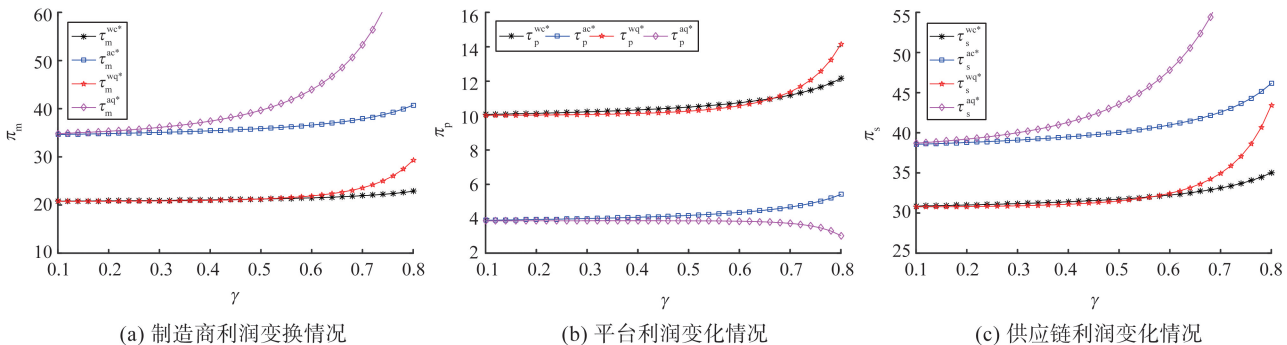


图4 同种销售模式下政府补贴系数对产品价格的影响
Fig.4 The influence of government subsidy coefficient on price under same mode

由图3—4可知,2种补贴策略下产品最优碳减排水平均随补贴系数的增加而增加,低碳产品定价随补贴系数的增减趋势与补贴方式有关:在研发成本补贴下随补贴系数增加而提高,在产量补贴下随之增加而降低。由图3中 $\tau_a^{c^*} > \tau_a^{q^*}$, $\tau_w^{c^*} > \tau_w^{q^*}$ 所示,无论何种销售模式下,在政府采取减排研发补贴时的最优减排水平高于基于产量补贴的方式。由图中曲线斜率 $k_a^{c^*} > k_a^{q^*}$, $k_w^{c^*} > k_w^{q^*}$ 可知基于减排研发成本的补贴方式下碳减排水平对补贴系数的增加也更敏感。由图4中 $p_w^{c^*} > p_w^{q^*}$, $p_a^{c^*} > p_a^{q^*}$ 可知,政府基于研发成本补贴下的价格高于产量补贴,产量补贴下制造商为获取更多政府补贴,将采取“薄利多销”的营销策略,降价销售以扩大市场需求。



(a) 制造商利润变换情况

(b) 平台利润变化情况

(c) 供应链利润变化情况

图5 同种销售模式下政府补贴系数对供应链成员利润的影响

Fig.5 Influence of government subsidy coefficient on supply chain profits under same mode

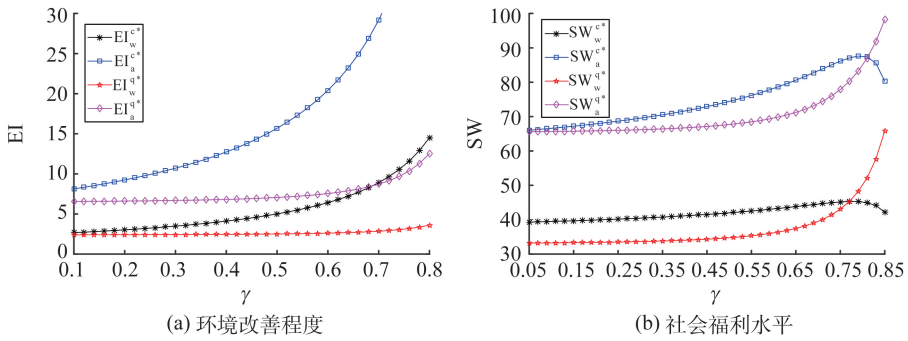


图6 同种销售模式下政府补贴系数对环境改善程度和社会福利水平的影响

Fig.6 Influence of government subsidy coefficient on environmental improvement and social welfare under same mode

由图5可知,随补贴系数增加,供应链中制造商、平台和总利润均随之上升,其中代理模式下基于产量补贴时,平台利润随补贴系数增加而降低。当补贴系数低于某值时($\gamma_w < 0.6$),有 $\pi_m^{aq*} > \pi_m^{ac*}$, $\pi_m^{wq*} > \pi_m^{wc*}$ 和 $\pi_p^{wc*} > \pi_p^{wq*}$, $\pi_p^{ac*} > \pi_p^{aq*}$,基于产量补贴的方式对制造商和供应链总利润更有益,而平台利润在基于减排研发成本补贴下更高。当补贴系数过高时($\gamma_w > 0.7$),在批发模式下基于产量补贴方式平台利润高于研发成本补贴,而在代理模式产量补贴下,平台利润随补贴系数增加平台利润甚至呈现下降趋势,供应链总利润则大幅增加,这是因为该模式下制造商为获取高额利润降价获取补贴,攫取了供应链中较多利润,平台利润被挤占,供应链整体利润依赖于政府补贴。

由图6可知,给定销售模式时,由 $EI_a^{c*} > EI_a^{q*}$, $EI_w^{c*} > EI_w^{q*}$ 可知,政府采用减排研发补贴策略时社会改善程度更高,且减排研发补贴带来的环境改善程度的增长幅度大于基于产量补贴方式。当政府补贴系数低于某阈值(如 $\gamma < 0.75$)时, $SW_a^{c*} > SW_a^{q*}$, $SW_w^{c*} > SW_w^{q*}$,政府依据减排研发成本进行补贴时最有利于提升社会福利水平。当政府补贴系数阈值高于该值时,由 $SW_a^{q*} > SW_a^{c*}$, $SW_w^{q*} > SW_w^{c*}$,相同销售模式下政府采用产量补贴策略提升作用更显著,基于研发成本补贴方式下随补贴系数增加社会福利水平减少。

4.2 相同补贴支出下其他参数变化的影响

基于4.1参数假设,并取定 $\gamma_w = 0.50 > \gamma_a = 0.33$,此时4种情形政府支出相同。基于政府补贴支出相等的前提,探究4种不同情形下消费者低碳偏好、平台履责水平和低碳推广水平系数对碳减排水平、供应链定价、环境改善和社会福利水平的影响如图7—10。

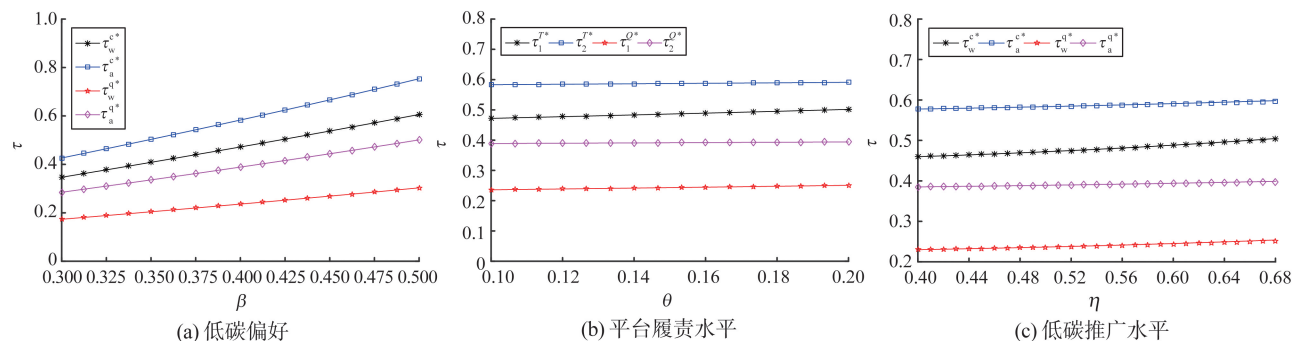


图7 相同政府支出下低碳偏好 β 、平台CSR水平 θ 和低碳推广水平系数 η 对碳减排水平的影响

Fig.7 Influence of low carbon preference, platform CSR level and low carbon promotion level on carbon emission reduction level under the same government expenditure

由图7可知,4种模型下产品碳减排水平均随消费者低碳偏好、平台履行CSR水平和低碳推广水平的增加而增加,且消费者低碳偏好程度对碳减排水平提高的作用更显著。如图7所示,有 $\tau_m^{ac*} > \tau_m^{wc*} > \tau_m^{aq*} > \tau_m^{wq*}$,随平台低碳推广努力水平系数的增强,批发模式下碳减排水平对其敏感程度大于代理模式。这是由于批发模式下制造商能够知悉低碳推广所带来的价格增加,也更能迎合消费者的低碳需求,因此提高碳减排积极性。

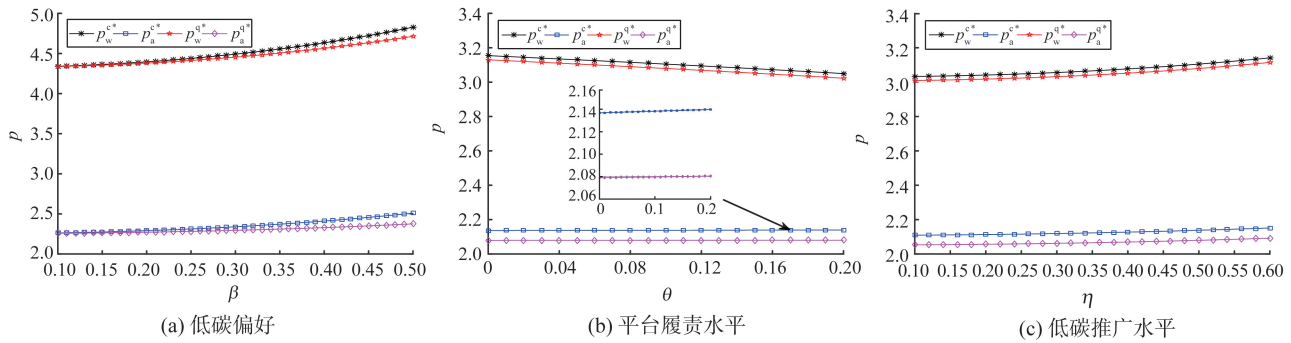


图 8 相同政府支出下低碳偏好 β 、平台 CSR 水平 θ 和低碳推广水平系数 η 对产品定价的影响
 Fig.8 Influence of consumers' low carbon preference, platforms' CSR level and promotion effort level on pricing under same government expenditure

从图 8 可知,随补贴系数增加,产品定价随消费者低碳偏好和低碳推广对需求的影响因子增加而增加,代理模式下平台提高履行 CSR 水平会提高产品价格,批发模式下则对价格有负向影响。这是由于制造商批发销售时碳减排水平较低促使市场需求量相对较低,制造商将提升价格以弥补市场需求降低带来的损失,消费者为获得更高的低碳满足,愿意以更高的价格购买低碳产品。同时,平台在履行 CSR 时关注消费者剩余,因此对消费者来说性价比更高。由图 8 中 $p_w^{c^*} > p_a^{c^*} > p_w^{q^*} > p_a^{q^*}$,表明平台批发模式下产品价格高于代理模式,政府研发补贴下价格高于产量补贴,且平台模式造成的价格差异要远大于补贴方式。

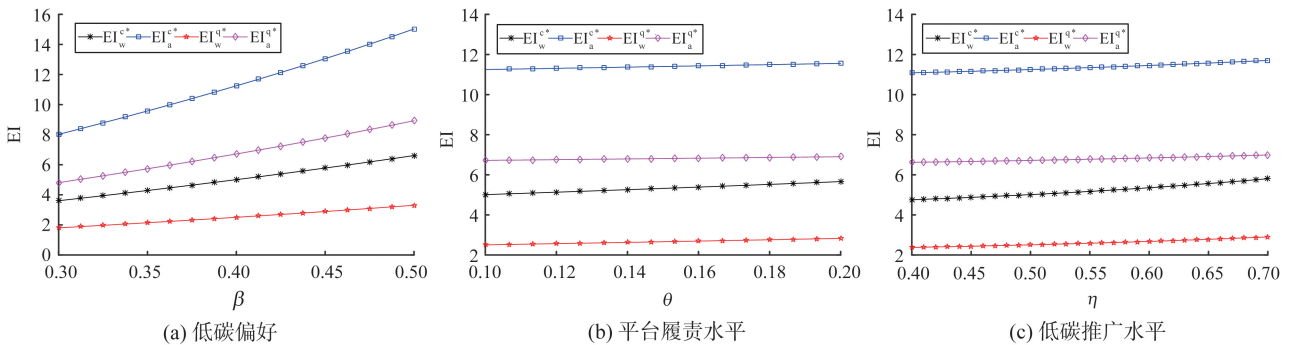


图 9 相同政府支出下低碳偏好 β 、平台 CSR 水平 θ 和低碳推广水平系数 η 对环境改善程度的影响
 Fig.9 Influence of low carbon preference, platforms' CSR level and low carbon promotion level on environmental improvement under the same government expenditure

由图 9 可知,消费者低碳偏好、平台履责水平与低碳推广水平系数的增加均有益于提高环境改善程度,且消费者低碳偏好在 3 种因素中提升作用最显著。由图中 $EI_a^{c^*} > EI_a^{q^*} > EI_w^{c^*} > EI_w^{q^*}$ 可知,制造商选择代理模式对提高环境改善程度更有利,且销售模式对环境改善程度带来的影响程度大于补贴方式。

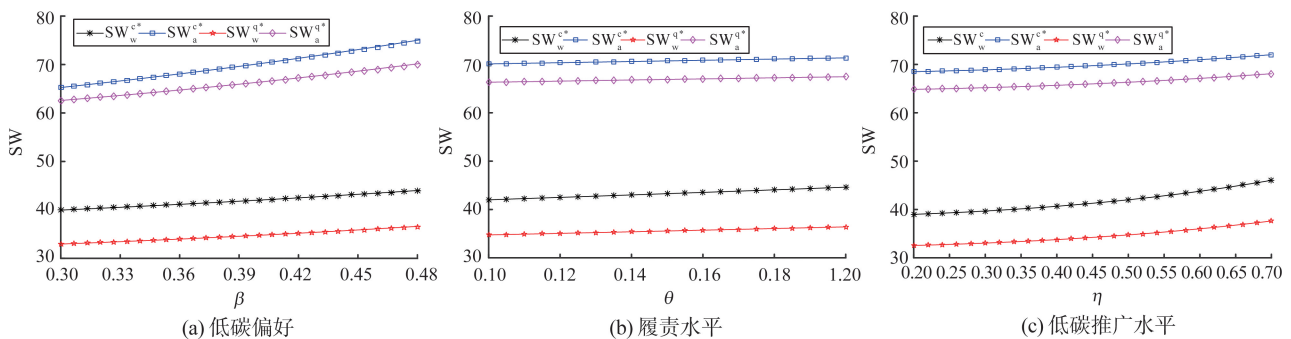


图 10 相同政府支出下低碳偏好 β 、平台 CSR 水平 θ 和低碳推广水平系数 η 对社会福利水平的影响
 Fig.10 Influence of low carbon preference, platforms' CSR level and low carbon promotion level on social welfare under the same government expenditure

由图 10 可知,随消费者低碳偏好、平台履责水平与低碳推广水平系数的增长,不同销售模式和补贴策略下社会福利水平均会增长,因此各参数对社会福利水平提升具有正向影响,其中消费者低碳偏好对于社会福利水平的提升作用更显著。由 $SW_a^{c^*} > SW_a^{q^*} > SW_w^{c^*} > SW_w^{q^*}$ 可知,供应链结构为代理模式时最有利于提升社

会福利水平。 SW_w^{i*} 、 SW_a^* 均随 β 、 η 增加而增加,且 SW_a^{c*} 对 β 的增长更敏感, SW_w^{c*} 对 η 的增长更敏感。这表明在批发模式下,随平台低碳推广努力水平不断增加,社会福利水平提升越显著;在代理模式下,消费者低碳偏好对提升社会福利水平有利。

5 结语

本文考虑平台批发和代理2种销售模式,构建不同政府补贴方式下平台供应链减排决策模型,在不同销售模式和补贴方式下,分析消费者低碳偏好、平台履行CSR水平和低碳推广努力水平等因素对供应链的减排与运营决策的影响。通过均衡比较与数值仿真分析,有以下结论和管理学启示。

(1) 随消费者低碳偏好、平台履责水平和低碳推广努力水平系数的增加,产品碳减排水平、供应链成员利润、环境改善程度和社会福利水平均随之增加。这不仅有利于提高供应链经济利润,对环境和社会目标均有益,且消费者低碳偏好对环境改善和社会福利水平的提升较为显著。

(2) 当政府确定了补贴方式时,对消费者来说,平台代理模式下产品价格低于批发模式,且平台模式造成的价格差异要远大于补贴方式;碳减排水平、制造商和供应链整体利润、环境改善程度和社会福利水平在代理模式下利润均为最高。但平台利润水平在批发模式下明显更高、且随补贴系数增加会继续提高,在代理模式产量补贴下平台利润甚至出现降低趋势。

(3) 当制造商确定了销售模式后,政府研发补贴下价格高于产量补贴,且研发补贴下产品销售价格随补贴系数增加而增加,而产量补贴则随之增加呈现降低趋势。从最优碳减排水平的维度考虑,政府基于减排研发成本补贴应为最优策略;从供应链成员利润的维度分析,基于产量补贴策略有利于提高制造商和供应链整体的利润,而减排研发成本补贴方式则对平台利润更有利;从环境改善程度维度看,政府采用减排研发成本补贴策略提升作用更显著;最后,社会福利水平涵盖了供应链和政府的经济利润、环境改善程度和消费者剩余,能够综合考虑经济、生态和社会目标,比较发现政府采用减排研发成本补贴策略最优,政府补贴系数较高时考虑产量补贴方式会有利于社会福利水平提升,但政府补贴支出负担较大。

研究结果可为平台供应链中制造商决策和政府从经济、社会和环境等维度决定补贴策略提供参考建议。

(1) 对于制造商而言,为了提高碳减排水平和供应链利润,虽无法决定政府补贴政策,但可从促进低碳推广努力水平、履责水平和选择合适的销售模式等方面考虑提升自身和供应链系统的利润。例如,代理模式下制造商和供应链整体利润均为最佳,可与平台企业合作签订收益共享合同共同提高利润实现双赢,商定合适的低碳推广力度以及履责水平。此外,制造企业可利用消费者偏好的特性,突出产品节能减排的优势,吸引消费者购买以此提升企业利润。(2) 对于政府而言,补贴有利于提高企业碳减排水平,但需考虑多种因素如消费者低碳偏好、平台履行CSR水平和低碳推广努力水平的影响。一方面对于减排潜力较大的企业,了解制造企业减排技术进展,提供完善的政策支持以便帮助企业缓解减排研发的压力,但也要避免过高的政策补贴造成企业依赖。另一方面鼓励核心企业积极履行企业社会责任,有利于缓解政府经济压力,进而提升补贴效率,实现经济、生态和社会协同发展的目标。(3) 对于平台而言,可以加大低碳宣传力度,提升消费者的购买欲望,从而提高定价来获取超额利润;同时,平台可做大做强,提升与制造商的谈判能力,选择对自身更有利的代销模式。

本文研究销售模式和政府补贴方式对平台供应链CSR和碳减排决策的影响,未考虑混合销售模式情形、及未结合碳税和碳交易开展研究,这些都是待研究问题。在补贴对象方面,可以拓展对补贴对象以及相关协调机制设计的开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨磊,张琴,张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. 管理科学学报,2017,20(11):75-87.
YANG Lei, ZHANG Qin, ZHANG Zhiyong. Channel selection and carbon emissions reduction polices in supply chains with the cap-and-trade scheme[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(11):75-87.
- [2] HE P, HE Y, XU H. Channel structure and pricing in a dual-channel closed-loop supply chain with government subsidy[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 213:108-123.
- [3] 孙书省,浦徐进,韩广华. 考虑线下权力结构的制造商线上销售模式选择研究[J]. 中国管理科学,2019,27(5):119-129.

- SUN Shuxing, PU Xujin, HAN Guanghua. The strategy of online channels under different offline channel power structures[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(5):119-129.
- [4] 卞亦文,程文超. 平台供应链线下渠道策略与运营模式选择研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 39:1-26.
BIAN Yiwen, CHENG Wenchao. Offline channel strategy and operations model adoption in a platform supply chain[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 39:1-26.
- [5] 栾新风,康凯,尹洁璇. 考虑产品绿色度的制造商销售模式选择研究[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(2):280-288.
LUAN Xinfeng, KANG Kai, YIN Jiexuan. Research on selection of manufacturer's sales mode considering product greenness [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(2):280-288.
- [6] 方德斌,盛嘉良. 考虑销售服务和服务成本差异的制造商线上销售模式选择研究[J]. *管理学报*, 2023, 20(4):568-577.
FANG Debin, SHENG Jialiang. Manufacturer's online sales modes selection considering sales service and service cost difference[J]. *Chinese Journal of Management*, 2023, 20(4):568-577.
- [7] 曹裕,易超群,万光羽. 基于制造商网络渠道选择的双渠道供应链定价与服务决策研究[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(2):189-199.
CAO Yu, YI Chaoqun, WANG Guangyu. Pricing and service strategies of dual-channel supply chain based on manufacturer's online channel selection[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2021, 35(2):189-199.
- [8] WEI J, LU J, ZHAO J. Interactions of competing manufacturers' leader-follower relationship and sales format on online platforms[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 280(2):508-522.
- [9] 聂佳佳,胡元潇. 制造商生产成本结构对其线上销售模式选择的影响[J]. *工业工程*, 2021, 24(3):18-25.
NIE Jijia, HU Yuanxiao. The influence of manufacturers' production cost structure on their online sales model selection[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2021, 24(3):18-25.
- [10] 李晓静,艾兴政,唐小我. 电子商务环境下交叉竞争供应链的渠道策略研究[J]. *管理学报*, 2017, 14(3):459-465.
LI Xiaojing, AI Xingzheng, TANG Xiaowo. Research on channel strategy of cross competition supply chain under the environment of electronic commerce[J]. *Chinese Journal of Management*, 2017, 14(3):459-465.
- [11] 魏杰,舒伯灿,卢静会. 基于电商平台的最优销售模式和退款保证策略研究[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(7):213-219.
WEI Jie, SHU Bocan, LU Jinghui. The optimal selling format and money-back guarantee strategy based on online platform [J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(7):213-219.
- [12] 王文宾,丁军飞. 基于电商平台的混合销售渠道对供应链决策的影响研究[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(6):89-97.
WANG Wenbin, DING Junfei. Effects of the mixed selling channel based on the ecommerce platform on the decision of a supply chain[J]. *Operations Research and Management Science*, 2019, 28(6):89-97.
- [13] 赵菊,刘龙,王艳,等. 基于电商平台的供应商竞争和模式选择研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(8):2058-2069.
ZHAO Ju, LIU Long, WANG Yan, et al. Research on competition and mode selection of suppliers based on e-commerce platform[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2019, 39(8):2058-2069.
- [14] LIU J, KE H. Firms' preferences for retailing formats considering one manufacturer's emission reduction investment[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(10):3062-3083.
- [15] XU X, HE P, FAN Y. The pricing and carbon abatement decisions of a manufacturer selling with marketplace or reselling mode[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2022, 29(2):1220-1245.
- [16] 曹裕,周默亭,胡韩莉. 考虑政府补贴与企业社会责任的两级供应链优化[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(5):101-111.
CAO Yu, ZHOU Moting, HU Hanli. Secondary supply chain optimization with social responsibility sensitive consumption under government subsidy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(5):101-111.
- [17] MA P, SHANG J, WANG H. Enhancing corporate social responsibility: Contract design under information asymmetry[J]. *Omega*, 2017, 67:19-30.
- [18] BISWAS I, RAJ A, SRIVASTAVA S K. Supply chain channel coordination with triple bottom line approach[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 115:213-226.
- [19] 梁喜,魏光何. 不同 CSR 投入下闭环供应链回收与减排决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(12):1-31.
LIANG Xi, WEI Guanghe. Recycling and carbon emission reduction decisions of closed-loop supply chain under different corporate social responsibility[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(12):1-31.
- [20] 何建佳,张鑫月. 不同权力结构下考虑 CSR 的供应链减排决策[J]. *生态经济*, 2022, 38(6):80-91.
HE Jianjia, ZHANG Xinyue. Study on emission reduction decisions of supply chain considering CSR under different power structures[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(6):80-91.
- [21] WANG Y, FAN R, SHEN L, et al. Recycling decisions of low-carbon e-commerce closed-loop supply chain under government subsidy mechanism and altruistic preference[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259:120883.
- [22] 曹裕,李青松,胡韩莉. 不同政府补贴策略对供应链绿色决策的影响研究[J]. *管理学报*, 2019, 16(2):297-305.

CAO Yu, LI Qingsong, HU Hanli. Research on the influence of different government subsidy strategies on the green decision-making of supply chain[J]. Chinese Journal of Management, 2019, 16(2):297-305.

- [23] 温兴琦,程海芳,蔡建湖,等. 绿色供应链中政府补贴策略及效果分析[J]. 管理学报,2018,15(4):625-632.
WEN Xinqi, CHENG Haifang, CAI Jianhu, et al. Government subsidy polices and effect analysis in green supply chain[J]. Chinese Journal of Management, 2018, 15(4):625-632.
- [24] 贺勇,陈志豪,廖诺. 政府补贴方式对绿色供应链制造商减排决策的影响机制[J]. 中国管理科学,2022,30(6):87-98.
HE Yong, CHEN Zhihao, LIAO Nuo. The impact of mechanism of government subsidy approach on manufacturer's decision-making in green supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(6):87-98.
- [25] 张福安,李娜,达庆利,等. 基于两种补贴政策的多元需求闭环供应链低碳减排研究[J]. 中国管理科学,2023,31(10):116-127.
ZHANG Fuan, LI Na, DA Qingli, et al. Research on low-carbon emission reduction in a closed-loop supply chain with multiple demands under two subsidy policies[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(10):116-127.
- [26] HONG Z, GUO X. Green product supply chain contracts considering environmental responsibilities[J]. Omega, 2019, 83:155-166.
- [27] PANDA S, MODAK N M, CÁRDENAS-BARRÓN L E. Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 188:11-21.
- [28] XUE J, GONG R, ZHAO L, et al. A green supply-chain decision model for energy-saving products that accounts for government subsidies[J]. Sustainability, 2019, 11(8):2209.
- [29] 林志炳. 考虑企业社会责任的绿色供应链定价与制造策略研究[J]. 管理工程学报,2022,36(3):131-138.
LIN Zhibing. Research on pricing and manufacturing strategies in a green supply chain considering corporate social responsibility [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2022, 36(3):131-138.
- [30] 周驰,王艺馨,于静. 批发,代理还是混合? ——与自营平台竞争的复合平台销售模式选择策略[J]. 山东大学学报(理学版),2023,58(1):89-100.
ZHOU Chi, WANG Yixin, YU Jing. Wholesale, agency or hybrid: sales mode choices of hybrid platform in competition with self-run platform[J]. Journal of Shandong University(Natural Science), 2023, 58(1):89-100.

(编辑:祁业卿)

附录

定理 1 的证明

证明 平台的效用函数 V_p^{wc} 关于 p 和 s 的 Hessian 矩阵 $H_p(p,s) = \begin{pmatrix} \theta-2 & \eta(1-\theta) \\ \eta(1-\theta) & \theta\eta^2-2 \end{pmatrix}$ 负定, $V_p^{wc}(p,s)$ 是 p

和 s 的严格联合凹函数,联立求解方程组 $\frac{\partial V_p^{wc}}{\partial p} = \frac{\partial V_p^{wc}}{\partial s} = 0$, 得到反应函数 $p(w,\tau) = \frac{2(1-\theta)(\beta\tau+d)+w(2-\eta^2)}{4-\eta^2-2\theta}$ 和

$s(w,\tau) = \frac{\eta(\beta\tau+d-w)}{4-\eta^2-2\theta}$, 将其代入制造利润函数。当满足 $2(1-\gamma)(4-\eta^2-2\theta) - \beta^2 > 0$ 时, Hessian 矩阵

$$H_m(w,\tau) = \begin{pmatrix} \frac{-4}{4-\eta^2-2\theta} & \frac{2\beta}{4-\eta^2-2\theta} \\ \frac{2\beta}{4-\eta^2-2\theta} & 2(\gamma-1) \end{pmatrix} \text{负定, } \pi_m^{wc} \text{ 是关于 } w \text{ 和 } \tau \text{ 的联合凹函数, 求解一阶条件方程组, 得到最优批}$$

发价格 w_w^c 及碳减排水平 τ_w^c , 分别代入 $p(w,\tau)$ 和 $s(w,\tau)$, 可求得最优零售价格 p_w^c 和低碳推广水平 s_w^c , 分别代入制造商和平台利润函数中, 可求得供应链利润。

定理 2 的证明

证明 首先, $\frac{\partial^2 V_p^{ac}}{\partial s^2} = \theta\eta^2 - 2 < 0$, 由一阶条件 $\frac{\partial V_p^{ac}}{\partial s} = 0$, 求得反应函数 $s(p,\tau) = \frac{\eta\theta((d-p+\beta\tau)-p)}{2-\theta\eta^2}$, 代入制

$$\text{造利润函数, } \pi_m^{ac} \text{ 的 Hessian 矩阵 } H_m(p,\tau) = \begin{pmatrix} \frac{2(t-1)(t\eta^2-2)}{\theta\eta^2-2} & \frac{2\beta(t-1)}{\theta\eta^2-2} \\ \frac{2\beta(t-1)}{\theta\eta^2-2} & 2(\gamma-1) \end{pmatrix} \text{负定, } \pi_m^{ac} \text{ 是关于 } p \text{ 和 } \tau \text{ 的联合凹}$$

函数,联立求解一阶条件方程组,得到最优售价和最优减排水平,进而可求出平台最优低碳推广服务水平。

定理3和定理4的证明过程分别与定理1和定理2类似,不再重复。

性质1的证明

证明 以定理2中的相关均衡结果对政府补贴系数的敏感性为例,易得

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & \frac{\partial p_a^c}{\partial \gamma} = \frac{d\beta^2(1-t)(2-\theta\eta^2)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial s_a^c}{\partial \gamma} = \frac{d\eta\beta^2(1-t)(t+\theta-t\theta\eta^2)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial \bar{q}_a^c}{\partial \gamma} = \frac{d\beta^2(1-t)(2-t\eta^2)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial \tau_a^c}{\partial \gamma} = \frac{\alpha\beta^2(1-t)(2-\theta\eta^2)(2-t\eta^2)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0. \\
 (2) \quad & \frac{\partial \pi_p^{ac}}{\partial \gamma} = \frac{2d^2\beta^2(t-1)(1-\gamma)(\eta^2(t^2\eta^4\theta^2-3t^2\theta\eta^2+3t^2+\theta^2)+2t(\theta\eta^2(2-\theta\eta^2)-2))}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial \pi_m^{ac}}{\partial \gamma} = \frac{d^2\beta^2(1-t)^2}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0. \\
 (3) \quad & \frac{\partial CS_a^c}{\partial \gamma} = \frac{d^2\beta^2(1-t)^2(C+2\gamma(2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2))}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial EI_a^c}{\partial \gamma} = \frac{d^2\beta^2(1-t)(2-t\eta^2)(C+2\beta(1-t))}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial SW_a^c}{\partial \gamma} = \frac{2d^2\beta(1-t)g_2(\gamma)}{C^2},
 \end{aligned}$$

其中 $g_2(\gamma) = -a\gamma + b$, 由

$$\begin{aligned}
 a-b &= \beta(t-1)(2-t\eta^2)(\theta\eta^2+\beta^2/2-2) > 0, \\
 b &= ((-(6\theta+1)\beta-2)\eta^2-\beta^2+6\beta-\eta^4(\theta+2\beta\theta^2))\eta^2t^2+4\theta(\theta\beta+1)\eta^4 \\
 & \quad + ((-8-\beta^2+(-8\theta-4)\beta)\eta^2-2\beta^2+8\beta)t+(-2\beta\theta^2-4\theta)\eta^2+2(\beta^2+2\beta+4))/2 > 0
 \end{aligned}$$

可得,存在某一阈值 $\hat{\gamma}$ 使 $0 < \gamma_a < \hat{\gamma}$ 时, $\frac{\partial SW_a^c}{\partial \gamma} > 0$, 当 $\gamma_a > \hat{\gamma}$ 时, $\frac{\partial SW_a^c}{\partial \gamma} < 0$ 。

上述证明为代理销售模式研发补贴下的分析,其余情形分析过程相类似,此处省略。

性质2的证明

证明 以定理2中的相关均衡结果对平台履责水平的敏感性为例,易得

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & \frac{\partial p_a^c}{\partial \theta} = \frac{d\eta^2(1-\gamma)(1-t)\beta^2}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial \tau_a^c}{\partial \theta} = \frac{d\beta\eta^2(1-t)(1-\gamma)(2-t\eta^2)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial s_a^c}{\partial \theta} = \frac{d\eta(\gamma-1)((2-t\eta^2)^2(\gamma-1)+\beta^2(1-t\eta^2)(1-t))}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial \bar{q}_a^c}{\partial \theta} = \frac{d\eta^2(1-\gamma)^2(2-t\eta^2)^2}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0. \\
 (2) \quad & \frac{\partial \pi_m^{ac}}{\partial \theta} = \frac{d^2\eta^2(1-\gamma)^2(1-t)(2-t\eta^2)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0, \\
 & \frac{\partial \pi_p^{ac}}{\partial \theta} = \frac{d^2\eta^2(1-t)^2(\eta^2(\theta(t-1)\eta^4+2\beta^2\eta^2\theta-3\beta^2)\alpha^3+((-2\beta^2-6t+1)\theta\eta^4- \\
 & \quad (4\theta-3)\beta^2\eta^2+4\beta^2)\alpha^2+((4\beta^2+12t-12)\theta\eta^2+2\beta^2(\theta-2))\alpha-(2\beta^2+8t-8)\theta)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^3} > 0.
 \end{aligned}$$

$$(3) \frac{\partial CS_a^{c*}}{\partial \theta} = \frac{d^2 \eta^2 (1-\gamma)^2 (2-t\eta^2)^3}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^3} > 0,$$

$$\frac{\partial CS_a^{c*}}{\partial \theta} = \frac{2\beta d^2 \eta^2 (1-\gamma)^2 (2-t\eta^2)^2 (1-t)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^3} > 0.$$

上述证明为代理模式研发补贴下的分析,其余分析过程相类似,此处省略。

性质3的证明

证明 以定理2中的相关均衡结果对消费者低碳偏好的敏感性为例,易得

$$(1) \frac{\partial p_a^{c*}}{\partial \theta} = \frac{2d\beta(1-\gamma)(1-t)(2-\theta\eta^2)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0,$$

$$\frac{\partial \tau_a^{c*}}{\partial \theta} = \frac{d(1-t)(C+2\beta^2(1-t))}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0,$$

$$\frac{\partial s_a^{c*}}{\partial \theta} = \frac{2d\beta\eta(1-t)(1-\gamma)(t+\theta-t\theta\eta^2)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0.$$

$$(2) \frac{\partial \pi_m^{ac*}}{\partial \beta} = \frac{2d^2\beta(1-t)^2(1-\gamma)}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^2} > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_p^{ac*}}{\partial \beta} = \frac{4d^2\beta(t-1)(1-\gamma)^2(\eta^2(t^2\eta^4\theta^2-3t^2\theta\eta^2+3t^2+\theta^2)+2t(\theta\eta^2(2-\theta\eta^2)-2))}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^3} > 0.$$

$$(3) \frac{\partial CS_a^{c*}}{\partial \beta} = \frac{2\beta(1-t)d^2(1-\gamma)^2(2-t\eta^2)^2}{C^3} > 0,$$

$$\frac{\partial EI_a^{c*}}{\partial \theta} = \frac{d^2(1-\gamma)(1-t)(2-t\eta^2)(B+4\beta^2(1-t))}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^3} > 0,$$

$$\frac{\partial SW_a^{c*}}{\partial \beta} = \frac{d^2(t-1)(2\beta^3(1-t)^2+(\gamma-1)g(\gamma)+(1-\gamma)(t\eta^2-2)(C+4\beta^2(1-t)))}{((2-t\eta^2)(2-\theta\eta^2)(1-\gamma)-\beta^2(1-t))^3},$$

其中

$$g(\gamma) = 4d^2\theta^2\eta^6(\gamma-1)-2t\eta^4((4\theta+1)(\gamma-1)-\theta)t+1+(4\theta+2)(\gamma-1)+4((\gamma-2)t^2+(2\theta+4)(\gamma-1)-\theta+1)t+((\theta+2)(\gamma-1)+1)\theta\eta^2-6(\gamma-1)+2t-2.$$

上述证明为批发销售模式研发补贴下的分析,其余分析过程相类似,此处省略。

命题1的证明

证明 以批发模式下的最优定价和减排决策比较为例,显然

$$(1) \tau_w^{q*} - \tau_w^{c*} = \frac{d\beta(2f_w(\gamma_w)+2(\eta^2+2\theta-4)(1+\gamma_w)+\beta^2)}{(8-2\eta^2-4\theta-\beta^2)(2(4-\eta^2-2\theta)(1-\gamma_w)-\beta^2)} = \frac{a\beta(f_w(\gamma_w)-2A+B)}{4AB},$$

由反证法,假定 $\tau_w^{c*} \leq \tau_w^{q*}$, 则 $f_w(\gamma_w) \leq 2A-B$, 不等式平方并化简得 $4-\eta^2-2\theta-\frac{\beta^2}{4} \leq 0$, 与均衡解存在条件矛盾, 假设不成立, $\tau_w^{c*} > \tau_w^{q*}$

得证。 $\Delta\tau_a^* = \tau_a^{q*} - \tau_a^{c*} = \frac{d\beta(1-t)(f_a(\gamma_a)+C-2D)}{2CD}$, 由 $f_a(\gamma_a) \in (\beta\sqrt{2(1-t)D}, D)$ 和 $C < D$, $\Delta\tau_a^* < 0$ 得证。

$$(2) \frac{\partial \Delta p_w}{\partial f_w(\gamma_w)} = \frac{\beta^2+\eta^2-2}{4AB} < 0 \text{ 且 } f_w(\gamma_w) > B, \text{ 得 } \Delta p_w(f_w(\gamma_w)) < \Delta p_w(B) = \frac{d\beta^2\gamma_w(\eta^2+4\theta-6)}{4AB} < 0.$$

同上, $\frac{\partial \Delta w_w}{\partial f_w(\gamma_w)} = \frac{\beta^2+\eta^2+2\theta-4}{4AB} < 0$, $\Delta w_w(f_w(\gamma_w)) < \Delta w_w(B) = \frac{d\beta^2\gamma_w(\eta^2+2\theta-4)}{4AB} < 0$, 可证 $\Delta p_a < 0$, $\Delta w_a < 0$ 。

$$(3) s_w^{q*} - s_w^{c*} = \frac{d\eta(2f_w(\gamma_w)+2(\eta^2+2\theta+\beta^2-4)(1-\gamma_w)-\beta^2)}{2(8-2\eta^2-4\theta-\beta^2)(2(4-\eta^2-2\theta)(1-\gamma_w)-\beta^2)} = \frac{d\eta(f_w(\gamma_w)+B-A(1-\gamma_w))}{2AB},$$

假定 $s_w^{c*} > s_w^{q*}$, 则 $f_w(\gamma_w)^2 < (A(1-\gamma_w)-B)^2$, 化简得 $2\gamma_w\beta^2A(2\gamma_w-1) < 0$, 即 $\gamma_w < \frac{1}{2}$ 得证。由于代理模式的证明过程与此类似,

此处省略。

命题 2 的证明

证明 以批发模式下的制造商和平台利润比较为例,显然

$$(1) \text{ 由 } \pi_m^{wq*} - \pi_m^{wc*} = \frac{d^2(4Bf_w(\gamma_w) - 4A^2(\gamma_w - 1)^2 + \gamma_w \beta^2(\gamma_w \beta^2 + 2A))}{8AB^2} \text{ 且 } f_w(\gamma_w) > B, \Delta\pi_m^{w*} > \Delta\pi_m^{w*}(B) =$$

$$\frac{d^2\beta^2\gamma_w(2(4-\eta^2-2\theta)(2\gamma_w-1)+\beta^2)}{8AB^2} \text{ 可知,当 } \gamma_w > \frac{1}{2} - \frac{\beta^2}{4(4-\eta^2-2\theta)} \text{ 时, } \Delta\pi_m^{w*} > 0, \text{ 即 } \pi_m^{wc*} < \pi_m^{wq*}。$$

$$\text{将 } \Delta\pi_m^{a*} = \frac{d^2(1-t)(f_a(\gamma_a)^2 + 2Cf_a(\gamma_a) + 4(\gamma-1)CD + C^2)}{4C^2D} \text{ 代入 } f_a(\gamma_a) = \sqrt{C^2 + 2\gamma_a(1-t)\beta^2D} \text{ 整理得,}$$

$$\Delta_m = f_a(\gamma_a)^2 + 2Cf_a(\gamma_a) + 4(\gamma_a - 1)CD + C^2 > 2\gamma_a(1-t)\beta^2[(2\gamma_a - 1)(\eta^2 - 2)(\theta\eta^2 - 2) + \beta^2(t - 1)],$$

当 $\gamma_a < \frac{D}{2(2-\eta^2)(2-\theta\eta^2)}$ 时 $\Delta\pi_m^{a*} > 0$ 得证。

$$(2) \text{ 由 } \frac{\partial\Delta\pi_p^w}{\partial f_w(\gamma_w)} = \frac{d^2(4-\eta^2-4\theta)}{8A^2B} > 0 \text{ 和 } \Delta\pi_p^w(B) = \frac{d\beta^2\gamma_w(\eta^2+4\theta-4)((3-4\gamma_w)A-\beta^2\gamma_w)}{16A^2B^2}, \text{ 当 } \gamma_w >$$

$$\frac{3}{4}\left(1 - \frac{\beta^2}{4A+\beta^2}\right) \text{ 时, } \Delta\pi_p^w > \Delta\pi_p^w(B) > 0 \text{ 得证; 由 } \frac{\partial\Delta CS_1}{\partial f_w(\gamma_w)} = \frac{d^2B}{4A^2B} > 0 \text{ 和 } \Delta CS_w(B) = \frac{d\beta^2\gamma_w((3-4\gamma_w)A-\beta^2\gamma_w)}{4A^2B^2} \text{ 得,}$$

$\Delta CS_w > 0$ 的条件同上。

$$(3) \frac{\partial\Delta EI_w^*}{\partial f_w(\gamma_w)} = \frac{d^2\beta}{4A^2B} > 0, \Delta EI_w^* > \frac{g(\gamma_w)}{4A^2B^2}, \text{ 其中 } g(\gamma_w) = (4-\eta^2-2\theta)^2(\gamma-1) + \frac{\beta^2A}{4}, \text{ 由均衡解 3.1 假设条件得}$$

$$\Delta EI_w^* < \frac{\beta^2(4-\eta^2-2\theta)}{4} + \frac{\beta^4}{8} < 0。 \text{ 由于代理模式的证明过程与此类似,此处省略。}$$

命题 3 的证明

证明 (1) 以批发模式下的碳减排、消费者剩余、环境改善程度比较:

$$\Delta\tau^{c*} = \tau_w^{c*} - \tau_a^{c*} = \frac{d\beta(1-\gamma)(\eta^2-2)(t\theta\eta^2+2t\theta-2\theta-4t+2)}{2BC},$$

$$\text{由 } \frac{\partial\Delta\tau^{c*}}{\partial t} = \frac{d\beta(1-\gamma)(2-\eta^2)(2-\theta\eta^2)}{C^2} > 0, \text{ 得 } \Delta\tau_{t \rightarrow 0}^{c*} = \frac{d\beta(1-\theta)(2-\eta^2)(1-\gamma)}{B(2(2-\theta\eta^2)(\gamma-1)+\beta^2)}, \text{ 由 } 2(2-\theta\eta^2)(\gamma-1)+\beta^2 < 0, \text{ 得}$$

$$\Delta\tau^{c*} < 0; \text{ 由 } \tau_w^{c*} = \frac{d\beta}{2B} < \tau_a^{c*} = \frac{d\beta(1-t)}{C} \text{ 得 } \pi_m^{wc*} = \frac{d^2(1-\gamma)}{2B} < \pi_m^{ac*} = \frac{d^2(1-\gamma)(1-t)}{C}, \text{ 证毕。}$$

(2) 代理模式下的碳减排、消费者剩余、环境改善程度比较:

$$\Delta\tau^{q*} = \tau_w^{q*} - \tau_a^{q*} = \frac{\beta(2-\eta^2)((2((d+\lambda)\eta^2+2d)\theta-2\eta^2\lambda-\beta^2\lambda-8d)t-4(\theta-1)(d+\lambda))}{4AD},$$

$$\text{由 } \frac{\partial\Delta\tau^{q*}}{\partial t} = \frac{\beta(2-\eta^2)(2d(2-\theta\eta^2)+\beta^2\lambda)}{2D^2} > 0, \text{ 得 } \Delta\tau^{q*} > \Delta\tau_{t \rightarrow 0}^{q*} = \frac{\beta(2-\eta^2)(\theta-1)(d+\lambda)}{A(4-2\theta\eta^2-\beta^2)},$$

$$\text{由 } 4-2\theta\eta^2-\beta^2 > 0, \text{ 则 } \Delta\tau^{q*} < 0; \text{ 由 } \tau_w^{q*} = \frac{\beta(d+\lambda)}{A} < \tau_a^{q*} = \frac{\beta E(\lambda)}{D} \text{ 得 } \pi_{m1}^{q*} = \frac{(d+\lambda)^2}{A} < \pi_{m2}^{q*} = \frac{E(\lambda)^2}{D}, \text{ 证毕。}$$