

7-15-2024

Decision-Making Considering Power Consumption and Preference for New Energy Under Dual-Credit Policy

Fang Li

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China,
lifang2502@126.com

Tianhao Dong

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China,
dth989898@163.com

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Decision-Making Considering Power Consumption and Preference for New Energy Under Dual-Credit Policy

Abstract

Abstract: To explore the production decision-making problem of the electrification transformation in the domestic automobile industry faced by automobile manufacturers, different decision-making models under two production scenarios are constructed for the secondary supply chain composed of manufacturers and retailers under the background of a dual-credit policy. The electric energy consumption of new energy vehicles and consumers' preference for new energy are introduced. The Stackelberg game is applied to obtain the optimal production decision and income analysis of each member in the supply chain under different decision modes in different production scenarios. The results show that the in-depth implementation of the dual-credit policy is conducive to improving the power consumption level of new energy vehicles, reducing the sales price of new energy vehicles, expanding the market size, and promoting the fuel vehicles to improve the emission reduction level. Automobile enterprises should choose to improve the production capacity of new energy models under the centralized decision-making mode and gradually reduce the output of traditional fuel vehicles to bring more benefits to each member of the supply chain. In the short term, although the profit obtained by the manufacturer in the case of continuing production of fuel vehicles is higher than that in the case of stopping production of fuel vehicles, its profit fluctuates greatly while the profit shows a stable growth trend after the manufacturer stops production of fuel vehicles and fully transforms into production of new energy vehicles.

Keywords

dual-credit policy, electric power consumption, consumer preference for new energy, optimal decision, production decision

Recommended Citation

Li Fang, Dong Tianhao*. Decision-Making Considering Power Consumption and Preference for New Energy Under Dual-Credit Policy[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1596-1608.

双积分政策下考虑电耗、新能源偏好的决策研究

李芳, 董天浩*

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为探讨汽车制造商面对国内汽车行业电气化转型的生产决策问题, 在双积分政策背景下针对制造商、零售商组成的二级供应链构建两种生产情形下不同决策模型, 并引入新能源汽车电能消耗和消费者新能源偏好, 运用Stackelberg博弈求得不同生产情形中不同决策模式下供应链各成员最优生产决策与收益分析。结果表明: 双积分政策的深入实施有利于提高新能源汽车电能消耗水平, 降低新能源汽车销售价格, 扩大市场规模的同时促使燃油车提高减排水平; 车企应选择集中决策模式下提高新能源车型产能, 逐渐减少传统燃油车产量, 给供应链中各成员带来更多收益; 从短期看制造商继续生产燃油车的生产情形所获收益虽高于停产燃油车情形, 但其收益波动较大且制造商停产燃油车全面转型生产新能源汽车后的收益呈稳定增长趋势。

关键词: 双积分政策; 电能消耗; 消费者新能源偏好; 最优决策; 生产决策

中图分类号: TP391; F272.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)07-1596-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0375

引用格式: 李芳, 董天浩. 双积分政策下考虑电耗、新能源偏好的决策研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(7): 1596-1608.

Reference format: Li Fang, Dong Tianhao*. Decision-Making Considering Power Consumption and Preference for New Energy Under Dual-Credit Policy[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1596-1608.

Decision-Making Considering Power Consumption and Preference for New Energy Under Dual-Credit Policy

Li Fang, Dong Tianhao*

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To explore the production decision-making problem of the electrification transformation in the domestic automobile industry faced by automobile manufacturers, different decision-making models under two production scenarios are constructed for the secondary supply chain composed of manufacturers and retailers under the background of a dual-credit policy. The electric energy consumption of new energy vehicles and consumers' preference for new energy are introduced. The Stackelberg game is applied to obtain the optimal production decision and income analysis of each member in the supply chain under different decision modes in different production scenarios. The results show that the in-depth implementation of the dual-credit policy is conducive to improving the power consumption level of new energy vehicles, reducing the sales price of new energy vehicles, expanding the market size, and promoting the fuel vehicles to improve the emission reduction level. Automobile enterprises should choose to improve the production capacity of new energy models under the centralized decision-making mode and gradually reduce the output of traditional fuel vehicles to bring more benefits to each member of the supply chain. In the short term, although the profit obtained by the manufacturer in

收稿日期: 2023-04-04 修回日期: 2023-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(72271164); 上海市软科学研究重点项目(19692104000)

第一作者: 李芳(1966-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为闭环供应链、绿色供应链。E-mail: lifang2502@126.com

通讯作者: 董天浩(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为供应链管理。E-mail: dth989898@163.com

the case of continuing production of fuel vehicles is higher than that in the case of stopping production of fuel vehicles, its profit fluctuates greatly while the profit shows a stable growth trend after the manufacturer stops production of fuel vehicles and fully transforms into production of new energy vehicles.

Keywords: dual-credit policy; electric power consumption; consumer preference for new energy; optimal decision; production decision

0 引言

汽车产业作为国民支柱产业是“碳中和”的重要战略阵地。大力推广新能源汽车是我国实现“双碳”目标的重要路径,我国在2018年实施《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》^[1]。双积分政策核算主体都是乘用车企业,油耗积分由企业平均燃料消耗量和平均燃料消耗量目标值通过计算所得:CAFC(corporate average fuel consumption)积分=(CAFC达标值-CAFC实际值)×乘用车生产量。实际值低于达标值则产生正积分;反之产生负积分^[2]。NEV(new energy vehicle)积分值是指企业新能源积分实际值与达标值之间的差额。其中,NEV实际值=新能源单车积分×新能源车产量,NEV达标值=传统能源车产量×新能源积分比例系数。

早期研究从能源政策角度展开,如文献[3]研究早期车辆技术及燃油经济性政策在减排降耗方面的作用。文献[4]对全球多个国家新能源市场进行调查,以此为新能源产业政策提供改进建议。文献[5]研究疫情影响下补贴退坡等刺激政策使新能源汽车暂时获得优于燃油车市场优势。文献[6]构建两车企合作创新动态演化博弈模型,发现双积分政策和政府监管可促进两企业向积极合作方向演化。以上研究针对不同政策对车企生产决策影响,但未对新能源车型种类细分且没有考虑消费者的新能源偏好。文献[7]通过三阶段博弈,对双寡头新能源车企在研发竞争情形中分析企业总利润、社会福利函数变化趋势。文献[8]从闭环供应链视角在制造商、零售商之间构建成本分摊契约和责任分摊契约双渠道电池回收博弈模型,发

现2种不同回收契约模式可降低新能源汽车价格,扩大市场需求,增加电池回收率。以上模型研究在双积分政策背景下对供应链成员收益变化及契约进行选择,但并未涉及供应链生产定价与最优决策等方面的问题。

文献[9]研究双积分政策下汽车制造商定价策略和减排决策,探讨新能源汽车积分值和积分比例要求对政府和企业决策的作用,但仅考虑制造商生产新能源汽车并没有考虑双积分政策对传统燃油车收益的影响。文献[10]基于供应链参与主体博弈权力的差异,构建制造商主导、销售商主导、第三方回收商主导的不同决策模式下的博弈模型,发现只有加强合作协调才能实现利润最大化和环境友好的双赢。文献[11]研究4类具有不同合规能力的制造商在双积分政策约束下的产品策略选择,总结了这些汽车制造商最具成本效益的合规策略。文献[12]建立了传统能源车和新能源汽车联合决策模型,针对积分价格和汽车销量求解生产计划的鲁棒区间及策略调整。以上学者讨论双积分政策下制造商生产策略调整和收益影响,未考虑不同决策模式下汽车供应链生产决策变化趋势。文献[13]在研究双渠道零售商销售的供应链定价与减排决策时加入消费者低碳偏好。文献[14]分析低碳供应链在集中决策与分散决策下的各项最优决策,得出供应链利润随低碳偏好增加而增加的结论。文献[15]考虑在消费者低碳偏好影响下构建斯塔克伯格模型,得出低碳偏好提升企业产品价格的结论。以上研究在模型中纳入消费者低碳偏好的考量因素,分析得出制造商收益及定价决策,但未涉及制造商生产决策。

综上所述，本文考虑双积分政策下消费者新能源偏好及电耗水平对车辆需求、价格、减排水平的影响，并探讨不同决策模式下制造商最优生产决策以及收益变化，最后利用数值分析研究决策最优解与收益水平的变化趋势。

1 问题描述与假设

1.1 问题描述

本文考虑由一个制造商和一个零售商组成的二级汽车供应链，制造商分别生产燃油车、混动车、纯电车，以及仅生产混动车、纯电车 2 种情

形，如图 1 所示。本文涉及到的变量及参数说明，如表 1 所示。

汽车制造商为供应链中的主导者，零售商为汽车制造商的决策跟随者，博弈过程中主导者根据经验信息预测跟随者对自己所作决策的反应，优先进行决策以获得最大收益；处于弱势地位的跟随者，在主导者做出决策后再确定自身的最优决策，故汽车供应链构建 Stackelberg 模型进行主从博弈。最后通过逆向归纳法，从博弈的最后一个阶段开始逐步向前归纳各阶段参与者的最优策略选择。

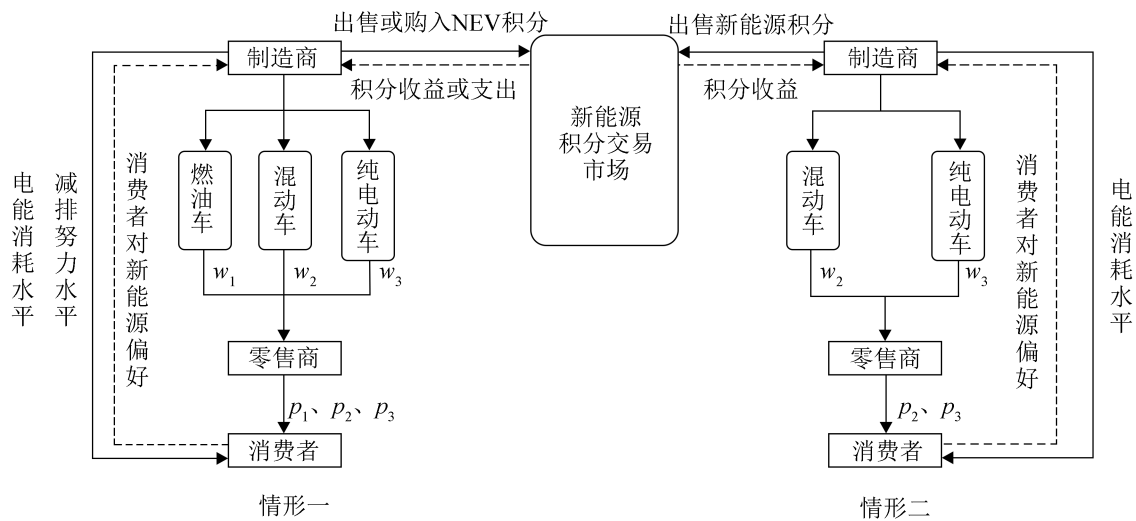


图 1 研究思路

Fig. 1 Research idea

表 1 模型相关参数说明

Table 1 Description of model-related parameters

符号	符号意义	符号	符号意义
p_1	燃油车销售价格	θ	消费者对新能源偏好程度
p_2	混动车销售价格	λ	国家规定新能源汽车积分比例要求
p_3	纯电动车销售价格	e_1	每台混动车型积分值
p_4	新能源积分交易价格	e_2	每台纯电动车型积分值
w_1	燃油车批发价格	a	国家规定平均燃料消耗量达标值
w_2	混动车批发价格	b	燃油车平均燃料消耗量实际值
w_3	纯电动车批发价格	m	燃油车减排努力成本系数
τ	燃油车减排努力水平	n_1	混动车电能消耗努力成本系数
k_1	混动车电能消耗努力水平	n_2	纯电动车电能消耗努力成本系数
k_2	纯电动车电能消耗努力水平	g	消费者对电能消耗的关切

1.2 基本假设

假设1: 由于CAFC正积分以及购买的NEV正积分仅限当年度使用, 为方便计算, 仅考虑单周期内决策^[16-17], 故本文考虑在单周期内CAFC积分结转问题。

假设2: 双积分政策中规定不同电能消耗量的新能源汽车积分值也不同, 积分值与电量消耗水平正相关, 故借鉴文献[18]假设每台新能源汽车积分核算公式为 $e_i \times k_i$, $i=1,2$ 。

假设3: 为保证双积分政策对燃油车有约束作用, 假设当前燃油车平均燃料消耗实际值未达标, 即 $b>a$ 。

假设4: 为便于计算分析, 在不影响结论准确性的前提下, 参照文献[19-20], 令生产成本为0, 假设3款车型的生产成本为0, 即 $c_1=c_2=c_3=0$ 。

假设5: 假设混动和纯电动车的电能消耗努力成本系数不同, 即 $n_1>n_2$ 。由于混动车搭载的电动机功率较小, 所以混动车电能消耗高于纯电动车型。以比亚迪生产的唐DM和EV车型为例, 唐2022款DM-i尊享型百公里耗电量为23.5 kW·h, 而唐EV2022款尊享型百公里耗电量为15.7 kW·h。

燃油车市场需求 D_1 受燃油车价格、消费者新能源偏好等影响, 混动车和纯电动车市场需求 D_2 和 D_3 受价格、消费者对电能消耗关切等影响, 可表示为

$$D_1=(1-\theta)A-fp_1+\tau$$

$$D_2=\frac{1}{2}\theta A-fp_2+gk_1$$

$$D_3=\frac{1}{2}\theta A-fp_3+gk_2$$

式中: A 为汽车市场整体需求量; f 为汽车价格敏感系数。为方便分析计算, 将 A 简化为1, 并令 $f=1$ 。故汽车需求函数为

$$D_1=(1-\theta)-p_1+\tau$$

$$D_2=\frac{1}{2}\theta-p_2+gk_1$$

$$D_3=\frac{1}{2}\theta-p_3+gk_2$$

将燃油车的减排努力成本、混动车和纯电动车的电能消耗努力成本分别表示为

$$C(\tau)=\frac{1}{2}m\tau^2$$

$$C(k_1)=\frac{1}{2}n_1k_1^2$$

$$C(k_2)=\frac{1}{2}n_2k_2^2$$

同时采用不同上标 ij 来区别决策情况, “ $i=1,2$ ”表示情形一、情形二, “ $j=1,2$ ”表示分散决策、集中决策; 下标M、R、sc分别代表制造商、零售商、供应链整体。

2 模型构建与分析

2.1 情形一: 制造商生产燃油车、混动车以及纯电动车

2.1.1 分散决策

汽车制造商的利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_M^{11} = & D_1w_1 + D_2w_2 + D_3w_3 + \\ & [a-(1-\tau)b]D_1p_4 + \\ & (e_1k_1D_2 + e_2k_2D_3 - \lambda D_1)p_4 - \\ & \frac{m\tau^2}{2} - \frac{n_1k_1^2}{2} - \frac{n_2k_2^2}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: 第1、2、3项为制造商生产燃油车、混动车、纯电动车的收益; 第4项为抵消CAFC负积分所需费用; 第5项为制造商出售生产NEV积分所得收益; 第6项为燃油车减排努力成本; 第7、8项为新能源车型电能消耗努力成本。

零售商的利润函数为

$$\Pi_R^{11} = (p_1 - w_1)D_1 + (p_2 - w_2)D_2 + (p_3 - w_3)D_3 \quad (2)$$

式中: 第1项为零售商销售燃油车的收益; 第2、3项为零售商销售混动车、纯电动车的收益。采用逆向归纳法对模型求解。式(2)关于 p_1 、 p_2 、 p_3 的Hessian矩阵为

$$H_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_1^2} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_1 \partial p_2} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_1 \partial p_3} \\ \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_2 \partial p_1} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_2^2} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_2 \partial p_3} \\ \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_3 \partial p_1} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_3 \partial p_2} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{11}}{\partial p_3^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

此时, H_1 为负定阵, 故存在唯一最优解使得

$$H_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \frac{1-bp_4}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{g-e_1p_4}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{g-e_2p_4}{2} \\ \frac{1-bp_4}{2} & 0 & 0 & -m+bp_4 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{g-e_1p_4}{2} & 0 & 0 & -n_1+ge_1p_4 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{g-e_2p_4}{2} & 0 & 0 & -n_2+ge_2p_4 \end{bmatrix}$$

当满足 $1-4m+2bp_4+b^2p_4^2 < 0$, $(g+e_1p_4)^2-4n_1 < 0$ 且 $4n_2-(g+e_2p_4)^2 > 0$ 时 H_2 为负定阵。令式(1)关于各决策变量的一阶导数等于 0, 联立求出各最优解为

$$w_1^{11} = \frac{2(-1+\theta)m-(a-2am+\lambda(-1+2m))}{1-4m+2bp_4+b^2p_4^2} + \frac{b(-2+\theta+2m)p_4}{1-4m+2bp_4+b^2p_4^2} + \frac{b(-a-b(-2+\theta)+\lambda)p_4^2}{1-4m+2bp_4+b^2p_4^2}$$

$$w_2^{11} = \frac{\theta(-2n_1+e_1p_4(g+e_1p_4))}{2(-4n_1+(g+e_1p_4)^2)}$$

$$w_3^{11} = \frac{\theta(-2n_2+e_2p_4(g+e_2p_4))}{2(-4n_2+(g+e_2p_4)^2)}$$

$$\tau^{11} = \frac{(1+bp_4)(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)}{1-4m+2bp_4+b^2p_4^2}$$

$$k_1^{11} = -\frac{\theta(g+e_1p_4)}{2(-4n_1+(g+e_1p_4)^2)}$$

$$k_2^{11} = -\frac{\theta(g+e_2p_4)}{2(-4n_2+(g+e_2p_4)^2)}$$

目标函数利润最大。令式(2)关于 p_1 、 p_2 、 p_3 的一阶导数等于 0, 可得零售商最优销售价格反应函数为

$$p_1 = \frac{1-\theta+\tau+\omega_1}{2}$$

$$p_2 = \frac{\theta+2gk_1+2w_2}{4}$$

$$p_3 = \frac{1}{4}(\theta+2gk_2+2w_3)$$

将零售商三个销售价格反应函数代入制造商利润函数式(1), 得到其 Hessian 矩阵为

将制造商的决策变量代入零售商最优销售价格反应函数, 可得零售商最优决策为

$$p_1^{11} = \frac{3(-1+\theta)m-(a+\lambda(-1+m))}{1-4m+2bp_4+b^2p_4^2} - \frac{am+b(-2+\theta+m)p_4}{1-4m+2bp_4+b^2p_4^2} + \frac{b(-a-b(\theta-2)+\lambda)p_4^2}{1-4m+2bp_4+b^2p_4^2}$$

$$p_2^{11} = \frac{\theta(-3n_1+e_1p_4(g+e_1p_4))}{2(-4n_1+(g+e_1p_4)^2)}$$

$$p_3^{11} = \frac{\theta(-3n_2+e_2p_4(g+e_2p_4))}{2(-4n_2+(g+e_2p_4)^2)}$$

再将各决策变量代入需求函数及制造商、零售商利润函数, 可得

$$D_1^{11} = \frac{m(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)}{1-4m+2bp_4+b^2p_4^2}$$

$$D_2^{11} = \frac{\theta n_1}{2(4n_1-(g+e_1p_4)^2)}$$

$$D_3^{11} = \frac{\theta n_2}{2(4n_2-(g+e_2p_4)^2)}$$

$$\begin{aligned} \Pi_M^{11} &= \frac{16m^2(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)^2}{8(1-4m+2bp_4+b^2p_4^2)^2} - \\ &\quad \frac{4m(1+bp_4)^2(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)^2}{8(1-4m+2bp_4+b^2p_4^2)^2} + \\ &\quad \frac{4\theta^2n_1^2-\theta^2n_1(g+e_1p_4)^2}{8(-4n_1+(g+e_1p_4)^2)^2} + \\ &\quad \frac{4\theta^2n_2^2-\theta^2n_2(g+e_2p_4)^2}{8(-4n_2+(g+e_2p_4)^2)^2} \\ \Pi_R^{11} &= \frac{4m^2(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)^2}{4(1-4m+2bp_4+b^2p_4^2)^2} + \\ &\quad \frac{\theta^2n_1^2}{4(-4n_1+(g+e_1p_4)^2)^2} + \\ &\quad \frac{\theta^2n_2^2}{4(-4n_2+(g+e_2p_4)^2)^2} \\ \Pi_{sc}^{11} &= \frac{48m^2(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)^2}{16(1-4m+2bp_4+b^2p_4^2)^2} - \\ &\quad \frac{8m(1+bp_4)^2(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)^2}{16(1-4m+2bp_4+b^2p_4^2)^2} + \\ &\quad \frac{12\theta^2n_1^2-2\theta^2n_1(g+e_1p_4)^2}{16(-4n_1+(g+e_1p_4)^2)^2} + \\ &\quad \frac{12\theta^2n_2^2-2\theta^2n_2(g+e_2p_4)^2}{16(-4n_2+(g+e_2p_4)^2)^2} \end{aligned}$$

2.1.2 集中决策

在集中决策下制造商、零售商以供应链整体收益最大化为决策目标。汽车供应链集中决策利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_{sc}^{12} &= D_1w_1 + D_2w_2 + D_3w_3 + [a-(1-\tau b)]D_1p_4 + \\ &\quad (e_1k_1D_2 + e_2k_2D_3 - \lambda D_1)p_4 - \frac{1}{2}m\tau^2 - \\ &\quad \frac{1}{2}n_1k_1^2 - \frac{1}{2}n_2k_2^2 + (p_1 - w_1)D_1 + \\ &\quad (p_2 - w_2)D_2 + (p_3 - w_3)D_3 \end{aligned}$$

求解可得

$$\begin{aligned} p_1^{12} &= \frac{(-m+2bp_4)(1-\theta-ap_4+bp_4+\lambda p_4)}{1-2m+2bp_4+b^2p_4^2} - \\ &\quad \frac{(1-bp_4)(ap_4-b\theta p_4-\lambda p_4)}{1-2m+2bp_4+b^2p_4^2} \\ p_2^{12} &= \frac{\theta(-n_1+e_1p_4(g+e_1p_4))}{2(-2n_1+(g+e_1p_4)^2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_3^{12} &= \frac{\theta(-n_2+e_2p_4(g+e_2p_4))}{2(-2n_2+(g+e_2p_4)^2)} \\ \tau^{12} &= \frac{(1+bp_4)(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)}{1-2m+2bp_4+b^2p_4^2} \end{aligned}$$

$$k_1^{12} = -\frac{\theta(g+e_1p_4)}{2(-2n_1+(g+e_1p_4)^2)}$$

$$k_2^{12} = -\frac{\theta(g+e_2p_4)}{2(-2n_2+(g+e_2p_4)^2)}$$

代入需求函数及供应链利润函数, 可得

$$D_1^{12} = \frac{m(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)}{1-2m+2bp_4+b^2p_4^2}$$

$$D_2^{12} = \frac{\theta n_1}{2(2n_1-(g+e_1p_4)^2)}$$

$$D_3^{12} = \frac{\theta n_2}{2(2n_2-(g+e_2p_4)^2)}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{sc}^{12} &= \frac{8m^2(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)^2}{8(1-2m+2bp_4+b^2p_4^2)^2} - \\ &\quad \frac{4m(1+bp_4)^2(-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)^2}{8(1-2m+2bp_4+b^2p_4^2)^2} + \\ &\quad \frac{2\theta^2n_1^2-\theta^2n_1(g+e_1p_4)^2}{8(-2n_1+(g+e_1p_4)^2)^2} + \\ &\quad \frac{2\theta^2n_2^2-\theta^2n_2(g+e_2p_4)^2}{8(-2n_2+(g+e_2p_4)^2)^2} \end{aligned}$$

2.2 情形二: 制造商仅生产混动车及纯电动车

2.2.1 分散决策

汽车制造商的利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_M^{21} &= D_2w_2 + D_3w_3 + (e_1k_1D_2 + e_2k_2D_3)p_4 - \\ &\quad \frac{n_1k_1^2}{2} - \frac{n_2k_2^2}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: 第1、2项为生产商制造混动车、纯电动车的收益; 第3项为制造商出售生产新能源车型所得NEV积分收益; 第4、5项为新能源车型电能消耗努力成本。

零售商的利润函数为

$$\Pi_R^{21} = (p_2 - w_2)D_2 + (p_3 - w_3)D_3 \quad (4)$$

式中: 第1、2项为零售商销售混动车、纯电动车的收益。求解方法同上, 可得

$$w_2^{21} = -\frac{2\theta n_1 - g\theta e_1 p_4 - \theta e_1^2 p_4^2}{2(g^2 - 4n_1 + 2ge_1 p_4 + e_1^2 p_4^2)}$$

$$w_3^{21} = -\frac{2\theta n_2 - g\theta e_2 p_4 - \theta e_2^2 p_4^2}{2(g^2 - 4n_2 + 2ge_2 p_4 + e_2^2 p_4^2)}$$

$$k_1^{21} = -\frac{g\theta + \theta e_1 p_4}{2(g^2 - 4n_1 + 2ge_1 p_4 + e_1^2 p_4^2)}$$

$$k_2^{21} = -\frac{g\theta + \theta e_2 p_4}{2(g^2 - 4n_2 + 2ge_2 p_4 + e_2^2 p_4^2)}$$

$$p_2^{21} = \frac{\theta(-3n_1 + e_1 p_4 (g + e_1 p_4))}{2(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)}$$

$$p_3^{21} = \frac{\theta(-3n_2 + e_2 p_4 (g + e_2 p_4))}{2(-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)}$$

$$D_2^{21} = \frac{\theta n_1}{2(4n_1 - (g + e_1 p_4)^2)}$$

$$D_3^{21} = \frac{\theta n_2}{2(4n_2 - (g + e_2 p_4)^2)}$$

$$\Pi_M^{21} = \frac{\theta^2(n_2(g + e_1 p_4)^2 + n_1(-8n_2 + (g + e_2 p_4)^2))}{8(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)(-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)}$$

$$\Pi_R^{21} = \frac{\theta^2 n_2^2 (g + e_1 p_4)^4}{4(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)^2 (-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)^2} + \frac{\theta^2 n_1^2 (32n_2^2 - 8n_2(g + e_2 p_4)^2)}{4(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)^2 (-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)^2} + \frac{(g + e_2 p_4)^4 - 8\theta^2 n_1 n_2^2 (g + e_1 p_4)^2}{4(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)^2 (-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)^2}$$

$$\Pi_{sc}^{21} = \frac{2n_1^2 \theta^2 (96n_2^2 - 32n_2(g + e_2 p_4)^2)}{8(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)^2 (-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)^2} + \frac{3(g + e_2 p_4)^4}{8(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)^2 (-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)^2} - \frac{n_1 \theta^2 (g + e_1 p_4)^2 (-8n_2 + (g + e_2 p_4)^2)^2}{8(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)^2 (-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)^2} - \frac{n_2 \theta^2 (g + e_1 p_4)^4 (-6n_2 + (g + e_2 p_4)^2)}{8(-4n_1 + (g + e_1 p_4)^2)^2 (-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2)^2}$$

2.2.2 集中决策

在集中决策模式下，汽车制造商与零售商均以实现整个供应链的收益最大化为决策目标。汽车供应链集中决策利润函数为

$$\Pi_{sc}^{22} = D_2 w_2 + D_3 w_3 + (e_1 k_1 D_2 + e_2 k_2 D_3) p_4 - \frac{1}{2} n_1 k_1^2 - \frac{1}{2} n_2 k_2^2 + (p_2 - w_2) D_2 + (p_3 - w_3) D_3$$

求解可得

$$p_2^{22} = -\frac{\theta n_1 - g\theta e_1 p_4 - \theta e_1^2 p_4^2}{2(g^2 - 2n_1 + 2ge_1 p_4 + e_1^2 p_4^2)}$$

$$p_3^{22} = -\frac{\theta n_2 - g\theta e_2 p_4 - \theta e_2^2 p_4^2}{2(g^2 - 2n_2 + 2ge_2 p_4 + e_2^2 p_4^2)}$$

$$k_1^{22} = -\frac{g\theta + \theta e_1 p_4}{2(g^2 - 2n_1 + 2ge_1 p_4 + e_1^2 p_4^2)}$$

$$k_2^{22} = -\frac{g\theta + \theta e_2 p_4}{2(g^2 - 2n_2 + 2ge_2 p_4 + e_2^2 p_4^2)}$$

由此可得

$$D_2^{22} = \frac{\theta n_1}{2(2n_1 - (g + e_1 p_4)^2)}$$

$$D_3^{22} = \frac{\theta n_2}{2(2n_2 - (g + e_2 p_4)^2)}$$

$$\Pi_{sc}^{22} = \frac{\theta^2(n_2(g + e_1 p_4)^2 + n_1(-4n_2 + (g + e_2 p_4)^2))}{8(-2n_1 + (g + e_1 p_4)^2)(-2n_2 + (g + e_2 p_4)^2)}$$

3 模型分析

命题一：当汽车制造商生产燃油车、混动车及纯电动车，即情形一时： $(\partial \tau^{11})/(\partial \lambda) < 0$ ， $(\partial \tau^{11})/(\partial m) < 0$ ， $(\partial \tau^{12})/(\partial \lambda) < 0$ ， $(\partial \tau^{12})/(\partial m) < 0$ ， $(\partial \tau^{11})/(\partial \theta) < 0$ ， $(\partial \tau^{12})/(\partial \theta) < 0$ 。在分散决策模式下，若 $p_4 > p_4^1$ 时，则 $(\partial \tau^{11})/(\partial p^4) < 0$ ，若 $0 < p_4 < p_4^1$ ，则 $(\partial \tau^{11})/(\partial p^4) > 0$ ；在集中决策模式下，若 $0 < p_4 < p_4^2$ 时， $(\partial \tau^{12})/(\partial p^4) > 0$ ，若 $p_4 > p_4^2$ ，则 $(\partial \tau^{12})/(\partial p^4) < 0$ 。

证明：存在 $p_4 = p_4^1 = (B_1 - \sqrt{B_2 + B_3})/B_4$ ，使得 $(\partial \tau^{11})/(\partial p_4) = 0$ 且 $(\partial^2 \tau^{11})/(\partial p_4^2) > 0$ ；存在 $p_4 = p_4^2 = (B_1 - \sqrt{B_2 - B_3})/B_4$ ，使得 $(\partial \tau^{12})/(\partial p^4) = 0$ 且 $(\partial^2 \tau^{12})/(\partial p_4^2) > 0$ 。其中， $B_1 = 2ab - 4b^2 - 8abm + 8b^2 m + 2b^2 \theta - 2b\lambda + 8bml$ ， $B_2 = -4(-ab^2 + 2b^3 - b^3 \theta +$

$b^2\lambda) \times (-a + 2b + 4am - b\theta - 4bm\theta + \lambda - 4m\lambda)$, $B_3 = (-2ab + 4b^2 + 8abm - 8b^2m - 2b^2\theta + 2b\lambda - 8bm\lambda)^2$, $B_4 = 2(-ab^2 + 2b^3 - b^3\theta + b^2\lambda)$.

命题一表明, 当制造商生产燃油车, 即情形一时, 两种决策模式下, 燃油车减排努力水平 τ 与新能源汽车积分比例要求 λ 、燃油车减排努力成本系数 m 呈负相关。积分比例要求、减排努力成本越高, 则燃油车减排努力水平越低。当积分价格处在某阈值范围内时, 提高价格有利于燃油车减排努力水平提高, 若超出该阈值范围, 积分价格再上升, 不利于燃油车减排努力水平提升, 故政策制定者应设定一个适当的积分价格范围。

命题二: $(\partial p_2^{11})/(\partial n_1) > 0$, $(\partial p_3^{11})/(\partial n_2) > 0$, $(\partial p_3^{12})/(\partial n_2) > 0$, $(\partial p_2^{11})/(\partial g) > 0$, $(\partial p_2^{12})/(\partial g) > 0$, $(\partial p_3^{11})/(\partial g) > 0$, $(\partial p_3^{12})/(\partial g) > 0$, $(\partial p_1^{11})/(\partial \theta) < 0$, $(\partial p_2^{11})/(\partial \theta) > 0$, $(\partial p_3^{11})/(\partial \theta) > 0$, $(\partial p_1^{12})/(\partial \theta) < 0$, $(\partial p_2^{12})/(\partial \theta) > 0$, $(\partial p_3^{12})/(\partial \theta) > 0$, $(\partial p_1^{11})/(\partial p_4) > 0$, $(\partial p_2^{11})/(\partial p_4) < 0$, $(\partial p_3^{11})/(\partial p_4) < 0$, $(\partial p_1^{12})/(\partial p_4) > 0$, $(\partial p_2^{12})/(\partial p_4) < 0$, $(\partial p_3^{12})/(\partial p_4) < 0$ 。

证明: 同上。

命题二表明, 两种决策模式下, 混动车与纯电动汽车价格 p_2 、 p_3 随混动车电耗成本 n_1 、纯电动车电耗成本 n_2 的增加而增加, 也随消费者对电能消耗关切 g 的增加而增加。消费者对电耗关切以及新能源偏好在提高新能源车辆售价的同时降低燃油车价格。混动车与纯电车售价随积分价格增大而递减, 积分价格上涨使得制造商从中收益更多, 适当下降新能源汽车售价可换取更大的市场销量, 零售商也因此产生更多收益, 从而形成良性循环。

命题三: $(\partial D_1^{11})/(\partial m) < 0$, $(\partial D_1^{12})/(\partial m) < 0$, $(\partial D_1^{11})/(\partial \theta) < 0$, $(\partial D_1^{12})/(\partial \theta) < 0$; $(\partial D_2^{11})/(\partial n_1) < 0$, $(\partial D_3^{11})/(\partial n_2) < 0$, $(\partial D_2^{12})/(\partial n_1) < 0$, $(\partial D_3^{12})/(\partial n_2) < 0$, $(\partial D_2^{11})/(\partial g) > 0$, $(\partial D_3^{11})/(\partial g) > 0$, $(\partial D_2^{12})/(\partial g) > 0$, $(\partial D_3^{12})/(\partial g) > 0$, $(\partial D_2^{11})/(\partial \theta) > 0$, $(\partial D_3^{11})/(\partial \theta) > 0$, $(\partial D_2^{12})/(\partial \theta) > 0$, $(\partial D_3^{12})/(\partial \theta) > 0$ 。

证明: 同上。

命题三表明, 当制造商生产燃油车(即情形一)时, 燃油车市场需求 D_1 随着燃油车减排成本 m 、消费者新能源偏好 θ 的增加而递减, 因此, 制造商也会降低燃油车产量。当制造商只生产新能源车型(即情形二)时, 在两种决策模式中混动车需求 D_2 、纯电车需求 D_3 与混动车电耗努力成本 n_1 、纯电动车电耗努力成本 n_2 呈负相关, 但与消费者对电耗关切 g 成正相关。电耗关切的增加, 表明消费者逐渐注重新能源车辆百公里电耗水平, 制造商为获得更多销量, 努力提升车辆电耗表现, 而提升新能源车电耗水平成本增加, 降低了新能源汽车市场需求。

命题四: 当 $\lambda > \lambda_1$ 时, $(\partial \Pi_M^{11})/(\partial \lambda) > 0$; 当 $0 < \lambda < \lambda_1$ 时, $(\partial \Pi_M^{11})/(\partial \lambda) < 0$; 当 $0 < \lambda < \lambda_2$ 时, $(\partial \Pi_R^{11})/(\partial \lambda) < 0$; 当 $\lambda > \lambda_2$ 时, $(\partial \Pi_R^{11})/(\partial \lambda) > 0$; 当 $0 < \lambda < \lambda_3$ 时, $(\partial \Pi_{sc}^{12})/(\partial \lambda) < 0$; 当 $\lambda > \lambda_3$ 时, $(\partial \Pi_{sc}^{12})/(\partial \lambda) > 0$ 。

证明: 存在 $\lambda = \lambda_1$, 使得 $(\partial \Pi_M^{11})/(\partial \lambda) = 0$, $(\partial^2 \Pi_M^{11})/(\partial \lambda^2) = -(mp_4^2)/(1 - 4m + 2bp_4 + b^2p_4^2) > 0$; 存在 $\lambda = \lambda_2$, 使得 $(\partial \Pi_R^{11})/(\partial \lambda) = 0$, $(\partial^2 \Pi_R^{11})/(\partial \lambda^2) = (2m^2p_4^2)/((1 - 4m + 2bp_4 + b^2p_4^2)^2) > 0$; 存在 $\lambda = \lambda_3$, 使得 $(\partial \Pi_{sc}^{12})/(\partial \lambda) = 0$, $(\partial^2 \Pi_{sc}^{12})/(\partial \lambda^2) = -(mp_4^2)/(1 - 2m + 2bp_4 + b^2p_4^2) > 0$ 。其中, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = (ap_4 - bp_4 - \theta + 1)/(p_4)$ 。

命题四表明, 当制造商生产燃油车时, 新能源积分比例要求 λ 处于较小阈值范围内, 分散决策模式下制造商利润 Π_M^{11} 、零售商利润 Π_R^{11} , 以及集中决策模式下供应链整体利润 Π_{sc}^{12} 随 λ 的增大而递减; 若 λ 超出此阈值范围, 则各方利润随 λ 的增大而递增。当 λ 较小时, 积分比例系数加大, 使得制造商花费更多资金去购买积分; 当 λ 较大时, 积分比例系数的增加推动制造商提高燃油车减排努力水平和新能源汽车电耗水平, 消费者更青睐此类产品, 高水平车辆市场需求的扩增使得各方均能受益。

命题五: $(\partial \Pi_M^{11})/(\partial n_1) < 0$, $(\partial \Pi_R^{11})/(\partial n_1) < 0$, $(\partial \Pi_{sc}^{12})/(\partial n_1) < 0$, $(\partial \Pi_M^{21})/(\partial n_1) < 0$, $(\partial \Pi_R^{21})/(\partial n_1) < 0$, $(\partial \Pi_{sc}^{21})/(\partial n_1) < 0$ 。

0, $(\partial\Pi_{sc}^{22})/(\partial n_1) < 0$, $(\partial\Pi_M^{11})/(\partial n_2) < 0$, $(\partial\Pi_R^{11})/(\partial n_2) < 0$, $(\partial\Pi_{sc}^{12})/(\partial n_2) < 0$, $(\partial\Pi_M^{21})/(\partial n_2) < 0$, $(\partial\Pi_R^{21})/(\partial n_2) < 0$, $(\partial\Pi_{sc}^{22})/(\partial n_2) < 0$.

证明: 同上。

命题五表明, 在情形一、二中分散决策下, 制造商的利润 Π_M^{11} 、零售商的利润 Π_R^{11} , 以及集中决策下供应链整体利润均为关于混动车电能消耗努力成本系数 n_1 、纯电车电能消耗努力成本系数 n_2 的减函数。为不断提高电能消耗努力水平需不断增加成本, 导致制造商、零售商乃至供应链整体收益下降。

4 决策比较

命题六: 当 $0 < p_4 < (1-\theta)/(b-a+\lambda)$ 时, $\tau^{12} - \tau^{11} > 0$; 当 $p_4 > (1-\theta)/(b-a+\lambda)$ 时, $\tau^{12} - \tau^{11} < 0$; 当 $0 < p_4 < (-4ge_1 - \theta e_1 + e_1\sqrt{\theta^2 + 64n_1})/(4e_1^2)$ 时, $k_1^{12} - k_1^{11} < 0$; 当 $p_4 > (-4ge_1 - \theta e_1 + e_1\sqrt{\theta^2 + 64n_1})/(4e_1^2)$ 时, $k_1^{12} - k_1^{11} > 0$; 当 $0 < p_4 < (\sqrt{2n_2} - g)/e_2$ 或 $p_4 > (\sqrt{4n_2} - g)/e_2$ 时, $k_2^{12} - k_2^{11} > 0$; 当 $(\sqrt{2n_2} - g)/e_2 < p_4 < (\sqrt{4n_2} - g)/e_2$ 时, $k_2^{12} - k_2^{11} < 0$ 。

证明: $\tau^{12} - \tau^{11} = (-2m(1+bp_4))/((-1+2m-2bp_4-b^2p_4^2)) \times (-1+\theta+(-a+b+\lambda)p_4)/(1-4m+2bp_4+b^2p_4^2)$, 因 $1-2m+2bp_4+b^2p_4^2 < 0$ 、 $1-4m+2bp_4+b^2p_4^2 < 0$ 且 $-a+b+\lambda > 0$, 故当 $p_4 = -1/(b)$ 或 $p_4 = (1-\theta)/(b-a+\lambda)$ 时, $\tau^{12} - \tau^{11} = 0$ 。当 $0 < p_4 < (1-\theta)/(b-a+\lambda)$ 时, $\tau^{12} < \tau^{11}$, 反之, $\tau^{12} > \tau^{11}$ 。同理, $k_1^{12} - k_1^{11} = (\theta^{11}(g+e_1p_4)^{11}(-8n_1+(g+e_1p_4)(2g+\theta+2e_1p_4)))/(4096(-4n_1+(g+e_1p_4)^2)^{12})$, $k_2^{12} - k_2^{11} = (\theta n_2(g+e_2p_4))/(8n_2^2-6n_2(g+e_2p_4)^2+(g+e_2p_4)^4)$, 亦可求解得出。

命题六表明, 积分价格 p_4 会影响燃油车减排努力水平。若使燃油车具备良好的减排水平, 在积分价格较低时, 制造商和零售商应选择分散决策模式; 当积分价格较高时, 选择集中决策模式会具备更出色的减排水平。同样, 积分价格较低

时, 分散决策下混动汽车电能消耗水平更优, 但当积分价格上升后, 集中决策模式下混动汽车电耗表现相对出色。但对纯电车来说, 当积分价格处于较低或较高范围时, 集中决策下纯电车电耗表现优于分散决策, 反之, 分散决策模式优于集中决策模式。

命题七: 当 $0 < p_4 < (-1 + \sqrt{2m})/b$ 时, $D_1^{12} > D_1^{11}$; 当 $p_4 > (-1 + \sqrt{2m})/b$ 时, $D_1^{12} < D_1^{11}$; 当 $0 < p_4 < (\sqrt{2n_1} - g)/e_1$ 或 $p_4 > (\sqrt{4n_1} - g)/e_1$ 时, $D_2^{12} > D_2^{11}$; 当 $(\sqrt{2n_1} - g)/e_1 < p_4 < (\sqrt{4n_1} - g)/e_1$ 时, $D_2^{12} < D_2^{11}$; 当 $0 < p_4 < (\sqrt{2n_2} - g)/e_2$ 或 $p_4 > (\sqrt{4n_2} - g)/e_2$ 时, $D_3^{12} > D_3^{11}$; 当 $-(\sqrt{2n_2} - g)/e_2 < p_4 < (\sqrt{4n_2} - g)/e_2$ 时, $D_3^{12} < D_3^{11}$ 。

证明: 同上。

命题七表明, 积分价格会影响燃油车市场需求规模。在积分价格较低时, 制造商和零售商选择集中决策模式有较好的燃油车市场需求表现; 当积分价格较高时, 选择分散决策模式会有更高销量。积分价格也能影响混动车市场需求和纯电动车市场需求。当积分价格处于较低或较高范围时, 制造商和零售商在集中决策下的市场需求高于分散决策, 反之, 分散决策模式下新能源汽车市场需求高于集中决策。

命题八: $\Pi_M^{21} - \Pi_M^{11} < 0$; $\Pi_R^{21} - \Pi_R^{11} < 0$; $\Pi_{sc}^{22} - \Pi_{sc}^{12} < 0$; $\Pi_{sc}^{12} - \Pi_{sc}^{11} > 0$; $\Pi_{sc}^{22} - \Pi_{sc}^{21} > 0$ 。

证明: 同上。

命题八表明, 制造商零售商在分散决策模式下生产销售燃油车, 虽有制造成本、消除燃油负积分成本的产生, 但出售燃油车所产生的收益回报大于付出成本, 所以在分散决策下, 制造商、零售商选择继续生产销售燃油车(即情形一)所获得收益高于只生产新能源车辆所获收益(即情形二)。同理, 集中决策下情形一中整体收益也高于情形二中收益。并且在两种生产情形中, 集中决策下的供应链整体收益都是高于分散决策下收益。

5 数值分析与决策比较

为验证上述模型的真实性与合理性, 本节采用 Matlab 绘制图形进行算例分析。参考工信部 2020 年 6 月 29 日发布的《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》中提到的 2022 年度新能源汽车积分比例要求为 16%, 故令 $\lambda=0.16$; 根据《新能源乘用车车型积分计算办法》, 令 $e_1=1.5$, $e_2=3$, $p_4=0.6$ 万元/分, 并假设 $\theta=0.3$, $m=60$, $n_1=70$, $n_2=50$, $g=0.5$ 。

图 2 为积分价格变化对制造商减排水平、新能源汽车电耗水平的影响。两种决策模式下燃油减排努力水平 τ^{11} 、 τ^{12} 先随积分价格 p_4 增加而增加, 当达到 p_4 阈值后, 减排努力水平开始降低。集中决策下燃油车减排努力水平大于分散决策模式, 但二者减排水平差距随积分价格增加而逐渐缩小, 但显然集中决策下减排水平更优。积分价格上涨会提高混动车与纯电动汽车电耗努力水平, 但新能源车型在集中决策模式下电耗水平 k_1^{12} 、 k_2^{12} 均优于分散决策模式下的 k_1^{11} 、 k_2^{11} , 所以制造商选择集中决策模式可使新能源汽车具有更优电耗水平, 且电动汽车电耗表现优于混动汽车。

图 3 为消费者新能源偏好对燃油车减排水平、新能源汽车电耗水平的影响。消费者新能源偏好 θ 增大, 消费者对燃油车购买意愿降低, 致使燃油车减排水平 τ 持续降低, 但新能源偏好加大会使消费者更青睐新能源车型, 有利于提高两种决策模式下混动车和纯电动车电耗努力水平 k_1^{11} 、 k_2^{11} 、 k_1^{12} 、 k_2^{12} 。

图 4 为积分价格变化对车辆需求的影响, 制造商可据此调整生产。积分价格 p_4 抬高首先影响最大的就是传统燃油车市场需求, D_1^{11} 、 D_1^{12} 会迅速下降, 而积分价格变化对新能源汽车需求 D_2^{11} 、 D_3^{11} 与 D_2^{12} 、 D_3^{12} 影响较小, 呈逐渐上升趋势; 当积分价格上涨突破某个阈值后, 燃油车市场需求完全小于新能源汽车市场需求, 因此, 当积分价格处于较高位置时, 制造商应降低传统燃油车生产

量, 转而加大新能源汽车生产产量; 反之, 制造商可适当增加传统燃油车生产量来应对汽车市场需求变化。

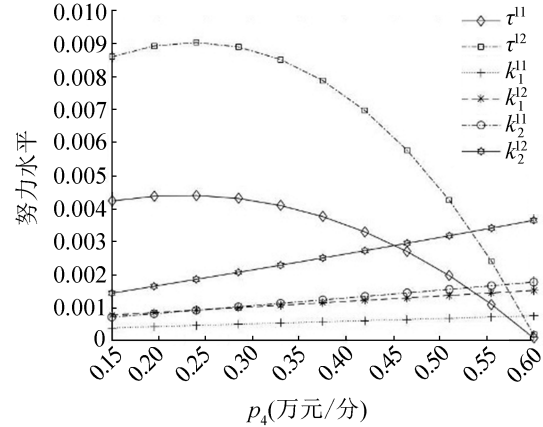


图 2 燃油车减排努力水平、新能源车电耗努力水平与积分价格变化关系

Fig. 2 Relationship between emission reduction level of fuel vehicle, the power consumption level of new energy vehicles and price change of credits

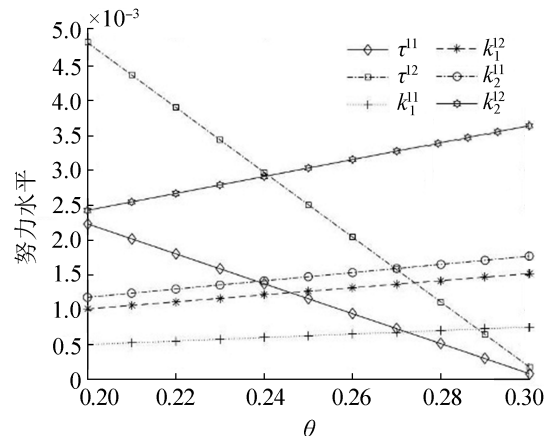


图 3 燃油车减排努力水平、新能源车电耗努力水平与新能源偏好变化关系

Fig. 3 Relationship between emission reduction level of fuel vehicles, power consumption level of new energy vehicles and consumer preference for new energy

图 5 为消费者新能源偏好变化对车辆需求量的影响。随着消费者逐渐偏好绿色新能源, 两种决策模式下的传统燃油车市场需求 D_1^{11} 、 D_1^{12} 均呈下降趋势, 而新能源车辆需求 D_2^{11} 、 D_3^{11} 与 D_2^{12} 、 D_3^{12} 相应上升, 集中决策模式下混动汽车与纯电动汽车的市场需求 D_2^{12} 、 D_3^{12} 均高于分散决策下的需求 D_2^{11} 、 D_3^{11} 。因此, 积分价格与消费者新能源偏

好对汽车供应链生产低碳车型、减少碳排放具有协同放大作用。在绿色低碳背景下，制造商选择集中决策模式有利于新能源汽车快速扩散，并根据积分价格、消费者新能源偏好的变化，动态调整不同车型的生产规模，以利于实现收益最大化。

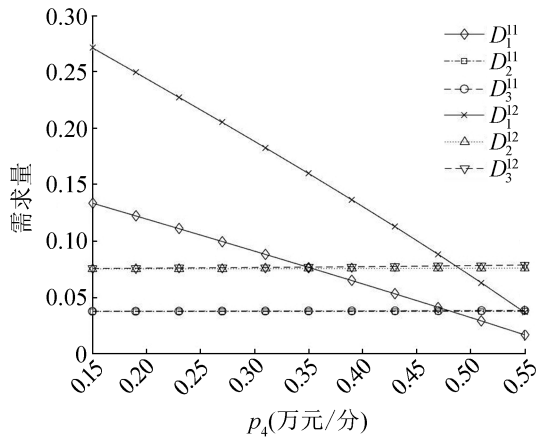


图 4 汽车需求量与积分价格变化关系

Fig. 4 Relationship between demand of vehicles and price of credits

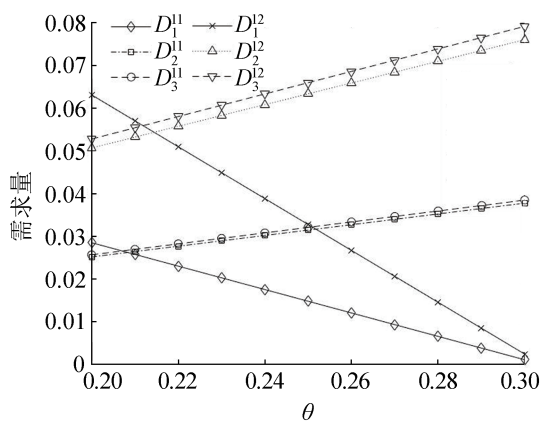


图 5 汽车需求量与消费者新能源偏好变化关系

Fig. 5 Relationship between the demand of vehicles and consumer preference for new energy

图 6 为消费者新能源偏好对供应链各方收益影响。两种生产情形中分散模式下制造商收益 Π_M 、零售商收益 Π_R ，以及集中决策模式下供应链整体收益 Π_{sc} 会随消费者新能源偏好 θ 加大而增加，但情形一中分散决策下 Π_M^{11} 、 Π_R^{11} 、 Π_{sc}^{11} ，均随新能源偏好增加而愈发大于情形二中相应的 Π_M^{12} 、 Π_R^{12} 、 Π_{sc}^{12} ，即新能源偏好越大制造商选择情形一的收益优势越明显；同时，制造商在两种生产情

形中集中决策下供应链收益大于分散决策下供应链成员收益之和。

图 7 可以看出：积分价格 p_4 上升带动情形二中分散模式下 Π_M 、 Π_R 、 Π_{sc} 持续增加，而情形一中继续投产燃油车产生的各方收益波动幅度较大，当积分价格较低时，情形一中分散模式下制造商收益、零售商收益以及集中决策模式下供应链整体收益处于下降趋势；当积分价格上涨到一定阈值后，各方收益才转为上升趋势。因此，从收益稳定性角度来看，制造商选择只生产新能源车型、摒弃传统燃油车，即情形二更为适宜；从收益最大化角度来看，制造商继续生产燃油车且选择集中决策模式才可实现收益最大化。

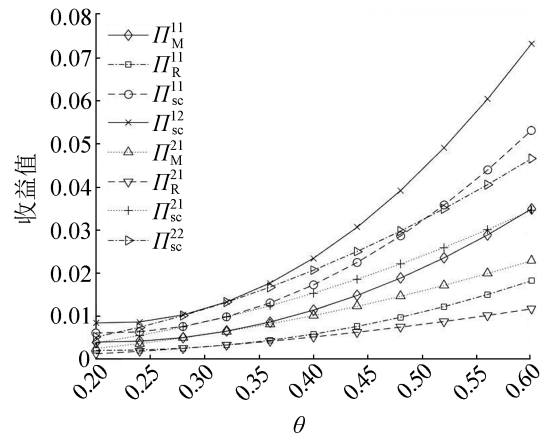


图 6 各方收益与消费者新能源偏好变化关系

Fig. 6 Relationship between income of each party and consumer preference for new energy

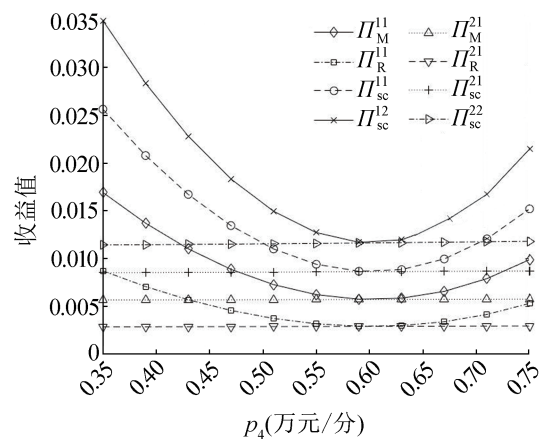


图 7 各方收益与积分价格变化关系

Fig. 7 Relationship between income of each party and price of credits

6 结论

本文针对制造商与零售商组成的二级供应链构建不同生产情形模型,用主从博弈求出不同情形中不同决策下各成员的最优生产决策与收益分析。研究发现:①双积分政策的深入实施有利于混动车与纯电动车提高各自电能消耗表现,在降低新能源车价格的同时倒逼燃油车提高减排水平。②随着积分价格以及消费者新能源偏好日益提升的趋势变化,制造商应选择集中决策模式下提高新能源车型产能,逐渐减少传统燃油车产能。不仅促进新能源汽车扩散实现低碳减排,还给供应链各成员带来更多收益。③从数值分析部分可知,继续投产燃油车(即情形一)后各方收益虽高于停产燃油车所得收益(即情形二),但收益起伏波动较大,不及情形二中收益持续增长。因此,从短期来看,制造商继续生产燃油车所得收益高于停产燃油车情形;但从长远来看,制造商选择摒弃生产燃油车的生产模式(即情形二)带来的收益将处于稳定增长状态。

管理启示:①对政府而言,继续推动双积分政策,提高传统油车减排水平和新能源汽车电耗水平,并且将积分价格控制在一个合理范围,有利于汽车产业转型升级。②对制造商而言,短期内放弃传统燃油车生产会使企业处于利润降低的“阵痛期”,但在碳中和背景下,车企需加大新能源技研投入力度,减少对传统能源依赖,同时采取集中决策模式,加强供应链上下游合作紧密程度。

本文仅考虑单周期下供应链制造商、零售商决策,未涉及双积分跨年结转,未来可考虑多周期下积分结转问题。此外,未考虑混动汽车与纯电动汽车市场需求存在一定竞争性和局限性,未来可考虑两款细分车型市场需求竞争性。

参考文献:

[1] 李文翔,李一鸣,董洁霜,等.碳交易机制下的新能源汽车消费选择行为[J].系统工程,2023,41(1):15-26.

- Li Wenxiang, Li Yiming, Dong Jieshuang, et al. Consumption Choice Behavior of New Energy Vehicle Under Carbon Emission Trading Scheme[J]. Systems Engineering, 2023, 41(1): 15-26.
- [2] 李苏秀,刘颖琦,王静宇,等.基于市场表现的中国新能源汽车产业发展政策剖析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(9):158-166.
- Li Suxiu, Liu Yingqi, Wang Jingyu, et al. China's New Energy Vehicle Industry Development Policy: Based on the Market Performance[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(9): 158-166.
- [3] Huo Hong, He Kebin, Wang M, et al. Vehicle Technologies, Fuel-economy Policies, and Fuel-consumption Rates of Chinese Vehicles[J]. Energy Policy, 2012, 43: 30-36.
- [4] Wang Ning, Tang Linhao, Pan Huizhong. A Global Comparison and Assessment of Incentive Policy on Electric Vehicle Promotion[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 44: 597-603.
- [5] 唐金环,杨芳,姜力文.疫情冲击下考虑产业政策对汽车制造商生产的影响研究[J].中国管理科学,2023,31(8):122-131.
- Tang Jinhuan, Yang Fang, Jiang Liwen. The Research on the Influence of Industrial Policies on Production-decision of Automakers to the COVID-19 Shocking[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(8): 122-131.
- [6] 赵丹,严啸宸,汪和平,等.双积分政策下汽车企业合作创新演化博弈分析[J].中国管理科学,2024,32(4):279-292.
- Zhao Dan, Yan Xiaochen, Wang Heping, et al. Evolutionary Game Analysis of Cooperative Innovation of Automakers Under Dual-credit Policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(4): 279-292.
- [7] 卢超,闫俊琳.考虑“双积分”交易的双寡头新能源汽车企研发博弈[J].工业技术经济,2019,38(1):67-73.
- Lu Chao, Yan Junlin. A R&D Game of Dual-oligopoly New Energy Vehicle Enterprises: Under the Context of CAFC and NEV Integrals Transaction[J]. Journal of Industrial Technology and Economy, 2019, 38(1): 67-73.
- [8] 马亮,刘玉洁,朱浩.闭环供应链视角下新能源汽车电池双渠道回收契约设计[J].科技管理研究,2021,41(20):184-193.
- Ma Liang, Liu Yujie, Zhu Hao. Design of Dual-channel Recycling Contract for New Energy Vehicle Batteries from the Perspective of Closed-loop Supply Chain[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(20): 184-193.
- [9] 卢超,王倩倩,赵梦园,等.“双积分”政策下汽车制造商

- 竞争定价与减排策略研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(1): 64-76.
- Lu Chao, Wang Qianqian, Zhao Mengyuan, et al. A Study on Competitive Pricing and Emission Reduction Strategies of Automobile Manufacturers Under the "Double Credits" Policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(1): 64-76.
- [10] 徐颖, 刘勤明, 周林森. 基于博弈论的闭环双渠道回收供应链决策研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 396-408.
- Xu Ying, Liu Qinming, Zhou Linsen. Research on Decision-making of Closed-loop Supply Chain for Dual-channel Recovery Based on Game Theory[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(2): 396-408.
- [11] Wang Yue, Zhao Fuquan, Yuan Yinshuo, et al. Analysis of Typical Automakers' Strategies for Meeting the Dual-credit Regulations Regarding CAFC and NEVs[J]. Automotive Innovation, 2018, 1(1): 15-23.
- [12] 程永伟, 穆东. 双积分制下汽车生产商生产决策优化[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(11): 2817-2830.
- Cheng Yongwei, Mu Dong. Optimal Production Decision of Vehicle Manufacturer Based on Double-score System [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(11): 2817-2830.
- [13] Ji Jingna, Zhang Zhiyong, Yang Lei. Carbon Emission Reduction Decisions in the Retail/dual-channel Supply Chain with Consumers' Preference[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 852-867.
- [14] 姚慧丽, 陈慧慧. 基于消费者低碳偏好的双渠道供应链协调研究[J]. 江苏科技大学学报(社会科学版), 2022, 22(2): 96-102.
- Yao Huili, Chen Huihui. Research on Coordination of Dual-channel Supply Chains Based on Consumers' Low-carbon Preference[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Social Science Edition), 2022, 22(2): 96-102.
- [15] 蒋雷勇, 孙立成. 异质性减排政策下考虑消费者低碳偏好的供应链决策研究[J]. 工业工程, 2022, 25(3): 164-172.
- Jiang Leiyong, Sun Licheng. A Research on Supply Chain Decision Taking into Account Consumers' Low Carbon Preference Under Heterogeneous Emission Reduction Policies[J]. Industrial Engineering Journal, 2022, 25(3): 164-172.
- [16] 郑吉川, 赵骅, 李志国. 双积分政策下新能源汽车产业研发补贴研究[J]. 科研管理, 2019, 40(2): 126-133.
- Zheng Jichuan, Zhao Hua, Li Zhiguo. A Research on New Energy Vehicle Industry R&D Subsidy Under the Policy of "Double Credits"[J]. Science Research Management, 2019, 40(2): 126-133.
- [17] 唐金环, 杨芳, 徐家旺. 双积分政策下考虑供需两侧驱动的汽车企业制造决策优化[J]. 系统工程, 2020, 38(4): 59-68.
- Tang Jinhuan, Yang Fang, Xu Jiawang. Optimal Manufacturing Decisions of an Automaker Considering Two Sides of Supply-demand Driven Under Dual-credit Policy[J]. Systems Engineering, 2020, 38(4): 59-68.
- [18] 马亮, 郭鹏辉. 双积分制下新能源汽车产业链续航能力决策研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39(23): 151-161.
- Ma Liang, Guo Penghui. Research on Decision-making of Endurance Ability of New Energy Automobile Industry Chain Based on Double-score System[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(23): 151-161.
- [19] Feng Qi, Lu Xiaoyuan. Supply Chain Contracting Under Competition: Bilateral Bargaining vs. Stackelberg[J]. Production and Operations Management, 2013, 22(3): 661-675.
- [20] 卢超, 王倩倩, 陈强. "双积分"政策下考虑价格、减排和续航的汽车供应链协调[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(10): 2595-2608.
- Lu Chao, Wang Qianqian, Chen Qiang. Automobile Supply Chain Coordination Considering Auto Price, Emission Reduction and the Mileage Range in One Charge Under the "Double Points" Policy[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(10): 2595-2608.