

碳配额交易政策下考虑“以旧换新”补贴和碳减排的汽车供应链决策研究

贺裕雁^{1,2,3}, 王丰俊^{1,*}

1. 广西科技大学, 经济与管理学院, 广西 柳州, 545006
2. 柳州高新区博士后流动科研工作站, 广西 柳州, 545006
3. 华南理工大学, 工商管理学院, 广东 广州, 510641

摘要: 本文考虑在碳配额交易和“以旧换新”补贴的双重政策下, 构建了由单一汽车制造商、单一零售商、政府以及消费者组成的闭环汽车供应链, 利用博弈论的思想研究不同的“以旧换新”补贴对汽车供应链和政府的决策影响。研究发现: “以旧换新”补贴政策对新能源汽车与燃油汽车市场均具有显著的促进作用, 零售商可通过提高汽车的销售价格以提升利润水平; 碳交易价格的上涨促使汽车制造商主动减排创新, 还可通过出售盈余碳配额获取额外收益; 碳交易价格上涨能有效激励汽车制造商进行碳减排, 但根据“以旧换新”补贴对象的不同, 对最优碳减排量产生不同的影响。并且仅减少汽车生产阶段的碳排放量对汽车的全生命周期碳排放来说是远远不够的, 促进汽车全生命周期的碳减排还需付出更多努力。

关键词: 碳配额交易; “以旧换新”; 供应链决策; 碳减排

Research on Automobile Supply Chain Decision-making Considering “Trade-in” Subsidies and Carbon Emission Reduction under Carbon Quota Trading Policy

Yuyan He^{1,2,3}, Fengjun Wang^{1,*}

1. School of Economics and Management, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi, China, 545006
2. Post-doctoral Mobile Research Station, Liuzhou High-tech Zone, Liuzhou, Guangxi, 545006, China
3. School of Business Administration, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, China, 510641

Abstract: This study considers the dual policies of carbon quota trading and "trade in" subsidies, a closed-loop automobile supply chain consisting of a single automobile manufacturer, a single retailer, the government, and consumers is constructed. The impact of different "trade in" subsidies on the automobile supply chain and government decision-making is studied using game theory. The research has found that the "trade in" subsidy policy has a significant positive effect on both the new energy vehicle and fuel vehicle markets, and retailers increase their profit levels by raising the selling prices of automobiles; The rise in carbon trading prices has prompted automobile manufacturers to actively innovate in emissions reduction and can also generate additional revenue by selling surplus carbon quotas; The increase in carbon trading prices can effectively incentivize

automobile manufacturers to reduce carbon emissions, but it has different impacts on the optimal carbon reduction emissions depending on the different subsidy recipients of the "trade in" policy. Moreover, reducing carbon emissions only during the production phase of automobiles is far from enough for the full lifecycle carbon emissions of automobiles. More efforts are needed to promote carbon reduction throughout the entire lifecycle of automobiles.

Keywords: Carbon quota trading; "Trade-in"; Supply chain decision-making; Carbon emission reduction

2024 年国家发布了《关于进一步做好汽车以旧换新工作的通知》,“以旧换新”补贴政策的发布不仅是为了刺激消费,更是国家为推动汽车向绿色转型、促进节能减排和助力“双碳”目标的实现的重要举措。碳配额交易政策是助力企业实现碳减排的有效手段,通过市场机制和价格机制对资源配置进行优化和鼓励制造商技术创新,以推动绿色低碳发展和应对全球气候变化的问题。

关于碳配额交易政策下的供应链减排决策问题,目前已有学者展开了研究。例如,张令荣等^[1]通过构建碳交易政策下制造商回收再制造等三种模型,研究减排成本系数等如何影响企业利润。Mao 等^[2]研究发现碳排放配额政策促进再制造生产商提高再制造产品的质量和产量。刘培德等^[3]研究发现碳配额交易机制不仅能推动低碳技术的扩散,还能提升企业利润。李彪等^[4]建立了碳配额交易下分散和集中决策的减排投资模型,结果发现集中决策的减排水平更高。孙林辉等^[5]考虑了利他偏好和参考低碳因素,结果表明制造商的碳减排程度与碳交易价格呈正相关,利他偏好能降低消费者的参考低碳效应影响。

在国家推动经济转型升级、促进循环经济发展的背景下,“以旧换新”政策作为一项关键举措,目前,围绕该政策的补贴机制已积累了较为丰富的研究成果。例如,易余胤和陈健^[6]以及 Li 和 Tian^[7]研究了在以旧换新燃油汽车和新能源汽车共存时的情形,发现当消费者的里程焦虑较大时,政府补贴力度以及燃油汽车的耐用性均会影响零售商的定价决策。唐飞等^[8]研究发现政府的以旧换新补贴有利于促进环境效益和社会福利。Liao 等^[9]分析了在以旧换新能源汽车或燃油汽车的背景下,发现“以旧换新”补贴能促进新能源汽车的渗透,还会促进利润的增长。

零碳经济已经成为各产业的核心竞争力目标,全产业链的碳减排需要供应链上下游各成员共同努力,关于供应链及其成员的碳减排问题,许多学者展开了研究。如贺勇等^[10]研究了不同减排形式下政府补贴对供应链减排的影响,发现政府补贴有效提升制造商的减排水平。Cai 和 Jiang^[11]探究了限额和交易规定下供应链成员的碳排放决策问题。卢诗和杨玉香^[12]考虑了减排研发和单位产品减排量两种补贴,发现利润和总碳排放量均与补贴系数呈正相关。还有学者将区块链技术融入到供应链中,张令荣等^[13]研究发现区块链技术会提高产品的减排量和低碳产品的需求量。龚本钢等^[14]研究发现在再制造供应链中,当只有原始设备制造商采取区块链技术时,最有利于企业碳减排投资。也有学者将碳减排与以旧换新相结合,如王小霞^[15]研究了碳交易机制和“以旧换再”补贴下的制造商决策问题,发现政府补贴与提高碳配额均会激发制造商的减排积极性。Tao 等^[16]研究发现报废产品的以旧换新计划助力企业获得更高的利润。

综上,不少学者将碳配额交易和碳减排结合分析供应链决策问题,也有学者研究了“以旧换新”政策融入新技术和多因素问题,但是少有研究针对在碳配额交易政策下,将以旧换新燃油汽车和以旧换新能源汽车与碳减排问题相结合。因此本文将碳配额交易政策和“以旧换新”补贴政策结合,研究“以旧换新”补贴和碳交易价格对汽车供应链各成员的影响,并考虑了碳减排投资,最终为政

府、汽车制造商和零售商的决策提供一定的参考和支持。

1 问题说明和模型假设

1.1 模型说明

本文模型是由单一汽车制造商、单一零售商、政府以及消费者组成的闭环供应链。在碳配额交易政策下，汽车制造商和零售商的生产和定价决策均会受到影响。在“以旧换新”补贴政策下，当消费者购买的新汽车成为废旧汽车后，消费者在“以旧换新”政策下有三个选择，换购新能源汽车、换购新燃油汽车或保持原状，获得的政府补贴因购买选择而异。汽车制造商负责碳减排投资的同时，还与零售商合作完成废旧汽车的回收。

1.2 模型假设

假设 1：在汽车闭环供应链中，各成员间存在 Stackelberg 博弈关系，汽车制造商作为领导者，零售商作为其跟随者。

假设 2：新能源汽车生产成本为 c_n ，燃油汽车生产成本为 c_f ，因为新能源汽车动力电池成本巨大，则 $c_n > c_f$ 。汽车制造商将新能源汽车和燃油汽车按照 w_n 和 w_f 的批发价格出给零售商。零售商再按照 p_n 和 p_f 的销售价格卖给消费者，满足 $p_n > p_f$ 。本文考虑汽车制造商和零售商达成合作，消费者将废旧汽车交给零售商并支付给消费者回收价格 J_c ，汽车制造商给零售商的单位回购价格为 J_r ，为促进“以旧换新”活动的顺利进行，假设 $J_r > J_c$ 。

假设 3：消费者对燃油汽车的支付意愿为 v ，服从 $[0,1]$ 上的均匀分布， $\theta \in (0,1)$ 为消费者的环保意识。

假设 4：碳配额交易政策下，碳交易价格为 P_c ，设政府给定的碳配额为 E ，新能源汽车的单位生产碳排放量为 e_n ，燃油汽车的单位生产碳排放量为 e_f ， $e_n > e_f$ 。

假设 5：根据国家发布的“以旧换新”政策，假设政府给予以旧换新能源汽车的消费者补贴为 S_n ，给予以旧换新燃油汽车的消费者补贴为 S_f ，根据政策， $S_n > S_f$ 。

假设 6：本文考虑在汽车的生产装配上产生的碳排放量，由汽车制造商承担主要碳减排成本，为应对减排形势，通过碳减排投资降低碳排放成本，假设新能源汽车和燃油汽车的碳减排量均为 λ ，则碳减排投资成本与单位汽车碳减排量的关系为 $E_{\text{减}} = K\lambda^{2[17]}$ ， K 为碳减排投资模型系数。

此时，当不考虑“以旧换新”补贴政策，“以旧换新”消费者的三种购买行为的效用分别为 $U_n = (1+\theta)v - p_n + J_c$ ， $U_f = v - p_f + J_c$ 和 $U_0 = 0$ 。则新能源汽车和燃油汽车的需求函数分别为

$$q_n^N = 1 - \frac{p_n - p_f}{\theta} \quad (1)$$

$$q_f^N = \frac{p_n - p_f - \theta(p_f - J_c)}{\theta} \quad (2)$$

当考虑“以旧换新”补贴政策时，“以旧换新”消费者的三种购买行为的效用分别为 $U_n = (1+\theta)v - p_n + J_c + S_n$ ， $U_f = v - p_f + J_c + S_f$ 和 $U_0 = 0$ 。则新能源汽车和燃油汽车的需求函数分别为

$$q_n^S = 1 - \frac{p_n - p_f + S_f - S_n}{\theta} \quad (3)$$

$$q_f^S = \frac{p_n - p_f + S_f - S_n - \theta(p_f - J_c - S_f)}{\theta} \quad (4)$$

2 模型构建和求解

2.1 碳配额交易政策下无“以旧换新”补贴模型

汽车制造商利润函数为

$$\pi_M^N = (w_n - c_n - J_r)q_n^N + (w_f - c_f - J_r)q_f^N + p_c[E - (e_n - \lambda)q_n^N - (e_f - \lambda)q_f^N] - K\lambda^2 \quad (5)$$

零售商利润函数为

$$\pi_R^N = (p_n - w_n - J_c + J_r)q_n^N + (p_f - w_f - J_c + J_r)q_f^N \quad (6)$$

通过逆向归纳法进行求解，可得到不考虑“以旧换新”补贴模型下的最优均衡结果。最优均衡结果如表1所示。

2.2 碳配额交易政策下考虑“以旧换新”补贴模型

汽车制造商利润函数为

$$\pi_M^S = (w_n - c_n - J_r)q_n^S + (w_f - c_f - J_r)q_f^S + p_c[E - (e_n - \lambda)q_n^S - (e_f - \lambda)q_f^S] - K\lambda^2 \quad (7)$$

零售商利润函数为

$$\pi_R^S = (p_n - w_n - J_c + J_r)q_n^S + (p_f - w_f - J_c + J_r)q_f^S \quad (8)$$

同理可得到考虑“以旧换新”补贴模型下的最优均衡结果。最优均衡结果如表1所示。

表1 四种模型下的均衡解

Table 1 Equilibrium solutions under four models

	无“以旧换新”补贴	有“以旧换新”补贴
w_n^*	$\frac{(1+\theta+c_n+e_n p_c+2J_r)A-(1-c_f-e_f p_c)p_c^2}{2A}$	$\frac{(1+\theta+c_n+e_n p_c+S_n+2J_r)A-(1+S_f-c_f-e_f p_c)p_c^2}{2A}$
w_f^*	$\frac{J_r A+4K(1+c_f+e_f p_c)-p_c^2}{A}$	$\frac{J_r A+4K(1+S_f+c_f+e_f p_c)-(1+S_f)p_c^2}{A}$
λ^*	$\frac{(1-c_f-e_f p_c)p_c}{A}$	$\frac{(1+S_f-c_f-e_f p_c)p_c}{A}$
p_n^*	$\frac{(3+3\theta+c_n+e_n p_c+4J_r)A-(1-c_f-e_f p_c)p_c^2}{4A}$	$\frac{(3+3\theta+c_n+e_n p_c+3S_n+4J_r)A-(1+S_f-c_f-e_f p_c)p_c^2}{4A}$
p_f^*	$\frac{(1+2J_r)A+4K(1+c_f+e_f p_c)-p_c^2}{2A}$	$\frac{(1+S_f+2J_r)A+4K(1+S_f+c_f+e_f p_c)-(1+S_f)p_c^2}{2A}$
q_n^*	$\frac{\theta-A_1 p_c-A_3}{4\theta}$	$\frac{\theta-A_1 p_c+A_2-A_3}{4\theta}$
q_f^*	$\frac{(A_1 p_c+A_3)A+\theta(p_c^2-8Kc_f-8Ke_f p_c)}{4\theta A}$	$\frac{(A_1 p_c+A_2+A_3)A+\theta(p_c^2+8KS_f-8Kc_f-8Ke_f p_c)}{4\theta A}$
π_M^*	$\frac{A_1^2 p_c^2+A_3^2+2A_1 A_3 p_c+\theta^2-2c_n \theta-2\theta e_n p_c+8E \theta p_c}{8\theta} + \frac{4K(1+c_f^2+e_f^2 p_c^2+2c_f e_f p_c)-e_f p_c^3-c_f p_c^2}{4A}$	$\frac{A_1^2 p_c^2+A_2^2+A_3^2-2A_1 A_2 p_c+2A_1 A_3 p_c-2A_2 A_3+\theta^2+2S_n \theta-2c_n \theta-2\theta e_n p_c+8E \theta p_c}{8\theta} + \frac{4K(1+S_f^2+c_f^2+e_f^2 p_c^2-2S_f c_f-2S_f e_f p_c+2c_f e_f p_c)-e_f p_c^3+S_f p_c^2-c_f p_c^2}{4A}$

$$\pi_R^* = \frac{\frac{A_1^2 p_c^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 p_c + \theta^2 - 2c_n \theta - 2\theta e_n p_c}{16\theta} + \frac{A_1^2 p_c^2 + A_2^2 + A_3^2 - 2A_1 A_2 p_c + 2A_1 A_3 p_c - 2A_2 A_3 + \theta^2 + 2S_n \theta - 2c_n \theta - 2\theta e_n p_c}{16\theta}}{\frac{32K^2(1+c_f^2+e_f^2 p_c^2+2c_f e_f p_c)+e_f p_c^5+c_f p_c^4-16e_f p_c^3-16Kc_f p_c^2}{8A^2}} + \frac{32K^2(1+S_f^2+c_f^2+e_f^2 p_c^2-2S_f c_f-2S_f e_f p_c+2c_f e_f p_c)+e_f p_c^5+c_f p_c^4-S_f p_c^4-16e_f p_c^3-16Kc_f p_c^2}{8A^2}}$$

注：其中， $A_1 = e_n - e_f, A_2 = S_n - S_f, A_3 = c_n - c_f, A = 8K - p_c^2$ 。

3 均衡结果比较与分析

命题1 (1) 当 $K > \frac{p_c^2}{8}$ 时, $p_n^S > p_n^N$ 。(2) 当 $\frac{p_c^2}{8} < K < \frac{p_c^2}{6}$ 时, $p_f^S < p_f^N$; 当 $K > \frac{p_c^2}{6}$ 时, $p_f^S > p_f^N$ 。

由命题1可知, 新能源汽车和燃油汽车的销售价格均受到 K 的影响, 当碳减排投资系数较小时, 碳减排规模较小, 由于对燃油汽车的碳减排压力较小, 而补贴政策刺激了汽车的需求量, 因此不需要提高价格抵消碳减排投资成本。当碳减排投资系数较大时, 对汽车的整体碳减排成本较大, 又因为在“以旧换新”补贴下, 直接减少了消费者的购买成本, 零售商则通过提高销售价格来平衡碳减排投资成本。然而对新能源汽车的碳减排压力较大, 则需要通过涨价的方式弥补增加的成本。

命题2 $\lambda^S > \lambda^N$ 。

由命题2可知, “以旧换新”补贴下的汽车制造商的最优减排量高于无补贴下的, 说明补贴后汽车制造商利润增加, 有更多资本投入到碳减排规模中, 能够通过减少整体的碳排放量促进企业绿色转型, 实现了政府补贴的经济激励与战略引导的作用。

命题3 (1) $q_n^S > q_n^N$ 。(2) 当 $0 < S_f < \frac{AS_n}{A+8K}$ 时, $q_f^S < q_f^N$; 当 $S_f > \frac{AS_n}{A+8K}$ 时, $q_f^S > q_f^N$ 。

由命题3可知, “以旧换新”补贴下的新能源汽车的需求量高于无补贴下的, 而燃油汽车的需求量受到补贴力度的影响。当补贴力度低于某一阈值时, 对消费者的补贴力度较小, 不足以引起消费者的积极性; 当补贴力度高于某一阈值时, 能够刺激消费者的购车需求, 提升燃油汽车的销量。说明补贴力度的大小影响补贴政策的效果, 为扩大汽车市场政府应合理制定补贴范围。

命题4 (1) $\frac{\partial p_n^S}{\partial S_n} > 0$, $\frac{\partial p_f^S}{\partial S_n} = 0$; (2) $\frac{\partial p_n^S}{\partial S_f} < 0$, 当 $\frac{p_c^2}{8} < K < \frac{p_c^2}{6}$ 时, $\frac{\partial p_f^S}{\partial S_f} < 0$; 当 $K > \frac{p_c^2}{6}$ 时, $\frac{\partial p_f^S}{\partial S_f} > 0$ 。

由命题4可知, 新能源汽车的销售价格随 S_n 增加而增加, 随 S_f 增加而下降。而燃油汽车的销售价格受 K 阈值的影响。当碳减排投资较小时, 汽车制造商集中在碳减排压力更小的燃油汽车的减排事业上, 通过补贴政策和主动降低价格的方式吸引更多消费者以实现利润最大化。当碳减排投资较大时, 新能源汽车的减排事业成为重点, 碳减排成本增加, 汽车制造商会通过提高燃油汽车的价格抑制需求而提高新能源汽车需求量的方式, 补偿碳减排带来的成本。

命题5 (1) $\frac{\partial q_n^S}{\partial S_n} > 0, \frac{\partial q_f^S}{\partial S_n} < 0$; (2) $\frac{\partial q_n^S}{\partial S_f} < 0, \frac{\partial q_f^S}{\partial S_f} > 0$ 。

由命题5可知, 新能源汽车的需求量随 S_n 增加而增加, 随 S_f 增加而下降, 燃油汽车则相反。补贴政策直接减少了消费者的购买成本, 刺激了消费者需求, 让更多受制于预算约束的消费者实现购车的愿望, 助力实现汽车更新换代和改善空气质量以及推动经济发展。

命题6 (1) $\frac{\partial \lambda^S}{\partial S_n} = 0$; (2) $\frac{\partial \lambda^S}{\partial S_f} > 0$ 。

由命题6可知, 补贴下的最优碳减排量仅受 S_f 影响, 不受 S_n 影响。可能原因为 S_n 增加, 新能源汽车的需求量随之增加, 而燃油汽车需求量却下降, 又因为在汽车的生产阶段, 新能源汽车碳排放量更高, 导致总碳排放量上升, 此时汽车制造商减排的压力更多在于动力电池的生产, 而动力电池的生产涉及全链路协同, 相比于发动机制造的短链条, 要实现碳减排更加困难, 仅靠由政府补贴为汽车制造商带来的收益无法实现全链条上的碳减排。而 S_f 增加促进燃油汽车需求量增加, 新能源汽车需求量下降, 此时总碳排放量减少, 发动机的制造主要集中在制造端, 可通过成熟的技术实现快速降碳。

命题7 (1) $\frac{\partial \pi_M^S}{\partial S_n} > 0, \frac{\partial \pi_R^S}{\partial S_n} > 0$; (2) $\frac{\partial \pi_M^S}{\partial S_f} > 0, \frac{\partial \pi_R^S}{\partial S_f} > 0$ 。

由命题7可知, 汽车制造商和零售商的利润与 S_n 和 S_f 呈正相关, 补贴政策下, 直接减少了消费者的购买成本, 削弱了汽车制造商和零售商通过降价刺激销量的必要性, 还可以通过上调价格提高收益, 实现了二者利润的共赢。

4 数值分析

为更加直观地探究碳配额交易政策与“以旧换新”补贴政策对汽车供应链的决策影响, 本文将通过数值分析展示碳交易价格与“以旧换新”补贴对各最优结果的影响。在结合国家政策和参考相关研究下, 假定 $c_n = 0.55, c_f = 0.35, J_c = 0.08, J_r = 0.04, e_n = 0.12, e_f = 0.08, \theta = 0.3, S_n = 0.2, S_f = 0.15, E = 5, p_c = 0.1, K = 0.5$ 。

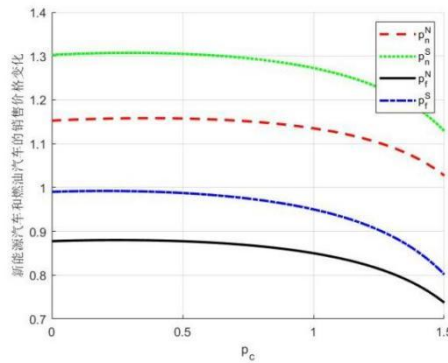
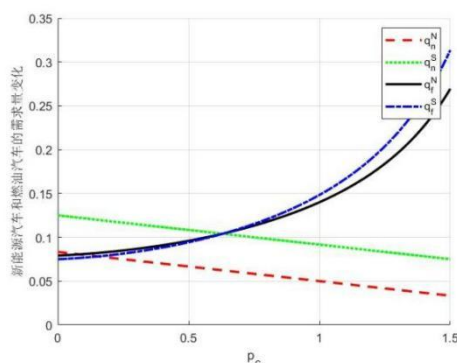


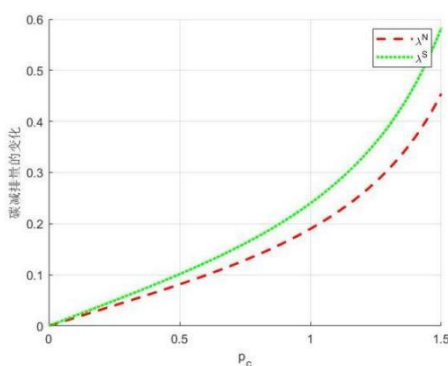
图1 P_c 对汽车销售价格的影响

Fig. 1 The influence of P_c on car sales prices

由图1可知, 新能源汽车和燃油汽车的销售价格均随 P_c 出现先轻微上升后下降的情况, 且“以旧换新”补贴下的销售价格高于无补贴的。当碳交易价格上涨时, 短期内汽车制造商无法通过碳减排投资降低碳排放量, 只能提高价格将新增的成本转嫁给消费者。到后期碳交易价格的不断上涨促使汽车制造商不得不加大碳减排投资, 通过提升技术效率等措施减少汽车生产的碳排放量, 当技术创新带来的碳减排低于免费的碳配额时, 还可以将盈余的碳配额出售以获得额外收入, 对冲甚至超越碳交易价格上涨带来的成本, 为降低销售价格拓宽了空间。说明了碳交易政策能够有效推动汽车制造商进行技术创新和实现绿色转型。

图2 P_c 对汽车需求量的影响Fig. 2 The influence of P_c on the demand for cars

由图2可知,新能源汽车的需求量随 P_c 增加而下降,而燃油汽车的需求量出现上升的情况,因为碳交易价格越高,对新能源汽车的减排压力更大,要实现碳减排更加困难,因此汽车制造商将更多碳减排投资投入到低排放量的燃油汽车上,通过增加燃油汽车产量提高利润平衡碳减排带来的成本。从环保的宏观角度看,虽然汽车的使用阶段的碳排放占主导地位,但使用阶段取决于用户的行为,汽车制造商无法对用户的行为进行控制,但可以通过在生产阶段使用更加低碳环保的原材料以研发性能更优的汽车,努力减少汽车全生命周期的碳排放量。

图3 P_c 对碳减排量的影响Fig. 3 The influence of P_c on carbon emission reduction

由图3可知,无论政府是否采取“以旧换新”补贴政策,两种模型下的最优碳减排量均与 P_c 呈正相关。碳交易价格上涨促使汽车制造商不得不进行碳减排投资,积极进行技术创新提高效率和采用更加低碳的原材料,以缓解碳交易压力,总碳排放量的减少还为汽车制造商出售剩余的碳配额提供机会,为碳减排投资提供了正向激励。说明碳配额交易政策通过市场机制为汽车制造商的碳减排提供了核心动力。

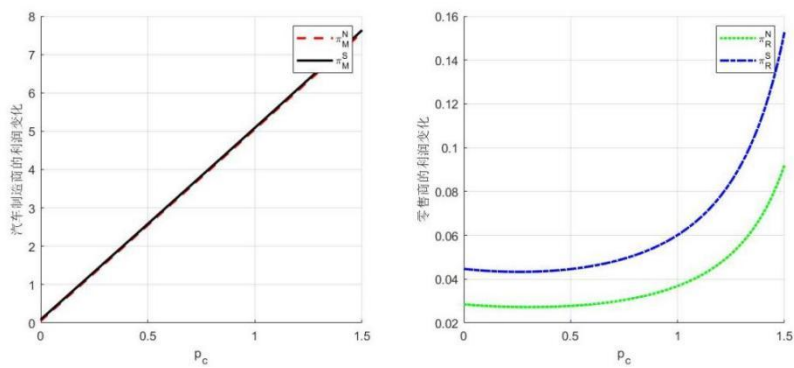


图 4 P_c 对汽车制造商和零售商的影响

Fig. 4 The influence of P_c on the profits of automobile manufacturers and retailers

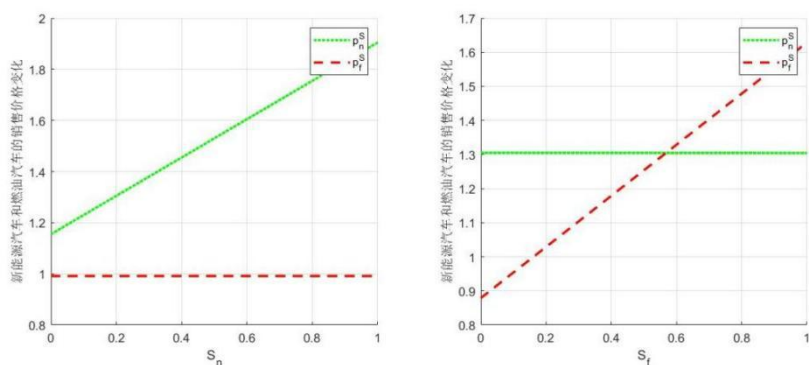
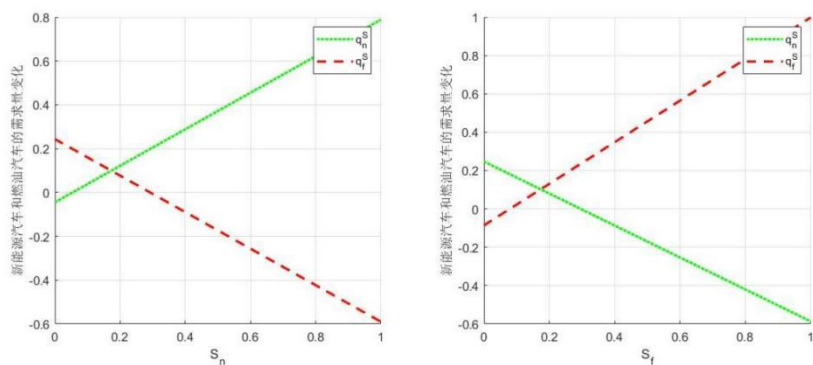
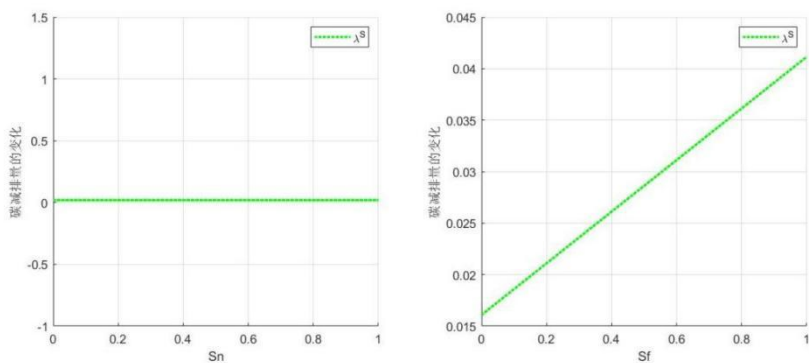
表 2 P_c 对汽车制造商和零售商的影响

Table 2 The influence of P_c on the profits of automobile manufacturers and retailers

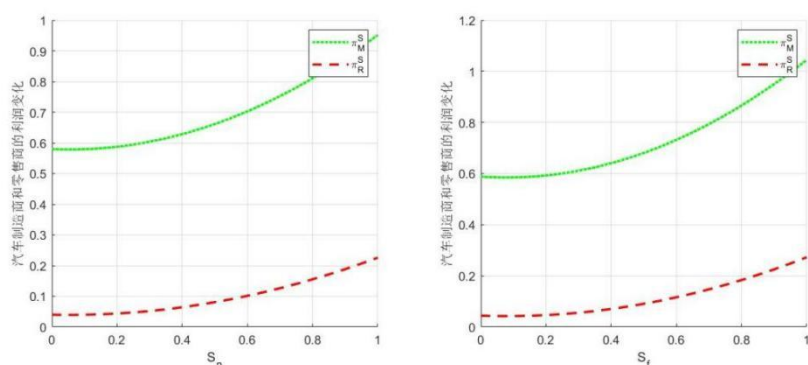
P_c	π_M^N	π_R^N	π_M^S	π_R^S
0.05	0.3062	0.0281	0.3384	0.0442
0.1	0.5555	0.0278	0.5875	0.0438
0.5	2.5523	0.0278	2.5841	0.0446
1	5.0557	0.0369	5.0914	0.0601
1.5	7.5809	0.0921	7.6355	0.1527
1.9	9.8182	1.6307	10.0406	2.7619

由图 4 和表 3 可知，碳交易价格对汽车制造商和零售商产生不同的影响，汽车制造商利润与 P_c 呈正相关，而零售商的利润随 P_c 先下降后上升。对汽车制造商来说，碳交易价格的上涨使得碳排放成本增加，迫使他们采取措施积极降碳，碳排放量的减少也为出售盈余碳配额提供了空间，此外技术创新后的新型新能源汽车的需求量也会增加，提升了利润。对零售商来说，碳交易价格较低时，可通过提高价格转移成本，但价格上涨会压缩需求量，不利于利润的增加。当碳交易价格较高时，汽车制造商的技术创新使得批发价格有所下降，为零售商下调销售价格拓宽了空间，使得汽车需求量提高，提升了利润。说明合理的碳交易价格有助于碳交易市场的稳定和汽车市场的绿色发展。

由图 5 和图 6 可知，新能源汽车和燃油汽车的销售价格和需求量均随其对应的补贴增加而增加。政府补贴直接降低了消费者的购买成本，刺激了对两类汽车的需求，面对扩张的需求量，零售商可通过提高销售价格最大化利润。但补贴力度的持续增加会影响另一种类型汽车的需求量。因此，为保证两种汽车市场的稳定发展应制定合理的补贴力度。

图5 S_n 和 S_f 对汽车销售价格的影响Fig. 5 The influence of S_n and S_f on car sales prices图6 S_n 和 S_f 对汽车需求量的影响Fig. 6 The influence of S_n and S_f on the demand for cars图7 S_n 和 S_f 对碳减排量的影响Fig. 7 The influence of S_n and S_f on carbon emission reduction

由图7可知，两种“以旧换新”补贴模式对碳减排量的影响是不同的，碳减排量随 S_f 增加而增加，却不受 S_n 的影响。由于新能源汽车的动力电池的碳足迹涉及全球长链条协同，对其进行碳减排技术复杂且投资巨大，仅凭政府补贴带来的收益无法满足碳减排的要求。而燃油汽车的发动机等部件涉及链条短且成熟，对其进行碳减排技术成熟且容易实施，补贴越多，燃油汽车需求提高，为碳减排提供了资金支持。但仅仅通过减少汽车生产阶段的碳排放量对汽车的全生命周期碳排放来说是不够的，因此政府需要制定合理的补贴预算鼓励新能源汽车产业的低碳发展和绿色转型。

图8 S_n 和 S_f 对汽车制造商和零售商的影响Fig. 8 The influence of S_n and S_f on the profits of automobile manufacturers and retailers

由图8可知,随“以旧换新”补贴力度的增加,汽车制造商和零售商的利润也会增加,“以旧换新”补贴从价格和需求两方面助力利润的增长,政府应结合实际市场情况制定合理的补贴力度促进汽车产业的发展。

5 结论

本文基于碳配额交易政策背景下,构建了碳配额交易政策下有无“以旧换新”补贴的决策博弈模型,并分析了碳交易价格和补贴对汽车的销售价格、需求量、碳减排量和利润的影响,得到以下结论:

(1) 政府的“以旧换新”补贴政策对新能源汽车与燃油汽车市场均具有显著的促进作用。补贴直接降低了消费者购买成本,有效刺激了对两类汽车的市场需求。需求的扩张和补贴的激励,为零售商提高销售价格提升利润水平提供了空间。但政府应结合两种汽车市场的实际情况,科学制定合理的补贴力度,促进汽车的更新消费和可持续发展。

(2) 碳配额交易政策有效推动了汽车制造商的绿色转型与技术创新。碳交易价格的上涨激励汽车制造商主动开展减排创新,还可通过出售盈余碳配额开辟新的利润来源。长期来看,碳配额交易政策激励汽车制造商致力于汽车的低碳化发展,推动汽车行业碳排放整体下降。

(3) 碳交易价格上涨能有效激励汽车制造商进行碳减排投资,减少生产阶段的汽车碳排放量。然而,“以旧换新”补贴对象的不同也产生不同的影响,对燃油汽车的补贴能够促进碳减排量提升,而对新能源汽车的补贴则对碳减排影响有限,促进整体的碳减排还需付出更多努力。因此,政府应科学设计差异化补贴方案,合理调控碳交易价格,以实现整体碳减排目标的有效推进。

参考文献

- [1] 张令荣, 杨子凡, 程春琪. 碳配额交易政策下闭环供应链的减排策略选择[J]. 管理工程学报, 2022, 36(01): 172-180.
- [2] Mao H Y, Wang W B, Liu C H, et al. Effects of the carbon emission quota policy on the quality and sales of manufactured and remanufactured products[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 266: 109058.
- [3] 刘培德, 李西娜, 李佳路. 碳配额交易机制下竞争企业低碳技术扩散——基于复杂网络的演化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(02): 684-703.
- [4] 李 飏, 夏西强, 李秋月. 碳配额下碳交易对碳减排效应的影响及协调机制研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(08): 250-261.
- [5] 孙林辉, 孙 悦, 吴安波, 等. 碳交易下考虑参考低碳和利他偏好的动态减排研究[J]. 系统科学与数学, 2024, 44(12): 3718-3739.

- [6] 易余胤, 陈 健. 汽车供应链的以旧换新最优定价研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(04): 1072-1085.
- [7] Li W L, Tian L P. Optimizing prices in trade-in strategies for vehicle retailers [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 238: 122004.
- [8] 唐 飞, 代 颖, 王永龙, 等. 基于社会福利最大化的政府促销补贴政策选择[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(10): 3280-3293.
- [9] Liao B Y, Sun M, Y Zhu X X, et al. Investigation of discriminatory government subsidies for fuel vehicles and new energy vehicles by considering trade-ins[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2025, 50: 26.
- [10] 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(06): 87-98.
- [11] Cai J H, Jiang F Y. Decision models of pricing and carbon emission reduction for low-carbon supply chain under cap-and-trade regulation[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 264: 108964.
- [12] 卢 诗, 杨玉香. 政府补贴政策对供应链碳减排及定价决策的影响[J]. 数学的实践与认识, 2025, 55(09): 1-16.
- [13] 张令荣, 王 锋, 刘笑言. 碳交易与区块链技术下双产品低碳供应链减排决策研究[J]. 管理工程学报, 2025, 39(04): 239-250.
- [14] 龚本刚, 唐文慧, 刘 志, 等. 碳交易政策下区块链技术对再制造供应链定价与减排决策的影响[J]. 系统管理学报, 2025, 34(02): 363-376.
- [15] 王小霞. 碳交易机制下考虑“以旧换再”补贴的闭环供应链定价与减排决策[D]. 贵州财经大学, 2020.
- [16] Tao Z Y, Li J B, Liu Z X. Trade-in for carbon emission reduction under tax regulation[J]. Annals Operations Research, 2025, 347(1): 367-404.
- [17] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and remanufactured products[J]. Management Science, 2006, 52(1): 15-26.

基金项目：广西科技基地和人才专项(桂科 AD23026317)，国家自然科学基金地区科学基金项目(72461004)，广西科技大学博士基金项目(20S08)，广西科技大学研究生教育创新计划项目(GKYC202537)。

¹ 第1作者简介：贺裕雁(1989-)，女，博士，副教授，研究方向：启发式算法、大数据、决策评价等。E-mail: yuyan_517@126.com。

*** 通讯作者简介：**王丰俊(2000-)，女，硕士在读，广西科技大学，研究方向：供应链与物流工程。E-mail: wangfengjun1210@163.com。