

# 静态碳税条件下政府与车企的演化博弈分析

## ——基于前景理论

林玉良<sup>1</sup>, 李军祥<sup>1,2\*</sup>, 邹敬涵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学管理学院, 上海

<sup>2</sup>上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

收稿日期: 2025年1月25日; 录用日期: 2025年2月18日; 发布日期: 2025年2月27日

### 摘要

随着全球气候变化的紧迫性日益凸显, 中国作为世界上最大的汽车生产和消费国, 面临着减少碳排放的巨大挑战。在此背景下, 新能源汽车(NEVs)的发展成为实现“碳达峰”和“碳中和”目标的关键途径。本研究旨在分析静态碳税条件下, 政府与新能源汽车制造商之间的演化博弈策略和互动机制。基于前景理论, 构建了一个演化博弈模型, 模拟了地方政府和汽车制造商在不同碳税政策下的行为策略选择。研究首先概述了中国新能源汽车产业的发展现状和政策背景, 然后通过引入前景理论, 提高了博弈双方增益函数的精度。模型分析了地方政府的监管选择与汽车制造商的生产决策之间的相互作用, 以及这些互动如何影响新能源汽车产业的演化稳定状态(ESS)。研究发现, 在静态碳税下, 系统可能不存在稳定点, 表明需要更灵活的政策工具来促进产业的健康发展。本研究的政策建议包括: 开发碳排放核算技术, 为新能源汽车行业提供稳定的经济回报; 建立动态碳税体系, 减轻新能源汽车业务的成本负担; 提高公众的低碳出行意识, 并通过量化消费者的减排量来鼓励购买新能源汽车。此外, 研究强调了政府与制造商合作的重要性, 以及在碳税政策设计中考虑消费者低碳偏好的必要性。

### 关键词

碳税机制, 新能源汽车, 演化博弈, 前景理论

# Evolutionary Game Analysis of Government and Automobile Enterprises under Static Carbon Tax Conditions

## —Based on Prospect Theory

Yuliang Lin<sup>1</sup>, Junxiang Li<sup>1,2\*</sup>, Jinghan Zou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

\*通讯作者。

## Abstract

With the increasing urgency of global climate change, China, as the world's largest producer and consumer of automobiles, faces a huge challenge in reducing carbon emissions. In this context, the development of new energy vehicles (NEVs) has become a key pathway to achieving the goals of "carbon peak" and "carbon neutrality". This study aims to analyze the evolutionary game strategies and interactive mechanisms between the government and new energy vehicle manufacturers under static carbon tax conditions. Based on prospect theory, an evolutionary game model was constructed to simulate the behavioral strategy choices of local governments and automobile manufacturers under different carbon tax policies. The study first outlined the current development status and policy background of China's new energy vehicle industry, and then improved the accuracy of the gain functions of both parties in the game by introducing prospect theory. The model analyzed the interaction between the regulatory choices of local governments and the production decisions of automobile manufacturers, and how these interactions affect the evolutionary stability state (ESS) of the new energy vehicle industry. Research has found that under a static carbon tax, there may not be a stable point in the system, indicating the need for more flexible policy tools to promote the healthy development of industries. The policy recommendations of this study include developing carbon emission accounting technology to provide stable economic returns for the new energy vehicle industry; Establish a dynamic carbon tax system to reduce the cost burden of new energy vehicle business; Raise public awareness of low-carbon travel and encourage the purchase of new energy vehicles by quantifying consumer emissions reductions. In addition, the study emphasizes the importance of cooperation between the government and manufacturers, as well as the necessity of considering consumers' low-carbon preferences in the design of carbon tax policies.

## Keywords

Carbon Tax Mechanism, New Energy Vehicles, Evolutionary Game Theory, Prospect Theory

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

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

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



Open Access

## 1. 引言

传统燃油汽车(FV)的发展受到气候变化、环境污染和燃油消耗的制约。新能源汽车(NEV)的崛起,不仅为汽车产业的可持续发展提供了新路径,也对中国经济的高质量发展具有战略意义。NEV的推广有助于能源多元化,减少对石油的依赖,进而降低对外国石油进口的需求。此外,NEV的发展对于实现中国的“碳达峰”和“碳中和”目标至关重要。据2024年数据显示,NEV碳减排量累计达到2517万吨,同比增长52.0%,过去五年市场份额显著提升。自2010年起,中国政府实施了一系列政策以刺激NEV产业的发展。碳税作为一种经济手段,通过提高排放成本来激励制造商减少碳排放,成为政策讨论的焦点。研究表明,碳税能够促进技术创新,为NEV产业的可持续发展提供动力。然而,中国尚未明确是否征收碳税及其具体实施细节,包括征收范围、基数和税率等[1]。

本研究引入前景理论,构建了碳税政策下 NEV 制造商与地方政府的演化博弈模型。模型假设双方均为有限理性,通过价值函数替换支付矩阵中的不确定性损失和收益,提高了增益函数的精度。地方政府面临监管或不监管的选择,而制造商则需决定生产 NEV 或 FV。研究系统分析了不同情境下双方的行为策略和互动机制,并在静态碳税条件下,检测了演化博弈系统的稳定化策略(ESS)。本文的结构安排如下:第二部分提供相关文献概述;第三部分进行静态碳税政策对 NEV 推广影响的理论分析,基于政府与制造商演化博弈模型的演化动力学分析;第四部分进行碳税政策对 NEV 发展的仿真实验分析,通过 Matlab 仿真模拟静态碳税政策对 NEV 推广的影响;最后,第五部分总结研究结论并提出政策建议。

## 2. 文献综述

研究人员之前已经使用各种理论和方法研究了政府碳减排法规对新能源汽车生产商决策的影响。博弈论是考察新能源汽车制造商碳减排策略与政治行为关系的有效分析方法。一些研究人员利用博弈论对新能源汽车行业进行了调查,并得出了重要的发现。

演化博弈理论作为一种分析策略互动机制的工具,被广泛应用于 NEV 领域的研究。王海啸和缪小明(2013)的研究假设博弈方完全理性,但现实中这种条件难以实现[2]。因此,学者们开始创新博弈理论,以更贴近实际市场情况。Cai (2024)等人探讨了基于奖励和惩罚机制的 NEV 推广演化博弈[3]。胡振华和朱亚力(2022)建立了地方政府、生产商和消费者之间的演化博弈模型[4]。王璐(2022)等研究了绿色消费者对 NEV 扩散的影响[5]。李冬冬(2024)等构建了政府-企业-消费者三方博弈模型[6]。《汽车工业蓝皮书》强调了 NEV 在实现“碳中和”目标中的关键作用。尽管 NEV 在中国的市场份额有限,但其市场渗透率正在提高。Su(2021)等人指出政府补贴和税收减免对 NEV 市场增长的积极影响[7]。然而,这些政策增加了政府的财政负担,且不利于 NEV 产业的长远发展。

本研究创新性地将前景理论引入演化模型,以减少博弈参与者损益的不确定性。前景理论由 Kahneman 和 Tversky 提出,对不确定性条件下的人类判断和决策做出了重要贡献[8]。针对前景理论在碳税政策中的应用,研究者通过构建利益感知矩阵,考察了政府环境规制下低碳技术创新扩散的机制。这些结果表明,提高碳税率会鼓励企业采取低碳生产战略[9]。研究者通过构建利益感知矩阵,考察了政府环境规制下低碳技术创新扩散的机制[10]。程国柱、刘轩龄和冯天军(2024)基于行为经济学理论,构建了出行者与政府部门之间的演化博弈模型[11]。

碳税作为一种内部化低碳制造成本的机制,与碳交易相比,为企业提供了不同的激励。Wong 和 Zhang(2022)发现取消碳税后市场行为的逆转[12]。Zhang 和 Ding (2022)构建了基于碳交易和税收的混合机制的演化博弈模型[13]。杨玉香(2021)等人提出政府可以通过征税或补贴激励低碳排放[14]。Jia 和 Zhu (2025)探讨了碳税政策如何影响车辆污染控制和碳减排[15]。在 NEV 产业中,碳税的研究相对较少。孙明波和郑帅彬(2023)分析了碳税政策促进企业减排的有效性[16]。Liu 等人(2024)聚焦于碳税与补贴的组合效应[17]。Hu 和 Wang (2022)研究了碳税背景下制造商、消费者和政府间的互动机制[18]。

本研究将前景理论与演化博弈理论相结合,探讨了 NEV 制造商与政府之间的低碳战略博弈,为 NEV 领域的研究提供了新的视角。通过构建演化博弈模型,本研究详细描述了模型的构建过程,旨在为政策制定者提供理论支持和实践指导。

## 3. 模型构建

### 3.1. 调整的霍特林模型

本节采用了经过调整的霍特林模型,该模型基于三个核心假设来构建,从而为我们提供了一个理论框架,用以探讨制造商如何在产品差异化和策略互动中寻求最优解。

假设 1: 消费者的估值各不相同。基于霍特林经典空间模型的基本结构, 考虑消费者均匀分布在一个长度为 1 的水平差异线性空间城市中, 每个消费者只消耗一个车辆单位[19] [20], NEV 和 FV 争夺的是边际消费者, 运输成本是一个线性函数。

假设 2: 制造商选择生产位于左侧和右侧(分别为位置 0 和 1)的 NEV 和 FV, 如图 1 所示, 销售同质产品的边际成本为零。设  $V_1$  表示 NEV 的基础值,  $V_2$  表示 FV 的基础值。为了确保市场覆盖率, 我们假设  $V_1$  和  $V_2$  足够高都为 1,  $\theta > 0$  反映了消费者对低碳排放的偏好, 因此, 消费者可以从 NEVs 获得  $\theta e_1$  的环境效用, 从 FVs 获得  $\theta e_2$  的环境效用。

假设 3: 零售商对消费者群体的类型有完整的信息, 消费者有理性的预期。假设博弈的时间顺序为: 第一阶段新能源汽车厂商同时选择价格策略, 第二阶段确定价格规模, 第三阶段消费者选择购买整车产品。博弈的各种场景将分别讨论。

考虑到消费者根据其个人效用作出购买决策, 我们有以下 NEV 消费者和 FV 消费者的净效用规范, 计算过程如下。

首先我们列出了研究中使用的主要符号, 如表 1 所示。

Table 1. Primary symbol

表 1. 主要符号

参数	意义
$T_c$	消费者购买商品出行成本
$C_1$	NEV 的制造成本
$C_2$	FV 的制造成本
$U_e$	购买 NEV 的效用价值
$U_f$	购买 FV 的效用价值
$p_e$	NEV 售价
$p_f$	FV 售价
$\pi_e$	NEV 销售获得的利润
$\pi_e$	NEV 销售获得的利润
$e_1$	购买 NEV 的低碳价值估算
$e_2$	购买 FV 的低碳价值估算
$e_r$	NEVs 相对于 FVs 的碳排放减少量
$M$	购买 NEVs 补贴
$\Lambda$	购买 FVs 时支付的车辆购置税
$\theta$	消费者低碳偏好因子
$\beta$	单位产品网络规模对消费者效应的正外部性
$C_3$	政府管制成本
$C_4$	由政府承担的环境管理费用
$F$	政府不监管失去的社会效用价值
$R_1$	地方政府环境受益于 NEVs 生产的社会福利附加值
$R_2$	制造商碳交易额外好处

续表

$R_3$	企业所得税减免
$r$	碳税率
$Q$	碳税的上限
$C_t$	生产 NEVs 的低碳技术成本
$S$	对生产新能源汽车的制造商的补贴
$\eta$	消费物价敏感系数
$x$	汽车制造商生产新能源汽车的比例
$y$	政府征收碳税的比例
$t$	演化时间

下面的等式代表了购买 NEV 和 FV 的消费者的效用函数。

$$U_e = 1 - p_e - T_c X + \beta e_1 + \theta e_r + M \quad (1)$$

$$U_f = 1 - p_f - T_c(1 - X) + \beta e_2 - \Lambda \quad (2)$$

引入一个在购买 NEV 和 FV 时具有相同效用的未分化消费者，即一个消费者在继续使用 NEV 和切换到 FV 之间无所谓，其特征是  $\bar{X}$ ，表明以下内容：

$$1 - p_e - T_c X + \beta e_1 + \theta e_r + M = 1 - p_f - T_c(1 - X) + \beta e_2 - \Lambda \quad (3)$$

求解方程(3)得到：

$$\bar{X} = \frac{T_c + p_f - p_e + \beta(e_1 - e_2) + \theta e_r + M + \Lambda}{2T_c} \quad (4)$$

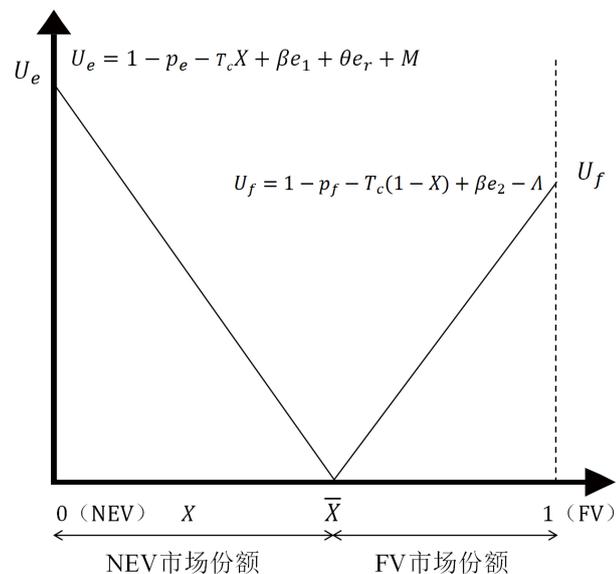


Figure 1. Market share of NEV and FV

图 1. NEV 和 FV 市场份额示

而边际消费者对这两个选择无所谓。由此，可以得到 NEV 和 FV 的市场份额，分布在  $(0, \bar{X})$  的客户

将选择购买新能源汽车，在  $(\bar{X}, 1)$  区间内会选择购买传统燃油汽车，如图 1 所示。

接下来，就可以求解博弈的第三阶段，根据以上分析得到新能源汽车和传统燃油汽车制造商的利润函数分别为  $\pi_e$  和  $\pi_f$ ，取函数的一阶导数，令一阶导数为零，得到最优价格  $p_e$  和  $p_f$  如式(5)和(6)。

$$p_e = \frac{3t + \beta(e_1 - e_2) + \theta e_r + M + \Lambda + C_2 + 2C_1}{3} \quad (5)$$

$$p_f = \frac{3t - \beta(e_1 - e_2) - \theta e_r - M - \Lambda + C_1 + 2C_2}{3} \quad (6)$$

将  $p_e$  和  $p_f$  分别代入利润函数，得到新能源汽车和传统燃油汽车制造商的最优利润：

$$\pi_e = \frac{[3T_c + \beta(e_1 - e_2) + \theta e_r + M + \Lambda + C_2 - C_1]^2}{18T_c} \quad (7)$$

$$\pi_f = \frac{[3T_c - \beta(e_1 - e_2) - \theta e_r - M - \Lambda + C_1 - C_2]^2}{18T_c} \quad (8)$$

消费者对新能源汽车产品的评估和支付意愿会随着预期产品规模的扩大而提升，这代表产品对消费者需求具有显著的线性网络效应： $\frac{\beta(e_1 - e_2)}{2T_c}$ 。此外，消费者对低碳产品的偏好存在垂直替代效应： $\frac{\theta e_r}{2T_c}$ ，

随着对环保意识的提高，低碳产品将逐渐取代传统产品，成为消费者的首选。本研究引入了两个关键变量，分别反映了网络效应和垂直替代效应，进一步丰富了霍特林模型。通过整合模型中的水平和垂直因素对消费者购买策略的影响，有助于提高演化博弈模型的准确性。

### 3.2. 模型假设

本研究对两个参与者的博弈模型进行了假设，以便更容易地分析他们的行为。

假设 1：参与者 1 和参与者 2 分别是当地政府(LG)和汽车制造商，两个代理人都是有限理性的，且均以自身利益最大化为决策依据，其中两者的策略选择受到各自获得的信息和个人偏好等因素影响。两者通过动态调整各自的策略以响应对方的行动，逐步趋近于一种演化稳定状态。在此过程中，各方的策略选择受其对成本与收益价值的感知所驱动。为了更精确地量化这种价值感知，本研究应用将前景理论中的价值函数和权重函数两个核心构件，作为评估参与者对潜在收益感知的依据。

设  $V$  表示参与者对损益的感知价值，感知价值  $V$  由价值函数  $v(\Delta x_i)$  和主观概率权重函数  $\pi(p_i)$  共同决定，前景理论在期望收益的基础上用主观概率权重函数  $\pi(p_i)$  将概率转化为权重，用价值函数  $v(\Delta x_i)$  替代效用模型。前景理论中的期望价值如式(9)所示。

$$V = \sum_{i=1}^n \pi(p_i) v(\Delta x_i) \quad (9)$$

通常人们对极高概率事件赋予 1 的权重对极低概率事件赋予 0 的权重，则有  $\pi(1)=1$ ， $\pi(0)=0$ 。而中、高概率事件容易被低估，低概率事件被高估，则当  $p_i$  较大时，有  $\pi(p_i) < p$ ，当  $p_i$  较小时，有  $\pi(p_i) > p$ 。 $v(\Delta x_i)$  代表决策者主观感受到的价值，如式(10)所示。

$$v(\Delta x_i) = \begin{cases} \Delta x_i^\alpha, & \Delta x_i \geq 0 \\ -\lambda(-\Delta x_i)^\beta, & \Delta x_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

我们设  $\alpha \in (0, 1)$  且  $\beta < 0$ 。参数  $\lambda$  为损失规避系数，表明决策的损失规避程度，通常设定  $\lambda \geq 1$ ，其值越大则决策者对损失的敏感程度高于收益。

决策权重函数  $\pi(p_i)$  的具体形式为:

$$\pi(p_i) = \frac{(p_i)^\sigma}{\left((p_i)^\sigma + (1-p_i)^\sigma\right)^{1/\sigma}} \quad (11)$$

其中,  $\sigma(0 < \sigma < 1)$  为函数的调节参数, 体现决策权重函数曲线的曲率。

假设 2: 地方政府的策略空间为  $\{S, NS\}$ , 其中 S 和 NS 表示监督和不监督,  $x(0 \leq x \leq 1)$  为选择“监督型”策略的概率,  $(1-x)$  为选择“非监督型”策略的概率。汽车制造商的策略空间为  $\{NEVs, FVs\}$ , 其中 NEV 和 FV 分别表示生产新能源汽车和传统燃油汽车,  $y(0 \leq y \leq 1)$  为选择策略“NEVs”的概率,  $(1-y)$  为选择策略“FVs”的概率。

假设 3: 我们假设消费者具有低碳偏好, 地方政府的目的是社会福利最大化, 而汽车制造商作为理性的经济主体, 目标是利润最大化。

我们基于这个假设建立了博弈双方政府和制造商之间的感知收益矩阵, 如表 2 所示。

**Table 2.** Perceived benefit matrix between the governments and manufacturers of both sides in the game  
**表 2.** 博弈双方政府和制造商之间的感知收益矩阵

制造商	地方政府	
	监管 ( $x$ )	不监管 ( $1-x$ )
生产新能源汽车 ( $y$ )	$\pi_e - C_I + V(S) + V(R_2) + V(R_3) - C_3 + V(R_1) - V(-S)$	$\pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3) - F + V(R_1)$
生产燃油汽车 ( $1-y$ )	$\pi_f + V(-rQ) - C_3 + V(-C_4) + V(rQ)$	$\pi_f - F + V(-C_4)$

假设 4: 考虑到中国的实际情况, 该研究将新能源汽车生命周期中, 涉及汽车材料和零部件生产阶段所产生的二氧化碳排放, 纳入了碳税的征税范畴。

假设 5: 为了深入分析并简化模型, 本研究设定感知效用函数中的参考点为零, 同时将收益的绝对值转换为相应的离散单位, 以便于更精确地量化和比较不同情境下的效用变化。

### 3.3. 模型构建

我们将汽车制造商收入矩阵定义为  $H$ , 具体表示如下:

$$H = \begin{pmatrix} \pi_e - C_I + V(S) + V(R_2) + V(R_3) & \pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3) \\ \pi_f + V(-rQ) & \pi_f \end{pmatrix} \quad (12)$$

汽车制造商在选择新能源汽车策略时的平均预期效用为:

$$\begin{aligned} U_M &= eH^T y \\ &= (1 \ 0) \begin{pmatrix} \pi_e - C_I + V(S) + V(R_2) + V(R_3) & \pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3) \\ \pi_f + V(-rQ) & \pi_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ 1-y \end{pmatrix} \\ &= y[\pi_e - C_I + V(S) + V(R_2) + V(R_3)] + (1-y)[\pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3)] \end{aligned} \quad (13)$$

新能源汽车制造商的平均收益为:

$$\begin{aligned} \bar{U}_M &= \mathbf{x}^T \mathbf{H}^T \mathbf{y} \\ &= (x \quad 1-x) \begin{pmatrix} \pi_e - C_I + V(S) + V(R_2) + V(R_3) & \pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3) \\ \pi_f + V(-rQ) & \pi_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ 1-y \end{pmatrix} \\ &= x \{ y [\pi_e - C_I + V(S) + V(R_2) + V(R_3)] + (1-y) (\pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3)) \} \\ &\quad + (1-x) \{ y [\pi_f + V(-rQ)] + (1-y) \pi_f \} \end{aligned} \tag{14}$$

我们将地方政府收入矩阵  $\mathbf{W}$  定义为:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} -C_3 + V(R_1) - V(-S) & -F + V(R_1) \\ -C_3 + V(-C_4) + V(rQ) & -F + V(-C_4) \end{pmatrix} \tag{15}$$

当地方政府选择监管策略时, 平均期望效用为:

$$\begin{aligned} U_G &= \mathbf{e} \mathbf{W}^T \mathbf{x} = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} -C_3 + V(R_1) - V(-S) & -F + V(R_1) \\ -C_3 + V(-C_4) + V(rQ) & -F + V(-C_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 1-x \end{pmatrix} \\ &= x [-C_3 + V(R_1) - V(-S)] + (1-x) [-F + V(R_1)] \end{aligned} \tag{16}$$

地方政府的平均收益是:

$$\begin{aligned} \bar{U}_G &= \mathbf{y}^T \mathbf{W}^T \mathbf{x} = (y \quad 1-y) \begin{pmatrix} -C_3 + V(R_1) - V(-S) & -F + V(R_1) \\ -C_3 + V(-C_4) + V(rQ) & -F + V(-C_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 1-x \end{pmatrix} \\ &= y \{ x [-C_3 + V(R_1) - V(-S)] + (1-x) [-F + V(R_1)] \} \\ &\quad + (1-y) \{ x [-C_3 + V(-C_4) + V(rQ)] + (1-x) [-F + V(-C_4)] \} \end{aligned} \tag{17}$$

根据马尔萨斯方程, 复制动力学方程为:

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{dx}{dt} = x [\mathbf{e} \mathbf{H}^T \mathbf{y} - \mathbf{x}^T \mathbf{H}^T \mathbf{y}] \\ &= x(1-x) \{ y [V(S) - V(-rQ)] + \pi_e - \pi_f - C_I + V(R_2) + V(R_3) \} \end{aligned} \tag{18}$$

类似地, 地方政府机构选择监管策略的复制动态方程为:

$$\begin{aligned} F(y) &= \frac{dy}{dt} = y [\mathbf{e} \mathbf{W}^T \mathbf{x} - \mathbf{y}^T \mathbf{W}^T \mathbf{x}] \\ &= y(1-y) \{ x [-V(-S) - V(rQ)] + V(R_1) - V(-C_4) \} \end{aligned} \tag{19}$$

### 3.4. 模型分析

#### 3.4.1. 制造商低碳战略演化路径分析

**Table 3.** Stable points of pure strategy evolution in three scenarios

**表 3.** 3 种情形下的纯策略演化稳定点

情形	$y$	$F'(0)$	$F'(1)$	ESS
情形 1	$y > \frac{\pi_f - \pi_e + C_I - V(R_2) - V(R_3)}{V(S) - V(-rQ)}$	+	-	$x=1$
情形 2	$y < \frac{\pi_f - \pi_e + C_I - V(R_2) - V(R_3)}{V(S) - V(-rQ)}$	-	+	$x=1$

续表

情形 3	$y < \frac{\pi_f - \pi_e + C_1 - V(R_2) - V(R_3)}{V(S) - V(-rQ)}$	-	+	$x = 0$
------	---	---	---	---------

根据方程(18)  $x = 0, x = 1, y^* = \frac{\pi_f - \pi_e + C_1 - V(R_2) + V(R_3)}{V(S) - V(-rQ)}$  是  $F(x)$  的根。根据稳定性定理, 当

$F(x) = 0$  时,  $F'(x) \leq 0, x$  为 ESS 时, 进行如下讨论, 3 种情形下的纯策略演化稳定点如下表 3 所示, 制造商策略选择的动态演化路径如下图 2 所示。

情况 1 表明, 与生产传统燃油汽车相比, 生产新能源汽车能为制造商带来更高的收益从而促使他们选择新能源汽车生产战略。制造商博弈的相图如图 2(a) 所示。

情况 2 表明, 汽车制造商从生产新能源汽车中获得的收益比生产传统燃油汽车更多, 汽车制造商将采取 NEVs 生产战略。制造商博弈的相图如图 2(b) 所示。

情况 3 表明, 汽车制造商将采用 FV 生产策略。制造商博弈的相图如图 2(c) 所示。

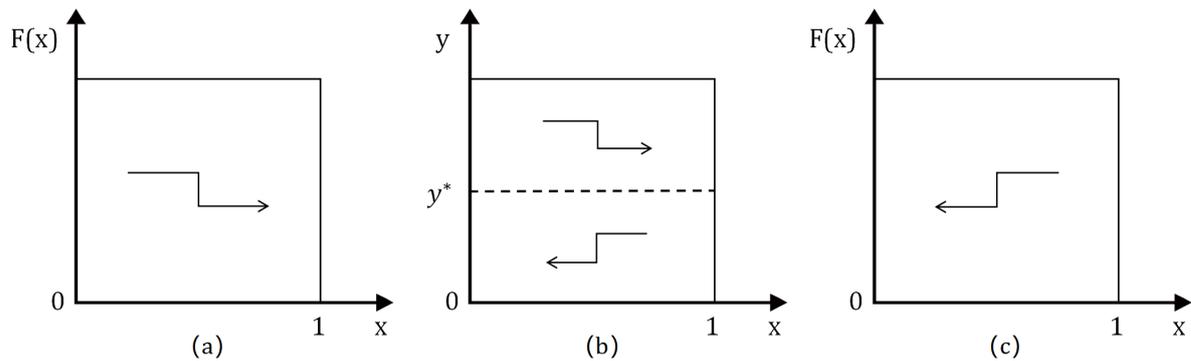


Figure 2. Phase diagram equilibrium point of manufacturer game (a): Scenario 1; (b): Scenario 2; (c): Scenario 3  
图 2. 制造商博弈的相图, 平衡点(a): 情况 1; (b): 情况 2; (c): 情况 3

### 3.4.2. 地方政府低碳战略演化路径分析

观察方程(19),  $y = 0, y = 1$  和  $x^* = \frac{-V(R_1) + V(-C_4)}{-V(-S) - V(rQ)}$  是  $F(y)$  的根。根据稳定性定理, 当  $F(y) = 0,$

$F'(y) \leq 0, x$  为 ESS 时, 进行如下讨论, 3 种情形下的纯策略演化稳定点如下表 4 所示, 地方政府策略选择的动态演化路径如下图 3 所示。

Table 4. Stable points of pure strategy evolution for manufacturers in three scenarios  
表 4. 3 种情形下制造商纯策略演化稳定点

情形	$x$	$F'(0)$	$F'(1)$	ESS
情形 4	$x > \frac{-V(R_1) + V(-C_4)}{-V(-S) - V(rQ)}$	+	-	$y = 1$
情形 5	$x > \frac{-V(R_1) + V(-C_4)}{-V(-S) - V(rQ)}$	-	+	$y = 0$
情形 6	$x < \frac{-V(R_1) + V(-C_4)}{-V(-S) - V(rQ)}$	-	+	$y = 0$

情况 4 表明，地方政府将采取监管策略。政府博弈的相图如图 3(a)所示。

情况 5 表明，地方政府将采取非监管策略。政府博弈的相图如图 3(b)所示。

情况 6 表明，地方政府将采取非监管策略。政府博弈的相图如图 3(c)所示。

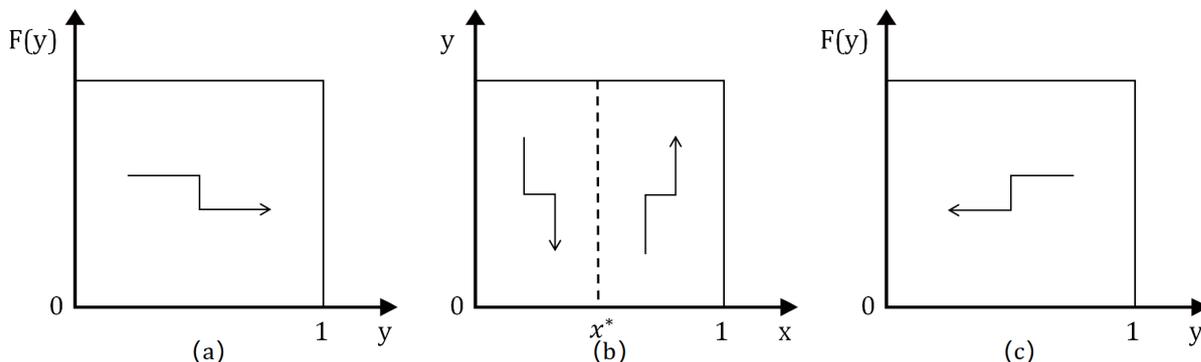


Figure 3. Phase diagram equilibrium point of local government game (a): Scenario 1; (b): Scenario 2; (c): Scenario 3

图 3. 地方政府博弈的相图，平衡点(a): 情况 1; (b): 情况 2; (c): 情况 3

### 3.4.3. 地方政府和制造商的稳定性分析

根据分析，新能源汽车制造商和地方政府在不同初始条件下都有相应的稳定策略。这包括考虑到目前市场的成熟度、新能源汽车行业的发展状况、消费者的绿色低碳意识。通过式(18)和式(19)，我们得到了由地方政府和汽车制造商组成的复制动力系统，如式(20)所示：

$$\begin{cases} F(x) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)\{y[V(S)-V(-rQ)] + \pi_e - \pi_f - C_I + V(R_2) + V(R_3)\} \\ F(y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)\{x[-V(-S) - V(rQ)] + V(R_1) - V(-C_4)\} \end{cases} \quad (20)$$

此条件下，系统的平衡点为： $0 \leq \frac{\pi_f - \pi_e + C_I - V(R_2) - V(R_3)}{V(S) - V(-rQ)} \leq 1$  和  $0 \leq \frac{-V(R_1) + V(-C_4)}{-V(-S) - V(rQ)} \leq 1$ ，即为复

制动态系统的平衡条件： $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)$  和  $\left(\frac{-V(R_1) + V(-C_4)}{-V(-S) - V(rQ)}, \frac{\pi_f - \pi_e + C_I - V(R_2) - V(R_3)}{V(S) - V(-rQ)}\right)$ 。

用于建立复制动态方程的雅可比矩阵(21)如下所示：

$$\begin{pmatrix} (1-2x)\{y[V(S)-V(-rQ)] + \pi_e - \pi_f - C_I + V(R_2) + V(R_3)\} & x(1-x)[V(S)-V(-rQ)] \\ y(1-y)[-V(-S) - V(rQ)] & (1-2y)\{x[-V(-S) - V(rQ)] + V(R_1) - V(-C_4)\} \end{pmatrix} \quad (21)$$

根据李雅普诺夫局部稳定性定理，假定稳定点具有一定的抗干扰能力，平衡点的稳定性分析见表 5。我们将五个平衡点代入雅可比矩阵进行局部稳定性分析，结果如表 6 所示。

Table 5. Stability analysis of local governments and manufacturers

表 5. 地方政府和制造商的稳定性分析

点	Det(J)	Tr(J)	结果
(0,0)	$\begin{bmatrix} \pi_e - \pi_f - C_I + V(R_2) + V(R_3) \\ V(R_1) - V(-C_4) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \pi_e - \pi_f - C_I + V(R_2) + V(R_3) \\ + [V(R_1) - V(-C_4)] \end{bmatrix}$	不稳定

续表

(0,1)	$\begin{aligned} & [V(S)-V(-rQ)+\pi_e-\pi_f-C_I+V(R_2)] \\ & [V(-C_4)-V(R_1)] \end{aligned}$	$\begin{aligned} & [V(S)-V(-rQ)+\pi_e-\pi_f-C_I+V(R_2)] \\ & +[V(-C_4)-V(R_1)] \end{aligned}$	不稳定
(1,0)	$\begin{aligned} & [\pi_e-\pi_f-C_I+V(R_2)+V(R_3)] \\ & [-V(-S)-V(rQ)+V(R_1)-V(-C_4)] \end{aligned}$	$\begin{aligned} & [\pi_e-\pi_f-C_I+V(R_2)+V(R_3)] \\ & +[-V(-S)-V(rQ)+V(R_1)-V(-C_4)] \end{aligned}$	不稳定
(1,1)	$\begin{aligned} & [V(-rQ)-V(S)+\pi_f-\pi_e+C_I-V(R_2)-V(R_3)] \\ & [V(-S)+V(rQ)+V(-C_4)-V(R_1)] \end{aligned}$	$\begin{aligned} & [V(-rQ)-V(S)+\pi_f-\pi_e+C_I-V(R_2)-V(R_3)] \\ & +[V(-S)+V(rQ)+V(-C_4)-V(R_1)] \end{aligned}$	不稳定
$(x^*, y^*)$	+	0	中心点

Table 6. Local stability analysis of equilibrium point

表 6. 均衡点局部稳定性分析

点	状态	结果
(0,0)	$\pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3) < \pi_f$	$V(R_1) < V(-C_4)$ 不稳定
(0,1)	$\pi_e - C_I + V(S) + V(R_2) + V(R_3) < \pi_f + V(-rQ)$	$V(R_1) < V(-C_4)$ 不稳定
(1,0)	$\pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3) > \pi_f$	$V(R_1) < V(-S) + V(rQ) + V(-C_4)$ 不稳定
(1,1)	$\pi_e - C_I + V(S) + V(R_2) + V(R_3) > \pi_f + V(-rQ)$	$V(R_1) > V(-S) + V(rQ) + V(-C_4)$ 不稳定
$(x^*, y^*)$	$\det(\mathbf{J}) > 0$	$\text{tr}(\mathbf{J}) = 0$ 中心点

中心点  $(x^*, y^*)$  的雅可比矩阵为:

$$\mathbf{J}' = \begin{pmatrix} 0 & K_1 \\ K_2 & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

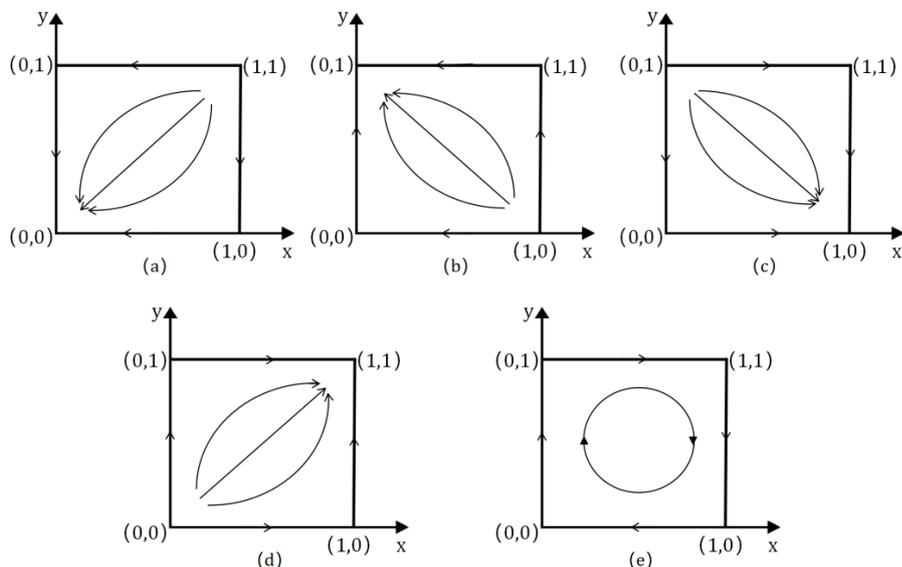
$$K_1 = \frac{[-V(R_1) + V(-C_4)][-V(-S) - V(rQ) + V(R_1) - V(-C_4)]}{[-V(-S) - V(-rQ)]^2 [V(S) - V(-rQ)]} \quad (23)$$

$$K_2 = \frac{(\pi_f - \pi_e + C_I - V(R_2) - V(R_3))[V(S) - V(-rQ) - \pi_f + \pi_e - C_I + V(R_2) + V(R_3)]}{[V(S) - V(-rQ)]^2 [-V(-S) - V(rQ)]} \quad (24)$$

矩阵  $\mathbf{K}$  的特征值为:

$$\lambda_{1,2} = \pm i\sqrt{K_1 K_2} \quad (25)$$

假设根是点  $(x^*, y^*)$  的特征值  $A_1$  和  $A_2$ 。根据 Routh-Hurwitz 稳定性判据,  $(x^*, y^*)$  是中心点, 而不是复制动态系统的渐近 ESS。因此, 在这种情况下, 系统没有 ESS, 政府应该采取有效措施来解决这种情况, 复制动态系统演化的相图如图 4 所示。



**Figure 4.** Copy the equilibrium point a of the evolutionary phase diagram of a dynamic system: (0, 0); b: (0, 1); c: (1, 0); d: (1, 1); and e: (1, 1)

**图 4.** 复制动态系统的演化相图，平衡点 a: (0, 0); b: (0, 1); c: (1, 0); d: (1, 1); 和 e: (1, 1)

## 4. 仿真与模拟

### 4.1. 案例描述和参数设置

实证分析通常用于测试模型和数据。本研究采用 MATLAB 2023a 软件，结合中国汽车工业协会、国家统计局年鉴和相关文献研究的行业数据，对模型进行了仿真，并对参数进行了赋值。参数初始值见表 7。

比亚迪作为中国新能源汽车的最大制造商已经发布了朝代系列、海豚系列和仰望系列等多个系列新能源汽车，而小米汽车作为后起之秀，也推出了多款新能源汽车，其中小米 SU7 成为 2024 最受欢迎的车型，它的官方销售价格(综合补贴后)为 215900~299900 元，一辆小米 SU7 的中央补贴大约为 18000，地方已取消补贴，相同水平的其它包括福特蒙迪欧、凯迪拉克 5ct、丰田亚洲龙和大众迈腾等新能源汽车的销售价格大约为传统内燃机汽车的销售价格的 125%，因此新能源汽车价格、传统燃料汽车价格和补贴大约分别为 25 万元/辆，2 万元/辆，和 1.8 万元/辆。车辆购置税是销售价格的 10%，即 2.6 万元/辆。

一辆新能源汽车的排放水平为一辆传统化石能源汽车的 20%，一辆普通汽车的一年碳排放量约为 2.7 吨，它的使用年限为 10 年，因此一辆新能源汽车能够减少 21.6 吨二氧化碳。由于我国还未征收碳税，本研究参考德国碳税征收方法，德国于 2021 年 1 月开始征收碳税，截至 2024 年起始税率为每吨二氧化碳征收 45 欧元，换算成人民币大约为 342.38 元(1€ = 7.6RMB)。

根据国际清洁交通委员会(ICCT)的报告，到 2030 年，燃油紧凑型车的车辆制造成本进一步上升至 13800 美元，而电动汽车(包括不同纯电续航里程的 BEV 和 PHEV)的车辆制造成本为 12100~16500 美元。我们可以估算一辆新能源汽车的制造成本大约在 12100~16500 美元之间，折合人民币约为 8.5 万~11.6 万元(按汇率 1 美元 = 7.45 人民币计算)，因此本研究设定， $C_1 = 100500$  元。一般来说，汽车的制造成本占汽车售价的 43%左右。这包括了汽车各种零件发动机的价格，以及设计费用、广告费用、运输费用等。因此我们粗略估算燃油汽车的制造费用约为 86000 元，即  $C_2 = 86000$  元。新能源汽车中的纯电动汽车的成本主要由电池、电机、电控、电驱动零部件和其它构成，其中电驱动零部件占比 8%，本文将其算作低碳技术成本即为  $C_3 = 800$  元。根据先前的文献，将生产燃油汽车的制造商产生的政府环境管理成本  $C_4$  设定为 1000，而生产新能源汽车的制造商产生的社会福利上升为 1600。

目前我国交通运输行业已经被纳入碳交易市场，新能源汽车制造商通过卖积分赚取收益，2024 年新能源积分 351057，按照 2024 年其新能源汽车市场占有率计算其新能源车型销量约为 130000 辆，2021 年新能源积分平均交易单价为 2088/分，如果小米出售全部的新能源积分，每生产一辆新能源汽车就能获得 5638.51 元积分收入，因此计算出  $R_2 = 0.56$ 。一般企业法定所得税税率为 25%，小米汽车由于属于高科技企业其法定所得税税率为 15%，其 2024 年的所得税额为人民币 1,049,166,000.00 元，2024 年汽车业务收入占据小米集团总收入约 10.5%，其新能源车型销量约为 134000 辆，按照法定所得税税率优惠 15% 计算，小米每生产一辆新能源汽车的税收优惠约为 548.07 元，因此计算出  $R_3 = 0.05$ 。

**Table 7.** Initial values of important parameters  
**表 7.** 重要参数初始值

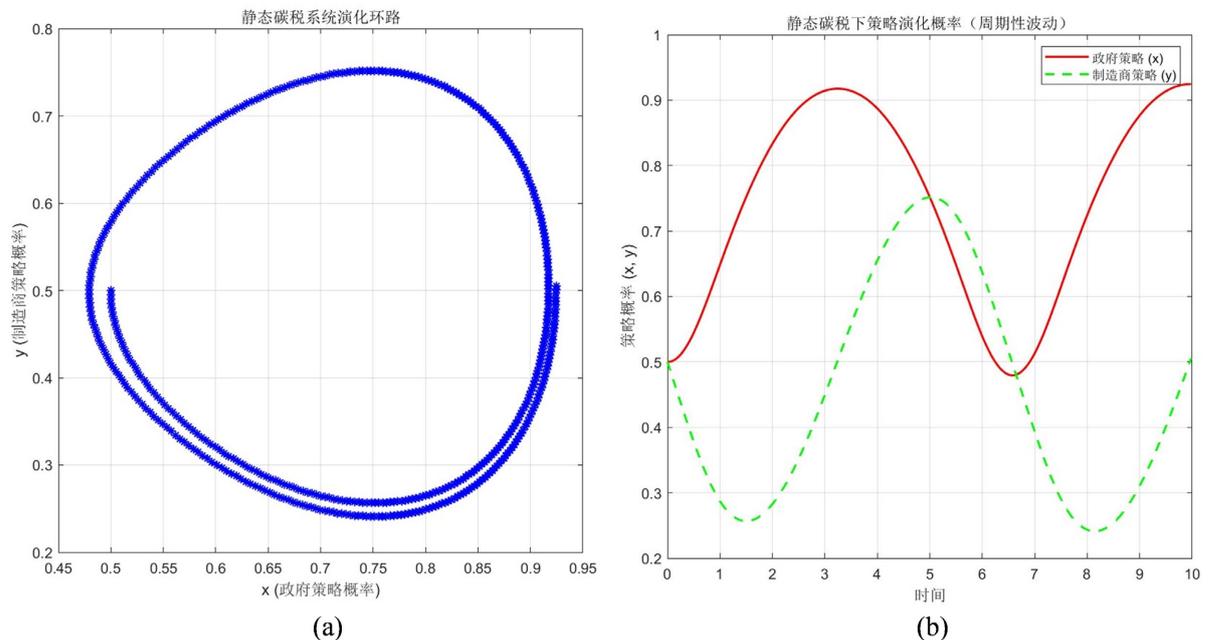
参数	含义	初始值	单位	核算
$p_e$	新能源汽车价格	25.79	10000 元/辆	(215900 + 299900)/2
$p_f$	燃油汽车价格	20	10000 元/辆	257900/125%
$M$	购买 NEVs 补贴	1.8	10000 元/辆	18000
$\Lambda$	购买 FVs 时支付的车辆购置税	2.6	10000 元/辆	257900*10%
$e_r$	NEVs 相对于 FVs 的碳排放减少量	21.6	吨/辆	2.7*10*0.8
$r$	碳税率	0.03	10000 元/辆	7.6*45
$Q$	碳税的上限	0.65	10000 元/辆	0.03*21.6
$C_1$	生产 NEVs 的低碳技术成本	0.4	10000 元/辆	10.05*40%
$C_1$	NEV 的制造成本	10.05	10000 元/辆	(85000 - 116000)/2
$C_2$	FV 的制造成本	8.6	10000 元/辆	200000*43%
$C_4$	由政府承担的环境管理费用	1000	元	1000
$R_1$	生产 NEVs 的社会福利附加值	1600	元	1600
$R_2$	制造商碳交易额外好处	0.56	10000 元/辆	351057*2088/130000
$R_3$	企业所得税减免	0.05	10000 元/辆	(1,049,166,000.00/15%*25% - 1,049,166,000.00)*10.5%/134000
$\eta$	消费物价敏感系数	0.5	%	
$\beta$	消费者效应的正外部性	0.5	%	
$\theta$	消费者低碳偏好因子	0.8	%	

## 4.2. 仿真结果分析

系统策略的初始值为(0.5, 0.5)。图 5 描绘了复制动态系统的演化过程以及静态碳税下博弈主体行为策略的比例。

图 5(a)表明，在静态碳税下，复制动态系统的演化轨迹是围绕中心点的闭环，在博弈主体之间没有渐近稳定点。静态碳税政策下地方政府不能根据汽车制造商的生产行为以一种动态及时的方式调整政策。

图 5(b)显示，两个行动者的演化路径都是不断起伏的，反映了静态碳税下群体规模策略选择的不稳定性。可知静态碳税下博弈方的数量随着时间的推移在不断变化，这种变化曲线类似于一个  $\cos$  函数，这可能是因为在新能源汽车发展的初级阶段汽车制造商的缺乏弹性和对政府激励政策的高度依赖。



**Figure 5.** Evolution results under static carbon tax: (a) System evolution path and (b) Strategy probability of players under static carbon tax

**图 5.** 静态碳税下的演化结果：(a)系统演化路径与(b)静态碳税下博弈者的策略概率

静态碳税对新能源汽车市场的影响是多方面的。首先，静态碳税可以为制造商提供一种激励，以减少碳排放并采用更环保的生产方式。然而，当碳税带来的额外收益不足以抵消生产新能源汽车的低碳技术成本时，制造商可能会选择继续生产传统燃油汽车以实现利润最大化。这种情况下，地方政府可能认为监管成本高于社会福利的增加，从而选择不介入监管，这对 NEV 产业的长远发展不利。另一方面，当 NEV 的净利润加上政府补贴和碳交易额外收益，小于制造商生产 FV 的利润与支付的碳税之间的差额时，政府的监管措施对制造商而言显得毫无吸引力。制造商宁愿支付更高的碳税，也不愿意投资于 NEV 的生产，这可能导致社会福利的损失。

在某些情况下，当 NEV 的低碳技术利润与成本之差加上碳交易额外收益大于生产 FV 的利润时，制造商会选择生产 NEV。这通常发生在 NEV 市场相对成熟的阶段，消费者对 NEV 的需求增加，产品对消费者需求的网络效应显现，表明 NEV 产业具有更大的市场潜力。而当 NEV 带来的社会福利附加值的感知效用大于补贴、碳税和监管成本的感知收益损失之和时，制造商将选择生产 NEV，政府将选择监管到稳定的程度。这种情况下，汽车制造商获得的利润不断增加，社会福利价值的增加也为地方政府提供了激励监督，形成良性循环，这是 NEV 厂商与政府之间理想的博弈状态。

综上所述，我们通过分析复制动力学系统的不同稳定点，揭示了新能源汽车产业中政府与制造商之间博弈的复杂性。这些发现强调了政府政策在推动新能源汽车产业发展中的关键作用，同时也揭示了制造商在面对不同市场和政策条件下的策略选择。然而静态碳税下群体规模策略选择是不稳定的，静态碳税政策下地方政府不能根据汽车制造商的生产行为以一种动态及时的方式调整政策。为了实现新能源汽车产业的健康发展，政府还需要制定更加有效的政策，以激励制造商生产新能源汽车，并促进市场的成熟。此外，政府与制造商之间的合作对于建设必要的基础设施、提高消费者意识和接受度也至关重要。

## 5. 政策建议

基于分析和讨论，在静态碳税背景下，为促进新能源汽车(NEV)市场的发展，本研究就政府如何对汽

车制造商征收碳税提出了以下政策建议：

1. 中国尚未在碳市场上为新能源汽车的减排提供明确的奖励。政府应开发碳排放核算技术，确保新能源汽车行业的减排努力得到量化和认可。通过为 NEV 行业提供稳定的经济回报，鼓励增长的碳排放市场。

2. 鉴于静态碳税下缺乏稳定点，政府应根据市场反馈和 NEV 产业的发展阶段，动态调整碳税政策和其他相关激励措施，以确保政策的有效性和适应性。同时借鉴国际经验，建立一个可行的、动态的碳税体系，以充分发挥碳税的调控作用。建议从较低的碳税起征点税率开始，减轻对新能源汽车业务的成本负担，并为新能源汽车生产企业提供税收减免或退税，以促进行业健康发展。

3. 政府应通过媒体宣传和教育活动，提高公众对碳减排重要性的认识。实施碳包容政策，激励公众积极参与碳减排行动。通过建立完善的新能源汽车碳减排工具，量化消费者的减排量，并以经济价值形式返还，鼓励购买新能源汽车。

## 基金项目

上海理工大学大学生创新项目(XJ2024137)。

## 参考文献

- [1] 高萍, 高羽清. 基于碳定价视角对我国开征碳税的思考[J]. 税务研究, 2023(7): 39-44.
- [2] 王海啸, 缪小明. 我国新能源汽车研发补贴的博弈研究[J]. 软科学, 2013, 27(6): 29-32.
- [3] Cai, R., Zhang, T., Wang, X., Jia, Q., Zhao, S., Liu, N., *et al.* (2024) Evolutionary Game and Simulation Analysis of New-Energy Vehicle Promotion in China Based on Reward and Punishment Mechanisms. *Mathematics*, **12**, Article 2900. <https://doi.org/10.3390/math12182900>
- [4] 胡振华, 朱亚力. 可持续发展背景下新能源汽车发展策略的演化博弈分析[J]. 工业技术经济, 2022, 41(9): 11-17
- [5] 王璐, 马庆庆, 杨劼, 郑君君. 基于复杂网络演化博弈的绿色消费者对新能源汽车扩散的影响研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(4): 74-85.
- [6] 李冬冬, 商辰宣, 吕宏军, 杨晶玉, 张岭. “后补贴”时代考虑消费者需求异质性的新能源汽车推广政策研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(4): 141-152.
- [7] Su, C., Yuan, X., Tao, R. and Umar, M. (2021) Can New Energy Vehicles Help to Achieve Carbon Neutrality Targets? *Journal of Environmental Management*, **297**, Article ID: 113348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113348>
- [8] Barberis, N.C. (2013) Thirty Years of Prospect Theory in Economics: A Review and Assessment. *Journal of Economic Perspectives*, **27**, 173-196. <https://doi.org/10.1257/jep.27.1.173>
- [9] Goh, H.H., Xu, Z., Liang, X., Zhang, D., Dai, W., Liu, H., *et al.* (2023) Solving Carbon Tax Challenges with a Holistic Approach: Integrating Evolutionary Game Theory and Life Cycle Energy Solutions. *Journal of Cleaner Production*, **423**, Article ID: 138817. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138817>
- [10] Meng, Q., Liu, Y., Li, Z. and Wu, C. (2021) Dynamic Reward and Penalty Strategies of Green Building Construction Incentive: An Evolutionary Game Theory-Based Analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 44902-44915. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13624-z>
- [11] 程国柱, 刘轩龄, 冯天军. 行为经济学视角下城市居民出行方式选择演化博弈模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(7): 102-111.
- [12] Wong, J.B. and Zhang, Q. (2022) Impact of Carbon Tax on Electricity Prices and Behaviour. *Finance Research Letters*, **44**, Article ID: 102098. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.102098>
- [13] Zhang, P. and Ding, R. (2023) How to Achieve Carbon Abatement in Aviation with Hybrid Mechanism? A Stochastic Evolutionary Game Model. *Energy*, **285**, Article ID: 129349. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129349>
- [14] 杨玉香, 林梦, 张宝友, 孟丽君, 于艳娜. 不同碳税政策对供应链网络均衡的影响研究[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(10): 3036-3048.
- [15] Jia, S. and Zhu, W. (2025) Effects of Carbon Tax Policy on Vehicle Pollution Control and Carbon Reduction Based on the Availability Heuristic and System Dynamics. *Sustainable Cities and Society*, **118**, Article ID: 105990. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105990>

- [16] 孙明波, 郑帅彬. 政府补贴与碳税动态影响下的绿色技术创新扩散机制研究[J]. 生态经济, 2023, 39(5): 78-86.
- [17] Liu, D., Feng, M., Liu, Y., Wang, L., Hu, J., Wang, G., *et al.* (2024) A Tripartite Evolutionary Game Study of Low-Carbon Innovation System from the Perspective of Dynamic Subsidies and Taxes. *Journal of Environmental Management*, **356**, Article ID: 120651. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120651>
- [18] Hu, Z. and Wang, S. (2021) An Evolutionary Game Model between Governments and Manufacturers Considering Carbon Taxes, Subsidies, and Consumers' Low-Carbon Preference. *Dynamic Games and Applications*, **12**, 513-551. <https://doi.org/10.1007/s13235-021-00390-3>
- [19] Liu, Y., Gupta, S. and Zhang, Z.J. (2006) Note on Self-Restraint as an Online Entry-Deterrence Strategy. *Management Science*, **52**, 1799-1809. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0566>
- [20] Li, K.J. and Jain, S. (2016) Behavior-Based Pricing: An Analysis of the Impact of Peer-Induced Fairness. *Management Science*, **62**, 2705-2721. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2015.2265>