

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2021.06.007

# 新能源汽车补贴政策与保有量影响研究:单位补贴、销售奖励与产品差异化<sup>①</sup>

鞠晴江<sup>1</sup>, 鞠鹏<sup>1</sup>, 代文强<sup>1\*</sup>, 冉伦<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学经济与管理学院, 成都 611731; 2. 北京理工大学管理与经济学院, 北京 100081)

**摘要:** 以提升新能源汽车市场保有量和整体质量的补贴政策为背景, 建立包括政府、制造商、零售商和消费者在内的动态博弈模型, 将产业数量目标、高质量发展目标及补贴预算约束等政策特征纳入模型, 对单位补贴、销售奖励以及差异化单位补贴政策的影响进行理论研究发现: 在确保政府补贴绩效为正的条件下, 政府对制造商和消费者的单位补贴可增加新能源汽车的市场需求量, 并提高制造商和零售商的利润水平; 叠加的销售奖励不仅可改善单位补贴的市场结果, 还可提高政府补贴绩效. 考虑汽车质量的差异化单位补贴在不降低市场需求总量的同时, 可减少低质量车的需求量并增加高质量车的需求量. 单位补贴的最优值主要由政府设定的数量目标和制造商单位成本决定, 数量目标和单位成本越高, 则单位补贴越高, 但政府补贴绩效越低.

**关键词:** 新能源汽车; 政府补贴政策; 市场保有量; 动态博弈

**中图分类号:** F713.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2021)06-0101-16

## 0 引言

新能源汽车产业是国家确定的重要战略性新兴产业, 发展该产业是有效缓解能源和环境压力、促进汽车产业优化升级的重要举措. 然而该产业尚处于发展初期, 新能源汽车面临着电池技术瓶颈、生产规模小、生产成本和销售价格高、难以得到消费者认可等诸多困境<sup>[1-4]</sup>. 国务院办公厅于2009年首先提出《汽车产业调整和振兴规划》, 国务院随后于2012年印发《节能与新能源汽车产业发展规划(2012年~2020年)》, 在明确新能源汽车<sup>②</sup>的技术路线、主要目标和任务的基础上, 对产业发展提出量化目标, 即: 到2020年, 新能源汽车生产能力达到200万辆、累计产销量超过500

万辆.

为实现这一规划目标, 我国政府出台了一系列补贴政策来促进新能源汽车产业发展<sup>[5-8]</sup>. 补贴政策瞄准了新能源汽车的推广应用, 通过对消费者和生产者进行补贴, 提高新能源汽车的市场保有量. 例如, 财政部和科技部于2009年在《关于开展节能与新能源汽车示范推广试点工作的通知》中提出, 对新能源汽车购买方给予补贴; 国务院办公厅于2014年在《加快新能源汽车推广应用的指导意见》中提出, 除对消费者购买进行补贴外, 还对推广应用规模较大的企业给予奖励. 在数量目标之外, 补贴政策还进一步瞄准新能源汽车产业升级和高质量发展. 例如, 财政部等四部委相继在2017年~2019年对财政补贴政策进行3轮

① 收稿日期: 2019-06-15; 修回日期: 2020-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71871045; 71772028); 国家社会科学基金资助项目(17XGL011; 18BGL108); 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91746210); 北京市自然科学基金资助项目(9172016).

通讯作者: 代文强(1978—), 男, 四川彭州人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: wq dai@uestc.edu.cn

② 规划中提及的新能源汽车包括纯电动汽车和插电式混合动力汽车两类.

调整完善,强调按续航里程、电池能量密度、车辆能耗等标准进行差异化补贴,以鼓励技术水平高、安全可靠的高质量产品的推广应用。

一系列补贴政策取得了显著成效。据财政部数据显示,中央财政在2009年~2015年间累计安排补贴资金334.35亿元,推动新能源汽车产销量快速增长,到2015年底,累计产销量达到49.7万辆和44万辆,使我国一跃成为全球新能源汽车保有量最大的国家<sup>③</sup>。在后续补贴政策的推进下,到2019年底,我国新能源汽车保有量达到381万辆,比2018年增长50%<sup>④</sup>。

尽管补贴政策取得了上述显著效果,但新能源汽车的市场规模仍然偏小,2019年全国新能源汽车保有量仅占汽车总量的1.46%<sup>④</sup>,产业发展还远未实现规模经济。因此,在理论上对政府补贴政策的影响机制及组合效果进行研究具有重要意义。总体上,在政府补贴预算日益趋紧<sup>⑤</sup>的背景下,补贴政策在追求数量目标和质量目标过程中的影响机制和效果是什么?具体在政策类型上,常用的单位补贴政策的影响是什么?在此基础上,政府对制造商额外的销售奖励的叠加效果又如何?考虑新能源汽车质量的差异化单位补贴政策对产业高质量发展的影响是什么?这一系列问题有待进行理论探讨。

为回答这些问题,本文以政府预算约束下新能源汽车的规模化数量目标和高质量发展目标为政策背景,针对由制造商和零售商组成的新能源汽车供应链,建立包括政府、制造商、零售商和消费者在内的动态博弈模型,对政府的单位补贴、销售奖励以及差异化单位补贴等政策的影响机制和效果进行理论研究。

## 1 文献综述

发展新能源汽车普遍被视为减少温室气体排放、减缓气候变化的重要举措,但却面临着环境领

域和技术创新及推广领域的双重市场失灵<sup>[9, 10]</sup>。为此,政府补贴政策在世界各国相继出台,以促进新能源汽车的广泛接受,提高其市场保有量。针对新能源汽车补贴政策及其效果影响,国内外学者展开了一系列研究。

从补贴对象看,政策研究文献既有的仅针对生产者的补贴,如对制造商的成本补贴(如文献[11])和对销售商的销售补贴(如文献[12])等,也有仅针对消费者的补贴(如文献[13, 14]);少数文献同时分析了生产者补贴和消费者补贴(如文献[4, 15])。本文的研究同时考虑了这二者。从研究方法看,现有文献主要采用计量经济模型(如文献[16])或博弈模型分析,本研究采用博弈模型进行分析。

运用博弈模型来研究不同类型补贴政策的影响,可以为政策分析提供逻辑一致的微观基础。更进一步的,这些文献可以分为无供应链视角和有供应链视角两类。本文的研究考虑后者,即在供应链视角下进行博弈模型分析。在无供应链视角的博弈模型研究中,补贴政策类型主要包括研发补贴和销售补贴等。例如,马亮等<sup>[11]</sup>运用同步博弈模型分析发现,新能源汽车研发补贴对产业发展具有促进作用。张海斌等<sup>[12]</sup>考虑新能源汽车销售企业促销行为的正外部性,构建博弈模型分析销售补贴的影响发现,获取补贴的销售目标对新能源汽车推广具有正向作用。Lim等<sup>[17]</sup>从消费者行为特征出发研究里程焦虑和再售焦虑对新能源汽车保有量的影响,认为政府政策应结合消费者焦虑及企业商业模式等因素来推动新能源汽车的大规模接受。

随着供应链理论的发展,在博弈模型中引入供应链视角成为研究的重要手段<sup>[18]</sup>。这运用于新能源汽车补贴政策研究中,有助于在不同的供应链主体、市场结构及异质性特征下研究各类补贴政策的影响。现有文献以研究消费者补贴政策为

③ 数据来源于国务院网页《财政部关于地方预决算公开和新能源汽车推广应用补助资金专项检查的通报》, [http://www.gov.cn/xinwen/2016-09/08/content\\_5106603.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-09/08/content_5106603.htm)

④ 数据来源于《人民公安报》电子版2020年1月8日第4版文章“全国66个城市汽车保有量超过百万辆”, <http://epaper.cpd.com.cn/szb.html?d=20200414&t=szb>

⑤ 财政部等四部委早在2010年的补贴政策中,就提到采取“退坡机制”,即随着产业规模扩大逐步降低补贴标准。其后的补贴政策进一步将降低补贴标准与生产成本、规模效应、技术进步等因素关联起来。

主,政策影响包括新能源汽车需求量、供应链利润、消费者福利、环境效益等方面,采用的供应链结构主要是由制造商和零售商组成的新能源汽车供应链(如文献[15]),少数考虑了传统汽车供应链与电动汽车供应链之间的双寡头竞争(如文献[13,14]).例如,Huang等<sup>[13]</sup>研究单位消费补贴对电动汽车销量及环境保护的影响发现,消费者议价能力越强,补贴对销量增加的影响越大,但补贴增加并不一定带来环境改善. Shao等<sup>[14]</sup>比较了单位消费补贴和价格折扣补贴的影响,发现两类补贴在新能源汽车需求量、消费者剩余、环境效益和社会福利上的影响相同,但单位消费补贴的政府支出更少.最近的研究工作可以参考最新的综述性文献[19]及其所引用的文献.

综合上述分析,本文将紧密结合我国新能源汽车补贴政策实践,在供应链视角下对新能源汽车补贴政策的影响进行博弈模型分析,通过考虑政府预算约束下的规模化目标和高质量发展目标,对政府的单位补贴、销售奖励以及差异化单位补贴政策对市场保有量的影响进行理论研究,并对政策绩效结果加以比较分析.与已有研究不同的是:1)与现有文献将政府补贴政策设定为外生变量不同,本文将补贴政策作为内生变量,对新能源汽车保有量这一政府直接目标进行建模,并在

预算约束下确定最优的补贴额度;2)与多数博弈模型对单位消费补贴或成本补贴进行单独研究不同,本文同时考虑这两类政策的影响;3)在中央政府单位补贴之外,地方政府多以附加的销售奖励方式鼓励新能源汽车生产企业扩大销售规模<sup>⑥</sup>,这一叠加政策的有效性研究比较缺乏,本文将予以考虑;4)现有文献对我国新能源汽车补贴政策的突出特征——高质量发展目标缺乏考虑,本文将对于基于产品质量的差异化补贴政策的影响展开研究.

## 2 模型框架

### 2.1 问题描述

如图1所示,本文考虑由一个制造商和一个零售商组成的新能源汽车供应链,构建包括政府、制造商、零售商和消费者在内的四阶段 Stackelberg 动态博弈模型,分析政府不同类型补贴政策的市場影响.假设制造商和零售商的目标是利润最大化,政府的目标是新能源汽车的市場保有量最大化.为简化起见,模型中不考虑存货问题.同时借鉴现有文献的做法,考虑到我国新能源汽车产业还处于初级“入门”阶段,本文在建模中统一用市場需求量代替市場保有量.

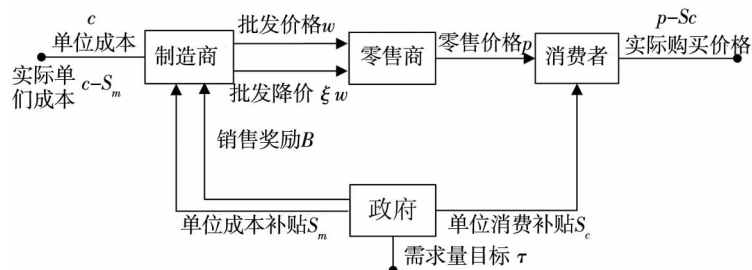


图1 新能源汽车供应链的政府补贴示意图

Fig. 1 Government subsidies for new energy vehicle supply chain

在基于新能源汽车供应链的补贴政策下,博弈模型的决策顺序是:第一阶段,政府根据决策目标制定多类型的补贴政策,决策变量包括对制造商成本的单位补贴 $s_m$ 、对消费者购买的单位补贴 $s_c$ 、对制造商的销售奖励 $B$ .第二阶段,制造商将新能源汽车批发给零售商,决策变量是批发价格 $w$ .

在政府的销售奖励政策下,制造商还通过降低批发价格来激励零售商,促使零售商降价从而扩大市場销售量,这时制造商的决策变量是批发降价因子 $\xi$ .第三阶段,零售商向消费者销售新能源汽车,决策变量是零售价格 $p$ .最后的第四阶段,消费者依据支付意愿和实际零售价格决定是否购买

⑥ 以江西省为例,该省在《2018年新能源汽车推广应用奖励办法》中提出,政府根据本地新能源汽车生产企业当年的销售数量给予1 000万元~3 600万元不等的奖励.

新能源汽车.

为行文清晰起见,本文的所有证明都放在附录中.

### 2.2 模型参数符号

在上述模型框架下,所有参数符号及其含义见表1.

表1 参数符号及含义

Table 1 Parameter symbols and meanings

参数	含义
$D$	新能源汽车的市场需求量
$\tau$	政府制定的新能源汽车需求量目标
$c$	新能源汽车制造者的单位成本
$w$	新能源汽车的批发价格
$p$	新能源汽车的零售价格
$\pi_m$	制造商利润
$\pi_r$	零售商利润
$s_m$	政府对制造商成本的单位补贴
$s_c$	政府对消费者购买的单位补贴
$s$	政府对制造商和消费者的单位总补贴
$u_g$	政府的补贴绩效
$B$	政府对制造商的销售奖励额
$\theta$	政府对制造商销售奖励的激励因子
$\xi$	制造商对零售商的批发降价因子
$\delta$	消费者对高质量车的偏好系数(>1,低质量车为1)
$k$	政府对高质量车需求量目标的偏好系数(>1,低质量车为1)

### 3 单位补贴政策影响的基础模型

首先考虑仅包含单位补贴政策的基础模型,即在图1中不考虑销售奖励政策 $B$ ,也不考虑新能源汽车质量差异.假设制造商只生产并销售一款新能源汽车.根据逆向递推法,首先定义消费者的需求函数.为简化模型分析,借鉴Örsemir等<sup>[20]</sup>和夏西强等<sup>[21]</sup>的处理,假设消费者的支付意愿 $v$ 服从 $[0, 1]$ 的均匀分布,即 $v \sim U[0, 1]$ ,消费者需求函数即为 $D = 1 - p$ .在消费者获取单位补贴时,消费者购买新能源汽车的实际支付价格为 $p - s_c$ .当支付意愿不小于实际购买价格即 $v \geq (p - s_c)$ 时,消费者选择购买,由此得到单位补贴政策下消费者的需求函数为 $D = 1 - (p - s_c)$ .

其次,依次考虑零售商和制造商实现利润最大化的定价决策.零售商向消费者销售新能源汽

车的单位利润为 $p - w$ ,则零售商的定价决策问题为

$$\max_p \pi_r = (p - w)[1 - (p - s_c)] \quad (1)$$

根据一阶条件 $\partial \pi_r / \partial p = 0$ ,可求得零售商制定的最优零售价格为

$$p^*(w, s_c) = \frac{1 + w}{2} + \frac{s_c}{2} \quad (2)$$

在制造商获取单位成本补贴时,制造商向零售商批发新能源汽车的单位利润为 $w - (c - s_m)$ ,实现利润最大化的定价决策问题为

$$\max_w \pi_m = [w - (c - s_m)][1 - (p - s_c)] \quad (3)$$

根据式(3)的一阶条件 $\partial \pi_m / \partial w = 0$ ,并将最优解代入需求函数和式(2),可得单位补贴政策下新能源汽车的最优批发价格、零售价格及市场需求量分别为

$$w^*(c, s_c, s_m) = \frac{1 + c}{2} + \frac{s_c - s_m}{2} \quad (4)$$

$$p^*(c, s_c, s_m) = \frac{3 + c}{4} + \frac{3s_c - s_m}{4} \quad (5)$$

$$D^*(c, s_c, s_m) = \frac{1 - c}{4} + \frac{s_c + s_m}{4} \quad (6)$$

从式(4)~式(6)可得:在单位补贴对价格的影响上,新能源汽车的批发价格和零售价格都随消费者补贴 $s_c$ 的增加而增加,随制造商补贴 $s_m$ 的增加而减少;在单位补贴对市场需求量的影响上,新能源汽车的市场需求量随着这两类单位补贴的增加而增加.进一步,代入式(1)和式(3),可求得单位补贴政策下零售商的最优利润为 $\pi_r^*(c, s_c, s_m) = \frac{(1 - c + s_c + s_m)^2}{16}$ ,制造商的最优利润为 $\pi_m^*(c, s_c, s_m) = \frac{(1 - c + s_c + s_m)^2}{8}$ .

最后,定义并求解政府的补贴决策函数.在政府日益趋紧的补贴预算背景下,政府的决策目标是补贴绩效 $u_g$ 最大化.这里的补贴绩效是补贴收益与补贴成本之差,其中的补贴收益为不低于政府目标值的市场需求量 $D$ ,补贴成本为政府补贴总额,即单位总补贴 $s_c + s_m$ 与市场需求量 $D$ 的乘积.若补贴绩效为正,则政策是有效的.由于以上求解的最优需求量及厂商利润均与单位总补贴 $s_c + s_m$ 有关,令 $s = s_c + s_m$ ,此时的政府补贴决策问题可表述为

$$\begin{aligned} \max_s u_g &= D - s \times D \\ \text{s. t. } u_g &\geq 0, D \geq \tau > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $u_g \geq 0$  是确保政府补贴政策有效率； $D \geq \tau$  是确保新能源汽车市场需求量  $D$  不小于政府制定的数量目标。这里的  $D$  可以理解为政府补贴投入的“回报”，这一思想在最近的文献如 Knuckles 等<sup>[22]</sup> 的研究中已被采用。

将单位总补贴  $s$  代入式(6)，可得  $D$  与  $s$  的关系式为  $D = (1 + s - c)/4$ 。将其代入式(7)，则政府补贴决策变量仅为  $s$ 。根据一阶条件  $\partial u_g / \partial s = 0$ ，可得定理 1。

**定理 1** 当政府对新能源汽车进行单位补贴时，给定政府目标  $\tau$  和制造商单位成本  $c$ ：

1) 当  $c \leq 2 - 8\tau$  时，最优的市场需求量  $D^*$ 、单位总补贴  $s^*$ 、零售商利润  $\pi_r^*$ 、制造商利润  $\pi_m^*$  和政府补贴绩效  $u_g^*$  分别是  $D^* = \frac{2-c}{8}$ ， $s^* = \frac{c}{2}$ ， $\pi_r^* = \frac{(2-c)^2}{64}$ ， $\pi_m^* = \frac{(2-c)^2}{32}$ ， $u_g^* = \frac{(2-c)^2}{16}$ ；

2) 当  $2 - 8\tau < c \leq 2 - 4\tau$  时，政府补贴问题(7)无可行解：约束条件  $u_g \geq 0$  成立但  $D \geq \tau$  不成立；此时，为了实现给定的数量目标以使  $D^* = \tau$ ，单位总补贴需增加为  $s^* = 4\tau + c - 1$ ；

3) 当  $c > 2 - 4\tau$  时，政府补贴问题(7)无可行解：约束条件  $u_g \geq 0$  和  $D \geq \tau$  均不成立。

定理 1 表明，当考虑新能源汽车制造商的单位成本  $c$ ，存在关于政府设定目标  $\tau$  的两个阈值， $2 - 8\tau$  和  $2 - 4\tau$ 。若单位成本  $c$  非常低 ( $c \leq 2 - 8\tau$ ，或政府目标  $\tau$  非常低)，则政府补贴政策有效率 ( $u_g^* \geq 0$ )，设定的数量目标也能达成 ( $D^* \geq$

$\tau$ )；若  $c$  非常高 ( $c > 2 - 4\tau$ ，或  $\tau$  设定的非常高)，此时，政府补贴既无效率也不会达到预定的目标；当  $c$  处于这两个阈值之间时，政府的补贴有效率，但政府补贴的数量目标无法达成 ( $D^* < \tau$ )。此时，为了达到给定的数量目标  $\tau$ ，根据式(6)，简单计算知单位总补贴需增加为  $s^* = 4\tau + c - 1$ ，进而可求得此时的  $\pi_r^* = \tau^2$ ， $\pi_m^* = 2\tau^2$ ， $u_g^* = (2 - 4\tau - c)\tau$ 。

如下讨论将聚焦于  $c \leq 2 - 4\tau$  条件下的问题。表 2 总结了政府单位补贴政策的最优解及市场影响。与无补贴时相比，在制造商单位成本高、低两种情况下，单位补贴均增加了新能源汽车的市场需求量，提高了零售商与制造商的利润，并同时保证了政府补贴绩效为正。从政府单位总补贴  $s$  的表达式可知， $s$  由制造商单位成本  $c$  和政府的数量目标  $\tau$  决定，但消费者补贴  $s_c$  和制造商补贴  $s_m$  的具体分配比例无法求解。具体从参数  $c$  和  $\tau$  对补贴的影响看，制造商单位成本和政府设定的数量目标越高，政府的单位补贴和补贴总额就越高，政府的补贴绩效就越低。这表明，降低制造商单位成本是提高补贴绩效、推动新能源汽车产业规模化的重要途径。由此得到结论 1。

**结论 1** 与无补贴时相比，政府的单位补贴在确保补贴绩效为正的同时，增加了新能源汽车的市场需求量，同时提高了制造商和零售商的利润。单位总补贴由制造商单位成本和政府设定的需求量目标决定，但补贴在消费者和制造商之间的具体分配比例无法确定。制造商单位成本和政府数量目标越高，单位补贴就越高，补贴绩效就越低。

表 2 无补贴时和单位补贴政策下的最优解

Table 2 Optimal solutions under no subsidy and unit subsidy policy

补贴政策	单位成本的取值范围	单位总补贴 $s^*$	市场需求量 $D^*$	零售商利润 $\pi_r^*$	制造商利润 $\pi_m^*$	政府补贴绩效 $u_g^*$
无补贴	—	0	$\frac{1-c}{4}$	$\frac{(1-c)^2}{16}$	$\frac{(1-c)^2}{8}$	—
单位补贴	$c \leq 2 - 8\tau$	$\frac{c}{2}$	$\frac{2-c}{8}$	$\frac{(2-c)^2}{64}$	$\frac{(2-c)^2}{32}$	$\frac{(2-c)^2}{16}$
	$2 - 8\tau < c \leq 2 - 4\tau$	$4\tau + c - 1$	$\tau$	$\tau^2$	$2\tau^2$	$(2 - 4\tau - c)\tau$

#### 4 销售奖励政策对单位补贴政策的叠加影响

在前一节的基础上,本部分考虑政府对制造商的销售奖励政策的叠加影响.为了将这两类政策的效果加以分离,定义政府销售奖励  $B$  是制造商降低批发价格的函数,即  $B = \theta(1 - \xi)$ . 这里,  $\theta$  是政府设定的激励因子;  $\xi$  是制造商对零售商的批发降价因子,即制造商在政府奖励的激励下将式(4)的最优批发价格  $w^*$  降低为  $\xi w^*$ , 其中  $\xi \in (0, 1]$ . 此时,  $(1 - \xi)$  即为制造商的降价幅度.

以单位补贴政策为基础,意味着原最优批发价格  $w^*$  和单位总补贴  $s^*$  保持不变. 由此,在政府叠加的销售奖励政策下,根据新的批发价格  $\xi w^*$  和式(2),可得零售商制定的新零售价格为  $p^*(\xi) = \frac{1 + \xi w^*}{2} + \frac{s_c}{2}$ . 此时,与无销售奖励时相比,零售价格降低,当  $\xi = 1$  即制造商的降价幅度为 0 时,就回到无销售奖励的情形. 在政府叠加的销售奖励政策下,制造商实现利润最大化的降价决策问题为

$$\max_{\xi} \pi_m = [\xi w^* - (c - s_m)][1 - (p - s_c)] + \theta(1 - \xi) \quad (8)$$

$$\text{s. t. } w^* = \frac{1 + c}{2} + \frac{s_c - s_m}{2}, 0 < \xi \leq 1$$

根据一阶条件  $\partial \pi_m / \partial \xi = 0$ , 可得制造商批发降价因子  $\xi^*$  关于政府激励因子  $\theta$  的函数表达式为

$$\xi^*(\theta) = 1 - \frac{4\theta}{(1 + c + s_c - s_m)^2} \quad (9)$$

根据逆向递推法,政府根据式(9)来选择  $\theta$ , 并由此确定销售奖励  $B = \theta(1 - \xi^*(\theta))$ . 此时,政府补贴决策变量是  $\theta$ , 补贴决策问题是在式(7)中减去销售奖励  $B$ , 具体表达为

$$\max_{\theta} u_g = D - s \times D - \theta(1 - \xi) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } u_g \geq 0, D \geq \tau > 0$$

根据一阶条件  $\partial u_g / \partial \theta = 0$ , 得到政府对制造商销售奖励的最优激励因子为

$$\theta^* = \frac{(1 + c + s_c - s_m)(1 - s_c - s_m)}{8} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9),得到制造商确定的最优批发降价因子为

$$\xi^*(\theta^*) = \frac{1 + 2c + 3s_c - s_m}{2(1 + c + s_c - s_m)} \quad (12)$$

将式(11)~式(12)代入市场需求函数及式(2)、式(8)和式(10),可得最优市场需求量、零售商利润、制造商利润以及政府补贴绩效值分别为

$$D^*(c, s) = \frac{3 - 2c + s}{8} \quad (13)$$

$$\pi_r^*(c, s) = \frac{(3 - 2c + s)^2}{64} \quad (14)$$

$$\pi_m^*(c, s) = \frac{5 + 4c^2 + 6s + 5s^2 - 8c(1 + s)}{32} \quad (15)$$

$$u_g^*(c, s) = \frac{(-5 + 4c - 3s)(-1 + s)}{16} \quad (16)$$

结合制造商单位成本的不同取值范围,将定理1中满足  $c \leq 2 - 4\tau$  时  $s$  的两个最优解代入式(13)~式(16)中,得到定理2.

**定理2** 当政府对新能源汽车在单位补贴基础上叠加销售奖励时,给定政府目标  $\tau$  和制造商单位成本  $c$

1) 当  $c \leq 2 - 8\tau$  时,最优市场需求量  $D^*$ 、零售商利润  $\pi_r^*$ 、制造商利润  $\pi_m^*$  和政府补贴绩效  $u_g^*$  分别是  $D^* = \frac{3(2 - c)}{16}$ ,  $\pi_r^* = \frac{9(2 - c)^2}{256}$ ,  $\pi_m^* = \frac{5(2 - c)^2}{128}$ ,  $u_g^* = \frac{5(2 - c)^2}{64}$ ;

2) 当  $2 - 8\tau < c \leq 2 - 4\tau$  时,最优的市场需求量  $D^*$ 、零售商利润  $\pi_r^*$ 、制造商利润  $\pi_m^*$  和政府补贴绩效  $u_g^*$  分别是  $D^* = \frac{2 - c + 4\tau}{8}$ ,  $\pi_r^* = \frac{(2 - c + 4\tau)^2}{64}$ ,  $\pi_m^* = \frac{(c - 2)^2 + 8(c - 2)\tau + 80\tau^2}{32}$ ,  $u_g^* = \frac{(-2 + c - 12\tau)(-2 + c + 4\tau)}{16}$ ;

3) 当  $c > 2 - 4\tau$  时,问题无可行解.

需要注意的是,定理2关于销售奖励政策的分析是建立在单位补贴基础之上的,因此同定理

1 相比,使  $D \geq \tau$  的单位补贴  $s^*$  由于叠加了销售奖励而总有  $D \geq \tau$ , 因此定理 2(2) 总是有可行解的. 表 3 总结了仅有单位补贴、及单位补贴加销售奖励的政策组合下的最优解, 比较后可得到结论 2.

**结论 2** 与仅有单位补贴时相比, 政府叠加销售奖励政策不仅增加了新能源汽车的市场需求量、零售商利润和制造商利润, 而且提高了政府补

贴绩效.

结论 2 说明, 政府在单位补贴基础上对制造商实施额外的销售奖励, 通过激励制造商降低批发价格, 能够促使零售商降低零售价格, 最终不仅能让消费者和厂商分享额外的补贴收益(增加市场需求量、制造商利润和零售商利润), 还能使政府补贴绩效增加, 这表明政府叠加销售奖励政策的有效性.

表 3 单位补贴及销售奖励政策下的最优解

Table 3 Optimal solutions under unit subsidy and sales incentive policies

补贴政策类型	单位成本的取值范围	单位总补贴 $s^*$	市场需求量 $D^*$	零售商利润 $\pi_r^*$	制造商利润 $\pi_m^*$	政府补贴绩效 $u_g^*$
单位补贴	$c \leq 2 - 8\tau$	$\frac{c}{2}$	$\frac{2-c}{8}$	$\frac{(2-c)^2}{64}$	$\frac{(2-c)^2}{32}$	$\frac{(2-c)^2}{16}$
	$2 - 8\tau < c \leq 2 - 4\tau$	$4\tau + c - 1$	$\tau$	$\tau^2$	$2\tau^2$	$(2 - 4\tau - c)\tau$
单位补贴 + 销售奖励	$c \leq 2 - 8\tau$	$\frac{c}{2}$	$\frac{3(2-c)}{16}$	$\frac{9(2-c)^2}{256}$	$\frac{5(2-c)^2}{128}$	$\frac{5(2-c)^2}{64}$
	$2 - 8\tau < c \leq 2 - 4\tau$	$4\tau + c - 1$	$D^*$	$\pi_r^*$	$\pi_m^*$	$u_g^*$

注:  $D^* = \frac{2-c+4\tau}{8}$ ,  $\pi_r^* = \frac{(2-c+4\tau)^2}{64}$ ,  $\pi_m^* = \frac{(c-2)^2 + 8(c-2)\tau + 80\tau^2}{32}$ ,  $u_g^* = \frac{(-2+c-12\tau)(-2+c+4\tau)}{16}$

## 5 考虑新能源汽车质量的差异化单位补贴政策的影响

### 5.1 模型分析

在政府对制造商成本和消费者购买的单位补贴基础上, 本部分考虑新能源汽车的质量差别, 拓展分析差异化单位补贴政策的影响. 现实中, 新能源汽车在续航里程、电池能量密度、车辆能耗等方面存在质量差别, 政府倾向于对高质量车给予更多补贴. 简化分析起见, 假设市场上有两款新能源汽车  $i, i=l, h, l$  表示低质量车,  $h$  表示高质量车. 制造商在两款车上的单位成本分别是  $c_l$  和  $c_h$ , 与汽车质量差异相一致, 假设  $c_l < c_h$ . 另根据前面定理 1 和定理 2 的讨论, 如下假设  $c_l \leq 2 - 4\tau$ . 消费者对低质量车  $l$  具有基础偏好,  $v_l \sim U[0, 1]$ ; 对高质量车  $h$  具有高偏好,  $v_h = \delta v_l$ , 这里的  $\delta > 1$ , 是消费者对高质量车的偏好系数.

根据逆向递推法, 首先定义消费者对高、低质量两款汽车的需求函数. 在对消费者购买的单位补贴政策下, 消费者对新能源汽车  $i$  的实际支付

价格为  $p_i - s_{ci}$ , 保留价格为  $v_i$ . 如果满足  $v_l > (p_l - s_{cl})$  和  $v_l - (p_l - s_{cl}) > v_h - (p_h - s_{ch})$ , 消费者购买低质量车; 如果满足  $v_h > (p_h - s_{ch})$  和  $v_h - (p_h - s_{ch}) > v_l - (p_l - s_{cl})$ , 消费者购买高质量车; 在其他情况下, 消费者将不购买新能源汽车. 根据  $v_l \sim U[0, 1]$  和  $v_h = \delta v_l$ , 可分别得到消费者对新能源汽车  $i$  的需求函数为

$$D_l = \frac{(p_h - s_{ch}) - (p_l - s_{cl})}{\delta - 1} - (p_l - s_{cl}) \quad (17)$$

$$D_h = 1 - \frac{(p_h - s_{ch}) - (p_l - s_{cl})}{\delta - 1} \quad (18)$$

其次, 考虑零售商和制造商实现利润最大化的定价决策. 给定制造商批发价格  $w_i$ , 零售商制定零售价格  $p_i$  以最大化利润, 此时零售商的定价决策问题为

$$\max_{p_l, p_h} \pi_r = (p_l - w_l)D_l + (p_h - w_h)D_h \quad (19)$$

将式(17), 式(18)代入式(19), 并联立一阶条件方程组  $\partial \pi_r / \partial p_l = 0$  和  $\partial \pi_r / \partial p_h = 0$ , 可得最优零售价格  $p_l$  满足

$$p_l = \frac{1 + w_l}{2} + \frac{s_{cl}}{2} \quad (20)$$

$$p_h = \frac{\delta + w_h}{2} + \frac{s_{ch}}{2} \tag{21}$$

在差异化单位补贴政策下,制造商在新能源汽车*i*上的单位利润为 $w_i - (c_i - s_{mi})$ ,制造商实现利润最大化的定价决策问题为

$$\max_{w_l, w_h} \pi_m = [w_l - (c_l - s_{ml})]D_l + [w_h - (c_h - s_{mh})]D_h \tag{22}$$

根据式(17),式(18)和式(20),式(21)可知,式(22)中的 $D_i$ 是关于 $w_i$ 的函数.联立一阶条件方程组 $\partial\pi_m/\partial w_l = 0$ 和 $\partial\pi_m/\partial w_h = 0$ ,并根据式(17),式(18)和式(20),式(21),可得差异化单位补贴政策下两款新能源汽车的最优市场需求量分别为

$$D_l^* = \frac{\delta(s_{cl} + s_{ml} - c_l) - (s_{ch} + s_{mh} - c_h)}{4(\delta - 1)} \tag{23}$$

$$D_h^* = \frac{\delta - 1 - (s_{cl} + s_{ml} - c_l) + (s_{ch} + s_{mh} - c_h)}{4(\delta - 1)} \tag{24}$$

最后,定义并求解政府的补贴决策函数.与第3部分基础模型的思路一致,政府决策目标为补贴绩效最大化,即补贴收益与补贴成本之差最大.由于以上最优解均与单位总补贴 $s_i$ 有关,令 $s_i = s_{ci} + s_{mi}$  ( $i = l, h$ ).在新能源汽车产业高质量发展目标下,假设政府在设定需求量目标时,对低质量车*l*的数量目标具有基础偏好,没有具体的数量要求;对高质量车*h*的数量目标具有高偏好,偏好系数 $k > 1$ ,同时将需求量目标设定为 $\tau$ .为此,在考虑新能源汽车质量的差异化单位补贴政策下,政府的补贴决策问题可表述为

$$\max_{s_l, s_h} u_g = D_l + kD_h - s_l D_l - s_h D_h \tag{25}$$

$$\text{s. t. } u_g \geq 0, D_l > 0, D_h \geq \tau > 0$$

将单位总补贴 $s_i$ 代入式(23)~式(25),并根据一阶条件 $\partial u_g/\partial s_i = 0$ ,可得定理3.

**定理3** 当 $c_l \geq \frac{\delta - k + c_h}{\delta}$ 或 $c_l \geq 2 - 8\tau$ 时, $D_l^* = 0$ ,市场上仅有高质量车的消费.反之,当 $c_l < \min\left\{\frac{\delta - k + c_h}{\delta}, 2 - 8\tau\right\}$ 时, $D_l^* > 0$ ,市场上存在高、低质量两款车的消费.当政府对这两款车进行差异化单位补贴时,给定政府对高质量车的需求量目标 $\tau$ 及其偏好系数 $k$ ,制造商在高、低质

量车上的单位成本 $c_h$ 和 $c_l$ 、消费者对高质量车的偏好系数 $\delta$ ,定义 $C^1(c_l) = \delta c_l + k - \delta$ 、 $C^2(c_l) = c_l + k + \delta - 2 - 8\tau(\delta - 1)$ 和 $C^3(c_l) = \frac{[c_l - (2 - 8\tau)]^2}{16\tau} + k + \delta(1 - 4\tau)$ ,则

1)当 $C^1(c_l) < c_h \leq C^2(c_l)$ 时,两款车的最优市场需求量和单位总补贴分别是 $D_l^* = \frac{\delta(1 - c_l) - k + c_h}{8(\delta - 1)}$ , $D_h^* = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)}$ , $s_l^* = \frac{c_l}{2}$ , $s_h^* = \frac{c_h}{2} + \frac{k - \delta}{2}$ .

2)当 $C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$ 时:政府补贴问题(25)无可行解;约束条件 $u_g \geq 0$ 成立但 $D \geq \tau$ 不成立;此时,为了实现给定的数量目标以使 $D_h^* = \tau$ ,高质量车的单位总补贴需增加为 $s_h^* = c_h - \frac{c_l}{2} + (\delta - 1)(4\tau - 1)$ .

3)当 $c_h > C^3(c_l)$ 时,政府补贴问题(25)无可行解:约束条件 $u_g \geq 0$ 和 $D \geq \tau$ 都不成立.

定理3表明,当考虑制造商在高质量新能源车上的单位成本 $c_h$ 时,类似于定理1,存在关于低质量车的单位成本 $c_l$ 、政府设定的高质量车数量目标 $\tau$ 及其偏好系数 $k$ 、以及消费者对高质量车的偏好系数 $\delta$ 的3个阈值, $C^1(c_l)$ 、 $C^2(c_l)$ 和 $C^3(c_l)$ .若 $c_h$ 落在区间 $(0, C^1(c_l)]$ 内,则 $D_l^* = 0$ ,这是因为若高质量车相对于低质量车的生产成本不太高,消费者将倾向于购买高质量车,从而导致市场上低质量车的需求量为0.这表明,降低高质量车的单位成本是推动产业升级的有效途径.若 $c_h$ 落在区间 $(C^1(c_l), C^2(c_l)]$ ,则政府补贴政策有效率( $u_g^* \geq 0$ ),且高质量车的数量目标也能达成( $D_h^* \geq \tau$ );若 $c_h$ 落在区间 $(C^2(c_l), C^3(c_l)]$ ,则政府的补贴绩效虽然为正,但数量目标无法达成( $D_h^* < \tau$ );但若 $c_h$ 落在了最后区间 $(C^3(c_l), +\infty)$ ,则政府补贴既无效率也达不到预定数量目标.

以下讨论将聚焦 $(C^1(c_l), C^3(c_l)]$ 区间下的问题.表4比较了无补贴时和差异化单位补贴政策下的最优解.可以看出,与无补贴时相比,差异化单位补贴增加了新能源汽车的市场需求总量,并同时实现了政府补贴绩效为正.当 $k > \delta$ 即政



府对高质量车数量目标的偏好系数大于消费者对高质量车的偏好系数时,差异化补贴还改善了新能源汽车的市场需求结构,使高质量车的需求量增加,低质量车的需求量减少。

表 4 高、低质量两款车在无补贴时及差异化单位补贴政策下的最优解

Table 4 Optimal solutions for high and low quality vehicles under no subsidy and differentiated unit subsidy policies

补贴政策类型	单位成本的取值范围	市场需求量 $D^*$	单位总补贴 $s^*$	政府绩效值 $u_g^*$
无补贴		$D_l^* = \frac{-\delta c_l + c_h}{4(\delta - 1)},$ $D_h^* = \frac{\delta - 1 + c_l - c_h}{4(\delta - 1)}$	$s_l^* = 0, s_h^* = 0$	-
差异化单位补贴	$C^1(c_l) < c_h \leq C^2(c_l)$	$D_l^* = \frac{\delta(1 - c_l) - k + c_h}{8(\delta - 1)},$ $D_h^* = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)}$	$s_l^* = \frac{c_l}{2}$ $s_h^* = \frac{c_h}{2} + \frac{k - \delta}{2}$	$u_g^{*1}$
	$C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$	$D_l^* = \frac{2 - c_l - 8\tau}{8}, D_h^* = \tau$	$s_l^* = \frac{c_l}{2}, s_h^* = c_h - \frac{c_l}{2} + (\delta - 1)(4\tau - 1)$	$u_g^{*2}$

注:  $u_g^{*1} = \frac{c_h^2 + k^2 + 2k(c_l + \delta - 2) + \delta(c_l^2 - 2c_l + \delta)}{16(\delta - 1)}$ ,  $u_g^{*2} = \frac{-2c_h(c_l + k + \delta - 2)}{16(\delta - 1)}$ ,  $u_g^{*2} = \frac{1}{16}(c_l - 2)^2 + (c_l - c_h + k + \delta - 2)\tau - 4(\delta - 1)\tau^2$

进一步从单位总补贴  $s_i$  的表达式可知,  $s_i$  由制造商单位成本  $c_i$ 、政府的高质量车数量目标  $\tau$  及其偏好系数  $k$ 、消费者对高质量车的偏好系数  $\delta$  共同决定,但补贴在消费者和制造商之间的具体分配比例无法求解。具体从参数对  $s_i$  的影响看,制造商在两款车上的单位成本以及政府设定的高质量车数量目标越高,政府的单位总补贴就越高,政府补贴绩效就越低。这与单位补贴基础模型的结论 1 相一致。在高质量车补贴上,政府对高质量车数量目标的偏好系数  $k$  越高,单位总补贴就越多,补贴绩效也越高;消费者对高质量车的偏好系数  $\delta$  越高,单位总补贴就越低,补贴绩效越高。由此得到结论 3。

**结论 3** 与无补贴时相比,政府考虑新能源汽车质量的差异化单位补贴使市场需求总量增加,同时实现了补贴绩效为正。当  $k > \delta$  即政府对高质量车数量目标设定的偏好系数大于消费者对高质量车的偏好系数时,低质量车的需求量减小,高质量车的需求量增加,市场需求结构得以优化。政府补贴绩效随制造商单位成本的增加而下降,随政府及消费者对高质量车的偏好增加而增加。

这一结论有效支持了近年来财政部等四部委

对新能源汽车补贴政策的调整举措。如四部委在 2019 年 3 月发布的《关于进一步完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》中提出“优化技术指标,坚持扶优扶强”,即“稳步提高新能源汽车动力电池系统能量密度门槛要求,适度提高新能源汽车整车能耗要求,提高纯电动乘用车续航里程门槛要求”。以上分析表明,这样的差异化补贴政策对促进新能源汽车推广应用和产业高质量发展具有重要作用。

### 5.2 单一的和差异化的单位补贴政策比较

定理 1 和定理 3 分别描述了不同供应链假设下单位补贴政策的影响,即仅存在一款新能源汽车时的单一补贴和存在高、低质量两款车时的差异化补贴。根据定理中的参数范围,考虑  $k > \delta$  的情况,图 2 绘制了差异化补贴下单位成本 ( $c_l, c_h$ ) 的 5 种取值范围,用以对两类政策下各最优解进行比较分析。在图 2 中,横轴为低质量车单位成本  $c_l$ ,取值范围为  $(0, 2 - 4\tau]$ ,纵轴为高质量车单位成本  $c_h$ ,取值范围为  $(0, k + \delta - 2 + \frac{1}{4\tau} - 4(\delta - 1)\tau]$ 。在这些取值范围内,政府补贴绩效均为正。

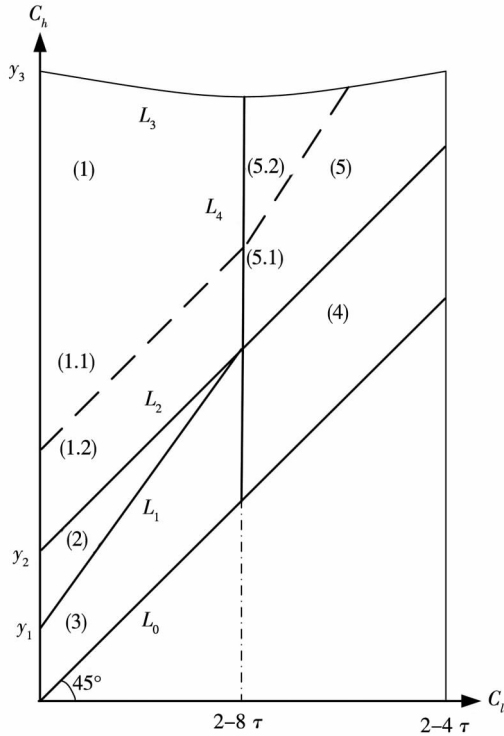


图2 不同单位成本取值范围下的最优解分区

Fig. 2 Optimal solution partitioning under different unit costs

注:  $y_1 = k - \delta$ ,  $y_2 = k + \delta - 2 - 8\tau(\delta - 1)$ ,  $y_3 = k + \delta - 2 + \frac{1}{4\tau} - 4(\delta - 1)\tau$

图2中的5条线对应了不同的参数条件.当两款车的单位成本相同时,可得45度线 $L_0$ :  $c_l = c_h$ .由于总有 $c_l < c_h$ ,因此在线 $L_0$ 以上的区域才有意义.分别绘出直线 $L_1$ :  $c_h = C^1(c_l)$ 、直线 $L_2$ :  $c_h = C^2(c_l)$ 、曲线 $L_3$ :  $c_h = C^3(c_l)$ 和直线 $L_4$ :  $c_l = 2 - 8\tau$ .根据直线 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 的截距关系,可得 $y_3 > y_2 > y_1 > 0$ .这5条线将 $L_0$ 以上区域划分为5个子区域,以下分别对这5种参数情况下两类政策的影响进行比较分析.

为方便比较两类政策下的最优解,用上标a表示单一补贴情况,用上标c表示差异化补贴情况.分别在5个子区域内对单一补贴时最优的需求量 $D^{a*}$ 、零售商利润 $\pi_r^{a*}$ 、制造商利润 $\pi_m^{a*}$ 、政府补贴绩效 $u_g^{a*}$ 与差异化补贴时最优的需求量 $D^{c*}$ (等于两款车需求量之和,即 $D^{c*} = D_l^{c*} + D_h^{c*}$ )、零售商利润 $\pi_r^{c*}$ 、制造商利润 $\pi_m^{c*}$ 、政府补贴绩效 $u_g^{c*}$ 进行比较,可知:

1) 当 $C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$ 且 $c_l < 2 - 8\tau$ 时,对应于区域(1):  $D^{a*} = \frac{2 - c_l}{8} > 0, D_l^{c*} =$

$\frac{2 - c_l - 8\tau}{8} > 0, D_h^{c*} = \tau$ .此时 $D^{a*} = D^{c*}$ ,这表明两类

政策下新能源汽车的市场需求总量不变.  $\pi_r^{c*} > \pi_r^{a*}, \pi_m^{c*} > \pi_m^{a*}$ ,这表明差异化补贴时零售商和制造商的利润更高.进一步比较政府补贴绩效 $u_g^*$ ,

当 $C^2(c_l) + 4\tau(\delta - 1) < c_h \leq C^3(c_l)$ 时,对应于区域(1.1):此时 $u_g^{c*} < u_g^{a*}$ ,表明当高质量车的成本 $c_h$ 较高时,单一补贴的绩效更高;

当 $C^2(c_l) < c_h \leq C^2(c_l) + 4\tau(\delta - 1)$ 时,对应于区域(1.2):此时 $u_g^{c*} > u_g^{a*}$ ,表明当高质量车的成本 $c_h$ 较低时,差异化补贴的绩效更高;

2) 当 $C^1(c_l) < c_h \leq C^2(c_l)$ 时,对应于区域

(2):  $D_l^{c*} = \frac{\delta(1 - c_l) - k + c_h}{8(\delta - 1)}, D_h^{c*} = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)}$ .此时 $D^{a*} = D^{c*} = \frac{2 - c_l}{8}$ ,

$\pi_r^{c*} > \pi_r^{a*}, \pi_m^{c*} > \pi_m^{a*}, u_g^{c*} > u_g^{a*}$ ,这表明两种政策下的市场需求总量不变,但差异化补贴政策下的厂商利润和补贴绩效都更高;

3) 当 $c_l < c_h \leq C^1(c_l)$ 且 $c_l < 2 - 8\tau$ 时,对应于区域(3):  $D^{a*} = \frac{2 - c_l}{8}, D_l^{c*} = 0, D_h^{c*} =$

$\frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)}$ .此时 $D^{c*} > D^{a*}, \pi_r^{c*} > \pi_r^{a*},$

$\pi_m^{c*} > \pi_m^{a*}, u_g^{c*} > u_g^{a*}$ ,表明差异化补贴政策在各方面的影响都更优;

4) 当 $c_l < c_h \leq C^2(c_l)$ 且 $2 - 8\tau \leq c_l \leq 2 - 4\tau$ 时,对应于区域(4):  $D^{a*} = \tau, D_l^{c*} = 0, D_h^{c*} = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)}$ .此时 $D^{c*} > D^{a*}, u_g^{c*} > u_g^{a*}$ ,这

表明差异化补贴下市场需求量和政府补贴绩效更高.但仅当 $\delta \geq 2$ 时,有 $\pi_r^{c*} > \pi_r^{a*}, \pi_m^{c*} > \pi_m^{a*}$ ;

5) 当 $C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$ 且 $2 - 8\tau \leq c_l \leq 2 - 4\tau$ 时,对应于区域(5):  $D^{a*} = \tau, D_l^{c*} = 0, D_h^{c*} = \tau$ .此时 $D^{a*} = D^{c*}$ .当 $\delta \geq 2$ 时,有 $\pi_r^{c*} > \pi_r^{a*}, \pi_m^{c*} > \pi_m^{a*}$ .进一步比较 $u_g^*$ ,

当 $C^2(c_l) < c_h < \min\{\frac{3}{2}c_l + \delta + k - 3, C^3(c_l)\}$ 时,对应于区域(5.1):此时 $u_g^{c*} > u_g^{a*}$ ;

当 $\frac{3}{2}c_l + \delta + k - 3 - 4\tau(\delta - 2) < c_h < C^3(c_l)$ 时,对应于区域(5.2):此时 $u_g^{c*} < u_g^{a*}$ .

结合图2和以上比较分析可知,从补贴对象看,区域(1)和区域(2)是政府对两款新能源汽车同时进行补贴;区域(3)、区域(4)和区域(5)是低质量车的需求量为0,政府只对高质量车进行补贴.从市场需求量看,在5个子区域中,差异化补贴都不会降低市场需求量.从零售商与制造商的利润看,在区域(1)、区域(2)和区域(3)中,在所有参数范围内,差异化补贴均能提高供应链利润;在区域(4)和区域(5)中,当消费者对高质量车的偏好系数较高时( $\delta > 2$ ),差异化补贴能够提升供应链利润.从政策效果看,在区域(1)和区域(5)中,在部分参数范围内差异化补贴能够提升政府补贴绩效;在区域(2)、区域(3)和区域(4)中,在所有参数范围内差异化补贴均能提升补贴绩效.综合来看,可得到结论4.

**结论4** 与单一补贴相比,考虑新能源汽车高、低质量的差异化单位补贴政策具有更好的补贴效果,可在不降低市场需求量的同时,提高政府补贴绩效,并提高零售商和制造商的利润.

## 6 结束语

我国的新能源汽车产业补贴政策历时10余年,取得了显著成效,但政策作用机制和效果有待

理论检验.本文以新能源汽车产业补贴政策实践为背景,针对由制造商和零售商组成的新能源汽车供应链,建立了包括政府、制造商、零售商和消费者在内的动态博弈模型,对政府的单位补贴、销售奖励以及差异化单位补贴政策对新能源汽车市场保有量的影响进行了理论研究,并对比分析了不同政策下政府补贴绩效的差异.研究发现,首先,对消费者购买和制造商成本的单位补贴能够提升新能源汽车的市场需求量和供应链利润,但政府的补贴绩效受制造商单位成本的制约;其次,叠加的销售奖励可以改善单位补贴政策的市場结果,并提高政府补贴的绩效;最后,考虑产品质量的差异化单位补贴政策不仅可以改善市場结果和政府补贴绩效,而且可以促使消费者减少低质量车的消费并增加高质量车的消费.因此,政府应通过实施销售奖励来改善单位补贴的政策效果,在设计补贴方案时应考虑产品质量的差异性,从而提高新能源汽车的市場保有量,促使产业升级,实现产业高质量发展.本文的研究及得到的结论不仅丰富了相关的研究,而且对现有的政策实施具有一定的指导作用.在未来的研究中,可以继续考虑市场需求价格弹性对结论的影响,以及考虑零售商间的竞争等因素的影响,这些都是值得进一步研究的问题.

## 参考文献:

- [1] Coffman M, Bernstein P, Wee S, et al. Electric vehicles revisited: A review of factors that affect adoption[J]. *Transport Reviews*, 2017, 37(1): 79-93.
- [2] Huang Y, Kockelman K M. Electric vehicle charging station locations: Elastic demand, station congestion, and network equilibrium[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 78: 102179.
- [3] Santos G, Davies H. Incentives for quick penetration of electric vehicles in five European countries: Perceptions from experts and stakeholders[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 137: 326-342.
- [4] 孙晓华, 王 昀, 刘小玲. 范式转换、异质性与新兴产业演化[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(8): 67-83.  
Sun Xiaohua, Wang Yun, Liu Xiaoling. Paradigm shift, heterogeneity and emerging evolution of emerging industry[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(8): 67-83. (in Chinese)
- [5] 周 燕, 潘 遥. 财政补贴与税收减免——交易费用视角下的新能源汽车产业政策分析[J]. *管理世界*, 2019, 35(10): 133-149.  
Zhou Yan, Pan Yao. Fiscal subsidies and tax relief: Analysis of new energy vehicle industry policy from the perspective of transaction costs. *Management World*, 2019, 35(10): 133-149. (in Chinese)

- [6] Zhang L, Qin Q. China's new energy vehicle policies: Evolution, comparison and recommendation[J]. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 2018, (11): 57–72.
- [7] Qiu Y Q, Zhou P, Sun H C, et al. Assessing the effectiveness of city-level electric vehicle policies in China[J]. *Energy Policy*, 2019, 130: 22–31.
- [8] 高 伟, 胡潇月. 新能源汽车政策效应: 规模抑或创新中介? [J]. *科研管理*, 2020, 41(4): 32–44.  
Gao Wei, Hu Xiaoyue. New energy vehicle policy effect: Does scale or innovation serve as an intermediary? [J]. *Science Research Management*, 2020, 41(4): 32–44. (in Chinese)
- [9] 张国兴, 叶亚琼, 管 欣, 等. 京津冀节能减排政策措施的差异与协同研究[J]. *管理科学学报*, 2018, 21(5): 111–126.  
Zhang Guoxing, Ye Yaqiong, Guan Xin, et al. Difference and collaboration in Jing-Jin-Ji's energy saving and emission reduction policy measurers [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2018, 21(5): 111–126. (in Chinese)
- [10] 姚洪心, 吴伊婷. 绿色补贴、技术溢出与生态倾销[J]. *管理科学学报*, 2018, 21(10): 47–60.  
Yao Hongxin, Wu Yiting. Green subsidy, technology spillover and eco-dumping[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2018, 21(10): 47–60. (in Chinese)
- [11] 马 亮, 仲伟俊, 梅姝娥. “供给侧改革”背景下的新能源汽车产业补贴政策创新研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(9): 2279–2288.  
Ma Liang, Zhong Weijun, Mei Shu'e. An innovative research on subsidy policies in new energy automotive industry under the background of “supply-front reform” [J]. *System Engineering: Theory and Practice*, 2017, 37(9): 2279–2288. (in Chinese)
- [12] 张海斌, 盛昭瀚, 孟庆峰. 新能源汽车市场开拓的政府补贴机制研究[J]. *管理科学*, 2015, 28(06): 122–132.  
Zhang Haibin, Sheng Zhaohan, Meng Qingfeng. The government subsidies mechanism for market development of new energy vehicle[J]. *Journal of Management Science*, 2015, 28(6): 122–132. (in Chinese)
- [13] Huang J, Leng M, Liang L, et al. Promoting electric automobiles: Supply chain analysis under a government's subsidy incentive scheme[J]. *IIE Transactions*, 2013, 45(8): 826–844.
- [14] Shao L, Yang J, Zhang M. Subsidy scheme or price discount scheme? mass adoption of electric vehicles under different market structures[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 262: 1181–1195.
- [15] Gu X, Ieromonachou P, Zhou L. Subsidising an electric vehicle supply chain with imperfect information[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 211: 82–97.
- [16] Wang S. Are electric vehicles incentives effective? evidence from the fifty US states[D]. Georgetown University, 2020.
- [17] Lim M K, Mak H, Rong Y, et al. Toward mass adoption of electric vehicles: Impact of the range and resale anxieties[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2015, 17(1): 101–119.
- [18] 王 宇, 于 辉. 市场竞争下企业股权融资的供应链模型分析[J]. *管理科学学报*, 2020, 23(1): 113–126.  
Wang Yu, Yu Hui. Supply chain modeling analysis of enterprise equity financing under market competition[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2020, 23(1): 113–126. (in Chinese)
- [19] Shen Z J M, Feng B, Mao C, et al. Optimization models for electric vehicle service operations: A literature review[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 128: 462–477.
- [20] Örsdemir A, Kemahlioglu-Ziya E, Parlaktürk A K. Competitive quality choice and remanufacturing[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(1): 48–64.
- [21] 夏西强, 朱庆华, 赵森林. 政府补贴下制造/再制造竞争机理研究[J]. *管理科学学报*, 2017, 20(4): 71–83.  
Xia Xiqiang, Zhu Qinghua, Zhao Senlin. Competition mechanism of manufacture/remanufacture considering government subsidies[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(4): 71–83. (in Chinese)
- [22] Knuckles J, Sodhi M M S, Tang C S, et al. Optimal subsidies grants and subsidies for development supply chains: Case of solar lanterns in Haiti[J]. Available at SSRN: 3060590, 2017.

## Adoption of new energy vehicles under subsidy policies: Unit subsidies, sales incentives and product differentiation

JU Qing-jiang<sup>1</sup>, JU Peng<sup>1</sup>, DAI Wen-qiang<sup>1\*</sup>, RAN Lun<sup>2</sup>

1. School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract:** Based on the subsidy policies to increase the adoption of new energy vehicles and upgrade the overall industry, dynamic game models involving the government, manufacturers, retailers and consumers are established to analyze the impacts of policies involving unit subsidies, sales incentives and differentiated unit subsidies. Three specific policy characteristics are introduced into our models, including both quantity target and high-quality development of the industry and subsidy budget constraints. The results show that given the positive subsidy performance, unit subsidies to manufacturers and consumers can increase the market demand for new energy vehicles and the profit of manufacturers and retailers. Additional sales incentives can improve the market outcome of unit subsidies and increase the performance of government subsidies. The differentiated unit subsidies can reduce the demand for low-quality vehicles and increase the demand for high-quality vehicles without reducing the total quantity demanded, thereby promoting the upgrading of the industry. The optimal value of unit subsidy is mainly determined by the quantity target set by the government and the unit cost of the manufacturer. The higher the quantity target and unit cost, the higher the unit subsidy, but the lower the government subsidy performance.

**Key words:** new energy vehicles; subsidy policies; adoption; dynamic game

附录:

**定理 1 的证明** 根据式(7), 令  $\partial u_g / \partial s = 0$ , 可得最优的单位总补贴  $s^* = \frac{c}{2}$ . 将其代入式(6), 式(7), 可得市场需求量  $D^* = \frac{2-c}{8}$ , 政府绩效值  $u_g^* = (1-s^*)D^* = \frac{(2-c)^2}{16}$ . 将  $s^*$  代入厂商利润表达式, 可得零售商利润  $\pi_r^* = \frac{(2-c)^2}{64}$ , 制造商利润  $\pi_m^* = \frac{(2-c)^2}{32}$ . 这些最优解需满足式(7)的约束条件  $D^* \geq \tau$ , 可得单位成本取值范围是  $c \leq 2 - 8\tau$ .

当式(7)的约束条件  $D^* \geq \tau$  不满足即  $D^* < \tau$  时, 可得  $c > 2 - 8\tau$ . 此时令  $D^* = \tau$ , 代入式(6), 式(7)可得  $s^* = 4\tau + c - 1$  和  $u_g^* = (2 - 4\tau - c)\tau$ . 将  $s^*$  代入厂商利润表达式, 可得零售商和制造商利润分别为  $\pi_r^* = \tau^2$  和  $\pi_m^* = 2\tau^2$ . 这些最优解需满足式(7)的约束条件  $u_g^* \geq 0$ , 进一步可得单位成本取值范围是  $c \leq 2 - 4\tau$ . 证毕.

**结论 1 的证明** 根据式(1)、式(3)和式(6), 令  $s_c = s_m = 0$ , 计算可得无补贴时最优的市场需求量  $D^{0*} = \frac{1-c}{4}$ , 零售商利润  $\pi_r^{0*} = \frac{(1-c)^2}{16}$ , 制造商利润  $\pi_m^{0*} = \frac{(1-c)^2}{8}$ . 这些最优解需满足参数条件  $0 < c < 1$ .

分情况讨论有:

1) 当  $c \leq 2 - 8\tau$  时, 简单计算知, 补贴后各变量的变化为  $\Delta D^* = D^* - D^{0*} = \frac{c}{8}$ ,  $\Delta \pi_r^* = \pi_r^* - \pi_r^{0*} = \frac{-3c^2 + 4c}{64}$ ,

$\Delta\pi_m^* = \pi_m^* - \pi_m^{0*} = \frac{-3c^2 + 4c}{32}$ . 由于  $0 < c < 1$ , 所以有  $u_g^* > 0, \Delta D^* > 0, \Delta\pi_r^* > 0, \Delta\pi_m^* > 0$ .  $\frac{\partial s^*}{\partial c} = \frac{1}{2} > 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial c} = \frac{2-c}{8} < 0$ .

2) 当  $2 - 8\tau < c \leq 2 - 4\tau$  时,  $\Delta D^* = D^* - D^{0*} = \tau - \frac{1-c}{4} > 0$ ,  $\Delta\pi_r^* = \pi_r^* - \pi_r^{0*} = \tau^2 - \frac{(2-c)^2}{64} > 0$ ,  $\Delta\pi_m^* = \pi_m^* - \pi_m^{0*} = 2\tau^2 - \frac{(2-c)^2}{32} > 0$ ,  $u_g^* = (2 - 4\tau - c)\tau > 0$ .  $\frac{\partial s^*}{\partial c} = 1 > 0$ ,  $\frac{\partial s^*}{\partial \tau} = 4 > 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial c} = -\tau < 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial \tau} = 2 - 8\tau - c < 0$ , 证毕.

**定理 2 的证明** 根据式(10), 并将定理 1 中  $c \leq 2 - 4\tau$  时  $s$  的两个最优解代入式(13)~式(16), 可得定理 2 中各变量的均衡解. 当  $c > 2 - 4\tau$  时, 单位补贴问题式(7)不满足所有约束条件, 叠加的销售奖励问题也不成立.

**结论 2 证明** 用上标 a 表示只有单位补贴政策, 用上标 b 表示在单位补贴基础上叠加销售奖励政策. 根据定理 1 和式(13)~式(16), 分情况讨论有:

1) 当  $c \leq 2 - 8\tau$  时, 叠加销售奖励后最优市场需求量变化为  $\Delta D^* = D^{b*} - D^{a*} = \frac{2-c}{16} > 0$ , 零售商利润变化为  $\Delta\pi_r^* = \pi_r^{b*} - \pi_r^{a*} = \frac{5(2-c)^2}{256} > 0$ , 制造商利润变化为  $\Delta\pi_m^* = \pi_m^{b*} - \pi_m^{a*} = \frac{(2-c)^2}{128} > 0$ , 政府补贴绩效变化为  $\Delta u_g^* = u_g^{b*} - u_g^{a*} = \frac{(2-c)^2}{64} > 0$ .

2) 当  $2 - 8\tau < c \leq 2 - 4\tau$  时,  $\Delta D^* = D^{b*} - D^{a*} = \frac{2-4\tau-c}{8} > 0$ ,  $\Delta\pi_r^* = \pi_r^{b*} - \pi_r^{a*} = \frac{1}{64}(c-2-12\tau)(c-2+4\tau) > 0$ ,  $\Delta\pi_m^* = \pi_m^{b*} - \pi_m^{a*} = \frac{1}{32}(c-2+4\tau)^2 > 0$ ,  $\Delta u_g^* = u_g^{b*} - u_g^{a*} = \frac{1}{16}(c-2+4\tau)^2 > 0$ . 证毕.

**定理 3 的证明** 根据式(25), 令  $\partial u_g / \partial s_i = 0$ , 可得两款车的最优单位总补贴为  $s_l^* = \frac{c_l}{2}$  和  $s_h^* = \frac{c_h}{2} + \frac{k-\delta}{2}$ . 将其代入式(23), 式(24), 可得两款车的最优需求量  $D_l^* = \frac{\delta(1-c_l) - k + c_h}{8(\delta-1)}$ ,  $D_h^* = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta-1)}$ . 将其代入式(25), 可得  $u_g^* = \frac{c_h^2 + k^2 + 2k(c_l + \delta - 2) + \delta(c_l^2 - 2c_l + \delta)}{16(\delta-1)} \times \frac{-2c_h(c_l + k + \delta - 2)}{16(\delta-1)}$ . 这些最优解需满足式(25)的约束条件  $D_l^* > 0$  和  $D_h^* \geq \tau$ , 求得单位成本取值范围包括  $c_h > \delta c_l + k - \delta = C^1(c_l)$  和  $c_h \leq c_l + k + \delta - 2 - 8\tau(\delta-1) = C^2(c_l)$ . 当  $c_l < 2 - 8\tau$  时,  $c_h$  的这两个阈值相减得到  $C^2(c_l) - C^1(c_l) = (\delta-1)(2-8\tau-c_l) > 0$ , 因此  $c_h$  的取值范围满足  $C^1(c_l) < c_h \leq C^2(c_l)$ .

当式(25)的约束条件  $D_h^* \geq \tau$  不满足时, 可得  $c_h > C^2(c_l)$ . 此时令  $D_h^* = \tau$  和  $s_l^* = \frac{c_l}{2}$ , 代入式(23), 式(24), 可得  $D_l^* = \frac{2-c_l-8\tau}{8}$ ,  $s_h^* = c_h - \frac{c_l}{2} + (\delta-1)(4\tau-1)$ . 将最优解代入式(25), 可得  $u_g^* = \frac{1}{16}(c_l-2)^2 + (c_l-c_h+k+\delta-2)\tau - 4(\delta-1)\tau^2$ . 这些最优解需满足式(25)的约束条件  $u_g^* \geq 0$ , 进一步可得单位成本取值范围是  $c_h \leq \frac{[c_l-(2-8\tau)]^2}{16\tau} + k + \delta(1-4\tau) = C^3(c_l)$ . 当  $c_l < 2 - 8\tau$  时,  $c_h$  两个阈值相减得到  $C^3(c_l) - C^2(c_l) = \frac{[c_l-(2-8\tau)]^2}{16\tau} + 4\delta\tau + 2 - 8\tau - c_l > 0$ , 因此  $c_h$  的取值范围满足  $C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$ . 证毕.

**结论 3 的证明** 当政府不提供补贴时, 市场总需求量  $D^{0*} = D_l^{0*} + D_h^{0*} = \frac{1-c_l}{4}$ . 根据定理 3(1), 当  $C^1(c_l) < c_h \leq$

$C^2(c_l)$  即高质量车的单位成本较低时, 差异化单位补贴后的市场总需求量  $D^* = D_l^* + D_h^* = \frac{2-c_l}{8}$ . 简单计算知,

$\Delta D^* = D^* - D^{0*} = \frac{c_l}{8} > 0$ . 从需求量结构的变化看, 补贴后低质量车的需求量变化为  $\Delta D_l^* = D_l^* - D_l^{0*} = \frac{\delta - k + \delta c_l - c_h}{8(\delta - 1)}$ , 补贴后高质量车的需求量变化为  $\Delta D_h^* = D_h^* - D_h^{0*} = \frac{k - \delta - c_l + c_h}{8(\delta - 1)}$ . 考虑  $k > \delta > 1$ , 因为  $c_h > \delta c_l + k - \delta > \delta c_l - (k - \delta) > c_l - (k - \delta)$ , 所以  $\Delta D_l^* < 0, \Delta D_h^* > 0$ .

根据定理 3(2), 当  $C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$  即高质量车的单位成本较高时,  $D^* = \frac{2-c_l}{8}$ ,  $\Delta D^* = \frac{c_l}{8} > 0$ . 与定理 3(1) 中低成本情况下的需求量比较可得,  $\frac{2-c_l-8\tau}{8} - \frac{\delta(1-c_l)-k+c_h}{8(\delta-1)} = \frac{k+\delta-2+c_l-c_h-8\tau(\delta-1)}{8(\delta-1)} < 0$ , 又因  $\frac{\delta(1-c_l)-k+c_h}{8(\delta-1)} < D_l^{0*}$ , 可得  $\Delta D_l^* < 0$ . 由  $\Delta D^*$  不变, 可得  $D_h^* > 0$ .

对政府绩效值影响因素的分析: 当  $c_l + k + \delta - 2 - 8\tau(\delta - 1) = c_h$  时,  $D_l^* = \frac{2-c_l-8\tau}{8} = \frac{\delta(1-c_l)-k+c_h}{8(\delta-1)}$ ,  $D_h^* = \tau = \frac{k+\delta-2+c_l-c_h}{8(\delta-1)}$ ,  $s_l^* = \frac{c_l}{2}$ ,  $s_h^* = c_h - \frac{c_l}{2} + (\delta-1)(4\tau-1) = \frac{c_h}{2} + \frac{k-\delta}{2}$ ,  $u_g^* = \frac{(c_l-2)^2}{16} + 4\tau^2(\delta-1)$ . 当  $C^1(c_l) < c_h \leq C^2(c_l)$  时,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial c_l} = \frac{\delta c_l - c_h + k - \delta}{8(\delta - 1)}$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial c_h} = \frac{c_h - c_l - k - \delta + 2}{8(\delta - 1)}$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial k} = \frac{c_l - c_h + k + \delta - 2}{8(\delta - 1)}$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial \delta} = -\frac{(c_l - c_h + k - \delta)(c_l - c_h + k + \delta - 2)}{16(\delta - 1)^2}$ . 根据取值条件有  $c_l - c_h + k - \delta < \delta c_l - c_h + k - \delta < 0$ ,  $0 \leq c_l - c_h + k + \delta - 2 - 8\tau(\delta - 1) < c_l - c_h + k + \delta - 2$ , 可得  $\frac{\partial u_g^*}{\partial c_l} < 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial c_h} < 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial k} > 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial \delta} > 0$ , 即政府绩效随单位成本增加而减小, 随政府及消费者对高质量车偏好的增加而增加. 当  $C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$ , 且  $c_l < 2 - 8\tau$  时,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial c_l} = \frac{c_l - 2 + 8\tau}{8} < 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial c_h} = -\tau < 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial k} = \tau > 0$ ,  $\frac{\partial u_g^*}{\partial \delta} = (1 - 4\tau)\tau > 0$ , 结论不变. 证毕.

**结论 4 的证明** 用上标 a 表示单一补贴政策, 用上标 c 表示差异化补贴政策. 两种情况下政府补贴绩效分别为  $u_g^{a*}$  和  $u_g^{c*}$ , 零售商的单位利润分别为  $\bar{\pi}_r^{a*}$  和  $\bar{\pi}_r^{c*}$ , 制造商的单位利润分别为  $\bar{\pi}_m^{a*}$  和  $\bar{\pi}_m^{c*}$ .

在只有一款新能源汽车的单一产品供应链中, 根据式(4), 式(5), 可得单一补贴政策下零售商和制造商的单位利润分别为  $\bar{\pi}_r^{a*} = p - w = \frac{1-c}{4} + \frac{s}{4}$  和  $\bar{\pi}_m^{a*} = w - (c - s_m) = \frac{1-c}{2} + \frac{s}{2}$ .

在有两款新能源汽车的供应链中, 根据式(22), 联立一阶条件方程组可得两款车批发价格的最优解分别为  $w_l^* = \frac{1+c_l}{2} + \frac{s_{cl}-s_{ml}}{2}$  和  $w_h^* = \frac{\delta+c_h}{2} + \frac{s_{ch}-s_{mh}}{2}$ . 将这两个最优解代入式(20), 式(21), 可得零售价格的最优解分别为  $p_l^* = \frac{3+c_l+3s_{cl}-s_{ml}}{4}$  和  $p_h^* = \frac{3\delta+c_h+3s_{ch}-s_{mh}}{4}$ . 在差异化补贴政策下, 低质量车零售商和制造商的单位利润分别为  $\bar{\pi}_{rl}^{c*} = p_l - w_l = \frac{1-c_l}{4} + \frac{s_l}{4}$  和  $\bar{\pi}_{ml}^{c*} = w_l - (c_l - s_{ml}) = \frac{1-c_l}{2} + \frac{s_l}{2}$ , 高质量车零售商和制造商的单位利润分别为  $\bar{\pi}_{rh}^{c*} = p_h - w_h = \frac{\delta-c_h}{4} + \frac{s_h}{4}$  和  $\bar{\pi}_{mh}^{c*} = w_h - (c_h - s_{mh}) = \frac{\delta-c_h}{2} + \frac{s_h}{2}$ . 由于满足  $\bar{\pi}_m^{a*} = 2\bar{\pi}_r^{a*}$ ,  $\bar{\pi}_{ml}^{c*} = 2\bar{\pi}_{rl}^{c*}$ ,  $\bar{\pi}_{mh}^{c*} = 2\bar{\pi}_{rh}^{c*}$ , 当  $\Delta\bar{\pi}_r^* > 0$  时, 即可得到  $\Delta\bar{\pi}_m^* > 0$ . 分情况讨论如下:

(1) 当  $C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$  且  $c_l < 2 - 8\tau$  时,  $s_l^{c*} = \frac{c_l}{2}$ ,  $s_h^{c*} = c_h - \frac{c_l}{2} + (\delta-1)(4\tau-1)$ ,  $s^{a*} = \frac{c_l}{2}$ ;  $\bar{\pi}_{rl}^{c*} = \frac{2-c_l}{8}$ ,  $\bar{\pi}_{rh}^{c*} = \frac{2-c_l}{8} + \tau(\delta-1)$ ,  $\bar{\pi}_r^{a*} = \frac{2-c_l}{8}$ ,  $\bar{\pi}_{ml}^{c*} = \frac{2-c_l}{4}$ ,  $\bar{\pi}_{mh}^{c*} = \frac{2-c_l}{4} + 2\tau(\delta-1)$ ,  $\bar{\pi}_m^{a*} = \frac{2-c_l}{4}$ .  $\bar{\pi}_{rh}^{c*} - \bar{\pi}_r^{a*} = \tau(\delta-1)$ ,

由  $\delta > 1$  得  $\tau(\delta - 1) > 0$ , 所以  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} > \bar{\pi}_{rl}^{c^*} = \bar{\pi}_r^{a^*}$ , 继而  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} > \bar{\pi}_{ml}^{c^*} = \bar{\pi}_m^{a^*}$ , 结合  $D_l^{c^*} + D_h^{c^*} = D^{a^*}$ , 得到  $\pi_m^{c^*} > \pi_m^{a^*}$ ,  $\pi_r^{c^*} > \pi_r^{a^*}$ .

根据  $\Delta u_g^* = u_g^{c^*} - u_g^{a^*} = (1 - \frac{c_l}{2})(\frac{2 - c_l - 8\tau}{8}) + (k - c_h + \frac{c_l}{2} - (\delta - 1)(4\tau - 1))\tau - (1 - \frac{c_l}{2})(\frac{2 - c_l}{8}) = (k - 2 + c_l - c_h - 4\delta\tau + \delta + 4\tau)\tau$ . 考虑  $c_h$  的取值范围, 当  $c_h = C^3(c_l)$  时, 可得  $\Delta u_g^* = (c_l + 4\tau - 2)\tau < -4\tau^2 < 0$ ; 当  $c_h = C^2(c_l) + 4\tau(\delta - 1)$  时, 可得  $\Delta u_g^* = 0$ ; 当  $c_h = C^2(c_l)$  时, 可得  $\Delta u_g^* = 4\tau^2(\delta - 1) > 0$ . 因此  $\Delta u_g^*$  随  $c_h$  的增加而单调递减, 当  $C^2(c_l) < c_h \leq C^2(c_l) + 4\tau(\delta - 1)$  时,  $\Delta u_g^* > 0$ . 当  $C^2(c_l) + 4\tau(\delta - 1) < c_h \leq C^3(c_l)$  时,  $\Delta u_g^* < 0$ .

(2) 当  $C^1(c_l) < c_h \leq C^2(c_l)$  时,  $s_l^{c^*} = \frac{c_l}{2}$ ,  $s_h^{c^*} = \frac{c_h}{2} + \frac{k - \delta}{2}$ ,  $s^{a^*} = \frac{c_l}{2}$ ,  $\bar{\pi}_{rl}^{c^*} = \frac{2 - c_l}{8}$ ,  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} = \frac{\delta + k - c_h}{8}$ ,  $\bar{\pi}_r^{a^*} = \frac{2 - c_l}{8}$ .  $\bar{\pi}_{ml}^{c^*} = \frac{2 - c_l}{4}$ ,  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} = \frac{\delta + k - c_h}{4}$ ,  $\bar{\pi}_m^{a^*} = \frac{2 - c_l}{4}$ . 根据单位成本取值约束条件, 有  $c_l - c_h \geq -k - \delta + 2 + 8\tau(\delta - 1)$ , 得到  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} - \bar{\pi}_r^{a^*} = \frac{\delta + k - 2 + c_l - c_h}{8} \geq \tau(\delta - 1) > 0$ , 即  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} > \bar{\pi}_{rl}^{c^*} = \bar{\pi}_r^{a^*}$ , 继而有  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} > \bar{\pi}_{ml}^{c^*} = \bar{\pi}_m^{a^*}$ . 结合  $D_l^{c^*} + D_h^{c^*} = D^{a^*}$ , 得到  $\pi_m^{c^*} > \pi_m^{a^*}$ ,  $\pi_r^{c^*} > \pi_r^{a^*}$ .

根据  $\Delta u_g^* = u_g^{c^*} - u_g^{a^*} = (1 - \frac{c_l}{2}) \frac{\delta(1 - c_l) - k + c_h}{8(\delta - 1)} + \frac{k - c_h + \delta}{2} \times \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)} - \frac{(2 - c_l)^2}{16}$ , 这里的  $k > 1$ . 当  $k=1$  时,  $\Delta u_g^* |_{k=1} = (1 - \frac{c_l}{2}) \frac{\delta(1 - c_l) - 1 + c_h}{8(\delta - 1)} + \frac{1 - c_h + \delta}{2} \times \frac{\delta - 1 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)} - \frac{(2 - c_l)^2}{16} = \frac{(1 - \delta + c_h - c_l)^2}{16(\delta - 1)} \geq 0$ . 由于对任意的  $k > 1$ , 有  $\frac{\partial \Delta u_g^*}{\partial k} = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)} = D_h^{c^*} > 0$ . 因此有  $\Delta u_g^* |_{k>1} > \Delta u_g^* |_{k=1} \geq 0$ .

(3) 当  $c_l < c_h \leq C^1(c_l)$  且  $c_l < 2 - 8\tau$  时,  $s_h^{c^*} = \frac{c_h}{2} + \frac{k - \delta}{2}$ ,  $s^{a^*} = \frac{c_l}{2}$ ,  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} = \frac{\delta + k - c_h}{8}$ ,  $\bar{\pi}_r^{a^*} = \frac{2 - c_l}{8}$ ,  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} = \frac{\delta + k - c_h}{4}$ ,  $\bar{\pi}_m^{a^*} = \frac{2 - c_l}{4}$ . 由于  $D_h^{c^*} - D^{a^*} = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)} - \frac{2 - c_l}{8} = \frac{k - \delta + \delta c_l - c_h}{8(\delta - 1)} \geq 0$ , 所以  $D_h^{c^*} \geq D^{a^*}$ .  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} - \bar{\pi}_r^{a^*} = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8} > \tau(\delta - 1) > 0$ , 即  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} > \bar{\pi}_r^{a^*}$ , 继而有  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} > \bar{\pi}_m^{a^*}$ ,  $\pi_m^{c^*} > \pi_m^{a^*}$ ,  $\pi_r^{c^*} > \pi_r^{a^*}$ . 由于单位补贴绩效变化量  $(k - s_h^{c^*}) - (1 - s^{a^*}) = \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{2} > 4\tau(\delta - 1) > 0$ , 因此总的补贴绩效变化  $\Delta u_g^* = (k - s_h^{c^*})D_h^{c^*} - (1 - s^{a^*})D^{a^*} > 0$ .

(4) 当  $c_l < c_h \leq C^2(c_l)$  且  $2 - 8\tau \leq c_l \leq 2 - 4\tau$  时,  $s_h^{c^*} = \frac{c_h}{2} + \frac{k - \delta}{2}$ ,  $s^{a^*} = 4\tau + c_l - 1$ ,  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} = \frac{k + \delta - c_h}{8}$ ,  $\bar{\pi}_r^{a^*} = \tau$ ,  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} = \frac{k + \delta - c_h}{4}$ ,  $\bar{\pi}_m^{a^*} = 2\tau$ .  $D_h^{c^*} \geq \tau = D^{a^*}$ , 当  $\delta > 2$  时,  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} = \frac{k + \delta - c_h}{8} > \frac{k + \delta - 2 + c_l - c_h}{8(\delta - 1)} \geq \tau = \bar{\pi}_r^{a^*}$ , 继而有  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} > \bar{\pi}_m^{a^*}$ ,  $\pi_m^{c^*} > \pi_m^{a^*}$ ,  $\pi_r^{c^*} > \pi_r^{a^*}$ . 由于单位补贴绩效的变化量为  $(k - s_h^{c^*}) - (1 - s^{a^*}) = \frac{k + \delta - 4 + 8\tau + 2c_l - c_h}{2} \geq \frac{c_l - 2 + 8\tau\delta}{2} > 0$ , 因此总变化量  $\Delta u_g^* = (k - s_h^{c^*})D_h^{c^*} - (1 - s^{a^*})D^{a^*} > 0$ .

(5) 当  $C^2(c_l) < c_h \leq C^3(c_l)$  且  $2 - 8\tau \leq c_l \leq 2 - 4\tau$  时,  $s_h^{c^*} = c_h - \frac{c_l}{2} + (\delta - 1)(4\tau - 1)$ ,  $s^{a^*} = 4\tau + c_l - 1$ ,  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} = \frac{2 - c_l}{8} + \tau(\delta - 1)$ ,  $\bar{\pi}_r^{a^*} = \tau$ ,  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} = \frac{2 - c_l}{4} + 2\tau(\delta - 1)$ ,  $\bar{\pi}_m^{a^*} = 2\tau$ .  $D_h^{c^*} = D^{a^*}$ , 当  $\delta \geq 2$  时,  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} - \bar{\pi}_r^{a^*} = \frac{2 - c_l}{8} + \tau(\delta - 2) > 0$ , 所以  $\bar{\pi}_{rh}^{c^*} > \bar{\pi}_r^{a^*}$ , 继而有  $\bar{\pi}_{mh}^{c^*} > \bar{\pi}_m^{a^*}$ ,  $\pi_m^{c^*} > \pi_m^{a^*}$ ,  $\pi_r^{c^*} > \pi_r^{a^*}$ . 由于单位补贴绩效变化量  $(k - s_h^{c^*}) - (1 - s^{a^*}) = \frac{3}{2}c_l - c_h + k + \delta - 3 - 4\tau(\delta - 2)$ , 考虑直线  $c_h = \frac{3}{2}c_l + k + \delta - 3 - 4\tau(\delta - 2)$ , 与区域(5)交于值  $(2 - 8\tau, k + \delta - 4\tau(\delta + 1))$  和值  $(2 - 4(\sqrt{5} - 1)\tau, k + \delta - (4\delta + 6\sqrt{5} - 14)\tau)$ . 因此, 当  $\frac{3}{2}c_l + \delta + k - 3 - 4\tau(\delta - 2) < c_h < C^3(c_l)$  时,  $\Delta u_g^* < 0$ ; 当  $c_h = \frac{3}{2}c_l + \delta + k - 3 - 4\tau(\delta - 2)$  时,  $\Delta u_g^* = 0$ ; 当  $C^2(c_l) < c_h < \min\{\frac{3}{2}c_l + \delta + k - 3 - 4\tau(\delta - 2), C^3(c_l)\}$  时,  $\Delta u_g^* > 0$ . 证毕.