

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2021.09.005

# 激励政策退坡下私家电动汽车扩散分析<sup>①</sup>

——以上海市为例

沈峰, 马铁驹\*, 赵兴荣, 许诺愉, 冯净冰, 马也

(华东理工大学商学院, 上海 200237)

**摘要:** 政府的各类激励政策(如补贴、免费牌照等)对私家电动汽车的扩散起着重要促进作用。激励政策在逐渐退坡,这对私家电动汽车扩散会产生什么样的影响?考虑电动汽车技术的发展态势,什么样的退坡机制较为合理?本研究以上海为例分析这些问题。本研究基于技术生命周期的概念,利用专利数据分析电动汽车技术成熟度的动态变化,同时厘清促进私家电动汽车扩散的重要因素及其之间的因果联系和反馈环路,在此基础上构建私家电动汽车扩散的系统动力学模型。与以往模型相比,该模型的主要创新点是考虑了技术成熟度的动态变化和激励政策退坡。本研究以上海电动汽车扩散为案例。得益于免费沪牌等激励政策,上海已成为全球电动汽车保有量最多的城市之一。本研究利用上海电动汽车历史销售数据校验所构建的系统动力学模型,在此基础上运用该模型模拟不同激励退坡机制下上海私家电动汽车的扩散场景。研究结果可为电动汽车激励退坡机制的制定提供参考,也可为电动汽车生产厂商提供未来市场发展趋势的展望。

**关键词:** 电动汽车扩散; 激励政策退坡; 系统动力学

**中图分类号:** C93.03   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1007-9807(2021)09-0079-26

## 0 引言

近年来,各国政府陆续出台政策支持新能源汽车产业的发展<sup>[1,2]</sup>。目前占主导地位的新能源汽车为电动汽车,包括纯电动汽车和可插电混合动力汽车。我国也实施了一系列推广新能源汽车的措施和政策,目前我国电动汽车产销均居于世界首位<sup>[3]</sup>。在电动汽车产业的发展初期,政府的各种激励政策(包括补贴、免费牌照等优惠政策)起着重要作用,但电动汽车产业的发展不能永远依赖政府的补贴,随着技术的不断改进,电动汽车产业的发展更需要依靠市场。我国2019年3月大幅下调了对电动汽车的政府补贴,补贴金额基本减半,且不再允许发放地区补贴<sup>[4]</sup>。这说明对电

动汽车的补贴已经开始退坡。如果政府激励政策逐渐减弱甚至完全退出,电动汽车的扩散是否能持续?考虑电动汽车技术的发展态势,政府的激励政策采用什么样的退出机制才能对电动汽车扩散的影响最小?本研究的主要目的是试图为这些问题提供一些解答。

学者们对新能源汽车的扩散已做了较多的研究。一些学者用传统的技术扩散模型分析新能源汽车扩散。例如,任斌等对 Bass 模型进行了拓展,在此基础上构建了中国电动汽车扩散模型,研究肯定了充电站设施以及电动汽车价格在电动汽车扩散中的作用,并提出消费者在初次选择电动汽车时更多考虑实用性和便利性,而购买价格的下降将在后期推动电动汽车进一步扩散<sup>[5]</sup>;Kong 和

① 收稿日期: 2019-09-11; 修订日期: 2020-07-27。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71571069; 71961137012; 71874055)。

通讯作者: 马铁驹(1975—), 男, 江苏常州人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: tjma@ecust.edu.cn

Bi 基于 Bass 模型,分析了不同商业模式下电动汽车的扩散过程<sup>[6]</sup>.刘颖琦等则借鉴混合动力汽车历史数据,采用 Bass 模型预测中国新能源汽车的扩散<sup>[7]</sup>.

新能源汽车的扩散涉及到很多因素,这些因素往往交织在一起形成因果反馈环路.除了传统的技术扩散模型外,系统动力学模型也是学者们研究新能源汽车扩散的重要方法之一.例如,Shepherd 和 Bonsall 运用系统动力学模型分析了影响英国电动汽车未来 40 年需求的重要因素<sup>[8]</sup>.缪小明和刘啦基于系统动力学,分析了政府采购、购置补贴等政策在电动汽车产业化过程中的作用<sup>[9]</sup>.Lee 等将系统动力学与消费者选择模型相结合,研究了税费优惠和报废补贴政策对混合动力汽车扩散的作用<sup>[10]</sup>.Shafiei 等利用系统动力学模型,研究了冰岛应采取何种财政激励政策来推动电动汽车的扩散<sup>[11]</sup>.Liu 和 Xiao 利用系统动力学模型分析了多种激励政策的组合对电动汽车扩散的作用<sup>[12]</sup>.冯博等利用系统动力学模型分析了经济效用和社交效用在电动汽车采纳过程中的作用<sup>[13]</sup>.Wang 等利用系统动力学模型,分析了政府补贴对中国电动汽车市场销量的影响<sup>[14]</sup>.

电动汽车的扩散是不同决策主体相互作用、相互影响后“涌现”出来的结果<sup>[15]</sup>.ABM(基于主体的建模,agent-based modeling)是研究复杂社会经济系统中“涌现”的有力工具<sup>[16,17]</sup>.近些年很多学者也用 ABM 来研究新能源汽车扩散.例如,Zhang 等用 ABM 分析了新能源汽车产业中的关键参与者(厂商、消费者和政府机构)之间的互动情况,侧重分析了技术推动、市场拉动,以及政策推动三项机制对新能源汽车扩散速度的影响<sup>[18]</sup>;向诗剑和马铁驹应用 ABM 研究了新能源汽车及其加能站的协同扩散<sup>[19]</sup>;Noori 和 Tatari 使用 ABM 预测美国 2030 年不同类型的新能源汽车的市场占有率<sup>[20]</sup>.孙晓华等利用 ABM 研究了充电设施建设对电动汽车扩散的促进作用<sup>[21]</sup>.

还有些学者集成不同的模型来分析新能源汽车的扩散.例如,Park 和 Kim 集成 Bass 模型和系统动力学模型,侧重考虑基础设施和生产规模效应,提出了一个燃料电池汽车的市场渗透预测模型<sup>[22]</sup>.Shafiei 等将系统动力学与 ABM 结合起来,

考虑汽车生产商、汽车经销商、顾客、能源提供系统、燃料站和政府等主体的交互,分析传统汽车向新能源汽车的转变过程<sup>[23]</sup>.

总体说来,很多学者利用不同的方法,从不同的角度,对新能源汽车的扩散已经做了大量研究,并取得了很多具有启发性的成果.但是,现有工作还存在以下不足:1)还很少研究激励政策退坡对新能源汽车扩散的影响,以及什么样的退坡机制比较合理;2)现有对新能源汽车扩散的研究较少考虑新能源汽车的技术成熟度.

针对以上不足,本研究着重分析政府购置补贴降低、购置税减免到期,免费车牌取消等激励政策退坡对电动汽车扩散的影响,并以上海为例,设计三种免费沪牌退出机制,分析不同退出机制对上海私家电动汽车扩散可能造成的影响.本研究运用技术生命周期理论,利用专利数据预估电动汽车技术成熟度的动态变化,作为私家电动汽车扩散系统动力学模型中的重要因素之一.

新产业的发展需要技术的进步,一种技术越成熟,它对政府投入的依赖就越低,或者说对一项新技术的激励政策退坡要考虑技术成熟度的动态变化,本研究的主要贡献和创新点是把激励政策退坡和技术成熟度引入到对新能源汽车扩散的研究中,分析技术成熟度动态变化下,不同政策退坡机制对新能源汽车扩散可能的影响,为政府制定激励退坡机制提供参考.

新能源汽车的种类很多,本研究中的新能源汽车指目前主流的电动汽车,包括纯充电汽车和可插电混合动力汽车.本研究侧重研究政府激励政策、技术成熟度、充电桩与电动汽车配比、技术学习效应等因素形成的因果反馈环路对电动汽车扩散的影响,而把不同决策者的异质性界定在研究边界之外,所以主要采用系统动力学建模方法.本研究聚焦于私家电动汽车的扩散.电动公共汽车以及共享电动汽车的扩散除了激励政策外,更多受到政府规划的影响,计划在未来的工作中对它们的扩散开展研究.

本研究以上海为案例,主要是基于以下几点考虑.1)上海是我国乃至世界上电动汽车扩散最快的城市之一<sup>[24]</sup>,分析上海电动汽车扩散可为其

他城市和地区提供参考;2)本研究团队对上海电动汽车的扩散做了大量调查,积累了很多一手数据;3)本研究团队的前期问卷调查证实了上海实施的(满足特定条件下的<sup>[25]</sup>)免费沪牌政策对电动汽车在上海的扩散起到了非常重要的作用;4)目前针对电动汽车的免费沪牌没有设定额度上限,如果持续实施无额度上限的免费沪牌政策,上海私家汽车总保有量很有可能突破城市交通能够承载的极限.为了保障城市公路交通的正常运行,上海市之前一直通过汽车牌照的限额拍卖来控制城市汽车保有量.从这个角度看,电动汽车无限额免费沪牌这一政策必定会退坡,而这正契合本研究想要回答的主要问题.当然每个城市/地区对新能源汽车的激励政策各不一样,因此激励政策的退坡机制也会有所不同.这一案例研究对免费沪牌的退出机制的制定可以提供一定参考,对其他城市/地区的激励政策退坡不一定有直接参考价值,但分析框架可以为分析其他城市/地区的激励政策退坡提供一定参考.

## 1 电动汽车的技术成熟度

一项新技术从产生到成熟往往要经历一定过程,越成熟的技术往往越容易被广泛接受,也越来越少依赖政府的补贴等激励政策.因此了解电动汽车的技术成熟程度对帮助分析电动汽车未来可能的扩散场景以及激励政策退坡的设置非常重要.

Abernathy 和 Utterback 于 1978 年首次提出了技术生命周期的概念,指出任何技术的发展都会经历从产生到成熟至淘汰的不同阶段<sup>[26]</sup>.很多研究表明专利数据可以被用来识别技术发展所处的阶段<sup>[27-31]</sup>.如图 1 所示,随着专利申请累计数量的增加,技术生命周期呈现为一条 S 型曲线,共分 4 个阶段,依次为:导入期、成长期、成熟期和衰退期<sup>[31]</sup>.在这一过程中,技术成熟度不断提升.处于导入期的一般被称为新技术,处于成长期的一般被称为萌芽技术(有时也被称为追踪技术<sup>[32]</sup>),处于成熟期的一般被称为关键技术,处于衰退期的一般被称为基础技术<sup>[31,33]</sup>.

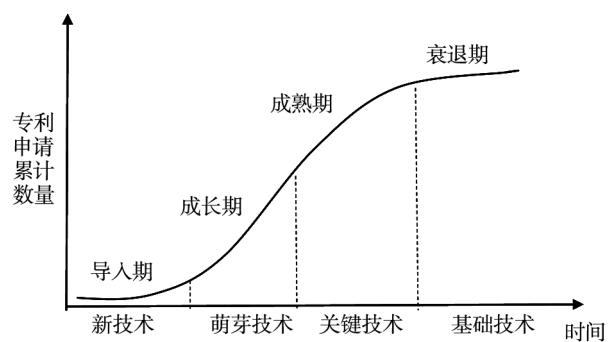


图 1 技术生命周期的 S 型曲线

Fig. 1 S-curve of the technology life cycle

注:根据张涛,余仁桥<sup>[33]</sup>绘制

学者们常用公式(1)所示的 Logistic 模型<sup>[34]</sup>拟合技术生命周期 S 型曲线<sup>[35]</sup>

$$N(T) = \frac{K}{1 + e^{-r(T-b)}} \quad (1)$$

其中  $N(T)$  为  $T$  时刻的专利申请累计数量,  $r$  为 S 型曲线斜率,即 S 型曲线的成长率;  $b$  为 S 型曲线中转折点的时间点;  $K$  代表成长的饱和水平,即饱和时预计达到的专利申请总量;  $e$  代表自然对数的底数,约等于 2.718.

本研究也运用公式(1)来测度电动汽车的技术成熟度,从德温特专利数据库中检索电动汽车相关的发明专利申请数据(检索式见附录 B).德温特专利数据库是收录全球专利信息最全的数据库之一,经常被用作分析技术发展趋势的数据来源<sup>[36]</sup>.专利权人通常会在多个国家或地区为相同或基本相同的发明申请专利,这些专利被称为同族专利或者专利族<sup>[37]</sup>.德温特专利数据库为同族专利增加了一致的 DWPI 标题,这为本研究识别同族专利提供了条件.本研究把同族专利作为一条专利申请记录来处理,因为它们本身代表的是一项发明,只不过不同时间在不同国家或地区申请专利.参考优先权日期的确定规则,本研究选取最早专利申请日期作为同族专利的申请日期.由于专利从申请到公开时间较长,存在一定滞后性,因此 2018 年~2019 年的专利统计数据并不完整,由此本研究选用截止到 2017 年 12 月的专利数据,归并同族专利后,1964 年 9 月至 2017 年 12 月电动汽车相关发明专利记录共计 117 508 条.

将 1964 年 9 月设为初始时刻 ( $T = 0$ ),以申请累计量月度数据为时间序列数据,利用迭代最

小二乘估计<sup>[38]</sup>,拟合出公式(1)中的  $K, r, b$  的参数值,得到  $K = 277\ 960$ ,  $r = 0.015\ 363$ ,  $b = 658.73$  (即2019年7月),  $R^2$  为0.985,拟合优度

较高.如表1所示,  $K, r, b$  三项参数估计值均在99%置信区间中,表明三项参数值的估计较为可靠.

表1 电动汽车技术 Logistic 模型参数估计

Table 1 Logistic model parameter estimation of electric vehicle technology

参数	$K$	$r$	$b$
参数估计值	277 960 *** (8.383 1 × 10 <sup>-5</sup> )	0.015 363 *** (3.916 6 × 10 <sup>-5</sup> )	658.73 *** (0.211 23)
99% 置信区间下限	261 210	0.015 094	652.06
99% 置信区间上限	294 710	0.015 633	665.4

注: 括号中是标准误; \*\*\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*  $p < 0.1$ .

图2为拟合得到的曲线与电动汽车专利申请历史数据的对比,从中也可以看出,拟合得到的曲线能很好反映电动汽车专利申请历史数据.表2给出了拟合得到的电动汽车技术生命周期模型的饱和点、转折点、技术成熟度从10%到90%的成长时间.以图2和表2为依据,结合图1所示的技术生命周期模型,电动汽车技术的导入期大约为1964年~2006年,成长期大约为2007年~2019年,成熟期预计为2019年~2031年,衰退期预计为2031年以后.

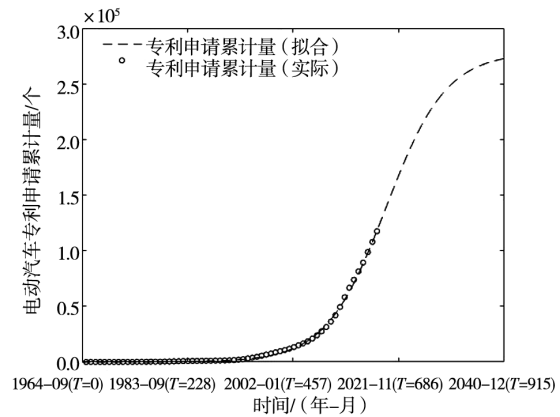


图2 电动汽车技术生命周期的S型曲线拟合

Fig. 2 S-curve fitting of electric vehicle technology life cycle

表2 电动汽车技术 Logistic 模型摘要表

Table 2 Logistic model summary table of electric vehicle technology

饱和点 (saturation)/件	转折点 (midpoint)/月	成长时间 (growth time)/年
277 960	2019 -07	24

对于处于“导入期”及“成长期”阶段的新技术,政府的补贴等激励政策对促进其发展和扩散很重要,在“成长期”阶段的中后期,技术日趋成熟,具备了一定的市场份额,企业可以依靠市场上的获益继续对其发展和完善,这时,政府可以考虑实施激励政策退坡.技术成熟度会与其他因素相互交织影响电动汽车的扩散.在下一节构建的电动汽车扩散系统动力学模型中,电动汽车技术成熟度被作为重要因素之一,这也是本研究的主要创新点之一.

把技术成熟度最高设为1,公式(1)的 Logistic 曲线转换成公式(2).

$$M(T) = \frac{1}{1 + e^{-r(T-b)}} \quad (2)$$

其中  $M(T)$  代表在时间为  $T$  时的电动汽车的技术成熟度.

按照公式(2),2018年底电动汽车技术成熟度接近0.5,经过“成熟期”阶段的发展,到2031年底电动汽车技术成熟度将达到0.9以上.

## 2 电动汽车扩散的系统动力学模型

### 2.1 电动汽车扩散的影响因素及因果回路图

国内外学者对影响电动汽车扩散的因素做了

很多研究.学者们发现电动汽车的持有成本对消费者的购买意愿起着很大的影响<sup>[39, 40]</sup>,政府激励(补贴、免税等)是影响电动汽车持有成本的重要因素,在电动汽车产业发展前期直接影响电动汽车的扩散<sup>[41-43]</sup>.技术学习效应被认为是电动汽车扩散的内生动力.技术学习指一项新技术的成本将随着人们在该项技术上经验的积累而下降<sup>[44]</sup>.技术学习效应能降低电动汽车的购置成本<sup>[19]</sup>,促进消费者购买意愿的提升.充电站的建设有助于提高充电便利性,减少消费者对电动汽车的“里程焦虑”<sup>[45, 46]</sup>,增强购买意愿,从而促进电动汽车的扩散.近年来,我国出台了一系列政策来促进充电设施的建设<sup>[47, 48]</sup>,以促进电动汽车的扩散.很多消费者会对电动汽车的技术成熟程度产生疑虑<sup>[1]</sup>.现有研究表明有限的续航里程是导致消费者不选择电动汽车的重要原因<sup>[49]</sup>.技术进步有望提升电动汽车的续航里程等性能,因此提升技术水平,特别在控制成本的同时提高续航里程,将对电动汽车扩散起到推动作用.在归纳总结现有研究的基础上,本研究把政府购置补贴、自专用充电桩数量和公用充电桩数量、技术成熟度、技术学习效应等作为电动汽车扩散的重要影响因素.与以往的电动汽车扩散系统动力学模型相比,本研究构建的模型主要创新点为:1)将技术成熟度引入了系统动力学模型中;2)现有模型有的侧重于分析电动汽车生产、销售、充电等环节的影响,有的侧重于研究政府政策的作用,同时考虑这两方面因素的比较少见,本研究构建的模型既涵盖电动汽车生产、销售、充电等各环节的因素,又刻画政府政策对电动汽车扩散的作用;3)现有模型往往不区分不同的充电设施,本研究将充电设施细分为自专用充电桩、公用充电桩、公共充电站.

本研究以上海市为案例,在构建模型的过程中有针对性地考虑了上海市出台的有关电动汽车的各项规划以及补贴政策.这样做的优点是更好地刻画出上海电动汽车扩散的要素,缺点是模型中的一些要素(比如免费牌照)在其他城市/地区不一定适用.但本研究总体框架可以适用于其他城市/地区.

本研究所构建的系统动力学模型考虑的因素及其主要相互关系提炼如下.

1)电动汽车价格高于传统内燃机汽车.在电动汽车扩散初期,政府通过对消费者进行补贴,以降低消费者的购置成本、提升电动汽车销量,随之带动电动汽车累计产量的增加.生产厂商在电动汽车上的技术知识不断积累,从而产生技术学习效应扩大,使电动汽车的成本和价格下降.

2)电动汽车销量的增加,会带动各类充电设施的建设;自专用充电桩的增多,会更好满足电动汽车的日常充电需求;公用充电桩和公共充电站的增多,会更好满足电动汽车的临时充电需求,以降低消费者的里程焦虑.

3)技术成熟度的提升将增加电动汽车的续航里程,降低消费者的里程焦虑.

图3给出了模型的因果回路图.其中包含4个正反馈回路,分别表示为R1、R2、R3、R4,以下是这四个回路.

1)正反馈回路R1:电动汽车生产成本 $\xrightarrow{+}$ 电动汽车销售价格 $\xrightarrow{+}$ 电动汽车购置成本 $\xrightarrow{-}$ 电动汽车销量 $\xrightarrow{+}$ 电动汽车累计销量 $\xrightarrow{-}$ 电动汽车生产成本

估算技术学习效应需要时间序列数据.电动汽车总产量数据较易获得,产量的时间序列数据不易获得.而电动汽车销量的时间序列数据较易获得.因此在回路R1中,使用电动汽车累计销量来估算技术学习效应对生产成本的影响.

2)正反馈回路R2:电动汽车销量 $\xrightarrow{+}$ 自专用充电桩建设量 $\xrightarrow{+}$ 自专用充电桩数量 $\xrightarrow{+}$ 自专用桩车比 $\xrightarrow{+}$ 充电不担心系数 $\xrightarrow{+}$ 电动汽车销量

3)正反馈回路R3:电动汽车销量 $\xrightarrow{+}$ 公用充电桩建设量 $\xrightarrow{+}$ 公用充电桩数量 $\xrightarrow{-}$ 公用充电设施平均服务半径 $\xrightarrow{-}$ 充电不担心系数 $\xrightarrow{+}$ 电动汽车销量

4)正反馈回路R4:电动汽车保有量 $\xrightarrow{+}$ 公共充电站建设量 $\xrightarrow{+}$ 公共充电站数量 $\xrightarrow{-}$ 公用充电设施平均服务半径 $\xrightarrow{-}$ 充电不担心系数 $\xrightarrow{+}$ 电动汽车销量 $\xrightarrow{+}$ 电动汽车保有量

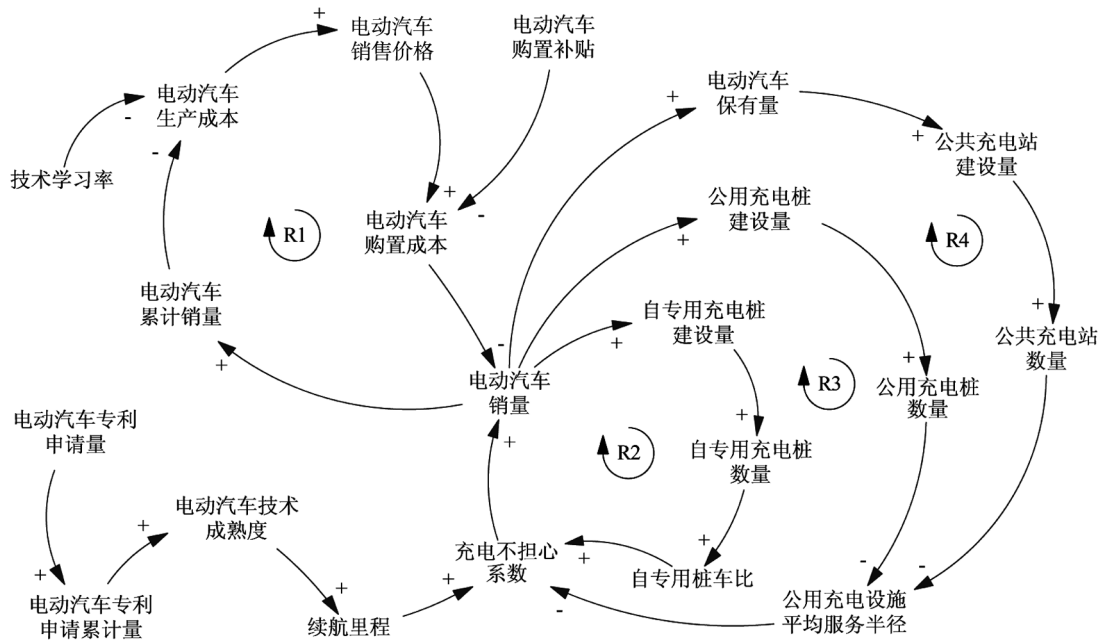


图 3 电动汽车扩散的因果回路图

Fig. 3 Causal circuit diagram of diffusion of electric vehicles

### 2.2 上海市私家电动汽车扩散系统动力学模型

在图 3 所示因果回路图的基础上,结合上海市私家电动汽车的特色政策,比如在一定条件下电动汽车可获得免费沪牌,本研究构建了如图 4 所示的上海市私家电动汽车扩散系统动力学模型.在这一模型中,私家电动汽车保有量、自专用充电桩数量、公用充电桩数量、公共充电站数量、电动汽车累计销量、电动汽车专利申请累计量、申请沪牌私家电动汽车累计量是随着时间变化的水平变量;引起这些水平变量变化的是速率变量,主要包括:私家电动汽车销量、私家电动汽车报废量、自专用充电桩建设量、公用充电桩建设量、公共充电站建设量、电动汽车销量、电动汽车专利申请量、申请沪牌私家电动汽车数量、获批沪牌私家电动汽车数量等;模型中的辅助变量主要包括:私家电动汽车销量增长率、购置成本系数、充电成本系数、充电不担心系数、沪牌中标系数、单辆电动汽车购置感知成本、单辆内燃机汽车购置成本、单辆电动汽车生产成本、单辆电动汽车“三电系统”生产成本、电动汽车技术成熟度、续航里程、有效公用充电设施数量、公用充电设施平均服务半径、单辆电动汽车销售价格、单辆电动汽车购置补贴、单辆电动汽车购置税、单辆内燃机汽车购置税、自

专用桩车比等;模型中的常量包括:电动汽车与自专用充电桩配比、电动汽车与公用充电桩配比、电动汽车与公共充电站配比、内燃机汽车购置税税率等.

图 4 所示模型中建立的主要流率方程和辅助变量方程共 35 个(部分流率方程和辅助变量方程参见附录 C),其数学表达式及补充说明分列如下.

1) 私家电动汽车保有量( $t$ ) = 私家电动汽车保有量( $t - 1$ ) + 私家电动汽车销量( $t$ ) - 私家电动汽车报废量( $t$ )

单位:辆

私家电动汽车保有量( $t_0$ ) 为市场上私家电动汽车的初始保有量.

2) 私家电动汽车销量( $t$ ) = 私家电动汽车销量( $t - 1$ )  $\times$  (1 + 私家电动汽车销量增长率( $t$ ))

单位:辆

私家电动汽车销量( $t_0$ ) 为市场上私家电动汽车的初始销量.

3) 私家电动汽车报废量( $t$ ) = 私家电动汽车保有量( $t$ )  $\times$  电动汽车报废率( $t$ )

单位:辆

私家电动汽车报废量受市场上私家电动汽车保有量和电动汽车报废率的影响.

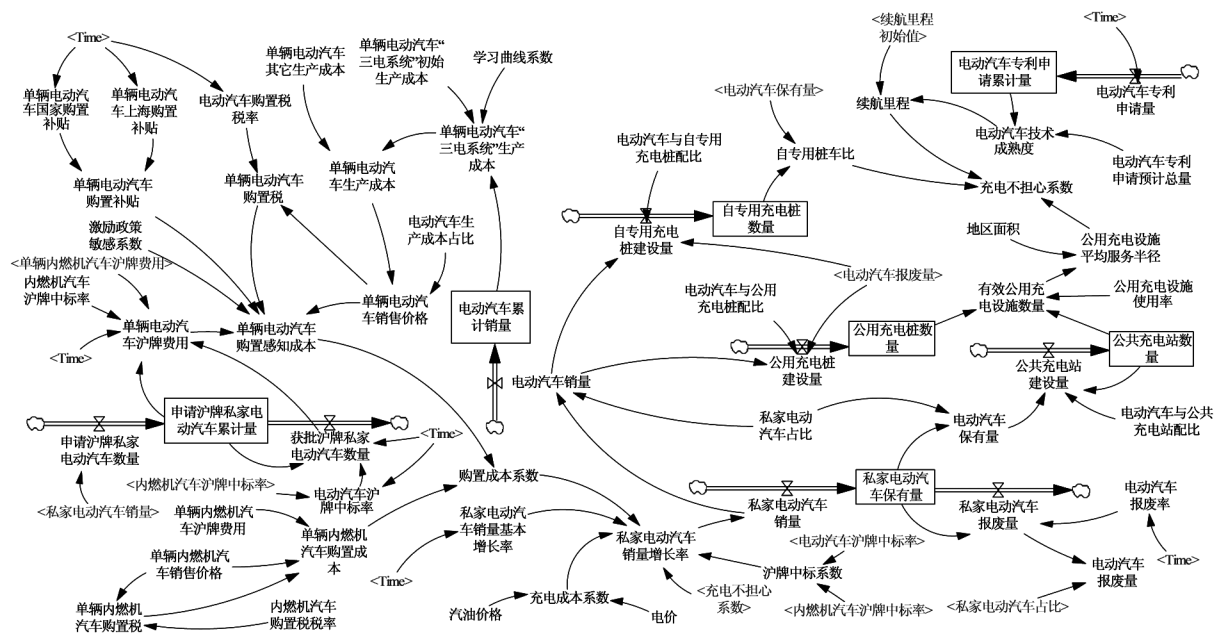


图4 上海市私家电动汽车扩散的系统动力学模型

Fig.4 System dynamics model of diffusion of private electric vehicles in Shanghai

4) 电动汽车专利申请累计量( $t$ ) = 电动汽车专利申请累计量( $t - 1$ ) + 电动汽车专利申请量( $t$ )  
 单位:件  
 电动汽车专利申请累计量( $t_0$ ) 为电动汽车专利申请累计量的初始值.

$$5) \text{ 电动汽车专利申请量}(t) = \frac{K}{1 + e^{-r(t-b)}}$$

单位:件/月

根据前文的分析,电动汽车专利申请量使用 Logistic 模型来拟合.

6) 申请沪牌私家电动汽车累计量( $t$ ) = 申请沪牌私家电动汽车累计量( $t - 1$ ) + 申请沪牌私家电动汽车数量( $t$ ) - 获批沪牌私家电动汽车数量( $t$ )  
 单位:辆  
 申请沪牌私家电动汽车累计量( $t_0$ ) 为申请沪牌私家电动汽车累计量的初始值.

7) 申请沪牌私家电动汽车数量( $t$ ) = 私家电动汽车销量( $t$ )  
 单位:辆/月  
 申请沪牌私家电动汽车数量受私家电动汽车销量的影响.

8) 获批沪牌私家电动汽车数量( $t$ ) = 申请沪牌私家电动汽车累计量( $t$ ) $0 \leq t \leq 60$ (2015 - 12 ~

2020 - 12)

单位:辆/月

获批沪牌私家电动汽车数量受申请沪牌私家电动汽车累计量的影响. 根据 2018 年发布的《上海市鼓励购买和使用新能源汽车实施办法》,继续免费发放新能源汽车专用牌照额度,有效期至 2020 年 12 月 31 日. 在此期间,申请沪牌的私家电动汽车均可免费获批牌照.

9) 私家电动汽车销量增长率( $t$ ) =  $\alpha \times$  私家电动汽车销量基本增长率( $t$ )  $\times$  (1 + 购置成本系数( $t$ ))  $\times$  (1 + 充电成本系数( $t$ ))  $\times$  (1 + 充电不担心系数( $t$ ))  $\times$  (1 + 沪牌中标系数( $t$ ))  
 单位:dmnl(无量纲)

公式中的  $\alpha$  是一个固定的参数. 根据前文所述,私家电动汽车销量主要受购置成本、充电成本,以及充电不担心程度 3 方面因素的影响,此外还考虑了上海新能源汽车免费沪牌政策的影响. 因此本研究设置了私家电动汽车销量基本增长率,并引入购置成本系数、充电成本系数、充电不担心系数、沪牌中标系数,来拟合上海私家电动汽车销量增长率的变化.

10) 购置成本系数( $t$ ) = (单辆内燃机汽车购置成本( $t$ ) - 单辆电动汽车购置感知成本( $t$ )) / (单辆内燃机汽车购置成本( $t$ ) + 单辆电动

汽车购置感知成本( $t$ )

单位:dmnl(无量纲)

购置成本系数是指将单辆内燃机汽车购置成本与单辆电动汽车购置感知成本进行比较,描述比较结果对私家电动汽车销量的影响.

$$11) \text{ 充电成本系数}(t) = (\text{汽油价格}(t)/3 - \text{电价}(t))/(\text{汽油价格}(t)/3 + \text{电价}(t))$$

单位:dmnl(无量纲)

充电成本系数是指将居民用电价格与汽油价格进行对比,描述比较结果对私家电动汽车销量的影响.1L 汽油大约可以发出 10 兆 J 的电,1 度电等于  $3.6 \times 10^6$  J,即 1L 汽油约等价 3 度电.因此,公式中将汽油价格除以 3,再与电价进行比较.

$$12) \text{ 充电不担心系数}(t) = \text{自专用桩车比}(t) \times (\text{续航里程}(t)/100 - \text{公用充电设施平均服务半径}(t))/(\text{续航里程}(t)/100 + \text{公用充电设施平均服务半径}(t))$$

单位:dmnl(无量纲)

充电不担心系数是指将自专用桩车比、电动汽车的续航里程、公共充电设施(公用充电桩和公共充电站)平均服务半径三项因素进行综合考虑,描述其对私家电动汽车销量的影响.

为统一续航里程与公用充电设施平均服务半径的量级,故将续航里程除以 100.

$$13) \text{ 沪牌中标系数}(t) = (\text{电动汽车沪牌中标率}(t) - \text{内燃机汽车沪牌中标率}(t))/(\text{电动汽车沪牌中标率}(t) + \text{内燃机汽车沪牌中标率}(t))$$

单位:dmnl(无量纲)

沪牌中标系数是指将电动汽车沪牌中标率与内燃机汽车沪牌中标率进行比较,描述比较结果对私家电动汽车销量的影响.免费沪牌的价格因素将纳入电动汽车购置成本中考虑,本系数仅考虑沪牌中标率情况.

$$14) \text{ 单辆电动汽车购置感知成本}(t) = \text{单辆电动汽车销售价格}(t) + \text{激励政策敏感系数} \times (\text{单辆电动汽车沪牌费用}(t) + \text{单辆电动汽车购置税}(t) - \text{单辆电动汽车购置补贴}(t))$$

单位:元/辆

单辆电动汽车购置成本一般由单辆电动汽车销售价格、购置税和车牌费用组成,同时还应扣除

政府给予的购置补贴.在计算电动汽车购置感知成本时,考虑了不同消费者对于政府激励政策(免费车牌、购置税减免、购置补贴)的不同反应,因此在公式中加入了激励政策敏感系数.

$$15) \text{ 单辆电动汽车生产成本}(t) = \text{单辆电动汽车“三电系统”生产成本}(t) + \text{单辆电动汽车其它生产成本}$$

单位:元/辆

单辆电动汽车生产成本可分为“三电系统”生产成本和其它生产成本.

$$16) \text{ 单辆电动汽车“三电系统”生产成本}(t) = \text{单辆电动汽车“三电系统”初始生产成本} \times 0.85 \times (\text{电动汽车累计销量}(t)/\text{电动汽车累计销量}(t_0))^{-a} + \text{单辆电动汽车“三电系统”初始生产成本} \times 0.15$$

单位:元/辆

单辆电动汽车“三电系统”生产成本( $t$ )表示  $t$  时的生产成本,  $(\text{电动汽车累计销量}(t)/\text{电动汽车累计销量}(t_0))^{-a}$  表示当达到  $t$  时的累计销量时,成本下降为原来的百分之几.技术学习率可表示为  $1 - 2^{-a}$ ,即销量翻倍时成本降低的比率.

技术学习效应能降低电动汽车的生产成本<sup>[19]</sup>,进而拉低电动汽车的销售价格.单辆电动汽车生产成本主要在电池、电机、电控三大系统,约占整车生产成本的 65%,其它生产成本约占 35%.鉴于电动汽车其它生产成本与内燃机汽车相比差距不大.因此,技术学习效应主要发生在电动汽车的“三电系统”中.

传统内燃机汽车的发动机及动力总成系统约占总成本的 15%,据此假设电动汽车“三电系统”的成本最低可降至初始成本的 15%.

$$17) \text{ 电动汽车技术成熟度}(t) = \text{电动汽车专利申请累计量}(t)/\text{电动汽车专利申请预计总量}$$

单位:dmnl(无量纲)

根据上一节的分析,本研究用当前电动汽车专利申请累计量与专利申请预计总量的比值表征电动汽车技术成熟度.

$$18) \text{ 续航里程}(t) = \text{续航里程}(t_0)/(1 - \text{电动汽车技术成熟度}(t) + \text{电动汽车技术成熟度}(t_0))^2$$

单位:km



续航里程( $t_0$ )为电动汽车续航里程的初始值,电动汽车技术成熟度( $t_0$ )为电动汽车技术成熟度的初始值.电动汽车续航里程与其技术成熟度成正比,随着技术成熟度的提升不断增加.

19) 有效公用充电设施数量( $t$ ) = 公用充电设施使用率  $\times$  (公用充电桩数量( $t$ )/4 + 公共充电站数量( $t$ ))

单位:座

公用充电桩一般集中分布,形成一处公用充电设施.有效公用充电设施数量受公用充电设施使用率的影响.

20) 公用充电设施平均服务半径( $t$ ) =

$$\sqrt{\text{地区面积} / \text{有效公用充电设施数量}(t)}$$

单位:km

公用充电设施包括公用充电桩和公共充电站.在实际生活中,消费者更多受到有效公用充电设施的影响.因此,在本文模型中,使用有效公用充电设施数量来计算公用充电设施平均服务半径.

### 2.3 模型变量初值设置

本研究以上海市的电动汽车扩散为研究对象,主要依据《上海市电动汽车充电基础设施专项规划(2016年~2020年)》和《上海市鼓励购买和使用新能源汽车实施办法(2018年)》设置模型的变量初始值.

主要变量初值设置如下:

1) Initial Time = 0月(起始时间设置为2015年12月)

2) Time Step = 1个月(最小模拟单元为1个月)

3) Time Span = 180个月(前36个月模拟上海私家电动汽车2016年~2018年的扩散情况,后144个月预测上海私家电动汽车2019年~2030年的扩散情况)

4) 电动汽车初始累计销量 = 59 666辆<sup>[50, 51]</sup>

5) 私家电动汽车占比 = 65%<sup>[50]</sup>

6) 私家电动汽车初始保有量 = 59 666  $\times$  0.65 = 38 783辆

7) 私家电动汽车销量基本增长率( $t$ ) =

$$\begin{cases} 3.3\%, & 0 \leq t \leq 24 (2015 - 12 \sim 2017 - 12) \\ 1.23\%, & 25 \leq t \leq 60 (2018 - 01 \sim 2020 - 12) \\ 0.375\%, & 61 \leq t \leq 180 (2021 - 01 \sim 2030 - 12) \end{cases}$$

根据《上海市电动汽车充电基础设施专项规划(2016年~2020年)》和《上海市清洁空气行动计划(2018年~2022年)》,到2017年私家电动汽车保有量需达85 000辆;到2020年约207 000辆<sup>[50, 52]</sup>.假设每月销量的增长幅度是稳定的,为达到规划的电动汽车保有量,2016年~2017年月均销量基本增长率约为3.3%,2018年~2020年月均销量基本增长率约为1.23%.

参照2008年~2017年上海私家车月均增长率<sup>②</sup>,2021年~2030年的上海私家电动汽车销量基本增长率设置为0.375%.

8) 私家电动汽车初始销量 = 1 239辆/月<sup>[50]</sup>

根据《上海市电动汽车充电基础设施专项规划(2016年~2020年)》的新能源汽车发展预测,及上文设置的私家电动汽车销量基本增长率,估算得到私家电动汽车初始销量约为1 239辆.

9) 电动汽车报废率( $t$ ) =

$$\begin{cases} 0.001, & 0 \leq t \leq 12 (2015 - 12 \sim 2016 - 12) \\ 0.003, & 13 \leq t \leq 36 (2017 - 01 \sim 2018 - 12) \\ 0.005, & 37 \leq t \leq 60 (2019 - 01 \sim 2020 - 12) \\ 0.007, & 61 \leq t \leq 180 (2021 - 01 \sim 2030 - 12) \end{cases}$$

成熟汽车市场每年报废率一般在6%~8%,电动汽车作为新生事物,市场远未饱和,但随着电动汽车陆续临近使用年限,电动汽车的报废率会逐步增长.

10) 单辆电动汽车“三电系统”初始生产成本 = 13.65万元/辆

单辆电动汽车销售价格一般从20万元~50万元不等.折中选取35万元,作为电动汽车的初始售价.假设电动汽车售价中含30%的税费和10%的利润,因此单辆电动汽车初始生产成本为35  $\times$  60% = 21万元.

单辆电动汽车生产成本主要在“三电系统”,即电池、电机、电控三大系统,约占整车生产成本

② 根据2009年~2018年上海统计年鉴数据计算所得.

的 65%。本研究假设单辆电动汽车初始生产成本为 21 万元,则“三电系统”成本约为  $21 \times 65\% = 13.65$  万元。

11) 单辆电动汽车其它生产成本=7.35 万元/辆  
单辆电动汽车除“三电系统”以外的其它生产成本,约占整车生产成本的 35%,即  $21 \times 35\% = 7.35$  万元。

12) 学习曲线系数 = 0.152

设初始技术学习率为 10%,此时对应的学习曲线系数为 0.152。

13) 电动汽车生产成本占比 = 0.6

假设电动汽车厂商生产的单辆电动汽车的生产成本占其实际销售价格的 60%。

14) 单辆电动汽车国家购置补贴( $t$ ) =

$$\begin{cases} 4.25, & 0 \leq t \leq 12 & (2015 - 12 \sim 2016 - 12) \\ 3.4, & 13 \leq t \leq 36 & (2017 - 01 \sim 2018 - 12) \\ 2.55, & 37 \leq t \leq 42 & (2019 - 01 \sim 2019 - 06) \\ 1.7, & 43 \leq t \leq 48 & (2019 - 07 \sim 2019 - 12) \\ 0.85, & 49 \leq t \leq 60 & (2020 - 01 \sim 2020 - 12) \\ 0, & 61 \leq t \leq 180 & (2021 - 01 \sim 2030 - 12) \end{cases}$$

单位:万元

根据《关于 2016 年~2020 年新能源汽车推广应用财政支持政策的通知》,2016 年新能源汽车推广应用补助标准为:2016 年混合动力乘用车补助最高为 3 万元,纯电动乘用车补助最高为 5.5 万元。2017 年~2020 年除燃料电池汽车外其他车型补助标准适当退坡,其中,2017 年~2018 年补助标准在 2016 年基础上下降 20%,2019 年~2020 年补助标准在 2016 年基础上下降 40%,直至 2020 年以后补贴完全取消。

2019 年 3 月,财政部、工业和信息化部、科技部、发展改革委联合发布《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》,规定 2019 年新能源汽车补贴标准在 2018 年的基础上退坡超过 50%,并取消“地补”。2019 年 3 月 26 日至 2019 年 6 月 25 日为过渡期,6 月 26 日补贴新政开始实施。至 2020 年底,国家补贴退坡完毕。

15) 单辆电动汽车上海购置补贴( $t$ ) =

$$\begin{cases} 1.7, & 0 \leq t \leq 12 & (2015 - 12 \sim 2016 - 12) \\ 1.36, & 13 \leq t \leq 36 & (2017 - 01 \sim 2018 - 12) \\ 1.02, & 37 \leq t \leq 42 & (2019 - 01 \sim 2019 - 06) \\ 0, & 43 \leq t \leq 180 & (2019 - 07 \sim 2030 - 12) \end{cases}$$

单位:万元

根据《上海市鼓励购买和使用新能源汽车实施办法(2018 年)》,对消费者购买电动汽车(除进口电动汽车以外),在中央财政补助基础上,根据上海市新能源汽车登记车型有关信息和相应补助标准,再给予本市财政补助。

对符合条件的纯电动汽车,按照中央财政补助 1:0.5 给予本市财政补助;对符合条件的插电式混合动力乘用车,按照中央财政补助 1:0.3 给予本市财政补助。参考电动汽车和混合动力汽车的补贴数据,本研究假设按照中央财政补助 1:0.4 给予本市财政补助。

根据 2019 年补贴新政,2019 年 7 月起上海市“地补”取消。

16) 电动汽车购置税税率( $t$ ) =

$$\begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 60 & (2015 - 12 \sim 2020 - 12) \\ 0.1, & 61 \leq t \leq 180 & (2021 - 01 \sim 2030 - 12) \end{cases}$$

根据 2014 版《关于免征新能源汽车车辆购置税的公告》,自 2014 年 9 月 1 日~2017 年 12 月 31 日,对购置的电动汽车免征车辆购置税。根据 2017 版《关于免征新能源汽车车辆购置税的公告》,自 2018 年 1 月 1 日~2020 年 12 月 31 日,对购置的电动汽车免征车辆购置税。参照现行车辆购置税率,本研究假设自 2021 年 1 月 1 日起,对购置的电动汽车征收税率为 10%的车辆购置税。

17) 单辆内燃机汽车销售价格( $t$ )=20 万元/辆  $0 \leq t \leq 180$  (2015 - 12 ~ 2030 - 12)

单辆内燃机汽车销售价格一般从 10 万元~30 万元不等。折中选取 20 万元作为内燃机汽车的售价。

18) 内燃机汽车购置税税率 = 0.1

购买内燃机汽车需缴纳购置税,参照《中华人民共和国车辆购置税法》,车辆购置税的税率为 10%。

19) 单辆电动汽车沪牌费用( $t$ ) = 0 元/辆  $0 \leq t \leq 60$  (2015 - 12 ~ 2020 - 12)

根据 2018 版《上海市鼓励购买和使用新能源汽车实施办法》,符合相关条件的电动汽车免费

发放电动汽车专用沪牌,有效期至2020年12月31日。2021年及之后的电动汽车免费沪牌发放政策,后文将分不同场景进行讨论。

20) 单辆内燃机汽车沪牌费用( $t$ ) = 89 500元/辆  
 $0 \leq t \leq 180(2015 - 12 \sim 2030 - 12)$

2016年~2018年,沪牌平均中标价格在83 000元~94 000元之间,每年呈缓幅递增趋势,2019年全年沪牌警示价88 100元,据此设置。

21) 电动汽车沪牌中标率( $t$ ) = 100%  $0 \leq t \leq 60(2015 - 12 \sim 2020 - 12)$

根据2018年发布的《上海市鼓励购买和使用新能源汽车实施办法》,继续免费发放新能源汽车专用牌照额度,有效期至2020年12月31日。

22) 内燃机汽车沪牌中标率( $t$ ) = 5.81%  
 $0 \leq t \leq 180(2015 - 12 \sim 2030 - 12)$

根据2018年1月~2019年12月的沪牌拍卖中标率数据,计算得到中标率平均值为5.81%。

23) 自专用充电桩初始数量 = 19 700个<sup>[50]</sup>

24) 电动汽车与自专用充电桩配比 = 1.4辆/个<sup>[50]</sup>

25) 公用充电桩初始数量 = 1 200个<sup>[50]</sup>

26) 新能源汽车与公用充电桩配比 = 7辆/个<sup>[50]</sup>

27) 公共充电站初始数量 = 30座

2015年底上海电动汽车保有量约59 666辆,按照每2 000辆电动汽车配套建设一座公共充电站<sup>[50]</sup>,2015年上海应有公共充电站30座。

28) 电动汽车与公共充电站配比 = 2 000辆/座<sup>[50]</sup>

29) 地区面积 = 6 340.5 km<sup>2</sup>

上海全市面积6 340.5 km<sup>2</sup>。

30) 续航里程初始值 = 250 km

根据2016版《新能源汽车推广补贴方案及产品技术要求》,电动汽车补贴下限为工况法续航里程不低于100 km,如续航里程超过250 km最高补贴4.4万元。根据2018版《新能源汽车推广补贴方案及产品技术要求》,电动汽车补贴下限为工况法续航里程不低于150 km,如续航里程超过400 km最高补贴5万元。据此,本研究将电动汽车续航里程初始值设置为250 km。

31) 电动汽车专利申请累计量初始值 =

95 622件

截止2015年12月,电动汽车专利申请累计量为95 622件。

32) 电动汽车专利预计总量 = 277 960件  
 数据来自表2。

33) 电价( $t$ ) = 0.642元/千瓦时  $0 \leq t \leq 180(2015 - 12 \sim 2030 - 12)$

现行的上海市居民用电价格为阶梯电价,第1档为0.617元,第2档为0.667元,第3档为0.917元。第1档、第2档用电基数的政策设计覆盖范围分别为80%和95%,研究显示现行第1档用电基数偏低,而第2档用电基数覆盖率基本达到政策水平<sup>[53]</sup>。因此,电价折中设置为 $(0.617 + 0.667)/2 = 0.642$ 元/(kW/h)。

34) 汽油价格( $t$ ) = 7.5元/升  $0 \leq t \leq 180(2015 - 12 \sim 2030 - 12)$

常用的95号汽油价格约为7.5元/升。

35) 公用充电设施使用率 = 0.3

本研究将充电设施分为自专用充电桩、公用充电桩、公共充电站(集中布置公用充电桩的设施)。鉴于功能定位的区别,自专用充电桩满足电动汽车日常充电需求,公用充电桩和公共充电站满足电动汽车临时充电需求。

首先,来自专用充电桩,根据上海市现行的新能源汽车申请免费车牌政策,购买新能源汽车,必须配备自专用充电桩,用于满足日常充电需求。据此,本研究假设自专用充电桩的使用率为100%。

其次,来看公用充电桩和公共充电站,根据上海市城乡建设和交通发展研究院2017年发布的《上海电动汽车充电设施建设运营情况和实施效果评估》,公共桩供给远高于需求导致使用率不高,七成以上的公共桩长期闲置,实际有充电记录的桩数仅占33%<sup>[54]</sup>。据此,本研究假设基准场景中公用充电设施(包含公用充电桩和公共充电站)使用率为30%。

36) 激励政策敏感系数 = 0.8

激励政策敏感系数是指市场上消费者对政府推广电动汽车激励政策的反应。市场上价格敏感度高的消费者占比越高,对政府激励政策的反应就越强,对应的激励政策敏感系数也就越高。

上述“价格敏感度”的概念源自于经济学理

论,Goldsmith 等指出价格敏感度 (price sensitivity) 是消费者个体对产品或者服务的价格变化产生的感知和反应程度<sup>[55]</sup>. 相对于日用品而言,消费者对耐用品的价格敏感度较高<sup>[56]</sup>. 政府激励政策(补贴、减税、免费车牌)的变化,会直接影响电动汽车的购置成本,进而使得具有不同价格敏感度的消费者做出不同的反应.

根据消费者的价格敏感度,将市场上的消费者区分为价格敏感度高的消费者(对激励政策反应值为 1)和价格敏感度低的消费者(对激励政策反应值为 0). 鉴于电动汽车是一种耐用商品,政府激励政策引起的购置成本变化会对消费者产生较大的影响. 因此,本研究将价格敏感度高消费者占比初始值设置为 80%,将价格敏感度低消费者占比初始值设置为 20%. 这一假设虽在一定程度上体现了消费者个性差异对于政策激励的反应存在着较大的差异,但还是比较粗略的,所以在论文的最后一节中,也对此不足做了进一步的说明.

在设置完两类消费者的比重后,本研究将两类消费者对政府激励政策的反应系数进行加权计算,所得的加权值,将其定义为“激励政策敏感系数”,用于代表市场上所有消费者对政府激励政

策的综合反应程度,如式(3)所示.

$$\text{激励政策敏感系数} = \text{价格敏感度高消费者占比} \times 1 + \text{价格敏感度低消费者占比} \times 0 \quad (3)$$

式(3)中,本研究设置价格敏感度高的消费者对激励政策反应值为 1,价格敏感度低的消费者对激励政策反应值为 0. 由于本研究设价格敏感度高的消费者占比初始值为 80%,此时对应的激励政策敏感系数值为 0.8.

### 2.4 模型检验

本研究使用系统动力学建模软件 Vensim 作为模拟平台. 模拟时间步设为 180 个,单位为月,模拟 2016 年 1 月~2030 年 12 月上海电动汽车的扩散情景. 本研究用 2016 年 1 月~2018 年 12 月的上海市电动汽车累计产量(上海市统计局: <http://tjj.sh.gov.cn/>),以及 2016 年~2019 年新能源汽车的产销率均值 0.942(国家统计局: <http://www.stats.gov.cn/>),估算得到 2016 年 1 月~2019 年 12 月的上海市电动汽车累计销量数据. 将该数据与模型模拟结果进行对比,作为对模型的检验之一. 对比结果如图 5 所示,从图中可以看到,模拟得到的累计销量较好地拟合了实际累计销量的变化趋势.

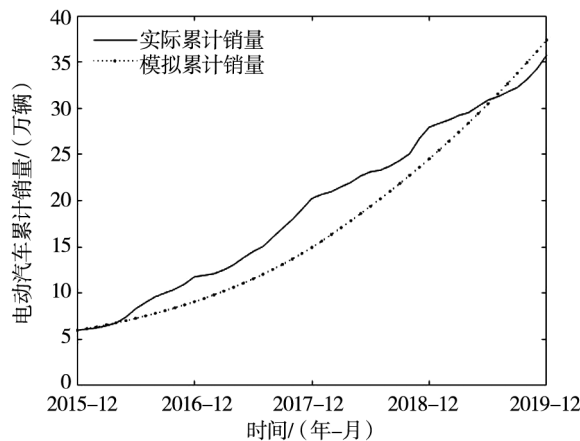


图 5 上海市电动汽车累计销量(2015 年 12 月~2019 年 12 月)

Fig. 5 Cumulative sales of electric vehicles in Shanghai (December 2015 ~ December 2019)

注: 数据来源,上海市统计局(<http://tjj.sh.gov.cn/>)

为了进一步检验模型的有效性,将 2016 年 12 月、2018 年 9 月、2018 年 12 月三个时点上模拟出的电动汽车保有量数据,与上海市经济和信息化委员会公布的数据进行对比,如表 3 所示. 结果显示,模拟结果与实际数据较为一致,特别是

2018 年 9 月和 2018 年 12 月两个时间点,模拟结果与实际数据很接近.

在验证模型的基础上,本研究以 2018 年 12 月为初始时点,模拟 2019 年~2030 年激励政策退坡下上海市私家电动汽车的扩散情况.

表3 上海电动汽车实际保有量与模拟结果的对比

Table 3 Comparison of the actual number of electric vehicles in Shanghai and the simulation results

时间	电动汽车保有量	私家电动汽车保有量	电动汽车模拟保有量 (技术学习率10%)	私家电动汽车模拟保有量 (技术学习率10%)
2016年12月	102 726 辆	66 771 辆	89 868 辆	58 414 辆
2018年9月	201 500 辆	130 975 辆	209 357 辆	136 082 辆
2018年12月	239 784 辆	155 859 辆	233 988 辆	152 092 辆

注:本表中的私家电动汽车保有量,按电动汽车保有量的65%计算。数据来源,上海市经济和信息化委员会(<http://www.sheitc.sh.gov.cn/>)

### 3 激励政策退坡下上海私家电动汽车扩散模拟

#### 3.1 购置补贴退坡下上海私家电动汽车扩散模拟

2016年以来,为使新能源汽车生产企业摆脱“补贴依赖症”,推动新能源汽车技术健康发展,财政部等四部委建立了新能源汽车补贴政策动态调整机制,主要着眼于两方面:一是加大补贴退坡力度,通过分阶段释放压力,以实现2020年以后补贴退出的目标;二是提高补贴的技术门槛,重点支持能耗水平低、技术水平高的优质产品。基于

表4 原补贴方案与新政补贴方案

Table 4 Original subsidy program and new policy's subsidy program

方案	2019年1月~2019年6月		2019年7月~2019年12月		2020年		2021年~2030年	
	国家补贴/ 元	上海补贴/ 元	国家补贴/ 元	上海补贴/ 元	国家补贴/ 元	上海补贴/ 元	国家补贴/ 元	上海补贴/ 元
原补贴方案	25 500	10 200	25 500	10 200	25 500	10 200	0	0
新政补贴方案	25 500	10 200	17 000	0	8 500	0	0	0

此外,由于现行新能源汽车免购置税政策将于2020年底到期。参考政府补贴退坡的原则,模型假设自2021年起将对电动汽车开始征收购置税,购置税率参照内燃机汽车的现行标准,即购置税率为10%。

技术学习效应能降低电动汽车的成本,在电动汽车扩散中发挥重要作用。本研究将基准技术学习率设为10%。但技术学习率有很大的不确定性<sup>[57]</sup>,另外也存在溢出效应<sup>[58]</sup>,即一个厂商可以从其他厂商(包括上海以外的厂商)取得技术积累受益。因此本研究也模拟了技术学习率较低(5%)和技术学习率较高(15%)两种场景下上海私家电动汽车的扩散情况,并与技术学习率为

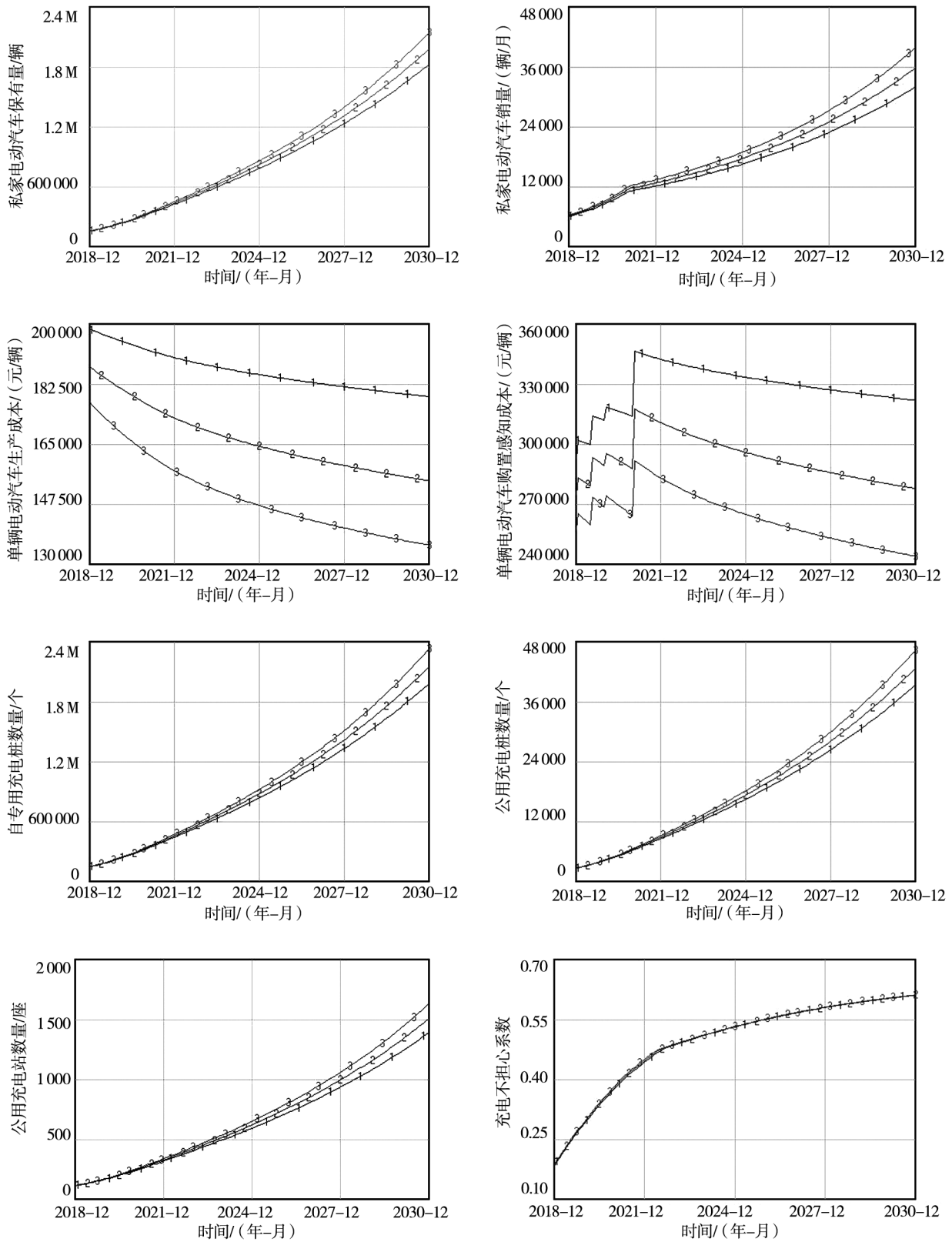
此,2019年3月,我国调整新能源汽车补贴政策,财政部、工业和信息化部、科技部、发展改革委联合发布《关于进一步完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》。通知规定2019年新能源汽车补贴标准在2018年的基础上退坡超过50%,并取消“地补”,改为补贴充电基础设施。2019年3月26日~2019年6月25日为过渡期,6月26日新的补贴政策开始实施。根据此次补贴新政,2019年国家补贴几乎减半,“地补”全面取消,至2020年底,国家补贴退坡完毕。据此,模型中关于政府购置补贴的设置,2019年1月~2019年6月按原补贴方案设置,2019年7月~2030年12月,按新政补贴方案设置,如表4所示。

10%的基准场景进行对比。

图6给出了这三种场景下模型的模拟结果。

1)在三种场景下,私家电动汽车保有量均随时间推移不断增加,但增幅相差较大。截止2030年12月,在技术学习率较低(5%)时,私家电动汽车保有量为182.5万辆;在技术学习率10%时,保有量为197.9万辆;在技术学习率较高(15%)时,保有量则将达到214.3万辆。

2)在三种场景下,私家电动汽车销量均随时间推移呈现增长态势,其前期增长动力主要源于政府的激励政策,后续增长更依赖于电动汽车技术的不断成熟、充电设施的完善,以及技术学习效应。在不同技术学习率下,销量增幅差距较大。截



技术学习率 5% 1-1-1 技术学习率 10% 2-2-2 技术学习率 15% 3-3-3

图6 不同技术学习率下模型的模拟结果

Fig. 6 Model simulation results at different learning rates

止2030年12月,技术学习率较低(5%)时,私家电动汽车销量为32 010辆/月;技术学习率为10%时,销量为35 833辆/月;技术学习率较高(15%)时,销量则将达到39 904辆/月。

3)在三种场景下,电动汽车的成本均呈现下降趋势,但降幅相差较大。截止2030年12月,技术学习率较低(5%)时,电动汽车生产成本为178 813元/辆,相比2018年12月降幅为9.93%;技术学习率为10%时,生产成本为154 289元/辆,降幅为17.74%;技术学习率较高(15%)时,生产成本为135 552元/辆,降幅达到了23.46%。2021年起,随着购置补贴取消和免购置税政策到期,截止2030年12月,技术学习率较高(15%)时,电动汽车购置感知成本为243 994元/辆,相比2018年12月下降5.10%。在另两种场景下,则均出现了电动汽车购置感知成本上升的情况。技术学习率为10%时,购置感知成本为277 721元/辆,相比2018年12月小幅上升1.16%;技术学习率较低(5%)时,购置感知成本为321 863元/辆,相比2018年12月增长9.92%。

4)在三种场景下,随着市场上电动汽车销量的增加,参照专项规划制定的配比原则,自专用充电桩、公用充电桩的建设数量均相应增长,截止2030年12月,技术学习率较高(15%)时,自专用充电桩数将达到233.2万个,技术学习率为10%和5%时,自专用充电桩数分别为215.2万个和198.2万个。与之相似,当技术学习率为15%、10%和5%时,公用充电桩数分别为463 591个、

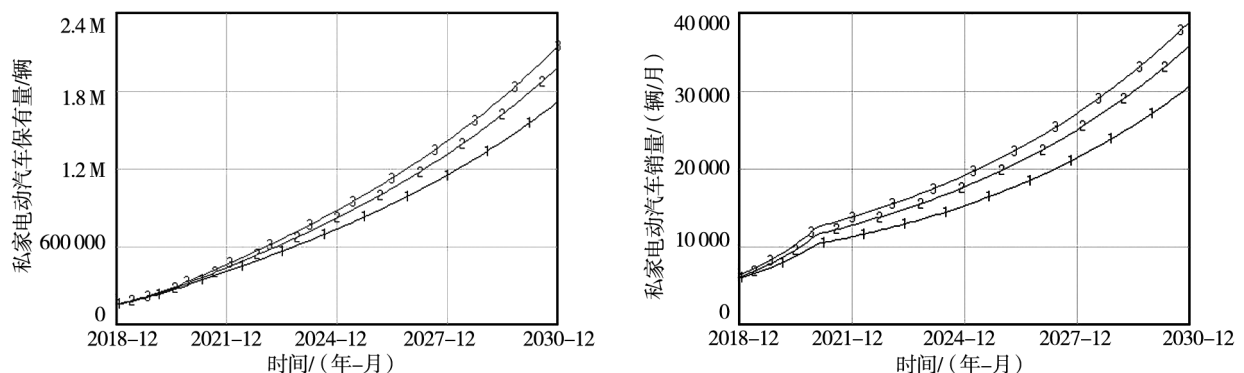
427 560个和393 634个。上述充电设施的完善有助于推动电动汽车的扩散。鉴于政府规划目标和自身功能定位的区别(自专用充电桩满足日常充电需求、公用充电桩满足临时充电需求),自专用充电桩数量的增长远大于公用充电桩。

5)在三种场景下,随着市场上电动汽车保有量的增加,参照专项规划制定的配比原则,公共充电站数量也相应增长。截止2030年12月,技术学习率较高(15%)时,公共充电站数将达到1 629个,技术学习率为10%和5%时,公共充电站数分别为1 505个和1 388个。公共充电站的建设能为电动汽车提供更好的集中充电服务。

6)在三种场景下,充电不担心系数较为一致,均从0.18左右逐步增长为超过0.6。充电不担心系数越大,表明驾驶者越不担心电动汽车的充电问题。到2030年,充电不担心系数超过0.6,表明驾驶者不再过分担心电动汽车的充电问题,这显然有利于电动汽车的扩散。

本研究对公用充电设施使用率和激励政策敏感系数也分别做了灵敏度分析。

公用充电设施使用率反映了有效公用充电设施的数量。本研究依据上海市城乡建设和交通发展研究院的调研报告<sup>[54]</sup>,将基准公用充电设施使用率设为30%。同时,也模拟了公用充电设施使用率10%和公用充电设施使用率50%两种场景下的上海私家电动汽车扩散情况,并与公用充电设施使用率30%的基准场景进行对比。图7给出了这三种场景下模型的模拟结果。



公用充电设施使用率10% 1-1-1 公用充电设施使用率30% 2-2-2 公用充电设施使用率50% 3-3-3

图7 不同公用充电设施使用率下模型的模拟结果

Fig. 7 Model simulation results at different usage rates of public charging facilities

1)在三种场景下,私家电动汽车保有量均随 时间推移不断增加。随着公用充电设施使用率提

升,私家电动汽车保有量随之增长,但增幅放缓.截止2030年12月,公用充电设施使用率较低(10%)时,私家电动汽车保有量为171.4万辆;公用充电设施使用率为30%时,保有量为197.9万辆;公用充电设施使用率较高(50%)时,保有量达到214万辆.

2)在三种场景下,私家电动汽车销量均随时间推移呈现增长态势.随着公用充电设施使用率提升,私家电动汽车销量随之增长,但增幅放缓.截止2030年12月,公用充电设施使用率较低(10%)时,私家电动汽车销量为30 588辆/月;公用充电设施使用率为30%时,销量为35 833辆/月;公用充电设施使用率较高(50%)时,销量达到38 900辆/月.

激励政策敏感系数反映了消费者对于政府激励政策的敏感程度.政府的激励政策能降低电动汽车的购置成本,在电动汽车扩散初期发挥着重要作用.但由于个性差异,消费者对激励政策的反应并不相同.依据价格敏感度对消费者进行分类,将价格敏感度高的消费者(对激励政策反应值为1)占比设置为80%,将价格敏感度低的消费者(对激励政策反应值为0)占比设置为20%,以此设置基准激励政策敏感系数值为0.8.本研究也模拟了激励政策敏感系数取值为0.5和1两种场景下的上海私家电动汽车扩散,并与激励政策敏

感系数取值为0.8的基准场景进行对比.图8给出了这三种场景下的模拟结果.

1)在三种场景下,私家电动汽车保有量均随时间推移不断增加,但增幅相差较小.截止2030年12月,激励政策敏感系数取值较低(值为0.5)时,私家电动汽车保有量为189.7万辆;激励政策敏感系数值为0.8时,保有量为197.9万辆;激励政策敏感系数取值较高(值为1)时,保有量则为203.9万辆.由此可知,在维持免费车牌、补贴逐步退坡的情境下,激励政策敏感系数值越高,私家电动汽车保有量的增量越大.但鉴于购置补贴等激励政策退坡,激励政策敏感系数的影响逐步减弱,三种场景增幅差距不大.

2)在三种场景下,私家电动汽车销量均随时间推移呈现增长态势.在不同的激励政策敏感系数值下,销量增幅差距较小.截止2030年12月,激励政策敏感系数取值较低(值为0.5)时,私家电动汽车销量为34 508辆/月;激励政策敏感系数值为0.8时,销量为35 833辆/月;激励政策敏感系数取值较高(值为1)时,销量则将达到36 810辆/月.由此可知,在维持免费车牌、补贴逐步退坡的情境下,激励政策敏感系数值越高,私家电动汽车销量的增量越大.但鉴于购置补贴等激励政策退坡,激励政策敏感系数的影响逐步减弱,三种场景增幅差距不大.

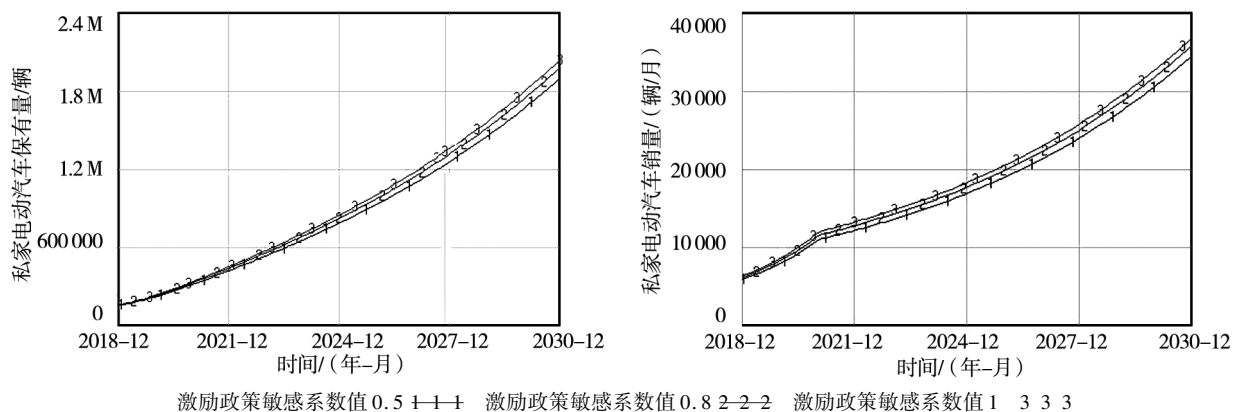


图8 不同激励政策敏感系数值下模型的模拟结果

Fig. 8 Model simulation results at different values of incentive policy sensitivity coefficient

目前上海私家车每年增量主要源于两方面:一是当年获得沪牌的私家车,二是当年销售的私家电动汽车.根据上海统计年鉴,2015年~2017年上海个人民用轿车拥有量年均增长约17万辆.2016年~

2018年通过拍卖形式投放的沪牌额度约每年13万张.2016年~2018年电动汽车年均增长6万辆,按私家电动汽车占比65%计算,私家电动汽车年均增长约4万辆.每年通过拍卖获得沪牌的私家车数



量加上当年新增私家电动汽车数量约17万辆,与上海市统计局公布的数据吻合。

据此,在现有电动汽车免费牌照政策不变的前提下,参照2016年~2018年拍卖沪牌额度投放情况,假设2019年~2030年上海私家车每年增量为13万辆拍得沪牌的私家车加上当年私家电动汽车增量(模型模拟获得),可估算出2019年~2030年上海私家车的保有量。通过将模型模拟获得的上海私家电动汽车保有量与估算获得的上海私家车

保有量进行对比,可得到上海私家车中电动汽车的比例。图9描绘了2016年~2030年上海私家车中电动汽车比例的变化情况。从图中可以看到,在免费沪牌政策不变的情况下,上海私家车中电动汽车的比例逐年提升,从最初不足5%,逐渐提升至35%左右。在2016年~2020年之间,得益于政府补贴,私家电动汽车占比上升较快;2020年以后随着购置补贴取消和免购置税政策到期,私家电动汽车占比增速有所放缓。

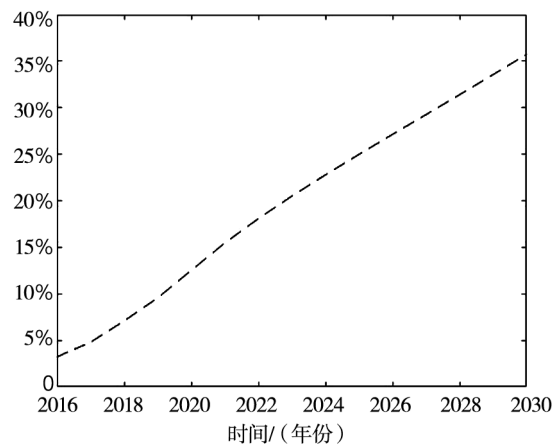


图9 2016年~2030年上海私家车中电动汽车的比例(有免费沪牌情况下)

Fig. 9 Percentage of electric vehicles among private vehicles in Shanghai in 2016~2030 (with free license plates)

### 3.2 免费沪牌退坡下上海私家电动汽车扩散模拟

免费沪牌政策对电动汽车在上海的扩散起了非常重要的作用。为了控制上海市私家汽车总保有量不突破城市交通能够承载的极限,目前实施的对电动汽车无限额的免费沪牌这一政策必定会退坡。免费沪牌退坡对私家电动汽车扩散会产生何种影响?采用什么样的退坡机制对私家电动汽车扩散的影响较小?在考虑购置补贴退坡的基础上,本研究进一步模拟不同免费沪牌退出机制下上海私家电动汽车的扩散。这些模拟以上一节中的技术学习率10%、公用充电设施使用率30%、激励政策敏感系数取值0.8时的场景为基准场景。

根据2018版《上海市鼓励购买和使用新能源汽车实施办法》,新能源汽车免费牌照政策将执行至2020年12月31日,因此免费沪牌退出的场景从2021年开始。此外,根据2017版《关于免征新能源汽车车辆购置税的公告》,从2018年1月1日~2020年12月31日,对购置的新能源汽车免

征车辆购置税。本研究在分析不同免费沪牌退出机制对上海私家电动汽车扩散的影响时,假设自2021年起,电动汽车按10%的税率缴纳车辆购置税。沪牌中标率根据2018年1月~2019年12月的均值,设为5.81%。在此基础上,模拟以下三种免费沪牌退出机制下上海私家电动汽车的扩散。

1) 快速退出:自2021年起,全面取消电动汽车免费沪牌。

2) 中速退出:2021年免费沪牌额度按当年电动汽车保有量增量的4/5发放,2022年免费沪牌额度按上一年未申请到沪牌的电动汽车数量加当年电动汽车保有量增量总和的3/5发放,以后每年递减1/5,2025年起全面取消电动汽车免费沪牌。在这一机制下,免费沪牌完全退出为期5年。

3) 慢速退出:2021年免费沪牌额度按当年电动汽车保有量增量的9/10发放,2022年免费沪牌额度按上一年未申请到沪牌的电动汽车数量加当年电动汽车保有量增量总和的8/10发放,以后每年递减1/10,2030年起全面取消电动汽车免费沪牌。在这一机制下,免费沪牌完全退出为期10年。

图 10 给出了三种退坡机制下上海私家电动汽车扩散的模拟结果,并与维持现有免费沪牌政策的模拟结果进行对比.在维持现有免费沪牌政策时,2030 年 12 月私家电动汽车保有量将达到 197.9 万辆,销量将达到 35 833 辆/月,保有量相比 2020 年 12 月增幅为 513.15%,销量相比 2020 年 12 月增幅为 217.78%.在快速退出机制下,私家电动汽车保有量和销量均出现较大幅度下降,截止 2030 年 12 月,私家电动汽车保有量为 141.7 万辆,销量为 19 752 辆/月,保有量相比 2020 年 12 月增幅为 339.03%,销量相比 2020 年 12 月增幅为 75.17%.在中速退出机制下,截止 2030 年 12 月,私家电动汽车保有量为 165.9 万辆,月

销量为 24 013 辆,保有量相比 2020 年 12 月增幅为 414.01%,销量相比 2020 年 12 月增幅为 112.96%.在慢速退出机制下,私家电动汽车保有量和销量下降幅度最小,截止 2030 年 12 月,私家电动汽车保有量为 189.4 万辆,月销量为 30 952 辆,保有量相比 2020 年 12 月增幅为 486.82%,销量相比 2020 年 12 月增幅为 174.49%.慢速退出机制下的私家电动汽车保有量相比维持免费沪牌的场景,并未出现大幅下滑.截止 2030 年 12 月,两者保有量相差 8.5 万辆,月销量相差 4 881 辆.相比之下,在快速退出机制下,私家电动汽车保有量减少了 56.2 万辆,月销量相差 16 081 辆.

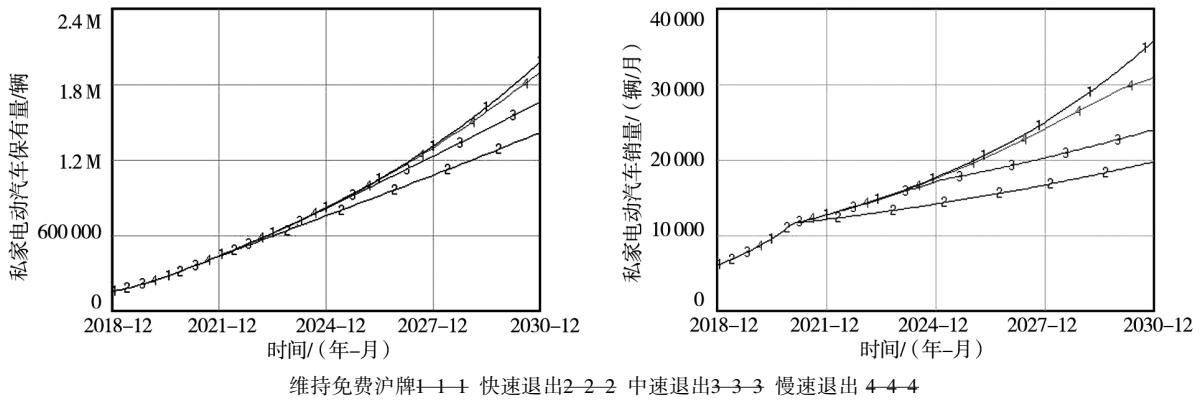


图 10 三种免费沪牌退出机制下的私家电动汽车保有量与销量(激励政策敏感系数取值 0.8)

Fig. 10 The number and sales of private electric vehicles under three fade-out mechanisms of free license plates (The value of incentive policy sensitivity coefficient is 0.8)

本研究也模拟了当激励政策敏感系数取值分别为 0.5 和 1 时,三种免费沪牌退出机制下的私

家电动汽车扩散场景,模拟结果如图 11 和图 12 所示.

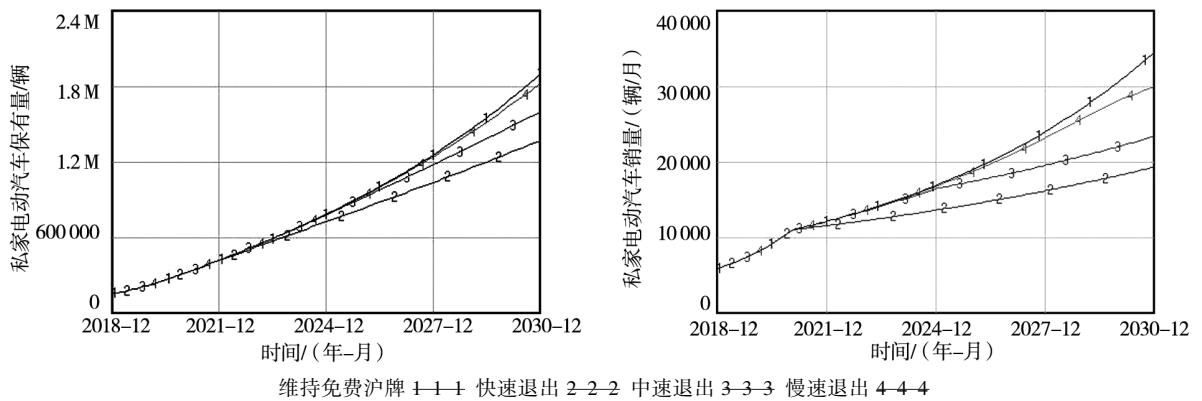


图 11 三种免费沪牌退出机制下的私家电动汽车保有量与销量(激励政策敏感系数取值 0.5)

Fig. 11 The number and sales of private electric vehicles under three fade-out mechanisms of free license plates (The value of incentive policy sensitivity coefficient is 0.5)

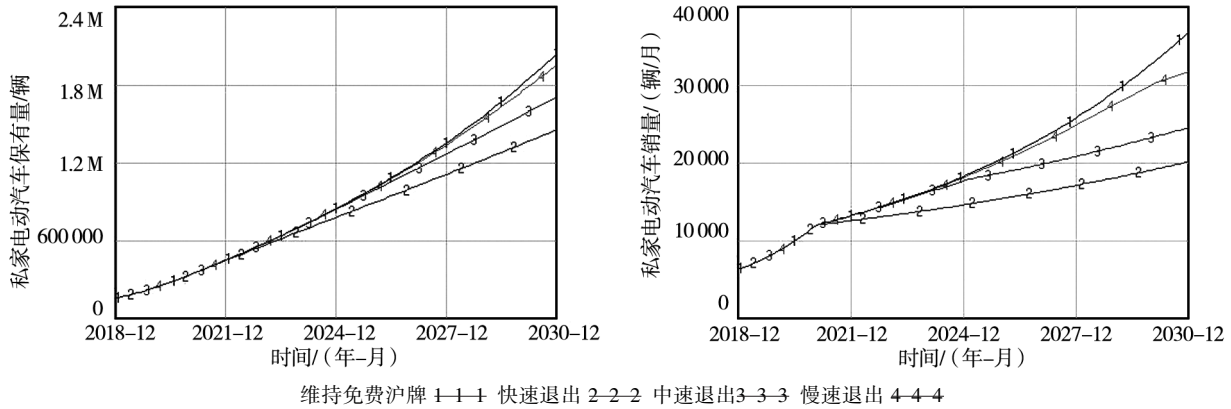


图 12 三种免费沪牌退出机制下的私家电动汽车保有量与销量(激励政策敏感系数取值 1)

Fig. 12 The number and sales of private electric vehicles under three fade-out mechanisms of free license plates (The value of incentive policy sensitivity coefficient is 1)

通过对比图 10 ~ 图 12, 可以看到当激励政策敏感系数取值不同时, 私家电动汽车的扩散趋势基本一致, 但在私家电动汽车保有量和销量的增长幅度上有差异. 表 5 给出了激励政策敏感系数取值与

免费沪牌退坡机制的各种组合下上海市私家电动汽车保有量增长情况, 从表中可以看到, 免费沪牌退坡速度越快, 激励政策敏感系数取值越高, 其对应的私家电动汽车保有量增幅下降就越明显.

表 5 激励政策敏感系数不同取值下的私家电动汽车保有量增长对比

Table 5 Comparison of growth in the number of private electric vehicles at different values of incentive policy sensitivity coefficient

激励政策敏感系数值		系数值 0.5	系数值 0.8	系数值 1
维持免费沪牌	2020 年 12 月	311 171 辆	322 759 辆	331 142 辆
	2030 年 12 月	1 897 000 辆	1 979 000 辆	2 039 000 辆
	增幅	509.63%	513.15%	515.75%
慢速退出	2020 年 12 月	311 171 辆	322 759 辆	331 142 辆
	2030 年 12 月	1 818 000 辆	1 894 000 辆	1 950 000 辆
	增幅	484.24%	486.82%	488.87%
中速退出	2020 年 12 月	311 171 辆	322 759 辆	331 142 辆
	2030 年 12 月	1 597 000 辆	1 659 000 辆	1 705 000 辆
	增幅	413.22%	414.01%	414.88%
快速退出	2020 年 12 月	311 171 辆	322 759 辆	331 142 辆
	2030 年 12 月	1 369 000 辆	1 417 000 辆	1 453 000 辆
	增幅	339.95%	339.03%	338.78%

### 4 结束语

本研究分析了对电动汽车扩散有较大影响的政府激励政策、技术成熟度、充电桩与电动汽车配比、技术学习效应等因素形成的因果反馈环路, 以上海为例构建了私家电动汽车扩散的系统动力学模型, 并用上海私家电动汽车扩散的历史数据对模型进行了检验, 模型的模拟结果与历史数据相吻合, 模型的有效性得到了检验.

在模型得到检验的基础上, 本研究以 2019 年

3 月的补贴新政为背景, 以 2018 年 12 月为基准, 模拟 2019 年 ~ 2030 年上海私家电动汽车的扩散. 模拟结果显示: 1) 如果上海保持免费沪牌政策不变, 2030 年 35% 的私家车有望为电动汽车; 2) 电动汽车的技术学习效应对电动汽车的扩散非常重要. 本研究进一步模拟了不同免费沪牌退出机制对上海私家电动汽车扩散的影响. 发现如从 2021 年起全面取消免费沪牌, 将对上海私家电动汽车扩散形成较大的冲击. 如采用免费沪牌分阶段退出机制, 对私家电动汽车扩散的影响则将大为缓解. 根据上述研究, 提出如下政策

建议.

1) 对免费牌照实施分阶段退出是一个较为稳妥的过渡举措. 在具体实施中, 首先可以对当年私家电动汽车保有量进行预估, 然后设置一定的比例, 再按比例限额发放免费沪牌. 这一比例将逐年降低, 直至最终全面取消免费沪牌. 限额的免费沪牌可采取摇号或参照北京的“申请-排队”等方式.

2) 在激励政策退坡时, 应采取一些组合政策. 对于价格敏感度高的消费者而言, 补贴退坡减弱了正向激励, 加征车辆购置税和取消免费车牌则增强了负向激励. 因此, 在激励政策退坡(如免征购置税到期和取消免费车牌)时, 免费车牌采用慢速退出机制比采用快速退出机制更为稳妥, 同时可以考虑延长免征电动汽车购置税的时限、实施电动汽车充电优惠、停车优惠等配套措施. 通过实施组合政策, 提供给价格敏感度高的消费者更多降低电动汽车使用成本的途径, 可在一定程度上减少激励政策退坡对私家电动汽车扩散的影响.

3) 产、学、研、政应特别关注电动汽车的技术学习效应. 技术学习效应的估算很大程度上取决于电动汽车, 尤其是电动汽车“三电系统”的历史数据的积累. 技术学习效应的估算不能仅依赖于单个企业的投入, 而要依赖整个行业的投入和成本变化的历史数据. 政府应组织好相关的大数据

建设工作, 以便能较准确地估算电动汽车成本下降的空间, 为整个汽车产业的发展方向提供指导.

4) 电动汽车公用充电设施的使用率有待提升. 充电设施建设单位应根据公用充电桩的使用情况, 充分调研电动汽车驾驶者的现实需求, 调整和完善公用充电设施的布局 and 配置, 以提升公用充电设施的使用率. 公用充电设施使用率的提升, 将增加有效公用充电桩的数量, 为电动汽车充电提供更多的便利, 这将有助于促进市场上电动汽车的进一步扩散.

当然, 本研究也存在一定的局限性, 不同的消费者特性不同, 对激励政策及其退坡的反应各不相同. 根据消费者的价格敏感度, 将市场上的消费者区分为价格敏感度高的消费者(对激励政策反应值为1)和价格敏感度低的消费者(对激励政策反应值为0). 这种假设虽在一定程度上体现了消费者个性差异对于政策激励的反应存在着较大的差异, 但还是比较粗略的. 消费者的其他一些特性, 如年龄、学历、收入等, 尚未纳入本研究的模型中用于区分消费者对于激励政策的反应, 这将在后续的研究中予以完善. 另外消费者之间还存在相互影响, 例如一个消费者对电动汽车的接受程度会受周围人的影响, 这些都没有能体现在系统动力学模型中. 在未来的研究中, 将进一步研究不同个体的异质性及其交互行为对电动汽车扩散的影响机理.

## 参 考 文 献:

- [1] 刘学元, 孙 敏, Chu W. 我国新能源汽车产业创新发展对策研究——基于中德日韩美五国的问卷调查[J]. 科技进步与对策, 2015, 32(21): 77-83.  
Liu Xueyuan, Sun Min, Chu W. Research on the innovation and development countermeasures for the new energy vehicle industry in China: Based on a questionnaire survey in China, Germany, Japan, South Korea, and the United States[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2015, 32(21): 77-83. (in Chinese)
- [2] Schuitema G, Anable J, Skippon S, et al. The role of instrumental, hedonic and symbolic Aattributes in the intention to adopt electric vehicles[J]. Transportation Research Part A-Policy and Practice, 2013, 48: 39-49.
- [3] 工业和信息化部. 《汽车产业中长期发展规划》解读[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057592/c5599879/content.html>, 2017-04-25.  
Ministry of Industry and Information Technology. Interpretation of “Mid and Long-term Development Plan for the Automobile Industry”[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057592/c5599879/content.html>, 2017-04-25. (in Chinese)
- [4] 财政部, 工业和信息化部, 科技部, 发展改革委. 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[R]. 北京: 财政部, 工业和信息化部, 科技部, 发展改革委, 2019.

- Ministry of Finance, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Science and Technology, National Development and Reform Commission. Notice on Further Improving the Financial Subsidy Policy for the Promotion and Application of New Energy Vehicles[R]. Beijing: Ministry of Finance, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Science and Technology, National Development and Reform Commission, 2019. (in Chinese)
- [5]任斌,邵鲁宁,尤建新. 基于创新扩散理论的中国电动汽车广义 Bass 模型[J]. 软科学, 2013, 27(4): 17-22.  
Ren Bin, Shao Luning, You Jianxin. Development of a generalized Bass model for Chinese electric vehicles based on innovation diffusion theory[J]. Soft Science, 2013, 27(4): 17-22. (in Chinese)
- [6]Kong D Y, Bi X H. Impact of social network and business model on innovation diffusion of electric vehicles in China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014; 7.
- [7]刘颖琦,王萌,王静宇. 中国新能源汽车市场预测研究[J]. 经济与管理研究, 2016, 37(4): 86-91.  
Liu Yingqi, Wang Meng, Wang Jingyu. The predictive research on China's new energy vehicles market[J]. Research on Economics and Management, 2016, 37(4): 86-91. (in Chinese)
- [8]Shepherd S, Bonsall P, Harrison G. Factors affecting future demand for electric vehicles; A model based study[J]. Transport Policy, 2012, 20: 62-74.
- [9]缪小明,刘啦. 基于系统动力学的电动汽车产业化政策研究[J]. 软科学, 2015, 29(8): 33-38.  
Miao Xiaoming, Liu La. Study on industrialization policy of the electric car based on System Dynamics[J]. Soft Science, 2015, 29(8): 33-38. (in Chinese)
- [10]Lee Y, Kim C, Shin J. A hybrid electric vehicle market penetration model to identify the best policy mix: A consumer ownership cycle approach[J]. Applied Energy, 2016, 184: 438-449.
- [11]Shafiei E, Davidsdottir B, Fazeli R, et al. Macroeconomic effects of fiscal incentives to promote electric vehicles in iceland: Implications for government and consumer costs[J]. Energy Policy, 2018, 114: 431-443.
- [12]Liu D, Xiao B. Exploring the development of electric vehicles under policy incentives: A scenario-based system dynamics model[J]. Energy Policy, 2018, 120: 8-23.
- [13]Feng B, Ye Q, Collins B J. Adynamic model of electric vehicle adoption: The role of social commerce in new transportation [J]. Information & Management, 2019, 56(2): 196-212.
- [14]Wang N, Tang L, Zhang W, et al. How to face the challenges caused by the abolishment of subsidies for electric vehicles in China? [J]. Energy, 2019, 166: 359-372.
- [15]Stephan C, Sullivan J. An agent based hydrogen vehicle/infrastructure model[A]. Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation[C]. Portland: IEEE, 2004: 1774-1779.
- [16]Arthur W B. Complexity and the economy[J]. Science, 1999, 284(5411): 107-109.
- [17]谭劲松,张红娟,林润辉. 产业创新网络动态演进机制模拟与实例分析[J]. 管理科学学报, 2019, 22(12): 1-14.  
Tan Jinsong, Zhang Hongjuan, Lin Runhui. Modeling and analyzing the evolution mechanism of industrial innovation network[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(12): 1-14. (in Chinese)
- [18]Zhang T, Gensler S, Garcia R. A study of the diffusion of alternative fuel vehicles: An agent-based modeling approach[J]. Journal of Product Innovation Management, 2011, 28(2): 152-168.
- [19]向诗剑,马铁驹. ABM 与 GIS 集成及在分析新能源汽车扩散中的应用[J]. 管理科学学报, 2014, 17(1): 1-10.  
Xiang Shijian, Ma Tiejue. Integration of ABM and GIS and its application in analysis of diffusion of alternative energy vehicles[J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(1): 1-10. (in Chinese)
- [20]Noori M, Tatari O. Development of an agent-based model for regional market penetration projections of electric vehicles in the United States[J]. Energy, 2016, 96: 215-230.
- [21]孙晓华,孙瑞,涂安娜. 网络效应、新兴产业演化与生态位培育——来自电动汽车行业的 ABM 仿真研究[J]. 管理科学学报, 2018, 21(11): 1-17.  
Sun Xiaohua, Sun Rui, Tu Anna. Network effects, emerging industries evolution and niche cultivation: An agent-based modeling simulation from electric vehicle industry[J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(11): 1-17. (in Chinese)

- [22] Park S Y, Kim J W, Lee D H. Development of a market penetration forecasting model for hydrogen fuel cell vehicles considering infrastructure and cost reduction effects[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3307 – 3315.
- [23] Shafiei E, Stefansson H, Asgeirsson E I, et al. Integrated agent-based and system dynamics modelling for simulation of sustainable mobility[J]. *Transport Reviews*, 2013, 33(1): 44 – 70.
- [24] 上海市经信委. 上海新能源汽车推广突破 10 万辆、产值突破百亿 跃居全球拥有量最大城市[EB/OL]. <http://www.sheitc.sh.gov.cn/zxxx/20170103/0020-672622.html>, 2017-01-03.  
Shanghai Municipal Commission of Economy and Informatization. The Number of New Energy Vehicles Promoted in Shanghai Exceeded 100,000, and the Output Value Exceeded 10 Billion, Making Shanghai Own the Largest Number of New Energy Vehicles in the World[EB/OL]. <http://www.sheitc.sh.gov.cn/zxxx/20170103/0020-672622.html>, 2017-01-03. (in Chinese)
- [25] 上海市人民政府办公厅. 关于转发市发展改革委等七部门制订的《上海市鼓励购买和使用新能源汽车实施办法》的通知[R]. 上海: 上海市人民政府办公厅, 2018.  
The General Office of Shanghai Municipal People's Government. Notice on Forwarding the "Implementation Measures of Shanghai Municipality on Encouraging the Purchase and Use of New Energy Vehicles" Formulated by Seven Departments, Including the Shanghai Municipal Development & Reform Commission[R]. Shanghai: The General Office of Shanghai Municipal People's Government, 2018. (in Chinese)
- [26] Abernathy W, Utterback J. Patterns of industrial innovation[J]. *Technology Review*, 1978, 80(7): 40 – 47.
- [27] Miguez J L, Porteiro J, Perez-Orozco R, et al. Evolution of Co<sub>2</sub> capture technology between 2007 and 2017 through the study of patent activity[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 1282 – 1296.
- [28] Li X, Xie Q, Jiang J, et al. Identifying and monitoring the development trends of emerging technologies using patent analysis and twitter data mining: The case of perovskite solar cell technology[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 146: 687 – 705.
- [29] Aaldering L J, Song C H. Tracing the technological development trajectory in post-lithium-ion battery technologies: A patent-based approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118343.
- [30] 徐 欣, 郑国坚, 张腾涛. 研发联盟与中国企业创新[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(11): 33 – 53 + 81.  
Xu Xin, Zheng Guojian, Zhang Tengtao. R & D alliances and Chinese corporate innovation[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(11): 33 – 53 + 81. (in Chinese)
- [31] Ernst H. The use of patent data for technological forecasting: The diffusion of cnc-technology in the machine tool industry [J]. *Small Business Economics*, 1997, 9(4): 361 – 381.
- [32] 钟 华, 邓 辉. 基于技术生命周期的专利组合判别研究[J]. *图书情报工作*, 2012, 56(18): 87 – 92.  
Zhong Hua, Deng Hui. Patent portfolio analysis based on technology life cycle[J]. *Library and Information Service*, 2012, 56(18): 87 – 92. (in Chinese)
- [33] 张 涛, 余仁桥. 产品生命周期中企业组织结构的选择——基于技术环境中吸收能力的匹配[J]. *科技进步与对策*, 2006, (1): 89 – 91.  
Zhang Tao, Yu Renqiao. The choosing of organization structure during product circle[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2006, (1): 89 – 91. (in Chinese)
- [34] 余爱华. Logistic 模型的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.  
Yu Aihua. A Study on Logistic Model[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2003. (in Chinese)
- [35] 赵莉晓. 基于专利分析的 RFID 技术预测和专利战略研究——从技术生命周期角度[J]. *科学学与科学技术管理*, 2012, 33(11): 24 – 30.  
Zhao Lixiao. Technology foresight of radio frequency identification and patent strategy based on patent analysis: Based on technology life cycle[J]. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2012, 33(11): 24 – 30. (in Chinese)
- [36] 栾春娟, 王续琨, 刘则渊. 基于《德温特》数据库的核心技术确认方法[J]. *科学学与科学技术管理*, 2008, (6): 32 – 34.  
Luan Chunjuan, Wang Xukun, Liu Zeyuan. Methods of affirming core technology via derwent innovations index[J]. *Science of Science and Management of S.&T.*, 2008, (6): 32 – 34. (in Chinese)

- [37]唐春. 基于国际专利制度的同族专利研究[J]. 情报杂志, 2012, 31(6): 19-23+29.  
Tang Chun. A study on the patent family based on the international patent system[J]. Journal of Intelligence, 2012, 31(6): 19-23+29. (in Chinese)
- [38]Seber G A F, Wild C J. Nonlinear Regression[M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003.
- [39]Levy P Z, Drossinos Y, Thiel C. The effect of fiscal incentives on market penetration of electric vehicles: A pairwise comparison of total cost of ownership[J]. Energy Policy, 2017, 105: 524-533.
- [40]Gnann T, Stephens T S, Lin Z, et al. What drives the market for plug-in electric vehicles? A review of international pev market diffusion models[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 158-164.
- [41]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 evolution of emerging industry[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(8): 67-83. (in Chinese)
- [42]Wee S, Coffman M, La Croix S. Do electric vehicle incentives matter? Evidence from the 50 U. S. States[J]. Research Policy, 2018, 47(9): 1601-1610.
- [43]赵骅, 郑吉川. 不同新能源汽车补贴政策对市场稳定性的影响[J]. 中国管理科学, 2019, 27(9): 47-55.  
Zhao Hua, Zheng Jichuan. The impact of different new energy vehicle subsidy policies on market stability[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(9): 47-55. (in Chinese)
- [44]Arrow K J. The economic implications of learning by doing[J]. The Review of Economic Studies, 1962, 29(3): 155-173.
- [45]Neubauer J, Wood E. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility[J]. Journal of Power Sources, 2014, 257: 12-20.
- [46]Broadbent G H, Drozdowski D, Metternicht G. Electric vehicle adoption: An analysis of best practice and pitfalls for policy making from experiences of Europe and the US[J]. Geography Compass, 2018, 12(2): 15.
- [47]国务院办公厅. 关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见[R]. 北京: 国务院办公厅, 2015.  
General Office of the State Council of the People's Republic of China. Guiding Opinions on Accelerating the Construction of Electric Vehicle Charging Infrastructures[R]. Beijing: General Office of the State Council of the People's Republic of China, 2015. (in Chinese)
- [48]国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部, 住房和城乡建设部. 关于印发《电动汽车充电基础设施发展指南(2015-2020年)》的通知[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部, 住房和城乡建设部, 2015.  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Housing and Urban-Rural Department. Notice on Issuing the "Guidelines for the Development of Electric Vehicle Charging Infrastructures (2015-2020)" [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Housing and Urban-Rural Department, 2015. (in Chinese)
- [49]Krupa J S, Rizzo D M, Eppstein M J, et al. Analysis of a consumer survey on plug-in hybrid electric vehicles[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2014, 64: 14-31.
- [50]上海市交通委. 上海市电动汽车充电基础设施专项规划(2016-2020年)[R]. 上海: 上海市交通委, 2016.  
Shanghai Municipal Transportation Commission. Special Planning for Electric Vehicle Charging Infrastructures in Shanghai (2016-2020) [R]. Shanghai: Shanghai Municipal Transportation Commission, 2016. (in Chinese)
- [51]上海市经信委. 2018年上海新能源汽车注册登记突破7万辆 累计保有量达24万辆[EB/OL]. <http://www.sheitic.sh.gov.cn/zxxx/20190131/0020-680498.html>, 2019-01-31.  
Shanghai Municipal Commission of Economy and Informatization. The Registration Number of New Energy Vehicles in Shanghai Exceeded 70,000 in 2018, and the Cumulative Number Reached 240,000 [EB/OL]. <http://www.sheitic.sh.gov.cn/zxxx/20190131/0020-680498.html>, 2019-01-31. (in Chinese)
- [52]上海市人民政府办公厅. 关于印发《上海市清洁空气行动计划(2018-2022年)》的通知[R]. 上海: 上海市人民政府办公厅, 2018.  
The General Office of Shanghai Municipal People's Government. Notice on Issuing the "Shanghai Clean Air Action Plan

- (2018–2022)”[R]. Shanghai: The General Office of Shanghai Municipal People’s Government, 2018. (in Chinese)
- [53] 孙 岩. 上海市阶梯电价政策合理性评估[J]. 中国物价, 2016, (1): 45–47.  
Sun Yan. Evaluation of the rationality of tiered electricity pricing policy in Shanghai[J]. China Price, 2016, (1): 45–47. (in Chinese)
- [54] 上海市城乡建设和交通发展研究院. 上海电动汽车充电设施建设运营情况和实施效果评估[R]. 上海: 上海市城乡建设和交通发展研究院, 2017.  
Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Development Research Institute. Construction and Operation Status of Electric Vehicle Charging facilities and Its Evaluation of Implementation Effects in Shanghai[R]. Shanghai: Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Development Research Institute, 2017. (in Chinese)
- [55] Goldsmith R E, Kim D, Flynn L R, et al. Price sensitivity and innovativeness for fashion among Korean consumers[J]. The Journal of Social Psychology, 2005, 145(5): 501–508.
- [56] 曹 丽, 李纯青, 高 杨, 等. 积分联盟感知价值及其影响因素对客户忠诚的影响: 价格敏感度的调节作用[J]. 管理评论, 2016, 28(2): 103–115.  
Cao Li, Li Chunqing, Gao Yang, et al. The impact of the perceived value of the loyalty programs partnerships and its influencing factors on customer loyalty: The moderating effect of price sensitivity[J]. Management Review, 2016, 28(2): 103–115. (in Chinese)
- [57] McDonald A, Schratzenholzer L. Learning rates for energy technologies[J]. Energy Policy, 2001, 29(4): 255–261.
- [58] Ma T, Grubler A, Nakamori Y. Modeling technology adoptions for sustainable development under increasing returns, uncertainty, and heterogeneous agents[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 195(1): 296–306.

## Diffusion of private electric vehicles with the fade-out of incentive policies: The case of Shanghai

*SHEN Feng, MA Tie-ju<sup>\*</sup>, ZHAO Xing-rong, XU Nuo-yu, FENG Jing-bing, MA Ye*

School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

**Abstract:** Various government incentive policies (such as subsidies, free license plates.) play an essential role in the diffusion of private EVs (electric vehicles). How will the fade-out of incentive policies influence the diffusion of EVs? With the technology progress of EVs, what would be the rational fade-out mechanisms? This study aims to explore these questions with the case of Shanghai. The dynamics of EVs’ technology maturity is firstly analyzed with the concept of technology life cycle and patent data. Then the causal links and feedback loops among important factors for the diffusion of private EVs are identified, and a SD (system dynamics) model is built for the diffusion of private EVs. Comparing with existing SD models on the diffusion of EVs, the main innovation of our model is that it simultaneously includes the dynamics in EVs’ technology maturity and the fade-out of incentive policies. As a case study, this research focuses on the diffusion of private EVs in Shanghai. Shanghai is one of the cities with the largest number of EVs in the world, due to various incentive policies, especially the policy of free license plates for EVs. The SD model developed in this study is verified with the historical data on diffusion of EVs in Shanghai, and then the SD model is used to simulate the diffusion of private EVs in Shanghai with different mechanisms of fade-out of incentive policies. This study provides some policy implications for designing appropriate fade-out of incentive policies, and also provides visions on future EV market which might be helpful for EV producers.

**Key words:** diffusion of electric vehicles; fade-out of incentive policies; system dynamics



**附录 A:**

调查问卷：“消费者电动汽车购买影响因素问卷调查”

调查时间：2018年6月~2019年1月

调查地点：上海市15个行政区

调查对象：上海市汽车消费者及潜在消费者

调查方式：通过实地走访上海市各行政区的汽车4S店及咖啡店并分发问卷，被调查者现场填写纸质问卷，填写完成后当场收回问卷

问卷数量：实发1800份问卷，收回1793份问卷，有效问卷1705份

问卷为5级李克特量表，消费者选1表示做购买决策时很少考虑该因素，选5表示做购买决策时非常关注该因素。下表为所有消费者选择某因素的平均值，并按照由高到低的顺序进行排序。从表中可以看出，消费者购买电动汽车时最先考虑的是免费牌照，其次为电池容量和百公里耗电情况，高架不限行排在第4位。

**表 A.1 调查问卷中消费者对影响因素的态度排名**

Table A.1 Ranking of consumers' attitudes to influencing factors in survey

因素	均值	排序
免费牌照	4.374 2	1
电池续航	4.168 3	2
百公里耗电	3.919 1	3
高架不限行	3.733 1	4
通勤	3.709 7	5
充电时间	3.628 2	6
公共充电桩	3.602 9	7
单位充电桩	3.576 5	8
价格	3.531 4	9
小区充电桩	3.520 3	10
收入	3.311 4	11
有车朋友数	3.262 8	12
社会保有量	3.214 7	13
节能	3.187 1	14
动力性	3.176 5	15
维护费	3.153 1	16
补贴	3.131 4	17
免购置税	2.783 6	18
折旧费	2.554 8	19
时尚	2.227 0	20

注：免费牌照、高架不限行、补贴、免购置税为政府政策因素；价格、电池续航、百公里耗电、动力性、维护费、折旧费为汽车性能因素；收入、节能、时尚为个人生活态度因素；有车朋友数、社会保有量为同伴效应因素；公共充电桩、小区充电桩、单位充电桩、充电时间、通勤为充电相关因素。

**附录 B:**

本文中使用的电动汽车专利申请数据，从德温特专利数据库中检索获得。

检索时间为：2019年7月4日

检索式：TID = ((electric vehicle) or (electric car) or (electromobile) or (electric automobile) or (battery car) or (electric motor car) or (electric motor vehicle) or (hybrid electric vehicle) or (plug-in hybrid electric vehicle) or (hybrid vehicle) or (hybrid electric car) or (plug-in hybrid electric car) or (hybrid car))

## 附录 C:

模型的其它流率方程和辅助变量方程:

$$1) \text{ 自专用充电桩数量}(t) = \text{自专用充电桩数量}(t-1) + \text{自专用充电桩建设量}(t)$$

单位:个

自专用充电桩数量( $t_0$ )为自专用充电桩的初始数量.

$$2) \text{ 自专用充电桩建设量}(t) = (\text{电动汽车销量}(t) - \text{电动汽车报废量}(t)) / \text{电动汽车与自专用充电桩配比}$$

单位:个/月

自专用充电桩建设量受市场上电动汽车保有量增量,以及电动汽车与自专用充电桩配比的影响.其中,电动汽车保有量增量由电动汽车的销量和报废量决定,电动汽车与自专用充电桩配比则根据政府出台的规划文件确定.

$$3) \text{ 公用充电桩数量}(t) = \text{公用充电桩数量}(t-1) + \text{公用充电桩建设量}(t)$$

单位:个

公用充电桩数量( $t_0$ )为公用充电桩的初始数量.

$$4) \text{ 公用充电桩建设量}(t) = (\text{电动汽车销量}(t) - \text{电动汽车报废量}(t)) / \text{电动汽车与公用充电桩配比}$$

单位:个/月

公用充电桩建设量受市场上电动汽车保有量增量,以及电动汽车与公用充电桩配比的影响.其中,电动汽车保有量增量由电动汽车的销量和报废量决定,电动汽车与公用充电桩配比则根据政府出台的规划文件确定.

$$5) \text{ 公共充电站数量}(t) = \text{公共充电站数量}(t-1) + \text{公共充电站建设量}(t)$$

单位:座

公共充电站数量( $t_0$ )为公共充电站的初始数量.

$$6) \text{ 公共充电站建设量}(t) = \text{电动汽车保有量}(t) / \text{电动汽车与公共充电站配比} - \text{公共充电站数量}(t-1)$$

单位:座/月

公共充电站建设量受市场上电动汽车保有量,以及电动汽车与公共充电站配比的影响.其中,电动汽车与公共充电站配比根据政府出台的规划文件确定.

$$7) \text{ 电动汽车保有量}(t) = \text{私家电动汽车保有量}(t) / \text{私家电动汽车占比}$$

单位:辆

市场上电动汽车保有量受私家电动汽车保有量,以及私家电动汽车占比的影响.

$$8) \text{ 电动汽车销量}(t) = \text{私家电动汽车销量}(t) / \text{私家电动汽车占比}$$

单位:辆/月

市场上电动汽车销量受私家电动汽车销量,以及私家电动汽车占比的影响.

$$9) \text{ 电动汽车累计销量}(t) = \text{电动汽车累计销量}(t-1) + \text{电动汽车销量}(t)$$

单位:辆

电动汽车累计销量( $t_0$ )为电动汽车累计销量的初始值.

$$10) \text{ 自专用桩车比}(t) = \text{自专用充电桩数量}(t) / \text{电动汽车保有量}(t)$$

单位:个/辆

自专用桩车比是自专用充电桩数量与电动汽车保有量的比值.

$$11) \text{ 单辆电动汽车销售价格}(t) = \text{单辆电动汽车生产成本}(t) / \text{电动汽车生产成本占比}$$

单位:元/辆

单辆电动汽车销售价格受单辆电动汽车生产成本,以及电动汽车生产成本占比的影响.

$$12) \text{ 单辆电动汽车购置补贴}(t) = \text{单辆电动汽车国家购置补贴}(t) + \text{单辆电动汽车上海购置补贴}(t)$$

单位:元/辆

电动汽车购置补贴主要由国家购置补贴和上海购置补贴两部分构成.

$$13) \text{ 单辆电动汽车购置税}(t) = \text{单辆电动汽车销售价格}(t) \times \text{电动汽车购置税税率}(t)$$

单位:元/辆

单辆电动汽车购置税受单辆电动汽车销售价格和电动汽车购置税税率的影响.

$$14) \text{ 单辆内燃机汽车购置成本}(t) = \text{单辆内燃机汽车销售价格}(t) + \text{单辆内燃机汽车购置税}(t) + \text{单辆内燃机汽车沪牌费用}(t)$$

单位:元/辆

单辆内燃机汽车购置成本由单辆内燃机汽车销售价格、购置税和车牌费用组成.

$$15) \text{ 单辆内燃机汽车购置税}(t) = \text{单辆内燃机汽车销售价格}(t) \times \text{内燃机汽车购置税税率}$$

单位:元/辆

单辆内燃机汽车购置税受单辆内燃机汽车销售价格和内燃机汽车购置税税率的影响.