

# 基于“学习曲线”的我国纯电动汽车价格补贴及其可持续性研究

□ 林倩云 邱国玉 曾 惠 刘锦慧

(北京大学 环境与能源学院, 广东 深圳 518055)

[摘要] 为探究无补贴下我国纯电动汽车未来可持续性发展,以特斯拉和比亚迪为例,通过“学习曲线”方法进行事后学习率确定和事前价格的预测,并与典型传统燃油汽车对比,为纯电动汽车的未来发展动态提供了基于经验的一种估计。

[关键词] 纯电动汽车;学习曲线;技术学习;价格预测

[中图分类号]F407.471 [文献标识码]A [文章编号]1003-1154(2019)03-0039-05

## 一、引言

新能源汽车因其环境友好性的特点,被各国大力推广,以解决城市汽车尾气排放污染日益严重的问题。近几年我国大力扶持新能源汽车,包括消费端、成本端以及一系列间接激励措施。

关于新能源汽车的研究,主要有三大类。第一类是针对新能源汽车的国家扶持政策;第二类是将相关政策进行定量分析,量化其对新能源汽车的销售普及的具体作用;第三类是量化成本分析以及能量分析,评估其经济与环境效益。

政府对于新能源汽车的扶持包括直接的财政补贴政府采购也包括间接行政措施,如限制性政策等<sup>[1]</sup>。以新能源上市企业为例,研究发现政府补贴在不同时点对新能源汽车销量影响不同,这是由于不同时点补贴的形式不同<sup>[2]</sup>。兼具生产新能源以及传统燃油汽车的企业,在限制性政策设计合理的情况下,取消补贴政策,对其新能源汽车产业的发展影响不大<sup>[3]</sup>。如果不考虑极端政策出台,新能源汽车未来30年对传统汽车业并无显著影响<sup>[4]</sup>。新能源汽车信贷计划和企业平均燃料消耗监管能够促进新能源汽车的发展,且新能源汽车的数量显著增加到当前补贴水平的两倍<sup>[5]</sup>。

从新能源汽车的成本端、消费端,以及环境友好性等方面的研究也有许多。对于新能源汽车的成本研究,可以使用进度比率方法来预测未来成本,未来不同车辆的相对成本取决于它们的起始成本和累积生产的差异,这可能受到政府政策以及假定的学习率

的影响,在成本价格方面,对新能源汽车中的核心部件电池进行研究,研究表明纯电动电池的学习率在所有电动车中都是相同的,范围从5%至15%<sup>[6]</sup>。研究成本的另一常用方法为年总拥有成本(TCO)分析<sup>[7]</sup>。除此之外,净现值研究也是对新能源汽车的成本研究常用的一种方法,研究表明到2030年,汽油价格从0.7美元/升到1.9美元/升不等,混合动力汽车可以具有成本效益<sup>[8]</sup>。

关于新能源汽车普及程度的研究主要涉及到消费者的接受度,以及电动汽车的市场渗透率。新能源汽车在市场化过程中的重要因素是市场群众认可度<sup>[9]</sup>。政府的补贴以及消费者口碑相传对电动汽车的市场占有率具有一定影响,考虑市场渗透率,预估2030年美国电动汽车可能的市场份额高达所有新增汽车销量的30%,在其中,纯电动汽车位列第一<sup>[10]</sup>。

虽然政府补贴是推进新产品的最快捷有效的方法,但不是可持续性的方法。随着发展,政府对新能源汽车的补贴也是呈现一种下降的趋势。

政府补贴退坡是未来趋势。而对于目前我国的新能源汽车市场,大多数学者都立足于现有的政策研究其影响以及政府的政策建议研究,但是假如没有政府补贴,新能源汽车是否可以发展下去或者说到什么阶段,我国的新能源汽车是否能够不需要补贴也能在市场竞争中占有优势,对这些问题没有给出一定的解释。

在我国新能源汽车细分类中,纯电动汽车的市场份额位列第一,本文研究的目的是按照现行的市场条件、规模以及市场接受度,对纯电动汽车的技术学习率进行研究,并探讨研究未来15年的价格成本变化

[基金项目] 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0116500)。

趋势,讨论在不同销量增长率情况下,纯电动汽车未来价格变化趋势,为纯电动的未来发展在无补贴下是否能够可持续发展提供一定理论支持。

## 二、研究方法

### (一)理论基础

新能源汽车目前总体上比传统燃油汽车更昂贵,但可能由于技术学习而变得更便宜。由于规模经济以及技术创新等因素的存在,技术的生产成本通常通过各种机制的相互作用而下降,这些机制通常被称为技术学习,可以通过经验曲线进行量化。严格来说,经验曲线方法仅适用于生产成本<sup>[11]</sup>。

目前“学习曲线”的研究方法被广泛运用于工业投产量决策研究、成本改善、潜力预测、定价等。

在生产决策中,利用“学习曲线”可以解决最优产量问题<sup>[12]</sup>。在环境碳减排领域,利用“学习曲线”可以对污染物排放下降潜力进行预测<sup>[13]</sup>。有学者利用“学习曲线”的方法研究表明,所有类型的混合插电动力的平均学习率在 8+2%(美国)和 5+4%(德国)之间。纯电动汽车可能在 2026 年左右达到与混合动力电动汽车的平均价格平衡,而在 2032 年左右达到与传统燃油车辆的价格平衡<sup>[14]</sup>。而基于成本学习曲线的分布式光伏发电成本定价研究,也是研究分布式光伏并网定价的有效方法<sup>[15]</sup>。

因此,本文基于“学习曲线”模型,构建纯电动汽车未来价格的变动模型具有合理性。由于技术的成本被厂商严格保密,所有用价格作为成本的替代变量去估算是经验曲线分析的过程中的常见做法,所以在本文中运用厂商的指导价格预估纯电动汽车以及传统燃油汽车的未来成本走势,通过零售价格估算纯电动汽车以及传统燃油汽车的生产成本走势情况。本文利用经验曲线方法量化纯电动汽车和传统燃油汽车的技术学习,将车辆的厂商指导价格以及累计产量进行建模如下:

$$C(x_t, i) = rC(x_0, i) \left( \frac{x(t, i)}{x(0, i)} \right)^{b_i}$$

其中,  $x_{0,i}$  是技术  $i$  在任意起点 0 的累积产量,  $x_{t,i}$  是时间点  $t$  的累积产量,  $C(x_{t,i})$  是  $x_{t,i}$  的具体价格或价格差异,  $C(x_{0,i})$  是  $x_{0,i}$  的具体价格或价格差异,而  $b_i$  是特定技术经验指数,  $r$  为历年通货膨胀对其价格所产生的影响。

通过对幂函数取对数,可以获得一个  $b_i$  为斜率参数线性方程。

计算进度比率  $PR_i$  和学习率  $LR_i$  作为价格下降率,每次累计产量增加 1 倍为:

$$PR_i = 2^{b_i}$$

$$LR_i = 1 - PR_i = 1 - 2^{b_i}$$

估计  $PR_i$  和  $LR_i$  的误差区间作为经验曲线的隐含误差,即斜率参数的 95% 置信区间。

### (二)数据说明

本研究选取各厂商和汽车工业协会公布的指导售价以及销量数据进行经验曲线的估计,涉及 2008—2018 年的近十年数据。运用汽车工业协会销售量增长率预计,预测直到未来年限纯电动汽车和传统燃油车辆的价格。由于无法获取涵盖整个纯电动汽车市场以及传统燃油汽车市场的动态数据,所以本文研究将目标锁定在典型车辆品牌。

### (三)前提假设

研究中主要基于以下几点假设:

1. 假设技术是进步的,无论纯电动汽车还是传统燃油汽车。
2. 假设研究期限内乘用车行业内无重大技术变革。
3. 假设研究期限内产量的增长按照可预见的增长率增长。
4. 研究对象在研究假设期限内正常运行,厂商无重大意外或者重大技术变革。
5. 未来纯电动汽车市场是竞争性市场而非垄断性市场。

## 三、结果与讨论

本研究的经验曲线分析由两部分组成:对于纯电动汽车的未来价格预估,首先,建立特斯拉纯电动汽车以及比亚迪纯电动汽车的事后经验曲线和学习率。其次,使用既定的学习率来推导比亚迪纯电动汽车的事前价格预测;对于传统燃油汽车未来价格预估,以典型车辆品牌的将近 10 年的历史价格销量建立经验曲线以及学习率,以此预估未来年限的传统燃油汽车的价格走势。

由于发动机功率通常是车辆消费者以及生产者所关注的一大指标,价格也与这一指标具有一定的关系。通过发动机功率归一化,以绝对车辆价格考虑各种混合动力电动汽车、纯电动汽车和传统燃油车辆之间的差异。数据表征显示,电池容量和发动机功率分别在 BEV 的价格变化中分别解释了 87% 和 94%。这一发现证实了电池容量紧跟发动机功率,所以本研究采用发动机功率标准化绝对纯电动汽车价格的方法是有效的。本研究采用的功率为出厂标明的车辆动力系统的最大功率。由于每款车型售价的影响因素诸多,单纯的以绝对价格进行衡量将会存在较大的误差以及不可对比性,所以本研究考虑选择一定的指标将价格进行统一标准化,使得其具有横向可比性。

### (一) 纯电动汽车经验曲线估计

目前市场上纯电动汽车品牌主要以特斯拉为代表,而比亚迪则是在中国纯电动汽车市场占有优势地位的品牌,故本研究主要以特斯拉以及比亚迪车型的近几年的销售价格,以及销售量的事后数据进行经验曲线的拟合,确定其学习率。

利用特斯拉厂商 2008—2018 年的官方数据,以及比亚迪 2012—2018 年的官方数据,对这几年的纯电动汽车的技术学习率进行估算,在模型中本研究将关税、消费税等税费的影响扣除且考虑通货膨胀的影响,建立经验曲线并估计特斯拉的学习率  $LR_b$ ,具体步骤如下:

1. 将研究车型的价格以及产量数据标准化;
2. 建立经验曲线并估计研究车型纯电动汽车的学习率  $LR_b$ 。

以下分别建立特斯拉纯电动汽车以及比亚迪纯电动汽车的事后经验曲线,并确认其学习率。

$$PR_b = 2^{b_b} = 0.92$$

$$LR_b = 1 - 2^{b_b} = 0.08$$

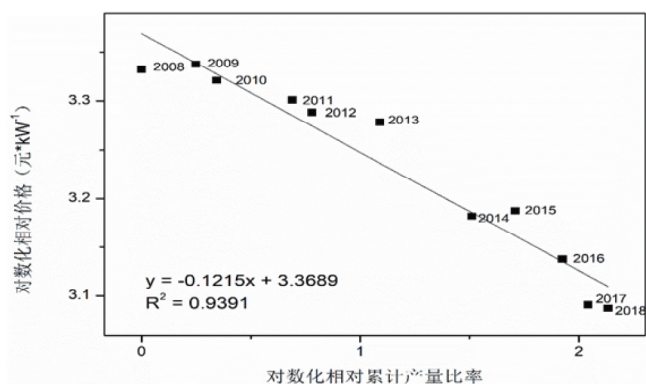


图1 特斯拉纯电动汽车经验曲线,其中置信区间为 95%

根据图 1 经验曲线,可以知道特斯拉纯电动汽车的学习率为 8.0%。这一学习率与丰田普锐斯的学习率 1+1%(日本)、6+2%(德国)6+2%(美国)之间相比处于一个较高水平,与所有类型的混合插电动力的学习率在 8+2%(美国)和 5+4%(德国)之间相比处于一个较为正常的水平。

$$PR_b = 2^{b_b} = 0.79$$

$$LR_b = 1 - 2^{b_b} = 0.21$$

根据图 2 经验曲线,可以知道比亚迪纯电动汽车的学习率为 21%。这一学习率明显高于特斯拉纯电动汽车的学习率 8.0%。结合中国发展的具体情况分析,主要是由于纯电动汽车在我国兴起带有一定政策指导性,在我国正处于初步发展阶段政府补贴力度大,价格波动大。

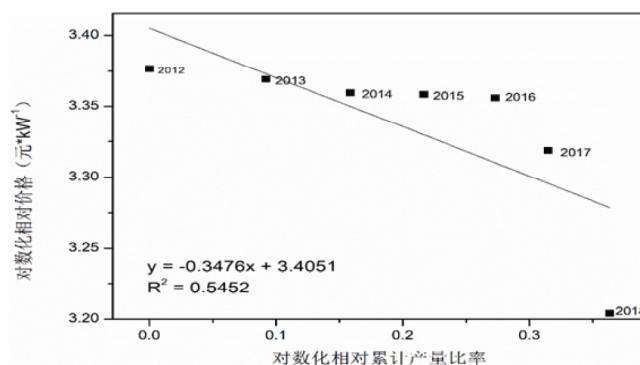


图2 比亚迪纯电动汽车的经验曲线,其中置信区间为 95%

而在我国传统燃油汽车领域,目前乘用车分为基本轿车和运动型实用汽车 SUV 进行考虑,根据这类型的近三年的销量数据,以每一款车型的销量第一品牌作为典型品牌进行研究,分别选择朗逸(基础款轿车)和哈弗 H6(SUV)两款典型车型品牌作为代表研究不同车型的传统燃油汽车的价格,以及累积产量的经验曲线走势,进而对其未来年限的指导价格做出预测。

根据朗逸品牌汽车车型 2008—2018 年的数据建立学习曲线可以确定朗逸的学习率为 4%( $R^2 = 0.55$ )。根据哈弗 H6 车型 2011—2018 年的数据建立学习曲线,可以确定哈弗 H6 汽车的学习率为 8%( $R^2 = 0.88$ )。

### (二) 我国典型纯电动汽车品牌以及典型传统燃油汽车的未来价格预测

比亚迪纯电动汽车是我国典型的纯电动车辆,近年来的纯电动汽车排名稳居前三,所以对以比亚迪为例的纯电动汽车的未来价格走势研究具有一定的代表性。在假设技术进步的前提下,对特斯拉的历史数据进行学习率的估计,对于比亚迪品牌具有一定的适用性。

传统燃油车的市场条件处在一个较为劣势的情况,假设其按照近三年的平均增长率预测未来年限的销量值。

在这部分,本文主要对研究的纯电动汽车以及传统燃油汽车的未来价格进行预测,具体步骤如下:

1. 分别根据历年的销售增长率预测未来年限特斯拉、比亚迪纯电动车以及朗逸、哈弗 H6 车型的预期销售数量;
2. 根据各自的学习率预测未来年限的预估价格;
3. 根据比亚迪纯电动汽车以及朗逸、哈弗 H6 车型的未来价格走势确认纯电动汽车以及传统燃油汽车的价格平衡点。

根据纯电动汽车近三年的平均增长率,预测未来



年限的销量,进而通过学习效率预估得到未来 15 年的价格走势如图 3 所示。

虑这种特殊情况。

以比亚迪汽车自身的学习率去预估未来技术学

习的学习曲线,结果表明比亚迪汽车的价格下降速度会加快,这会进一步加快比亚迪汽车与传统燃油汽车价格水平达到相一致的速度,在 2021 年左右就能达到与朗逸相一致的水平,甚至在 2026 年左右可以与哈弗 H6 价格持平。但是由于比亚迪汽车在研究期内价格波动巨大,主要涉及到纯电动汽车在我国初步研发阶段以及蓬勃发展阶段,在这期间价格的剧烈波动更可能是由于外界的因素影响,例如政府高补贴问题,所以本研究主要以特斯拉的学习率作为纯电动汽车的技术学习率,而以比亚迪自身的经验数据作为参照。

考虑到纯电动汽车未来较高的年销量增长率 50% 的情况下,比亚迪汽车(特斯拉的学习率)将会在 2028 年左右达到与朗逸相一致的水平,特

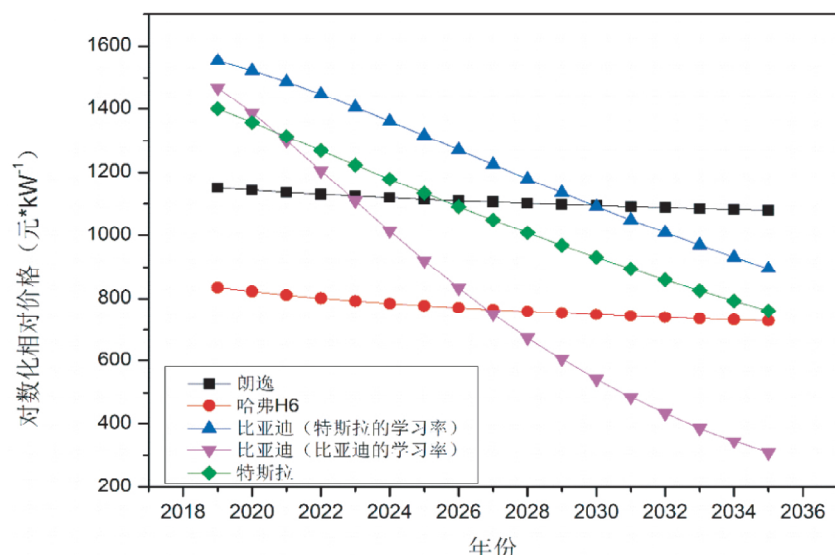
斯拉的单位价格预计在 2025 年会达到跟朗逸相一致的水平;考虑到较低的纯电动汽车未来年销量增长率 10% 的情况下,比亚迪汽车(特斯拉的学习率)到 2035 年也无法达到与朗逸汽车价格相一致的水平,特斯拉的单位价格预计在 2035 年会达到跟朗逸相一致的水平;考虑到纯电动汽车就维持目前的年销售量没有增长,那么比亚迪(特斯拉的学习率)以及特斯拉到 2035 年均无法达到与朗逸相一致的水平。

总体而言,我国以比亚迪为代表的纯电动车在 2030 年左右达到与朗逸汽车单位价格水平相一致的水平,特斯拉预计在 2026 年单位价格达到与朗逸相一致的水平,在不同的预期销量增长率的情况下,时间有所提前或推迟。本研究的分析为纯电池动力的乘用车的未来价格动态提供了基于经验的一种估计。

## 四、结论与建议

第一,特斯拉纯电动汽车的学习率为 8.0%,这意味着在技术进步的假设下,特斯拉纯电动汽车产量增加一倍,其指导售价会下降 8.0%。而比亚迪纯电动汽车的学习率为 21%,其产量增加一倍,其指导售价会下降 21% 左右。

第二,我国典型传统燃油汽车朗逸汽车学习率为 4%。纯电动汽车的学习率高于传统燃油汽车情况下,意味着在未来时间内,纯电动汽车的成本下降速度高于传统燃油汽车。在外界环境一致情况下,纯电



假定特斯拉销量年增长率为 40%、亚迪纯电动汽车销量年增长率为 40%、朗逸以及哈弗 H6 汽车销量年增长率为 0%。

图 3 特斯拉、比亚迪、朗逸和哈弗 H6 未来年限价格趋势预测图

### (三) 纯电动汽车不同增长率情况下的未来价格与纯电动汽车对比

由于纯电动汽车未来销量的增长具有比较大的不确定性,受政策的影响较大,所以基于不同的销量增长率,本研究对结果进行进一步补充,分别考虑 50%、10% 以及 0% 的销量增长率,结果如表 1 所示。

表 1 纯电动汽车不同增长率情况下的未来价格与传统燃油汽车价格相一致年份表

车辆品牌	纯电动汽车销量增长率		
	50%	10%	0%
比亚迪(特斯拉的学习率)单位价格达到与朗逸汽车相一致水平的年份	2028 年	近 15 年不能达到	近 15 年不能达到
特斯拉单位价格达到与朗逸汽车相一致水平的年份	2025 年	2035 年	近 15 年不能达到

### (四) 综合分析

根据实证结果可知,假定纯电动汽车的未来年增长率近三年平均化的增长率 40% 时,传统燃油汽车保持现行年销售量的情况下,以特斯拉的学习率作为比亚迪未来技术学习的学习曲线,在 2030 年左右可以与朗逸汽车的价格达到相一致的水平为 1 092 元每千瓦上下;比亚迪在 20 年更远都难以达到哈弗 H6 的平均价格水平,这主要是由于哈弗 H6 的目前售价已经处于一个较低的水平,在汽车行业中属于中等偏下的价格,由于本身偏低的价格,使得纯电动汽车要达到此价格的难度较大。就本文研究的比亚迪汽车,在未来的 15 年内很难与哈弗 H6 汽车的价格达到一种平衡状态,除非有特殊情况发生,在本研究中不予考

动汽车与传统燃油汽车的价格差距会以一定的加速度逼近。

第三,比亚迪汽车在2030年左右可以与朗逸汽车的价格达到相一致的水平为1 092元每千瓦上下。而特斯拉在2026年左右达到与朗逸汽车相近的价格,约为1 110元每千瓦。就比亚迪与特斯拉的对比而言,标准化的单位价格从一开始特斯拉就略低于比亚迪,这主要是由于特斯拉纯电动汽车的电机功率普遍高于比亚迪纯电动汽车,特斯拉的电机功率普遍在500 kW左右,而比亚迪则在160 kW上下,所以单位化的价格比亚迪甚至高于特斯拉,比亚迪单位价格高于特斯拉,说明比亚迪的单位价格具有较大的下降空间,降价可以从降低成本入手,也可以从提高机电功率入手。

第四,如果考虑政府的补贴以及出台的纯电动汽车利好政策,那么会进一步加快缩减纯电动汽车与传统燃油汽车之间的差距。如果纯电动汽车的成本以及价格可以下降,消费者对其的接受度上升,那么由供给需求推动的市场化可持续发展可以成为现实。

第五,政府对新能源汽车的直接扶持政策退出是可行的。根据技术进步,纯电动汽车的未来成本呈现一定比例下降,所以在未来不需要政府的直接补贴,随着技术进步,以比亚迪和特斯拉为代表的纯电动汽车是可以达到与现行销量最高的轿车品牌朗逸的价格相一致水平,那么不可考虑市场接受度问题,仅考虑价格因素,纯电动汽车的价格补贴在未来可以取消。

第六,政府应该从直接扶持推广纯电动汽车,转向支持技术研发,以及电池回收等其他问题。纯电动汽车在解决城市汽车尾气方面做出了巨大的贡献,但是电池的回收性又对环境提出了另一层面上的压力,政府对纯电动汽车的扶持应该从最初的市场端转向技术端,支持技术的研发以及电池的回收,应该尽力避免污染转移的问题出现。□

#### [参考文献]

- [1] Zhang X, Bai X. Incentive Policies from 2006 to 2016 and New Energy Vehicle Adoption in 2010—2020 in China[J]. Social Science Electronic Publishing, 2017, 70(11):24-43.
- [2] 高秀平,彭月兰. 我国新能源汽车财税政策效应与时变研究——基于A股新能源汽车上市公司的实证分析[J]. 经济问题,2018(01).
- [3] 马亮,仲伟俊,梅姝娥. 新能源汽车补贴政策“退坡”问题研究[J]. 软科学,2018(04).
- [4] 周玲芝,孙竹,孙林,等. 新能源汽车发展对传统

通讯作者:邱国玉,E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn.

汽车业的影响——基于Bass模型的实证研究[J]. 国际经济合作,2018(02).

- [5] Li Y, Zhang Q, Liu B, et al. Substitution Effect of New-Energy Vehicle Credit Program and Corporate Average Fuel Consumption Regulation for Green-car Subsidy [J]. Energy, 2018, 152 (03): 223-236.
- [6] Seixas J, Dias L, et al. Assessing the Cost-effectiveness of Electric Vehicles in European Countries Using Integrated Modeling[J]. Energy Policy, 2015, 80(01):165-176.
- [7] Breetz H L, Salon D. Do Electric Vehicles Need Subsidies? Ownership Costs for Conventional, Hybrid, and Electric Vehicles in 14 U. S. Cities [J]. Energy Policy, 2018, 120(05):238-249.
- [8] L D Danny Harvey. Cost and Energy Performance of Advanced light Duty Vehicles: Implications for Standards and Subsidies [J]. Energy Policy, 2018, 114(11):1-12.
- [9] Du H, Liu D, Sovacool B K, et al. Who Buys New Energy Vehicles in China? Assessing Social-psychological Predictors of Purchasing Awareness, Intention, and Policy [J]. Transportation Research Part F Traffic Psychology & Behaviour, 2018, 58 (05):56-69.
- [10] 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(12):215-230.
- [11] Dutton J M, Thomas A. Treating Progress Functions as a Managerial Opportunity [J]. The Academy of Management Review, 1984, 9 (02): 237-247.
- [12] 李细枚,张湘伟,张毕西,等. 基于“学习曲线”理论的投产量决策模型研究[J]. 系统科学学报,2018 (04).
- [13] 王文熹,于渤. 基于环境学习曲线的工业大气污染物排放强度下降潜力测算 [J]. 经济问题,2018 (12).
- [14] 杨昌辉,葛志祥. 关于分布式光伏发电上网定价研究[J]. 价格理论与实践,2018(04).
- [15] Weiss M, Patel M K, Junginger M, et al. On the Electrification of Road Transport—Learning Rates and Price Forecasts for Hybrid-electric and Battery-electric Vehicles [J]. Energy Policy, 2012, 48(05): 374-393.