

国产风电机组装机规模对于 机组成本的影响

——基于学习曲线模型的实证研究

王 怡, 刘 强, 李 平

(中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 100732)

摘要: 自 2006 年《可再生能源法》和国产化率保护等政策实施以来, 中国风电产业迅速发展壮大, 风力发电机等风电设备的制造能力不断提升, 机组成本不断下降。本文基于 2005—2016 年陆上风电项目的机组价格数据, 利用学习曲线模型考察了国产机组装机规模对于机组成本的影响。研究发现, 随着国产机组装机规模迅速增长, 机组成本显著下降。每次国产机组装机规模实现翻倍时, 机组成本大约下降 3.9%。为了克服技术进步对于机组成本的影响, 本文进一步分别考察了国产 1.5 MW 机组与国产 2 MW 机组的学习曲线, 发现大容量机组的学习曲线更平坦, 其成本下降速度更慢。2018 年的机组平均价格 (3400 元 /kW) 远远低于由学习曲线估计出的机组平均成本, 这可能是国内整机制造商之间非理性竞争的结果。因而, 建议整机制造商进一步加大产品研发和技术创新力度, 以更加优质的产品和运维服务, 迎接平价上网时代的到来。

关键词: 风电设备制造业; 机组成本; 学习曲线; 学习率

中图分类号: F426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2355-(2019)06-0037-06

Doi: 10.3969/j.issn.1003-2355.2019.06.007

Abstract: Since the implementation of the Renewable Energy Law and the domestic content protection in 2006, China's wind power industry has developed rapidly, the manufacturing capacity of wind power equipment has been continuously improved, and the cost of wind turbine has been declining continuously. Based on the price data of the onshore wind power project from 2005 to 2016, this paper uses the learning curve model to investigate the impacts of accumulated installed capacity on turbine cost. It is found that the cost of domestic turbine has decreased significantly along with the increase of accumulated installed capacity. According to the learning curve, when the cumulative installed capacity doubles, the cost of domestic turbine will decrease by 3.9%. In order to avoid the influence of technological progress on turbine cost, the learning curves of domestic 1.5 MW turbine and domestic 2 MW turbine are further investigated. It is found that the learning curves of large capacity turbine are more flat, and the cost decline of large capacity turbine are more slowly. The average price of wind turbines in 2018 (3,400 yuan/kW) is contrary to the law of cost reduction, which may be the result of the irrational market competition of domestic turbine manufacturers. Therefore, it is suggested that manufacturers should further strengthen R&D and technological innovation, and improve the quality of turbine products and operation and maintenance services, so as to well prepare for wind grid parity.

Key words: Wind Turbine Manufacturing Industry; Turbine Cost; Learning Curve; Learning Rate

收稿日期: 2019-05-10

作者简介: 王怡 (1986-), 女, 北京人, 博士, 现就职于中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 主要研究方向为能源模型, 可再生能源等。

1 引言

发展风电产业是中国降低化石能源消费比重、优化能源结构的重要途径,对于减少大气污染、应对气候变化和实现经济可持续发展具有重要意义。自2006年《可再生能源法》实施以来,中国风电产业进入高速发展阶段,并成为“十三五”国家战略性新兴产业之一。伴随国产机组的装机规模的迅速增长,以及国产风电设备制造水平的迅速提升,国产风电机组的生产成本也在不断降低。根据中国可再生能源学会风能专业委员会出版的《中国风电发展报告》^[1](以下简称CWEA),风电机组的平均市场价格由2004年的4800元/kW左右,已降至2018年的3400元/kW左右,下降了近30%。机组成本是风电成本的重要组成部分(在风电场建设投资中,机组成本通常占到70%左右),研究风电机组成本的下降规律对于预测未来风电发电成本的下降趋势,以及判断风电平价上网的可行性将提供重要参考。

在风电领域,存在这样一种“干中学”(Learning By Doing,缩写LBD)效应:随着装机规模的迅速增长,整机制造商生产经验不断积累、工人的熟练度不断提高、生产效率不断提升,机组成本将持续下降。Wright^[2]最早在飞机制造业中发现了这种“干中学”效应。他通过建立幂函数形式的学习曲线模型,分析某种产品(或者技术)累计产量的增长对其生产成本的影响;同时,他还定义了学习率和进步率两个指标,用于反映“干中学”效应中成本的下降速度。近些年来,学习曲线模型作为技术经济学中一种较为实用的量化工具,被广泛用于分析风电机组装机规模对于风电成本的影响^[3-9]。根据成本的不同定义,这些研究可以分为以下三类。第一类,机组成本的学习曲线,即考察累计装机容量(或者累计装机台数)对于风电机组制造成本的影响^[3, 4]。第二类,风电项目建设成本或者风电项目投资成本的学习曲线,即考察累计装机规模对于风电项目建设成本的影响^[5, 6]。第三类,发电成本的学习曲线,即考察累计装机规模对于风电发电成本的影响^[7, 8]。相对于第一类学习曲线,后面两类学习曲线不仅仅反映了制造商的生产经验积累,还体现了风电场开发商(包括项目管理部门、设计部门、施工部门和运维部门等)的经验积累。并且,后面两类学习曲线受风资源条件、建设条件和并网条件等客观因素的影响相对较大。由于很难实现对这些因素进行

严格区分和控制,导致后面两类学习曲线得到的学习率差异性较大^[9]。

关于中国风电成本的下降规律,一些研究也利用学习曲线模型对此进行了广泛和深入的探讨。邸元等^[10]采用1991至2008年风电投资成本、累计装机容量和上网电量的数据,得出中国风电项目发电成本的学习率为12.6%。Qiu和Anadon^[11]利用2003至2007年中国风电特许权项目投标价格、累计装机量、工业技术引进量等数据,得出风电项目建设成本的学习率在4.1%~4.3%之间。Yu等^[12]采用风电机组年均价格、累计装机量、风电机组专利数量等数据,对三种时间段(1998—2010年、1998—2011年、1998—2011年)进行测算,学习率分别为6.43%、7.97%、8.08%。Hayashi等^[13]采用2005至2012年中国312个CDM(清洁发展机制)风电项目的数据进行测算,未发现任何学习效果。他们认为风电场发电成本主要取决于风电场的规模,规模越大,发电成本越低。机组价格的下降来自制造商之间的价格竞争,并且这种竞争是以机组技术和质量的下降作为代价的。

由于数据可获得性的原因,现有关于机组成本学习曲线的研究普遍存在未区分国产机组与进口机组、未考虑技术进步以及样本量偏少等问题。首先,在研究中国风电制造商“干中学”效应时,需要剔除进口机组的数据。其次,机组的容量越大、叶片长度越长、叶片材质具有更好的捕风性能、机组控制系统更加智能化等等,都会导致生产成本的增加。所以,在考察装机规模对于机组成本的影响时,需要取消技术进步对于机组成本的影响。再有,由于整机制造商同时在研发和生产多个型号的机组,某一种机组的实际生产成本往往难以获得,所以学界大多采用机组价格来反映机组成本。然而,机组价格不完全取决于生产成本,机组价格还可能受供需关系、整机制造商的销售策略、制造商之间的市场竞争等市场因素的影响。某种型号机组上市后一般需要经历打开市场、价格保护伞、价格震荡和平稳期四个阶段,在这四个阶段中机组价格围绕机组成本的下降而表现为波动下降^[6],所以学习曲线模型一般需要10年以上、并且价格数据量尽可能大的样本反映机组成本的下降规律。

综合以上,本文可能的贡献主要体现在以下两个方面:一是采用2006—2016年陆上风电项

目的机组价格数据(不含塔筒和运费,下同),从微观数据层面实证分析了国产机组装机规模对国产机组成本的影响,通过描绘国产机组的机组成本学习曲线揭示国产机组成本的下降规律。二是为了克服技术进步对于机组成本的影响,本文进一步考察了2006年以来两款主流机组(国产1.5 MW机组与国产2.0 MW机组)的学习曲线。

2 风电装机的规模化、国有化与大型化

CWEA的数据显示^[1],2004年中国风电累计装机规模在743 MW左右(全球排名第10)。这一规模只相当于一台大型火电机组、或者三峡水电站一台水电机组(700 MW)的容量。2010年我国风电装机规模达到44.73 GW,首次超越美国,成为全球装机第一大国。2018年达到188.39 GW,占全球的36%左右,是美国累计装机规模(89.08 GW,全球排名第二)的两倍以上。如图1所示,2004—2018年中国风电装机规模增长十分迅速,年平均增速约53.6%。其中,2006—2009年连续4年,风电装机实现翻倍增长(增长率在100%以上)。

2005年之前,国产机组的年产量仅有100余台,并且国内制造商只能生产单机容量在600 kW以下机组,750 kW以上机组全部依靠进口。而后,中国风电装机规模的迅速增长为国内风电设备制造商提供了巨大的市场,另一方面得益于国有化率等相关政策的扶持,国产机组的投运量和市场份额迅速增加。2005年国产750 kW机组问世,并成为2006和2007年市场主流机型。2006年,国产1.5 MW机组问世,2008—2014年该机型一直是市场主流机型。2007年国产2 MW问世,该机型是2015年以来的市场主流机型。图2统计了国内风电机组制造商与外资或合资制造商每年的新增装机容量,并用国产机组和进口机组分别表示。如图2所示,2004年国产机组市场份额还不足25%,2011年提升至92%左右,2013年以来保持在95%以上。

从风力发电机的技术发展趋势来看,机组大型化是最突出的发展趋势。风电机组大型化是由消费市场的客观需求带来的:对于既定容量风电项目来说,风电开发商选用单机容量更大的机组能够减少布机数量,减少机组之间的尾流影响,同时减少风电场建设所需的土地面积,从而降低风场配套设施成本和运输施工成本。如图3所示,2005年中国新增兆瓦级机组(单机容量大于等于

1 MW)仅占当年新增装机容量的11.5%,2007年、2008年和2009年分别占到31%、72.8%和86.8%。到了2018年,2 MW以下(不含2 MW)的市场份额仅占7.3%左右,2 MW至3 MW(不包括3 MW)机组约为85%,3 MW以上机组约为7.7%。根据拟合直线的估计,每隔5年国内市场新增装机的平均容量大约增加0.5 MW。

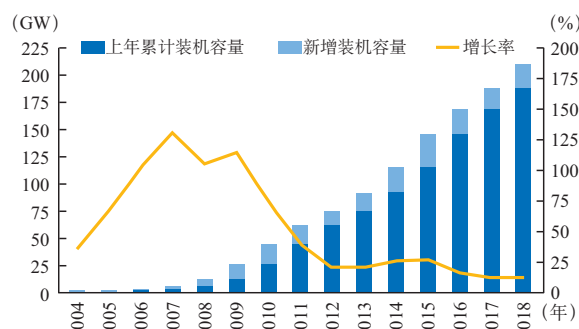


图1 2004—2018年中国风电累计装机容量及增长率

数据来源:数据来自CWEA的报告^[1]及其网站。

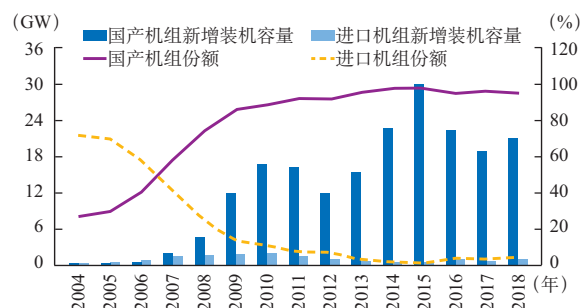


图2 2004—2018年国产机组与进口机组市场份额

注:进口机组包括维斯塔斯(Vestas)、歌美飒(Gamesa)、通用电气(GE)、瑞其能、恩德(Nordex)、苏士兰(Suzlon)等外资或中外合资企业生产的机组。

数据来源:2004—2010年的数据来自Hayashi等^[13],2010—2016年的数据来自CWEA的报告^[1]。

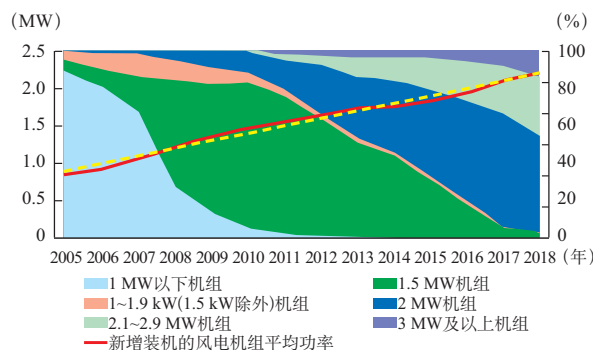


图3 2005—2018年不同单机容量市场份额与新增平均装机容量

数据来源:数据来自CWEA网站。

伴随风电装机规模化、国有化和大型化的过程,风电机组成本不断下降,但机组价格却表现为波动下降,价格波动过程可以分为三个阶段。第一阶段(2004—2008年):这一阶段中国风电装机规模增长较快,而国内整机制造商的生产能力有限,市场表现为供不应求的卖方市场。在此期间,风电机组的市场平均价格不断攀升,由2004年的4800元/kW左右涨至2008年的6200元/kW左右。

第二阶段(2009—2014年):自2009年起,由于国内制造商生产能力的提升、钢材价格的下降、运输成本的降低、规模效应逐渐显现等因素,市场表现为买方市场,机组价格开始下降,2012年市场平均价格下降至4000元/kW左右。然而,自2013年以起,由于低风速风电项目建设需求不断增加,机组大型化趋势日趋明显,技术进步带动风机价格开始上扬,2014年市场平均价格上涨至4300元/kW左右。

第三阶段(2015—2018年):由于上网电价不断下调,风电项目开发商不得不大幅压低设备成本,由此带来了整机制造商之间的竞争加剧。迫于严峻的市场形势,制造商纷纷通过较低的报价获取市场份额。风电机组的市场平均价格持续下滑,由2014年的4300元/kW左右下降到2018年的3300元/kW左右。

3 模型与数据

3.1 学习曲线模型

学习曲线刻画了装机规模对于机组成本的影响,其幂函数形式如式(1)^[1,4,5]:

$$C_{Cum} = C_0 \times (C_{um})^b \quad (1)$$

式中,

C_t ——第 t 年机组成本(元/kW),它综合劳动力成本、资本成本、管理成本和研发成本等;

C_0 ——初始成本,即第一个单位容量的生产成本;

Cum_t ——第 t 年累计装机容量;

b ——学习指数。

根据式(1),当累计容量翻倍时机组成本将缩减为原来的 2^b 倍。为了便于比较成本的下降速度,定义进步率(Progress Ratio,缩写PR)和学习率(Learning Ratio,缩写LR)分别为:

$$PR = 2^b \quad (2)$$

$$LR = 1 - 2^b = 1 - PR \quad (3)$$

学习率越大表示机组成本的降速越快,而进

步率越大则表示机组成本的降速越慢。

根据式(1),得到单因素学习曲线的统计模型,即:

$$\log C_{Cum} = \log C_0 + b \log Cum + \varepsilon \quad (4)$$

在模型(4)的基础上,模型(5)进一步控制了地区和时间因素。参照Qiu等^[10]做法,本文用虚拟变量和,分别对4类风资源地区和年份进行控制。风资源地区的划分来自于《关于完善风力发电上网电价政策的通知》中对风资源类型的分类。

$$\log C_{Cum} = \log C_0 + b_1 \log Cum + \sum_i u_i \text{Category}_i + \sum_j v_j \text{Year}_j + \varepsilon \quad (5)$$

3.2 数据来源和统计性描述

本文采用了两类数据。第一类,机组采购价格数据,数据来自龙源电力设计单位在编制风电项目可行性研究报告过程中的机组询价。龙源电力公司是当前全球最大的风电开发商,在长期的机组采购过程中,龙源公司与多家机组制造商建立起合作关系。本文采用的价格样本涉及金风、联合动力、华锐、远景、明阳、维斯塔斯等18家整机制造商不同型号机组在不同时间的报价。第二类,全部国产机组、国产1.5 MW机组和国产2 MW机组的累计装机容量,数据根据2007—2016年《风电发展报告》^[1]中的数据,以及CWEA网站上公布的数据整理得到。

表1给出了数据的统计性描述。其中,1.5 MW机组的起止年份为2006—2016年,而2 MW机组的起止年份为2007—2016年。

表1 统计性描述

变量	变量解释	样本数	平均值	标准差	最小值	最大值
C	机组价格	369	4489.54	595.59	3600	6750
$Cum D$	国产机组累计装机容量	369	90338.90	49301.02	874.61	155300.50
$Cum 1.5D$	国产1.5 MW机组累计装机容量	122	42246.04	19901.06	120.66	78179.46
$Cum 2D$	国产2 MW机组累计装机容量	121	32808.03	15566.51	192.31	50585.63

4 实证结果与分析

本节采用2005—2016年机组价格的面板数据,利用学习曲线模型估计了累计装机容量对机组成本的影响,回归结果报告于表2中。

表2 国产机组装机规模对于机组成本的影响

	(1) <i>log C</i>	(2) <i>log C</i>	(3) <i>log C</i>	(4) <i>log C</i>
<i>log Cum</i>	-0.057*** (-16.21)	-0.033*** (-6.44)		
<i>log Cum 1.5D</i>			-0.090*** (-15.70)	
<i>log Cum 2D</i>				-0.017** (-2.08)
_cons	9.028*** (231.69)	8.779*** (156.45)	9.296*** (156.56)	8.540*** (101.13)
N	375	375	122	121
r ²	0.413	0.704	0.673	0.0350
地区	N	Y	N	N
年份	N	Y	N	N
PR-LBD (%)	96.1	97.8	94.0	98.8
LR-LBD (%)	3.9	2.2	6.0	1.2

注：地区和年份分别表示风资源地区和年份的虚拟变量，“Y”表示进行了控制，“N”表示未进行控制。括号内是稳健标准误，***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 的水平上显著。

第 1 列报告了国产机组累计装机容量对风电机组成本的影响，回归系数为 -0.057，并且回归系数在 1% 统计水平上显著，进步率为 96.1%，学习率为 3.9%。回归结果表明，随着累计装机容量的增长，风电机组成本大大降低了，并且每次当累计装机容量翻倍时，风电机组成本将下降 3.9%。学习率 (4.2%) 略小于 Yu 等^[12]得到的学习率 (6.43%~8.08%)，可能的原因是：龙源电力长期与金风、远景、联合动力等整机制造商进行采购交易，导致机组采购价格表现为一种合作价格，略低于市场上同款机组的平均售价，因而得到的学习率较低。第 2 列进一步控制了风资源类型和年份，回归结果依然稳健。第 3 列报告了国产 1.5 MW 机组累计装机容量对风电机组成本的影响。回归结果表明，国产 1.5 MW 机组的学习率为 6.0%，说明每次累计装机容量实现翻倍，机组成本将降低 6.0%。第 4 列进一步控制了风资源类型和年份，回归结果依然稳健，但学习率有所下降。第 5 列报告了国产 2 MW 机组累计装机容量对风电机组成本的影响。回归结果表明，国产 2 MW 机组的学习率为 1.2%，说明每次累计装机容量实现翻倍，机组成本将降低 1.2%。

学习曲线对于估计机组成本走势提供了重要参考。根据表 2 的结果，可以得到三条学习曲线：

(1) 全部国产机组 $y=8333.177x^{-0.0527}$ ；(2) 国产 1.5 MW 机组 $y=10894.35x^{-0.0900}$ ；(3) 国产 2 MW 机组 $y=5115.344x^{-0.0172}$ 。如图 4 所示，全部机组的学习曲线高于其它两条学习曲线。这是因为全部机组的学习曲线综合刻画了不同容量机组成本的下降规律，当装机容量未来达到某一既定规模时，由全部机组学习曲线估计的平均成本，要高于 1.5 MW 机组和 2 MW 机组达到这一规模时的成本。

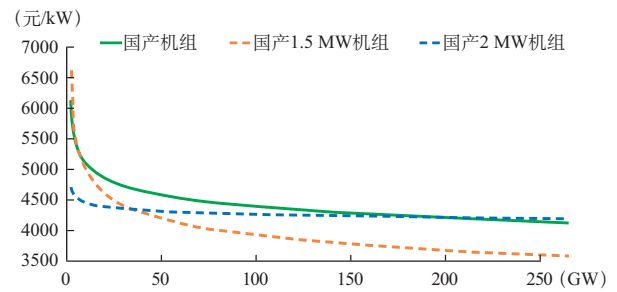


图4 机组成本学习曲线

对比国产 1.5 MW 机组和国产 2 MW 机组的学习曲线，国产 1.5 MW 机组的初始成本（第一个单位的生产成本）高于国产 2 MW 机组，但国产 1.5 MW 机组比国产 2 MW 机组的成本下降速度更快。可能的原因是：国产 1.5 MW 机组的研发早于国产 2 MW 机组，所以初始成本更高。2010 年以来，国产 2 MW 机组为了抢占原本国产 1.5 MW 机组的市场份额，很可能是以较低价格、甚至是低于成本价格出售的。整体来看，国产 2 MW 机组的价格下降幅度较小，因而得到的国产 2 MW 机组成本的下降速度慢于 1.5 MW 机组。由此可见，未来大容量机组的初始成本会更低，但机组成本的下降速度将会变得更慢，学习曲线也会更加平坦。

2018 年年底，风力发电机组累计装机规模为 210.39 GW，其中国产机组累计装机规模在 195.3 GW 左右。用全部国产机组的学习曲线对机组平均成本进行估计，得到此时的机组平均成本应在 4151.26 元/kW 左右。可见，2018 年机组平均价格 3400 元/kW 属于过低，甚至可能低于机组的实际成本。产生这种现象的可能原因是：一方面，由于推进风电平价上网的政策相继出台，风电开发商为了降低发电成本而大幅压缩风电设备的采购成本。受到上游原材料供应商和下游风电开发商两头的压力，整机制造商不得不采取薄利多销的策略维持企业正常运营。另一方面，2018 年风力发

电机组价格迅速走低还可能由于大型整机制造商在大容量机组刚刚上市不久,就率先下调了大容量机组的市场售价,导致小型整机制造商被动下调销售价格。尽管如此,风电设备制造业的集中度仍然在不断提高。根据《2018年中国风电吊装容量统计简报》^[14],2018年中国风电市场有新增装机记录的整机制造商共22家,前两家的市场份额达到一半以上,前5家达到 $\frac{3}{4}$ 以上,即金风科技(31.72%)、远景能源(19.77%)、明阳智能(12.41%)、联合动力(5.88%)、上海电气(5.4%)。上一轮的整机制造商之间的“价格战”发生在2010—2011年,当时整机机组制造商从60家迅速下滑至30家。从目前的趋势来看,未来风电设备制造业很有可能形成5~10家整机制造商寡头垄断的局面。短期内,价格战有利于淘汰落后产能,使大型整机制造商的“干中学”效应进一步增强,提高产品质量。但是,长期来看,寡头垄断的市场并不利于技术进步,也不利于整个产业链的良性发展。

5 结论与建议

风电作为改善能源结构的主要替代能源技术之一,在过去30年中国政府对于风电产业发展给予了有力的支持。随着中国风电设备制造业迅速发展壮大,设备制造能力不断提升,单位容量的机组成本不断下降。本文基于2006—2016年风电机组价格数据,利用学习曲线模型考察了国产风电机组装机规模对于机组成本的影响,得到以下结果。第一,中国风力发电机组整机制造业存在“干中学”效应,即随着国产机组累计装机容量的增长,国产机组成本显著降低了。每次国产机组累计装机容量实现翻倍时,国产机组成本将下降3.9%左右。第二,在机组大型化发展的趋势下,大容量机组的学习曲线更为平坦,所以未来大容量机组的成本下降空间可能十分有限。第三,2018年的机组平均价格(3400元/kW)有悖于学习曲线的下降规律,这可能是国内整机制造商非理性市场竞争的结果。

在风电平价上网时代的来临之际,本文的结论为中国风力发电机组整机制造商提供了重要启示。当前陆上风电的装机规模已经十分庞大,未来实现规模翻倍需要更久的时间,所以短期内依靠制造商的“干中学”效应难以拉动风力发电机组成本实现大幅下降。面对日益激烈的市场竞争,建议整机制造商应更加重视研发投入和技术创新,在机组整体设计、载荷优化计算、控制策略优化、

并网性能等方面实现真正的自主创新和突破,充分发挥“研中学”效应,使单位千瓦的风力发电机组成本实现继续下降。

参考文献:

- [1] 中国循环经济协会可再生能源专业委员会(CREIA),中国可再生能源学会风能专业委员会(CWEA).中国风电发展报告(系列报告,每年定期发布)[R].北京:中国环境科学出版社,2007—2016.
- [2] Wright, T.P. Factors affecting the cost of airplanes[J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1936, 3: 122—128.
- [3] Neij L., Andersen P.D., Durstewitz M. Experience curves for wind power[J]. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2004, 2(1/2):15.
- [4] Neij L. Cost development of future technologies for power generation—A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(6): 2200—2211.
- [5] McDonald A., Schrattenholzer L. Learning rates for energy technologies[J]. *Energy Policy*, 2001, 29(4): 255—261.
- [6] Junginger, M., Faaij, A., Turkenburg, W.C. Global experience curves for wind farms[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(2):133—150.
- [7] IEA. Experience curves for energy technology policy[Z]. Paris, 2000.
- [8] Ibenholt K. Explaining learning curves for wind power[J]. *Energy Policy*, 2002, 30(13): 1181—1189.
- [9] Rubin E.S., Azevedo I.M.L., Jaramillo P., Yeh S. A review of learning rates for electricity supply technologies[J]. *Energy Policy*, 2015, 86: 198—218.
- [10] 邸元,崔潇濛,刘晓鸥.中国风电产业技术创新对风电投资成本的影响[J].*数量经济技术经济研究*, 2012, (3): 140—150.
- [11] Qiu, Y., Anadon, L.D. The price of wind power in China during its expansion: technology adoption, learning-by-doing, economies of scale, and manufacturing localization[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(3): 772—785.
- [12] Yu Y., Li H., Che Y., et al. The price evolution of wind turbines in China: A study based on the modified multi-factor learning curve[J]. *Renewable Energy*, 2017, 103:522—536.
- [13] Hayashi D., Huenteler J., Lewis J. I. Gone with the wind: A learning curve analysis of China's wind power industry[J]. *Energy Policy*, 2018, 120:38—51.
- [14] 中国循环经济协会可再生能源专业委员会,中国农业机械工业协会风力机械分会,国家可再生能源中心.2018年中国风电吊装容量统计简报[R].2019.