

光伏组件技术进步的“干中学”与“研中学”效应研究

袁潮清, 董鸿源

(南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 光伏产业是我国具有全球竞争优势的战略性新兴产业, 推动其高质量发展是实现“3060”双碳目标的重要手段之一。采用双因素学习曲线模型, 参照索罗余值法测度从2015—2020年光伏组件技术进步的“干中学”效应和“研中学”效应。其中, 由“干中学”效应导致的光伏组件成本下降约为0.85元/瓦, 贡献率为42.40%; 由“研中学”效应导致的成本下降约为1.07元/瓦, 贡献率为57.60%。进一步对光伏组件“干中学”效应和“研中学”效应的驱动因素进行研究。“干中学”效应方面, 从供给侧和需求侧两个维度采用文献分析法讨论了驱动光伏组件产量增加的因素; “研中学”效应方面, 采用知识生产函数分析研发资本投入和人力投入对光伏组件技术进步速度的影响。结果表明, 光伏组件研发资本投入存在边际报酬递减的现象, 而研发人力投入的边际报酬是递增的。在此基础上, 分析研究结果的政策启示。

关键词: 技术进步; 干中学; 研中学; 光伏组件

中图分类号: F062.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-0566(2024)07-0049-10

Study on the “learning by doing” and “learning by researching” effects of technological progress of photovoltaic module

YUAN Chaoqing, DONG Hongyuan

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The photovoltaic industry is a strategic emerging industry with international competitive advantages in China, and promoting its high-quality development is one of the important means to achieve the “3060” dual carbon goals. This article uses a two factor learning curve model and refers to the Solow residual method to measure the “learning by doing” and “learning by studying” effects of photovoltaic module technological progress from 2015 to 2020. The cost reduction of photovoltaic modules caused by the “learning by doing” effect is about 0.85 RMB/Watt, with a contribution of 42.40%; That caused by the “learning by researching” effect is 1.07 RMB/Watt, with a contribution of 57.60%. In further the driving factors of the “learning by doing” and “learning by researching” effects in the photovoltaic module are analyzed. In terms of the “learning by doing” effect, the factors driving the increase in production of the photovoltaic modules were discussed by using literature analysis method from two dimensions: supply side and demand side; In terms of the “learning by researching” effect, the knowledge production function is used to analyze the impact of two direct factors, R&D capital investment and human investment, on the technical progress rate of the photovoltaic modules. The results indicate that there is a phenomenon of diminishing marginal returns in photovoltaic module R&D capital investment, while the marginal returns in R&D manpower investment increase. On this basis, the policy implications of the research results were analyzed.

Key words: technological progress; learning by doing; learning by researching; photovoltaic modules

收稿日期: 2024-02-20 修回日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(72374102); 教育部人文社会科学研究规划基金一般项目(21YJA630110)。

作者简介: 袁潮清(1979—), 男, 安徽怀宁人, 南京航空航天大学经济与管理学院教授, 博士, 研究方向为产业创新。

工业革命以来,化石能源消费支撑了人类社会的发展。然而由此引发的污染和排放问题日益严重,从而对全球可持续发展造成巨大冲击。能源低碳化已成为国际共识,是新一轮能源革命的主要标志。中国在全球低碳发展中起到了重要的推动作用。2020 年 9 月,国家主席习近平在联合国大会上代表中国向世界庄严宣布了“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的目标。大力发展光伏等新能源产业,是我国实现“3060”双碳目标、应对气候变化的重要途径之一。

经过 10 余年的创新发展,中国光伏产业逐步实现了全球领先。2022 年,中国光伏新增和累计装机容量继续保持全球第一;多晶硅、硅片、电池片、组件产量也稳居世界第一,显示出了全产业链的竞争优势;光伏产业出口总额约 512.5 亿美元,成为出口贸易的“新三样”之一;采用 PERC 技术规模化生产的 p 型单晶和多晶电池的转换效率分别为 23.2% 和 21.1%,实现了技术上的国际领先。

技术进步是光伏产业高质量发展的关键。随着技术进步,光伏电池转换效率不断提高。新材料的研发和工艺的改进使得光伏电池能够更高效地将太阳能转化为电能,在同样面积下可获取更多的电力输出,从而增加光伏系统的发电能力,同时也带来了光伏组件制造成本的降低。自动化生产设备的应用、工艺优化等技术手段也有助于提高生产效率并降低成本。多晶硅、硅片、电池片以及组件的成本实现了持续的大幅度下降,如图 1 所示。成本下降使得光伏发电平价上网变成了现实。

作为技术进步的源头,技术创新可划分为基础创新和次级创新两种形式:前者即研究与发展,是在有意识的研发创新活动中通过模仿性或自主性技术创新来实现的,其可创造出新的生产机会;后者即“干中学”,是指在生产过程中通过积累经验进而实现渐进式技术进步,其使由基础创新所创造的生产经验成为现实^[1]。换言之,以基础创新或研究与发展为基础的“研中学”,是通过开展科技创新活动积极探索新技术、新机制,以帮助企业提升生产效率、降低生产成本为目的的一种组织学习模式^[2];以次级创新为基础的“干中学”是由于企业生产过程中积累经验,从量产经验中

获取生产技能、丰富知识储备,进而导致生产效率提升、长期生产成本降低的现象的通俗名称^[3]。

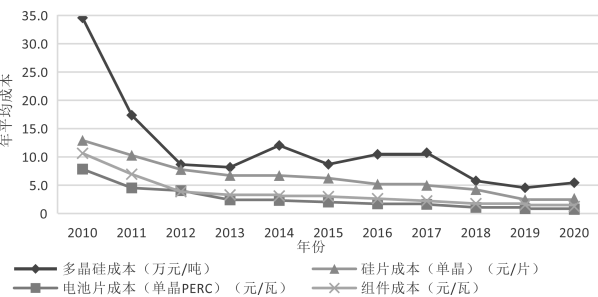


图 1 中国光伏产业多晶硅、硅片、电池片及组件的年平均成本

数据来源:根据上市公司年报估算。

关于光伏产业的“研中学”和“干中学”的效应,均有相当丰富的研究。对于“研中学”效应,主要集中在光伏技术路线^[4],以及企业创新决策^[5]、产业政策^[6]、政府补贴^[7]、创新生态^[8]、区域创新体系^[9]及创新模式^[10]等对以专利为代表的创新产出的影响。这些研究识别了企业因素、政策因素和环境因素等光伏研发活动和创新产出的积极作用。对于“干中学”效应,更多采用学习曲线来进行研究。估计光伏学习率,揭示光伏成本下降的规律^[11]。也有学者认识到光伏产业技术进步的“研中学”效应和“干中学”效应是同时存在的^[12]。他们在单因素学习曲线模型的基础上将研发加入,构建双因素或者多因素学习曲线模型,更好地刻画光伏技术进步的特征和动态。

现有的研究明确了技术进步“干中学”效应和“研中学”效应的存在,采用计量模型和学习曲线对其进行了研究。但是现有的研究对于“干中学”效应和“研中学”效应,未能进行充分的测度。而准确测度“干中学”效应和“研中学”效应,对于解释产业发展和技术进步的重要前提,也是评价和优化产业政策的重要依据。其次,“干中学”效应和“研中学”效应都会导致光伏组件成本的显著下降,而目前对“研中学”效应的研究都集中在对专利的研究,未能充分重视“研中学”效应的经济效益。此外,光伏的研发投入也在迅速增长,这些要素投入的合理性和经济性,也需要做进一步的探索。

光伏系统的初始全投资主要包括组件、逆变器、一次设备、二次设备等关键设备成本,以及土

地费用、电网接入、管理费用等。但是组件相较于其他光伏设备,其成本有较大的下降空间,受区域等差异性因素的影响较小,且在总成本中占比较高,所以本文将光伏组件的生产成本作为研究对象。本文的主要内容如下:基于双因素学习曲线模型,借助索洛余值的思想将技术进步分解为“干中学”效应和“研中学”效应,并对“干中学”效应和“研中学”效应的驱动因素展开研究。其中采用文献分析法归纳总结了“干中学”效应驱动因素,采用知识生产函数重点讨论了光伏组件研发投入对“研中学”效应的作用。

一、光伏组件技术进步的“干中学”效应和“研中学”效应测度

(一)光伏组件技术进步的“干中学”效应和“研中学”效应的分解模型

考虑光伏组件技术进步由“干中学”效应和“研中学”效应两部分组成,参考索洛余值法,将光伏组件成本下降中不能由“干中学”效应解释的部分归因于“研中学”效应。构建出如下的双重技术效应学习曲线:

$$C_t = C_0 \times Q_t^{-\beta_1} \times A_t^{-1} \quad (1)$$

式(1)中, C_t 表示 t 时期的单位成本, C_0 表示初始单位成本, Q_t 表示 t 时期的累计产量, A_t 表示 t 时期通过研发获得的知识存量, β_1 表示“干中学”效应的学习率指数。等式两边同取对数后得:

$$\ln C_t = \ln C_0 - \beta_1 \ln Q_t - \ln A_t \quad (2)$$

由于缺乏光伏组件行业层面的数据,本文将采用上市公司数据开展研究,将式(2)转化为面板数据模型,具体形式如下:

$$\ln C_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln Q_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式(3)中, i 代表第 i 家上市企业; t 代表年份; C_{it} 表示第 i 家上市公司第 t 年的单位成本; Q_{it} 表示第 i 家上市公司第 t 年的累计产量; ε_{it} 表示随机扰动项; β 为待估计参数。

(二)数据来源与处理

从沪深 A 股中选取符合标准的光伏组件生产上市公司,收集整理其数据。筛选企业的思路如下。

首先,初步挑选出取沪深 A 股中的光伏产业的上市公司。在沪深 A 股中筛选出主营业务与光伏产业相关的上市公司,并通过中国财富网等各

大金融信息平台的光伏概念股板块以及索比光伏网等光伏网站和中国光伏产业年度报告中提及的光伏企业信息等查漏补缺。

然后,选取最具代表性的光伏组件生产上市公司。选取在 2015 年及之前在国内上市的光伏企业,并查阅各个企业的财务报表进行筛选和整理,剔除 2015—2020 年期间主营业务并非一直包括光伏业务及营业产品中并非一直包括组件的上市公司。

最后,为避免样本存在异常值而导致实验结果产生误差,剔除研究期间的 ST、*ST 上市企业,剔除关键变量数据严重缺失的样本。

经过以上步骤的样本筛选与数据整理、计算后,共从沪深 A 股的 135 家光伏上市公司中筛选出符合标准的 16 家上市公司作为研究对象,这 16 家上市公司的光伏组件产量占全国的一大半,且是产业龙头企业,在技术、生产方面都具有领先优势,具有很好的代表性。时间跨度为 2015—2020 年(2021 年,2022 年受疫情影响,生产成本存在异常提高)。基于确定的光伏组件生产上市公司名单,通过中国研究数据服务平台(CNRDS)搜集并整理相关企业的数据指标,部分缺失数据通过查询企业年度报告获取。

根据以上分析,各变量的名称与具体含义总结如表 1 所示。

表 1 各变量的名称与具体含义

变量类型	变量名称	变量代码	变量测度
因变量	单位成本	lnC	组件生产的单位成本的自然对数
自变量	累计产量	lnQ	组件生产的累计产量的自然对数

(三)光伏组件技术进步的“研中学”“干中学”效应分解

将上述数据对式(3)的双因素学习曲线运用混合最小二乘法(POLS)进行回归参数估计,回归结果如表 2 所示。

表 2 双因素学习曲线的回归结果

变量	系数	标准误差	t 值	p 值
$\ln Q_{it}$	-0.185 2	0.025 2	-7.34	0.000 ***
常数项	15.977 8	0.205 7	77.67	0.000 ***
$R^2 = 0.364\ 5$, 调整 $R^2 = 0.357\ 8$				

根据结果可整理出学习曲线模型如下所示:

$$C_t = C_0 \times Q_t^{-0.185\ 2} \times A_t^{-1} \quad (4)$$

对式(4)中 C_t 求全微分后并对等式两边同除以 C_t 得:

$$\frac{\Delta C_t}{C_t} = -0.1852 \frac{\Delta Q_t}{Q_t} - \frac{\Delta A_t}{A_t} \quad (5)$$

$$g_c = -0.1852 g_Q - g_A \quad (6)$$

式(5)、式(6)中, $g_c = \frac{\Delta C_t}{C_t}$, 即单位成本的增长率; $g_Q = \frac{\Delta Q_t}{Q_t}$, 即累计产量的增长率; $g_A = \frac{\Delta A_t}{A_t}$, 即知识存量的增长率。

“干中学”的贡献率,即技术进步由产量增加贡献的份额,便可表示为: $\alpha \frac{\Delta Q/Q}{\Delta C/C}$; 研中学的贡献率,即技术进步由研发创新贡献的份额,便可表示为: $\frac{\Delta A/A}{\Delta C/C}$ 。将各光伏企业历年数据代入后,求得各光伏企业历年干中学的贡献率和研中学的贡献率,再分别将历年的各企业的数据平均后结果如表 3 所示。

表 3 光伏组件技术进步的“干中学”贡献率和“研中学”贡献率

年份	干中学贡献率/%	研中学贡献率/%
2015	81.89	18.11
2016	62.53	37.47
2017	8.27	91.73
2018	21.28	78.72
2019	62.70	37.30
2020	17.71	82.29
2015—2020	42.40	57.60

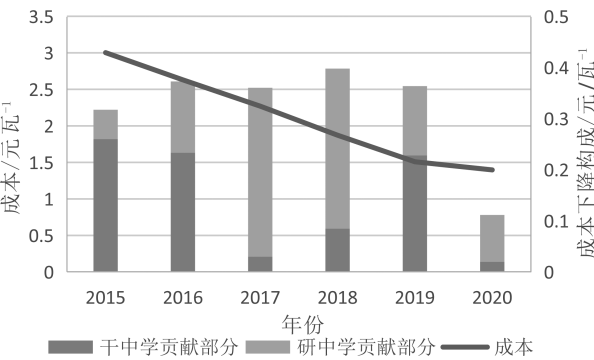


图 2 光伏组件成本下降的构成

根据表 1 计算的贡献率,可以计算光伏组件成本下降构成(右轴),如图 1 所示。其中,由“干中学”效应导致的成本下降累计约为 0.85 元/瓦,由“研中学”效应导致的成本下降累计约为 1.07 元/瓦;“干中学”效应贡献了其中的 42.40% ,“研中学”效应贡献了 57.60%。可见,“干中学”效应和“研中学”效应在中国光伏组件技术进步中都相当重要。

表 3 的结果还表明,“干中学”效应和“研中学”效应贡献率波动幅度较大。索罗余值法计算出来的技术贡献率包含技术进步,管理创新等多重因素影响,且这些影响并不是均匀的、连续的,具有一定的随机性和不确定性,所以索洛余值计算结果一般都有比较大的波动^[13]。本文参考索洛余值法构建双重技术效应模型,其计算结果与索洛余值在这一方面是类似的。而且,光伏组件技术进步具有非连续性“阶跃”的特点。光伏技术迭代速度较快,技术的轨道变迁会引起非连续性的技术进步,进而带动光伏整个产业链各环节的成本和价格呈现“阶跃式”下降。2014 年,RCZ 单晶生产技术产业化和金刚线切割技术国产化问题先后被攻克;2016 年年底,单、多晶组件几乎实现同价,单晶完成了对多晶的超越,单晶产品的规模化量产对这一阶段我国光伏技术进步起到了明显的推动作用,从而 2017 年之前“干中学”贡献率较高。2017 年,我国光伏产业开始出现产能过剩的问题,产量迅猛增加、市场竞争激烈、价格下降及政府减少补贴政策等因素导致光伏产业供过于求现象日益严重,造成生产资源大量浪费,因此光伏组件的“干中学”效应不增反降。2018 年“531”新政和 2019 年“19 号文”使“平价上网”成为光伏产业发展的核心之义,缓解了产业下游的产能过剩,助推 PERC 技术的发展。2019 年,PERC 电池成为了市场新的主流产品,当年投产的电池产线均为 PERC 电池,一些普通单晶电池产业也逐步改为 PERC 产线,这使得当年“干中学”的贡献率再次上升。但随着技术红利的逐渐消失,PERC 电池的效率已逐渐逼近理论转换效率天花板,进一步提升的空间有限,这也导致后期 2020 年的“干中学”贡献率再次降低。因此,光伏未来发展还需实现新的技术跃迁,进一步将“干中学”和“研中学”相结合,推动光伏组件技术进步和成本下降。

“干中学”效应和“研中学”效应的分解,厘清了累计产量和研发创新对技术进步和成本下降的影响。而对于两种效应的驱动因素需要进一步分析,才能对产业发展和政策制定提供更加直接的依据。

二、光伏组件“干中学”和“研中学”效应的驱动因素分析

(一)光伏组件“干中学”效应的驱动因素分析
“干中学”效应是发生在生产过程中的生产率

的提高与技术外溢,是随累计产量增加而产生的。而产量是由供给和需求共同决定的,现有研究也多从供给侧和需求侧两个维度讨论驱动光伏组件产量增加的因素^[14]。相关的研究已经十分充分,本节采用文献分析的方法对其进行简要的概括,如图3所示。供给侧因素变化推动供给曲线由 S_1 向右移动至 S_2 ,需求侧因素变化推动需求曲线由 D_1 向右移动至 D_2 ,从而导致光伏组件产量的快速增加并加速了“干中学”效应。

在供给侧,依靠大量的有形资本和劳动力投入实现了大规模的产业扩张^[15],供应链管理 and 原材料供应状况也是影响产量变化的重要因素^[16],企业规模、盈利能力、偿债能力等经营能力也会影响光伏的产量^[17]。光伏产业作为典型的需求驱动型新兴产业,市场需求的变化会导致光伏组件制造业反应迅速^[18],部分市场灵敏性强的企业会根据市场需求即将增大的市场信息提前扩大企业的生产规模^[19]。而供给侧政策通过财政补贴、税收优惠^[20]、人才培养^[21]及信息服务^[4]等支持措施为光伏企业提供支持,推动供给扩张甚至产能的“非理性扩张”^[22]。

在需求侧,地方电力需求、出口及贸易摩擦^[23]等会增加光伏的产量。再者,需求侧政策对光伏企业生产活动具有积极影响,主要通过政府采购^[24]、上网电价补贴^[25]、对外承包^[4]、并网补贴^[26]等方式为光伏产品创造应用市场,以降低市场不确定性和产品的市场准入成本,进而扩大市场需求、增加产量。

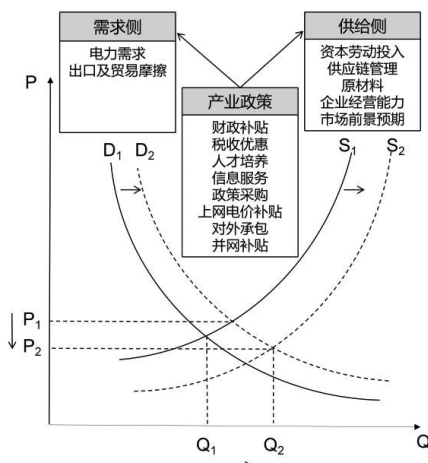


图3 供给侧因素和需求侧因素对光伏组件产量的影响

“干中学”效应是随累计产量增加而产生的,而对于影响光伏产量的因素研究相对成熟。其主要争议在于光伏政策的影响,但是可以肯定的是,光伏政策促进了光伏产量的增加。这也就意味着光伏政策强化了“干中学”效应。从这一点来看,光伏政策的政策效果无疑是积极的,甚至说,也正是因为光伏政策,中国光伏才迅速扩张和成长并在全球竞争中抢占了先机。

(二)光伏组件“研中学”效应的驱动因素分析

1. “研中学”效应的知识生产函数

“研中学”效应是研发投入所产生的最终效果,其重要体现是成本的下降。因此,本节将采用第二节测算的“研中学”效应作为被解释变量,探讨光伏组件研发投入与“研中学”效应的关系。

1990年,Romer^[27]构建了知识生产函数,研究了新知识的创造对现有知识存量的依赖性。他假设了一个知识生产函数的特殊形式:

$$\dot{A} = B K_A^\alpha L_A^\beta A^\theta \quad (7)$$

式(7)中, $\dot{A}$ 为新知识, K_A 为研发资本投入量, L_A 为研发人员数, A 为总知识存量。 B 为转移参数($B > 0$), α 、 β 和 θ 为待估参数。

参考Romer对知识生产函数的核心假定,令 $\theta = 1$,认为创新活动处于稳定状况,即创新过程中的研发资金投入和研发人力投入决定知识存量的增长速度^[28]。可得到衡量研发投入与创新产出效率之间关系的创新核算模型:

$$g_A = B K_A^{\beta_2} L_A^{\beta_3} \quad (8)$$

式(8)中, g_A 为知识存量增长率($g_A = \frac{\dot{A}}{A}$, $\dot{A}$ 为知识进步量, A 为总知识存量); K_A 为研发资本投入量; L_A 为研发人力投入; B 为转移参数($B > 1$), β_2 、 β_3 为待估参数。

对等式两边同取对数后得:

$$\ln g_A = \beta_0 + \beta_2 \ln K_A + \beta_3 \ln L_A \quad (9)$$

根据式(9)构建面板数据回归模型进行实证分析:

$$\ln g_{A_{it}} = \beta_0 + \beta_2 \ln K_{A_{it}} + \beta_3 \ln L_{A_{it}} + \sum \gamma_i C V_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

式(10)中, i 代表第 i 家上市公司; t 代表年份。 $g_{A_{it}}$ 为 i 上市公司 t 时期的知识存量增长率;

$K_{A_{it}}$ 为第 i 家上市公司 t 时期的研发资本存量; $L_{A_{it}}$ 为第 i 家上市公司 t 时期的研发人力投入; CV 为控制变量。 β 为待估参数。 μ_i 代表不可观测的个体效应; λ_t 代表模型的时间效应; ε_{it} 表示随机扰动项。

2. 变量与数据

成本是技术创新的实际价值体现,故利用第二节中计算出“干中学”效应(g_A)来测度研发产出作为被解释变量。考虑到 g_A 存在个别负数,直接取对数会出现缺失值、降低样本总数,故参照相关文献的做法^[29],对 g_A 加 1 后再取对数。

根据式(10),采用研发资本存量和研发劳动力投入作为解释变量。

对于研发资本存量,选择光伏组件生产上市公司的历年研发投入累积量的对数加以测度。企业在核算研发投入的时候,包括了研发人员的薪酬。而研发投入中的“职工薪酬”,一方面和研发人员投入是高度一致的,另一方面也不会形成研发资本的积累。因此,在计算光伏企业的历年研发投入累积量时,将“研发投入合计”栏目下“职工薪酬”项加以扣除。数据来源与处理如下。

(1)从中国研究数据服务平台(CNRDS)搜集各公司的“研发投入合计”;查阅各公司历年的年度报告整理出各公司历年的研发费用中的研发人员“职工薪酬”。

(2)用“研发投入合计”减去研发费用中的“职工薪酬”,求得各光伏组件生产上市公司历年除去研发人力成本的研发资金投入。

(3)借鉴永续盘存法(PIM)计算研发投入累积量^[30]。

首先,利用各公司历年的研发投入求得各公司的研发投入的年均增长率 $\bar{g}_{K_{A_{it}}}$ 。

其次,采用 15% 的资本折旧率。再者,根据 2015—2020 年研发投入的年均增长率和资本折旧率求得基期的研发投入累积量,本文以 2015 年为基期,其具体公式如下:

$$K_{A_{t0}} = E_{t0} / (\bar{g}_{K_{A_{it}}} + \delta) \quad (11)$$

式(11)中, $K_{A_{t0}}$ 为第 i 家光伏企业的初始年份(2015 年)研发投入累积量; E_{t0} 是第 i 家光伏企业的初始年份研发投入; $\bar{g}_{K_{A_{it}}}$ 是第 i 家光伏企业的研发投入的年均增长率; δ 为资本折旧率($\delta = 15\%$)。

最后,采用永续盘存法计算出各个企业历年的研发投入累积量,PIM 公式如下:

$$K_{A_{it+1}} = (1 - \delta) K_{A_{it}} + E_{it} \quad (12)$$

式(12)中, $K_{A_{it}}$ 和 $K_{A_{it+1}}$ 分别表示为第 i 家企业第 t 年与第 $t+1$ 年的研发投入累积量; E_{it} 为第 i 家企业第 t 年的研发投入; δ 为资本折旧率。

对于研发劳动投入,采用光伏组件生产上市公司的历年研发人员数量的对数测度。企业研发人员数量的数据来源于中国研究数据服务平台(CNRDS)。

除此以外,还要考虑企业年龄、企业规模等指标作为控制变量。

(1)企业年龄,光伏组件生产上市公司成立年限。有学者认为在延续性创新环境中企业年龄和其创新绩效呈显著正相关关系^[31],随着企业经营时间的增长,企业拥有更多的机会积累创新知识与经验,具有更强的组织学习力、行业洞察力和市场理解力。也有学者认为企业年龄在高技术企业创新对企业成长的影响关系中起到负向的调节作用^[32],较老的企业可能在技术领域存在滞后性或陈旧化,可能面临创新惯性和组织僵化等问题,而新兴企业可能更具灵活性和创新能力,更敢于采纳新技术和知识,能够更快地推动创新知识增长,并保持创新竞争力。企业年龄对创新的影响并不确定。

(2)企业规模,光伏组件生产上市公司资产总额的自然对数。通常认为科技企业的企业规模对其创新能力有显著的正向影响^[33]。大规模企业相比于中小型企业更能承受创新风险,其创新效率更高、知识存量增速更快。此外,大规模企业更容易吸引高水平的研发人员,更易形成稳定、完善的组织文化和创新体系,进而支持知识累积和开展创新活动。也有学者认为规模较小的企业通常更加灵活和敏锐,敢于采取新技术和新知识,它们更容易创建创新团队和实施创新项目,并在短时间内转化为创新成果。而企业规模过大时,企业扩张将对创新效率产生显著负面效应^[34]。企业规模对创新的影响也并不确定。

(3)员工学历水平,光伏组件生产上市公司的硕士及以上学历员工占比。人力资本是推动企业进行技术创新的必要因素,高学历领导和高学历员工均有助于促进企业增加创新活动和扩大创新

规模,进而促进创新产出^[35]。

(4)企业负债水平,光伏组件生产上市公司的资产负债率。资产负债率是衡量企业财政风险的重要指标。有学者认为资产负债率和企业研发投入负相关^[36]。当企业资产负债率过高时,其经营风险较大,而创新活动具有成本高、风险大、耗时的特点,此时企业迫于财政高压可能会选择更加谨慎和保守的发展策略,其创新意愿便极有可能降低。也有学者认为高资产负债率的企业为了扭转自己的经营现状,可能会选择投入更多的研发资金和人力以研发新的产品和技术,以期通过技术创新来获取竞争优势^[37]。企业负债水平对创新的影响并不确定。

(5)董事会股权激励,光伏组件生产上市公司的董事会所有成员持股数量占公司总股数的比例。有学者认为董事会作为公司提出决策的重要一方,为保证自己可以更直接地从公司的长期成功和价值增长中获得收益,董事会成员势必会更加关注公司的长期发展,此时他们便会更倾向于采取长期战略,而不仅仅关注短期利润,这有利于支持并落实涉及研发创新的企业决策,促进企业加大研发投入,推动企业开展技术创新活动^[38]。而有些学者认为董事会的强烈外在监督压力使管理者受到的内部约束加大,进而可能更加警惕外在风险,只愿意采取保守投资决策,使得公司有意地规避了许多创新行为^[39]。董事会股权激励对创新的影响也不确定。

(6)政府补贴。财政补贴为企业进行研发和创新活动提供了直接的资金支持,同时财政补贴作为一种激励机制有着很强的附着效应,政府补贴释放的积极信号有利于企业获取外部创新资源,对企业创新具有显著促进作用^[40]。但财政补贴所具有无偿性可能导致企业将关注点从市场需求转移至追求补贴资金,当研发补贴集中度较高时,企业更愿意投资于寻租活动以获取政府补贴进而增加自身利润,这显著抑制了企业创新^[41]。此时,若政府只关注数量而忽视质量的监督,便会导致企业只追求短期的成果和表面化的创新,而忽视长期的技术突破和核心能力的提高。政府补

贴对创新的影响也不确定。

(7)企业盈利能力,光伏组件生产上市公司的净利润与营业成本的比值。普遍认为,盈利能力强的企业拥有较强的研发能力,其知识存量增速也较快^[42]。根据以上分析,各变量的名称与具体含义总结如表4所示。

表4 研究变量定义与测度

变量类型	变量名称	变量代码	变量测度	预期影响
因变量	研发产出	$\ln(g_A + 1)$	对数处理后的的 g_A ($g_A = -0.1852g_Q - g_C$)	—
自变量	研发资本存量	$\ln K_A$	研发资金投入累积量的自然对数	正向
	研发劳动人力存量	$\ln L_A$	研发人员数量的自然对数	正向
	企业年龄	Age	成立年限	不确定
控制变量	企业规模	$Size$	资产总额的自然对数	不确定
	员工学历水平	Edu	硕士及以上学历员工占比	正向
	企业负债水平	$Debt$	资产负债率	不确定
	董事会股权激励	Boa	董事会持股比例	不确定
	政府补贴	Sub	政府补贴加1的对数	不确定
	企业盈利能力	$Gain$	净利润与营业收入的比值	正向

3. 模型检验与选择

针对模型进行自相关、异方差以及截面相关的检验以保证模型拟合结果的有效性,结果如表5所示。Friedman 检验并未呈现显著性 ($P = 1 > 0.05$),模型不存在截面相关的问题;Wald 检验呈现显著性 ($p = 0 < 0.05$),模型存在组内异方差问题;Wooldridge 检验呈现显著性 ($p = 0 < 0.05$),模型存在组内自相关问题。模型存在组内异方差和组内自相关问题,故文本使用聚类稳健标准误来修整异方差和自相关问题。为保证回归模型的有效性,进行F检验、BP检验以及Hausman检验,对混合效应模型、随机效应模型和固定效应模型进行两两比较后确定最优回归模型。F检验并未呈现出显著性 ($p = 0.985 > 0.05$),意味着相对固定效应模型而言,混合效应模型更优。BP检验呈现出5%水平的显著性 ($p = 0.007 < 0.05$),意味着相对混合效应模型而言,随机效应模型更优。Hausman检验呈现出5%水平的显著性 ($p = 0.000 < 0.05$),意味着相对随机效应模型而言,固定效应模型更优。故最终回归分析模型选择固定效应模型。考虑时间效应和个体效应后选择双向固定效应模型进行后续的研究分析。

表 5 模型检验

检验类型	检验值	Prob > F
Friedman 检验	0.393	1.000
Wald 检验	357.53	0.000
Wooldridge 检验	4.092	0.000
F 检验	0.358	0.985
BP 检验	6.048	0.007
Hausman 检验	29.186	0.000

4. 实证结果

最终回归结果如表 6 所示。回归结果显示:光伏上市企业的研发资本存量对其研发产出 g_A 具有显著的负向影响 ($\beta_2 = -0.07846, p = 0.059 < 0.1$)。这说明在研发资本投入方面,光伏组件的研发投入呈现出边际报酬递减的态势。随着研发资本投入的增加,研发产出量虽仍在增长,但其增速是放缓的。光伏组件生产上市公司的研发人力投入对其知识存量增长率具有显著的正向影响 ($\beta_3 = 0.07487, p = 0.037 < 0.1$)。在人力投入方面,光伏组件的研发投入是边际报酬递增的,随着研发人力投入的增加,研发产出增加。

表 6 回归分析结果

变量	系数	标准误差	t 值	p 值
$\ln K_A$	-0.07846	0.0321	-2.44	0.059*
$\ln L_A$	0.07487	0.0265	2.82	0.037**
Age	0.21720	0.1085	2.00	0.102
Size	-0.02999	0.0453	-0.66	0.537
Edu	2.25092	1.0092	2.23	0.076*
Debt	-0.01004	0.0777	-0.13	0.902
Boa	-0.00234	0.0017	-1.40	0.221
Sub	0.00006	0.0028	0.02	0.983
Gain	0.13862	0.2425	0.57	0.592
组内 $R^2 = 0.1431$				

注:**、* 分别表示在 $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$ 时有统计学意义。

需要注意,我国光伏组件的研发资本投入与研发产出的关系虽是边际报酬递减的,但并不意味就不再需要加大研发资本投入。因为随着研发资本投入的增加,研发产出即知识存量增长率的增速虽有所放缓,但知识存量仍处于增长态势。针对研发投入的边际报酬递减现象,有学者将其作为解释创新悖论产生^①的原因。对于高速发展的产业部门,Ejermo 等^[43]认为当其发展到一定阶段后便自然会出现研发投入边际报酬递减的现象,这甚至可以被认为是产业成功的标志,是产业在研发方面进行广泛投资的结果。他认为产业的

持续高速发展需要大量的研发投入支撑,这可以理解为是为了维持长期的高速发展所需支付的溢价,从长远角度看,大量的研发投入必是有回报的。近年来,在政策引导和技术革新驱动的双重作用下,我国光伏产业保持高速发展态势,现已成为取得国际领先优势的产业。图 4 显示以 2015 年为基期,我国光伏组件历年“研发投入合计”的倍数和总资产倍数。我国光伏组件研发投入增速远远大于固定资产的投入,这种大规模创新投入也可能出现了创新悖论的问题。同时也恰恰说明了我国光伏产业发展与这种高强度创新是直接相关的。

观察控制变量的结果,发现光伏组件生产上市公司员工学历水平对知识存量增速具有显著的正向影响,人力资本对企业的创新产出具有促进作用。企业年龄、政府补贴、企业盈利能力和知识存量增长率呈不显著的正向关系。老牌公司拥有更多的机会积累和沉淀创新知识与经验,盈利能力强的企业拥有更多的财政资源及更具创新性的文化氛围,故他们多在技术创新方面保持领先。政府补贴不仅为企业提供了直接资金支持,还具有很强的附着效应,从多方面推动了企业创新成果转化。企业规模、董事会持股激励、企业负债水平呈不显著的负相关关系。当企业规模过大时,其创新发展过程可能会受到组织层级繁多、决策过程缓慢等问题限制,进而减缓其知识存量增长的速度。董事会持股过多的企业,其发展决策会受到董事会的强烈监督压力,这在一定程度上会束

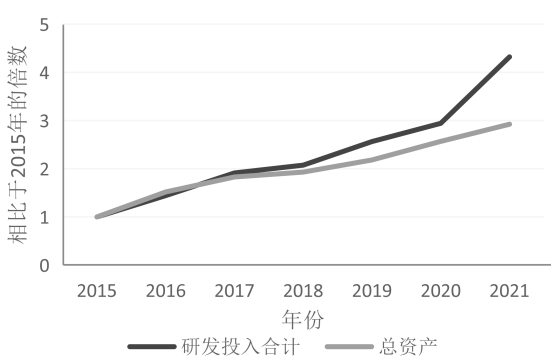


图 4 我国光伏产业研发投入合计和总资产相对于 2015 年的倍数

① 创新悖论:随着时间的推移,部门的研发支出和 GDP 之间的差距越来越大,研发投入量的增速远远大于 GDP 的增速。

缚企业,使其有意规避高风险的创新行为进而选择保守的投资决策。当企业资产负债率过高时,其迫于财政高压也可能会选择更加谨慎和保守的发展策略,故不利于知识的增加。控制变量的回归结果与部分相关研究是一致的。

三、政策启示

本文将示中国光伏组件技术进步的分解为“干中学”效应和“研中学”效应,并进一步讨论“干中学”效应和“研中学”效应背后的驱动因素。本文的研究不仅对技术进步进行了溯源,还对产业政策支持产业创新提供了重要的启示。

研究表明,光伏组件技术进步既有“干中学”效应也有“研中学”效应,因此对于光伏等新兴产业的发展需要统筹发挥“干中学”和“研中学”的作用。由于光伏产能过剩的问题,光伏政策受到了不少质疑,但是政策的作用是多方面的。光伏政策促进了光伏产量的扩张和光伏研发的投入,推动了光伏产品的快速更新换代,以大踏步的科技进步实现了成本持续迅猛的下降,在国际市场也实现了全面的领先。本文也提到了光伏产品技术已经实现了数次迭代。在迭代过程中,技术落后的产能就会被淘汰。光伏政策通过“干中学”效应和“研中学”效应实实在在地加速了这个迭代过程,从而在表面上看光伏产能过剩问题始终不能解决。而从某种意义上说,这恰恰是各种补贴、优惠、规制、政府采购等光伏政策组合有效性的体现。

本文还重点探讨了“研中学”效应的驱动因素。尽管研发资本投入的边际产出在递减,但是这不能说明光伏组件研发投入无效率。在讨论研发投入效率之前应该先关注研发投入所产生的效果。只要在充分获得了“研中学”效应的前提下,讨论研发投入的效率才是有意义的。研发投入效率高,可能说明研发资本的投入相对不足,没有达到应有的投入强度,未能实现研发的最大效益。所以对于光伏等新兴产业,采用税收优惠、研发补贴、人才政策等多种措施促进企业高强度的研发投入,是十分必要而且有效的。

本文还讨论了企业特征对“干中学”效应的影响。不同光伏企业在年龄、规模、员工学历水平及负债水平等因素存在差异,这些因素对企业的研

发产出的影响也有所不同。因此,要想精准施策,政策制定时需要充分考虑这些差异性,比如对于一些研发补助的营收或者利税的门槛、人才政策的实施条件等进行合理的设定。

此外,本文从成本下降的角度来描述和测度光伏组件技术进步,更加注重了研发的实际经济成效。光伏政策是否有效?光伏产业发展是否成功?不是通过计算专利的数量,而是应该观察光伏组件成本的下降和光伏产业的竞争力。因此,政府在对光伏等新兴产业扶持政策的效果进行评估时,应该从产业整体竞争力的角度进行考量。在产业政策具体实施时应该侧重对政策下的相应企业项目执行过程的考核,降低对专利等数量指标的考核。在政策实施过程中强调严谨性,并对微观企业的创新活动给予更多的空间,实现产业整体高质量发展。

参考文献:

- [1] 张慧毅. “干中学”、生产现场创新与技术进步:以装备制造业为例[J]. 中央财经大学学报, 2014(7): 100-106.
- [2] 汪安佑, 郭琳. 推进高科技企业自主创新的“研中学”模型[J]. 管理学报, 2009, 6(5): 658-663.
- [3] THOMPSON P. Learning by doing[J]. Handbook of the economics of innovation, 2010(1): 429-476.
- [4] 黄萃, 徐磊, 钟笑天, 等. 基于政策工具的政策—技术路线图(P-TRM)框架构建与实证分析:以中国风机制造业和光伏产业为例[J]. 中国软科学, 2014(5): 76-78.
- [5] 李纪珍, 刘子譔. 光伏企业何以在补贴退坡中实现“逆势研发”? [J]. 中国软科学, 2023(10): 34-43.
- [6] 周亚虹, 蒲余路, 陈诗一, 等. 政府扶持与新型产业发展:以新能源为例[J]. 经济研究, 2015, 50(6): 147-161.
- [7] 王宏伟, 朱雪婷, 殷晨曦. 中国光伏产业发展及电价补贴政策影响研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(7): 90-112.
- [8] 董彩婷, 柳卸林, 高雨辰, 等. 从创新生态系统视角分析中国光伏产业的追赶与超越[J]. 科研管理, 2022, 43(12): 44-53.
- [9] 董鸿源, 袁潮清. 产业政策对光伏企业创新绩效的影响研究:基于区域创新体系的调节作用[J]. 技术经济, 2023, 42(6): 36-46.
- [10] 柳卸林, 刘雨田. 开发和探索二元性与我国光伏企业追赶的关系研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2019, 40(8): 33-56.
- [11] CASTREJON-CAMPOS O, AYE L, HUI F. Effects of learning curve models on onshore wind and solar PV cost

- developments in the USA [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2022, 160: 112278.
- [12] YU Y, LI H, CHE Y 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] 王书芳. “干中学”效应对我国制造业绿色全要素生产率的作用机制研究[D]. 吉林: 吉林大学商学院, 2020: 27-30.
- [14] ZHAO Xingang, WANG Wei. Driving force for China's photovoltaic industry output growth: factor-driven or technological innovation-driven? [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 274: 122848.
- [15] 苏南. 原材料涨价制约光伏开发进度[N]. 中国能源报, 2022-06-20(15).
- [16] 止水. 原材料跌价增厚下游盈利 光伏组件“五虎”上半年净利暴增[N]. 第一财经日报, 2023-09-01(A6).
- [17] 徐波, 白婷. 中国上市公司可再生能源投资的影响因素、领先优势与政策效应[J]. *中国软科学*, 2009(S2): 284-289.
- [18] 余东华, 吕逸楠. 政府不当干预与战略性新兴产业产能过剩: 以中国光伏产业为例[J]. *中国工业经济*, 2015(10): 53-68.
- [19] 洪凌, 孙志久, 寿春晖, 等. 基于财务评价体系的光伏项目含税 LCOE 分析[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(2): 203-210.
- [20] 包红丽, 杜玉申, 刘梓毓. “干中学”式光伏产业供给侧规制的得与失[J]. *科学学研究*, 2022, 40(10): 1778-1787.
- [21] FAN Jingli, WANG Jiaxing, HU Jiawei, et al. Will China achieve its renewable portfolio standard targets? an analysis from the perspective of supply and demand [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2021, 138: 110510.
- [22] 霍沫霖, 张希良, 何建坤. 光伏组件价格影响因素: 基于计量的案例分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51(6): 796-801.
- [23] 向洪金, 赖明勇. 全球视角下美国对华光伏产品“双反”案的经济效应研究[J]. *世界经济*, 2013, 36(4): 111-137.
- [24] AHMED Z, AHAMD M, RJOUB H, et al. Economic growth, renewable energy consumption, and ecological footprint: exploring the role of environmental regulations and democracy in sustainable development[J]. *Sustainable development*, 2022, 30(4): 595-605.
- [25] 戴慧. 新能源发电价格补贴政策回顾与完善激励机制的建议[J]. *价格理论与实践*, 2022(3): 22-25.
- [26] 肖兴志, 李少林. 光伏发电产业的激励方式、他国观照与机制重构[J]. *改革*, 2014(7): 75-86.
- [27] ROMER P M. Endogenous technological change [J]. *Journal of political economy*, 1990, 98(5, Part 2): S71-S102.
- [28] 罗焱. 河南省知识生产函数的贝叶斯估计及实证研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 7-8.
- [29] 郭玥. 政府创新补助的信号传递机制与企业创新[J]. *中国工业经济*, 2018(9): 98-116.
- [30] 吴延兵. R&D 存量、知识函数与生产效率[J]. *经济学(季刊)*, 2006(3): 1129-1156.
- [31] 李寅龙. 基于创新环境类型的企业年龄与创新绩效关系研究[J]. *企业经济*, 2015(8): 30-35.
- [32] 王保林, 蒋建勋, 管璐. 高技术企业创新投入对企业成长的研究: 基于企业年龄的调节作用[J]. *技术与创新管理*, 2019, 40(4): 416-424.
- [33] 张忠寿, 朱旭强. 中国科技企业创新能力与 IPO、盈利能力、资本结构和企业规模关系研究[J]. *宏观经济研究*, 2022(2): 147-154.
- [34] 王孝松, 张瑜. 企业规模与创新效率: 基于中国高技术产业的经验分析[J]. *吉林大学社会科学学报*, 2021, 61(3): 129-141, 236-237.
- [35] 王珏, 祝继高. 劳动保护能促进企业高学历员工的创新吗: 基于 A 股上市公司的实证研究[J]. *管理世界*, 2018, 34(3): 139-152, 166, 184.
- [36] 黄国良, 董飞. 我国企业研发投入的影响因素研究: 基于管理者能力与董事会结构的实证研究[J]. *科技进步与对策*, 2010, 27(17): 103-106.
- [37] 刘静文. 资产负债率对制造业企业研发支出的影响[J]. *商场现代化*, 2021(2): 134-136.
- [38] 王煜. 董事会内部控制专业胜任力、股权再融资与企业创新行为[J]. *财会通讯*, 2023(12): 51-55, 142.
- [39] 朱磊, 孙成, 王春燕, 等. 大股东股权质押对企业创新投资的影响分析: 基于创业板上市公司的经验证据[J]. *证券市场导报*, 2019(2): 26-34, 76.
- [40] 夏清华, 何丹. 政府研发补贴促进企业创新了吗: 信号理论视角的解释[J]. *科技进步与对策*, 2020, 37(1): 92-101.
- [41] 袁军, 邵燕敏, 王珏. 研发补贴集中度、高管技术背景与企业创新: 以战略性新兴产业上市公司为例[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(5): 1185-1196.
- [42] 范高乐, 叶莉. 盈利能力、债务融资能力与创业板企业创新决策[J]. *财会通讯*, 2020(16): 34-37, 78.
- [43] EJERMO O, KANDER A, HENNING M S. The R&D-growth paradox arises in fast-growing sectors [J]. *Research policy*, 2011, 40(5): 664-672.

(本文责编: 润 泽)