

创新激励政策与能源前沿技术创新*

——以“光伏领跑者计划”为例

孙博文 袁明生 李倩文 孙传旺

内容提要:前沿技术是大国竞争的核心,也是加快形成新质生产力的关键。如何推动产能结构优化升级,激励企业进行前沿技术创新是党和国家关切的重大问题。本文根据2009—2022年中国光伏产业的45万余条专利数据,利用基于Transformer深度学习框架进行预训练的大语言模型测算了企业的前沿技术创新程度,并在此基础上评估了“光伏领跑者计划”这个对光伏产业技术突破具有重大影响的创新激励政策的实际效果。研究发现,“光伏领跑者计划”能够显著促进企业前沿技术创新,这一效果主要通过需求扩张效应、研发优化效应和知识溢出效应三条渠道实现。此外,“光伏领跑者计划”还对整个行业具有显著的势力提升效应和优质示范效应。政府通过深化供给侧结构性改革,以关键技术参数作为企业遴选和产品准入的有效区分标准,使得优质企业获得了更大的市场势力,进而显著促进了光伏行业整体的技术进步。本文建议,在培育未来产业的过程中应借鉴“光伏领跑者计划”的成功经验,逐步提高技术标准,扩大优质产品的市场需求,从而充分发挥优质企业的示范作用,推动经济高质量发展。

关键词:光伏领跑者计划 前沿技术创新 创新激励 新质生产力

一、引言

战略性新兴产业与未来产业是推动国民经济高质量发展的重要引擎,不仅能够引领科技创新和产业变革,也是大国竞争的关键领域。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》(以下简称“十五五”规划纲要)中明确提出,要培育壮大新兴产业和未来产业,完善产业创新发展生态。2026年4月召开的中共中央政治局会议进一步强调,要加快建设现代化产业体系,深入整治“内卷式”竞争。在此政策导向下,战略性新兴产业的发展将更加注重技术创新、质量提升和良性竞争秩序的构建。推动战略性新兴产业和未来产业高质量发

* 孙博文,中国社会科学院数量经济与技术经济研究所、中国社会科学院大学应用经济学院,邮政编码:100732,电子信箱:sunbowen@cass.org.cn;袁明生,厦门大学经济学院,邮政编码:361005,电子信箱:yuanms2017@163.com;李倩文,江南大学商学院、江南大学国家安全与绿色发展研究院,邮政编码:214122,电子信箱:zzxhlqw@163.com;孙传旺(通讯作者),厦门大学经济学院、计量经济学教育部重点实验室(厦门大学),邮政编码:361005,电子信箱:cw_sun@foxmail.com。本文研究得到中国社会科学院研究阐释党的二十届四中全会精神重大项目(2026YZDJ007)的资助。作者感谢匿名评审专家的宝贵意见,文责自负。

展,不仅需要促进前沿技术的不断突破,更需要完善产业生态,引导产业的发展模式向创新驱动升级。绿色发展是高质量发展的底色,新质生产力本身就是绿色生产力。光伏技术作为绿色低碳前沿技术的典型代表,既是推动能源结构转型的重要支撑,也是培育绿色新质生产力的重要载体(孙博文,2026)。产业发展的核心动力源于技术的不断突破与持续迭代,中国光伏产业实现从技术跟跑到技术领跑的跨越式发展,其背后的创新演进逻辑值得深入剖析。如何从光伏产业的发展历程中总结成功经验,并为其他产业的创新发展提供借鉴,已成为学术界广泛关注的议题。

产业的健康有序发展有赖于科学引导和有效监管,通过产业政策制度设计和必要的市场支持,政府能够推动未来产业的稳定增长和持续创新(陈强远等,2022;宋华盛等,2025)。然而,全球产业发展中“劣币驱逐良币”的案例^①比比皆是,不当的市场干预会吸引低质量的进入者,扭曲企业的发展路径,从而无法促使各类优势要素向先进生产力集聚,最终降低经济资源的配置效率(余东华和吕逸楠,2015)。产业政策充分发挥效能的关键在于,是否通过科学的制度设计形成有效的市场筛选和激励约束机制,以增强企业前沿技术创新的内生动力。由此,本文提出的问题是:政府应采取何种举措推动产业政策的有效实施,如何通过以设定技术门槛为核心的市场化机制设计给予优质企业更大的市场需求,进而激励企业进行前沿技术创新?以促进光伏行业技术进步为目标的“光伏领跑者计划”^②如何通过提高创新资源配置的针对性,避免创新资源流向低效的生产主体,进而推动企业形成面向前沿技术的创新导向?“光领计划”能否通过示范项目建设和能效认证促进企业间知识溢出,降低企业开展前沿技术研发面临的知识约束?这一政策如何通过市场势力提升效应和优质示范效应优化行业竞争格局,推动企业优胜劣汰与行业整体技术进步?对于这些问题的回答,有助于明晰产业政策在推动技术革新和产业升级方面应发挥的具体作用。

进入21世纪,中国光伏产业取得了瞩目的成绩,发展过程中也经历了必要的调整与升级。2009年后,在“金太阳工程”^③等补贴政策的作用下,大量企业积极进入光伏领域。在这一时期,中国光伏企业的业务重点集中于组件环节,国内光伏市场产能规模迅速提升。^④部分曾经的光伏头部企业因过于倚重产能规模,在技术创新

① 例如,西班牙政府2007年出台的太阳能安装补贴政策,由于其宽松的申请条件,催生了众多的企业投机行为。即使效率很低的光伏项目也能获得大量补贴,这直接导致了光伏装机容量的盲目扩张,市场上充斥着大量的劣质光伏产品。又例如,2000年以前,在乌干达农业市场中,由于掺假等原因,劣质的化肥和杂交种子驱逐了优质的农业投入要素,从而导致农业生产的回报率较低(Bold et al., 2017)。

② 下文将“光伏领跑者计划”简称为“光领计划”。

③ 2009年,为推动光伏产业技术进步,财政部、科技部和国家能源局联合发布了《关于实施金太阳示范工程的通知》,文件指出,中央财政从可再生能源专项资金中安排一定资金,支持光伏发电关键技术产业化,这一政策被简称为“金太阳工程”。

④ 资料来源:《跌落神坛的光伏巨人——从光伏起落看战略性新兴产业发展中的知识产权评议(一)》,国家知识产权局,2013年2月17日。

成果方面积累不足,最终经历了战略调整与重组。与此同时,一批具有前瞻创新意识的企业坚持技术突破,不断补齐短板,在国家“光领计划”等创新激励政策的支持下,逐步成长为行业领军力量,带动了行业从规模扩张向技术驱动的转型。这一发展历程表明,光伏产业的竞争优势并不单纯来源于产能扩张,更取决于企业前沿技术创新能力的积累以及产业政策的有效引导。

2015年推出的“光领计划”是我国旨在促进光伏前沿技术创新、应用和推广的一项创新激励政策。这一政策的核心在于以技术水平作为筛选优质企业的主要标准,从而推动企业之间的产能竞争和价格竞争转向科技竞争和创新竞争。已有关于中国创新激励政策的文献主要集中在政府引导基金(吴超鹏和严泽浩,2023)、政府补贴(蒋冠宏,2022)、税收优惠(梁若冰等,2025)、创新资格认定(汪冲和江笑云,2018)、政府采购(武威等,2024)、绿色信贷(郭俊杰等,2024)和政策协同(孙博文,2025)等方面,但从创新激励政策本身的核心特征和具体举措出发,剖析政策内容如何引导企业前沿技术创新的内在机理的相关研究仍然有待补充。关于中国光伏产业创新激励的相关文献,则集中在市场交易(程承等,2024)和电价补贴(王宏伟等,2022;孙传旺和占妍泓,2023)等方面,少有研究讨论光伏产业创新的激励政策。Banares-Sanchez et al.(2026)从城市和企业层面讨论了补贴对创新、产出和价格的影响,却并未围绕特定创新激励政策内容如何驱动企业前沿技术突破展开分析。因此,有关国家创新激励政策如何促进战略性新兴产业加快前沿技术创新这一难题,仍然需要深入研究。本文关于“光领计划”推动光伏行业前沿技术创新内在机制的探讨能够弥补这一领域的研究不足,并为国家培育未来产业提供经验参考。

本文的边际贡献主要有以下三个方面。第一,本文具体分析了“光领计划”的作用机制,从政策自身的核心内涵出发,揭示了创新激励政策促进企业进行前沿技术创新的内在机理。基于中国光伏产业的发展实践,本文系统探讨了“光领计划”这一对于产业技术突破和转型升级具有重大影响的关键政策的运行逻辑,从“技术赋能产业政策有效性”这一新视角揭示了政府如何通过优化政策机制设计识别优质企业,并促进企业进行前沿技术创新。有别于以往有关市场准入(张宽等,2023)等产业政策工具有效性的研究,本文突出强调了技术要素在提高产业政策靶向性方面的关键作用,为战略性新兴产业探索以科技突破引领产业升级的发展路径提供了理论启示。

第二,本文构造的指标综合了多个维度的光伏前沿技术定义,精准识别了光伏科技的前沿技术方向,增强了本文研究结论的可靠性。已有利用专利测度企业创新的方法主要有基于Word2Vec模型的词典法(周鹏等,2024)、基于PageRank算法的社会网络分析法(Funk & Owen-Smith,2017;安同良等,2023)和基于SBERT算法的大语言模型方法(黄先海等,2024)等。本文在现有方法的基础上,使用了基于大规模语料进行预训练的BERT、ERNIE、RoBERTa和ELECTRA四种大语言模型,通过对中国上市公司专利文本的深入分析,创新性地构造了反映企业前沿技术创新的

量化指标。同时,本文还在模型性能、时间特征、地区特征、技术特征、企业特征和专利特征等多个维度对测算结果进行了检验,有效弥补了现有文献中有关光伏企业前沿技术创新测度的有效性和准确性不足的问题。

第三,本文拓展了创新激励政策效应评估的相关研究,厘清了“光领计划”在促进企业前沿技术创新之外的衍生效应。结合“光领计划”的政策特征和作用机制,本文将势力提升效应和优质示范效应纳入分析框架,深入剖析了技术要素在驱动光伏行业实现优胜劣汰方面发挥的关键作用,揭示了“光领计划”在增强企业的市场竞争力和技术引领示范作用方面的积极影响,丰富了创新激励政策推动光伏行业技术创新的相关研究。

本文的其余部分安排如下:第二部分介绍“光领计划”的政策背景并提出研究假说;第三部分说明数据来源和实证研究设计;第四部分对实证结果进行分析;第五部分探讨政策的作用机制;第六部分进一步分析政策在行业层面的势力提升效应和优质示范效应;第七部分总结全文并提出政策建议。

二、政策背景与理论分析

(一)政策背景

在我国光伏产业发展的早期阶段,产业政策激励有效促进了企业进入和产能形成,但也在一定程度上催生了规模竞争倾向。例如,在2009年“金太阳工程”等政策的推动下,全国大部分省份都建立了光伏产业基地,光伏行业迎来了快速的产能扩张期;大量企业进入光伏领域,4年间光伏企业数量增长了5倍,中国光伏组件产能占到全球产能的80%左右。在政策补贴和市场预期的共同作用下,企业更倾向于通过扩大投资和提升产能赢得市场份额。在这一时期,由于缺乏相应的政策规范和技术标准,光伏组件市场中的产品以中低端为主。国家能源局等三部委发布的《关于促进先进光伏技术产品应用和产业升级的意见》(国能新能〔2015〕194号)(以下简称“194号文件”)指出,自2013年以来,部分落后产能未及时退出市场,加之先进光伏产品成本较高,短期内难以进入市场,光伏产业整体技术升级缓慢。

为激励企业进行前沿技术突破,国家能源局在2015—2017年实施了三批“光领计划”,每年筛选出一批先进的光伏基地进行重点支持和示范推广。2015年,山西大同采煤沉陷区国家先进技术领跑者基地获批,标志着国家首批“光伏领跑者”项目正式落地实施。随后两年,国家能源局又先后实施了两批领跑者基地项目。具体建设批次如表1所示,三批共建设了22个光伏发电基地,累计有48家企业入选“光领计划”的项目开发商。而项目企业入围,是一个以国家能源局设定高技术门槛为导向,由省级能源部门通过竞争性市场机制来完成筛选的过程。光伏产品供应商入围通常经历以下步骤:首先,基地管理部门公开发布招标公告,公布项目的规模、技术要求等;其次,供应商按照招标公告要求提交相关证明材料和竞争性投标文件;再次,主管部门和评审专家对企业资质进行审核评分,筛选出能够达到“光领计划”技术指标的供应商企业;最后,领跑者基地对中标结果和供应商名单进行

公示,公示无异议后正式确定供应商资格。“194号文件”对光伏组件的光电转化效率等技术指标作出了明确规定,要求项目中采用的产品必须达到一定的技术标准。因此,企业能否入围产品供应商名单,主要取决于其产品性能能否达到政策设定的关键指标要求。^①基于此,本文从企业层面构建双重差分模型,以评估政策效应。

表 1 “光领计划”建设批次

批次	基地所在地	装机规模	年份
第一批	大同 ^②	1000MW	2015
第二批	包头、乌海、张家口、济宁、新泰、两淮 ^③ 、阳泉、芮城	5500MW	2016
第三批 (应用类)	大同、寿阳、渭南、海兴、白城、泗洪、宝应、格尔木、 德令哈、达拉特旗	5000MW	2017
第三批 (技术类)	上饶、长治、铜川	1500MW	2017

结合上述政策文件,本文提炼了“光领计划”三个方面的核心政策举措,并将其概括为以下三条机制,如表 2 所示。第一,需求扩张效应。“光领计划”需求扩张效应的核心在于“以市场换技术”,明确要求扩大先进产品的市场份额,并为达到特定技术门槛的企业提供额外的市场规模,从而激发企业技术进步的内生动力。“光领计划”为技术领先的企业提供了项目支持,为高效可靠的光伏产品提供了市场支持。例如,“194号文件”中指出,国家能源局每年安排一定的市场规模实施“光领计划”,要求基地项目优先采用先进的光伏技术产品,其中多晶硅电池组件和单晶硅电池组件的光电转换效率分别达到 16.5% 和 17% 以上。第二,研发优化效应。“光领计划”鼓励企业开展前沿技术的研发活动,通过财政资金增强企业进行前沿技术创新的动力,推动研发资源的优化配置。一方面,“光领计划”通过技术标准筛选出市场中的优质企业,规定财政资金优先向这些优质企业倾斜,使其在市场竞争中获得更多的研发支持,从而推动企业间研发资源的优化配置;另一方面,“光领计划”通过提高技术准入门槛促使企业投入更多的资源进行研发,引导企业之间的竞争从价格竞争转为科技竞争,从而实现企业内部研发资源的优化配置。例如,“194号文件”指出,要充分发挥财政资金对企业技术进步的促进作用,各级地方政府使用财政资金支持的光伏发电项目以及国家重点支持的公益类和扶贫类光伏发电项目,优先采用“领跑者”技术产品。第三,知识溢出效应。“光领计划”通过设立应用示范平台鼓励企业之间进行技术交流,对优质的光伏产品进行能效认证,从而促进

① 由于领跑者基地较少公布招商细则,本文从《大同采煤沉陷区国家先进技术光伏示范基地项目管理办法》(同政发[2015]53号)、《国家能源局关于下达 2016 年光伏发电建设实施方案的通知》(国能新能[2016]166号)、《国家能源局关于推进光伏发电“领跑者”计划实施和 2017 年领跑基地建设有关要求的通知》(国能发新能[2017]54号)等官方文件中推断出相应的招商标准,主要包括企业技术水平、企业规模、投资能力、经营绩效等方面。

② 大同在第一批和第三批均入选了光伏发电领跑基地。

③ 两淮指安徽省两淮采煤沉陷区国家先进技术光伏示范基地,包括淮南、淮北、阜阳、亳州和宿州五个城市。

了先进技术的知识溢出。例如,首批光伏领跑者基地计划建设12个单体项目,其中5个为“光领计划+新技术、新模式示范”项目,这些项目以推动前沿光伏技术的创新和应用示范为主要目的。

表2 “光领计划”政策的具体举措

文件名称	政策举措	作用	效应
《关于促进先进光伏技术产品应用和产业升级的意见》(国能新能[2015]194号)	“国家能源局每年安排专门的市场规模实施‘领跑者’计划,要求项目采用先进技术产品。2015年,‘领跑者’先进技术产品应达到以下指标:多晶硅电池组件和单晶硅电池组件的光电转换效率分别达到16.5%和17%以上”	通过扩大先进产品市场份额,为达到技术门槛企业提供额外市场规模,给予技术领先企业项目支持,给予先进技术产品市场支持	需求扩张效应
	“发挥财政资金和政府采购支持光伏发电技术进步的作用……各级地方政府使用财政资金支持的光伏发电项目以及在各级政府机构建筑设施上安装的光伏发电项目,优先采用‘领跑者’先进技术产品”	利用财政资金加速技术突破,通过技术标准筛选优质企业并给予财政资金支持,引导企业加大研发投入,转变竞争方式	研发优化效应
	光伏领跑者基地设立“光领计划+新技术、新模式示范”项目,树立行业技术标杆	设立应用示范平台鼓励企业开展技术交流,对优质光伏产品进行能效认证,通过示范工程鼓励企业学习先进技术	知识溢出效应

(二)理论分析与研究假说

“光领计划”推动了钝化发射极和背面电池技术、背接触晶体硅技术和异质结电池等前沿技术的创新,显著提升了光伏组件的转换效率和运行效能,对于中国光伏产业的技术升级和降本增效具有重要意义。然而,这一政策如何激发企业前沿技术创新的内生动力并推动我国光伏产业实现跨越式发展,仍有待理论分析。本文的理论逻辑如图1所示:“光领计划”的核心举措体现为技术标准筛选、资金流向引导和示范平台建设三个方面。在企业层面,上述制度安排分别通过需求扩张效

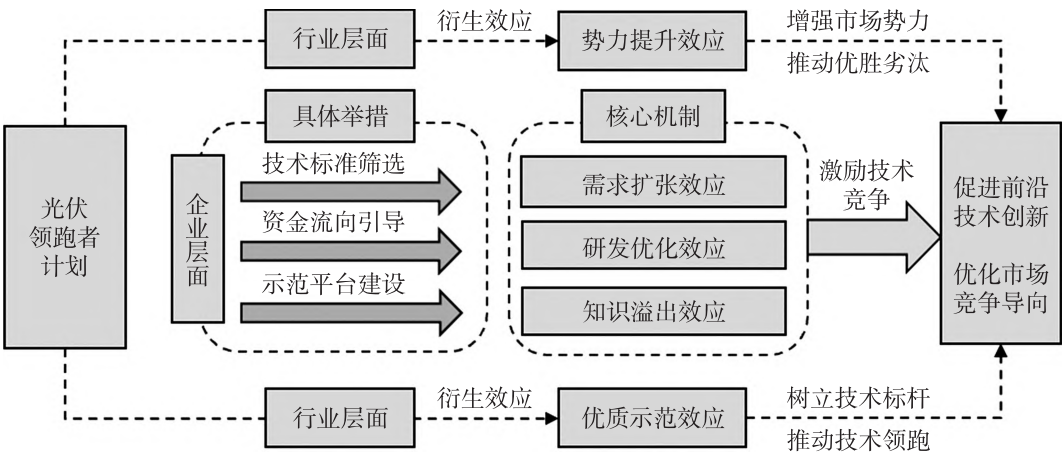


图1 “光领计划”推动企业前沿技术创新的理论逻辑

应、研发优化效应和知识溢出效应,促使企业将竞争重心由低价扩张转向前沿技术突破;在行业层面,政策效应表现为技术领跑企业的市场势力提升和追随企业向技术标杆靠拢,最终推动低效率、低质量产能退出市场,优化市场竞争导向。基于此,本文进一步剖析“光领计划”促进企业前沿技术创新的内在机理,并提出核心研究假说。

1. 需求扩张效应

根据需求引致创新理论,市场需求扩张有助于企业进行前沿技术创新,当下游产品市场传递出积极的需求信号时,企业会加大前沿技术的研发力度以满足市场需求(Gao & Rai, 2019; Gerarden, 2023)。具体到光伏产业,开展高效电池和系统集成等前沿技术研发,往往需要持续投入固定资产、专用设备和试验生产线,前期沉没成本较高。如果缺乏稳定且以技术为导向的市场需求,企业容易转向低价竞争和产能扩张,从而难以形成良性的前沿技术创新生态。而“光领计划”将终端市场需求与生产端技术创新进行有效耦合,通过向企业传递市场对高效光伏产品的需求信号,激励企业不断提升产品性能。该政策明确规定了政府扶持的前沿技术方向,对于光伏组件的质量设定了硬性参数标准,只有满足技术创新型企业才能获得更大的市场需求空间。因此,为了满足“光领计划”的入选标准,企业不得不从原来的价格竞争转为技术竞争。这一机制将促使企业不断探索前沿技术,研发更加高效的光伏产品。通过技术标准与市场需求的联动,积极进行技术研发的企业将获得更多的市场份额,从而加快研发成本回收,并在市场竞争中形成持续优势。由此,本文提出如下假说。

H1:“光领计划”围绕组件的关键技术参数设定准入门槛,扩大先进产能的市场空间,通过需求扩张效应促进企业进行前沿技术创新。

2. 研发优化效应

研发资源的优化配置是促进企业创新的关键因素(李丹丹, 2022)。“光领计划”要求充分发挥财政资金对光伏技术进步的激励作用,研发资源要优先用于“领跑者”光伏项目。其内在逻辑在于,新能源前沿技术的研发风险较高,前期需要大量的资金投入,政策不确定性和技术迭代不确定性会增加企业的研发风险(Hud & Hussinger, 2015; 孙博文, 2026)。一方面,研发成果具有较强的非竞争性,企业难以完全获得研发投资所产生的全部收益,导致私人收益低于社会收益,从而使企业研发投入水平低于社会最优水平(Becker, 2015);另一方面,研发活动具有不确定性,研发投入与创新产出之间并不存在确定对应关系,高强度的研发投入还可能挤占企业正常生产经营的资金,加剧其融资约束和经营风险(Zhang, 2015)。

根据资源配置效率理论,研发资源的合理配置能够激励企业对前沿技术进行突破性创新,而研发资源的错配将极大扭曲创新绩效。在企业间资源配置层面,当研发资源未能有效流向具有创新禀赋的优质企业时,将产生双重负向效应,不仅会造成研发资源的浪费,还会削弱企业追求技术进步的内生动力(Liu et al., 2019);在企业内资源配置层面,如果企业没有投入足够的资金进行研发,而是将更多的资源

用于扩张已有的落后产能和打“价格战”,将会严重挤占企业的研发资源。这将导致企业在技术创新和产业升级方面落后于竞争对手,进而错失在关键技术领域取得突破的机会。事实上,企业“以低价换市场”的经营策略不仅难以推动自身生产效率提高,还可能导致全行业面临成本倒挂的困境。因此,研发资源的优化配置是提高创新产出的关键(王艺明和马晴晴,2024)。“光领计划”通过引导研发资源的流向,使优质企业获得了更多的研发资源,从而推动了企业之间研发资源的优化配置。与此同时,为了在政策支持中取得优势,企业也会投入更多的资源进行研发,从而促进了企业内部研发资源的优化配置。由此,本文提出如下假说。

H2:“光领计划”引导财政资金向创新型企业倾斜,激励企业增加研发投入,通过研发优化效应促进企业进行前沿技术创新。

3. 知识溢出效应

创新经济学理论认为,创新活动的产生有赖于企业对外部知识的学习和整合。在科技创新日益复杂和多维融合的背景下,知识溢出对于企业的创新产出至关重要。一方面,“光领计划”通过设立“新技术应用示范平台”,为企业间技术交流、经验共享和成果扩散提供了制度化载体,加快了先进技术的知识溢出;另一方面,该政策通过对高能效产品进行技术认证,树立了市场竞争中的技术标杆,引导企业向行业先进水平看齐。事实上,“光领计划”中的示范项目是一个促进前沿技术溢出的平台,有助于企业更清晰地把握行业前沿技术水平和未来发展趋势,打破信息壁垒,降低对于前沿技术的认知门槛(Nie et al., 2022)。与此同时,入选项目所采用的光伏产品体现了国家鼓励企业开展技术攻关的政策导向,其性能标准和技术路线具有较强的示范价值。先进技术的知识溢出有助于企业找到差异化的产品定位和研发策略,进而推动企业在前沿技术方面不断取得突破。在该机制推动下,铝背场电池技术、钝化发射极和背面电池技术、N型高效电池技术等各种技术路线之间相互竞争,共同推动了光伏技术的迭代升级和组件转换效率的持续提升。由此,本文提出如下假说。

H3:“光领计划”依托示范项目建设和先进产品技术认证,强化企业间技术交流,通过知识溢出效应促进企业进行前沿技术创新。

值得注意的是,“光领计划”对于光伏行业还具有行业层面的势力提升效应和优质示范效应。势力提升效应是指“光领计划”能够提高技术领跑型企业的市场地位,增强其在市场中的竞争力;优质示范效应则体现在“光领计划”能够通过树立技术标杆,从需求端引导和激励追随型企业学习行业中的技术领跑型企业,从而缩小企业间的技术差距,带动行业整体技术进步。根据有效竞争理论,创新型企业可以通过技术创新获得超额利润,从而在市场竞争中占据有利地位,进而提高市场竞争力。一方面,“光领计划”对于企业的科技水平设定了更高的技术标准,促使企业积极探索前沿技术以降低度电成本。随着前沿技术的不断突破,技术领跑型企业将在市场中获得更大的市场份额,不断增强其在市场中的竞争优势。另一方面,“光领计划”还促使其他光伏电站项目向“领跑者”项目看齐,逐步提升技术标准,从需

求侧不断推动高效产品的市场需求增长,同时挤压技术含量较低产品的市场空间,加速低效落后产能退出市场。随着优质高效的产品逐渐成为技术标杆,优质企业在市场中形成了“鲑鱼效应”,强化市场中的企业优胜劣汰,最终推动行业整体的技术进步(黄先海和张胜利,2019)。据此,本文提出以下假说。

H4:“光领计划”能够提高创新型企业的市场竞争力,激励行业中的普通光伏发电项目向“领跑者”项目看齐,发挥势力提升效应和优质示范效应。

三、数据来源与研究设计

(一)计量模型设定

为了验证上文的假说,本文构建如下交错双重差分模型,实证考察2015年开始实施的“光领计划”对企业前沿技术创新的因果效应。

$$Solarpat_{it} = \beta_0 + \beta_1 Treat_i \times Post_t + \beta_2 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

其中,下标*i*和*t*分别代表企业和年份。被解释变量为 $Solarpat_{it}$,表示企业*i*在*t*年的光伏前沿技术创新。核心解释变量为处理组虚拟变量 $Treat_i$ 与时间虚拟变量 $Post_t$ 的交互项:当企业*i*入选“光领计划”时, $Treat_i$ 取值为1,否则为0;当年份在企业*i*入选年份的当年及之后, $Post_t$ 取值为1,否则为0。 β_1 是本文关注的核心估计系数,衡量“光领计划”对于企业光伏前沿技术创新的因果效应。 X_{it} 表示一系列控制变量, μ_i 表示企业固定效应, λ_t 表示年份固定效应, ϵ_{it} 表示随机误差项。本文对回归结果的标准误在企业层面进行聚类调整。

(二)指标构建

1. 被解释变量

相较于采用词典法和随机森林等传统的机器学习算法进行文本分类的有关研究,本文所采用的基于海量文本数据进行预训练的ERNIE模型能够很好地克服完备性不足和准确性较低的问题(金星晔等,2024)。为了反映测算结果的准确性,本文在传统文本分类任务测算流程的基础上做出如下改进:(1)综合政策导向、行业分析、学术研究和企业实践四个维度界定光伏前沿技术,从而避免单一视角的局限性;(2)在数据标注时避免完全随机抽取所带来的类别分布不均衡问题,通过综合比较四种大语言模型的性能,进一步优化数据标注策略,从而提高模型的泛化能力;(3)在模型性能、时间特征、地区特征、技术特征、企业特征和专利特征等多个维度对分类结果进行有效性验证,增强了测算结果的可靠性和稳健性。本文的测算思路是基于专利文本描述的技术特征和主要用途判断这一技术是否符合前沿技术方向,具体的测算流程如图2所示,可具体分为以下七个步骤。

步骤一:界定光伏前沿技术。对光伏前沿技术进行科学界定,是准确识别企业创新行为和评估政策作用效果的基础,对于优化政策机制设计和推动光伏产业发展具有重要意义。本文将光伏前沿技术定义为符合国家战略发展方向,且能够为光伏领域的技术难点提出创新方案的技术。现有文献对于光伏前沿技术创新的界定缺乏明确且统一的定义,本文在已有文献的基础之上,综合政策导向、行业分析、

学术研究和企业实践四个维度提炼了光伏行业的前沿技术。这一多维度的识别思路既能够体现国家产业政策对技术发展方向引导,也能够兼顾行业技术演进、学术前沿和企业创新实践的现实特征。本文的做法可以使不同维度技术定义之间相互补充,有助于降低仅凭单一维度界定前沿技术所带来的偏误。由此形成的技术范围更加具有系统性和可操作性,也为后续基于专利文本识别企业前沿技术创新提供了依据。^①

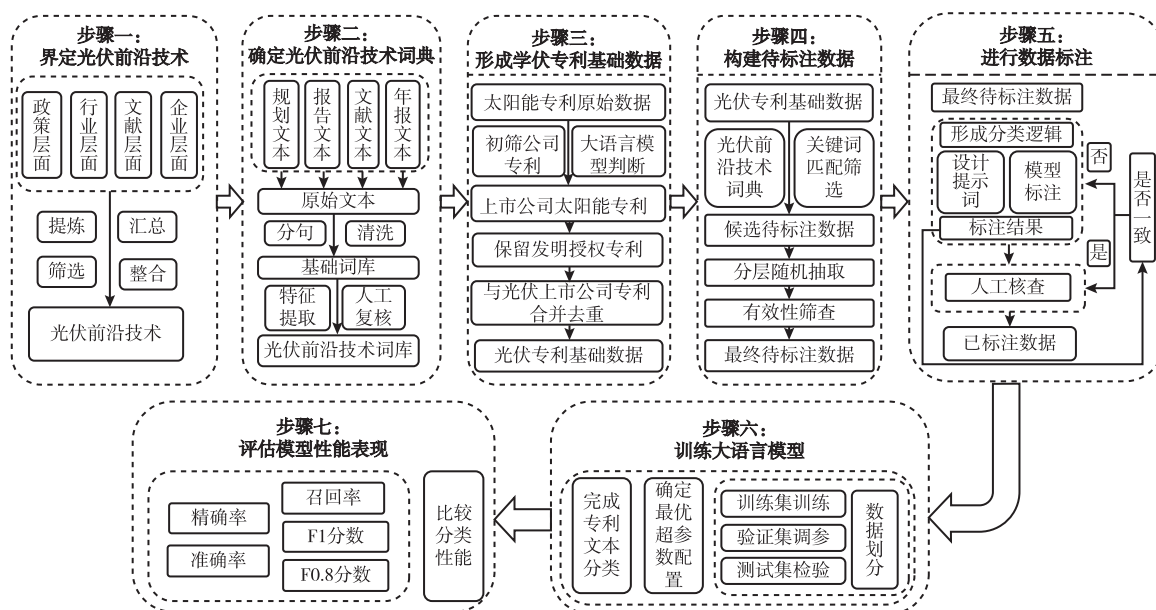


图2 光伏前沿技术的测算流程

步骤二:确定光伏前沿技术词典。为了尽可能覆盖更加广泛的前沿技术,本文从规划文件、行业报告、学术文献和企业年报等多种途径收集了超过两百万字的原始文本,并利用大语言模型从中抽取了与光伏技术发展相关的句子。在得到这些能够表征前沿技术的句子之后进行特征提取,进而得到能够反映前沿技术特征的基础词库。为了提高词库的准确性,本文对基础词库进行了人工核对、筛选和去重,最终得到了光伏前沿技术词库。^②经过不同语料的相互补充,本文在识别前沿技术时尽可能避免了单一语料的语义倾向性所带来的偏误。

步骤三:形成光伏专利基础数据。首先,从智慧芽专利数据库获取了2009—2022年专利公开号以CN开头的45万余条太阳能专利原始数据,然后通过识别申请人名称中的“公司”字样初筛公司专利。其次,对全部公司名称进行清洗去重,并利用大语言模型判断公司名称对应的企业主体是否为上市公司,从而得到上市公司太阳能专利相关数据。再次,剔除上市公司太阳能专利中发明申请和发明专利重复的数据,仅保留发明专利。最后,将清洗后的上市公司太阳能专利,与光伏上市公司的专利进行合并去重,并据此构建覆盖范围更完整的光伏专利基础数据。

步骤四:构建待标注数据。本文基于步骤三中的光伏专利基础数据,以光伏前

^{①②} 因篇幅所限,光伏前沿技术的相关内容详见本刊网站登载的附录。

沿技术词典作为筛选依据,通过关键词匹配筛选,构建候选待标注数据。该筛选过程能够将样本范围进一步聚焦于光伏前沿技术相关专利,有助于提升候选待标注数据中潜在前沿技术专利的占比。同时,为提高样本数量在年度间分布的均衡性,本文首先以年份为分层依据,对候选待标注数据进行分层随机抽取;随后对抽取的数据进行有效性筛查,剔除摘要信息不足或技术属性难以判断的数据,从而形成2149条最终待标注数据。

步骤五:进行数据标注。首先,以步骤四形成的最终待标注数据为对象,参照光伏前沿技术的主要特征,从技术相关性、创新特点、材料与工艺、结构组成、条件与环境、性能指标等维度综合考虑,重点考查各项专利是否有助于提高光电转换效率、降低生产成本和促进规模化生产,进而形成标签判断的分类逻辑;然后,本文据此设计提示词,引导大语言模型对待标注数据进行标注,从而得到标注结果,并检验标注结果与分类逻辑是否一致;若二者不一致,则返回提示词设计和模型标注环节进行优化,直至大语言模型能够较好地理解上述分类逻辑;最后,对标注结果进行人工核查,形成已标注数据。

步骤六:训练专利文本分类模型。ERNIE模型能够在文本分类任务中自动学习专利文本中的有效特征表示,并输出较为准确的分类结果。^①因此,基于步骤五中得出的已标注数据,本文使用ERNIE模型进行专利文本分类,按照8:1:1的比例将已标注数据划分为训练集、验证集和测试集。其中,训练集用于模型训练,验证集用于超参数调整和训练过程监测,测试集用于检验模型的分类效果和泛化能力。在此基础上,本文最终确定了最优超参数配置,并利用训练后的模型完成专利文本分类。

步骤七:评估模型性能表现。为比较不同大语言模型的分类性能,本文使用BERT模型、ERNIE模型、RoBERTa模型和ELECTRA模型四种大语言模型进行企业前沿技术专利分类,并计算了五个常用的机器学习性能评估指标,包括精确率(Precision)、准确率(Accuracy)、召回率(Recall)、F1分数(F1—Score)和F0.8分数(F0.8—Score)。^②在本文使用的模型中,ERNIE模型的分类性能显著优于其他模型。因此,选用ERNIE模型的分类结果作为基准结果。经过以上步骤,最终构造出了一份专利—企业—年份三维结构的非平衡面板数据,最终得到了5201条前沿专利数据。

在完成指标测算之后,本文从模型性能、时间特征、地区特征、技术特征、企业特征和专利特征等多个维度对测算结果进行了检验。^③同时,为了缓解专利数据的分布偏态问题,对前沿专利的数量进行反双曲正弦变换,将变换后的前沿专利数量

① ERNIE模型的训练过程大致分为以下三个步骤。(1)输入语料。模型先对输入的文本进行向量化表示,得到模型输入所需的词嵌入编码、位置信息编码和句子分割编码。然后,在嵌入层将模型输入组合成三种编码信息的加总,利用多头自注意力机制和前馈神经网络对于中间层的Transformer编码进行优化迭代,最终在输出层输出状态张量。(2)构造遮掩任务。模型按照不同颗粒度选取文本中的词、短语及实体进行掩码,然后利用上下文信息预测各遮掩位置对应的单元,进而恢复被遮掩的内容。(3)优化模型参数。模型根据预训练任务的预测结果与真实标签构造损失函数,并通过反向传播计算参数梯度,然后反复迭代更新模型参数。

②③ 因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的附录。

作为本文的被解释变量。

2. 核心解释变量

本文的核心解释变量是“光领计划”政策($Treat_i \times Post_t$)。如果企业*i*中标光伏领跑者基地的产品供应商,则将变量 $Treat_i$ 赋值为1,否则为0。如果年份在企业中标年份的当年及之后,则将 $Post_t$ 赋值为1,否则为0。 $Treat_i$ 与 $Post_t$ 的交互项是本文识别政策效应的核心变量。“光伏领跑者”发电项目由地方政府按照国家能源局规定的发电规模进行公开招标,企业按照招标公告提交项目申请,地方政府的工作领导小组对申报项目进行评审,最终确定中标企业名单。^①这一遴选机制通过设置产品性能和技术参数等评价标准,引导企业竞争由追求产能和价格优势,逐步转向重视技术性能、产品质量和应用效率。

3. 控制变量

为了控制可观测的混淆因素对于“光领计划”政策效应的干扰,借鉴已有研究(孙传旺和占妍泓,2023;孙博文和张友国,2022),本文选取了如下变量作为控制变量:企业性质(Soe),如果企业是国有企业则为1,否则为0;企业年龄的对数($Lage$),即企业成立年限的自然对数;托宾Q值(TQ),即企业的市场价值与重置成本的比值;两权分离率(Sep),衡量经营权与所有权的分离程度;研发资金投入强度(Rdi),即企业研发支出与营业收入的比值;经营现金流(Ocf),即经营活动产生的现金流量净额;资本性支出比率(Cap),即购建固定、无形及其他长期资产所支付现金与总资产的比率;净资产收益率(Roe),即公司税后利润与平均净资产的比值;营业收入增长率($Grow$),即当期营业收入相较于上期营业收入的增长幅度;赫芬达尔指数(Hhi),即市场中各上市企业市场份额的平方和,反映了市场的竞争程度与行业集中度;公司业绩波动性(Vol),即企业销售收入的标准差,反映了企业经营的稳定性与受宏观政策环境变化的冲击程度。

(三)样本说明与描述性统计

本文的专利数据来自智慧芽专利数据库,其中包括专利申请时间、专利类型、专利名称和专利摘要等信息。对于“光领计划”入选企业名单数据,本文对领跑者基地所在城市的市政府、发展改革委和能源局官方网站等多个来源进行了综合比对,收集了三个批次共计48家企业的中标信息。企业层面财务数据来自CSMAR数据库,为了尽可能地保留更多样本,同时增加企业之间的可比性,本文对数据样本的主要处理包括以下五个方面:(1)在沪深A股所有上市公司中筛选在样本期内具有太阳能专利的上市企业;(2)合并沪深A股上市企业中的光伏行业上市企业;(3)剔除ST

^① “光领计划”政策具有一定的外生性:从招标过程来看,2015年6月25日,经国家能源局批复同意,首个“光伏领跑者计划”示范基地正式落户大同。同年7月6日发布正式公告,7月11日投递文件截止,7月12日公布中标名单。政策的实施具有一定的突然性,个体难以预知自己是否能够进入处理组;从研发基础来看,前沿专利的成功申请需要国家级重点实验室、企业科研中心、大型科技项目等基础支撑,企业难以在短期内做出策略性反应;从入选标准来看,在之后的批次中,招商公告中也未公布评选细则,企业难以在短期内有针对性地提高自身评分;国家能源局要求招标过程公开透明,因此,寻租的空间也较小。本文还进一步考虑了领跑者基地建设对“光领计划”政策效应的干扰。因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的附录。

类等经营异常的上市公司样本,仅保留正常上市的企业样本;(4)对具有缺失值的连续变量进行行业一年份均值插补,并保留在样本期内至少有6年连续数据的企业样本;(5)对连续变量进行上下1%缩尾处理以消除极端值的影响。经过以上筛选步骤,本文共获得了2009—2022年362家上市公司的4398条非平衡面板数据样本。^①

四、实证分析

(一)基准回归

为了检验“光领计划”对企业前沿技术创新的影响,本文采用交错双重差分模型进行实证估计,回归结果如表3所示。在不同控制变量设定下,核心解释变量的估计系数均保持为正且通过了5%显著性水平的检验,说明基准回归结果并不依赖于特定控制变量设定,具有较好的稳健性。总体来看,“光领计划”能够显著促进企业进行前沿技术创新。本文的基准回归结果为理解产业政策引导企业突破前沿技术提供了初步经验证据:具有明确技术标准和筛选机制的政策工具,能够在一定程度上弥补企业研发活动中的创新激励不足问题,从而推动企业进行前沿技术创新。^②

表3 “光领计划”对企业光伏前沿技术创新的影响

变量	光伏前沿技术创新			
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Treat × Post</i>	0.4719** (0.2038)	0.4778** (0.1912)	0.4833** (0.1935)	0.4520** (0.2031)
前定控制变量×时间趋势	否	是	否	否
前定控制变量×年份固定效应	否	否	是	否
控制变量	否	否	否	是
企业固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
观测值	4398	4398	4398	4398
Adj.R ²	0.5668	0.5735	0.5734	0.5684

注:本文根据“光领计划”光伏产品供应商入围条件,从技术水平、企业规模、投资能力、经营绩效四个方面选取前定变量,包括研发投入占营业收入比例、研发人员数量占比、总资产规模的自然对数、现金流水平、固定资产支出占比、净资产收益率、营业收入增长率7个变量。括号内为企业层面的聚类标准误,*,**、***分别表示在10%、5%和1%的水平上显著,下同。

(二)稳健性检验^③

1. 平行趋势假设评估。本文基准估计结果成立的重要前提是,在“光领计划”

① 太阳能专利IPC分类号来自《战略性新兴产业分类与国际专利分类参照关系表》,光伏上市企业数据来自东方财富网太阳能板块。因篇幅所限,变量的描述性统计详见本刊网站登载的附录。

② 本文进一步使用广义随机森林算法和分位数回归方法考察了“光领计划”的异质性处理效应和非线性政策效应。除此之外,本文进一步考察了“光领计划”政策效应在不同批次、不同企业规模以及不同研发投入水平企业之间的异质性。因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的附录。

③ 因篇幅所限,稳健性检验结果详见本刊网站登载的附录。

政策实施前,处理组与对照组企业的光伏前沿技术创新变化趋势不存在系统性差异。为检验这一前提假设,本文采用事件研究法,以政策实施前1期为基准期,选取政策实施前后各4期作为时间窗口,构造相对时期虚拟变量进行实证检验。估计结果表明,政策实施前各期系数均未与0存在显著差异,说明平行趋势假设无法被拒绝。同时,本文还进一步作了平行趋势敏感性分析,结果显示本文基准模型的平行趋势假设具有较好的稳健性。

2. 更换核心变量测度方法和估计模型。第一,为了检验“光领计划”对企业前沿技术创新规模的影响,参考 Fang et al.(2017)中对于专利折旧的处理方法,将专利折旧率设定为15%,将被解释变量替换为考虑折旧的前沿专利数量的年度累加值;第二,采用泊松模型来处理被解释变量的计数特征,以增强结论的稳健性;第三,将被解释变量替换为利用熵值法测度的企业前沿技术创新复合指标,以更加多维地衡量企业的前沿技术创新。估计结果表明,本文的研究结论具有较好的稳健性。

3. 更换不同的匹配方法。本文借鉴已有文献的做法(周泽将等,2022),通过更换不同的匹配方法为处理组企业找到尽可能相似的控制组企业。在光伏基地建设招标时,技术水平是地方政府评判每家企业开发资质的首要考量因素,市场竞争力和创新能力越强的企业越有可能成为项目的中标企业。因此,本文选取企业性质、市场份额、超额主营业务利润率、研发投入占比、发明专利数量等反映企业市场竞争力和创新能力的指标作为匹配依据。分别采用1:3协变量匹配、1:5协变量匹配、熵平衡匹配和广义精确匹配等方法进行稳健性分析,并对匹配后样本的协变量平衡性进行考察。估计结果表明,核心结论保持稳健。

4. 采用异质性稳健估计量。Goodman-Bacon(2021)认为当存在异质性处理效应时,双向固定效应模型会将较早接受处理的样本作为较晚接受处理样本的控制组,从而使得估计系数产生偏误。为了缓解评估政策效应时可能存在的“负权重”问题,采用 Sun & Abraham(2021)与 De Chaisemartin & D'Haultfœuille(2020)提出的异质性稳健估计量对本文的基准回归模型进行检验,估计结果具有较好的稳健性。

5. 进行安慰剂检验。为了进一步缓解“光领计划”的处理组企业与对照组企业样本之间不可观测的影响因素给估计结果带来的混淆,同时增强本文结论的非随机性,借鉴陈强等(2025)的证伪检验思路,进行了时间、空间与混合三种类型的安慰剂检验,结果表明本文结论具有较好的稳健性。

6. 考虑个体处理效应稳定性假设。当样本中存在与“光领计划”的中标企业具有高度关联的企业时,政策效应的无偏性可能会受到潜在影响。因此,本文进一步剔除存在生产关联或股权关联的企业样本,以排除企业间关联关系可能对政策效应估计造成的干扰。估计结果表明,本文的核心结论保持稳健。

7. 控制同期政策干扰与缓解样本选择偏误。为缓解同期政策叠加可能带来的估计偏误,本文进一步控制了上网电价补贴和碳排放权交易试点政策的影响。同时,考虑到潜在的样本选择偏误,采用 Heckman 两步法进行稳健性检验。结果表

明,本文的核心结论具有较好的稳健性,即“光领计划”能够显著促进企业进行前沿技术创新。

五、机制分析

第四部分着重讨论了“光领计划”对企业前沿技术创新的影响,但其中的作用机制有待进一步验证。具体而言,需求扩张效应主要在市场牵引环节发挥作用,即通过关键技术参数门槛和领跑者基地项目,创造以高质量产品和先进技术应用为导向的市场需求;研发优化效应主要在资源保障环节发挥作用,即在需求信号明确之后,推动财政资金和研发资源向创新型企业集中,从而缓解企业开展前沿技术研发所面临的资金约束和风险约束;知识溢出效应则在交流扩散环节发挥作用,即通过示范基地、技术认证和企业间学习,降低企业的技术认知成本和试错成本。下文将从这三个方面对理论机制进行实证检验。

(一)需求扩张效应

需求扩张效应表明,“光领计划”通过制定前瞻性的技术方向和提高产品的技术标准,为达到特定技术门槛的企业创造了额外的市场需求,促使企业围绕高质量市场需求展开技术竞争。在政策支持下,符合技术标准的企业能够在市场上与其他企业形成有效区分,从而获得更大的市场份额。如果这一机制成立,那么“光领计划”将显著增加技术达标企业所面临的市场需求。为了验证这一机制,本文从企业内部生产性投资和外部市场需求两个维度展开分析。借鉴孙传旺等(2024)的做法,采用企业购置固定资产、无形资产和其他长期资产支出的现金净额衡量企业内部生产性投资。同时,为了能够尽可能地识别企业的市场需求,需要寻找相对外生的外部需求变动来源,借鉴 Mayer et al.(2021)和 Garin & Silvério(2024)的研究思路,构建如下市场需求指标:

$$Dema_{it} = g \left[\left(\frac{x_{it_0}}{X_{t_0}} \right) \times M_{it} \right] - \frac{1}{N_s - 1} \sum_{k \in s, k \neq i} g_{kt} \quad (2)$$

其中, x_{it_0} 表示企业*i*在 t_0 年(样本初年)的主营业务收入, X_{t_0} 表示企业*i*所在行业在 t_0 年的全行业上市公司主营业务收入,二者的比值反映了样本初年企业*i*所占的市场份额。 M_{it} 表示企业*i*所在行业在第*t*年扣除自身后的其他企业主营业务收入总额。通过两者相乘,可以得到不受企业*i*自身经营情况影响的外部市场需求。 $g(\cdot)$ 表示外部市场需求的增长率,第二项整体表示剔除企业*i*后同类企业外部市场需求增长率的平均水平。这一指标的优势是可以控制同行业内其他企业共同面临的市场需求冲击,从而得到企业*i*相对于其他企业的外部市场需求变化。估计结果如表4所示,一方面,“光领计划”显著增加了中标企业的外部市场需求,而市场规模扩大所带来的收益预期进一步增强了企业开展前沿技术研发的动力;另一方面,“光领计划”显著推动了企业内部生产性投资的扩张,为企业进行技术研发和设备升级提供了坚实的物质基础,增强了政策对企业前沿技术创新的促进效应。综上,

“光领计划”通过需求扩张效应给予了企业更多的市场规模,保障了前沿技术的发展空间,上述结果有力地支持了本文提出的需求扩张效应。

表 4 需求扩张效应分析

变量	市场需求 (1)	光伏前沿技术创新 (2)	光伏前沿技术创新 (3)	生产性投资 (4)	光伏前沿技术创新 (5)	光伏前沿技术创新 (6)
<i>Treat × Post</i>	1.3774*** (0.4508)	0.6571** (0.2824)	0.2441 (0.1964)	0.3227* (0.1690)	0.5572* (0.3201)	0.2925 (0.2201)
控制变量	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	4398	2201	1902	4398	1763	2340
Adj.R ²	0.1467	0.5635	0.5668	0.8760	0.5247	0.5971

注:列(2)(3)是按照政策发生前企业外部市场需求的平均值分组,列(2)表示企业外部市场需求较高组,列(3)表示企业外部市场需求较低组;列(5)(6)是按照政策发生前企业内部生产性投资的平均值分组,列(5)表示企业内部生产性投资较高组,列(6)表示企业内部生产性投资较低组。为避免标准误被低估和统计显著性被夸大,在估计时剔除了在所属分组中仅有单个观测值的样本,因此,本文汇报的样本量是有效估计样本量,下同。

(二)研发优化效应

“光领计划”作为具有明确导向性的政策工具,规定了财政资金优先向满足前沿技术标准的企业倾斜。这一举措不仅提高了公共资源配置的精准性,也向企业释放了清晰的政策信号:只有持续推进技术升级和前沿创新,才能获得更多政策支持。从作用机制看,其本质在于发挥政府补贴的风险分担与信号传递功能,降低企业前沿技术研发的不确定性,提高研发资源的配置效率。为了验证研发优化效应这一机制,本文从研发资源获取、研发资源投入和研发资源产出三个维度展开实证分析。具体而言,在研发资源获取维度,首先考察“光领计划”是否显著增加了中标企业研发补贴,从而缓解企业开展研发活动面临的资源约束;在研发资源投入维度,进一步考察该政策是否促进了中标企业的实际研发投入,而非停留在研发资源获取层面;在研发资源产出维度,本文验证该政策是否最终提升了企业的前沿技术创新产出,从而实现了研发优化效应。

本文从上市公司年度财务报表附注中收集了2009—2022年上市公司获得的政府补助项目明细,并进一步对这些补助项目进行筛选,识别出了相对准确的研发补贴项目。^①具体而言,本文将研发补贴分为不同的类别,包括与科技研发专项有关

① 项目主要包括:(1)与科技研发专项有关的补贴。包括针对特定研发项目提供的特定资金支持(02专项、863计划、973计划等)、创新平台建设补贴(创新平台建设专项补助投资计划等)、技术改造补贴(130MW多晶硅重点工业技术改造项目等)、资格认定类补贴(国家高新技术企业认定等)、研发机构培育补贴(企业研发机构建设专项资金等)、研发后补助(企业研发后补助财政奖补资金)。(2)与人才引进和培养相关的补贴。包括企业人才引进培养资助专项资金、人才发展专项资金、科技创新人才专项资金。(3)与知识产权相关的补贴。包括知识产权密集型企业项目、专利申请资助资金、PCT专利奖励资金。(4)与科技成果奖励相关的补贴。包括国家高新区科技奖励项目、科技进步奖、科技创新工作先进单位奖励。(5)与研发补贴类似的财政资金支持。包括企业研发费用财政补助、专精特新“小巨人”企业研发费用加计扣除奖励经费等。

的补贴、与人才引进和培养相关的补贴、与知识产权相关的补贴、与科技成果奖励相关的补贴、与研发补贴类似的财政资金支持等。根据以上分类,本文提取了与研发补贴相关的关键词。借鉴 Chen et al.(2018)的方法,当政府补贴中包含研发补贴的关键词时,本文将其定义为研发补贴,在此基础上,采用研发补贴的自然对数作为企业所获研发资源的代理变量。根据表5列(1)显示,核心解释变量估计系数为3.9423,且在1%的水平上显著,说明“光领计划”显著增加了中标企业获得的研发补贴,为企业开展前沿技术创新提供了外部资源支持。列(2)进一步表明,“光领计划”有效促进了企业自身研发投入的增加,说明政策效应并非仅表现为企业对补贴资源的被动吸收,而是进一步激发了企业的主动研发行为。列(3)(4)说明,对于研发投入强度更高的企业,“光领计划”的创新促进效应也更明显。上述结果为研发优化效应提供了实证支持,表明“光领计划”能够推动研发资源在企业间优化配置,促进前沿技术创新产出的提升。

表5 研发优化效应和知识溢出效应分析

变量	研发补贴 (1)	研发投入 (2)	光伏前沿技术创新 (3) (4)		专利被引 (5)	联合创新 (6)
<i>Treat × Post</i>	3.9423*** (0.9149)	2.4561** (1.0547)	0.7863*** (0.2917)	0.1978 (0.2363)	0.1691* (0.0979)	0.4594* (0.2547)
控制变量	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	4398	4398	2225	2114	4398	4398
Adj.R ²	0.2602	0.5867	0.6050	0.5320	0.3170	0.7689

注:列(3)(4)是按照企业研发投入的平均数分组,列(3)表示企业研发投入较高组,列(4)表示企业研发投入较低组。

(三)知识溢出效应

知识溢出效应表明,“光领计划”通过设立新技术应用示范平台为企业间技术交流与经验共享创造了有利条件,促进了先进技术知识的扩散与传播,从而加快了企业前沿技术突破的进程。一方面,“光领计划”设立的示范项目打通了企业间的信息与知识流动通道,有效降低了企业在前沿技术探索中的信息搜寻成本与不确定性,促进前沿技术的跨企业知识溢出;另一方面,示范平台通过搭建技术交流场景推动企业间双向的知识流动,有助于企业间合作关系的形成。本文进一步从知识溢出广度和知识溢出强度两个方面检验知识溢出效应这一机制。知识溢出广度衡量企业创造的前沿知识是否更多地成为后续创新的技术基础,本文采用前沿专利的被引用数量来衡量企业间的知识溢出广度;而知识溢出强度表征不同创新主体间的知识交换和协同创新程度,本文采用企业联合申请的发明专利的数量来衡量企业间的知识溢出强度。

估计结果如表5列(5)(6)所示,“光领计划”显著提升了知识溢出的广度与强度。一方面,“光领计划”显著增加了企业前沿专利的被引用数量,推动前沿专利产

生了广泛的知识溢出;另一方面,企业联合申请的发明专利数量也显著增加,创新主体间的知识关联更紧密、协同创新的程度更高。知识溢出效应有助于企业识别更符合自身发展战略的技术方向,进一步研发出更加高效的潜在产品,最终在差异化的产品赛道上形成新的竞争优势。前沿技术的扩散降低了企业开展前沿技术突破的认知成本和试错成本,从而显著增强了企业的创新能力。上述分析表明,知识溢出效应是“光领计划”促进企业前沿技术创新的重要作用机制。

六、进一步分析

第五部分对需求扩张效应、研发优化效应和知识溢出效应进行了分析,揭示了“光领计划”政策效应的影响机制。在此基础上,企业层面的前沿技术创新可能会进一步改变行业竞争结构:一方面,技术领跑企业依托创新优势获得更强的市场地位,表现为势力提升效应;另一方面,追随企业在技术标杆引领下加快技术升级,表现为优质示范效应。二者共同揭示了“光领计划”如何通过微观创新激励进一步推动行业优胜劣汰与技术进步。接下来,本文从势力提升效应和优质示范效应这两个视角出发,考察“光领计划”对整个行业的影响。

(一)势力提升效应

在经济新常态的背景下,部分产品的供给质量难以适应消费需求变化,导致供给和需求之间出现不匹配。因此,需要进一步优化供给结构,提高资源配置效率,为新兴产业发展创造更好的市场环境。“光领计划”通过设定高技术标准扶持先进产能,提高了技术领先型企业的市场势力,市场势力的提升意味着技术领先型企业定价能力的增强和成本优势的强化,能够以更低的价格或更高的产品质量在市场竞争中逐渐扩大市场份额,这在无形之中抬高了整个行业生存的技术门槛,从而不断挤压生产效率低下、产品质量较低的落后企业的利润空间。落后企业无法满足市场对高品质光伏产品的需求,从而不得不退出市场。“光领计划”推动经济资源在企业间高效配置,最终推动形成优胜劣汰的产业良性循环。

为了检验上述理论逻辑是否成立,一方面,本文借鉴 De Loecker & Warzynski (2012)提出的方法,采用企业加成率衡量企业的市场势力,实证检验“光领计划”是否能够推动企业市场势力的提升;另一方面,本文检验了该政策效果的异质性,即在初始生产效率更高的企业中,市场势力的提升是否更为显著。回归结果如表6所示,列(1)中“光领计划”的估计系数显著为正,这说明“光领计划”能够推动企业市场势力的提升。进一步地,本文以全要素生产率衡量企业的生产效率,并以政策发生前企业的平均生产效率进行分组,列(2)(3)的结果显示,对于政策实施前生产效率较高的企业,政策效应更为突出。这表明,“光领计划”有助于强化高效率企业的市场地位,增强其市场势力和议价能力。^①综合上述分析,本文发现“光领计划”给予了优质企业发挥技术优势的机会,促使这些企业在市场竞争中逐

^① 本文进一步检验发现,“光领计划”会显著降低落后企业的市场份额和盈利能力。因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的附录。

渐提高自身的市场势力，迫使落后产能逐渐退出市场，从而发挥了势力提升效应。^①

(二) 优质示范效应

从上文对势力提升效应的理论分析可知，优质企业获得了更多的市场势力，在市场竞争中逐渐占据优势地位，通过提高行业竞争门槛和推动低效率企业退出，最终实现了产业升级。接下来进一步探讨“光领计划”在引领光伏行业前沿技术发展方面是否具有优质示范效应。“光领计划”的目标在于充分发挥先进企业的带动作用，政府通过指导性和扶持性的政策，激励企业之间相互竞争，不仅提高了光伏基地项目的技术水平，也能够带动其他普通光伏电站项目提高技术标准。随着前沿技术的不断突破，具备较强研发能力和技术积累的头部企业将获得更大的技术优势，将更多的资源用于研发符合未来技术方向的产品。参考卢福财等(2024)，本文将主营业务收入位于行业前30%的企业定义为头部企业，将追随企业定义为除头部企业之外的其他企业。基于创新网络的视角，本文利用专利引用数据构建了企业间的创新网络，并采用PageRank算法计算各企业的网络中心度，以此衡量企业在创新网络中的中心性与影响力。

为了检验“光领计划”的示范效应，本文仅保留追随企业样本，并进一步将被解释变量设为追随企业创新地位与头部企业平均创新地位的差距。该指标越小，说明追随企业与头部企业之间的创新网络地位差距越小。估计结果如表6列(4)—(6)所示。列(4)的估计系数为-0.4374，并且通过了5%水平的显著性检验，说明“光领计划”使得追随企业与头部企业间的创新地位差距缩小。同时，本文借鉴赖烽辉和李善民(2023)的做法，利用企业间专利类别向量的余弦值衡量企业的技术相似度，并据此考察示范效应是否存在技术距离上的差异。列(5)(6)的结果显示，技术相似度较高组的估计系数为-0.6768，并在5%的水平上显著，说明示范效应更可能发生在技术相似的企业之间。综上，优质示范效应具有技术适配条件，只有当企业具备相近的知识基础和研发方向时，前沿技术路线才更容易被吸收和转化。

表6 势力提升效应与优质示范效应分析

变量	市场势力			创新网络中心性差距		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Treat × Post</i>	0.1429** (0.0572)	0.1448** (0.0721)	0.1395 (0.0921)	-0.4374** (0.2115)	-0.6768** (0.2671)	-0.2264 (0.3382)
控制变量	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是

① 本文考虑了与“光领计划”同时执行的“严格执行光伏产品市场准入标准”这一“准入”政策对于势力提升效应所带来的干扰。研究发现，排除“准入”政策影响之后的政策效应仍然显著，从而验证了“光领计划”势力提升效应的稳健性。因篇幅所限，相关内容详见本刊网站登载的附录。

续表 6

变量	市场势力			创新网络中心性差距		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
观测值	4398	2442	1928	2013	949	1010
Adj.R ²	0.7597	0.7826	0.6874	0.3943	0.3961	0.3890

注：列(2)(3)是按照全要素生产率平均值分组，列(2)表示企业全要素生产率较高组，列(3)表示企业全要素生产率较低组；列(5)(6)是按照追随企业与头部企业的技术相似度平均值分组，列(5)表示技术相似度较高组，列(6)表示技术相似度较低组。

七、结论与政策建议

战略性新兴产业和未来产业是推动经济结构转型升级、培育新质生产力的重要载体，而前沿技术创新则是令其实现高质量发展的关键支撑。掌握前沿技术不仅对于保障国家产业安全具有重要意义，还有助于在新一轮全球产业变革中形成引领优势。然而，在行业技术门槛较低的情况下，企业间容易将竞争重点放在价格上，导致资源较多流向短期产能扩张而非长期技术研发，从而对企业技术创新的动力和潜力形成一定约束。因此，立足新发展阶段，通过有效的制度设计和政策工具，引导企业从价格竞争转向技术竞争，正是推动现代化产业体系建设迈向更高水平的关键所在。

本文对中国光伏产业的发展进行了细致剖析，研究发现以“光领计划”为代表的创新激励政策能够推动企业前沿技术创新，并且存在三条核心的影响机制。首先，通过需求扩张效应，“光领计划”为达到特定技术门槛的先进企业提供了额外的市场规模，激励企业之间为赢得高质量的市场需求而展开技术竞争；其次，通过研发优化效应，“光领计划”提高了研发补贴的针对性，帮助优质企业获得了更多的研发资源，提高了研发资源的配置效率；最后，通过知识溢出效应，“光领计划”能够促进前沿技术的知识溢出，降低企业进行研发创新的试错成本。除此之外，“光领计划”还对整个行业具有显著的势力提升效应和优质示范效应，不仅能够提高优质企业的市场势力，推动行业中企业的优胜劣汰，而且还能发挥技术标杆企业的引领示范作用，从而促进行业整体的技术进步。综上，本文认为，“光领计划”的政策设计在推动企业进行前沿技术创新方面具有重要的示范价值，对于当下其他战略性新兴产业和未来产业的发展具有较为普适的借鉴意义。

为加快形成新质生产力，根据以上结论，本文对政府创新激励政策的设计提出如下政策建议。第一，完善政府激励制度的顶层设计，建立面向先进产品的稳定需求牵引机制。由需求扩张效应可知，“光领计划”之所以能够推动企业的前沿技术创新，是因为政府通过设定技术门槛，释放了明确的质量导向信号，定向激励了对于高质量产品的市场需求。借鉴“光领计划”的相关举措，本文认为应不断加大战略性新兴产业和未来产业市场中对高质量产品的市场需求，逐渐提高技术标准，适时淘汰落后产能。同时，对于新能源产业来讲，地方政府在招标和项目遴选，应

以转换效率、长期发电性能和技术迭代潜力等技术先进性指标为核心构建综合评分体系,合理平衡价格因素与技术指标。除此之外,政府还应充分发挥对行业前沿技术方向的规划和引导作用,激励企业将研发方向聚焦于亟待突破的前沿技术,从而促进整个行业的高质量发展。

第二,提高政府研发补贴的针对性,优化研发资源的配置效率。2025年3月,国家能源局印发《国家能源局主责国家重点研发计划重点专项管理实施细则(试行)》(国能发科技〔2025〕23号),明确提出要优化配置能源领域科技资源,发挥市场配置技术创新资源的决定性作用,建立覆盖资金管理使用全过程的资金监督机制,提高资金使用效益。在新能源产业发展由“量”向“质”转变的过程中,提高研发资源配置的精准性会显得更加重要。研发资源的配置直接影响了企业的创新能力,在世界各国科技竞争日益激烈的背景下,政府对于研发资源的配置更应注重效率。因此,政策设计应以技术先进性和创新绩效为导向,将更多的研发资源分配给积极进行前沿技术研发的企业。与此同时,本文建议对研发资源进行全过程、全链条的管理,引导其向先进产能建设和前沿技术创新方向集聚。

第三,引导企业间知识溢出,营造开放共享的创新生态。由知识溢出效应可知,“光领计划”能够通过设立示范项目激励企业之间互相学习,从而加速企业前沿技术突破的进程。未来产业的发展需要积累大量的前沿技术,依靠单个企业难以突破行业技术壁垒,而知识溢出可以加速技术扩散,帮助企业拓展知识边界,从而降低研发的试错成本,弥补自身研发能力的不足。因此,本文建议在推动未来产业发展的过程中不断扩大技术交流的规模,探索建立行业前沿技术信息共享平台,加强对高能效产品的技术认证和市场推广,从而不断推动企业进行前沿技术创新。同时,建议围绕行业技术标准建设,推动组建产业创新联盟等组织,探索建立行业间的“共享专利池”,打造开放共享的创新生态系统。

第四,强化创新型企业的市场地位,提升行业整体竞争力。创新型企业是推动光伏产业技术迭代的关键主体,能够通过持续研发投入、高效率产品供给和先进工艺应用,不断提升行业技术边界,并带动市场需求向高质量、高性能产品转变。“光领计划”能够帮助创新型企业通过技术优势提高市场势力,倒逼低效企业退出市场,从而优化整个行业的资源配置效率。基于势力提升效应,本文建议政府加大对创新型企业的扶持力度,以技术水平作为推动行业优胜劣汰的主要标准。与此同时,应畅通低效产能的退出路径,动态更新产业技术标准。此外,建议探索建立行业白名单机制,定期评选并公布行业中的技术领跑型企业名单,从而提高行业竞争的技术门槛,优化市场竞争格局。

第五,建立优质示范机制,充分发挥行业技术标杆的引领示范作用。明确前沿技术方向并发挥技术示范作用,有助于降低行业创新的不确定性,引导企业研发资源向前沿技术领域集中。技术实力雄厚的企业作为创新的先行者能够为行业提供清晰的技术参照和市场预期,减少行业中研发方向选择的试错成本。根据优质示范效应,本文建议进一步强化行业中技术标杆企业的引领作用。对于新能源行业

而言,建议探索建立行业技术示范项目库,围绕高效率电池技术、智能制造、系统集成优化等重点方向,遴选一批具有代表性的示范项目,通过产业政策引导和财政资金支持鼓励追随型企业学习行业中的先进技术。除此之外,本文建议在光伏项目的招标中借鉴“领跑者”项目的筛选思路,通过市场机制逐步淘汰低效产能,促进行业技术标准的整体提升,最终实现全行业的技术进步和可持续发展。

参考文献

- 安同良、姜舸、王大中,2023:《中国高技术制造业技术测度与赶超路径——以锂电池行业为例》,《经济研究》第1期。
- 陈强、齐霁、颜冠鹏,2025:《双重差分法的安慰剂检验:一个实践的指南》,《管理世界》第2期。
- 陈强远、张醒、汪德华,2022:《中国技术创新激励政策设计:高质量发展视角》,《经济研究》第10期。
- 程承、安润飞、董康银、任晓航、王震、赵国浩,2024:《碳交易机制引导下可再生能源发电企业创新策略研究——基于演化博弈视角》,《中国管理科学》第3期。
- 郭俊杰、方颖、郭晔,2024:《环境规制、短期失败容忍与企业绿色创新——来自绿色信贷政策实践的证据》,《经济研究》第3期。
- 黄先海、孙涌铭、陈梦涛,2024:《企业数字化转型与颠覆性技术创新——来自专利网络与SBERT模型的微观证据》,《中国工业经济》第10期。
- 黄先海、张胜利,2019:《中国战略性新兴产业的发展路径选择:大市场诱致》,《中国工业经济》第11期。
- 蒋冠宏,2022:《中国产业政策的均衡效应分析——基于政府补贴的视角》,《中国工业经济》第6期。
- 金星晔、左从江、方明月、李涛、聂辉华,2024:《企业数字化转型的测度难题:基于大语言模型的新方法与新发现》,《经济研究》第3期。
- 赖烽辉、李善民,2023:《共同股东网络与国有企业创新知识溢出——基于国有企业考核制度变迁的实证研究》,《经济研究》第6期。
- 李丹丹,2022:《政府研发补贴对企业创新绩效的影响研究——基于企业规模和产权异质性视角》,《经济学报》第1期。
- 梁若冰、杨健鹏、梅思雨、冯晨,2025:《税收优惠确定性改革与企业技术创新——来自研发项目鉴定前置的证据》,《经济研究》第11期。
- 卢福财、王雨晨、徐远彬,2024:《头部企业在数字化转型中的作用》,《数量经济技术经济研究》第5期。
- 宋华盛、杨梦霞、罗德明,2025:《战略性新兴产业政策与高校创新》,《经济研究》第6期。
- 孙博文、张友国,2022:《中国绿色创新指数的分布动态演进与区域差异》,《数量经济技术经济研究》第1期。
- 孙博文,2025:《国家绿色创新系统理论的构建及其多维价值》,《改革》第12期。
- 孙博文,2026:《绿色技术创新的全球方位与中国范式:国家绿色创新系统理论与实践》,中国科学技术出版社。
- 孙传旺、占妍泓,2023:《电价补贴对新能源制造业企业技术创新的影响——来自风电和光伏装备制造业的证据》,《数量经济技术经济研究》第2期。
- 孙传旺、占妍泓、徐梦洁,2024:《电力需求响应信号与新能源制造企业绩效》,《管理世界》第12期。
- 汪冲、江笑云,2018:《研发税收激励、企业资格认定与减免可持续性》,《经济研究》第11期。
- 王宏伟、朱雪婷、殷晨曦,2022:《中国光伏产业发展及电价补贴政策影响研究》,《数量经济技术经济研究》第7期。
- 王艺明、马晴晴,2024:《财政补贴对战略性新兴产业的资源配置效应——以光伏产业为例》,《经济管理》第3期。
- 吴超鹏、严泽浩,2023:《政府基金引导与企业核心技术突破:机制与效应》,《经济研究》第6期。
- 武威、曹畅、王馨竹,2024:《政府采购与“专精特新”中小企业创新——基于产业链供应链现代化视角》,《数

量经济技术经济研究》第7期。

余东华、吕逸楠,2015:《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》,《中国工业经济》第10期。

张宽、雷卓骏、李后建,2023:《市场准入管制与企业全要素生产率:来自负面清单的证据》,《世界经济》第5期。

周鹏、王卓、谭常春、宋敏,2024:《数字技术创新的价值——基于并购视角和机器学习方法的分析》,《中国工业经济》第2期。

周泽将、汪顺、张悦,2022:《知识产权保护与企业创新信息困境》,《中国工业经济》第6期。

Banares-Sanchez, I., R. Burgess, D. László, P. Simpson, J. Van Reenen, and Y. Wang, 2026, “Ray of Hope? China and the Rise of Solar Energy”, NBER Working Paper, No.34893.

Becker, B., 2015, “Public R&D Policies and Private R&D Investment: A Survey of the Empirical Evidence”, *Journal of Economic Surveys*, 29(5), 917—942.

Bold, T., K. C. Kaizzi, J. Svensson, and D. Yanagizawa-Drott, 2017, “Lemon Technologies and Adoption: Measurement, Theory and Evidence from Agricultural Markets in Uganda”, *Quarterly Journal of Economics*, 132(3), 1055—1100.

Chen, J., C. S. Heng, B. C. Y. Tan, and Z. J. Lin, 2018, “The Distinct Signaling Effects of R&D Subsidy and Non-R&D Subsidy on IPO Performance of IT Entrepreneurial Firms in China”, *Research Policy*, 47(1), 108—120.

De Chaisemartin, C., and X. D’Haultfœuille, 2020, “Two-Way Fixed Effects Estimators with Heterogeneous Treatment Effects”, *American Economic Review*, 110(9), 2964—2996.

De Loecker, J., and F. Warzynski, 2012, “Markups and Firm-Level Export Status”, *American Economic Review*, 102(6), 2437—2471.

Fang, L. H., J. Lerner, and C. P. Wu, 2017, “Intellectual Property Rights Protection, Ownership, and Innovation: Evidence from China”, *Review of Financial Studies*, 30(7), 2446—2477.

Funk, R. J., and J. Owen-Smith, 2017, “A Dynamic Network Measure of Technological Change”, *Management Science*, 63(3), 791—817.

Gao, X., and V. Rai, 2019, “Local Demand-Pull Policy and Energy Innovation: Evidence from the Solar Photovoltaic Market in China”, *Energy Policy*, 128, 364—376.

Garin, A., and F. Silvério, 2024, “How Responsive Are Wages to Firm-Specific Changes in Labour Demand? Evidence from Idiosyncratic Export Demand Shocks”, *Review of Economic Studies*, 91(3), 1671—1710.

Gerarden, T. D., 2023, “Demanding Innovation: The Impact of Consumer Subsidies on Solar Panel Production Costs”, *Management Science*, 69(12), 7799—7820.

Goodman-Bacon, A., 2021, “Difference-in-Differences with Variation in Treatment Timing”, *Journal of Econometrics*, 225(2), 254—277.

Hud, M., and K. Hussinger, 2015, “The Impact of R&D Subsidies During the Crisis”, *Research Policy*, 44(10), 1844—1855.

Liu, D. Y., T. Chen, X. Y. Liu, and Y. Z. Yu, 2019, “Do More Subsidies Promote Greater Innovation? Evidence from the Chinese Electronic Manufacturing Industry”, *Economic Modelling*, 80, 441—452.

Mayer, T., M. J. Melitz, and G. I. P. Ottaviano, 2021, “Product Mix and Firm Productivity Responses to Trade Competition”, *Review of Economics and Statistics*, 103(5), 874—891.

Nie, P. Y., C. Wang, and H. X. Wen, 2022, “Technology Spillover and Innovation”, *Technology Analysis and Strategic Management*, 34(2), 210—222.

Sun, L. Y., and S. Abraham, 2021, “Estimating Dynamic Treatment Effects in Event Studies with Heterogeneous Treatment Effects”, *Journal of Econometrics*, 225(2), 175—199.

Zhang, W., 2015, “R&D Investment and Distress Risk”, *Journal of Empirical Finance*, 32, 94—114.

Innovation Incentive Policy and Energy Cutting-edge Technological Innovation: Evidence from the “Top Runner” PV Project

SUN Bowen^{a,b}, YUAN Mingsheng^c, LI Qianwen^{d,e} and SUN Chuanwang^{c,f}

(a: Institute of Quantitative & Technological Economics, Chinese Academy of Social Sciences;

b: Faculty of Applied Economics, University of Chinese Academy of Social Sciences;

c: School of Economics, Xiamen University;

d: School of Business, Jiangnan University;

e: The Research Institute for National Security and Green Development, Jiangnan University;

f: Key Laboratory of Econometrics (Xiamen University), Ministry of Education)

Summary: How to promote the optimization and upgrading of industrial capacity and encourage enterprises to engage in cutting-edge technological innovation is a major issue of national concern. Launched in 2015, the “Top Runner” PV Project is an innovation incentive policy designed to promote the innovation, application, and dissemination of cutting-edge photovoltaic technologies in China. The core of this policy lies in using technological advancement as the primary criterion for selecting high-quality enterprises, thereby driving a shift in competition among enterprises from capacity and price-based rivalry to technological and innovation-based competition. However, there remains a lack of sufficient empirical evidence and theoretical discussion regarding the impact of this policy on promoting cutting-edge technological innovation in the photovoltaic industry and its underlying mechanisms.

Drawing on over 450000 patent records from China’s photovoltaic industry between 2009 and 2022, this paper utilizes large language models, such as ERNIE, which has been pre-trained using the Transformer deep learning framework, to measure the degree of cutting-edge technological innovation among enterprises, thereby assessing the policy effects of the “Top Runner” PV Project. The study finds that the “Top Runner” PV Project significantly enhances enterprises’ cutting-edge technological innovation, with this effect primarily realized through three channels: demand expansion, research and development optimization, and knowledge spillovers. Furthermore, the project also generates significant market power enhancement effects and benchmark demonstration effects across the industry. By deepening supply-side structural reforms and using key technical parameters as effective criteria for differentiation, the government has enabled high-quality enterprises to gain greater market influence, thereby significantly promoting technological progress across the entire photovoltaic industry. This paper recommends that the government draw on the successful experience of the “Top Runner” PV Project in fostering future industries to support high-quality economic development.

The marginal contributions of this paper are threefold. First, this paper opens the “black box” of the mechanisms underlying the “Top Runner” PV Project and reveals how innovation incentive policies promote enterprises’ cutting-edge technological innovation. Based on the development practices of China’s PV industry, this paper reveals, from the new perspective of “technology-enabled effectiveness of industrial policy”, how the government should identify high-quality enterprises by optimizing policy mechanism design and thereby promotes enterprises’ cutting-edge technological innovation. Second, building upon existing methodologies, this paper utilizes large language models to conduct an in-depth analysis of patent abstracts from Chinese listed companies. Based on this, it innovatively constructs quantitative indicators reflecting enterprises’ cutting-edge technological innovation, effectively addressing the shortcomings in the validity and accuracy of existing measures of such innovation in the literature. Third, this paper extends existing research on the evaluation of innovation incentive policies by incorporating two industry-level effects—the market power enhancement effect and the benchmark demonstration effect—into the analytical framework. It provides an in-depth analysis of the critical role that technological factors play in driving the “survival of the fittest” in the photovoltaic industry, revealing the far-reaching impact of such policies on enhancing the market competitiveness of innovative enterprises and serving as a model for technological advancement. This enriches and extends research on how innovation incentive policies drive technological innovation in the photovoltaic sector.

Keywords: “Top Runner” PV Project; Cutting-edge Technological Innovation; Innovation Incentives; New Quality Productive Forces

JEL Classification: F01, F27, F42

(责任编辑: 溯 明)(校对: 曹 帅)