

引用格式:董长贵,周润民,李佳颖.补贴政策对中国光伏装机市场的影响:基于面板数据回归的实证分析[J].资源科学,2021,43(6):1065-1076. [Dong C G, Zhou R M, Li J Y. The effect of feed-in tariff on China's photovoltaic capacity development: An empirical analysis based on panel data regression[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1065-1076.] DOI: 10.18402/resci.2021.06.01

补贴政策对中国光伏装机市场的影响 ——基于面板数据回归的实证分析

董长贵,周润民,李佳颖

(中国人民大学公共管理学院,北京 100872)

摘要:准确评估补贴对于新兴产业发展的影响是科学制定政府补贴政策的重要依据。一方面,补贴过高会带来财政压力和产能过剩;另一方面,补贴过低会造成产业发展动力不足。中国光伏产业的高速增长伴随着亟待解决的“弃光限电”和财政补贴缺口问题,其背后是光伏补贴政策科学评估的缺乏。为此,本文以中国光伏产业为例,运用面板数据回归和模拟仿真方法,严谨评估中央补贴对光伏产业发展的影响大小。研究发现:①光伏补贴每提升0.1元/度电,全国光伏装机将增加540万~660万kW/年,大大超过现有文献估计。②反事实模拟表明,如果一开始完全取消光伏补贴,中国光伏装机市场规模将在原有基础上缩水85%左右。③以2019年弃光限电问题严重的9省为例,如果光伏补贴调整至不存在弃光的水平,这些省份的光伏补贴缺口每年可减少13亿元。本文研究结论可用于补贴政策调整优化、缓解弃光限电和补贴缺口等多个现实政策问题。

关键词:光伏产业;补贴政策;政策评估;弃光限电;补贴缺口;反事实模拟;日照资源

DOI: 10.18402/resci.2021.06.01

1 引言

新能源产业的健康发展对于占据战略性新兴产业先导优势、推进能源革命和打赢污染防治攻坚战具有重要意义^[1,2]。近10年来,在补贴政策的大力推动下,中国光伏装机市场发展迅速。2006—2019年,全国光伏装机容量从80 MW增长至204 GW,增长高达2550倍,并于2015年跃居世界首位。然而,光伏行业超高速增长也产生了一系列问题,其中最为严重的是局部地区的“弃光限电”^①和财政补贴的巨额缺口。2016年西北地区平均弃光率高达20%;2018年可再生能源补贴缺口超千亿元。这些问题产生的主要原因是多年来光伏补贴水平偏高,政策调整过慢,补贴退坡机制滞后于光伏技术成本下降。政策调整的不足反映出政策制定者很可能低

估了补贴对新能源产业的市场推动作用。因此,科学评估光伏补贴政策对市场装机的影响大小对于补贴政策调整优化、缓解弃光限电和补贴缺口等政策问题至关重要。

学界对于财政补贴能否驱动新能源产业发展已形成基本共识^[2,3],并得到了大量国内外研究的积极佐证^[4-7]。相关文献大致可分为两类:①将补贴政策作为虚拟变量来处理,着重考察补贴政策是否有效。比如,有学者发现拥有省级政策支持能够让风电装机增加70%^[8],并且补贴政策比非补贴的政策支持更有效果^[9]。分区域来看,有研究表明补贴仅在风能资源丰富的区域对风电产业的发展有显著影响^[10];但也有研究发现风能补贴政策在全国层面和多数区域内均对风能产业的发展有显著的推动

收稿日期:2020-07-17,修订日期:2020-08-12

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(19YJC630028)。

作者简介:董长贵,男,湖南衡阳人,副教授,研究方向为能源环境政策。E-mail: changgui.dong@ruc.edu.cn

通讯作者:周润民,男,甘肃临夏人,硕士研究生,研究方向为能源环境政策。E-mail: runmin.zhou@ruc.edu.cn

① 弃光限电是指光伏发电能力未被充分利用,多出的发电能力因不能被电网消纳而受到限制、无法发电。弃光率=弃光电量/(弃光电量+上网电量)。

作用^[11,12]。②将补贴作为连续变量处理,更为细致地估计补贴变动对新能源装机的影响。如,研究表明美国住宅分布式光伏税收返还每增加1美元/W,平均每1000户居民电力用户就会增加500W装机容量^[13];运用类似方法对美国东北部地区家用太阳能光伏进行估计时,研究者发现光伏装机只增加了3.2%^[14]。德国光伏补贴(FIT)每上升0.1欧元/kWh,德国全国的光伏装机将提高8.41万kW^[15];美国加州光伏补贴每提高0.1美元/kWh,光伏装机将增加10%^[16]。此外,国内有研究者发现中国分布式光伏补贴每增加1元/kWh,所在省份两年平均新增装机容量8.74万kW^[17]。此外,尽管财政补贴能够推动新能源产业的发展,但是不合理的补贴政策会带来一系列新的问题。就中国风能发展而言,高额补贴甚至已经成为弃风限电和补贴缺口的直接推手^[18,19]。已有研究甚至发现风电补贴每增加0.1元,弃风率会提高2%~3%^[20]。

上述研究虽在一定程度上回答了补贴政策对行业发展的影响大小,但仍存在如下几个问题:①大部分研究聚焦于欧美发达国家,对中国新能源产业补贴政策的评估关注较少;②已有研究多数将补贴政策当作二分变量处理,其他则对补贴政策对市场装机的影响程度未能达成一致,且存在低估的可能性^[21];③少数对光伏补贴影响评估的文献采用横截面数据方法^[17],研究结论的信度和效度略显不足;④既有研究尚未结合弃光限电和补贴缺口等政策问题进行分析,实际应用性偏低,无法为政策制定提供直接借鉴。基于这些文献不足,本文对以光伏补贴为代表的新能源补贴政策进行科学评估,并且将研究结论与政策实践相结合,为进一步探讨补贴政策优化问题提供扎实的实证基础和科学的政策建议。

在实际的行业发展中,光伏装机增长并非只由补贴推动,因而还需要梳理其他关键因素。其中,资源禀赋被认为是影响一个国家或地区新能源产业发展和空间分布的重要因素^[22-25],部分研究进一步给出了资源禀赋的测算^[26,27]。以平准化成本衡量的技术进步也是影响光伏企业投资者的重要因素。此外,地区能源总量增长^[28-30]和能源结构变化^[31,32]等能

源行业特征也可能对新能源增长产生影响。本文将对这些因素进行综合考察。

本文将从3个方面对现有研究进行改进:①在系统梳理光伏装机影响因素的基础上,提出包括财政补贴、技术进步和资源禀赋在内的统一分析框架,增强计量模型的现实解释力;②方法上运用面板数据回归以缓解内生性问题,并通过分资源区回归进一步探索补贴政策影响的地区差异;③构造反事实模拟,在计量模型估计结果的基础上进一步模拟出补贴政策调整对光伏装机容量、弃光量和财政补贴缺口的影响。

2 政策背景

中国光伏装机容量的快速增长离不开补贴政策的大力推动。2011年,中国开始实施全国统一的光伏固定标杆上网电价(Feed-in Tariff, FIT),即光伏电站对电网的长期稳定售价。固定上网电价是世界范围内普遍采用的一种补贴方式,一般显著高于燃煤机组的上网价格;FIT一旦确定将维持20年不变,这给光伏投资企业的未来收益提供了很大的确定性。

2013年《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》(以下简称《意见》)出台,对集中式光伏电站^②开始实行分区域标杆上网电价。《意见》将全国分为3类资源区(表1),其划分依据主要是各地的日照资源。值得注意的是,资源区的划分与省级行政区划并不完全一致(跟地级市一致),部分省份横跨两类资源区。跨资源区的省份主要集中在中国北部,包括青海、甘肃、新疆、内蒙古、河北、山西、陕西(以下简称“北方7省”)。不同资源区享有的光伏补贴水平不同,背后的目的是保证全国范围内基本一致的投资回报率。

《意见》还规定要根据光伏发电技术成本变化等因素,合理调减光伏电站上网电价(称为退坡机制)。从表1可以看出,3类资源区的光伏补贴均以一定幅度下调,其中资源I区下降幅度最大。但是也需要注意到,补贴政策在2014年1月—2016年7月长达两年半的时间内并没有任何下调,大大滞后于光伏技术成本的快速变化。尽管这些资源区之间不同的补贴水平及其变化的差异,给本文估计补

② 光伏装机按规模大小可以分为大规模的集中式光伏电站和小规模的分布式光伏系统。后者因为装机容量相对较小、全国补贴水平一样,所以在本文中不予考虑。后文中如果不加区分,光伏装机仅指光伏电站的装机部分。

2021年6月

表1 中国集中式光伏电站FIT数额(单位:元/kWh)

Table 1 Feed-in tariff (FIT) levels for utility-scale photovoltaic (PV) projects in China (Unit: yuan/kWh)

资源区分	资源区	2012.1— 2013.12	2014.1— 2016.6	2016.7— 2017.6	2017.7— 2018.6	2018.7— 2019.6
I	宁夏,青海海西,甘肃嘉峪关、武威、张掖、酒泉、敦煌、金昌,新疆哈密、塔城、阿勒泰、克拉玛依,内蒙古除赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔以外地区	1.00	0.90	0.80	0.65	0.50
II	北京,天津,黑龙江,吉林,辽宁,四川,云南,内蒙古赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔,河北承德、张家口、唐山、秦皇岛,山西大同、朔州、忻州,陕西榆林、延安,青海、甘肃、新疆除I类外其他地区	1.00	0.95	0.88	0.75	0.60
III	除I类、II类资源区以外的其他地区(该政策未包含西藏、香港、澳门、台湾)	1.00	1.00	0.98	0.85	0.70

注:表格内数值为各资源区每一时间段内维持不变的光伏电站标杆上网电价。数据来源:国家能源局。

贴对光伏装机的影响提供了便利,但是本文仍然面临一定的数据挑战。具体而言,由于跨资源区省份的存在和市级光伏装机数据的缺失,跨资源区省份装机所对应的补贴水平难以确定。本文将通过资源区面积加权和敏感性分析克服这一挑战。衡量补贴对光伏装机影响的另一挑战在于,补贴水平不断下行,而光伏装机总体上在不断增加,从而导致二者在时间序列上将呈现某种负相关(图1)。这种统计负相关显然有悖于我们对补贴政策预期效果的理解。因此有必要在统计分析时控制其他混淆变量,其中最重要的变量是光伏的技术变化。光伏技术成本变化不仅是补贴下调的依据,也会导致光伏装机增多,因此,在回归分析中必须加以控制。

3 模型、变量与数据

3.1 回归模型

本文采用如下理论分析框架来定量评估补贴对光伏装机的影响(图2):本文关注的核心是补贴

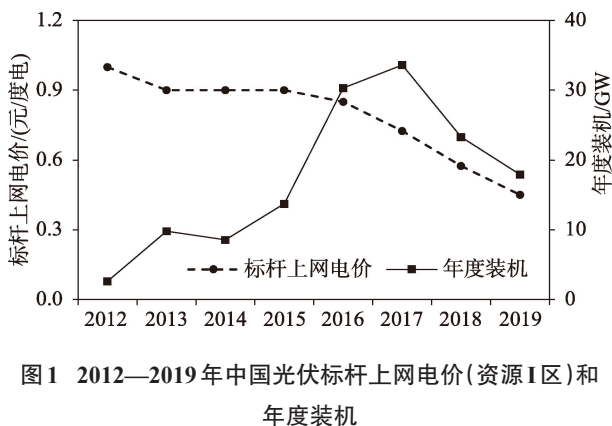


图1 2012—2019年中国光伏标杆上网电价(资源I区)和年度装机

Figure 1 China's photovoltaic (PV) feed-in tariff (zone I) and annual installed capacity, 2012-2019

政策对光伏装机的边际影响;其中,补贴的横向地区差异主要由当地日照资源决定,纵向历时变化受技术进步驱动;光伏装机也会受其他地区特征影响(除日照资源),比如当地的能源结构和经济状况,而这些地区特征跟日照资源之间存在统计相关。因此,在光伏装机对补贴的回归中,也有必要控制这些跟装机显著相关的地区特征。此外,西北地区的“弃光限电”问题引发了国家能源局对装机建设的规模管理,在一定程度上抑制了光伏行业在这些地区的过快发展。因此,本文也在回归分析中控制了规模管理政策。

根据以上理论分析框架,本文采用如下面板数据回归方程:

$$Capacity_{it} = \beta_0 + \beta_1 FIT_{it} + \beta_2 LCOE_{it} + \beta_3 Res_{it} + \delta' X_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中:因变量 $Capacity_{it}$ 为 i 省半年度 t 的新增光伏装机,核心解释变量 FIT 为光伏补贴水平。根据前文的讨论,有必要在回归中控制光伏技术成本 $LCOE$ 和日照资源 Res ,因为它们同时影响因变量和核心解释变量。 X 为其他解释变量和控制变量(地区能源和经济特征、规模管理政策等), β_0 为截

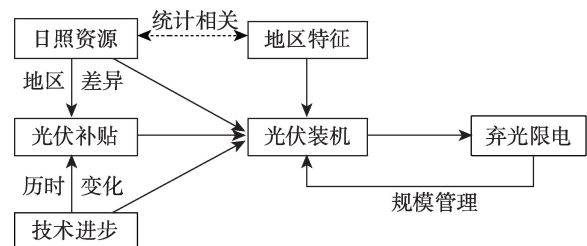


图2 理论分析框架图

Figure 2 Analytical framework of the research

距, β_1 、 β_2 、 β_3 和 δ 为各变量的斜率参数, α_i 为省级固定效应, γ_i 为时间固定效应, ε_{it} 为残差项。各变量的具体解释如下:

(1) 光伏装机 *Capacity*。本文的被解释变量为各省半年度的集中式光伏电站新增装机容量。半年度数据样本量更大、能更精准地考察影响因素对光伏装机容量增长的作用, 同时契合 2016—2018 年的光伏补贴调整时间(表 1)。此外, 本文选择新增光伏装机而不是累计装机的原因在于光伏补贴不会影响过去几年的装机; 同时新增装机的时间序列相关问题更小。

(2) 光伏补贴 *FIT*。表 1 整理了全国统一光伏电站标杆上网电价和分区光伏电站标杆上网电价, 将光伏发电项目的最后投运期限作为补贴调整时间。唯一需要解决的是跨资源区的北方 7 省光伏补贴水平的操作化问题。本文首先假设某跨资源区省份内分属两个资源区的光伏装机容量与其下属地级市的面积总和成正比, 接着以该省处于两类资源区地级市的面积总和为权重加权平均得到该省对应的补贴水平。在后文敏感性分析中, 本文还考虑了以地级市个数为权重的情况, 并进一步检验这种估算方法的合理性。这 7 个省份的资源区面积比重如表 2。本文预期光伏补贴系数符号为正。

(3) 平准化度电成本 *LCOE*。平准化度电成本 (Levelized Cost of Energy, *LCOE*) 是衡量技术成本的通用指标, 具体衡量的是光伏项目生命周期内的总成本现值与总发电量现值的比值, 即度电发电总成本(元/度电)。*LCOE* 来源于国际能源署 IEA 的公开数据, 本文预期这一变量的系数符号为负。并且由于补贴和技术成本对光伏企业来说是投资回报的两面, 本质上并无差别, 因此, 理论上这两个变量的回归系数应该相等。

LCOE 最大的数据问题在于只有全国层面的时

间序列数据。如果方程(1)中加入时间固定效应, 那么 *LCOE* 将因完全共线性被去除。为此本文引入 *LCOE_v2*, 即 *LCOE* 与地区光伏容量因子 *CF* (Capacity Factor) 的交互项。光伏容量因子是光伏发电设备的年平均利用率, 一个省份的光伏容量因子越大, 年发电量就越多, 对应的 *LCOE* 将越低。*LCOE_v2* 的定义如下:

$$LCOE_v2_{it} = \frac{LCOE_{it}}{CF_{it}} \quad (2)$$

(4) 日照资源 *Res*。日照资源不仅影响资源区光伏补贴水平, 而且也通过潜在发电量和投资回报率来影响光伏装机量。

其他解释和控制变量包括地区能源与经济特征、规模管理政策、省级碳交易政策和地方财政健康状况等。

(5) 地区能源和经济特征。地区能源总量增长通常以做大蛋糕的方式推动新能源产业的增长^[28-30]。经济发展可能带动新能源产业的需求、推动产业增长^[11]。具体包括 3 个指标: 人均煤炭消费量 (*Coal*)、人均用电量 (*Elec*) 和人均 GDP (*GDP*)。从供给侧来讲, 可再生能源发展在一定程度上和地方煤炭经济的发展和转型相关, 煤炭依赖度越高的地区, 发展新能源的动力可能越足。本文将使用人均煤炭消费量 (*Coal*) 来衡量地方煤炭经济。从需求侧来讲, 人均用电量 (*Elec*) 能够衡量地方能源需求, 直接体现地区的能源需求总量。人均 GDP (*GDP*) 反映地区的经济发展水平, 中国西北地区人均 GDP 较低, 发展太阳能、风能等战略性新兴产业动力更强, 因此预期该项系数为负。此外, 为避免反向因果, 本文将这 3 个指标均滞后一年。

(6) 规模管理政策 *Scale*。为抑制光伏装机的无序增长, 中国自 2014 年开始实施规模管理政策, 并且根据各省弃光的严重程度调整其光伏建设规模,

表 2 跨资源区省份在两资源区中的土地面积比重

Table 2 Land area ratio of two types of cities in the seven northern provinces

资源区	甘肃	新疆	青海	内蒙古	河北	山西	陕西
I	0.639	0.195	0.459	0.605			
II	0.361	0.805	0.541	0.395	0.530	0.297	0.390
III					0.470	0.703	0.610

数据来源: 各省人民政府官网。

2021年6月

本文预期该项的符号为负;赋予未受影响的省份远大于其实际规模的管理额度(999万kW),以衡量受限省份的光伏装机变化。

(7)省级碳交易政策 *Carbon*。碳交易政策可以限制火电行业的总排放量^[33-35],同时提高可再生能源的竞争力^[36,37]。中国自2013年开始在7省市先后开展碳交易(*Carbon*)试点,本文将这些省份试点开始年份设置为1,其他年份和其他省份为0。一方面,试点省份环保意识可能较强,对可再生能源支持度较高;另一方面,碳交易作为补贴的替代政策可能削弱发展可再生能源的动力。该项符号待定。

(8)地方政府财政健康状况(*FisHe*)。政府能力与意愿在政策推进过程中的作用同样不容忽视^[38],本文将其操作化为政府财政健康状况(*FisHe*),即财政预算内收入与财政预算内支出之比。一方面,财政健康状况良好有利于提高地方对光伏产业的支持力度;另一方面,地方政府即使财政健康状况不好也可能通过扶持光伏产业带动当地经济发展。

3.2 反事实模拟

前面提到,光伏补贴政策的调整滞后导致了严重的弃光限电和财政补贴缺口问题。因此,在面板数据回归结果的基础上,对弃光严重省份的光伏补贴进行反事实模拟,进一步估算出补贴调整对弃光量和补贴缺口的影响。具体模拟思路如下:

首先,计算出为了消除弃光限电光伏补贴所要降低的幅度 ΔFIT :

$$\Delta FIT = (Elec_{curt} \div Hour) \div \beta_1 \quad (3)$$

式中: $Elec_{curt}$ 是观测到的弃光量, $Hour$ 是光伏平均利用小时数, β_1 是回归方程式(1)中 FIT 的系数。

其次,在上述基础上对补贴缺口变化进行估算。这里不妨假设可再生能源补贴收入和其他类别的可再生能源补贴支出不变,从而补贴缺口的变化就等于光伏补贴支出的变化 ΔSub :

$$\Delta Sub = Sub_{actu} - Sub_{adj} \quad (4)$$

式中: Sub_{actu} 为补贴水平调整前的实际支出, Sub_{adj} 为补贴调整后的补贴支出。 Sub_{adj} 的计算公式如下:

$$Sub_{adj} = (FIT_{actu} - \Delta FIT - P_{coal}) \times (Cap_{new} - \beta_1 \times \Delta FIT) \times Hour \quad (5)$$

式中: FIT_{actu} 为调整前的固定标杆上网电价, P_{coal} 为当地脱硫燃煤机组标杆上网电价, Cap_{new} 是实际新增装机容量。式(5)中补贴支出的减少来自两个方面:一是补贴水平的下调,二是新增装机量的下降。由此,估算出补贴政策调整对弃光限电和补贴缺口的影响。

3.3 数据来源和描述性统计

本文数据集为30个省级行政区(因数据缺失未包含西藏、港澳台地区)、14个半年(2012下半年—2019上半年)的面板数据。各变量的数据来源和预期符号如表3所示。

变量的描述性统计如表4所示。统计数据显示,各省装机规模差距明显,早期部分省份装机量

表3 变量操作化

Table 3 Operationalization of key variables

变量	描述	数据来源	预期符号
<i>Capacity</i>	每个省每半年度的新增光伏装机/万kW	国家能源局	/
<i>FIT</i>	标杆上网电价/(元/kWh)	发改委	+
<i>LCOE</i>	平准化成本,根据2018年美元兑人民币汇率,将单位换算为元/kWh	IEA	-
<i>CF</i>	容量因子,用以衡量全年发电量的大小	文献[26]	/
<i>Res</i>	潜在日照资源/万kW	文献[26]	+
<i>Coal_lag</i>	滞后一期的人均煤炭消费量/(万吨标准煤/万人)	国家统计局	+
<i>Elec_lag</i>	滞后一期的人均电力消费量/(亿kWh/万人)	国家统计局	+
<i>GDP_lag</i>	滞后一期的人均GDP/(万元/人)	国家统计局	-
<i>Scale</i>	年初和年中调整的光伏发展指标/万kW	国家能源局	-
<i>Carbon</i>	碳交易市场(试点所在省份为1,否则为0)	碳排放交易网 http://tanpaifang.com/	+/-
<i>FisHe</i>	地方政府当年财政收入与财政支出之比	国家统计局	+/-

表4 描述性统计

Table 4 Descriptive statistics

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
<i>Capacity</i>	420	31.060	46.219	0.000	353.000
<i>FIT</i>	420	0.901	0.130	0.500	1.000
<i>LCOE</i>	420	0.705	0.273	0.211	1.264
<i>CF</i>	420	0.189	0.022	0.151	0.260
<i>LCOE_v2</i>	420	0.705	0.284	0.151	1.557
<i>Res</i>	420	732.112	1766.914	0.850	7498.000
<i>Coal_lag</i>	420	3.786	3.351	0.236	16.772
<i>Elec_lag</i>	420	0.474	0.273	0.186	1.548
<i>GDP_lag</i>	420	2.624	1.235	0.801	7.183
<i>Scale</i>	420	410.690	474.114	1.000	999.000
<i>Carbon</i>	420	0.155	0.362	0.000	1.000
<i>FisHe</i>	420	0.507	0.186	0.156	0.931

为0,后期一省半年装机最高可达353万kW。光伏补贴和技术成本度量单位一样、规模相近,但技术成本比光伏补贴下降更多,可能造成补贴调整滞后和产能过剩等问题。此外,*LCOE*的两个版本均值相等,与预期一致。

4 结果与分析

4.1 基准回归

本文主要运用R 3.5进行回归分析。由于本文时间期数为14,为避免非平稳时间序列造成的“伪回归”问题,首先使用Augmented Dicky-Fuller检验对所有变量进行逐一单位根检验,发现在10%的显著水平上可以拒绝所有单位根的原假设,表明本文的面板数据是平稳的,无须再对整个面板数据做协整检验。为保证计量结果的稳健性,通过豪斯曼(Hausman)检验来选择采用随机效应模型(RE)还是固定效应模型(FE),因为基准回归模型的豪斯曼检验均不显著,本文将重点考察随机效应模型。此外,随机效应模型的好处在于日照资源变量得以保留。

表5汇总了3个模型的回归结果。模型1是未加入时间固定效应的随机效应模型;模型2加入了时间固定效应;模型3在加入时间固定效应的基础上,进一步限制光伏补贴和技术成本的回归系数相等。具体做法为构建一省的*FIT*与*LCOE_v2*的差

值(*FIT_v2*)并置于回归中,以衡量开发商的投资净收益。设计模型3是为了避免模型2中的时间固定效应过度控制时间趋势,削弱技术成本的影响,从而导致*FIT*与*LCOE_v2*的系数出现很大差异,与理论预期不一致。下面以模型1和3为例详细讨论各解释变量的系数。

(1)模型1和3均发现*FIT*对光伏装机有显著的积极推动作用,符合假设预期,说明模型设定克服了补贴和装机在时间维度上的负相关性。在其他因素不变的情况下,补贴每增加1元/kWh,一个省份半年的新增光伏装机约为90万~110万kW。这是已有研究结果^[17]的40~50倍,原因是该文献使用了横截面数据,其估计很可能存在较大的偏差,并且两年新增9万kW的结果和半年平均增加31万kW(表4)差距明显。因此,本文结果更符合光伏装机增长的实际情况。从全国范围来看,在其他影响因素不变的情况下,光伏补贴每提升0.1元/kWh,全国光伏装机将增加540万~660万kW/年。

根据模型1,2018年中央政府出台的光伏“531”新政预计使新增装机量在全国范围内减少1009万kW^③;根据国家能源局的数据,实际新增装机在“531”新政后减少了1023万kW,与模型估计结果仅相差14万kW,说明上述估计结果比较可靠。

(2)*LCOE*的系数显著为负,符合预期。以模型

③ 计算方法为112.12万(kW/元/省/半年)×2个半年×30省×(-0.15)元=-1009万kW。按照模型3的系数来计算的话,光伏装机将减少824万kW。

2021年6月

表5 基准回归结果

Table 5 Baseline regression results

	RE (1)	RE (2)	RE (3)
<i>FIT</i>	112.120*** (27.991)	148.756*** (47.089)	
<i>LCOE</i>	-70.336*** (15.479)		
<i>LCOE_v2</i>		-42.254 (40.628)	
<i>FIT_v2</i>			91.534*** (30.082)
<i>Res</i>	0.004 (0.004)	0.006 (0.005)	0.005 (0.005)
<i>Coal_lag</i>	0.720 (1.958)	0.659 (2.133)	0.886 (2.070)
<i>Elec_lag</i>	33.075* (19.713)	44.616* (24.052)	34.005 (22.045)
<i>GDP_lag</i>	-0.146 (3.987)	-10.727** (4.781)	-11.136** (4.743)
<i>Scale</i>	-0.0002 (0.006)	-0.019** (0.009)	-0.020** (0.009)
<i>Carbon</i>	-14.169** (6.386)	-1.327 (6.704)	-1.818 (6.712)
<i>FisHe</i>	-34.754 (26.254)	34.594 (29.576)	51.012* (28.921)
省级固定效应	是	是	是
时间固定效应	否	是	是
<i>F</i> 统计量	68.132	158.057	159.457
样本量	420	420	420
<i>R</i> ²	0.157	0.258	0.255
豪斯曼检验	13.445(不显著)	4.757(不显著)	5.896(不显著)

注:不带括号的数值为回归系数的数值,带括号的数值为回归系数的聚类稳健标准误。*表示 $p<0.1$,**表示 $p<0.05$,***表示 $p<0.01$ 。下同。

1为例,在其他因素不变的情况下,*LCOE*每降低1元,一省的半年装机量就会增长约70万kW。在本文中*LCOE*的系数与*FIT*的系数非常接近(统计上差别不显著),说明光伏补贴政策的调整幅度和调整频率需要跟进*LCOE*的下降趋势,从而确保光伏行业有序健康发展。模型3展示了将*FIT*和*LCOE*合并的结果,其系数等于模型1中二者系数绝对值的平均值,反映了模型设定的合理性。

(3)日照资源的系数未能通过显著性检验,背

后的原因可能由中国光伏产业发展逐渐东移所致。中国光伏装机起初确实集中在日照资源丰富的西北地区,之后由于弃光限电问题而逐渐东移。此外,日照资源丰富的西藏、青海省光伏装机并不太多。尽管新能源的布局和发展理应遵循因地制宜的原则,但显然中国各省的光伏装机规模受到了多重因素影响。

(4)就地区能源和经济特征来说,煤炭消费量在模型1-3中均未通过显著性检验,主要原因可能是光伏产业受国家补贴和技术进步的影响,目前可能还未开始大规模替代煤炭消费。人均电力消费的系数大多为正,虽然只在10%水平上显著,但说明地区的电力需求能够刺激光伏产业的发展。在控制时间固定效应之后,人均GDP对光伏装机增长有显著的负向作用,可能是因为经济欠发达地区发展光伏行业的积极性更高。

(5)规模管理政策对地方光伏装机有一定的抑制作用,这也解释了日照资源系数不显著的原因。光伏补贴属价格政策,其有效性还需规模管理等数量政策的配合。但如果能够准确评估出补贴对装机的影响,起初就有补贴退坡机制,也许就不需要后续的规模管理政策了。

(6)碳交易市场似乎抑制了光伏装机的增长,这是因为碳交易和光伏补贴的目的基本相同。最后,政府财政健康状况对光伏装机增长在不同模型中影响各异,说明光伏装机增长跟地方财政关联不大,因为光伏补贴主要来自中央财政。

4.2 敏感性分析

针对北方7省的*FIT*变量操作化问题,本文对此进行敏感性分析。具体做法为将各省两类资源区面积的权重上浮或下调0.1^④,放宽光伏装机与地级市面积成正比的假设。因此,每个省将有3个*FIT*值,北方7省组合起来将有 $3^7=2187$ 个*FIT*值。相应地,模型1会产生*FIT*的2187个系数(图3)。*FIT*回归系数的变动范围在107~117之间,均值为112,所有2187个系数均在1%的水平上显著。因此,*FIT*变量操作化中的假设对其回归系数影响并不大;将面积权重换作个数权重所得到的结果几乎无差异。

如果在回归中直接去掉7个跨资源区的北方省

④ 新疆的行政区面积分析无法让权重变动超过0.2,因此统一将权重变动设为0.1。

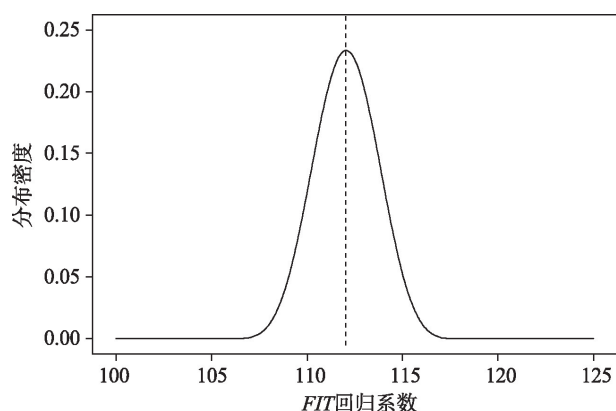


图3 光伏补贴的敏感性分析

Figure 3 Sensitivity analysis on photovoltaic (PV) feed-in tariff (FIT) coefficient

份,样本量将从420变为322,结果见表6。由于样本量的下降,表6里核心解释变量的统计显著性有所下降。豪斯曼检验说明第1列选择固定效应模型更为可靠。模型1的回归系数虽有所减小,但仍跟表5的结果比较接近。总体来看,核心变量FIT和LCOE仍然是光伏装机增长的重要推动力量。此外,表6的结果表明,对非北方7省而言,日照资源更有可能跟光伏装机负相关。

4.3 分区回归

本文进一步以表5中模型1为基准,沿资源区

表6 去掉跨资源区省份的回归结果

Table 6 Regression results excluding the seven northern provinces

	FE (1)	RE (2)	RE (3)
<i>FIT</i>	91.790*** (26.116)	83.447* (43.565)	
<i>LCOE</i>	-47.975** (19.260)		
<i>LCOE_v2</i>		-36.317 (39.364)	
<i>FIT_v2</i>			59.915* (31.935)
<i>Res</i>		-0.034* (0.020)	-0.040** (0.019)
省级固定效应	是	是	是
时间固定效应	否	是	是
<i>F</i> 统计量	67.463	153.46	154.656
样本量	322	322	322
R^2	0.151	0.357	0.357
豪斯曼检验	19.029(显著)	5.485(不显著)	6.472(不显著)

交界将各省分别划入各类资源区,其中跨资源区省份按其面积比重较大的资源区归类。由于I类资源区样本过少(仅有宁夏),因而本文合并了I类和II类资源区(表7)。其中,FIT的回归系数均显著,并与基准回归结果相近。FIT和LCOE的系数在3个资源区之间没有明显的统计学差异(列1和列2)。与表5(模型3)相比,表7的模型没有限定LCOE和FIT系数相等,因此前者的系数绝对值要稍小一些,尽管符号相反。其他变量的结果与基准回归基本一致。人均GDP和光伏装机的负向关系集中在经济相对不发达的I & II类资源区;政府财政健康状况在III类资源区与装机发展呈显著负相关,说明在东中部地区,同等财政收入水平下,地方财政支出对光伏行业发展有着正向的影响。

4.4 反事实模拟

4.4.1 补贴重要性

为了更加直观地呈现补贴对光伏装机的重要

表7 分资源区回归结果

Table 7 Regression results by resource zone

	I & II类 RE (1)	III类 FE (2)
<i>FIT</i>	118.299** (48.878)	98.314** (40.256)
<i>LCOE</i>	-67.760** (30.389)	-63.974*** (24.243)
<i>Res</i>	0.006 (0.004)	
<i>Coal_lag</i>	-1.439 (2.138)	13.186 (11.746)
<i>Elec_lag</i>	47.118** (19.758)	-45.620 (157.326)
<i>GDP_lag</i>	-8.951 (5.838)	4.899 (6.548)
<i>Scale</i>	0.005 (0.011)	-0.00005 (0.008)
<i>Carbon</i>	-0.470 (14.176)	-10.609 (9.415)
<i>FisHe</i>	-12.692 (36.531)	-272.913*** (88.785)
<i>F</i> 统计量	47.241	61.068
样本量	182	238
R^2	0.204	0.210
豪斯曼检验	7.95(不显著)	16.38*(显著)

2021年6月

性,本文进一步以表5模型1为基准进行反事实模拟:即无补贴情形下中国的累计光伏装机总量。具体计算步骤为:首先,将光伏补贴水平与FIT的回归系数相乘,得到光伏补贴带来的新增装机容量,此即光伏补贴的贡献;然后,从实际新增装机容量中减去光伏补贴的贡献,得到无补贴情形下的光伏装机容量;最后,还限定了无补贴情形下新增装机不能为负数。在此基础上计算全国累计光伏装机。通过对比有补贴和无补贴两种情形下的光伏装机,光伏补贴的重要性和行业贡献得以体现。图4表明,与实际观测值相比,完全取消光伏补贴将使全国累计装机在历史观测值的基础上下降85%,这充分反映出政府补贴对中国光伏市场成长的重要性。此外,图4还表明表5模型1的拟合值在多数情况下和实际观测值很接近(除了2015年和2016年弃光限电问题比较严重的时间段),再次印证了回

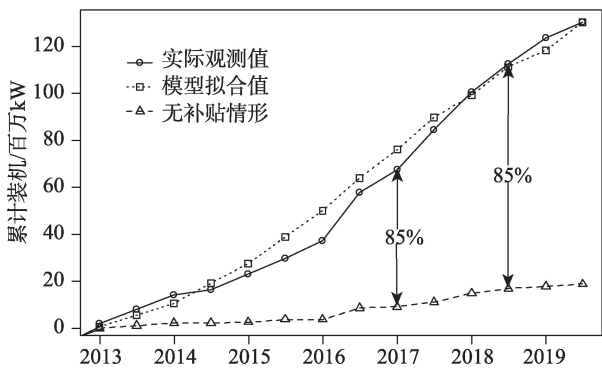


图4 补贴对光伏装机市场的重要性
Figure 4 The importance of feed-in tariff (FIT) to China's photovoltaic (PV) market

归模型的拟合优度。

4.4.2 弃光量和补贴缺口

表8的反事实模拟结果表明:下调FIT可以同时缓解弃光限电和补贴缺口问题。以2019年上半年为例,将9个弃光严重省份的FIT调整至弃光量归零的水平,财政补贴缺口半年可减少6.6亿元,全年可减少约13亿元。所以,对这些省份开展有针对性的政策调整,一方面有助于缓解弃光问题,另一方面还可以缓解财政补贴压力。此外,表8还表明:对个别弃光严重的省份,取消当年补贴也不能完全消除弃光量;需要调整的补贴量已经超过当时的补贴水平。换言之,这些地区严重的弃光问题背后有其他原因。

5 结论和政策建议

5.1 结论

本文利用2012—2019年中国30个省级行政区的半年度光伏产业数据,检验了光伏补贴、资源禀赋和技术进步对产业发展的影响,并重点估计了补贴对光伏产业发展的驱动作用。主要研究结论如下:

(1)从整体上看,终端补贴、技术成本、地方电力需求、地方经济发展水平和规模管理政策都对对中国光伏产业的发展起到了一定的推动作用,但是资源禀赋效果不显著。

(2)光伏补贴在产业发展中发挥的作用最为明显。从全国范围来看,光伏补贴每提升0.1元,全国光伏装机将增加540万~660万kW/年。如果完全取消光伏补贴,中国光伏装机市场将缩水85%左右。

表8 2019年上半年主要省份FIT调整的影响估计

Table 8 Estimated impact of feed-in tariff (FIT) adjustments in major provinces: First half year of 2019

省份	半年弃光量/亿 kWh	消除弃光的FIT降低值/(元/kWh)	新增装机减少量/万 kW	补贴缺口的变化/亿元
新疆	7.7	0.94	105.58	-1.52
甘肃	4.3	0.54	60.74	-0.51
青海	5.2	0.59	65.89	-2.07
陕西	1.9	0.25	28.15	-1.17
宁夏	1.9	0.24	26.96	-0.07
河北	1.6	0.19	21.72	-0.75
内蒙古	0.6	0.06	7.24	-0.34
吉林	0.4	0.05	5.31	-0.03
山西	0.1	0.01	1.36	-0.13
小计	23.7		322.94	-6.58

(3)调低光伏补贴水平能有效缓解弃光问题和光伏补贴缺口问题。完全消除弃光问题所需的补贴水平调整能够在弃光严重省份每年约减少13亿元的光伏补贴缺口,大幅缓解财政补贴缺口问题。

5.2 政策建议

根据上述研究结论,为了促进未来光伏产业的健康可持续发展,制定合理的补贴退坡机制,尽快解决“弃光限电”和财政压力过大等问题,本文提出以下政策建议:

(1)依据技术进步和市场供求,制定合理适度的光伏补贴退坡机制,维护光伏产业的健康稳定发展。本文结果中,光伏补贴和技术成本回归系数的一致性表明,光伏补贴的退坡应以光伏技术进步为前提。过早或过晚地下调光伏补贴水平都对光伏产业的可持续发展不利。因此,光伏补贴政策应当建立在科学分析的基础上,依据技术进步和市场供求的变化及时调整补贴水平。同时,政府还需要采取渐进式政策调整,科学严谨决策,避免光伏产业发展出现较大波动。

(2)平衡光伏发电的供需两侧,优化补贴政策设计,提升光伏消纳能力,着力解决三北地区“弃光限电”问题。在供给侧,政府需要进一步提高光伏补贴分区政策的合理性,将光伏补贴、投资回报率和市场消纳能力有机结合起来,引导资本在地区间有序流动,避免出现严重的产能过剩问题。在需求侧,政府还需要建立光伏发电消纳的市场机制和保障机制,促进电力输送能力和系统调峰能力的提升,保证清洁电力资源的充分利用。

(3)大力发展光伏平价上网项目,减少补贴需求,缓解财政补贴缺口压力。政府应当积极推进光伏平价上网项目,并借助完善的价格发现机制来逐步降低和取消光伏补贴,避免补贴缺口的进一步扩大。此外,建立可再生能源绿色证书交易机制也有助于降低补贴需求。

(4)积极探索无补贴时代的政策措施,保障光伏产业向全面平价上网阶段平稳过渡。决策者需要严谨评估取消光伏补贴可能导致的负面影响,确保光伏这一战略性新兴产业的稳定发展。即使是在无补贴时代,本文估计的光伏补贴系数仍然可以被用来估计技术进步带来的装机容量变化,为无补贴

时代的产业政策提供参考,更好地应对未来的潜在挑战。

参考文献(References):

- [1] 陈婕, 邓学平. 可再生能源投资与绿色经济发展的实证分析[J]. 华东经济管理, 2020, 34(11): 100-106. [Chen J, Deng X P. Empirical analysis of renewable energy investment and green economy development[J]. East China Economic Management, 2020, 34(11): 100-106.]
- [2] 牟初夫, 王礼茂, 屈秋实, 等. 主要新能源发电替代减排的研究综述[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2323-2334. [Mou C F, Wang L M, Qu Q S, et al. Review of emission reduction research on major new energy generation[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2323-2334.]
- [3] 徐乐, 赵领娣. 重点产业政策的新能源技术创新效应研究[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 113-131. [Xu L, Zhao L D. New energy technology innovation effect of key industrial policy[J]. Resources Science, 2019, 41(1): 113-131.]
- [4] 胡宗义, 邱先翼, 李毅. 政府补助对可再生能源投资的门槛效应研究[J]. 财经理论与实践, 2020, 41(5): 61-69. [Hu Z Y, Qiu X Y, Li Y. Threshold effect of government subsidies on renewable energy investments[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2020, 41(5): 61-69.]
- [5] 涂强, 莫建雷, 范英. 中国可再生能源政策演化、效果评估与未来展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 29-36. [Tu Q, Mo J L, Fan Y. The evaluation and evaluation of China's renewable energy policies and their implications for the future[J]. China Population Resources and Environment, 2020, 30(3): 29-36.]
- [6] 王风云. 我国可再生能源电价补贴及优化研究[J]. 学习与探索, 2020, (3): 95-102. [Wang F Y. Research on renewable energy electricity price subsidy and optimization in China[J]. Study & Exploration, 2020, (3): 95-102.]
- [7] 张丽虹, 何凌云, 钟章奇. 可再生能源投资及其影响因素: 一个理论分析框架[J]. 西安财经学院学报, 2019, 32(6): 66-73. [Zhang L H, He L Y, Zhong Z Q. Renewable energy investment and its influencing factors: A theoretical analysis framework[J]. Journal of University of Finance & Economics, 2019, 32(6): 66-73.]
- [8] Zhang X G, Wang D, Liu Y H, et al. Wind power development in China: An assessment of provincial policies[J]. Sustainability, 2016, 8(8): 734-734.
- [9] Zhao X L, Li S J, Zhang S F, et al. The effectiveness of China's wind power policy: An empirical analysis[J]. Energy Policy, 2016, 95: 269-279.
- [10] Xia F, Lu X, Song F. The role of feed-in tariff in the curtailment of wind power in China[J]. Energy Economics, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104661.
- [11] Zhang R X, Ni M, Shen G Q P, et al. An analysis on the effectiveness and determinants of the wind power feed-in tariff policy at

2021年6月

- China's national-level and regional-grid-level[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019, 34: 87-96.
- [12] 赵彦云, 李倩. 风电上网电价政策地区差异及其产业效应[J]. 资源科学, 2021, 43(1): 12-22. [Zhao Y Y, Li Q. Regional difference and industrial effects of wind power feed-in tariff policy[J]. Resources Science, 2021, 43(1): 12-22.]
- [13] Matisoff D C, Johnson E P. The comparative effectiveness of residential solar incentives[J]. Energy Policy, 2017, 108: 44-54.
- [14] Crago C L, Chernyakhovskiy I. Are policy incentives for solar power effective? Evidence from residential installations in the Northeast[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2017, 81: 132-151.
- [15] Leepa C, Unfried M. Effects of a cut-off in feed-in tariffs on photovoltaic capacity: Evidence from Germany[J]. Energy Policy, 2013, 56: 536-542.
- [16] Hughes J E, Podolefsky M. Getting green with solar subsidies: Evidence from the California solar initiative[J]. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 2015, 2(2): 235-275.
- [17] 贾亚雷, 石建国, 庞永超, 等. 基于省级截面数据的分布式光伏发电补贴政策实证分析[J]. 可再生能源, 2016, 34(10): 1435-1440. [Jia Y L, Shi J G, Pang Y C, et al. An empirical analysis of subsidy policy on distributed photovoltaic power generation based on provincial cross-sectional data[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(10): 1435-1440.]
- [18] Dong C G, Qi Y, Dong W J, et al. Decomposing driving factors for wind curtailment under economic new normal in China[J]. Applied energy, 2018, 217: 178-188.
- [19] 北京大学国家发展研究院能源安全与国家发展研究中心, 中国人民大学经济学院能源经济系联合课题组. 关于中国风电和光伏发电补贴缺口和大比例弃电问题的研究[J]. 国际经济评论, 2018, (4): 67-85. [Joint research Group, Department of Energy Economics, School of Economics, Renmin University of China, National Research Center for Energy Security and Development, Peking University. Subsidy crisis and large-scale curtailment of wind and solar power in China[J]. International Economic Review, 2018, (4): 67-85.]
- [20] Xia F, Song F. The uneven development of wind power in China: Determinants and the role of supporting policies[J]. Energy Economics, 2017, 67: 278-286.
- [21] 黄珺仪. 补贴政策对风电产业发展影响的实证分析[J]. 生态经济, 2018, 34(5): 115-120. [Huang J Y. An empirical analysis of the impact of subsidy policy on wind power industry[J]. Ecological Economy, 2018, 34(5): 115-120.]
- [22] Dong L, Liang H W, Gao Z Q, et al. Spatial distribution of China's renewable energy industry: Regional features and implications for a harmonious development future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1521-1531.
- [23] Goh H H, Lee S W, Chua Q S, et al. Renewable energy project: Project management, challenges and risk[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 917-932.
- [24] Zhao X G, Wang J Y, Liu X M, et al. China's wind, biomass and solar power generation: What the situation tells us?[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 6173-6182.
- [25] 陈枫楠, 王礼茂. 中国太阳能光伏产业空间格局及影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, 34(2): 287-294. [Chen F N, Wang L M. On distribution and determinants of PV solar energy industry in China[J]. Resources Science, 2012, 34(2): 287-294.]
- [26] He G, Kammen D M. Where, when and how much solar is available? A provincial-scale solar resource assessment for China[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 74-82.
- [27] 周泽人, 舒印彪, 董存, 等. 基于混合威布尔分布的风能资源分布统计分析研究[J]. 数理统计与管理, 2020, 39(4): 584-594. [Zhou Z R, Shu Y B, Dong C, et al. Statistical analysis of wind energy distribution based on mixture Weibull distribution model[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2020, 39(4): 584-594.]
- [28] Bao C, Fang C L. Geographical and environmental perspectives for the sustainable development of renewable energy in urbanizing China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 464-474.
- [29] Liu X, Mao G Z, Ren J, et al. How might China achieve its 2020 emissions target? A scenario analysis of energy consumption and CO₂ emissions using the system dynamics model[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 401-410.
- [30] Yuan X L, Zuo J, Huisingh D. Social acceptance of wind power: A case study of Shandong Province, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 92: 168-178.
- [31] Ansari M F, Kharb R K, Luthra S, et al. Analysis of barriers to implement solar power installations in India using interpretive structural modeling technique[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 163-174.
- [32] Lin B Q, Omoju O E, Okonkwo J U. Factors influencing renewable electricity consumption in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 687-696.
- [33] 任晓松, 马茜, 刘宇佳, 等. 碳交易政策对高污染工业企业经济绩效的影响: 基于多重中介效应模型的实证分析[J]. 资源科学, 2020, 42(9): 1750-1763. [Ren X S, Ma Q, Liu Y J, et al. The impact of carbon trading policy on the economic performance of highly polluting industrial enterprises: Empirical analysis based on multiple mediating effect model[J]. Resources Science, 2020, 42(9): 1750-1763.]
- [34] 王丽颖. 中国碳交易试点政策的减排效果分析[J]. 社会科学战线, 2021, (4): 251-255. [Wang L Y. Analysis of emission reduction effect of carbon trading pilot policies in China[J]. Social Science Front, 2021, (4): 251-255.]
- [35] 张宁, 刘青君. 碳交易减少了中国火电厂的减排成本吗? 基于2005-2010年面板数据的实证分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(1): 7-16. [Zhang N, Liu Q J. Does carbon trading reduce the carbon emissions abatement cost for Chinese thermal companies? Empirical analysis based on panel data from

- 2005 to 2010[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019, 21(1): 7-16.]
- [36] 薛飞, 周民良. 中国碳交易市场规模的减排效应研究[J]. 华东经济管理, 2021, 35(6): 11-21. [Xue F, Zhou M L. Research on emission reduction effect of the scale of China's carbon trading market [J]. East China Economic Management, 2021, 35(6): 11-21.]
- [37] 朱凡, 李天琦. 中国碳交易市场减排绩效的实证研究[J]. 税务与经济, 2021, (3): 54-62. [Zhu F, Li T Q. An empirical study on emission reduction performance of China's carbon trading market [J]. Taxation and Economy, 2021, (3): 54-62.]
- [38] 李成威, 杜崇珊. 公共风险、公共债务与财政健康度[J]. 现代经济探讨, 2021, (3): 43-49. [Li C W, Du C S. Public risk, public debt and fiscal health[J]. Modern Economic Research, 2021, (3): 43-49.]

The effect of feed-in tariff on China's photovoltaic capacity development:

An empirical analysis based on panel data regression

DONG Changgui, ZHOU Runmin, LI Jiaying

(School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Accurately estimating the impact of government subsidy on the development of strategic new industries is a key to evidence-based decision making of subsidy policies because, on the one hand, over-subsidization will bring about fiscal pressure and overcapacity to the society, and on the other hand, under-subsidization will slow down the development of these new industries. The rapid growth of China's photovoltaic (PV) industry is accompanied by the problems of solar curtailment and fiscal pressure which need to be solved urgently. Behind this is the lack of scientific evaluation of PV subsidy policy. This research took China's PV industry as an example, and used panel data regression and counterfactual analysis to rigorously estimate the impact of government subsidy on PV market development. Our findings have the following indications. (1) With all other factors controlled, an increase of 0.1 yuan/kWh in PV subsidy will bring about 5.4- 6.6 GW/year of installed capacity to the Chinese PV market, which is much greater than that estimated in the literature. (2) From a different perspective, if China were not having any PV subsidy in the first place, the PV market size would likely shrink by 85% compared to the actual case. (3) Taking the nine provinces with serious PV curtailment in the first half year of 2019 as the case, if PV subsidies were adjusted to a level where there is no curtailment, the subsidy deficit will be reduced by about RMB 1.3 billion yuan per year for these provinces. The conclusions of this research can be applied to optimizing the subsidy policy design and mitigating policy problems including PV curtailment and subsidy deficit.

Key words: solar PV industry; subsidy policy; policy evaluation; PV curtailment; subsidy deficit; counterfactual simulation; solar resource