

武琛昊,孙启宏,段华波,等.基于生命周期评价的光伏产业技术进步与经济成本分析[J].环境工程技术学报,2022,12(3):957-966.

WU C H,SUN Q H,DUAN H B,et al.Technology progress and economic cost analysis of photovoltaic industry based on life cycle assessment[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 957-966.

基于生命周期评价的光伏产业技术进步与经济成本分析

武琛昊¹,孙启宏¹,段华波²,李雪迎¹,黄蓓佳³,满贺诚¹,李晓蔚¹,谢明辉^{1*}

1.中国环境科学研究院

2.深圳大学土木与交通工程学院

3.上海理工大学环境与建筑学院

摘要 为了对光伏产业的环境影响、技术进步、经济成本进行系统分析,采用生命周期评价对光伏产业环境影响进行量化分析;基于评价结果,构建光伏产业技术进步评价模型并计算技术进步率;将光伏产业生产设备投资额结合环境影响评价结果计算成本下降率,同时梳理近年来的光伏电价补贴政策,计算补贴下降率;最后将光伏产业技术进步与经济成本进行综合分析。结果表明:生产1 kWp多晶硅光伏组件时光伏产业的环境影响潜值为83.83 Pt,高纯多晶硅、硅片、电池片和组件的环境影响潜值占比分别为43.05%、16.24%、14.84%和25.87%;以2016年为基准年,2017—2020年光伏产业技术进步率分别为5.20%、8.98%、12.48%和20.91%,成本下降率分别为-5.81%、-21.05%、-25.23%和-32.63%,补贴下降率分别为-15.60%、-30.36%、-40.46%和-51.33%;同期光伏补贴下降率大于技术进步率和成本下降率,技术进步速度和成本下降速度在2017年后较为同步,反映了补贴下降在一定程度上能够倒逼企业采用更先进的技术以降低成本。

关键词 光伏产业;生命周期评价;技术进步;补贴变动;成本变动

中图分类号:X196,X820.3,X324 文章编号:1674-991X(2022)03-0957-10 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210387

Technology progress and economic cost analysis of photovoltaic industry based on life cycle assessment

WU Chenhao¹, SUN Qihong¹, DUAN Huabo², LI Xueying¹, HUANG Beijia³,
MAN Hecheng¹, LI Xiaowei¹, XIE Minghui^{1*}

1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.School of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University

3.School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology

Abstract To systematically analyze the environmental impact, technological progress and economic cost of the photovoltaic industry, firstly the life cycle assessment (LCA) was conducted to quantitatively analyze the environmental impacts of the industry. Based on the results of LCA, the technology progress assessment model of photovoltaic industry was constructed and the technology progress rates were calculated. Then the investments of equipment in photovoltaic industry were combined with the results of the environmental impact assessment to calculate the cost reduction rates. At the same time, the photovoltaic electricity price subsidy policies in recent years were sorted out to calculate the subsidy decline rates. Finally, the photovoltaic industry technological progress and economic cost were comprehensively analyzed. The results showed that the photovoltaic industry had an environmental impact potential of 83.83 Pt when producing 1 kWp polysilicon photovoltaic modules, among which high purity polysilicon, silicon wafer, cell and module accounted for 43.05%, 16.24%, 14.84% and 25.87%, respectively. Taking 2016 as the base year, the technological progress rates of the photovoltaic industry in 2017, 2018, 2019 and 2020 were 5.20%, 8.98%, 12.48% and 20.91%; the cost reduction rates were -5.81%, -21.05%, -25.23% and -32.63%; and the subsidy decline rates were -15.60%, -30.36%, -40.46% and -51.33%, respectively. During the same period, the decline rates of photovoltaic subsidies were greater than the rates of technological

收稿日期:2021-08-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1502804),国家自然科学基金面上项目(71974129)

作者简介:武琛昊(1997—),男,硕士研究生,主要从事环境经济和生命周期评价研究, Wuch1026@163.com

* 责任作者:谢明辉(1981—),男,研究员,博士,主要从事生命周期评价研究, huibird82@163.com

progress and cost decline. The rates of technological progress and cost decline were more synchronized after 2017, reflecting that the decline in subsidies could force companies to adopt more advanced technologies to reduce costs to a certain extent.

Key words photovoltaic industry; life cycle assessment; technological progress; changes of subsidy; changes of cost

在我国提出碳达峰、碳中和的目标下,对减污降碳有了新要求,单纯依赖化石能源不能满足发展需要,使用可再生能源来替代化石能源的需求更加迫切。光伏行业作为新能源行业之一,近年来在我国得到快速发展,根据中国光伏行业协会统计数据,2020 年全国新增光伏并网装机容量为 48.2 GW,同比上升 60.1%,累计光伏并网装机容量达到 253 GW,新增和累计装机容量均为全球第一,全年光伏发电量为 2 605 亿 kW·h,约占全国全年总发电量的 3.5%,同比提升 0.4 个百分点^[1]。同时,我国已经形成了较为完备的光伏产业链,2020 年全国高纯多晶硅、硅片、电池片和组件的产量分别为 39.2 万 t、161.3 GW、134.8 GW 和 124.6 GW,分别占全球产量的 75.24%、96.18%、82.50%、76.11%^[2],我国光伏行业已实现装机容量、发电量、制造业的 3 项世界第一。

随着光伏行业的快速发展,国内外学者对光伏产业的研究也越来越多。在环境研究方面,多聚焦在以下领域:1)全生命周期能源分析。如 Fu 等^[3]分析了多晶硅光伏发电系统生命周期的能源需求并计算能源回收期,Wu 等^[4]对 1 MW 光伏组件和平衡系统的能源回收期做出了研究。2)评价模型研究。采用不同的环境影响评价模型对光伏行业展开研究,如 Desideri 等^[5]使用 Eco-Indicator 99 评价方法对 1 778 kWp 光伏电站和传统能源电站的环境影响做比较,Latunussa 等^[6]使用 ReCiPe 评价方法分析了废弃晶体硅光伏组件的环境影响,赵若楠等^[7]基于本地化研究构建终点破坏类评价模型对光伏组件生产、使用和处置阶段的环境影响进行分析。3)碳排放研究。如 Pu 等^[8]计算了光伏电站生命周期碳排放量并对碳减排潜力做出分析,Kim 等^[9]计算了碲化镉光伏发电系统生命周期 CO₂ 排放量和 CO₂ 回收期,Sharma 等^[10]对屋顶安装和地面安装的独立太阳能光伏发电系统的碳排放潜力进行了分析。4)光伏发电系统研究。光伏发电大规模的应用使得发电系统呈现多样化特点,学者们对不同类型的光伏发电系统也进行了大量研究,如单晶硅发电系统^[11]、多晶硅发电系统^[12]、光伏电站^[13]、碲化镉光伏发电系统^[14]、光伏储能系统^[15]、半透明光伏窗^[16]、光伏建筑^[17]、海洋光伏发电系统^[18]等。在经济研究方面,

多集中在以下领域:1)补贴政策分析。涂强等^[19]对包括光伏发电在内的中国可再生能源政策进行系统评估与总结,马中等^[20]对光伏发电电价补贴的政策效应与资金机制进行了研究,Wang 等^[21]分析了补贴下降对光伏发电带来的影响,Shao 等^[22-23]对中国光伏发电补贴政策的绩效进行了评价。2)发电成本分析。Symeonidou 等^[24]计算了光伏发电系统全生命周期成本,王嘉阳等^[25]对光伏发电平准化度电成本进行了研究,何后裕等^[26]研究了分布式光伏发电的成本分摊问题。3)经济性分析。Yang 等^[27-28]对光伏电价的制定及预测进行了研究,昌敦虎等^[29]对光伏发电的经济效益进行了分析,Wu 等^[30]对光伏发电的投融资问题进行了研究。

然而已有研究中鲜见将光伏产业环境影响与技术进步、经济分析相结合的系统分析。笔者通过对光伏产业进行生命周期评价,识别出对环境影响较大的因素并以此构建光伏产业技术进步评价模型,计算光伏产业技术进步率;再通过文献调研计算光伏电价补贴下降率和成本下降率;最后将技术进步、补贴和成本进行综合分析。

1 研究方法

为了对光伏产业进行综合系统分析,构建了光伏产业“环境-技术-经济”(photovoltaic industry environment-technology-economy, P-ETE)评价模型(图 1):首先采用生命周期评价方法对光伏产业各阶段的环境影响进行量化分析,选取影响较大的指标构建光伏产业技术进步评价模型,以生命周期评价结果为权重计算技术进步率;其次梳理光伏产业成本和电价补贴政策,结合生命周期评价结果,计算成

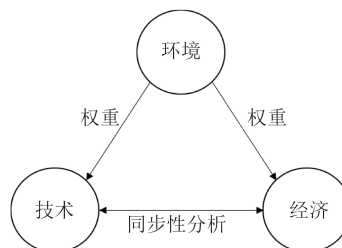


图 1 光伏产业“环境-技术-经济”评价模型

Fig.1 Photovoltaic industry environment-technology-economy assessment model

本下降率和补贴下降率, 进行经济成本分析; 最后将光伏产业技术进步与经济成本进行综合分析。

1.1 环境影响情况

生命周期评价是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[31], 主要包括研究目标与范围的确定、清单分析、影响评价、结果解释 4 个步骤。本研究的生命周期环境影响评价方法采用本地化研究结果^[32], 选取致癌作用、细颗粒物形成、气候变化、水资源消耗、光化学臭氧形成、生态毒性、酸化、富营养化、矿产资源、化石燃

料 10 个影响类别, 分别对应人体健康、生态系统和资源 3 个破坏终点(表 1)。环境影响潜值计算公式如下:

$$E = \sum_k \frac{a_k \times b_k}{b_n} \times w_n \tag{1}$$

式中: E 为环境影响潜值, Pt ; a_k 为污染物(资源、能源) k 排放量(消耗量); b_k 为污染物(资源、能源) k 对应的破坏因子; b_n 为环境影响类别 n 对应的人均基准值; w_n 为环境影响类别 n 对应的权重, 参考已有成果^[33], 人体健康、生态系统和资源的权重分别取 60%、25% 和 15%。

表 1 终点破坏类生命周期评价模型参数
Table 1 Parameters of end-point damage life cycle assessment model

破坏终点	影响类别	人均基准值	单位	权重/%
人体健康	致癌作用、细颗粒物形成、气候变化、水资源消耗、光化学臭氧形成	0.019	DALY	60
生态系统	气候变化、水资源消耗、生态毒性、酸化、富营养化、光化学臭氧形成	3.68×10^{-5}	species	25
资源	矿产资源、化石燃料	2 536.37	MJ	15

注: DALY(disability adjusted life years, 伤残调整寿命年)表示理想寿命和现实寿命间的差值; species表示环境影响造成生态系统的物种损失数量; MJ表示资源开采消耗的额外能源量。

1.2 技术进步情况

为量化评估光伏产业技术进步情况, 根据生命周期评价结果构建光伏产业技术进步评价模型, 并结合各指标的环境影响潜值占比计算指标权重, 公式如下:

$$W_{ij} = \frac{E_{ij}}{\sum_j E_{ij}} \times 100\% \tag{2}$$

式中: W_{ij} 为产品 i 的第 j 项指标的权重; E_{ij} 为产品 i 的第 j 项指标的环境影响潜值; i 表示产品, 分别为高纯多晶硅、硅片、电池片和组件。

根据各指标权重, 分别计算高纯多晶硅、硅片、电池片和组件的技术进步率, 公式如下:

$$P_i = \sum_j h_{ij} \times W_{ij} \tag{3}$$

$$a_{ij} = \frac{|x_{0j} - x_{tj}|}{x_{0j}} \times 100\% \tag{4}$$

式中: P_i 为产品 i 的技术进步率; h_{ij} 为产品 i 在第 j 项指标的进步率; x_{0j} 和 x_{tj} 分别为指标 j 在基准年和目标年的值。

在各产品技术进步率的基础上, 结合产品的环境影响潜值占比, 计算光伏产业技术进步率, 公式如下:

$$P_t = \sum_i P_i \times W_i \tag{5}$$

式中: P_t 为第 t 年光伏产业技术进步率; W_i 为流程产品 i 环境影响潜值在总环境影响潜值的占比。

1.3 成本变动情况

随着光伏发电的大规模应用, 受原材料价格波

动、技术进步、规模化生产等的影响, 光伏产业成本也在不断变动。由于生产企业的生产规模、设计运营年限等不同, 造成运营成本差异较大且数据不易获取, 同时相关研究表明, 设备投资是电池生产线建设的重要部分, 是影响光伏电池成本的主要因素之一^[34]。因此, 在成本分析时仅考虑投资成本, 以光伏产业各产品生产设备投资额作为分析指标, 同时为与产业技术进步率计算相一致以便展开比较, 在计算光伏产业成本下降率时权重因子同样结合各产品的环境影响潜值占比, 公式如下:

$$c_i = \frac{c_{it} - c_{0i}}{c_{0i}} \times 100\% \tag{6}$$

$$C_t = \sum_i c_i \times W_i \tag{7}$$

式中: c_i 为产品 i 的成本下降率; c_{it} 和 c_{0i} 分别为产品 i 在第 t 年和基准年的设备投资额; C_t 为光伏产业在第 t 年的成本下降率。

1.4 补贴变动情况

为了分析光伏电价补贴的变动情况, 首先对光伏补贴政策进行梳理, 按每年实施政策的天数进行加权处理, 计算各年度的光伏电价补贴, 公式如下:

$$S = \frac{S_1 \times u + S_2 \times v}{u + v} \tag{8}$$

式中: S 为年度光伏电价补贴; S_1 为当年度补贴政策未发生变动时的光伏电价补贴; S_2 为当年度补贴政策变动后的光伏电价补贴; u 和 v 分别为当年度补贴政策变动前后的光伏电价补贴实施天数。若当年未发生补贴政策变动, 则 $S_2=0, v=0$, 即 $S=S_1$ 。

在此基础上,计算光伏电价补贴下降率,公式如下:

$$R_t = \frac{S_t - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中: R_t 为光伏电价补贴下降率; S_t 和 S_0 分别为第 t 年和基准年的光伏电价补贴。

1.5 综合分析

随着政策不断变化,补贴降低导致行业成本提升,部分企业因自身成本高于行业成本而被淘汰,部分企业则通过采取相应措施提高技术水平从而降低生产成本得以在激烈的行业竞争中存活。可见,补贴降低在一定程度上能够倒逼企业进行技术革新,同时技术进步又能够提高生产效率、降低成本,因此需要对光伏产业技术、成本和补贴进行综合分析。式(5)、式(7)和式(9)计算得到的技术进步率(P_t)、成本下降率(C_t)和补贴下降率(R_t)分别表征各目标年光伏产业技术、成本和补贴的相对变动幅度,均无量纲,具有可比性。为消除数值的正负差异,将同一目标年下 P_t 、 C_t 和 R_t 3 项指标取绝对值后比较大小,以此表征各自变动速率的快慢,从而评判光伏产业技术进步、成本变动和补贴下降是否达到一致。

2 结果与讨论

2.1 环境影响

2.1.1 目标与范围定义

使用生命周期评价方法对光伏产业环境影响进行量化的目的是为了得到光伏产业各产品的环境影响潜值,从而为技术、成本分析提供依据。选取生产 1 kWp 多晶硅光伏组件作为功能单元进行生命周期评价,评价范围包括高纯多晶硅生产、硅片生产、电池片生产和组件生产 4 个阶段(图 2),其中输入端主要以资源、能源为主,输出端除相应产品外还包括气体污染物、水体污染物和固体废物。

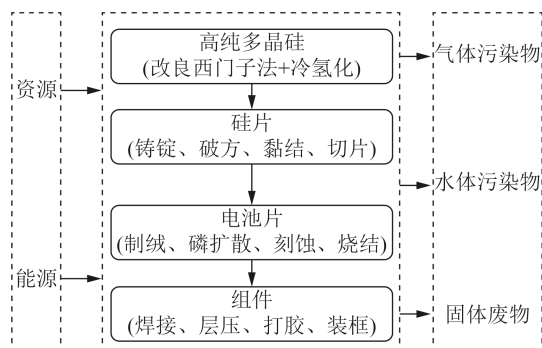


图 2 系统边界

Fig.2 System boundary

2.1.2 清单分析

本研究的清单数据是在参考已有文献^[35]的基础

上,根据《中国光伏产业发展路线图(2020 年版)》对部分数据进行更新所得(表 2)。

2.1.3 结果解释

将清单数据及本地化影响评价模型输入 SimaPro 9.0 软件中,计算得到生产 1 kWp 多晶硅光伏组件时光伏产业的环境影响潜值为 83.83 Pt。高纯多晶硅、硅片、电池片和组件 4 个阶段的环境影响潜值及其主要环境影响因素占比见图 3。由图 3 可知,高纯多晶硅、硅片、电池片和组件的环境影响潜值分别为 36.09、13.61、12.44 和 21.69 Pt,分别占总环境影响潜值的 43.05%、16.24%、14.84% 和 25.87%。除组件生产阶段外,电耗均为光伏产业产品生产阶段过程中环境影响最大的因素,分别占高纯多晶硅、硅片和电池片环境影响潜值的 71.5%、73.1% 和 69.7%。此外,工业硅、蒸汽、聚乙二醇、砂浆、银浆、铝浆、硝酸、铝合金和玻璃等的环境影响在各产品的环境影响中占比较大。

2.2 技术进步

2.2.1 技术进步评价模型

基于生命周期评价结果,结合 2016—2020 年《中国光伏产业发展路线图》和 2015 年、2018 年颁布的《光伏制造行业规范条件》,同时考虑数据可得性,从高纯多晶硅、硅片、电池片和组件的生产过程中选取影响较大和技术变动较大的指标构建光伏产业技术进步评价指标体系,结果见表 3。

2.2.2 技术进步率

根据光伏产业技术进步评价指标体系和式(2)~式(5),以 2016 年为基准年,分别计算 2017—2020 年高纯多晶硅、硅片、电池片、组件及光伏产业技术进步率,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,相较于基准年,2017—2020 年光伏产业技术进步率整体稳步提升,分别为 5.20%、8.98%、12.48% 和 20.91%。从各产品和具体指标来看,由于硅片和组件均为单一指标,硅片生产环节电耗下降幅度和组件功率提升幅度分别代表其技术进步,其中,硅片的技术进步在 2019 年有明显提升,主要是其生产环节电耗相比 2018 年降低了 10.26%,组件功率在 2020 年提升明显,由 2019 年的 285 W 提升至 345 W,使得组件在 2020 年的进步率比 2019 年提高近 23 个百分点;高纯多晶硅技术进步率波动程度较小,其中,蒸汽消耗是体现高纯多晶硅生产环节技术进步最明显的指标,2017—2020 年蒸汽消耗相比 2016 年下降 15.29%、27.06%、34.12% 和 45.88%,其次是电耗,硅耗相比之下技术进步最小,2017—2020 年分别下降 4.17%、6.67%、7.50% 和 8.33%;在电池片生产环节中,铝浆和银浆消耗量下

表 2 1 kWp 多晶硅光伏组件生命周期清单
Table 2 Life cycle inventory of 1 kWp polysilicon photovoltaic modules

投入/排放		单位	高纯多晶硅	硅片	电池片	组件
投入	高纯多晶硅	kg	—	5.353 3	—	—
	硅片	片	—	—	262	—
	电池片	片	—	—	—	247
	工业硅	kg	5.9	—	—	—
	液氯	kg	1.1	—	—	—
	液氢	kg	0.286 8	—	—	—
	NaOH	kg	1.9	—	—	—
	石灰石	kg	1.3	—	—	—
	坩埚	kg	—	1.135 3	—	—
	氩气	kg	—	2.060 9	—	—
	切割线	kg	—	2.241 0	—	—
	砂浆	kg	—	1.601 5	—	—
	聚乙二醇	kg	—	6.932 8	—	—
	黏合剂	kg	—	0.012 1	—	—
	清洗剂	kg	—	0.167 8	—	—
	HCl	kg	—	0.031 5	0.243 8	—
	HF	kg	—	0.062 9	2.004 7	—
	HNO ₃	kg	—	0.204 5	3.172 5	—
	乙酸	kg	—	0.141 3	—	—
	玻璃	kg	—	0.299 2	—	36.066 7
	银浆	kg	—	—	0.023 5	—
	铝浆	kg	—	—	0.217 9	—
	液氨	kg	—	—	0.075 9	—
	三氯氧磷	kg	—	—	0.021 7	—
	硅烷	kg	—	—	0.023 5	—
	H ₂ SO ₄	kg	—	—	0.600 8	—
	KOH	kg	—	—	0.124 6	—
	液氧	kg	—	—	0.045 7	—
	铝合金	kg	—	—	—	12.4
	焊带(锡)	kg	—	—	—	0.157 3
	焊带(铜)	kg	—	—	—	0.629 3
	EVA胶膜	kg	—	—	—	5.3
	背板(PVDF)	kg	—	—	—	0.68
	背板(PET)	kg	—	—	—	2.293 3
能源	电	kW·h	355.997 6	179.843 0	119.472 9	47.466 7
	蒸汽	kg	123.1			

(续表 2)

投入/排放		单位	高纯多晶硅	硅片	电池片	组件
气体污染物	硅尘	kg	0.014 6	—	0.005 989	—
	HCl	kg	0.000 5	—	0.005 370	—
	NO _x	kg	0.001 1	0.008 7	0.051 471	—
	HF	kg	0.000 01	0.001 0	0.001 120	—
	Cl ₂	kg	—	—	0.000 019 7	—
	NH ₃	kg	—	—	0.015 712	—
	非甲烷挥发性有机物(NMVOC)	kg	—	—	0.000 704 3	—
排放	COD	kg	0.010 9	0.312 0	0.017 638 6	0.000 101 3
	氯化物	kg	0.412 2	—	—	—
	氟化物	kg	0.002 6	0.016 3	0.005 923 7	—
	悬浮物	kg	0.007 7	0.090 5	0.046 775 4	—
	氨氮	kg	0.000 1	—	—	—
	总氮	kg	—	—	0.127 624 0	—
	总磷	kg	—	—	0.000 519 5	—
固体废物	硅废料	kg	0.012 4	—	—	—
	废坩埚	kg	—	0.996 4	—	—
	废切割线	kg	—	2.241 0	—	—
	废玻璃	kg	—	0.254 1	—	—

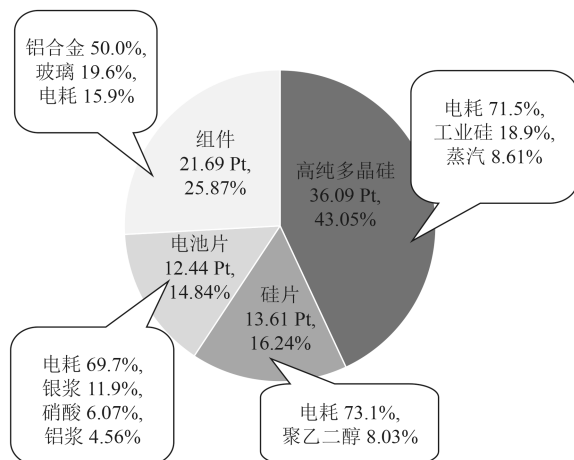


图 3 1 kWp 多晶硅光伏组件各产品环境影响潜值占比
Fig.3 Proportion of environmental impact potential of each product of 1 kWp polysilicon photovoltaic module

降是体现电池片技术进步的主要因素，尤其是 2018 年，铝浆和银浆的消耗量同比 2017 年分别下降 18.82% 和 7.41%，是电池片技术进步在 2018 年较为显著的主要原因。技术进步一方面能够降低光伏产品在生产过程中的资源能源消耗，另一方面能够提升产品质量，增加产品竞争力。

2.3 成本变动

2.3.1 生产设备投资

为分析光伏产业成本的变动情况，根据 2016—2020 年《中国光伏产业发展路线图》，对高纯多晶

表 3 光伏产业技术进步评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of photovoltaic industry technology progress

产品	指标	单位	指标属性
高纯多晶硅	电耗	kW·h/kg	负
	蒸汽消耗	kg/kg	负
	硅耗	kg/kg	负
硅片	电耗	kW·h/kg	负
电池片	电耗	万kW·h/MWp	负
	铝浆消耗	mg/片	负
	银浆消耗	mg/片	负
组件	组件功率	W	正

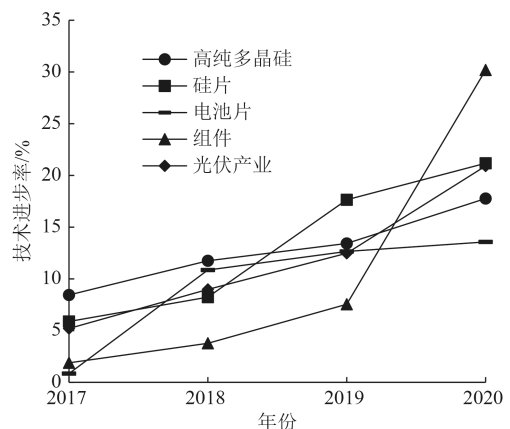


图 4 2017—2020 年光伏产业技术进步情况

Fig.4 Technological progress of photovoltaic industry from 2017 to 2020

硅、硅片、电池片和组件的生产设备投资额进行整理,结果见表 4。

表 4 2016—2020 年光伏各产品设备投资额
Table 4 Equipment investment of photovoltaic products from 2016 to 2020

产品	单位	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
高纯多晶硅	万元/t	15.00	14.50	11.50	11.00	10.20
硅片	万元/t	5.10	4.20	2.80	2.60	2.10
电池片	万元/MW	60.00	53.50	42.00	30.30	22.50
组件	万元/MW	6.90	6.80	6.80	6.80	6.30

2.3.2 成本下降率

根据表 4 和式(6)、式(7),以 2016 年为基准年,分别计算 2017—2020 年光伏产业及各产品成本下降率,结果如图 5 所示。

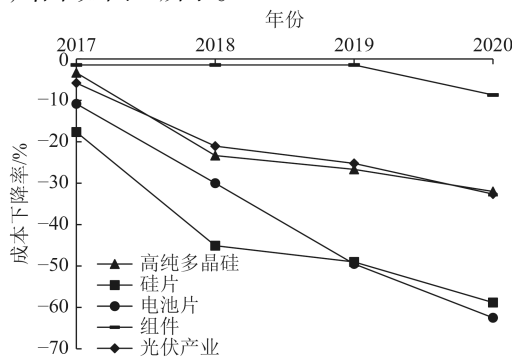


图 5 2017—2020 年光伏产业成本下降情况
Fig.5 Cost reduction of photovoltaic industry from 2017 to 2020

由图 5 可知,2017—2020 年光伏产业成本下降率分别为-5.81%、-21.05%、-25.23%和-32.63%,呈逐年下降趋势。其中,2018 年成本降幅明显增加,主要是因为高纯多晶硅、硅片和电池片的设备投资额在 2018 年下降明显,相比 2017 年降幅分别增加 20.00%、27.45%和 19.17%。从各流程产品来看,硅片和电池片的成本降幅较大,相比基准年,2 种产品的成本在 2019 年降幅接近 50%,在 2020 年降幅达 60%;组件的成本降幅最小,在 2017—2019 年没有变动,仅在 2020 年下降了 8.70%;高纯多晶硅成本变动趋势与光伏产业成本变动趋势较为接近,这与加权计算时多晶硅占比最大(43.05%)有一定关联。研究表明,组件成本占光伏发电项目总成本的比例接近 1/2,组件价格是影响发电项目收益的重要敏感因素之一^[35],因此组件成本的降低对降低光伏度电成本、提升光伏电厂效益具有重要意义。

2.4 补贴变动

2.4.1 光伏补贴政策

为鼓励和支持光伏行业发展,我国出台了一系列政策措施,其中制定光伏发电标杆电价、征收可再生能源电价附加对光伏行业进行补贴,对推动我国光伏行业快速发展起到了重要作用^[36-37]。而近年来国家对光伏发电补贴政策不断进行调整,加快了对光伏发电的补贴退坡,表 5 为近年来光伏电价补贴政策。

表 5 光伏电价补贴政策

Table 5 Photovoltaic electricity price subsidy policies				元/(kW·h)
文号	I 类资源区	II 类资源区	III 类资源区	执行时间
发改价格[2011]1594号 ^[38]		1.15、1.00 ¹⁾		2011年7月24日
发改价格[2013]1638号 ^[39]	0.90	0.95	1.00	2013年8月26日
发改价格[2015]3044号 ^[40]	0.80	0.88	0.98	2016年1月1日
发改价格[2016]2729号 ^[41]	0.65	0.75	0.85	2017年1月1日
发改价格规[2017]2196号 ^[42]	0.55	0.65	0.75	2018年1月1日
发改能源[2018]823号 ^[43]	0.50	0.60	0.70	2018年5月31日
发改价格[2019]761号 ^[44]	0.40	0.45	0.55	2019年7月1日
发改价格[2020]511号 ^[45]	0.35	0.40	0.49	2020年6月1日

1)上网电价未区分资源区,而是按项目核准建设、建成投产日期等区分。

2.4.2 补贴下降率

根据表 5 和式(8)计算 2013—2020 年光伏电价补贴,结果见表 6。由表 6 可知,光伏电价补贴的变动主要呈现 2 个特点:1)变动频繁,从 2016 年起平均每年变动一次;2)变动幅度大,由 2013 年的 1.07~1.10 元/(kW·h),逐步下调至 2020 年的 0.37~

0.51 元/(kW·h),平均降幅为 60.05%。此外,光伏发电即将进入平价时代,根据国家发展和改革委员会相关通知,自 2021 年 8 月 1 日起,对新备案工商业分布式光伏项目,中央财政不再补贴,实行平价上网;新建光伏项目上网电价将按当地燃煤发电基准价执行^[46]。

表 6 2013—2020 年光伏电价补贴

Table 6 Photovoltaic electricity
price subsidy amount from
2013 to 2020 元/(kW·h)

年份	I 类资源区	II 类资源区	III 类资源区
2013	1.07	1.08	1.10
2014	0.90	0.95	1.00
2015	0.90	0.95	1.00
2016	0.80	0.88	0.98
2017	0.65	0.75	0.85
2018	0.52	0.62	0.72
2019	0.45	0.52	0.62
2020	0.37	0.42	0.51

为将光伏电价补贴下降幅度与技术进步、成本变动情况相比较,以 2016 年为基准年,根据表 6 和式(9)计算 2017—2020 年电价补贴下降率,同时将 I 类、II 类和 III 类资源区的补贴下降率取平均值,代表光伏行业补贴下降率,结果见表 7。由表 7 可知,2017—2020 年光伏电价补贴降幅较大。其中,电价补贴下降率表现为 I 类资源区>II 类资源区>III 类资源区。相较于基准年,2020 年 I 类和 II 类资源区电价补贴降幅均超 50%,III 类资源区降幅也接近 50%。与其他年份相比,2018 年光伏补贴出现明显下降,降幅比 2017 年高出近 15 个百分点。

表 7 2017—2020 年光伏电价补贴下降率

Table 7 Reduction rate of photovoltaic electricity
price subsidy from 2017 to 2020 %

年份	I 类资源区	II 类资源区	III 类资源区	平均值
2017	-18.75	-14.77	-13.27	-15.60
2018	-35.00	-29.55	-26.53	-30.36
2019	-43.75	-40.91	-36.73	-40.46
2020	-53.75	-52.27	-47.96	-51.33

2.5 综合分析

根据 1.5 节,将计算得到的 2016—2020 年光伏产业技术进步率、成本下降率和补贴下降率取绝对值后绘制图 6。由图 6 可知,光伏产业技术进步幅度小于成本下降幅度,也小于补贴下降幅度。同时,相比 2016 年,2017—2020 年电价补贴分别下降 15.60%、30.36%、40.46% 和 51.33%,技术进步分别提升 5.20%、8.98%、12.48% 和 20.91%,成本分别降低 5.81%、21.05%、25.23% 和 32.63%,光伏补贴下降速度要显著快于技术进步和成本下降速度。同

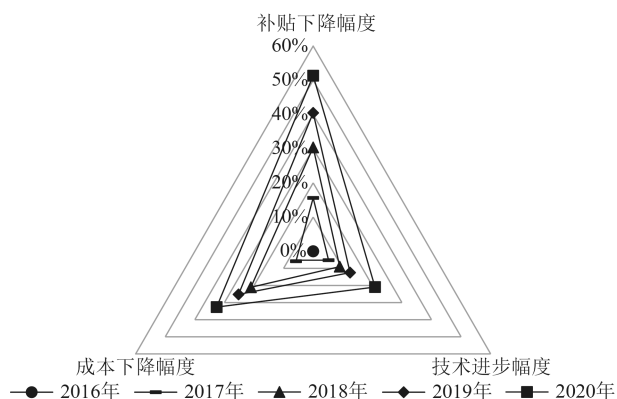


图 6 2016—2020 年光伏技术进步幅度、
成本及补贴下降幅度

Fig.6 Extent of photovoltaic technology progress, cost and
subsidy reduction from 2016 to 2020

时,除 2017 年技术进步和成本下降幅度较为接近外,2018—2020 年二者的升/降趋势较为相似,表明这一时期光伏产业技术进步速度和成本下降速度接近。

3 结论

(1)生产 1 kWp 多晶硅光伏组件时光伏产业的环境影响潜值为 83.83 Pt,其中高纯多晶硅、硅片、电池片和组件的环境影响潜值占比分别为 43.05%、16.24%、14.84% 和 25.87%,电耗是主要的环境影响因素,分别占高纯多晶硅、硅片和电池片环境影响潜值的 71.5%、73.1% 和 69.7%。

(2)以 2016 年为基准年,2017—2020 年光伏产业技术进步率分别为 5.20%、8.98%、12.48% 和 20.91%,技术提升较为明显;同期成本下降率分别为 -5.81%、-21.05%、-25.23% 和 -32.63%,降幅较为明显,补贴下降率分别为 -15.60%、-30.36%、-40.46% 和 -51.33%,表现出变动频繁和降幅较大 2 个特点。

(3)同期光伏补贴下降率大于技术进步率和成本下降率,补贴下降速度要快于技术进步速度,技术进步速度和成本下降速度在 2017 年后较为同步,反映了补贴下降在一定程度上能够倒逼企业采用更先进的技术以降低成本。

本研究存在部分数据不易获取、时间选取范围不广等不足,后续将进一步优化模型、精简指标,提升模型适用性。

参考文献

- [1] 王世江,金艳梅,江华,等.中国光伏产业发展路线图:2020年版[R].北京:中国光伏行业协会,2021.
- [2] 王勃华.中国光伏行业2020年回顾与2021年展望[EB/OL].

- (2021-02-25)[2021-07-15].<https://guangfu.bjx.com.cn/news/20210225/1138322.shtml>.
- [3] FU Y Y, LIU X, YUAN Z W. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 180-190.
- [4] WU P S, MA X M, JI J P, et al. Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 68-74.
- [5] DESIDERI U, PROIETTI S, ZEPPARELLI F, et al. Life cycle assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems[J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 930-943.
- [6] LATUNUSSA C E L, ARDENTE F, BLENGINI G A, et al. Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 156: 101-111.
- [7] 赵若楠, 董莉, 乔琦, 等. 考虑处置阶段的光伏组件生命周期评价[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(4): 807-813.
- ZHAO R N, DONG L, QIAO Q, et al. Life cycle assessment of photovoltaic module considering disposal stage[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(4): 807-813.
- [8] PU Y R, WANG P, WANG Y Y, et al. Environmental effects evaluation of photovoltaic power industry in China on life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123993.
- [9] KIM H, CHA K, FTHENAKIS V M, et al. Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems[J]. *Solar Energy*, 2014, 103: 78-88.
- [10] SHARMA R, TIWARI G N. Life cycle assessment of stand-alone photovoltaic (SAPV) system under on-field conditions of New Delhi, India[J]. *Energy Policy*, 2013, 63: 272-282.
- [11] CHEN W, HONG J L, YUAN X L, et al. Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1025-1032.
- [12] 于志强. 冶金法多晶硅及其光伏系统并网发电的生命周期评价研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [13] 王祯仪, 汪季, 高永, 等. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(1): 191-196.
- WANG Z Y, WANG J, GAO Y, et al. Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 191-196.
- [14] GÖKHAN Y, BÜSRA Ç, ALIE G, et al. Investigation of life cycle CO₂ emissions of the polycrystalline and cadmium telluride PV panels[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2020, 14: 100343.
- [15] YAN J C, BROESICKE O A, WANG D, et al. Parametric life cycle assessment for distributed combined cooling, heating and power integrated with solar energy and energy storage[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119483.
- [16] LI Z H, ZHANG W, XIE L Z, et al. Life cycle assessment of semi-transparent photovoltaic window applied on building[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126403.
- [17] SIERRA D, ARISTIZÁBAL A J, HERNÁNDEZ J A, et al. Life cycle analysis of a building integrated photovoltaic system operating in Bogotá, Colombia[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 10-19.
- [18] LING-CHIN J, HEIDRICH O, ROSKILLY A P. Life cycle assessment (LCA)-from analysing methodology development to introducing an LCA framework for marine photovoltaic (PV) systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 352-378.
- [19] 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 evolution 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.
- [20] 马中, 蒋姝睿, 马本, 等. 中国环境保护相关电价政策效应与资金机制[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(6): 2715-2728.
- MA Z, JIANG S R, MA B, et al. Policy effect and funding mechanism of environmental related electricity pricing in China[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(6): 2715-2728.
- [21] WANG Z X, FAN W R. Economic and environmental impacts of photovoltaic power with the declining subsidy rate in China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 87: 106535.
- [22] SHAO X F, FANG T S. Performance analysis of government subsidies for photovoltaic industry: based on spatial econometric model[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2021, 34: 100631.
- [23] ZHANG H M, XU Z D, ZHOU Y, et al. Optimal subsidy reduction strategies for photovoltaic poverty alleviation in China: a cost-benefit analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 166: 105352.
- [24] SYMEONIDOU M M, ZIOGA C, PAPADOPOULOS A M. Life cycle cost optimization analysis of battery storage system for residential photovoltaic panels[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 309: 127234.
- [25] 王嘉阳, 周保荣, 吴伟杰, 等. 西部集中式与东部分布式光伏平准化度电成本研究[J]. *南方电网技术*, 2020, 14(9): 80-89.
- WANG J Y, ZHOU B R, WU W J, et al. Levelized cost of energy of centralized photovoltaic power in Western China and distributed photovoltaic power in Eastern China[J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(9): 80-89.
- [26] 何后裕, 何华琴, 王骞, 等. 考虑碳足迹与交易的分布式光伏发电成本分摊[J]. *电力建设*, 2020, 41(6): 85-92.
- HE H Y, HE H Q, WANG Q, et al. Cost sharing of distributed photovoltaic power generation considering carbon footprint and transactions[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(6): 85-92.
- [27] YANG C H, YAO R, ZHOU K L. Forecasting of electricity price

- subsidy based on installed cost of distributed photovoltaic in China[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 3393-3398.
- [28] 杨昌辉, 葛志祥. 关于分布式光伏发电上网定价研究[J]. *价格理论与实践*, 2018(4): 51-55.
- YANG C H, GE Z X. Feed-in tariff pricing model and simulation analysis of distributed photovoltaic generation in China[J]. *Price: Theory & Practice*, 2018(4): 51-55.
- [29] 昌敦虎, 田川, 张泽阳, 等. 基于LCOE模型的光伏发电经济效益分析: 以宜昌农村地区光伏扶贫电站项目为例[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(10): 2412-2420.
- CHANG D H, TIAN C, ZHANG Z Y, et al. Economic benefit analysis on photovoltaic power generation with LCOE model: the case of poverty alleviation project in rural areas of Yichang City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(10): 2412-2420.
- [30] WU Z Q, NJOKE M L, TIAN G N, et al. Challenges of investment and financing for developing photovoltaic power generation in Cameroon, and the countermeasures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 299: 126910.
- [31] 国家质量监督检验检疫总局. 环境管理 生命周期评价原则与框架: GB/T 24040—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [32] 李雪迎, 白璐, 杨庆榜, 等. 我国终点型生命周期影响评价模型及基准值初步研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(11): 2778-2786.
- LI X Y, BAI L, YANG Q B, et al. Preliminary study on endpoint life cycle impact assessment model and normalisation value in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(11): 2778-2786.
- [33] 谢明辉, 阮久莉, 乔琦, 等. 基于生命周期评价的多晶硅片环境影响研究[J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(1): 72-77.
- XIE M H, RUAN J L, QIAO Q, et al. Research on environmental impacts of multi-silicon wafer based on life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6(1): 72-77.
- [34] 顾秋容. 我国光伏产业成本问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [35] XIE M H, RUAN J L, BAI W N, et al. Pollutant payback time and environmental impact of Chinese multi-crystalline photovoltaic production based on life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 648-659.
- [36] 鲁正, 孙炜, 陈芸菲. 基于用户侧的光伏项目成本-效益分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(4): 209-214.
- LU Z, SUN W, CHEN Y F. Cost-benefit evaluation of photovoltaic system based on customer-side[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(4): 209-214.
- [37] 王思聪. 政府补贴政策演进对光伏发电产业发展影响研究[J]. *价格理论与实践*, 2018(9): 62-65.
- WANG S C. The evolution of PV subsidy policy and its impacts on PV market in China[J]. *Price: Theory & Practice*, 2018(9): 62-65.
- [38] 国家发展改革委关于完善太阳能光伏发电上网电价政策的通知: 发改价格〔2011〕1594号[A/OL]. (2011-08-01)[2021-08-12]. http://www.nea.gov.cn/2011-08/01/c_131097437.htm.
- [39] 国家发展改革委关于发挥价格杠杆作用促进光伏产业健康发展的通知: 发改价格〔2013〕1638号[A/OL]. (2013-08-26)[2021-08-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201308/t20130830_963934_ext.html.
- [40] 国家发展改革委关于完善陆上风电光伏发电上网标杆电价政策的通知: 发改价格〔2015〕3044号[A/OL]. (2015-12-22)[2021-08-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201512/t20151224_963536_ext.html.
- [41] 国家发改委关于调整光伏发电陆上风电标杆上网电价的通知: 发改价格〔2016〕2729号[A/OL]. (2016-12-28)[2021-08-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/28/content_5153820.htm.
- [42] 国家发展改革委关于2018年光伏发电项目价格政策的通知: 发改价格规〔2017〕2196号[A/OL]. (2017-12-19)[2021-08-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201712/t20171222_960932.html?code=&state=123.
- [43] 国家发展改革委、财政部、国家能源局关于2018年光伏发电有关事项的通知: 发改能源〔2018〕823号[A/OL]. (2018-06-01)[2021-08-12]. http://www.nea.gov.cn/2018-06/01/c_137223460.htm.
- [44] 国家发展改革委关于完善光伏发电上网电价机制有关问题的通知: 发改价格〔2019〕761号[A/OL]. (2019-04-28)[2021-08-21]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201904/t20190430_962433.html?code=&state=123.
- [45] 国家发展改革委关于2020年光伏发电上网电价政策有关事项的通知: 发改价格〔2020〕511号[A/OL]. (2020-03-31)[2021-08-21]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202004/t20200402_1225031_ext.html.
- [46] 国家发展改革委关于2021年新能源上网电价政策有关事项的通知: 发改价格〔2021〕833号[A/OL]. (2021-06-07)[2021-08-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202106/t20210611_1283088.html?code=&state=123. ⊗