

2020 年 可再生能源发电成本

执行摘要

2020 年可再生能源发电成本

2020 年，全球性疫情大爆发，COVID-19 病毒的传播造成了经济损失，也夺走了许多生命。然而，值得欣慰的是，可再生能源发电供应链快速恢复，并且新增装机容量再创纪录。

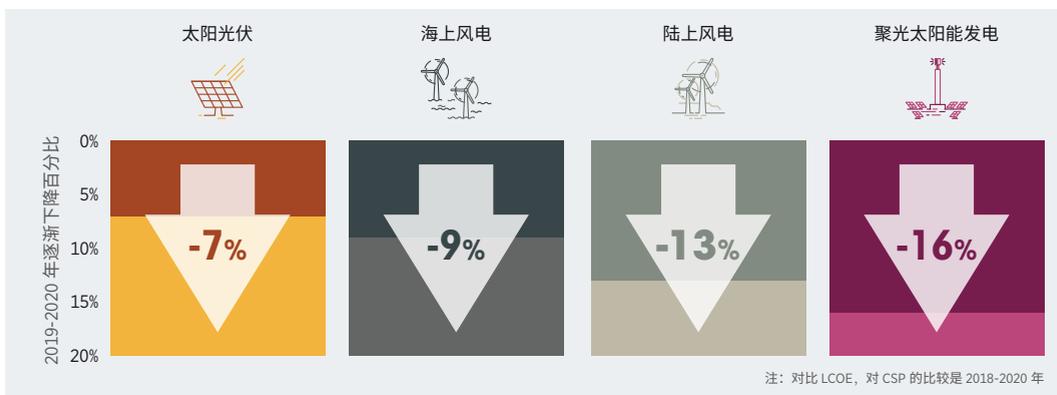
太阳能和风能成本持续下降的趋势也没有受到破坏。2020 年，全球陆上风电新增容量的加权平均平准化发电成本 (LCOE) 比 2019 年下降了 13%。在同一时期，海上风电的 LCOE 下降了 9%，并网规模的太阳能光伏发电 (PV) 的 LCOE 下降了 7% (图 S.1)。

全球陆上风电加权平均 LCOE 同比下降 13%，从 0.045 美元/kWh 降至 0.039 美元/kWh，¹比 2019 年的降幅略高。全球加权平均总装机成本下降了 9%，这是因为中国的装机成本低于平均水平，而且在 2020 年估计有 69 GW 装机容量并网发电，占该年部署的新产能的三分之二。

2020 年，并网太阳能光伏发电的 LCOE 同比下降 7%，从 0.061 美元/kWh 降至 0.057 美元/kWh，低于 2019 年 13% 的下降幅度。同样在 2020 年，全球并网太阳能光伏的加权平均总安装成本也下降了 12%，仅为 883 美元/kW。

并网太阳能光伏发电的 LCOE 下降幅度低于预期，这主要是因为当年全球新项目加权平均容量系数的下降部分抵消了总安装成本的下降。² 这种情况是由 2020 年的部署量所决定的，总的来说，与 2019 年的部署情况相比，2020 年的部署更偏重于太阳能资源较差的地区。³ 与陆上风电的情况类似，中国是新产能的最大市场，估计占 2020 年新增并网装机容量的 45%。

图 S.1 2019 年至 2020 年全球新投产的并网太阳能和风能技术的加权平均 LCOE



来源：IRENA 可再生能源成本数据库

1 本报告中给出的所有财务值都是 2020 年的实际值，也就是说，这些值根据 2020 年基准年的通货膨胀影响进行调整。LCOE 的计算根据附件一中详述的方法进行，并排除了任何可用财政支持的影响。

2 本报告中引用的所有太阳能光伏容量系数都是交流 (AC)/直流 (DC) 容量系数，而且太阳能光伏的所有安装成本数据都引用每瓦特直流电为单位，但这是一种例外情况，因为所有其他技术的报告都是以交流为单位。

3 考虑到双面模块和单轴跟踪器的重要性日益增加，数据可用性将滞后于总安装成本，并对容量系数带来重大影响，因此应谨慎对待这一结果。可以仅对 2020 年容量系数进行修订。

2020 年全球海上风电的加权平均 LCOE 同比下降 9%，全球新项目的加权平均电力成本从 0.093 美元/kWh 降至 0.084 美元/kWh。这比 2019 年的下降幅度更大，主要是因为中国的装机成本低于平均水平，而且提高了其在新增产能中的份额，即从 2019 年的三分之一左右增加到 2020 年的一半左右。

2020 年投产的新的聚光太阳能热发电 (CSP) 项目的全球加权平均 LCOE 同比下降了 49%。然而，该结果并不是很典型，因为 2019 年有两个推迟已久的以色列项目推高了全球加权平均 LCOE，而 2020 年只有两家工厂投入使用，而且都在中国。看一下 2018 年至 2020 年的数字，不难发现年复合下降率为 16%，这更能代表最近的成本下降率。

2010 年至 2020 年可再生能源发电成本趋势：成本下降的十年

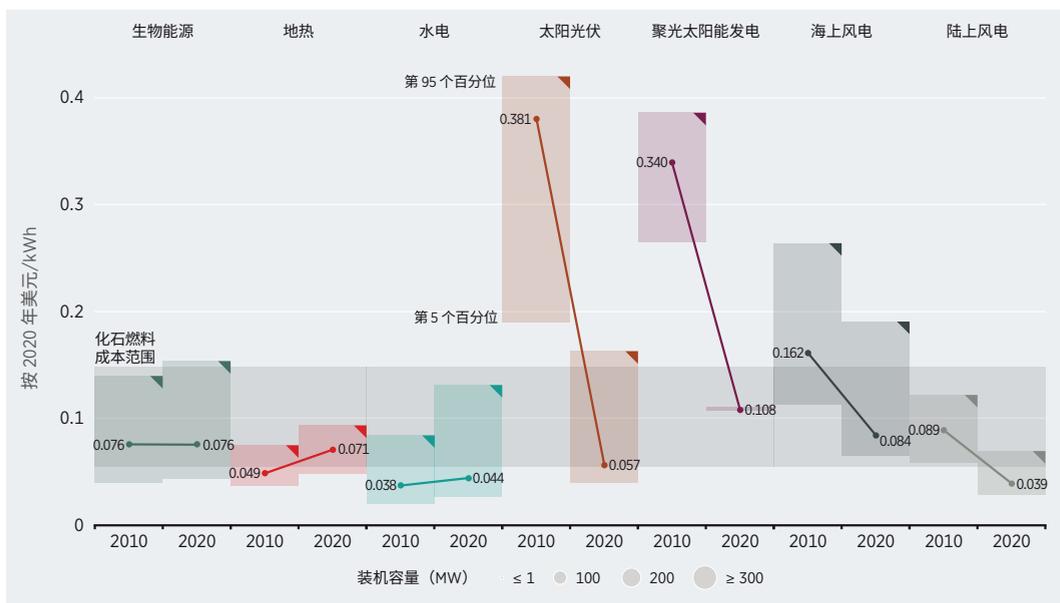
2010 年至 2020 年是太阳能和风能技术成本明显下降的一段时期。有针对性的政策支持 and 行业驱动力相结合，使通过太阳能和风能生产的可再生能源电力从一个成本高昂的小众产能，变成了能与化石燃料正面竞争的新产能。在此过程中，很明显可再生能源将成为电力系统的支柱力量，不但有助于发电脱碳，成本也低于其他传统型能源。

2010 年至 2020 年期间，全球新投产的并网规模太阳能光伏发电项目的总安装成本从 4731 美元/kW 降至 883 美元/kW，因此加权平均 LCOE 下降了 85%，从 0.381 美元/kWh 降至 0.057 美元/kWh（图 S.2）。之所以出现这种情况，是因为所有太阳能光伏（并网型和屋顶）的全球累计装机容量从 2010 年的 42 GW 增加到 2020 年的 714 GW。这代表着成本的迅速下降，从成本比最昂贵的化石燃料发电方案还高出两倍，到进入化石燃料新产能成本的范围的最底部。⁴

在此期间，住宅光伏系统的 LCOE 也在急剧下降。在澳大利亚、德国、意大利、日本和美国，住宅光伏系统的 LCOE 从 2010 年的 0.304 美元/kWh 至 0.460 美元/kWh 下降到 2020 年的 0.055 美元/kWh 至 0.236 美元/kWh，下降幅度在 49% 至 82% 之间。

对于陆上风电项目来说，2010年至2020年期间，全球加权平均电力成本下降了56%，从0.089美元/kWh降至0.039美元/kWh，平均容量系数从27%上升到36%，总装机成本从1971美元/kW降至1355美元/kW。在此期间，累计装机容量从178 GW增长到699 GW。太阳能光伏发电电力成本下降的主要原因是总装机成本的下降，与其相比，陆上风电成本下降的主要原因则是涡轮机价格和设备平衡成本的下降，以及当今先进涡轮机更高的容量系数。

图 S.2 2010 年至 2020 年全球新投产的并网级可再生能源发电技术的 LCOE



来源：IRENA 可再生能源成本数据库

注：该数据为投产年份的数据。粗线是全球加权平均的 LCOE 值，来自于每年投产的各个工厂。项目级 LCOE 通过实际加权平均资本成本 (WACC) 计算而得。2010 年经合组织国家和中国为 7.5%，2020 年降至 5%；世界其他地区 2010 年为 10%，2020 年降至 7.5%。单一条状带代表化石燃料发电成本范围，而每个技术和年份的条状带代表可再生能源项目的第 5 和第 95 百分位条状带。

4 按国家和燃料类型划分，二十国集团 (G20) 的化石燃料发电成本范围估计在 0.055 美元/kWh 至 0.148 美元/kWh 之间。下限代表中国的新建燃煤电厂，依据 2020 年 IEA 的相关数据。

对于海上风电而言，全球新投产项目的加权平均 LCOE 从 2010 年的 0.162 美元/kWh 下降到 2020 年的 0.084 美元/kWh，10 年内下降了 48%。这改变了海上风电的发展前景，到 2020 年底，海上风电的累计装机容量仅为 34 GW，约为陆上风电的二十分之一。

在 2010 年至 2020 年期间，全球 CSP 的加权平均电力成本从 0.340 美元/kWh 下降到 0.108 美元/kWh，降幅达 68%。2020 年仅有两个项目投产且均在中国，这些结果也反映了该国的国情。尽管如此，CSP 的电力成本仍下降了 68%（进入化石燃料新产能成本的中间范围），这仍然是一个了不起的成就。相比之下，到 2020 年底，全球 CSP 的累计装机容量仅为 6.5 GW，略低于太阳能光伏装机容量的百分之一。

在 2010 年和 2020 年之间，生物能源发电容量新增 60 GW。在此期间，全球生物能源发电项目的加权平均 LCOE 经历了一定程度的波动，但在这十年结束时与开始时的水平大致相同，即 0.076 美元/kWh，这一数字处于新的化石燃料发电项目成本的低端。同期，水电产能新增了 715 GW，而全球加权平均 LCOE 则增长了 18%，从 0.038 美元/kWh 上升至 0.044 美元/kWh。尽管水电产能在 2020 年的成本同比增加了 16%，但仍然低于最便宜的新化石燃料发电技术。

自 2016 年以来，全球地热发电的加权平均 LCOE 在 0.071 美元/kWh 至 0.075 美元/kWh 之间。2020 年全球新投产电厂的加权平均 LCOE 处于该范围的低端，为 0.071 美元/kWh，同比下降了 4%。

2010 年至 2020 年，全球陆上风力发电的加权平均成本下降了 56%，从 0.089 美元/kWh 降至 0.039 美元/kWh。

可再生能源发电正在成为新产能默认的经济性选择

在 2010 年至 2020 年这十年里，太阳能和风能技术的竞争力有了极大的提高。这一时期，若在不考虑财政支持的情况下进行计算，CSP、海上风电和并网级太阳能光伏与陆上风电一样，都属于化石燃料发电新产能的成本范围。事实上，当需要新的发电产能时，可再生能源不仅能与化石燃料竞争，而且会大幅削弱对化石燃料的需求量。

2020 年，在新增的 162GW 可再生能源发电产能中，其发电成本均低于最便宜的新化石燃料发电产能。这约占该年净增产能总量的 62%。新兴经济体中的电力需求不断增长，并且需要新的产能。与增加同样的化石燃料发电量的成本相比，这些可再生能源发电项目每年将至少为电力行业减少 60 亿美元的成本。

自 2010 年以来，全球可再生能源发电产能累计增加了 644 GW，其估计成本低于相应年份最便宜的化石燃料。⁵ 在 2016 年之前，几乎所有可再生能源发电产能都来自水电，但在此之后，陆上风电和太阳能光伏发电所占的比例不断增加。在这十年中，新兴经济体发电装机容量共增加了 534 GW。到 2021 年，可为这些新兴经济体的电力系统减少成本 320 亿美元（在其经济寿命期间，未折算的成本为 9200 亿美元）。



通过拍卖或电力购买协议 (PPA) 对可再生能源进行竞争性采购的结果证实了可再生能源的竞争力。国际可再生能源机构 (IRENA) 可再生能源拍卖和 PPA 数据库的数据表明，在最近的竞争性采购过程中获胜的并网级太阳能光伏项目（将于 2022 年投入使用）的平均价格可能达到 0.04 美元/kWh（图 S.3）。这比 2020 年全球太阳能光伏的加权平均 LCOE 减少了 30%，比最便宜的化石燃料竞争者（燃煤电厂）低了约 27%（0.015 美元/kWh）。

相关拍卖和 PPA 数据表明，在 2023 年之前，欧洲的海上风电成本将处于 0.05 美元/kWh 至 0.10 美元/kWh 的范围内，新市场或推迟的项目的成本很可能会更高。海上风电的低成本说明，在欧洲一些市场，这些项目在批发电价方面将具有竞争力。同时，CSP 的市场并不活跃，而且现有数据表明 2021 年将继续下滑，因为今年大型的迪拜发电和热水 CSP 项目即将上线。

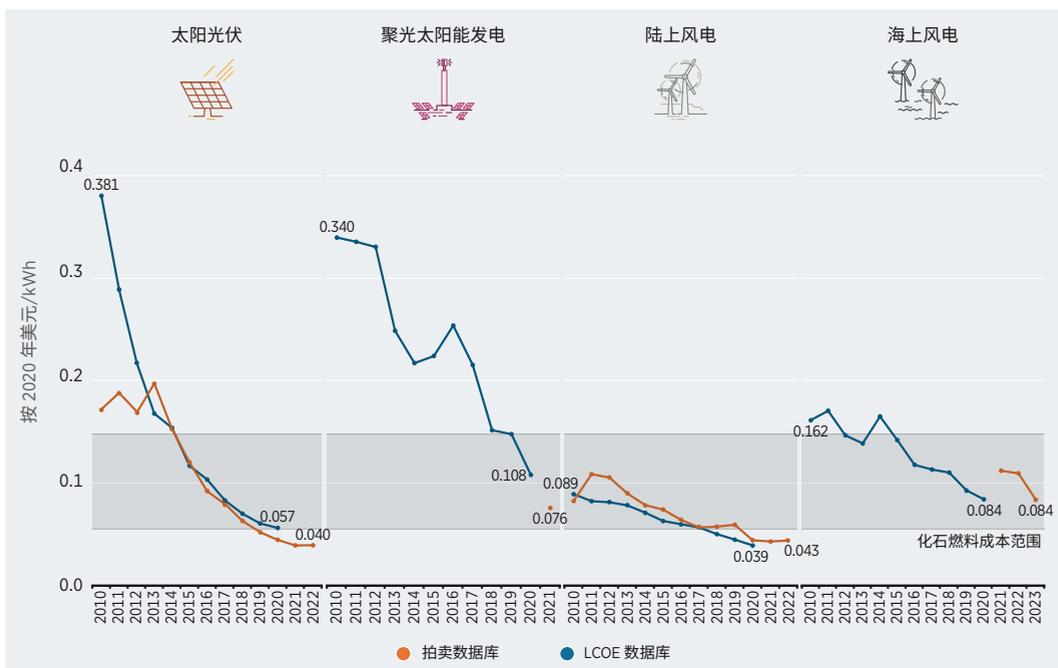
因此，IRENA 可再生成本数据库和拍卖与 PPA 数据库中的数据明显表明，并网级太阳能光伏和陆上风电项目平均能够以低于最便宜的新建化石燃料成本项目的价格发电。对于海上风电和 CSP 而言，成本将下降到新型化石燃料发电厂成本的较低范围。

自 2010 年起，可再生能源发电能力累计增加了 644 GW，估计成本低于最便宜的化石燃料发电方案

这些数据还表明，有越来越多项目的电力成本非常低，低于 0.03 美元/kWh。事实上，在过去的 18 个月里，太阳能光伏发电的报价连续创下了三个新低，首先是卡塔尔的 0.0157 美元/kWh，然后是阿拉伯联合酋长国的 0.0135 美元/kWh 和沙特阿拉伯的 0.0104 美元/kWh。令人惊讶的是，低于 0.02 美元/kWh 的价格也并非不可能，但这在几年前根本无法想象。然而，这些项目都要求几乎所有影响 LCOE 的因素都处于“最佳”值。

这种非常低的太阳能光伏发电价格水平意味着低成本的可再生氢气可能已触手可得。根据沙特阿拉伯最近拍卖的太阳能光伏和陆上风电的低价，潜在的平准化氢气成本可能低至 1.62 美元/公斤氢气 (kg H₂)。这与天然气蒸汽甲烷重整的假设成本相比会更有优势，目前的碳捕获、利用和存放 (CCUS) 成本在 1.45 美元/kg H₂ 到 2.4 美元/kg H₂ 之间。

图 S.3 2010 年至 2023 年全球太阳能光伏、陆上风电、海上风电和 CSP 的加权平均 LCOE 和 PPA/拍卖价格



来源：IRENA 可再生能源成本数据库

注：粗线是全球加权平均 LCOE，即按年份计算的拍卖价值。有关 LCOE 数据，请参阅图 S.2 注释。穿过整个图表的条状带代表化石燃料发电的成本范围。

低成本的可再生能源正在使现有的燃煤电厂陷入困境。

随着太阳能光伏发电和陆上风力发电成本的下降，新增可再生能源发电装机容量不仅比新建化石燃料发电厂越来越便宜，而且单从运营成本指标也比现有燃煤电厂更低。

事实上，在 2021 年，欧洲燃煤电厂的运营成本远高于新型太阳能光伏发电和陆上风电的成本（包括 CO₂ 价格的成本）。对德国和保加利亚的分析表明，调研的所有燃煤电厂目前的运营成本都高于新型太阳能光伏发电和陆上风电。然而，美国和印度燃煤电厂的运营成本较低，这主要是因为没有考虑到一个很重要的 CO₂ 价格，但也不完全出于这个原因。尽管如此，目前大多数印度和美国燃煤电厂的成本都高于太阳能光伏发电和陆上风电，因为这两种可再生技术在这两个国家的成本非常具有竞争力。

2021 年，在美国，有 77% 至 91% 的现有燃煤机组的运营成本估计将高于新型太阳能或风能产能的成本，而在印度，这一数字是 87% 至 91%。根据平准化成本调整后，2021 年印度太阳能光伏发电的拍卖和购电协议的加权平均价格为 0.033 美元/kWh，而陆上风电的价格为 0.032 美元/kWh。在美国，这些数字分别为 0.031 美元/kWh 和 0.037 美元/kWh。

虽然确定燃煤发电的价值是否高于其成本，已超出了本分析的范围。但考虑到美国电网企业级蓄电池储能成本在 2015 年至 2018 年期间下降了 71%，即从 2152 美元/kWh 降至 635 美元/kWh，甚至对燃煤电厂提供稳定和灵活发电的价值主张也有所削弱。新型太阳能和风能发电成本与越来越多的燃煤电厂的现有运营成本之间的差距越来越大，这种情况表明了提前淘汰煤炭发电所带来的经济潜能。

表 S.1 2021 年不经济的现有燃煤电厂的装机容量以及每年节省的燃煤发电量、发电成本和 CO₂ 排放量

	煤炭产能的运营成本高于 新型太阳能和风能		新型太阳能和风能取代 煤炭每年节省的费用	每年减少的 CO ₂ 排放量
	(GW)	+5 美元/MWh 可再生能源 并网成本 (GW)	(十亿美元/年)	(吨 CO ₂ /年)
保加利亚	3.7	3.7	0.7	18
德国	28	28	3.3	99
印度	193	141	6.4	643
美国	188	149	5.6	332
世界其他地方	724	488	16.3	1 881
世界	1 137	810	32	2 973

来源：IRENA 分析参考的材料有 Carbon Tracker, 2018、Szabó et al.2020、IEA, 2021、Öko-Institut, 2017、Booz&Co, 2014、Energy-charts.de、DIW Berlin, Wuppertal Institut and EcoLogic, 2019、Gimon et al., 2019、US EIA, 2021 和 IRENA 可再生能源成本数据库



照片：商业图片

太阳能和风能发电技术的学习率明显提高

从 2010 年到 2020 年经历的成本下降表明了下降速度非常快。这不仅对可再生能源发电技术在中期内的竞争力有巨大影响，也会给其他具有类似特征且在能源转型中需要的技术带来影响。

在 2010 年至 2020 年期间，包括新增的 94% 的累计可再生能源装机容量，并网规模的太阳能光伏发电在全球加权平均总装机成本中的估计学习率达到最高值⁶，即 34%。这项技术的 LCOE 也是最高，为 39%。该数值几乎超出以前所有基于早期部署数据的太阳能光伏学习率分析结果 - 认为当时的学习率可能会比后期高。

对于陆上风电，2010 年至 2019 年期间的 LCOE 学习率为 32%，略低于总安装成本的两倍。鉴于总装机成本和 LCOE 的学习率的密切关系，从表 S.2 中可以清楚地看出，总装机成本的降低对并网规模的太阳能光伏发电成本的下降非常重要。对于其他技术来说，提高容量系数的性能改进在电力成本下降方面发挥了更大的作用。因此，CSP、陆上和海上风电的 LCOE 学习率明显高于总安装成本的学习率。

表 S.2 2010 年至 2021 年 3 月太阳能光伏、CSP、陆上和海上风电的学习率

	学习率	
	2010 年至 2020 年的 总安装成本	LCOE 2010-2021/23
	(%)	(%)
公用事业级太阳能光伏	34	39
CSP	22	36
陆上风电	17	32
海上	9	15

6 学习率指的是累计装机容量每增加一倍，价格/成本下降的百分比。



© IRENA 2021

本《执行摘要》翻译自“2020年可再生能源发电成本”

ISBN: 978-92-9260-348-9” (2021)。如果本译本与英文原本间有差别，则以英文原本为准。

免责声明

本出版物及所使用的资料均按“原样”提供。IRENA 已经采取了所有合理的措施，以验证本出版物中资料的可靠性。然而，无论是 IRENA 还是其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供者均不提供任何形式，包括明示或暗示的担保，它们对使用本出版物或材料的任何后果不承担任何责任或法律责任。

本文中包含的信息不一定代表所有 IRENA 成员的观点。提及特定的公司或特定的项目或产品并不意味着 IRENA 认可或推荐这些公司或产品，认为其优先于未提及的类似性质的其他公司或产品。此处采用的名称和本材料的表述，并不意味着 IRENA 会就任何地区、国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位或对边界或边界的划定表示任何意见。