

光伏组件 碳足迹及低碳发展 报告





目录

背景介绍	01
光伏组件及其产业链的生产工艺	09
光伏组件全生命周期评价方法	13
光伏组件生命周期碳排放分析	19
光伏组件碳减排探索	25
以科学降碳方案和碳管理方法应对挑战	33
总结与建议	39



背景介绍

光伏产业为全球能源转型注入强劲动力

2015年，联合国气候变化大会通过《巴黎协定》，提出各方将加强对气候变化威胁的全球应对，把全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2°C 之内，并为把升温控制在 1.5°C 之内努力。2021年在于格拉斯哥举行的《联合国气候变化框架公约》第26次缔约方大会 (COP26) 上，与会国家共同达成《格拉斯哥气候协议 (Glasgow Climate Pact) 》，为保障 1.5°C 温控目标的落实，进一步明确了一系列目标及路线图。在一致的气候治理目标下，全球多个经济体相继提出碳中和目标，并将发展可再生能源作为实现目标的关键推手。中国是《巴黎协定》第23个缔约方，也是落实《巴黎协定》的积极践行者。中国在2020年9月正式宣布了明确的碳达峰和碳中和目标，即力争于2030年前实现碳达峰，努力争取2060年前实现碳中和。为了实现这一目标，中国计划到2030年将非化石能源消费比重提升至25%左右，风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上；到2060年非化石能源消费比重进一步达到80%以上。



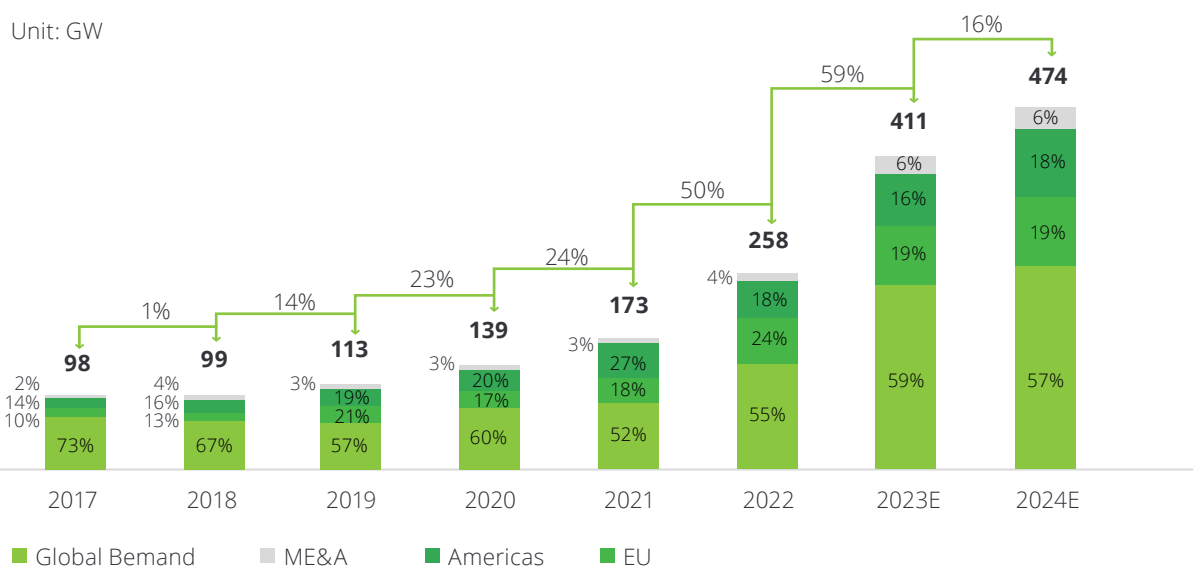


光伏作为应用最成熟的可再生能源技术之一，装机规模在全球范围内迎来爆发式增长。全球光伏新增装机量由2010年的17.46 GW提升至2023年的411GW¹，预计2024年全球光伏新增装机容量将达到474 GW²（图1）。从全球装机量分布来看，中国已崛起成为光伏发展引领者。根据国家能源局数据³，中国光伏装机新增装机量由2010年的0.61 GW提升至2023年的216.88 GW，2023年中国新增装机量约为全球新增装机量的一半，是全球光伏装机的主要推动者之一。在政策支持、技术迭代、规模化等多种因素驱动下，光伏发电经济性持续提升，未来应用规模有望进一步扩大。

大力发展光伏产业，不仅有助于推进能源生产和消费革命，也为经济高质量发展贡献强劲动力。中国已将光伏产业列为国家战略性新兴产业之一，在产业政策引导和市场需求驱动的双重作用下，中国光伏产业实现了快速发展，已成为中国在全球贸易中的一大亮点。

图1：2010-2024全球新增光伏装机量（GW）

Unit: GW

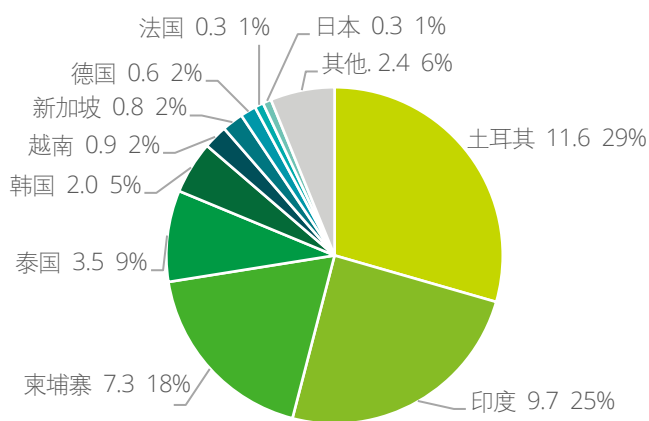
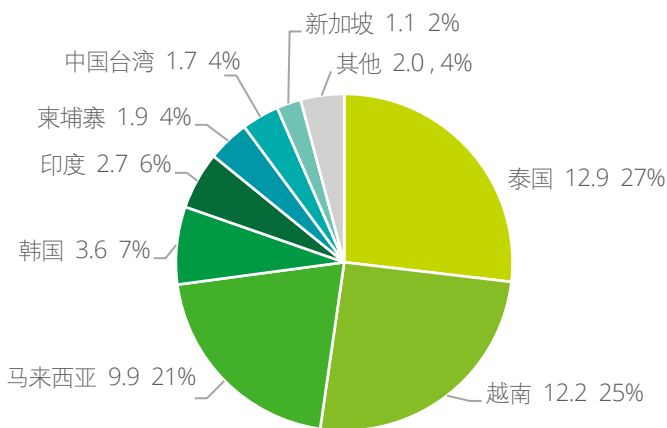


数据来源: trendforce

尾注

1. <https://www.chinca.org/sjtcoc/info/23030921074811>
2. <https://guangfu.bjx.com.cn/news/20231214/1350108.shtml>
3. http://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm

图2: 2023年中国光伏硅片出口市场份额分布情况 (单位: 亿美元) 图3: 2023年中国光伏电池片出口市场分布 (单位: 亿美元)



数据来源: 中国机电产品进出口商会-光伏分会

能源转型激发海外市场组件需求

近些年, 海外市场装机需求激增, 为中国光伏产品出口提供了巨大市场机遇。2022年中国光伏产品出口额同比增长226.2%, 光伏组件出口额达423.6亿美元。2023年中国光伏产品出口量同比增长25%。中国光伏产品出口以光伏组件为主, 占据了全球光伏组件市场的半壁江山, 其中欧洲、亚洲和美洲是主要的出口目的地, 分别占据了46%、25%和11%的出口量。

硅片出口量大幅上涨。2023年中国光伏硅片出口额为48.2亿美元, 同比下降4.6%, 出口量约78亿片, 同比大幅上涨45.6%。越南、马来西亚、泰国仍是中国硅片出口主要市场, 占总出口额72.9%(图2)。其中对泰国出口额连续两年大幅上涨, 得益于泰国本土市场不断增长的电力需求以及中国光伏企业在东南亚投资建厂等因素的加持, 泰国光伏产能扩张迅速。根据亚洲光伏行业协会(APVIA)和全球光伏理事会(GSC)发布的一份报告指出, 预计2023年

年东南亚光伏新增产能将达到3.8GW, 同比增长13%, 在未来的25年内, 泰国可再生能源装机占比预计将达到66%。2023年中国光伏硅片对印度出口额大幅上涨, 主要由于印度本土光伏产能扩张势头猛烈, 除下游组件环节外, 印度也开始大量从中国进口电池片生产设备, 大力布局制造端产能。

中国电池片出口量大幅上涨。2023年中国电池片出口额为39.4亿美元, 同比上涨5.2%, 出口量约39GW, 同比大幅上涨69.4%, 对土耳其、印度、柬埔寨、泰国、韩国五国的出口额合计占比86.3%(图3)。随着碳中和目标的迫近, 土耳其越来越重视可再生能源产业的发展, 尤其是光伏发电。在当前国际地缘政治风险加剧的背景下, 土耳其政府积极出台一系列支持光伏产业的政策, 包括鼓励投资建设光伏组件等核心制造环节产线, 同时放宽分布式光伏电站的安装标准, 还包括向相关项目提供财政补贴等激励措施, 并加速光伏发电装机容量的扩大。

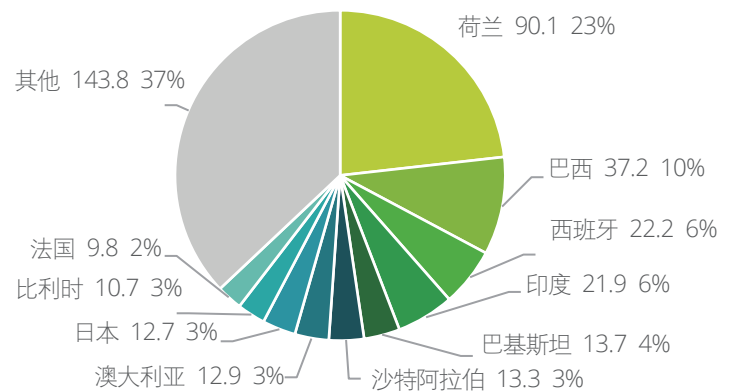
中国光伏产品对土耳其市场的出口也呈现出显著增长趋势, 截止到2023年第三季度, 土耳其本土组件产能约8GW, 制造模式以进口电池片并在当地制成组件为主, 为全球第四大组件生产国, 累计装机量也超8GW。此外, 印度对于光伏电池片需求量较大, 主要原因在于印度目前已有约30GW的光伏组件产能, 并且仍在加速扩张, 而其本土电池片产能不足10GW, 需要大量进口以满足下游产能需要。



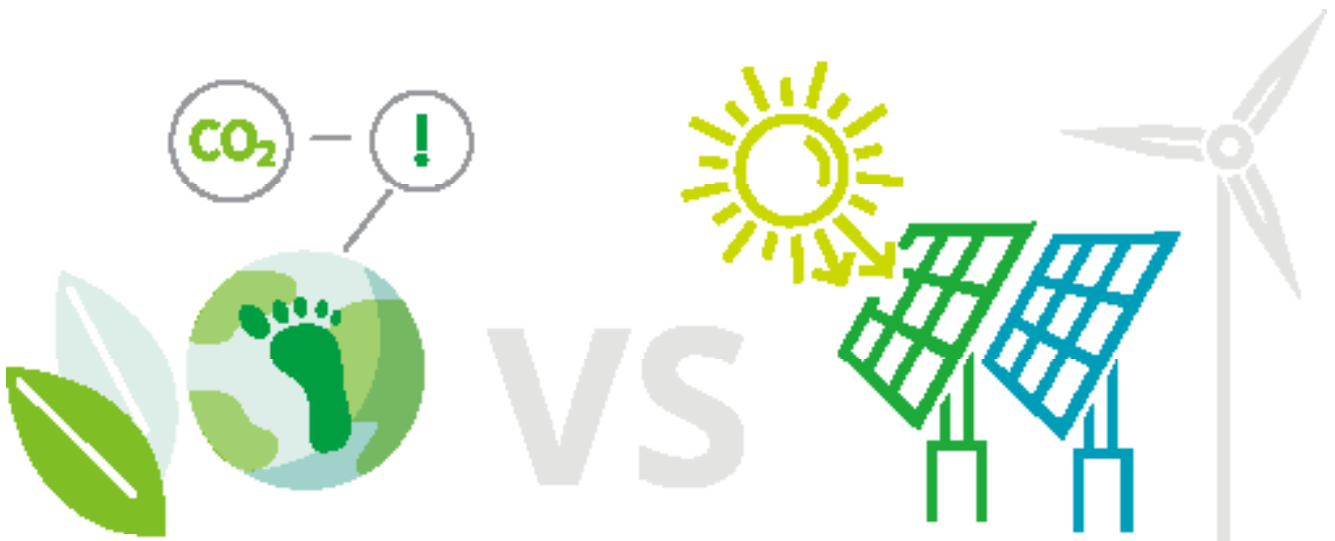
欧洲市场是全球能源转型的领导者，也是中国光伏组件出口最大市场。自2022年俄乌冲突爆发导致能源危机，以及2021年7月14日，欧盟委员会通过了“减碳55”（Fit for 55）一揽子计划，将2030年可再生能源在能源结构中占比目标从40%提高到45%，欧盟光伏市场可再生能源需求量激增，其中德国、西班牙2023-2026年光伏新增装机量均有望超过50GW，荷兰、波兰、法国等国2023-2026年新增装机量也均在20GW左右。这些政策刺激了欧洲市场对光伏组件的需求，2023年，中国对欧洲的光伏产品出口额超过200亿美元，占中国总出口额的40%以上（图4）。欧洲市场的价格接受度也较高，需求受价格波动影响较小，并且欧洲本土的光伏制造成本较高，供应链建设也需要时间，因此，欧洲市场仍然依赖中国的光伏组件，预计在中短期内，欧洲仍将是中国光伏组件出口的最大市场。

值得注意的是，尽管欧洲是中国光伏组件出口的第一大市场，但在2022年法国光伏组件招标项目中，中国的市场份额仅占25%，低于中国在欧洲其他国家的市场份额。法国对光伏组件的碳足迹认证要求较高，是影响中国光伏组件进入法国市场的主要壁垒，后续章节将详细展开碳足迹核算部分的碳壁垒内容。

图4：2023年中国光伏组件出口市场分布（单位：亿美元）



数据来源：中国机电产品进出口商会-光伏分会



碳足迹正逐渐成为光伏组件出口的关键竞争力

随着光伏行业的快速发展和国际对全球变暖的关注，光伏产业链全生命周期碳排放正成为全球政府、企业和研究机构关注的焦点。发达国家正在以产品生命周期评价、碳足迹为基础建立国际绿色贸易壁垒。

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是定量和定性分析不同产品生命周期过程对环境影响的方法，综合评定产品生命周期过程中的温室气体排放、水资源消耗、能源消耗等方面产品对环境的

影响。而碳足迹 (Carbon Footprint of Products, CFP) 是LCA评价中环境影响的一种，是衡量某产品在其生命周期阶段中直接或间接产生的温室气体排放量。

目前多国已推出针对光伏组件的碳足迹评价标准，例如：法国、韩国的光伏组件碳足迹认证要求；瑞典、意大利的光伏组件环境产品声明 (Environmental Product Declaration, EPD) 要求；欧盟光伏组件专用评价规范 (Product Environmental Footprint Category Rules, PEFCR) 等。

具体来看，以下国家的规定比较严格：

1/ 法国

法国从2011年7月开始推行光伏项目招标机制，对光伏项目进行竞标评估。竞标评估的主要标准是价格和环境影响因素，其中光伏组件的碳足迹值是环境影响因素的重要指标。在总分为100分的竞标评估中，环境影响因素占到最终竞标得分的18-30%。组件碳足迹高低会影响投标者的中标与否、以及电价补贴的高低，具有低碳排放数值的组件成为投标者的首选。光伏组件的碳足迹值越低，说明其对环境的影响越小，竞标评估的得分就越高，电价补贴也就越高。

为了统一和简化光伏组件的碳足迹评估，法国能源监管委员会 (CRE) 制定了一套简化碳评估 (ECS) 方法。ECS方法根据光伏组件的材料成分、制造地区、分配系数等因素，采用默认系数法或生命周期评价法 (LCA) 来计算光伏组件的GWP值。ECS方法的具体步骤和要求在CRE发布的《与太阳能发电设施建设和运营有关的招标规范 (AO PPE2 PV Sol)》(简称“PPE2文件”)中有详细说明。PPE2文件还根据光伏项目的规模和类型，规定了不同的碳足迹值标准。

法国PPE2文件也对不同国家的碳排因子设定了默认值。下表罗列了光伏组件生产各环节原材料的碳排因子，对于中国、瑞典、法国、德国和美国，法国的碳足迹标准采用了不同的默认因子值，并且中国的因子值显著高于其他地区。

法国碳足迹计算标准的默认因子值与中国实际情况有所出入，这使得中国企业计算的光伏组件的碳足迹都偏高。该标准定义中国电力因子为1.024kg CO_{2-eq}/kWh，未考虑绿电等因素，而中国多晶硅及硅片(这两个产业链环节约占全部碳排放量的60-70%)主要生产大企业大规模分布在四川、云南等以水电为主的区域，统一按中国较高的煤电比例计算碳足迹排放值，计算结果会高于中国企业的实际的产品碳足迹。而法国在计算美国企业的碳排放值时，采用了较为合理的方法，把美国分成几个区域，分别计算不同区域企业的碳排放值。

此外，法国标准在碳足迹排放计算规则中，对所有企业使用相同的物料投入量进行计算碳排放值。中国企业组件制备过程

硅棒切割硅片良品率可达70%，折算至单瓦硅耗约3g，但法国标准组件原料量折算至单瓦硅耗为5g，是中国实际生产情况2倍左右。对所有企业使用相同的物料投入量进行碳排计算，这对物料投入量较低的中国企业而言，不符合生产实际。

由于国际碳足迹标准中对中国采用的默认因子值并不完全符合中国实际，因此在同等条件下，中国光伏产品碳排放数值偏高。如果采用法国碳足迹计算标准，使用其默认的电力因子以及投放材料量，1 kWc组件对应的二氧化碳排放为近800kg，但如果使用中国实际的电力因子以及材料量，在中国西南地区(多为水力发电)完成1 kWc组件对应的碳排仅为400kg CO_{2-eq}左右，降低比例高达50%。高估的碳足迹导致中国光伏产品在法国的市占率远低于欧洲其他国家。

表1: 法国碳足迹计算标准默认因子

	单位	中国	瑞典	法国	德国	美国
冶金级硅	kg CO _{2-eq} /kg	15.99	5.27	5.3	11.72	12.09
多晶硅-西门子法	kg CO _{2-eq} /kg	80.56	15.98	16.18	56.98	55.71
硅锭-单晶	kg CO _{2-eq} /kg	40.66	9.73	9.82	28.47	29.3
硅锭-多晶	kg CO _{2-eq} /kg	8.18	1.07	1.09	5.17	5.69
硅锭-类单晶	kg CO _{2-eq} /kg	10.64	3.67	3.69	7.77	8.15
硅砖	kg CO _{2-eq} /kg	1.79	0.61	0.62	1.32	1.36
硅片-单晶	kg CO _{2-eq} /m ²	7.7	2.74	2.75	5.65	5.94
硅片-多晶/类单晶	kg CO _{2-eq} /m ²	8.04	3.37	3.38	6.25	6.29
电池片	kg CO _{2-eq} /m ²	39.64	15.28	15.35	29.94	30.78
玻璃	kg CO _{2-eq} /kg	1.05	0.94	0.94	1.01	1.01
钢化玻璃	kg CO _{2-eq} /kg	0.17	0.179	0.18	0.187	0.166
封装材料 (EVA或同等)	kg CO _{2-eq} /kg	3.13	2.35	2.36	2.75	2.89
背板材料 (PET或同等)	kg CO _{2-eq} /kg	4.04	3.4	3.41	3.8	3.8
背板材料 (PVF)	kg CO _{2-eq} /kg	21.19	17.93	17.94	19.57	20.19
晶体硅电池板	kg CO _{2-eq} /m ²	8.86	5.11	5.12	7.31	7.52
电力	kg CO _{2-eq} /kWh	1.024	0.049	0.052	0.635	0.669

2/ 韩国

韩国针对光伏产品颁布的新规则与法国的规则相呼应，与法国不同的是，韩国的框架为制造商附加了所谓“级别”，根据产品整个生命周期内的每千瓦碳排放量，组件被分成三个特定类别。只有最高类别的组件（碳排低于 $670 \text{ kgCO}_{2\text{-eq}}/\text{kWc}$ ）才有资格获得政府补贴。根据韩国新能源和可再生能源中心（NREC）此前发布的新消息，最高分留给了使用韩国硅片的韩国本土制造商，中国制造商被列入最低类别。

3/ 意大利&瑞典

瑞典、意大利要求环境产品声明（Environmental Product Declaration, EPD）。EPD是以量化的产品环境影响评价方法学，即LCA分析方法为基础，规范化、标准化的III类环境声明。EPD报告可以为产品和服务提供公平的比较基准，在国际范围有广泛的认可度。意大利（EPD意大利）和瑞典（国际EPD）是国际上权威的EPD体系。EPD比碳足迹的要求更高，可理解为EPD包含碳足迹要求，碳足迹是最基本的量化环境指标。对于中高压输变电产品，在意大利国家电力公司（ENEL）的投标资格要求中，明确需要EPD证书，证明产品“从摇篮到坟墓”生命周期内的等效二氧化碳排放量。国内和国际制造商应根据ENEL的可持续发展标准取得资格，才能成为ENEL的供应商。在评审时会审核其产品相应的碳排当量，并且作为加分项。同时在交货时，如果其不满足ENEL要求，将会被罚款或拒收。

4/ 欧盟

ErP指令的全称为“能源相关产品生态设计要求建立框架的指令”，欧盟在这一框架下进一步制定了各类耗能产品需符合的生态设计要求。最新欧盟ErP指令对进入欧盟市场的光伏组件和逆变器建立生态设计法规，从提高效率和降低环境影响角度，提出更多的要求；最新的政策对光伏组件信息披露、可靠性、可修复性、可拆卸行、可回收性和碳足迹6个方面分别提出要求。

绿色贸易壁垒加大我国光伏产业出口产业压力。做好产品碳足迹核算、全生命周期碳排放管理进而降低产品碳足迹，不仅是企业应对绿色贸易壁垒对企业出口的紧迫要求，也会是企业增强其产品竞争力、获得更多下游买家及消费者青睐的必要手段。

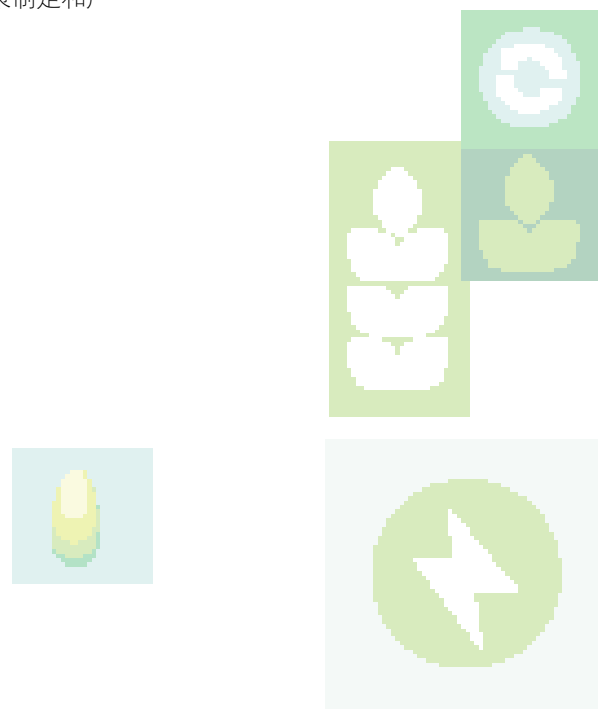


研究目的及意义

本报告旨在深入探讨全球及中国光伏产业的发展态势，并对比了国际和中国光伏产品的碳足迹。随着行业的发展以及对产品绿色低碳属性的要求，光伏行业积极努力降低产品的碳足迹，以满足迅速变化的环境保护和可持续发展要求。然而，值得注意的是，中国的实际碳排放情况与国际制定的标准存在一定的差异，这在本报告中将详细阐释。

本报告深入研究了我国光伏产品的碳足迹优化。随着可再生能源需求的增长，光伏技术作为清洁能源的代表，在全球范围内得到了广泛应用。中国光伏行业正在积极采取了各种措施，包括技术创新、生产工艺优化和能源结构调整，以降低光伏产品的碳足迹。通过广泛应用高效太阳能电池技术以及智能制造流程，我国成功提升了光伏产品的能效，显著降低了其碳足迹。

本报告通过建立中国本地化的光伏产品因子库，核算光伏组件碳足迹，明确光伏组件的碳排放热点和减碳方法，剖析这些因素对中国光伏产业碳足迹的影响，并呈现出实际排放情况与国际要求之间的差异。这将有助于更全面地了解中国光伏行业的环境绩效，并为未来的政策制定和产业优化提供有力的决策支持。



光伏组件及其产业链的生产工艺

光伏组件介绍

光伏组件是指具有封装及内部连接的、能单独提供直流电、不可分割的最小光伏电池装组合装置。它是光伏发电系统的核心部件。目前常用的分类方式是按照材料将其分为晶硅组件和薄膜组件。晶硅组件进一步分为单晶硅组件和多晶硅组件，薄膜组件包括碲化镉 (CdTe)、铜铟硒 (CIS)，铜铟镓硒 (CIGS) 等多种。晶硅组件的光电转化率很高，技术发展较为成熟，设备投资较低，已占据光伏组件市场主导地位，据CPIA数据，2021年晶硅组件市场份额高达96.2%。薄膜组件使用非晶硅薄膜电池封装形成，发电功率较晶硅组件偏低，2021年市场占有率仅有3.8%。因此本报告接下来会以晶硅组件作为主要研究对象。

图5: 不同种类组件对比

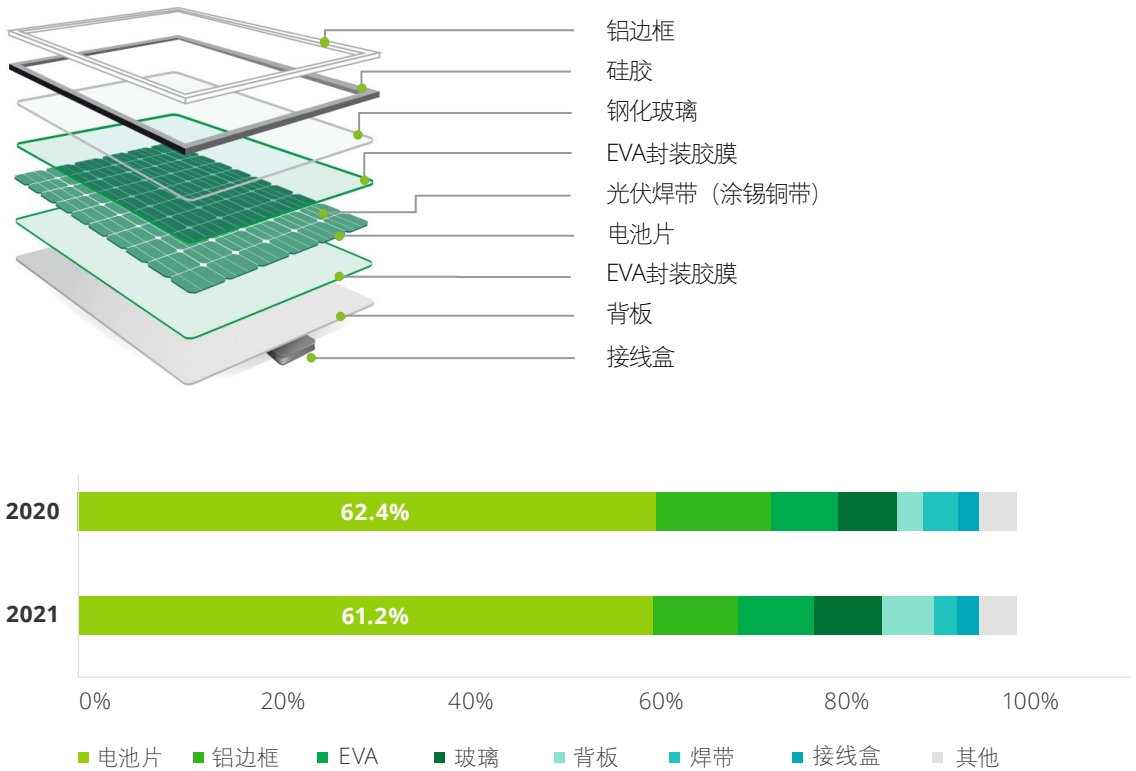
	晶硅组件		薄膜组件
	单玻晶硅组件	双玻晶硅组件	
2021年市占率	60.2%	36.0%	3.8%
优点	单块组件发电功率高		高温性能好，弱光性能好， 阴影遮挡功率损失小
	较单玻晶硅组件转换效率更高， 生命周期更长，单瓦成本更低		
缺点	重量大，易碎，高温性能差		发电功率较低， 产品寿命衰减快
	较单玻晶硅组件更重，对支架要求高，破损率较高		
适用领域	适用于工业领域， 对环境的要求比较高	适用于居民住宅、化工厂、 海边、水边、酸雨或者盐雾 大的地区的光伏电站	适用于BIPV（光伏建筑一体化） 领域，轻钢屋顶，光伏大棚等

资料来源：CPIA, 东亚前海证券研究所

光伏组件结构

传统的光伏组件由八大核心材料组成(图6),包括:电池片,光伏玻璃,背板材料,光伏焊带,接线盒,封装胶膜,铝边框和硅胶。

图6: 光伏组件结构示意图及成本占比



资料来源: 杜邦公司, 华经产业研究院

1 电池片

电池片是整个光伏组件的核心，电池片可将太阳的光能转为电能的半导体薄片，决定了光伏系统的发电能力。电池片的转换效率直接影响光伏系统的发电效率，电池片生产工艺的优良直接影响光伏系统使用寿命。从成本占比来看，电池片是光伏组件成本的核心，同时也是光伏组件降本的主要途径。电池片主要分为晶硅电池，薄膜电池和新型钙钛矿电池等。

2 光伏玻璃

光伏玻璃是光伏电池最重要的组件之一，主要起到保护光伏电池及透光的作用。较传统玻璃，光伏玻璃具有含铁量低、透光率高、耐高温、抗氧化、耐腐蚀等优势，其质量直接影响组件发电效率和使用年限。

3 背板材料

背板是组件背部的封装材料，以有机高分子类材料为主，也有适用于双玻晶硅组件的无机物类材料（玻璃背板等）。背板能够保护光伏组件免受光、湿、热等外部环境的侵蚀，具备较高光反射率的背板也能提升组件整体的光电转换效率。



4 光伏焊带

焊带分为用于串联电池片的互联焊带和用于连接电池串及接线盒的汇流焊带，两者皆用于收集电池片转化的电流，是组件中的核心电气连接部件，直接影响组件电流的收集效率和电池片的碎片率。

5 接线盒

接线盒能够将组件内产生的电流传输到外部线路，其结构中二极管的性能具备在组件故障时形成旁路通路保持正常工作（旁路二极管），以及低光照时防止电流回流（阻塞二极管）等作用。

6 封装胶膜

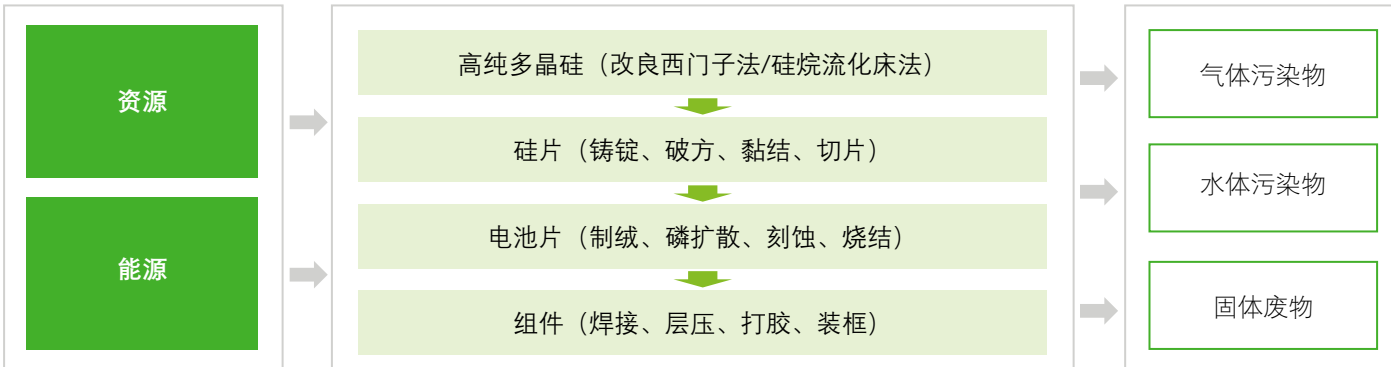
光伏胶膜具备优越的黏着力、耐久性和光学特性，主要将电池片与玻璃、背板粘接，起到保护电池片、隔绝空气的作用。由于粘接过程不可逆，所以胶膜的质量直接决定了组件的封装质量和使用寿命。

7 边框

铝边框作为组件最外层的封装结构，相较于钢边框和橡胶件卡扣短边框具有更强的承载能力和耐腐蚀性，同时轻便性较好，完美契合了组件的特性需求，属于中短期内不可替代的刚需辅材。铝边框占组件成分比例受组件尺寸影响。



图7: 光伏组件的生产流程及物质输入输出示意图



晶硅光伏组件产业链

光伏组件是光伏发电的核心，也是面向下游终端的直接载体。光伏组件的生产组装已经形成了一条完整的工业产业链，且该产业链与生命周期碳足迹分析路线重合，因此本报告从产业链角度分析，获取全生命周期碳足迹结果。

光伏组件的生产流程如图 7所示，涉及硅料、硅棒、硅片、电池片和组件等环节，这些环节都需要能源的输入，并且伴随着污染物的排放。因此，在对光伏组件进行碳排放和减碳分析时，需要将硅料、硅棒、硅片、电池片、组件和光伏电站，整条产业链都纳入考虑范围。

光伏组件的生产工艺流程可以概述为以下几个步骤：

1 多晶硅环节

多晶硅是光伏产业链中最上游的原材料，由冶金级硅提纯制成。目前主要采用改良西门子法和硅烷流化床法，分别生产棒状硅和颗粒硅。改良西门子法具有产品质量稳定，副产物循环利用的优点，是目前的主流工艺。硅烷流化床法具有能耗低，反应转化率高的优点，但品质一般。

2 硅棒/硅锭拉晶环节

拉晶是将多晶硅料生长成硅体的过程，目前主要分为单晶硅棒和多晶硅锭2种类型。单晶硅棒主要采用直拉法或悬浮区熔法，直拉法是目前的主流工艺，能够满足制作光伏电池用单晶硅的条件。多晶硅锭主要采用铸锭法，其优点是生长简便，易于大尺寸生长，易于自动化生长和控制。

3 硅片环节

硅片是将硅棒或硅锭切割成薄片的过程，目前主要分为多晶硅片和单晶硅片两种类型，单晶硅片的寿命和光电转换效率均优于多晶硅片。硅片生产工艺包括切方、切片、清洗分选三个环节。其中切片是使用金刚线切片机将柱状硅单质切为硅片，是硅片生产的核心环节。硅片的尺寸也在不断发展，目前市场上硅片尺寸主要以156.75 mm、157 mm、158.75 mm、166 mm、182 mm、210 mm等多种尺寸，其中182 mm和210 mm尺寸硅片的市场占比在不断增长，未来或将成为主流。

4 电池片环节

电池片是将硅片加工成具有光电转换功能的器件的过程，是光伏组件生产的核心环节。电池片的生产工艺包括制绒、扩散、刻蚀、镀膜、丝网印刷、烧结、测试与分选等多个步骤，其中制绒、扩散、镀膜等步骤是影响电池片效率的关键因素。

5 光伏组件环节

光伏组件是将电池片连接并封装成具有一定输出功率的装置的过程，是光伏组件生产的最终环节。光伏组件的生产工艺包括电池片分选、机器焊接、层叠、层压、EL测试、装框、装接线盒、清洗、IV测试、成品检验等多道工序，其中层压、装框、装接线盒等步骤是影响光伏组件性能和寿命的重要因素。

光伏组件全生命周期评价方法

全生命周期评价方法被广泛用于评估光伏全产业链各环节的碳排放情况和潜在环境影响。通过统一对光伏产业上游的硅料、硅棒、硅片，产业中游的电池片和光伏组件，产业链下游的光伏发电系统建设进行环境综合评价，对比光伏产业链各环节的碳排放情况。

全生命周期评价方法介绍

全生命周期评价方法 (Life Cycle Assessment, LCA) 是一种客观评价产品、生产工艺和活动对环境负荷的过程。它通过辨识和量化物质和能量利用以及由此产生的环境废物排放，评估它们对环境的影响，并寻找改善的途径。

依据ISO 14040/44标准，LCA评价包括四个阶段：

(1) 目标和范围，确定研究的框架和目标；(2) 生命周期清单，对产品价值链上的质量和能量流进行投入/产出分析；(3) 生命周期影响评估，评估环境相关性，如全球变暖潜力；(4) 结果解释，基于评估结果提出对策。





LCA也广泛用于评估光伏产业链各环节的碳排放情况和潜在环境影响。LCA重点分析光伏产业链在全生命周期中从原材料获取、生产制造、使用到尾端处理过程对环境的潜在影响，并提出减碳建议和改进措施。目前，关于光伏产业链各环节的全生命周期碳排放核算和管理的标准法规主要包括通用的方法和光伏组件专用标准法规。

通用类光伏组件碳足迹核算标准包括ISO 14067；针对光伏组件而言，有5个专用标准（见表2），分别是欧盟委员会于2019年2月12日发布的《Photovoltaic Modules used in Photovoltaic Power Systems for Electricity Generation》（PEFCR），EPD意大利于2020年3月16日最新发布的《Electricity Produced by Photovoltaic Modules》，EPD国际于2021年发布的《Electricity, steam and hot/cold water generation and distribution》，中华人民共和国工

业和信息化部2021年发布、中国电子技术标准化研究院归口管理与起草的《中华人民共和国电子行业标准 产品碳足迹 产品种类规则 光伏组件》和法国能源监管委员会2021年10月6日颁布、2023年2月8日修订更新的《与太阳能发电设施的建设和运营有关的招标规范（AO PPE2 PV Sol）》（简称“法国PPE2文件光伏组件碳足迹标准”）。这些标准可以用于对光伏产品产业链上中下游各产品组件和生产环节全生命周期的碳排放进行核算。

其中，法国针对光伏组件实施招标计划，对规模大于100 kWc的光伏组件施行碳足迹要求。在2017-2021年，该项目为CRE4招标计划，要求光伏组件依据法国光伏标准进行碳足迹评估；2021年开始，到2026年结束，招标计划为PPE2（AO PPE2 PV Sol），在2023年法国光伏标准修订后，该招标计划要求的碳足迹评估也随之更新。

图8：光伏组件专用标准颁布时间线

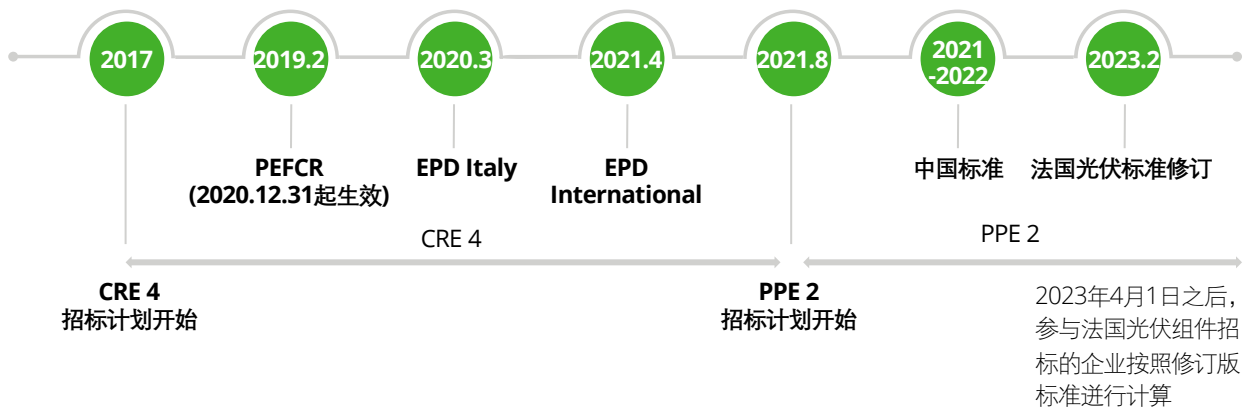


表2: 不同光伏组件专用标准对比

标准名称	Electricity Produced by Photovoltaic Modules	Electricity, steam and hot/cold water generation and distribution	Photovoltaic Modules used in Photovoltaic Power Systems for Electricity Generation (PEFCR)	法国PPE2文件光伏组件碳足迹标准	中华人民共和国电子行业标准 产品碳足迹 产品种类规则 光伏组件
发布机构	EPD Italy	EPD international	欧盟委员会	法国能源监管委员会	中华人民共和国工业和信息化部
适用产品	<ul style="list-style-type: none"> 单晶硅板 多晶硅板 非晶硅板 其他晶型的硅板, 主要用于住宅或工业发电 不包括不用于住宅或工业发电的光伏板 	<ul style="list-style-type: none"> N/A 	<ul style="list-style-type: none"> 适用于在欧盟和欧洲自由贸易联盟销售的产品 碲化镉光伏组件(CdTe) 铜铟镓硒光伏组件(CIS/CIGS) 微晶硅光伏组件(micro-Si) 多晶硅光伏组件(multi-Si) 单晶硅光伏组件(mono-Si) 	<ul style="list-style-type: none"> 无框光伏组件 (光伏层压板), 包括晶硅组件和薄膜组件; 峰值功率只考虑组件正面(不考虑背面)。 	<ul style="list-style-type: none"> 晶体硅光伏组件产品
包含的产品组件	<ul style="list-style-type: none"> N/A 	<ul style="list-style-type: none"> N/A 	<ul style="list-style-type: none"> 光伏电池 半导体层(薄膜技术) 基板和覆盖材料(玻璃、塑料薄膜) 连接件(用于电池的相互连接) 电缆(用于组件的相互连接) 框架 	<ul style="list-style-type: none"> 冶金级硅 多晶硅 硅锭 硅砖 硅片 电池片 电池板 玻璃和钢化玻璃 封装材料(EVA, POE或其他) 背板材(PET, PVF, POE或其他) 	<ul style="list-style-type: none"> N/A

标准名称	Electricity Produced by Photovoltaic Modules	Electricity, steam and hot/cold water generation and distribution	Photovoltaic Modules used in Photovoltaic Power Systems for Electricity Generation (PEFCR)	法国PPE2文件光伏组件碳足迹标准	中华人民共和国电子行业标准 产品碳足迹 产品种类规则 光伏组件
功能单元	在使用寿命期间发电量平均到1 kWh	在使用寿命期间发电量平均到1 kWh	在使用寿命期间发电量平均到1 kWh	1 kWc光伏组件产品	1 kWc光伏组件产品
RSL寿命	30年	30年	30年	N/A	N/A
系统边界	<p>摇篮到坟墓</p> <ul style="list-style-type: none"> 上游：原材料获取阶段与运输； 核心阶段：组件生产制造、组件生产过程排放的污染物、组件包装材料的获取及运输、组件成品分销（至安装地点）、电站建设材料的获取及运输、安装组件&建设电站能耗、安装及建设过程排放的污染物、组件&电站运维材料的获取、组件&电站运维能耗、组件&电站运维过程产生的污染物、组件及电站拆解耗费材料、组件及电站拆解耗费能耗、拆解废弃物的运输（至处理厂）； 下游：电力传输能耗损失、配电系统建设、运维、处置产生的环境影响。 	<p>摇篮到坟墓</p> <ul style="list-style-type: none"> 上游：组件&电站运维材料的获取； 核心阶段：组件原材料的获取及运输、组件生产制造、组件生产过程排放的污染物、组件包装材料的获取及运输、组件成品分销（至安装地点）、电站建设材料的获取及运输、安装组件&建设电站能耗、安装及建设过程排放的污染物、组件&电站运维能耗、组件&电站运维过程产生的污染物、组件及电站拆解耗费材料、组件及电站拆解耗费能耗、拆解废弃物的运输（至处理厂）； 下游：配电系统建设、电力传输能耗损失。 	<p>摇篮到坟墓</p> <ul style="list-style-type: none"> 原材料的获取及预处理：组件原材料的获取及运输、组件包装材料的获取及运输、组件生产制造、组件生产过程排放的污染物、电站建设材料的获取； 分销阶段：组件成品分销（至安装地点）、电站建设材料的运输； 电站建设阶段：安装组件&建设电站能耗、安装及建设过程排放的污染物； 使用阶段：组件&电站运维材料的获取、组件&电站运维能耗、组件&电站运维过程产生的污染物、电力传输能耗损失 尾端处理阶段：组件及电站拆解耗费材料、组件及电站拆解耗费能耗、拆解废弃物的运输（至处理厂）。 	<p>摇篮到大门（简化）</p> <ul style="list-style-type: none"> 冶金级硅生产，多晶硅生产，硅锭生产，硅砖生产，硅片生产，电池片生产，电池板生产，玻璃和钢化玻璃生产，封装材料生产（EVA，POE或其他），背板材料生产（PET，PVF，POE或其他）。 	<p>摇篮到坟墓</p> <ul style="list-style-type: none"> 原辅材料获取阶段：电池片、封装玻璃、封装胶膜等原辅材料生产过程及运输到组件生产企业过程； 能源获取阶段：柴油、电力等能源的开采、加工与生产过程及运输到组件生产企业过程； 组件生产阶段：光伏组件产品生产所涵盖的全部工序，不包括厂区内人员及生活设施； 使用阶段：产品出厂后的运输、安装、运维等过程； 尾端处理阶段：光伏组件的报废、回收、循环利用与最终处置等过程。

光伏组件全生命周期阶段介绍

对光伏组件而言，按照系统边界可以分为“从摇篮到大门”，即从原材料开采到光伏组件制造和分销的过程；“从摇篮到坟墓”，即从光伏组件原材料获取及运输、光伏组件生产制造、分销、电站建设、使用到尾端处理的全过程（见图9）。

• 原材料获取与预处理

该阶段主要包括太阳能电池片、光伏玻璃、背板材料、封装材料、接线盒、边框、硅胶和其他材料（包括包装材料或与最终产品生产相关的任何相关材料）的获取及运输。该阶段主要资源消耗为太阳能电池片、背板、钢化玻璃等；消耗的能源主要为电能，包括开采和运输阶段；产生的污染物主要有废气和固体废弃物等。

• 组件生产制造

晶硅光伏组件的制造主要是将电池片、光伏玻璃、背板材料、光伏焊带、接线盒、封装胶膜、铝边框和硅胶等组装成组件的过程。制造过程主要包括光伏焊带、层压、去毛边（去边、清洗）、装边框（涂胶、装角键、冲孔、装框、擦洗余胶）、焊接接线盒、高压测试、组件测试-外观检验、包装入库。该阶段的消耗的能源主要是组装光伏组件所需的电耗和热能；产生的污染物主要有层压阶段产生的少量废气；还有少量固体废弃物，包括焊接废弃物、一般废弃物。

• 分销

该阶段主要指组件成品分销至安装地点的过程，也就是将光伏组件运输到太阳能电站的过程。该阶段的排放来源于运输能耗。

• 电站建设

该阶段包括电站建设材料的获取及运输，光伏组件的安装及电站的建设。光伏电站是利用太阳光能、采用特殊材料诸如晶硅板、逆变器等电子元件组成的发电体系，与电网相连并向电网输送电力的光伏发电系统。光伏电站的建设材料可分为机械系统平衡部件（BOS）、电气BOS和其他材料；其中，机械BOS包括如框架、紧固装置、支架、安装结构、储水箱等，电气BOS包括逆变器、电缆、开关、电池等。其他基础设施包括地基、道路等。

电站的建设共7个分部工程：支架基础、支架安装、组件安装、逆变器安装、屏柜安装、电缆敷设、防雷与接地安装。该阶段主要资源消耗为上述提及的机械BOS、电气BOS和其他材料等；消耗的能源主要为电能，包括安装组件和建设电站的能耗；产生的废弃物主要有废气和固体废弃物等。

• 运维阶段

该阶段主要涵盖光伏电站的日常运营和维护，包括清理组件表面的灰尘及其他遮挡物同时应根据具体的运行情况进行清洗、检查、维护等。该阶段主要资源消耗为组件和电站运维材料，清理组件的水耗等；主要消耗的能源包括组件试运行的电耗等。

• 使用阶段

该阶段主要指光伏发电站将太阳能转化为电能后，电能从电站输送到用户端的过程。该阶段的排放主要来源于电力传输能耗损失。

• 尾端处理

该阶段涵盖了光伏组件及电站的拆解，废弃物运输至处理厂，废弃物回收利用以及拆解废弃物的报废处理。该阶段的排放来源于拆解过程耗费的材料和能耗，运输废弃物的运输能耗，回收处理废弃物的物料投入与能耗。

图9: 光伏组件全生命周期示意图（绿框为“从摇篮到大门”）

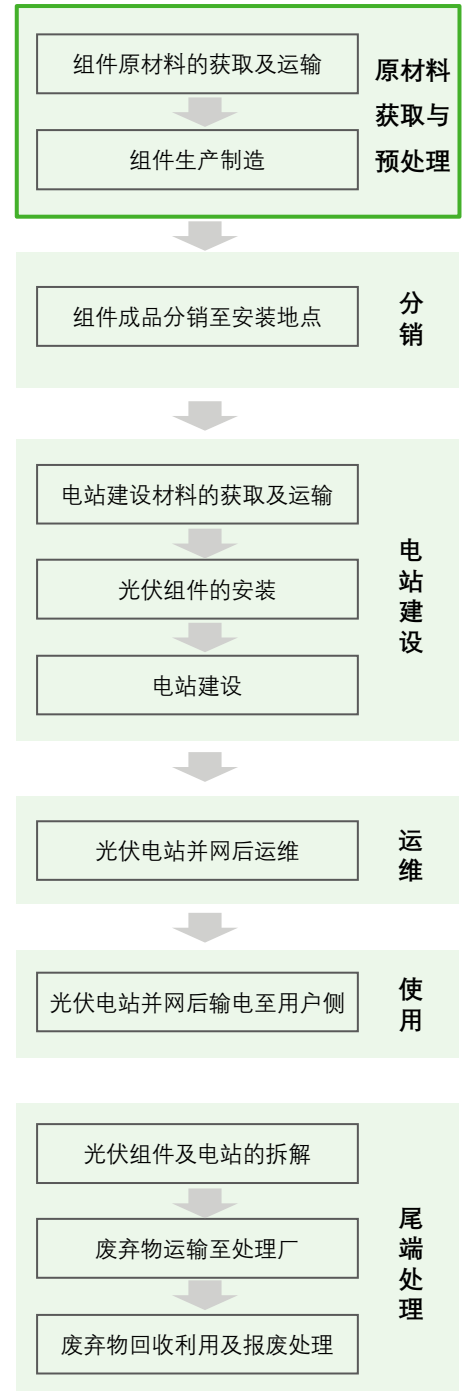
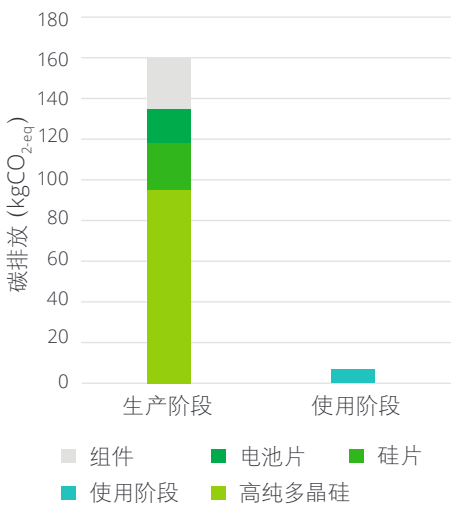




图10: 光伏生产阶段和使用阶段的碳排放对比



资料来源: 文献

尾注

4. 光伏行业生命周期碳排放清单分析 赵若楠

LCA评估界限与范围

光伏组件是光伏发电系统的核心部件,可将太阳能转为直流电。根据文献报告⁴,光伏组件在运输到发电站后,电站的使用和维护阶段的碳排放几乎是“从摇篮到大门”的碳排放的1/20,排放很少。不同体系对于LCA的评估范围不同,对于EPD和PEFCR体系,关注的碳足迹范围覆盖“从摇篮到坟墓”,对于法国体系,关注的碳足迹范围聚焦在“从摇篮到大门”。本报告后续对光伏产品的碳排放分析时,将光伏组件作为研究对象,生命周期关注“从摇篮到大门”和“从摇篮到坟墓”。

数据来源

目前,虽然全球光伏行业总体呈快速向上发展态势,但只有少数公司披露了光伏组件全生命周期的材料消耗、能源消耗和碳排放数据。此外,不同国际标准对光伏组件碳足迹核算方法存在差异,功能单元的定义也不尽相同,各标准的默认因子值差异较大,这些因素均可能导致相同光伏产品的碳足迹结果不同。

本报告基于相关文献、行研报告和国内外数据库等,获取光伏产业链产品全生命周期各阶段数据信息。通过整理数据,分析不同类别光伏产品碳足迹变化趋势,并挖掘排放热点,同时分析降低光伏产品碳足迹的可行方式。



光伏组件生命周期碳排放分析

为提高生产效率和产品质量，企业正逐步探索更高效先进的生产技术；同时，考虑到碳排成本，越来越多的企业开始注重实现环境友好的生产方式，关注光伏组件生命周期的碳排。本章针对光伏组件从摇篮到大门的碳足迹趋势进行分析。识别光伏组件的生命周期碳排放热点，同时挖掘减少光伏产品环境影响的关键环节和影响主要因素，为光伏低碳发展提供可行路径。

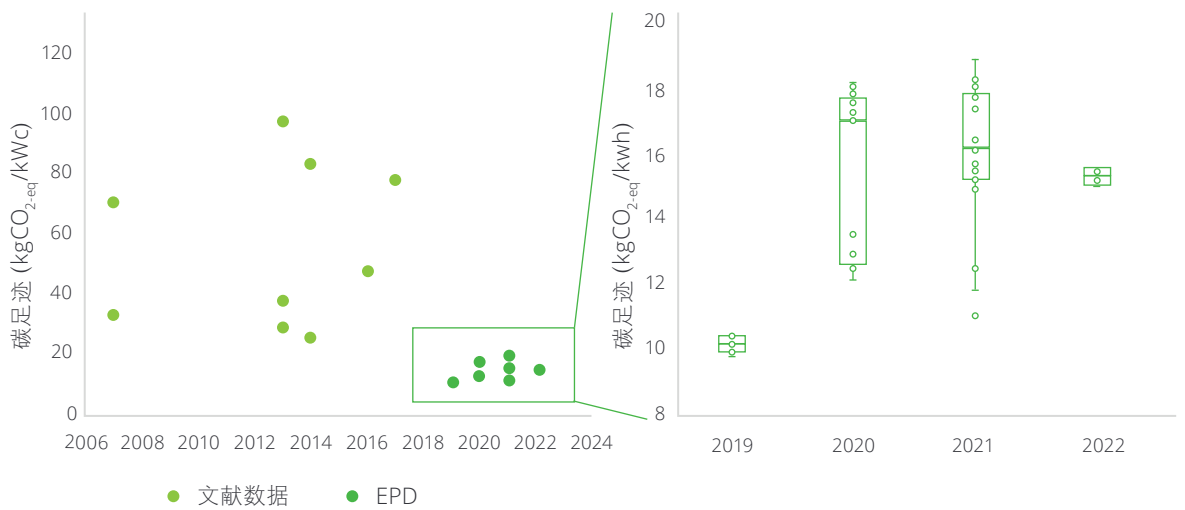
光伏组件跨期碳足迹分析

据国内外学者的研究结果，我们对单位光伏组件功率 (kWc) 碳排放进行了对比分析。假设每片电池片功率为4 Wc，并且国内电力碳排水平为900 gCO_{2-eq}/kWh。整体来看，中国单位光伏组件产品碳排放呈下降趋势。从2011年的平均2900 kgCO_{2-eq}/kWc^{5,6}，到2015年的平均2080 kgCO_{2-eq}/kWc^{7,8}，再到2016年的平均1940 kgCO_{2-eq}/kWc^{9,10}，以及2017年的平均1680 kgCO_{2-eq}/kWc^{11,12,13}，进一步发展至2018年的平均1490 kgCO_{2-eq}/kWc^{14,15,16}，最终在2020年单面光伏组件碳排1220 kgCO_{2-eq}/kWc，双面光伏组件碳排1230 kgCO_{2-eq}/kWc¹⁷。需要指出的是，各年间仍存在一定差异，这主要是产品类型（多晶、单晶）、工艺路线（改良西门子法、硅烷流化床法）以及碳足迹核算方法的不统一所导致的。

由于光伏行业的迅速发展，许多生产工艺和技术仍处于更新迭代的阶段，大部分企业不愿公开其生产过程的工艺细节和能耗等原始数据。

本报告收集、整理并分析了从2007年至2023年不同型号光伏组件的LCA研究数据，基于光伏电站规模 (GW)，光伏电站年发电量 (GWh)，光伏组件效率 (%)、功率输出范围 (W) 等基本信息，核算了从“摇篮到坟墓”的光伏组件碳排放，提供了光伏组件生产的详细结果。此外，这些文献均使用光伏组件产品在使用寿命期间发电量平均到1 kWh作为功能单元来衡量不同类型光伏组件的碳足迹。

图11: 2007-2022年光伏组件碳足迹趋势图(左), 2019-2022年光伏组件碳足迹箱型图(右)

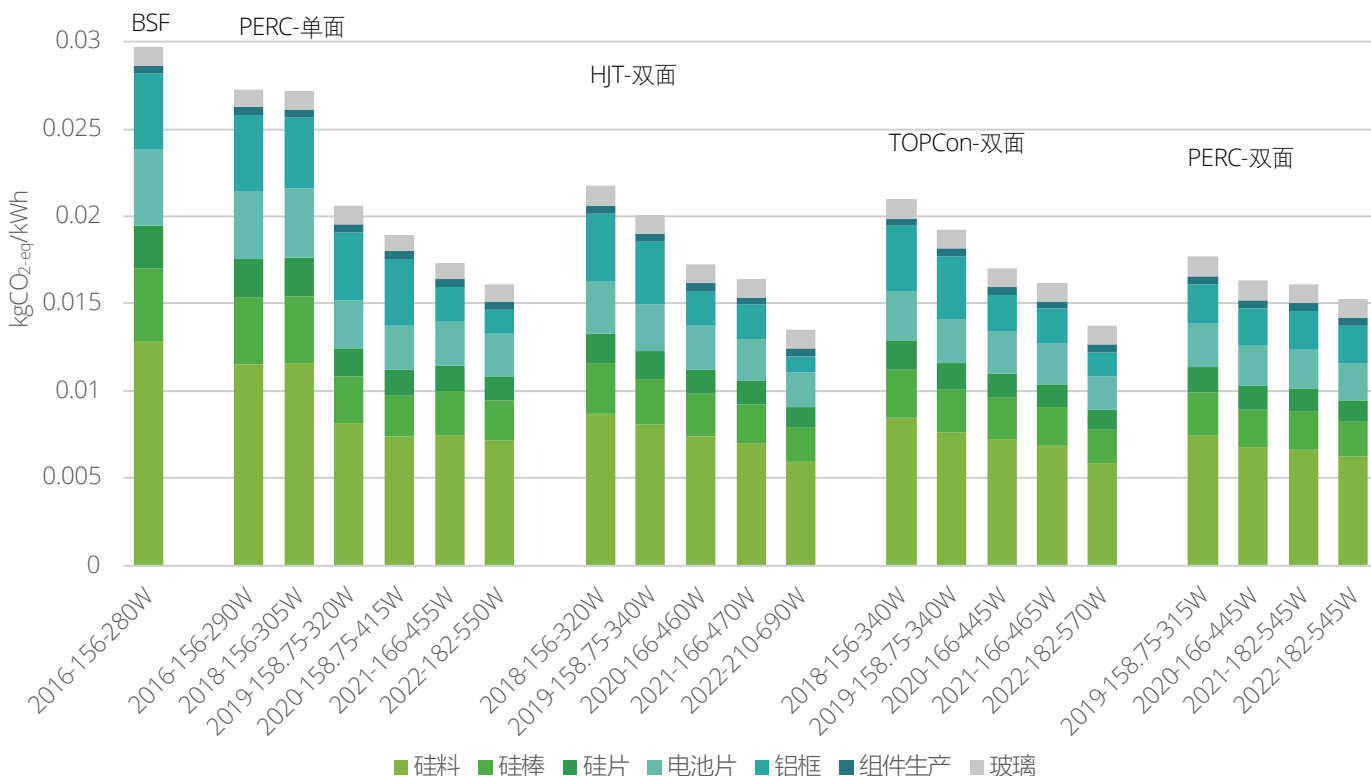


资料来源: 根据相关文献、公开数据整理

随着生产技术和能源转型, 光伏组件的碳足迹呈下降趋势。根据文献和认证证书的发布时间, 图11左图展示了2007-2023年间的光伏组件“从摇篮到坟墓”的碳足迹数据。有效的EPD数据始于2019年, 而关于中国光伏组件碳足迹的文献数据则始于2007年。在国际上明确光伏组件碳足迹计算方法学之前, 对于光伏组件碳足迹的核算存在较大的不确定性, 且数据质量参差不齐。随着EPD的实施, 碳足迹核算方法学得到完善, 单位过程数据的确定和不

确定性得到详细规定, 建立了可靠的LCA框架, 使得光伏组件碳足迹核算结果更具有可比性和数据稳定性, 同时披露了更多的碳足迹数值(见图11右)。在EPD Italy和international EPD推行之后, 由于方法学的标准化和统一, 中国出口的光伏组件碳足迹核算值显著降低。2007-2017年平均碳足迹为58.03 gCO_{2-eq}/kWh, 而到了2019-2023年, 平均碳足迹下降至15.86 gCO_{2-eq}/kWh。

图12: BSF、PERC-单面、HJT-双面、TOPCon-双面和PERC-双面的碳足迹变化趋势



另外,光伏组件碳足迹的逐年降低也得益于高效太阳能电池技术的进步。新一代太阳能电池,具有更高的能量转换效率,在相同的光照条件下可产生更多的电能,减少制造过程中原材料和能源消耗。2016年-2022年,BSF、PERC-单面降幅达38%,HJT-双面以及TOPCon-双面降幅达27%(图12)。

在光伏组件制造过程中,材料的选择和使用对碳足迹有重要影响。随着研发的推进,越来越多的环保友好型材料被应用于光伏制造中,以减少生产过程中的碳排放,例如可回收材料、低碳材料和有机材料等。能源消耗也是影响碳足迹的关键因素。随着清洁能源技术的进步,生产过程中使用的电力来源于可再生能源的比例逐渐增加,这有助于降低整个制造过程的碳排放。循环经济模式的推广也在降低光伏组件碳足迹中发挥着重要作用。通过回收利用废弃的光伏组件和材料,减少了资源的浪费,降低了对新材料的需求,从而减少了整个产业链的碳排放。

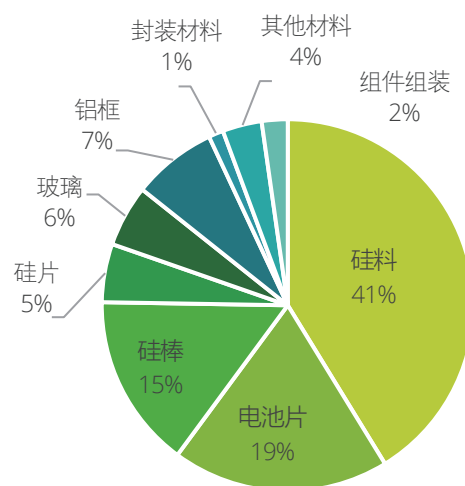
光伏组件碳排热点分析

光伏组件的碳排放是衡量其对环境的影响和可持续性的重要指标。为了更准确地了解光伏组件的碳排情况,挖掘减排路径,我们需要从全产业链的角度分析光伏组件碳排。

光伏组件的碳排主要来源于4大部分。如图13所示,光伏组件的碳排放主要来自于其生产过程中消耗的电能和原材料,其中最大的碳排源是硅料生产,占比41%。其次是硅棒拉晶及硅片切割,占比20%。再次是电池片生产,占比19%。其余的碳排源是铝框生产和玻璃生产,分别占比7%和6%。而组件组装碳排占比只有2%。

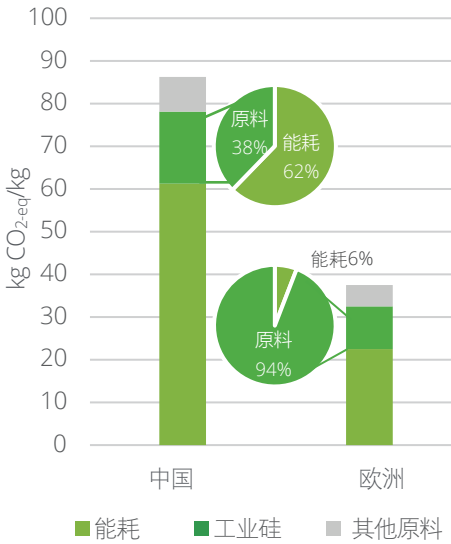
为了更深入地分析光伏组件的碳排放,我们将对这几个环节进行单独的研究,探讨其碳排放的影响因素和未来趋势。

图13: 1 kWc光伏组件碳排占比



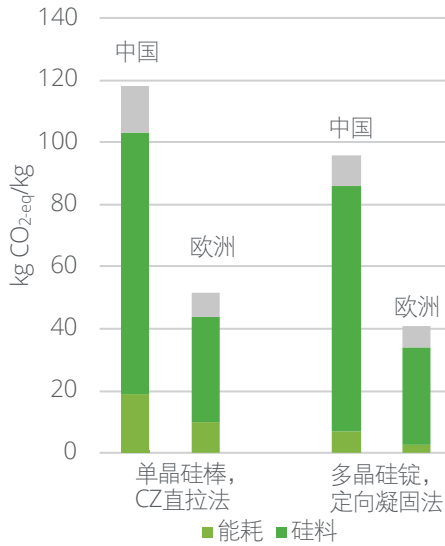
数据来源: 根据公开数据收集整理

图14: 不同区域硅料碳排对比



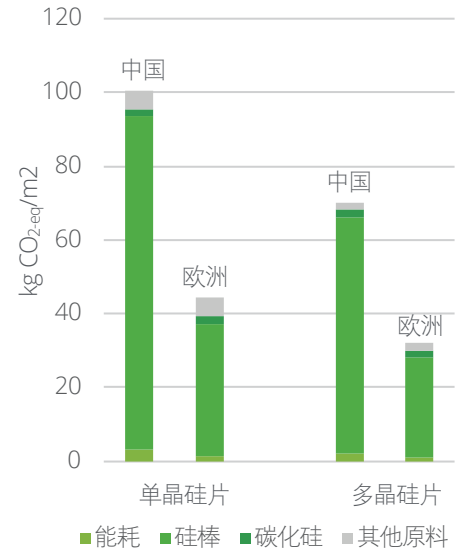
数据来源: 权威国际数据库, CPIA

图15: 不同区域单晶硅棒和多晶硅锭碳排对比



数据来源: 权威国际数据库, CPIA

图16: 不同区域单晶和多晶硅片碳排对比



数据来源: 权威国际数据库

硅料生产

硅料生产是光伏组件的主要碳排放源,其碳排放主要取决于其耗和原料的碳足迹。如图14所示,硅料生产过程中,中国能耗所占的碳排占比高达70%以上,而欧洲的能耗所占的碳排比例仅为55%,两者之间的碳排差距近40 kg。这主要是由于中国的电网碳排因子非常高,达到1kg CO₂-eq/kWh,而欧洲的电网碳排因子仅为0.35kg CO₂-eq/kWh,是中国的一半不到。

除了能耗之外,硅料生产的另一个重要的碳排放源是工业硅,需要经过冶炼、精炼等工艺。中国和欧洲的工业硅的碳排占比都在20%左右,但是两者的碳排结构有很大的差别。中国的工业硅碳排中,有62%来自能耗,而欧洲工业硅的碳排中,仅有6%来自能耗。这说明,中国的工业硅生产过程中,也存在着能源结构的问题,需要使用更为清洁绿色的能源,以降低工业硅的碳足迹。

硅棒/硅锭制备及硅片切割

硅棒/硅锭制备和硅片切割是光伏组件的第二大贡献源,其碳排放与其能源消耗和材料利用率密切相关。目前中国单晶硅棒拉晶的电耗约为22 kWh/kg,多晶硅锭铸造电耗约为6.5 kWh/kg,硅片切割电耗约为6.5 kWh/百片,这些会带来大量的碳排放。此外,硅片切割过程中使用的金刚线,其主要成分是碳化硅,也是一个重要的碳排放源。另外,硅棒切割成硅片的过程中,也会造成一定的硅料损耗,也增加了碳排放。

硅棒/硅锭的碳排放水平也与其类型和产地有关。一般来说,单晶硅棒的碳排放高于多晶硅锭,因为单晶硅棒的生产过程更为复杂,需要更多的电能和化学品。如图15,在中国,单晶硅棒的碳排放为120 kgCO₂-eq/kg,而多晶硅锭的碳排放为100 kgCO₂-eq/kg。同时,不同国家和地区的硅棒/硅锭的碳排放水平也有差异,中国地区硅棒/硅锭的碳排放高于欧洲。

不同类型及地区的硅片碳排也有差异。单晶硅片的碳排高于多晶硅片,这主要是由于单晶硅片的生产工艺更为复杂,中国单晶硅片为100.51 kgCO₂-eq/m²,而多晶硅片70.2 kgCO₂-eq/m²。另外,不同国家和地区硅片的碳排放水平也有差异,中国硅片显著高于欧洲(单晶硅片44.3 kgCO₂-eq/m²,多晶硅片32kgCO₂-eq/m²) (图16)。

图17: BSF, PERC-单面, PERC-双面电池片碳足迹变化趋势¹⁸

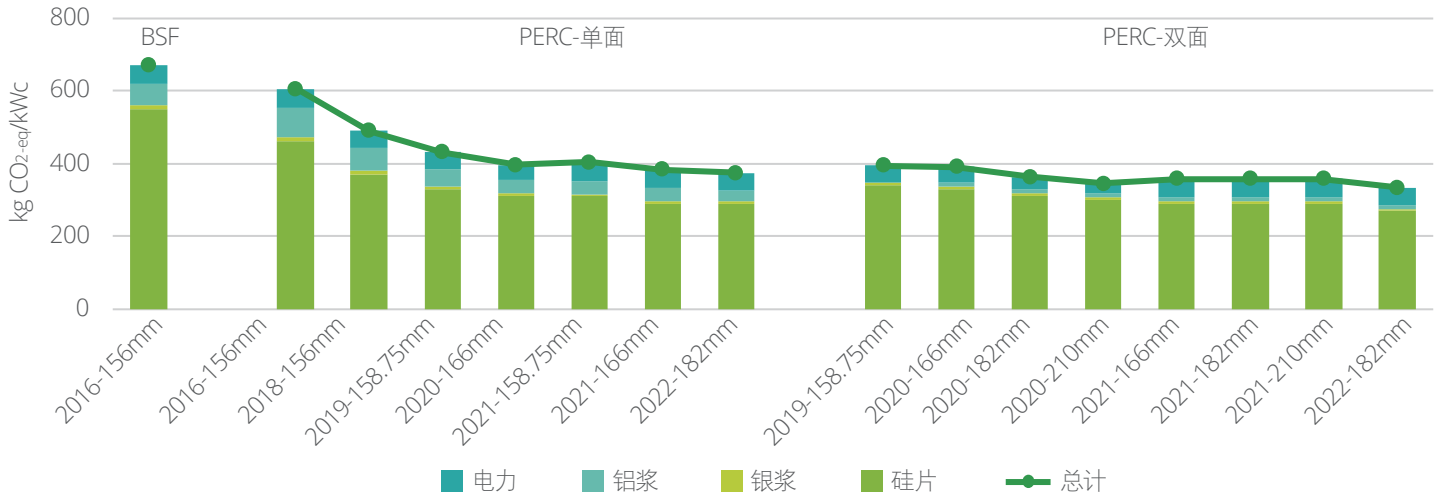
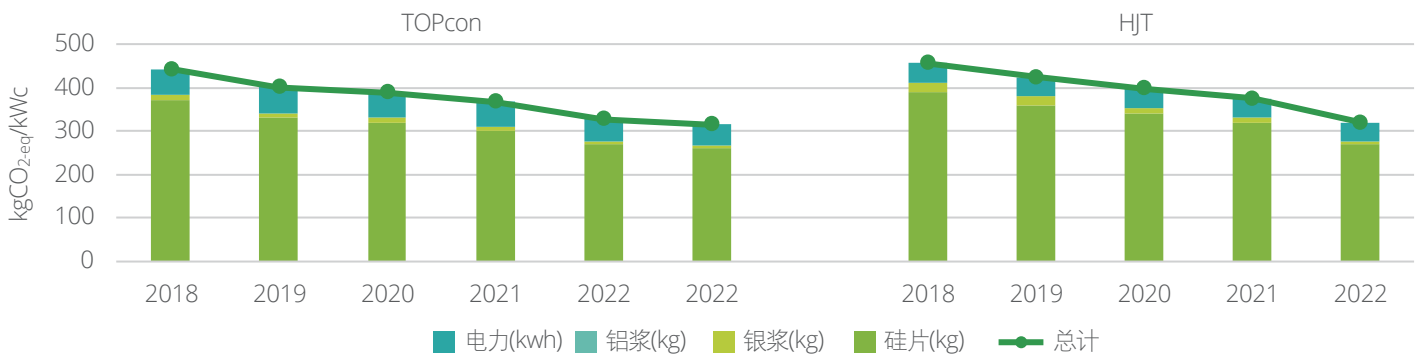


图18: TOPcon, HJT电池片碳足迹变化趋势



电池片生产

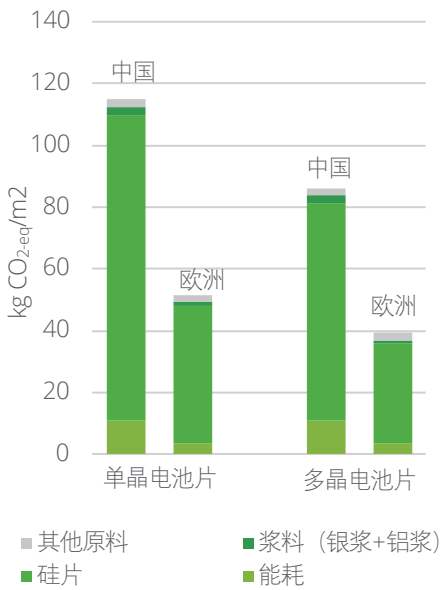
电池片生产是光伏组件碳排的第三大来源，电池片的碳排来源主要是消耗的电力和材料。电池片生产需消耗4.8万 kWh/MW，这带来了大量的碳排放。此外，电池片的制造需要使用一些稀有金属和材料，如银、铝等，这些材料的开采和提炼过程通常涉及到能源密集型的活动，例如矿石开采、冶炼和精炼，这些过程产生了大量的CO₂等温室气体排放，导致电池片的碳排放很高。

2016-2019年，由于工艺优化，P型电池片碳足迹降幅明显，2019年后，由于大规模生产，整体碳足迹变化趋于平缓。2016年，156mm BSF电池片碳足迹为680 kg CO_{2-eq}/kWc，而PERC-单面碳足迹为610 kg CO_{2-eq}/kWc，下降了70 kg CO_{2-eq}/kWc。而对于PERC-单面电池片，从2016年-2019年，随着尺寸不断变大，银浆铝浆用量逐渐下降，碳足迹也降低了38%；2019年后，PERC-单面及PERC-双面碳足迹趋于平缓；2022年，由于硅片厚度明显减薄，碳足迹再次下降（图17）。

从2018年起，N型电池片碳足迹逐年降低，同年份，HJT碳足迹普遍高于TOPcon碳足迹（图18）。2022年，TOPcon电池片碳足迹相较2018年，下降了28.86%，HJT电池片碳足迹下降了28.14%。另外由于HJT电池片银浆用量高于TOPcon电池片，所以同年份，HJT碳足迹高于TOPcon，但由于HJT理论效率更高，后续降碳潜力更大。

电池片的碳排放水平也与其类型和产地有关。对于电池片，无论单晶还是多晶光伏组件，中国地区的电池片碳排都显著高于欧洲地区。中国单晶电池片碳足迹比欧洲高 56.21 kgCO_{2-eq}/m²，多晶电池片碳足迹高 38.2 kgCO_{2-eq}/m²。

图19: 不同区域单晶和多晶电池片碳排放对比



数据来源: 权威国际数据库

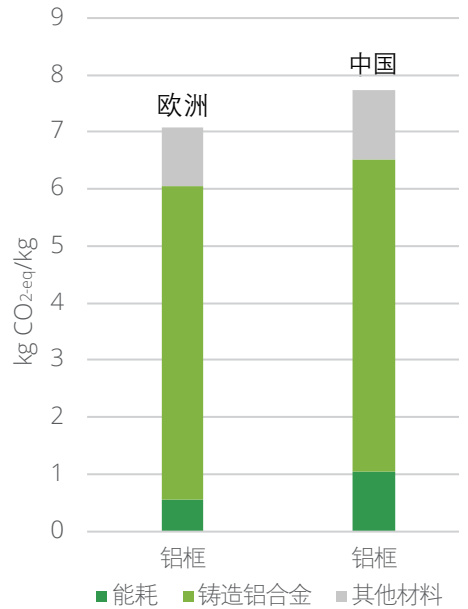
铝框生产

铝框是光伏组件原材料获取阶段第四大来源。铝框的制造过程也会涉及到能源密集型的活动，例如铝土矿的开采、精炼和铝材的生产等，这些过程也会产生大量的CO₂等温室气体排放。

中国地区铝框的碳排高于欧洲地区。如图20，可以发现，中国地区铝框的碳排在 8 kg CO_{2-eq}/kg，欧洲地区在 7 kg CO_{2-eq}/kg，差异不大。但法国政府在今年9月20日法国发布的新能源乘用车环境评分细则与获得生态奖励的资格条件的法令中，定义中国铝材的碳排因子是 20 kg CO_{2-eq}/kg，而欧洲仅有 2 kg CO_{2-eq}/kg，这无疑给中国铝材企业设定了“碳壁垒”。

以上造成国家间硅料生产、硅棒/硅锭制备、硅片切割、电池片生产和铝框生产的碳排差异，主要原因是，不同国家和地区的能源结构和生产工艺可能存在差异，导致碳足迹的不同。数据库中其他国家电力因子比中国的电网因子低 0.3-0.7 kgCO_{2-eq}/kWh。除此之外，一些国家和地区可能在生产工艺和能源效率方面更加先进，从而减少了生产过程中的碳排放。

图20: 不同区域铝框碳排放对比



数据来源: 权威国际数据库

尾注

- 刁周玮, 石磊. 中国光伏电池组件的生命周期评价 [J]. 环境科学研究, 2011, 5:571-572。
- 詹晓燕, 多晶硅—光伏系统全生命周期碳排放研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2011。
- 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.
- Yang D, Liu J R, Yang J X, et al. Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,94:35-45.
- Hou G F, Sun H H, Jiang Z Y, et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China [J]. Applied Energy, 2016,164:882-890.
- Hong J L, Chen W, Qi C C, et al. Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China [J]. Solar Energy, 2016,133:283-293.
- Yu Z Q, Ma W H, Xie K Q, et al. Life cycle assessment of gridconnected power generation from metallurgical rout multi-crystalline silicon photovoltaic system in China [J]. Applied Energy, 2017,185:68-81.
- 何津津, 基于生命周期评价的光伏发电碳排放研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017。
- 翁琳, 陈剑波. 光伏系统基于全生命周期碳排放量计算的环境与经济效益分析 [J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(3):282-288。
- Xu L, Zhang S F, Yang M S, et al. Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011~2016: A life cycle assessment approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,170:310-329.
- 于志强, 马文会, 魏奎先, 等. 冶金法多晶硅光伏系统能量回收期与碳足迹分析 [J]. 太阳能学报, 2018,39(2):520-528。
- 陈娴, 黄蓓佳, 王翔宇, 等. 太阳能光伏组件环境成本的货币化核算研究 [J]. 复旦学报(自然科学版), 2019,58(1):120-126。
- 陈大纪, 庄天奇, 裴会川, 等. 单面和双面光伏组件环境影响对比分析 [J]. 信息技术与标准化, 2022(12):26-30。
- 贾晓洁, “常规p型多晶硅光伏组件的全生命周期评价报告”。

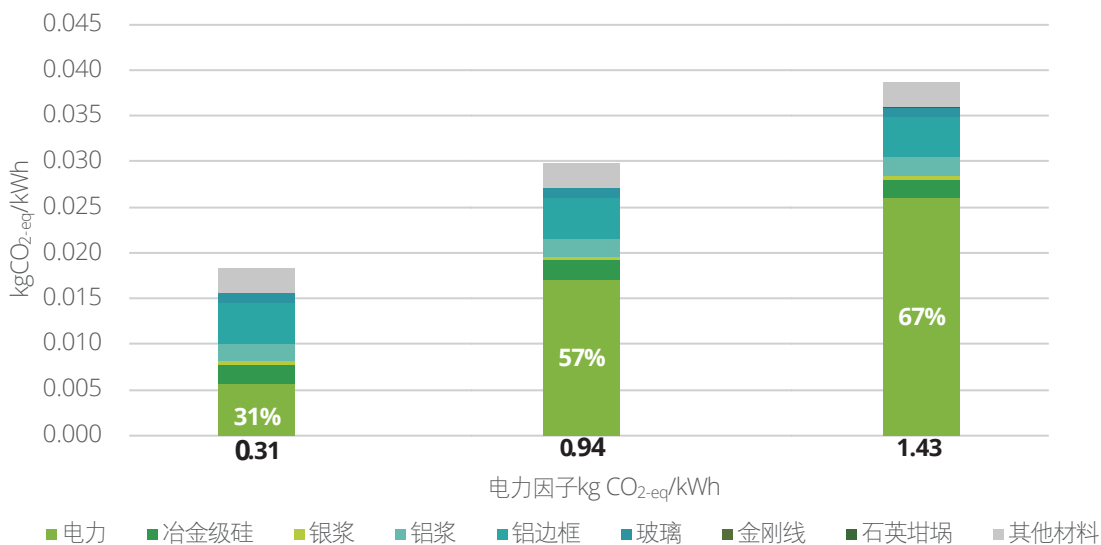
光伏组件碳减排探索

调整能源结构

电力的碳排放取决于当地的电力能源结构。不同的区域由于具有特定的电力组合，即使是同款组件在不同地区制造，碳足迹也会有差别。以中国为例，中国南方区域清洁能源的占比非常高，这主要是由于在四川，云南等地，中国的水电十分发达，而北方区域清洁能源的占比最低，因而在国际数据库中，中国重庆，四川，西藏三地的电力因子仅有0.308 kg CO_{2-eq}/kWh，内蒙，辽宁，吉林，黑龙江则为1.43 kg CO_{2-eq}/kWh。国际权威因子库中，中国平均电网因

子为0.941kgCO_{2-eq}/kWh，目前中国虽无权威的全生命周期电力排放因子，但生态环境部发布的2021年省级电力二氧化碳排放因子范围为0.1235-0.7901 kgCO_{2-eq}/kWh。由此体现，中国近年大力发展清洁能源的成效尚未完全体现在国际产品全生命周期因子库中。图21反映了冶金级硅-硅料-硅棒-硅片-电池片-光伏组件全产业链的电力的碳足迹占比，电网因子若按照辽宁等东北地区的1.43 kgCO_{2-eq}/kwh计算，则电力碳排占比达到67%，电网因子若按照四川等西南地区计算，则电力碳排占比31%。

图21: 光伏组件全产业链碳足迹分析





因时间和能源政策的变化，各国电网能源结构也在不断变化。欧洲电网平均碳排放因子的一般估计值在0.2-0.5 kgCO_{2-eq}/kWh，低于美国的0.4-0.8 kgCO_{2-eq}/kWh和韩国、日本、中国的0.5-1.2 kgCO_{2-eq}/kWh。

不同能源结构供应下光伏组件的碳排放量有显著差异。一般来说，使用化石能源（如火电）作为背景能源的光伏组件具有最高的碳排放，而使用可再生能源（如风能、水电、光伏）作为背景能源的光伏组件具有最低的碳排放。

具体来说，据Pierre等的研究，以火电为背景能源的光伏系统的碳排放量接近100g CO_{2-eq}/kWh，而以核能、水电、风能和光伏为背景能源的光伏系统的碳排放量分别为25g、15g、10g和5g CO_{2-eq}/kWh¹⁹。同样，根据李鹤等的研究，针对6个国家（中国、德国、日本、美国、瑞士和法国）的电网进行了对比分析，发现中国光伏产品碳足迹的最高，为68.8g CO_{2-eq}/kWh，法国最少，为6.7g CO_{2-eq}/kWh，原因是中国电力构成中火电的比例较大，而法国电力构成中核能的比例较大²⁰。

使用绿电能够显著降低光伏系统碳足迹。相较于传统电力排放因子，由于绿电完全由可再生能源生产，其排放因子几乎为0。

远景科技集团的零碳产业园模式提供了一种很好的解决方案。零碳产业园内的风机、光伏、储能与智能物联网协同形成的清洁、稳定、高效的新型电力系统，为组件原材料生产、组装过程提供100%零碳能源供给。同时，直供入驻园区内的组件上游合作伙伴，降低硅料，硅片，电池片等高耗能制造环节的碳排放，实现整个光伏产业链的低碳甚至是零碳。基于EnOS智能物联操作系统打造的零碳数字认证系统，赋予园区内产品可追溯溯源、符合各类国际标准、经过权威机构认证的“零碳绿码”，以应对国际绿色壁垒。

优化技术路径

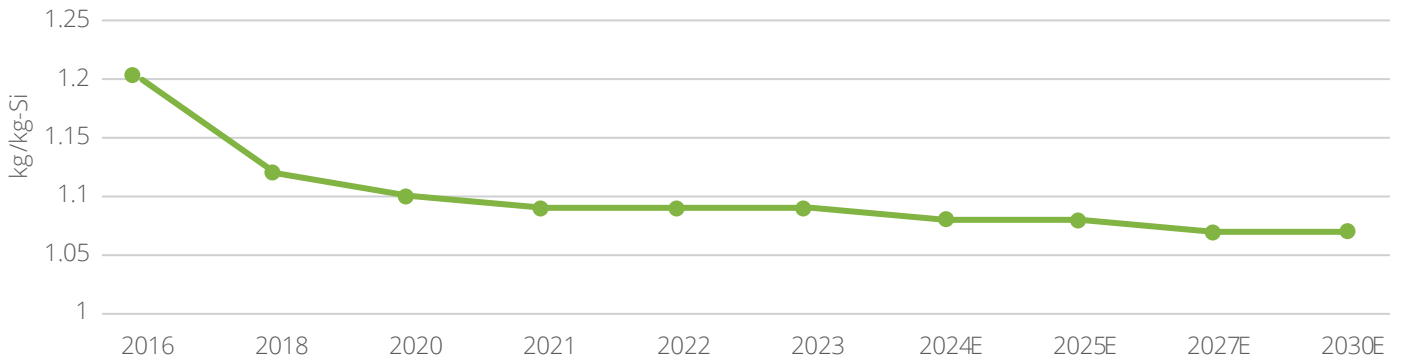
对于企业而言,当前光伏组件减排核心点主要集中于优化产业链生产工艺,节能降耗;降低硅片厚度,提高硅片尺寸、提高组件效率三个方面:

优化硅料及硅棒生产工艺,节能降耗

硅料生产,硅棒拉棒都需耗费大量的能源和资源,对该过程优化可有效降低光伏组件碳足迹。

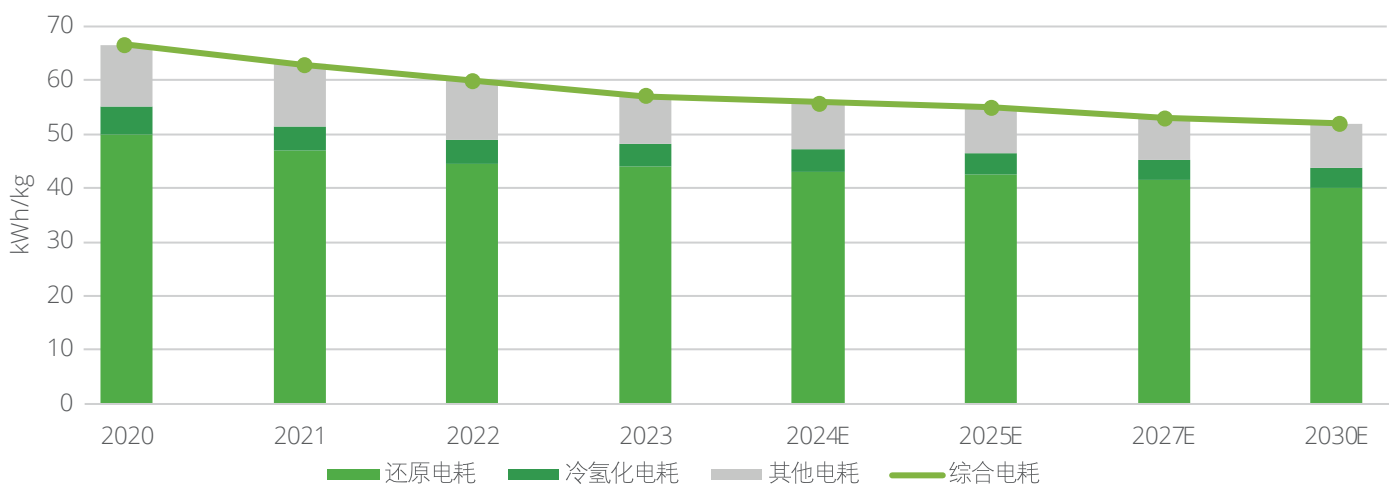
采用自动化、机器学习等智能制造技术,可使生产线运行更为高效,从而有效降低改硅料生产和硅棒拉制过程的电耗和硅耗。2016年,生产1 kg硅料耗费1.2 kg工业硅,2022年,硅耗水平下降至1.09 kg/kg-Si,同比下降9.1%。预计到2030年,硅耗水平下降会至1.07 kg/kg-Si(图22)。能耗方面,2022年,多晶硅的平均综合电耗约为60 kWh/kg,与2020年相比同下降11%,未来随着生产装备技术提升、系统优化能力提高、生产规模增大等,预计至2030年有望下降至52 kWh/kg-Si(图23)。

图22: 2016年-2030年每生产1 kg硅料工业硅硅耗情况



数据来源: 公开文献资料

图23: 2016年-2030年每生产1 kg硅料能耗情况



数据来源: 公开文献资料

单位硅耗和能耗的降低带来硅料的整体碳排逐年降低。2016年，硅料碳排总计95.88 kg CO_{2-eq}/kg，其中生产制造部分碳排占比79%，工业硅碳排占比16%；到2022年，总碳排下降至74.63 kg CO_{2-eq}/kg，同比下降22.16%。预计至2030年，硅料的总碳排有望下降至66.34 kg CO_{2-eq}/kg (图24)。

拉棒方面，拉棒能耗将逐年降低。2016年，行业拉棒电耗约为36 kWh/kg，2022年，下降至24.4 kWh/kg，同比下降32.2%，未来随着热场改善，保温性能提升，设备自动化、智能化发展，预计到2030年，拉棒电耗将下降至19.8 kWh/kg (图25)。

单位硅耗和能耗的降低带来硅棒的整体碳排逐年降低。2016年，硅棒碳排总计141.25 kg CO_{2-eq}/kg；到2022年，总碳排下降至105.05 kg CO_{2-eq}/kg，同比下降25.63%。预计至2030年，硅棒的总碳排有望下降至89.61 kg CO_{2-eq}/kg (图26)。

图24: 2016年-2030年单位硅料碳排情况 (kgCO_{2-eq}/kg)

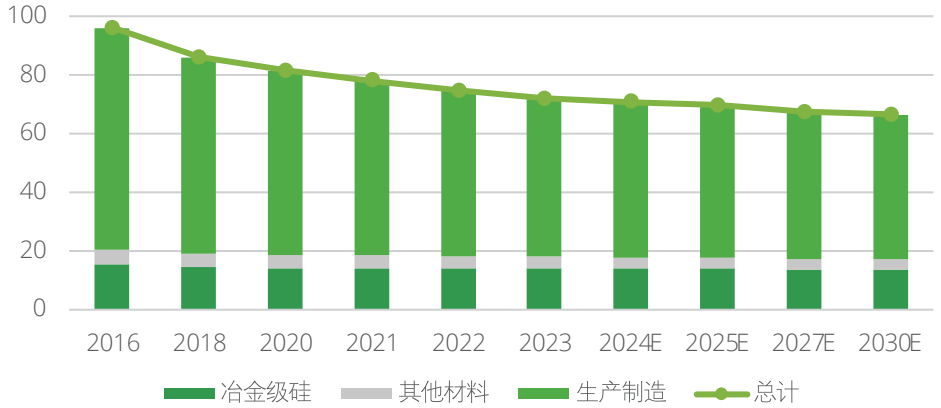


图25: 2016年-2030年拉棒及铸锭电耗 (kWh/kg)

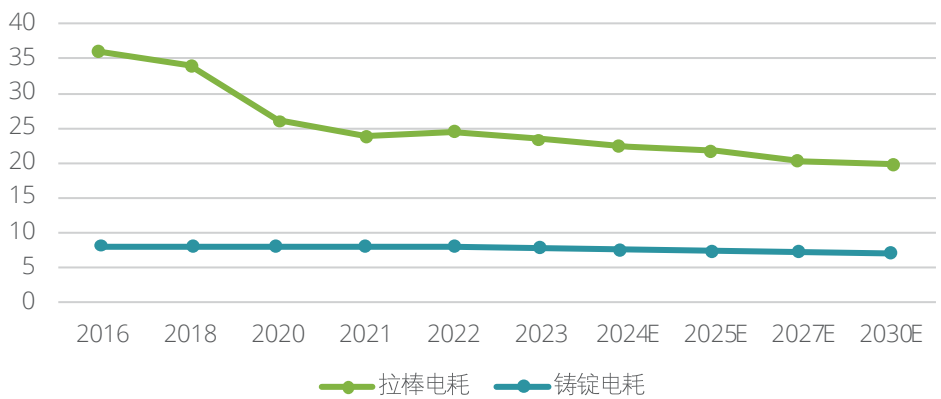
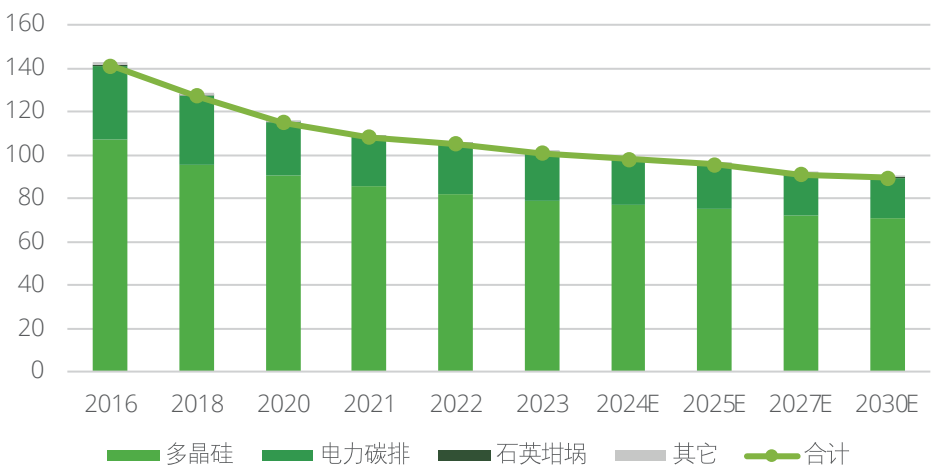


图26: 2016年-2030年硅棒碳排 (kgCO_{2-eq}/kg)



降低硅片厚度，提高硅片尺寸

降低硅片厚度，提高硅片尺寸可有效减少材料和能耗消耗，从而降低碳排。薄化大尺寸化硅片可以降低单片的硅料用量，从而减少对自然资源的消耗，如产业链内全规格单晶硅片全面转换到160 mm厚度，预计可节省6.8%的硅耗，从而降低碳排。此外，大尺寸化薄片化还可以减少制造工序的能耗，例如切割、抛光和清洗等，有助于减少碳排放。另外，大尺寸化薄片化也可提高组件功率输出，从而降低碳排。最后，薄片化和大尺寸化硅片也可减少组件的体积和重量，从而降低运输过程中的碳排。

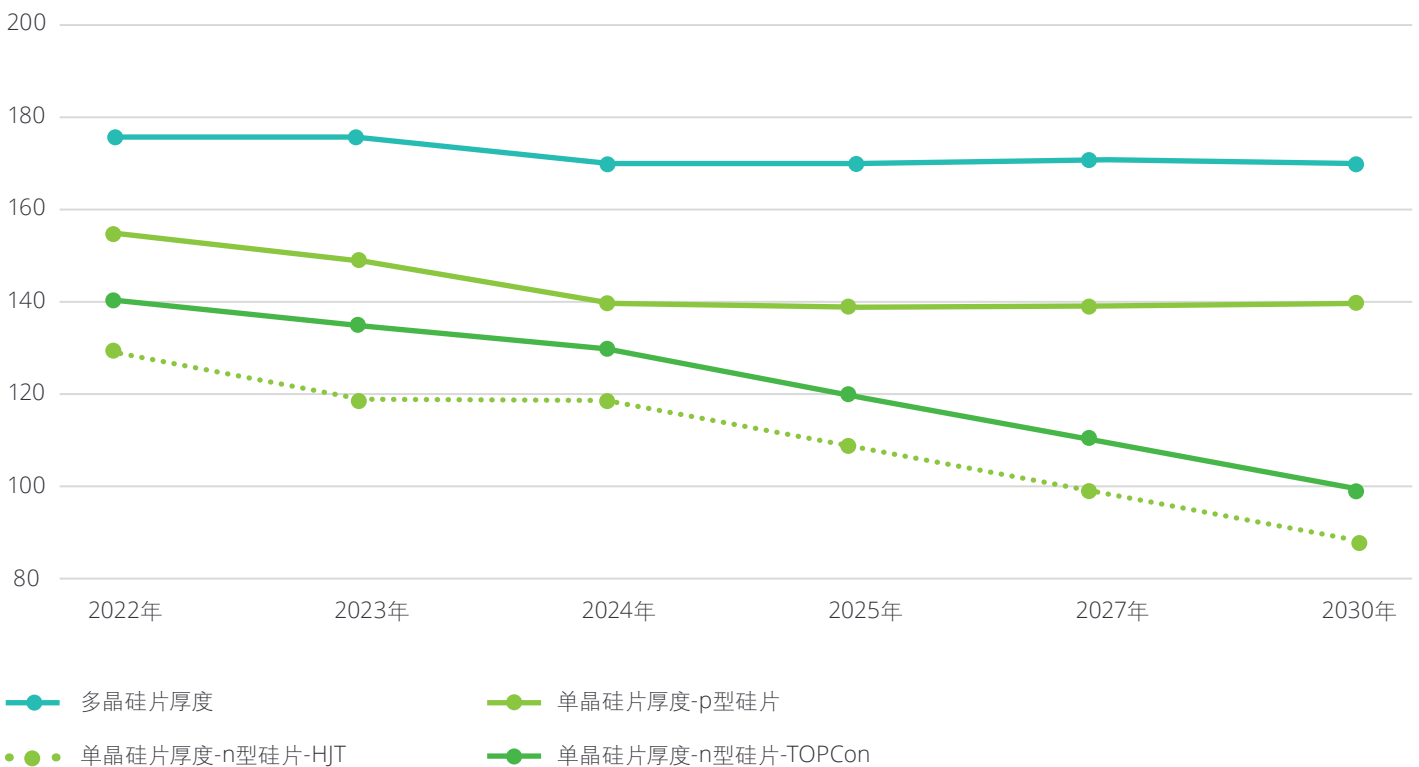
随着技术的进步，不断变薄是硅片的发展趋势。预计到2030年，多晶硅片、P型单晶硅片、用于TOPCon电池的n型硅片和用于HJT电池的n型硅片的平均厚度都将比2022年降低10%以上（见图27）。

硅片尺寸不断变大，厚度变薄，硅片碳足迹降低。从2020年至2030年间，四类硅片（166 mm P型单晶硅片，182 mm P型单晶硅片，182 mm N型TOPcon单晶硅片，210 mm N型HJT单晶硅片）的碳足迹，可以看到不管是哪个年间，随着硅片尺寸的不断变大，硅片的碳足迹都在降低，这主要是由于随着尺寸变大，厚度不断变薄，切割次数减少，降低能耗，减少废料（图28）。

2020年至2030年，相同尺寸的硅片碳排也在逐年降低。166 P型单晶硅片2020年碳排为77.22 kg CO_{2-eq}/m²，预计2023年，碳排为50.38 kg CO_{2-eq}/m²，下降34.76%；210 mm N型HJT单晶硅片2020年碳排为64.14 kg CO_{2-eq}/m²，预计2023年，碳排为34.97 kg CO_{2-eq}/m²，下降45.47%（图29）。

综上所述，通过降低硅片厚度，增大硅片尺寸，可以实现材料消耗、制造能耗和运输能耗的减少，转化效率的提升，从而有效降低组件的碳排放。这一优化措施不仅有助于保护环境，还能提高能源利用效率。

图27: 2022-2030年硅片厚度发展趋势 (μm)



资料来源：CPIA

图28: 不同尺寸硅片碳足迹变化情况 (kgCO₂-eq/m²)

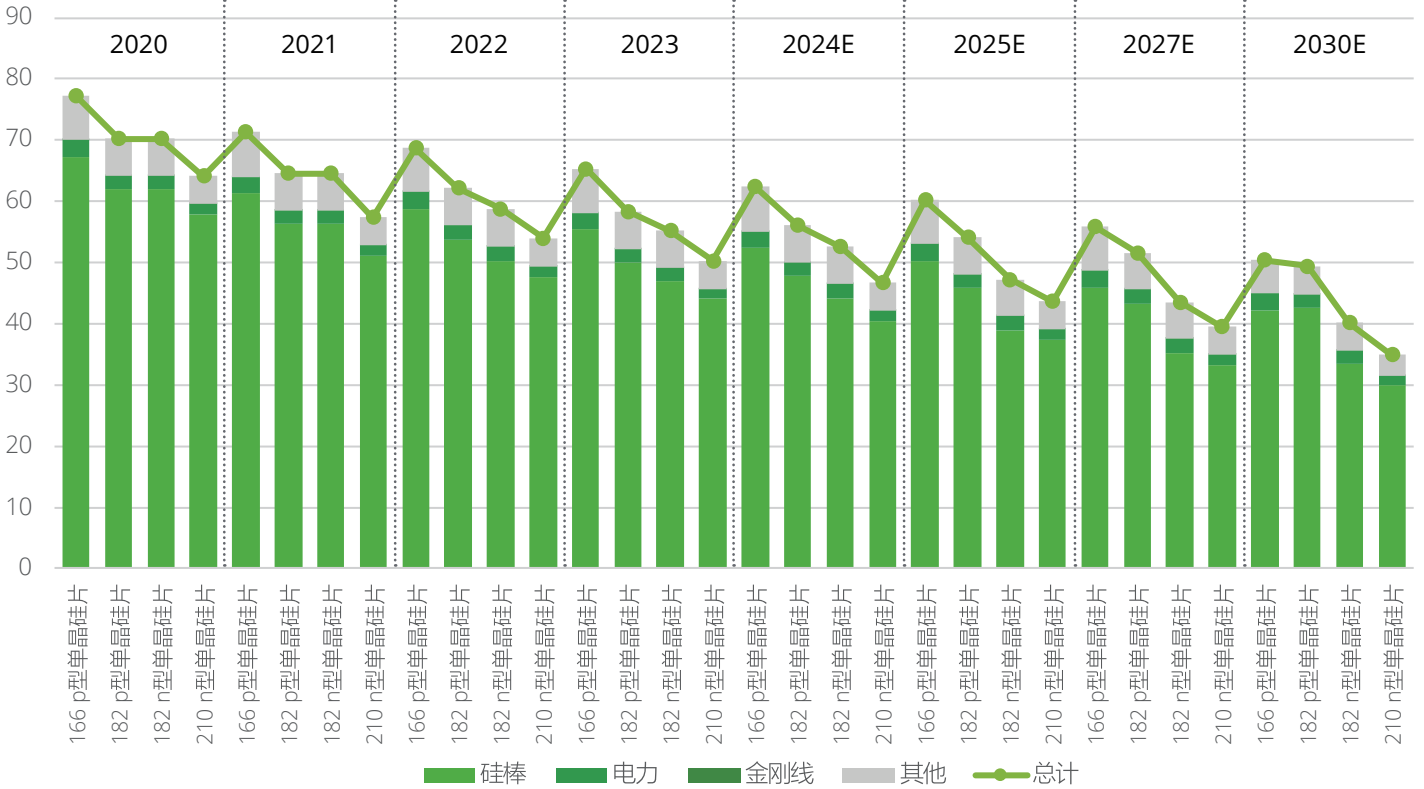


图29: 2020年-2030年间硅片碳足迹变化情况 (kgCO₂-eq/m²)

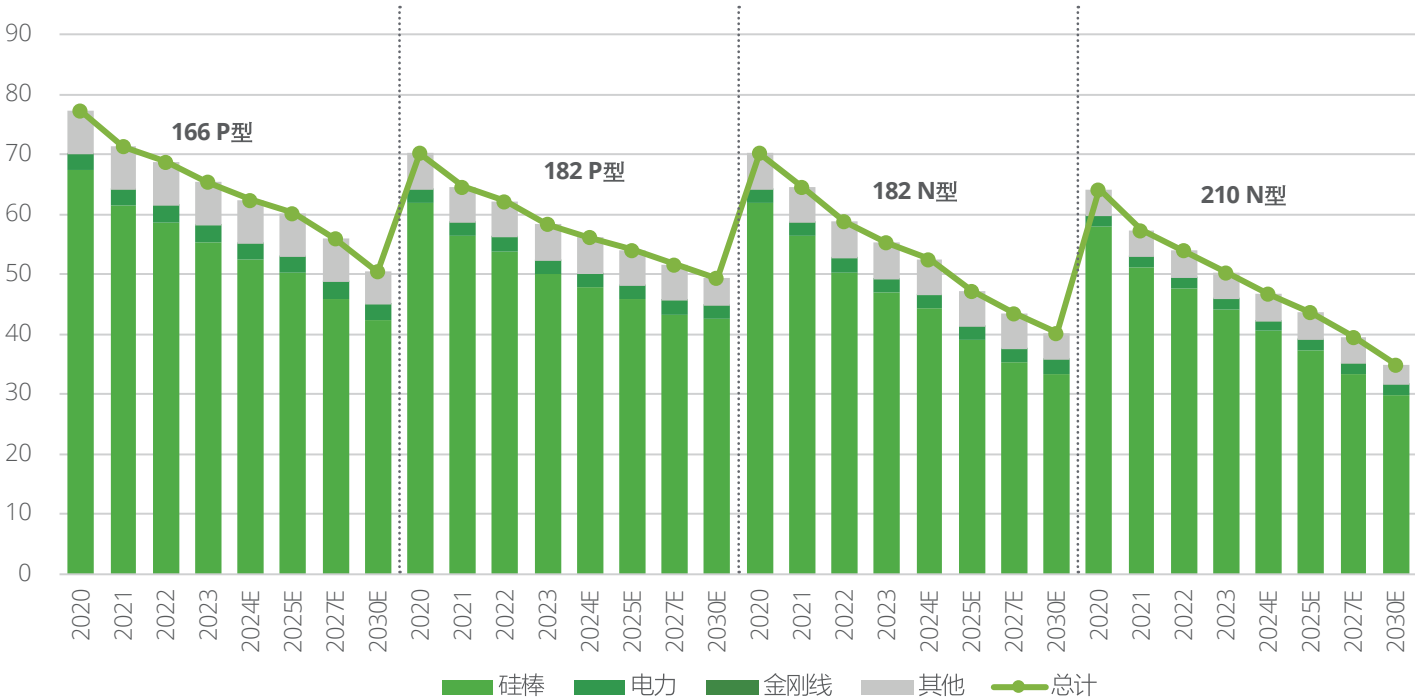


表3: 国际关于光伏组件回收相关政策

时间	国家	主要内容
2012年	欧盟	废弃电子电气设备(WEEE)指令, 要求废弃光伏组件的回收率需达到一定水平
2022年	德国	• 规定实行生产者责任制并要求退役光伏组件的回收率为85%且回收材料的再利用率为80%。另外, 不同场景下的退役组件也都需要进行特定的退役处理
2023年	中国	• 《国家发展改革委等部门关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》中提出了促进退役风电、光伏设备循环利用的总体要求、重点任务和保障措施
2023年	韩国	• 工业、贸易和能源部 (MOTIE) 批准了一项太阳能电池板回收计划。新规定为韩国各主要地区建立标准化的收集系统, 以确保废电池板的回收/再利用超过80%
2023年	荷兰	• 计划从2023年7月1日起提高光伏组件回收费用, 新增资金将用于光伏板的回收

数据来源: 各国政府官网

提高组件效率

不断提高光伏组件的转换效率也是降低碳排放的重要途径。目前, 高效的电池技术如PERC、TOPCon和HJT已经得到广泛应用, 其转换效率显著提高。2022年, 规模化生产的p型单晶电池均采用PERC技术, 平均转换效率达到23.2%, 2022年, n型TOPCon电池平均转换效率达到24.5%, HJT电池平均转换效率达到24.6%, 两者较2021年均有较大提升, XBC电池平均转换效率达到24.5%。

目前, 天合光能已经逐步过渡到HJT n型光伏组件生产, 转换效率达到23.5%, 碳足迹相较传统的PERC组件降低30%。随着技术进步和成本降低, 高效电池技术将取代传统技术, 进一步降低碳排放。

加强回收利用

在光伏产业规模化发展的同时, 最早于21世纪初投产使用的光伏组件, 也即将抵达20-25年设计使用寿命的终点。再加上例如荒漠干旱、高原、热带、亚热带地区、沿海地区等外部环境影响, 组件寿命将会进一步缩短。

根据国际可再生能源机构的报告, 2020年全球废弃光伏组件的数量约为43.5万吨, 预计到2030年将达到800万吨, 到2050年将达到7800万吨。如何妥善回收处理“退役”光伏组件, 以及对退役组件的资源化再利用也成为了光伏产业实现绿色闭环的“最后一公里”。

回收政策

统计公开信息可以发现, 目前已有多个国家针对光伏组件回收展开了相应的计划和研究。

欧盟、德国、韩国、荷兰等国家对光伏组件退役报废回收均十分重视, 已制定了相应的计划和研究, 以推动回收利用体系的建设, 引导行业的规范化。在其发布的相关法案和政策中, 明确指出光伏组件回收的重要性, 旨在推动回收利用体系的建设, 引导行业的规范化。例如, 欧盟在2012年修订了废弃电子电气设备(WEEE)指令, 要求废弃光伏组件的回收率需达到一定水平, 并规定了生产者责任制。从2021年1月1日起, 欧盟还要求所有在欧盟销售的光伏组件必须符合生态设计指令

(Ecodesign Directive) 的要求, 包括信息披露、可靠性、可修复性、可拆卸性、可回收性和碳足迹等方面。

中国也高度重视退役光伏设备的回收利用, 密集出台多项政策, 积极构建覆盖绿色设计、规范回收、高值利用、无害处置等环节的光伏设备循环利用体系。2023年7月, 国家发改委、国家能源局、工信部、生态环境部、商务部、国务院国资委六部门联合发布《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》(发改环资〔2023〕1030号), 补齐了光伏产业链绿色低碳循环发展最后一环, 助力实现碳达峰碳中和提出相关要求。意见提出要积极构建覆盖绿色设计、规范回收、高值利用、无害处置等环节的光伏设备循环利用体系, 到2025年, 光伏电站退役设备处理责任机制基本建立, 光伏设备循环利用相关标准规范进一步完善, 资源循环利用关键技术取得突破。

回收方法及流程

晶硅光伏组件构成材料大量都具有优异的回收价值，如银、铜、铝等，这些金属不仅具有较高的经济价值，也是重要的战略资源（见表4）。因此，回收利用晶硅光伏组件中的金属，不仅可以减少资源浪费和环境污染，也可以提高光伏产业的可持续性和竞争力。

目前，晶硅光伏组件的回收主要包括组件拆解以及组分分离两大过程。

组件拆解的方法通常可分为物理法、热处理法和化学法。物理法主要是通过机械破碎、高压电场破碎等物理方式，将拆除外框的组件破碎成较小的颗粒及粉体，然后对颗粒及粉体进行分离，分离的方法

通常有密度筛分和静电分选两种方式；热处理法是指在加热条件下，对有机封装层EVA进行软化、剥离以达到分离盖板玻璃和电池的目的；化学法则是通常使用有机溶剂或无机溶剂对已经去除铝外框、接线盒和背板的光伏组件进行浸泡，使得玻璃和电池片分离。

组分分离技术包括火法冶金和湿法冶金，火法冶金的对象主要为铝边框以及铜焊带，通过高温熔融结合气化等方式回收铝、铜、锡、铅等组分。湿法冶金则通过酸碱刻蚀、溶解、沉降等操作获得高纯硅片以及铜、银等高价金属盐，进一步通过萃取、还原、电解等可提高高价金属银、铜、铝等的纯度。

回收方式碳排评价

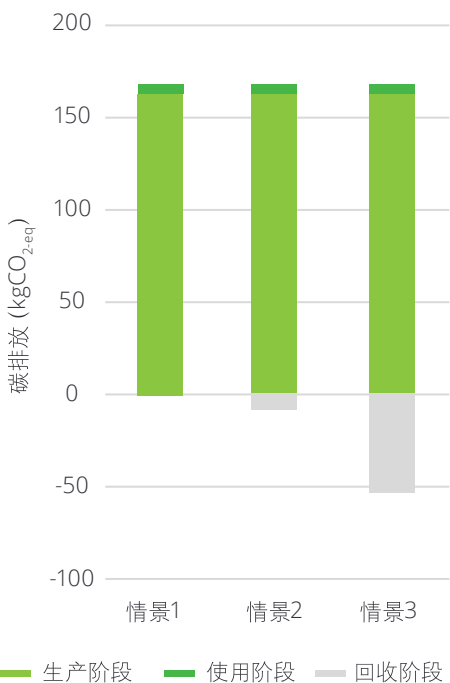
提高组件的回收率，能够有效降低组件生产带来的碳排放。使用回收技术、再生材料可以不同程度地减少组件生产阶段的污染物排放，使光伏组件的碳排放下降。

光伏行业全生命周期碳排放随着处置方式资源化程度的不断深入，呈下降趋势。如图，人工拆解的光伏行业全生命周期碳排放因拆解了铝合金边框，较结合填埋处置的光伏行业全生命周期碳排放降低了6%；热解回收的光伏组件由于获得了铝合金边框、玻璃、硅、铝、银等物质，碳排大幅削减了33.59%。因此，积极推广光伏组件回收技术是进一步降低行业碳排放的重要途径。

表4: 晶硅光伏组件构成材料可回收价值²¹

材料	重量占比 (%)	相对经济价值	可回收价 (数量与价值积)
硅	2-3	高	高
玻璃	69-75	低	高
有机物	7	低	低
钢	0.6-1	高	高
银	0.006-0.06	高	高
铝	10-20	中	高
硼	<0.1	—	低
磷	<0.1	—	低
锡	<0.1	—	低
铅	<0.1	—	低

图30: 不同情景的光伏组件碳排结果



Müller等²²也对电池板的回收再利用进行了LCA分析，参考Deutsche Solar AG公司的回收方法，通过物理和化学流程可以获得清洁的硅片，可进行电池板再生产。对直接生产的硅片和使用回收的硅片两种情形进行能耗对比，结果显示回收的硅片具有很好的环境性能，能耗降低了53.5%，原因是回收过程消耗的能量远远小于直接生产硅片所消耗的能量。

综上，回收光伏组件可有效降低碳排放。一方面回收光伏组件可以回收有价值的物质，如铝、玻璃、硅、银等，从而降低再生产的碳排；同时，回收光伏组件可以避免废弃组件的填埋或焚烧，从而降低处置阶段的碳排放。因此，回收光伏组件不仅可以节约资源，还可以减少环境污染，是实现光伏产业绿色发展的重要途径。根据国际电力协会的研究，如果全球所有的光伏组件都能被回收利用，那么到2050年，光伏产业的碳排放将比不回收的情况下减少18%。

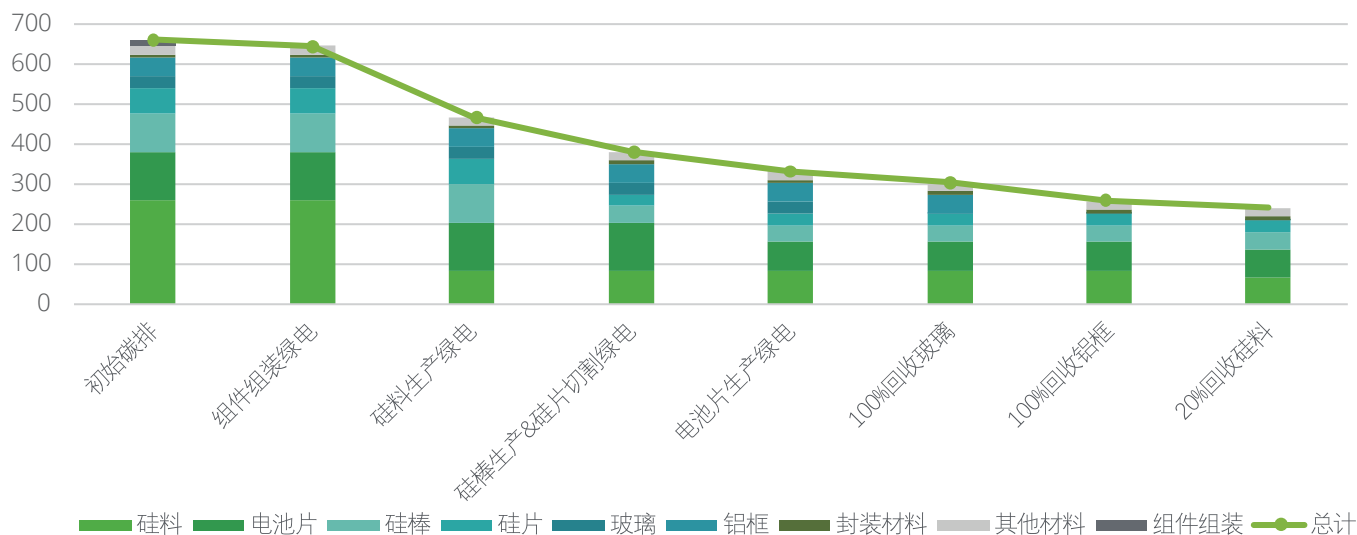
技术路径图

光伏组件全球平均碳足迹为700 kgCO₂-eq/kWc左右，通过采用100%绿电进行组件组装，碳排可降低2.3%；若硅料生产使用绿电，碳排可进一步降低38%，若硅棒生产&硅片切割、电池片生产采用绿电，碳排可降至330 kgCO₂-eq/kWc (图31)。

采用回收料可进一步降低光伏组件的碳足迹。100%采用回收玻璃，碳排可降低3.8%；若进一步采用回收铝框，碳排可降低6.8%；最后采用20%的回收硅料，碳排可降至330 kgCO₂-eq/kWc。

综上所述，采用绿电、严格的回收要求对减少光伏组件的碳排放起到了积极的作用。未来在更清洁的电力结构和更加完善的回收政策驱动下，光伏组件的生产将更加环保和可持续。

图31: 光伏组件减排路径图 (kgCO2-eq/kWc)





尾注

19. Beloin Saint Pierre, D., Blanc, I., Payet, J., Jacquin, P., Adra, N., Mayer, D., Environmental impact of PV systems: Effects of energy sources used in production of solar panels, In Proceedings of the 24rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany ISBN: 3-936338-25-6, pp4517-4520. DOI: 0.4229/24thEUPVSEC2009-6DV.3.7
20. 中国晶体硅太阳能电池板的生命周期评价 李鹤。
21. P. Dias. et al. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes., Journal of Cleaner Production 174 (2018): 7-16.
22. Muller, A, Wambach, K, Alsema, EA. Life cycle analysis of solar module recycling process. In: Materials Research Society Symposium Proceedings 2006; 895: 0895/G03/07.1- 0895/G03/07.6.

以科学降碳方案和碳管理方法应对挑战

光伏组件碳排放受其生命周期诸多环节和变量的影响，其中包括能源结构调整和工艺改进等。光伏组件碳减排是实现可持续发展的必然选择。通过对光伏组件碳减排潜力的探索和分析，以及比较不同碳减排途径的优缺点，能够为光伏组件制造企业实现低碳经济和环境友好型转型提供借鉴和参考。另外，在全球碳监管政策趋严的背景下，除了企业减少光伏组件从摇篮到大门的碳足迹外，如何帮助中国光伏企业优化碳管理能力，应对国际碳监管政策，也是本报告的重点之一。

建立与国际接轨的光伏产品碳足迹评价标准

为贯彻落实中国“双碳”发展战略，积极应对国际绿色低碳供应链、碳边境调节机制等绿色壁垒，最大限度地维护国内光伏企业利益，必须加强光伏产品碳足迹相关研究，构建和完善与国际接轨的、高标准的技术性标准贸易措施体系，加快以中国理念和实践

为基础的技术性贸易措施输出，提高中国光伏行业在国际贸易中的话语权。在协助企业解决应对法国、韩国等碳足迹造成的绿色贸易壁垒问题时，行业龙头企业已多次向政府部门提出诉求，呼吁尽快建立统一的以光伏行业碳足迹为基础的绿色低碳贸易标准，来积极争取应对绿色贸易壁垒的主动权，助力中国产品出口。

为此，中国光伏产品进出口商会已得到行业主流企业自愿参标授权，牵头组织隆基、晶科、晶澳、天合、正泰、正信、通威七家国内上下游企业（覆盖行业上下游、兼顾大中小企业利益、合计出口占比超过全国70%）积极配合商务部打造《低碳产品量化要求 出口光伏组件》相关行业标准，力图形成借鉴国际通用和主要光伏碳足迹市场（法国、韩国）要求、并且不低于国际标准的要求规范，引领国内光伏产业绿色贸易转型升级，做到扶优扶强、国际引领。

《低碳产品量化要求 出口光伏组件》标准通过建立一个统一的框架，评估出口光伏组件整个生命周期阶段的碳足迹；提供符合国际惯例并适用于光伏组

件出口特定情况的数据收集和计算方法；制定低碳光伏组件的评估标准，包括定义系统边界和将排放分配给各个生命周期阶段；为碳足迹评估结果制定报告指南，用于决策、客户沟通和公开披露。并且此标准体系通过中国标准院等相关单位专家的论证，分为基础标准、通用标准和应用标准三个层次。本标准结合光伏行业领域的贸易特点，通过提供清晰和标准化的方法来评估和报告光伏组件的碳足迹，支持制造商和出口商满足国际贸易要求和可持续性标准。该标准代表了光伏行业向可持续发展迈出的重要一步。它与全球环境目标和中国的双碳目标相一致，促进了更绿色的未来。

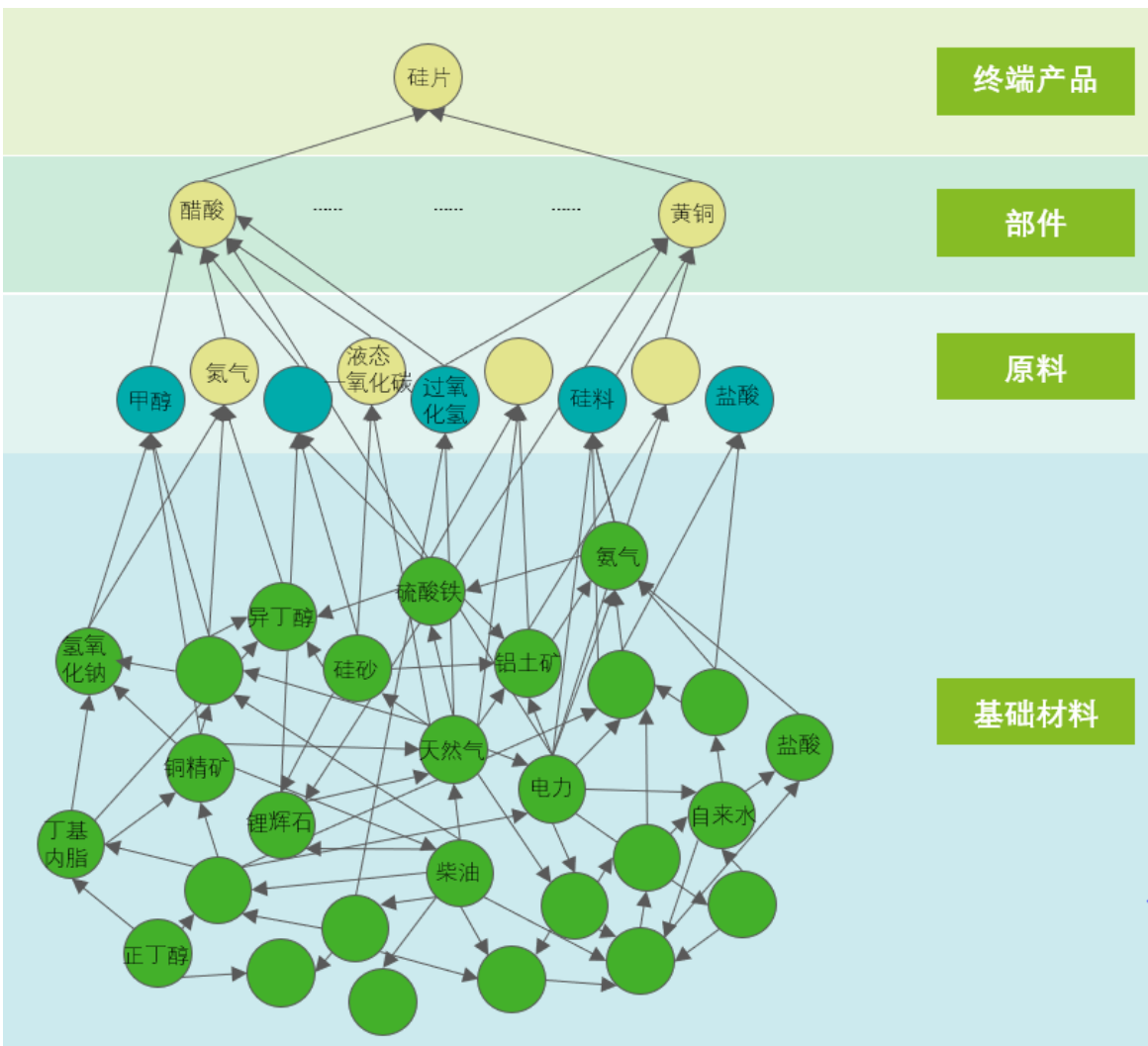


建立统一完善的中国碳排因子库可降低因数据缺失带来光伏碳排放的高估

目前，国内的碳排因子存在内容不全，来源分散，数值不一等问题。国内因子库包括CLCD数据库，CPCD数据库，宝钢自建的钢铁行业碳排数据库等；由于不同数据库核算标准及参与编制单位不同，同一产品数值各异，不便于企业参考引用和行业内外对比分析。而国外数据库，如ecoinvent, sphera等，多数中国因子采用国外工艺镜像获得，数值过大，不符合中国实际，不便于企业参考使用。因此，现阶段建立健全客观反应中国生产技术水平、具有时间地域代表性的高质量碳排因子库迫在眉睫。

远景科技集团深入光伏行业调研分析，搭建了中国光伏产品碳排因子库。该因子库具有充分的数据代表性，每条因子的搭建都充分加权考察行业领军企业的工艺情境，形成数据集，以确保数据集与中国实际工艺情况密切契合；同时各碳排放因子均基于统一规范和流程，由终端产品不断向底层延申搭建，从终端产品出发，深入调查其组成部件，继而追溯至所涉及的初始原料，以及更基础层次的起始材料，在此过程不断显现新的原料，最终，共同交织形成错综复杂的网络结构，可实现碳排放因子间的协同（见图32）；另外，使用该套因子进行碳足迹核算，可实现结果在多层次间的追溯性展现，帮助企业对核算结果溯源。

图32: 中国光伏产品因子库搭建方式



利用IoT的碳计量和碳管理系统提升碳排放分配和申报的准确性和可追溯性

利用物联网技术 (IoT) 的碳计量和碳管理系统可以提高碳排放分配和申报的准确性和可追溯性。通过实时监测和记录企业的能源消耗数据,可以更加准确地计算碳排放量。同时,通过建立碳管理系统,可以对碳排放数据进行统一管理和分析,以便更好地了解碳排放情况,并制定相应的减排措施。

远景科技集团与中国机电进出口商会合作打造了“中国机电商会光伏产品碳足迹公共服务平台”。该平台覆盖工业硅、硅料、硅棒、硅片、电池片、组件及辅助材料逆变器、支架等产品的碳足迹模型,并且涵盖多个国家和地区的计算标准,包括中国、法国、意大利、国际、欧盟等,确保满足不同地区和市场的要求,为企业提供了更广泛的适用性和竞争优势。除此之外,平台可快速,估算工艺迭代下的碳排放,准确评估新技术和工艺的减排影响,助力企业优化后,平台确保每条数据与文件并行,确1可追溯、可验证,助力第三方认证的同步成碳核算数据归档。

通过该平台,可帮助中国光伏企业高质量地完成产品碳足迹核算,助力中国为应对国际绿色贸易壁垒,扩大出口。

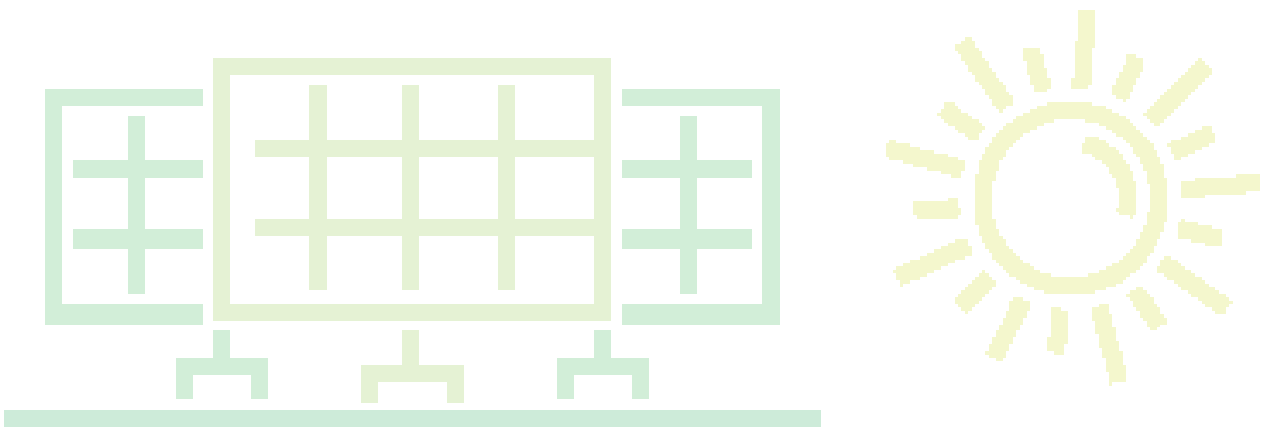
以零碳产业园为首的绿电直供是破解碳壁垒的杀手锏

以零碳产业园为代表的绿电直供方案,可以通过智能物联网源荷互动控制系统和基于绿氢的能源岛,实现100%绿色零碳能源供给,从而帮助企业降低碳排放,降低碳成本,提高企业的竞争力。欧盟新电池法、法国光伏PPE2规则等一系列针对进口产品的碳新规都明确说明目前只认可绿电直供形式,因此绿电直供可能是目前最为理想的清洁能源替代方案。目前,远景科技集团计划未来十年内建设百座零碳产业园,这些产业园将通过智能物联网源荷互动控制系统和基于绿氢的能源岛,实现100%绿色零碳能源供给,从而帮助企业降低碳排放,降低碳成本,提高企业的竞争力。这些零碳产业园将成为绿色发展的典范,为全球的可持续发展做出贡献。



总结与建议

随着全球能源转型加速，光伏装机规模持续扩大，海外的光伏组件需求不断增长。在全球积极推动气候治理，加强碳监管的背景下，中国作为全球重要的光伏组件出口国，开展碳足迹认证、挖掘产品减碳潜力，也成为光伏产业高质量发展的必由之路。一方面，需要对光伏组件全生命周期的碳排放进行分析，发现减排关键环节，助力行业低碳发展；另一方面，需要建立光伏碳足迹计算标准和推动中国本土化光伏行业碳排因子库的打造，打通国际认证平台。



总结

本报告针对单晶和多晶光伏组件，综合收集了相关数据，计算分析其碳足迹。评估光伏组件中的碳排热点，比较原材料获取和生产制造过程的能耗，也对不同的生产工艺进行比较，进一步探索减排潜力。

本报告分析了国际标准对中国光伏组件碳足迹计算所采用的因子与中国实际因子值的对比，凸显了因子库本地化的重要性与紧迫性。中国急需开发自己的光伏产品碳足迹平台，一键打通碳足迹的计算与申报。

1 光伏组件

LCA结果表明，随着制造技术的升级和光伏组件标准化核算制度的完善，光伏组件碳足迹总体呈现下降趋势，尤其在2019年后，碳足迹明显降低。整体而言，单晶光伏组件的碳足迹略高于多晶光伏组件，但由于单晶硅片具有使用寿命长、光电转换效率高的优势，单晶光伏组件仍是未来的发展趋势。

2 原材料

光伏组件主要的碳排源自产业链硅料生产环节，占比41%。所以对光伏组件进行减排的关键是对产业链硅料生产进行减排。由于多晶硅的制造需要使用稀有金属和材料，这些材料的开采和提炼过程通常涉及到能源密集型的活动，产生了大量的二氧化碳等温室气体排放，导致原材料获取阶段的碳排放相对较高。并且原材料的运输通常涉及到长距离物流，运输能耗非常大。相比之下，生产制造阶段的碳排放通常因为技术的进步、工艺的改进和清洁能源的使用而得以控制。

3 技术路径

当前光伏组件技术路径提升空间主要集中于优化产业链生产工艺，节能降耗；降低硅片厚度，提高硅片尺寸、提高组件效率三个方面。硅料生产和硅棒拉棒都需要大量的能源和资源，通过采用自动化、机器学习等智能制造技术，可以使生产线运行更为高效，从而有效降低改硅料生产和硅棒控制过程的电耗和硅耗。降低硅片厚度，提高硅片尺寸可有效减少材料和能耗消耗，从而降低碳排。不断提高光伏组件的转换效率也是降低碳排放的重要途径。目前，高效的电池技术如PERC、TOPCon和HJT已经得到广泛应用，其转换效率显著提高。

4 碳足迹核算

目前国际上，尤其是法国和韩国，对于中国的光伏组件碳足迹计算采用的默认因子值明显高于中国实际。若使用中国本地因子值，最终的碳足迹结果相较法国标准降低比例高达50.3%。不合理的因子值导致在同等条件下，中国光伏产品碳排放数值偏高，这直接导致中国光伏产品在法国的市占率远低于欧洲其他国家。作为全球主要的光伏出口国，中国的光伏组件企业面临日益严峻的出口碳壁垒。

建议

为推动光伏产业的可持续发展，优化光伏组件的环境表现和减少碳排放，本报告提出以下建议：

1 推广《低碳产品量化要求 出口光伏组件》标准

发达国家正在以产品生命周期评价、碳足迹为基础建立国际绿色贸易新规。《低碳产品量化要求 出口光伏组件》是借鉴国外市场绿色准入标准要求（如法国、韩国碳足迹要求；瑞典、意大利EPD要求等），结合国内相关行业标准实际情况，制定出的标准。此标准结合光伏行业领域的贸易特点，通过提供清晰和标准化的方法来评估和报告光伏组件的碳足迹，支持制造商和出口商满足国际贸易要求和可持续性标准。统一的标准有利于光伏行业的健康发展，并提高整个产业链的可持续性。

2 推广中国光伏产品碳排因子库

中国光伏产品碳排因子库的推广对于光伏组件的碳足迹核算和评价至关重要。通过推动具有时间和地域代表性的高质量排放因子，有助于揭示不同行业和地区的碳排放差异，促进技术进步和低碳发展。另外，发达国家尤其是光伏进口国，在对中国光伏产品碳足迹进行核算时，无法获得更为本地化的因子值，导致光伏组件碳足迹核算误差很大。因此，推动中国光伏产品碳排因子库，使用具有时间和地域代表性的高质量排放因子，可以更好的衡量其环境影响，促进清洁能源的使用，减少碳排放。

3 鼓励企业应用数字化管理平台开展碳足迹核算和绿色认证工作

鼓励企业应用数字化管理平台开展碳足迹核算，基于平台实现覆盖全产业链的产品碳足迹和供应链碳足迹管理，例如中国机电商会光伏产品碳足迹公共服务平台。选择光伏组件、电池片、硅片、逆变器、支架等行业企业，科学运用全生命周期评价（LCA）方法，率先开展数字化碳足迹核算工作，带动光伏全产业链产品全生命周期碳足迹评价。此外，通过数字化平台，企业可以自主申报认证，由行业组织联合国内、国际知名第三方认证机构（如CQC、CTC、鉴衡、TUV等）在线上进行绿色低碳产品认证，并发放行业碳标识。

关于远景

远景科技集团是全球领先的新型能源系统企业，秉持“为人类可持续未来解决挑战”的使命。远景旗下拥有专注于智能风电、储能系统及绿氢解决方案的远景能源、智能电池企业远景动力、开发全球领先智能物联操作系统的远景智能，管理远景-红杉百亿碳中和基金的远景创投，以及电动方程式世锦赛年度总冠军车队——远景电动方程式车队。远景持续推动风电和储能成为“新煤炭”，电池和氢燃料成为“新石油”，智能物联网成为“新电网”，零碳产业园成为“新基建”，培育绿色“新工业”体系，开创美好零碳世界。

凭借在可持续领域的优异表现，远景2023年获得全球权威的可持续发展评级机构EcoVadis“金牌”评级和CDP A-评级，成为中国首个获得A-评级的新能源企业；2022年，远景荣膺“福布斯中国最佳雇主”榜单前十；2021年，荣登《财富》杂志“改变世界的公司”全球榜单第二位。2019年，荣登全球权威机构《麻省理工科技评论》“2019年全球50家最聪明公司”榜单前十。

远景在中国、美国、德国、丹麦、新加坡、日本等国家设立研发中心，引领全球绿色科技创新与最佳实践。2021年，远景加入科学碳目标倡议（SBTi）并承诺实现“1.5°C的企业雄心（Business Ambition for 1.5°C）”，并于2022年底实现运营碳中和，以及将于2028年底实现价值链碳中和。

关于产品碳足迹与低碳发展系列报告



风机碳足迹与低碳发展报告



动力电池碳足迹及低碳循环发展白皮书

关于德勤

德勤中国是一家立足本土、连接全球的综合性专业服务机构，由德勤中国的合伙人共同拥有，始终服务于中国改革开放和经济建设的前沿。我们的办公室遍布中国31个城市，现有超过2万名专业人才，向客户提供审计及鉴证、管理咨询、财务咨询、风险咨询、税务与商务咨询等全球领先的一站式专业服务。

我们诚信为本，坚守质量，勇于创新，以卓越的专业能力、丰富的行业洞察和智慧的技术解决方案，助力各行各业的客户与合作伙伴把握机遇，应对挑战，实现世界一流的高质量发展目标。

德勤品牌始于1845年，其中文名称“德勤”于1978年起用，寓意“敬德修业，业精于勤”。德勤全球专业网络的成员机构遍布150多个国家或地区，以“因我不同，成就不凡”为宗旨，为资本市场增强公众信任，为客户转型升级赋能，为人才激活迎接未来的能力，为更繁荣的经济、更公平的社会和可持续的世界开拓前行。

Deloitte（“德勤”）泛指一家或多家德勤有限公司，以及其全球成员所网络和它们的关联机构（统称为“德勤组织”）。德勤有限公司（又称“德勤全球”）及其每一家成员所和它们的关联机构均为具有独立法律地位的法律实体，相互之间不因第三方而承担任何责任或约束对方。德勤有限公司及其每一家成员所和它们的关联机构仅对自身行为承担责任，而对相互的行为不承担任何法律责任。德勤有限公司并不向客户提供服务。请参阅www.deloitte.com/cn/about了解更多信息。

德勤亚太有限公司（一家担保责任有限公司，是境外设立有限责任公司的其中一种形式，成员以其所担保的金额为限对公司承担责任）是德勤有限公司的成员所。德勤亚太有限公司的每一家成员及其关联机构均为具有独立法律地位的法律实体，在亚太地区超过100个城市提供专业服务，包括奥克兰、曼谷、北京、班加罗尔、河内、香港、雅加达、吉隆坡、马尼拉、墨尔本、孟买、新德里、大阪、首尔、上海、新加坡、悉尼、台北和东京。

本通讯中所含内容乃一般性信息，任何德勤有限公司、其全球成员所网络或它们的关联机构并不因此构成提供任何专业建议或服务。在作出任何可能影响您的财务或业务的决策或采取任何相关行动前，您应咨询合格的专业顾问。

我们并未对本通讯所含信息的准确性或完整性作出任何（明示或暗示）陈述、保证或承诺。任何德勤有限公司、其成员所、关联机构、员工或代理方均不对任何方因使用本通讯而直接或间接导致的任何损失或损害承担责任。

感谢《环球零碳》提供资料支持。

《环球零碳》聚焦全球碳达峰、碳中和背景下的能源转型、气候科技创新、工业体系升级、ESG建设、零碳与可持续的文明等话题，致力于成为零碳领域决策者、创新者、商界领袖、研究者、投资者的信息汇聚策源地和思想观点交流碰撞平台。

© 2024。欲了解更多信息，请联系德勤中国。

CQ-007CN-24



这是环保纸印刷品