环境工程学报
CHINESE JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
第 18 卷 第 10 期 2024 年 10 月
Vol. 18, No.10 Oct. 2024
http://www.cjee.ac.cn E-mail: cjee@rcees.ac.cn (010) 62941074
DOI 10.12030/j.cjee.202403060 中图分类号 X705 文献标识码 A

基于 LCA 方法的光伏产品碳足迹量化评价与低碳设计

刘含笑[1,2,3,4,✉], 朱前林[5], 林青阳[6], 周烨[7], 朱海舰[1,8], 刘小伟[2], 刘美玲[1], 孙立[1]

1. 浙江菲达环保科技股份有限公司，绍兴 311800；2. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室，武汉 430074；3. 华北电力大学，北京 102206；4. 浙江省环保集团生态环保研究院有限公司，杭州 310030；5. 中国矿业大学，徐州 221008；6. 浙江大学，杭州 310000；7. 上海易碳数字科技有限公司，上海 201308；8. 中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司，太原 030000

摘　要　电力行业作为我国最大的碳排放源，承受着巨大的减排挑战。由于光伏技术对我国电力行业实现零碳转型至关重要，针对光伏产品开展直观、全面的命周期温室气体排放量评价具有重要的意义。介绍了光伏产品碳足迹评价的标准、发展过程以及评价体系和方法，比较了基于投入产出法、生命周期法和 IPCC 清单法的优缺点与适用性，详细分析了 LCA 方法在我国光伏产品碳足迹评价的应用流程和计算方法。研究依据原材料供给、能源输入输出、运输、建设、安装、调试、运营维护等主要研究边界，将系统边界划分为上游、核心和下游 3 个环节，并解释了下游是否纳入碳评价的情景。综述了产品类型、用能结构、工艺流程、减排技术等因素对光伏产品碳足迹评价的影响；分析了当前光伏产品碳足迹评价在方法论、成本、技术、政策等方面面临的挑战；讨论了光伏与其他新能源在技术、经济、环境效益的比较分析。结果发现，上游光伏组件制备过程资源需求种类多、碳排放量占总量的 80% 以上。基于潜在问题，阐述了未来针对光伏产业进行基于低碳设计的绿色转型发展方向与建议，以清洁能源的开发利用为典型的能源转型是实现各国碳中和与可持续发展目标的必要手段。

关键词　光伏；碳足迹；生命周期评价

气候变化所引发的海平面上升、荒漠化加剧、极端天气频繁出现，以及粮食和主权安全，对人类构成了严峻威胁，到 2050 年将导致 2 亿人流离失所[1-2]。大气中 CO_2 浓度在 2022 年达到 200 万年以来的新高，是直接导致温室效应和气候变化的原因。全球能源与工业排放相关的 CO_2 排放量达到 3.7×10^{10} t，中国碳排放约占总量的 1/3。电力行业 2020 年碳排放总量约 3.6×10^{9} t，为我国最大的碳排放源，预计未来将达 4.5×10^{9}~5.0×10^{9} t[3]，此外，鉴于电力行业成为首个纳入全国碳交易体系的行业，对自身组织碳排放和产品碳足迹的准确评估需求显得尤为迫切。电力低碳转型对下游用能终端产业降低能源成本和消耗、提高能源供应稳定性也具有重要作用。碳排放和温室气体对地球生态造成的严峻挑战，使得人类承受应对气候变化、全球温室气体减排、碳中和的紧迫压力[4]。太阳能以丰富的资源、省时的设施部署、广泛的应用场景、可观的装机容量等优势，已成为全球追捧的重要技术。

随着光伏技术的持续进步，新型技术如柔性薄膜太阳能电池和量子点太阳能电池等不断涌现，展现出光伏领域的创新活力[5]。仅 2023 年上半年，我国光伏新增装机同比增长了惊人的 154%，总量仅次于煤电，发电量达 2.7×10^{11} kWh，同比增长约 30%，平均利用率约 98%，是最具前景的可再生能源之一[6]。然而，光伏系统的生命周期内总能量产量能否补偿生产过程中的能源消耗仍存在争议[7]。光伏电厂基础设施建造阶段，尤其是光伏组件，会产生大量污染物。由于物质流和能量流的复杂性，仅关注某一阶段难以获得准确可靠的结果。2022 年，中国多晶硅产量达 8.3×10^{5} t，同比增长 63.4%；硅晶电池片产量约为 3.2×10^{11} W，同比增长 60.7%[8]。尽管市场份额巨大，但相关的碳足迹标准和体系仍有待完善。《产品与服务生命周期温室气体

收稿日期：2024-03-12　**录用日期**：2024-05-22

基金项目：浙江省“尖兵”计划项目 (2022C03030)；国家重点研发计划 (2022YFC3701501)

第一作者：刘含笑 (1987—)，男，博士研究生，高级工程师，gutounan@163.com　✉通信作者

评价规范》(publicly available specification 2050，PAS 2050) [9]、《产品生命周期计算与报告标准》(greenhouse gas protocol，GHG protocol) [10] 和 ISO 14067[11]3 项标准在国际产品碳足迹领域使用率超过 70%。日本、韩国等国家都制定了相关产品碳足迹评估和标示的通用规则，德国、瑞典等国还建立了碳足迹数据库。而中国主要依靠《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(GB/T 24040—2008) [12] 和《环境管理 生命周期评价 要求与指南》(GB/T 24044—2008) [13]。尽管我国明确了碳足迹体系发展蓝图，积极构建重点行业碳足迹数据库、确立重点产品碳足迹核算规则，并推动碳标签的国内外互认，但众多碳足迹指导条例仍处在起步制定阶段，例如《产品碳足迹量化要求和指南》[14]。

然而，除碳足迹标准体系建设不成熟之外，国内外相关研究也存在众多技术方法上的瓶颈。首先，光伏电力产品生产链较长，涉及原材料获取、制造、运输、使用、回收等多个环节，数据追踪溯源困难、存在差异性和不确定性，是实际评价过程中的技术难题。其次，国内外碳足迹核算方法、研究边界等尚未统一，结果缺乏可比性，评价结果经常受到质疑。再者，光伏行业低碳技术的研发和应用虽取得一定进展，但关键技术的自给率较低，难以充分利用核心技术来降低碳排放。此外，光伏电力产品低碳设计也需要考虑经济性和实用性的平衡，产品成本、性能和市场接受度等因素都是潜在的要求。因此，准确的碳评价是支撑产品碳足迹核查标准体系不可缺失的基础，推动了统一评估体系的建立、产品碳标签的制订以及突破碳关税壁垒，符合政策方向和市场发展需求。

综上所述，太阳能作为清洁能源的重要组成部分，双碳背景下光伏电力行业碳足迹评价与脱碳的必要性逐渐显露出来。该研究分析了 4 种碳足迹评价方法的适用性，并基于 LCA 方法，总结了光伏产品碳足迹评价方法在国内外的研究现状，详细介绍了中国开展光伏产品碳足迹评价的应用流程，解决了光伏发电的贡献能否补足自身产业链过程中的碳排放的问题，指出了该产业目前的影响因素、面临挑战和转型方向，就如何推广光伏发电的低碳设计提供了参考意义。

1　碳足迹的起源与发展

“碳足迹 (carbon footprint) ”的起源可追溯到里斯 (Rees) 和瓦克纳格尔 (Wackemagel) [15] 量化地描述人类生产消费活动与生态环境的相互作用关系及潜在影响。如今碳足迹考虑了全球变暖潜势 (global warming potential) 与整个生命周期，关注某个活动、组织的温室气体直接和间接排放总量，以 CO_2 排放当量 (CO_2e) 表示[16]。

自 1997 年《京都议定书》实施以来，工业化国家对温室气体排放归类并设定统一限值，引入了污染物排放权交易机制，推动了第三方碳足迹的审定与核查，进而形成了碳排放评价制度。2007 年“巴厘岛路线图”强化了“三可”原则，促进了国际碳排放评价制度的发展。耿涌等[16] 对碳足迹进行了详细的分类，涵盖了产品、企业、个人等多个层面，又依据研究尺度界定了碳足迹的所属区域、组织、部门等类别。英国为满足消费者绿色生活方式，碳信托在 2006 年推出了产品碳标签，构成了早起的碳评价制度，也为 2 年后标准协会 (BSI) 推出首个核算标准 PAS-2050: 2008 提供了重要参考价值[17]。之后，GHG Protocol-2011[10] 和 PAS-2050: 2011[9] 两项标准得到完善，与 ISO-14067 共同构成了当前的国际碳足迹评估标准[18]。早在 2012 年，INGWERSEN 与 STEVENSON[19] 就估计，已发表或正在开发的 PCR 总数超过 300 个，然而，现有的 PCR 种类和数量仍无法满足市场需求，需要进一步开发以提高碳评价的准确性。

2　光伏产品碳足迹研究现状

2.1　碳足迹评价体系

碳足迹评价作为一种准确量化指定阶段内产品、服务或生产过程的碳排放量的方法，它为决策者提供了关于如何减少碳排放的关键信息，帮助人们了解其对气候变化的影响，进而采取措施减少碳排放量。该概念源于生态足迹，但并非面积单位，而是表示一段时间内的累加碳重量[20]。目前，主要有投入产出法 (input-output，I-O) 、生命周期评价法 (life cycle assessment，LCA) 、IPCC 清单法和碳足迹计算器法。投入产出法是一种“自上而下”模型，通过建立平衡方程来反映各部分投入与产出的关系，尽管该方法在全面性和可信度上表现出色，但在微观个体层面的效果受到限制[21]。生命周期评价法则从生产到消亡全过程分析碳排放，弥补了投入产出的微观层面缺陷[22-23]。该方法涵盖目标定义、范围界定、清单分析、影响评价和改善评价 4 个

步骤，但实际应用中边界界定过程会引入截断误差，且本身数据搜集等环节也面临消耗较大等诸多困难[24]。IPCC 清单法考虑了几乎所有的温室气体排放源，碳排放量=活动数据×排放因子，但无法考证消费者层面的隐含碳排放[25]。碳足迹计算器可简易计算小团体 (个人或家庭) 的碳排放量[16, 26-27]。作为一种在线计算工具，其操作简单易懂，但准确性有待提高，意义在于提高公众低碳意识和促进绿色减排宣传。

董会娟和耿涌[28] 在投入产出法帮助下，综合性地分析了 2007 年北京碳排放特征，找到了直接和间接碳足迹的关系。ARVESEN 等[29] 采用生命周期法评估了挪威北部城市供电传输的碳足迹，得出的总碳足迹为 7.8 Kg·MWh^{-1}。KHAN 等[30] 深入探讨了金融发展、收入不平等、能源消耗和人均 GDP 对 CO_2 排放的影响，并基于此研究绘制了亚洲发展中国家的环境库兹涅茨曲线 (EKC) 以凸显各参数的潜在作用关系。BOAMAH 等[31] 以我国 1980—2014 年城市人口增长和国际贸易两个因素的变化对环境造成恶劣影响为例，揭示了人类面临的主要污染源，分别是进口、城市化和能源消耗，发现了经济与环境间的 N 形 EKC 关系。SUO 等[32] 结合上海市能源系统与污染排放情况，开发出了 2 阶段 2 型模糊随机规划法 (TTSP) ，能够有效处理不确定条件下碳和污染物减排对能源系统清洁性的影响，建立能源、环境、经济、政策的联系。

2.2 光伏产品碳足迹评价方法

PREHODA 和 PEARCE[33] 评估了美国燃煤和光伏发电的数据，通过量化采用光伏技术替代燃煤发电所挽救的生命，展示了清洁能源发电对生态和人类健康的益处。SUKUMARAN 和 SUDHAKAR[34] 分析了印度机场采用光伏发电后的运营数据，发现利用跑道周围空间实现光伏发电在经济和环境方面皆展现出有效性。REN 等[35] 采用投入产出视角、基于 EBM DEA 模型对光伏产业的减排和效率进行评估，发现区域气候、技术、政策等因素造成发电效率的差异性，东北等地还有待提高。SANTOYO-CASTELAZO 等[36] 通过并网光伏发电全生命周期评估，发现组件制造过程占产业总能源消耗和温室气体排放的 84%，太阳能级硅 (SoG-Si) 生产占总量的 35% 以上，能量回报时间为 1.6~2.3 年，温室气体排放量为 60.1~87.3 g CO_2e·kWh^{-1}。MARIGO[37] 定量分析显示 2000~2007 年中国产能以每年 70% 的速度增长，但上游硅材料短缺和中游创新技术不足是限制的重要因素。在意大利，CUCCHIELLA 等[38] 结合太阳能和经济投资收益，发现每千瓦安装可节省 8.5 t CO_2e 并带来 2 000 欧元的现金流。GUO 等[39] 计算了中国光伏发电系统在 1 000~3 000 h 不同年均有效光照持续时间下的碳回收期为 2~6 年，分析了太阳辐射水平对碳减排、回收效果的显著影响。赵若楠等[40] 和赵若楠等[41] 基于全生命周期评价，以 1 m^2 光伏组件单位产品为例，计算出多晶硅、硅片、电池片、电池组件碳排放分别为 94.07 (58.5%) 、23.38 (14.5%) 、15.38 (9.6%) 、28.02 (17.4%) kg CO_2e。

综上所述，源于美国的生命周期评价法 (LCA) 被广泛采用，能够系统、全面地量化产品全生命周期的环境影响，包括从原材料获取、能源生产、产品制造、使用到最终处理、循环和处置等全过程[42-44]。基于 LCA 法的光伏产品碳足迹评价补足了国内研究的空白，促进了可再生能源带来的经济、环境和政治效益，对广泛开展国际互认合作至关重要。

3 我国光伏产品碳足迹评价流程与标准

3.1 碳足迹评价体系

光伏电力产品由光伏电站生产，除混凝土、支架、线缆等基础设施外，主要由光伏组件阵列构成。由自然矿物硅矿开采出的硅原料经加工、精洗、运输至工厂；通过和木炭、煤、石油焦等碳质还原剂经高温反应被还原为工业硅，也称冶金硅或金属硅；经冶金法或改良西门子法提纯为光伏太阳能级多晶硅；后将其切割、清洗，放入铸锭炉中进行熔炼，形成硅锭，后切割得到薄切片。单晶硅组件则需要通过直拉法、区熔法等工艺提纯出单晶硅，再使用金刚砂或钨合金切割线进行切片。硅片经扩散制结、丝网印刷、烧结等工艺流程制备为电池片，与铝材、PVC 膜等材料被组装为光伏组件。最终，光伏组件和平衡系统共同构成光伏阵列，基于逆变器、变压器、汇流箱等基础设施，半导体材料吸收光能，激发电子跃迁形成电流，稳定生产光伏电力图 1。

3.2 光伏产品碳足迹评价基本程序

光伏产品碳足迹量化与评价基本程序包括：目的和范围的确定、产品功能单位、产品系统边界、生命周期清单分析、生命周期影响评价、生命周期解释和产品碳足迹量化评价图 2。采用“摇篮到坟墓”的生命周期系统边界，由于下游分配输送、使用售卖等碳转移因素的复杂性，实际碳评价范围参考过往经验可仅考虑上

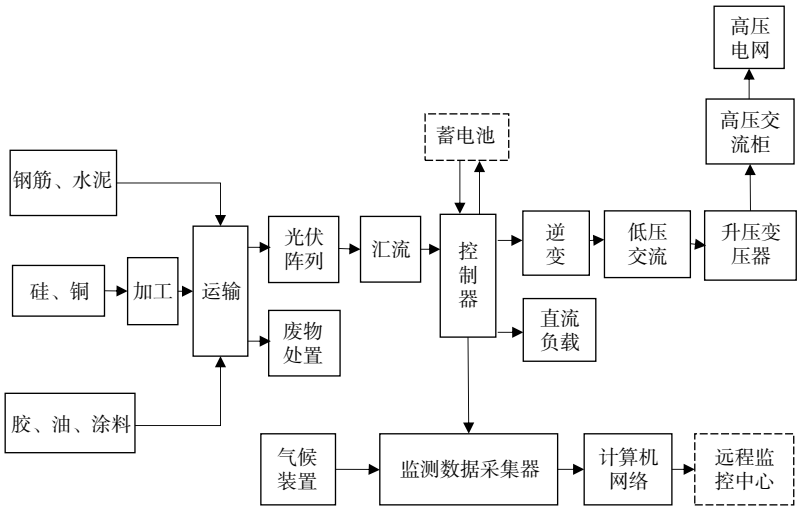
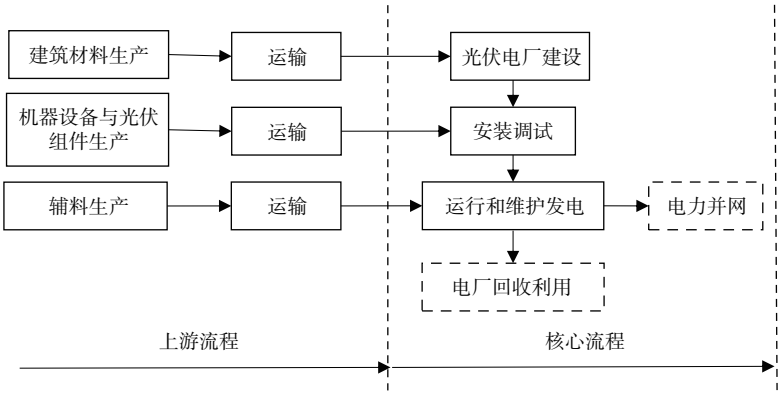


图 1　光伏电力产品典型工艺流程

Fig. 1　Photovoltaic power product typical process flow



注：虚框线表示不确定是否纳入碳足迹评价范围的步骤，需依据实际具体的要求进行界定。

图 2　光伏电力产品生命周期系统边界

Fig. 2　Photovoltaic power product life cycle system boundary

游与核心环节，下游环节不纳入边界范围。上游环节包括：建筑材料从开采到加工的全过程，机器设备与光伏组件的生产，水、涂料等辅料生产，各环节的交通运输；核心环节包括：光伏电厂基础设施建设及能源消耗，设备安装、调试及输入能源，运行、维护及辅料、能源消耗，电力因并网造成的电力损耗。数据分配时优先考虑根据产品的质量、体积等基础物理参数，若物理分配不适用时采用产品产值或利润比例的经济关系。

光伏产品环境收益采用系统扩展法进行计算，依据副产品或废料的实际利用，以抵消其所替代产品的环境负荷。电厂的回收利用与核心环节并列，涉及固、液、气体废物的产生，清洁设备运输潜在排放或泄露，以及处理过程中能源开采与消耗。电池板 25 年后仍以高于额定功率 80% 的状态工作的使用寿命也是重要指标[45]，需详细描述组件衰减率和年总发电量滑坡曲线，视实际情况与评价要求界定是否纳入碳足迹评价范围。

3.3　中国光伏产品碳足迹评价案例

LCA 在不确定性的情况下识别复杂价值链或流程中的环境问题[38]，用于防止和减少环境退化、污染和技术对人类健康的负面影响[46]，允许使用 ISO 标准完善评估过程，被公认为最适合的碳足迹评估方法，不仅可以评估发电系统的环境绩效，还可整体评估能源和材料的消耗[47-48]，推断出减排方案[49]。以我国华东某地典型单晶硅光伏电站 1 年内的数据为例，对光伏产品碳足迹进行评价，并考虑在 25 年最低使用年限标准下光

伏电站电池衰减率的问题。传统研究在计算光伏电站发电总量时，并未将电池衰减率纳入评价范围，导致发电总量计算结果偏高，电力碳足迹偏低。且我国要求光伏电站标准年限在 25~30 年左右，未来几年内，我国将迎来第一波大规模废弃组件的回收利用。依据具体的评价要求，考虑回收利用环节具体哪些步骤纳入碳足迹评价范围，极大程度降低了生命周期成本，大大提高了光伏电力产品碳足迹计算结果的准确性。该评价过程采用数据质量评价体系，用 5 分制评分从数据来源、类型、时间 3 个指标对现场数据、背景等数据等进行数据质量进行评价，取所有工序单元过程数据的算术平均值为评价结果。其中，产品生命周期碳足迹贡献占比绝对值超过 5% 的工序单元过程敏感性较高，基于 GB/T 24 040[12] 和 GB/T 24 044[13] 的规定，分析参数变化对碳足迹结果的影响。选择运输距离、使用寿命、设备能效等关键参数，依据生产情况、技术水平、政策变化等设定范围，衡量参数变化对光伏电力产品碳足迹的影响，进而寻找关键点的节能减排点以优化产品设计、改进生产工艺，达到降低产品碳足迹的目的。温室气体 g 的累积量按式 (1) 计算。

$$b_{T,F,g}=b_{F,g}+\sum_{i=1}^{n}a_i b_{i,g} \tag{1}$$

式中：F 为单位产品 1 kWh 上网电量；$b_{T,F,g}$为以功能单位 F 为基准的温室气体 g 的累积量 T，$kg\cdot kWh^{-1}$；$b_{F,g}$是以功能单位 F 为基准的温室气体 g 在产品生产过程的直接流量，$kg\cdot kWh^{-1}$；n 是单元过程 i 的数量；a_i为原辅料及能源等在产品系统中单元过程 i 每功能单位的直接消耗量，或硅矿在加工成硅片过程中产生的废料及烟气处理副产物等在产品系统中单元过程 i 每功能单位的直接利用量或处置量，$kg\cdot kWh^{-1}$、$Nm^3\cdot kWh^{-1}$、$MJ\cdot kWh^{-1}$、$kWh\cdot kWh^{-1}$；$b_{i,g}$是温室气体 g 在单元过程 i 的直接流量，$kg\cdot kg^{-1}$、$kg\cdot Nm^{3-1}$、$kg\cdot MJ^{-1}$、$kg\cdot kWh^{-1}$。

产品碳足迹量化评价借用温室气体 100 年内的全球变暖潜势，见表 1。

表 1 温室气体全球变暖潜势

Table 1 Greenhouse Gases Global Warming Potential

温室气体类别	化学式	全球变暖潜势 GWP100
二氧化碳	CO_2	1
甲烷	CH_4	27.9
氧化亚氮	N_2O	273
氢氟碳化物	HFCs	4.84~14 600
全氟碳化物	PFCs	7 380~12 400
六氟化硫	SF_6	25 200
三氟化氮	NF_3	17 400

碳足迹量化评价按公式 (2) 计算。

$$C=\sum_{i=1}^{n}(Q_i m_i) \tag{2}$$

式中：C 为产品碳足迹的计算结果，$kg\ CO_2e\cdot kWh^{-1}$；m_i 为温室气体 i 生命周期清单的结果，$kg\cdot kWh^{-1}$；$m_i=b_{T,F,g}$；Q_i为温室气体 i 的全球变暖潜势，$kg\ CO_2e\cdot kg^{-1}$。光伏电力产品生产系统全生命周期发电总量根据公式 (3) 进行。

$$E_{total}=\alpha\cdot P_{peak}\cdot RSL \tag{3}$$

式中：E_{total}为光伏组件全生命周期发电总量，kWh；α为组件单位年发电量，$kWh\cdot(kWp\cdot a)^{-1}$，在计算该值时应根据 GB/T 39 857—2021[43]，充分考虑光伏组件转换效率、串联失配率、光伏逆变器转换效率、电缆线路线损、变压器效率等环节因素；P_{peak}为组件标称峰值功率，kWp；RSL为基于电厂环境下光伏组建的理论寿命，a；根据 GB 55 015—2021[44] 最低要求取 25 年，以一标称峰值功率 550 kWp，首年效率衰减 2%，后续年效率衰减 0.5% 的单晶硅光伏组件为例，根据公式 (4) 计算出其全生命周期总发电量为 13 673 kWh。

$$E_{total}=\left(\frac{1a\cdot(1-2\%)+24a\cdot(1-0.5\%)}{25a}\right)\cdot 550\ kW_p\cdot 25a \tag{4}$$

据上述公式计算出华东某地典型单晶硅光伏电站全生命周期 1 年内并网光伏电力为 6.99×10^9 kWh，上游和核心环节碳足迹分别为 0.04 467、0.00 164 $kg\ CO_2e\cdot kWh^{-1}$，占总量 0.04 631 的 96.46%、3.54%。可见，光伏产品上游环节能耗与排放占据了整个流程的绝大部分，组件制备过程节能减排潜力巨大。

4 讨论

4.1 光伏产品碳足迹评价的影响因素

1) 光伏电池分为单晶、多晶硅、有机、染料敏化、纳米线等；光伏电站分为集中式和分布式，还存在户

用、上网等不同终端消耗方式，产品类型的差异是影响碳足迹的根本原因之一。以硅为例，FAN 等[50] 基于生命周期法，对比了 4 种硅片在产生相同电量时的总环境影响指数 ECER-135，结果显示，S-P-Si、S-S-Si 和 M-Si 硅片对环境的影响分别是 M-P-Si 硅片的 3.3、4.5 和 2.8 倍。此外，美国普林斯顿大学成功研发出一种具有特殊晶体结构的半导体钙钛矿太阳能电池，不仅具备商业可行性，而且可在室温下制造。这种电池在 35 ℃ 下连续以 5 a 照明时，能稳定维持 80% 以上的峰值效率，从而显著减少了制备过程中的碳排放量[51]。而集中式和分布式的结构布局，也通过规模大小、运输距离长短、建设运营成本、气候资源丰富程度影响着生命周期内的碳排放量。

2) 光伏产品生产消耗的能源种类主要为煤炭、石油、电力和天然气，以烧结、运输耗能最为严重，一次能源供应的 80% 仍依赖于化石燃料，火力占据行业的 70%[52]。FAN 等[50] 发现，若在生产过程中以水力发电替代火电，硅片的 ECER-135 将显著降低约 50%。为优化生产过程的能耗，在冬季室外温度低于 15 ℃ 时，天合光能将层压机真空泵置于室外以代替冰水机组进行降温，仅 4 个月的工作时长就节约 2.45×10^5 kWh，减少碳排放 201 t；将电池车间夏季空调由风冷热泵转为水源热泵制冷，不仅提高了安全系数，每年还节约用电 7.89×10^5 kWh，减碳排放量约 650 t[53]。另外，学习瑞士以水电火车作为交通运输首要选择、车间内区域新风循环系统应用等方式，都极大降低了光伏产品的碳足迹，节约了隐性能源开支。

3) 优化工艺流程分为创新核心部件的制备技术和新型材料在辅助零件的应用。LAURA 等[54] 基于 LCA 比较了改良西门子法、升级冶金级硅 (UMG-Si) 新技术与传统制备方法对环境的影响，发现 Ferrosolar 直接冶金路线工艺使得温室气体排放量减少了 20%、能源回报周期缩短了 25%，在能源消耗和现金成本方面也展现出巨大优势。另外，日本日清纺织公司利用特殊橡胶提升了电池板保护膜的密封性，在 85 ℃、85% 湿度的实验环境中经过 3 800 h 的高电压破坏性测试，仍未出现质量退化[55]，可见辅助零件的开发，提升了产品性能，从侧面降低了成本。技术进步和新型材料的应用通过减少生产过程中的碳排放、延长电池板使用寿命等方式，直接或间接地优化了产业结构，有效实现了节能减排。

4) 减排技术是降低光伏产品碳足迹的最直接途径[56]。我国预计在 2030 年迎来光伏组件报废高峰，超过 90% 的材料可通过回收再利用减少碳排放。然而，目前回收规模较小，缺乏完整的产业链，亟需补足这块空白[57]。李群生[58] 将化工精馏技术应用于多晶硅生产，实现了低能耗、高质量，提高了我国多晶硅的国际竞争力。董莉等[59] 通过热处理法、有机溶剂溶解法、无机酸溶解法和物理分离法，循环利用了硅 (3.46%) 、玻璃 (68%) 、铝 (17.74%) 等有价值的资源，具有极大的环境与经济价值。

4.2　光伏产品碳足迹评价的挑战

1) 统一评价体系、基础数据库、监管机构暂未形成。生命周期法、投入产出法与 IPCC 清单法是国际上主流的碳足迹评价方法，但在核算模型、认证体系皆未形成统一的评价标准，不同国家和地区对同一产品的核算结果存在差异，难以寻求生产过程中的技术水平和碳排放的共同点。在 2022 年，我国多晶硅、电池及组件的产量均实现了超过 50% 的同比增长，这一成绩使我国在这 3 个领域均稳居全球领先地位，但缺乏产业上下游的全生命周期碳排放基础数据是当前面临的最主要难题之一。尽管瑞士的 Ecoinvent 和德国的 GaBi 数据库可作为参考，但在中国本土的适配性还有待商讨[42]。而现存评价结果缺乏第三方认证机构的审查与监管，其权威性和公信力也常受到质疑。

2) 数据与影响因子的复杂性。“摇篮到坟墓”的碳足迹评价，需要完成从原材料开采到末期处理完整的数据采集和评估，本身工作量已经足够庞大。此外，同产品不同技术路线的碳排放量存在显著差异，其产品类型、生产耗能结构、工艺制造流程、低碳减排技术都是碳足迹评价的主要影响因素。碳排放因子的不确定性与复杂性，增加了碳足迹评价的难度，尤其是在下游环节的分配、输送与回收过程。光伏电力产品在下游供给用户时，电网分配复杂、电力输送损耗，涉及碳转移等影响因素，回收过程又引入电池衰减率、发电量等变量。要实现光伏产品真正意义上从“摇篮到坟墓”的全生命周期评价，需要关注影响下游环节的复杂因素并尽快与上游、核心环节相结合。

4.3　光伏与其他新能源的比较分析

1) 技术：太阳能与风能借助太阳光和风等气候资源发电，属于间歇性发电。二者基础设施都较为成熟，但光伏组件生产制造过程能耗最高，相同装机容量下单位发电量达到 2.29×10^6 kJ，能源回收约为 1.58 年；而风力发电仅 6.80 kJ，0.53 年。除太阳能电池的制造技术需要进一步降低碳排放、提升转换效率之外，光伏

相较其他清洁能源能够大范围推广的。

2) 经济：在政府政策支撑与福利补贴的情况下 1 kWh 光伏发电与风力发电成本约为 0.21 元，生物质发电为 0.05 元。相较于传统燃煤火力发电，其他发电方式的经济成本普遍较高。平价上网是清洁能源发挥主导地位必须达到的前提条件。

3) 环境：光伏发电生态足迹为 4.141 hm^2，远高于风能的 0.002 hm^2，比生物质能与核能的碳足迹低[60]。核能虽拥有巨大潜力，但对技术与人员要求较高，运营、维护、处理成本大，且在开发利用过程存在泄露、辐射风险。因此，风电在某些维度是最为理想的清洁能源，但光伏更加容易实现群众的普遍利用，可通过后期技术进步逐步补足新能源现存的能耗、转换率、新材料等方面的劣势，将进一步降低碳排放、提升转换效率。

4.4 光伏产业绿色低碳转型方向

1) 建立成熟的废旧组件回收机制。未来 5 年内，全球可回收的废旧组件达到 1.5×10^6 t，电池组件回收再利用是能否实现固废资源化的关键[61]。中国在未来几年即将迎来第一批报废高峰，硅若不妥善处理，不仅会造成生态环境的破坏，而且会造成大量资源浪费。关注废旧组件的回收机制，环境、经济效益可以发挥最大优势，且可提高回收赛道的竞争力。可在全国指定范围内设立区域级的光伏废旧组件回收站点，制定统一管理标准与要求。同时，利用物联网、大数据、云计算等网络技术，与光伏制造商、安装商和回收企业建立合作关系，构建逆向物流体系；推动试行废旧组件回收市场交易平台，在二级市场促进废旧材料的回收交易；建立智能回收管理系统，实现废旧组件信息追踪管理、闭环回收和二次利用。

2) 控制上游资源需求量，降低碳排放与发电成本。光伏产业上游资源需求多样，主要包括硅料、铝合金、玻璃和 PET 膜等高耗能生产材料[61]。预计 2025 年我国多晶硅实际产能需求约 1.2×10^6~1.5×10^6 t，相比 2020 年底扩张 2~3 倍[61]，集中碳排放是可预见的。短期资源供给紧张和市场机制造成发电成本高出 11%~74%，需尽早达到平价惠民的重要拐点。可研发具有高转换效率、长寿命和低衰减的光伏材料与组件，减少单位发电量所需的原材料量；改进逆变器和储能系统的效率，减少能量转换过程中的损失；结合智能监控系统、调度系统、回收系，减少运营成本和对新资源的需求；实施资源税和碳排放权交易制度，鼓励金融机构为光伏企业提供绿色信贷和融资支持。

3) 优化原材料类型与生产耗能结构。硅制电池板在选择与加工过程中，要偏向环境友好型、导电性能高的硅材。例如染料敏化太阳能电池 (DSC) 和有机太阳能电池 (OSC) 皆比硅制电池在可获得性、制造成本、环境影响、稳定效率都展示出部分优势。同时，建立能源管理系统，实现实时信息追踪、监测、控制生产中的能源消耗，并通过数据分析和优化算法，达到能源的合理利用与节约目的。充分发挥清洁电力、高低温自然天气的作用以代替煤炭、石油、天然气的消耗，也可极大节约光伏产品在生产过程中的碳排放。通过采用高效节能设备、优化设备配置及运行参数等手段，提升生产设备的能源使用效率。同时，借助互联网技术，搭建全流程管理平台，实现光伏组件生产线的智能化管理与控制。

4) 加强低碳技术推广和产品升级，精进光伏产品工艺流程和排放物减排技术。过去，依托于 PERC 技术，我国规模化生产的 p 型单晶电池转换率约 23.2%，该技术下黑硅多晶电池转换率比常规款高出将近 2%[8]，还有 Ferrosolar 升级冶金法和蒸发脱盐技术。通过这些手段可降低生产碳排放量、提高转换效率、延长使用寿命、中和废弃排放物。应组织技术推广活动，向企业普及低碳技术的优势和应用方法；以课程、培训、考核等方式，加强相关从业人员的技术水平和环保意识；积极引入废水、废气处理技术和如节能灯具、高效电机等生产过程中的节能降耗技术；从改变原材料物理化学特性或寻找可替代环境友好型资源入手升级产品性能。从而迭代升级，达到更加绿色的生产方式。

5) 保持并加大因地制宜的帮扶创新政策与国际合作。我国光伏发电必须立足于区域国情，驱动创新发展战略，结合光伏企业、院校、科研机构等多方力量，共同研发低碳技术，促进科研成果投入实践的转化[35]，平衡太阳能资源丰富地区科技创新力不足的缺陷[35]。政府可以出台相关政策以扶持建立光伏技术创新基金，鼓励企业研发和应用低碳技术，对采用环保原材料和生产工艺的企业给予税收减免、资金补贴等支持，并为用户发放光伏用电补贴。建立绿色认证制度，对符合绿色低碳标准的光伏产品进行认证和推广，提高市场接受度和竞争力。同时，要加强国际合作、跨行业合作，从产品、销售、使用、回收等角度制定不同技术标准和碳足迹评价导则，全方位实施相关管理策略，持续推进光伏产业的低碳发展。

5　结论与展望

中国碳排放总量常居世界前列，与发达国家相比，面临更严峻的经济发展与低碳减排相矛盾的挑战，光伏产品碳足迹评价是未来该行业实现可持续发展的必经之路。本文基于 LCA 在中国的应用与研究，得出以下结论与展望。

1) 中国暂未形成完善的碳足迹评价体系，按生命周期法，光伏产品碳足迹可划分为“摇篮到坟墓”3 个流程，下游涉及分配、输送等复杂因素，一般计算时仅考虑上游和核心环节，回收利用与核心环节并列。

2) 光伏产业链上游环节需大量耗能材料，硅制电池组件过程的碳排放量超过整个流程总量的 80% 以上，有巨大的节能减排空间。

3) 产品类型、用能结构、工艺流程、减排技术是光伏产品碳足迹评价的主要影响因素，通过改进原材料技术以提供较高的效率、优化零部件生产工艺、以电动汽车运输、提高回收效率等方式，极大降低了光伏产品的生命周期成本。

4) 初始投资高、单位电力成本高、投资回报期长、转换效率低是制约光伏产业的主要缺点，要通过技术优化来控制发电成本，适当减少基础设施建设安装和运营成本，避免盲目追求扩大发电面积而造成资源浪费、回报周期长等情况。

在全球碳中和的背景下，光伏产业的发展是我国电力行业脱碳的关键，LCA 方法在我国光伏产品碳足迹评价的应用，既迈出了量化产品碳足迹的实践步伐，也为国际社会贡献了宝贵的案例经验与支持。

参 考 文 献

[1] WENNERSTEN J R, ROBBINS D. Rising tides climate refugees in the twenty-first century[J]. Indiana University Press, 2017, 357(6346): 41.

[2] MERONE L, TAIT P. ‘Climate refugees’: is it time to legally acknowledge those displaced by climate disruption?[J]. Australian and New Zealand Journal of Public Health, 2018, 42(6): 508-509.

[3] 马溪原, 陈彬, 盘和林, 等. 电力碳排放核算与监测体系亟待升级[N]. 中国能源报, 2021-09-20.

[4] 徐四川, 马惜钰, 周天皓, 等. 碳排放 CO_2 温室效应机制[J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2023, 45(2): 513-522.

[5] 李波, 赵建红, 赵鑫波, 等. 新型太阳能电池的研究进展及发展趋势[J]. 能源研究与信息, 2021, 37(1): 32-39.

[6] WANG Y, ZHOU S, HUO H. Cost and CO_2 reductions of solar photovoltaic power generation in China: Perspectives for 2020[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 370-380.

[7] HOU G, SUN H, JIANG Z, et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China[J]. Appl Energy, 2016, 164: 882-890.

[8] 王世江, 江华, 李嘉彤, 等. 中国光伏产业发展路线图 (2022-2023 年)[R]. 中国光伏行业协会, 2023: 2-23.

[9] TRUST G C. PAS 2050-Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services[S]. British Standards Institution, 2011.

[10] World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Greenhouse Gas Protocol: Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard[S]. 2020.

[11] GENEVA. ISO 14067: 2018 Greenhouse gases-Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification[S]. International Organization for Standardization, 2018.

[12] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24040—2008 环境管理 生命周期评价 原则与框架[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[13] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24044—2008 环境管理 生命周期评价 要求与指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[14] 中国国家标准化管理委员会. 产品碳足迹量化要求和指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.

[15] WACKERNAGELM, REES W. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth[J]. New Society Publishers, 1998, 23(2): 35.

[16] 耿涌, 董会娟, 郗凤明, 等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(10): 6-12.

[17] 白伟荣, 王震, 吕佳. 碳足迹核算的国际标准概述与解析[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7486-7493.

[18] 计军平, 马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济, 2011(4): 76-80.

[19] INGWERSEN W W, STEVENSON M J. Can we compare the environmental performance of this product to that one? An update on the development of product category rules and future challenges toward alignment[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 24: 102-108.

[20] HAMMOND G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue[J]. Nature, 2007, 445(7125): 256.

[21] MILLER R E, BLAIR P D. Input-output analysis: foundations and extensions[J]. Cambridge university press, 2009, 51(1): 196-197.

[22] MITCHELL P, HYDE R. 'Bottom-up'approach to the implementation of environmental life cycle assessment (LCA); proceedings of the Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, F, 1999[C]. IEEE: 509-514.

[23] 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 71-78.

[24] LENZEN M J J O I E. Errors in conventional and input - output-based life-cycle inventories[J]. Journal of Industrial Ecology, 2000, 4(4): 127-148.

[25] 王文美, 陈颖, 张宁, 等. IPCC 方法在区域温室气体清单编制中应用初探[J]. 环境科学学报, 2013, 26(1): 13-15.

[26] 陈丽娜, 马慧, 吴一娜. 基于 WEB 的中文碳足迹计算器的研究[J]. 价值工程, 2013(1): 186-187.

[27] 单力, 阿柱. 计算你的碳足迹[J]. 环境, 2007(8): 54-56.

[28] 董会娟, 耿涌. 基于投入产出分析的北京市居民消费碳足迹研究[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 494-501.
[29] ARVESEN A, HAUAN I B, BOLSØY B M, et al. Life cycle assessment of transport of electricity via different voltage levels: A case study for Nord-Trøndelag county in Norway[J]. Applied Energy, 2015, 157: 144-151.
[30] KHAN A Q, SALEEM N, FATIMA S T J E S, et al. Financial development, income inequality, and CO_2 emissions in Asian countries using STIRPAT model[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(7): 6308-6319.
[31] BOAMAH K B, DU J, BOAMAH A J, et al. A study on the causal effect of urban population growth and international trade on environmental pollution: evidence from China[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 25: 5862-5874.
[32] SUO C, LI Y, JIN S, et al. Identifying optimal clean-production pattern for energy systems under uncertainty through introducing carbon emission trading and green certificate schemes[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 299-316.
[33] PREHODA E W, PEARCE J M J R, Reviews S E. Potential lives saved by replacing coal with solar photovoltaic electricity production in the US[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 710-715.
[34] SUKUMARAN S, SUDHAKAR K. Fully solar powered airport: A case study of Cochin International airport[J]. Journal of Air Transport Management, 2017, 62: 176-188.
[35] REN F R, TIAN Z, LIU J, et al. Analysis of CO_2 emission reduction contribution and efficiency of China's solar photovoltaic industry: Based on Input-output perspective[J]. Energy, 2020, 199: 117493.
[36] SANTOYO-CASTELAZO E, SOLANO-OLIVARES K, MARTÍNEZ E, et al. Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3 kWp: A case study for Mexico[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 316: 128314.
[37] MARIGO N J P I P R, Applications. The Chinese silicon photovoltaic industry and market: a critical review of trends and outlook[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2007, 15(2): 143-162.
[38] CUCCHIELLA F, D'ADAMO I, KOH S L J J O C P. Environmental and economic analysis of building integrated photovoltaic systems in Italian regions[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 98: 241-252.
[39] GUO X, LINM K, HUANG H, et al. Carbon footprint of the photovoltaic power supply chain in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 626-633.
[40] 赵若楠, 董莉, 白璐, 等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751-2757.
[41] 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.
[42] 丁冠元, 张军华. 双碳背景下我国光伏行业碳排放数据库建设必要性分析[J]. 信息技术与标准化, 2023(12): 53-56.
[43] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 39857-2021 光伏发电效率技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
[44] 中国国家标准化管理委员会. GB 55015-2021 建筑节能与可再生能源利用通用规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
[45] 《高科技与产业化》编辑部摘编. 延长太阳能电池板寿命[J]. 高科技与产业化, 2014(7): 12.
[46] NITA A. Empowering impact assessments knowledge and international research collaboration-A bibliometric analysis of Environmental Impact Assessment Review journal[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2019, 78: 106283.
[47] 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.
[48] GIRARDI P, GARGIULO A. Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies[M]. Cham: Springer, 2019: 17-30.
[49] PARISI M L, FERRARA N, TORSELLO L, et al. Life cycle assessment of atmospheric emission profiles of the Italian geothermal power plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234: 881-894.
[50] FAN M, YU Z, MA W, et al. Life cycle assessment of crystalline silicon wafers for photovoltaic power generation[J]. Silicon, 2021, 13: 3177-3189.
[51] 《机械制造》编辑部摘编. 钙钛矿太阳能电池寿命延长至 30 a[J]. 机械制造, 2022, 60(6): 54.
[52] 王喜平, 任雅丽. 绿色低碳政策对电力行业低碳转型的影响效应研究[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(10): 39-51.
[53] 王沛. 天合光能光伏组件通过 BSI 产品碳足迹认证[J]. 天合光能, 2014(12): 70-72.
[54] MÉNDEZ L, FORNIÉS E, GARRAIN D, et al. Upgraded metallurgical grade silicon and polysilicon for solar electricity production: A comparative life cycle assessment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 789: 147969.
[55] 《科技创新导报》编辑部摘编. 新材料可让太阳能电池板寿命延长[J]. 科技创新导报, 2014, 11(17): 4.
[56] 刘夏青, 张建华, 梁思哲, 等. 钢铁产品碳足迹: 概念内涵、影响因素与对策建议[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(2): 1-6.
[57] 赵志杰, 赵艳祥. 废旧晶体硅光伏组件回收利用技术及其环境经济效益分析[J]. 环境保护前沿, 2022, 12: 295.
[58] 李群生. 氯硅烷和多晶硅精馏节能减排与提高质量的技术与应用[J]. 新材料产业, 2008(9): 60-66.
[59] 董莉, 刘景洋, 张建强, 等. 废晶体硅光伏组件资源化处理技术研究现状[J]. 现代化工, 2014, 34(2): 20-23.
[60] GAO C, ZHU S, AN N, et al. Comprehensive comparison of multiple renewable power generation methods: A combination analysis of life cycle assessment and ecological footprint[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 147: 111255.
[61] 杨俊峰, 李博洋, 霍婧, 等. "十四五"中国光伏行业绿色低碳发展关键问题分析[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2021(12): 57-62.

(责任编辑: 金曙光)

Carbon footprint evaluation and low carbon design of China's photovoltaic products based on LCA methodology

LIU Hanxiao[1,2,3,4,*], ZHU Qianlin[5], LIN Qingyang[6], ZHOU Ye[7], ZHU Haijian[1,8], LIU Xiaowei[2], LIU Meiling[1], SUN Li[1]

1. Feida Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shaoxing 311800, China; 2. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. Zhejiang Environmental Protection Group Eco-Environmental Research Institute, Hangzhou 310030, China; 5. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 6. Zhejiang University, Hangzhou 310000, China; 7. Shanghai E-Carbon Digital Technology Co., Ltd., Shanghai 201308, China; 8. China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Engineering Company Limited, Taiyuan 030000, China

*Corresponding author, E-mail: gutounan@163.com

Abstract The power sector, as the largest source of carbon emissions in China, faces significant challenges in emission reduction. Since photovoltaic (PV) technology play a crucial role in facilitating China's power sector to achieve net-zero transition, it is of great significance to conduct a comprehensive and intuitive life cycle assessment (LCA) of the greenhouse gas emissions of photovoltaic products. Introduces the standards, development process, assessment framework and methods of carbon footprint assessment for PV products. The advantages, disadvantages, and applicability of input-output analysis, life cycle assessment, and IPCC inventory analysis methods were compared. Carefully examines the application procedure and computational techniques employed in utilizing the LCA method for assessing the carbon footprint of PV products in China. The research based on the main study boundaries of raw material supply, energy input and output, transport, construction, installation, commissioning, operation and maintenance, the system boundary was delineated into upstream, core, and downstream stages, elucidating scenarios for including downstream processes in carbon assessment. The product types, structure of the energy use, process workflows, emission reduction technologies were carefully reviewed. This was followed by outlining the challenges in carbon footprint assessment for PV products, including methodologies, costs, technologies, and policies. In addition, a comparative analysis was conducted among PV and other renewable energy sources in terms of technological, economic, and environmental benefits. Find that the resource demands in the upstream PV module preparation process are diverse, with carbon emissions accounting for over 80% of the total. Finally, concludes future directions and recommendations for green transformation and development of the PV industry through low-carbon design. It emphasized that the development and utilization of clean energy, typified by PV, were indispensable to fulfill carbon neutrality and sustainable development goals globally.

Keywords photovoltaic; carbon footprint; life cycle assessment