

附件7

《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 光伏组件（征求意见稿）》

编制说明

标准编制组

二〇二五年三月

目 录

1	项目背景	1
1.1	任务来源	1
1.2	工作过程	1
2	行业概况及标准制订的必要性	2
2.1	光伏行业概况	2
2.2	标准制订必要性	6
3	国内外相关标准情况的研究	7
3.1	主要国家、地区及国际组织相关标准情况的研究.....	7
3.2	国内相关标准情况的研究.....	9
3.3	本标准与国内外同类标准或技术法规的对比.....	9
4	标准制订的基本原则和技术路线	10
4.1	标准制订的基本原则.....	10
4.2	标准制订技术路线.....	11
5	标准主要技术内容	11
5.1	标准适用范围	11
5.2	标准结构框架	12
5.3	术语和定义	12
5.4	标准主要技术内容确定的依据.....	12
5.5	企业案例试算	15
6	标准实施建议	18

1 项目背景

1.1 任务来源

根据《2030年前碳达峰行动方案》《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》关于探索建立重点产品全生命周期碳足迹标准有关要求，生态环境部印发《关于建立我国碳足迹管理体系的实施方案》（环气候〔2024〕30号），明确提出优先聚焦电力、煤炭、水泥、玻璃、锂电池、新能源汽车、光伏和电子电器等重点产品制定发布产品碳足迹核算规则标准。为此生态环境部立项编制《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 光伏组件》，项目编号为2024-61。项目由中国环境科学研究院承担，联合相关单位开展标准编制工作。

1.2 工作过程

（1）成立标准编制组

2024年4月，组建标准编制工作组，由中国环境科学研究院、中国科学院电工研究所、中国科学院生态环境研究中心、中国可再生能源学会联合承担标准编制工作。讨论确定了标准的主要内容及分工，制定了标准编制计划，确保各项任务有序推进，设立工作组组长，负责整体工作的推进、协调与沟通。

（2）碳足迹标准现状和行业概况调研

2024年4月-5月，编制组收集和整理了国内外关于碳足迹的政策法规、标准体系、核算方法等方面的资料；同时系统梳理了光伏组件企业生产及温室气体排放情况，通过会议、访谈等方式梳理出我国当前光伏组件产品碳足迹标准存在的主要问题，如边界不统一、协同性差、标准适用性及可操作性差等。

（3）编制开题论证报告和标准草案

2024年5月，编制组先后组织多次标准内部研讨会，就标准的系统边界、数据取舍、数据收集原则、核算方法等主要内容进行反复研讨，形成标准开题论证报告和标准草案。

（4）开题论证

生态环境部环境标准研究所组织召开标准开题论证会，组织相关专家对开题论证报告和标准草案进行了论证，会议通过了该标准的开题论证，并提出了下一步的工作建议。

（5）企业调研与碳足迹因子研究

2024年6月-8月，标准编制组先后开展了文献调研和国内外碳足迹因子数据库比对等工作，梳理得到光伏组件产品碳足迹核算所需的材料、能源、运输等因子需求；同时标准编制组对陕西、内蒙古等光伏企业较为集中的地区开展调研，进行了碳足迹因子的优化和企业试算，并根据企业反馈的意见和建议，对标准文本进行多次修改、优化。

（6）编制标准征求意见稿及编制说明

2024年9月-10月，标准编制组多次组织召开内部研讨会，就标准的主要技术内容等关键问题进行研讨，并形成了标准征求意见稿初稿及编制说明初稿。

（7）召开标准征求意见稿技术审查会

2024年10月31日，组织召开了《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 光伏组件》技术审查会，审查专家组听取了标准编制组对标准文本和编制说明的介绍后，一致同意通过

该标准征求意见稿技术审查，并提出了完善建议。

2024年11月-至今，编制组根据专家意见对标准进一步修改完善，形成了《温室气体产品碳足迹量化方法与要求 光伏组件》（征求意见稿）及编制说明，向社会公开征求意见。

2 行业概况及标准制订的必要性

2.1 光伏行业概况

2.1.1 行业基本情况

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17.46GW提升至2023年的411GW，2024年仍保持快速增长的态势。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，中国光伏新增装机量由2010年的0.61GW提升至2024年的277.57GW，2024年中国新增装机量为全球第一，是全球光伏装机的主要推动者之一。2023年，集中式光伏新增装机容量排名前十的省份包括云南、新疆、甘肃、河北、湖北、青海、陕西、山西、内蒙古、宁夏。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。

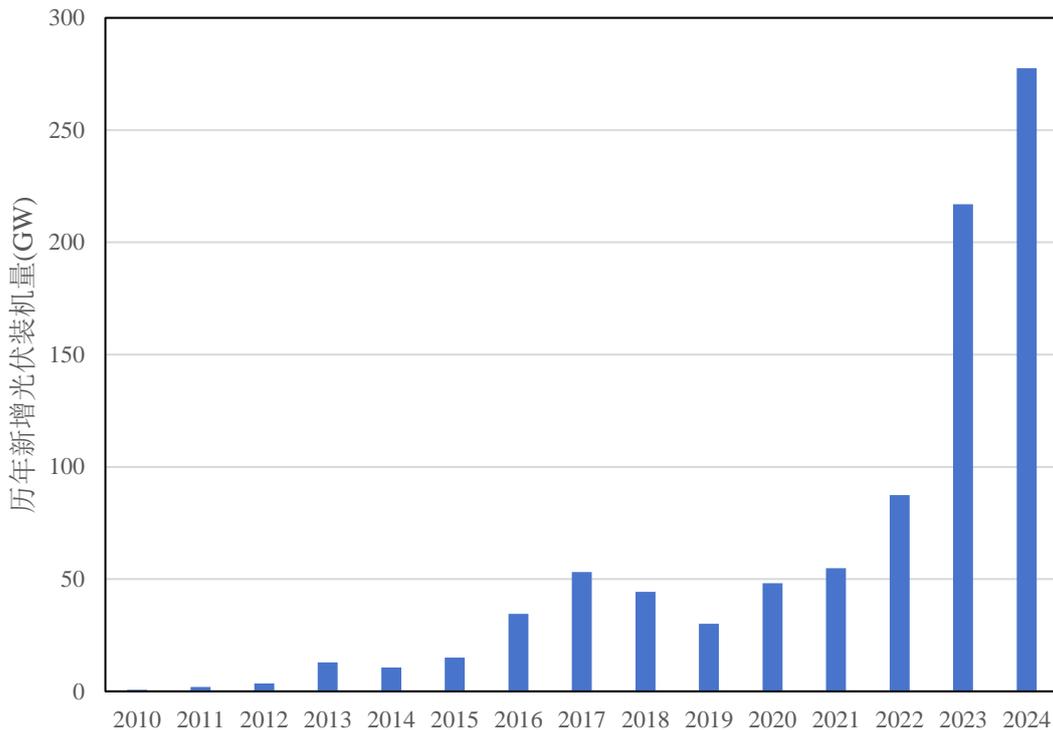


图 2-1 中国历年新增光伏装机量变化图

光伏行业涉及将太阳能转换为电能的技术和过程，主要通过使用基于半导体材料（如硅）的光伏电池实现。这些电池能够捕捉太阳光并将其转化为电流，是实现太阳能电力转换的关键组件。光伏系统一般包括光伏面板、逆变器、电池存储和监控系统，这些组件协同工作，高效地将太阳能转化为可用的电能。整个系统的工作原理依赖于光生伏打效应，即当光子（太阳光中的能量单元）照射到光伏电池上时，会激发电子从价带跃迁到导带，从而在电子和空

穴之间形成电位差，并通过外部电路产生电流。这种转换过程不涉及任何移动部件，使得光伏系统特别耐用且维护成本低。从 20 世纪 50 年代初应用在航天领域到现在广泛部署在商业和住宅中，光伏技术已经经历了显著的进步和成本效益的提高。随着技术的不断成熟和规模化生产，制造成本已大幅下降，使得光伏发电成为越来越实惠的可再生能源解决方案。

在全球范围内，随着人们对可再生能源需求的增加和对环境可持续性的关注，光伏行业得到了快速发展。政府通过各种政策，如补贴、税收优惠和可再生能源配额等措施，进一步推动了这一技术的普及。此外，不断的技术创新，例如叠层太阳能板和透明太阳能电池等，也在推动光伏行业向更高效率和更广应用领域发展。光伏技术的普及和应用提供了一种减少碳排放和对传统化石燃料依赖的有效方式，预示着在全球能源结构转型中将扮演更加重要的角色。随着成本的进一步降低和效率的不断提高，光伏行业未来的发展潜力巨大，为实现全球能源的可持续发展提供了宝贵的技术支撑。

2.1.2 发展历程

中国光伏行业的发展历程可以划分为四个阶段：缓慢发展期（1970 年-2004 年）、快速成长期（2005 年-2012 年）、高速发展期（2013 年-2018 年）和平价上网期（2019 年至今）。

（1）缓慢发展期：中国太阳能电池技术从航空向民用领域过渡，宁波、开封等地陆续成立民用太阳能电池厂。进入 21 世纪，全球环境问题的加剧催生了各国政府推出的再生能源补贴政策，光伏开始步入高速发展。21 世纪初，无锡尚德成功建立 10MW 太阳能电池生产线，大幅缩短了中国与国际光伏产业的差距。

（2）快速成长期：无锡尚德在美上市，带来的“首富效应”成为中国光伏产业的加速器。2006 年，中国颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，进一步促进了可再生能源的开发利用，标志着中国光伏产业发展进入快车道。2009 年的“金太阳工程”政策则专用支持促进光伏发电产业技术进步和规模化发展。

（3）高速发展期：全国光伏发电累计装机容量增长超过 10 倍。2013 年 7 月，国务院提出“分布式光伏发电”和“光伏电站”的二分法，并分类制定电价和补贴政策。同期“国五条”的细化配套政策正式下发，催生了中国光伏应用市场的“黄金时代”。

（4）平价上网期：2019 年，国家发展改革委印发《关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知》，拉开了光伏平价上网时代的大幕。2020 年竞价政策提前下达，但补贴退坡趋势愈发明显，且电价继续下调，行业开始进入提质增效发展阶段。2022 年，政策指导加快推动以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地建设。中国光伏新增装机量连续 10 年位居全球首位，展现了中国光伏行业的强大实力和发展潜力。

2.1.3 行业现状

中国光伏行业在 2023 年呈现出显著的增长和发展，其中光伏主材的供应量大幅增长，技术进步和出口业绩突出。根据中国光伏行业协会的统计，2023 年高纯多晶硅产量达到 143 万吨，增长率高达 67%；硅片产量为 622GW，同比增长 67.5%；电池片产量达到 545GW，增长率为 64.9%；组件产量则达到 500GW，增长率高达 69.3%。这些数据不仅显示了产量的大幅提升，还突出了产业结构的优化和技术进步。

在技术和效率方面，高纯多晶硅的生产电耗显著降低，综合电耗降至 57 千瓦时/千克，

还原电耗更是降至 43 千瓦时/千克。这一改进表明，光伏行业在能效和环保方面取得了显著进展。同时，大尺寸硅片市场的占有率也在持续增长，182mm 以上的硅片占比提升至 98%，这标志着市场对高效率产品的需求增加。N 型电池片的市场占有率提升至 25% 以上，并主导了增量产能的提升，这反映了光伏行业在向更高效能和更环保技术转型的趋势。此外，组件最大功率的提升和双面组件市场占有率的快速扩大，进一步证明了产品性能的持续优化和市场接受度的增强。

出口方面，2023 年中国光伏产品的出口量也实现了高增长。硅片、电池片和光伏组件的出口量分别达到 70.3GW、39.3GW 和 211.7GW，同比增长分别为 93.6%、65.5% 和 37.9%。这一跃进不仅显示了中国光伏产品在全球市场的竞争力，还反映了国际市场对中国光伏产品的高度依赖。在出口市场分布上，欧洲和亚洲是主要的出口目的地，分别占出口总额的 42% 和 40%。荷兰、巴西、西班牙和印度则保持为中国光伏产品的前四大出口市场。

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。通过对光伏组件碳足迹量化方法的探索和分析，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，如何帮助中国光伏企业优化碳管理能力，也是本标准制定的重点之一。

2.1.4 光伏组件生产工艺及污染物排放

光伏组件的生产组装已经形成了一条完整的工业产业链。光伏组件的生产流程如下图所示，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足迹核算时，需要将硅料、硅棒、硅片、电池片和组件，整条产业链都纳入考虑范围。

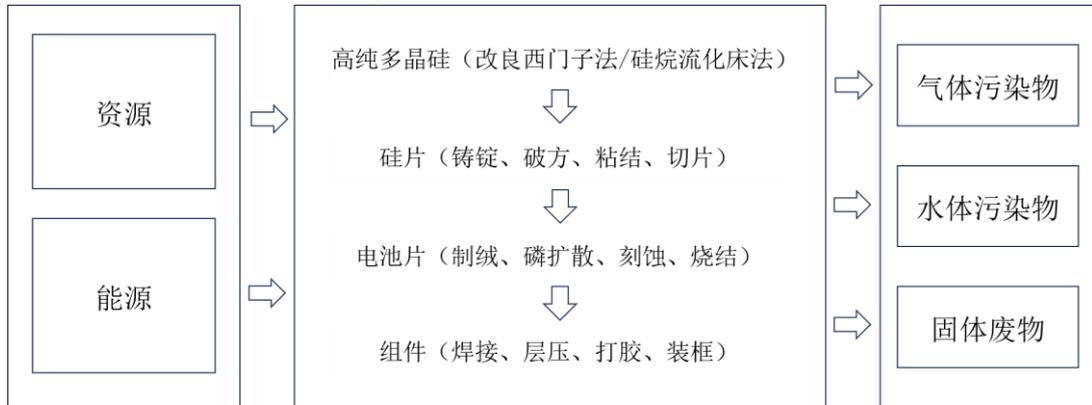


图 2-2 光伏组件的生产流程及物质输入输出示意图

a.高纯多晶硅环节：多晶硅是光伏产业链中最上游的原材料，由冶金级工业硅提纯制成。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、副产物可循环利用的优点，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，但其技术要求较高。

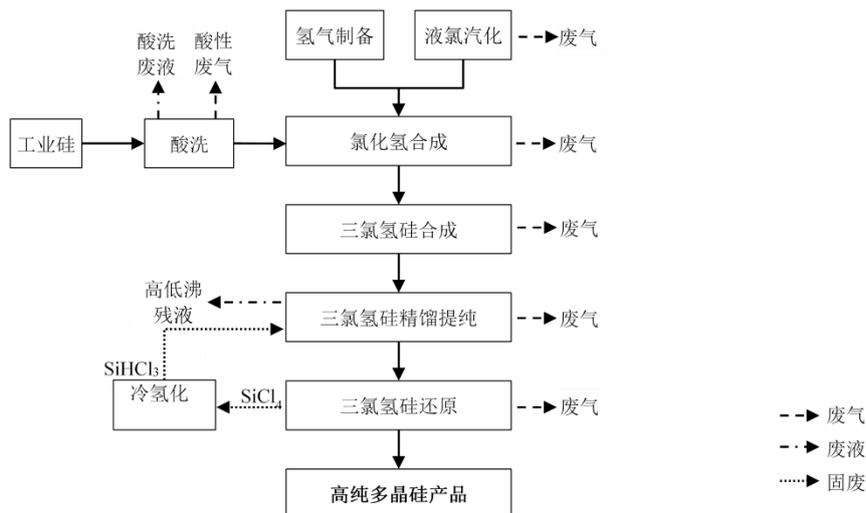


图2-3 高纯多晶硅生产工艺（改良西门子法）

b.硅片环节：硅片是高纯多晶硅生长成硅棒或硅锭后，再切割成薄片的过程。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。硅片生产工艺包括长晶、破方、切方、切片等环节。硅片的尺寸也在不断发展，目前市场上硅片尺寸主要有 156.75mm、157mm、158.75mm、166mm、182mm、210mm 等，其中 182mm 和 210mm 尺寸硅片的市场占比在不断增长，目前已成为主流。

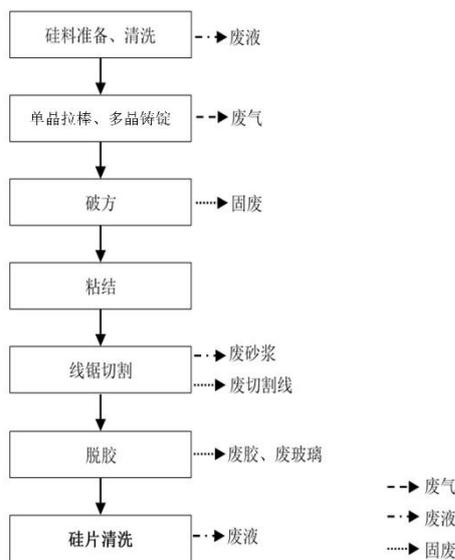


图2-4 硅片生产工艺

c.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。

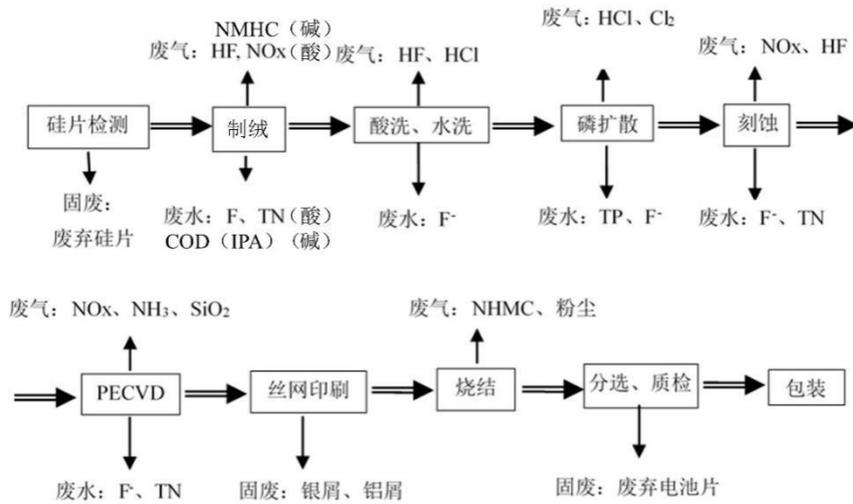


图2-5 电池片生产工艺

d.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、V 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。

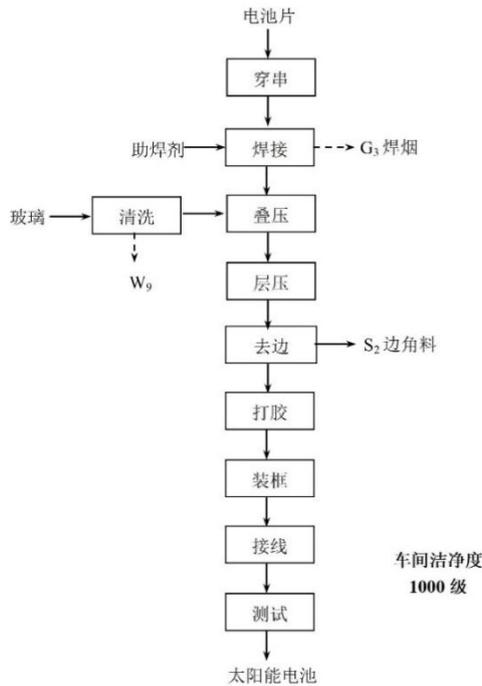


图2-6 光伏组件生产工艺

2.2 标准制订必要性

(1) 落实国家相关政策的需要

党的二十届三中全会《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》强调“构建碳排放统计核算体系、产品碳标识认证制度、产品碳足迹管理体系”。《2030年前碳达峰行动方案》提出探索建立重点产品全生命周期碳足迹标准。2022年，国家发展改革委、国家统计局、生态环境部印发的《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施

方案》中提到，由生态环境部行业主管部门研究制定重点行业产品的原材料、半成品和成品的碳排放核算方法，优先聚焦电力、钢铁、电解铝、水泥、石灰、平板玻璃、炼油、乙烯、合成氨、电石、甲醇及现代煤化工等行业和产品，逐步扩展至其他行业产品和服务类产品。推动适用性好、成熟度高的核算方法逐步形成国家标准，指导企业和第三方机构开展产品碳排放核算。

(2) 建立我国碳足迹管理体系的需要

2024年6月生态环境部等15部门印发了关于《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》（环气候〔2024〕30号，简称《方案》）的通知。《方案》提出，目标到2027年，碳足迹管理体系初步建立；制定发布与国际接轨的国家产品碳足迹核算通则标准，制定出台100个左右重点产品碳足迹核算规则标准，产品碳足迹因子数据库初步构建，产品碳足迹标识认证和分级管理制度初步建立，重点产品碳足迹规则国际衔接取得积极进展。同时，《方案》明确提出了要编制光伏等重点产品碳足迹核算标准。该标准的制定能够帮助企业更准确地计算和管理其产品的碳排放，对于促进企业可持续发展、增强市场竞争力以及响应全球气候变化挑战具有重要的意义。

光伏行业是我国少有的取得全球竞争优势，实现端到端安全可控，并有望成为高质量发展典范的新兴产业。作为绿色发展的典范，作为提供清洁能源的源头，光伏产业自身的清洁发展与碳中和非常重要。光伏产品的碳足迹与碳中和两项工作都应尽快推进，这对于建立我国产品碳足迹管理体系、促进可持续发展、应对气候变化以及推动光伏产业的绿色转型具有重要意义。

(3) 提升我国光伏企业国际竞争力

随着全球环境问题日益严峻，减少温室气体排放成为国际社会普遍关注的问题。碳足迹作为衡量产品生命周期内直接和间接产生的温室气体排放量的重要指标，逐渐受到政府、企业以及消费者的重视。例如，欧盟碳边境调节机制（CBAM）和《新电池法》等政策法规的出台，对进入欧盟市场的产品设置了严格的碳足迹准入门槛。法国能源监管委员会（CRE）更新了《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）》文件，对于2023年4月1日及以后的光伏组件简化碳评估（ECS）提出了新的要求，意味着光伏出口型企业在投标前需要按法国CRE最新的要求执行。面对碳足迹政策要求越来越严格的情况，加快制定产品碳足迹标准显得尤为重要。我国应加强碳足迹核算和标准化工作，推动碳足迹标准国际化，加强国际合作与交流，共同应对气候变化。

3 国内外相关标准情况的研究

3.1 主要国家、地区及国际组织相关标准情况的研究

“碳足迹”能够很好地展示产品的碳排放情况，产品碳足迹认证在其他国家逐步发展应用。如：法国、美国的碳足迹认证要求；瑞典、意大利的环境产品声明（Environmental Product Declaration, EPD）要求等。

3.1.1 法国

2023年4月,法国能源监管委员会(CRE)更新了《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“PPE2文件”),要求面向法国出口的光伏企业执行简化碳评估(ECS)工作,按要求披露出口光伏产品的碳足迹评估结果。PPE2文件中的功能单元是1 kWc光伏组件,系统边界是“摇篮”到“大门”,不涉及生命末期。PPE2文件提供碳足迹因子(包括高纯多晶硅、钢化玻璃、EVA薄膜等材料),企业只需要使用文件给定的碳足迹因子值,乘以不同形态下产品的重量或数量,即可获得碳足迹结果。PPE2文件中给出的中国电力排放因子为1.024 kgCO₂eq/kWh,该因子数来源于EcoInvent 3.5,数值高于中国当前的电力水平(全国电力平均碳足迹因子为0.6205kgCO₂e/kWh)。法国大规模太阳能招标将低碳制造考虑在内,同时还考虑开发商同意接受电力价格。在招标时按照碳足迹值分为不同等级,投标对应不同打分,主要受控于上游硅片碳足迹贡献。碳排放值越低(一般要求二氧化碳排小于550kg/kWc),产品中标的可能性越高。

3.1.2 瑞典和意大利

环境产品认证(EPD)是国际公认的基于ISO14025标准的一套环保报告,严苛跟踪检测某一产品在其整个生命周期内对环境造成的影响,包括原材料获取阶段、制造加工阶段、运输阶段、使用阶段、报废阶段等。涉及光伏产品的EPD体系主要是意大利(《Electricity Produced by Photovoltaic Modules》,EPD意大利)和瑞典(《Electricity, steam and hot/cold water generation and distribution》,EPD国际)。EPD意大利和EPD国际的功能单元均是在使用寿命期间发电量平均到1 kWh,系统边界均是“摇篮”到“坟墓”,都包含了碳足迹因子。EPD意大利在生命末期阶段考虑组件及电站拆解耗费的材料、组件及电站拆解能耗,废弃物的运输(至处理厂),处置产生的环境影响。EPD国际在生命末期阶段考虑组件及电站拆解耗费的材料、能耗以及废弃物的运输(至处理厂)。EPD比碳足迹认证的要求更高,可简单理解为EPD包含碳足迹要求,碳足迹是最基本的量化环境指标。意大利国家电力公司(ENEL)光伏电站项目招标要求,除温室气体外,考虑更多环境影响因素。

3.1.3 欧盟

产品环境足迹(Product Environmental Footprint)是欧盟官方的生命周期评价(LCA)标准与认证体系,由欧盟研究总署和欧盟环境总署联合制定,并组织多个行业制定了几十类产品的细则 Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR)。欧盟的《产品环境足迹类别规则(PEFCR):光伏发电系统用于发电的光伏组件》自2013年开始制订,已经过多次更新,目前最新版为2020年发布的PEFCR。其中规定的功能单位是在使用寿命期间发电量平均到1 kWh,系统边界是“摇篮”到“坟墓”,给定碳足迹因子,生命末期阶段考虑组件及电站拆解耗费的材料、能耗以及废弃物的运输(至处理厂)。

3.1.4 美国

EPEAT全称为电子产品环境评价工具(Electronic Product Environmental Assessment Tool)。由美国绿色电子委员会(GEC)组织实施,于2006年开始正式上线,是一个全面的环境评估体系,通过评估产品生命周期内对环境的影响等级为机构和消费者提供产品对比、评估和

选择，并制定了 IEEE 1680《电子产品环境影响评价》。EPEAT NSF/ANSI 457-2019《Sustainability Leadership Standard for Photovoltaic Modules and Photovoltaic Inverters》标准包括物质管理、首选使用材料、生命周期评价（LCA）、能源效率和用水、寿命终止管理和回收设计、产品包装、企业责任等。该标准中的功能单位是在使用寿命期间发电量平均到 1 kWh，系统边界是“摇篮”到“坟墓”，生命末期是回收利用、废弃物处置，未报告碳足迹因子。

其他包括挪威、荷兰、西班牙等国家和地区也在研究产品碳足迹相关要求。

3.2 国内相关标准情况的研究

国内有关晶体硅光伏组件产品碳足迹的标准主要有两个：（1）工信部的 SJ/T 11926-2024《产品碳足迹 产品种类规则 光伏组件》电子行业标准；（2）深圳市质量检验协会的 T/SQIA032-2023《碳足迹评价技术要求 晶体硅光伏组件》团体标准。两个标准均制定了国内光伏组件产品碳足迹评价的标准体系，为光伏产业的绿色转型和可持续发展提供了有力支撑。

2024年3月，中华人民共和国工业和信息化部发布了 SJ/T 11926-2024《产品碳足迹 产品种类规则 光伏组件》电子行业标准，该标准规定了光伏组件碳足迹评价的基本规则和要求，适用于晶体硅光伏组件，其他光伏组件可参照使用。标准中的功能单位为 1 千瓦光伏组件，系统边界包含原辅材料（电池片、封装玻璃、封装胶膜等）获取、能源获取、组件生产等单元过程，宜包括产品使用和生命末期阶段的过程，从“摇篮”到“坟墓”，生命末期包括光伏组件的报废、回收、循环利用与最终处置等过程。

由粤港澳大湾区（深港）计量检测认证发展促进联盟提出，莱茵技术监护（深圳）有限公司、深圳市计量质量检测研究院等单位参与编制，深圳市质量检验协会于 2023 年 10 月发布 T/SQIA032-2023《碳足迹评价技术要求 晶体硅光伏组件》，适用于晶体硅光伏组件及其包装物的碳足迹评价，薄膜光伏组件也可参考使用。该标准未公布碳足迹因子，对于“摇篮”到“大门”的碳足迹评价，功能单位为 1 kWp（每生产 1 kWp 光伏组件所对应的碳足迹）；对于“摇篮”到“坟墓”的碳足迹评价，功能单位为 1 kWh（每产生 1 kWh 电力所对应的碳足迹）。晶体硅光伏组件系统边界应包括原材料获取、制造、分销、使用和生命末期阶段。生命末期阶段从产品废弃后拆除开始，到废弃产品通过焚烧、回收或填埋等方式处理结束，包括废弃产品的拆卸；废弃产品的运输；废弃产品的前处理，包括拆解、破碎和筛选等；以及废弃产品的最终处置，包括焚烧、回收或填埋等。

这两个标准对于光伏组件碳足迹的评价均以电池片为原材料，然而在实际生产过程中，光伏组件生产企业不仅限于使用电池片作为原料，它们同样可以选择硅片或者高纯多晶硅作为生产的起始材料。对于这些企业来说，现有标准可能不适用，因此有必要从全产业链条进行光伏组件碳足迹标准的研究。

3.3 本标准与国内外同类标准或技术法规的对比

关于功能单位，PPE2 文件的功能单位是 1 kWc 光伏组件；EPD 意大利和 EPD 国际、欧盟 PEF、美国 EPEAT 认证体系的功能单元均是在使用寿命期间发电量平均到 1 kWh；T/SQIA032-2023《碳足迹评价技术要求 晶体硅光伏组件》不同的系统边界采用不同的功能

单位，对于“摇篮”到“大门”的碳足迹评价，功能单位为 1 kWp（每生产 1 kWp 光伏组件所对应的碳足迹），对于“摇篮”到“坟墓”的碳足迹评价，功能单位为 1 kWh（每产生 1 kWh 电力所对应的碳足迹）；SJ/T 11926-2024《产品碳足迹 产品种类规则 光伏组件》的功能单位为 1 千瓦光伏组件。本标准的功能单位为标称功率为 1 kWp 的地面用晶体硅光伏组件，便于行业内的数据收集、比较和监管。

关于系统边界的确定，法国 PPE2 文件的系统边界是“摇篮”到“大门”，EPD 意大利和 EPD 国际、欧盟 PEF、美国 EPEAT 认证体系、T/SQIA032-2023《碳足迹评价技术要求 晶体硅光伏组件》和 SJ/T 11926-2024《产品碳足迹 产品种类规则 光伏组件》的系统边界都是“摇篮”到“坟墓”。本标准的系统边界为“摇篮”到“坟墓”。同时进行产品碳足迹量化时可根据自身生产情况选择原材料，高纯多晶硅、或硅片、或电池片，本标准适用于光伏行业全产业链的碳足迹量化。

关于产品碳足迹因子，IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change，政府间气候变化专门委员会）中的碳排放因子（Carbon emission factor）指每一种能源燃烧或使用过程中单位能源所产生的碳排放数量。本标准中的产品碳足迹因子（Product Carbon Footprint Factor）和 IPCC 的排放因子概念是不同的。产品碳足迹因子指单位产品在系统边界内的生命周期温室气体排放量和温室气体清除量之和，以二氧化碳当量每单位产品表示。产品碳足迹因子包括范围 1，2，3，而排放因子只包含范围 1 和范围 2^①。为了避免两者混淆，提高标准的适用性，故提出产品碳足迹因子的概念。目前只有 PPE2 文件、EPD 意大利、EPD 国际和欧盟 PEF 中披露了部分原材料的产品碳足迹因子缺省值，国内现有碳足迹核算标准均未披露生产原料的产品碳足迹因子缺省值。

4 标准制订的基本原则和技术路线

4.1 标准制订的基本原则

本标准的制订严格遵循生命周期的核心理念，通过整理融合与光伏组件生产行业碳排放相关的政策、法规、技术指南和标准等资料，在充分考虑我国光伏组件生产行业现状的基础上，标准编制组遵循以下原则：

（1）注重标准的科学性。本标准与 GB/T 24067-2024《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》保持统一，考虑国内市场的特殊性和企业实际操作的能力。本标准的制订基于大量文献研究、实地调研和实践经验总结，充分调研、分析和评估相关材料、数据和信息，确保标准的科学性和可靠性。

（2）注重标准的系统性。本标准遵循 ISO 14067、PAS2050 等产品碳足迹标准通则的框架，在功能单位、系统边界、取舍准则等重要内容方面注重与国际光伏组件碳足迹标准的协调衔接，增强了光伏组件产品碳足迹量化的系统性和可行性。

（3）注重标准的适用性。借鉴国内外生命周期相关标准，充分考虑光伏组件发展现状、

^① 范围 1 排放指的是企业直接控制或拥有的排放源所产生的温室气体排放；范围 2 排放指的是企业外购的电力、蒸汽、热力或冷力所产生的温室气体排放；范围 3 排放是报告公司价值链中发生的所有间接排放（不包括在范围 2 中）。范围 1、2、3 的概念出自 GHG Protocol（温室气体核算体系）。

产品生命周期特点，建立碳足迹量化方法，提供核算公式及各生命周期阶段数据收集清单，并对重点企业多种产品进行验证，确保标准适用性和实践可操作性。

(4)注重标准的规范性。本标准按照《环境保护标准编制出版技术指南》(HJ 565-2010)的要求和规定编写，确定标准的组成要素。

4.2 标准制订技术路线

本标准制订的技术路线如图 4-1 所示。通过国内外相关文献和标准的调研以及行业企业交流等，初步形成标准修订原则和框架结构，确定标准主要技术内容，包括碳足迹量化的功能单位、系统边界、核算方法、数据质量评价以及碳足迹缺省因子等，编制形成标准草案，邀请企业根据本标准草案进行案例试算，将试算过程的问题及建议反馈给标准编制组，根据企业反馈情况，优化完善标准草案，形成标准征求意见稿和编制说明。最后公开征求行业意见之后，修改完善标准草案，形成标准送审稿和报批稿。

本标准制订工作技术路线图如下：

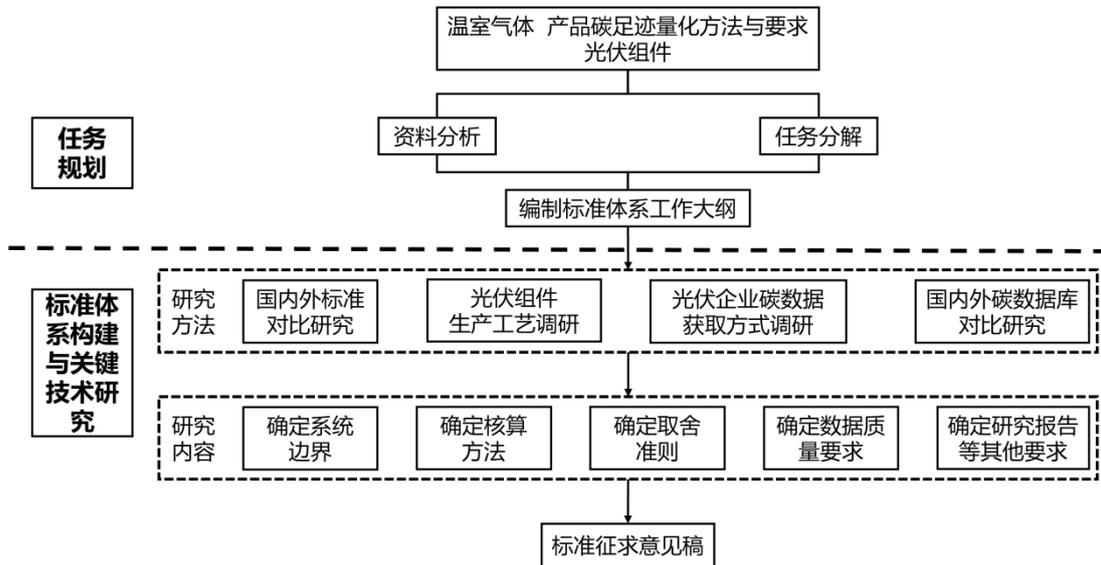


图 4-1 技术路线图

5 标准主要技术内容

5.1 标准适用范围

本标准适用于地面用晶体硅光伏组件碳足迹相关研究，不适用薄膜光伏组件。薄膜光伏组件的主要材料包括非晶硅、铜铟镓硒、碲化镉等薄膜材料，地面用晶体硅光伏组件的主要材料包括单晶电池片、钢化玻璃、EVA 胶膜、铝边框等，两者的主要材料存在很大区别，因此本标准不适用于薄膜光伏组件产品碳足迹的研究。

考虑到国家对碳足迹管理工作的需要，本标准可以支撑产品碳足迹绩效评价、产品碳足迹信息披露、环保信息公开等工作。

5.2 标准结构框架

本标准分为正文和附录两部分。正文包括适用范围、规范性引用文件、术语和定义、量化目的和范围、清单分析、影响评价、结果解释和产品碳足迹报告 8 个章节，附录对数据收集清单、数据质量评价方法、碳足迹因子缺省值、产品碳足迹报告模板进行了规范和说明。

量化目的和范围、清单分析、影响评价为标准的核心内容，其中量化目的和范围明确了本标准制定的目的和量化的范围，包括产品范围、时间范围、功能单位（“标称功率为 1 kW_p 的地面用晶体硅光伏组件”，与国际通行做法保持一致）和系统边界（原材料获取阶段、生产阶段、分销阶段、使用阶段和生命末期阶段）；清单分析定义了数据收集类型、数据质量要求（初级数据质量要求和次级数据质量要求）、数据选择要求（活动水平数据选择和碳足迹因子选择），以及数据审定要求；影响评价提出了产品碳足迹核算公式，包括原材料获取阶段碳足迹核算公式、生产阶段碳足迹核算公式、分销阶段碳足迹核算公式、使用阶段碳足迹核算公式和生命末期阶段碳足迹核算公式。

5.3 术语和定义

本标准术语和定义共有 5 个，其中光伏组件、产品碳足迹和数据质量与已发布的相关国家标准一致。光伏组件采用了 GB/T 2297《太阳光伏能源系统术语》中的定义，指的是具有封装及内部联结的、能单独提供直流电输出的，最小不可分割的晶体硅光伏电池组合装置；产品碳足迹采用了 GB/T 24067 中的定义，指的是产品系统中的温室气体排放量和温室气体清除量之和，以二氧化碳当量表示，并基于气候变化这一单一环境影响类型进行生命周期评价；产品碳足迹因子和数据质量等级的定义为标准编制组和专家共同商议后确定，产品碳足迹因子为单位产品在系统边界内的生命周期温室气体排放量和温室气体清除量之和，以二氧化碳当量每单位产品表示；数据质量等级为基于时间代表性、技术代表性、地理代表性对数据质量进行的半定量评估；数据质量采用了 GB/T 24040-2008《环境管理 生命周期评价 原则与框架》中的定义，指的是数据在满足所声明的要求方面的能力特性。此外，GB/T 24067-2024 界定的其他术语和定义适用于本标准。值得注意的是，因子通常理解为单位产品污染物或温室气体排放量，本标准结合产品碳足迹核算工作的实际需要，重点增加了系统边界、全生命周期两个限制性描述，增强了核算工作的统一性、可比性和可操作性。

5.4 标准主要技术内容确定的依据

5.4.1 功能单位

本标准的功能单位为标称功率为 1 kW_p 的地面用晶体硅光伏组件。kW_p 指光伏组件在标准测试条件下（如光照强度 1000 W/m²、温度 25℃ 等）的最大输出功率，是一个直接反映光伏组件性能的标准化指标，便于不同组件之间的比较和评估。1 kWh 则是一个电量单位，表示的是光伏组件在一定时间内的发电量，其值会受到光照条件、使用环境、组件效率等多种因素的影响，不同地区的光照强度和日照时间不同，1 kWh 的发电量在不同地区所需的组件功率也不同。如果以 1 kWh 为功能单位，就需要考虑这些复杂的使用条件，增加了核算的复杂性和不确定性。相比之下，1 kW_p 更稳定、更直接地反映了组件本身的性能，且便于行业内的数据收集、比较和监管，也符合国际标准和规范。

5.4.2 系统边界

为了准确评估光伏组件在其整个生命周期中的碳足迹，本标准借鉴国内外研究经验，将系统边界设定为从“摇篮”到“坟墓”，包括原材料获取阶段（A1-A3）、生产阶段（B1、B2）、分销阶段（C1）、使用阶段（D1）和生命末期阶段（E1、E2）。光伏组件产品碳足迹量化的系统边界见图5-1。

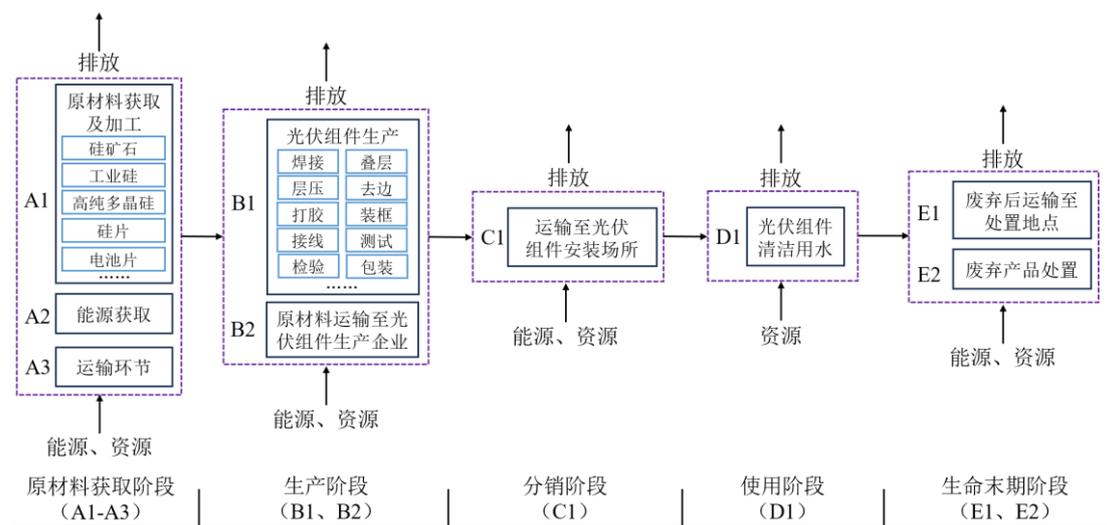


图 5-1 光伏组件产品碳足迹量化系统边界图

5.4.3 取舍准则

本标准中的取舍准则主要依据GB/T24067-2024和GB/T 24044-2008。光伏组件整个生命周期中所有的能源输入均需列出，当个别物质流或能量流对某一过程的碳足迹无显著贡献时，可将其作为数据排除项予以舍去并进行报告。可依据各项原辅材料投入占产品重量或总投入重量的比例进行取舍，舍去的单项物质重量不超过总重量的1%；应量化至少95%与功能单位相关的产品碳足迹，舍去的产品碳足迹应不超过5%；道路与厂房的基础设施、各工序设备的制造与装配、厂区内人员及生活设施的消耗和排放，均不计入。对于排除项，应在产品碳足迹报告中予以说明。

5.4.4 数据收集要求

根据光伏组件产品的系统边界，进行数据收集。按照标准文本附录 A 中信息采集表要求，数据收集应尽可能收集企业基本信息、工艺流程、生产信息等，以及系统边界内相关阶段及过程的能源、资源消耗和温室气体排放相关初级数据和次级数据。对数据获得方式和来源应予以说明。

活动数据优先采用直接计量、检测获得的初级数据，如果初级数据无法获得，可以根据要求选择合适的次级数据。

碳足迹因子优先采用企业通过生命周期评价方法且经第三方专业机构验证获得的碳足迹因子，其次可采用国家正式公布的产品碳足迹因子；基于 GB/T 24040、GB/T 24044 等相关标准且经第三方专业机构验证的生命周期评价报告、碳足迹报告、文献、数据库中提供的基于我国实际的碳足迹因子参考值。以上数据均不可获得时可采用国外数据库的替代数据，同时论证数据的可行性。

5.4.5 数据质量评价

本标准 DQR 方法参照欧盟的《产品环境足迹类别规则（PEFCR）：光伏发电系统用于发电的光伏组件》数据质量评价指标，将评价指标分为时间代表性、地理代表性和技术代表性，仅要求评价次级数据的数据质量，并参考欧盟 PEF 体系数据质量等级，建议数据最终质量评估结果宜 ≤ 3.0 。考虑到本地数据库可能存在未定义数据集有效期的情况，为鼓励使用本地数据库同时也为了增加实际评分过程的可操作性，在时间代表性评分表中增加官方数据集最新发布年相关要求。

5.4.6 影响评价

5.4.6.1 碳足迹核算方法

光伏组件产品碳足迹的核算应包括原材料获取阶段、生产阶段、分销阶段、使用阶段和生命末期阶段涉及的所有单元过程。本标准分别给出了光伏组件产品生命周期不同阶段碳足迹量化方法。原材料获取阶段和生产阶段的产品碳足迹核算方法为相应阶段中原材料、能源的消耗量乘以相应的产品碳足迹因子，再加上不同运输方式的加权运输距离乘以该种运输方式的碳足迹因子。分销阶段主要涉及运输环节，因此该阶段的产品碳足迹核算方法为运往光伏组件安装场所的产品量乘以不同运输方式的加权运输距离，再乘以该种运输方式的碳足迹因子。使用阶段主要涉及清洁用水，因此该阶段核算方法为清洁用水的消耗量乘以清洁用水的产品碳足迹因子。生命末期阶段主要涉及退役光伏组件运输到处置地点处理的过程，该阶段的产品碳足迹计算采用产品废料或能源的消耗量乘以相应的产品碳足迹因子，再加上运输阶段的碳足迹。

企业可按照此核算方法，依据本单位的活动水平数据和产品碳足迹因子数据进行核算。如在核算过程中无法获得某项原材料的产品碳足迹因子，可使用本标准附录 C 中的碳足迹因子缺省值。

5.4.6.2 产品碳足迹因子缺省值来源

影响评价过程中除了企业自身的活动数据外，产品碳足迹因子的选择也至关重要。碳足迹因子的选取鼓励优先采用经过核证的实测数据，若无实测数据，可按照优先级顺序依次采用政府官方数据、行业经验值以及文献值等，同时注明所有因子的来源。附录 C 中给出了运输过程碳足迹因子和部分原料产品碳足迹因子。

（1）运输过程碳足迹因子

运输过程中的碳足迹主要考虑运输设备使用过程中消耗的柴油、燃气、航空煤油、燃料油、电力等的碳足迹。运输过程碳足迹计算公式如下：

$$E_{\text{运输}} = E_{\text{公路}} + E_{\text{铁路}} + E_{\text{水路}} + E_{\text{航空}} \quad (5-1)$$

公路运输设备主要包括柴油、燃气货车等。按质量段划分的柴油和燃气货车燃料消耗量采用近 400 万辆重型车排放远程在线监控数据和部分车载排放测试数据；按质量段划分的柴油和燃气货车保有构成采用 500 万辆重型货车环保信息公开数据；公路货运周转量采用交通运输部官方发布数据；铁路运输设备主要包括柴油内燃机车和电力机车等；铁路运输设备主要包括柴油内燃机车和电力机车等；水路运输主要使用柴油和燃料油；航空运输主要使用航空煤油。基于生态环境部机动车排污监控中心的公路、铁路、水路和航空当量碳排放量

和交通运输部发布的货运周转量计算形成运输基础因子，见表 5-1。

表 5-1 运输过程碳足迹因子缺省值及对比

序号	类型	单位	缺省值	GREET 模型
1	公路运输	kgCO ₂ e/(t·km)	0.076	0.039
2	铁路运输	kgCO ₂ e/(t·km)	0.003	0.017
3	水路运输	kgCO ₂ e/(t·km)	0.020	0.004
4	航空运输	kgCO ₂ e/(t·km)	1.404	--

(2) 主要原材料产品碳足迹因子

标准编制组实地调研多家光伏组件生产企业，产业链涵盖高纯多晶硅生产、切片、电池片和光伏组件生产等环节。光伏组件的组成部分为电池片、铝边框、EVA 胶膜、钢化玻璃等，其中电池片是光伏组件的心脏，是光伏组件成本构成中最重要的一环。电池片的生产过程是首先通过直拉法或定向凝固法的工艺过程，将高纯多晶硅转化为单晶硅棒或者多晶硅锭，然后采用专用切割设备将单晶硅棒或多晶硅锭切割成一定厚度的单晶硅片或多晶硅片，之后再经过制绒、扩散、刻蚀等一系列的加工工序制作成单晶电池片或多晶电池片。因此高纯多晶硅、单晶硅片、多晶硅片、单晶电池片和多晶电池片为光伏组件的主要原材料。

主要原材料产品碳足迹因子缺省值与法国 PPE2 文件中提供的原材料碳足迹因子如表 5-2 所示。本标准中提供的主要原材料产品碳足迹因子均小于法国 PPE2 文件中的因子，主要原因是本标准核算产品碳足迹因子时采用的电力碳足迹因子来源于生态环境部联合国家统计局、国家能源局印发的《关于发布 2023 年电力碳足迹因子数据的公告》，数值为 0.6205kgCO₂e/kWh，该数值小于法国 PPE2 文件中的中国电力因子 1.024 kgCO₂e/kWh。

表 5-2 主要原材料产品碳足迹因子

名称	缺省值	法国 PPE2 文件	单位
高纯多晶硅	45.10	80.56	kgCO ₂ e/kg
单晶硅片（182 mm×182 mm）	1.32	2.07	kgCO ₂ e/片
多晶硅片（182 mm×182 mm）	1.10	1.66	kgCO ₂ e/片
单晶电池片（182 mm×182 mm）	1.59	3.38	kgCO ₂ e/片
多晶电池片（182 mm×182 mm）	1.36	2.97	kgCO ₂ e/片

5.5 企业案例试算

为了验证标准的可行性和实用性，在标准完成草案编制后编制组邀请企业开展案例试算工作。企业选择从“摇篮”到使用阶段的系统边界，如表 5-3 所示。当前光伏组件产品尚未进入大规模退役阶段，目前生命末期阶段的数据大多为假设数据，可能与退役时的实际情况存在较大差异，故本次试算未将生命末期阶段纳入核算范围。

表 5-3 核算的具体过程或内容

阶段	过程		过程描述	取舍
原材料获取阶段	A1	原材料获取及加工	高纯多晶硅、硅片、电池片、钢化玻璃、封装胶膜、边框等生产过程	选取
	A2	能源获取	原材料获取及加工所需能源（电力等）	选取
	A3	运输	原材料运输到企业及企业内部运输	舍弃

阶段	过程		过程描述	取舍
生产阶段	B1	组件生产	光伏组件生产	选取
	B2	运输	原材料运输至光伏组件生产企业的过程	舍弃
分销阶段	C1	分销	将光伏组件从生产企业运输到光伏组件安装场所的过程	选取
使用阶段	D1	使用	光伏组件的清洗耗水过程	选取
生命末期阶段	E1	运输至处置地点	将废弃光伏组件产品运输到处置地点的过程	舍弃
	E2	废弃产品处置	包括填埋、回收等方式	

5.5.1 试算一

(1) 基本信息

企业以单晶硅片为原料生产光伏组件，功能单位为标称功率为 1 kWp 的地面用晶体硅光伏组件，硅片尺寸为 182mm×182mm。

(2) 核算结果

光伏组件产品各阶段的碳足迹及总和如表 5-4 所示。

表 5-4 光伏组件产品各阶段的碳足迹

阶段	原材料获取阶段	生产阶段	分销阶段	使用阶段	生命末期阶段	合计
碳足迹 (kgCO _{2e})	551.02	60.67	38.00	0.07	0.00	649.76
占比 (%)	84.80	9.34	5.85	0.01	0.00	100.00

1 kWp 光伏组件产生的碳排放为 649.76 kgCO_{2e}，其中原材料获取阶段产生的碳排放最高，占比约为 84.80%；其次为生产阶段所产生的碳排放，占比约为 9.34%。原材料获取阶段硅片贡献的碳足迹最大，为 52%，其次为铝边框（31%）和钢化玻璃（15%）。

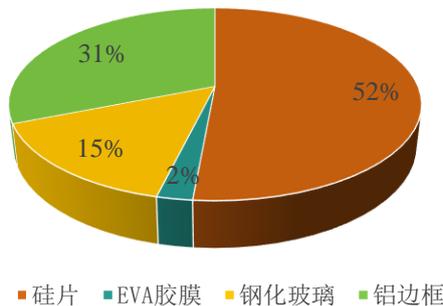


图 5-2 原材料获取阶段碳足迹贡献图

5.5.2 试算二

(1) 基本信息

企业以单晶电池片为原料生产光伏组件，功能单位为标称功率为 1 kWp 的地面用晶体硅光伏组件，电池片尺寸为 182mm×182mm。

(2) 核算结果

光伏组件产品各阶段的碳足迹及总和如表 5-5 所示。

表 5-5 光伏组件产品各阶段的碳足迹

阶段	原材料获取阶段	生产阶段	分销阶段	使用阶段	生命末期阶段	合计
碳足迹 (kgCO _{2e})	625.05	22.44	38.00	0.07	0.00	685.56
占比 (%)	91.17	3.27	5.54	0.01	0.00	100.00

1 kWp 光伏组件产生的碳排放为 685.56 kgCO_{2e}，其中原材料获取阶段产生的碳排放最高，占比约为 91.17%；其次为分销阶段所产生的碳排放，占比约为 5.54%。原材料获取阶段电池片贡献的碳足迹最大，为 57%，其次为铝边框（28%）和钢化玻璃（13%）。

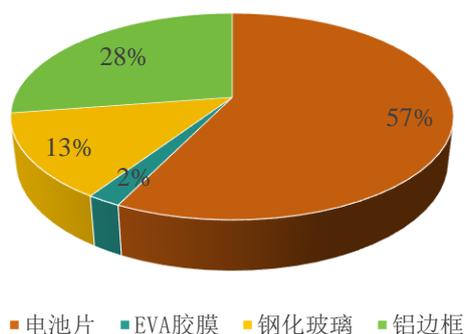


图 5-3 原材料获取阶段碳足迹贡献图

5.5.3 对比分析

基于相同的系统边界和计算方法，以试算一中的活动水平数据为准，将碳足迹因子替换成法国 PPE2 文件中的值，计算出光伏组件产品各阶段的碳足迹及总和如表 5-6 所示。

表 5-6 光伏组件产品各阶段的碳足迹（法国 PPE2 文件）

阶段	原材料获取阶段	生产阶段	分销阶段	使用阶段	生命末期阶段	合计
碳足迹 (kgCO _{2e})	700.02	100.13	53.50	0.25	0.00	853.90
占比 (%)	81.98	11.73	6.27	0.03	0.00	100.00
试算一碳足迹 (kgCO _{2e})	551.02	60.67	38.00	0.07	0.00	649.76

采用法国 PPE2 文件中碳足迹因子计算得到的光伏组件产品各阶段的碳足迹均大于试算一中的结果。1 kWp 光伏组件产生的碳排放为 853.90 kgCO_{2e}，高出试算一 31%，其中原材料获取阶段产生的碳排放最高，占比约为 81.98%；其次为生产阶段所产生的碳排放，占比约为 11.73%。原材料获取阶段硅片贡献的碳足迹最大，为 63%，其次为铝边框（25%）和钢化玻璃（10%）。两者差异主要是中国电力因子的选取，国外对中国地区生产过程中的电力因子选取偏大，从而导致整体的碳足迹偏大。

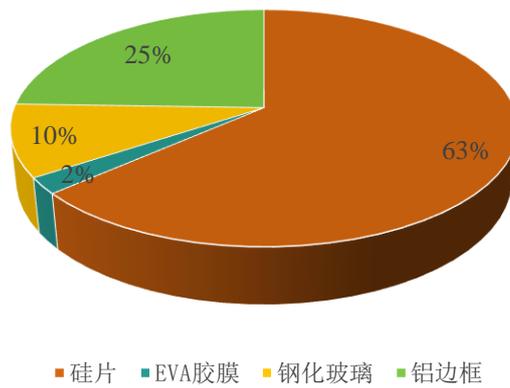


图 5-4 原材料获取阶段碳足迹贡献图（法国 PPE2 文件）

6 标准实施建议

本标准作为重点产品碳足迹核算方法体系中的重要部分，为光伏组件产品碳足迹量化提供了科学的核算方法，其结果可作为产品碳足迹绩效评价、企业温室气体减排持续改进和绿色供应链管理、产品碳足迹信息披露、环保信息公开等不同应用的依据。

为了保证光伏组件产品碳足迹核算的数据质量和动态更新，应建立健全光伏组件产品碳足迹模型和数据库，健全本地因子库，补充产业链不同阶段因子，形成统一的碳排放计算体系，以便更好地核算碳排放，同时也为产品碳足迹评价提供支持。