

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.12.008

“十四五”中国光伏行业绿色低碳发展关键问题分析

杨俊峰¹, 李博洋¹, 霍婧¹, 潘寻²

(1. 中国电子信息产业发展研究院, 北京 100048;

2. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029)

摘要:随着我国光伏行业的快速发展壮大,光伏制造过程的资源环境问题日益显现,未来绿色低碳将成为光伏行业可持续发展的重要考量。围绕产业链关键环节,研究了光伏制造过程的绿色低碳发展情况,涵盖资源消耗、能源消耗、污染物排放、碳排放四个层面。结合政策、市场环境,重点分析了“十四五”我国光伏行业绿色低碳发展关键问题,包括:全行业能源消耗总量将持续增加,在能耗双控制度下面临较大压力;双碳对光伏行业发展提出更高要求,降低产品碳足迹将成为核心竞争力;上游资源需求量迅速增长,叠加能耗双控和双碳影响供给保障难度较大;光伏行业与环境关系更加复杂化,废旧电池组件回收再利用提上日程。

关键词:光伏行业;资源;能源;环境;绿色低碳

中图分类号:X24;X77

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)12-0057-06

Analysis on Key Issues of Green and Low-carbon Development in Chinese Photovoltaic Industry during the 14th Five-Year Plan Period

YANG Jun-feng¹, LI Bo-yang¹, HUO Jing¹, PAN Xun²

(1. Electronic Information Industry Development Research Institute of China, Beijing 100048, China;

2. Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment
of the People's Republic of China, Beijing 100029, China)

Abstract: With the rapid development and expansion of China's photovoltaic industry, resource and environmental problems in photovoltaic manufacturing process are increasingly emerging. In the future, green and low-carbon will become an important consideration for sustainable development of photovoltaic industry. Focusing on key links of industrial chain, green and low-carbon development of photovoltaic manufacturing process was studied, covering four levels of resource consumption, energy consumption, pollutant emission and carbon emission. Combined with policy and market environment, key issues of green and low-carbon development of China's photovoltaic industry in the 14th Five-Year Plan were analyzed, including: total energy consumption of whole industry will continue to increase, facing great pressure under dual control of energy consumption; Dual carbon puts forward higher requirements for development of photovoltaic industry, reducing carbon footprint of products will become the core competitiveness; With rapid growth of upstream resource demand, it is difficult to guarantee supply of resource. Relationship between photovoltaic industry and environment is more complicated, and recycling of waste battery modules is put on the agenda.

Key words: photovoltaic industry; resources; energy; environment; carbon reduction

收稿日期:2021-10-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1908504)

作者简介:杨俊峰(1981-),男,吉林通化人,博士,高级工程师;通信作者:霍婧(1990-),女,甘肃天水人,硕士,高级工程师

我国已明确提出2030年前实现碳达峰、2060年实现前碳中和的时间表,这是全球应对气候变化的里程碑事件,将显著加速全球绿色低碳发展进程。化石能源带来的碳排放约占我国排放总量的80%以上,为实现碳达峰碳中和(以下简称双碳)目标,我国必须建成新能源占据主导地位的清洁能源体系^[1]。大力发展清洁能源,实施可再生能源替代行动,到2030年中国非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右,风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上,构建以新能源为主体的新型电力系统^[2]。在光伏、风电、生物质发电等新能源电力供给主体中,光伏具有显著优势,是新能源发展的主力军。光伏的优势主要体现在两个方面:一是应用场景多、潜力大、受限因素少;二是成本下降空间大、经济竞争力强。国际上也普遍认为,在长期的能源战略中,光伏在众多新能源中具有更好的发展前景。

在政策引导和市场驱动的双重作用下,近年来我国光伏行业发展迅速。2020年我国光伏新增并网装机容量48.2 GW,同比增长60.1%,累计装机量达到253 GW,均连续多年位居全球首位。光伏制造产业规模不断扩大,2020年多晶硅、硅片、电池片和光伏组件四个主要环节实现两位数增长,多晶硅产量约39.2万t(同比增长14.6%),硅片产量约为161.3 GW(同比增长19.7%),电池片产量约为134.8 GW(同比增长22.2%),光伏组件产量124.6 GW(同比增长22.2%),均位居世界首位^[3]。在国内深入推动“双碳”战略和国际加快碳中和进程的拉动下,“十四五”时期我国光伏行业将持续快速增长,预计年均增速在20%左右。在高增长的同时,光伏行业自身的资源环境问题逐渐显现,尤其是在绿色低碳日益成为发展主旋律的情况下,整个光伏行业特别是制造端亟须深入研究和做好应对。鉴于此,本研究梳理了光伏制造过程的绿色低碳发展情况,提出了可能存在的主要问题,重点分析了“十四五”我国光伏行业绿色低碳发展关键问题,并提出了有关建议。

1 光伏制造过程绿色低碳发展情况

2020年晶硅电池产量占太阳能光伏电池组件总产量比重约为95%,是目前光伏电池的主流技术路线^[3],因此本研究以晶硅电池为主要研究对象,暂不涉及薄膜电池等新型电池。重点分析光伏制造过程中的资源消耗、能源消耗、环境污染和碳排放等方面的主要因素,范围涵盖工业硅、多晶硅、硅片、电池片和电池组件的制造过程。

1.1 资源消耗情况

生产工业硅(又称准金属硅)主要的原料是硅石(脉石英、石英岩、石英砂岩)、碳质还原剂(木炭、洗煤、石油焦、半焦、焦炭等),在工业炉中还原熔炼,生产1 t工业硅需要消耗3.4 t左右硅石^[4],碳质还原剂消耗量一般计入能源消耗。多晶硅生产技术目前主要有改良西门子工艺(三氯氢硅西门子法)和硅烷流化床法,对应的产品形态分别是棒状硅和颗粒硅,其中三氯氢硅西门子法生产工艺成熟,2020年采用该工艺生产的多晶硅占全国总产量的97%以上,《中国光伏产业发展路线图(2020年版)》预测该工艺未来10年内仍将是多晶硅的主流生产工艺^[3]。基于三氯氢硅西门子工艺,多晶硅生产过程中的主要物料为工业硅粉、四氯化硅、氢气、氧化钙、碳化硅粉、氢氟酸、硝酸、盐酸、氢氧化钠、压缩空气、氮气、氩气等。硅片生产主要是将硅锭加工成具有精确几何尺寸、均匀、光洁的镜面硅片,主要原料包括硅棒、硅锭、金刚线、坩埚、胶水(环氧树脂)、冰醋酸、清洗剂等。电池片生产流程主要包括表面制绒及清洗、扩散制结、去磷硅玻璃、刻蚀及清洗、镀膜、丝网印刷、烧结等环节,主要原料包括硅片、氢氧化钾、盐酸、硝酸、氢氟酸、硅烷、氨气、氮气、银浆、铝浆、松油醇、乙醇、磷酸、三氯氧磷等。电池组件生产主要是将电池片通过焊接、组装而成,工艺流程主要包括焊接、层叠层压、割边、固化、装框、接线、装配等,主要原料包括太阳能电池片、玻璃、EVA、TPT、电池组件边框、助焊剂、乙醇等^[4]。

一些学者借助生命周期评价方法(ISO 14040—14043)开展了光伏制造全生命周期资源投入清单研究,借鉴已有研究成果对光伏制造过程中的主要资源投入进行定量分析,1 m²光伏组件产品生产阶段主要资源平均消耗情况见表1^[5-7]。

表1 光伏制造主要资源消耗强度

Table 1 Main resources consumption intensity of photovoltaic manufacturing

序号	资源种类	消耗强度/g	序号	资源种类	消耗强度/g
1	工业硅	1 050	12	氢氟酸	310
2	液氯	151	13	银浆	5.19
3	氢气	40.5	14	铝浆	50.7
4	石灰石	438	15	铝合金边框	1 860
5	NaOH	266	16	焊带	118
6	坩埚	160	17	钢化玻璃	5 410
7	切割线	316	18	EVA	795
8	砂浆	226	19	PVDE	102
9	玻璃	42.2	20	PET	344
10	盐酸(36%)	41.0	21	三氯氧磷	3.25
11	硝酸(50%)	505	22	液氮	11.4

1.2 能源消耗情况

光伏制造过程中各种类型的能源使用主要包括电力和水(各个生产环节)、蒸汽(主要是电池片和电池组件生产环节)、燃气(电池片生产环节)、煤炭(工业硅生产环节或蒸汽、电力生产)等,其中电力主要来自电网供电,蒸汽来源主要是企业自备锅炉或园区集中供气^[4]。参考《光伏制造行业规范条件(2021年版)》、《工业硅单位产品能源消耗限额》(GB 31338—2014)、《绿色设计产品评价技术规范 多晶硅》(T/CNIA 0021—2019)、《绿色设计产品评价技术规范 光伏硅片》(T/CESA 1074—2020)、《绿色设计产品评价技术规范 光伏电池》(T/CESA 1117—2020)、《绿色设计产品评价技术规范 光伏组件》(T/CESA 1118—2020)和相关研究文献,目前我国工业硅单位产品综合能耗约 2.8 kgce/kg;多晶硅单位产品综合电耗约 70 kWh/kg,单位产品综合能耗 11.5 kgce/kg;硅片环节单位产品综合电耗分别是:拉晶 33 kWh/kg、多晶硅棒 14 kWh/kg、单晶硅棒 19 kWh/kg、切片 85 MWh/百万片(按硅片尺寸 156.75 mm/180 μ m 计);光伏电池片环节单位产品综合电耗约 80 MWh/MW;电池组件环节单位产品综合电耗约 40 MWh/MW^[8-11]。

从光伏制造产业链主要耗能工艺环节能耗变化看,2020 年多晶硅平均还原电耗为 49 kWh/kg,相比 2016 年的 52 kWh/kg 有小幅下降。未来随着大炉型的投用和稳定生产以及气体配比的不断优化等因素,多晶硅还原电耗将持续下降,预计到 2025 年有望下降至 46 kWh/kg。2020 年多晶硅生产企业综合能耗平均值约为 11.5 kgce/kg,比 2016 年下降约 20% 以上,随着技术进步和节能降耗,预计到 2025 年有望降至 10 kgce/kg 以下,平均每年下降 3% 左右。此外,拉晶、硅棒和切片等工艺环节近年来综合电耗下降较快,预计到 2025 年综合电耗平均每年下降 3%~5%^[3]。

1.3 污染物排放情况

光伏制造过程中排放的对环境影响较大的污染物主要是大气污染物、废水污染物和固体废物等,工业硅生产、多晶硅生产等上游环节排放量较电池组件生产等下游环节排放量更大。工业硅生产环境污染物排放主要包括:粉尘、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、氯化氢、氟化氢、固体废物等,此外石英砂的开采通常会带来一定程度的生态环境破坏。多晶硅生产大气污染物排放主要包括含粉尘废气(主要为硅

粉)、含氯化氢废气和表面处理废气等,还有一定的无组织排放废气(通常含有一定量的三氯氢硅、四氯化硅、氟化氢、氯化氢等有害气体);废水主要包括循环冷却水、含酸碱的生产废水和冲洗废水等;固体废物主要是除尘器收集下来的硅尘、废液闪蒸残渣、酸洗残渣、废水处理设施产生的污泥等^[12]。

硅片生产环节污染物排放主要是废水和固体废物,废水主要包括含氟废水、清洗有机废水和一般废水等,废水中主要污染物有 COD、酸、碱、氟化物、SS、聚乙二醇、表面活性剂、盐类等;固体废物主要是布袋除尘灰、废坩埚、碳化硅粉、废金刚线、固体废胶、废玻璃、废水处理污泥等。电池片制造环节污染物排放种类较多,大气污染物主要包括酸碱性废气、有机废气和无组织废气等,涉及氟化氢、氯化氢、氮氧化物、氨气、醚类和醇类有机废气等;废水主要是制备纯水产生的含盐废水、生产过程产生的含氟废水和清洗废水;固体废物包括废硅片、废包装材料、废机油、废润滑油等。电池组件生产环节废气污染物主要是含异丙醇、乙醇等污染物的废气,水污染物主要是清洗废水,固体废物主要是废活性炭、废包装材料等^[13]。目前,光伏制造整体环保治理水平较好,企业通过落实环境保护设施要求,主要污染物排放能够达到甚至明显优于相应的排放标准要求,同时不断做好生产过程中的有毒有害物质管控。近年来,废旧光伏组件的回收再利用、光伏发电系统的景观和生态影响等新兴环境问题也逐渐被重视起来。

1.4 碳排放情况

目前国内关于光伏制造过程中碳排放情况和产品碳足迹相关研究刚刚兴起,存在的主要困难是缺乏能够覆盖全产业链、全生命周期的基础数据。由于基础数据薄弱、核算体系不完善、计算结果可能存在偏差,在现有的光伏行业政策、规范和标准中未发现关于碳排放相关的数据指标要求。光伏产品是一种典型的能源产品,早在 20 世纪 70 年代国际上就开始基于生命周期评价方法研究光伏的能源回收期,这其中同时蕴含着碳核查和碳减排视角。随着技术的不断进步,光伏能源回收期计算结果从 1976 年的 12 a 左右缩减到目前的 1~2 a,反映了光伏制造水平和产品转换效率的巨大进步^[6,14]。

近年来,我国光伏组件的碳排放强度水平也呈显著下降趋势,根据国内学者研究成果,单位光伏组件功率的碳排放量从 2011 年的 2.90 kgCO₂ eq/Wp,下降到 2015 年的 2.08 kgCO₂ eq/Wp,再下降到 2018 年的 1.49 kgCO₂ eq/Wp。根据上述结果,2018 年

光伏组件的碳排放强度仅相当于为2011年的51.4%,随着工艺技术持续革新和能效水平不断提升,未来光伏组件的碳排放强度仍有很大下降空间,尤其是能源结构的清洁化和低碳化将显著推动光伏制造低碳发展进程。关于光伏产品碳足迹,近期有代表性的研究是赵若楠、谢明辉等学者基于全生命周期评价方法测算了单位产品的碳排放情况,得出1 m²光伏组件的碳排放量为160.86 kgCO₂ eq,其中多晶硅(含工业硅生产)、硅片、电池片、电池组件生产的碳排放量分别为94.07(占比58.5%)、23.38(占比14.5%)、15.38(占比9.6%)和28.02 kgCO₂ eq(占比17.4%)^[5-7]。

2 “十四五”我国光伏行业绿色低碳发展重点问题

2.1 全行业能源消耗总量将持续增加,在能耗双控制度下面临较大压力

根据《中国光伏产业发展路线图》统计数据和《光伏制造行业规范条件》等规范文件指标要求变化,近年来我国光伏行业能源利用水平不断提升,工业硅、多晶硅、硅片、电池片、电池组件几乎所有生产环节的单位产品能耗都在持续下降,预计“十四五”期间各环节将以每年3%~5%的速度继续下降(整体按4%计)。但是由于光伏产品产量增速远高于(预计保持20%左右)单位产品能耗下降速度,预计到2025年全行业能源消耗总量将比2020年增长102.89%。

在各地严格落实能耗双控制度的大背景下,光伏行业高速发展带来的能源消耗总量大幅增加矛盾会更加凸显,“十四五”期间光伏行业可能会面临较为严峻的能耗双控压力,部分企业扩张发展可能受限于用能指标。鉴于光伏行业对于推动清洁能源革命和低碳发展的重大作用,建议按照国家发改委发布的《完善能源消费强度和总量双控制度方案》(发改环资[2021]1310号)文件精神,结合地方实际差别化分解能耗双控目标,对于有利于增加可再生能源使用的光伏行业增加其能耗双控管理弹性^[15]。

2.2 双碳对光伏行业发展提出更高要求,降低产品碳足迹将成为核心竞争力

自2020年9月22日我国双碳目标提出以来,国家相关部委将推动碳达峰碳中和作为核心要务开始积极部署重点工作,各地也纷纷着手应对双碳工作,相关政策文件密集出台。双碳对光伏行业发展具有重大和深远的影响,光伏行业的地位和重要性

日益凸显,光伏行业要承担起双碳主力军的重要角色,必然对行业发展提出了更高的要求。一方面,推动碳达峰碳中和亟须大力发展清洁能源,光伏行业迎来历史性发展机遇,需要迅速做大做强。“十四五”时期,光伏发电将全面进入平价时代,竞争力持续提升,大规模集中式光伏电站将迎来新一轮发展热潮,分布式光伏项目也将蓬勃发展。另一方面,光伏行业制造环节碳排放较高,产量增长速度高于技术进步、能效提升等带来的减碳速度,碳排放可能在相当长的一段时间持续增加。未来钢铁、水泥等传统高碳行业主要产品产量将进入平台期,这些行业有望在近几年陆续实现碳达峰。而对于产量规模高速扩张的光伏行业,实现碳达峰难度相对更大,需要全行业大幅提升清洁能源使用比例,因此光伏全产业链的能源低碳化将成为重中之重。

在欧美国家的推动下,全球碳中和进程有逐渐加快之势,一些国家正在谋划或推动碳交易、碳税、碳边境调节机制等,希望借助碳中和大旗抢占话语权和更多经济利益。有些国家和地区已计划要求某些产品提供碳足迹,出台相关产品碳足迹标准,甚至将来设置产品碳足迹阈值。我国作为光伏产品出口大国,未来产品出口将面临更多低碳要求,亟需提前研究和应对,做好相关基础工作,尽早谋划低碳转型之路。

2.3 上游资源需求量迅速增长,叠加能耗双控和双碳影响供给保障难度较大

光伏行业上游资源需求种类较多,从质量上看硅料、铝合金、玻璃、封装胶膜、PET膜等是主要原料,其中硅料、铝合金、玻璃用量相对较多,均为生产能耗较高的品种。2020年我国多晶硅产量为39.6万t,总产能为42万t,产能利用率接近95%^[3]。受供需关系影响,从2020年四季度开始,国内多晶硅价格快速上涨,短短几个月时间涨了两倍多。其他上游原材料价格也在飙涨,导致光伏全链条主要产品都纷纷提价。

“十四五”期间,随着我国光伏行业整体需求量和产量的大幅扩张,上游资源需求量将快速增长,主要资源的产能和产量还需要大幅度增长。预计到2025年,我国多晶硅市场需求量将达到100万t左右,实际产能需求约120万t~150万t,相比2020年底产能需要扩张2~3倍。从目前新建项目进展看,个别省份的多晶硅项目因能耗双控等原因进度缓慢,加剧了短期资源供给紧张。在可以预见的短期内,除能耗双控外,各地将陆续部署启动双碳工作,将进一步加大硅料等上游资源供给保障难度。

2.4 光伏行业与环境关系更加复杂化,废旧电池组件回收再利用提上日程

从光伏生产制造端看,随着环境污染治理水平持续提升,“十四五”时期我国光伏制造过程中产生的二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、COD、氨氮等常规污染物将通过深度净化处理得到有效控制,此外有机废气、氟化物、氯化氢、硅烷等特征污染物和有毒有害物质应重点防控^[12],以避免或减轻其对环境和人体健康的不利影响。

从光伏电站建设和运营阶段看,未来随着光伏装机量的大幅增长和应用场景的不断拓展,光伏发电与城市建筑、工矿企业、农业农村、渔业、牧业、交通等融合发展,光伏如何做到与周边环境的和谐与融合成为不可忽视的重要问题,在“光伏+”各类应用场景系统设计建设阶段应充分考量生态环境因素。

从光伏电站退役回收看,废旧电池组件回收再利用成为固废处理和资源化领域的重点关注方向,废旧电池组件如果不妥善处理,不仅会造成大量的资源浪费,而且会带来新的环境问题。据国际可再生能源署预测,到2030年全球废旧光伏组件回收规模将达到150万t,这些新兴固废如果不加以回收利用将造成生态环境的破坏。

3 结语

“十四五”时期我国光伏行业迎来高速扩张的同时,必须同步推动全行业的绿色低碳发展。从能源消费总量看,在产量快速增长的带动下,“十四五”期间我国光伏制造过程能源消费总量仍将大幅增长,鉴于光伏是新能源发展的主力军,建议适当放宽对光伏行业的用能总量管控,并持续推动能效提升。碳排放方面,推动能源低碳化将是重中之重,尤其是多晶硅等主要碳排放环节,应大幅提升清洁能源使用比例。从国际市场看,未来光伏产品出口将面临更多低碳要求,降低产品碳足迹是竞争的关键。资源消耗方面,上游资源需求量将大幅增长,而能耗双控和双碳政策可能不利于光伏上游资源供给保障,建议做好统筹协调。环境保护方面,要充分评估“光伏+”各类应用场景的生态环境影响,抓好光伏生产制造、光伏电站建设和运营、废旧电池组件回收再利用等全流程环境保护工作。

参考文献

- [1] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 赵剑波, 王蕾. “十四五”构建以新能源为主体的新型电力系统[J]. 中国能源, 2021, 43(5): 17-21.
- [3] 中国光伏行业协会. 《中国光伏产业发展路线图(2020年版)》[EB/OL]. [2021-10-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-11/30/content_5140508.htm.
China Photovoltaic Industry Association. China photovoltaic industry development roadmap (2020 Edition) [EB/OL]. [2021-10-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-11/30/content_5140508.htm.
- [4] 傅银银. 中国多晶硅光伏系统生命周期评价[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李兴盛, 胡向然, 郑淞生, 等. 基于多晶硅金刚线切割工艺的光伏生命周期分析[J/OL]. 太阳能学报: 1-5 [2021-10-02]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0082>.
LI X S, HU X R, ZHENG S S, et al. Photovoltaic life cycle analysis based on polysilicon diamond wire cutting process[J/OL]. Acta Energia Sinica: 1-5 [2021-10-12]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0082>.
- [8] 工业和信息化部. 《光伏制造行业规范条件(2021年版)》[EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/dzs/wjfb/art/2021/art_f4ad5ce6359a457395cfe931

- c69bd777. html.
Ministry of Industry and Information Technology. Specification Conditions for Photovoltaic Manufacturing Industry (2021 Edition) [EB/OL]. [2021-10-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-11/30/content_5140508.htm.
- [9] 工业和信息化部.《绿色设计产品评价技术规范 多晶硅》(T/CNIA 0021) [EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/qjsc/art/2021/art_651f1af99f914c2fb68ca8a2aab4c943.html.
Ministry of Industry and Information Technology. Technical Specification for Evaluation of Green Design Products Polysilicon (T/CNIA 0021) [EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/qjsc/art/2021/art_651f1af99f914c2fb68ca8a2aab4c943.html.
- [10] 工业和信息化部.《绿色设计产品评价技术规范 光伏组件》(T/CESA 1118) [EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/qjsc/art/2021/art_651f1af99f914c2fb68ca8a2aab4c943.html.
Ministry of Industry and Information Technology. Technical Specification for Evaluation of Green Design Products Photovoltaic Modules (T/CESA 1118) [EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/qjsc/art/2021/art_651f1af99f914c2fb68ca8a2aab4c943.html.
- [11] 工业和信息化部.《绿色设计产品评价技术规范 光伏硅片》(T/CESA 1074) [EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/qjsc/art/2021/art_651f1af99f914c2fb68ca8a2aab4c943.html.
Ministry of Industry and Information Technology. Technical Specification for Evaluation of Green Design Products Photovoltaic Modules (T/CESA 1074) [EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/qjsc/art/2021/art_651f1af99f914c2fb68ca8a2aab4c943.html.
- [12] 杨栋. 太阳能光伏产业的污染与有效防治分析[J]. 资源节约与环保, 2021(4): 103-104.
YANG D. Analysis of pollution and effective prevention and control of solar photovoltaic industry[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2021(4): 103-104.
- [13] 卢兰兰, 毕冬勤, 刘壮, 等. 光伏太阳能电池生产过程中的污染问题[J]. 中国科学: 化学, 2013, 43(6): 687-703.
LU L L, BI D Q, LIU Z, et al. Pollution problems in the production of photovoltaic solar cells[J]. Science in China: Chemistry, 2013, 43(6): 687-703.
- [14] 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.
YU Z Q, MA W H, WEI K X, et al. Analysis of energy payback period and carbon footprint of metallurgical polysilicon photovoltaic system[J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(2): 520-528.
- [15] 国家发展改革委.《完善能源消费强度和总量双控制度方案》[EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202109/t20210916_1296857.html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission. Plan to Improve the Dual Control System of Energy Consumption Intensity and Total Quantity [EB/OL]. [2021-10-02]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202109/t20210916_1296857.html?code=&state=123.