

光伏行业生命周期碳排放清单分析

赵若楠^{1,2},董莉¹,白璐¹,张玥¹,李雪迎¹,乔琦¹,谢明辉^{1*},王伟³ (1.中国环境科学研究院,北京 100012; 2.中国人民大学,北京 100872; 3.中国环境保护产业协会,北京 100037)

摘要: 本研究建立了光伏行业生命周期碳排放清单,并在处置阶段对不同处置情景的碳排放进行比较.通过现场、资料调研和工艺研发应用的方式,获得光伏行业生产、使用、处置阶段及三个情景的资源、能源的输入/输出和污染物排放数据.结果表明:光伏行业碳排放集中在生产阶段,其中又以高纯多晶硅生产过程的碳排放最高;使用阶段碳排放较小,仅为生产阶段的 3%;电耗是最主要的碳排放因素,占生产和使用阶段碳排放的 64.98%.处置阶段的 3 种情景的碳排放由大到小依次是填埋>拆解>热解,除了填埋略微增加碳排放外,拆解和热解都能显著降低行业碳排放,可分别降低 6.03%和 33.59%.研究显示采用热解回收技术的光伏组件生命周期单位发电量碳排放强度,不仅低于同类研究,还远低于我国当前电力结构的碳排放水平,发展光伏行业可实现环境与能源双赢.

关键词: 光伏; 生命周期评价; 碳排放; 回收

中图分类号: X820.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)06-2751-07

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0308

Inventory analysis on carbon emissions of photovoltaic industry. ZHAO Ruo-nan^{1,2}, DONG Li¹, BAI Lu¹, ZHANG Yue¹, LI Xue-ying¹, QIAO Qi¹, XIE Ming-hui^{1*}, WANG Wei³ (1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.Renmin University of China, Beijing 100872, China; 3.China Association of Environmental Protection Industry, Beijing 100037, China). *China Environmental Science*, 2020,40(6): 2751~2757

Abstract: The inventory of carbon emissions in the life cycle of photovoltaic industry was analyzed. The carbon emissions from different scenarios for disposal stage were compared. The data for the resource, energy fluxes and environmental emissions were obtained from site investigations, published literature and new technologies development and application. It shows that the carbon emissions of manufacture stage were high, among which the polycrystalline silicon production process's carbon emissions were the most. The carbon emissions of use stage were the lowest, accounting for 3.7% of manufacture stage. Thermal power consumption was the primary factor of carbon emissions, which its carbon emission was accounting for 64.98% of manufacture and use stages. The carbon emissions of disposal stage were highest in landfill treatment followed by dismantling and thermal decomposition. Landfill could increase 0.08% of carbon emissions in manufacture and use stage. In contrast, dismantling and thermal decomposition could reduce 6.03% and 33.59% of carbon emissions more significantly. The results highlighted that the carbon emission of 1kW·h of electricity generation from photovoltaic module with thermal decomposition in disposal stage were significantly lower than these from other research and current electrical power system in China. Development of photovoltaic industry would achieve a win-win situation between environment and energy.

Key words: photovoltaic; life cycle assessment (LCA); carbon emissions; recovery

我国是光伏行业大国,自 2012 年开始,光伏产品一直占据世界第一的市场份额.2018 年,我国的高纯多晶硅、硅片、电池片、组件等光伏产品产量已经占全球市场的 58.1%、93.1%、74.8%、72.8%^[1].目前在国家发展与改革委员会公布的多批行业企业温室气体核算方法与报告指南中并没有光伏行业产品,考虑到 2018 年国家层面的机构改革工作中,碳排放管理职能并入生态环境部,因此,厘清光伏行业碳排放特征、掌握碳排放量对光伏行业的环境管理具有前瞻意义.

光伏产品作为一种能源产品,早期能源回收期

研究往往伴随着碳减排视角,如在上世纪 1976 年 Hunt^[2]首次核算了单晶组件生产过程的能源消耗,并计算出能源回收期为 12a;Komiyama^[3]比较了在日本和印尼安装光伏组件的碳排放,结果显示印尼安装的组件碳排放少于日本安装,得益于印尼太阳能资源丰富.到目前为止,光伏行业碳排放研究主要聚焦:1)光伏产品的使用具有较大的环境效益,与传统的化石能源行业相比减排潜力巨大^[4-6];2)光伏行

收稿日期: 2019-11-05

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1502804)

* 责任作者, 研究员, xiemh@craes.org.cn

业碳排放影响因素除了光照资源^[7]、产品类型^[8-9],还包括安装角度、安装方式、系统寿命和平衡系统效率^[10]等;3)与常规能源碳排放的比较分析^[11-12]。此外,为了全面评估光伏行业作为新能源行业的优劣,常用生命周期评价来研究光伏产品的环境影响,如Fthenakis^[13]对单晶硅、多晶硅、带状矽和碲化镉光伏电池的生命周期环境影响进行了分析,并与火电进行比较;Jungbluth^[14]核算了光伏产品的物质能源输出和污染物排放数据,并被收录进入 Ecoinvent 数据库,这是光伏行业首次较为系统的生命周期数据清单分析工作。

我国学者早期对光伏行业碳排放的研究聚焦在能源回收期方面^[15-16],直到 2011 年开始逐渐对光伏碳排放和生命周期评价有了一些研究,习周玮等^[17]采用生命周期评价的方法核算了我国光伏组件生产技术的全球变暖潜值为 1200kgCO₂(常规技术)500kgCO₂(最优技术);刘臣辉等^[18]分析了 280MW 多晶硅—光伏系统产业链的碳排放为 5.62×10⁸kg,多晶硅生产环节碳排放最多(占 85%);Fu 等^[19]评估了我国多晶组件发电的全球变暖潜值是 50.9gCO₂-eq/kW·h,并评估了生命周期环境影响;Yu 等^[20]对我国采用冶金路线生产的多晶组件并网发电碳排放进行了生命周期评价,核算了环境负荷和环境综合影响值。

以单位光伏组件功率(Wp)碳排放对国内学者研究结果进行对比分析(假设 1 片电池片功率为 4Wp、国内电力碳排放水平为 900gCO₂-eq/kW·h),整体来说我国单位光伏组件产品碳排放呈下降趋势,从 2011 年^[17,21]平均 2.90kgCO₂-eq/Wp、2015 年^[19,22]平均 2.08kgCO₂-eq/Wp、2016 年^[23-24]平均 1.94kgCO₂-eq/Wp、2017 年^[20,25-26]平均 1.68kgCO₂-eq/Wp 到 2018 年^[27-29]平均 1.49kgCO₂-eq/Wp。各年间仍有差异,这主要是产品类型(多晶、单晶)、研究方法(IMPACT2002+^[30]、TRACI^[31]、ReCiPe^[32]、IMPACTWorld+^[33])、工艺路线(改良西门子法、冶金法)的差异导致的,另外,论文发表与数据获取的相对滞后性也是造成数据间差异的一个原因。

虽然我国学者在较短的时间内对光伏产品的碳排放开展大量的研究,但这些研究都集中在高纯多晶硅到组件的生产阶段,对使用和处置阶段研究较少,原因是目前国际上废弃光伏组件回收的工业

生产线较少。当前对处置阶段的数据清单研究多基于假设,如回收率假设^[19,34]、回收阶段增长 20%碳排放假设^[35-36]、实验数据推算假设^[37]等,都不能如实反映废弃光伏组件回收的实际情况。笔者所在课题组通过“实验室试验—模拟小试—现场中试—实际应用”技术途径,实现了废弃光伏组件的回收再利用,获取了处置阶段清单数据,分析不同处置(回收)技术对碳减排的影响,以期用客观真实的光伏行业全生命周期(涵盖生产、使用、处置阶段)碳排放结果为行业环境管理、国际气候谈判提供支撑。

1 研究方法

研究基于生命周期评价方法,对全生命周期所有资源能源投入的碳排放数据进行核算。参考生命周期评价的方法步骤 ISO 14040-14043^[39],核算光伏行业碳排放也可以分为四个步骤:①确定目标范围和系统边界;②收集清单数据;③根据排放因子核算碳排放;④结果分析。

将光伏行业分为生产、使用、回收三个阶段,生产阶段主要由使用能源、资源产生的碳排放和处理污染物的碳排放三部分组成;使用阶段主要是使用资源产生的碳排放;处置阶段主要由使用能源、资源产生的碳排放、处理污染物的碳排放和回收物质可抵消的碳排放四部分组成。即

$$C = P + A + W$$

式中: C 为光伏产品的碳排放总量,kg; P 为生产阶段的碳排放总量,kg; A 为使用阶段的碳排放总量,kg; W 为处置阶段的碳排放总量,kg。

(1) 生产阶段的碳排放模型

$$P = Pe + Pr$$

式中: Pe 表示生产阶段能源消耗碳排放,kg; Pr 表示生产阶段资源消耗的碳排放,kg。

Pe 计算公式为:

$$Pe = \sum Ei \times RE$$

式中: Ei 为各过程消耗的电量,kW·h; RE 为电力碳排放因子。

Pr 计算公式为:

$$Pr = \sum_{i=1}^n Ri \times RRi$$

式中: Ri 为各过程中使用资源 i 的量,kg; RRi 为资源 i 碳排放因子,kg CO₂/kg。

(2) 使用阶段的碳排放模型

$$A = Ar$$

式中: Ar 为使用阶段资源消耗碳排放, kg, 计算公式同 Pr 。

(3) 处置阶段的碳排放模型

$$W = We + Wr + Ww - Wr$$

式中: We 为处置阶段能源消耗碳排放, kg; Wr 为处置阶段资源消耗的碳排放, kg; Ww 为处置阶段处理污染物碳排放, kg; Wr 为处置阶段回收资源可抵消的碳排放, kg。

We 、 Wr 和 Ww 计算公式同上, Wr 计算公式为:

$$Wr = \sum_{i=1}^n Wi \cdot Ui$$

式中: Wi 为回收得到的资源 i 的量, kg; Ui 为资源 i 碳排放因子, kgCO_2/kg 。

2 光伏产品生命周期碳排放的计算

2.1 功能单元与系统边界

本研究的功能单位确定为 1m^2 光伏组件产品, 材质为晶体硅材料, 包括生产、使用、回收三个生命周期阶段, 系统边界如图 1 所示。假设使用寿命 25a, 全球变暖趋势按 100a 计。基于“从摇篮到坟墓”的理念, 所有的原料消耗的碳排放核算都追溯到基础矿产和一次能源开采环节。

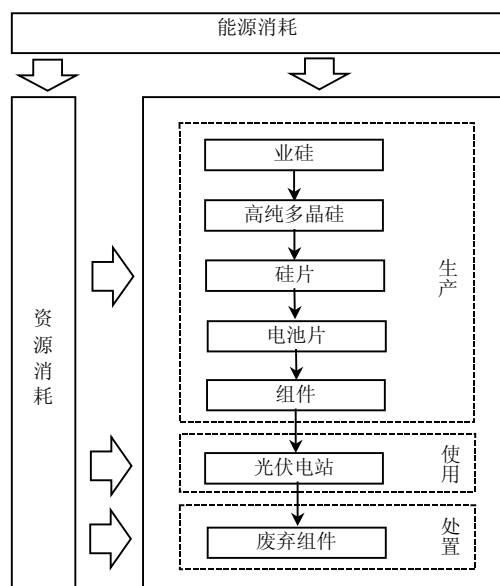


图1 光伏行业生命周期评价的系统边界

Fig.1 The boundary of lifecycle assessment of photovoltaic industry

2.2 清单分析

光伏产品生命周期数据清单主要来自行业调

研和文献数据。其中生产阶段的高纯多晶硅、硅片、电池片、组件等产品生产过程的数据清单主要来自国家环保公益性行业科研专项“我国新能源产业(太阳能电池)环境影响和管理研究”课题成果^[39-40]。

使用阶段基本不产生环境影响, 考虑到数据可得性, 本文针对光伏产品使用阶段的主要输入是逆变器, 逆变器采用跟组件 1.2:1 的容配比, 功率型号选取 500kW, 按 1m^2 光伏产品功率为 155Wp, 折算 1m^2 组件需要的逆变器 0.000372 个, 数据清单见表 1。

处置阶段考虑三种情景:

情景 1(填埋情景): 使用寿命到期后, 直接填埋处置。

情景 2(拆解情景): 使用寿命到期后, 进行人工拆解铝边框, 仅回收铝边框(折旧 10%抵消碳排放), 其余部分填埋。

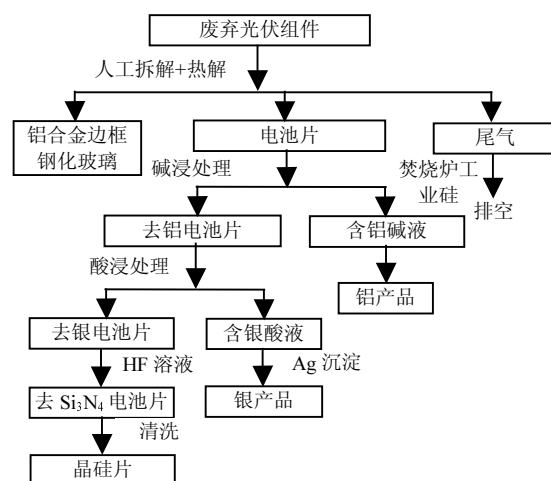


图2 废光伏组件回收工艺

Fig.2 The technology processes of recover of photovoltaic module

情景 3(热解情景): 使用寿命到期后, 采用中国环境科学研究院研发的热解回收工艺^[41-43]回收铝、银、玻璃和晶硅片。该工艺是在人工拆解铝合金边框基础上, 采用高温热解分离玻璃和电池片, 然后通过化学处理实现背板的铝、前板的银和晶硅片的回收, 工艺流程图见图 2。目前该工艺连续稳定运行, 为本研究提供了能源、资源消耗, 污染物排放量, 以及回收物质量。回收的晶硅片可直接用于硅片生产, 品质与新品一致, 不考虑折旧; 其他回收物质(玻璃、铝合金边框、银、铝)的品质并不能与正常生产出的产品品质一致, 因此, 按折旧 10%核算抵消的碳排放(即抵

消生产同样重量产品的碳排放 90%)。三个阶段的数据清单见表 1。

表 1 光伏行业生命周期数据清单
Table 1 The lifecycle inventory of photovoltaic industry

阶段		数据清单			
生产阶段	消耗:	工业硅:1.05kg	液氯:151kg	氢气:40.5g	石灰石:438g
		NaOH:266g	坩埚:160g	切割线:316g	砂浆:226g
		玻璃:42.2g	盐酸(36%):41.0g	硝酸(50%):505g	氢氟酸:310g
		银浆:5.19g	铝浆:50.7g	三氯氧磷:3.25g	铝合金边框:1860g
		焊带:118g	钢化玻璃:5410g	EVA:795g	PVDE:102g
	排放:	PET:344g	电:124kWh	液氮:11.4g	
		氯化氢:0.872g	NO _x :9.09g	氟化氢:0.181g	氨气:2.36g
		COD:48.3g	氯化物:58.2g	氟化物:3.55g	氨氮:0.0202g
		总氮:19.14g	总磷 0.0779g	废坩埚:141g	废切割线:316g
		废玻璃:35.9g			
使用阶段	消耗:	铜丝: 125g	润滑油:328g	印刷电路:0.836cm ²	铝:487g
		低合金钢板:535g	集成电路:0.0104g	电:1.70kWh	电容器:0.231g
处置情景 1	填埋:	铝合金边框:1.86kg	玻璃:5.36kg	PET:344g	其他:102g
处置情景 2	填埋:	玻璃:5.36kg	PET:344g	其他:102g	
	产出:	铝合金边框:1.84kg			
处置情景 3	消耗:	电:10.7kWh	盐酸(36%):481g	硝酸(50%):223g	氢氟酸:156g
	产出:	铝合金边框:1.84kg	玻璃:5.36kg	高纯多晶硅:0.352kg	铝:42.7g 银:4.62g
	排放:	CO ₂ :2.63g	CH ₄ :4.47g	乙烷:3.41g	丙烷:1.95g

2.3 核算碳排放

在核算我国光伏产品碳排放清单过程中,优先采用本地化的排放因子,主要从已发表的文献或报告中获取,如高纯多晶硅^[44]、铝^[45]、玻璃^[46]、PET^[47]等,特别是在每个阶段都占比较大的电力碳排放因子采用国家发展和改革委员会前应对气候变化司^[48]和中国电力企业联合会的成果^[49],无法获得本地化排放因子的原料物质则采用 IPCC 相关指南的缺省值。

2.4 结果分析

对光伏行业生产、使用阶段的碳排放核算结果如图 3 所示。

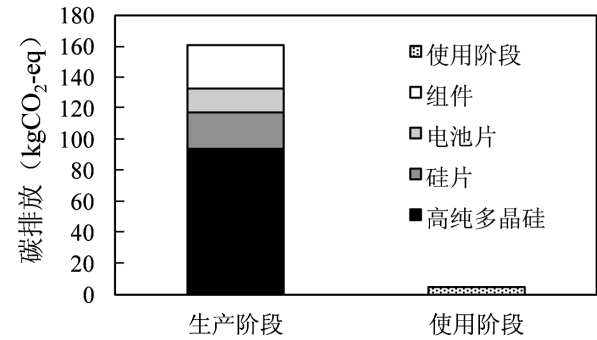


图 3 光伏生产阶段和使用阶段碳排放对比

Fig.3 The comparison on carbon emissions of manufacture and use stages of photovoltaic industry

光伏行业生产阶段的碳排放为 160.86kgCO₂-eq,其中高纯多晶硅、硅片、电池片、组件生产的碳排放分别是 94.07kgCO₂-eq、23.38kgCO₂-eq、15.38kgCO₂-eq、28.02kgCO₂-eq,依次占生产阶段的 58.48%、14.54%、9.56%、17.42%,如图 4 所示。

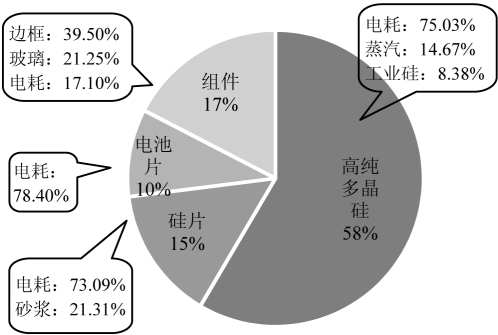


图 4 光伏行业生产阶段各产品主要碳排放环节

Fig.4 The comparison on carbon emissions of processes of each photovoltaic productions

从图 4 也可以看出,光伏行业各产品生产过程中,电耗都是最大的碳排放因素(组件除外),依次占高纯多晶硅生产、硅片生产、电池片生产过程碳排放的 75.03%、73.09%、78.40%,生产阶段电耗碳排放量整体占比 64.98%。

光伏行业使用阶段的碳排放较低,仅为

4.93kgCO₂-eq,仅为生产阶段的 3%.

处置阶段不同情景的碳排放结果见表 2.

表 2 处置阶段不同情景的碳排放(kg CO₂-eq)
Table 2 The comparison on carbon emission of disposal stage from three scenarios

项目	情景 1	情景 2	情景 3
玻璃	0.039	0.039	-5.359
PET	0.032	0.032	/
其他	0.013	0.013	0.139
铝合金边框	0.041	-9.961	-9.961
高纯多晶硅	/	/	-47.842
铝	/	/	-0.465
银	/	/	-0.421
电耗	/	/	7.201
盐酸	/	/	0.039
氢氟酸	/	/	0.421
硝酸	/	/	0.649
合计	0.124	-9.878	-55.598

情景 1:没有回收任何物质,报废组件填埋处置,所以有少量的碳排放 0.124kg CO₂-eq,较生产和使用阶段(165.79kg CO₂-eq)增长 0.08%.

情景 2:报废组件经人工拆解后,可得到 1.84kg 的铝边框,避免了生产此重量的铝边框产生的碳排放(-9.96kg CO₂-eq),因此,处置阶段情景 2 的碳排放为-9.88kgCO₂-eq,可降低生产和使用阶段碳排放的 5.96%.

情景 3:报废组件经人工拆解和热解后,可获得铝合金边框、玻璃、多晶硅、铝、银等物质,产生正效益-64.05kgCO₂-eq,同时,此情景还有电耗和其他物质消耗(包括污染物排放),因此,回收阶段情景 3 的碳排放为-55.60kgCO₂-eq,可降低生产和使用阶段碳排放的 33.54%.

将回收阶段三种场景跟生产、使用阶段加在一起,得到三种不同场景下光伏行业全生命周期碳排放,如图 5 所示.

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,人工拆解的光伏行业全生命周期碳排放(155.91kgCO₂-eq)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(165.91kgCO₂-eq)降低了 6.03%;热解回收的光伏行业全生命周期碳排放(110.19kgCO₂-eq)大幅削减了 33.59%填埋处置的光伏行业全生命周期碳排放.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.

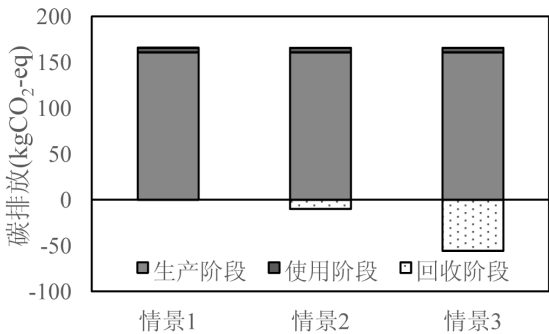


图 5 不同情景的光伏行业全生命周期碳排放结果

Fig.5 The comparison onlifecyclearbonemission of photovoltaic industry from three scenarios

2.5 与我国电力系统比较

假设每片电池片的功率为 4.2Wp,则每 m² 光伏组件的功率为 155Wp;按年度阳光辐射量 1200h 计算年发电量为 155×1200/1000=186(kW·h)/(a·m²),25a 的使用寿命内发电量为 4650kW·h,三种处置情景对应的单位发电量碳排放分别是 35.68gCO₂-eq/kW·h、33.53gCO₂-eq/kW·h、23.70gCO₂-eq/kW·h,都低于 FU 等(50.9gCO₂-eq/kW·h)^[19]、HONG 等(56.15gCO₂-eq/kW·h)^[24]、翁琳等(79.94gCO₂-eq/kW·h)^[26]研究结果,主要得益于回收的铝合金、玻璃、晶体硅避免了常规生产的碳排放.上述结果远低于我国当前电力结构的单位发电量二氧化碳排放因子(592gCO₂-eq/kW·h)^[49],环境效益显著.

3 结论

3.1 1m² 光伏组件生产阶段和使用阶段碳排放分别是 160.86kg CO₂-eq 和 4.93kg CO₂-eq,生产阶段碳排放主要来自高纯多晶硅生产(58.48%)其次是组件、硅片、电池片,依次占比 17.42%、14.54%、9.56%.电耗是生产阶段碳排放的主要因素,各生产过程占比都很高,合计占比 64.98%,节能降耗是碳减排的主要途径.

3.2 处置阶段的不同情景碳排放结果显示,直接填埋略增加光伏组件生产和使用阶段的碳排放的 0.08%;人工拆解获得铝边框可降低光伏组件生产和使用阶段碳排放的 5.96%;热解回收工艺对于降低碳排放效果显著,可削减 33.59%的碳排放,应作为行业回收技术的首选.

3.3 处置阶段采用热解回收工艺的光伏组件单位发电量碳排放强度为 $23.70\text{gCO}_2\text{-eq/kWh}$, 低于国内同类研究, 且远低于当前我国电力系统的碳排放, 主要是回收的副产品避免了常规生产的碳排放。

参考文献:

- [1] 王勃华, 王世江, 江 华, 等. 2018-2019 年中国光伏产业年度报告 [R]. 北京: 中国光伏行业协会, 2019.
Wang B H, Wang S J, Jiang H, et al. Annual report of China's photovoltaic industry in 2018[R]. Beijing: China Photovoltaic Industry Association, 2019.
- [2] Hunt L P. Total energy use in the production of silicon solar cells from raw materials to finished product [C]//12th Photovoltaic Specialists Conference, 1976:347-352.
- [3] Komiyama H, Yamada K, Inaba A, et al. Life cycle analysis of solar cell system as a means to reduce atmospheric carbon dioxide emissions [J]. Energy Conversion, 1996,(37):1247-1252.
- [4] Peng J, Lu L, Yang H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013,19:255-274.
- [5] Meier P J, Kulcinski G L. Life-cycle energy requirements and greenhouse gas emissions for building-integrated photovoltaics [R]. Madison, USA: Fusion Technology Institute, University of Wisconsin; 2002.
- [6] Fthenakis V M, Moskowitz P D. Photovoltaics: environmental, health and safety issues and perspectives [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2000,8:27-38.
- [7] Fthenakis V M, Kim H C. Greenhouse-gas emissions from solar electric and nuclear power: a life-cycle study [J]. Energy Policy, 2007,35:2549-57.
- [8] Masaizu I, Kazuhiko K, Hiroyuki S, et al. A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2003,(75):507-517.
- [9] Masakazu I, Keiichi K, Kosuke K. Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules [J]. Current Applied Physics, 2010,10(2):271-273.
- [10] Sherwani A F, Usmani J A, Varun. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010,14:540-544.
- [11] Wang Y, Zhou S, Huo H. Cost and CO_2 reductions of solar photovoltaic power generation in China: Perspectives for 2020 [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,39:370-380.
- [12] Breyer C, Koskinen O, Blechinger P. Profitable climate change mitigation: The case of greenhouse gas emission reduction benefits enabled by solar photovoltaic systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,49:610-628.
- [13] Fthenakis V M, Kim H C. Photovoltaics: life-cycle analyses [J]. Solar Energy, 2011,85:1609-1628.
- [14] Jungbluth N. Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database [J]. Progress Photovoltaic, 2005,13(5):429-446.
- [15] 胡润青. 太阳能光伏系统的能量回收期有多长? [J]. 太阳能, 2008,(3):6-10.
Hu R Q. How long was the energy payback time of solar photovoltaic system? [J]. Solar Energy, 2008,(3):6-10.
- [16] 胡润青. 我国多晶硅并网光伏系统能量回收期的研究 [J]. 太阳能, 2009,(1):9-14.
Hu R Q. Research on energy payback time of polysilicon grid connected photovoltaic system in China [J]. Solar Energy, 2009,(1):9-14.
- [17] 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.
Diao Z W, Shi L. Life Cycle Assessment of Photovoltaic Panels in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2011,24(5):571-579.
- [18] 刘臣辉, 詹晓燕, 范海燕, 等. 多晶硅-光伏系统碳排放环节分析 [J]. 太阳能学报, 2012,33(7):1158-1163.
Liu C H, Zhan X Y, Fan H Y, et al. Analysis of carbon emission links on polycrystalline-silicon PV system [J]. Acta Energetica Sinica, 2012,33(7):1158-1163.
- [19] 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.
- [20] Yu Z Q, Ma W H, Xie K Q, et al. Life cycle assessment of grid-connected power generation from metallurgical route multi-crystalline silicon photovoltaic system in China [J]. Applied Energy, 2017,185:68-81.
- [21] 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.
Zhan X Y. Life cycle research on carbon emissions of polycrystalline silicon - photovoltaic system [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
He J J. Research on carbon emission of photovoltaic generation with life cycle assessment [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [26] 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.
Weng L, Chen J B. Environmental and economic analysis on the carbon dioxide emissions calculation in the life cycle of a photovoltaic system [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2017,39(3):282-288.
- [27] 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.

- [28] 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 time and carbon footprint of metallurgical route polysilicon PV power system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018,39(2):520-528.
- [29] 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.
Chen X, Huang B J, Wang X Y, et al. Research on monetary accounting of environmental cost of solar PV [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2019,58(1):120-126.
- [30] Joliet O, Margni M, Charles R, et al. IMPACT2002+: A new life cycle impact assessment methodology [J]. *Inter Journal of Life Cycle Assessment*, 2003,8:324-330.
- [31] Bare J C, Norris G A, Pennington D W, et al. TRACI—the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2003,6:56-68.
- [32] Huijbregts M, Steinmann Z, Elshout, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level [J]. *Journal of Life Cycle Assessment*, 2017,22:138-147.
- [33] Plouffe G, Bulle C, Deschênes L. Including metal speciation in LCA terrestrial ecotoxicity: new regionalised characterization factors [C]// Berlin: SETAC Europe 22nd Annual Meeting/6th SETAC World Congress, 2012.
- [34] 李 鹍,于随然.中国光伏系统的生命周期评价 [J]. 环境工程, 2014,32(10):119-124.
Li Y, Yu S R. Life cycle assessment of photovoltaic system in China [J]. *Environmental Engineering*, 2014,32(10):119-124.
- [35] Guo X P, Lin K, Huang H, et al. Carbon footprint of the photovoltaic power supply chain in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,233:626-633.
- [36] Gong D R, Chen D, Yuan Z Z. Mathematics calculation model and application of CO₂ emission of photovoltaic (PV) power generation system [J]. *Renew Energy Resource*, 2013,31(9):1-4.
- [37] Huang B J, Zhao J, Chai J Y, et al. Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process [J]. *Solar Energy*, 2017,143: 132-141.
- [38] International Organization for Standardization Technical. ISO 14040: 2006 environmental management life cycle assessment: principles and framework [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [39] 谢明辉,白 璐,阮久莉,等.以晶体硅太阳能电池产业为例的产业生命周期评价初探 [J]. 环境科学研究, 2017,30(12):1970-1978.
Xie M H, Bai L, Ruan J L, et al. Exploratory research on industrial life cycle assessment illustrated by case study of crystalline silicon photovoltaic cell industry [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017,30(12):1970-1978.
- [40] Xie M H, Ruan J R, Bai W N, et al. Pollutant payback time and environmental impact of Chinese multicrystalline photovoltaic production based on life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,184:648-659.
- [41] 董 莉,刘景洋,周潇云.废晶体硅光伏组件中乙烯-醋酸乙烯共聚物热处理及产物分析 [J]. 环境污染与防治, 2016,38(10):61-66.
Dong L, Liu J Y, Zhou X Y, et al. Thermal treatment and products analysis of EVA in waste crystalline silicon photovoltaic modules [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016,38(10):61-66.
- [42] 董 莉.废晶体硅太阳能电池板资源化技术研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2014.
Dong L. Research on waste crystalline silicon solar panels resource recovery technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [43] 董 莉,刘景洋,张建强.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.
Dong L, Liu J Y, Zhang J Q, et al. Research situation of waste crystalline silicon PV modules resource processing technology [J]. *Modern Chemical Industry*, 2014,34(2):20-23.
- [44] 谢明辉,阮久莉,白 璐,等.太阳能级多晶硅生命周期环境影响评价 [J]. 环境科学研究, 2015,28(2):291-296.
Xie M H, Ruan J L, Bai L, et al. Environmental impacts of solar grade polysilicon based on life cycle assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015,28(2):291-296.
- [45] 罗丽芬,周云峰,李昌林,等.某电解铝企业的碳排放核算方案 [J]. 有色冶金节能, 2019,35(4):47-50.
Luo L F, Zhou Y F, Li C L, et al. Accounting scheme for carbon emission of an electrolytic aluminum enterprise [J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2019,35(4):47-50.
- [46] 严玉廷,刘晶茹,丁 宁,等.中国平板玻璃生产碳排放研究 [J]. 环境科学学报, 2017,37(8):3213-3219.
Yan Y T, Liu J R, Ding N, et al. Investigation on CO₂ emissions from flat glass production in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8):3213-3219.
- [47] 王 玲,万 超,刘 阳,等.基于树脂聚酯的生命周期碳排放评价 [J]. 化工管理, 2019,(25):112-114.
Wang L, Wan C, Liu Y, et al. Life cycle carbon emissions evaluation based on resin polyester [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2019(25):112-114.
- [48] 关于公布 2009 年中国区域电网基准线排放因子的公告 [R]. 国家发展改革委应对气候变化司, 2009.
Announcement on the emission factors of China's regional grid in 2009 [R]. National Development and Reform Commission, Department for climate change, 2009.
- [49] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告 2019 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2019.
China Electricity Council. China electric power industry annual development report 2019 [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2019.

作者简介: 赵若楠(1989-),女,山西大同人,工程师,中国人民大学博士研究生,主要从事清洁生产与污染源管理研究.发表论文 5 篇。