

文章编号:1007-6735(2017)03-0282-07

DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2017.03.013

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

翁琳, 陈剑波

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 以上海临港某光伏发电项目为案例, 同时结合光伏发电系统全生命周期碳排放模型和各阶段实际过程, 对各个阶段碳排放的独特性、独特来源进行分析和计算, 进而明晰其计算结果. 根据该系统的碳排放周期、碳交易经济回收期以及光伏发电上网电量的经济回收期对光伏发电系统进行客观的评价.

关键词: 碳排放; 多晶硅; 太阳能光伏系统; 全生命周期评价

中图分类号: TM 615

文献标志码: A

Environmental and Economic Analysis on the Carbon Dioxide Emissions Calculation in the Life Cycle of a Photovoltaic System

WENG Lin, CHEN Jianbo

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Taking the photovoltaic (PV) project located in Shanghai Lingang as an example, based on the established CO₂ emission model and the actual process of every stage, the uniqueness and unique source of carbon emissions were explored in details. In addition, in accordance with the CO₂ emissions in the life cycle of the PV system, in the payback period of the carbon trading system as well as in the payback period of the photovoltaic power, an objective evaluation on the PV system was carried out.

Keywords: carbon dioxide emission; SOG-Si; solar photovoltaic system; life cycle assessment

多年来, 由于光伏产业链上游的多晶硅原料的生产设备相对落后、工艺技术掌握不完全、生产规模较小等影响, 光伏产品的生产能耗相对较高,

光伏行业也被冠以“高耗能”的清洁能源代表. 此前一直有质疑声称: “光伏组件从全生命周期看并不环保, 光伏产品所发的电量还不足以偿还生产

收稿日期: 2017-01-04

第一作者: 翁琳(1988-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 新能源应用技术. E-mail: holidayong@163.com

通信作者: 陈剑波(1962-), 男, 教授. 研究方向: 暖通空调系统集成与节能、新能源应用技术等. E-mail: cjbzh@vip.sina.com

其产品所耗费的电量。”产业屡曝污染事件,国内各地光伏发电相关产业的部署也普遍存在盲目性和重复浪费等现象,使人们对光伏发电运行的环境价值产生疑问,从而对光伏发电产生质疑,阻碍了光伏发电的应用。

本文以上海临港某 12.162 25 MW 的光伏发电项目为案例,从光伏系统全生命周期^[1]角度出发,利用环境经济学思想研究多晶硅太阳能电池的生产、安装施工、使用以及回收过程中的碳排放,较全面地计算该系统整个生命周期内的碳排放量,并将其与系统建成后生命周期内的项目减排量以及整个项目的资金投入进行比较,得出其碳回收期、经济回收期等参数,研究其对环境的影响。以此为依据,对光伏发电系统进行客观的评价,为其发展从技术上提供指导,有利于光伏发电产业健康发展和规模化推广。

1 光伏系统全生命周期碳排放量计算模型

根据全生命周期评价(LAC)^[2-4]方法,建立光伏系统碳排放模型为

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 = \sum_{i=1}^n (E_i R_e) + \sum_{i=1}^n (M_i Q_i R_m + C_{wc}) \cdot \sum_{i=1}^n W_{an} + \sum_{i=1}^n (P_i R_p + DH) \cdot \sum_{i=1}^n (G_p \eta_i G_i R_g) + \sum_{i=1}^n (M_i H_i R_m)$$

式中: C_t 为光伏发电系统全生命周期的碳排放总量,kg; C_1 为光伏发电系统光伏组件原材料获取阶段的碳排放量,kg; C_2 为光伏发电系统光伏组件生产阶段的碳排放量,kg; C_3 为光伏发电系统光伏组件在运输阶段的碳排放量,kg; C_4 为光伏发电系统在施工安装阶段的碳排放量,kg; C_5 为光伏发电系统在使用维护阶段的碳排放量,kg; C_6 为光伏发电系统在拆除清理阶段的碳排放量,kg; E_i 为生产主线各过程消耗的电量,kW·h; R_e 为电力的碳排放系数^[5],取 0.749 kg CO₂/(kW·h); M_i 为第 i 种材料单位建材内含能量^[6],MJ/kg; Q_i 为第 i 种材料用量,kg; R_m 为第 i 种材料对应能源与碳排放量转换系数,kgCO₂/MJ,为简化计算,取统一定值; C_{wc} 为好氧处理废水的 CO₂ 排放系数,kg/m³; W_{an} 为各生产

过程处理的废水量,m³; P_i 为设备的价格,万元; R_p 为工业行业专业设备的碳排放系数^[7-9],kg/万元; D 为运输距离,km; H 为运输质量,t; G_p 为温室气体的全球增温潜力系数; η_i 为温室气体转化成 CO₂ 的转换系数; G_i 为燃料油的消耗强度,L/(t·km); H_i 为施工安装阶段第 i 种化石燃料的消耗量,kg;其中,施工机械设备台班能源消耗因子^[10]已知; R_g 为燃料油的温室气体排放系数,kg/L,查 IPCC (国家温室气体排放清单指南)可得。

2 某光伏发电项目碳排放量的测算与评价

2.1 项目概况

上海临港某光伏发电项目装机总容量为 12.162 25 MW,采用多晶硅光伏组件,光伏组件铺设在新建车棚、冲压车间屋顶和荒地上,面积约为 140 000 m²。光伏电站与电力用户在同一场所,接入用户侧,为可逆流的并网方式,所发电量由用户“自发自用,余电上网”。

该项目共安装 250 W 多晶硅组件 43 600 块,255 W 多晶硅组件 4 950 块,500 kW 逆变器 22 台,630 kW 逆变器 1 台,汇流箱 160 台。太阳能电池组件生产概况如下:收集 2011-01-01—2011-12-31 期间生产过程的相关数据作为 CO₂ 排放量计算的初级数据。光伏板碳排放量的计算单位为 1 台(套)组件,碳排放量表示为 XX kgCO₂e/台(套),e 为当量(equivalent)。光伏组件生产过程中多晶硅的生产工艺为改良西门子法。

根据生产企业提供的信息,该产品的生产流程如图 1 所示(见下页)。根据生产企业提供的信息,该产品的质量流程如图 2 所示(见下页)。

每项输入、输出流的质量如图 2 所示,涉及到的各项能耗均根据质量流程图中的质量折算出单位产品的质量与相应的排放因子相乘进行计算。

2.2 碳排放量的计算

2.2.1 原材料获取阶段(以硅矿石开采阶段为例)

产品主要原料包括:太阳能级硅、铝边框、玻璃面板、密封材料、背板/基板、接线盒、焊带、硅胶及包装材料等。组件中的太阳能级硅和铝边框都从采矿开始计算,开采方式默认为露天开采,相应能耗采用次级数据(行业数据、学术期刊、专业书籍等)计算其碳排放量,能源消耗量用标准煤表示为 XX kgCe/t。

其他供应商直接供应的原料采用相应供应商的初级能耗数据进行计算;运输过程采用生产企业提供的初级数据.

以下所有排放因子采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中的默认值或是国家权威部门发布的数据.如表 1 所示.

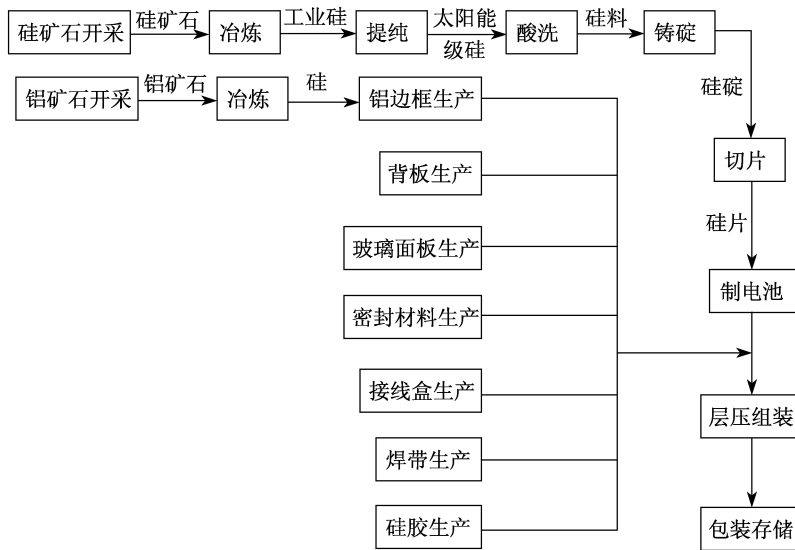


图 1 多晶硅太阳能电池组件生产流程
Fig.1 Production schedule of the solar modules

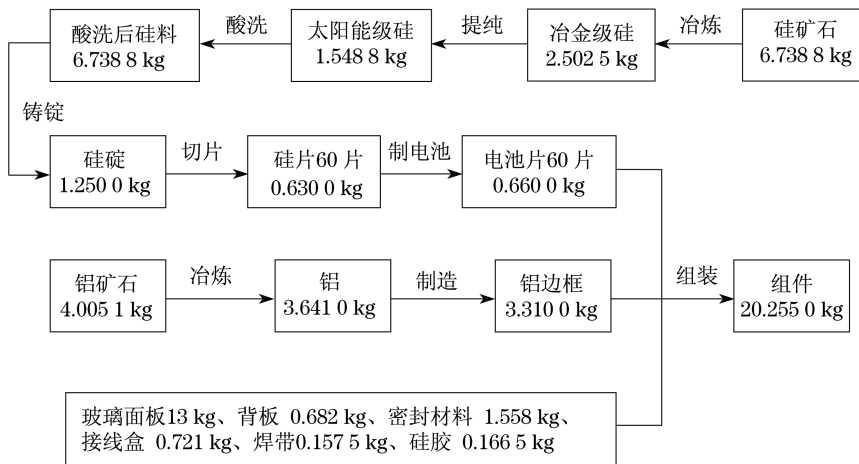


图 2 多晶硅太阳能电池组件生产质量流程图
Fig.2 Mass flow of productions

表 1 原材料获取阶段 (以硅矿石开采阶段为例)

Tab.1 Raw materials acquisition phase (a case study of Si ore exploitation)

输入参数	数 值	单 位	来 源
硅矿石开采单位质量能耗	1.215 0	kgCe/t 矿石	关于统一冶金矿山采矿工序能耗指标的看法
标煤的 CO ₂ 排放因子	2.772 0	kgCO ₂ /kgCe	根据 IPCC 中燃料煤的碳排放因子计算
硅矿石开采单位质量 CO ₂ 排放量	3.367 9	kgCO ₂ /t 矿石	计算值
每套组件所需硅矿石质量	6.738 8	kg 矿石	生产企业提供
每套组件的 CO ₂ 排放量	0.022 7	kgCO ₂	计算值

2.2.2 生产阶段

a. 光伏板组件生产阶段的碳排放(以酸洗阶段为例)。

由图1可知,生产企业内的制造过程包括:酸洗—铸锭—切片—制电池—层压—包装。每个阶段的能耗以及制造阶段相关的运输、废物处理、直接排放的数据都是生产企业提供的初级数据。计算数据如表2所示。

b. 光伏发电系统其他组件生产阶段的碳排放(以逆变器为例)。

光伏发电系统除光伏板组件以外,还包括汇流箱、逆变器等,其实际用量以及规格参数等根据实际工程数据确定。专业设备的碳排放系数 y 随时间变化遵循如下关系^[6-8]: $y = 2.252e + 143e^{-1.654x}$,其中, x 为年份数。碳排放转化系数采用2013年专业设备碳排放系数进行计算。计算数据如表3所示。

表3 其他组件生产阶段碳排放量计算表(以逆变器为例)

Tab.3 Carbon emissions of other components in the production phase (a case study of inverters)

设备	型号	数量/台	单价/万元	专业设备碳排放系数/ (万t·亿元 ⁻¹)	碳排放量/(kgCO ₂)
逆变器	SG500MX	16	20.750	0.056 8	18 857.60
	SG630KTL	1	26.775		1 520.82
	CP500TL	6	26.650		9 082.32

表4 运输阶段(以铝边框运输为例)

Tab.4 Transportation phase (a case study of Al frames' transportation)

输入参数	数值	单位	来源
运输工具的百公里油耗	20	L/(100 km)	供应商提供
运输工具的装载量	20	t	供应商提供
铝边框运输的单位能耗	0.01	mL柴油/(kg·km)	计算值
每套组件所需铝边框	3.31	kg	生产企业提供
铝边框运输往返距离	110	kg	供应商提供
柴油的CO ₂ 排放因子	2.73	kgCO ₂ /L	IPCC提供
每套组件的CO ₂ 排放量	0.009 9	kgCO ₂	计算值

2.2.4 施工安装阶段(以施工电力为例)

施工安装阶段的碳排放主要包括:施工耗材生产的碳排放和施工安装过程中设备使用的碳排放,以及施工消耗电力的碳排放,计算数据均为施工现场的实地核实数据。计算数据如表5所示(见下页)。

2.2.3 运输阶段(以铝边框运输为例)

一般运输工程碳排放包括:原材料从生产场地运输到光伏组件生产厂的碳排放;光伏组件生产企业各分厂之间运输的碳排放;生产企业运输到发电项目现场的碳排放。计算数据如表4所示。

表2 生产阶段(以酸洗阶段为例)

Tab.2 Production phase (a case study of pickling)

输入参数	数值	单位	来源
酸洗消耗电力	2 050 856.59	kW·h	现场核实
硅料总量	3 255 608	kg	现场核实
单位硅料酸洗所需电力排放因子	0.629 9	kW·h/kg	计算值
电力排放因子	0.749	kgCO ₂ /(kW·h)	发改委文件发布
每套组件所需硅料质量	1.262 5	kg	生产企业提供
每套组件的CO ₂ 排放量	0.595 7	kgCO ₂	计算值

2.2.5 使用维护阶段

光伏发电系统使用阶段属于可再生能源发电,并无任何能耗及排放,使用过程中的维护采用人工处理,且不消耗其他能源作为动力时,可忽略工作人员的人员碳排放量,即可视使用维护阶段的碳排放

量为0.

2.2.6 废弃回收阶段

产品废弃回收阶段主要包括产品废弃后的运输排放以及对不可回收物质的填埋处理的排放.而在光伏发电系统中,其组件成分大都为玻璃或金属材料,都可回收,在填埋中不产生排放量,即光伏发电系统在废弃回收阶段的排放量为运输排放.计算数据如表6所示.

表5 施工安装阶段(以施工电力为例)

Tab.5 Construction phase (a case study of electric power for construction)

输入参数	数值	单位	来源
施工现场消耗电力	2 700	kW · h	供应商提供
电力排放因子	0.749	kgCO ₂ /(kW · h)	发改委文件发布
每套组件的CO ₂ 排放量	2 022.3	kgCO ₂	计算值

表6 废弃回收阶段

Tab.6 Decommission and reclamation phase

输入参数	数值	单位	来源
每公里耗柴油	0.55	L/km	发改委文件提供
柴油的CO ₂ 排放因子	2.73	kgCO ₂ /L	IPCC 提供
运输工具的装载量	10 000	kg	按装载量 10 t 计算
运输排放系数	0.000 2	kgCO ₂ /(kg · km)	计算值
平均运输距离	500	km	按 500 km 计算
每套组件的质量	20.255	kg	生产企业提供
每套组件的CO ₂ 排放量	1.520 6	kgCO ₂	计算值

2.3 光伏组件生产阶段碳排放量

基于上述碳排放模型,计算得出该光伏发电项目的碳排放量共计 21 812 614.07 kg.其中,原材料获取阶段的碳排放量为 15 995 418.94 kg,占全生命周期碳排放的 73.3%;光伏组件及设备的生产阶段的碳排放量为 5 086 893.175 kg,占全生命周期碳排放的 23.32%;运输阶段的碳排放量为 48 438.64 kg,占全生命周期碳排放的 0.22%;施工阶段的碳排放量为 608 038.180 4 kg,占全生命周期碳排放的 2.79%;废弃回收阶段的碳排放量为 73 825.13 kg,占全生命周期碳排放的 0.34%.

原材料的获取阶段以及光伏组件和设备的生产阶段是对整个全生命周期碳排放量影响最大的阶段,这2个阶段的碳排放量占整个生命周期项目总排放量的 96.65%.其中,对于光伏组件而言,原材料的获取过程中的碳排放量所占比重尤其大,为 73.33%.

3 某光伏发电项目碳排放回收期分析

3.1 年上网电量计算

根据光伏电池组件 25 年衰减率,按照线性衰减,计算得出 25 年分年发电量,如表 7 所示.

表7 光伏系统 25 年分年发电量(万 kW · h)

Tab.7 Annual power generation of the photovoltaic project within 25 years

年份	发电量/(万 kW · h)	年份	发电量/(万 kW · h)
1	1 205.5	14	1 081.3
2	1 188.7	15	1 072.8
3	1 179.6	16	1 064.2
4	1 170.5	17	1 055.7
5	1 161.3	18	1 047.2
6	1 152.2	19	1 038.7
7	1 143.1	20	1 030.2
8	1 133.9	21	1 021.6
9	1 124.8	22	1 013.1
10	1 115.7	23	1 004.6
11	1 106.8	24	996.0
12	1 098.3	25	987.5
13	1 089.8		

从表7中可以看出,考虑组件衰减性,第一年发电量理论计算值为 1 205.5 万 kW · h,比年平均上网电量高出 10.46%,按照分段线性衰减,第1年衰减率 2%,第2~10年,平均年衰减率 0.75%,总衰减率 6.75%;第11~25年,平均年衰减率 0.7%,总衰减率 10.5%;整个生命周期组件总衰减率为 19.25%.

3.2 碳排放回收期

根据该项目使用周期内每年的上网电量,可以计算出项目寿命周期内逐年累计 CO₂ 减排量.对比整个项目生命周期内的 CO₂ 排放量,可以得出项目的碳排放回收期,如图3所示.

由图3可以看出,光伏系统的 CO₂ 减排能力随

着使用年份的增长逐年呈线性增长,而系统全生命周期 CO_2 排放量则始终保持不变,在光伏系统投入使用的第 2.5 年,系统 CO_2 减排量开始超过系统全生命周期 CO_2 排放量. 因此,可以看出,本项目系统 CO_2 回收期大概为 2.5 年.

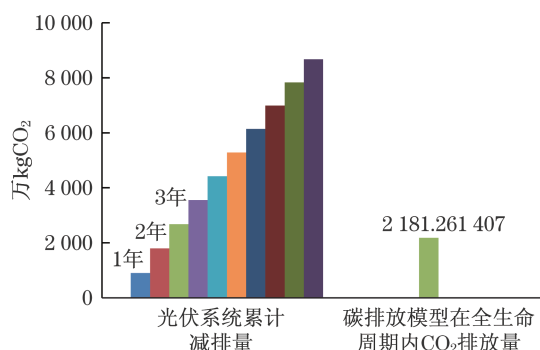


图3 光伏系统减排能力对比图

Fig.3 Comparison of carbon emissions reduction capacity of the photovoltaic system

3.3 经济回收期

3.3.1 上网电量的经济回收期

2013 年国家发改委(能源局)、财政部和电网公司连续出台了一系列有利于国内分布式光伏市场开发的鼓励政策,包括度电补贴、并网接入、项目备案等. 以 2013-08-30 发展改革委明确发布的分布式光伏上网电价补贴 0.42 元/(kW·h)为例,并结合 2013 年工业电价 0.81 元/(kW·h),光伏发电每度电收益共 1.23 元. 根据以上数据,该光伏发电项目上网电量经济回收期如图 4 所示.

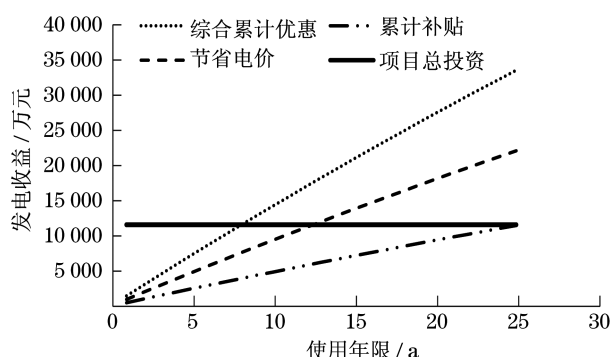


图4 光伏系统上网电量的经济回收期

Fig.4 Economic pay-back time of the photovoltaic system on-grid electricity

从图 4 中可以看出,若只计算政府的补贴政策(0.42 元/(kW·h)),该光伏发电项目在使用寿命内无法收回整个项目的总投资;若只计算

0.81 元/(kW·h)的工业电价,则该项目可以在第 13 年收回整个项目的总投资. 但是,同时计算政府 0.42 元/(kW·h)的补贴政策以及节省电费的 0.81 元/(kW·h)的工业电价,则该项目在光伏系统投入使用的第 9 年即可以收回投资成本.

3.3.2 碳交易的经济回收期

假设该光伏项目的减排量在碳交易市场上进行交易,以项目所在地上海环境能源交易所 2014-04-15 碳交易为例,碳交易成交均价为 40.05 元/t. 比较该光伏发电项目碳减排量成交额与项目总投资,可得图 5.

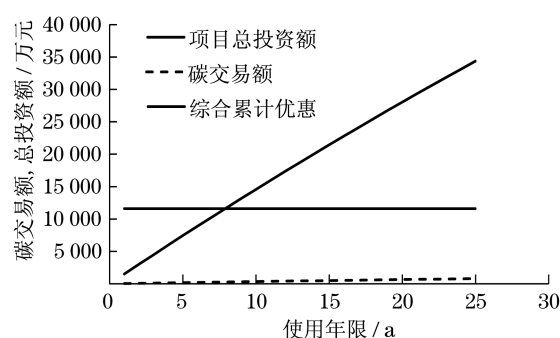


图5 光伏系统碳交易额与项目总投资比较

Fig.5 Comparison between the carbon transaction volume and the total project investment

由图 5 可以看出,以 2014-04-15 上海交易所碳交易单日平均成交价为例,碳交易额远远小于整个项目的总投资. 经进一步计算可得,如果在该系统生命周期 25 年内,如想通过碳交易市场碳减排量的交易回收整个光伏项目的投资成本,则成交价格至少应为 567.57 元/t. 若再同时考虑发电效益,则该项目可以在第 8 年收回整个项目的总投资.

4 结论与展望

研究了光伏发电系统全生命周期的碳排放问题,以上海临港 12.162 25 MW 的光伏发电项目为案例,对光伏系统全生命周期内各个阶段主要环节直接和间接的碳排放来源进行了分析. 结合各个阶段的特点,分别计算每一阶段的碳排放量,得到了该光伏发电系统的碳排放值. 最后,将计算所得的光伏系统的全生命周期的碳排放量与系统建成后生命周期内的项目减排量以及整个项目的资金投入进行比较,得出其碳回收期、经济回收期等.

若按照本文的碳排放量模型计算,则该系统的

CO₂回收期大概为2.5年;若只计算0.81元/(kW·h)的工业电价,则该项目可以在第13年收回整个项目的总投资;若同时计算政府0.42元/(kW·h)的补贴政策以及节省电费的0.81元/(kW·h)的工业电价,则该项目在光伏系统投入使用的第9年即可以收回投资成本;若再同时考虑碳排放交易金额,并以2014-04-15上海交易所碳交易单日平均成交价40.05元/t为例,则该项目可以在第8年收回整个项目的总投资,有效扭转对光伏产业“高耗能”、“高污染”的认识误区。

对光伏项目碳排放的分析只研究了碳排放回收期以及经济回收期,今后可以对整个项目碳排放量作更深入的研究,如进一步研究光伏系统的安装位置、安装角度等因素对碳排放回收期的影响,同时,随着市场碳排放量交易价格的变化、政府的补贴政策调整和光伏产品生产技术提高,可作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 杨建新,王如松.生命周期评价的回顾与展望[J].环境科学进展,1998,6(2):21-28.
- [2] KOMIYAMA H, YAMADA K, INABA A, et al. Life cycle analysis of solar cell systems as a means to reduce atmospheric carbon dioxide emissions [J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37 (6/7/8): 1247-1252.
- [3] KANNAN R, LEONG K C, OSMAN R, et al. Life cycle assessment study of solar PV systems; an example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore [J]. Solar Energy, 2006, 80(5): 555-563.
- [4] ITO M, KOMOTO K, KUROKAWA K. Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules [J]. Current Applied Physics, 2010, 11(2S): 271-273.
- [5] 国家发展和改革委员会. 2011 中国区域电网基准线排放因子[R]. 北京: 国家发展改革委气候司, 2011.
- [6] 彭文正. 以生命周期评估技术应用于建筑耗能之研究 [D]. 台中: 台湾朝阳科技大学, 2003.
- [7] 张德英, 张丽霞. 碳源排碳量估算办法研究进展 [J]. 内蒙古林业科技, 2005(1): 20-23.
- [8] 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.
- [9] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995-2004 [J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 158-161.
- [10] 原电子工业部. 全国统一施工机械台班费用定额 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2005.

(编辑: 石 瑛)