

# 中国家庭式光伏发电的环境与经济效益研究 ——以江西5 kW光伏系统为例

温泽坤 邱国玉<sup>†</sup>

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; <sup>†</sup> 通信作者, E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn

**摘要** 对江西省新余市家庭光伏示范工程进行调研,以投资回收期 and 内部收益率(IRR)作为经济性评价指标,以能量回收期和年节约标准煤作为环境效益评价指标,分析5 kW光伏系统的发电量、收益组成、环境效益以及不同补贴模式下的经济效益。结果表明,江西省5 kW光伏发电系统的平均年发电量为4056.7度,只有理论值的79%。在既有国家补贴又有江西省补贴的情况下,投资回收期平均不到8年,平均内部收益率为11.2%,家庭式光伏发电具有良好的经济效益,缺少国家补贴或者江西省的补贴都会对投资的经济效益产生较大的影响。光伏发电系统还具有良好的节能和环保效益,能量投资回收期为5.22年,年节约标准煤1.46吨。目前家庭光伏的发展还需要国家政策的支持和合适的推广模式。

**关键词** 家庭光伏发电; 经济效益; 环境效益; 发展

**中图分类号** TM615

## Economic and Environmental Analysis of Household Photovoltaic System: Taking 5 kW Photovoltaic System in Jiangxi Province as an Example

WEN Zekun, QIU Guoyu<sup>†</sup>

School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055;

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn

**Abstract** Based on the survey of household photovoltaic demonstration project in Xinyu City of Jiangxi Province, stable investment recovery period and internal rate of return (IRR) are applied as the economic evaluation index, the energy recovery period and annual savings of standard coal as the environmental benefit evaluation index, the generation power, revenue composition and economic benefits under different circumstances, environmental benefits of 5 kW household photovoltaic system were analyzed. The results show that the yearly power generation of 5 kW household photovoltaic system is 4056.7 kWh, only 79% of the theoretical value. The system has a good economic benefit with the subsidies from the state and Jiangxi Province. The stable investment recovery period is less than 8 years, and the internal rate of return is 11.2%. Lack of subsidies from the state or Jiangxi would have a large impact on the economic benefits of investments. The photovoltaic system also has a good environmental benefit, saving 1.46 tons of standard coal each year, and the energy payback period is 5.22 years. The development of household photovoltaic needs support of national policy and appropriate promotion model.

**Key words** household photovoltaic; economic benefits; environmental benefits; prospect

光伏是光生伏特的简称。太阳能光伏发电是利用半导体界面的光生伏特效应,将光能直接转变为电能的一种太阳能发电技术<sup>[1-2]</sup>。太阳能是绿色的

清洁能源,光伏发电是利用太阳能的主要方式之一。太阳能光伏发电具有很多特点,如电池组件模块化、安装维护方便、使用方式灵活等<sup>[3]</sup>,对环境

深圳市科技计划项目(JCYJ20140417144423187, JCYJ20150331160617771)和深圳市发改委未来产业发展专项“深圳市太阳能与风能海水淡化关键技术工程实验室”资助

收稿日期: 2017-01-10; 修回日期: 2017-02-20; 网络出版日期: 2017-04-13

影响小,安全可靠,没有噪声,无污染排放,不会对空气和水产生污染<sup>[4]</sup>,对推动节能减排具有重要意义,有利于改变人类的能源结构,维持长远的可持续发展。

光伏项目的投资需要考虑太阳能资源、当地的电力需求、电网输送能力等,目前中国光伏发电呈现由西北向东南发展的趋势。我国的太阳能发电最初在光照条件好、地广人稀的西北地区发展比较快,建立了大批大规模的地面太阳能发电站。但是,由于远离电能用户、长距离输送等问题,弃光限电现象日益严重。国家能源局最新数据显示,2016 年一季度,甘肃弃光限电 8.4 亿 kWh,弃光率为 39%,新疆(含新疆生产建设兵团)弃光限电 7.6 亿 kWh,弃光率为 52%;宁夏弃光限电 2.1 亿 kWh,弃光率为 20%。国家能源局《2016 年光伏发电建设实施方案》中,甘肃和新疆被停止或者暂缓下达光伏电站新建指标。2016 年一季度,华北、华东、华中和南方地区新增光伏发电装机均超过 100 万 kW,光伏发电装机总计达 2560 万 kW,已超过西北地区的 2364 万 kW,光伏发电格局正在发生变化。

太阳能发电向东南发展的同时,由于受场所限制,大规模集中发电受到一定的影响,因此家庭式太阳能发电是分布式光伏的发展方向。中东部地区经济比西北地区更发达,用电需求大,电力缺口也大,光伏发电能够就地消纳。中东部地区上网电价相对较高,光伏发电的收益相对较大,但是土地资源相对紧缺,因此分布式光伏是较好的发展途径。分布式光伏发电在节约能耗、减少污染气体排放、保护环境和生态方面还能做出更大的贡献。在屋顶建设光伏发电系统,不仅能够充分利用建筑屋顶资源,降低建筑温升,而且可以就近使用,降低电能运输过程中的损耗。小型分布式的屋顶光伏发电系统使用年限较长,可长期获得收益,将来是个巨大的市场。因此,对小型家庭式光伏发电的研究很有必要。

目前,在对国内光伏发电系统的分析中,基于理论公式和仿真软件对光伏发电运营模式、经济和环境效益的分析较多。孙艳伟等<sup>[5]</sup>应用光伏系统仿真设计与分析软件 PVsyst,计算 10 MW 大型并网光伏发电系统的年均发电量。乔虹桥等<sup>[6]</sup>利用 PVsyst,模拟上海市民用 3 kW 和 5 kW 分布式光伏发电系统的发电量,并进行经济效益分析。邵汉桥等<sup>[7]</sup>利用理论计算公式,计算一台装机容量为 3 kW

的分布式光伏发电系统的发电量,进行分布式光伏发电的经济性及政策分析。谢东等<sup>[8]</sup>建立小规模分布式光伏发电系统经济性分析模型,从用户角度分析光伏发电系统的经济性。刘振东等<sup>[9]</sup>利用实际发电量,对河南安阳市 20 kW 准单晶并网光伏系统案例进行经济和环境效益分析。苏剑等<sup>[10]</sup>利用实际案例中的发电量,评价分布式光伏发电运营模式的经济性。

光伏系统的发电量受很多因素的影响,如太阳能辐射量、灰尘损失、组件组合损失、控制逆变器损失、线路损失、降雪降雨、管理水平等,安装在家庭屋顶的小型分布式太阳能光伏发电系统的发电量还可能受到其他因素的影响,因此理论计算值可能与实际值有较大差距。家庭式光伏的装机容量大多在 5 kW 左右,家庭式光伏发电在我国数量还不多,时间也不长,很少有基于实际发电量的研究来探讨其环境与经济效益,尤其有关东南地区的研究更少。本文在实际数据的基础上,探究家庭式光伏发电的经济效益、环境效益以及未来的发展情况,为政策的制定、太阳能产业的发展提供科学依据。

## 1 研究对象与研究方法

### 1.1 太阳能资源情况

本文以江西省新余市为研究对象。江西省全省年太阳总辐射量为 3700~4600 MJ/m<sup>2</sup>,北部和东南部地区的太阳能辐射量相对较高,西部的井冈山地区相对较低。从季节上看,夏季总辐射量最多,冬季最少<sup>[11]</sup>。新余市的年平均太阳辐射量约为 4400 MJ/m<sup>2</sup>,峰值日照时数约 3.5 小时,在江西省内属于中等偏上水平<sup>[12]</sup>。

### 1.2 屋顶光伏发电项目实施情况

在江西省推行的屋顶示范工程中,建设方式有居民自建、合同能源管理和政府统一组织建设 3 种。其中,居民自建模式由居民本人或委托第三方向当地县级能源管理部门提出建设申请,申请通过后,由居民或受托方自行建设,项目建成并网后,由能源管理部门对居民进行投资补助。

图 1 为 2016 年两处 5 kW 家庭太阳能光伏发电设施。实际调查发现,安装屋顶光伏发电设施的大多数为别墅和顶层复式楼家庭,产权明晰;而商品房小区的屋顶属于公共所有,产权不明晰,容易引起纠纷,难以达到要求。别墅采光较好,附近没有高建筑物遮挡,但是部分顶层复式楼的横梁高于



图1 江西省两处 5 kW 家庭太阳能光伏发电设施  
Fig. 1 5 kW household photovoltaic systems in Jiangxi Province

太阳能发电板。部分太阳能组件贴着屋顶坡面安装,且安装方位不朝南。

### 1.3 数据来源

数据来自国家电网江西省电力公司,包括 2014 年全年的发电量、上网电量、国家补贴、上网电费等,主要是新余市“万家屋顶光伏示范工程”第一期的发电项目,共 31 个家庭,装机容量都为 5 kW。

### 1.4 经济效益计算方法

屋顶光伏系统每发一度电,国家补贴 0.42 元,采用“自发自用,余电上网”模式。上网电量售价按照江西省燃煤机组上网标杆电价,江西省 2013 年为 0.4872 元/kWh,2014 年为 0.4555 元/kWh,2015 年为 0.4396 元/kWh,呈逐年下降的趋势。

家庭分布式光伏发电系统的年收入包括国家补贴、余电上网收入以及自发自用省下的电费三部分,地方政府补贴按照江西省“万家屋顶光伏发电示范工程”的政策,即每瓦初始建设补贴为 4 元。对于一个价格为 5 万元的 5 kW 的光伏发电系统,地方政府补贴 2 万元,居民只需支付 3 万元,安装费用、设备的运输费用由当地供电局负责。本文中上网电价每度收入按照江西省 2014 年的标准 0.4555 元/kWh,自用电量节省费用按照新余市居民生活电价 0.6 元/kWh 计算。

$$\text{收益} = \text{自发自用电量} \times (\text{用电电价} + 0.42) + \text{余量上网电量} \times (\text{脱硫电价} + 0.42)。 \quad (1)$$

对于电池板的使用寿命,通常按照 25 年计算,考虑到国家补贴年限为 20 年以及使用 20 年后电池效率的损失、电池故障等风险,本文按照 20 年计算,不考虑通货膨胀。由于是家庭自用,另有企业的支持以及光伏系统维修相对方便等特点,因此不考虑后期维护费用。

#### 1) 发电量的估算。

光伏发电系统的发电量采用以下公式进行估算:

$$L = W \times t \times 365 \times \eta, \quad (2)$$

$L$  为光伏发电系统年发电量,  $W$  为装机容量,  $t$  为峰值日照时数,  $\eta$  为光伏系统综合效率。根据项目立项时的估算情况,  $\eta$  取值为 0.8。

#### 2) 静态投资回收期的计算公式为

$$\text{静态投资回收期} = \frac{\text{初始投资额}}{\text{年净收益}}, \quad (3)$$

本文中初始投资额为 3 万元。

3) 若考虑组件效率的损失,如第 20 年年末系统效率为 80%,则每年系统效率减少  $r$ ,

$$(1-r)^{20} = 0.8, \quad (4)$$

$$\text{初始投资额} = \text{年净收益} \times \frac{1-(1-r)^n}{r}, \quad (5)$$

$n$  为静态投资回收期。

#### 4) 内部收益率 IRR 的计算:

$$\text{初始投资} = \frac{\text{年净收益}}{\text{IRR}} \times \left( 1 - \frac{1}{(1+\text{IRR})^{20}} \right)。 \quad (6)$$

## 1.5 环境效益分析方法

### 1.5.1 能量回收期

光伏系统在生产制造、运输安装和运行过程中会消耗能量,在设备的回收环节也会耗能。由于光伏系统在运行期内几乎无污染物排出,系统运行基本上不消耗能源,所以运行过程中的能耗忽略不计。光伏系统的寿命通常在 20 年以上,大多数光伏发电系统实际的使用时间较短,光伏设备回收的试点项目较少,无法收集到退役阶段的能耗<sup>[13]</sup>,所以本文将光伏系统生产制造以及运输安装过程中的耗能视为系统全寿命周期中的能耗。根据胡润青<sup>[14]</sup>

的研究, 光伏系统全生命周期内生产制造能耗为 3573 kWh/kW, 材料的能耗为 737 kWh/kW, 运输安装能耗为 29 kWh/kW。本文取光伏系统全生命周期内的总能耗 4339 kWh/kW, 再根据式(7)得到能量回收期的值:

$$\text{能量回收期} = \frac{\text{全生命周期内的总能耗}}{\text{光伏系统年发电量}} \quad (7)$$

### 1.5.2 减排效果分析

我国燃煤发电量占总发电量 70% 以上, 燃煤会产生大量污染环境的气体和粉尘, 对人体健康有害, 而太阳能光伏发电系统运行过程中无噪声、无污染排放, 能耗低。参照国内电厂的平均能耗, 每节约一度电, 就节约 0.36 kg 标准煤, 可以减少污染排放 0.272 kg 碳粉尘、0.997 kg CO<sub>2</sub>、0.03 kg SO<sub>2</sub> 和 0.015 kg NO<sub>x</sub><sup>[15]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 发电量分析

根据调查, 得到 31 个装机容量为 5 kW 的光伏屋顶发电设施一年的发电量, 如表 1 所示。可以看出, 新余市 5 kW 屋顶光伏发电系统的实际平均年发电量为 4056.7 kWh。

由式(2)可得出年均发电量为  $L = 5 \text{ kW} \times 3.5 \text{ h} \times 365 \times 80\% = 5110 \text{ kWh}$ , 实际平均发电量比估算平均发电量低 1053 kWh, 约为估计值的 79%。

31 个家庭分布在新余市的多个小区, 不同小区的建筑样式不同, 别墅区的周边建筑物遮挡较少, 能较好地利用太阳能; 而顶层复式楼的一部分水泥横梁在太阳能板上有阴影, 导致接收的太阳能辐射量减少, 发电量偏低。

同一小区光伏发电系统的功率、技术、产品型号都相同, 但发电量仍然存在较大差异。我们发现, 屋顶光伏太阳能板的安装角度并不完全相同, 有的差异较大, 这一方面是由于屋顶实际情况的限制, 另一方面, 业主对发电设施与建筑之间协调美观的要求使得安装角度未按最大发电量设计方式。组件的安装角度(方位角和倾斜角)对光伏发电系统的发电效率有直接影响, 如果光伏组件安装的方位角偏离正南 30°~60°, 则光伏阵列发电量将减少 15%~30%<sup>[16]</sup>。以最佳倾斜角为基点, 偏离 5° 以内对发电量的影响为 0.2%~0.4%, 偏离 10° 左右时影响为 0.7%~1.4%, 偏离 15° 左右时影响为 2.8%~7.8%<sup>[17]</sup>。

表 1 31 个 5 kW 家庭太阳能光伏发电设施的年发电量  
Table 1 Actual power generation of 5 kW household photovoltaic system of 31 cases

序号	实际发电量/kWh	比值/%	实际发电量的主要影响因素
01	4384	85.8	安装角度、灰尘
02	4131	80.8	安装角度、灰尘
03	5203	101.8	无(发电正常)
04	4487	87.8	安装角度、灰尘
05	3996	78.2	安装角度、灰尘
06	3618	70.8	安装角度、有遮挡
07	3925	76.8	安装角度、有遮挡
08	4001	78.3	安装角度、灰尘
09	4849	94.5	灰尘
10	3961	77.5	安装角度、灰尘
11	3620	70.8	安装角度、灰尘、建筑物部分遮挡
12	4409	86.3	安装角度、灰尘
13	4287	83.9	安装角度、灰尘
14	4157	81.4	安装角度、遮挡
15	4540	88.8	安装角度、灰尘
16	5324	104.2	无(发电正常)
17	2573	50.4	管理问题、设备故障
18	4587	89.8	部分遮挡、灰尘、安装角度
19	2994	58.6	水泥横梁遮挡、管理不当、灰尘
20	2747	53.8	管理不当、设备故障、设备安装
21	4082	79.9	安装角度、灰尘
22	4334	84.8	部分遮挡有阴影、灰尘
23	3576	69.9	安装角度、水泥横梁遮挡、表面不干净
24	4508	88.2	灰尘、遮挡
25	4838	94.7	灰尘
26	4516	88.4	灰尘、遮挡
27	3038	59.5	安装角度、设备问题
28	3785	74.1	遮挡、灰尘
29	4385	85.8	安装角度、灰尘
30	3390	66.3	管理不当、设备问题、安装角度
31	3513	68.7	管理不当、设备问题、安装角度

说明: 理论发电量为 5110 kWh, 比值=实际发电量/理论发电量 × 100%。

此外, 停电导致发出的电无法使用、跳闸以及运行过程中太阳能板件灰尘、线路损耗、逆变器等问题也会影响发电量。

## 2.2 经济效益分析

### 2.2.1 收益来源分析

$$\text{总收益} = \text{自发自用电量} \times (\text{用电电价} + 0.42) + \text{余量上网电量} \times (\text{脱硫电价} + 0.42), \quad (8)$$

$$\text{国家补贴} = (\text{自发自用电量} + \text{余量上网电量}) \times 0.42, \quad (9)$$

$$\text{上网售电收益} = \text{余量上网电量} \times \text{脱硫电价}, \quad (10)$$

$$\text{省下的电费} = \text{自发自用电量} \times \text{用电电价}. \quad (11)$$

图 2 显示发电量与实际收益的关系，一般发电量越大，总收益越大。因为总收益包含用户省下的电费，而用户自用电的电价高于上网电价，当发电量一定时，用户自用电量越少，上网电量就越多，上网电量收益占比越高，省下的电费占比越小。如果发电量较低的用户用电量较大，发电量较高的用户用电量较小，则可能出现发电量较低的家庭的总收益大于发电量较高的家庭的情况。如第 6 个点发电量为 3513 kWh，用电量为 1154 kWh，第 7 个点发电量为 3576 kWh，但是用电量只有 98 kWh，总收益反而低于第 6 个点。

图 3 是按照平均值计算的总收益中不同收益来源占比，比例最大的是国家补贴，达 46%，其次是上网电量收益，占 41%，而省下的电费只占总收益的 13%。图 4 是各个发电项目中国家补贴在总收益中的占比，一般都在 45% 以上，最低的为 41%，该用户发电量为 4082 kWh，低于平均值近 500 kWh，而用电量为 1271 kWh，比平均值高近 400

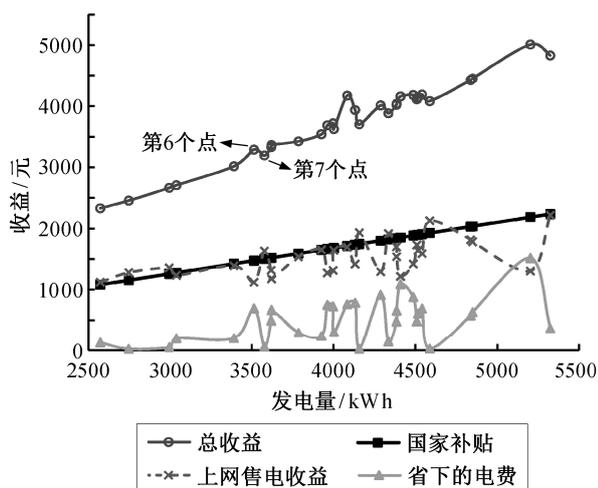


图 2 江西 5 kW 家庭式太阳能发电系统的实际发电量与实际收益的关系

Fig. 2 Relationship between the actual annual electricity generation and economic incomes of family of the household photovoltaic system in Jiangxi Province

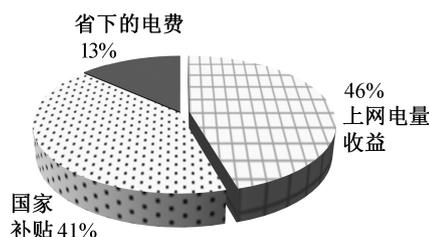


图 3 家庭太阳能光伏发电项目总收益中不同收益来源占比  
Fig. 3 Different sources of income in household photovoltaic system

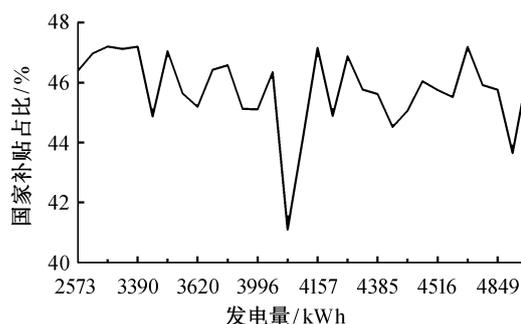


图 4 家庭太阳能光伏发电项目总收益中国家补贴占比  
Fig. 4 Proportion of state subsidies in the income of household photovoltaic system

kWh，省下的电费较多，所以在总收益中国家补贴占比较低，但仍超过 40%。由此看出，国家对分布式光伏的扶持政策很重要。

### 2.2.2 投资回收期和项目内部收益率(IRR)

图 5 和 6 是 5 种情景下光伏发电项目的投资回收期和内部收益率。在既有国家补贴又有江西省建设补贴的情况下，用户的投资回收期最短，平均为 8.3 年，最短的不到 6 年。IRR 平均值为 10.8%，最小值为 4.6%，最大值为 15.8%，且 20 年后光伏发电系统仍能运行。一般情况下，发电量大于用电量，多余电量可以出售。下面考虑以下 4 种情形下光伏发电的经济效益。

1) 考虑光伏系统效率逐年降低的情况。一般光伏发电设施在 20 年后仍能保持 80% 的发电效率，按照系统效率逐年递减估计，第 20 年年末系统效率为第一年的 80% 情况下，平均投资回收期为 8.7 年。从图 5 可以看出，“国补+省补”和“第 20 年年末效率 80%”这两条线几乎重合，表明光伏系统效率逐年降低对投资回收期的影响不大。从图 6 可以看出，光伏系统投资的 IRR 平均值为 9.7%。

2) 在只有国家每度电补贴 0.42 元而没有江西省补贴时，投资回收期有大幅度的延长，最长为

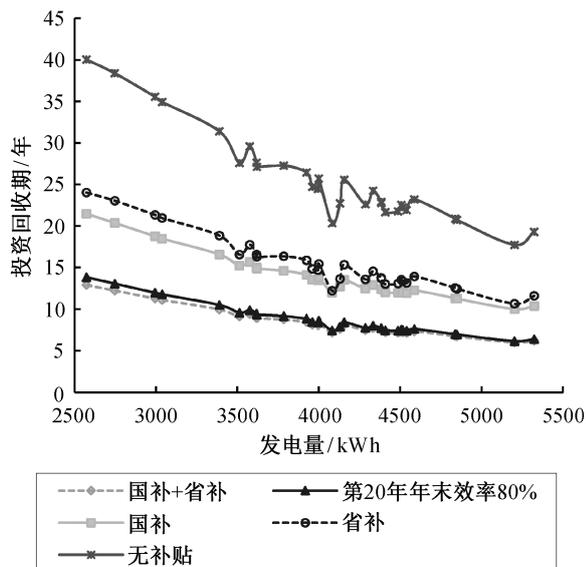


图 5 5 种情景下家庭太阳能光伏发电项目的投资回收期  
Fig. 5 Payback period of household photovoltaic system in five scenarios

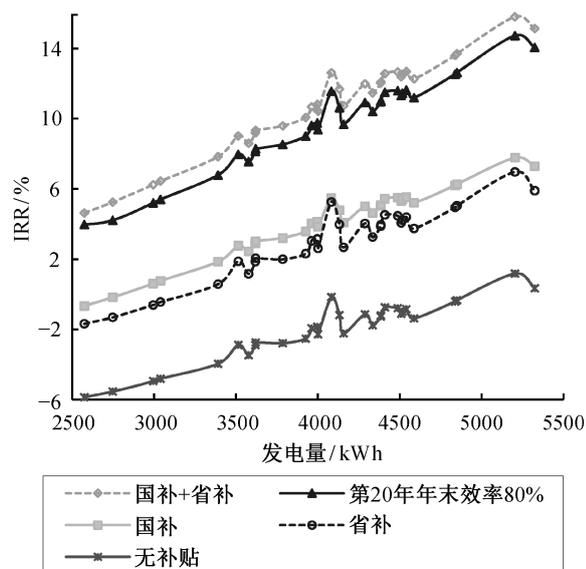


图 6 5 种情景下家庭太阳能光伏发电项目的 IRR  
Fig. 6 IRR of household photovoltaic system in five scenarios

21.46 年, 最短也有 10 年, 平均 13.8 年, 比有省补和国补的情况下延长 5 年多, IRR 也大幅降低, 平均为 4.07%。

3) 在只有江西省补贴而没有国家补贴时, 平均投资回收期长达 15.36 年, 比只有国家补贴时的投资回收期长 1 年多, IRR 平均值为 3%。

4) 在没有江西省补贴也没有国补时, 投资回收期最长, 最短也需近 20 年, 平均达 25.6 年, IRR 都

为负值, 投资光伏发电项目几乎没有吸引力。

### 2.3 环境效益分析

#### 2.3.1 能量回收期

根据式(7), 利用平均值计算得到光伏系统发电的能量回收期为  $4339 \times 5 / 4056.7 = 5.35$  年(远低于光伏系统的保守寿命期 20 年)。该系统 5.35 年发出的电量即可抵消其制造、运输和安装运行过程中消耗的能量, 包括生产能耗和物耗, 5.35 年之后产生的电能都是纯产出。

#### 2.3.2 减排效果分析

表 2 为发电项目的节能减排情况。5 kW 光伏发电系统年均发电 4056.7 kWh, 节约标准煤 1460 kg, 运行期间(20 年)总发电量为 81134 kWh, 节约标准煤 29208 kg。

表 2 发电项目的节能减排  
Table 2 Energy-saving and emission-reduction

节能减排分析项目	年均节能减排量	运行期间节能减排量(20 年)
二氧化碳/tce	4.050	80.89
碳粉尘/t	1.103	22.07
二氧化硫/t	0.122	2.434
氮氧化物/t	0.061	1.220

光伏发电环保、低碳, 能产生良好的环境效益, 但目前光伏发电系统的环境效益没有纳入经济效益的计算中。如果用货币来衡量环境效益, 则光伏项目的投资回收期会缩短。

### 3 展望及建议

现阶段, 家庭光伏发电存在成本偏高、居民对发电相关知识及补贴政策不了解以及光伏发电还不能实现平价上网等问题, 需要有政府补贴才具有良好的经济效益。家庭式光伏发电已经显现出巨大的优势, 未来可大力发展居民住宅的小型分散式屋顶光伏发电系统<sup>[18]</sup>。首先, 2015 年年底, 光伏发电装机容量为 4318 万 kW, 国家能源局规划到 2020 年年底, 太阳能光伏发电装机容量达到 1.05 亿 kW 以上, 而屋顶分布式光伏发电是重点鼓励的方向, 发展潜力巨大。与大规模地面光伏电站出现弃光限电等问题相比, 家庭式光伏发电是国家鼓励的方向, 不存在限电、补贴不到位等问题。其次, 传统化石能源带来的环境污染、资源耗竭、生态失衡等问题越来越严重, 低能耗、高效益的绿色经济成为各国经

济转型方向,太阳能发电具有安全性、充足性以及潜在的经济性等优点,使其在长期的能源战略中具有重要地位。家庭式光伏发电在节约传统能源,优化能源结构、保障能源安全,改善环境和生态保护方面具有重要意义。第三,光伏发电技术进步迅速,成本和价格不断下降,“十二五”期间光伏发电成本总体降幅超过 60%,随着居民节能环保意识的不断增强,居民对家庭式光伏的接纳程度也会提高,购买能力的提高和购买意愿的增强有利于家庭式光伏的普及。

美国、日本和德国采用不同的模式和政策推广家庭式光伏系统。美国通过联邦财政激励计划和法律法规等管理类政策,提供税收优惠、现金补贴以及贷款优惠等政策<sup>[19]</sup>,采用光伏租赁业务和 PPA (power purchase agreement) 等创新业务模式,促进家庭式光伏系统的普及。德国采用差异性、逐年递减的固定上网电价,截至 2011 年年底,德国光伏发电总装机容量为 2470 万 kW,分布式发电系统容量占比近 80%,其中主要应用形式为屋顶光伏发电系统。日本对住宅光伏补贴力度较大,“日本新阳光计划”对安装家庭光伏系统的居民给予安装设备成本 50% 的补贴,高额补贴极大地提升了日本居民安装太阳能发电设备的意愿,使得日本住宅光伏市场稳步增长,家庭式光伏系统得到很好的应用与普及<sup>[20]</sup>。

根据本文的研究结果,在只有国家每度电补贴 0.42 元而没有江西省补贴时,投资回收期有大幅度的延长,最长达 21.46 年,最短也有 10 年,平均 13.8 年。投资回收期太长,投资者投资意愿不强,不利于家庭式光伏的普及。因此,国家补贴加上省级补贴是必要的,各个地级市还可以根据自身的财政实力以及发展新能源的规划推出市级补贴。比如浙江省金华市对居民家庭式光伏发电项目的补贴政策为在国补、省补政策的基础上,按所发电量再补 0.3 元/kWh,连续补贴 3 年。补贴额度还要考虑地域差别,太阳能年总辐射量低区域的补贴应该比太阳能总辐射量高的地域多。随着技术的进步和产量的提高,成本会下降,最终不需要补贴,实现平价上网,因此,补贴的额度也应该逐年下降,但是下降幅度要慎重考虑,以利于行业平稳健康地发展。

在我国城市和农村推广家庭太阳能光伏项目时,要结合实际情况,创新推广模式,拓宽推广渠道。激励措施、成本下降、技术提升、金融政策支持以及建筑和光伏发电设施的协调美观程度都是普

及家庭光伏的重要因素<sup>[21]</sup>。有些家庭希望在停电时能通过屋顶光伏发电系统发电自用,这时离网比并网更符合他们的需求。用户安装离网光伏系统同样能节能减排,产生环境效益。然而,目前的补贴政策并不包括离网用户,这就降低了他们安装光伏系统的积极性。还要充分了解用户的支付意愿,与农村居民相比,城市居民的节能意识相对较强,收入相对更高,对太阳能光伏发电项目所愿支付的金额相对较多,因此推广模式会有所不同。另外,不仅仅是政府和光伏生产企业,社会资本也能发挥重要作用,社会资本的参与有利于拓宽投融资渠道,加快家庭式光伏发电的应用,促进产业发展。

## 4 结论

1) 在既有国家补贴又有江西省补贴的情况下,江西省家庭屋顶光伏发电系统具有良好的经济效益,用户投入 3 万元,年均发电量为 4056.7 kWh,年均收益为 3732 元,投资回收期平均不到 8 年,IRR 平均值为 11.2%。在仅有国家补贴的情况下,投资回收周期为 13.8 年,IRR 为 4.07%。在仅有江西省补贴的情况下,投资回收周期 15.36 年,IRR 为 3%。在没有补贴的情况下,投资回收周期为 25.6 年,IRR 为负值。国家补贴在总收益中占比较大,一般在 45% 以上,缺少国家补贴或省补贴,对投资的经济效益产生较大的影响,所以国家和地方政府对家庭式光伏的扶持政策很重要。

2) 家庭式光伏发电系统具有良好的节能和环保效益。5 kW 光伏发电系统的能量回收期为 5.22 年,不到 6 年的发电量即可抵消其制造、运输和安装运行过程中消耗的能量。年节约标准煤 1460 kg,CO<sub>2</sub>、碳粉尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 年均节能减排量分别为 4.05, 1.103, 0.122 和 0.061 吨。

3) 家庭式光伏系统的理论年发电量为 5110 kWh,实际平均发电量比估算平均发电量低 1053 度,约为理论估计值的 79%。与一般的地面电站不同,安装家庭式光伏发电设施时还需要考虑发电设施与建筑的协调美观程度,太阳能板安装的方位角和倾斜角,周边建筑物的遮挡情况以及光伏发电设施不正常运行等对发电量造成的影响。

4) 家庭式光伏发展潜力大,在节约传统能源、优化能源结构、改善环境和生态保护方面具有重要意义。家庭式光伏发电的推广需要国家政策的支持和合适的推广模式。国家补贴应该长期稳定,鼓励

各省市根据自身的财政情况以及发展新能源的规划,推出省级、市级补贴,补贴应逐年下降,但下降幅度要慎重,补贴的对象还应包括离网用户。

### 参考文献

- [1] 孟懿. 太阳能光伏发电的发展. 东北电力技术, 2010, 31(11): 19-21
- [2] 王璐, 李林军, 邱国玉. 德国光伏电价的下降历程及其对中国光伏发电产业的启示. 生态经济(学术版), 2014(1): 228-233
- [3] Dong J, Feng T T, Sun H X, et al. Clean distributed generation in China: policy options and international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 753-764
- [4] Mundo-Hernández J, de Celis A B, Hernández-Álvarez J, et al. An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 639-649
- [5] 孙艳伟, 王润, 肖黎姗, 等. 中国并网光伏发电系统的经济性与环境效益. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(4): 88-94
- [6] 乔虹桥, 冯相赛, 张海磊, 等. 民用光伏发电系统经济效益分析. 能源与节能, 2016(2): 100-103
- [7] 邵汉桥, 张籍, 张维. 分布式光伏发电经济性 & 政策分析. 电力建设, 2014, 35(7): 51-57
- [8] 谢东, 刘慧, 张籍, 等. 小规模分布式光伏发电系统用户侧经济性分析. 可再生能源, 2015, 33(5): 736-740
- [9] 刘振东, 张石定, 贾晗. 安阳市并网光伏系统案例经济和环境效益分析. 中国电力, 2013, 46(8): 43-47
- [10] 苏剑, 周莉梅, 李蕊. 分布式光伏发电并网的成本/效益分析. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 50-56
- [11] 占明锦, 章毅之, 孔萍. 江西省太阳能资源评估研究. 能源研究与管理, 2010(3): 19-22
- [12] 廖卫兵, 罗玉峰, 李玲, 吴闰生. 江西省太阳能十万屋顶计划可行性分析. 新余学院学报, 2013, 18(4): 98-100
- [13] 朱群志, 司磊磊, 蒋挺燕. 不同安装方式建筑光伏系统的经济性及环境效益. 太阳能学报, 2012, 33(1): 24-29
- [14] 胡润青. 我国多晶硅并网光伏系统能量回收期的研究. 太阳能, 2009(1): 9-14
- [15] 李晓伟, 李昭刚, 谈文松, 等. 基于 3 kW 分布式光伏发电系统的经济社会效益研究. 绿色科技, 2015(4): 253-255
- [16] 高宏玲, 赵翼. 并网光伏发电系统设计中影响系统发电效率的因素分析. 工业技术创新, 2014, 1(2): 148-154
- [17] 王帅杰. 光伏组件倾斜角对并网发电影响的研究. 沈阳工程学院学报, 2014, 10(4): 302-308
- [18] 章激扬, 李达, 杨苹, 等. 光伏发电发展趋势分析. 可再生能源, 2014, 32(2): 127-132
- [19] 张川, 何维达. 美国光伏产业政策探索及启示. 管理现代化, 2015, 35(1): 19-21
- [20] 海山, 栾春娟. 全球太阳能光伏产业法律政策分析及启示. 太阳能, 2012(23): 6-13
- [21] Gautam B R, Li F, Ru G. Assessment of urban roof top solar photovoltaic potential to solve power shortage problem in Nepal. *Energy and Buildings*, 2015, 86(9): 735-744