

# Benefit Analysis of Photovoltaic Power Generation for Heat Pump Heating in Tibetan Dwellings in Northwest Sichuan

Huayu Tang, Ganrong Zhao

Sichuan Academy of Building Sciences, Chengdu Sichuan  
Email: 776070514@qq.com

Received: Sep. 18<sup>th</sup>, 2019; accepted: Oct. 4<sup>th</sup>, 2019; published: Oct. 11<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Closely focusing on the utilization of Photovoltaic-Solar Assisted Heat Pum in Tibetan residential houses of Northwest Sichuan, this paper takes a two-storey residential building with typical Tibetan style in Northwest Sichuan as a model. Based on meteorological data, this paper simulates the power consumption of Photovoltaic-Solar Assisted Heat Pum during a heating period. The energy, economic and environmental benefits during the twenty-year life cycle show that the residential buildings in Northwest Sichuan can effectively meet the heating needs of single-family residential buildings by installing photovoltaic arrays on their roofs, transforming the abundant solar energy resources into electric energy, and driving the operation of air-source heat pumps; the roof photovoltaic arrays can be produced annually. In addition to satisfying household self-use, electricity can also be used to generate income from the surplus electricity, thus recovering the cost within five years, and the net income can reach more than three times the cost. In northwest Sichuan, residential buildings use roof photovoltaic arrays to generate electricity; each household produces electricity every year, which can save more than 4 tons of standard coal for power generation and effectively reduce the cost. Pollutant emissions have significant environmental benefits.

## Keywords

Photovoltaic Power Generation, Residential Houses, Heat Pump Heat Supply, Expected Revenue

---

# 光伏发电用于川西北藏族民居热泵供暖的效益分析

唐华宇, 赵干荣

四川省建筑科学研究院, 四川 成都  
Email: 776070514@qq.com

## 摘要

紧密围绕光伏发电在川西北藏族民居热泵供暖问题, 以一幢具有典型的川西北藏区风格的二层民居建筑为模型。结合气象资料, 模拟光伏系统在采暖期内, 驱动家用直接蒸发式空气源热泵系统供暖的耗电量, 研究光伏系统在二十年寿命期内的能源、经济、环境收益。结果表明, 川西北地区的民居, 在其屋面设置光伏阵列, 将当地丰富的太阳能资源, 转化为电能, 驱动空气源热泵运行, 可以有效地满足独栋民居的采暖需求; 屋面光伏阵列每年可产生的电能, 除满足家庭自用电外, 还可以将余电上网获得收益, 由此在使用期5年内收回成本, 净收益可达到成本的3倍以上; 川西北地区民居使用屋面光伏阵列发电, 每户每年生产的电能, 可节约发电用标准煤4吨以上, 有效降低污染物排放, 具有显著的环境收益。

## 关键词

光伏发电, 民居, 热泵供暖, 效益分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 绪论

四川西北部地区, 是青藏高原的一部分, 平均海拔在 3000 米以上, 供暖期长, 供暖需求大。该地区缺少化石燃料资源, 历史上受社会经济发展条件限制, 取暖多采用生物质燃料, 卫生条件差, 环境污染大。同时, 川西北高原的太阳能资源丰富, 太阳年辐射量和年日照时数均为四川省最高值[1]。合理利用太阳能这一可再生清洁能源, 可以有效提升该地区建筑舒适性, 节约建筑能耗、减少污染物排放。

太阳能光伏技术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技术。光伏系统主要由太阳能电池板、控制器和逆变器、蓄电池等组成, 太阳能电池经过串联后, 形成大面积的太阳电池组件。我国于 2005 年起实施《可再生能源法》, 鼓励风能、太阳能等非化石能源的开发利用。2010 年起, 我国光伏系统装机容量迅速增加, 至 2016 年, 达到 21,100 MW<sub>p</sub> [2]。

空气源热泵是以空气作为热源, 通过电力驱动制冷剂在系统中进行逆卡诺循环, 从而使热能从低位热源流向高位热源的空调系统。在供暖期, 这种系统可以将室外空气中低品位热能搬运至室内, 达到供暖的效果。直接蒸发式空气源热泵, 具有安装简便、无循环水管路、无污染物排放、自行调节的优点; 与电热采暖相比, 耗电量低 50% 至 70% [3]。是解决川西北高原地区供暖的理想设备。

本文通过模拟软件设计了一幢民居模型, 对川西北地区利用光伏发电, 驱动家用直接蒸发式空气源热泵系统(图 1)供暖的能效进行分析。

## 2. 川西北地区民居的建模和供暖负荷模拟

本次模拟的建筑形式和构造, 采用四川省住建厅某定点扶贫村新夯土建筑项目, 如图 2。该民居具有典型的川西北藏区民居风格。本次模拟将该建筑地址设置于甘孜州稻城县(北纬 29.031978, 东经 100.297116)。该民居共两层, 总建筑面积 258.2 m<sup>2</sup>, 建筑高度 6.25 m, 采用钢筋混凝土框架结构。为了

充分利用太阳能, 建筑模型的搭建做了如下考虑:

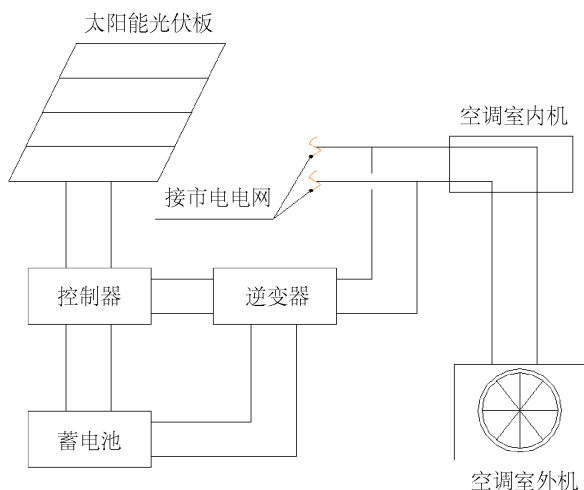


Figure 1. PV heat pump heating system

图 1. 光伏热泵供暖系统构成



Figure 2. The residential model of the Tibetan area in the northwest of Sichuan

图 2. 川西北藏区民居模型

1) 本建筑外墙采用夯土墙体, 其材料可以就地取材, 且建设方便。夯土墙体对太阳辐射的吸收率高, 储热能力好, 并具有一定的抗震防震功能。

2) 建筑的正立面设置为南向, 以充分吸收太阳辐射。建筑的主要使用空间, 如卧室、起居室也布置在南侧。南侧立面多开设外窗, 且窗体尺寸较大, 以充分获取阳光; 北侧立面则相反, 以减少热量损失。窗户的开口周围作出深色的装饰, 既具有民族特色, 又有利于对太阳辐射的吸收。

3) 建筑屋面采用平屋顶, 为太阳能光伏板的摆放留出空间, 也有利于增加建筑对太阳辐射的吸收。对该民居供供暖负荷的模拟设定以下边界条件:

1) 该建筑 1 层设 1 间客厅、1 间卧室; 2 层设 1 间卧室、1 间主卧室、1 间起居室。以上房间属于供暖房间。建筑的厨房、卫生间属于非供暖房间。

2) 供暖时间段为每日 18:00 至次日 6:00。供暖室内设计温度, 按《民用建筑供暖通风与空气设计调节规范》GB50736-2012 中热舒适度 II 级的要求, 设定为 18℃。供暖期亦按该规范设定为每年 10 月 14

日至第二年的4月18日。

3) 供暖期内, 卧室空调每天的启停时间为晚 22:00 至第二天凌晨 7:00, 客厅、起居室每天的供暖时间为晚 18:00 至 24:00。

利用 DEST 软件, 对民居在一个采暖期的逐时负荷进行模拟计算, 如图 3。采暖期的总热负荷为 9523.1 kWh。

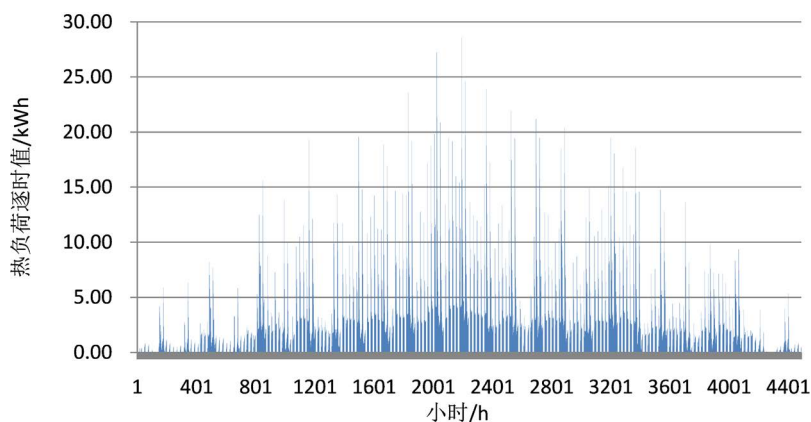


Figure 3. Hourly heat load during residential heating period  
图 3. 民居供暖期内逐时热负荷

### 3. 直接蒸发式空气源热泵耗电量的计算

热泵在供暖工况下, 单位时间内制热量与输入功率的比率, 定义为循环性能系数 COP (coefficient of performance, W/W), 改数值决定了热泵运行的能耗。对于直接蒸发式风冷热泵系统, 决定其运行时的 COP 值的决定因素, 是外界环境温度。根据文献[4]中的测试结果, 在寒冷地区, 随着室外环境温度的降低, 直接蒸发式空气源热泵的 COP 值均低于额定值, 且会波动下降, 如表 1 所示。

Table 1. Measured values of COP at different outdoor temperatures

表 1. 不同室外温度下的 COP 实测值

室外温度(°C)	COP 值	室外温度(°C)	COP 值
1.34	1.92	-6.50	1.88
-2.77	1.92	-8.06	2.73
-2.99	2.61	-8.17	2.58
-3.43	3.04	-8.19	1.57
-3.67	2.84	-10.43	1.76
-3.73	2.30	-10.57	2.06
-3.97	2.98	-12.85	1.44
-4.91	2.30	-13.65	1.40
-6.38	2.00		

以室外温度值为自变量, 以 COP 值为因变量, 对以上数据进行一元线性回归分析, 获得的线性拟合线如图 4, 对应的回归方程为:

$$Y = 0.0688X + 2.3674 \quad (1)$$

方差  $R^2 = 0.2688$ 。

由此可以得出, 在各月日均最低气温下的 COP 值, 以及对应的月采暖耗电量最大值。如表 2 所示。

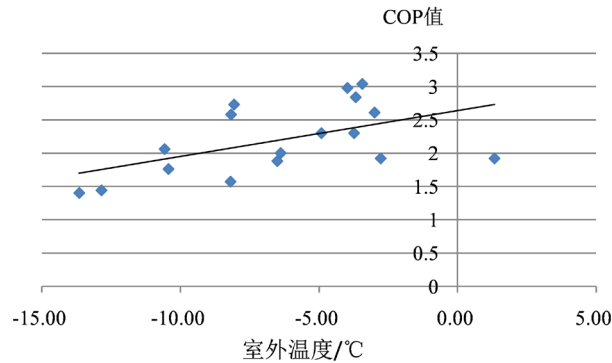


Figure 4. Temperature-COP linear fit line  
图 4. 温度-COP 线性拟合线

Table 2. Monthly heat load and heat pump power consumption statistics during residential heating period  
表 2. 民居供暖期内逐月热负荷及热泵耗电量统计

月份	10 月	11 月	12 月	1 月
日均最低气温(°C)	0.00	-6.00	-11.00	-12.00
热负荷(kWh)	140.3	1015.9	2018.5	2714.7
COP 最低值	2.64	2.22	1.88	1.81
采暖月耗电量最大值(kWh)	53	458	1074	1500
月份	2 月	3 月	4 月	
日均最低气温(°C)	-10.00	-6.00	-1.00	
热负荷(kWh)	2083.7	1327.9	222.1	
COP 最低值	1.95	2.22	2.57	
采暖月耗电量最大值(kWh)	1069	598	86	

## 4. 光伏系统的建模和太阳辐射量计算

### 4.1. 光伏阵列的建模

本次模拟将太阳能光伏阵列设置在民居模型屋面(图 1)。光伏阵列分为两个组串, 各有 17 和 18 块光伏板。光伏板朝向正南, 长 1390 mm, 宽 1080 mm, 安装倾角为 34°。单块光伏板标准功率 270 W<sub>P</sub>, 使用寿命 20 年。

### 4.2. 光伏板太阳辐射量的计算原理

光伏板所受的太阳辐射  $H_q$  由板面直接辐射、板面散射辐射、地面反射辐射三部分组成。

光伏板面直接辐射  $H_{qz}$  的计算公式定义为:

$$H_{qz} = R_b H_{sz} \quad (2)$$

式中:  $R_b$  为直接辐射转换系数, 其定义为:

$$R_b = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

$\theta_z$  为太阳天顶角, 与太阳高度角  $\alpha$  互为余角;

$\theta_i$  为太阳入射角, 即太阳直射光线与光伏板面法线之间的夹角;

$H_{sz}$  为水平面直接辐射。

目前计算散射辐射的常用数学模型为 Hay 模型[5], 该模型将散射辐射分为太阳周围发散的辐射, 和其余天空穹顶均匀分布的散射, 光伏板面散射辐射的计算公式为:

$$H_{qs} = H_{ss} \left[ \frac{H_{sz}}{H_0} R_b + \frac{1 + \cos \beta}{2} \left( 1 - \frac{H_{sz}}{H_0} \right) \right] \quad (4)$$

式中,  $\frac{H_{sz}}{H_0}$  称为晴朗指数,  $H_0$  为太阳常数, 即大气层外表面上, 单位面积每秒钟接受的太阳辐射量,

$H_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ ,  $H_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ ,  $\beta$  为光伏板面与水平面的倾角;  $H_{ss}$  为水平面直接辐射。

地面反射辐射计算公式为:

$$H_r = \frac{1}{2} \rho H_s \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为地表发射率;

$H_s$  为水平面总辐射。

从 Cythelia 数据(Ta Température: 2000~2009, Ins. Rayonnement: 1991~2010)中查询各地的逐时总辐射量、水平面直接辐射量和水平面散射辐射量, 再根据气象软件中的逐时太阳高度角(图 5), 代入式(3)~(5), 可以计算出光伏板的每月标准日逐时辐射量。

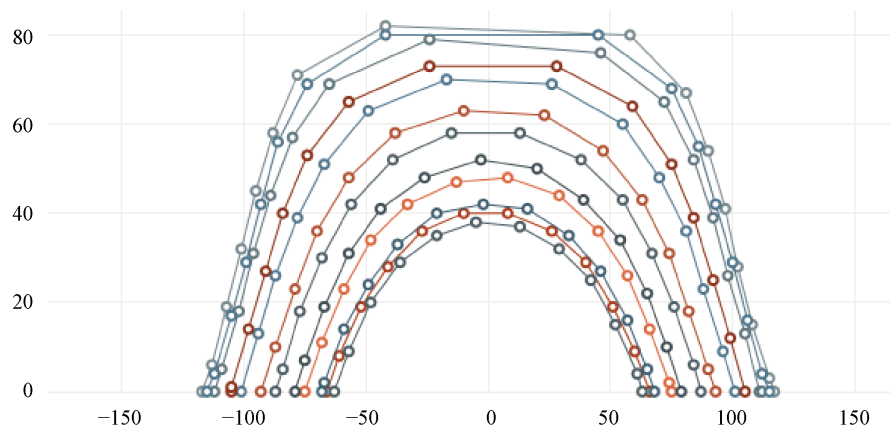


Figure 5. Sun track of Daocheng County, Ganzi Prefecture (the horizontal axis is the azimuth angle and the vertical axis is the height angle)

图 5. 甘孜州稻城县太阳轨迹(图中横轴为方位角度, 纵轴为高度角度)

## 5. 光伏发电量的模拟计算

为分析光伏阵列的发电效益, 本次模拟采用法国 Archelios Prog 光伏计算软件。该软件与 Sketchup 软件结合使用, 可以进行地势模拟和 3D 光伏阵列布置与自动布线、按辐射量筛选组件等。软件有庞大的制造商产品选型库, 可进行逆变器、光伏优化器的选型。软件的数据库内置全球地表日照数据和气象站数据, 可以进行详细的光伏产量计算和经济收益计算, 并进行项目或方案间数据对比。

经该软件模拟, 本光伏阵列模型的各项损失如表 3:

**Table 3.** Simulation statistics of photovoltaic array photoelectric conversion efficiency loss

**表 3.** 光伏阵列光电转换效率损失模拟统计

损失项	效率损失百分比(%)
阴影遮挡	-9.9
反光	-2.26
光伏板污损	-2
温度系数	-3.39
错配	-2
直流电缆	-0.62
交流电缆	-0.57
逆变器	-4.22
气象导致无法使用	-2

利用 Archelios Prog 软件, 计算得经过效率损失修正后的光伏系统光电转换率为 14.5%, 供暖期逐月发电量如表 4。合计交流电年发电量为 13,615 kWh。将逐月光伏产电量与表 2 中的采暖月耗电量最大值对比, 可得出各月夜间供暖的最低保证率。以上各计算值见表 4。从计算结果看, 1 月份的光伏发电量不能完全满足热泵供暖需要, 不足部分需依靠电网补充。光伏在采暖期用于供暖的发电量为 4638 kWh。

**Table 4.** PV system power generation and battery discharge statistics

**表 4.** 光伏系统发电量及蓄电池放电电量统计

月份	10 月	11 月	12 月	1 月
光伏发电量(kWh)	1145	1268	1247	1301
电网补充电量(kWh)	0	0	0	200
月份	2 月	3 月	4 月	
光伏发电量(kWh)	1190.73	1161.91	1048.15	
电网补充电量(kWh)	0	0	0	

## 6. 光伏发电的经济效益预测

对该民居光伏发电系统经济效益的预测设定以下边界条件:

1) 本模拟项目所使用的光伏产品, 当前市场售价约为 35,000 元。估算川西北高原地区运输及安装费用约为 7000 元。因此本系统的成本约 42,000 元。系统首年维修费用设置为成本的 1%, 考虑通胀因素, 每年的维护费按 3% 的幅度递增。

2) 光伏板的转换率在未来的使用年份中, 会因为光伏板老化, 导致转换效率逐年降低, 设每年比上一年度的衰减幅度为 0.05%。光伏生产出的电能, 在满足家庭供暖和日常用电使用的前提下, 余量销售给电网。目前, 川西北地区一户家庭的每年日常用电量约为 800 kWh。考虑经济发展, 模型建筑每年的日常用电量以 5% 的幅度递增。

3) 根据四川省电网销售电价表, 2019 年度, 四川省城乡一户一表居民使用中高压线路(35~110 KV)

供配电的, 其电价为 0.5124 元/kWh。对此后每年的电价增幅, 本模型按每年递增 0.5% 模拟。据 2019 年《国家发改委关于完善光伏上网电价机制有关问题的通知》, 采用“自发自用, 余量上网”的户用分布式光伏发电补贴标准调整为 0.18 元/kWh。鉴于我国对光伏发电的补贴标准已大幅度下降, 在模拟未来年份的上网电价时, 对补贴金额不做增加。光伏发电上网销售电价为电网销售电价与补贴金额之和。

$$4) \text{ 光伏上网销售电量} = \text{光伏发电量} - \text{供暖耗电量} - \text{日常用电量} \quad (6)$$

$$5) \text{ 光伏自用节约电费} = (\text{蓄电池供暖发电量} + \text{日常用电量}) \times \text{电网销售电价} \quad (7)$$

$$6) \text{ 光伏净收入} = \text{光伏自用节约电费} + \text{光伏上网销售电量} \times \text{光伏上网电价} - \text{电网补充供暖电量} \times \text{电网销售电价} - \text{维修开支} \quad (8)$$

7) 按此标准计算出的该民居模型的历年光伏发电收支, 见表 5。根据表中数据统计, 光伏系统在使用期的第 5 年内可以收回投资, 在整个使用期内的净收入 158,090 元。

**Table 5.** Residential photovoltaic power generation capacity and power generation revenue over the years  
**表 5.** 民居光伏模型历年发电量及发电收入

年份	交流电年产量 kWh	日常用电 + 光伏发电量 kWh	自用节省电费 元	可销售电量 kWh	销售收入 元	维修开支 元	实际收入 元
1	13,615	5438	2921	8177	5662	420	8061
2	13,558	5478	2941	8080	5801	433	8208
3	13,500	5520	2963	7980	5944	446	8360
4	13,442	5564	2985	7878	6091	459	8516
5	13,385	5610	3009	7774	6241	473	8676
6	13,327	5659	3034	7668	6395	487	8840
7	13,269	5710	3060	7559	6551	502	9008
8	13,212	5764	3088	7448	6711	517	9180
9	13,154	5820	3116	7334	6872	532	9355
10	13,095	5879	3147	7216	7035	548	9531
11	13,037	5941	3178	7096	7200	564	9712
12	12,980	6006	3212	6973	7367	581	9895
13	12,921	6075	3247	6846	7532	599	10,078
14	12,863	6147	3284	6716	7698	617	10,263
15	12,805	6222	3322	6583	7864	635	10,449
16	12,748	6301	3363	6446	8027	654	10,634
17	12,688	6384	3406	6304	8186	674	10,816
18	12,631	6472	3450	6159	8342	694	10,996
19	12,572	6563	3497	6008	8491	715	11,171
20	12,514	6660	3547	5854	8634	736	11,342

## 7. 光伏系统的环境效益预测

现阶段我国的电力生产结构仍然以煤炭火力发电为主, 单位发电量的耗煤量约为 320 g 标准煤/kWh。燃煤发电会产生大量的 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和粉尘等污染物。每燃烧一吨标准煤所排放的污染物, 及单位污染物排放所对应的环境成本如表 6 所示[6]。利用太阳能光伏发电就可以避免这些污染物的产生。根据表



5 的发电量数据, 光伏系统的有效发电量为日常用电量与热泵耗电量、销售电量之和。其中第一年的有效发电量为 13,615 kWh, 可以节省标准煤 4355 kg, 按原煤折标系数 0.7143 计算, 可节省原煤 6098 kg; 对各种污染物的减排量 and 环境收益见表 6。随着我国节能技术发展, 单位发电量的耗煤量有逐渐下降的趋势, 而光伏系统的光电转换效率会逐年衰减, 因此该光伏模型在第一年的减排量 and 环境收益为各年相应数值中的最大值。

**Table 6.** Residential PV model emission reductions and environmental benefits  
**表 6.** 民居光伏模型减排量 and 环境收益

	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	粉尘
标准煤单位排放系数(kg/kgce)	1.731	0.022	0.01	0.017
单位排放物环境成本(元/kg)	0.023	6	8	2.2
光伏墙年最大减排量(kg)	7540	96	43	75
光伏墙年最大环境收益(元)	173	579	346	165
年最大环境收益合计(元)	1263 元			

## 8. 结论

本文以川西北地区典型的独栋两层民居作为分析对象, 建立屋面光伏阵列模型, 结合气象资料, 模拟了光伏系统在采暖期内, 驱动家用直接蒸发式空气源热泵系统供暖的耗电量, 并分析了光伏系统在二十年寿命期内的能源、经济、环境收益。从模拟结果分析:

- 1) 川西北地区的民居, 在其屋面设置光伏阵列, 将当地丰富的太阳能资源, 转化为电能, 驱动空气源热泵运行, 可以有效地满足独栋民居的采暖需求。
- 2) 屋面光伏阵列每年可产生的电能, 除满足家庭自用外, 还可以将余电上网获得收益, 由此在使用期 5 年内收回成本, 净收益可达到成本的 3 倍以上。
- 3) 川西北地区民居使用屋面光伏阵列发电, 每户每年生产的电能, 可节约发电用标准煤 4 吨以上, 有效降低污染物排放, 具有显著的环境收益。

## 基金项目

四川省科技支撑计划项目(2017FZ0080)。

## 参考文献

- [1] 朱瑞兆, 马胜红, 杨振斌, 周昌恩. 中国分省太阳能资源图集[M]. 北京: 中国气象局, 2006.
- [2] 吴迎新, 田李剑. 太阳能光伏发电现状研究及问题分析[J]. 技术与市场, 2019, 26(1): 115-116.
- [3] 刘春蕾, 刘智民, 宋盼想, 白雪, 刘海威. 空气源热泵用于寒冷地区供热的性能分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2018, 36(3): 42-46.
- [4] 白叶飞, 李富宏, 周燕平. 北方寒冷地区家用中央空调系统的应用[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(2): 93-96.
- [5] 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其环境效益[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1): 24-29.
- [6] 张健, 谢应明, 杨元皓. 光伏墙 BAPV 系统经济性及其环境效益分析[J]. 建筑节能, 2017, 45(313): 44-49.