

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.206

公共建筑光伏系统太阳能利用潜力评价

徐 伟,张慧慧

(内蒙古科技大学 土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:面对不断增长的能源需求及减少碳排放的双重挑战,提高城市可再生能源利用率,降低建筑能耗,发展光伏建筑一体化应用,实现建筑与新能源产业的融合发展显得非常重要。本研究选取包商银行公共建筑光伏系统,依据内蒙古包头市独特的气候特征,利用 Ecotect 求取典型建筑表面全年太阳辐射模型,基于最优系统配置方式,从高峰期能源潜力、经济潜力、社会潜力 3 个维度构建了光伏建筑太阳能利用潜力评价模型,对包商银行光伏系统太阳能利用潜力进行评价。研究结果表明:在极端气候期间,包商银行光伏系统以总电力需求的 12.5% 来缓解高峰期当地电网的压力,将用能高峰延迟了 2 h;光伏系统 25 a 生命周期净收益 104.66 万元,基于光伏系统单位造价为 7.9 元/W,上网电价 0.8 元/kWh 的情况下,系统投资可在 5.15 a 内收回,且单位造价、政府补贴与投资回收期之间具有三维耦合关系;光伏系统寿命期内的环境效益为 0.096 元/kWh,社会效益为 11.93 元/kWh。此评价模型为城市中光伏建筑的推广及光伏产业政策的制定提供借鉴。

关键词:太阳能光伏系统;可再生能源;高峰期能源潜力;经济潜力;社会潜力

中图分类号: TU-9

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)03-053-10

Solar energy utilization potential evaluation of public building photovoltaic system

XU Wei, ZHANG Huihui

(Institute of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology,
Baotou 014010, Inner Mongolia, P. R. China)

Abstract: Faced with the dual challenges of increasing energy demand and reducing carbon emissions, it is of great significance to improve urban renewable energy utilization, reduce building energy consumption, develop integrated photovoltaic building applications, and achieve the integration of construction and new energy industries. In this paper, the public building photovoltaic system of Baoshang Bank was selected for the research. According to the unique climatic characteristics of Baotou City, Inner Mongolia, Ecotect was used to obtain the annual solar radiation model of typical building surface. Based on the optimal system configuration method, the solar energy utilization potential evaluation model of photovoltaic building was constructed from three dimensions: peak energy potential, economic potential and social potential. The research shows that the photovoltaic system of Baoshang Bank alleviates the pressure of the local power

收稿日期: 2019-04-24 **网络出版日期:** 2019-09-26

基金项目: 内蒙古自然科学基金资助项目(2017MS0535)。

Supported by Inner Mongolia Natural Science Foundation Project (2017MS0535).

作者简介: 徐伟(1970—),女,内蒙古科技大学副教授,主要从事绿色建筑与清洁能源研究,(E-mail) btxuwei2006@126.com。

grid at the peak period with 12.5% of the total power demand during the extreme climate, and delays the peak period of energy consumption by 2 hours. The net income of photovoltaic system with 25-year life cycle is 1.0466 million yuan. When the unit cost of photovoltaic system is 7.9 yuan/W, the on-grid price is 0.8 yuan/kWh, the system investment can be recovered within 5.15 years. In addition, there is a three-dimensional coupling relationship between unit cost, government subsidy and investment payback period. The environmental benefit during the life of the photovoltaic system is 0.096 yuan/kWh, and the social benefit is 11.93 yuan/kWh. This evaluation model provides reference for the promotion of photovoltaic buildings in the city and the formulation of photovoltaic industry policies.

Keywords: photovoltaic solar system; renewable energy; peak energy potential; economic potential; social potential

据《2019 世界能源展望》统计,建筑物占全球能源增长的 1/3 以上,建设终端能耗将占到全社会总能耗的 40%左右。随着中国工业化、城镇化速度的加快,对于建筑新能源的开发利用越来越受到重视,在可再生能源中太阳能是安全清洁、颇具潜力的替代能源,由于其自身具有品位低、分布广的特点,最适宜在建筑领域推广^[1]。为了缓解城市中能源危机、降低建筑能耗,评价城市中建筑光伏利用潜力已成为研究热点。以往学者多从两方面对光伏建筑太阳能利用潜力进行评价,其一,以城市建筑为研究对象,利用 GIS 等工具进行城市控规阶段的建筑光伏利用潜力研究^[2-5];其二,以区域住宅及民用建筑为研究对象,对建筑屋顶的技术、经济、环境利用潜力进行定性及定量评估^[6-9]。

综上,学者对光伏建筑太阳能利用潜力的研究多集中在城市控规阶段的区域建筑,民用建筑及住宅建筑。随着城市化进程的加快,公共建筑在城市建筑中占比逐渐增大,相比住宅建筑,公共建筑具有更丰富的辐射面积,且公共建筑应用的商业电价远高于居民用电。因此,以公共建筑为例系统地构建了光伏建筑太阳能利用潜力评价体系,量化利用太阳能替代传统能源所产生的效益,展示公共建筑采用分布式光伏系统的发展前景,为光伏行业发展及该领域的科学研究提供参考。

1 包商银行商务大厦光伏系统概况

内蒙古地区太阳能资源丰富,仅次于西藏,居全国第二位,包头市地理坐标为 $109^{\circ}50'E \sim 111^{\circ}25'E$ 、 $41^{\circ}20'N \sim 42^{\circ}40'N$,太阳能年总辐射量在 $1\ 658.05 \sim 1\ 675.14\ \text{kWh}/\text{m}^2$ 之间,年日照时数 $2\ 806\ \text{h}$,年日照百分率为 $0.6 \sim 0.75$,属于太阳能资源较丰富地区(见表 1),可利用的太阳能资源量巨大。选择最佳光伏组件配置方案对位于包头市新都市区包商银行商务大厦光伏应用示范项目进行潜力最大化评价。包商银行光伏系统配置方式如图 1 所示,建筑屋顶配置 $260\ \text{kWp}$ 的多晶硅发电系统,分别安装在 B 座办公楼和 C 座酒店的屋顶,光电转化效率为 14.49% ,采用 1 台 $33\ \text{kW}$ 及 3 台 $20\ \text{kW}$ 逆变器,其转化效率为 98% ,设计寿命 $25\ \text{a}$;建筑立面为光伏遮阳板系统,采用汉能欧瑞康 BIPV 光伏组件,尺寸 $1\ 100\ \text{mm} \times 1\ 300\ \text{mm}$, 5% 透光,共计 $2\ 070$ 块,总安装面积 $2\ 960\ \text{m}^2$,分别安装在 A 座办公楼、裙楼、B 座办公楼的南立面和东立面,总装机量 $420\ \text{kW}$,可替代传统遮阳设备,并实现微透光。

表 1 内蒙古太阳能资源区域对比表

Table 1 Comparison table of solar energy resources in Inner Mongolia

分区名称	地区	太阳能总辐射/ $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
较丰富 I 区	阿拉善盟西部、鄂尔多斯市西部	$1\ 700 \sim 1\ 740$
较丰富 II 区	阿拉善盟东部、鄂尔多斯市东部、乌海市、呼和浩特市大部、包头市大部、乌兰察布市大部、锡林郭勒盟西部	$1\ 650 \sim 1\ 700$
较丰富 III 区	赤峰市西部、锡林郭勒盟东部、巴彦淖尔市大部	$1\ 600 \sim 1\ 650$

续表

分区名称	地区	太阳能总辐射/ $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
较丰富Ⅳ区	通辽市大部、赤峰市东部	1 500~1 600
较丰富区Ⅴ区	兴安盟大部、呼伦贝尔市西部	1 400~1 500
较贫乏区Ⅵ区	呼伦贝尔市东部	$\leq 1 400$

数据来源:中国气象局统计数据



图 1 包商银行及光伏系统配置图

Fig. 1 Baoshang Bank and PV system configuration diagram

2 光伏建筑全年太阳辐射模型的测设

以包商银行商务大厦为例并选取典型辐射区域,采用包头地区中国标准气象数据(CSWD, Chinese standard weather data),利用 Autodesk Ecotect 软件进行了区域外围护结构全年太阳辐射量的模拟计算,从而得出图 2 中建筑能量 3D 彩色辐射分布图。所选典型建筑物表面的年太阳辐射总量约为 14 659 800 kWh,最大年辐射密度为 1 472 kWh/m²,定义为黄色,最小年辐射密度为 960 kWh/m²,定义为蓝色。为了分析屋顶和立面的太阳能潜力,表 2 列出了相关的辐射指标。屋顶在建筑物表面中每单位面积接收的年度太阳辐射最多,平均太阳能密度可达到 1 334.4 kWh/m²,其次为南立面的平均密度为 921.6 kWh/m²,东立面平均密度为 577.6 kWh/m²。在不同季节,夏季太阳辐射产量占太阳辐射总产量的 38%,春季为 31%,秋季为 19%,冬季为 12%。根据建筑物辐射分布图配置合适的光伏组件,使光伏建筑太阳能利用能力达到最大化,由分布图可知建筑屋顶区域辐射密度远高于立面,适合配置发电效率较高的多晶硅电池,从而提高光伏系统整体发电量;而在立面等辐射密度较小的区域配置非晶硅薄膜电池,利用其形式多样、生产能耗低、弱光响应好、功率温度系数低、成本相对较低等特点来提高光伏系统的美观性及太阳能利用潜力,保证系统整体效率在 97%以上。以上光伏系统配置方式与包商银行光伏系统配置一致,验证了辐射模型及配置方式的准确性。

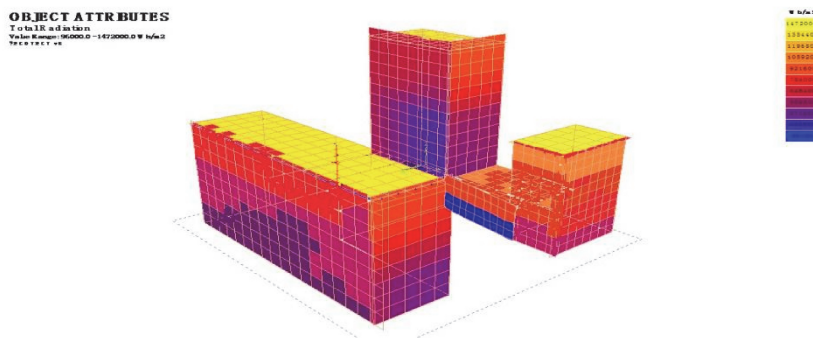


图 2 建筑表面 3D 年辐射图

Fig. 2 3D annual radiation pattern of the building surface

表 2 包商银行典型建筑表面相关辐射指数

Table 2 Baoshang Bank's typical building surface related radiation index

建筑表面	面积(窗户除外)/m ²	年辐射产量/kWh	年平均辐射密度/(kWh/m ²)	最大年辐射密度/(kWh/m ²)	最低年辐射密度/(kWh/m ²)	夏季辐射产量/MJ	冬季辐射产量/MJ	春季辐射产量/MJ	秋季辐射产量/MJ
A 座南立面	3 523.6	2 762 541.6	784.0	1 059.2	508.8	1 049 765.8	331 504.9	856 387.8	524 882.9
A 座东立面	5 692.0	3 287 728.0	577.6	646.0	371.0	1 249 336.6	394 527.3	1019 195.7	624 668.3
B 座屋顶	1 305.0	1 741 392.0	1 334.4	1 472.0	784.0	6 61 728.9	208 967.0	539 831.5	330 864.4
B 座南立面	2 967.7	3 143 440.8	1 059.2	1 207.0	519.0	1 194 507.5	377 212.8	974 466.6	597 253.7
C 座屋顶	5 421.0	7 605 663.0	1 403.0	1 472.0	960.0	2 890 151.9	912 679.5	2 357 755.5	1 445 075.9
裙楼屋顶	4 410.0	4 972 275.0	1 127.50	1 197.0	1 060.0	1 889 464.5	596 673.0	1 541 405.2	944 732.2

3 光伏建筑太阳能利用潜力评价模型的构建

研究遵循科学性、数据可获得性、可计算性的原则,通过光伏系统高峰期能源潜力、经济潜力、社会潜力 3 个维度构建评价模型,对光伏建筑太阳能利用潜力进行最大化评价。

3.1 高峰期能源潜力评估

3.1.1 光伏系统发电量计算

光伏系统年发电量是其性能评价的重要指标,也是衡量光伏建筑太阳能利用潜力的基础。根据光伏组件性能参数及 Meteonorm 7.1 气象数据库中包头市气象数据,利用 PV_{sys} 软件分别对多晶硅光伏系统及薄膜光伏系统进行模拟计算,得到光伏系统 25 a 生命周期总发电量为 6 695 777.78 kWh,典型建筑物表面的逐月及全年光伏系统年发电量如图 3 所示。由图 3 可知,在典型气象年条件下,多晶硅系统与薄膜系统全年发电量共计 287 856.11 kWh,其中多晶硅系统年发电量为 118 501.43 kWh,薄膜系统年发电量为 169 354.68 kWh,月均发电高峰期集中在 4,5,6 月份,其中又以 5 月份发电量最多,7 月份太阳辐射量较高而发电量低是由温度过高,光伏板发电效率降低所致。其结果与表 3 中 Meteonorm 7.1 气象数据库中包头市峰值日照时数相吻合。

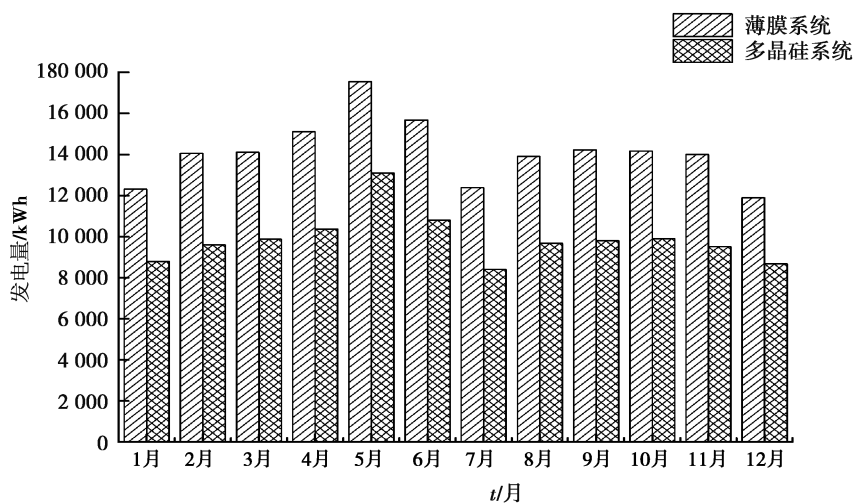


图 3 包商银行光伏系统逐月发电量

Fig. 3 Monthly sales of photovoltaic system of Baoshang Bank

利用包商银行商务大厦监测典型建筑物的能源使用量,太阳能光伏系统提供的能源比例从夏季的 20%左右到冬季的 10%左右。图 4 显示了太阳能发电系统和当地电网输送能源的季节性贡献,随着光伏板质量、技术性能及其后期维护水平的提高,太阳能发电量占建筑总用能的比重将进一步增加。

表 3 包头市峰值日照时数
Table 3 Peak sunshine hours in Baotou City

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均日照
日照时数/ (kWh · m ⁻² · d ⁻¹)	2.74	4.62	4.74	5.88	6.43	6.39	5.95	5.19	4.44	3.74	2.85	2.38	4.53

数据来源:meteonorm 7.1 气象数据库。

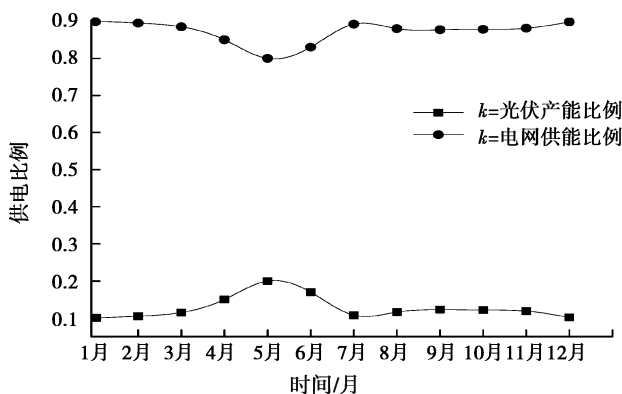


图 4 包商银行光伏系统产能与电网供能贡献率

Fig. 4 Baoshang Bank's photovoltaic system capacity and grid energy contribution rate

3.1.2 高峰期能源潜力计算

实现光伏建筑一体化,除了直接满足建筑本身的用能需求以外,还能够有效减少大量的输变电损失,能够在用电高峰期起到削峰填谷的作用,在气候变化和由此导致的极端气候事件增加的背景下,光伏建筑的广泛应用可在一定程度上缓解区域电网的压力。

内蒙古地区作为中国北方重要生态屏障,据有关研究表明其暖昼日数具有显著增加趋势,变化速率为每 10 a 将出现 1.7 d 暖昼日^[10]。闫慧敏等相关研究也指出内蒙古地区表征高温时间的夏日指数、暖昼日数、暖夜日数、热持续指数等均呈上升趋势^[11]。据《2017 年内蒙古气象公报》统计,2017 年日最高气温达到极端事件监测标准的站点中,内蒙古区域于 2017 年 5 月 18 日出现 43.6 °C 的极端高温天气,其中包头市于 2017 年 5 月 18 日和 7 月中旬分别出现 2 次高温天气。以 5 月 18 日前后高温天气为例,分析包头市包商银行商务大厦用电高峰期能源潜力情况。表 4 为包头市气象局统计的 2017 年包头市高温天气,5 月 18 日前后 3 天的每日最低和最高温度,以及包商银行光伏系统功率峰值、净电力需求峰值和最小值。由表 4 可以看出,为了提高人类热舒适性,极端气候期间的最大环境温度与电气负载峰值状态相对应,而光伏系统在负载峰值状态对电网有一定的缓解作用,如图 5 所示,为极端气候期间对包商银行光伏系统发电量、净电力及总电力实施监测的需求状况。由图 5 可得:①极端气候期间包商银行典型建筑平均每日总电力需求为 460.41 kW,净电力需求为 403.78 kW,光伏系统平均日发电量为 57.7 kW,其中净电力需求对总电力需求的贡献为 87.7%,光伏发电对其总电力需求的贡献为 12.5%,即包商银行光伏系统能以总电力需求的 12.5%来缓解高峰期当地电网的压力。②选取包商银行典型建筑由银行办公大楼及商务酒店组成,由图 5 看出,第一个用电高峰期为银行上班时间 9:00~17:00,在光伏系统发电期间 6:00~19:00 以内。第二个用电高峰期为 20:00,而当地电网高峰期为 18:00,则光伏系统在 18:00 以后的建筑用能高峰期间持续做出贡献,将用能高峰延迟了 2 h,减少了高峰期间电网供应无法满足用电需求而导致的停电事件的发生。③光伏系统对建筑用能的贡献,减少了

对昂贵的电网基础设施的需求,从而降低了区域经济的能源成本。

表 4 2017 包头市极端气候期每日极端温度、光伏系统和净电力需求峰值
Table 4 2017 Daily extreme temperature and peak PV system and net electricity demand during the extreme climatic period in Baotou City

日期	最低温度/°C	最高温度/°C	光伏系统峰值/kW	净电力峰值/kW
2017 年 5 月 17 日	22	35	120	900
2017 年 5 月 18 日	23	37	110	1 050
2017 年 5 月 19 日	23	36	115	950

数据来源:包头市气象局及包商银行统计数据

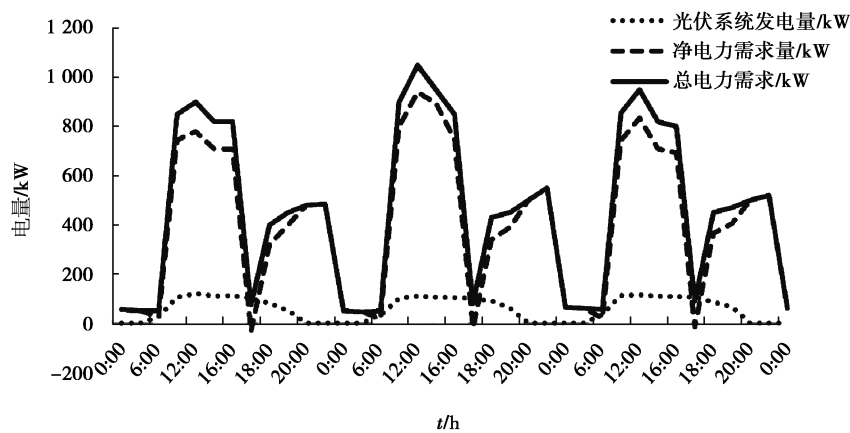


图 5 极端气候期间包商银行光伏系统发电量、净电力及总电力需求状况

Fig. 5 Overview of PV system's photovoltaic system power generation, net power and total electricity demand during extreme climate

3.2 光伏建筑太阳能利用经济及社会潜力评价

通过选取一系列相关的经济性及社会潜力评价指标,对包商银行光伏系统太阳能利用的经济及社会潜力进行量化,并对相关的经济指标进行耦合性分析,为实现太阳能利用经济潜力最大化提供参考。

3.2.1 经济性潜力评价

通过全生命周期净收益、单位供电成本、单位造价、投资回收期等经济指标对包商银行光伏建筑太阳能利用的经济潜力进行评价,并分析了政府补贴、单位供电成本与投资回收期的耦合关系。

1) 经济性指标评价。

光伏建筑的成本效益是太阳能利用经济潜力的最直观表现。包商银行光伏系统遵循“自发自用,余电上网”的原则,2种情况都可享受20年0.42元/度的国家光伏补贴,2018年“5.31”光伏新政以后,其仍执行0.42元/度的国家分布式光伏发电补贴政策。2018年中国工商业电价为0.8元/kWh,为各种售电类型中最高一类,同时,光伏上网电价也为0.8元/kWh,则包商银行光伏系统整个生命周期电价均按0.8元/kWh计算,如下为包商银行光伏系统经济潜力评价指标计算,其主要技术经济参数如表5所示。随着光伏技术的提高与推广,光伏发电效益有不断上升的趋势。光伏系统生命周期内总发电效益为

$$B_{\text{total}} = 287\ 856.11 \times (0.8 + 0.42) \times 20 + 287\ 856.11 \times 0.8 \times 5 = 817.51 \text{ 万元。}$$

光伏系统总投资成本为

$$C_{\text{total}} = C_{\text{system}} + C_{\text{o\&m}} + C_{\text{ac}}, \quad (1)$$

式中: C_{total} 为系统总成本; C_{system} 为系统初始投资成本; $C_{\text{o\&m}}$ 为总运行维护费用; C_{ac} 寿命期内偶生成本。

单位供电成本^[12]为

$$C_{\text{unit}} = \frac{C_{\text{discounted}}}{N \times P_{\text{average}}}, \quad (2)$$

式中: C_{unit} 为单位供电成本; $C_{\text{discounted}}$ 为总成本折现值; P_{average} 为年平均发电量; N 为系统寿命周期。将各项成本折算到投资初期的现值即为总成本折现值,折现率计算公式为

$$i' = \frac{1+i}{1+g} - 1, \quad (3)$$

取利率 i 为4%,通货膨胀率 g 为3%,则折现率 i' 为0.97%。

光伏系统运行维护费用的折现值为

$$C_{\text{o\&m}} = \lambda C_{\text{system}} \frac{(1+i)25-1}{i(1+i)25}, \quad (4)$$

式中,年运行系数 λ 取0.5%。

包商银行光伏系统的偶生成本 C_{ac} 为逆变器的维护或更换成本,取初投资成本的20%^[12]。光伏系统生命周期净收益可表示为

$$I_a = [(B+P) \times Q \times 20 + P \times Q \times 5] - C_{\text{total}}, \quad (5)$$

式中: B 为国家财政补贴; P 为当地电价; Q 为年实际平均用电量。建筑光伏系统的静态投资回收期计算为

$$T = C_{\text{system}} / I_a, \quad (6)$$

光伏系统单位造价计算公式为

$$C_u = \frac{C_{\text{system}}}{p}, \quad (7)$$

式中, p 为光伏系统装机容量。

综合考虑各项费用,包商银行光伏系统的总成本折现值为561.3万元;单位供电成本为0.78元/kWh;生命周期净收益104.66万元;投资回收期为5.15 a;光伏系统单位造价为7.9元/W。

表5 包商银行光伏系统主要技术经济参数

Table 5 Main technical and economic parameters of the PV system of Baoshang Bank

年发电量/kWh	寿命期/a	初始投资/万元	年运维费用/万元	偶生成本/万元
287 856.11	25	534.16	2.67	106.832

数据来源:作者模拟及项目统计资料

2) 政府补贴与单位造价的耦合性分析。

当光伏系统发电电价与电网上网电价相同时,在光伏系统寿命期间内收不回投资,因此,为了保证系统的经济性,需要国家给予一定的财政补贴。而且,随着光伏技术的提高及单位造价的降低,光伏单位供电成本呈逐年降低的趋势。2018年5月31日三部委联合发布“5.31”光伏新政,新政指出将分布式光伏纳入指标管理,加速补贴退坡,以解决光伏消纳问题并缩小光伏财政补贴缺口。光伏发电系统的单位供电成本降低是政府缩减补贴的重要依据,因此,以包商银行光伏系统为例分析政府补贴、单位供电成本及投资回收期的三维耦合关系,以期使光伏建筑的经济潜力最大化并为光伏产业政策提供借鉴。

图6所示为包商银行光伏系统单位造价、政府补贴与投资回收期之间的三维耦合关系。由图6可知,当政府补贴及单位造价按照一定的规律同时下降,光伏系统的投资回收期会维持在合理水平。从2018年“5.31”光伏新政来看,降低光伏系统单位造价及政府补贴是光伏建筑及光伏产业未来发展的正确趋势。当政府补贴与单位造价之间的补贴不协调,将造成光伏产业的波动。

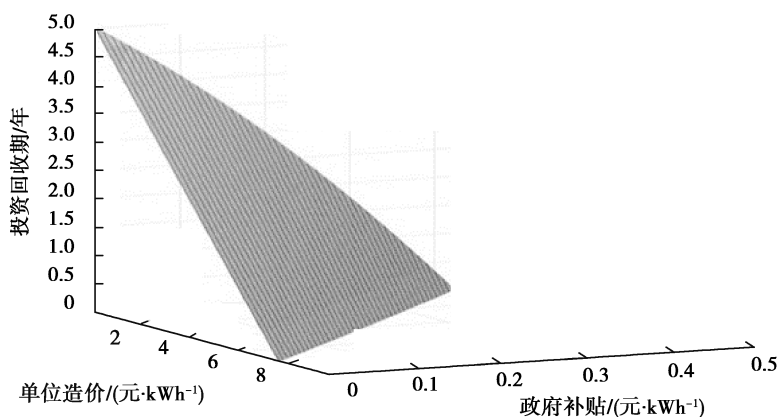


图 6 包商银行光伏系统投资回收期、政府补贴及单位造价的耦合关系

Fig. 6 Coupling relationship between investment recovery period, government subsidy and unit cost of PV system of Baoshang Bank

3.2.2 社会潜力评价

光伏建筑除了通过产生电力给相关经济主体带来良好的经济效益外,还在使用过程中产生一定的外部效益^[13]。光伏建筑的外部效益主要表现在社会效益方面,通过光伏建筑的国民经济价值及环境价值对外部效益进行量化,以评估光伏建筑太阳能利用的社会潜力。

1) 社会潜力评价模型。

光伏建筑的国民经济价值指增加单位电力贡献带来的 GDP 增加值,以电力的国民经济影子价格来表示。光伏建筑的环境价值指因发展光伏建筑而避免的环境破坏及节约的环境效益。则光伏建筑的社会效益为

$$b_s = p_s + b_E, \quad (8)$$

式中: b_s 为光伏建筑的社会效益; p_s 为电力影子价格; b_E 为光伏建筑的环境效益。

2) 社会潜力评价。

随着中国电力资源的短缺,电力的影子价格远远大于其市场价格,则可用电力的平均经济价值即 GDP 与年发电量的比值来替代其影子价格^[14]。表 6 给出中国 2013~2017 年电力平均经济价值的变化情况,由表 6 可以看出,中国电力平均经济价值从 2013 年的 11.03 元/kWh 逐年增长到 2017 年的 12.73 元/kWh,取其 5 年的平均值 11.83 元/kWh 作为当前光伏系统的平均经济价值。

表 6 2013~2017 年中国电力平均经济价值

Table 6 Average economic value of China's electricity from 2013 to 2017

年份	平均经济价值/(元·kWh ⁻¹)
2013	11.03
2014	11.40
2015	11.90
2016	12.11
2017	12.73

数据来源:2013~2017 年统计年鉴

目前中国建筑用电仍以燃煤发电为主,且燃煤发电产生的 CO₂、SO₂、NO_x 及粉尘等污染物增加了建筑能耗的同时给环境保护带来巨大的威胁。因此文中对比燃煤发电方式,评价包商银行光伏发电系统给建筑

物带来的环境效益。包商银行光伏系统 25 a 生命周期的总发电量为 6 695 777.78 kWh,2017 年中国平均供电煤耗为 308 g/kWh,则包商银行光伏系统在其寿命期可节约 2 062.30 t 标准煤,表 7 为 1 t 标准煤燃烧排放的污染物及每单位污染物排放带来的环境成本。表 8 为包商银行光伏系统污染物减排量及其环境效益,由表 8 可以看出与燃煤发电相比,包商银行光伏系统 25 a 寿命期内的污染物减排量为 5 590.90 t,故包商银行光伏系统产生的环境效益为 0.096 元/kWh,由式(8)可得包商银行光伏系统产生的社会效益为 11.93 元/kWh。

表 7 单位减排系数及环境成本^[15]Table 7 Unit emission reduction coefficient and environmental cost^[15]

气体	污染物排放/(kg·t ⁻¹)	环境成本/(元·kg ⁻¹)
CO ₂	2 662	0.023
SO ₂	22	6
NO _x	10	8
TSP	17	2.2

表 8 污染物减排量及环境效益

Table 8 Pollutant emission reductions and environmental benefits

气体	减排量/kg	环境效益/元
CO ₂	5 489 842.6	126 266.38
SO ₂	45 370.6	272 223.60
NO _x	20 623.0	164 984.00
TSP	35 059.1	77 130.02
总量	5 590 895.3	640 604.00

4 结 论

以公共建筑光伏系统为例,在求取光伏建筑全年太阳辐射模型的基础上,系统地构建了光伏建筑太阳能利用潜力评价模型,从高峰期能源潜力、经济潜力、社会潜力 3 个方面对其太阳利用潜力进行评价。研究指出:光伏系统在公共建筑用能高峰期以总用能的 12.5% 缓解当地电网的压力,并可将在用能高峰推迟;选取相关经济及环境指标进行评价,并对相关经济指标的耦合性进行分析,得出公共建筑光伏系统具有良好的经济及社会效益,并为光伏政策的制定提供建议。

随着智能电网技术的发展,太阳能等清洁能源越来越受到重视。文章所提出的光伏建筑太阳能利用潜力的评价方法,对于光伏建筑一体化的推广,光伏产业政策的制定及可再生能源在建筑上的应用具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Lukač N, Žlaus D, Seme S, et al. Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data[J]. Applied Energy, 2013, 102: 803-812.
- [2] Kanters J, Wall M. The impact of urban design decisions on net zero energy solar buildings in Sweden[J]. Urban, Planning and Transport Research, 2014, 2(1): 312-332.
- [3] Lee K S, Lee J W, Lee J S. Feasibility study on the relation between housing density and solar accessibility and potential uses[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 749-758.

- [4] Mohajeri N, Assouline D, Gudmundsson A, et al. Effects of city size on the large-scale decentralised solar energy potential [J]. *Energy Procedia*, 2017, 122: 697-702.
- [5] Vulkan A, Kloog I, Dorman M, et al. Modeling the potential for PV installation in residential buildings in dense urban areas[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 169: 97-109.
- [6] Mitscher M, R  ther R. Economic performance and policies for grid-connected residential solar photovoltaic systems in Brazil[J]. *Energy Policy*, 2012, 49: 688-694.
- [7] Berry S, Whaley D. The implications of mandating photovoltaics on all new homes[J]. *Energy Procedia*, 2015, 83: 91-100.
- [8] Tam V W Y, Le K N, Zeng S X, et al. Regenerative practice of using photovoltaic solar systems for residential dwellings: An empirical study in Australia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75: 1-10.
- [9] Omar M A, Mahmoud M M. Grid connected PV- home systems in Palestine: A review on technical performance, effects and economic feasibility[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2490-2497.
- [10] 赵国永, 韩艳, 刘明华, 等. 1951-2014 年内蒙古自治区极端气温事件时空变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2017(12): 113-119.
Zhao G Y, Han Y, Liu M H. Temporal and spatial variation characteristics of extreme temperature events in Inner Mongolia Autonomous Region from 1951 to 2014 [J]. *Dryland Resources and Environment*, 2017(12): 113-119. (in Chinese)
- [11] 闫慧敏, 陈伟娜, 杨方兴, 等. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征[J]. *地理研究*, 2014, 33(1): 13-22.
Yan H M, Chen W N, Yang F X, et al. The spatial and temporal analysis of extreme climatic events in Inner Mongolia during the past 50 years[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(1): 13-22. (in Chinese)
- [12] 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[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(1): 24-29.
Zhu Q Z, Si L L, Jiang T Y. Economical and environmental analysis of building photovoltaic systems with different installation styles[J]. *Acta Energi   Solaris Sinica*, 2012, 33(1): 24-29. (in Chinese)
- [13] 李芊, 唐蓓蕾, 李贺龙. 光伏建筑外部性量化分析[J]. *土木工程与管理学报*, 2016, 33(6): 74-77, 87.
Li Q, Tang B L, Li H L. Externally quantitative analysis of BIPV[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2016, 33(6): 74-77, 87. (in Chinese)
- [14] 张希良, 汪婧. 西部地区发展并网光伏发电系统的社会成本效益分析与政策评价[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(1): 32-36.
Zhang X L, Wang J. Social cost-benefit analysis and policy assessment for grid-connected solar photovoltaics system development in [J]. *Acta Energi   Solaris Sinica*, 2007, 28(1): 32-36. (in Chinese)
- [15] 孙可. 几种类型发电公司环境成本核算的分析研究[J]. *能源工程*, 2004(3): 23-26.
Sun K. Environmental cost analysis and research of different power plants[J]. *Energy Engineering*, 2004(3): 23-26. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)