

DOI: 10.7672/sjgs2026040128

机场周边产业园区光伏安装可行性分析与效益评估*

陈喜平¹, 张毅超¹, 王肖¹, 孙慧奇¹, 王月¹, 刘子扬²

(1. 中铁七局集团西安铁路工程有限公司, 陕西 西安 710032;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 以贵州双龙航空航天配套产业园为研究对象, 采用熵权-云模型对屋顶光伏项目的安装风险进行评估, 并从空域安全、技术、经济、环境等多维度分析可行性, 同时对光伏系统的全生命周期效益进行综合评估。结果表明, 项目整体风险等级为中等风险, 空域安全风险需重点关注, 但通过优化设计可降低至可接受水平。技术可行性分析显示, 单晶硅光伏板在 25° 倾角下的发电潜力最大, 年发电量可达 $4.82 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。经济效益评估表明, 项目在第 11 年实现盈利, 25 年总盈利达 1 032 万元。环境效益显著, 25 年内可减少 CO_2 排放 93 225t。

[关键词] 光伏; 机场; 安装; 风险; 评估; 熵权-云模型

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0128-07

Feasibility Analysis and Benefit Evaluation of Photovoltaic Installation in Industrial Parks Surrounding Airports

CHEN Xiping¹, ZHANG Yichao¹, WANG Xiao¹, SUN Huiqi¹, WANG Yue¹, LIU Ziyang²

(1. China Railway Seventh Bureau Group Xi'an Railway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: This study focuses on the roof photovoltaic (PV) installation risk assessment and feasibility analysis for the Guizhou Shuanglong Aerospace Supporting Industrial Park. An entropy weight-cloud model is employed to evaluate installation risks, incorporating multiple dimensions including airspace safety, technical feasibility, economic viability, and environmental impact. A comprehensive life-cycle benefit analysis of the PV system is also conducted. The results show that the overall project risk level is moderate, with airspace safety identified as a critical concern. However, this risk can be reduced to an acceptable level through optimized system design. Technical analysis indicates that monocrystalline silicon PV panels installed at a 25° tilt angle offer the highest generation potential, yielding an annual output of approximately $4.82 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$. Economic evaluation reveals that the project achieves breakeven in year 11, with a cumulative net profit of 10.32 million CNY over 25 years. The environmental benefits are notable, with an estimated reduction of 93 225 tons of CO_2 emissions during the same period.

Keywords: photovoltaic; airport; installation; risk; assessment; entropy weight-cloud model

0 引言

产业园区作为经济发展的重要载体, 对经济做出重要贡献的同时也占据全国约 31% 的碳排放量^[1-3], 是落实节能减碳的重点领域。因此, 探索并评估分布式光伏在产业园区的开发潜力, 对于促进可持续发展、提高园区能源利用效率具有重要意义。

近年来, 许多学者进行了大量研究, 为分布式光伏在产业园区的推广应用提供了坚实支撑。姜雷等^[4]通过建立辐射传输模型, 评估了不同工业厂房光伏屋顶构造形态的发电效益, 指出相对于倾斜式安装, 同等条件下的平铺式安装能显著提高发电量; 姜斌^[5]针对既有工业厂房的屋面改造, 提出了光伏建筑一体化施工技术, 通过拆除原有钢制屋层面并直接安装专用支架与光伏组件, 实现清洁发电; Xiao 等^[6]以某工业园区分布式屋顶光伏发电项

* 陕西省重点研发计划(2020SF-373)

[作者简介] 陈喜平, 高级工程师, E-mail: 751846887@qq.com

[收稿日期] 2025-09-05

目为对象,分析了不同情况下的线损和变压器损耗变化,通过对比表明光伏并网后的变化损耗稳定,不存在额外的变压器损耗;李薇等^[7]利用区间数理论对某园区内光伏等分布式综合能源系统进行了敏感性分析和效益评估,指出合理选择光伏发电技术与天然气冷热电三联供系统结合能提高能源综合利用效率;崔乔儒等^[8]研究了大规模分布式光伏接入对工业园区配电网规划适应性的影响,通过承载力测算、约束因素分析等,提出了加强电网规划管理及运维安全等建议,确保配电网安全稳定运行。上述研究为光伏在产业园区的应用提供了技术支持。然而,机场附近产业园区因其特殊的地理位置和运营环境,光伏系统的安装可能面临一定风险。因此,深入分析机场附近产业园区光伏安装的可行性,并综合评估其效益,是实现节能减排目标、促进机场周边区域绿色发展的关键步骤。基于此,以贵阳龙洞堡机场附近的产业园区为研究对象,采用熵权-云模型对光伏项目的安装风险进行评估,从多个维度分析其可行性,并对光伏系统的全生命周期效益进行综合评估。

1 工程概况

贵州双龙航空航天配套产业园(一期)项目位于贵阳市南明区,西南侧距离贵阳龙洞堡国际机场约4.3km,如图1所示,西接中电汽车产业园,东临绕城高速,属典型机场邻近型产业园区。园区规划建设7栋厂房,采用钢筋混凝土框架结构,其中建筑屋顶总面积为45 893m²。厂房屋顶采用装配式叠合板结构,屋面坡度平缓,为光伏组件的安装提供了基础条件。园区地处北回归线以南,夏季有效光照时间较长,太阳辐射条件对光伏发电系统较为有利。但因紧邻机场净空保护区,需重点评估光伏系统可能产生的眩光及对空域安全的影响。同时,项目建设施工过程中存在机械施工、高空坠落等安全

风险,且地处喀斯特地貌区,地质条件复杂,安全管理难度较大。

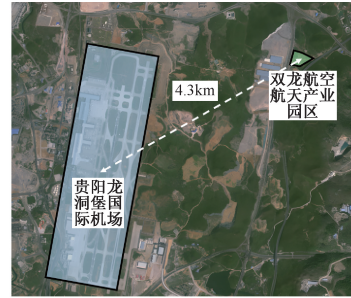


图1 产业园区平面位置

Fig. 1 Plan layout of the industrial park

2 产业园区屋顶光伏项目风险评估

2.1 风险评估指标体系构建

机场附近产业园区开展光伏项目建设面临多方面挑战,构建科学合理的风险评估指标体系是项目风险评估与可行性分析的基础。通过文献研究、专家访谈和实地调研构建了包含6项一级指标、20项二级指标的风险评估指标体系,涵盖技术、空域安全、经济、环境、施工管理及政策多个维度(见图2)。其中,空域安全风险是机场附近光伏项目特有的考量因素,该指标体系全面涵盖了贵州双龙航空航天配套产业园光伏项目可能面临的各类风险,为后续基于熵权-云模型的风险评估提供科学依据。

2.2 基于熵权-云模型的风险评估

2.2.1 基本原理

1) 熵权法

熵权法是通过信息熵理论确定风险评估指标体系中各指标的权重^[9],用于衡量系统中信息的无序程度,指标的信息熵越大,表示该指标提供的有效信息越少,其权重越小。信息熵 E_j 计算公式为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (1)$$

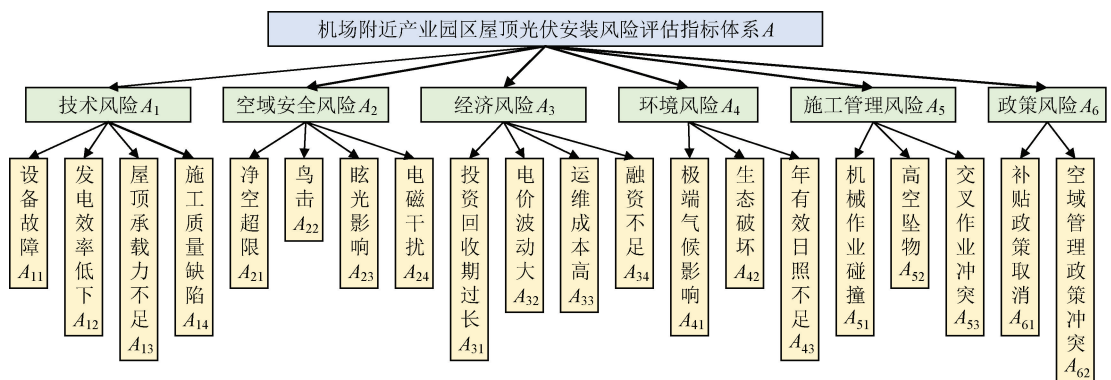


图2 机场附近产业园区屋顶光伏安装风险评估指标体系

Fig. 2 Risk evaluation index system for roof photovoltaic installation in industrial parks near airports

式中: n 为样本数; P_{ij} 为指标所占比重, 计算公式为:

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为经标准化处理后得到的数据, 规定 $p_{ij} = 0$ 时, $p_{ij} \ln(p_{ij}) = 0$ 。

根据信息熵可计算指标权重 w_j 为:

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (3)$$

2) 云模型

云模型是处理不确定性问题的数学工具^[10-12], 通过期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 描述概念的统计特性, E_x 表示定性概念在论域中的中心值, E_n 表示定性概念的模糊性与离散程度, 反映数据分布的波动范围, H_e 反映 E_n 的离散程度, 反映云滴的厚度。根据划分的风险等级, 采用二项约束法生成云模型的特征参数:

$$\begin{cases} E_x = (C_{\max} + C_{\min})/2 \\ E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6 \\ H_e = k \end{cases} \quad (4)$$

式中: $[C_{\min}, C_{\max}]$ 为风险等级的分值区间; k 为常数, 本文 k 取 0.1。正向云发生器通过特征参数生成大量云滴, 先以 E_n 为期望、 H_e 为标准差生成正态随机熵 $E'_n \sim N[E_n, H_e^2]$, 再以 E_n 为期望、 E'_n 为标准差生成云滴 $x \sim N[E_x, (E'_n)^2]$, 为了提高云模型的计算精度, 重复上述步骤生成 N 个云滴, 得到评价标准云图。再使用逆向云发生器将每个二级指标对应的具体数据转化为指标评价云 (E_x, E_n, H_e) 。

$$\begin{cases} E_{xj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{ij} \\ E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |a_{ij} - E_{xj}| \\ S_j^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_{ij} - E_{xj})^2 \\ H_{ej} = \sqrt{|S_j^2 - E_{nj}^2|} \end{cases} \quad (5)$$

结合熵权法得出指标权重计算综合评价云的特征参数:

$$\begin{cases} E_x = \sum_{j=1}^n (E_{xj} \cdot w_j) \\ E_n = \sqrt{\sum_{j=1}^n (E_{nj}^2 \cdot w_j)} \\ H_e = \sum_{j=1}^n (H_{ej} \cdot w_j) \end{cases} \quad (6)$$

利用正向云发生器得到综合评价云图, 通过与评价标准云图比较确定风险评价结果。

2.2.2 风险评估结果

根据机场周边光伏项目的风险特征, 将风险等级划分为 5 级 (I ~ V 级), 评分区间为 0~10 分, 根据式(4) 确定各等级云模型数字特征参数, 如表 1 所示。

表 1 风险等级划分与云模型参数

Table 1 Risk level classification and cloud model parameters

区间	风险等级	风险描述	(E_x, E_n, H_e)
[0,2]	I 级	低风险	(1,0.333,0.1)
(2,4]	II 级	较低风险	(3,0.333,0.1)
(4,6]	III 级	中等风险	(5,0.333,0.1)
(6,8]	IV 级	较高风险	(7,0.333,0.1)
(8,10]	V 级	高风险	(9,0.333,0.1)

根据风险等级的云模型参数绘制评价标准云图, 如图 3 所示。

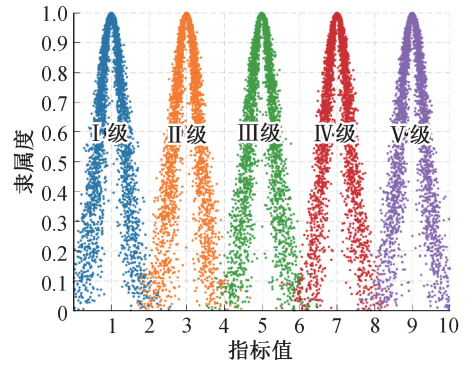


图 3 风险评价标准云图

Fig. 3 Standard cloud chart for risk evaluation

对于构建的风险评估指标体系, 邀请 6 位在光伏工程、机场安全和产业园区管理领域具有丰富经验的专家, 对贵州双龙航空航天配套产业园光伏项目的 20 项二级指标进行评分, 形成专家评分矩阵如表 2 所示。

根据专家评分矩阵, 采用熵权法计算各指标权重。首先对专家评分进行标准化处理, 然后根据式(1)~(3) 计算各指标的信息熵和权重, 如表 3 所示。

将表 3 整理的专家评分代入式(5), 通过逆向云发生器求出二级指标的指标评价云(见表 3)。然后通过式(6) 计算出综合评价云的特征参数为 $(E_x, E_n, H_e) = (5.379, 0.664, 0.281)$, 绘制云图如图 4 所示。

基于熵权-云模型的综合评估结果, 贵州双龙航空航天配套产业园屋顶光伏项目的整体风险评价处于中等风险等级。尽管总体风险等级为中等风

表 2 专家评分矩阵

Table 2 Expert scoring matrix

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6
A_{11}	6	5	6	6	5	7
A_{12}	4	5	4	5	4	5
A_{13}	3	4	4	4	3	4
A_{14}	5	4	6	5	4	6
A_{21}	6	5	6	5	5	6
A_{22}	7	6	6	7	6	7
A_{23}	8	7	8	7	7	8
A_{24}	5	4	6	5	4	6
A_{31}	6	5	6	5	5	6
A_{32}	4	4	5	4	3	5
A_{33}	6	5	6	6	5	7
A_{34}	5	4	5	5	4	6
A_{41}	8	7	8	7	8	8
A_{42}	5	5	6	5	4	6
A_{43}	5	6	7	6	5	6
A_{51}	5	4	5	5	4	5
A_{52}	4	3	4	5	4	5
A_{53}	3	4	2	4	3	4
A_{61}	4	3	4	4	3	4
A_{62}	6	5	5	6	5	6

险,仍需关注熵权法计算得出的高权重指标,特别是空域安全风险、技术风险和经济风险方面。高权重指标可能对项目实施和长期运行带来较大的不确定性,因此需采取针对性的控制措施和优化策略,以确保光伏项目顺利推进。

3 光伏安装多维可行性分析

3.1 空域安全可行性

基于熵权-云模型的风险评估结果显示,空域安

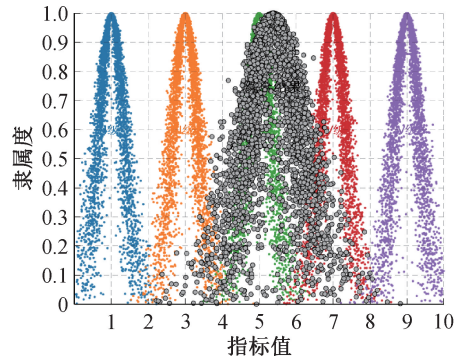


图 4 风险评估云图

Fig. 4 Risk evaluation cloud chart

全风险是机场邻近区域光伏项目的核心风险因素,结合机场周边特殊环境,本研究从净空限制、鸟击风险、眩光影响及电磁干扰方面展开空域安全可行性分析。

1) 净空限制

根据《民用机场管理条例》要求,园区屋顶光伏组件安装高度需符合机场净空保护区限高标准。经测算,若在屋顶两侧楼梯间安装光伏组件,总高度超过 30m,存在净空超限风险。优化后的方案选择楼梯间的平面区域铺设(见图 5),光伏组件最高点距屋顶平面 $\leq 2.8\text{m}$,未超出建筑原高度,且不违反净空限制,符合飞行安全要求。

2) 鸟击风险

光伏设备的建设可能影响鸟类活动,间接增加鸟击风险。鸟类与飞机相撞可能造成飞机发动机、

表 3 风险指标权重及指标评价云

Table 3 Risk indicator weights and evaluation cloud of indicators

一级指标	权重	二级指标	局部权重	全局权重	(E_x, E_n, H_c)
技术风险 A_1	0.213	设备故障 A_{11}	0.227	0.048	(5.833, 0.696, 0.286)
		发电效率低下 A_{12}	0.343	0.073	(4.500, 0.627, 0.304)
		屋顶承载力不足 A_{13}	0.201	0.043	(3.667, 0.557, 0.209)
		施工质量缺陷 A_{14}	0.229	0.049	(5.000, 0.836, 0.319)
空域安全风险 A_2	0.268	净空超限 A_{21}	0.273	0.073	(5.500, 0.627, 0.304)
		鸟击 A_{22}	0.273	0.073	(6.500, 0.627, 0.304)
		眩光影响 A_{23}	0.273	0.073	(7.500, 0.627, 0.304)
		电磁干扰 A_{24}	0.182	0.049	(5.000, 0.836, 0.319)
经济风险 A_3	0.195	投资回收期过长 A_{31}	0.374	0.073	(5.500, 0.627, 0.304)
		电价波动大 A_{32}	0.131	0.026	(4.167, 0.696, 0.286)
		运维成本高 A_{33}	0.248	0.048	(5.833, 0.696, 0.286)
		融资不足 A_{34}	0.248	0.048	(4.833, 0.696, 0.286)
环境风险 A_4	0.116	极端气候影响 A_{41}	0.366	0.042	(7.667, 0.557, 0.209)
		生态破坏 A_{42}	0.219	0.025	(5.167, 0.696, 0.286)
		年有效日照不足 A_{43}	0.415	0.048	(5.833, 0.696, 0.286)
施工管理风险 A_5	0.093	机械作业碰撞 A_{51}	0.460	0.043	(4.667, 0.557, 0.209)
		高空坠物 A_{52}	0.275	0.026	(4.167, 0.696, 0.286)
		交叉作业冲突 A_{53}	0.265	0.025	(3.333, 0.836, 0.177)
政策风险 A_6	0.116	补贴政策取消 A_{61}	0.369	0.043	(3.667, 0.557, 0.209)
		空域管理政策冲突 A_{62}	0.631	0.073	(5.500, 0.627, 0.304)

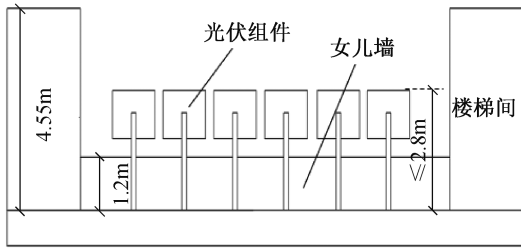


图 5 屋顶光伏组件安装

Fig. 5 Installation of roof photovoltaic modules

机翼和挡风玻璃等损坏。然而,机场附近产业园区的屋顶光伏系统在安装和运行过程中引发鸟击风险的可能性较低。Devault 等^[13]研究表明,机场安装光伏板不会增加碰撞的风险,光伏组件的设计不会吸引鸟类聚集,且其反射光谱不符合鸟类的视觉吸引特征,因此不会显著增加鸟类活动密度。

3) 眩光影响

眩光是机场附近建设光伏系统时必须重视的潜在风险。查阅相关资料可知,普通光伏板(如单晶硅、多晶硅)的反射率在 5%~10%,经过特殊的抗反射涂层处理后,反射率可进一步降低。光伏板的反射率与沥青路面相近,通常低于多数自然地形(如沙地、雪地)和混凝土表面。园区屋顶光伏系统距离机场约 4.3km,且途中存在建筑物、植被等自然遮挡,能进一步减少眩光的传递,不会对机场塔台的工作人员造成影响。

4) 电磁干扰

机场通信、导航和雷达系统对电磁波干扰极为敏感,而光伏系统中的逆变器是电磁干扰的主要来源之一。依据 GB 6364—2013《航空无线电导航台(站)电磁环境要求》,园区的光伏设备距机场最近的导航设备距离均>500m,符合国家对超短波定向台电磁环境的要求,不会产生电磁干扰。

综上所述,尽管机场附近产业园区进行光伏安装可能面临净空限制、鸟击、眩光和电磁干扰等潜在风险,但通过合理的规划设计和技术手段,这些风险均可有效控制并降低到可接受的水平。

3.2 技术可行性

熵权-云模型的风险评估结果显示,技术风险是光伏项目的核心风险因素之一。针对技术风险,本研究从光伏组件选型与安装、阵列布局设计方面展开技术可行性分析,确保系统高效稳定运行。

1) 选型与安装

对于光伏面板的材料选择,单晶硅和多晶硅因其较高的转换效率被选为屋顶分布式光伏系统的主要材料(见表 5)。在成本和维护方面,由于调节

型光伏板的高成本和复杂性,选择固定式安装,光伏板安装方位统一朝向正南,以求太阳辐射吸收量最大化,后续探讨光伏板的合理安装倾角。

表 5 各类光伏面板性能参数

Table 5 Performance parameters of various photovoltaic panels

类别	电池类型	特点	转换效率/%
硅系	单晶硅	成本高	16~21
	多晶硅	寿命较短	12~15
	非晶硅薄膜	成本低	5~11
化合物	碲化镉薄膜	成本较低	7~16
	铜钢镱硒薄膜	成本较高	12~16

2) 阵列布局设计

光伏板的安装倾角对能量转换效率具有重要影响。为了优化发电量,必须选择最合适的倾角。通过 Meteororm 8.0 得到产业园区所在位置的气象数据,并使用 PVsyst 软件分析不同倾角在夏季(4月—9月)、冬季(10月—次年3月)和全年的辐射总量,如图 6 所示。

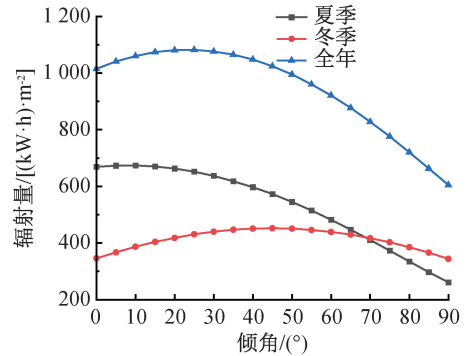


图 6 不同倾角下光伏板的辐射量

Fig. 6 Radiation amount of photovoltaic panels at different tilt angles

由图 6 可知,光伏板在不同倾角下的辐射量存在明显差异,光伏板倾角固定在 10°、45° 和 25° 时分别为夏季、冬季和全年辐射量最大值。

为避免阴影遮挡导致的发电效率损失,通过式(7)计算不同倾角下的最小阵列间距:

$$D = L \cdot \cos\beta + L \cdot \sin\beta \cdot \frac{0.707\tan\varphi + 0.433}{0.707 - 0.433 \cdot 8\tan\varphi} \quad (7)$$

式中: β 为阵列倾角,分别取 10°、45° 和 25°; φ 为当地纬度,为 26°56'; L 为阵列倾斜面长度,取 1m; D 为前后排阵列的间距(m)。

计算可得, β 为 10°、25° 和 45° 时, D 分别为 1.25、1.60 和 1.87m。园区建筑屋顶总面积为 45 893m²,确定好光伏安装各项参数后,扣除每栋楼两侧楼梯间面积和光伏组件安装空隙等面积,预计

采用约 70% 的屋顶面积用于光伏板安装。通过计算,屋顶光伏可用总面积为 32 125.1 m²。

4 全生命周期效益评估

4.1 发电潜力与经济效益

查阅资料可知,光伏发电的潜力计算公式为:

$$E = I \cdot e \cdot A_{\text{光}} \cdot \lambda \quad (8)$$

式中: E 为屋顶光伏的年潜在发电量(kW·h); I 为每平方光伏板的年接收太阳辐射量(kW·h); e 为所选光伏板的转换效率; $A_{\text{光}}$ 为总的可用屋顶上的光伏面积; λ 为光伏系统的运行效率,一般为 0.75~0.8,本文取 0.75。

6 种安装方式下,园区第 1 年最大潜力下的发电量如图 7 所示,误差线上下界分别对应表 5 中单晶硅(16%~21%)与多晶硅(12%~15%)转换效率极值,代入式(8)计算得出的发电量波动区间,柱状图高度表示采用光伏组件转换效率平均值(单晶硅 18.5%,多晶硅 13.5%)计算的发电量。由图 7 可知,所有方案第 1 年的发电量为 $3.33 \times 10^6 \sim 4.82 \times 10^6$ kW·h,其中倾角为 25° 的单晶硅光伏板发电量最大,为 4.82×10^6 kW·h,而倾角为 45° 的多晶硅光伏板发电量最小,为 3.33×10^6 kW·h。

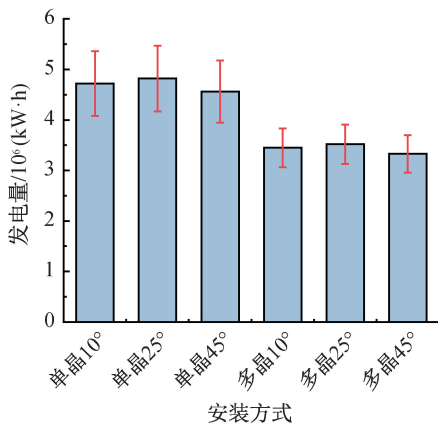


图 7 不同安装方式下光伏首年发电量

Fig. 7 First-year electricity generation of photovoltaic panels under different installation methods

本文采用净现值对光伏发电的经济效益进行评估, NPV 表示分布式光伏系统从开始投入使用到指定服役年限内净现金流量与初始投资之间的差异,如式(9)所示,当 NPV 为正值时,则表明该项目盈利。

$$NPV_i = \sum_{n=1}^i \frac{R_n - C_n}{(1+r)^n} \quad (9)$$

式中: i 表示光伏使用年份,假定光伏使用 25 年; R_n 为分布式光伏系统第 n 年收益; C_n 为分布式光伏系统第 n 年成本; r 为折现率,取 6%,其中屋顶分布式

光伏系统成本包括光伏电池、逆变器等组件的安装等成本为 3.54 元/W,每年的运行与维护成本为 0.035 元/W,每块光伏板的额定功率为 250W,光伏发电效率的年衰减率为 0.5%,电费单价为 0.5 元/(kW·h)。对倾角 25° 的单晶硅光伏板发电进行经济效益评估,如图 8 所示。

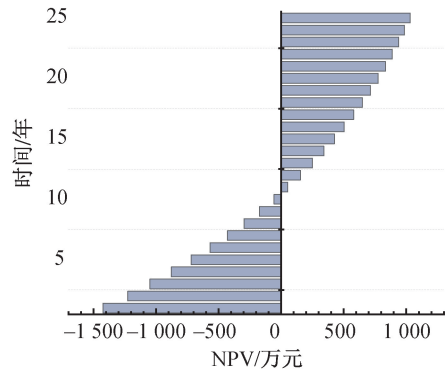


图 8 屋顶光伏发电逐年的净现值

Fig. 8 Net present value of roof photovoltaic power generation over the years

由图 8 可知,倾角 25° 的单晶硅光伏板的累计净现值从 11 年开始转正,表示从这一年开始产业园区光伏屋顶开始产生经济效益,在第 25 年时盈利 1 032 万元。

4.2 环境与社会效益

由 2024 年度《中国电力行业年度发展报告》可知,我国火电发电标准煤耗 0.3kg/(kW·h),每生产 1kW·h 电,就会产生 821g CO₂, 0.038g 烟尘, 0.187g SO₂ 和 0.195g NO_x。当产业园区屋顶安装倾角为 25° 的单晶硅光伏板进行光伏发电时,每年发电量为 4.82×10^6 kW·h。园区使用分布式屋顶光伏的 25 年内,在等效替代火力发电的条件下,平均每年的发电量相当于节约标准煤为 1 362t,能够减少 CO₂ 排放量为 3 729t,同时减少烟尘、SO₂、NO_x 排放量分别为 173,849,886kg。

5 结语

1) 基于熵权-云模型的风险评估结果表明,贵州双龙航空航天配套产业园屋顶光伏项目整体风险等级为中等风险,需重点关注空域安全风险。通过选择屋顶两侧楼梯间之间的平面区域安装和使用低反射率光伏板等措施,可将空域安全风险降至可接受水平。

2) 全生命周期效益分析显示,单晶硅光伏板在 25° 倾角下的发电潜力最大,年发电量可达 4.82×10^6 kW·h,累计净现值于第 11 年转正,25 年总盈利达 1 032 万元。此外,光伏发电在降低碳排放、节约

标准煤等方面具有显著的环境效益,25年内可减少CO₂排放93 225t,环境效益显著。

参考文献:

- [1] 廖茂林,付华. 碳中和目标下清洁能源消纳议题:影响机理、国际经验与发展路径[J]. 东岳论丛,2025,46(1):59-71.
LIAO M L, FU H. Clean energy consumption under the goal of carbon neutrality: impact mechanism, international experience and development path[J]. Dongyue tribune, 2025, 46(1): 59-71.
- [2] 叶小宁,王彩霞,时智勇,等. 国外高比例新能源消纳分析及对中国新能源可持续发展的建议[J]. 中国电力,2025,58(6):137-144.
YE X N, WANG C X, SHI Z Y, et al. Analysis of high proportion of new energy consumption abroad and suggestions for sustainable development of new energy in China[J]. Electric power, 2025, 58(6): 137-144.
- [3] 郭扬,吕一铮,严坤,等. 中国工业园区低碳发展路径研究[J]. 中国环境管理,2021,13(1):49-58.
GUO Y, LÜ Y Z, YAN K, et al. Low-carbon development pathways of industrial parks in China[J]. Chinese journal of environmental management, 2021, 13(1): 49-58.
- [4] 姜雷,胡忆南. 工业厂房光伏屋顶构造形态对发电效益的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版),2022,36(2):183-188,195.
JIANG L, HU Y N. Influence of photovoltaic roof structural forms of industrial plants on power generation efficiency[J]. Journal of University of Jinan (science and technology), 2022, 36(2): 183-188, 195.
- [5] 姜斌. 基于厂房屋面改造的光伏建筑一体化施工技术[J]. 施工技术,2019,48(3):49-51.
JIANG B. Construction technology of building-integrated photovoltaics based on industrial plant roof renovation[J]. Construction technology, 2019, 48(3): 49-51.
- [6] XIAO Y, LI K, HUANG H Q, et al. Energy loss analysis of distributed rooftop photovoltaics in industrial parks[J]. Energy engineering, 2023, 120(2): 511-527.
- [7] 李薇,包哲,杨涵晟,等. 基于区间数理论的园区分布式综合能源系统效益及影响因素分析[J]. 太阳能学报,2020,41(2):339-346.
LI W, BAO Z, YANG H S, et al. Cost-benefit and influencing factors analysis of distributed comprehensive energy system based on interval number theory[J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(2): 339-346.
- [8] 崔乔儒,鄢峻雯,王定,等. 基于大规模分布式光伏接入的工业园区配电网规划适应性研究[J]. 电气技术与经济,2023(9):77-79,82.
CUI Q R, YAN J W, WANG D, et al. Research on adaptability of distribution network planning in industrial park based on large-scale distributed photovoltaic access[J]. Electrical equipment and economy, 2023(9): 77-79, 82.
- [9] 刘威,董婉琪. 基于AHP-熵权法组合赋权的排水管网风险评估方法研究[J]. 安全与环境学报,2021,21(3):949-956.
LIU W, DONG W Q. Risk assessment on the drainage pipe network based on the AHP-entropy weight method[J]. Journal of safety and environment, 2021, 21(3): 949-956.
- [10] 胡长明,刘林,王晓华,等. 基于模糊熵-云理论的二维深基坑施工风险评价[J]. 安全与环境学报,2021,21(2):521-528.
HU C M, LIU L, WANG X H, et al. Risk assessment for the 2D deep foundation pit based on the fuzzy entropy-cloud theory[J]. Journal of safety and environment, 2021, 21(2): 521-528.
- [11] 王强,章伟康,袁崇洋,等. 基于改进云模型的公路隧道运营安全评估研究[J]. 浙江工业大学学报,2024,52(6):674-682.
WANG Q, ZHANG W K, YUAN D Y, et al. Comprehensive evaluation of highway tunnel operation safety based on improved cloud model[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2024, 52(6): 674-682.
- [12] 刘振江,王正,曹玉洁,等. 基于改进CRITIC-云模型法的机场鸟击风险评价[J]. 生态环境学报,2025,34(1):135-144.
LIU Z J, WANG Z, CAO Y J, et al. Risk assessment of bird strike at airport based on improved CRITIC-cloud model[J]. Ecology and environmental sciences, 2025, 34(1): 135-144.
- [13] DEVAULT T L, SEAMANS T W, SCHMIDT J A, et al. Bird use of solar photovoltaic installations at US airports: implications for aviation safety[J]. Landscape and urban planning, 2014, 122: 122-1.