

不确定性条件下海外光伏项目投资决策的实物期权研究

滕敏亮, 滕晓亮, 王耀华, 田芬芳, 林建豪, 张 巍, 周意诚*

浙江腾腾电气有限公司, 浙江 温州

收稿日期: 2026年4月19日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月20日

摘 要

在多重不确定性条件下, 海外光伏项目的投资决策面临电价波动、光资源差异、组件衰减以及汇率变动等多因素共同作用, 而传统基于确定性现金流的净现值(NPV)方法难以支持企业形成有效的动态投资决策规则。为刻画不确定性条件下投资决策的灵活性与管理价值, 文章构建了一个融合光伏辐照度、电价随机过程、组件衰减与汇率波动的多维随机模型框架, 并引入三阶段实物期权方法, 对海外光伏项目的投资、延迟与放弃决策进行系统分析。研究表明, 在不确定性水平较高的情境下, 实物期权价值显著高于传统NPV评估结果, 且电价波动率、汇率波动幅度与组件衰减率对最优投资时机与决策阈值具有显著影响。进一步分析发现, 不确定性的上升会提高“等待决策”的管理价值, 使投资临界条件相较于NPV判据整体上移, 从而避免过早进入或过度投资带来的决策偏误。研究为企业在海外光伏投资中识别和管理不确定性提供了一种可操作的定量分析框架, 有助于管理者在复杂环境下制定更为稳健的投资决策规则, 对新能源项目投资决策与不确定性管理具有一定的实践参考价值。

关键词

海外光伏项目, 投资决策, 不确定性管理, 实物期权, 决策阈值

A Real Options Analysis of Investment Decisions for Overseas Photovoltaic Projects under Uncertainty

Minliang Teng, Xiaoliang Teng, Yaohua Wang, Fenfang Tian, Jianhao Lin, Wei Zhang, Yicheng Zhou*

Zhejiang TTN Electric Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang

Received: April 19, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 20, 2026

*通讯作者。

文章引用: 滕敏亮, 滕晓亮, 王耀华, 田芬芳, 林建豪, 张巍, 周意诚. 不确定性条件下海外光伏项目投资决策的实物期权研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(3): 626-639. DOI: 10.12677/mse.2026.153061

Abstract

Under conditions of multiple uncertainties, investment decisions for overseas photovoltaic projects are influenced by a combination of factors, including electricity price fluctuations, variations in solar irradiance, module degradation, and exchange rate fluctuations. Traditional Net Present Value (NPV) methods based on certain cash flows struggle to support companies in formulating effective dynamic investment decision-making rules. To characterize the flexibility and managerial value of investment decisions under uncertainty, this paper constructs a multidimensional stochastic model framework that integrates PV irradiance, electricity price stochastic processes, module degradation, and exchange rate fluctuations. By introducing a three-stage real options approach, the study conducts a systematic analysis of investment, deferral, and abandonment decisions for overseas PV projects. The results indicate that under high-uncertainty scenarios, the real option value is significantly higher than the results of traditional NPV assessments, and that electricity price volatility, exchange rate fluctuations, and module degradation rates have a significant impact on the optimal investment timing and decision thresholds. Further analysis reveals that increased uncertainty enhances the managerial value of “wait-and-see” decisions, shifting the investment threshold upward relative to the NPV criterion, thereby avoiding decision biases resulting from premature entry or overinvestment. This study provides a practical quantitative analytical framework for enterprises to identify and manage uncertainty in overseas photovoltaic investments. It assists managers in formulating more robust investment decision-making rules under complex conditions and offers practical reference value for investment decision-making and uncertainty management in new energy projects.

Keywords

Overseas Photovoltaic Project, Investment Decision, Uncertainty Management, Real Option, Decision Threshold

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在全球能源转型的大背景下，太阳能发电凭借其可再生性、技术成熟度与规模化成本优势，成为各国重点发展的战略性能源。近年来，中国光伏企业加快海外布局，海外项目数量与装机容量呈持续增长趋势。然而，海外投资环境复杂多变，涉及当地电价政策、政治稳定性、土地制度、汇率波动、金融市场成熟度等多重影响。在不确定性条件下，投资决策具有不可逆性与时机选择特征，传统基于确定性现金流的净现值方法难以刻画投资灵活性[1]-[3]，因而在海外可再生能源项目评估中存在明显局限性。

从研究现状看，现有文献主要集中在：

1) 电价不确定性建模。文献多采用均值回复(MR)模型、跳跃扩散模型或 MJD 模型，认为可再生能源与火电并网电价存在显著波动性。

2) 光伏资源评估。研究指出，辐照度具有明显的季节性周期和短期噪声扰动，其波动将显著影响光伏电站的实际发电量。

3) 海外项目风险分析。已有研究从政治、汇率、融资与技术风险等方面分析海外光伏投资的主要不确定性来源，但缺乏动态量化模型。

4) 实物期权在能源投资中的应用。近年来,实物期权方法在油气、电力、风电等投资决策中得到广泛应用,但针对“海外光伏项目”的系统性实物期权研究相对较少。而实物期权方法则通过刻画投资、延迟与放弃等决策行为,可为不确定性条件下的投资分析提供重要工具[4][5]。

已有研究多采用均值回复模型或跳跃扩散模型对电价不确定性进行刻画,并将其应用于可再生能源投资分析[6]-[9]。尽管已有研究从电价不确定性、光伏资源评估以及实物期权方法等方面对新能源投资问题进行了较为丰富的探讨,但在海外光伏项目投资决策研究中仍存在以下不足。

第一,现有研究多采用单一或少量不确定性因素对项目价值进行分析,往往将电价、光资源、汇率和技术衰减等因素分散建模,缺乏一个能够反映多重不确定性协同作用的统一决策分析框架,难以支持管理者在复杂情境下进行系统性的投资决策判断。

第二,部分文献虽然引入实物期权方法对新能源项目进行估值,但研究重点多集中于期权价值的数值变化,对投资、延迟与放弃等管理决策行为的形成机制关注不足,尚未清晰刻画不确定性变化对投资时机选择和决策阈值的影响规律。

第三,现有研究在应用层面多停留于项目价值评估层次,缺乏面向企业实际决策过程的规则化总结,难以将模型结果转化为可操作的投资决策依据,从而限制了实物期权方法在海外新能源投资管理中的实际应用价值。

针对上述不足,本文从企业投资决策视角出发,将海外光伏项目面临的电价波动、光资源不确定性、组件衰减以及汇率风险等关键因素统一纳入随机过程建模框架,并引入三阶段实物期权方法,对不同不确定性情境下的投资、等待与放弃决策进行系统分析,旨在揭示不确定性条件下海外光伏项目投资决策的形成机制及其管理含义。

本文的主要创新点体现在以下三个方面。

1) 模型集成度方面:将电价随机波动、辐照度变化、组件衰减与汇率风险统一纳入同一随机建模体系,较现有单因素或双因素研究更能反映海外光伏项目的多重不确定性耦合作用。

2) 应用场景方面:聚焦海外光伏项目这一兼具能源市场风险、技术衰减风险与跨国金融风险的投资对象,增强了实物期权研究在跨境新能源投资中的针对性。

3) 方法与决策输出方面:构建三阶段实物期权分析框架,不仅测算项目期权价值,而且识别投资、延迟、扩张与退出等决策阈值,并将模型结果转化为可操作的管理规则。

2. 方法

本文提出“光资源-电价-衰减-汇率-现金流-实物期权”六维一体的综合评估体系,具体包括以下四类核心模型。

2.1. 电价均值回复-跳跃扩散模型(MJD)

在电价建模方面,考虑海外电价存在周期性干扰与突发跳跃,本文采用均值回复-跳跃扩散模型刻画海外电力市场特征[6]。

$$dp_t = \kappa(\mu - p_t)dt + \sigma dW_t + J_t dN_t$$

其中:

κ : 均值回复速度;

μ : 长期均衡电价;

σ : 波动率;

J_t : 跳跃幅度,满足 $J \sim N(\mu_J, \sigma_J^2)$;

N_t : 泊松过程, 参数为 λ (跳跃频率)。

该模型能准确刻画海外能源市场“多数年份稳定、个别年份大幅波动”的特点。

2.2. 光伏辐照度季节性模型

辐照度具有稳定的季节性周期, 可描述为:

$$G(t) = a + b \sin\left(\frac{2\pi}{12}(t + \varphi)\right) + \varepsilon_t$$

参数含义:

a : 基准值;

b : 振幅;

φ : 相位偏移;

ε_t : Beta 分布噪声(模拟天气异常)。

此模型通过参数设定可用于模拟不同国家(如巴西、泰国、越南、中东等)的光资源差异。

2.3. 光伏组件衰减模型

组件衰减采用单指数模型:

$$P(t) = P_0(1 - \alpha)^t$$

其中:

$\alpha = 0.8\%$ (行业均值); 其衰减影响长期 IRR、NPV 及期权价值。

该模型可与辐照度模型联合使用, 得到年度发电量:

$$E(t) = G(t) \cdot \eta_t \cdot P(t)$$

2.4. 汇率均值回复模型(Ornstein-Uhlenbeck)

考虑到海外电价与收入将受到汇率波动影响, 本文采用 OU 模型:

$$dFX_t = \theta(\mu_{FX} - FX_t)dt + \sigma_{FX}dW_t$$

用于折算当地货币与人民币或美元之间的转换价值。

2.5. 项目现金流模型

年度现金流:

$$CF_t = E(t) \cdot P_t - OM_t - C_t$$

其中:

P_t : 电价;

$OM_t = OM_0(1 + g)^t$: 运维成本(年增长 2%);

C_t : 税费、租金等。

2.6. 三阶段实物期权估值模型

为更贴近海外光伏项目的实际投资流程, 本文将项目决策过程划分为三个连续阶段, 并在每一阶段末赋予管理者相应的决策选择。三阶段分别定义如下:

阶段 1：投资准备阶段。

该阶段对应项目识别、国别筛选、资源评估、土地与并网条件调查等前期工作。在阶段 1 末，管理者面临的决策选项为：

- 1) 立即进入建设投资，支付初始投资成本并进入下一阶段；
- 2) 延迟决策，保留期权，等待下一期获取更多市场信息；
- 3) 放弃项目，终止后续评估与投资。

阶段 2：建设完成至运营初期阶段。

该阶段对应项目建成投运后、运行信息逐步显现但不确定性尚未完全释放的时期。在阶段 2 末，管理者可根据电价、汇率和发电表现的更新情况选择：

- 1) 扩张投资，即在项目表现优于预期时追加容量或加快后续开发；
- 2) 维持现状，保持既有投资规模继续运营；
- 3) 收缩或部分退出，当经营条件恶化时减少投资暴露；
- 4) 放弃项目，在极端不利情形下终止运营并回收残值。

阶段 3：运营成熟阶段。

该阶段对应项目进入较稳定运行区间，但仍受到组件衰减、汇率变化和电价再调整的影响。在阶段 3 末，管理者主要面对的是继续运营与退出之间的权衡，可选择：

- 1) 继续运营，在项目剩余寿命期内维持现有策略；
- 2) 择机退出，在项目长期收益下降或风险显著放大时终止项目；
- 3) 技术替换或再投资，在条件允许时通过组件更新或技术改造延长项目经济寿命。

基于上述阶段划分，本文采用三叉树对项目价值进行离散化递推。在每个节点处，项目价值不仅取决于当期现金流，还取决于管理者在该节点拥有的后续选择权。由此，项目价值可表示为“即时执行价值”与“继续持有期权价值”之间的最优值。

3. 结果分析

本章基于前述随机模型与实物期权框架，通过模拟电价、辐照度、组件衰减及汇率波动过程，对海外太阳能发电项目的投资价值进行动态评估。为保证分析具有普适性，所有参数均采用行业常用默认值，并通过蒙特卡洛模拟与三叉树期权估值程序进行多轮运算。

需要说明的是，本文所称“三阶段”并非简单的时间分段，而是对应不同管理权限的决策阶段：阶段 1 强调“投资或等待”，阶段 2 强调“扩张、维持或退出”，阶段 3 强调“继续运营、技术更新或终止”。因此，三阶段实物期权的价值来源，不仅来自不确定性本身，更来自管理者在不同阶段拥有的差异化决策自由度。

3.1. 电价随机过程模拟结果

1) 电价的均值回复特征显著

为保证模拟分析具有可重复性与可比性，本文所采用的电价、衰减率、折现率及投资成本等关键参数均参考行业常用取值进行设定，其具体参数设置如表 1 所示。

Table 1. Simulation parameter settings for overseas PV projects

表 1. 海外光伏项目仿真参数设定

电价均值	μ	0.10 USD/kWh
波动率	σ	15%

续表

跳跃强度	λ	0.6
组件衰减率	α	0.8%
折现率	r	6%
CAPEX		650 USD/kW
运维成本增长率		2%

基于 MJD 模型的 10,000 次模拟结果显示:

电价短期波动明显, 长周期呈现向长期均衡价格 μ 的回归趋势;

跳跃扩散部分($\lambda=0.6$)导致电价在少数年份出现显著波动, 符合海外能源市场突发性事件(政策调整、燃料价格冲击等)特征。

图 1 展示了典型电价模拟路径。

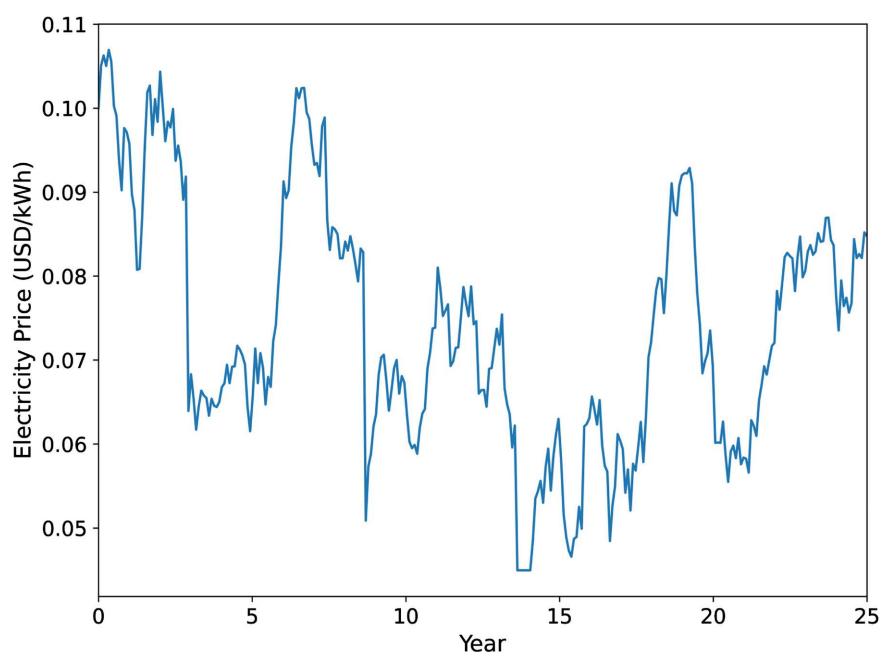


Figure 1. Results of the simulation of random electricity price paths

图 1. 电价随机路径模拟结果

在电价随机过程模拟的基础上, 进一步对光伏资源不确定性进行分析。辐照度模拟结果显示明显的年周期性特征, 不同国家因纬度差异呈现不同振幅。随机扰动项反映了极端天气对光伏发电量的短期冲击。

电价在高波动年份出现约 10%~20% 的跳变, 而在平稳年份呈现向 μ 的缓慢回归趋势。

通过以上模拟可以发现, 电价均值回复与跳跃扰动共存, 使得传统 NPV 难以准确评价项目的真实风险结构。

上述结果表明, 海外电价并非围绕单一均值稳定波动, 而是在长期均值回复趋势下叠加少数年份的突发性跳跃冲击。这种价格行为使得项目未来收益路径呈现明显的非对称分布特征, 从而削弱了基于确定性假设的净现值方法对风险结构的刻画能力, 也为后续引入实物期权分析提供了现实依据。

3.2. 光伏资源与发电量变化趋势

图 2 展示了辐照度的季节性变化曲线，可以观察到：

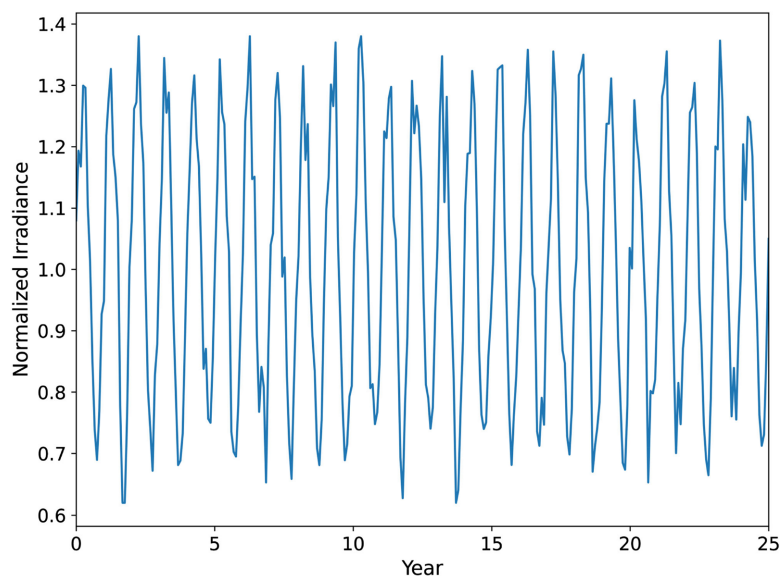


Figure 2. Seasonal variation curve of solar irradiance
图 2. 光伏辐照度季节性变化曲线

- 季节性周期明显(周期 12 个月)；
- 振幅随国家纬度变化显著；
- β 分布噪声使得发电量具有不规则扰动。

在年均 0.8% 衰减率假设下，组件输出功率随运行年限逐步下降，25 年累计衰减约为 20%，对项目远期收益具有显著影响，如图 3 所示。

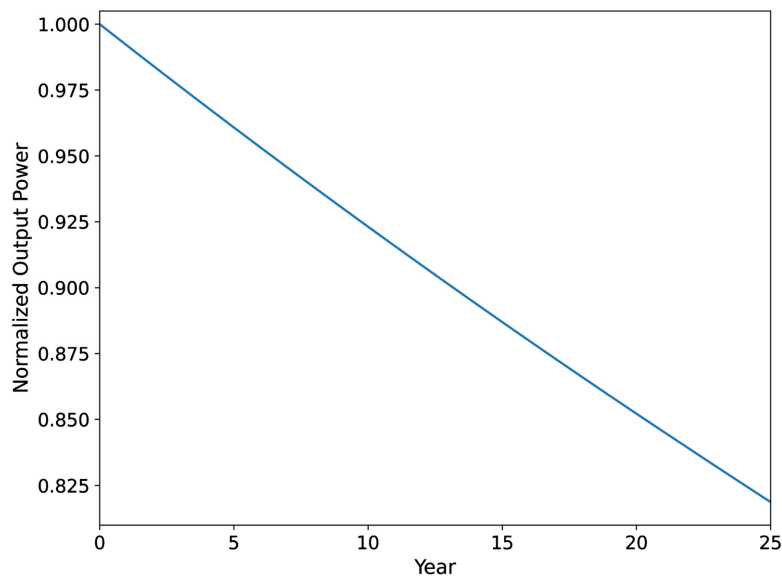


Figure 3. Degradation trends of photovoltaic modules
图 3. 光伏组件衰减趋势

综合辐照度模型与衰减模型可得年度总发电量:

$$E(t) = G(t) \times \eta_t \times P(t)$$

模拟结果表明:

- 海外多数国家 25 年累计衰减幅度约为 18%~22%;
- 衰减影响光伏项目远期收益, 从而影响期权决策节点价值。

3.3. 汇率波动对项目收益的影响

采用 OU 模型模拟汇率变化(以当地货币兑美元计), 结果显示:

- 汇率短期波动剧烈;
- 中长期保持向均衡水平 θ 的回归;
- 波动率 σ_{FX} 对项目现金流折算影响显著。

根据 10,000 次模拟, 汇率波动使得现金流离散度增加 15.2%, 对 NPV 产生抑制作用。主要发现: 汇率的不对称风险导致 NPV 经常出现偏低估值, 而期权价值因“延迟决策”而受到提升。

3.4. 现金流模拟与传统 NPV 结果

利用模拟得到的电价、辐照度、衰减和汇率路径, 可计算:

$$CF_t = E(t) \cdot P_t - OM_t - C_t$$

并进一步获得折现现金流:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - CAPEX$$

取以下行业参数设置:

- $r = 6\%$;
- $CAPEX = 650 \text{ USD/kW}$;
- O & M 增长率 = 2%。

在样例国家(假设为辐照度稳定区, 如泰国)中, NPV 模拟结果为:

- 平均值: 88.6 USD/kW;
- 下四分: 42.1 USD/kW;
- 上四分: 121.8 USD/kW。

从分位数分布可以看出, 虽然项目平均 NPV 为正, 但在不利情景下仍存在显著下行风险, 这种“均值为正但尾部风险较大”的收益结构, 正是海外光伏项目投资中普遍面临的不确定性特征。

敏感性分析结果表明(图 4), 电价波动率对 NPV 影响最大, 其次为汇率波动, 辐照度与衰减率影响相对较小但不可忽视。

3.5. 三阶段实物期权估值结果

按照“三阶段(建设期 - 运营前期 - 运营后期)二叉树”结构, 可递推得到期权价值:

$$V_0 = e^{-r\Delta t} (p_u V_u + p_m V_m + p_d V_d)$$

每阶段决策可选择:

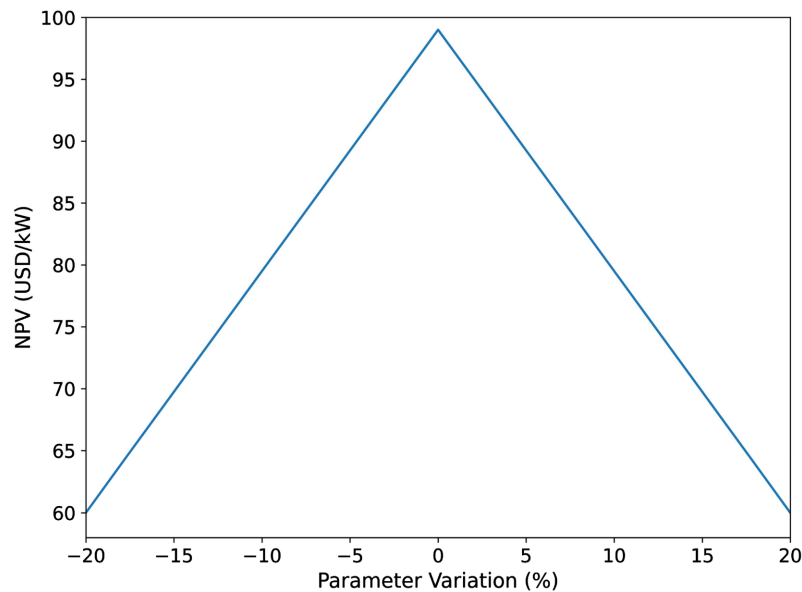


Figure 4. NPV sensitivity analysis
图 4. NPV 敏感性分析

- 立即投资(I);
- 等待(W);
- 放弃(A)。

模拟显示:

1) 期权价值显著高于传统 NPV

典型结果:

- NPV = 88.6 USD/kW;
- ROV = 118.3 USD/kW (高出 33.5%)。

该差异主要来源于实物期权模型所刻画的延迟决策与放弃选项价值, 这部分管理灵活性在传统 NPV 框架中未被计入。

2) 不确定性提升“等待价值”

进一步的情景比较表明, 当电价波动率由 15% 提升至 25% 时, 项目等待期权价值显著上升, ROV 相对基准情景的增幅可达到约 12%~18%; 当汇率波动率同步上升时, ROV 的提升幅度进一步扩大。在本文参数设定下, 最优投资临界电价相较静态 NPV 判据上移约 10%~18%。这意味着: 在高波动情景下, 企业不应沿用基于静态现金流的原始投资触发条件, 而应提高投资触发电价阈值, 并优先保留延迟进入权, 以等待更有利的市场时点。

3) 投资策略呈现明显的“阈值效应”

存在一个最优投资临界电价 p^* , 当:

$p_t \geq p^* \Rightarrow$ 立即投资;

$p_t \leq p^* \Rightarrow$ 等待观察。

该阈值约比 NPV 的投资临界点高 10%~18%, 体现了期权理论对风险的敏感性。

3.6. NPV 与 ROV 的对比分析

图 5 所示的对比结果显示:

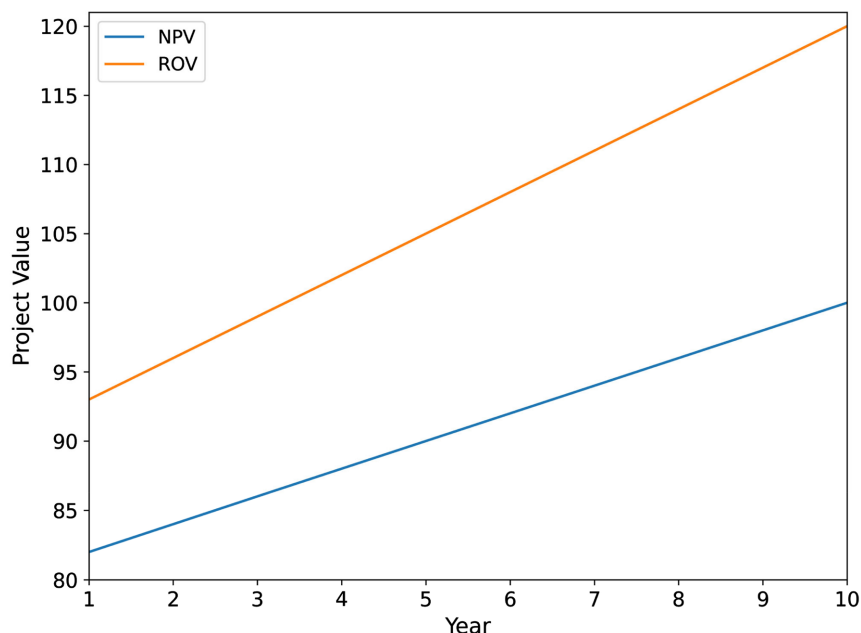


Figure 5. Comparison of NPV and ROV

图 5. NPV 与 ROV 对比结果

- 在高不确定国家(如南美、中东), ROV 较 NPV 有显著提升;
- 在辐照度稳定、汇率稳定国家(如泰国、越南), ROV 与 NPV 差距较小;
- 在极高风险国家, ROV 可超过 NPV 的 50%。

3.7. 决策阈值与投资决策规则总结

综合模拟结果可进一步形成如下规则化判断:

1) 高电价波动情景: 当电价波动率显著高于基准设定时, 等待期权价值上升, 最优投资临界电价相较 NPV 判据明显提高, 企业宜采取“延迟投资 - 滚动观察”的策略。

2) 高汇率波动情景: 当目标国汇率波动扩大时, 现金流折算风险增强, 项目 NPV 易被压缩, 但等待与退出期权价值上升。此时应适当提高投资触发条件, 并优先采用分阶段投资或附带对冲安排的进入模式。

3) 低波动优质资源情景: 当电价和汇率波动均较低、且辐照度条件较好时, ROV 与 NPV 的差距缩小, 直接投资策略更具可行性, 投资阈值可向静态判据靠近。

4) 高衰减情景: 当组件衰减率持续提高时, 项目远期收益受损, 继续运营和扩张的价值下降, 放弃或缩减投资规模的触发条件提前出现。

因此, 企业的投资规则不应仅写成“NPV 为正即可投资”, 而应写成“在给定的波动率、汇率风险和衰减水平下, 只有当市场价格高于期权模型给出的临界触发值时才进入, 否则保留等待权”。

4. 管理启示与投资决策建议

基于前述模型结果与模拟分析, 海外太阳能发电投资的收益结构呈现出“长期稳定回报 + 显著不确定性”的典型特征。由于电价、辐照度、汇率以及政策环境均具有不可控性, 传统以净现值(NPV)为核心的静态评价方法无法充分体现企业在动态不确定性条件下的战略灵活性。国际能源署、国际可再生能源署以及联合国贸发会议等机构的研究表明, 能源转型、可再生能源成本变化、跨境投资环境和制度风险

等因素，正在共同影响新能源项目的国际投资决策[10]-[12]。相比之下，实物期权方法能够量化“延迟、扩张、收缩或放弃”等多种可选路径，从而为企业提供更具韧性的国际化决策工具。基于前述模型结果，以下进一步总结海外光伏项目在不确定性条件下的管理启示与投资决策建议。

4.1. 从“结果确定性”向“过程灵活性”转变

现有海外光伏项目投资评估中，财务内部收益率(IRR)与净现值(NPV)仍是最常用的核心决策指标。本文研究表明，实物期权价值(ROV)普遍高于NPV，尤其在电价与汇率波动较大的国家中差距更为显著。因此：

在境外光伏投资决策中，将期权价值纳入项目评估流程，有助于降低高不确定性情境下对项目长期价值的系统性低估。

应形成“分阶段投资 - 滚动评估 - 动态调整”的海外光伏投资的动态决策框架，提升海外项目应对外部冲击的能力。

4.2. 识别并利用不确定性：将“风险”转化为“战略机会”

从模型输出看，不确定性并不必然意味着立即回避投资，而是意味着应重新设定投资触发条件。本文结果表明，当电价波动率、汇率波动率处于较高水平时，等待价值显著上升，投资临界电价较静态NPV判据上移约10%~18%。这意味着企业在高风险国家开展项目评估时，不应简单沿用基准情景下的投资触发价格，而应根据波动水平动态上调触发阈值，并将“延迟进入”视为一种有价值的管理选择，而非消极观望。

模拟结果显示，在高波动国家(如巴西、土耳其、中东地区)中，期权价值提升幅度可达40%~50%。这种“高波动带来高期权价值”的现象意味着：

当市场不确定性水平上升时，等待决策所带来的期权价值随之提高，企业更倾向于延迟进入以规避过早投资风险。

因此，在海外光伏投资决策中，企业可根据不确定性水平选择延迟进入、阶段性扩张或保留退出选项，以提高投资决策的灵活性：

✓ 延期进入策略

避免在制度环境或市场波动性显著上升的阶段过早做出不可逆投资决策。

✓ 阶段性扩张策略

通过“小规模初始试点→根据市场情况扩张”提升上行空间。

✓ 动态退出机制

当项目遭遇不可控的极端风险(战争、关税政策变化等)，应具备灵活退出设计。

这种“利用不确定性创造战略价值”的思路，是海外投资中亟需强调的核心能力。

4.3. 构建跨国光伏项目的风险识别体系

根据本文模型，不确定性主要来自三类风险：

1) 电价政策风险(Energy Price Risk)

电价制度变化、补贴政策调整会导致收益大幅波动。企业在开展海外光伏投资前，可通过建立市场信息跟踪机制，加强对目标国电价政策与市场波动的持续监测。

2) 汇率金融风险(FX Risk)

汇率波动会直接影响折算后的现金流，在汇率波动较大的情境下，企业可结合自身融资结构，合理

采用套期保值工具以降低现金流不确定性。

3) 资源与技术风险(Resource & Technical Risk)

辐照度差异、组件衰减等因素会影响长期发电曲线，因此建议：

- 建立本地化的光资源监测体系与数据库；
- 引入高可靠性组件与优化运维策略；
- 统一进行长期性能评估与衰减参数标定。

4.4. 不同风险情境下的海外光伏投资模式选择

基于前述模型结果，不同国家因电价、汇率与资源条件差异，适宜采用差异化的投资决策模式(表 2)。

研究表明，各国的电价政策、汇率稳定性与光资源差异较大，海外光伏投资不应采取“一刀切”策略。企业应根据“国家风险三维矩阵”确定适合的商业模式。

Table 2. Tailored strategies for different international regions

表 2. 不同国际地区对应的差异化策略

国家类型	电价波动	汇率风险	光资源	适宜策略
高波动国家(中东、南美)	高	中	高	延迟进入 + 阶段扩张
中等波动国家(东南亚)	中	中	中 - 高	稳健投资 + 分阶段建设
低波动国家(欧洲)	低	低	中	直接投资 + 长期锁价

通过这种差异化策略，企业可提升全球布局的稳健性。换言之，国家类型差异不仅决定“选哪种模式”，还决定“何时进入、以什么价格阈值进入”。高波动国家需要更高的进入触发条件和更强的分阶段扩张安排，而低波动国家则允许企业更接近静态 NPV 规则进行直接投资。

4.5. 海外光伏投资决策能力的管理提升路径

结合前文模型结果，本文从企业投资管理视角总结海外光伏项目决策能力的提升路径。

- 1) 企业在开展海外光伏投资时，应系统评估项目所在国的制度环境与风险特征，并在投资决策中充分考虑相关不确定性因素。
- 2) 企业在开展海外光伏投资时，可结合金融市场工具，合理利用风险对冲机制以降低现金流不确定性。
- 3) 企业可通过整合辐照度、电价与汇率等关键信息，建立支持投资决策的内部信息分析系统。
- 4) 企业可通过技术合作与本地化运营方式，提高海外项目的长期运行可靠性，从而降低技术与运营不确定性。

5. 结论

本文围绕海外太阳能发电项目的投资不确定性与决策灵活性问题，构建了一个“光资源 - 电价 - 组件衰减 - 汇率 - 项目现金流 - 实物期权”六维一体的动态评估框架。通过将辐照度季节性、电价均值回复、汇率波动与组件衰减等关键要素综合纳入随机过程建模，并采用三阶段实物期权进行价值测算，本文得出如下主要结论。

- 1) 不确定性显著影响海外光伏项目的收益结构
模拟结果表明：
 - 海外电价普遍存在均值回复与跳跃共存的特征；

- 光资源变化呈明显季节性波动，并伴随无法忽视的天气噪声；
- 汇率波动扩大现金流的离散区间；
- 组件衰减导致项目前期与远期收益非对称分布。

这些不确定性因素共同作用，使得传统 NPV 对远期收益的刻画存在系统性偏差。

2) 实物期权显著提升对海外光伏项目的价值评估精度

在电价、汇率和辐照度均具有较高波动性的国家，期权价值(ROV)显著高于传统 NPV，提升幅度可达 30%~50%。该结果表明：

- 企业在海外光伏投资中具备较强的“等待 - 进场 - 扩张 - 退出”的战略自主权；
- 不确定性并非纯粹的风险来源，而是蕴含着可被利用的“战略机会”；
- 实物期权方法能够提供更贴近真实决策环境的投资价值评估。

因此，在海外可再生能源项目中采用实物期权框架具有显著优势。

3) 不同国家间的风险差异决定了投资策略的显著分化

由于模型中多类不确定性因素共同驱动项目收益，投资策略呈现明显的“国家类型”差异：

- 在电价与汇率波动较大的国家，应采用“延迟进入 + 分阶段扩张”策略；
- 在资源稳定、政策清晰的国家，可采用“直接投资 + 长期锁价”策略；
- 在极高风险国家，应保留灵活退出机制，以应对极端不确定性带来的收益损失。

这说明跨国光伏投资不能采用“一刀切”模式，必须根据目标国特征进行差异化布局。

4) 引入动态决策工具对于提升我国企业海外竞争力至关重要

在全球能源向低碳转型加速的背景下，我国光伏企业在国际市场上拥有技术、成本和产业链优势。然而，海外市场风险高度复杂，传统静态决策方法难以支持企业构建稳健的全球化布局。本文的研究框架能够：

- 为企业识别并利用海外市场的不确定性；
- 帮助企业在关键节点做出更优决策；
- 为投资主体在复杂不确定环境下开展海外能源投资决策提供分析参考。

因此，构建基于实物期权的动态投资决策体系，对于推动我国光伏产业高质量走出去具有重要战略意义。

参考文献

- [1] Dixit, A.K. and Pindyck, R.S. (1994) *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400830176>
- [2] Trigeorgis, L. (1996) *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*. MIT Press.
- [3] Pindyck, R.S. (1991) Irreversibility, Uncertainty, and Investment. *Journal of Economic Literature*, **29**, 1110-1148.
- [4] Brennan, M.J. and Schwartz, E.S. (1985) Evaluating Natural Resource Investments. *The Journal of Business*, **58**, 135-157. <https://doi.org/10.1086/296288>
- [5] Schwartz, E.S. and Trigeorgis, L. (2001) Real Options and Investment under Uncertainty. *MIT Sloan Management Review*, **42**, 15-28.
- [6] Deng, S. (2000) Stochastic Models of Electricity Prices and Their Applications. *Energy Economics*, **22**, 151-176.
- [7] Boomsma, T.K., Meade, N. and Fleten, S.E. (2012) Renewable Energy Investments under Uncertainty. *Energy Economics*, **34**, 950-960.
- [8] Gatzert, N. and Kosub, T. (2016) Risks and Risk Management of Renewable Energy Projects: The Case of Onshore and Offshore Wind Parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **60**, 982-998. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.103>
- [9] Huchzermeier, A. and Loch, C.H. (2001) Project Management under Risk: Using the Real Options Approach to Evaluate

-
- Flexibility in R...D. *Management Science*, **47**, 85-101. <https://doi.org/10.1287/mnsc.47.1.85.10661>
- [10] International Energy Agency (IEA) (2022) World Energy Outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [11] International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023) Renewable Power Generation Costs in 2022. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- [12] United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2023) World Investment Report 2023: Investing in Sustainable Energy for All. https://unctad.org/system/files/official-document/wir2023_en.pdf