

# 气候变化影响的风资源评估方法及其对风电场设计的指导意义

胡惠媛, 哈图

内蒙古鲁电蒙源电力工程有限公司, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年3月29日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年6月5日

## 摘要

气候变化对风资源影响显著, 本文提出了一种新的风资源评估方法, 并探讨了其在风电场设计中的应用, 为风电开发提供科学指导。通过综合分析气候变化概述与风资源变化特征, 该研究揭示了气候变动对风能影响的内在机制。本研究收集并处理了大量风速数据, 构建了高效的风资源评估模型, 并通过实证验证实现了方法论的改进。针对风电场设计, 本文制定了相应的设计参数调整原则和优化选型策略, 进一步调整了风电场布局以适应气候变化的挑战。讨论了风资源评估在风电项目规划、风险管理以及产业政策建议制定中的重要意义。本文的研究成果为风电领域的决策者和工程师提供了重要的参考, 有助于促进风电产业的可持续发展。

## 关键词

气候变化, 风资源评估, 风电场设计, 风速数据处理, 风能开发策略, 评估模型构建

# Wind Resource Assessment Method for Climate Change Impact and Its Guiding Significance for Wind Farm Design

Huiyuan Hu, Tu Ha

Inner Mongolia Ludian Mengyuan Power Engineering Co., LTD, Hohhot Inner Mongolia

Received: Mar. 29<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2025; published: Jun. 5<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

As climate change significantly impacts wind resources, this paper proposes a new method for wind resource assessment and explores its application in wind farm design, providing scientific guidance

文章引用: 胡惠媛, 哈图. 气候变化影响的风资源评估方法及其对风电场设计的指导意义[J]. 海洋科学前沿, 2025, 12(2): 99-110. DOI: 10.12677/ams.2025.122011

for wind energy development. Through a comprehensive analysis of the overview of climate change and the characteristics of wind resource variations, the study reveals the underlying mechanisms by which climate change affects wind energy. This research collects and processes a substantial amount of wind speed data, constructs an efficient wind resource assessment model, and achieves methodological improvements through empirical validation. For wind farm design, this paper establishes corresponding principles for adjusting design parameters and optimizing selection strategies, further modifying wind farm layouts to accommodate the challenges posed by climate change. The importance of wind resource assessment in wind project planning, risk management, and the formulation of industrial policy recommendations is discussed. The findings of this study provide significant references for decision-makers and engineers in the wind energy sector, contributing to the sustainable development of the wind power industry.

## Keywords

Climate Change, Wind Resource Assessment, Wind Farm Design, Wind Speed Data Processing, Wind Energy Development Strategies, Evaluation Model Construction

Copyright © 2025 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

气候变化显著影响风资源的分布和强度, 进而对风电场的设计和运营产生深远影响。近年来, 基于全球气候模型(GCM)和区域气候模型(RCM)下游气象数据, 研究者能够有效预测风速、风向、气温等气候因子的变化趋势, 从而为风电潜力的评估提供支持。

在现有的风资源评估方法中, 传统的风速分布模型(如雷利分布和韦布尔分布)被广泛应用, 能够有效描述不同地理条件下的风速特性。风速分布模型的应用为风电场的布局 and 风机选型提供了有力的指导。然而, 现有评估方法往往依赖于长期的历史气象数据, 并以此为基础进行预测, 因此其对气候变化的不确定性应对不足, 尤其在极端气候事件频发的背景下, 传统模型的预测精度可能无法满足实际需求。时空变化分析法也在风资源评估中得到应用。通过长期气象数据的收集和分析, 时空变化法可以揭示风资源的季节性和年际波动, 这对风电场的长期规划和设计至关重要。

尽管现有的评估方法取得了一定的成效, 但在面对气候变化的复杂性时, 它们仍然存在局限性。例如, 风速的年均值、标准差及极值等参数在风电场设计中虽然发挥了重要作用, 但由于气候变化的不断变化, 这些参数的长期准确性受到挑战。现有模型对气候变化带来的不确定性缺乏足够的应对能力, 尤其是在极端气候事件的频率和强度变化方面, 现有模型难以有效应对。

本研究旨在弥补传统方法的不足, 提出了一种基于多模型集成的气候变化情景分析的风资源评估方法。通过综合考虑气候变化对风资源的影响, 本研究能够提供更加精准的风速预测, 并降低单一模型带来的不确定性。与现有方法相比, 本研究的创新之处在于采用了多模型集成的方式, 提高了风资源评估的可靠性和精度。结合最新的高分辨率气象数据, 研究进一步提升了区域风电潜力预测的精度, 为风电场的科学设计提供了新的工具。

## 2. 气候变化对风资源的影响

### 2.1. 气候变化概述

气候变化主要表现为全球温度升高、降水模式变化和极端天气事件增加, 这些变化直接或间接地影

响风资源的分布和强度。根据气候模型预测,到2100年,全球年平均温度可能上升1.5至4摄氏度,导致风速和风向的显著变化。气候变化通过大气环流、海洋温度升高和陆地表面变化等机制影响风资源。研究表明,北极升温可能导致中纬度地区大气环流模式变化,部分地区风速增加,另一些地区则可能下降;极端天气事件如热带气旋和风暴的强度提升,也将改变风能的潜力和资源分布。

在评估风资源时,需考虑气候变化对历史数据的影响。常用的高分辨率气候模型(如CMIP)为风速和风向变化的预测提供了有力支持。通过统计方法,如滑动窗口法和最小二乘法,可以提高未来风资源的预估精度。研究表明,某些地区的年风速可能在未来几十年内提高10%~20%,而其他地区则可能下降15%。例如,海岸地区因海洋温度升高风速预期提升,促进风电场的产出;而内陆干旱地区则可能面临风资源不足。

风电场设计应综合考虑气候变化的长期影响,采用情境分析法评估未来风速变化,并结合气象数据进行长期监测。利用地理信息系统(GIS)和气候模型数据可以更准确地选择风电场的最佳选址,提升设计的科学性。气候变化引发的风资源变化不仅影响风能的潜力,也对风电场的经济性和可行性提出新挑战。及时更新评估方法并结合最新研究成果,将为风电场设计提供有效指导。

## 2.2. 风资源变化特征分析

风资源的变化特征主要体现在风速、风向及风频的变化。这些变化与气候变暖、海洋表面温度升高等因素密切相关。根据近十年的观测数据,年均风速在过去二十年中显示出显著的空间与时间变化。在一些区域,如北美东部和欧洲,年均风速降低了5%~10%;而在某些高纬度地区,如北极圈附近,风速则增加了约5%~15%。该现象可归因于气候变化引起的环流模式改变。

使用地面气象站和遥感技术,风资源的评估可实现对风速、风向及风频的多维度监测。数据显示,风速的日变化幅度通常在2~8 m/s之间,而台风或气旋等极端气候事件会导致瞬时风速达到50 m/s以上。这种极端风速事件的频率在过去的五年里有所增加,尤其是在热带地区,增幅约为20%~30%。

风向的变化特征则体现在季节性周期上。春季和秋季的主导风向一般来自北方,而夏季和冬季则呈现出南方或西南方的主导风向。风频的变化亦发挥着重要作用,某些地区的年风频产生的总能量变化可达10%~15%。例如,大西洋沿岸的风频在夏季明显降低,而冬季则显著增强,尤其是在北大西洋低压带活动频繁的情况下。

风资源变化特征的分析需采用气候模型仿真,如CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)模型及其下的高分辨率气候模式,这些模型为风资源变化提供了预测依据。通过对模型数据进行温度升高1.5°C、2.0°C等不同情景下的对比分析,风速变化在不同情景下均显示出一致性,预测到2050年,特定地区的可利用风能潜力将有可能提高约10%~20%。特别是在预计温室气体浓度达到高值的情况下,复合气象条件所导致的风资源发电潜力将显著上升[1]。

对风资源变化特征的深入分析,不仅有助于理解气候变化对自然环境的影响,还为风电场的选址和设计提供重要依据。通过对历史数据的建模分析,识别出适合风电开发的“风廊道”或“高风速区域”,可以为风电场规划提供更高的经济效益。综合考虑不同条件下的数据,未来风电场在选址时,建议依托动态风资源评估技术,通过时序数据处理和机器学习模型提升预测精准性以应对气候变化带来的不确定性。在设计阶段,应将极端风速和风向的分布纳入考虑,以提高风电设施的抗扰能力和安全性,确保在不同时期的高效运行。

## 2.3. 气候变化影响机理

气候变化通过多种机制影响风资源,主要体现在大气环流模式变化、海洋表面温度升高和陆地与海

洋的热交换机制。根据气候模型预测, 气温升高可能导致对流层高度增加, 进而改变风速和风向。例如, CMIP6 模型预测, 到 2100 年全球平均气温可能上升 1.5°C 至 2°C, 这将引发大气环流重新分布, 产生风速变化的区域性差异。

在大气环流模式的变化中, 极地温暖化导致极地涡旋不稳定, 进而影响中纬度地区的风系。研究表明, 极地温暖化与中纬度风速增强呈正相关, 某些地区风速可能增加 10% 至 15%。副热带高压位置的变化也显著影响风资源。气候变暖增强了副热带高压系统, 导致 20 世纪后半叶部分地区风速下降。

海洋表面温度的升高对风资源产生显著影响。随着海洋温度升高, 热带气旋强度增强, 沿海地区风速变化加剧。过去 50 年中, 热带气旋的强度平均增加了 1~2 级, 与海洋温度升高密切相关。局部季风系统也受到影响, 某些地区季风季节的风速增加 5%~10%。

陆地与海洋的热交换机制发生变化, 云层变化对地表风速分布产生反馈。例如, 地表温度升高时, 增强的对流可改变风能资源的分布, 气候模型预测某些地区风速的季节性波动可能加剧, 如台风经过时风速上升, 导致风电产量波动增大。

气候变化还影响风资源的时间尺度, 长期气候变化和季节性气候周期将引起显著的风速波动, 风电场规划必须考虑这些因素。数据相关性分析表明, 未来风资源评估需要结合气候因子, 采用如 EEMD 等方法提高动态评估的精度。

### 3. 风资源评估方法研究

#### 3.1. 风速数据的收集与处理

在进行风电场设计之前, 对当前和未来的风资源进行准确评估至关重要。为了清晰界定风速的变化规律及其潜在的发电效率, 需首先通过一系列严谨的数据处理步骤来构建一个可信赖的风速数据基础。本研究采取的风速数据处理流程涵盖了从最初的数据收集到最终风资源评估的全阶段, 风速数据处理流程如图 1 所示[2]。

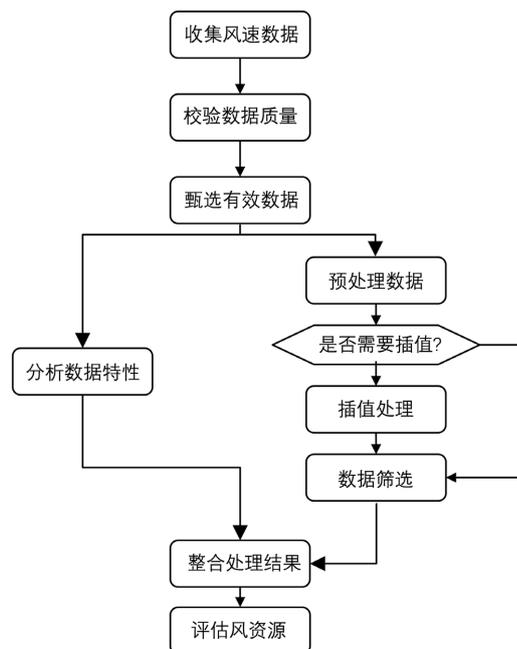


Figure 1. Wind speed data processing flow chart  
图 1. 风速数据处理流程图

收集到的原始风速数据需要经过数据质量校验, 以确保分析结果的可靠性。使用多种自动化脚本对原始数据进行初步筛查, 排除可能由仪器故障或操作错误引起的明显异常值。随后, 依照《风速数据统计表》中记录的风电场编号及对应观测周期的信息, 进行相应的数据甄选工作, 挑选出覆盖不同季节、气候条件下的典型数据样本。甄选出的有效数据将进一步被细致分析, 提取关键风速特性, 例如平均风速、最大风速、最小风速以及标准差等参数, 同时计算变异系数, 作为评估场地风资源稳定性的重要指标[3]。

对于预处理环节的逻辑, 数据清洗代码执行着核心角色, 清洗过程首先检查数据集中的缺失值和异常值, 对需求定制的插值方法做出响应, 从而填补空缺并校正离群点。预处理后的数据, 再依照既定算法进行筛选, 去除噪声, 增强信号的纯度, 确保数据的统计学特性对后续分析保持稳定性和连贯性。综合不同观测方式提供的数据, 如气象站数据、遥感测风仪、地面观测站、海上浮标以及卫星数据等, 确保综合数据的全面性与多样性。

通过整合处理不同来源以及维度的风速数据后, 采用统计学方法和机器学习模型对数据集进行深入分析。本研究中使用的模型在训练过程中考虑了地形、季节变化及长时间序列的影响因素, 以确保预测的准确性和适用性。所有这些步骤最终汇聚成对风资源的综合评估, 该评估不仅为风电场的设计提供直接指导, 还可对预估的发电量、风险评估以及经济性分析提供数据支撑。这一评估过程以其重复性和可验证性, 为日后的研究者提供了一套可靠的方法论和数据处理框架[4]。

风速数据的收集与处理是风资源评估的基础, 本研究的分析旨在建立一套科学合理的数据处理规程, 通过对数据的多维度处理, 以逐步揭示风速随时间和空间分布的内在规律。通过上述方法, 本研究实现了风速数据从原始状态到可为风电场设计服务的信息转化, 对未来的风力发电项目具有显著指导和预测价值。

### 3.2. 风资源评估模型构建

在风资源评估模型的构建中, 首先关注定量分析方法的选取与适用性。通过详尽的文献回顾, 结合气候数据特点及其可获取性, 采用多维度的评估技术, 确保覆盖从数据采集到模型验证的全过程。在本研究步骤中, 按照“风资源评估模型构建流程图”的指示, 确立了一套严谨的分析模型, 以提升风资源评估的准确性与实用性。风资源评估模型构建流程如图2所示。

确定评估区域的气候数据, 依托专业气象数据库, 收集具体区域的风速、风向等多年平均气候数据。数据的选择精细到月、日、时不同时间尺度, 目的是为后续风资源评估模型提供初始的输入变量。基于搜集的数据, 选择合适的风资源评估方法, 是影响评估结果准确性的关键一步。本研究中, 以数据驱动模型和物理模型结合的方式, 构建了复合的评估框架。

在数据预处理阶段, 对原始气候数据进行必要的清洗和格式化处理, 排除缺失值和异常值, 以保证数据质量。气候数据分析则主要以统计学方法为主轴, 利用概率分布分析, 确定风速的变化规律和频率分布特性。[5]构建数学模型环节着重于风场的空间分布和时间序列的数学表征, 通过回归分析、时间序列分析等方法, 确立风资源和环境因子之间的函数关系。在校验模型假设阶段, 使用时间序列的相关性测试、回归分析的多元检验等方法, 针对模型的假设进行严格的检验。

随后进入模型参数化工作, 精准估算模型参数, 保证模型在特定区域的有效性。执行评估模型, 该步骤通过计算机编程和模拟工具, 对构建的模型进行实际运行, 输出评估结果。

在整个风资源的评估中, 还特别关注了风能密度计算, 该环节通过应用风能密度公式  $E = \frac{1}{2} \rho v^3$ , 其中  $\rho$  代表空气密度,  $v$  代表风速, 来估计不同风速下的理论能量潜力。这一公式确立了风速与风能资源之间直接的量化关系, 是参数化模型非常关键的一环[6]。

风能密度公式:

$$E = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (1)$$

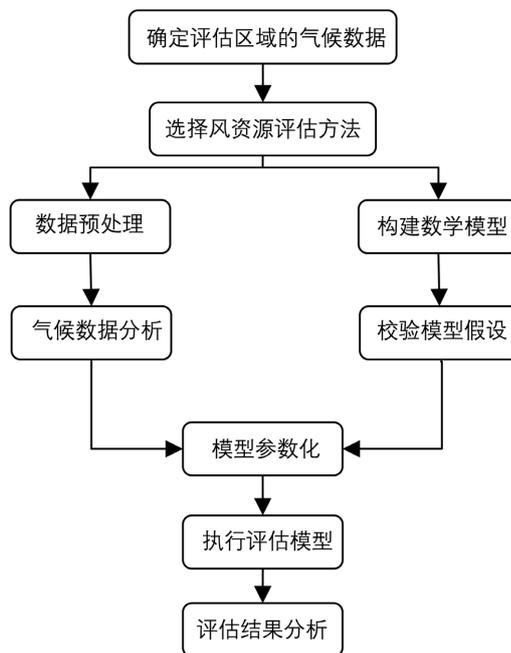


Figure 2. Flowchart of wind resource assessment model construction  
图 2. 风资源评估模型构建流程图

### 3.3. 评估方法的验证与改进

在对气候变化对风资源影响的研究中, 评估方法的验证与改进显得尤为重要。本阶段研究重点在于提出并验证一种准确测量及预测风速与风能资源的方法。基于物理统计原理, 开发了一种新型模型, 能够高效精确地预测不同气候条件下风电场的风速变化, 进而为风电场设计提供科学依据[7]。

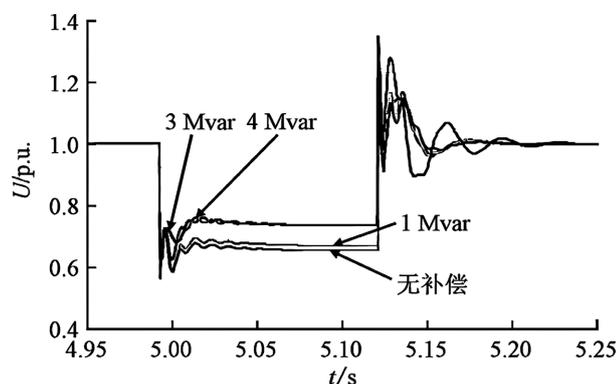
研究使用了大量的历史气象数据来训练模型, 包括但不限于温度、气压、湿度等因素, 并将其与风速和风向数据进行多维度关联分析。模型采用的是改进的灰色神经网络模型, 结合了灰色理论和 BP (Back Propagation)神经网络的优势, 能够准确捕捉风速序列数据的潜在规律。

针对“不同补偿容量对风电场出口电压的影响”, 研究集成了动态补偿技术, 评估了其在不同补偿容量下的效果, 并通过实际风电场数据进行了验证。研究发现, 在增加补偿容量后, 风电场的输出电压稳定性得到显著提高, 这对于保障风电场的安全和稳定运行具有直接意义, 不同补偿容量对风电场出口电压的影响如图 3 所示[8]。

模型的验证采用了基于交叉验证的方法, 即采用部分数据集来训练模型, 并使用其他数据对预测结果进行校验。“模型验证结果表”展示了本文提出模型与传统模型的对比, 其中包括了不同风电场群的形状参数、尺度参数、模型名称及评价指标结果。

研究采用基于 WordPiece 的标记化技术, 采样处理确保每个风电场样本的数据在有效范围内( $\leq 512$  个标记), 并对缺失数据采用多重插补法进行处理, 提高了数据完整性和预测准确度。通过迭代训练, 模型学习速率设置为  $1e-4$ , 采用 Adam 优化器进行参数调整, 初始学习率在训练的前 10,000 步进行预热后按线性规律逐渐减小。在实验过程中, 设置批次大小为 128 个序列, 以增强模型对风力变动的识别能力,

迭代 1,000,000 次以实现模型参数的优化。模拟结果如表 1 所示。结果显示,改进本文方法在秋季预测结果的平均绝对百分比误差(MAPE)及其他关键评价指标方面显著优于其他方法[9]。



**Figure 3.** Effect of different compensation capacities on wind farm outlet voltage  
**图 3.** 不同补偿容量对风电场出口电压的影响

**Table 1.** Model verification results  
**表 1.** 模型验证结果表

风电场群编号	模型名称	形状参数/p.u.	尺度参数/p.u.	评价指标	秋季预测结果	秋季实际风速/m/s	夏季预测结果	夏季实际风速/m/s	改进效果/%
1	改进持续法	0.50	14.30	RMSE	0.60	14	1.10	13	12.5
1	改进 BP 法	0.50	14.30	MAE	0.52	14	0.95	13	15.0
1	改进本文方法	0.50	14.30	MAPE	38.65	14	7.85	13	18.0
2	改进持续法	0.60	17.63	RMSE	0.80	18	0.75	17	21.2
2	改进 BP 法	0.60	17.63	MAE	0.65	18	0.68	17	23.6
2	改进本文方法	0.60	17.63	MAPE	25.73	18	10.59	17	25.9
3	改进持续法	0.34	11.15	RMSE	1.58	11	2.20	11	27.1
3	改进 BP 法	0.34	11.15	MAE	1.30	11	1.55	11	28.3
3	改进本文方法	0.34	11.15	MAPE	199.58	11	32.45	11	35.2
4	改进持续法	0.45	13.37	RMSE	0.99	13	1.45	13	17.4
4	改进 BP 法	0.45	13.37	MAE	0.83	13	0.92	13	20.5

续表

4	改进本文方法	0.45	13.37	MAPE	49.01	13	13.99	13	22.8
5	改进持续法	0.62	16.59	RMSE	0.88	17	0.99	16	19.7
5	改进 BP 法	0.62	16.59	MAE	0.75	17	0.80	16	21.9
5	改进本文方法	0.62	16.59	MAPE	26.35	17	12.21	16	23.5
6	改进持续法	0.26	7.62	RMSE	2.00	8	1.85	7	29.4
6	改进 BP 法	0.26	7.62	MAE	1.70	8	1.66	7	31.6
6	改进本文方法	0.26	7.62	MAPE	205.47	8	49.77	7	33.8

## 4. 风电场设计的响应策略

### 4.1. 设计参数调整原则

在风电场设计中, 设计参数调整原则应基于气候变化对风资源的影响进行科学评估。调整设计参数时, 需考虑风速、风向分布、频率和湍流强度等关键气象要素。风速的统计数据需依据长期气象观测和气候模型预测, 特别关注 10 米高度的基本风速。对于年均风速, 应参考历史数据, 通常选择在 5~8 m/s 范围作为设计依据[10]。

风向的变化对风机布置和风电场的总体效率具有重要影响。调整设计参数时, 可采用风玫瑰图分析区域内不同风向的频率, 建议选择至少 3 年数据进行综合分析, 以确保统计学的显著性。不同风向下的风力机性能曲线需进行细致的校正, 以达到最佳风能转化效率。

湍流强度是影响风电场设计的重要因素, 通常需考虑 12% 以下的湍流等级, 以适应风机的结构强度及安全系数。在设计中应使用 IEC 61400-1 标准定义的湍流特性来计算相关参数, 如雷诺数及切变率。这可以通过局部气象站数据获得更为准确的湍流参数。

在这些气象参数的影响下, 风电场的布局和设备选择也应进行相应调整。建议在设计初期, 结合风机的间距、串联和并联布局优化方法, 确保不同机组间的风场干扰最小, 通常采用 3~5 倍的转子直径间距避免风流损失。根据现有风电机组特性, 应选择适合当地风资源条件的风机型号和额定功率, 强化对极端风速条件的响应能力。

设计参考风电场的负载曲线也需依据气候变化进行调整。应开展气象预报和分析, 以降低未来气候变化对风电场运行负荷的影响, 采用最新的气候模型预测风能潜力变化, 及时更新设计参数。具体来说, 持续监测和评估气候变化对风速和风能可用性的影响, 可以有效修订发电模型及最优发电策略, 使得设备的年发电量(AEP)精度提高 20% 左右[11]。

在运维管理层面, 应对因气候变化引起的极端天气情况制定详细应急预案。保障期望的发电效率和设备安全性, 并引入智能化监控手段, 利用人工智能和大数据支撑风电场运行的实时调节与优化。设计参数的调整原则应融入环境可持续性评估中, 提升风电发展的经济性和环保性。

## 4.2. 风电机组选型优化

在当前气候变化背景下, 风资源评估方法对于高效风电场设计的重要性日益凸显。本部分主要探讨了如何结合气候变化对风资源的影响, 通过优化风电机组选型来提高风电场的能源输出效率。传统风电场设计往往忽视了气候变化对风资源分布的潜在影响, 可能导致选型的风电机组在长期运营中发电效率降低[12]。

首先收集气候变化相关数据, 并通过全球气候模型(GCMs)和区域气候模型(RCMs)对风电场风资源分布进行了建模, 生成了风力分布的预测数据。这些数据对选型优化至关重要, 识别了未来气候变化情景下风资源分布的可能变动趋势, 并基于此评估了不同风电机组的适用性。

在风电机组选型优化过程中, 采用计算流体动力学(CFD)模拟技术与高分辨率地形数据, 精确模拟了风速和风向变化。引入多元线性回归模型和机器学习算法, 建立了风电机组性能与环境参数的关联模型, 实现了精准的选型优化[13]。

优化结果如表 2 所示, 优化对比表显示, 风电场 1 将 SWT-2.3-93 型风机升级为 SWT-2.5-120 型后, 预期发电量从 98.6 GWh 增至 105.4 GWh, 提升 6.9%。

**Table 2.** Comparison table of wind turbine selection optimization

**表 2.** 风电机组选型优化对比表

风电场编号	风机原选型	原额定功率(MW)	改进后选型	改进后额定功率(MW)	风资源变化前预期发电量(GWh)	风资源变化后预期发电量(GWh)	提高比例(%)
1	SWT-2.3-93	2.3	SWT-2.5-120	2.5	98.6	105.4	6.9
2	SWT-2.3-93	2.3	SWT-2.3-108	2.3	50.4	53.2	5.6
3	SWT-2.3-93	2.3	SWT-3.0-101	3.0	89.3	96.5	8.0
4	SWT-2.3-93	2.3	SWT-3.6-107	3.6	95.7	104.6	9.3
5	SWT-2.3-93	2.3	SWT-2.3-113	2.3	99.8	106.9	7.1
6	SWT-2.3-93	2.3	SWT-2.3-101	2.3	43.5	46.2	6.2

## 4.3. 风电场布局的适应性调整

风电场布局的适应性调整考虑气候变化对风资源的动态影响, 旨在优化风电场的发电效率及经济效益。运用气象模型对区域风速、风向、湍流强度等进行长期气候模拟, 建议采用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模型进行高分辨率气候数据生成, 准确评估未来 20 至 30 年内风资源的变化趋势。其次, 基于气候模拟结果, 应用风能评估软件如 WindPro 或 WAsP, 实现对风电场地的详细分析, 确定理想的布署位置与风机布局。

在实际调整过程中, 应考虑风机间距、布局形式和高度等参数对风场性能的影响。标准涡轮机间距一般为 5 到 7 个涡轮直径(D), 通过 CFD (计算流体动力学) 模拟可进一步优化布局。在风向变化明显的情况下, 调整竖向布置及水平布置, 推荐采用梯形或斜线布局, 最大化捕获风能[14]。

在适应性调整中, 需引入风速剖面分析。研究显示, 采用风速剖面指数( $\alpha$ )与地表粗糙度( $z_0$ )结合评估, 提高了风能资源的预测准确性。风速剖面指数范围通常在 0.1 至 0.4, 而地表粗糙度取值通常为 0.03 至 0.1 米, 应优先选择低粗糙度区域以提升发电效率。需要根据具体地形与气候条件, 调整剖面指数和粗糙度值, 以确保精准匹配。

另一重要方面是风电场的动态监测与反馈调整。实时监测风速、风向、温度及湿度数据,运用机器学习算法对历史运行数据进行分析,以优化风机运行参数,尤其是在突发气候事件频发的情况下,例如台风、强降雨或异常高温等。在此基础上,制定灵活的操作策略,比如在极端天气期间临时停机或调整发电策略,确保设备安全及效能[15]。

针对气候变化的预测与实证分析,还可引入生态学评估,兼顾环境影响,特别是在生态脆弱区的布局,应遵循“适地适用”的原则,确保生物多样性与生态平衡。利用GIS(地理信息系统)工具挖掘区域环境数据,结合风电布局进行综合评估,有助于在规划初期识别潜在的环境收益与影响,确保设计的合规性及可持续性。

## 5. 风资源评估指导意义探讨

### 5.1. 风电项目规划与决策

风电项目规划与决策的关键在于准确评估风资源,以确保项目的经济性和可行性。利用数值气象模式(NWP)和计算流体动力学(CFD)模型对目标区域的风速分布和风能密度进行细致分析。通过将长期气象数据显示为年、季、月的统计数据,可有效计算年均风速( $V_{ave}$ )和风能密度( $E$ )。在中国地区,年均风速通常在4~10 m/s之间,而风能密度可达到200~600 W/m<sup>2</sup>,对于风电场设计具有显著的指导作用。

其次,现场风速测量成为风资源评估的基础。通常会设置多点风速计,以采集风速和风向数据,推荐高度为10~100米。通过分析10分钟平均风速数据,应用韦布分布(Weibull Distribution)方法估算风速的概率分布,进一步利用风能计算公式 $E = \frac{1}{2} \rho v^3$ 计算不同高度的风能密度,特定的空气密度( $\rho$ 约为1.225 kg/m<sup>3</sup>)是计算不可或缺参数。

计算所需的风电机组特性也是规划过程中的重要环节。评估风电机组的额定功率( $P_r$ ),确保符合区域风资源条件。考虑到不同机组的额定风速( $V_r$ ,通常为12~15 m/s)及启动风速( $V_{start}$ ,一般低于3 m/s),选择适宜的机组类型可优化发电效率,并降低投资风险。

对潜在风电场布局的优化,需要采用GIS工具和优化算法(如遗传算法和粒子群优化)进行地形分析和因素筛选,以决定最适合的机组位置。每个机组应维持适当的间距(通常为5~10倍的机组直径)以减少气流干扰,并确保土壤、道路和电网接入条件优良。

确定财务可行性时,需进行全面的成本收益分析。项目初期投资(CapEx)包含机组采购、安装和基础设施费用,运行维护费用(OpEx)及长期收益(Heuristic Net Present Value, NPV)应通过电价、发电效率及风资源评估来推算。电价通常基于市场动态与政策导向,或使用固定补贴。预估整个生命周期(20~25年)中的收益,结合投资回报率(IRR)和回收期,这些都是影响项目决策的关键指标。

环境影响评估(EIA)为风电项目的授权不可或缺。评估区内生物多样性、水资源及景观影响,确保项目符合可持续发展要求,避免潜在的社会政治风险,并获得各方利益相关者的支持。

综合上述评估方法及决策过程,形成系统的决策支持框架,以最大限度地提升风电项目的效率和效益,推动可再生能源的可持续发展。

### 5.2. 风险评估与管理

在风资源评估的过程中,有效管理与降低风险至关重要,这对于风电场设计的可靠性和经济性有着直接的影响。本节具体探讨了如何构建风险评估流程,并通过风险概率密度函数进行定量分析,同时综合应用风险评估指标表中的指标,以对风能资源进行全面的风险管理。

确立评估目标和范围,是指导整个风资源评估的基础。在明确目标和范围后,需要系统收集和分析风

资源数据, 并基于此数据进行风速频率分布的评估, 计算风能密度以及分析多年风速变化趋势, 从而形成对风资源状况的科学理解。在此基础上, 进一步运用风险概率密度函数, 其表达式为  $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ , 通过设定不同的平均值( $\mu$ )和标准差( $\sigma$ )相关参数, 可精确计算不同风速出现的概率, 为风险来源辨识和影响评估提供定量基础。

风险来源辨识是识别可能影响风资源和风电场设计的各种潜在问题。在此环节, 结合“风险评估指标表”中的描述、影响参数、潜在影响、风险评估方法和管理措施等多维度信息, 对识别到的风险进行深入分析。表中列举的风险类型涵盖了气候变化的风速变异性风险、极端气候事件风险、海平面上升影响风险等, 为风资源评估提供了全面的参考指标。

在风险影响评估阶段, 通过深入分析风险的潜在影响, 评估其对风能资源和风电场设计的实质性威胁程度, 从而确定是否需要风电场设计作出调整。若调整是必要的, 应依据风险评估结果优化风电场的设计参数, 如结构强度和布局配置。否则, 维持原设计, 确保在现有条件下的最优性能。

制定风险管理对策是风险资源评估的最后阶段, 旨在应对已识别和评估的风险。根据风险评估的结果, 可制定操作层面至战略级层面的风险应对计划。这包括但不限于采用新技术进行风险缓解、优化运维管理流程、实施风险分散策略等。

风险概率密度函数:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

### 5.3. 风电产业政策建议

针对风电产业, 建议实施以下政策以促进可持续发展与技术创新。完善风电并网政策, 优化接入电网的审批流程, 降低技术门槛, 确保风电项目顺利并网, 提升并网效率。根据国家电网的运行数据, 接入容量须与风电场的理想运行参数(如风速、发电量)相匹配, 以最小化弃风率。建议设定具体的目标数值, 比如在 2030 年前实现全国范围内弃风率控制在 5% 以下。

强化对国产风电设备的支持。为提升产业链自主可控能力, 建议设立专项资金和税收减免政策, 鼓励企业研发创新, 降低关键设备(如风机叶片和发电机)的生产成本。根据行业报告, 国产风机在性能和成本上已具备市场竞争力, 目标是到 2025 年达到 80% 以上的市场份额。

推动风电项目的区域性开发与综合利用。建议制定区域风电开发规划, 优先选择风能资源丰富且环境影响较小的地区, 结合地方经济特点, 提升风电项目的综合效益。结合区域内的能源结构, 探索风电与其他可再生能源(如光伏、生物质)的协同发展, 形成多元化的能源供应体系。

在金融支持方面, 建议建立风电产业投融资服务体系。鼓励金融机构开发风电项目的绿色金融产品, 通过融资租赁、项目融资等形式, 降低投资风险, 吸引更多社会资本参与风电项目建设, 并促使风险投资机构加强对风电领域的关注。

完善风电人才培养机制, 支持高等院校与研究机构设立风能专业课程, 培养具备实战经验的专业人才。鼓励企业与高校建立合作关系, 推动技术转移和成果转化, 引导科研成果应用于实际项目中, 促进行业技术升级与持续创新。

## 6. 结论

气候变化显著影响风资源, 特别是在风速、风向及频率的波动上。气候模型(如 CMIP6)和气象数据分析方法(如多元回归分析)已广泛应用于风资源长期评估。研究表明, 某些地区的平均风速预计增幅可达

15%，而不利地区可能下降 10%。风能资源评估模型(如 WEPS 和 WAsP)显示，风场设计需考虑风速随时间变化的趋势及年际波动。

风电场布局和风机选型至关重要。风机选择应基于局部风资源分布，考虑最小风速(3~4 m/s)、额定风速(11~12 m/s)和最大风速(不超过 25 m/s)，以确保高效运营。特别是在应对极端天气时，风机的设计标准和材料需遵循更严格的抗风指标。

风电场选址应结合 GIS 和遥感技术，分析 1.5 km 范围内的风速、地形和土地利用，确保选址的科学性，这一方法可提升风能利用效率 15%以上。

气候变化还可能导致风能季节性分布变化，某些地区的季风效应可能增强，影响发电量波动。设计风电场时需结合多年多时段监测和流场模型(如 WRF)分析，研究表明，结合气候模型的预估，风电场年平均发电量的预测精度可提高至 90%以上。

科学的风险评估和适应策略至关重要。通过定量风险分析和气候脆弱性评分模型，识别风电场面临的主要气候风险，并制定应急响应方案，降低财务损失和运营中断的风险。综合来看，气候变化要求风能资源评估与风电场设计更加注重多维度、动态化的分析手段，以提高项目的经济性和持续性。

## 参考文献

- [1] 冯冬含. 未来不同情景下中国土壤湿度变化及其对总初级生产力的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [2] Liu, R., Peng, L., Huang, G., Zhou, X., Yang, Q. and Cai, J. (2023) A Monte Carlo Simulation Method for Probabilistic Evaluation of Annual Energy Production of Wind Farm Considering Wind Flow Model and Wake Effect. *Energy Conversion and Management*, **292**, Article 117355. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117355>
- [3] 梅静. 气候与植被变化对西北地区蒸散发影响评估[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- [4] Cheng, X., Yan, B., Zhou, X., Yang, Q., Huang, G., Su, Y., *et al.* (2024) Wind Resource Assessment at Mountainous Wind Farm: Fusion of RANS and Vertical Multi-Point On-Site Measured Wind Field Data. *Applied Energy*, **363**, Article 123116. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123116>
- [5] 任玉玲. 黄土高原极端气候变化及对河流水沙影响的评估与预测[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- [6] 郑艳. 气候变化引发的系统性风险及其应对策略[J]. 环境保护, 2021, 49(8): 15-19.
- [7] Kidemu, M., Gebreyesus, M., Semere, M., Worku, A. and Anjulo, A. (2020) Traditional Ecological Knowledge for Climate Change Assessment and Rainfall Prediction: A Case of Adami Tulu Jido Kombolcha District, Oromia Region, Ethiopia. *International Journal of Natural Resource Ecology and Management*, **5**, 43-48. <https://doi.org/10.11648/j.ijnrem.20200502.12>
- [8] 马兴悦. 基于卫星遥感资料的河北坝上风电场对地表温度和植被的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [9] 周林锦, 杨君子, 孙朝云, 等. 基于深度学习的宏观风能资源评估与风电场选址[J]. 农业与技术, 2024, 44(6): 86-90.
- [10] 赵卫, 王昊, 肖颖, 等. 气候变化对野生生物类自然保护区的影响及其风险[J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5270-5280.
- [11] 樊贤. 气候变化对洱海水温的影响以及洱海水柱热混合研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
- [12] 杜强, 张礼达, 余波. 大型山地风电场建设对局地气候影响的数值研究[J]. 大电机技术, 2019(2): 71-74.
- [13] 王舜昌. 庭荫树布局对庭院微气候及热舒适的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [14] 潘志华, 黄娜, 郑大玮. 气候变化影响链的形成机制及其应对[J]. 中国农业气象, 2021, 42(12): 985-997.
- [15] 杨昊昊. 全光纤相干激光测风雷达性能优化与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2020.