

引用格式: 蓝浩宸, 卢炳夫, 李仲怡, 等. 极端寒潮天气过程风机凝冰受限容量分析[J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 26-35. LAN Haochen, LU Bingfu, LI Zhongyi, et al. Analysis of the limited capacity of wind turbine icing in extreme cold wave weather process [J]. Southern energy construction, 2025, 12(2): 26-35. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-358.

极端寒潮天气过程风机凝冰受限容量分析

蓝浩宸, 卢炳夫, 李仲怡[✉], 黄丹, 李勇, 赵金彪
(广西壮族自治区气象灾害防御技术中心, 广西南宁 530000)

摘要: [目的] 针对寒潮天气下风机凝冰容量受限预测困难, 造成风功率预测不准、风电调度决策依据不足等问题。[方法] 通过风机凝冰受限容量预测模型, 利用常规气象观测资料、风机停机实况数据及数值模式等资料对广西一次极端寒潮天气过程下风机凝冰受限容量进行分析总结。[结果] 结果表明: 通过融合数值预报产品与凝冰受限容量的实况数据, 并应用回归分析进行实时订正, 有效提升了凝冰预测的参考价值 and 准确性。此外, 凝冰预测模型能够对较强冷空气系统南下影响广西风电场做出有效反应, 但对转折性天气反应不足, 预测结果比实况偏大。同时, 数值模式预报结果存在幅值偏差和相位偏差, 在本次过程中预测值偏大于实况。在预测效果上, 模型在气温预测方面表现优于相对湿度和风速, 且高海拔地区气象要素预测效果普遍好于低海拔地区。[结论] 基于上述结论, 提出了加强寒潮预警预测能力、开展凝冰容量预测系统升级改造工作等建议, 以提高极端寒潮天气下风机凝冰预测受限容量的准确率。

关键词: 极端寒潮; 风机凝冰; 凝冰受限容量; 预测模型; 风电

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-358

文章编号: 2095-8676(2025)02-0026-10

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-358

中图分类号: TK89; P49



论文二维码

Analysis of the Limited Capacity of Wind Turbine Icing in Extreme Cold Wave Weather Process

LAN Haochen, LU Bingfu, LI Zhongyi[✉], HUANG Dan, LI Yong, ZHAO Jinbiao

(Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] The analysis of limited icing capacity of wind turbine in cold wave weather is difficult to predict, resulting in inaccurate wind power prediction and insufficient decision-making basis for wind power dispatching. [Method] Through the prediction model of the limited icing capacity of wind turbine, the limited icing capacity of wind turbine in extreme cold wave weather process in Guangxi was analyzed and summarized by using conventional meteorological observation data, wind turbine shutdown actual data and numerical model data. [Result] The results show that the reference value and accuracy of icing prediction are effectively improved by integrating the numerical prediction products with the actual data of limited icing capacity and applying regression analysis for real-time correction. In addition, the icing prediction model can effectively respond to the strong cold air system southward affecting the Guangxi wind farm, but the response to the turning weather is insufficient, and the prediction result is larger than the actual data. At the same time, the numerical model prediction results have amplitude deviation and phase deviation, and the predicted value is larger than the actual value in this process. In terms of prediction effect, the model performs better in air temperature prediction than relative humidity and wind speed prediction, and the prediction effect of meteorological elements in high altitude areas is generally better than that in low

收稿日期: 2024-10-17 修回日期: 2024-11-11

基金项目: 广西壮族自治区气象局资助项目“新能源气温降尺度精细化预报研究”(桂气科 2023QN07); 广西气象科研计划项目“柳江流域水库径流量预报模型开发及服务系统建设”(桂气科 2023ZL09); 广西气象科研计划项目“微地形环境下风电场雷电活动特征分析及风险评估”(桂气科 2024QN13); 广西气象科研计划项目“高影响天气下的光伏发电功率预测”(桂气科 2024ZL06)

altitude areas. [Conclusion] Based on the above conclusions, some suggestions are put forward, such as strengthening the early warning and prediction ability of cold wave, carrying out the upgrading and transformation of icing capacity prediction system, so as to improve the prediction accuracy of the limited icing capacity of wind turbine in extreme cold wave weather.

Key words: extreme cold wave; wind turbine icing; limited icing capacity; prediction model; wind power

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

自广西能源发展“十四五”规划发布以来^[1], 广西风电行业实现了迅猛增长。截至 2023 年 12 月, 广西已建成并网的风电场达 134 家, 装机容量总计 14 GW。特别是在桂北地区, 已有 53 家风电场并网, 装机容量为 5.6 GW。然而, 风电的大规模并网带来了新的挑战, 即风力发电的逆负荷特性, 使得电力系统对天气变化极为敏感^[2]。随着全球气候变暖, 极端天气事件变得更加频繁和强烈, 尤其是寒潮和低温天气, 这些因素对风力发电、输电线路以及电力负荷产生了显著影响^[3-6], 给电网的安全稳定运行和电力调度带来了严峻的挑战。因此, 开展凝冰容量的预测研究, 对于确保电力系统的可靠供应与安全稳定运行至关重要。

在极端寒潮和低温天气下, 风机容易发生大范围 and 长时间的凝冰停机现象, 这严重影响了电网的稳定运行^[6-8]。例如, 2021 年 2 月, 美国德州电网因间接性风光电源极寒无风和风机凝冰脱网导致电网供需失衡而引发了大规模停电^[9]。类似地, 2022 年 1—2 月, 广西遭遇了大范围的持续低温雨雪冰冻天气, 导致全区风机普遍发生凝冰停机, 进而限制了用电, 电力部门不得不启动应急处置措施^[10]。面对这一挑战, 学术界已经在风机凝冰停机所带来的功率损失等方面取得了一定的研究进展。尽管多数研究由于缺乏实际风机停机数据, 主要依赖于结冰增长模型的仿真结果与冰风洞覆冰试验结果^[11-13], 但一些学者已经开始结合实际风机凝冰情况, 对风机功率损失进行深入研究^[14-16]。例如, 舒立春等^[17]在自然覆冰试验站展开试验研究, 研究分析叶片覆冰程度对风力机功率损失的影响规律和机制。许杨、李仲怡等^[18-19]基于 Makkonen 结冰增长模型^[20-23]建立了风机凝冰预报模型, 对风机凝冰起止时间和厚度测量进行了初步预测。吴文倩^[24]分析了不同气象预测数据源对广西风电场风速预测准确率的影响, 为风

机凝冰预测模型的优化提供了重要的参考依据。卓毅鑫等^[25]提出一种多模式融合的风机气温预测方法, 通过集成多种人工智能算法, 显著提高了凝冰期预测的准确率。

在极端寒潮背景下, 本研究以 2023 年 12 月 16—25 日期间广西经历的一次极端寒潮天气为案例, 采用现有的风机凝冰受限容量预测模型, 对广西地区的风机凝冰受限容量进行了深入分析。该模型结合了现有的风机覆冰厚度预测和功率预测技术, 并综合利用常规气象观测资料、风机停机实况数据以及数值模式等多源信息进行构建。研究不仅关注预测的准确性, 还深入探讨了风机凝冰受限容量预测的偏差来源, 以及低温脱网和阴雨弱风等极端天气条件对风机运行的具体影响。通过这些分析, 本研究旨在提升极端天气条件下风机凝冰受限容量的预测能力, 并为预报员在实际工作中积累宝贵的经验。

1 资料与方法

本研究的数据基础涵盖了风机覆冰厚度、气温、风速、降雨量、相对湿度和气压等关键气象指标的预测和实况数据, 这些数据均由广西气象局提供。同时, 风机凝冰的起始和结束时间、凝冰导致的容量受限情况、风机顶部的气温、相对湿度和风速等实况数据则由当地风电场收集并提供。

风机凝冰受限容量定义为因凝冰导致的风电机组停机而无法产生的电量。为了深入探究极端寒潮天气对风电功率的具体影响, 文章采用了风机凝冰受限容量预测模型(图 1^[19])进行研究。该模型综合了各类气象预报数据和实况资料, 运用了随机森林、人工神经网络等先进的人工智能算法来识别风机的停机状态。通过式(1), 模型能够计算出凝冰状态下的受限容量。

$$S_{\text{total-icing}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{i,j} S_{i,j} \quad (1)$$

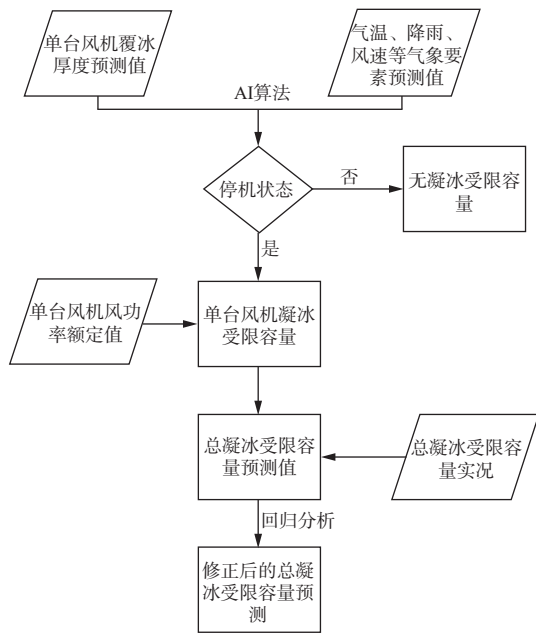


图 1 风机凝冰受限容量预测模型框架^[19]

Fig. 1 Prediction model framework of limited icing capacity of wind turbine^[19]

式中:

$S_{\text{total-icing}}$ ——风机凝冰总的停运容量(MW);

$P_{i,j}$ ——单台风电机组额定功率(MW);

$S_{i,j}$ ——单台风机凝冰停机状态,其中状态 1: 停机, 0: 不停机;

m ——风电场站数量(场);

n ——单个风电场单台风机数量(台)。

为比较模式凝冰预测受限容量与实际凝冰受限容量的偏差,采用预测准确率进行表示,计算公式如下:

$$\text{MAE} = \frac{1}{mm} \sum_{i=1}^{mm} |LC_i - LS_i| \quad (2)$$

$$\text{RIGHT} = \left(1 - \frac{\text{MAE}}{\text{LT}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:

MAE ——凝冰容量受限平均绝对误差(MW);

mm ——总风机凝冰受限时次(h);

i ——风机凝冰受限时序;

LC_i ——第 i 时次凝冰受限预测值(MW);

LS_i ——第 i 时次凝冰受限实况值(MW);

RIGHT ——凝冰容量受限预测准确率(%);

LT ——总凝冰受限容量(MW)。

文章在分析凝冰受限容量的实况数据基础上,进一步利用回归分析法对凝冰受限容量预测进行了

实时订正。通过回归分析过去 24 h 数据,确定了常数 a 和 b ,并据此预测未来 72 h 的凝冰受限容量,以此提高预测的准确性和可靠性。

$$Y = aX + b \quad (4)$$

式中:

Y ——凝冰受限容量实况值(MW);

X ——凝冰受限容量预测值(MW);

a, b ——常数。

2 寒潮过程概况

2023 年 12 月 15—26 日,广西经历了一次罕见的极端寒潮。此次寒潮具有降温剧烈、低温持续时间长、北风强劲和降雨相态多样等特点。根据广西国家级地面气象观测站的资料,此次寒潮在范围和综合强度上排名第 3,是 1961 年以来 12 月同期最强的一次。受影响地区包括 12 个市 72 个县(市、区),出现了雪、雨夹雪、冻雨、霜冻、冰冻或道路结冰等现象。各地降温幅度介于 6.8~20.4 °C,最低气温在 -0.4~9.9 °C,高寒山区更是低至 -8~-1 °C。全区 91 个国家级地面气象观测站均记录到了不同程度的冷空气过程,其中寒潮强度的观测站达到 78 个。此次寒潮期间,全区平均气温为 7.6 °C,较常年同期偏低 5.1 °C,创下近 40 a 来同期最低记录。此外,全区平均日最低气温连续 10 d 低于 8.0 °C,过程共出现结冰 15 站,霜冻 23 站,雨淞 1 站,雪 5 站,大风 34 站,其中大风范围为 12 月历史同期最广。

在这次极端寒潮过程中,风机凝冰现象主要集中在广西的桂北地区,桂中地区也有少量风电场受到影响(图 2)。据统计,最大凝冰受限容量日累计有 46 个风电场发生了凝冰停机事件,这些风电场主要分布在桂林(17 家)、柳州(9 家)、贺州(7 家)、河池(4 家)、百色(3 家)、来宾(2 家)、贵港(1 家)、南宁(1 家)、钦州(1 家)和玉林(1 家)。截至 12 月 19 日 8 时,广西电网共有 37 条 35 kV 及以上的输电线路受到凝冰影响。同时,由于强降温导致的取暖设备用电量剧增,各市电网的最大负荷均有显著增长。

3 凝冰受限容量预测分析

3.1 凝冰受限容量变化与天气形势

在本次极端寒潮事件中,本研究基于数值模式预报的时效性和出现转折性天气的时间点,选择了

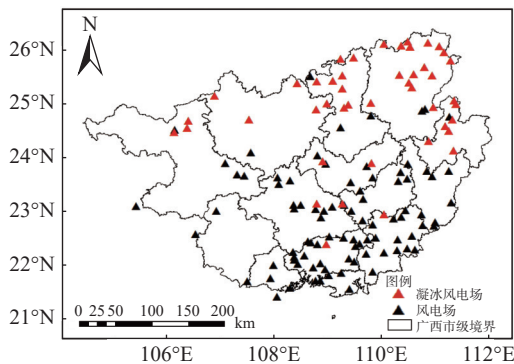


图 2 2023 年 12 月 19 日广西出现风机凝冰容量受限的风电场分布图

Fig. 2 Distribution of wind farms with limited icing capacity of wind turbines in Guangxi on December 19, 2023

3 个关键时间点(12 月 14 日、16 日、19 日)的风机凝冰受限容量预测模型, 对其未来 72 h 的预测结果进行了深入分析(图 3)。分析内容涵盖了风机凝冰受限容量的实况、模型的初始预测值以及预报员通过回归分析方法(表 1)对这些预测值进行的实时调整。12 月 14 日起报的分析(图 3(a))显示, 模型与订正后的风机凝冰受限容量预测结果整体大于实际值, 且预测的凝冰开始时间均早于实际发生的时间。具体来看, 风机在 15 日 23 时实际出现了凝冰停机, 而模型预测和经过订正后的预测分别提前了 12 h 和 9 h, 即 15 日 5 时和 15 日 14 时。12 月 16 日起报的分析(图 3(b))指出, 尽管实际的风机凝冰受限容量整体呈上升趋势, 但模型和订正后的预测曲线却显示出下降趋势。这一偏差可能是由于 17 日广西受到偏南暖湿气流增强的影响, 低层水汽含量的增加有利于凝冰现象的发生, 导致实际凝冰受限容量持续增加。12 月 19 日起报的分析(图 3(c))揭示了实际值与订正后的预测值整体呈下降趋势, 而模型预测值却呈上升趋势。从 20 日起, 由于偏南暖湿气流减弱, 冷空气持续补充, 数值模式预报结果与实况出现了较大偏差, 导致预测的凝冰受限容量与实况变化趋势相反。然而, 经过预报员的订正, 订正后的预测值与实况变化趋势较为接近。

鉴于数值模式预报的时效性以及风机凝冰受限容量模型在不同时段起报的未来 72 h 预测结果与实况存在较大误差, 本研究选择使用风机凝冰受限容量模型的未来 24 h 预报结果, 对广西凝冰受限容量和天气形势变化进行深入分析。2023 年 12 月 15—

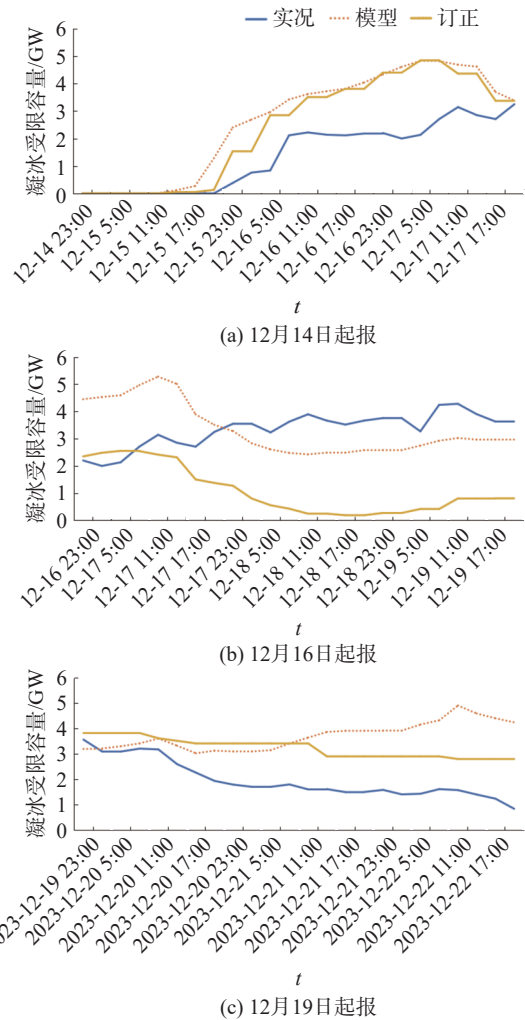


图 3 2023 年 12 月 14 日、16 日、19 日起报的未来 72 h 凝冰受限容量实况和预测图

Fig. 3 Actual value and predicted value of limited icing capacity in the next 72 hours reported from December 14, 16 and 19, 2023

26 日广西凝冰受限容量实况和未来 24 h 预测曲线图如图 4 所示。

由图 4 可知, 实际凝冰受限容量趋势整体呈现单峰分布, 其中 12 月 19 日 11 时记录了日最大凝冰受限容量为 4.28 GW。通过分析本次寒潮天气形势可知, 12 月 12—14 日, 蒙古横槽东移并摆动转竖, 引导地面强冷空气南下, 为寒潮的到来奠定了基础。12 月 15 日 8 时, 850 hPa 切变线已推进至贵州至广西交界, 标志着冷空气的前锋到达。12 月 15 日下午, 冷空气开始影响广西北部风电场, 风机凝冰受限容量逐渐上升, 至 16 日 2—11 时急剧增加至 2.22 GW。同时, 1035 hPa 线南压至广西桂北地区, 导致柳州、

表 1 2023 年 12 月 16—24 日 A、B 风电场凝冰受限容量实际值与预测值的回归模型
Tab. 1 Regression model of the actual value and the predicted value of the limited icing capacity
of A and B wind farms from December 16 to 24, 2023

日期	模型		相关系数 R		复相关系数 R^2		F 值		显著性水平	
	风电场A	风电场B	风电场A	风电场B	风电场A	风电场B	风电场A	风电场B	风电场A	风电场B
16日	—	$Y=5.786+1.660X$	—	0.913	—	0.834	—	30.055	—	<0.05
17日	$Y=251.393-0.015X$	$Y=251.393-0.015X$	0.623	—	0.388	—	3.800	—	<0.10	—
18日	$Y=37.188+0.770X$	—	0.230	—	0.053	—	0.336	—	>0.10	—
19日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21日	$Y=-900.071+2.531X$	—	0.953	—	0.908	—	59.062	—	<0.01	—
22日	$Y=-524.121+1.769X$	—	0.598	—	0.358	—	3.344	—	>0.10	—
23日	$Y=-7.731+1.150X$	$Y=251.393-0.015X$	0.952	0.910	0.907	0.829	58.573	29.022	<0.01	<0.01
24日	$Y=72.300+0.601X$	$Y=10.867-0.192X$	0.924	0.588	0.854	0.346	35.103	3.174	<0.01	>0.10

注：“—”为尚未凝冰或凝冰维持，无回归模型。

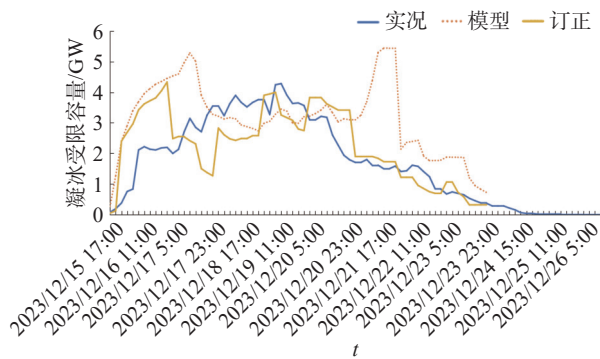


图 4 2023 年 12 月 15—26 日广西凝冰受限容量实况和未来 24 h 预测曲线图

Fig. 4 Limited icing capacity in Guangxi from December 15 to 26, 2023 and the prediction curve for the next 24 hours

桂林市北部地区出现雪或雨夹雪，桂北大部风电场气温降至零下。12 月 17—19 日，随着后续冷空气补充和低层偏南气流的影响，桂北大部风电场风机气温维持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，桂北低温雨雪冰冻天气维持，风机总凝冰受限容量达到最大值。12 月 20—26 日，冷空气持续补充，850 hPa 转北风，广西降雨渐止，天气转多云到晴。白天气温缓慢回升，大部风电场气温逐渐升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，部分风机开始融冰，凝冰受限容量随之逐渐减少。

模型提前 24 h 预测曲线显示，凝冰受限容量的趋势整体呈现双峰分布。模型预测的日最大凝冰受限容量出现在 12 月 21 日 20 时，达到约 5.44 GW，其次是 12 月 17 日 11 时的 5.28 GW。预测曲线显示，自 15 日下午冷空气进入桂北地区后，该地区风电场

迅速发生了大范围的凝冰停机事件，导致凝冰受限容量急剧增加。随着冷空气的持续补充，全区天气在 17 日后逐渐放晴，气温回升，部分风机在白天开始融冰，凝冰受限容量因此逐渐减少。到了 20 日，随着冷空气的进一步南下，凝冰受限容量再次上升，达到最高值。预报员利用回归分析技术(表 1)，结合数值预报产品和凝冰受限容量的实时数据，对凝冰受限容量的预测结果进行了实时订正。订正后的凝冰受限容量趋势整体呈现波动分布，日最大凝冰预测受限容量出现在 12 月 16 日 23 时，为 4.33 GW，其次是 12 月 20 日 2 时的 3.83 GW。

3.2 预测偏差分析

凝冰受限容量预测误差图(图 5(a))揭示了模型预测的日最大凝冰受限容量绝对误差呈现出明显的波动分布。在 12 月 17—20 日期间，日最大误差维持在 1 GW 以下，而最大误差出现在 12 月 15 日，约为 2.02 GW。订正后的预测误差整体呈下降趋势，但在 12 月 15—19 日期间，日最大误差均超过 1 GW，其中 12 月 17 日误差最大，为 2.28 GW。这表明，在缺乏前期实况数据的前期，模型预测与订正预测效果相近；中期模型预测结果较优；后期订正预测效果更佳。

凝冰受限容量预测准确率图(图 5(b))显示，模型和订正后的日平均预测准确率均呈现先升后降再上升的趋势。模型在 12 月 15—17 日和 21—23 日的日平均预测准确率低于 35%，而 18—20 日的准确率较高，超过 71%。订正后的预测在 12 月 15—17 日

的准确率低于 68%,而在 18—23 日(除 20 日外)的准确率较高,介于 71%~88%。这表明订正后的预测准确率整体优于模型预测。

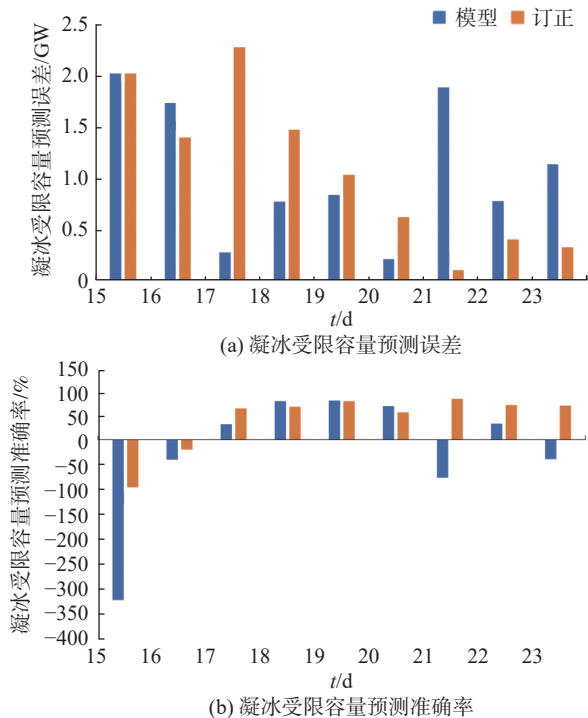


图 5 2023 年 12 月 15—23 日广西凝冰受限容量预测误差、准确率图

Fig. 5 Prediction error and accuracy of limited icing capacity in Guangxi from December 15 to 23, 2023

进一步的分析比较了提前 24 h、48 h 和 72 h 的订正预测效果。统计结果显示,凝冰受限容量的平均绝对误差随着预测时效的延长而增加,其中提前 24 h 的预测平均绝对误差最低,为 755.52 MW,平均预测准确率为 54%。相比之下,提前 48 h 和 72 h 的预测平均绝对误差分别为 1.12 GW 和 1.13 GW,准确率分别为 50% 和 34%,这证实了提前 24 h 订正预测结果的优越性。综上所述,订正后的凝冰预测受限容量预报结果整体优于模型原始计算结果。预报员基于经验的订正对提高预测的准确性具有显著的正向作用,使得预报结论具有较高的参考价值。

3.3 单站对比分析

当前已知在气温低于 0 °C、风速小于 10 m/s 以及相对湿度大于 85% 的气象条件下,风机凝冰现象较为显著^[26]。在本次过程中,前期预报效果存在较大偏差,因此以 12 月 15—20 日为主要预报误差分析时段,选取广西北部某 2 个风电场(风电场 A: 海

拔 517.0 m, 风机 365 台; 风电场 B: 海拔 1 688.8 m, 风机 66 台)提前 24 h 预测结果为例,依据现有模型结论^[19],选取风电场温度、相对湿度和风速 3 个关键气象要素对本次过程预测作进一步分析。

2 个风电场凝冰受限容量的实况与预测如图 6 所示,高海拔风电场 B 的预测凝冰受限容量与实况较为接近。而低海拔风电场 A 在 16 日 14 时—18 日 23 时的预测结果与实况出现显著的偏差。具体来看,低海拔风电场 A 在 16 日 2 时有近半数风机因凝冰停机。到了 17 日 20 时,随着低层偏南暖湿气流的加强,风机凝冰适宜条件得以改善,凝冰受限容量达到最大值 596 MW。随后,在 20 日 17 时,随着暖湿气流的减弱,凝冰受限容量开始逐渐降低。相比之下,预测结果显示风电场 A 的凝冰受限容量于 16 日晚上达到峰值后,随着冷空气过境和天气转晴,气温回升,凝冰受限容量逐渐减少。

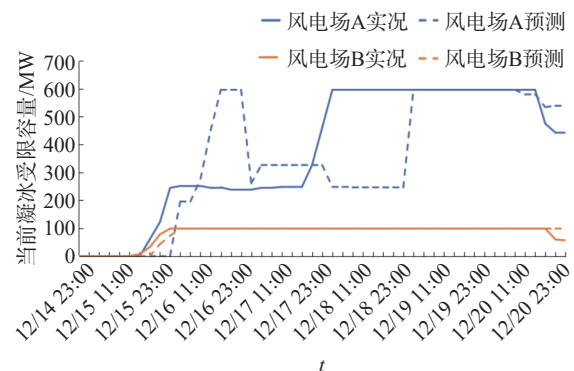


图 6 2023 年 12 月 15—20 日广西北部某 2 个风电场凝冰受限容量实况与未来 24 h 预测曲线图

Fig. 6 Actual limited icing capacity of two wind farms in northern Guangxi from December 15 to 20, 2023 and the prediction curve of the next 24 hours

气温方面(图 7(a)),风电场 A 和风电场 B 气温的 MAE 约为 2.4 °C、2.7 °C,相关系数分别达到 0.95 和 0.93(表 2)。整体来看,2 个风电场的预测气温整体变化趋势与实况大致相符,但预测值普遍高于实际气温。特别是在 17 日受到低层偏南暖湿气流的影 响时,风电场 B 观测到较大幅度的升温,而风电场 A 的气温变化较小。尽管如此,2 个风电场的实际气温均保持在 0 °C 以下,而预测气温则显示为 0 °C 以上,表明预测模型在气温回升的幅度上存在高估。

相对湿度方面(图 7(b)),风电场 A 和风电场 B 相对湿度的 MAE 约为 9.8%、8.6%,相关系数为

0.33 和 0.49(表 2)。2 个风电场实际相对湿度与预测相对湿度曲线吻合度较差。具体来看,在冷空气

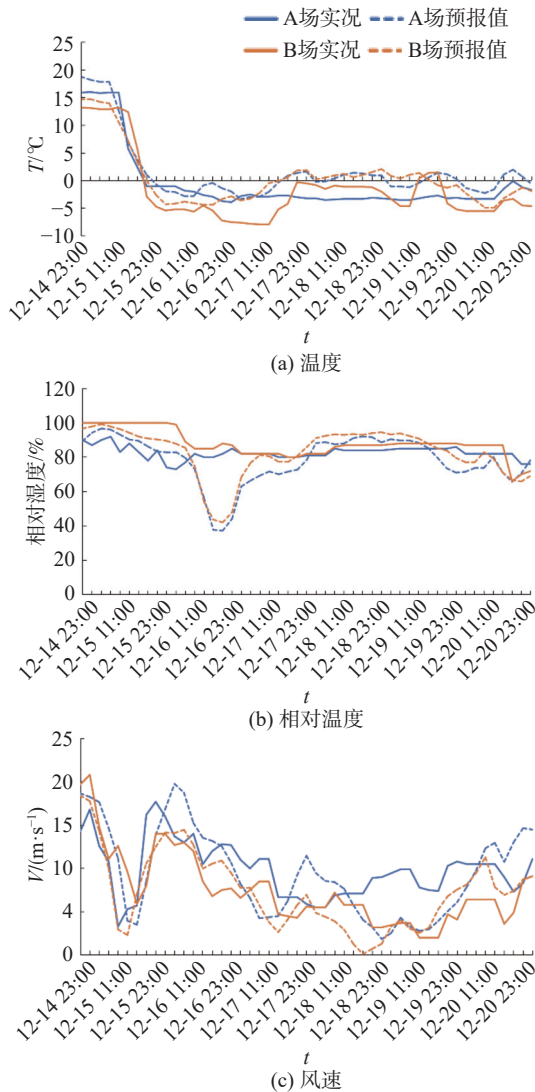


图 7 2023 年 12 月 15—20 日广西北部某 2 个风电场气温、相对湿度、风速实况与预报图

Fig. 7 Actual value and predicted value of air temperature, relative humidity and wind speed of two wind farms in northern Guangxi from December 15 to 20, 2023

表 2 2023 年 12 月 15—20 日 A、B 风电场的气温、相对湿度和风速的实际值与预测值的平均绝对误差 (MAE)

Tab. 2 Mean absolute error between actual value and predicted value of the air temperature, relative humidity and wind speed of the A and B wind farms from December 15 to 20, 2023

风电场	气温/°C		相对湿度/%		风速/(m·s ⁻¹)	
	MAE	相关系数	MAE	相关系数	MAE	相关系数
A	2.3914	0.9521	9.7535	0.3304	3.7094	0.5507
B	2.6513	0.9289	8.5626	0.4945	2.1949	0.7752

持续性的影响下,风电场 A 与风电场 B 的相对湿度虽有所下降,但始终维持着充足的水汽条件,实际相对湿度均小幅波动,总体维持在 80% 以上。2 个风电场的预测相对湿度在 16 日 8 时—17 日 8 时短暂低于 80%,其余时段与实际值相近。在这一时段内,预测模型显示的湿度下降趋势均比实际更为显著。此外,在 17 日的偏南暖湿气流作用下,预测的湿度上升趋势略高于实际值。

风速方面(图 7(c)),风电场 A 和风电场 B 风速的 MAE 约为 3.71 m/s、2.19 m/s,相关系数依次达到 0.55 和 0.78(表 2)。风电场 A 和风电场 B 的实际风速和预测风速均呈现“下降-上升-下降-上升”的趋势,曲线吻合度为一般。同时趋势变化还反映了锋前弱风的天气现象,风电场 A 的预测风速表现出滞后性,而风电场 B 则表现出提前性,且预测风速的幅度普遍高于实际风速。具体来说,风电场 A 和风电场 B 的实际最低值出现在 15 日 11 时和 19 日 10 时,分别为 3.3 m/s 和 2 m/s,预测最低值出现在 18 日 23 时和 18 日 17 时,分别为 1.8 m/s 和 0.1 m/s。

根据上述分析,2 个风电场气温的预测效果均优于相对湿度和风速,而高海拔风电场气温、相对湿度和风速的预测效果普遍高于低海拔风电场。同时 2 个风电场气温、相对湿度和风速的预测值变化趋势与实际值大致近似,但预测值比实际值变化幅度较大。在冷空气持续性影响下,2 个风电场对 17 日出现的转折性天气,即偏南暖湿气流的影响表现出不同的反应。这导致不同海拔高度的风电场在凝冰受限容量上呈现出不同的变化趋势。高海拔风电场 B 的提前 24 h 预测结果优于低海拔风电场 A。风电场 A 的预测偏差主要由于模型未能充分考虑 17—20 日低层偏南暖湿气流的影响。在此过程中,2 个风电场的气温、相对湿度和风速均处在适宜风机凝冰的气象条件下,因此,风电场 B 的凝冰受限容量能够维持最大值,而风电场 A 的凝冰受限容量则逐渐增大至最大值。

4 讨论

在研究 2023 年 12 月广西一次极端寒潮天气对风机凝冰受限容量的影响时,研究发现在寒潮期间出现了 3 次显著的转折性天气事件:15 日下午的短时强降温和锋前弱风、17 日下午低层偏南暖湿气流

的影响、20日凌晨暖湿气流的减弱和冷空气的持续南下。这些气象变化导致预测误差增大,具体分析如下:

12月15日,在水汽条件良好的背景下,广西地区的风机因受到冷空气的强烈影响,气温的预测值和实际值均降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。这表明模型能够准确捕捉到实际发生的短时强降温天气现象,但急剧的降温也导致凝冰受限容量预测的初始值较实际值偏大。同时,模型在预测锋前弱风的强度上与实际观测也存在偏差,预测风速低于风机的切入风速(3 m/s),与实际不符。这导致模型预测的凝冰受限容量不仅包括了低温导致的凝冰,还额外包含了风机因弱风停机而增加的受限容量。

12月17日,广西地区受低层偏南暖湿气流的影 响,出现了持续的低温阴雨天气,有利于风机凝冰。模型预测与实际观测在气温和风速上均显示了这一趋势,且两者的值都处于凝冰的理想范围内。同时,暖湿气流为风机凝冰提供了充足的水汽。尽管如此,模型在预测相对湿度时未能完全反映暖湿气流的影 响,导致预测的相对湿度值偏低。这一偏差影响了凝冰预测的准确性,使得模型预测的凝冰受限容量 低于实际值。

12月20日,随着低层偏南暖湿气流的减弱和冷 空气的持续南下补充,广西的天气由阴雨转为晴朗, 这一转变导致相对湿度降低,昼夜温差增大,日间最 高气温缓慢上升,部分风机开始融冰。夜间辐射降 温使得最低气温保持低位,一些风机短暂维持凝冰, 但总体凝冰受限容量呈减少趋势。模型对暖湿气流 减弱的反应不足,而对冷空气南下的反应较为敏感。 在风速适宜的情况下,模型预测气温和相对湿度下 降,导致凝冰受限容量在短期内先升后下降。

5 结论

文章通过应用风机凝冰受限容量预测模型,结 合常规气象观测资料、风机停机实况数据及数值模 式等资料,对2023年12月15—26日广西地区极端 寒潮期间的风机凝冰情况进行了深入分析,所得结论 如下:

1) 预报员通过融合数值预报产品与凝冰受限容 量的实况数据,并应用回归分析进行实时订正。结 果表明,预报员的经验和订正对凝冰预测受限容量

的准确性有一定的正面影响。然而,由于对本次天 气系统的理解、地形地貌的掌握、凝冰厚度预测以 及短时临近预报的经验尚不充分,预报的准确性和 时效性需要进一步提高。

2) 风机凝冰受限容量预测模型在应对强冷空气 南下影响风电场时表现较强。但在寒潮背景下,对 于锋前弱风和偏南暖湿气流等转折性天气现象的响 应不足,导致模型预测的凝冰受限容量普遍高于实际值。

3) 寒潮作为极端突变天气,数值天气模式对极 端突变天气的模拟容易出现幅值偏差和相位偏差。 针对模型3大气象要素的对比分析,模型气温预测 效果普遍优于相对湿度和风速,这得益于对模型预 测气温的订正^[19],而低层地形复杂多变,导致低海拔 场站的气象要素预测效果则低于高海拔。整体来看, 数值模式预报结果虽然与实况大致相符,但预测幅 度普遍偏大,这进一步导致凝冰受限容量的预测结 果超出实际值。同时低海拔风机凝冰受限容量预测 难度要大于高海拔地区。

为提高极端寒潮天气下风机凝冰预测受限容量 的准确率,并为电力生产调度提供科学依据,以实现 零弃风、全额消纳的目标,提升发电效益。在后续 的工作中建议加强特殊天气的诊断工作,提升对寒潮 等极端天气的预警预测能力,针对寒潮影响严重的 地区开展更精细化的预报预警服务。同时开展凝冰 受限容量预测模型的升级改造工作,提高数值天气 预报准确度,完善场站实况数据的精准收集,确保数 据的可靠性和实用性。

参考文献:

- [1] 广西壮族自治区人民政府办公厅. 广西壮族自治区人民政府 办公厅关于印发广西能源发展“十四五”规划的通知 [J]. 广 西壮族自治区人民政府公报, 2022(24): 2-24.
General Office of the People's Government of Guangxi Zhuang Autonomous Region. General Office of the People's Government of Guangxi Zhuang Autonomous Region on the issuance of Guangxi energy development "14th five-year plan" notice [J]. Gazette of the People's Government of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 2022(24): 2-24.
- [2] 张康,孙国文. 电力保供的当下之计与长远之策 [J]. 中国电力 企业管理, 2022(19): 57-59.
ZHANG K, SUN G W. Current measures and long-term strategies for power supply [J]. China power enterprise management, 2022(19): 57-59.
- [3] 王艳兰,伍静,唐桥义,等. 广西长低温雨雪冰冻过程环流特征

- 及低温扰动分析 [J]. *气象科技*, 2022, 50(1): 75-84. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20200439.
- WANG Y L, WU J, TANG Q Y, et al. Analysis on characteristics of atmospheric circulation and low temperature disturbance of long-term catastrophic freezing weather in Guangxi [J]. *Meteorological science and technology*, 2022, 50(1): 75-84. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20200439.
- [4] 吴文倩. 不同气象预测数据源对山地风电场风速预测准确率的影响分析 [J]. *气象研究与应用*, 2022, 43(1): 31-35. DOI: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.06.
- WU W Q. Analysis on the influence of different meteorological forecast data sources on the accuracy of wind speed prediction in mountain wind farms [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2022, 43(1): 31-35. DOI: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.06.
- [5] 易贤, 王开春, 马洪林, 等. 大型风力机结冰过程水滴收集率三维计算 [J]. *空气动力学学报*, 2013, 31(6): 745-751.
- YI X, WANG K C, MA H L, et al. 3D numerical simulation of droplet collection efficiency in large-scale wind turbine icing [J]. *Acta aerodynamica sinica*, 2013, 31(6): 745-751.
- [6] 曾琦, 陈正洪. 近年来气象灾害对风电场影响的研究进展 [J]. *气象科技进展*, 2019, 9(2): 49-55. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.010.
- ZENG Q, CHEN Z H. A review of the effect of meteorological disasters on wind farms in recent years [J]. *Advances in meteorological science and technology*, 2019, 9(2): 49-55. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.010.
- [7] 广西壮族自治区气候中心. 广西气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- Guangxi Zhuang Autonomous Region Climate Center. The climate of the Guangxi Zhuang Autonomous Region [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [8] 谷昱君, 黄永章, 杨鑫, 等. 新能源采用同步电机对 (MGP) 并网暂态稳定性研究 [J]. *南方电网技术*, 2021, 15(3): 32-38. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.03.005.
- GU Y J, HUANG Y Z, YANG X, et al. Transient stability research on renewable energy adopting motor-generator pair (MGP) for grid-connection under grid fault [J]. *Southern power system technology*, 2021, 15(3): 32-38. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.03.005.
- [9] 檀丛青, 王志奇, 陈柳明, 等. 高寒高海拔地区风光互补热电联供系统多目标优化研究 [J]. *分布式能源*, 2020, 5(4): 43-50. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2003001.
- TAN C Q, WANG Z Q, CHEN L M, et al. Multi objective optimization of wind-solar hybrid heat and power generation system in frigid and high-altitude area [J]. *Distributed energy*, 2020, 5(4): 43-50. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2003001.
- [10] 李妍君, 何洁琳, 何慧, 等. 2022 年 2 月广西罕见低温雨雪冰冻过程气候特征分析 [J]. *气象研究与应用*, 2022, 43(4): 109-114. DOI: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.4.18.
- LI Y J, HE J L, HE H, et al. Climatic characteristics of rare low temperature, rain and snow freezing process in Guangxi in February 2022 [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2022, 43(4): 109-114. DOI: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.4.18.
- [11] 黄治娟, 胡志光, 张秀丽, 等. 风机叶片防覆冰技术研究 [J]. *华北电力*, 2014(6): 16-19, 37. DOI: 10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2014.06.007.
- HUANG Z J, HU Z G, ZHANG X L, et al. Research on wind turbine blade anti-ice coating technology [J]. *North China electric power*, 2014(6): 16-19, 37. DOI: 10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2014.06.007.
- [12] 吴光军, 孙志禹, 朱亚伟, 等. 风电机组叶片防覆冰技术研究分析 [J]. *风能*, 2016(9): 62-64. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2016.09.018.
- WU G J, SUN Z Y, ZHU Y W, et al. Research and analysis of anti-icing technology for wind turbine blades [J]. *Wind energy*, 2016(9): 62-64. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2016.09.018.
- [13] 杨亚炬. 风电机组叶片覆冰安全运行边界条件研究 [J]. *河南科技*, 2019(16): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5168.2019.16.024.
- YANG Y J. Boundary conditions for safe operation of wind turbine blades covered with ice [J]. *Henan science and technology*, 2019(16): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5168.2019.16.024.
- [14] 舒立春, 任晓凯, 胡琴, 等. 环境参数对小型风力发电机叶片覆冰特性及输出功率的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(21): 5873-5878. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.151582.
- SHU L C, REN X K, HU Q, et al. Influences of environmental parameters on icing characteristics and output power of small wind turbine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21): 5873-5878. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.151582.
- [15] BARBER S, WANG Y, JAFARI S, et al. The impact of ice formation on wind turbine performance and aerodynamics [J]. *Journal of solar energy engineering*, 2011, 133(1): 011007. DOI: 10.1115/1.4003187.
- [16] LAMRAOUI F, FORTIN G, BENOIT R, et al. Atmospheric icing impact on wind turbine production [J]. *Cold regions science and technology*, 2014, 100: 36-49. DOI: 10.1016/j.coldregions.2013.12.008.
- [17] 舒立春, 李瀚涛, 胡琴, 等. 自然环境叶片覆冰程度对风力机功率损失的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(18): 5599-5605. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171001.
- SHU L C, LI H T, HU Q, et al. Effects of ice degree of blades on power losses of wind turbines at natural environments [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(18): 5599-5605. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171001.
- [18] 许杨, 陈正洪. 风电场风机覆冰期预报方法 [J]. *气象科技*, 2021, 49(6): 923-929. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20210095.
- XU Y, CHEN Z H. Method for forecasting duration of wind

- turbine icing in wind farms [J]. *Meteorological science and technology*, 2021, 49(6): 923-929. DOI: [10.19517/j.1671-6345.20210095](https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.20210095).
- [19] 李仲怡, 叶庚姣, 卢小凤, 等. 基于 Makkonen 结冰增长模型的风力机覆冰预报 [J]. *广东电力*, 2020, 33(10): 127-133. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2020.010.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2020.010.014).
LI Z Y, YE G J, LU X F, et al. Wind turbine ice prediction based on Makkonen icing growth model [J]. *Guangdong electric power*, 2020, 33(10): 127-133. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2020.010.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2020.010.014).
- [20] MAKKONEN L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [J]. *Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 2000, 358(1776): 2913-2939. DOI: [10.1098/rsta.2000.0690](https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0690).
- [21] MAKKONEN L. Modeling power line icing in freezing precipitation [J]. *Atmospheric research*, 1998, 46(1/2): 131-142. DOI: [10.1016/S0169-8095\(97\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(97)00056-2).
- [22] MAKKONEN L. Modeling of ice accretion on wires [J]. *Journal of climate and applied meteorology*, 1984, 23(6): 929-939. DOI: [10.1175/1520-0450\(1984\)023<0929:MOIAOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0929:MOIAOW>2.0.CO;2).
- [23] MAKKONEN L, LAAKSO T, MARJANIEMI M, et al. Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines [J]. *Wind engineering*, 2001, 25(1): 3-21. DOI: [10.1260/0309524011495791](https://doi.org/10.1260/0309524011495791).
- [24] 吴文倩. 不同气象预测数据源对山地风电场风速预测准确率的影响分析 [J]. *气象研究与应用*, 2022, 43(1): 31-35. DOI: [10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.06](https://doi.org/10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.06).
WU W Q. Analysis on the influence of different meteorological forecast data sources on the accuracy of wind speed prediction in mountain wind farms [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2022, 43(1): 31-35. DOI: [10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.06](https://doi.org/10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.06).
- [25] 卓毅鑫, 秦意茗, 胡甲秋, 等. 基于组合权重的多模式融合风机气温预测方法 [J]. *南方电网技术*, 2023, 17(2): 111-117. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2023.02.013](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2023.02.013).
ZHUO Y X, QIN Y M, HU J Q, et al. Multi-mode fusion fan temperature prediction method based on combination weight [J]. *Southern power system technology*, 2023, 17(2): 111-117. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2023.02.013](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2023.02.013).
- [26] 国家能源局. 陆上风电场覆冰环境评价技术规范: NB/T 10629—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
National Energy Administration. Technical code of icing environmental evaluation for onshore wind power projects: NB/T 10629—2021 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.

作者简介:



蓝浩宸

蓝浩宸(第一作者)

1997-, 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事气象防灾减灾和专业气象服务工作(e-mail) lhc0071@163.com。

卢炳夫

1985-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事行业气象服务工作(e-mail) lu19320@163.com。

李仲怡

李仲怡(通信作者)

1992-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事专业气象预报研究与服务工作(e-mail) 964423632@qq.com。

黄丹

1992-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事雷电监测预警工作(e-mail) 279197396@qq.com。

李勇

1979-, 男, 高级工程师, 学士, 主要从事专业气象预报研究与服务工作(e-mail) 35717774@qq.com。

赵金彪

1969-, 男, 正研级高级工程师, 硕士, 主要从事天气气候研究与预报服务工作(e-mail) zjb0073@126.com。

(责任编辑 孙舒)