

桂北低温冰冻天气对高山风力发电的影响分析

阳薇¹, 秦川², 曾毓琳¹, 伍静¹, 李向红^{1,✉}

(1. 广西桂林市气象局, 广西 桂林 541001;
2. 广西壮族自治区气候中心, 广西南宁 530022)

摘要: [目的] 风资源丰富的湘桂走廊, 也是冷空气南下广西的通道。每到冬季, 常常出现低温、冰冻等灾害性天气, 会导致风机叶片覆冰、材料及结构性能改变、载荷改变等多种问题, 造成风机使用寿命降低、影响发电产能。在广西, 寒潮低温天气对风力发电的影响受到广泛关注, 低温条件对风电场运行阶段有着重要的影响, 目前鲜有对于风电机组低温天气运行及其影响进行统计分析的研究。[方法] 文章利用实况观测资料、欧洲中心 ERA5 的 0.25×0.25 再分析资料, 以及广西风电公司有关凝冰停机及弃风电损数据, 分析了 2023 年 12 月 15 日~24 日低温冰冻天气过程对桂林北部高山风力发电业务的影响, 同时分析了桂林灾害性低温冰冻天气的形成机理与预报技术。[结果] 发现环境温度、空气湿度与风电损耗存在相关的关系, 得出相关性公式。[结论] 成果将为未来桂林高山风电场低温天气的预报预警及风力发电功率预测提供基础。利用数值预报的温度预报产品, 提前预报未来逐日停机台数和电损, 助力风功率预测。同时高精度冰冻灾害天气预报预警可优化客户资源配置, 降低客户财产损失, 确保人员和设备安全。

关键词: 风力发电; 湘桂走廊; 低温冰冻; 风机凝冰; 弃风电损; 高精度冰冻灾害天气; 预报预警

中图分类号: TK89; P747

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

OA: <https://www.energychina.press/>

Analysis of the Impact of Low Temperature and Freezing Weather in Northern Guangxi on High-Altitude Wind Power Generation

YANG Wei¹, QIN Chuan², ZENG Yulin¹, WU Jing¹, LI Xianghong^{1,✉}

(1. Guilin Meteorological Bureau of Guangxi, Guilin 541001, Guangxi, China;

2. Climate Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, Guangxi, China)

Abstract: [Introduction] The Hunan-Guangxi Corridor, rich in wind resources, is a channel for cold air to move southward into Guangxi. Every winter, there are often severe weather conditions such as low temperatures and freezing, which can lead to problems such as ice coating on wind turbine blades, changes in material and structural properties, and changes in load, resulting in reduced service life of wind turbines and affecting power generation capacity. In Guangxi, the impact of cold wave and low temperature weather on wind power generation has received widespread attention. Low temperature conditions have a significant impact on the operation phase of wind farms. Currently, there are few studies that statistically analyze the operation of wind turbines under low-temperature conditions and their impacts. [Method] This paper utilized real-time observation data and 0.25 × 0.25 reanalysis data from the European Center ERA5, as well as data from wind energy companies in Guangxi on ice induced shutdowns and wind curtailment power losses. An analysis was conducted on the impact of the low temperature and freezing weather from December 15 to 24, 2023 on the high-altitude wind power generation in northern Guilin. Simultaneously, the formation mechanism and forecasting techniques of Guilin's severe low temperature and freezing weather were analyzed. [Result] It is found that there is a correlation between environmental temperature, air humidity, and wind power loss, and a correlation formula is derived. [Conclusion] This research provides a foundation for further prediction and early warning of low temperature weather and wind power generation in Guilin high-altitude wind farm. Using temperature forecasting products from numerical forecasting, the number of daily shutdowns and power losses in the future can be predicted in advance, assisting in wind power forecasting. At the same time, high-precision freezing disaster weather forecast and warning can optimize customer resource allocation, reduce customer property losses, and ensure personnel and equipment safety.

基金项目: 广西自然科学基金项目; 桂科计字[2023]26号“漓江烟雨的预报方法研究和应用”(2023GXNSFBA026359)

Key words: wind power generation; Hunan-Guangxi Corridor; low-temperature freezing; fan icing; wind curtailment power losses; high-accuracy freezing disaster weather; forecast and warning

0 引言

风力发电是一种不消耗矿物质能源、不污染环境、建设周期短、建设规模灵活、具有良好的社会效益和经济效益的新能源项目。风电的开发,符合国家能源政策和电力工业发展的需要,也是地方经济的可持续发展、人民的物质文化生活水平提高的需要。目前,中国已经成为全球最大的风电市场之一^[1],风资源丰富的湘桂走廊,也是桂林市的全州,资源、兴安、灵川和恭城县一带,是广西的风电场主要集中地之一,常常建设在海拔 800 m 以上的高山上。多项研究与实践表明,风机设备运行安全保障与气象行业密切关联。由于桂林地处桂东北,湘桂走廊也是冷空气南下广西的通道,每到冬季,常常出现寒潮大风、雨夹雪、冻雨、结冰、雾凇、雨凇等灾害性天气,低温会导致风机叶片覆冰、材料及结构性能改变、载荷改变等多种问题,造成风机使用寿命降低、影响发电产能^[2]。

多项研究表明^[3],发电机组在低温下运行会造成叶片、齿轮箱、轴承等传动部件寿命减少。当风机叶片凝冰后,会造成叶片翼型发生变化,从而影响叶片周围的流场,严重降低叶片的空气动力特性;机组输出功率损失严重,发电效率降低,出力减少^[4]。叶片载荷随着冰层厚度的增加而增加,极端情况下会造成风塔整体坍塌或局部破损。由于惯性力可能造成叶片的高幅震动。覆冰会造成并网运行风电场的非计划停机,对电网安全调度带来风险。覆冰后叶片产生的振动和噪音会影响附近区域的居民。覆冰融化松动后会发生“甩冰”现象,甚至会被抛出数百米远,对建筑物、车辆等造成危害,甚至威胁到人们的生命安全。而当输电线路因覆冰过重,造成荷载冲击,发生断线,杆塔断杆,倒塌影响电力输送。

目前,国内外有一些关于风机叶片覆冰模型的研究,覆冰模型方法主要分为覆冰增长模型和经验模型^[5-6]。有基于回归和判别分析的电线积冰厚度预报方法^[7-8],也有通过统计分析,研究电线积冰与积冰逆温层结相关性研究^[9-14]。在广西,寒潮低温天气对风力发电的影响受到广泛关注,低温条件对风电场

运行阶段有着重要的影响,有很多关于寒潮和低温冰冻形成机制的研究^[15-20],但是鲜有对风电机组在低温天气运行及其影响进行统计分析的研究。桂林位于广西北部,风能丰富,风电场多半分布在海拔较高的山区,低温冰冻,对风资源预测、风机运行发电、人员设备的安全等影响很大。2023 年 12 月,桂林出现了 1 次寒潮天气过程,特别是位于资源、兴安等县的高山风电场出现了持续冰冻天气,针对这次低温过程对风电的影响开展了分析。

1 资料和方法

1.1 风电数据

由国家电投集团广西金紫山风电有限公司提供的 2023 年 12 月 15 日~24 日期间坵坪风电场、马家风电场和金紫山风电场的停运及电损数据。坵坪风电场位于广西桂林兴安县境内海拔在 250~1 300 m,马家风电场位于广西桂林资源县瓜里乡与车田乡境内海拔 1 000~1 400 m 以上高山丘陵,金紫山风电场位于金紫山山脉,位于广西桂林资源县车田乡脚古冲村和瓜里乡金江村境内海拔 1 300 m 以上高山丘陵区。

1.2 气象数据

采用欧洲中心 ERA5 再分析资料的温度、气压和风分析这次雨雪冰冻过程成因,2023 年 12 月 15 日~24 日兴安国家基本气象站(以下简称兴安站)、资源县隘门界气象观测站(以下简称隘门界站)的日最高气温、日最低气温、日平均气温、降水和相对湿度观测数据。

需要说明的是,由于地面气象站点和风电场的空间位置不匹配(见图 1),分析时,坵坪风电场采用的是兴安站日最低气温数据按气温垂直递减率 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 推算到坵坪风电场最高海拔轮毂高度(设定 100 m)处,马家风电场和金紫山风电场直接采用的是距离、海拔高度较近的隘门界站的观测数据进行对比分析。

2 低温冰冻天气实况

2023 年 12 月 15 日~24 日,受强冷空气南下,

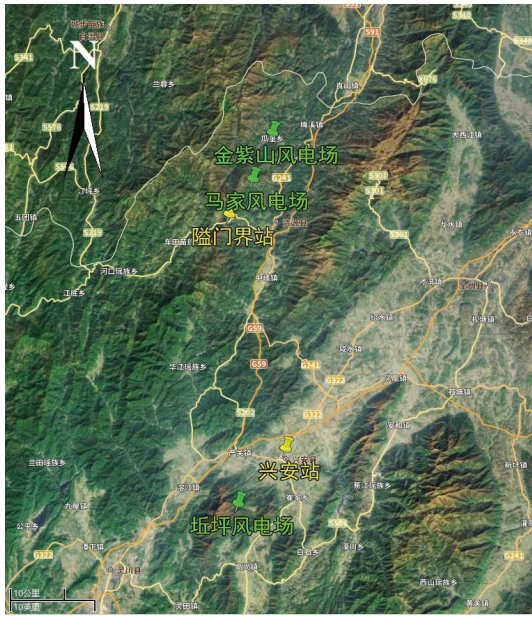


图 1 地面气象站点和风电场地理位置示意图

Fig. 1 Geographical location diagram of ground meteorological stations and wind farms

以及地形、冷暖系统相互作用等影响, 桂林先后出现强寒潮、低温雨雪冰冻、霜冻的长低温天气过程。此次强冷空气天气过程具有降水相态多样、降温快速, 降温幅度大等特点。

2.1 降雨相态多样

2023 年 12 月 15 日~16 日, 冷空气主力在南岭北侧稍有停留, 只有一些冷空气渗透到桂林北部, 桂林北部出现降水。16 日开始冷空气南下, 桂林北部的资源、兴安、全州、灌阳县和中南部的高寒山区出现雨夹雪或冻雨天气, 中南部出现小雨, 坵坪风电场所在地位于兴安, 也出现雨夹雪或冻雨天气, 降雨量普遍为小雨, 1/5 的站出现中雨到大雨, 雨雪从 16 日持续到 19 日, 20 日后转为晴冷天气, 由于辐射降温影响, 21 日~25 日冰冻持续, 部分地区还出现霜冻。

本次过程具有降雨相态多样特点, 由于强冷空气影响, 全市大部最低气温降至 0℃ 左右, 全州、资源、龙胜、兴安、灌阳及高寒山区出现雨夹雪、雨淞、雾淞、冰冻和道路结冰, 灵川、永福、桂林市、临桂、阳朔、平乐等局部有冰冻和霜冻。具体凝冻实况如表 1 所示。

2.2 降温剧烈, 大部出现寒潮

如图 2 所示, 从 15 日~17 日, 全市都达到 48 h 降温幅度 ≥ 8℃, 最低平均温度低于 ≤ 7℃ 寒潮标准。

表 1 2023 年 12 月 16 日~25 日低温雨雪冰冻实况
Tab. 1 Chilling icy rain and snow freezing practical data from December 16 to 25, 2023

雨夹雪 (16日~20日)	冰冻和道路结冰 (16日~20日)	冻雨 (16日~25日)	霜/冰冻 (21日~25日)
资源、全州、龙胜、兴安、灌阳	资源、全州、龙胜、兴安、灵川、永福、阳朔、灌阳、桂林市区	全州、临桂、永福、灌阳	资源、全州、龙胜、兴安、灵川、临桂、永福、阳朔、桂林市区、平乐、恭城、灌阳、荔浦

风电场所在地的资源和兴安 15 日~16 日的日平均气温降幅分别达 9.5℃ 和 14.2℃, 16 日平均气温最低分别为 2.3℃ 和 7.3℃, 达到寒潮天气过程和寒潮蓝色预警信号标准, 平均气温 7℃ 以下持续至 26 日。16 日资源兴安最低气温降至 4℃, 17 日开始资源和兴安最低气温降至 0℃ 以下, 高寒山区最低 -10℃, 导致北部及高寒山区出现雨雪冰冻及道路结冰等。

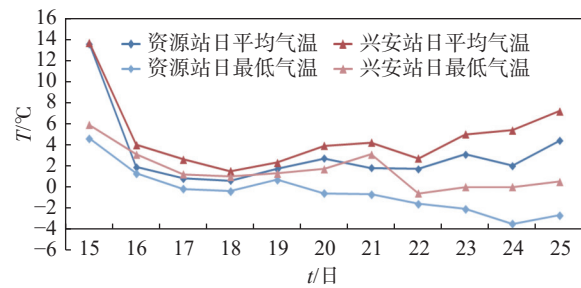


图 2 2023 年 12 月 14 日~25 日资源兴安日平均气温、最低气温时序图

Fig. 2 Time series diagram of daily average temperature and minimum temperature in Xing'an and Ziyuan from December 14 to 25, 2023

2.3 主要低温时段气温明显偏低

本次过程主要低温时段为 12 月 16 日~22 日, 与历史同期对比, 资源 2023 年 12 月 16 日~22 日最低气温平均为 -0.2℃, 同时段资源最低气温多年均值为 4.1℃, 偏低 4.3℃; 兴安 2023 年 12 月 16 日~22 日最低气温平均为 1.5℃, 同时段兴安最低气温多年均值为 5.7℃, 偏低 4.2℃。资源 2023 年 12 月 16 日~22 日平均温度为 7.5℃, 同时段平均温度为 1.6℃, 偏低 5.9℃, 兴安 2023 年 12 月 16 日~22 日平均温度为 3℃, 同时段平均温度为 8.8℃, 偏低 5.8℃。

2.4 北风强、范围广

风力最大主要发生在 16 日冷空气过境时, 全市

偏北风 5~6 级, 湘桂走廊铁路沿线阵风 8 级以上, 最大风速出现在 16 日。

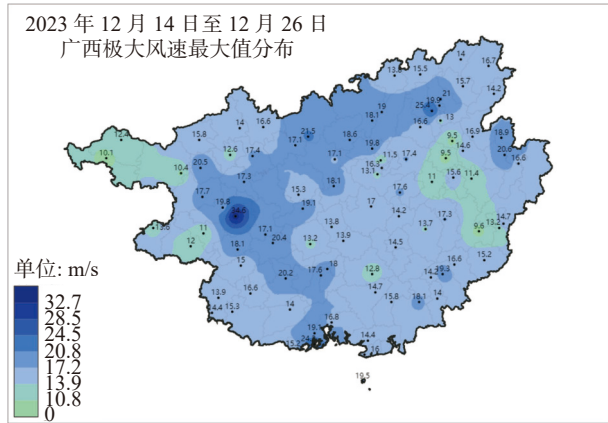


图 3 2023 年 12 月 14 日~26 日广西极大风速分布示意图
Fig. 3 Extreme wind speed from the 14th to the 26th

3 低温雨雪冰冻成因分析

根据 ERA5 资料可知, 本次低温过程降温幅度大和气温低是由地面高压异常偏强、乌拉尔山阻塞高压建立和横槽转竖引导冷空气南下导致。

3.1 地面巴尔克什湖冷高压中心异常偏强

2023 年 12 月 13 日~14 日地面巴尔克什湖冷高压中心加强并维持在 1 080 hPa 以上(图 4(a)), 异常偏强。到 15 日 20 时, 由于地面冷空气南移, 地面巴湖冷高压中心稍有减弱, 但冷高压的前锋南移影响华南北部地区(图 4(b)), 16 日~17 日, 地面冷空气继续南下, 巴湖冷高压中心强度减弱至 1 067 hPa, 冷空气主力从湘桂走廊进入桂林(图 4(c)), 大部分县市出现强寒潮及大风天气, 桂林北部的资源、全州和兴安出现了雨雪及冰冻等天气。18 日~19 日地面巴湖冷高压中心再次加强至 1 075 hPa 以上(图 4(d)), 一股新冷空气继续补充南下, 导致桂林北部县的雨雪冰冻维持。

3.2 乌拉尔山阻塞高压建立

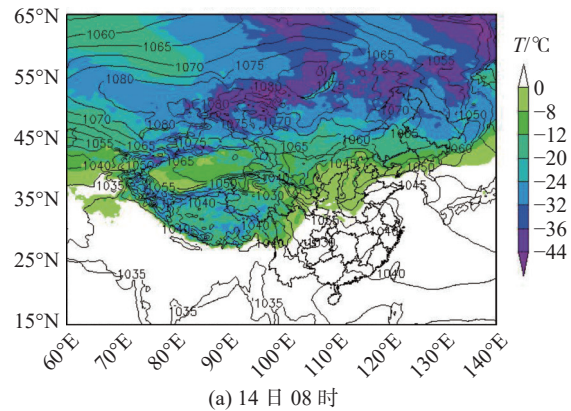
2023 年 12 月 13 日~14 日, 500 hPa 中高纬乌拉尔山阻塞高压形成, 对应地面巴尔克什湖冷高压的位置, 500 hPa 是深厚的切断低涡, 冷涡中心达到 -45°C (图 5(a))。阻塞高压外围的横槽在强劲的偏北风作用下逐渐转竖, 并不断有小槽分裂南下, 引导地面冷空气南下影响华南北部(图 5(b)~图 5(c)), 导致桂北出现雨雪天气; 18 日~19 日 500 hPa 阻塞高压崩

溃, 再次引导地面冷空气补充南下(图 5(d)), 推动桂北一带切变线、锋区及 0°C 线南移, 再次造成雨雪冰冻天气。

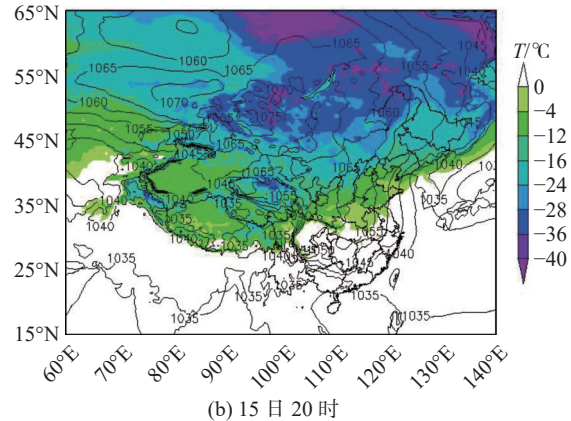
20 日之后受槽后宽广的高压脊及地面冷高压控制, 天气转为晴冷天气, 地面贝湖冷高压中心 19 日~21 日维持在 1 070 hPa 以上, 晴冷天气维持霜冰冻 3 d 以上。

3.3 雨雪相态分析

17 日的 500 hPa 高度的温度阴影图如图 6 所示。位于桂林中北部及高寒山区的风电场在 18 日~19 日出现明显冰粒、雨夹雪天气和冻雨天气, 导致风机覆冰, 从 18 日 08 时桂林站探空剖面图(图 7)可见, 湿层位于 665~900 hPa, $t\text{-}t_d < 1^{\circ}\text{C}$ (基本重合), 湿层较厚, 近地面气温为 $0\sim 3^{\circ}\text{C}$, 3.5 km 以下基本为 0°C 以下过冷却水滴, 600~850 hPa 有两层 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的暖层, 有逆温层, 融化很明显, 近地面在 3°C 以内, 探空廓线和 0°C 线有三个交点, 上下冷, 中间暖的状态, 有利形成雨夹雪和冻雨, 桂林市城区主要是分散性的雨夹雪天气, 高山站出现冻雨和雨夹雪并存。



(a) 14 日 08 时



(b) 15 日 20 时

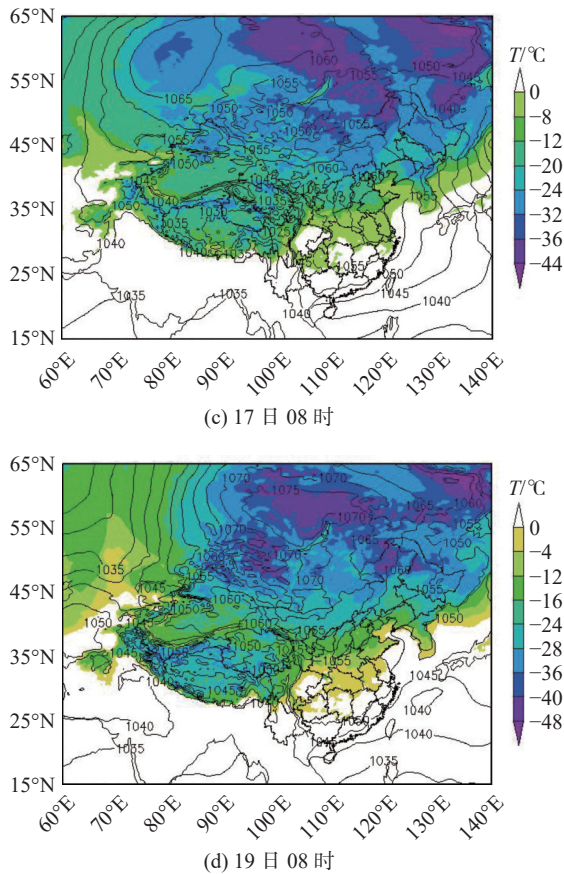


图 4 地面气压场(黑色实线,单位:hPa)和温度场(阴影,单位:℃)的演变
 Fig. 4 Evolution of ground pressure field (black solid line, unit: hPa) and temperature field (shadow, unit: °C)

逆温是导致冻雨、雨夹雪的关键,在风电的低温覆冰预警预报服务中,预报逆温的出现与维持是关键。

4 风机覆冰对桂北风电运行影响

寒潮期间,冷冻的细雨、湿雪或结冰雾、云和霜与风机叶片表面长时间慢速碰撞,逐渐导致风机叶片出现覆冰。研究表明^[1-6],风电机组覆冰形成的主要条件是存在逆温层、环境温度低于 0 °C、叶片表面低于-5 °C、空气湿度在 85% 以上。风电机组叶片覆冰和风电场的环境温度、空气湿度等存在直接的联系。环境温度,给叶片覆冰影响最直接也最为明显。空气湿度,其高低对于叶片覆冰的形成是有绝对性影响的,还易导致雨淞的出现。

4.1 风机叶片覆冰,损失直接,数量巨大

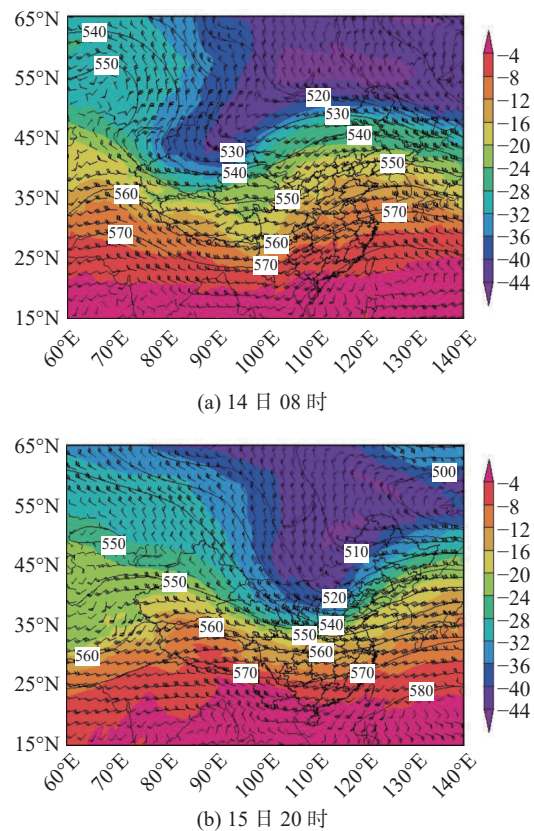
受强冷空气影响,2023 年 12 月 15 日开始,国家

电投集团广西金紫山风电有限公司经营的三个风电场陆续出现因低温冰冻引起的大规模凝冰停机。当冷空气过境时,一直有连续降雨,空气中液态水含量大,降温过程中伴随大风,具备了叶片结冰条件。分析此次寒潮天气过程中环境温度(日最高气温、日最低气温、日平均气温)、空气湿度对三个风电场发电量的影响,经统计,此次寒潮过程中,三个风电场因凝冰弃风共损失电量 64.375 4 GWh,损失巨大。

4.2 环境温度对弃风电损的影响

统计此次寒潮过程日最高气温、日最低气温、日平均气温和风电场日凝冰弃风损失电量,如图 5 所示,15 日~16 日,气温迅速下降,最低气温降至 0 °C 以下,因凝冰弃风损失电量迅速增多。整个过程坭坪风电场最低温度出现在 18 日,当日整个风电场风机全部停机,损失电量 7 060.8 MWh;金紫山风电场、马家风电场最低温度出现在 17 日,当日两个风电场风机全部停机,金紫山风电场损失电量 625.1 MWh,马家风电场损失电量 593.1 MWh。

20 日之后,天气迅速转为晴冷。白天晴空无云,夜间辐射降温也能导致一部分的结冰难以消融,凝



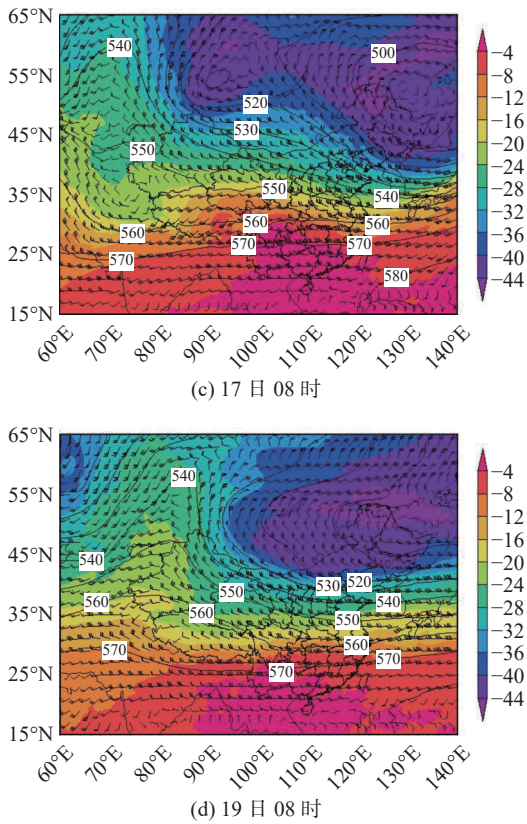


图5 500 hPa 气压场(黑色实线,单位:hPa)、温度场(阴影,单位:℃)和风场(单位:m/s)的演变
 Fig. 5 Evolution of 500 hPa pressure field (black solid line, unit: hPa), temperature field (shadow, unit: °C) and wind field (unit: meters/second)

冻维持但时间短。随着气温快速回升,覆冰逐步减少,电力开始恢复。

4.3 空气湿度对弃风电损的影响

统计此次寒潮过程日平均相对湿度和风电场日凝冰停机情况,如图6所示,15日~16日,桂林北部出现降水,高寒山区出现雨夹雪或冻雨天气,空气湿

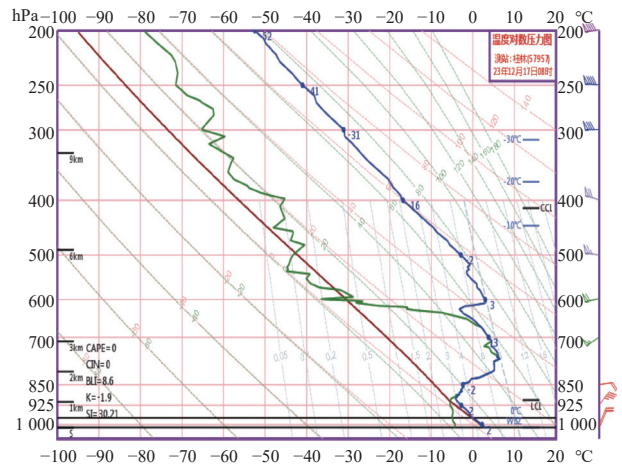


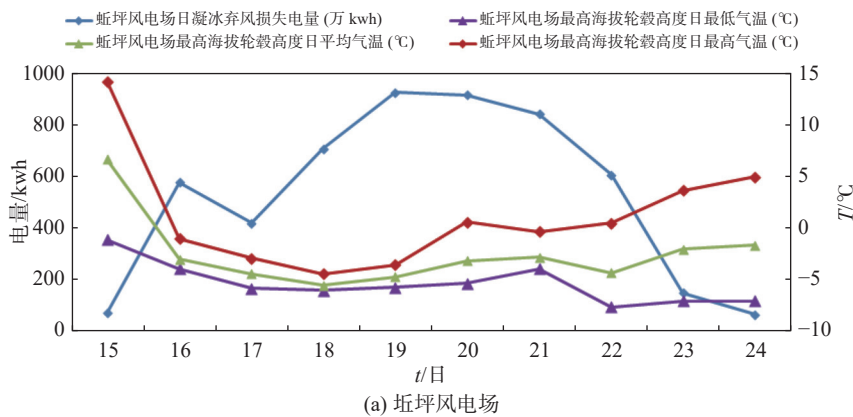
图6 2023年12月18日桂林站探空图
 Fig. 6 Sounding chart of Guilin on December 18, 2023

度非常高,甚至超过了90%,出现叶片覆冰。当冷空气过境,最低气温降至0℃以下,风电机组凝冰停机迅速增多。20日之后,白天天气晴好,北风维持,气温回升,空气湿度迅速降低,覆冰逐步减少,风电机组开始恢复生产。

5 低温凝冻预警及对策

5.1 低温凝冻预报

低温凝冻预警对风电公司合理安排生产非常重要,预警越提前准确率越高越有利安排生产。研究表明桂北风电场低温凝冻天气与地面冷高压中心强度、500 hPa 环流形势,以及水汽输送密切相关。500 hPa 环流中高纬分3种类型,乌山阻塞(横槽)、两槽一脊及多波动型,配合中低纬不断有南支小槽东移影响造成。贝加尔湖地面冷高强度一般要达到1060 hPa以上(这次达到1080 hPa),冷高压越强,爆发南下时850 hPa 0℃线就越偏南,越有利于雨雪过程的形



(a) 坭坪风电场

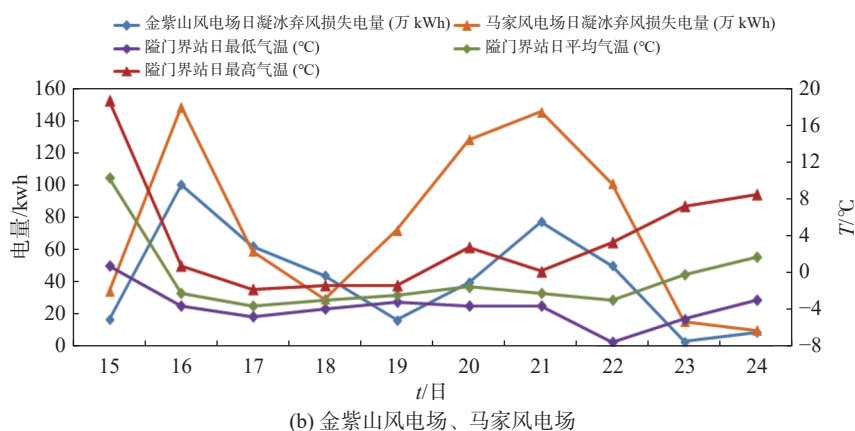


图 7 各风电场损失电量与日最高、日最低、日平均气温对比分析(a:邱坪风电场,b:金紫山风电场、马家风电场)

Fig. 7 Comparative analysis of power loss and daily maximum, minimum, and average temperature in various wind farms (a: Wind Farm of Qiuping; b: Wind Farm of Jinzishan, Wind Farm of Majia)

表 2 三个风电场 2023 年 12 月 15 日 ~ 24 日凝冰停机及日凝冰弃风损失电量情况

Tab. 2 Ice induced shutdown and daily ice freezing wind curtailment power losses of three wind farms from December 15 to 24, 2023

日期	邱坪风电场			马家风电场			金紫山风电场		
	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	日凝冰停 机台数占 比/%	日凝冰弃 风损失电 量/MWh	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	日凝冰停 机台数占 比/%	日凝冰弃 风损失电 量/MWh	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	日凝冰停 机台数占 比/%	日凝冰弃 风损失电 量/MWh
12月15日	9.8	34.79	706.8	7.2	100.00	346.2	8.1	100.00	166.1
12月16日	13.4	46.58	5769.6	9.3	100.00	1487.9	13.5	100.00	1003.7
12月17日	8.8	93.42	4193.8	4.8	100.00	593.1	5.9	100.00	625.1
12月18日	7.5	100.00	7060.8	3.7	100.00	294.1	5.8	100.00	442.2
12月19日	9.0	100.00	9244.1	5.3	100.00	723.2	2.8	100.00	165.0
12月20日	9.5	100.00	9149.8	8.1	100.00	1282.3	5.6	100.00	397.0
12月21日	11.8	74.25	8396.8	10.4	82.86	1457.4	10.2	56.06	775.1
12月22日	10.4	53.70	6052.7	8.3	80.00	1012.4	8.6	39.39	503.7
12月23日	7.1	32.88	1494.4	5.2	74.29	155.0	4.5	24.24	32.2
12月24日	8.5	10.41	654.0	6.6	14.29	100.5	7.2	16.67	90.3

成; 而 500 hPa 环流形势与冷空气堆积和引导地面冷空气南下路径有关, 如果 500 hPa 环流形势是乌山阻塞型(横槽), 那么越有利于 500 hPa 贝加尔湖或有切断冷低涡, 横槽分裂小槽将引导地面冷空气从东路南下, 桂北风电场低温雨雪天气往往会持续一周以上, 那么导致低温凝冻天气持续天数会更长; 如果 500 hPa 环流形势是两槽一脊及多波动型, 高空槽往往引导地面冷空气从中西路南下, 导致雨雪天气只有 2~3 d, 然后迅速转为晴好天气, 即使夜间辐射降温也能导致结冰, 但白天天气晴好, 气温回升快, 凝冻天气维持时间短。

此外, 如果降雨相态是冻雨, 风机有可能结冰更

厚一些。可以通过分析数值预报产品, 分析出未来几天风电场的 850~925 hPa 高度气温是否低于 0 °C, 地面气温是否低于 2 °C, 同时通过数值预报产品的探空曲线预报, 判断未来是否存在低层逆温层, 也就是存在融化暖层, 通过探空曲线还可以判断水汽是否充沛, 根据这些做出低温凝冻开始时间以及持续时长的预报, 并发布预警, 方便风电公司提前做好融冰措施, 能够有效的减轻经济损失。

5.2 低温与停机、弃风电损关系

通过 4.2 分析的环境温度对弃风电损的影响, 采用一元线性回归方法, 建立环境温度与弃风电损的统计模型, 初步建立两者的相关性公式, 如表 3 所示。

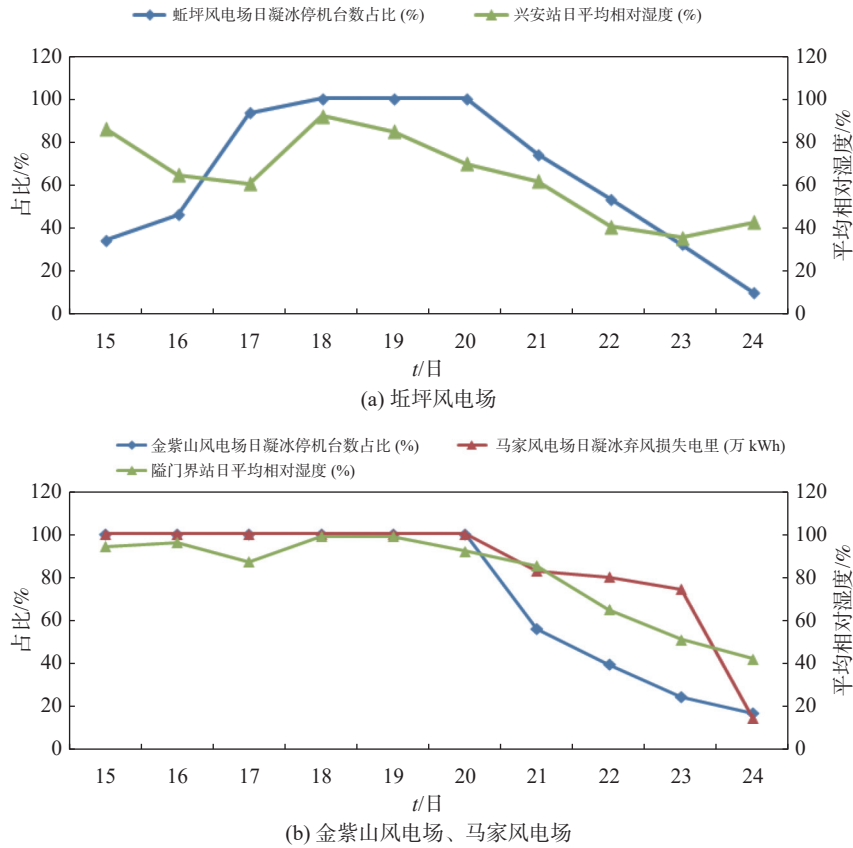


图 8 各风电场停机台数占比与日平均相对湿度对比分析(a:坵坪风电场,b:金紫山风电场、马家风电场)

Fig. 8 Comparative analysis of the proportion of wind farm shutdowns and daily average relative humidity (a: Wind Farm of Qiuping; b: Wind Farm of Jinzishan, Wind Farm of Majia)

表 3 3 个风电场环境温度与弃风电损的回归模型

Tab. 3 Regression model of environmental temperature and abandoned wind power loss of three wind farms

模型	相关系数R	复相关系数R ²	F值	显著性水平
$Y_1 = -44.5187X_1 + 577.7137$	0.7206	0.5193	8.6431	<0.05
$Y_1 = -11.7160X_2 + 464.1272$	0.0671	0.0045	0.0361	>0.5
$Y_1 = -60.7200X_3 + 373.8508$	0.6214	0.3862	5.0327	<0.1
$Y_2 = -3.6485X_4 + 88.0930$	0.4336	0.1880	1.8525	>0.1
$Y_2 = -5.5430X_5 + 53.9559$	0.2144	0.0460	0.3856	>0.5
$Y_2 = -5.2028X_6 + 71.4500$	0.4015	0.1612	1.5377	>0.1
$Y_3 = -2.6730X_4 + 51.9474$	0.5351	0.2863	3.2097	>0.1
$Y_3 = -3.8783X_5 + 27.6153$	0.2527	0.0639	0.5458	>0.1
$Y_3 = -3.8783X_6 + 27.6153$	0.4726	0.2233	2.3001	>0.1

其中, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别为坵坪、马家、金紫山风电场的弃风损失电量, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为坵坪风电场最高海拔轮毂高度日最高气温、日最低气温与日平均气温, X_4 、 X_5 、 X_6 分别为隘门界站日最高气温、日最低气温与日平均气温。由表 3 可知, 由坵坪风电场弃风损失电量与坵坪风电场最高海拔轮毂高度日最

高气温建立的回归模型效果最好, 复相关系数为 0.5193, F 值为 8.6431, 通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

通过订正数值预报产品, 预报出未来 10 天逐日最低环境温度, 利用公式, 计算出初步的逐日停机、电损情况, 助力风电公司风功率预测, 提前采取融冰措施和电力调配。

6 结论

根据此次寒潮天气过程对桂林北部高山风力发电业务的影响, 分析了桂林灾害性低温冰冻天气的形成机理与预报技术, 并结合桂林北部高寒山区风电场弃风电损的案例研究了环境温度、空气湿度对风电损耗的影响, 得出以下结论。

1) 2023 年 12 月 15 日 ~ 25 日桂林长低温冰冻天气过程, 是由于地面巴尔克什湖冷高压中心异常偏强, 冷高压中心达到 1 080 hPa, 15 日 ~ 17 日乌拉尔山阻塞高压建立, 高压前部横槽分裂, 引导地面强冷空气从东路南下, 导致全市寒潮, 北部出现雨雪; 18 日 ~ 19 日, 乌拉尔山阻塞高压崩溃, 横槽转竖, 再次引导强冷空气南下, 强低温雨雪冰冻得以持续; 同时由于南支槽前西南气流提供的水汽条件, 850 hPa 的 0 °C 线南压达到广西中部, 在低层有逆温形成, 导致雨滴凝结, 高山出现冻雨或雨夹雪现象。20 日 ~ 22 日受高压脊控制, 晴天为主, 北风减小, 导致辐射降温, 高寒山区温度在 0 °C 以下, 造成冰冻和霜冻共存, 但最高气温会升高, 风电场覆冰逐渐减弱。

2) 此次寒潮天气过程中, 15 日 ~ 16 日, 桂林北部出现降水, 高寒山区出现雨夹雪或冻雨天气, 空气湿度非常高, 甚至超过了 90% 以上, 当冷空气过境, 最低气温降至 0 °C 以下, 风电机组凝冰停机迅速增多。20 日之后, 白天晴空无云, 气温回升, 空气湿度迅速降低, 夜间辐射降温也导致了一部分的结冰难以消融, 凝冻维持但时间很短。随着气温快速回升, 覆冰减少, 电力开始恢复。

3) 寒潮属于极端突变天气, 针对上述寒潮天气过程中, 风电发生弃风电损与低温冰冻天气形成机理和环境温度、空气湿度的影响研究, 通过分析环境温度与停机、电损的关系, 得出相关性公式, 利用数值预报的温度预报产品, 提前预报未来逐日停机台数和电损, 助力风功率预测, 提前采取措施和调配电力供应。

4) 加强寒潮天气的预测预警工作。通过与地方气象局建立合作机制, 开展特殊天气特征的气象专家诊断工作, 提前掌握寒潮过程的预警信息掌握寒潮影响严重地区的局部精细化气象预报预警信息, 开展低温寒潮天气过程下风力发电预测预警技术研究。

5) 鼓励风电场开展风机低温运行能力提升改造。通过开展风电机组抗冻、除冰研究和试验, 引导风电企业对已投产设备进行抗寒抗冻改造, 提高风电机组在低温高湿环境下的适应能力。

高精度冰冻灾害天气预测预警可以指导风电企业开展预防风机叶片结冰, 以及除冰工作, 优化客户资源配置, 降低客户财产损失, 确保人员和设备安全。

参考文献:

- [1] 贺莉微, 陈正洪, 李金建. 风电场风机叶片覆冰气象条件及覆冰模型研究进展 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2023, 17(3): 1-7. DOI: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.001.
HE L W, CHEN Z H, LI J J. Advance on meteorological conditions and icing models of wind turbine blades in wind farm [J]. *Desert and oasis meteorology*, 2023, 17(3): 1-7. DOI: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.001.
- [2] 郑婷婷, 单小雨, 马继涛, 等. 寒潮天气对风电运行和功率预测的影响分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(4): 8-12. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0048.
ZHENG T T, SHAN X Y, MA J T, et al. Impact of cold wave weather on wind power operation and power prediction [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2023, 41(4): 8-12. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0048.
- [3] 孙少华, 徐洪雷, 符鹏程, 等. 叶片覆冰对风电机组的影响 [J]. *风能*, 2014(9): 100-103. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2014.09.026.
SUN S H, XU H L, FU P C, et al. The impact of blade icing on wind turbines [J]. *Wind energy*, 2014(9): 100-103. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2014.09.026.
- [4] 宋丹, 夏晓玲, 张蕾, 等. 基于回归和判别分析的贵州电线积冰厚度预报方法 [J]. *气象研究与应用*, 2018, 39(4): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8411.2018.04.007.
SONG D, XIA X L, ZHANG L, et al. Guizhou wire icing thickness forecast method based on stepwise regression and discriminant analysis [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2018, 39(4): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8411.2018.04.007.
- [5] 胡艳楠, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 湖北电线积冰统计分析及其逆温层研究 [J]. *气候与环境研究*, 2017, 22(1): 35-44. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15267.
HU Y N, NIU S J, LÜ J J, et al. Statistical analysis and inversion study on ice accretion in Hubei province [J]. *Climatic and environmental research*, 2017, 22(1): 35-44. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15267.
- [6] 李登文, 杨静, 吴兴洋. 2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程中

- 贵州电线积冰气象条件分析 [J]. *气象*, 2011, 37(2): 161-169. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2011.2.005.
- LI D W, YANG J, WU X Y. Discussion on genesis of wire icing in Guizhou during the freezing rain and snow storm in January 2008 [J]. *Meteorological monthly*, 2011, 37(2): 161-169. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2011.2.005.
- [7] 陈百炼, 吴战平, 张艳梅, 等. 贵州冬季电线积冰及其天气成因分析 [J]. *气象*, 2014, 40(3): 355-363. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.03.011.
- CHEN B L, WU Z P, ZHANG Y M, et al. Analysis on wires icing and its weather conditions in Guizhou province [J]. *Meteorological monthly*, 2014, 40(3): 355-363. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.03.011.
- [8] 江志红, 杭月荷, 刘冬, 等. 我国南方输电线路覆冰极值序列重建试验 [J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(3): 407-413. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12011.
- JIANG Z H, HANG Y H, LIU D, et al. Reconstruction of an extreme wire icing series in southern China [J]. *Climatic and environmental research*, 2013, 18(3): 407-413. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12011.
- [9] 刘丹, 牛生杰. 两次电线积冰过程气象条件实时观测研究 [J]. *大气科学学报*, 2015, 38(3): 428-432. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130313001.
- LIU D, NIU S J. Observational study on real-time meteorological conditions during two wire icing processes [J]. *Transactions of atmospheric sciences*, 2015, 38(3): 428-432. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130313001.
- [10] 顾光芹, 田国强, 周须文. 河北省电线积冰的气候特征及一次电线积冰天气过程分析 [J]. *气象与环境科学*, 2012, 35(1): 8-13. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7148.2012.01.002.
- GU G Q, TIAN G Q, ZHOU X W. Climatic characteristic of wire icing in Hebei Province and synoptic process analysis [J]. *Meteorological and environmental sciences*, 2012, 35(1): 8-13. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7148.2012.01.002.
- [11] 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 导线积冰的云雾特征观测研究 [J]. *应用气象学报*, 2008, 19(1): 91-95. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2008.01.012.
- LUO N, WEN J F, ZHAO C, et al. Observation study on properties of cloud and fog in ice accretion areas [J]. *Journal of applied meteorological science*, 2008, 19(1): 91-95. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2008.01.012.
- [12] 朱君, 向卫国, 赵夏菁. 贵州导线覆冰的致灾机理研究 [J]. *高原山地气象研究*, 2011, 31(4): 42-50. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2184.2011.04.008.
- ZHU J, XIANG W G, ZHAO X J. Study on disaster-causing mechanism of wire icing in Guizhou [J]. *Plateau and mountain meteorology research*, 2011, 31(4): 42-50. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2184.2011.04.008.
- [13] 周悦, 高正旭, 周月华, 等. 湖北省电线积冰特征及其冰区划分 [J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(6): 169-177. DOI: 10.13577/j.jnd.2003.0622.
- ZHOU Y, GAO Z X, ZHOU Y H, et al. Characteristics of wire icing and icing zoning in Hubei Province [J]. *Journal of natural disasters*, 2013, 22(6): 169-177. DOI: 10.13577/j.jnd.2003.0622.
- [14] 赵晓萌, 李栋梁, 熊海星, 等. 西南地区覆冰气象要素的变化特征及综合评估 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 802-813. DOI: 10.11849/zrzyxb.2011.05.008.
- ZHAO X M, LI D L, XIONG H X, et al. Variations of meteorological factors concerning icing and comprehensive assessment in southwest China [J]. *Journal of natural resources*, 2011, 26(5): 802-813. DOI: 10.11849/zrzyxb.2011.05.008.
- [15] 陆虹, 周秀华, 黄卓, 等. 华南地区低温雨雪事件的时空变化特征 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 237-246. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201901.031.
- LU H, ZHOU X H, HUANG Z, et al. Spatio-temporal variation of cold rain and snow events over South China [J]. *Chinese journal of ecology*, 2019, 38(1): 237-246. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201901.031.
- [16] 唐熠, 谢晓燕, 周秀华, 等. 广西低温雨雪冰冻灾害危险性评估和区划 [J]. *灾害学*, 2021, 36(4): 101-106. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.017.
- TANG Y, XIE X Y, ZHOU X H, et al. Assessment and zoning of low-temperature, rain/snow and freezing disasters in Guangxi [J]. *Journal of catastrophology*, 2021, 36(4): 101-106. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.017.
- [17] 欧阳家萌, 韦小雪, 廖志朗, 等. 贺州市一次低温雨雪冰冻天气成因及预报效果分析 [J]. *气象研究与应用*, 2023, 44(4): 91-95. DOI: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.14.
- OUYANG J M, WEI X X, LIAO Z L, et al. Analysis of the causes and forecasting effects of a low temperature rain and snow freezing weather in Hezhou city [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2023, 44(4): 91-95. DOI: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.14.
- [18] 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.
- [19] 朱秋宇, 何慧, 周秀华, 等. 广西持续性低温雨雪冰冻过程特征和气候成因分析 [J]. *气象研究与应用*, 2019, 40(1): 38-41. DOI: [10.3969/j.issn.1673-8411.2019.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8411.2019.01.009).
ZHU Q Y, HE H, ZHOU X H, et al. Analysis on the characteristics and climatic causes of the persistent low temperature and snow freezing process in Guangxi [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2019, 40(1): 38-41. DOI: [10.3969/j.issn.1673-8411.2019.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8411.2019.01.009).
- [20] 王军君, 唐熠, 王艳兰. 2018 年广西一次极端低温雨雪冰冻灾害成因分析 [J]. *气象研究与应用*, 2021, 42(4): 118-122. DOI: [10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.21](https://doi.org/10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.21).
WANG J J, TANG Y, WANG Y L. Cause analysis of an extreme low temperature rain, snow and freezing disaster in Guangxi in 2018 [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2021, 42(4): 118-122. DOI: [10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.21](https://doi.org/10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.21).
- [21] 蒋慕凝, 何宇, 张荣茜, 等. 基于特征选择及误差修正的风电功率预测 [J]. *分布式能源*, 2023, 8(2): 37-43. DOI: [10.16513/j.2096-2185.DE.2308205](https://doi.org/10.16513/j.2096-2185.DE.2308205).
JIANG M N, HE Y, ZHANG T Q, et al. Wind power prediction based on feature selection and error correction [J]. *Distributed energy*, 2023, 8(2): 37-43. DOI: [10.16513/j.2096-2185.DE.2308205](https://doi.org/10.16513/j.2096-2185.DE.2308205).

作者简介:



阳薇

阳薇(第一作者)

1982-, 女, 工程师, 学士, 主要从事专业气象服务与研究工作(e-mail) 14055050@qq.com。

秦川

1989-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事气候监测与气候变化影响研究工作(e-mail) qinch806@126.com。

曾毓琳

1983-, 女, 工程师, 学士, 主要从事专业气象科技服务与研究工作(e-mail) 519949439@qq.com。

伍静

1982-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事灾害性天气机理研究工作(e-mail) wu.jing.0512@163.com。

李向红

李向红(通信作者)

1966-, 女, 正研级高级工程师, 硕士, 主要从事灾害性天气形成机理研究及重大天气预报和服务工作(e-mail) glxh99@163.com。

(责任编辑 孙舒)