

引用格式:王博妮,王锋,葛行成,等.海上风电气象服务关键技术及应用分析[J].南方能源建设,2025,12(1):65-74. WANG Boni, WANG Feng, GE Hangcheng, et al. Analysis of key technologies and applications of meteorological service for offshore wind power [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 65-74. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-126.

海上风电气象服务关键技术及应用分析

王博妮^{1,2,✉}, 王锋³, 葛行成¹, 黄芳¹, 桑小卓¹, 张敏^{1,2}

(1. 江苏省气象服务中心, 江苏 南京 210008;

2. 中国气象局能源气象重点实验室, 北京 100081;

3. 国家电投集团江苏海上风力发电有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要: [目的]海上风电安全至关重要,气象服务能有效解决影响风电场安全的浪高、风暴潮、强对流以及海雾等预报预警难点问题,保障海上风电项目安全、高效运行。[方法]文章以江苏省海上风电场气象服务为例,通过数据同化技术和最新人工智能方法,结合数值模式,建立海上风电场风-浪-流预报、波浪有效波高和风暴潮智能预报、海上风电场高影响天气监测预报预警等关键技术,最终形成海上风电精细化气象服务与应用,并对气象赋能海上风电产业链和加强不同行业技术融合等提出思考。[结果]结果表明,近海风电场10 m风、100 m风、浪高等要素预报时空分辨率提高至1 h、3 km;有效波高和风暴潮潮位预报时效增至72 h,6 h预报准确率达85%;强对流预警时效提前1 h、海雾预警提前30 min,预报准确率达92%;技术实现了多工作场景的精细化气象服务应用。[结论]研究海上风电气象服务关键技术的应用,能有效提升海上风电安全生产和运维能力,优化海上风电机组发电效率,降低出海作业成本及损耗,保障出海作业安全,减少生命财产损失。此外,随着海上风电的发展,气象服务将不断加强与不同学科的技术融合,赋能海上风电全产业链的发展。

关键词: 海上风电; 气象服务; 数据集; 高影响天气; 全产业链

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-126

文章编号: 2095-8676(2025)01-0065-10

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-126

中图分类号: TK89



论文二维码

Analysis of Key Technologies and Applications of Meteorological Service for Offshore Wind Power

WANG Boni^{1,2,✉}, WANG Feng³, GE Hangcheng¹, HUANG Fang¹, SANG Xiaozhuo¹, ZHANG Min^{1,2}

(1. Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Energy Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. SPIC Jiangsu Offshore Wind Power Co., Ltd., Yancheng 224000, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Offshore wind power safety is of paramount importance. Meteorological services effectively address forecasting and warning challenges related to high waves, storm surges, severe convection and sea fog that impact wind farm safety, ensuring the secure and efficient operation of offshore wind energy projects. [Method] This paper took the meteorological services for offshore wind farms in Jiangsu as an example. By utilizing the data assimilation techniques and state-of-the-art artificial intelligence methods, combined with numerical models, it developed key technologies such as wind-wave-current forecasting for offshore wind farms, intelligent forecasting of significant wave height and storm surges, as well as high-impact weather monitoring and forecasting alerts. Ultimately, this led to the refinement of meteorological services and applications for offshore wind farms. The reflections on the empowerment of

收稿日期: 2024-04-26 修回日期: 2024-06-18 网络首发日期: 2024-11-18

基金项目: 中国气象局科技项目“揭榜挂帅”项目“基于改进海气界面交换动力机制的海上风能预报技术研发”(CMAJBGS202315); 江苏海洋气象开放研究基金“基于数值模式的江苏海上全高度层风预测技术研究与应用”(HYQX2022); 中国气象局公共气象服务中心创新基金项目(M202415); 江苏省气象局科研项目(KM202503)

meteorology in the offshore wind power industry and the enhancement of technological integration across different sectors were presented. [Result] The results indicate that the spatial and temporal resolution of forecasting elements such as 10 m wind, 100 m wind, and wave height in offshore wind farms has been improved to 1 hour and 3 kilometers. The lead time for forecasting significant wave height and storm surge water level has increased to 72 hours, with an 85% accuracy rate for 6-hour forecasts. The lead time for severe convective warnings has been advanced by 1 hour, and sea fog warnings by half an hour, with a forecast accuracy rate of 92%. The technology has enabled refined meteorological services and applications for multiple working scenarios. [Conclusion] The application of key technologies in offshore wind farm meteorological services has effectively enhanced the safety production and O & M capabilities of offshore wind power, optimized the power generation efficiency of offshore wind turbine units, reduced the costs and losses of offshore operations, ensured the safety of offshore operations, and minimized losses of life and property. As offshore wind farms continue to evolve, meteorology will increasingly integrate with various disciplines, empowering the development of the entire offshore wind power industry chain.

Key words: offshore wind power; meteorological service; dataset; high-impact weather; industrial chain

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

当今世界正经历百年未有之大变局,气候变化对人类的影响日益显著,全球能源和工业体系加快演变重构,各国都在应对降低碳排放以及保障能源供应这两大问题。“双碳”战略的执行,彰显了中国对《巴黎协定》中气候行动承诺的坚定信念^[1-3]。二十大党报告强调“全方位推进新能源体系的规划和建设”,这些国家政策和战略计划揭示了我国已步入构建现代能源体系的新阶段,能源安全保障也进入了关键攻坚期^[4-5]。目前,构建以新能源为主体的新型电力系统,已成为深化电力体制改革发展的主要目标任务^[6]。海上风电是指利用海上风力发电设施,将风能转化为电能的清洁能源^[7]。我国海上风电产业起步较晚但发展较快,特别是在“双碳”目标提出后,进入规模化开发的快车道^[8]。截至 2023 年,我国海上风电装机容量已超越英国,跃居全球首位。

我国海岸线长度为 1.8 万 km,可利用海域面积超 300 万 km²,尤其是东部沿海地区海上风能资源禀赋、工业基础良好、电力消纳能力强,但常规能源缺乏,因此对于风能开发的需求非常旺盛。但是海上风电项目属于典型的“靠天吃饭”,强对流、冷空气大风、海雾、台风等恶劣天气对于项目建设、生产和运维都有极大影响。尤其在极端天气事件呈多发、频发、强发、并发的态势下,对海上风电项目的诸多环节都带来重大考验^[9-10]。海上风电项目是一项资金和技术密集型的产业,具有投资额度大、建设周期

长、风险隐患多等特点,一旦发生事故,往往造成难以挽回的经济损失和社会不良影响^[11-13]。2022 年,台风“暹芭”造成了阳江某海上风电场项目施工浮吊船“福*001”发生锚链断裂,船体失衡,触碰风机塔筒后断裂沉没,造成船上 25 人死亡、1 人失踪。2021 年,在福建南日岛附近海域作业的风电工程船“企*6”和在长乐机场附近海域作业的风电运输船“金**王”,受台风“圆规”和冷空气大风的共同影响,导致走锚和失控漂航,分别造成船上 42 人和 16 人遇险。2017 年 7 月,受海上强对流天气影响,强雷电导致黄海北部某风电作业平台起火,造成 1 人跳海失联的惨剧。恶劣的气象、海洋条件不仅给人民造成生命财产损失,还导致风电机组故障率升高,影响船舶出海运维和登靠条件,大幅缩短运维窗口期。

在上述背景条件下,气象服务需求井喷,对气象科技支撑和业务服务能力提出了极高要求,开展海上风电气象服务关键技术研究势在必行。杨源等^[14-15]通过简要分析指出精准气象预报是海上风电场智慧运维管理重要组成部分,但未详细说明气象预报如何应用到海上风电场管理中。董昌明等^[16]通过数值模式建立中国边缘海的风浪流预报系统,模拟海面气象要素预报。王博妮等^[17]通过研究发现强对流、海雾和台风对海上风电场的影响最大。李近元等^[18]对海上漂浮式风电场海域的海浪模拟,表明浪流耦合作用对最大有效波高的影响空间分布差异明显。崔冬林等^[19]通过研究发现受上风向相邻风电场区的“尾流效应”影响,下风向场区发电损失严重。蔡彦枫和李晓宇^[20]以高空风能发电示范工程为研究对象,

发现在 3 km 高度内, 风廓线雷达比激光测风雷达具有更好的观测适应性。王明等^[21]通过中国气象局风能太阳能预报系统风速预报数据的可靠性分析, 结果表明该数据短期预报效果较佳。徐瑾等^[22]利用高分辨率数值模式模拟了 2016 年苏北近海的风场和波浪场, 发现风速、有效波高和涌浪在冬、秋季较大, 春、夏季较小。郭乔影^[23]通过对多源遥感数据风速精度检验, 表明 ASCAT 反演风速数据在近海精度最高。张双益等^[24]通过研究发现气候预测系统的在分析数据(CFSR)在江苏响水海上风电场长风能资源评估中具有可靠性。刘东海等^[25]通过分析广东近海的三维超声测风仪实测数据, 发现强台风“黑格比”过程中海面产生的极端阵风风速与风电机组设定的极端阵风风速都出现在台风眼壁强风区。上述研究多集中气象预报对海上风电运维影响、各类气象数据的个例分析或特征研究以及数值模式模拟海面单一要素的预报, 很少有研究将专业气象服务融汇到海上风电全周期的多个核心环节中。江苏省地跨两海, 海岸线长达 953.9 km, 拥有亚洲最大海上风电群, 截至 2023 年, 风电累计总装机容量达 11.835 GW, 规模为国内最大, 海上风电发电量达 18.55 TWh, 同比

增长 65.6%(图 1), 均位居全国前列^[11], 但江苏近海多为潮间带区域, 气象、海洋环境复杂。针对以上现状和研究, 文章利用数值模式, 人工智能等信息化手段, 结合智慧气象服务理念, 探索建立海上风电气象服务合作共赢、协同发展机制, 有效提升江苏近海经济发展能力, 取得了良好的成效。

1 海上风电气象服务关键技术研究

随着海上风电产业快速增长, 复杂、苛刻的气象海洋环境对风电设备、运维人员和船舶带来了严重危害, 对影响安全的浪高、风暴潮、强对流和海雾等气象、海洋预报预警服务提出了更高要求。通过海上风电气象服务技术的研究, 攻克了海上风电场专业气象海洋服务单一、高影响天气监测预警精细化程度不高等难点问题。通过技术的落地应用, 推动了气象服务与风电产业链的精准对接, 提高了海上风电高影响天气监测预警服务能力和风电场的运行效率, 为新能源可持续发展国家战略贡献气象智慧。

1.1 打造海上风电气象服务大数据集

海上风电项目作为多学科交叉汇聚、多技术跨

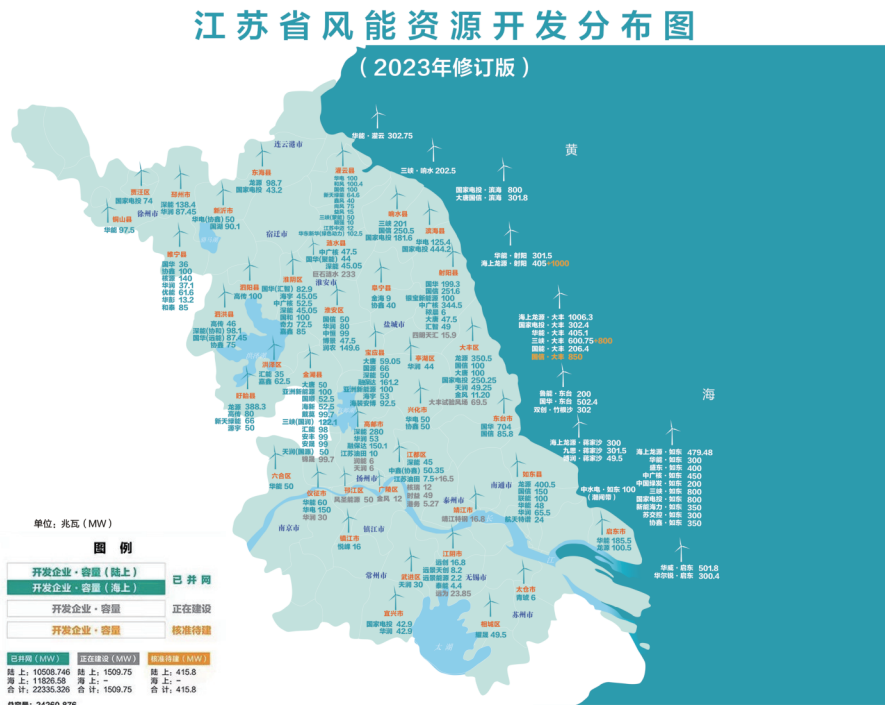


图 1 江苏省风能资源开发及装机示意图

Fig. 1 Map of wind energy resource development and installed capacity in Jiangsu Province

界融合、多部门协同的系统工程,基于气象多源数据本身,结合风电等外部数据,实现数据整合、多源信息互换、共享和互融,构建了支撑海上风电气象服务发展的大数据集(图 2)。通过大数据集的分析 and 挖

掘,推动了海上风电领域的智能化发展,提高了海上风电气象预报的准确性和可靠性,支持了海上风电气象服务研究和技术创新,定制了个性化服务和决策依据,加强了海上风电气象服务效能。

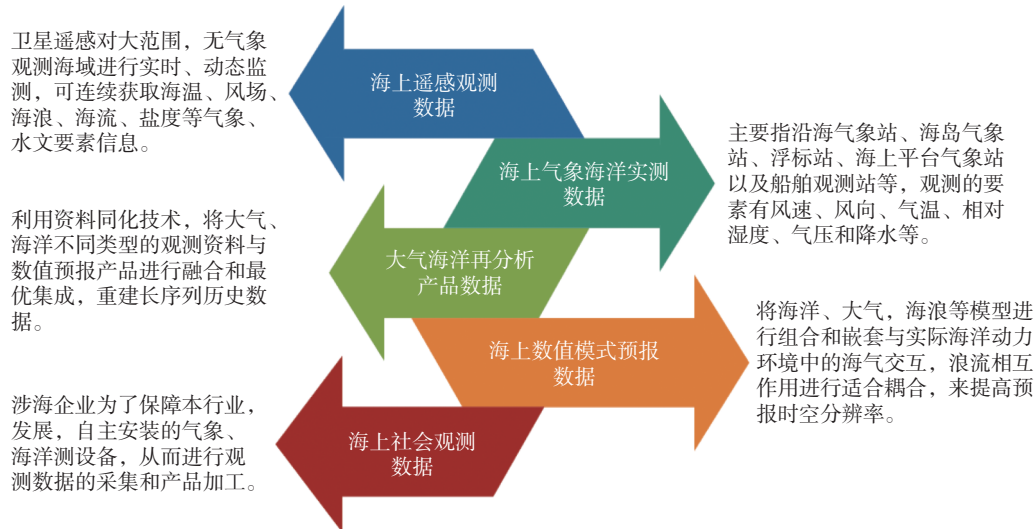


图 2 海上风电气象服务大数据集

Fig. 2 Large data set of meteorological services for offshore wind power

随着“海洋强国”战略发展,海上浮标、海上升压站或平台气象观测站、测风塔、激光测风雷达,高清视频监控等技术设备被广泛应用于海上气象监测中,规模化的海上气象观测监测体系对防御海上灾害性天气,卫星遥感监测具有大范围、全天时、长时序动态观测的优势,尤其以风云系列气象卫星为代表的国产卫星,在诞生之初就获取了大量高质量气象云图和海洋资料,是获取无气象观测海域海温、风场、海浪、海流、盐度等气象、水文要素信息的最有效观测手段。

此外,利用各类气象观测数据反演,结合卫星数据同化形成了接近实况的长序列大气海洋再分析产品数据,可提供从地球表面至大气层顶部的逐小时的风、温度、气压等要素,同时还有历史气候数据。再分析资料有效解决海上观测资料时空分布不均、观测数据匮乏的问题。随着高性能计算机能力的显著提升,大气海洋耦合数值模式数据成了大气和海洋深度融合的主要数据来源^[17],它提高了模拟物理过程的复杂程度,这使得模拟结果更加贴近实际海洋环境,实现了不同尺度和时间步长的耦合,最后由预报员结合近海天气气候特征和主观经验,对模式

预报数据进行订正,可用于预测未来更长时间的天气状况。此外,社会气象观测通过整合不同行业观测能力,实现了气象观测设备的互补和数据的共享功能,既弥补自身气象要素观测领域时空方面的不足,又保障了自身的行业发展,同时契合了气象服务业务的需求。海上风电气象服务大数据集的建立保证了海上气象服务数据的全面性和准确性,是开发海洋资源、拉动海洋经济的重要抓手。

1.2 研发海上风电高影响天气预报预警关键技术

围绕困扰海上风电安全的强对流、海雾、台风等高影响天气监测、预报、预警等问题。通过耦合数值模式、机器学习等技术在海上风电气象服务领域的研究与应用,研发了基于海气耦合数值模式的海上风电场风-浪-流预报技术,实现了海上风电场 10 m 风、100 m 风、浪高等气象、海洋要素预报。在提高了海上风电专业预报要素的多样性和准确性的前提下,运用人工智能算法实现了台风等天气扰动下波高和风暴潮的快速预报。构建了基于多源资料的强对流和海雾预警模型,形成了强对流云团的陆、海无缝隙监测与追踪,提升了区域海雾的预报能力和预警时效。通过自主研发的海上风电智能气象服

务系统和微信小程序集成关键技术, 完成了海上多工作场景的精细化服务产品发布。

1) 建立海上风电场风-浪-流预报技术

海上气象观测能力相对于陆上观测能力相当匮乏, 在这种情况下, 数值模式成为业务应用和科学研究的主要手段。考虑到海上条件的特殊性, 将大气数值模式(WRF)、海洋数值模式(CROCO)和海浪数值模式(SWAN)进行耦合, 再结合资料同化技术、人工智能方法等构建了基于海上风电场风-浪-流预报技术, 实现了对海上风电场的精细化数值模拟, 形成了基于风机塔筒位置和海上风电场海域的未来 120 h 的 10 m 风、100 m(风机轮毂高度)风、浪高、能见度、温度等气象海洋要素的预报, 空间分辨率提升到了 3 km, 时间分辨率精确到 1 h。通过风速智能预报订正, 10 m 风和 100 m 风的预报准确率达到 92%。图 3 为利用风-浪-流技术预报海上风电气象、海洋要素预报的技术路线图。

2) 研发海上风电场有效波高和风暴潮智能预报技术

通过气象和海洋信息的深度融合, 设计了台风

等剧烈天气扰动下, 海上风电场有效波高和风暴潮预报技术。结合台风历史观测资料、WaveWatch III 再分析数据^[26] 以及验潮站信息等, 通过人工智能算法, 构建了海上风电场有效波高预报模型。通过验证发现在正常海况和特殊海况(台风)下, 有效波高 6 h 预报准确率分别达到了 85% 和 81%, 与数值模式相比, 基于机器学习的有效波高预报模型节省了计算资源, 降低了运算成本, 特别在台风等高影响天气发生时, 可以快速的提供准确的预报结果。

根据不同海域的风暴潮和天文潮耦合数值模式提供的预报产品结合历史观测数据, 通过卷积神经网络和卷积长短期记忆等深度学习模型实现了海上风电场未来 72 h 的风暴增水预报和沿岸风暴潮风险等级预测。在一定程度上克服了依靠传统统计或半经验方法建立的风暴潮模型准确性不高的局限性。

3) 构建海上风电场高影响天气智能监测预警技术

通过卫星遥感资料、雷达数据和机器学习算法, 研究了分海域、分灾种、分影响的风速、能见度、降雨以及雷暴大风等预报预警阈值。利用江苏沿海历

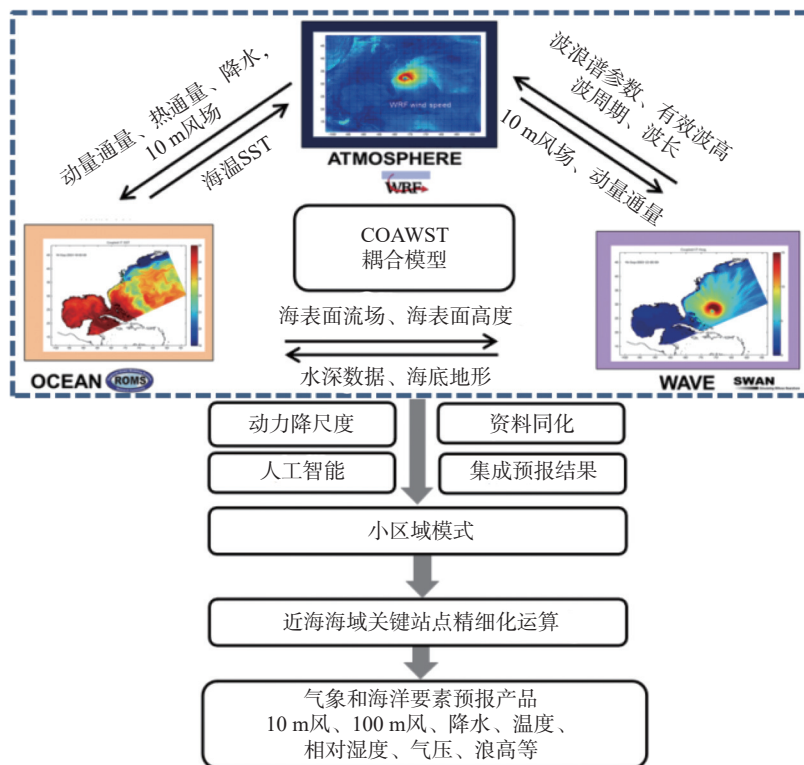


图 3 江苏海上风电场气象、海洋要素预报技术路线图

Fig. 3 Technical roadmap for meteorological and oceanographic element forecasting at Jiangsu offshore wind farm

年的强对流雷达反射率资料,结合卫星、沿海自动站、浮标等数据建立了基于深度学习的卫星数据反演雷达反射率算法,实现了陆地与近海强对流天气的自动识别和无缝隙监测预警,空间分辨率提升至 1 km。此外,利用 FY-4A 卫星数据,结合近海能见度观测资料,利用决策树 C4.5 算法建立海上风电场海雾预测模型,有效提高了海雾的识别精度,预报时效提前 0.5 h。

目前,海上风电气象服务技术已应用至江苏多个单体风电场,以江苏某风电场(装机容量 400 MW)为例,气象服务开展后,仅 2020 年发电量提高了 120 GWh,净收益增加了 1.02 亿元,船舶运行费用节约了 580 万元,经济效益明显增加和应对海上风电高影响天气能力有效提升。为海上风电场安全稳定运营提供强有力的技术支撑,保障了海上风电场的生产需求,实现了经济、社会和生态效益三赢。

1.3 开展海上风电多工作场景专业气象服务

1) 研发融合多源技术的气象服务产品集

通过与海上管理部门、风电企业从安全、监管等需求入手,充分挖掘海上气象、海洋、电力等大数据,运用海上风电气象服务关键技术,构建了模式与人工双重保障的海上风电专业气象服务产品集,将专家分析与数值模式预报结果相结合,精准预测海上风电多尺度天气和风力发电气象预报(图 4)。构建基于风-浪-流数值预报和多源数据同化技术,通过匹配校验、自动误差订正等,形成了基于风机和风电

场海域位置的未来 5 d 逐小时 10 m 风、100 m 风、雷电概率、浪高、降水量以及安全出海指数等服务产品集,实现了对码头、风机、船舶动态位置的差异化精准监测、预报和预警。

2) 建立多源数据+技术+互联网的海上风电气象服务方式

通过气象、海洋和行业多源异构数据解析融合技术,研发了不同管理和作业人员的服务方式,面向海上监管和管理决策人员研发海上风电智能气象服务系统,可查询海上风电场周边海域气象、海洋数据监测、不同时间尺度的精细化气象预报、高影响天气预报预警和安全出海指数等服务产品,用于工作计划的制定和出海安排;构建了出海作业人员使用的海上风电气象服务微信小程序,可快速、便捷的查询作业海域的气象动态数据以及高影响天气的预报预警信息。有效减小因天气原因导致的人员、财产损失,降低出海成本,提升了海上风电工程的高影响天气风险综合防范水平。

3) 发面向海上风电场不同场景的智能化气象服务

针对建设-施工-安装-运维-生产-管理等核心环节,确定出港、航道、停靠、登乘等业务服务场景,实现产品和服务按需组合,自动根据场景匹配数字化的气象服务产品,根据提供基于服务海域位置的气象监测、预报和灾害性天气预警等数字化服务产品,可充分调动气象数据、服务等个性化场景需求,满足技术应用单位的智能感知、工程场景预判和工程趋

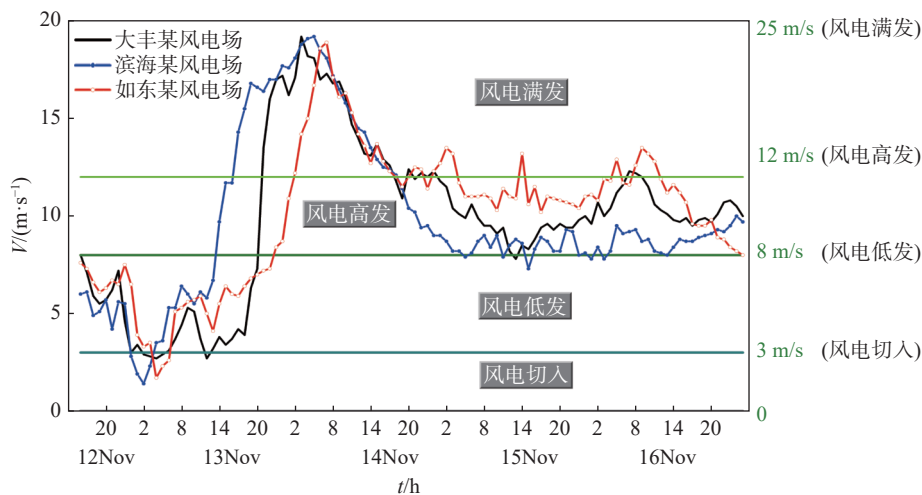


图 4 江苏海上风电发电气象条件预报曲线(2023 年 11 月 12 日 16 时—16 日 04 时)

Fig. 4 Curve of meteorological condition forecast for offshore wind power in Jiangsu
(From 16:00 on November 12 th, 2023 to 04:00 on November 16 th, 2023)

势预选等定制化的服务。开发海上风电气象服务插件或标准数据服务接口,支持多种方式跨层级、跨部门的数据交换和数据共享。

总之,海上风电气象服务目的是降低风险,减小成本,提高效益。海上风电气象监测、预报、预警产品通过海上风电气象智能服务系统和微信小程序在江苏海上风电公司、风电场站、海事局等部门应用,取得了良好的服务效果。尤其在2019年台风“利奇马”,2020年2月15—16日强冷空气、“7月22日龙卷”、12月28日夜—30日的跨年寒潮,2021年4月30日极端大风,台风“烟花”以及2022年6月18日—23日连续性海雾等重大天气过程过,通过智能预报系统及微信小程序进行滚动发布预报预警信息,避免了灾害性天气以及次生灾害对海上风电场的影响,做到了船舶及时回港避风,未出现任何安全事故和险情。

2 应用案例

海上风电气象服务主要采用的是数值模式、人工智能和预报员预报相结合的服务形式。尤其在重大天气过程中气象灾害发生的不同阶段,除了提供专业预报预警服务产品外,还需要分级别、分区域精细化调动各部门应急联动和社会力量,让气象监测预报预警信息能快速转化为管理部门和服务单位的防灾减灾行动力。以下围绕一次台风过程,主要从预报员角度,简要分析气象服务在海上风电中的应用。

台风给海上风电场带来机遇的同时也带来了挑战。台风影响期间可大幅提高风电机组发电量,提升经济效益,尤其在台风登陆前后,根据风速精准预测,分析统调负荷与竞价空间日前预测值和实时值的偏差走势,通过调整申报功率预测曲线增加收益。但台风本身破坏性仍不能忽视,台风登陆时风向突变、瞬时风速过大会造成风机塔筒屈曲、叶片损坏、机舱倾覆等灾害,同时台风引起的大涌浪叠加波高,会对风机承台底部造成巨大波浪浮托力和冲击力。2021年7月26日,台风“烟花”影响江苏滨海某海上风电场时,海上风电智能气象服务系统,监测到风电场升压站气象观测站10 min平均风速达到23.5 m/s,瞬时风速最高达32.1 m/s,浪高超过了7 m,且伴随着强降水、雷暴大风等灾害性天气。在做好气象防灾减灾的同时,安装在该风电场的100 MW容量海

上风电机组实现24 h满功率运行,单日发电量达2.45 GWh,刷新了风电单机单日发电量新纪录,该发电量能满足85.4万人/d的用电量。

2021年7月18日,监测到台风“烟花”生成后,江苏海上风电智能气象服务系统台风预报预警模块,开始逐小时更新多模式台风预报路径、强度、位置、最大风速、移动速度和方向等,卫星雷达数据反演显示移动过程可能对海上风电场产生的风雨影响程度以及台风影响下的风电场海域风暴增水、潮位、浪高等水文预报,最终综合各类气象、水文预报要素,规划风电机组安全距离和安全作业海域。

7月16日,江苏海上风电气象服务团队全面开展海上风电递进式精细化气象服务,按1周、1~3 d、6~12 h、3 h、1 h递进式服务原则开展气象监测预报预警服务,不断修正预报结论以提高预报精准性。在整个服务过程中提前6 d提示南海有热带扰动发展,提前4 d预测对海上风电场的风雨影响,明确防范建议。提醒用户在最佳天气窗口期安排发电机启停检测、油量储备检查以及核对防台物资储备等。提前3 d预测重点影响海域的风电场,提醒用户完成风机暴风模式测试,确保叶片收桨正常,做好叶片精细检查,及时修补隐患。提前2 d锁定台风影响范围,结合海上风电场位置,预测海面 and 风机轮毂高度处的风速,如果风速大于25 m/s时,风机停机收桨,保证叶片安全,当风速下降到25 m/s后,再次开机发电。

提前3 h精准预测台风登陆时间、地点以及对风电场的风雨影响程度,及时发布台风预警和风力发电等级气象条件预报,并滚动发布台风最新预报预警信息。建立台风“烟花”监测预报预警信息联合上报机制,联合沿海市县气象局,向海事、水上搜救中心、技术应用单位及时发布海上风电场台风风情、雨情、潮情等信息,便于相关部门了解情况和科学决策。在台风“烟花”影响期间,共发布《海上风电场重大天气专报》5期,发布台风、暴雨预警信息9条,滚动逐小时更新台风消息及海上风电场风、雨情况信息共11条。

3 结论

通过与海上风电技术应用单位开展气象服务合作,关键技术得到了有效应用,并推动了气象、海洋服务与风电产业链的精准对接,初步建立了技术先

进、集约高效、结构完整、保障有力的现代化海上风电气象保障服务体系。研究为沿海各省市开展海上风电气象服务提供技术支撑和解决方案,对推动以新能源为核心的新型电力系统改革具有深远的理论价值和实践意义。同时,强烈意识到在海上风电气象服务过程中还需做好气象和不同行业的技术融合,只有将气象赋能到海上风电全产业链发展,才能推动能源气象高质量发展。

3.1 开展气象与不同行业的技术融合模式

海上风电气象服务是一个综合性极强的系统学科,它深度融合了气象学、海洋学、电力工程学等多个学科领域的知识与技术,具有技术跨领域、学科交叉互融的特点,需要加强气象与不同行业融合发展的模式,积极吸纳科研院所、高校和企业对海上风电气象服务关键技术的研究,通过建立联合研发机构,共建实验室等形式,加快推进海上风电集群风功率预测技术研究、海上风电场对海洋生态影响评估分析、海上碳汇观测和潜在影响研究以及远海海上漂浮式风电气象服务技术等,实现从技术研发、模式产品、服务应用、效果反馈等全方面多方位协作,为气象、能源、海洋等相关部门合作提供了典型案例,构建一种全新的将服务与管理互动的海上风电气象服务融合发展模式。

3.2 推动气象赋能海上风电全产业链发展

目前针对海上风电产业气象服务的核心内容包括风资源评估、天气窗口期预报以及风功率预测等方面,气象服务与海上风电产业链全过程资源尚未得到有效整合。海上风力发电直接关系到电力交易、调度、电量消纳、储能等产业链发展,通过联通产业链,打通海上风电的“生产、储运、调度、交易、消纳”等全链条“一站式”需求。此外,利用“气象+”,赋能到海上水产养殖、海洋牧场、绿电制氢、海水淡化等间接海洋产业,打造“海上风电+气象”的综合能源产业融合模式,推动“海上风电+牧场”、“海上风电+光伏”、“海上风电+氢能”、“海上风电+储能”等气象衍生服务,赋能海上新兴交融业态发展,争取形成点上突破与面上带动,推动海上风电产业链发展。

海上风电通过气象服务关键技术研发和应用,实现了个性化与专业化的精准靶向服务模式。以海上风电防灾减灾为抓手,通过数值模式、人工智能、

多源数据融合等技术,推出“一场一策”闭环气象服务方法,智能感知风电场服务需求,提高靶向服务精准性。针对影响海上风电场安全作业的难点问题开展了跨学科的研究,建立了海上风电场风-浪-流预报技术、波浪有效波高和风暴潮智能预报技术、海上风电场高影响天气监测预报预警技术,形成了海上风电精细化气象服务示范与应用技术,为海上风电从选址规划、施工建设、运维作业,生产管理等提供气象服务。通过应用案例的分析,明确了海上风电气象服务的关键地位,海上风电技术应用单位已经根据海上高影响天气制定了详细的应对策略和技术路线,打造了可供中国海上风电场学习借鉴的高影响天气防御手段。此外,海上风电气象服务将不断加强与不同行业的技术融合,通过“气象+”赋能到海上风电全产业链的发展,实现海洋资源综合化、融合化利用。

参考文献:

- [1] ZHOU N, PRICE L, DAI Y D, et al. A roadmap for China to peak carbon dioxide emissions and achieve a 20% share of non-fossil fuels in primary energy by 2030 [J]. *Applied energy*, 2019, 239: 793-819. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.154.
- [2] ZHAO X L, CAI Q, ZHANG S F, et al. The substitution of wind power for coal-fired power to realize China's CO₂ emissions reduction targets in 2020 and 2030 [J]. *Energy*, 2017, 120: 164-178. DOI: 10.1016/j.energy.2016.12.109.
- [3] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3117-3125. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212780.
- XIN B A, SHAN B G, LI Q H, et al. Rethinking of the "three elements of energy" toward "carbon peak and carbon neutrality" [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9): 3117-3125. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212780.
- [4] YOLCAN O O. World energy outlook and state of renewable energy: 10-year evaluation [J]. *Innovation and green development*, 2023, 2(4): 100070. DOI: 10.1016/j.igd.2023.100070.
- [5] 赵德福, 袁家海, 张健, 等. 多层次视角下颠覆性技术驱动的中国能源电力转型路径 [J]. *电力建设*, 2024, 45(8): 1-10. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2024.08.001.
- ZHAO D F, YUAN J H, ZHANG J, et al. China's energy and power system transition pathways driven by disruptive technologies: a multilevel perspective [J]. *Electric power construction*, 2024, 45(8): 1-10. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2024.08.001.
- [6] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现

- 实路径研究 [J]. *发电技术*, 2023, 44(4): 484-491. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23002](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23002).
- XU H H, SHAO G P, E C L, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation [J]. *Power generation technology*, 2023, 44(4): 484-491. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23002](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23002).
- [7] 严新荣, 张宁宁, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述 [J]. *发电技术*, 2024, 45(1): 1-12. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23093](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23093).
- YAN X R, ZHANG N N, MA K C, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(1): 1-12. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23093](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23093).
- [8] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(14): 3758-3770. DOI: [10.13334/j.0258-8013.psee.152756](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.152756).
- CHI Y N, LIANG W, ZHANG Z K, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(14): 3758-3770. DOI: [10.13334/j.0258-8013.psee.152756](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.152756).
- [9] 葛珊珊, 张韧. 全球气候变化背景下灾害性天气变化及对海上风电的影响 [J]. *中国工程科学*, 2010, 12(11): 71-77. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.013).
- GE S S, ZHANG R. Disastrous weather trend under global climate change and its influence on offshore wind power [J]. *Strategic study of CAE*, 2010, 12(11): 71-77. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.013).
- [10] WANG Q L, ZHOU C H, ZHANG H Y, et al. Offshore wind power prediction method considering typhoon, cold wave and other meteorological features under transitory weather [J]. *Procedia computer science*, 2023, 224: 377-382. DOI: [10.1016/j.procs.2023.09.051](https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.09.051).
- [11] YANG Z H, LIN Y F, DONG S. Weather window and efficiency assessment of offshore wind power construction in China adjacent seas using the calibrated SWAN model [J]. *Ocean engineering*, 2022, 259: 111933. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2022.111933](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111933).
- [12] 卢睿, 熊小伏, 陈红州. 考虑台风时空特性的海上风电场群协同紧急防御策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 13-24. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.231428](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.231428).
- LU R, XIONG X F, CHEN H Z. Collaborative emergency defense strategy for offshore wind farm clusters considering the spatial-temporal characteristics of a typhoon [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(12): 13-24. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.231428](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.231428).
- [13] 宋明阳, 瞿晟珉, 秦少茜, 等. 基于故障风险水平的海上风电场机会维护策略 [J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 117-129. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2023.06.013](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2023.06.013).
- SONG M Y, QU S M, QIN S X, et al. Offshore wind farm opportunity maintenance strategy based on failure risk level [J]. *Electric power engineering technology*, 2023, 42(6): 117-129. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2023.06.013](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2023.06.013).
- [14] 杨源, 阳熹, 汪少勇, 等. 海上风电场智能船舶调度及人员管理系统 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(1): 47-52. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007).
- YANG Y, YANG X, WANG S Y, et al. Scheme design of intelligent vessel dispatching and personnel management system for offshore wind farm [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(1): 47-52. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007).
- [15] 杨源, 汪少勇, 谭江平, 等. 海上风电场智慧运维管理系统 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(1): 74-79. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011).
- YANG Y, WANG S Y, TAN J P, et al. The intelligent operation and maintenance management system for offshore wind farms [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(1): 74-79. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011).
- [16] 董昌明, LIM KAM SIAN K T C, 蒋星亮, 等. 一个中国边缘海的风-浪-流预报系统 [J]. *海洋科学进展*, 2022, 40(4): 660-683. DOI: [10.12362/j.issn.1671-6647.20220703001](https://doi.org/10.12362/j.issn.1671-6647.20220703001).
- DONG C M, LIM KAM SIAN K T C, JIANG X L, et al. A wind-wave-current forecast system for China's marginal seas [J]. *Advances in marine science*, 2022, 40(4): 660-683. DOI: [10.12362/j.issn.1671-6647.20220703001](https://doi.org/10.12362/j.issn.1671-6647.20220703001).
- [17] 王博妮, 黄亮, 董昌明, 等. 海上风电高影响天气预报预警服务关键技术与示范应用 [J]. *科技成果管理与研究*, 2023, 18(4): 66-67. DOI: [10.3772/j.issn.1673-6516.2023.04.021](https://doi.org/10.3772/j.issn.1673-6516.2023.04.021).
- WANG B N, HUANG L, DONG C M, et al. Key technologies and demonstration applications of offshore wind power high-impact weather forecasting and early warning services [J]. *Management and research on scientific & technological achievements*, 2023, 18(4): 66-67. DOI: [10.3772/j.issn.1673-6516.2023.04.021](https://doi.org/10.3772/j.issn.1673-6516.2023.04.021).
- [18] 李近元, 王宇, 曹淑刚, 等. 海流海浪耦合作用对台风浪影响的数值研究 [J]. *海洋科学进展*, 2023, 41(3): 456-465. DOI: [10.12362/j.issn.1671-6647.20210902001](https://doi.org/10.12362/j.issn.1671-6647.20210902001).
- LI J Y, WANG Y, CAO S G, et al. Numerical study on the influence of ocean current wave coupling on typhoon waves [J]. *Advances in marine science*, 2023, 41(3): 456-465. DOI: [10.12362/j.issn.1671-6647.20210902001](https://doi.org/10.12362/j.issn.1671-6647.20210902001).
- [19] 崔冬林, 沙伟, 刘树洁, 等. 海上相邻风电场间的“尾流效应”实例分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 21-28. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.003).
- CUI D L, SHA W, LIU S J, et al. Case study of "wake effect" of adjacent offshore wind farms [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 21-28. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.003).

- 01.003.
- [20] 蔡彦枫, 李晓宇. 面向空中风力发电系统的高空风场观测 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(1): 1-9. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.1.01](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.1.01).
- CAI Y F, LI X Y. High-altitude wind field observation of airborne wind energy system [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(1): 1-9. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.1.01](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.1.01).
- [21] 王明, 孟丹, 许沛华, 等. 中国气象局风能太阳能预报系统 (CMA-WSP) 在风资源短期预报中的检验评估 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(1): 73-84. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.1.08](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.1.08).
- WANG M, MENG D, XU P H, et al. Validation and evaluation of the China meteorological administration wind energy and solar energy forecasting system (CMA-WSP) in short-term wind resource forecasting [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(1): 73-84. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.1.08](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.1.08).
- [22] 徐瑾, 曹玉晗, 杨永增, 等. 2016 年苏北近海风场和波浪场多时间尺度变化的数值模拟研究 [J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(4): 600-623. DOI: [10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.006).
- XU J, CAO Y H, YANG Y Z, et al. Numerical simulation of multi-scale temporal variations of sea surface wind and wave field in the offshore area of the northern Jiangsu Province in 2016 [J]. *Advances in marine science*, 2020, 38(4): 600-623. DOI: [10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.006).
- [23] 郭乔影. 基于星地多源数据的海上风能资源评估方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.001831](https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.001831).
- GUO Q Y. Assessing ocean wind energy resources integrated multiple satellite and ground-based data [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.001831](https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.001831).
- [24] 张双益, 胡非, 王益群, 等. 利用 CFSR 数据开展海上风电场长年代风能资源评估 [J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(11): 1795-1804. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj201711008](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj201711008).
- ZHANG S Y, HU F, WANG Y Q, et al. Application of CFSR data to offshore wind farms' long term wind energy resource assessment [J]. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(11): 1795-1804. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj201711008](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj201711008).
- [25] 刘东海, 宋丽莉, 李国平, 等. 强台风“黑格比”实测海上风电机组极端风况特征参数分析和讨论 [J]. *热带气象学报*, 2011, 27(3): 317-326. DOI: [10.3969/j.issn.1004-4965.2011.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4965.2011.03.004).
- LIU D H, SONG L L, LI G P, et al. Analysis of the extreme loads on offshore wind turbines by strong typhoon "Hagupit" [J]. *Journal of tropical meteorology*, 2011, 27(3): 317-326. DOI: [10.3969/j.issn.1004-4965.2011.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4965.2011.03.004).
- [26] 吴萌萌, 王毅, 万莉颖, 等. WAVEWATCH III 模式在全球海域的数值模拟试验及结果分析 [J]. *海洋预报*, 2016, 33(5): 31-40. DOI: [10.11737/j.issn.1003-0239.2016.05.004](https://doi.org/10.11737/j.issn.1003-0239.2016.05.004).
- WU M M, WANG Y, WAN L Y, et al. Numerical simulation experiments and analysis using WAVEWATCH III in the global ocean [J]. *Marine forecasts*, 2016, 33(5): 31-40. DOI: [10.11737/j.issn.1003-0239.2016.05.004](https://doi.org/10.11737/j.issn.1003-0239.2016.05.004).

作者简介:



王博妮

王博妮(第一作者, 通信作者)

1984-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事新能源气象预报、服务技术研究工作(e-mail) bnsmile@163.com。

王锋

1983-, 男, 工程师, 学士, 主要从事海上风电工程及安全生产工作(e-mail) jssinovel@163.com。

葛行成

1997-, 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事能源气象相关研究的工作(e-mail) gehc296@163.com。

黄芳

1994-, 女, 工程师, 博士, 主要从事能源气象研究的工作(e-mail) 774686732@qq.com。

桑小卓

1994-, 女, 工程师, 博士, 主要从事能源气象研究的工作(e-mail) 827564648@qq.com。

张敏

1992-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事能源安全及风能太阳能预测研究工作(e-mail) z857188112@163.com。

(责任编辑 孙舒)