

江苏省海上风电气象服务研究进展

王博妮^{1,2} 朱天华³ 张敏^{1,2} 黄亮^{1,2} 吴寿康⁴ 黄芳¹ 葛行成¹ 桑小卓¹ 袁心仪^{1,2} 姚阮¹

(1 江苏省气象服务中心, 南京 210008; 2 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210008;

3 国家电投集团南通新能源有限公司, 南通 226300; 4 国家电投集团江苏海上风力发电有限公司, 盐城 224000)

摘要: 随着能源改革和“双碳”战略的深入推进, 海上风电作为重要的清洁能源进入了高速发展期, 对严重困扰海上风电安全的强对流、海雾、浪高等高影响天气监测预报预警服务需求也日益强烈。本文从空基、海基、岸基等多维度观测的开展到海上风电高影响天气监测预报预警服务关键技术的研发, 以及海上风电精细化气象服务的实现三个方面, 分析和总结了江苏省海上风电气象服务关键技术及取得的创新性成果, 并提出海上风电未来的发展方向, 以期为沿海其他省市开展海上风电气象服务研究和制订新能源方案等提供理论依据和技术支撑。

关键词: 海上风电, 气象服务, 风-浪-流预报技术

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.06.007

Progress of Meteorological Service for Offshore Wind Power in Jiangsu Province

Wang Boni^{1,2}, Zhu Tianhua³, Zhang Min^{1,2}, Huang Liang^{1,2}, Wu Shoukang⁴, Huang fang¹, Ge Hangcheng¹, Sang Xiaozhuo¹, Yuan Xinyi^{1,2}, Yao Ruan¹

(1 Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008; 2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, China

Meteorological Administration, Nanjing 210008; 3 SPIC Nantong New Energy Co., Ltd., Nantong 226300;

4 SPIC Jiangsu Offshore Wind Power Co., Ltd., Yancheng 224000)

Abstract: With the deepening of energy reform and the advancement of the “Dual Carbon” strategy, offshore wind power, acknowledged as a renewable energy source, has entered a period of rapid development. This calls for the accelerating demand for high-impact weather monitoring, forecasting, and warning services to mitigate severe weather conditions, such as strong convection, sea fog, and high waves, which have a substantial impact on the safety of offshore wind power. This paper presents a systematic analysis and comprehensive summary of the key technologies and innovative achievements in meteorological services for offshore wind power from three aspects: the airborne, sea-based, and land-based observations, the development of key technologies of high-impact weather forecast and early warning services for offshore wind power as well as the implementation of refined meteorological services for offshore wind power. Furthermore, it proposes the future development direction of offshore wind power, aiming to provide a theoretical foundation and technical support both for the research on meteorological services targeted for offshore wind power and for the development of new energy solutions in other coastal provinces and cities.

Keywords: offshore wind power, meteorological service, wind-wave-current forecasting technology

0 引言

为显著增强我国应对气候变化的能力, 加速构建绿色低碳能源体系, 国家与地方政府相继通过有力度的支持政策促成海上风电产业高速发展^[1]。海上风电作为我国未来实现“双碳”目标的关键性产业之

一^[2-5], 是绿色能源的重要一环。2022年1月, 国家发展改革委、国家能源局联合印发了《“十四五”现代能源体系规划》, 强调统筹推动海上风电规模化开发, 积极推进沿海地区海上风电集群化开发^[6]。同年6月, 《“十四五”可再生能源发展规划》联合印发, 更是提出优化近海海上风电布局, 开展深远海海上风电规划的要求^[7]。《江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划》指出全力推进海上风电规模化发展, 探索海上风电和光伏发电的融合发展^[8]。

江苏省沿海“风光”资源丰富、风速稳定、风电转化率高, 是全国海上风电开发建设条件最好的区域之一。凭借得天独厚的沿海风力资源和产业端

收稿日期: 2023年12月20日; 修回日期: 2024年5月22日

第一作者: 王博妮(1984—), Email: bnsmile@163.com

资助信息: 中国气象局软科学研究项目(2023ZDXM03); 江苏省气象局科研项目(KM202105); 江苏海洋气象开放研究基金(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)

1.1 海上遥感观测数据

卫星遥感监测利用携带的各类传感器全面地远距离了解海洋状况，以及海洋和低空大气层的能量交换过程等，可对大范围无气象观测海域进行实时、动态监测是连续获取海面温度、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^[14]。此外通过飞机、气球、飞艇等空中平台对海面感测的航空遥感技术，更具有速度快、机动灵活、空间分辨率高的特点，特别适用于重点海域的高精度气象、水文监测，尤其在海面船舶动态监管、突发情况应急响应等方面表现出色^[15]。

随着卫星组网观测能力的提升和星上有效载荷技术的提高，中国风云系列气象卫星取得了快速发展，完成了从试验应用型向业务服务型的转变^[16]。风云气象卫星是我国最早用于海洋遥感的国产卫星，在诞生之初就获取了大量高质量气象云图和海洋资料。此后，风云气象卫星搭载的高精度微波和光学仪器，可获取海洋水色、海表温度、海面风速、海冰、海雾、海洋气溶胶和海上大气可降水等观测数据（表1），为我国海洋遥感提供了大量丰富的卫星数据，其中海温、海面风速、云导风等产品质量接近国际同类产品^[17]。

表1 部分风云系列气象卫星产品
Table 1 Some of the Fengyun meteorological satellite products

产品分类	名称	空间分辨率/km	产品周期
海洋	海面温度，海洋水色，洋面风速，海冰	1~5	轨道、日、旬、月
大气	云产品：云检测，云量，云分类，云相态，云高/云顶温度，云光学厚度，云水含量	1~5	轨道、日、旬、月
	大气产品：大气可降水，地面降水，大气气溶胶光学厚度，臭氧总量，臭氧垂直廓线，大气温度、湿度廓线，大气温湿廓线推导产品降水检测，冰水厚度，云导风	1~50	轨道、日、旬、月
	掩星探测产品：大气折射率廓线，大气干空气的密度、气压廓线大气温度廓线，低层大气湿度廓线	掩星事件	掩星事件
	监测服务产品：沙尘、雾等	1	日
	辐射收支产品：射出长波辐射，大气顶辐射收支	1~28	轨道、日、旬、月

1.2 海上海洋气象实测数据

海上气象、水文观测站点包括沿海气象站、海岛气象站、浮标站、海上平台气象站以及船舶观测站等，观测要素有风速、风向、气温、相对湿度、气压和降水等。浮标站是以锚定在海上观测浮标为主体组成的海洋水文气象自动观测站，其水上部分为气象要素传感器（风速、风向、气压、气温、空气湿度等），水下部分为水文要素传感器（水温、盐度、波浪、海流、潮位等），最典型的Argo浮标，可在全球海洋中自由漂移，提供海面到水下2000 m水深之间的海水温度、盐度和深度资料，跟踪其漂移轨迹，可获取海水的移动速度和方向^[18]。海上气象水文实况观测数据在抵御台风，观测厄尔尼诺等气象灾害，保障涉海工程、远洋运输，渔业捕捞等海上活动的安全，以及全球海洋、气候和生态系统的相互作用机制研究中起着非常重要的作用。

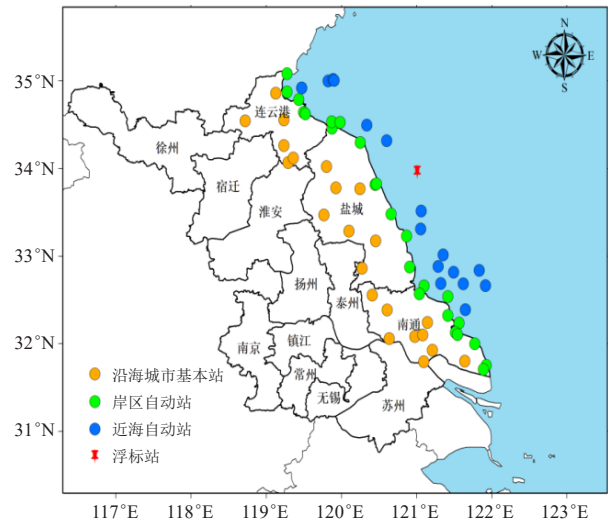


图2 江苏省近海自动气象站
Fig. 2 Distribution of offshore automatic weather stations in Jiangsu Province

随着海上风电场的快速发展，为了满足气象服务需要，海上升压站平台上搭载了气象自动观测站，海上升压站气象观测站位于风电场的“心脏”位置，周围无风机遮挡、观测环境良好，具备气象、水文观测条件，可以代表所在海域内的风电场天气变化。图2为江苏省近海气象自动站位置信息，共有14台海上升压站气象观测站，观测要素有能见度、温度、相对湿度、风速、风向、1 h降水量、气压等。除了固定观测

外，气象、海洋移动观测具有很高的灵活性和自主航行能力，主要是海面上或海下的移动观测设备，如无人遥控潜器、无人观测船、拖曳式观测平台等。

1.3 大气海洋再分析产品数据

再分析资料是现代气候变化研究中十分重要的数据源，主要是利用资料同化技术，将各种来源和不同类型的观测资料与数值预报产品进行融合和最优集成，重建长序列历史数据，有效解决观测资料时空分

布不均、观测数据匮乏的问题。目前大气、海洋再分析产品数据已在大气-海洋-陆地相互作用、气候监测和季节预报等诸多研究领域得到了广泛应用^[19]。

ERA5是ECMWF（欧洲中期天气预报中心）第五代大气再分析数据集，是目前最先进的再分析产品，具有广泛的时间覆盖面和精细化的时空分辨率，提供了大量大气、陆地和海洋气候变量的每小时估计值，垂直分层有137层。数据水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，时间分辨率为1 h，时间跨度为1959—2022年^[20]，提供包含海平面气压、海温、10 m的 u 、 v 分量、浪高等7个气候参数值。有学者通过适用性评估分析，发现该模式产品精细化地描述了大气状态，尤其是相对湿度、风场两种要素表现更明显^[21]。

国家海洋信息中心研发的中国海洋再分析CORA v2.0是全球高分辨率冰-海耦合再分析产品^[22]。通过

构建多源海洋环境数据的超分辨率智能分析模型，结合多源海洋观测资料同化方法，开展多源多模态海洋资源与海洋环境数据联合标识和协同分析，研发了多区域、多要素、高精度和长时序的超高分辨率海洋环境信息产品，是目前国际上公开发表的唯一含潮信号的全球海洋再分析产品，可广泛应用于海洋科学研究、海洋防灾减灾和气候变化等领域。产品要素包括海面高（含潮汐），三维温度、盐度、海流（含潮流），海冰密集度、厚度等，水平分辨率为9 km，垂直向分50层，时间跨度为1989—2020年，时间分辨率为3 h（表2）。研究通过对1958—2008年的西北太平洋再分析CORA 1.0产品进行检验，发现2009—2018年的CORA v2.0产品可以再现海洋要素长时间序列，时空多尺度的变化特征，可以为研究特征海洋现象和过程提供背景信息^[23]。

表2 CORA v2.0海洋再分析产品
Table 2 CORA v2.0 ocean reanalysis products

机构名称	产品名称	产品要素	水平分辨率	时段(年份)
欧洲中期天气预报中心(ECMWF)	ORAS5	海面高、三维温盐流、海冰	1/4°	1979—2012
美国马里兰大学	SODA3.4.2	海面高、三维温盐流、海冰	1/4°	1980—2019
美国海军研究实验室(NRL)	HYCOM	海面高、三维温盐流、海冰	1/12°	1994—2015
法国Mercator海洋中心	Mercator	海面高、三维温盐流、海冰	1/12°	1992—2019
国家海洋信息中心	CORA v2.0	海面高、三维温盐流、海冰	1/12°	1989—2020
	CORA v1.0	海面高、三维温盐流	1/4°	1958—2020

1.4 海上模式预报数据

随着高性能计算机运算和存储能力的提升，大气海洋耦合数值模式得到了极大的发展，数值模式预报产品成为大气和海洋深度融合的主要数据来源^[24]。如海洋环流模式ROMS (Regional Ocean Model System) 可以进行物理、生态、数据同化等多个模块耦合，用于海洋环流、潮汐、海浪、海洋生化过程、海洋泥沙等过程模拟。FVCOM (An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model) 是一个基于非结构网格的近岸海洋模式，主要在近岸高分辨率以及小尺度计算问题上发挥出色^[25]。海浪数值模式20世纪50年代就已经开始，目前国际上流行的第三代海浪模式有WAVE WATCH III (WW3) 和 SWAN (Simulating Waves Nearshore) 等。WW3是由NCEP研发的第三代海浪模式，最大的特点是模式中风输入函数有多种方案^[26]。SWAN模式是第三代针对近岸环境研发的海浪模式，采用隐式格式计算，适用于近岸海浪增长和传播的数值模拟。模式可以进行从实验室尺度到大陆架海尺度的风浪和涌浪计算，同时方便地嵌入其他模式。WRF作为开源的区域大气数值模式，可以模拟多尺度的区域天气过程，是认识天气系统演变机制的重

要工具，并广泛应用于海洋、环境、能源等领域^[27]。

COAWST耦合模型是一个海洋-大气-波浪耦合模型，是目前最主流的区域耦合模型。主要是将海洋模型(ROMS)、天气预报模式(WRF)、浅海波浪模型(SWAN)等模型进行组合和嵌套，通过Model Coupling Toolkit进行数据交换，实现不同尺度和时间步长的耦合(图3)。将实际海洋动力环境中的海气交互、浪流相互作用进行适合耦合，来提高模型整体的时空分辨率，增加模拟物理过程的复杂性，使模拟结果与实际海洋环境更加吻合^[28]，应用于研究海上台

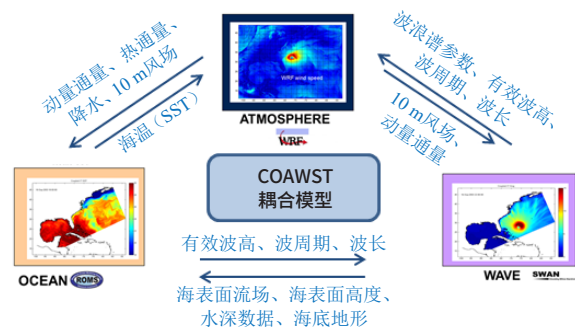


图3 COAWST耦合模型框架图

Fig. 3 Frame diagram of coupled model with COAWST

风、热带风暴、海岸变化等问题研究。董昌明等^[24]利用大气数值模式(WRF)、海洋数值模式(CROCO)和海浪数值模式(SWAN)进行离线耦合,预报海面风场、海温等海洋气象要素。

2 江苏省海上风电气象服务关键技术研究

围绕严重困扰海上风电场安全的强对流、海雾、台风等高影响天气监测、预报、预警等难点问题,通过风-浪-流耦合数值模式、机器学习等技术在海上风电气象服务安全保障领域的研究与应用,研发了基于海气耦合数值模式的区域海上风电场风-浪-流预报

技术、基于机器学习的海上风电场有效波高和风暴潮预报技术以及海上风电场高影响天气监测预报预警技术,显著提高了海上风电场海域气象、海洋要素预报的准确性,实现了台风等紧急事件下有效波高和风暴潮的快速预报,提升了强对流云团的陆地和近海无缝隙监测、追踪能力和区域海雾的预报能力及预警时效性,最后通过海上风电智能气象服务系统和微信小程序集成多个关键技术产品,实现了多工作场景的精细化服务产品集的分发和推送。海上风电气象服务关键技术结构图如图4所示。

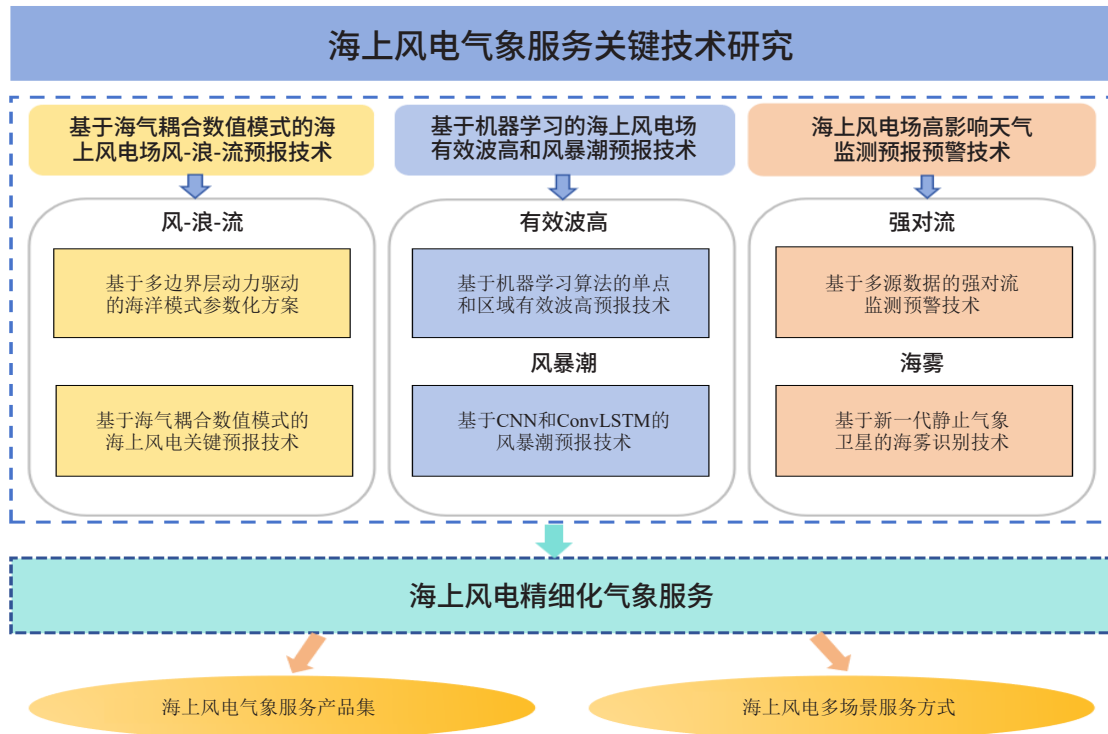


图4 江苏省海上风电气象服务关键技术结构图

Fig. 4 Structure of key technologies of meteorological service for offshore wind power in Jiangsu Province

2.1 研发海上风电场风-浪-流预报技术

基于国际先进的风-浪-流耦合数值模COAWST (Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport), 将非静力大气模式WRF、浅海波浪模式SWAN和区域海洋模式ROMS进行数据交换耦合,对中国近海海域进行精细化数值模拟和关键海域进行模式嵌套,以提高关键站点预报数据的真实性和可信度。在此基础上,对模式数据通过数据同化技术优化预报结果,再结合订正技术对模拟结果进行集成预报,最终形成基于海上风电场海域和风机位置的10 m风、100 m风(风机轮毂高度)、浪高等气象海洋要素的预报,空间分辨率达到3 km,时间分辨率达到1 h,预报时效为120 h。

2.2 构建海上风电场有效波高和风暴潮智能预报技术

利用浮标站观测数据和海上站点观测资料,构建了海上单点有效波高历史观测数据集,通过经验模态分解-长短期记忆网络联合模型建立了单点风机位置的有效波高预测技术,将预报时效由原来的48 h延长到72 h。利用WaveWatch III再分析数据集和台风监测数据,建立了基于卷积长短期记忆神经网络算法的海上风电场海域二维有效波高预测模型,使正常海况和台风影响等极端海况下6 h预报相关系数均达0.98,准确率分别为85%和81%。相较于传统海浪数值模式,基于机器学习的有效波高预测技术显著节省了计算资源,解决了对模拟区域地形,特别是在浅水近岸海域

和计算区域边界敏感的问题,尤其在台风等紧急事件发生时,可快速、准确地给出有效波高的预报结果。

根据面向江苏省海域的风暴潮耦合数值模式提供的动力预报产品,构建海上风电场风暴潮历史数据集,再利用卷积神经网络(CNN)和卷积长短期记忆神经网络(LSTM)算法提取海面风场数据,输入高分辨率海洋局地特征信息,构建海上风暴潮预报模型,实现了潮位站风暴潮增水预报和沿岸风暴潮风险等级预报,提高了台风引起的风暴潮强度预测的准确性,相较于传统的数值模式,计算更快、成本更低。

2.3 建立海上风电场高影响天气智能监测预警技术

利用江苏省近海区域性强对流天气(短时强降水、雷暴大风、雷电等)雷达数据和高分辨率气象卫星多通道光谱数据集,利用CNN和LSTM算法建立海上强对流自动识别技术,实现近海强对流云团监测与追踪,通过反演江苏省近海雷达反射率,自动识别海上强对流天气并及时预警,有效提升了海上风电场强对流的监测预警能力。

基于FY-4A卫星数据建立有海雾及非海雾时次的卫星像素集,结合海上风电场及周边气象站能见度观测资料,利用随机森林算法,构建海雾识别模型,实现风电场海雾识别;统计分析海雾事件及气象要素特征,确定海雾发生发展的基本规律,并基于机器学习中经典的决策树C4.5算法建立海雾预测模型,平均命中率、平均临界成功指数和平均误报率均优于传统海雾识别模型,预警时效提前0.5 h,预测准确率达92%。

2.4 实现海上风电场精细化气象服务示范与应用

通过与海上风电企业和海上管理部门沟通,充分挖掘海上气象、海洋大数据,运用海上风电气象服务关键技术,研发了基于数值模式的海上风电气象服务产品集,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,开展了面向多工作场景的精细化海上风电气象服务方式。

2.4.1 研发基于数值模式的海上风电气象服务产品集

基于多源数据同化和精细化数值预报技术,进一步对数值预报结果进行匹配校验、自动误差订正等,最终提供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、温度、相对湿度、气压、雷电概率、浪高、降水量以及安全出海指数等服务产品,实现针对风机、船舶位置及施工海域的差异化精准监测预警。

2.4.2 构建模式与人工双重保障的海上风电气象服务产品集

充分发挥专家分析预报技巧和丰富服务经验的优

势,结合实况演变特征,对数值模式预报结果进行人工优化订正,以提升短中长期天气及各类高影响天气预报准确率,并根据具体服务需求,提供专业气象信息,量身定制气象服务专报等决策指导产品。

海上风电常规气象预报产品:针对海上风电施工、出海运维等作业特点,建立了针对固定风电场的固定时次以及针对运维船舶行程途中可变更地点、变更时次的海上风电常规气象预报服务,力求在最佳的天气窗口期完成出海作业任务。

高影响天气预报预警产品:冷空气大风、雷电、台风,海雾等高影响天气极易对海上风电场设备和运维人、船的安全造成影响,还会冲击电网安全。围绕不同海上风电场、航段、码头等通过开展数值模拟、特异性差异和卫星遥感分析,建立了江苏省海上风电场分海域、分灾种、分影响确定风速、强对流、海雾和降雨等高影响天气预报预警产品,力争把灾害造成的损失降低到最小。

2.4.3 开展多工作场景的海上风电气象服务方式

面向管理决策人员,构建海上风电智能气象服务系统,提供了周边海域气象海洋要素监测、预报、高影响天气预报预警和安全出海指数等服务产品。管理决策人员通过服务系统及时获取服务产品,了解当前及未来天气、海况等,安排和开展后续工作。

面向出海作业人员,构建了海上风电气象服务微信小程序,方便一线运维、施工人员及时、便捷地查询作业海域的气象动态信息,并最快接收到各类高影响天气的预报预警,减少减轻了因高影响天气导致的人员、财产损失,降低出海作业成本和损耗,提升海上风电工程的高影响天气风险综合防范水平。

目前,江苏省海上风电气象服务关键技术已应用至江苏省8个单体风电场,其中滨海某风电场2020年提高发电量1.2亿kW·h,增加净收益1.02亿元,节约船舶运行维护修理费用580万元。显著提升了海上风电高影响天气监测预报预警服务保障能力,有效减少了海上风电安全事故的发生,解决了影响风电场安全的波浪有效波高、风暴潮、强对流和海雾等监测、预报、预警中的难点痛点问题,为保障海上风电场安全、有序、高效运营提供有力支撑,满足了海上风电场的实际需求,推动海上风电气象服务的发展,技术应用后取得了突出的经济、社会、生态效益,具有重大的推广前景。

3 思考与展望

海上风电气象服务业务研究着眼于大气科学,海洋学及电力工程学的交叉领域,聚焦“双碳”战略,

是海上风能利用及灾害性天气防御的结合点。江苏省海上风电气象服务以大气科学理论为基础,以防灾减灾方法为目的,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。通过借助空基、海基、岸基3个维度观测网络为主,卫星遥感观测为辅的海上风电气象监测体系,提升海上风电场的气象观测能力。利用数值模式、人工智能技术等,建立了基于海气耦合数值模式的海上风电场风-浪-流预报技术、基于机器学习的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,实现了海上风电精细化气象服务示范与应用,为海上风电项目从选址规划、施工建设、运维作业,生产管理等提供全链条的气象服务。江苏省海上风电气象服务实现了从无到有,从有到强的发展。形成了以下几点思考与展望:

1) 海上风电气象服务瞄准能源保供需求,实现了个性化、专业化的靶向服务。以海上风电气象安全为切入点,应用数值模式耦合、人工智能、数据融合等技术,推进海上风电气象服务发展。打造了“用户-需求-场景”生态链,通过细化风电服务需求,精准对接用户施工、运维、生产、管理的全流程,开发场景式服务专业气象服务产品集,建立面向多工作场景的精细化海上风电气象服务方式,精准对接用户施工、运维、生产、管理的全流程,有效提升了海上风电场运营管理能力,为沿海各省开展海上风电服务提供了应用与示范。

2) 海上风电气象服务提供了不同行业融合发展的模式,实现了服务协同联动。基于气象、海洋和风电等跨学科技术交叉互融特点,气象与海上风电企业、高校、海事局等部门紧密合作,从技术研究、产品研发、服务应用、效果反馈等方面全方位协作,构建海上风电气象服务体系,为气象、能源等相关部门合作提供了典型案例,是一种全新的将服务与管理深度融合的气象服务发展模式。

随着海上风电向深海、远海的发展,运维难度、成本以及天气风险等级显著提升,气象服务智能化服务势在必行。由于深远海气象、水文观测严重匮乏,且缺少适用于深、远海的专用气象数值预报模型,因此亟须研发适合深远海项目的气象海洋灾害预报预警系统,为深远海海域风电场提供气象海洋灾害预报预警服务及安全运维保障支撑,提升风电服务业务的智能化保障水平,服务风电项目从选址到施工再到运维的全链条闭环管理。同时,开发气象水文无人监测智能设备,将其融入海上风电场日常运维与管理,可进

一步提高风电场整体协同效率,降低运行成本,使效益最大化。

参考文献

- [1] 孔祥威. 江苏省海上风电现状、发展趋势及对策建议[J]. 中国战略新兴产业, 2022(5): 53-55.
- [2] 闵兵, 王梦川, 傅小荣, 等. 海上风电是风电产业未来的发展方向——全球及中国海上风电发展现状与趋势[J]. 国际石油经济, 2016, 24(4): 29-36.
- [3] 李志川, 胡鹏, 马佳星, 等. 中国海上风电发展现状分析及展望[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 229-236.
- [4] 蔡绍宽. 平价上网助力海上风电行业发展——未来五年海上风电从业同仁的使命[J]. 南方能源建设, 2019, 6(2): 7-15.
- [5] 许立国, 任建宇. 海上风力发电的现状与展望[J]. 港工技术, 2022, 59(6): 45-48.
- [6] 杜伟, 文腾. 《“十四五”现代能源体系规划》等多项政策出台布局中国新型能源体系[J]. 国际石油经济, 2023, 31(1): 9-10.
- [7] 国家能源局. 国家能源局科学技术部关于印发《“十四五”能源领域科技创新规划》的通知[EB/OL]. (2021-11-29)[2023-12-15]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-11/29/c_1310540453.htm.
- [8] 江苏省发展改革委. 江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划[EB/OL]. (2022-06-30) [2023-12-15]. <http://fzggw.jiangsu.gov.cn/attach/0/75525ce5a488407da252037b9de7510e.pdf>.
- [9] 顾云娟, 钱林峰, 周红芳, 等. 江苏海上风电产业创新发展路径与对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(4): 106-115.
- [10] 吴大明. 近年来全球极端天气气候事件情况及影响分析[J]. 中国减灾, 2021(15): 22-25.
- [11] 马英杰, 周理明. 我国海洋观测预报体系初探[J]. 海洋信息, 2009(1): 1-3.
- [12] 李颖虹, 王凡, 任小波. 海洋观测能力建设的现状、趋势与对策思考[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 715-722.
- [13] 罗续业. 发展海洋观测技术建设业务保障体系[J]. 海洋开发与管理, 2012, 29(6): 29-30.
- [14] 林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 99-112.
- [15] 蒋兴伟, 林明森, 张有广. 中国海洋卫星及应用进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1185-1198.
- [16] 唐世浩, 邱红, 马刚. 风云气象卫星主要技术进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 842-849.
- [17] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [18] 罗续业. 海洋技术进展2014[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [19] 蔡逸男, 杜岩, 陈泽生. 四种全球大洋水汽数据产品的比较分析[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(2): 17-26.
- [20] 张萌. ERA5全球再分析产品[J]. 气象科技进展, 2020, 10(4): 160.
- [21] 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 91-99.
- [22] 国家海洋信息中心. 中国海洋再分析(China Ocean ReAnalysis, CORA)2.0版[EB/OL]. (2021-11-26)[2023-12-15]. <https://mds.nmdis.org.cn/server/file/cms/1638873589374.pdf>.
- [23] Chao G F, Wu X R, Zhang L X, et al. China Ocean ReAnalysis (CORA) version1.0 products and validation for 2009-18[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2021, 14(5): 100023.
- [24] 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.
- [25] Chen C S, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured-grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) system[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [26] 朱智慧, 曹庆, 徐杰. 神经网络方法在上海沿海海浪预报中的应用[J]. 海洋预报, 2018, 35(5): 25-33.
- [27] 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.
- [28] 易路. 陆面水文模型TOPX的改进及其与区域气候模式WRF的耦合研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.

(编辑: 卢冰)