

我国海洋气象综合保障工程建设成效与高质量发展分析

冷春香¹ 谭娟¹ 钱传海¹ 陈飘¹ 张诗歌¹ 郑祺¹ 赵培涛²

(1 中国气象局气象发展与规划院, 北京 100081; 2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 海洋气象综合保障工程是依据《海洋气象发展规划(2016—2025年)》、围绕国家“海洋强国”战略设立的重要工程建设项目。通过海洋气象综合保障一期工程实施, 初步构建了涵盖综合观测、预报服务、信息网络及综合保障等的海洋气象业务技术体系, 工程的社会、经济及生态效益初步显现。海洋气象综合保障一期工程建设虽取得阶段性进展, 目前仍存在海洋气象观测密度不够、预报关键核心技术能力不足、服务能力不能满足需求等问题。本文旨在全面总结海洋气象综合保障一期工程建设成效, 深入分析目前海洋气象业务面临的主要问题, 并系统梳理海洋气象业务发展需求和趋势。这对于推动我国海洋气象业务高质量发展, 助力经济社会可持续发展和筑牢防灾减灾第一道防线等具有重要意义。

关键词: 海洋气象, 综合观测, 预报服务

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.03.003

Analysis of the Achievements and High-Quality Development of National Marine Meteorological Comprehensive Support Project

Leng Chunxiang¹, Tan Juan¹, Qian Chuanhai¹, Chen Piao¹, Zhang Shige¹, Zheng Qi¹, Zhao Peitao²

(1 CMA Institute for Development and Programme Design, Beijing 100081;

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081)

Abstract: The Marine Meteorological Comprehensive Support Project is an important engineering construction project based on the Marine Meteorological Development Plan (2016—2025) and the National Strategy for Maritime Power. With the implementation of the phase-1 project, a technological system for comprehensive marine meteorological operation has been initially established, which covers integrated observation, forecasting and service, information network and comprehensive support. The social, economic, and ecological benefits brought by the project have begun to emerge. Although this project has made phased progress, there are still issues such as limited marine meteorological observation density, insufficient capabilities in key forecasting technologies, and inadequate service capabilities to meet demand. This article summarizes the achievements of the phase-1 Marine Meteorological Comprehensive Support Project, analyzes the bottlenecks in the current marine meteorological operation, and lists the needs and trends of its future development. This holds significant importance in promoting the high-quality development of China's marine meteorological operation, supporting the sustainable economic and social development, and strengthening the front line of marine weather disaster prevention and mitigation.

Keywords: marine meteorology, comprehensive observation, forecast and service

0 引言

我国是一个海陆兼备的国家, 沿海地区台风、爆发性气旋、强对流天气、寒潮大风和海雾等海洋气象灾害频发^[1], 造成的经济损失巨大^[2]。在全球气候变暖

背景下, 海上灾害性极端天气呈增多增强趋势^[3-4], 因此, 加强海洋气象能力建设, 更好地服务国家经济社会发展和保障人民生命财产安全等显得尤为重要。

我国海洋气象业务起步于20世纪, 至今已取得非常大的进展。但从全球视角来看, 我国海洋气象综合业务能力与美国、欧洲等世界先进水平相比, 存在海洋气象观测能力有限、海洋气象预报预警核心技术水平不高、海洋气象服务能力和手段不足、海洋气象装备保障能力几近空白等问题, 远不能满足我国日益增长的海洋气象预报服务需求^[4-7]。2016年, 国家发

收稿日期: 2023年9月11日; 修回日期: 2024年6月3日

第一作者: 冷春香(1976—), Email: lengchunxiang@cma.gov.cn

通信作者: 钱传海(1968—), Email: chqian@cma.gov.cn

资助信息: 中国气象局2023年软科学研究重点项目(2023ZDIANXM12); 中国气象局2024年软科学研究专项课题(2024ZXXM02)

展和改革委员会、中国气象局、国家海洋局联合印发了《海洋气象发展规划(2016—2025年)》(简称《规划》),提出了分步骤实施三期工程建设,从而提升我国海洋气象综合能力^[8]。2022年国务院印发的《气象高质量发展纲要(2022—2035年)》(简称《纲要》)提出实施海洋强国气象保障行动,针对加强海洋气象观测能力、提升海洋气象灾害监测预报预警、强化全球远洋导航气象服务等做出明确要求^[9]。

国际上一直非常关注海洋气象观测、预报、服务等能力建设。为弥补海上观测资料不足,欧美主要航海国家自19世纪50年代就提出了利用船舶开展海洋气象和水文环境观测的设想^[10]。随着无线电通信技术的发展,船舶观测资料的实时发送和共享成为可能。船舶观测已成为当前全球天气监测网的重要组成部分^[11]。1984—1985年世界范围的志愿观测船(VOS)数量达到顶峰,约7700艘。近40年来,志愿观测船数量呈现下降趋势,目前全球范围内有约4000艘VOS船舶开展风、气压、气温、湿度、海温、海浪等观测,为弥补海上观测盲区发挥着重要作用^[10]。近年来,自然资源部招募了36艘志愿观测船,可在我国近海及远洋开展船舶观测。除船舶观测外,浮标(锚碇浮标和漂流浮标)也是海洋观测中十分重要的平台,广泛应用于海洋环境观测、气象资料收集、海洋科学研究等领域。随着材料科学、通信技术、传感器及物联网等技术的不断发展,海洋浮标的综合性能得到了极大提升。例如,复合材料、合成材料的应用使得浮标具有更高的强度和耐久性;智能化技术的应用使得浮标能够更加智能地感知和处理数据,提高了数据的准确性和可靠性^[12]。近年来,我国气象部门也逐步加强了海洋浮标观测能力建设,截至2022年底,已在我国近海布设41个各型浮标,在海洋天气观测及大型活动保障中发挥了重大作用^[13]。国际上很早就探讨并实施将飞机作为观测平台,开展热带气旋直接观测。作为全球飞机观测技术最成熟的国家,美国针对热带气旋和冬季风暴开展飞机观测研究和业务已有数十年历史^[13-14]。美国还在持续不断地改进其机载观测能力和观测策略,以获取更多热带气旋内核附近的观测资料,更准确分析热带气旋中心位置、强度及结构等信息,从而提升热带气旋预报准确率^[15]。在西北太平洋地区,日本等国家,以及中国的台湾、香港等地也开展了各具特色的热带气旋飞机观测,为实时业务提供了重要支撑^[16-17]。国内学者对海洋气象发展开展了系列研究,同时,针对海洋气象工程建设情况,从提升海洋气象监测与分析能力、加强海洋气象灾害预报预警能力、

提升海洋气象公共服务保障能力等方面提出相应的对策和建议^[5,18]。

海洋气象综合保障一期工程(简称海洋一期工程)作为落实《规划》目标和任务的首期工程,旨在搭建海洋气象业务体系构架,积累海洋工程建设经验,参与建设单位涉及中国气象局国家气象中心、国家信息气象中心、地球系统数值预报中心等众多国家级业务单位以及辽宁、吉林、河北、天津等12个沿海省(区、市)和4个计划单列市气象局。为保障海洋一期工程的顺利实施,项目设计方采用了“整体设计、分步实施、统筹集约、共建共享”的工程设计理念,分设了海洋气象综合观测、预报预警、公共服务、信息网络及综合保障支撑5大功能建设任务(图1)。为支撑上述5大功能建设任务,每个功能领域又细分为若干分功能领域,如海洋气象预报预警功能细分为常规海洋天气预报、海洋气象灾害预报预警、海洋气象要素网格预报、海洋气象数值预报、海洋气候监测预测等分功能建设任务。海洋一期工程于2018年启动建设,2021年底建设完成并通过竣工决算。当前正处于海洋一期工程效益显现期,因此系统总结海洋一期工程实施成效、深入剖析存在的问题,梳理海洋气象发展需求和趋势,对于后期海洋工程项目建设及全面实现《规划》和《纲要》目标,促进海洋气象高质量发展和助力海洋强国建设等具有重要意义。

1 海洋一期工程建设成效

1.1 海洋气象综合观测

1.1.1 海基/岛礁观测

由于观测站点选址的局限性及高盐高湿环境对观测仪器腐蚀严重等问题,海洋气象观测一直是海洋气象的难点。为提高海洋气象观测能力,海洋一期工程开展了海基、空基和天基气象观测及资料应用能力建设,共完成213套海岛自动气象站、18套石油平台自动气象站设备更新,在东南海域新建25个石油平台自动气象站;同时,更新了南沙东门礁、赤瓜礁、南薰礁和华阳礁等4处岛礁自动气象站(双套站)共8套。

沿海省(区、市)气象部门也积极争取地方财政投资加大海洋气象观测能力建设,其中,浙江在沿海地区布设9套海雾观测站;广东建成10个海岛气象站,并在湛江徐闻、汕头南澳建成对流层风廓线雷达,实现了珠三角相控阵雷达组网观测;江苏、天津、河北、海南和福建等省加强本省沿海自动气象站建设,强化重点区域海洋气象灾害监测能力。

上述海岛、岛礁、石油平台自动气象站及其他观测设施已全部投入业务使用,某种程度上弥补了

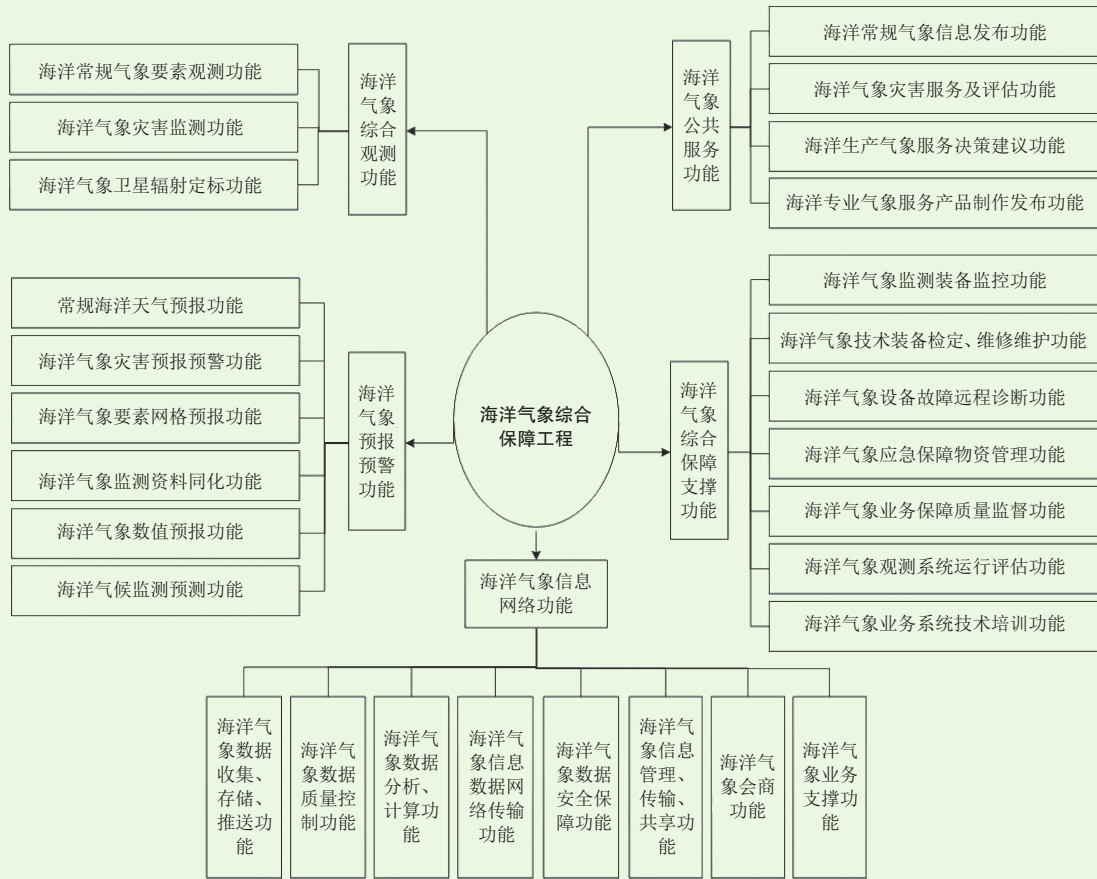


图1 海洋一期工程功能框架示意图

Fig. 1 Functional framework of the phase-1 Marine Meteorological Comprehensive Support Project

海上观测资料的不足，增强了我国沿岸及近海海域风、温、压、湿等常规气象要素及灾害性天气的监测能力。

1.1.2 飞机观测

为弥补海洋气象固定点位观测站网不足，《规划》明确提出要开展移动观测能力建设，应具备离岸3000~5000 km空基机动探测能力。为此，中国气象局气象探测中心开展了南海台风机动观测能力建设，建成一套具有自主知识产权的、基于国产高性能无人机“翼龙-10”的下投探空系统及数据处理平台(图2)。“翼龙-10”作为移动观测平台参加了2020年南海台风观测试验，机载下投探空观测获取了台风“森拉克”环境场温、湿、压、风、水凝物等三维大气关键物理量，飞机观测资料经数值天气预报模式同化后，改进了台风初始场分析精度，使台风降水预报评分提高了约3%。无人机下投探空系统建设，一方面验证了载荷的性能，另一方面也为验证国产大型无人机用于海洋气象观测的可行性提供了重要基础，为海洋气象二、三期工程进一步开展无人机气象观测试验打下了良好的基础^[19]。

1.2 海洋气象预报预警

为提升海洋气象预报预警能力，海洋一期工程安排了国家级业务单位开展海洋常规天气要素和台风、海雾、近海强对流、海上大风等灾害性天气监测分析和预报预警能力建设，开展基于MICAPS4的海洋气象业务支撑平台建设，并实现工程成果在沿海省级气象部门的部署和应用。此外，还开展了海洋气象多源观测资料同化、海洋气象目标观测指导业务平台以及海洋气候监测预测、海洋气象数值预报模式能力建设等。本节主要介绍国家级业务单位在台风和海雾智能监测、海洋气象智能网格预报业务及海洋气象数值模式等方面的进展。

1.2.1 基于人工智能的台风监测

台风是影响我国最重要的灾害性天气系统之一，开展台风精密监测分析是台风精准预报和精细服务的前提。常规的台风强度监测分析是预报员基于各种资料，特别是卫星观测，利用国际通用的DVORAK技术分析台风强度指数，进而得到台风中心附近最大风速和中心最低气压^[20-21]。在海洋一期工程建设过程中，为提升台风强度分析的自动化和智能化水平，国家

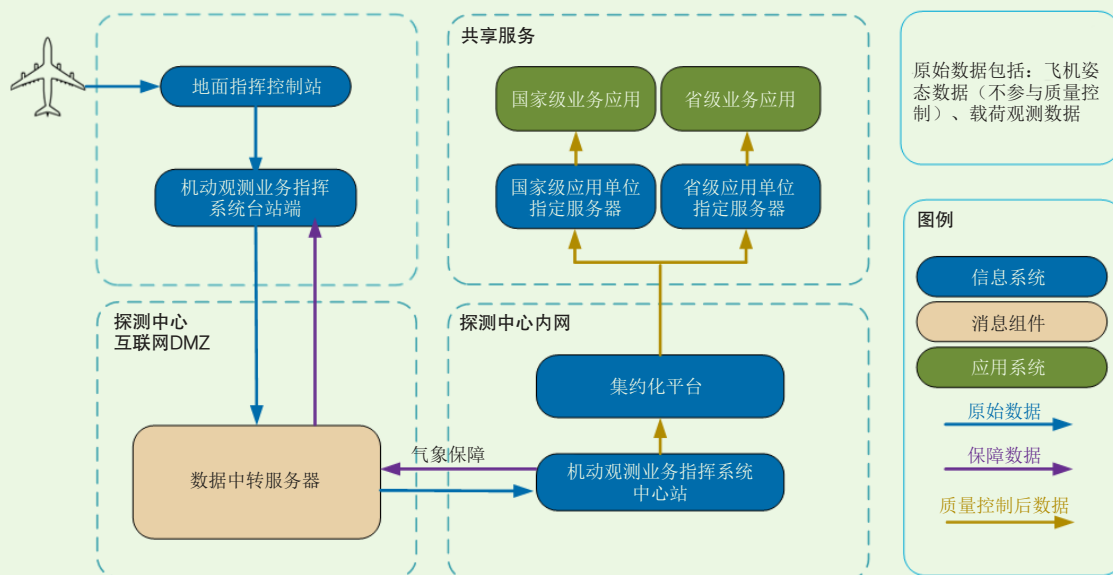


图2 中国气象局气象探测中心无人机下投探空系统资料传输作业流程示意图

Fig. 2 The schematic diagram of data transmission process for unmanned aerial vehicle (UAV) dropsonde system of CMA Meteorological Observation Centre

气象中心加强了人工智能技术在台风监测分析中的应用，基于2005—2018年西北太平洋及南海台风的卫星云图样本，利用ResNet深度学习模型，构建了一种自动、客观的台风强度估测技术。通过对2019年全年业务试运行结果进行检验分析，表明该技术能够实现针对不同强度、不同发展阶段的台风客观强度估测，为实时业务提供重要参考。另外，国家气象中心还开发了基于深度图像目标检测的台风涡旋识别模型及融合时空序列特征的台风快速增强判别模型，为进一步提高我国台风监测和预报预警能力提供了有力支撑。

1.2.2 基于人工智能的海雾监测

海雾是指发生在海上或沿海地区低层大气中，由于水汽凝结而产生的大量水滴或冰晶使大气水平能见度小于1 km的天气现象。海雾给海上船舶航行、油气生产及港口作业等带来较大危害，有统计表明，我国近海发生的船舶碰撞或触礁事故中，有50%~70%与海雾有关^[22]。为提升海雾监测能力，国家气象中心开发了基于深度卷积神经网络方法的海雾监测技术，基于2017—2018年黄海和渤海海雾卫星云图样本，使用D-LinkNet深度卷积神经网络语义分割算法模型，实现对海雾卫星云图特征提取与特征量设计。基于该方法的渤海和黄海海雾检测正确率（检测正确样本/总样本）为93.2%，为提升近海海雾监测自动化和准确率奠定了基础（图3）。

1.2.3 海洋气象智能网格预报业务

国家气象中心海洋气象格点预报起步于2016年，

当时主要基于天气学原理和预报员经验对数值预报模式输出的海面风、浪、能见度等各要素预报进行主观订正，每日三次制作并下发责任海区72 h时效、12 h间隔、25 km分辨率的风、浪、天气现象及能见度等预报产品。《规划》的颁布和海洋一期工程实施，极大推进了海洋气象精细化格点预报业务的发展。借助于集合预报的概率预报及集合众数预报产品的开发、海雾“配料法”和决策树预报方法等工程化应用，海洋气象格点预报时效、时空分辨率及预报准确性等都取得较大进展。通过海洋一期工程，也进一步完善了基于MICAPS4框架的台风海洋一体化业务平台，新增了海洋气象格点分析和预报编辑功能，并实现了海区预报、大风落区预报图等产品的自动生成与分发功能；同时通过算法实现不同要素之间的关联，如风与浪、天气现象（如阴雨、暴雨等）与能见度之间的关联，极大提升了不同要素间的协同和工作效率。截至2020年，海洋气象智能网格预报客观产品实现了升级，预报时效延伸至168 h（7 d），空间分辨率达到5 km，24 h内预报间隔为逐小时，24~72 h预报间隔为逐3 h，72~168 h预报间隔为逐6 h。

1.2.4 海洋气象数值模式

数值预报模式是海洋气象业务最重要的技术支撑。在海洋一期工程建设过程中，重点开展了海洋气象多源资料融合分析与海洋气象多源资料区域快速循环同化、近海登陆台风临近预报数值模式、区域海气耦合海洋数值预报、海上污染物扩散数值预报及全球

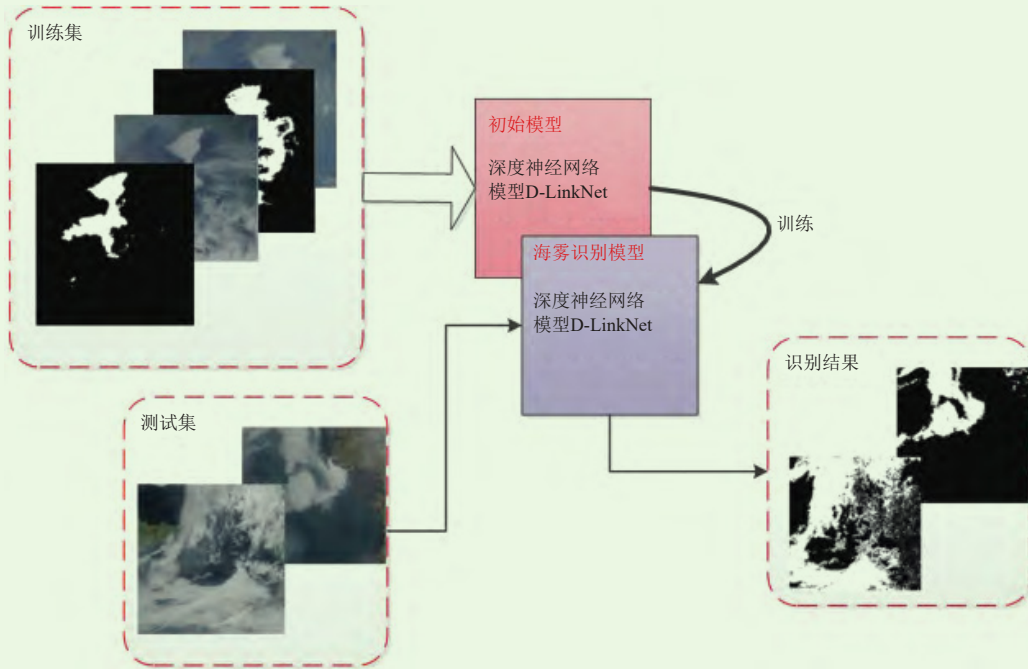


图3 国家气象中心基于深度学习技术的海雾检测框架

Fig. 3 Sea fog detection framework based on deep learning by CMA National Meteorological Centre

台风数值预报模式等建设内容。其中，全球台风数值预报模式实现了台风涡旋初始化方法（BDA方法）在全球模式中的耦合和优化，开发了台风涡旋的追踪识别，改进了台风后处理模块。全球台风数值预报模式

水平分辨率为25 km，预报结果输出间隔为3~6 h，台风路径、强度及风雨预报等产品预报时效为5 d，为我国开展北印度洋、东北太平洋及北大西洋等海域热带气旋预报业务提供了重要支撑（图4）。

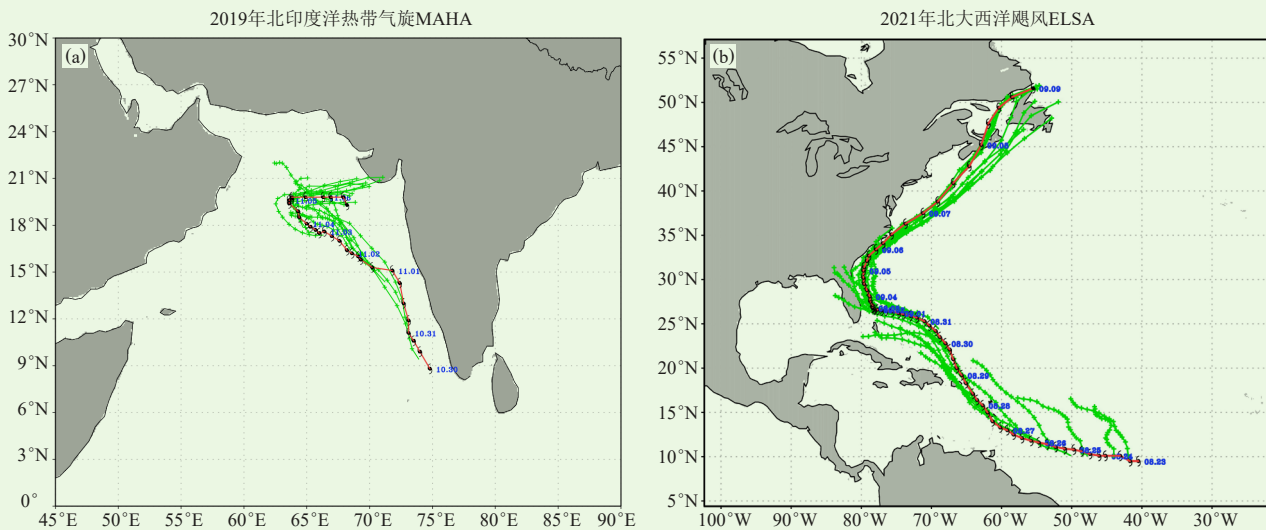


图4 中国气象局地球系统数值预报中心基于CMA-GFS模式的全球热带气旋路径预报（红色实线为热带气旋实况路径；绿色实线为模式不同时刻的预报路径；蓝色数字为日期）

Fig. 4 Tropical cyclone track forecasts based on the CMA-GFS model developed by CMA Earth System Modeling and Prediction Centre (the red line: the actual tropical cyclone observation track; the green lines: track forecasts at different initial times; the blue digits: the dates)

1.3 海洋气象公共服务

海洋一期工程实施以来，中国气象局以海洋气象信息发布手段、远洋气象导航保障能力、海洋气象灾

害风险普查和区划等为建设重点，逐步构建信息发布手段多样、灾害应急联动高效、社会广泛参与的海洋气象专业服务和灾害防御体系，助力筑牢海洋气象防

灾减灾第一道防线。

1.3.1 海洋气象信息发布

为提升海洋气象信息发布能力，海洋一期工程重点升级了海洋气象预警信息发布渠道和手段。通过跨部门合作，上海、广东新建了海洋气象信息传真发布系统，发布北太平洋及南海周边海域海洋气象分析及预报等传真图(图5)，恢复或填补海洋气象传真图领域的空白，拓展了海洋气象用户群体。山东石岛、浙江舟山、广东茂名的海洋气象广播电台进一步升级完

善。基于北斗卫星的海洋气象预警信息发布平台在浙江、广东、海南等沿海省份部署和安装，提升了预警信息覆盖面。依托广东茂名市气象局海洋气象信息发布站，建立了数字化气象信息发布管理系统，实现了多语种信息发布。同时，依托国家突发事件预警信息发布管理平台，拓展了信息采集、管理、分析和多手段发布模块，建立了海洋气象用户群组管理体系，制定了海洋灾害性天气预警精准发布策略，结合网络、手机、电视、户外大屏等多种手段，实现对海洋气象信息高效统一发布。

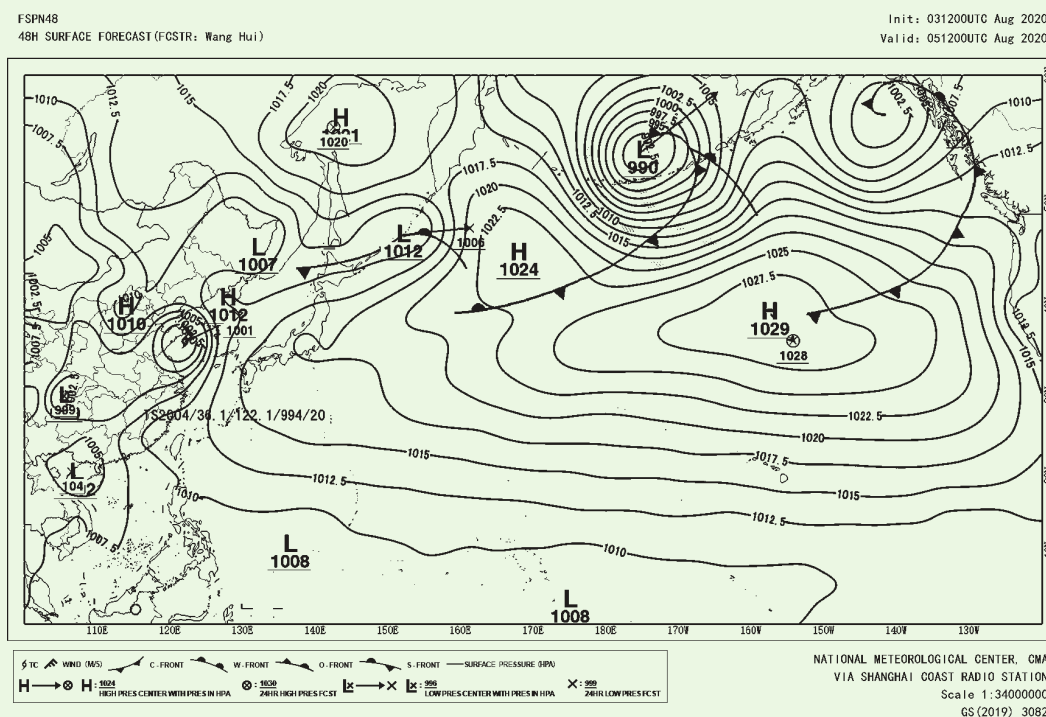


图5 2020年8月3日12时(世界时)北太平洋海平面气压场48 h预报传真图

Fig. 5 Facsimile map of 48 h forecast for sea-level pressure field over the North Pacific Ocean at 12: 00 UTC on 3 August 2020

1.3.2 海洋气象专业服务

我国是世界第一大货物贸易国和航运大国，有世界上最繁忙的港口和近海航线，海上航运及港口作业安全和效率等对气象服务提出了很高的需求。远洋船舶气象导航涉及气象学、海洋学、航海学、运筹学及计算机等多学科技术应用。目前我国远洋气象导航业务基础和核心技术能力与国际先进水平相比存在明显差距，远洋运输船队大多采用国外气象导航公司提供的服务。为提升我国自主可控的远洋气象导航服务能力，在海洋一期工程建设过程中，重点开发了集气象和海洋水文环境等多源数据分析、船舶航线模型与算法、岸基及船舶气象导航决策支持、海洋灾害天气预警、智能服务等于一体的远洋船舶导航系统，并重建

了包括航前、航中及航后等全链条的远洋气象导航业务流程(图6)。同时，设计开发了拥有自主知识产权的手机应用船舶导航App，船东或租家可以通过该应用进行船队管理、获取天气系统发展变化情况，掌握全球任意海域的水文气象要素预报及变化趋势等，为岸基及船端航行决策提供支撑。

除加强国家级远洋气象导航服务能力建设外，以上海、宁波气象部门为代表的港航物流气象保障业务也取得较大进展。通过技术升级和部门合作，上海海洋中心气象台细分了洋山港区台风预警发布规则，可以有效避免预警发布后海事部门“一刀切”管理方式而造成的船舶提前撤离、大桥提前封闭等现象，在保障安全的基础上，有效缩短了台风影响期间的空港

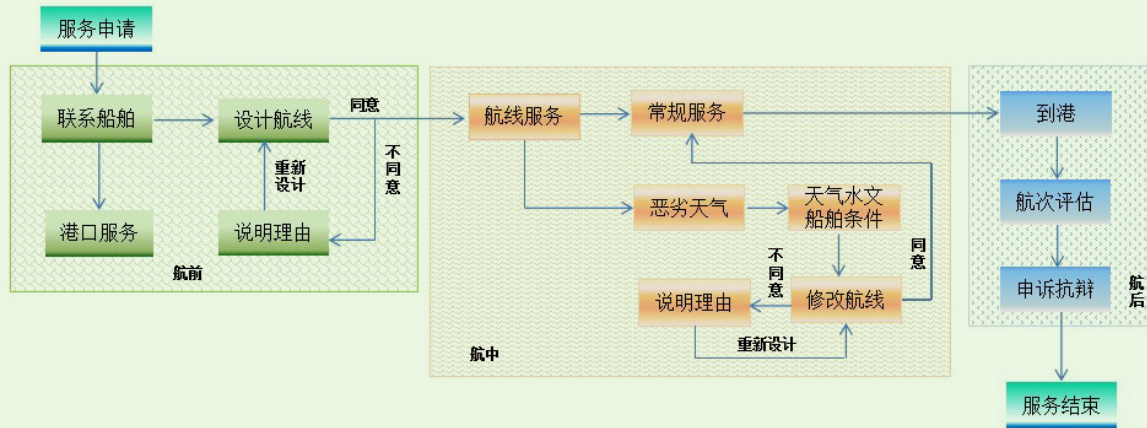


图6 中央气象台远洋气象导航业务流程图

Fig. 6 Operational process of ocean-meteorouting in Central Meteorological Observatory, CMA

期，为港区生产赢得宝贵时间。宁波市气象局与宁波舟山港管理部门密切合作，共同打造港区精细、高密度气象监测系统。同时，气象服务深入对接港区锚地、航道、码头至堆场，提供分港区天气预报、强对流天气警报等，协助港口有效应对灾害性天气，提高港口灾害防御能力和生产力。

1.3.3 海洋气象灾害风险管理

围绕海洋气象防灾减灾需求，海洋一期工程开展了海洋气象灾害风险管理能力建设，特别针对海上台风、寒潮大风、海雾、强对流天气等海洋气象灾害及核电站、跨海大桥两类承灾体，在历史灾害普查基础上，建立了实时-历史一体化的海洋气象灾害风险数据库，开发了海洋气象灾害风险区划检索查询和综合风险普查成果应用系统。基于上述海洋气象灾害管理系统，推动国家级和省级海上重大工程台风风险评估示范建设，完成针对海上重大工程台风风险评估，以及海洋气象灾害风险评估，形成我国近海海上大风灾害风险监测评估业务，逐步提高我国海洋气象灾害风险管理水平。

1.4 海洋气象信息网络建设

海洋一期工程建设过程中，中国气象局以海洋气象数据质量控制和整编、海洋气象信息安全系统建设、卫星应急通信系统和国、省两级基础设施资源池扩充建设为重点，极大增强了海洋气象观测资料 and 全球海洋气象信息的收集、存储和分发服务能力，有效支撑了海洋气象业务的发展。

国家气象信息中心研发了海洋气象基础数据产品，建立了海洋观测全要素实时质量控制业务，实现全球及中国近海海洋气象观测数据的质量控制；构建了海洋多源融合实况分析产品体系，实时生成海表温度、海冰密集度等多源融合实况分析产品，为国家

气象中心、国家气候中心等国家级及省级业务单位提供了海洋基础数据与实况数据支撑。借助海洋一期工程，完成国家级、3个海洋区域中心及9个涉海省（区）资源池的扩充建设；建立国、省两级气象大数据云平台，支撑海洋气象预报和服务等业务软件运行和海洋气象资料存储处理；通过地方投入在天津、上海、广州建立区域高性能计算系统，基本满足业务建设对基础设施资源的需求。

1.5 海洋气象装备保障建设

海洋气象观测设备长期处于高盐分、高湿度等不利环境，给设备运行监控、计量检定、维护维修等工作带来巨大挑战。在一期工程建设过程中，按《规划》要求，开展了国、省两级海洋气象综合保障技术体系建设，通过海洋气象观测试验数据处理中心改造、移动观测试验能力改进等，建设了国家级海洋气象观测设备试验基地，完成了海洋气象装备质量检测规范设计和海洋盐雾腐蚀试验检测能力建设，提升了国家级海洋气象装备质量检测能力。

海洋一期工程依托涉海省份现有海洋气象观测设备测试维修平台，充分考虑海洋气象观测的特点和技术要求，通过购置必要的检测工具，改进了现有测试维修平台软硬件条件，补充和完善了平台功能；同时，为提升海洋观测数据传输的时效性、稳定性和完整性，对通信设备开展了升级改造，并开发了海上无人站北斗卫星应急通信系统软件，在山东、天津等地进行了测试和部署，从海上无人站通信系统输出，上传到省级通信系统，用时15 s以内，数据文件传输完整性和正确性达100%。

针对新建的高性能无人机下投探空系统，海洋一期工程初步搭建了无人机气象探测地面应用保障系统，主要包括无人机探测基地、机载下投探空控制系

统、观测数据通讯链路、探空数据分析处理及效用评估等，积累了飞机观测保障经验，为将来开展台风飞机观测保障业务奠定了基础。

2 海洋一期工程的社会、经济及生态效益分析

海洋气象综合保障工程是中国气象局首个海洋气象领域的专项工程，海洋一期工程初步构建了海洋气象业务体系，积累了海洋工程建设经验，并产生了较好的社会、经济、生态效益。

2.1 社会效益

通过海洋一期工程建设，升级并新建了近海自动观测站点，初步建立了基于高性能无人机的台风观测系统，海洋气象观测范围得以向外海延伸。海洋气象智能网格预报准确率和精细化均得以提升。国家级业务单位和沿海省市气象部门有针对性地开展了包括海上油气开发、海洋牧场及渔业捕捞、港口物流、冬季供暖海运专项气象保障等各具特色的气象服务。另外，在海洋一期工程建设过程中，气象部门积极与涉海用户合作，发挥各自专业优势，针对不同应用场景联合制定相关作业规范及标准，如青岛市气象局联合青岛港相关部门共同制定了《港口作业气象服务》(DB37/T 3548—2019)地方标准，宁波市气象局联合港口、海事等部门制定了《港口作业气象预警等级及图标》(DB3309/T 2001—2020)、《港口水上交通气象条件》(DB3302/T 1108—2019)、《港航分区气象服务规范》(DB3302/T 1136—2022)等港航气象服务相关标准。同时，海洋一期工程优化了海洋气象预警信息发布渠道，实现预警信息中国海域100%覆盖，为筑牢防灾减灾第一道防线和助力经济社会发展发挥了重要作用，产生了良好的社会效益。

2.2 经济效益

港航物流、海上航运、油气开采、渔业生产等主要涉海经济活动受海洋灾害性天气影响较大。海洋一期工程建设有效提升了海洋灾害性天气监测预警精细化和准确率，增强了我国海洋专业气象服务能力。例如，海洋一期工程建设了具有自主知识产权的气象导航业务系统，支撑了我国全球气象导航业务的发展。2019年其服务的远洋船舶航线遍及太平洋、印度洋及大西洋，共签约48家航运公司，为用户节省2500 h、2600 t油耗，减损约400万元^[23]。另外，随着国省智能网格预报的发展和专业服务能力的提升，也为服务对象创造了较好的经济效益。上海海洋中心气象台联合海事、引航等部门因地制宜创新了洋山港区台风预警细分作业区发布办法，有效缩短了台风影响期间的空

港期，为港区生产赢得宝贵时间。2019年“利奇马”台风影响期间，利用细分预警发布法，比常规预警发布缩短空港期1 d，增加1 d可作业天数，为航运公司增收近1000万元。宁波市气象台开展精细化大风和海雾预报，2021—2023年年均为宁波舟山港港口增加可作业时长150 h、为港口与船舶公司增加营业收入5.6亿元。随着我国沿海地区经济持续发展、海洋经济进入一个前所未有的快速发展期，海洋一期工程及后续建设带来的长期潜在经济效益将更为显著。

2.3 生态效益

随着我国海洋经济的快速发展，海洋生态环境也日益受到关注。海洋一期工程提升了以大气为核心的海洋气象综合观测和海洋气候监测预测能力，将有助于理解海洋生态与全球气候变化的复杂关系。海洋一期工程初步建成了海上污染物扩散数值预报系统，为海上溢油或危险化学品泄露等影响生态环境的突发事件应急响应和治理提供了技术支撑。海上风能和太阳能是清洁、可再生的能源形式，海洋一期工程开展了我国近海风能、太阳能资源分布状况及储量评估，为持续发展海上清洁能源产业，同时保护海洋生态环境奠定了基础。另外，广东省气象局充分发挥卫星遥感反演产品在监测南海海温、叶绿素浓度、悬浮物浓度、水体透明度等海洋生态监测中的作用，定期发布海洋生态气象遥感专报和监测年报，为我国南海生态环境保护提供综合保障。

3 海洋气象业务存在的问题

海洋一期工程建设促进了我国海洋气象观测、预报预警及服务、信息及保障等能力的提升，取得了可喜的成绩，但仍然面临着一些发展瓶颈问题。

3.1 海洋气象观测仍然存在盲区

近年来，我国虽然在海洋气象观测方面取得较大进展，但距《规划》目标尚有不小差距。海洋一期工程主要是对沿岸或近海海岛、石油平台及南沙部分岛礁等已有观测站点进行设备更新，而新增海基观测站点非常有限。初步估算我国沿岸海区海基观测平均站距为78 km，与《规划》目标值50 km还有较大差距。虽然初步建成了南海台风无人机观测系统，但目前无人机观测范围仅限于海南岛东部近海，尚未覆盖整个南海海域，更谈不上具备离岸3000~5000 km的空基机动观测能力。除琼州海峡及部分港口布设有激光雷达能见度仪外，我国大部分沿岸海域尚缺乏海雾精细监测能力。海洋牧场作为渔业生产的新模式和海洋产业的新业态，对精准气象监测提出了更高的要求，而目前我国尚未建立海洋牧场观测规范，有些服务于海

洋牧场的观测站点设立在岸边，并不能真实反映离岸数千米或更远距离的海洋牧场观测信息，制约了海洋牧场精准预报和精细服务能力。

3.2 海洋气象预报关键技术能力尚有不足

虽然近年来我国海洋灾害性天气预报预警取得进展，但对于近海快速增强及路径异常变化台风、近海突发性雷暴大风及海雾精细化能见度等预报准确率与精细服务需求尚有不小差距，尚未开展海雾垂直监测和厚度预报业务。虽然我国已建立起门类齐全的数值预报模式体系，但这些模式多限于大气模式，尚未真正实现与洋流、海浪、海冰等模式耦合及业务化应用。和国际先进水平相比，我国数值预报模式的卫星资料和海洋资料同化占比偏低。虽然海洋一期工程有力推动了国家级和省级海洋气象智能网格预报业务的发展，但由于海上实况资料匮乏，海洋气象智能网格预报产品评估检验业务略显滞后，目前多是将网格预报插值到岸基代表站，并依据岸基代表站的实况进行格点预报检验，这种检验方式存在明显的局限性，只能是一种“权宜之计”。

3.3 海洋气象服务能力与需求存在差距

海洋一期工程大幅提升了我国海洋气象广播电台、海洋气象传真广播及基于北斗卫星的海洋气象预警信息发布能力，但产品针对性不强，对特定行业用户的需求缺乏了解，尚不能针对特定用户“量身定做”符合其需求的预报预警产品。虽然通过海洋一期工程建设开发了具有自主知识产权的远洋船舶气象导航系统，但系统智能化水平及航线优选算法、船舶在不同天气海况下的“失速”算法等，与国际先进水平还有不小差距。受卫星通信覆盖范围和传输带宽制约，远洋气象导航通信保障能力尚不能满足发展需求。

3.4 海洋观测仪器运维及保障能力欠缺

由于海洋观测设备多处于高盐高湿等恶劣环境，设备故障率明显偏高，设备寿命远低于内陆地区，因此，涉海观测设备运行维护成本较高。另外，海岛站、锚碇浮标、石油平台等海上观测平台设备的维护往往需要租船出海，无形中增加了运维经费，而目前国家级维持经费缺口较大，大部分靠地方气象部门自筹或地方政府支持，给基层气象部门造成较大负担。同时，海洋气象观测设备的备份比例低，难以保障设备正常业务运行。这种“重建设、轻运维”的现象在海洋工程项目中较为普遍，不利于工程项目效益发挥。

3.5 海洋资料共建共享水平有待提高

尽管《规划》对气象和海洋等部门在涉海观测站点共建共享方面做出了明确安排，如新建站点应采用统一标准、一站多能、共同选址，同时搭载气象和海洋观测设备，避免重复建设等，但站网规划阶段部门间存在交叉，导致有些观测站点距离仅几千米到十几千米，存在重复建设。另外，省级气象、海事等部门虽然实现了一定程度的设备共建共用、数据共享，但由于设备研制、采购及布设阶段缺少统一标准，应用阶段也尚未建立统一的标准规范，数据的集成应用难度大；同时，由于部门职责分工等原因，对海上平台设施建设缺少统一规划，相关部门对职责内事项考虑较多，对职责外考虑较少，没有发挥出海上平台设施建设的最大效益。从数据共享种类及数量来看，海面以上的气象数据共享较多，海面以下的海洋观测数据共享不够。部门间的数据共享量也存在较大差异，气象部门共享的数据多，但其他部门共享给气象部门的数据量较少。

4 海洋气象高质量发展思考

海洋一期工程作为落实《规划》目标和任务的首期工程，旨在搭建海洋气象业务体系构架，积累海洋工程建设经验。当前正处于海洋一期工程效益显现期、二期工程建设期和三期工程设计期。另外，《纲要》也对海洋气象观测能力、海洋气象灾害监测预报预警、海洋气象服务等提出了非常明确的要求。因此，系统总结海洋一期工程实施成效、深入剖析存在的问题，梳理海洋气象发展需求和趋势，对于全面实现《规划》和《纲要》目标，促进海洋气象高质量发展具有重要意义。

4.1 进一步提升海洋气象观测能力

海洋气象观测是海洋气象业务的基础，也是衡量一个国家海洋综合能力的重要指标。应不断优化和完善岸基自动气象站、雷达等站点设置及观测能力，强化岛礁、石油平台、船舶、锚碇及漂流浮标等观测能力建设，有效弥补海洋观测盲区。加强观测与预报互动研究，增强海洋气象机动观测能力建设，注重对无人机、无人艇、平流层飞艇等海洋气象新型观测设备的研究和应用，形成动静结合（固定站点和移动观测）、综合立体的海-岸-空-天四位一体的海洋气象综合观测能力。在提升沿岸及近海海域精密监测能力的同时，逐步建设面向西北太平洋、“海上丝绸之路”及北极航道沿线海域，乃至全球海域的观测能力，为全球预报和全球服务提供支撑。

4.2 提升海洋气象预报预警自主可控的核心技术能力

加强人工智能技术应用研究,进一步提升台风、近海强对流、海雾等海洋灾害性天气预报精细化和准确率。开展关键海区三维智能网格预报业务,优化全球海洋气象智能网格预报体系。加强数值模式资料同化技术研究,提升卫星和海洋观测资料同化占比。开展地球系统多圈层综合观测试验,为改善模式物理过程、提升海气界面物质和能量交换认知和定量表达,改善数值模式初始化和边界条件等奠定基础,推动我国海洋气象数值模式向自主可控的多圈层耦合核心技术发展。开展海洋气象智能网格预报多维度评估检验方法研究,更科学真实评估预报性能。开展全球气候关键区、敏感区气候监测和“海-陆-气”相互作用的综合研究,提升全球海洋气候监测和预测能力。

4.3 提升以远洋气象导航为代表的海洋气象服务能力

进一步完善海洋广播电台、海洋气象传真及北斗卫星等海洋气象信息发布系统,提升海洋气象信息发布效率和覆盖面。综合运用海洋气象灾害风险普查和区划成果,开展跨学科的海洋灾害性天气风险评估、影响预报及海洋气候资源开发利用等研究和业务,提升海洋气象服务的针对性和有效性。对标国际先进水平,大力发展远洋气象导航核心技术,支撑我国远洋导航业务快速发展。在沿岸及近海海域开展海洋气象多平台综合立体监测和预报业务,助力海洋低空经济发展。

4.4 推动形成共建共享的海洋气象发展新格局

受海洋环境的特殊性和恶劣性等因素影响,海洋观测站点选址受限,且建设难度大、运维成本高,仅凭气象部门一己之力,很难有效实现海洋观测“补盲”。应加强气象、海洋等部门海洋观测站网统筹设计,切实落实《规划》提出的多部门共建共享机制,联合开展海上观测装备研发、试验测试、计量检定、维修保养等工作,进一步推动海洋观测标准化和资料共享进程,实现海洋观测集约化和效益最大化。加强行业指导,发挥社会化观测力量,以大吨位渔船、客货船及远洋货轮等为载体,开展重点海域和航线的船舶志愿气象观测,提升船舶观测资料的质量和可用性,共同推进我国海洋气象综合观测能力。联合相关部门建立基于应用场景和风险管理的应急联动服务机制,提高我国海洋气象预报预警和服务整体能力,共同筑牢防灾减灾第一道防线。

致谢: 本文撰写过程中得到中国气象局国家气象中心、国家气候中心、国家卫星中心、国家气象信息

中心、地球系统数值预报中心、气象探测中心、公共气象服务中心、气象干部培训学院及上海海洋中心气象台和宁波市气象台等相关单位和专家的支持,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 许小峰, 顾建峰, 李永平. 海洋气象灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [2] 中国气象局. 气象统计年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2022.
- [3] 李元寿, 李峰, 王胜杰, 等. 加强海洋气象综合保障工程能力分析的分析与建议[J]. 浙江气象, 2018, 39(3): 29-34.
- [4] 李元寿, 李峰, 王胜杰, 等. 海洋气象综合保障工程建设的现状分析[J]. 浙江气象, 2017, 38(2): 37-43.
- [5] 黄彬, 赵伟. 国家级海洋气象业务现状及发展趋势[J]. 气象科技进展, 2017, 7(4): 53-59.
- [6] 张增海, 刘涛, 曹越男, 等. 船舶海洋气象导航的业务概况与发展现状[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(3): 11-16.
- [7] 美国大气科学和气候专业委员会, 美国地球科学, 环境和资源委员会, 等. 进入21世纪的大气科学[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [8] 国家发展和改革委员会, 中国气象局, 国家海洋局. 国家发展改革委中国气象局 国家海洋局关于印发《海洋气象发展规划(2016—2025年)》的通知[EB/OL]. (2016-02-24)[2023-01-11]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201602/t20160224_962176.html.
- [9] 国务院. 国务院关于印发气象高质量发展纲要(2022—2035年)的通知[EB/OL]. (2022-05-19)[2023-01-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/19/content_5691116.htm.
- [10] 刘家沂. 国际志愿观测船计划[J]. 海洋开发与管理, 2008, 25(2): 18-22.
- [11] 董翔, 张昊睿. 我国船舶测报现状与对策[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(7): 92-96.
- [12] 孙仲汉. 关于发展我国漂流浮标和锚泊浮标技术的建议[J]. 海洋技术, 2000, 19(2): 13-17.
- [13] Qian C H, Li Y, Xu Y L, et al. Tropical cyclone monitoring and analysis techniques: a review[J]. Journal of Meteorological Research, 2024, 38(2): 351-367.
- [14] 钱传海, 李泽椿, 张福青, 等. 国际热带气旋飞机观测综述[J]. 气象科技进展, 2012, 2(6): 6-16.
- [15] Zawislak J, Rogers R F, Aberson S D, et al. Accomplishments of NOAA's airborne hurricane field program and a broader future approach to forecast improvement[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(2): E311-E338.
- [16] Tang J, Zhang J A, Chan P W, et al. A direct aircraft observation of helical rolls in the tropical cyclone boundary layer[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 18771.
- [17] Hirano S, Ito K, Yamada H, et al. Deep eye clouds in tropical cyclone Trami (2018) during T-PARCCII dropsonde observations[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2022, 79(3): 683-703.
- [18] 陈洪滨, 李军, 马舒庆, 等. 海洋气象观测技术研发进展[J]. 科技导报, 2019, 37(6): 91-97.
- [19] 黄婧怡, 余申伟, 柯元惠, 等. “海燕”展翅 气象护航[N]. 中国气象报, 2021-12-22(02).
- [20] Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery[J]. Journal of Meteorological Research, 1975, 103(5): 420-430.
- [21] Velden C S, Olander T L, Zehr R M. Development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity from digital geostationary satellite infrared imagery[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(1): 172-186.
- [22] 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 等. 中国海雾研究简要回顾[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 20-28.
- [23] 李冬梅, 王晨, 简菊芳, 等. 气象高质量发展系列报道⑦ 生产发展篇高质量发展中的“气象密码”[EB/OL]. (2022-04-06)[2023-01-11]. https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2022zt/20220401/2022040107/202204/t20220412_4751001.html.

(编辑: 郑秋红)