

中国近海港航气象服务现状与发展

■ 韩焱红 陈辉 王志 赵鲁强 倪敏莉

在开展多种方式需求调查的基础上, 研究分析港口作业及海上航运不同生产环节的气象服务需求; 从服务体系、服务能力、服务效益等方面分析我国近海港航气象服务的现状和不足, 对其未来发展进行探讨和展望。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.02.007

2022年全国海洋生产总值94628亿元, 占国内生产总值的7.8%。其中, 海洋交通运输业保持较快增长, 是海洋产业的三驾马车之一; 同年, 沿海港口固定资产投资715亿元, 同比增长6.3%, 港口自动化和智能化水平不断提升。由于海上航运业“靠天吃饭”的局限性, 海洋经济发展给气象服务带来了新的机遇; 同时, 海上交通运输全链条涉及的不同作业场景、不同用户提出的多元化需求对气象服务提出了新的挑战。

大风、大雾、强对流、台风等恶劣天气会直接影响港口作业及海上航运安全, 导致港口压港、停止作业、航线停航等现象, 给港口企业和货运船只造成非常大的经济损失。应运而生的港航气象服务是面向港口作业和海上航运提供科学、准确、专业的气象服务, 是促进海洋经济发展的重要保障。本文从服务需求出发, 梳理我国近海港航气象服务的现状和问题, 并对其未来发展进行探讨和展望, 为港航气象服务的高质量、可持续发展提供参考。

1 港航气象服务需求

我国是海洋大国、航海大国, 拥有1400多个港口和21万艘运输船舶, 外贸进出口物资的90%由海运承担。2022年, 我国沿海主要港口新增外贸航线超100条, 沿海港口集装箱吞吐量同比增长4.6%, 海运进出口总额同比增长15.3%。随着海上航运和港口建设的发展, 海上运输各个生产环节对气象服务的需求日益旺盛, 尤其是在近年来极端天气多发、频发的背景下, 精准的港航气象服务可以在保障海上航运、港口作业安全的前提下, 最大限度缩短航行时间、提高作业效率, 帮助用户减少风险和损失, 获取更多的经济效益。

通过实地调研、交流座谈、问卷调查等多种方式

开展需求调查, 分析了解到港航气象服务需求主要集中在港口调度、码头作业、船舶航行等生产环节, 且不同作业场景关注的气象要素及阈值也有所差异。

1) 港口调度包括船舶引航、靠离泊等, 易受大风、大雾、暴雨、台风等恶劣天气的影响。其中, 大雾对船舶引航的影响最为显著, 其次是大风。暴雨导致的大气能见度低以及台风造成的风大浪高等天气也会对船舶引航和靠离泊产生不利影响。丁峰等人分析研究发现, 影响青岛港船舶引航的主要原因是气象条件, 其中大雾占80.2%, 大风占19.2%。

2) 码头作业包括货物装卸和储运等, 受大风、强降水、雷电等影响较大。由于不同种类货物的装载、卸货和储运方式有所不同, 各类货运码头, 如散杂货码头、集装箱码头、石油码头等, 关注的灾害性天气也存在差异。同时, 受码头周边地形特征、气候条件、水域条件等因素影响, 各地针对码头作业的气象服务也各有侧重。例如, 大连港矿石码头周边水域开阔, 船舶停靠码头作业受风、涌浪影响, 尤其是6级以上大风影响较大, 同时考虑地形阻挡作用, 服务时更加关注东南风、南风的影响。

3) 船舶航行主要受风、能见度、浪的影响, 且不同类型的船舶如客船、危险品船、渔船、超大型船舶等受天气影响的阈值和程度有所不同。大型船舶的抗风浪能力要强一些, 受天气限制较小; 危险品船或油船在航行中需防范大风大浪导致的船体剧烈摇晃; 集装箱船的航速较高, 在低能见度天气时发生风险的可能性更高。

2 港航气象服务现状

2.1 港航气象服务体系

我国海洋气象水文预报业务主要由中国气象局和

收稿日期: 2023年6月5日; 修回日期: 2023年9月20日

第一作者: 韩焱红(1988—), Email: hanyh@cma.gov.cn

通信作者: 陈辉(1980—), Email: chenhui@cma.gov.cn

资助信息: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J069, CXFZ2023J07, CXFZ2023J072)

自然资源部国家海洋环境预报中心承担。中国气象局负责海洋气象预报，国家海洋环境预报中心负责海洋水文预报。经过几十年发展，中国气象局已经建立了比较完整的海洋气象服务体系，包括海洋气象监测、预报警报发布以及公众海洋气象服务，同时将海洋气象预报服务与行业生产特性结合，为更多涉海部门提供针对性强、专业化高的海洋气象服务。

面向海上航行的各类船舶提供气象保障的海洋运输气象服务是海洋气象服务的重要内容，分为近海港航气象服务和远洋气象导航服务。我国远洋气象导航始创于20世纪80年代。中国气象局历经两年的技术储备，于1985年起开始开展远洋气象导航业务，1986年初进入具体实施阶段，为船舶渡洋制定最佳气象航线。随着气象科技的发展，远洋气象导航水平随之提升，目前我国已建立拥有自主知识产权的全球气象导航业务系统，为各类商船、工程船提供精细的气象导航服务，航线遍及太平洋、印度洋、大西洋等海域。在近海方面，沿海省、市气象部门围绕港口调度运营和近海航行保障需求，积极开展了定制化、专业化的港航气象服务，初步形成了各具特色的港航气象服务体系。大连、烟台、上海、厦门、海南等地围绕环渤海、江海联运、台湾海峡、南沙等主要近海航线开展了面向航运企业、海事部门的精细化海上航运气象服务；大连、天津、青岛、宁波、广西、广东等省份（市）气象部门结合港口集团、临港产业等用户需求，开展了分港区、分用户的精细化港区气象服务。

2.2 港航气象服务能力

部分沿海省份（市）气象部门结合港航气象服务需求，开展了海雾、大风等关键气象要素监测、订正与预报技术攻关，通过加强卫星资料、视频数据等多源资料以及人工智能技术在海洋气象服务中的应用，进一步提高了港航高影响天气的监测和预报精准度。宁波采用基于Xception卷积神经网络算法构建了海雾天气情况下大气能见度识别框架，通过对宁波市北仑区三山大闸摄像头监控进行图像的采集和样本训练，实现能见度等级的识别估测，识别精度可达99.36%，验证集准确率可达99.20%。福建气象部门提出了基于远距物联网通信技术（LoRa）的新型海雾观测方法，在关系模型的基础上，研发了LoRa海雾系统，解决地基海雾探测范围严重不足问题，为实现海雾的大范围实时精密监测提供解决方案和技术支撑。天津利用渤海28个石油、平台、浮标站资料分析得到的渤海10 m高度风速逐时格点场，使用“递减平均法”对ROAD（Regional Ocean and Atmosphere Model）模式渤海区域

10 m高度风速预报进行误差订正，对72 h预报时效内，86%以上的格点起到正的订正效果。

2.3 港航气象服务效益

沿海省份（市）气象部门通过开展定制化、专业化的港航气象服务，保障了港航运行安全，同时也为港口集团、航运公司等行业用户创造了经济价值。气象服务为港口生产带来的提升主要体现在延长作业时间、提高作业效率。以宁波为例，气象、海事两部门联合开展了港航气象服务效益评估，通过对比分析开展港航气象服务前后的港口运营数据，结果表明，2017年采用气象服务以后，海事管制准确率稳步提升，管制风险率、延误率显著降低。经宁波气象部门采用港口经济效益评估方法计算，针对大风天气，气象服务每年产生的经济效益在亿元以上，2019年达5.18亿元。

3 比较与分析

3.1 以沿岸海域为主的海洋气象观测网基本形成，但天、地、海、空立体观测体系亟待建立

经过多年的建设和发展，我国已初步建立以沿岸海域为主的海洋气象观测网和覆盖我国近海、远海的气象卫星遥感监测业务，形成较为完备的海洋气象观测体系。截至2020年底，气象部门已经建设并纳入业务运行409个海岛自动气象站、877个沿海自动气象站、72个海上石油平台自动气象站，25个船舶站、39个锚碇浮标站，初步建立了以沿岸海域为主的近海海域预报责任区海洋气象观测网。

在远海观测方面，我国于2002年1月正式宣布加入国际Argo计划，成为继美国、法国、日本、英国、韩国、德国、澳大利亚和加拿大之后第9个加入该计划的国家。布放的剖面浮标主要分布在西北太平洋、中北印度洋和南海海域，基本覆盖了“21世纪海上丝绸之路”沿线海域。但从全球Argo实时海洋观测网的剖面浮标数量来看，与国际海洋强国相比，我国贡献明显不足，这与我们对经略海洋的需求和国际大国的地位极不相称。截至2023年8月，在全球海洋上正常工作的剖面浮标总数为3851个，其中美国2098个、法国308个、澳大利亚296个、中国58个，中国位居第十（图1）。

近年来，我国气象卫星、海洋卫星持续发射运行，已初步形成了覆盖近、远海的卫星遥感探测能力。基于我国风云极轨、静止气象卫星，实现了海风、海雾、海温、海上降水等多种海洋气象实时监测。海洋卫星获取的海上风场监测资料在海上强天气的监测与数值模式中得到了应用。但现有卫星缺乏对

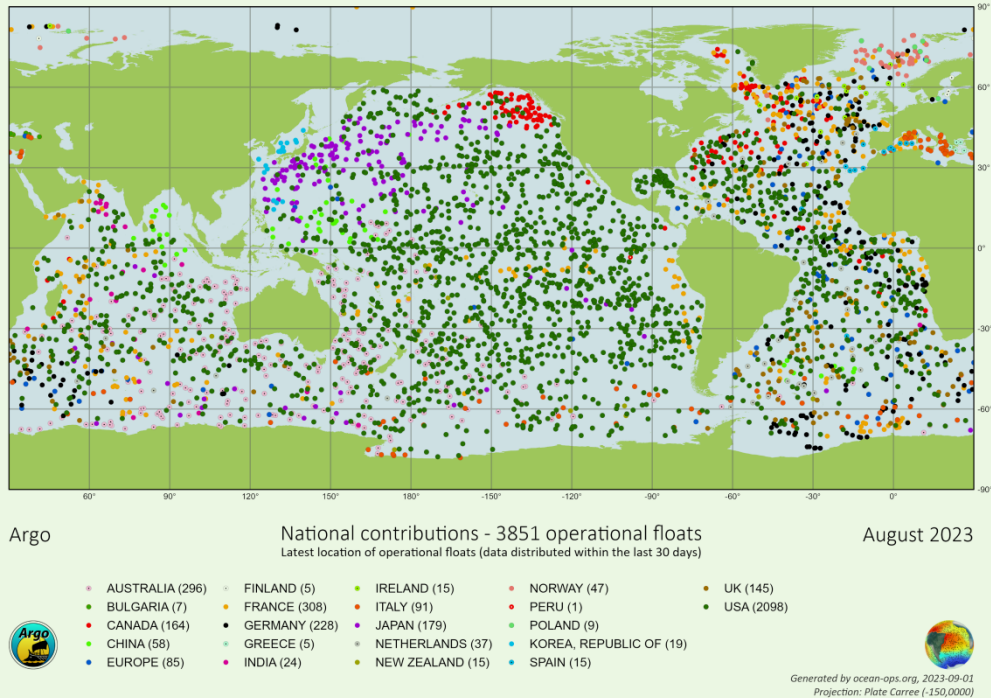


图1 Argo计划全球海洋浮标分布 (来源: <https://argo.ucsd.edu/>; 截至2023年8月)

海洋灾害性天气的针对性观测, 遥感观测精度不能适应远海和远洋保障服务需要。

当前, 随着卫星遥感、大型潜/浮标、海洋次表层剖面浮标、无人移动潜器等海洋技术和装备的发展, 发达国家尤其是美国和欧盟, 已基本形成了对全球上层海洋大尺度(百千米级)信息实时获取能力。与之相比, 我国的海洋观测网虽具一定规模, 但近海气象观测站点稀少、少量商船观测的气象数据不连续, 远海布设的浮标稀缺且缺少气象探空站网, 2000 m以下的深海观测几乎空白。整体来看, 我国涵盖海洋高空、海面、水体和海底的立体化海洋观测网建设尚在探索阶段, 且以传统的观测手段和技术为主, 与国际先进水平还存在较大差距。

3.2 海洋气象预报技术逐步发展, 但精细度和精准度有待进一步提高

目前, 我国已初步构建了海洋气象专业数值预报模式体系框架, 形成了0~15 d“无缝隙”海洋气象预报预警的全方位技术支撑保障。建成了全球和区域海面风场及台风数值预报模式体系、中国近海海雾和黄渤海海雾数值预报模式、全球海浪和西北太平洋区域海浪模式等, 为我国近海海洋天气预报和海上大风预警、海雾预报及世界气象组织责任海区海事天气公报提供技术支撑, 制作发布责任海区25 km分辨率和近海及沿岸5~10 km的72 h风、浪、天气现象和能见度等海洋气象要素精细化预报产品。台风预报预警技术

基本达到世界先进水平, 台风定位精度为15~20 km, 台风24 h路径预报误差小于70 km。与此同时, 区域海洋中心发展了高分辨率台风模式, 沿海省份(市)气象部门结合海上运输、港口运营的气象服务需求, 采用人工智能和机器学习技术, 实现了港区及近海海域范围内空间分辨率为1~5 km、时间分辨率为1~3 h的大风、低能见度、强对流等灾害性天气的精细化预报, 为当地港航气象服务提供支撑。

与服务需求相比, 港航高影响天气的预报精细化程度和精准度仍存在很大差距。用户为了最大限度争取作业时间, 降低经济损失, 在大风、低能见度、强对流、台风等恶劣天气来临之前, 需要尽可能地掌握精细到港区、码头、海上平台、航线等关键区域位置的定时、定点、定量的精准预报, 而气象部门提供的服务产品精度尚不能完全满足需求。

3.3 港航气象服务各具特色, 但规范化的标准体系尚未形成

沿海省份(市)气象部门与当地海事、港口等部门建立了良好的合作关系, 在数据共享、标准规范制定等方面加强合作, 为开展部门联动的港航气象服务业务奠定了基础。宁波、舟山、天津、山东、广东、深圳等沿海省份(市)气象部门结合当地港口规模、港区功能、水域气象条件等, 针对不同需求开展了各具特色的港航气象服务, 并根据业务需要因地制宜制定了相关气象服务标准规范, 但普遍以地方标准为

主，目前国内关于港航气象服务的行业标准仅有1项《船舶引航气象条件等级》。

通过文献调研、实地调研等多种方式，分析归纳了国内主要港口水域禁限航的风力阈值(图2)和大气能见度条件(图3)。结果表明，各地港口水域通航的气象阈值指标存在差异，而目前还没有适用于区域及全国范围的港航气象服务标准，这导致省际间的海上航运、港口调度气象服务缺少规范和依据，不利于区域协同联动。

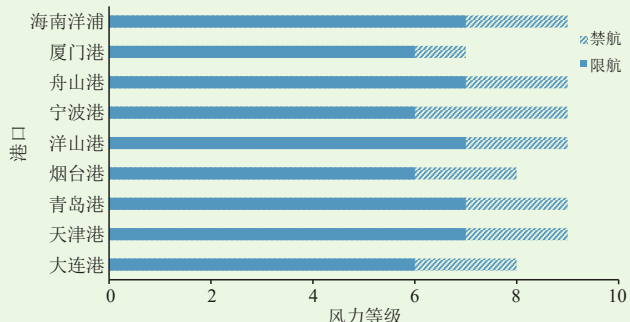


图2 我国主要港口水域禁限航的风力阈值

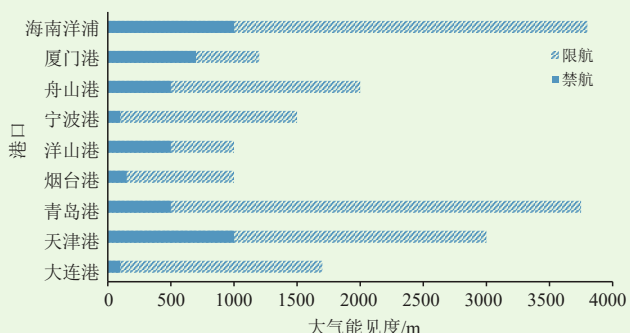


图3 我国主要港口水域禁限航的大气能见度

3.4 港航气象服务以气象信息服务为主，融入式、一站式气象服务体系尚未建立

国外海上气象保障多由私人公司提供有偿性的服务，基于海洋气象观测和数值模式预报等多源资料，针对航运不同环节加工制作满足用户需求的专业化产品，为用户提供多种多样的特色服务。同时还注重资源覆盖的全面性，通过建设具有良好体验感和可操作性的交互式系统平台，实现“一站式”服务，满足不同层次用户的需求。

日本Weathernews股份有限公司(WNI, <https://global.weathernews.com/>)是目前全球最大的气象服务公司，服务领域涉及海上气象、航空气象、陆上气象、环境气象、运动气象、生活气象和广播气象等。作为一家海上气象服务起家的公司，WNI每年向全世界10000艘以上船只提供气象服务，服务领域涉及海

上航运、海上能源、近海作业等，服务产品多种多样(表1)。

表1 WNI海上气象服务产品

服务领域	服务产品	服务内容
海上航运	最佳船舶定线	结合船舶专用高性能模型和最新天气预报，为船舶航行安全和提高航效提供最佳航线选择
	近海船舶定线	通过综合考虑经济成本和时间计划，优化3~5 d航程；服务区域包括中国东海、中国南海、加勒比海
	船舶性能监管	提供船舶性能评估，包括时间损失和燃料消耗，结合天气情况实时监测船舶速度和消耗
	安全状态监管	实时监测在各种天气、海浪、海流条件下的船舶位置
海上能源	碳强度监管	根据船舶报告数据等客观衡量船队CO ₂ 排放和船舶能效运营指数(EEOI)；通过CIM解决方案，支持船队制定ESG策略
	调查设计支持	基于风速、海浪、台风等历史数据统计分析，为用户提供方风能资源评估及海上风电场选址、规划、布局等决策支持
	项目规划决策	基于气象、海况历史数据分析，提供发生暴风雨等恶劣天气和好天气的频次，为风电场建设项目规划的制定和修订提供决策支持
	建设组织决策	基于自主研发的高分辨率气象预报模式和基于AI的短时临近预报技术，通过网络平台提供数字化服务，为用户制定周计划和每日风险管理提供决策支持
近海作业	运营维护决策	结合多源数据和自主研发的物理/AI天气预报模型，提供高精度风力预报；为船队运营提供航线气象预报，未来还将为无人驾驶船舶提供预报服务
	是否作业决策	为船长和运营商是否离港和靠泊提供决策信息支持；通过提供精准的高影响天气预报服务，为用户最大限度降低作业延期时间，节省停泊费等经济开支
	操作窗口决策	基于公司自建雷达的数据，为强风气象条件下的吊机安全作业风险提供决策支持；为岸上及海上施工作业提供满足需求的风、浪预报

MeteoGroup公司(<https://www.dtn.com/>)成立于1986年，是欧洲第一个商业气象公司。2018年被瑞士DTN气象公司收购。公司拥有200名覆盖全球的气象学家，超过10000个气象观测站的全球最大私人天气观测网络，为客户提供高精度及定制式的气象服务。服务领域涉及能源、运输、海事、农业、水运管理等。其中海事气象服务包括海上航运和近海作业两部分(表2)。

目前我国面向近海的港航气象保障主要由沿海省份(市)气象部门按照属地化原则开展专业服务。气象部门通过专报、短信、微信等方式，为用户提供港区及航线上的高影响天气监测、预报、预警等气象信息服务，遇有重大天气过程时，选派气象专家赴调度现场提供驻场服务，为港口、海事部门决策提供参考。部分地区根据气象对作业的影响，研发了港区气象灾害风险或船舶航行风险等产品。

但与国外先进水平相比，我国的港航气象服务呈现“小、低、散”的特点，受服务机制、管理体制

表2 瑞士DTN气象公司海上气象服务产品

服务领域	服务产品	服务内容
海上航运	船舶性能优化系统 (SPOS)	综合考虑海况, 包括风、浪、涌和其他气象要素, 实时优化船舶路径, 使船舶以最小的燃料消耗和排放量, 安全航行全球
	航线卫士	由船长和气象专家组成的团队在岸端为远洋船只提供最佳航线服务
	风险沟通	在风暴天气来临前, 提前与用户沟通提供风险评估; 在风暴天气期间提供实时监测和精准预报; 在风暴天气结束后及时提供影响分析报告, 为后续计划提供参考
	数字化服务	通过数字化服务提供一体化解决方案, 将海洋气象数据集集成到用户系统中, 以构建有效的船舶路线、航行优化、性能监控平台
近海作业	WeatherOps®海洋平台	平台由手机APP、网站、交互式显示屏等共同组成, 可在天气影响前和影响期间由气象专家团队实时提供全球天气咨询, 也可通过API和GIS为用户提供灾害天气监测、预测和决策分析
	极端天气和热带气旋专项服务	实时监测用户船队位置, 并由专家团队在恶劣天气 (如强对流、热带气旋、大风浪) 影响之前和期间提供实时咨询和定制化决策辅助同时可以根据用户需求和阈值指标, 及时提供恶劣天气警报和对策建议
	海上预报服务	通过网站或API提供海洋气象预测, 包括基于用户需求的未来10 d海洋预报, 可接入用户内部系统平台的逐时海洋预报数据API, 高分辨率的航线预报, 15 d长期集合预报等, 为用户规划作业提供支持
	专业短临预报	提供空间分辨率10 km的逐时预报 (每日4次), 关键海洋气象要素预报如10 m/50 m风、有效浪高、涌浪高度、海表洋流等, 基于用户交互设置阈值参数的自动告警等服务

等制约, 覆盖近海、远洋的一站式解决方案的气象服务能力欠缺。港航气象服务产品以满足用户浅层需求为主, 服务针对性、融合度不高, 缺少海洋气象与船舶靠泊、港口作业、海上运输等全链条多环节有机融合的场景化服务产品。同时, 气象部门与港口、海事等用户的信息系统不互通, 服务平台的数字化、智能化水平不能完全满足不同层次用户的多样化需求。此外, 由于普遍缺少船舶载运量以及船运公司、港口码头运营成本和收益等行业用户信息, 制约了港航气象服务效益定量化评估技术的发展, 不利于服务的拓展。

4 未来展望

随着海洋强国战略的实施, 海洋运输和港口建设在海洋经济发展中的作用日益凸显, 海事部门、港口集团、码头企业、船运公司等不同用户结合各自生产环节, 对气象服务提出的多元化需求也给港航气象服务带来了巨大挑战。气象服务要真正融入港航产业, 可以从需求调研、标准建设、能力建设、效益评估等方面加强推进实施, 构建符合中国国情的上下联动、左右协同, 可持续发展的港航气象服务体系。

4.1 深入挖掘分析港航气象服务需求

港口、海事等部门提出的气象需求普遍集中在近海大风、低能见度、强对流等灾害天气监测和预报。但不同类型的船舶、不同的港区码头、不同的作业环节的具体需求有所不同。港航气象服务要发挥实效, 需针对特定用户, 深入了解其关注的气象要素及阈值, 根据不同气象条件对其生产作业的影响, 开展定制式的精细化气象服务, 帮助用户节约成本、提高效益。

4.2 全面增强海洋气象观测和预报基础业务能力

精细的港航气象服务离不开海洋气象观测和预报的支撑。根据预报和服务需求, 完善海洋气象综合观测站网, 依托海岛、海上平台、船舶和浮标等多种设施提高近海气象观测密度, 利用大型高性能无人飞机开展海上探空观测, 加强气象卫星在台风、海上大风、海雾、海上强对流等海洋灾害天气监测方面的应用。同时, 加强部门合作, 促进港口、海上平台自建气象站和船载气象站的监测信息共享。

加强大风、低能见度、强对流等港航高影响天气预报关键技术攻关。通过优化完善全球海洋气象模式, 提高远海海洋气象预报时空分辨率。基于多源数据资料构建区域精细化海洋气象数值预报, 提高近海海域的海洋气象预报精准度。加强视频图像、卫星、雷达、气象站、船舶观测等多源资料和人工智能、机器学习等新技术的应用, 提高局地雷暴大风、雾等高影响天气的短临预报能力。

4.3 提高港航气象服务供给能力

开展面向用户的定制化产品研发。针对用户需求, 结合港口作业气象条件, 建立气象与港口作业场景深度融合的专业化模型, 研发面向不同作业环节、不同港区的场景化港航气象服务产品, 实现短时-短期-中期-长期、沿海-近海-远海的无缝隙气象服务。

打造数字化、一体化服务平台。融合气象、港口、海事、船舶等跨领域多元数据, 打造集数据分析、算法集成、用户交互、决策辅助、智能发布等功能于一体的数字化系统, 针对不同用户打造插件式服务模块, 综合利用网页端、移动端、船端、岸端等多平台实现定制化的港航气象服务。

4.4 构建港航气象服务标准体系

国、省、市三级气象部门通过国省协同、区域协

同,开展面向港口航运的分区域、分场景、分要素气象服务标准研究。针对港口调度、装卸作业、船舶通航等主要场景,构建适用于中国沿海港口群、近海主要航线的气象风险指标,为气象部门联动开展港航气象服务提供标准依据。

4.5 开展港航气象服务效益评估

发展客观、定量的港航气象服务效益评估技术,

深入阅读

- 丁锋,刘飞,张晋,等,2019.基于气象条件的船舶引航风险等级[J].中国航海,42(2):71-74,113.
- 何锡玉,蔡夕方,朱亚平,等,2021.我国风云极轨气象卫星及应用进展[J].气象科技进展,11(1):34-39.
- 黄彬,赵伟,2017.国家级海洋气象业务现状及发展趋势[J].气象科技进展,7(4):53-59.
- 孔扬,赵昶昱,王科,等,2021.宁波舟山港气象灾害风险及服务效益评估[J].热带气象学报,37(1):82-90.
- 李从初,励臣儒,朱佳敏,等,2023.基于迁移学习和Xception网络的海雾能见度等级估测研究[J].浙江气象,44(1):23-28.
- 李元寿,李峰,王胜杰,等,2017.海洋气象综合保障工程建设的现状分析[J].浙江气象,38(2):37-43.
- 林明森,张毅,宋清涛,等,2014.HY-2卫星微波散射计在西北太平洋台风监测中的应用研究[J].中国工程科学,16(6):46-53.
- 刘增宏,吴晓芬,许建平,等,2016.中国Argo海洋观测十五年[J].地球科学进展,31(5):445-460.
- 钱燕珍,贺芳,2012.宁波市港口气象服务评估和需求调查报告[J].浙江气象,33(2):21-24,40.
- 钱燕珍,赵昶昱,孙军波,等,2023.港口气象预报服务技术[M].北京:

是体现气象服务价值的基础。通过与港口、海事、船务公司等用户建立多方沟通反馈机制,量化评估用户对气象服务的满意度,综合利用海事管制数据、港口排期表等用户行业数据从作业时间、作业效率等方面定量评估气象服务产生的经济效益,计算港航气象服务贡献率、气象服务效益值等,形成服务闭环,促进港航气象服务可持续发展。

- 气象出版社.
- 孙贞,徐晓亮,2019.青岛港口航区气象风险指标服务产品研发及业务应用[J].气象水文海洋仪器,36(3):45-48.
- 王亚男,苏杭,胡田田,等,2019.ROAD模式渤海10 m风场预报误差订正[J].气象科技,47(6):934-940.
- 吴立新,陈朝晖,林霄沛,等,2020.“透明海洋”立体观测网构建[J].科学通报,65(25):2654-2661.
- 吴雪菲,余安安,任雍,等,2022.基于LoRa的海雾监测系统在漳州的观测精度分析[J].海峡科学(8):15-21.
- 中国气象局,2017.船舶引航气象条件等级(QX/T 333—2016)[S].北京:气象出版社.
- Bourlès B, Lumpkin R, McPhaden M J, et al, 2008. The PIRATA program: history, accomplishments, and future directions[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 89(8): 1111-1126.
- McPhaden M J, 1995. The tropical atmosphere ocean array is completed[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 76(5): 739-744.

(作者单位:中国气象局公共气象服务中心)

(编辑:卢冰)

(上接42页)

- resolution atmospheric motion vectors on convective scale short-term forecasts: 1. Observing System Simulation Experiment (OSSE)[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2021, 13(10): e2021MS002484.
- [68] Kim D H, Kim H M. Effect of assimilating himawari-8 atmospheric motion vectors on forecast errors over East Asia[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2018, 35(9): 1737-1752.
- [69] McCarty W, Carvalho D, Moradi I, et al. Observing system simulation experiments investigating atmospheric motion vectors and radiances from a constellation of 4-5- μ m infrared sounders[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2021, 38(2): 331-347.
- [70] Centurioni L R, Turton J, Lumpkin R, et al. Global *in situ* observations of essential climate and ocean variables at the air-sea interface[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 419.
- [71] Swart S, Gille S T, Delille B, et al. Constraining southern ocean air-sea-ice fluxes through enhanced observations[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 421.
- [72] Ma Y, Zou X L, Weng F Z. Potential applications of small satellite microwave observations for monitoring and predicting global fast-evolving weathers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(6): 2441-2451.
- [73] Aksoy A, Lorsolo S, Vukicevic T, et al. The HWRF Hurricane Ensemble Data Assimilation System (HEDAS) for high-resolution data: the impact of airborne Doppler radar observations in an OSSE[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(6): 1843-1862.
- [74] Halliwell G R, Goni G J, Mehari M F, et al. OSSE assessment of underwater glider arrays to improve ocean model initialization for tropical cyclone prediction[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2020, 37(3): 467-487.
- [75] Halliwell G R, Mehari M F, Le Hénaff M, et al. North Atlantic ocean OSSE system: evaluation of operational ocean observing system components and supplemental seasonal observations for potentially improving tropical cyclone prediction in coupled systems[J]. Journal of Operational Oceanography, 2017, 10(2): 154-175.
- [76] Sluka T C, Penny S G, Kalnay E, et al. Assimilating atmospheric observations into the ocean using strongly coupled ensemble data assimilation[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(2): 752-759.
- [77] Wu L X, Chen Z H, Lin X P, et al. Building the integrated observational network of “Transparent Ocean” [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(25): 2654-2661.
- [78] De Rosnay P, Browne P, De Boissèson E, et al. Coupled data assimilation at ECMWF: current status, challenges and future developments[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2022, 148(747): 2672-2702.

(编辑:郑秋红)