

全球及中国海洋气象数据产品研发进展

曹丽娟 陈丽凡 廖志宏 张冬斌 徐宾 商梦娇
(国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 基于多来源海洋气象观测数据, 制作高质量、长序列的海洋气象数据产品是海洋气象监测、预报、服务及数值模式同化等业务及科学研究应用的重要支撑, 对提升海洋气象业务能力具有重要意义。从海洋气象数据产品属性、产品生产流程及应用等方面, 系统概述目前全球代表性海洋气象数据产品及我国自主研发的全球海洋气象数据产品; 从产品研发计划、数据共享机制等方面提出加强我国海洋气象数据产品研发及应用建议。

关键词: 海洋气象, 数据产品, 数据服务

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.03.002

Research Progress of Global and China Marine Meteorological Data Products

Cao Lijuan, Chen Lifan, Liao Zhihong, Zhang Dongbin, Xu Bin, Shang Mengjiao
(National Meteorological Information Center, Beijing 100081)

Abstract: Based on multi-source marine meteorological observation data, the production of high-quality, long time series of marine meteorological data products provides important basis for marine meteorological monitoring, forecasting, service, assimilation and other operation and research applications, and is of great significance for improving marine meteorological operational capabilities. From the perspectives of product attributes, production technology processes, and application of marine meteorological data products, this paper provides a systematic overview of the global marine meteorological data products and those independently developed by China Meteorological Administration. In addition, suggestions are proposed to strengthen China's marine meteorological data product development and service capabilities from product design planning, data sharing mechanism and other aspects.

Keywords: marine meteorology, data products, data service

0 引言

海洋承载了80%以上的世界贸易, 维系着距海岸100 km以内、全球约40%的人口的生活。海洋气象观测资料是指表征海洋区域(包括海洋、海岛、海岸)大气环境状况及其运动变化的数据, 可用于研究海洋区域的各种大气现象、海洋现象及其相互间的关系。海洋气象观测资料被广泛应用于海洋天气预报、数值天气预报、气候监测等领域。目前, 海洋气象现场观测资料的获取主要基于商业船舶、科学考察船、锚碇浮标、漂流浮标、海上油气平台等观测平台。在世界气象组织(WMO)和政府间海洋学委员会(IOC)的组织框架下, 多个国家通过各类型的国际海洋观测项目开展合作, 实现全球海洋观测的组织、协调、实施与

数据共享, 知名的有国际志愿观测船(VOS)、全球漂流浮标项目(GDP)、热带锚碇浮标观测阵列(TAO, TRITON, PIRATA, RAMA)等观测项目。海洋气象观测资料通过全球通信系统(GTS)进行实时传输, 实现国际共享。近年来, 我国加快发展海洋气象观测项目建设, 在中国邻近海域开展锚碇浮标观测, 在商业船舶布设气象观测系统, 在中国沿海布设自动气象站, 获取的海洋气象观测资料通过中国国内气象通信系统和网络专线汇集至中国气象局。

国际上基于海洋水文气象观测资料, 生产海洋气象数据产品, 支撑天气气候监测预报应用。目前最完整且应用最广泛的海表观测基础数据集是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)研发的国际海气综合数据集(ICOADS)^[1-2]。ICOADS提供了近3个世纪以来的海洋表层资料, 其产品包括气温、海平面气压、比湿、风、总云量、海表温度、海浪等水文气象观测量, 以及相对湿度、海气温差、感热参数、潜热参数、风应力等导出量。美国、英国和日本等结合

收稿日期: 2023年6月6日; 修回日期: 2024年3月19日

第一作者: 曹丽娟(1980—), Email: Caolj@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划(2022YFC3004201); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J049, CXFZ2023J004, CXFZ2022J026)

ICOADS及GTS交换的船舶和浮标等现场观测资料,分别研制了最长达到百年的全球海表温度偏差订正及网格重构数据产品,主要包括:NOAA研制发布的全球逐月重建海表温度数据产品(ERSST)^[3],英国气象局哈德莱(Hadley)中心研制发布的全球逐月网格化海表温度数据产品(HadSST)^[4],日本气象厅基于ICOADS和GTS交换资料、加拿大浮标观测资料以及日本收集整理的Kobe资料研发的全球逐月重建海表温度数据产品(COBE)^[5]。伴随ICOADS数据源的不断扩展和质量提升,以上产品研发技术也在不断完善,产品逐年迭代升级,在联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)等重要报告中得到广泛应用,支撑海洋气候变化研究结论。此外,英国气象局Hadley中心和美国NOAA在定点海洋观测基础上,进一步加入了卫星观测资料,分别研制形成分辨率更高的月尺度全球海表温度格点数据产品(HadISST)^[6]以及融合AVHRR卫星海温数据的全球逐日最优插值多源融合海表温度数据产品(OISST)^[7-8]。除了海表温度,国际上应用较多的洋面风融合分析产品包括交叉定标多平台卫星探测海面风场资料(CCMP)^[9]和美国NOAA研制发布的洋面风融合产品(BSW)^[10-11]。英国气象局Hadley中心研制的海表气压数据集(HadSLP2)^[12]则融合了陆地与海洋的气压观测数据,重建了全球格点海平面气压场。

海洋气象数据产品在支撑科技创新、跨学科融合发展和应对气候变化等方面具有重要作用,IPCC第六次评估报告(AR6)中用于评估海洋变化的海洋气象数据产品大多来自上述国家^[13]。我国较缺乏时间范围较长,空间覆盖较完整,涵盖要素较齐全的海洋气象数据产品。因此,充分挖掘中国气象局收集的多来源海洋气象观测数据,根据数据特点进行整合并攻克数据质量控制、偏差订正、统计及格点分析等产品研制关键技术,依据业务需求研发高质量海洋气象数据产品,同时建立开放共享模式,对扩大我国海洋气象数据产品的应用价值具有重要意义。

本文介绍了国际代表性的海洋气象数据产品,通过总结其数据来源、数据质量控制、偏差订正及格点产品研发流程、应用场景等,分析其广泛推广应用的成功经验。在此基础上,重点综述了近年来我国自主研制支撑业务应用的全球及区域海洋基础气象数据产品及多源融合实况分析产品,分析国内海洋气象数据产品现状及存在的问题,并提出对策建议,为我国海洋气象数据产品未来发展提供参考。

1 国际海洋气象数据产品研发进展

1.1 全球海洋基础数据产品

美国NOAA是世界领先的海洋气象数据产品研发机构,其研制的海洋基础数据产品得到全球海洋气象领域的广泛应用。产品主要包含由海上船舶、系泊浮标、漂流浮标、海岸站、钻井及平台站等观测的气象及海面观测资料以及由Argo浮标、温盐观测仪(如MBT、CTD、XBT)等观测的深海温盐廓线资料。国际海气综合数据集(ICOADS)是目前国际公认最完整和最多样化的全球海洋表面数据产品,也是诸多海洋气象产品研发的数据基础^[2]。ICOADS的3个主要合作机构NOAA/ESRL(Earth System Research Laboratories, NOAA地球系统研究实验室)、NOAA/NCEI(National Centers for Environmental Information, NOAA国家环境信息中心)及NCAR(National Center for Atmospheric Research, 美国国家大气研究中心)分别提供不同的数据获取网页和多个格式的数据。该数据产品包含了1662年至今的全球海洋表层观测资料。该产品的发展是多部门共同合作的结果。1981年1月,NCEI等多家部门联合,经过4年的努力推出了海洋大气综合数据集(COADS)。COADS产品的最初版本包括了1854—1979年的海洋表面资料,自2.0版本之后,展开更广泛的国际交流合作,形成ICOADS。ICOADS是收集量最大的海洋表面数据集,由来自许多国家的数据集加工合并而成,包括来自船只(商业、海军、研究)的测量或观测数据、系泊浮标和漂流浮标数据、海岸站点数据以及其他海洋台站数据等,涵盖气象学和海洋学的多个观测变量:海表温度、气温、气压、湿度、经向和纬向的风速和云量等。产品覆盖全球,但取样密度随观测日期及观测点地理位置等不同。其中,美国国家数据浮标中心(NDBC)制作的OceanSITES、热带大气海洋浮标阵列数据TAO以及国家海洋资料中心(NODC)制作的世界海洋数据库(WOD)表面观测数据都成为ICOADS的重要输入源。

为支持全球气候研究,NOAA在2001—2009年志愿船气候项目(VosClim)支持下完成收集和提供高质量志愿观测船子集产品(VOSclim),包含实时和延迟数据,同时包含丰富的元数据信息。数据由NOAA/NCEI统一收集,统一转变为通用格式并包含质量监控统计,以FTP形式服务。该产品包含气温、湿度、海表气压、风及海表温度等要素。同时提供详细的志愿船观测元数据信息(WMO Pub 47)以及船舶观测图片记录信息,对于开展海洋观测偏差订正起到关键支撑作用。VosClim的志愿观测船子集产品也是ICOADS的

数据源之一。

美国国家海洋数据中心(NODC)海洋气候实验室(OCL)研制的WOD数据集是全球温盐廓线数据的著名代表,其数据时间序列长,海水温度数据可追溯至1772年,盐度的观测最早始于1803年。该数据集覆盖范围广,数据来源众多,包括了Argo计划、全球温盐剖面计划(GTSPP)和世界洋流实验(WOCE)等300多个全球或区域海洋观测/数据收集计划得到的数据。WOD将不同来源的数据进行统一的格式转化、数据去重和质量控制,数据更新频率较快,每隔3~4个月,NODC会发布一次WOD收集到的最新数据。WOD同时也受到国际海洋数据和信息交换项目的支持。

作为全球气候观测系统(GCOS)/全球海洋观测系统(GOOS)的重要组成部分,知名的Argo浮标阵列能够提供全球高精度温盐剖面数据。Argo计划最早于1998年由美国和日本等国家的大气、海洋科学家推出,是一个全球性的海洋观测计划项目,目的是建立一个实时、高分辨率的全球海洋中、上层监测系统,以便能快速、准确、大范围地收集全球海洋上层的海水温度和盐度剖面资料。Argo观测系统是基于上述想法而倡导的、以深海为对象的、以剖面浮标为手段的海洋观测业务系统。目前,Argo资料主要是利用Argo系统收集和转发,实现从海上到陆地的实时接收。数据被地面站接收后汇集到美国国家环境卫星和数据中心(NESDIS),然后用专线传送到位于法国图卢兹的Argo数据中心储存、处理,并用不同的方式分发给用户。

全球温盐廓线数据集(GTSPP)是政府间海洋学委员会/政府间海洋数据交换试验(IOC/IODE)和世界气象组织/全球海洋服务系统(WMO/IGOSS)联合开展的一项资料服务计划的成果。该计划在1989年启动,1990年11月进入运行阶段。其数据来源于多种海洋观测,包括XBT、MBT、锚系浮标、漂流浮标、剖面浮标(包括Argo浮标)、CTD、动物携带传感器、温深数据编码(BATHY)或温度盐度编码(TESAC)等。GTSPP为GCOS提供次表层温度和盐度关键气候变量,数据附有质量标识。

1.2 全球海洋格点分析数据产品

随着气象观测系统的迅猛发展,各行业对格点化、时空连续的气象数据产品要求越来越高。利用数据融合与数据同化技术,综合多种来源观测资料及多模式模拟资料,获得高精度、高质量、时空连续的多源数据融合气象格点产品是气象资料业务的发展趋

势。其中,海表温度(SST)、洋面风和海冰是影响海气热量和动量交换的三类主要的海表要素,相关格点分析产品得到优先发展。

总体而言,国际上发布的SST格点分析数据产品最多,主要通过结合历史的船舶测量数据以及浮标测量数据,开展对遥感反演的温度产品的融合分析研究,已形成一系列的全球SST分析产品和系统^[14-20]。SST分析产品的发展随着卫星对地观测技术的发展以及海面浮标数据的增加,从月分析产品、周分析产品,到目前逐小时更新的海表融合分析产品,产品的网格分辨率也从2°到普遍的0.25°,甚至为0.05°,产品的标准误差在0.4℃左右^[21],在海洋气象等领域都得到了广泛应用^[22-25]。此外,高分辨率海表温度小组(GHRSSST)针对部分国家和地区发展的需求,成立了区域数据集成中心(RDACs),专门发展区域海域的高精度SST分析产品^[26]。其中,法国海洋开发研究所、澳大利亚气象局、美国喷气动力实验室和丹麦气象局等机构根据自身区域特点与需求,融合了多卫星、多传感器的SST数据,分别研制了各自相关区域的高精度小时级SST分析产品,其产品空间分辨率均已达到千米级别^[27]。

NOAA研制的全球1981年以来逐日/0.25°×0.25°的OISST产品时效滞后8 h左右,是利用最优插值得到的日平均0.25°×0.25°的全球海表温度和海冰密集度数据。该产品中海表温度主要覆盖全球的非极地区,采用了质量控制后的各类船舶及浮标、AVHRR和AMSR卫星数据,并对白天和夜间的卫星数据进行偏差校正,再通过最优插值对各类观测数据进行融合,得到全球分布的海温场;在极地区由海冰密集度数据覆盖,其处理过程中实时数据使用NCEP的海冰密集度产品,使用的数据源为极轨DMSP系列卫星上的SSM/I和SSMIS微波传感器资料,通过NASA-Team海冰密集度反演算法及改进的天气滤波等技术获得,再通过中值滑动滤波等处理,生成全球0.25°×0.25°逐日更新的海温及海冰密集度产品。产品研制主要技术包括^[7-8]: 1) 数据获取: 卫星、船舶、浮标等不同观测资料的融合。2) 偏差订正: 采用EOT方法分别对卫星和浮标数据进行重建,对比两者间重建结果的差异值,即为卫星数据的偏差订正值;船舶采用固定值进行偏差订正。3) 融合方法: OI空间插值。

NOAA基于ICOADS和GTS交换的船舶和浮标等资料,采用SR02方法结合英国Hadley中心研制的HadNMAT2资料作为海洋观测气温数据进行海表温度的偏差订正,在此基础上,基于EOT等方法进行格点

重建, 研制了百年长度的月尺度海表温度格点重建气候数据产品ERSST^[3]。目前该产品已经更新发布5.0版, 数据源持续追加更新, 技术不断升级。其中, 数据源以现场海洋观测为主, 从最初的COADS2.0, 扩展到ICOADS3.0+GTS, 偏差订正和格点重建方法做了相关参数和具体技术细节的优化改进。针对船舶观测SST存在明显的系统性偏差问题, 美国NOAA发展的SR02偏差订正方法利用海洋观测气温和海表温度的稳定统计关系对SST进行订正。该方法基于海气相互作用的原理, 假设海气相互作用在大的时空尺度保持不变, 如果某个时刻的海气相互作用量发生明显改变, 那它主要是由SST的观测系统误差引起的, 订正过程仅需要均一化的海洋观测气温作为辅助数据。英国Hadley中心发布的经过严格偏差订正的海洋观测气温数据集(HadNMAT2)为该方法的实现提供了重要支撑。在此基础上, 通过整合陆地气温及海表温度, NOAA研制了全球表面陆地海洋温度分析产品(NOAA GlobalTemp)。该产品起始于1880年, 覆盖全球的温度距平序列($5^{\circ} \times 5^{\circ}$), 对于开展气候变化监测研究非常有益。产品中, 海表温度数据采用的是ERSST, 气温数据采用的是GHCN-M, 目前该产品已发布6.0版(ERSST V5.0+GHCN-M V4.0), 是IPCC引用的全球表面增温曲线之一。

覆盖全球海洋的降水实况分析产品在美国和日本研究较多。NOAA利用静止卫星红外云移动矢量和拉格朗日集成等方法, 实现了全球多颗静止卫星和极轨卫星的融合, 研制了CMORPH全球降水实况产品^[28], 产品在降水变化特征分析、多源降水融合、模型驱动等领域都取得了比较好的应用效果^[29-33]。但CMORPH对静止卫星的使用较少, 为了弥补这点不足, 日本的JAXA采用Kalman Filter方法根据红外亮温的变化对移动中的微波反演降水调整, 研制了GSMaP_MVK^[34]。随后NOAA也进一步改进了原有CMORPH方法, 利用Kalman Filter将拉格朗日外推降水与红外降水反演融合, 研制了KF-CMORPH^[35]。NASA则在吸收了TRMM、PERSIANN、CMORPH等多个全球降水产品的优点后, 综合应用Kalman Filter融合、人工神经网络的红外降水反演、卫星降水系统误差订正算法, 研制了逐30 min更新的 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的全球降水融合实况分析产品^[36]。

洋面风格点分析产品相对较少。海面风场观测主要包括常规的现场观测和新兴的卫星遥感观测资料。常规观测资料(包括船舶和浮标等资料)主要分布在近海, 其站点空间分布有限, 而遥感资料虽然能覆

盖远海区域, 但其对大风的观测、反演能力有限, 因此, 通过传统插值、变分同化等方法实现多源观测数据的有效整合, 研制形成一套集合高质量、高精度、高分辨率等优点的多源融合洋面风格点分析产品成为必然的发展趋势。国际上比较成熟的多源融合洋面风产品主要是美国RSS(Remote Sensing Systems)机构研制形成的CCMP产品, 其采用变分同化方法融合了现场观测、ASCAT(Metop-A和B)、WindSat、SSMIS、AMSR-2等多卫星反演洋面风资料及ERA模式产品, 形成自1993年以来的逐6 h滚动更新的 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 洋面风数据。由于融合了散射计卫星反演产品, 该产品要素项包括了风速及风矢量, 其输入的观测数据进行了多源卫星资料的偏差订正处理, 实现了多源观测资料的协调性。该产品在天气气候事件分析等科研及业务应用中发挥了重要作用^[37]。NOAA/NCEI研发的全球洋面风融合产品^[10-11], 融合多种星载散射计和微波辐射计的风反演产品, 分辨率达到逐6 h/ 0.25° , 产品序列长度自1987年至今。该产品通过利用NCEP-R2和ECMWF提供的逐6 h分析场作为背景, 并采用GTS获取的各类浮标及船舶的实测数据, 以及SSM/missions、QuikSCAT、TRMM-TMI、AMSR-E等微波辐射计及和散射计资料进行融合分析, 再通过高斯时空插值等技术获得全球分布的洋面风场。

此外, 基于WOD数据源, NODC生产较为丰富的海洋气候数据产品。这些产品大多为网格产品, 其中区域气候产品包含全球北大西洋、北极、东亚、墨西哥湾等区域 1° 、 0.25° 、 0.1° 的温盐气候场产品, 包含月平均、季节平均及年平均。此外, NODC还提供全球海洋气候图集产品(WOA)以及全球热盐含量产品等。

2 我国全球海洋气象数据产品研制进展

中国气象局收集获取的海洋气象观测数据主要来自GTS实时收集的WMO各成员国共享的船舶观测报告、浮标观测报告、船舶航行轨迹资料、海洋深水温度观测资料、海洋温度/盐度/洋流资料, 气象部门业务收集的海洋数据(主要包括沿海自动气象站、海岛自动气象站、锚碇浮标、海上平台以及协议购买的中远海运集团志愿船舶观测数据), 以及自然资源部共享交换的海洋数据(主要包括海洋站、浮标、志愿船等海洋数据)。以2022年12月为例^[38], 通过GTS收集到1980艘船舶(包含志愿船、科考船、集装箱船、散货船、警卫船等类型)、5535个浮标站(含Argo、漂流、锚碇、波浪、海啸、冰浮标及潜标)、571个潮位站、15个水下滑翔机及1个海洋站数据, 数据涵盖气

温、气压、相对湿度、风、海平面气压、海表温度、波浪、风浪等海表数据以及洋流、海温、海盐剖面数据；共收到8307个沿海站、384个海岛站、41个锚碇浮标、63个海上平台和292艘中远海运集团志愿船、10艘中国气象局自建船舶观测数据，以及共享交换的147个海洋观测站、25个浮标、26艘志愿船的实时观测数据。与发达国家手段多样、覆盖完善、保障充分的海洋气象立体观测网相比，我国海洋气象观测仍然相对匮乏，如锚系浮标观测站点稀疏，海洋气象数据产品空间覆盖度不足。基于收集的多来源海洋气象数据，通过自主研发数据整合、质量控制、偏差订正、网格化及引进优化发展多源海洋数据融合分析技术，研制全球及中国近海区域海洋气象数据产品，支撑海洋气象监测、预报及服务。

2.1 我国自主研发的全球海洋基础数据产品

2.1.1 全球海表观测基础数据集

受海上复杂观测环境影响，海洋气象观测资料的完整性、准确性和代表性较差，多平台、多来源观测海洋数据存在计量单位多样、质量不一、数据缺失或重复等多种问题，因此，海洋数据标准处理、质量控制、多源整合等是海洋基础数据产品研制的关键。通过整合全球多来源船舶、浮标等多平台海洋气象观测资料，应用自主研发的海表观测数据整合和质量控制技术，中国气象局研制了“全球海表观测定时值数据集”。该数据集起始于1900年，空间范围覆盖全球，包含海平面气压、气温、露点温度、洋面风、云、能见度、天气现象、海表温度、海浪等27个海洋气象与水文观测项目。图1为实时生成的全球海表温度小时站点实况示例。

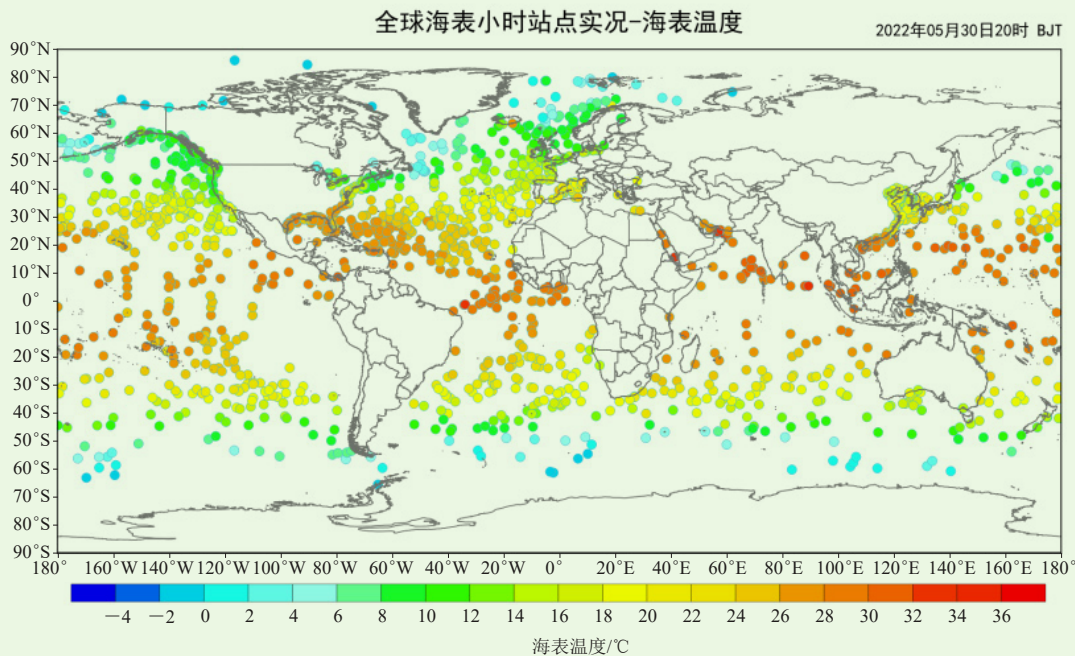


图1 2022年5月30日20时(北京时,下同)全球海表温度实况

Fig. 1 Global real-time data of sea surface temperature at 20: 00 BT on 30 May 2022

数据集实现了中国、日本、俄罗斯、韩国等机构释放的中国近海观测数据、美国NOAA研发的ICoads、美国CFSR、GDAS同化海上数据以及GTS交换的海洋观测数据等数据源的整合，夯实了观测平台等元数据信息的准确性。在1900—2019年统计时段内，各要素数据量逐步增加，由起初仅包含大西洋、印度洋重要航线，逐步扩展至南半球及热带，最终覆盖全球海域。在1979—2019年统计时段内，数据集中的海平面气压、气温等要素的数据量超过了GTS单一数据源的3倍。针对收集到的多个来源的海表观测资

料，通过对比评估，设定数据源分级，去除重复记录并进行资料拼接，数据经标准化处理，应用研发的全球海表观测资料质量控制技术完成数据质量控制，使用ECMWF的ERA Interim再分析产品作为参考数据，对海平面气压、海表温度等要素的评估结果显示：质量控制使得观测数据与分析产品的平均偏差与均方根误差均减小，观测场与分析场的空间模态更加接近，有效提升了数据质量。该数据集为中国气象局全球大气/陆面再分析(CMA-RA)及东亚大气再分析(ERA)产品研制提供高质量的海表观测同化数据^[39-40]，同时

为全球海洋天气气候监测、评估、预报及数值模式检验评估应用等提供基础数据支撑，也是全球海洋统计加工数据产品及多源数据融合产品的基础数据源。

以“全球海表观测定时值数据集”为数据源，参照ICOADS月值网格产品研制技术，中国气象局研发了全球海洋气象数据月值统计算法，在 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的网格内，选取基础数据中观测正确的定时值数据来统计日值，再由日值统计到月值，研制形成“全球海表观测基本气候数据集”，包含1900年以来全球洋面海表温度、海表气温、海气温差和海平面气压共4个关键要素。与HadISST2、COBE-SST2、ERSST、HadSST3等开展了对比评估，计算了Niño3.4、PDO和AMO海温指数等气候变率模态指数，结果表明，该海表温度格点统计产品能够很好地刻画大尺度气候模态的时间演变特征，与同类产品相关系数均在0.95以上，其中与ICOADS的相关系数达到0.99。

2.1.2 全球海表温度格点重建数据集

在诸多海洋观测要素中，海表温度（SST）是描

述海洋表层热状况最为重要的参数之一，常被用于监测ENSO（El Niño-Southern Oscillation）等海洋异常现象。长期以来，全球气候监测业务应用的海洋气象数据产品主要依赖美国、英国等发布的数据产品。中国气象局面向全球海洋长期气候监测业务应用需求，以“全球海表观测定时值数据集”为基础，研制了“全球海表温度格点重建数据集”。该产品基于全球SST观测百年长度的时空分布特征，对其中船舶和浮标观测SST进行了月尺度格点统计，吸收引入并优化完善美国ERSST数据产品的偏差订正和格点重建方法，对由传感器更换引起的SST序列不均一的观测值进行了偏差订正，应用优化的格点重建方法对现场观测存在的数据“空窗”进行了空间插补，通过时空重建，较好地填补了原有观测存在的数据“空窗”。评估表明，该产品与国际同类产品的质量相当，能够较好地反映全球海表温度的历史演变及空间分布特征^[41]（图2）。该产品起始于1850年，分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ，已用于开展全球SST的月-季节-年代际尺度监测、海洋气候变化分析评估、海气相互作用研究等业务与科研工作。

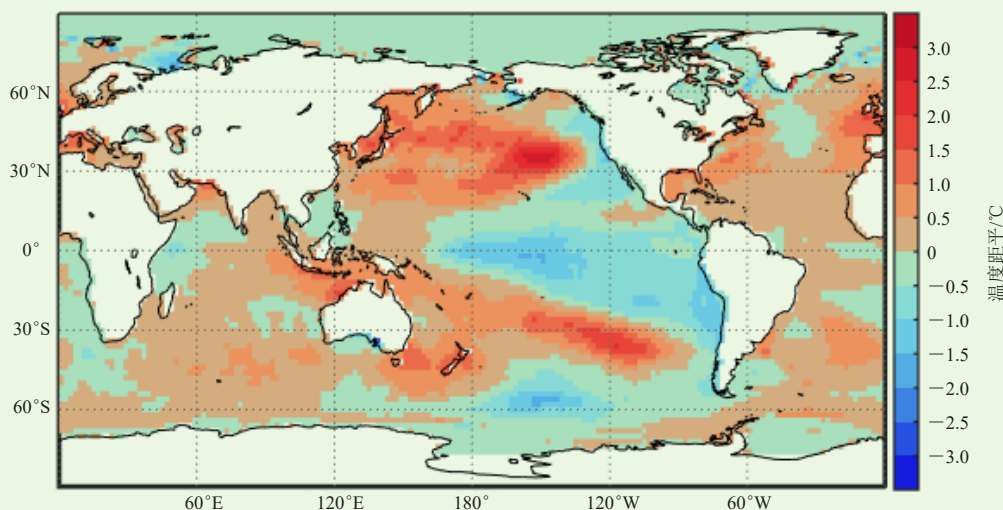


图2 2022年5月全球海表温度距平场（气候场：1991—2020年）
Fig. 2 Global sea surface temperature anomalies in May, 2022 (climatic field: 1991—2020)

2.1.3 中国近海锚碇浮标数据集

围绕中国近海海洋天气气候监测及数据同化业务应用需求，中国气象局研发了“中国近海锚碇浮标数据集”，实现了中国气象局布设的锚碇浮标与国家海洋局双边共享的锚碇浮标观测数据的有效整合，中国近海定点海洋观测数据完整性得到有效提升，同时夯实了观测平台等元数据信息的准确性。数据集包含海表气压、气温、相对湿度、风等30项气象要素和海表温度、海水盐度、海浪等24项水文要素，空间覆盖中国邻近沿海海域（图3）。产品研制过程首先完成数据

预处理，包含多来源海表观测数据记录拼接、按时间归并、资料去重、格式标准化等，解决不同观测资料存在重复观测记录、数据存储格式不一致等问题，实现数据格式标准化；随后基于自主研发的海表观测数据质量控制技术，结合近海资料实际特点进行优化，开展基本信息检查、缺测与特征值检查、界限值检查、主要变化范围检查、时间一致性检查、内部一致性检查、极值出现时间检查、要素字段重复检查等多个环节质量控制，甄别观测质量较差的数据并标识质量控制码。实时产品生产包含补算功能，兼顾时效性

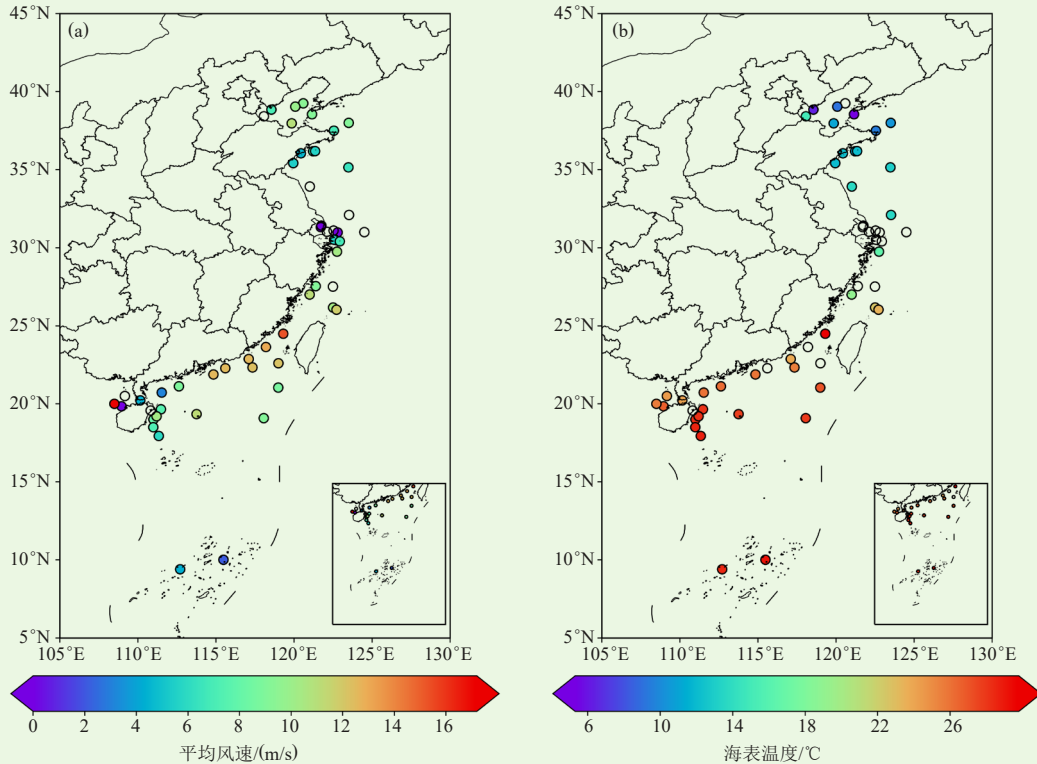


图3 2022年5月1日中国近海平均风速 (a) 和海表温度 (b) 实况

Fig. 3 Real-time data of China offshore average wind speed (a) and sea surface temperature (b) on 1 May 2022

与完整性，同时确保与业务系统对接的兼容性，已在中国近海海洋气象监测评估、台风监测预报及数值模式同化应用等业务科研中得到广泛应用。

2.2 全球海洋多源融合分析数据产品

2.2.1 全球 25 km 分辨率逐日海表温度多源融合实况分析产品

围绕全球数值天气预报、气候变化分析等业务

需求，中国气象局研发了1981年以来全球40年序列长度、水平分辨率25 km的逐日海表温度多源融合实况分析产品(图4)。该产品以全球浮标和船舶观测海表温度数据、FY-3C/VIRR反演海温以及NOAA系列卫星AVHRR反演海温、MetOp系列卫星AVHRR反演海温、Aqua/AMSR-E反演海温和GCOM-W1/AMSR2反演海温等数据以及ERA5的分析场数据等为数据源，综合

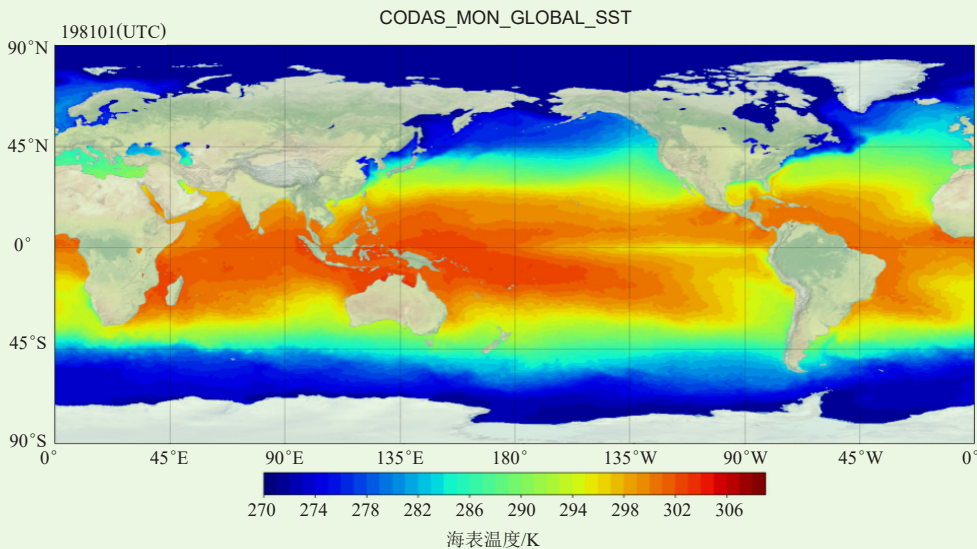


图4 全球25 km分辨率海表温度多源融合实况分析产品(1981年1月平均)

Fig. 4 Global 25 km daily sea surface temperature multi-source fusion real-time analysis product (January 1981 averaged)

利用卫星、船舶、浮标等观测资料，采用多源资料一体化质量控制、偏差订正、融合分析等关键技术研制而成，可为全球及区域气候变化分析及气候模式提供长序列数据支撑。基于该产品研制的40年逐日长序列海表温度距平变化场，可作为全球及区域气候模式的基础资料，以满足全球气候变化分析的数据需求。全球25 km逐日海表温度实况分析产品在沿海气象部门台风监测中得到广泛应用，产品每日滞后2 h更新，空间覆盖全球，总体质量与国际同类ERA5、OISST等产品相当，均方根误差 $<0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.2 全球25 km分辨率逐日海冰密集度多源融合实况分析产品

围绕全球数值天气预报、气候变化分析等业务需求，中国气象局研发了1981年以来全球40年序列长度、水平分辨率25 km的逐日海冰密集度多源融合

实况分析产品(图5)。该产品采用美国国家冰雪数据中心(NSIDC)的海冰密集度CDR产品、美国国家冰中心(NIC)的IMS北半球海冰产品、欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT)海洋海冰应用中心(OSI SAF)的海冰密集度数据、ERA5模式产品以及FY-3D/MWRI、FY-3C/VIRR海冰密集度产品为数据源，利用多种来源卫星观测资料和分析资料，采用多源资料一体化偏差订正、融合分析等关键技术研制而成。该产品逐日滞后12 h更新，质量总体与国际同类产品具有较高的相关性和一致性，能够有效反映南北极海冰密集度的年际变化趋势，并与OISST和ERA5的相关系数均超过0.9。此外，基于40年序列长度的25 km分辨率海冰密集度多源融合实况分析产品，研制了40年逐日的长序列海冰密集度气候态产品和月及年平均产品，可为全球及区域气候变化分析及气候模式提供长序列数据支撑。

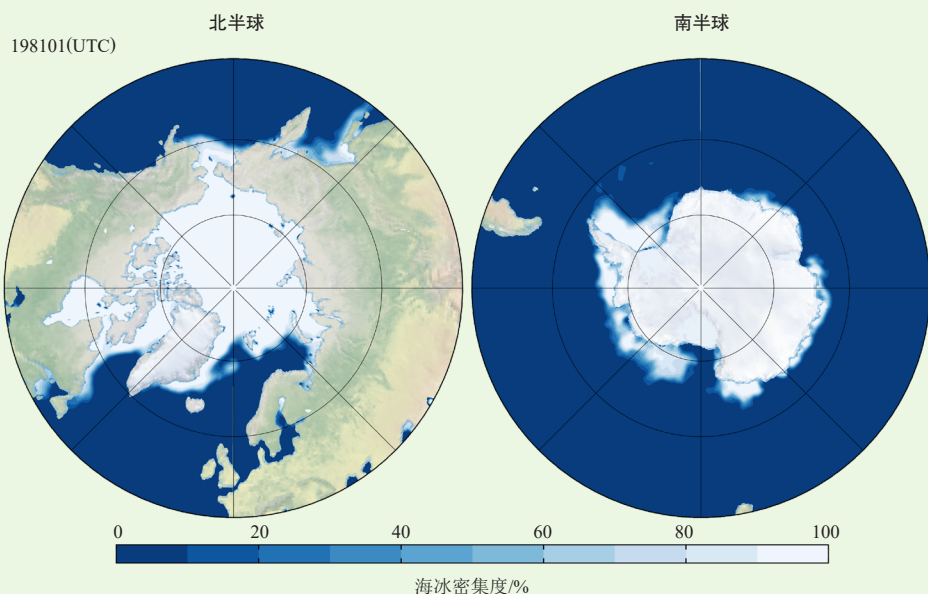


图5 全球25 km分辨率海冰密集度多源融合实况分析产品(1981年1月平均)

Fig. 5 Global 25 km daily sea ice density multi-source fusion real-time analysis product (January 1981 averaged)

2.2.3 全球10 km/1 h时空分辨率降水多源融合实况分析产品

面向全球气象业务能力提升的迫切需求，中国气象局采用全球微波降水集成、云移动矢量计算与融合、拉格朗日集成等方法，实现了FY-3D、FY-4A与H-8、Meteosat-11、GOES-16、GOES-17等4颗国外静止卫星和NOAA-19、NOAA-20、DMSP-F17、DMSP-F18、GPM、SNPP、Metop-B、Metop-C等8颗极轨卫星的融合应用，研制生成全球10 km/1 h时空分辨率降水多源融合实况分析产品(图6)。产品均方根误差 $<1.6\text{ mm/h}$ ，与国际同类型产品(如美国的CMORPH和IMERG、日本的GSMaP)在1 h、3 h、逐

日等多个时空尺度的质量相当，在空间覆盖方面优于美国的CMORPH和日本的GSMaP，与美国的IMERG相当，实现全球覆盖。为了满足全球降水监测需求，基于全球10 km/1 h降水多源融合实况分析产品，我国进一步开发了24 h、3 d、5 d、7 d、10 d等多种累计降水产品。

2.2.4 中国区域1 km/1 h时空分辨率极大风实况分析产品

中国区域1 km/1 h时空分辨率极大风实况分析产品(图7)是采用自主研发的全球大气实况分析系统短时预报和台风模式(CMA-TYM)预报作为背景场，利用多重网格三维变分方法，融合快速质量控制后的地

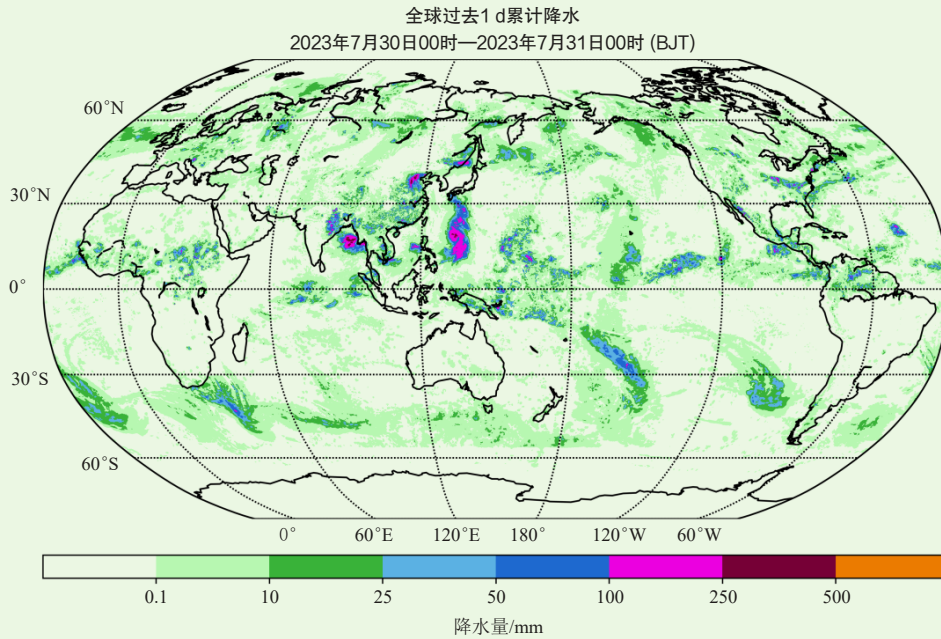


图6 全球10 km/1 h时空分辨率降水多源融合实况分析产品

Fig. 6 Global 10 km hourly Multi-Source Integrated Precipitation (GMSIP) real-time analysis product

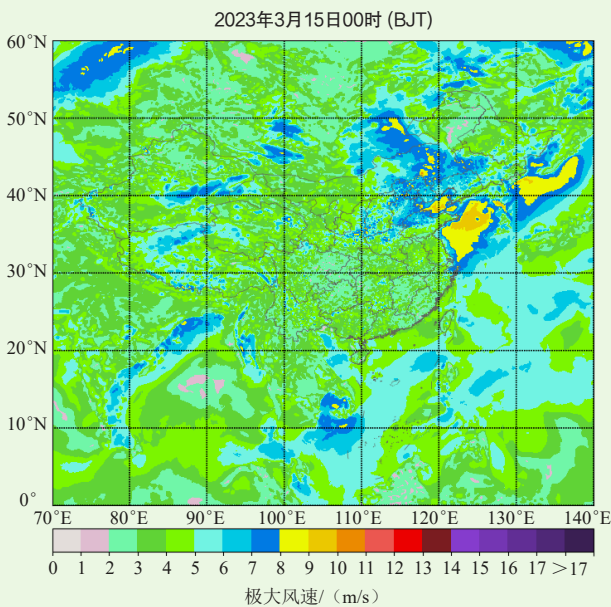


图7 中国区域1 km/1 h时空分辨率极大风实况分析产品
Fig. 7 China 1 km hourly wind gust real-time analysis product

面站点和海上极大风风速观测资料，从而得到的极大风网格分析产品。该产品采用等经纬度网格，空间覆盖范围为中国区域(0°—60°N, 70°—140°E)，包含邻近海域。评估表明，极大风融合产品能够有效提升模式预报的极大风速质量，其中9级以上风速的准确率较模式明显提高(由21.8%提高到62.8%)，相对误差也明显变小(由-25.0%降低为-8.2%)。该产品已在沿海气象部门台风监测中得到广泛应用，产品逐小时

更新，时效为5 min。

2.3 全球海洋气象数据产品应用及服务

目前，我国自主研发的全球及中国近海海洋气象数据产品已通过中国气象局业务准入，有效支撑国家和省级天气气候业务及科研应用。其中“全球海表观测测定时值数据集(1900年至今)”提供中国第一代全球大气再分析及东亚再分析产品研制同化应用^[29-30]，同时为多源数据融合及长序列气候数据产品研制提供数据基础。“全球海表温度格点重建数据集”为应对1.5℃增温科学问题研制全球表面温度序列产品提供自主研发的海表温度数据基础。全球海洋多源融合产品时效高、分辨率高，在国家级和沿海省台风监测预报业务中广泛应用。

目前，全球海洋气象实况分析产品关键要素已向社会公开发布。全球及中国海洋气象数据产品基于中国气象局数据共享平台“气象大数据云平台”(http://idata.cma/cmadaas/)对气象部门内用户提供应用服务。用户通过申请账号获得资料访问权限，可实现数据文件批量下载，检索定制及接口调用等多样化、综合性数据服务。该平台提供包括全球海洋海面观测要素资料、全球海洋深水观测要素资料、全球海洋潮位资料、中国海洋局交换的船舶及浮标数据等30余个海洋气象观测数据及产品。气象部门以外用户可通过“中国气象数据网”(https://data.cma.cn/)访问中国气象局发布的共享目录中的海洋气象数据产品。

3 结论与讨论

目前,围绕全球及中国近海海洋气象监测评估应用,我国自主研发完成多个全球及近海海洋气象数据产品,初步构建形成全球海洋气象数据产品体系。当前我国自主研发的产品以海表大气及表面观测要素为主,未来需进一步加强对深海观测数据的加工处理,研制覆盖重点港口、航道、极区等关键区域的海洋气象数据产品,重点包括以下几个方面。

1) 加快新技术研发及遥感遥测数据应用。开展大数据分析、机器学习等人工智能方法在卫星、雷达等遥测资料处理及多源资料融合分析中的应用技术研究,提升遥感遥测数据在海洋气象数据产品研发中的应用比例。

2) 提升全球海洋产品的时空分辨率。全球海洋格点分析产品分辨率将提升至5~10 km,小时级实时更新,研制覆盖远洋导航等重点港口、航道海洋气象数据产品,研发潮汐、海浪、海雾及深海温盐等数据产品。

3) 拓展中国责任海区多源融合产品。利用地面、卫星、雷达等多种来源观测资料、数值模式资料及各类社会化观测数据,建设快速更新的多源融合实况分析系统,研制实时-历史一体化的海洋多源融合实况分析产品,责任海区产品分辨率将达到5 km,小时级实时更新。

4) 健全海洋气象数据产品共享机制。加快海洋气象数据产品业务准入进程,实现更多的海洋气象数据产品的推广应用。

参考文献

- Woodruff S D, Worley S J, Lubker S J, et al. ICOADS Release 2.5: extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(7): 951-967.
- Freeman E, Woodruff S D, Worley S J, et al. ICOADS release 3.0: a major update to the historical marine climate record[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(5): 2211-2232.
- Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(20): 8179-8205.
- Kennedy J J, Rayner N A, Atkinson C P, et al. An ensemble data set of sea surface temperature change from 1850: the Met Office Hadley Centre HadSST.4.0.0.0 data set[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(14): 7719-7763.
- Ishii M, Shouji A, Sugimoto S., et al. Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(7): 865-879.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late Nineteenth Century[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4407.
- Banzon V, Smith T M, Chin T M, et al. A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies[J]. *Earth System Science Data*, 2016, 8(1): 165-176.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C Y, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(22): 5473-5496.
- Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, et al. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(2): 157-174.
- Zhang H M, Bates J J, Reynolds R W. Assessment of composite global sampling: sea surface wind speed[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(17): L17714.
- Zhang H M, Reynolds R W, Bates J J. Blended and gridded high resolution global sea surface wind speed and climatology from multiple satellites: 1987-present[C]//*Proceedings of the 14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*. Atlanta: American Meteorological Society, 2006.
- Allan R, Ansell T. A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850-2004[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(22): 5816-5842.
- IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M/OL]. 2021 [2021-08-01]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
- Martin M, Dash P, Ignatov A, et al. Group for high resolution sea surface temperature (GHRSSST) analysis fields inter-comparisons. Part 1: a GHRSSST multi-product ensemble (GMPE)[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 77-80: 21-30.
- Gemmill W, Katz B, Li X. Daily real-time global sea surface temperature: high-resolution analysis: RTG_SST_HR[R]. NCEP. EMC Office Note, 2007.
- Gentemann C L, Wentz F J, DeMaria M. Near real time global optimum interpolated microwave SSTs: applications to hurricane intensity forecasting[C]//*27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. Monterey: American Meteorological Society, 2006.
- Brasnett B. The impact of satellite retrievals in a global sea-surface-temperature analysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2008, 134(636): 1745-1760.
- Maturi E, Harris A, Mittaz J, et al. A new high-resolution sea surface temperature blended analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(5): 1015-1026.
- Good S, Fiedler E, Mao C Y, et al. The current configuration of the OSTIA system for operational production of foundation sea surface temperature and ice concentration analyses[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 720.
- 徐宾, 宇婧婧, 张雷, 等. 全球海表温度融合研究进展[J]. *气象科技进展*, 2018, 8(1): 164-170.
- Dash P, Ignatov A, Martin M, et al. Group for high resolution sea surface temperature (GHRSSST) analysis fields inter-comparisons - part 2: near real time web-based level 4 SST quality monitor (L4-SQUAM)[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 77-80: 31-43.
- Lee T, McPhaden M J. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(14): L14603.
- Embury O, Merchant C J, Good S A, et al. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1980 for climate applications[J]. *Scientific Data*, 2024, 11(326): 1-22.
- While J, Mao C, Martin M J, et al. An operational analysis system for the global diurnal cycle of sea surface temperature: implementation and validation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 143(705): 1787-1803.
- Wang X D, Wang C Z, Han G J, et al. Effects of tropical cyclones on large-scale circulation and ocean heat transport in the South China Sea[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(12): 3351-3366.
- Donlon C, Robinson I, Casey K S, et al. The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature

(下转45页)

献。回顾他们师生不平凡的人生经历，笔者深刻感悟到，历史长河里个人仅是一粒微小的沙子，个人命运与祖国的命运紧密相连；老师对学生的影响是无形的、巨大的。现代生活和研究环境条件远远优于前辈们的环境和条件，怎样才能做出超越前辈的成就？如何继承、发扬和光大先辈们开创的海洋气象学事业值得后

辈深思！

致谢：本文得到原山东海洋学院海洋气象学专业秦曾灏教授，以及王彬华教授亲朋好友的关心和鼓励，特别是王彬华教授的长子王立玮提供了一些有价值的线索和史料，表示衷心感谢。

深入阅读

- 傅刚, 2024. 推动中国海洋气象学发展的两位大师——第 I 部分: 蒋丙然的故事[J]. 气象科技进展, 14(2): 56-59.
- 王彬华, 1954. 在西藏高原影响下中国动力性气旋的生成及其发展[J]. 山东大学学报(4): 94-110.
- 王彬华, 1961a. 普通气象学(上册)[M]. 济南: 山东人民出版社.
- 王彬华, 1961b. 普通气象学(下册)[M]. 济南: 山东人民出版社.
- 王彬华, 1980a. 中国近海海雾持续和消散问题的探讨[J]. 山东海洋学院学报, 10(2): 20-30.
- 王彬华, 1980b. 中国近海海雾的几个特征[J]. 海洋湖沼通报, 2(3): 9-20.
- 王彬华, 1981. 中国近海海雾的初步分析[M]//海洋与湖沼论文集. 北京: 科学出版社, 1-18.
- 王彬华, 1983. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社.
- 王彬华, 秦曾灏, 1959. 人工造雾试验报告[J]. 山东海洋学院学报

- (1): 50-64.
- 王华文, 1941. 四川之春荒及其预防[J]. 气象学报, 15(2): 73-82.
- 王秀芹, 1990. 中国近代气象事业的先驱——蒋丙然[J]. 中国科技史料, 11(1): 41-54.
- Baines P G, 1987. Sea fog: Wang Binhua (Editor). China Ocean Press, Beijing, 1985. Distributed by Springer Verlag, Berlin, 1985, 330 pp., 199 Figs., DM215.00, hardcover[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 11(1): 92-93.
- Fu G, Li P Y, Chen L J, et al, 2023. Historic and future perspectives of storm and cyclone[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 40(3): 447-463.
- Wang B H, 1985. Sea Fog[M]. Beijing: China Ocean Press. Berlin: Springer Verlag.

(作者单位: 中国海洋大学海洋与大气学院海洋气象学系;
中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室)

(编辑: 郑秋红)

(上接19页)

- pilot project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(8): 1197-1214.
- [27] Buongiorno Nardelli B, Tronconi C, Pisano A, et al. High and ultra-high resolution processing of satellite sea surface temperature data over southern European seas in the framework of MyOcean project[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 129: 1-16.
- [28] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3): 487-503.
- [29] De Vera A, Terra R. Combining CMORPH and rain gauges observations over the Rio Negro Basin[J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(6): 1799-1809.
- [30] Maggioni V, Vergara H J, Anagnostou E N, et al. Investigating the applicability of error correction ensembles of satellite rainfall products in river flow simulations[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4): 1194-1211.
- [31] Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(6): 3063-3075.
- [32] Guillod B P, Orłowsky B, Miralles D G, et al. Reconciling spatial and temporal soil moisture effects on afternoon rainfall[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6443.
- [33] Lee H, Zhang Y, Seo D J, et al. Utilizing satellite precipitation estimates for streamflow forecasting via adjustment of mean field bias in precipitation data and assimilation of streamflow observations[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 779-794.
- [34] Ushio T, Sasashige K, Kubota T, et al. A Kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2009, 87A: 137-151.
- [35] Joyce R J, Xie P P. Kalman filter: based CMORPH[J]. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(6): 1547-1563.
- [36] Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG)[EB/OL].(2014-09-15)[2023-06-05]. https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V4.4.pdf.
- [37] Mears C A, Scott J, Wentz F J, et al. A near-real-time version of the cross-calibrated multiplatform (CCMP) ocean surface wind velocity data set[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(10): 6997-7010.
- [38] 国家气象信息中心. 全球气象数据资源月报[R]. 2023年第1期.
- [39] Liu Z Q, Jiang L P, Shi C X, et al. CRA-40/atmosphere - the first-generation Chinese atmospheric reanalysis (1979 - 2018): system description and performance evaluation[J]. Journal of Meteorological Research, 2023, 37(1): 1-19.
- [40] Yin J F, Liang X D, Xie Y X, et al. East Asia reanalysis system (EARS)[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(6): 2329-2346.
- [41] Chen L F, Cao L J, Zhou Z J, et al. A new globally reconstructed sea surface temperature analysis dataset since 1900[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(6): 911-925.

(编辑: 郑秋红)