

我国海洋气象预报业务现状与发展

尹尽勇 徐晶 曹越男 张增海 赵伟 黄彬

(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 近年来, 随着海洋经济的发展和海洋防灾减灾的需要, 我国海洋气象预报业务有了长足的进展。对海洋气象预报业务的现状及其发展进行了简要回顾, 阐述了当前海洋气象监测技术手段, 以及国内外在海雾、海上大风、海浪和风暴潮等海洋气象灾害预报技术方面的发展, 指出了当前海洋气象业务存在的不足及未来的发展方向。

关键词: 海洋气象, 现状, 发展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.06.002

The Development and Current Status of Marine Weather Forecasting Operation in China

Yin Jinyong, Xu Jing, Cao Yuenan, Zhang Zenghai, Zhao Wei, Huang Bin

(National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: With the development of marine economy and the increasing requirement of marine hazard mitigation, marine weather forecast operations in China have made great progress in recent years. This paper briefly reviewed the development and current status of marine weather forecast operation in China, with emphasis on the technology of marine weather monitoring, the development of numerical models for sea fog, sea gale, sea wave and storm surge, and the progress in operational forecasting technology and marine weather service. Deficiencies in the current operational system and future developments were also discussed.

Keywords: marine forecast, current status, development

1 海洋气象预报业务现状

世界气象组织(WMO)规定了海洋气象预报业务是向海上或岸上的用户提供其所需的海洋气象和海洋水文情报, 用以保证海洋作业的安全及在可能的条件下提高海洋作业的效率和减少费用开支^[1]。海洋气象预报实际上是海洋水文预报和海洋气象预报的统称, 由于历史上首先发展了海洋气象预报, 因而习惯上把海洋水文气象预报也称为海洋气象预报。

世界各国为做好海洋气象预报都建有专业的服务机构。比如, 美国的海洋预报业务由国家环境预报中心(NCEP)下属的海洋预报中心(OPC)、国家飓风中心(NHC)和中太平洋飓风中心(CPHC)负责, 英国的海洋气象服务工作由英国气象局(MO)、英国交通部下属的海上与海岸警备机构(MCA), 以及位于英国北部阿伯丁(Aberdeen)的海洋中心共同负责, 日本的海洋气象服务业务由日本气象厅下的4个海洋气象台负责。总体来看, 世界各国的海洋气象业务机构承担的海洋气象预报业务不是单一的海洋气象预报, 而是涵盖了海洋水文预报在内的综合性海洋气

象预报业务。世界各国在做好本国海洋气象服务的同时, 还根据WMO划分的职责承担着公海海洋气象预报业务。

我国海洋气象预报业务主要由中国气象局和国家海洋局海洋环境预报中心承担, 中国气象局主要负责海洋气象预报, 国家海洋局海洋环境预报中心负责海洋水文预报。

在中国气象局的直接领导下, 经过广大气象工作者的不断努力, 海洋气象预报业务有了长足的进步, 逐步建立起了国家级、海洋区域中心级、省级及地(市)级海洋气象监测、预报、警报、服务业务体系和海洋气象灾害服务系统流程(图1), 具备了一定的科学研究与技术开发基础。今天的海洋气象预报服务产品除热带气旋服务产品外, 各级海洋气象台根据卫星、雷达、自动站、浮标站以及海上石油平台或船舶观测资料开展制作我国近海海区预报、近岸海区预报和远海海区预报产品, 制作和发布影响我国近海的海洋灾害天气预警产品。中国气象局中央气象台除承担我国近海海区预报服务业务和对下级海洋气象台站海洋气象业务指导外, 还承担着WMO第11责任海区的海洋气象预报预警产品的制作和发布任务, 同时制作北太平洋监测、分析及预报产品。中国气象局通过

收稿日期: 2012年5月20日; 修回日期: 2012年8月27日
第一作者: 尹尽勇(1962—), Email: yin_jinyong@sina.com

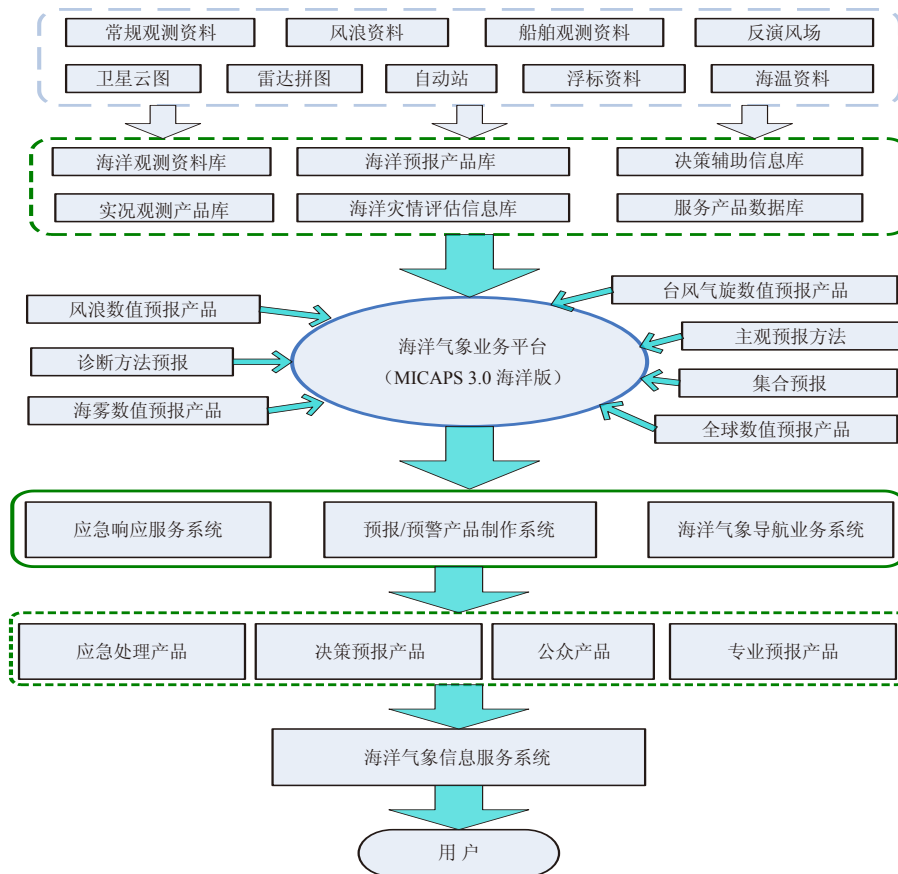


图1 中国气象局海洋气象灾害服务系统流程图

建立“全国海洋气象信息共享系统”实现各级海洋气象预报服务联动（图2），提高预报产品的使用率和预报结果的一致性。

国家海洋局海洋环境预报中心前身为国家海洋局海洋水文气象预报总台，通过多年的发展，已经成为我国专门从事海洋环境和海洋灾害预报报警、科学研究和咨询服务的权威机构。主要职能是负责我国海洋环境预报、海洋灾害预报和警报的发布及业务管理。目前，除了发布海浪、风暴潮、海啸、赤潮、海冰、海流、海温、厄尔尼诺、海水浴场预报、海上溢油、海平面高度等海洋要素预报产品外，国家海洋环境预报中心还承担着组织开展重大海洋灾害的调查评估，编制《中国海洋灾害公报》，开展海气相互作用、海洋应对气候变化、海洋遥感和地理信息系统的理论和应用研究，制作和发布海洋气候预测产品，负责极地科考海洋环境预报保障等工作。

多年来，以热带气旋预报服务为核心的海洋气象预报业务取得了显著的社会经济效益，但海洋气象预报总体上业务发展不平衡，与我国经济社会发展需求以及海洋气象事业发展战略要求相比，还存在很大差距。海洋气象预报面临最大的困难是海上气象

观测资料匮乏及其资料同化分析处理技术落后，缺乏先进的全球海洋数值预报模式产品，不能真正做到全球海上灾害性天气系统监测预警，预报预警还仅仅停留在我国近海海域，不能为我国远洋运输以及海上国防提供满意的预报服务。尽管如此，经过多年的研究开发，我国已经建立了海浪、海雾、风暴潮、海流以及海上大风等客观数值预报产品，使海洋气象预报有效时效达到或接近120h。同时，我国的海洋气象服务正在向着专业化和特色化发展，目前各地海洋气象台站主要针对海洋渔业、近岸旅游、石油平台、溢油监测、航线气象预报以及远洋气象导航等开展了多种形式的专业化海洋气象业务服务，取得了一定的社会效益^[2]。

2 海洋气象监测技术

广义的海洋气象观测涵盖所有在海—气界面、海面以下及海面以上的大气和与之有关的环境要素的观测，在综合气象观测业务系统中占有重要的地位。海洋观测内容主要包括天气系统、海洋气象要素和海洋环境要素的监测，监测手段除了包括传统的浮标站、飞机探测、船舶探测以外，还包括日益发展的遥感观

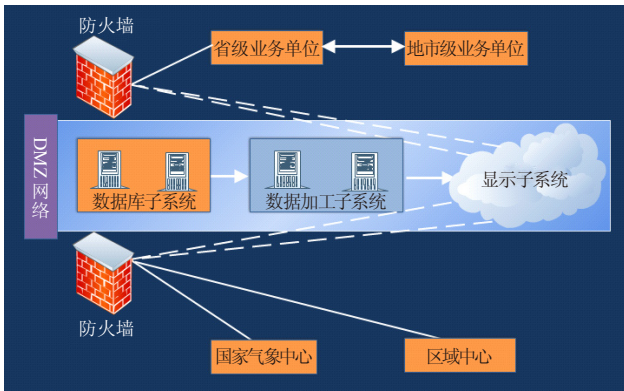


图2 中国气象局“全国海洋气象信息共享系统”结构图

测、自动气象站、高频地波雷达、天气雷达、风廓线仪、海岸边界层等观测手段。一般来说，海洋气象观测由地基的常规观测系统和空基的非常规观测系统组成。这样一种全方位、全天候的立体观测，为海洋气象预报服务业务提供了坚实基础。

2.1 主要监测技术手段

目前常规海洋气象观测有岸基气象观测站、海洋气象浮标站、船舶气象观测站、海岛自动气象站、海上石油平台/塔台自动气象站组成。

岸基气象观测站一般是指距离海岸线（最高潮位线）500m以内，定时进行海面气温、降水、气压、风速和风向、表面辐射收支、海洋—大气之间动量、感热、潜热通量、碳通量、海表温度、海表盐度、海平面高度、海况等大气和海洋要素的测量。岸基站是我国海洋气象监测网的重要组成部分，在浮标资料尚不能满足海洋气象观测信息需求的情况下，发展岸基台站观测技术仍然是我国海洋气象观测技术的重要内容之一。

海洋浮标站是根据海洋水文气象预报、海洋资源开发和科学研究的需要而发展起来的一种新型现代化的海洋水文气象观测平台，是海洋气象资料观测中重要的技术之一。浮标一般来说分为锚系浮标和漂流浮标。

锚系浮标能在固定位置观测风、温、湿、压、日照和降水等气象要素，以及海水照度、噪声、流速、水温、盐度和波浪等水文气象要素，是观测离岸较远海域水文、气象条件的重要手段，在研究海洋和大气的相互作用及全球气候变化、预报全球性和地区性海洋灾害、海洋污染监测、卫星遥感数据真实性校验以及作为平台用于GPS定位等方面正在发挥着越来越重要的作用。气象浮标还是沿海地区中尺度预警系统的重要组成部分，主要为地区天气预报、预警和生态环境监测提供气象和水文信息。

漂流浮标（Argos）是随着全球定位系统和卫星

通信技术的进步而发展起来的一种十分有效的大尺度海洋水文气象监测手段，主要用来观测海表层温度，并通过Argos的位置变化来计算表层洋流。近年来，利用GPS和Argos双重定位，大大提高了定位精度，观测参数迅速增多，观测海域也从大洋发展到主要用于近海。目前，全球大约有1500个漂流浮标和800多个次表层浮子在进行海洋观测。

船舶气象观测站是指以船舶作为开展海洋气象观测的平台，观测海洋天气和水文要素。船舶观测作为一种流动的海洋观测手段是目前获取海洋观测资料最多来源之一，目前进入WMO全球电信系统（GTS）气象观测数据网的气象观测志愿船舶观测大约有2800多艘，海洋气象观测志愿船对世界天气监测网全球观测系统做出了重要贡献。在今天，乃至今后，海洋气象观测志愿船将继续是海洋气象资料的主要来源。

海岛气象站主要是指不能直接采用陆地交通方式到达的海岛自动气象站，通信需采用无线电通信，有些站除了担负常规气象观测外，还有海浪、海水温度等观测项目。海岛气象站是观测海洋气象状况的重要场所。海岛自动站安装的海岛自动测风系统是专门为测量海岛出现的强风而设计的，其特点是具有较好的测强风能力。

海上石油平台/塔台气象站是将观测点布设于海洋中的石油平台或者航标塔台上，由于石油平台或航标塔台均为有人值守的观测站点，因此，无论从设备维护，还是观测资料可靠性都较无人值守的海岛观测站更有优势。

海岸高频地波雷达可用于测量海冰及海面风、浪、流等海面环境要素。美、英、加、日等国先后研制、使用了用于测量海表面动力环境的岸基高频地波雷达。我国“863项目——高频地波雷达OSMAR 2000系统”采用小孔径波长比天线阵和发射机，可探测海流和风向的距离达到200km，探测浪高和风速达100km。

海洋气象监测系统中，卫星遥感观测技术的发展是对海洋气象观测的一大贡献，卫星遥感观测弥补了海洋地基观测的不足，不但能够提供高精度的全球范围的观测资料，而且能够提供长期稳定可靠的连续资料。在海洋气象预报业务中，尤其是在台风、温带气旋、海雾和海冰的监测方面，卫星遥感观测都是做好预报不可缺少的手段之一^[3]。美国在1978年发射了世界上第一颗海洋卫星SEASAT 21，后来欧洲、加拿大、日本、中国、印度等国家和地区都陆续发射了各类型海洋和气象卫星。目前全球在轨运行的涉海卫星约有30颗，按用途分，海洋卫星可分为海洋水色卫

星、海洋动力环境卫星、海洋综合探测卫星。不同用途的海洋卫星用于得到不同海洋遥感产品，而海洋水文、气象要素的获得主要是依靠动力环境卫星和综合探测卫星。

海洋动力环境卫星是对海面风场、海面高度、流场以及温度场等动力环境要素探测的卫星，有效载荷通常是微波散射计、微波辐射计、雷达高度计等。能够通过微波散射计得到全球海洋上的风矢量场，以及利用雷达高度计提供全球高分辨率的海浪、大洋环流、海面风速、大地水准面（重力场）、海底地形和极地冰盖监测产品。

微波散射计能够利用海面粗糙度与洋面10m高度的中性层结稳定风场之间的关系得到洋面风产品。比如美国QuikSCAT卫星上的Seawinds散射计（2009年失效），现今在轨运行的欧洲MetOp-1卫星上的ASCAT和印度Oceansat上的OSCAT散射计。另外，散射计还提供极地冰雪监测产品。

星载雷达高度计也是一种主动式微波传感器，通过测量脉冲经海面反射之后的往返时间可得出卫星的高度。比如美国TOPEX和JASON-1卫星上的POSEIDON高度计，用它可进行下列测量：大地水准面（POSEIDON高度计测高精度度小于2~4cm）；海冰，包括冰面高度和冰的体积，因而能跟踪陆冰层，还可测量海上冰盖的消长，监测海冰的分布和运动；潮汐、大洋环流、海面风强度和有效波高等。

海洋水色卫星能够对海洋水色要素（如叶绿素、悬浮沙和可溶性的黄色物质等）和水温进行探测，有效载荷通常选用海洋水色扫描仪。

海洋环境综合卫星的有效载荷包括可见光成像仪、红外成像仪，主动、被动遥感器，如微波辐射计、多光谱成像仪、合成孔径雷达等。能够提供全天时、全天候海况实时资料，如海温、海表面盐度、海面降雨率、海面风产品等。

红外遥感海面温度。比如美国NOAA卫星上的AVHRR（甚高分辨率辐射计），AQUA卫星上的MODIS（中分辨率光谱仪）等能够利用两个热红外波段的测量值反演海面温度SST。现有的AVHRR反演海温的精度大约是0.5K，MODIS夜间反演海温的精度大约是0.3K。

微波辐射计/成像仪是被动微波传感器，包括美国TRMM卫星上的TMI微波成像仪、AQUA卫星上的AMSU和AMSR-E微波扫描辐射仪，以及我国FY-3卫星上的微波成像仪等，通过各波段的亮温与海面温度、海面盐度、海面风场、海面降雨率的经验关系来

反演这些海洋表面参数。美国Coriolis卫星上的全极化辐射计Windsat还能利用全极化测量得到风向信息，从而反演全天候的海面风场，不受海上降雨的影响。

合成孔径雷达(SAR)是一种高方位分辨率的相干成像雷达。许多海洋卫星上搭载了不同类型的合成孔径雷达，例如，欧洲的ASAR，日本的PALSAR和加拿大的RADARSAT卫星上的SAR，以观测海洋和海冰为主，可以得到海洋内波、海浪谱、海冰的冰龄、厚度、分布、水-冰边界、冰山高度等重要信息。

2.2 我国海洋气象监测现状与规划

经过40多年的建设与发展，我国已建设并形成了一定规模的海洋气象监测网，开展了包括海岸和海岛气象站、沿海气象雷达、海上浮标、志愿观测船、海上石油平台自动观测站以及气象卫星遥感等海洋气象监测业务。据不完全最新统计数据，目前，中国气象局已经投入业务运行海岛自动气象站196个，岸基站14个，石油平台站8个，灯塔站1个，浮标站19个，船舶气象观测船15只。

我国的气象卫星事业发展迅速，从1988年第一颗风云一号气象卫星发射成功到现在，我国已成功地发射了4颗风云一号、2颗风云三号极轨卫星和5颗风云二号静止气象卫星。实现了全球全天候定量遥感可以对大气进行立体观测，具有全球250m分辨率地表环境监测能力，可对台风等灾害性天气进行微波探测。风云系列气象卫星除了观测资料以外还提供多种图像产品，以及风、海面温度、降水估计、云分类、热带气旋卫星定位、沙尘暴、海上气溶胶、海洋水色、海冰和海雾等20多种海洋监测数据产品。除了气象卫星的快速发展外，我国还积极发展海洋卫星，2002和2011年分别发射了海洋一号（HY-1，海洋水色环境）和海洋二号（HY-2，海洋动力环境），前者海洋水色环境系列，用于获取我国近海和全球海洋水色水温及海岸带动态变化信息，遥感载荷为海洋水色扫描仪和海岸带成像仪；后者为海洋动力环境系列，用于全天时、全天候获取我国近海和全球范围的海面风场、海面高度、有效波高与海面温度等海洋动力环境信息，遥感载荷包括微波散射计、雷达高度计和微波辐射计等。预计未来的海洋卫星（海洋三号，HY-3）卫星系列用于全天时、全天候监视海岛、海岸带、海上目标，并获取海浪场、风暴潮漫滩、内波、海冰和溢油等信息，遥感载荷为多极化多模式合成孔径雷达。

在气象卫星的遥感水平方面，中国与先进国家之间尚存在差距，与国外的产品相比，我国的海洋遥感

的仪器载荷还不够全面,产品也不及国外丰富,精度有待进一步检验。例如在国外的海洋卫星计划中,列入了各种SAR的研究,而我国的海洋、气象卫星上还没有合成孔径雷达、星载激光雷达,以及国外最新的圆锥扫描微波成像仪、真实孔径雷达、激光测高系统等,装载合成孔径雷达的HY-3已经在“十一五”列入背景型号预研。我国HY-2上的微波散射计是Ku波段单频,缺乏欧洲的C波段散射计。我国的微波辐射计只有两个极化方式,无法获取全极化辐射计能够得到的海面风向信息。对于最新的海洋遥感探测手段的研发,以及如何改进现有的探测仪器,是我国海洋遥感领域今后的研究重点。

目前,我国海洋气象观测业务能力与国际先进水平还有较大差距,未来几年在现代气象业务体系建设中,我国将建设包括台风及其热带气旋的海洋气象监测网、海岸带海洋气象观测网、中国海洋气象灾害应急监测与科学试验机观测网以及为沿海各省区市经济建设服务的专项监测服务网,使其具有天基、空基、船基全方位的海洋气象观测能力,满足国家重要海洋战略活动保障需要。

3 海洋气象预报技术

以数值预报(大气、海洋模式)产品为基础,结合预报员主观预报经验的数值预报释用方法是当前海洋气象预报的主要方法。作为海洋气象预报的主要预报手段——数值预报,近些年来,除大气数值预报模式外,相继有多种海洋环境数值预报模式应用于海洋气象预报服务业务,这些预报模式有海雾数值预报模式、海浪数值预报模式、风暴潮数值预报模式、海洋污染物扩散数值预报模式。

3.1 海雾数值预报模式

美国于1989年初步建立了能见度数值预报系统,用来为预报员提供客观指导产品。系统提供4—9月的北太平洋和北大西洋的雾和能见度12h间隔的72h预报,当时的预报产品还不适用于沿岸地区。1998年新的预报系统在全球预报模式(GFS)里嵌入了云模式,并使用了Stolina和Warner 1998年开发的一个算子。目前版本的预报系统(NCEP MMAB Global Visibility System, 2006年)是建立在GFS模式输出结果基础上,使用了修订版的Stolina和Warner开发的算子。输出结果为能见度,范围为0~20000m,预报时效为168h,预报间隔3h,每天起报4次。

我国海雾数值模拟研究起步较晚,但已经取得了一定进展。不断改进的天气模式(WRF, RAMS, MM5等)是海雾模式建立的基础。国内学者对很多

个典型海雾个例进行了成功的模拟。目前提高海雾模式的主要技术是通过数据同化方法来改进模式的初始场,改进模式初始场可以加强海—气边界层的稳定性和修订低层海—气边界层的风场。国家气象中心于2007年建立了黄渤海海雾数值预报系统,该系统在海雾生消变化规律的研究基础上,综合考虑大气边界层、云辐射等方案,结合地表能量收支、植被、液态水的重力沉降等物理因素,对WRF模式加以优化,使之成为能对海雾进行数值模拟和预报的模式。模式水平分辨率为15km,垂直方向上分为35层。模式采用欧拉质量坐标,采用Runge-Kutta的三阶时间积分方案,模式的物理参数化方案分别为RRTm长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、Monin-Obukhov近地面层方案、陆面过程选用热量扩散方案、YSU边界层方案、Betts-Miller-Janjic积云参数化方案,微物理过程方案为Lin方案,能见度计算方法主要采用Stoelinga建立的能见度计算方程:

$$VIS = -\ln 0.02 / (\beta_{cw} + \beta_{ci} + \beta_{rain} + \beta_{snow})$$

$$\beta_{cw} = 144.7C^{0.88}, \beta_{ci} = 163.9C^{1.00}, \beta_{rain} = 1.1C^{0.75},$$

$$\beta_{snow} = 10.4C^{0.78}$$

其中C为含有云冰、云水等空气的密度,单位: g/m^3 。

利用卫星海雾反演产品对黄渤海海雾进行检验发现,该模式对成片的浓雾天气具有较好的预报水平,在业务预报中具有一定的指导意义^[4]。

3.2 海浪数值预报模式

海浪的预报方法分为人工预报方法和数值预报方法。人工预报方法包含由风资料计算海浪要素的预报方法、海浪经验统计预报方法和半经验半理论预报方法。海浪经验统计预报方法包括Bretschneider经验预报方法、Wilson经验预报方法、井岛经验预报方法、宇野木经验预报方法等。半经验半理论预报方法包含有效波预报方法,此方法是由Sverdrup和Munk最先提出的一种较系统的海浪预报方法,包括深水和浅水风浪与涌浪预报,后经Bretschneider修正,所以简称为SMB方法。这种方法的风浪大小和周期预报是由风速、风时和风区决定的,绘制了风时、风区预报图,把有效波高和周期作为海面复杂海浪状态的参数,从海浪能量的方程中求解。还有一种方法是波谱预报方法,这种方法是以前谱概念为基础,由Pierson, Neumann和James提出的一种预报方法,简称PNJ方法,其特点是直接通过谱得到海浪要素,而不是通过海浪能量变化的计算求得海浪要素。而能量平衡方程导出谱的预报方法是结合了上述两种方法的优点,将谱引入能量平衡方程获得风浪随风区和风时成长关系而建立的。

20世纪50年代至今, 海浪数值预报模式得到了迅速发展。目前的主要计算模型可以分为三类: 第一类是基于Boussinesq方程的计算模型, 它直接描述海浪波动过程水质点运动的模型; 第二类是基于缓波方程的计算模型, 它是基于海浪要素在海浪周期和波长的时空尺度上缓变的事实; 第三类是基于能量平衡方程的计算模型, 主要用于深海和陆架海的海浪计算, 但是在近岸较大范围波浪计算也有很大优势。总体来看, 海浪数值预报技术的发展过程可以分为三个阶段^[5]。

第一阶段的典型代表是Phillips平衡域谱、PM谱和第一代海浪模式, 其特点是海浪谱各分量独立传播和成长, 海浪谱不会无限成长, 存在一个人为设定的限制状态。1957年法国Gelci基于微分波谱能量平衡方程, 完成了DSA海浪模式。这也是海浪数值预报的一个开创性的工作, 成为第一代海浪模式的典型代表。

第二个阶段的典型代表是JONSWAP谱和第二代海浪模式, 其主要特点是在能量平衡方程源项中考虑了波波非线性相互作用, 并用较为简单的参数化方案考虑了该非线性项。美国国家环境预报中心(NCEP)第一个用作业务化的海浪谱模式是Cardone和Ross发展的第二代的SAIL模式。20世纪80年代中期, 由美国、日本、英国、德国、荷兰等国的海洋专家组成的海浪模拟计划(SWAMP)研究组对第一代和第二代模式进行了全面的比较, 发现所有第二代海浪模式的非线性能量转换的参数化方法都具有明显的局限性, 尤其当风、浪的条件迅速改变时, SAIL等第二代海浪模式未能给出令人满意的结果。

第三个阶段即第三代海浪模式的研究和业务化应用。1983—1986年德国、荷兰、英国、法国、挪威等西欧国家40多名海洋专家研究发展了适用于全球深水和浅水的海浪数值计算模式。它采用当今各种海浪理论研究和海浪观测新成果, 应用了物理上较合理、计算上较精确的源函数, 在计算时对算法进行优化, 使它成为代表当今海浪预报技术世界水平的海浪数值计算模式。第三代海浪模式的特征是直接计算波波非线性相互作用, 将海浪模拟归结为各源函数的计算。目前应用较为广泛的第三代海浪模式主要有WAM模式、SWAN模式和WAVEWATCH模式等。

我国目前主要是采用WAVEWATCH(III)模式, 在全球集合天气预报风场成员的驱动15个海浪预报集合成员运行, 建立了分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球集合海浪数值预报系统, 开发了可应用的集合海浪数值预报产品。同时, 采用WRF中尺度模式的区域风场预报, 驱

动区域海浪模式WAVEWATCH(III), 通过模式的连接匹配和区域边界值的处理, 加以模式嵌套技术和引进高分辨率海底地形数据, 进行环渤海范围的区域嵌套处理, 建立了环渤海海域分辨率为5km的风、浪数值预报试验系统。

3.3 风暴潮数值预报模式

风暴潮的预报方法很多, 总体分为两大类: 经验统计预报方法和数值预报方法。

经验统计预报方法主要是基于长期的历史资料, 用数理统计的方法建立气象要素与特定地点的风暴潮之间的经验函数关系。该方法主要包含相似型预报法和单站经验统计方法。相似型预报法的思路就是当预报台风的路径、强度、移速等与历史某次台风相似时, 参考历史台风的增水值来做风暴潮预报。单站经验统计方法是指利用单站的长期历史观测资料, 建立该站点的气压、风速等要素与增水之间的关系来预报风暴增水的方法。

随着计算机技术的不断进步, 数值预报方法已经成为世界各国进行风暴潮预报采用的主要方法, 风暴潮的数值计算始于20世纪50年代, 70年代达到昌盛时期。进入21世纪, 风暴潮模式的研究主要集中于近岸浪—风暴潮—潮汐和洪水的多向耦合数值预报研究、风暴潮漫堤漫滩风险预报研究, 以及应用这些模式进行沿海重要区域和城市的风暴潮灾害风险评估和区划工作。在美国, Jelesnianski进行了不考虑和考虑底摩擦的风暴潮数值计算, 并于1972年建立了著名的SPLASH模式^[6]。进入20世纪80年代, 美国在SPLASH模式的基础上又进行了SLOSH模式的研究, 这个模式能预报海上、陆地以及大湖区的台风风暴潮, 在风暴潮防灾减灾中发挥了较大作用, 该模式在全世界广泛使用, 并于20世纪80年代末由国家海洋环境预报中心引入中国。英国的自动化温带风暴潮预报模式“海模式”(Sea Model)于20世纪70年代问世, “海模式”是Bidston海洋研究所在Heaps的二维线性模式的基础上发展起来的。日本气象厅于1998年开始业务化运行台风风暴潮数值预报, 并在风暴增水中耦合了天文潮预报。近几年, 日本气象厅发展了基于多台风路径的风暴潮集合预报系统并投入业务化运行。

我国的风暴潮数值模式研究从20世纪80年代开始得到了相当迅速的发展, 至20世纪末国家海洋局国家海洋环境预报中心先后建立了高分辨率的覆盖中国沿海的业务化风暴潮—天文潮耦合数值预报模式、高分辨率多重嵌套网格的风暴潮漫滩数值预报模式。国家气象中心于2007年与华东师范大学合作开发了黄渤

海、东海风暴潮数值预报系统，可以模拟温带风暴潮和台风风暴潮。该模式采用三角网格，在沿岸风暴潮敏感区域的分辨率可达几百米，模式在正确模拟天文潮的基础上，还考虑了天文潮和风暴潮的非线性相互作用，模式采用了干湿网格判别方法，可以模拟风暴潮漫滩过程。

3.4 海上大风预报技术

海上大风是造成海上灾难的最主要原因之一，据中国渔船安全分析报告指出^[7]，1999—2005年7年间各类事故造成渔船全损704艘次，风灾事故占渔船全损事故的51.85%，可见，风灾是造成渔船发生全损事故的最主要因素。

海上大风是发生在大气边界层下界的常见天气现象。回顾海上大风的预报方法，20世纪50—60年代主要是纯天气学方法，这种方法着重于天气分型和预报指标的作法。到了20世纪70年代，计算机技术虽然有一定程度的发展，但是由于对大气边界层物理过程的认识不足，数值模式无法预报诸如地表风、最高最低温度、水平能见度等地面要素，这种缺陷在一定程度上促进了动力统计（stochastic-dynamic）预报技术的发展，PP（Perfect Prognostic method）法和MOS（Model Output Statistics）方法应运而生。

PP方法是建立在观测的基础上，即利用统计方法或其他方法（比如神经网络方法）建立待预报要素与其他观测要素或再分析数据诊断变量之间的关系，再将模式预报变量带入此关系得到待预报要素的方法。在我国，已有不少研究者利用此方法在沿海大风预报方面做了有益的工作^[8-13]。林良勋等^[9]根据梯度风原理，将三种典型气压分布下关键站点气压梯度作为强风判别因子，用经验和统计方法形成三种气压分型下广东各海面各预报风级的判别因子组合，再将日本数值预报模式的地面气压和风的预报结果带入上述组合，得到未来5d华南分海域的强风预报结果。根据海面强风预报业务评分标准，该方法24h和48h预报时段得到较高的评分，表明其具有较好的预报指导意义。毛绍荣等^[10]通过对1988—1997年10年间冷空气造成的广东沿海强东北季风过程进行统计，挑选出多个与强东北风相关程度较高的因子做最优因子组合，考虑各因子与强风的相关程度（最大概括率）不同，引入调整系数，建立了24条概率预报方程，形成了冬春季强东北季风概率预报方法，经检验，过程预报准确率达到80%以上。周伟隆等^[11]以福建东电站作为指标站，将若干关键站与汕头站的气压差作为主要参考变量，建立预报方程，经检验该方法对近海大风过程预报准确率达80%以上。

MOS方法是统计一段时间内单点待预报要素的观测值与模式预报该点的要素及相关变量、前期观测、或者与该点有关的固有信息（地形、气候值、经纬度）之间的关系，再经过剔除因子过程从而缩小方程的维数，得到简化的预报方程，再将模式预报要素或变量带入预报方程得到待预报要素的方法。MOS方法的思想可由如下式表示：

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_k X_k$$

其中， \hat{Y} 表示估计值， a_0 为常数， a_i 表示独立变量 X_i 的系数。

通过线性多元回归分析求得 a_0, a_1, \dots, a_k ，使得

$$\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 = \text{最小}$$

其中， y_j 表示第 j 次观测， \hat{y}_j 表示第 j 次估计。

通常情况下，回归方程包含许多变量，而这些变量由于彼此之间不相互独立而出现过度拟合的现象，而且变量多意味着计算量较大，所以需要再经过剔除因子过程，剔除因子通常有三种方法：逐步剔除法、逐步引进法、双重检验的逐步回归法^[14]。其中逐步剔除法的缺点是计算量较大，逐步引进法虽然计算量较小，但不一定保证最后的方程是“最优”的。双重检验逐步回归法综合前两者的优点，它的基本思想是：将因子一个个引入，引入因子的条件是该因子的方差贡献是显著的。同时，每引入一个新因子后，要对老因子逐个检验，将方差贡献变为不显著的因子剔除。20世纪70年代，基于Subsynoptic Advection Model（SAM）模式，美国国家气象局的Glahn等^[15]将此方法应用于定点的降水概率、地面风、日最高温度、云量等要素的预报之中，经与美国国家气象局的主观预报结果比较，风向的预报两者相当，而风速的预报要好于主观预报。实践证明，MOS方法能够有效地消除模式的系统误差，时至今日，仍在美国的气象预报中发挥着重要的作用，经美国国家气象局统计，采用MOS方法后获得的结果与预报员主观预报结果相当^[16]。沈阳中心气象台应用卡尔曼滤波方法，即利用前一时刻预报误差的反馈信息，及时修正预报方程，以提高下一时刻的预报精度，建立了海上大风极值预报模型。2008年青岛奥帆赛期间，采用MOS方法得到的风的产品较释用前的数值预报相比，风速预报准确率平均提高了32%^[17]。

多模式集成预报也是MOS方法的一种，它并不局限于一种模式，优点是可以发挥多种成员模式的优点，从而提高预报要素的准确率。杨育强等^[17]开发的多模式集成预报系统在青岛奥帆赛期间为预报员精细化预报提供了重要的参考，系统融合了6种模式产品

资料，权重系数根据检验的结果动态分配，经检验，风速的均方根误差为1.4m/s，风向的均方根误差为45°。国家气象中心开发的多模式集成海上大风预报系统，综合了欧洲中心细网格10m风产品、T639 10m风产品、T639 1000hPa风产品，根据成山头站测风数据分大风（6级及以上）和小风分别建立预报方程，采用最小二乘法分配给各模式权重系数，经检验，多模式集成产品在大风风速预报时的平均误差和均方根误差均优于成员模式的预报效果。

随着数值预报技术的发展和大气边界层物理过程认识的不断深化，目前的主流预报模式，已经达到相当高的预报水平，像T639、ECMWF数值模式的可预报天数已经达到10d，数值模式对形势场的预报准确度在逐步提高，而且数值模式输出产品包含了丰富的信息量，可以输出地面风、地面温度以及能见度等一系列产品，而且预报准确率也较高。据国家气象中心统计，ECMWF地面10m风产品风速24h预报误差平均为2.2m/s，风向预报误差平均为45.7°；而T639 10m风产品的风速预报误差平均为2.4m/s，风向预报误差平均为48.8°。因此，用数值模式产品预报近海海面风场成为一种趋势，它将逐渐取代建立在以天气动力学理论和预报员经验基础上的半理论半经验的预报方法。

然而，全球模式产品和区域模式产品还远远不能满足海洋气象专业化、精细化发展的需求。据国家气象中心统计，不论是ECMWF产品还是T639产品，随着实况风力的增加，模式都有风力预报偏小的情况，且风力越大偏差越大。而且，对于海上中小尺度天气系统引发的短时大风及强对流天气，目前的主流模式均无能为力。因此，加强海上天气系统的监测，了解各家模式性能，发展专业海洋气象模式，同时继续开展数值预报产品解释应用开发是专业化、精细化气象预报未来的发展趋势。目前美国国家气象局已经实现了覆盖美国大陆及近岸海域的精度为5km的格点MOS预报指导产品，其中的风力、风向以及阵风的指导产品时间间隔为3h，预报时效可达192h。中国气象局国家气象中心参考高分辨率的数值模式资料，辅以预报员的主观经验，开发了覆盖第11海事区的海上大风格点预报产品，空间分辨率达到0.5°，时间分辨率为12h，预报时效为72h。经过与NCEP再分析资料对比后发现（图3），在日本以南洋面、台湾周边海域、华南中东部沿海、南海西南部海域存在较高的空报率，而这几个区域往往是冬季冷空气大风较强的区域。分析原因有两种可能：一种是由于海上实况观测

的缺乏不得已采用NCEP再分析资料，但再分析资料在这些区域分析的风力原本就较小；另一种可能是预报员主观判断由于地形的原因导致这些区域的风力往往偏大。问题的关键是在这些海区缺乏长时效的实测数据，相比陆地上密集的观测仪器来说，海洋观测资料少得可怜。进入21世纪以来，海洋观测得到空前的发展，除原有的志愿船观测外，卫星、雷达等遥感观测提供了大量准实时的海洋观测信息。这些资料极大地促进了海洋数值模式、海洋气象业务的发展。目前，美国的海洋预报中心利用卫星反演海面风场资料反推海平面气压场形成了较为准确的海表面实况天气图。另外，雷达资料、沿海浮标、石油平台观测也弥补了海洋观测的不足。未来几年，海洋气象技术正在着手发展将多源监测资料（常规和非常规）进行融合，研发以卫星监测反演风场，配合海岛、浮标和船舶观测资料合成的中国近海的海平面实况风场，来解决目前海洋监测资料匮乏的问题。这样，一方面可以通过同化分析技术形成质量较高的初始场来提高模式的预报效果，另一方面，可以通过客观分析的方法得到时空分辨率较高的实况场，开展数值预报解释应用方法的研究。美国国家气象局在这方面的做法值得借鉴：（1）在有观测、且观测质量较好的海域继续采用单点的动力统计预报方法，提高模式对单点的风的预报准确率，为预报员制作附近海域的主观预报提供参考；（2）针对观测资料较为密集的海域，开展格点MOS预报（Gridded MOS），即在已有MOS单点预报的基础上，通过客观分析的方法获得均匀格点上的预报值。

随着计算技术和数值模式的发展，随着人类对大气边界层认识的深化，相信数值模式对于海上大风的预报准确率会越来越高。但是，面对复杂的海洋环境，针对不同尺度的天气系统造成的海上大风，不

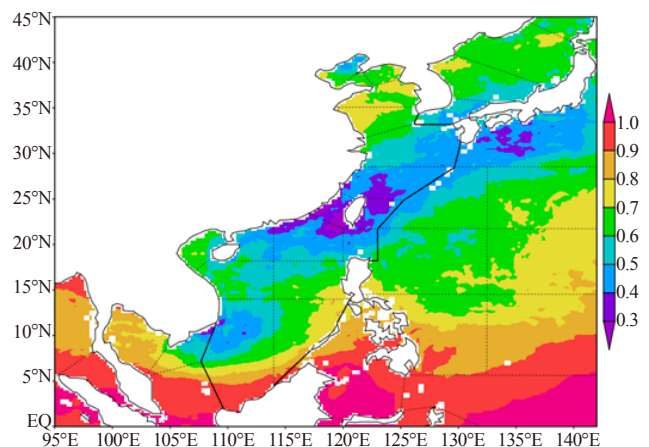


图3 国家气象中心对大风格点预报产品的TS评分

同模式会有不同的表现，这些都需要预报员在全面翔实地掌握天气实况后有选择地参考数值预报结果，所以，在未来，预报员的经验依旧不可或缺。打个比方来说，预报员好比驾驶员，模式好比汽车，如果遇到一个蹩脚的驾驶员，即使给他再好的汽车也不会充分发挥其最好的性能。

4 海洋气象导航的发展和水平

气象的发展源于军事服务，海洋气象预报的发展更离不开海上军事保障的需求。早期的海上军事舰船是以风帆作为航行动力的，为了充分利用顺风、顺流，同时为了减少海上风暴给船队安全带来的风险，自19世纪以来，以美国为代表的国家开展了利用风浪流等海洋环境条件，并结合船舶航行原理，为海上军事行动进行气象保障服务的技术——海洋气象导航技术。海洋气象导航就是充分利用短、中期天气预报和海洋气候特征，并结合船舶航行特性，为跨洋航行船舶设计一条既安全、又经济的跨洋航线，并在航行过程中不断地跟踪修正航线，从而确保航行安全、经济的一种航运服务技术。

国家气象中心于1985年开始研究海洋气象导航技术，1989年正式开展海洋气象导航实时业务。国家气象中心导航中心经过近20多年的业务实践，研究开发了海洋气象导航业务平台，实现了航线计算、船舶跟踪导航计算和航行评估分析计算自动化，以及航线与气象预报分析的叠加显示。建立了包括风向、风速、浪高、涌向、涌高、航向、航速、实际排水量八大主要影响船舶航行速度的船舶失速计算统计学方法，同时也开展了基于二维切片理论和三维时域理论预报波阻和作用在船体上风阻的船舶失速计算动力学方法研究。完成了三大洋气候及洋流数据库、船舶资料信息库的建设，形成了以全球数值预报为基础的，海洋环境数值预报为辅的，结合船舶航行技术的一套完整的海洋气象导航业务系统。海洋气象导航业务系统主要由通信系统、全球气候及海洋环境信息数据库、大气及海洋数值预报模式产品库、船舶资料信息库以及导航计算程序包所组成。

在近20多年的导航业务实践中，国家气象中心海洋气象导航中心积累了大量船舶在大风浪条件下的航行指导经验，为几千艘次的航行进行了安全、经济的气象导航服务，使船舶有效地偏离了恶劣天气影响，减少了船货损失，受到船长的普遍好评。但是，发展中的中国气象导航事业与世界发达国家相比还有一定的差距。这些差距不仅反映在技术上，同时也反映在服务意识上。最关键的技术问题主要反映在业务平台

的建设以及因风、浪、流对船舶航行速度影响的失速计算方法。而服务意识问题主要是不能以客户需求为导向，及时改进技术、完善业务流程，加强与客户的沟通与交流，不断地推出新产品以满足用户的需求。

5 目前我国海洋气象业务存在的不足及发展前景

5.1 存在的不足

我国海洋气象事业已经取得了一些进展，但随着经济社会发展对海洋气象业务需求的提高以及相关领域技术的迅速发展，海洋气象业务现有的内容和产品还远不能满足国民经济建设、社会发展、国家安全和人民生活水平提高的需求，海洋气象业务能力与社会及公众的需求矛盾仍很突出，主要表现在：

5.1.1 海洋气象监测业务和技术薄弱

我国海洋监测存在部门分割，布局不合理，应用技术落后的问题；海上资料缺乏必要的质量控制，浮标资料稀少且断断续续，持续性没法保障，按照要求，我国沿海通过GTS上传的仅有18个浮标站资料，部分省级自建以及其他涉海部门建立的浮标站还没有纳入业务管理与资料共享。利用卫星、雷达等的定量分析产品与业务应用需求尚有较大差距，多源资料的融合技术还不成熟。风云系列卫星监测产品大多停留在定性应用阶段。国外卫星及卫星定量应用产品在数值预报同化和业务监测中应用不够充分。

5.1.2 海洋气象技术支持体系不完善

在海洋气象数值模式支持方面，目前，业务化的全球和区域海气耦合模式还没有建立，近海海雾、风暴潮模式还不能满足业务应用的要求，缺乏能覆盖西北太平洋区域的区域集合预报系统。基于模式后处理的海洋灾害性天气预报的客观技术缺乏足够的前期积累，集合预报产品的大量信息还没有被充分应用，概率预报产品的概念还没有引入海洋气象，尚未建立海洋灾害性天气预报的检验方法和规范。目前国家气象中心业务运行的海洋业务平台集约化水平有待提高，海洋要素的分析显示以及海洋精细化产品制作的功能还不完善，基于海图系统的海洋专业服务系统还缺乏规划设计，全面、统一和规范的海洋数据库支持系统和海洋信息共享系统还亟待完善。

5.1.3 海洋预报产品不能满足精细化服务的需求

目前的海洋气象业务产品还不能满足精细化的服务需求，也不能满足来自于近海旅游、水产养殖、石油平台及远洋导航等用户对精细化气象服务的需求。这些需求主要包括：海岛、港口、渔区、海滨浴场、航线上的气象及海洋要素监测和预报产品。在这样精

细化的预报服务需求下，省级沿海气象台站还是以传统的方式提供专业气象服务，普遍存在预报和有效预警时效短、产品单一、通用性差、精细化程度低。大风、海雾、海上强对流等典型海上灾害性天气的预报准确率还有待进一步提高。

5.2 未来的发展

海洋气象预报的发展将以科技水平和服务能力为基础，遵循“公共气象、安全气象、资源气象”的发展理念，以服务需求为导向，依靠科技创新，争取在未来几年内建立和完善海洋监测业务，制作中国海区25km分辨率的海上风监测分析产品，建立基于格点化的海洋气象精细化预报业务，有效延长预报时效，逐步提高海洋预警和服务能力。

5.2.1 建立和完善海洋监测业务

充分应用卫星、雷达、岸基站和海岛站资料等综合信息，初步建立我国责任区内的海洋气象监测业务，逐步提高针对海上灾害性天气的监测能力。建立和完善卫星资料的定量反演技术和业务应用，改进风云系列卫星的海雾、海温、海冰定量反演技术；加强国外卫星资料的搜集、共享和应用，研发全球卫星拼图和不同时间窗的极轨卫星的洋面风融合技术，极轨卫星定量产品与数值预报产品的融合分析技术。开展对沿海海洋代表站和浮标站的实时业务检验，发展基于多种观测融合的海上大风分析技术，综合应用常规/自动站地面观测、船舶、卫星以及雷达等多源观测资料，发展资料融合技术，形成洋面风分析场。通过沿岸、海区风的对比分析，针对不同海区、不同天气形势等，建立沿岸与海面风场之间的关系，构建海区风场实况。

5.2.2 逐步建立海洋气象要素格点化指导产品业务体系，延长预报时效，拓展产品种类

发展建立西北太平洋海洋数值预报系统，发展基于统一区域数值模式系统下的海雾、海浪和风暴潮数值预报系统。开展海上大风、海雾、海上天气现象精细化预报技术研发，建立基于数值预报产品的海浪、能见度格点化预报技术，海洋气象要素客观预报方法。建立和发展海洋气象要素格点化产品检验技术，研发海岛、港口、渔区要素客观预报技术，建立基于

集合预报的海洋天气中期概率预报业务，延长预报时效。建设具有海洋气象专业化特点的综合分析预报业务平台，加强基于网络的海洋频道的建设，加强海洋产品的服务渠道，逐步完善海洋信息共享业务，推进上下业务联动的海洋气象业务。

5.2.3 加强对外合作，促进资源共享，加强海洋气象服务

与各涉海部门合作，努力实现信息共享，包括卫星资料、浮标资料等；通过国际双边合作，获得OSCAT等卫星洋面风资料，合理增加和改善志愿船舶观测资料质量，加强海洋气象观测资料的质量控制。重视海洋服务用户的交流和反馈，按照海洋用户需求来设立和深化服务产品的内涵，提高服务效益。海洋用户以专业用户为主，合理分清公共服务和专业服务的界限，做好公共服务。

参考文献

- [1] 崔玉玺, 陆家琏, 方维模, 等译. 海洋气象服务手册与指南. 北京: 气象出版社, 1990.
- [2] 中国气象局. 中国气象现代化60年. 北京: 气象出版社, 2009.
- [3] 李艳兵, 黄思训, 翟景秋. 卫星反演风场进展概述. 气象科学, 2009, 29(2): 277-284.
- [4] 黄彬, 陈涛, 陈炯, 等. 黄渤海海雾数值预报系统及检验方法研究. 气象科技, 2009, 37(3): 271-275.
- [5] 王毅. SWAN 模式及数据同化技术在海浪预报中的试验研究和应用. 中国海洋大学博士学位论文, 2011.
- [6] Jelesnianski C P. SPLASH I Landfall Storms, NOAA Technical Memorandum NWS TDL-46, 1972.
- [7] 孙颖士, 李冬霄. 中国渔船安全分析报告. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [8] 张增海, 曹越男, 赵伟. 渤海湾海域风况特征分析与海-陆风速对比分析. 海洋预报, 2011, 28(6): 33-39.
- [9] 林良勋, 程正泉, 张兵, 等. 完全预报 (PP) 方法在广东冬半年海面强风业务预报中的应用. 应用气象学报, 2004, 15(4): 486-493.
- [10] 毛绍荣, 林镇国, 梁健, 等. 广东沿海强东北季风的概率预报方法. 热带气象学报, 2003, 19(1): 94-100.
- [11] 周伟隆, 陈往溪, 肖巍. 粤东海面冷空气强风的统计分析. 广东气象, 2005, 4: 20-22.
- [12] 颜梅, 范宝东, 满柯, 等. 黄渤海大风的客观相似预报. 气象科技, 2004, 32(6): 467-470.
- [13] 李敏, 王辉, 金敬华. 中国近海海面风场预报方法综述. 海洋预报, 2009, 26(3): 114-120.
- [14] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 (第三版). 北京: 气象出版社, 2004.
- [15] Glahn H R, Lowry D A. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. Journal of Applied Meteorology, 1972, 11: 1203-1211.
- [16] Ruth D P, Glahn B, Dagostaro V. The performance of MOS in the Digital Age. Weather and Forecasting, 2009, 24: 504-519.
- [17] 杨育强, 高荣珍, 马艳, 等. 海面风精细化集成预报系统在青岛奥帆赛期间的应用. 气象, 2008, 34: 241-245.