

上海市气象局海洋气象数值预报技术研究进展

李永平¹ 郑运霞¹ 杨棋² 于润玲¹ 段自强¹ 朱智慧²

(1 中国气象局上海台风研究所, 温州台风预报技术应用联合实验室, 上海 200030;

2 上海海洋气象预报台, 上海 200030)

摘要: 为满足上海海洋区域中心海洋气象业务的需求, 近十多年来中国气象局上海台风研究所和上海海洋气象预报台承担完成了多项国家、上海市和气象部门的海洋气象数值预报技术研究方面的科研课题, 在海气相互作用物理过程观测研究方面揭示了台风和海雾边界层大气湍流能量输送一些新的事实, 通过合理地表达海洋飞沫对于动量和热量输送作用和改进海面拖曳系数方案等手段, 有效提高了海气耦合模式对于台风强度的模拟和预报能力。研发了全球和西北太平洋风浪数值预报系统, 特别是发展了包括波流相互作用等复杂物理过程的近岸高分辨率海浪和风暴潮数值预报系统, 还基于观测和数值模式波浪要素研发了浅滩效应指数、波浪陡度指数、涌浪占比指数和谐指指数等船舶风险指数产品, 使海洋气象预报服务更有针对性, 并取得了很好的应用效果。

关键词: 海气相互作用, 耦合模式, 高分辨率, 风浪, 风暴潮, 船舶风险指数

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.009

Progress of the Numerical Prediction of Marine Meteorology in SMB

Li Yongping¹, Zheng Yunxia¹, Yang Qi², Yu Runling¹, Duan Ziqiang¹, Zhu Zhihui²

(1 Shanghai Typhoon Institute of CMA, Wenzhou Typhoon Laboratory of STI, Shanghai 200030 2 Shanghai Marine and Meteorological Center, Shanghai 200030)

Abstract: To meet the requirements of marine meteorological services in Shanghai Regional Marine Meteorological Center of CMA, a few of scientific research projects from national, Shanghai municipal government and CMA were undertaken by Shanghai Typhoon Institute and Shanghai Marine and Meteorological Center in recent 10 years. The observational research on physical process of air-sea interaction reveals some new facts of turbulence energy transport in the atmospheric boundary layer in typhoon and sea fog. The simulation and prediction of typhoon intensity in the coupled ocean-atmosphere model is improved by reasonable expression of the effect of sea spray on momentum, heat transfer and drag coefficient on the sea surface. The operational wave model is established for global and northwest Pacific respectively. In particular, is developed wave and storm surge numerical prediction systems is developed with high resolution over coastal sea including complex physical processes, such as wave flow interaction. Based on the numerical model output, some useful ship risk indexes, such as the wave steepness index, swell ratio index and synchronism index, and so on, are set up and put into use by Shanghai Marine and Meteorological Center. So the marine weather forecasting services are more targeted in SMB recently. The numerical products are widely used in daily operational work and professional services.

Keywords: air-sea interaction, coupled model, refined, wave, storm surge, ship risk index

0 引言

上海区域海洋气象预报中心是我国三大海洋气象预报中心之一, 责任海区覆盖黄海和东海海域, 经世界气象组织授权, 承担着包括北至渤海湾, 南至台湾海峡, 东至琉球群岛在内的公海范围海洋气象预报信息发布任务, 以及预报海区内海上重大活动气象保障

任务。同时, 作为上海市省级海洋气象台, 负责对上海本地各级海洋气象预报的业务和技术指导工作; 制作发布上海沿岸海域预报区内各海区海洋气象监测、预报、预警产品; 近年来随着海洋经济的高速发展, 对海洋气象工作的全面融入和服务能力提出了新的更高的要求, 对此基于传统的天气学和统计学的预报方法较难适应海洋气象业务发展现状。

当前的海洋气象预报准确率和众多的预报要素及服务内容需求越来越依赖于数值模式技术的发展, 近十多年来, 上海市气象局以上海台风研究所(以下简称台风所)海洋气象研究室为主体, 联合上海中

收稿日期: 2017年6月10日; 修回日期: 2017年10月28日
第一作者: 李永平(1961—), Email: liyp@typhoon.org.cn
资助信息: “全球变化与海气相互作用”专项国际合作项目(GASI-IPOVAI-04); 上海市气象局专项(YJ201503)

心气象台和上海海洋气象预报台业务人员，承担完成了多项国家、上海市和气象部门的海洋气象数值预报技术研究方面的科研项目，这些项目主要涉及海气相互作用的观测分析及关键物理过程研究、台风海气耦合模式技术研究、海洋气象数值预报系统和行业延伸服务产品的开发等方面工作，取得一批高水平的研究成果，解决了海洋气象数值预报技术一些关键技术难题，有效提高了台风强度、海浪、风暴潮和海雾等主要海洋气象要素的预报能力，以下对四个相关方面的工作分别予以介绍。

1 海气相互作用物理过程的观测研究

数值模式中准确的海气相互作用过程表达对于海洋气象要素预报至关重要。海洋与大气的相互作用的直接体现是动量和热量的交换，而这种交换主要是通过时空尺度很小的湍流过程实现的，因此通常数值模式中湍流过程的作用都基于统计方法的由平均状态量的参数化方法表征，它具有较大的经验性，且普适性存在争议。台风所的科研人员依据布设在我国东南沿海的大量超声风温仪的湍流观测资料开展了相关研究，由于资料的时间分辨率高达0.05 s，可以捕获多尺度湍流的三维扰动信息，并揭示了一些台风边界层大气湍流能量输送特征的新事实。首先，发现在台风不同部位，不同尺度湍流之间能量传输方向差别较大，

在台风内核区域以小尺度向大尺度反向串级输送为主，而在台风外围区域则以大尺度向小尺度正向湍流串级输送为主，这颠覆了认为大气湍流能量主要以正向串级输送为传统的观点^[1]；第二，发现台风边界层内的湍流平均时空尺度、动量通量随高度变化廓线等因不同的台风而有差异（图1）^[2]；第三，揭示台风阵风扰动显现出明显的相干结构，即沿顺风方向阵风风速峰期有下沉运动，谷期有上升运动，且各向异性特征明显，阵风扰动表现出重力内波的一些特性^[3]；第四，发现台风近地面边界层大气中湍流动量垂直通量虽然主要沿平均风垂直切变梯度方向输送，但普遍存在沿逆梯度方向输送现象，且高度越高，逆梯度输送现象越明显^[4]；第五，发展了一种去除湍流资料中船体运动和晃动影响的方法，提高了船载走航观测方式所获湍流资料的应用价值^[5]；第六，揭示出无论是有限风区还是无限风海区，海面拖曳系数（ C_D ）均存在极大值，并随风速的进一步增大而减小，极大值对应的风速要略小于已有多数研究结果^[6]；第七，揭示了边界层湍流过程对海雾生消的作用，发现海上大雾发生前夕，湍流的动能、动量通量和感热通量有迅速增强的过程，湍流动量通量和感热通量的垂直分布起到减小平均风速和降温的作用。大雾消散过程中，湍流感热通量有利于雾顶附近逆温层结的消失^[7]。

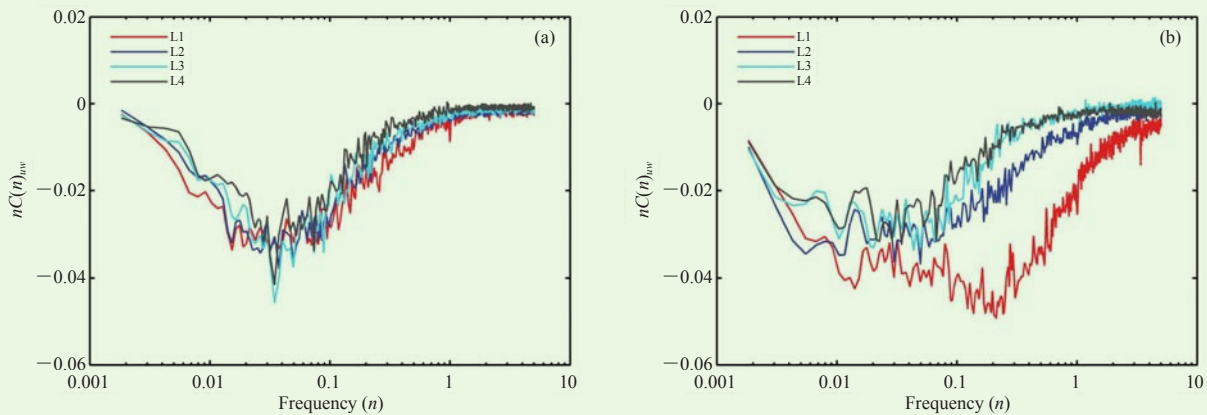


图1 2010年台风“凡亚比”（a）与“鲑鱼”（b）在登陆过程中边界层内湍流动量通量协谱

Fig. 1 Cospectra of momentum flux along-wind in the boundary layer of typhoon Fanapi (a) and typhoon Megi (b) in 2010

开展海洋与台风相互作用研究的一大难题是缺少台风过程中的海上观测资料。在台风极端天气情况下利用常规手段进行观测非常困难。为了对目标台风进行从大气到海洋的更为全面的综合立体观测，台风所参与的国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“上层海洋对台风的响应和调制机理研究”在南海北部台风活动最频繁的海域布设了由5个锚定浮标和4个

潜标构成的海洋观测列阵（图2），在2014年获得了台风威马逊和海鸥比较详细的实时海洋和大气观测资料。这种专门针对台风过程的海洋观测阵在国内尚属首次，在国际上也很罕见，为剖析台风过程中的海气相互作用过程和机制提供了前所未有的第一手资料。

2 台风海气耦合模式研究

目前对控制台风移动的大气大尺度引导气流的

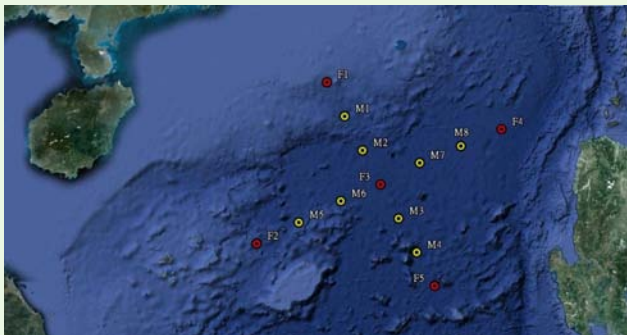


图2 台风所参与的973计划项目在南海北部布设的浮标观测阵列

Fig. 2 The buoy observation array in the north of South China Sea by the national 973 project which the Shanghai Typhoon Institute (STI) worked on

预报能力大大提高，使对台风的路径预报平均误差从10年前的110 km左右提高到目前的70 km左右，尽管如此，对台风强度变化的预报能力却停滞不前，是国际气象界公认的难题。海洋是台风发生发展的能量源泉，台风强度一方面会受到海洋动力和热力过程等复杂海洋过程的影响，同时海洋状态也因台风而变化，因此海洋与台风是两个相互作用的主体，这种相互作用过程极为复杂。例如，台风作用下海洋次表层冷水上翻以降低海面温度（sea surface temperature, SST），使台风强度比固定海面温度情况下弱，但海面温度降低的幅度又与海洋温度和环流结构有关^[8-9]；高风速条件下，海面波浪会增加海面粗糙度，有利于台风减弱，而海面产生的大量飞沫则会增加海洋向大气的水汽输送量，降低海面粗糙度，有利于台风增强。但现有台风预报业务模式通常假设海洋的温度和粗糙度等物理属性不随台风过程变化，这显然不利于做出准确的台风强度预测。为此，在973计划项目的支持下，台风研究所开展了台风海气耦合模式预报关键技术研究，以提高对台风强度的预报能力。

首先建立了一个由海洋环流模式、海浪模式与大气模式构成的台风海气耦合模式系统。该系统对反映海气相互作用的耦合方案进行了改进，实现了三个模式之间更加完整和合理的能量同步交换，能够更加真实地描述复杂的台风海气相互作用过程^[10-11]。例如，采用分粒径段组合方式对海洋飞沫生成函数进行改进^[12]，在此基础上发展了一个考虑海洋飞沫作用的新拖曳系数 C_D 方案，由此改善海气界面海气动量和热量交换表达方式。采用新的方案进一步提高了对上层海洋的模式模拟准确性，数值模拟试验结果发现，低风速情况下，考虑海洋飞沫因素后的 C_D 与传统计算方案数值相近；在高风速情况下，考虑海洋飞沫因素

后的 C_D 方案与模式传统计算方案不同，表现出随风速增长趋缓，直至随风速略有下降现象。与传统拖曳系数方案相比，采用新的拖曳系数方案后，模拟的台风条件下上层海洋的温度降温幅度、混合层深度加深幅度、温跃层强度减弱程度都略有减弱，这些模拟特征与观测事实更加接近^[13]。另外，目前国内外台风海气耦合模式中的海洋环流模式初始场的建立主要以海洋气候场为基础，通过大气的低频和高频强迫生成，而极少使用实时的海洋观测资料同化方法，针对这一问题台风所应用集合最优插值方法同化高分辨率的卫星遥感海面温度资料，通过与南海强化观测阵列海洋资料的比较，证实该系统有效地改进了海洋环流模式初始场。另外还改进了台风海气耦合模式的大气初始场，主要发展了集合混合同化技术，实现对卫星、探空（包括火箭探空）和海洋浮标等多源资料的集合同化，并据此开发了台风集合预报技术和产品^[14]。大量台风个例数值模拟试验表明，改进后的台风海-气-浪耦合模式有效提高了对台风强度和结构变化的模拟和预报准确性（图3）。

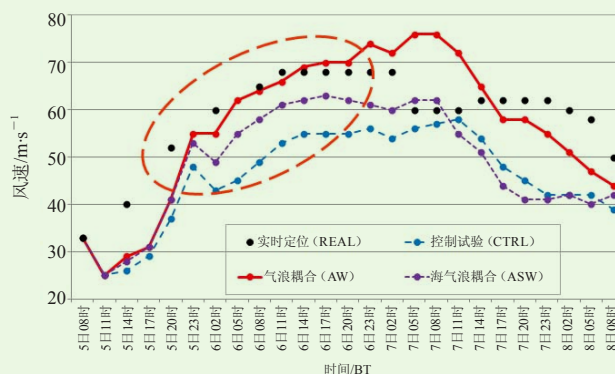


图3 海-气-浪台风耦合模式对2016年7月5-8日台风“尼伯特”的强度预报改进

Fig. 3 The improvement of intensity forecast of typhoon Nepartak by the coupled air-sea-wave model in 2016

3 海洋气象数值预报系统建设

为满足上海市气象局全球导航业务和责任海区的海洋气象业务的需求，改变传统的经验性和统计的海洋气象业务预报方法，2002年台风所在全国气象部门率先发展了西北太平洋风浪数值预报业务系统（STI-NWPWAVE），2005年中国气象局预测减灾司下发邮件，向全国沿海主要气象部门推广应用其产品和技术，取得良好的应用效果，该系统稳定运行至今，较好地满足上海区域海洋气象业务应用的需求^[13]。随后又开发了全球海域的风浪数值预报业务系统（STI-GWAVE）^[15]。这些系统基于WAVEWATCH III波浪模型建立，全球海浪模式分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，西北

太平洋海域模式分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ，预报时效为168 h；模式每天起报2次，分别为北京时间08和20时；模式输出产品为有效波高、波周期和浪向、涌浪波高等；分海域显示，以方便应用（图4）。预报业务系统实现从资料采集、模式运行到预报结果输出的全自动化，模式预报系统运行稳定，采用并行计算方式保证了提供预报产品准点及时。

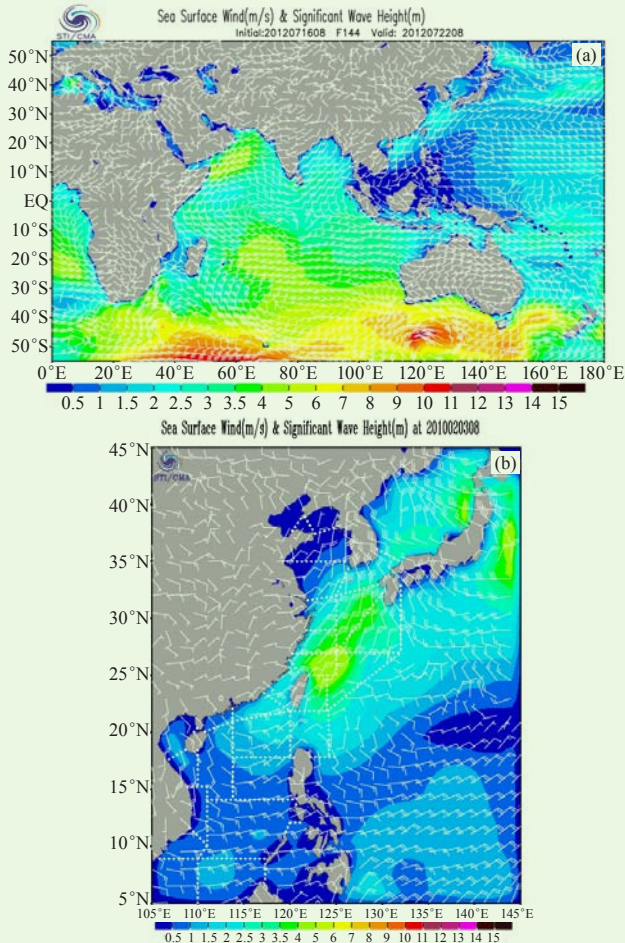


图4 台风所全球及西北太平洋海域的风浪数值预报业务系统产品

Fig. 4 The STI's operational forecasting products of wind and wave for the global and northwest Pacific

近年来又建立了一个精细化的海浪数值预报业务系统（STI-FWAVE），它以SWAN波浪模型为基础，引入包括16个主要天文分潮的潮汐过程，可反映潮汐对波浪的作用。采用贴合岸线的无结构网格，实现了对重点海域空间分辨率的局部加密。模式范围覆盖渤海、黄海、东海海域，在长三角沿海海域具有很高的空间分辨率，尤其在上海洋山港等重点海域最高分辨率达20 m（图5）。模式输出产品分10个区域显示；预报时效为72 h；模式每天起报2次，分别为北京时间08和20时。

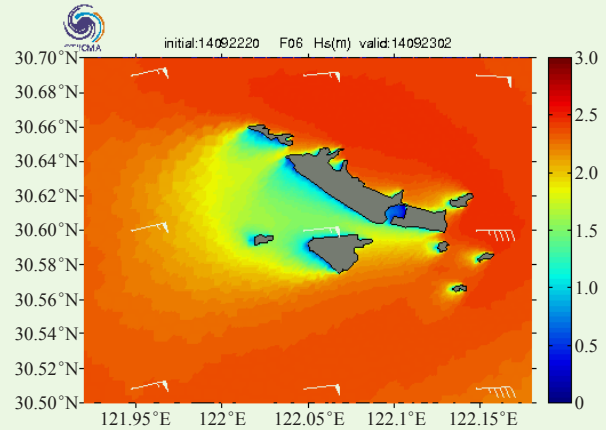


图5 台风所精细化海浪数值预报业务系统产品示例（上海洋山港海区的浪浪预报）

Fig. 5 A wind-wave forecast product developed by STI with fine resolution in the sea around Yangshan International Port

采用上海市气象局在上海沿海布设的东海浮标、航道浮标、洋山浮标、口外船标、南槽船标、黄泽洋船标和海礁浮标等七个波浪浮标站观测资料，对风浪模式预报准确率进行统计，表明该预报系统具有较高的准确率。图6给出精细化海浪数值预报业务系统对2012年11号台风海葵有效波高的预报结果检验，可见预报的波浪高度最大值、最小值和位相变化等都与观测十分接近。

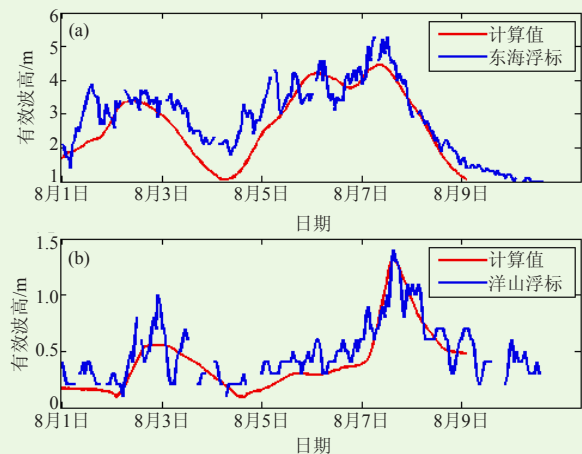


图6 台风所精细化海浪数值预报业务系统对2012年11号台风海葵有效波高的预报（红线）和观测（蓝线）

(a) 东海浮标；(b) 洋山浮标

Fig. 6 The significant wave height forecast (red line) for typhoon Haikui in 2012 by the numerical wave model of STI, comparing with observations at Buoys in Yangshan and East Sea (blue lines)

台风所还建立了一个精细化风暴潮数值预报业务系统（STI-FVCOM），它基于FVCOM三维海洋环流模型，采用贴合岸线的无结构网格系统，模式范围包

括渤海、黄海、东海和南海海域，并在长三角沿海、珠江三角洲沿海、瓯江口、闽江口等我国重要河口具有较高的空间分辨率，最高分辨率达100 m左右。模式引入了天文潮过程，包括16个主要天文分潮，考虑了风暴潮与天文潮的相互作用，还考虑了我国长江、珠江、瓯江、闽江等主要河流的季节性入海径流量。

预报时效为72 h，模式每天起报2次，分别为北京时间08和20时。模式预报系统采用并行计算方式，保证了业务应用的时效性。模式输出产品包括我国沿海风暴潮增水的空间分布、潮流的空间分布、我国沿岸85个主要验潮站位上风暴潮增水和全潮位要素的时间变化序列，并指示各站的警戒水位等。

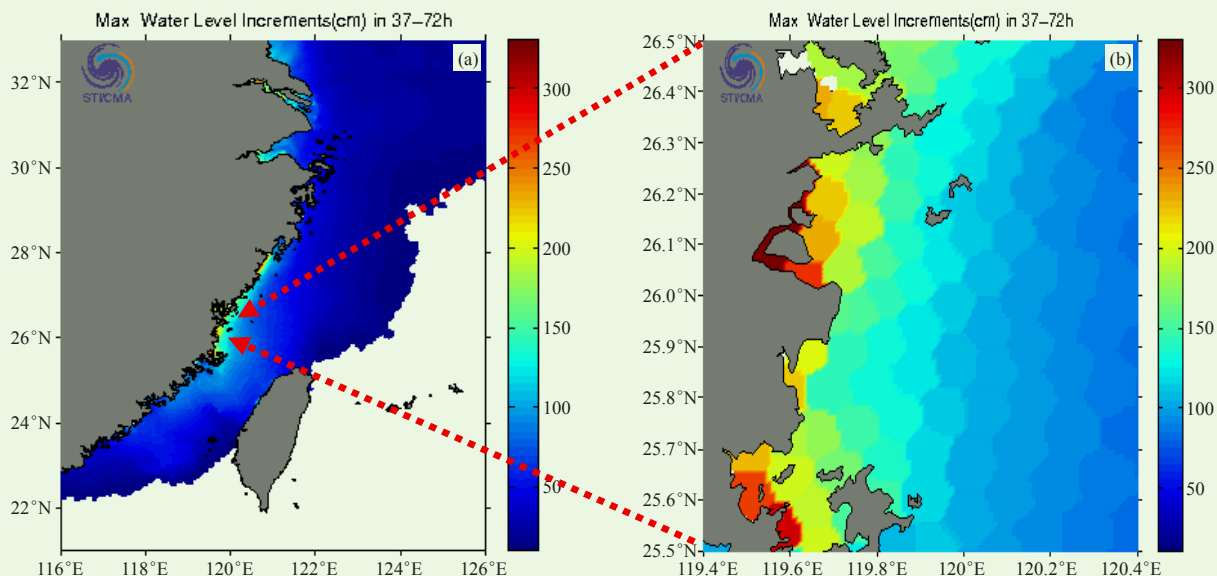


图7 台风所精细化风暴潮数值预报模式的最大增水预报 (a) 和福建闽江口附近的最大增水 (b)

Fig. 7 The forecast of maximum water level increment by the storm surge model with fine resolution in STI. The right figure indicates the water level increment forecast in the estuary of the Minjiang River in Fujian Province

应用华东沿岸部分验潮站数据对风暴潮模式的预报准确率进行分析，表明其具有较高的预报准确性^[16]。图8给出风暴潮模式预报的0709号超强台风“圣帕”期间福建省平潭验潮站位上的增水过程曲线，以及与实况的比较。由图可见，模式预报的增水趋势与实况基本一致，最大增水峰值及其出现时间与实况也比较接近。增水预报平均误差为15 cm。

台风所在海雾数值预报和客观预报方法研究领域

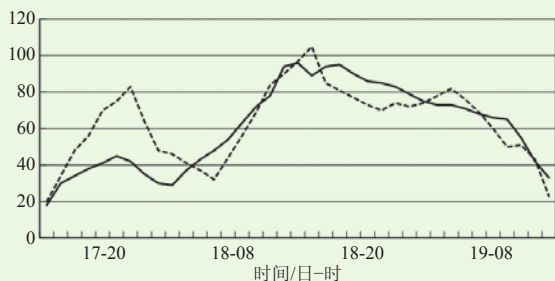


图8 0709 台风期间福建平潭验潮站增水过程预报 (单位: cm; 实线: 预报, 虚线: 观测)

Fig. 8 The forecast of water level increment at Pingtan Gauge Station in Fujian Province during 0709 typhoon period (solid line) comparing to its observation (dotted line)

也取得进展，由于对海雾数值预报结果的直接应用还不甚理想，目前其在业务中多应用基于观测、结合数值预报结果的统计客观预报方法，该方法首先利用我国东部沿海和岛屿气象站的地面观测资料，研究分析了各海域成雾的海洋和气象条件，有些条件具有地域独特性，例如发现冷空气条件下也有一定比例的海雾形成，东海海域的冷空气雾其近海面边界层大气普遍有逆温或近于等温情况，而黄海北部海域出现逆温或等温的情况比较少^[17]。在此基础上，建立了更具物理意义的海雾分型和等级预报方程^[18]，并应用大气模式预报输出产品，如海洋大气边界层中的气温、风速、风向、相对湿度、气压、海表温度等，进行雾的等级实时预报^[19]。还以气象卫星云图为基础，应用云雾光谱特征和结构特征进行雾区的动态检测和提取；利用地面自动气象站资料，采用诊断分析方法建立雾区变化与气象要素的关系，利用经修正的中尺度数值天气预报模式输出的气象要素产品，对卫星遥感雾区进行0~2 h的外延预报^[20]。这些预报方法在实际业务中都具有一定的效果。

4 海洋气象数值预报产品的应用

台风所开发的海洋气象数值模式产品（图9）为上海中心气象台每天制作黄海、东海责任海区风浪预报提供网格数据，也为上海中心气象台的东海多点石油平台作业气象保障提供波浪周期、涌浪、波向等更多有针对性的要素，与以往预报业务相比，它大大提高了预报员工作效率和对海况的预报准确性。温州市气象局则应用这些产品为沿海岛屿之间的海上客运和旅游观光船舶气象安全保障提供气象服务。数值模式预报产品在近几年发送给全国气象部门的《台风专报》、《台风暨华东区域重要天气专题报告》，以及在汛期全国气象部门台风远程会商中被经常性引用。



图9 台风所风浪数值预报产品在上海中心气象台责任海区海况预报业务平台中的应用

Fig. 9 Application of the numerical forecast products from STI to the marine forecast platform in Shanghai Weather Observatory

另外，上海海洋气象台利用 BP 神经网络方法，结合上海沿海浮标站的观测资料，对台风所海浪模式的有效波高预报结果进行训练，并建立了预报模型，结果表明：针对近岸地形复杂的洋山浮标，BP 神经网络预报模型对有效波高预报结果具有明显的改进^[21]。

上海海洋气象台还基于观测和数值模式的波浪要素，研究了长江口潮流及潮位变化对波浪的影响^[18]，研发了船舶风险指数产品，包括浅滩效应指数、波浪陡度指数、涌浪占比指数与谐摇指数等。其中浅滩效应指长江口等海域的浅滩地形常造成波高突然增大现象，而引发沉船事故。大的波浪陡度也可能造成船舶大幅倾斜，导致沉船。研究发现，逆流低潮位且波周期较大时浅滩效应显著，通常浅滩效应时的波周期大

于8 s；相对于冷空气而言，偏南大风及台风的风区大且风时长，因而波周期较大，更容易出现浅滩效应。在浅滩效应指数的设计中，把复杂的波浪计算合理简化，使得在灾害性波浪的监测中能够考虑到浅海地区地形与潮汐的影响，上海海洋气象台在理论研究的基础上结合实时观测资料，研发了浅滩效应的监测技术——利用海上波浪、海流及潮位观测数据实时计算波高与初始波高之比以监测浅滩效应，并已实现业务化运行，它扩展了海洋气象预警预报的要素。

除了波高外，大的波浪陡度也可能造成船舶大幅倾斜，导致沉船。研究发现，不同频率波浪组成成分对船舶的影响较大，涌浪能量占比大时，系泊船舶容易发生缆绳断裂。为此，结合波浪理论及船舶运动特征，运用浪涌分离方法计算了波浪陡度并设计计算了涌浪占比，利用实时观测资料及模式数据，进行波浪陡度与涌浪占比的业务实时监测及预报，目前“上海海洋气象精细化预报分析与制作平台”和“多灾种早期预警决策指挥支持系统”已能提供基于台风所WW3海浪模式产品的陡度预报图和涌浪能量占比预报图，并在上海海洋气象台微信公众平台发布。预报实践发现，通常冷空气及台风影响后期，陡度逐渐下降，涌浪占比增大。

船舶谐摇监测预报技术主要通过提取影响船舶的主要波浪因素，建立船舶谐摇监测方法。通过设计谐摇指数极坐标图，实现了波浪、波周期以及船舶航向与航速的动态显示（图10）。目前已结合实时观测资料及模式数据进行了船舶谐摇的业务实时监测及预报，即利用浮标波向及波周期数据进行浮标附近海域谐摇周期的实时监测，每日整点输出。根据模式波浪预报结果分析谐摇周期在海域的空间分布及时间变化，辅助服务船只进行航线设计；在船舶行驶时，根据浮标数据的谐摇周期实时分析结果以及基于模式预报的谐摇周期分析结果，指导船只规避谐摇剧烈海域，降低了船舶行驶风险。

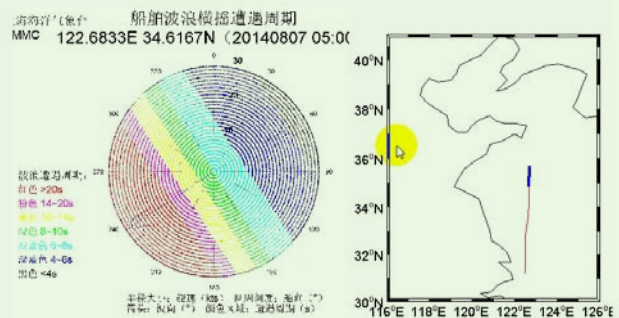


图10 船舶波浪谐摇遭遇周期图
Fig. 10 The wave harmonic cycle for ships

基于波浪的船舶风险指数系列产品开发是对海洋气象影响预报实践的探索,部分地填补波浪对船舶风险预警及预报研究领域的空白^[22-23],可以使海洋气象预报服务部门有效地为上海港停港船舶及行驶于长江口及其沿海海域的船舶做出针对性的波浪预警及预报服务,减少事故的发生(图11)。目前相关预报信息通过“上海海洋气象监测预报预警服务系统”和“多灾种早期预警决策指挥支持系统”调阅。这些成果已在多个航运部门得到实际应用,例如上海迈利船舶科技有限公司和上海梓海海洋科技有限公司等,实践证明这些产品可以有效防范浅滩、谐摇、陡浪及涌浪对船舶的威胁,增强了船只安全运行保障能力。

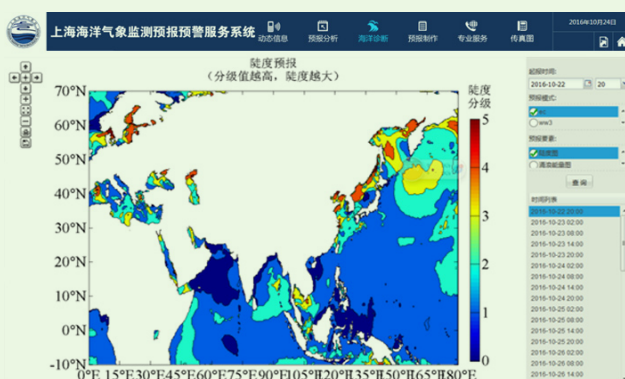


图11 上海海洋气象台监测预报预警服务系统中的波浪陡度预报产品

Fig. 11 The wave steepness forecast products in the monitor, forecast and warning system at Shanghai Marine and Meteorological Center

5 结论与讨论

经过近十多年的努力,上海市气象局在海洋气象数值预报技术研究和应用领域取得长足进步,2003年率先在全国气象部门开发了以复杂海浪模式为基础的风浪数值预报业务系统,2005年中国气象局预测减灾司下文,向全国沿海气象部门推广应用该项技术和产品,并得到广泛应用和成效。2011年又在全国气象部门率先开发成功基于无结构网格的沿海高分辨率风浪数值预报系统和风暴潮数值预报系统,基于观测和数值模式波浪要素研发的浅滩效应指数、波浪陡度指数、涌浪占比指数与谐摇指数等船舶风险指数产品,使海洋气象预报服务更有针对性。这些成果促进了我国海洋气象数值预报技术向高分辨率和精细化方向的发展,为此2015年该研究获得“上海市气象局科技成果应用奖一等奖”。

海气耦合模式系统的建设是今后海洋气象数值预报技术发展的重要方向,目前台风所虽然已建立了初步的中尺度台风海气耦合模式系统并开展业务试运

行,但是其离投入正式业务运行和实际应用还有很长的距离,目前正在深入开展模式海气耦合物理过程优化、海洋环流初始场的观测资料同化和台风涡旋初始化等关键技术研究,以进一步提高对于台风强度和海洋物理环境要素的模拟和预报准确性。

参考文献

- [1] Tang J, Byron D, Zhang J A. Horizontal transition of turbulent cascade in the near-surface layer of tropical Cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, 75(12): 4915-4925.
- [2] Duan Z Q, Yao X H, Li Y P, et al. Investigation of turbulent momentum flux in the typhoon boundary layer. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2017. Doi:10.1002/2016JC012169.
- [3] 李永平,郑运霞,平治. 2009年“莫拉克”台风登陆过程阵风特征分析. *气象学报*, 2012, 70(6): 1188-1199.
- [4] 郑运霞,李永平,段自强. 1013号“鲇鱼”台风大气边界层低层动量通量逆梯度输送的观测特征. *海洋与湖沼*, 2015, 46(6): 1263-1269.
- [5] 段自强,高会旺. 利用不同方法校正船体运动对海气通量观测结果的影响. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45: 18-27.
- [6] 方平治,赵兵科,张帅,等. 中等到强风条件下近海拖曳系数随风速变化的观测. *热带气象学报*, 2014, 30(3): 443-454.
- [7] Li Y P, Zheng Y X. Analysis of atmospheric turbulence in the upper layers of sea fog. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(3): 809-818.
- [8] Li Y P, Xue H J, Bane J M. Air-Sea Interactions during the Passage of a winter storm over the Gulf Stream: a 3D coupled atmosphere-ocean model study. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C11), 21: 1-13.
- [9] 黄伟,郑运霞,沈洪,等. 一个区域海-气耦合模式的建立: 模式验证及其对热带气旋“云娜”的模拟. *海洋与湖沼*, 2014, 45(3): 443-452.
- [10] Duan Y H, Wu R S, Yu R L, et al. Numerical simulation of changes in tropical cyclone intensity using a coupled air-sea model. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27(5): 658-672.
- [11] Zheng Y X, Huang W, Yu R L, et al. A regional coupled air-sea-wave model: simulation of upper-ocean responses to an idealized tropical cyclone. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 21(3): 232-245.
- [12] 段自强,李永平,于润玲,等. 海洋飞沫方案改进对台风“威马逊”强度预报的影响. *海洋与湖沼*, 2016, 47(6): 1075-1090.
- [13] 刘霄燕,李永平,段自强. 考虑飞沫影响的拖曳系数方案对台风条件下上层海洋海温数值模拟的影响. *热带海洋学报*, 2017, 36(5): 24-32.
- [14] Li H. Assimilation of real observational data with the GSI-based hybrid data assimilation system to improve typhoon forecast. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 21: 400-407.
- [15] 李永平,刘晓波,于润玲. 上海区域气象中心第3代海浪数值预报业务系统. *大气科学研究与应用*, 2007, (2): 1-11.
- [16] 李永平,于润玲,郑运霞. 一个我国沿岸台风风暴潮数值预报系统的建立与应用. *气象学报*, 2009, 67(5): 884-891.
- [17] 王亚男,李永平. 冷空气影响下的黄东海海雾特征分析. *热带海洋学报*, 2009, 25(2): 216-221.
- [18] 杨棋,欧建军,李永平. 洋山海域海雾客观预报方法研究. *热带海洋学报*, 2013, 32(5): 59-64.
- [19] 于润玲,王亚男,李永平. 黄海和东海海雾短期客观预报业务系统. *大气科学研究与应用*, 2007, (2): 28-37.
- [20] 李永平,刘晓波,葛伟强,等. 一种基于卫星遥感和数值预报产品的雾预报方法. *应用气象学报*, 2012, 23(3): 340-347.
- [21] 朱智慧,曹庆,徐杰. BP神经网络方法在上海沿海海浪预报中的应用//第八届长三角气象科技发展论坛论文集, 2011: 742-748.
- [22] 杨棋,欧建军,李永平,等. 长江口潮流及潮位变化对波浪的影响. *热带海洋学报*, 2015, 34(5): 19-26.
- [23] Yang Q, Oo J J, Huang N L, et al. The study of wave warning indexes for ships. *International Journal of Engineering and Technology*, 2018, 10(1): 23-28.