

平潭海域精细化三维温盐流业务化数值预报系统

曾银东^{1,2}

(1.福建省海洋预报台,福建福州 350003;2.中国海洋大学海洋与大气学院,山东青岛 266071)

摘要: 根据平潭附近海域实际需求和地理区位特点,研发了三维温、盐、流高分辨率业务化数值预报系统,对该系统采用的模式、配置、预报结果验证和业务化运行等情况进行了详细介绍。该系统基于ROMS海流模式,采用正交曲线网格和网格嵌套技术;建立了包含数据预处理、温盐流预报和预报产品后处理等子程序的业务化数值预报系统。结果表明:模式预报产品具有较高精度,整个业务流程运行在30 min之内,系统运行稳定,达到业务化预报的要求。

关键词: 平潭海域;精细化;海流模式;业务化;数值预报系统

中图分类号: P731.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)06-0039-09

1 引言

近年来,随着沿海各国大力发展海洋经济,如何保障海上活动的公共安全成为关注焦点,其中海上落水人员搜救、海上溢油的保障预报技术成为维护国家海洋权益、保障海上公共安全的研究重点。为此,各国都在积极发展全球海洋预报系统、区域嵌套高分辨率海洋预报系统,以及针对海湾和河口等多重嵌套精细化海洋预报系统。例如,法国基于NEMO(Nucleus for European Models of the Ocean)模式建立了Mercator海洋预报系统^[1];意大利同样基于NEMO模式建立了“地中海海上安全决策支持系统”(Mediterranean Decision Support System for Marine Safety, MEDESS4MS)^[2];美国建立了HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Mode)/NCODA(Navy Coupled Ocean Data Assimilation)系统和GRTOFS(Global Real-Time Ocean Forecast System)系统^[3-5];国家海洋环境预报中心基于ROMS(Regional Ocean Modeling System)模式建立了全球业务化海洋学预报系统和中国海三维温盐流数值预报系统^[4-5];国家海洋局北海预报中心基于ROMS模式建立了黄渤海近岸精细化三维海温、盐度、海流(以

下简称温、盐、流)业务化数值预报系统^[6]。业务化海洋预报系统可以提供相对可靠的海洋环境预报产品,在海洋工程建设、海上交通运输、海洋权益维护、海上搜救和应急处置等方面发挥了重要作用。

平潭位于福建东部,其近岸海域岛屿众多,海底地形复杂,海况和水文气象条件复杂多变,是台湾海峡重要的水动力研究区域^[7-9]。夏季受西南季风影响,该海域存在明显上升流,而冬季由长江、闽江和九龙江等入海径流与沿岸海水混合形成的富含营养盐、低温、低盐的浙闽沿岸流到达平潭^[10],对台湾海峡的环流结构、水团组成、海洋生产力、沿岸物质运输等产生重要的影响。平潭近岸海域也因此成为船舶交通事故和溢油事故多发区,海上船只航行、停泊、渔业生产和海上作业安全事故时有发生。例如,2010年9月30日凌晨,天津籍货船“惠盈168”轮在平潭岛附近海域沉没,船上15名船员落水,当晚已有3人死亡、3人获救,另外9人失踪。目前,针对台湾海峡及其周边海域已建立了业务化三维温盐流数值预报系统和海上突发事件辅助决策系统^[11],但该系统在平潭近岸海域空间分辨率较低,无法为该海域提供精细化的三维温、盐、流数值预报产品和服务。因此,本研究将利用当前该海域高

收稿日期:2017-06-07;修回日期:2017-07-21。

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAB04B00);福建省科技计划项目(2017Y0005)。

作者简介:曾银东(1978-),男,高工,博士在读,主要从事海洋观测预报工作。E-mail: zydzyd100@163.com

精度的水深地形资料和大量的海洋观测数据,基于国际先进的ROMS海洋环流模式,采用正交曲线网格和网格嵌套技术,发展平潭海域精细化三维温、盐、流数值预报系统,并对模式进行验证和业务化试运行,最终实现该系统的业务化运行,为该海域海上活动公共安全提供精细化温、盐、流数值预报产品。

2 系统模式介绍与配置

2.1 ROMS 模式介绍

ROMS 是一个自由表面、静水力学和三维非线性斜压原始方程模式,由罗格斯大学和加利福尼亚大学洛杉矶分校共同开发完成^[12-13],该模式可以模拟多种尺度的海洋环流运动,如全球尺度的环流模拟、中尺度由气象因素或是天文潮所引起的水位与流场变化,也可以计算小尺度河流渠道等流体运动。模式垂直方向采用S坐标系,垂向分层随着地形变化;水平方向采用正交曲线坐标系及Arakawa C差分网格;为提高计算效率,采用了模态分离法,将带自由表面的三维流动问题分成表面波的传播问题(外模态)和内波的传播问题(内模态),对外模态采用显式差分;计算垂向涡动黏性系数和紊动扩散系数由2.5阶紊流模式^[14]确定。

2.2 模式配置

2.2.1 模式区域、网格和水深地形

本模式采用曲线正交网格和双重嵌套方法,大网格区域范围为 $95^{\circ}\sim 147.9^{\circ}\text{E}$, $9^{\circ}\text{S}\sim 44.01^{\circ}\text{N}$,小网格区域为平潭近岸海域(见图1)。大网格开边界网格距约为45 km,逐渐过渡到台湾海峡为1.5 km。整个模式区域的水深地形数据采用多种数据融合后的数据:外海区域水深地形资料采用ETOPO2;近海区域水深地形数据采用数字化的沿岸海图水深(共26张)和台湾海峡地形数据(0.5'网格化水深);福清湾海域采用高精度的1:1 000水深。经融合和插值到数值模式所需要的网格化水深和岸线如图1所示。大、小网格垂向均取30层,采用S坐标进行垂向分层,在海表分层较密,以反映海表混合层及温、盐跃层的复杂垂直结构。小网格在大网格中以1:7加密,平潭海域达到200 m的水平分辨率(见图1)。对于平潭小区域,本模式通过定义临界水深(取

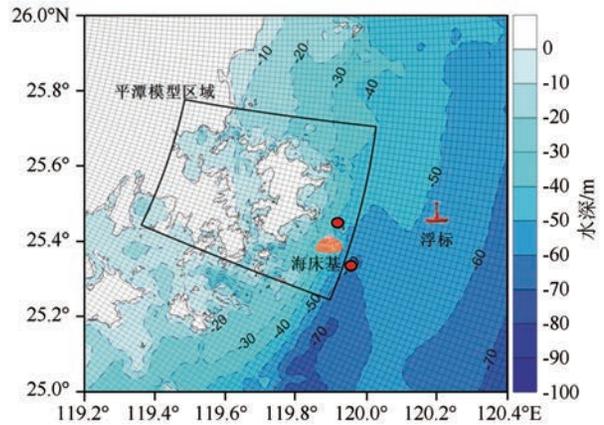


图1 模式计算网格区域范围、水深地形和观测站点图

0.2 m)进行干湿边界的转换,以准确体现该区域的纳潮量。

2.2.2 模式上表面和开边界条件

模式在大小网格的海表都考虑了海表热通量,并在模式中考虑了河流淡水流入。模式上边界采用福建省海洋预报台业务化运行的西北太平洋的WRF大气模式风场和热通量场等作为大气强迫场。模式所需的河流流量数据采用《中国海湾志》的主要河流各月及多年平均流量(见表1)。

模式开边界控制参数含温、盐、流及水位,其中水位含与大洋环流相关的大洋表面高度及潮汐所引起的海表起伏。模式的开边界采用MyOcean的业务化产品,包括海表高度、海温、盐度和海流。MyOcean业务化产品由ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts)研发海洋信息服务支持系统提供,MyOcean是基于观测数据、数值模型与数据同化系统建立的全球海洋实时观测和预报系统,可以提供全球范围海洋观测和预报产品服务。开边界的潮汐调和常数采用日本NAOTIDE(National Astronomical Observatory (Japan) Tide Prediction Model)模式提供的天文潮调和常数,包含M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1、M1、J1、OO1、2N2、Mu2、Nu2、L2和T2 16个主要天文分潮。

模式上层热通量控制边界条件:

$$\frac{K_H}{D} \left[\frac{\partial T}{\partial s}, \frac{\partial S}{\partial s} \right] = \langle u\theta \rangle, s \rightarrow 0 \quad (1)$$

式中: $\langle u\theta \rangle$ 为海表热及降水净通量,数值取自采用福建省海洋预报台业务化运行的西北太平洋的WRF大气模式产品获取。

表 1 中国主要河流多年平均径流量的数据(单位: $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$)

河流	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
长江口	1.040	1.120	1.540	2.350	3.580	4.100	4.950	4.630	4.300	3.590	2.540	1.530
珠江口	0.346	0.341	0.566	0.903	1.866	1.978	1.679	1.495	1.195	0.794	0.540	0.358
鸭绿江口	0.076	0.066	0.080	0.077	0.082	0.088	0.137	0.170	0.103	0.083	0.076	0.077
辽河口	0.003	0.002	0.009	0.017	0.021	0.026	0.061	0.102	0.048	0.023	0.013	0.006
滦河口	0.003	0.004	0.005	0.008	0.004	0.008	0.041	0.058	0.021	0.011	0.008	0.004
瓯江口	0.007	0.021	0.068	0.053	0.115	0.117	0.106	0.020	0.051	0.009	0.004	0.004
闽江口	0.072	0.098	0.175	0.275	0.438	0.543	0.258	0.160	0.134	0.098	0.072	0.069
九龙江口	0.015	0.021	0.029	0.043	0.077	0.122	0.069	0.063	0.062	0.033	0.021	0.017
韩江口	0.028	0.037	0.060	0.092	0.130	0.193	0.104	0.098	0.097	0.051	0.038	0.028

3 模式验证

3.1 实测数据来源

海洋观测资料来自福建省海洋预报台布放在平潭牛山岛海域的海床基和平潭近海的浮标(位置见图1),分别代表平潭沿岸海域和平潭近海。海床基布放于海底水深约50 m,从海底向海表观测共25层剖面流;浮标观测表层海温和海表至水下约50 m深处剖面流,每5 m一层,共10层。

3.2 验证与讨论

图2和图3为模式24 h、48 h和72 h预报海流分

别与海床基、浮标观测海流的对比情况。由图可见,模式预报流速、流向与观测值吻合较好。模式预报值和观测值均反映了夏季7月份盛行西南风的情况下,在潮汐及环流的共同作用下,流场以往复流为主,一天之内有4个峰值出现,南向流速大于北向流速。表、中、底层的预报流速与观测值比较表明,流速较为一致,表层流速大,中、底层流速较小,表、中、底层流向基本一致。在2014年7月23—25日之间出现强的连续南向流是由于“麦德姆”台风过程引起,模式预报和观测值误差高于其它时间段,但两者总体表现比较一致,能够反应台风的影响过程。

图3为模式24 h、48 h和72 h预报海温与浮标

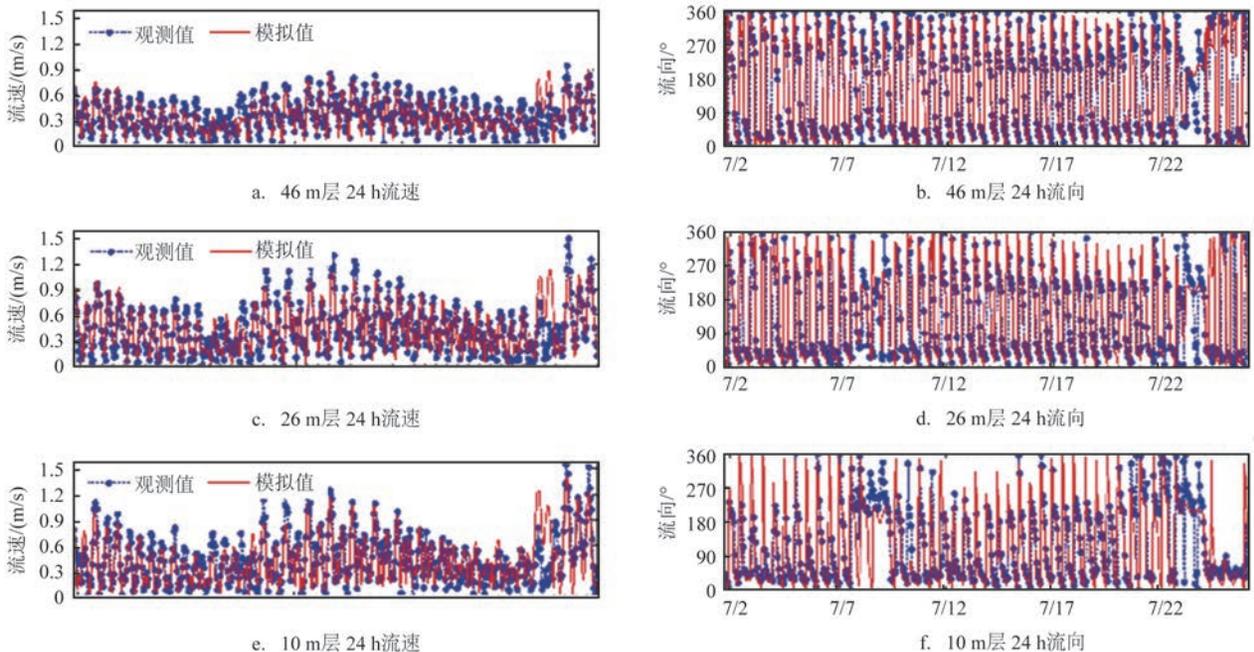


图 2 牛山岛模式不同时间预报海流与海床基观测海流对比

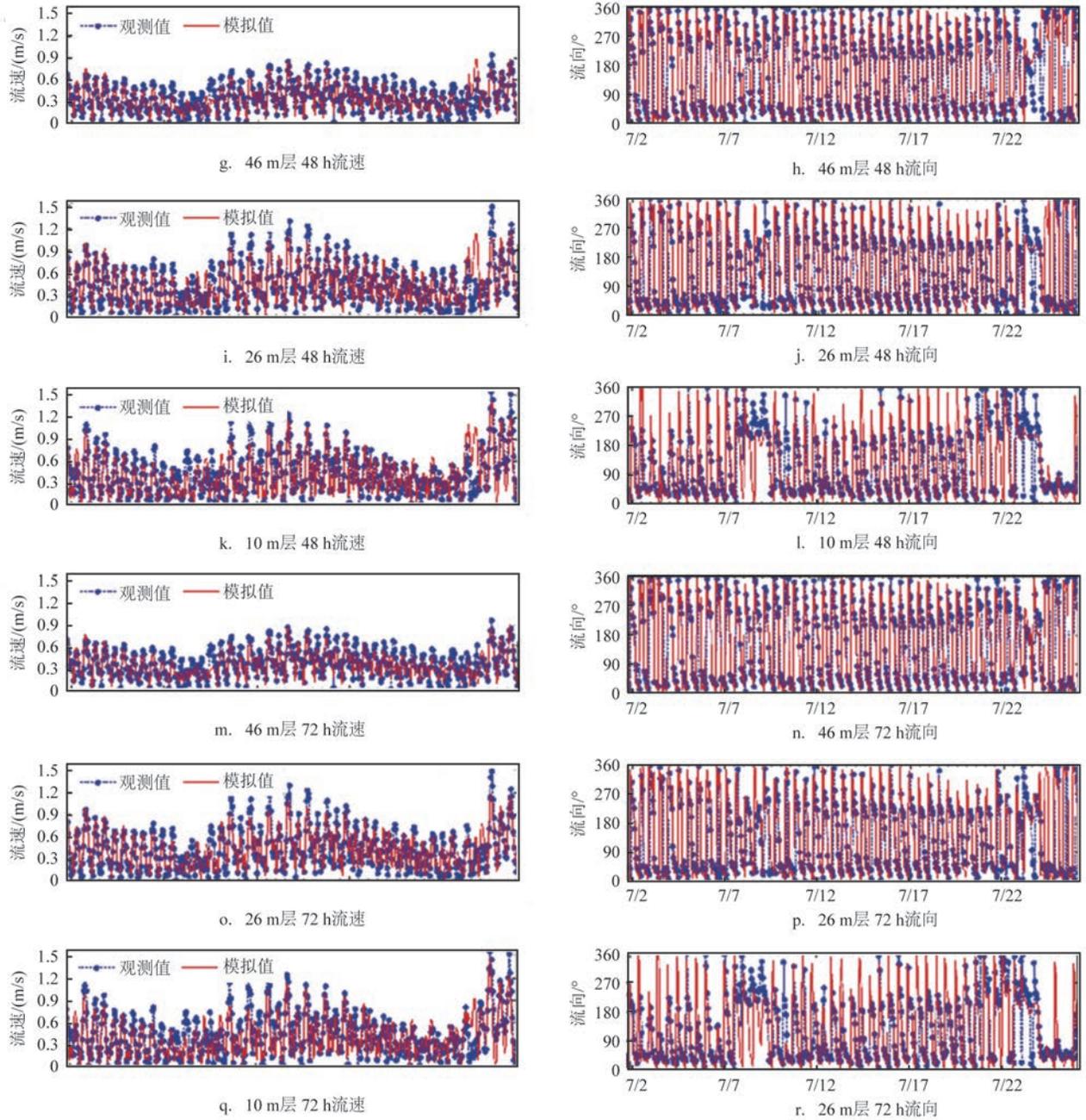


图2 (续)

观测海温的对比情况。从图上看,模式预报海温与浮标实测海温变化趋势比较一致。23—25日浮标观测海温出现急剧下降,形成“V”形状,主要是受1410号台风“麦德姆”正面影响,台风影响过后海温迅速回升,台风的抽吸作用是导致海温下降的主要原因^[15]。

为了进一步检验模式预报的准确性,本文选用了比较常见的检验统计参数绝对平均误差(MAE)和均方根误差(RMSE)等统计方法。

(1)绝对平均误差:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (2)$$

(2)均方根误差

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

对模式预报结果分别与海床基和浮标实测数据进行误差统计,得到表2、表3和表4。总体而言,

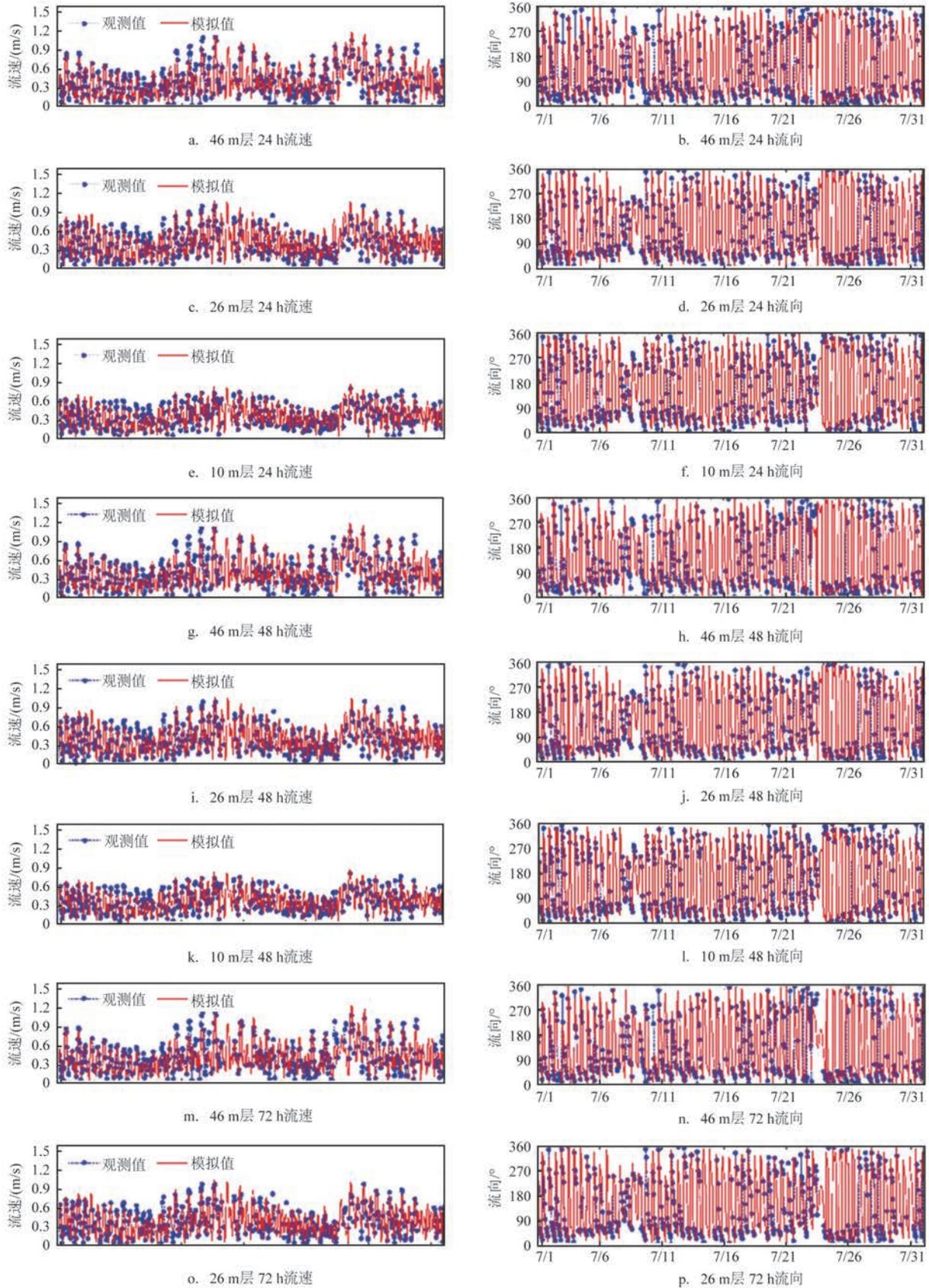


图3 3号浮标模式不同时间预报海流与浮标实测海流对比

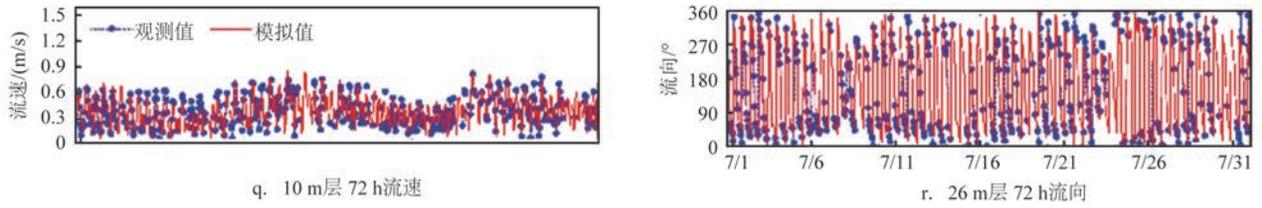


图3 (续)

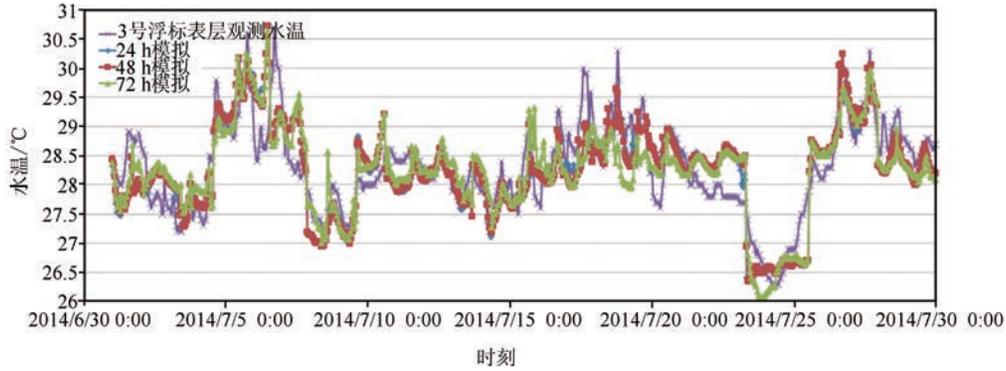


图4 模式24 h、48 h和72 h预报海温与浮标观测海温的对比

表2 模式预报流速(单位:m/s)和流向(单位:°)结果与海床基观测数据的误差统计

统计方法		预报时效								
		24 h			48 h			72 h		
		10 m	26 m	46 m	10 m	26 m	46 m	10 m	26 m	46 m
MAE	流速	0.15	0.12	0.09	0.15	0.13	0.09	0.15	0.14	0.09
MAE	流向	33.3	32.7	31.7	34.2	34.3	32.6	35.4	34.5	33.5
RMSE	流速	0.19	0.18	0.12	0.19	0.18	0.12	0.19	0.18	0.13
RMSE	流向	43.4	30.3	27.0	43.7	31.0	29.0	48.4	31.7	30.0

表3 模式预报流速(单位:m/s)和流向(单位:°)结果与3号浮标观测数据的误差统计

统计方法		预报时效								
		24 h			48 h			72 h		
		10 m	25 m	40 m	10 m	25 m	40 m	10 m	25 m	40 m
MAE	流速	0.11	0.11	0.08	0.11	0.11	0.08	0.11	0.11	0.08
MAE	流向	26.9	23.5	22.0	27.0	23.8	22.8	27.6	24.6	22.9
RMSE	流速	0.14	0.13	0.10	0.14	0.13	0.10	0.14	0.13	0.10
RMSE	流向	26.0	26.9	22.2	26.1	27.2	22.8	28.2	27.8	23.4

模式预报结果与实测结果比较一致,模式在平潭近海预报结果优于沿岸海域。

表2结果显示,模式预报流速绝对平均误差小于0.15 m/s,表层最大,底层最小,预报时效延长误差差异不大;预报流向绝对平均误差小于35.4°,随着预报时效延长误差略有升高,表层最大,底层最小;预报流速均方根误差小于0.20 m/s,表层最大,

底层最小,随着预报时效延长误差略有下降;预报流向均方根误差小于43.4°,表层最大,底层最小,随着预报时效延长误差呈下降趋势。

表3结果显示,模式预报流速绝对平均误差都小于0.11 m/s,表层最大,底层最小,预报时效延长误差没有显著差异;预报流向绝对平均误差小于27.6°,表层最大,底层最小,预报时效延长误差略有

增大;预报流速均方根误差小于0.15 m/s,表层最大,底层最小,随着预报时效的延长误差下降;预报流向均方根误差小于28.2°,表层最大,底层最小,随着预报时效的延长误差略有增大。

表4结果显示,模式预报24 h、48 h和72 h表层海温与相应的实测海温绝对平均误差约1℃左右,随着预报时效延长误差略有增大;模式预报表层海温与实测海温均方根误差约1.3℃左右,并且同样随着预报时效延长误差略有增大。

3 系统业务化流程及其应用

平潭海域精细化三维海流业务化数值预报系统流程图如图5所示。该系统依托福建省海洋预报台曙光40万亿次高性能计算机,其存储容量为248TB。该预报系统在预报结果与实测数据对比验证和业务化试运行的基础上,目前已经实现了从资料接收、处理、模式运行到产品可视化及发布的安全、高效、稳定业务化运行。该系统已稳定业务化

表4 模式预报表层海温(单位:℃)结果与3号浮标观测数据的误差统计

统计方法	预报时效		
	24 h	48 h	72 h
MAE	1.14	1.15	1.16
RMSE	1.32	1.33	1.35

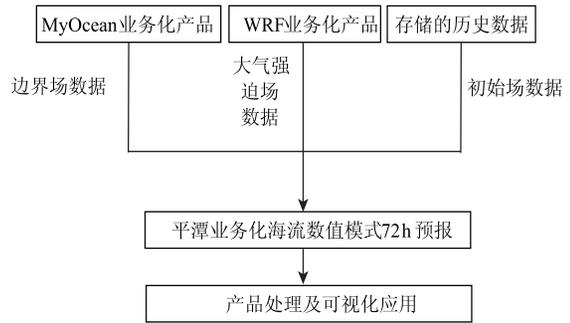


图5 平潭海域精细化海流业务化数值预报系统流程图

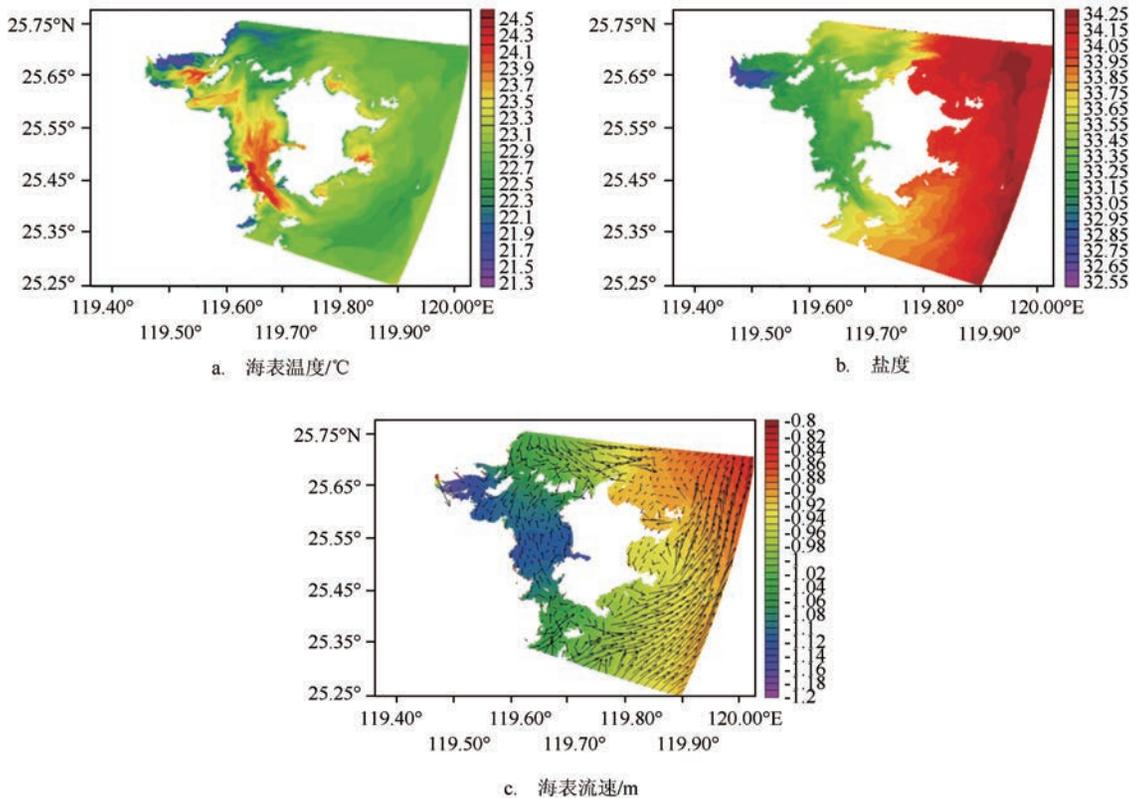


图6 平潭海域精细化温、盐、流业务化数值预报产品展示图

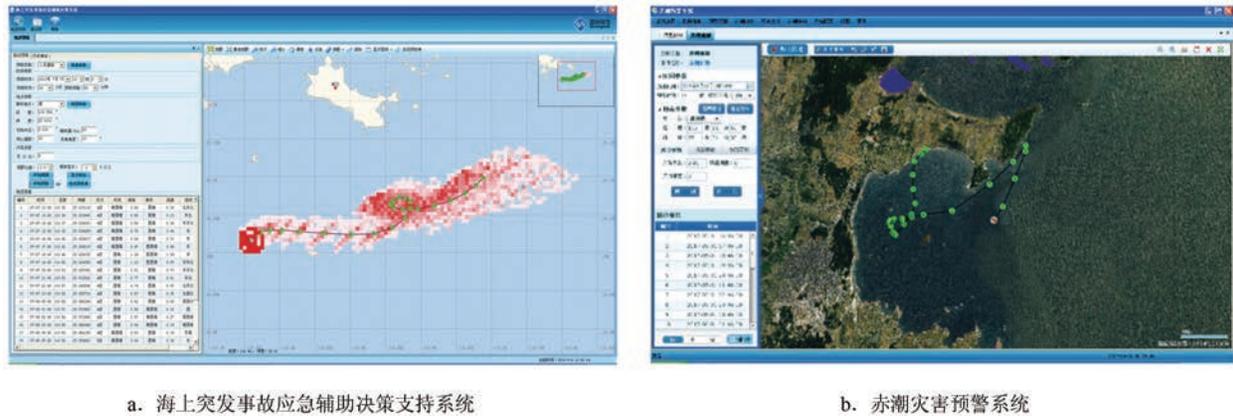


图7 预报系统应用界面

运行2—3 a。系统起报时间为每日20时(北京时),提供未来72 h温盐流预报产品。系统业务具体流程为:

(1)每日9时高性能计算机启动预报主程序;

(2)数据预处理:系统自动获取福建省海洋预报台业务化的WRF气象模式预报产品,并代入模式计算得到系统所需的海表面净热通量、水气通量和动量通量作为海洋模式的海表驱动;系统自动下载Myocean当天的业务化海表高度、温、盐和流预报产品作为该系统海洋模式所需的开边界数据;该系统海洋模式采用热启动方式,并采用前两天存贮的历史文件作为该海洋模式的初始场;

(3)进行72 h三维温、盐、流数值预报,运行时间为30 min。模式预报结果产生后,系统自动启动产品后处理子系统,并生成标准数据格式,自动化制作图形图像产品(见图6),并将逐时海流场数据自动推送到福建省海上突发事故应急辅助决策系统和赤潮灾害预警系统业务平台(见图7),开展海上落水人漂移轨迹预测和赤潮漂移轨迹预测工作,为海上搜救应急提供保障服务,为赤潮漂移对养殖区、滨海浴场等潜在风险的应急处置决策提供技术支撑。整个预报系统无需人工干预,具有较高的自动化程度。

4 结论

本文基于ROMS海洋模式,采用正交曲线网格和网格双重嵌套技术,建立了以平潭附近海域为重

点区域,涵盖西北太平洋区域的精细化三维温、盐、流数值预报模式。模式验证结果表明,模式预报结果与实测结果比较一致,模式在平潭近海预报结果优于沿岸海域。平潭沿岸海域模式预报流速绝对平均误差和均方根误差分别小于0.15 m/s和0.20 m/s,流向绝对平均误差和均方根误差分别小于35.4°和43.4°;平潭近海海域模式预报流速绝对平均误差和均方根误差分别小于0.11 m/s和0.15 m/s,流向绝对平均误差和均方根误差分别小于27.6°和28.2°。在模式的基础上,建立了包含数据预处理、温盐流预报和预报产品后处理等子程序的业务化数值预报系统。业务化运行结果表明:数值预报产品具有较高精度,整个业务流程运行在30 min之内,系统运行稳定,达到业务化预报的要求。该预报业务系统已业务化运行2—3 a,多次为平潭海域海上落水人员、赤潮漂移轨迹预测提供海洋水动力数据支持。同时,该系统也可以为海上军事活动、海上运动、海上交通运输等提供有效的海洋环境安全保障,具有较高的应用价值和社会经济价值。

参考文献:

- [1] France GODAE OceanView Science Team. GODAE ocean-view national reports 2011: France Mercator[R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011.
- [2] De Dominicis M, Bruciaferri D, Gerin R, et al. A multi-model assessment of the impact of currents, waves and wind in modelling surface drifters and oil spill[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2016, 133: 21-38.
- [3] Rhodes R C, Hurlburt H E, Wallcraft A J, et al. Navy real-time global modeling systems[J]. Oceanography, 2002, 15(1): 29-43.

- [4] 王辉, 万莉颖, 秦英豪, 等. 中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1090-1104.
- [5] 李云, 刘钦政, 王旭. 海上失事目标搜救应急预报系统[J]. 海洋预报, 2011, 28(5): 77-81.
- [6] 吴玲娟, 高松, 徐江玲. 黄渤海近岸精细化三维温盐流业务化数值预报系统研发[J]. 防灾科技学院学报, 2015, 17(4): 83-91.
- [7] 陈冠惠. 风对福建中部沿岸春、夏季水文结构和上升流的影响[J]. 海洋科学, 1991, (4): 48-53.
- [8] 黄荣祥, 翁学传. 闽中沿岸上升流特征和成因分析[J]. 热带海洋, 1996, 15(1): 52-59.
- [9] 林培根, 陈照章, 胡建宇, 等. 2011年夏季台湾海峡上升流的变化特征及其与风场的关系[J]. 台湾海峡, 2012, 31(3): 307-316.
- [10] Hu J Y, Kawamura H, Li C Y, et al. Review on current and sea-water volume transport through the Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography, 2010, 66(5): 591-610.
- [11] 江毓武, 万振文, 柴扉, 等. 台湾海峡三维海流现报及预报系统[C]//海峡两岸第七届海洋科学研讨会论文集. 杭州: 国家海洋局, 2008.
- [12] Haidvogel D B, Arango H G, Hedstrom K, et al. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2000, 32(3-4): 239-281.
- [13] Warner J C, Sherwood C R, Arango H G, et al. Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method[J]. Ocean Modelling, 2005, 8(1-2): 81-113.
- [14] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics and, 1982, 20(4): 851-875.
- [15] Leipper D F. Observed ocean conditions and Hurricane Hilda, 1964[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1967, 24(2): 182-196.

An operational three-dimensional numerical forecasting system of the sea temperature, salinity and water currents with fine resolutions for Pingtan coastal region

ZENG Yin-dong^{1,2}

(1. Marine Forecasting Center of Fujian Province, Fuzhou 350003 China; 2. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266071 China)

Abstract: Based on geographic and hydrodynamic characteristics of Pingtan coastal region of Fujian Province of China, an operational three-dimensional numerical system for sea temperature, salinity and current forecasting with high horizontal and vertical resolutions have been developed. This paper details the numerical model, configuration, results validation, and operational running. This forecasting system is based on ROMS model, by using orthotropic curvilinear grids and nested grid techniques. This system is composed of pre-processing data module, forecasting module, and forecasting production visualization module. The forecasting system has shown reasonable results by comparing with observational data, and the operational running time of the system is constrained in 30 min. The system is stable, and has reached the requirement and standard to become an operational forecasting system.

Key words: Pingtan coastal region; fine resolution; sea current model; operationalization; numerical forecasting system