

海洋环流与海浪模式的发展及其应用

刘春霞 赵中阔 毕雪岩 袁金南 温冠环 黄辉军

(中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080)

摘要: 通过对海洋环流模式、海浪模式、风暴潮模式研究现状和世界海洋强国当前运行业务模式系统的调研, 发现无论是全球模式还是区域模式, 海洋环流模式和海浪模式的分辨率越来越高, 全球海洋模式空间分辨率小于10 km, 达到涡可分辨程度, 海浪模式水平和波谱空间的分辨率都在提高。通过调研, 发现随着海洋各类观测资料的同化和数值模式分辨率的提高, 近年来加强了远海、近海及海岸带各种物理过程精细化研究, 海洋环流模式垂向采用混合坐标提升了模式对不同海域海洋内部物理过程的解释能力, 海洋模式、海浪模式、风暴潮模式中无结构网格的应用提高了模式对近海浅水区和岸界地形描述的能力, 加深对海岸带海洋物理过程的认识。文中提出海洋环流-海浪-潮汐耦合模式系统建立是近年来风暴潮模式发展的趋势, 将来大气-海洋-海浪-潮汐模式的耦合可细化对海洋各种物理过程的解释, 是业务模式系统发展的主要方向。

关键词: 海洋模式, 海浪模式, 风暴潮模式

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.002

Research and Application of Ocean Circulation and Wave Models: A Review and Prospects

Liu Chunxia, Zhao Zhongkuo, Bi Xueyan, Yuan Jinnan, Wen Guanjuan, Huang Huijun

(Institute of Tropical and Marine Meteorology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080)

Abstract: Based on the investigation of ocean models, wave models, storm surge models and the current operational model systems, it is found that both the global model and the regional model have higher and higher resolution in ocean circulation model or wave model. The resolutions of these wave models are improved in horizontal and spectral space, the grid interval of the global ocean model is less than 10 km and up to eddy resolution. According to the survey, the physical processes in the ocean, off shore and coastal zone have been refined by assimilating ocean observational data and using the higher resolution model. And the hybrid coordinate in the oceanic circulation model has been adopted to understand the internal physical ocean processes in detail over different ocean regions. The unstructured grids in the ocean, wave and storm surge models have been used to describe the detailed topography over shallow water or coastal areas, then the detailed physical ocean process in coastal zone has been known. The current storm surge model is ocean-wave-tide coupled model system. In the future, the main trend of improvement in the operational ocean model system is going to develop atmosphere-ocean-wave-tide coupled model for better interpretation of the ocean physical processes.

Keywords: ocean model, wave model, storm surge model

0 引言

早在20世纪60年代初期, 就已经开始了海洋数值预报的研究和试验工作。早期的海洋模式以理论模型和二维模型为主, 从20世纪70年代中期开始开展三维海洋温、盐、流数值模拟方法研究, 如在国际上应用

非常广泛的海洋环流模式POM就是在1977年由美国普林斯顿大学研发的。随着海洋观测技术、计算机技术的发展, 海洋模式发展进入了百花齐放阶段, 国际上出现了众多不同坐标系、不同离散计算方案的全球海洋模式和区域海洋模式, 这些模式应用在海洋环流、潮汐、泥沙堆积、海洋生态等方面。海浪的数值预报研究始于20世纪50年代后期, 60年代中期开始进行数值计算实验。80年代初, 世界上多个国家联合研发了第三代海浪模式, 在此基础上, 目前世界各国多基于第三代海浪模式发展自己国家的海浪数值模式。风暴潮数值计算始于20世纪50年代, 发展到现在, 建立了

收稿日期: 2017年2月5日; 修回日期: 2017年6月27日
第一作者: 刘春霞(1968-), Email: cxliu@grmc.gov.cn
资助信息: 2014年中国气象局小型业务化项目“全国海洋气象精细化预报业务系统建设(一期)”; 2015广东山洪地质灾害防治气象保障工程建设项目(GDX1526S/YD15G0512)

许多二维或三维的风暴潮数值模式，美国、英国、法国、荷兰、日本、印度等国家开展的风暴潮数值模式研究和业务应用比较早，我国也已经建立了业务风暴潮模式系统。关于国内外海洋环流模式的发展，赵艳玲等^[1]、方长芳等^[2]、王辉等^[3]已经就国际上流行的海洋环流模式、我国海洋环流模式研究及全球海洋业务化模式系统进展给出了比较详尽的综述。闻斌等^[4]回顾了海浪数值模型和国内外数值模式。尹尽勇等^[5]和黄彬等^[6]总结了国际上及我国海洋气象业务涉及的海浪、风暴潮模式的发展。本文目的是针对国际上常用海洋环流模式、海浪模式、风暴潮模式进行梳理，给出了各国预报中心现在运行的业务数值预报模式，为未来海洋气象专业模式发展提出建议。

1 三维海洋环流模式研究进展及业务应用

从20世纪70年代开始至今，世界上不同的研究团体研发了众多的海洋模式，21世纪初常用的模式包括POM (Princeton Ocean Model)、HAMSOM (Hamburg Shelf Ocean Model)、MOM (Modular Ocean Model)等，从21世纪初到现在，随着计算能力和数值模式技术的提高，三维海洋环流模式发展迅速。目前常用的具有代表性的模式有区域模式POM、ROMS (Regional Ocean Model System)、FVCOM (Finite-Volume Coastal Ocean Model)和全球模式NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean)、HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model)、MOM，也有一些研究工作将全球模式应用到区域海洋环流数值模拟中。我国从20世纪80年代开始海洋环流数值模式研究，21世纪初建立了第四代全球环流模式LICOM 1.0和区域海洋环流模式。

1.1 区域海洋模式

国际上常用于区域海洋数值模拟和预报的模式主要有POM、HAMSOM、ROMS和FVCOM等。POM模式是1977年由美国普林斯顿大学研发的，从模式发布之日起，广泛地应用于区域海洋环流、潮汐、风暴潮等数值模拟^[7-11]。HAMSOM是由德国汉堡大学于20世纪80年代针对大陆架研发的非线性原始方程模式，多用于边缘海以及陆架海域的数值模拟^[12-13]。21世纪初由Rutger大学和UCLA共同研发的区域海洋模式ROMS，分为Rutger-ROMS版本、法国IRD ROMS_AGRIF和UCLA版本，在海盆或海岸带海洋环境数值模拟和预报中广泛应用^[14-17]。由美籍华人陈长胜教授研发的无结构网格海洋环流模式FVCOM，由于其在近岸高分辨率以及小尺度计算问题上优势明显，多应用于河口、海岸等区域的海洋环流模拟，更多地应用

于潮流和风暴潮预报^[18-23]。

纵观区域海洋环流模式，这些模式都是基于静压近似和Boussinesq近似的自由海表面的原始方程模式，坐标系和网格点设置各有特点^[24-28]。图1给出了几种海洋模式开始释放时间以及模式采用的垂向坐标和离散计算方案。由图1可知，在几种常用的区域海洋模式中，POM和FVCOM垂向采用 σ 坐标，HAMSOM垂向则采用Z坐标，ROMS垂向采用S坐标；POM、HAMSOM、ROMS离散化计算方案采用Arakawa C有限差分，FVCOM离散化计算方案采用了非结构三角网格有限体积方法。在不同垂向坐标系中，Z坐标系对于浅水区混合层的描述方面具有一定的优势， σ 坐标可以刻画海底地形，但是对于浅水区的混合层描述得不好，使得POM模式模拟的混合层厚度较浅，温跃层现象不明显，同时在陡峭的地形处水平压力梯度计算误差偏大；针对POM模式的缺点，ROMS垂向采用了S坐标系，与 σ 坐标相比，S坐标系在温跃层和底边界层具有很好的解析度，ROMS模式中使用了新的水平压力梯度计算，以减少陡峭地形区域水平压力梯度的计算误差。4个区域模式中ROMS和FVCOM在水平方向都采用了非结构网格，与结构网格点相比，非结构网格在近岸和远海可采用不同分辨率，近岸采用细网格，远离岸基或远海区域采用分辨率比较粗的网格，在提高海岸线和河口等复杂地形解析度的同时，还可以提高计算效率。与ROMS相比，FVCOM采用三角网格有限体积离散计算方案，对于复杂地形岸界的计算问题可以保证质量守恒性，因此该模式对于近岸高分辨率和小尺度物理过程数值模拟优于其他海洋环流模式。由上述4个模式研发时间可以看出，ROMS

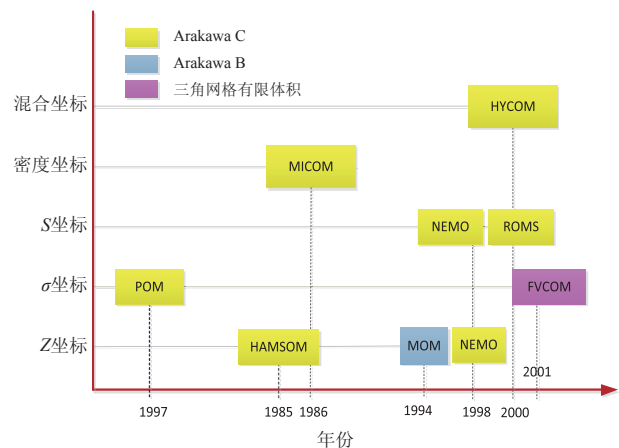


图1 国外常用海洋模式开始释放时间以及模式采用的垂向坐标和离散计算方案

Fig. 1 The first release time of some commonly used ocean models, the vertical coordinates and discrete schemes used in the models

和FVCOM是在2000年以后释放并得到应用,从时间上来看,区域模式的水平网格点开始走向非结构网格点设计,从而提高对近岸复杂地形的刻画能力。

国内20世纪末也开展了海洋环流模式研究,90年代初开始研发三维斜压海洋环流模式。模式采用 η 坐标系,水平离散化采用Arakawa C网格,分辨率达到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂直为24层,主要用来模拟南海海域的海洋环流^[29]。

1.2 全球海洋模式

目前国际上常用的全球海洋环流模式主要有MOM、NEMO、HYCOM等。NEMO是由法国、英国和意大利共同研发的,应用于27个国家。MOM是由GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 研发的全球环流模式, HYCOM是由FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)、NRL (Naval Research Laboratory)、NCEP (National Centers for Atmospheric Prediction) 多家研究机构合作研发的。图1给出了MOM、NEMO、HYCOM三个模式垂向坐标和离散化计算方案的特点^[30-32], MOM水平采用可变的经纬度网格点,离散化计算方案却采用Arakawa B网格; NEMO和HYCOM采用正交曲线坐标,水平离散化采用Arakawa C网格计算方案, NEMO模式将网格极点移动到亚洲和北美洲大陆,以避免在计算中出现奇点问题^[31]。MOM模式是由GFDL于20世纪90年代开始研发的,从MOM1到MOM4垂向都采用Z坐标,由于Z坐标在处理地形时有明显的不足,从MOM5开始垂向坐标考虑随地形坐标。NEMO是ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 再分析系统中的海洋环流模式^[33-36],其垂向采用两种坐标系,即Z坐标或S坐标,正如前面所说, S坐标是传统 σ 坐标的改进。2000年开始释放的HYCOM模式是基于迈阿密等密度坐标海洋模式MICOM^[37]而研发的原始方程海洋环流模式,其垂向坐标在原有的等密度面基础上,增加了Z坐标和 σ 坐标,在开阔海洋仍保留等密度面,在浅海或陆架区域采用 σ 坐标提高对复杂地形的解析度,改进由于陡峭地形引起的水平压力梯度的计算误差,在混合层或层化不明显区域采用Z坐标,可以更好地描述层化海洋的垂直结构。对应于不同坐标系, HYCOM模式提供了各种不同的垂直混合方案供选择,其中KPP非刚盖垂直混合方案可有效地刻画从海洋边界层到海洋内部的弱的垂直混合过程,将诸如海洋内部的背景场内波、不稳定剪切混合和双扩散过程,海表边界层的风生混合、海表浮力通量和对流不稳定等难以解析的物理过程参数化^[38-39]。目前

HYCOM被多个学术团体和业务中心应用,不仅应用于全球模式,同时也应用于区域和海盆模式^[40-44]。

在国内,中国科学院大气物理研究所地球流体力学国家重点实验室(简称IAP/LASG)早在20世纪80年代便开展了海洋环流模式的研发,21世纪初,基于IAP/LASG第三代全球海洋环流模式,研发了准全球涡相容的原始方程模式LICOM。模式水平方向采用球坐标系,垂直方向为 η 坐标。目前该模式已经发展到LICOM2.0,与大气模式耦合构成一个海气耦合系统^[45]。LICOM2.0分辨率达到了10 km,可以描述中尺度涡等海洋内部的中尺度物理过程。

1.3 各预报中心业务海洋模式

随着海洋数值模式发展和数值计算机能力的提高,现阶段以美国和欧洲各国为代表的海洋大国都已经建立了全球和区域海洋预报系统,王辉等^[3]非常详细地描述了这些国家的全球海洋业务预报系统和我国海洋业务预报系统建设。本文针对主要的海洋预报系统,如美国NCEP全球实时海洋预报系统RTOFS (Real-Time Ocean Forecast System)、英国气象局的业务预报系统FOAM (The Forecast Ocean Assimilation Model)、法国麦卡托海洋中心海洋预报系统等,给出其最新进展^[46-48]。美国全球实时海洋预报系统RTOFS中早期采用的业务海洋模式是MOM4,现在运行的业务系统是在HYCOM基础上建立的,2011年开始在NCEP业务化运行,2013年在美国海军业务化运行。在NCEP业务运行的RTOFS系统中包括全球和大西洋区域海洋模式,分辨率为 $(1/12)^\circ$;美国海军运行的海洋业务预报系统不仅包括全球海洋模式和大西洋区域海洋模式,还包括太平洋和印度洋区域海洋模式,与NCEP相比,全球模式水平分辨率差不多,大约为 $(2/25)^\circ$,区域模式分辨率为 $(1/25)^\circ$,明显高于前者。两者采用同样的同化系统即多变量三维变分海洋资料同化系统,分析变量包括温度、盐度、水位、流速矢量。FOAM海洋业务预报系统是英国气象局业务海洋分析和预报系统,现业务运行的系统以NEMO海洋模式为核心,可提供深海和沿岸近海海洋预报,包括北大西洋、印度洋和地中海区域模式,其中全球模式水平分辨率为 $(1/4)^\circ$,区域模式水平分辨率为 $(1/12)^\circ$,采用NEMOVAR同化系统每天同化48 h内的卫星和现场观测海水温度、盐度、海面高度、海冰浓度等。法国麦卡托海洋中心(Mercator Océan)是法国提供业务海洋预报的主要机构,与英国FOAM系统一样,其业务运行的全球和区域海洋分析预报系统都以NEMO为核心海洋模式,其中全球海

洋分析系统有两种不同分辨率即 $(1/4)^\circ$ 和 $(1/12)^\circ$ ，区域海洋预报系统水平分辨率达到了 $(1/36)^\circ$ ，系统同化方案采用了SEEKF (Singular Evolutive Extended Kalman Filter) 和三维变分偏差订正，可同化观测资料包括卫星探测的海表温度、海面高度和现场温盐廓线等。中国国家海洋预报中心现在业务运行的全球和区域业务海洋模式分别基于MOM4和ROMS建立，全球模式分辨率为 $(1/4)^\circ$ ，大洋区域模式(印度洋)分辨率为 $(1/12)^\circ$ ，西太平洋和南海区域海洋模式分辨率为 $(1/30)^\circ$ ，海洋模式系统采用集合最优插值同化技术，该系统从2013年开始业务运行^[3, 49]。

纵观国际上现代海洋业务模式，从模式分辨率来看，模式分辨率越来越高，全球海洋模式分辨率从 1° 发展到 $(1/12)^\circ$ ，区域模式分辨率已达到 $(1/36)^\circ$ ；从水平网格点来看，无结构网格点在更多区域模式中得到应用，如ROMS和FVCOM等；从地形坐标来看，为了比较好地考虑地形作用、混合层及大洋物理海洋过程的特点，引入了混合坐标，即使MOM采用的Z坐标也在MOM5进行了改进；从海洋模式同化技术来看，采用同化方法有最优插值、三维变分和KF (Kalman Filter) 等。

2 海浪模式研究进展及业务应用

2.1 海浪数值模式发展

海浪数值预报模式早在20世纪50年代就已经开始。法国1956年基于海况谱分解建立了预报北大西洋海浪的数值模式，称为第一代海浪模式。第一代海浪模式特点是没有明确地考虑非线性项，非线性项隐含在输入和耗散过程中，70年代第一代模式发展为半球海浪模式，模式缺点是过高估计风的输入，低估了非线性传播的增长。随着海浪谱观测研究的深入和海浪谱型的发现，发展了第二代海浪模式如美国SAIL (Sea-Air Interaction Laboratory) 模式，与第一代海浪模式相比，第二代海浪模式采用限定谱型如JONSWAP谱的参数化方式处理非线性相互作用项。尽管在第二代海浪模式中考虑了非线性传播参数化，但是，第二代模式不能很好地模拟风场突然改变时风浪复杂的生长过程，难以处理风浪和涌之间的过渡问题。针对前两代海浪模式存在的问题，1980—1983年，由美国、英国、德国、荷兰、日本等国的海洋专家组成了SWAMP (Sea Wave Modeling Project Group) 研究组，针对世界各国的代表性海浪模式，进行分类和试验。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，称为第三

代海浪模式。与前两代海浪模式相比，第三代海浪模式最大的不同是显式地描述了非线性相互作用项，其优点是对谱形不加任何限制，而是通过基本谱的传输方程积分计算浪谱，将影响浪谱发展的物理过程通过源函数的方式显示地描述出来，方便数值计算和对波浪谱增长物理过程的理解^[50]。目前国际上流行的海浪模式WAM (Wave Model)、WAVE WATCH III和SWAN (Simulating Waves Nearshore) 等都是基于第三代海浪模式建立的。

WAM海浪模式是由世界各国联合组织的WAMDI (The Wave Model Development and Implementation Group) 研究组共同研发的第一个二维谱空间传播的海浪模式，WAM模式分为浅水或深水模式，在深海考虑风输入项、非线性作用项、白冠耗散项，浅水模式中还增加了海底摩擦项。现在WAM模式已发展到4.5版本，主要由德国研发。目前欧洲很多国家如德国、法国等业务模式都采用WAM系统，ECMWF海浪业务模式系统也是基于WAM建立的^[51-53]。

WAVE WATCH III (简称WW3) 是由NCEP研发的第三代海浪模式，与WAM模式最大不同体现在风输入函数的计算，在WW3模式中风输入函数有多种方案，包括了WAM3、WAM4风输入函数计算方案和Tolman and Chalikov计算方案，WW3最早仅适用于深水区，现在模式已进行了浅水区订正。WW3 V3.14及以前的版本水平网格点采用球面坐标，目前比较成熟的4.18版本不仅考虑浅水引起的浪的破碎，更加将坐标系改为无结构网格点或球面多元网格点 (Spherical Multiple-Cell, SPC) ^[54-55]。目前，WW3在美国NCEP、英国气象局、韩国气象局等多个业务中心使用^[56-58]。

SWAN模式是荷兰Delft大学基于第三代海浪模式研发的，与WAM、WW3相比，SWAN是针对近岸环境研发的海浪模式，坐标系包括球面直角坐标和无结构网格，更多考虑了浅水区物理过程如波浪浅化、折射、绕射、破碎等。模式采用隐式格式计算，使得模式更适用于近岸海浪增长和传播的数值模拟^[59]。

还有一些国家基于第三代海浪模式研发了自己的海浪模式，如日本气象厅研发的适用于深水的海浪模式MRI-III^[60]，我国袁业立等^[61-62]改进了国际盛行的WAM模式，发展了基于正交笛卡尔平面下的LAGFD-WAM海浪模式，以及后来在此基础上建立了球坐标系下的MASNUM (Key Laboratory of MARine Science and NUMerical Modeling) 海浪模式^[63]。

2.2 各国业务海浪模式

表1给出了世界主要国家业务海浪模式概况。ECMWF海浪业务模式是建立在第三代海浪模式WAM基础上,1992年海浪模式开始业务运行,目前ECMWF运行海浪模式有三类,单一全球模式HERS-SEW、耦合全球模式HRES-WAM及集合预报模式ENS-WAM,2016年11月业务运行海浪高分辨率模式HRES-WAM水平分辨率从0.25°提高到0.125°,集合预报ENS-WAM 0~15天预报的水平分辨率从0.5°提高到0.25°,HERS-SEW水平分辨率为0.1°,分为36个波向,36个波数^[64]。德国海浪预报系统也是在WAM基础上发展的,包括全球、欧洲区域以及北海和德国湾近岸模式系统等,即将业务化的近岸海浪模式最高分辨率约900 m,德国湾近岸海洋预报系统频率从0.042~0.66 Hz共30个频段,24个方向^[65]。法国业务海浪模式MFWAM,是2009年基于ECMWF海浪模式WAM建立的,水平分辨率为0.5°,30个波数和24个方向,采用最优插值方法同化了高度计资料,现在运行的区域模式分辨率为0.1°。MFWAM新一代近岸海浪预报系统是基于WW3 V4.18建立的,水平网格距从10

km到200 m,波谱空间为24个方向和30个波数^[66]。

美国、英国、澳大利亚、韩国等国家业务模式是基于WW3建立的(表1),包括全球、区域等模式^[56]。美国目前运行的业务模式是WW3 V2.2,全球和区域(飓风)模式水平分辨率为1.25°×1°和0.25°(0.25°),波谱空间是25波数,24个方向。从2008年开始,英国气象局海浪业务预报模式是基于WW3建立的,2013年开始运行的欧洲和英国区域模式是基于WW3 V3.14建立的。2016年11月英国气象局发布了新的全球海浪预报系统,该模式系统基于WW3 V4.18建立,采用了WW3 V4.18多元网格点和新的源函数,全球模式从远离海岸到近岸分辨率为25, 12, 6 km,英国区域模式从远离海岸到近岸分辨率为12, 6, 3 km,36波数,36个方向^[57, 67]。澳大利亚2016年4月全球海浪模式AUSWAVE-G升级为第三个版本,前两个版本运行分别为2010和2012年;新运行的业务全球海浪模式从WW3 V3.14升级到V4.18,模式中源函数也做了改进,模式分辨率从40 km升级到25 km^[68]。现在运行的区域模式AUSWAVE-R从2013年4月开始运行,水平分辨率为0.1°^[69]。韩国气象局从2008年开始业务运行

表1 国际上主要海浪业务模式
Table 1 Mainly operational wave models in the world

预报中心	预报模式名称	模式名称	区域	水平格点分辨率	波数, 方向数
ECMWF	HERS-SEW		全球	0.1°	36, 36
	HERS-WAM	WAM4	全球	0.125°	36, 36
	ENS-WAM		全球	0.25°/0.5°	30, 25
美国 NOAA/ NCEP	NWW3		全球	1.25°×1.0°	
	AKW/WNA /ENP/NAH /NPH	WW3 V2.22	Alaskan/西北大西洋/ 东北太平/北大西洋飓风/ 北太平洋飓风	0.25°	25, 24
法国 Meteo-France	MFWAM	WAM WW3 V4.18	全球/区域 近岸非结构网格	0.5° 10 km~200 m	30, 24 30, 24
	日本 JMA	深水模式	MRI-III	全球 近岸	0.5° 0.05°
浅水模式		WAM4	8个区域	1'	35, 36
韩国 KMA		WW3	全球	50 km	
		WW3	亚洲	8 km	25, 36
		WW3	近岸	1 km	
英国	S36125	WW3	全球	从远离海岸到近岸分辨率为25, 12, 6 km	
			区域	从远离海岸到近岸分辨率为12, 6, 3 km	
德国 气象局		WAM4	北海区域 德国湾	5 km 900 m	30, 24
	澳大利亚 气象局	AUSWAVE-G	全球	25 km	
AUSWAVE-R		WW3	区域	0.1°	25, 24
中国 国家海洋预报中心	全球海浪模式	WW3	全球	(1/3)°	
	印度洋海浪模式	WW3	印度洋	(1/6)°	
	西北太平洋海浪模式 南海海浪模式	SWAN	西太平 南海	(1/10)° (1/30)°	25, 24

WW3海浪模式，现业务运行V2.2版本，新的海浪预报系统将开始运行WW3 V4.18版本，共有3套模式即全球、亚洲区域和近岸区域，水平分辨率为50、8和1 km，可提供10天、3天、1天预报^[58]。

日本气象厅和我国国家海洋环境预报中心业务模式也有不同。日本气象厅现在运行的业务海浪模式有3套，即全球、近岸和浅水区模式，近岸模式（CWM）针对日本海，全球和近岸是日本气象厅（JMA）气象研究所（MRI）自主研发的第三代海浪模式MRI-III模式，浅水模式是针对日本沿海岸基于WAM浅水模式建立的海浪模式。其水平分辨率分别为 0.5° 、 0.05° 、 $1'$ ，频率为25、25、35频段，方向为36、36、36^[70]。中国国家海洋环境预报中心业务海浪模式建立在WW3和SWAN基础上，其中全球和印度洋模式建立在WW3基础上，西北太平洋和南海区域模式由于考虑近岸地形，是基于SWAN模式基础上发展起来的。全球、印度洋、西北太平洋、南海区域海浪模式水平分辨率分别为 $(1/3)^\circ$ 、 $(1/6)^\circ$ 、 $(1/10)^\circ$ 和 $(1/30)^\circ$ ，预报时效为120 h^[3]。

回顾海浪模式发展，海浪模式分辨率越来越高，ECWMF全球模式分辨率为 0.1° ，法国气象局近岸区域海浪模式达到200 m。针对高分辨率模式的发展，海浪模式网格点发生了变化如WW3 V4.18发展的球形多元网格。近年来，基于观测研究，在源函数、考虑浅水效应引起破碎和海浪最大值预报等方面也有了明显改进。最近几年欧洲多个国家和研究团体联合开展Mywave研究计划，包括法国气象局、德国Helmholtz中心、西班牙Puertos del Estado、意大利ISMAR（the Institute of Marine Sciences）、荷兰DeltaRes和KNMI（荷兰皇家气象研究协会）等，目的是建立一个包括新的或改进的海浪物理过程在内的欧洲统一的海浪数值预报系统。

3 风暴潮模式研究进展及业务应用

风暴潮的数值模拟始于20世纪50年代，经过几十年的发展，已经形成了很多风暴潮的数值预报系统，如美国的SLOSH（Sea, Lake and Overland Surges from Hurricane）、英国的STWS（Storm Tide Warning System），日本、澳大利亚、荷兰等很多沿海国家也都建立了自己的风暴潮预警系统。20世纪风暴潮模式系统多为二维模式，21世纪开始，随着数值方法和计算机技术的飞速发展，三维海洋环流数值模式如POM、FVCOM、ADCIRC（Advanced Circulation Model For Oceanic）等被应用于风暴潮数值模拟和业务预报。直到近年来，各国开始大力发展风暴潮一潮

汐—海浪耦合模式系统，随着波流耦合和波浪近岸增减水研究的发展，越来越多的学者将风暴潮中风浪过程对近岸增水和近岸流场的影响也考虑到风暴潮的数值模拟当中。

3.1 二维风暴潮模式

早期风暴潮数值模式以二维深度积分模型为主，如日本气象厅业务风暴潮模式、美国NCEP业务模式SLOSH、印度风暴潮模式等。世界上已经报告的风暴潮模式接近75%是二维模式，如表2所示，到2011年为止，多数国家的业务和准业务风暴潮模式为二维模式^[71]。

美国的风暴潮模式最早是由Jelesnianski于1972年建立的SPLASH模式。进入20世纪80年代后，在SPLASH模式的基础上进行了SLOSH模式的研究，并提供业务预报产品如风暴潮淹没指导产品^[72]。SLOSH模式是以运动和连续方程深度积分为基础建立的，在模式中根据风暴路径、最大风速半径、风暴中心和环境场气压差建立模型风场，计算风应力。SLOSH采用双曲线或椭圆格点类型，使得靠近岸界和海湾分辨率高，深水区域分辨率降低。早期的SLOSH模式没有考虑天文潮、波增水和波浪爬高，Stockdon等^[73]给出了波增水和波浪爬高的经验参数化计算方案，指出在风暴条件下，波增水和波浪爬高作用使得岸边水位抬升超出风暴潮两倍，目前美国业务预报模式中不包括波增水和波浪爬高等物理过程。美国NWS（National Weather Service）现在业务风暴潮概率指导预报产品就是由SLOSH模式提供的^[74-75]。

亚洲国家开展风暴潮数值模式研究和业务应用相对于欧美地区比较晚，比较有名的是印度IIT（Indian institution of technology）二维风暴潮模式和日本气象厅二维风暴潮模式。印度IIT风暴潮模式于20世纪80年代开始研发，后应用于印度洋阿拉伯海的风暴潮预报，该模式采用的坐标与SLOSH不同，为直角笛卡尔坐标，计算时水陆分开^[76-77]，现已在整个北印度洋得到应用^[78]。日本气象厅研发的二维风暴潮模式也是采用直角坐标，数值计算中将水陆分离，采用的网格点是可变的，即在浅水区采用细网格，深水区采用粗网格，系统还可以提供集合预报产品，2016年该系统开始提供多场景风暴潮预报^[79]。上述两个模式作为WMO向亚洲各国推荐的风暴潮模式，在亚洲多个国家和地区业务风暴潮预报中应用。

欧洲各国在20世纪80年代就开始建立风暴潮模式系统，如英国、荷兰、丹麦等国家都建立了自己的风暴潮预警系统^[80]。荷兰从20世纪80年代中期开

表2 各大风暴潮业务模式概况
Table 2 Features of operational storm surge models

国家	模式	区域	类型	格点
西班牙	HAMSOM Nivmar	地中海和伊比利亚半岛	二维深度积分正压模式	10'
丹麦	Mike 21	北海、波罗的海	二维流体动力学方程	9, 3, 1, (1/3) nmi
加拿大	耦合海洋-海冰模式NPAC	40°—62°N, 120°—160°W	POM (三维环流模式)	1/8°
日本	JMA风暴潮模式	23.5°—46.5°N, 122.5°—146.5°E	二维线性深度积分浅水方程	1'
韩国	KMA风暴潮模式	20°—50°N, 115°—150°E	基于POM二维正压风暴潮和潮流模式	1/12°
葡萄牙	NIVEMAR	葡萄牙沿海	二维深度积分浅水方程	1'
阿根廷	SMARA风暴潮	32°—55°S, 51°—70°W和Rio de la Plata	二维深度平均	(1/3)°, (1/20)°
德国	BBH环流—BBH风暴潮	东北大西洋、北海、波罗的海	三维静压环流模式和二维正压风暴潮模式	北海及波罗的海6 nmi, 德国海岸西部1 nmi
哈萨克斯坦	Caspian风暴潮	Caspian Sea 36°—48.5°N, 45°—58°E; North Caspian Sea 44.2°—48°N, 46.5°—55.1°E	基于MIKE21二维流体力学	10 km×2 km
瑞典	HIROMB/NOAA	东北大西洋、波罗的海	三维斜压模式	24 nmi
荷兰	DCSM98	陆架48°—62°N, 12°—13°E	二维深度积分浅水方程	(1/8)° × (1/12)°
法国	源自MOTHY漏油漂移模型	近欧洲大西洋8.5°—10°E, 43°—59°N	二维非线性浅水方程	5'
香港	SLOSH	距香港130 km南海区域	二维深度积分	极坐标 1~7 km
俄罗斯	短期海平面和海流预报	里海和近岸低洼地带	三维静力斜压模式	3 nmi
印度	IIT	印度东西海岸	非线性二维深度积分方程	12.8 km
英国	CS3	西北欧陆架水域	二维垂直平均	12 km
美国	SLOSH	美国沿大西洋和墨西哥湾海岸带	二维深度积分	625 m

始，研发了数值流体动力学模式DCSM (the Dutch Continental Shelf Model)，该模式是深度积分浅水方程，利用商业软件WAQUA软件包计算，模式驱动场由高分辨率有限区域气象模式提供，90年代早期开始利用KF方法同化潮汐并观测资料，预报荷兰沿岸水位及其概率预报^[81-82]。英国气象局风暴潮业务预报模式CS3X是潮汐—风暴潮模式，在业务的风暴潮模式系统中考虑潮汐和风暴潮相互作用，近年来发展了风暴潮集合预报系统^[83]。法国风暴潮模式是基于球面非线性浅水方程建立的，为了解决岸界问题，采用C网格差分格式，强迫风场采用Holland模型，模式从20世纪90年代开始业务化运行^[84]。

综上所述，二维风暴潮模式都是基于深度积分的浅水方程，形式简单，不同的模式采用的网格点不同，有采用双曲线型如SLOSH模式，有选取直角坐标如JMA和IIT风暴潮模式，所有的风暴潮模式没有考虑天文潮和近岸过程引起的波爬升、波增水等物理过程，其采用的风强迫多为经典风压关系计算得到的。但是二维模式的优点是形式简单、易于计算，在业务预报中广泛使用。为了解决物理过程、风强迫带来的不确定性，现在二维业务预报系统逐渐向集合预报和概率预报发展。

3.2 三维风暴潮模式

预报风暴潮最常用的三维模式有POM、ROMS、

FVCOM、ADCIRC、Delft3D等，这些模式广泛应用于近岸水文和海洋环境的数值模拟和预报中。如加拿大业务风暴潮模式采用的就是POM，上海台风研究所的近岸风暴潮模式也是在POM的基础上建立的^[11]。POM、FVCOM特点已经在前面描述，下面主要介绍比较常用的三维风暴潮模式，如ADCIRC、Delft3D等。

ADCIRC模式是由北卡罗来纳大学海洋科学研究所的Luettich教授和美国圣母大学的Westerink教授联合研制的，可应用于海洋、海岸、河口跨尺度区域的水动力计算的数学模型。模式基于Boussinesq和静压近似，包括二维模式和三维模式，二维模式ADCIRC-2DDI通过求解垂直积分动量方程得到平均流速和潮汐，三维模式基于广义拉伸垂直坐标系，利用标准圆柱投影，将球面控制方程转换为笛卡尔坐标中的等效方程组来求解；模式采用有限元方法进行离散化数值计算^[85]。ADCIRC已经发展为完善的模式系统，被大量地应用于近岸工程的海洋环境的模拟^[86-88]，美国新一代近岸/飓风登陆的风暴潮业务模式就是建立在ADCIRC基础上，可提供比SLOSH更精细的预报^[89]。

Delft3D是目前世界上最为先进的完全的三维水动力—水质模型系统，Delft3D是由荷兰Delft大学WL Delft Hydraulics开发的一套功能强大的软件包。Delft3D-FLOW可以提供3种坐标系，即笛卡尔直角

坐标、正交曲线坐标和球面坐标,在垂直方向上提供Z坐标和 σ 坐标,采用有限元离散化数值计算^[90]。Delft3D支持所有主要的操作系统如Windows, Unix, Linux, Mac等,已经发展成为非常完善的商业软件。Delft3D系统在国际上应用十分广泛,如荷兰、俄罗斯、波兰、德国、澳大利亚、美国、西班牙、英国、新西兰、新加坡、马来西亚等,尤其是美国已经有很长的应用历史,Delft3D系统在我国风暴潮数值模拟等方面也得到应用^[91-92],该模式更多地应用于泥沙输送和水质的数值计算中。

三维模式不仅可以模拟海洋环流和三维风暴潮,还考虑了更加完善的海洋物理过程对风暴潮的影响。You等^[93]研究显示基于ROMS三维模式预报风暴潮与二维模式相比,可以更好地描述风暴潮空间和时间的变化。Zheng等^[94]基于FVCOM二维/三维模式风暴潮模拟研究发现,采用相同的海底拖曳系数计算公式,三维风暴潮模式模拟的风暴潮略大于等效二维风暴潮模式。其原因是,用于二维模式中计算海底应力的速度大于三维模式中的速度,导致了二维风暴潮模式计算的海底摩擦应力偏大,抵消了表面应力,与三维模式相比海平面梯度减少。正是由于三维模式具有比较完善的海洋物理过程,一些国家未来的风暴潮模式开始向三维模式发展,如英国气象局将在NEMO三维海洋环流模式基础上发展业务风暴潮模式系统^[95]。但是三维风暴潮模式需要非常多的计算资源,而且目前大范围三维风暴潮模式不是主流,三维模式更多可能用于特殊区域敏感性试验。

3.3 风暴潮模式发展的新趋势

近年来,无结构网格点风暴潮模式得到越来越广泛的应用,如FVCOM、ADCIRC、SELFE (Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Element model)、Delft3D-FLOW等。商业模式像MIKE (DHI公司)、Tuflow (BMT-WBM公司)广泛应用于水文和海洋环境领域。这些无结构网格点的优点是具有灵活的网格分辨率,在浅的海岸带采用细网格,在海水深的地带采用粗网格,非常适用于沿海岸带风暴潮数值模拟和预报。随着计算机运算能力的提高,模式细网格分辨率已经达到几百米,可以详细地模拟海水漫滩的过程。

风暴潮—潮汐—海浪耦合模式系统是近年来业务风暴潮模式系统发展的又一个新趋势。单独的风暴潮模式预报结果具有很多的不确定性,这些不确定性包括多种因素,如风和气压等大气强迫不确定性,以及潮汐、近岸浪的爬升和增水、海底摩擦、潮流等海洋物理过程的不确定性。因此越来越多的业务系

统与大气高分辨率模式耦合,获得比较好的风场和气压场。同时,单独的风暴潮模式开始与潮汐、海浪模式耦合,如Qi等^[96]利用FVCOM和近岸海浪模式SWAVE发展了耦合模式系统,Roland等^[97]利用海洋环流模式SELFE和海浪模式耦合,Dietrich等^[98]利用海洋环流模式ADCIRC和海浪模式SWAN发展了耦合系统模拟飓风风暴潮,Westhuysen等^[99]利用海洋环流模式ADCIRC分别和海浪模式SWAN、WAM耦合,这些模式的模拟结果显示耦合系统可以给出合理的风暴潮和海浪预报,而且高分辨率模式还可以模拟出波增水这种小尺度现象。Forbes等^[100]的研究给出在NHC (National Hurricane Center)实施的风暴潮漫滩模式SLOSH和海浪模式SWAN耦合模式检验结果,发现海浪在模式中对风暴潮预报的作用非常明显。Yoon等^[101]基于FVCOM和海浪模式耦合试验结果显示,当风暴潮模式和海浪模式耦合后,风暴潮模拟结果得到明显改善,同时指出,近岸波浪对于风暴增水极大值最大贡献可以达到18% (表3),但是对于海浪有效波高影响不明显。

表3 考虑陆地摩擦耗散 (SOL) 和考虑陆地摩擦耗散与海浪耦合 (SWL) 模拟的最大风暴潮及观测最大风暴潮^[101]
Table 3 The maximum surge heights of the simulations from SOL and SWL experiment and of the observed (SOL: storm surge simulation using wind stress including land dissipation effects; SWL: coupled storm surge and wave simulation using wind stress including land dissipation effects)

站名	观测最大风暴潮 (cm)	模拟最大风暴潮 (cm)		海浪对风暴潮影响 (cm)
		SOL	SWL	SWL-SOL
Goheung	63.9	37.0	48.6	11.6 (18.2%)
Gwangyang	100.5	69.6	68.4	-1.2 (-1.2%)
Yeosu	73.7	72.9	73.4	0.5 (0.7%)
Tongyeong	87.7	77.8	80.1	2.3 (2.6%)
Masan	106.1	116.1	113.2	-2.9 (-2.7%)
Geoje	66.7	54.2	52.5	-1.7 (-2.5%)
Gadeok	65.0	53.1	58.3	5.2 (8.0%)
Busan	59.7	48.3	59.5	11.2 (18.0%)

随着WMO推动风暴潮观测网络的不断建设和完善,风暴潮测站资料和卫星探测水位资料同化技术研究工作在各国陆续开展,目前采用的同化有最优插值、变分同化等方法。Huang等^[102]利用变分同化方法将上海黄浦测站的合成潮位资料在FVCOM中同化,模拟预报的台风0515号风暴潮改进了27.9%~61.9%。Zheng等^[103]采用自由伴随四维变分同化方法,同化了潮位资料,比较好地模拟出德国北海风暴潮。Kristine等^[104]首先将潮位计数据和卫星高度计近岸海平面观测

数据合并,再采用集合最优插值方法同化合并的海平面数据,利用潮位计独立样本检验,发现2年的模拟试验的海平面均方根误差减少了7%~43%,相关系数改进1%~23%,意味着通过同化可以改进风暴潮的预报。综上所述,海平面实际观测资料的同化可以有效地改善风暴潮模式的初值条件,减少初值不确定性对风暴潮预报结果的影响。

4 未来展望

1) 无论是海洋环流模式、海浪模式还是风暴潮模式,高分辨率模式是未来海洋模式发展的主流。全球海洋环流模式已经发展到了(1/12)°,达到海洋中尺度涡可分辨尺度,区域海洋环流模式分辨率更高。全球海浪模式分辨率达到0.1°,区域海浪模式分辨率各国不一致,大多小于10 km,近岸海浪模式最高分辨率达到200 m(如法国气象局近岸海浪模式)。风暴潮模式预报达到几百米。

2) 海底高度分布不均一及岸界不规则等复杂地形对海洋环境要素影响明显,模式坐标系及网格点的选取直接影响了对海洋物理过程描述的程度,从而影响了海洋环境的数值模拟和预报。未来海洋环流模式垂向坐标倾向于利用混合坐标,这样可以发挥不同坐标系优点。在水平方向上,无论海洋环流模式、海浪模式还是风暴潮模式,为了利于处理海岸线不规则给计算带来的误差,在近岸地区,越来越多的数值模拟和业务预报采用无结构网格点模式。

3) 近岸区域海浪的中小尺度过程如波浪爬升和增水等,对风暴潮影响非常明显,采用耦合的风暴潮—潮汐—海浪耦合模式系统预报沿岸水位变化和漫滩是业务风暴潮数值模式现在的发展趋势,甚至大气—海洋环流—潮汐—海浪全耦合模式系统预报近岸海洋环境将可能是业务预报中心解决近岸海洋环境预报的发展方向。

4) 随着海洋各类观测资料不断增多,资料同化各种方法如变分同化、集合最优插值、KF等,海洋资料如海表温度、海面高度、海浪、潮位等在同化分析中得到应用,海洋资料同化技术发展也是将来海洋模式发展的重要方向。

参考文献

[1] 赵艳玲,张铭,司广宇.海洋环流模式研究回顾与展望.解放军理工大学学报(自然科学版),2006,7(3):281-290.
[2] 方长芳,张翔,尹建平.21世纪初海洋预报系统发展现状和趋势,2013,30(4):93-102.
[3] 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用.地球科学进展,2016,31(10):1090-1104.
[4] 闻斌,刘俊.海浪数值模式研究回顾与进展.海洋预报,2006,23(4):76-81.
[5] 尹尽勇,徐晶,曹越男,等.我国海洋气象预报业务现状与发展.气

象科技进展,2012,2(6):17-26.
[6] 黄彬,阎丽凤,杨超,等.我国海洋气象数值预报业务发展与思考.气象科技进展,2014,4(3):57-61.
[7] 钱永甫,王谦谦,朱伯承.海底地形对南海海流、海面高度和海温影响的数值试验.热带气象学报,1999,15(4):289-296.
[8] Jacobs G A, Hur H B, Riedlinger S K. Yellow and East China Seas response to winds and currents. J Geophys Res, 2000, 105(C9): 947-968.
[9] 张静,孙省利,林建国,等.深圳湾海域环境容量及污染总量控制研究——I.潮汐、潮流数值模拟.海洋通报,2010,29(1):22-28.
[10] Niwa Y, Hibiya T. Numerical study of the spatial distribution of the M2 internal tide in the Pacific Ocean. J Geophys Res, 2001, 106(C10): 441-449.
[11] 李永平,于润玲,郑运霞.一个中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.
[12] Harms I H. Water mass transformation in the Barents Sea-application of the Hamburg shelf ocean model (HamSOM). ICES J Marine Science, 1997, 54(3): 351-365.
[13] Vander M J, Gerrits J, De Swart H E. Modelling the morphodynamics of a tidal shelf sea. Continental Shelf Research, 2004, 24(4): 483-507.
[14] Lim H S, Kim C S, Park K S, et al. Down-scaled regional ocean modeling system (ROMS) for high-resolution coastal hydrodynamics in Korea. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(9): 50-61.
[15] Powell B S, Moore A M, Arango H G, et al. Near real-time ocean circulation assimilation and prediction in the Intra-Americas Sea with ROMS. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2009, 48(1): 46-68.
[16] Fan W, Song J, Li S. A numerical study on seasonal variations of the thermocline in the South China Sea based on the ROMS. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(7): 56-64.
[17] 王晓红,俞志明,樊伟,等.基于水动力ROMS与BOX耦合模型的长江口及邻近水域水通量及水体交换特性.海洋与湖泊,2015,46(1):118-132.
[18] Chen C, Gao G, Qi J, et al. A new high-resolution unstructured grid finite volume Arctic Ocean model (AO-FVCOM): an application for tidal studies. J Geophys Res Ocea, 2009, 114(C8): 1-20.
[19] 林作梁,朱学明,鲍献文,等.基于FVCOM的泉州湾海域三维潮汐与潮流数值模拟.海洋学报,2013,35(1):15-24.
[20] 赵晓东,王亮,沈永明.基于GIS和FVCOM数值模型的近海岸水动力计算——以渤海为例.地理科学进展,2011,30(9):1152-1158.
[21] 王建丰,王玉,王刚.基于FVCOM数值模拟和观察资料的长江淡水转向机制分析.地球科学进展,2012,31(2):194-201.
[22] Wan Z, Wan Z, Ren Z, et al. Application of unstructured grid finite-volume coastal ocean model (FVCOM) to the Yangtze River hypoxic zone. Internat J Numerical Meth Heat & Fluid Flow, 2016, 26(8): 2410-2418.
[23] Yoon J J, Shim J S. Numerical experiments of storm surge and coastal inundation by unstructured grid finite volume model FVCOM. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 2013, 13(5): 337-346.
[24] Mellor GL. Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Princeton: Princeton University, 2002.
[25] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
[26] Backhaus J O. A three-dimensional model for the simulation of Shelf Sea dynamics. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 1985, 38: 165-187.
[27] Chen C, Liu H, Robert C B. An unstructured grid finite-volume three-dimensional primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. J Atmos Ocea Tech, 2003, 20(1): 159-186.
[28] Chen C, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-

- volume coastal ocean model: FVCOM. *Oceanography*, 2006, 19(1): 78-89.
- [29] 李荣凤, 游小宝. 海洋环流模式的发展和应用 II. 近海和区域环流模式. *大气科学*, 2003, 27(4): 729-737.
- [30] Griffies S M. Elements of the Modular Ocean Model (MOM). Princeton: NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 2012.
- [31] Madec G, Delecluse P, Imbard M, et al. OPA 8.1 Ocean General Circulation Model Reference Manual. Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, 1998.
- [32] Bleck R, Halliwell G R, Wallcraft A J, et al. Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) user's manual: details of the numerical code. HYCOM Consortium, 2002.
- [33] Storkey D, Blockley E W, Fuener R, et al. Forecasting the ocean state using NEMO: the new FOAM system. *J Operational Ocean*, 2010, 3(1): 3-15.
- [34] Drévilion M, Bourdallé-Badie R, Derval C, et al. The GODAE/Mercator-Ocean global ocean forecasting system: results, applications and prospects. *J Operational Ocean*, 2008, 1(1): 51-57.
- [35] Kristian M, Magdalena A B, Anthony W. The NEMOVAR ocean data assimilation system as implemented in the ECMWF ocean analysis for System 4. ECMWF, 2012.
- [36] Drillet Y, Lellouche J M, Levier B, et al. Forecasting the mixed layer depth in the north east Atlantic: an ensemble approach, with uncertainties based on data from operational oceanic systems. *Ocean Sci Discuss*, 2004, 11: 1435-1472.
- [37] Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, 2002, 37(4): 55-88.
- [38] Halliwell G R. Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the HYbrid-Coordinate Ocean Model (HYCOM). *Ocean Modelling*, 2004, 7(3): 285-322.
- [39] Chassignet E P, Smith L T, Halliwell G R, et al. North Atlantic simulations with the Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and thermobaricity. *J Phys Oceanogr*, 2003, 33(12): 2504-2526.
- [40] 郑沛楠, 吴德星, 陈学恩, 等. 基于HYCOM的风生大洋环流模拟及季节变化分析. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(1): 7-12.
- [41] Zhang Y, Du Y. Seasonal variability of salinity budget and water exchange in the northern Indian Ocean from HYCOM assimilation. *Chinese J Oceanol Limno*, 2012, 30(6): 1082-1092.
- [42] Mehra A, Rivin I. A Real Time Ocean Forecast System for the North Atlantic Ocean. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2010, 21(1): 211-228.
- [43] Chassignet E P, Hurlburt H E, Smedstad O M, et al. Ocean prediction with the hybrid coordinate ocean model (HYCOM)// Ocean weather forecasting. Springer Netherlands, 2006: 413-426.
- [44] Metzger E J, Hurlburt H E, Xu X, et al. Simulated and observed circulation in the Indonesian Seas: 1/12 global HYCOM and the INSTANT observations. *Dyna Atmos Oceans*, 2010, 50(2): 275-300.
- [45] 张学洪, 俞永强, 刘海龙. 海洋环流模式的发展和应用 I. 全球海洋环流模式. *大气科学*, 2003, 27(4): 607-617.
- [46] Metzger E J, Smedstad O M, Thoppil P G, et al. US Navy operational global ocean and Arctic ice prediction systems. *Oceanography*, 2014, 27(3): 32-43.
- [47] Blockley E W, Martin M J, McLaren A J, et al. Recent development of the Met Office operational ocean forecasting system: an overview and assessment of the new Global FOAM forecasts. *Geosci Model Dev Discuss*, 2013, 6: 6219-6278.
- [48] Lellouche J M, Le Galloudec O, Drévilion M, et al. Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan. *Ocean Science*, 2013, 9(1): 57-81.
- [49] Zhu X, Wang H, Liu G, et al. Comparison and validation of global and regional ocean forecasting systems for the South China Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(7): 1639-1655.
- [50] Group T W. The WAM model a third generation ocean wave prediction model. *J Phys Oceanogr*, 1988, 18(12): 1775-1810.
- [51] Behrens A. Development of an ensemble prediction system for ocean surface waves in a coastal area. *Ocean Dynamics*, 2015, 65(4): 469-486.
- [52] Aouf L, Lefèvre J M. On the impact of the assimilation of SARAL/AltiKa wave data in the operational wave model MFWAM. *Marine Geodesy*, 2015, 38(sup1): 381-395.
- [53] Bidlot J R. Present status of wave forecasting at ECMWF. ECMWF Workshop on Ocean Waves, June 25-27, 2012.
- [54] Tolman H L. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III TM Version 3.14. MMAB, 2009.
- [55] Tolman H L. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 4.18. MMAB, 2014.
- [56] NWS. NWW3 implementations. NWS, 2012. <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.shtml>
- [57] Saulter A. Assessment of WAM Cycle-4 based source terms for the Met Office global-regional wave modelling system. Forecasting Research Technical Report, 2015.
- [58] Son G, Park J S, Lim B. Validation and sensitivity experiments comparing the physical parameterization of numerical wave model. OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. IEEE, 2015: 1-3.
- [59] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [60] Ueno K, Kohno N. The development of the third generation wave model MRI-III for operational use. Proc 8th Int Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting 2004, G2: 1-7.
- [61] 袁业立, 潘增弟, 华锋, 等. LAGFD-WAM海浪数值模式——I. 基本物理模型. *海洋学报*, 1992, 13(5): 1-7.
- [62] 袁业立, 华锋, 潘增弟, 等. LAGFD-WAM海浪数值模式——II. 区域性特征线嵌入格式及其应用. *海洋学报*, 1992, 13(6): 12-24.
- [63] 杨永增, 乔方利, 赵伟, 等. 球坐标系下MASNUM海浪数值模式的建立及其应用. *海洋学报*, 2005, 26(2): 1-7.
- [64] Haiden T, Janousek M, Bidlot J, et al. Evaluation of ECMWF Forecasts, Including the 2016 Resolution Upgrade. ECMWF, 2016.
- [65] Staneva J, Behrens A, Wahle K. Wave modelling for the German Bight coastal-ocean predicting system. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2015, 633(1): 012117.
- [66] French operational coastal wave forecasting system and application to a wave-current interaction study. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, and 5th Coastal Hazard Symposium. , November 8-13, 2015.
- [67] Saulter A, Bunney C, Li J G. Application of a refined grid global model for operational wave forecasting. Met Office, 2016.
- [68] Bureau National Operations Centre. Operational Upgrade to the AUSWAVE Global Wave Model (AUSWAVE-G). Bureau National Operations Centre, 2016.
- [69] NMOC. Operational Upgrade to the AUSWAVE Regional Wave Model (AUSWAVE-R). NMOC, 2013.
- [70] Japan Meteorological Agency. Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Japan Meteorological Agency, 2013.
- [71] WMO. Guide to Storm Surge Forecasting. WMO, 2011.
- [72] Jarvinen B R, Lawrence M B. An evaluation of the SLOSH storm-surge model. *Bull Amer Meteor Soc*, 1985, 66(11): 1408-1411.
- [73] Stockdon H F, Holman R A, Howd P A, et al. Empirical parameterization of setup, swash, and run up. *Coastal engineering*, 2006, 53(7): 573-588.
- [74] Zachry B C, Booth W J, Rhome J R, et al. A national view of storm surge risk and inundation. *Weather, Climate, and Society*, 2015, 7(2): 109-117.
- [75] Zachry B C, Rhome J. Operational Storm Surge Forecasting at the National Hurricane Center. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting & 5th Coastal Hazard Symposium, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [76] Dube S K, Sinha P C, Roy G D. Numerical simulation of storm surges induced by tropical storms impinging on the Bangladesh coast. *Coastal Engineering Proceedings*, 1984, 1(19): 190-198.

- [77] Dube S K, Sinha P C, Rao A D, et al. Numerical modelling of storm surges in the Arabian Sea. *Applied Mathematical Modelling*, 1985, 9(4): 289-294.
- [78] Dube S K, Jain I, Rao A D. Recent developments in storm surge prediction models for the North Indian Ocean. First JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Seoul, Republic of Korea, October 2-6, 2007.
- [79] Hasegawa H. Development of JMA storm surge model. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [80] Flather R A. Existing operational oceanography. *Coastal Engineering*, 2000, 41(1): 13-40.
- [81] Verlaan M, Zijderfeld A, de Vries H, et al. Operational storm surge forecasting in the Netherlands: developments in the last decade. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 363(1831): 1441-1453.
- [82] Hans de Vries. Probability forecasts for water levels at the coast of the Netherlands. First JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Seoul, Republic of Korea, October 2-6, 2007.
- [83] Flowerdew J, Mylne K, Jones C, et al. Extending the forecast range of the UK storm surge ensemble. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2013, 139(670): 184-197.
- [84] Daniel P, Haie B, Aubail X. Operational forecasting of tropical cyclones storm surges at Meteo-France. *Marine Geodesy*, 2009, 32(2): 233-242.
- [85] Luettich R A, Westerink J J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44 XX. R Luettich, 2004.
- [86] 李雪, 王智峰, 武双全, 等. 近岸浪-风暴潮耦合模型在天津沿海的应用. *海洋通报*, 2016, 34(6): 657-665.
- [87] Xie D M, Zou Q P, Cannon J W. Application of SWAN+ADCIRC to tide-surge and wave simulation in Gulf of Maine during Patriot's Day storm. *Water Science and Engineering*, 2016, 9(1): 33-41.
- [88] 赵长进, 葛建忠, 丁平兴. 长江口及其邻近海区无结构网格风暴潮预报系统的研制与分析. *海洋科学进展*, 2015, 33(2): 182-194.
- [89] Feyen J, Vinogradov S, Asher T, et al. Development of operational storm surge guidance to support total water predictions. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [90] Hydraulics D. Delft3D-FLOW user manual: simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Technical Report, 2014.
- [91] 储麇. Delft3D在天文潮与风暴潮耦合数值模拟中的应用. *海洋预报*, 2004, 21(3): 29-36.
- [92] 俞亮亮, 陈可锋, 陆培东, 等. 海平面上升背景下辐射沙脊风暴潮增水研究. *水利水运工程学报*, 2014, 35(6): 52-57.
- [93] You S H, Lee W J, Moon K S. Comparison of storm surge/tide predictions between a 2-D operational forecast system, the regional tide/storm surge model (RTSM), and the 3-D regional ocean modeling system (ROMS). *Ocean dynamics*, 2010, 60(2): 443-459.
- [94] Zheng L, Weisberg R H, Huang Y, et al. Implications from the comparisons between two-and three-dimensional model simulations of the Hurricane Ike storm surge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(7): 3350-3369.
- [95] Furner R, Williams J, Horsburgh K, et al. Adapting NEMO for use as the UK operational storm surge forecasting model. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [96] Qi J, Chen C, Beardsley R C, et al. An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): implementation, validations and applications. *Ocean Modelling*, 2009, 28(1): 153-166.
- [97] Roland A, Zhang Y J, Wang H V, et al. A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C11): 1-18.
- [98] Dietrich J C, Tanaka S, Westerink J J, et al. Performance of the unstructured-mesh, SWAN+ ADCIRC model in computing hurricane waves and surge. *J Scienti Comput*, 2012, 52(2): 468-497.
- [99] Westhuysen A, Anselmi C, Calzada R, et al. A Wave, Surge and Inundation Modeling Testbed For Puerto Rico and the US Virgin Islands. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [100] Forbes C, Van der Westhuysen A, Mattocks C, et al. Implementation of coupled storm surge plus waves modeling system at National Hurricane Center. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting/2nd JCOMM Scientific and Technical Symposium on Storm Surges, Key West, Florida, USA, November 8-13, 2015.
- [101] Yoon J J, Jun K C. Coupled storm surge and wave simulations for the Southern Coast of Korea. *Ocean Science Journal*, 2015, 50(1): 9-28.
- [102] Huang S, Xu J, Wang D, et al. Storm surge model based on variational data assimilation method. *Water Science and Engineering*, 2010, 3(2): 166-173.
- [103] Zheng X, Mayerle R, Xing Q, et al. Adjoint free four-dimensional variational data assimilation for a storm surge model of the German North Sea. *Ocean Dynamics*, 2016, 66(8): 1037-1050.
- [104] Madsen K S, Høyer J L, Fu W, et al. Blending of satellite and tide gauge sea level observations and its assimilation in a storm surge model of the North Sea and Baltic Sea. *J Geophys Res: Oceans*, 2015, 120(9): 6405-6418.