

21 世纪初海洋预报系统发展现状和趋势

方长芳, 张翔, 尹建平

(海军海洋水文气象中心, 北京 100073)

摘 要: 海洋预报是一切海上活动的基础, 人类社会需求驱动着海洋预报的发展。海洋观测、数据同化、数值模拟和高性能计算机等技术的进步推动着全球海洋业务预报的发展。国际先进的海洋数值模式有 NCOM、NCOM、HYCOM、NEMO、MOM、POM 和 ROMS 等。在 GODAE 和 GODAE OceanView 项目期间, 通过国际合作和交流, 全球海洋业务预报系统得到快速发展。21 世纪初, 全球海洋预报系统水平分辨率最高达到 $1/32^\circ$, 预报时效一般为一周, 部分海洋预报系统能够预报诊断海洋涡旋和海洋锋等。未来海洋预报系统的分辨率和预报精度将继续提高, 预报要素扩展到海洋生态和生物地球化学等学科。海洋数据同化技术、海洋物理过程参数化方案和模式耦合技术是推动海洋预报发展的重要研究方向。

关键词: 海洋预报; 海洋模式; 数值预报; GODAE; 数据同化

中图分类号: P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-0239(2013)04-0093-09

1 引言

21 世纪是海洋世纪, 海洋占地球表面的 70 %。据估计, 海洋油气储备占全球总资源的 34 %, 目前探明率为 30 %, 尚处于勘探早期阶段。丰富的油气和矿产资源、重要的海上贸易运输通道使得各国竞相争夺海洋领土和海洋权益。海洋、海权和海军是各国发展的重要方向和保障。

海洋预报是一切海上活动的基础。全球和区域海洋数据同化预报系统自 20 世纪 90 年代开始迅速发展, 主要原因有以下 4 个。(1) 海洋数值模拟技术和高性能计算机的发展; (2) 全球海洋观测系统的形成和发展, 使得获取的高质量海洋观测数据增多, 比如 ARGO、卫星高度计等数据; (3) 海洋数据同化方案技术的发展; (4) 社会和军事活动对海洋环境信息的迫切需求驱动着海洋分析预报技术的不断发展。人类社会对海洋分析预报的需求包括: 海洋业务化预报、台风预报、季节和气候预测、全球变化研究、海上航运、渔业、目标漂浮物的跟踪预

报、海上搜救、溢油预报、海上执法和管理、海上石油和天然气作业、海洋旅游等。海军是一个国际化军种, 各个国家要求其海军能在世界公海范围内自由活动, 海军对海洋分析预报的需求有: 水面舰艇的航行安全、作战训练、武器装备性能的发挥、维护国家海上权益、海外救援等。

1998 年, 国际海洋界、遥感界和气象界联合发起了持续 10 年全球海洋资料同化实验 GODAE (1998—2008)^[1], 通过国际合作和经验技术交流等途径, 极大地促进了全球海洋准实时多源观测数据集成融合技术、海洋数据同化技术和海洋预报系统的发展。GODAE OceanView 计划(2008-)是继 GODAE 之后的国际长期合作项目, 将继续支持海洋分析预报系统的研发和海洋人才的培养。GODAE OceanView 每年召开一次年会, 介绍主要海洋大国海洋预报系统的最新现状和发展计划。表 1 展示了 21 世纪初先进的全球或区域海洋预报系统, 海洋预报系统信息来源主要是 Dombrowsky^[2]和 GODAE OceanView 2011 年 11 月的年会报告^[3]。少部分海洋

收稿日期: 2012-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40706004)

作者简介: 方长芳(1983-), 女, 工程师, 从事气象和海洋预报和研究工作。E-mail: fangchangfang@126.com

预报系统包含的生态、生物地球化学模块,表1没有介绍。本论文的第二部分总结21世纪初国际海洋预报系统的总体特点,第三部分详细介绍各种海洋数值模式和海洋预报系统,第四部分是海洋预报系统发展展望。

2 21世纪初国际先进海洋预报系统的总体特点

2.1 海洋模式和海洋预报系统百花齐放

海洋模式是海洋数值预报系统的动力框架和核心组成部分。海洋模式自1969年诞生起就不断完善发展,至今已经有40多个海洋模式^[4],包括针对不同海域(大洋、近海、近岸、港湾)和不同海洋学科(物理海洋、海洋生态、海洋化学)的海洋模式。不同海洋模式的适用海域不同,模式特点各不相同。常用业务化海洋模式有HYCOM、NEMO、MOM、ROMS和POM等(见表1),将在第3部分详细介绍。全球海洋环流模式以HYCOM、NEMO和MOM为主要方向,区域海洋模式以ROMS为主,POM适合应用在陆架或沿海,还有应用于海峡、海湾和河口的ECOM、FVCOM和SLOSH模式等。无结构三角形网格可以在海峡、海湾和河口等面积狭小的重点海域进行网格加密,提高模式水平分辨率。

在人类社会活动需求的驱动下,根据所关注的预报海域和预报要素,世界各国使用各种海洋模式通过区域嵌套技术等建立了全球海洋预报系统、区域嵌套高分辨率海洋预报系统(见表1)以及针对海湾、河口和内陆湖泊等的多重嵌套高分辨率海洋预报系统。欧洲国家的海洋预报系统主要使用其共同开发的NEMO模式,美国则主要使用HYCOM、ROMS和POM等海洋环流模式。使用NEMO模式建立的海洋预报系统有法国的Mercator系统、英国的FOAM系统、意大利的MFS系统、加拿大的CONCEPTS系统等。使用HYCOM模式建立的海洋预报系统有美国的HYCOM/NCODA系统和RTOFS系统、挪威的TOPAZ系统、巴西的REMO系统、中国的西北太平洋海洋预报系统等。

2.2 海洋模式分辨率不断提高,预报时效一般为一周

在全球海洋预报系统中,NLOM模式的水平分

辨率最高,达到 $1/32^\circ$;FOAM模式的垂直分辨率最高,在10 m以上的海洋近表层垂直分辨率达到1 m。加拿大基于NEMO模式在北美洲五大湖区建立了水平分辨率为2 km的区域海洋预报系统^[5]。海洋模式分辨率影响对海洋环流、海洋涡旋等海洋中小尺度过程的模拟。模式各个纬度的局地水平分辨率必须等于或小于局地第一斜压Rossby波变形半径(纬度越高,斜压Rossby变形半径越小^[6]),模式才能分辨出海洋中尺度涡旋,较好地模拟海洋环流,这样的模式称涡旋识别模式(eddy resolving)^[7]。21世纪初,涡旋识别全球海洋预报系统有美国的NLOM、HYCOM/NCODA、RTOFS和法国的Mercator等(见表1)。

大气强迫场的预报时效影响海洋模式的预报时效。海洋预报系统的预报时效一般是一周。美国海军的NLOM模式可以提供海流、海洋中尺度涡等海洋中小尺度现象的一个月的预报。

2.3 海洋观测系统和海洋数据同化技术的发展促进了海洋预报的快速发展

海洋观测资料的匮乏是制约海洋预报发展的瓶颈之一。海洋观测数据获取的难度高、成本大,所以海洋观测数据稀少、时空分布不均匀。自1980年以来,海洋观测事业得到了国际社会的重视,资金投入增多,海洋观测技术不断进步:观测资料的类型和数量不断增多(特别是遥感资料)、时空采样变得密集、数据质量提高,海洋观测数据能够通过卫星、互联网等通信手段较快地(几个小时或几天之内)传输到数据应用中心,全球准实时海洋观测系统已经形成^[8]。海洋模式通过同化大量准实时海洋观测数据,提高了海洋预报的准确度。业务化应用的海洋数据同化方法有松弛逼近、最优插值、三维变分和Kalman滤波等。同化的观测资料主要有CTD、XBT、卫星高度计资料、Argo温盐剖面数据、高精度融合SST产品、海冰等^[9]。

2.4 海洋环境多学科要素预报和海洋环境耦合模式开始繁荣发展

随着人类开发利用海洋的脚步加快,海洋生态环境预报越来越受到重视,例如,渔业和渔业管理不仅需要物理海洋要素的预报,还需要生物地质化学/生态要素的预报。海洋环境多学科要素预报、海洋环境耦合模式及同化技术开始繁荣发展^[10]。物理

海洋要素和过程(温、盐、密、流等)影响海洋生物地质化学/生态过程,海洋生物地质化学/生态过程也会影响中小尺度物理海洋过程,因此大部分生物地球化学/生态模式已经实现与物理海洋模式的耦合。部分海洋模式(见表1)包含生物地球化学/生态模块,比如 NEMO、HYCOM、ROMS 和 FVCOM 等海洋模式。

3 海洋模式和海洋预报系统介绍

下面详细介绍各常用海洋模式以及使用该模式建立的海洋预报系统。

3.1 美国海军的 NLOM 和 NCOM

美国海军的全球海洋预报系统^[11]包括海军分层海洋模式(NLOM)、海军近海海洋模式 NCOM 和 HYCOM/NCODA 模式系统,由美国海军业务化全球大气预报系统(NOGAPS)的气象输出场驱动。NLOM 是原始方程模式,水平分辨率为 $1/32^\circ$,属于涡旋识别模式,垂直分辨率比较低,只有7层,包括海洋混合层和6个拉格朗日层,在垂直方向上物理过程比较简单。NLOM 同化卫星高度计资料和海面温度资料,提供海面高度、海洋涡旋和海洋锋等的30天预报。

NCOM 模式是基于 POM 和 sigma-z 混合坐标的自由表面原始方程模式。NCOM 水平分辨率低于 NLOM,但是垂直方向分辨率高于 NLOM,垂直共分为40层,海洋上层是 sigma 坐标(19层),海洋下层是 z 坐标(21层)。NCOM 在北极有两个极点,分别在北美大陆和亚洲大陆。变量水平网格配置有多种选择。NCOM 在北极与海冰模式 PIPS3.0 相耦合。NCOM 采用的数据同化方法是多变量最优插值(MVOI)。NCOM 每天做5天的三维温盐流预报,为沿岸区域高分辨率海洋模式提供边界条件。NCOM 可以与美国海军海气耦合中尺度预报模式(COAMPS)相耦合,进行区域海气耦合预报。

3.2 HYCOM 模式和 RTOFS、HYCOM/NCODA、TOPAZ、REMO 海洋预报系统

HYCOM^[12]是原始方程全球海洋环流模式,采用非 Boussinesq 近似。海洋垂直坐标、垂直分辨率和垂直混合参数化方案影响对海洋混合的模拟,进而影响对海洋环流和气候的模拟。HYCOM 模式在

垂直方向是混合坐标系,在大洋内部层化明显的海域使用等密度面坐标,在世纪时间尺度上保持水团的特性;在海洋上混合层(海洋层化较弱的海域)使用具有较高垂直分辨率的 z 坐标;在海洋近岸和海底地形起伏较大海域使用 σ 坐标(Sigma,地形跟随坐标)。HYCOM 具有等密度坐标的优点,同时在海洋上混合层、海洋近岸和海底具有较高分辨率,能够较好地模拟海洋上层。HYCOM 模式有多种垂直混合参数化方案,可以为海洋上混合层和跨等密度面混合相对较弱的大洋内部选择不同的垂直混合参数化方案,例如 KPP^[13], KT^[14], PWP^[15], MY-2.5^[16], GISS^[17-18]等方案。KPP 混合参数化方案^[10]能参数化多种海洋物理过程对混合的影响,包括海洋内部的内波破碎、剪切不稳定混合和双扩散(盐指和扩散不稳定)、风应力驱动、表面浮力强迫和对流不稳定等,还可以对温盐混合的非局地影响进行参数化^[9]。

HYCOM 模式是比较先进、应用广泛的海洋模式(见表1),应用于美国的 RTOFS、美海军的 HYCOM/NCODA、挪威的 TOPAZ、巴西的 REMO 和中国西北太平洋等海洋预报系统。NCEP 的实时海洋预报系统 RTOFS 基于 HYCOM 海洋模式建立,包括8个分潮,水平分辨率是 $1/12^\circ$,垂直有32层,属于涡旋识别模式。RTOFS 可以提供水位、海流、温度和盐度的预报,为局地和近岸物理海洋模式、海气耦合模式、生态地质化学模式等提供初始场和边界条件。RTOFS 包括全球海洋预报系统和大西洋预报系统,未来 NCEP 将实现 HYCOM 模式(RTOFS 系统)与台风预报模式 HWRF 和全球大气模式 GFS 的耦合^[19]。

美国海军的 HYCOM/NCODA 业务化海洋预报系统基于 HYCOM 2.2 建立,在极地与海冰模式 CICE 耦合在一起,水平分辨率是 $1/12^\circ$,垂直方向是32层的混合坐标,属于涡旋识别模式,大气驱动场来自 NOGAPS。HYCOM/NCODA 使用的数据同化方法是三维多变量最优插值(MVOI)。未来5年, HYCOM/NCODA 业务化预报将使用三维变分数据同化方法(3DVAR),模式水平分辨率将从现在的 $1/12^\circ$ 提高到 $1/25^\circ$,模式将考虑潮汐强迫和波浪的作用,将实现 HYCOM 模式与 CICE 海冰模式、WaveWatch III 海浪模式的双向耦合^[20]。

挪威基于 HYCOM 2.2.12 在大西洋和北冰洋建

立了 TOPAZ 区域海洋预报系统^[21],垂直方向是 28 层混合坐标,每周做一次 10 天预报,数据同化方法是集合 Kalman 滤波法(100 个集合成员),大气驱动场来自于 ECMWF 的 T799 全球大气模式每 6 h 的大气输出场。

巴西基于 HYCOM 2.2.14 在大西洋和南大西洋建立了 REMO 海洋预报系统^[22],水平分辨率分别是 $1/4^\circ$ 和 $1/12^\circ$,垂直方向是 21 层的混合坐标,每天做一次 7 天预报,使用 Cooper and Haines 的同化方法同化海面高度数据^[23],大气驱动场是 NCEP 的 GFS 模式每 3 h 的大气输出场。

3.3 NEMO 模式和 Mercator、FOAM、MFS、CONCEPTS 海洋预报系统

NEMO 海洋模式系统由法国、英国和意大利共同研发,应用于 27 个国家的 270 项科学计划中。本文关于 NEMO 模式的介绍主要来自于 NEMO 2012 年的用户手册^[24]。NEMO 主要包括海洋模式 OPA, OPA 的切线性伴随模式 TAM(用于数据同化),海冰模式 LIM 和海洋生物地球化学模式 TOP。NEMO 模式系统的海洋模式 OPA 是一个原始方程海洋环流模式,采用 Boussinesq 和静力近似,正交曲线坐标,Arakawa-C 网格,垂直坐标可以采用 z 坐标或者 S 坐标^[34]。OPA 海洋模式可以用于模拟预报全球和局地海洋环流,也可以用于研究海洋与大气、海冰等之间的关系。物理过程参数化方案和数值计算算法是数值模拟技术的核心技术,OPA 海洋模式有多种成熟先进的物理参数化方案和数值计算算法供选择。物理过程参数化方案包括海洋侧向混合、垂向混合、对流、双扩散混合、底摩擦和潮致混合等参数化方案。垂向混合参数化方案包括 KPP^[13]、TKE^[25]和 GLS^[26]。

NEMO 模式系统主要用于海洋业务化预报、海洋科学研究和气候研究,应用于法国的 Mercator^[27]、英国的 FOAM^[28]、意大利的 MFS^[29]和加拿大的 CONCEPTS^[5]等海洋预报系统中。Mercator 和 FOAM 的全球海洋预报系统都有 $1/4^\circ$ 和 $1/12^\circ$ 两个版本,全球 $1/4^\circ$ 版本为高分辨率区域海洋模式提供边界条件,全球 $1/12^\circ$ 版本是涡旋识别模式,可以预报诊断海洋涡旋等;在垂直方向选用 z 坐标,共 50 层,在海洋近表层(10 m 深度以上)的垂直分辨率可以达到 1 m。Mercator 全球海洋预报系统每周一次做 14 天的预

报,北大西洋和地中海区域模式每天一次做 7 天的预报;大气驱动场是欧洲中期天气预报中心(EC-MWF)的每 3 h 的大气输出场。加拿大基于 NEMO 建立了全球($1/4^\circ$)和西北大西洋($1/12^\circ$)海洋预报系统,还在北美洲五大湖区建立了水平分辨率为 2 km 的海洋预报系统。意大利的地中海高分辨率海洋预报系统 MFS,是欧洲海洋核心信息服务计划(MyOcean 计划)的地中海子系统,水平分辨率是 $1/16^\circ$,垂直坐标有 72 层,在海洋近表层的垂直分辨率是 3 m。

Mercator 和 CONCEPTS 系统现在使用的数据同化系统是 SAM2,同化方法是奇异演化扩展 Kalman 滤波法(SEEK);MFS 使用三维变分和松弛逼近法(OCEANVAR 同化系统);FOAM 使用客观分析校正法和三维变分法(NEMOVAR 同化系统)。

3.4 MOM 模式及其应用

美国海洋大气管理局地球物理流体力学实验室(GFDL)研发的模块化海洋模式 MOM^[30]是自由表面原始方程海洋模式,采用非 Boussinesq 近似和静力近似,垂直坐标是 z 坐标,变量空间配置采用 Arakawa B 网格。MOM 采用水平正交坐标,有三个极点,在北极有两个极点,一个在西伯利亚,另一个在北美大陆。MOM 的单一 z 坐标使其具有一定局限性,但也具有其他优点。MOM 采用非 Boussinesq 近似,模式动能方程、动量方程和物理方案基于质量守恒框架,考虑海洋热容量变化(steric effect)对海洋高度的影响,因此对海面高度的预报优于采用 Boussinesq 近似(体积守恒)的海洋模式。此外, MOM4 还考虑月球引潮力对海面高度的影响。MOM 的垂直混合参数化方案有 KPP、Richardson 数决定的涡动混合系数法^[31]等。

MOM 主要用于海洋气候系统研究和海洋预报。MOM4 是海气耦合气候模式 GFDL_CM2 的海洋模式, MOM3 在美国国家环境预报中心用于预测厄尔尼诺。澳大利亚的 BLUElink > 全球海洋预报系统^[32]基于 MOM4p1 模式建立,水平分辨率是 1° ,在澳洲附近海域水平分辨率是 $1/10^\circ$,垂直坐标是 z 坐标,共 47 层,海洋近表层垂直分辨率达 5 m,每 4 天做一次 7 天预报。国家海洋局海洋环境预报中心基于 MOM4 建立了全球和热带太平洋海洋预报系统^[33]。

3.5 日本的MRI.COM

日本气象研究所海洋模式MRI.COM^[33]基于原始方程,垂直坐标是 σ - z 混合坐标,共有54层,其中24层位于海洋上200 m。MRI.COM每5天做一次60天的预报,分为全球、北太平洋和西北太平洋三个区域,分辨率分别为 1° 、 $1/2^\circ$ 、 $1/10^\circ$,未来将在日本周边再嵌套一个分辨率为2 km的预报区域。大气驱动场由日本气象厅(JMA)气候数据同化系统(JCDAS)提供,使用逐日气候态海冰数据。使用三维变分同化船舶报、浮标、温盐剖面 and 卫星高度计等资料。

3.6 ROMS模式及其应用

ROMS^[34]是自由表面、原始方程海洋模式,采用Bousinesq近似和静力近似。水平方向使用正交曲线坐标,变量空间配置采用Arakawa C网格,垂直坐标采用S坐标(Stretched Terrain-following Coordinates)。S坐标是一种地形追随坐标,可以在重点关注海域增加分辨率,比如海洋温跃层和海底边界层附近,能够较好地模拟海洋边界层(上边界层和底边界层)和边界层流。ROMS垂直混合参数化方案采用的局地闭合方案有MY-2.5^[16]、TKE^[25]和GLS^[26]混合参数化方案,非局地闭合方案有KPP方案^[13]。ROMS可以进行四维变分和集合预报。ROMS模式系统的动力框架包括四个模式:非线性模式(NLM)、切线性模式(TLM)、代表切线性模式(RPM)和伴随模式(ADM),这四个模式可以单独运行,也可以共同运行。ROMS包含准确高效的物理方案和数值计算方案算子,可以与生物地球化学、生物光学、沉积和海冰等模块耦合在一起。

ROMS主要应用于海洋近岸和河口海洋环境预报。美国海军使用ROMS模式,以菲律宾群岛为中心建立了区域海洋预报系统(100° — 140°E , 18°S — 25°N)。迈阿密大学、NOAA和美国海军等部门使用ROMS模式在墨西哥湾和加勒比海域建立了区域海洋预报系统。印度基于ROMS、MOM、HYCOM、Wave Watch III和WAM等海洋模式建立了印度的海洋预报系统(INDOFOS),可以提供全球、印度洋、局地海域、沿岸和定点的海浪、表层流、海表面温度、混合层深度和温跃层深度预报。

3.7 POM模式及其应用

POM^[35]是一个自由表面、三维斜压原始方程海

洋模式,采用静力近似和Boussinesq近似,包含完整的热力学过程。垂直坐标是单一的 σ 坐标(即地形跟随坐标),水平坐标是正交曲线坐标,变量空间配置使用Arakawa C网格。垂向混合系数由MY-2.5湍流闭合模型^[13]确定。水平时间差分采用显式格式;垂直时间差分采用隐式格式,垂向不受CFL条件限制,可以在海洋表层和底层提高分辨率。 σ 坐标适用于地形变化显著的海域,如河口和陆架斜坡等。湍流闭合模型与 σ 坐标的完美结合,能够使POM模式比较理想地模拟出海洋底边界层,这对研究海岸和河口动力过程、海洋底层水形成过程、海盆斜压性等具有重要意义。

POM模式可以模拟海洋中的多尺度现象,比如河流、河口、海洋大陆架和斜坡、湖泊、半封闭海域、外海的海洋环流和海洋混合过程。POM模式被广泛地应用于海洋近岸、河口的海洋业务化预报(温、盐、流、水位)和研究中,应用海域包括西北大西洋、西北太平洋、美国东海岸、墨西哥湾和哈得逊湾、北冰洋、地中海、中国近海等。国家海洋局海洋环境预报中心和第一海洋研究所基于POM模式建立了全球和区域海洋预报系统(见表1)^[36]。

4 海洋预报系统的发展趋势

海洋预报的发展离不开海洋科学基础理论、海洋观测、海洋资料同化、数值模拟和高性能计算机等技术的发展进步。海洋预报系统的发展趋势主要有以下五点。

(1) 高分辨率高精度海洋模式的发展

高分辨率高精度海洋模式需要准确的大气驱动场、丰富的海洋观测资料、先进的海洋数据同化技术、成熟的海洋物理过程参数化方案和高性能并行计算技术等。人类社会的需求驱动高分辨率高精度海洋模式的发展。海洋斜压Rossby波变形半径远小于同纬度大气斜压Rossby波变形半径,因此,模拟海洋中小尺度现象需要更高的模式水平分辨率。高分辨率海洋模式能够模拟预报海洋沿岸流、海洋涡旋、海洋锋等海洋中小尺度过程。海洋中尺度涡是重要的“海洋天气现象”,模拟和预报海洋涡旋是未来物理海洋模式的发展趋势之一。模式水平分辨率的提高意味着计算量以级数倍增加,需要高性能并行技术优化海洋模式,提高计算速度

和效率。

(2) 海洋观测特别是海洋遥感的发展

21 世纪初,海洋观测有了较大发展,但是还是不能满足海洋环境业务化预报的需求。海洋观测的发展将为海洋业务化预报提供更加丰富准确的准实时观测资料。海洋观测数据的快速传输依赖于发达的信息传输网络。海洋观测系统实验(OSE)和海洋观测系统模拟实验(OSSE)^[37]可以规划设计和检验评估海洋观测系统。

在全球大气模式中,气象卫星遥感资料占有同化资料的 90 %。海洋卫星遥感将发展成为海洋观测的主要手段,极大地丰富准实时观测数据来源。2020 年前,中国将有 18 颗陆海资源卫星在轨运行,其中包括 8 颗海洋卫星,海洋卫星遥感产品的业务化应用将是重点研究方向。

(3) 海洋数据同化技术的发展

研究同化海洋多源观测资料特别是海洋卫星遥感数据的数据同化方法,比如三维变分,四维变分, Kalman 滤波,变分同化和集合 Kalman 滤波的结合方法等。大气四维变分同化已经实现了业务化应用,但是海洋四维变分业务化应用困难比较大,主要原因是计算量太大。王斌等人^[38]发展了后向映射四维变分法,该方法考虑了模式约束,同化后的初值场和模式协调,计算量小,不需要伴随,协方差流依赖。

(4) 海洋物理过程参数化方案的完善优化

海洋物理过程参数化方案的优化需要大量模拟实验和模式检验评估反馈,根据所关注现象的时空尺度等特点的不同,同一物理过程适用的参数化方案可能也不同。海洋关键物理过程参数化方案主要包括:海洋中小尺度过程参数化方案、海洋垂直过程参数化方案、海洋侧向混合参数化方案、潮汐潮流参数化方案、波致混合参数化方案、河口径流参数化方案、太阳短波辐射参数化方案等。潮汐潮流参数化方案考虑太阳和月亮潮汐引潮力的影响,现在有的潮波模式考虑了 11 个分潮。作为海气边界层重要海洋现象的海浪,对于大气海洋之间的动量、水汽和物质的交换起着重要作用,对于海洋混合和海流的模拟具有重要意义。太阳短波辐射对海水的辐射加热与地理位置、海水深度、海水光学性质、海洋生态环境等有关。Morel and Antoine

的短波穿透模式^[39]是常用的太阳短波辐射参数化方案,考虑了太阳短波辐射三个光谱段的衰减吸收。随着海洋卫星事业的发展,同化海洋水色卫星遥感产品,可以显著提高对太阳短波辐射加热的模拟水平。

(5) 海洋环境多学科要素预报和耦合模式的发展

地球气候系统是一个多圈层相互作用的复杂系统,海洋子系统起着重要作用。海洋、大气、海浪、海冰、陆地、生态、化学等模式之间的耦合是海洋环境预报的研究热点。例如,国外内有关学者已经实现了 WRF 区域大气模式和 ROMS 区域海洋模式的耦合,物理海洋模式和生态模式的耦合(第 2 部分有介绍),美国海军已经实现中尺度海气耦合模式 COMAPS 和 NCOM 的双向耦合。海洋环境耦合模式的数据同化技术也是难点之一。例如,海洋和大气的时空特征尺度、模式时间积分步长和模式敏感度不一样,使得大气海洋耦合模式的数据同化更加复杂。

参考文献:

- [1] Bell M J, Lefebvre M, Le Traon P Y, et al. GODAE: The Global-Ocean Data Assimilation Experiment[J]. *Oceanography*, 2009, 22(3):14-21.
- [2] Dombrowsky E, Bertino L, Brassington G B, et al. GODAE systems in operation [J]. *Oceanography*, 2009, 22 (3):80-95.
- [3] GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011 [R]. Paris:The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team,2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>
- [4] 中国气象数值模式联盟.各种海洋模式及网站链接 <http://www.mnmuc.org/thread-137-1-1.html>
- [5] Canada GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011: Canada CONCEPTS [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011.<https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>.
- [6] Chelton D B, DeSzoeke R A, Schlax M G, et al. Geographical Variability of the First Baroclinic Rossby Radius of Deformation[J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 1998, 28(3): 433-460.
- [7] Hurlburt H E, Chassignet E P, Cummings J A, et al. Eddy-resolving global ocean prediction[J]. *Ocean Modeling in an Eddy-resolving Regime*, *Geophys. Monogr. Ser.*, 2008, 177: 353-381.
- [8] Clark C, the In Situ Observing System Authors, Wilson S and the Satellite Observing System Authors. An overview of global

- observing systems relevant to GODAE[J]. *Oceanography*, 2009, 22(3):22-33.
- [9] Cummings J, Bertino L, Brasseur P, et al. Ocean data assimilation systems for GODAE[J]. *Oceanography*, 2009, 22(3): 96-109.
- [10] Brasseur P, Gruber N, Barciela R, et al. Integrating biogeochemistry and ecology into ocean data assimilation systems[J]. *Oceanography*, 2009, 22(3):206-215.
- [11] Rhodes R C, Hurlburt H E, Wallcraft A J, et al. Navy Real-time Global Modeling Systems[J]. *Oceanography*, 2002, 15:29-43.
- [12] Bleck R, Halliwell G, Wallcraft A, et al. Hybrid Coordinate Ocean Model User's Manual [M], 2002.
- [13] Large W, McWilliams J, Doney S. Oceanic vertical mixing: A review and a model with nonlocal boundary layer parameterization [J]. *Rev. Geophys.*, 1994, 32: 363-403.
- [14] Bleck, R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates [J]. *Ocean Modelling*, 2002, 4:55-88.
- [15] Price J F, Weller R A, Pinkel R. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91:8411-8427.
- [16] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, 20: 851-875.
- [17] Canuto V M, Howard A, Cheng Y, et al. Ocean turbulence. Part I: One-point closure model. Momentum and heat vertical diffusivities[J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 2001, 31: 1413-1426.
- [18] Canuto V M, Howard A, Cheng Y, et al. Ocean turbulence. Part II: Vertical diffusivities of momentum, heat, salt, mass, and passive scalars [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 2002, 32:240-264.
- [19] Tolman H and Mehra A. GOVST-III meeting presentations: RTOFS Global Status and Plans [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/presentations/>.
- [20] Chassignet E, Cummings J, and Hogan P. GOVST-III meeting presentations: HYCOM reports [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/presentations/>.
- [21] Norway GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011: Norway TOPAZ [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>.
- [22] Brazil GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011: Brazil REMO [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>.
- [23] Cooper M and Haines K. Altimetric assimilation with water property conservation [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(C1): 1059-1077.
- [24] Gurvan M and the NEMO team. NEMO ocean engine [M]. France, Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), 2012. <http://www.nemo-ocean.eu/About-NEMO/Reference-manuals>
- [25] Bougeault P and Lacarrere P. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, 117 (8): 1872-1890.
- [26] Umlauf L, Burchard H. A generic length-scale equation for geophysical turbulence models [J]. *J. Mar. Sys.*, 2003, 61 (2) : 235-265.
- [27] France GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011: France Mercator [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>
- [28] UK GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011: UK FOAM [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>
- [29] Italy GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011: Italy MFS [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>
- [30] Griffies S M. ELEMENTS OF MOM4P1. Princeton: NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 2010. <http://www.gfdl.noaa.gov/ocean-model>
- [31] Pacanowski R C and Philander G. Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 1981, 11: 1442-1451.
- [32] Australia GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011: Australia BLUElink [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>
- [33] Japan GODAE OceanView Science Team. GODAE OceanView National Reports 2011: Japan MOVE/MRI.COM [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/report/>
- [34] ROMS 海洋模式网站. ROMS 用户手册 https://www.myroms.org/wiki/index.php/Documentation_Portal.
- [35] Mellor, G. L., Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive

- Equation Numerical Ocean Model. Available on the Princeton Ocean Model web site [M]. 2004, Web site: <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>.
- [36] Wang H. GOVST-III meeting presentations: China-NMEFC [R]. Paris: The 3rd meeting of the GODAE OceanView Science Team, 2011. <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/govst-iii-meeting/presentations/>.
- [37] Oke P R, Balmaseda M A, Benkiran M, et al. Observing system evaluations using GODAE systems[J]. *Oceanography*, 2009, 22 (3):144-153.
- [38] Wang B, Liu J J, Wang S D, et al. An economical approach to four-dimensional variational data assimilation[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 2010, 27(4): 715-727.
- [39] Morel A and Antoine D. Heating rate within the upper ocean in relation to its bio-optical state[J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, 24: 1652-1665.

Development status and trends of ocean forecasting system in the 21st Century

FANG Chang-fang, ZHANG Xiang, YIN Jian-ping

(*Navy Marine Hydrometeorological Center of Chinese PLA, Beijing 100073 China*)

Abstract: Ocean forecast is the basis of human marine activities. The human demand on ocean environment information drives ocean forecast to advance, with the development of ocean observing system, data assimilation, ocean numerical modeling, and supercomputer. The most popular ocean models are NLOM, NCOM, HYCOM, NEMO, MOM, POM, and ROMS et al. During the GODAE and GODAE OceanView programs, the global ocean operational forecast systems develop and prosper fastly through international cooperation and intercommunication. At the beginning of the 21th century, the highest horizontal resolution of global ocean forecast systems is $1/32^{\circ} \times 1/32^{\circ}$, and the longest forecast lead-time is 60 days. Some high resolution global ocean forecast systems can predict and diagnose ocean eddy and front. In the future, ocean forecast systems will do better with higher resolution and less forecast bias, and will provide ecological and biogeochemical forecast. Ocean data assimilation, physical process parameterization and model coupling are crucial for ocean forecast development in the future.

Key words: ocean forecast; ocean model; numerical forecast; GODAE

表1 21 世纪初国际先进的海洋预报系统

国家机构	系统名称	海洋模式	地理范围	水平分辨率	垂直层数和坐标	预报时效	数据同化方法和系统
美国海军研究实验室	NLOM/	NLOM	全球	1/32°	7 层	30 天	最优插值, 增量分析更新法 (IAU), 松弛通近, modas 同化系统, NCODA 同化系统
	NCOM	NCOM, CICE 海冰模式	全球	1/8°	40 层, σ -z 混合坐标	4 天 5 天	
美国海军海洋局	HYCOM/NCODA	HYCOM, PIPS 海冰模式	全球	1/12°	32 层, 混合坐标	7 天	三维多变量最优插值、三维变分同化法、IAU 法, NCODA 系统
美国国家环境预报中心 (NCEP)	RTOFS	HYCOM	全球	1/12°	32 层, 混合坐标	6 天	三维变分
			大西洋	4~17 km	26 层, 混合坐标		
法国	Mercator	NEMO, LIM2_EVP 海冰模式	全球	1/4°和 1/12°	50 层, z 坐标	14 天	奇异演化扩展 Kalman 滤波法 (SEEK), SAM2 数据同化系统
			北大西洋、地中海	1/12°		7 天	
英国气象局	FOAM	NEMO, LIM2 海冰模式	全球	1/4°	50 层, z 坐标	6 天	客观分析校正和 IAU 法
意大利	MFS	NEMO, WAM 海浪模式	北大西洋、地中海、印度洋	1/12°		10 天	三维变分, SST 松弛通近
			地中海	1/16°	72 层, z 坐标		
加拿大	CONCEPTS	NEMO 3.1, CICE 海冰模式	全球	1/4°		10 天	海冰三维变分, SAM2 数据同化系统
			西北大西洋	1/12°	50 层, z 坐标		
澳大利亚	BLUEink	MOM4	全球	1°	47 层, z 坐标	7 天	多变量集合最优插值, BODAS 同化系统。
日本气象厅	MOVE/MRIL COM	MRICOM	亚澳地区	1/10°		60 天	三维变分, 增量分析更新方法
			全球	1°			
			北太平洋	1/2°			
			西北太平洋	1/10°			

续表

国家机构	系统名称	海洋模式	地理范围	水平分辨率	垂直层数和坐标	预报时效	数据同化方法和系统
挪威	TOPAZ	HYCOM	大西洋和北冰洋	11—16 km	28层, 混合坐标	10天	集合Kalman滤波(100个集合成员)
巴西	REMO	HYCOM	大西洋 南大西洋	1/4° 1/12°	21层, 混合坐标	7天	Cooper和Haines的同化方法
印度	INDOFOS	MOM4 ROMS 3.3	全球 印度洋	1/2°x 1/3° —1° 1/8°	40层, z坐标 40层, σ坐标	5天	三维变分 SST松弛逼近 暂无
国家海洋局 海洋环境 预报中心 (NMEFC)	MOM海洋 预报系统 POM海洋 预报系统	MOM4 POM	全球 热带太平洋 西北太平洋 渤海	1/2° 1/4° 1/2° 1/8° 1/24°	50层, z坐标 21层, σ坐标 30层 11层	7天 3天	松弛逼近 松弛逼近, 最优插值, 正研发三维变分同化系统。
国家海洋局第 一海洋 研究所	HYCOM海洋 预报系统 浪潮流耦合 海洋模式 海浪模式	HYCOM POM, MASNUM 海浪模式	全球 北太平洋 全球 西北太平洋 中国近海	1/4° 不均匀网格 1/2° 1/8° 1/24°	22层, 混合坐标 21层 33层 33层, σ坐标	3天 3天	集合最优插值, 正研发集合 Kalman滤波同化系统。 最优插值, 正研发Kalman滤波 和简化Kalman滤波同化系统。