

高分辨率浪-潮-流耦合数值预报系统的业务化运行与检验分析*

张 权¹, 王 燕¹, 王关锁^{2,3}, 张 涛¹, 杨永增^{2,3}

(1. 海军海洋水文气象中心, 北京 100161;

2. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要:依据我国独立发展的浪致混合理论, 基于 MASNUM 第三代海浪数值模式和三维 POM 海流数值模式, 研制开发了高分辨率浪-潮-流耦合数值预报系统并进行了(准)业务化运行与预报产品精度检验。该浪-潮-流耦合数值预报系统能够提供全球、西北太平洋和中国近海三个海域不同分辨率的海浪、海流以及温度、盐度等数值预报产品。基于卫星遥感数据、浮标数据等海洋环境观测资料, 实现了海洋数值预报产品检验功能, 自动化生成预报产品精度的逐月检验报告。业务化运行及检验结果表明, 该数值预报系统运行稳定, 预报产品具有较高精度, 达到业务化预报要求。

关键词:数值预报; 业务化; 浪-潮-流耦合; 检验

中图分类号: P731.3

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2011)02-0129-08

受理论发展和计算能力的限制, 前人基于海洋波浪、环流和潮流等单一动力过程建立数值预报模式^[1-4]。但上述多尺度海洋动力过程之间存在显著的相互作用, 发展耦合数值预报技术, 研制开发耦合数值预报系统, 是当今海洋数值预报发展的一个主要方向。

依据我国独立发展的浪致混合理论, 基于 MASNUM(key laboratory of Marine Science and Numerical Modeling)第三代海浪数值模式和 POM(Princeton Ocean Model)三维海流模式, 建立了浪-潮-流耦合数值模式^[5]。其采用的海浪数值模式是在 LAGFD-WAM 第三代海浪数值模式^[3-4]基础上发展起来的球坐标系下并行化 MASNUM 海浪数值模式^[6-7], 采用的海流模式是基于三维斜压控制方程上的并行化 POM 海流数值模式^[8]。上述模式已经成功应用于全球和中国海模拟, 进行了浪-潮-流耦合试验^[5,9-14]。为了满足业务化应用需求, 本研究研制开发了高分辨率浪-潮-流耦合数值预报系统, 并实现了海洋数值预报产品检验功能, 对海面风场、波高、海表温度、海流等数值预报产品精度进行自动化快捷评估。2006-07 该预报系统在银河 IV 高性能计算平台上准业务化运行, 2009-09 移植到神威 3000A 高性能计算平台, 转入业务化运行, 至今已形成近 4 a 的逐月检验报告。本研究重点介绍该预报系统的系统组成、运行流程、监控及预报产品检验功能, 并进行综合分析。

1 高分辨率浪-潮-流耦合数值预报业务系统

1.1 系统组成

依据业务化预报要求, 该预报系统进行了一体化结构设计、模块化开发和标准化接口。系统设计过程

* 收稿日期: 2010-04-21

资助项目: 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目——波浪破碎对上层湍流运动的作用(GY02-2007G15)

作者简介: 张 权(1966-), 男, 江苏高邮人, 工程师, 主要从事数值预报方面研究。E-mail: lugui@yahoo.com.cn

(张 骞 编辑)

中,充分考虑了系统的可扩展性和继承性,使之具备灵活方便的二次开发功能,便于维护和升级;预报系统核心模块实现了基于 MPI 通讯机制的并行化功能^[6,8],系统易于在不同架构的计算平台上移植。

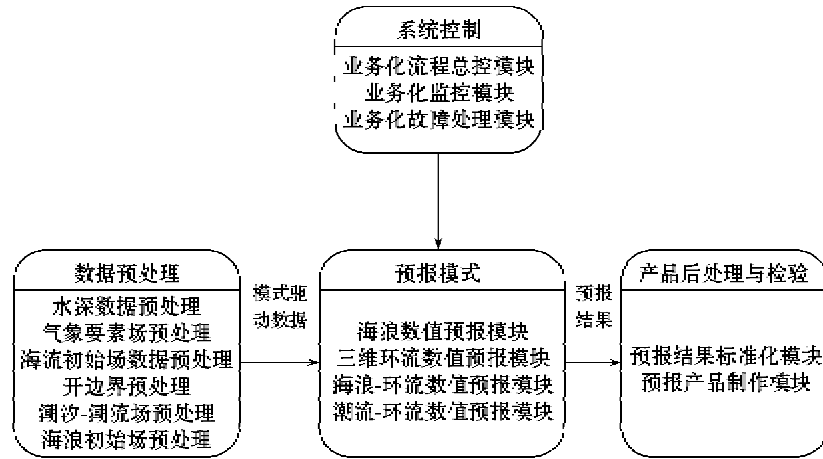


图 1 预报系统流程图

Fig. 1 Flow chart for the forecast system

该预报系统由 4 个子系统组成(图 1),包括系统控制子系统、数据预处理子系统、预报模式子系统和预报产品后处理子系统。预报模式子系统里的海浪数值预报核心模块提供预报海域有效波高、波向等预报产品,并为海浪-环流耦合模块提供耦合过程所需波致混合参数;环流数值预报核心模块提供预报海域的三维海洋温度、盐度、水位和海流等预报产品;海浪-环流耦合核心模块实现海浪-环流耦合功能。

数值模式嵌套计算采用三重嵌套方案实现边界条件的处理(图 2),3 个预报区域分别为全球海域($90^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{N}$, $0\sim 360^{\circ}\text{E}$)、西北太平洋海域($0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $99^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)和中国近海海域($15^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$);水平分辨率分别是 $(1/2)^{\circ}\times(1/2)^{\circ}$ 、 $(1/8)^{\circ}\times(1/8)^{\circ}$ 和 $(1/24)^{\circ}\times(1/24)^{\circ}$;环流模式垂向采用 σ 坐标,垂直分为 21 层。

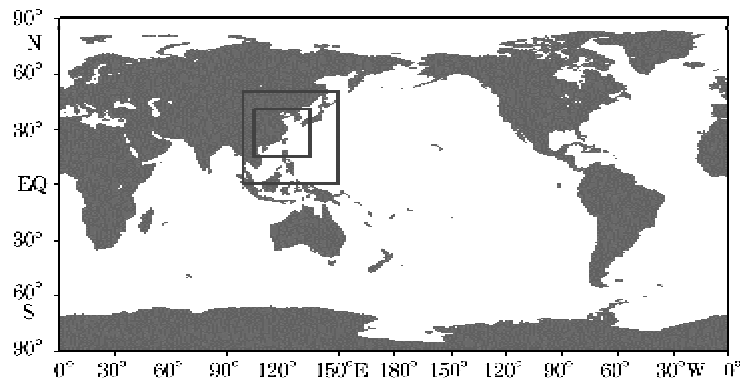


图 2 预报系统嵌套示意图(2 个矩形框代表西北太平洋和中国邻海海域)

Fig. 2 Sketch showing the nested domains for the forecast system

(The two rectangulars are respectively for the seas adjacent to China and the northwestern Pacific Ocean)

1.2 系统运行流程及监控

1.2.1 运行流程

该数值预报系统以神威 3000A 高性能计算机(理论峰值为 23 万亿次/s)作为运行平台。每日 00:30 (CST)定时启动,制作前一天 20:00(CST)作为起报时的预报。整个业务过程完成需要时间约为 50 min(墙

钟时间),能够满足日常保障需要。具体业务流程如下:

- 1) 获取预报模式子系统所需的强迫场和同化数据;
- 2) 启动资料同化模块,生成预报模式子系统启动的合理初始场;
- 3) 启动预报模式子系统,进行 72 h 数值预报;
- 4) 预报结束后,产品后处理子系统生成标准数据格式,制作图形图像产品。

在预报模式子系统 72 h 预报中,海浪模式核心模块执行流程与环流模式核心模块类似,以下只介绍后者流程设计(图 3):1)启动全球海流预报模块,当模块启动条件满足,开始全球环流 72 h 预报产品制作,同时生成西北太平洋海流预报模块的实时边界数据;2)启动西北太平洋海流预报模块,检查该预报模块所需的边界数据,如果条件满足,开始西北太平洋海流 72 h 预报产品制作,同时生成中国近海海流预报模块边界数据;3)启动中国近海海流预报模块,检查所需边界条件,如果条件满足,则开始制作中国近海 72 h 预报产品;4)海流预报模块结束。

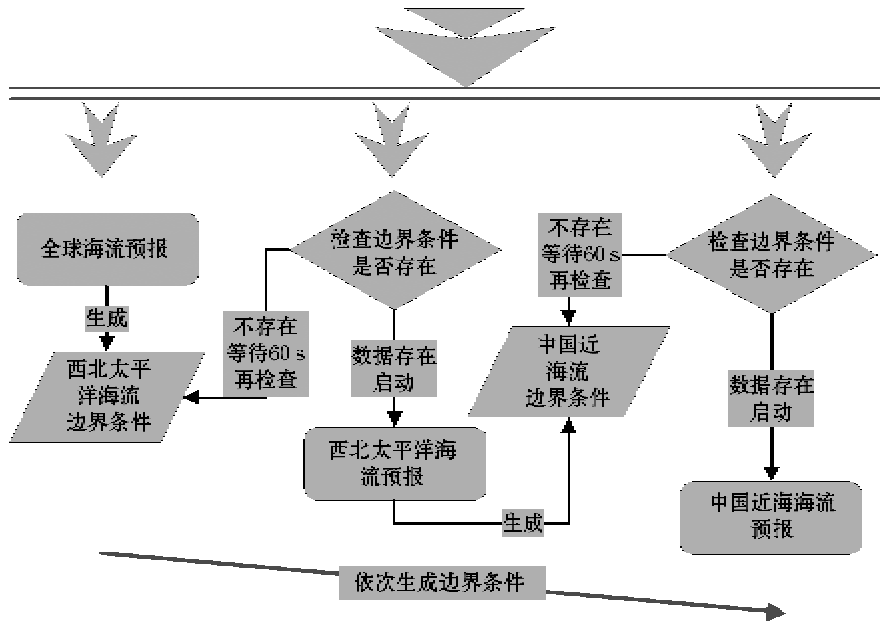


图 3 海流预报边界条件处理过程

Fig. 3 The process for treatment of boundary conditions in current forecast

1.2.2 系统监控

为方便业务保障人员监控和管理该数值预报系统,本研究基于 Linux 操作系统平台,研发了网页式业务监控系统。该业务监控系统由两大功能系统组成:服务端监控调度系统和客户端 Web 网页监控显示系统。服务端监控调度系统基于 Supervisor Monitor Scheduler (SWASM)程序库,实现业务流程调度;客户端监控显示系统通过 SW Command and Display(SCMD)命令行控制和显示程序实现与服务端系统通讯。

在业务监控界面(图 4),所有功能子模块用节点表示,节点包括目录节点和任务节点。文件夹图标表示目录节点,由一组任务节点或目录节点组成;任务节点用文件图标代表,表示实际可执行文件,节点当前所处状态用不同颜色表征。点击存在的任务节点,可以查看该任务节点概况,并能对该任务实现排队、执行、阻塞、继续、终止、完成的操作。

该数值预报系统提供的全球海域、西北太平洋海域和中国近海海域 72 h 预报产品可实时显示。海浪预报产品包括有效波高、主波向、跨零周期、谱峰周期等;海洋环流预报产品包括温度、盐度和海流等。图 5 和图 6 为中国近海 2009-08-09 T 20:00 的 72 h 数值预报图形图像产品,图 5 a, b, c, d 分别是 0,24,48 和 72 h 预报波高、波向分布,图 6 a, b, c, d 分别是 0,24,48 和 72 h 预报表层海温、流速分布。



图 4 业务监控界面

Fig. 4 The operational monitoring interface

2 数值预报产品检验

预报产品检验功能依据业务化保障需求设计,每月 15 日对上月数值预报产品进行检验,形成月检验报告文档,检验要素包括 24, 48, 72 h 的海面风场、波高、海表温度等预报产品。用于系统检验的观测数据包括卫星高度计波高数据(Jason-1)、微波遥感观测海面温度数据(SST)、NDBC 浮标数据、ARGO 数据、中国近海浮标和台站数据等多源多要素观测数据。观测数据来源见表 1。

表 1 用于系统检验的观测数据来源

Table 1 Observational data sources for the system verification

数据类型	观测平台	数据来源
海面风场	QuikSCAT	http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat
海浪波高	Jason-1	http://www.avisioceanobs.com/中国浮标和台站等
海面温度	ftp.discover-earth.org/NDBC 浮标	http://www.ndbc.noaa.gov/rmd.shtml 中国浮标和台站等

2.1 数据预处理

数据预处理包括观测数据预处理和预报数据预处理。观测数据预处理包括 ARGO 数据预处理、AVISO 数据预处理、风场数据预处理、NDBC 预处理数据和海表面温度数据预处理等 5 部分。该预处理主要实现对观测数据的观测信息提取和质量控制。观测信息提取过程主要输出观测数据的观测时间和观测位置信息,形成预报产品预处理的输入文件;质量控制过程通过误差控制软件剔除无效观测数据,利用 Fourier 级数展开、积分变换等数学工具滤除高频噪音,将有效数据转存储为标准格式。

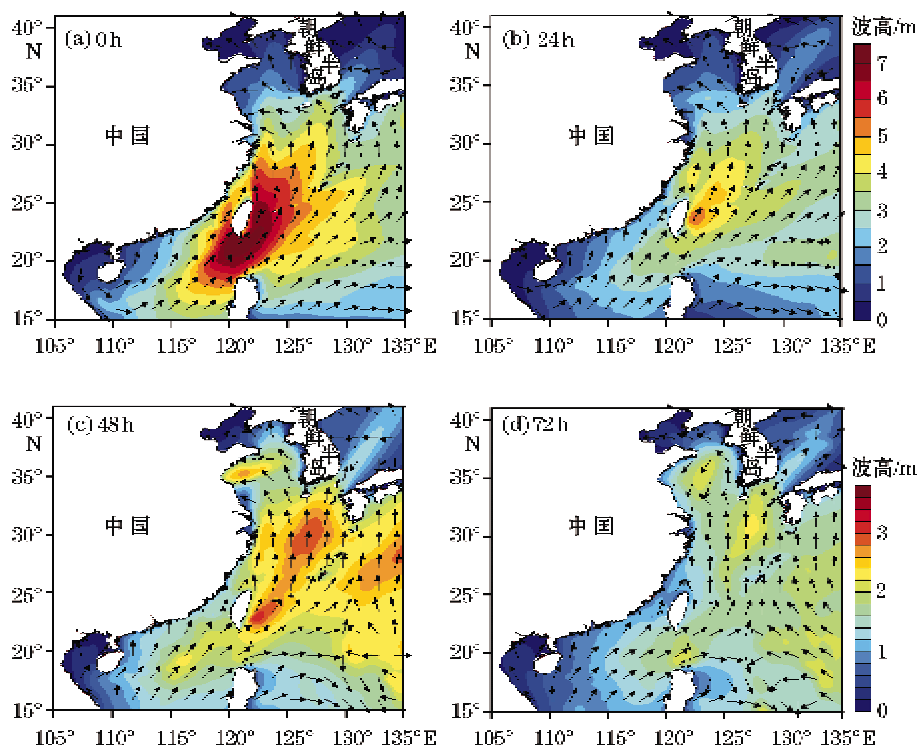


图 5 高分辨率浪潮流耦合数值预报系统预报波高、波向分布

Fig. 5 Distributions of the forecasted significant wave height and wave direction by mean of the wave-tide-current coupling numerical forecast system with fine resolution

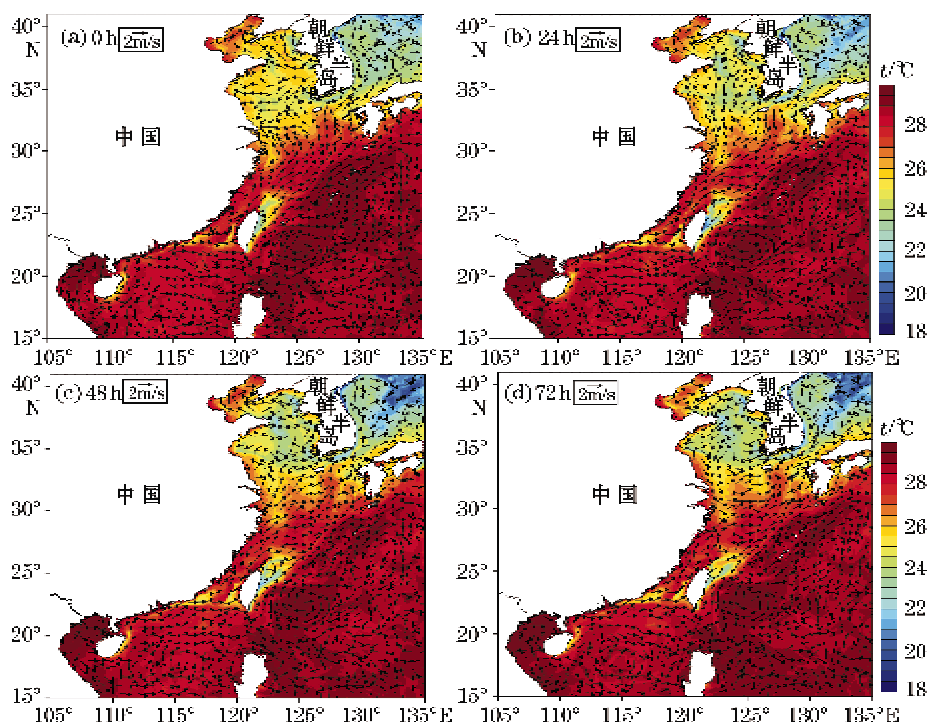


图 6 高分辨率浪潮流耦合预报系统预报表层海温、流速分布

Fig. 6 Distributions of sea surface temperature and surface current by means of the wave-tide-current coupling forecast system

预报数据预处理过程将网格化的数值预报产品插值处理到观测数据所对应的时间及空间位置上,并转存储为标准格式。上述预处理为误差统计、精度分析做准备。

2.2 误差统计

完成观测数据预处理和预报产品预处理过程后,对预报数据和观测数据进行误差统计。本系统检验以旬为时间窗口,采用的检验方法包括:平均误差、绝对平均误差、均方根误差(均方差)、相关系数、相对误差等。依据误差计算公式,对标准格式下的观测数据和预报数据进行误差统计,形成逐月的预报产品精度检验报告。

2.3 检验功能实现

该检验功能模块基于 Linux 系统平台开发,图 7 为系统检验功能的流程设计,具体操作过程为:

- 1) 下载观测数据并存储到指定目录,并按照不同的区域分别上传到~/verify/argo/argo_original_data 目录下的 atlantic_ocean、pacific_ocean 和 indian_ocean 文件夹;
- 2) 进入检验模块工作目录(~/verify),输入~/verify.sh YYYYMM [1/2/3]命令,启动检验流程。其中 YYYYMM 代表将要检验的年月。[1/2/3]是一个可选择的参数,1 代表上旬,2 代表中旬,3 代表下旬。如果不输入参数代表检验一个月的数据;
- 3) 检验统计结果输出到~/verify/statistic-data 文档下,形成检验报告。

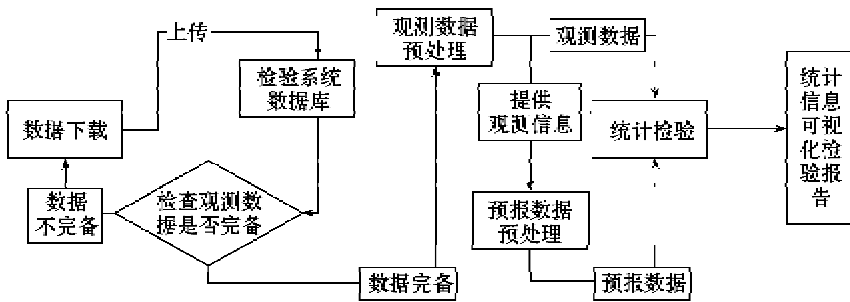


图 7 系统检验功能流程图

Fig. 7 Flow chart for the system verification

表 2 预报波高与卫星高度计测波高对比检验统计结果(2009-09)

Table 2 The statistical errors between the forecasted Hs and the data derived from Jason-1 (in September, 2009)

项 目	时 段								
	1 10 日			11 20 日			21 30 日		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h
平均误差/m	-0.44	-0.47	-0.47	-0.39	-0.38	-0.18	-0.59	-0.56	-0.61
绝对平均误差/m	0.55	0.57	0.64	0.45	0.45	0.58	0.64	0.69	0.71
均方根误差/m	0.69	0.71	0.81	0.62	0.60	1.03	0.91	1.05	1.08
相关系数	0.83	0.83	0.71	0.77	0.79	0.78	0.77	0.61	0.55

表 3 预报海表温度产品与卫星遥感观测海面温度统计结果(2009-09)

Table 3 The statistical errors between the forecasted SST and the Remote Sensing data (in September, 2009)

项 目	时 段								
	1—10 日			11—20 日			21—30 日		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h
平均误差/°C	-0.06	-0.13	-0.18	-0.28	-0.34	-0.38	-0.08	-0.14	-0.19
绝对平均误差/°C	0.50	0.55	0.58	0.47	0.52	0.57	0.42	0.46	0.49
均方根误差/°C	0.65	0.72	0.77	0.60	0.68	0.74	0.59	0.63	0.67
相对误差	-0.22	-0.46	-0.65	-1.03	-1.24	-1.37	-0.31	-0.50	-0.70

表 2 和表 3 给出了 2009 年 9 月中国近海波高和海表温度检验结果,可以看出 24、48、72 h 波高预报绝对平均误差在 0.6 m 左右,均方根误差为 0.6~1.0 m,相关系数在 0.8 左右,但该月下旬误差较大,相关系数偏低,须进一步分析。海表温度预报绝对平均误差在 0.5 °C 左右,均方根误差为 0.6~0.8 °C,预报精度随着预报时效的延长而降低。该系统检验功能操作简便,结果直观。

3 结 语

将先进的海洋数值预报技术应用到实际水文气象业务保障中,可提高业务化保障部门的实际保障能力。本研究基于我国独立发展的海浪-环流耦合理论,研制开发了高分辨率浪致混合数值预报系统并进行了业务化运行。该预报系统近 4 a(准)业务化运行表明,系统运行安全稳定,整个业务流程运行在 50 min(墙钟时间)以内,非计算机故障的运行正常率达到 100%;海浪、海流预报产品具有较高精度。与观测资料对比表明,海浪-环流耦合技术的应用显著提高了上层海洋温度的预报能力,此技术是本数值预报系统的关键技术。该预报系统能够为海上军事活动、海洋防灾减灾、交通运输等提供有效的海洋环境保障,具有较高的应用价值。该系统实现的海洋数值预报精度自动化检验功能,可以对海洋数值预报产品开展有效的精度检验,为提高海洋数值预报水平、改进和完善海洋数值预报系统提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. *Rev. Geophys. and Space Phys.*, 1982, 20: 851-875.
- [2] WAMDI GROUP. The WAM model- A third generation ocean wave prediction model [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 1988, 18: 1775-1810.
- [3] YUAN Y L, PAN Z D, HUA F, et al. The LAGFD-WAM wave model- I. Basic physical model[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(5): 1-7. 袁业立,潘增弟,华锋,等. LAGFD-WAM 海浪数值模式- I. 基本物理模型[J]. *海洋学报*, 1992, 14(5): 1-7.
- [4] YUAN Y L, HUA F, PAN Z D, et al. The LAGFD-WAM wave model- II. Regional characteristic inlaid scheme and its application[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(6): 12-24. 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[J]. *海洋学报*, 1992, 14(6): 12-24.
- [5] QIAO F L, YUAN Y L, YANG Y Z, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31, L11303, doi:10.1029/2004GL019824.
- [6] WANG G S, QIAO F L, YANG Y Z. Study on parallel algorithm for MPI-based LAGFD-WAM numerical wave model[J]. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(4): 401-406. 王关锁,乔方立,杨永增. 基于 MPI 的 LAGFD-WAM 海浪数值模式的并行算法研究. *海洋科学进展*, 2007, 25(4): 401-407.
- [7] YANG Y Z, QIAO F L, ZHAO W, et al. MASNUM wave numerical model in spherical coordinates and its application[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 1-7. 杨永增,乔方立,赵伟,等. 球坐标系下 MASNUM 海浪数值模式的建立及其应用[J]. *海洋学报*, 2005, 27(2): 1-7.
- [8] WANG G S, QIAO F L, XIA C S. Parallelization of a coupled wave-circulation model and its application [J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(2): 331-339.
- [9] SUN Y J, QIAO F L, WANG G S, et al. Forecast operation and verification of MASNUM surface wave numerical model[J]. *Advances In Marine Science*, 2009, 27(3): 281-294. 孙玉娟,乔方立,王关锁,等. MASNUM 海浪数值模式业务化预报与检验[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(3): 281-294.
- [10] QIAO F L, YANG Y Z, LV X G, et al. Coastal upwelling in the East China Sea in winter [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111, C11S06, doi:10.1029/2005JC003264.
- [11] QIAO F L, MA J, XIA C S, YANG Y Z, et al. Influences of surface wave-induced mixing and tidal mixing on the vertical temperature structure of the Yellow and East China Seas in summer[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(7): 739-746.
- [12] QIAO F L, YANG Y Z, XIA C S, et al. The role of surface waves in the ocean mixed layer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 27(3): 30-37.
- [13] XIA C S, QIAO F L, ZHANG M N, et al. Simulation of double cold cores of the 35°N section in the Yellow Sea with a wave-tide-circula-

tion coupled model [J]. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 2004, 22(3): 292-298.

- [14] XIA C S, QIAO F L, YANG Y Z, et al. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111, C11S03, doi:10.1029/2005JC003218.

Operation and Verification for a Wave-tide-current Coupling Numerical-forecast System With Fine Resolution

ZHANG Quan¹, WANG Yan¹, WANG Guan-suo^{2,3}, ZHANG Tao¹, YANG Yong-zeng^{2,3}

(1. *Hydro-meteorological Center of Navy*, Beijing 100161, China;

2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling*, SOA, Qingdao 266061, China ;

3. *First Institute of Oceanography*, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: According to the wave-induced mixing theory independently developed in China, the third generation MASNUM wave numerical model and the 3 dimensional POM circulation model are used to study and establish a wave-tide-current coupling numerical forecast system with fine resolution, and to carry out its pre-routine operation and to verify the accuracy in its forecast outputs. This numerical forecast system can provide the wave, current, temperature, and salinity outputs with various resolution respectively for the global oceans, the northwestern Pacific Ocean, and the seas adjacent to China. In addition, by means of satellite-remote data and buoy observational data for marine environments, the numerical forecast output verification with its automatically completed monthly report on the output accuracy is realized. It is shown in the results from its routine operation and verification that this numerical forecast system can stably work, its forecast outputs are accurate, and it meets the need in the routine forecast.

Key words: numerical forecast; routine operation; wave-tide-current coupling; verification

Received: April 21, 2010