

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2021.02.004

马尔代夫海域水位、海流数值预报研究

李春辉^{1,2}, 施凌³, 王强⁴, 纪棋严⁵, 刘宇^{2,5}

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
5. 浙江海洋大学, 浙江 舟山 316022)

摘 要: 基于无结构有限体积法海洋模式(FVCOM), 建立了马尔代夫双重嵌套的水位、海流预报模式, 并实现了业务化运行。利用三角网格提高重点区域(马尔代夫大桥及岛屿附近海域)的分辨率, 最高网格分辨率达到 45 m。垂向分层采用 σ -s 混合坐标的方式划分, 分为 31 层, 分别在表层和底层进行加密。采用 GFS 预报的风场、气压场和热通量结果制作模式表面强迫场文件。在开边界处与 HYCOM 预报结果进行嵌套, 在斜压条件下, 采用热启动的方式, 业务化模拟了马尔代夫海域 2020 年的水位流场过程。结果表明, 模式能够较好地再现计算海域内天文潮和综合水位的预报, 模式预报的水位值与潮位站实测值非常接近。

关键词: 马尔代夫; 数值预报; 水位; 海流; FVCOM

中图分类号: P731.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-6392(2021)02-0154-07

Research on numerical prediction of water level and current in Maldives

LI Chunhui^{1,2}, SHI Ling³, WANG Qiang^{1,4}, JI Qiyan⁵, LIU Yu^{2,5}

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China; 3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Beijing 100007, China;
4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 5. Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Based on the Unstructured Grid, Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM), a nested water level and current forecast model in the Maldives was established and operationalized. The triangular grid was used with high resolution of key areas (sea area nearby the Maldives Bridge). The highest grid resolution reaches 45 m. Vertically the model set 31 layers by σ -s mixed coordinates, which are encrypted at the surface and the bottom layers. Wind, air pressure and heat flux predicted by GFS are used as the surface forcing. Nested with the HYCOM forecast results at the open boundary, this study uses the hot start method under baroclinic conditions to operationally simulate the water level and flow process in the Maldivian waters in 2020. The results show that the model can reproduce the calculation of the astronomical tide and the comprehensive water level forecast in the study area. The water level predicted by the model are very close to the measured values at the Male station.

Keywords: Maldives; numerical forecast; water level; ocean current; FVCOM

随着海上工程施工、远洋运输、海洋渔业等领域对海洋动力环境预报信息的需求日益提升, 近几十年来, 各国的海洋预报研究取得了显著进展(王辉等, 2016), 涌现出了一批海洋业务化预报系

统, 如基于混合坐标的海洋模式 HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) 建立的全球海洋实时预报系统(Chassignet et al, 2009; Metzger et al, 2014, 2008)、美国海军实验室研制的全球海洋预报系统

收稿日期: 2020-09-27; 修订日期: 2020-12-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1404203 2017YFA0604103 2016YFC1401407) 江苏省自然科学基金青年基金(BK20180803)

作者简介: 李春辉(1988—), 博士, 讲师, 主要从事物理海洋学、海洋数值模拟方面研究。电子邮箱: lichunhui@nuist.edu.cn

通讯作者: 刘宇, 博士, 副教授, 主要从事区域海洋数值模拟研究。电子邮箱: liuyuhk@zjou.edu.cn

<http://hytb.nmdis.org.cn>

GOFS (Global Ocean Forecast System) 等 (朱亚平等, 2015; 徐洋等, 2016)。这些预报模式多是针对全球范围的业务化预报, 水平网格分辨率相对较低, 预报结果不能满足如海上工程施工等需要局地化精细预报的需求, 往往需要单独建立模型以提高预报的精度。目前, 已有一些局部海域的预报系统建设的报道 (李远芳, 2011; 慕梦楠, 2014; 曾银东, 2017)。

为保障马尔代夫跨海大桥施工的顺利进行, 本文针对马尔代夫海域岛屿众多, 地形复杂的特点, 基于 FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) 模型, 建立了一套双重嵌套的水位、海流业务化预报系统, 以为其提供精细化的水动力预报数据。

1 模型简介

预报采用 FVCOM 模型, 该模型是由UMASSD-WHOI 共同开发的采用非结构网格、有限体积法的三维海洋环流模型, 可以用于计算水动力、波浪、泥沙运输、海冰、生态演变等研究 (Chen et al, 2003), 近年来已被成功应用于多个海区的海洋动力环境模拟 (王彪等, 2019; 陶英佳等, 2016; 褚飞等, 2014; 单慧洁等, 2014; 郭玉臣等, 2012; 宋德海等, 2012; 葛建忠, 2007)。该模型采用有限体积法求解, 结合了有限差分法和有限元法的优点, 所采用的非结构网格既能较好的贴合岸线, 又能局部加密, 可以更好地刻画近岸复杂地形下的海水运动, 特别适合马尔代夫这种岛屿众多, 地形复杂海域的水动力数值模拟。

1.1 基本方程

直角坐标系下的原始方程由连续性方程、动量方程、温盐扩散方程和密度方程组成:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\rho_H + \rho_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\rho_H + \rho_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z}$$

$$- \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (7)$$

式中, t 为时间; u, v, w 分别为 x, y, z 方向的流速分量; p_a 为海表面气压, p_H 为静水压力, q 为非静水压力; f 为柯氏参量 ($f = 2\omega \sin\varphi$, ω 是地球自转的角速度, φ 是当地的纬度), g 为重力加速度; T 为温度, S 为盐度, ρ 为密度; K_m 是垂向涡粘系数, K_h 为垂向温盐扩散系数, 由 MY-2.5 湍流模式计算得到; F_u, F_v, F_T, F_S 代表水平动量扩散项及水平温盐扩散项。

1.2 边界条件

(1) 自由表面边界条件 (海表面处 $r = 0$ 处)

运动学边界条件为:

$$\omega = 0 \quad (8)$$

动力学边界条件为:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r}, \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{J}{\rho_0 K_m} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (9)$$

式中, (τ_{sx}, τ_{sy}) 为 x, y 方向的表面风应力。

温盐边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\rho c_p K_h} [Q_n(x, y, t) - SW(x, y, 0, t)] \quad (10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

式中, $Q_n(x, y, t)$ 为表面热通量, 包括四部分: 短波辐射、长波辐射、感热通量和潜热通量, $SW(x, y, 0, t)$ 为海表面入射短波通量, c_p 为海水的比热。

(2) 海底边界条件 (在海底 $r = -1$ 处)

运动学边界条件为:

$$\omega = 0 \quad (12)$$

动力学边界条件为:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r}, \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{J}{\rho_0 K_m} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (13)$$

式中, $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_d \sqrt{u^2 + v^2} (u, v)$ 为 x, y 方向的底部切应力, C_d 为阻力系数, $C_d = \max[\kappa^2 / \ln(z_{ob}/z_0)^2, 0.0025]$, $\kappa = 0.4$ 是卡门常数, k_s 为底部糙率参数, z_b 为参考高度。

温盐边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{A_h \tan\alpha}{K_h / J + A_h \tan\alpha} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (14)$$

$$\frac{\partial S}{\partial r} = -\frac{A_h \tan \alpha}{K_h / J + A_h \tan \alpha} \frac{\partial S}{\partial n} \quad (15)$$

式中, α 为底部坡度, n 为水平坐标。

(3) 闭边界条件

$$v_n = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \quad (16)$$

式中, v_n 为边界法向速度分量, n 为侧向固壁边界的法线方向。

2 模型设置及可靠性检验

为评估所采用的数值模式 (FVCOM) 以及相关设置 (网格剖分、地形刻画以及数值模式相关参数设置) 在研究海域的适用性, 采用 FVCOM 模式建立研究海域数学模型进行后报, 对 2015 年 1—4 月 (已获取到部分时段实测水位、海流资料) 该海域的水位、海流进行模拟, 以验证所建立模型的可靠性。

2.1 后报模型设置

利用 SMS (Surface Water Model System) 软件生成三角形网格, 在岛屿附近和近岸地形复杂处进行重点加密, 采用大小模型嵌套的方式进行模式预报, 网格剖分如图 1 所示, 水深分布如图 2 所示, 图 1 和图 2 中左右两边分别为大范围模型和小范围

模型的网格剖分和水下地形分布。大范围模型网格数为 158 845, 节点数为 80 697, 模型范围为 $70^{\circ}30'E-76^{\circ}E$, $2^{\circ}S-8^{\circ}N$, 模式控制开边界分为北边界、东边界、西边界和南边界, 最高水平网格分辨率为 100 m。小范围模型网格数为 89 527, 节点数为 46 669, 模式控制开边界分为北边界、东边界、西边界和南边界, 最高水平网格分辨率为 45 m。两个模型垂向分层一致, 均采用 σ -S 混合坐标分层, 共分为 31 层, 200 m 为 σ 坐标与 S 坐标分界处水深, 在水深小于 200 m 的海域采用 σ 坐标系, 水深大于 200 m 的海域采用 S 坐标系, 海洋表面厚度 50 m 的上边界层等分为 10 层, 每层厚度为 5 m, 海洋底部厚度 30 m 的下边界层等分为 6 层, 每层厚度为 5 m, 其余各层则采用随深度变化坐标函数分层。岸边界采用干湿网格点判断法, 最小水深为 0.05 m, 计算过程中水深小于 0.05 m 的节点将不参与计算。底摩擦系数、水平和垂向混合参数采用 FVCOM 模式默认方案。采用内外模态交替算法, 水位和垂向平均速度由外模计算, 垂向每层的速度由内模计算, 大范围模型外模时间步长为 1 s, 内模时间步长为 10 s, 小范围模型外模时间步长为 0.4 s, 内模时间步长为 2.4 s, 计算时间段为 2015 年 1 月 1 日 0 时至 2015 年 4 月 10 日 0 时。后报模型开边界及强迫所用数据来源见表 1。

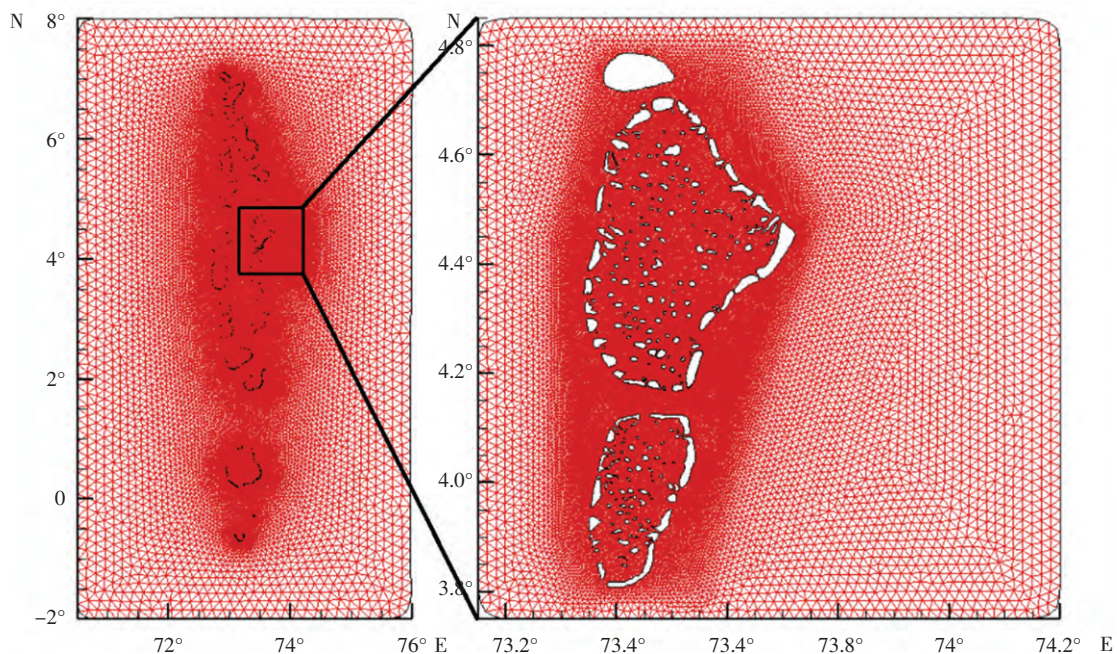


图1 网格剖分图

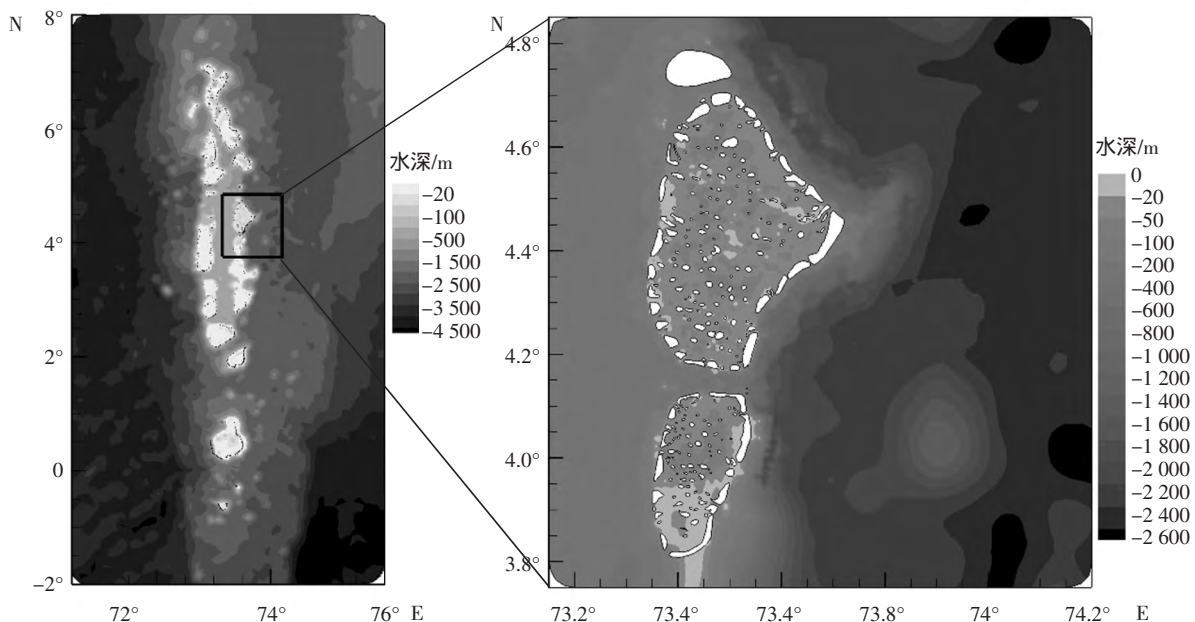


图 2 水深地形图

表 1 后报模型输入文件数据来源

输入物理量	数据来源
开边界水位	大范围模型: 天文潮推算水位(TPX09)+HYCOM 海表面高度模拟结果 小范围模型: 采用大范围模拟结果进行嵌套
开边界流速	大范围模型: 天文潮推算潮流(TPX09)+HYCOM 海流模拟结果 小范围模型: 采用大范围模拟结果进行嵌套
开边界温度、盐度	大范围模型: HYCOM 温度、盐度模拟结果 小范围模型: 采用大范围模拟结果进行嵌套
风场、气压场、海表面热辐射通量、降水和蒸发	CFSv2 再分析资料(美国国家环境预报中心, NCEP)
温度、盐度初始场	HYCOM 温度、盐度模拟结果
水位、海流初始场	冷启动 均设为 0

后报模式所用相关数据来源如下：

(1) TPX09 数据

TPX0 (TOPEX/POSEIDON global tide model) 模式是由美国俄勒冈州立大学 (Oregon State University, OSU) 建立的潮汐模式。目前最新版本为 TPX09-atlas v1, 该版本融合了区域潮汐模式的结果, 包含 8 个主要分潮 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 和 Q_1)、两个较长周期分潮 (M_f , M_m) 和 3 个浅水分潮 (M_4 , MS_4 和 MN_4) 的潮位、潮流通量 (潮流) 信息, TPX09 中特别加入了 $2N_2$ 和 S_1 两个分潮 (下载网址: <https://www.tpxo.net/global>)。

(2) HYCOM 数据

HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) 是由美国国家海洋计划 (National Ocean Partnership

Program, NOPP) 赞助开发的一个全球海洋模式, HYCOM 提供再分析的后报以及预报全球海洋数据, 空间分辨率为 $1/12^\circ$, 包含海表面高度、垂向分为 40 层的海水温度、盐度以及海流数据。(下载网址: www.hycom.org)。

(3) CFSv2 数据

CFSv2 是由美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 开发的 CFS (The Climate Forecast System) 的第二代预报系统得到的数据产品, 提供陆地、海洋、大气的数值产品 (下载网址: <https://rda.ucar.edu/>)。

2.2 模型验证

用于验证的 2 个水位测站, 分别为马累站和机场站, 测量时段: 马累站为 2015 年 4 月 5 日 0 时

<http://hytb.nmdis.org.cn>

至 2015 年 4 月 7 日 0 时，机场站为 2015 年 4 月 5 日 0 时至 2015 年 4 月 6 日 14 时，均为每 10 min 测量一次；2 个流速测站，分别为 CD1 测站和 CD2 测站（位于 Gaadhoo Koa 海峡），测量时段均为 2015 年 4 月 5 日 0 时至 2015 年 4 月 6 日 13 时，每 30 min 测量一次，测站位置分布见图 3。验证结果见图 4—图 6，由图可以看出，所建立的模型能够很好地模拟出研究海域中重点关注区域（马尔代夫大桥及岛屿附近海域）的水位和海流的变化，可以利用所建模型进行该海域的水位和海流的预报工作。

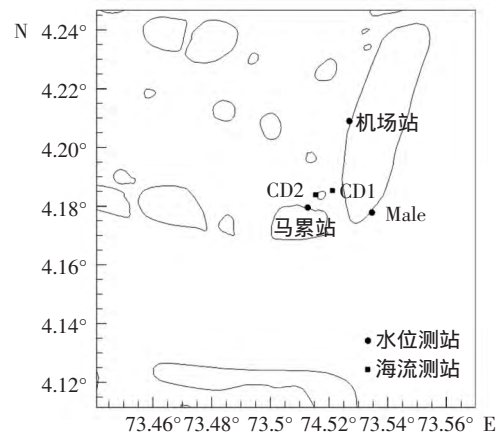


图 3 测站位置分布图

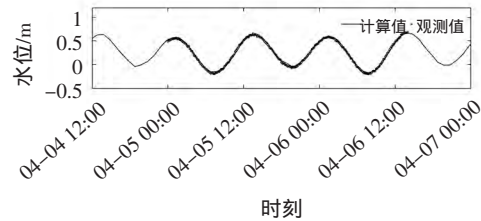
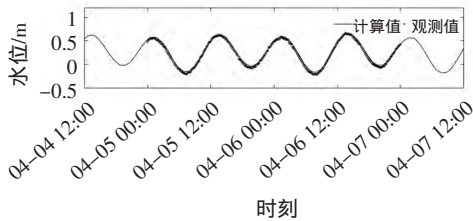


图 4 马累站 (左)、机场站 (右) 水位验证图

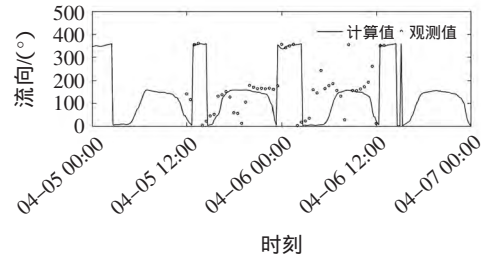
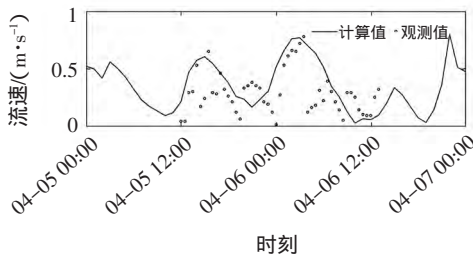


图 5 CD1 测站表层流速 (左)、流向 (右) 验证图

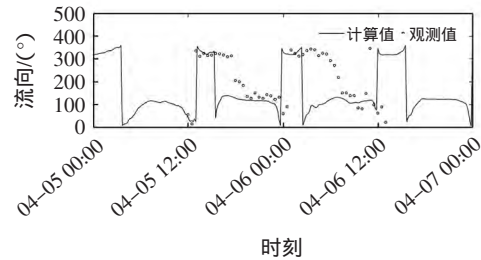
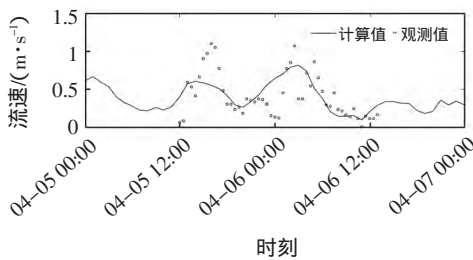


图 6 CD2 测站表层流速 (左)、流向 (右) 验证图

2.3 预报模型设置

预报模型水平、垂向网格剖分以及模型参数设置等均与前文所描述的模型设置相同，根据马尔代夫跨海大桥施工预报需求，确定预报时效为 4 天，预报起始时间为前一天 21:00，结束时刻为 4 天后 00:00。大、小范围模型在计算过程中每隔 1 天均输出一个热启动文件，供下一天预报模型启动时作为初始场使用，以保证模型计算区域内各物理量的

连续性及稳定性，减少模型 spin-up 时间，提高预报结果的精度。预报要素包括：水位、流速、流向、温度和盐度，时间分辨率为 1 h，除水位外，其他几个要素均为垂向分层结果，为 31 层。预报模型输入文件设置及数据来源见表 2。目前已进行 2020 年 2 月 15 日至 2020 年 9 月 9 日（截至投稿日，该预报模式仍在业务化运行）的每天预报。

预报所采用的 GFS 数据下载自美国国家环境

表 2 预报模型输入文件数据来源

输入物理量	数据来源
开边界水位	大范围模型 :天文潮推算水位(TPX09)+HYCOM 预报海表面高度 小范围模型 :采用大范围模拟结果进行嵌套
开边界流速	大范围模型 :天文潮推算潮流(TPX09)+HYCOM 预报海流 小范围模型 :采用大范围模拟结果进行嵌套
开边界温度、盐度	大范围模型 :HYCOM 预报温度、盐度结果 小范围模型 :采用大范围模拟结果进行嵌套
风场、气压场、海表面热辐射通量、降水和蒸发	GFS 预报结果(美国国家环境预报中心 ,NCEP)
温度、盐度初始场	首次模拟(2020 年 2 月 15 日)采用 HYCOM 预报结果, 之后为热启动 采用模式前一天预报结果
水位、海流初始场	首次模拟(2020 年 2 月 15 日)为冷启动 均设为 0 之后为热启动 采用模式前一天预报结果

预报中心的全球预报系统，该系统每天发布 4 次全球范围的气象数据，分辨率最高可达到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。（下载网址为：<http://www.ftp.ncep.noaa.gov/data/ncf/com/gfs/prod/>）

2.4 预报模型业务化运行实现

预报模型业务化运行基于 Linux 系统计划任务功能 (crontab)，通过编写脚本进行模型数据前处理、模型运行以及模型后处理过程，具体业务化计算流程见图 7。

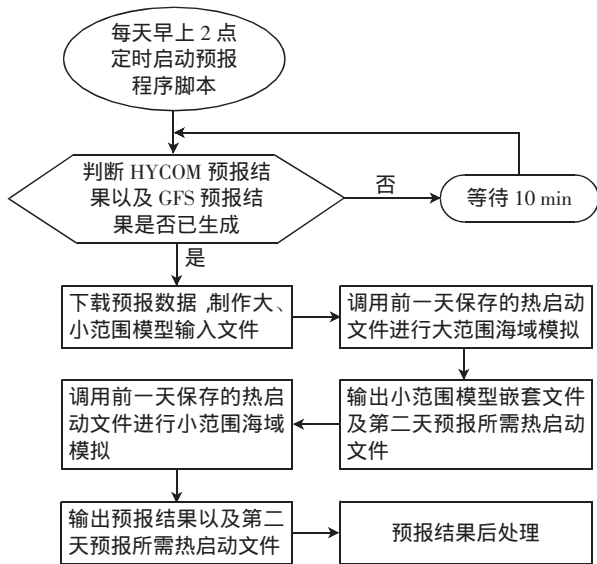


图 7 模型业务化预报流程图

3 预报结果验证及模型精度分析

3.1 预报结果验证

采用 Male 站实测水位结果对预报模型模拟结果进行验证，站点位置见图 3。图 8 为 2020 年 2

月 15 日至 2020 年 2 月 22 日每天预报数据验证结果。根据 GFS 预报风场数据来看，验证时间段内研究海域内风速、风向相对平稳且强度不大，对于水位的影响不大。

3.2 水位预报结果精度分析

通过计算结果和实测值之间的均方根误差 $RMSE$ 、平均绝对误差 MAE 来分析 Male 站水位计算结果的准确性。误差分析结果见表 3，统计量计算公式如下：

均方根误差：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad (17)$$

平均绝对误差：

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| \quad (18)$$

式中， x_i 代表实测值， y_i 模拟值， N 为样本总量， \bar{x} 和 \bar{y} 分别为实测值和模拟值的平均值。

表 3 马累站水位计算误差分析 单位：m

日期	均方根差($RMSE$)	平均绝对误差(MAE)
2020.2.15	0.339 4	0.301 3
2020.2.16	0.323 4	0.285 8
2020.2.17	0.293 6	0.260 1
2020.2.18	0.241 0	0.213 8
2020.2.19	0.197 5	0.174 3
2020.2.20	0.132 5	0.115 3
2020.2.21	0.087 6	0.073 5
2020.2.22	0.050 9	0.039 3

由图 8 和表 3 中的水位计算误差分析可以看出，随预报天数的增加，由模型初始场所造成的影响正在逐步消除。水位的验证结果在前 5 天（2020 年 2 月 15 日至 2020 年 2 月 19 日）的预报结果与

实测值相差较大,随着预报次数的增加,预报水位和实测值之间的误差在逐渐减小,到模式预报进行到第 6 天(2020 年 2 月 20 日)以后,二者误差已

经很小。因此,在进行业务化预报时,采用热启动的方式是非常必要的。

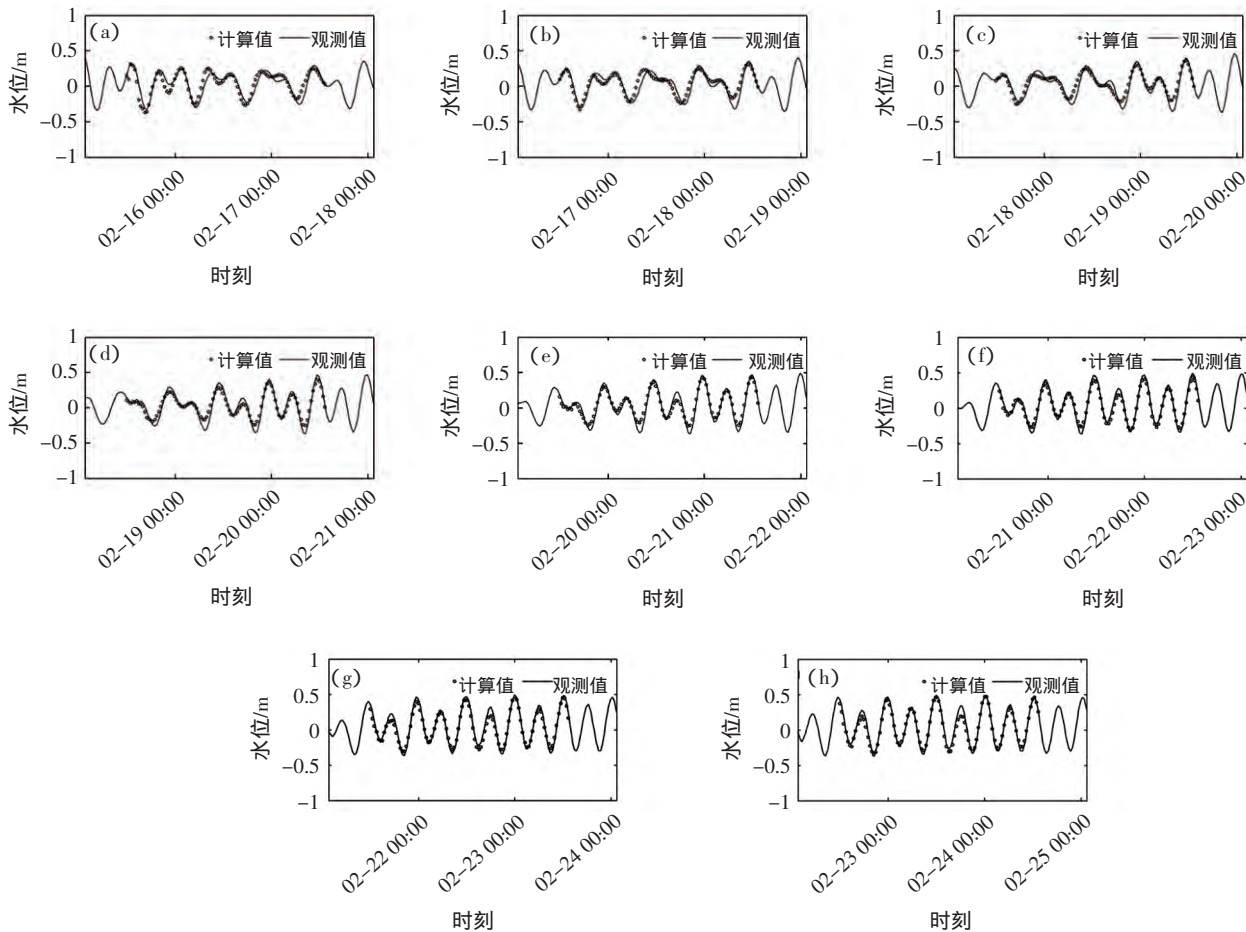


图 8 2020 年 2 月 15 日至 2020 年 2 月 22 日(分别对应图 a—图 h) 水位验证图

4 结论

基于 FVCOM 模型,建立了大、小范围嵌套的马尔代夫水位、海流预报模式,并进行了自动化处理,得到了业务化预报结果。从模型后报结果分析中可以看出,所建模型能够满足研究海域的水位、海流数值模拟需要,模拟精度较高;从预报结果中可以确定,该模型在进行实际预报工作前,需要提前模拟 5 天左右的时间用于消除由于初始场中各种物理量和其真实值的偏差带来的影响,在第 6 天开始的预报结果已能很好地反映水位和海流的变化过程,可以为该海域的海洋工程作业和海上生产生活提供有参考价值的预报数据。

参考文献

- 葛建忠. 2007. 风暴潮数值预报及可视化[D]. 上海: 华东师范大学.
- 郭玉臣,王庆业,陈建军,等. 2012. 兴化湾及周边海域潮流动力特征与数值模拟研究. 海洋通报, (3): 262-267.
- 李远芳. 2011. 南海区域海洋环境预报业务化系统集成平台的研制[D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 慕梦楠. 2014. 厦门湾及邻近海域潮汐潮流数值模拟与预报研究[D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 单慧洁,张钊,汪一航,等. 2014. 温州鳌江近海建设工程环境影响潮汐潮流数值模拟. 海洋通报, (3): 250-258.
- 陶英佳,葛建忠,丁平兴. 2016. 长江口咸潮入侵预报系统的设计与应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), (2): 128-143.
- 宋德海,鲍献文,张少峰,等. 2012. 基于 FVCOM 的廉州湾及周边海域三维潮汐潮流数值模拟. 海洋通报, (2): 136-145.

(下转第 188 页)

参 考 文 献

- 李占海, 高抒, 沈焕庭, 2006. 大丰潮滩悬沙粒径组成及悬沙浓度的垂向分布特征[J]. 泥沙研究, (1): 62-70.
- 林伟波, 孔得雨, 罗锋, 2013. 瓯江口细颗粒泥沙沉速计算方法研究[J]. 水力发电学报, 32(4): 114-119.
- 倪晋仁, 惠遇甲, 1988. 悬移质浓度垂线分布的各种理论及其间关系[J]. 水利水运科学研究, 1: 83-97.
- 钱宁, 万兆惠, 1983. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 72-78.
- 王昌杰, 2001. 河流动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 59-67.
- 谢卫明, 窦身堂, 余欣, 等, 2019. 黄河口现行流路入海水沙特征对流域的响应[J]. 海洋通报, 38(6): 675-682.
- 邢飞, 汪亚平, 高建华, 邹欣庆, 2010. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. 海洋与湖沼, 41(3): 459-468.
- 尹琦琚, 高抒, 高明哲, 等. 黄海和东海表层悬沙浓度年际变化特征[J]. 海洋通报, 2016, 35(5): 494-506.
- 朱文谨, 王娜, 董啸天, 等, 2020. 海州湾水流紊动强度和含沙量对沉降速度的影响研究[J]. 海洋通报, 39(4): 475-480, 506.
- 赵季伟, 李占海, 徐圣, 等, 2019. 长江口北港上段河道枯季悬沙浓度垂向分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 28(9): 2207-2218.
- HENDERSON, FRANCIS M, 1966. Open channel flow [M]. New York: McMillan Co, 85-86.
- LI R J, LUO F, ZHU W J, 2009. The suspended sediment transport equation and its near-bed sediment flux[J]. Science in China, 52(2): 387-391.
- MAA P Y, KWON J I, 2007. Using ADV for cohesive sediment settling velocity measurements[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 73 (Issues1/2): 351-354.
- (本文编辑: 王少朋)
-
- (上接第 160 页)
- 王彪, 卢士强, 陈义中, 2019. 基于海洋数值模型的潮汐潮流业务化预报技术研究[J]. 上海环境科学, 38(6): 237-239+269.
- 王辉, 万莉颖, 秦英豪, 等, 2016. 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, 31(10): 1 090-1 104.
- 徐洋, 齐久成, 李清, 等, 2016. 美国海军业务化海洋预报系统综述[J]. 舰船科学技术, 38(9): 142-146.
- 曾银东, 2017. 区域性海洋业务化预报系统建设研究--以福建省为例[J]. 海洋开发与管理, 34(10): 89-94.
- 褚飞, 黄亚力, 张俊伟, 等, 2014. 海州湾潮汐模拟预报系统研究[J]. 海洋信息, (3): 1-6.
- 朱亚平, 程周杰, 何锡玉, 2015. 美国海军海洋业务预报纵览[J]. 海洋预报, 32(5): 98-105.
- CHASSIGNET E P, HURLBURT H E, METZGER E J, et al, 2009. U. S. GODAE: Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). Oceanography, 22(2), 64-75.
- CHEN C, LIU H, BEARDSLEY R C, 2003. An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 20(1): 159-186.
- METZGER E J, SMEDSTAD O M, THOPPIL P G, et al. US navy operational global ocean and Arctic ice prediction systems[J]. Oceanography, 2014, 27(3): 32-43.
- METZGER E J, SMEDSTAD O M, THOPPIL P, et al. . 2008. Validation Test Report for the Global Ocean Prediction System V3.0 -1/12° HYCOM/ NCODA: Phase I[R]. Naval Research Laboratory, Oceanography Division, Stennis Space Center.
- (本文编辑: 王少朋)