

基于潮汐表数据同化的天文潮数值预报模型 及其模拟预报效果

王代锋¹, 洪华生^{2,1}, 商少平^{3,1}, 陈金泉¹, 谢燕双¹, 魏 艳¹

(1. 厦门大学海洋与环境学院, 福建 厦门 361005 2 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005

3. 厦门大学水声通信和海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 潮汐表是利用长期潮汐观测结果经调和和分析实现的主要港湾潮汐预报结果, 具有较高的预报精度, 而通常的天文潮数值预报目前还难以达到潮汐表的预报精度. 本研究在建立常规天文潮数值预报模型的基础上, 建立了基于潮汐表数据同化的天文潮数值预报模型, 并分别采用这 2 种模型预报福建沿岸海域的天文潮. 其结果表明同化模型的预报结果无论是在潮时还是在潮高均明显优于常规模型; 同化模型能显著地改善所研究的沿岸海域 90 个水位点中至少 45 个水位点的潮汐预报结果, 而其他水位点的预报结果也有不同程度地改善.

关键词: 物理海洋学; 潮汐表; 天文潮; 数值预报; 数据同化

DOI 10.3969/J. ISSN. 1000-8160. 2010. 02. 002

中图分类号: P 731. 21

文献标识码: A

文章编号: 1000-8160(2010)02-0154-05

福建沿岸海域受台风的影响很频繁, 是我国受风暴潮灾害影响最严重的区域之一. 与此同时, 福建沿岸海域也是强潮区域, 平均潮差高达数米, 最大潮差超过 8m. 因此, 准确的天文潮预报对于风暴潮灾害预警、预报尤为重要.

常规的天文潮数值预报的精度一般明显低于基于长期潮汐观测数据调和和分析所得的天文潮的预报精度^[1-10]. 本文所建立的天文潮数值模型计算域较大(东西跨度为 2 220km, 南北跨度为 1 330km), 而北、东、南 3 个水边界条件来源于全球数模结果, 缺乏实测资料校验, 水边界条件本身就带有误差. 因此, 常规天文潮数值模型的预报精度难以提高.

为提高福建沿岸海域天文潮数值预报的精度, 本文将《2009 年潮汐表》上对应计算域内的 63 个站点的预报潮位作为天文潮数值模型的同化数据^[11-12], 所建立的合同化模块的数值模型称之为“基于潮汐表数据同化的天文潮数值预报模型”, 简称“同化模型”. 计算结果表明, 同化模型预报的天文潮结果明显优于常规天文潮数值模型.

1 基于潮汐表数据同化的天文潮数值模型

1.1 基本方程

模式采用全流表达的海水运动方程和连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{h + \zeta} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{h + \zeta} \frac{\partial u}{\partial y} = -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + fv - \frac{\gamma_b^2 (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} u}{(h + \zeta)^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{h + \zeta} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{h + \zeta} \frac{\partial v}{\partial y} = -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fu - \frac{\gamma_b^2 (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} v}{(h + \zeta)^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

收稿日期: 2009-06-16

基金项目: 国家 863 计划重大资助项目(2006AA09A302-6)

作者简介: 王代锋(1983~), 女, 硕士生; E-mail: dfeng@xmu.edu.cn

通讯作者: 商少平, 教授; E-mail: spshang@xmu.edu.cn

模式在准直角坐标系展开, 坐标的 oxy 面与静止海面重叠; x 轴指向正东, y 轴指向正北, z 轴向上为正; ζ 为以 oxy 面起算的海面上升高度; u, v 分别为全流沿 x, y 方向的 2 个分量; h 为水深; ν_b^2 为底摩擦系数, 是经验常数, 本模式取 0.0009 ; f 为科氏参量, $f = 2\Omega \sin\Psi$, Ψ 为地理纬度, Ω 为地转角速度, $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

1.2 差分方案

计算中采用有限差分方法离散方程组, 空间上采用交错网格 (C 网格), 网格的空间步长为 $6' \times 6'$, 计算区域为 $18^\circ \sim 30^\circ\text{N}$, $110^\circ \sim 130^\circ\text{E}$ (图 1). 时间上采用可显式计算的隐显交替格式, 时间步长为 30s

1.3 定解条件

1.3.1 初始条件 在 63 个验潮站对应的网格水位点处, 初始时刻潮位 ζ_k^0 ($k = 1, 2, \dots, 63$) 取起算时间对应的潮汐表上该站的潮位 (对于常规模型而言, 初始时刻潮位 $\zeta_k^0 = 0$). 其他网格点的初始值潮位 $\zeta_{其他}^0 = 0$, $u^0 = v^0 = 0$

1.3.2 边界条件 陆边界: 计算中, 陆边界取为折线, 通过 u 点或 v 点, 在 u 点 $u = 0$ 在 v 点处 $v = 0$ 即陆边界取其法向的全流为 0

水边界: 研究海域的所有水边界设定为水位强迫边界. 水边界的潮位以 $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$ 共 8 个主要分潮的周期性余弦函数形式^[13] 输入, 即:

$$\zeta = \sum_{i=1}^8 H_i \cos(\sigma_i t + v_{0i} - g_i) \tag{4}$$

式中, H_i 为 i 分潮的振幅, g_i 为它的迟角, σ_i 为 i 分潮的角速率, v_{0i} 为 i 分潮的天文初相角, 可由基本天文要素等公式^[14] 计算.

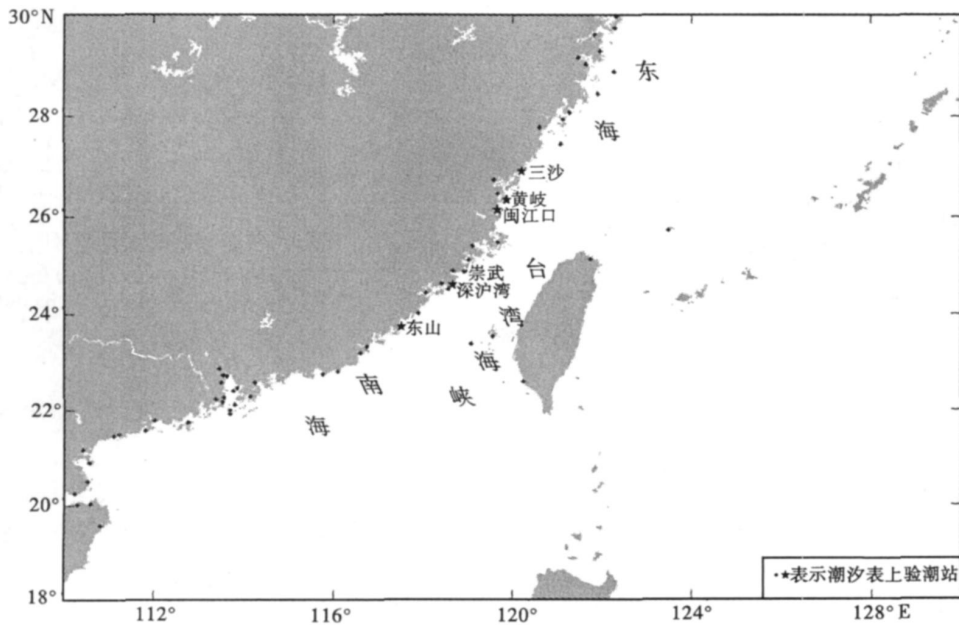


图1 计算域及63个验潮站的位置

Fig.1 Computational domain and distribution of 63 stations considered in the assimilation

1.4 数据同化

1.4.1 数据准备 本文用于同化的数据来自《2009年潮汐表》^[11-12]. 图 1 显示了计算域内 63 个验潮站的分布情况. 潮汐表上有些验潮站既有逐时的数据又有高低潮数据, 有些验潮站只有高低潮数据. 根据需要, 本文利用线性插值方法将前一种验潮站的数据插值成间隔 30s 的数据; 利用分段三角函数拟合方法将后一种验潮站数据拟合成间隔 30s 的数据.

1.4.2 同化方法 在 63 个验潮站对应的网格水位点处,以验潮站水位为强迫水位输入模型中,亦即令任何时刻潮位 $\zeta_k^1 (k=1, 2, \dots, 63)$ 等于潮汐表上该站同一时刻的潮位 (对于常规模型而言,不做此种数据同化, ζ_k^1 由连续性方程计算得出)。

2 结果与讨论

2.1 与验潮站相邻水位点的预报结果与讨论

三都澳是福建省宁德市的 1 个海湾 (图 2), 下面以三都澳海域为例进行讨论. 图 2 中编号为 7 的网格水位点是“帮门验潮站”, 编号 8 和 13 是其相邻的网格水位点的编号. 8 号和 13 号水位点距离 7 号水位点约 11km.

根据潮汐的规律, 相邻 11km 的 2 个水位点的潮汐, 无论是潮时或者潮位都应该很接近.

图 3 给出了 2009 年 8 月 1 日, 8 号、13 号水位点基于常规模型预报的数据所绘制的潮汐过程曲线 (星形线) 和 8 号、13 号水位点基于同化模型预报的数据所绘制的潮汐过程曲线 (虚线) 及 7 号帮门验潮站基于潮汐表上的数据所绘制的潮位过程曲线 (实线) 的对比图.

由图 3 可以看出:

(1) 8 号、13 号水位点基于常规模型预报的高潮时 (星形线) 落后于 7 号帮门验潮站潮汐表的高潮时 (实线) 达 2h 左右, 潮位与 7 号帮门验潮站潮汐表的潮位偏差最大高达 2m. 这显然不符合潮汐的规律, 说明常规模型对该湾内的潮汐预报存在着较大的偏差.

(2) 8 号、13 号水位点同化模型预报的潮时 (虚线) 与 7 号帮门站潮汐表的潮时 (实线) 很接近, 潮位也与 7 号帮门站潮汐表的潮位偏差很小. 这表明本文的同化模型显著地改善了湾内潮汐预报结果.

2.2 位于 2 个验潮站之间水位点的预报结果与讨论

下面以闽江口 (图 2) 为例进行讨论. 图 2 中编号 21 的水位点是“黄岐验潮站”, 编号 24 的水位点是“闽江口验潮站”, 编号 23 的水位点是位于这 2 个验潮站之间的水位点.

图 4 给出了 2009 年 8 月 1 日 23 号水位点常规模型预报的潮汐过程曲线 (星形线)、同化模型预报的潮汐过程曲线 (实线)、21 号黄岐验潮站潮汐表的潮汐过程曲线 (虚线) 和 24 号闽江口验潮站潮汐表的潮汐过程曲线 (点划线) 对比图.

根据潮汐规律, 位于 2 个验潮站之间的水位点, 其潮时一般应介于这 2 个验潮站的潮时之间, 其潮位应介于这 2 个验潮站的潮位之间. 但图 4 中常规模型预报的 23 号水位点的潮位比其相邻的 2 个验潮点的都偏低或都偏高, 潮时也有一定的偏离, 而同化模型预报的 23 号水位点的潮汐过程曲线 (实线) 介于这 2 个验潮站潮汐过程曲线之间, 明显优于常规模型的预报结果.

3 结语

本文数值模型中福建沿岸海域共有 90 个网格水位点, 其中潮汐表中验潮站对应的水位点有 17 个, 与验潮站相邻的水位点有 28 个. 由以上讨论可见, 本文所建立的同化模型能显著地改善潮汐预报结果的至少有 45 个水位点, 而其他水位点的预报结果也有不同程度地改善. 总体而言, 本文所建立的“基于潮汐表数据同

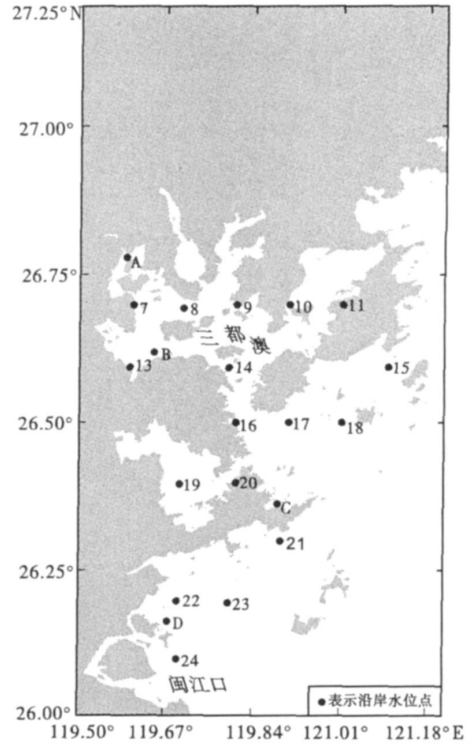


图2 三都澳、闽江口地形图及沿岸水位点
Fig.2 Topography of the Sandouao, Mingjiangkou and coastal points
A.帮门, B.三都澳, C.黄岐, D.闽江口

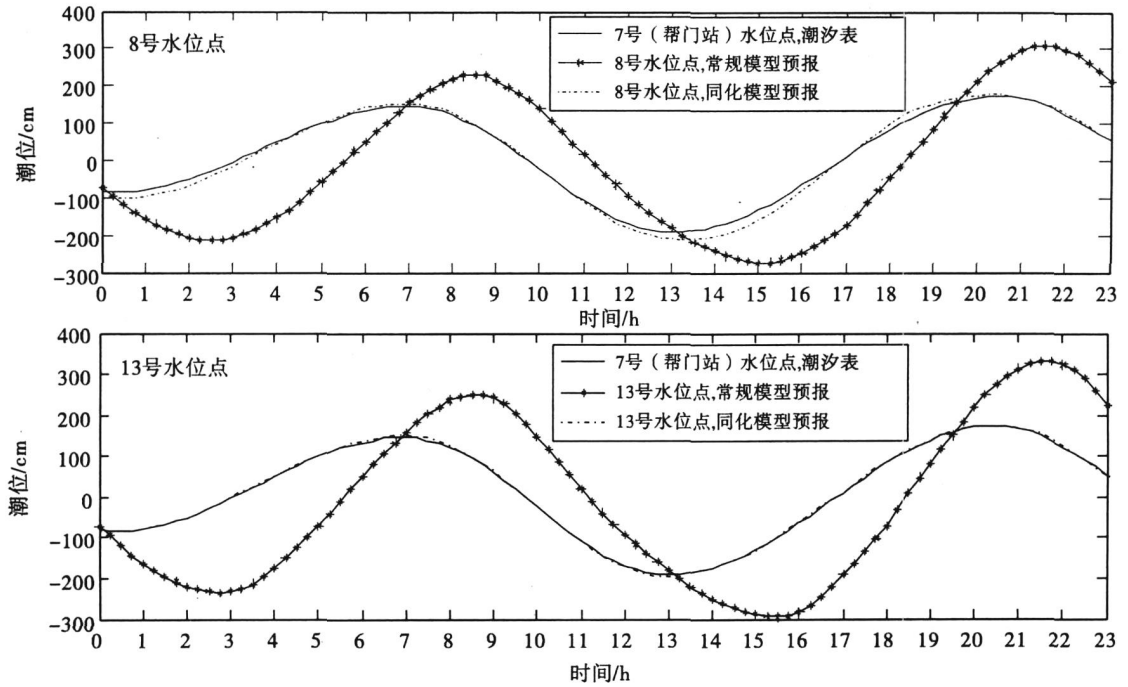


图3 8号、13号水位点和7号验潮站8月1日潮汐过程曲线对比

Fig.3 Comparison of tides of points No.8, No.13 and No.7 during August 1st

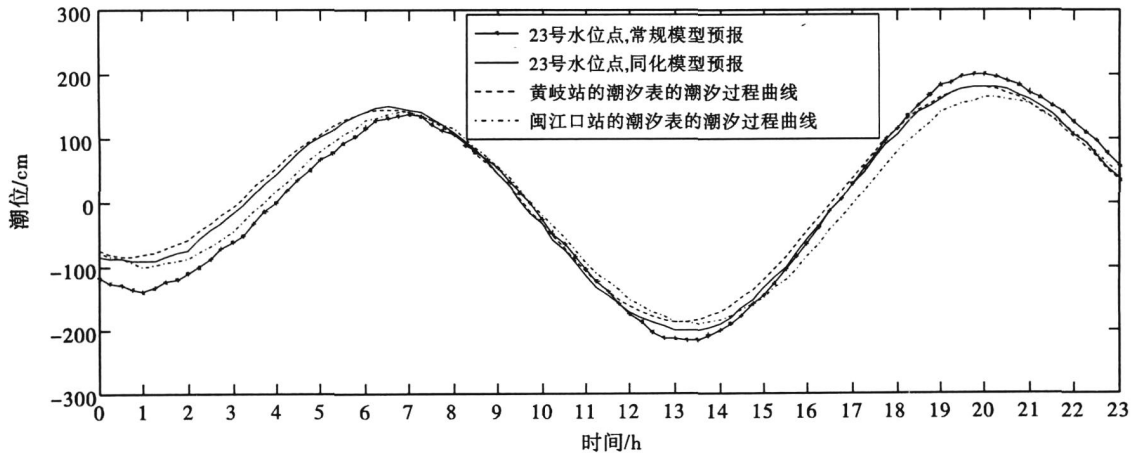


图4 23号水位点、黄岐验潮站及闽江口验潮站8月1日潮汐过程曲线对比

Fig.4 Comparison of tides at point No.23, Huangqi and Minjiangkou stations for August 1st

化的天文潮数值预报模型”能明显地改善福建沿岸海域天文潮的数值预报结果.

参考文献:

[1] 郑文振, 陈福年, 陈新忠. 台湾海峡的潮汐和潮流 [J]. 台湾海峡, 1982, 1(2): 1-4

[2] 叶安乐, 陈宗镛, 于宜法. 台湾海峡及其附近海域三维半日潮波的数值研究 [J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(6): 439-450

[3] 方国洪, 杨景飞, 赵绪才. 台湾海峡潮汐和潮流的一个数值模型 [J]. 海洋学报, 1985, 7(1): 12-21.

[4] Fang G.H. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China [J]. C. J. of Oceanology and Limnology, 1986, 4(1): 1-16

[5] 颜廷壮, 吴永成. 福建沿岸上升流数值研究I. 台湾海峡潮汐、潮流的数值模拟 [J]. 海洋科学集刊, 1995(36): 47-53

- [6] Q ian C C, Shen Y J. Distribution of 9 principal tidal constituents and tide prediction for the East China Sea [J]. China Ocean Engineering 2000, 14(4): 541-548
- [7] 沙文钰, 吕新刚, 张文静, 等. 台湾岛海域全日分潮的特征和潮汐、潮流的综合性质 [J]. 海洋科学, 2002, 26(10): 62-69
- [8] Yu Y F, Yu Y X, Zuo J C, et al. Effect of sea level variation on tidal characteristic value for the East China Sea [J]. China Ocean Engineering 2003 17(3): 369-382
- [9] Jan S, Wang Y H, Wang D P, et al. Incremental inference of boundary forcing for a three-dimensional model tides in the Taiwan Strait [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 337-351
- [10] Fang G H, Wang Y G, Wei Z X, et al. Empirical co-tidal charts of the Bohai, Yellow and East China Seas from 10 years of TOPEX/Poseidon altimetry [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: 1-13
- [11] 中国人民解放军海军司令部航海保证部. 2009年潮汐表: 东海海区 [M]. 北京: 中国航海图书出版社, 2008
- [12] 中国人民解放军海军司令部航海保证部. 2009年潮汐表: 南海海区 [M]. 北京: 中国航海图书出版社, 2008
- [13] 朱佳, 胡建宇, 张文舟, 等. 台湾海峡及其邻近海域潮汐数值计算 [J]. 台湾海峡, 2007, 26(2): 165-176
- [14] 方国洪, 陈宗镛, 郑文振, 等. 潮汐和潮流的分析和预报 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986

A numerical model for tide forecasting from assimilation of tide table data and its forecasting results

WANG Daifeng¹, HONG Hua-sheng^{2,1}, SHANG Shao-ping^{3,1},

CHEN Jin-quan¹, XIE Yan-shuang¹, WEI Yan¹

(1. College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

3. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology,

Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract Tide table data is the main harmonic analysis forecasting data of tides based on long-term tide observations. It has a higher forecasting accuracy than the normal astronomical numerical forecasting tide model. Here a new tide model was established by assimilating tide table data into the normal astronomical numerical forecasting tide model. By adopting these two models for the forecasting of astronomical tides along the Fujian coast, the new model produced distinctly better tidal forecasting results than that of the normal tide model both in aspects of tidal time and height. At least 45 of the gridding points of the 90 coastal gridding points used showed markedly better forecasting results whilst results at the other points were also improved to lesser degrees.

Key words physical oceanography; tide table; tide; numerical forecasting; data assimilation

DOI 10.3969/J. ISSN. 1000-8160. 2010. 02. 002

(责任编辑: 郭水伙)