

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221793

NAO.99Jb 模式在长江口的精度评估及潮流数模中的应用

唐建华

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为给长江口及邻近海域潮汐预报和长江口潮流数学模型外海开边界条件的给定提供有效手段,评估了NAO.99Jb模式在长江口及邻近海域的精度,研究了其为长江口潮流数学模型提供外海开边界条件的可行性。结果表明,NAO.99Jb模式能够准确模拟各主要分潮在长江口及邻近海域的传播;在长江口外海域该模式潮位模拟精度较高,在长江口内水域则精度较低;利用该模式预报的长江口外海潮位可以作为长江口潮流数学模型的开边界条件,且精度良好,该手段可进一步推广应用。

关键词: NAO.99Jb; 长江口; 精度评估; 潮流数模; 应用

中图分类号: TV856

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0015-04

1 引言

长江口是我国经济发展速度最快、经济总量最大、发展潜力最大的区域,其沿线水土资源的保护与利用对区域经济社会的高质量发展来说举足轻重。目前,长江口的保护与治理正如火如荼,涉及到大量整治工程的前期研究工作,潮流数学模型作为重要的技术手段,在这些整治工程的规划、设计、研究和决策工作中,发挥越来越重要的作用^[1]。潮流数学模型以潮流因素为主要研究对象,来模拟潮波传播规律和潮流运动特征。根据相关研究^[1],潮流数学模型建立过程中,外海开边界条件对模型精度的影响至关重要,由于外海实际潮位观测资料严重缺乏,常导致模型外海开边界条件难以准确给定。但随着全球大洋潮汐模式的建立和不断发展及精度的逐步提高,利用全球大洋潮汐模式为潮流数学模型提供高精度的外海开边界条件成为可能^[1-3]。根据相关研究^[4-7],可为长江口潮流数学模型提供外海潮位边界条件的全球大洋潮汐模式有20多个,可分为3类,第1类主要是基于地面或卫星测高资料,通过经验分析法获得全球大洋的潮汐分布;第2类利用潮波动力方程,通过数值模拟得到全球大洋的潮汐分布;第3类是第1、2类的集合体,它基于潮波动力方程,利用实测潮汐资料通过同化获得全球大洋

潮汐分布。NAO.99b属于第3类全球大洋潮汐模式,集合了潮波动力传播模拟、实测资料同化的优势,具有较高准确度。汪一航等^[4]认为目前的全球大洋潮汐模式中,NAO.99b在中国近海的精度最高;李大炜等^[5]认为目前的全球大洋潮汐模式,在深海精度可达2 cm,在近海精度稍差,在中国近海,NAO.99b模式精度最高;孙佳龙等^[6]认为当利用潮汐模式研究海洋潮汐分布特征时,在中国海域适宜采用NAO.99b模式。但目前鲜见关于NAO.99b模式在长江口的精度评估及潮流数模中的应用研究。鉴此,本文基于NAO.99b潮汐模式,利用大量实测资料,分析评估其在长江口及邻近海域的精度,并探讨其为长江口潮流数学模型提供外海开边界条件的可行性及精度。

2 NAO.99Jb 模型

2.1 NAO.99Jb 模式介绍

NAO.99b模式是日本国立天文观测台基于二维非线性浅水方程研发,它利用Blending方法将T/P卫星测高数据和日本、韩国沿岸验潮站的实测潮位数据同化到动力学模型中建立开发,分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,网格数为 720×360 ,范围为 $-89^{\circ}45' \sim 89^{\circ}45'N, 0.25^{\circ} \sim 359^{\circ}45'E$ 。该模式可给出16个短周期分潮($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1,$

收稿日期: 2022-08-30, 修回日期: 2022-11-07

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3002700)

作者简介: 唐建华(1981-),男,博士、高级工程师,研究方向为河口海岸规划, E-mail: jianhuatang2004@126.com

P_1 、 Q_1 、 M_1 、 J_1 、 OO_1 、 $2N_2$ 、 MU_2 、 NU_2 、 L_2 、 T_2) 和 7 个长周期分潮 (M_{tm} 、 M_f 、 M_{sf} 、 M_m 、 M_{sm} 、 S_{sa} 、 S_a)^[7-8]。NAO. 99Jb 为 NAO. 99b 的区域模式, 范围为 $20^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 155^{\circ}\text{E}$, 分辨率为 $0.5' \times 0.5'$ 。该模式在 NAO. 99b 基础上, 同化了近岸 219 个验潮站数据及大量卫星测高数据, 相对 NAO. 99b 有更高的分辨率和精度^[8-9]。该类模式只能考虑单纯的潮汐作用下深水区域的潮汐传播特征研究、潮位预报, 不能准确反映近岸的复杂边界、地形及入海径流等导致的潮汐变形。

2.2 NAO.99Jb 模式在长江口及邻近海域的精度评价

2.2.1 潮波运动特征模拟准确性评估

根据 NAO. 99Jb 模式给出的长江口及邻近海域 8 大主要分潮 (M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1) 的调和常数 (振幅、位相), 分别绘制得到各分潮的同潮图 (图 1)。经与海洋图集编委会编制的《渤海黄海东海海洋图集 (水文)》^[10] 及朱学明^[11] 的研究成果比较, 结果表明, NAO. 99Jb 潮汐模式分析得到的长江口及邻近海域的各主要分潮的同潮图, 与《渤海黄海东海海洋图集 (水文)》^[10]、朱学明^[11] 给出的各主要分潮同潮图差异较小, 各主要分潮的无潮点位置也基本一致 (图 1)。这说明 NAO. 99Jb 潮汐模式能较准确地模拟各主要分潮在长江口及邻近海域的传播特征, 验证了 NAO. 99Jb 潮汐模式具有较好的可靠性。

2.2.2 潮汐调和常数精度评估

利用收集到的长江口口外海域常设潮位站的长期潮位观测资料, 经调和与分析得到各站的调和常数, 以此作为验证资料, 分析评估 NAO. 99Jb 潮汐模式给出的对应水域的调和常数的精度。所采用的 6 处常设潮位站分别为长江口北部的吕四, 长江口东部的佘山、鸡骨礁、绿华, 以及长江口南部的三星山、大西塞 (图 2)。对比分析表明, NAO. 99Jb 模式给出的长江口口外海域 6 处常设潮位站的 8 大主要分潮的潮汐调和常数, 与依据实测潮位资料分析得出的潮汐调和常数相比, 差异均较小 (表 1)。这说明 NAO. 99Jb 潮汐模式能较准确地反映长江口口外海域的潮汐特征, 对各主要分潮调和常数的模拟精度较高。

2.2.3 长江口不同水域潮位模拟精度评价

为了解 NAO. 99Jb 潮汐模式在长江口及邻近海域的潮位模拟精度, 利用收集到的 2007 年 8 月长江口口外海域 4 处常设潮位站 (吕四、佘山、鸡骨礁、绿华)、长江口口水域 4 处常设潮位站 (大戢山、中浚、长兴、连兴港) 的潮位观测资料 (图 2),

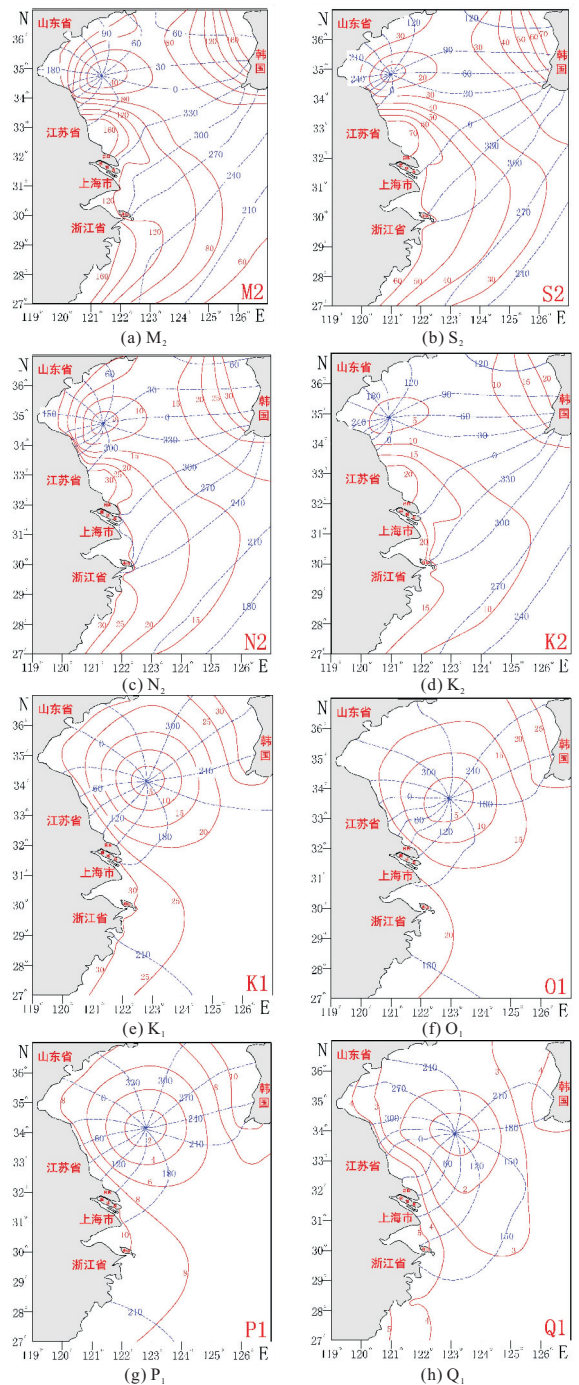


图 1 根据 NAO. 99Jb 绘制的主要分潮同潮图 (实线为振幅, 单位 cm; 虚线为位相, 单位 $^{\circ}$)

Fig. 1 Co-tidal charts of main tidal components according to NAO. 99Jb

经 NAO. 99Jb 潮汐模式预报的潮位与实测潮位对比分析表明, 在长江口口外海域, 无论从相位上看, 还是从数值上看, NAO. 99Jb 潮汐模式预报的潮位与实测潮位吻合良好, 潮位的峰谷值基本吻合 (图 3(a)、(b) 的佘山站、绿华站)。统计表明, 在长江口口外的 4 处常设潮位站, NAO. 99Jb 预报的潮位均方根误差平均为 14.3 cm、最小仅 13.0 cm、最大为 15.0 cm, 相关系数平均为 0.98、最小为 0.96、最大达 0.99 (表 2)。在长江口口内

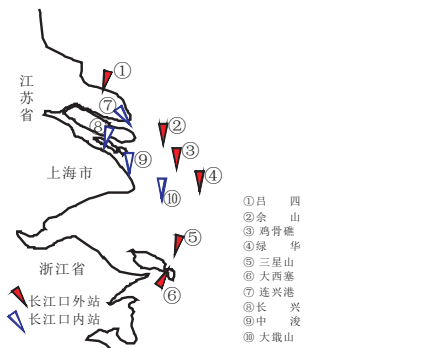


图 2 长江口及邻近海域潮位站位置示意图

Fig. 2 Location of tide level stations in the Changjiang Estuary and its adjacent area

表 1 NAO.99Jb 给出的长江口口外海域各主要分潮调和常数误差统计

Tab. 1 Statistics of accuracy of main tidal components' harmonic constants of NAO.99Jb

分潮名称	振幅误差/cm	振幅误差率/%	相位误差/(°)	分潮名称	振幅误差/cm	振幅误差率/%	相位误差/(°)
M ₂	5.3	4.3	4.7	O ₁	1.3	7.8	5.4
S ₂	4.0	7.2	6.0	P ₁	0.6	7.0	3.6
N ₂	1.3	5.8	6.9	Q ₁	0.4	12.2	5.5
K ₂	1.2	8.3	7.1	平均	1.9	7.2	5.3
K ₁	1.4	5.2	3.5				

水域, 无论从相位上看, 还是从数值上看, NAO.99Jb 预报的潮位与实测潮位相比均存在较大差异, 尤其是潮位的峰谷值差异较大(图 3(c)、(d)长兴站、中浚站)。统计表明, 在长江口口内的 4 处常设潮位站, NAO.99Jb 预报的潮位均方根误差平均为 45.8 cm、最小为 28.0 cm、最大达 72.0 cm, 相关系数平均为 0.72、最小仅 0.51、最大为 0.90(表 2)。

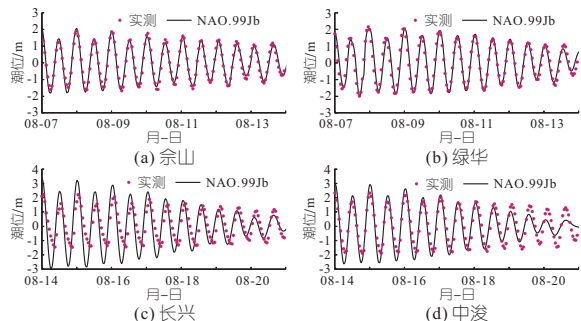


图 3 NAO.99Jb 预报潮位与实测潮位的比较

Fig. 3 Comparison between NAO.99Jb computed and measured tide level

对比分析结果表明, NAO.99Jb 在长江口口外海域的模拟精度明显高于在长江口口内水域的模拟精度, 其主要原因为外海潮波进入长江口后, 在长江口特殊的河岸边界、水下地形及入海径流等综合影响下, 潮波发生了一定变形, 而 NAO.99Jb 不能考虑此因素的影响。因此, 长江口口外海域可利用 NAO.99Jb 潮汐模式来预报潮位, 精度较

表 2 长江口口内、口外潮位站 NAO.99Jb

预报潮位误差统计

Tab. 2 Statistics of accuracy between NAO.99Jb and measured tide level(outside and inside the Changjiang Estuary)

位置	潮位站	均方根误差/cm	相关系数	位置	潮位站	均方根误差/cm	相关系数
长江口	吕四	15	0.98	长江口	大戢山	32	0.84
口外	余山	13	0.99	口内	中浚	51	0.62
	鸡骨礁	14	0.97		长兴	72	0.51
	绿华	15	0.96		连兴港	28	0.90
	平均	14.3	0.98		平均	45.8	0.72

高; 而对于长江口口内水域, 则不宜用 NAO.99Jb 来预报潮位。

3 应用

3.1 长江口潮流数学模型介绍

采用荷兰代尔夫特水工研究所的 DELFT3D 数学模型系统, 建立长江口潮流数学模型, 计算范围为整个长江口、杭州湾及近海水域, 北至 32°17'N, 东至 123°45'E, 南至 29°11'N, 西边界长江至大通、钱塘江至海宁; 模型东西向长约 500 km, 南北向宽约 350 km(图 4)。

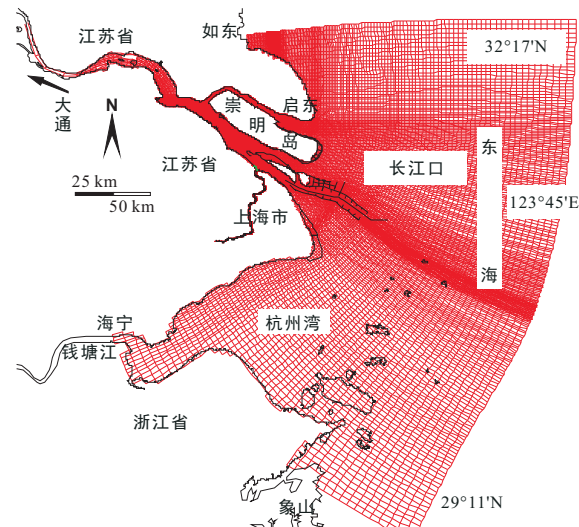


图 4 长江口潮流数学模型的计算范围和计算网格

Fig. 4 Horizontal mesh of the Changjiang Estuary numerical model

3.2 NAO.99Jb 模式在长江口潮流数学模型中的模拟精度评价

利用收集到的 2007 年 8 月长江口口内水域 4 处常设潮位站(图 2)的潮位及潮流资料, 对利用 NAO.99Jb 潮汐模式预报的潮位作为外海开边界条件所建立的长江口潮流数学模型的精度进行评估。结果表明, 利用 NAO.99Jb 潮汐模式预报的潮位作为外海开边界后, 长江口潮流数学模型模拟的潮位与实测潮位吻合良好, 长江口口内水域

潮位模拟的均方根误差平均为 10.3 cm、最小仅 8.0 cm、最大为 12.0 cm,相关系数平均为 0.98、最小为 0.97、最大达 0.99(表 3);长江口口内水域潮流涨、落急流速误差为 0.12 m/s,相位误差 0.5 h,流向误差小于 12°,平均精度达 88%。因此,利用 NAO.99Jb 潮汐模式预报的潮位作为长江口潮流数学模型的外海开边界条件是可行的,且有较好的模拟精度。

表 3 长江口潮流数学模型模拟潮位与实测潮位误差统计

Tab. 3 Statistics of accuracy between simulated and measured tide level

潮位站	均方根误差/cm	相关系数
大戙山	8	0.99
中浚	10	0.99
长兴	11	0.98
连兴港	12	0.97
平均	10.3	0.98

4 结论

a. NAO.99Jb 潮汐模式能较准确地模拟潮汐在长江口及邻近海域的传播。

b. NAO.99Jb 潮汐模式预报的潮位精度在长江口口外水域较高,在长江口口内水域精度较低,不宜用来预报长江口口内潮位。

c. 利用 NAO.99Jb 模式预报的潮位作为长江口潮流数学模型的外海开边界条件,是一种行之有效的解决长江口潮流数学模型外海开边界条件不易给定的方法。

参考文献:

[1] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 河口海岸水

沙盐成套模拟关键技术与实践技术总结报告[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2022.

[2] 高秀敏,魏泽勋,吕咸青,等. 全球大洋潮汐模式在南海的准确度评估[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(1): 1-14.

[3] 刘经东,张文静,刘春笑,等. 全球大洋潮汐模式在北印度洋潮汐预报准确性的评估[J]. 海洋通报, 2019, 38(2): 159-166.

[4] 汪一航,方国洪,魏泽勋,等. 基于卫星高度计的全球大洋潮汐模式的准确度评估[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4):353-359.

[5] 李大炜,李建成,金涛勇,等. 利用验潮站资料评估全球海潮模型的精度[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(4): 106-110.

[6] 孙佳龙,郭金运,郭淑艳,等. 基于验潮资料的 CSR4.0 模型和 NAO.99b 模型在中国海域的精度分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2787-2795.

[7] 赵强,侯国锋,汤志华,等. 七个海洋潮汐模式在浙江海域的准确度评估[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(2): 311-320.

[8] MATSUMOTO K, TAKANEZAWA T, OOE M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan [J]. Journal of oceanography, 2000,56(5): 567-581.

[9] 松本晃治, KOJI MATSUMOTO. 海洋潮汐モデル NAO.99bの構築と普及[J]. 測地学会誌, 2004, 50(3):187-200.

[10] 海洋图集编委会. 渤海黄海东海海洋图集(水文)[M]. 北京:海洋出版社, 1993.

[11] 朱学明. 中国近海潮汐潮流的数值模拟与研究[D]. 山东:中国海洋大学, 2009.

Accuracy Evaluation of NAO.99Jb and Its Application in Tidal Flow Numerical Model of the Changjiang Estuary

TANG Jian-hua

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to provide a suitable means for the tidal prediction of the Changjiang Estuary and its adjacent area and for the open boundary conditions of tidal flow numerical model of the Changjiang Estuary, accuracy of NAO.99Jb was evaluated. The feasibility of providing open boundary conditions for tidal flow numerical model of the Changjiang Estuary was studied. The results show that the NAO.99Jb model can accurately simulate the propagation of the tide outside the Changjiang Estuary and its adjacent area; The NAO.99Jb has good accuracy outside the Changjiang Estuary, but has lower accuracy inside the Changjiang Estuary; It is feasible for using the tidal level predicted by NAO.99Jb as the open boundary condition of the tidal flow numerical model of the Changjiang Estuary, and the accuracy is good, which can be further popularized and applied.

Key words: NAO.99Jb; the Changjiang Estuary; accuracy evaluation; tidal flow numerical model; application