doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2023.02.006

基于数值模拟的强潮海湾潮汐预报模型精度 分析:以三门湾为例

马苑浩1,2, 汪求顺1, 周春艳2, 陈甫源1

(1. 浙江省水利河口研究院,浙江 杭州 310020; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要:全球潮汐预报模型在深水大洋具有较高的精度,但在近岸强潮海区由于地形岸线、模型分辨率等原因精度不一,难以直接应用。三门湾海域多年平均潮差4m,最大潮差可达7m, 是典型的强潮海湾,为了评估TPXO9.0、TPXO9.0-atlas(TOPEX/POSEIDON TIDES)、NAO.99b (National Astronomical Observatory of Japan)与GTM (Global Tide Model)4种预报模型在三门湾 海域的预报精度,本文分别通过上述4个潮汐预报模型提取水动力数学模型开边界进行对比, 并利用提取的开边界潮位对二维水动力模型进行驱动。通过计算分析潮位站实测数据与数值模 拟结果的误差,研究4种预报模型模拟的三门湾潮汐变化得出,NAO.99b 模型在三门湾海域整 体预报精度最佳,分潮振幅、迟角和实测数据误差最小,TPXO9.0-atlas分潮振幅模拟较好,但 迟角误差较大。对湾内四大分潮进行潮汐调和分析发现,三门湾海域以半日潮为主,M2、S2和 K1分潮振幅由湾顶向湾口递减,O1分潮相反。

关键词: 三门湾; 全球潮汐预报模型; 数值模拟; 潮汐调和分析 中图分类号: P714+.8; P738.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-2029 (2023) 02-0044-09

潮汐是海水在天体引力作用下产生的一种周期 性运动,潮汐预报一直是海洋科学关注焦点。根据 预报方式的不同,潮汐预报模型分为经验模式、同 化模式和潮波动力学模式三类。如今,潮汐预报模 型被广泛应用于海平面变化^[1]、海洋环流^[2]和潮流能 量化^[3]等研究,而对不同预报模型预报精度的分析 也一直是潮汐预报研究的重点。NGUYEN V T等^[4]、 PICCIONIG等^[5]、SEIFIF等^[6]采用潮汐调和分析手 段探究了多种潮汐预报模型在不同海域预报精度差 异的成因。ZHAO H等^[7]利用潮位站和卫星观测数 据对 8 个全球海潮模型和 1 个区域海潮模型进行验 证,认为 DTU10 在全球范围与验潮站一致性更好。 大洋潮汐预报模型在中国海区的预报精度分析也是 国内学者关注的重点。李大炜等¹⁸、范长新等¹⁹通过 与中国近海验潮站实测资料对比认为,在中国海域 不同模型的预报精度和适用海区各有差别,目前对 不同海潮模型的预报精度仍不清晰。孙佳龙等¹⁰⁹通 过潮位误差分析认为 NAO.99b 模型在中国海域具有 较高的精度。赵强等¹¹¹对 8 个主要分潮评估后认 为 TPXO8-atlas 在浙江沿海具有较高的预报精度, 但仍需要根据实际研究区域和分潮加以选择。全球 海潮模型是提取水动力数学模型开边界潮位驱动的 主要来源,特别是浅水分潮的预报精度,对近海地 区潮汐建模至关重要¹¹²。近年来,一些学者采用水 动力数值模拟手段分析了河口海岸地区海潮模型预 报精度¹¹³⁻¹⁴,但对中国海区尤其是强潮海湾的精度

收稿日期: 2022-11-04

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LGF20E090003);浙江省水利科技计划项目(RB2001)

作者简介:马苑浩 (1999—),男,硕士研究生,主要从事近海水动力、海湾长期演变研究。E-mail: MYH131207@163.com 通讯作者:汪求顺 (1984—),男,博士,高级工程师,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: wangqiushun57@163.com

第2期

分析尚属空白。

浙江省三门湾是典型的半封闭式强潮多汊道海 湾,湾内具有丰富的滩涂、港口和能源资源。近年 来,随着三门湾岸线、水沙输移特性的不断演变, 国内外众多学者利用数值模拟手段对三门湾海域水 动力环境进行分析[15-16]。因此,探究不同海潮模型 在三门湾海域的预报精确度对三门湾水动力数值模 拟有着重要意义。本文通过数值模拟手段与潮汐调 和分析对在中国近海研究与工程应用中常用的同化 模型 NAO.99b、TPXO 模式和经验模型 GTM 在三 门湾海域的潮汐预报精度进行研究。

1 材料和方法

1.1 研究区域

三门湾居于我国海岸线中心,北纬 28°57′— 29°22′, 东经 121°25′-121°58′, 北与象山港接壤, 南邻台州湾,东与猫头洋毗邻。海域的总面积达到 775 km²,平均水深约 9 m,是浙江省六大湾区之 一。三门湾南、西、北三面临山,海湾被低山丘陵 环绕,通过东南湾口及石浦水道与猫头洋相通,港 汉呈指状深入内陆,属于典型半封闭型海湾,三门 湾内入湾河流多为短小的山溪性溪流,湾内年平均 径流量仅占潮量的2‰,湾内水动力主要为潮流。 湾内岸线曲折、地形复杂、岬角从生、岛礁罗列、 多分支港汊且港汊深嵌内陆,形成了港汊与潮滩相 间发育的地貌形态。

1.2 计算模型

1.2.1 全球潮汐模型简介

本文分别对 TPXO9.0、TPXO9.0-atlas、NAO.99b 与 GTM 模型在三门湾海域的潮汐预报精度进行 分析。

TPXO 模式^{III}是美国俄勒冈大学研发的反演同 化模型,以二维正压流体动量方程为基础,并同化 了 T/P、Jason 卫星高度计资料和验潮站资料。本文 采用 TPXO9.0 提供的全球 15 个主要分潮的潮汐调 和常数,分辨率为1/30°×1/30°的模式。

TPXO9-atlas^[17]是 TPXO 模式最新的 1/30°分辨率 全球潮汐预报模型, 该模型结合了 1/6°分辨率的 TPX09.0 模型和 30 个全球近岸地区 1/30°分辨率的

区域潮波模式。

NAO.99b^[18]模型是日本国立天文台将5年T/P卫 星高度计数据同化成流体动力学模型建立的全球大 洋潮汐模型。本文采用其提供的全球 8 个主要分潮 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1 和 8 个次要 分潮 MU2、NU2、T2、L2、2N2、J1、M1、001 的 调和常数,分辨率为0.5°。

GTM^[19]由 DTU10 潮汐预报模型发展而来,模型 将近 17 年 TOPEX/Posedion 与 Jason1/2 卫星的测量 数据用于海平面参差分析,考虑了半日分潮 M2、 S2、K2、N2, 全日分潮 S1、K1、O1、P1、Q1 和浅 水分潮 M4,本文采用 0.125°分辨率进行分析。 1.2.2 三门湾潮汐数值模拟

Mike21 是丹麦水力研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI) 研制的一款流体动力学数值模拟软 件,其在纳维-斯托克斯方程的数值解上,使用非 结构化三角形网格和干湿边界,可以很好地模拟河 口海岸等复杂岸线下的水动力变化。为了对比分析 4 种潮汐预报模式在三门湾海域预报精度上的差异, 本文采用 Mike21 构建了三门湾二维平面水动力数 学模型,分别采用上述四种潮汐预报模型提取数学 模型的开边界预测潮位,开边界南起台州湾南岸大 尖山头,北至三门湾北岸龙洞岗,开边界网格分辨 率为 500 m, 模型最小网格步长 30 m。

模型模拟时间段为 2017/12/30 00:00-2019/1/1 00:00, 潮位验证时间区段为 2018/11/1 00:00-2018/12/1 00:00, 模型计算时间步长 30 s, 计算网 格节点 52 236 个, 单元 96 376 个, 计算域糙率系 数为 0.015~0.02。根据中国气象局国家气象科学 数据中心监测记录,模型验证期三门湾海域最大风 力不超过三级,不考虑风速对验证精度影响。

利用国家海洋科学数据中心潮汐实测数据,与 计算结果进行对比分析。本文选用的潮位验证点为 健跳站、石浦站与旗门港站(图1)。同时,对开边 界预测潮位进行对比分析。网格布置及验潮站点位 如图 1 所示,其中 NAO.99b 模型潮位验证如图 2 所 示。潮位模拟结果与3个实测站点数据基本吻合, 最高、低潮位与实测数据相对误差不超过10%,满 足潮位验证要求。



图 1 模型计算区域及网格分布图

2 结果与讨论

2.1 潮位误差对比

对比 4 种预报模型的开边界潮位驱动及模拟结 果,以开边界第 50 号潮位驱动点为例分析其在潮 位模拟中的误差,潮位驱动及模拟潮位对比如图 3 所示。NAO.99b 和 TPXO 模式提取的开边界潮位驱 动较为一致,GTM 模式与其他 3 种预报模型预测潮 位在大潮期潮位、相位上存在差异。由于经验模型 用以提取潮汐数据的测高卫星,在近海浅水地区无 法精确识别海潮空间上的快速变化¹⁹,因此,GTM 模 型提取的开边界潮位驱动在相位与振幅上相较其 他 3 种预报模式误差较大,其振幅差别在大潮期 间最为显著。



图 2 NAO.99b 模式潮位验证

为精确分析4种潮汐预报模型的模拟精度,本 文计算分析了4种预报模式在3个验潮站模拟潮位 与实测数据的平均绝对误差(绝均差)、标准差与 均方根误差,如表1所示。 第2期



图 3 开边界 50 号潮位预测点对比及健跳站模拟潮位对比

				単位: m
潮位站	预报模型	绝均差	标准差	均方根误差
	TPX09.0	0.31	1.39	0.41
	NAO.99b	0.21	1.59	0.28
健跳	GTM	0.41	1.16	0.51
	TPXO9.0-atlas	0.32	1.46	0.43
	潮位站实测	/	1.50	/
石浦	TPX09.0	0.20	1.12	0.25
	NAO.99b	0.15	1.35	0.18
	GTM	0.21	1.02	0.26
	TPX09.0-atlas	0.21	1.19	0.27
	潮位站实测	/	1.23	/
旗门港	TPX09.0	0.35	1.70	0.43
	NAO.99b	0.38	1.72	0.47
	GTM	0.41	1.25	0.52
	TPX09.0-atlas	0.34	1.58	0.43
	潮位站实测	/	1.71	/

表1 各预报模型在验潮站处精度对比

石浦站位于三门湾湾口,受湾内岸线地形变化 影响较小,4种潮汐预报模式在石浦站平均预测 精度最好,绝均差与均方根误差分别为0.19m和 0.24m;位于三门湾湾顶、蛇蟠水道末端的旗门港 站,站点附近水深 5~6m,浅水效应强,预报精度 受水深地形变化影响较大¹⁸,绝均差与均方根误差分 别达到 0.37 m 和 0.46 m。

在各站点的预报精度方面,NAO.99b 在 3 个站 点的均方根误差最小,为 0.31 m,误差相较 TPXO9.0 与 TPXO9.0-atlas 分别低 0.05 m 和 0.07 m; GTM 模型在 3 个站点预报误差均最高,其绝均差与 均方根误差分别为 0.34 m 和 0.43 m。对比 3 种模型 标准差,TPXO9.0-atlas 和 NAO.99b 与实测数据标 准差相近,TPXO9.0 在旗门港潮位站精度较高。 GTM 模型标准差偏小,也印证了该模式在潮位模拟 中与实测数据的较大差异。

2.2 三门湾潮汐分析

本文对 4 种预报模型在 3 个验潮站的平均高低 潮位、平均潮差和平均涨落潮历时进行计算,见 表 2。其中 NAO.99b 和 TPXO9-atlas 两种模型分别 在平均高低潮位上具有良好的预报精度。NAO.99b 在各站平均误差基本低于 0.05 m; TPXO9-atlas 则 在低潮位预报中具有优势,平均误差低于 0.06 m, 相较TPXO9.0 模型其平均潮差精度提升约 4.75%。 由于 GTM 模型基于全球调和常数集进行潮汐预报 的数据库缺乏中国近海验潮站资料⁹⁹,其在平均高低 潮位上的误差仍较大。

表 2 不同潮汐预报模型涨落潮过程分析

潮位站	预报模型	平均高 潮位/m	平均低 潮位/m	平均潮 差/m	平均涨 潮历时/h	平均落 潮历时/h
	TPX09.0	2.05	-1.68	3.73	5.81	6.61
健跳	NAO.99b	2.03	-1.86	3.90	5.67	6.75
	GTM	1.55	-1.46	3.01	5.69	6.74
	TPX09-atlas	2.15	-1.78	3.93	5.87	6.56
	健跳实测	2.11	-1.91	4.01	6.18	6.26
石浦	TPX09.0	1.58	-1.37	2.95	5.85	6.57
	NAO.99b	1.80	-1.63	3.43	6.05	6.38
	GTM	1.38	-1.29	2.67	6.07	6.36
	TPX09-atlas	1.67	-1.46	3.13	5.97	6.46
	石浦实测	1.78	-1.46	3.24	5.69	6.74
旗门港	TPX09.0	2.22	-1.82	4.04	5.42	7.02
	NAO.99b	2.48	-2.23	4.71	5.04	7.39
	GTM	1.64	-1.58	3.22	5.29	7.15
	TPX09-atlas	2.31	-1.93	4.24	5.40	7.03
	旗门港实测	2.52	-1.97	4.49	6.46	5.98

4种预报模型在湾内不同站点误差不一。整体 来讲,健跳站平均高低潮位与潮差误差最小,石浦 站次之,旗门港站模型误差最大。在涨落潮历时方 面4种预报模型在健跳、石浦两站模拟精度较好, 在旗门港站平均涨落潮历时普遍有约1h误差。三 门湾潮汐属于正规半日潮性质,外海潮波向湾顶传 播过程中发生一定变形,浅水分潮明显增强^[20],而 潮汐预报模型对浅水分潮的预报精度直接影响着潮 位与涨落潮过程的模拟。为进一步分析不同预报模 型的差异与成因,本文对4种模型模拟结果进行了 潮汐调和分析。

2.3 分潮振幅与迟角

2.3.1 三门湾四大分潮调和分析

中国近海潮波以 M2、S2、K1、O1 四个分潮为 主¹⁰。为了进一步检验 4 种潮汐预报模式的预报精 度,通过潮汐调和分析,对四大分潮的分潮振幅与 迟角误差进行对比,调和分析参数见表 3。

分析对比发现, TPXO9.0、NAO.99b和TPXO9.0atlas 三种预报模式在分潮振幅与迟角精度上均较

表 3 调和分析参数

潮位站	八油	实测数据		GTM		NAO.99b		TPX09.0		TPX09.0-atlas	
	刀砌	振幅/m	迟角/(°)	振幅/m	迟角/(°)	振幅/m	迟角/(°)	振幅/m	迟角/(°)	振幅/m	迟角/(°)
健跳	M2	1.86	253	1.46	259	1.95	257	1.71	264	1.78	264
	S2	0.81	287	0.49	303	0.82	289	0.69	303	0.75	309
	K1	0.31	200	0.33	196	0.32	197	0.34	205	0.32	208
	01	0.23	174	0.18	175	0.21	179	0.18	189	0.21	189
石浦	M2	1.54	249	1.29	244	1.66	247	1.37	257	1.45	257
	S2	0.68	283	0.46	285	0.7	274	0.56	293	0.63	300
	K1	0.31	195	0.32	182	0.32	187	0.32	196	0.31	201
	01	0.21	171	0.17	166	0.21	170	0.19	180	0.21	182
旗门港	M2	2.09	263	1.55	263	2.09	263	1.82	268	1.91	269
	S2	0.88	119	0.55	129	0.86	117	0.74	130	0.79	135
	K1	0.39	198	0.35	195	0.34	202	0.35	209	0.34	213
	01	0.22	180	0.17	184	0.2	184	0.18	193	0.21	194

好,整体优于GTM 模型。

NAO.99b 模型 M2 分潮振幅在健跳、石浦两站 模拟误差较大,分别为 0.09 m 和 0.12 m,但整体振 幅误差比未超过 10%。在迟角对比中,NAO.99b 在健 跳站各分潮误差均未超过 5°,石浦站 S2、K1 分潮迟 角误差偏大,相较其他 3 种预报模型的模拟结果, NAO.99b 模型在分潮振幅迟角模拟中精确度最佳。

TPXO9.0 在 M2、S2 分潮振幅预报精度较差,

振幅误差在 0.01 ~ 0.27 m, 在旗门港站误差最大。 TPXO9.0-atlas 在分潮振幅预报精度上相较 TPXO9.0 有较为全面的提升,其分潮振幅误差控制在 0.2 m 内,迟角误差在-16° ~ 22°;在健跳、石浦两站其 M2、K1、O1 分潮振幅在所有模拟中均为最优。 TPXO9.0-atlas 在旗门港站 O1 分潮振幅预报精度较 高,但在迟角模拟中相较 TPXO9.0 则无明显改善。

GTM 模型在 M2、S2 分潮振幅误差较大,平均

误差分别达到 0.4 m 和 0.29 m,这也导致在大潮期 GTM 模型的潮位模拟误差较大。在迟角误差方面, GTM 模型在 S2 与 K1 分潮上迟角误差较大,但迟 角误差整体小于 TPXO9.0 与 TPXO9.0-atlas。

为了比较不同预报模式在不同站点分潮振幅的 预报精度,本文分别计算了4种预报模型在各站点 四大分潮的振幅均方根误差,均方根误差分布见图 4。从分布上看,TPXO9.0、TPXO9.0-atlas与GTM 三种预报模式在蛇蟠水道末端的旗门港站预报精度 较差,在水深较深的健跳港与靠近湾口的石浦站预 报精度较高。NAO.99b 模型在3个站点的分潮均方 根误差均较低。



图 4 4 种预报模型分潮振幅均方根误差示意图

各海潮模型在中国沿海 M2 分潮预报中相对误 差最大,直接主导了海潮模型的整体精度^[9]。在三 门湾海域 M2 分潮振幅最为显著^[10]。整体来看,4种 预报模式在三门湾各分潮预报中 M2 分潮误差均最 大,但相对误差不一。GTM 模式 M2 分潮振幅预报 精度最差^[9],直接导致了在潮位模拟中的较大偏差; 而潮位模拟精度较高的 NAO.99b 和 TPXO9.0-atlas 在 M2 分潮振幅预报精度明显较好。

潮汐预报模型的分辨率与其考虑的分潮数影响 着预报模型的精度^[8,21],对于同化模型,其选用的潮 位站同化数据也会对不同区域的潮汐预报精度产生 影响。NAO.99b 模型同化了日本、韩国沿岸的验潮 站和5年 T/P 沿轨海面高数据,并提供了全球 16个 分潮调和常数^[8]。相较于其他3种模型,NAO.99b 考虑了主要分潮的从属分潮影响,如 M2 分潮产生 的 NU2 分潮与 S2 分潮产生的 T2 分潮,因此该模 式虽然长周期分潮分辨率为 0.5°, 但在分潮预报精 度上依然较优。而 GTM 相较其他 3 种预报模式由 于其数据库缺乏中国近海潮汐资料,因此在主要分 潮上预报精度较差。TPXO9.0-atlas 在增加了近岸区 域潮汐模型后,分潮振幅预报精度有了较大提升, 但迟角误差上没有明显改进。NAO.99b 与TPXO9.0atlas 在三门湾海域四大分潮振幅预报精度最佳, NAO.99b 模式在四大分潮迟角预报模拟中精度 最佳。

2.3.2 旗门港涨落潮历时误差分析

潮汐不对称现象的直接原因是分潮间的相互作用,涨落潮历时之差可由 M4 与 M2 分潮振幅比值 得出;而涨落潮历时长短可由分潮相位差判断^[22]。 本文对 4 种预报模型在旗门港站的调和分析结果进 行计算分析,计算结果见表 4。

表 4 旗门港涨落潮历时误差分析

粉提本酒	振幅/m		迟角/(°)		11M /11M	2 M M	
致1.后不你	M2	M4	M2	M4	$\Pi M_4 / \Pi M_2$	$2gm_2 - gm_4$	
旗门港实测	2.09	0.16	263	181	0.07	345	
NAO.99b	2.09	0.31	296	181	0.15	51	
TPX09.0	1.82	0.27	268	128	0.15	48	
TPX09.0-atlas	1.91	0.27	269	130	0.14	48	
GTM	1.55	0.18	263	72	0.11	94	

注: *HM*₄/*HM*₄₂ 为 M4 与 M2 分潮振幅比值; 2*g*M₂ - *g*M₄ 为 M4与 M2 分潮相位差,其中,*g*M₂ 为 M2 分潮迟角,*g*M₄ 为 M4 分潮迟角。

两分潮振幅比值越大,涨落潮历时之差越大。 当相位差位于(0°,180°)时,落潮历时长,相位 差位于(180°,360°)时,涨潮历时长^[23]。明显发 现,4种预报模式下的分潮振幅比和相位差与实测 数据均有较大差异,主要体现在落潮历时长且涨落 潮历时之差较大,与2.2节涨落潮历时分析结果一 致。对比分潮振幅迟角可以发现,GTM 模型 M4 分 潮振幅误差仅0.02 m,但 M2 分潮振幅预报误差可 达25.8%,该误差导致了该模式下的涨落潮历时之 差较大,而其他3种预报模式 M2 分潮振幅精度较 高,但 M4 分潮振幅预报误差可达68.7%~125%; 4种模式在 M4 分潮迟角误差可达79°~109°,导致 模拟落潮历时长于涨潮历时。

2.4 三门湾内潮汐振幅分布

三门湾内半日潮占主导地位, M2 分潮振幅由 湾口向湾顶处递增, S2 分潮变化幅度小于 M2, K1 分潮和 01 分潮振幅在湾内分布较为一致16。为了 进一步分析三门湾潮汐特征,本文选用 NAO.99b 模 型模拟结果,提取网格面数据进行调和分析,并绘 制四大分潮同潮时线图,如图5所示。分析发现, 三门湾内潮汐振幅以半日潮为主, M2 分潮振幅最 大, S2 分潮振幅次之。M2、S2 和 K1 分潮振幅均



(a) M2 分潮

为湾顶向湾口递减[23], 而 01 分潮则是从湾顶向湾口 递增,且振幅变化较小。其中, M2 分潮在湾口与 湾顶处的振幅差约 0.6~0.8 m; S2 分潮振幅变化相 对 M2 分潮变化较小,振幅差约 0.3~0.4 m; K1、 01 分潮振幅变化较小,振幅差约为 0.1 m,这与其 他学者的研究结论一致[16,23]。



(b) S2 分潮



(c) K1 分潮

图 5 三门湾分潮同潮时线图

结论与展望 3

本文基于验潮站实测数据与潮汐调和分析方 法,采用数值模拟手段分析了 TPXO9.0、TPXO9.0atlas、NAO.99b 与 GTM 四种潮汐预报模型在三门 湾海域潮汐预报精度,为潮汐预报模型在强潮海湾 的精度评估提供了新思路。研究认为 NAO.99b 在研 究海域分整体预报精度最佳,各模型在分潮振幅与 迟角预报方面精度不一,可根据研究区域与内容择 优选用。本文采用精度最佳的 NAO.99b 模型分析三 门湾四大分潮振幅分布发现, 该海域以半日潮为

主, M2、S2和K1分潮振幅均为湾顶向湾口递减, 01分潮反之。

全球海潮模型在海洋数值模拟与潮汐物理机制 的研究中具有重要价值,但由于缺少中国近海验潮 站数据,以及测高卫星尚无法在近海实现潮汐变化 精确捕捉等原因,全球海潮模型在中国近海的预报 精度较深海区域仍有一定差距。随着高精度测高卫 星的并轨应用,海潮模型的下一步研究重点应改进 同化技术,提高现有潮汐资料利用率,同时更多地 同化浅水地区的验潮站数据,以实现在近海地区预 报精度的提升。

参考文献:

- [1] ZAWADZKI L, ABLAIN M, CARRERE L, et al. Investigating the 59-Day Error Signal in the Mean Sea Level Derived from TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2 Data with FES and GOT Ocean Tide Models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(6): 3244-3255.
- [2] BUIJSMAN M C, ANSONG J K, ARBIC B K, et al. Impact of parameterized internal wave drag on the semidiurnal energy balance in a global ocean circulation model[J]. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(5): 1399–1419.
- [3] MO A, IDH A, MIL B, et al. Sensitivity assessment of bathymetry and choice of tidal constituents on tidal-stream energy resource characterization in the Gulf of California, Mexico-Science Direct[J]. Applied Ocean Research, 2020, 102: 102281.
- [4] NGUYEN V T, LEE M. Effect of open boundary conditions on the tidal modeling around the west coast of korea[C]//proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts. Hanoi, Viet nam: Springer, 2020: 731–736.
- [5] PICCIONI G, DETTMERING D, SCHWATKE C, et al. Design and regional assessment of an empirical tidal model based on FES2014 and coastal altimetry[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(2): 1013–1022.
- [6] SEIFI F, DENG X, ANDERSEN O B. Assessment of the accuracy of recent empirical and assimilated tidal models for the Great Barrier Reef, Australia, using satellite and coastal data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1211.
- [7] ZHAO H, CHENG C, HUANG G, et al. Combining the tide gauge stations and GPS/GLONASS observations to validate global and regional ocean tide models around China coast[J]. Journal of Surveying Engineering, 2022, 148(3): 04022004.
- [8] 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.
- [9] 范长新. 全球海潮模型最新进展及在中国沿海精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(5): 476-481.
- [10] 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.
- [11] 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):310-320.
- [12] TRANCHANT Y T, TESTUT L, CHUPIN C, et al. Near-coast tide model validation using GNSS unmanned surface vehicle (USV), a case study in the pertuis charentais (France)[J]. Remote Sensing, 2021, 13(15): 2886–2906.
- [13] AHN J E, RONAN A D. Impact of discrepancies between global ocean tide models on tidal simulations in the Shinnecock Bay area [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2019, 145(2): 04018042.
- [14] ZHU L, YIN X L, JIANG L. Accuracy comparison for the ocean tide models in estuarine tidal prediction, the Pearl River estuary [C]//proceedings of the 4th International Conference on Civil Engineering. Haikou, China: Trans Tech Publications Ltd., 2014: 2141–2145.
- [15] 何齐齐,宋丹,许雪峰,等.三门湾海域污染物扩散数值研究[J].海洋通报,2018,37(1):63-73.
- [16] 杨万康,尹宝树,杨青莹,等.海岸围垦工程对三门湾内潮汐振幅的影响与研究[J].应用海洋学学报,2019,38(3):408-415.
- [17] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [18] 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.
- [19] CHENG Y C, ANDERSEN O B. Improvement in global ocean tide model in shallow water regions[C]//Altimetry for Oceans and Hydrology OST-ST Meeting. Lisbon: OSTST, 2010: 1–68.
- [20] 宋泽坤,施伟勇,张峰,等.三门湾近期水动力特性观测研究[J].应用海洋学学报,2017,36(2):279-285.
- [21] LOGEMANN K, LINARDAKIS L, KORN P, et al. Global tide simulations with ICON-O: Testing the model performance on highly irregular meshes[J]. Ocean Dynamics, 2021, 71(1): 43-57.
- [22] 李谊纯,李庆,林振良.正规半日潮海域潮汐不对称性及量化[J].海洋工程, 2019, 37(6): 86-93.
- [23] 师鹏飞,许东峰,王俊,等.三门湾外海的潮汐和潮流特征[J].海洋学研究, 2012, 30(2): 27-35.

Accuracy Analysis of Tidal Models of Macro Tidal Bay Based on Numerical Simulation: The Example of Sanmen Bay

MA Yuanhao^{1,2}, WANG Qiushun¹, ZHOU Chunyan², CHEN Fuyuan¹

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ocean tidal changes are accurately simulated by global ocean tide models, but different tide models have distinct prediction accuracy in estuaries and coasts. The Sanmen Bay is a typical macro-tidal bay, and the average and maximum tidal range is 4 m and 7 m, respectively. In order to evaluate the prediction accuracy of the four forecasting models, i.e., TPXO9.0, TPXO9.0-atlas, NAO.99b and GTM in the Sanmen Bay. In this study, the above four tidal models are used to extract the open-sea water level in hydrodynamic model to drive for numerical simulation. By calculating and analyzing the error between the measured data at the tidal level station and the numerical results, the tidal changes in the Sanmen Bay are analyzed by employing four forecasting models, and it is concluded that the NAO.99b model has the best forecast accuracy in general, with the minimum error in tidal range, epoch of tidal constituent compared to the measured data, and it is prefer to using TPXO9.0-atlas for numerical simulation in tidal range, but the epoch error of tidal constituent is larger. On the basis of tidal harmonic analysis of the four major sub-tides in the bay, it is found that the tide in the Sanmen Bay is semidiurnal, and the amplitude of tidal constituent M2, S2 and K1 decreased from the inner of the bay to the bay mouth, but it was reverse for the tidal constituent O1.

Key words: Sanmen Bay; forecasting model; numerical simulation; tidal harmonic analysis