

七个海洋潮汐模式在浙江海域的准确度评估

赵 强^{1,2}, 侯国锋¹, 汤志华¹, 舒志光¹

(1. 国家海洋局 宁波海洋环境监测中心站, 浙江 宁波 315012;

2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘 要:利用浙江近岸 33 个潮位站的 8 个主要分潮($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1$ 和 Q_1) 的调和常数和潮高, 对 7 个全球/区域潮汐模式(CSR4.0, FES2012, HAMTIDE11a, TPXO7.2, TPXO8-atlas, TPXO-CSI2016 和 NAO99Jb) 的准确度进行了评估。以 M_2 分潮的潮高均方根误差大小为标准, 评估结果显示 FES2012 模式在浙江近海的准确度相对较高, 33 个潮位站平均的 M_2 分潮潮高均方根误差为 22.12 cm。各模式在杭州湾和瓯江 4 个测站的准确度普遍较低, 多模式平均的 M_2 分潮潮高均方根误差都超过 70 cm。若不考虑上述 4 个测站, TPXO8-atlas 模式的准确度最高, 29 个潮位站平均的 M_2 分潮潮高均方根误差为 16.38 cm。综合来看, FES2012 和 TPXO8-atlas 在浙江近海的准确度较高, 可根据实际研究区域和分潮加以选择。

关键词:潮汐模式; 准确度评估; TPXO; NAO99; FES2012

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)02-0310-11

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.02.016

20 世纪 90 年代以来, 随着以 TOPEX/Poseidon(以下简称 T/P)、Jason 等为代表的卫星高度计资料的广泛应用, 大洋潮汐模式得到了快速发展, 其准确度也有了很大提高, 其中较具代表性的有美国的 TPXO^[1], CSR^[2], GOT^[3], 日本的 NAO^[4], 法国的 FES^[5], 德国的 EOT^[6] 和 HAMTIDE^[7] 等。这些模式大都基于水动力学方程组, 并将卫星高度计资料和验潮站资料同化到模式中。模式的结果通常以公开数据集的形式提供, 研究人员可采用这些数据进行潮汐特征分析、海洋动力模型开边界建立等工作。

目前的大洋潮汐模式有几十种, 这些模式的准确度在世界范围内得到了评估。Anderson 等^[8] 基于全球 95 个验潮站数据, 将 14 个 1994 年后出现的基于 T/P 高度计资料的全球大洋潮汐模式以及基于潮位站实测资料的 SCW80 模式^[9] 和基于 Geosat 卫星高度计的 CR91 模式^[10] 进行了比较, 发现基于 T/P 资料的潮汐模式在开阔海域具有更高的精度, 且对于 M_2 和 K_1 分潮, Schrama 等^[11] 的模式与验潮站数据符合最好, 对于 S_2 和 O_1 分潮, TPXO2 模式^[12] 准确度最好。Shum 等^[13] 对 1994 年后的 10 种大洋潮汐模式进行了评估, 整体而言, SR95.0/.1 与验潮站数据符合最好。Gladkikh 等^[14] 将 TPXO7.2, GOT00.2, NAO99b, FES2004 和 EOT10a 这 5 个全球大洋潮汐模式与新西兰沿岸的 7 个验潮站资料进行了比较, 发现 TPXO7.2 在新西兰沿岸的准确度最高。汪一航等^[15] 选取全球 152 个大洋验潮站观测结果对 7 个大洋潮汐模式的 8 个主要分潮结果进行了比较验证, 结果显示模式的总体准确度达到 95%, 且除 SCW80 模式准确度较低外, 各模式间准确度差异不大。他们还依据中国近海 18 个岛屿验潮站的调和常数对 5 个大洋潮汐模式(NAO99b, GOT00, FES2002, FES2004 和 TPXO7) 的准确度进行了比较, 结果表明 NAO99b 模式在中国近海的准确度相对较高。李大炜等^[16] 利用大洋验潮站对 5 个全球海潮模型(NAO99b, FES2004, TPXO7.2, GOT4.7 和 EOT10a) 进行了精度评估, 结果显示在水深大于 1 000 m 的深海海域, 各模式精度相当, 而在水深小于 200

收稿日期: 2017-01-06

资助项目: 国家海洋局东海分局青年科技基金项目——海洋潮汐模式在浙北海域的准确度评估(201628); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放课题——黄东海浪-流耦合模型的建立及不同耦合方式的对比分析(QNHX1724)

作者简介: 赵 强(1982-), 男, 山东青岛人, 工程师, 博士, 主要从事海洋动力学和生态系统的数值模拟方面研究. E-mail: zhaoliang@eastsea.gov.cn

(李 燕 编辑)

m 的浅海, EOT10a 的结果最优, NAO99b 的结果较不理想。而与中国近海验潮站数据比较的结果显示, NAO99b 与验潮站数据的偏差最小, TPXO7.2 较差。孙佳龙等^[17]基于中国近海 17 个验潮站数据比较了 CSR4.0 和 NAO99b 模型在中国海域精度, 以水位时间序列的差值为标准, 他们认为 CSR4.0 优于 NAO99b, 以分潮高误差为标准, NAO99b 优于 CSR4.0。高秀敏等^[18]采用南海海域 60 个验潮站和 22 个 T/P 高度计轨道交叉点的调和常数资料, 对比了 4 种大洋潮汐模式 (TPXO7.2, GOT00.2, NAO99b 和 DTU10^[19]) 的准确度, 发现 DTU10 在南海准确度最高。雷宁等^[20]的研究结果也显示, 在南海浅海海域, DTU10 模式的结果与验潮站数据较为符合。

传统全球潮汐模式的空间分辨率较低, 且受海洋动力和陆地反射的影响, 一般基于卫星高度计数据建立的海洋潮汐模型在浅海海域存在较大的误差^[8,13,15-16,20]。然而随着观测和技术发展, 潮汐模式可同化的观测点数量越来越多, 高度计资料的时间序列越来越长, 模式的空间分辨率也得到了提高, 出现了一些高分辨率的区域模式, 这些最新的潮汐模式在近岸的结果值得重新评估。

本文选取了 7 个全球/区域潮汐模式, 利用通过《潮汐表》^[21]调和与分析得到的浙江近海 33 个潮位站的调和常数对这些模式的准确度进行了评估。

1 模式介绍

本文选择 5 个全球潮汐模式和 2 个区域潮汐模式进行准确度评估 (表 1)。

TPXO 模式是由美国俄勒冈州立大学 (Oregon State University, OSU) 建立的潮汐模式。该模式基于 Laplace 潮汐方程, 采用最小二乘法, 同化了 T/P, Jason 卫星高度计资料^[1]。目前最新版本为 TPXO8-atlas v1, 该版本融合了区域潮汐模式的结果, 提供了 8 个主要分潮 ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1$ 和 Q_1)、2 个长周期分潮 (M_f, M_m) 和 3 个浅水分潮 (M_4, MS_4, MN_4) 的潮位、潮流通量信息。其中, $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$ 和 M_4 的空间分辨率为 $(1/30)^\circ$, M_f, M_m, MS_4 和 MN_4 的分辨率为 $(1/6)^\circ$ 。China Seas & Indonesia 2016 (以下简称 TPXO-CSI2016) 为 OSU 提供的区域模式结果, 范围为 $(95^\circ \sim 155^\circ E, 30^\circ S \sim 42^\circ N)$, 分辨率为 $(1/30)^\circ$, 仅包括 8 个主要分潮, 不包括长周期分潮和浅水分潮; TPXO7.2 为未融合区域潮汐模式的版本, 分辨率为 $(1/4)^\circ$, 我们将这三个版本的模式结果纳入比较。

CSR4.0 是由美国空间飞行研究中心 (Center for Space Research, CSR) 基于经验算法建立的第二代大洋潮汐模式^[2], 基于 T/P 高度计资料, 提供 16 个短周期分潮 ($M_2, S_2, N_2, K_2, 2N_2, Mu_2, Nu_2, L_2, T_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_1, J_1$ 和 OO_1) 的潮汐数据, 分辨率为 $(1/2)^\circ$ 。

NAO99Jb 由日本国立天文观测台 (National Astronomical Observatory, NAO) 开发的针对日本周边海域的区域潮汐模式^[4], 模式范围 $(110^\circ \sim 155^\circ E, 20^\circ \sim 65^\circ N)$ 。该模式同化了大约 5 a 的 T/P 卫星高度计资料和日本周边的验潮站数据, 提供 16 个短周期分潮 ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_1, J_1, OO_1, 2N_2, Mu_2, Nu_2, L_2$ 和 T_2) 和 7 个长周期分潮 ($M_{tm}, M_f, MS_f, M_m, MS_m, S_{sa}$ 和 S_a) 的潮位信息。其中短周期分潮的分辨率为 $(1/12)^\circ$, 长周期分潮的分辨率为 $(1/2)^\circ$ 。

FES2012 是由法国潮汐工作组 (the French Tidal Group) 开发的全球有限元大洋潮汐模式 (Finite Element Solution) 的最新版本^[5]。该模式同化了 T/P, Jason-1, Jason-2, ERS-1, ERS-2 和 Envisat 等卫星的高度计资料, 提供 32 个分潮 ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, S_1, J_1, 2N_2, Mu_2, Nu_2, L_2, T_2, E_2, R_2, La_2, MKS_2, M_{tm}, M_f, MS_f, M_m, S_{sa}, M_3, M_4, MN_4, N_4, S_1, M_6, MS_4$ 和 M_8) 的潮位和潮流信息, 模式结果的分辨率为 $(1/16)^\circ$ 。

HAMTIDE11a 是由德国汉堡大学海洋研究所 (Institut für Meereskunde, University Hamburg) 建立的全局潮汐模式^[7], 模式同化了 15 a 的 TOPEX 和 Jason-1 卫星高度计资料, 包括 8 个主要分潮 ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1$ 和 Q_1) 的潮汐、潮流信息, 分辨率为 $(1/8)^\circ$ 。

表 1 全球/区域海洋潮汐模型
Table 1 Global/regional ocean tide models

模 型	分潮数	主要分潮分辨率	范 围
CSR4.0	16	(1/2)°	全球
FES2012	32	(1/16)°	全球
HAMTIDE11a	8	(1/8)°	全球
TPXO7.2	13	(1/4)°	全球
TPXO8-atlas	13	(1/30)°	全球
TPXO-CSI2016	8	(1/30)°	(95°~155°E, 30°S ~42°N)
NAO99Jb	23	(1/12)°	(110°~155°E, 20°~65°N)

2 潮汐模式在浙江近海的准确度评估

2.1 评估方法

通常以某一分潮的计算值与观测值的偏差来评估潮汐模式的准确度。偏差的计算有 2 种方式,一种是
通过计算调和常数,考察经模式结果获得与经观测值获得的振幅之间和迟角之间的偏差,即对某一特定分
潮有:

$$\Delta H = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_{\text{sim},n} - H_{\text{obs},n}|, \quad (1)$$

$$\Delta g = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |g_{\text{sim},n} - g_{\text{obs},n}|, \quad (2)$$

式中, H 为振幅, g 为迟角, 下标 sim 和 obs 分别代表经由模式结果获得与经由观测值获得; n 为站位数,
 $n=1, 2, \dots, N$ 。另一种方法通过分潮调和常数计算分潮潮高, 考察经模式结果获得与经观测值获得的分
潮潮高之间的偏差。对某一特定分潮, 潮高为

$$h_n = H_n \cos(\omega t - g_n), \quad (3)$$

式中, t 为时间, ω 为角速率。分潮潮高的均方根值为

$$\eta_n = \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [H_n \cos(\omega t - g_n)]^2 dt \right\}^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{2}} H_n. \quad (4)$$

经模式结果获得与经观测值获得的分潮潮高的均方根误差为

$$\sigma_n = \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [H_{\text{sim},n} \cos(\omega t - g_{\text{sim},n}) - H_{\text{obs},n} \cos(\omega t - g_{\text{obs},n})]^2 dt \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1}{2} [(H_{\text{sim},n} \cos g_{\text{sim},n} - H_{\text{obs},n} \cos g_{\text{obs},n})^2 + (H_{\text{sim},n} \sin g_{\text{sim},n} - H_{\text{obs},n} \sin g_{\text{obs},n})^2] \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

对于 N 个站位, 其相应的平均值分别为

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_n, \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma_n, \quad (7)$$

相对误差则表示为

$$r = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (8)$$

一般认为,前一种方法计算简单,但需同时考虑振幅误差和迟角误差两个变量的准确度,且在分潮振幅较小时容易高估迟角误差对准确度的影响,故较难合理地制定评估标准;后一种方法计算稍显复杂,但只需对潮高误差这一个变量进行评价,故更适合用于准确度评估^[13-14]。

2.2 评估结果

由于实测潮位数据除了包含潮汐信息外,还包含天气系统尺度的增水信息,如台风风暴潮、温带风暴潮等,因此本文采用 2014 年《潮汐表》^[21]中提供的潮位资料用于计算 8 个主要分潮(M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 和 Q_1)的调和常数。《潮汐表》由国家海洋信息中心编制,用于指导各地方海洋台站的潮汐预报,具有一定的权威性。同时,我们也对岱山、六横岛、沈家门、嵊山、石浦和镇海六个潮位站 2014 年的实测潮位数据进行了调和,结果与通过《潮汐表》资料计算得到的调和常数进行了对比,多站平均的分潮振幅误差和平均迟角误差如表 2 所示,分潮振幅和迟角的平均差值分别为 0.5 cm 和 2.13°,差异很小。本文选用的浙江近海 33 个潮位站名称和位置如图 1 所示。

表 2 通过潮位站实测数据和《潮汐表》资料分别计算的多站平均的分潮振幅差(ΔH)和迟角差(Δg)

Table 2 The ΔH and Δg (averaged over 6 stations) of 8 tidal constituents between observation and Tide Tables

潮汐参数	M_2	S_2	N_2	K_2	K_1	O_1	P_1	Q_1	平均
$\Delta H/cm$	1.55	0.61	0.68	0.38	0.14	0.37	0.18	0.11	0.50
$\Delta g/^\circ$	0.86	0.84	1.84	1.54	0.59	0.70	2.75	7.88	2.13

7 个潮汐模式多站平均的分潮的振幅误差、迟角误差、潮高均方根误差和潮高相对误差如表 3 所示。从计算结果看,各潮汐模式在浙江近岸的平均误差普遍较大, M_2 分潮的振幅误差为 18.25~47.78 cm,迟角误差为 9.72°~31.52°,潮高均方根误差为 22.12~58.08 cm,潮高相对误差为 0.23~0.58; S_2 分潮的振幅误差为 8.28~20.38 cm,迟角误差为 10.71°~29.14°,潮高均方根误差为 9.83~21.77 cm,潮高相对误差为 0.26~0.59; K_1 分潮的振幅误差为 1.72~8.04 cm,迟角误差为 6.25°~16.09°,潮高均方根误差为 2.72~7.45 cm,潮高相对误差为 0.13~0.35; O_1 分潮的振幅误差为 1.46~5.42 cm,迟角误差为 4.92°~28.16°,潮高均方根误差为 1.79~5.78 cm,潮高相对误差为 0.13~0.38。

以潮高均方根误差为标准,FES2012 的各分潮误差在 7 个模式中全部都为最小;以相对误差为标准,FES2012 的 M_2 , K_1 , O_1 , P_1 和 Q_1 这 5 个分潮的准确度最高,TPX08-atlas 的 S_2 , N_2 和 K_2 这 3 个分潮的准确度最高。综上所述,与潮位站资料吻合最好的为 FES2012 全球模式,虽然其分辨率为 $(1/16)^\circ$,但整体计算结果优于 TPX08-atlas 和 TPX08-CSI2016 这 2 个 $(1/30)^\circ$ 的更高分辨率模式,也优于 NAO99Jb 区域模式。NAO99Jb 的 K_1 分潮的准确度仅次于 FES2012,但其他分潮的准确度略低于 TPX08-

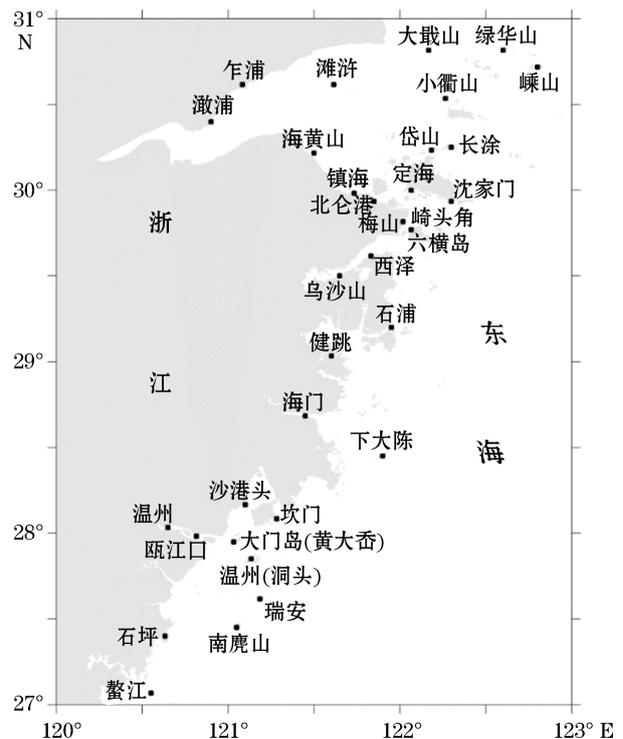


图 1 浙江近海 33 个潮位站名及位置图

Fig.1 Names and locations of the 33 tide-gauge stations along the coastline of Zhejiang

atlas。TPX08-atlas 全球模式的准确度略高于 TPX0-CSI2016 区域模式,二者在除 K_1 分潮外的 7 个分潮的准确度都优于低分辨率的 TPX07.2。HAMTIDE11a 和 CSR4.0 的在浙江近海的准确度最差。

表 3 各潮汐模式多站平均的分潮的振幅误差(ΔH)、迟角误差(Δg)、潮高均方根误差(σ)和潮高相对误差(r)

Table 3 The ΔH , Δg , σ and r (averaged over 33 stations) of 8 tidal constituents between model and observation

模式	分潮	$\Delta H/cm$	$\Delta g/^\circ$	σ/cm	r	模式	分潮	$\Delta H/cm$	$\Delta g/^\circ$	σ/cm	r
CSR4.0	M_2	47.78	31.52	58.08	0.58	CSR4.0	K_1	8.04	16.09	7.45	0.35
	S_2	19.85	26.08	21.76	0.59		O_1	4.96	28.16	4.73	0.33
	N_2	9.17	31.86	10.28	0.61		P_1	2.12	15.96	2.16	0.38
	K_2	6.06	25.54	5.89	0.53		Q_1	1.02	24.07	0.94	0.37
FES2012	M_2	18.25	9.72	22.12	0.23	FES2012	K_1	1.72	6.25	2.72	0.13
	S_2	8.28	10.71	9.83	0.28		O_1	1.46	4.92	1.79	0.13
	N_2	4.66	15.47	4.90	0.30		P_1	0.82	6.43	1.03	0.19
	K_2	2.31	12.94	3.04	0.29		Q_1	0.49	8.08	0.61	0.25
HAMTIDE11a	M_2	45.43	20.88	47.21	0.46	HAMTIDE11a	K_1	6.52	8.40	5.61	0.26
	S_2	20.38	29.14	21.77	0.57		O_1	5.42	22.60	5.40	0.38
	N_2	9.07	30.73	10.35	0.59		P_1	2.14	33.55	3.07	0.53
	K_2	6.35	38.48	6.67	0.61		Q_1	1.04	29.60	0.99	0.39
TPX07.2	M_2	30.22	17.67	37.21	0.34	TPX07.2	K_1	2.65	9.89	4.14	0.20
	S_2	12.26	16.21	13.58	0.33		O_1	2.05	22.04	5.78	0.41
	N_2	5.24	19.69	6.79	0.38		P_1	1.18	9.53	1.40	0.26
	K_2	2.50	23.94	4.80	0.40		Q_1	1.46	8.89	1.09	0.43
TPX08-atlas	M_2	26.98	11.71	28.06	0.25	TPX08-atlas	K_1	4.31	12.61	5.19	0.24
	S_2	9.84	11.93	10.71	0.26		O_1	1.80	10.19	2.77	0.19
	N_2	4.33	12.66	5.20	0.26		P_1	0.87	9.26	1.17	0.21
	K_2	2.64	11.72	3.04	0.26		Q_1	0.89	10.30	0.80	0.32
TPX0-CSI2016	M_2	26.53	13.37	31.40	0.27	TPX0-CSI2016	K_1	4.19	13.78	5.50	0.26
	S_2	9.95	13.07	11.74	0.28		O_1	1.69	10.85	2.95	0.21
	N_2	4.27	14.37	5.96	0.30		P_1	0.89	9.63	1.25	0.22
	K_2	2.63	13.65	3.52	0.30		Q_1	0.87	9.91	0.78	0.31
NAO99Jb	M_2	22.62	13.53	29.17	0.34	NAO99Jb	K_1	2.81	10.44	4.66	0.22
	S_2	14.76	19.44	18.51	0.58		O_1	2.59	6.50	2.71	0.19
	N_2	9.01	42.30	10.00	0.65		P_1	2.05	13.85	2.26	0.41
	K_2	8.21	25.21	8.69	0.92		Q_1	1.27	20.19	1.32	0.54

图 2 为多模式平均的 M_2 分潮潮高均方根误差在 33 个潮位站的分布,其他各分潮的误差空间分布与 M_2 分潮相似。总体上看,距离浙江岸线越远,潮汐模式的误差越小。各潮汐模式在杭州湾海域的误差普遍较大,在澉浦站和乍浦站的 M_2 分潮的平均潮高均方根误差都超过了 100 cm,分别达到 160.54 和 131.18 cm;在滩浒站的 M_2 分潮的平均潮高均方根误差为 82.66 cm。温州站位于瓯江上游,各模式在该站的误差也较大, M_2 分潮的平均潮高均方根误差为 72.05 cm。不统计各潮汐模式在上述 4 个潮位站的误差,重新计算各潮汐模式 8 个主要分潮的潮高均方根误差,其在 29 个潮位站间的平均值如表 4 所示。此时,TPX08-atlas 模式的 M_2 , S_2 , N_2 , K_2 和 P_1 分潮的潮高均方根误差在 7 个模式中最小,而 FES2012 模式的 K_1 , O_1 和 Q_1 分潮

的潮高均方根误差在各模式间最小。

表 4 不考虑 4 个误差较大的潮位站时,8 个各潮汐模式多站平均的分潮潮高均方根误差 (cm)

Table 4 The σ (cm) of 8 tidal constituents averaged over 29 stations

模 式	分 潮							
	M_2	S_2	N_2	K_2	K_1	O_1	P_1	Q_1
CSR4.0	42.88	17.21	7.91	4.69	5.14	3.33	1.51	0.71
FES2012	16.64	7.42	3.76	2.34	2.06	1.41	0.95	0.47
HAMTIDE11a	37.31	18.35	8.90	5.69	4.31	4.33	2.74	0.82
TPXO7.2	20.26	9.50	5.05	2.80	3.26	4.63	1.29	1.01
TPXO8-atlas	16.38	6.72	3.38	1.90	3.75	1.84	0.77	0.67
TPXO-CSI2016	20.17	7.86	4.25	2.44	4.12	2.03	0.85	0.65
NAO99Jb	25.62	15.08	7.16	5.97	3.09	1.93	1.67	1.06

浙江沿岸属于强潮海区,且岸线曲折,地形复杂,目前各大洋潮汐模式的精度在这一海域与高分辨率的小区域模式^[22]相比仍有一定差距,李大炜等^[16]认为水动力环境复杂、陆地反射影响、测高卫星地面轨迹空间分布、未同化我国沿海验潮站资料等是大洋潮汐模型在我国近海海域精度较差的原因。但是可以看到,较新的潮汐模型与较早的潮汐模型相比,精度有了进一步提高。在以往的对比评估中,通常认为 NAO99Jb 模式在中国近海具有最高的准确度^[15-17],但在本文的评估中,其在浙江近岸的准确度明显低于 FES2012, TPXO8-atlas 和 TPXO-CSI2016 这 3 种较新的模式。这 3 种模式的的空间分辨率都比 NAO99Jb 高,且同化了 T/P, Jason, ERS 和 Envisat 等多源多代卫星高度计的资料,同化资料的时间序列长度也比 NAO99Jb 长。

在每个潮位站,选取 7 个潮汐模型中 4 个主要分潮(M_2, S_2, K_1 和 O_1)潮高均方根误差最小的模式列于图 3,并统计其在 33 个潮位站中出现的站位个数列于表 5。对于 M_2 分潮, TPXO7.2 误差最小的潮位站数量最多,为 8 个;其次为 TPXO8-atlas 和 TPXO-CSI2016,站位数都为 7 个;再次为 FES2012 和 NAO99Jb,站位数都为 5 个。对于 S_2, K_1 和 O_1 分潮, FES2012 模式误差最小的潮位站数量都超过 10 个,显著多于其他潮汐模式,其次为 TPXO8-atlas 和 TPXO7.2。

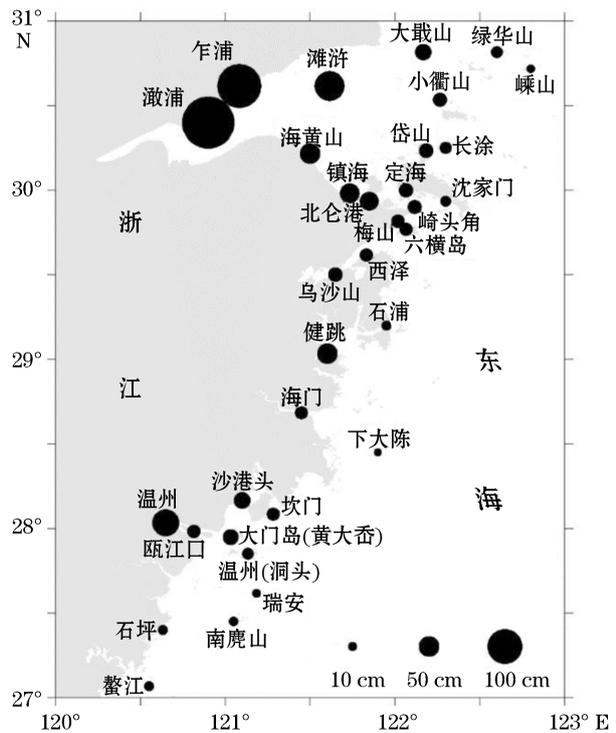


图 2 多模式平均的 M_2 分潮潮高均方根误差的在各潮位站的分布

Fig.2 The averaged σ of M_2 of 7 models at the 33 stations

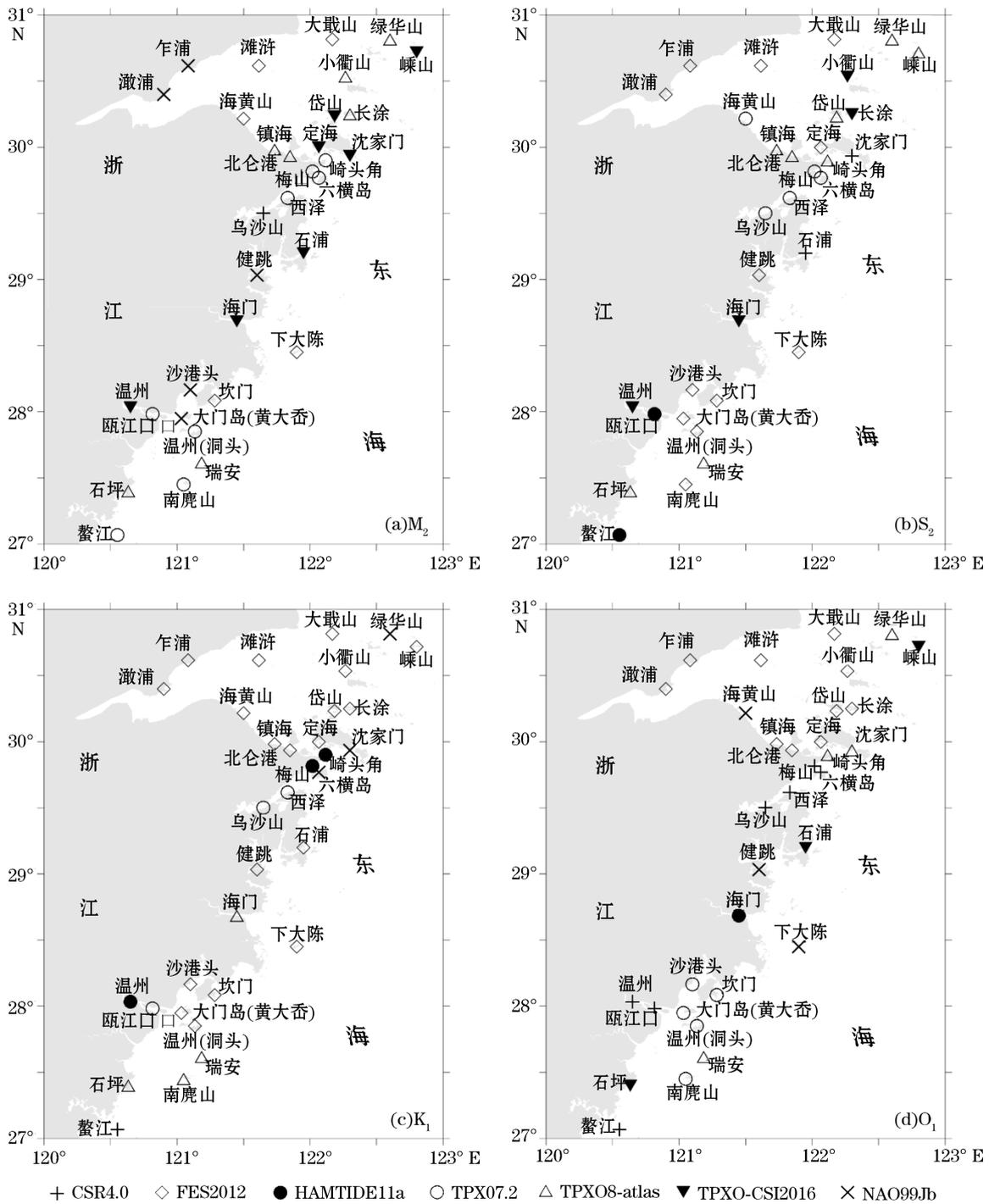


图 3 各站 4 个主要分潮潮高均方根误差最小的潮汐模式分布

Fig.3 The model with the smallest σ of the 4 tidal constituents

表 5 图 3 中各模式出现的次数
Table 5 The number of occurrence of each model in Fig.3

模 式	分 潮			
	M ₂	S ₂	K ₁	O ₁
CSR4.0	1	2	1	7
FES2012	5	12	19	10
HAMTIDE11a	0	2	3	1
TPXO7.2	8	5	3	5
TPXO8-atlas	7	8	4	4
TPXO-CSI2016	7	4	0	3
NAO99Jb	5	0	3	3

此外,我们也将各潮汐模式结果与浙江外海的卫星高度计产品进行了比较。卫星高度计产品由 CTOH/LEGOS 提供,是利用 1993—2016 年间 T/P,Jason-1 和 Jason-2 卫星高度计资料提取的潮汐调和常数产品。本文选用了(121°~124°E,27°~31°N)区域范围内的产品进行了比较,结果如表 6 所示。从结果可以看出,相较于近岸,各潮汐模式在浙江外海的准确度更高。以 M₂ 分潮为例,准确度最高的模式依然是 FES2012,平均潮高均方根误差仅为 1.31 cm,平均潮高相对误差为 2%,其次为 TPXO-CSI2016 和 TPXO8-atlas,准确度最低的为 CSR4.0,这与在近岸的评估结果基本一致。各模式 Q₁ 分潮的准确度都相对较低,平均潮高相对误差都超过 20%。

表 6 与卫星高度计相比,8 个潮汐模式的分潮振幅误差(ΔH)、迟角误差(Δg)、潮高均方根误差(σ)和潮高相对误差(r)

Table 6 The averaged ΔH , Δg , σ and r of the 8 tidal constituents between model and altimetry data

模 式	分 潮	$\Delta H/cm$	$\Delta g/^\circ$	σ/cm	r	模 式	分 潮	$\Delta H/cm$	$\Delta g/^\circ$	σ/cm	r
CSR4.0	M ₂	5.50	8.59	10.52	0.12	CSR4.0	K ₁	2.14	1.39	1.60	0.08
	S ₂	2.37	2.69	2.53	0.07		O ₁	0.68	3.45	0.96	0.08
	N ₂	1.84	35.90	1.98	0.12		P ₁	0.43	3.35	0.52	0.09
	K ₂	1.16	7.08	1.64	0.17		Q ₁	0.53	8.07	0.53	0.22
FES2012	M ₂	1.18	0.62	1.31	0.02	FES2012	K ₁	1.18	1.81	1.08	0.06
	S ₂	0.86	0.94	0.92	0.03		O ₁	0.36	1.06	0.39	0.03
	N ₂	0.62	7.40	0.68	0.04		P ₁	0.37	3.90	0.54	0.09
	K ₂	0.77	1.68	0.67	0.07		Q ₁	0.51	8.76	0.55	0.26
HAMTIDE11a	M ₂	2.33	2.97	3.18	0.04	HAMTIDE11a	K ₁	1.16	0.80	0.89	0.05
	S ₂	7.21	3.86	5.74	0.16		O ₁	0.52	2.75	0.76	0.06
	N ₂	1.33	26.11	1.39	0.09		P ₁	0.88	9.36	1.12	0.19
	K ₂	3.44	6.42	2.65	0.27		Q ₁	0.46	8.66	0.47	0.20
TPXO7.2	M ₂	3.05	4.40	3.85	0.05	TPXO7.2	K ₁	0.58	1.92	0.83	0.04
	S ₂	1.33	1.90	1.75	0.05		O ₁	0.80	2.06	0.78	0.06
	N ₂	0.76	13.29	0.99	0.06		P ₁	0.39	4.49	0.57	0.10
	K ₂	0.51	2.61	0.62	0.06		Q ₁	0.67	9.79	0.62	0.25

续表

模式	分潮	$\Delta H/cm$	$\Delta g/^\circ$	σ/cm	r	模式	分潮	$\Delta H/cm$	$\Delta g/^\circ$	σ/cm	r
TPXO8-atlas	M_2	0.56	0.92	1.54	0.02	TPXO8-atlas	K_1	0.98	1.14	0.84	0.04
	S_2	0.49	0.65	0.61	0.02		O_1	0.29	1.27	0.39	0.03
	N_2	0.58	8.28	0.60	0.04		P_1	0.39	3.80	0.50	0.08
	K_2	0.49	2.57	0.63	0.06		Q_1	0.51	8.93	0.50	0.20
TPXO-CSI2016	M_2	0.57	0.92	1.52	0.02	TPXO-CSI2016	K_1	0.98	1.13	0.83	0.04
	S_2	0.50	0.63	0.60	0.02		O_1	0.29	1.28	0.39	0.03
	N_2	0.58	8.28	0.59	0.04		P_1	0.39	3.80	0.50	0.08
	K_2	0.49	2.55	0.63	0.06		Q_1	0.51	8.92	0.50	0.20
NAO99Jb	M_2	1.44	3.52	2.04	0.02	NAO99Jb	K_1	0.87	1.90	0.94	0.05
	S_2	0.75	0.75	0.80	0.02		O_1	0.80	1.52	0.75	0.06
	N_2	1.20	15.68	1.22	0.07		P_1	0.41	4.07	0.56	0.10
	K_2	0.63	1.59	0.58	0.06		Q_1	0.54	11.05	0.66	0.31

3 结 语

本文利用浙江近岸 33 个潮位站的 8 个主要分潮($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1$ 和 Q_1) 的调和常数和潮高, 对 7 个全球/区域潮汐模式的准确度进行了评估, 结果显示各潮汐模式在浙江近海的误差仍然较大。其中, FES2012 和 TPXO8-atlas 的准确度相对较高, 33 个潮位站平均的 M_2 分潮潮高均方根误差分别为 22.12 和 28.06 cm, 剔除 4 个误差较大的潮位站后, 这两个模式 29 个潮位站平均的 M_2 分潮潮高均方根误差分别减小到 16.38 和 16.64 cm。从各潮汐模式 4 个主要分潮(M_2, S_2, K_1 和 O_1) 潮高均方根误差最小的潮位站个数来看, 对 M_2 分潮, TPXO7.2, TPXO8-atlas 和 TPXO-CSI2016 误差最小的潮位站数量较多; 对其它分潮, FES2012 误差最小的潮位站数量显著多于其它潮汐模式。FES2012, TPXO8-atlas, TPXO-CSI2016 和 TPXO7.2 在浙江近海的准确度皆优于 NAO99Jb, 而后者在诸多前人的研究中被认为其在东海近海的准确度较优^[15-17], 可见随着模式空间分辨率的提升和同化数据的增多, 较新的模式与较早的模式相比, 准确度得到了进一步提高。总的来说, FES2012 和 TPXO8-atlas 在浙江近海的准确度较高, 可根据实际研究区域加以选择。从结果看, 各模式各分潮的准确度在不同区域有所差别, 在下一步的工作中, 我们将根据评估结果尝试将多个潮汐模式进行融合, 形成一组在浙江近海具有更高精度的潮汐数据集。

参考文献 (References):

- [1] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [2] EANES B R J, BETTADPUR S V. The CSR 3.0 Global Ocean Tide Model: Diurnal and semi-diurnal ocean tides from TOPEX/POSEIDON altimetry[R]. Technical Report CRS-TM-96-05, Centre for Space Research, Texas; University of Texas, 1996.
- [3] SCHWIDERSKI E W. Ocean tides, part II: A hydrodynamical interpolation model[J]. Marine Geodesy, 2009, 3(1-4): 219-255.
- [4] 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.
- [5] LYARD F, LEFEVRE F, LETELLIER T, et al. Modelling the global ocean tides; modern insights from FES2004[J]. Ocean Dynamics, 2006, 56(5-6): 394-415.
- [6] SAVCENKO R, BOSCH W, DETTMERING D, et al. EOT11a-Global Empirical Ocean Tide Model from multi-mission satellite altimetry[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(C12): C12021.

- try, with links to model results[R]. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, 2012.
- [7] TAGUCHI E, STAMMER D, ZAHLE W. Inferring deep ocean tidal energy dissipation from the global high-resolution data-assimilative HAMTIDE model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4573-4592.
- [8] ANDERSEN O B, WOODWORTH P L, FLATHER R A. Intercomparison of recent ocean tide models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 1002(C12): 25261-25282.
- [9] SCHWIDERSKI E W. On charting global ocean tides[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1980, 18: 243-268.
- [10] CARTWRIGHT D E, RAY R D. Oceanic tides from Geosat altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 3069-3090.
- [11] SCHRAMA E J O, RAY R D. A preliminary tidal analysis of TOPEX/POSEIDON altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres/Oceans*, 1994, 99(C12): 24799-24808.
- [12] EGBERT G D, BENNETT A F, FOREMAN M G G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12): 24821-24852.
- [13] SHUM C K, WOODWORTH P L, ANDERSEN O B, et al. Accuracy assessment of recent ocean tide models[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C11): 25173-25194.
- [14] GLADKIKH V, TENZER R. A comparison of model estimates of ocean-tide loading displacements in New Zealand[J]. *Journal of Geodetic Science*, 2011, 1(2):94-113.
- [15] WANG Y H, FANG G H, WEI Z X, et al. Accuracy assessment of global ocean tide models base on satellite altimetry[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 25(4): 353-359. 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.
- [16] LI D W, LI J C, JIN T Y, et al. Accuracy estimation of recent global ocean tide models using tide gauge data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(4): 106-110. 李大伟, 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.
- [17] SUN J L, GUO J Y, GUO S Y, et al. Accuracy analysis of CSR4.0 and NAO.99b over China sea by tidal data[J]. *Progress in Geophysics*. 2013, 28(5): 2787-2795. 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.
- [18] GAO X M, WEI Z X, LV X Q, et al. Accuracy assessment of global ocean tide models in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(1): 1-14. 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.
- [19] CHENG Y C, ANDERSEN O B. Multimission empirical ocean tide modeling for shallow waters and polar sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C11), DOI: 10.1029/2011JC007172.
- [20] LEI N, FU Y G, YANG L, et al. A method of constructing high precision tide model for shallow water in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(3): 370-376. 雷宁, 付延光, 杨龙, 等. 一种建立南海浅海海域高精度潮汐模型方法的研究[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(3): 370-376.
- [21] The National Marine Data and Information Service. Tide tables 2014 Vol.2 from the Changjiang River Mouth to he Taiwan Straits[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013: 1-590. 国家海洋信息中心. 潮汐表 2014 第 2 册长江口至台湾海峡[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 1-590.

Accuracy Assessment of Seven Numerical Models on Simulating Tides in the Coastal Area of Zhejiang

ZHAO Qiang^{1,2}, HOU Guo-feng¹, TANG Zhi-hua¹, SHU Zhi-guang¹

(1. *Ningbo Marine Environment Monitoring Center, SOA, Ningbo 305012, China;*

2. *State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China*)

Abstract: Harmonic constants of 8 tidal constituents M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , and Q_1 derived from the observations from 33 tide-gauge stations along the coastline of Zhejiang are used to evaluate the skill of 7 global/regional ocean tide models CSR4.0, FES2012, HAMTIDE11a, TPXO7.2, TPXO8-atlas, TPXO-CSI2016, and NAO99Jb. With the root-mean-square error (σ) of M_2 amplitude taken as a criteria, comparison between the observations and model results reveals that the FES2012 are most accurate among the 7 models, and the averaged σ of M_2 simulated by FES2012 at 33 stations is 22.12 cm. Large errors are found at the 4 stations in Huangzhou Bay and Oujiang River, and the averaged σ of the 7 models at these stations all exceed 70 cm. If the 4 stations are excluded from comparison, the TPXO8-atlas has the best skill, and the averaged σ of the rest 29 stations is 16.38 cm. In general, the FES2012 and the TPXO8-atlas provide better results in the coastal area of Zhejiang.

Key words: ocean tide model; accuracy assessment; TPXO; NAO99; FES2012

Received: January 6, 2017