

利用验潮站资料评估全球海潮模型的精度*

李大炜¹⁾ 李建成^{1,2)} 金涛勇^{1,2)} 胡敏章¹⁾

(¹⁾武汉大学测绘学院,武汉 430079
(²⁾武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉 430079)

摘要 利用传统验潮站数据对5个全球海洋潮汐模型NAO99b、FES2004、GOT4.7、TPX07.2和EOT10a进行精度评估,结果表明:现在的全球海洋潮汐模型相比早期的海潮模型均取得了较大进步,在深海海域,模型精度达到了2 cm,空间分辨率为50 km。在中国海域,NAO99b的精度最高,RSS为14.86 cm。EOT10a在全球海洋范围综合指标最优,能较好地反映全球海洋潮汐的分布。

关键词 海洋潮汐模型;卫星测高;验潮站;中国海域;精度

中图分类号:P731.23 **文献标识码**:A

ACCURACY ESTIMATION OF RECENT GLOBAL OCEAN TIDE MODELS USING TIDE GAUGE DATA

Li Dawei¹⁾, Li Jiancheng^{1,2)}, Jin Taoyong^{1,2)} and Hu Minzhang¹⁾

(¹⁾School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079
(²⁾Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract Due to the availability of multi-satellite altimetry and advances in numerical simulation methodologies in recent 20 years, recent global ocean tide models are well known to 2 cm RSS (root square of the sum of the squares of the 8 rms values) and with a spatial resolution of 50 km in deep ocean. The paper is aimed to validate the performance of five models by using tide gauge data. The results show that the performance of NAO99b is best in China sea areas, its RSS is 14.86 cm. Compared with other contemporary models, EOT10a fit the tide gauge data in global distribution better.

Key words: ocean tide models; satellite altimetry; tide gauge; China sea areas; accuracy

1 引言

在现代科学技术中,包括海洋潮汐在内的潮汐作用,影响着多种精密观测量的计算,海洋潮汐模型成为确定高精度高分辨率重力场模型、海面地形和海洋环流的重要影响因素^[1]。卫星测高技术

的出现,为建立全球潮汐模型提供了丰富的海洋潮汐信息,极大地推动了海洋潮汐的研究。1990年,Cartwright和Ray建立了第一个基于卫星测高数据的全球海潮模型,证明卫星测高数据经过合适的分析方法可以获得更高精度的海潮模型。1992年8月,美国国家航空航天局(NASA)和法国国家空间研究中心(CNES)联合发射了Topex/Poseidon卫星(简称T/P),测距精度达到3 cm,掀起了全球海洋潮汐模

* 收稿日期:2012-03-29

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2012CB957703)

作者简介:李大炜,男,1984年生,博士,主要从事卫星大地测量研究。E-mail:lidawei123@gmail.com

型的研究热潮,国际上相继出现了多个基于 T/P 数据的全球或区域海潮模型。Anderson 等和 Shum 等对这些模型进行比较后,指出基于卫星测高技术海洋潮汐模型在开阔海域能够获得较好的精度,在浅海海域,由于水深资料、底摩擦系数和黏性系数的不确定性,精度欠佳^[2,3]。过去的 10 年间,多颗测高卫星发射升空,其轨道和测距精度,以及测距仪模式都得到了较大的提高和完善。T/P 后续卫星 Jason-1 和 Jason-2 分别于 2001 年 12 月和 2008 年 6 月发射,这三颗卫星提供了至今长达 19 年的连续观测资料,是研究海洋潮汐最好且最完整的数据。随着卫星测高技术的发展和多源测高数据的积累,近些年国际上推出的全球海洋潮汐模型,在分辨率和覆盖范围上都取得了较大的进步,本文旨在通过卫星测高和验潮站数据对近期海洋潮汐模型在全球海域、南极地区以及中国海域的精度进行比较,综合评述目前全球海洋潮汐模型的整体精度。

2 全球海洋潮汐模型

在 T/P 系列卫星任务的成功推动下,国际潮汐研究团队开始致力于精化和发展新的海洋潮汐模型,使其逐渐分为两种类型,一种是基于卫星测高数据的经验模型,这类模型通过潮汐分析从卫星测高

数据中提取潮汐信息;另一种是同化模型,基于流体动力学方程,按照特定的优化标准和方法,将观测数据和数值模型相结合,从而获得海洋潮汐分布。本文选取了 5 个近期应用广泛具有代表性的全球海潮模型(表 1)。

NAO99b 是日本国家天文台基于二维非线性浅水方程,采用 Blending 方法同化日本、韩国沿岸验潮站和 5 年 T/P 沿轨海面高数据建立的全球以及日本周边局部海潮模型^[4]。FES2004 是 FTG (the French tidal group) 推出的一系列有限元海洋潮汐模型的最新版本,其同化了 T/P、ERS-2 交叉点数据和验潮站数据^[5]。NASA 戈达德海潮模型 GOT4.7 是利用测高数据建立的经验海潮模型,包括了 T/P, ERS-1/2 以及 GFO 多源卫星测高数据^[6]。TPXO (Topex/Poseidon Crossover Solution) 是美国俄勒冈州立大学利用代表函数展开法同化 T/P 交叉点数据建立的系列全球海潮反演模型,TPXO7.2 是其最新版本,同化了 T/P、Jason-1、ERS-2 以及诸多验潮站数据^[7]。EOT10a 是德国 DGFI (Deutsches Geodisches Forschungsinstitut) 通过对多源卫星测高数据的调和与分析,建立的基于 FES2004 的经验改正模型^[8]。

表 1 近期全球海洋潮汐模型

Tab.1 Recent global ocean tide models

模型	年	分潮数	方法	分辨率	数据	
					卫星测高	验潮站
NAO99b	2000	16	Blending 同化	0.5° × 0.5°	T/P	无
FES2004	2004	14	Representer 同化	0.125° × 0.125°	T/P, ERS-2	有
GOT4.7	2008	10	经验方法	0.5° × 0.5°	T/P, ERS1/2, GFO, Jason - 1	无
TPXO7.2	2010	13	Representer 同化	0.25° × 0.25°	T/P, Jason-1, ERS-2	有
EOT10a	2010	13	经验方法	0.125° × 0.125°	T/P, Jason-1/2, ERS-2, Envisat-1	无

3 精度比较与分析

3.1 基本方法

为了描述全球海洋潮汐模型间的差异,并对它们的精度进行评估,我们通过以下步骤对表 1 中 5 个模型进行比较。首先是模型间的直接比较,将各模型、分潮内插成统一格网,计算 ±66° 范围内每个格点 M_2 、 K_1 分潮潮高标准差;随后,利用多组验潮站和深海水位计等实测资料与模型比较,采用式(1)计算均方根(RMS)衡量模型与验潮站某分潮潮高不符值,式(2)计算的和方根(RSS)来综合评估模型的整体精度。

$$RMS = \left\{ \frac{1}{2K} \sum_{n=1}^K [(H_m^n \cos g_m^n - H_o^n \cos g_o^n)^2 + (H_m^n \sin g_m^n - H_o^n \sin g_o^n)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$RSS = \left\{ \frac{1}{2K} \sum_{n=1}^K \sum_{i=1}^I [(H_{m,i}^n \cos g_{m,i}^n - H_{o,i}^n \cos g_{o,i}^n)^2 + (H_{m,i}^n \sin g_{m,i}^n - H_{o,i}^n \sin g_{o,i}^n)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中 H_o 、 g_o 分别代表验潮站的振幅和格林尼治迟角, H_m 、 g_m 分别代表模型值在验潮站点的振幅和格林尼治迟角, K 为验潮站数, I 为分潮数。

3.2 模型间的比较

图 1 展示了 5 个模型主要半日和全日分潮 M_2 、 K_1 ±66° 范围内的标准差分布。在全球范围分潮 M_2 与 K_1 分潮呈现相同的趋势:在开阔海域, M_2 分潮小于 1 cm, K_1 分潮小于 0.5 cm;在近海海域,模型间偏差较大,甚至超过 50 cm,特别是在白令海峡,哈

德逊湾,阿根廷南部巴塔哥尼亚大陆架海区和中国海及其邻近海域。剔除模型间标准差超过 10 cm 的点, M_2 分潮按纬度加权求得的全球平均值从 0.79 cm 减小为 0.42 cm, K_1 分潮从 0.32 cm 减小为 0.27 cm, M_2 分潮的均方根从 5.05 cm 减小为 0.97 cm, K_1 分潮从 1.59 cm 减小为 0.74 cm。

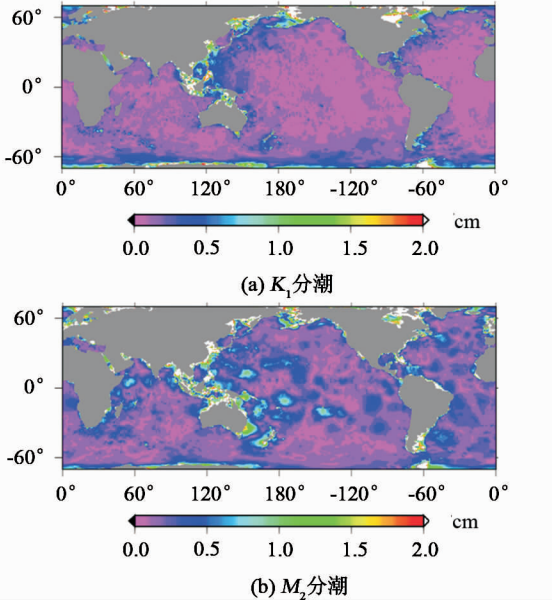


图 1 各模型间 M_2 和 K_1 分潮标准差分布

Fig. 1 Standard deviation for M_2 and K_1 from five recent tide models

3.3 与传统验潮站的比较

3.3.1 与大洋验潮站的比较

选取两组大洋验潮站数据,第一组数据来源于 Richard D. Ray 提供的 ST102 数据,由 49 个岛屿近海验潮站和 53 个深海水位计组成,是早期潮汐模型比较常用的数据集。第二组数据来自于 WOCE (World Ocean Circulation Experiment) 和 IASPO (the International Association for the Physical Sciences of the Ocean) 提供的验潮站数据集(简称 W&I),综合选取了纬度 $-66^\circ \sim 66^\circ$ 范围内的 202 个站点(图 2)。

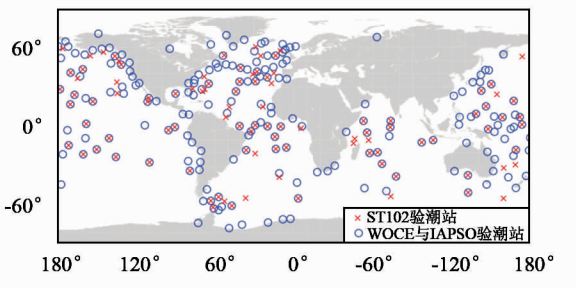


图 2 全球验潮站分布

Fig. 2 Distribution of global ocean tide gauges

应用式(1)和式(2)对模型 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 O_1 、 P_1 、 K_1 、 Q_1 八个主要分潮进行计算,结果见表 2。由表 2 可知,各模型与 ST102 均符合较好,其中 M_2 分潮为 1.41 ~ 1.60 cm, K_1 分潮为 0.95 ~ 1.00 cm,模型的 RSS 为 2.28 ~ 2.70 cm,相比早期模型与 ST102 模型有了明显的提高。EOT10a 与 W&I 数据的结果较好, RSS 为 4.73 cm, FES2004、GOT4.7、TPX07.2 次之,分别为 4.96 cm、5.30 cm 与 6.32 cm, NAO99b 稍差,为 8.31 cm。由表 3 可知,在深海海域(大于 1 000 m),各模型精度相当,两组数据的 RSS 均为 2 ~ 3 cm。在浅海海域(小于 200 m),各模型的结果不甚理想,其中 EOT10a 结果最优, NAO99b 结果稍差。从表 3 可以看到,浅海海域的精度影响了各海潮模型在全球海域范围内的整体精度。

表 2 5 个全球海潮模型与大洋验潮站的比较(单位:cm)
Tab. 2 Comparison among 5 global tide models for WOCE & IASPO and ST102 data sets (unit: cm)

	M_2	S_2	N_2	K_2	O_1	P_1	K_1	Q_1	RSS	
NAO99b	7.39	2.47	1.64	0.95	1.30	0.53	1.62	0.44	8.31	
WOCE	FES2004	3.41	2.13	1.29	1.05	1.25	0.66	1.89	0.37	4.96
&	GOT4.7	4.24	2.05	1.22	0.87	1.01	0.44	1.48	0.42	5.30
IASPO	TPX07.2	5.39	2.17	1.62	0.71	0.89	0.48	1.36	0.35	6.32
	EOT10a	3.39	1.98	1.28	0.94	1.44	0.57	1.64	0.36	4.73
	NAO99b	1.60	1.08	0.64	0.48	1.32	0.37	1.00	0.25	2.70
	FES2004	1.45	0.95	0.67	0.49	0.75	0.43	0.95	0.31	2.33
ST102	GOT4.7	1.46	1.01	0.64	0.40	0.76	0.36	0.98	0.27	2.34
	TPX07.2	1.44	0.93	0.64	0.37	0.86	0.37	0.95	0.27	2.31
	EOT10a	1.41	0.93	0.74	0.42	0.73	0.37	0.96	0.27	2.28

表 3 5 个全球海潮模型在深海和浅海海域的 RSS 比较(单位:cm)
Tab. 3 Comparison among the RSS of 5 global tide models in deep water and shallow water (unit: cm)

		深海海域 (> 1 000 m)	浅海海域 (< 200 m)	
WOCE	NAO99b	10.64	2.79	
	FES2004	5.91	2.78	
	&	GOT4.7	6.47	2.68
	IASPO	TPX07.2	7.92	2.77
		EOT10a	5.61	2.65
ST102	NAO99b	2.75	2.70	
	FES2004	2.41	2.25	
		GOT4.7	2.48	2.11
		TPX07.2	2.43	2.15
		EOT10a	2.34	2.21

3.3.2 与中国海域沿岸验潮站的比较

引用文献[9-11]中的沿岸验潮站数据,包括沿东中国海的 137 个验潮站与沿南海分布的 63 个验潮站调和常数(图 3),对模型 M_2 、 S_2 、 O_1 、 K_1 四个

主要分潮进行比较,结果见表 4。由表 4 可以看出,各模型在中国海域的精度明显不如深海海域, M_2 分潮平均在 14 cm 左右, RSS 在 14 ~ 20 cm,其中 NAO99b 与验潮站的偏差最小, GOT4.7、FES2004 和 EOT10a 次之, TPX07.2 较差。

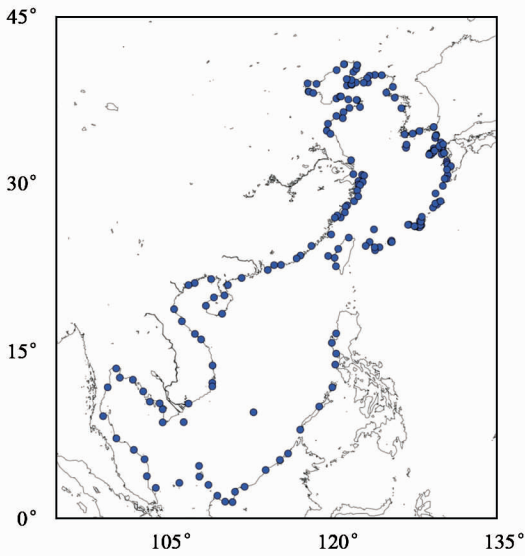


图 3 中国海域沿岸验潮站分布

Fig. 3 Distribution of tide gauge used for 5 models validation in China sea areas

表 4 各模型与中国海域沿岸验潮站的比较(单位:cm)

Tab.4 Comparison among 5 models for in situ measurements in China sea areas (unit: cm)

	M_2	S_2	O_1	K_1	RSS
NAO99b	12.13	6.42	3.84	4.57	14.86
FES2004	13.70	6.30	4.72	5.86	16.87
GOT4.7	14.30	6.20	3.87	4.03	16.55
TPX07.2	15.93	6.41	5.12	6.41	19.04
EOT10a	13.98	6.65	4.18	5.27	16.88

3.4 精度分析

为进一步验证全球海潮模型的精度,我们依据多组验潮站数据对模型在全球海域,以及中国海域进行了比较。结果表明近期海潮模型在深海海域均达到了较高的精度,在近岸局部海域,各模型表现不一。其中,EOT10a 在全球海域精度最优,与两组大洋验潮站比较结果最好,EOT10a 是基于多源测高数据,建立在 FES2004 上的经验改正模型,FES2004 同化了 ST102 与 WOCE 提供的 671 个全球沿岸验潮站数据,以及 T/P 和 ERS 卫星的交叉点数据^[5],相比其他模型,EOT10a 和 FES2004 在全球海域的表现更有优势。中国海域是全球海潮模型实用性最差的地区之一,各模型与验潮站偏差在 16cm 左右,NAO99b 相对较好,RSS 为 14.86 cm,究其原因:首先,中国近海大部分海域属于浅水大陆架,受复杂

的海洋动力环境和陆地反射的影响;其次,受测高卫星地面轨迹空间分布的影响,利用测高数据建立的模型对潮汐场有较强的平滑作用;最后,利用同化方法得到的海潮模型中尚未采用我国的验潮站资料。实际观测资料的不足是导致海潮模型在我国近海海域精度较差的主要原因。尽管单一测高卫星不能获得高分辨率的近海潮汐分布,但是如 GOT4.7 联合 T/P, Jason-1、GFO 和 ERS 系列卫星,提高数据的空间分辨率,或者如 NAO99b 同化按纬向分布的测高沿轨海面高数据,均可提高模型在中国海域的精度。以上分析表明,早期的纯流体动力学模型已经不能满足全球海潮模型精度的要求,基于卫星测高数据的经验法和数据同化法是目前建立海潮模型的两种主要方法。联合验潮站和多源多代卫星测高数据等实测资料,充分发挥测高卫星地面邻近轨迹和交叉轨迹的相关性,同时与适当的同化方法相结合,势必提高和改善全球海潮模型的空间分辨率和其在局部海域的精度。

4 结论

在近 20 年,随着卫星测高观测数据处理时间的跨度越来越长,全球海潮模型得到了突飞猛进的发展,模型的分辨率和精度不断提高,开阔海域模型精度达到了 2 cm,空间分辨率达到 50 km,基于多源卫星测高数据的经验海潮模型与同化模型精度相当。浅水区域也在不断改进,相比早期模型,进一步缩小了深海与浅水海域模型预测的精度。数据同化方法对沿海及陆架海域有明显改善,其依赖合理的区域流体动力学模型和实际观测数据,然而受海区形状,海底地形等诸多条件影响,改善全球海潮模型在浅海的精度依然是一个突出的问题,发展适合浅海海域的潮汐模型和对全球海潮模型的局部改进是目前沿岸测高技术应用的新课题。

参 考 文 献

- 1 暴景阳. 基于卫星测高数据的潮汐分析理论与方法研究 [D]. 武汉大学,2002. (Bao Jingyang. Study on theories and methods of tidal analysis based on altimetry data [D]. Wuhan University, 2002)
- 2 Andersen O B, Woodworth P L and Flather R A. Intercomparison of recent ocean tide models [J]. J Geophys Res., 1995, (100): 25 261 - 25 282.
- 3 Shum C K, et al. Accuracy assessment of recent ocean tide models [J]. J Geophys Res., 1997, (102): 25 173 - 25 194.
- 4 Matsumoto K, Takanezawa T and 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: 567 - 581.
- 5 Lyard F, et al. Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56: 394 - 415.
- 6 Ray R D. A global ocean tide model from Topex/Posidon altimetry: GOT99. 2 [R]. Maryland: Goddard Space Flight Center, 1999.
- 7 Egbert G D, Bennett A F and Foreman M G G. Topex/Posidon Tides Estimated Using a Global Inverse Model[J]. *J Geophys Res.*, 1994, 99: 24 821 - 24 852.
- 8 Savcenko R and Bosch W. EOT08a-empirical ocean tide model from multi-mission satellite altimetry[R]. München: Deutsches Geod tisches Forschungsinstitut, 2008.
- 9 Bosch W, et al. Residual ocean tide signals from satellite altimetry, GRACE gravity fields, and hydrodynamic modeling [J]. *Geophys J Int.*, 2009, 178: 1 185 - 1 192.
- 10 张继才. 三维正压潮汐潮流伴随同化模型数值建模及应用研究[D]. 中国海洋大学, 2008. (Zhang Jicai. Development and application of a three-dimension numerical barotropic adjoint assimilation tidal model[D]. Ocean University of China, 2008)
- 11 Fang G, et al. Numerical simulation of principle tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand[J]. *Continental Shelf Research*, 1999, (19): 845 - 869.

(上接第 105 页)

- tion transforming system of quasi geoid in GPS survey area [J], *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 1999, 18(6): 607 - 608)
- 4 张兴福, 沈云中, 周全基. GPS 高程异常拟合精度的估算方法[J]. *测绘通报*, 2003(8): 21 - 22. (Zhang Xingfu et al. The estimate method of the accuracy of GPS height abnormality simulation [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2003, (8): 21 - 22)
- 5 丛爽. 面向 Matlab 工具箱的神经网络理论与应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998. (Cong Shuang. *Neural network theory and applications with Matlab toolboxes* [M], He Fei: China Science and Technology University Press, 1998)
- 6 鲁铁定, 钟小威. 基于改进 BP 学习算法的 GPS 高程转换 [J]. *测绘通报*, 2005, (12): 31 - 32. (Lu Tieding and Zhong Xiaowei. GPS height Conversion on the improvement of BP learning algorithm[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2005, (12): 31 - 32)
- 7 杨明清, 等. 用神经网络方法转换 GPS 高程[J]. *测绘学报*, 1999, (4): 45 - 48. (Yang Mingqing et al. Conversion of GPS height by artificial neural network method[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, (4): 45 - 48)