

全球大洋潮汐模式在南海的准确度评估

高秀敏¹, 魏泽勋^{1*}, 吕咸青², 王永刚¹, 杨扬³

(1. 国家海洋局第一海洋研究所海洋环境与数值模拟研究室, 山东 青岛 266061;

2. 中国海洋大学物理海洋实验室, 山东 青岛 266100; 3. 国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘要:采用南海海域 60 个验潮站和 22 个 TOPEX/Poseidon 卫星高度计轨道交叉点的调和常数资料, 对比了 TPXO7.2、GOT00.2、NAO.99b 和 DTU10 四种全球大洋潮汐模式 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 四个主要分潮调和常数在南海的准确度。为了准确评估这四种大洋潮汐模式在南海不同区域的准确度, 本研究将南海分成了 8 个区分别进行了对比。结果表明, 南海北部和东部区域, 4 个分潮都是 DTU10 准确度最高; 南部区域, M_2 和 O_1 分潮 GOT00.2 的偏差最小, S_2 和 K_1 分潮 DTU10 的偏差最小。总体而言, 在进行南海潮汐数值模拟选择开边界条件时, 建议以 DTU10 模式为主, 并利用 GOT00.2 模式作适当调整。还简单分析了南海 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 四个主要分潮的潮汐分布特征。

关键词:大洋潮汐模式; 南海; 验潮站; 卫星高度计

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2014)01-0001-14

潮汐潮流数值模拟中, 开边界的选取至关重要。通常情况下, 都是将大区域结果插值到区域模式边界上, 或利用观测资料进行估计, 作为区域模式的开边界条件。目前, 国际上有几十种全球大洋潮汐模式, 很多区域潮波模式的边界条件都是来自于这些全球模式, 因此, 对这些全球模式在研究区域进行准确度评估至关重要。

全球大洋潮汐模式的建立开始于 20 世纪 80 年代。Schwiderski^[1-3]建立了水动力模式, 并将验潮站资料同化到模式中, 给出了比较精确的全球大洋潮汐模式。Cartwright 等^[4]根据 Geosat 卫星高度计资料给出了第一个基于卫星高度计的全球大洋潮汐模型。随着 1992 年 TOPEX/Poseidon(以下简称 T/P)卫星的发射, 基于 T/P 及其后续 Jason 卫星高度计资料的大洋潮汐模式得到了快速发展, 且精度有了很大的提高。目前常见的大洋潮汐模式有美国空间飞行研究中心的 CSR(Center for Space Research)模式^①, NASA 戈达德太空飞行中心的 GOT(Goddard Ocean Tide)模式^②, 法国潮汐工作组的 FES(Finite Element Solution)模式^[5-8], 美国俄勒冈大学的 TPXO 模式^[9-10]和日本国立天文观测台的 NAO 模式^[11]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。

Andersen 等^[12]对 12 种全球大洋潮汐模式进行了比较评估, 指出对于 M_2 和 K_1 分潮, Schrama 等^[13]与验潮站数据符合最好, 对于 S_2 和 O_1 分潮, Egbert 等^[9]与验潮站数据符合最好。Shum 等^[14]指出 1994 年以来新发展了 20 多种全球大洋潮汐模式, 并对其中的 10 种模式进行了准确度评估, 对于 M_2 分潮, SR95.0/1^[13]与验潮站数据符合最好。Penna 等^[15]对常用的大洋潮汐模式(NAO.99b, FES94.1, GOT00.2, TPXO.

收稿日期: 2013-04-10

资助项目: 国家高技术研究发展计划项目——南海及周边海域风浪流耦合同化精细化数值预报与信息服务系统(2013AA09A506); 国家自然科学基金项目——中国近海及邻近海区海洋与地球潮汐相互作用研究(40676009); 国家重点基础研究发展计划项目——南海环流和海峡水交换对海气相互作用的影响(2011CB403502); 青岛市科技计划基础研究项目——渤海东海潮汐潮流预报系统(11-1-4-98-jch); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——海洋环流建模研究(2007-31)

作者简介: 高秀敏(1984-), 女, 河北衡水人, 博士, 主要从事潮波数值模拟方面研究。E-mail: gaoxm@fio.org.cn

* 通讯作者, E-mail: weizx@fio.org.cn

(杜素兰 编辑)

① EANES R J, BETTADPUR S V. The CSR3.0 global ocean tide model: Diurnal and semi-diurnal ocean tides from TOPEX/POSEIDON altimetry. Technical Report CRS-TM-96-05, Centre for Space Research, University of Texas, Austin, Texas, 1996.

② RAY R D. A global ocean tide model from TOPEX/POSEIDON altimetry: GOT99.2. NASA/TM-1999-209478, Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, MD, USA, 1999.

6.2, CSR3.0)进行了简单的介绍。汪一航等^[16]依据中国近海18个岛屿的调和常数对5个大洋潮汐模式(NAO99, GOT00, FES2002, FES2004, TPXO7)的准确度进行了检验,结果表明,日本国家天文台的潮汐模式NAO99在中国近海的结果相对较准确。Gladkikh等^[17]利用新西兰沿岸7个验潮站分析了全球大洋潮汐模式TPXO7.2, GOT00.2, NAO.99b, FES2004和EOT10a^[18]的准确度,对比结果表明在新西兰沿岸TPXO7.2与验潮站数据符合最好。李大炜等^[19]利用传统验潮站数据对NAO99b, FES2004, GOT4.7, TPXO7.2和EOT10a五个全球大洋潮汐模式进行精度评估,结果表明,在中国近海,NAO99b的精度最高,EOT10a在全球海洋范围综合指标最优。

本研究选取了全球大洋潮汐模式TPXO7.2, GOT00.2, NAO.99b和DTU10^[20],分析了它们在南海区域 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 分潮的分布特征,并利用验潮站资料和T/P卫星高度计资料对它们的准确度进行了评估。

1 模式介绍

TPXO模式是由美国俄勒冈大学(Oregon State University)建立的反演同化模式,该模式以拉普拉斯潮汐方程组为基础,并同化了T/P、Jason卫星高度计资料和验潮站资料。TPXO7.2为其最新版本,分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,网格数为 1440×721 ,纬度 $-90^\circ \sim 90^\circ\text{N}$,经度 $0.25^\circ \sim 360^\circ\text{E}$,此模式提供了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 共13个分潮的潮汐信息。TPXO7.2模式的下载网址为<http://volkov.occ.orst.edu/tides/global.html>。

GOT模式是由NASA戈达德太空飞行中心(Goddard Space Flight Center)研发的,GOT00.2是GOT99.2b的升级版,分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,网格数为 720×361 ,纬度 $-90^\circ \sim 90^\circ\text{N}$,经度 $0^\circ \sim 359^\circ 30'\text{E}$ 。该模式是基于FES94.1动力学模型的,并对FES94.1模型进行修正,它还融合了T/P和ERS1/2卫星数据。GOT00.2模式的下载网址为<http://www.mmmt.net/db/0/0/falcon.grdl.noaa.gov/pub/dave/GOT00.2>。

NAO.99b模式是日本国立天文观测台(National Astronomical Observatory)开发的,分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,网格数为 720×360 ,纬度 $-89^\circ 45' \sim 89^\circ 45'\text{N}$,经度 $0.25^\circ \sim 359^\circ 45'\text{E}$ 。该模型将大约5a的T/P卫星测高数据同化到动力学模型,给出了16个短周期分潮(M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 P_1 、 K_2 、 Q_1 、 M_1 、 J_1 、 OO_1 、 $2N_2$ 、 M_{U_2} 、 N_{U_2} 、 L_2 和 T_2)和7个长周期分潮(M_m 、 M_f 、 M_{Sf} 、 M_m 、 M_{Sm} 、 S_{sa} 和 S_a)的结果。NAO.99b为区域模式,范围为纬度 $20^\circ \sim 65^\circ\text{N}$,经度 $110^\circ \sim 155^\circ\text{E}$,分辨率为 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$,另外还同化了沿岸验潮站数据。NAO.99b模式的下载网址为http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index_En.html。

DTU10模式是近期出现的全球大洋潮汐模式,是丹麦科技大学(Technical University of Denmark)开发的,分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,网格数为 2881×1441 ,纬度 $-90^\circ \sim 90^\circ\text{N}$,经度 $0^\circ \sim 360^\circ\text{E}$ 。该模式是基于FES2004^[8]和响应法^[21],并利用从1992-09-2009-09的17a的T/P、Jason-1和Jason-2卫星高度计资料发展起来的一个新的全球大洋潮汐模型,包含8个主要分潮 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 ,此外,还包含2个来自于GOT4.7模式的 S_1 、 M_4 分潮。DTU10模式的下载网址为http://www.space.dtu.dk/English/Research/Scientific_data_and_models/Global_Ocean_Tide_Model.aspx。

2 准确度评估方法

用振幅绝对均差和迟角绝对均差来表示计算值和观测值之间的偏差,这种方法比较直观。其计算公式为:

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

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

式中, H 为振幅; g 为迟角;下标 sim 和 obs 分别代表计算值和观测值; N 为观测值个数, $n=1,2,\dots,N$ 。当

振幅较小时,计算和观测的迟角都不太稳定,同时振幅较小时的误差对潮高计算误差影响也较小,故式(2)中不考虑振幅的差别而将所有迟角差进行平均并不十分合理。另一种方法不是很直观,但更合理一些,这种方法取均方根偏差:

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(a_{sim,n} - a_{obs,n})^2 + (b_{sim,n} - b_{obs,n})^2] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

其中,

$$a = H \cos g, \quad b = H \sin g \quad (4)$$

σ 也常常被称为计算值和观测值之间的距离,它表征了计算值和观测值的偏离程度,而它与观测值变化性的相对偏离程度可用相对偏差

$$\delta = \sigma / s \quad (5)$$

来表示,其中,

$$s = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(a_{obs,n} - \bar{a}_{obs})^2 + (b_{obs,n} - \bar{b}_{obs})^2] \right\}^{1/2} \quad (6)$$

这里, \bar{a}_{obs} 和 \bar{b}_{obs} 分别为 $a_{obs,n}$ 和 $b_{obs,n}$ 的平均值,而

$$r^2 = 1 - \delta^2 \quad (7)$$

代表了计算值和观测值的拟合程度, r 相当于线性回归中的相关系数。

3 大洋潮汐模式在南海的准确度评估

本研究采用 60 个验潮站和 22 个 T/P 卫星高度计轨道交叉点的调和常数资料(站位分布见图 1,验潮站资料引自 Fang 等^[22],其站名见表 1)作为观测值,将全球大洋潮汐模式和观测资料全都插值到 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的网格上,采用第 2 节描述的方法,对大洋潮汐模式 TPX07.2、GOT00.2、NAO.99b 和 DTU10 中 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 四个主要分潮调和常数在南海的准确度进行了评估。

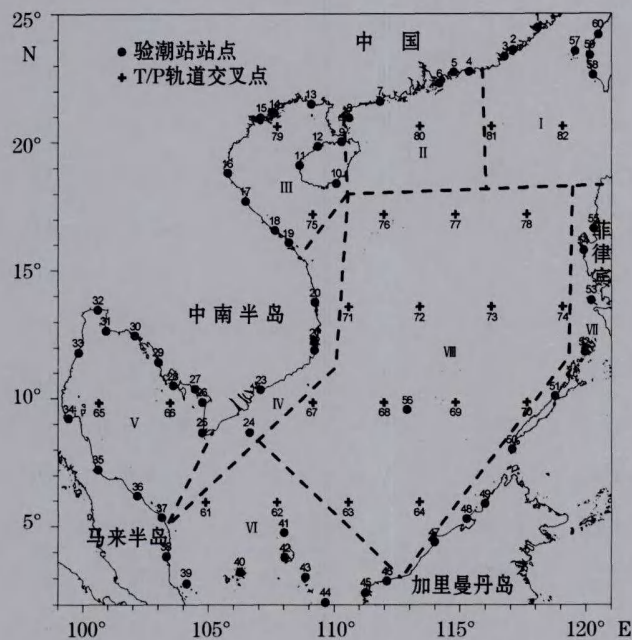


图 1 验潮站站位和 T/P 轨道交叉点位置

Fig. 1 Locations of tidal gauge stations and T/P crossover points

表1 验潮站对应站名

Table 1 Names of tidal gauge stations

站号	站名	E	N	所在区域	站号	站名	E	N	所在区域
1	厦门	118°04'	24°27'	I	31	梭桃邑	100°55'	12°39'	V
2	诏安湾	117°06'	23°36'	I	32	曼谷沙洲	100°35'	13°28'	V
3	汕头	116°45'	23°20'	I	33	巴蜀	99°49'	11°48'	V
4	汕尾	115°21'	22°45'	II	34	万伦	99°25'	9°13'	V
5	大亚湾	114°44'	22°44'	II	35	宋卡	100°36'	7°13'	V
6	香港	114°10'	22°18'	II	36	通帕	102°10'	6°12'	V
7	闸坡	111°49'	21°35'	II	37	瓜拉丁加奴	103°08'	5°21'	V
8	碓洲岛	110°35'	20°57'	II	38	关丹	103°20'	3°50'	VI
9	海口	110°17'	20°01'	III	39	潮满岛	104°08'	2°48'	VI
10	陵水角	110°04'	18°23'	III	40	锡安坦岛	106°15'	3°14'	VI
11	八所	108°37'	19°06'	III	41	劳特岛	108°00'	4°45'	VI
12	洋浦	109°20'	19°50'	III	42	大纳土纳岛	108°02'	3°48'	VI
13	北海	109°05'	21°29'	III	43	苏比岛	108°51'	3°03'	VI
14	东科岛	107°37'	21°08'	III	44	达土角	109°39'	2°05'	VI
15	鸿基	107°04'	20°57'	III	45	科拉帕洛	111°14'	2°27'	VI
16	红牛	105°46'	18°48'	III	46	木卡	112°05'	2°54'	VI
17	箐河口	106°28'	17°42'	III	47	米里	113°59'	4°23'	VII
18	顺安	107°38'	16°34'	III	48	纳闽岛	115°15'	5°17'	VII
19	峴港	108°11'	16°05'	III	49	哥打基纳巴卢	115°59'	5°52'	VII
20	归仁	109°13'	13°45'	IV	50	巴拉巴克	117°04'	8°00'	VII
21	芽庄	109°12'	12°12'	IV	51	尤鲁甘湾	118°46'	10°04'	VII
22	金兰湾	109°12'	11°53'	IV	52	龟良岛	119°57'	11°48'	VII
23	头顿	107°04'	10°20'	IV	53	卢邦岛	120°12'	13°49'	VII
24	昆仑岛	106°38'	8°40'	IV	54	圣克鲁斯	119°54'	15°46'	VII
25	加茂河外	104°45'	8°39'	V	55	圣费尔南多	120°18'	16°37'	VII
26	竹岛	104°45'	9°50'	V	56	永暑礁	112°53'	9°33'	VIII
27	河山	104°28'	10°22'	V	57	马公	119°34'	23°33'	I
28	里姆	103°36'	10°30'	V	58	高雄	120°16'	22°37'	I
29	戈公岛	103°00'	11°25'	V	59	布袋	120°09'	23°23'	I
30	尖竹汶	102°04'	12°28'	V	60	台中	120°29'	24°11'	I

表 2 给出了 4 个大洋潮汐模式与验潮站调和常数的对比,从表中可以看出,对于 M_2 分潮,TPXO7.2、GOT00.2、NAO.99b 和 DTU10 的均方根偏差分别为 13.63,11.00,15.37 和 8.36 cm,DTU10 结果最好,GOT00.2 次之;对于 S_2 分潮,TPXO7.2、GOT00.2、NAO.99b 和 DTU10 的均方根偏差分别为 6.28,10.14,8.38 和 5.22 cm,DTU10 结果最好,TPXO7.2 次之;对于 K_1 分潮,TPXO7.2、GOT00.2、NAO.99b 和 DTU10 的均方根偏差分别为 11.01,6.63,7.42 和 7.18 cm,GOT00.2 结果最好,DTU10 次之;对于 O_1 分潮,TPXO7.2、GOT00.2、NAO.99b 和 DTU10 的均方根偏差分别为 10.23,7.32,7.56 和 7.57 cm,GOT00.2 结果最好,DTU10 和 NAO.99b 偏差相差不大,TPXO7.2 结果最差。

表 3 给出了 4 个大洋潮汐模式与 T/P 卫星轨道交叉点调和常数的对比,从表中可以看出,4 个大洋潮汐模式的结果都很好,且相差不大。对于半日分潮,DTU10 和 NAO.99b 的结果要好于 GOT00.2 和 TPXO7.2;对于全日分潮,GOT00.2 和 DTU10 的结果要好于 NAO.99b 和 TPXO7.2。与表 2 相比,4 个大洋潮汐模式与卫星高度计资料的误差明显小于与验潮站比较的误差。

表 4 给出了 4 个大洋潮汐模式与验潮站和 T/P 卫星轨道交叉点调和常数的对比,由于 4 个大洋潮汐模式在 T/P 卫星轨道交叉点处的偏差都很小且相差不大,因此表 4 的结果与表 2 只与验潮站调和常数对比的结果类似。

为了更精确地给出 4 个大洋潮汐模式在南海不同区域的准确度,文中将南海分成了 8 个区,见图 1。区域 I 位于台湾海峡和吕宋海峡附近,包括 7 个验潮站点(站号 1~3,57~60)和 2 个 T/P 卫星轨道交叉点(站号 81 和 82)。区域 II 位于广东沿岸,包括 5 个验潮站点(站号 4~8)和 1 个 T/P 卫星轨道交叉点(站号 80)。区域 III 位于北部湾,包括 11 个验潮站点(站号 9~19)和 2 个 T/P 卫星轨道交叉点(站号 75 和 79)。区域 IV 位于越南东南部,包括 5 个验潮站点(站号 20~24)。区域 V 位于泰国湾,包括 13 个验潮站点(站号 25~37)和 2 个 T/P 卫星轨道交叉点(站号 65 和 66)。区域 VI 位于巽他陆架上,包括 9 个验潮站点(站号 38~46)和 2 个 T/P 卫星轨道交叉点(站号 61 和 62)。区域 VII 位于加里曼丹岛和菲律宾群岛沿岸,包括 9 个验潮站点(站号 47~55)。区域 VIII 位于南海中央海盆,包括 1 个验潮站点(站号 56)和 13 个 T/P 卫星轨道交叉点(站号 63,64,67~74,76~78)。

表 5 为分区域的对比结果,这里只给出了均方根偏差。由表 5 可以看出,在区域 I,4 个分潮均是 DTU10 的偏差最小;在区域 II,除了 K_1 分潮 GOT00.2 的偏差最小外,另外 3 个分潮均是 DTU10 的偏差最小;在区域 III,4 个分潮均是 DTU10 的偏差最小;在区域 IV, M_2 分潮 NAO.99b 的偏差最小, S_2 和 O_1 分潮 GOT00.2 的偏差最小, K_1 分潮 DTU10 的偏差最小;在区域 V, M_2 和 S_2 分潮 DTU10 的偏差最小, K_1 和 O_1 分潮 NAO.99b 的偏差最小;在区域 VI, M_2 和 O_1 分潮 GOT00.2 的偏差最小, S_2 和 K_1 分潮 DTU10 的偏差最小;在区域 VII,除了 O_1 分潮 GOT00.2 的偏差最小外,另外 3 个分潮均是 TPXO7.2 的偏差最小;在区域 VIII, M_2 分潮 NAO.99b 的偏差最小, S_2 分潮 TPXO7.2 的偏差最小, K_1 和 O_1 分潮 GOT00.2 的偏差最小。

对南海进行潮汐潮流数值模拟时,开边界主要位于台湾海峡北口的北边界、吕宋海峡处的东边界和卡里马塔海峡附近的南边界。北边界和东边界位于区域 I,在此区域,4 个分潮都是 DTU10 结果最好。南边界位于区域 VI, M_2 和 O_1 分潮 GOT00.2 的偏差最小, S_2 和 K_1 分潮 DTU10 的偏差最小。

图 2~图 5 分别给出了 4 个大洋潮汐模式的南海 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 分潮的同潮图,其传播规律基本相同,在北部湾和泰国湾处略有差异。与 Fang 等^[22]的结果相比,对于 M_2 分潮,GOT00.2 的结果最接近,对于 S_2 分潮,DTU10 的结果最接近;对于 K_1 分潮,DTU10 的结果最接近,对于 O_1 分潮,NAO.99b 的结果最接近。

表2 与验潮站调和常数的对比

Table 2 Comparison with the harmonic constants observed at the tidal gauge stations

模式	分潮	振幅绝对均差/cm	迟角绝对均差/°	均方根偏差/cm	拟合程度/%
TPX07.2	M ₂	7.01	17.97	13.63	92.21
	S ₂	3.03	23.92	6.28	83.09
	K ₁	5.71	11.14	11.01	92.69
	O ₁	4.99	9.98	10.23	91.82
GOT00.2	M ₂	4.99	11.81	11.00	94.92
	S ₂	3.09	30.14	10.14	55.93
	K ₁	3.50	6.57	6.63	97.35
	O ₁	3.70	7.21	7.32	95.82
NAO.99b	M ₂	6.28	16.40	15.37	90.09
	S ₂	3.65	26.61	8.38	69.93
	K ₁	3.24	6.74	7.42	96.68
	O ₁	3.07	8.10	7.56	95.54
DTU10	M ₂	3.66	10.66	8.36	97.07
	S ₂	2.24	20.74	5.22	88.35
	K ₁	2.87	6.78	7.18	96.90
	O ₁	3.01	8.19	7.57	95.52

表3 与 T/P 卫星轨道交叉点调和常数的对比

Table 3 Comparison with the harmonic constants observed at the T/P crossover points

模式	分潮	振幅绝对均差/cm	迟角绝对均差/°	均方根偏差/cm	拟合程度/%
TPX07.2	M ₂	1.22	8.11	3.50	92.49
	S ₂	0.46	9.24	1.21	94.23
	K ₁	1.52	2.89	3.00	98.80
	O ₁	1.28	2.62	2.51	99.00
GOT00.2	M ₂	0.64	2.79	1.32	98.93
	S ₂	0.56	7.60	1.24	93.92
	K ₁	0.58	1.64	1.29	99.78
	O ₁	0.67	1.86	1.37	99.70
NAO.99b	M ₂	0.50	2.06	1.07	99.31
	S ₂	0.53	6.02	1.03	95.86
	K ₁	0.75	2.29	1.96	99.48
	O ₁	0.66	1.90	1.56	99.62
DTU10	M ₂	0.48	1.73	0.88	99.52
	S ₂	0.32	6.24	0.84	97.22
	K ₁	0.88	1.56	1.44	99.72
	O ₁	0.84	1.41	1.41	99.68

表 4 与验潮站和 T/P 卫星轨道交叉点调和常数的对比

Table 4 Comparison with the harmonic constants observed at the tidal gauge stations and the T/P crossover points

模 式	分 潮	振幅绝对均差/cm	迟角绝对均差/°	均方根偏差/cm	拟合程度/%
TPX07.2	M ₂	5.46	15.33	11.80	92.26
	S ₂	2.34	19.98	5.41	83.60
	K ₁	4.58	8.93	9.55	93.70
	O ₁	4.00	8.01	8.85	93.10
GOT00.2	M ₂	3.82	9.39	9.43	95.05
	S ₂	2.41	24.09	8.70	57.59
	K ₁	2.72	5.25	5.71	97.75
	O ₁	2.89	5.78	6.30	96.50
NAO.99b	M ₂	4.73	12.55	13.16	90.37
	S ₂	2.81	21.09	7.19	71.06
	K ₁	2.57	5.55	6.43	97.14
	O ₁	2.42	6.44	6.51	96.26
DTU10	M ₂	2.81	8.27	7.17	97.14
	S ₂	1.73	16.85	4.48	88.74
	K ₁	2.34	5.38	6.18	97.36
	O ₁	2.43	6.37	6.52	96.26

表 5 分区域均方根偏差的对比 (cm)

Table 5 Comparison of root mean square deviations in different subareas (cm)

分 潮	模 式	区域 I	区域 II	区域 III	区域 IV	区域 V	区域 VI	区域 VII	区域 VIII
M ₂	TPX07.2	18.77	4.32	4.76	7.63	12.45	10.48	2.85	0.92
	GOT00.2	19.56	7.94	8.21	9.24	10.70	4.97	4.29	0.99
	NAO.99b	21.70	19.26	13.52	3.79	17.12	8.38	3.49	0.66
	DTU10	16.48	4.32	4.76	4.90	7.57	5.04	3.32	0.71
S ₂	TPX07.2	7.56	3.64	5.99	3.80	7.83	5.25	2.00	0.81
	GOT00.2	20.53	3.85	2.70	2.99	10.73	5.84	2.74	1.06
	NAO.99b	10.54	8.72	8.96	3.41	8.76	6.44	2.48	1.06
	DTU10	7.07	2.47	1.84	4.21	6.93	4.79	2.26	0.87
K ₁	TPX07.2	4.28	5.99	11.61	6.90	17.11	7.33	2.70	1.98
	GOT00.2	4.24	2.23	8.75	5.31	7.77	4.86	4.14	1.30
	NAO.99b	6.25	7.99	9.63	4.87	7.62	4.81	4.39	1.52
	DTU10	3.26	2.56	6.72	4.54	11.58	4.30	2.79	1.35
O ₁	TPX07.2	4.12	6.64	14.36	4.74	12.19	8.84	3.19	1.44
	GOT00.2	5.06	1.75	10.84	2.91	6.80	7.80	2.40	1.17
	NAO.99b	4.67	6.67	11.03	3.41	5.60	8.50	3.15	1.23
	DTU10	2.84	1.66	9.35	3.06	9.73	7.98	2.78	1.22

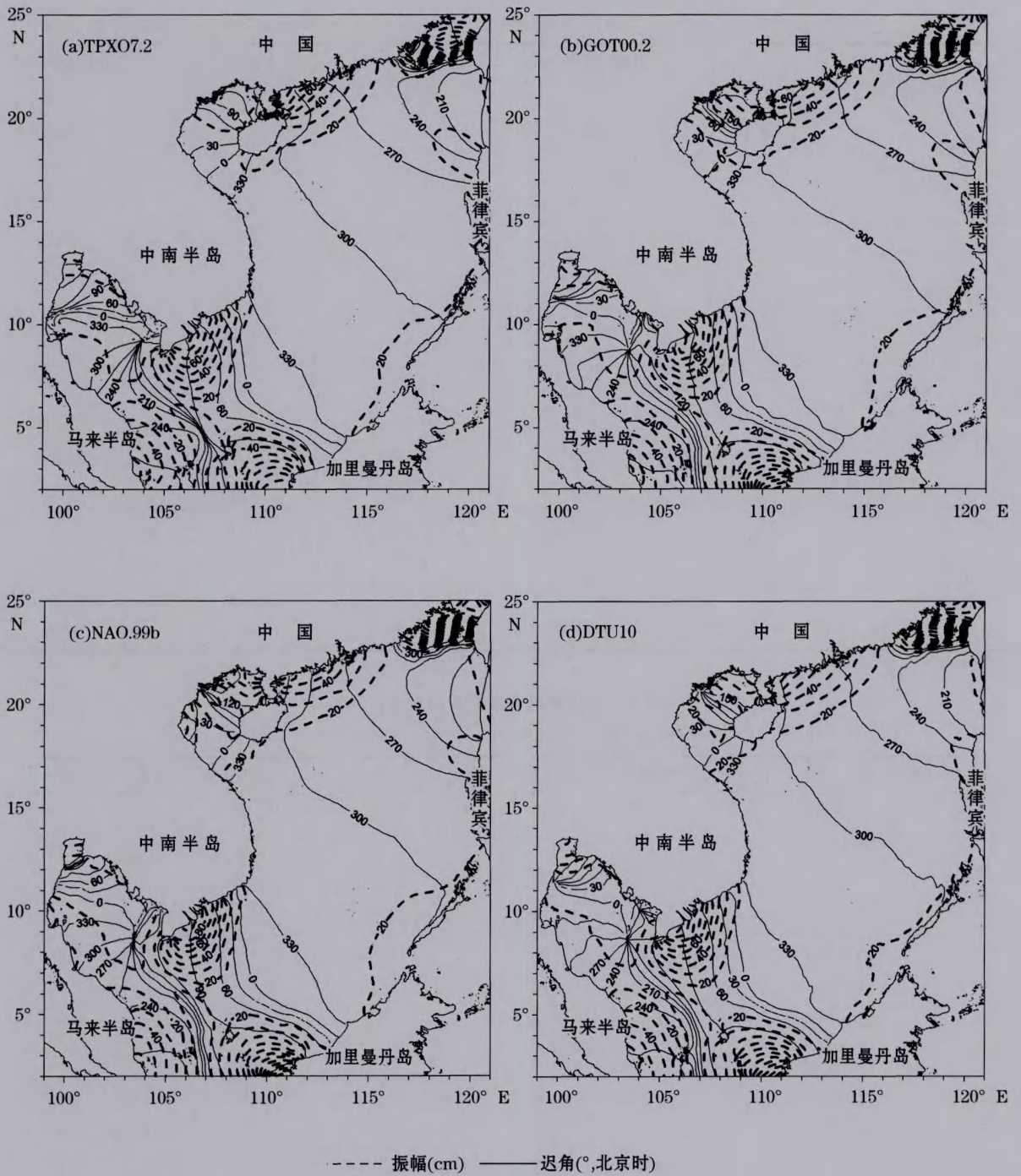


图2 不同全球大洋潮汐模式下的 M_2 分潮同潮图

Fig. 2 Co-tidal charts of M_2 for different global ocean tide models

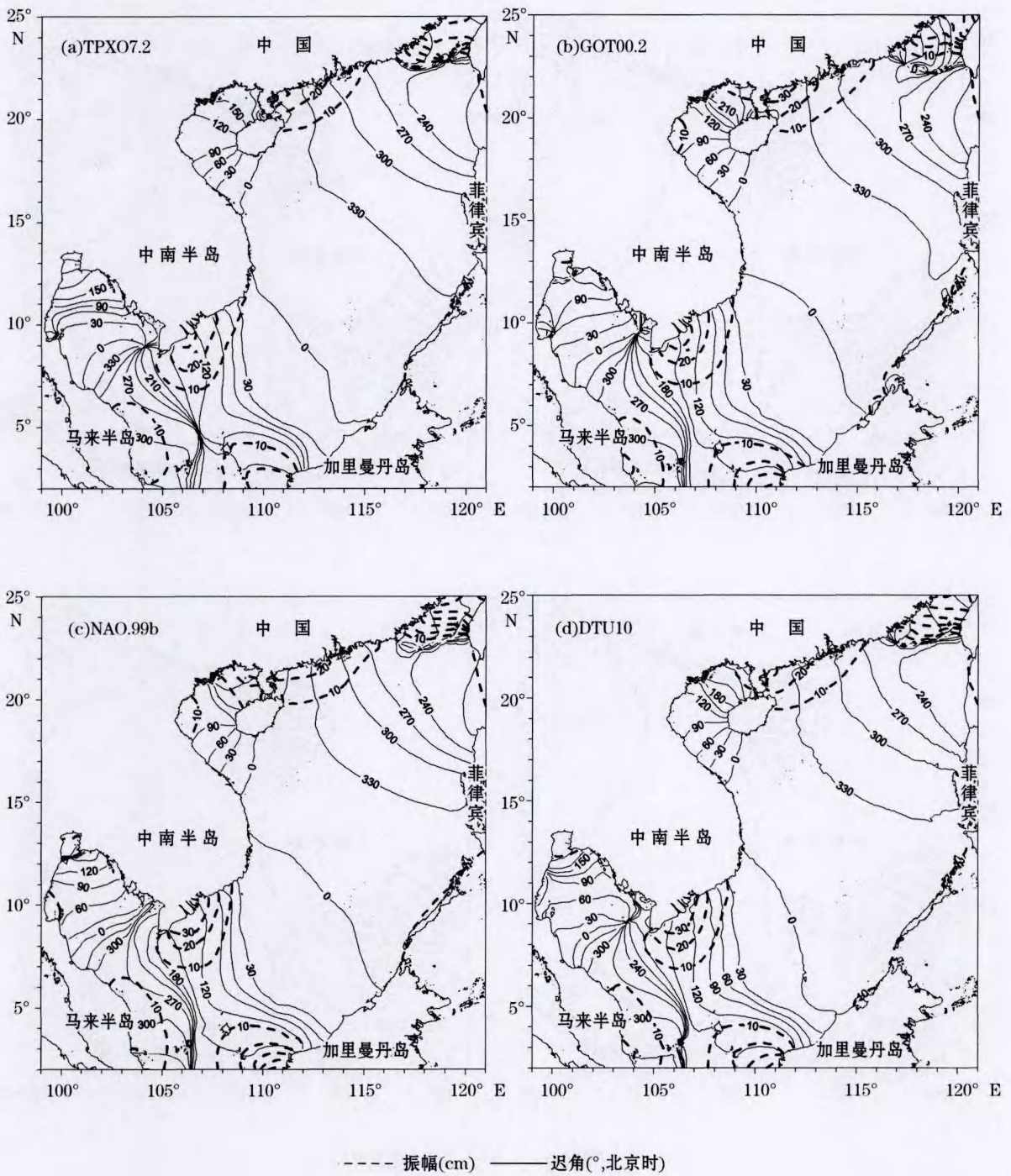


图 3 不同全球大洋潮汐模式下的 S_2 分潮同潮图

Fig. 3 Co-tidal charts of S_2 for different global ocean tide models

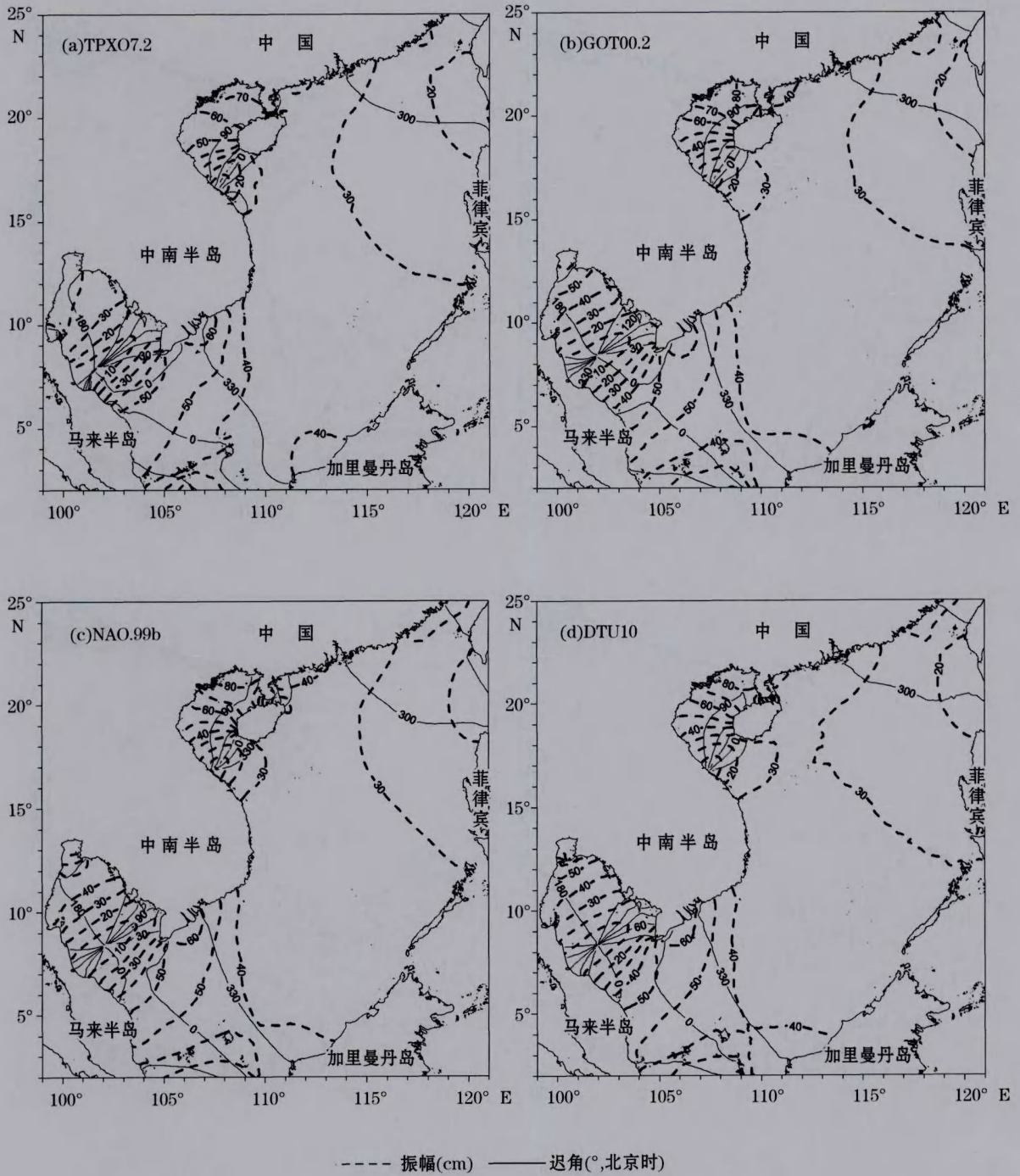


图 4 不同全球大洋潮汐模式下的 K_1 分潮同潮图

Fig. 4 Co-tidal charts of K_1 for different global ocean tide models

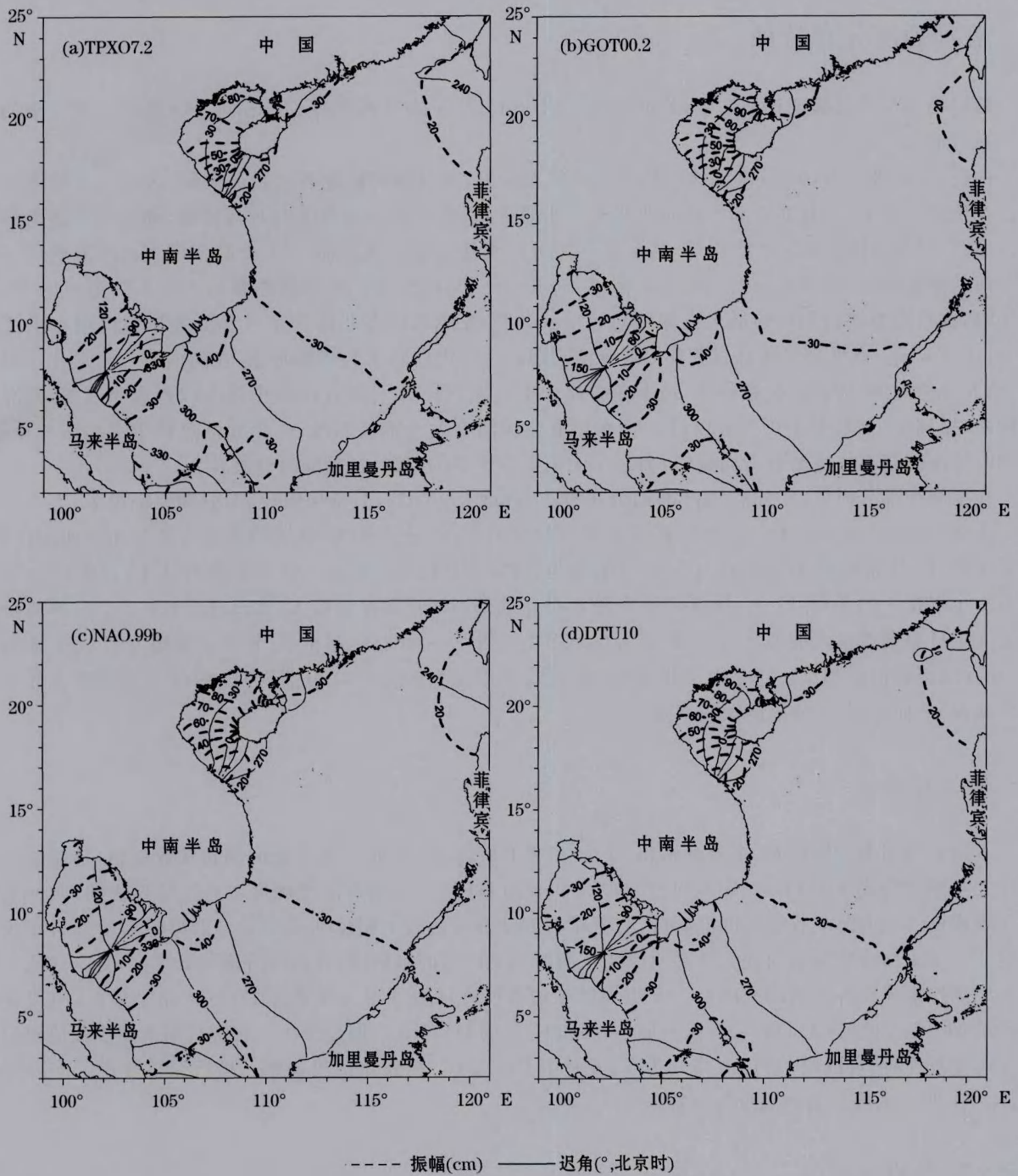


图 5 不同全球大洋潮汐模式下的 O_1 分潮同潮图

Fig. 5 Co-tidal charts of O_1 for different global ocean tide models

4 南海潮汐分布特征

根据第 3 节的准确度评估结果,分别利用图 2b、3d、4d、5c 来分析南海 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 四个主要分潮的潮汐分布特征。

由图 2b 可以看出, M_2 分潮潮波经吕宋海峡传入南海,部分潮波向北转入台湾海峡,大部向南海内部传播。在传播过程中,又有部分潮波转向西北进入北部湾,其主要部分则继续向西南传播,到达越南西南部附近海域时,部分潮波转向进入泰国湾,其余部分往南向巽他陆架海域传播。 M_2 分潮在进入台湾海峡后与来自东海的潮波相遇,此处的等振幅线非常密集,这是由于来自东海的 M_2 分潮振幅远大于来自南海的 M_2 分潮振幅,在台湾海峡西北口的最大振幅超过了 2 m。 M_2 分潮在南海北部广东沿岸最大振幅出现在湛江附近,可达 0.8 m。在北部湾传播过程中, M_2 分潮同潮时线的走向基本与湾轴垂直,在湾内有一个退化了的无潮点,北部湾内 M_2 分潮的振幅很小,最大在湾顶 0.4 m 左右。 M_2 分潮在南海中部海域表现为驻波,同潮时线稀疏,振幅很小,基本在 0.2 m 以内。 M_2 分潮在泰国湾有两个潮波系统,一个无潮点位于泰国湾的顶端,同潮时线绕无潮点作逆时针方向旋转,另一个无潮点位于泰国湾湾口,呈顺时针旋转。

在南海大部分海区, S_2 分潮(图 3d)的分布与 M_2 分潮大体一致,只是振幅较 M_2 分潮要小很多。

由图 4d 和 5c 可以看出,在南海,除了北部湾和泰国湾, K_1 分潮和 O_1 分潮的潮波均从东北向西南传播。在泰国湾, K_1 分潮和 O_1 分潮都有一个完整的逆时针方向旋转的潮波系统。在北部湾湾口, K_1 分潮和 O_1 分潮各有一个退化了的无潮点。 K_1 分潮和 O_1 分潮都是在北部湾湾顶的振幅最大,都超过了 0.8 m。北部湾是我国近海全日分潮最大的海区,这在世界上也不多见。对于一般海区,通常 K_1 分潮的振幅大于 O_1 分潮的振幅,而在北部湾恰好相反。这是由于北部湾的自由振荡周期更接近于 O_1 分潮周期,使 O_1 分潮潮波在北部湾产生共振,从而使得 O_1 分潮的振幅增强^[23]。

5 结 语

本研究利用南海海域 60 个验潮站和 22 个 T/P 卫星高度计轨道交叉点处的调和常数资料,检验了四种全球大洋潮汐模式 TPX07.2、GOT00.2、NAO.99b 和 DTU10 在南海的准确度。对比结果表明,四种全球大洋潮汐模式在南海均有较高的准确度,与卫星高度计资料比较的精度明显高于与沿岸验潮站资料比较的精度。为了更精确地给出四种大洋潮汐模式在南海不同区域的准确度,将南海分成了 8 个区,分别对比了四种大洋潮汐模式在各区域的准确度。北边界和东边界所在区域 4 个分潮都是 DTU10 结果最好,南边界所在区域 M_2 和 O_1 分潮 GOT00.2 的偏差最小, S_2 和 K_1 分潮 DTU10 的偏差最小。在进行南海潮汐数值模拟选择开边界条件时,可以以 DTU10 模式为主,并利用 GOT00.2 模式作适当调整。最后简单分析了南海 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 四个主要分潮的潮汐分布特征。

参考文献(References):

- [1] SCHWIDERSKI E W. Ocean tides, part I: Global ocean tidal equations[J]. *Marine Geodesy*, 1980, 3:161-217.
- [2] SCHWIDERSKI E W. Ocean tides, part II: A hydrodynamical interpolation model[J]. *Marine Geodesy*, 1980, 3(1-4):219-255.
- [3] SCHWIDERSKI E W. On charting global ocean tides[J]. *Reviews of Geophysics*, 1980, 18(1):243-268.
- [4] CARTWRIGHT D E, RAY R D. Oceanic tides from Geosat altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(C3):3069-3090.
- [5] LE PROVOST C, GENCO M L, LYARD F, et al. Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12):24777-24797.
- [6] LE PROVOST C, LYARD F, MOLINES J M, et al. A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C3):5513-5529.

- [7] LEFEVRE F, LYARD F H, LE PROVOST C. FES98: A new global tide finite element solution independent of altimetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(17):2717-2720.
- [8] LYARD F, LEFEVRE F, LETELLIER T, et al. Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56(5-6):394-415.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] ANDERSEN O B, WOODWORTH P L, FLATHER R A. Intercomparison of recent ocean tide models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C12):25261-25282.
- [13] SCHRAMA E J O, RAY R D. A preliminary tidal analysis of TOPEX/POSEIDON altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12):24799-24808.
- [14] SHUM C K, WOODWORTH P L, ANDERSEN O B, et al. Accuracy assessment of recent ocean tide models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C11):25173-25194.
- [15] PENNA N T, BOS M S, BAKER T F, et al. Assessing the accuracy of predicted ocean tide loading displacement[J]. *J. Geod*, 2008, 82(12):893-907.
- [16] 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 Earth Sciences*, 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.
- [17] 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.
- [18] SAVCENKO R, BOSCH W. EOT10a - a new global tide model from multi-mission altimetry[J]. *Geophysical Research Abstracts*, EGU General Assembly 2010, Vol. 12, EGU2010-9624, 2010.
- [19] 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.
- [20] CHENG Y C, ANDERSEN O B. Multimission empirical ocean tide modeling for shallow waters and polar seas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C11), C11001, doi:10.1029/2011JC007172.
- [21] MUNK W H, CARTWRIGHT D E. Tidal Spectroscopy and Prediction[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, 1966, 259(1105):533-581.
- [22] FANG G H, KWOK Y K, YU K J, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand[J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(7):845-869.
- [23] QIAO F L. *Regional Oceanography of China Seas-Physical Oceanography*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012; 358-359. 乔方利. *中国区域海洋学——物理海洋学*[M]. 北京: 海洋出版社, 2012; 358-359.

Accuracy Assessment of Global Ocean Tide Models in the South China Sea

GAO Xiu-min¹, WEI Ze-xun¹, LV Xian-qing², WANG Yong-gang¹, YANG Yang³

(1. *Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*; 2. *Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 3. *National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China*)

Abstract: The harmonic constants of four tidal constituents M_2, S_2, K_1, O_1 of the global ocean tide models TPXO 7.2, GOT00.2, NAO.99b and DTU10 are validated comparing to the observed data at 60 tide gauge stations and 22 T/P satellite altimeter crossover points in the South China Sea. In order to give accurate estimate of the four tide models in different parts of the South China Sea, we divide the South China Sea into eight sub-areas, in each of which the comparison of accuracy is carried out separately. The results show that in the northern and eastern sub-areas of the sea the four tidal constituents of DTU10 have the highest accuracy. And in the southern sub-area of the sea the M_2 and O_1 constituents of GOT00.2 and the S_2 and K_1 constituents of DTU10 have the smallest deviation. For selecting the open boundary conditions for the numerical simulation of tides in the South China Sea, therefore, the model DTU10 should be considered first and the model GOT00.2 can be used for making appropriate adjustments. The distribution features of the four tidal constituents M_2, S_2, K_1, O_1 in the South China Sea are also analyzed briefly.

Key words: Global ocean tide model; the South China Sea; tidal gauge station; satellite altimeter

Received: April 10, 2013