

徐晓庆, 魏泽勋, 滕飞, 等. 全球垂向位移负荷潮模式在渤海、黄海、东海及周边区域的准确度评估[J]. 海洋学报, 2022, 44(12): 19–30, doi:10.12284/hyxb2022159

Xu Xiaqing, Wei Zexun, Teng Fei, et al. Accuracy assessment of global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(12): 19–30, doi:10.12284/hyxb2022159

# 全球垂向位移负荷潮模式在渤海、黄海、东海 及周边区域的准确度评估

徐晓庆<sup>1,2,3,4,5</sup>, 魏泽勋<sup>2,3,4,5\*</sup>, 滕飞<sup>2,3,4,5</sup>, 孙俊川<sup>2,3,4,5</sup>, 高秀敏<sup>2,3,4,5</sup>, 方国洪<sup>2,3,4,5</sup>

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410073; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061; 4. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 本研究利用渤海、黄海、东海及周边区域 21 个 GPS 站的调和常数资料, 对 5 个全球垂向位移负荷潮模式 (FES2014, EOT11a, GOT4.10c, GOT4.8 和 NAO.99b) 在渤海、黄海、东海及周边区域的准确度进行了评估。结果表明, 在渤海、黄海、东海及周边区域, 对于  $M_2$  分潮, FES2014 和 EOT11a 模式结果准确度相对较高; 对于  $S_2$  分潮, NAO.99b 和 EOT11a 模式结果准确度相对较高; 对于  $K_1$  分潮, EOT11a 和 FES2014 模式结果准确度相对较高; 对于  $O_1$  分潮, EOT11a 和 GOT4.8 模式结果准确度相对较高; 对于  $N_2$  分潮, EOT11a 和 FES2014 模式结果准确度相对较高; 对于  $K_2$  分潮, NAO.99b 和 FES2014 模式结果准确度相对较高; 对于  $P_1$  分潮, EOT11a 和 GOT4.8 模式结果准确度相对较高; 对于  $Q_1$  分潮, FES2014 和 EOT11a 模式结果准确度相对较高。除此之外, 本文还简单分析了渤海、黄海、东海及周边区域 8 个主要分潮的垂向位移负荷潮分布特征。

**关键词:** 准确度评估; 垂向位移负荷潮模式; 渤海、黄海、东海及周边区域; GPS 站

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)12-0019-12

## 1 引言

在海洋潮汐负荷的作用下, 地球会发生位移、倾斜和应变, 同时会产生与海洋潮汐有关的引力场。海洋潮汐的负荷效应在垂直方向的位移形变称为垂向位移负荷潮, 其在大地测量、地球物理、海洋学和天文学领域有重要作用, 因而受到广泛关注。随着 GPS 观测技术及分析方法的进步, 现今 GPS 观测资料在研究潮汐垂向位移方面已成为最基本的数据, 因为它具有其他大地测量技术难以实现的高精度和时空高分辨率。研究证实, 观测数据是评估潮汐模式精度最

有效和直接的方法<sup>[1-2]</sup>, 因而经常被用作评估全球潮汐模式的准确度。在海洋学领域, 垂向位移负荷潮模式关系到由卫星高度计观测资料提取海洋潮汐信息的准确性<sup>[3-4]</sup>。在地球物理学领域, 垂向位移负荷潮模式可以为各种测量提供海平面修正<sup>[5-6]</sup>, 也可提供建立精确垂直基准转换的基础数据<sup>[7-8]</sup>。因此, 根据 GPS 站实测资料得到潮汐形变的调和常数对全球垂向位移负荷潮模式进行准确性评估十分重要<sup>[9-13]</sup>。

目前, 全球潮汐模式有很多, 但其中只有部分模式包含有负荷潮资料。本研究选取了 5 个垂向位移负荷潮模式 (FES2014, EOT11a, GOT4.10c, GOT4.8

收稿日期: 2022-06-28; 修订日期: 2022-07-22。

基金项目: 国家自然科学基金 (41821004, 42176035)。

作者简介: 徐晓庆 (1986—), 女, 山东省烟台市人, 工程师, 主要从事潮汐潮流与负荷潮方面研究。E-mail: xuxq@fio.org.cn

\* 通信作者: 魏泽勋 (1970—), 男, 研究员, 主要从事潮汐和环流动力学方面研究。E-mail: weizx@fio.org.cn

和 NAO.99b), 分析了在渤海、黄海、东海及周边区域  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$  8 个主要分潮的垂向位移负荷潮分布特征, 并利用 GPS 站实测资料得到的潮汐形变的调和常数<sup>[14]</sup> 对其进行准确度评估。

## 2 全球垂向位移负荷潮模式介绍

FES2014 模式是法国潮汐小组(French Tidal Group, FTG)开发的全球同化模式<sup>[15]</sup>, 分辨率为  $(1/16)^\circ \times (1/16)^\circ$ , 网格数为  $5\,760 \times 2\,881$ , 纬度为  $90^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{N}$ , 经度为  $0^\circ \sim 180^\circ \sim 0.062\,5^\circ\text{W}$ 。该模式提供了 CM<sup>①</sup> 参考系下 33 个分潮的垂向位移负荷潮信息。

EOT11a 模式是由德国地理学会(Deutsches Geodisches Forschungs Institut, DGF)建立的经验改正模式<sup>[16]</sup>, 分辨率为  $(1/8)^\circ \times (1/8)^\circ$ , 网格数为  $2\,881 \times 1\,441$ , 纬度

为  $90^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{N}$ , 经度为环全球经度。该模式提供了 CF<sup>②</sup> 参考系下 13 个分潮的垂向位移负荷潮信息。

GOT4.8 和 GOT4.10c 模式是美国戈达德太空飞行中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)开发的经验改正模式<sup>[17]</sup>, 分辨率为  $(1/2)^\circ \times (1/2)^\circ$ , 网格数为  $720 \times 361$ , 纬度为  $90^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{N}$ , 经度为  $0^\circ \sim 180^\circ \sim 0.5^\circ\text{W}$ 。该模式提供了 CM 参考系下 10 个分潮的垂向位移负荷潮信息。

NAO.99b 模式是日本国立天文观测台(National Astronomical Observatory, NAO)研发的同化模式<sup>[18]</sup>, 分辨率为  $(1/2)^\circ \times (1/2)^\circ$ , 网格数为  $720 \times 360$ , 纬度为  $89.75^\circ\text{S} \sim 89.75^\circ\text{N}$ , 经度为  $0.25^\circ\text{E} \sim 180^\circ \sim 0.25^\circ\text{W}$ 。该模式提供了 CM 参考系下 23 个分潮的垂向位移负荷潮信息。

各全球垂向位移负荷潮模式的详细信息见表 1。

表 1 全球垂向位移负荷潮模式介绍

Table 1 Introduction of global vertical displacement loading tide models

模式名称	研制机构	分辨率	构建方法	分潮
FES2014	法国潮汐小组 (FTG)	$(1/16)^\circ \times (1/16)^\circ$	同化模型	$M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $P_1$ 、 $K_2$ 、 $Q_1$ 、 $J_1$ 、 $2N_2$ 、 $L_2$ 、 $T_2$ 、 $R_2$ 、 $Mu_2$ 、 $Nu_2$ 、 $La_2$ 、 $MKS_2$ 、 $E_2$ 、 $M_3$ 、 $N_4$ 、 $S_4$ 、 $M_4$ 、 $MN_4$ 、 $MS_4$ 、 $M_6$ 、 $M_8$ 、 $M_f$ 、 $M_m$ 、 $MS_f$ 、 $M_{sqm}$ 、 $M_{tm}$ 、 $S_a$ 、 $S_{sa}$ (共33个)
EOT11a	德国地理学会 (DGF)	$(1/8)^\circ \times (1/8)^\circ$	经验模型	$M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ 、 $S_1$ 、 $2N_2$ 、 $M_f$ 、 $M_m$ 、 $M_4$ (共13个)
GOT4.10c	美国戈达德太空飞行中心(GSFC)	$(1/2)^\circ \times (1/2)^\circ$	经验模型	$M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $P_1$ 、 $K_2$ 、 $Q_1$ 、 $S_1$ 、 $M_4$ (共10个)
GOT4.8	美国戈达德太空飞行中心(GSFC)	$(1/2)^\circ \times (1/2)^\circ$	经验模型	$M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $P_1$ 、 $K_2$ 、 $Q_1$ (共8个)
NAO.99b	日本国立天文观测台(NAO)	$(1/2)^\circ \times (1/2)^\circ$	同化模型	$M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $P_1$ 、 $K_2$ 、 $Q_1$ 、 $M_1$ 、 $J_1$ 、 $OO_1$ 、 $2N_2$ 、 $Mu_2$ 、 $Nu_2$ 、 $L_2$ 、 $T_2$ 、 $M_f$ 、 $M_m$ 、 $MS_f$ 、 $M_{sm}$ 、 $M_{tm}$ 、 $S_a$ 、 $S_{sa}$ (共23个)

## 3 准确度评估方法

首先我们用振幅绝均差  $\Delta H$  和迟角绝均差  $\Delta g$  来表示垂向位移负荷潮模式值和 GPS 站观测值之间的平均偏离, 称为绝均差, 其计算公式为

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

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

式中,  $H$  为振幅;  $g$  为迟角; 下标 mod 和 obs 分别代表模式模拟值和 GPS 站观测值;  $n$  代表 GPS 站的序号;  $N$  为 GPS 站的总个数,  $n = 1, 2, \dots, N$ 。

进一步, 我们还采用向量均方根偏差, 称为标准差, 来表示垂向位移负荷潮模式和 GPS 站观测值的总体偏差, 其计算公式为

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

式中,  $a$  为调和常数的余弦分量;  $b$  为正弦分量。

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

标准差  $\sigma$  是模式模拟值和实际观测值之间的距离, 代表模式模拟值和实际观测值之间的偏离程度, 而标准差  $\sigma$  与实际观测值变化性之间的相对偏离程度则可用相对偏差  $\delta$  来表示,

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

式中,

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

式中,  $\bar{a}_{\text{obs}}$  代表  $a_{\text{obs},n}$  的平均值;  $\bar{b}_{\text{obs}}$  代表  $b_{\text{obs},n}$  的平均值。

另外我们还可以采用模式值和实际观测值的拟合程度  $r^2$  来表达,

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

① CM 参考系包括大气、海洋在内的整个地球质量中心。

② CF 参考系为固体地球外表面的形状中心。

式中,  $r$  相当于线性回归中的相关系数。

#### 4 全球垂向位移负荷潮模式在渤海、黄海、东海及周边区域的准确度评估

本研究采用 21 个 GPS 站的调和常数资料<sup>[14]</sup> 作为观测值, 将垂向位移负荷潮模式插值到对应的 GPS

站位上, 采用第 3 节描述的方法, 对 5 个全球垂向位移负荷潮模式(FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b) 中  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$  8 个主要分潮的调和常数在渤海、黄海、东海及周边区域的准确度进行评估。这 21 个 GPS 站的站位分布见图 1, 各 GPS 站信息见表 2 和表 3。

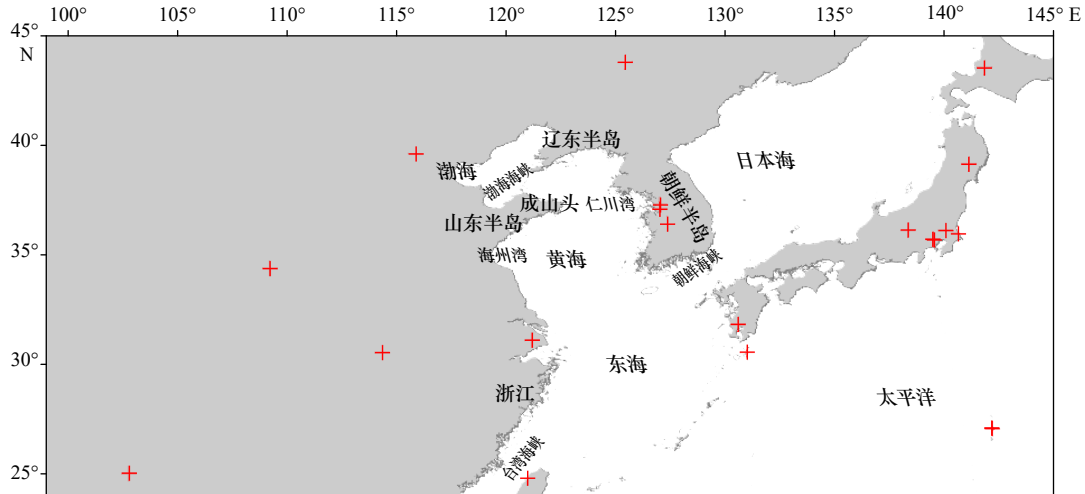


图 1 渤海、黄海、东海及周边区域 GPS 站位置

Fig. 1 GPS station locations in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

表 4 给出了 5 个垂向位移负荷潮模式值与渤海、黄海、东海及周边区域在 21 个 GPS 站处 8 个主要分潮调和常数的对比结果, 从表中可以看出, 对于  $M_2$  分潮, FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b 模式的振幅绝均差分别为 0.47 mm、0.56 mm、0.88 mm、0.85 mm 和 0.94 mm, 迟角绝均差分别为 19.71°、2.94°、5.74°、5.65°和 10.22°, 标准差分别为 0.71 mm、0.90 mm、1.71 mm、1.69 mm 和 1.88 mm, 拟合程度分别达 99.12%、98.62%、94.85%、95.01% 和 93.81%, 在渤海、黄海、东海及周边区域以 FES2014 模式结果最好, EOT11a 模式结果次之; 对于  $S_2$  分潮, FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b 模式的振幅绝均差分别为 0.70 mm、0.69 mm、0.75 mm、0.76 mm 和 0.53 mm, 迟角绝均差分别为 7.20°、6.95°、9.39°、8.24°和 6.14°, 标准差分别为 1.09 mm、1.08 mm、1.12 mm、1.13 mm 和 0.83 mm, 拟合程度分别达 89.16%、89.22%、88.51%、88.28% 和 93.66%, 在渤海、黄海、东海及周边区域以 NAO.99b 模式结果最好, EOT11a 模式结果次之; 对于  $K_1$  分潮, FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b 模式的振幅绝均差分别为 1.06 mm、1.03 mm、1.06 mm、1.08 mm 和 1.63 mm, 迟角绝均差分别为 9.58°、6.44°、10.13°、10.41°和 12.18°, 标准差分别为 1.79 mm、1.75 mm、1.84 mm、1.85 mm 和 2.53 mm, 拟合程度分别达 81.13%、83.63%、80.11%、79.86% 和 62.39%, 在渤海、黄海、东

海及周边区域以 EOT11a 模式结果最好, FES2014 模式结果次之; 对于  $O_1$  分潮, FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b 模式的振幅绝均差分别为 0.24 mm、0.18 mm、0.13 mm、0.17 mm 和 1.02 mm, 迟角绝均差分别为 5.51°、1.49°、6.02°、4.90°和 11.36°, 标准差分别为 0.52 mm、0.31 mm、0.49 mm、0.43 mm 和 1.55 mm, 拟合程度分别达 97.95%、99.34%、98.20%、98.61% 和 81.99%, 在渤海、黄海、东海及周边区域以 EOT11a 模式结果最好, GOT4.8 模式结果次之; 对于  $N_2$  分潮, FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b 模式的振幅绝均差分别为 0.16 mm、0.10 mm、0.18 mm、0.17 mm 和 0.35 mm, 迟角绝均差分别为 9.28°、4.43°、13.37°、12.17°和 16.23°, 标准差分别为 0.23 mm、0.17 mm、0.31 mm、0.30 mm 和 0.47 mm, 拟合程度分别达 97.37%、98.67%、95.18%、95.51% 和 89.01%, 在渤海、黄海、东海及周边区域以 EOT11a 模式结果最好, FES2014 模式结果次之; 对于  $K_2$  分潮, FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b 模式的振幅绝均差分别为 0.43 mm、0.45 mm、0.47 mm、0.47 mm 和 0.38 mm, 迟角绝均差分别为 37.74°、38.45°、37.88°、37.77°和 38.06°, 标准差分别为 0.78 mm、0.80 mm、0.80 mm、0.82 mm 和 0.78 mm, 拟合程度分别达 56.18%、53.71%、54.06%、52.03% 和 56.84%, 在渤海、黄海、东海及周边区域以 NAO.99b 模式结果最好, FES2014 模

表 2 渤海、黄海、东海及周边区域 GPS 站在 CM 参考系下 8 个主要分潮的调和常数

Table 2 Harmonic constants of eight principal tidal constituents under the CM reference frame in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

纬度	经度	观测时间长度/d	M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		K <sub>2</sub>		K <sub>1</sub>		O <sub>1</sub>		P <sub>1</sub>		Q <sub>1</sub>	
			振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角
31.82°N	130.60°E	4 879	14.51	122.7	8.33	146.6	3.01	118.0	2.70	115.2	9.85	228.4	7.71	224.7	3.24	242.4	1.66	211.4
39.61°N	115.89°E	4 183	1.10	108.7	0.82	96.5	0.21	130.6	0.61	169.7	4.08	225.2	2.07	200.5	0.87	201.5	0.44	201.4
27.07°N	142.20°E	1 320	12.15	76.1	5.85	96.9	2.30	79.3	1.70	67.8	12.51	228.0	9.96	211.2	4.75	230.5	2.20	192.5
27.10°N	142.18°E	4 712	12.31	76.3	6.24	97.0	2.29	80.4	1.46	69.6	12.69	228.1	9.95	208.9	4.50	230.1	2.17	201.0
43.79°N	125.44°E	2 375	1.25	85.0	0.52	92.3	0.24	126.2	1.10	110.6	4.02	227.4	2.88	190.1	1.60	177.0	0.64	189.3
36.40°N	127.37°E	4 398	4.52	53.3	2.90	97.1	0.57	53.4	0.76	98.9	4.43	260.9	3.69	233.4	2.14	242.3	0.85	222.4
30.56°N	131.02°E	2 248	19.89	110.9	9.55	138.2	3.92	106.2	3.87	117.8	10.47	257.9	9.70	222.9	4.15	234.3	1.92	210.0
35.71°N	139.49°E	3 274	7.39	49.4	3.39	75.0	0.94	60.1	1.33	52.4	8.80	213.0	7.51	197.3	2.58	216.1	1.45	187.7
35.96°N	140.66°E	3 205	8.69	38.8	5.80	65.7	1.09	33.2	1.39	29.0	8.87	204.1	8.73	193.3	3.69	211.1	1.97	187.8
25.03°N	102.80°E	4 027	1.26	168.2	1.49	107.8	0.17	170.9	1.47	34.2	4.50	284.6	1.39	287.3	0.37	19.6	0.30	232.5
39.14°N	141.13°E	3 316	6.75	18.3	3.07	58.9	0.65	16.6	0.56	25.2	9.44	205.0	7.28	185.8	3.31	206.2	1.43	181.9
35.68°N	139.56°E	3 239	7.64	48.7	3.67	74.5	1.08	55.1	0.61	105.3	9.69	214.0	7.56	197.1	2.93	217.8	1.62	191.3
37.08°N	127.02°E	3 505	7.59	52.3	3.66	99.9	0.97	41.1	1.05	92.9	4.25	255.7	3.31	238.3	1.43	256.0	0.73	221.9
31.10°N	121.20°E	4 373	7.39	225.3	1.73	242.6	1.57	206.9	1.25	305.2	6.79	247.7	4.51	237.6	2.27	246.6	0.91	219.3
43.53°N	141.84°E	3 095	5.21	8.3	2.39	50.5	0.34	337.7	0.50	92.8	7.40	204.4	6.69	182.8	2.85	204.5	1.32	176.3
37.28°N	127.05°E	4 618	7.06	55.9	3.60	102.4	0.98	42.4	1.10	82.3	4.00	243.9	3.30	234.3	1.70	232.7	0.75	227.2
36.11°N	140.09°E	5 768	7.44	42.5	4.20	66.6	0.96	52.1	0.89	49.5	9.55	217.0	7.63	193.9	3.41	213.7	1.61	190.3
36.13°N	138.36°E	5 508	5.99	51.1	3.17	90.5	0.92	63.9	0.78	84.3	8.47	228.6	6.31	196.3	2.96	229.5	1.36	189.1
30.53°N	114.36°E	5 471	2.64	150.3	1.91	127.5	0.63	146.3	0.19	317.0	4.35	257.6	2.26	253.2	0.92	267.6	0.46	239.2
34.37°N	109.22°E	3 041	1.26	144.0	1.04	117.7	0.22	156.9	0.73	184.0	2.08	254.2	1.38	228.2	0.86	163.7	0.41	195.8
24.80°N	120.99°E	3 150	12.53	216.5	4.04	221.3	3.02	192.9	1.02	178.8	7.14	287.2	7.52	268.3	2.53	290.8	1.54	250.0

注: 振幅单位为mm, 迟角是格林威治迟角, 单位为(°)。

式结果次之; 对于 P<sub>1</sub> 分潮, FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b 模式的振幅绝均差分别为 0.41 mm、0.30 mm、0.41 mm、0.37 mm 和 0.28 mm, 迟角绝均差分别为 13.19°、10.24°、13.02°、13.04°和 19.39°, 标准差分别为 0.58 mm、0.50 mm、0.58 mm、0.55 mm 和 0.72 mm, 拟合程度分别达 86.98%、91.24%、86.94%、88.17% 和 79.71%, 在渤海、黄海、东海及周边区域以 EOT11a 模式结果最好, GOT4.8 模式结果次之; 对于 Q<sub>1</sub> 分潮, FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8 和 NAO.99b 模式的振幅绝均差分别为 0.06 mm、0.08 mm、0.05 mm、0.07 mm 和 0.16 mm, 迟角绝均差分别为 6.52°、5.14°、8.34°、8.16°和 18.24°, 标准差分别为 0.15 mm、0.16 mm、0.17 mm、0.16 mm 和 0.39 mm, 拟合程度分别达 95.77%、95.31%、94.55%、94.73% 和 69.98%, 在

渤海、黄海、东海及周边区域以 FES2014 模式结果最好, EOT11a 模式结果次之。总体来看, 5 个全球垂向位移负荷潮模式中, EOT11a 垂向位移负荷潮模式在渤海、黄海、东海及周边区域 8 个主要半日和全日分潮的调和常数最为准确。另外, 表 5 给出了 EOT11a 垂向位移负荷潮模式分区域准确度分析结果, 从表中可以发现, EOT11a 垂向位移负荷潮模式在中国大陆地区准确度相对较高, 日本岛准确度次之, 朝鲜半岛由于仅有 3 个站位信息, 准确度相对较差。

## 5 全球垂向位移负荷潮模式在渤海、黄海、东海及周边区域的分布特征

图 2 至图 9 分别给出了 5 个垂向位移负荷潮模式下渤海、黄海、东海及周边区域 8 个主要分潮(M<sub>2</sub>、

表3 渤海、黄海、东海及周边区域 GPS 站在 CF 参考系下 8 个主要分潮的调和常数

Table 3 Harmonic constants of eight principal tidal constituents under the CF reference frame in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

纬度	经度	观测时间长度/d	M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		K <sub>2</sub>		K <sub>1</sub>		O <sub>1</sub>		P <sub>1</sub>		Q <sub>1</sub>	
			振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角	振幅	迟角
31.82°N	130.60°E	4 879	15.87	123.4	8.48	147.5	3.40	117.8	2.69	115.3	11.05	234.8	8.69	230.0	3.73	247.1	1.81	216.8
39.61°N	115.89°E	4 183	2.22	113.1	0.91	99.2	0.55	114.9	0.57	167.7	5.22	245.6	2.76	232.4	1.10	238.7	0.57	227.8
27.07°N	142.20°E	1 320	13.00	81.9	5.80	100.0	2.61	85.2	1.68	68.5	13.95	231.7	10.91	215.2	5.25	233.6	2.33	196.7
27.10°N	142.18°E	4 712	13.16	82.0	6.19	100.0	2.61	86.1	1.44	70.5	14.14	231.7	10.87	213.1	5.00	233.4	2.33	204.7
43.79°N	125.44°E	2 375	2.44	98.1	0.65	100.4	0.61	111.7	1.12	108.3	5.75	247.6	3.55	218.6	1.58	206.4	0.76	211.5
36.40°N	127.37°E	4 398	5.10	67.2	2.95	99.9	0.84	76.0	0.76	97.7	6.29	266.8	4.90	243.2	2.68	250.8	1.05	231.6
30.56°N	131.02°E	2 248	21.17	112.3	9.67	139.2	4.30	107.2	3.86	117.9	12.00	260.0	10.62	227.1	4.57	238.6	2.06	214.6
35.71°N	139.49°E	3 274	7.89	59.5	3.34	78.9	1.23	74.6	1.34	53.1	10.15	223.4	8.32	206.5	3.07	227.2	1.58	196.4
35.96°N	140.66°E	3 205	8.94	48.1	5.72	67.9	1.23	51.4	1.39	29.8	10.01	215.8	9.48	201.8	4.13	219.9	2.10	194.4
25.03°N	102.80°E	4 027	2.16	158.7	1.45	108.6	0.46	138.0	1.47	31.6	5.24	292.8	2.25	295.9	0.65	356.4	0.40	259.0
39.14°N	141.13°E	3 316	6.65	30.6	3.01	63.0	0.75	47.8	0.58	28.1	10.67	217.1	7.90	197.6	3.73	217.6	1.54	192.0
35.68°N	139.56°E	3 239	8.13	58.6	3.62	78.2	1.33	69.3	0.63	105.2	11.05	223.4	8.38	206.3	3.42	227.5	1.76	198.8
37.08°N	127.02°E	3 505	8.11	60.9	3.72	102.0	1.17	59.0	1.06	91.9	6.10	263.6	4.59	247.8	2.05	263.7	0.93	232.7
31.10°N	121.20°E	4 373	7.46	215.8	1.83	239.2	1.61	193.3	1.27	305.1	7.94	254.2	5.44	245.1	2.66	253.4	1.04	228.6
43.53°N	141.84°E	3 095	5.08	24.2	2.36	55.7	0.34	46.0	0.56	91.2	8.79	221.2	7.27	197.2	3.29	219.3	1.42	188.7
37.28°N	127.05°E	4 618	7.66	64.8	3.67	104.5	1.18	59.8	1.11	81.4	5.72	256.0	4.55	245.0	2.20	245.7	0.97	236.5
36.11°N	140.09°E	5 768	7.80	53.0	4.12	69.6	1.21	68.3	0.90	50.5	11.04	226.2	8.39	203.4	3.87	222.9	1.75	198.0
36.13°N	138.36°E	5 508	6.56	63.0	3.19	94.5	1.22	77.6	0.80	84.5	10.18	236.9	7.11	207.4	3.54	237.3	1.49	198.3
30.53°N	114.36°E	5 471	3.74	145.7	1.95	129.8	0.96	135.5	0.22	315.7	5.41	266.7	3.23	263.5	1.32	277.3	0.63	252.3
34.37°N	109.22°E	3 041	2.25	136.2	1.08	117.9	0.52	128.4	0.69	185.3	3.35	274.5	2.27	256.9	0.58	200.7	0.47	225.3
24.80°N	120.99°E	3 150	12.98	211.0	4.23	220.9	3.17	186.4	1.02	181.6	8.08	287.5	8.34	269.3	2.85	290.6	1.69	252.5

注: 振幅单位为mm, 迟角是格林威治迟角, 单位为(°)。

S<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>1</sub>、O<sub>1</sub>、P<sub>1</sub>、Q<sub>1</sub>)的同潮图,对半日分潮而言,其传播规律基本相同,但在局部海域略有不同。从图2可看出, M<sub>2</sub>垂向位移负荷潮的最大振幅出现在浙江沿岸外海海域,第二最大值出现在台湾海峡以东的西太平洋区域,第三最大值出现在仁川湾。在渤海、黄海、东海海域, M<sub>2</sub>垂向位移负荷潮在成山头外海出现1个蜕化的无潮点,在山东半岛南方存在1个无潮点。在渤海内部海域, M<sub>2</sub>垂向位移负荷潮存在两个无潮点。在朝鲜海峡不存在无潮点,但在朝鲜半岛南端陆地上形成1个无潮点。从图3可看出, S<sub>2</sub>垂向位移负荷潮的最大振幅出现在台湾海峡以东的西太平洋区域,第二最大值出现在浙江沿岸外海海域,第三最大值出现在仁川湾。在渤海、黄海、东海海

域, S<sub>2</sub>垂向位移负荷潮在成山头外海出现1个无潮点,在山东半岛南方存在1个无潮点。在渤海内部海域, S<sub>2</sub>垂向位移负荷潮不存在无潮点,但在辽东半岛南端陆地存在1个无潮点。在朝鲜海峡不存在无潮点,但在朝鲜半岛南端陆地上形成1个无潮点。从图4可看出, N<sub>2</sub>垂向位移负荷潮与 M<sub>2</sub>垂向位移负荷潮的分布特征类似,但是 N<sub>2</sub>垂向位移负荷潮振幅比 M<sub>2</sub>垂向位移负荷潮振幅小。N<sub>2</sub>垂向位移负荷潮的最大振幅也出现在浙江沿岸外海海域,第二最大值出现在台湾海峡以东的西太平洋区域,第三最大值出现在仁川湾。在渤海、黄海、东海海域, N<sub>2</sub>垂向位移负荷潮在成山头外海出现1个蜕化的无潮点,在山东半岛南方存在1个无潮点。在渤海内部海域, N<sub>2</sub>垂向位移负荷

表 4 各模式与渤海、黄海、东海及周边区域 GPS 站调和常数的标准差及拟合度

**Table 4 The standard deviations and fitting degrees of the harmonic constants between each model values and GPS observations in Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas**

	FES2014	EOT11a	GOT4.10c	GOT4.8	NAO.99b	
M <sub>2</sub>	$\Delta H/mm$	0.47	0.56	0.88	0.85	0.94
	$\Delta g/(\circ)$	19.71	2.94	5.74	5.65	10.22
	$\sigma/mm$	0.71	0.90	1.71	1.69	1.88
	$r^2/\%$	99.12	98.62	94.85	95.01	93.81
S <sub>2</sub>	$\Delta H/mm$	0.70	0.69	0.75	0.76	0.53
	$\Delta g/(\circ)$	7.20	6.95	9.39	8.24	6.14
	$\sigma/mm$	1.09	1.08	1.12	1.13	0.83
	$r^2/\%$	89.16	89.22	88.51	88.28	93.66
K <sub>1</sub>	$\Delta H/mm$	1.06	1.03	1.06	1.08	1.63
	$\Delta g/(\circ)$	9.58	6.44	10.13	10.41	12.18
	$\sigma/mm$	1.79	1.75	1.84	1.85	2.53
	$r^2/\%$	81.13	83.63	80.11	79.86	62.39
O <sub>1</sub>	$\Delta H/mm$	0.24	0.18	0.13	0.17	1.02
	$\Delta g/(\circ)$	5.51	1.49	6.02	4.90	11.36
	$\sigma/mm$	0.52	0.31	0.49	0.43	1.55
	$r^2/\%$	97.95	99.34	98.20	98.61	81.99
N <sub>2</sub>	$\Delta H/mm$	0.16	0.10	0.18	0.17	0.35
	$\Delta g/(\circ)$	9.28	4.43	13.37	12.17	16.23
	$\sigma/mm$	0.23	0.17	0.31	0.30	0.47
	$r^2/\%$	97.37	98.67	95.18	95.51	89.01
K <sub>2</sub>	$\Delta H/mm$	0.43	0.45	0.47	0.47	0.38
	$\Delta g/(\circ)$	37.74	38.45	37.88	37.77	38.06
	$\sigma/mm$	0.78	0.80	0.80	0.82	0.78
	$r^2/\%$	56.18	53.71	54.06	52.03	56.84
P <sub>1</sub>	$\Delta H/mm$	0.41	0.30	0.41	0.37	0.28
	$\Delta g/(\circ)$	13.19	10.24	13.02	13.04	19.39
	$\sigma/mm$	0.58	0.50	0.58	0.55	0.72
	$r^2/\%$	86.98	91.24	86.94	88.17	79.71
Q <sub>1</sub>	$\Delta H/mm$	0.06	0.08	0.05	0.07	0.16
	$\Delta g/(\circ)$	6.52	5.14	8.34	8.16	18.24
	$\sigma/mm$	0.15	0.16	0.17	0.16	0.39
	$r^2/\%$	95.77	95.31	94.55	94.73	69.98

表 5 EOT11a 垂向位移负荷潮模式分区准确度分析  
Table 5 Accuracy analysis of EOT11a vertical displacement loading tide model in different regions

		中国大陆	日本岛	朝鲜半岛
M <sub>2</sub>	$\Delta H/mm$	0.31	0.70	1.04
	$\Delta g/(\circ)$	4.69	1.68	2.47
	$\sigma/mm$	0.82	0.91	1.10
S <sub>2</sub>	$\Delta H/mm$	0.70	0.99	0.07
	$\Delta g/(\circ)$	10.83	4.66	3.33
	$\sigma/mm$	0.94	1.35	0.21
K <sub>1</sub>	$\Delta H/mm$	1.60	0.84	0.60
	$\Delta g/(\circ)$	9.19	6.18	4.67
	$\sigma/mm$	1.97	1.94	0.84
O <sub>1</sub>	$\Delta H/mm$	0.17	0.25	0.08
	$\Delta g/(\circ)$	1.47	1.57	1.60
	$\sigma/mm$	0.23	0.39	0.17
N <sub>2</sub>	$\Delta H/mm$	0.08	0.12	0.11
	$\Delta g/(\circ)$	3.69	6.18	2.40
	$\sigma/mm$	0.14	0.20	0.12
K <sub>2</sub>	$\Delta H/mm$	0.50	0.59	0.07
	$\Delta g/(\circ)$	77.81	23.43	6.07
	$\sigma/mm$	0.91	0.88	0.18
P <sub>1</sub>	$\Delta H/mm$	0.19	0.30	0.51
	$\Delta g/(\circ)$	22.30	3.58	7.37
	$\sigma/mm$	0.52	0.46	0.60
Q <sub>1</sub>	$\Delta H/mm$	0.08	0.07	0.06
	$\Delta g/(\circ)$	9.50	2.36	3.70
	$\sigma/mm$	0.18	0.13	0.10

潮存在两个退化的无潮点。在朝鲜海峡不存在无潮点,但在朝鲜半岛南端陆地上形成 1 个无潮点。从图 5 可看出, K<sub>2</sub> 和 S<sub>2</sub> 垂向位移负荷潮也具有同样的规律, K<sub>2</sub> 垂向位移负荷潮振幅相较于 S<sub>2</sub> 也相对较小,分布规律基本一致, K<sub>2</sub> 垂向位移负荷潮的最大振幅出现在台湾海峡以东的西太平洋区域,第二最大值在浙江沿岸外海海域,第三最大值出现在仁川湾。在渤海、黄海、东海海域, K<sub>2</sub> 垂向位移负荷潮在成山头外海存在 1 个无潮点,在山东半岛南方存在 1 个无潮点。在渤海内部海域, K<sub>2</sub> 垂向位移负荷潮不存在无潮点,但在辽东半岛南端陆地存在 1 个无潮点。在朝鲜海峡不存在无潮点,但在朝鲜半岛南端陆地上形成 1 个无潮点。

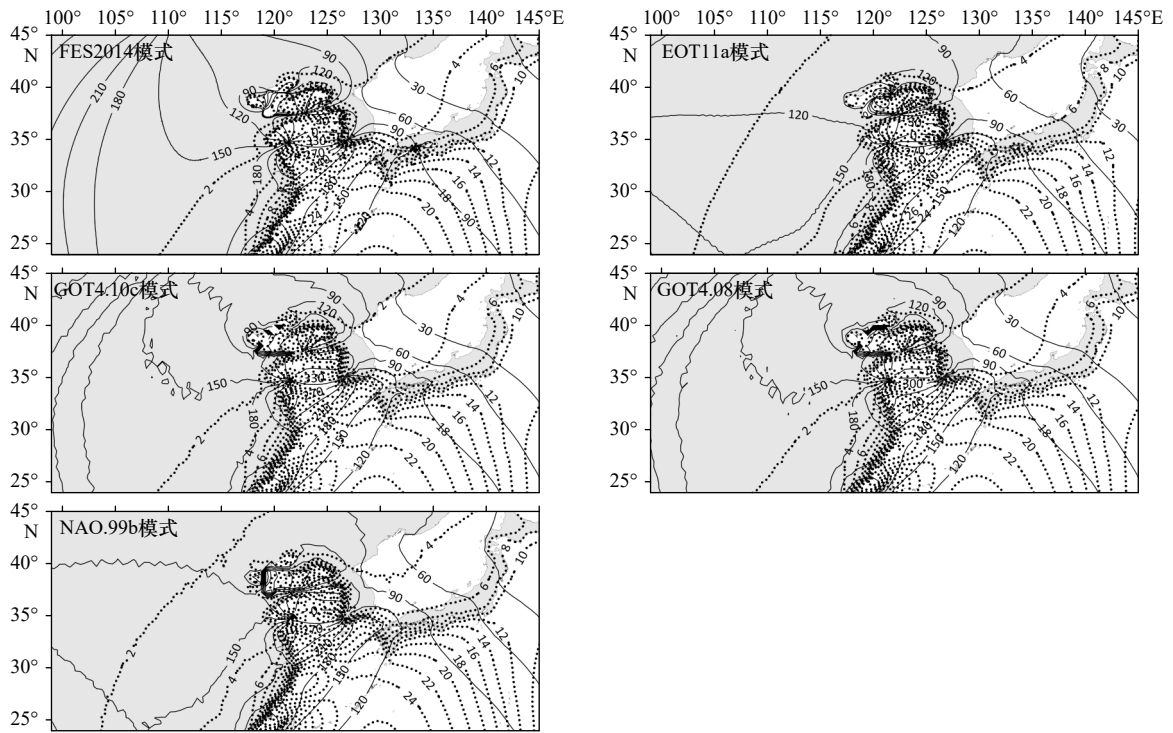


图2 不同全球垂向位移负荷潮模式下  $M_2$  分潮在渤海、黄海、东海及周边区域的同潮图  
 Fig. 2 Co-tidal charts of  $M_2$  for different global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

虚线为振幅(mm), 实线为格林威治迟角(°)

Dashed lines indicate amplitude (mm), solid lines indicate Greenwich phase-lag (°)

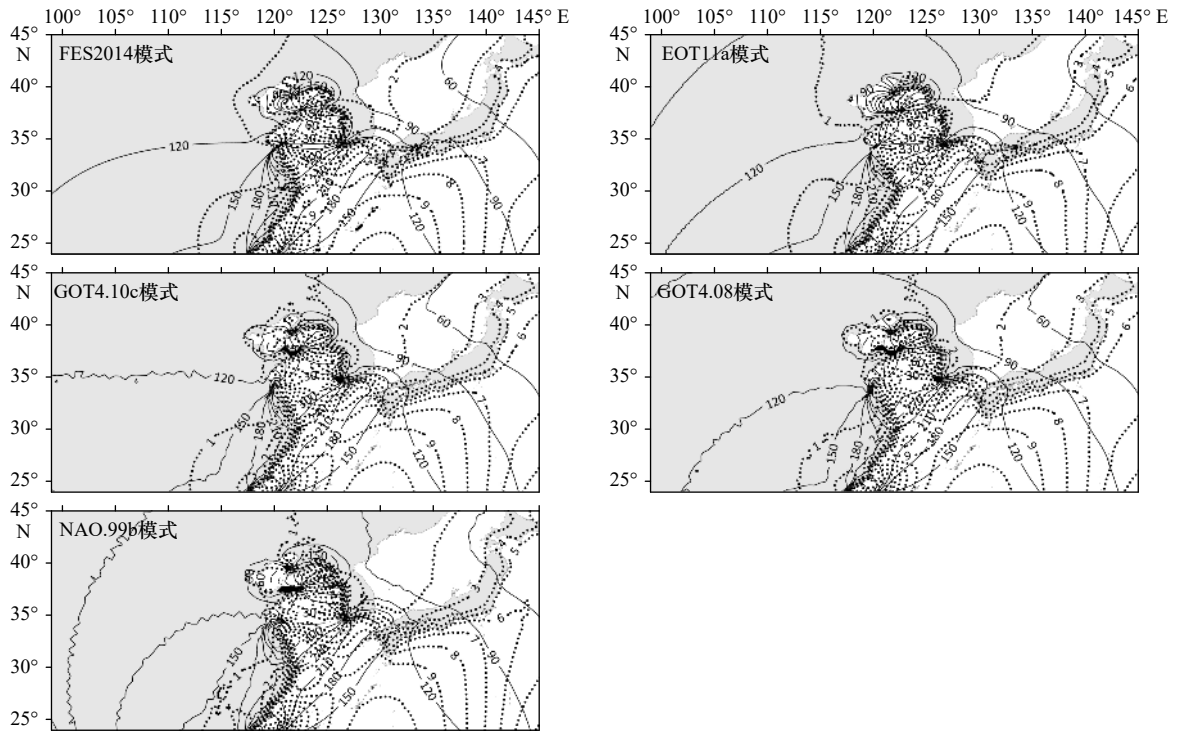


图3 不同全球垂向位移负荷潮模式下  $S_2$  分潮在渤海、黄海、东海及周边区域的同潮图  
 Fig. 3 Co-tidal charts of  $S_2$  for different global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

虚线为振幅(mm), 实线为格林威治迟角(°)

Dashed lines indicate amplitude (mm), solid lines indicate Greenwich phase-lag (°)

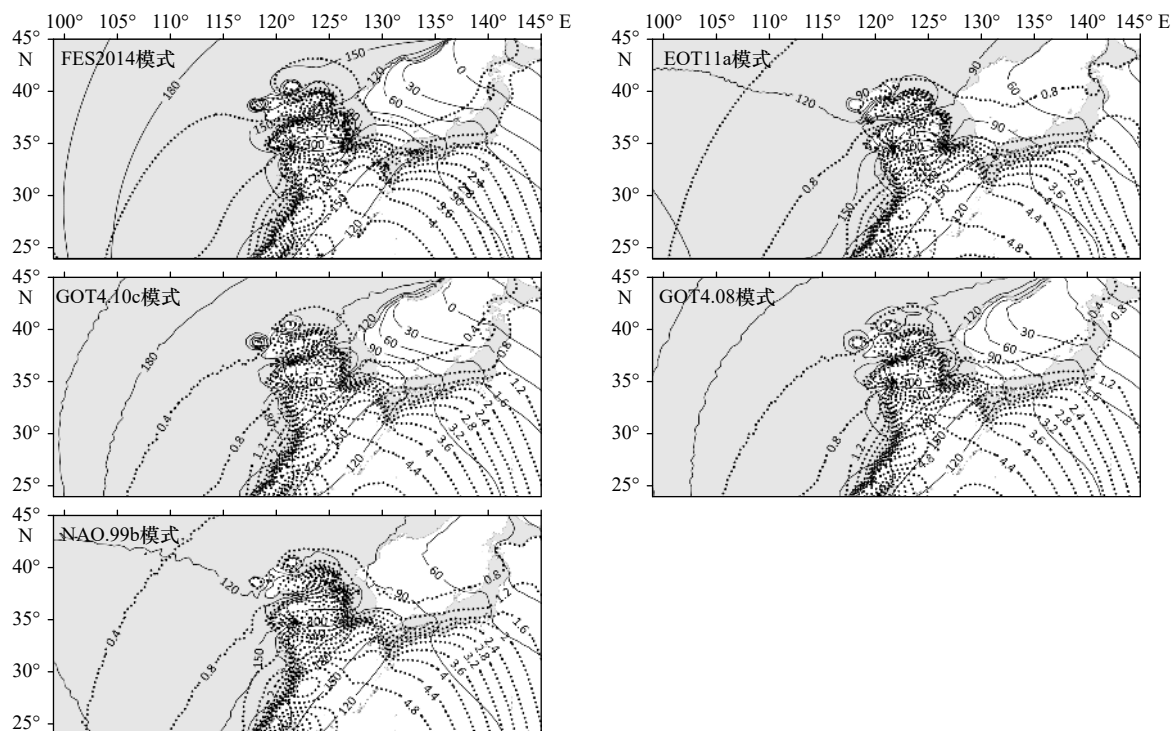


图 4 不同全球垂向位移负荷潮模式下  $N_2$  分潮在渤海、黄海、东海及周边区域的同潮图  
 Fig. 4 Co-tidal charts of  $N_2$  for different global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

虚线为振幅(mm),实线为格林威治迟角(°)

Dashed lines indicate amplitude (mm), solid lines indicate Greenwich phase-lag (°)

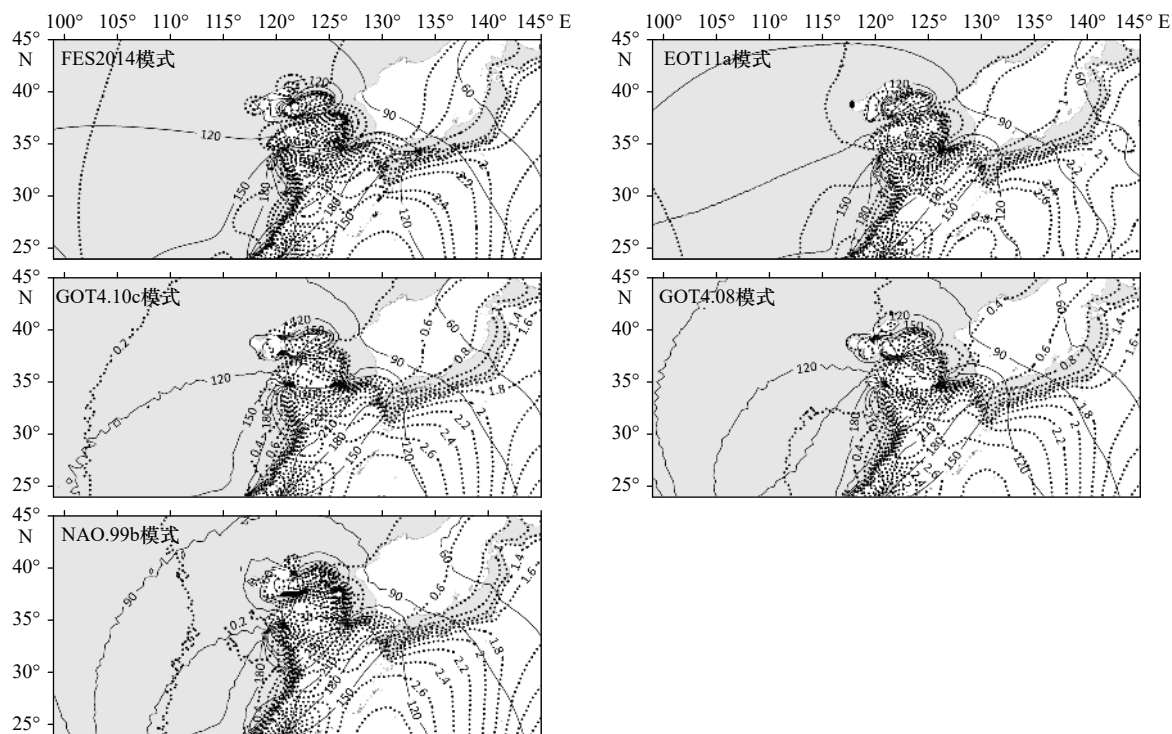


图 5 不同全球垂向位移负荷潮模式下  $K_2$  分潮在渤海、黄海、东海及周边区域的同潮图  
 Fig. 5 Co-tidal charts of  $K_2$  for different global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

虚线为振幅(mm),实线为格林威治迟角(°)

Dashed lines indicate amplitude (mm), solid lines indicate Greenwich phase-lag (°)

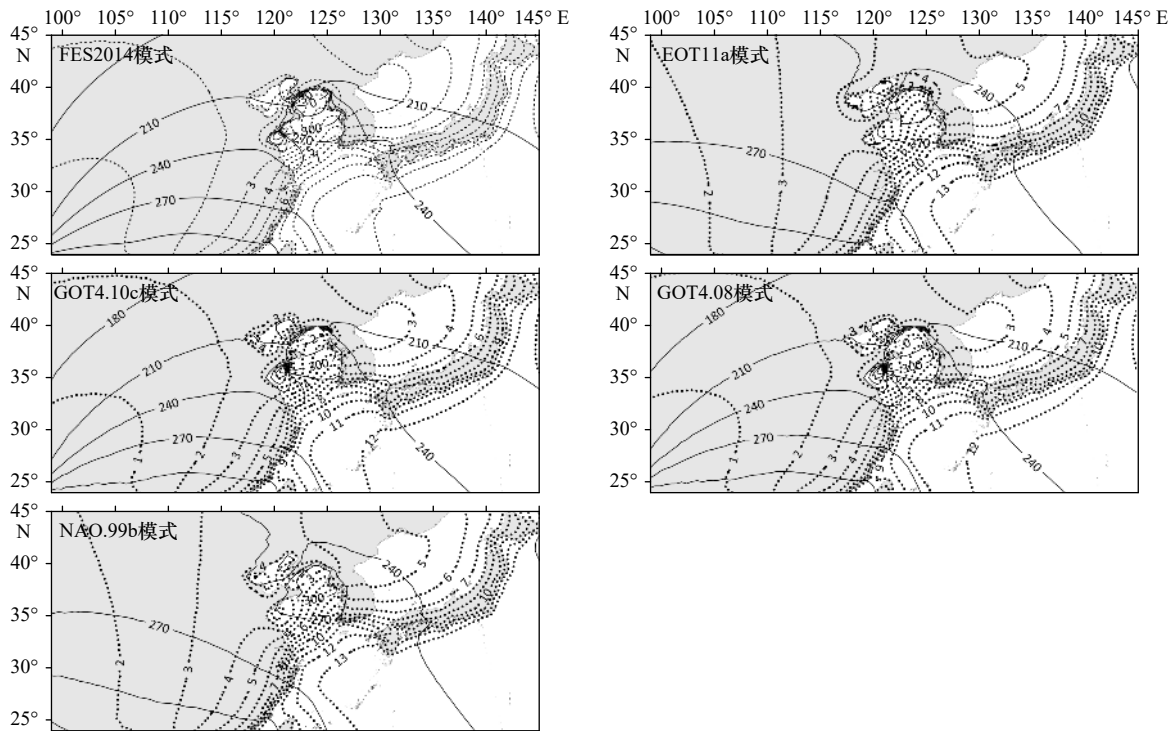


图6 不同全球垂向位移负荷潮模式下 $K_1$ 分潮在渤海、黄海、东海及周边区域的同潮图

Fig. 6 Co-tidal charts of  $K_1$  for different global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

虚线为振幅(mm), 实线为格林威治迟角( $^{\circ}$ )

Dashed lines indicate amplitude (mm), solid lines indicate Greenwich phase-lag ( $^{\circ}$ )

对全日分潮而言, 其传播规律差别较大。从图6可看出,  $K_1$ 垂向位移负荷潮振幅分布规律基本一致, 最大值出现在西北太平洋海域。在东海海域, 振幅逐渐向西和西南方向减小。在黄海和渤海海域, 振幅逐渐向西北方向减小, 并逐渐减小到辽东半岛南部和海州湾低值区。 $K_1$ 垂向位移负荷潮迟角分布规律差别较大, 在FES2014、GOT4.10c和GOT4.8模式下垂向位移负荷潮迟角分布规律基本一致,  $K_1$ 垂向位移负荷潮在山东半岛东南方有1个无潮点, 在渤海海峡东北海域也有1个无潮点。而EOT11a和NAO.99b模式垂向位移负荷潮迟角分布则与其他3个模式不同, EOT11a和NAO.99b模式 $K_1$ 垂向位移负荷潮的同潮时线分布稀疏, 且在整个研究海域没有出现无潮点。从图7可看出,  $O_1$ 垂向位移负荷潮振幅分布规律基本一致, 最大值出现在西北太平洋海域。在东海海域振幅向西和西南递减, 在黄渤海向西北递减。同潮时线在整个研究海域均不出现无潮点。从图8可看出,  $P_1$ 和 $K_1$ 垂向位移负荷潮具有同样的规律,  $P_1$ 垂向位移负荷潮振幅相较于 $K_1$ 也相对较小, 分布规律基本一致。同理, 从图9可看出,  $Q_1$ 和 $O_1$ 垂向位移负荷潮也具有同样的规律,  $Q_1$ 垂向位移负荷潮振幅相较于 $O_1$ 也相对较小, 分布规律基本一致。

## 6 结论

本研究利用渤海、黄海、东海及周边区域21个GPS站的调和常数资料, 检验了5种垂向位移负荷潮模式FES2014、EOT11a、GOT4.10c、GOT4.8和NAO.99b在渤海、黄海、东海及周边区域的准确度。结果表明, 对于 $M_2$ 分潮, 其最小的两个标准差分别为0.71 mm和0.90 mm, 以FES2014和EOT11a模式结果准确度相对较高; 对于 $S_2$ 分潮, 其最小的两个标准差分别为0.83 mm和1.08 mm, 以NAO.99b和EOT11a模式结果准确度相对较高; 对于 $K_1$ 分潮, 其最小的两个标准差分别为1.75 mm和1.79 mm, 以EOT11a和FES2014模式结果准确度相对较高; 对于 $O_1$ 分潮, 其最小的两个标准差分别为0.31 mm和0.43 mm, 以EOT11a和GOT4.8模式结果准确度相对较高; 对于 $N_2$ 分潮, 其最小的两个标准差分别为0.17 mm和0.23 mm, 以EOT11a和FES2014模式结果准确度相对较高; 对于 $K_2$ 分潮, 其最小的两个标准差分别为0.78 mm和0.78 mm, 以NAO.99b和FES2014模式结果准确度相对较高; 对于 $P_1$ 分潮, 其最小的两个标准差分别为0.50 mm和0.55 mm, 以EOT11a和GOT4.8模式结果准确度相对较高; 对于 $Q_1$ 分潮, 其最小的两个标准差分别为

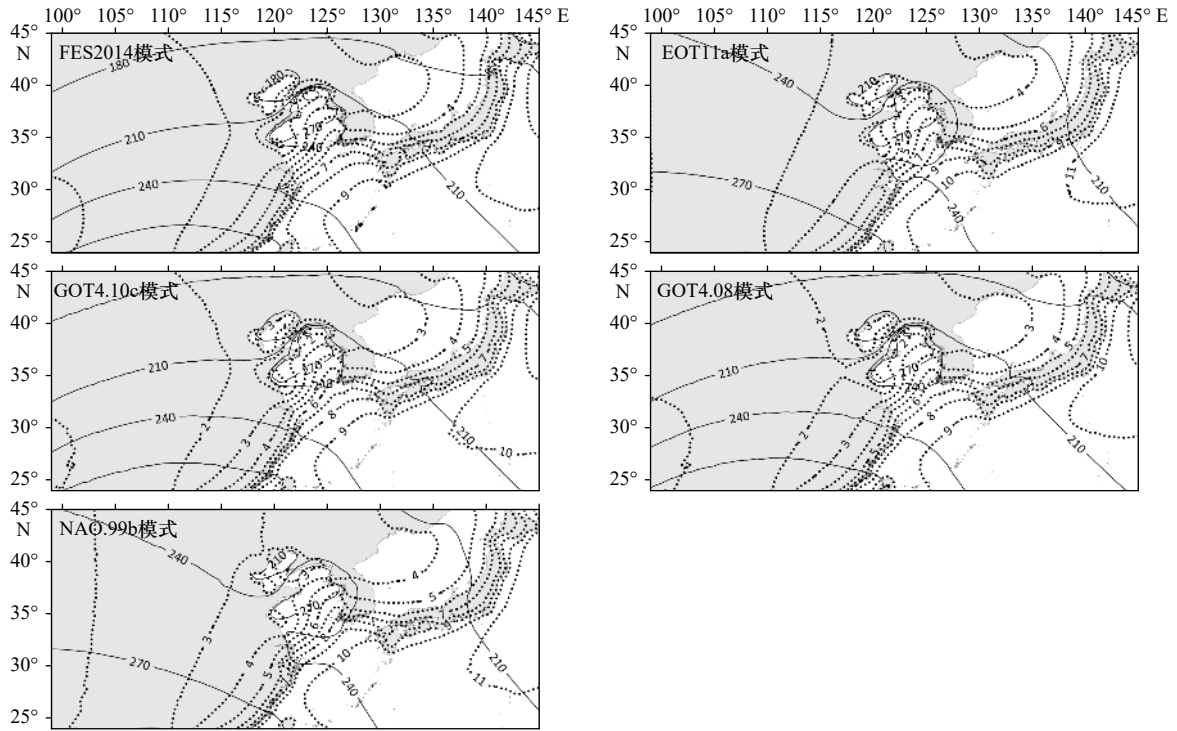


图 7 不同全球垂向位移负荷潮模式下  $O_1$  分潮在渤海、黄海、东海及周边区域的同潮图

Fig. 7 Co-tidal charts of  $O_1$  for different global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

虚线为振幅 (mm), 实线为格林威治迟角 ( $^{\circ}$ )

Dashed lines indicate amplitude (mm), solid lines indicate Greenwich phase-lag ( $^{\circ}$ )

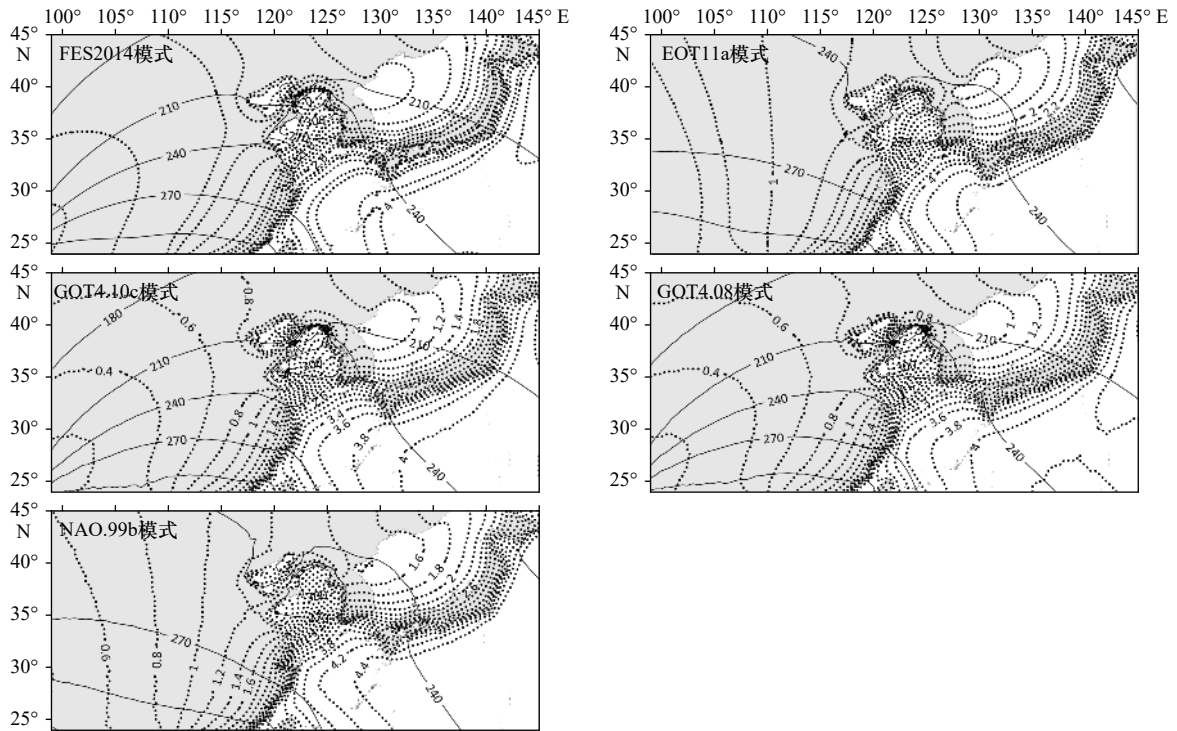


图 8 不同全球垂向位移负荷潮模式下  $P_1$  分潮在渤海、黄海、东海及周边区域的同潮图

Fig. 8 Co-tidal charts of  $P_1$  for different global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

虚线为振幅 (mm), 实线为格林威治迟角 ( $^{\circ}$ )

Dashed lines indicate amplitude (mm), solid lines indicate Greenwich phase-lag ( $^{\circ}$ )

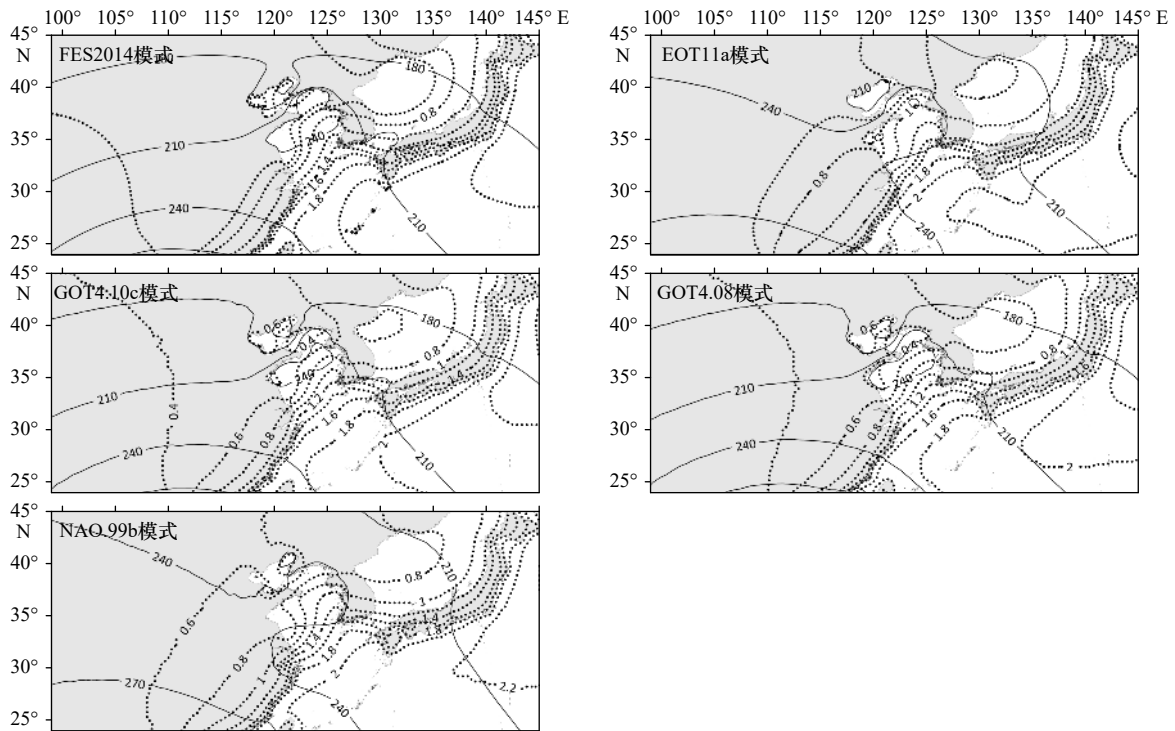


图9 不同全球垂向位移负荷潮模式下  $Q_1$  分潮在渤海、黄海、东海及周边区域的同潮图

Fig. 9 Co-tidal charts of  $Q_1$  for different global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

虚线为振幅(mm), 实线为格林威治迟角( $^{\circ}$ )

Dashed lines indicate amplitude (mm), solid lines indicate Greenwich phase-lag ( $^{\circ}$ )

0.15 mm 和 0.16 mm, 以 FES2014 和 EOT11a 模式结果准确度相对较高。总体来看, 5 个全球垂向位移负荷潮模式中, EOT11a 垂向位移负荷潮模式在渤海、黄海、东海及周边区域 8 个主要半日和全日分潮的垂向位移负荷潮调和常数最为准确。本文最后简单分析了研究区域中  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$  和  $Q_1$  8 个主要分潮的垂向位移负荷潮分布特征。对于半日分潮, 各垂向位移负荷潮模式传播规律基本相似, 振幅较大的区域主要出现在浙江沿岸外海海域、台湾海峡以

东的西太平洋区域和仁川湾海域, 无潮点分布基本类似, 局部区域略有不同。对于全日分潮, 各垂向位移负荷潮模式传播规律差别较大, 尤其是  $K_1$  和  $P_1$  分潮的迟角分布规律在各垂向位移负荷潮模式中表现出显著的差异, 对 FES2014、GOT4.10c 和 GOT4.8 模式  $K_1$  和  $P_1$  垂向位移负荷潮在山东半岛东南方存在 1 个无潮点, 在渤海海峡东北海域也存在 1 个无潮点; 而 EOT11a 和 NAO.99b 模式对应的垂向位移负荷潮同潮时线分布较为稀疏, 在整个研究区域没有出现无潮点。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Seifi F, Deng Xiaoli, 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.
- [3] Fang Guohong, Xu Xiaoqing, Wei Zexun, et al. Vertical displacement loading tides and self-attraction and loading tides in the Bohai, Yellow, and East China Seas[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(1): 63–70.
- [4] 徐晓庆, 魏泽勋, 滕飞, 等. 南海及邻近海峡垂向位移负荷潮和自吸-负荷潮[J]. *海洋学报*, 2022, 44(7): 44–51.  
Xu Xiaoqing, Wei Zexun, Teng Fei, et al. Vertical displacement loading tides and self-attraction and loading tides in the South China Sea and adjacent straits[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(7): 44–51.
- [5] Fu L L, Cazenave A. Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications[R]. San Diego: Academic Press, 2001: 1–463.
- [6] Visser P N A M, Sneeuw N, Reubelt T, et al. Space-borne gravimetric satellite constellations and ocean tides: aliasing effects[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(2): 789–805.

- [7] Iliffe J C, Ziebart M K, Turner J F, et al. Accuracy of vertical datum surfaces in coastal and offshore zones[J]. *Survey Review*, 2013, 45(331): 254–262.
- [8] Keyzers J H, Quadros N D, Collier P A. Vertical datum transformations across the Australian littoral zone[J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 31(1): 119–128.
- [9] Ito T, Okubo M, Sagiya T. High resolution mapping of Earth tide response based on GPS data in Japan[J]. *Journal of Geodynamics*, 2009, 48(3/5): 253–259.
- [10] Khan S A, Tscherning C C. Determination of semi-diurnal ocean tide loading constituents using GPS in Alaska[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(11): 2249–2252.
- [11] King M A, Penna N T, Clarke P J, et al. Validation of ocean tide models around Antarctica using onshore GPS and gravity data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B8): B08401.
- [12] Vergnolle M, Bouin M N, Morel L, et al. GPS estimates of ocean tide loading in NW-France: determination of ocean tide loading constituents and comparison with a recent ocean tide model[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2010, 173(2): 444–458.
- [13] Yeh T K, Hwang C, Huang Jiufu, et al. Vertical displacement due to ocean tidal loading around Taiwan based on GPS observations[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2011, 22(4): 373–382.
- [14] Yuan Linguo, Chao B F, Ding Xiaoli, et al. The tidal displacement field at Earth's surface determined using global GPS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(5): 2618–2632.
- [15] Lyard F H, Allain D J, Cancet M, et al. FES2014 global ocean Tide Atlas: design and performance[J]. *Ocean Science*, 2020, 17(3): 615–649.
- [16] Savcenko R, Bosch W. EOT11A-empirical ocean tide model from multi-mission satellite altimetry[R]. Munich, Germany: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, 2012: 49.
- [17] Ray R D. Precise comparisons of bottom-pressure and Altimetric Ocean tides[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4570–4584.
- [18] Matsumoto K, Takanezawa T, Oe 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.

## Accuracy assessment of global vertical displacement loading tide models in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas

Xu Xiaoqing<sup>1,2,3,4,5</sup>, Wei Zexun<sup>2,3,4,5</sup>, Teng Fei<sup>2,3,4,5</sup>, Sun Junchuan<sup>2,3,4,5</sup>,  
Gao Xiumin<sup>2,3,4,5</sup>, Fang Guohong<sup>2,3,4,5</sup>

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 4. Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Qingdao 266061, China; 5. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

**Abstract:** In this study, the harmonic constants of the 5 global vertical displacement loading tide models FES2014, EOT11a, GOT4.10c, GOT4.8 and NAO.99b are validated evaluated to the observed data of 21 GPS stations in Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas. The results show that the accuracy of the  $M_2$  constituents of FES2014 and EOT11a models are relatively high,  $S_2$  constituents of NAO.99b and EOT11a models are relatively high,  $K_1$  constituents of EOT11a and FES2014 models are relatively high,  $O_1$  constituents of EOT11a and GOT4.8 models are relatively high,  $N_2$  constituents of EOT11a and FES2014 models are relatively high,  $K_2$  constituents of NAO.99b and FES2014 models are relatively high,  $P_1$  constituents of EOT11a and GOT4.8 models are relatively high,  $Q_1$  constituents of FES2014 and EOT11a models are relatively high. The distribution features of the eight vertical displacement loading tides in Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas.

**Key words:** accuracy assessment; vertical displacement loading tide model; Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and surrounding areas; GPS stations