

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): 17–24, doi:10.12284/hyxb2022112

Xu Xiaqing, 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): 17–24, doi:10.12284/hyxb2022112

# 南海及邻近海峡垂向位移负荷潮和自吸-负荷潮

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>, 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:** 本文采用 Green 函数方法, 基于高分辨率南海海潮模型、DTU10 全球海洋潮汐模型以及 Gutenberg-Bullen A 地球模型计算了南海及邻近海峡的负荷潮。结果表明,  $M_2$  垂向位移负荷潮振幅最大值出现在台湾海峡, 其值超过 18 mm; 另一个极大值区出现在加里曼丹岛西北外海, 其值超过 14 mm。 $K_1$  和  $O_1$  垂向位移负荷潮振幅在南海南部最大, 分别超过 18 mm 和 14 mm; 另一个极大值区出现在北部湾, 振幅超过 8 mm。在研究海区内, 全日潮的垂向位移负荷潮不出现无潮点。自吸-负荷潮分布特征与垂向位移负荷潮相近, 其振幅大约是垂向位移负荷潮的 1.2~1.7 倍, 其位相与垂向位移负荷潮基本上相反。 $M_2$  自吸-负荷潮最大振幅值也出现台湾海峡和加里曼丹岛西北外海, 其值分别超过 24 mm 和 18 mm。

**关键词:** 南海及邻近海峡; 垂向位移负荷潮; 自吸-负荷潮

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)07-0017-08

## 1 引言

南海是位于我国大陆南端的陆缘海, 南海北部通过台湾海峡与东海相连, 东北部通过吕宋海峡与太平洋相通, 南部通过卡里马塔海峡与爪哇海相连, 东南部通过民都洛海峡和巴拉巴克海峡与苏禄海相连, 西南部通过马六甲海峡与印度洋相通, 是沟通太平洋和印度洋的重要通道之一(图 1)。南海及其周边海域水深变化较大, 岸线曲折, 岛礁众多, 尤其是南海海域内包含了东沙群岛和台湾浅滩, 地形变化剧烈, 这些因素使得南海的潮汐潮流运动变得十分复杂。在海洋潮汐负荷的作用下, 地球会发生相关的形变, 包括位移、倾斜和应变; 同时会产生与海潮有关的引力场。海洋潮汐的负荷效应在大地测量、地球物理学及天文学中均具有重要作用, 因而受到地球物理学家的关注。海洋学家则主要关注其中的垂向位移(亦称

径向位移)和自吸-负荷效应<sup>[1-7]</sup>。前者关系到由卫星高度计观测提取海洋潮汐信息的准确性<sup>[8]</sup>; 后者关系到海洋潮汐动力学和数值模拟的准确性。通过使用近 30 年的高精度卫星高度计观测, 大洋潮汐模型已十分准确<sup>[9]</sup>, 故大洋中负荷潮计算结果的准确度已较高。但在浅海区, 由于海潮观测不够准确, 所得的负荷潮也有较大误差<sup>[10]</sup>。我国地球物理学家对海洋潮汐的负荷效应做过大量研究和计算, 但他们所关心的是陆地上的分布, 而在海洋中的负荷效应研究较少<sup>[10-18]</sup>。近些年, Fang 等<sup>[2]</sup>利用高精度海潮模型优化了渤海、黄海、东海区域负荷潮的计算结果, 发现  $M_2$  和  $K_1$  垂向位移负荷潮的最大振幅分别超过 28 mm 和 13 mm, 但是基于计算范围的限制, Fang 等<sup>[2]</sup>并未给出南海及邻近海峡负荷潮的分布。最近, 我们已获得高精度的南海及邻近海峡海洋潮汐分布, 可进一步完善南海及邻近海峡海域负荷潮模型。

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2021-12-23。

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1408404); 国家自然科学基金(42076024, 42106032, 41821004)。

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

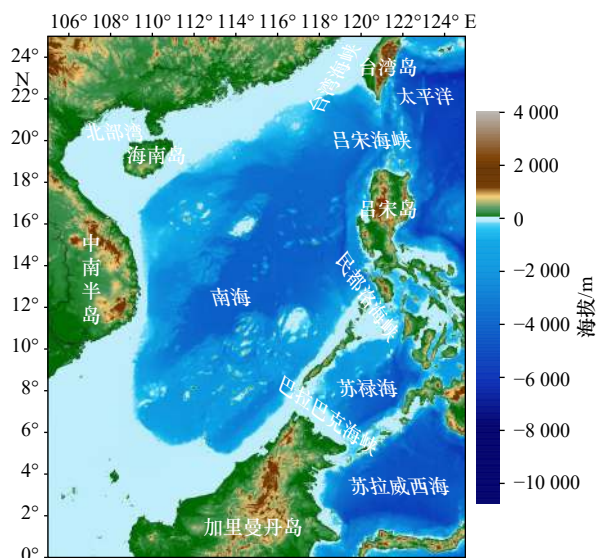


图1 南海及邻近海峡地形分布

Fig. 1 Topographical distribution of the South China Sea and adjacent straits

## 2 方法和资料

由于卫星高度计可以获得全球准确的海面高度资料,其已被广泛用于潮汐研究。但卫星高度计只能测量海面到地球中心的距离,故测量得到海面变化的潮汐成份称为地心潮。地心潮潮高 $\zeta_g$ 由通常的海洋潮汐潮高 $\zeta$ 和固体地球潮汐潮高所组成;后者又由天体引潮力直接引起的体潮潮高 $\zeta_b$ 和海潮负荷引起的垂向位移负荷潮高 $\zeta_i$ 两部分所组成(图2),即

$$\zeta_g = \zeta + \zeta_b + \zeta_i, \quad (1)$$

这里各种潮高均以垂直向上为正,垂向位移负荷潮也称径向位移负荷潮。为了从卫星高度计资料得出海洋潮汐潮高 $\zeta$ ,必须知道体潮潮高 $\zeta_b$ 和垂向位移负荷潮高 $\zeta_i$ 。 $\zeta_b$ 可直接由引潮力得出,公式为

$$\zeta_b = h_2 \Phi / g, \quad (2)$$

式中, $\Phi$ 为引潮势<sup>[19-21]</sup>;  $h_2$ 为 Love 数<sup>[22]</sup>;  $g$ 为重力加速度。而 $\zeta_i$ 则是本文的主要研究对象之一。

另一方面,海洋潮汐还会产生自吸作用,与负荷作用一起能改变引力场,从而改变引潮力。因此,在进行潮汐动力学研究时,特别在潮汐数值模拟中还要考虑这一效应,即自吸-负荷(Self-Attraction and Loading, SAL)效应。与引潮势类似,自吸和负荷所引起的附加位势一般也用对应的平衡潮高表示,称作自吸-负荷平衡潮,或简称自吸-负荷潮。这样,修正后的水平引潮力 $F$ 可表达为

$$F = -g \nabla (\zeta - \zeta_{EQ} - \zeta_{SAL}), \quad (3)$$

式中, $\zeta_{SAL}$ 是自吸-负荷潮高,为本文的另一个主要研究对象; $\zeta_{EQ}$ 为考虑了地球体潮后的平衡潮高,其

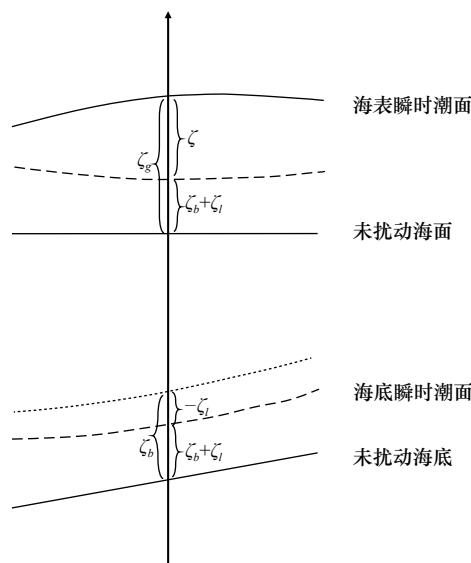


图2 各种潮面的关系

Fig. 2 Relationship among various tidal surfaces

公式为

$$\zeta_{EQ} = (1 + k_2 - h_2) \Phi / g, \quad (4)$$

式中, $k_2$ 为 Love 数<sup>[22]</sup>。

与绝大多数研究者一样,我们这里也采用了 Farrell<sup>[23]</sup>、Francis 和 Mazzego<sup>[24]</sup>的 Green 函数方法计算垂向位移负荷潮高 $\zeta_i$ 和自吸-负荷潮高 $\zeta_{SAL}$ 。根据该方法,任一地点的 $\zeta_i$ 和 $\zeta_{SAL}$ 可用下式计算得到:

$$\zeta_i(\phi, \lambda, t) = \rho_w a^2 \iint_S \zeta(\phi', \lambda', t) G_i(\theta) \cos \phi' d\phi' d\lambda', \quad (5)$$

$$\zeta_{SAL}(\phi, \lambda, t) = \rho_w a^2 \iint_S \zeta(\phi', \lambda', t) G_{SAL}(\theta) \cos \phi' d\phi' d\lambda', \quad (6)$$

式中, $(\phi, \lambda)$ 为计算点的纬度和经度; $(\phi', \lambda')$ 为负荷点的纬度和经度; $t$ 为时间; $\rho_w$ 为海水密度; $a$ 为地球半径; $S$ 为全球海洋面积; $G_i$ 和 $G_{SAL}$ 为对应的 Green 函数; $\theta$ 为 $(\phi, \lambda)$ 和 $(\phi', \lambda')$ 之间的角距离(大圆弧角),由下式给出:

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \phi' + \cos \phi \cos \phi' \cos(\lambda - \lambda'). \quad (7)$$

式(5)和式(6)中 Green 函数则决定于负荷 Love 数 $h'_n$ 和 $k'_n$ :

$$G_i(\theta) = \frac{a}{M_c} \sum_{n=0}^{\infty} h'_n P_n(\cos \theta), \quad (8)$$

$$G_{SAL}(\theta) = \frac{a}{M_c} \sum_{n=0}^{\infty} (1 + k'_n - h'_n) P_n(\cos \theta), \quad (9)$$

式中, $M_c$ 为地球质量; $P_n(\cos \theta)$ 为第 $n$ 阶 Legendre 多项式。负荷 Love 数 $h'_n$ 和组合负荷 Love 数 $(1 + k'_n - h'_n)$ 依赖于所采用的地球弹性模型。

Agnew<sup>[25-26]</sup>研发了一个基于 Green 函数的负荷潮计算方法和程序(即 Agnew 程序),该方法可以把全球海潮模型和更高分辨率的区域海潮模型结合起来计算,以便利用更高精度的近岸区域海潮模式改善计

算结果。Agnew 程序所采用的地球模型是 Gutenberg-Bullen A 模型。不少研究者采用过不同的地球模型来计算负荷潮,如许厚泽和毛伟建<sup>[11]</sup>采用 Gilbert 和 Dziewonski 的 G-D1066A 模型;Francis 和 Mazzega<sup>[24]</sup>采用 Dziewonski 和 Anderson 的 PREM 模型。Francis 和 Mazzega<sup>[24]</sup>、Ray<sup>[27]</sup>、郑祎等<sup>[12]</sup>和 Agnew<sup>[26]</sup>的研究工作都表明,垂向位移和自吸-负荷潮潮高的计算结果与所选择的地球模型关系不大。例如 Francis 和 Mazzega<sup>[24]</sup>比较了采用 Gutenberg-Bullen A 模型和 PREM 模型的重力负荷潮潮高计算结果,表明两者  $M_2$  分潮振幅差别不超过 1%,位相差别不超过 0.6°。郑祎等<sup>[12]</sup>比较

了采用 Gutenberg-Bullen A 模型和 G-D1066A 模型的位移负荷潮潮高计算结果,表明  $M_2$  垂向位移负荷潮高的振幅平均偏差为 0.05 mm,位相平均偏差为 0.3°。因此,本研究仍采用 Agnew 的程序。亦即,采用的地球模型是 Gutenberg-Bullen A 模型。

本文所采用的海潮数据由两部分构成。在南海海域,我们以 Fang 等<sup>[28]</sup>的研究为基础,把卫星高度计资料扩展至近年,同时用流体动力学数值同化方法计算得出  $5' \times 5'$  分辨率的主要分潮  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  的区域海潮模型。图 3 给出区域模型的范围和 4 个主要分潮的分布。在这个海区之外的全球海洋,我们采用

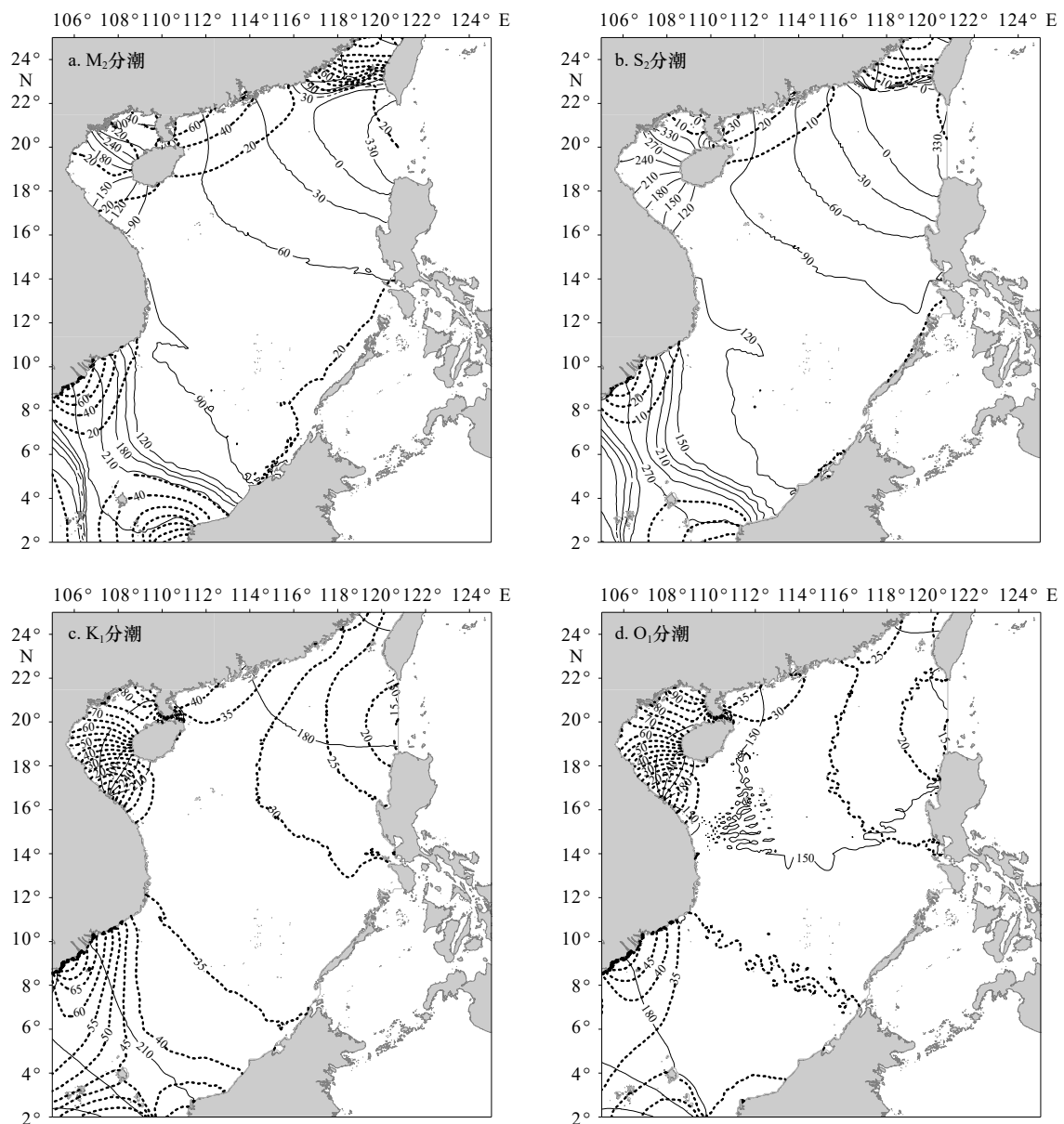


图 3 南海及邻近海峡分潮同潮图

Fig. 3 Cotidal charts for the South China Sea and adjacent straits

虚线为振幅(单位: cm);实线为格林威治迟角(单位: °)

Dashed lines indicate amplitude (unit: cm); solid lines indicate Greenwich phase-lag (unit: °)

了  $7.5' \times 7.5'$  分辨率的 DTU10 全球海潮模型<sup>[29]</sup>。

### 3 结果及讨论

计算所得垂向位移负荷潮和自吸-负荷潮的同潮图示于图 4 至图 7, 图中时间系统采用世界时, 即迟角采用格林威治迟角。由图 4 可见, 研究海区  $M_2$  垂向位移负荷潮波经由吕宋海峡传入南海, 潮波的主要部分向南海内部传播, 少部分向北转入台湾海峡。这主要是由于海潮本身具有这种特征(图 3a)。 $M_2$  垂向位移负荷潮振幅在吕宋海峡以东的西太平洋区域和南海的东南方向的苏拉威西海域具有较大的量值(超过 22 mm); 而在南海内部则以台湾海峡西侧和加里曼丹岛西北外海最大(超过 18 mm)。由于陆地上负荷为 0, 陆上和沿岸的负荷潮较小, 而海潮较大的地方,

负荷潮也可能较大, 如台湾海峡和加里曼丹岛西北外海较大的负荷潮就是属于此种情形。另外, 由于负荷潮是对海潮负荷作用进行累积的结果, 如海潮波长较短(即同潮时线密集), 则不同地点的负荷作用力会相互抵消, 引起的负荷潮也较小; 反之亦然。因此, 由于南海北部海域的潮波较长(即海潮同潮时线较稀疏), 负荷潮的振幅总的来看也较大。吕宋海峡以东的西太平洋和苏拉威西海域的负荷潮就是对应着较稀疏的海潮同潮时线。由图 4 进一步可以看到, 在北部湾  $M_2$  垂向位移负荷潮则出现两个退化的无潮点, 湾内垂向位移负荷潮振幅较小。大部分海区, 特别是海潮和垂向位移负荷潮振幅都较大的区域, 它们基本具有反位相的关系。亦即, 海潮达高潮(低潮)时, 海底相应地降至最低(升至最高)。

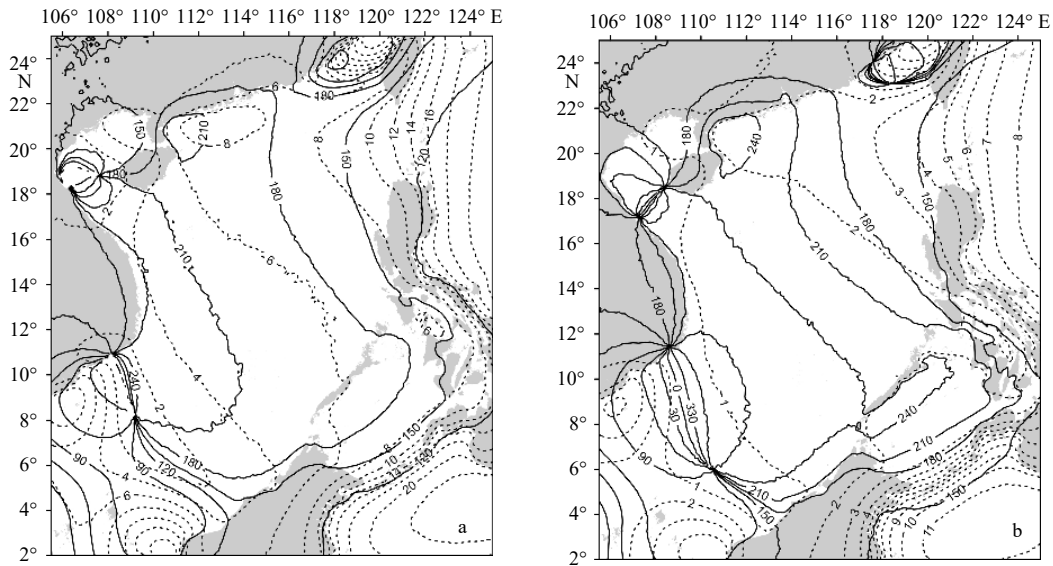


图 4  $M_2$ (a) 和  $S_2$ (b) 垂向位移负荷潮

Fig. 4  $M_2$  (a) and  $S_2$  (b) vertical displacement loading tides

虚线为振幅(单位: mm); 实线为格林威治迟角(单位:  $^{\circ}$ )

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

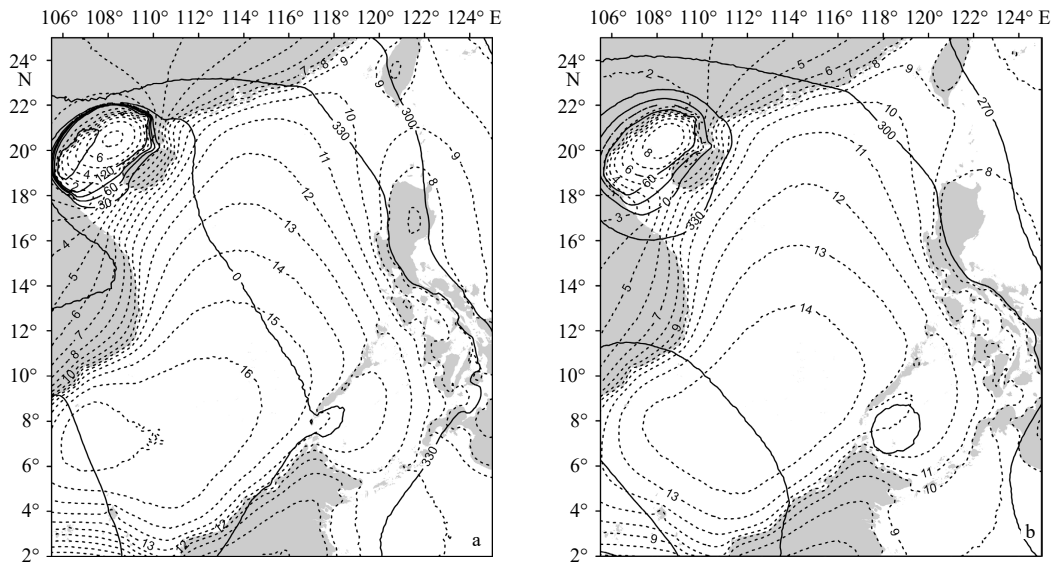
$S_2$  垂向位移负荷潮的特征与  $M_2$  的相类似(图 4)。由于  $S_2$  海潮振幅较  $M_2$  的小,  $S_2$  垂向位移负荷潮振幅也较小。与  $M_2$  分潮相比,  $S_2$  垂向位移负荷潮在台湾海峡存在两个无潮点。与海潮类似,  $S_2$  垂向位移负荷潮的迟角比  $M_2$  的大  $30^{\circ}$  左右。

$K_1$  垂向位移负荷潮的最大振幅值出现在南海南部, 其值超过 18 mm。另一个极大值区出现在北部湾湾内, 其值超过 8 mm(图 5a)。与半日潮相同,  $K_1$  垂向位移负荷潮同样表现出由吕宋海峡传入并由东北向西南方向传播的特征, 但在台湾海峡处全日潮没有出现北向的传播现象。 $K_1$  垂向位移负荷潮的同潮时

线分布稀疏, 且没有出现无潮点。

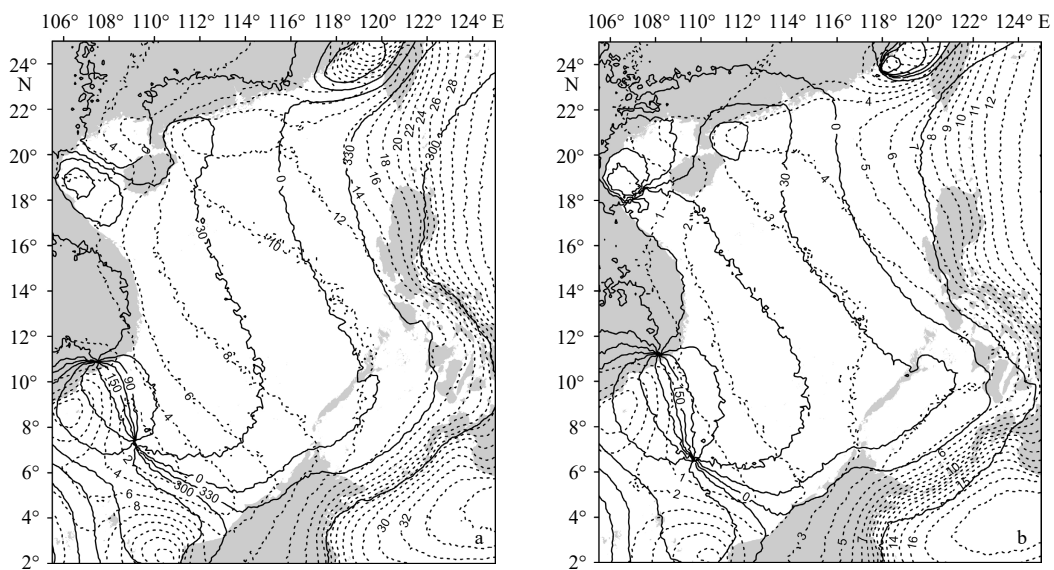
$O_1$  垂向位移负荷潮的分布格局与  $K_1$  的十分相似(图 5b)。其振幅最大值也出现在南海南部, 超过 14 mm。另一个极大值区出现在北部湾湾内, 其值超过 8 mm。同潮时线也没有出现无潮点, 迟角约比  $K_1$  的小  $20^{\circ}$  左右。

对图 6 和图 7 与图 4 和图 5 分别进行比较, 可以发现自吸-负荷潮和垂向位移负荷潮的分布格局十分相似, 振幅大体上成比例, 迟角则基本相反。造成这一结果的原因是自吸-负荷潮的组合 Love 数  $(1+k_n-h_n)$  与垂向位移负荷潮的 Love 数  $h_n'$  符号相反, 前者

图5  $K_1$ (a)和 $O_1$ (b)垂向位移负荷潮Fig. 5  $K_1$  (a) and  $O_1$  (b) vertical displacement loading tides

虚线为振幅(单位: mm); 实线为格林威治迟角(单位: (°))

Dashed lines indicate amplitude (unit: mm); solid lines indicate Greenwich phase-lag (unit: (°))

图6  $M_2$ (a)和 $S_2$ (b)自吸-负荷潮Fig. 6  $M_2$  (a) and  $S_2$  (b) self-attraction and loading tides

虚线为振幅(单位: mm); 实线为格林威治迟角(单位: (°))

Dashed lines indicate amplitude (unit: mm); solid lines indicate Greenwich phase-lag (unit: (°))

大小与后者大小之比变化范围不大。例如,当 $n=2$ 时,此比值约为1.7, $n=10\ 000$ 时,比值约为1.2。因此,实际计算所得的自吸-负荷潮与垂向位移负荷潮的振幅比应当大都在1.2~1.7之间,且波长越长,比值越大。由图6可见, $M_2$ 自吸-负荷潮在吕宋海峡外海、苏拉威西海、台湾海峡和加里曼丹岛西北外海的振幅最大值可分别超过36 mm、34 mm、24 mm和18 mm。由图7可见, $K_1$ 自吸-负荷潮在南海南部的振幅最大

值可超过28 mm。

## 4 结语

本文采用高分辨率南海区域海潮模型、DTU10全球海洋潮汐模型、Gutenberg-Bullen A地球模型计算了南海及邻近海峡垂向位移负荷潮和自吸-负荷潮。对研究海域大部分海区,特别是海潮和垂向位移负荷潮振幅都较大的区域,海潮和垂向位移负荷潮两者基本

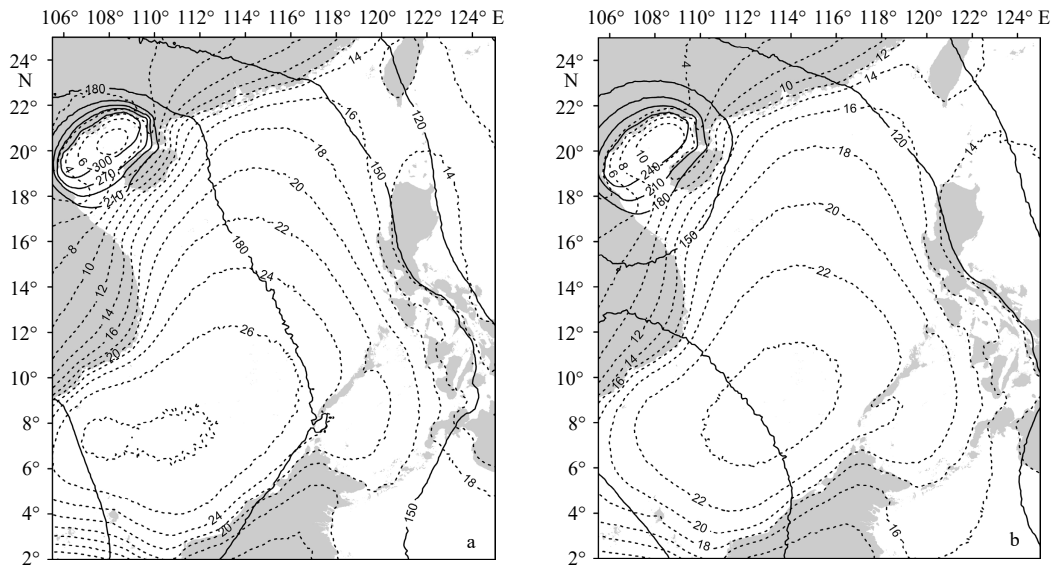


图 7  $K_1$ (a)和  $O_1$ (b)自吸-负荷潮

Fig. 7  $K_1$  (a) and  $O_1$  (b) self-attraction and loading tides

虚线为振幅(单位: mm);实线为格林威治迟角(单位:  $^{\circ}$ )

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

具有反位相的关系。当海潮达高潮时,海底相应地降至最低;海潮达低潮时,海底相应地升至最高。从海潮负荷的振幅数值来看, $M_2$ 和 $K_1$ 垂向位移负荷潮在南海及邻近海峡的最大振幅都超过 18 mm,这对从卫星高度计资料提取准确潮汐信号十分重要,对完整地解南海及邻近海峡海域潮汐的构成也具有重要意义,同时对大地测量观测资料实施有效地海潮负荷改正具有重要参考意义。南海及邻近海峡自吸-负荷潮和垂向位移负荷潮的振幅比大都在 1.2~1.7 之间,

且波长越长,比值越大。 $M_2$ 和 $K_1$ 自吸-负荷潮在南海及邻近海峡的最大振幅分别超过 24 mm 和 28 mm,虽然自吸-负荷潮的振幅显著小于引力平衡潮的振幅,但由于自吸-负荷潮波长短,它们所引起的水平梯度力则可能与引潮力的水平分量相当,甚至大于引潮力的水平分量,因此,在对南海及邻近海峡潮汐进行模拟时,必须考虑自吸-负荷潮的影响,研究南海及邻近海峡自吸-负荷潮的分布对于进一步认识南海及邻近海峡海区潮汐动力学具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Stepanov V N, Hughes C W. Parameterization of ocean self-attraction and loading in numerical models of the ocean circulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C3): C03037.
- [2] 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.
- [3] Teng Fei, Fang Guohong, Xu Xiaoqing. Effects of internal tidal dissipation and self-attraction and loading on semidiurnal tides in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea: a numerical study[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35(5): 987–1001.
- [4] Apecechea M, Verlaan M, Zijl F, et al. Effects of self-attraction and loading at a regional scale: a test case for the Northwest European Shelf[J]. *Ocean Dynamics*, 2017, 67(6): 729–749.
- [5] 姜锦东, 方国洪, 滕飞, 等. 内潮耗散与自吸-负荷潮对南海潮汐影响的数值研究[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(3): 457–470.
- [6] Schindelegger M, Green J A M, Wilmes S B, et al. Can we model the effect of observed sea level rise on tides?[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(7): 4593–4609.
- [7] Adhikari S, Ivins E R, Frederikse T, et al. Sea-level fingerprints emergent from GRACE mission data[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(2): 629–646.
- [8] 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.
- [9] Wang Yihang, Fang Guohong, Wei Zexun, et al. Accuracy assessment of global ocean tide models base on satellite altimetry[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(4): 353–359.
- [9] Stammer D, Ray R D, Andersen O B, et al. Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models[J]. *Reviews of Geophysics*,

- 2014, 52(3): 243–282.
- [10] Zhou Xuhua, Wu Bin, Zhu Yaozhong, et al. The ocean tidal displacement corrections for earth crust movement network of China[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2002, 26(1): 81–87.
- [11] 许厚泽, 毛伟建. 中国大陆的海洋负荷潮汐改正模型[J]. 中国科学B辑, 1988(9): 984–994.  
Xu Houze, Mao Weijian. The correction model of ocean load tides in Chinese continent[J]. *Science in China (B)*, 1988(9): 984–994.
- [12] 郑祎, 伍吉仓, 王解先, 等. 海潮模型和格林函数对海潮位移改正的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(4): 71–76.  
Zheng Yi, Wu Jicang, Wang Jiexian, et al. Effect of ocean tide model and Green function on ocean tidal displacement correction[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, 22(4): 71–76.
- [13] 周江存, 许厚泽, 孙和平. 中国台湾地区海洋负荷潮汐对重力、位移、倾斜和应变固体潮观测的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1): 81–86.  
Zhou Jiangcun, Xu Houze, Sun Heping. Influence of ocean load tides on gravity, displacement, tilt and strain in Taiwan[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, 22(1): 81–86.
- [14] 袁林果, 丁晓利, 孙和平, 等. 利用GPS技术精密测定香港海潮负荷位移[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 53(7): 993–1007.  
Yuan Linguo, Ding Xiaoli, Sun Heping, et al. Determination of ocean tide loading displacements in Hong Kong using GPS technique[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 53(7): 993–1007.
- [15] 杜文成, 袁林果, 张宁宁, 等. 青岛台站重力固体潮和海潮负荷特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(9): 913–916, 942.  
Du Wencheng, Yuan Linguo, Zhang Ningning, et al. Study of Earth's gravity tide and oceanic loading characteristics at Qingdao station[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(9): 913–916, 942.
- [16] 赵红. 海潮负荷效应及利用GPS技术建立海潮负荷位移模型研究[J]. 测绘学报, 2018, 47(1): 133.  
Zhao Hong. Research on ocean tide loading and ocean tide loading displacement model estimated by GPS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(1): 133.
- [17] 王继刚, 周江存. 沿海和岛屿重力海潮负荷改正模型——以马祖岛为例[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(8): 794–798.  
Wang Jigang, Zhou Jiangcun. Correction model of ocean tide loading on gravity over coastal area and islands: a case study of Matzu Island[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(8): 794–798.
- [18] Huang Pingping, Sulzbach R L, Tanaka Y, et al. Anelasticity and Lateral Heterogeneities in Earth's upper mantle: impact on surface displacements, self-attraction and loading, and ocean tide dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2021, 126(9): e2021JB022332.
- [19] 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.  
Chen Zongyong. *Tidology*[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [20] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.  
Fang Guohong, Zheng Wenzhen, Chen Zongyong, et al. *Analysis and Prediction of Tides and Tidal Currents*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.
- [21] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.  
Huang Zuke, Huang Lei. *Tidal Theory and Calculation*[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.
- [22] Wahr J M. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth[J]. *Geophysical Journal International*, 1981, 64(3): 677–703.
- [23] Farrell W E. Deformation of the Earth by surface loads[J]. *Reviews of Geophysics*, 1972, 10(3): 761–797.
- [24] Francis O, Mazzega P. Global charts of ocean tide loading effects[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(C7): 11411–11424.
- [25] Agnew D C. NLOADF: a program for computing ocean-tide loading[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B3): 5109–5110.
- [26] Agnew D C. SPOTL: some programs for ocean-tide loading. User's Manual Version 3.3. 0[R]. US: Scripps Institution of Oceanography, 2012.
- [27] Ray R D. Ocean self-attraction and loading in numerical tidal models[J]. *Marine Geodesy*, 1998, 21(3): 181–192.
- [28] Fang Guohong, Wang Yonggang, Wei Zexun, et al. Empirical cotidal charts of the Bohai, Yellow, and East China Seas from 10 years of TOPEX/Poseidon altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(11): C11006.
- [29] Cheng Yongcun, Andersen O B. Multimission empirical ocean tide modeling for shallow waters and polar seas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C11): C11001.

## Vertical displacement loading tides and self-attraction and loading tides in the South China Sea and adjacent straits

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>, 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:** The loading tides in the South China Sea and adjacent straits are calculated by means of the Green's function method based on a high-resolution regional ocean tide model for the South China Sea, the DTU10 global ocean tide model, and the Gutenberg-Bullen A Earth model. The results show that the maximum amplitude of  $M_2$  vertical displacement loading (VDL) tide exceeding 18 mm appears in the Taiwan Strait; the second maximum exceeding 14 mm appears off the north-west coast of Kalimantan. The maximum amplitudes of the  $K_1$  and  $O_1$  VDL tides, exceeding 18 mm and 14 mm respectively, appear near the southern South China Sea; the second maximum exceeding 8 mm, appears in the Beibu Gulf. The distribution patterns of self-attraction and loading (SAL) tides are very similar to those of VDL tides in that the SAL tides have amplitudes about 1.2 times to 1.7 times the corresponding VDL tides and have phases basically opposite to corresponding VDL tides. The maximum amplitude of  $M_2$  SAL tide also appears in the Taiwan Strait and off the north-west coast of Kalimantan, with a magnitude exceeding 24 mm and 18 mm respectively.

**Key words:** South China Sea and adjacent straits; vertical displacement loading tides; self-attraction and loading tides