

潘海东, 王雨哲, 吕咸青. 南海潮汐主要分潮振幅变化趋势研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(6): 26–34, doi:10.12284/hyxb2021096

Pan Haidong, Wang Yuzhe, Lü Xianqing. The study of the trends of tidal amplitudes of major constituents in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(6): 26–34, doi:10.12284/hyxb2021096

南海潮汐主要分潮振幅变化趋势研究

潘海东¹, 王雨哲¹, 吕咸青^{1*}

(1. 中国海洋大学 物理海洋学教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 潮汐变化研究对于海洋工程、沿海地区洪涝灾害预防、海上交通等各个方面都有着重要的意义。由于验潮站都集中在近海, 所以之前潮汐变化研究主要集中在近海海域。相比之下, 深海地区由于长期高频水位观测的缺乏导致相关的潮汐变化研究非常少。基于近海验潮站数据和深海卫星高度计数据, 本文首次用非平稳潮汐调和工具包 S_TIDE 提取了南海 4 大主要分潮 (M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1) 振幅的长期趋势。研究发现在南海大部分地区, 4 大主要分潮的振幅都是比较稳定的, 不存在显著的上升趋势或下降趋势。在南海少部分地区 4 大主要分潮的振幅存在显著的趋势, 最大的上升趋势可达 2.91 mm/a, 最大的下降趋势可达 3.50 mm/a。该海域潮汐的长期趋势可能与内潮海表面信号的变化有关。卫星观测到的潮汐既包含正压潮, 也包含内潮海表面信号。南海作为全球内潮活动最活跃的海域之一, 其内潮海表面信号是非常显著的。而内潮对海洋层化的变化是非常敏感的, 海洋层化的变化会影响内潮的生成、传播和耗散以及内潮在海表的显示, 最终引起该海域潮汐振幅的长期趋势。

关键词: 南海; 潮汐长期趋势; 卫星高度计; S_TIDE; 内潮

中图分类号: P722.7

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)06-0026-09

1 引言

全球的海洋潮汐都处在不断的变化中^[1-2]。过去几十年来大量的研究都证明了这一点。早在 1924 年, Doodson^[3]就指出了加拿大芬地湾圣约翰验潮站的 M_2 分潮振幅存在显著的正趋势。但是 Doodson 使用的水位数据太短, 只有 22 a。Godin^[4-5]使用了更长的数据重新研究了圣约翰验潮站的潮汐演化, 他发现该地的 M_2 分潮振幅在以 12.6 cm/(100 a) 的速度迅速增加, 这是已知最大的潮汐长期趋势之一。Cartwright^[6]计算发现, 法国布雷斯特的 M_2 分潮振幅自 18 世纪早期以来每世纪增加大约 1%。DiLorenzo 等^[7]发现, 自 20 世纪早期以来, 特拉华河的特伦硕地区的潮差增加了近 1 倍, 从 1.3 m 增加到了 2.45 m。Flick 等^[8]分

析了全美国的验潮站数据, 指出全美绝大部分海域的潮差都存在显著的长期趋势。Ray^[9]发现, 美国缅因湾 M_2 分潮振幅在 20 世纪大部分时间里都在快速增加, 但是在 20 世纪 80 年代早期, M_2 分潮振幅开始突降, 原因未知。Colosi 和 Munk^[10]认为, 夏威夷火奴鲁鲁验潮站 M_2 分潮振幅的长期趋势与当地内潮的变化有关。Jay^[11]指出, 东太平洋绝大部分海域 M_2 和 K_1 分潮振幅都在不断变化, 其中潮汐变化最强的地方一般在河口地区。Ray^[12]认为, 北美东海岸 S_2 分潮振幅的减弱可能与太阳辐射的变化有关。Müller^[13]发现, 北大西洋 M_2 和 S_2 分潮振幅和迟角自 1980 年早期起有异常增大的趋势, 并推测可能与全球变暖有关。由于深水航道的建设, 德国维瑟河口的潮差从 1885 年的约 0.25 m 暴增至 1985 年的 4.25 m^[14]。Feng 等^[15]指

收稿日期: 2020-06-20; 修订日期: 2020-08-26。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1408400); 国家自然科学基金面上项目(42076011)。

作者简介: 潘海东(1995—), 男, 安徽省芜湖市人, 博士研究生, 主要从事潮汐变化研究。E-mail: panhaidong_phd@qq.com

* 通信作者: 吕咸青, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事浅海动力学、数据同化研究。E-mail: xqinglv@ouc.edu.cn

出,黄海的 M_2 分潮振幅以每年 4~7 mm 的速度增加。Rodriguez-Padilla 和 Ortiz^[16] 通过数值模拟指出,美国旧金山港口 M_2 分潮振幅的长期趋势主要与地形变化(水深和岸线)有关,其次是河流径流的变化以及海平面上升。Devlin 等^[17-18] 分析了太平洋和北大西洋数百个验潮站水位数据,指出在绝大部分海域,主要分潮振幅的变化和平均海平面变化存在相关性。Ralston 等^[19] 指出,由于人类活动,哈得孙河口上游河段的潮差在过去 150 年里增加了超过 1 倍,从 0.67 m 增加到了 1.57 m。

由于验潮站都集中在近海,所以之前潮汐变化研究主要集中在近海海域。相比之下,长期高频水位观测的缺乏导致深海地区相关的潮汐变化研究非常少。自从 1992 年 TOPEX/Poseidon (T/P) 发射后,T/P 卫星高度计数据被广泛用于潮汐动力学的研究。通过对卫星观测数据做调和得到的分潮调和常数被同化到了潮汐数值模型里,显著提高了模型的精度^[20]。但是由于卫星高度计资料数据要比验潮站数据长度短太多,所以目前还没有人使用卫星高度计资料来研究深海潮汐的长期趋势。

如图 1a 所示,南海由中央深海海盆和在北方和西南方的浅陆架海组成^[21]。作为西北太平洋最大的半封闭海域,南海在太平洋和印度洋水体交换中发挥了重要作用^[22]。前人已经用观测数据和数值模型详细探讨了南海潮汐的主要特征、潮波运动特点和潮波能量平衡^[23-28]。然而,由于观测数据的缺乏,很少有研究探讨南海(尤其是中央深海海盆)潮汐的长期变化。本文首次使用非平稳潮汐调和工具包 S_TIDE^[29-31] 分析长达 25 a 的南海卫星高度计数据,提取了南海中央深海海盆主要分潮振幅的线性趋势,并

结合南海沿岸的 14 个长期验潮站数据研究了整个南海的主要分潮变化趋势。

2 研究数据

25 a (1992 年 10 月至 2017 年 9 月)的卫星高度计数据从雷达高度计数据系统网站 (RADS, <https://rads.tudelft.nl>) 下载,其中包括 T/P 卫星高度计数据 (1992 年 10 月至 2002 年 8 月)、Jason-1 卫星高度计数据 (2002 年 1 月至 2009 年 1 月)、Jason-2 卫星高度计数据 (2008 年 7 月至 2016 年 2 月) 和 Jason-3 卫星高度计数据 (2016 年 2 月至 2017 年 9 月)。这些卫星都有相同的轨道,采样周期都是 9.915 6 d。图 1b 展示了 T/P、Jason-1、Jason-2 和 Jason-3 卫星高度计在南海的沿轨轨道(蓝色实线)。为了保证分析结果的可靠性,我们根据数据长度(要长于 18.61 a)和数据完整度(缺测少于 20%)这两个标准,挑选了 600 个数据点(图 1b 中黑色点)。这些黑色点主要集中在南海中央深海海盆。南海的长期验潮站数据从美国夏威夷海平面中心 (UHSLC, <http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/>) 获取,共计 14 个站点,全部位于近海沿岸,信息如表 1 所示。这些站点都满足时间长度大于 18.61 a,并且缺测少于总数据量的 20%。

3 分析方法

3.1 验潮站数据分析方法

经典潮汐调和分析方法 (Classical Harmonic Analysis, CHA) 认为,各个分潮的振幅和迟角都是常数。为了得到主要分潮振幅的时间变化,本文用 T_TIDE^[32] 对长期的逐时水位观测数据逐年做经典潮汐调和和分析。根据瑞利准则,T_TIDE 自动分辨了 67 个分潮。

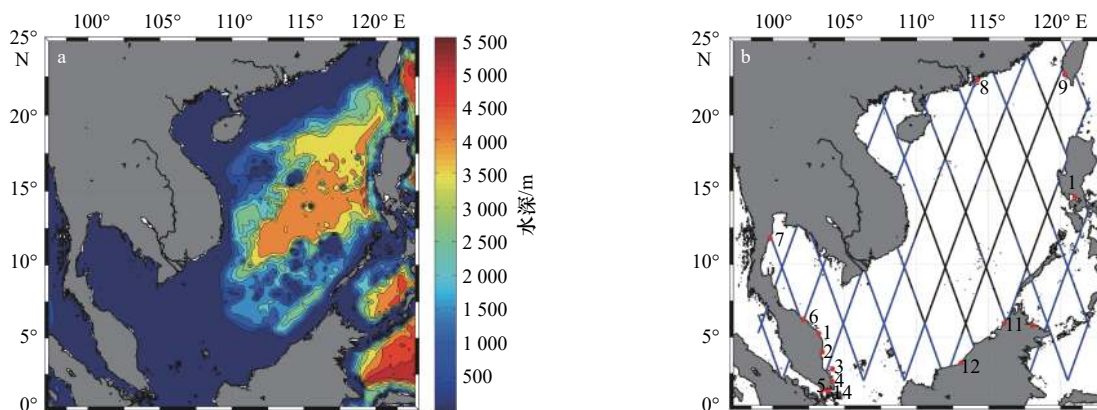


图 1 南海水深示意图(a),南海验潮站分布(红色点)和卫星观测分布(b)

Fig. 1 The bathymetry of the South China Sea (a), the locations of tide gauges (red dots) as well as satellite altimetry data (b)

蓝色线为卫星轨道,黑色点为本文筛选的高质量卫星数据点

Blue lines represent the satellite tracks, back dots are selected data with high quality

表 1 南海长期验潮站信息

Table 1 The information of long-term tide gauges in the South China Sea

站点名称	UHSLC编号	本文的编号	纬度	经度	年份跨度
CENDERING	320	1	5.27°N	103.19°E	1984–2015年
KUANTAN	322	2	3.98°N	103.43°E	1983–2015年
TIOMAN	323	3	2.81°N	104.14°E	1985–2015年
SEDILI	324	4	1.93°N	104.12°E	1986–2015年
KUKUP	325	5	1.33°N	103.44°E	1985–2015年
GETING	326	6	6.23°N	102.11°E	1986–2015年
KO LAK	328	7	11.80°N	99.82°E	1985–2019年
QUARRY BAY	329	8	22.30°N	114.22°E	1986–2019年
KAOHSIUNG	340	9	22.62°N	120.28°E	1980–2016年
MANILA	370	10	14.59°N	120.97°E	1984–2015年
KOTA KINABALU	386	11	5.98°N	116.07°E	1987–2015年
BINTULU	387	12	3.22°N	113.07°E	1992–2015年
SANDAKAN	389	13	5.81°N	118.07°E	1993–2015年
TANJONGPAGAR	699	14	1.26°N	103.85°E	1984–2016年

如果某年的缺测数据超过了该年总数据量的 20%，那么该年的潮汐调和结果就会被舍弃。接着，本文对 T_TIDE 得到的分潮振幅变化应用于公式(1)，即用经典的最小二乘模型来去除 18.61 a 循环并估计线性趋势。

$$P(t) = A_0 + A_1 t + a \cos\left(\frac{2\pi}{18.61}t\right) + b \sin\left(\frac{2\pi}{18.61}t\right), \quad (1)$$

式中， $P(t)$ 为通过调和得到的在时间 t 的分潮的振幅或者迟角； A_0 为常数； A_1 为线性趋势； a 和 b 为 18.61 a 循环的余弦和正弦项的振幅。图 2 展示了位于香港的 QUARRY BAY 验潮站 M_2 分潮振幅变化以及用公式(1)拟合的结果，可以看到该站 M_2 分潮振幅存在明显的下降趋势，下降速度为 $(0.96 \pm 0.30) \text{ mm/a}$ 。我们设定某个站点分潮振幅趋势显著必须满足下面两个条件：(1) 分潮振幅趋势的信噪比必须大于 1；(2) 分潮振幅在观测时间内振幅的变化必须大于振幅误差。对于 QUARRY BAY 验潮站， M_2 分潮振幅趋势的信噪比为 3.2。在 34 a 里， M_2 分潮振幅减小了 31.68 mm (图 2 蓝色线)，远远大于 M_2 分潮振幅的平均误差 (2.82 mm)。所以，在 QUARRY BAY 验潮站， M_2 分潮振幅的下降趋势是显著的。

3.2 卫星高度计数据分析方法

本文使用非平稳潮汐调和工具包 S_TIDE，从 25 a 的卫星高度计数据中提取主要分潮的线性趋势。S_TIDE 工具包基于非平稳潮汐调和工具包

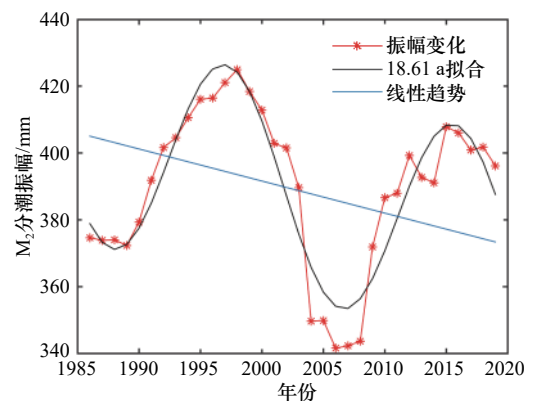


图 2 T_TIDE 得到的 QUARRY BAY 验潮站 M_2 分潮振幅变化(红线)以及拟合结果(黑线)

Fig. 2 The variations of M_2 component amplitude at QUARRY BAY obtained by T_TIDE (red line) and the results of nodal fit (black line)

(Enhanced Harmonic Analysis, EHA) [33]。EHA 在理念上将传统调和理论中的振幅和迟角由常数改进为随时间变化的函数，并将独立点方案 [20, 34] 和三次样条插值方法引入到调和分析方法中，利用最小二乘法对随时间变化的振幅和迟角进行求解。考虑到卫星高度计数据的采样频率比较低，所以本文对 25 a 卫星高度计数据整体做调和，并对 EHA 模型做了改动，把交点因子 f 和交点订正角 u 融入了非平稳潮汐调和模型中，如公式(2)所示：

$$H(t) = H_0 + \sum_{i=1}^I [f_i A_i \cos(w_i t + u_i) + f_i B_i \sin(w_i t + u_i)], \quad (2)$$

式中, $H(t)$ 代表 t 时刻观测水位; H_0 代表平均海平面高度; w_i 为第 i 分潮的频率; I 代表分潮总个数; A_i 和 B_i 为用于计算振幅和迟角的调和变量。

分潮振幅和迟角由公式(3)和公式(4)计算:

$$h_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}, \quad (3)$$

$$g_i = \arctan(B_i/A_i). \quad (4)$$

假设 H_0 、 A_i 和 B_i 都存在线性趋势, 所以公式(3)和公式(4)被修改成了公式(5):

$$H(t) = H_0(t) + \sum_{i=1}^I [f_i A_i(t) \cos(w_i t + u_i) + f_i B_i(t) \sin(w_i t + u_i)], \quad (5)$$

式中

$$H_0(t) = H_{0,0} + H_{0,1} \times t, \quad (6)$$

$$A_i(t) = A_{i,0} + A_{i,1} \times t, \quad (7)$$

$$B_i(t) = B_{i,0} + B_{i,1} \times t. \quad (8)$$

利用 25 a 的卫星高度计观测数据, 式(6)至式(8)里的未知变量可以通过最小二乘的方法得到, 实际求解是通过 S_TIDE 1.16 版本里的 s_tide_m3 函数。为了消除观测水位里离群点对调和和分析结果的影响, S_TIDE 使用了迭代权重最小二乘回归^[31]。独立点个数是 S_TIDE 最核心的输入参数, 独立点个数越多, 反演得到的分潮的振幅和迟角的变化越复杂; 独立点越少, 反演得到的分潮的振幅和迟角的变化越简单^[29, 35]。当使用 2 个独立点时, S_TIDE 即可求解 H_0 、 A_i 和 B_i 的线性趋势(即求解式(6)至式(8))。当使用 1 个独立点时, S_TIDE 可以得到时间不变的 H_0 、 A_i 和 B_i , 此时 S_TIDE 结果和经典调和和分析结果是完全一样的。

图 3 蓝色线展示了在 14.16°N, 113.62°E 处, 卫星观测到的海平面高度异常。红色线和黑色线分别是采用 CHA 和 EHA (2 个独立点) 回报的水位, EHA 的回报要比 CHA 的回报要略微准确: EHA 的回报解释了原始观测 89.77% 的方差变化, 均方根误差为 11.39 cm; CHA 的回报解释了原始观测 89.18% 的方差变化, 均方根误差为 11.71 cm。需要注意的是, CHA 和 EHA 模型都只分辨了 10 个主要分潮: M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 N_2 、 K_2 、 Q_1 、 S_{sa} 和 S_a 。本文只关注 8 大主要分潮中振幅最大的 4 个分潮, 即 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 。

图 4 展示了在 14.16°N, 113.62°E 处, 由 CHA 和 EHA 反演得到的 M_2 分潮的 A 和 B 以及它们的 95% 置信区间。可以看到 CHA 只能得到时间不变的值, 而 EHA 能得到 A 和 B 的线性趋势。然而, 由于非线性

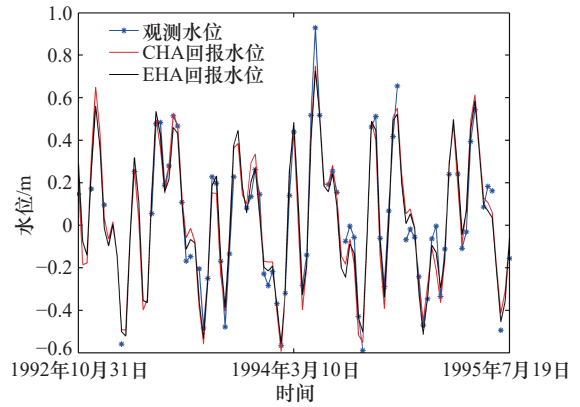


图 3 卫星观测到 14.16°N, 113.62°E 的海平面高度异常(蓝色线)

Fig. 3 Satellite-observed sea level anomalies (blue line) at 14.16°N, 113.62°E

红色线和黑色线分别是采用 CHA 和 EHA

(2 个独立点) 回报的水位

The hindcast obtained by classical harmonic analysis (red line) and enhanced harmonic analysis (black line, two independent points)

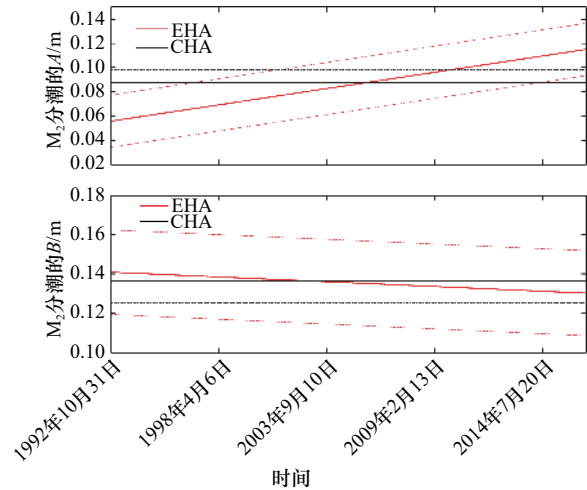


图 4 CHA 和 EHA 反演的 14.16°N, 113.62°E 处 M_2 分潮的 A 和 B (实线) 以及它们的 95% 置信区间(虚线)

Fig. 4 A and B of M_2 component (solid line) and 95% confidence intervals (dash lines) obtained by classical harmonic analysis and enhanced harmonic analysis at 14.16°N, 113.62°E

转化函数(即式(3)和式(4)), 线性变化的 A 和 B 会得到非线性变化的振幅和迟角(如图 5 中的红色实线所示)。所以, 我们对非线性变化的分潮振幅做了线性拟合, 得到线性趋势(图 5 黑色实线)。

4 实验结果分析

4.1 验潮站结果分析

南海近海主要分潮振幅和平均海平面的趋势统计结果如表 2 所示。可以看到, 在大部分验潮站, S_2 、

K_1 和 O_1 分潮的振幅都是比较稳定的, 不存在显著的上升或者下降趋势。相比之下, 在超过一半的验潮站, M_2 分潮振幅存在显著的上升或者下降趋势。对于平均海平面, 几乎所有的观测点都存在显著的上升趋势(只有 KAOHSIUNG 显示了较弱的下降趋势)。

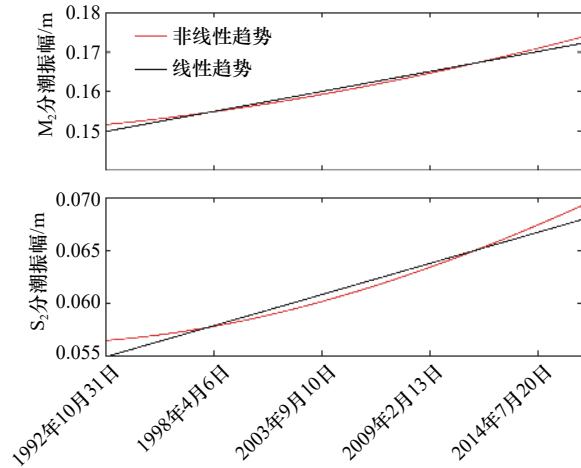


图5 S_TIDE 提取的 14.16°N, 113.62°E 处的非线性变化的 M_2 和 S_2 分潮振幅(红线)和其线性拟合结果(黑线)
Fig. 5 The nonlinear variations of the amplitudes of M_2 and S_2 component (red lines) and the results of linear fit (black lines) obtained by S_TIDE at 14.16°N, 113.62°E

值得一提的是, 4 大主要分潮最大的下降趋势都发生在 QUARRY BAY。 M_2 分潮振幅最大的上升趋势为 0.58 mm/a, 发生在 GETTING。 S_2 分潮振幅最大的上升趋势为 0.39 mm/a, 发生在 KUKUP。 K_1 分潮振幅最大的上升趋势为 0.46 mm/a, 发生在 MANILA。 O_1 分潮振幅最大的上升趋势为 0.26 mm/a, 发生 TANJONG-PAGAR。平均海平面的最大上升趋势为 12.94 mm/a, 发生在 MANILA。

4.2 卫星高度计结果分析

南海中央深海海盆主要分潮和平均海平面的趋势统计结果如表 3 所示。可以看到, 在绝大部分卫星观测点, 主要分潮振幅都是比较稳定的, 不存在显著的上升或者下降趋势。其中, O_1 分潮振幅趋势不显著的空间点最多, 达到了 1 417 个; 而 K_1 分潮振幅趋势不明显的空间点最少, 只有 1 031 个。对于平均海平面, 不存在趋势不显著的空间点, 所有的观测点都存在显著的上升趋势, 最大的上升趋势达到了 10.55 mm/a。对于 M_2 和 S_2 分潮, 振幅呈上升趋势的观测点个数要明显多于下降趋势的观测点个数。对于 K_1 和 O_1 分潮, 振幅呈下降趋势的观测点要明显多于上升趋势的观测点个数。图 6 展示了南海中央深海海盆 M_2 和 S_2 分潮振幅线性趋势。对于 M_2 分潮振幅, 只有 97 个

表 2 从长期验潮站得到的南海主要分潮振幅和平均海平面的趋势

Table 2 The trend of major constituents' tidal amplitudes and mean sea level obtained from long-term tide gauges in the South China Sea

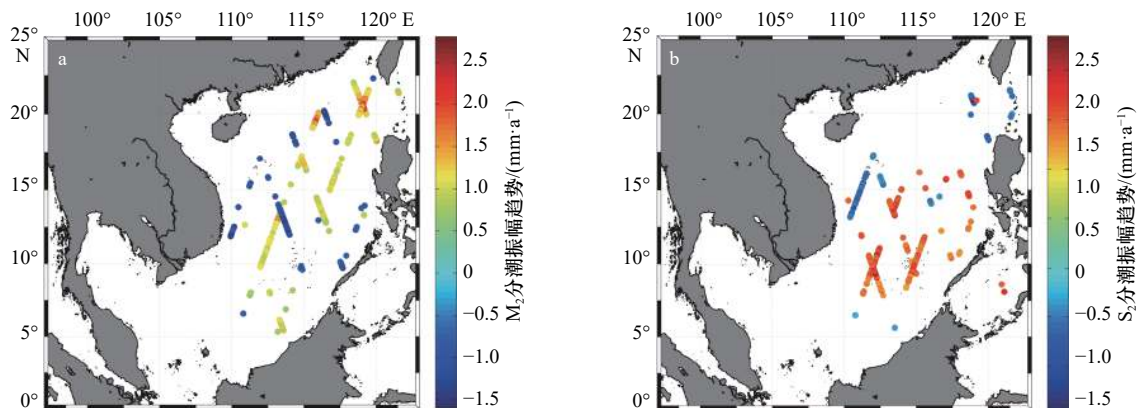
站点名称	M_2 分潮振幅趋势/(mm·a ⁻¹)	S_2 分潮振幅趋势/(mm·a ⁻¹)	K_1 分潮振幅趋势/(mm·a ⁻¹)	O_1 分潮振幅趋势/(mm·a ⁻¹)	平均海平面趋势/(mm·a ⁻¹)
CENDERING	0.17	-	-	-	3.41
KUANTAN	0.40	-	-	-	3.25
TIOMAN	0.33	-	-	-	3.20
SEDILI	-	-	-0.39	-	2.75
KUKUP	0.44	0.39	-	-	3.71
GETTING	0.58	0.26	0.31	0.14	3.27
KO LAK	0.14	-	-	-	5.98
QUARRY BAY	-0.96	-0.45	-0.61	-0.50	1.99
KAOHSIUNG	0.30	-	-	-	-0.47
MANILA	-	-	0.46	0.23	12.94
KOTA KINABALU	-	-	-	-	4.46
BINTULU	-	-	-	-	4.80
SANDAKAN	-	-	-	-	5.06
TANJONGPAGAR	-	-0.18	0.24	0.26	3.38

注: -代表趋势不显著。

表3 从卫星高度计观测得到的南海中央深海海盆主要分潮振幅和平均海平面的趋势统计结果

Table 3 The trend of major constituents' tidal amplitudes and mean sea level in the central deep sea basin of South China Sea obtained from satellite altimeter data

分潮	趋势不显著的 点个数	正趋势的 点个数	负趋势的 点个数	所有点趋势平均值/ (mm·a ⁻¹)	所有点趋势最大值/ (mm·a ⁻¹)	所有点趋势最小值/ (mm·a ⁻¹)
M ₂	1 293	216	91	0.57	2.80	-1.61
S ₂	1 344	192	64	0.51	1.85	-1.94
K ₁	1 031	243	326	-0.17	2.91	-3.50
O ₁	1 417	61	122	-0.37	2.22	-1.93
平均海平面	0	1 600	0	5.61	10.55	1.29

图6 南海中央深海海盆M₂和S₂分潮振幅线性趋势Fig. 6 The linear trends of M₂ and S₂ component amplitudes in the central deep sea basin of South China Sea

空间点的趋势在 $-1\sim 1$ mm/a。M₂分潮振幅最大的上升趋势为2.80 mm/a,发生在吕宋海峡西侧(20.68°N, 119.03°E);最大的下降趋势为1.61 mm/a,发生在越南东部外海(12.43°N, 110.12°E)。对于S₂分潮振幅,只有101个空间点的趋势在 $-1\sim 1$ mm/a。S₂分潮振幅最大的上升趋势为1.85 mm/a,发生在越南东部外海(9.46°N, 112.11°E);S₂分潮振幅最大的下降趋势为1.94 mm/a,发生在吕宋海峡西侧(20.93°N, 118.93°E)。图7展示了南海中央深海海盆K₁和O₁分潮振幅线性趋势。对于K₁分潮振幅,只有69个空间点的趋势在 $-1\sim 1$ mm/a。K₁振幅最大的上升趋势为2.91 mm/a,发生在海南岛南部外海(17.64°N, 111.79°E);最大的下降趋势为3.50 mm/a,发生在广东省南部外海(18.43°N, 115.32°E)。对于O₁分潮振幅,只有38个空间点的趋势在 $-1\sim 1$ mm/a。O₁振幅最大的上升趋势为2.22 mm/a,发生在越南东部外海(11.46°N, 111.36°E);最大的下降趋势为1.93 mm/a,发生在广东省南部外海(20.05°N, 116.00°E)。

5 结果讨论

综合近海验潮站数据结果和深海卫星数据结果,

我们可以看到南海潮汐和海平面变化的一些共同的特点。第一,在南海大部分地区,4大主要分潮振幅都是比较稳定的,不存在显著的上升趋势或下降趋势。第二,南海海平面总体上是快速上升的。近海潮汐容易受到各种非潮过程(特别是港口建设、填海造陆等人类活动的影响)^[19, 36-37]的影响,变化比较复杂。QUARRY BAY位于香港,受到填海造陆等人类活动的影响更加显著,导致其主要分潮的振幅都存在非常大的负趋势。相比近海沿岸的验潮站,南海中央深海海盆的潮汐几乎不会受到人类活动的影响,所以我们认为该海域潮汐长期趋势可能是海平面变化和海水温度的变化引起的。之前的大量研究^[10, 17-18, 38-40]已经指出了潮汐变化与平均海平面变化是紧密相关的。海平面的变化(上升或者下降)会改变水深,进而改变底摩擦,从而影响到潮波的传播和耗散。图8展示了南海平均海平面的线性趋势,可以看到,尽管在不同地点,海平面变化趋势大小不一,但是所有卫星观测点的海平面都是上升的,区域平均的海平面趋势为5.61 mm/a。海平面最大的上升趋势为10.55 mm/a,在25 a里使水深增加了大约0.26 m。但是考虑到我

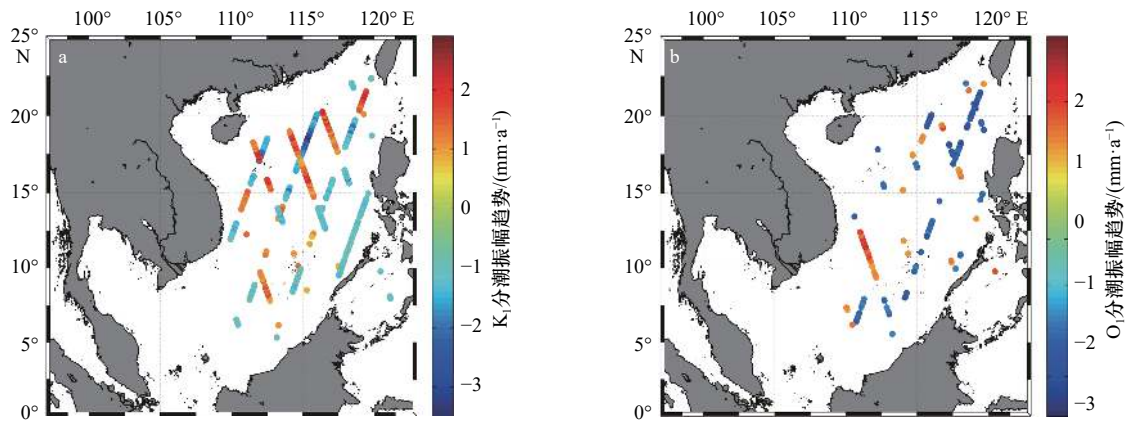


图 7 南海中央深海海盆 K_1 和 O_1 分潮振幅线性趋势

Fig. 7 The linear trends of K_1 and O_1 component amplitudes in the central deep sea basin of South China Sea

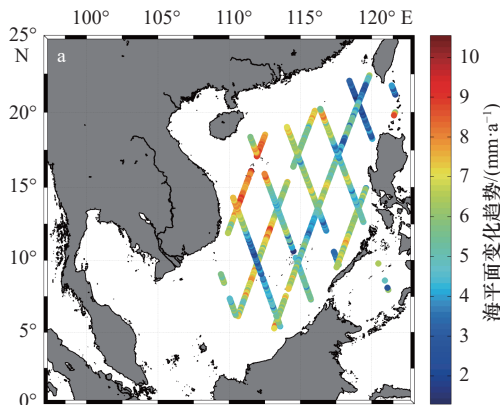


图 8 南海平均海平面线性趋势

Fig. 8 The linear trends of mean sea level in the South China Sea

们研究的南海中央深海海盆的水深超过 1 000 m(图 1), 海平面上升引起的水深变化对于潮汐的影响非常有限。因此, 我们认为在南海, 海水温度的长期趋势引起的海洋层化的变化对潮汐的影响是主导的。由于深海观测数据的缺乏, 我们无法给出南海海洋层化在 1992–2017 年变化的具体数值。但是南海海平面的快速上升反映了南海海洋热含量的持续增加, 间接表明了南海海洋层化存在长期变化^[41]。卫星观测到的潮汐既包含正压潮, 也包含内潮海表面信号^[13]。南海复杂的地形(比如吕宋海峡的特殊双脊地形)、较强的海洋层化使得该海域成为了全球内潮活动最为活跃的海域之一^[22]。内潮对海洋层化的变化是非常敏感的, 海洋层化的变化会影响内潮的生成、传播和耗散以及内潮在海表的显示^[10], 最终引起该海域潮汐的长期趋势。事实上, 在其他内潮活跃的海区, 也存

在类似的现象。早在 2006 年, 基于夏威夷地区长期验潮站数据, Colosi 和 Munk^[10]就指出, 该海域 M_2 分潮振幅的长期趋势是内潮海表面信号的位相变化导致的。

6 结论

潮汐与人类社会的发展密切相关, 潮汐变化研究对海洋工程、沿海地区洪涝灾害预防、海上交通、海洋环境保护、海洋资源和能源开发等各个方面都有着重要的意义。由于绝大部分的验潮站都集中在近海, 所以之前的研究主要关注近海海域的潮汐变化。由于观测数据的缺乏, 很少有学者探讨南海(尤其是中央深海海盆)潮汐的变化趋势。本文首次使用修改的 EHA 模型来分析长达 25 a 的南海卫星高度计数据, 并结合近岸的验潮站数据分析结果, 调查了南海主要分潮振幅的线性趋势。在南海大部分地区, 4 大主要分潮的振幅都是比较稳定的, 不存在显著的上升趋势或下降趋势。在南海少部分地区 4 大主要分潮的振幅存在显著的趋势, 最大的上升趋势可达 2.91 mm/a, 最大的下降趋势可达 3.50 mm/a。本文认为, 该海域潮汐的长期趋势与内潮海表面信号的变化有关。对于南海主要分潮振幅的变化的原因, 本文只是基于经验做了初步的猜测, 未来主要通过数值模拟等手段来进一步验证这些猜想。

致谢: 感谢雷达高度计数据系统网站和夏威夷海平面中心提供了本文的研究数据。感谢 Pawlowicz 教授提供了 T_TIDE 工具包。

参考文献:

- [1] Woodworth P L. A survey of recent changes in the main components of the ocean tide[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(15): 1680–1691.

- [2] Talke S A, Jay D A. Changing tides: the role of natural and anthropogenic factors[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2020, 12: 121–151.
- [3] Doodson A T. Perturbations of harmonic tidal constants[J]. *Proceedings of the Royal Society, London Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1924, 106(739): 513–526.
- [4] Godin G. Possibility of rapid changes in the tide of the Bay of Fundy, based on a scrutiny of the records from Saint John[J]. *Continental Shelf Research*, 1992, 12(2/3): 327–338.
- [5] Godin G. Rapid evolution of the tide in the Bay of Fundy[J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(2/3): 369–372.
- [6] Cartwright D E. Secular changes in the oceanic tides at Brest, 1711–1936[J]. *Geophysical Journal International*, 1972, 30(4): 433–449.
- [7] DiLorenzo J L, Huang Poshu, Thatcher M L, et al. Dredging impacts of Delaware estuary tides[C]//*Proceedings of the 3rd International Conference Sponsored by the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, Estuarine and Coastal Modeling III*. Oak Brook, IL: ASCE, 1993, 19: 86–104.
- [8] Flick R E, Murray J F, Ewing L C. Trends in United States tidal datum statistics and tide range[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2003, 129(4): 155–164.
- [9] Ray R D. Secular changes of the M_2 tide in the Gulf of Maine[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(3): 422–427.
- [10] Colosi J A, Munk W. Tales of the venerable Honolulu tide gauge[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(4): 967–996.
- [11] Jay D A. Evolution of tidal amplitudes in the eastern Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(4): L04603.
- [12] Ray R D. Secular changes in the solar semidiurnal tide of the western North Atlantic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): L19601.
- [13] Müller M. Rapid change in semi-diurnal tides in the North Atlantic since 1980[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(11): L11602.
- [14] Winterwerp J C, Wang Z B. Man-induced regime shifts in small estuaries—I: theory[J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(11): 1279–1292.
- [15] Feng Xiangbo, Tsimplis M N, Woodworth P L. Nodal variations and long-term changes in the main tides on the coasts of China[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(2): 1215–1232.
- [16] Rodríguez-Padilla I, Ortiz M. On the secular changes in the tidal constituents in San Francisco Bay[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(9): 7395–7406.
- [17] Devlin A T, Jay D A, Zaron E D, et al. Tidal variability related to sea level variability in the Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(11): 8445–8463.
- [18] Devlin A T, Pan Jiayi, Lin Hui. Extended spectral analysis of tidal variability in the North Atlantic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(1): 506–526.
- [19] Ralston D K, Talke S, Geyer W R, et al. Bigger tides, less flooding: effects of dredging on barotropic dynamics in a highly modified estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(1): 196–211.
- [20] Pan Haidong, Guo Zheng, Lü Xianqing. Inversion of tidal open boundary conditions of the M_2 constituent in the Bohai and Yellow Seas[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(8): 1661–1672.
- [21] Green J A M, David T W. Non-assimilated tidal modeling of the South China Sea[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 78: 42–48.
- [22] Gao Xiumin, Wei Zexun, Lü Xianqing, et al. Numerical study of tidal dynamics in the South China Sea with adjoint method[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 92: 101–114.
- [23] Fang Guohong, Kwok Y K, Yu Kejun, 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.
- [24] Zu Tingting, Gan Jianping, Erofeeva S Y. Numerical study of the tide and tidal dynamics in the South China Sea[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2008, 55(2): 137–154.
- [25] 王延强, 仇天宇, 朱学明. 基于18.6年卫星高度计资料对南海潮汐的分析与研究[J]. *海洋预报*, 2014, 31(2): 35–40.
Wang Yanqing, Zhang Tianyu, Zhu Xueming. Tidal characteristics analysis in the South China Sea by 18.6 years satellite altimetry data[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(2): 35–40.
- [26] 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.
Lei Ning, Fu Yanguang, Yang Long, 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.
- [27] 赵玖强, 张艳伟, 刘志飞, 等. 南海北部深海潮汐的季节性变化特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 62(4): 671–683.
Zhao Jiuqiang, Zhang Yanwei, Liu Zhifei, et al. Seasonal variability of tides in the deep northern South China Sea[J]. *Science China (Terrestrial)*, 2019, 62(4): 671–683.
- [28] 刘旭华, 杨俊钢, 刘全生, 等. 基于长时序T/P和Jason系列卫星高度计数据的中国南海潮汐信息提取研究[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(2): 438–444.
Liu Xuhua, Yang Jungang, Liu Quansheng, et al. Extraction of tidal information in the South China Sea base on long time series of T/P and Jason series altimeter data[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(2): 438–444.
- [29] Pan Haidong, Lü Xianqing, Wang Yingying, et al. Exploration of tidal-fluvial interaction in the Columbia river estuary using S_TIDE[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(9): 6598–6619.
- [30] Wang Daosheng, Pan Haidong, Jin Guangzhen, et al. Seasonal variation of the principal tidal constituents in the Bohai Sea[J]. *Ocean Sci-*

- ence, 2020, 16(1): 1–14.
- [31] 潘海东. S_TIDE工具包使用中文教程1.0[R]. 青岛: 中国海洋大学, 2019.
Pan Haidong. S_TIDE toolbox tutorials (in Chinese)[R]. Qingdao: Ocean University of China, 2019.
- [32] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(8): 929–937.
- [33] Jin Guangzhen, Pan Haidong, Zhang Qilin, et al. Determination of harmonic parameters with temporal variations: An enhanced harmonic analysis algorithm and application to internal tidal currents in the South China Sea[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(7): 1375–1398.
- [34] Guo Zheng, Pan Haidong, Fan Wei, et al. Application of surface spline interpolation in inversion of bottom friction coefficients[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(9): 2021–2028.
- [35] Pan Haidong, Zheng Quanxin, Lü Xianqing. Temporal changes in the response of the nodal modulation of the M_2 tide in the Gulf of Maine[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 186: 13–20.
- [36] Familkhalili R, Talke S A. The effect of channel deepening on tides and storm surge: A case study of Wilmington, NC[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(17): 9138–9147.
- [37] Chant R J, Sommerfield C K, Talke S A. Impact of channel deepening on tidal and gravitational circulation in a highly engineered estuarine basin[J]. *Estuaries and Coasts*, 2018, 41(6): 1587–1600.
- [38] Devlin A T, Jay D A, Talke S A, et al. Can tidal perturbations associated with sea level variations in the western Pacific Ocean be used to understand future effects of tidal evolution?[J]. *Ocean Dynamics*, 2014, 64(8): 1093–1120.
- [39] Devlin A T, Jay D A, Talke S A, et al. Coupling of sea level and tidal range changes, with implications for future water levels[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17021.
- [40] 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: Oceans*, 2018, 123(7): 4593–4609.
- [41] 王佳莹, 方国洪, 王永刚. 南海海面风场、高度场和温度场近十年的变化趋势及年际变化特征[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 159–175.
Wang Jiaying, Fang Guohong, Wang Yonggang. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height and surface temperature in the recent decade[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 159–175.

The study of the trends of tidal amplitudes of major constituents in the South China Sea

Pan Haidong¹, Wang Yuzhe¹, Lü Xianqing¹

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The study of tidal changes is of great significance in marine engineering, marine mapping as well as marine transportation. Because nearly all tide gauges are located in the coastal waters, previous studies mainly focus on tidal changes in the shallow waters. In the deep sea, due to the lack of long-term high-frequency sea level observations, tidal changes are remained unclear. Based on the tide gauge observations and satellite altimeter data, non-stationary tidal harmonic analysis toolbox S_TIDE to extract the long-term trend of amplitudes of four major constituents in the South China Sea is first used in this paper. Results show that in most areas of the South China Sea, the amplitudes of four major constituents are stable and have no significant positive or negative trends. In minor areas of the South China Sea, the amplitudes of four major constituents have significant trends. The largest positive trends can reach 2.91 mm/a and the largest negative trends can reach 3.50 mm/a. The long-term trends of tidal amplitudes in this area may be related to the change of the surface expression of internal tides. The tides observed by satellite contain not only barotropic tides but also the surface expression of internal tides. The internal tides as well as their surface expression in the South China Sea are strongest in the world. The changes of ocean stratification can influence the generation, propagation and dissipation of internal tides as well as their surface expression and eventually induce the long-term trends of tidal amplitudes in the South China Sea.

Key words: South China Sea; the long-term trend of tides; satellite altimeter; S_TIDE; internal tides