

# 基于 T/P 和 Jason-1/2 卫星高度计海面高度数据获取南海同潮图的研究

郑好<sup>1,2</sup>, 李晓春<sup>1,2</sup>, 王道胜<sup>1,2</sup>, 蒋浩宇<sup>1,2</sup>, 赵恩金<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉) 海洋学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学深圳研究院, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 随着卫星高度计资料的不断丰富, 通过对卫星高度计所得潮汐调和常数进行插值或拟合得到潮汐同潮图成为可能。本文拟对 T/P(TOPEX/POSEIDON)、Jason-1 和 Jason-2 卫星高度计数据进行分析, 得到南海区域星下观测点处四个主要分潮( $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  分潮)的调和常数, 进而利用双调和样条插值方法对其进行插值, 获取南海同潮图。首先, 以 1992~2016 年 T/P 和 Jason 卫星高度计所得海面高度数据为基础, 利用调和分析方法计算了南海星下观测点处  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮的调和常数, 并与 40 个验潮站数据进行了对比, 最大矢量均差为 4.99 cm, 说明分析所得调和常数与利用验潮站资料提取的调和常数的误差较小。进而采用双调和样条插值方法对星下点调和常数进行插值, 得到了南海四个主要分潮的同潮图, 所得结果与全球潮汐模型 TPXO7.2 模式结果的矢量均差分别为 4.69、2.46、3.13 和 2.42 cm, 与 141 个验潮站处观测结果的矢量均差分别为 22.59、10.26、10.24 和 8.51 cm。此外, 插值所得四个主要分潮的无潮点位置与前人研究结果相近。上述实验结果表明: 利用双调和样条插值方法对卫星高度计所得调和常数进行插值能够获取较为准确的同潮图。

**关键词:** 卫星高度计; 双调和样条插值; 同潮图

中图分类号: 170.6035

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2019)07-0061-11

DOI: 10.11759/hyxx20190102002

南海是一个半封闭海, 其与外界水体交换的主要通道是吕宋海峡<sup>[1]</sup>, 南海北部具有宽广的大陆架和大陆坡, 陆架区潮汐现象显著<sup>[2]</sup>。因此, 针对南海潮汐的研究一直在国内外颇受重视。TOPEX/POSEIDON(T/P)卫星是由美国国家航空航天局和法国空间局联合于 1992 年 8 月 10 日发射的世界上第一颗专门为研究世界大洋环流而设计的高度计卫星。T/P 卫星在 2002 年 9 月变轨, 原轨道的任务由 2001 年 12 月发射的 Jason-1 卫星执行。Jason-1 卫星于 2009 年 2 月变轨到 T/P 卫星变轨后的轨道上继续运行。原有轨道测量任务随后交给 2008 年 6 月发射的 Jason-2 卫星。T/P、Jason-1 和 Jason-2 三颗卫星高度计系统的定轨精度和测高精度较以前有显著提高, 其测量精度约为 5 cm, 为潮汐的研究提供了重要的数据源。鉴于 T/P 和 Jason 卫星高度计观测海面高度精度高的特性, 国内外很多学者将其应用到潮汐研究中。Yanagi 等<sup>[3]</sup>基于 3 年的卫星高度计资料及沿岸验潮站的调和与分析结果, 以指数函数为插值系数插值得到了中国东海和黄海八个主要分潮的调和常数。Fang 等<sup>[4]</sup>利用卫星高度计资料及验潮站数据进

行二次多项式拟合, 得到了渤、黄、东海网格点的调和常数, 进而得到了渤、黄、东海五个主要分潮的调和常数。范丽丽<sup>[5]</sup>基于物理量在空间上的连续性, 提出一种通过轨道上的调和常数拟合轨道间任意点调和常数的方法, 并将该方法应用于夏威夷海域。

本文数据采用 1992~2016 年 T/P 和 Jason 卫星高

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-03-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1404700); 深圳市科技创新委员会基础研究学科布局项目(20170418); 广东省促进经济发展专项资金(海洋经济发展用途)项目(GDME-2018E001); 中国地质大学(武汉)2018 年研究生教育教学改革项目基金(YJG2018219); 北海市科学研究与技术开发计划项目(北科合 201995036)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1404700; Discipline Layout Project for Basic Research of Shenzhen Science and Technology Innovation Committee, No.20170418; Guangdong Special Fund Program for Economic Development (Marine Economic), No. GDME-2018E001; Graduate Education Reform Project Fund of China University of Geosciences (2018), No. YJG2018219; Beihai Scientific Research and Technology Development Plan Project, No. 201995036]

作者简介: 郑好(1995-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为卫星遥感数据处理, 电话: 15971485065, E-mail: cugwh521@foxmail.com; 王道胜, 通信作者, 副教授, 主要从事浅海动力学、数据同化方面的教学和研究, 电话: 15853278531, E-mail: dswangouc@163.com

度计海面高度资料,对南海海域(2°~25°N, 99°~122°E, 图 1)的潮汐信号进行了提取。然后,采用以格林函数为基础的双调和样条插值法对所提取的 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 四个主要分潮调和常数进行了空间二维插值,得到了南海四个主要分潮的同潮图,并利用全球潮汐模型 TPXO7.2、验潮站数据和前人研究中无潮点位置对插值结果进行了评估。

## 1 数据和方法

### 1.1 卫星高度计数据

变轨前的 T/P 卫星轨道高度达 1 336 km, 倾角为 66°, 覆盖面大, 轨道的交点周期(绕地球一圈的时间)为 6 745.8 s, 轨道运行 127 圈以后精确重复, 重复周期为 9.915 6 d。本文高度计数据来自南海海域(2°~25°N, 99°~122°E)变轨前 T/P 卫星轨道上 1992~2016 年多卫星数据, 包含: 1992~2002 年未变轨的 T/P 卫星高度计数据、2002~2008 年未变轨的 Jason-1 卫星高度计数据和 2008~2016 年 Jason-2 卫星高度计数据(下载地址: <ftp://avisoftp.cnes.fr/AVISO/pub/>), 共有 4 300 多个星下观测点, 每个星下观测点都对应一个海面高度的时间序列。

### 1.2 验潮站数据

本文中的 141 个验潮站(验潮站分布情况见图 1)数据来自于中国近海及周边海域验潮站的资料和国际上公开的验潮站资料, 包括 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 四个主要分潮的潮汐调和常数。

### 1.3 调和分析方法

实际水位可以看作是很多个分潮所致水位迭加的结果, 但是在实际分析中只能选取有限个主要分潮。假设我们选取  $J$  个分潮, 任意一点的潮位  $h$  的表达式为:

$$h = S_0 + \sum_{j=1}^J f_j H_j \cos(\sigma_j t + V_{0j} + u_j - g_j), \quad (1)$$

其中,  $S_0$  为余水位,  $f_j$  为第  $j$  个分潮的交点因子,  $u_j$  为第

$j$  个分潮的交点订正角,  $H_j$ 、 $g_j$  分别为第  $j$  个分潮的振幅和迟角, 统称为调和常数,  $\sigma_j$  为第  $j$  个分潮的分潮角速度,  $V_{0j}$  为第  $j$  个分潮的初相位,  $t$  为时间。

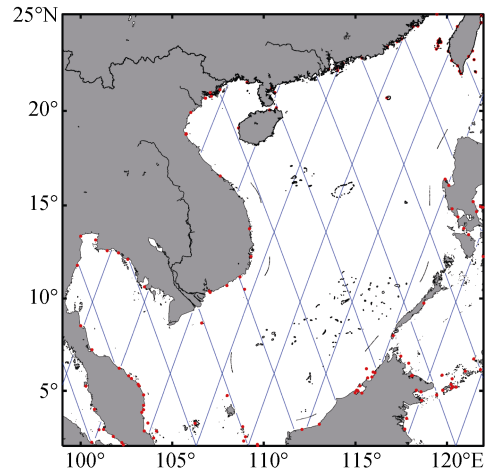


图 1 4309 个星下观测点(蓝点)以及 141 个验潮站(红点)分布

Fig. 1 Distribution of 4309 T/P satellite tracking points (blue points) and 141 tidal stations (red points)

某一分潮所引起的水位变化为:

$$f_j H_j \cos(\sigma_j t + V_{0j} + u_j - g_j). \quad (2)$$

式(2)可化为式(3):

$$\begin{aligned} & f_j \cos(\sigma_j t + V_{0j} + u_j) H_j \cos g_j + \\ & f_j \sin(\sigma_j t + V_{0j} + u_j) H_j \sin g_j \end{aligned}, \quad (3)$$

其中, 时间  $t$  和分潮角速度  $\sigma_j$  均为已知, 交点因子  $f_j$ 、交点订正角  $u_j$  和分潮初相位  $V_{0j}$  可根据 Doodson 数和时间  $t$  计算得出<sup>[6]</sup>。对应  $J$  个分潮, 则有:

$$\begin{aligned} h = S_0 + \sum_{j=1}^J f_j \cos(\sigma_j t + V_{0j} + u_j) H_j \cos g_j + \\ \sum_{j=1}^J f_j \sin(\sigma_j t + V_{0j} + u_j) H_j \sin g_j \end{aligned}. \quad (4)$$

如果在  $n$  个时刻  $t = t_1, t_2, \dots, t_n$ , 有  $n$  个潮位观测值  $h = h_1, h_2, \dots, h_n$ , 那么, 就可以建立如下由  $n$  个方程构成的方程组:

$$\begin{cases} S_0 + \sum_{j=1}^J x_j f_j \cos(\sigma_j t_1 + V_{0j} + u_j) + \sum_{j=1}^J y_j f_j \sin(\sigma_j t_1 + V_{0j} + u_j) = h_1 \\ S_0 + \sum_{j=1}^J x_j f_j \cos(\sigma_j t_2 + V_{0j} + u_j) + \sum_{j=1}^J y_j f_j \sin(\sigma_j t_2 + V_{0j} + u_j) = h_2 \\ \vdots \\ S_0 + \sum_{j=1}^J x_j f_j \cos(\sigma_j t_n + V_{0j} + u_j) + \sum_{j=1}^J y_j f_j \sin(\sigma_j t_n + V_{0j} + u_j) = h_n \end{cases}. \quad (5)$$

方程(5)中  $x_j$  对应  $H_j \cos g_j$ ,  $y_j$  对应  $H_j \sin g_j$ , 它们和  $S_0$  共同构成了方程组中的全部未知量。潮位观测个数  $n$  往往大于未知量个数  $2J+1$ , 因此需要利用最小二乘法对上述方程组进行求解。求得  $x_j$  和  $y_j$  后, 即可得到各个分潮的调和常数  $H$  和  $g$ 。本文中  $J$  取 4, 即只考虑  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮。

### 1.4 双调和样条插值

双调和样条插值法是以格林函数为基础的内插法, 通过插值计算, 找到通过空间数据点的曲率最小的曲线或曲面。在二维空间中, 满足平面上  $N$  个点的双调和方程为:

$$\begin{aligned} \nabla^4 \zeta(x) &= \sum_{j=1}^N \alpha_j \delta(x-x_j) \\ \zeta(x_j) &= \zeta_j, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $\nabla^4$  为双调和算子,  $x$  为二维平面中的一个坐标点,  $\zeta(x)$  为内插结果在  $x$  处的位移。 $\alpha_j$  为在  $x_j$  处的加权系数,  $\delta(x-x_j)$  为狄拉克函数, 即

$$\delta(x-x_j) = \begin{cases} 0, & x \neq x_j \\ \infty, & x = x_j \end{cases} \quad \text{且} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1. \quad (7)$$

双调和方程的通解为

$$\zeta(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \Phi(x-x_j). \quad (8)$$

加权系数  $\alpha_j$  可以通过求解线性方程  $\zeta_j = \sum_{i=1}^N \alpha_i \Phi(x_i-x_j)$  得到, 其中  $\Phi(x) = |x|^2 (\ln|x| - 1)$  为格林函数。

双调和样条插值综合利用数据值和斜率确定插值曲面, 比样条插值更为灵活, 此外, 即使是带噪声的数据, 也能在最小二乘意义下实现有效插值, 特别适合对不规则的卫星高度计数据进行插值<sup>[7-8]</sup>。

### 1.5 评估方法

本文采用振幅差  $\Delta H$  和迟角差  $\Delta g$  分别评估振幅和迟角的误差, 采用矢量差  $\Delta$  综合评估振幅和迟角的误差<sup>[4]</sup>。矢量差  $\Delta$  表达式如下:

$$\Delta = [(H_a \cos g_a - H_b \cos g_b)^2 + (H_a \sin g_a - H_b \sin g_b)^2]^{1/2}, \quad (9)$$

其中,  $H_a$  和  $g_a$  为卫星高度计数据或者插值所得的振幅和迟角,  $H_b$  和  $g_b$  为验潮站资料提取的振幅和迟角或者全球潮汐 TPXO7.2 模式的振幅和迟角。矢量差  $\Delta$ 、振幅差  $\Delta H$  和迟角差  $\Delta g$  的平均值分别用  $\bar{\Delta}$ 、 $\bar{\Delta H}$  和  $\bar{\Delta g}$  表示。

## 2 结果分析

### 2.1 星下观测点处调和常数

参照 Fang 等<sup>[4]</sup>和暴景阳<sup>[9]</sup>中所述方法, 计算了  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮的混淆周期, 结果见表 1。然后根据 Rayleigh 准则, 计算得到了分离四个主要分潮所需的最短资料长度为 2.97 a(表 2)。剔除观测时间小于 2.97 a 的星下点数据, 得到了可以分离出四个主要分潮调和常数的 4309 个星下点(图 1)。

表 1 四个主要分潮的周期和混淆周期

Tab. 1 Tidal periods and aliasing periods of four major tidal constituents

分潮	周期/h	潮汐混淆周期/d
$M_2$	12.42	62.11
$S_2$	12.42	58.74
$K_1$	23.93	173.19
$O_1$	25.82	45.71

表 2 四个主要分潮的基本分辨时间(单位: a)

Tab. 2 T/P alias synodic periods of each pair of constituents (unit: a)

	$K_1$	$S_2$	$M_2$
$O_1$	0.17	0.56	0.47
$K_1$		0.24	0.27
$S_2$			2.97

利用调和分析方法得到了 4 309 个星下观测点处  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮的调和常数(注: 下文的迟角都为东 8 区迟角)。以 15 km 的空间窗口对 4 309 个星下观测点与南海 141 个验潮站的位置在空间上进行了匹配, 其中有 40 个验潮站符合要求。

对比星下观测点处调和分析和验潮站处观测结果(表 3)可知, 利用卫星高度计数据所得星下点处的四个主要分潮调和常数结果与验潮站处观测结果误差较小, 半日分潮的振幅绝对均差整体大于全日分潮的振幅绝对均差。其中,  $M_2$  分潮的振幅绝对均差和矢量均差均最大, 分别为 3.16 cm 和 4.99 cm;  $K_1$  分潮与验潮站处观测结果的振幅绝对均差最小, 为 1.75 cm;  $S_2$  分潮与验潮站处观测结果的矢量均差最小, 为 3.43 cm。

通过与前人结果进行对比(表 4)可知: 相对于李培良等<sup>[10]</sup>, 本文调和和分析所得星下观测点处  $K_1$  分潮的振幅和迟角与验潮站处观测结果的误差均相对较小;  $M_2$ 、 $S_2$  和  $O_1$  分潮振幅和迟角拟合效果与前人结果相当, 其中  $S_2$  分潮迟角绝对均差相对较大, 但仍与暴景阳等<sup>[9]</sup>、王延强等<sup>[11]</sup>和 Fang 等<sup>[12]</sup>在南海的误差结果相近。

表 3 星下观测点与验潮站处  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  分潮的振幅差  $\Delta H$  和矢量差  $\Delta$   
 Tab. 3 Amplitude difference and vector difference between the T/P solutions and the observations of tidal stations for the  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ , and  $O_1$  constituents

验潮站位置/ (°E/°N)	星下点位置/ (°E/°N)	距离 /km	$\Delta H/cm$				$\Delta/cm$			
			$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$
114.03/22.10	114.03/22.08	2.70	2.40	0.04	0.66	0.14	2.52	3.77	4.16	3.20
114.03/22.10	114.05/22.13	3.29	1.28	2.03	0.18	0.89	2.66	4.38	1.01	4.43
101.00/2.88	100.97/2.90	4.17	7.72	0.56	0.65	0.34	11.78	1.67	0.68	0.88
110.68/20.17	110.73/20.21	6.77	1.75	6.82	6.79	1.08	5.40	8.70	12.32	11.96
101.00/2.88	100.95/2.85	7.04	8.47	1.20	0.92	0.18	10.21	2.31	2.24	0.47
101.00/2.88	100.98/2.95	7.41	7.50	1.02	1.41	0.35	12.17	2.65	2.34	0.52
108.95/10.50	108.91/10.45	7.61	0.09	2.20	1.15	12.41	1.77	2.59	7.70	12.41
114.03/22.10	114.01/22.03	8.56	2.74	0.86	0.94	1.74	3.27	1.08	2.67	2.44
108.70/11.17	108.67/11.09	9.02	1.39	0.73	0.77	0.24	2.86	1.85	7.91	0.41
108.95/10.50	108.87/10.54	9.93	3.96	3.17	0.39	10.40	4.91	3.22	9.91	10.41
108.85/3.05	108.76/3.07	10.36	6.69	0.12	2.02	1.24	8.10	3.83	2.26	2.96
113.98/4.58	113.89/4.57	10.38	0.07	1.91	0.41	0.69	2.47	4.61	0.77	2.57
110.68/20.17	110.71/20.26	10.43	1.02	8.34	6.80	0.80	5.58	10.43	10.85	10.39
113.98/4.58	113.91/4.52	10.90	1.88	1.84	0.27	2.78	2.63	2.76	1.01	3.54
110.60/20.95	110.71/20.94	11.02	8.96	2.59	0.98	6.12	11.44	5.96	6.96	6.95
121.28/18.87	121.19/18.92	11.07	3.11	0.16	4.35	2.33	4.10	0.17	4.81	2.53
111.62/16.55	111.71/16.50	11.15	0.87	2.75	1.06	0.50	2.69	4.74	3.61	1.78
121.10/18.62	121.11/18.72	11.50	2.71	3.79	0.96	2.55	4.89	4.04	2.15	2.90
99.82/11.80	99.91/11.75	11.62	0.31	0.26	2.08	0.76	0.91	2.00	2.37	1.44
111.62/16.55	111.73/16.55	11.67	2.26	3.25	1.05	1.53	2.35	3.58	4.24	2.40
121.28/18.87	121.17/18.87	11.69	2.33	1.47	4.16	0.55	2.96	1.51	4.35	1.76
108.95/10.50	108.93/10.40	11.92	0.64	2.14	0.85	13.07	2.09	2.68	7.43	13.07
101.00/2.88	100.93/2.80	12.30	9.14	0.79	0.99	1.35	10.60	2.17	2.34	1.35
103.00/11.42	102.89/11.38	12.67	2.19	0.68	3.53	4.41	4.58	1.03	3.54	8.03
120.30/16.62	120.22/16.53	12.71	1.60	0.71	1.36	1.04	2.09	1.30	1.37	1.21
101.00/2.88	101.00/3.00	12.73	7.72	1.53	0.21	0.48	13.88	3.38	3.29	0.57
113.98/4.58	113.87/4.62	12.90	1.83	0.70	2.12	11.67	3.46	1.72	2.27	11.67
114.00/22.23	114.05/22.13	13.00	1.48	1.53	0.42	0.29	2.76	5.39	0.56	3.81
121.28/18.87	121.21/18.97	13.34	6.33	3.06	3.54	0.57	6.44	3.67	5.31	2.49
120.15/23.00	120.06/22.91	13.76	1.64	0.80	0.71	1.10	1.90	3.19	7.60	2.34
108.70/11.17	108.69/11.04	13.87	1.80	2.17	0.65	0.40	2.91	2.19	10.10	0.65
103.00/11.42	102.87/11.43	13.91	0.47	0.23	3.28	5.10	4.28	0.52	3.32	8.51
110.60/20.95	110.73/20.99	14.04	7.99	3.62	0.39	7.06	11.55	8.21	5.17	7.54
103.00/11.42	102.91/11.33	14.06	2.89	1.30	4.71	5.33	3.96	3.27	4.84	8.41
108.85/3.05	108.74/3.12	14.31	7.51	0.02	1.39	2.21	7.78	2.30	1.77	2.71
114.03/22.10	113.99/21.98	14.45	1.27	2.03	0.03	0.79	2.59	2.12	2.63	2.06
109.53/18.22	109.51/18.09	14.56	0.27	10.10	0.92	1.56	5.03	11.06	4.83	4.91
111.62/16.55	111.75/16.60	14.76	0.10	2.23	1.01	0.91	0.54	3.13	3.60	0.95
121.28/18.87	121.15/18.82	14.84	1.79	1.07	4.08	0.93	3.68	1.09	4.17	2.21
108.95/10.50	108.85/10.59	14.95	2.34	2.68	1.92	12.61	3.76	2.88	8.37	12.61
均值			3.16	2.06	1.75	2.96	4.99	3.43	4.42	4.54

表 4 星下观测点与验潮站处,  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  分潮振幅绝对均差  $\Delta\bar{H}$  和迟角绝对均差  $\Delta\bar{g}$

Tab. 4 Differences of the amplitude and phase lag between the T/P solutions and the observations of tidal stations for  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ , and  $O_1$  constituents

结果来源	$\Delta\bar{H}$ /cm				$\Delta\bar{g}$ /°			
	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$
本文	3.16	2.06	1.75	2.96	6.87	13.64	8.50	6.72
赵云霞等 <sup>[13]</sup>	2.00	—	2.60	—	3.70	—	7.10	—
暴景阳等 <sup>[9]</sup>	1.61	0.51	0.85	0.75	3.20	22.20	3.60	3.90
王延强等 <sup>[11]</sup>	4.40	2.40	3.10	3.30	7.70	13.20	7.20	7.80
Fang 等 <sup>[12]</sup>	6.50	2.50	4.50	2.70	9.40	14.00	7.10	9.90
李培良等 <sup>[10]</sup>	11.91	—	4.73	—	28.43	—	11.60	—

注: —表示论文中未涉及此分潮误差的分析

总的来看, 调和分析所得星下观测点处  $K_1$  分潮的误差相对最小,  $M_2$ 、 $S_2$  和  $O_1$  分潮结果总体偏差与前人研究相当, 上述结果表明: 利用 1992~2016 年的卫星高度计数据进行调和分析所得结果是可信的。

## 2.2 南海同潮图

### 2.2.1 双调和样条插值得同潮图

以美国国家海洋大气局发布的水深数据 ETOPOS 为参考, 制作了分辨率为  $5' \times 5'$  的插值参考点。将调和和分析所得  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮的振幅  $H$

和迟角  $g$  转化为  $H\sin g$  和  $H\cos g$ , 然后采用双调和样条插值法对其进行插值, 再将插值所得网格点处的  $H\sin g$  和  $H\cos g$  转化为振幅  $H$  和迟角  $g$ , 进而绘制了四个主要分潮的同潮图(图 2)。

### 2.2.2 与 TPXO7.2 模式同潮图的对比

TPXO7.2 是由俄勒冈大学开发的全球海洋潮汐模型, 该模式以拉普拉斯潮汐方程组为基础, 同化了 T/P、Jason 卫星高度计和验潮站数据<sup>[14]</sup>。高秀敏等<sup>[14]</sup>采用南海 60 个验潮站的调和常数资料对 TPXO7.2

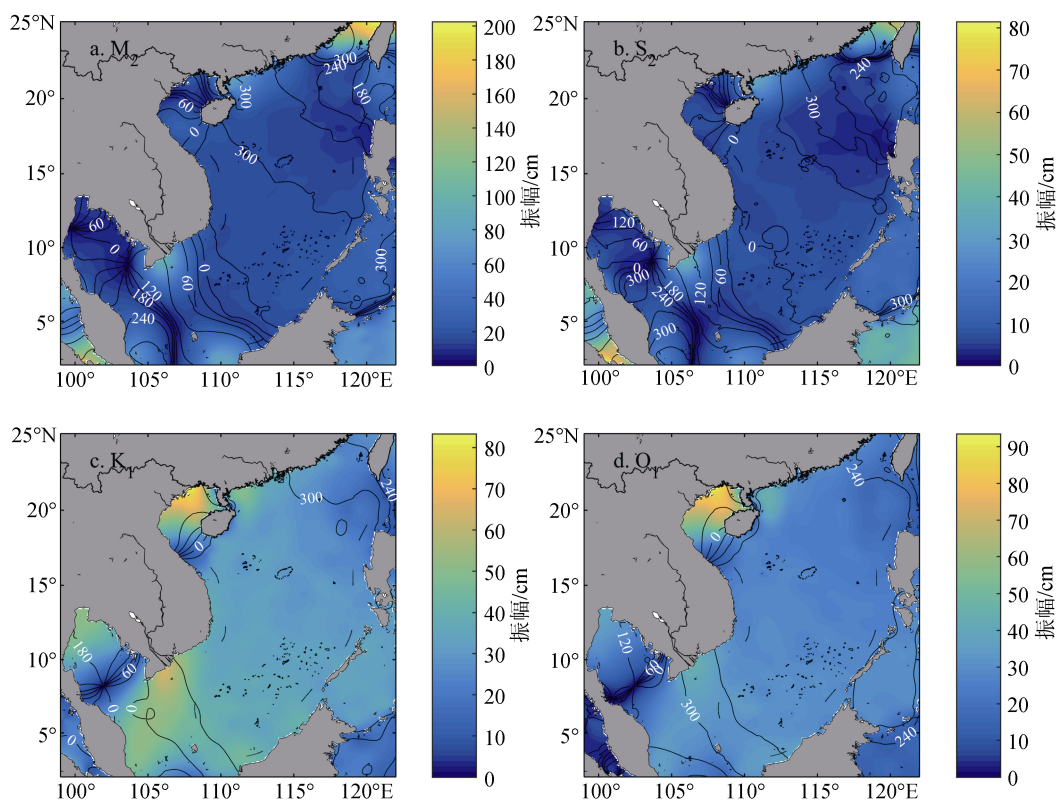


图 2 双调和样条插值得到的南海同潮图

Fig. 2 Cotidal charts obtained from the interpolation method in the South China Sea

注: 实线: 等迟角线(单位: °), 图 3 同



模式结果进行了评估,  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮的拟合程度均大于 83%。此外, TPXO7.2 模式结果与本文 141 个验潮站处  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮的矢量均差分别为: 12.68、6.32、9.32 和 7.23 cm。上述结果表明: TPXO7.2 模式结果在南海有较高的准确度, 可用于评估双调和样条插值方法所得南海同潮图。

利用 TPXO7.2 模式结果绘制了南海四个主要分

潮的同潮图(图 3), 并将其作为基准, 与插值所得同潮图进行了对比。从同潮图整体分布来看, 双调和样条插值所得四个分潮的同潮图在南海中部、南海南部和泰国湾等绝大部分研究区域与 TPXO7.2 模式所得同潮图的等振幅线和等迟角线的变化趋势较为接近; 在雷州半岛附近海域、台湾海峡和泰国湾湾顶等少数浅水海域与 TPXO7.2 模式的同潮图存在一定的误差。

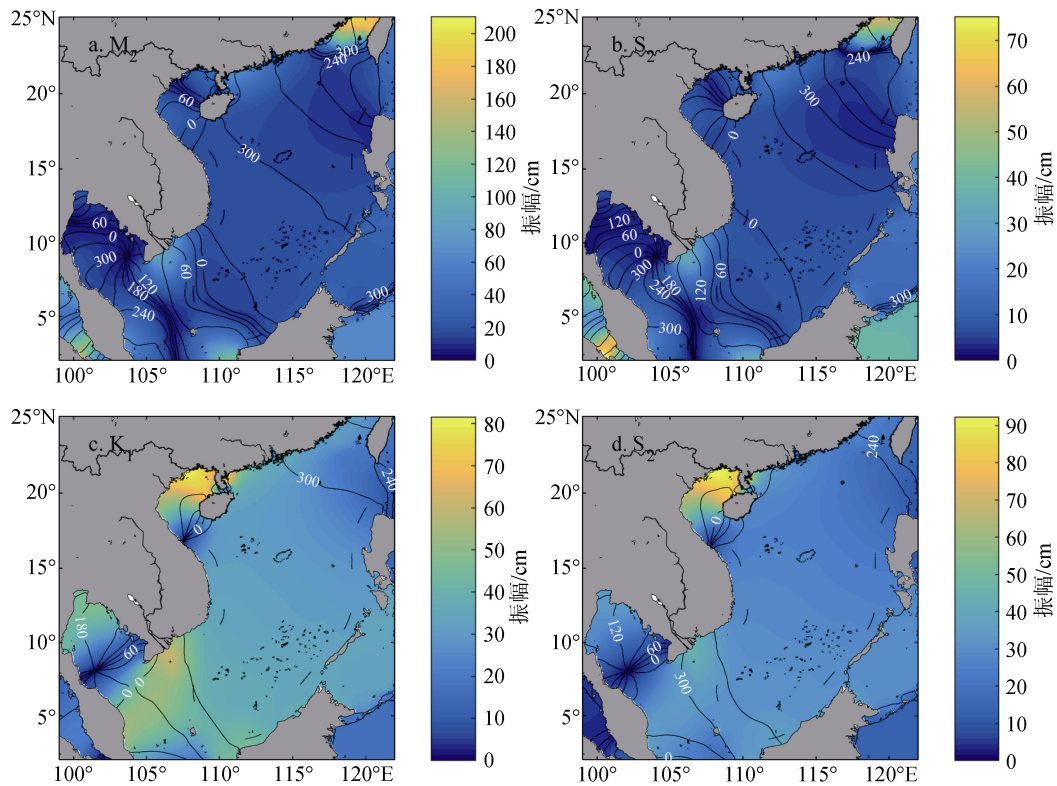


图 3 TPXO7.2 模式得到的南海同潮图

Fig. 3 Cotidal charts obtained from TPXO7.2 model in the South China Sea

为了定量计算插值结果和 TPXO7.2 模式结果之间的误差, 将南海 48 500 个网格点处双调和样条插值所得调和常数和 TPXO7.2 模式结果进行了比较, 四个主要分潮的矢量差在南海的分布见图 4, 整体误差统计结果见表 5。可以看出, 四个分潮的矢量差在远离陆地的开阔海域都小于 4 cm, 矢量差大于 10 cm 的网格点大多分布在雷州半岛附近海域和台湾海峡等少数近岸浅水海域, 这可能与 TPXO7.2 模式在我国近海海域精度较差有关<sup>[15]</sup>。车贝雪夫多项式广泛应用于气象要素插值<sup>[16]</sup>, 车贝雪夫多项式插值所得的  $O_1$  分潮的同潮图与 TPXO7.2 模式结果误差最小, 振幅绝均差和迟角绝均差分别为: 4.49 cm 和 17.58°, 而双调和样条插值所得  $O_1$  分潮的同潮图与 TPXO7.2

模式结果振幅绝均差和迟角绝均差分别为: 1.43 cm 和 6.06°, 双调和样条插值所得结果明显优于车贝雪夫多项式插值结果。此外, 双调和样条插值所得  $M_2$  分潮的同潮图与 TPXO7.2 模式结果误差最大, 振幅绝均差和迟角绝均差分别为: 3.06 cm 和 7.37°, 但也在合理范围之内。以上结果表明: 双调和样条插值结果和 TPXO7.2 模式结果之间整体误差较小。

### 2.2.3 与验潮站数据的对比

为了进一步验证利用双调和样条插值法所得同潮图的精度, 比较了 141 个验潮站处双调和样条插值所得四个主要分潮调和常数和验潮站观测结果, 四个主要分潮振幅插值结果与验潮站观测结果的对比见图 5, 振幅绝均差、迟角绝均差和矢量均差结果

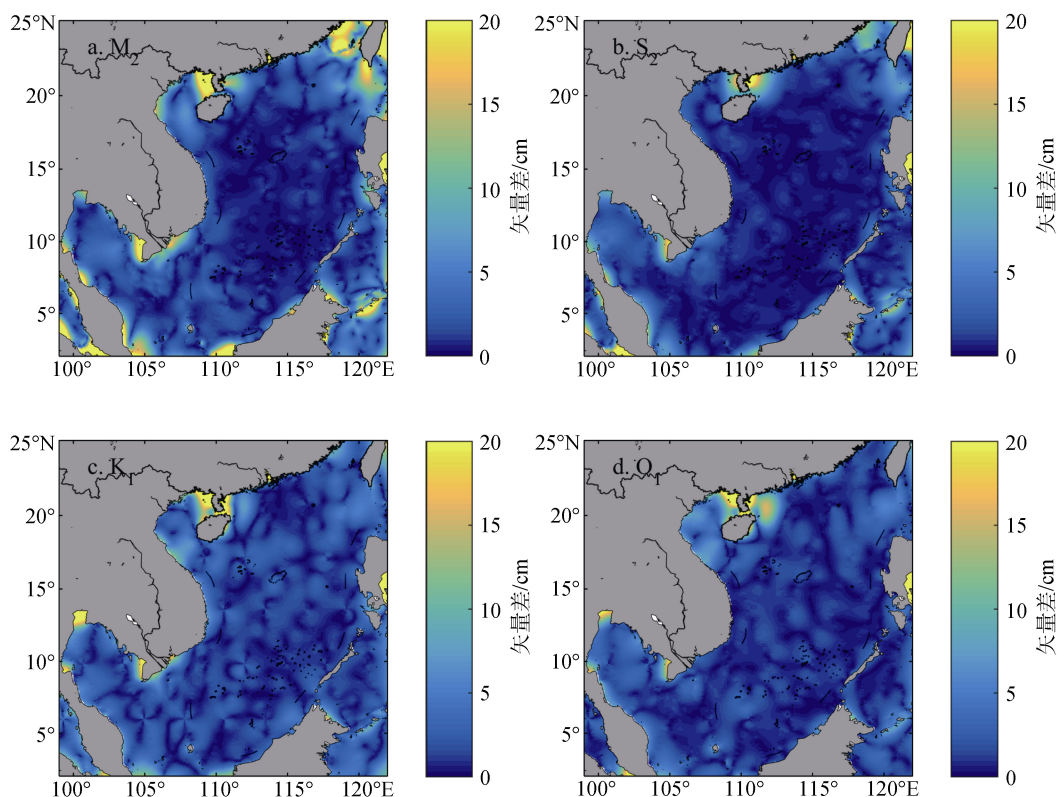


图 4 双调和样条插值结果和 TPXO7.2 模式结果之间矢量差分布

Fig. 4 Distribution of vector difference between the result of the interpolation method and that of TPXO7.2 model

表 5 双调和样条插值结果与 TPXO7.2 模式结果整体误差  
Tab. 5 Comparison between the interpolated harmonic constants and those in the TPXO7.2 model

分潮类型	$\Delta\bar{H}$ /cm	$\Delta\bar{g}$ /°	$\bar{\Delta}$ /cm
M <sub>2</sub>	3.06	7.37	4.69
S <sub>2</sub>	1.63	9.55	2.46
K <sub>1</sub>	1.94	4.80	3.13
O <sub>1</sub>	1.43	6.06	2.42

见表 6。可以看出, M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 四个主要分潮的矢量均差分别为 22.59、10.26、10.24 和 8.51 cm, 平均相对误差均小于 36%。车贝雪夫多项式插值所得 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 分潮的矢量均差分别为 46.15、14.93、16.60 和 14.83 cm, 均大于双调和样条插值方法所得误差, 进一步说明双调和样条插值所得结果优于车贝雪夫多项式插值结果。以上结果说明利用双调和样条插值所得结果与利用验潮站观测资料提取的调和常数误差较小, 能够较好地刻画四个主要分潮的特征。

李培良等<sup>[10]</sup>利用正交潮响应法对南海 T/P 高度计资料进行了潮波分析, 并按照潮汐在海洋内部的变化向岸边插值, 与 53 个验潮站处的主要分潮数据

进行了对比, 结果表明: K<sub>1</sub> 分潮振幅和迟角的平均绝对误差分别是 4.73 cm 和 11.6°, M<sub>2</sub> 分潮振幅和迟角的平均绝对误差分别是 11.91 cm 和 28.4°。高秀敏等<sup>[17]</sup>利用一个考虑内潮耗散的二维潮波模型模拟了南海 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 四个主要分潮, 并与南海 63 个验潮站和 24 个 T/P 卫星高度计轨道交叉点处的调和常数进行了对比, M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 四个主要分潮的振幅绝对均差分别为: 13.57、3.09、12.23 和 3.81 cm, 迟角绝对均差分别为: 17.41°、13.92°、24.97°和 19.27°。可以看出, 利用双样条调和插值方法所得南海四个主要分潮的误差与前人利用正交潮响应法或者数值模拟方法得到的误差相近, 但本文所采用的双调和样条插值方法计算量更小、更易实施, 是一种有效获取南海同潮图的方法。

#### 2.2.4 无潮点位置的对比

本文得到的 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 四个主要分潮的无潮点均分布在泰国湾(具体位置见表 7), M<sub>2</sub> 分潮在泰国湾有两个旋转潮波系统, 湾口的无潮点呈顺时针旋转, 潮波系统特征和无潮点位置与 Fang 等<sup>[18]</sup>在泰国湾的潮汐数值拟合结果相近, 湾顶的逆时针无潮点离陆地很近, 位置与曹德明等<sup>[19]</sup>的结果最接近

(见表 7),  $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  分潮均在泰国湾有一个无潮点,  $S_2$  分潮的潮波系统呈顺时针旋转,  $K_1$  和  $O_1$  分潮的潮波系统都是逆时针方向旋转, 三者的无潮点位置均与前人的研究结果基本一致。  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个

主要分潮无潮点位置的比较结果表明: 双调和样条插值所得结果不仅能够在整体上刻画南海四个主要分潮的特征, 还能较为准确地再现无潮点位置这一局部特征。

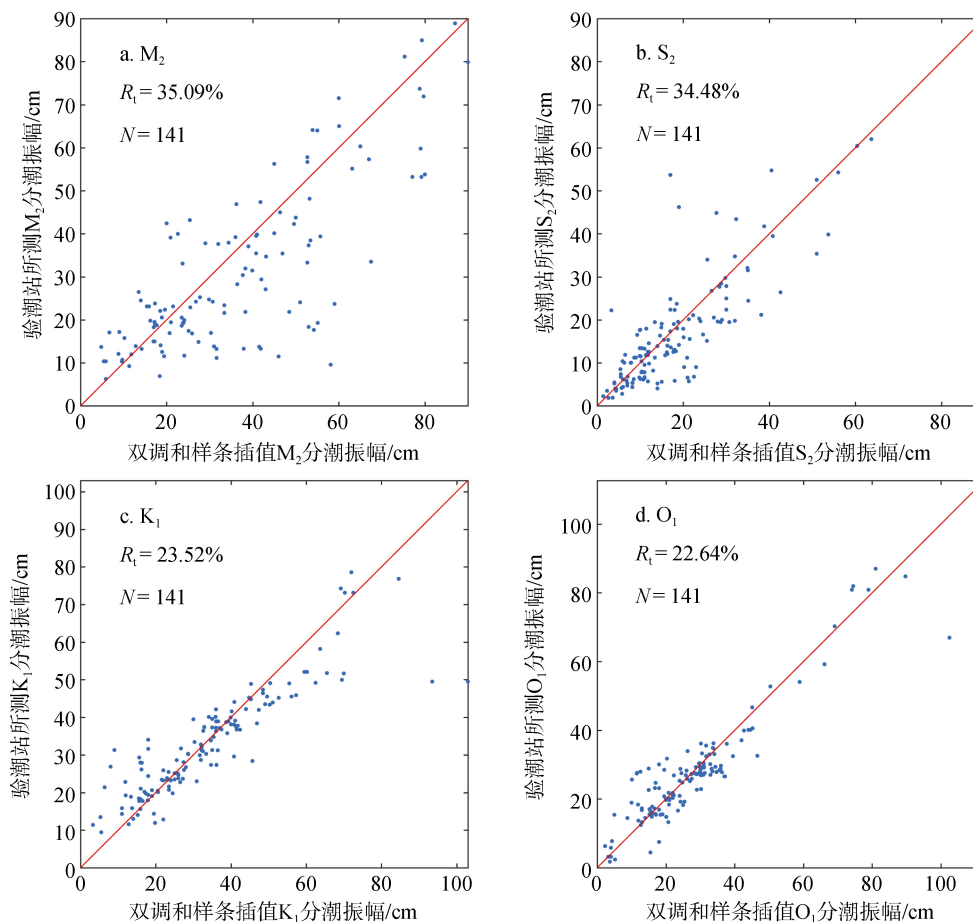


图 5 双调和样条插值振幅和验潮站处观测振幅的比较

Fig. 5 Comparison of amplitude between the result of the interpolation method and the observations of tidal stations

注:  $R_1$ : 振幅插值结果相对于验潮站的平均相对误差;  $N$ : 匹配对数量

Note:  $R_1$ : average relative error of the interpolation results relative to that of tidal stations;  $N$ : the number of matching pairs

表 6 双调和样条插值结果与验潮站观测结果的误差统计  
Tab. 6 Comparison between the interpolated harmonic constants and the observations of tidal stations

分潮类型	$\Delta\bar{H}$ /cm	$\Delta\bar{g}$ /°	$\bar{\Delta}$ /cm
$M_2$	12.83	23.87	22.59
$S_2$	5.05	32.13	10.26
$K_1$	5.33	16.48	10.24
$O_1$	4.53	16.50	8.51

### 3 结论

基于 1992 年至 2016 年卫星高度计海面高度资料, 运用调和分析方法得到了南海区域卫星星下观

测点处  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮的调和常数, 并通过和验潮站观测数据以及前人研究结果的对比验证了调和和分析结果的准确性。

利用双调和样条插值方法对星下观测点处四个主要分潮的调和常数进行插值, 进而绘制了南海  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个主要分潮的同潮图。插值结果在在雷州半岛附近海域和台湾海峡等少数近岸浅水区域与 TPXO7.2 模式结果误差较大, 在其他海域均与 TPXO7.2 模式结果误差较小; 与 141 个验潮站处观测结果的矢量均差分别为 22.59、10.26、10.24 和 8.51 cm; 所得四个主要分潮的无潮点数量和位置与前人研究结果基本一致。此外, 利用双样条调和插值



表 7 双调和样条插值同潮图与前人研究在泰国湾 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 分潮无潮点的位置比较

Tab. 7 Comparison of position of amphidromic point between the result of the interpolation method and that of previous studies for M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>1</sub> and O<sub>1</sub> constituents in the Gulf of Thailand

分潮类型	沈育疆等 <sup>[20]</sup>	曹德明等 <sup>[19]</sup>	Fang 等 <sup>[18]</sup>	高秀敏 <sup>[17]</sup>	本文
M <sub>2</sub>	105°00'E, 7°36'N	103°30'E, 8°25'N	103°20'E, 8°35'N	103°30'E, 8°05'N	103°50'E, 8°45'N
	100°30'E, 11°12'N	99°40'E, 11°10'N	100°00'E, 11°20'N	100°15'E, 10°00'N	99°50'E, 11°10'N
S <sub>2</sub>	105°00'E, 7°36'N	—	104°40'E, 9°25'N	—	104°27'E, 8°50'N
	100°30'E, 11°12'N	—	—	—	—
K <sub>1</sub>	102°03'E, 8°37'N	102°12'E, 8°18'N	102°20'E, 8°10'N	102°05'E, 8°10'N	102°30'E, 8°20'N
O <sub>1</sub>	102°03'E, 8°37'N	—	102°10'E, 8°30'N	102°00'E, 8°10'N	102°35'E, 8°35'N

注: —表示论文中未涉及此分潮无潮点位置的分析

方法所得南海四个主要分潮的误差与前人利用正交潮响应法或者数值模拟方法得到的误差相近。上述结果表明: 双调和样条插值方法是一种有效的插值方法, 能够通过卫星高度计所得调和常数数据进行插值获取较为准确的南海同潮图。

参考文献:

[1] 刘昆. 吕宋海峡内潮生成与传播的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2016.  
Liu Kun. Numerical study on the generation and propagation of internal tides in the Luzon Strait[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, CAS, 2016.

[2] 李明杰. 南海北部内潮的三维模拟与研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.  
Li Mingjie. Three-dimensional Numerical Simulation and Analysis of Internal Tides in the Northern South China Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, CAS, 2012.

[3] Yangi, T, A Morimoto, K Ichikawa. Co-tidal and Co-range Charts for the East China Sea and the Yellow Sea Derived from Satellite Altimetric Data[J]. Journal of Oceanography. 1997, 53: 303-309.

[4] Fang G, Wang Y, Wei Z, 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(C11).

[5] 范丽丽. 风暴潮数值同化研究和高度计资料拟合方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
Fan Lili. Research on simulation of storm surges and application of altimeter data[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.

[6] 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 北京科学出版社, 1980: 127-168.  
Chen Zongyong. Tidalogy[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1980: 127-168.

[7] 夏吉庄. 双调和样条内插方法在测井和地震资料整合中的应用[J]. 石油与天然气地质. 2010, 31(02): 244-249.  
Xia Jizhuang. An application of biharmonic spline inter-

polarization to integration of logging and seismic data[J]. OIL and GAS GEOLOGY. 2010, 31(02): 244-249.

[8] Sandwell D. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data[J]. Geophysical Research Letter, 1987, 14(2): 139-142.

[9] 暴景阳, 晁定波, 李建成. 南中国海 TOPEX/POSEIDON 轨迹交叉点测高数据的潮汐调和与分析[J]. 测绘学报. 2000, 1: 19-25.  
Bao Jingyang, Chao Dingbo, Li Jiancheng. Tidal Harmonic Analysis near Crossovers of TOPEX /POSEIDON Ground Track in South China Sea[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica | Acta Geod Cartogr Sin. 2000, 1: 19-25.

[10] 李培良, 左军成, 李磊, 等. 南海 TOPEX/POSEIDON 高度计资料的正交响应法潮汐分析[J]. 海洋与湖沼. 2002, 3: 287-295.  
Li Peiliang, Zuo Juncheng, Li Lei, et al. Orthogonalized convolution method for analysis of South China Sea tidal data from TOPEX/Poseidon[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 3: 287-295.

[11] 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, 2: 35-40.  
Wang Yanqiang, Zhang Tianyu, Zhu Xueming. Tidal characteristics analysis in the South China sea by 18.6 years satellite altimetry data[J]. Marine Forecasts. 2014, 2: 35-40.

[12] Fang G, Kwok Y, Yu K, 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.

[13] 赵云霞, 魏泽勋, 王新怡. 利用 T/P 卫星高度计资料调和与分析南海潮汐信息[J]. 海洋科学. 2012(05): 10-17.  
Zhao Yunxia, Wei Zexun, Wang Xinyi. The South China Sea tides analysis based on TOPEX/Poseidon altimetry[J]. Marine Sciences. 2012(05): 10-17.

[14] 高秀敏, 魏泽勋, 吕咸青, 等. 全球大洋潮汐模式在南海的准确度评估[J]. 海洋科学进展. 2014(01): 1-14.  
Gao Xiumin, Wei Zexun, Lv Xianqin, et al. Accuracy as-

- essment of Global Ocean Tide Models in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2014(01): 1-14.
- [15] 付延光, 周兴华, 周东旭, 等. 利用验潮站资料的中国近岸海潮模型精度评估[J]. *测绘科学*. 2017, 42(08): 28-32.  
Fu Yanguang, Zhou Xinghua, Zhou Dongxu, et al. Accuracy analysis of ocean tidal model over China seas based on the gauge data[J]. *Science of Surveying and Mapping*. 2017, 42(08): 28-32.
- [16] 王冰, 海云莎. 用车贝雪夫多项式作中国西南雨季降水场预报[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2001(04): 294-296+302.  
Wang Bing, Hai Yunsha. Forecasting the Precipitation Distribution of Southwest of China with Chebyshev Polynomials[J]. *Journal of Yunnan University*, 2001(04): 294-296+302.
- [17] 高秀敏. 考虑内潮耗散的南海潮波伴随同化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
Gao Xiumin. Data assimilation tides in the South China Sea using adjoint method considering the internal tide dissipation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [18] Fang G, Kwok Y, Yu K, 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.
- [19] 曹德明, 方国洪, 黄企洲, 等. 南沙及其西南海域的潮波系统[J]. *海洋与湖沼*. 1997(02): 198-208.  
Cao Demin, Fang Guohong, Huang Qizhou, et al. Tidal regime in the Nansha sea area and its adjacent southwest waters[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*. 1997(02): 198-208.
- [20] 沈育疆, 胡定明, 梅丽明, 等. 南海潮汐数值计算[J]. *海洋湖沼通报*. 1985(01): 1-11.  
Shen Yujiang, Hu Singming, Mei Liming, et al. Numerical computation of the tides in the South China Sea.[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*. 1985(01): 1-11.

# Extraction of cotidal charts in the South China Sea from satellite altimeter sea surface height data

ZHENG Hao<sup>1, 2</sup>, LI Xiao-chun<sup>1, 2</sup>, WANG Dao-sheng<sup>1, 2</sup>, JIANG Hao-yu<sup>1, 2</sup>, ZHAO En-jin<sup>1, 2</sup>

(1. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Shenzhen Research Institute, China University of Geosciences, Shenzhen 518057, China)

**Received:** Jan. 2, 2019

**Key words:** satellite altimetry; biharmonic spline interpolation; cotidal charts

**Abstract:** With the continuous enrichment of satellite altimeter data, it becomes possible to obtain cotidal charts by interpolating or fitting the tidal harmonic constants derived from the satellite altimeter data. The satellite altimeter data, derived from T/P, Jason-1 and Jason-2, are analyzed to obtain the harmonic constants of the four major tidal constituents, including  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$  constituents, at satellite tracking points, which will be interpolated by using the biharmonic spline interpolation method to obtain the corresponding cotidal charts in the South China Sea (SCS). Firstly, the harmonic constants of four major tidal constituents ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$  constituents) at satellite tracking points in SCS are obtained by using the harmonic analysis based on the sea surface height in the satellite altimeter data. Comparison of 40 matching pairs between satellite tracking points and tidal stations shows that the maximum value of averaged vectorial difference is 4.99 cm, indicating that the harmonic constants from altimeter data are relatively accurate. Then, cotidal charts of the four major tidal constituents in SCS are obtained by spatially interpolating the harmonic constants with the biharmonic spline interpolation method. The averaged vectorial difference between the interpolation results and the results in the TPXO7.2 model are 4.69, 2.46, 3.13 and 2.42 cm for the  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$  constituents, respectively, and those between the interpolation results and the observed results at tidal stations data are 22.59, 10.26, 10.24 and 8.51 cm. Furthermore, the positions of the amphidromic points for the four major tidal constituents in the interpolated results are close to those in previous studies. The aforementioned experimental results show that the cotidal charts can be obtained by interpolating the tidal harmonic constants, derived from satellite altimeter data, with the biharmonic spline interpolation method.

(本文编辑: 李晓燕)