

# 基于卫星高度计数据的全球海洋潮汐特征分析\*

许安迪, 陈学恩\*\*

(中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 本文基于长度为 18.61 年(1992-10-03~2011-04-29)的 TOPEX/Poseidon, Jason-1 及 Jason-2 卫星高度计沿轨数据, 选择全球海域 48 943 个计算点进行调和与分析, 提取了四大分潮( $M_2, S_2, K_1, O_1$ )的潮汐调和常数。与分布在不同水深下的 162 个验潮站分析结果对比, 四大分潮的矢量均方根误差在水深超过 200 m 时分别为 5.28, 4.17, 2.41 和 1.17 cm, 表明分析结果真实可信。同时, 全球潮汐模式 TPXO9.1 输出结果也佐证了卫星高度计数据所得同潮图的准确性。在此基础上探究了在 18.61 年跨度上全球海洋的潮汐特征的变化, 对该 18.61 年中最初 2.97 年(1992-10-03~1995-09-18)和最末 2.97 年(2008-05-13~2011-04-29)的资料调和与分析并对比  $M_2$  分潮的结果, 发现全球大部分海域振幅和迟角变化不大; 振幅变化在中国近海可达 10 cm, 迟角变化大多分布在无潮点附近, 日本海周边海域及泰国湾北侧则有  $30^\circ$  左右的变化。

**关键词:** 卫星高度计; 18.61 年; 全球潮汐特征; 验潮站; 潮汐特征变化

**中图分类号:** P731.23

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-5174(2021)01-001-08

**DOI:** 10.16441/j.cnki.hdxh.20190417

**引用格式:** 许安迪, 陈学恩. 基于卫星高度计数据的全球海洋潮汐特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(1): 1-8.

XU An-Di, CHEN Xue-En. Analysis of global tidal characteristics using satellite altimetry data[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(1): 1-8.

由于潮汐的海洋观测易受仪器、天气、地形和经济的制约, 难以得到长期的大面站观测资料, 而通过星载雷达高度计可以对海平面高度、有效波高和后向散射进行全天候检测, 故自 1970 年代海洋卫星测高技术兴起, 潮汐的研究就开始趋于依赖高度计测高技术。特别是 1992 年发射升空的 TOPEX/Poseidon(以下简称 T/P)及其后续卫星, 数据质量有明显提高<sup>[1]</sup>, 为物理海洋学研究提供了重要资料, 在潮汐的研究方面取得了丰硕成果。

最先从卫星高度计数据中提取潮汐信息的是 Cartwright 和 Ray<sup>[2]</sup>, 他们通过 Geosat 高度计卫星第一年的数据对全球潮汐进行研究, 给出了第一个基于卫星高度计数据的全球潮汐模型。此后, Ma 等<sup>[3]</sup>利用 T/P 卫星第一年的观测数据, 对 Cartwright 和 Ray<sup>[2]</sup>给出的模型进行了校正。关于利用高度计资料提取潮汐信息的研究, 国内学者做了大量工作, 但大多聚焦于中国近海<sup>[4-10]</sup>; 而在全球海域的研究较为匮乏, 如沈春等<sup>[11]</sup>通过 10 年 T/P 资料对四大分潮进行了分析, Wang 等<sup>[12]</sup>利用 16 年 T/P 及 Jason-1 卫星资料聚焦于八大分潮的分析, 宋箬阳等<sup>[13]</sup>对 18.61 年高度计数据

进行分析, 并探究了不同数据长度对分析结果的影响, 但涉及通过高度计数据探究长时间跨度上全球潮汐特征变化的研究颇少。

随着全球气候变暖, 海平面不断上升。李大炜等<sup>[14]</sup>利用 T/P、Jason-1 及 Jason-2 高度计卫星的海面高数据和验潮站数据分析了全球海平面变化趋势, 表明在 1993—2011 年间全球海平面以  $(3.12 \pm 0.4)$  mm/a 的速率上升。海平面上升会减小陆架浅水区的底摩擦及侧摩擦作用, 从而导致潮波传播发生变化, 造成潮差及潮时的变化<sup>[15]</sup>。而近年来兴起的填海造陆等人类活动也必然会导致岸线地形的变化。孟云等<sup>[16]</sup>利用 FVCOM 模型, 基于 2004 年和 2014 年的渤海岸线地形资料, 证明当岸线地形变化时, 潮波系统和潮流性质也随之发生改变。综上, 气候变化和人类活动造成的海洋状态改变将对潮波系统产生一定影响。月球赤道面与地球赤道面之间的夹角称为月球赤纬角, 其变化周期为 18.61 年, 也就是最长的分潮周期。那么在 18.61 年跨度上, 全球海洋的潮汐特征究竟存在如何的改变? 这是本文所关心的问题。

本文采用 18.61 年(1992-10-03~2011-04-29)的

\* 基金项目: 国家重点研究发展计划项目(2016YFC1401300)资助

Supported by the National Key Research and Development Projects of China (2016YFC1401300)

收稿日期: 2019-12-08; 修订日期: 2020-05-15

作者简介: 许安迪(1998-), 女, 硕士生。E-mail: xad@stu.ouc.edu.cn

\*\* 通讯作者: E-mail: xchen@ouc.edu.cn

T/P, Jason-1 和 Jason-2 卫星高度计沿轨数据,通过验潮站实测数据和同潮图探讨验证了高度计资料应用的可靠性与准确性;在此基础上,对比分析了特定时段资料,即该 18.61 年中最初 2.97 年(1992-10-03~1995-09-18)和最末 2.97 年(2008-05-13~2011-04-29)的结果,以探究在 18.61 年变化周期跨度上  $M_2$  分潮特征的变化。

## 1 数据与方法

### 1.1 卫星数据

TOPEX/Poseidon(以下简称 T/P)高度计卫星于 1992 年 8 月 10 日由法国太空总署(CNES)和美国太空总署(NASA)联合发射升空,轨道周期为 112.0 min,重复周期为 9.915 6 d。卫星环绕地球多圈后回到原位对应的星下点轨迹被称为一个 cycle,每环绕地球一圈中最南和最北两端之间的星下点轨迹被称为一个 pass;一个 cycle 包含 127 个公转圈数,即 254 个 pass,其中单行为上行,双行为下行。位于赤道处的卫星离地参考高度为 1 336 km,相邻轨道距离为 315 km。T/P 卫星开始记录数据(cycle 2)的时间是发射同年的 10 月 3 日。

Jason-1 卫星于 2001 年 12 月 7 日发射升空,2002 年 1 月 15 日开始记录数据。在 Jason-1 卫星发射 7.5 年之后,Jason-2 卫星于 2008 年 6 月 20 日发射升空,同年 7 月 12 日开始记录数据,时至今日仍在运行。Jason-1 和 Jason-2 卫星作为 T/P 卫星的后续继任,重复周期和初始轨道均与其一致。

本文采用的数据来自宋箐阳等<sup>[13]</sup>处理后的高度计沿轨数据,在卫星覆盖的全球海域内( $66^\circ\text{S}\sim 66^\circ\text{N}$ )共确定了 48 943 个计算点(见图 1(a))。数据长度自 1992 年 10 月~2012 年 4 月,约 19.5 年。

月球白道面与地球赤道面之间的夹角称为月球赤纬角,最小为  $18.5^\circ$ ,最大为  $28.5^\circ$ ,两个极值的变化周期为 18.61 年,即为最长的分潮周期。为进行调和分析,取上述数据中最接近 18.61 年的长度(约 18.609 年),即 1992 年 10 月 3 日~2011 年 4 月 29 日,共 685 个 cycle,每个星下点水位序列的时间间隔均为一个卫星重复周期 9.915 6 d。由于三颗卫星在轨时间存在重叠,以重叠期均采用后一颗卫星数据的原则,本文具体选取的卫星数据如表 1 所示。

### 1.2 验潮站数据

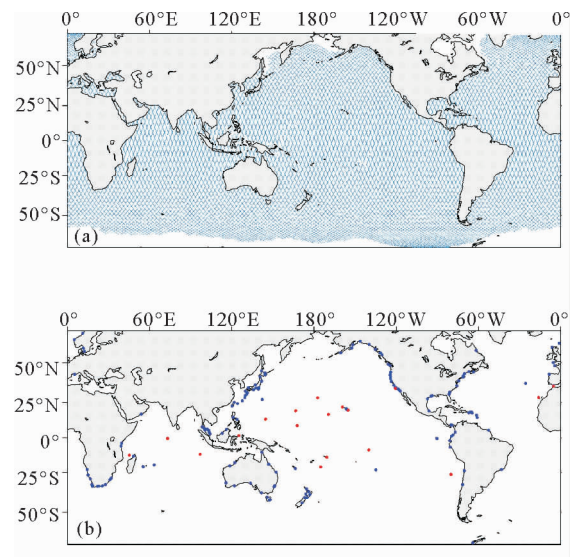
本文使用的验潮站数据取自夏威夷大学海平面中心(University of Hawaii Sea Level Center,以下简称 UHSLC)提供的质控后逐时数据(Research Quality Data)。鉴于高度计数据时间跨度为 1992-10-03~2011-04-29,本文从 UHSLC 提供的全部验潮站中筛选出了数据时间跨度能覆盖 1992-10-03~2011-04-29 的

验潮站,对同样的 18.61 年数据进行调和分析,以排除不同时间跨度下可能的水深地形改变引起的潮汐特征变化。在  $66^\circ\text{N}\sim 66^\circ\text{S}$  共有 162 个验潮站,其中水深超过 200 m 的有 18 个,水深在 200 m 之内的有 144 个。站位分布如图 1(b)所示。

表 1 本文使用的卫星数据

Table 1 The satellite data used in this paper

卫星传感器 Missions	周期数 Cycles	日期 Date period
T/P	cycle2~cycle343	1992-10-03~2002-01-05
Jason-1	cycle1~cycle239	2002-01-15~2008-07-02
Jason-2	cycle1~cycle104	2008-07-12~2011-04-29



(红色圆点代表水深超过 200 m 的站位,蓝色圆点代表水深在 200 m 之内的站位。Red dots indicate stations with depth of over 200 m and blue dots indicate depth of within 200 m.)

图 1 卫星星下点(a)及验潮站(b)位置分布

Fig.1 Locations of sub-satellite points (a) and gauge stations (b)

### 1.3 TPXO9.1 数据

本文在提取 18.61 年高度计资料的四大分潮同潮图时,作为佐证的是美国俄勒冈州立大学(Oregon State University)提供的 TPXO9.1 全球海洋模式输出的四大分潮调和常数结果。该模式基于拉普拉斯潮汐方程,除了对 T/P 系列高度计沿轨数据进行同化外,还包括高纬地区的 ERS1,2/Envisat 高度计沿轨数据和南北极测站数据<sup>[17]</sup>。其数据分辨率为  $1/6^\circ$ ,提供了 8 个主要分潮 ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$  和  $Q_1$ )、2 个长周期分潮 ( $M_f$ ,  $M_m$ )、3 个浅水分潮 ( $M_1$ ,  $MS_1$ ,  $MN_1$ ) 及辐射潮  $S_1$  和  $2N_2$  共 15 个分潮的调和常数信

息。

作为成熟的海洋潮汐模式, TPXO9.1 在深海大洋中的  $M_2$  分潮均方根误差仅为 0.5 cm, 在浅海及陆架处也仅 3 cm 左右, 结果准确可靠, 足以作为本文分析同潮图时的参照。尽管 TPXO9.1 中同化有 T/P 系列卫星高度计数据, 但依然能在一定程度上佐证同潮图的准确性。

#### 1.4 高度计资料的高频混淆

高频混淆是指卫星高度计对海表面高度进行离散采样时, 频谱上形成虚假谱峰, 高频信号向低频转移造成混乱的现象<sup>[18]</sup>。当采样间隔  $\Delta t$  给定时, 能分辨出的最高频率, 即折叠频率  $f_N$  由(1)式给出

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1)$$

T/P 系列卫星的取样间隔为 9.915 6 d, 远大于典

型半日及全日潮的变化周期, 故其相应的折叠频率也远低于典型分潮的频率。根据 Rayleigh 准则, 分离两个不同频率的潮汐信号所需要的时间  $T$  应满足(2)式

$$T > \frac{1}{F_i - F_j} \quad (2)$$

式中  $F$  代表分潮周期。由此计算得到 8 个主要分潮基本分辨所需资料长度(见表 2)。如表中下划线加粗字体所示, 将  $M_2$  和  $Q_1$ ,  $N_2$  和  $O_1$  分潮分辨开需要 1.63 年的资料, 将  $M_2$  和  $S_2$  分潮分辨开需要 2.97 年的资料, 而最长的分辨资料也不过是分离  $K_2$  和  $P_1$  所需的 9.317 年, 其余分潮只需一年的资料就足够被分辨, 远小于本文用于分析的 18.61 年。因此在使用 18.61 年高度计资料时无需考虑高频混淆的影响, 使用超过 2.97 年的资料也足以将四大分潮( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )分离。

表 2 8 个主要分潮基本分辨所需资料长度

Table 2 Alias synodic periods of each pair of 8 major constituents

分潮 Constituent	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$	$N_2$	$K_2$	$P_1$	$Q_1$
$M_2$	0	<b>2.97</b>	0.27	0.47	0.67	0.60	0.56	<b>1.63</b>
$S_2$		0	0.24	0.56	0.86	0.50	0.47	<b>1.05</b>
$K_1$			0	0.17	0.19	0.47	0.50	0.32
$O_1$				0	<b>1.63</b>	0.27	0.26	0.37
$N_2$					0	0.32	0.31	0.47
$K_2$						0	<b>9.18</b>	0.95
$P_1$							0	0.86
$Q_1$								0

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 高度计分析结果准确性评估

2.1.1 与验潮站观测结果的综合比较 本文对上述计算区域(66°S~66°N)内 48 943 个计算点上 18.61 年的水位时间序列进行调和分析, 得到 68 个分潮的潮汐调和常数; 同样, 对上述选取的计算区域内 162 个验潮站的水位资料分别进行调和分析, 得到每个站位的调和常数。从中选取主要的半日分潮  $M_2$ 、 $S_2$  和主要的全日分潮  $K_1$ 、 $O_1$ , 将高度计分析结果插值到上述站位, 与验潮站观测结果进行了综合对比, 以评估高度计分析结果的准确性。以下分别从调和常数的平均绝对偏差、绝对偏差范围及其百分比和矢量均方根误差三方面对不同分潮和不同水深进行讨论。

表 3 所示为四大分潮调和常数在全球海域及不同

水深下的平均绝对偏差。在全球海域, 四大分潮  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$  的平均振幅偏差分别为 6.91, 2.60, 1.39 和 1.05 cm。平均迟角偏差最大的是  $S_2$  分潮, 为 16.27°; 两个全日分潮的平均迟角偏差分别为 10.28° 和 10.17°, 较两个半日分潮低。从不同水深下的结果来看, 水深大于 200 m 时结果明显优于水深小于 200 m 的结果。对于两个偏差相对较大的半日分潮来说,  $M_2$  分潮在水深小于 200 m 时振幅偏差可达 7.49 cm, 而在水深大于 200 m 时振幅偏差仅有 2.15 cm;  $S_2$  分潮在水深小于 200 m 时迟角偏差达 16.98°, 而水深大于 200 m 时为 10.50°, 准确度也有着明显的提高。对于两个振幅较小的全日分潮, 调和常数在水深超过 200 m 时也有改善, 平均振幅偏差分别降低了 1.36 和 0.27 cm, 平均迟角偏差也分别有着 1.86° 和 2.38° 的降低。

表3 调和常数平均绝对偏差

Table 3 Mean absolute differences of the harmonic constants in different depth and global seas

	M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>		K <sub>1</sub>		O <sub>1</sub>	
	振幅差	迟角差	振幅差	迟角差	振幅差	迟角差	振幅差	迟角差
	Mean ΔH/cm	Mean Δg/(°)	Mean ΔH/cm	Mean Δg/(°)	Mean ΔH/cm	Mean Δg/(°)	Mean ΔH/cm	Mean Δg/(°)
深度大于 200 m Depth of over 200 m	2.15	8.59	1.05	10.50	0.09	8.62	0.81	8.05
深度小于 200 m Depth of within 200 m	7.49	12.05	2.80	16.98	1.45	10.48	1.08	10.43
全球海域 Global ocean	6.91	11.67	2.60	16.27	1.39	10.28	1.05	10.17

高度计分析结果与验潮站观测结果的调和常数绝对偏差范围及其所占百分比见表4、5。由表4可知,对于S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>分潮,振幅绝对偏差在2 cm之内的站点百分比分别为70.74%、75.61%及82.32%,对于M<sub>2</sub>分潮,也有超过60%的站点的振幅绝对误差小于4 cm。如表5所示,对于M<sub>2</sub>、K<sub>1</sub>和O<sub>1</sub>分潮,迟角绝对误差小于20°的站点均在90%左右,而对于上述提到平均迟角误差最大的S<sub>2</sub>分潮,迟角绝对误差小于20°的站点也超过了75%。

表4 四大分潮振幅绝对偏差范围及其所占百分比(%)

Table 4 Distribution of the absolute differences of amplitude

振幅 Amplitude	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
ΔH<1 cm	31.11	45.13	54.88	64.64
1 cm<ΔH<2 cm	12.80	25.61	20.73	17.68
2 cm<ΔH<4 cm	17.07	14.02	19.51	15.24
ΔH>4 cm	39.02	15.24	4.88	2.44

表5 四大分潮迟角绝对偏差范围及其所占百分比(%)

Table 5 Distribution of the absolute differences of phase

迟角 Phase	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
Δg<10°	42.68	33.54	69.51	68.90
10°<Δg<20°	45.73	42.07	20.12	19.51
Δg>20°	11.59	24.39	10.37	11.59

为客观比较高度计分析结果及验潮站观测结果的偏差,表6给出了4个主要分潮调和常数在全球及不同水深的矢量均方根误差(Vector root mean square difference)。矢量均方根误差综合考虑了分潮振幅和迟角的误差,能更客观地评估各分潮调和常数的准确度。计算公式由Le Provost等<sup>[19]</sup>给出,如式(3)所示。

其中T为分潮周期,N为验潮站个数

$$RMS = \left\{ \frac{1}{N} \sum_N \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \{ [A(\lambda, \varphi)]_2 - A(\lambda, \varphi) \cos[\omega t, g(\lambda, \varphi)]_1 \}^2 dt \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

四大分潮在全球海域中的矢量均方根误差分别为10.52、4.65、2.88和2.26 cm,而沈春等<sup>[11]</sup>使用10年T/P资料得到的此误差为16.70、6.14、6.29和3.94 cm,本文四大分潮的准确度均优于其结果。另外M<sub>2</sub>分潮的矢量均方根误差最大,O<sub>1</sub>分潮最小,这一趋势也与其结果一致。从不同水深下的结果对比来看,卫星高度计资料在水深低于200 m的浅海及陆架处误差相对较大,最大的M<sub>2</sub>分潮矢量均方根误差接近11 cm;而水深超过200 m时,最大的M<sub>2</sub>分潮矢量均方根误差也不过5.28 cm,最小的O<sub>1</sub>分潮仅为1.17 cm,四个分潮的准确度比水深小于200 m时都有着提高。

表6 四大分潮在全球及不同水深的矢量均方根误差

Table 6 Vector RMS differences of four major constituents in different depth and global seas /cm

RMS	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>2</sub>	O <sub>1</sub>
深度大于 200 m Depth of over 200 m	5.28	4.17	2.41	1.17
深度小于 200 m Depth of within 200 m	10.99	4.71	2.94	2.36
全球海域 Global ocean results	10.52	4.65	2.88	2.26
文献全球海域结果 <sup>[11]</sup> Global ocean results with Ref <sup>[11]</sup>	16.70	6.14	6.29	3.94

综上,本文的高度计分析结果是可信的。虽然在浅水仍存在一定缺陷,但这是由地形和计算点的限制决定的。在浅海由于地形的影响,潮汐特征变化较快,

轨道间隔在 300 km 左右的高度计卫星很难捕捉到精细的潮汐特征;另外,深水验潮站大多分布在开阔大洋中,而浅水验潮站大多位于岛屿及陆架附近,卫星高度计数据在岛屿附近不连续,数据平滑处理的结果准确度将弱于开阔大洋中的相应结果<sup>[5]</sup>。此外,验潮站观测资料中还包括陆架浅海处的边缘波及陆架波等现象引起的海面变化,而简单的资料分析方法还不能充分考虑这些影响<sup>[11]</sup>。

### 2.1.2 基于 18.61 年高度计资料的四大分潮同潮图

将上述高度计分析结果的调和常数插值到  $1^\circ \times 1^\circ$  的网格上进行四大分潮同潮图的绘制,并与全球海洋模式 TPXO9.1 的输出结果进行对比。

如图 3 所示,高度计分析结果中四大分潮的振幅与 TPXO9.1 相比,在大部分海域无明显差异,只是在加拿大东北侧近岸处高度计分析结果偏大。这是由于高度计卫星覆盖范围的限制,插值不能完全反映缺测处振幅的变化所致。对于  $M_2$  分潮,最大振幅超过 3.3 m,是所有分潮中振幅最大的一个;在赤道太平洋附近,印度洋中部和大西洋中部等中低纬海域存在超过 0.5 m 的振幅高值区。 $S_2$  分潮的最大振幅在 0.5 m 左右,高值区的分布与  $M_2$  分潮类似,只是赤道太平洋东侧的高值区范围较小。综合来看,对于半日分潮  $M_2$  和  $S_2$ ,北

半球东岸振幅整体大于西岸,而南半球相反。作为两个主要的全日分潮, $K_1$  分潮和  $O_1$  分潮的振幅分布也同样相似,但  $K_1$  分潮振幅相对较大, $O_1$  分潮在南半球高纬海域也另有高值区。两个全日分潮的振幅在北太平洋和印尼群岛附近较大,埃及半岛附近也有相对高值区。整体较之,两个全日分潮的振幅较两个半日分潮更小。由于地形的影响,各分潮振幅在近岸普遍大于深海大洋。旋转潮波系统的振幅在无潮点处最小,随着与无潮点距离的增加而变大。二者在四大分潮的旋转潮波系统个数及位置上也得到了基本一致的结果,特别是半日分潮  $M_2$  和  $S_2$ ,而全日分潮  $K_1$  和  $O_1$  在南半球的同潮时线相对杂乱,无潮点位置不够清晰。本文认为这一现象是由于 TPXO9.1 提供的结果经过了八次平滑<sup>[17]</sup>,故插值结果的平滑度更优。另外,TPXO9.1 的分辨率为  $1/6^\circ$ ,在计算区域内有 170 余万个数据点,同化过程中还引入了沿岸测站的结果,而本文使用的高度计数据只有 48 943 个计算点,且高度计数据在近岸存在一定误差。但总体来说,从 18.61 年高度计数据提取的同潮图有效地再现了四大分潮的全球分布特征,与 TPXO9.1 结果基本吻合,从而佐证了本文中高度计分析结果的可信度。

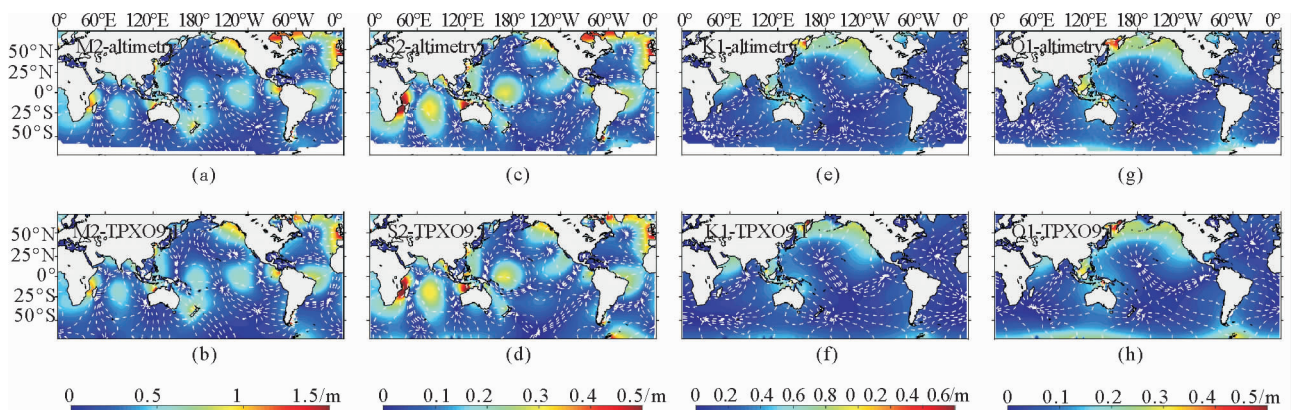


图 2 18.61 年四大分潮高度计分析结果((a),(c),(e),(g))与 TPXO9.1 输出结果((b),(d),(f),(h))的四大分潮同潮图

Fig.2 Comparison of the co-tidal chart from harmonic analysis results of 18.61-year altimetry data((a),(c),(e),(g))and results of TPXO9.1 assimilation model((b),(d),(f),(h))

## 2.2 18.61 年内 $M_2$ 分潮特征随时间的变化

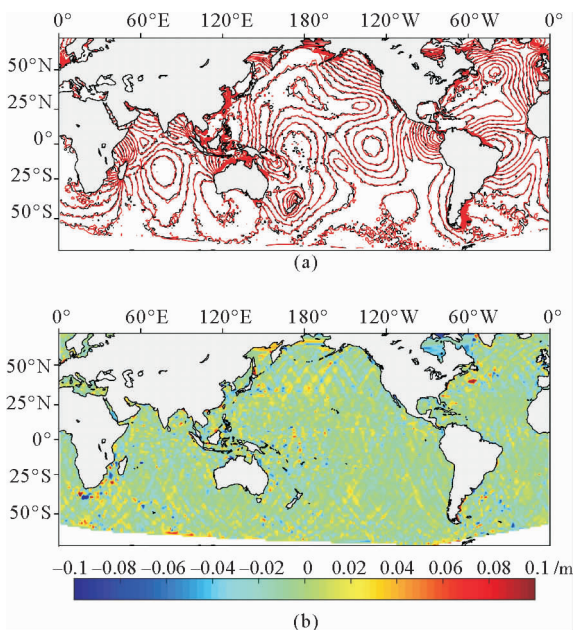
根据表 2,将  $M_2$  分潮与其他主要分潮基本分辨所需的最长资料长度为与  $S_2$  分潮分离开的 2.97 年。因此在分析  $M_2$  分潮特征是否存在时间跨度上的变化时,本文选取了研究时段内最接近 2.97 年的数据(110 个 cycle,约 2.988 年),即该 18.61 年内最初 2.97 年(1992-10-03~1995-09-18)和最末 2.97 年(2008-05-13~2011-04-29),对两个时段内的资料分别进行分析,选取分析结果中  $M_2$  分潮的调和常数,插值到  $1^\circ \times 1^\circ$  的网格上绘

制同潮图,并将两个时段内的结果进行对比,以探究  $M_2$  分潮特征在 18.61 年跨度上的变化,同时排除其他分潮的混淆影响。

如图 3(a)中所示为两个时段内分析得到的  $M_2$  分潮等振幅线,可见大部分海域振幅较为稳定,部分海域振幅有量值较小的变化。做差后进一步绘制图 3(b)中两时段内的振幅变化,其中非洲大陆东南侧振幅略有增加,且由北向南的增加量逐渐增大,量值约 0~5 cm,马达加斯加岛西侧振幅略有减小。孟加拉湾北部和格

陵兰岛西侧振幅略有增加,量值不超过 5 cm。在三个大洋中,太平洋海域中振幅产生变化的海域面积大于大西洋和印度洋,其中北太平洋尤甚。

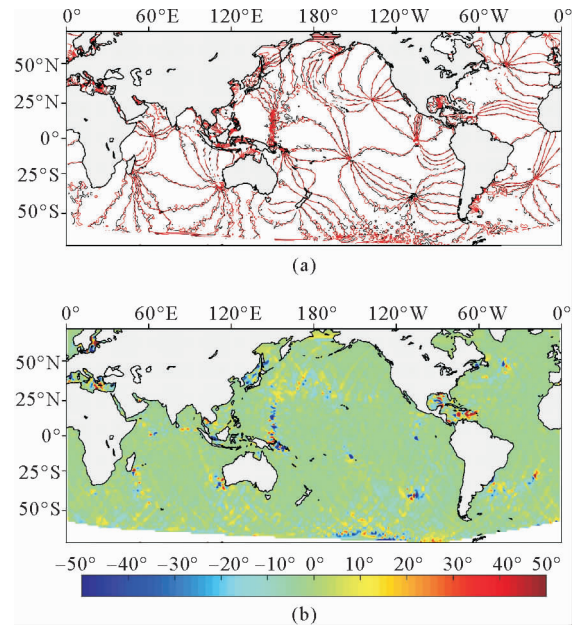
在不考虑高度计卫星在近岸精度误差的前提下,聚焦中国近海, $M_2$ 分潮振幅在此海域有一定变化。在渤海中,辽东湾振幅有明显的增加,莱州湾有明显降低,量值均在 10 cm 左右,这与孟云等<sup>[16]</sup>利用 2004 和 2014 年岸线地形数据进行模式验证的结论相似;而黄海北部靠近朝鲜半岛的海域振幅有 10 cm 左右的增加,山东半岛南侧有 5 cm 左右的增加,江苏沿岸有 5 cm 左右的降低;东海沿岸地区振幅增加,其中台湾海峡一带变化明显,量值同样在 10 cm 左右;同样,在南海沿岸,海南岛附近,振幅有 5 cm 左右的增加。



(黑线代表最初 2.97 年分析结果,红线代表最终 2.97 年分析结果。Black contours show results from the first 2.97-year. Red contours show the last 2.97-year.)

图 3  $M_2$  分潮在两个时段内的等振幅线(a)及振幅变化(b)  
Fig.3 Co-amplitude lines in two different periods (a) and differences of amplitude (b) for  $M_2$  constituent

两个时段内的  $M_2$  分潮的同潮时线见图 4(a)。同样,同潮时线在三个大洋内随时间推移的变化并不显著。做差后进一步得到图 4(b)中两时段内的迟角变化,可见迟角在全球大部分海域变化为 0,较大的变化大多分布在无潮点附近。菲律宾海东侧有两个相距较近无潮点,可能也在一定程度上加剧了这种偏差。日本海及周边海域变化较明显,在  $30^\circ$  左右。泰国湾北部沿岸迟角也有  $30^\circ$  左右的增加。另外,在南太平洋  $50^\circ\text{S}\sim 60^\circ\text{S}$  海域及北太平洋  $25^\circ\text{N}\sim 50^\circ\text{N}$  之间有呈轨道状分布的小幅度迟角变化,偏差大约在  $10^\circ$  之内。在  $60^\circ\text{S}$  以南的海域迟角也有较明显的变化,这可能与该处星下点相对密集,同潮时线不够平滑有关。



(黑线代表最初 2.97 年分析结果,红线代表最终 2.97 年分析结果。Black contours show results from the first 2.97-year. Red contours show the last 2.97-year.)

图 4  $M_2$  分潮在两个时段内的同潮时线(a)及迟角变化(b)  
Fig.4 Co-phase lines in two different periods (a) and differences of phase (b) for  $M_2$  constituent

从上述比较中可以看到,在 18.61 年跨度上,大部分海域的调和常数变化不大,但在中国近海振幅变化可达 10 cm;迟角变化大多分布在无潮点附近,这可能会由于进行插值时,无潮点附近的周期性会造成巨大误差<sup>[13]</sup>。而日本海周边海域及泰国湾北侧也有  $30^\circ$  左右的变化。图中呈轨道状分布的变化可能与 T/P 系列卫星轨道间隔和插值过程有关。当无潮点或振幅较高的区域处于两条轨道之间时,插值无法得到该区域的真实值。星下点的分布不均也可能导致插值过程不能完全反映调和常数的分布情况。

### 3 结语

本文基于三颗高度计卫星 18.61 年的沿轨数据在全球海域形成的 48 943 个不规则分布的计算点上进行了调和与分析,得到以下结论:

系统对比 162 个与高度计数据时间跨度一致的验潮站观测结果,当水深大于 200 m 时,四大分潮的矢量均方根误差仅为 5.28, 4.17, 2.41 和 1.17 cm,在大洋中的分析结果是真实可信的。虽然在浅水仍存在一定缺陷,但这是由地形和计算点的限制决定的。此外,本文分析结果的准确性较前人结果也有着明显提高。

对比高度计分析结果与 TPXO9.1 输出结果的同潮图,除去高度计覆盖范围和插值结果平滑的限制因素,四大分潮的振幅分布、旋转潮波系统个数及位置与 TPXO9.1 基本吻合,佐证了本文分析结果的准确性。

在此基础上,排除其他分潮的混淆影响,对比分析最初 2.97 年和最末 2.97 年资料中  $M_2$  分潮的分析结果,发现在 18.61 年时间跨度上,大部分海域  $M_2$  分潮的振幅和迟角的变化不大,但在中国近海振幅变化可达 10 cm;迟角变化大多分布在无潮点附近,在日本海周边海域及泰国湾北侧则有  $30^\circ$  左右的变化。

**致谢:** 卫星遥感数据和验潮站数据分别来自宋箐阳博士和夏威夷大学海平面中心,TPXO9.1 数据来自美国俄勒冈州立大学,在此一并致谢。

### 参考文献:

- [1] Cheney R E. Preface to special section on TOPEX/POSEIDON: Scientific results[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, 100(C12): 24893-24893.
- [2] Cartwright D E, Ray R D. Oceanic tides from Geosat altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1990, 95(C3): 3069-3090.
- [3] Ma X C, Shum C K, Eanes R J, et al. Determination of ocean tides from the first year of TOPEX/POSEIDON altimeter measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24809-24820.
- [4] 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 P L, Zuo J C, Li L, 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.
- [5] 董晓军,马继瑞,黄斌,等.利用 TOPEX/Poseidon 卫星高度计资料提取黄海、东海潮汐信息的研究[J]. *海洋与湖沼*, 2002(4): 386-392.  
Dong X J, Ma J R, Huang C, et al. Tidal information of the Yellow and East China Seas from TOPEX/Poseidon satellite altimetric data[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002(4): 386-392.
- [6] Fang G H. 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(C11006).doi: 10.1029/2004JC002484.
- [7] 仲昌维,杨俊钢.基于 T/P 和 Jason-1 高度计数据的渤海东海潮汐信息提取[J]. *海洋科学*, 2013, 37(10): 78-85.  
Zhong C W, Yang J G. Extraction of tidal information in the East China Sea, the Yellow Sea and the Bohai Sea based on T/P and Jason-1 altimeter data[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(10): 78-85.
- [8] 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 Y Q, Ji T Y, Zhu X M. Tidal characteristics analysis in the South China sea by 18.6 years satellite altimetry data[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(2): 35-40.
- [9] 付延光,周兴华,许军,等.利用 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1 高度计数据提取中国南海潮汐信息[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(6): 901-907.  
Fu Y G, Zhou X H, Xu J, et al. Extraction of tidal information in the South China Sea Based on TOPEX/Poseidon and Jason-1 altimeter data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 901-907.
- [10] 赵杰,汪一航,王永刚,等.基于卫星高度计资料提取浙江近海的潮汐信息[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(3): 356-365.  
Zhao J, Wang Y H, Wang Y G, et al. Extraction of tidal information on Zhejiang offshore based on satellite altimetry data[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(3): 356-365.
- [11] 沈春,左军成,杜凌,等.世界大洋潮汐特征的比较分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(4): 523-529.  
Shen C, Zuo J C, Du L, et al. Comparison and analysis of world ocean tides[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(4): 523-529.
- [12] Wang Y H, Fang G H, Wei Z X, et al. Cotidal charts and tidal power input atlases of the global ocean from TOPEX/Poseidon and JASON-1 altimetry[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31(4): 11-23.
- [13] 宋箐阳,于华明,陈学恩,等.卫星高度计数据样本大小对潮汐信息提取的影响[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(5): 8-16.  
Song Q Y, Yu H M, Chen X E, et al. Effect from sample size of satellite altimetric data on global tidal information extraction[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(5): 8-16.
- [14] 李大炜,李建成,金涛勇,等.利用多代卫星测高资料监测 1993~2011 年全球海平面变化[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(12): 1421-1424.  
Li D W, Li J C, Jin T Y, et al. Monitoring global sea level change from 1993 to 2011 using TOPEX and Jason altimeter missions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1421-1424.
- [15] 张锦文,杜碧兰.中国黄海沿岸潮差的显著增大趋势[J]. *海洋通报*, 2000, 19(1): 1-9.  
Zhang J W, Du B L. The trend of tidal range enlarging along the coast of the Yellow Sea of China[J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(1): 1-9.
- [16] 孟云,娄安刚,刘亚飞,等.渤海岸线地形变化对潮波系统和潮流性质的影响[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(12): 1-7.  
Meng Y, Lou A G, Liu Y F, et al. Impact of coastline and topography changes on tidal wave system and tidal current character in the Bohai Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(12): 1-7.
- [17] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183-204.
- [18] 毛庆文,施平,齐义泉.运用调和分析方法分离卫星高度计资料中的潮汐信息[J]. *海洋工程*, 2002, 20(1): 41-45.  
Mao Q W, Shi P, Qi Y Q. Tide separation from the altimetry data using harmonic analysis method[J]. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(1): 41-45.
- [19] Le Provost C, Genco M L, Lyard F, et al. Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24777-24797.

## Analysis of Global Tidal Characteristics Using Satellite Altimetry Data

XU An-Di, CHEN Xue-En

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In this paper, the harmonic constants of the first four major constituents ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ) are derived using the 18.61-year of TOPEX/Poseidon, Jason-1 and Jason-2 altimetry along-track data from October 3, 1992 to April 29, 2011. Compared with 162 global tide gauge stations of different depths, the results demonstrate that the altimetry data is reliable especially with a depth of over 200 m, where the vector RMS of the four major constituents is 5.28, 4.17, 2.41 and 1.17 cm. The comparison with TPXO9.1 also proves that the global tidal characteristics are reproduced well. Then the results of the first 2.97-year (1992-10-03~1995-09-18) and the final 2.97-year (2008-05-13~2011-04-29) for  $M_2$  constituent derived from the above mentioned altimetry data are investigated for tidal characteristics variation over time, which demonstrates that most ocean areas are mainly unchanged, while the amplitudes in the China Seas change about 10 cm, and the variations of phase are mostly near the amphidromic points, also the phase changes in the sea of Japan and the Gulf of Thailand about  $30^\circ$ .

**Key words:** satellite altimeter; 18.61 years; global tidal characteristics; gauge station; tidal characteristic variation

责任编辑 庞旻