

# 渤、黄、东海同化 TOPEX/POSEIDON 高度计资料的半日分潮数值模拟\*

李培良 左军成 吴德星<sup>†</sup> 李磊 赵玮<sup>‡</sup>

(中国海洋大学海洋系 青岛 266003)

<sup>†</sup>(中国海洋大学物理海洋实验室 青岛 266003)

<sup>‡</sup>(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

**提要** 使用调和分析方法分析了渤、黄、东海中的 TOPEX/POSEIDON 沿轨高度计资料,并利用基于最优插值理论的混合法把交叉点处的两个主要的半日分潮( $M_2$  和  $S_2$ ) 同化到动力模式中。同化结果显示,两个主要半日分潮的分布特征与前人动力模式结果比较一致,在同化高度计资料以后模式结果  $M_2$  分潮与 167 个实测站的“距离”为 17.2cm,  $S_2$  分潮为 8.9cm,比单纯的动力模式结果精度分别提高 14.9% 和 23.3%。

**关键词** 潮波数值模拟, 数据同化, 高度计, TOPEX/POSEIDON

**中图分类号** P731.23

TOPEX/POSEIDON 卫星于 1992 年发射,伴随着高度计资料的积累和应用,人们对深海潮汐研究有很大的进展,建立了许多精度较高的大洋潮波模型,但 Shum 等(1997)指出:这些全球潮波模式最大的不同出现在浅海区域,也就是说,在浅海区域这些模型的精度相对比较差;李立等(1999)对卫星高度计资料在进行潮汐订正后(全球模式)的海面测高资料中存在着与主要分潮混淆周期一样的显著变化进行了讨论。现在浅海区域潮波模型的精度已经成为制约高度计资料在该区域其他应用研究的瓶颈。

由高度计数据研究区域潮波的工作已经开展了许多(Woodworth *et al.*, 1990; Mazzega *et al.*, 1994; Han *et al.*, 1996, 2000; 吴自库等, 2003)。Woodworth 等(1990)和 Mazzega 等(1994)的工作是利用高度计资料分析调和常数,结合沿岸验潮站资料给出潮汐分布;Han 等(1996; 2000)的工作则是把高度计资料同化到浅海潮波动力模式中。

我国近几年才开始开展利用高度计资料研究潮汐。董晓军等(2002)利用 TOPEX/POSEIDON 高

度计资料提取了黄海和东海的潮汐;李培良等(2002)利用正交响应法进行了南中国海高度计资料的潮汐分析。这些研究工作对高度计资料的潮波准确提取有很大的帮助,但是由于浅海区域潮波长变短,潮波的空间变化非常大,而这种变化的空间尺度可能比卫星轨道间距要小或者相当,这就使得单纯提取 TOPEX/POSEIDON 高度计来研究浅海区域的潮波特征精度偏低。解决这个问题最有效的方法是把高度计资料同化进浅海潮波动力模式中。吕咸青等(2002)曾利用沿岸测站和高度计资料,使用伴随方法反演了渤海开边界条件。

渤、黄、东海潮波等数值模拟研究甚多(赵保仁等, 1994; 叶安乐等, 1995; 万振文等, 1998; Lefevre *et al.*, 2000)。本文中作者将轨道交叉点上的高度计资料提取的潮汐信号同化到三维动力模式中,模拟渤、黄、东海的两个主要的半日分潮  $M_2$  和  $S_2$ 。

## 1 卫星资料提取

### 1.1 资料来源及预处理

本文中使用的资料为 NASA 提供的 TOPEX/POSEIDON 卫星海面高度资料  $H$ :

\* 国家自然科学基金资助项目, 49906001 号和 40376005 号; 教育部科学技术重点项目, 99075 号; 国家教育部高等学校骨干教师奖励基金资助项目, 教技司[2000]65 号。李培良, 博士, E-mail: Lpliang@mail.ouc.edu.cn

$$H = SSH - GS - CR \quad (1)$$

上式中  $SSH$  为卫星测得的海面高度;  $GS$  (Geophysical Surface) 为本文中采用的平均海面高度;  $CR$  (Corrected Range) 是资料订正, 主要包括干、湿对流层订正, 电离层订正和电磁偏差订正等。该资料在整个渤黄东海区域共有 12 条轨道, 见图 1, 其中上行轨道有 6 条(轨道编号自左向右为: 077、153、229、045、127、203), 下行轨道有 6 条(自左向右分别为 184、240、062、138、214、036)。本文中所采用的数据为采样周期的第 11—336 个周期, 总的时间跨度超过 9 年。对这些数据的处理分为以下两步完成:

(1) 资料进行订正, 主要包括湿对流层订正 (wet troposphere correction)、干对流层订正 (dry troposphere correction)、电离层订正 (ionosphere)、电磁偏差 (electromagnetic bias) 订正以及反气压订正。这些订正值连同高度计资料一同在读数据时完成, 订正值由 NASA 提供。

(2) 在每一个数据观测点上形成一个时间序

列, 并进行数据检查, 剔除奇异值。

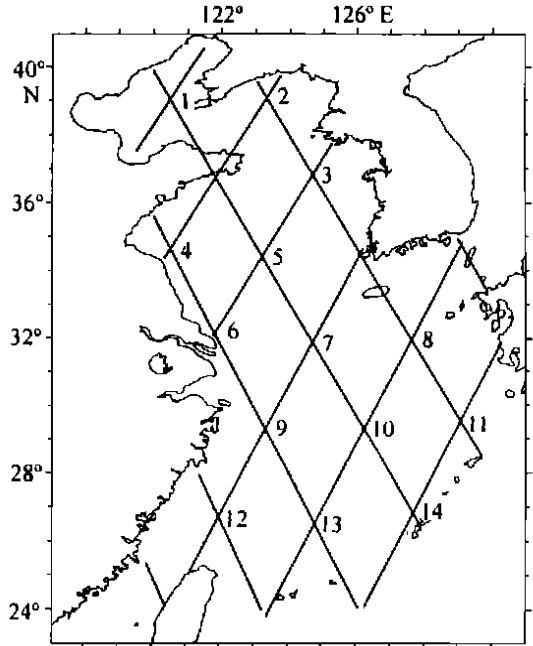


图 1 渤、黄、东海 TOPEX/POSEIDON 轨道分布  
Fig. 1 Distribution of the TOPEX/POSEIDON orbit

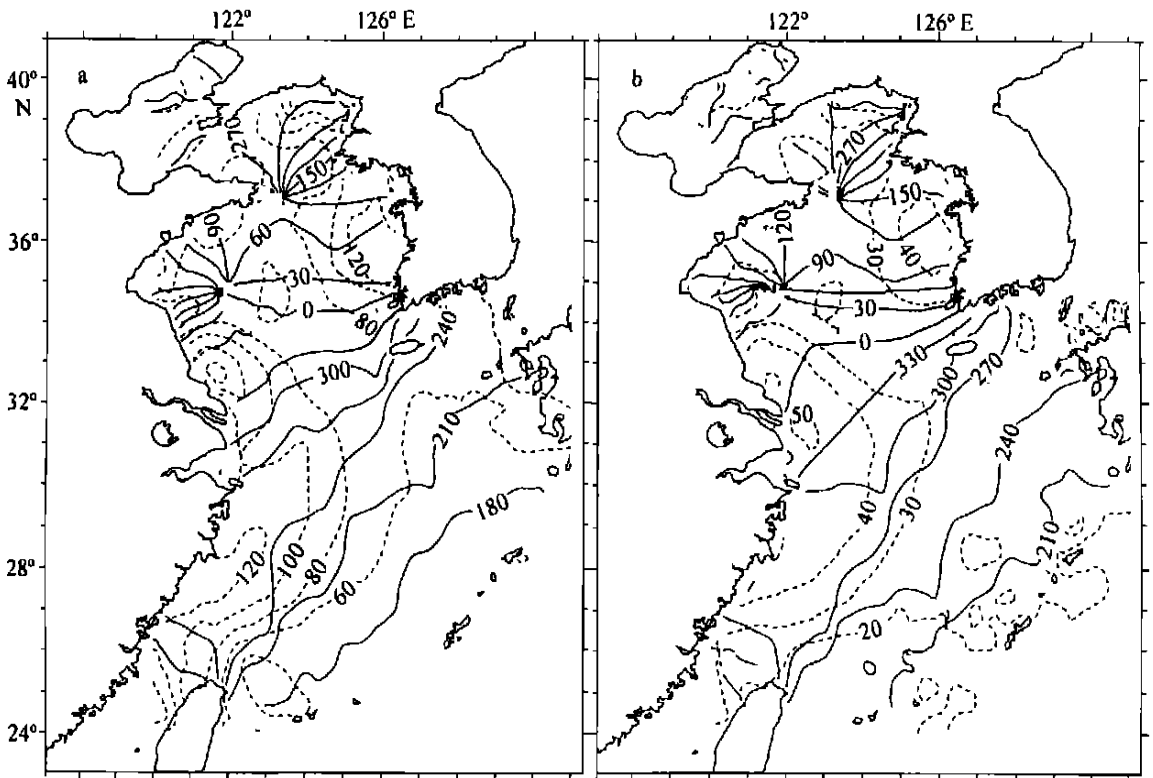


图 2 从高度计资料分析得出的  $M_2$  分潮 (a) 和  $S_2$  分潮 (b) (虚线为等振幅线, cm; 实线为同潮时线, °)

Fig. 2  $M_2$  (a) and  $S_2$  (b) tidal charts from TOPEX/POSEIDON. Solid line: phase lag (in deg), dashed line: amplitude (in cm)

## 1.2 资料分析

采用调和分析方法对渤、黄、东海的高度计资料进行沿轨分析,在计算过程中选择了 18 个分潮,其中长周期分潮 5 个:  $S_a$ 、 $S_{sa}$ 、 $M_m$ 、 $M_f$ 、 $M_{Sf}$ ; 全日分潮 4 个:  $P_1$ 、 $O_1$ 、 $K_1$ 、 $Q_1$ ; 半日分潮 7 个:  $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $P_2$ 、 $\mu_2$ 、 $\nu_2$ 、 $L_2$ ; 四分日分潮 2 个:  $M_4$ 、 $MS_4$ 。图 2 是从 TOPEX/POSEIDON 资料分析得出的渤、黄、东海两个主要半日分潮的等振幅线和同潮时图。由于卫星轨道离海岸较远,并且缺乏渤、黄、东海中部海区的常规观测资料,而把分析结果同沿岸验潮站资料的比较需要进行插值,且这种插值人为因素较大,因此没有对分析结果与沿岸资料进行比较。但是通过对分析结果与前人的结论比较发现,渤、黄、东海卫星高度计资料的潮波分析在刻画渤海中的潮波分布方面受到限制(这是因为渤海海区的浅水潮波波长短,空间变化大,TOPEX/POSEIDON 卫星在渤海的观测点不能分辨该海区的空间变化特征)。由于高度计资料可以较好地反映

潮波在黄海和东海的分布特征,这大大增加了人们对该海域中潮波特征的了解,克服了前人根据沿岸资料来推导海区中央潮波特征的局限,同样也克服了动力模拟结果在海区中部得不到实测资料验证的局限。

## 1.3 同化数据质量控制

为了保证同化到动力模式中高度计资料的准确性,作者只将交叉点处的高度计资料同化到动力模式中。表 1 列出了两个主要半日分潮在 14 个交叉点处上升轨道和下降轨道的调和常数及其调和常数差。作者认为在交叉点处上升轨道与下降轨道调和常数差值越小,高度计资料在此处的潮汐观测分析误差则越小。从表 1 中可以看到,6 号交叉点处上升轨道与下降轨道差别相对较大,在同化过程中该交叉点的值没被采用。渤、黄、东海  $M_2$  分潮的高度计资料分析结果比  $S_2$  要好一些,渤海中  $S_2$  上升轨道与下降轨道的差值相对较大。

表 1 上升轨道和下降轨道在交叉点处主要半日分潮的迟角和振幅

Tab. 1 The phase lag and amplitude of semidiurnal constituents at crossover points

序号及平均绝对误差	经度 (°)	纬度 (°)	$M_2$ 分潮				$S_2$ 分潮			
			迟角 (°)	振幅 (cm)	迟角差 (°)	振幅差 (cm)	迟角 (°)	振幅 (cm)	迟角差 (°)	振幅差 (cm)
1	120.4801	39.1720	340.20	23.88	0.96	5.58	35.47	10.51	7.41	0.91
	120.4973	39.2240	343.19	20.16	3.43	6.79	33.08	9.46	9.39	2.53
2	123.3072	39.1720	243.11	123.55	0.71	9.35	298.82	31.35	9.04	6.65
3	124.7530	37.0920	97.38	94.19	0.54	1.10	149.16	33.78	5.18	0.50
4	120.4768	34.8040	180.20	75.02	0.99	0.12	228.32	15.61	7.44	2.34
5	123.3310	34.8040	20.54	57.78	0.57	0.59	62.43	19.43	3.06	3.05
6	121.9048	32.3600	339.71	127.63	3.50	13.73	19.71	43.76	7.63	11.39
7	124.7225	32.3600	287.49	63.76	1.17	0.79	321.58	28.04	4.67	1.44
8	127.5657	32.3600	222.95	62.50	1.18	0.30	259.37	25.16	0.14	0.59
9	123.3113	29.7080	249.10	109.89	0.18	1.15	295.07	44.07	3.52	2.37
10	126.1583	29.7080	210.07	63.52	0.57	2.66	251.42	24.38	1.86	0.12
11	128.9788	29.7080	181.51	52.47	1.45	2.62	210.02	21.69	3.24	1.61
12	121.8950	26.8480	256.46	103.39	0.06	1.30	290.77	33.56	6.43	0.73
13	124.7334	26.8480	196.97	53.04	0.33	1.34	230.35	19.96	2.68	1.53
14	127.5712	26.8480	176.44	49.42	1.24	2.14	207.63	20.23	1.19	0.39
	127.5835	26.9000	176.56	50.23	0.30	1.80	208.94	20.25	2.49	0.30
平均绝对误差	所有交叉点				1.07	3.21			4.71	2.28
	除去 6 号交叉点				0.91	2.50			4.51	1.67

注:表中的振幅与迟角为交叉点处上升轨道和下降轨道的平均值。

## 2 数值模式设置

动力模式采用的是 POM98, 在模拟渤、黄、东海潮波中使用的是正压模型, 所以温度和盐度为常数 ( $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S = 35$  即密度为常数), 表面热通量、盐通量和风应力都为 0。计算区域和网格分布见图 3, 包括了渤、黄、东海整个区域, 网格空间分辨率是  $10' \times 10'$ , 在经向上长 18.529km, 纬向上宽 13.984—16.927km。垂向分为 11 层 (分别为  $\sigma = 0, -0.05, -0.10, -0.20, -0.30, -0.40, -0.50, -0.70, -0.80, -0.90, -1.0$ )。所采用的水深数据为中国科学院海洋研究所方国洪研究员和魏泽勋博士提供, 并根据中国人民解放军海军司令部航海保证部 2000 年 8 月出版的航海图在局部沿岸区域作了相应的调整。底摩擦系数在渤海取为 0.0009, 在黄海和东海取为 0.0022。

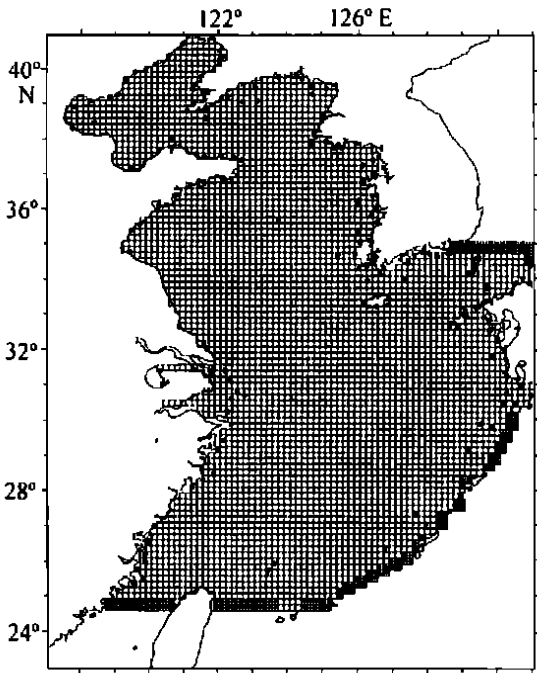


图 3 渤、黄、东海数值计算网格和观测站位分布 (+ 为开边界)

Fig 3 Distribution of the computational mesh and the tidal gauges (plus is the open boundary)

在开边界加上水位边界条件:

$$\zeta = \sum f H_C \cos[\omega t + (V_0 + u) c - g c] \quad (2)$$

式(2)中  $H$  和  $g$  分别是调和常数的振幅和迟角, 下标  $C$  代表着  $M_2, S_2$  两个分潮中的一个;  $\omega$  代表着分潮角频率,  $f$  为交点因子,  $u$  为交点订正角,  $V_0$  是天文潮的初位相。台湾海峡、对马海峡和琉球

群岛链处的开边界是由附近的观测资料插值得出。吐噶喇海峡处的开边界非常重要, 渤、黄、东海的潮能, 特别是全日分潮的潮能, 主要由此进入。此处的开边界条件由综合测站资料、前人的模式结果和海洋图集给出, 并根据模式的计算结果做出微调。

模式初始条件为  $\zeta = u = v = 0$ , 模式外模态的时间步长为 60s, 内模态的时间步长为 1800s。开始运行后, 当模式达到稳定状态时, 每隔 1h 输出每个网格上的  $\zeta, u$  和  $v$ , 为了准确地分析出水位调和常数和潮流椭圆要素, 一共输出 15 天的计算结果, 然后对计算结果进行分析和比较。

## 3 同化方法

利用由调和和分析得到的交叉点上两个主要半日分潮的调和常数计算出模式中相应时间的水位值, 把这个水位值同化到模式中的水位场上。

同化方案采用最优线性插值 (White *et al.*, 1990) 基础上的一种混合方法, 每隔一段固定时间 (3 个时间步长) 加入一个强迫项。同化对水位场采取如下的插值方案:

$$\eta = \xi + K(\zeta - R\xi) \quad (3)$$

式中, 新的水位状态参量是水位  $\xi$  (由模式分时间步计算得到) 和修正项  $K(\zeta - R\xi)$  (基于观测值与模式结果的差) 之和。这里  $\zeta$  是由卫星高度计资料计算出的水位,  $R$  是观测位置矩阵,  $K$  是观测影响矩阵。观测影响矩阵  $K$  提供了一个模式和观测不相符的权重系数, 这个权重来自最优线性插值理论 (Bretherton *et al.*, 1976)。理论上, 影响矩阵的取值应当建立在坚实的基础上, 例如对模式和潮汐资料误差的统计分析上。  $K$  的选取不在本文的讨论范围内。本文中采用了一种相对简单的形式, 取  $K = 0.8$ , 在每一个交叉点周围的 4 个网格点上引入强迫。如果交叉点的位置与网格点重合 (或距离小于 1km), 则只在一个网格点上引入强迫。

## 4 模式结果验证

国内几乎所有潮汐模拟结果的验证都采用平均绝对误差, 这种方法非常直观, 但也有它的局限性: 当振幅较小的时候计算和观测的  $g$  不是很稳定, 同时  $H$  较小时,  $g$  的变化对总的潮位影响也小。所以此方法中不考虑振幅的变化而直接将迟角的绝对误差平均作为验证模式结果的标准不是非常合理。

为了克服平均绝对误差的局限性,本文中采用了系数  $H_s$  (Davies *et al.*, 1997) 来验证数值模拟结果与观测的偏差,称之为距离:

$$H_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left\{ (HC_i)^2 + (HS_i)^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

这里  $N$  为测站的个数。

$$\begin{aligned} HC_i &= A_{oi} \cos g_{oi} - A_{ci} \cos g_{ci} \\ HS_i &= A_{oi} \sin g_{oi} - A_{ci} \sin g_{ci} \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $A_{oi}$  和  $g_{oi}$  是在第  $i$  个测站观测到的振幅和迟角,  $A_{ci}$  和  $g_{ci}$  是在第  $i$  个测站数值模拟得到的振幅和迟角。参数距离  $H_s$  客观地反映了潮位计算结果相对于实测值的偏差。

为了验证计算结果,本文中选取了沿岸和岛屿 167 个测站资料的调和常数(图 3),与模式计算结果进行比较。表 2 中列出了数值模式验证结果和同化后验证结果及该海区其他研究者的验证结果,可以发现同化高度计资料以后  $M_2$  分潮和  $S_2$  分潮的计算精度分别提高 14.9% 和 23.3%。相

对于 Lefevre 等(2000)的结果,本文中  $M_2$  分潮的结果稍差,  $S_2$  分潮则优于其结果。本文的结果无论是单纯的数值结果还是同化后的结果都优于 Ho 等(2002)的结果。

表 2 本文的计算结果精度和其他研究者的结果精度对比

Tab. 2 The comparison of accurate of our results to that of others

作者	$M_2$ (cm)	$S_2$ (cm)
本文结果(没有同化)	20.2	11.6
本文结果(同化高度计后)	17.2	8.9
Lefevre <i>et al.</i> (2000)	15.8	13.1
Ho Jin Lee <i>et al.</i> (2002)	24.9(6 个实验中最好的结果)	

图 4 是同化后渤、黄、东海  $M_2$  分潮和  $S_2$  分潮的等振幅线和同潮时图,本文中所得出的半日分潮的分布特征与前人结果基本一致。

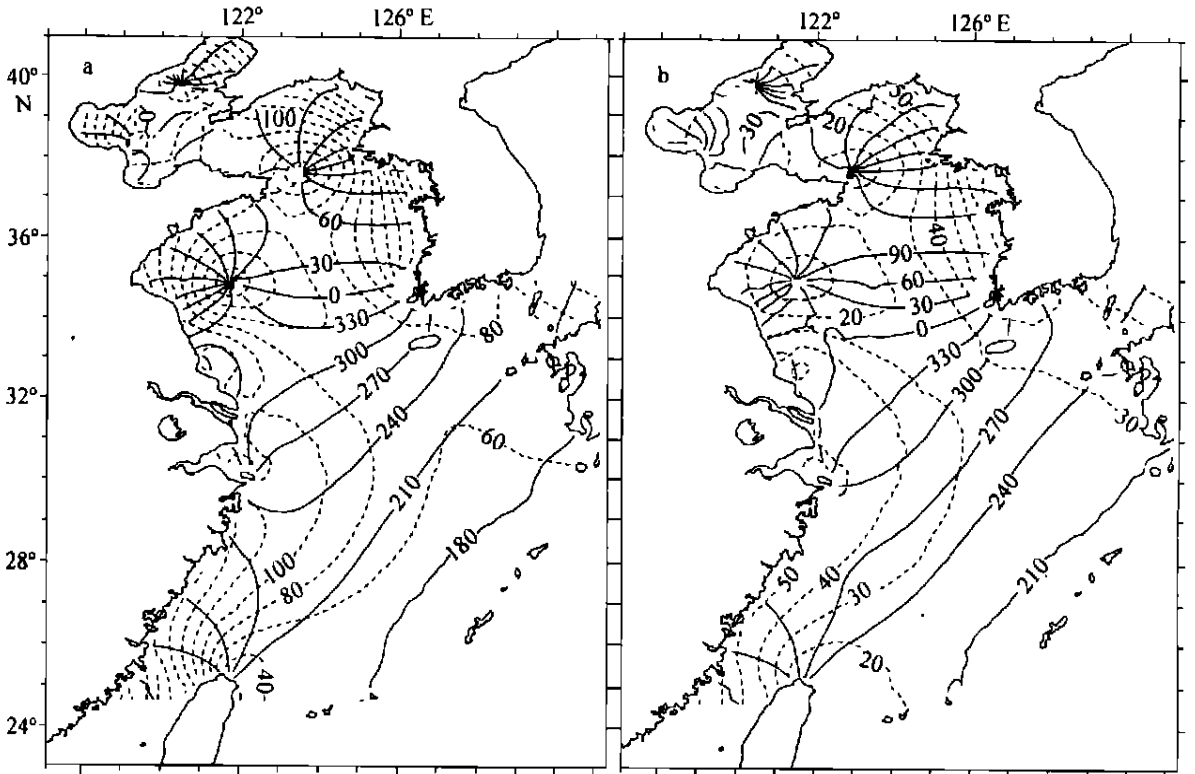


图 4 同化高度计资料后渤、黄、东海数值模拟结果  $M_2$  分潮(a) 和  $S_2$  分潮(b) (虚线为等振幅线, cm; 实线为同潮时线, °)

Fig. 4  $M_2$ (a) and  $S_2$ (b) tidal charts from numerical model with assimilation. Solid line: phase-lag (in deg), dashed line: amplitude (in cm)

## 5 结论

作者对渤、黄、东海中的 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计超过 9 年的资料进行了沿轨的调和分潮分析。利用混合法 (blending) 把交叉点处两个主要的半日分潮  $M_2$  和  $S_2$  同化到动力模式中。结果显示,在同化高度计资料以后模式结果  $M_2$  分潮与 167 个实测站的“距离”为 17.2cm,  $S_2$  分潮为 8.9cm, 同化后的结果精度分别提高 14.9% 和 23.3%。

把高度计同化到浅海潮波动力模式中可以较好地提高模拟精度,但是此模拟精度的提高依赖于卫星高度计潮波信息提取的精度,此方面的工作还有待加强。

## 参 考 文 献

- 董晓军, 马继瑞, 黄斌等, 2002. 利用 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计资料提取黄海、东海潮汐信息的研究. 海洋与湖沼, 33(4): 386—392 [Dong X J, Ma J R, Huang C *et al.*, 2002. Tidal information of the Yellow and East China Seas from TOPEX/POSEIDON satellite altimetric data. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33(4): 386—392]
- 李立, 吴日升, 李燕初等, 1999. TOPEX/POSEIDON 高度计浅海潮汐混淆的初步分析. 海洋学报, 21(3): 8—14 [Li L, Wu R S, Li Y C *et al.*, 1999. A preliminary analysis of shallow water tidal aliasing in TOPEX/POSEIDON altimetric data. *Acta Oceanologica Sinica*, 21(3): 8—14]
- 李培良, 左军成, 李磊等, 2002. 南海 TOPEX/POSEIDON 高度计资料的正交响应法潮汐分析. 海洋与湖沼, 33(3): 287—295 Li P L, Zuo J C, Li L *et al.*, 2002. Orthogonalized convolution method for analysis of South China Sea tidal data from TOPEX/POSEIDON. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33(3): 287—295]
- 吕咸青, 方国洪, 2002. 渤海开边界潮汐的伴随法反演, 海洋与湖沼, 33(2): 113—120 [Lu X Q, Fang G H, 2002. Inversion of the tides on the open boundary of the Bohai Sea by adjoint method. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33(2): 113—120]
- 吴自库, 田纪伟, 吕咸青等, 2003. 南海潮汐的伴随同化数值模拟. 海洋与湖沼, 34(1): 101—108 [Wu Z K, Tian J W, Lu X Q *et al.*, 2003. A numerical modeling of tides in the South China Sea by adjoint method. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 34(1): 101—108]
- 万振文, 乔方利, 袁业立, 1998. 渤、黄、东海三维潮波运动数值模拟. 海洋与湖沼, 29(6): 611—616 [Wan Z W, Qiao F L, Yuan Y L, 1998. Three-dimensional numerical

modeling of tidal waves in the Bohai, Yellow and East China Seas. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 29(6): 611—616]

- 叶安乐, 梅丽明, 1995. 渤、黄、东海潮波数值模拟. 海洋与湖沼, 26(1): 63—69 [Ye A L, Mei L M, 1995. Numerical modeling of tidal waves in the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26(1): 63—69]
- 赵保仁, 方国洪, 曹德明, 1994. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟. 海洋学报, 16(5): 1—10 [Zhao B R, Fang G H, Cao D M, 1994. Numerical simulation of tides and tidal currents in the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 16(5): 1—10]
- Bretherton F P, Davis R E, Fandy C B, 1976. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73. *Deep Sea Research*, 23: 559—582
- Davies A M, Kwong S C M, Flather R A, 1997. Formulation of a variable-function three dimensional model, with applications to the  $M_2$  and  $M_4$  tide on the North-west European continental Shelf. *Continental Shelf Research*, 17: 165—204
- Han G, Ikeda M, Smith P C, 1996. Oceanic tides over the Newfoundland and Scotian Shelves from TOPEX/POSEIDON altimetry. *Atmosphere-Ocean*, 34: 589—604
- Han G, Hendy R, Ikeda M, 2000. Assimilating TOPEX/POSEIDON derived tides in a primitive equation model over the Newfoundland Shelf. *Continental Shelf Research*, 20: 83—108
- Ho Jin Lee, Kyung Tae Jung, Jae Kwi So *et al.*, 2002. A three-dimensional mixed finite-difference Galerkin function model for the oceanic circulation in the Yellow Sea and the East China Sea in the presence of  $M_2$  tide. *Continental Shelf Research*, 22: 67—91
- Lefevre F, Le Provost C, Lyard F H, 2000. How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. *J Geophys Res*, 105, C4, 8707—8725
- Mazzege P, Berg M, 1994. Ocean tides in the Asian Semi-enclosed from TOPEX/POSEIDON, *J Geophys Res*, 99: 24867—24881
- Shum C K, Woodworth P L, Andersen O B *et al.*, 1997. Accuracy assessment of recent ocean tide models. *J Geophys Res*, 102: 25173—25194
- White W B, Tai C K, Holland W R, 1990. Continuous assimilation of simulated Geosat sea level into an eddy-resolving numerical ocean model I, Sea level differences. *J Geophys Res*, 95: 3219—3234
- Woodworth P L, Thomas J P, 1990. Determination of the major semidiurnal tides of the northwest European continental shelf from Geosat altimetry. *J Geophys Res*, 95: 3061—3068

# NUMERICAL SIMULATION OF SEMIDIURNAL CONSTITUENTS IN THE BOHAI SEA, THE YELLOW SEA AND THE EAST CHINA SEA WITH ASSIMILATING TOPEX/POSEIDON DATA

LI Pei-Liang, ZUO Jun-Cheng, WU De-Xing<sup>\*</sup>, LI Lei, ZHAO Wei<sup>\*\*</sup>

(*Oceanography Department, Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

<sup>\*</sup>(*Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

<sup>\*\*</sup>(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences Qingdao, 266071*)

**Abstract** After the launch of TOPEX/POSEIDON in 1992, there has been considerable improvement in the accuracy of the global tidal models. However, the application of global tidal model to the study on shallow sea tides was unsatisfactory in accuracy.  $M_2$  and  $S_2$  semidiurnal tidal elevations and currents in the study area including the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea were derived by combining tidal harmonic analyses of TOPEX/POSEIDON altimeter data and a regional hydrodynamic model in an assimilation scheme based on optimal linear interpolation.

The tidal harmonic analysis along satellite orbit was used to abstract tidal constituents from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data in the study area where 12 orbits situated. The cycle of the altimeter data is from 11 to 336.18 constituents, including 5 long-period ( $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $M_m$ ,  $M_f$  and  $M_{sf}$ ), 7 semidiurnal ( $N_2$ ,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $P_2$ ,  $\mu_2$ ,  $\nu_2$  and  $L_2$ ), 4 diurnal ( $P_1$ ,  $O_1$ ,  $K_1$  and  $Q_1$ ), and 2 quarter-diurnal ( $M_4$  and  $MS_4$ ), were involved in the harmonic analysis. The results showed that the altimeter data could give a good distribution of tides in the Yellow Sea and the East China Sea. The internal coincidence accuracies of the amplitudes of  $M_2$  and  $S_2$  at 13 crossover points out of 14 are 2.50cm and 1.67cm, and the accuracies of lags were  $0.91^\circ$  and  $4.51^\circ$  respectively.

The POM model is a three-dimensional model that imbedded with sub-model of second moment turbulence closure, which provides vertical mixing coefficients. It uses a sigma coordinate in the vertical, a curvilinear orthogonal coordinate and an "Arakawa C" differencing scheme in the horizontal. The model has a free surface and a split time step. The external mode portion of the model is two-dimensional, and uses a short time step based on the CFL condition and the external wave speed. The internal mode is three-dimensional, and uses a long time step based on the CFL condition and the internal wave speed. It has been used to simulate the tide in this region correctly by other researchers. The computational grid size is  $10' \times 10'$ . The drag coefficient in the ocean bottom boundary layer was taken to be 0.0009 in the Bohai Sea and 0.0022 in the Yellow Sea and the East China Sea. The two major semidiurnal constituents were simulated simultaneously. Along the open boundaries, the heights of the water surface were given as  $\zeta = \sum f H_C \cos[\omega_C t + (V_0 + u) C - g_C]$  (Eq. 2), where  $H$  and  $g$  are harmonic constants for the amplitude and phase-lag respectively, the subscript  $C$  stands for either one of the constituents:  $M_2$  or  $S_2$ ;  $\omega$  is the angular speed of the tidal constituents,  $f$  the nodal factor,  $u$  the nodal angle,  $V_0$  the initial phase angle of the equilibrium tide.

The tidal elevations of  $M_2$  and  $S_2$  derived from TOPEX/POSEIDON altimeter data at the crossover are assimilated into a dynamical model (POM) using blending method based on optimal interpolation methods. The weights matrix  $K$  come from the theory of optimal linear interpolation, which was used by Guoqi Han *et al* (1996, 2000). Ideally, this matrix should be based on solid grounds, such as a statistical analysis of the differences between the model first guess and the altimetric tidal data. Discussion on this topic is beyond the scope of this paper, and a relatively simple method,  $K = 0.8$  was assumed.

The characteristics of the two semidiurnal tides agreed well with those from other researchers. The distance was 17.2 cm for the  $M_2$  tide and 8.9cm for the  $S_2$  tide when compared to the observations of 167 tide gauges distributed along the coastlines. The accuracy improvements were by 14.9% for  $M_2$  tide and 23.3% for  $S_2$  tide after the assimilation, respectively.

**Key words** Tidal numerical simulation, Data assimilation, Altimeter, TOPEX/POSEIDON