

基于 T/P 和 Jason-1 高度计数据的渤黄东海潮汐信息提取

仲昌维^{1,2}, 杨俊钢²

(1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266555; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 对 19 a 的 TOPEX/POSEIDON(以下称 T/P)和 Jason-1 卫星高度计测高数据进行调和分析, 得到渤黄东海海域的 8 个主要分潮(M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1 和 Q1)。提出一种将两类卫星高度计数据统一的方法, 消除了因两类卫星高度计校正算法等不同所导致的相互之间的偏差。变轨后的 T/P 与 Jason-1 卫星加密了高度计对潮汐观测的空间分布。通过对交叉点处升轨与降轨的潮汐调和分析结果进行比较, 检验调和分析方法及高度计数据的可靠性; 将基于高度计数据的调和分析结果与验潮站资料进行比较, 以检验其正确性。4 个主要分潮(M2、S2、K1、O1)振幅之差的均方根介于 1.0~1.8 cm, 迟角之差的均方根介于 4.1°~7.8°。与已有研究结果相比, 调和分析结果的精确性有所提高。在此基础上, 综合变轨前后两类高度计测高数据的调和分析结果, 给出并分析了渤黄东海 4 个主要分潮的同潮图。

关键词: T/P(TOPEX/POSEIDON); 卫星高度计; Jason-1; 调和分析; 数据统一; 同潮图

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2013)10-0078-08

20 世纪 70 年代初出现的卫星测高技术推动了全球海洋科学研究的发展。特别是 1992 年 T/P(TOPEX/POSEIDON)卫星高度计发射升空以来, 卫星高度计成为了海洋研究的重要工具。卫星高度计实现了人类第一次对全球海洋的连续观测, 第一次获得了全球海洋潮汐信息。Munk^[1]指出现代卫星资料的应用是海洋学重要的技术创新。国外基于高度计数据开展了大量海洋潮汐提取研究工作, 出现了很多利用卫星高度计数据得出的经验大洋潮汐模式, 如美国空间飞行研究中心的 CSR3.0、CSR4.0 模式^[2], NASA 戈达德太空飞行中心的 GOT 模式, Desai 和 Wahr^[3]的 D&W98 模式等。中国近海方面, 也有许多学者利用卫星高度计数据开展过潮汐提取研究。Yanagi 等^[4]采用调和分析法, 从 T/P 高度计数据中得到了黄海、东海以及南海同潮图; 方国洪等^[5]利用 10 a 的 T/P 高度计数据调和分析结果, 结合沿岸以及岛屿验潮站的数据得到了渤黄东海同潮图; 李培良等^[6]利用正交响应法对南海 T/P 高度计数据进行了潮汐分析; 丘仲锋等^[7]利用 T/P 高度计数据对渤海、黄海潮汐进行了同化模拟。

1992 年 8 月, 美国国家航空航天局和法国国家空间研究中心联合发射了 T/P 卫星, 其测高精度达到了前所未有的 3 cm^[8-9], 这使得将其观测数据用于潮汐研究成为可能。T/P 卫星于 2002 年 9 月变轨继续运行了 120 个周期, 新轨道位于原轨道中间位置, 原轨道测

量任务由 2001 年 12 月发射的 Jason-1 卫星高度计继续执行。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 三颗卫星高度计相互配合, 实现了卫星观测轨道的空间加密。

由于 T/P 和 Jason-1 卫星高度计轨道间距较大(中低纬度达几百千米), 利用其得到的潮汐各分潮同潮图存在空间分辨率偏低的问题。此外, 由于 T/P 和 Jason-1 高度计数据中的各种误差校正算法不同, 使得二者之间的测高数据存在偏差, 二者联合使用时需考虑数据统一的问题。本文利用 T/P 和 Jason-1 两颗卫星变轨前和变轨后共 19 a 的高度计测高数据, 轨道间距减半, 提高了观测数据的空间分辨率, 开展渤黄东海潮汐信息提取研究, 同时给出了一种将 T/P 与 Jason-1 高度计测高数据统一的方法。

1 数据及预处理

1.1 高度计数据

本文使用由美国 NASA 喷气推进实验室(NASA/JPL)提供的 T/P 高度计 MGDR_C 数据, 以及法国空

收稿日期: 2012-03-31; 修回日期: 2012-08-29

基金项目: 海洋公益性行业科研专业经费项目(201105032-1)

作者简介: 仲昌维(1984-), 男, 山东平度人, 硕士研究生, 主要从事高度计数据潮汐应用研究, E-mail: zcwsss@126.com; 杨俊钢, 通信作者, 副研究员, 主要从事卫星高度计数据海洋应用研究, 电话: 0532- 88966694, E-mail: yangjg@fio.org.cn

间局国家空间研究中心(CNES)提供的 Jason-1 高度计 GDR_C 数据。将 T/P 和 Jason-1 卫星高度计数

据分为变轨前和变轨后两部分, 具体使用情况见表 1。

表 1 本研究使用的高度计数据

Tab. 1 The altimeter data used for harmonic analysis

卫星高度计名称	时间(年-月)		周期编号		数据类型	数据来源
	变轨前	变轨后	变轨前	变轨后		
T/P	1992-11~2002-06	2002-07~2005-06	7~360	370~470	MGDR_C	NASA/JPL
Jason-1	2002-03~2009-01	2009-02~2011-09	7~259	262~355	GDR_C	CNES

1.2 数据预处理

用于海洋潮汐信息提取的高度计数据预处理主要包括两方面: 基于高度计数据的潮汐高度计算和将不同周期的数据对应处理到统一的基准轨道。

基于 T/P 和 Jason-1 卫星高度计数据的潮汐高度计算公式为:

$$\begin{cases} h_{T/P} = h_{SSH}^{T/P} - h_{MSS}^{T/P} - h_{SET}^{T/P} - h_{LT}^{T/P} - h_{PT}^{T/P} - h_{INV}^{T/P} \\ h_{Jason} = h_{SSH}^{Jason} - h_{MSS}^{Jason} - h_{SET}^{Jason} - h_{LT}^{Jason} - h_{PT}^{Jason} - h_{INV}^{Jason} - h_{HF}^{Jason} \\ h_{SSH} = H - (R + R_C) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $h_{T/P}$ 和 h_{Jason} 为潮高, $h_{SSH}^{T/P}$ 和 h_{SSH}^{Jason} 为原始海面高度, $h_{MSS}^{T/P}$ 和 h_{MSS}^{Jason} 为平均海表面高度, $h_{SET}^{T/P}$ 和 h_{SET}^{Jason} 为固体地球潮高度, $h_{LT}^{T/P}$ 和 h_{LT}^{Jason} 为负荷潮高度, $h_{PT}^{T/P}$ 和 h_{PT}^{Jason} 为极潮高度, $h_{INV}^{T/P}$ 和 h_{INV}^{Jason} 为大气逆压, h_{HF}^{Jason} 为海面高频振荡, H 为 T/P 或 Jason-1 卫星轨道高度, R 为 T/P 或 Jason-1 高度计到瞬时海面的测距, R_C 为干对流层、湿对流层、海况偏差、电磁偏差等各项校正值之和。

为了得到某一点处潮高的时间序列, 需对高度计数据做进一步处理, 具体处理步骤如下:

1) 利用卫星和地球运转的几何关系, 给出 T/P 和 Jason-1 卫星高度计地面轨迹表达式^[10-11], 从而获得卫星地面轨迹经纬度信息。

2) 计算出卫星轨道交叉点, 在相邻交叉点之间沿轨道每 3 s 给出一个点, 得到基准轨道。然后将卫星高度计各周期上观测数据(约 1 s 一个观测数据)对应地插值到这个基准轨道上来。这样可大大减少计算量, 同时多点平均部分消除了数据扰动的影响。

这样便得到 700 多个有效提取点, 每个提取点上都有 600 多个观测数据, 其时间间隔为 T/P 和 Jason-1 共同的轨道重复周期 9.915642 d。变轨后观测数据处理方法同上, 同样得到 700 多个有效提取点。这样便获得了 1 400 多个提取点, 空间分辨率提高了 1 倍, 见图 1。

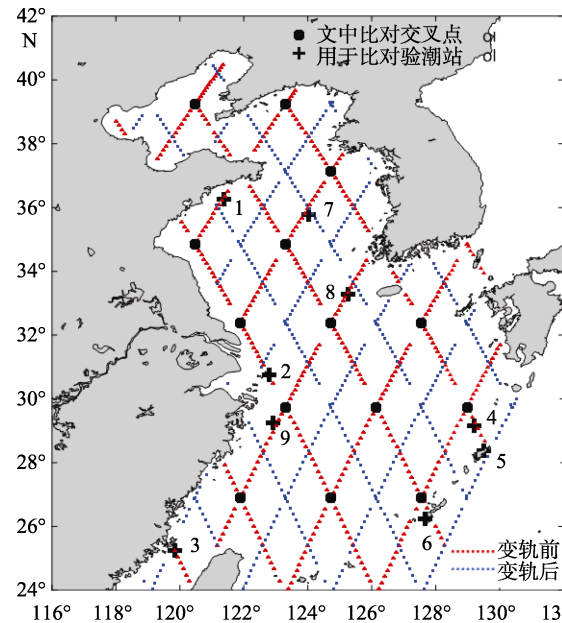


图 1 本文所用 T/P 与 Jason-1 变轨前后提取点地面轨迹
Fig. 1 The ground tracks of T/P and Jason-1 before and after orbit transfer

2 潮汐调和分析及其结果验证

2.1 调和分析

本文对各提取点高度计观测得到的潮汐高度数据进行调和分析^[12], 公式如下:

$$h = H_0 + \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos[\omega_i t + (V_{0i} + u_i) - g_i] \quad (2)$$

这里 h 为 t 时刻的高度计观测得到的潮汐高度; H_0 是平均水位; f_i 为分潮交点因子; H_i 为分潮振幅, ω_i 为分潮圆频率, $(V_{0i} + u_i)$ 为标准子午线处的平衡分潮初相位, u_i 为分潮交点订正角, g_i 为分潮格林威治迟角, i ($i=1, 2, 3, \dots, 8$) 代表第 i 个分潮。

基于公式(2), 利用最小二乘法解超定线性方程组, 得到提取点上各分潮调和常数 H_i 和 g_i 。

2.2 T/P 和 Jason-1 卫星高度计测高数据统一方法

虽然 T/P 和 Jason-1 卫星使用相同的参考椭球面,

但由于计算高度 h 时需要用到平均海表面、固体潮、负荷潮、极潮、大气逆压、高频振荡等校正模型, 计算原始海面高度 $h_{SSH}^{T/P}$ 和 h_{SSH}^{Jason} 时需用到干湿对流层、海况偏差等校正项, 而 T/P 和 Jason-1 卫星高度计数据的这些校正模型并不完全相同, 且 T/P 卫星高度计数据没有高频振荡校正项, 故同时刻同一地点 $h_{T/P}$ 和 h_{Jason} 之间会有一个偏差项, 这个偏差项会反映在调和和分析得出的平均水位(非时变部分)上。分别对 T/P 和 Jason-1 观测数据进行调和, 可得其平均水位幅度为 $-5 \sim 5$ cm 和 $10 \sim 15$ cm, 后者偏大, 这样, 我们便无法将 T/P 和 Jason-1 两颗卫星高度计数据连入同一时间序列。因此, 在做调和和分析之前必须要将二者的非时变部分进行统一, 以免影响最小二乘求解的精度。

为了解决这个问题, 我们将基准轨道的同一提取点上所有周期的 T/P 和 Jason-1 高度计数据的非时变部分分别计算出, 并分别求其平均, 得到 $h'_{T/P}$ 和 h'_{Jason} , 两者之差便为分别由 Jason-1 和 T/P 卫星高度计数据得到的平均水位之差 δ 。公式如下:

$$\begin{cases} h'_{T/P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{T/P_i} - T_{T/P_i}) \\ h'_{Jason} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{Jason_i} - T_{Jason_i}) \\ \delta = h'_{Jason-1} - h'_{T/P} \end{cases} \quad (3)$$

其中, n 为该提取点上数据量, T_{T/P_i} 和 T_{Jason_i} 为高度计自带潮汐模型得出的潮位值。

将 h_{Jason} 减去 δ , 便得到和 $h_{T/P}$ 统一的平均水位。之后, 便可将各提取点上的 T/P 和 Jason-1 观测数据连入同一时间序列, 进而进行调和和分析。图 2 给出了数据统一前后, 由 T/P 和 Jason-1 卫星数据得到的平均水位之间的比较结果。以渤黄东海 600 多个观测数据点中的前 300 个数据点为例, 比较结果见图 2。

2.3 交叉点升轨与降轨的调和与分析比较

为了验证高度计数据提取潮汐信息的可靠性, 我们将 T/P 和 Jason-1 高度计轨道交叉点处升轨与降轨数据分别进行调和, 对比其调和常数。本文选取了渤黄东海 14 个交叉点数据, 对其 8 个主要分潮进行对比, 结果见表 2、表 3。其中 ΔH 、 Δg 分别表示由升轨和降轨各自提取出的 H 之差的绝对值和 g 之差的绝对值, σ_H 、 σ_g 代表 ΔH 和 Δg 的均方根。

由表 2 和表 3 中的数据计算得出: 8 个分潮中, σ_H 最大的是 M2 分潮, 为 2.35 cm; 其次为 S2 分潮, σ_H 为 2.25 cm, 其余各分潮均方根均小于 2 cm。4 个主要分潮中, M2、S2 分潮的 σ_g 小于 1° , K1、O1 分潮的 σ_g 小于 5° 。另外 4 个分潮中, Q1 分潮的 σ_g 达 31.6° 。

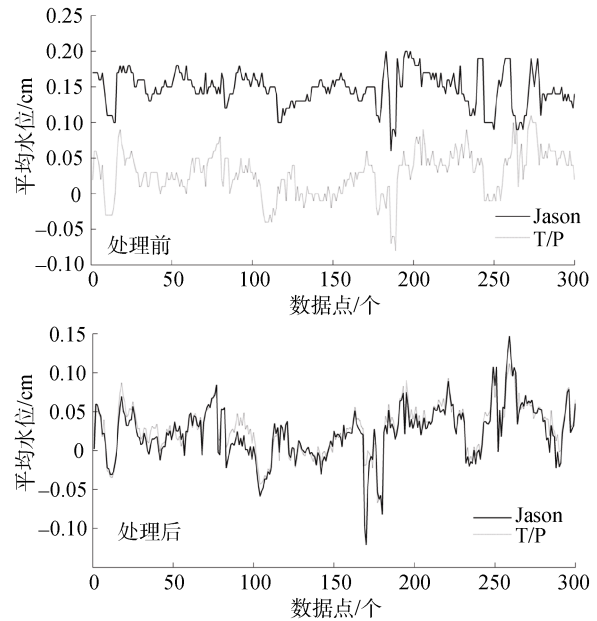


图 2 处理前后由 Jason-1 和 T/P 数据得到的平均水位比较图

Fig. 2 Comparison of mean height calculated based on Jason-1 and T/P data before and after processing

这是因为我们所选研究区域的交叉点多位于浅海附近, 而 Q1 分潮仅在远离近岸海区发挥明显作用^[5]。

为了更形象地对比交叉点升轨和降轨的调和常数, 对于 H 和 g , 分别计算它们在交叉点处升轨和降轨的相关系数。表 4 给出了二者 8 个主要分潮的计算结果。除 Q1 分潮振幅的相关系数为 0.0479 之外(原因同上), 其余各分潮的升轨和降轨调和常数都表现出了很强的相关性。

由此得知, 我们所用的 T/P 和 Jason-1 数据是可靠的, 二者的数据统一方法也是适用的。

2.4 基于验潮站实测数据的调和与分析结果检验

为了验证联合使用 T/P 和 Jason-1 观测数据的调和与分析结果的可靠性、正确性, 我们选取了 9 个验潮站, 对 4 个分潮(M2、S2、K1、O1)进行了对比分析。如图 1 中“+”所示, 这些验潮站均位于高度计卫星轨道附近, 其中 1~6 号为岛屿验潮站, 7~9 号为开阔海域验潮站。表 5 给出了比较结果, ΔH 、 Δg 表示由高度计数据和验潮站数据分别经调和与分析得到的潮汐分潮振幅与迟角之差的绝对值。 σ_H 、 σ_g 分别代表 ΔH 和 Δg 的均方根。其中 M2、S2、K1、O1 分潮的 σ_H 分别为 1.8, 1.0, 1.8, 1.1 cm; Δg 分别为 6.7° , 7.8° , 6.1° , 4.1° 。

图 3 给出了 9 个验潮站资料与基于高度计数据的潮汐调和常数提取结果的对比散点图, 直观地显示出了高度计提取结果的准确性。

表 2 交叉点处升轨和降轨分别提取出的调和常数(H)之差的绝对值

Tab. 2 The absolute values of differences between the harmonic constants H derived from ascending and descending passes at crossover points

序号	经度	纬度	ΔH (cm)							
			M2	S2	K1	O1	N2	K2	P1	Q1
1	121.90°E	26.90°N	1.10	0.01	0.73	1.54	0.34	1.38	0.25	0.80
2	124.73°E	26.90°N	0.14	0.36	0.87	0.47	0.81	0.34	0.17	0.59
3	127.56°E	26.90°N	0.56	0.78	0.49	0.27	0.90	0.50	0.08	0.82
4	123.31°E	29.74°N	0.79	0.09	1.34	0.91	0.31	1.15	1.44	0.16
5	126.15°E	29.74°N	0.04	0.14	1.22	2.34	1.06	0.19	0.03	1.71
6	128.98°E	29.74°N	1.15	0.76	0.98	0.34	0.69	0.42	0.27	0.27
7	121.90°E	32.38°N	5.12	8.04	1.13	1.87	2.89	2.20	3.43	1.68
8	124.73°E	32.38°N	1.52	0.42	1.03	0.23	0.49	0.72	0.87	1.13
9	127.56°E	32.38°N	0.33	0.55	0.05	0.51	0.75	0.77	0.92	1.66
10	120.48°E	34.84°N	1.27	1.62	1.14	0.55	0.84	1.81	1.74	1.05
11	123.31°E	34.84°N	0.61	0.65	0.67	0.03	0.26	0.47	0.68	0.76
12	124.73°E	37.12°N	3.00	0.00	1.27	0.71	0.12	1.09	0.19	0.22
13	120.48°E	39.23°N	4.26	0.60	2.74	1.06	0.06	1.87	4.08	2.01
14	123.31°E	39.23°N	4.03	0.84	1.38	1.42	1.42	1.84	2.06	0.15
均方根			2.35	2.25	1.22	1.10	1.04	1.23	1.69	1.11

表 3 交叉点处升轨和降轨分别提取出的调和常数(g)之差的绝对值

Tab. 3 The absolute values of differences between the harmonic constants g derived from ascending and descending passes at crossover points

序号	经度	纬度	Δg (°)							
			M2	S2	K1	O1	N2	K2	P1	Q1
1	121.90°E	26.90°N	0.2	0.2	0.3	2.9	2.5	3.6	27.7	3.2
2	124.73°E	26.90°N	0.6	0.0	0.8	1.4	2.7	7.7	4.7	5.6
3	127.56°E	26.90°N	0.2	2.1	5.8	1.3	3.3	14.4	21.3	6.2
4	123.31°E	29.74°N	0.2	0.4	0.5	3.6	1.6	4.6	17.8	21.8
5	126.15°E	29.74°N	0.5	1.2	1.1	1.8	5.0	9.1	5.3	1.9
6	128.98°E	29.74°N	0.4	4.3	2.6	5.4	3.6	6.5	15.8	21.7
7	121.90°E	32.38°N	2.6	4.9	12.9	0.9	2.3	2.7	12.6	73.1
8	124.73°E	32.38°N	0.0	0.4	6.3	1.6	0.4	1.6	12.3	14.4
9	127.56°E	32.38°N	1.6	1.9	1.1	3.5	3.5	1.6	0.7	10.2
10	120.48°E	34.84°N	0.2	0.6	6.4	1.3	3.2	5.0	22.0	16.0
11	123.31°E	34.84°N	0.2	1.0	0.3	4.9	4.7	7.0	4.4	37.1
12	124.73°E	37.12°N	0.5	1.2	0.1	1.8	2.6	1.7	2.4	21.9
13	120.48°E	39.23°N	0.5	7.2	0.2	3.8	17.3	25.4	5.6	35.7
14	123.31°E	39.23°N	1.2	4.5	1.5	1.5	0.4	20.5	1.0	62.4
均方根			0.9	0.9	4.6	2.9	5.49	10.6	13.9	31.6

表 4 交叉点处升轨与降轨提取出的调和常数之间的相关系数

Tab. 4 The correlation coefficients of the harmonic constants derived from ascending and descending passes at crossover points

调和常数	相关系数							
	M2	S2	K1	O1	N2	K2	P1	Q1
H	0.9980	0.9694	0.9816	0.9636	0.9895	0.9694	0.7408	0.0479
g	1.0000	0.9965	0.9984	0.9991	0.9993	0.9965	0.9873	0.9348

表 5 基于 T/P 和 Jason-1 高度计数据提取的潮汐调和常数与验潮站资料的比较结果

Tab. 5 The harmonic constants comparison between those derived based on data of T/P and Jason-1 and tidal stations

序号	分潮类型	$H(\text{cm})$		$\Delta H(\text{cm})$	$g(^{\circ})$		$\Delta g(^{\circ})$
		验潮站	高度计		验潮站	高度计	
1	M2	98.3	97.3	1.0	96.1	96.6	0.5
	S2	34.7	36.4	1.7	139.5	137.5	2.0
	K1	22.3	22.4	0.1	342.0	341.8	0.2
	O1	18.3	17.2	1.1	286.1	280.1	6.0
2	M2	112.7	111.8	0.9	279.0	291.1	12.1
	S2	52.4	52.8	0.4	324.4	335.0	10.6
	K1	25.3	28.3	3.0	195.7	186.1	9.6
	O1	16.5	15.7	0.8	151.1	151.2	0.1
3	M2	201.4	199.2	2.2	312.1	313.3	1.2
	S2	60.8	60.4	0.4	354.4	355.8	1.4
	K1	30.8	28.2	2.6	250.7	256.5	5.2
	O1	25	22.9	2.1	212.3	210.4	1.9
4	M2	56	57.3	1.3	180	173.8	6.2
	S2	23	23.9	0.9	209	202	7
	K1	22	21.6	0.4	202	192.8	9.2
	O1	15	16.3	1.3	172	169.9	2.1
5	M2	56.6	57.5	0.9	170.3	170.3	0
	S2	24.4	24.6	0.2	204.7	203.4	1.3
	K1	20	20.1	0.1	194.3	192.1	2.1
	O1	15.2	15.8	0.6	167.7	165.8	1.9
6	M2	57.3	55.7	1.6	175.5	177.2	0.3
	S2	24	23.7	0.3	208	207.8	0.2
	K1	20.6	20.1	0.5	203.7	198.3	5.4
	O1	15.8	16.6	0.8	175.3	171.5	3.8
7	M2	88.4	87.7	0.7	41.2	54.3	13.1
	S2	30.3	32	1.7	89.8	105.1	15.3
	K1	20.3	19.5	0.8	281.7	290.7	9
	O1	16.6	15.9	0.7	243	249	6
8	M2	64.7	66.5	1.8	303.4	309.2	5.8
	S2	24.8	24.8	0	326.1	338.3	12.2
	K1	20.5	18.7	1.8	206.5	210.8	4.3
	O1	14.5	14.9	1.1	177	177.8	0.8
9	M2	130.1	126.2	3.9	247.2	243.9	3.3
	S2	52.5	51.3	1.2	287.8	286.7	1.1
	K1	28.8	26.5	2.3	204.8	205.1	0.3
	O1	19.5	19.7	0.2	162.9	170.2	7.3

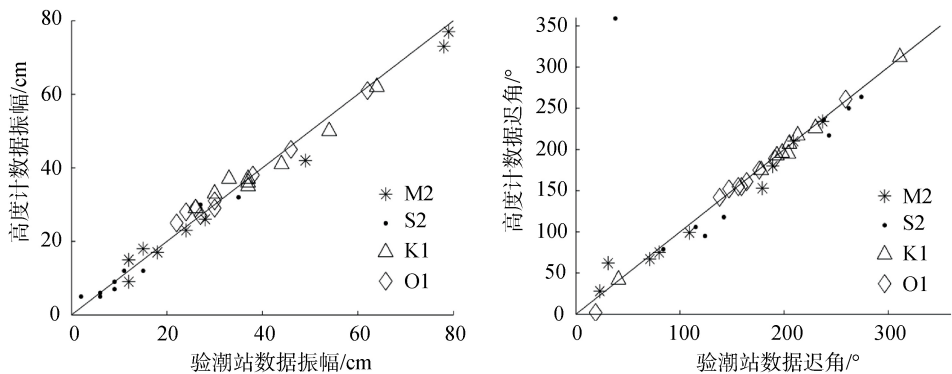


图 3 验潮站资料与基于高度计数据的潮汐调和结果的分析图

Fig. 3 The harmonic constants comparison between those derived from the satellite altimeter and 9 tidal stations

3 同潮图

由上文得知, 利用 T/P 和 Jason-1 高度计观测数据得到的潮汐调和常数达到了足够高的精度。同时, 至今已经积累了近 6 a 的 T/P 和 Jason-1 变轨后的观测数据, 该时间序列长度可以有效地分离 M2、S2、K1、O1 这 4 个主要分潮^[13-14]。本文将 T/P 和 Jason-1 两颗卫星变轨前后的全部观测数据进行调和分析, 这样便得到了 1 400 多个有效提取点, 使得研究区域高度计数据总量大大提高。

利用 T/P 和 Jason-1 变轨前后的观测数据提取潮

汐调和常数, 做出渤黄东海 4 个主要分潮(M2、S2、K1、O1)的同潮图, 如图 4 所示, 其中实线为等迟角线, 虚线为等振幅线。很多研究者都曾给出该区域同潮图, 如 Yanagi 等^[4]利用高度计数据获得了黄海和东海的同潮图; 方国洪等^[5]利用 10 a 的 T/P 数据结合 275 个验潮站资料给出渤黄东海同潮图; 王永刚^[15]利用数值模式同化验潮站观测数据给出了该区域的同潮图。本文得出的同潮图整体上与前人的结果一致, 但因高度计在近岸地区测量精度不高, 故同潮图在渤海湾区域差别较大。然而, 由于本文利用的高度计实测数据多、精度高, 我们有理由相信, 除近岸

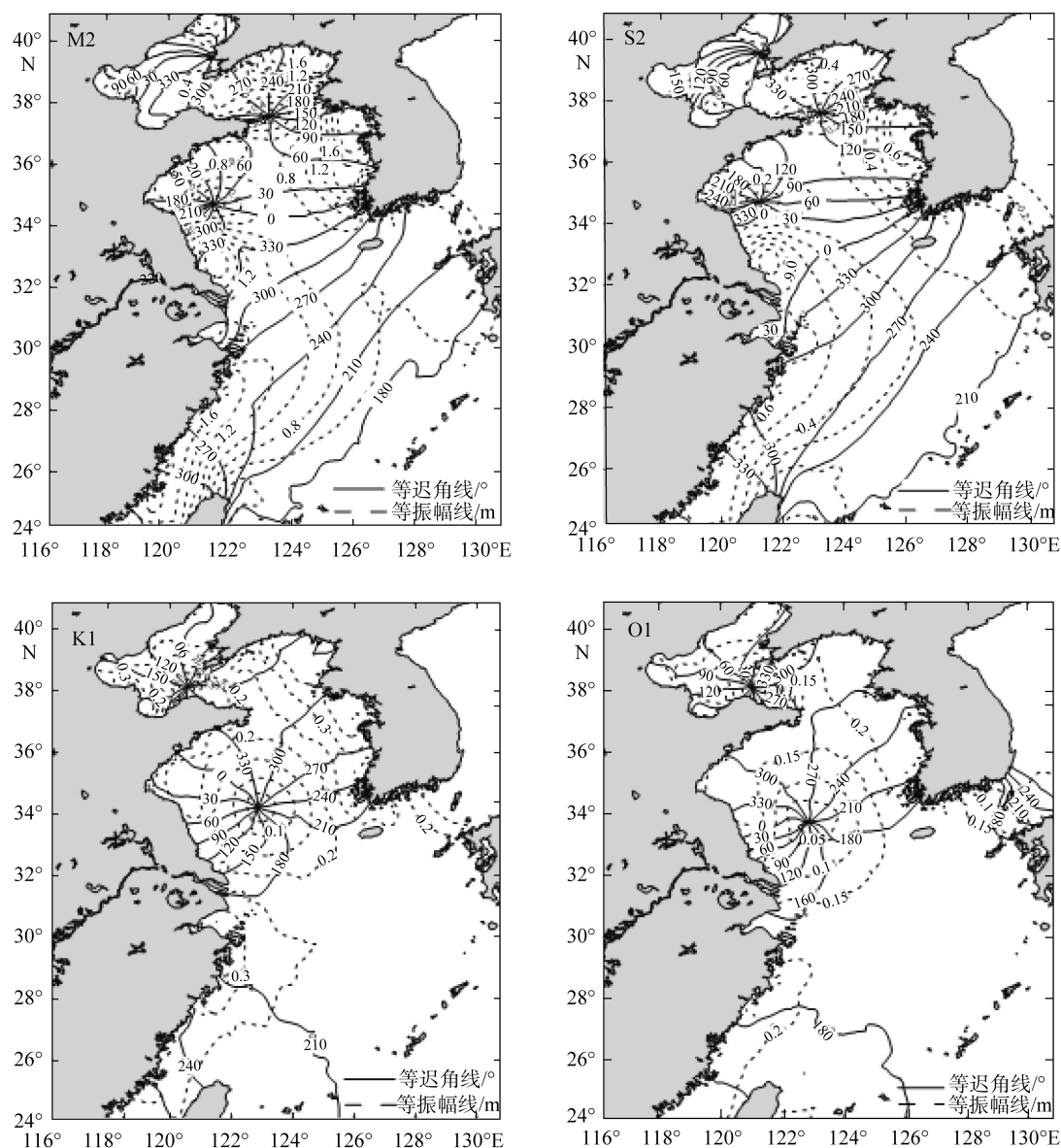


图 4 M2、S2、K1 和 O1 分潮同潮图

Fig. 4 The cotidal chart of M2, S2, K1 and O1 tide

外, 该同潮图具有比较高的精度。

同时, 本文给出了 4 个主要分潮(M2、S2、K1、O1)的无潮点, 见表 6。4 个分潮各存在 2 个无潮点, 其中 M2、S2 分潮各有 1 个无潮点位于黄海北部威海成山头

附近, 另外各有 1 个无潮点位于黄海中部, M2 分潮的 2 个无潮点相对偏东; K1、O1 分潮各有 1 个无潮点位于渤海海峡, 另外各有 1 个无潮点位于黄海南部, O1 分潮的 2 个无潮点相对偏东; 渤海湾内未发现无潮点。

表 6 4 个主要分潮(M2、S2、K1、O1)的无潮点

Tab. 6 The amphidromic points location of 4 tidal constituents(M2, S2, K1, O1)

序号	经纬度坐标			
	M2	S2	K1	O1
1	123.26°E, 37.54°N	123.19°E, 37.62°N	122.86°E, 34.21°N	122.83°E, 33.73°N
2	121.44°E, 34.70°N	121.22°E, 34.73°N	120.57°E, 38.13°N	120.99°E, 38.14°N

4 结论

本文对 T/P 和 Jason-1 卫星高度计 19 a 的观测数据进行了潮汐调和, 得到渤黄东海的 8 个分潮(M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1)的调和常数。为了同时使用两颗卫星高度计的数据提取潮汐信息, 我们将 T/P 和 Jason-1 高度计数据做了统一处理。同时, 为了检验调和结果的准确性, 我们对交叉点处的升轨和降轨的调和结果进行对比, 并将高度计提取结果与验潮站资料进行比较。

对交叉点处升轨与降轨的调和结果进行比较, 4 个主要分潮(M2、S2、K1、O1)振幅之差的均方根分别为 2.35, 2.25, 1.22 和 1.10 cm, 迟角之差的均方根分别为 0.9°, 0.9°, 4.6°和 2.9°; 将基于高度计数据提取得到的 4 个主要分潮的调和常数与岛屿验潮站数据对比表明, 振幅之差的均方根分别为 1.8, 1.0, 1.8, 1.1 cm; 迟角之差的均方根达到 6.7°, 7.8°, 6.1°和 4.1°。基于高度计数据的提取结果与验潮站资料的相关系数, 除 K1 分潮迟角为 0.83°外, 均在 0.9°以上。这充分显示出了本文所用的观测数据时间序列长, 最小二乘结果稳定的优势, 并验证了我们给出的 T/P 与 Jason-1 测高数据统一方法的可靠性。

利用 T/P 和 Jason-1 变轨前后的测高数据得到了渤黄东海 4 个主要分潮的同潮图, 由于变轨后观测数据的加入, 有效观测数据点的数量增加了 1 倍, 目标区域内调和常数的精度显著提高。但由于高度计数据在近岸的局限性, 其在渤海湾近岸的精度有待提高, 尚需借助数值模式或沿岸验潮站资料对其进行完善。

致谢: 该研究所用 T/P 数据来源于美国 NASA 喷气推进实验室; Jason-1 数据来源于法国空间局国家空间研究中心(CNES), 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Munk W. The evolution of physical oceanography in the last hundred years [J]. *Oceanography*, 2002, 15: 135-141.
- [2] Eanes R J, Bettadpur B. The CSR3.0 global ocean tide model: Diurnal and semi-diurnal ocean tides from TOPEX/POSEIDON altimetry(Technical Report CRS-TM-96-05)[R]. Austin, Texas: Centre for Space Research, University of Texas, 1996.
- [3] Desai S D, Wahr J M. Empirical ocean tide models estimated from TOPEX/POSEIDON altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C12): 25205-25228.
- [4] Yanagi T, Morimoto A, Ichikawa K. Co-tide and co-range charts in the South China Sea and the Yellow Sea derived from satellite altimetric data [J]. *Journal of Oceanography*, 1997, 53: 303-309.
- [5] Fang Guohong, Wang Yonggang, Wei Zexun, et al. Empirical cotidal charts of the Bohai, Yellow and China Sea from 10 years of TOPEX/POSEIDON altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C11): 1-13.
- [6] 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, 33(3): 287-295.
- [7] 丘仲锋, 何宜军, 吕咸青. 黄海、渤海 TOPEX/POSEIDON 高度计资料潮汐伴随同化[J]. *海洋学报*, 2005, 27(4): 10-18.
- [8] Tapley B D, Chambers D P, Shum C K, et al. Accuracy assessment of the large-scale dynamic ocean topography from TOPEX/POSEIDON altimetry [J]. *Journal of*

- Geophysical Research, 1994, 99(C12): 24, 605-24, 619.
- [9] He Yijun, Chen Ge, Guo Peifang, et al. Ocean Remote Sensing of Altimeter Research and Application [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [10] 刘传勇, 黄谟涛, 欧阳永忠, 等. 卫星测高正常点海面高度计算方法研究[J]. 海洋测绘, 2005, 25(6): 4-8.
- [11] 彭富清, 夏哲仁, 张瑞华, 等. 计算测高卫星的正常点及其平均海面高[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 437-441.
- [12] 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.
- [13] 胡建宇. 台湾海峡及其邻近海区海洋动力环境特征的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2002.
- [14] 毛文庆, 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.
- [15] 王永刚, 方国洪, 曹德明, 等. 渤、黄、东海的一种验潮站资料同化数值模拟[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(3): 253-274.

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

ZHONG Chang-wei^{1, 2}, YANG Jun-gang²

(1. China University of Petroleum(East China), Qingdao 266555, China; 2. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Mar., 31, 2012

Key words: T/P(TOPEX/POSEIDON); satellite altimetry; Jason-1; harmonic analysis; data unification; cotidal charts

Abstract: The harmonic analysis of M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 and Q1 tidal constituents in the East China Sea, the Yellow Sea and the Bohai Sea was performed utilizing 19 years altimeter data of T/P(TOPEX/POSEIDON) and Jason-1. A data unification method was proposed to solve the differences of T/P and Jason-1 data due to different correction algorithms. After orbit transfer, the T/P and Jason-1 data enhanced the spatial distribution of tidal observation effectively. The intercomparison of harmonic constants derived from ascending and descending passes at crossover points was performed to evaluate the tidal harmonic analysis method and the altimeter data. The comparison between altimetry-derived and ground-measured harmonic constants at offshore and island stations indicated that the range of the amplitude RMS and phase lag of 4 principal constituents (M2, S2, K1, O1) were 1.0~1.8 cm and 4.1°~7.8°, respectively. Compared to previous studies, the accuracy of harmonics was improved. Finally, the cotidal charts of 4 principal constituents in the East China Sea, the Yellow Sea and the Bohai Sea were drawn by combining the harmonics solutions from altimeter data.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)