

文章编号: 1671-8860(2006) 06-0503-05

文献标志码: A

潮汐模型对利用卫星测高数据研究海平面变化的影响

许 军¹ 暴景阳^{1,2} 刘雁春¹

(1 大连舰艇学院海洋与测绘科学系, 大连市解放路 667 号, 116018)
(2 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛市高新园区仙霞岭路 6 号, 266061)

摘 要: 利用 T/P 测高数据反演了中国近海及西北太平洋海域的潮汐参数, 构造了 CSR3.0、FES95.2 和 T/P 反演的海潮模型改正下的海面高时间序列, 通过海面高变化曲线及功率谱的比较确定了利用测高数据发现的海平面季节内变化主要是潮汐模型误差的贡献。

关键词: 卫星测高; 海平面变化; 潮汐模型; 潮汐混叠
中图法分类号: P228.42; P229.2

中外学者在利用 T/P 数据监测海平面变化方面做了许多有益的工作^[1-7]。董晓军等^[2]成功监测了 1997 年度 El Nino 过程; 王海瑛等^[3]得到了中国近海各海区的海平面年变化率, 分析了 El Nino 对各海区的影响; 李建成等^[4]联合多种卫星测高资料研究了全球和中国海域海平面变化规律; 董晓军等^[1]分析了加权方法、水深和潮汐模型对全球海平面变化的影响; 胡建国等^[5]监测了 1997 年的 El Nino 过程并分析了全球和中国海海平面季节性变化。同时, 多位学者发现海平面时间序列存在明显的 1 a、30 d 及 60 d 的周期项, 王海瑛等^[3]认为中国近海的准 60d 变化项是 M_2 、 S_2 分潮的频率混叠所致; 董晓军等^[1]认为潮汐混叠效应是引起海平面季节性变化的原因, 但都没有给出证明。Minster 等^[6]认为是气压改正误差引起的; Cheinway Hwang^[7]在研究南中海海平面变化时认为潮汐混叠影响不大, Fumiaki Kobashi^[8]有相似的结论。

1 测高数据处理

1.1 海面高的归算

本文的研究区域为中国近海及西北太平洋 ($0^{\circ}\text{N}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $109^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$), 不包括苏禄海和日

本海。采用的 T/P 卫星测高数据是由美国 NASA 喷气推进实验室提供的 MGD-R 数据集中的 CYCLE 11(1993 年 1 月 1 日) 到 CYCLE 348(2002 年 2 月 27 日)。该数据已改正了漂移误差, 同时调整了 TOPEX 和 Poseidon 两个高度计间的相对测距偏差^[1,9]。

卫星观测的是卫星到瞬时海面的雷达波传播距离, 经对流层、电离层延迟改正后得到卫星到瞬时海面的距离。根据卫星星历和参考面模型就可以计算出瞬时海面相对于参考面的高度, 再进行潮汐、固体潮和极潮等地球物理改正得到海平面高。取多周平均值得到相应时间长度的平均海平面高。考虑到 T/P 卫星的轨迹重复误差和沿迹方向的位置差在参考面垂直方向上的差异将进入海面高的变化中, 本文选择 OSUMS95 平均海面高模型作为参考面, 减小位置差的影响。

在进行归一化处理时, 本文没有采用共线法, 而是沿迹以纬差 0.1° 形成正常点。每个正常点的高度值通过前后各 $10'$ 的测高值经多项式拟合得到, 正常点的经度取所有周期重复点的经度平均值。多项式拟合可以降低随机噪声的影响, 同时解决了部分周期由于观测异常产生的缺值。若正常点前后在时域上缺少 5 s 以上的观测值, 则不插值, 减小插值误差的影响。

1.2 沿迹潮汐参数的提取及模型间比较

由于 T/P 卫星的重复周期 p 为 9.915 6 d, 所有周期短于 $2p$ 的分潮都会产生混叠。主要分潮的混叠周期为: $M_f = 36.2$ d; $Q_1 = 69.4$ d; $O_1 = 45.7$ d; $P_1 = 88.9$ d; $K_1 = 173.2$ d; $N_2 = 49.5$ d; $M_2 = 62.1$ d; $S_2 = 58.7$ d; $K_2 = 86.6$ d。两两分潮间的基本分辨时间由它们的混叠周期由 Rayleigh 准则确定, 9 a 的 T/P 数据已能克服主要分潮间的混叠影响, 可以按调和分析或响应分析法获得沿迹上的高分辨率潮汐参数^[10]。本文选取了 12 个分潮(长周期、全日和半日分潮各 4 个)进行沿迹调和分, 具体原理参考文献[10-12]。利用交叉点不符值估计内符合精度, 中国近海及西北太平洋 T/P 交叉点不符值中误差如下: $S_a = 0.9$ cm; $S_{a_1} = 0.7$ cm; $M_m = 0.6$ cm; $M_f = 1.3$ cm; $Q_1 = 1.7$ cm; $O_1 = 1.3$ cm; $P_1 = 1.9$ cm; $K_1 = 2.7$ cm; $N_2 = 1.4$ cm; $M_2 = 1.3$ cm; $S_2 = 1.1$ cm; $K_2 = 1.8$ cm。

统计表明, 由 9 a 的 T/P 测高数据反演的潮汐参数已十分稳定可靠, 包括在中国近海的浅水区域。因此, 以反演的潮汐模型作为 T/P 构建海面高序列的海潮改正模型应能更彻底地消除潮汐的影响, 特别是在目前的全球海潮模型误差较大的浅水海域。文献[10-11]作了详尽的精度分析, 证明了在浅水海区, 由足够长时间的 T/P 卫星测高数据, 采用沿迹调和分分析可以得到和大洋海区相媲美的精确潮汐信息。

CSR3.0 与 FES95.2 是 T/P 的 MGDR-B 数据集推荐采用的潮汐模型。CSR3.0 是以 AG95.1、FES94.1 为半日分潮和全日分潮的参考模型, 利用 89 周(2.4 a) T/P 数据计算相对于参考模型的残差潮高, 在 $3^\circ \times 3^\circ$ 平均意义上估计残差对应的正交权系数, 用半径为 7° 的高斯函数作卷积平滑后修正于参考模型, 分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。FES95.2 是将深度大于 1 000 m 的海洋 $5^\circ \times 5^\circ$ 分区内的 CSR2.0 数据通过 Representer 技术同化于 FES94.1。CSR2.0 是利用两年的 T/P 数据在 $3^\circ \times 3^\circ$ 分区内作正交潮响应分析并经高斯平滑内插得到的。因此, CSR3.0、FES95.2 都是以 FES94.1(采用有限元法解算的纯动力学模型)为参考模型通过卫星测高数据改进得到的。但同化的 T/P 数据的时间跨度只有两年左右, 不能克服混叠影响, 所以采用了分区分析及高斯平滑内插, 较大区域内的平均及平滑只能在一定程度上改进深海解, 但对浅海解改进较小。故 CSR3.0、FES95.2 与本文的反演结果相比, 在浅海的误差仍较大, 其比较结果见表 1。

表 1 CSR3.0、FES95.2 与 T/P 反演的潮汐模型的比较

Tab.1 Deviation of CSR3.0 and FES95.2 Compared with the Tide Model Established by Authors

综合误差	RMS/cm	Q_1	O_1	P_1	K_1	N_2	M_2	S_2	K_2
黄海	CSR3.0	1.5	4.6	2.4	7.9	5.4	28.6	8.5	2.4
	FES95.2	1.2	11.2	-	14.0	4.5	28.1	38.0	2.4
东海	CSR3.0	1.2	2.5	1.9	5.2	5.4	31.4	10.8	3.4
	FES95.2	1.2	7.1	-	11.8	14.3	73.0	28.9	3.0
南海	CSR3.0	0.9	2.2	1.0	2.4	1.3	4.5	2.6	1.5
	FES95.2	0.8	1.8	-	2.7	2.4	7.5	2.0	1.2
西北太平洋	CSR3.0	1.0	1.2	1.1	2.0	0.9	2.0	1.2	1.5
	FES95.2	1.0	1.0	-	1.6	0.9	1.5	1.0	1.5

表 1 表明, 在西北太平洋深水区, 模型间差异都不超过 2 cm, 但在普遍水深浅于 200 m 的东海、黄海差异较大, 甚至达到 73 cm。

1.3 各海区海平面高的计算

在进行归一化处理时, 沿迹正常点的间隔都为 0.1° , 即在沿迹纬向上是等间距的, 但纬度越高, 卫星的轨迹越密, 即正常点在空间分布上不均匀。故在计算全球或某海域的海平面高时, 等权的方法必然会夸大高纬度地区观测的影响。权应与单位面积内一个重复周期内的观测数成反比。因此, 每个观测的权因子应取为 $\cos \varphi$, 其中 φ 为观测时刻星下点的地理纬度。

若某海域第 j 周期有 N_j 个正常点, 则该周期的海面高为:

$$h^j = \sum_{k=1}^{N_j} h_{kw}^j / \sum_{k=1}^{N_j} w_k^j$$

式中, h_k^j 、 w_k^j 是纬度为 φ_k^j 的正常点处的内插值和权因子。对测高值分别使用 CSR3.0、FES95.2 和 T/P 沿迹反演的潮汐模型进行海潮改正, 计算出各海域相对 OSUMSS95 模型的海平面高的时间序列。

2 计算结果与分析

图 1 是中国近海黄海、东海、南海和西北太平洋的海平面的变化曲线。为了便于规律性的显示, 已对海平面进行了 30 d 的移动平滑, 而下文的功率谱分析仍建立在原始的海面高时间序列上。从图 1 可以看出, 经 CSR3.0 和 FES95.2 潮汐模型改正后的海面高变化中存在明显的年周期项。

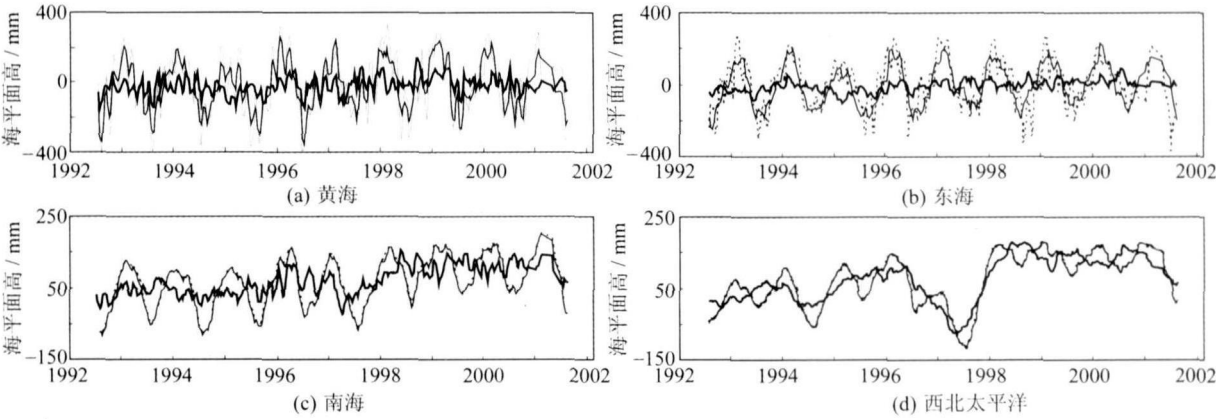
对各海平面高的时间序列作频谱分析(图 2), 结合图 1 可以看出以下几个方面。

1) 因 CSR3.0 和 FES95.2 潮汐模型中不含

有长周期分潮, 其中有较大幅值的年周期分潮的贡献将反映在海面高变化中。而本文利用 T/P 测高资料反演的潮汐模型中包含有 4 个长周期分潮, 从图 1 和图 2 中都可以看出海面高序列中已没有年周期项。考虑到年周期分潮 S_a 实质上是气象引起的, 主要是周期性的风和气压的变化。因此, 在研究海面高变化与风和气压等关系时可不加年周期项。

2) 黄海、东海、南海经 CSR3.0 和 FES95.2 改正后的海面高变化中存在较强的准 60 d 的频

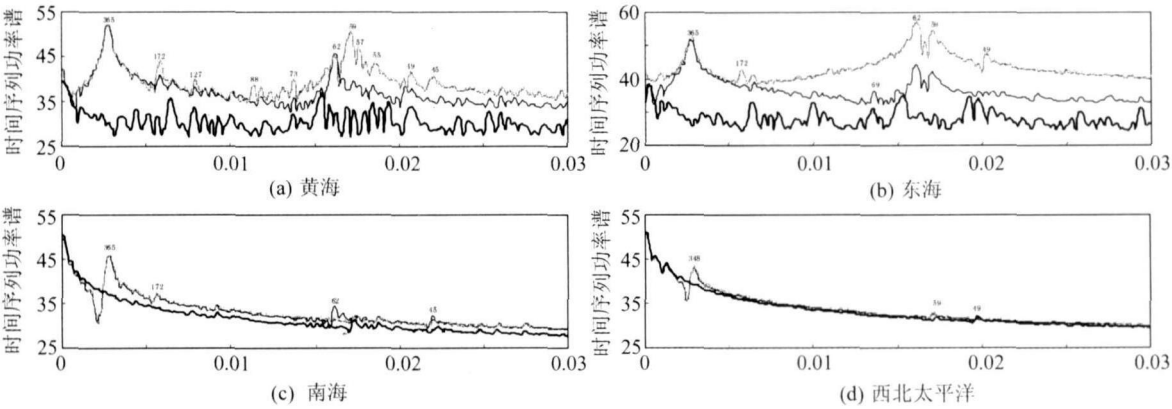
率项。由表 1 知, M_2 、 S_2 的混叠周期分别为 62 d、59 d, 据此, 王海瑛等^[3]认为潮汐模型的误差是准 60 d 周期项的激发原因。利用 T/P 反演的潮汐模型改正后的海面高中已基本去除了准 60 d 项, 证明了此观点的正确性。准 60 d 周期项的量值在东海最大, 黄海次之, 南海最小, 反映了与这些分潮振幅的基本对应关系以及全球潮汐模型的混叠影响程度。同时还可发现, 在东海、黄海 FES95.2 改正后的海面高中存在的准 60 d 项比 CSR3.0 改正后的幅值更大。



虚线表示 FES95.2, 细线表示 CSR3.0, 粗线表示反演的潮汐模型

图 1 中国近海及西北太平洋各海区经不同潮汐模型, 改正后的海面高时间序列曲线图

Fig.1 Mean Sea Level Variations Corrected by Different Tide Models in Seas Adjacent to China and Northwest Pacific



虚线表示 FES95.2, 细线表示 CSR3.0, 粗线表示反演的潮汐模型

图 2 中国近海及西北太平洋各海区经不同潮汐模型改正后的海面高时间序列功率谱图(1/ d)

Fig.2 Power Spectral Density of Mean Sea Level Corrected by Different Tide Models in Seas Adjacent to China and Northwest Pacific(1/ d)

3) 综合表 1 和图 2 可以看出, 经 CSR3.0 和 FES95.2 改正后的海平面变化中的各主要周期项基本上都与潮汐混叠效应有关, 其中有明显的 M_2 和 S_2 潮汐模型误差引起的 62 d 和 59 d, P_1 和 K_2 引起的准 90 d, O_1 的 45 d、 N_2 的 49 d 和 K_1 的 173 d 混叠周期在黄海、东海也比较明显。

结合表 1, CSR3.0、FES95.2 与 T/P 反演的潮

汐模型的各主分潮的偏差量值基本与其对应的混叠周期项在功率谱上的功率密度相对应。同时黄、东海因存在 M_2 、 K_1 和 O_1 的无潮点, 时空差异大而成为目前全球海潮模型适用性最差的地方。即使是本文反演的潮汐模型, 改正后的海面高变化中仍有较多的频率项, 可能是没有考虑的分潮的作用, 虽幅值较小, 但足够影响海平面季节内振荡特征分

析。因此,黄、东海的潮汐模型仍有精化的必要。

4) 在南海和西北太平洋, CSR3. 0、FES95. 2 与 T/P 反演的潮汐模型订正效果都良好。但从图 1 可以看出, 1994 年、1997 年的 El Nino 和 1998 年的 La Nino 事件对南海和西北太平洋的海平面影响较大。在发生 El Nino 时海平面有较大的下降, 而在发生 La Nino 时海平面有较大的上升, 这可能是不同的学者利用卫星测高数据得出的海平面长期变化率差异较大的主要原因之一。

5) Minster 等^[6]认为, 海平面变化中的主要周期项是气压改正误差引起的。笔者另文已就逆气压改正对潮汐提取的影响进行了详细分析, 结果表明, 气压主要表现年周期性。在年周期分潮 S_a 的实际振幅中气压变化的平均贡献比率为 42%, 而对其他主分潮的影响不到 0. 5 cm, 即气压改正误差的影响除在年周期上不应体现在其它主分潮对应的混叠周期上。另外, 应在彻底的潮汐改正后才能有效地评估气压改正误差的影响, Minster 实际是将潮汐改正的影响并入气压改正的影响中了。Chenway Hwang 等^[7]利用小波分析方法得出潮汐模型误差不是海平面变化主要贡献项的结论时, 依据的是分潮的振幅不应随时间发生变化。但据验潮站数据分析结果看, 各分潮的调和常数是随时间变化的, 即调和常数可认为具有时效性。

3 结 语

从运用卫星测高数据计算海平面变化的原理知, 潮汐模型的误差将进入海平面变化中, 海平面中将存在对应的混叠频率项, 干扰对真实海平面变化规律的提取及解释。因此, 在计算海平面变化时需特别关注潮汐模型的精度, 重视潮汐模型对利用卫星测高数据研究海平面变化的影响。目前全球潮汐模型精度较低的浅水区域如中国近海, 较大的潮汐模型误差已掩盖了真实的海平面变化规律, 只有在建立高精度、高分辨率的区域潮汐模型的基础上才能利用卫星测高数据研究海平面变化。

参 考 文 献

[1] 董晓军, 黄斌. 利用 TOPEX/Poseidon 卫星测高资料监测全球海平面变化[J]. 测绘学报, 2000, 29 (3): 266-272

[2] 董晓军, 黄斌, 郑大伟, 等. 利用 TOPEX 卫星测高技术监测 1997 年度 El Nino 过程[J]. 科学通报, 1998, 43(19): 2 062-2 064

[3] 王海瑛, 许厚泽, 王广运. 中国近海 1992~ 1998 海平面变化监测与分析[J]. 测绘学报, 2000, 29 (特刊): 32-37

[4] 李建成, 王正涛, 胡建国. 联合多种卫星测高数据分析全球和中国海平面变化[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 343-347

[5] 胡建国, 李建成, 董晓军, 等. 利用卫星测高技术监测海平面变化[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 316-321

[6] Minster J F, Brossier C, Rogel P. Variation of the Mean Sea Level from TOPEX/POSEIDON Data[J]. J Geophysical Research, 1995, 100(C12): 25 153-25 162

[7] Hwang Chenway, Chen Sungan. Fourier and Wavelet Analyses of TOPEX/Poseidon-derived Sea Level Anomaly over the South China Sea: a Contribution to the South China Sea Monsoon Experiment[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C12): 28 785-28 804

[8] Kobashi F, Kawamura H. Variation of Sea Surface Height at Periods of 65-220 Days in the Subtropical Gyre of the North Pacific. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(C11): 26 817-26 831

[9] Benada J R. Merged GDR (TOPEX/POSEIDON) Generation B User's Handbook[R]. JPL D-11007, PO. DAAC. California, 1997

[10] 暴景阳. 基于卫星测高数据的潮汐分析理论与方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002

[11] 暴景阳. 由 T/P 卫星测高数据建立南中国海潮汐模型的初步研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(4): 341-345

[12] 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

[13] 王勇, 许厚泽, 詹金刚. 中国近海 TOPEX/Poseidon 卫星测高海平面变化的 CPCA 分析[J]. 测绘学报, 2001, 30(2): 173-178

[14] 申辉, 郭佩芳, 钱成春, 等. 1993-2001 年全球海面高度变化特征[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(2): 169-178

[15] Douglas B C. Global Sea Rise: A Redetermination [J]. Surveys in Geophysics, 1997, 18(2): 279-292

[16] Kosek, Wieslaw. Long-term and Short Period Global Sea Level Changes From TOPEX/Poseidon altimetry[J]. J Planetary Geodesy, 2001, 36(3): 71-84

[17] Nerem R S, Chambers D P, Leuliette E W, et al. Variations in Global Mean Sea Level Associated with the 1997-1998 ENSO Event: Implications for Measuring Long Term Sea Level Change[J]. Geophysical research letters, 1999, 26(19): 3 005-3 008

第一作者简介: 许军, 硕士生。现主要从事卫星测高数据的处理及应用。

E-mail: xujun_1999@yahoo.com.cn

Influence of Tide Model on Mean Sea Level Variation Using Altimetry Data

XU Jun¹ BAO Jingyang^{1,2} LIU Yanchun¹

(1 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, 667 Jiefang Road, Dalian 116018, China)
(2 First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 6 Xianxialing Road, Qingdao 266061, China)

Abstract: Variations of sea surface height in the Yellow Sea, East China Sea, South China Sea and Northwest Pacific have been obtained from TOPEX/Poseidon altimetry data corrected by CSR3.0, FES95.2 and the tide model established by authors respectively. It is shown by spectral analyses that sea level variations corrected by CSR3.0 and FES95.2 contain major components which are dominated by the annual and alias periods of principal tides constituent under T/P sampling. Nevertheless, sea level variations corrected by the tide model established by authors represent characteristic of non-tidal effects which means that tidal and non-tidal variations have been segregated correctly. And Fourier analysis shows that power spectral density is in proportion to deviation of CSR3.0 and FES95.2 compared with the tide model established by authors, which verifies the tidal aliasing is the mechanism of major components. In shallow area where the precision of the global tide models is lower, such as the seas adjacent to China, error of the tide models is higher than the real rule of variations of sea surface height in magnitude. Thus particular attention should be paid to the precision of the tide model in calculating variations of sea surface height.

Key words: satellite altimetry; variation of sea surface height; tide model; tidal aliasing

About the first author: XU Jun, postgraduate. His major research is on the applications of satellite altimetry.
E mail: xujun_1999@yahoo.com.cn

(上接第 502 页)

Prediction on Time Series Analysis of Water Quality in Yangtze Gorges Reservoir Area

WU Tao^{1,2} YAN Huiwu^{1,2} TANG Guigang³

(1 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(3 China National Environmental Monitor Center, 1 Huiyu Road, Beijing 100029, China)

Abstract: The conception, category and analysis method of time series analysis are stated. On the basis of the time series data about indexes of water quality during different periods of Yangtze Gorges reservoir, it announces the anticipant results by combination of the study of water quality experiment which was done with Holt-Winters time series anticipation model.

Key words: Yangtze Gorges reservoir; time series analysis; Holt-Winters time series anticipation model

About the first author: WU Tao, Ph. D candidate, majors in GIS Web services.
E mail: wt1118wc1118@263.net