

利用卫星测高数据研究海面高月异常变化与厄尔尼诺现象的相关性

王正涛¹ 李建成¹ 晁定波¹ 姜卫平²

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学 GPS 工程技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 利用美国宇航局和法国空间局联合公布的 T/P 数据(1994 年、1996 年和 1997 年)、欧洲空间局的 ERS1 数据(1992~1993 年)和 ERS2 数据(1996 年、1997 年)以及美国海军的 Geosat 精密重复任务数据(1987 年、1988 年), 由共线法计算了热带太平洋及东、西赤道太平洋洋域海平面高月变化, 进而研究了 1987 年、1991~1992 年、1994 年、1997 年四次厄尔尼诺现象与该地区海面高月变化的相关性。测高数据采用最新编辑标准编辑, 同时进行了逆气压等各项物理改正, 得出了与 1987 年、1992~1993 年、1994 年、1997 年厄尔尼诺现象有联系的热带太平洋及东、西赤道太平洋逐月的海面高变化异常图, 利用正常年 1988 年、1996 年海平面高月变化作为基准, 计算出相对于正常年的海平面高变化的异常值。

关键词: 卫星测高; 海平面变化; 厄尔尼诺

中图法分类号: P229. 2; P228. 3

海面温度变化异常导致全球大气环流变化, 从而使得全球异常气候频繁发生, 严重地影响了人类的生产和生活。研究厄尔尼诺现象长期天气和气候变化的规律和原因, 探索预测厄尔尼诺现象发生的新途径, 已成为当代世界面临的一个紧迫问题^[1]。

1 数学模型与数据处理

1.1 共线法数学模型

共线法的思想基于共线对^[2]。在理想状态下, 测高卫星每一周期相对应的弧的地面轨迹应该吻合。然而, 由于引力、电离层、仪器等种种原因, 卫星的地面轨迹并不能精确共线, 轨迹之间的最大距离可达 1km。由此, 通过固定一条轨迹为参考轨迹, 来确定其他周期相对应弧的相同纬度点的经度及其海面高, 即得到海平面高的异常变化。其数学模型如下。

对于上升弧(以轨道倾角小于 90°为例), 如图 1(a)所示, O 为参考轨道的观测点, O' 为不同

周期对应轨迹相同纬度的点。显然, 这个点不可能有直接卫星观测记录。因此, 这个点的海面高可以通过与 O' 点相邻的两观测点 P 、 Q 的记录, 由线性内插求得。与 O 相对应的 O' 的经度为:

$$\lambda = \lambda_P - (\varphi_P - \varphi_O) / (D_1 \cdot \cos \varphi_O) \quad (1)$$

式中, D_1 为共线弧的斜率, 可由 P 、 Q 两点的经、纬度确定:

$$D_1 = (\varphi_P - \varphi_Q) / [(\lambda_P - \lambda_Q) \cos \varphi_Q] \quad (2)$$

对于下降弧, 如图 1(b)所示, 同样可用类似方法求出, 即

$$\lambda = \lambda_P - (\varphi_O - \varphi_P) / (D_2 \cdot \cos \varphi_O) \quad (3)$$

$$D_2 = (\varphi_Q - \varphi_P) / [(\lambda_P - \lambda_Q) \cos \varphi_Q] \quad (4)$$

同理可以导出轨道倾角大于 90°的情况。对于上升弧和下降弧的共线方程分别为:

$$\lambda = \lambda_P + (\varphi_P - \varphi_O) / (D_1 \cdot \cos \varphi_O)$$

$$D_1 = -(\varphi_P - \varphi_Q) / [(\lambda_P - \lambda_Q) \cos \varphi_Q] \quad (5)$$

和

$$\lambda = \lambda_P + (\varphi_O - \varphi_P) / (D_2 \cdot \cos \varphi_O)$$

$$D_2 = (\varphi_P - \varphi_Q) / [(\lambda_P - \lambda_Q) \cos \varphi_Q] \quad (6)$$

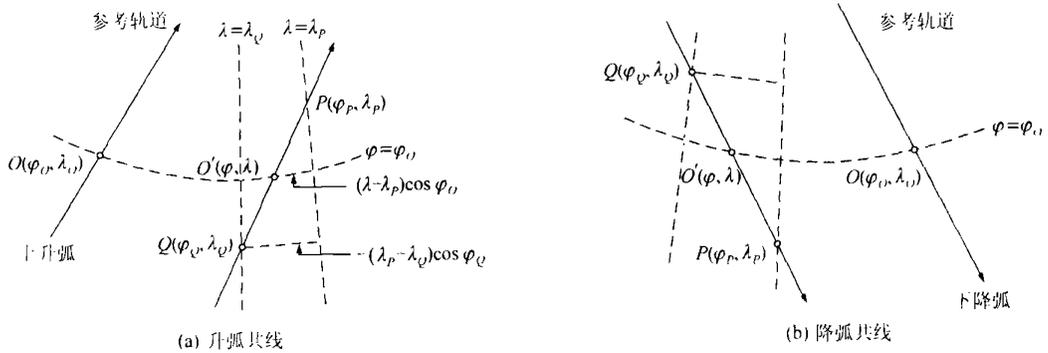


图1 数学模型

Fig. 1 Model of Mathematics

综合式(1)~式(6),可以得到内插同纬度对应共线点海面高的统一表达式为:

$$\lambda = \lambda_P - (\varphi_P - \varphi_O) / (D \cdot \cos \varphi_O)$$

$$D = (\varphi_P - \varphi_Q) / [(\lambda_P - \lambda_Q) \cos \varphi_Q]$$

与 O 相对应的 O' 的海面高为:

$$H = H_Q + (H_P - H_Q) \frac{(\varphi_O - \varphi_Q)}{(\varphi_P - \varphi_Q)}$$

1.2 数据处理

1.2.1 T/P 数据处理

本文采用 CNES 提供的 AVISO 最新处理的第三版 T/P GDR-M (merged geophysical data records) CDROM 产品,以 AVISO 用户手册给出的编辑准则为基础,并结合 OSU^[3] 的编辑标准,除常规标准外,还修改和增加了以下内容:①改正的海面高与 OSU1995 平均海面高之差大于 1m;②有效波高大于等于 9m;③海面高差大于 3m 且小于 5m,且有效波高均方差大于 4m。

同时,地球物理改正采用了干、湿对流层改正、Topex 双频电离层改正和 DORIS 电离层改正;海洋状态(K_1)、海潮(CSR3.0)、固体潮和极潮也由最新模型改正;逆气压改正采用了第一周期平均大气压计算的改正数。

1.2.2 ERS 数据处理

对 ERS-1/2 数据的编辑方法在采用 ESA 所提供的编辑标准的基础上,参照文献 3,4 的标准,综合 JPL 国际同行所作的一些其他方法,并根据需要融入了一些新思想,对 ERS-1 和 ERS-2 数据进行了编辑。具体删除标准为:①机动标志 (manoeuvre flag);②辐射计陆地标志;③冰标志;④海面高 $H > 100\text{m}$ 或 $H < -130\text{m}$;⑤每秒观测值个数小于 10;⑥ 20 个海面高观测值标准差 $\sigma_H > 450\text{cm}$ 或 $\sigma_H < 0$;⑦干对流层改正大于 $-1\,900\text{mm}$ 或小于 $-2\,500\text{mm}$;⑧辐射计湿对流层改正大于 -1mm 或小于 -500mm ;⑨电

离层改正大于 -1mm 或小于 -200mm ;⑩有效波高大于 10m 或小于 0;⑪反向散射计改正大于 30dB 或小于 6dB;⑫海潮改正大于 5 000mm 或小于 $-5\,000\text{mm}$;⑬固体潮改正大于 1 000mm 或小于 $-1\,000\text{mm}$ 。

对 ERS-1/2 有效观测值的各项地球物理及环境改正与 Geosat 数据相似,以 CERSAT 用户手册为基础,标准逆气压改正中以每个周期的平均大气压值(P)代替标准大气压。

1.2.3 Geosat 数据处理

采用的 Geosat/ERM 数据是美国 NOAA 公布的 1997 年版 JGM3-GDR 最新测高数据,由于基于精度较高的 JGM3 重力场模型,并且提高了各项地球物理方面的改正精度,其交叉点的中误差只有 13cm,总体的轨道精度优于 10cm。各项地球物理模型改正包括:①利用 CSR3.0 模型计算海潮和负荷潮;②新的 Cartwright and Edden 潮汐模型计算固体潮;③基于 NCEP/NCAP 分析模型的对流层干湿项改正;④基于 NASA NVAP 数据库的对流层湿项改正;⑤基于 IRI95 模型的电离层改正;⑥利用 Freilich 和 Challenor 模型计算风速;⑦利用风速、波高、卫星姿态角计算新的 SSB 值;⑧平均海面采用 OSU MSS95 模型^[4]。

采用的数据编辑标准是在参考 NOAA 提供的用户手册的基础上,借鉴 OSU 标准的经验,对数据进行了相应的编辑和筛选。具体编辑、删除标准为:①第 2~8 参考标志位等于 1;②经过陆地/海冰的数据;③海平面高观测值标准差 $\sigma_H > 10\text{cm}$ 或 $\sigma_H < 0$;④有效波高 (SWH) 大于 1 000cm 或小于 -50cm ;⑤有效波高标准差 $\sigma_{\text{SWH}} < 100\text{cm}$;⑥卫星姿态角大于 1.3° ;⑦海潮改正的绝对值大于 100cm;⑧ 10 个/s 的海面高与其 1 个/s 的平均值之间的最大差值 $\Delta h_{\text{max}} \geq 100\text{cm}$;⑨改正后的海面高与 OSU MSS95 平均海面高

的差值绝对值 $\Delta H \geq 1\ 000\text{cm}$ 。

对经过上述编辑标准处理的海平面高再作包括逆气压等各项地球物理方面的环境改正, 数据中基本上消除了各种伪观测值。

三种卫星测高数据经过上述处理过程, 剔除符合标准的各种伪观测值(总剔除率约为总数据量的 15%), 测高数据中绝大部分观测粗差也被予以消除, 各项环境偏差(如潮汐、气压等影响)得到改正。

2 数值结果与分析

在研究热带太平洋及东、西赤道太平洋海平面月变化时, Geosat/ERM 是从第 4 周期(1987.01)开始与后两周期对应的通过文件共线, 计算出了 1987、1988 两年的海平面月变化; T/P 数据分别从第 48 周期(1994.01)、第 121 周期(1996.01)、第 158 周期(1997.01)开始每隔 3 个周期对应的通过文件共线, 计算出了 1994、1996、1997 三年的海平面月变化; ERS1 数据从第 1 周期(1992.04)开始与后一周期对应的通过文件共线, 计算出了 1992.04~1993.12 两年的海平面月变化; ERS2 数据从第 7 周期(1996.01)开始与后一周期对应的通过文件共线, 计算出了 1996、1997 两年的海平面月变化。

图 2~图 5 给出了正常年(1988 年、1996 年)与异常年海平面变化对比图。图中实线代表正常

年海平面变化, 虚线代表异常年海平面变化, 图中数据单位均为 m。从图 2~图 5 可以看出, 对于不同的区域, 正常年海平面变化(实线)趋势及大小几乎一致, 证明了算法的正确性与稳定性。考虑到不同卫星的仪器、轨道、参考模型的不同, 在进行比较时, 采用同种卫星作为基准。

从图 2 可以看出, 1987 年热带太平洋及东西太平洋在 1~8 月与正常年 1988 年海平面变化趋势一致, 但 2 月份海平面异常高 3cm, 3~6 月海平面异常低平均 2cm, 9、10 月有明显的异常海面高变化, 9 月海面异常低平均 9cm, 10 月海面异常高 12cm。

从图 3 可以看出, 1993 年海平面变化较为复杂, 相对于正常年 1996 年, 海面高有明显异常, 1~3 月海面异常低平均 3cm, 4、5 月海面异常高平均 2cm, 7~9 月海面异常高平均 4cm, 10~12 月未有规律性异常变化。

从图 4 可以看出, 1994 年海平面变化仍较为复杂, 相对于正常年 1996 年, 海面高异常有突变, 1、3、9、11、12 月海面异常高平均 3cm, 2、4、5、8、10 月海面异常低平均 3cm。

从图 5 可以看出, 在东赤道太平洋, 2~6 月均有海面异常现象, 平均海面异常高 3cm, 在 10 月份有 3.5cm 异常高; 对于热带太平洋和西赤道太平洋, 1997 年海面变化趋势一致, 相对于正常年 1996 年变化, 1、3、7、9 月海面异常低平均 5cm, 2、4、6 月海面异常高平均 4cm。



图 2 1987 年与 1988 年 ERM 数据海平面月变化比较图

Fig. 2 Monthly MSLVs of Western Equatorial from ERM of 1987 and 1988

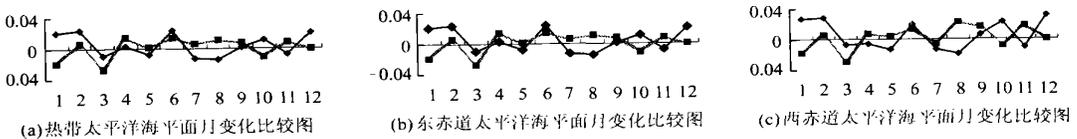


图 3 1993 年 ERS1 与 1996 年 ERS2 数据海平面月变化比较图

Fig. 3 Monthly MSLVs of Western Equatorial from ERS1 of 1993 and ERS2 of 1996

3 结语

本文利用 Geosat/ERM、ERS1/2 以及 T/P 数

据, 采用共线法给出了 1987~1988 年(ERM)、1992~1993 年(ERS1)、1994 年(T/P)、1996 年(T/P、ERS2)、1997 年(T/P、ERS2)热带太平洋以及东、西赤道太平洋海域海平面月变化, 通过以

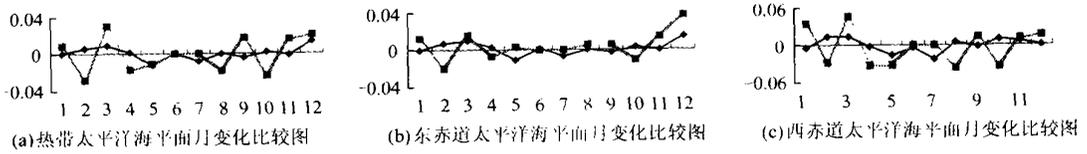


图4 1994年与1996年T/P数据海平面月变化比较图

Fig. 4 Monthly MSLVs of Western Equatorial from T/P of 1994 and 1996

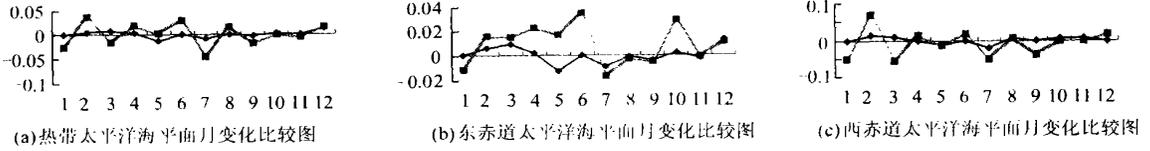


图5 1996年与1997年T/P数据西赤道太平洋海平面月变化比较图

Fig. 5 Monthly MSLVs of Western Equatorial from T/P of 1996 and 1997

正常年(1988年、1996年)为基准得出了异常年(1987年、1992~1993年、1994年、1997年)海平面变化异常值。如图2~图5中实线显示,对于不同的区域,正常年海平面变化趋势及大小几乎一致,而对于异常年,海平面变化呈现出不规律性。综合数据处理的结果分析,以正常年海平面变化高为基准,异常年海平面变化高相对于正常年在春季呈现负值,平均-6cm;在秋季呈现正值,平均+8cm,与厄尔尼诺现象发生的特征相吻合,从而证明海平面异常变化与厄尔尼诺现象有较强的相关性。

致谢:感谢ESA提供的ERS-1和ERS-2测高数据、NOAA提供的Geosat测高数据、CNES提供的T/P测高数据。

参 考 文 献

- 1 胡明城. 跨世纪的大地测量. 北京: 国家测绘科技信息研究所, 1994
- 2 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. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 343~347
- 3 Rapp R H, Yi Y C, Wang Y M. Mean Sea Surface and Geoid Gradient Comparisons with Topex Altimeter Data. J. Geophys. Res., 1994, 99(C12): 24 657~24 667
- 4 Yi Y C. Determination of Gridded Mean Sea Surface from Topex, ERS-1 and Geosat Altimeter Data. Rep. 434. Dept. of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, 1995
- 5 Brenner A C, Koblinsky C J, Beckey B D. A Preliminary Estimated of Geoid-induced Variations in Repeat Orbit Satellite Altimeter Observations. J. Geophys. Res., 1990, 95: 3 033~3 040
- 6 Chen J L, Shum C, Wilson C, et al. Seasonal Sea Level

- Change from Topex/ Poseidon Observation and Thermal Contribution. Journal of Geodesy, 2000, 73(12): 323~332
- 7 Chen J L, Wilson C R, Chambers D P, et al. Seasonal Global Water Mass Balance and Mean Sea Level Variations. Geophys. Res. Lett., 1998, 25(19): 3 555~3 558
- 8 Douglas B. Global Sea Level Rise. J. Geophys. Res., 1996, 96(C4): 6 981~6 992
- 9 Minster J F, Brossier C, Rogel P. Variation of the Mean Sea Level from Topex/ Poseidon Data. J. Geophys. Res., 1995, 100: 25 153~25 161
- 10 Nerem R S. Measuring Global Mean Sea Level Variations Using Topex/ Poseidon Data. J. Geophys. Res., 1995, 100: 25 135~25 151
- 11 Repert J P, Donguy J R, Elden G, et al. Relations Between Sea Level, Thermocline Depth, Heat Content, and Dynamic Height in the Tropical Pacific Ocean. J. Geophys. Res., 1985, 90(C6): 11 719~11 725
- 12 Wang Z T, Li J C, Hu J G. Sea Level Changes Detected by Using Satellite Altimeter Data and Comparing with Tide Gauge Records in China Sea. In: Hwang C, Shum C, Li J, eds. Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 271~277
- 13 Wyrtek K. Water Displacements in the Pacific and Genesis of El Niño Cycles. Journal of Geophysics Research, 1985, 90: 7 129~7 132
- 14 陈俊勇, 李建成, 晁定波. 用Topex/Poseidon卫星测高数据确定我国海域及其邻海海面高和海面地形. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(4): 321~326
- 15 邓晓丽, 晁定波, 陈俊勇. 中国近海Topex/Poseidon卫星测高数据处理的初步结果. 测绘学报, 1996, 25(3): 226~232
- 16 胡明城. 跨世纪的大地测量(续). 北京: 国家测绘科技信息研究所, 1997

- 17 姜卫平, 李建成, 王正涛. 联合多种测高数据确定全球平均海面 WHU2000. 科学通报, 2002, 47(15): 1 187~1 191
- 18 李建成, 姜卫平, 章 磊. 联合多种测高数据建立高分辨率中国海平均海面高模型. 武汉大学学报·信息

科学版, 2001, 26(1): 40~45

第一作者简介: 王正涛, 博士生. 现主要从事卫星测高数据处理和卫星重力数据恢复重力场的相关研究.

E-mail: ztwang@wtusm.edu.cn

Correlativity Study Between El Niño Phenomenon and Mean Sea Level Abnormal Variations in Equator Pacific Area Using Multi-satellite Altimetric Data

WANG Zhengtao¹ LI Jiancheng¹ CHAO Dingbo¹ JIANG Weiping²

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Research Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Mean sea level abnormal variations in equator pacific area are analyzed using cillinear method of along track based on three years (1994, 1996, 1997) of T/P data, two years (1992~1993) of ERS-1 data, two years (1996~1997) of ERS-2 data as well as all Geosat/ERM data. The overall editing criteria for altimetric data are considered and the precision of the geophysical correction models is improved. The results proves the significant correlative relation between El Niño phenomenon and mean sea level abnormal variations.

Key words: altimetry; mean sea level variation; El Niño

About the first author: WANG Zhengtao, Ph. D candidate, majors in altimetric data processing and earth gravity field recovery with SST technique.

E-mail: ztwang@wtusm.edu.cn

(责任编辑: 平子)

欢迎订阅《武汉大学学报·信息科学版》

《武汉大学学报·信息科学版》即原《武汉测绘科技大学学报》,是以测绘学为主的专业学术期刊。其办刊宗旨是:立足测绘科学前沿,面向国际测量界,通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果,展示中国测绘研究的最高水平,引导测绘学术研究的方向。本刊为中国核心期刊,国家优秀科技期刊,并入选中国期刊方阵。

本刊主要栏目有院士论坛、学术论文、科技新闻等,内容涉及摄影测量与遥感、大地测量与物理大地测量、工程测量、地图学、图形图像学、地球动力学、地理信息系统、全球定位系统等。收录本刊论文的著名国际检索系统包括 EI、SCI、PK、CSA 等,其影响因子名列中国高校学报前列。

本刊国内外公开发售,读者对象为测绘及相关专业的高级研究人员。本刊为月刊, A4 开本, 96 面, 每月 5 日出版, 每册定价 8.0 元, 邮购价加 25%。本刊邮发代号: 38-317, 欢迎广大读者到邮局订阅。漏订者可与本刊编辑部联系补订。