

用 T/P 测高数据确定中国海域及其邻海的海面高及海面地形*

陈俊勇 李建成 晁定波

(国家测绘局,北京百万庄,100830)

摘要 描述了利用 T/P 卫星测高数据确定中国海域及其邻海的海面地形。处理了 T/P 59~82 周(Cycle)1994 年第 83d~311d 的数据,将 59~82 周数据分成两部分分别估计海面高,并分析了海面高变化。结果与 Basic 和 Rapp 1992 年确定的海面高作了比较。利用 Shepard 曲面拟合法给出了 $30' \times 30'$ 平均海面高结果,分别以 OSU91 和 WDM94 地球重力场模型作为参考重力场,计算了相应的 $30' \times 30'$ 平均海面地形。

关键词 卫星测高;海面高;海面地形;中国海域;TOPEX/POSEIDON

分类号 P223

TOPEX/POSEIDON(T/P)是美国 NASA 和法国空间研究中心合作研究和实施的,目的在于支持全球海洋学研究和全球天气研究计划的大规模实验,也可供海洋大地测量、海洋地球重力场以及地球物理研究之用。这一任务的主要大地测量观测量是海面高,即海面至参考椭球之间的距离。

T/P 卫星轨道高度为 133 6km,倾角 66° ,每日绕地球 12.7 周,沿着相同的地面轨迹每 10d 重复一次,重复偏差约在 1km 之内,每重复一次绕地球 127 周,每周轨迹在赤道上的间隔为 $360^\circ/127$,约为 2.9° 即 315km(如图 1 所示)。

T/P 任务前 6 个月(1992 年 10 月至 1993 年 3 月)的测高结果已经对全球海面变化进行了迄今最为精确的描述,这种变化是季节性的海面变暖、变冷和风力作用的综合影响引起的。现有海面测高数据来自 GESO-3、SEASAT、GEOSAT、ERS-1 和 T/P 五类测高卫星。Rapp 等 1993 年用 T/P、ERS-1 和 GEOSAT 测高数据求定平均海面时,把 T/P 的测高剖面作为参考,保持固定不变,沿着 ERS-1 和 GEOSAT 的剖面进行二次多项式拟合,得出 38cm 的交叉点残差。

本文研究处理了最近的 T/P 卫星测高数据,时间为 1994 年第 83 天~1994 年第 321 天数据,共 239d。T/P 数据记录(GDR)周数号为 059~082,确定了我国近海及邻海的海面高(如图 2)及其变化,给出了相应的海面地形。

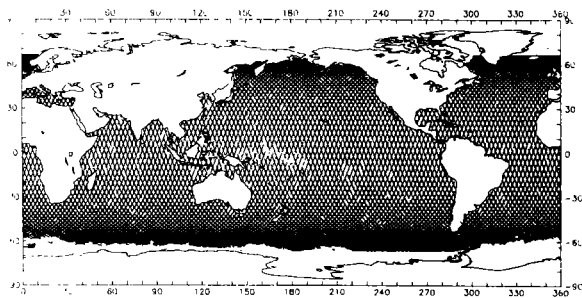


图 1 TOPEX/POSEIDON 卫星地面轨迹在全球的覆盖

收稿日期:1995-07-20. 陈俊勇,男,42岁,教授,中国科学院院士,现从事卫星大地测量研究。

* 国家自然科学基金和国家测绘局测绘科技发展基金资助项目。

1 计算方法

1.1 T/P 卫星测高数据的编辑与处理

卫星至海面的测高观测值为 (Denker, 1990):

$$\rho = h_s - h \quad (1)$$

式中 ρ 为卫星质心到海面的距离, h_s 和 h 分别为卫星和海面的大地高, h_s 可由卫星星历给出。T/P 数据有 2 个卫星轨道, 一是 NASA 轨道文件, 另一个是法国空间局 (CNES) 轨道文件, 本文采用了前者。 ρ 值顾及了环境改正, 包括测高仪偏差改正, 电离层改正, 干湿对流层改正, 电磁偏差改正, 逆气压改正, 极潮、负荷潮和海潮改正。

通过数据删选组成海面高数据文件, 计算公式为:

$$h = h_s - \rho - V \quad (2)$$

式中 V 为地球物理改正。

1.2 30' × 30' 格网平均海面高的确定

格网平均海面高的确定利用了 Shepard 方法 (陈俊勇等, 1995)。本文作了一些改进, 即将过去采用的平面直角坐标改为球面坐标。在球面坐标系 (B, L) 中, 已知卫星测高离散点 (B_i, L_i) 以及相应的海面高 $f_i = f(B_i, L_i) (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 。对于已知格网中心点坐标 (B_0, L_0) , 内插点 (B, L) 海面高为 $f(B, L)$, 拟合函数为 $F = F(B, L)$ 。我们采用局部拟合曲面 (核函数):

$$\psi(r) = \begin{cases} \frac{1}{r} & 0 < r \leq \frac{R}{3} \\ \frac{27}{4R} (\frac{r}{R} - 1)^2, & \frac{R}{3} < r \leq R \\ 0, & r > R \end{cases} \quad (3)$$

这个函数是连续可微的, 并当 $r > R$ 时恒为零, R 为选定的一个局部拟合半径 ($R > 0$)。当 $r = 2\bar{R}\sin\frac{\bar{\psi}}{2}$ (\bar{R} 为平均地球半径 $\sqrt[3]{a^2b}$, a, b 分别为椭球的长半轴和短半轴, $\bar{\psi}$ 为计算点 P 与流动点 Q 的球面角距), 则定义新的拟合曲面为:

$$\sin^2 \frac{1}{2}\bar{\psi} = \sin^2(\frac{1}{2}\Delta B) + \sin^2(\frac{1}{2}\Delta L)\cos B_P \cos B_Q$$

$$Z = F(B, L) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N [f_i [\psi(r_i)]]^u}{\sum_{i=1}^N [\psi(r_i)]^u}, & \text{当 } r_i \neq 0 \text{ 时} \\ f_i, & \text{当 } r_i = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

u 通常取 1 和 2。由于海面高在小范围较平滑, 所以 u 取 1。由于 T/P 卫星在地面上的轨迹间距为 2.9° , 因此 R 取 2° 为半径。

1.3 海面地形的确定

海面地形的表达式为:

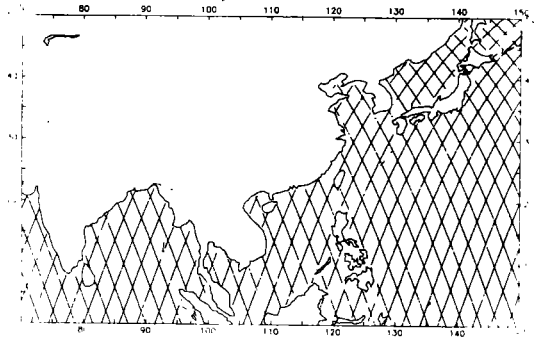


图 2 TOPEX/POSEIDON 卫星测高数据在中国海域及邻海的分布

$$\zeta = h - N \tag{5}$$

式中 h 为海面高, N 为大地水准面高, N 由地球重力场模型计算, 即:

$$N = \frac{T}{\gamma} = \frac{GM}{\gamma r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=1}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}(\cos\theta) \tag{6}$$

式中 T 为扰动位, GM 为引力常数与地球质量的乘积, θ 为地心余纬, λ 为地心经度, \bar{C}_{nm}^* 、 \bar{S}_{nm} 为地球位系数, r 为计算点的地心距, $\bar{\gamma}$ 为平均正常重力, 本文采用了 OSU 91 模型和 WDM 94 模型。

1.4 基准的统一

由于 T/P 数据采用的参考椭球与 OSU 91 模型、WDM 94 模型采用的椭球不同, 所以我们将 T/P 任务提供的海面高数据转换到 OSU 91 和 WDM 94 采用的 GRS 80 椭球上, 转换公式为(陈健和晁定波, 1989):

$$\begin{cases} dB = \frac{N}{(M+h)^2} e^2 \sin B \cos B da + \frac{M(2-e^2 \sin^2 B)}{(M+h)(1-\alpha)} \sin B \cos B da \\ dh = -\frac{N}{a} (1-e^2 \sin^2 B) da + \frac{M}{1-\alpha} (1-e^2 \sin^2 B) \sin^2 B da \\ dL = 0 \end{cases} \tag{7}$$

$$B = B_T + dB, \quad h = h_T + dh, \quad L = L_T \tag{8}$$

式中下标 T 表示 T/P, N 、 M 分别为卯酉圈和子午圈曲率半径, $da = 0.7m$ 为 GRS 80 长半轴与 T/P 椭球长半轴之差, $\alpha = 0$ 为 GRS 80 椭球扁率与 T/p 椭球扁率之差。

2 数值结果

本研究处理的 T/P 数据的周数为 059 ~ 082, 其中 065 周和 079 周在 $B(0^\circ, 50^\circ)$, $L(70^\circ, 150^\circ)$ 内数据质量不好, 没有有效数据记录, 实际上总共处理了 219d、22 周数据。在处理过程中, 将 059 ~ 082 周分为两部分, 即 059 ~ 070 和 071 ~ 082, 各为 11 周, 除分别给出各段结果外, 还给出了总的结果, 如图 3 所示。所得海面高与 Basic 和 Rapp 1992 年的海面高结果作了比较。比较结果见表 1、表 2, 如图 3 所示。

059 ~ 082 周的海面高等值线图如图 4 所示, 它显示了与大地水准面基本相同的趋势。与 Basic 和 Rapp 1992 年结果的差值等值线图由图 5 给出。

T/P 海面高与 Basic 和 Rapp 1992 年海面高结果的差异主要反映了海平面随时间的变化, 因为 Basic 和 Rapp 的结果是处理多种数据周期近 15a 的测高数据得出的, 可以认为他们的结果不含时变部分。为了利用 T/P 数据研究海面高的时变性质, 我们将 059 ~ 070 周和 071 ~ 082 周(均为 110d) 的 $30' \times 30'$ 平均海面高结果作了比较, 见表 3, 如图 6、7 所示。

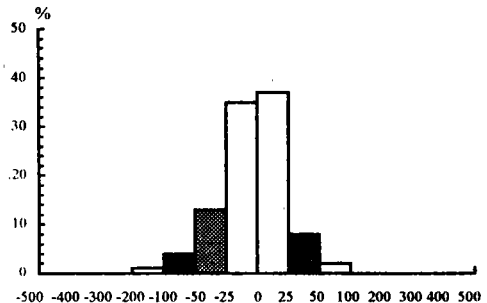


图 3 TOPEX 59 ~ 82 周海面高与 BR 海面高残差直方图(单位:cm)

表 1 059 ~ 070 周, 071 ~ 082 周和 059 ~ 082 周海面高结果
与 Basic 和 Rapp 1992 年结果之差的区间统计 /cm

差异区间	059 ~ 070 点数	070 ~ 082 点数	059 ~ 082 点数
- 500 ~ - 400	0	0	0
- 400 ~ - 300	0	4	4
- 300 ~ - 200	47	65	112
- 200 ~ - 100	955	630	1585
- 100 ~ - 50	5481	4353	9834
- 50 ~ - 25	16009	15327	31336
- 25 ~ 0	12126	39719	81845
0 ~ 25	48828	37522	86350
25 ~ 50	11648	8154	19802
50 ~ 100	1938	1971	3909
100 ~ 200	130	124	254
200 ~ 300	16	17	33
300 ~ 400	13	9	22
400 ~ 500	3	2	5
总 数	127204	107887	235091

表 2 059 ~ 070 周, 071 ~ 082 周和 059 ~ 082 周海面高结果与 Basic 和
Rapp 1992 年结果之差的统计值 /cm

统计结果	059 ~ 070	071 ~ 082	059 ~ 082
平均值	- 3	- 5	- 4
均方差	± 29	± 28	± 29
标准差	± 29	± 28	± 28
最大值	489	453	489
最小值	- 297	- 345	- 345

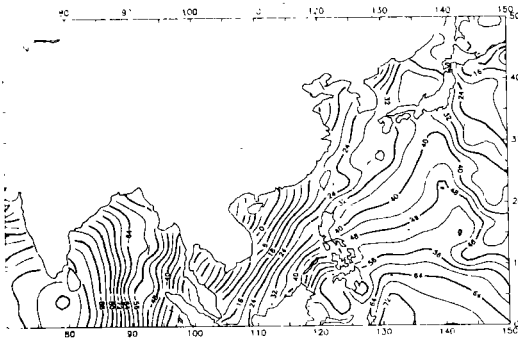


图 4 059 ~ 082 周海面高等值线图
(单位: cm; 间距: 4cm)

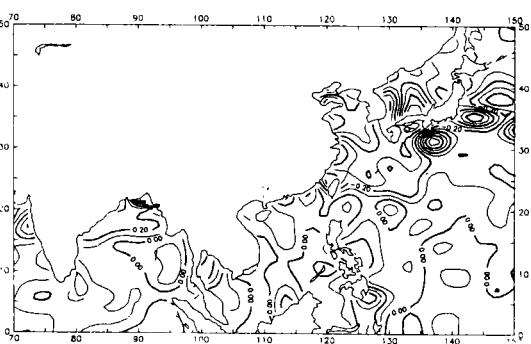


图 5 059 ~ 082 周海面高与 Basic、Rapp 1992 年
海面高结果等值线图(单位: m; 间距: 0.1m)

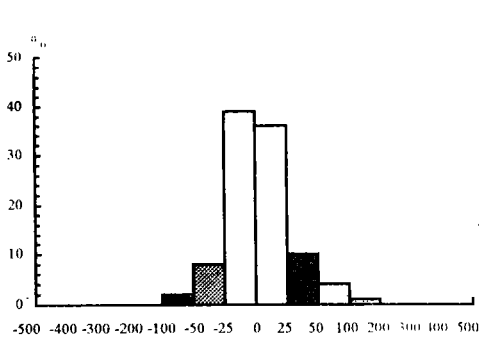


图 6 70PEX 71~82 周海面高与 TOPEX 59~70 周海面高残差直方图(单位:cm)

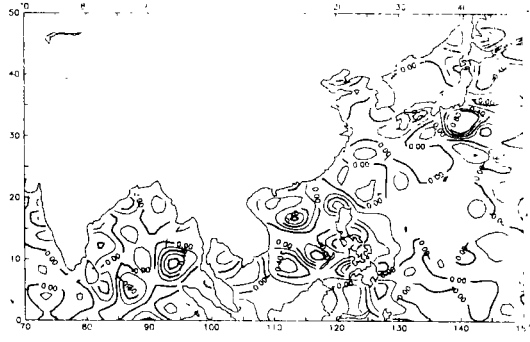


图 7 059~070 周和 071~082 周海面高差值等值线图(单位:m;间距:0.2m)

表 3 059~070 周和 071~082 周海面高差值统计/m

差异区间	格网数	百分比
-200~-100	24	0
-100~-50	177	2
-50~-25	712	8
-25~0	3500	39
0~25	3242	36
25~50	931	10
50~100	349	4
100~200	62	1
200~300	0	0

注:平均值 0.025m,均方差±0.276m,标准差±0.275m,最大值 1.959m,最小值-1.822m。

由表 3 可知,中国近海及邻海从 1994 年第 83d~第 321d 海平面平均变化为 0.025m。

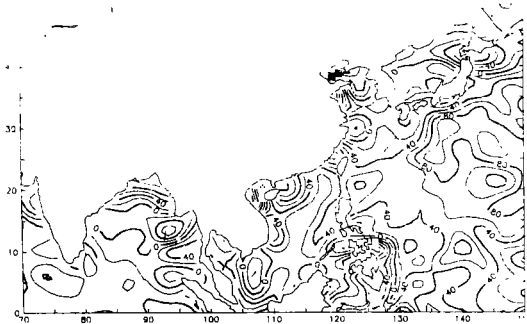


图 8 以 OSU 91 模型作为参考重力场的海面地形(单位:cm;间距:20cm)

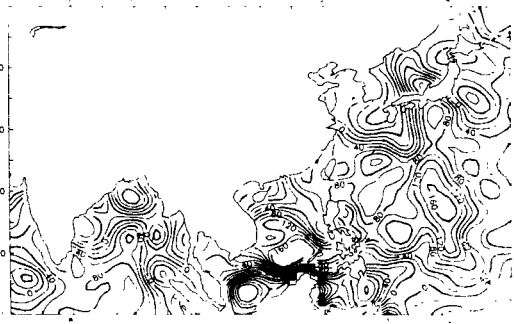


图 9 以 WDM 94 模型作为参考重力场的海面地形(单位:cm;间距:20cm)

以上述求出的海面高为基础,以 OSU 91 和 WDM 94 模型为参考重力场,同样利用 Shepard 方法给出了相应的 30'×30' 平均海面地形,如图 8 和 9 所示。比较两图,两者的海面地形最大差异为 80cm。其主要原因是 OSU 91 模型低阶部分确定是以测高数据作为跟踪数据,联合低阶卫星重力模型计算的。WDM 94 模型仅利用了低阶卫星模型和中国近海船测重力异

常资料确定的,可能存在系统差异。

3 结束语

本文用新的 T/P 数据作了初步的处理, T/P 轨道误差小于 5cm, 海洋环境和地球物理改正较完善, 计算结果与 Basic 和 Rapp 1992 年约 15a 的联合处理结果作了比较, 趋势符合较好, 进一步的工作是联合我国验潮站数据分析系统差和时变海面高。

感谢 Patrick 博士热情支持和 C. L. SAVISO 运行中心提供 T/P 数据。

参 考 文 献

- 1 Basic T, Rapp R H. Oceanwide Prediction of Gravity Anomalies and Sea Surface Heights Using Geos-3, Seasat, and Geosat Altimeter Data and ETOPO5U Bathymetric Data, Report No. 416. Dept of Geodetic Science and Surveying, OSU, 1992. 13~30
- 2 陈俊勇, 晁定波, 李建成. 利用计算机图形跟踪扫描系统推估平均重力异常. 测绘学报, 1995, 24(3): 239~241
- 3 陈 健, 晁定波. 椭球大地测量学. 北京: 测绘出版社, 1989.
- 4 Denker H. Radial Orbit Error Reduction and Sea Surface Topography Determination Using One Year of GEOSAT Altimeter Data, Report No. 404. Dept. of Geodetic Surveying, OSU, 1990, 30~34

Determination of the Sea Level Height and Sea Surface Topography in the China Sea and Neighbour by T/P Altimeter Data

Chen Junyong Li Jiancheng Chao Dingbo

(National Bureau of Surveying and Mapping, Baiwanzhuang, Beijing, 100830)

Abstract This paper deals with the determination of the sea level height and sea surface topography in the china sea and neighbour by TOPOX/POSEIDON (T/P) satellite altimeter data. The data of T/P 59~82 cycles covering 83th~311th days in 1994 are processed. The data of 59~82 cycles are divided into two parts, which have respectively been used to estimate the sea level height and to analyze the sea level changes. The obtained results are compared with the sea level heights estimated by Basic and Rapp in 1992 Using the combined solutions of Geos-3, Seasat, Geosat, and ETOPO5U bathymeter data. Results of the 30' × 30' mean sea level heights are obtained by the Shepard curve fitting method. Taking respectively the OSU 91 and the WDM 94 earth gravity field models as the reference gravith field, the 30' × 30' mean sea surface topography is computed.

Key words altimetry; sea level height; sea surface topography; the China Sea; TOPEX/POSEIDON