

# 用东海和南海潮汐资料修正全球海潮模型对中国及邻区重力场负荷计算的影响<sup>\*</sup>

周江存<sup>1, 2)</sup> 孙和平<sup>1)</sup>

1) 中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室

2) 中国北京 100049 中国科学院研究生院

**摘要** 利用 11 个全球海潮模型和中国东海及南海近海潮汐资料, 计算了海潮负荷对中国及邻区重力场的影响, 进而讨论了用近海潮汐资料修正全球海潮模型对负荷结果的影响. 结果表明, 用近海潮汐资料修正全球海潮模型对沿海地区的负荷计算影响较大, 因此在计算海潮负荷对沿海台站的影响时, 必须顾及近海潮汐效应. 计算  $M_2$  波海潮负荷时, 选择 CSR4.0, FES02, GOT00, NAO99 和 ORI96 海潮模型, 则对于内陆大部分台站负荷的近海效应在  $0.1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  量级; 而计算  $O_1$  波时, 如选择 AG95 或 CSR3.0 模型, 则在  $0.05 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  量级. 这说明模型中的各个潮波在我国沿海的准确性并不是一致的, 因此模型的选择是比较复杂的.

**关键词** 全球海潮模型 近海海潮资料 修正 海潮负荷

**中图分类号**: P731.23; P312.1

**文献标识码**: A

## 引言

随着科学技术的发展, 重力场的观测精度得到了很大的提高, 用 FG5 重力仪进行的绝对重力测量已达到  $10^{-8} \text{ m/s}^2$  的精度, 超导重力仪在频率域可以检测到  $0.01 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  的微弱信号. 利用地表高精度的重力场观测, 可以精密测定地球潮汐常数, 反演地壳上地幔构造, 研究地球内核运动和地球近周日自由摆动, 还可以研究极移的重力效应. 为了有效地利用重力资料研究上述地球物理学和地球动力学问题, 实施对重力观测资料的海潮负荷信号改正就显得特别重要(孙和平, 周江存, 2002). 因此, 任何  $10^{-8} \text{ m/s}^2$  级或更低的干扰都必须加以考虑.

Farrell(1972)给出了计算海潮负荷的负荷格林函数, 并指出海潮负荷就是海潮潮高和负荷格林函数的褶积积分. 因此, 研究海潮负荷亦即围绕这一积分而包括三方面内容: ① 海潮模型; ② 格林函数; ③ 计算方法. 在测高技术发展之前, Schwiderski(1980)给出的海潮模型一直作为标准模型使用. 而随着卫星测高技术的发展以及有限元方法的应用, 越来越多的海潮模型(Shum *et al*, 1998)被有效地应用到海潮负荷的研究中; 格林函数通常都采用 Farrell 在 1972 年给出的函数表内插; 计算方法方面有直接离散化的数值积分(Sun,

<sup>\*</sup> 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-131)、百人计划项目和国家自然科学基金项目(40374029)联合资助.

2004-05-18 收到初稿, 2004-11-01 收到修改稿, 2004-12-06 决定采用.

1992), 远区采用球谐展开、近区采用数值积分的远近区相结合的方法以及积分格林函数方法(Goad, 1980; Agnew, 1997). 本文采用了积分格林函数方法.

由于多种海潮模型的出现, 因此需要进行选择. 海潮模型对重力负荷计算的影响具有非常明显的地域性特点(孙和平等, 2005), 因此在全球区域没有一个绝对优越的海潮模型. 研究表明, 近海潮汐对于沿海台站的影响是非常大的(Sun, 1992; 周江存等, 2004), 而全球海潮模型往往不能很好地顾及全球的一些近海潮汐. 徐建桥等(2003)对南极重力的研究, 说明近海潮汐效应对负荷研究是必要的, 不考虑近海效应往往得不到很好的结果. 用近海海潮资料替换全球海潮模型中的相应区域, 能够有效地消除这一不利因素(Sun, 1992). 本文的目的就是研究用近海海潮资料, 修正全球海潮模型对中国及邻区重力场负荷计算的影响, 为选择适当的全球海潮模型提供参考.

## 1 计算公式

海潮负荷计算依据海潮潮高和负荷格林函数的褶积积分, 其公式如下:

$$L(\theta, \lambda, t) = \rho_w R^2 \iint_{S_G} H(\theta', \lambda', t) G(\psi) \sin\psi d\psi dA \quad (1)$$

其中,  $\theta, \lambda$  是计算点的坐标;  $\theta', \lambda'$  是负荷点的坐标;  $\psi, A$  是计算点和负荷点的球面角距离和方位角.  $\rho_w$  是海水的密度,  $G(\psi)$  是负荷格林函数,  $H(\theta', \lambda', t)$  是  $(\theta', \lambda', R)$  处的瞬时潮高.  $S_G$  是整个地球表面或海面. 积分格林函数方法就是将  $\psi$  分成若干小区间, 先在每个小区间上对  $\psi$  积分然后对  $A$  积分, 最后求和

$$L(\theta, \lambda, t) = \rho_w \sum_{i=1}^n \int H(\psi, A, t) \int_{\psi_{i-1}}^{\psi_i} R^2 G(\psi) \sin\psi d\psi dA \quad (2)$$

其中

$$G_i(\psi) = \int_{\psi_{i-1}}^{\psi_i} R^2 G(\psi) \sin\psi d\psi \quad (3)$$

式(3)即为积分负荷格林函数的表示式. 当顾及近海潮汐时必须对计算公式进行修正, 式(1)将变为

$$L'(\theta, \lambda, t) = \rho_w R^2 \iint_{S_G - S_L} H(\theta', \lambda', t) G(\psi) dS + \rho_w R^2 \iint_{S_L} H_L(\theta', \lambda', t) G(\psi) dS \quad (4)$$

式中,  $H_L(\theta', \lambda', t)$  表示近海区域  $S_L$  的瞬时潮高.

为了对用近海潮汐资料修正全球海潮模型对中国及邻区重力场的影响有整体的认识, 计算了修正引起的差异矢量振幅在该区域的平均值, 以衡量差异的量级

$$L_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i L_i} \quad (5)$$

$L_i = L'(\theta, \lambda, t) - L(\theta, \lambda, t)$  是第  $i$  个网格点处的负荷差异矢量的振幅.

## 2 数值结果与讨论

首先用经东海和南海海潮资料(东海区域为  $23^{\circ}50'N \sim 41^{\circ}N$ 、 $117^{\circ}30'E \sim 131^{\circ}20'E$ , 网格大小为  $10' \times 10'$ ; 南海区域为  $2^{\circ}N \sim 25^{\circ}15'N$ ,  $99^{\circ}E \sim 121^{\circ}15'E$ , 网格大小为  $15' \times 15'$ )修正前和修正后的 11 个全球海潮模型, 计算海潮负荷对中国及邻区( $70^{\circ}E \sim 140^{\circ}E$ ,  $14^{\circ}N \sim 56^{\circ}N$ )  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  重力场的影响, 然后求出修正前后这一影响的差异. 图 1, 2 给出了用不同的

海潮模型修正前后计算的重力负荷矢量振幅差异在该区域的平均值. 具体的差异分布结果见图 3, 4.

由图 1, 2 可以很明显地看出用近海潮汐资料修正不同的全球海潮模型对重力负荷计算影响的量级, 以及各模型之间的差异.

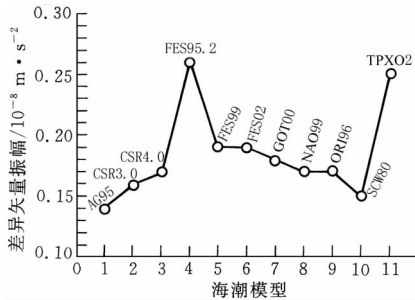


图 1 修正前后重力负荷矢量  
振幅差异区域平均( $O_1$ )

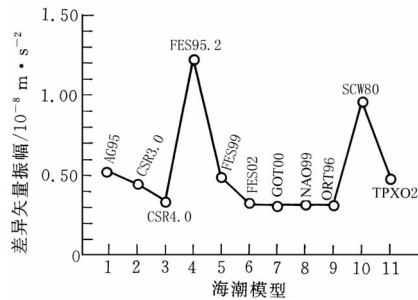


图 2 修正前后重力负荷矢量  
振幅差异区域平均( $M_2$ )

对于  $O_1$  波(图 1), FES95.2 和 TPX02 两个海潮模型修正前后对重力负荷计算影响最大, 其差异矢量振幅的平均值分别为  $0.26 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  和  $0.25 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ; AG95 海潮模型的这一影响最小, 为  $0.14 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ; 而其它的 8 个模型的影响分别为  $0.16 \times 10^{-8} \sim 0.19 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ . 显然, FES95.2 和 TPX02 模型的  $O_1$  波潮汐在中国近海区域是不准确的. 另外, 从图中可以看出 FES95.2, FES99 和 FES02 模型系列的优化过程. 另外两个模型系列是 ORI96 和 NAO99 以及 CSR3.0 和 CSR4.0. 其中前者都采用了一些验潮站上的资料, 基本相当; 而后者也仅有  $0.01 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  的增加. SCW80 是最早的比较精确的海潮模型, 虽然被认为是没有最近的测高模型精度高, 但是其  $O_1$  波海潮对于中国及其邻区还是比较适用的, 其影响量级为  $0.15 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ .

对于  $M_2$  波(图 2), FES95.2 和 SCW80 两个模型在修正后对重力负荷的计算影响是比较显著的, 分别达到  $1.22 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  和  $0.96 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ . 说明这两个海潮模型中的  $M_2$  波运动特征在中国东海和南海区域并未得到准确的描述. 同样可以看出 FES 系列的优化过程. ORI96 和 NAO99 没有显著变化, 而 CSR4.0 比 CSR3.0 下降了  $0.1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ . CSR4.0, FES02, GOT00, NAO99 和 ORI96 这些模型基本保持一致, 约为  $0.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ .

对比图 1, 2, 除去明显差异的模型外, 总的来说不同模型的修正对重力负荷计算的影响  $O_1$  波小于  $0.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,  $M_2$  波小于  $0.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ .  $M_2$  波的影响要大于  $O_1$  波的影响. FES95.2 模型在中国近海是不精确的. 值得注意的是 SCW80 和 TPX02 这两个海潮模型, 对于  $O_1$  波 TPX02 的影响较大, 而 SCW80 不明显; 对于  $M_2$  波却正好相反. 说明在同一个模型中各个潮波的准确度也不是一致的, 这就给模型的选择带来了困难.

图 3, 4 给出了近海潮汐资料修正全球海潮模型对重力负荷计算的影响在中国及其邻区的分布. 对于  $O_1$  波给出了影响大于  $0.05 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  的区域, 其等值线的间距为  $0.05 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ; 而对于  $M_2$  波给出了影响大于  $0.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  的区域, 其等值线的间距为  $0.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ .

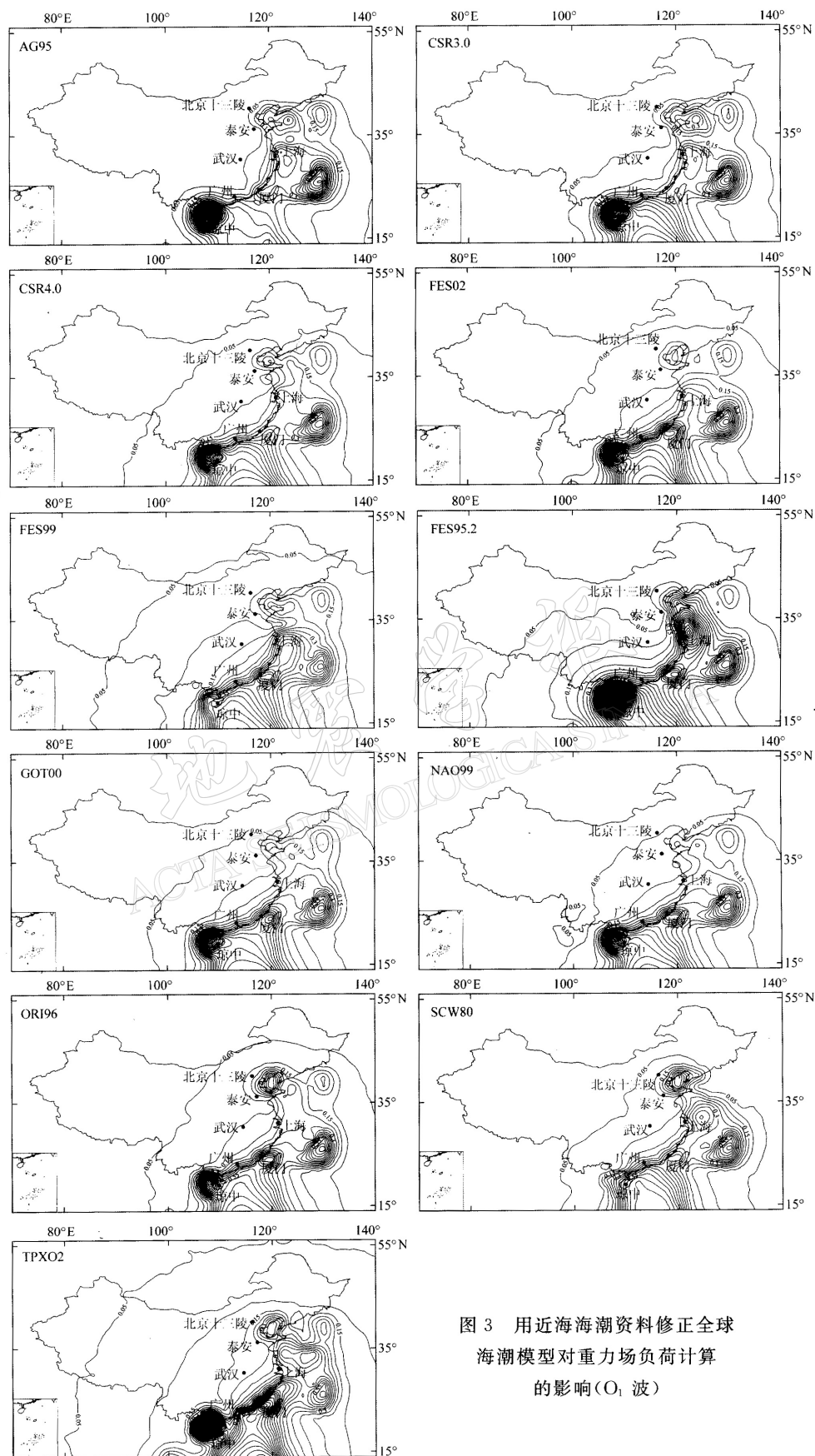


图3 用近海海潮资料修正全球海潮模型对重力场负荷计算的影响(O<sub>1</sub>波)

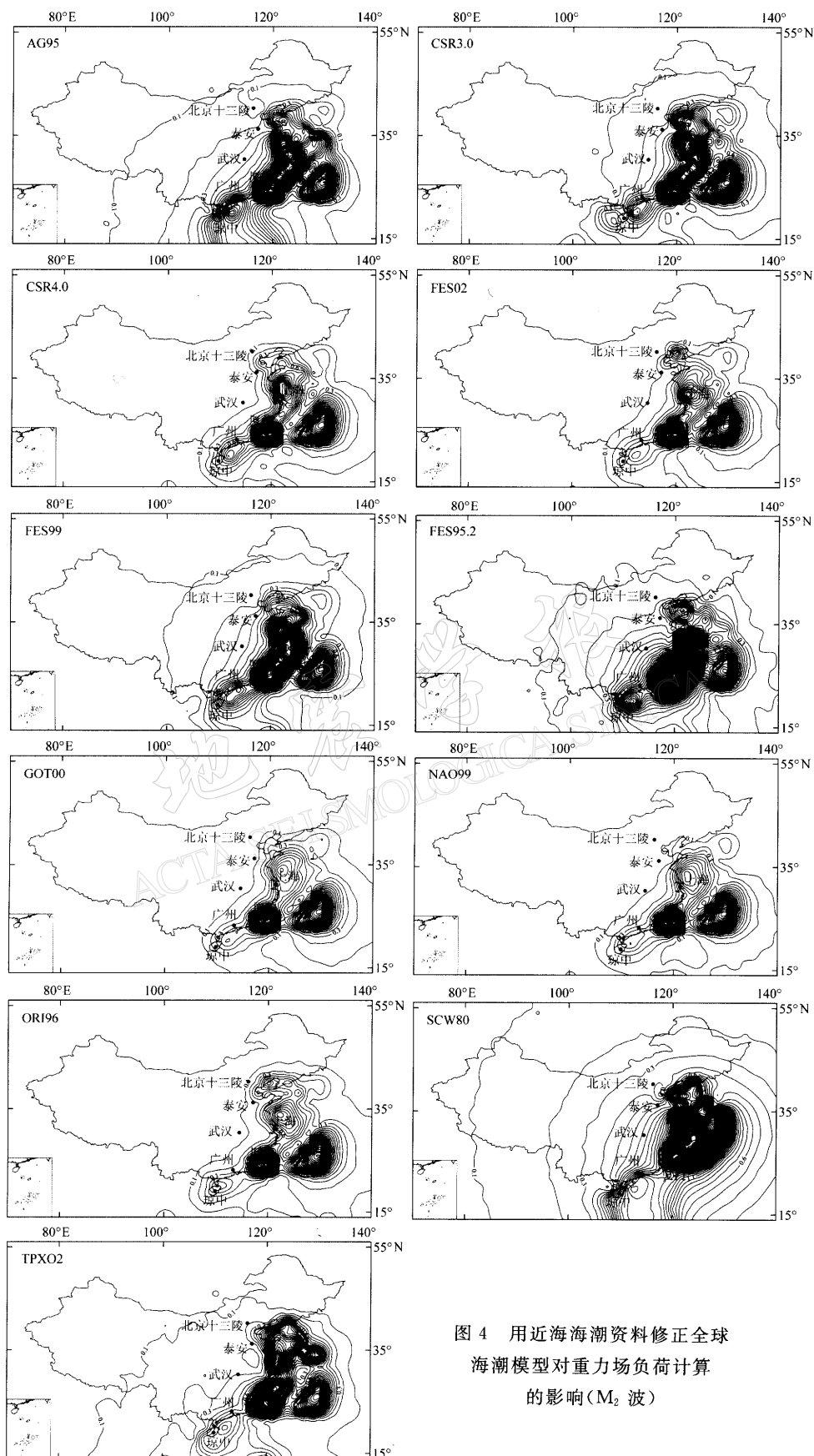


图 4 用近海海潮资料修正全球海潮模型对重力场负荷计算的影响( $M_2$  波)

对于  $O_1$  波, 由图 3 可知, 修正对重力场的影响主要在沿海一带. 在琼中、厦门附近有影响的极值区, 尤以琼中为最大. 其中对 AG95 和 CSR3.0 的修正, 对于重力的影响区域最小并具有相似性, 说明这两个模型的  $O_1$  波特征在东海和南海区域与实际情况比较吻合. 而实际上这两个模型都是来源于 FES94.1 水动力模型. 同样, CSR4.0, FES02, GOT00, NAO99, ORI96 和 SCW80 这 6 个海潮模型的修正, 对重力的影响也具有很好的相似性. 影响区域稍大一些, 但主要还是沿海地区, 中部的影响都在  $0.05 \times 10^{-8} \sim 0.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  之间. 而 TPX02 的影响区域要大一些, 中部地区也有  $0.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  的影响. 影响大于  $0.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  的区域在东南部, 而西部和北部的区域所受的影响都小于  $0.05 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ . 因此只有东南部的地区和少部分中部地区需要顾及近海效应, 而在其他地区只有在精度要求较高时才需顾及近海效应.

对于  $M_2$  波, 由图 4 可知, 与  $O_1$  波一样, 修正主要影响沿海地区. 其中对模型 CSR4.0, FES02, GOT00, NAO99 和 ORI96 的修正, 对重力负荷计算的影响较小并具有很好的 consistency, 都集中在沿海的小部分地区. 这说明相对于其它的海潮模型, 这些模型在东海和南海区域较好地描述了  $M_2$  波的运动特征. 修正对重力场的影响在琼中、厦门和上海附近有极值区, 尤以厦门附近所受的影响最大, 这与其特殊的地理位置有关. 这里可以很直观地看到 FES 和 CSR 系列模型的优化过程, 如修正对重力场的影响区域从 FES95.2 到 FES99 再到 FES02 很明显越来越小. CSR3.0 和 CSR4.0 海潮模型也是如此. SCW80 海潮模型, 这个早期的由验潮站资料获得的海潮模型, 修正对重力的影响基本涉及了图中的整个区域, 对我国大陆地区的影响基本上呈圆环状. 其中心在上海附近, 即影响与距离有直接的对应关系. 因此, 当采用该模型进行重力负荷改正时, 必须顾及东海和南海潮汐的影响, 该影响可以用与距离的某种关系来模拟.

以武汉为例, 从图中可以看出, 当采用 CSR4.0, FES02, GOT00, NAO99 和 ORI96 海潮模型时, 修正对重力负荷的影响约为  $0.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ , 在 11 个模型中是比较小的.

### 3 结论

利用东海和南海海潮资料修正全球海潮模型, 对于重力负荷计算的影响主要集中在沿海地区, 内陆地区受到的影响要小一些. 对于  $O_1$  波, 琼中附近受到的影响最大; 而对于  $M_2$  波, 厦门附近受到的影响最大. 在计算海潮负荷对重力的影响时, 在沿海地区, 尤其上述极值区域, 必须要考虑近海潮汐的影响.

在内陆的大部分地区, 计算  $M_2$  波海潮负荷时, 如选择 CSR4.0, FES02, GOT00, NAO99 和 ORI96 模型时, 负荷重力的近海效应小于  $0.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ; 而计算  $O_1$  波海潮负荷时, 如选择 AG95 或 CSR3.0 模型时, 负荷重力的近海效应小于  $0.05 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ . 说明模型中的各个潮波在我国沿海的准确程度是不一样的, 因此模型的选择是比较复杂的.

### 参 考 文 献

- 孙和平, 许厚泽, 周江存, 等. 2005. 武汉超导重力仪观测最新结果和海潮模型[J]. 地球物理学报, 48(2): 299~307
- 孙和平, 周江存. 2002. 中国地壳运动观测网络基准站重力场变化海潮负荷信号改正问题[J]. 地球科学进展, 17(1): 39~43
- 徐建桥, 孙和平, 周江存. 2003. 南极地区的重力固体潮观测与研究[J]. 武汉大学学报, 信息科学版, 28(特刊): 129~132

- 周江存, 李辉, 孙和平, 等. 2004. 地震网络重力固体潮台站观测的海潮负荷影响[A]. 见: 朱耀仲等主编. 大地测量与地球动力学进展[C]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 449~455
- Agnew D C. 1997. A program for computing ocean—tide loading[J]. *J Geophys Res*, **102**(B3): 5 109~5 110
- Farrell W E. 1972. Deformation of the Earth by surface loads[J]. *Rev Geophys and Space Phys*, **10**: 761~797
- Goad C C. 1980. Gravimetric tidal loading computed from integrated green's functions[J]. *J Geophys Res*, **85**(B5): 2 679~2 683
- Schwiderski E W. 1980. On charting global ocean tides[J]. *Rev Geophys Space Phys*, **18**(1): 243~268
- Shum C K, Woodworth P L, Andersen O B, *et al.* 1998. Accuracy assessment of recent ocean tide models[J]. *J Geophys Res*, **102**(C11): 25 173~25 194
- Sun H P. 1992. Comprehensive researches for the effect of the ocean loading on gravity observations in the western pacific area[J]. *Bulletin D' Information de Marees Terrestres*, **113**: 8 271~8 292

## INFLUENCE OF THE MODIFIED GLOBAL OCEAN TIDE MODEL WITH LOCAL TIDES OF EAST AND SOUTH CHINA SEAS ON LOAD GRAVITY IN CHINA AND ITS NEIGHBOR AREA

Zhou Jiangcun<sup>1, 2)</sup> Sun Heping<sup>1)</sup>

1) Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2) Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** By using 11 global ocean tide models and tidal gauge data obtained in the East China Sea and South China Sea, the influence of the ocean loading on gravity field in China and its neighbor area is calculated in this paper. Further-more, the differences between the results from original global model and modified models with local tides are discussed based on above calculation. The comparison shows that the differences at the position near the sea are so large that the local tides must be taken into account in the calculation. When the global ocean tide models of CSR4.0, FES02, GOT00, NAO99 and ORI96 are chosen, the local effect for  $M_2$  is less than  $0.10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  over the area far away from sea. And the local effect for  $O_1$  is less than  $0.05 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  over that area when choosing AG95 or CSR3.0 models. This numerical result demonstrates that the choice of model is a complex problem because of the inconsistent accuracy of the models over the areas of East and South China Seas.

**Key words:** global ocean tide model; local tides data; modification; ocean tide loading