

Sumatra-Adaman 大地震同震和震后形变的 GRACE 卫星检测

邢乐林^{1,2,3} 李建成¹ 李 辉^{2,3} 孙文科⁴

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 中国地震局地震研究所,武汉市洪山侧路 40 号,430071)
(3 地壳运动与地球观测实验室,武汉市洪山侧路 40 号,430071)
(4 东京大学地震研究所,日本东京都内文京区本乡,113-0032)

摘 要:利用 CSR 公布的 RL-04 版 GRACE 卫星月重力场模型计算了 9.1 级 Sumatra-Adaman 大地震的同震和震后形变效应。数值结果表明,GRACE 能够监测到的同震和震后形变量为-20~10 cm 的等效水高,为大地震同震和震后形变监测提供了一种独特、有效的方法。

关键词:GRACE;重力场;大地震
中图法分类号:P227

GRACE 是 2002 年实施的重力探测卫星,其主要科学目标是提供高精度的地球重力场及其时间变化^[1],其优势在于能以较短的时间(如 30 d)恢复高空间分辨率、高精度的地球重力场模型。2004 年 12 月 26 日发生的 Sumatra-Adaman 大地震是近 40 年以来少数几个震级达到 9 级的超级大地震之一。在这次地震前,Sun 和 Okubo 从位错理论出发,对重力卫星能否检测到同震重力变化问题进行过研究^[2],他们得出的结论被随后发生的 Sumatra-Adaman 大地震所证实^[3]。Han 等^[4]利用 GRACE Level-1 距离和距离变化率数据计算的同震重力变化约 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 以及 2004 年相对 2003 年的 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 地震前兆重力变化,尽管所利用的位错模型过于简单,却给出了世界上第一个由重力卫星观测到的同震重力变化结果,其意义在于论证了重力卫星观测技术将是跨越式提高强地震监测能力的有效手段之一,在未来的地震监测预报工作中具有广泛的应用前景。Ogwa 等^[5]指出,利用 GRACE Level-2 (Release 01)数据产品能够揭示同震和震后重力变化。Chen 等^[6]利用 GRACE Level-2 (Release 04)数据产品计算了 Sumatra-Adaman 大地震同震和震后形变。本文利用 GRACE Level-2 (Re-

lease 04)月重力场模型,以 GGM02S 重力场模型为背景场,计算了 Sumatra-Adaman 大地震的同震和震后形变量,并根据 Okubo 改进的位错理论,利用 USGS 发布的位错模型计算了同震重力变化。需要特别说明的是,本文利用 GRACE 监测到的形变量非地壳几何形变,而是由地球表面及内部物质迁移引起的密度变化,以等效水高的形式给出的。

1 水储量变化的 GRACE 卫星检测

1.1 基本原理

目前,GRACE 主要反映的是地球重力场中的中、长波部分。大地水准面高的球近似表达式为^[7]:

$$N(\varphi,\lambda) = R_e \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \tag{1}$$

式中,

$$\bar{C}_{nm}^* = \begin{cases} \bar{C}_{nm}, m \neq 0 \text{ 或 } m = 0, \text{ 且 } n \text{ 为奇数} \\ \bar{C}_{n,0} - \bar{C}_{n,0}^{\text{Nor}}, m = 0, \text{ 且 } n \text{ 为偶数} \end{cases}$$

$\bar{C}_{n,0}^{\text{Nor}}$ 为正常引力位系数; R_e 为地球平均半径; \bar{C}_{nm} 、 \bar{S}_{nm} 为完全规格化的引力位系数; $\bar{P}_{nm}(\sin\varphi)$ 为完

全规格化的勒让德函数,可根据罗志才教授提出的有效算法进行递推计算^[8]。

地球表面物质运动直接引起的大地水准面变化 ΔN 为:

$$\Delta N(\varphi,\lambda) = R_e \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \quad (2)$$

由于固体地球受到物质作用产生形变,形变亦引起大地水准面的球谐系数变化,因此,物质质量分布变化对大地水准面的贡献为直接质量变化(mass)与间接负荷形变变化(deform)两部分之和。其中,形变部分与 n 阶负荷 love 数 k'_n 有关^[9,10]。

考虑到地球表层质量重新分布于地球重力场变化之间的关系,根据文献[9]中的式(4)~式(9)可以得到地球表面密度变化 $\Delta\sigma(\varphi,\lambda)$ 的表达式。由于 GRACE 月重力场模型随着阶数 n 的增加,误差增大很快,为了减少误差,提高计算精度,引入平滑函数 W_n ^[11],得到含高斯平滑函数的面密度变化公式。将 $\Delta\sigma(\varphi,\lambda)$ 除以水密度 $\rho_w=1.0\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,即为等效水高 d_h :

$$d_h = \frac{R_e \rho_a}{3\rho_w} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k'_n} W_n \cdot (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \quad (3)$$

其中, $\rho_a=5.517\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,为地球平均密度。

1.2 截断阶数的选取

理论上,地球重力场模型只有在其包含从 0 到无穷的所有阶次球谐系数时,才能反映全波段的重力场信息,但 GRACE 重力卫星在其运行期间,每月提供的月重力场模型最大阶为 120,其阶数越大,误差也越大。为了得到适合地震分析研究的重力场截断阶数,可以通过重力异常阶方差分析得到,表达式为^[12]:

$$\sigma_n^2 = \frac{GM}{R_e^2} (n-1) \sigma_{n0}^2(\bar{C}) + \sum_{m=1}^l \frac{GM}{R_e^2} (n-1) (\sigma_{nm}^2(\bar{C}) + \sigma_{nm}^2(\bar{S})) \quad (4)$$

按照式(4)分别计算了 GRACE 的 50 个月重力场模型的重力异常误差阶方差,其分布如图 1 所示。为进行地震研究,重力场的最大阶次的选取必须满足累计重力变化的精度不低于 $20\times 10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的条件^[13]。由图 1 可知,截断阶数为 60 阶时,均能满足要求。

1.3 负荷 love 数的计算

为了得到同震形变信息量,需对间接负荷形变进行严密计算,而负荷 love 数 k'_n 的计算至关重要。70 阶以下的部分负荷 love 数值可参见文献

[14],对于未给出的数值可以通过分段线性内插得到。

1.4 高斯平滑半径的选择

在利用 GRACE 位模型数据反演地球表面质量变化的计算过程中,高斯滤波的平滑算法能够有效地减小 GRACE 观测误差和其他地球物理信号的污染,平滑半径的选择对地球表面质量变化的反演结果起着重要的影响。图 2 显示了当高斯平滑半径分别为 300 km、500 km、800 km 和 1 000 km 下 W_n 随阶数 n 的变化曲线,可以看出,在 60 阶内,随着平滑半径的增加,曲线收敛的速度加快,低阶项所占的权重越来越大。当平滑半径为 1 000 km 时,在普通性能的电脑上,在 $n\geq 65$ 时,数值计算已经出现错误,此问题可以利用高性能的大型计算机(如 IBM 机 P575)解决。

综上所述,考虑到使用的 GRACE Level-2 数据为 60 阶的 RL-04 版位模型,为了充分利用高频信息、顾及重力异常阶方差的精度,本文选取阶数为 60、高斯平滑半径为 500 km 作为最佳参数进行计算。同时,由于 GRACE 的轨道几何形状对重力场的低阶项不敏感,低阶带谐项 C_{20} 的精度相对较低,通常 C_{20} 项不参与计算。本文采用一种比较有效的方法,利用卫星激光测距(SLR)技术得到的 C_{20} 项代替 GRACE 月重力场模型的 C_{20} 项,这样可以消除季节性变化的影响^[15]。

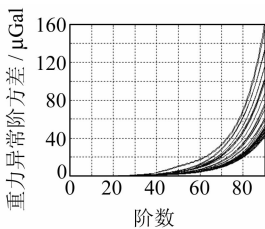


图 1 50 个月的 GRACE 月重力场模型的重力异常误差阶方差

Fig. 1 Degree Variance of Gravity Anomaly

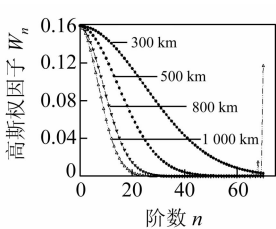


图 2 W_n 随阶数 n 的变化曲线

Fig. 2 Curve of W_n with Degree n

2 模型及数据资料

2.1 GRACE RL04 版月重力场模型

GRACE 时变重力场采用美国德克萨斯大学空间研究中心(CSR)解算的 Level-2 RL-04 版 GSM 重力场球谐系数,最大阶数为 60 阶。与 RL-01、RL-02、RL-03 版相比,RL-04 版 GSM 模型的改进主要有^[6]:使用新的背景重力场模型 GIF22a;使用新的海洋潮汐模型 FES2004;基于

IERS2003 的固体地球极潮模型;基于卫星测高数据的海洋极潮模型。由于 GSM 重力场模型在计算中已经扣除了极潮、固体潮、海潮等潮汐以及非潮汐大气和海洋的影响,从而该时变重力场除计算误差和模型扣除造成的误差外,反映的主要是水储量变化信息。

2.2 CPC 水文模型

CPC(climate prediction centre)的月平均陆地水储量模型是根据全球观测到的降水分布而建立的,采用的数据包括 CPC 每日和每小时的降水分析结果、太阳辐射分布、地表大气压、潮湿度、温度以及风速等。该模型没有包括极地冰盖的变化,经纬度方向的空间格点间隔为 0.5° ,其时间跨度从 1980 年至今^[10]。

3 位错理论在重力卫星观测数据中的应用

如图 3 所示,设任一均匀矩形断层的长宽分别为 L 和 W ,断层倾角为 δ ,其走滑、倾滑和张性错动分量分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 ,断层底部深度为 d 。

3.1 多断层错动引起的同震重力变化

设地表坐标系为 $O\text{-}XYZ$ (X 轴指向正东, Y 轴指向正北, Z 轴垂直向下), $S(s_x, s_y, 0)$ 为断层顶部地表迹线(或投影线)中点(如图 4 所示)。设断层方位角为 α ,则由 N 个断层位错引起的地表任意一点 $(x_i, y_i, 0)$ 的重力变化可表示为^[16,17]:

$$\delta g = \sum_{i=1}^N \Delta g_i(x_i, y_i, 0; U_1, U_2, U_3, L, W, d, \delta, \alpha, s_x, s_y)$$

(5)

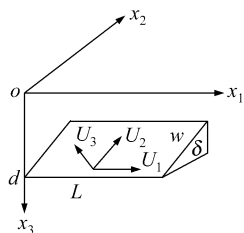


图 3 矩形断层位错模型示意图

Fig. 3 Dislocation Model of a Rectangle Fault

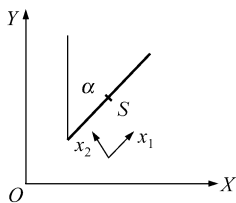


图 4 断层运动地表坐标系统示意图

Fig. 4 Surface Coordinate System of the Fault Movement

3.2 变形地球表面和空间固定点的同震重力变化公式

为了更好地应用解释重力卫星观测数据的地震位错模型,需对地表面同震变形计算公式进行适当修改。适用于变形地球表面的同震重力变化

公式为^[3,17]:

$$\delta g(\varphi, \lambda) = \Delta g(\varphi, \lambda) - \beta \Delta h$$

(6)

式(6)中的最后一项 $-\beta \Delta h$ 对应于地表位移的自由空气改正。去掉该项后,便是适用于重力卫星观测数据的(空间固定点)同震重力变化公式。应该指出的是,由于重力卫星轨道高度的原因,重力信号有一定程度的衰减。高阶信号精度较低,在数据处理时通常进行滤波,相应地用位错理论计算同震重力变化时,也必须进行相应的滤波处理^[3]。文献[3]根据位错理论及地震断层模型^[18],得到信号平滑、振幅量级较小的理论重力卫星观测结果。

4 数据处理结果、比较和分析

计算 Sumatra-Adaman 大地震的 GRACE 卫星同震形变变化时,选取地震前后各 2 a 的 22 个月的数据计算形变(等效水高)变化,即(2005+2006)的平均值减去(2003+2004)的平均值,其中不包括 2004 年 12 月(地震发生月份,不参与计算)和 2003 年 6 月(03 年缺 1 个月)的 GSM 位模型数据(2005、2006 年亦去除相同月份的位模型数据)。按照式(5) 计算全球及地震区域的同震形变(见图 5(a))和 CPC 水文模型的等效水高变化(见图 5(b))。从图 5(a)可以看出,GRACE 结果包括一系列的非季节性水文影响,主要包括南美洲的亚马逊河流域、北美洲的密西西比河流域、非洲的赞比西河流域、亚洲东南部的孟加拉湾以及两极(南极、格陵兰岛)冰后回弹的影响^[19],而图 5(b)的 CPC 模型不包括两极结果,除去上述几个主要大河流域外,在苏门答腊区域是 GRACE 与 CPC 模型的主要区别。本文认为,该形变效应主要受 Sumatra-Adaman 大地震的影响,为 GRACE 卫星检测到的同震形变信息。可

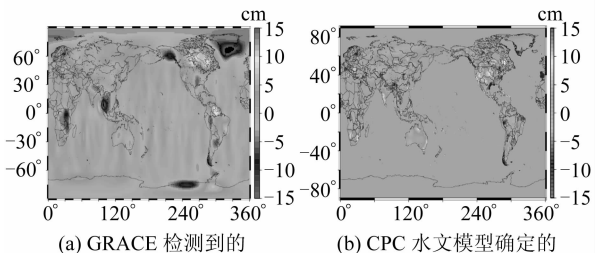


图 5 GRACE 检测到的和 CPC 水文模型确定的全球形变(等效水高),500 km 高斯平滑

Fig. 5 Global Deformation Detected by GRACE and Change from CPC Model

以看出,形变变化分成正负两部分,负变化为地表沉降区,正变化为地表上升区,结果不仅与 Han^[4]和 Chen^[6]的结果非常相似,也与 Sun^[3]的理论 GRACE 观测结果比较一致,实际计算结果与理论值相比,GRACE 观测到的形变变化在范围、量级以及平滑度等指标上要大些。

为了检验重力卫星检测到的同震重力形变,本文以美国地质调查局(USGS)发布的 Sumatra-Adaman 地震断层数据^[18]进行分析,选取的最优发震断层参数为:走向 320°,分别沿走向和倾向均匀地分成 30×15 块子断层,每个子断层的尺度为 15 km×12 km。按式(5)、式(6)分别计算地表重力变化与空间固定点的同震重力变化(如图 6 所示),结果表明,两者除了数量级有所不同外,符号基本相反。因此,适合 GRACE 卫星观测的是空间固定点的同震重力变化结果。

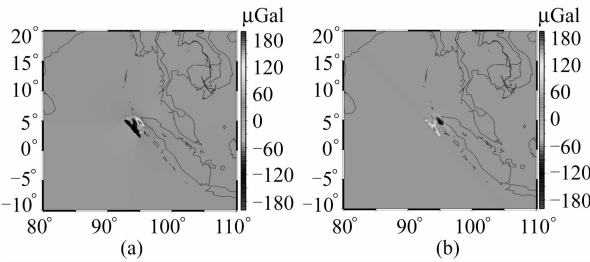


图 6 变形地球表面(a)和空间固定点的同震重力变化(b)

Fig. 6 Co-seismic Gravity Changes on the Deformed Earth Surface and at Space-fixed Point

为了分析同震和震后形变变化,本文亦选择 A(1.5 N,92.5 E)和 B(6.5 N,97.5 E)两个空间固定点(见图 7)作为计算点,以 GGM02S 重力场模型作为背景场,将 GSM 月重力场位模型分别与 GGM02S 重力场模型求差,按式(5)计算得到 2003~2006 年的形变月变化序列如图 8 所示。以 B 点为例可以看出,在地表沉降区,在地震前后有明显的形变下降(约 20 cm),而地表上升区

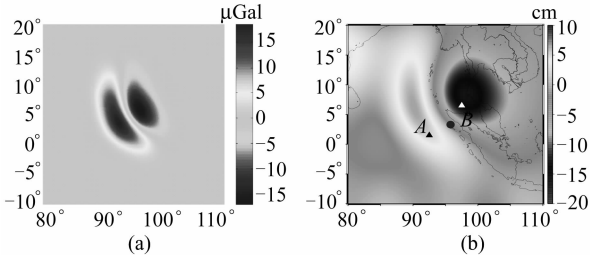


图 7 高斯平滑后的空间固定点的同震重力变化和 GRACE 检测到的同震形变变化(等效水高)

Fig. 7 Co-seismic Gravity Changes at Space-fixed Point and Co-seismic Deformation

的形变变化虽然有所增大(约 3 cm),但不明显。震后形变变化在沉降区和上升区都存在明显的增大。

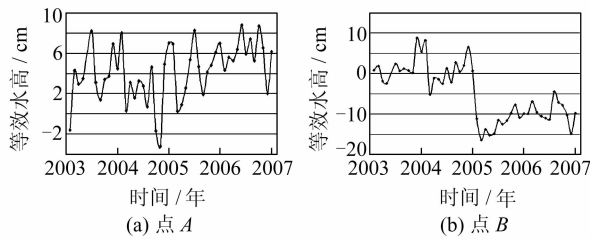


图 8 空间固定点 A、B 的非季节性形变变化
Fig. 8 Non-seasonal Deformation Change at Space-fixed Points A and B

5 结 语

与卫星重力测量相比,传统地面重力测量技术耗时多、劳动强度大,并有许多难以到达的地区,致使重力测量的地面覆盖率和分辨率受到极大的限制^[20],但在今后的 3~6 a,GRACE 重力卫星的观测数据量将会越来越多,轨道也会愈来愈低,这样,它对重力场及其变化将愈来愈敏感,在空间和时间方面,分辨率都将愈来愈高^[21]。有理由相信,在轨运行及后续重力卫星的发射将为大地震的监测与预报提供一种独特的途径。

致谢:感谢日本东京大学地震研究所孙文科教授的指导与帮助!

参 考 文 献

[1] 王正涛. 卫星跟踪卫星测量确定地球重力场的理论和方法[D]. 武汉:武汉大学,2005

[2] Sun W, Okubo S. Co-seismic Deformations Detectable by Satellite Gravity Mission-a Case Study of Alaska(1964,2002) and Hokaido(2003) Earthquake in the Spectral domain[J]. J Res, 2004, 109(B4): B04405

[3] 孙文科. 地震火山活动产生重力变化的理论与观测研究的进展及现状[J]. 大地测量与地球动力学, 2008,28(4):45-53

[4] Han S C, Shum C K, Bevis M, et al. Crustal Dilation Observed by GRACE After the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake[J]. Science, 2006, 313: 658-662

[5] Ogawa R, Heki K. Slow Postseismic Recovery of Geoid Depression Formed by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake by Mantle Water Diffusion[J]. Geophy Res Lett, 2007,34: 106313

[6] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. GRACE Detects Coseismic and Postseismic Deformation

from the Sumatra-Andaman Earthquake[J]. Geophys Res Lett, 2007, 34:L13302

[7] 李建成,陈俊勇,宁津生,等. 地球重力场逼近理论与中国 2000 似大地水准面的确定[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003

[8] 罗志才. 利用卫星重力梯度数据确定地球重力场的理论与方法[D]. 武汉:武汉大学,1996

[9] Wahr J, Molenaar M, Brayan F. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE[J]. J Geophys Res, 1998, 103 (B12): 30 205-30 299

[10] 周旭华,吴斌,彭碧波,等. 全球水储量变化的 GRACE 卫星检测[J]. 地球物理学报,2006, 49(6): 1 644-1 650

[11] Jekeli C. Alternative Methods to Smooth the Earth's Gravity Field[D]. Columbus: Ohio State University, 1981

[12] 邹正波,邢乐林,李辉,等. 中国大陆及邻区 GRACE 卫星重力变化研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008,28(1):23-27

[13] 王丹,李辉,申重阳,等. 地面重力时空变化向卫星高度的解析延拓[J]. 大地测量与地球动力学, 2005,25(2):69-74

[14] 黄振威. 利用 GRACE 数据恢复陆地水储量变化的方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2008

[15] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. Low Degree Gravitational Changes from GRACE: Validation and Interpretation[J]. Geophys Res Lett, 2004, 31: L22607

[16] 谈洪波,申重阳,李辉. 断层位错引起的地表重力变化特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28 (4):54-62

[17] Sun W, Okubo S. Surface Potential and Gravity Changes Due to Internal Dislocations in a Spherical Earth- I . Theory for a Point Dislocation[J]. Geophys J Int, 1993, 114:569-592

[18] Fault Model in USGS Site[OL]. http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2004/eq_041226/neic_slav_ff.html, 2008

[19] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. Satellite Gravity Measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet[J]. Science, 2006, 313:1 958-1 960

[20] 宁津生. 跟踪世界发展动态 致力地球重力场研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2001,26(6): 471-474

[21] 陈俊勇. 重力卫星五年运行对求定地球重力场模型的进展和展望[J]. 地球科学进展,2006, 21(7): 661-665

第一作者简介:邢乐林,博士生,助理研究员,主要从事卫星大地测量研究。
E-mail:xinglelin@163.com

Detection of Co-seismic and Post-seismic Deformation Caused by the Sumatra-Andaman Earthquake Using GRACE

XING Lelin^{1,2,3} LI Jiancheng¹ LI Hui^{2,3} SUN Wenke⁴

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Institute of Sesimology, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China)
(3 Crustal Movement Laboratory, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China)
(4 Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan)

Abstract: The co-seismic and post-seismic deformation caused by Sumatra-Adaman earthquake are computed by using RL04 GSM monthly gravity model of GRACE published by CSR. The analysis and comparison of numerical results show that co-seismic and post-seismic deformation information about -20-10 cm equivalent water thickness from large earthquake can be detected by GRACE satellite gravity surveying.

Key words: GRACE; gravity field; large earthquake

About the first author: XING Lelin, Ph.D candidate, assistant research, majors in satellite geodesy.
E-mail: xinglelin@163.com