

利用 GRACE 卫星数据研究汶川地震 前后重力场的变化^{*}

段虎荣^{1,2}, 张永志¹, 刘 锋¹, 康荣华¹

(1. 长安大学 地测学院, 西安 710054 2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要: 介绍了利用 GRACE 卫星数据计算和分析重力场变化的方法。以 EIGEN-GRACE02S 重力场模型为背景, 对高斯平滑处理前后中国大陆月重力场的变化作了比较, 认为取平均半径为 666 km 作高斯平滑, 能够得到合理的重力变化结果。以 3 个月时间尺度计算了 2008 年汶川地震前后中国大陆的重力场变化, 将结果与 2006 年和 2007 年相同时间尺度的变化结果进行比较, 发现三者相符合, 并且同震重力的负变化可用地壳膨胀模型理论来解释。

关键词: GRACE; 重力场; 高斯平滑; 汶川地震

中图分类号: P312.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2009)03-0295-04

0 引言

2002 年 3 月 17 日, 德国和美国合作, 成功发射了两颗重力恢复与气候实验 (Gravity Recovery And Climate Experiment 简称 GRACE) 卫星, 由此, 对卫星探测地球重力场及其时间变化的研究和应用工作在全球展开。

目前, 美国德克萨斯大学空间研究中心 (University of Texas Center for Space Research 简称 UTCSR)、美国宇航局喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory 简称 JPL) 和德国地学中心 (Geoforschungszentrum Potsdam 简称 GFZ) 等国外权威研究机构利用 GRACE 卫星数据研制了各自的静态重力场模型, 例如, GGM 系列 (UTCSR 和 JPL 研制)、EIGEN-GRACE 和 EIGEN-GRACE02C 系列 (GFZ 研制) 等。美国俄亥俄州立大学给出了 2004 年 12 月印尼 8.7 级巨震的 $3 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ 同震重力变化和 2004 年相对于 2003 年的 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 地震前兆重力变化 (Han et al, 2006), 其结果与由地震模型预测的重力变化相当。Sun 和 Okubo (2004) 研究发现, 震级大于 9.0 的剪切型或大于 7.5 的张裂型地震的同震形变能被 GRACE 卫星观测到。Valentir 等 (2004) 对利用卫星重力测量探

测不同震级构造变形引起的重力场变化的可能性进行了数字模拟和统计检验分析。Chen 等 (2005) 研究了利用 GRACE 卫星探测印尼 8.7 级巨震的同震和震后变形。国内, 武汉大学利用 GRACE 卫星 18 个月的数据 (2003 年 2 月 1 日至 2004 年 8 月 1 日) 于 2005 年成功研制出 GRACE 重力场模型系列 WHU-GM05 (90 阶和 120 阶)。这些研究成果表明, 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, 在未来的地震监测工作中具有广泛的应用前景。

1 GRACE 卫星监测的重力变化计算

1.1 数据说明

GRACE 科学数据产品分 4 类: Level0、Level1A、Level1B 和 Level2。GRACE 卫星在轨运行已经 7 年多, 其数据也对外公布。GRACE 数据的处理、存档和发布主要由 UTCSR、JPL、GFZ 三个研究中心协作完成该数据系统的设计任务就是利用每月的数据并基于某已知的模型来解算地球重力场, 并按照 GRACE 科学数据系统发展计划来完成。Level2 数据产品由对上一层数据产品的处理而得, 包括重力场和相关数据产品, 也包括处理过程中的附属数据产品。本文采用 GFZ 发布的

* 收稿日期: 2008-11-21.

基金项目: 国家自然科学基金 (40674001) 资助.

GRACE2格式的数据。

1.2 重力变化计算

理论上，地球重力场模型只有在包含从 0到无穷的所有阶次的球谐系数时，才能反映全波段的重力场信息。但实际上只能得到某一最大阶数，由 GRACE卫星只能恢复某一固定阶次的重力场，因此只能对部分频谱进行分析。而且由 GRACE恢复的重力场模型的阶数越大（尤其是在 90 阶以后），其误差也越大，因此 GRACE科学数据中心在发布重力场模型时都提醒用户最好不要采用 90 阶以后的系数（罗志才，1996）。

地球对外部空间的引力位为

$$V(r,\varphi,\lambda)=\frac{GM}{r}\left\{1+\sum_{l=2}^{l_{max}}\sum_{m=0}^l\left(\frac{a}{r}\right)^l\bar{P}_m(\sin\varphi)\left[\bar{C}_m\cos m\lambda+\bar{S}_m\sin m\lambda\right]\right\}.$$
 (1)

式中，GM是地球引力常数，单位为 m³ s⁻²，r是外部某点到地心的距离，φ、λ分别是地心纬度和地心经度，a是地球平均赤道半径，l_{max}是位系数能够恢复的最大阶数，P_m(sinφ)为l阶m次的规格化勒让德函数，C_m，S_m为规格化球谐系数。

地球对外部空间的引力为

$$g(r,\varphi,\lambda)=\frac{GM}{r^2}\left\{1+(l+1)\sum_{l=2}^{l_{max}}\sum_{m=0}^l\left(\frac{a}{r}\right)^l\bar{P}_m(\sin\varphi)\left[\bar{C}_m\cos m\lambda+\bar{S}_m\sin m\lambda\right]\right\}.$$
 (2)

将 GRACE月重力场模型与背景重力场作差，就得到月重力场相对的时间变化，其结果可用于重力场变化的研究和分析，即：

$$\Delta g=g-g_{背景}.$$
 (3)

由于 GRACE卫星重力场的特殊的获取方式，使得其在经度方向的精度高于纬度方向，因此出现轨道痕迹，其重力变化大约为 10⁻⁵ m s⁻²量级，无法提取可用的地球信号。由于 GRACE时变重力场不可避免地存在着截断误差，且随阶数的增大而增大，计算过程中由高阶项造成的误差也不可忽略。因此产生了南北向的异常条带重力变化分布现象（图 1 a），这不利于利用卫星数据分析和解释地震前后重力场的变化。我们采用高斯平滑方法来降低高阶项误差对结果造成的影响（Chen et al 2005, Swenson Wahr 2002, 朱广彬，2007, 周新等，2008, 邹正波等，2008），即对高阶项系数进行降权处理。经高斯平滑处理后，重力变化公式为

$$\Delta g=-\frac{GM}{r^2}\sum_{l=2}^{l_{max}}(l+1)\left(\frac{a}{r}\right)^l\sum_{m=0}^lW_l\bar{P}_m(\sin\varphi)\left[\Delta\bar{C}_m\cos(m\lambda)+\Delta\bar{S}_m\sin(m\lambda)\right].$$
 (4)

其中，ΔC_m ΔS_m为月重力场与背景重力场模型的球谐系数之差，W_l为高斯平滑函数。

结果表明高斯平滑能很好地抑制 GRACE时变重力场信号中的高频成分。高斯平滑方法的优点体现在：加入 W_l算子后，式（2）高阶系数的权重减小，高阶系数误差的影响减弱，截断的误差影响减小，结果与真实重力场更符合。

通过反复比较计算，笔者确定计算 70阶次重力场变化时采用 666 km为平均半径进行高斯平滑。图 1 a和图 1 b分别为 2008年 7月 70阶重力场模型平滑前后的重力变化。图 1 b中重力变化的异常条带的影

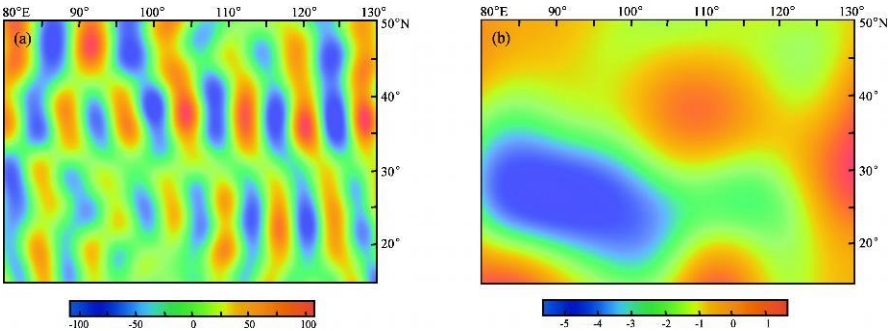


图 1 滤波前 (a) 和滤波后 (b) 的重力变化 (单位: 10⁻⁸ m s⁻²)
Fig 1 Variation of gravitational field before GAUSS smoothing (a)
and after GAUSS smoothing (b) (unit: 10⁻⁸ m s⁻²)

2 汶川地震前后重力场变化

汶川地处我国南北地震带上的龙门山活动构造带，为地壳运动活跃区域。南北地震带延绵数千千米，跨越宁夏，甘肃东部、四川西部、云南，属于地震多发集带。而龙门山地震带处于南北地震带的活跃区域——青藏高原与四川盆地的交界处（滕吉文等，2008；张培震等，2008）。2008 年 5 月 12 日汶川大地震反映了汶川地区特定的深部介质和构造环境、特异的深层过程及动力学响应。

笔者选取 EIGEN-GRACE02 S 重力场模型作为重力变化计算的背景场，该模型是利用 GRACE 的 110 天观测数据解算得到的（Reigber et al 2005）。笔者利用 2006~2008 年每年的 5 月、6 月、7 月的 GRACE 地球重力场模型，通过差分、平滑处理，得到月重力变化，然后对月变化结果进行平均计算，得到 3 个月的重力异常变化。图 2 为处理后得到的重力异常变化。

从图 2 可以看出，2006、2007 年兰州与昆明一带的重力值正值变化突出，高值区范围也很大，这可能与大震孕育有一定关系。2008 年这两个区域的重力值均大幅减弱，边缘处的值有向负值逆转的迹象，这与大震能量释放有关，在一定程度上反映出地震对地球重力异常变化产生的影响。从图中还可以看出，在龙门山断裂区域，2006、2007 年为绿色，2008 年为蓝色，绝对量值差异不是很大，但正、负发生逆转，反映出震前孕震与同震能量释放的不同状态。重力变化可解释为龙门山断裂区域深部物质在应力作用下重新分布、调整。

从图 3 可以看出，2008 年 1~4 月成都、长春两区域重力变化差异不大，但 4~6 月成都重力变化明显强于长春，这与地震发生区域位置有关。地震发生时，地震使地壳中的应力得到释放，原来处于压缩状态的地壳产生膨胀，使地震区地壳介质的密度变小，导致观测到的同震地球重力场发生负变化。

3 结语

（1）在时间尺度为 3 个月的等震重力变化中，汶川地区 2008 年的重力值相对 2006 年和 2007 年

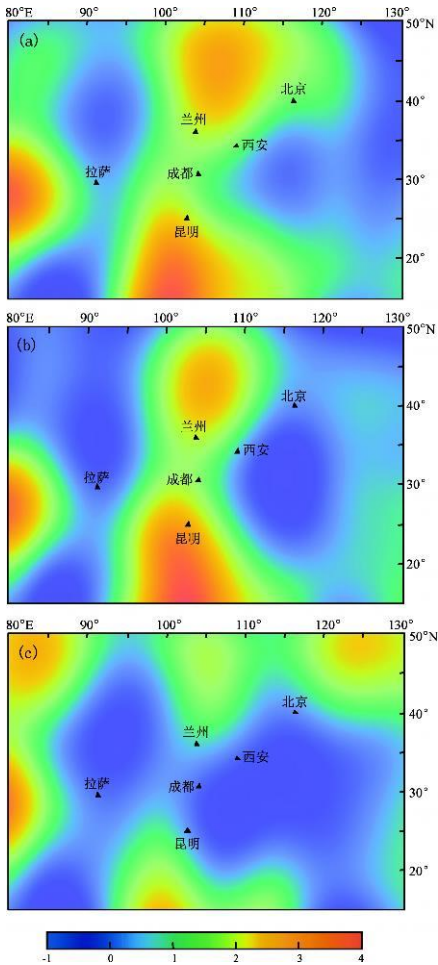


图 2 2006 (a)、2007 (b) 和 2008 (c) 5 月、6 月、7 月 3 个月尺度的重力变化 (单位: 10^{-8} ms^{-2})
Fig2 Variation of gravitational field of China by three-month scale in 2006 (a), 2007 (b) and 2008 (c) (unit: 10^{-8} ms^{-2})

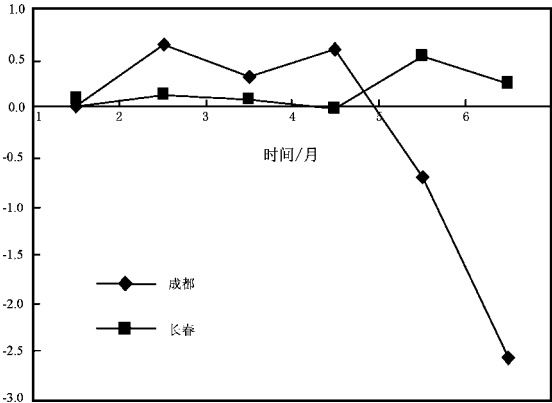


图 3 2008 年 1 月~6 月成都和长春地区的重力变化 (单位: 10^{-8} ms^{-2})

Fig3 Variation of gravitational field of Chengdu and Changchun from January to June in 2008 (unit: 10^{-8} ms^{-2})

大约变化了 $2 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ ，我们认为这个变化跟地震应力、能量释放相关。

(2) 卫星重力资料能够反映大尺度的重力变化，然而要将卫星重力应用于地震预测研究还有许多问题要解决，包括模型的选取、平滑方法的改进、空间分辨率的提高等。

参考文献:

付虹, 李永莉, 赵小艳, 等. 2008. 云南 $M \geq 5$ 地震震前异常的统计特征 [J]. 地震研究, 31 (4): 335—339.

郭俊义. 1994. 物理大地测量学基础 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社.

罗志才. 1996. 利用卫星重力梯度数据确定地球重力场的理论和方法 [D]. 武汉: 武汉测绘科技大学.

孙文科. 2008. 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, 28 (4): 44—53.

滕吉文, 白登海, 杨辉, 等. 2008. 2008 年汶川 $M_{S8.0}$ 地震发生的深层过程和动力学响应 [J]. 地球物理学报, 51 (5): 1385—1402.

王丹, 李辉, 申重阳, 等. 2005. 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, 25 (2): 69—74.

张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因 [J]. 地球物理学报, 51 (4): 1066—1073.

张永志. 1994. 地震过程中形变能的演化特征 [J]. 地震研究, 17 (2): 171—176.

周新, 邢乐林, 邹正波, 等. 2008. GRACE 时变重力场的高斯平滑研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 28 (3): 41—45.

朱广彬. 2007. 利用 GRACE 位模型研究陆地水储量的时变特征 [D]. 北京: 中国测绘科学研究院.

邹正波, 邢乐林, 李辉, 等. 2008. 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, 28 (1): 23—27.

Chen J L, Wilson C R, Fan J L, et al. 2005. Spatial sensitivity of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) time-variable gravity observations [J]. JGR 110 (B9): 8408—+, doi: 10.1029/2004JB003536.

Han S C, Shum C K, Bevis M, et al. 2006. Crustal dilation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake [J]. Science 313: 658—662.

Reigber C, Schmidt R, Flechner F. 2005. An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S [J]. Journal of Geodynamics 39: 1—10.

Sun W, Okubo S. 2004. Coseismic deformations detectable by satellite gravity missions: A case study of Alaska (1964—2002) and Hokkaido (2003) earthquakes in the spectral domain. JGR 56: 881—892.

Svenson S, Wahr J. 2002. Methods for inferring regional surface mass anomalies from GRACE measurements of the time-variable gravity [J]. JGR 107 (B9), 2193. doi: 10.1029/2001JB000576.

Valentini M. 2004. Can tectonic processes be recovered from new gravity satellite data. Earth and Planetary Science Letters 228: 281—297.

Study of the Gravity Variance in Chinese Mainland before and after Wenchuan Earthquake with GRACE Gravity Models

DUAN Hu.rong^{1,2}, ZHANG Yong.zhi¹, LIU Feng¹, KANG Rong.hua¹

(1. School of Geographical Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

(2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shaanxi, China)

Abstract

The method of calculating and analyzing the variation of gravity field with the GRACE satellite data is introduced. Taking the EIGEN-GRACE02S as a reference, we compare the monthly variation of the gravity field in Chinese mainland before the Gaussian Smoothing with the one after the Gaussian Smoothing. The reasonable variation of the gravity field can be obtained by Gaussian Smoothing when taking 666 km as the average radius. We calculate the variation of gravity field in Chinese mainland before and after the Wenchuan $M_{S8.0}$ earthquake in 2008. By three month scale we compare the gravity field with the ones in 2006 and in 2007 and find that the three variation in three different years are accordant with each other. The negative coseismic gravity changes can be interpreted by the expansion of the Earth's crust model.

Key words: GRACE, gravity field, Gaussian Smoothing, Wenchuan earthquake



邓柏昌 华南理工大学物理系副教授。1982年7月毕业于合肥工业大学地质系应用地球物理专业,获学士学位。1992年毕业于北京师范大学物理系物理教学专业,获硕士学位。主要从事电离层物理、地震电磁预报、电磁场理论及工科大学物理教学法等方面的研究工作。



武安绪 北京市地震局副局长。1989年毕业于云南大学地球物理系。目前主要从事地震活动、地壳形变、数字波形、综合预报、爆炸识别、信号处理、软件开发等研究工作。



蒋锋云 中国地震局第二监测中心工程师。2002年毕业于东华理工大学测绘系测绘工程专业,获理学学士学位。2006年毕业于中国地震局地震研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震预报与GPS数据处理及分析等方面的工作。



段虎荣 陕西铁路工程职业技术学院讲师。2002年7月毕业于长安大学测量工程专业,获学士学位;2006年7月毕业于长安大学大地测量与工程测量学专业,获硕士学位;2008年4月开始攻读长安大学大地测量与工程测量学博士学位。主要从事卫星大地测量研究工作。



武艳强 中国地震局地震预测研究所助理研究员。2003年天津大学计算机信息管理专业毕业,获学士学位;2008年中国地震局地震预测研究所固体地球物理学专业毕业,获理学硕士学位。主要从事大地测量数据处理与分析、孕震形变场识别等方面的研究工作。



张建国 河北省地震局邯郸地震中心台工程师。2006年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理专业,获理学学士学位。2008年毕业于吉林大学地球探测科学与技术学院固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事地震监测工作。



李俊 四川大学电子信息学院在读硕士研究生。2006年毕业于四川大学电气信息学院,获工学学士学位。主要从事网络多播技术的研究工作。



庞卫东 2006年毕业于昆明理工大学地球科学系资源勘查工程专业,获学士学位,现为云南大学地球物理系在读硕士研究生。主要从事地球物理数据处理、地震地质及地震活动性分析方面的研究工作。



吕坚 江西省地震局预报中心工程师。2007年毕业于中国科学技术大学地球物理专业,获学士学位。主要从事地震活动性、地震危险性和数字地震学研究工作。



赵刚 中国地震局地壳应力研究所副研究员。2002年毕业于中国地震局地壳应力研究所固体地球物理专业,获理学硕士学位。主要从事前兆观测技术研究工作。

注:秦嘉政、付虹、张立、潘纪顺、王赞赞、杨国华、胡亚轩、周光全的简介已分别刊登在本刊 Vol28 No4, Vol30 No1, Vol29 No4, Vol31 No3, Vol32 No2, Vol31 No1, Vol30 No2, Vol29 No2