

汶川地震与卫星重力变化^{* 1}

邹正波^{1,2)} 李 辉^{1,2)} 康开轩^{1,2)} 吴云龙^{1,2)}

(1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071
(2) 中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地,武汉 430071

摘 要 利用 GRACE 重力卫星的重力场模型,计算了中国大陆及周缘地区在汶川地震前后两年的重力变化,在剔除陆地水质量变化的影响后,研究了卫星重力变化与由位错模型模拟的同震重力变化之间的关系,结果表明:卫星重力变化揭示了汶川地震对中国大陆的影响。

关键词 汶川地震;重力变化;GRACE;位错模型;GLDAS

中图分类号:P227;P315⁺⁶ **文献标识码**:A

WENCHUAN EARTHQUAKE AND SATELLITE GRAVITY VARIATION

Zou Zhengbo^{1,2)}, Li Hui^{1,2)}, Kang Kaixuan^{1,2)} and Wu Yunlong^{1,2)}

(1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071
(2) Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071

Abstract Using GRACE gravity field models, gravity changes in Chinese mainland and its vicinities before and after the Wenchuan earthquake are calculated. After removing the influence of water mass changes, the relationship between satellite gravity variation and simulated coseismic gravity changes based on displacement theory is analyzed. The result shows that the satellite gravity indicates the impact of the Wenchuan earthquake to China mainland.

Key words: Wenchuan earthquake; gravity changes; GRACE; dislocation model; GLDAS

1 引言

2008 年 5 月 12 日 14 点 28 分中国四川省汶川县映秀镇附近(30. 95°, 103. 40°)发生 $M_s 8.0$ 的巨大地震,震源深度为 14 km,地震发生在中国大陆最为活跃的南北地震带的次级地震带——龙门山断裂带上^[1],是一次以逆冲为主、兼少量右旋走滑分量的地震,断层向西北方向倾斜,走向为 229°。

地震的孕育和发生必然产生物质的迁移及质量的再分布,引起地球重力场随时间及空间的变化,并可通过不同手段观测出来。重力手段自用于地震监

测预测以来,已在多个地震震例中取得地震前后的重力变化^[1]。汶川地震发生以来,许多学者已从地面重力观测角度对该地震进行了深入研究,申重阳等^[2]将中国大陆近 10 年的流动重力数据与 GPS 等资料相结合,研究了汶川地震的重力变化演变特征及孕震机理;祝意青等^[3]系统分析了龙门山断裂带重力变化特征与汶川地震的关系,并证实地面重力变化能很好地反映出活动断层的物质迁移及构造变形效应。

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 重力卫星作为重力观测的另一种手段,为地震

* 收稿日期:2013-04-16

基金项目:中国地震局基本科研业务费专项(15201116022);国家自然科学基金(40704009,41004030)

作者简介:邹正波,女,助理研究员,在读博士,研究方向为卫星重力及其在地震中的应用. E-mail: zouzpb@126.com

监测提供了长时空尺度的重力变化信息,已捕获到 2004 苏门答腊-安达曼地震、2010 智利大地震及 2011 年日本东北部大地震引起的重力变化,在地震研究应用中发挥着独特的作用^[4-9]。在利用 GRACE 对汶川地震的探测研究中,一些学者从不同角度使用不同方法进行了分析讨论,王武星等^[10]采用 GRACE 与 GPS 数据联合探测到与汶川地震相关的重力变化,段虎荣等^[11]利用汶川地震前后 3 个月的 GRACE 数据探索重力场变化,并以地球膨胀模型解释其重力负变化影响。

本文对卫星重力数据做去相关及高斯滤波处理后,提取汶川地震前后两年的差分重力变化,剔除陆地水质量变化影响后,与地震位错模型模拟的同震重力变化比较,探索两者之间的关联性,并对其做出合理解释。

2 数据和方法

2.1 卫星重力资料处理及方法

已知地球重力场模型时间序列,求解地球上某点 (r, θ, λ) 的重力变化,可直接由

$$\Delta g = \frac{GM}{a^2} \sum_{l=2}^{l_{\max}} (l-1) \left(\frac{a}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos\theta) W_l(\Delta \bar{C}_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta \bar{S}_{lm} \sin(m\lambda)) \quad (1)$$

计算^[12]。式中, Δg 是重力异常, $\Delta \bar{C}_{lm}$, $\Delta \bar{S}_{lm}$ 是相关重力场球谐系数月重力场与正常重力场的完全规格化球谐系数之差, $\bar{P}_{lm}(\cos\theta)$ 为完全规格化的缔合勒让德多项式, l_{\max} 是位系数最大阶数, γ 是观测点距离地球质心的距离, l, m 为球谐系数对应的阶数和次数, λ, θ 分别对应于观测点的经度和余纬, W_l 高斯滤波函数。

采用美国德克萨斯大学空间研究中心处理的 GRACE RL04 地球重力场模型,包括最高阶次为 60 的规格化重力场位系数序列,已扣除大气、海洋、极潮、固体潮及海潮等影响,因 GRACE 由式(1)直接计算的重力变化存在南北向异常条带,故采取去相关(P3M8)及高斯滤波(300 km)方法,对汶川地震前后中国大陆及其周缘的重力异常进行计算,以总体平均为背景重力场,从而提取重力变化。

2.2 陆地水资料处理及方法

GRACE 时变信号反映全球陆地水、冰川及地震等相关物质迁移及质量再分布。为了从 GRACE 中提取与地震重力变化相关的信号,需要考虑诸多因素影响,水质量变化最为显著,需加以处理。全球陆地数据同化系统 GLDAS(Global Land Data Assimilation System)提供等效雪水高、地表水湿度、蒸发及径流等水质量信息,并按月对外发布。根据全球陆

面数据同化系统 GLDAS 发布的提取水质量变化(主要考虑到土壤水湿度及等效雪水高),由式(2)建立水质量变化与重力位系数之间的关系^[13],构建法方程,解算出水质量变化对应的球谐系数变化。采用与 GRACE 重力变化提取相同的方法得到陆地水质量变化引起的重力变化,从卫星重力结果中去除,获取与地震相关的重力变化。

$$\Delta \sigma(\theta, \lambda) = \frac{\rho_{\text{ave}}}{3} \sum_{l,m} \frac{2l+1}{1+k_l} \bar{P}_{lm}(\cos(\theta)) \times [\Delta \bar{C}_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta \bar{S}_{lm} \sin(m\lambda)] \quad (2)$$

式中, $\Delta \sigma$ 是质量变化, $\Delta \bar{C}_{lm}$, $\Delta \bar{S}_{lm}$ 是质量变化引起的球谐系数变化, ρ_{ave} 为地球平均密度($5\,517 \text{ kg/m}^3$), k_l 为勒夫数。

3 结果分析

对从 GRACE 卫星数据提取的 2008 年 6 月—2010 年 8 月累积重力变化与 2006 年 2 月—2008 年 4 月累积重力变化进行差分,得到汶川地震前后两年差分重力变化(图 1(a)),并进一步剔除同时段水质量变化的影响(图 1(b))。

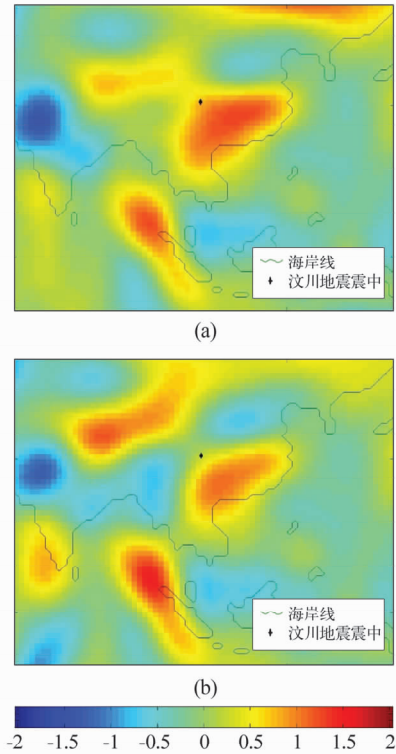


图 1 汶川地震前后两年差分重力变化(单位: 10^{-8} ms^{-2})

Fig. 1 Gravity anomaly difference in two years before and after Wenchuan earthquake (unit: 10^{-8} ms^{-2})

为研究 GRACE 在汶川地震前后的重力变化与该地震的联系,结合汪荣江的同震位错软件 PSGRN + PSCMP 计算的在($99^\circ \sim 107^\circ \text{E}$, $28^\circ \sim 36^\circ \text{N}$)范围的

点位垂直位移变化(图 2(a))及重力变化结果(图 2(b))^[14]。比较分析图 1、2 后,发现:1)水质量变化处理可有效改善结果。水质量变化剔除前(图 1(a))中国大陆仅东南及西北出现大范围正变化;剔除后(图 1(b))在中国大陆出现正负相间的近四象限分布特征,且对称方向与汶川地震断层方向基本一致,卫星重力结果与模拟结果特征相近,但范围更大,量级更小($2 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$),从侧面反映了汶川地震对中国大陆区域的影响。2)地面重力受垂直位移变化(图 2(b))影响,地表下陷重力增加,地表隆起重力减少,而 GRACE 观测的空间固定点重力变化不受地表沉降影响。因此卫星重力(图 1(b))观测得到与模拟地面重力(图 2(a))正负相反的结果。

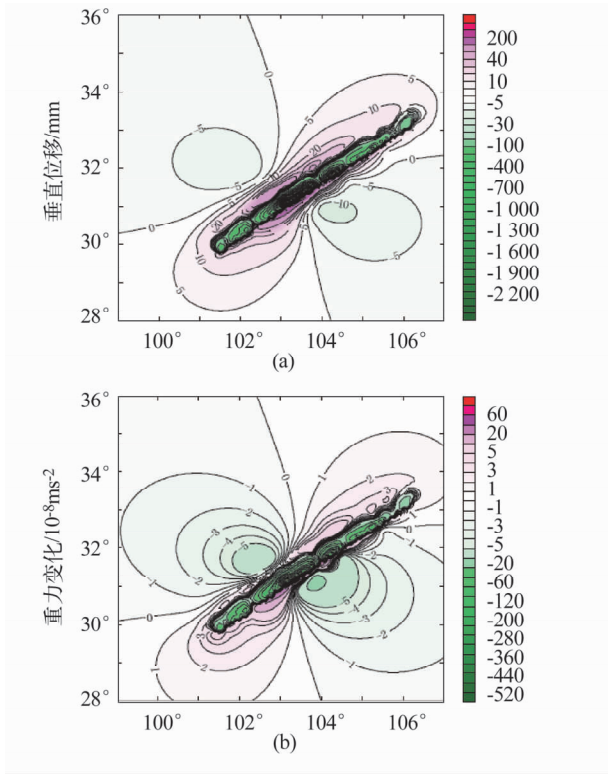


图2 汶川地震断层模型解算的同震垂直位移
Fig.2 Coseismic vertical displacements

4 结论

1)水质量变化对重力影响需在地震研究中加入考虑。剔除水质量变化的干扰,使卫星重力变化与模型模拟结果接近,便于揭示卫星观测结果与汶川地震可能的联系。
2)卫星重力变化与模拟重力变化两者之间存

在着相似的四象限分布特征,但范围更大,量级更小,反映了汶川地震对中国大陆的影响。

参 考 文 献

1 中国地震局监测预报司. 汶川 8.0 级地震科学研究报告 [M]. 北京:地震出版社,2009.

2 申重阳,等. 重力动态变化与汶川 Ms8.0 地震关系研究 [J]. 地球物理学报,2009,52(10):2 547 - 2 557, DOI: 10.3969/j. issn. 0001 - 5733. 2009. 10. 013.

3 祝意青,等. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究 [J]. 地球物理学报,2009,52(10):2 538 - 2 546, DOI:10.3969/j. issn. 0001 - 5733. 2009. 10. 012.

4 Chen J L, et al. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake [J]. Geophys Res Lett., 2007, 30 (B12): 30 205 - 30 229. L13302, DOI: 10.1029/2007GL030356.

5 Han S C, et al. Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake [J]. Science, 2006, 313(5787): 658 - 666.

6 周新,孙文科,付广裕. 卫星重力 GRACE 监测出 2010 年智利 Mw8.8 地震的同震重力变化 [J]. 地球物理学报, 2011,54(7):1 745 - 1 749, DOI:10.3969/j. issn. 0001 - 5733. 2011. 07. 007.

7 Matsuo K and Heki K. Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from satellite gravimetry [J]. Geophys Res Lett., 2011, 38, L00G12, DOI: 10.1029/2011GL049018.

8 Wenke Sun and Xin Zhou. Coseismic deflection change of the vertical caused by the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw9.0) [J]. Geophys J Int., 2012,189, 937 - 955.

9 邹正波,等. 日本 Mw9.0 级地震前 GRACE 卫星重力变化 [J]. 测绘学报,2012,41(2):171 - 176.

10 王武星,等. GRACE 卫星观测到的与汶川 Ms8.0 地震有关的重力变化 [J]. 地球物理学报, 2010,53(8):1 767 - 1 777.

11 段虎荣,等. 利用重力卫星数据研究汶川地震前后重力场的变化 [J]. 地震研究,2009,32(3):295 - 298.

12 邹正波,等. GRACE 探测强地震重力变化 [J]. 大地测量与地球动力学,2010,(2):6 - 9.

13 Wahr J, Molenaar M & Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE [J]. J geophys Res., 1998,103:30205 - 30230.

14 谈洪波,等. 汶川大地震震后重力变化与形变的粘弹性分层模拟 [J]. 地震学报,2009,31(5):491 - 505.