

刘潇. 小波多尺度分析尼泊尔 M_w 7.8 地震前卫星重力变化[J]. 华南地震, 2021, 41(1): 73–77. [LIU Xiao. Wavelet Multi Scale Analysis of Satellite Gravity Changes before Nepal M_w 7.8 Earthquake[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 73–77]

小波多尺度分析尼泊尔 M_w 7.8 地震前卫星重力变化

刘 潇

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 利用 GRACE 重力卫星 RL05 月重力场数据, 获取尼泊尔大地震前后震源区周缘 2010—2015 年每月重力变化, 以及震中点位重力时间序列。基于小波多尺度分析方法对卫星重力场进行分解, 获得重力场细节和近似部分。研究表明: 尼泊尔地震前 5 年(2010—2014)内在震源区周边出现了比较明显的卫星重力异常正负交替和迁移现象, 2014 至 2015 年间, 震区周边形成了明显正负异常区, 正重力异常区重力增加现象明显。震中重力时间序列反映从 2013 年开始, 重力变化处于稳定状态, 且处在较高位; 通过功率谱分析, 计算多尺度分解各阶细节对应的场源深度, 前 4 阶小波分解后的重力异常细节, 反映了浅部地质体的位置和异常情形; 5 阶小波细节更加侧重于刻画地区构造变形和深部物质流动引起的重力变化。

关键词: GRACE 卫星重力; 重力变化; 尼泊尔地震; 时间序列; 小波多尺度分解

中图分类号: P315.726

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)01-0073-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.10

Wavelet Multi Scale Analysis of Satellite Gravity Changes before Nepal M_w 7.8 Earthquake

LIU Xiao

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The monthly gravity field data of GRACE gravity satellite RL05 was used to obtain the monthly gravity changes of the periphery of the epicenter of the Nepal earthquake from 2010 to 2015 and the gravity time series of the epicenter. Based on the wavelet multi-scale analysis method, the satellite gravity field is decomposed to obtain the details and approximate parts of the gravity field. The results of the study show that in the 5 years before the Nepal earthquake (2010–2014), there were obvious positive and negative satellite gravity anomalies and migration around the source area. From 2014 and 2015, obvious positive and negative anomalies were formed around the earthquake area. The gravity increase in the gravity anomaly area is obvious. The epicenter's gravity time series reflects that since 2013, the gravity change is in a stable state and at a high level; through power spectrum analysis, the depth of the field source corresponding to each order of multi-scale decomposition is calculated, and the details of gravity anomalies after the first 4 order wavelet decomposition,

收稿日期: 2020-08-10

作者简介: 刘潇(1993–), 男, 工程师, 主要从事铁路工程精密控制测量研究。

E-mail: 643012734@qq.com

which reflects the location and anomalies of shallow geological bodies; the details of the 5th-order wavelet are more focused on describing regional structural deformation and gravity changes caused by deep material flow.

Keywords: GRACE satellite gravity; The gravity change; Nepal earthquake; Time series; The wavelet multi-scale decomposition

0 引言

2015年4月25日14时11分,尼泊尔境内发生了 $M_w 7.8$ 地震,美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)测定的此次地震的震中位于尼泊尔博卡拉(28.15°N , 84.71°E),即位于首都加德满都西北77 km处。此次地震的震级较大,并引发多处滑坡、冰崩雪崩;造成了大量人员伤亡以及建筑物倒塌和损坏。

能够用重力手段监测地震是由于在大地震孕育和发生过程中,震源区附近会产生物质迁移和质量再分布现象,重力场也随之变化^[1];2002年3月发射成功的GRACE重力卫星,具有高精度、高时间空间分辨率,能够监测出重力变化,其时变重力场能够提高人类认识地球内部物质迁移。重力场的变化量揭示了地球系统内部的物质运动、分布及变化,它主要是由地球流体圈层的质量迁移引起的,也可能与冰川均衡调整和地震现象造成的质量运动有关。

孙文科^[2]尝试将GRACE运用在日本大地震的研究中,取得了不错的结果;邹正波^[3]等研究GRACE重力变化的计算和分析,对球谐系数选取以及高斯平滑半径进行了讨论;王武星^[4]等利用GRACE研究了汶川地震发震前的重力异常;已有研究成果表面GRACE卫星观测到的重力变化包含了浅部到深部的各种质量改变成分,可以通过位场分离的方法去识别与提取。小波多尺度分析方法将重力异常分解到不同的尺度空间中,尺度大小决定了重力异常所反映的地质体埋深^[5-6]。

本文利用GRACE的时变重力特征和小波多尺度分解的优点,对尼泊尔地震前的重力变化进行研究,并试图分析和解释重力的变化与地震的孕育及地球内部物理的流动之间的关系。

1 数据处理与方法

1.1 GRACE 的数据处理

目前提供GRACE产品的机构有法国的GRGS(Space Geodesy Research Group)、美国的CSR、德

国的GFZ(GeoForschungsZentrum)和美国的JPL(Jet Propulsion Laboratory),其中除了GRGS的RL02产品为10日解,其他产品均为月解。

根据Wahr^[6]的理论,定义重力扰动计算公式:

$$\delta g(\theta, \varphi) = \frac{GM}{R^2} \sum_{l=0}^{\infty} (l+1) \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos\theta) (\Delta C_{lm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{lm} \sin(m\varphi)) \quad (1)$$

式(1)中: R 地球的半径, ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 都是球谐系数的变化值, θ 和 φ 余纬(距离 z 轴的角度,称作余纬度或顶角,角度从0到 180°)和经度 \bar{P}_{lm} 正则化的勒让德函数

1.2 二维小波分解

小波多尺度分析方法作为一种位场分离途径,可以将重力异常分解到不同的尺度空间中,尺度大小决定了重力异常所反映的地质体埋深。在实际的GRACE重力数据处理当中,常用的是二维小波变化,所以有必要将小波变化从一维推广到二维,这里直接给出二维离散型小波变换公式。对于函数(信号) $f(t) \in L^2(R^2)$,是一个二维信号, x , y 分别表示其纵横坐标, $\psi(x, y)$ 表示二维基本小波,满足条件^[5-7]:

$$(Wf)(j, k, n) = \frac{1}{2^j} \int \int f(x, y) \psi\left(\frac{1}{2^j}x - k, \frac{1}{2^j}y - n\right) dx dy \quad (2)$$

二维小波变换具有旋转的能力,不但具有放大的功能,还会产生极化的现象。在实际应用中,二维小波变换通过不同阶数的分解提取出来各个方向的分量。

2 尼泊尔地震 GRACE 重力场的变化

选取的空间尺度为 $15^\circ \sim 45^\circ\text{N}$, $70^\circ \sim 100^\circ\text{E}$,分布于震中四周,南北、东西均大于3000 km,以更大的空间尺度显示该震前的重力变化信息,时间尺度为震前5年,即2010-01至2015-04,以反映震前中短期的重力变化信息^[8-10]。

本文使用UTCSR提供的RL05(Level-2 Release-05)月重力场产品GSM(GRACE Satellite only Model),最大阶数为60阶;数据处理中采用

Swenson^[11]的一阶项结果代替;采用高斯平滑滤波方法,选取平滑半径为 400 km;GRACE 轨道存在系统误差,使用 SLR 计算的 C20 替换^[12];利用

Duan^[13]方法做去相关性处理。获得年度月重力累计变化(图 1)。

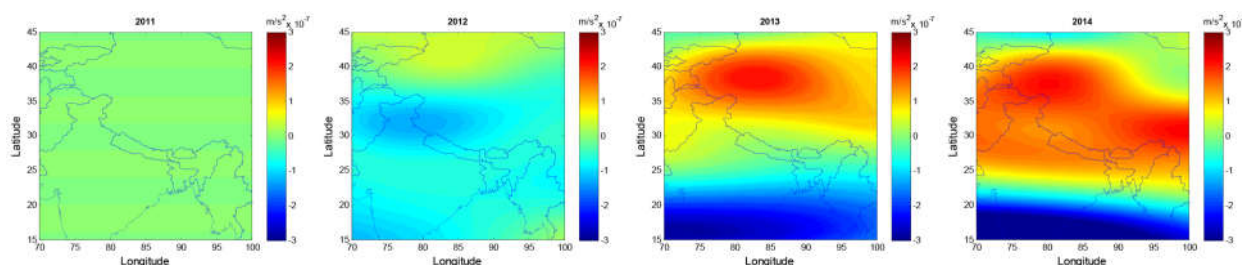


图 1 尼泊尔及邻区年度重力变化

Fig. 1 Annual gravity variation in Nepal and its adjacent areas

从图 1 年度累计重力变化连续图发现:

此次大地震前,尼泊尔南北出现了比较明显的重力异常变化,分别是北部的正异常变化,峰值幅度达到 $25 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,以及南部地区的负重力异常变化,峰值幅度达到 $-30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

为了定量的比较震前的重力值变化^[14],利用减去 2006—2014 年的 GRACE 数据的平均系数值,计算了尼泊尔地震中心的卫星重力异常时间序列

(图 2)。GRACE 反演的结果中有明显的地表周期性水文影响,为消除这些变化的影响,通过最小二乘法扣除年、半年、季节尺度重力场变化,以突显地震相关重力信息。

从图 2 中可以看出,在 2012 年 5 月之后重力异常值处于累积的(正值),出现这样情况的原因是,大地震发生前在震源区可能有物质迁移,使得该地区出现了明显的重力积累效应;

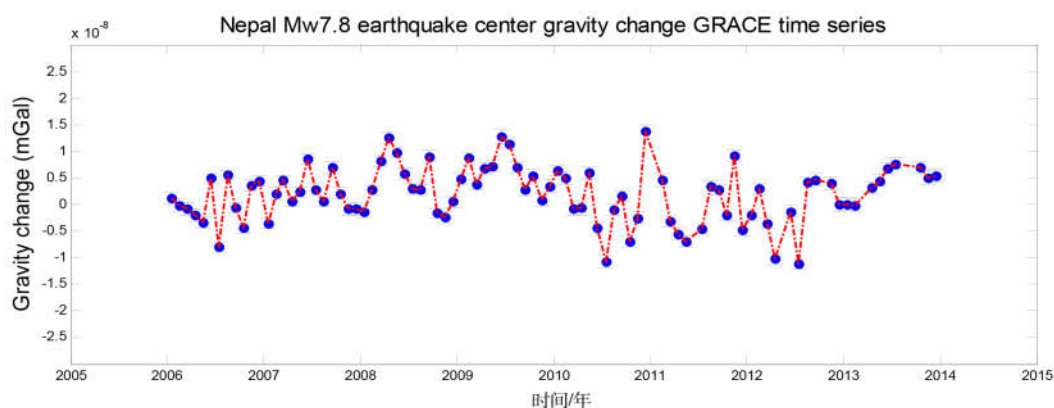


图 2 尼泊尔地震中心(28.15°N, 84.71°E)的卫星重力变化时间序列

Fig. 2 Satellite gravity center of the Nepal earthquake center(28.15 ° N, 84.71 ° E)

3 尼泊尔地震 GRACE 重力场小波多尺度分解及结果分析

利用 GRACE 卫星观测到的重力场主要是由水储量的变化、构造形变和地下物质流动等因素引起的,水储量变化、冰盖融化等引起的地表密度变化相对较大且变化较快。

由于水储量、构造形变以及深部物质流动在空间尺度上具有差异,由浅入深可能表现为不同波长成分。

一般情况下,小波分解最大尺度选取的越大,那么被滤除的细节部分就越多,分离出的成分越多;但是在进行信号重构的时候系数置零的部分就越多,重构后的信号就会丢失很多有用信号,造成信号的失真。一般,对于信噪比较大的信号,观测信号比有用信号的量级要大,这时候较小的分解阶数就能很好的解决问题,相反的情况就需要分解的阶数较高。

对于重力数据理论模型,不同尺度分解出来的重力数据,对应不同深度、不同密度的不均匀分布

重力异常多尺度分析的最理想结果,是通过功率谱分析,计算各阶细节对应的场源深度。同时与小波多尺度分解出的细节部分对比,从地球物理的角度,确定分解阶次的合理性。刁博在 2007 的文章中发现 5 阶细节反映的场源深度为 17~34 km,而 6 阶细节只是对 5 阶细节的伸缩,是布格重力异常在小波分析纯数学意义上所产生的假象^[15]。因此,利用小波多尺度分析方法对 2011–2014 年 GRACE 卫星观测到的重力场进行 5 阶分解,结果如图 3。

小波分解的 2~4 阶细节反应的是 7~20 km 左右的浅表扰动或者上地壳密度变化,5 阶细节功率谱场源似深度为 17~34 km,主要反映的是中、下地壳密度变化;5 阶近似主要反映的是 34~100 km 范围下地壳及深部地幔物质运移引起的密度变化,基本上剔除了中、浅部质量迁移引起的重力变化^[16]。从 5 阶近似可以看到从 2010 年到 2014 年,尼泊尔震区呈现大范围的重力上升变化,幅值为 $10\mu\text{Gal}$,这可能是深部高原物质移动产生的结果。

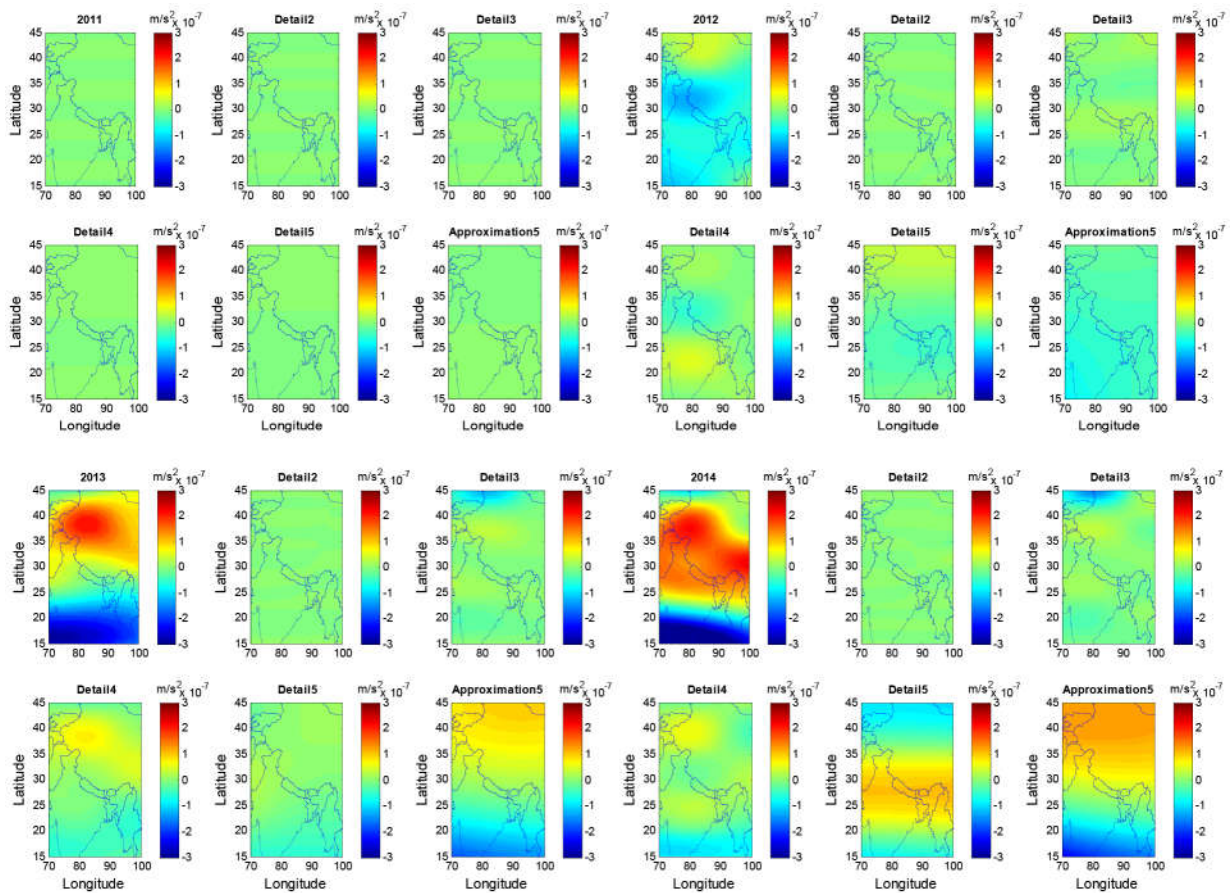


图 3 2011—2014 年 GRACE 重力变化 5 阶小波多尺度分解细节及近似部分

Fig.3 Details and approximate part of GRACE gravity change 5th order wavelet multi-scale decomposition from 2011 to 2014

4 结语

利用 GRACE 重力卫星 RL05 月重力场数据,获取尼泊尔 $M_w 7.8$ 地震前后震源区周缘 2010–2015 年每月差分重力变化,以及震中点位重力时间序列变化。并利用小波多尺度分析方法对卫星重力场进行分解,得到了反映不同深度的重力场细节和近似部分。研究结果表明:尼泊尔地震前 5 年(2010–2014 年)内在震源区周边出现了比较明显的卫星重力异常正负交替和迁移现象,2014 至 2015

年间,震区周边形成了明显正负异常区,正重力异常区重力增加现象明显。震中的重力时间序列分布指出从 2013 年开始,重力变化处于稳定状态,并都处在一个较高位;同时通过功率谱分析,计算多尺度分解各阶细节对应的场源深度,2 阶、3 阶和 4 阶小波分析后的重力异常细节,反映了浅部地质体的位置和异常情形;5 阶小波细节更加侧重于刻画地区构造变形和深部物质流动引起的重力变化。反映出大地震前震源区周边地下物质运动、质量迁移和能量积累等问题。

参考文献

- [1] 张国民. 地震预报引论[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [2] 孙文科. 2011 年日本大地震的科学解读[J]. 中国科技教育,2011(18):57-60.
- [3] 邹正波,罗志才,吴海波,等. 日本 M_w 9.0 地震前 GRACE 卫星重力变化[J]. 测绘学报,2012(2):171-176.
- [4] 王武星,石耀霖,顾国华,等. GRACE 卫星观测到的与汶川 M_s 8.0 地震有关的重力变化[J]. 地球物理学报,2010,53(8):1767-1777.
- [5] 汪海洪. 小波多尺度分析在地球重力场中的应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [6] Wahr, J., M. Molenaar, F. Bryan. Time variability of the earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1998, 103 (B12): 30205-30229.
- [7] 赵鹏志. 多尺度分析理论在重力异常分离中的应用[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014.
- [8] J. Morlet, G. Arens, J. Fourgeau, et al. Wave propagation and sampling theory[J]. Geophysics, 1982(47):203-236.
- [9] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. Pattern analysis and machine intelligence, IEEE Transactions, 1989, 11(7):674-693.
- [10] Torrence C., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1):61-78.
- [11] Sean, Swenson. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 2008, 113(B8), DOI:10.1029/2007JB005338.
- [12] Cheng M., B. D. Tapley. Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years [J]. J. Geophys. Res., 2004, 109, B09402, doi:10.1029/2004JB003028.
- [13] Duan, X. J., Guo J. Y., Shum C. K., et al. On the postprocessing removal of correlated errors in GRACE temporal gravity field solutions[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(11): 1095-1106.
- [14] Koji M., Kosuke H. Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake from satellite gravimetry [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(7):113-120.
- [15] 刁博,王家林,程顺有. 重力异常小波多分辨分析分解阶次的确定[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32(4):564-568.
- [16] 陈国雄,孙劲松,刘天佑. GRACE 卫星时变重力场的小波多尺度分解——以 2008 年汶川 M_s 8.0 大地震为例[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(6):679-682.