

李静,万晓云,徐铭. 2023. 基于 GRACE 卫星数据和位错模型的 2007 年印尼明古鲁  $M_w$  8.4 地震同震重力梯度信号对比分析[J]. 地震研究, 46(4): 521–528, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0031.

Li J, Wan X Y, Xu M. 2023. Comparative analysis of the coseismic gravity gradient signals of the 2007 Bengkulu, Indonesia  $M_w$  8.4 earthquake based on GRACE satellite data and the dislocation model[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4): 521–528, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0031.

# 基于 GRACE 卫星数据和位错模型的 2007 年印尼明古鲁 $M_w$ 8.4 地震同震重力梯度信号对比分析\*

李 静<sup>1</sup>, 万晓云<sup>1♣</sup>, 徐 铭<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 广州海洋地质调查局  
天然气水合物勘查开发国家工程研究中心, 广东 广州 511466)

**摘要:** 为评估基于 GRACE 重力卫星提供的时变重力场数据计算地震同震重力变化梯度的可行性, 利用 GRACE 卫星数据计算得到 2007 年印尼明古鲁  $M_w$  8.4 地震前后 12 个月的重力梯度变化值, 使用黏弹性半空间层状位错模型正演计算得到同震重力梯度变化的理论值, 并与 GRACE 重力卫星数据处理结果进行对比分析。结果表明: GRACE 重力卫星数据处理结果与位错模型正演结果量级一致, 但具体数值有差异; 相关性分析表明随着距震中越近, 两种方法得到的梯度变量相关性越高, 在震中区域的相关性可高达 90% 以上。

**关键词:** GRACE; 位错模型; 重力梯度; 印尼明古鲁地震

**中图分类号:** P315.726 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)04-0521-08  
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0031

## 0 引言

地震对世界所造成的灾难性影响, 时刻提醒着人们要加强地震的监测和预测。然而, 地面监测数据因实时性差、仪器设备容易受损等缺点无法完全满足要求, GRACE 卫星可以获得高精度的地区时变重力场。因此, 可使用卫星重力测量弥补地面地震资料的不足, 提高大地震的信号检测与监测能力。采用卫星重力数据研究地震引起的重力场变化, 对于研究地震的孕育机制和预测探测都有重要意义。

基于 GRACE 卫星数据的研究中, 大多数学者主要采用重力异常研究大地震的同震变化, 如张

赤军(1999)通过重力异常对区域性扰动物质的分布进行研究; Chen 等(2007)利用 GRACE 时变重力场模型, 将 2004 年苏门答腊 9.3 级地震前后两年的重力变化分别作为震前震后的平均重力场变化, 利用该地震的差值提取同震重力变化信号, 研究表明采用传统的差分方法可以消除背景中的平均引力, 减小周期性的水文信号影响, 从而提取同震重力变化。由于存在南北条带噪声, 通常使用 Wahr 等(1998, 2000)提出的高斯平滑滤波方法来消除 GRACE 卫星高频误差带来的影响; 邹正波(2016)通过检测证实了重力卫星具有探测地震前重力异常的能力; 付广裕等(2018)通过重力异常对川西地区的地壳密度结构进行研究。

\* 收稿日期: 2022-07-28.

基金项目: 国家自然科学基金(42074017); 中央高校基本科研业务费(2652018027)。

第一作者简介: 李 静(2000-), 主要从事卫星大地测量研究. E-mail: 13121238711@163.com.

♣ 通讯作者简介: 万晓云(1985-), 副教授, 博士生导师, 主要从事卫星重力和卫星测高研究.  
E-mail: wxy191954@126.com.

事实上,重力梯度数据更能反映重力场的细部结构,对于研究地震孕震过程具有较大潜力。Wolfgang (1993) 指出重力梯度以重力场的曲率描述重力场的区域结构,包含了地球物理学和大地测量学中十分重要的局部重力场信息;Wang 等 (2006) 发现重力场变化中的信号可以通过推导重力梯度得到放大;姜永涛等 (2015) 利用 GFZ Release 05 重力卫星对 2010 年智利 8.8 级特大地震同震重力和重力梯度变化进行分析,发现利用 GRACE 卫星观测数据与基于 SNREI 地球模型的位错模型理论计算的同震重力变化一致;Rahimi 等 (2018) 通过提取 2006—2007 年千岛 (Kuril Island) 地震同震重力梯度变化,发现相比于观测重力变化,只要考虑适当的信号恢复方法,重力梯度变化更适用于提取同震信号;郑增记等 (2019) 利用 GRACE 卫星观测数据提取到 2012 年苏门答腊 8.6 级特大地震的同震重力梯度变化,发现其在空间形态上与断层模型模拟结果符合较好,振幅差异较大,且重力和重力梯度变化的北向分量可以很好地抑制条带误差。

为探究 GRACE 重力卫星时变模型提取地震重力梯度变化信息的可行性,本文通过 GRACE 重力卫星时变模型计算得到 2007 年印尼明古鲁 8.4 级地震前后 12 个月的重力梯度变化,再利用位错模型进行正演计算,并将两种方法的计算结果作对比分析,从而评估利用 GRACE 卫星数据探测地震同震重力梯度变化的可行性。

1 地震与数据基本情况

2007 年 9 月 12 日,印尼苏门答腊东南部明古鲁市附近 150 km 海沟水域发生  $M_w$ 8.4 大地震,震中位置 ( $4.517^{\circ}\text{S}$ ,  $101.382^{\circ}\text{E}$ ),震源深度为 30 km (图 1)。9 月 13 日又发生  $M_w$ 7.9 余震。

郭飞霄等 (2020) 通过对美国德克萨斯大学空间研究中心 (CSR)、德国地学研究中心 (GFZ) 和美国宇航局喷气推进实验室 (JPL) 三大官方机构发布的 GRACE RL06 版本月重力场模型数据进行对比,发现 CSR 发布的模型数据阶方差最小。故本文选取 CSR RL06 版本的 GRACE 卫星观测数据进行同震信号提取和分析,数据截断至 60 阶次,采用 300 km 高斯空间平滑滤波去除南北条带噪声影响。

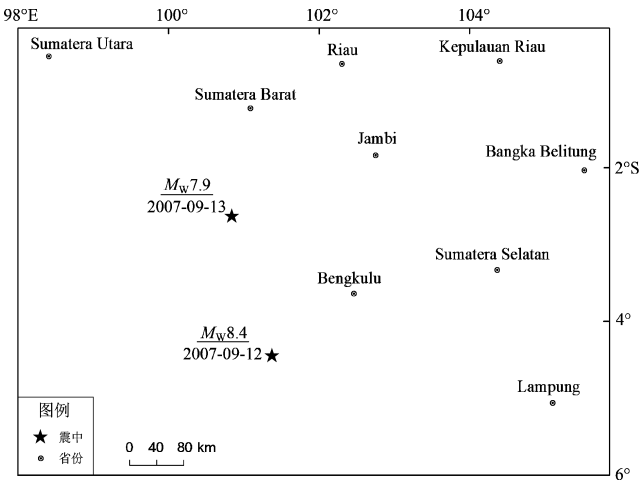


图 1 2007 年明古鲁  $M_w$ 8.4 地震示意图  
Fig. 1 A sketch map of the epicenter of the 2007 Bengkulu  $M_w$ 8.4 earthquake

本文选用美国地质调查局 USGS 发布的 2007 年印尼明古鲁  $M_w$ 8.4 地震的滑动断层模型,由于  $M_w$ 7.9 余震对主震的影响不可忽略 (Dai *et al*, 2016),所以也选用  $M_w$ 7.9 余震的滑动断层模型进行计算分析。在位错模型计算过程中,根据 CRUST2.0 (Bassin *et al*, 2000) 数据选取主震震中地区的地球分层模型进行地震同震重力梯度变化正演计算,见表 1。

表 1 2007 年明古鲁  $M_w$ 8.4 地震震中区域的地球分层模型  
(参数来源于 CRUST2.0)

Tab. 1 Earth stratification model in the epicenter area of the 2007 Bengkulu $M_w$ 8.4 earthquake (parameters from CRUST2.0)						
层级	深度/ km	$V_p$ / ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$V_s$ / ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$P$ / ( $\text{km}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏性系数/ ( $10^{18}\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	黏弹 性体
1	0.0 ~ 0.5	1.90	0.90	1 900	$\infty$	弹性体
2	0.5 ~ 2.2	5.00	2.50	2 600	$\infty$	弹性体
3	2.2 ~ 4.5	6.60	3.65	2 900	$\infty$	弹性体
4	4.5 ~ 7.0	7.10	3.90	3 050	$\infty$	弹性体
5	7.0 ~ $\infty$	8.15	4.65	3 350	1	麦克斯韦体

2 原理与方法

2.1 GRACE 重力卫星数据处理

Wang 等 (2012) 提出的重力梯度的计算公式如下:

$$V = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{a_e}{r} \right)^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos\theta) \quad (1)$$

式中:  $V$  为地震前后重力场变化;  $\Delta C_{nm}$  和  $\Delta S_{nm}$  是  $n$

阶  $m$  次的球谐系数变化值;  $P_{nm}$  为勒让德函数;  $G$  为引力常数;  $M$  为地球质量;  $a_e$  为赤道半径;  $r$ 、 $\theta$ 、 $\lambda$  为地心距离、余纬、经度。

在地方指北坐标系下, 重力梯度进一步可以推导为:

$$\begin{cases} V_{xx}(r, \theta, \lambda) = \frac{1}{r} V_r(r, \theta, \lambda) + \frac{1}{r^2} V_{\theta\theta}(r, \theta, \lambda) \\ V_{xy}(r, \theta, \lambda) = V_{yx}(r, \theta, \lambda) = \frac{1}{r^2 \sin\theta} [-\cot\theta V_{\lambda}(r, \theta, \lambda) + V_{\theta\lambda}(r, \theta, \lambda)] \\ V_{xz}(r, \theta, \lambda) = V_{zx}(r, \theta, \lambda) = \frac{1}{r} V_{r\theta}(r, \theta, \lambda) - \frac{1}{r^2} V_{\theta}(r, \theta, \lambda) \\ V_{yy}(r, \theta, \lambda) = \frac{1}{r} V_r(r, \theta, \lambda) + \frac{1}{r^2} \cot\theta V_{\theta}(r, \theta, \lambda) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} V_{\lambda\lambda}(r, \theta, \lambda) \\ V_{yz}(r, \theta, \lambda) = V_{zy}(r, \theta, \lambda) = \frac{1}{r \sin\theta} [V_{r\lambda}(r, \theta, \lambda) - \frac{1}{r} V_{\lambda}(r, \theta, \lambda)] \\ V_{zz}(r, \theta, \lambda) = V_{rr}(r, \theta, \lambda) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $V_r$ 、 $V_{\theta}$ 、 $V_{\lambda}$  为  $V$  关于  $r$ 、 $\theta$ 、 $\lambda$  的一阶导数;  $V_{\theta\theta}$ 、 $V_{\lambda\theta}$ 、 $V_{r\theta}$ 、 $V_{r\lambda}$ 、 $V_{\theta\lambda}$  为  $V$  的二阶导数。

本文选择差分法消除平均引力及周期性信号影响获取同震重力变化后, 通过式 (2) 计算获得重力梯度, 再选用高斯滤波对条带噪声进行平滑处理。差分法是在地震前后各选取一段时间 GRACE 月模型数据求取其平均值并做差, 以求出地震前后因地震引起的同震阶跃值。周期变化信号是 GRACE 卫星所得的时变重力场信号的重要组成部分, 其伴随重力场变化长期存在, 如年际信号等, 所以采用差分法对各时段的平均场重力进行差分处理, 从而较好地减弱周期信号的影响。

## 2.2 位错模型计算方法

Steketee (1958) 最早在地震学中引入位错模型, 并迅速建立起基于断层研究的地球位错理论。Okada (1992) 推导得出基于半无限空间均匀介质地球模型的位错公式。Wang 等 (2006) 对该公式进行改进, 提出考虑到层状黏弹性介质的矩形位错理论, 独立研发了 PSGRN/PSCMP 计算源程序。Sun 等 (2010) 提出球体位错模型理论, 能够高精度解译 200 km 外的远场同震重力变化。

本文采用 Wang 等 (2006) 提出的黏弹性半空间层状位错模型及其相应的配套计算程序 PSGRN/PSCMP, 对 2007 年明古鲁  $M_w 8.4$  大地震的同震重力变化作了正演计算。对通过上述程序计算得到

重力异常后进行球谐展开, 将得到的系数带入式 (2) 即可计算得到重力梯度。为使位错模型计算结果与 GRACE 卫星数据计算结果具有一致的空间分辨率, 将位错正演结果进行球谐截断至 GRACE 卫星数据相同阶次, 并采用相同滤波半径的高斯滤波进行处理。

## 3 结果与分析

### 3.1 GRACE 计算结果

图 2 给出了使用 GRACE 卫星数据计算得到明古鲁  $M_w 8.4$  地震前后 12 个月不同重力梯度变量的重力梯度均值变化。从图中可以看到, 在震中两侧重力梯度变量均具有非常显著的正、负的变化。各梯度分量重力变化的极大值、极小值也均出现在震中两侧附近。从图 2d ~ f 中, 还能观测到较明显的高斯滤波未消除的南北异常条带噪声。若消除异常条带噪声, 这将极大地减弱地球的物理信号, 从而使空间分辨率下降, 干扰滤波分析, 因此本文后续未作进一步的滤波处理。

### 3.2 位错模型正演结果

为了与 GRACE 卫星数据计算结果进行比较分析, 本文使用黏弹性半空间层状位错模型进行正演计算, 得到了明古鲁  $M_w 8.4$  地震的同震重力梯度变化分布 (图 3)。由图 3 可知, 在断层的上盘

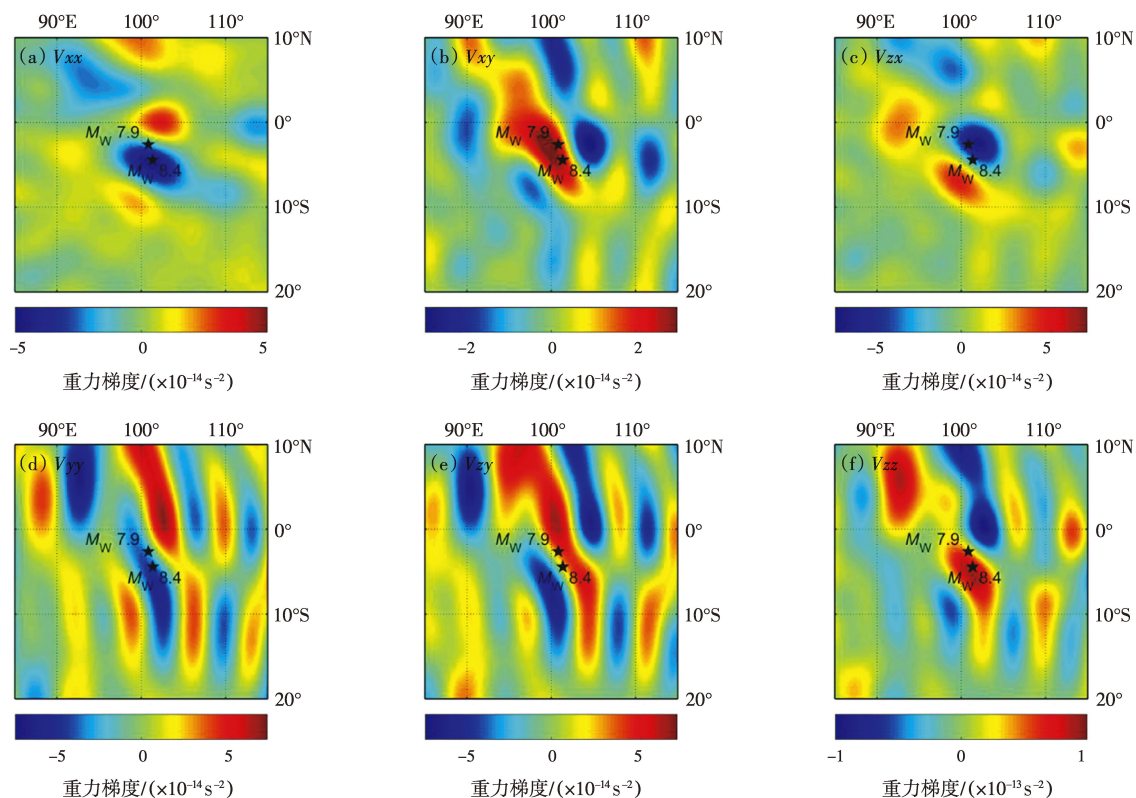


图2 用 GRACE 卫星数据计算得到的重力梯度变化空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the data signals of gradient variables calculated by GRACE satellite data

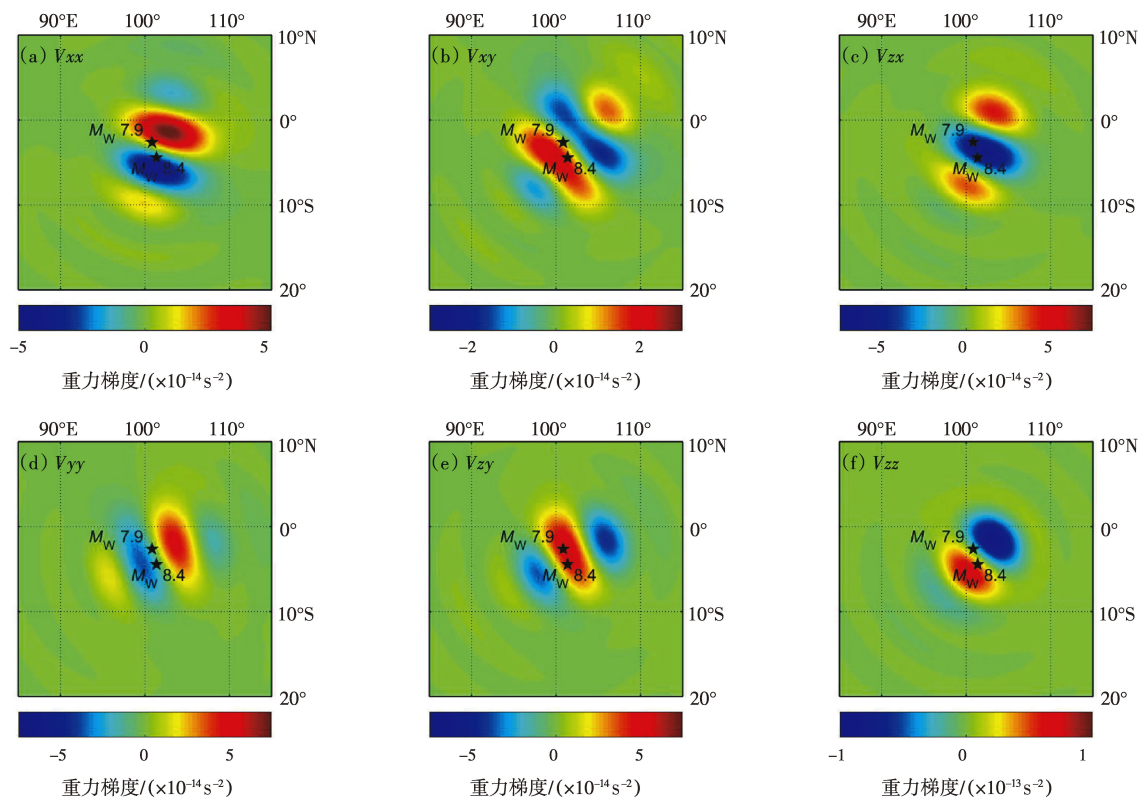


图3 用位错模型正演得到的重力梯度变化空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the data signals of the gradient variables by the forward modeling of the dislocation model

隆起带中,各重力梯度变量存在正向变化,观测到的重力梯度有显著升高的迹象,而在断层的上盘俯冲带存在重力负极值区。

3.3 比较与分析

图 4 给出了基于 GRACE 卫星数据和位错模型的重力梯度变化差值分布。根据图 4 可知,6 个梯度变量的重力梯度差值都在同一量级且数值都较小。总体看,正、负重力梯度差异的空间分布范围类似,这表明 GRACE 卫星能够探测到地震重力

梯度信号,但在具体数值上,用 GRACE 卫星探测得到的重力梯度变化与用位错模型的正演计算结果有一定差别。需要说明的是,高斯滤波半径的选择,会影响梯度变量南北条带噪声的削弱情况,如果适当增大滤波半径,可以进一步消除异常条带,但会严重削弱地球真实物理信号,从而导致空间分辨率降低,不利于滤波分析。本文选用的滤波半径为 300 km,导致  $V_{yy}$ 、 $V_{zy}$ 、 $V_{zz}$  梯度变量差值存在南北条带噪声。

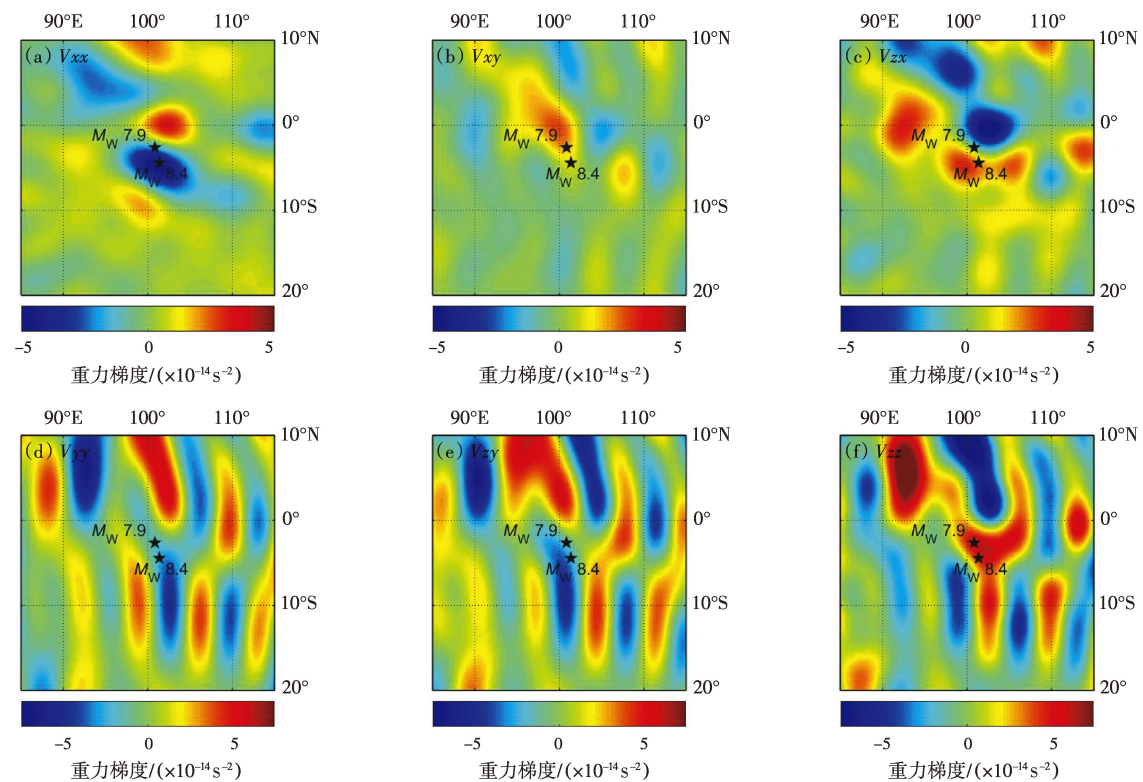


图 4 基于 GRACE 卫星数据和位错模型的重力梯度变化差值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the difference of coseismic gravity gradient variations between GRACE satellite data and the dislocation model

表 2 基于 GRACE 卫星数据和位错模型的重力梯度最大值、最小值、均值、标准差及差值

Tab. 2 Maximum value, minimum value, average value, standard deviation and difference of forward results of gradient variables based on the GRACE satellite data and the dislocation model

变量	最大值/( $\times 10^{-14} \text{ s}^{-2}$ )			最小值/( $\times 10^{-14} \text{ s}^{-2}$ )			均值/( $\times 10^{-16} \text{ s}^{-2}$ )			标准差/( $\times 10^{-14} \text{ s}^{-2}$ )		
	GRACE	位错模型	差值	GRACE	位错模型	差值	GRACE	位错模型	差值	GRACE	位错模型	差值
$V_{xx}$	3.4	5.0	-1.7	-4.8	-4.2	0.57	-1.8	1.9	-3.7	0.1	0.85	0.20
$V_{xy}$	3.3	2.3	0.99	-3.0	-1.9	-1.1	-8.2	0.32	-8.5	0.86	0.47	0.39
$V_{yy}$	6.5	4.5	2.2	-6.4	-3.5	-2.9	6.7	1.7	5.0	2.2	0.77	1.4
$V_{xz}$	4.6	4.2	0.43	-6.8	-6.2	-0.52	5.6	-0.12	-52.4	1.4	0.99	0.38
$V_{zy}$	6.8	5.2	1.2	-6.5	-4.2	-2.3	8.4	-0.007	8.4	2.4	0.92	1.5
$V_{zz}$	9.4	7.3	2.1	-9.8	-9.5	-0.33	-97.8	-3.6	-1.3	2.8	1.4	1.5



表 2 为使用 GRACE 卫星数据和位错模型所得的各梯度变量的重力梯度最大值、最小值、标准差及差值。由表可知, 各梯度变量最大值和最小值的数量级基本一致, 差值在同一数量级或更小。进一步对这两种方法的处理结果进行相关性分析, 得到 GRACE 计算结果与位错模型正演结果的相关系数矩阵及相关性见表 3, 相关性随区域的变化如图 5 所示。

表 3 基于 GRACE 卫星数据和位错模型各梯度变量相关性

Tab. 3 Correlation between results of gradient variables by the GRACE satellite data and the dislocation model

变量	GRACE 和位错模型计算结果相关矩阵	相关性	变量	GRACE 和位错模型计算结果相关矩阵	相关性
$V_{xx}$	$\begin{bmatrix} 1.000 & 0.498 \\ 0.498 & 1.000 \end{bmatrix}$	实相关	$V_{xz}$	$\begin{bmatrix} 1.000 & 0.383 \\ 0.383 & 1.000 \end{bmatrix}$	实相关
$V_{xy}$	$\begin{bmatrix} 1.000 & 0.507 \\ 0.507 & 1.000 \end{bmatrix}$	显著相关	$V_{zy}$	$\begin{bmatrix} 1.000 & 0.400 \\ 0.400 & 1.000 \end{bmatrix}$	实相关
$V_{yy}$	$\begin{bmatrix} 1.000 & 0.496 \\ 0.496 & 1.000 \end{bmatrix}$	实相关	$V_{zz}$	$\begin{bmatrix} 1.000 & 0.415 \\ 0.415 & 1.000 \end{bmatrix}$	实相关

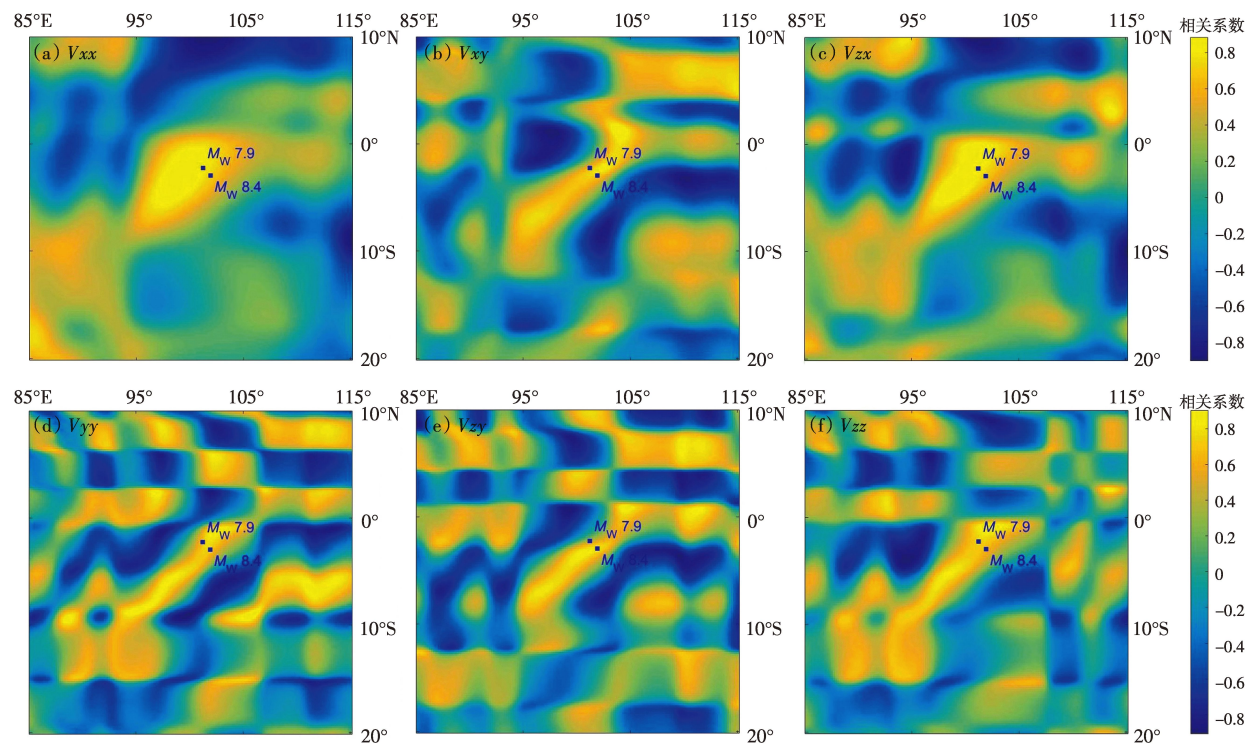


图 5 基于 GRACE 卫星数据和位错模型的重力梯度各梯度变量相关性空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the correlation between the gradient components based on GRACE satellite and dislocation model

根据皮尔逊设计的统计指标 (谢海花等, 2021; 陈天异, 2021) 可知, 相关系数 0.00 ~ ±0.30 是微相关, ±0.30 ~ ±0.50 是实相关, ±0.50 ~ ±0.80 是显著相关, ±0.80 ~ ±1.00 是高度相关。因此, 由于 GRACE 计算结果和位错模型正演结果的 6 个梯度变量相关系数为 0.38 ~ 0.51 (表 3), 可以确定两种方法处理地震数据的结果具有相关性, 且相关关系的密切程度较高。为衡量相同区域使用这两种方法得出的重力梯度之间的相关性, 计算各梯度变量之间的皮尔逊相关系数, 图 5 给出了两种方法各梯度变量相关性的区域分布, 在 (95° ~ 105°E, 0° ~ 10°S) 范围内相关性较高, 震中西南方向的海水域相关性效果比较好。为进一步探究距震中远近与相关性的关

系, 选取 ( $100^{\circ} \sim 102^{\circ} \text{E}$ ,  $2.4^{\circ} \sim 4.4^{\circ} \text{S}$ ) 为初始范围, 以  $1^{\circ}$  为步长向四周扩散, 对得到的 13 个形状相同大小不一的矩形进行相关性分析, 依次得到关于 GRACE 卫星数据和位错模型正演结果的各梯度变量的相关系数, 各梯度变量的相关系数随震中距的变化情况如图 6 所示。

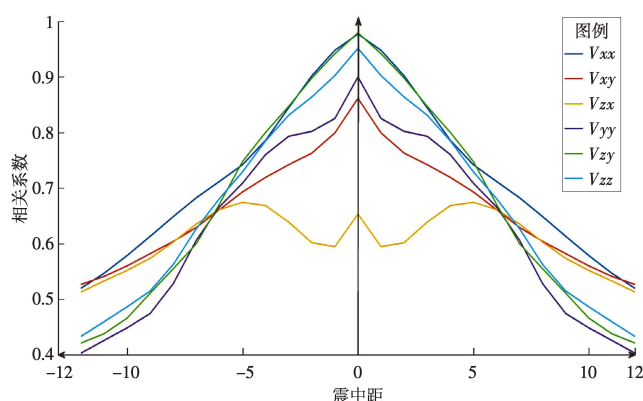


图 6 基于 GRACE 卫星数据与位错模型的各梯度变量的相关系数随震中距的变化

Fig. 6 Variation of the correlation coefficient between the gradient by the GRACE satellite data and the gradient by the dislocation model along with epicentral distance

以  $V_{xx}$  分量为例, 在包括了震中的初始区域范围中, 两种方法得到的各梯度变量相关性最大, 为 0.98。随着区域逐渐扩大, 相关系数值越来越小, 最终整个区域的相关系数约为 0.50。6 个梯度变量相关系数变化幅度较为接近, 除  $V_{zx}$  外, 其余分量均表现出距离震中越近的区域相关性越高的特点, 震中区域的相关性均在 0.8 之上;  $V_{zx}$  分量在震中区域相关性稍低, 但也高于 0.6。上述结果表明: GRACE 卫星数据探测结果与位错模型正演结果在震中区域具有强相关性, 能够用于地震的同震重力梯度变化研究。

## 4 结论

本文以 2007 年印尼明古鲁  $M_w 8.4$  地震为例, 对 GRACE 重力卫星在地震同震重力梯度变化中的探测效果进行了分析, 得出以下结论:

(1) 选取地震前后 12 个月数据为例, 基于 GRACE 卫星数据计算得到的重力梯度变化与位错模型正演所得同震重力梯度变化虽然在数值上存

在一定差异, 但在整体空间分布上较为类似; GRACE 卫星与位错模型所得数据基本保持在同一数量级, 两组数据为显著相关或实相关。

(2) 各梯度变量的区域相关系数, 在震中位置附近达到最大值, 随着震中距增大, 相关系数逐渐降低。

需要说明的是, 虽然本文中 GRACE 卫星对于震中位置的重力梯度提取效果较好, 而对于较大范围的重力梯度变化探测, 卫星重力产品的精度有待进一步提高。另一方面, 受制于震级大小、发震类型以及发震地点的不同, GRACE 卫星对于同震或震后变化的探测也会有差异, 因此对于其它地震重力梯度变化以及震中位置的探测均有待进一步研究。

## 参考文献:

- 陈天昇. 2021. 试验工作中统计学知识的应用[J]. 市政技术, 39(12): 118-123.
- 付广裕, 金红林, 王灼华, 等. 2018. 汶川  $M_w 7.9$  地震周边地区布格重力异常与岩石圈垂向构造应力场[J]. 地震, 38(2): 28-36.
- 郭飞霄, 孙中苗, 任飞龙, 等. 2020. GRACE RL06 与 RL05 时变重力场模型数据初步比较分析[J]. 大地测量与地球动力学, 40(5): 546-550.
- 姜永涛, 张永志, 王帅, 等. 2015. 智利  $M_w 8.8$  地震同震重力梯度变化[J]. 地震地磁观测与研究, 36(1): 60-64.
- 谢海花, 马晓飞, 赵月平, 等. 2021. 基于回归预测的公路施工扬尘扩散预测[J]. 公路, 66(5): 89-92.
- 张赤军. 1999. 用地形数据确定重力异常垂直梯度[J]. 科学通报, 44(6): 656-661.
- 郑增记, 金双根, 范丽红. 2019. 利用 GRACE 重力力和重力梯度变化估计 2012 年苏门答腊地震断层参数[J]. 地球物理学报, 62(11): 4129-4141.
- 邹正波. 2016. 利用 GRACE 卫星重力场研究地震重力变化[D]. 武汉: 武汉大学.
- Wolfgang T. 重力测量学[M]. 徐菊生译. 1993. 北京: 地震出版社.
- Bassin C, Laske G, Masters G. 2000. The current limits of resolution for surface wave tomography in North America, Eos Trans[J]. AGU, 81: F897.
- Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. 2007. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 34(13): 173-180.
- Dai C, Shum C K, Guo J, et al. 2016. Improved source parameter constraints for five undersea earthquakes from north component of GRACE gravity and gravity gradient change measurements[J]. Earth and Planetary Science Letters, 443: 118-128.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(2): 1018-1040.

- Rahimi A, Li J, Raoofian N M, *et al.* 2018. On the extraction of co-seismic signal for the Kuril Island earthquakes using GRACE observations [J]. *Geophysical Journal International*, 215(1): 346–362.
- Steketee J A. 1958. On volta's dislocations in a semi-infinite elastic medium[J]. *Canadian Journal of Physics*, 36(2): 192–205.
- Sun W, Okubo S, Fu G, *et al.* 2010. General formulations of global co-seismic deformations caused by an arbitrary dislocation in a spherically symmetric earth model-applicable to deformed earth surface and space-fixed point[J]. *Geophysical Journal International*, 177(3): 817–833.
- Wahr J, Molenaar M, Bryan F. 1998. 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*, 103(B12): 30205–30229.
- Wahr J, Wingham D, Bentley C. 2000. A method of combining ICESat and GRACE Satellite data to constrain Antarctic mass balance[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B7): 16279–16294.
- Wang L, Shum C K, Christopher J. 2012. Gravitational gradient changes following the 2004 December 26 Sumatra-Andaman Earthquake inferred from GRACE[J]. *Geophysical Journal International*, 191(3): 1109–1118.
- Wang R, Lorenzo – Martín F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory [J]. *Computers & Geosciences*, 32(4): 527–541.

## Comparative Analysis of the Coseismic Gravity Gradient Signals of the 2007 Bengkulu, Indonesia $M_w$ 8.4 Earthquake Based on GRACE Satellite Data and the Dislocation Model

LI Jing<sup>1</sup>, WAN Xiaoyun<sup>1</sup>, XU Ming<sup>1,2</sup>

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

(2. National Engineering Research Center for Gas Hydrate Exploration and Development, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511466, Guangdong, China)

### Abstract

To assess the feasibility of the time-variable gravity field data provided by GRACE satellite in detection of the coseismic gravity gradient changes, the gravity gradient changes in 12 months before and after the 2007 Bengkulu, Indonesia  $M_w$  8.4 earthquake in the epicenter and its vicinity are calculated by GRACE satellite data. The theoretical values of coseismic gravity gradient changes are calculated by the forward of the dislocation model, and then compared with the GRACE results. At the level of the order of magnitude, the GRACE results are consistent with the results from the forward of the dislocation model, though the specific values are a little different. Correlation analysis shows that the closer to the epicenter, the higher the correlation of the gradient values obtained by the two methods are, and the correlation in the epicentral area are over 90%.

**Keywords:** GRACE; the dislocation model; gravity gradient; the Bengkulu, Indonesia  $M_w$  8.4 earthquake