

邹正波, 李辉, 吴云龙, 康开轩, 吴桂桔. 2016. 日本 $M_w 9.0$ 地震震区及其周缘 2002—2015 年卫星重力变化时空特征. 地震学报, 38(3): 417–428. doi:10.11939/jass.2016.03.009.

Zou Z B, Li H, Wu Y L, Kang K X, Wu G J. 2016. Spatial and temporal characteristics of long-term satellite gravity change in the epicenter of $M_w 9.0$ Japan earthquake and its surrounding regions. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 417–428. doi:10.11939/jass.2016.03.009.

日本 $M_w 9.0$ 地震震区及其周缘 2002—2015 年卫星重力变化时空特征^{*}

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

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室)

2) 中国武汉 430079 武汉大学测绘学院

摘要 本文在考虑全球陆面数据同化系统陆地水储量变化影响后, 利用 2002 年 4 月—2015 年 4 月 GRACE 卫星 RL05 月重力场模型获取了 2011 年日本 $M_w 9.0$ 地震震中及其周边区域的重力场信息; 然后给出了日本及其周边 2003—2015 年的年度累积重力变化和差分重力变化, 并且利用经验正态函数方法深入分析了该地震过程中同震重力变化对区域重力场的贡献. 结果显示: 日本 $M_w 9.0$ 地震前研究区域出现了幅值高达 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的异常重力变化, 其同震效应的时间和空间特征均出现在第一模态, 且同震重力变化和震后区域重力场变化特征显著, 这充分表明该地震对区域重力场的影响显著.

关键词 GRACE 重力变化 经验正交函数(EOF) 日本 $M_w 9.0$ 地震

doi:10.11939/jass.2016.03.009 中图分类号: P315.72⁺6 文献标志码: A

Spatial and temporal characteristics of long-term satellite gravity change in the epicenter of $M_w 9.0$ Japan earthquake and its surrounding regions

Zou Zhengbo^{1,2)} Li Hui^{1,†} Wu Yunlong¹⁾ Kang Kaixuan¹⁾ Wu Guiju¹⁾

1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, Wuhan 430071, China

2) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Considering the contribution of terrestrial water storage from global land data assimilation system to gravity changes, we use the temporal gravity field models of GRACE from April 2002 to April 2015 to calculate regional gravity changes in the epicenter of $M_w 9.0$ Japan earthquake and its surrounding regions. Then we present annual accumulated gravity changes, differential gravity changes and co-seismic gravity changes in the $M_w 9.0$ source region and its surrounding regions. Meanwhile empirical orthogonal function method is

* 基金项目 中国地震局地震行业科研专项(201308009, IS201116022, IS201326126)、国家自然科学基金(4143000136, 41304018, 40704009)和中国地震局地震科技星火计划(XH14036)共同资助。

收稿日期 2015-10-23 收到初稿, 2016-01-25 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: lihuieq@163.com



applied to study the contribution of the earthquake to regional gravity changes. The results show that GRACE is able to reveal the evolution of regional gravity field accompanied with the $M_w9.0$ earthquake, the gravity changes reached about $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ in the studied area three years before the $M_w9.0$ earthquake. Furthermore, the change in coseismic gravity and post-seismic regional gravity field are significant. The results from empirical orthogonal function method indicate that the coseismic effect with temporal and spatial gravity characteristics are presented in the first mode, which fully demonstrates that the Japan earthquake had significant influence on the regional gravity field.

Key words: GRACE; gravity change; empirical orthogonal function; $M_w9.0$ Japan earthquake

引言

地震通过能量释放及地球内部与表面的永久形变和渐变形变，能够引起重力场数千千米的空间变化以及数秒至几十年的时间变化(Han *et al*, 2013)，美德合作的 GRACE (gravity recovery and climate experiment) 重力卫星可以观测到巨大地震的重力场时间和空间变化。该卫星通过十余年高低跟踪与低低跟踪技术组合观测，为科学界提供了长期近连续的高精度时变地球重力场信息，为研究大型板块运动及其对地震孕育发生的影响提供了重要的科学观测依据，为研究地震过程中重力场的时间和空间演化奠定了基础。

目前相关研究已表明，GRACE 卫星能够探测到大地震前重力场的时空变化，已观测到 2004 年苏门达腊 $M_w9.3$ 和 2011 年日本 $M_w9.0$ 等地震的同震重力变化(Han *et al*, 2011; Zhou *et al*, 2012; 邹正波等, 2013; 张克亮等, 2014)。2011 年日本 $M_w9.0$ 地震发生在日本海沟底部，与太平洋板块、北美板块和欧亚板块构造活动密切相关；而且该震震级大，处于中国大陆边缘构造带上，对中国大陆地震活动的影响深远。

经验正交函数方法早期主要应用于气象气候和海洋学，后逐渐扩展至地磁、重力等领域。De Viron 等(2008)首次将该方法应用于卫星重力地震研究领域，给出了 GRACE 卫星在现有精度下对地震的探测能力；Schmeier 等(2012)利用该方法从 GRACE 月重力场中定量地分离出海洋、大气及陆地水对地球质量变化的贡献；周江存等(2013)利用该方法对日本 $M_w9.0$ 地震进行了研究，但是由于当时仅有震后两个月的资料(2008 年 1 月—2011 年 5 月)，未能提取出同震跳变以及与模型相对应的沿断层两侧的正负重力变化；张克亮等(2014)基于 2003 年 1 月—2013 年 6 月的 GRACE 数据采用最小二乘法和经验正交函数方法，提取了日本 $M_w9.0$ 地震震区及其周边的同震变化特征，并对其进行了重点分析，但未将陆地水储量变化这一对非构造重力变化影响较大的因素考虑在内。

本文将在前人研究的基础上，选取更长时段(2002 年 4 月—2015 年 4 月)的卫星资料，在充分考虑陆地水储量变化影响后，对日本 $M_w9.0$ 地震震中及其周边地区的时变重力场进行计算分析，给出区域长期累计重力变化和差分重力变化结果，并利用经验正交函数对区域重力场进行时空分离，以综合分析该地震震前孕震、同震释放和震后调整对该区域的影响以及该地震对重力场变化的贡献，从而探查日本地震重力场演变的时间和空间特征。

1 数据

1.1 GRACE 卫星时变重力场模型数据

GRACE 卫星自 2002 年 3 月 17 日发射以来, 不断对外发布产品, 其中应用最广泛的是月尺度球谐系数组成的重力场模型, 即月重力场模型。本文采用美国德克萨斯大学空间研究中心发布的 RL05 月重力场模型, 该模型在处理过程中已扣除固体潮、极潮、大气、海洋等因素的影响。选取 2002 年 4 月—2015 年 4 月 GRACE 重力场模型对重力时空信号进行分析, 其中 2003 年 6 月、2011 年 1 月和 6 月、2012 年 5 月和 10 月、2013 年 3 月和 8—9 月因缺乏关键有效载荷数据而无模型, 另外地震发生时段 2011 年 3 月的数据也一并剔除。根据产品说明将模型中的 C_{20} 替换为美国德克萨斯大学空间研究中心发布的由卫星激光测距数据计算所得到的 C_{20} 。

1.2 全球陆面数据同化系统陆地水数据

全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, 简写为 GLDAS)是由美国宇航局利用近实时地空观测系统数据约束陆地表面的状态, 采用数据同化技术, 提取陆地表面状态及流量变量(如等效雪水、土壤水湿度、总植冠水、降雨、降雪、蒸发、径流等)的全球水文模型之一, 其对外发布的陆地水模型最大时间分辨率为 3 小时, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Rodell *et al*, 2004)。GRACE 卫星信号中的陆地水储量变化对总质量变化的影响显著, 利用 GLDAS 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 月尺度产品可有效提取陆地水储量变化(包括土壤水湿度、雪水储量和植冠表面水储量)的影响, 有助于分析 GRACE 结果中构造因素对重力场的影响。

2 重力时变信号提取

2.1 重力变化参数选取

重力变化可用重力扰动 δg 和重力异常 Δg 来表示。前者为任意点 P 的实测重力值 g_P 与该点正常重力值 γ_P 之差, 即 $\delta g = g_P - \gamma_P$; 后者为 P 点的实测重力 g_P 与该点对应的正常椭球面上 Q 点的正常重力值 γ_Q 之差, 即 $\Delta g = g_P - \gamma_Q$ 。两者之间存在如下关系(Hofmann-Wellenhof, Moritz, 2005):

$$\Delta g = \delta g - \frac{2}{R} T = \delta g - \frac{2\gamma_0}{R} N_{PQ}, \quad (1)$$

其球谐表达式分别为

$$\delta g = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^{\infty} (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [\Delta \bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \Delta \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)] \bar{P}_{nm}(\cos\theta), \quad (2)$$

$$\Delta g = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^{\infty} (n-1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [\Delta \bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \Delta \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)] \bar{P}_{nm}(\cos\theta), \quad (3)$$

式中, G 为万有引力常数, M 为地球质量, a 为地球平均半径, n 和 m 分别为地球重力场模型的阶和次, r 为该点到地球质心的距离, N_{PQ} 为 P 点与 Q 点之间的距离, λ 为经度, θ 为余纬, \bar{P}_{nm} 为规格化勒让德函数, $\Delta \bar{C}_{nm}$ 和 $\Delta \bar{S}_{nm}$ 为真实重力场与正常重力场的完全规格化球谐系数之差。

考虑到重力扰动表征的是测点自身的重力观测值与该点的正常重力之差, 易于与其它观测资料如断层模型模拟的重力变化比较。由式(1)—(3)可以看出, 重力扰动与重力异常

相比存在一个 $(n+1)/(n-1)$ 的比例因子，且该值越大，越容易从卫星微小信号中提取异常变化，故本文选取重力扰动这一参数来表征重力时变特征。

2.2 GRACE 重力时变信号提取

为有效减小重力变化中明显的非地球物理信号性南北向异常条带的影响，避免去相关处理所造成的误差，本文采用扇形滤波技术(Zhang *et al*, 2009)来处理异常条带，并选取统一基准作为背景场，计算 GRACE 月重力扰动 δg_{Gm} 为

$$\begin{aligned} \delta g_{\text{Gm}} = & \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2} (n+1) \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} W_n(r_{\text{fan}}) \times \\ & \sum_{m=0}^n W_m(r_{\text{fan}}) [\Delta \bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \Delta \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)] \bar{P}_{nm}(\cos\theta), \end{aligned} \quad (4)$$

式中， W 为高斯滤波， r_{fan} 为扇形滤波的平滑半径。

本文选取 GRACE 平均月重力场模型作为背景场，利用式(4)计算其重力变化 δg_{Gm} ，由此得到便于解释的 GRACE 重力变化 $d g_{\text{GRACE}}$ 为

$$d g_{\text{GRACE}} = \delta g_{\text{Gm}} - \delta g_{\text{Gb}}. \quad (5)$$

2.3 GLDAS 陆地水重力时变信号提取

陆地水储量变化是 GRACE 信号中最重要的非构造因素之一，可利用模型定量地研究其与地震相关的重力变化。本文利用 GLDAS 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 产品，综合土壤水湿度、雪水储量和植被表面水储量等提取陆地水储量。由于任意三维函数均可用球函数表示(郭俊义, 1994)，因此由陆地水储量变化可得到与之对应的球谐系数(Wahr *et al*, 1998)

$$\begin{bmatrix} \bar{C}_{nm}^{\text{GLDAS}} \\ \bar{S}_{nm}^{\text{GLDAS}} \end{bmatrix} = \frac{3}{4\pi a \rho_w} \int \int \frac{1+k_n}{2n+1} \begin{bmatrix} \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \cos(m\lambda) \\ \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \sin(m\lambda) \end{bmatrix} \Delta\sigma(\theta, \lambda) \sin\theta d\theta d\lambda, \quad (6)$$

其中， ρ_w 为水密度， k_n 为复合勒夫数， $\Delta\sigma(\theta, \lambda)$ 为网格点的陆地水储量， $\bar{C}_{nm}^{\text{GLDAS}}$ 和 $\bar{S}_{nm}^{\text{GLDAS}}$ 均为基于 GLDAS 模型得到的球谐系数。

将解算得到的球谐系数代入式(4)—(5)即可得到相应的由陆地水储量变化引起的重力变化。与 $1^\circ \times 1^\circ$ 水文模型对应的重力场模型球谐系数最大阶次为 180，而 GRACE 重力场模型对应的最大阶次为 60，其分辨率为 $3^\circ \times 3^\circ$ 。为便于与 GRACE 结果比较，本文选取 60 阶次的球谐系数进行计算和后续讨论。

以 2011 年 3 月的 GLDAS 陆地水储量变化向重力变化转化为例，给出利用 GLDAS 提取重力变化信号的过程。首先，对原始信号(图 1a)利用式(6)进行球谐处理，结合式(2)得到等空间分辨率的重力信号(图 1b)；然后，对球谐系数 60 阶截断后，利用式(2)取得与 GRACE 结果空间分辨率相当的重力信号(图 1c)；最后，在此基础上利用 300 km 扇形滤波[式(4)]处理后得到可以与 GRACE 结果比较的重力信号(图 1d)。比较图 1a–c 与图 1d 可知，GLDAS 数据处理虽然使原始信号的振幅减小，空间分辨率降低；但仍能有效地捕捉到高频信号的影响，为更好地分析 GRACE 重力变化的原因提供了有力的支持。

2.4 扣除陆地水储量影响的重力时变信号提取

利用 2.3 节所述方法提取与 GRACE 观测时间匹配的陆地水储量引起的重力变化 $d g_{\text{GLDAS}}$ ，结合 GRACE 卫星重力变化 $d g_{\text{GRACE}}$ ，可得到研究区域内非陆地水储量因素引起的重力变化 $d g = d g_{\text{GRACE}} - d g_{\text{GLDAS}}$ 。下面以 2011 年 3 月地震发生时的数据为例进行计算，以分析采用 GLDAS 数据对 GRACE 重力变化结果的影响。

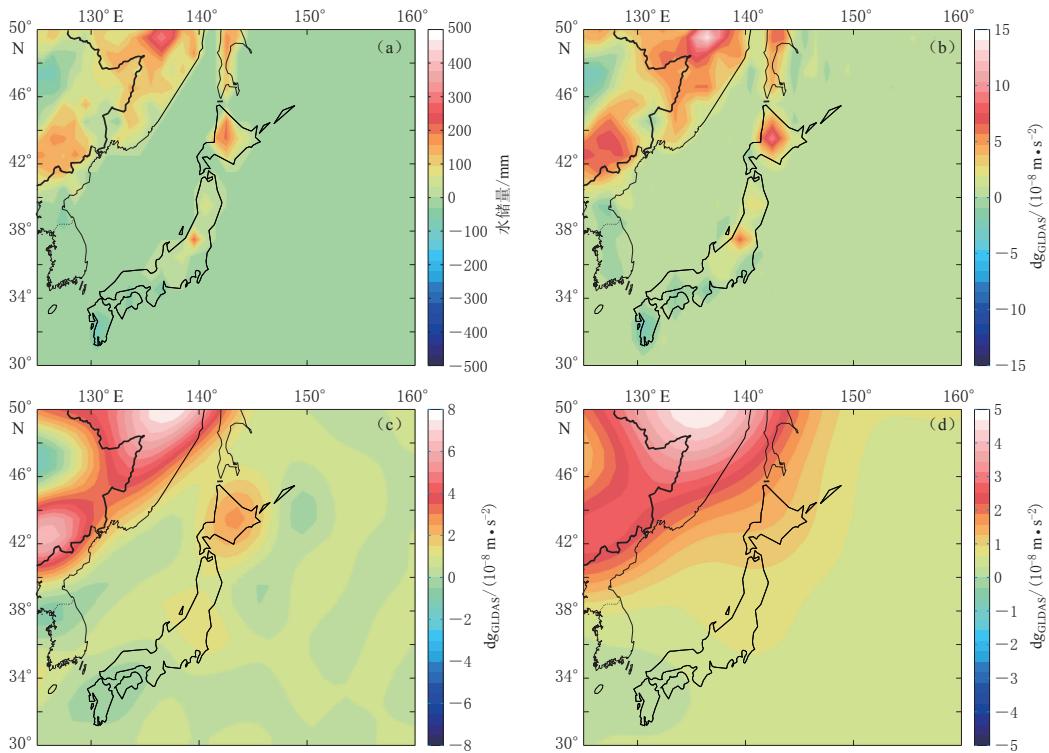


图 1 由 GLDAS 陆地水储量变化到重力变化(dg_{GLDAS})的转换过程处理

(a) GLDAS $1^\circ \times 1^\circ$ 陆地水储量; (b) 截断至 180 阶后的重力变化; (c) 截断至 60 阶后的重力变化; (d) 截断至 60 阶, 300 km 扇形滤波后的重力变化

Fig. 1 Process of conversion from variation of terrestrial water storage

to gravity change (dg_{GLDAS}) based on the GLDAS

(a) Terrestrial water storage with $1^\circ \times 1^\circ$ resolution; (b) Gravity changes with truncation at 180; (c) Gravity changes with truncation at 60; (d) Gravity changes with truncation at 60 and 300 km fan filter

图 2 给出了 2011 年 3 月由 GRACE 观测到的重力变化, 由陆地水储量引起的重力变化, 以及扣除陆地水储量变化这一非构造性因素影响得到的重力变化。可以看出: GRACE 卫星观测到震区两侧呈明显的正负异常, 日本海附近重力减少, 其变化幅值最大为 $-5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$; 震中东南局部重力增加, 增幅小于 $4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (图 2a); 而陆地水信号并未出现相关响应, 仅在中国东北及俄罗斯边界区域出现了重力增加 (图 2b); 扣除陆地水影响后, 在日本岛两侧出现了以“负一正”为主要特征的重力变化结果 (图 2c), 更有利于研究地震等构造因素对区域重力场的影响。

2.5 经验正交函数方法提取区域重力时空变化

经验正交函数(empirical orthogonal function, 简写为 EOF)方法, 也称为主分量分析方法, 是利用数学手段提取物理场主要特征的一种重要方法。该方法主要利用数据集的方差贡献来识别和强化信号的相似性, 通过将随时间变化的地球物理场分解为不随时间变化的空间部分和不随空间变化的时间部分, 从而有效实现时空信号的分离。

经验正交函数方法是通过对观测矩阵 \mathbf{Y} 进行分解实现的。 \mathbf{Y} 为扣除平均背景场后的重力场时空变化, 大小为 $n \times p$, 其中 n 为观测值的个数(即格网点数), p 为观测值的时间长度。对时空相关观测矩阵 \mathbf{Y} 进行经验正交函数分解, 使之满足

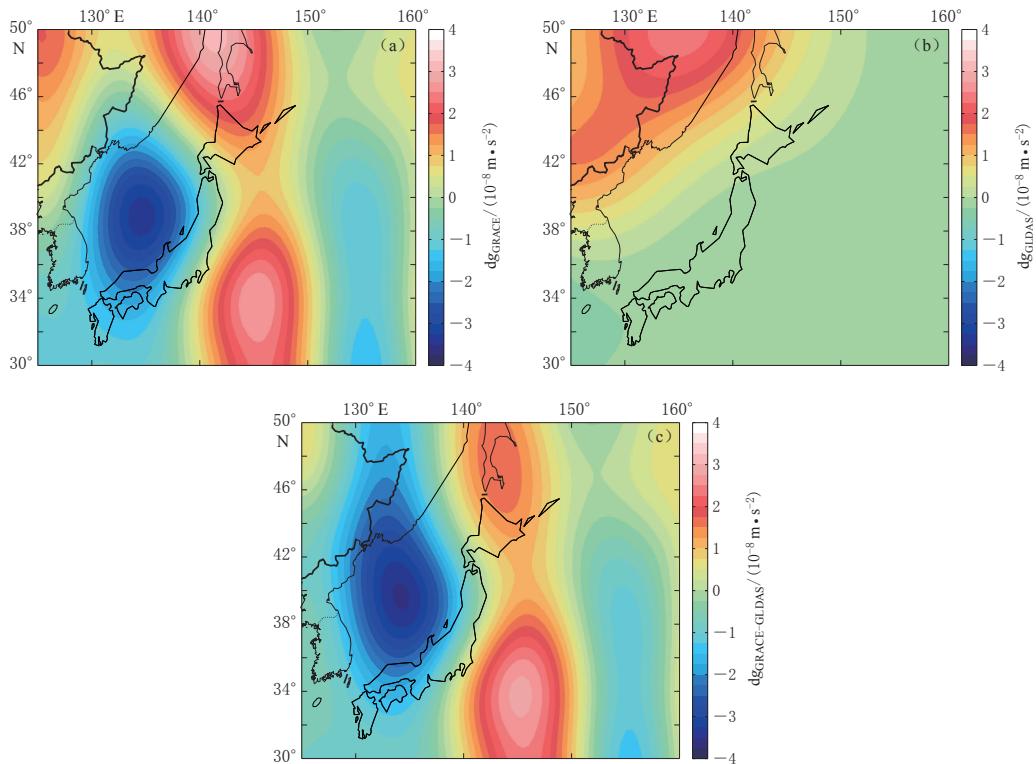


图 2 2011 年 3 月区域重力场变化

(a) GRACE 观测到的重力变化; (b) GLDAS 陆地水储量引起的重力变化;
 (c) GRACE 扣除 GLDAS 影响后的重力变化

Fig. 2 The regional gravity changes in March of 2011

(a) From GRACE; (b) From GLDAS; (c) From GRACE minus GLDAS

$$\mathbf{Y} = \mathbf{ED}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{E} 是由 \mathbf{Y} 的 $n \times n$ 信号协方差矩阵 $\mathbf{C} = \mathbf{YY}^T / p$ 的特征向量组成的矩阵; $\mathbf{C} = \mathbf{E}\Lambda\mathbf{E}'$, 其中 Λ 为包含 \mathbf{C} 矩阵 n 个特征值的对角矩阵, 且特征值按从大到小的顺序排列; $\mathbf{D} = \mathbf{E}^T\mathbf{Y}$ 与表征时间的主分量(时间系数)对应.

这样, 通过经验正交函数分解可将观测场 \mathbf{Y} 分离为不随时间变化的空间特征矩阵 \mathbf{E} 和不随空间变化的时间特征矩阵 \mathbf{D} . 因此, 经验正交函数分解可以理解为对矩阵 \mathbf{Y} 按照新的正交基(\mathbf{E})进行重新投影, 使之表征为空间函数与时间函数的线性组合.

3 累计重力变化和差分重力变化结果

通过 GRACE 卫星长期对地重复观测, 高效获取了全球地球重力场的时空变化, 为本文研究区域重力场模型的重力变化提供了可靠的资料. 然而 GRACE 观测到的重力变化是包括地震在内的多种地球物理过程的综合效应, 因此分析日本 $M_w 9.0$ 地震震中及其周边区域重力场时空变化特征时, 需认真分析各因素的影响. Matsuo 和 Heki(2011)认为研究区域陆地水的季节影响和年季水变化(主要是冬季雪)影响是除地震外的最重要因素, 因此本文利用 GLDAS 数据扣除上述两种因素的影响, 便于后续分析区域重力场与地震的

关系。

图 3 和图 4 分别给出了日本震区周边(30°N — 50°N , 125°E — 160°E)2003—2014 年扣除背景性周期性信号影响后的累积重力变化和差分重力变化。图中年度重力变化均基于当年 3 月至第二年 2 月的数据, 其中 2011 年重力变化扣除了地震发生月份(3 月)的数据。可以看出, 日本地震震区及其周边区域重力场变化的时空演变具有以下特征:

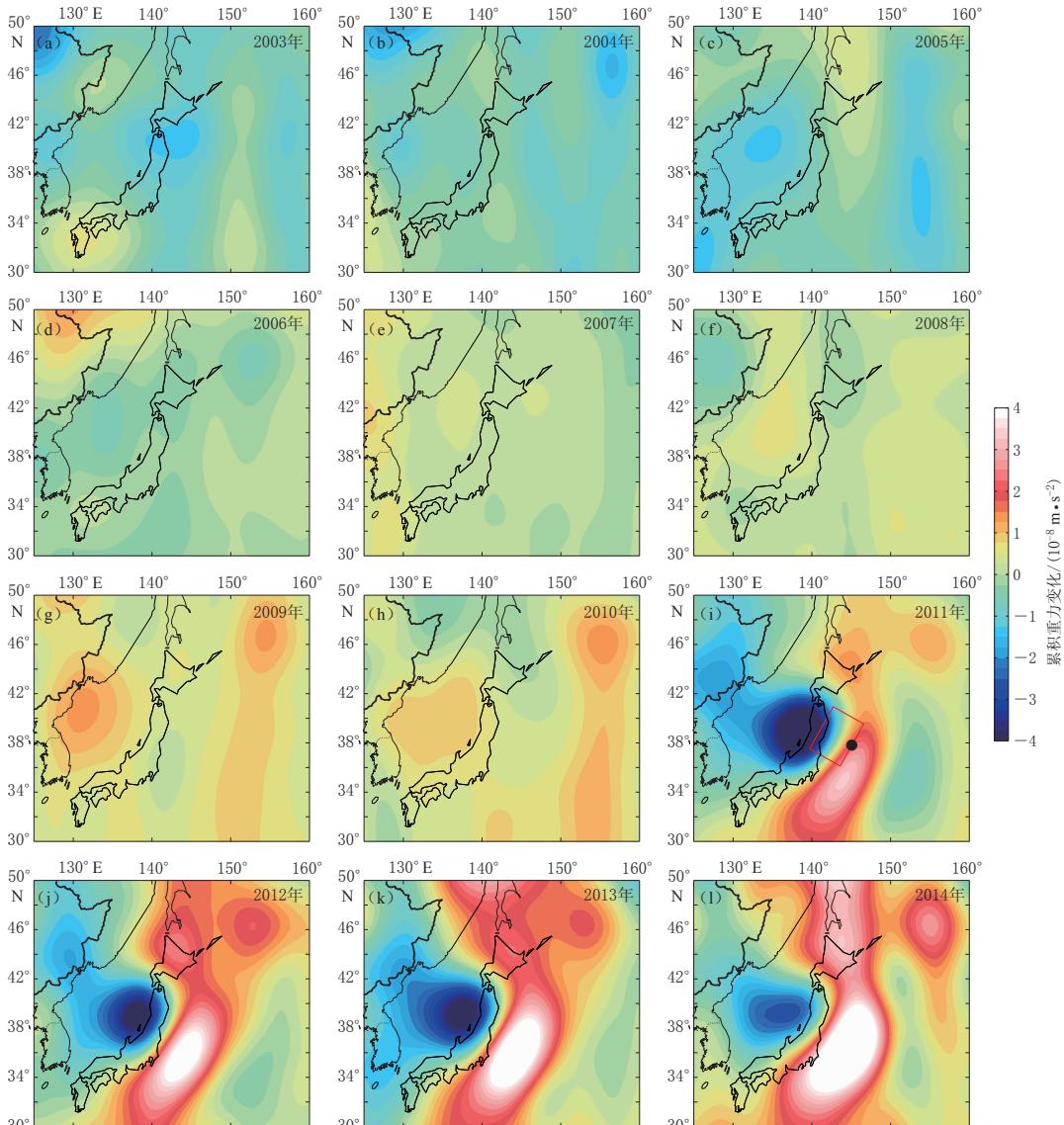


图 3 2003—2014 年日本地震震区及其周边区域地震前(a-h)、后(i-l)的累积重力变化
图中红色方框为断层边界, 黑色圆点为日本 $M_w 9.0$ 地震震中

Fig. 3 Accumulated gravity changes of the seismic zone and its surrounding areas from 2003 to 2014 before (a-h) and after (i-l) the $M_w 9.0$ Japan earthquake. Each panel presents the evolution of annual regional gravity changes. The red rectangle denotes the border of fault, and the dot denotes the epicenter of the $M_w 9.0$ Japan earthquake

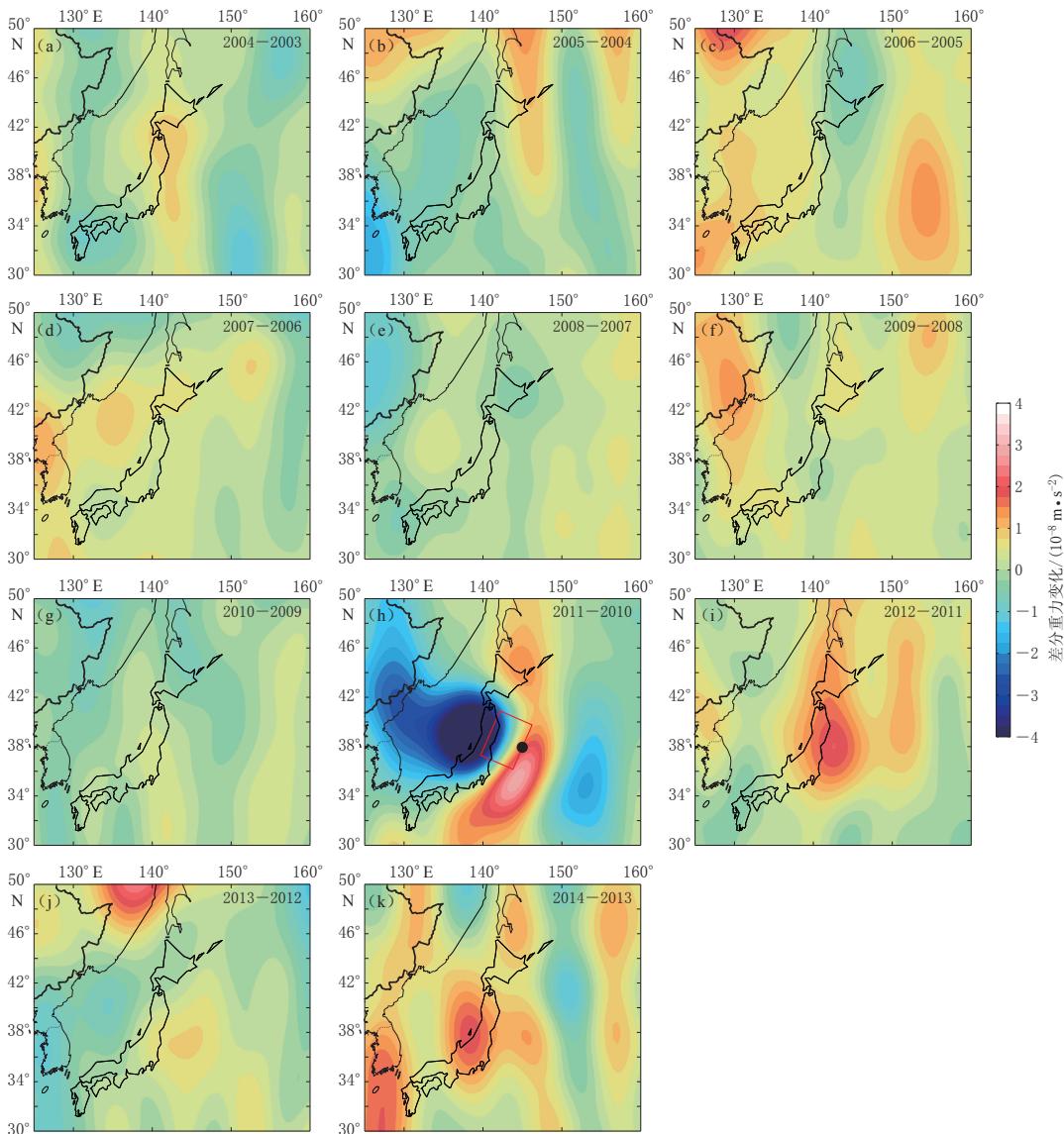


图 4 2003—2014 年日本地震震区及其周边区域的差分重力变化

(a)–(g) $M_w 9.0$ 地震震前差分重力变化; (h) 同震重力变化; (i)–(k) 震后差分重力变化

Fig. 4 Differential gravity change of the seismic zone of $M_w 9.0$ Japan earthquake and its surrounding area from 2003 to 2014

(a)–(g) Pre-seismic differential gravity change; (h) Coseismic gravity change;
(i)–(k) Post-seismic differential gravity change

1) 研究区域范围内的重力基本在 -1×10^{-8} — $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 内波动, 尤其是 2003—2008 年重力变化相对较小, 自 2009 年起重力变化出现高于 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的异常波动, 并持续增加。从累计重力变化(图 3)可以看出, 2011 年后重力变化基本被地震同震信号类似的特征控制, 而差分重力变化(图 4)也在 2011 年后呈现截然不同的特征。引起重力变化的原因一般与地球物理事件相关, 而 GRACE 重力变化主要源于陆地水储量和地下水的变化以及冰后回弹、板块运动、地震等; 本文中陆地水储量变化已经从结果中扣除, 日本及其

周边区域 2008—2011 年并未发生除 $M_w9.0$ 地震以外的重大事件 (Matsuo, Heki, 2011)，由此可推测区域重力场变化与板块运动及地震具有相关性。

2) 日本地震震源区及其周缘震前重力呈现异常变化，在累积重力变化结果中尤其明显。从 2009 年起中国东北、朝鲜半岛以东及日本海以西区域出现大范围的重力增加，2010 年重力增幅有所减弱，并向日本岛迁移，直至 2011 年发生日本 $M_w9.0$ 地震。

3) 日本 $M_w9.0$ 地震的同震效应对区域重力场影响显著。由 2003—2014 年累计变化结果(图 3)可以看出，该地震发生前后重力变化的空间分布特征存在显著差异，相对于震前，震后累积重力(图 3i-l)的空间分布与同震重力变化(图 4b)特征基本一致，说明区域重力场变化特征以 $M_w9.0$ 同震变化为主。从差分重力变化(图 4i-k)可以看出，震后震区重力开始增加，但增加幅度及位置有所差异。

4) 震后重力场出现明显调整。由 2012 年相对于 2011 年的震后重力差分结果(图 4i)及 2012 年累积重力变化(图 3j)可以看出，该地震所造成的断层以东区域重力负变化已经开始有所补偿，且持续至 2014 年(图 3l, 4k)，而在日本岛以西震中所在区域的重力仍在增加。

上述重力场变化特征均为研究日本 $M_w9.0$ 地震震后区域重力场调整及其动态演变过程提供了宝贵的观测证据，可用于后续黏滞系数等地球参数的反演。

4 经验正交函数方法提取的重力时间变化结果

针对 2002 年 4 月—2015 年 4 月 GRACE 卫星重力时变结果，选择不同的时间长度对卫星重力资料进行经验正交函数分解，形成 5 个方案。通过分析各方案的时变重力场空间分布特征，给出各主分量所表征的物理事件对区域重力场的贡献，以揭示 $M_w9.0$ 地震对区域重力场的影响。虽然经验正交函数方法在提取数据集主要信号方面具有优势，但其各主分量未必具有明确的物理含义，且对结果的物理解释需要相应的先验条件。本文研究区域的先验信息物理解释依据主要来源于：① 位错模型模拟的理论同震重力场变化 (Zhou et al., 2012; 邹正波等, 2013; 张克亮等, 2014)；② GRACE 观测到的区域时变重力场(图 3, 4)。此外，重力变化在时间分布上是否存在同震跳变以及在空间分布上是否存在与同震变化相似的特征，也是为经验正交函数结果提供合理物理解释的重要依据。

表 1 列出了不同方案的前 7 个主分量方差的贡献。可以看出：第一主分量的方差贡献百分比最大，基本为 27%—36%；第二主分量有所减少，为 16%—18%；第三主分量则为 10%—12%，因此前 3 个主分量的累计方差贡献达到 55%—72%，前两个主分量的累积方差贡献为 45%—52%。比较 5 套方案可知，5 种时间方案的方差贡献差异并不大，相对而言

表 1 不同方案的前 7 个主分量方差贡献

Table 1 Variance contribution of the first seven principle components for five schemes

方案	时段	各主分量方差贡献						
		第一 主分量	第二 主分量	第三 主分量	第四 主分量	第五 主分量	第六 主分量	第七 主分量
1	2002-04—2015-04	27%	18%	10%	9%	6%	5%	3%
2	2007-03—2015-03	34%	17%	12%	6%	5%	4%	3%
3	2008-03—2014-03	36%	17%	9%	6%	6%	4%	3%
4	2009-03—2013-03	34%	17%	11%	7%	6%	5%	3%
5	2010-03—2012-03	36%	16%	12%	7%	6%	5%	3%

最长时段的方案 1 信号相对不集中。虽然各方案选取的时间长度不同，但经验正交函数分解后的时空变化特征显示各主分量表征的物理含义基本相同，故本文选取时间相对较长的方案 2 即地震前后 4 年的数据进行分析。

4.1 重力场时间变化特征

通过分析各主分量(即时间系数)能够获取重力场随时间变化的规律。图 5 给出了方案 2(2007 年 3 月—2015 年 3 月)的重力场时间变化，可以看出：第一时间系数振幅最大，为 -80 — 100 ，存在显著的同震跳变，地震前后变化率差异显著；第二时间系数存在明显的周

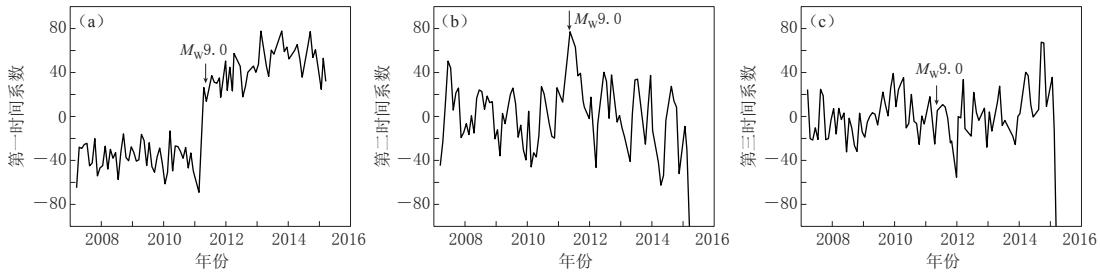


图 5 采用方案 2 所得到的研究区域前 3 个时间系数的时间变化

Fig. 5 The first three time coefficient variation of EOF for the scheme 2 in the studied area
(a) The first; (b) The second; (c) The third

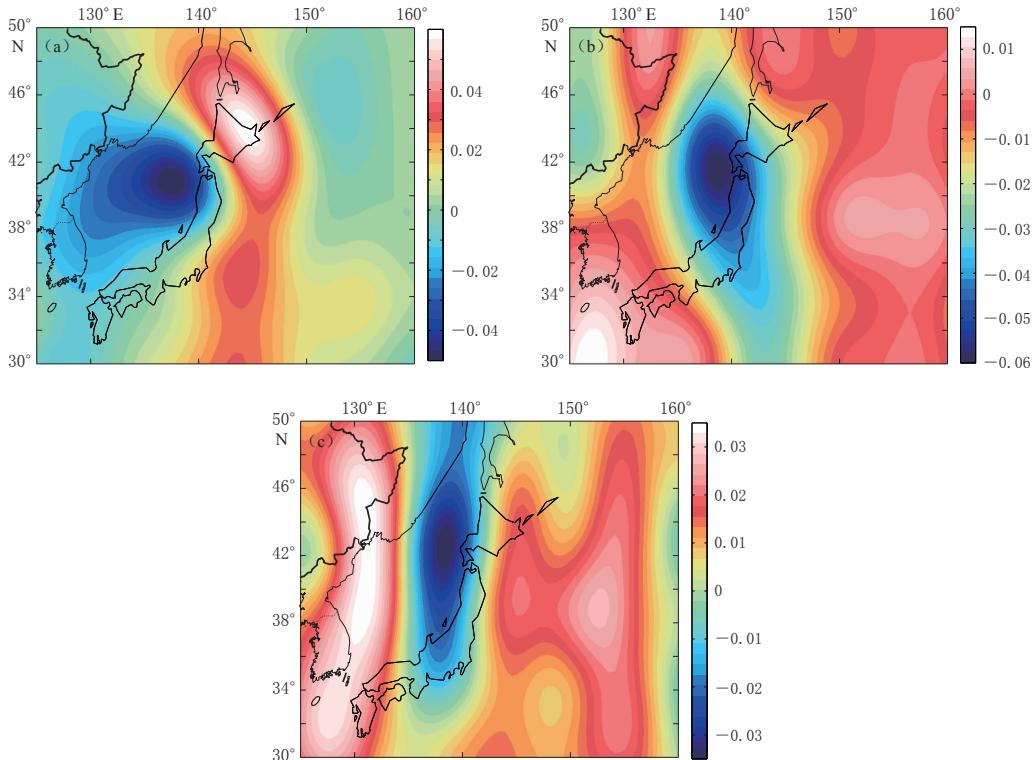


图 6 研究区域经验正交函数的前 3 个空间特征向量场
(a) 第一空间; (b) 第二空间; (c) 第三空间

Fig. 6 The first three spatial eigenvector fields of EOF in the studied area
(a) The first; (b) The second; (c) The third

期性变化特征，地震前后一年出现剧烈变化，震前增加，震后减小，发震时刻变化量达到最大；第三时间系数的幅值则较小，为 $-40\text{--}60$ ，仅 2015 年后期数据出现扰动。总体看来，日本地震前（2008 年下半年开始）时间系数出现明显的趋势性增加，震前一年（2010 年）该值减小，这与唐山地震前的重力变化情况相一致（李瑞浩，1997）。

4.2 重力场空间变化特征

图 6 给出了利用经验正交函数方法所得到的前 3 个主分量的空间特征场，可以看出：第一空间特征场（图 6a）区域几乎以发震断层为界分成东西两部分，日本海出现范围较小的重力场负变化，正变化区则相对较大；第二空间特征场（图 6b）显示研究区域重力场基本为负，说明重力场变化特征一致，即重力均增加或减小，结合图 3 和图 4，可知其变化与震前（日本岛以东）、震后（集中在本州岛及周边）的重力异常变化密不可分；第三空间特征场（图 6c）的空间分布呈正—负—正—负的特点，震区最东侧正变化依然显著，说明该特征场仍然可能包含同震及震前信号，且出现了一定的南北向条带异常，证实了经验正交方法也可以扣除 GRACE 的噪声，即将南北向条带异常留在相对贡献较小的第三分量。

5 讨论与结论

基于 2002 年 4 月—2015 年 4 月 GRACE 卫星的长期重力变化资料，扣除全球陆面数据同化系统陆地水储量变化的影响，得到了日本 $M_w 9.0$ 地震震区及其周边的累积重力变化和差分重力变化。利用经验正交函数方法从海量时空数据中有效地分离出时间空间信号的物理意义不明确的特征，以位错模型模拟所得的同震信号及区域累积重力变化和差分重力变化作为先验信息，获取了区域重力场的空间和时间演变特征。

基于经验正交函数方法的区域重力场结果显示，重力时空变化的第一主分量与日本 $M_w 9.0$ 地震的同震重力变化相关性强，即时间系数第一主分量变化幅度大且出现同震跳变，空间场第一主分量出现与理论模拟结果类似的近垂直断层方向的由负到正的重力变化。这说明日本地震对该区域重力变化信号的贡献显著，其在 GRACE 卫星 2002—2015 年长达 13 年的观测结果中的贡献为 27%，在地震前后 1—4 年的重力场信号中其贡献更大，可达 34%—36%，充分体现了地震对区域重力场所造成的显著影响。

本研究进一步证实了日本地震在造成区域重力场变化的诸多因素（气象、水文及构造等）中起主导作用。但是，本文利用经验正交函数方法分析所得结果的前 3 个主分量仅能解释约 50% 的区域重力场信号，下一步将考虑利用旋转经验正交函数等方法使地震相关重力信号更加集中，以最少主分量提取最佳地震重力场时空变化信息。

感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- 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：114—115.
- Guo J Y. 1994. *Geophysics Basis*[M]. Wuhan: Wuhan University of Surveying and Mapping Press: 114—115 (in Chinese).
- 李瑞浩，黄建梁，李辉，陈冬生. 1997. 唐山地震前后区域重力场变化机制[J]. 地震学报, **19**(4): 399—407.
- Li R H, Huang J L, Li H, Chen D S. 1997. The mechanism of regional gravity variation before and after the Tangshan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **19**(4): 399—407 (in Chinese).
- 王武星，顾国华，陈石. 2014. 利用 GRACE 观测资料分析日本 $M_w 9.0$ 地震前区域重力变化特征[J]. 地震地质,

- 36(2): 523–535.
- Wang W X, Gu G H, Chen S. 2014. Study on regional gravity changes before the $M_w 9.0$ Japan earthquake detected by GRACE[J]. *Seismology and Geology*, **36**(2): 523–535 (in Chinese).
- 张克亮, 甘卫军, 周新. 2014. GRACE 卫星重力场同震变化的经验正交函数分解: 以日本 $M_w 9.0$ 地震为例[J]. 地震地质, **36**(3): 763–774.
- Zhang K L, Gan W J, Zhou X. 2014. Detection of coseismic changes of great earthquakes in GRACE time-variable gravity field with Empirical Orthogonal Functions: A case study of the $M_w 9.0$ Tohoku-Oki earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **36**(3): 763–774 (in Chinese).
- 周江存, 孙和平, 徐建桥. 2013. EOF 方法检测 GRACE 卫星重力结果中的同震重力变化[J]. 大地测量与地球动力学, **33**(3): 25–29.
- Zhou J C, Sun H P, XU J Q. 2013. Coseismic gravity signals detection from GRACE results by EOF method[J]. *Geodesy and Geodynamics*, **33**(3): 25–29 (in Chinese).
- 邹正波, 罗志才, 吴海波, 申重阳, 李辉. 2012. 日本 $M_w 9.0$ 地震前 GRACE 卫星重力变化[J]. 测绘学报, **41**(2): 171–176.
- Zou Z B, Luo Z C, Wu H B, Shen C Y, Li H. 2012. Gravity changes observed by GRACE before the Japan $M_w 9.0$ earthquake[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, **41**(2): 171–176 (in Chinese).
- 邹正波, 李辉, 吴云龙, 康开轩, 谈洪波. 2013. 日本 $M_w 9.0$ 地震大尺度重力变化结果分析[J]. 大地测量与地球动力学, **33**(5): 1–6.
- Zou Z B, Li H, Wu Y L, Kang K X, Tan H B. 2013. Analysis of large-scale gravity changes results of Tohoku-Oki $M_w 9.0$ earthquake[J]. *Geodesy and Geodynamics*, **33**(5): 1–6 (in Chinese).
- De Viron O, Panet I, Mikhailov V, Van Camp M, Diament M. 2008. Retrieving earthquake signature in GRACE gravity solutions[J]. *Geophys J Int*, **174**(1): 14–20.
- Han S C, Sauber J, Riva R. 2011. Contribution of satellite gravimetry to understanding seismic source processes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **38**(24): L24312.
- Han S C, Riva R, Sauber J, Okal E. 2013. Source parameter inversion for recent great earthquakes from a decade-long observation of global gravity fields[J]. *J Geophys Res*, **118**(3): 1240–1267.
- Hofmann-Wellenhof B, Moritz H. 2005. *Physical Geodesy*[M]. New York: Springer Verlag Wien; 252–253.
- Matsuo K, Heki K. 2011. Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from satellite gravimetry[J]. *Geophys Res Lett*, **38**(7): L00G12.
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, Gottschalek J, Mitchell K, Meng C J, Arsenault K, Cosgrove B, Radakovich J, Bosilovich M, Entin J K, Walker J P, Lohmann D, Toll D. 2004. The global land data assimilation system[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, **85**(3): 381–394.
- Schmeier M, Schmidt M, Bosch W, Seitz F. 2012. Separation of mass signals within GRACE monthly gravity field models by means of empirical orthogonal functions[J]. *J Geodynam*, **59/60**: 124–132.
- 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]. *J Geophys Res*, **103**(B12): 30205–30229.
- Zhang Z Z, Chao B F, Lu Y, Hsu H T. 2009. An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter[J]. *Geophys Res Lett*, **36**(17): L17311.
- Zhou X, Sun W K, Zhao B, Fu G Y, Dong J, Nie Z S. 2012. Geodetic observations detecting coseismic displacements and gravity changes caused by the $M_w = 9.0$ Tohoku-Oki earthquake[J]. *J Geophys Res*, **117**(B5): B05408.