

ZOU Zhengbo, LUO Zhicai, WU Haibo, et al. Gravity Changes Observed by GRACE before the Japan M_w 9.0 Earthquake [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2): 171-176. (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, 41(2): 171-176.)

日本 M_w 9.0 地震前 GRACE 卫星重力变化

邹正波^{1,2,3}, 罗志才¹, 吴海波², 申重阳^{2,3}, 李 辉^{2,3}

1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 中国地震局 地震研究所, 湖北 武汉 430071; 3. 地壳运动与地球观测实验室, 湖北 武汉 430071

Gravity Changes Observed by GRACE before the Japan M_w 9.0 Earthquake

ZOU Zhengbo^{1,2,3}, LUO Zhicai¹, WU Haibo², SHEN Chongyang^{2,3}, LI Hui^{2,3}

1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China; 3. Crustal Movement Laboratory, Wuhan 430071, China

Abstract : The decorrelation and Gaussian smoothing method is implemented in GRACE monthly gravity field products to obtain annual and seasonal gravity changes in Japan and its vicinity, as well as time series gravity changes of several points. Results show regional gravity fields in Japan and its vicinity varied from positively to negatively and from area to area in five years before the Japan M_w 9.0 earthquake, obviously positive to negative gravity changes were formed in 1~2 years. Time series gravity changes of several points indicate the Japan earthquake displayed the similar time variation gravity phenomenon with the 1976 Tangshan earthquake in China. These results reflect mass migration, mass movement and energy accumulation in Japan and its vicinity before the earthquake occurred.

Key words : GRACE; satellite gravity; gravity variation; Japan earthquake; time series

摘 要: 利用 GRACE 重力卫星月重力场数据, 通过去相关与高斯滤波等方法获取日本大地震震前震源区周缘年度、季度和年度差分重力变化, 以及若干点位时间序列重力变化。分析结果表明: 日本大地震前 5 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, 至震前 1~2 年, 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。点位重力时间序列分布指出日本 M_w 9.0 级地震前存在与 1976 年唐山地震类似的重力变化现象。反映出日本大地震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。

关键词: GRACE; 卫星重力; 重力变化; 日本地震; 时间序列

中图分类号: P227 文献标识码: A 文章编号: 1001-1595(2012)02-0171-06

基金项目: 地震行业科研专项(201008007); 国家自然科学基金青年科学基金项目(40704009; 41004030); 中国地震局地震研究所基金(IS201116022)

1 引 言

2011 年 3 月 11 日 14 时 46 分日本东北部海域发生 M_w 9.0 级地震, 美国地质调查局(USGS)发布的震源深度为 32 km。震中位于日本海沟底部, 在太平洋板块与北美板块俯冲带上, 发震断层破裂长度超过 300 km, 垂向位移达 30~40 m, 能量释放远超过 2008 年汶川地震, 地震及其引起的海啸对震中区附近造成了巨大破坏和人员伤亡。

巨大地震孕育和发生过程中在震源区附近会产生物质迁移和质量再分布, 重力场也随之变化, 这是重力观测手段用于地震监测的基本前提。多年来地球物理学家对此进行探索^[1], 以期获得重力变化与地震活动之间的关系, 并解释其物理意义。

前人研究已指出, 巨大地震震前或震时发震断层区会产生横向和垂向的位移和质量迁移, 垂向变化有时可达几米甚至几十米, 同震形变将产生局部重力场的突然变化, 地表观测表明这种变化比较显著^[2-3]。GRACE 重力卫星在 2002 年 3 月发射成功后, 提供了一种较高精度、高时间空间分辨率的空间对地重力观测方法, 其时变重力场更为人类感知地球内部物质迁移提供了手段。因此国内外均开展了大量利用 GRACE 获取时变重力场模型的工作, 目前 GRACE 有 3 个数据处理中心, 包括美国德州大学奥斯汀分校空间研究中心(UTCSR), 美国航空航天局喷气式实验室(NASA/JPL)及德国地学中心(GFZ), 提供长期的月重力场模型的研究, 并定期发布业务化数据

产品。国内也有众多学者对 GRACE 重力场模型恢复的理论和方法进行研究^[4-6],对重力卫星快速应用于地球科学起到促进作用。而针对巨大地震前后震源区附近局部重力场的变化的研究也随着时变重力场的获得手段改进而得到快速发展,现已发现在几次巨大地震后 GRACE 观测到了明显的同震重力变化。文献[7]于 2006 年利用 GRACE 数据首次探测到 2004 年苏门答腊 9.1 级地震的同震重力变化,其峰值达士 $15 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,学者也分析获得了与该地震相关的同震重力变化^[8-10]。2008 年汶川 8.0 级地震和 2010 年智利 8.8 级地震后,文献[11—13]也分析了 GRACE 探测到的地震相关的重力变化。

对于 GRACE 卫星探测重力变化能力,文献[14]指出其能探测到 M 9.0 级以上剪切型地震和 M 7.5 级以上张裂型地震。文献[15]认为在当前分辨率和精度下,GRACE 卫星探测 9.0 级以上地震的概率达 98%。两者均指明 GRACE 能够探测到巨大地震产生的局部重力变化。但大震的孕育发展是个相当长的复杂过程,除地震发生时的同震物质迁移和地壳形变外,地震前尤其是临震前 1~2 年内震源区附近是否也会产生较明显质量迁移及重力变化。分析这种前兆性变化对地震发震机理探索无疑十分重要。

本文旨在基于卫星重力方法研究日本大地震前震源区附近质量迁移及重力变化过程,以探测震前可能存在的前兆性重力变化信息。

2 数据与方法

由美国宇航局与德国空间局共同研制的 GRACE(gravity recovery and climate experiment)重力卫星于 2002 年 3 月发射成功,为人类研究地球系统的时间变化提供了有力的观测手段。GRACE 卫星利用精密星间测距技术,通过两颗相同的低空卫星轨迹的微小改变来探测地球系统的质量异常,从而探测到地球重力场变化,具有空间广域性、时间准实时性的优点,可为地震重力监测研究提供重要的时变信息,能提高地震重力监测能力。

本文采用的 GRACE 时变重力场数据源于 GRACE 数据中心公布的美国得克萨斯大学空间研究中心 UTCSR 处理的 RL04 地球重力场模型产品,包括 2003-01—2010-12(除 2003 年 6 月外),该产品为处理后的规格化重力场位系数,最高阶为 60 阶,该模型已扣除了大气、海洋、极潮、固体

潮及海潮等影响^[16]。

文献[17]在 GRACE 月重力场模型研究中发现 8 阶以后的球谐系数,奇偶项分别存在着相关性,可用多项式拟合加以改正^[17]。而通过多项式拟合对球谐系数进行去相关处理(如 3 次多项式去除 8 阶以上球谐系数的相关性方法 P3M8),再用 500 km 半径的高斯滤波,取得的结果比直接采用高斯平滑更好,能获得更高空间分辨率,更突显地球物理信号的时间变化图^[8,17-18]。因此本文首先对月重力场模型位系数进行 P3M8 去相关处理,利用处理后的月地球重力场模型^[13],通过如下公式求得地球上高斯平滑的任意点(r, θ, λ)月重力变化 dg

$$dg = \frac{GM}{R^2} \sum_{l=2}^{60} (l-1) \left(\frac{R}{r}\right)^l \sum_{m=0}^l W_l \bar{P}_{lm}(\cos \theta) \cdot (d\bar{C}_{lm} \cos(m\lambda) + d\bar{S}_{lm} \sin(m\lambda)) \quad (1)$$

式中, dg 是重力变化; $d\bar{C}_{lm}$ 、 $d\bar{S}_{lm}$ 是真实重力场与平均重力场的完全规格化球谐系数之差,其中 $d\bar{C}_{20}$ 项用 SLR 数据获取的结果替代; W_l 为高斯滤波器; $\bar{P}_{lm}(\cos \theta)$ 为完全规格化的缔合勒让德多项式; l 、 m 分别是位系数阶数和次数; R 为地球平均半径; r 是观测点距离地球质心的距离; λ 、 θ 分别对应于观测点的经度和余纬。

3 日本大地震前 GRACE 重力场的变化

文献[19]指出不同震级的地震对重力的影响范围不同, M_s 8 级地震的最大影响范围为 1160 km, M_s 9 级地震的影响范围尚无定论。鉴于不同学者在研究印尼和智利大地震时选取的空间尺度^[7-9,13],本文研究选取的空间尺度为 $30^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{E}$,分布于震中四周,南北超过 3000 km,东西大于 4000 km,以更大的空间尺度显示该震震前的重力变化信息,时间尺度为震前 5 年,即 2006-01—2010-12,以反映震前中短期的重力变化信息。利用 UTCSR 公布的 RL04 月重力场模型数据,通过去相关滤波 P3M8+500 km 高斯滤波剔除南北异常条带对结果的影响,剔除平均背景场后,分别给出年度重力变化(图 1)、季度重力变化(图 2)和特定的差分重力变化(图 3),其原因为年度变化反映总体重力变化趋势,季度变化则提供更精细的动态演化过程信息,差分变化突显局部效应,结合分析能为研究大尺度重力变化提供更全面、直观的信息。此外还给出重力变化比较典型区域的若干点位重力变化时间序列。

3.1 累计重力变化

从日本及其邻区年度及季度重力变化的结果发现(图1、图2):

(1) 日本大地震前,出现了比较明显的正负重力异常变化,分别是2008年在俄罗斯东部的负异常变化,峰值幅度达到 $-10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,以及2010年俄罗斯东部及沿海地区的正重力异常变化,峰值幅度达到 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (图1)。

(2) 季节变化则以更高的时间分辨率给出了重力变化的详细的动态演化过程(图2)。正负重力异常存在明显的迁移变化,正重力异常区从2009年开始主要分布在俄罗斯东部海、库页岛和日本群岛北部和东部一带,范围较广,且强度逐渐增强,范围逐步集中,到2010年下半年缩小集中到俄罗斯东部沿海、中国东北地区 and 朝鲜半岛北部一带。仅2010年一年,俄罗斯东部沿海与中国黑龙江东部一带重力增加了近 $15 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

(3) 重力异常的迁移变化和正负交替变化也比较明显,俄罗斯东部沿海从2007年第3季度出现明显的负异常,之后持续增加,到2008年第4季度,负异常中心向南迁移至日本海沿岸,到2009年转变为正异常,正负差达到 $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,正异常一直持续到2010年第4季度,形成比较显著的正负交替变化。日本群岛东北部和千岛群岛一带2008年时存在约 $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 负异常,到2009年转变为正异常,到2009年第4季度达 $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,2010年又转变成负异常。

(4) 在2006—2010年期间,日本及其邻区存在着大范围的重力变化。日本群岛以西至俄罗斯东部的重力变化由负转变为正,正负峰值幅度差达 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。日本群岛以东及千岛群岛一带重力变化表现为负-正-负的演化过程,但变化幅度相对较小。

3.2 差分重力变化

差分重力变化更能体现局部重力效应,因此本文给出了2006—2010年的逐年差分重力变化图,同时由于2008—2010年重力变化非常显著,故也给出2010年相对于2008年的重力变化差分图(图3)。分析发现:

(1) 2006—2008年,总体变化比较平缓,仅在俄罗斯东部出现重力减小现象。

(2) 2009年相对于2008年,该区重力明显增加。2010年较2009年同样出现重力增加,正重力变化区向南迁移,同时千岛群岛一带出现重力

减小现象,在发震断层两侧形成比较明显的正负异常区。

(3) 2010年较2008年,在俄罗斯与中国黑龙江省一带出现了较大的重力变化梯度带。年度重力差分变化结果与3.1中的累积重力变化结果相吻合。

3.3 点位重力时间序列

为了更清楚地反映震区附近重力随时间的变化,本文在震中区四周,沿发震断层线选取了若干点位,分析其重力变化的时间序列。其范围为 $30^\circ \text{N} \sim 60^\circ \text{N}$ 和 $120^\circ \text{E} \sim 160^\circ \text{E}$,点位坐标为A($130^\circ \text{E}, 50^\circ \text{N}$)、B($155^\circ \text{E}, 50^\circ \text{N}$)、C($144^\circ \text{E}, 44^\circ \text{N}$)、D($125^\circ \text{E}, 40^\circ \text{N}$)、E($135^\circ \text{E}, 35^\circ \text{N}$)、F($145^\circ \text{E}, 30^\circ \text{N}$) (图4),由于震中东部为海洋,海洋对卫星重力的影响较明显些,因此点位主要在震中西部的陆地上,东部只有B和F两个点位。

通过计算获取各点位从2003年1月到2010年12月(2003年6月除外)月重力变化的时间序列。为消除周期性变化的影响,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。

分析发现点位的时间序列反映出的重力变化趋势与相应地区的年变和季度变化趋势一致。所选点位的重力变化总体变化均有一个显著特点,即各点均在2008年出现一个重力变化的拐点(图5中红色虚线标注所在位置),在该时刻前为一种重力变化特点,而此后则重力开始快速增加。

具体而言:① 位于俄罗斯东部的A点与位于东部的朝鲜半岛的D点,重力变化速率相对较大,重力最大增加约 $4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,且变化趋势对比鲜明,这一结果与图1~图3结果相吻合;② 位于西北部地区的千岛群岛的B点与位于日本北海道的C点,B和C点在2009年底达到最大,此后重力变化减少,总体呈现出重力增加-减小特征;③ E和F点重力变化幅度相对较弱,然而位于日本本土的E点的重力变化虽然也在2009年底出现明显的跳变,总体有重力值不断增加。而F点则相对不明显,但在自2008年初重力也是持续增大的。

4 讨论

本文利用GRACE数据,获得了 $M_w 9.0$ 地震发生前日本及其邻区的大范围重力动态演化过程,反映出该区域的物质的运动状态及质量迁移,为地震孕震提供了长时间和高空间尺度的地球动力学研究背景资料。结果明确指出了日本大地震

前在震源区周边地区在震前若干年内存在着显著的重力变化,这种变化反映着大地震孕育与发生过程中震区的层状地球密度结构的垂向形变,以及地壳甚至上地幔物质质量和密度的变化,结合前人的研究结果,以下一些问题或特点需要讨论。

一是日本及其邻区在震前5年存在着非常显著的重力变化,特别是日本海以西部分,其变化幅度可达 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,且长期来看,日本海以西存在着长期的重力累计增加,而大震前大范围的重力增加是大震前重力变化的最显著的标志之一^[3]。由于GRACE卫星重力变化不反映地表形变对其结果的影响,因此卫星重力变化体现为质量变化,即在地震发生前2~3年在日本海以东,存在着大范围的物质流动及质量积累,其结果反映了地下物质的汇聚运动,有利于能量增加,这为地震孕育的能量积累提供了必要的前提条件。

二是日本地震前2008—2010年,震中区东北部和西北部形成相对比较明显的正负异常区,其正负分界线与发震断层走向基本一致,呈近南北走向。美国地质调查局USGS反演的震源模型指出最优发震断层(图5中震中区的绿线位置)走向为 195° ,逆断层性质,正重力异常区位于发震断层上盘区,表明质量增加,下盘区为负异常,预示着质量亏损。另一种解释就是长期以来,欧亚大陆向东南方向运动,太平洋板块向西北方向运动,最终造成了欧亚大陆与日本海的碰撞,为重力监测到的质量积累提供了背景环境。且在震区重力变化不显著,表现其震前处于闭锁状态。文献[7]基于断层位错模型,解算了苏门答腊大地震震时海底和莫霍面的升降和质量差引起的重力的变化与其利用GRACE卫星重力观测结果一致,这些结果主要反映了同震GRACE重力变化的分布,即发震断层的上下盘区与GRACE重力场正负异常区对应一致,但在日本大地震前这种现象是否有所反映?从年度、季度和逐年差分重力场解算结果可以发现,2009年日本西部至俄罗斯东部沿海一带已经出现比较明显的正异常,到下半年日本东北部形成了较大范围的负异常,时间尺度为1~2年,反映巨大地震发生前对局部重力场的影响。

三是大地震前和震时GRACE卫星重力场变化量值和正负异常的变迁问题。2004年以来4次大地震:苏门答腊地震、汶川地震、智利地震和日本地震,从不同学者解算结果来看,同震重力变化量值符合震级愈大变化愈大的原则,尽管前人也

从理论上探讨了GRACE卫星探测震时地震能力的问题,但它能否探测到巨大地震之前重力场的变化与变迁需要研究。从本文的解算结果,在去除考虑到的各种干扰因素外,GRACE卫星能探测到一定的大震前震源区局部重力场变化。

四是从点位重力变化时间序列来看,除位于海洋的F点外,其他各点从2008年第2季度至2010年第4季度均出现了比较明显的增加-快速增加现象,幅度达 $1 \sim 2 \text{ m/s}^2$,其中B、C两点在2010年又出现了明显的下降趋势,这一特征与1976年唐山 $M_s 7.8$ 级地震震前地面重力变化相类似,为GRACE重力卫星探测大地震震前重力变化前兆信息提供了有力的支持。

致谢:感谢德州大学奥斯丁分校空间研究中心提供的数据及陈剑利博士的指导与帮助。

参考文献:

- [1] ZHANG Guoming, FU Zhengxiang, GUI Xietai, et al. Primer on Earthquake Prediction [M]. Beijing: Science Press, 2001: 323-326. (张国民,傅征祥,桂燮泰,等.地震预报引论[M].北京:科学出版社,2001:323-326.)
- [2] LI Ruihao, HUANG Jianliang, LI Hui, et al. The Mechanism of Regional Gravity Variation before and after the Tangshan Earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(4): 399-407. (李瑞浩,黄建梁,李辉,等.唐山地震前后区域重力场变化机制[J].地震学报,1997,19(4):399-407.)
- [3] SHEN Chongyang, LI Hui, SUN Shaoan, et al. Dynamic Variations of Gravity and the Preparation Process of the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake [J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(10): 2547-2557. (申重阳,李辉,孙少安,等.重力场动态变化与汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育过程[J].地球物理学报,2009,52(10):2547-2557.)
- [4] WANG Zhengtao. Theory and Methodology of Earth Gravity Field Recovery by Satellite to Satellite Tracking Data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (王正涛.卫星跟踪卫星测量确定地球重力场的理论与方法[D].武汉:武汉大学,2005.)
- [5] ZOU Xiancai, LI Jiancheng, WANG Haihong, et al. Application of Parallel Computing with OpenMP in Data Processing for Satellite Gravity [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(6): 636-641. (邹贤才,李建成,汪海洪,等.OpenMP并行计算在卫星重力数据处理中的应用[J].测绘学报,2010,39(6):636-641.)
- [6] XIAO Yun, XIA Zheren, WANG Xingtao. Recovering the Earth Gravity Field from Inter-satellite Range-rate of GRACE [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 19-25. (肖云,夏哲仁,王兴涛.用GRACE星间速度恢复地球重力场[J].测绘学报,2007,36(1):19-25.)
- [7] HAN S C, SHUM S K, BEVIS M. Crustal Dilatation Observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman

Earthquake[J]. Science, 2006, 313(5787): 658-666.

[8] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D. GRACE Detects Coseismic and Postseismic Deformation from the Sumatra-Andaman Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(13): 1-5.

[9] EINARSSON I, HOECHNER A, WANG R, et al. Gravity Changes due to the Sumatra-Andaman and Nias Earthquakes as Detected by the GRACE Satellites: A Reexamination[J]. Geophysical Journal International, 2010, 183(2):733-747.

[10] LI Jin, SHEN Wenbin. Investigation of the Co-seismic Gravity Field Variations Caused by the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Using Monthly GRACE Data[J]. Journal of Earth Science, 2011, 22(2): 280-291.

[11] ZOU Zhengbo, LUO Zhicai, LI Hui, et al. Detection of Gravity Changes before and after Strong Earthquakes by GRACE[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(2): 6-9. (邹正波, 罗志才, 李辉, 等. GRACE 探测强地震重力变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 6-9.)

[12] WANG Wuxing, SHI Yaolin, GU Guohua, et al. Gravity Changes Associated with the $M_s 8.0$ Earthquake Detected by GRACE[J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(8): 1767-1777. (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.)

[13] HAN S C, SAUBER J, LUTHCKE S. Regional Gravity Decrease after the 2010 Maule (Chile) Earthquake Indicates Large-scale Mass Redistribution[J]. Geophysical Research Letters, 2010,37(23): 1-5.

[14] SUN Wenke. Progress and Current Situation of Research on Theory and Observation of Gravity Change Caused by

Seismicity and Volcanism[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(4): 44-53. (孙文科. 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, 2008, 28(4): 44-53.)

[15] VIRON D O, PANET I, MIKHAILOV V, et al. Retrieving Earthquake Signature in GRACE Gravity Solutions [J]. Geophysical Journal International, 2008, 174(1): 14-20.

[16] BETTADPUR S. CSR Level-2 Processing Standards Document for Product Release 04[R]. Austin: Center for Space Research, 2007: 327-742.

[17] SWENSON S, WAHR J. Post-processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(8):1-4.

[18] ZOU Zhengbo, LI Hui, LUO Zhicai, et al. Seasonal Gravity Changes Estimated from GRACE Data [J]. Geodesy and Geodynamics, 2010, 1(1): 57-63.

[19] JIA Minyu, ZHAN Jiehui. The Structure and Ability of the China Seismological Gravity Monitoring System[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 22(4): 360-367. (贾民育, 詹洁晖. 中国地震重力监测体系的结构与能力[J]. 地震学报, 2000, 22(4): 360-367.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2011-05-24

修回日期: 2011-06-28

第一作者简介: 邹正波(1979—),女,博士生,助理研究员,研究方向为卫星重力。

First author: ZOU Zhengbo(1979—), female, PhD candidate, assistant researcher, majors in satellite gravity.

E-mail: zouzb@126.com

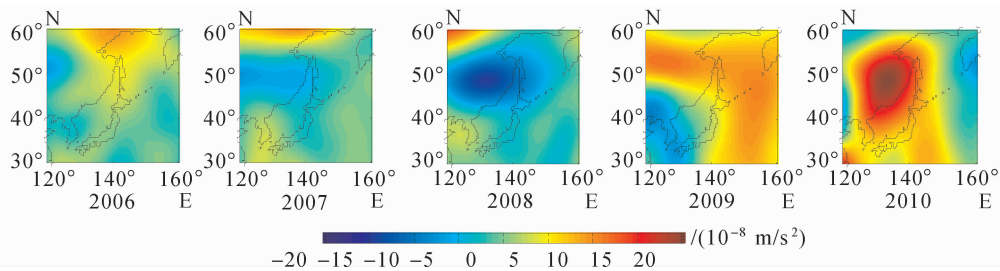
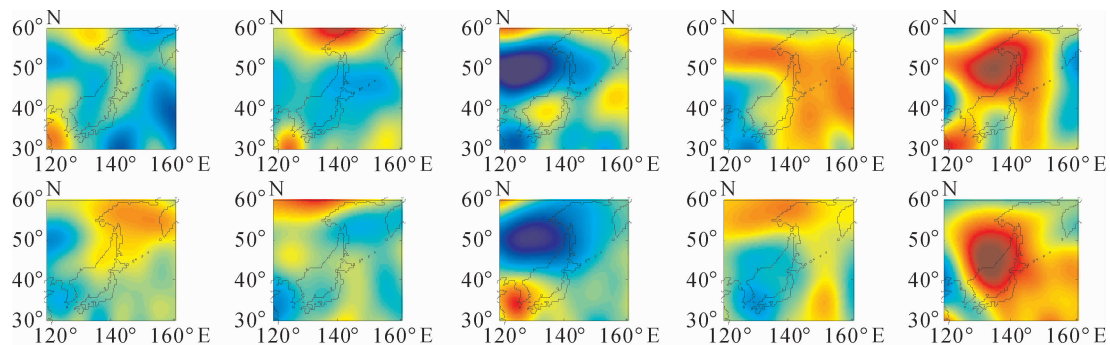


图 1 日本及邻区年度重力变化

Fig. 1 Annual gravity changes in Japan and its vicinity



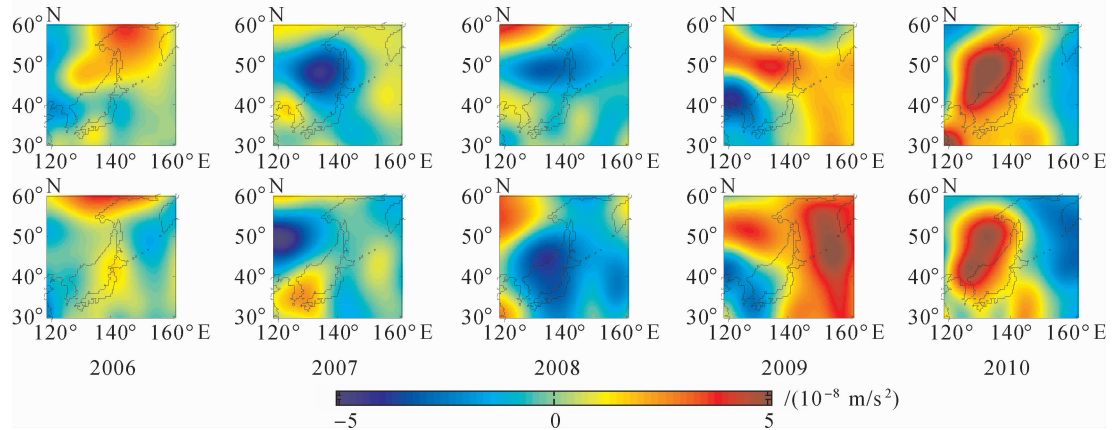


图2 日本及邻区季度重力变化,从上到下依次为春(1—3月)、夏(4—6月)、秋(7—9月)、冬(10—12月)4个季度
Fig. 2 Seasonal gravity changes in Japan and its vicinity

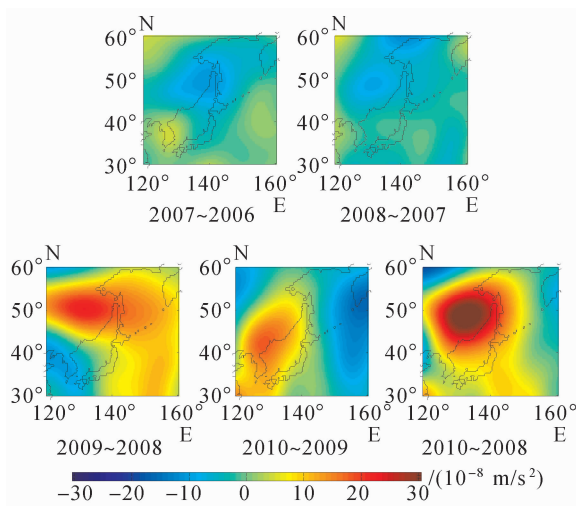


图3 日本及邻区年度差分重力
Fig. 3 The annual gravity difference in Japan and its vicinity

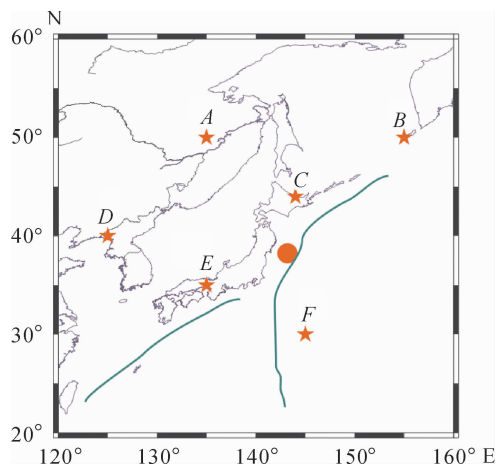


图4 点位A~F分布(绿线为断层线,红点为震中,五星为选取点位)
Fig. 4 The distribution of points(A to F)

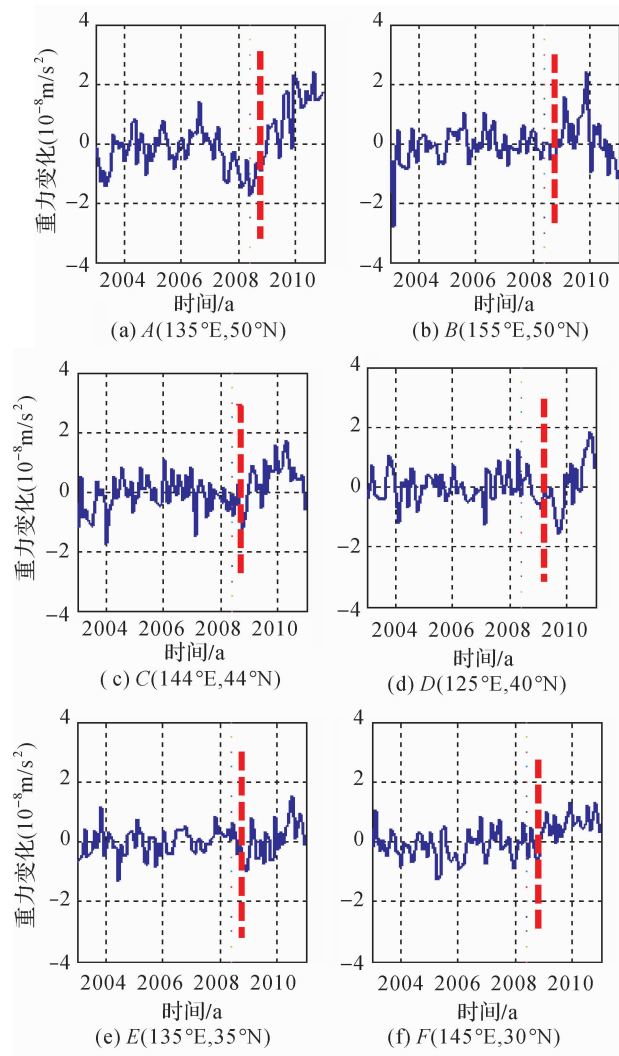


图5 A~F点位的卫星重力变化时间序列
Fig. 5 Time-series gravity changes of certain points