

陆汉鹏, 李建奎, 王锋吉, 等. 2013年莱州 M_s 4.6、2015年乳山 M_s 4.6级地震前后重力场变化特征[J]. 华南地震, 2016, 36(4): 27-33. [LU Hanpeng, LI Jiankui, WANG Fengji, et al. Characteristics of Gravity Field Change Before and After Laizhou M_s 4.6 Earthquake in 2013 and Rushan M_s 4.6 Earthquake in 2015 [J]. South china journal of seismology, 2016, 36(4): 27-33.]

2013年莱州 M_s 4.6、2015年乳山 M_s 4.6级地震 前后重力场变化特征

陆汉鹏, 李建奎, 王锋吉, 张 刚
(山东省地震局, 济南 250014)

摘要: 利用山东测区 2009—2015 年的流动重力资料, 采用绝对重力控制, 相对重力联测的经典平差方法, 给出了山东测区重力场动态变化图像, 系统地分析了 2013 年 11 月 23 日莱州 M_s 4.6 级、2015 年 5 月 22 日乳山 M_s 4.6 级地震前后重力场的空间变化和段差变化特点, 并结合地质构造及机理探讨了重力变化特征与莱州地震、乳山地震之间的关系。结果表明: 莱州 M_s 4.6 级地震震区位于重力场差分变化零值线拐弯区域; 乳山 M_s 4.6 级地震震区位于重力场差分变化正异常的最大区域。另外, 从跨断裂的段差变化可以看出, 地震发震前后重力段差必然在断裂带两侧有一次明显的累积上升过程, 且幅度较大, 一般在转折下降时易发震。

关键词: 莱州地震; 乳山地震; 重力变化; 地质构造

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2016) 04-0027-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.04.005

Characteristics of Gravity Field Change Before and After Laizhou M_s 4.6 Earthquake in 2013 and Rushan M_s 4.6 Earthquake in 2015

LU Hanpeng, LI Jiankui, WANG Fengji, ZHANG Gang
(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: Using the flow gravity observation data in Shandong survey area from 2009 to 2015, the absolute gravity control, relative gravity conjunction of the classical adjustment method, the paper gives the dynamic image of gravity field in Shandong survey area and systematically analyzes the spatial variation of gravitational field and segment difference change characteristics before and after the Laizhou M_s 4.6 earthquake on 23rd November 2013, Rushan M_s 4.6 earthquake on 22nd May, 2015. Combining with the geological structure and earthquake mechanism characteristics analysis, the paper discusses the relation of characteristic of gravity variation and Laizhou earthquake and Rushan earthquake. The results show that Rushan the zone of Laizhou M_s

收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 地震行业科研专项(201508009-12); 山东地震局合同制项目(15Y116)

作者简介: 陆汉鹏 (1971-), 男, 高级工程师, 主要从事流动野外监测工作。

E-mail: luhanpenglzx@163.com .

4.6 earthquake is located at the gravity field variation difference zero line turn areas; the zone of Rushan M_s 4.6 earthquake is located at the area with the maximum positive anomaly of gravity field difference. In addition, it can be seen from the cross fault segment difference that the earthquake seismic and gravity difference on both sides the fracture zone inevitably have a significant cumulative rise process with large magnitude and earthquakes generally occur in the transition falls.

Key words: Laizhou earthquake; Rushan earthquake; Gravitational field variation; Geological structure

0 引言

2013 年 11 月 23 日山东莱州市南发生了 M_s 4.6 级地震, 这也是继 1995 年 9 月苍山 M_s 5.2 级地震后第二次在山东内陆发生的较大地震, 震中位于莱州南柞村镇属于山东流动重力测区范围(图 1)。2014 年乳山震群地震频发, 并于 2015 年 5 月 22 日又发生了与莱州地震同级的乳山 M_s 4.6 级地震。为了对震后进行震例总结, 充分采用近年实测重力资料, 利用绝对重力与相对重力结合的经典平差方法, 对山东测区重力变化特点及可靠性进行了分析。

1 资料处理与计算

山东省地震局每年租用中国地震局 2 台高精度金属弹簧 LCR-G 型重力仪, 而且自 2009 年以来一直使用 LCR-G999 和 LCR-G1027 两台重力仪, 这样可以减少更换不同型号重力仪带来的系统误差的影响, 2009 年之后山东测区每年进行两期的相对流动重力观测, 并增加了绝对重力观测进行起算基准控制, 野外采用 PDA 掌上电脑记录, 往返自差、互差均小于限差要求。对流动重力观测资料进行预处理和平差计算, 预处理是对重力固体潮改正、气压改正、仪器高改正和仪器漂移

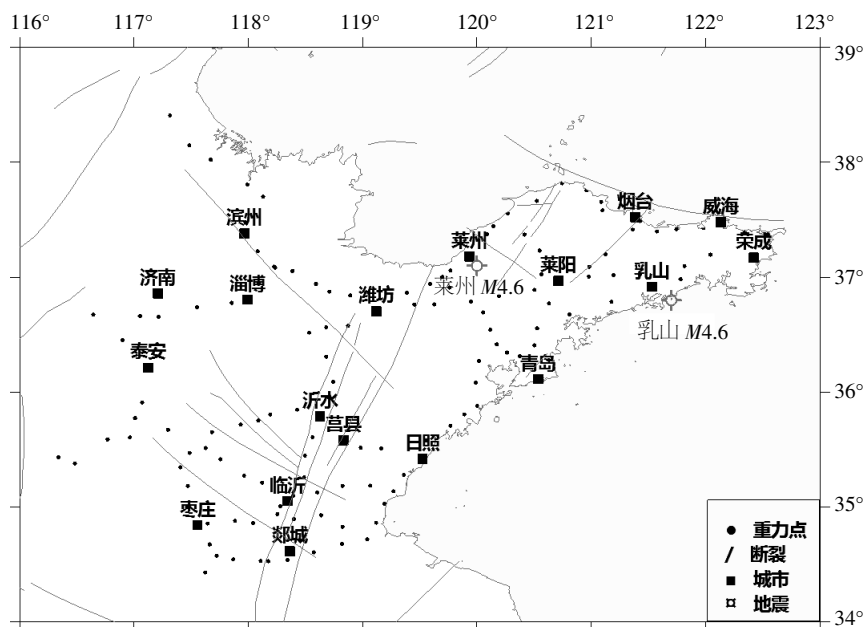


图 1 山东地质构造及重力测点分布图

Fig.1 Distribution map of the tectonic and the gravity surveying points in Shandong Province

改正等, 有效地消除了系统误差; 平差计算则以单台仪器的重力段差观测值为平差元素, 利用中国地震局实用化攻关推广的应用软件 LGADJ 对数据资料处理, 起算基准选用泰安、日照 2 个绝对重力点, 平差计算时, 先对多期观测资料计算结

果进行整体分析, 初步了解各台仪器的观测精度, 合理确定各台仪器的先验方差, 再重新做平差计算, 以得到最佳解算结果。

本文图件分析主要选用 2012—2013 年(震前)、2014—2015 年(震后)近四年的重力资料。近年重力观测精度较高, 其观测精度(见表 1)。

表 1 山东地区重力测量精度情况 (LCR-G 型重力仪, 单位: $\times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Table 1 The precision of gravity survey in Shandong area (LCR-G gravimeter) (Units: $\times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

使用仪器	观测时间/年-月	权中误差	点值中误差	使用仪器	观测时间/年-月	权中误差	点值中误差
G999、G1027	2012-03	7.5	9.1	G999、G1027	2014-03	7.5	9.1
G999、G1027	2012-08	8.0	9.4	G999、G1027	2014-08	6.7	8.3
G999、G1027	2013-03	8.5	9.8	G999、G1027	2015-03	6.9	8.4
G999、G1027	2013-08	6.6	8.0	G999、G1027	2015-08	8.4	10.0

2 重力场变化特征

2011 年 3.11 日本 9.0 级大地震后对山东测区产生了明显地影响, 2012 年山东测区地震活动明显增强, 2012 年 2 期复测结果显示 (图 2a、图 2b): 鲁北及胶东北部出现重力场的加剧上升与反向大幅度减小的剧烈变化, 并在 2012 年一年内发生 3~4 级小震活动, 其中, 在下半年胶东北部下降幅度较大, 并在 2012 年 7~8 月分别发生 M_L 3.1、 M_L 3.8、 M_L 3.2、 M_L 3.9 四次莱州地震, 当时正是重力观测期间。2013 年上半年重力变化明显减弱 (图 2c) 基本是小幅度的下降变化, 2013 年下半年 (图 2d) 复测后鲁南及胶东反向上升, 尤其特别注意的是在胶东正异常区域的零值线出现扭曲, 其拐弯区域位于莱州东侧。当时观测时间是 2013 年 8 月份, 一般地震发生在重力变化的梯度带的零值线区域, 其拐弯处是值得注意地区, 虽然此区域梯度带不明显, 但观测结束后在此区域发生了莱州 M_s 4.6 级有感地震。此次地震发生在 2013 年 11 月 23 日 13:44, 微观震中位于 $N37.10^\circ$ 、 $E120.02^\circ$, 宏观震中位于莱州市柞村镇, 此次地震发生在莱州断裂带附近, V 度区等震线为北东走向椭圆形^[1]。2014 年上半年复测显示 (图 2e), 山东测区出现大幅度的上升态势, 上升变化超过 $30 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ 的测点多达 110 个, 达到了近几年异常上升测点最高值, 变化最大的区域主要集中在鲁北及胶东测区, 重力场的上升预示着能量的逐渐积累, 2014 年上半年观测结果是否受 2013 年莱州地震的震后滞后效应影响值得考虑。2014 年下半年 (图 2f) 复测显示重力场大部分下降趋势平缓, 也说明山东测区重力场积累处于调整松弛阶段。2015 年上半年 (图 2g) 山东整体变化幅度比较均匀, 正负变化区域面积相当, 鲁南测区的中、南部趋势下降, 鲁南北部的沂水西区域出现较大幅度的上升变化, 并与沂水东部下降的正负变化差异较大, 其中沂水、莒县小区域显现的等值线比较密集, 观测期间在莒县连续发生了 M 2.1 级、 M 2.4 级两

次小震。2015 年下半年 (图 2h) 山东整体变化幅度较上半年减小, 重力场出现反向下降变化, 季节性变化又明显突出, 尤其沂水西部区域下降幅度较大, 沂水、莒县东、西区域正负差异变化又比较明显, 重力变化零值线向东扭曲剧烈, 上升区域在莒县、莒南东南区域, 下半年沂水西部区域没有延续上半年持续上升异常态势, 但正、负差异变化特点应该引起注意。

总之, 相邻两期的重力场动态变化较好地反映了半年尺度的重力变化, 先前重力场表现出上半年上升、下半年下降的正负交替的季节性变化, 而 2015 年上半年以上升为主的变化有所改变, 2015 年上半年打破季节性变化, 下半年重力场的下降变化又延续先前的季节性变化特征。

由于重力变化受起算控制点及网型大小影响, 对近期资料采用分网平差、单独计算胶东测区的方法得到 2014 年 12 月至 2015 年 8 月差分及累积重力场变化图像 (如图 3a、3b), 发现胶东南部海阳至荣成区域重力变化上升幅度较大, 其中乳山测点上升最大为 $53 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$, 由于受 2014 年乳山震群影响, 2014 年 12 月专门对胶东测区加密观测, 至 2015 年第一期观测仅 3 个多月时间出现了如此大的变化也是值得关注的。胶东测区 62 个测点, 超过 $30 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ 的测点 21 个, 异常比例达到 33%。2015 年第一期观测结束后 2 个月之内发生乳山 M_s 4.6 级地震, 此次地震震中就位于重力差分变化最大区域, 与 2013 年莱州 M_s 4.6 级地震重力变化特征不太一致。

3 重力段差变化与地震

地震重力测量中, 流动重力采用的是相对重力测量手段, 而段差变化不要求每期测量都有绝对点控制, 段差变化的计算相比点值变化, 可认为与平差方法选择无关, 误差不因为基点的选取会出现累积变化大。段差变化可以认为是一种重力水平梯度的方向变化, 与潜在发震位置更具有相关性。

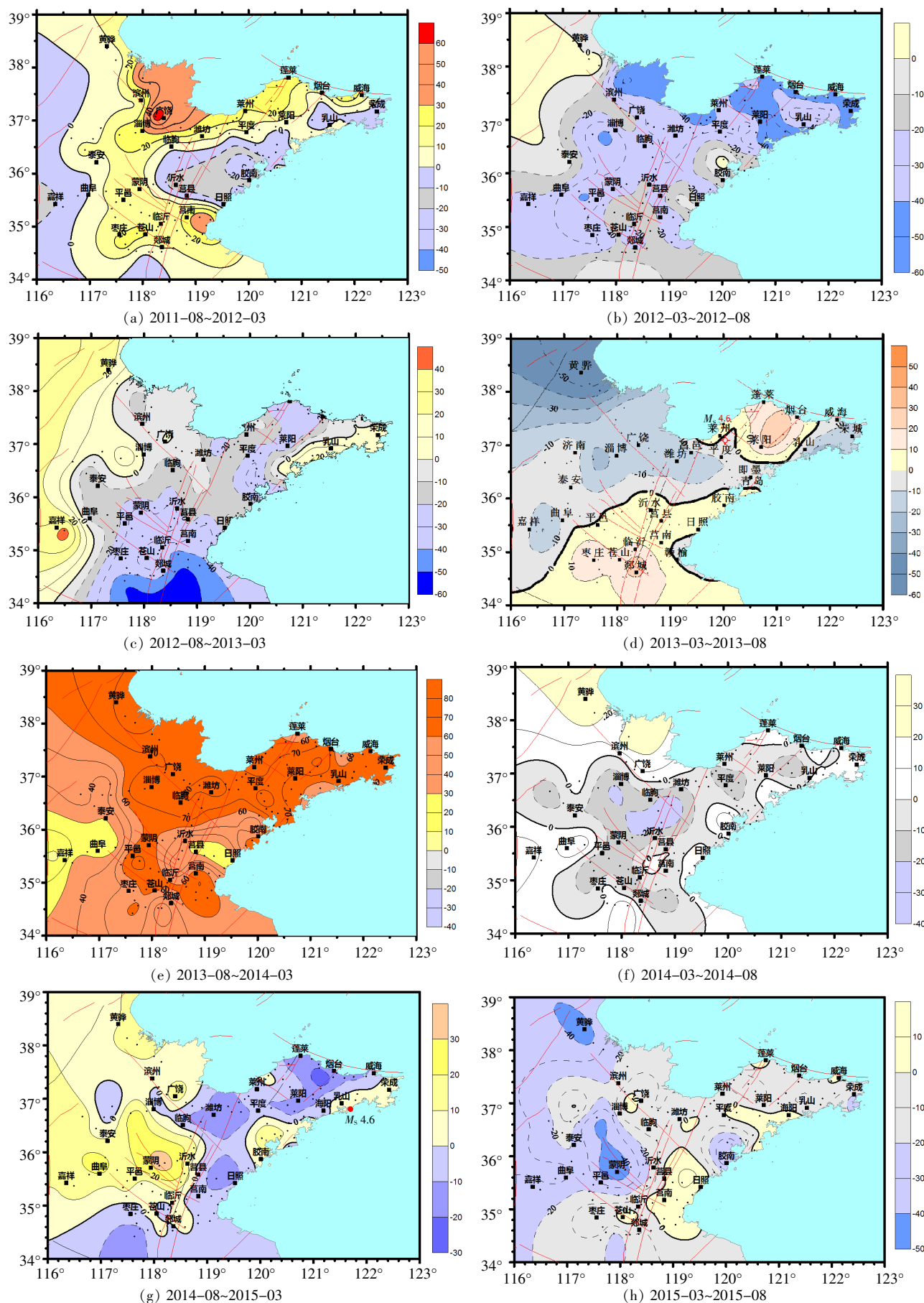


图2 山东测区重力变化等值线图

Fig.2 Isoline map of gravity variation in the area of Shandong

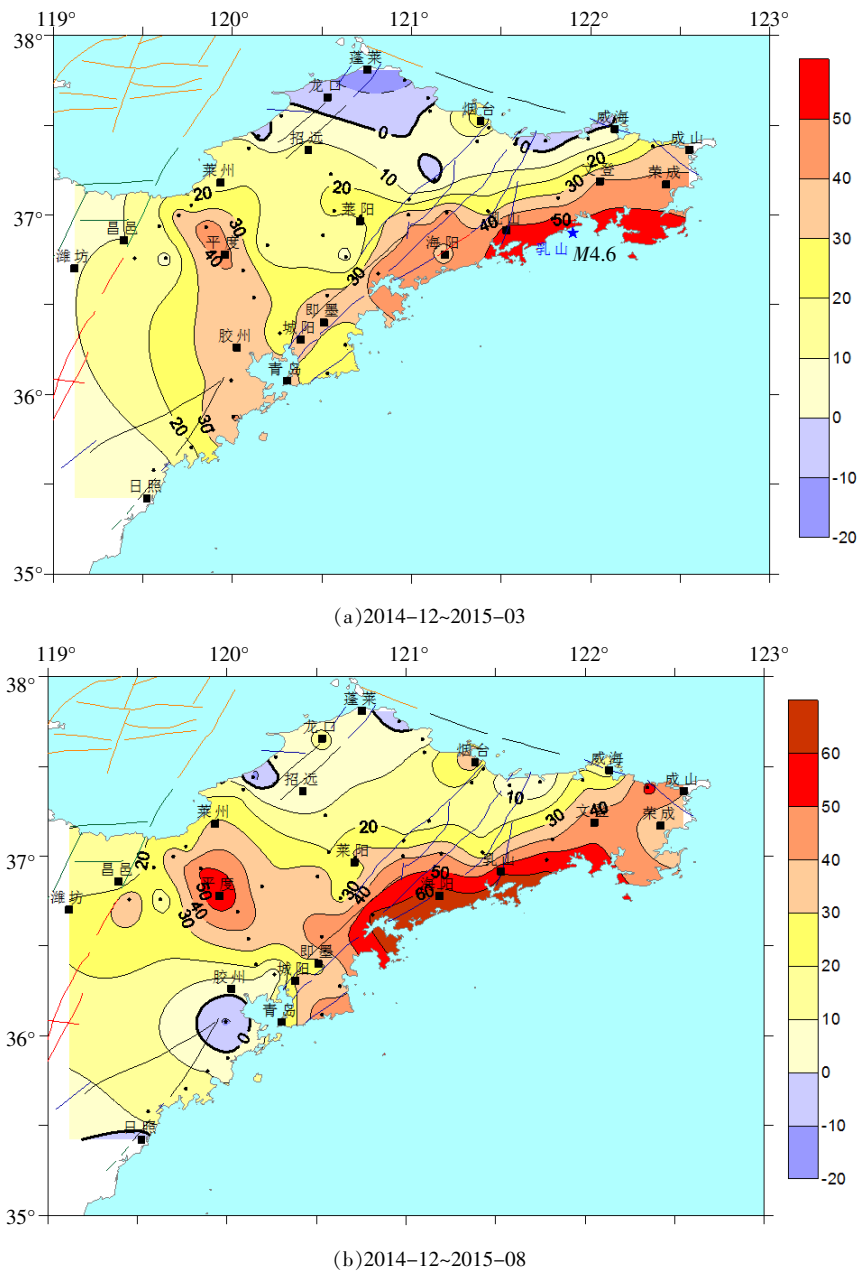


图 3 胶东测区重力变化等值线图
Fig.3 Isoline map of gravity variation in the area of Jiaodong

在靠近莱州西附近的沂沭断裂带两侧选用昌邑-新河测段做时序分析(图 4a), 自 2009 年 6 月观测至 2012 年 8 月平稳波动, 2012 年 8 月至 2013 年 8 月重力值加速上升, 1 年累积变化达到最高值 $44 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$, 观测结束 3 个月发生莱州 M 4.6 级地震。在靠近乳山附近的乳山断裂两侧选用海阳-乳山测段做时序分析(图 4b), 自 2009 年至 2012 年逐年波动上升, 2013 年大幅转折下降, 其中 2013 年 8 月下降速率较大, 下降到最低值, 2014 年 3 月复测显示出现转折上升, 并在转折上升中发生莱州 M 4.6 级地震, 地震之后段差变化继

续直线上升, 至 2015 年 3 月上升到最高值, 自 2013 年 8 月持续上升至 2015 年 4 月不到 2 年时间累积段差 $41 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$, 观测结束后 1 个月发生乳山 M_s 4.6 级地震。2015 年下半年观测转折下降。此次地震位于牟平-乳山断裂带附近海域, 其最大烈度初步确定为 V 度。从这次地震的宏观烈度考察结果看, V 度等震线长轴为北西向, 长约 26 km。由于段差变化不受平差计算及起算点精度影响, 实测结果更具有可靠性。通过以上 2 个跨断裂的段差变化图可以看出, 地震发震前后重力测点必然在断裂带两侧有一次明显的异常升降过程,

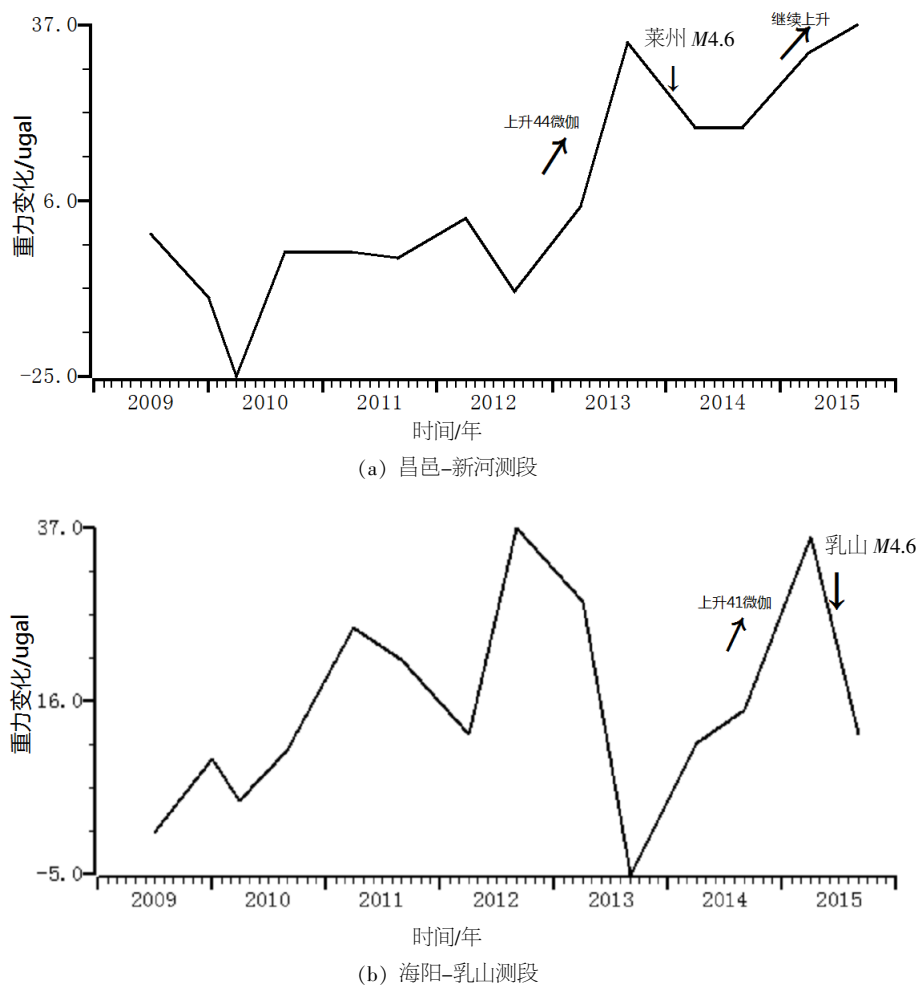


图4 段差时序变化图

Fig.4 Timing diagram of segment difference

且幅度较大^[2],一般在转折下降时易发震。重力段差时序变化能较好地反映跨断裂地段的重力动态变化^[3]。

4 重力场变化与地震的机理分析

山东位于华北构造区的东南部,新构造期地壳运动的性质、强度等具有明显的分区特征。

莱州与乳山地震处于鲁中南-鲁东上升山地区内,并发生在新构造单元的边界带上,莱州地震震中距沂沭断裂带东边界的昌邑-大店断裂的分支-景芝断裂约 15 km,震中虽然没有对应的第四纪活动断层,但其附近发育有北东向柞村断裂、北北东向莱州断裂,该区存在发生中强地震背景^[4]。乳山地震震中距离乳山断裂较近,附近海阳断裂与乳山断裂交叉分布是发生中强地震频繁的区域。由于地震是震源区介质发生的快速破裂错动或是原断层的失稳现象,在地震的孕育过程中,由于地壳内部应力的长期作用,应力、应变的积累,孕震

区内介质的物理、力学性质会发生不同程度的变化,导致活动性断层产生蠕动变化,这种蠕动变化以地面形变和物质质量变化表现出来,地壳形变会导致地面空间位置的变化,地壳的介质密度也可能会发生不同程度的变化,地壳和上地幔内还可能存在着物质的迁移等变化,所有这些变化都将导致重力场的变化,并且通过地表的重力测量反映出来^[4-7]。重力变化与构造应力之间有着密切的联系,当区域构造应力场发生强弱变化时,重力场图像也会随之出现时空变化,重力场变化能反映区域应力场的微动态活动,在区域构造应力场增强的过程中,地壳中的物质迁移出现有序性分布,相应的区域重力场也出现有序变化。莱州地震与乳山地震就是在这种地质构造复杂,地下物质能量累加,重力场逐渐增强,反映的区域应力场也随之增强的背景下发生的。

根据山东省地震台网中心记录到的波形资料,利用 P 波初动、振幅比、波形反演等方法

计算的震源机制解显示,莱州地震为右旋走滑型,乳山地震为左旋走滑型,莱州与乳山地震发生前该区地下介质密度都可能存在一定的变化。

5 结语

笔者对山东测区重力场空间变化及段差变化特征进行了详细地分析,并且结合2次中等地震进行了探讨,总体来说具有以下变化特点:

(1) 在空间分布上,2013年莱州 M_s 4.6级地震震区位于重力差分变化零值线的拐弯区域;2015年乳山 M_s 4.6级地震震区位于重力差分变化正异常的最大区域,两个区域重力场变化形态不同,但都位于重力变化等值线的异常区域,重力场的明显区域性变化与地震有一定的关联性,有时震前出现明显异常有时受震后滞后效应影响。震前震后重力变化形态上的差异反映了地质构造活动的不同,震后是地表活断裂的活动,震前可能是深部孕震层构造应力的相对集中。

(2) 对具有可靠性的跨断裂的重力段差变化特点进行了分析,并与地震关系进行了讨论,发现重力段差变化在莱州与乳山地震前都出现明显的上升增强态势,两年之内上升累积都在 $40\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 左右,具有4级左右地震的监控能力,震后重力段差反向减小。因为重力场变化与活动断裂构造密切相关,重力段差变化反映了断裂的构造运动,其变化主要是构造应力作用下活动断层两盘的物质变迁和构造变形差异运动产生的重力效应。

参考文献:

- [1] 李杰,朱成林,冯志军,等. 莱州 M 4.6级地震前山东形变异常特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34 (6): 9-13.
- [2] 李盛,陈维超,郭昱琴. 海南岛陆地区重力场变化与地震关系研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2013, 34 (3/4): 13-17.
- [3] 朱治国,王晓强,刘代芹,等. 2005—2009年喀什—伽师地区重力场变化与地震[J]. 地震研究, 2011, 34 (2): 143-147.
- [4] 许仪西,杨婕,张永固,等. 福建东南沿海重力场演变特征及其与地震的关系[J]. 华南地震, 2009, 29 (3): 78-84.
- [5] 刘代芹,王晓强,李杰,等. 2009年阿合奇5.5、阿图什 M_s 5.0地震前后重力场变化分析[J]. 内陆地震, 2010, 6 (2): 144-148.
- [6] 陈运泰,顾浩鼎,卢造勋,等. 1975年海城地震与1976年唐山地震前后的重力变化[J]. 地震学报, 1980, (1): 21-31.
- [7] 祝意青,徐云马,梁伟锋,等. 2008年新疆于田 M_s 7.3地震的中期预测[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28 (5): 13-15.