

2012年宁蒗—盐源5.7级地震前的重力变化*

郑兵¹, 王青华², 罗海元¹, 马伶俐¹, 蒲晓霞¹, 李菲菲¹, 苏琴¹

(1. 四川省地震局 测绘工程院, 四川 雅安 625000; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650300)

摘要: 利用2010年7月~2012年3月四川省和云南省的流动重力观测数据, 对2012年6月24日宁蒗—盐源5.7级地震孕育和发生过程中的重力场动态演化情况进行分析。结果显示: 地震孕育阶段震中区域重力场出现大面积的重力正值变化高值异常区域, 并形成密集的正值变化梯度带; 震前震中区域呈重力正变化低值状态, 处于重力变化0值线附近且等值线稀疏; 震前与发震有关的断裂带的跨断层重力测段段差值变化明显。

关键词: 流动重力测量; 重力场; 川滇地区; 宁蒗—盐源5.7级地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)02-0370-07

0 引言

流动重力测量反映的是区域重力场的非潮汐变化信息, 地壳内部的物质迁移、地壳构造和地震的形成过程等都可以在流动重力复测结果中反映出来。重力变化与构造应力之间有着密切的联系(向文, 李辉, 1999; 苏有锦, 泰嘉政, 2001), 区域构造应力场发生强弱的变化, 重力场图像也会相应地显示出时空变化, 而重力场动态变化图像一直是地震监测预报研究的基本信息源(陈运泰等, 1980; 贾民育等, 1995; 李瑞浩等, 1997; 李辉等, 2009)。通过对重力场动态变化的深入分析, 有可能捕获某些地震前兆的有效信息, 为地震的预测预报进行有效的探索。

2012年6月24日在云南省丽江市宁蒗彝族自治县、四川省凉山彝族自治州盐源县交界地区(27.7°N, 100.7°E)发生了5.7级地震, 震源深度约11 km, 属主—余震型地震, 造成了一定的人员伤亡和财产损失。四川和云南的流动重力资料显示重力场在该地震前有异常变化, 本文利用两省的流动重力资料研究震前区域重力场时空动态演化特征, 探讨重力场的异常变化与地震活动的规律, 对地震孕育过程中捕捉地震前兆进行监测预报具有一定的实际意义。

1 测区概况及资料处理

宁蒗—盐源5.7级地震发生在川滇菱形块体接近东边界的内部丽江—小金河断裂带以西的博克—木里断裂附近。四川和云南流动重力联测路线如图1所示, 联测路线覆盖了川滇地区主要的活动构造带龙门山断裂带和川滇菱形块体的活动断裂带, 形成了完整的流动重力闭合测环, 测网图形的控制能力较强, 能够监测川滇地区的主要构造带的活动并可以辐射到邻近区域, 为对地震活动的孕育形成研究提供丰富而准确的重力场变化数据。

笔者采用2010年7月~2012年3月的流动重力观测数据, 对数据资料的处理利用中国地震局实用化攻关推广的应用软件LGADJ, 统一起算基准点, 采用绝对重力控制下的相对重力联测的弱基准平差, 绝对重力点采用四川郫县、云南下关和昆明3个绝对重力点(图1)作为起算基准点(3个绝对重力点相对于2011年的重力变化分别为 $-6.1 \times 10 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $-1.8 \times 10 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $5.8 \times 10 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$, 重力变化较小, 2012年没有测量, 采用的是2011年的测量结果), 对川滇流动重力联测资料进行整体平差, 得到统一起算基准的绝对重力变化(李辉等, 2000; 申重阳等,

* 收稿日期: 2014-08-14.

基金项目: 四川省重点“项目高精度智能测量机器人跨断层位移测量实验”(LY1406)、“基于GPS、重力测量对龙门山断裂带芦山剖面跟踪分析”(LY1506)和地震科技星火计划攻关项目“川滇地壳形变特征及在强震中短期预测中的应用研究(XH15037SX)共同资助。

2011)。在了解测量仪器的后验中误差后,依据后验中误差在平差计算时合理调整各台仪器的先验方差以得到最佳解算结果。川滇的数据是分测区观测的,2011年上半年在四川省攀枝花市以渡口、河门口和格平8G共3个公共接点将两个测区的数据联为一个整体。由于云南和四川两个测网单独计算得出的公共点重力值差别较大,2011~2012年上半年3期云南和四川公共点点值数值差值渡口: $-402 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $623 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $1\,524 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$;格平8G: $-581 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $647 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $1\,186 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$;河门口: $67 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $648 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $1\,335 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$,所以从2011年起以公共点将云南、四川两个测区数据连接进行整体平差,减少误差,得到较好的处理结

果。解算出 4 期数据的点值精度分别是 $151 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $110 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $96 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $73 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ ，数据的可信度较高，系统误差较小，成果质量较好，能够用于分析研究。

2 区域重力场的演化特征

2.1 重力场动态变化

实践表明,分析重力场的动态变化图像能够捕获地震前后重力场变化特征。将处理后的 2010 年 7 月~2012 年 3 月的重力资料做出差分动态变化等值线图进行分析研究,如图 2 所示。虽然宁蒗—盐源 5.7 级地震的震中区域没有流动重力实测点位通过,但川滇测区的流动重力点位邻近该区域,重力变化等值线图仍然能够较为真实的反映出震前的重力场时空动态演化特征。

(1) 2010 年 7 月 ~ 2011 年 2 月

该时段川滇测区虽然没有公共点,有一定的误差,但是以绝对重力点为起算基准,算出的结果能够反映出重力场变化情况。四川和滇东测区出现了较大面积的重力负值异常区域,且变化数值较大,最大值约 $-1\ 200\ \text{nm} \cdot \text{s}^{-2}$, 异常区域主要分布在安宁河—则木河断裂带区域,等值线较为密集,这与该时段该区域发生较多的地震^①是相对应的。四川的宝兴—石棉区域和德阳—成都区域呈重力正值变化,形成了面积较小、变化数值较小的重力正值闭合等值线区域;丽江—攀枝花—昆明区域西南部的滇西测区呈重力正值变化,变化数值不大,等值线较为稀疏。宁蒗—盐源区域和宁蒗—盐源 5.7 级地震震中位于川滇菱形块体中部南侧,是重力负值变化区域,西边邻近重力变化 0 等值线,等值线相对密集,等值线负值变化数值向盐源方向逐步增大,在盐源县城附近重力变化值约 $-600\ \text{nm} \cdot \text{s}^{-2}$, 属于重力负值异常区域(图 2a)。

(2) 2011 年 2 月 ~ 2011 年 8 月

川滇测区的重力变化情况与上一个时段相比,发生了一个较大的逆转。四川和滇东测区在攀枝花—盐源区域之间有一小块区域继续保持数值较小的重力变化负值,其它区域几乎全部是重力变化正值区域,出现了多处重力正值变化异常:在

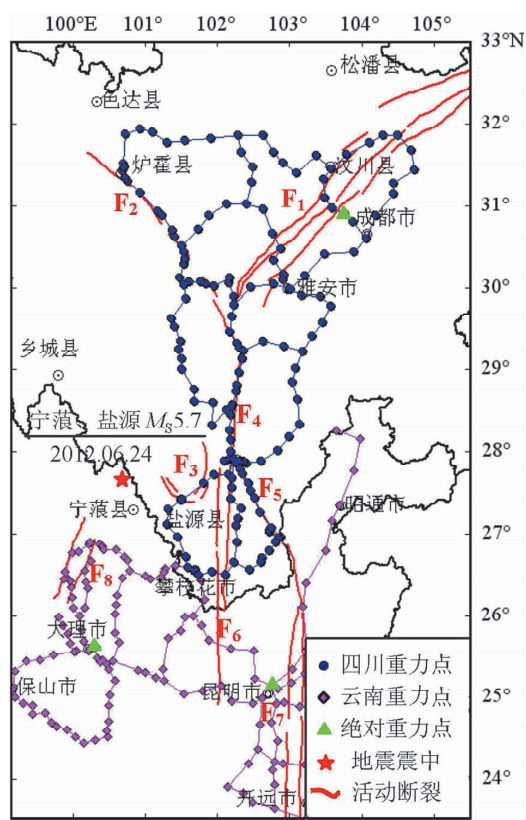


图1 四川和云南地区流动重力联测路线及构造示意图

Fig. 1 Sketch diagram of the distribution of gravity survey routes and tectonics in Sichuan and Yunnan Provinces

① 四川省地震局—震情速递. <http://www.scdzj.gov.cn/xwzx/zqsb>.

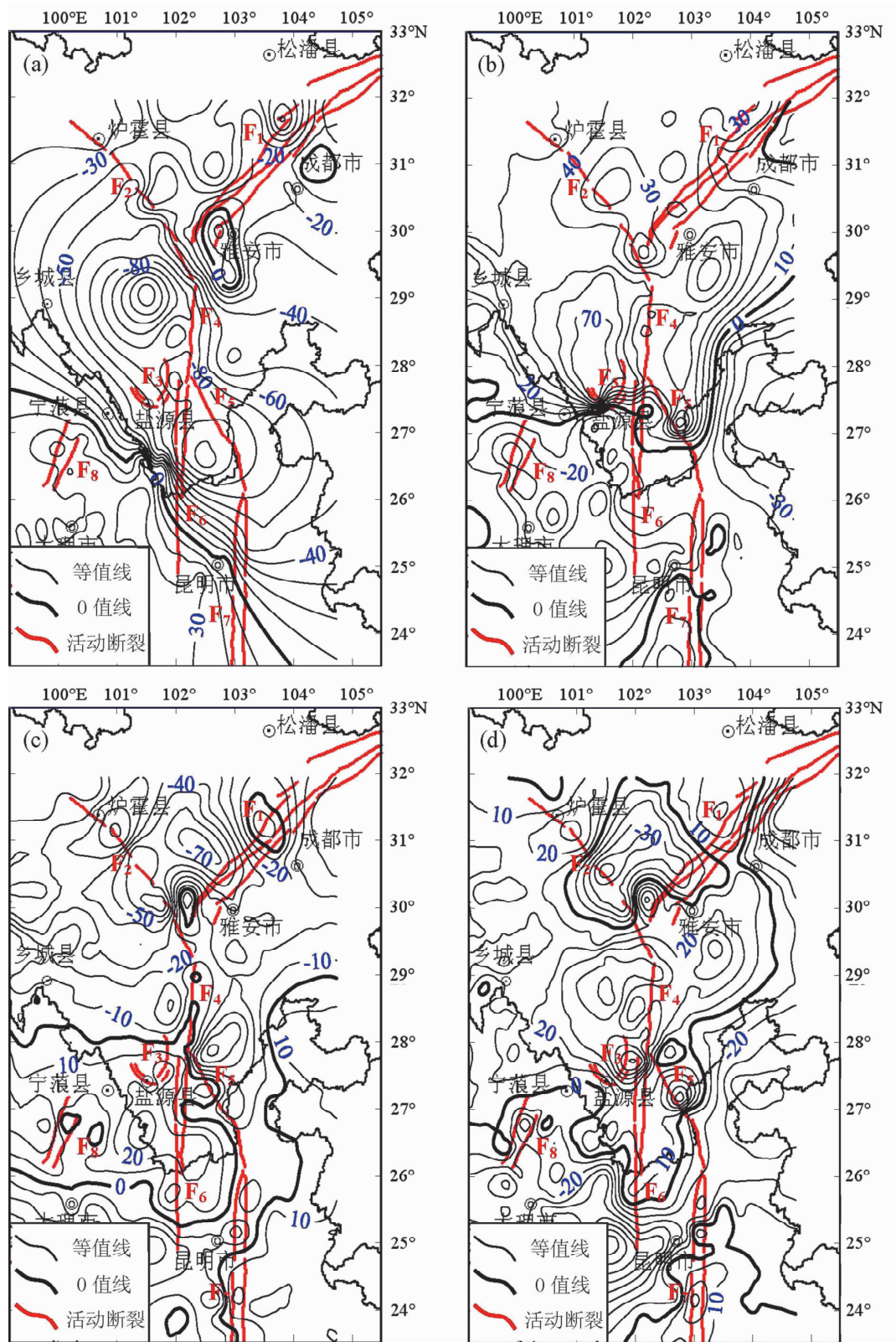


图2 四川和云南地区重力动态变化图 (2010-07 ~ 2012-03 时段) (单位: $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
 (a) 2010-07 ~ 2011-02; (b) 2011-02 ~ 2011-08; (c) 2011-08 ~ 2012-03; (d) 2011-02 ~ 2012-03

Fig. 2 Dynamic changes of gravity difference in Sichuan and Yunnan areas
 (2010-07 ~ 2012-03) (Unit: $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

石棉—康定区域是重力正值闭合等值线, 出现数值较小的重力变化正值异常区域, 等值线分布稀疏; 汶川地震余震区出现重力正值变化异常区域, 等值线分布较为密集, 在都江堰—北川—青川方向形成重力等值线变化梯度带, 青川没有实测的流动重力点通过, 但从等值线在北川地区变密的趋势来看, 青川地区的重力变化应该是较大的, 该梯度带及其附近发生了多个地震, 震级较大的是2011年11月1日青川文县5.4级地震和2011年12月26日彭州4.8级地震; 滇东测区重力正值变化较小, 没有出现重力正值变化异常区域。滇西测区则由上一个时段的重力正值变化转为重力负值变化, 变化数值不大, 等值线分布稀疏。宁蒗—盐源区域的重力变化值由上一个时段的负值变化转为正值变化, 变化幅度较大, 在盐源县城西南区域正值变化数值最大, 达 $800 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$, 出现了等值线较为密集的高值异常梯度带, 该梯度带延伸到了西昌、普格、宁南和雷波地区, 其中宁南—雷波梯度带邻近2012年9月7日彝良5.7、5.6级地震震中区域, 可能是该地震的活动对此梯度带的形成施加了影响。宁蒗—盐源—西昌—普格—宁南梯度带紧靠重力变化0值线, 0值线在盐源地区呈圆弧形的转折, 该梯度带及其附近地区宁蒗—盐源5.7、5.6级地震的震中在此时段等值线数值相对较小, 密度相对稀疏(由于震中位置没有实测点位通过), 但是处于高值异常梯度带上, 说明这个时段内宁蒗—盐源区域的构造断裂带活动较大, 使该地区的地壳结构状态和密度发生变化, 直接表现在该地区的重力变化在短期之内较大, 同时也说明该地区的重力正值变化始于2011年下半年(图2b)。

(3) 2011年8月~2012年3月

这个时段四川测区的康定—泸定小块区域继续重力正值变化并形成闭合等值线区域, 康定地区的等值线分布较为密集; 理县—汶川—都江堰区域小块区域是闭合的, 是数值较小的重力正值变化等值线区域; 川滇测区交界的中甸—木里—普格—米易—东川—武定—永仁—云龙所包围的区域呈数值较小的重力正值变化且等值线较为稀疏, 曲靖以南、路南以东区域也是低值重力正值变化区域。整个川滇测区重力正值变化区域面积较小且分散, 主要分布在川滇交界地区和滇东地区, 重力负值变化区域占主要面积, 图形变化情

况与图2b大致相反, 类似于图2a, 只是重力负值变化数值较小。宁蒗—盐源地区继续上一个时段的重力正值变化, 变化的数值变小, 约 $200 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$, 处于重力正负变化值交界区域附近, 分布着稀疏的重力正值变化等值线, 宁蒗—盐源5.7级地震的震中区域邻近重力变化0值线, 其重力变化数值约 $100 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$, 这说明在临震前约3个月宁蒗—盐源地区的重力变化虽然持续增加, 但是增加量已经变小(图2c)。

(4) 2011年2月~2012年3月

由于川滇测区重力正值变化是从2011年2月开始的, 所以从1a的尺度来分析震前的重力变化情况。从图2d可以看出, 从2011年初到2012年初, 川滇测区的重力主要以正值变化为主, 在马尔康—宝兴—康定北部—道孚区域、北川—都江堰—成都东侧和滇西区域是重力负值变化区域, 且数值不大。在重力正值变化区域出现异常的是康定地区和西昌—盐源区域: 康定地区重力正值变化等值线密集, 形成闭合区域, 靠近0值线; 西昌—盐源区域重力变化正值等值线密集, 形成闭合区域, 等值线密集方向向宁蒗方向延伸, 宁蒗—盐源5.7级地震的震中区域位于西昌—盐源区域附近, 邻近重力等值线0值线, 等值线分布稀疏, 重力变化数值较小, 约 $100 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$, 但这是由其附近川滇重力实测点重力变化辐射过去的, 从重力变化等值线的分布趋势来看, 如果该处有实测点位, 等值线的分布也会比较密集。这说明在2012年上半年川滇测区虽然以重力负值变化为主, 但是长时间尺度来看还是重力变化增加; 宁蒗—盐源地区在震前重力正值变化增加速度变慢, 形成了重力变化等值线梯度带, 聚集了较多的能量。

2.2 重力段差时序变化

重力段差时序变化能较好的反映跨断裂地段的重力动态变化。虽然宁蒗—盐源5.7级地震震中区域没有重力实测点位通过, 但在震中西北约9 km有一条小活动断裂延伸到滇西测区, 太安—白汉场新测段跨过该断裂。震中附近的断裂带还有: 东北方向约30 km的博科—木里断裂, 东南方向约33 km的小金河断裂及一些小活动断裂, 西南约45 km和58 km的洪门口断裂和大具断裂, 由于这些断裂带没有布设流动重力点, 不能直接研究震前各断裂带的活动变化, 但是相邻断裂带的活

动是互相影响的,所以在川滇测区各选取与震中附近断裂带相邻的活动断裂带两侧的重力点位,通过研究这些点位的段差变化来研究震中附近断裂带的重力动态变化。盐源弧形断裂西南段与博科—木里断裂和小金河断裂接壤,其跨断层测段是盐源—黄草;洱源—鹤庆断裂与小金河断裂接壤,其跨断层测段是龙山—丽江新。选取上述点位测段和与这些点位相邻而又不跨断裂带的流动重力点位测段(黄草—格萨拉、丽江新—太安、飞崖—龙山、丽江台—丽江新)的段差求出以起始变化值为0的相对变化量,以下盘相对上盘的变化为基准作出重力段差变化图(图3)进行分析研究。

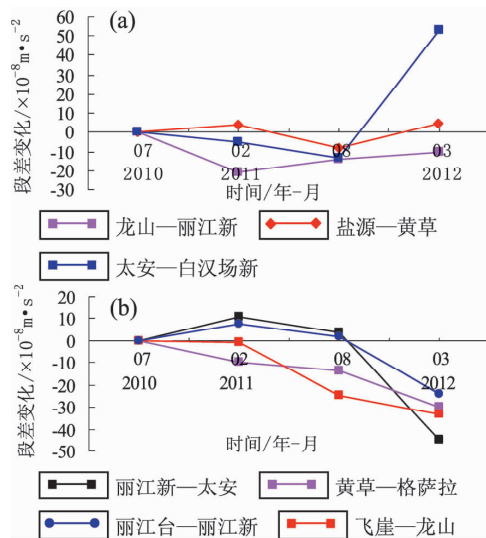


图3 跨断裂带(a)和非跨断裂带;(b)重力段差变化(2010-07~2012-03)

Fig. 3 Difference various of gravity segment across the fault zone (a) and non-across the fault zone (b) (2010-07~2012-03)

从图3可以看出,2010-07~2011-08时段跨断裂段差变化曲线的变化方向不一致,其变化值没有明显变化,但在震前2011-08~2012-03时段,段差值变化的方向却一致增大,太安—白汉场新测段的变化值有明显变化,约 $660 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$,其它段差变化值则较小。从图3b可以看出,在2010-07~2011-02时段,非跨断层变化段差变化值方向虽不同,但是变化数值都较小;2011-02~2011-08段差变化值朝减小方向发展,飞崖—龙山段差变化值相对较大,但不超过 $300 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$;

在2011-08~2012-03时段,各段差变化继续向减小方向发展,丽江新—太安测段变化较为显著,约 $500 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$,而其余测段的段差值变化量相对较小。由于地震发生之前,横跨发震构造的测段,重力段差值可能发生明显的变化,与发震构造无关的测段,重力变化值不大(吴兵,马丽,1982)。宁蒗—盐源5.7级地震震中西北小活动断裂带的太安—白汉场新测段在震前重力段差值变化明显,其相邻测段丽江新—太安测段段差虽然没有跨过断层,但受太安点影响,段差变化也较为显著,而同处断裂带一侧的非跨断层测段丽江台—丽江新测段段差值变化数值则变化相对较小,不超过 $300 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$,这说明该断裂是与发震有关的构造,该断裂带和震中附近断裂带的活动对地震的孕育、形成和发生起到了很大的作用;其余盐源弧形断裂和洱源—鹤庆断裂由于跨断层和非跨断层段差变化都不是特别显著,所以其构造运动与该地震无关,反而该地震的孕震活动通过小金河等断裂带的活动对其构造运动产生了影响,引起了它们的重力场的变化,使这些跨断裂测段段差值在震前一致增加,非跨断裂测段段差值则在震前一致减小。

3 讨论与结论

重力变化与构造应力之间有着密切的联系(向文,李辉,1999),重力场变化能反映出区域应力场的微动态活动。虽然2012年6月24日宁蒗—盐源5.7级地震震中位置没有实测的流动重力点位,但是由于断层活动是相互影响的,本文所采用的重力变化资料就是该地震对邻近区域的流动重力产生的影响而反映出地震的孕育过程。从重力场动态变化图像和段差时序变化可以看出,宁蒗—盐源5.7级地震是震中附近断裂带活动的结果,而断裂带的构造活动又影响了邻近的盐源弧形断裂、宁蒗断裂、洱源—鹤庆断裂和玉龙雪山东麓断裂等的活动,具体表现就是这些断裂带附近的流动重力点位的重力场变化。距离震中较近的四川盐源测区的盐源弧形断裂带等活动受到的影响较大,使该地区地壳物质密度发生变化,从而反映出了震中重力的变化。2011年下半年在宁蒗—盐源地区及其附近较大面积的区域形成了重

力正值变化高值异常区域,重力变化等值线形成了密集的高梯度带,构造活动聚集了大量的能量,满足了地震孕育发生的应力积累条件(申重阳等,2011),2012年上半年重力场正值变化区域大面积减少,重力正值高值异常区域消失,该地区的重力场正值变化虽然仍在增加,但是增加速度减小了许多,重力变化等值线稀疏,重力变化值减小到约 $200 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$,宁蒗—盐源5.7级地震的震中区域重力变化数值约 $100 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$,邻近重力变化0值线的转折部位,这样地震破裂部位的条件也具备了(申重阳等,2010),如果在震中区域有实测重力点位通过,图形效果会更明显;宁蒗—盐源5.7级地震前,邻近震中区域流动重力测段差值变化相对明显,这也是地震孕育的迹象(吴兵,马丽,1982)。重力正值变化显著的梯度带及其附近地区,往往在未来1~2年内有中强震发生(祝意青等,1999,2003;朱治国等,2012;梁伟锋等,2012),但是宁蒗—盐源5.7级地震从能量积累到发震,经历的时间约1 a,时间相对较短,该地震发生在非主流活动小断裂附近,断裂活动力度较大,使重力变化相对较大,在较短的时间积累了发震的能量并找到了能量爆发的突破口(震中),这是一个由非主流活动小断裂的构造活动引发的中强震。

从上面的讨论分析可以看出,宁蒗—盐源5.7级地震前的重力变化具有如下特点:

(1) 宁蒗—盐源5.7级地震是震区断裂带构造活动的结果,震前与发震有关的断裂带跨断层重力测段差值变化明显。

(2) 虽然宁蒗—盐源5.7级地震的震中区域没有实测流动重力点位,但是仍然较好地反映了地震从孕育到发生的过程中重力场变化情况:地震孕育阶段震中区域重力场出现大面积的重力正值变化高值异常区域,形成密集的正值变化梯度带;震前震中区域呈重力正变化低值状态,处于重力变化0值线附近,且等值线稀疏。

(3) 从重力场开始正值变化到发震经历的时间约1 a。

通过对宁蒗—盐源5.7级地震的重力场变化的分析和讨论,可以看出重力场动态变化对研究地震活动与地质构造活动的关系具有重要的意义。川滇测区2012年上半年的流动重力观测是在6月5日结束的,所以该期数据可视为宁蒗—盐源5.7级地震震前数据,对其重力场变化的研究与总结为对中强震乃至更高震级的地震预测预报能够提供的参考震例和经验。

参考文献:

- 陈运泰,顾浩鼎,卢造勋. 1980. 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,2(1):21-31.
- 贾民育,邢灿飞,孙少安. 1995. 滇西重力变化二维图像及其与5级(M_s)以上地震的关系[J]. 地壳形变与地震,15(3):9-19.
- 李辉,付广裕,孙少安,等. 2000. 滇西地区重力场动态变化计算[J]. 地壳形变与地震,20(1):60-66.
- 李辉,申重阳,孙少安,等. 2009. 中国大陆近期重力场动态变化图像[J]. 大地测量与地球动力学,29(3):1-10.
- 李瑞浩,黄建梁,李辉,等. 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.
- 梁伟锋,祝意青,徐云马,等. 2012. 文安5.1级地震前后不同时间尺度的重力变化分析[J]. 地震研究,35(3):318-322.
- 申重阳,李辉,孙少安,等. 2010. 2008年于田 $M_s 7.3$ 地震前重力场动态变化特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,30(4):1-7.
- 申重阳,谈洪波,郝洪涛,等. 2011. 2009年姚安 $M_s 6.0$ 地震重力场前兆变化机理[J]. 大地测量与地球动力学,31(2):17-23.
- 苏有锦,秦嘉政. 2001. 川滇地区强震活动与区域新构造运动的关系[J]. 中国地震,17(1):24-34.
- 吴兵,马丽. 1982. 断层活动与重力变化关系的探讨[J]. 地震,(2):28-30.
- 向文,李辉. 1999. 重力场构造与构造应力场内关系的理论研究[J]. 地壳形变与地震,19(1):32-36.
- 朱治国,刘代芹,李杰,等. 2012. 2011年新疆伽师 $M_s 5.8$ 地震重力场前兆异常特征[J]. 地震研究,35(2):201-206.
- 祝意青,胡斌,张永志. 1999. 永登5.8级地震前后的重力场动态图像特征研究[J]. 地壳形变与地震,19(1):71-77.
- 祝意青,胡斌,朱桂芝,等. 2003. 河西地区重力场及其动态演化特征[J]. 大地测量与地球动力学,23(4):44-48.

Gravity Variation before Ninglang – Yanyuan $M_s5.7$ Earthquake in 2012

ZHENG Bing¹, WANG Qing-hua², LUO Hai-yuan¹, MA Ling-li¹,
PU Xiao-xia¹, LI Fei-fei¹, SU Qin¹

(1. *Surveying Engineering Institute, Earthquake Administration of Sichuan Province, Yaan 625000, Sichuan, China*)

(2. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 620300, Yunnan, China*)

Abstract

Using the flow gravity observation data in Sichuan and Yunnan provinces from Jul. , 2010 to Mar. , 2012, we analyzed the gravity field dynamic evolution in the process of preparation and occurrence of Ninglang-Yanyuan $M_s5.7$ earthquake on Jun. 24, 2012. The results showed that in the process of earthquake preparation, a large area of high value anomaly of gravity positive changes appeared and formed to the intensive gradient belt of gravity positive in the area of epicenter. Before the earthquake, the epicenter region appeared the low value anomaly of gravity positive changes, where was near to the 0 contour line of the gravity field and the sparse contour line, and the variation in segment differences of the gravity across the fault zone which induced the earthquake was obvious.

Key words: flow gravity measuring; gravity field; Sichuan – Yunnan area; Ninglang – Yanyuan $M_s5.7$ earthquake