

郑兵、易天阳、杨洋等, 2014, 2013年芦山7.0级地震前后重力场变化特征, 中国地震, 30(4), 543~550。

2013年芦山7.0级地震前后 重力场变化特征

郑兵 易天阳 杨洋 苏琴 蒲晓霞 马伶俐 李菲菲

四川省地震局测绘工程院, 四川雅安市上坝路139号 625000

摘要 利用四川地区2010~2013年流动重力观测数据作出的重力场动态变化图像和重力段差时序变化图像, 对芦山7.0级地震前后的重力场动态演化特征进行了研究, 结果表明: 震前重力场经历了约3年的重力增大和约1年的减小变化, 重力变化呈“上升→加速上升→减速上升→加速下降→减速下降”特征; 芦山地震发生在重力场变化由下降转为上升的回调过程中; 震后重力场变化以较快的速度恢复到接近震前状况, 并出现重力正值变化异常区域; 临震前震中区域重力场变化数值较小, 构造带活动速度变慢。

关键词: 流动重力观测数据 2013年芦山地震 动态演化特征 重力场变化

[文章编号] 1001-4683(2014)04-0543-08 [中图分类号] [文献标识码] A

0 引言

2013年4月20日08时02分在四川省雅安市芦山县(30.3°N, 103.0°E)发生了7.0级地震。本次地震发生在龙门山地震断裂带南西段断层上盘(张勇等, 2013), 距汶川地震主震区87km, 震源深度13km, 为逆冲型地震, 震中烈度初步估计为IX度, 它也是汶川地震后发生在龙门山断裂带上最强的一次地震(王为民等, 2013)。在地震孕育的过程中, 随着震源区域应力的不断集中, 使地壳内部物质发生迁移, 导致地壳内部密度发生变化, 从而使该处地表的重力值发生变化(贾民育等, 1985、2000; 曾融生等, 1992; 祝意青等, 1999、2001、2003、2005; 李清林等, 2001; 焦青等, 2008), 这种变化能被重复重力测量监测到, 而根据这些监测到的重力值变化所绘制的重力场动态变化图一直是地震预测研究的基本信息源(陈运泰等, 1980; 贾民育等, 1995; 李瑞浩等, 1997; 李辉等, 2009)。芦山7.0级地震发生在四川流动重力网监测范围内, 其孕震过程中的重力场变化被流动重力监测所记录, 对分析预测该地震起到了一定的参考作用, 总结归纳大地震的重力场变化特征, 对研究活动断裂构造活动与地震的关系和地震的预测预报具有较高的参考价值。

[收稿日期] 2013-07-01; [修定日期] 2014-12-11

[项目类别] 2014年中国地震局震情跟踪支撑项目(2014010205)、“中国大陆7~8级地震中长期预测组织协调”课题(123210)共同资助

[作者简介] 郑兵, 男, 1976年生, 工程师, 主要从事流动重力野外测量及分析研究工作。

E-mail: zh-bing@163.com

1 发震地区概况及重力资料处理

发震区位于四川省雅安市芦山县,处于四川盆地西缘,属山区地带,龙门山断裂带南西段在此经过。而震中区附近是龙门山主山前边界断裂,为逆冲断裂,位于鲜水河断裂带、安宁河断裂带和龙门山断裂带交汇的三岔口地区边缘地带,这一地区历史地震强度并不高,但是据地质调查结果,该段应具备发生大地震的地质构造背景(苏有锦等,2001;闻学泽等,2009;朱守彪等,2009)。2008年汶川8.0级地震发生后,四川省地震局对原有的四川流动重力网进行了优化改造,不但将原有的成都、西昌和甘孜等3个测网连成一片,而且扩大了监测范围(图1),芦山地震震中就处在监测网范围内,其重力变化能够被流动重力监测到。本研究所采用的流动重力资料是2010年下半年新网建成后的观测资料。由于川西地区重力变化的情况复杂,资料的平差方式采用了拟稳平差,拟稳点的选取需满足以下2个条件:①点位处于相对稳定的地质构造单元中(祝意青等,1999、2011),比较稳定,受周围环境和外界影响小;②点位观测资料连续,无中断和重力变化差异大的情况。拟稳平差时尽量多的选取联测路线上满足条件的点位作为拟稳点进行拟稳平差,利用平差后的数据绘制出重力

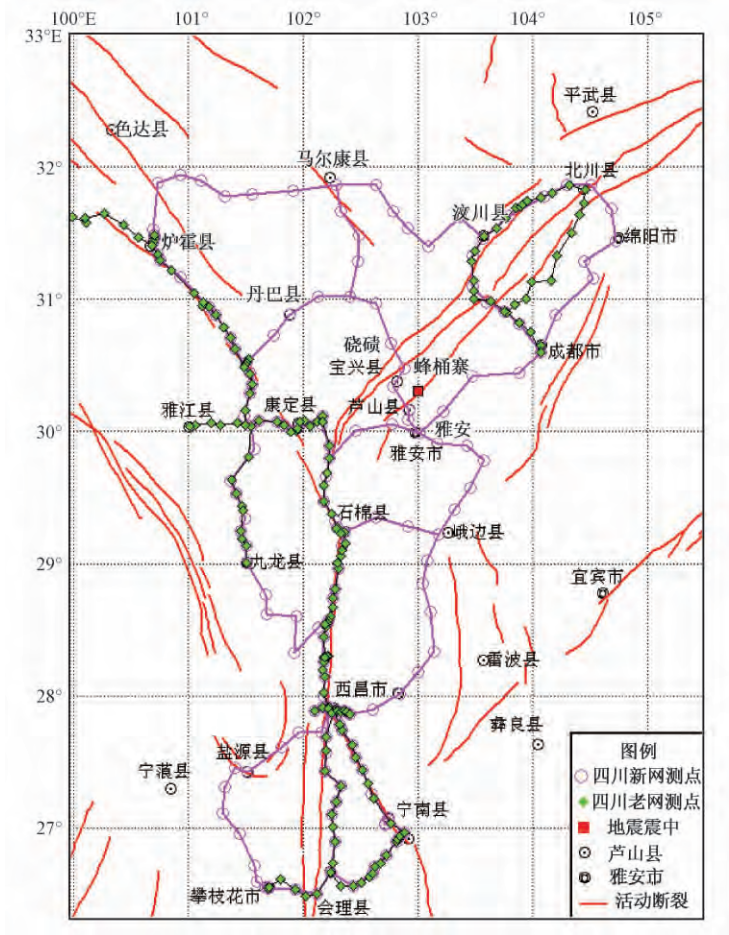


图1 四川省流动重力联测路线及构造示意图

场动态变化等值线图。

2 芦山 7.0 级地震前后重力场变化

对芦山 7.0 级地震前后的重力场变化的分析依重力场差分动态变化、累积动态变化及段差时序变化等逐一进行。

2.1 重力场差分变化

图 2 是四川地区相邻 2 测期重力场变化的差分图,笔者按照地震前后不同测期的重力场变化情况对差分图进行分析。

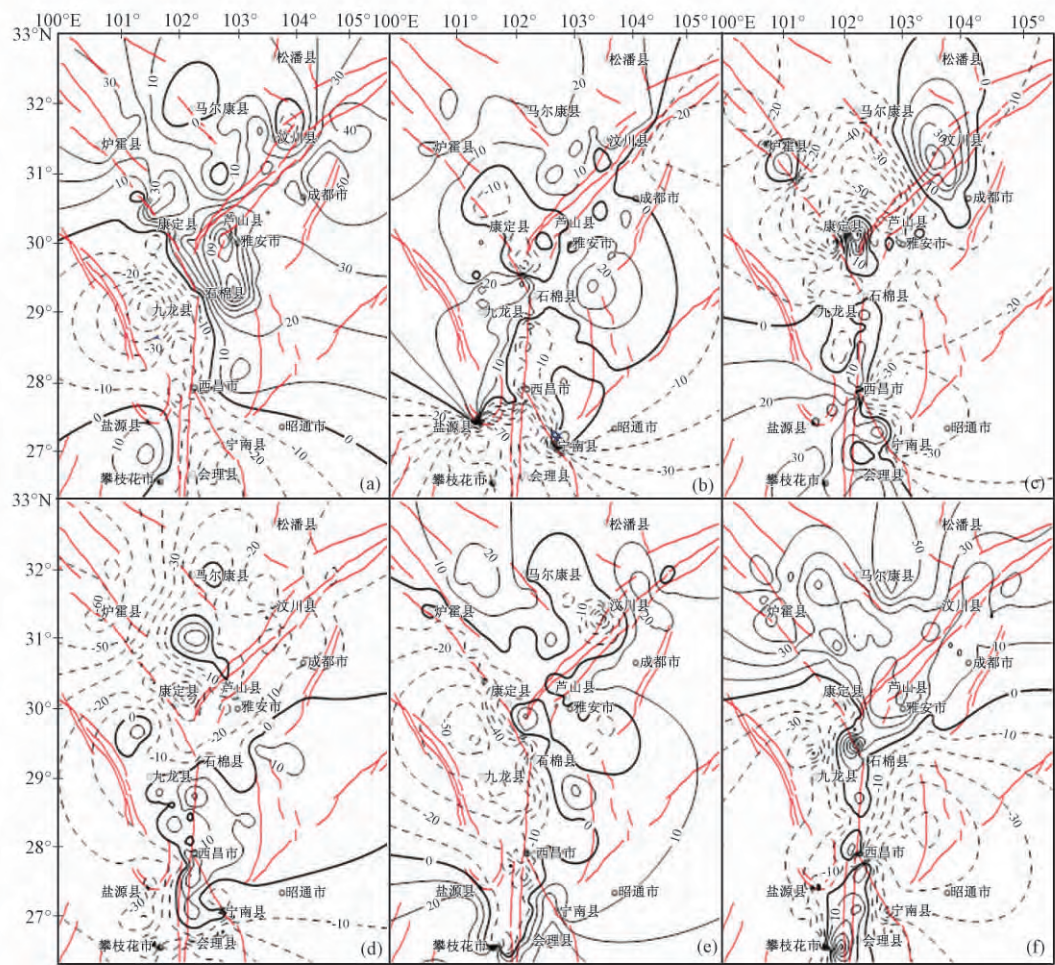


图 2 四川流动重力差分动态变化等值线图(2010 年 08 月~2013 年 08 月)
(a) 201008-201103 测期; (b) 201103-201110 测期; (c) 201109-201204 测期; (d) 201204-201209 测期;
(e) 201209-201304 测期; (f) 201304-201308 测期。等值线单位: $\times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (图中红线为断裂)

2.1.1 芦山地震前(201008-201209 测期)

从图 2 可以看出,201008-201109 测期震区及其邻区(主要指龙门山、安宁河和鲜水河等

断裂交汇的三岔口地区)重力场变化基本上是以正值变化为主,图 2(a)显示三岔口地区重力场出现闭合的重力正值变化异常梯度带区域,变化值最高达 $80 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,震中区位于该闭合区域的东北侧梯度带边缘,呈数值较小的正值变化。事实上,在此时期之前、汶川地震以后,在笔者亲历的几期流动重力测量过程中,均发现三岔口地区的重力场变化基本上呈增加趋势,只是 2010 年 8 月以前的甘孜西昌测网网形较差,测量缺少控制,资料可信度较低,难以定量分析,但是重力场变化的增加是可以确定的,这与汶川地震对龙门山断裂带南段起到加载作用,进而影响芦山地震的孕震及发生(赵静等,2013;蒋锋云等,2013)的认识基本一致。图 2(b)显示三岔口地区仍以重力正值变化为主,但变化量变小,开始出现小面积、数值较小的重力负值变化区域,震中区基本上处于重力变化 0 值线附近。201109 - 201209 测期(图 2(c)、(d))显示三岔口地区重力场从 2011 年的正值变化为主转为以负值变化为主。在此过程中,震中区的重力变化虽然保持持续的负变化,但是变化数值大小却是递减,且基本上位于 0 值线附近,也就是说,三岔口地区重力场的正值变化起于汶川地震以后,在 2012 年的上半年后加速转为负值变化,在芦山大震前半年,震中地区的重力变化开始回调。祝意青等(2013)认为芦山大震前震中附近的重力场变化,是一个由“重力正值异常区→重力异常区变化持续增加→沿相关活动构造带出现重力变化梯度带→局部‘硬化’构成的重力异常演化过程”。

2.1.2 芦山地震后(201209-201309 测期)

这个测期的差分图反映的是震后重力场变化情况,从图 2(e)可以看出,震后三岔口地区重力场开始向常态转化,出现面积较大的重力正值变化区域,震中区是数值较小的重力正变化,说明震中区震后重力场接续了震前的回调变化并且已回调到较小数值的正值变化。图 2(f)显示在 2013 年下半年重力场正值变化进一步加大,正值变化区域增大,几乎遍布四川测区的北部,三岔口地区重力场形成梯度带,展布方向大致与龙门山断裂带和鲜水河断裂带相同,在石棉地区形成一个正值变化异常区突出部,震中区重力场正值变化数值变大,炉霍地区和马尔康地区也出现闭合的正值异常区域。

2.2 重力场累积变化动态

为了分析震区较长时间的重力场累积变化动态情况,以 2010 年 8 月的首期观测资料为基准,绘制了芦山地震前后重力场的累积变化动态图(图 3)。从图 3(a)可以看出,在芦山震前半年,四川测区出现了 2 个重力正值变化异常区域,一个是成都-都江堰地区,另一个就是三岔口地区。成都-都江堰地区虽然出现重力场正值变化异常,但是其等值线数值和密度相对较小,而三岔口地区重力场形成了密集的、闭合的、不规则三角形的正值变化等值线高梯度带环区,最高异常值高达 $80 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。这个高梯度带环区的形状与三岔口主要活动断裂带的走向基本一致,震中则位于高梯度带环区弯转部位附近,这与强震一般发生在重力变化的局部异常、高梯度带以及梯度带的弯转部位的认识基本一致(祝意青等,1999、2001、2003、2005、2013;申重阳等,2010、2011),充分说明震前三岔口地区积累了较多的地应力。图 3(b)是芦山震后的累积变化图,由图可知,震后测区重力场正值变化区位置与面积几乎没有变化,成都-都江堰地区和三岔口地区仍然是正值变化异常区,但是变化数值减小,等值线密度降低,梯度带展布仍然与三岔口主要活动断裂带的走向基本一致,震中仍处于梯度带的弯转处,而重力变化数值降低,显示震后地应力得到了一定的释放。图 3(c)是震后半年

的重力场累积变化图,较之图 3(b),测区重力场正值变化数值和面积皆增大,即成都-都江堰和三岔口这 2 个重力正值变化异常区在数值和面积上都增大了,三岔口地区重力正值变化等值线密度加大,形成密集的闭合梯度带环,出现九龙及雅安一负一正两个局部重力异常区及伴生的重力变化高梯度带,且沿雅安-石棉-康定-马尔康-炉霍分布,形成了一个内陷的数值较小的负值区域,震中处于梯度带拐角位置,重力正值变化增加较多,这些说明在震后半年测区重力场变化回调,接近了震前的状态。

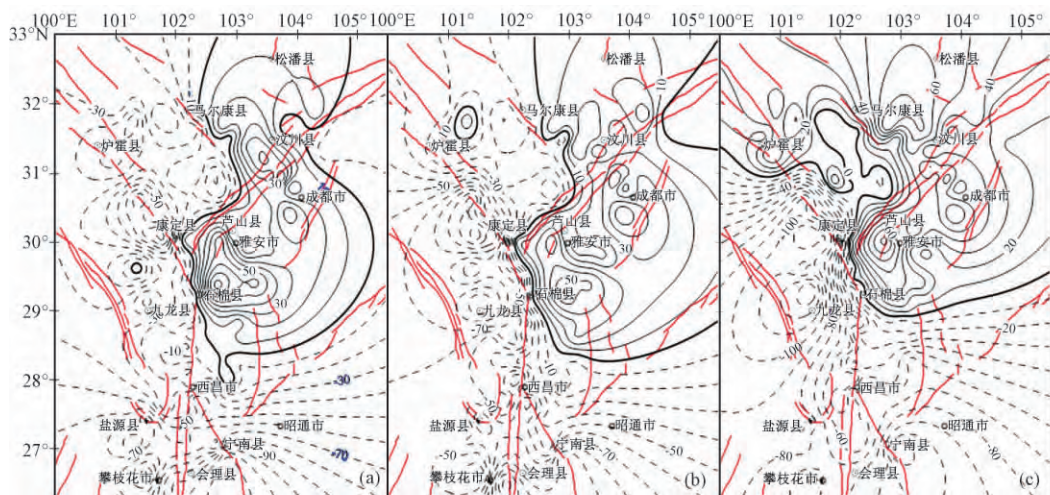


图3 四川流动重力累积动态变化等值线图(2010 年 08 月~2013 年 08 月)

(a) 201008-201209 测期; (b) 201008-201304 测期; (c) 201008-201308 测期。等值线单位: $\times 10^{-8} \text{ m/s}^2$

2.3 重力段差时序变化

重力段差时序变化能够较好地反映跨断裂地段的重力动态变化,故本文选取雅安-飞仙关、飞仙关-芦山、芦山-穆坪(跨灌县-安县断裂、龙门山山前主边界断裂)、穆坪-蜂桶寨(跨越映秀-北川断裂)、蜂桶寨-硃磬(跨越龙门山中央断裂、汶川-茂汶断裂、龙门山后山断裂)、硃磬-达维等 6 个测段的重力段差时序变化(图 4)进行分析,分析中以龙门山断裂下盘相对上盘方向为前进方向。

图 4 显示芦山-穆坪、穆坪-蜂桶寨、蜂桶寨-硃磬等 3 个跨断裂测段段差出现不同的有规律的变化:芦山-穆坪测段在 201103-201204 测期呈逐渐下降趋势,在临震前 1 年呈加速上升趋势,在震后上升趋势减缓;穆坪-蜂桶寨测段的变化趋势与芦山-穆坪测段相反;蜂桶寨-硃磬测段在 201204-201308 测期的变化量虽然没有芦山-穆坪大,但是其变化趋势基本上相同。由于这 3 个测段均跨断裂带,但是由于距离震中远近的差异,测段变化量是呈逐渐衰减的状态,但在临震前 1 年的测段段差的变化量相对加大,在震后则变化量减小,这说明发震断裂在芦山地震前逆冲运动加大,能量释放增强,并在地震时释放量达到最大,震后发震断裂运动减弱。其它 3 个不跨断裂的测段段差虽也出现一定的变化,但变化呈无规律的波动性。

在 20108-201204 测期,蜂桶寨-硃磬段差变化量很大,累积接近 $60 \times 10^{-8} (\text{m/s}^2)$,明显大于同期的芦山-穆坪、穆坪-蜂桶寨等测段。在 201204-201304 测期芦山地震前后段差变化量很小,但在震后半年段差变化量又开始加大。芦山-穆坪、穆坪-蜂桶寨测段在 20108-

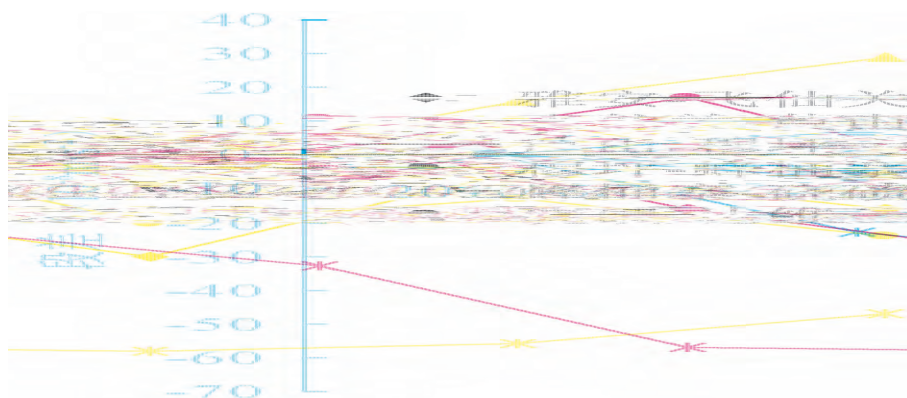


图4 震区部分测段重力段差变化时序图(2010年08月~2013年08月)

201204 测期段差变化方向尽管有所不同,但因所跨断裂距震中较近,随着蜂桶寨-硃砂测段段差变化量的增大,其段差变化量亦逐渐增大,在芦山地震前后段差变化量最大,并出现明显的突跳现象;震后半年段差变化量稍微减小,但是变化仍然明显,显然蜂桶寨-硃砂测段所跨断裂带的活动对这2个测段所的跨断裂带活动施加了影响,使它们的活动强度变大;在芦山地震后,这些邻近震中的断裂带的活动又反过来影响蜂桶寨-硃砂测段所跨断裂带使其活动开始增强。由于蜂桶寨-硃砂测段所跨断裂带包含汶川地震发震断裂带——龙门山中央断裂带,从段差时序变化过程来看,显然汶川地震断裂带的地震活动影响了相邻断裂带活动,引起地下应力的重新分布,导致芦山地震震区断裂应变积累的速率的提高,加速了芦山大震的孕育进程(祝意青等,2013;赵静等,2013)。在这个过程中,芦山地震震中区形成北北东向的挤压逆冲形变特征,似可以这样认为,是汶川巨震的孕育和爆发促进了芦山大震的爆发。

3 讨论和结论

重力变化与构造应力之间有着密切的联系(向文等,1999),重力场变化能反映出区域应力场的微动态活动(申重阳等,2010、2011)。通过对重力场变化情况的分析发现,在2008年汶川地震以后,受汶川地震的影响,芦山大震震中区所在的三岔口重力场基本上呈增加的正值变化;在2011年上半年三岔口地区重力场变化等值线呈高梯度带闭合区域,震中区位于梯度带的拐转部位附近且数值较小,在2011年下半年三岔口地区重力场基本上是数值较小的正值变化,这个过程基本上呈“上升→加速上升→减速上升”的情形。在2012年的上半年,三岔口地区重力场加速转为负值变化,在芦山大震前半年,震中地区的重力变化开始回调,这个过程基本上呈“加速下降→减速下降”状态,在此过程中震中区基本上处于重力变化0值线附近;芦山大震后重力场以较快的速度回调,在震后半年震中区重力场正变化数值达 $60 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 左右。芦山地震前后重力场变化特征基本上与1976年唐山7.8级地震(李瑞浩等,1997)、2008年汶川8.0级地震、2008年于田7.3级地震(申重阳等,2010)、2010年玉树7.1级地震相类似,但是芦山地震重力场变化也有自己的特点,那就是震后重力场的恢复不是平缓渐变,而是在震后半年就以较快的速度恢复到接近震前的状况,继续保

持重力场正值异常状态。这可能是由于龙门山断裂带南西段的活动虽然受到汶川地震的影响而使断裂应变积累速度加快(赵静等,2013),逆冲应变能增强(蒋锋云等,2013),发生了芦山地震;但是在芦山地震发生后,芦山至汶川之间还有 65km 左右的闭锁段未破裂,汶川地震和芦山地震对尚未破裂的闭锁区段具有一定的加载作用(蒋锋云等,2013),使四川测区再度出现重力场正值变化异常区域,而这一变化特征,需要给予关注。

综合芦山 7.0 级地震前后的重力场演化情况,可以看出芦山地震前后的重力变化情况具有如下特点:

(1) 芦山 7.0 级地震孕震时间较长,震前重力场经历了约 3 年的增大和约 1 年的减小变化,重力变化基本上呈“上升→加速上升→减速上升→加速下降→减速下降”的过程。

(2) 芦山地震发生在重力场变化由下降向上升的回调过程中,震后重力场变化以较快的速度恢复到接近震前状况,出现重力正值变化异常区域。

(3) 临震前震中区重力场变化数值较小,构造带活动速度变慢。

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,地震学报,2(1),21~31。
- 贾民育、刘敬宽、吴兵等,1985,论唐山地震前重力变化的可靠性,地壳形变与地震,5(3),249~257。
- 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,地壳形变与地震,(3),9~19。
- 贾民育、詹洁辉,2000,中国地震重力监测体系的结构与能力,地震学报,22(4),360~367。
- 蒋锋云、朱良玉、张晓亮等,2013,芦山 7.0 级地震形变孕震背景及同震响应,地震研究,36(4),450~454。
- 焦青、杨选辉、许丽卿等,2008,汶川 8.0 级地震前后龙门山断裂带活动特征浅析,大地测量与地球动力学,(4),7~11。
- 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,大地测量与地球动力学,29(3),1~10。
- 李清林、秦建增,2001,大同 5.6 级地震前后的重力场变化和深部动力学过程,地壳形变与地震,21(4),43~51。
- 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,地震学报,19(4),399~407。
- 王为民、郝金来、姚振兴,2013,2013 年芦山地震震源破裂过程反演初步结果,地球物理学报,56(4),1412~1417。
- 闻学泽、张培震、杜方等,2009,2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景,地球物理学报,52(2),446~454。
- 申重阳、李辉、孙少安等,2010,2008 年于田 $M_s7.3$ 地震前重力场动态变化特征分析,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 $M_s6.0$ 地震重力场前兆变化机理,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,中国地震,17(1),24~34。
- 向文、李辉,1999,重力场构造与构造应力场内在关系的理论研究,地壳形变与地震,19(1),32~36。
- 曾融生、孙为国,1992,青藏高原岩石圈及其东部邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论,地震学报,14(增刊),523~533。
- 张勇、许力生、陈运泰,2013,芦山“4·20”地震破裂过程及其致灾特征初步分析,地球物理学报,56(4),1408~1411。
- 赵静、武艳强、江在森等,2013,芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究,地震学报,35(5),681~691。
- 朱守彪、张培震,2009,2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震发生过程的动力学机制研究,52(2),418~427。
- 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象特征研究,地壳形变与地震,19(1),71~77。
- 祝意青、陈兵、张希等,2001,景泰 5.9 级地震前后的重力变化研究,中国地震,17(4),356~363。
- 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,大地测量与地球动力学,23(4),44~48。
- 祝意青、胡斌、朱桂芝等,2005,民乐 6.1、岷县 5.2 级地震前区域重力场变化,大地测量与地球动力学,(1),24~29。
- 祝意青、刘芳、郭树松,2011,2010 年玉树 $M_s7.1$ 级地震前的重力变化,大地测量与地球动力学,31(1),1~5。
- 祝意青、闻学泽、孙和平等,2013,2013 年四川芦山 $M_s7.0$ 地震前的重力变化,地球物理学报,56(6),1887~1894。

The variation characteristics of gravity field before and after of the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake

Zheng Bing Yi Tianyang Yang Yang Su Qin Pu Xiaoxia Ma Lingli Li Feifei

Surveying Engineering Institute, Earthquake Administration of Sichuan Province, Ya'an 62500, Sichuan, China

Abstract On the basis of gravity observation data from 2010 to 2013 in the Sichuan area, we draw dynamic pictures of gravity field and curves of gravity segment difference at some measuring-sections. These pictures have been used to study the dynamic evolution characteristics of the gravity field before and after the Lushan $M_s7.0$ earthquake. The result shows that the gravity field has experienced increase change about 3 years and decreases change about 1 year before the earthquake in a gravity field variation pattern of rise→accelerated rise→slow rise→accelerated decline→slow decline. The Lushan earthquake occurred in the callback procedure of the gravity field from decline to increase. The gravity field changes returned to near pre-earthquake conditions at a faster rate after the earthquake with the anomalies in positive gravity change areas. The gravity field changes of epicenter region was smaller before the earthquake and the tectonic activities were slower.

Key words: The repeated gravity observation data Lushan $M_s7.0$ earthquake The dynamic evolution characteristics The gravity field the dynamic evolution characteristics The gravity field changes