

徐立, 何万平, 周红伟, 等. 福建重力场演变特征与仙游  $M_L$  5.2 级地震研究[J]. 华南地震, 2019, 39(1): 76–85. [XU Li, HE Wanping, ZHOU Hongwei, et al. Study on the Evolution Characteristic of Gravity Field in Fujian Province and Xianyou  $M_L$  5.2 Earthquake[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 76–85]

## 福建重力场演变特征与仙游 $M_L$ 5.2 级地震研究

徐立, 何万平, 周红伟, 占惠, 许仪西, 洪鹏欣

(厦门地震勘测研究中心, 厦门 361021)

**摘要:** 对福建地区 2008—2017 年的流动重力复测资料进行系统整理和分析, 从重力场时空变化角度分析了福建地区重力场演变特征, 并重点研究了 2013 年仙游  $M_L$  5.2 级地震前区域重力场累积变化和震中附近测点重力点值时序变化, 探讨了重力场变化与地震的关系。研究发现: 福建地区重力场变化显著, 且呈现逐渐增强态势; 仙游地震发生前, 沙县—南日岛断裂两侧重力正、负高值异常变化, 震中附近测点重力值存在转折异常。

**关键词:** 重力场; 重力异常; 仙游地震

中图分类号: P315.726

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)01-0076-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.01.013

## Study on the Evolution Characteristic of Gravity Field in Fujian Province and Xianyou $M_L$ 5.2 Earthquake

XU Li, HE Wanping, ZHOU Hongwei, ZHAN Hui, XU Yixi, HONG Pengxin

(Xiamen Research Center of Seismology Survey, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on the mobile gravity measurement data in Fujian area from 2008 to 2017, the paper analyzed the temporal-spatial evolution of gravity field in Fujian area, focused on the cumulative changes of gravity field and the time variations of gravity point values of measuring points near the epicenter before Xianyou  $M_L$  5.2 earthquake in 2013, and discussed the relationship between gravity field and earthquake. The results show that the gravity field in Fujian area varied significantly with gradually increasing trend. Before the occurrence of the Xianyou earthquake, the gravity positive and negative high values on both sides of the Shaxian-Nanri fault changed abnormally, and there was a turning abnormality in the gravity value of the measuring points near the epicenter

**Keywords:** Gravity field; Gravity anomaly; Xianyou earthquake

收稿日期: 2018-03-15

作者简介: 徐立(1989-), 男, 工程师, 主要从事地球物理、重力研究。

E-mail: 389218117@qq.com.

## 0 引言

地球重力场是基本的地球物理场之一,它与地球形状和内部密度结构密切相关。在地震孕育过程中,随着震源区应力的不断积累,导致地面点的空间位置变化,此外,应变将伴生地壳介质密度的变化,所有这些都将导致地面重力场的变化<sup>[1]</sup>。通过重力异常变化来获取地球内部的物理机制,探讨不同时空重力场异常变化与地震孕育的关系。

国内学者做过一些福建地区重力场及其与地震活动相关性的研究工作。梁全强等<sup>[2]</sup>进行了台湾海峡西岸重力场变化梯度场图像分析;许仪西等<sup>[3]</sup>讨论过福建东南沿海重力场演变特征及其与地震的关系;周红伟等<sup>[4]</sup>研究了福建地区综合场地的重力资料。本文在前人的基础上,首次研究了福建地区 2008 年新的流动重力测网建立以来的重力场演化特征。

经过多年的流动重力观测,福建地区获得了较丰富的重力场变化资料。本文依据 2008—2017 年福建省流动重力的复测资料,进行了较为系统的处理与分析,总结了近年来全省的重力场演化特征,并重点对 2013 年仙游  $M_L 5.2$  级地震的震前重力场变化特征进行研究。

## 1 测区概况与资料处理

### 1.1 测区地震构造环境

福建及其沿海地区的地震活动,无论历史上或现今均在我国东南沿海较为突出,其频次和强度都居华南较高水平。福建地区地震活动较为突出,是与其所处的地震地质构造背景有关。就板块构造而言,福建位于欧亚板块的东南部,地处太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲碰撞带的内侧。区内从沿海到内陆活动断裂带贯穿全省,具有构造规模大、延伸长、切割深和活动性强等特点<sup>[5]</sup>。

福建省地质构造格局主要受三条近 NNE—NE 向展布的断裂带控制(图 1),自东至西有长乐—诏安断裂、政和—海丰断裂、邵武—河源断裂,这几条断裂规模较大,贯穿全省并延伸至广东省;此外自北至南还存在多条 NNW—NW 向断裂带:闽江断裂、沙县—南日岛断裂、永安—晋江断裂、九龙江断裂、上杭—云霄断裂等,这些断裂部位交错构成了福建省内陆的发震构造。福建地区的构造应力场主压应力轴方向为 NW 方向,但存在一定的区域差异,其中在福建北部主要方向为 NNW 方向,南部为 NWW 至近 EW 方向<sup>[6]</sup>。

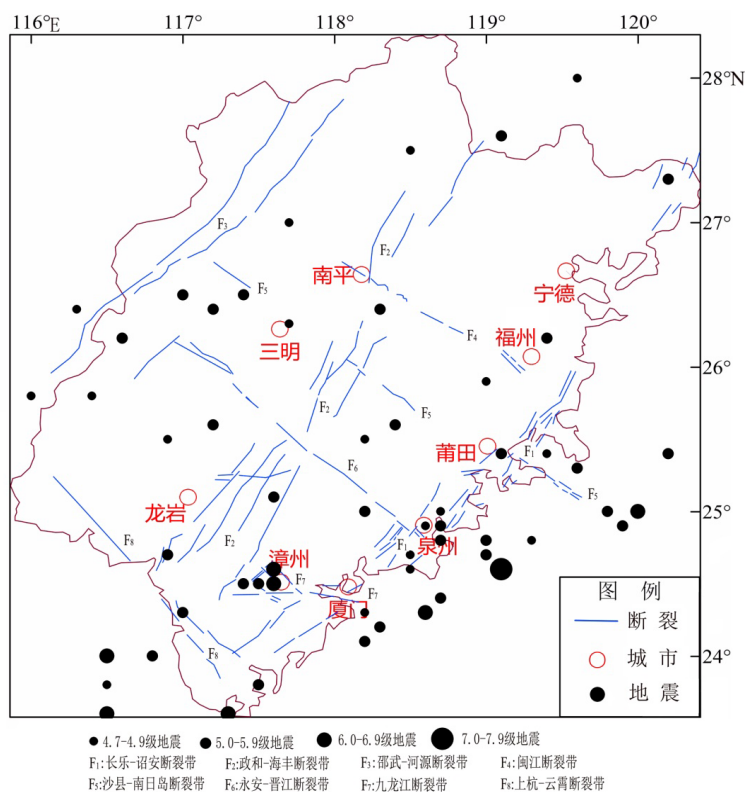


图 1 福建省地震构造图

Fig.1 Seismotectonic map of Fujian province

从第四世纪以来断裂活动有所增强，特别是 NE 向与 NW 向断裂的交汇处，地震活动尤其明显，其中长乐—诏安沿海断裂带是福建地区地震的高频地带。

1.2 测区流动重力测网概况

福建省于 2008 年建成新的重力测网，扩大了监测范围，基本上覆盖了全省，共计 217 个测点，248 个测段(图 2b)，改变了原来重力测网只布设在福建东南沿海长乐—诏安断裂带和闽赣环的格局(图 2a)，网型的加密一定程度上提升了对中小地震的监测能力。测点在闽东南沿海区域分布较为密集，测段跨越长乐—诏安断裂、政和—海丰

断裂、邵武—河源断裂等主要活动断裂。

1.3 测区资料处理

本文采用了 2008—2017 年的流动重力复测资料，观测资料的处理采用中国地震局实用化攻关推广的应用软件(LGADJ)进行，采用统一起算基准的整体拟稳平差计算方法：选取测区中 5 个比较稳定的点位(图 2b)作为统一起算拟稳基准，拟稳点之间重力变化差异较小，反映的重力场合理。通过对 18 期观测资料的平差处理，得到各期流动重力资料观测的点值精度(表 1)，均值为  $8.98 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，达到较高水平。

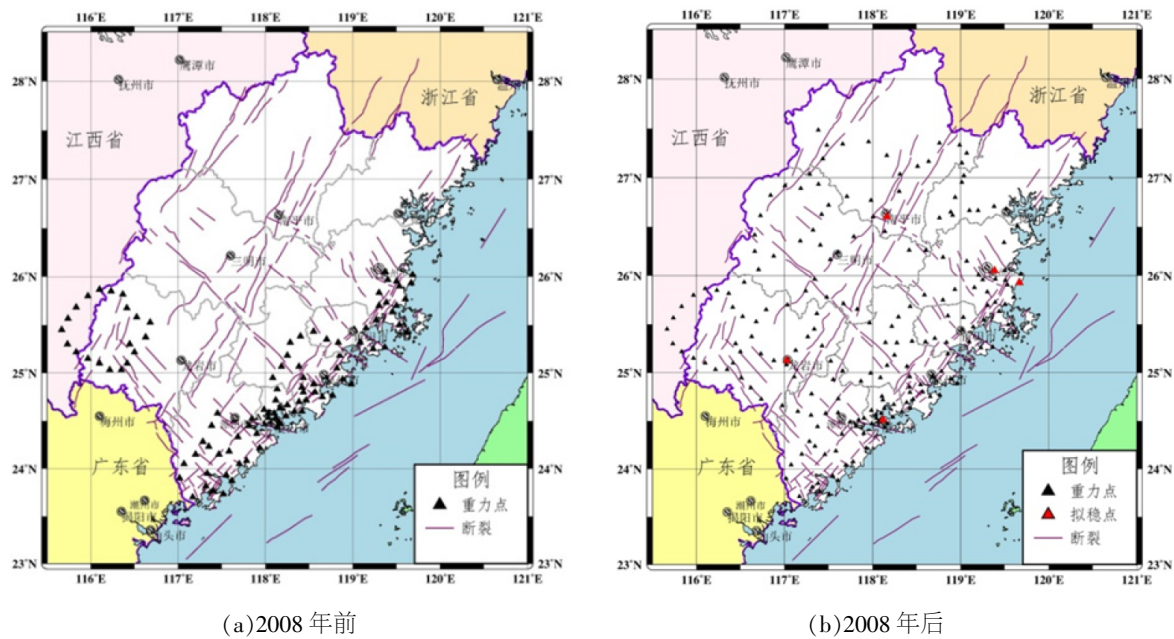


图 2 福建省流动重力测点点位变化图  
Fig.2 Changes of mobile gravity points in Fujian province

表 1 福建地区流动重力测量信息

观测时间/年-月	仪器型号	点值精度/ $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
2008-11~2008-12	G854/G1003	7.5
2009-04~2009-06	C217/C230	11.7
2009-10~2009-12	C230/C369	11.0
2010-06~2010-07	C230/C369	9.1
2010-11~2010-12	C230/C369	11.5
2011-05~2011-06	C230/C369	10.1
2011-11~2011-12	C230/C369	10.4
2012-04~2012-05	C511/C814	8.0
2012-09~2012-10	C511/C814	8.3

(转下表)

(续表 1)

观测时间/年-月	仪器型号	点值精度/ $10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^2$
2013-04~2013-05	C511/C814	7.9
2013-07~2013-08	C511/C814	7.9
2014-02~2014-04	C526/C814	7.7
2014-07~2014-08	C526/C814	8.0
2015-03~2015-04	C526/C814	9.1
2015-08~2015-09	C814/C1316	8.4
2016-03~2016-05	C814/C1316	8.1
2016-08~2016-09	C814/C1316	8.8
2017-02~2017-04	C814/C1316	8.2

2 福建省重力场演变特征

反映重力场的变化有两种方式：一是测区重力场的平面变化图，注重区域性、持续性和异常幅度；二是重力点值的时序变化图，注重趋势性、持续性。这两种方式都能直观的反映测区重力场的时间、空间和强度变化，从图中能较好地分辨出重力场的变化特征。本章就从这两种方式入手，通过分析福建地区多年尺度的重力场累积变化和部分重力点值的时序变化，揭示福建地区 2008 年新测网建成以来的重力场演变特征。

2.1 重力场累积变化

重力场累积变化图像能较好地反映近年来福建地区流动重力的区域性和持续性变化。笔者以 2008 年福建测网观测资料为对比基准，分别绘制了 2011-06~2008-12、2014-04~2008-12、2017-04~2008-12 三幅多年尺度的流动重力累积变化图像(图 3)。从图 3 可以看出，福建地区重力场累积变化分区特性明显，主要以沙县—南日岛断裂带(三明—莆田市一线)为界，闽北重力场为正变化，闽西南为负变化，重力场整体呈现逐渐增强态势。

(1)2011-06~2008-12 期间(图 3a)，研究区自北向南表现出正负相间的格局，整体呈南负北正分布特征，变化幅度在 $-70\sim+70\text{ ugal}$  以内，相对平缓。长乐—诏安断裂带南北两段存在明显重力场梯度变化，沙县—南日岛断裂三明地区存在重力场正负差异变化，接近重力零值线区域。

(2)2014-04~2008-12 期间(图 3b)，重力场变化较图 3a 有所增强，变化幅度在 $-90\sim+90\text{ ugal}$  以内，重力场分区特征更加显著。闽北区域重力场

正值变化范围扩大、变化幅度增强，政和—海丰断裂带北段南平市以东区域正值变化大幅增强；闽西南区域重力负异常累积变化也明显增强。

(3)2017-04~2008-12 期间(图 3c)，重力场变化基本维持图 3b 分布特征，变化幅度在 $-80\sim+100\text{ ugal}$  以内，但闽北区域重力场变化更加剧烈，闽西北区域正值变化有所增强，闽西南区域重力负异常变化有所缓和。重力异常变化的零值线沿 NE 方向偏移。

重力变化与介质密度变化和地下物质运移有关，表现到地表则与地壳形变有着密切关系。图 4 为近年来福建地区 GPS 连续观测的主应变图像，整体以政和—海丰断裂带为界，从西向东，由张应变较大转为压应变较大。主应变变化趋势与重力场的累积变化趋势存在一定的对应关系。闽北重力高值区域对应压性应力场，该区域持续增强的重力正异常变化可能是由于该区局部应力应变积累，构造活动加剧，深部物质向该区迁移，局部区域密度增高引起的；闽西南重力低值区域对应张性应力场，该区域呈现拉张膨胀状态，随着应力积累局部应变持续增大，地下岩石的破裂扩展，从而引起体积增大密度减小，体现为重力负异常变化。

2.2 重力场点值时序变化

重力点值的时序变化能较客观地反映区域重力场的变化，特别是具有一定趋势性和一定异常幅度的测点<sup>[9]</sup>。

通过对研究区域 2008 年以来重力复测资料的整理，排除人为改点造成的影响，统计了 2008—2017 年间累积重力异常幅度较大的测点数(本文根



据流动重力测量期变限差 30 ug<sub>al</sub> 的原则以及对福建地区历年重力值的综合统计分析, 选取了累积变化值超±70 ug<sub>al</sub> 的测点作为异常幅度较大点), 共计 32 个。通过对这些重力异常点位进行环境干扰分析发现, 仅龙岩地区一个测点因市政施工开

挖地下汽车隧道造成环境有变, 其余点位环境均无明显变化, 但考虑到其中小部分测点靠近福建沿海, 且重力复测时间的不统一, 涨潮退潮可能对重力值有一定影响。但是重力上升点和下降点反映的整体变化趋势仍值得参考。

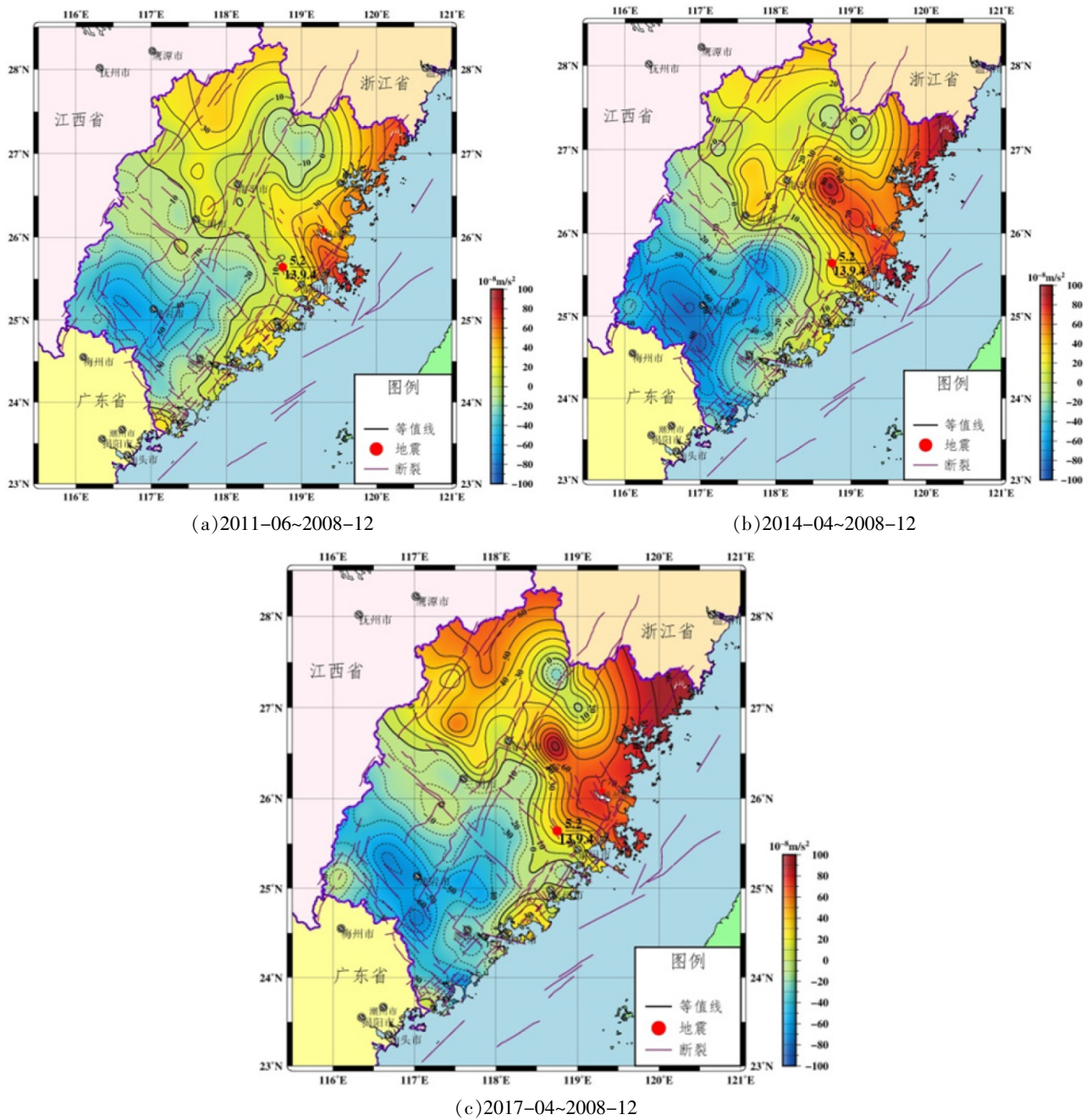


图 3 福建省重力累积变化图

Fig.3 Cumulative changes of gravity field in Fujian province

从这些测点的分布情况图(图 5)可以看出, 以沙县—南日岛断裂为界, 闽北、闽南地区异常幅度较大重力点值趋势变化不同, 与福建地区重力场变化整体呈南负北正分布的特征对应。闽北地

区的正变化异常点主要集中在闽江断裂东段与长乐—诏安断裂泉州中段交汇处以及长诏断裂北段宁德地区; 闽南地区的负异常点主要集中在政和—海丰断裂南段闽西南龙岩区域以及长乐—诏安断裂南段漳州南区域。

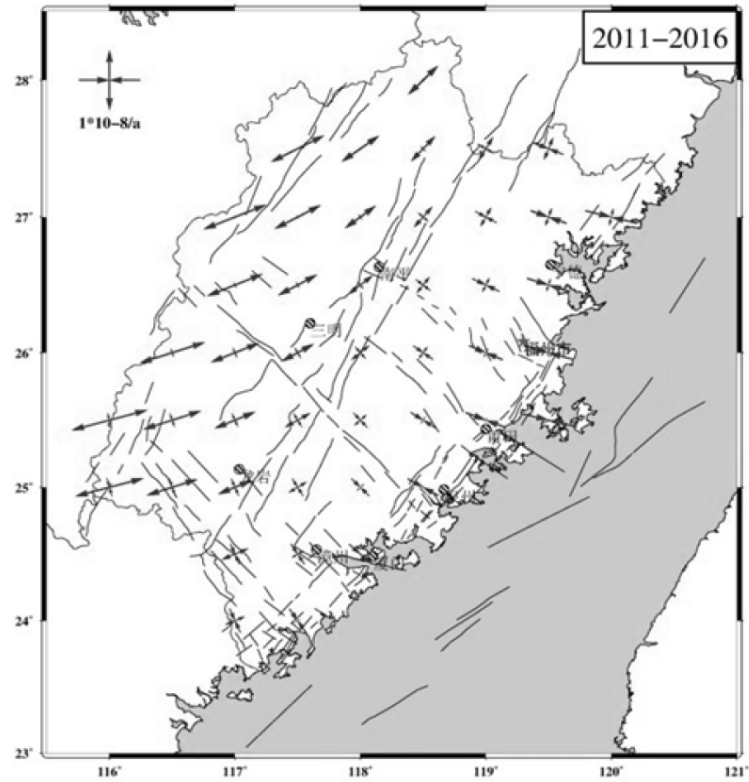


图 4 福建省主应变图(单位: $10^{-9}$ )

Fig.4 Principal strain map in Fujian province(unit:  $10^{-9}$ )

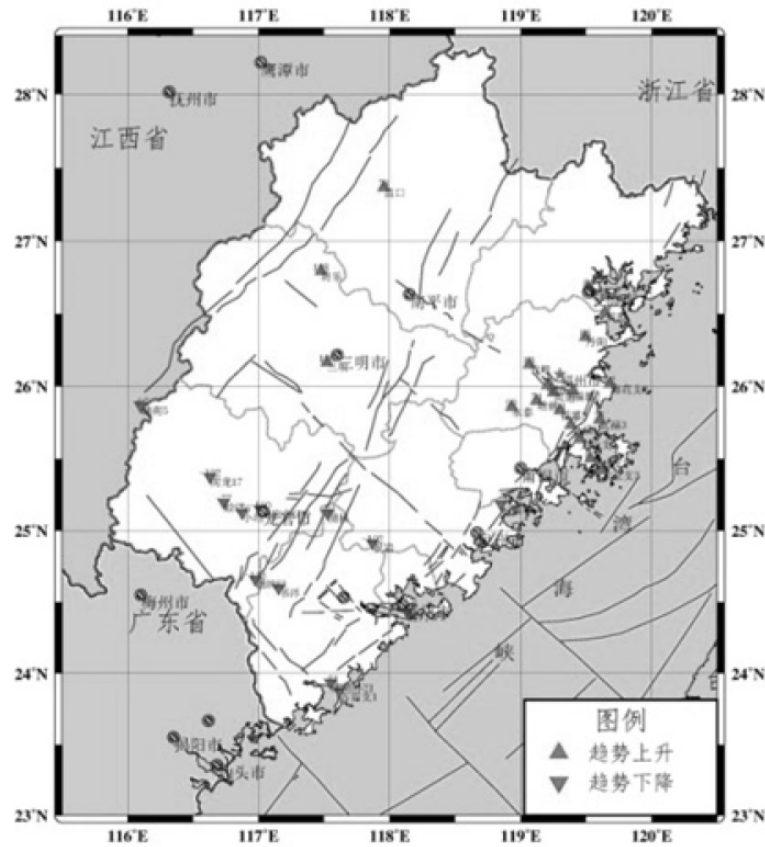


图 5 福建省重力异常累积高值点(2017-04~2008-12)

Fig.5 Cumulative high value points of gravity anomaly in Fujian Province (2017-04~2008-12)

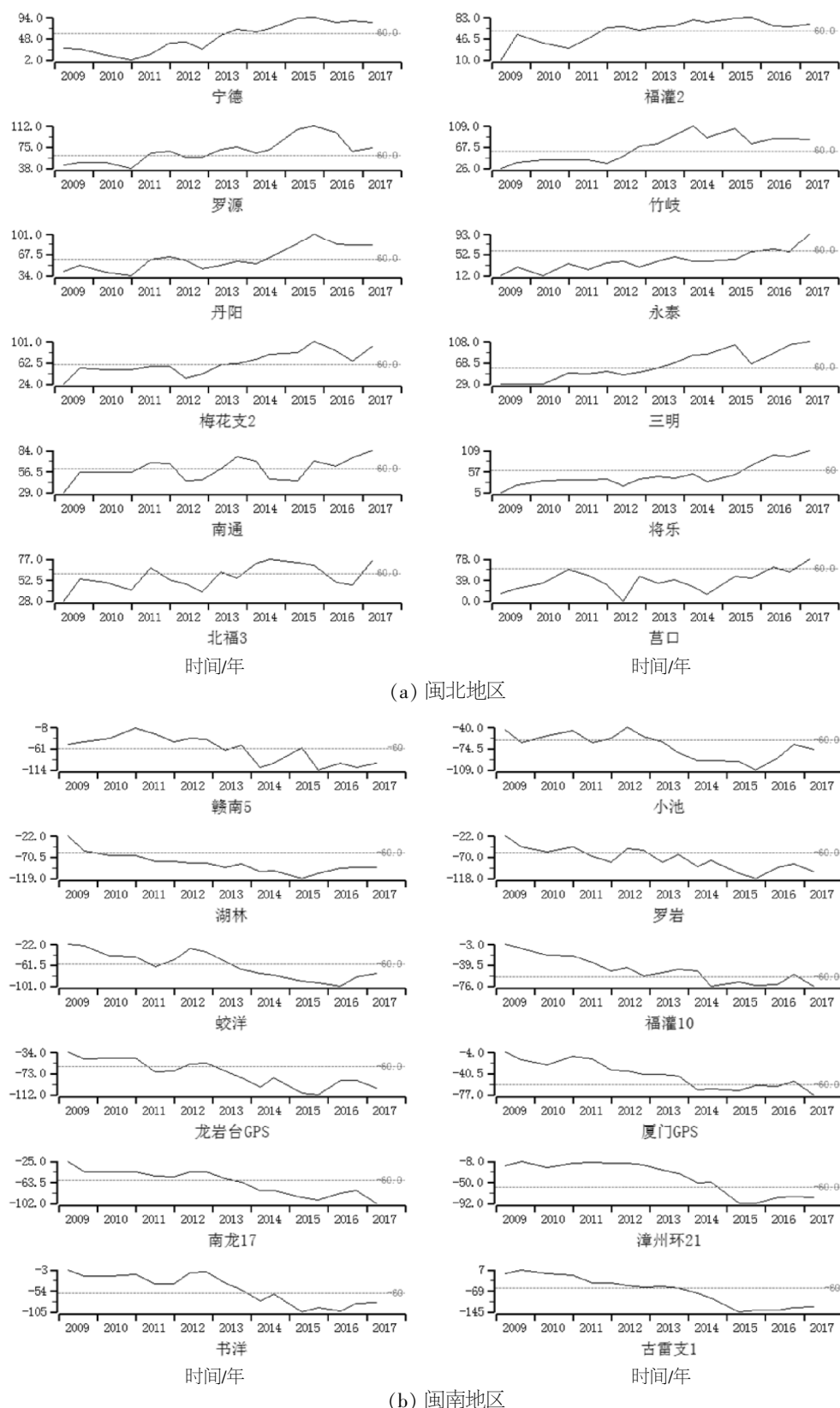


图 6 异常点重力点值变化时序图(单位:ugal)

Fig.6 Timing variations map of gravity point value of abnormal points(unit: ugal)

笔者从这些重力异常点中,选取代表性的异常测点作重力点值变化时序图(图 6)。闽北地区(图 6a)异常重力点值整体呈现同步上升的变化趋

势,2013—2014 年间呈现加速上升的态势,其中莒口、将乐两个测点不同于其他异常点的构造背景,因此上升趋势存在一些差异;闽南地区(图

6b)异常重力点值自2009年起整体呈现下降的趋势,2015—2016年间呈现转折变化,其中福灌10、厦门GPS、漳州环21、古雷支1四个测点因与其他异常点构造环境的差异,2015—2016年间呈现的转折变化有所差异。

综上,福建地区重力场变化整体呈南负北正分布特征,正累积变化范围逐步增加幅度逐步增强,负累积变化逐步增强(2016年开始有所缓和),沙县—南日岛断裂附近为重力异常正负变化的零值线区域。2014年上半年以来,福建地区重力场变化显著,整体且呈现逐渐增强态势,与应变场整体变化趋势一致。分析结果显示长乐—诏安断裂带南北两段、政和—海丰断裂带南段、闽江断裂带均存在重力场梯度变化,特别是长乐—诏安断裂带北段与闽江断裂带交汇处重力异常明显,值得关注。

### 3 仙游地震震例分析

2008年以来,福建地区共发生三次 $M_L 4.0$ 以上地震,2013年9月4日福建仙游发生 $M_L 5.2$ 级地震,也是福建地区近16年来发生的最大地震,地震发生时福建全省多处有明显震感,震中区域震感强烈<sup>[7]</sup>。

仙游地震的发生主要受控于近南北向主应压力,与福建地区背景应力场方向存在一定差异,故邱毅等<sup>[7]</sup>认为仙游地震是由位于震区的金钟水库蓄水造成震区应力调整而引起。袁丽文等<sup>[8]</sup>认为仙游地震主要受控于仙游地区小尺度区域的构造应力场,金钟水库的水位变化存与地震活动在一定相关性,但对仙游地区构造应力场影响不明显。对于仙游地震,不同于前人震源机制方面的研究,本文侧重分析震中区域重力场的变化,研究仙游地震的重力场“前兆”信息。

近年来重力场变化研究<sup>[9-13]</sup>获得的一些典型震例均表明,正负高值异常区边缘的高梯度带与发震地点具有较好的对应关系。高值重力异常有利于应力积累,而较大规模的重力变化梯级带,特别在重力变化相对上升和相对下降的过渡部位,往往能够反映出地下物质最大差异运动,在周边应力持续失衡作用下,易产生剪应力而首先破裂<sup>[9]</sup>。

#### 3.1 重力场平面变化与地震

图7是以2008年重力值为基准的研究区重力累积变化平面图,能清晰地看出重力场的平面变化过程。由图可见,仙游地震震中位于沙县—南日岛断裂与长乐—诏安断裂带泉州段交汇处。震

中的SW方向重力持续负变化,其中2013年上半年开始重力累积负变化有所增强,而NE方向重力持续高值正变化,沙县—南日岛断裂两侧重力呈现正、负高值异常变化。

正负重力异常变化梯度带的零线附近,是物质密度增加与减少的过渡地带,该处产生的物质增减差异运动剧烈,能量易于聚集,从而诱发地震<sup>[14]</sup>。从图7可以看出,仙游地震震中位于正负重力异常变化梯度带区域,2012年下半年开始零值线沿NE方向向震中偏移,距离震中大约30~50 km。

沙县—南日岛断裂是福建块体内活动性最弱的断裂带,2013年以来仙游地区数次地震都发生在该断裂带上,显示沙县—南日岛断裂主体虽然看上去构造活动并不强烈,但是可能处于闭锁状态,应力和应变能在不断积累<sup>[14]</sup>。根据最新的复测资料表明,仙游地震发生后,目前该区域重力场仍具有正负变化相间的分布特征,NE方向仍然维持高值正变化。这表明,该区域虽然经历了仙游 $M_L 5.2$ 级地震的能量释放,但积累的构造应力可能未完全释放,值得关注。

#### 3.2 重力点值变化与地震

重力点值时序变化能较好地突出异常测点的动态变化。本文选取了距离仙游震中最近的7个重力测点(梧桐、永泰、塘前、福灌3、福灌4、福灌5、福灌6)进行分析,发现在2013年9月仙游 $M_L 5.2$ 级地震前多个测点有一定程度上的趋势异常。

由图8可见,2010—2012年期间,该区域重力点值呈现一定的下降趋势,2012年下半年开始出现同步或准同步转折的加速上升,可能是这次地震的“前兆”异常,地震发生在重力场加速变化过程中<sup>[14]</sup>。2013年9月仙游地震后,梧桐、永泰、塘前、福灌3四个测点重力值呈现明显转折下降,而福灌4、福灌5、福灌6三个测点重力值继续维持原来的上升趋势,于2014年间才呈现平缓的下降趋势,这可能是地震之后重力场变化的滞后反映。

综上所述,仙游地震前典型的重力“前兆”信息可总结为:震前,沙县—南日岛断裂两侧重力正、负高值异常变化;震中位于重力变化相对上升和相对下降的过渡部位;2012年下半年开始该区域靠近震中的部分测点重力值出现同步或准同步转折的加速上升。而震后重力变化和较长时期内累积变化则显示,沙县—南日岛断裂及周边地区仍维持前述“前兆”信息相似的异常特征。



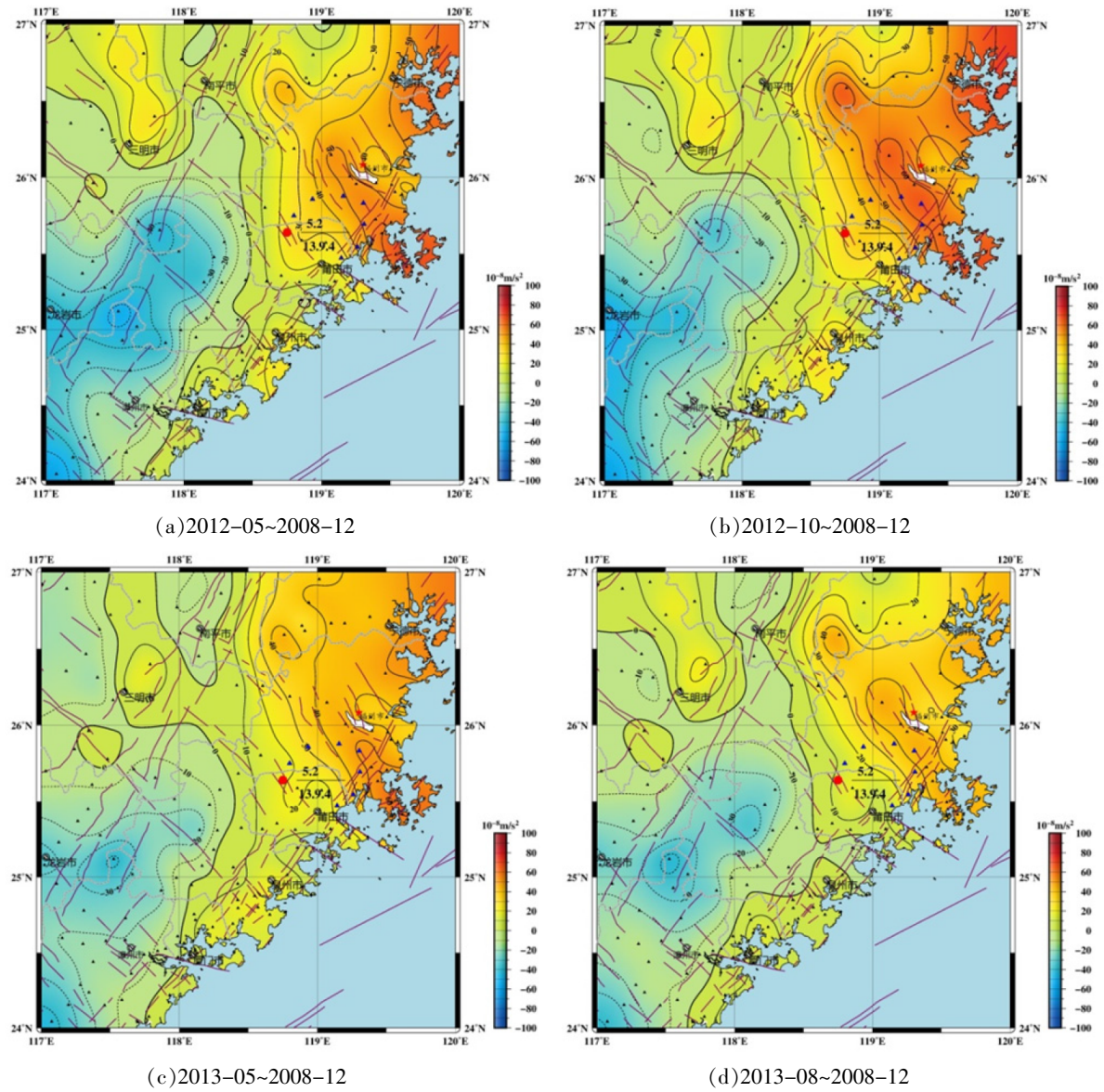


图 7 仙游地震前重力累积变化图

Fig.7 Cumulative changes of gravity field before Xianyou earthquake

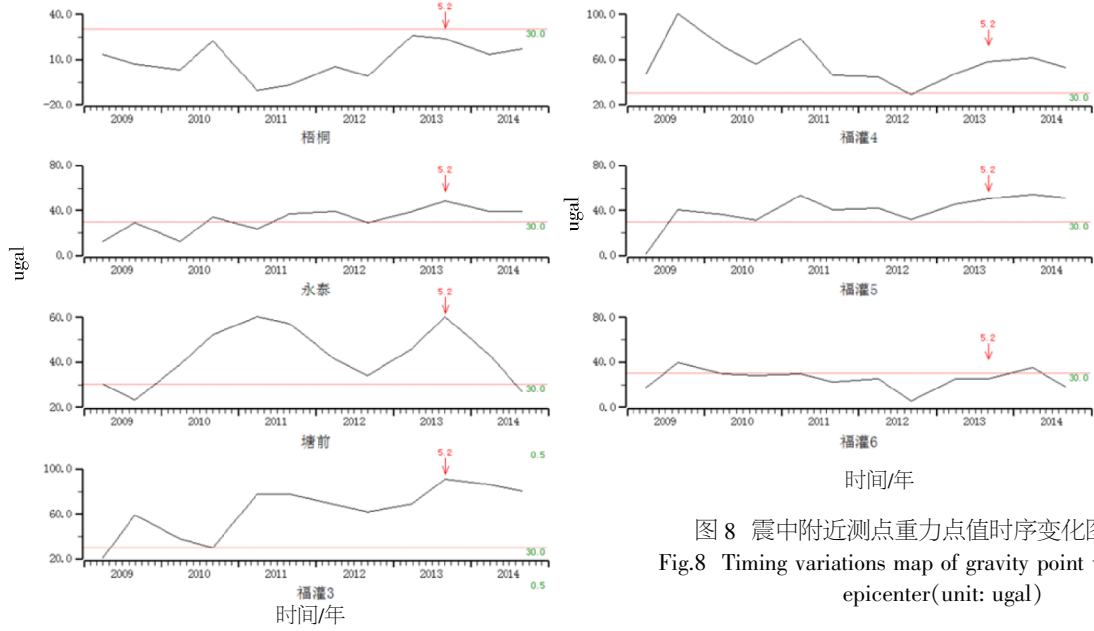


图 8 震中附近测点重力点值时序变化图(单位: ugal)  
Fig.8 Timing variations map of gravity point value near the epicenter(unit: ugal)

## 4 结语

本文主要从重力场时空变化的角度, 分析研究了福建地区重力场演化特征以及仙游  $M_L 5.2$  级地震的重力“前兆”信息, 获得一些认识:

(1) 福建地区重力场变化整体呈南负北正分布特征, 2014 年以来有逐步增强趋势, 主要反映在闽北区域正累积变化范围逐步增加幅度逐渐增强, 闽南区域持续负累积变化, 沙县—南日岛断裂附近为重力异常正负变化的零值线区域。长乐—诏安断裂带北段与闽江断裂带交汇处重力异常明显, 值得关注。

(2) 仙游  $M_L 5.2$  级地震前后重力场演化对仙游地震的孕育具有一定程度的反映。重力“前兆”信息为: 震前沙县—南日岛断裂带两侧持续正、负高值异常变化, 震后的复测表明, 重力场整体仍然维持原来的趋势; 重力点值时序变化反映为 2012 年下半年开始该区域测点重力值出现同步或准同步转折的加速上升, 震后重力值出现下降。

(3) 对福建地区重力场与地震活动关系的初步研究表明, 流动重力资料得到的重力场演化图像, 在一定程度上能反映地震孕育的演化过程。重力异常反映了该区域应力场的增强, 对地震的发生有一定的前兆反映。

### 参考文献:

[1] 祝意青, 李辉, 朱桂芝, 等. 青藏块体东北缘重力场演化与地震活动[J]. 地震学报, 2004, 26(11): 71-78.  
[2] 梁全强, 刘序严, 黄声明, 等. 台湾海峡西岸重力场变化梯度场图像分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(4): 82-85.

[3] 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.  
[4] 周红伟, 卢至孟, 何万平, 等. 福建地区综合场地水准, 重力及 GPS 资料的处理分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(Supp2): 5-8.  
[5] 史舜华. 福建省地震监测志[M]. 北京: 地震出版社, 2005.  
[6] 林松建, 丁学仁, 陈为伟, 等. 福建地区震源机制解与现代构造应力场研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(5): 27-32.  
[7] 邱毅, 李军, 康兰池, 等. 福建仙游地震序列的震源机制解[J]. 中国地震, 2014, 30(2): 280-288.  
[8] 袁丽文, 李强, 陈彩虹. 仙游地震序列中小地震震源机制解特征[J]. 防灾减灾学报, 2016 (03): 99-104.  
[9] 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.  
[10] 申重阳, 谈洪波, 郝洪涛, 等. 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, 2011, 31(2): 17-22.  
[11] 祝意青, 徐云马, 吕弋培, 等. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2538-2546.  
[12] 祝意青, 郭树松, 刘芳. 攀枝花 6.1, 姚安 6.0 级地震前后区域重力场变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(4): 8-11.  
[13] 祝意青, 闻学泽, 孙和平, 等. 2013 年四川芦山  $M_s 7.0$  地震前的重力变化[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1887-1894.  
[14] 占惠, 梁全强, 周红伟, 等. 联合 GPS 与重力资料反演福建地区地壳运动[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(1): 16-20.  
[15] 秦建增, 李清林, 李德庆, 等. 流动重力结果与河南范县  $M_L 4.7$  级地震[J]. 华北地震科学, 2008, 26(1): 17-21.