

莫佩婵, 文翔, 黄惠宁, 等. 2016年7月31日广西苍梧5.4级地震前兆异常研究[J]. 华南地震, 2018, 38(3):52-61. [MO Peichan, WEN Xiang, HUANG Huining, et al. Research on Precursory Anomaly of the Cangwu  $M_s$  5.4 Earthquake in Guangxi, on July 31<sup>st</sup>, 2016[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(3):52-61]

## 2016年7月31日广西苍梧5.4级地震前兆异常研究

莫佩婵, 文翔, 黄惠宁, 原永东, 周依  
(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

**摘要:** 2016年7月31日广西苍梧县发生5.4级地震, 震源深度10 km, 宏观震中位于苍梧县沙头镇。此次地震发生在监测能力较好的中地震活动区, 打破了东南沿海地震带长达17年5级地震平静, 对东南沿海地震带地震活动具有重要指示意义。为了对苍梧5.4级地震进行系统总结, 我们收集整理震中区附近连续前兆观测台站和流动地球物理场观测资料, 综合分析了地震前后前兆观测数据变化特征, 提取异常信息。结果显示: 苍梧5.4级地震发生前, 共出现8项前兆异常, 包括梧州连续重力、重力潮汐因子空间分布、桂平水位、信宜水位、地磁低点位移5项定点前兆异常和流动重力、GPS最大剪应变、面应变3项地球物理场异常; 震中200 km范围内的前兆异常台站、异常台项百分比分别为60%和30%。

**关键词:** 苍梧5.4级地震; 定点前兆; 流动重力; 异常

**中图分类号:** P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)03-0052-010

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2018.03.008

## Research on Precursory Anomaly of the Cangwu $M_s$ 5.4 , Earthquake in Guangxi on July 31<sup>th</sup>, 2016

MO Peichan, WEN Xiang, HUANG Huining, YUAN Yongdong, ZHOU Yi  
(*Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous region, Nanning 530022, China*)

**Abstract:** On July 31<sup>st</sup>, 2016, an  $M_s$  5.4 earthquake occurred in Cangwu county, Guangxi province, with the focal depth of 10 km, and the macro epicenter was located in Shatou town, Cangwu county. The earthquake occurred in a moderate seismic activity area with relatively good seismic monitoring capability. For the Cangwu  $M_s$  5.4 earthquake has broken the calmness of the southeast coastal earthquake belt for 17 years, it is of great significance to study the seismic activity of the earthquake. In order to systematically summarize the earthquake, the paper comprehensively analyzed the characteristics of precursory observation data before and after the earthquake and extracted abnormal information basing on the collected observation data of continuous precursor observation stations and mobile geophysical fields near the epicenter. Results showed that there were 8 anomalies before the earthquake, including 5 precursory anomalies (continuous gravity, gravity tidal factor spatial

**收稿日期:** 2018-01-01

**基金项目:** 广西科技攻关计划 (1377002、14124004-4-8) 项目资助

**作者简介:** 莫佩婵(1967-), 女, 本科, 工程师, 主要从事地震监测预报工作。

**E-mail:** rose.mpc@163.com.

distribution, Guiping water level, Xinyi water level, geomagnetic low point displacement), 1 flow gravity anomaly and 2 GPS anomalies (shear strain and surface strain). Within 200 km from the epicenter of the earthquake, the percentages of precursory anomaly stations and anomalous items were 60% and 30% respectively.

**Keywords:** The  $M_s$  5.4 Cangwu earthquake; Fixed-point precursor; Flow gravity; Anomaly

## 0 引言

2016年7月31日广西壮族自治区苍梧县发生5.4级地震, 微观震中  $24.08^{\circ}\text{N}$ 、 $111.56^{\circ}\text{E}$ , 震源深度 10 km, 宏观震中位于苍梧县沙头镇, 极震区烈度为 VII 度, 地震造成梧州市苍梧县沙头镇和石桥镇、贺州市八步区仁义镇、贺州市平桂区共 45 个行政村遭受不同程度破坏, 直接经济总损失 10 204.41 万元<sup>[1]</sup>。苍梧 5.4 级地震打破了东南沿海地震带长达 17 年 5 级地震的平静, 对东南沿海地震带地震活动具有重要的指示意义。地震发生前, 我们依据广西及邻区的地震活动及地震异常时空演化特征, 从中期尺度预测了广西及邻区存在发生 5 级左右地震的可能, 但由于震中区附近前兆观测手段较少、且震前没有发现明显的短临前兆异常和配套的宏观异常, 因此未能对发震位置做

出准确的预测。地震后, 部分机构和研究人员从地质构造、地震活动背景、震源机制解、地壳形变和地震前兆等方面开展了深入研究, 产出了丰富的成果<sup>[2]</sup>。在此基础上, 我们对苍梧 5.4 级地震震中区附近固定前兆台站连续观测资料和流动地球物理场观测资料进行了重新整理甄选, 系统分析了地震前后前兆观测数据变化特征, 提取异常信息, 供今后广西及类似地区地震预测预报参考借鉴。

## 1 观测台站(网)概况

苍梧 5.4 级地震 200 km 范围内共有定点前兆观测台站 5 个, 分别为梧州台的洞体应变、地倾斜和定点重力、桂平台的水位和水温、肇庆台的地磁、花都台的水位和水温、信宜台的水位和地倾斜共计 10 台项(图 1、表 1)。

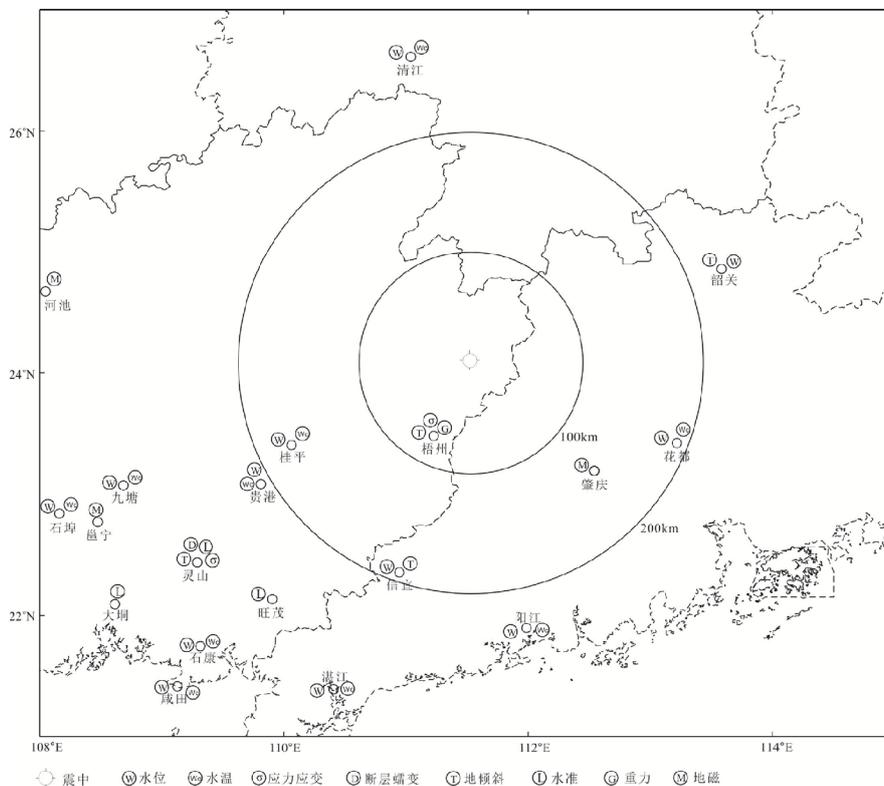


图 1 苍梧 5.4 级地震前定点前兆观测台站的分布图

Fig.1 Distribution of site observation stations before Cangwu  $M_s$  5.4 earthquake

表 1 苍梧 5.4 级地震前定点前兆观测项目登记表

Table1 Registration form of sentinel precursor observation project before the Cangwu  $M_s$  5.4 earthquake

编号	前兆观测台站	震中距/km	观测项目	观测仪器	
				仪器型号	主要技术指标
1	梧州	74	洞体应变	SSY	分辨率 $\leq 1 \times 10^{-9}$ (基线长 10 m), 采样率不低于 1 次/min
			地倾斜	DSQ	分辨率 $\leq 0.000 2''$ , 采样率不低于 1 次/min
			定点重力	Gphone	分辨率: 0.1 $\mu\text{Gal}$ , 精度: 1 $\mu\text{Gal}$
2	桂平	168	水位	SWY-II	采样率: 1 次/s, 分辨率优于 0.001 m
			水温	SZW-II	采样率: 5 次/min, 分辨率优于 0.000 1 $^{\circ}\text{C}$
3	肇庆	146	地磁	GM-4 磁通门	采样率: 1 sps, 分辨率: 0.1 nT
4	花都	184	水位	SWY-II	采样率: 1 次/s, 分辨率优于 0.001 m
			水温	SZW-1A	采样率: 1 次/min, 温度分辨率优于 0.000 1 $^{\circ}\text{C}$
5	信宜	200	水位	LN-3A	采样率: 1 次/min, 水位分辨率 $\leq 1$ mm
			水温	SZW-1A	采样率: 1 次/min, 温度分辨率优于 0.000 1 $^{\circ}\text{C}$
			地倾斜	VS	采样率: 1 次/min, 电容测微器精度优于 0.000 1 $\mu\text{m}$ , 仪器日漂移: 0.005''

为加强对广西及邻近地区地球物理场的动态监测能力, 广西地震局于 2013 年底构建了由 104 个测点、114 个测段组成的广西流动重力观测网, 测点平均间距为 30~40 km, 与全国流动重力测点联网, 每年开展 2 期常规复测, 适合 5 级以上地震大范围重力异常场的监测捕捉。流动重力采用

的是 CG-5 仪器, 2014 年 12 月至 2016 年 9 月共开展了 4 期流动重力观测。此外, 广西区内有 10 个 GNSS 基准站和 30 个流动 GPS 站点, 结合邻区 GPS 站点, 共同组成了广西及邻区 GPS 观测网络 (图 2)。收集以上资料, 分析研究苍梧地震前各前兆学科资料异常特征。

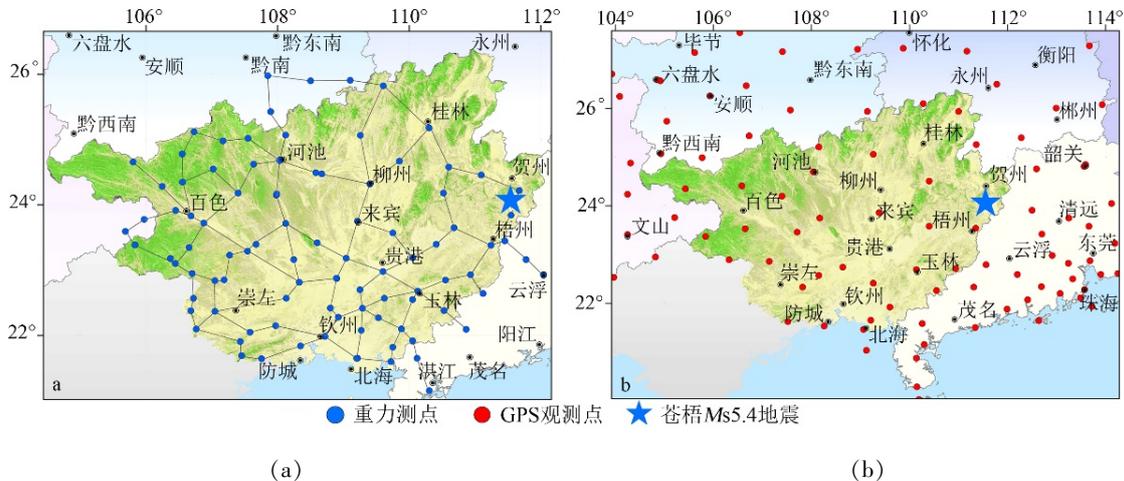


图 2 广西及邻区(a)流动重力和(b)GPS 观测网络

Fig.2 Flowing gravity, GPS observation network in Guangxi and its neighboring region

## 2 前兆异常分析

### 2.1 形变异常分析

#### 2.1.1 梧州台连续重力资料异常

连续重力信号扣除理论重力潮汐后得到重力非潮汐信号, 可反映台站垂直位移和周围地下物质运移。强震发生前 1~2a, 流动重力能够观测到几十甚至上百  $\mu\text{Gal}$  的重力变化<sup>[2]</sup>。以此推测, 强震发生前 1a 内连续重力非潮汐月均值变化量不会超过 10  $\mu\text{Gal}$ <sup>[2-3]</sup>。基于此思路, 对苍梧 5.4 级地震

前梧州台的重力非潮汐变化特征进行分析。对 2015 年 1 月至 2016 年 10 月连续重力观测数据进行固体潮改正、漂移改正和预处理, 得到重力非潮汐变化(图 3)。结果显示, 2015 年 9 月底以来, 梧州台重力非潮汐以 5.0  $\mu\text{Gal}/\text{月}$  的速度持续上升 10 个月后(累计变化 50  $\mu\text{Gal}$ ), 在距离台站 75 km 的苍梧县沙头镇发生 5.4 级地震。通过对该异常变化开展了现场核实, 可以排除周边环境干扰的影响, 故推测梧州台连续重力非潮汐持续上升现象可能与苍梧 5.4 级地震孕震过程有关。

2.1.2 重力潮汐因子变化空间分布异常

重力潮汐因子的变化能够反映区域地壳的压缩与膨胀变化,其中重力潮汐因子的正向变化反映地壳的压缩,重力潮汐因子的负向变化反映地壳的膨胀。据国家重力台网中心分析,2016年全年广西及

邻区重力潮汐因子变化空间分布图显示,重力潮汐因子变化的零值线在广西区域内大致呈南北向分布,广西西部地区潮汐因子变化值为负值,而苍梧地震震中区域潮汐因子变化值为正值,表明在苍梧5.4级地震前,震中区域地壳处于压缩状态(图4)。

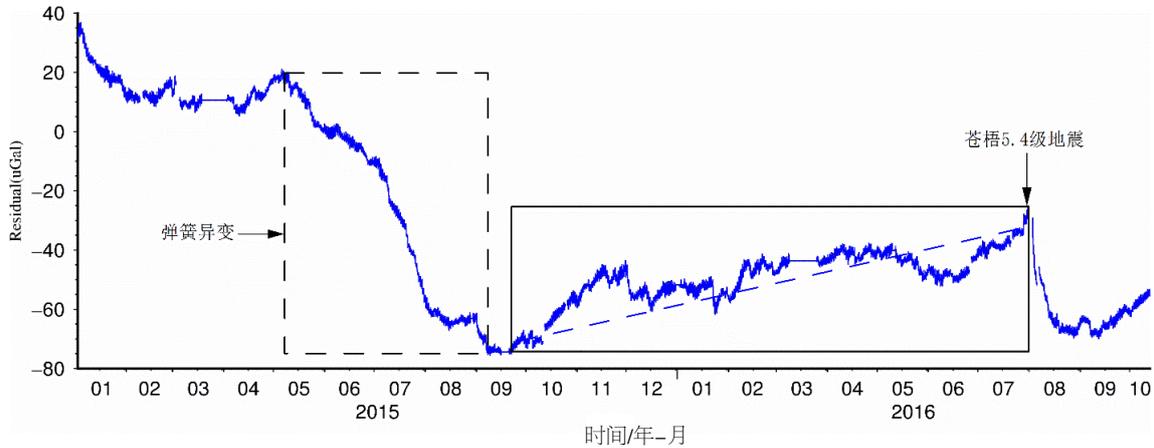


图3 苍梧地震前梧州台重力非潮汐变化<sup>①</sup>

Fig.3 Gravity non-tidal changes of Wuzhou station before Cangwu earthquake

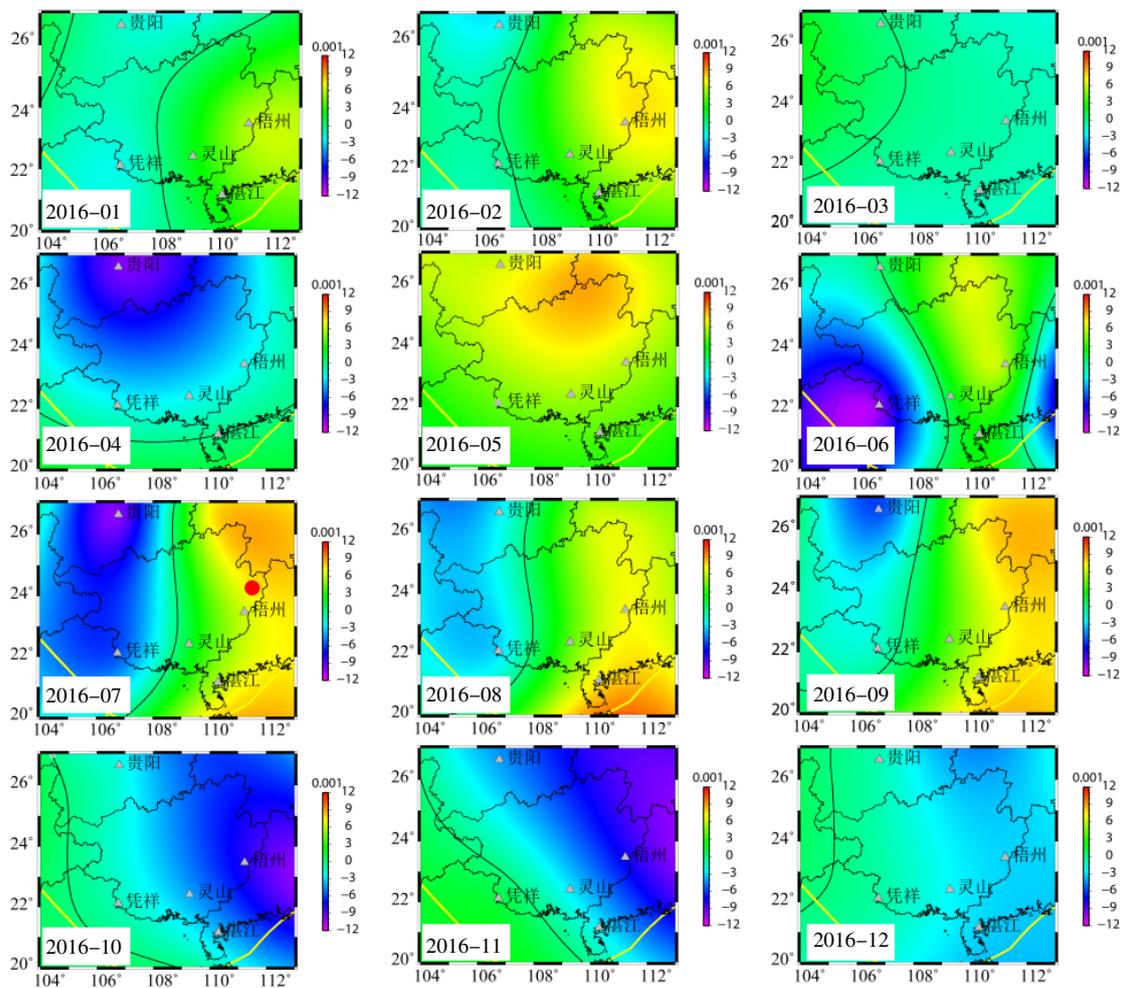


图4 2016年广西及邻区重力潮汐因子变化空间分布图

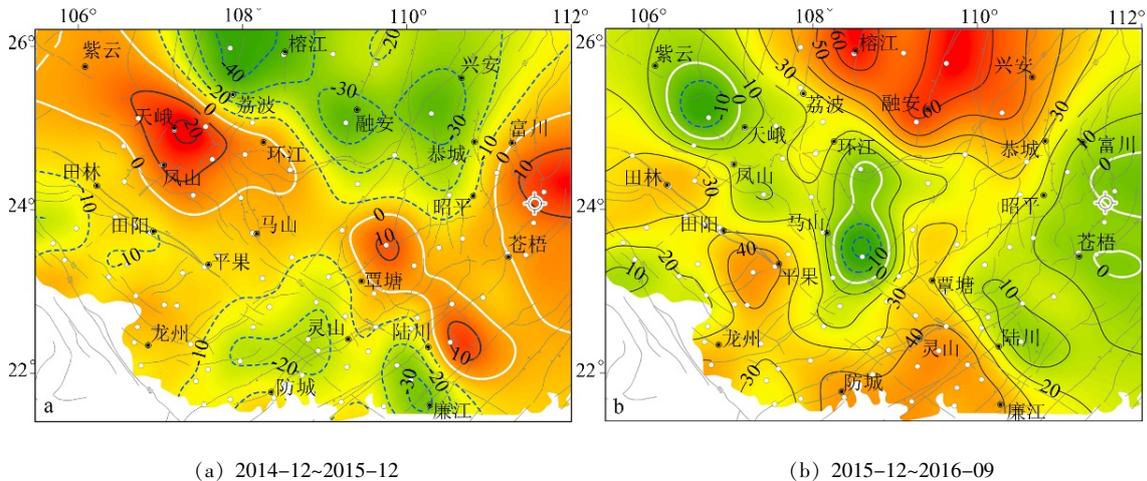
Fig.4 Spatial distribution of gravity tidal factor changes in Guangxi and its adjacent areas in 2016

### 2.1.3 广西地区流动重力异常

流动重力观测资料处理过程如下：① 收集测网内北海、梧州和河池 3 个绝对重力点的观测资料，采用 LGADJ 软件对资料进行经典平差计算；② 对多期重力观测资料平差计算结果进行整体分析，合理确定各台仪器的先验方差，再重新平差计算以得到最佳解算结果；③ 剔除平差结果中极个别周围环境改变或不重合的测点；④ 对重力观测数据进行拟合推估，以便突出显示构造因素的重力效应。经整体平差计算，4 期重力观测资料平均精度约  $6.8 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，观测资料可靠。

分析 1a 尺度的重力场动态图像(图 5)可以发现，2014-12~2015-12 期间桂东北地区自西北向东南出现由负向正逐渐增加的趋势性重力变化及沿主干断裂出现的重力变化高梯度带，而且区域重力场异常变化形态与布格重力异常的空间分布具有较好的相关性(本文布格重力数据来源于地质矿产部地球物理地球化学勘查局 1988 年主持编

制的 1: 400 000 0 比例尺的中国布格重力异常图)。布格重力异常自西北向东南逐渐增加，由龙胜的  $-75 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  上升至苍梧的  $-30 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，重力变化也表现为自西北向东南逐渐增加趋势，由龙胜的  $-30 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  上升至苍梧的  $+20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，苍梧  $M_s 5.4$  震中附近区域布格重力异常梯度带展布与 2014-12~2015-12 期间重力变化梯度带展布基本一致。祝意青等<sup>[4-6]</sup>研究认为，区域布格重力异常空间变化特征与地壳深部构造和地震分布之间存在内在联系，重力场时空变化特征则与区域构造活动和地震活动有着密切关系。2014-12~2015-12 期间桂东北地区重力异常变化的几何形态与布格重力空间分布密切相关，较好地反映了苍梧  $M_s 5.4$  地震前区域构造应力增强致使地壳物质迁移和构造变形，在地表产生相应的重力场有序性变化。2015-12~2016-09 期间桂东北地区重力场总体变化较上期相反，反映了苍梧  $M_s 5.4$  地震后局部应力释放引起的重力场反向恢复性变化。



(a) 2014-12~2015-12 (b) 2015-12~2016-09

图 5 苍梧地震前后 1a 尺度的重力场动态变化图像(单位:  $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

Fig.5 Dynamic image of gravity field at 1-year scale before and after the Cangwu earthquake (unit:  $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

分析地震前后区域重力场差分动态图像(图 6)可以发现，苍梧  $M_s 5.4$  地震前后测区的重力变化具有一定的分区性，震中区附近 2014-12~2015-06 期间自东向西出现由正向负的趋势性变化，沿区域主干断裂构造线出现重力变化梯度带；2015-06~2015-12 期间，震中西北的恭城-兴安附近地区持续重力负值变化，震中附近地区重力变化由上期正值转为负值，处于一个反向变化过程；2015-12~2016-09 期间，区域重力场总体变化与上期反向，表现为苍梧  $M_s 5.4$  地震后的反向恢复变化，并伴随着与区域主干断裂走向基本一致的重力变

化梯度带，苍梧  $M_s 5.4$  地震发生在重力变化梯度带的零值线附近，这与以往的研究基本一致<sup>[5-6]</sup>。重力场差分动态图像较好地反映了苍梧  $M_s 5.4$  地震前震中区附近的重力变化，是一个由“重力正值异常区向重力负值异常区变化并沿 NNE 向出现重力变化梯度带及其在反向变化过程中发震”的演化过程。

### 2.1.4 GPS 变化与苍梧 5.4 地震活动关系

利用 GPS 观测网络 2013—2015 年广西及邻区连续、流动 GPS 站观测资料，计算出 2013—2015 年广西及邻区面应变率与最大剪应变率。由面应

变率分布图像(图7a)可以看出苍梧地区呈现较弱的拉张膨胀,而昭平—富川地区表现为反向挤压收缩,面收缩率达到峰值( $-3.2 \times 10^{-8} \text{a}^{-1}$ ),2016年苍梧5.4地震震中位于面应变梯度带零值过渡区,

这有利于走滑破裂发育。进一步分析2013—2015年最大剪应变率分布图像(图7b)可以看出苍梧5.4地震震中位于最大剪应变率高值区边缘部位,异常现象与以往震例相似<sup>[7]</sup>。

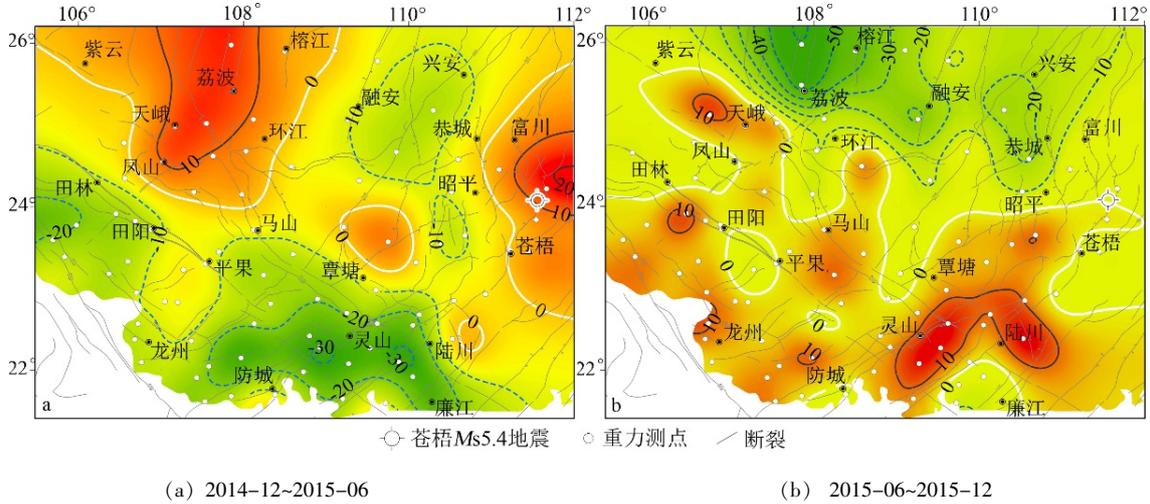


图6 苍梧地震前后重力场差分动态变化图像(单位:  $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

Fig.6 Difference dynamic image of gravity field scale before and after the Cangwu earthquake (unit:  $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

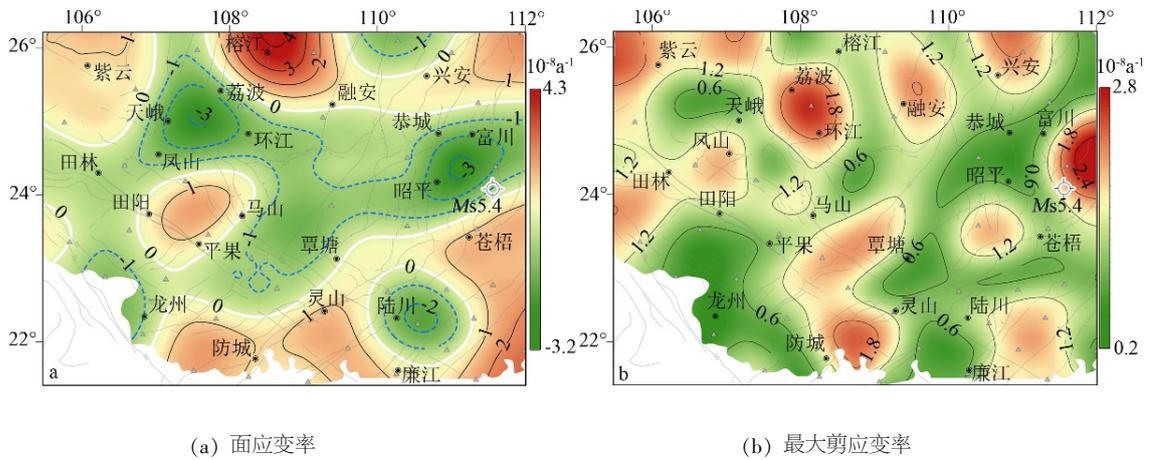


图7 广西地区面应变率及最大剪应变率分布 (2013—2015)

Fig.7 Surface strain rate and the maximum shear strain rate distribution in Guangxi region (2013—2015)

## 2.2 流体异常分析

### 2.2.1 桂平西山井水位异常

井水位破年变现象反映了区域地质构造应力的变化,是周边地区发生中强地震前中、短期异常的重要表现形式之一<sup>[8-10]</sup>。广西桂平西山井井深186.97 m,页岩裂隙深部循环承压水,动水位观测,自1994年观测以来,观测环境良好,资料连续可靠。水位呈夏高冬低的准年变动态,映震效能较好,对应大震多有明显的同震阶升效应。苍梧地震前,桂平地区无极端气候影响,降雨量处于正常范围,但该水位自2015年4月25日尼泊尔

8.1级地震同震阶升后开始下降,虽因多次受强降雨影响而有间歇性突升,但总体持续低值,至2016年5月26日才出现上升趋势,期间未表现出夏高冬低的准年变现象。苍梧5.4级地震致水位阶升0.141 m,井震距约168 km(图8)。

### 2.2.2 广东信宜水位异常

排除降雨影响后,井水位在短时间内快速上升现象反映了区域应力的增强,同样具有震兆意义<sup>[11-12]</sup>。广东信宜水位观测井井孔的基岩主要为花岗片麻岩变质后产生的混合岩,井孔总深101.90 m。储水空隙类型以裂隙承压水为主,少量孔隙水。观测层地下水埋藏类型为混合型水为主,静

水位观测。信宜十五井水位一直以来受降雨影响显著，具较明显的夏高冬低年变。2016年1月底至2月初，井孔所在地区尚未进入雨季，降雨量没有明

显的提升，而井水位却在1月27日至2月2日出现快速上升现象，升高幅度达0.564 m，与其它年度少雨季节相比，水位升高异常相当显著(图9)

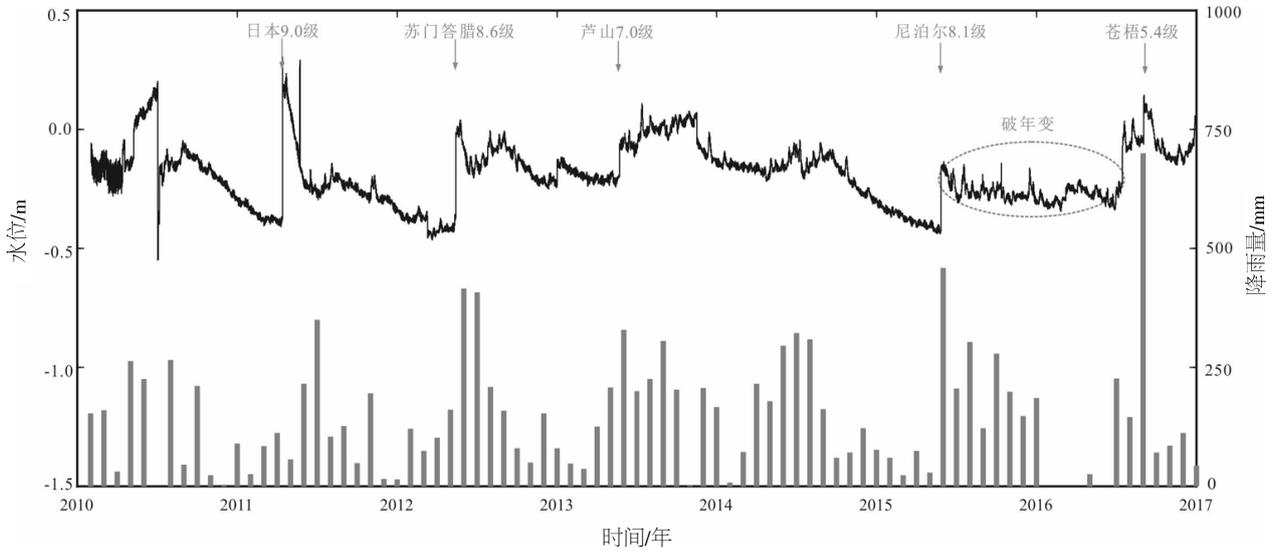


图8 桂平西山井水位异常

Fig.8 Water level anomaly of Xishan well in Guiping city

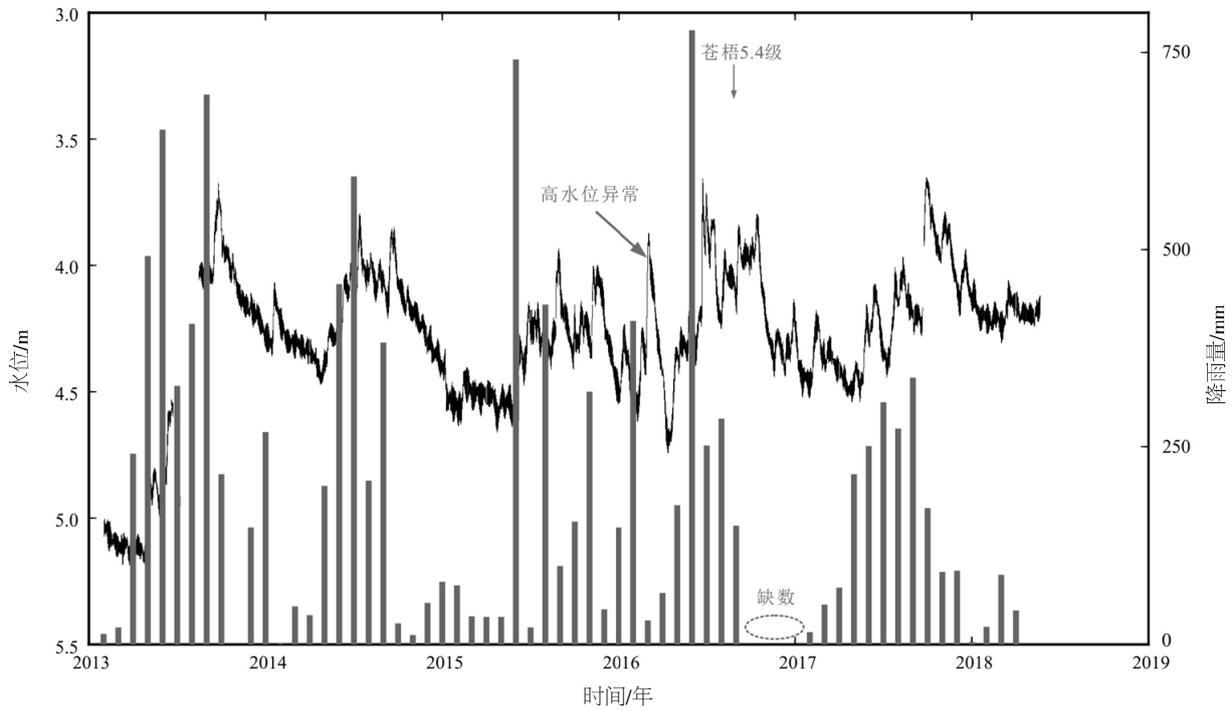


图9 信宜十五井水位异常

Fig.9 Water level anomaly of Xinyi well in Guangdong Province

### 2.3 地磁低点位移异常分析

2017年6月29日，华南地区地磁台站出现Z分量低点位移异常，广东、福建地区的地磁台站低点时间为10时15分至11时24分，海南、广西、贵阳、湖南地区地磁台站低点时间为13时21

分至14时42分，两组合站低点时间相差超过2小时，分界线途径粤桂交界、湖南南部和江西中部地区。苍梧5.4级地震发生在低点位移发生日之后的第32天，震中位于低点位移线附近(图10)，异常现象与以往震例相似<sup>[13-15]</sup>。

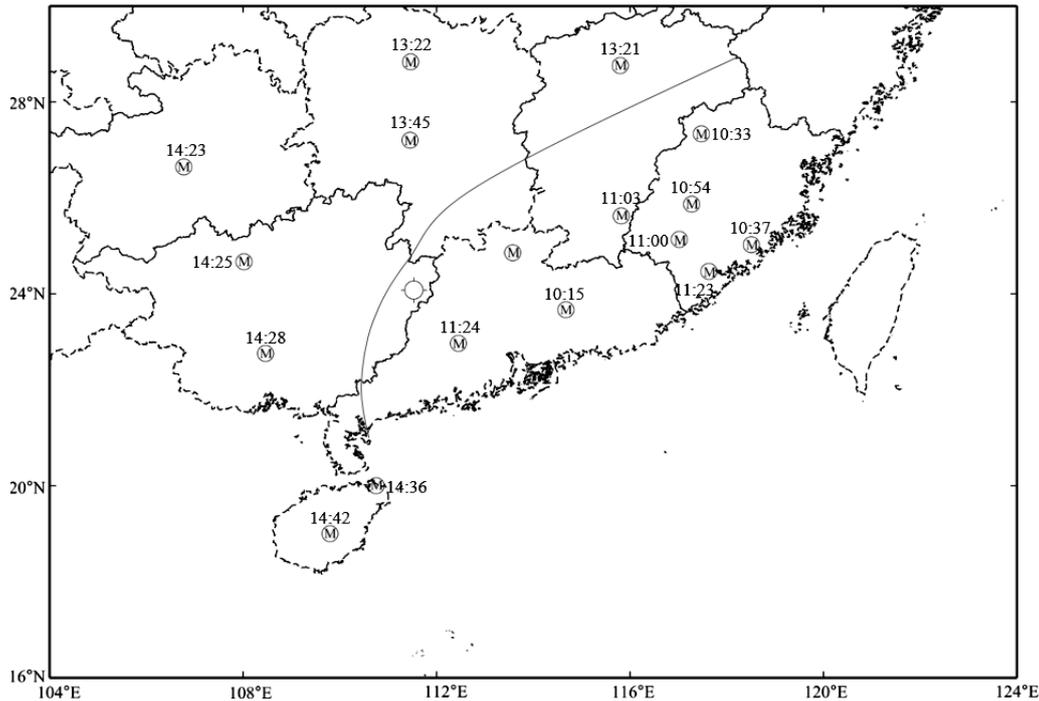


图 10 2016 年 6 月 29 日华南地区地磁低点位移异常

Fig.10 Geomagnetic low point displacement anomalies in Southern China area on June 29<sup>th</sup>, 2016

### 3 前兆异常特征

苍梧地震 200 km 范围内固定前兆台站较稀疏, 主要分布在震中南部地区, 5 个台站中有 3 个台站出现异常, 台站异常比为 60% (表 2)。梧州连续重力、广东信宜和桂平西山水位 3 个测项出现异常, 测项异常比为 30%, 梧州连续重力非潮汐变化和区域重力潮汐因子变化空间分布为较可靠的中期异常, 桂平西山井水位破年变为供参考的中期异常, 信宜水位大幅上升和华南地区地磁低点位移为较可靠的短期异常。总体来看, 震区附近前兆观测台站少, 可靠的中短期异常少。

针对广西及邻区前兆台站少、分布不均匀的现状, 广西地震局 2014 年以来构建了流动重力和 GNSS 观测网络, 有效弥补了该地区前兆监测能力的不足。苍梧 5.4 地震前区域重力场呈现出空间分布的有序性及沿主干断裂展布的重力异常梯度带, 震后重力场出现反向恢复变化; 震中区附近重力场是一个由“重力正值异常区向重力负值异常区变化并沿 NNE 向出现重力变化梯度带及其在反向变化过程中发震”的演化过程。苍梧  $M_s$  5.4 地震震中既位于重力变化梯度带附近, 也处于面应变梯度带零值过渡区和最大剪应变率高位区边缘部位, 这表明重力场动态变化与地壳水平运动及构

造变形密切相关, 也进一步佐证了重力场和形变场动态变化图像对中强地震地点预测具有重要的指示意义。但由于 2016 年苍梧 5.4 地震震中位于测网的边缘, 而且震中附近重力网测点稀疏、点距较大、观测时间较短, 所得到的信息难以全面反映出苍梧地震孕育、发生的整个过程。因此, 在今后流动重力观测工作中应进一步优化重力网络布局, 合理规划观测时间, 强化邻省联合观测, 加密重力变化显著地区的跟踪观测, 提升地震预测预报效能。

### 4 结语

(1) 苍梧 5.4 级地震发生前, 共出现 5 项定点前兆异常, 包括梧州连续重力、重力潮汐因子空间分布、桂平水位、信宜水位和地磁低点位移。梧州连续重力非潮汐变化和区域重力潮汐因子变化空间分布为较可靠的中期异常, 桂平西山井水位破年变为供参考的中期异常, 信宜水位大幅上升和华南地区地磁低点位移为较可靠的短期异常。震中 200 km 范围内的前兆异常台站、异常台项百分比分别为 60% 和 30%。

(2) 苍梧 5.4 级地震震中 200 km 范围内前兆观测台站少、测项少, 流动重力和 GNSS 监测网较好的弥补了该地区前兆监测能力的不足。此次地

震震中既位于重力变化梯度带附近,也处于面应变梯度带零值过渡区和最大剪应变率高值区边缘部位,表明重力场动态变化与地壳水平运动及构造变形密切相关,也进一步佐证了重力场和形变场动态变化图像对中强地震地点预测具有重要的指示意义。

(3) 苍梧地震发生在中国大陆东部 6 级以上地震超长平静和东南沿海地震带 5.5 级以上地震长期平静的背景下,苍梧 5.4 级地震的发生是否预示东南沿海地震带将进入新一轮地震活跃幕,对大陆东部强震活动有何指示意义,需进一步深入研究。

表 2 苍梧地震前兆异常信息

Table 2 Precursory anomaly information of Cangwu earthquake

序号	异常项目	台站或观测区	分析办法	异常判据及观测误差	震前异常起止时间	震后变化	最大幅度	震中距/km	异常类别	异常特点及备注
1	连续重力	梧州	非潮汐变化	趋势转折	2015-09~2016-07	速率降低	5 $\mu\text{gal}/\text{m}$	75	M2	震前 10 个月重力非潮汐变化以 5 $\mu\text{gal}/\text{m}$ 增加,震后上升至 7.5 $\mu\text{gal}/\text{m}$ 。
2	重力潮汐因子变化空间分布	广西及邻区	重力潮汐因子变化	零值线分布成南北向分布,震中处于压缩状态	2016-01~2016-07	反向恢复			M2	震中区域潮汐因子变化为正值,表明区域地壳处于压缩状态。
3	流动重力	105°~112° E 21°~26.5° N	重力变化空间分布	重力变化梯度带上、重力变化零值线附近和等值线拐弯部位	2014-12~2016-09		40 $\mu\text{Gal}$		M2	重力正值异常区向重力负值异常区变化并沿 NNE 向出现重力变化梯度带及其在反向变化过程中发震
4	GPS (水平)	105°~114° E 21°~27°N	最大剪应变空间分布	最大剪应变率高值区边缘部位	2013-04~2015-04	正常	$2.8 \times 10^{-8}$		M2	最大剪应变率高值区边缘部位
5			面应变空间分布	面应变梯度带零值过渡区	2013-04~2015-04	正常	$-3.2 \times 10^{-8}$		M2	面应变梯度带零值过渡区
6	水位	桂平西山井	整点值	破年变	2015-05~2016-05	正常		168	M3	没有出现一定的夏高冬低的年变。
7	水位	信宜十五井	日值	水位出现高值	2016-01~2016-02	正常	0.6591 m	188	S2	水位上升幅度增大
8	地磁低点位移	华南地区	地磁低点时间空间分布	苍梧地震位于地磁低点位移线附近	2016-06-29	正常	低点时间滞后 2h 46 min		S2	地磁低点位移线途径粤桂交界、湖南南部和江西中部地区,苍梧地震位于低点位移线附近

备注: M2 表示较可靠的中期异常, M3 表示可供参考的中期异常, S2 表示较可靠的短期异常。

致谢: 广东、福建、海南、湖南和江西省地震局提供前兆观测资料及资料分析意见, 地壳运动检测工程研究中心王新胜副研究员提供了梧州台重力非潮汐变化分析资料, 广东省地震局陈大庆高级工程师提供了广东信宜井水位异常分析资料, 评审专家提出了宝贵意见和建议, 在此一并表示衷心感谢。

#### 参考文献:

- [1] 周军学, 聂高众, 谭劲先, 等. 2016 年 7 月 31 日广西苍梧 5.4 级地震灾害特征分析[J]. 地震地质, 2017, 39(4): 780-792.
- [2] 王新胜, 韩宇飞, 韦进. 苍梧  $M_s$  5.4 地震和呼图壁  $M_s$  6.2 地震震前重力非潮汐变化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(12): 1 211-1 213.

- [3] 李盛,王赵清,李砚,等. 海南岛陆重力场演化特征研究[J]. 华南地震,2016,36(2):70-76.
- [4] 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(增刊):71-78.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 江在森,张希,祝意青,等. 昆仑山口西 $M_s$ 8.1地震前区域构造变形背景[J]. 中国科学(D辑),2003,32(增刊):163-172.
- [8] 国家地震局预测预报司编. 地下流体地震预报方法[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [9] 车用太,鱼金子. 地震地下流体学[M]. 北京:气象出版社,2005.
- [10] 盛艳蕊,张子广,张素欣,等. 昌黎井水位破年变异常分析[J]. 中国地震,2015,31(02):399-408.
- [11] 车用太,鱼金子. 地下流体典型异常的调查与研究[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [12] 杨明波,车用太,王力,等. 大灰厂井水位上升异常及其震兆意义[J]. 地震地磁观测与研究,2005,26(02):68-74.
- [13] 丁鉴海,刘杰,余素荣,等. 地磁日变化异常与强震的关系[J]. 地震学报,2004,26(增刊):79-87.
- [14] 冯志生,李琪,李鸿宇,等. 地磁低点位移线两侧异常变化的反相位现象及其解释[J]. 中国地震,2009,25(22):206-213.
- [15] 李军辉,何康,陈俊,等. 安庆 $M$ 4.8级地震前地磁低点位移现象研究[J]. 华南地震,2013,33(2):41-46.