

文翔,季灵运,向巍,等. 华南地区流动重力变化异常指标分析[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 117-126. [WEN Xiang, JI Lingyun, XIANG Wei, et al. Anomaly Index Analysis of Mobile Gravity Changes in South China[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 117-126]

华南地区流动重力变化异常指标分析

文翔¹, 季灵运², 向巍¹, 罗远鹏¹, 梁飞¹, 李砚¹, 柴现凡¹

(1. 广西壮族自治区地震局, 南宁 530022; 2. 中国地震局第二监测中心, 西安 710054)

摘要: 2013年以来华南地区先后发生2013年9月4日福建仙游 $M_s4.8$ 、2017年7月15日广西南丹 $M_s4.0$ 、2018年3月20日广东阳西 $M_L4.2$ 、2019年3月5日广东雷州 $M_L4.1$ 、2019年8月20日海南三亚 $M_s4.2$ 、2019年10月12日广西北流 $M_s5.2$ 、2019年11月25日广西靖西 $M_s5.2$ 与2021年8月4日广西德保 $M_s4.8$ 等中强地震。通过系统梳理以上中强震例震前不同时空尺度流动重力变化特征, 总结提炼地震孕育与重力变化异常时空演化特征之间的关系, 分析利用流动重力地震观测资料开展地震预测的“时、空、强”定量依据。结果表明: 华南地区多次4、5级左右地震震前出现局部重力场变化, 且地震易发生在与构造活动有关联的重力变化四象限中心地带或正、负异常区过渡的高梯度带附近; 华南地区4、5级左右地震前重力变化时变距和量级分析表明: 震级为4级时, 重力变化异常范围约100 km, 重力变化异常量级约40 μGal , 震级为5级时, 重力变化异常范围约150 km, 重力变化异常量级约50 μGal ; 目前流动重力观测多为1~2期/年的复测周期, 未能对震前重力场演化过程进行较详细跟踪, 在时间上流动重力以中期地震预测为主。

关键词: 华南地区; 异常指标; 重力时变距; 重力变化量级

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0117-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.16

Anomaly Index Analysis of Mobile Gravity Changes in South China

WEN Xiang¹, JI Lingyun², XIANG Wei¹, LUO Yuanpeng¹,
LIANG Fei¹, LI Yan¹, CHAI Xianfan¹

(1. Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China; 2. The Second Monitoring Application Center of China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China)

Abstract: Since 2013, there have been several moderate-strong earthquakes in South China, such as Xianyou $M_s4.8$ earthquake in Fujian on September 4th, 2013, Nandan $M_s4.0$ earthquake in Guangxi on July 15th, 2017, Yangxi $M_L4.2$ earthquake in Guangdong on March 20th, 2018, Leizhou $M_L4.1$ earthquake in Guangdong on March 5th, 2019, Sanya $M_s4.2$ earthquake in Hainan on August 20th, 2019, Beiliu $M_s5.2$ earthquake in Guangxi on October 12th, 2019, Jingxi $M_s5.2$ earthquake in Guangxi on November 25th, 2019 and Debao $M_s4.8$ earthquake

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 地震科技星火计划(XH22036D); 地震行业科研专项(2022010204); 广西重点研发计划(2018AB67009)联合资助。

作者简介: 文翔(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事重力与GPS在地震监测预报方面的应用研究。

E-mail: wenxiang6261@163.com.

通信作者: 季灵运(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地壳形变与地震预测分析。

E-mail: dinsar010@163.com

in Guangxi on August 4th, 2021. This paper systematically sorts out the characteristics of mobile gravity changes at different temporal and spatial scales before the above moderate and strong earthquakes, summarizes and refines the relationship between earthquake preparation and the temporal and spatial evolution characteristics of gravity variation anomalies, and analyzes the quantitative basis of "time, space and strength" for earthquake prediction using mobile gravity seismic observation data. The results show that: There are local gravity field changes before many *M*4 and *M*5 earthquakes in South China, and earthquakes are easy to occur in the center of the four quadrants of gravity change related to tectonic activities or near the high gradient zone of the transition between positive and negative anomaly areas. The time-varying distance and magnitude analysis of gravity changes before *M*4 and *M*5 earthquakes in South China show that: When the magnitude is 4, the anomaly range of gravity changes is about 100 km, and the anomaly magnitude of the gravity changes is about 40 μGal ; when the magnitude is 5, the anomaly range of gravity changes is about 150 km, and the anomaly magnitude of the gravity change is about 50 μGal . At present, the re-measurement cycles of the mobile gravity observations are usually 1–2 periods/year and the evolution process of the gravity field before the earthquake is not be tracked in detail, so that mobile gravity monitoring is often used for the mid-term earthquake prediction.

Keywords: South China; Anomalous index; Time-varying distance of gravity; Magnitude of gravity change

0 引言

流动重力观测是地震监测预报的重要技术方法之一。早在1964年日本新潟、美国阿拉斯加等地震前后即观测到了重力变化。我国自1966年邢台大地震后开始开展地震流动重力监测工作,并观测到了1975年海城7.3级、1976年唐山7.8级地震前后重力变化异常^[1-3]。近年来,利用流动重力观测资料,中国地震局重力学科专家对2008年汶川8.0级、2013年四川芦山7.0级、2014年云南鲁甸6.5级、2016年青海门源6.4级、2016年新疆呼图壁6.2级、2017年四川九寨沟7.0级等强震均进行了较好的年度、年中预测^[4-6]。

近年来在华南块体中强地震集中活跃的背景下,连续发生了2013年9月4日福建仙游 M_s 4.8、2016年7月31日广西苍梧 M_s 5.4、2017年7月15日广西南丹 M_s 4.0、2018年3月20日广东阳西 M_L 4.2、2019年3月5日广东雷州 M_L 4.1、2019年8月20日海南三亚 M_s 4.2、2019年10月12日广西北流 M_s 5.2、2019年11月25日广西靖西 M_s 5.2与2021年8月4日广西德保 M_s 4.8等中强地震。华南地区粤、闽、桂、琼流动重力观测网络在每年的上、下半年各开展1期观测^[7],通过对华南地区流动重力测网多期重力数据精细处理与分析,捕捉到广西南丹 M_s 4.0、广东阳西 M_L 4.2、广东雷州 M_L 4.1、广西北流 M_s 5.2、广西靖西 M_s 5.2和广西德保 M_s 4.8地震前震中附近的重力异常变化,并进行了较好的中期预测^[8-11, 13]。目前许多学者先后提出过质量迁移、

膨胀扩容、闭锁剪力等“模式”用于解释震前重力场变化^[2-3, 14-15],但受地球内部的“不可入性”、中强地震的“非频发性”、地震物理过程的复杂性等困难的制约^[16],地震预报还处于经验预报阶段。因此,从实践中不断总结经验,再应用于指导地震监测预报实践,是提高流动重力地震分析预报能力的重要方法。随着典型震例资料的积累,目前对5级以上地震孕育相关重力变化过程、范围、量级等有了更多的认识^[6, 17-20],但由于观测技术和应用需求等方面的原因,对4、5级左右地震重力变化过程、范围、量级除有一定总结外^[18, 20-21],总体关注较少,相关研究不多。因此本文通过搜集相关文献资料,并结合笔者近年在流动重力地震分析预报实践工作,以华南地区近年来发生的多次4、5级左右震例中总结提炼地震孕育与重力变化异常时空演化特征之间的关系,分析其在流动重力地震分析预报的“时、空、强”定量依据,为其它中等地震构造区重力场异常指标分析提供参考。

1 重力观测使用概况与资料处理

目前华南地区流动重力观测网络主要由广西、广东、福建、海南4个省份构成。2016年7月31日发生广西苍梧 M_s 5.4地震,凸显出广西—广东交界区域流动重力观测点位空间分布不均、密度不足等问题,所得到重力信息较为片面,难以捕捉地震孕育发生过程中出现的完整前兆信息,这直接制约着地震分析预测能力^[7]。因此2016年9月起粤、闽、桂、琼开始优化交界区域重力网络布局,拼接孤立

区域测网,进一步强化邻省公共测段观测,优化后的重力测网基本覆盖了粤、闽、桂、琼主要活动断裂带,旨在监测区域物质迁移及构造变形,为中等地震预测研究提供区域性构造运动前兆异常信息(图1),截止到2020年9月华南地区共开展9期流动重力观测。

流动重力观测资料处理过程:①采用LGADJ软件进行平差计算,考虑到测网内绝对重力点点位稳定,外界干扰影响小,且有高精度绝对重力观测值,因此采用经典平差计算方法;②平差计算时,

先对多期重力观测资料计算结果进行整体分析,初步了解各台仪器观测精度后,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对平差结果中极个别周围环境改变或不重合的测点进行删除;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。各期观测资料及整体平差计算后重力点值精度统计情况见表1,9期重力观测资料点值平均精度在 $8.0\times 10^{-8}\mu\text{Gal}$ 左右。

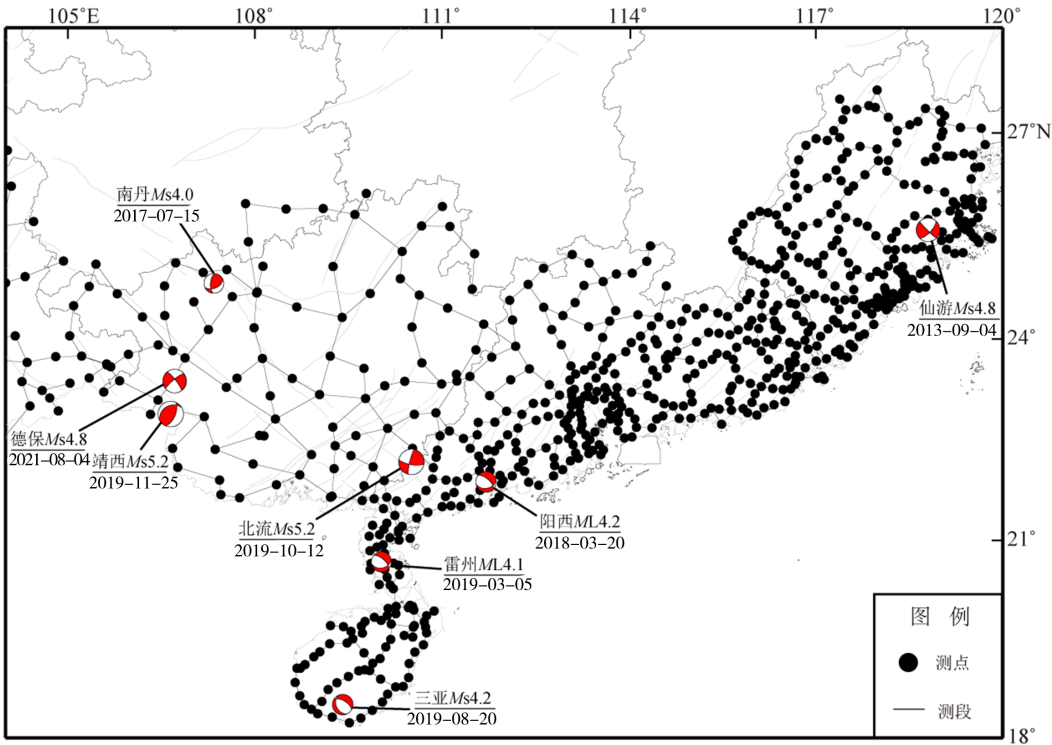


图1 华南地区流动重力观测网络
Fig.1 The mobile gravity monitoring network in South China

表1 华南地区流动重力测量情况及精度统计表
Table 1 Statistical table of mobile gravity monitoring and accuracy in South China

仪器型号	观测时间/年-月	点值平均精度/ μGal
CG5-385,386,232,369,814,1316	2016-09	11.3
CG5-169,170,385,386,232,369,814,1316	2017-03	8.1
CG5-055,216,232,369,814,1316	2017-09	8.7
CG5-230,216,232,369,834,845,814,1316	2018-03	8.1
CG5-385,386,232,369,834,845,814,1316	2018-09	7.7
CG5-385,386,369,526,834,845,814,1316	2019-03	5.9
CG5-385,386,369,526,834,845,814,1316	2019-09	7.4
CG5-385,386,834,845,814,1316,CG6-205,213	2020-03	7.6
CG5-385,386,834,845,814,1316,CG6-205,213	2020-09	6.9

2 华南地区中等地震前重力场动态变化

2.1 2017年南丹 $M_s4.0$ 地震前重力场动态变化图像

2017年7月15日广西河池市南丹县(24.82°N, 107.37°E)发生 $M_s4.0$ 地震, 震源深度为6 km, 震中位于NE向木伦—东兰—逻楼断裂与NW向河池—南丹断裂附近, 控震构造为NW向河池—南丹主干断裂, 发震构造为木伦—东兰—逻楼断裂。由2015-09—2016-09区域1 a尺度重力场动态变化图像可以看出桂西北地区在田林及贵州荔波一带出现

2个局部重力正变化异常区, 贵州紫云及柳州一带出现2个局部重力负变化区, 南丹一带呈现重力四象限分布异常特征, 重力差异变化约40 μGal ; 异常区中心位于NE向木伦—东兰—逻楼断裂与NW向河池—南丹断裂交汇处(图2a)。2016-09—2017-09期间重力变化呈现出新的态势, 乐业—田阳一带重力呈负值变化, 贵州荔波—罗甸一带重力呈正值变化, 重力差异变化约40 μGal , 并沿NW向河池—南丹主控断裂形成重力变化梯度带, 南丹 $M_s4.0$ 地震发生在重力异常梯度带“0”等值线拐弯处(图2b)。

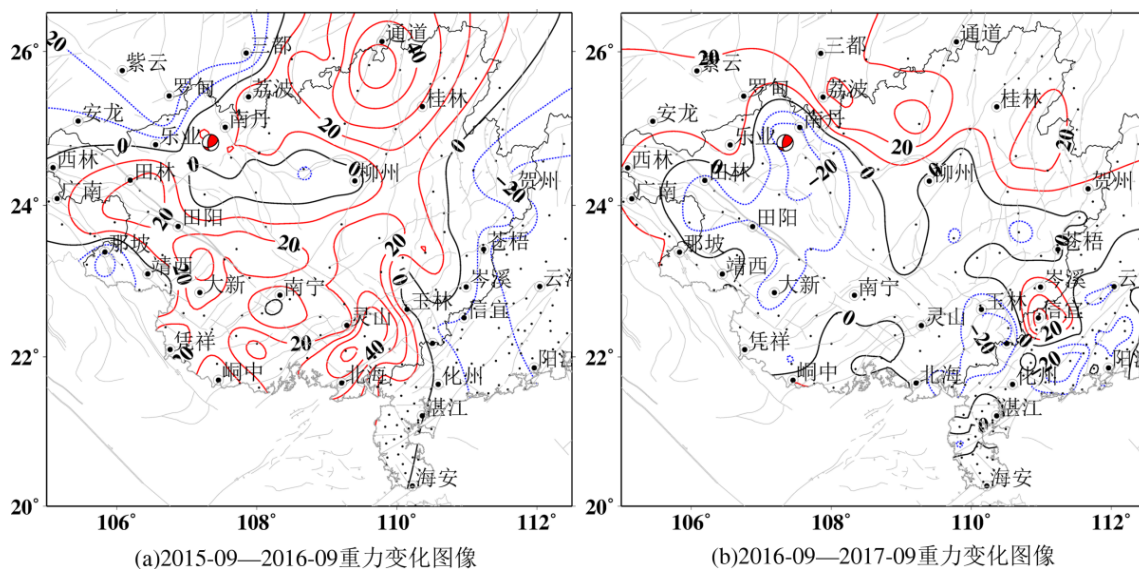


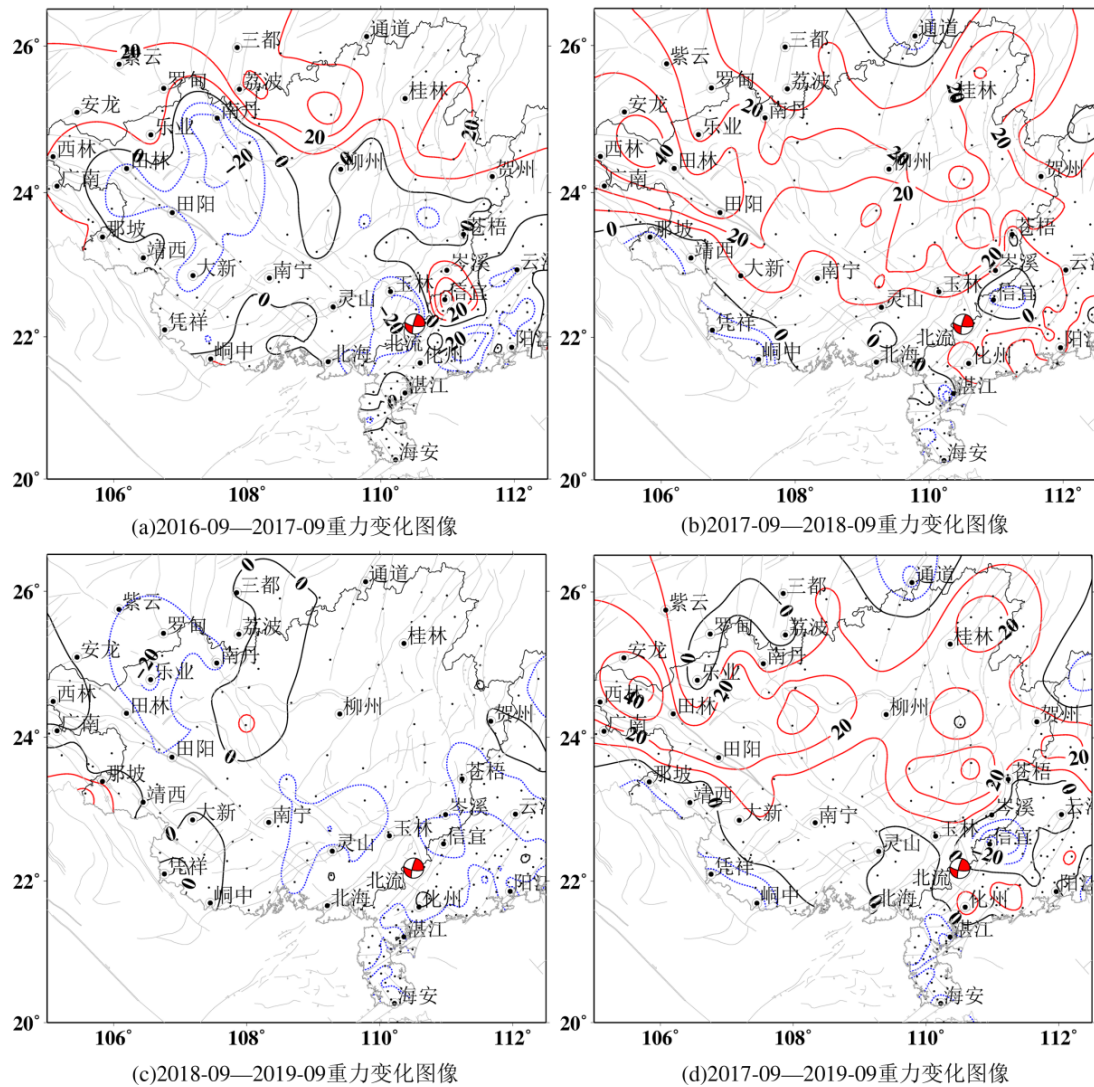
图2 南丹 $M_s4.0$ 地震前1 a尺度重力场动态变化图像

Fig.2 Image of dynamic variation of gravity field at 1 year scale before Nandan $M_s4.0$ earthquake

2.2 2019年北流 $M_s5.2$ 地震前重力场动态变化图像

2019年10月12日广西北流市石窝镇(22.18°N, 110.51°E)发生 $M_s5.2$ 地震, 震源深度10 km。震区处于华南褶皱系(I级)的云开—云雾大山断块隆起区(II级)的西部边界, 区域内分布的主要断裂带为NE向的合浦—北流断裂带、廉江—信宜断裂带及NW向的巴马—博白断裂这2组方向断裂带组成了共轭走滑断裂系。本次地震发生部位靠近巴马—博白断裂带博白茂名段与廉江—信宜断裂带的交汇部位。由区域1 a尺度重力场动态变化图像可以看出: 2016年9月—2017年9月广西北流至广东化州一带出现局部重力变化负异常区, 广西岑溪至广东信宜一带出现重力变化正异常区, 并沿NW向巴马—博白主控断裂出现重力变化高梯度带, 重力最大差异变化约50 μGal (图3a); 2017年9月—2018年9月

重力变化表现为一个新的态势, 广西北流至广东化州一带重力变化与上期相比由负向正变化, 广西岑溪至广东信宜一带重力变化与上期相比由正向负变化, 并沿NE向廉江—信宜断裂出现重力变化梯度带, 重力最大差异变化约40 μGal (图3b); 2018年9月—2019年9月广西北流、岑溪至广东信宜、化州一带重力变化减弱, 重力变化总体从活跃向平静过渡, 随后2019年10月12日发生北流 $M_s5.2$ 地震(图3c); 由区域1~2 a尺度累积重力场动态变化图像可以看出: 2017年9月—2019年9月2 a尺度累积重力变化总体显著, 与2016年9月—2017年9月期相比, 震中附近广西岑溪至广东信宜一带的重力变化由正转负, 北流 $M_s5.2$ 地震发生在重力反向变化过程中, 震中位于沿NE向廉江—信宜断裂走向一致的重力异常高梯度带“0”等值线附近。

图3 北流 $M_{5.2}$ 地震前1~2 a尺度重力场动态变化图像Fig.3 Image of dynamic variation of gravity field at 1-2 years scale before Beiliu $M_{5.2}$ earthquake

2.3 2019年靖西 $M_{5.2}$ 地震前重力场动态变化图像

2019年11月25日广西百色靖西市(22.89°N, 106.65°E)发生 $M_{5.2}$ 地震,震源深度10 km。靖西 $M_{5.2}$ 地震震区位于右江地区,右江地区的断裂以NW向为主,发育多条NW向区域性断裂;该区地震活动较为频繁,绝大部分地震都发生在NW向断裂上。此外,在右江地区的东南部有少量NE向断裂分布。靖西 $M_{5.2}$ 地震震中位于两条区域性断裂NW向的靖西—崇左断裂和NE向的下雷—灵马断裂交汇处。由区域1a尺度重力场动态变化图像可以看出(图4):2017年9月—2018年9月桂西南那坡—靖西—凭祥一带出现局部重力变化负异常区,田林—田阳—大新一带出现重力变化正异常区,并沿NW向靖西—崇左主控断裂出现重力变化高梯度

带,重力最大差异变化约50 μGal (图4a);2018年9月—2019年9月重力与上期相比总体呈现反向变化趋势,那坡—靖西—凭祥一带重力由负向正变化,田林—田阳—大新一带重力由正向负变化,并在靖西一带形成“0”等值线过渡区域(图4b);2019年9月—2020年9月重力反向变化加剧,那坡—靖西—凭祥一带由2017年9月—2018年9月重力-20 μGal 变化为+40 μGal ,田林—田阳—大新一带由2017年9月—2018年9月重力+30 μGal 变化为-10 μGal 左右,并沿NW向断裂出现重力变化梯度带,重力最大差异变化约50 μGal ;随后2019年11月25日发生靖西 $M_{5.2}$ 地震,地震发生在重力反向变化过程中,震中位于沿NW向靖西—崇左主控断裂走向一致的重力异常梯度带“0”等值线附近(图4c)。由区域2 a尺度重力场动态变化图像可以

看出：桂西南地区在那坡及峒中一带出现两个局部重力正变化异常区，大新一带出现局部重力负变化异常区，靖西—凭祥一带形成重力变化四象限分布特征，重力差异变化约 $50 \mu\text{Gal}$ ；异常区中

心位于NW向靖西—崇左断裂、NE向桂林—南宁断裂交汇处；靖西 $M_{\text{s}}5.2$ 地震发生在重力变化四象限中心部位(图4d)。

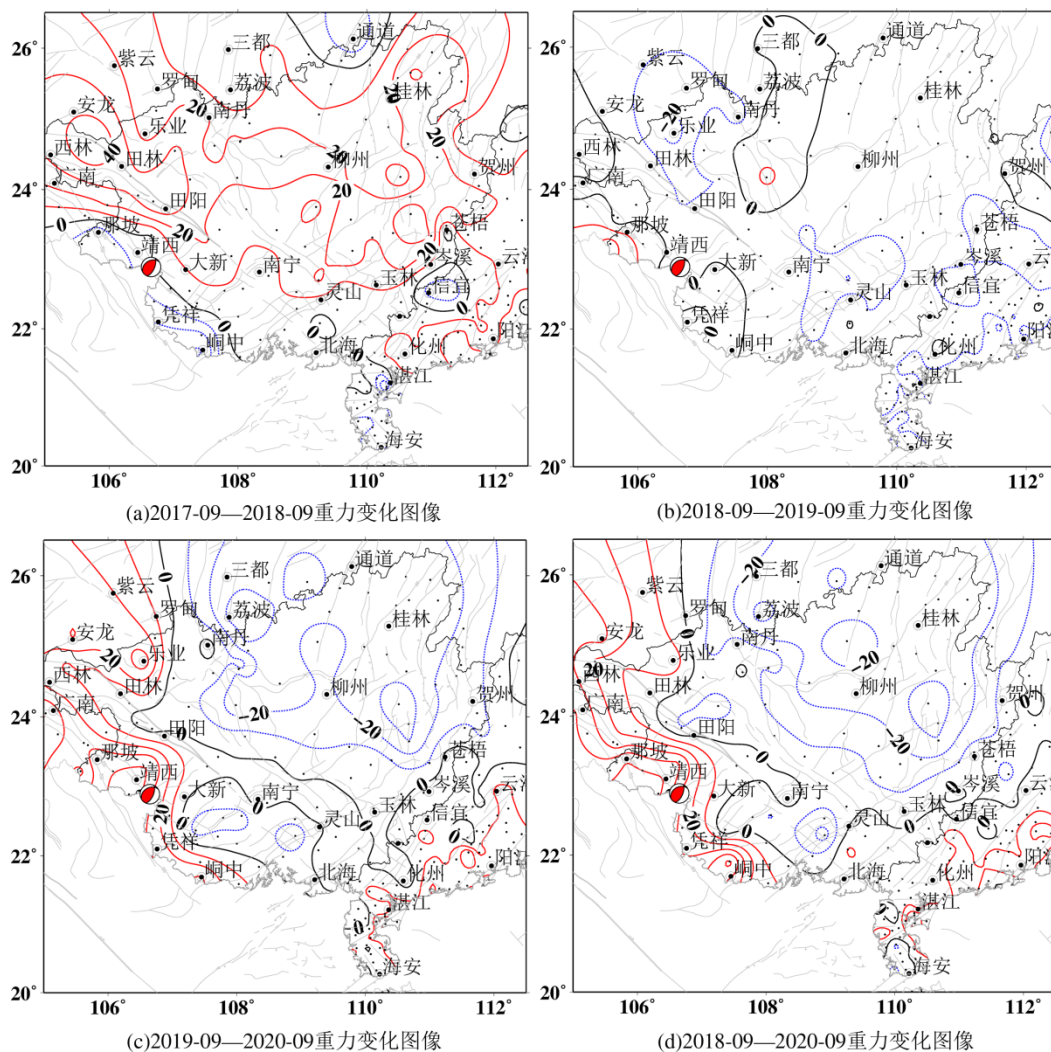


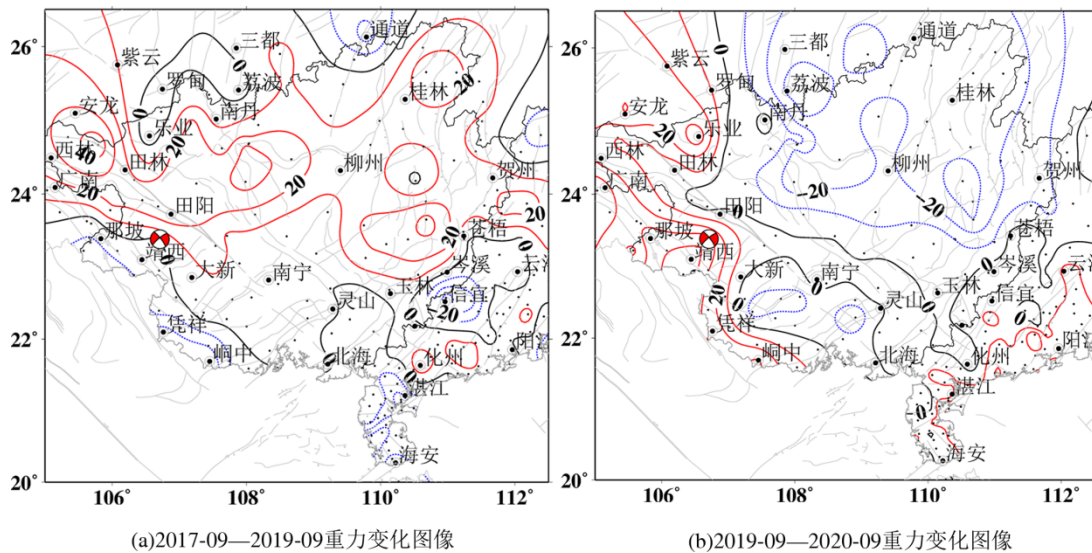
图4 靖西 $M_{\text{s}}5.2$ 地震前1~2 a尺度重力场动态变化图像

Fig.4 Image of dynamic variation of gravity field at 1-2 years scale before Jingxi $M_{\text{s}}5.2$ earthquake

2.4 2021年德保 $M_{\text{s}}4.8$ 地震前重力场动态变化图像

2021年8月4日广西百色市德保县(23.38°N , 106.71°E)发生 $M_{\text{s}}4.8$ 地震，震源深度10 km。德保 $M_{\text{s}}4.8$ 地震位于右江地震带，地震发生在NW向百色—合浦断裂带与靖西—崇左断裂带之间。综合序列重新定位空间展布、地震震源机制解、烈度调查结果、近场区震源区构造特征等综合推测，德保 $M_{\text{s}}4.8$ 地震的发震构造可能为NWW向隐伏断裂。由区域2 a尺度重力场动态变化图像可以看出：2017年9月—2019年9月桂西南那坡—凭祥—峒中

一带出现局部重力变化负异常区，田林—田阳—大新一带出现重力变化正异常区，并沿NW向主控断裂出现重力变化高梯度带，重力最大差异变化约 $40 \mu\text{Gal}$ (图5a)；2019年9月—2020年9月重力与上期相比总体呈现反向变化趋势，那坡—凭祥—峒中一带重力由负向正变化，田林—田阳—大新一带重力由正向负变化，重力最大差异变化约 $40 \mu\text{Gal}$ ，并在靖西—田阳一带形成“0”等值线拐弯区域，德保 $M_{\text{s}}4.8$ 地震发生在重力反向变化过程中，震中位于沿NW向主控断裂走向一致的重力异常高梯度带“0”等值线拐弯附近(图5b)。

图5 德保 $M_5.4$ 地震前1a尺度重力场动态变化图像Fig.5 Image of dynamic variation of gravity field at 1 year scale before Debao $M_5.4$ earthquake

2.5 粤闽琼地区地震前重力场动态变化图像

本文利用粤、闽、琼地区2013年以来区域流动重力观测资料,分析2013年9月4日福建仙游 $M_5.4$ (25.60°N、118.80°E)、2018年3月20日广东阳西 $M_L4.2$ (21.88°N, 111.71°E)、2019年3月5日广东雷州 $M_L4.1$ (20.68°N, 110.03°E)、2019年8月20日海南三亚 $M_5.4.2$ (18.51°N, 109.41°E)地震震前区域重力变化特征。徐立等^[12]分析认为福建仙游 $M_5.4$ 地震前沙县—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,重力场变化最大约为50 μGal ,异常范围约130 km;广东阳西 $M_L4.2$ 地震前,广东信宜—阳江一带出现重力场变化梯度带,重力场变化最大约为40 μGal ,异常范围约120 km(图6a);广东雷州 $M_L4.1$ 地震前,震中附近地区出现重力场累积变化梯度带,重力场变化最大约为30 μGal ,异常范围约90 km(图6b);海南三亚 $M_5.4.2$ 地震前,震中附近地区同样出现重力场累积变化梯度带,重力场变化最大约为40 μGal ,异常范围约100 km(图6c)^[13]。

3 华南4、5级左右地震及其重力变化时变距与变化量级关系

一般情况下,未来地震的“时、空、强”与重力变化异常的“时、空、强”呈正相关,即重力变化异常的量级、范围越大,则对应震级越大,

震级越大则震前重力场演化持续的时间可能越长,重力变化异常形态与未来发震地点密切相关。近年来随着典型震例资料的积累,许多地震工作者对5级以上地震孕育相关重力变化过程、范围、量级等有了更多的认识^[6, 18-20]。贾民育等^[18]采用时变距 S 来描述重力变化异常范围,定义时变距 S 为震中至重力正异常区中心的距离,是重力特征异常区的半径;胡敏章等^[20]对时变距 S 做两点补充说明:当重力测网稀疏时, S 取震中至重力正变化最显著点距离;重力异常变化出现四象限图像时,时变距 S 为震中至2个正变化中心距离的平均值。重力变化异常量级 G 定义为地震、断裂构造运动相关重力变化差异;祝意青等^[6]、胡敏章等^[20]将重力变化异常图像出现梯度带和四象限特征时,重力变化异常量级取正负变化的最大差值;仅有局部重力变化时,重力变化异常量级取最大变化值;由于中强震前一般有较长时间的重力场演化过程,而流动重力观测时间间隔较长,无法确定哪一期观测到的重力变化异常最具代表性,因此当某地震有多期变化值时,取累计变化较为显著时期平均值作为 G 值。通过提炼5级以上地震震级与重力变化异常范围和量级之间的统计关系^[6, 20],得到5、6、7、8级地震震级判定的重力变化异常量级(G)参考指标分别为50、70、90、120 μGal ,重力变化异常范围(两倍时变距 S)参考指标分别为140、220、350、660 km。本文依据重力变化时变距与变化量级的定义,统计了华南地区4、5级左右震例对应的重力变化时变距 S 、量级 G 与震级 M_5

(M_L)间的关系见表2。可以看出震级为4级时,重力变化异常范围约为100 km,重力变化异常量级40 μGal ;震级为5级时,重力变化异常范围约为150 km,重力变化异常量级50 μGal 。

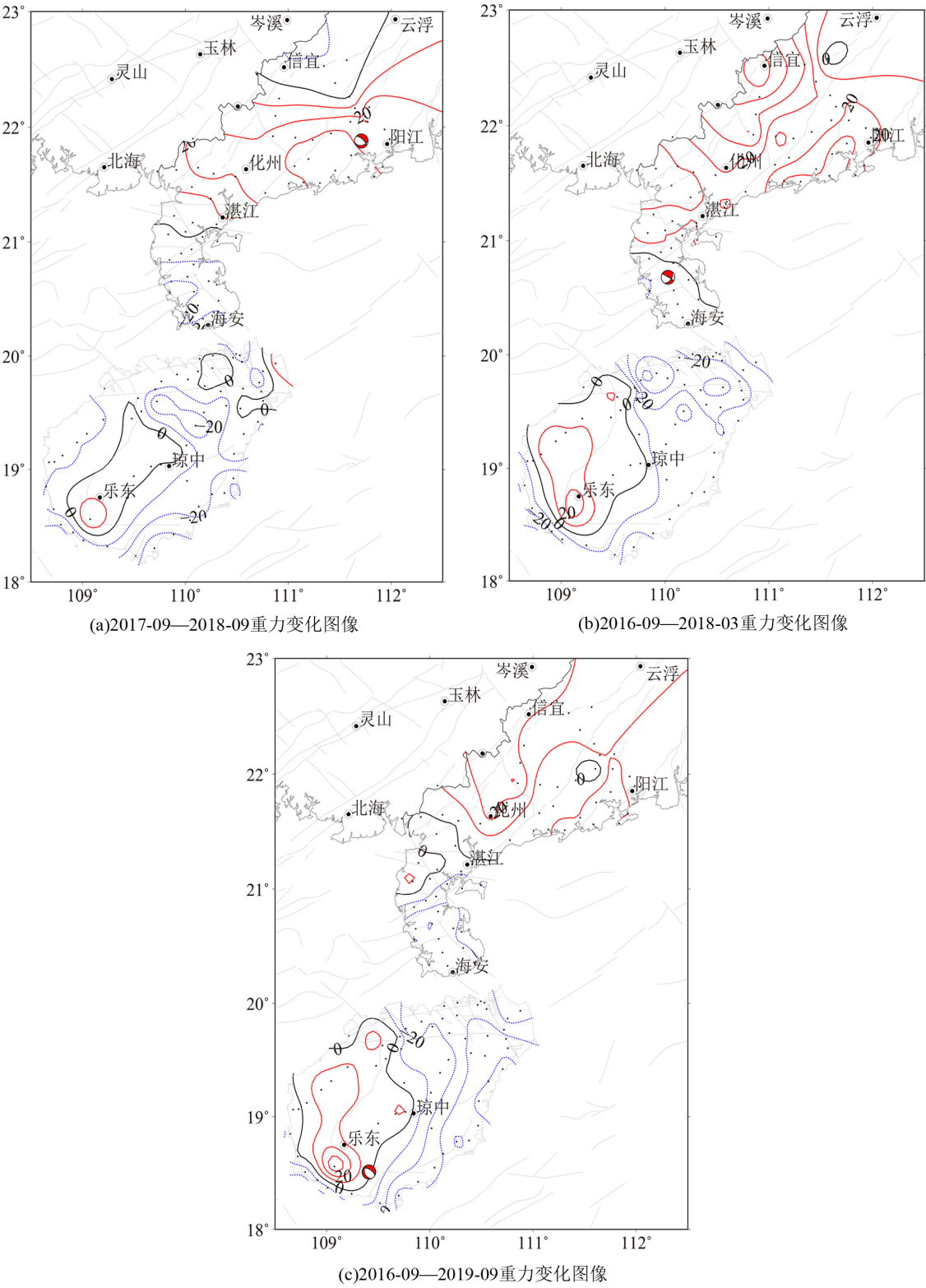


图6 雷琼地区震前重力场动态变化图像

Fig.6 Image of dynamic variation of gravity field in Leiqiong area before earthquake

表2 华南4、5级左右地震及其重力变化时变距*S*与变化量级*G*

Table 2 *M*4 and *M*5 earthquakes in South China and the time-varying distance *S* and magnitude *G* of their gravity variation

序列	时间(年-月-日)	震级	参考地点	时变距 <i>S</i> /km	量级 <i>G</i> /μGal
1	2017-07-15	<i>M</i> _s 4.0	广西河池市南丹县	54	41
2	2019-10-12	<i>M</i> _s 5.2	广西北流市石窝镇	76	47
3	2019-11-25	<i>M</i> _s 5.2	广西百色靖西市	81	45
4	2021-08-04	<i>M</i> _s 4.8	广西百色市德保县	45	43
5	2013-09-04	<i>M</i> _s 4.8	福建莆田市仙游县	66	52
6	2018-03-20	<i>M</i> _L 4.2	广东阳江市阳西县	58	44
7	2019-08-20	<i>M</i> _s 4.2	海南三亚市天涯区	52	43

4 结语

本文以华南地区近年来发生的多次4、5级左右地震为例,总结提炼地震孕育与重力变化异常时空演化特征之间的关系,分析流动重力地震分析预报的“时、空、强”定量依据,得到如下结论:

(1)地震从孕育到发生是一个从应力积累到能量释放的过程。在地震孕育过程中,随着震源区应力的不断积累,使得地壳内部产生变形和发生物质迁移,致使地壳内部形变和密度发生变化,从而使得该处地表变形和重力值发生变化,主要表现为地壳形变场空间分布的有序性变化和局部形变异常区及伴生的地壳形变高梯度带出现。4、5级左右地震活动本身积累的能量较小,伴随的重力场变化范围和量级小,在重力变化成因分析时更易受局部因素影响,导致震例验证机会较小。本文通过收集华南地区震例分析表明4、5级左右地震震前出现较为显著的局部重力场变化;通过分析地震前震中附近的重力异常变化特征,归纳得出地震易发生在与构造活动有关联的重力变化四象限中心地带或正、负异常区过渡的高梯度带附近,这与以往5级以上地震震例研究基本一致^[6, 19-20]。

(2)以华南地区4、5级左右地震为例研究了4、5级左右地震及其重力变化时变距与变化量级关系。分析认为震级为4级时,重力变化异常范围约为100 km,重力变化异常量级约40 μGal;震级为5级时,重力变化异常范围约为150 km,重力变化异常量级约50 μGal。研究表明计算的5级左右地震时变距、重力变化异常量级与胡敏章等^[20]、祝意青等^[6]的总结基本一致;4级左右地震时变距、

重力变化异常量级略大于文献^[20]总结结果(震级为4级时,重力变化异常范围约为70 km,重力变化异常量级约30 μGal)。由于本文是利用华南地区震例样本量对其时变距与变化量级进行初步定量分析,为更好系统总结,在今后研究工作中纳入中国大陆地区更多4、5级左右震例,进一步梳理地震及其重力变化时变距与变化量级关系,建立4、5级左右地震在流动重力地震分析预报空间、强度方面的定量依据,为其它中等地震构造区重力场异常指标分析提供参考。

(3)目前流动重力观测多为1~2期/年的复测周期,未能对震前重力场演化过程进行较详细跟踪,因此尚不能得出与时间的统计关系,在时间上流动重力以中期地震预测为主。

参考文献

[1] 卢造勋,方昌流,石作亭,等. 重力变化与海城地震[J]. 地球物理学报,1978,21(1):1-8.

[2] 陈运泰,顾浩鼎,卢造勋. 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,1980,2(1):21-31.

[3] 李瑞浩,付兆珠. 唐山地震(*M*=7.8)前后的区域重力变化和扩容过程[J]. 内陆地震,1987,1(4):426-434.

[4] 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.

[5] 祝意青,闻学泽,孙和平,等. 2013年四川芦山*M*_s7.0地震前的重力变化[J]. 地球物理学报,2013,56(6):1887-1894.

[6] 祝意青,申重阳,张国庆,等. 我国流动重力监测预报发展之再思考[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(5),441-446.

[7] 周斌,文翔,原永东. 2016年苍梧*M*_s5.4地震前后重力变化[J]. 地震地质,2018,40(3):539-551.

[8] 广西壮族自治区地震局. 广西壮族自治区2017年度地震趋势研究报告[R]. 南宁:广西壮族自治区地震局,2016.

- [9] 广西壮族自治区地震局. 广西壮族自治区 2018 年度地震趋势研究报告[R]. 南宁:广西壮族自治区地震局, 2017.
- [10] 广西壮族自治区地震局. 广西壮族自治区 2020 年度地震趋势研究报告[R]. 南宁:广西壮族自治区地震局, 2019.
- [11] 广西壮族自治区地震局. 广西壮族自治区 2021 年度地震趋势研究报告[R]. 南宁:广西壮族自治区地震局, 2020.
- [12] 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.
- [13] 李盛, 廖桂金. 雷琼地区重力场动态变化特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(11): 1118–1125.
- [14] 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): 17–23.
- [15] 黄浩哲, 申重阳, 谈洪波, 等. 姚安 $M_s 6.0$ 地震典型重力前兆孕震模型量化研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(4): 351–355.
- [16] 陈运泰. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 39(12): 1633–1658.
- [17] 贾民育, 邢灿飞, 孙少安. 滇西重力变化的二维图象及其与 5 级(M_s)以上地震的关系[J]. 地壳形变与地震, 1995, 15(3): 9–19.
- [18] 贾民育, 詹洁晖. 中国地震重力监测体系的结构与能力[J]. 地震学报, 2000, 22(4): 360–367.
- [19] 申重阳, 祝意青, 胡敏章, 等. 中国大陆重力场时变监测与强震预测[J]. 中国地震, 2020, 36(4): 729–743.
- [20] 胡敏章, 郝洪涛, 李辉, 等. 地震分析预报的重力变化异常指标分析[J]. 中国地震, 2019, 35(4): 417–430.
- [21] 胡敏章, 郝洪涛, 宋浩, 等. 弱地震活动背景地区流动重力变化探析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(4): 339–343.