

张永奇,韩美涛,曹建平,等,2021. 2018年宁强 M_s 5.3地震前重力场变化特征分析. 中国地震,37(3):704~716.

2018年宁强 M_s 5.3地震前 重力场变化特征分析

张永奇^{1,2)} 韩美涛¹⁾ 曹建平¹⁾ 郑增记¹⁾

1)陕西省地震局,西安 710068

2)中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室,北京 100029

摘要 利用陕甘川地区2016—2018年5期流动重力观测资料,分析了陕西宁强 M_s 5.3地震前半年和1年尺度的重力场变化特征。同时采用小波多尺度分解方法,对宁强 M_s 5.3地震震中区的布格重力异常进行1~4阶小波分解,并对1~4阶小波细节图像进行分析。研究表明:①宁强 M_s 5.3地震重力场呈现“正向变化—正向减弱—负向变化—负向减弱”演化过程,震前重力场呈现四象限分布特征,震中位于鞍部位置,符合走滑型地震特征;②布格重力异常2~3阶小波细节对宁强 M_s 5.3地震孕震特征有较好的反映,对应的场源深度为10~15km,与本次地震震源深度11km有较好的对应关系。

关键词: 宁强 M_s 5.3地震 重力观测 重力场变化 布格重力异常 小波多尺度分解

[文章编号] 1001-4683(2021)03-0704-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

重力场时空动态变化主要由地表观测点的位置变化、地表整体变形运动以及地球内部因构造块体变形运动导致的密度变化效应叠加引起,包含了十分丰富的深部物质运移与地壳密度变化等构造信息(李铁明等,2018)。研究表明,地震发生前后区域应力场将发生明显变化,这必将改变地壳内部物质的运移及密度变化,进而引起重力场在时间和空间上的转折变化(顾功叙等,1997;马瑾等,2007;陈石等,2011)。地震与重力场异常变化之间的关系为认识地震孕育、发生过程提供了可靠且有效的途径,通过定期重复流动重力观测,可以捕捉到震源区的重力前兆信息(Chen et al, 1979; 许厚泽, 2003)。重力观测用于地震研究最早可以追溯到19世纪20年代,国内外已在不少地震前观测到了可靠的重力异常变化,如1964年美国阿拉斯加地震、1965—1967年日本松代震群、1968年新西兰因南格华地震、1975年海城地震、1976年唐山地震、2008年四川汶川地震、2013年甘肃岷县-漳县地震、2017年四川九寨沟地震等(Barnes, 1966; Kisslinger, 1975; Hunt, 1970; 陈运泰等, 1980; 申重阳等, 2009;

[收稿日期] 2020-02-13 [修定日期] 2020-11-11

[项目类别] 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2021JQ-962)、2019年度“三结合”课题(3JH-201902006)、陕西省启航与创新基金(QC201717)共同资助

[作者简介] 张永奇,男,1985年生,博士研究生,工程师,主要从事基于大地测量资料的地壳形变正反演研究。

E-mail: zyq19851115@163.com

祝意青等,2014、2017)。近年来,随着全国及各省重力测网的不断优化改造,其映震能力得到不断提升,进而加快了重力地震指标体系建设(贾民育等,2000;Zhu et al,2019;胡敏章等,2015、2019a)。近年来大量震例总结证明,重力手段不仅在地震重点监测区及大地震的预测预报中可以发挥重要作用,在弱震地区及中小地震的监测预报中也可以发挥积极作用(胡敏章等,2019b)。此外,进行重力异常识别来判断重力场变化的正常态和异常态时,不仅要关注重力场变化的非均匀程度,还需要分析重力场变化与布格重力异常背景场间的关系(申重阳等,2007;祝意青等,2012)。为掌握陕甘川地区的重力场时空变化特征及其与构造活动的关系,进而捕捉地震前兆信息,陕西省地震局、甘肃省地震局、四川省地震局分别建立了各自的重力观测网,并进行 1 年 2 期的流动重力测量。为了降低各个单位独立测网解算带来的不利影响,重力学科组要求各单位对相邻测网进行公共测点和测段的测量,从而为不同测网之间开展整体数据处理与分析提供便利条件,有利于充分发挥重力测网的作用和优势。

2018 年 9 月 12 日陕甘川交汇地区发生宁强 $M_s5.3$ 地震,震源机制解显示该地震为走滑型地震,震源深度约为 11km。为深入认识该地区中强地震孕育发生过程与重力异常变化的关系,为该地区的中强地震预测预报提供参考依据,本文利用 2016—2018 年流动重力观测资料以及震中区布格重力异常数据,对宁强 $M_s5.3$ 地震前重力场动态和静态变化特征进行研究,开展该项研究对于了解陕甘川地区地壳深部环境变化及地震成因机理等具有一定的科学意义。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

2018 年 9 月 12 日宁强 $M_s5.3$ 地震发生在陕西省汉中市宁强县与四川省广元市交界处(32.75°N , 105.69°E),震中位于龙门山断裂带西北边界的青川断裂附近,青川断裂具有多期活动的特点,中生代表现为深部构造层次的韧性剪切变形,第四纪以来的运动性质为右旋走滑(王全伟等,2000)。本文主要研究区域限定在以宁强 $M_s5.3$ 地震震中为中心、震中距 200km 范围内,该研究区在构造体系上属于青藏块体东北缘的巴颜喀拉地块与秦岭造山带和大别山构造带的交界部位,也属于我国著名的南北地震带中北段,其复杂多样的构造变形模式和构造活动特征是该地区中强地震孕育和发生的重要原因。研究区内发育有晚第四纪以来活动性较强的 NNW 向陇县-宝鸡断裂带;近 EW 向的西秦岭断裂、成县盆地北缘断裂和南缘断裂、康县断裂、文县断裂;NEE 向的青川断裂和映秀-北川断裂等,如图 1 所示。2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震后,该地区发生多次 3.0 级以上地震,本文统计了 2009—2019 年发生的 3.0 级以上地震,其中 $M_s5.0$ 以上地震 2 次, $M_s4.0$ 以上地震 23 次, $M_s3.0$ 以上地震 145 次,地震主要分布在汶川地震余震条带上,如图 2 所示。

1.2 流动重力数据处理

本文采用的重力数据范围为: $32^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $104.5^{\circ}\text{E} \sim 107.5^{\circ}\text{E}$,主要处理 2016—2018 年 5 期流动重力数据资料。数据由陕西省地震局、中国地震局第二监测中心、中国地震局地球物理勘探中心、四川省地震局等单位观测完成。每年进行 2 期观测,第一期一般在 3—4 月完成,第二期一般在 8—9 月完成,流动重力复测利用 2 台拉科斯特-隆贝格 G 型重力仪(LCR-G)进行观测,此外每年还对测网中的绝对重力测点进行绝对观测,主要由中国地震局

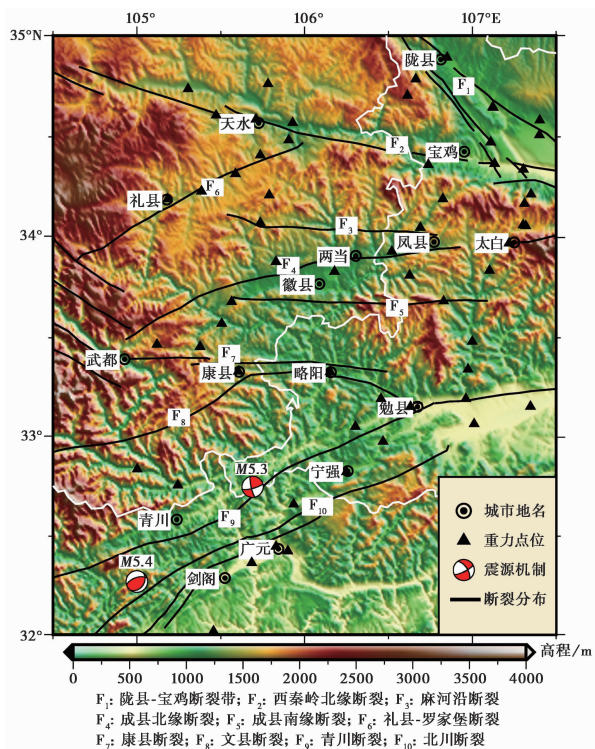


图 1 研究区断裂及重力点分布

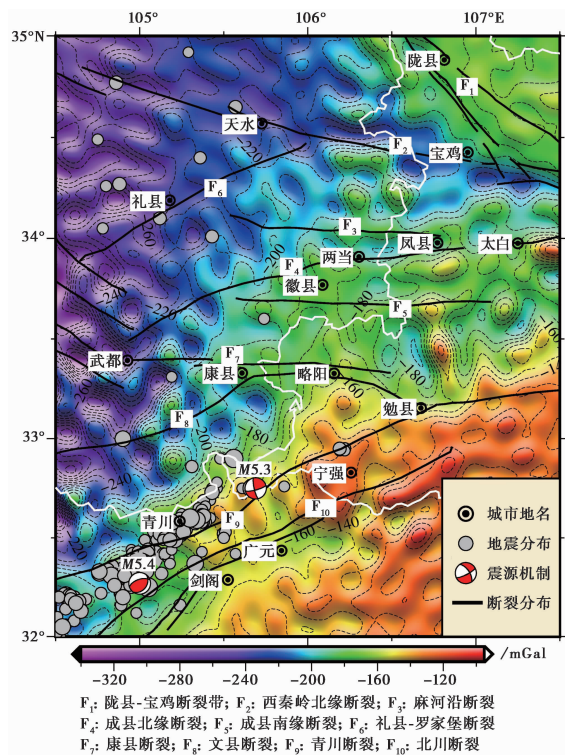


图 2 研究区完全布格重力异常及地震分布

地震研究所、自然资源部第一大地测量队等单位采用 FG-5 绝对重力仪进行施测。联测时将绝对重力点纳入测网中,本文采用的绝对重力点为西安重力测点、天水重力测点、广元重力测点,绝对重力点观测精度优于 $5\times10^{-8}\text{m/s}^2$,相对重力观测段差精度优于 $10\times10^{-8}\text{m/s}^2$ 。数据处理过程如下:①将原来各个测网数据单独计算优化为按照区域进行整网平差计算;②数据处理时采用基于绝对重力测点为起算基准的经典平差方法;③平差计算之前,首先对绝对重力和相对重力进行各项改正,并对误差较大的段差通过降权或粗差剔除的方法进行优化,最终计算结果显示,各期平差结果平均点值精度约为 $12\times10^{-8}\text{m/s}^2$,如表 1 所示,重力测点变化大于 2 倍中误差的是可靠的重力变化,与点值精度相当的重力变化相对不可靠;④基于平差结果,计算半年和 1 年尺度的重力变化量,并利用 GMT 软件提供的连续曲率格网算法进行空间插值,并对插值结果进行空间域滤波,进而获得整个研究区重力场变化等值线图,如图 3、4 所示。

表 1 陕甘川地区重力网数据解算精度

观测时间(年-月)	点值平均精度/ $(10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	观测时间(年-月)	点值平均精度/ $(10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
2016-09	10.9	2017-03	12.7
2017-09	10.2	2018-04	16.7
2018-09	11.2		

1.3 布格重力数据处理

布格重力异常是地壳内部不同密度岩性体综合信息的表达,可以反映出地壳深部构造特征及断裂展布等信息。本文采用 EGM2008 重力场模型计算布格重力异常,EGM2008 是现今精度和空间分辨率最高的重力场模型,可提供 2160 阶的重力异常场球谐系数(Pavlis et al,2008、2012)。EGM2008 重力场模型可在网站下载^①,该网站提供自由空气重力异常和简单布格重力异常数据下载,对自由空气重力异常经过层间改正、曲率改正和地形改正,或者对简单布格重力异常进行地形改正,即可获得完全布格重力异常。本文在经过简单布格重力异常地形改正后,获得研究区 $0.02^{\circ}\times0.02^{\circ}$ 完全布格重力异常,如图 2 所示。由图 2 可知,研究区布格重力异常从西北地区向 SE 地区逐渐增大,基本特征为:①在研究区的西北地区,即成县北缘断裂以北区域,布格重力异常基本在 $(-350\sim-220)\times10^{-5}\text{m/s}^2$;②在研究区中部地区,即成县北缘断裂与青川断裂之间区域,布格重力异常基本在 $(-220\sim-180)\times10^{-5}\text{m/s}^2$;③在研究区东南地区,青川断裂以南区域布格重力异常基本在 $(-180\sim-100)\times10^{-5}\text{m/s}^2$ 。上述 3 个区域布格重力异常差异明显,呈现明显的梯度带特征,说明研究区地下密度呈现明显的横向不均匀性。研究表明,地震大多发生在重力异常突变带或断裂交汇地区(周志鹏等,2014),本次宁强 $M_s5.3$ 地震震中就位于布格重力异常发生突变的区域——青川断裂附近。

布格重力异常是包含不同深度场源信息的叠加场,在研究深部构造时需要到场源信息进行有效分离,以提取出与研究对象相关的信息,进而对场源所引起的局部场异常进行分析研究。诸多研究者基于布格重力异常,利用小波多尺度分解方法开展震例研究,已取得大量

^① <http://icgem.gfz-potsdam.de>

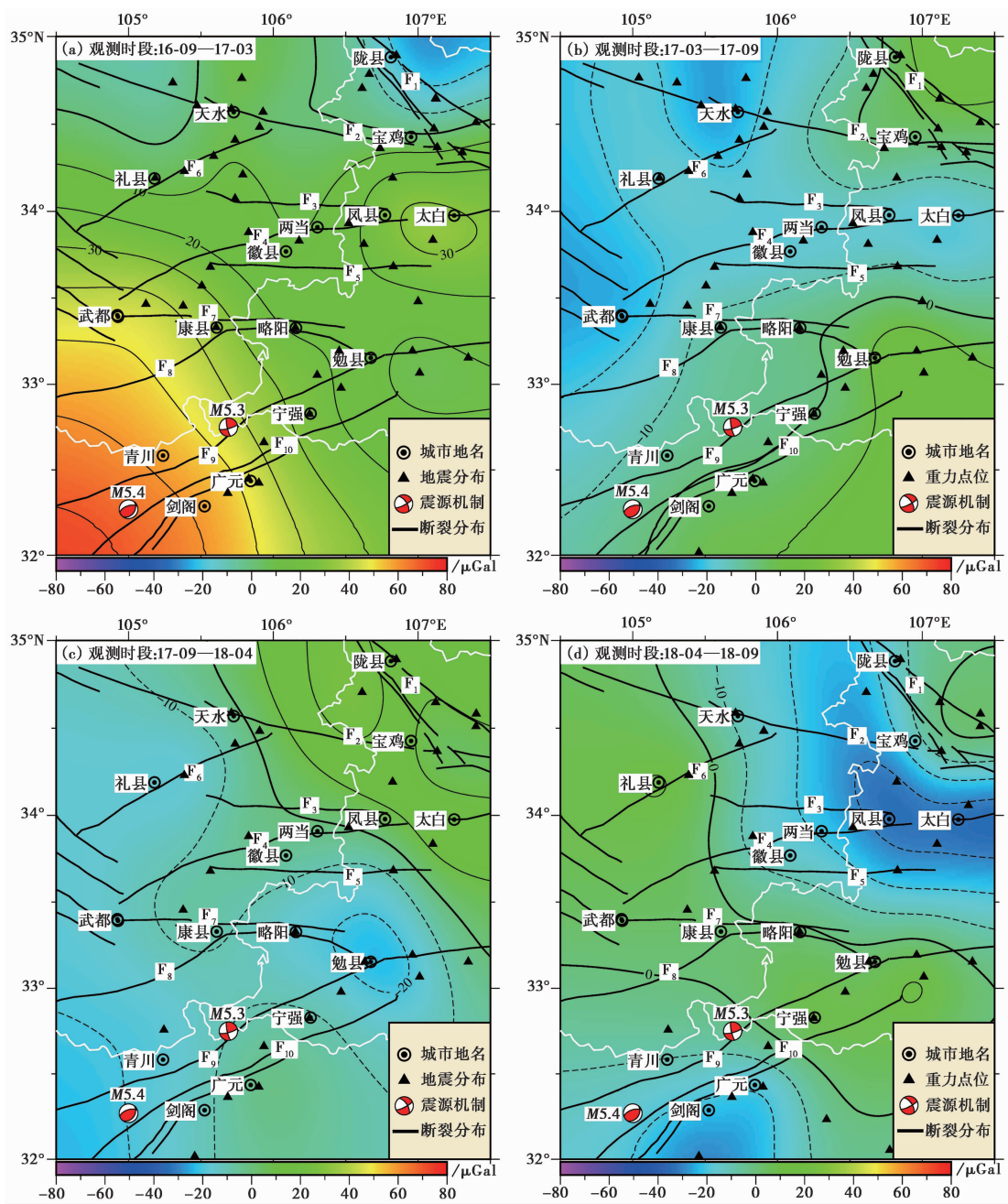
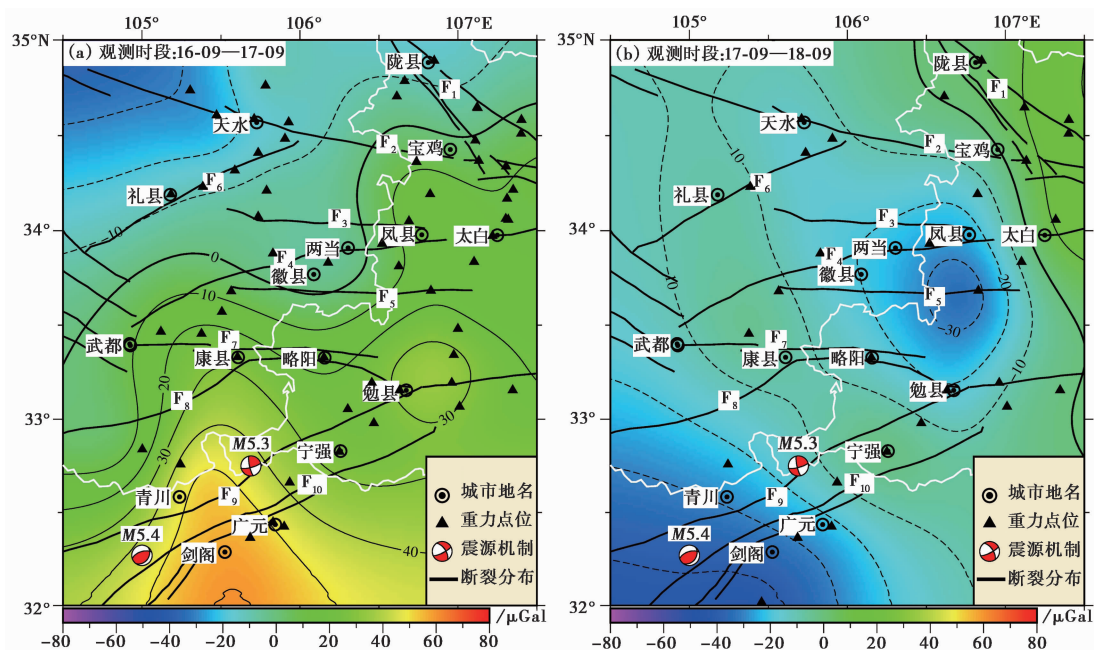


图 3 宁强 $M_{5.3}$ 地震前半年尺度重力场变化

图中断裂名称同图 1

成果(玄松柏等,2012;刘芳等,2017;艾力夏提·玉山等,2017;姜文亮等,2010)。研究结果表明:小波多尺度分解方法是非常有效的一种场源分离方法,根据小波多尺度分解原理,重力异常可分解为(侯遵泽等,1997;杨文采等,2001)

$$\Delta g(x,y) = A_i + D_i + D_{i-1} + \cdots + D_1 \tag{1}$$

图 4 宁强 $M_s5.3$ 地震前 1 年尺度重力场变化

图中断裂名称同图 1

其中, A_i 为重力异常的 i 阶 (i 为不小于 2 的整数) 近似, 即重力异常的低频成分; D_i ($i = 1, 2, \dots, i$) 为经 i 次分解后得到的各阶小波细节, 即重力异常的高频成分。基于此, 本文在计算布格重力异常的基础上, 利用小波多尺度分解方法对布格重力异常进行场源信息分离, 进而研究宁强 $M_s5.3$ 地震的深部地壳结构特征。实际处理过程中, 将 i 阶逼近平滑特征作为分解尺度选择的依据, 在 MATLAB 中选用二维重力异常分解的双正交小波基函数“bior3.5”进行 i 阶小波分解, 经过实验得出, 当 $i = 4$ 时, 小波逼近场具有平缓的区域场特征, 且与 3 阶小波逼近场具有高度相似性, 从而得到 1~4 阶小波逼近和小波细节, 由于小波细节场与局部构造特征相关, 本文在分析宁强 $M_s5.3$ 地震的构造背景特征时, 仅分析 1~4 阶小波细节图像, 如图 5 所示。

2 宁强 $M_s5.3$ 地震前重力场变化特征分析

2.1 半年尺度重力变化特征分析

半年尺度重力场变化更能反映地震孕育过程中地下物质运移及密度变化的连续性特征。研究表明, 5 级左右地震的重力变化指标一般为: 重力场变化范围 100~140km 左右, 时间尺度半年和 1 年, 重力场变化量级 $50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (Zhu et al, 2019; 胡敏章等, 2019a)。根据上述指标, 本文主要对半年和 1 年尺度的重力场变化特征进行分析, 首先分析半年尺度的重力场变化特征。

由图 3(a) 可以看出, 整个研究区重力场以正值变化为主, 重力场呈现出由研究区的东北区域向西南区域逐渐增大的变化趋势, 变化范围为 $(-25 \sim 70) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。研究区的北部

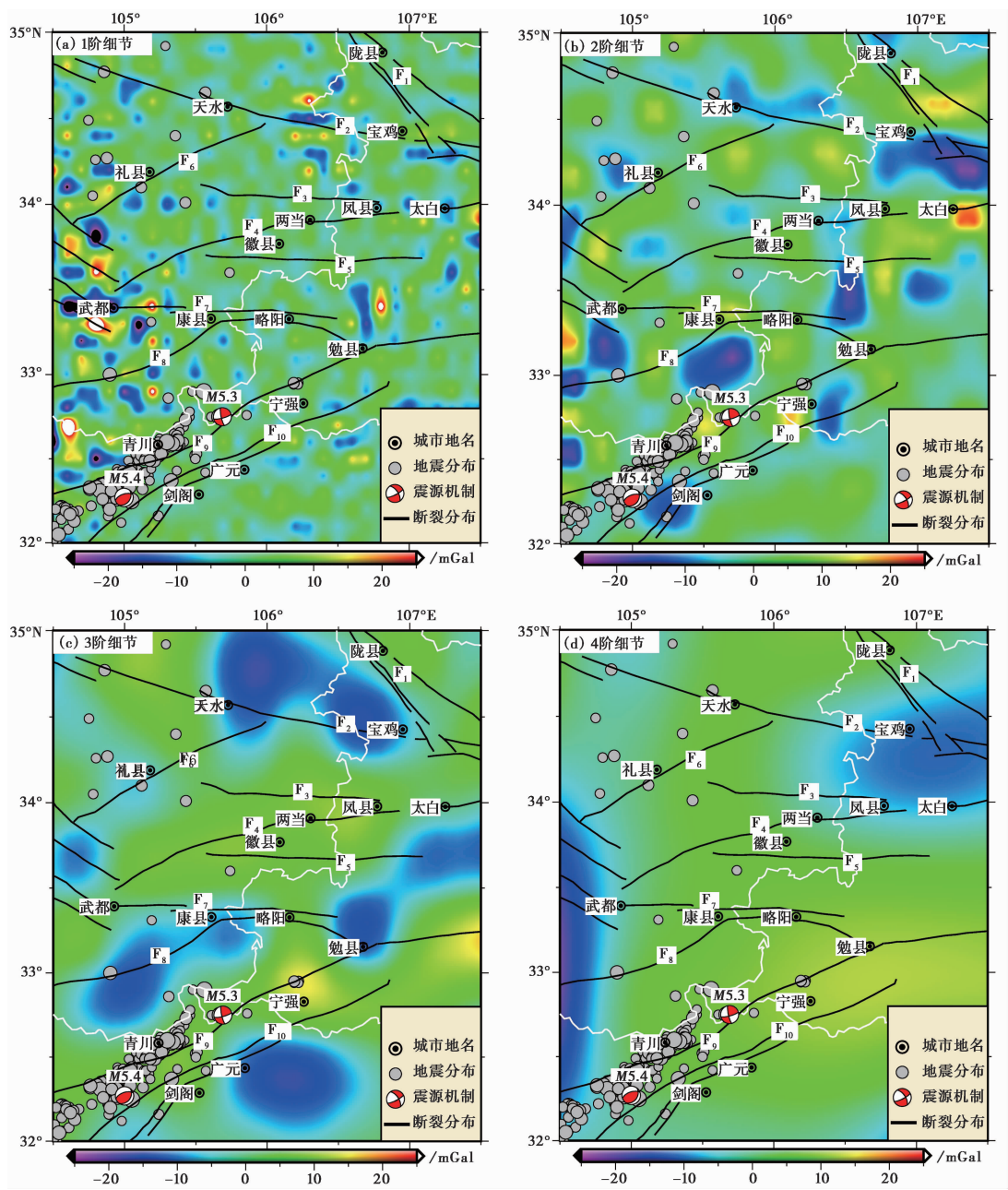


图 5 布格重力异常 1~4 阶小波细节

图中断裂名称同图 1

地区重力场等值线展布与陇县-宝鸡断裂带、西秦岭断裂及礼县-罗家堡断裂走向基本一致。在西南地区重力场等值线展布与康县断裂、文县断裂、青川断裂以及北川断裂走向垂直,重力场的这种分布特征可能受 2017 年 9 月 30 日四川青川 $M_{\text{s}}5.4$ 地震孕育过程的影响,震源机制解显示青川 $M_{\text{s}}5.4$ 地震为逆冲型地震,挤压方向为 NNE-SSW,与重力场等值线的展布

具有较好的一致性。宁强 $M_s5.3$ 地震震中处于重力场正值变化区,震中没有出现重力场等值线拐弯及正负差异变化梯度带等异常特征。

与图 3(a)相比,图 3(b)中重力场出现明显反向变化,整个研究区重力场呈现大范围的负值变化,但变化量值相较图 3(a)有所减小,基本在 $(-30 \sim 20) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间变化。研究区内大部分区域重力场等值线展布与断裂走向具有较好的一致性,尤其是四川青川 $M_s5.4$ 地震震中附近的等值线展布与青川断裂及北川断裂基本一致,说明本次地震除受到区域构造应力的作用外,还受到青川断裂及北川断裂活动的影响。此外重力场等值线的“0 值线”刚好从青川断裂和北川断裂之间穿过,震中附近出现重力场正负差异变化为 $35 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的梯度带,与前人总结的重力场与地震关系指标具有较好的对应关系(申重阳等,2009;祝意青等,2015;Zhu et al,2019;胡敏章等,2019a)。由于四川青川 $M_s5.4$ 地震与陕西南强 $M_s5.3$ 地震的震中位置、震级及发震时间均比较接近,因此 2 次地震孕育、发生过程中的重力场变化可能会相互制约与影响,这在一定程度上会对重力场与震例关系指标的对应产生一定的影响,与重力地震指标总结的变化规律存在一定偏差。

由图 3(c)可以看出,整个研究区重力场以负值变化为主,重力场“0 值线”位于天水、凤县一线,其东北侧重力场以正值变化为主,西南侧以负值变化为主,变化范围基本在 $(-25 \sim 20) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间。青川 $M_s5.4$ 地震、宁强 $M_s5.3$ 地震震中附近的重力场变化量值较小,基本在 $(-15 \sim 0) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间变化,本期重力场主要呈现 2017 年 9 月 30 日青川 $M_s5.4$ 地震之后的变化情况,表现出明显的震后应力场松弛现象。值得注意的是,尽管宁强 $M_s5.3$ 地震震中处于重力场负值变化区域,但仍然可以看出较明显的“准四象限”重力场变化特征,其中康县、广元地区重力场呈现负向变化高值区;青川、勉县地区呈现负向变化低值区。此外,宁强 $M_s5.3$ 地震震中附近重力场等值线出现“拐弯”特征,表现出一定的地震孕育前兆信息。

图 3(d)重力场表现出明显的分区性,研究区北部以天水、略阳、勉县一线为界,其东北侧重力场为负值变化;研究区南部以武都、宁强一线为界,其西南侧重力场为负值变化;而研究区中部重力场出现较大范围的正值变化,整个研究区重力场变化范围在 $(-40 \sim 15) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间。与图 3(a)~(c)相比,图 3(d)呈现的重力场变化特征更加符合陕西南强 $M_s5.3$ 地震孕育过程。根据 2 次地震的震源机制解可知,青川 $M_s5.4$ 地震属于逆冲型地震,重力场表现为正负差异变化的梯度带,而作为走滑型的宁强 $M_s5.3$ 地震,重力场呈现四象限分布特征。此外,宁强 $M_s5.3$ 地震震中刚好位于重力场等值线“0 值线”上,重力场等值线与本次地震的发震断裂——青川断裂不平行,一种相对合理的解释是本次地震的孕育发生不仅与青川断裂活动有关,还与区域构造应力场的远程加载触发有关。

2.2 1 年尺度重力场变化特征分析

尽管半年尺度的重力场可以更加细致地反映地震孕育发生的过程,但是容易受季节性因素的影响,从而给研究结果带来偏差,一般来说,季节性降水导致的重力变化一般小于 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,这种影响量级基本与计算精度相当,其不会对重力场变化的整体趋势产生影响,仅在局部地区存在差异,而 1 年尺度的重力场可以最大限度地避免季节性因素的影响。因此,本文进一步分析了陕西南强 $M_s5.3$ 地震前 1 年尺度的重力场变化特征。

图 4(a)表示的是 2016 年 9 月—2017 年 9 月的重力场变化特征,即青川 $M_s5.4$ 地震之

前的重力场变化,与图 3(a)反映的重力场变化特征具有一定的相似性。由图 4(a)可知,研究区重力场以正值变化为主,正向变化的高值区位于剑阁、广元地区;在武都、徽县、凤县、宝鸡一线以北地区,重力场出现较大范围的负值变化,负向变化的高值区位于天水、礼县一带,整个研究区重力场变化范围为 $(-30\sim 60)\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 。青川 $M_s5.4$ 及宁强 $M_s5.3$ 地震震中处于重力场正向变化的高梯度带附近,同时也位于重力等值线发生“拐弯”的部位。其中青川 $M_s5.4$ 地震震中附近的重力场等值线展布与青川断裂及北川断裂走向基本一致,表明此时段重力场主要受到断裂活动的控制。而宁强 $M_s5.3$ 地震震中附近重力场等值线与发震断裂垂直,可见此时重力场的展布还受到区域构造应力场的控制。重力场等值线的这种展布形态差异,似乎与发震时间迫切性及构造应力环境有关,即随着发震时间的临近,重力场等值线也会由受较大范围的区域构造应力影响为主转变为主要受局部发震构造断裂的影响。

图 4(b)表示的是 2017 年 9 月—2018 年 9 月重力场变化特征,即青川 $M_s5.4$ 地震之后、宁强 $M_s5.3$ 地震之前的重力场变化,与图 3(d)呈现的重力场变化特征具有一定的相似性。由于 2 次地震间隔时间较短,因此该期重力场既受到青川 $M_s5.4$ 地震震后应力场恢复调整的影响,同时又受到宁强 $M_s5.3$ 地震震前应力场及构造环境变化的影响。由图 4(b)可知,整个研究区重力场基本以负值变化为主,仅在陇县、太白县一线出现局部正值变化。其中,宁强 $M_s5.3$ 地震震中的西南侧剑阁地区、东北侧凤县地区出现重力场局部负值变化高值区,变化量值分别为 $-40\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 、 $-30\times 10^{-8}\text{m/s}^2$;震中西北部及东南部出现负值变化的低值区,变化量基本在 $-10\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 左右,从而形成以宁强 $M_s5.3$ 地震震中为鞍部的重力场“准四象限”分布特征,震中基本处于“0 值线”附近,重力场变化特征符合宁强 $M_s5.3$ 地震孕育过程,随后于 2018 年 9 月 12 日在陕西南强、四川广元交界位置发生宁强 $M_s5.3$ 地震。

3 区域布格重力异常特征分析

为了从不同尺度和深度上分析宁强 $M_s5.3$ 地震的深部成因,本文采用离散小波变化 (DWT) 方法对研究区布格重力异常 (图 2) 进行多尺度分解 (侯遵泽等, 1997; 杨文采等, 2001)。根据平均功率谱分析方法对不同阶数小波细节及小波逼近所反映的场源埋深进行计算,得到如下结论:1~2 阶小波细节对应的场源平均埋深分别为 4km、12km,基本反映的是沉积层及上地壳场源信息;3 阶小波细节对应的场源平均埋深为 17.5km,基本反映的是中上地壳场源信息;4 阶小波细节对应的场源平均埋深为 28km,基本反映的是中下地壳场源信息 (杨文采等, 2001)。前文述及 4 阶小波逼近具有平滑的区域场特征,故本文选择 4 阶尺度的小波分解进行场源分离,如图 5 所示。

由图 5(a)的 1 阶小波细节可见,重力异常分布较为零散,整体上重力异常变化范围在 $(-40\sim 50)\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ 之间。根据场源深度可知,1 阶细节主要反映的是浅层地表密度不均匀体分布情况,根据重力异常变化量值大小可知,研究区浅层密度对局部重力异常的影响相对较大。青川 $M_s5.4$ 地震震中附近重力异常变化相对明显,但宁强 $M_s5.3$ 地震震中附近重力异常变化不明显。2 阶小波细节 (图 5(b)) 对应的场源深度在 12km 以内,重力异常体圈闭范围有所扩大,呈现明显的块状和条带状分布特征,重力异常变化范围为 $(-25\sim 25)\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ 之间。重力异常变化相对较大的区域主要集中在多条断裂汇聚的区

域,如陇县-宝鸡断裂带与西秦岭断裂汇聚的宝鸡地区,迭部-白龙江断裂与康县断裂、文县断裂汇聚的武都地区等。青川断裂附近也出现较明显的重力异常正负差异变化,仔细观察可以发现,该区域的重力异常既表现出明显的梯度带特征,又表现出四象限分布特征。3 阶小波细节(图 5(c))反映中上地壳密度体场源信息,对应的场源深度小于 17.5km。3 阶小波细节(图 5(c))相比于 2 阶小波细节(图 5(b)),重力异常变化量值有所减小,基本在 $(-20 \sim 20) \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 之间变化,且以负值变化为主。异常区主要分布在陇县-宝鸡断裂带与西秦岭断裂交汇地区、成县北缘断裂与成县南缘断裂交汇地区、康县断裂与文县断裂交汇地区。宁强 $M_s5.3$ 地震震中附近出现重力异常四象限分布特征,震中位于重力异常四象限的鞍部位置。4 阶小波细节(图 5(d))对应的场源深度为 28km,反映的是中下地壳密度体信息,由图 5(d)可知,宁强地震震中重力异常变化平稳,没有明显的局部异常,根据震源机制解可知,宁强 $M_s5.3$ 地震震源深度约为 11km,属于浅源地震,因此,在 2~3 阶小波细节图中,震中附近的重力异常相对明显,而在 4 阶小波细节图中几乎没有异常,表明该地震主要由上地壳物质密度差异所致,与中下地壳的深部构造影响关系不大。

4 重力变化与宁强 $M_s5.3$ 地震

已有研究表明,地震震级与重力异常变化的持续时间、幅值及范围密切相关。观测资料积累的时间越长,越有利于判断强震发震震级,异常特征幅度越大、持续时间越长,其对应的震级越大(祝意青等,2015;Zhu et al,2019;胡敏章等,2019a)。受印度板块与欧亚板块的碰撞与挤压影响,青藏高原北部出现物质向东挤出趋势,并在稳定的鄂尔多斯地块和华南地块的阻挡作用下,使陕甘川交汇地区成为青藏高原东北缘地壳浅部物质向东运移的重要通道,导致该地区构造应力容易集中,地震危险性增强。戚帮申等(2016)根据应力测量结果得出青川断裂附近地应力已经达到使地壳浅部断层产生滑动失稳的临界条件。周琳等(2016)利用 GPS 资料分析了甘东南地区地壳水平形变,发现青川断裂附近压应变率、面膨胀率及最大剪应变均比较大,地震危险性进一步增强。而在 2017—2018 年期间,相继发生 2017 年 9 月 30 日四川青川 $M_s5.4$ 地震、2018 年 9 月 12 日陕西宁强 $M_s5.3$ 地震,根据前文重力场变化特征分析结果,这 2 次地震发生前不仅受到区域构造应力场的影响,还受到活动断裂的影响。大量研究结果表明,重力场变化与活动断裂构造密切相关,在地震孕育发生过程中,活动构造单元或块体的边缘往往容易出现重力等值线形态的转折和密集,形成高梯度带(马瑾等,2007;陈运泰等,2013;Liang et al,2013),由于在青川 $M_s5.4$ 及宁强 $M_s5.3$ 地震之前,震中附近区域确实出现了重力变化梯度带、等值线转折及四象限分布特征,使得本文研究结果进一步验证了上述研究结论的正确性。宁强 $M_s5.3$ 地震的发震断裂为青川断裂,其在晚新生代具有明显的右旋走滑特征,樊春等(2008)研究认为右旋走滑的成因机制可能与下地壳流体的运动有关,是下地壳流体运动在地面的表现。但是本文基于布格重力异常数据进行小波多尺度分解后获得的小波细节图显示,宁强 $M_s5.3$ 地震属于浅源地震,本次地震主要由上地壳密度差异变化引起,与深部构造影响关系不大,这也间接说明了青川断裂深部构造活动并非本次地震的主要诱发因素。邵志刚等(2010)通过研究汶川地震对周边断层地震活动性的影响认为,尽管青川断裂库仑应力变化最大,但由于背景地震发生率较弱,根据 Dieterich 模型计算的地震发生率反而较小,近年来青川断裂发生地震活动属于汶川 $M_s8.0$ 强震破裂运

动及其余震活动。本文根据重力场变化特征获得的研究结果也支持这种观点。

5 讨论与结论

本文基于 2016—2018 年陕甘川地区的流动重力及布格重力异常数据,获得该地区半年和 1 年尺度的重力场及 1~4 阶重力异常小波细节图像,在此基础上对陕西宁强 $M_s5.3$ 地震前重力场变化特征进行分析,得到如下结论:

(1)对本文重力场变化研究结果可知,2019 年 9 月 18 日陕西宁强 $M_s5.3$ 地震在 2018—2019 年 1 年时间尺度重力变化达到 $50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,影响范围在 150km 之内。本次地震的孕育发生符合前人研究总结的重力变化与地震孕育相关结论。

(2)2017 年 9 月 30 日发生的四川青川 $M_s5.4$ 地震,其重力场变化可以清晰地反映此次地震的孕育、发生过程。青川地震的发生对 2018 年 9 月 12 日宁强 $M_s5.3$ 地震的重力场变化有一定影响,2 次地震均发生在青川断裂附近,且位于汶川 $M_s8.0$ 地震余震条带的东北延伸段,2 次地震的深浅部构造环境具有强相关性,导致 2 次地震前重力场变化存在相互影响、相互制约的关系。

(3)半年尺度的重力场显示陕西宁强 $M_s5.3$ 地震前重力变化经历“正向变化—正向减弱—负向变化—负向减弱”的演化过程。此外,宁强 $M_s5.3$ 地震震中位于等值线的“0 值线”附近,且出现重力场四象限分布特征,与震源机制解显示的本次地震属于走滑型地震具有构造一致性;1 年尺度的重力场同样在震中呈现四象限分布特征,且震中基本位于四象限分布的鞍部位置。

(4)对区域布格重力异常进行 1~4 阶小波多尺度分解,不同阶次的小波细节反映出不同深度的场源信息,由 1~4 阶小波细节结果看出,随着小波细节阶数的增加,2~3 阶小波细节图中宁强 $M_s5.3$ 地震的区域构造特征逐渐明显,四象限分布特征逐渐清晰。由平均对数功率谱计算的近似场源深度可知,2~3 阶小波细节对应的场源深度在 10~15km 之间,主要反映的是上地壳密度体差异信息,与本次地震震源深度为 11km 具有较好的一致性。

致谢: 本文使用的流动重力数据来源于国家重力台网中心,布格重力数据来源于全球地球模型国际中心 (<http://icgem.gfz-potsdam.de/>),地震目录来源于国家地震科学数据中心 (<http://data.earthquake.cn/>),所有图件由 GMT 软件绘制 (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>),匿名专家提出了建设性的修改意见,在此一并感谢。

参考文献

- 艾力夏提·玉山,李瑞,刘代芹,等,2017. 2017 年精河 $M_s6.6$ 地震前重力变化特征分析. 中国地震,33(4):749~756.
- 陈石,王谦身,祝意青,等,2011. 汶川 $M_s8.0$ 震前区域重力场变化与震质中研究. 地球物理学进展,26(4):1147~1156.
- 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.
- 陈运泰,杨智娴,张勇,等,2013. 从汶川地震到芦山地震. 中国科学:地球科学,43(6):1064~1072.
- 樊春,王二七,王刚,等,2008. 龙门山断裂带北段晚新近纪以来的右行走滑运动及其构造变换研究——以青川断裂为例. 地质科学,43(3):417~433.
- 顾功叙,Kuo J T,刘克人,等,1997. 中国京津唐张地区时间上连续的重力变化与地震的孕育和发生. 科学通报,42(18):1919~1930.
- 侯遵泽,杨文采,1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析. 地球物理学报,40(1):85~95.

- 胡敏章,郝洪涛,李辉,等,2019a. 地震分析预报的重力变化异常指标分析. 中国地震, **35**(3):417~430.
- 胡敏章,郝洪涛,宋浩,等,2019b. 弱地震活动背景地区流动重力变化探析. 大地测量与地球动力学, **39**(4):339~343.
- 胡敏章,李辉,刘子维,等,2015. 川滇地区 2010—2013 年重力变化及重力网的地震监测能力. 大地测量与地球动力学, **35**(4):616~620.
- 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.
- 姜文亮,张景发,焦孟梅,等,2010. 基于布格重力异常小波多尺度分析方法研究首都圈地区构造特征. 地质学报, **84**(4):457~465.
- 李铁明,徐云马,杨永林,等,2018. 鲜水河断裂带地区重力场动态变化及其与 5 级以上地震的关系. 地震地质, **40**(6):1362~1379.
- 刘芳,祝意青,赵云峰,等,2017. 2017 年九寨沟地震前重力场异常特征提取. 中国地震, **33**(4):532~539.
- 马瑾,刘力强,刘培洵,等,2007. 断层失稳错动热场前兆模式:雁列断层的实验研究. 地球物理学报, **50**(4):1141~1149.
- 戚帮申,张鹏,丰成君,等,2016. 川甘陕交汇地区现今地应力环境与地震危险性. 中国地质, **43**(5):1814~1827.
- 邵志刚,周龙泉,蒋长胜,等,2010. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震对周边断层地震活动的影响. 地球物理学报, **53**(8):1784~1795.
- 申重阳,李辉,2007. 研究现今地壳运动和强震机理的一种方法. 地球物理学进展, **22**(1):49~56.
- 申重阳,李辉,孙少安,等,2009. 重力场动态变化与汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育过程. 地球物理学报, **52**(10):2547~2557.
- 王全伟,梁斌,谢启兴,等,2000. 青川地区青川断裂带的显微构造及其变形条件研究. 矿物岩石, **20**(1):87~90.
- 许厚泽,2003. 重力观测在中国地壳运动观测网络中的作用. 大地测量与地球动力学, **23**(3):1~3.
- 玄松柏,邢乐林,谈洪波,等,2012. 中国大陆 2000—2007 年重力场变化多尺度分解. 大地测量与地球动力学, **32**(3):7~16.
- 杨文采,施志群,侯遵泽,等,2001. 离散小波变换与重力异常多重分解. 地球物理学报, **44**(4):534~541.
- 周琳,郝明,秦姗兰,等,2016. 甘东南地区地壳水平形变研究. 工程勘察, **44**(10):57~60.
- 周志鹏,杜秋姣,梁青,等,2014. 大震与重力异常突变带、活动断裂带关系及其流变模型. 地球科学(中国地质大学学报), **39**(12):1887~1895.
- 祝意青,付广裕,梁伟锋,等,2015. 鲁甸 $M_s 6.5$ 、芦山 $M_s 7.0$ 、汶川 $M_s 8.0$ 地震前区域重力场时变. 地震地质, **37**(1):319~330.
- 祝意青,梁伟锋,陈石,等,2012. 青藏高原东北缘重力变化机理研究. 大地测量与地球动力学, **32**(3):1~6.
- 祝意青,梁伟锋,赵云峰,等,2017. 2017 年四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前区域重力场变化. 地球物理学报, **60**(10):4124~4131.
- 祝意青,赵云峰,李铁明,等,2014. 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震前后重力场动态变化. 地震地质, **36**(3):667~676.
- Barnes D F, 1966. Gravity changes during the Alaska earthquake. J Geophys Res, **71**(2):451~456.
- Chen Y T, Gu H D, Lu Z X, 1979. Variations of gravity before and after the Haicheng earthquake, 1975, and the Tangshan earthquake, 1976. Phys Earth Planet Inter, **18**(4):330~338.
- Hunt T M, 1970. Gravity changes associated with the 1968 Inangahua earthquake. New Zeal J Geol Geophys, **13**(4):1050~1051.
- Kisslinger C, 1975. Processes during the Matsushiro, Japan, earthquake swarm as revealed by leveling, gravity, and spring-flow observations. Geology, **3**(2):57~62.
- Liang W F, Zhao Y F, Xu Y M, et al, 2013. Gravity observations along the eastern margin of the Tibetan Plateau and an application to the Lushan $M_s 7.0$ earthquake. Earthq Sci, **26**(3~4):251~257.
- Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al, 2008. An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. In: 2008 General Assembly of the European Geoscience Union. Vienna, Austria.
- Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al, 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). J Geophys Res: Solid Earth, **117**(B4):B04406.
- Zhu Y Q, Liu F, Zhang G Q, et al, 2019. Development and prospect of mobile gravity monitoring and earthquake forecasting in recent ten years in China. Geod Geodyn, **10**(6):485~491.

Analysis of the Variation Characteristics of Gravity Field before the 2018 Ningqiang $M_s5.3$ Earthquake

Zhang Yongqi^{1,2)} Han Meitao¹⁾ Cao Jianping¹⁾ Zheng Zengji¹⁾

1) Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China

2) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract Based on the observation data of relative gravity in Shaanxi-Gansu-Sichuan region from the year 2016 to 2018, we analyzed the variation characteristics of gravity field at a time scale of 0.5 ~ 1 year before Ningqiang $M_s5.3$ earthquake. We also decomposed the Bouguer gravity anomaly in the epicentral area of Ningqiang $M_s5.3$ earthquake by 1 ~ 4 order wavelet, and analyzed the detail image of 1 ~ 4 order wavelet. The research results show that: ① The gravity field of Ningqiang $M_s5.3$ earthquake displays the evolution process pattern of “positive variation—positive weakening—negative variation—negative weakening”. Before the earthquake, the gravity field presents the characteristics of four quadrant distribution, and the epicenter is located in the saddle position, which implies the characteristics of strike slip earthquake. ② The 2nd to 3rd order wavelet details of Bouguer gravity anomaly have a good correlation on the seismogenic characteristics of Ningqiang $M_s5.3$ earthquake. The corresponding field source depth of the 2nd to 3rd order wavelet details is 10 ~ 15 km, which has a good corresponding relationship with the focal depth of this earthquake.

Keywords: Ningqiang $M_s5.3$ earthquake; Gravity observation; Variation of gravity field; Bouguer gravity anomaly; Wavelet multiscale decomposition