

艾力夏提·玉山、李瑞、刘代芹等,2017,2017年精河 M_s 6.6 地震前重力变化特征分析,中国地震,33(4),749~756。

2017 年精河 M_s 6.6 地震前重力变化特征分析

艾力夏提·玉山 李瑞 刘代芹 王晓强 朱治国
李杰 刘立人 苏力坦·玉散 陈丽

新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐市新市区科学二街 338 号 830011

摘要 利用新疆地区北疆测网 2015~2017 年观测的共 4 期流动重力资料,分析研究区半年、1 年尺度重力变化特征,并采用小波分解方法,对 2017 年 8 月 9 日精河 M_s 6.6 地震前重力变化异常进行分解,分离了不同深度的重力异常。结果表明,震中附近的精河地区从 2015 年开始一直处于重力负值变化,同时,震中周围的重力正值变化集中区逐步向震中地区迁移,地震发生前震中以南 60km 处出现重力变化零值线,并且零值线两侧的重力累积变化量达到 $70\mu\text{Gal}$ 。小波分解后,4 阶细节图较好地反映了精河地震前的重力异常,其与地震孕育发生有较好的对应性。

关键词: 精河 M_s 6.6 地震 重力变化 重力异常 小波分解

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0749-08 [中图分类号] P315.9 [文献标识码] A

0 引言

北京时间 2017 年 8 月 9 日 7 时 27 分,新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州精河县发生 M_s 6.6 地震,震中 44.27°N 、 82.89°E ,震源深度 11km。震中位于精河县托里镇,距精河县城 37km。初步分析认为,此次地震发震构造为库松木契克山前断裂,该断裂是全新世活动的右旋逆断裂,西起赛里木湖西部阿克巴依塔勒,经南岸松树头,顺库松木契克河南岸科古琴山北麓延伸至阿沙河左(西)岸,断层长度大于 120km,总体走向 280° ,倾 SW 或 NE,倾角 $50^\circ\sim 80^\circ$ 。该断裂的最新活动性在构造微地貌上有强烈响应,在赛里木湖东南隅,断裂切割了早更新世至晚更新世巨大的山前冲洪积扇。而在库松木契克河中下游,断裂亦切割过同期的山前冲洪积扇群,1958、1962 年在此发生 2 次 6.5 级地震(王秋亮等,2015)。由于地球内部密度不均匀,地壳内物质受到的重力作用也不同,这必然引起地壳内部能量积累的不平衡,同时,在应力作用下的地壳内物质运移受到阻挡后,形成挤压、推覆、逆冲与走滑构造,这为地震的孕育发生创造了条件(马杏垣,1989;陈石等,2011)。区域重力场的非潮汐变化信息、地壳内部的物质迁移、地壳构造和地震的形成过程等都可以在流动重力复测结果中反映出来,地表重力场的变化则能较好地反映地壳厚度的差异、地壳密度的变化和深部物质迁移

[收稿日期] 2017-10-18; [修定日期] 2017-11-11

[项目类别] 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2016D01A062)、震情跟踪定向工作任务(2017020202/2017010204)、新疆地震科学基金(201613、201612)、国家自然科学基金(41474016、41374030)、地震科技星火计划(XH17044、XH16042Y)及中国地震局地震预测研究所新疆精河 6.6 级地震深入科学研究项目共同资助

[作者简介] 艾力夏提·玉山,男,1984 年生,工程师,主要从事重力测量与地震趋势分析工作。E-mail: irxat@163.com

等构造活动信息(贾民育等,2000;祝意青等,2001),因此,流动重力测量是了解地震孕育与发生机理的有效手段之一。系统分析研究地震前后重力场时空变化特征,对认识地震的孕育发生规律、捕捉地震前兆、开展中强地震预测的应用研究等具有现实意义(祝意青等,2013)。本文利用2015~2017年的流动重力观测资料,分析测区重力场分布变化及其与2017年8月9日精河 M_s 6.6地震间的关系。

1 重力观测与数据处理

20世纪90年代,新疆地震局在北天山地区以乌鲁木齐、独山子、呼图壁、宁家河等为中心布设了几条沿天山一带的重力测线(刘代芹等,2012),2013年对北疆重力测线进行全新改造,形成了由45个点组成的北疆重力网,至2015年北疆重力网通过2次优化改造,观测点数达到了97个,覆盖范围扩展至天山中段、伊犁盆地等地区。从2015年重力网优化改造以后,每年5月、9月对整个监测网进行定期常规复测,观测仪器均使用中国地震局地震研究所提供的2台CG5型高精度重力仪。2017年8月9日精河地震发生前新疆地震局已完成对该地区的2017年度第1期流动重力常规监测(图1),积累该地区共4期流动重力观测数据。

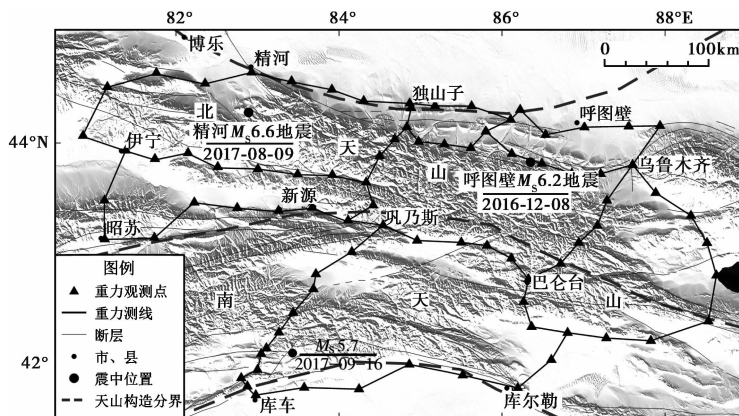


图1 北疆重力测网及近期地震分布

本文利用2015~2017年精河地震前观测的共4期流动重力观测资料,研究该区域近2年以来的重力场变化以及精河地震发生前的重力变化特征(表1)。研究范围包括精河地震震中附近的伊犁盆地地区以及北天山中西段等地区。所有测段观测值均符合规范要求,即往返测自差小于 $25\mu\text{Gal}$,互差小于 $30\mu\text{Gal}$ 。平差计算采用LGADJ软件。在平差计算时,选取测区中的库车、库尔勒、

乌鲁木齐等3个点的绝对重力值进行经典平差计算。最终平差计算结果显示,各期平差结果的点值精度为 $6\sim 14\mu\text{Gal}$,解算精度均满足重力场变化特征研究的需求。得到平差结果以后,对个别被破坏转移的点以及周围环境有较大变化的点进行删除(艾力夏提·玉山等,2017)。最后,分别计算研究区半年、1年尺度重力变化量,利用克里格插值法对重力变化量

表1 北疆重力网测量资料情况

使用仪器	观测月份 (年-月)	点值平均精度 $/(10^{-8}\text{ mrs}^{-2})$
G207、G511	2015-09	12.1
G207、G511	2016-05	11.6
G207、G511	2016-09	9.6
G207、G231	2017-06	7.4

进行内插计算得到整个研究区重力变化等值线图,并结合此次精河地震和区域地质构造,分析研究区重力场变化特征及地震孕育与重力变化之间的关系。

2 重力场变化特征

利用 2015 年 9 月~2017 年 6 月共 4 期的流动重力观测数据,绘制了北天山测网近 2 年重力场变化以精河地震发生前测区内重力变化图像(图 2)。

2.1 半年尺度重力场变化

由 2015 年 9 月~2016 年 5 月 2 期的重力变化(图 2(a))可见,南北天山地区出现明显的分区特征,北天山西段地区出现重力负值变化,而北天山中段、南天山地区出现重力正值变化。位于北天山山前地带的呼图壁、独山子、精河、伊宁等地区重力变化 $-40\mu\text{Gal}$ 左右,南天山地区的重力正值变化主要出现在和静、库尔勒、库车以北地区,变化量 $+20\mu\text{Gal}$ 左右,其中,呼图壁以南、巴伦台以北地区重力变化量达到 $+40\mu\text{Gal}$ 。重力变化零值线从乌鲁木齐开始沿着北天山往西延伸至独山子以南地区后发生转折,再沿巩乃斯、库车往西南方向分布。天山中段的乌鲁木齐、呼图壁地区出现走向与断裂带走向一致的重力变化高梯度带,正负累积变化量达 $80\mu\text{Gal}$ 。整个测区最大重力变化出现在精河地区,呈现重力负值变化,变化量达 $60\mu\text{Gal}$ 。

2016 年 5 月~9 月的重力变化图(图 2(b))显示,与前期重力变化情况相比,北天山中段地区的重力变化有所增强,范围也扩大。此外,呼图壁、巩乃斯、新源等地区的重力变化转为正值变化。从重力整体变化趋势来看,重力正值变化往北、往西扩展,精河、独山子以及伊犁盆地的重力负变化逐步减弱或转为正值变化。整个测区重力变化为 $-40\sim+50\mu\text{Gal}$,最大正值变化出现在巴伦台周围地区,最大负值变化出现在精河以北地区。2016 年 12 月 9 日在呼图壁境内发生的 6.2 级地震就发生在巴伦台重力高值异常以北的零值线附近。精河地震孕育地区的重力变化从前期的 $-30\mu\text{Gal}$ 减弱为 $-10\mu\text{Gal}$,并在精河地震震中以南的新源地区出现重力正值变化。对比图 2(a)、2(b)可以发现,2016 年 12 月 8 日呼图壁 M_s 6.2 地震发生前半年,在呼图壁以南地区开始出现重力正负高梯度带,至呼图壁地震前 3 个月,呼图壁以南的高梯度带继续扩大,并正整体往西扩展。

2017 年 6 月的观测资料(图 2(c))显示,沿北天山地区的乌鲁木齐、独山子、精河、伊宁等地区出现重力负值变化,而南天山大部分地区出现重力正值变化,从变化量级上看,重力负值变化量级大于重力正值。重力最大变化出现在精河地区,变化量达 $-50\mu\text{Gal}$,新源、巩乃斯以及库车以东地区出现重力正值变化最大值,变化量 $30\mu\text{Gal}$ 左右。测区本期重力分布与上一期(2016 年 5~9 月)的重力分布相比,受到呼图壁地震的影响,呼图壁及周边地区的重力正值变化转变为负值变化,同时,在呼图壁地震震中以南的巴伦台地区出现的重力变化从 $50\mu\text{Gal}$ 减弱到 $20\mu\text{Gal}$ 。此外,精河及周围的重力变化再次增强,达到了 $-50\mu\text{Gal}$,库车以北地区也出现小范围的重力高梯度带,重力变化量为 $-40\mu\text{Gal}$ 左右。2017 年 9 月 16 日库车县发生 5.7 级地震,震中位于重力正负变化中间的零值线附近。值得注意的是,2017 年 8 月 9 日精河 M_s 6.6 地震发生前,震中附近地区出现重力正负值变化高值区,正负累积变化量达 $70\mu\text{Gal}$;2017 年 9 月 16 日库车 M_s 5.7 地震发生前,震中附近地区也同样出现了正负高值区,2 次地震都发生在重力变化负高值区内。

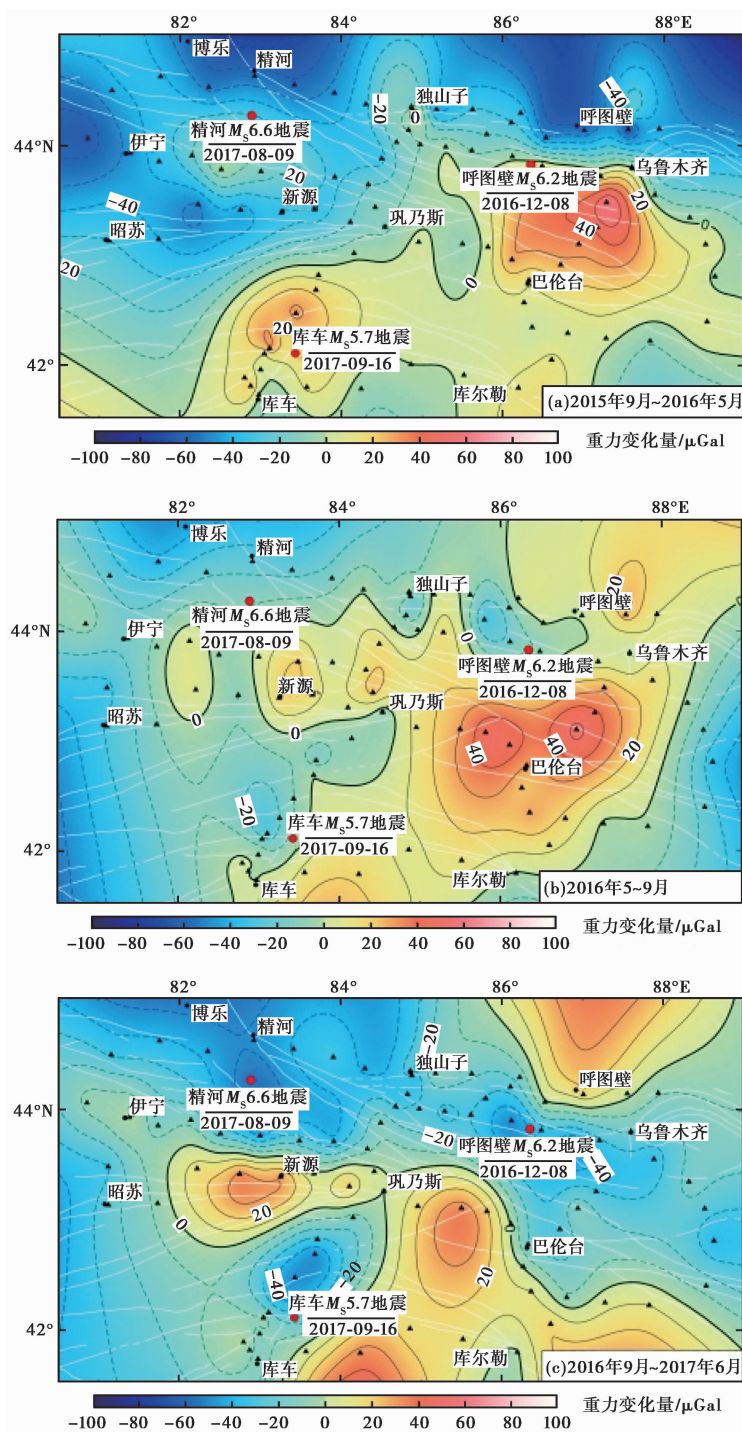


图 2 北天山测区相邻两期重力场变化图像

3 个红色圆点分别为 2016 年 12 月 8 日呼图壁 M_s 6.2 地震, 2017 年 8 月 9 日精河 M_s 6.6 地震以及 2017 年 9 月 16 日库车 M_s 5.7 地震; 白色实线为断层; 黑色小三角形为观测点; 等值线间距为 $10\mu\text{Gal}$

2.2 重力场 1 年尺度变化特征

考虑到季节性变化对重力观测数据的影响,选择精河地震前同季节观测(春季和秋季)的重力数据,分别绘制了 1 年尺度的重力变化图(图 3)。由 2015 年 9 月~2016 年 9 月 1 年尺度的重力变化图(图 3(a))可见,整个测区重力变化有明显分区特征,即天山中段乌鲁木齐以西、巴伦台、库尔勒、库车等地区出现重力正值变化,北天山北侧、伊犁盆地等地区出现重力负值变化。最大重力变化出现在和静县巴伦台镇周围地区,变化量达 $60\mu\text{Gal}$ 。巴伦台高值异常区以北地区重力等值线比其它区域相对密集,正负累积变化量达 $100\mu\text{Gal}$,并分布有高梯度带和零值线。2016 年 12 月 8 日呼图壁 M_s 6.2 地震就发生在该异常区内,震中落在重力正负高梯度带附近的重力变化零值线上,在呼图壁以南地区出现的重力高梯度带很可能是呼图壁地震前的前兆异常。在该时间段,精河地区重力变化以负值变化为主,虽然出现 $50\mu\text{Gal}$ 的重力负值变化,但没有出现正负高梯度带和零值线特征。

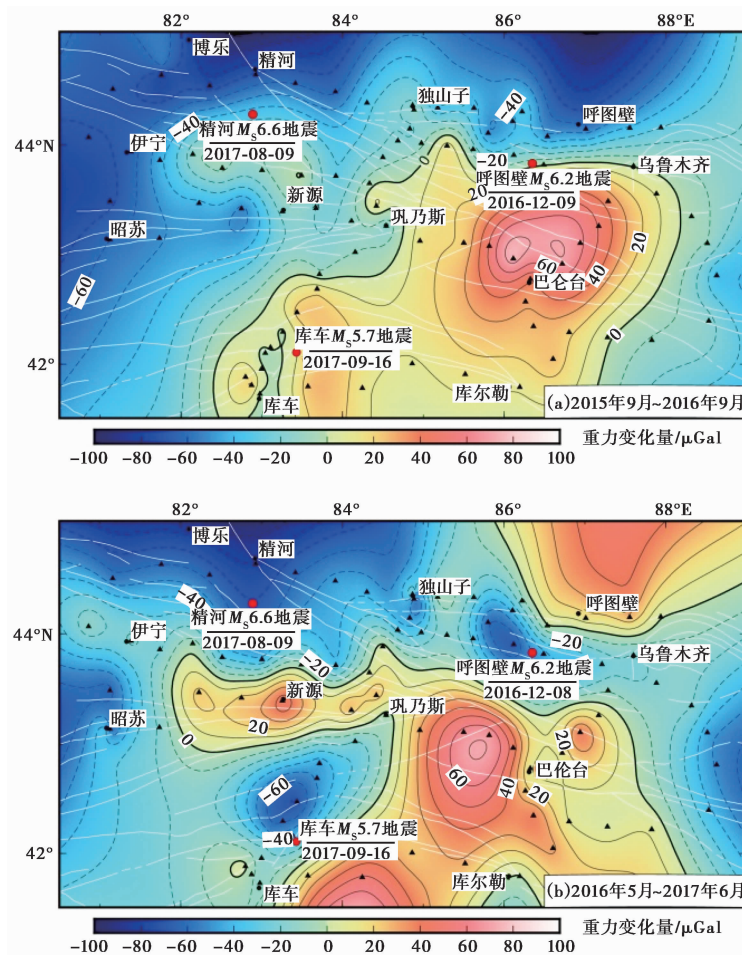


图 3 北天山测区重力场 1 年尺度变化图像

由 2017 年 6 月获取的 1 年尺度重力场变化图像(图 3(b))可见,测区重力变化比较剧烈,变化范围为 $-60\sim+60\mu\text{Gal}$,分别在库车以北、新源-巩乃斯、石河子以南等地区出现重力

变化高值,其中,新源、巩乃斯地区为重力正值高梯度带,库车以北和石河子以南地区为重力负值高梯度带。北天山地区重力变化等值线基本保持EW向分布,与北天山大型断裂带的走向一致。与前期1年尺度重力变化图(图3(a))相比,巴伦台地区重力高值集中区有所减小,并在新源地区出现 $30\mu\text{Gal}$ 的重力正值变化区,精河地区重力变化量为 $-50\mu\text{Gal}$ 左右。由图3(b)可见,精河地震震中以南约60km处出现重力正负变化高梯度带和零值线,重力高梯度带累积正负变化量达 $80\mu\text{Gal}$,很有可能是精河地震的前兆异常。此外,2017年9月16日库车县发生的 $M_s5.7$ 地震也正好在重力正负变化高梯度带附近的零值线附近。由图3(b)还可见,精河地震、库车地震前,在震源区及其附近出现明显的重力异常。

3 重力场多尺度小波分解

地表重力场是不同深度、不同密度、不同规模、不同形状的地下物体产生的叠加,因此,采用适当的数据处理方法,正确合理地进行重力场的分离是研究区域重力变化的关键步骤。而小波分析方法已广泛应用于地球物理信号处理领域(刁博等,2007)。对于重力异常的处理,前人已做过很多有意义的探索,杨文采等(2001)将小波分析首先应用于重力异常的分离和处理,为重力异常的分离提出了新的途径。本文选择最近一期重力观测结果(2016年9月~2017年6月)进行5阶小波分解,因1阶和2阶细节图主要以噪声为主,故本文主要针对3~5阶细节图进行分析。

图4为北天山测区重力场小波分解细节图,反映了分解后重力场分布信息,比较3~5阶细节图可发现,随着阶次的增大,重力场具有异常等值线圈闭加大、弱小异常消失、分布规律逐渐增强的趋势。重力变化小波细节图主要反映了不同深度处局部地质体密度横向差异引起的重力异常现象。本文利用功率谱方法计算了各阶次细节图所反映的重力变化深度,但该深度仅为统计意义上的估计,只能用来作为参考深度(姜文亮等,2011)。3阶细节图对应深度5~7km,许多弱小细节连成较大的重力变化闭合线,重力变化量小于 $10\mu\text{Gal}$,分布较均匀,主要反映的是近地表沉积层的密度变化,因此,我们认为重力变化除了与地壳浅层岩石密度不均匀有关外,还可能与重力观测中的误差有关。4阶细节图对应深度约10km,重力异常主要分布在精河至库车一带,从北向南呈现负—正—负的重力变化特征。其中,精河地区出现 $-20\mu\text{Gal}$ 的重力变化,精河地区与库车地区中间的新源地区出现 $+30\mu\text{Gal}$ 的重力变化,而库车地区出现 $-20\mu\text{Gal}$ 的重力变化。该地区的重力变化等值线走向与该地区的断裂带走向基本一致。原始重力变化图中,在巩乃斯同巴伦台中间地区以及呼图壁地区出现 $\pm 40\mu\text{Gal}$ 的重力正值变化异常区,而通过小波分解后,这些地区的重力变化在4阶细节图上消失。5阶细节图对应的场源深度约为15km,由图4(d)可见,测区中重力场分布范围较大,最大变化出现在库车以北地区,变化量达 $-30\mu\text{Gal}$ 。其次,为布伦口以西和呼图壁以北地区,变化量达 $20\mu\text{Gal}$ 。从重力场分布特征来看,5阶细节图上,在精河附近地区没有出现明显的重力异常,而在库车以北地区出现了明显的重力负值异常,说明不同场源深度重力异常对地震孕育发生有不同的反映能力。

4 讨论与结论

从2015年9月开始的邻近2期(半年尺度)重力变化情况来看,精河地区一直处于重力

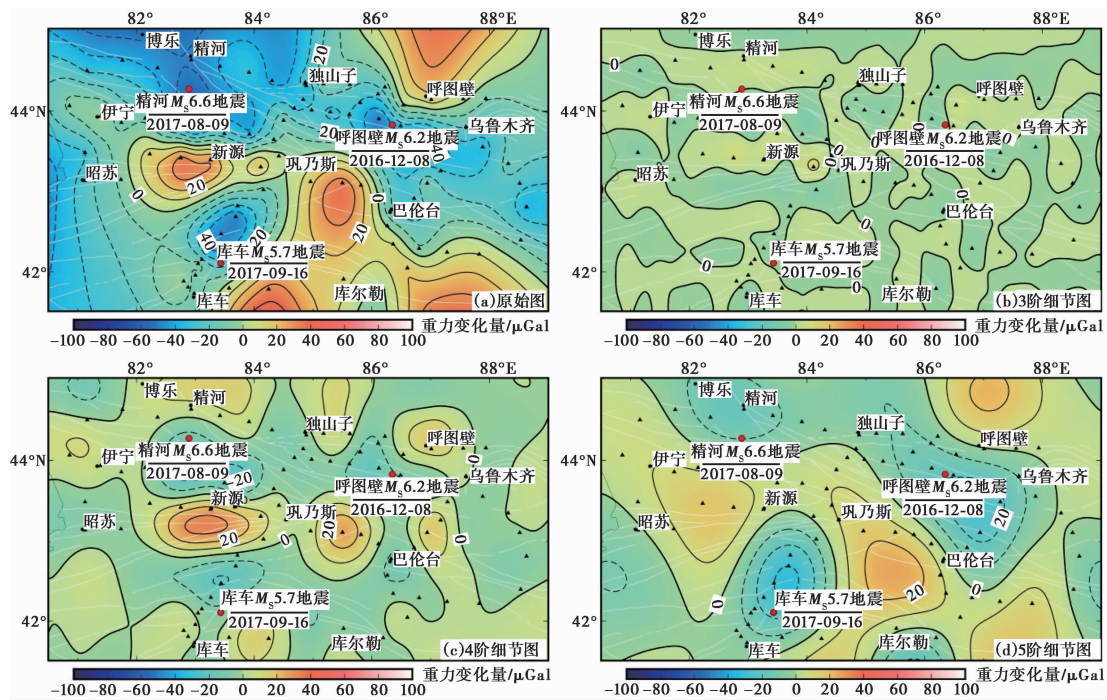


图 4 北天山测区重力场小波分解细节图

负值变化区域,并在天山中段出现重力正值变化逐步向孕震区迁移的趋势。地震发生前 2 个月,精河以南距震中约 60km 处出现重力变化高梯度带,说明该地区的地下物质密度发生了明显的变化。在精河以南地区出现重力变化高梯度带以外,库车以北地区也出现重力变化集中区,该地区出现的重力异常类似于精河地区的重力异常,但其范围比精河地区的异常更集中一些,变化量级基本相等。通过 3 个震例(呼图壁地震、精河地震、库车地震)可以看到,地震发生前,在震源区及其附近地区都出现不同程度的重力正负高梯度带异常。通过小波分解后,有效分离了不同深度的重力变化,3 阶小波分解后的细节图反映了近地表和上地壳的重力变化,其重力变化没有规律性,变化量较小,很有可能是由地表沉积层、地表、地下水以及观测误差等综合效应所致。而 4 阶小波分解图中重力变化等值线与构造分布较一致,构造运动强烈地区重力变化较大,能较好反映由构造运动引起的重力变化,尤其是精河以南地区出现的重力异常反映了精河地震震源区及附近地区的物质密度变化。4 阶细节图中精河至新源地区出现重力正负变化高梯度带,精河地震即发生在负值高梯度带内。在 5 阶细节图中,精河地区的重力异常消失,在库车以北地区出现了重力高梯度带,库车地震也发生在该梯度带内。通过分析 2015~2017 年重力变化特征发现,北天山地区的重力变化比较剧烈,大部分情况下,在北天山地区的重力变化等值线呈 EW 向分布,这种变化特征与该地区的构造分布比较一致。场源深度 10km 的小波分解 4 阶细节图中,在精河地区出现重力异常,而场源深度 15km 的小波分解 5 阶细节图中,库车地区出现明显的重力负值异常,能较好反映地震孕育过程。从精河地震发生前 2 年开始,震中地区出现重力负值变化,而震中周围的重力正值变化高梯度带逐步向震中地区迁移,地震发生前震中以南约 60km 处出现重力变化零值线,且零值线两侧出现重力正负集中值。小波分解结果显示,震中周围地区出现的

重力异常场源深度为 17~20km,重力异常呈现负—正—负高值集中区的 SN 向分布,该异常正好处于精河 $M_s6.6$ 地震震中与库车 $M_s5.7$ 地震震中的中间区域,很可能是与精河、库车地震的孕育发生有关的重力异常。因此,通过小波分解可以有效分离不同深度的重力异常,有助于消除部分噪声信息,提取与地震孕育有关的重力异常。

参考文献

- 艾力夏提·玉山、刘代芹、李杰等,2017,2016年阿克陶 $M_s6.7$ 地震前后重力变化特征分析,内陆地震,31(2),198~206。
- 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,地球物理进展,26(4),1147~1156。
- 刁博、王家林、程顺有,2007,重力异常小波多分辨率分析分解阶次的确定,中国科学,32(4),564~569。
- 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,2011,川滇地区重力场与深部结构特征,地球物理学报,26(6),1915~1924。
- 刘代芹、朱治国、王晓强等,2012,新疆天山中部重力场时空变化特征研究,地震研究,35(4),506~514。
- 马杏恒,1989,重力作用于构造运动,北京:地震出版社。
- 王秋亮、刘小利、李雪等,2015,新疆博州地区地震地质特征,大地测量与地球动力学,35(4),571~575。
- 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。
- 祝意青、江在森、陈兵等,2001,南北地震带和青藏块体东部重力变化演化与地震特征,中国地震,17(1),56~69。
- 祝意青、闻学泽、孙和平等,2013,2013年四川庐山 $M_s7.0$ 地震前的重力变化,地球物理学报,56(6),1887~1894。

Analysis of gravity changes before the Jinghe $M_s6.6$ earthquake of 2017

*Ailixiati · Yushan Li Rui Liu Daiqin Wang Xiaoqiang Zhu Zhiguo Li Jie
Liu Liren Sulitan · Yusan Chen Li*

Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

Abstract We used the four periods of the fluid gravity observation data from the northern Xinjiang networks from 2015 to 2017 to analyse the half year and the one year gravity change characteristics of the researched region, decomposed the gravitational anomalies before the August 9, 2017 Jinghe $M_s6.6$ earthquake with the wavelet decomposition method and extracted the gravitational anomalies in different depths. The result shows that there have been negative gravitational changes near Jinghe since 2015. Meanwhile, the positive gravity changes with high value around the epicenter have gradually moved to the epicenter region. There were gravity zero change line 60km south to the epicenter before the earthquake, and the gravity changes accumulated up to 70 microgal before the earthquake. After the wavelet decomposition, 4 order wavelet obviously reflects the gravitational anomalies of the Jinghe earthquake, and shows consistency with earthquake preparation. Different depths of gravitational anomalies could be extracted and the near surface or shallow gravity anomalies irrelevant to earthquake preparation could be removed using wavelet analysis.

Key words: Jinghe $M_s6.6$ earthquake; Gravity changes; Gravity anomalies; Wavelet analysis