

于博,张庆云,李勇江,等. 2025. 基于重力场与 InSAR 的 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震形变特征研究[J]. 地震研究, 48(4): 641–649, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0065.

Yu B, Zhang Q Y, Li Y J, et al. 2025. Research on the deformation features of the 2021 Maduo $M_s7.4$ earthquake based on the gravity field and InSAR[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(4): 641–649, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0065.

基于重力场与 InSAR 的 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震形变特征研究*

于博¹, 张庆云², 李勇江¹, 徐顺强¹, 杨利普¹

(1. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002; 2. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 基于 2019—2023 年的流动重力观测资料, 使用经典平差获得各测期测点重力值, 得到研究区不同时间尺度的重力场变化结果; 使用 GAMMA 软件对 InSAR 同震观测数据进行干涉处理, 获取 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震的同震形变场。结果显示: 玛多 $M_s7.4$ 地震震前研究区异常变化主要集中在震中附近, 以负变化为主; 地震前后 1 年期的重力场变化形成了“四象限”的分布特征; 震后研究区重力场发生大范围的反向变化, 但随着震后调整, 震中区域东部的重力场变化量较西部更大, 与双断层滑动模型给出的滑动量分布结果一致。玛多地震在 LOS 向最大位移约为 1.29 m, 发震断层为走滑型; 通过断层滑动分布反演得到双断层模型的滑动主要集中在 20 km 深度内, 发震主断层最大滑移量约为 4.8 m, 分支断层最大滑移量约为 2 m。联合 InSAR 形变场与 2020—2021 期重力场变化开展分析后发现, 玛多 $M_s7.4$ 地震的发震构造与重力场变化一致性较好, 表明重力资料与 InSAR 资料的联合应用有助于更好地分析大震发震构造及机制。

关键词: 时变重力; InSAR; 玛多 $M_s7.4$ 地震; 同震形变; 断层滑动模型

中图分类号: P315.727 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)04-0641-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0065

0 引言

2021 年 5 月 22 日 2 时 4 分, 青海果洛州玛多县 (34.59°N, 98.34°E) 发生 $M_s7.4$ 地震, 震源深度 17 km。本次地震发生在青藏高原东缘, 巴颜喀拉地块与柴达木地块 2 个次级地块的边界处, 是近年来唯一一次发生在块体内部的大地震, 填补了巴颜喀拉块体内部 7 级以上大地震的空白。因此, 研究该地震对深入探究巴颜喀拉块体内部构造活动、大震孕震环境具有重要意义。

地球重力场是地球的基本物理场之一, 其时空变化蕴含了地表及其内部物质的分布变化、形

变及质量迁移、物质交换等信息 (孙和平等, 2017)。研究表明, 震前区域重力场能较好地体现非潮汐变化信息, 反映地壳内部的物质迁移过程, 与地震的孕育、发生存在密切关系, 具有较好的中长期前兆性异常特征, 可在中强地震危险性预测中发挥重要作用 (祝意青等, 2016, 2017; 申重阳等, 2009, 2011; 黄江培等, 2022)。目前以重力场时空变化提取地震活动前兆的工作流程一般是, 每年利用相对重力仪对重力监测网进行 1~2 期流动重力观测, 以测网内绝对重力点值作为控制, 对观测资料进行经典平差计算, 对不同时间尺度作差从而得到重力场变化, 进而分析提取地震前兆异常。重力场虽然能反映地下质量迁移或结

* 收稿日期: 2024-10-28.

基金项目: 中国地震局地球物理勘探中心青年基金资助项目 (YFGEC2023007); 中国地震局地震科技星火计划项目 (XH24055YA).

第一作者简介: 于博 (1997-), 助理工程师, 主要从事流动重力监测及数据处理. E-mail: 954328651@qq.com.

构变化信息,但目前只能针对震区中长期重力演变特征,无法提供同震形变的相关信息。

InSAR 技术目前已被广泛应用于地表沉降监测、地震、火山等方面的研究(康帅等, 2021; Zhang *et al*, 2019),以同震形变场为约束反演出准确可靠的震源参数,可以很好地弥补重力场时空变化的不足(周传义, 2019),中长期重力演变特征与 InSAR 技术相结合,可为地震孕育、发生及震后调整的整个过程的研究提供更加充分的依据,但目前综合探讨的研究较少。因此,本文使用 2019—2023 年的流动重力观测资料和 2021 年 5 月 20—26 日 InSAR 同震观测数据,对 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震前后区域形变特征进行分析研究。

1 重力资料处理与分析

1.1 重力资料处理

2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震发生后,中国地震局通过综合地球物理场观测等项目,在青藏高原东缘建立了区域地震流动重力监测网,经多年优化,形成了中国大陆整体重力监测网络。其中青海省格尔木—五道梁测线与玛多—玉树测线之间的 2 条南北连接线均是在 2017 年青藏高原东缘测网改造时增加的测线,自 2018 年以来才形成稳定可靠的观测网络,并每年开展 1~2 期重力观测(胡敏章等, 2021)。包含 9 个绝对重力测点和 143 个相对重力联测点(图 1),本文使用 2019—2023 年玛多 $M_s7.4$ 地震震区及其周边流动重力测网。该测网的流动重力观测资料和观测工作由中国地震局第二监测中心、四川省地震局、中国地震局第一监测中心、湖北省地震局等

单位共同完成。相对重力联测主要使用 BURRIS 型相对重力仪,部分测期同时使用了 LCR-G 型和 CG-6 型相对重力仪(表 1)。

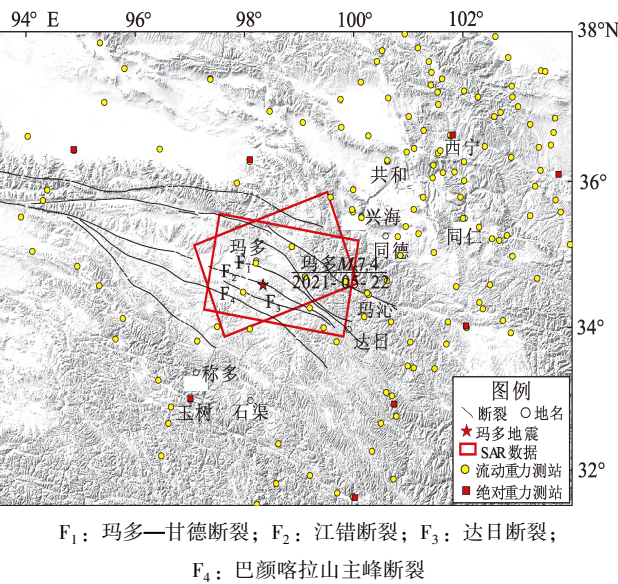


图 1 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震震区及
周边流动重力测网

Fig. 1 Mobile gravimetric network in the area of the
2021 Maduo $M_s7.4$ earthquake and its vicinity

为保证研究区数据资料的完整性,本文主要采用 2019—2023 年每年 8 月前后的流动重力观测资料,以测网内统一的绝对重力点值作为起算基准,采用经典平差方法计算测网每期重力点值(陈兆辉等, 2021),并通过作差计算获取了测点重力变化。表 1 显示,5 个年度观测结果平均点值精度均优于 $15 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,观测精度较高,数据处理结果可靠,可以用于对玛多 $M_s7.4$ 地震前后重力场变化的研究。

表 1 各期观测仪器与点值精度统计

Tab. 1 Measurement instruments and the accuracy of the measured values obtained
at the measuring points in each measurement period

观测年份	仪器型号	仪器编号	点值精度/($\times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)
2019	BURRIS、LCR-G	B-105, B-115, B-095, B-086, B-101, G-829, G-999, G-100	9.7
2020	BURRIS	B-105, B-115, B-086, B-101	14.3
2021	BURRIS	B-105, B-115, B-095, B-086	12.7
2022	BURRIS、CG-6	B-105, B-115, B-095, B-086, B-093, B-524, B-053, CG6-090, CG6-093	13
2023	BURRIS	B-123, B-115, B-095, B-086, B-053	11.6

Fig. 2 Dynamics of the gravity field in the study area one year before (a), two years before (b), one year before and after (c), one year after (d), and two years after (e) the 2021 Maduo $M_s 7.4$ earthquake

基准,得到玛多 $M_s7.4$ 地震后 1 年期和 2 年期研究区的重力场变化 (图 2d、e)。由于研究区西部测点较为稀疏,因此该区域出现的正变化 (图 2a) 应为由插值导致的假异常,本文不作深入研究。

从震前 1 年期的重力场变化 (图 2a) 可以看出,玛多 $M_s7.4$ 地震前,研究区西南部的重力场以正变化为主、东北部以负变化为主,正负异常变化基本围绕玛多地震震中区域展布;0 等值线出现在兴海—玛沁—同德之间,且在玛沁附近由南偏折向北;同德与玛多之间存在重力梯度带,变化量达到 $70 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,玛沁以东及玛多以西重力场以正变化为主,但变化较为平缓。从震前 2 年期的重力场累积变化 (图 2b) 可以看出,研究区东北部的负异常区面积明显扩大,但整体的变化量没有显著增加,重力梯度带随着负异常区的扩张向玛多地震的震中位置移动;0 等值线主要沿玛多至达日方向展布,且在玛多 $M_s7.4$ 地震震中附近,重力梯度带和 0 等值线的方向与构造断裂的方向吻合。与 1 年期的重力场相比较,2 年期的重力场整体变化量小,其原因 2021 年的重力观测资料是在玛多 $M_s7.4$ 地震发生后的 8 月采集,因此 2 年期的重力场变化中含有玛多 $M_s7.4$ 地震震后区域重力场调整的信息。整体而言,震前 1~2 年期研究区的重力场异常区主要围绕玛多地震震中区域展布,且正负异常交界随着时间增加逐渐向震中区域移动。

以 2020 年度为基准的重力场变化特征包含了地震发生前后区域物质的运移调整情况。图 2c 显示,研究区重力场以大规模的负变化为主;同时,其东北部的重力场由震前的负变化转为正变化,但变化量不大,这与震前的负变化部分抵消有关;玛多以南区域同样存在一定范围的正变化区;研究区负变化中心分别位于西北—东南方向,且负变化区彼此联通,贯穿了正变化区域,如果以江错断裂作为分界线,其南、北两侧以正变化为主,且正负变化形成类似于四象限的分布态势。

以 2021 为起算基准的重力场 1~2 年期变化反映了研究区震后调整状态。震后 1 年期重力场变化 (图 2d) 显示,重力场以东正西负为主,继承了 2020—2021 年的 1 年期重力变化形态。所不同的是,研究区重力场正变化区持续扩大,且由地震发生前

后的零散分布变为一个整体;0 等值线仍位于震中附近,但方向由北西—南东向调整为南北向。震后 2 年期重力场累积变化 (图 2e) 显示,震中附近大部分区域,即江错断裂的东部和南部皆呈现出大规模的负变化,只有其北部的玛沁至兴海存在小范围的正变化区,重力梯度带变化也较平缓。

在玛多 $M_s7.4$ 地震孕育、发生至震后调整各个不同阶段,研究区的重力变化特征可总结为:震前区域异常变化主要集中在震中附近,且重力梯度带随时间推移向震中位置移动,并逐渐形成四象限的变化特征,这一状态与发震断层为走滑型断层相吻合;震后,研究区重力场发生大范围的反向变化,但随着震后调整,江错断裂的南、北两侧呈现出不同的变化趋势,其南侧仍以反向变化为主,但其北侧已经显示有恢复至震前变化状态的趋势。

2 InSAR 形变场特征分析

2.1 同震形变场获取

从 2019—2023 年研究区重力场变化可以看出玛多地震发生前后区域中长期地球物理场的变化形态,但存在重力观测时间间隔较长的问题。为了弥补重力方法在研究临震与发震期间重力场变化特征观测的不足,本文收集了欧洲太空局 Sentinel-1 卫星获取的玛多 $M_s7.4$ 地震前后的升轨和降轨 SAR 数据 (图 1 中红色框),升轨数据干涉对为 2021-05-20—2021-05-26,轨道号为 Track99,降轨数据干涉对为 2021-05-20—2021-05-26,轨道号为 Track106,数据详细参数见表 2。

使用 GAMMA 软件对升轨和降轨数据进行干涉处理,其中外部 DEM 数据使用 SRTM30 m 分辨率数据。采用传统 Goldstein 滤波与平面拟合方式去

表 2 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震干涉图详细信息

Tab. 2 Details of the 2021 Maduo $M_s7.4$ earthquake interferogram

轨道号	飞行方向	成像模式	主影像	从影像	入射角/ (°)
T99	升轨	IW	2021-05-20 (S1A)	2021-05-26 (S1B)	34~44
T106	降轨	IW	2021-05-20 (S1A)	2021-05-26 (S1B)	34~44

除大气误差和轨道误差 (Werner *et al.*, 2000; 李永生等, 2016; Goldstein, Werner, 1998; Rosen *et al.*, 1996), 通过最小费用流方法进行相位解缠, 最后通过地理编码获取玛多地震的同震形变场。

图 3 为玛多 $M_s7.4$ 地震的 InSAR 同震形变场, 图中定义靠近卫星飞行方向为正, 远离卫星飞行方向为负。从升轨同震形变场 (图 3a) 可以看出, LOS 向最大抬升形变量约为 1.29 m, 主要分布于江错断裂的北盘; LOS 向最大沉降量约为 1.08 m, 主要分布于江错断裂的南盘, 最大形变量主要集

中在发震断层近场区域。从降轨同震形变场 (图 3b) 可以看出, LOS 向最大抬升形变量为 0.88 m, 主要分布于江错断裂南盘; LOS 向最大沉降量为 0.98 m, 主要分布在江错断裂北盘。从上文可以看出, 升轨和降轨同震形变场分布区域基本一致, 但 LOS 向抬升和沉降区域分布相反, 这是由 SAR 成像机理导致的。根据 InSAR 同震形变场分布可以初步推断玛多 $M_s7.4$ 地震的发震断层为走滑断层, 但由于近场形变量较大, 导致断层附近存在一定的失相干现象。

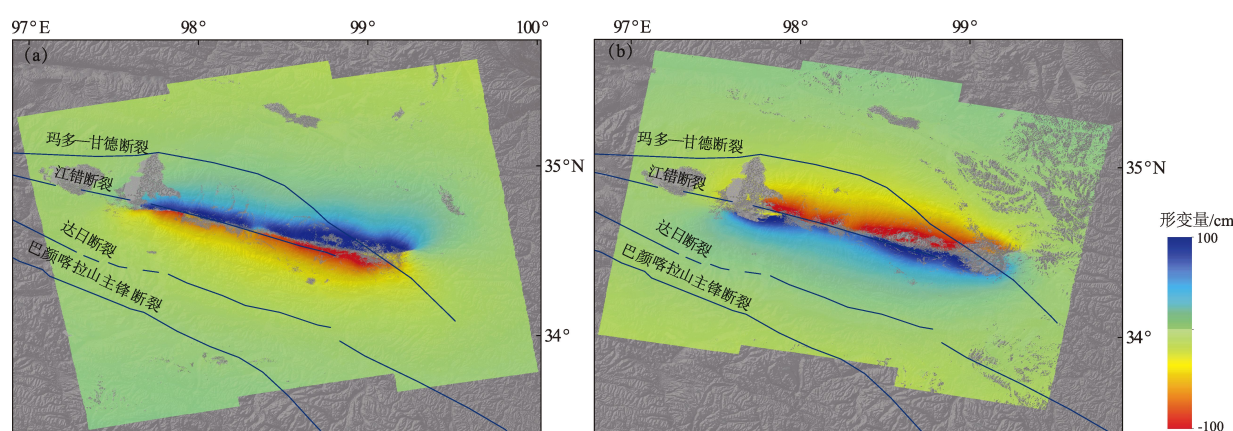


图 3 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震升轨 (a) 和降轨 (b) InSAR 同震形变场

Fig. 3 The ascending - orbit (a) and the descending - orbit (b) InSAR co - seismic deformation field of the Maduo $M_s7.4$ earthquake in 2021

2.2 断层滑动模型反演及分析

由于 InSAR 形变场数据量相对较大, 在反演前需要进行降采样。本文采用二叉树降采样算法对 InSAR 同震形变场进行降采样, 并将降采样处理后的升轨与降轨 InSAR 形变场进行联合反演。使用德国地学中心 SDM 软件 (Wang *et al.*, 2008) 进行断层滑动分布反演, 并使用分层介质模型计算格林函数。

考虑到玛多 $M_s7.4$ 地震发震构造的复杂性, 本文采用双断层模型进行反演, 断层几何模型参考 USGS (2021)、Global Centroid Moment Tensor (2021) 等机构的震源机制解和精定位后地震序列参数, 最后根据余震精定位结果 (王未来等, 2021) 及 InSAR 形变场展布, 获取玛多 $M_s7.4$ 地震的震源滑动模型 (图 4)。为获得相对精细的滑动分布结果, 本文将断层划分为 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 的子断层, 主断层倾角设置为 $70^\circ \sim 110^\circ$, 第二段断层

倾角设置为 $90^\circ \sim 80^\circ$, 最大滑动量设定为 7 m, 利用位错模型粗糙度和数据吻合度之间折中曲线, 确定反演使用的平滑因子 $\alpha = 0.25$ 。

基于 InSAR 数据反演的结果, 利用双断层模型反演得到的矩震级 M_w 为 7.52。从图 4 可以看出,

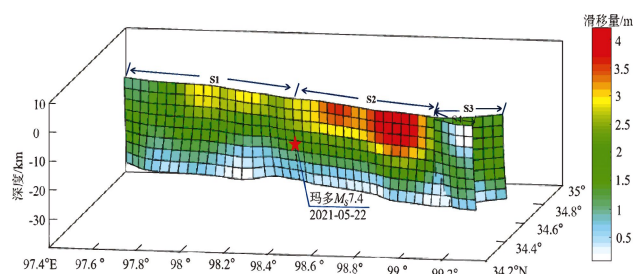


图 4 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震双断层滑动模型

Fig. 4 The co - seismic slip distribution of the 2021 Maduo $M_s7.4$ earthquake inversed by the double fault model

双断层模型的滑动主要集中在地壳内 20 km 深度内,主断层最大倾滑量约为 4.8 m,分支断层最大滑移量约 2 m;断层以走滑运动为主,尤其在最大滑动区域近乎纯走滑;在地表有明显的破裂,且规模巨大,最大滑动主要集中在 S2 段。潘家伟等 (2021) 的野外考察结果显示本次玛多 $M_s 7.4$ 地震地表破裂带主要沿 $N105^\circ E$ 走向展布,地表破裂带全长约 151 km,与本文获取的断层滑动分布结果一致。

3 讨论

玛多 $M_s 7.4$ 地震前观测到了较长时间尺度的累积重力变化,震前区域异常变化主要集中在震中附近,以负变化为主;震后研究区重力场发生大范围的反向变化,但随着震后调整,江错断裂的南北两侧呈现出不同的变化趋势。震前重力变化主要反映地球内部构造运动相关物质的迁移过程,对于 $M_s \geq 7.0$ 地震的重力变化分析,应关注其长期的重力变化特征,短期的弱变化可能意味着震区地壳已进入“固化”状态,内部应力持续增强 (胡敏章等, 2021)。从对玛多 $M_s 7.4$ 地震的区域应力场的相关研究发现,玛多震区构造应力场以 EW 向挤压作用为主 (徐志国等, 2021); 地表 GPS 速度场结果显示,区域地表位移是以由西往东运动为主 (Wang, Shen, 2020); 以 2021 年

为基准的震后重力场变化整体以西南区域为负变化,东北区域为正变化为主,反映出震后物质向东逃逸,与巴颜喀拉地块现今整体向东向运动的特征相符。

由于 2020 年与 2021 年两期流动重力观测数据的采集时间更接近于玛多 $M_s 7.4$ 地震的发震时间,可以认为 2020—2021 年 1 年尺度重力场变化更能反映玛多 $M_s 7.4$ 地震发生前后的区域重力场变化特征,因此选取此 1 年尺度的重力场变化与同震形变场进行叠加 (图 5)。图 5 显示,升轨和降轨 InSAR 同震形变场沿江错断裂呈倾斜的纺锤状分布,50 ~ 100 cm 的形变区域对应的重力场以负变化为主,但在江错断裂南盘存在小范围的重力正变化区,变化量在 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 以内,而其周边区域重力场变化量迅速减小至 $-60 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。这一现象的出现可能有以下原因:①该小范围的重力场正变化区域内测点数量稀少,通过插值获得的区域重力场变化会受到其周围大范围负变化的影响,导致原本变化量就不大的正变化区显示为负变化区;②2020—2021 年 1 年尺度重力场变化包含了地震发生前、后重力场变化的信息,但 InSAR 获得的同震形变场反映的是地震发震时的区域形变特征。相比之下,重力场变化调整是在地震发生后一段时间内较缓慢地进行,因此地震发生后重力场的变化量反映的更多是区域重力场震后的调整状态。

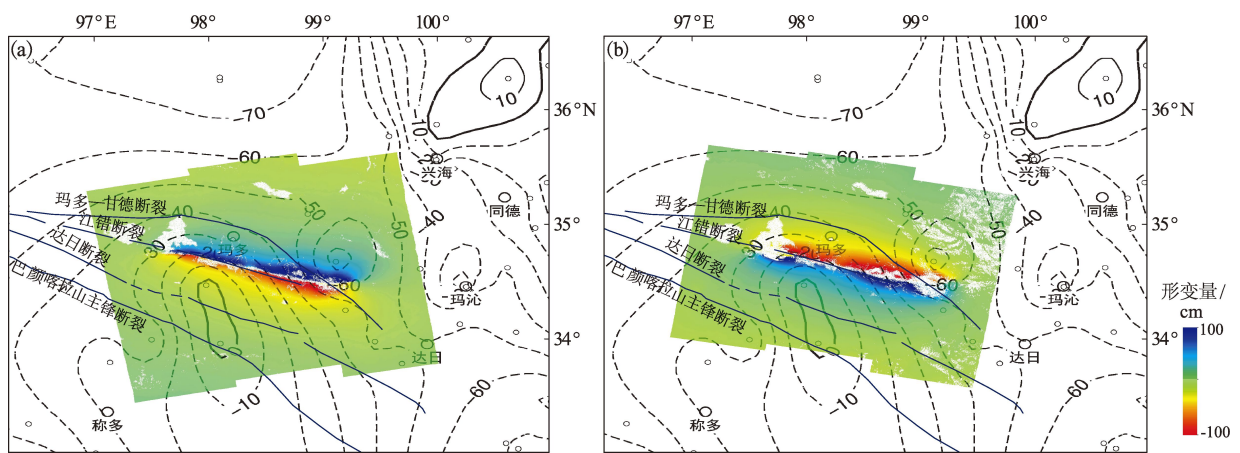


图 5 重力场变化 (2020-08—2021-08) 与升轨 (a) 和降轨 (b) InSAR 同震形变场叠加结果

Fig. 5 Composition of the gravity field changes from August 2020 to August 2021 and the ascending-orbit (a) and the descending-orbit (b) InSAR deformation

如果要更准确地将重力场变化与同震形变结果相对应,需将震后变化量扣除,但这是十分困难的,只能根据震后区域重力场变化趋势进行定性分析。综上认为玛多 $M_s7.4$ 地震的发震断层南部的重力场变化在发震前后以正变化为主,但范围和量级较北部的负变化小。这与 InSAR 同震形变场显示的断层两侧的形变量具有较好的一致性,也与谈洪波等(2021)利用地表同震形变与重力变化模拟的结果一致,该研究认为,玛多 $M_s7.4$ 地震近震区重力变化主要受地表垂直位移影响,震后由中下地壳介质黏弹效应造成了区域垂向形变,进而引发了区域重力场的这一中长期变化调整态势,说明震后壳内介质黏弹性松弛效应可能是重力场变化调整的影响因素之一。

结合图4分析可以发现,断层分支 S3 和 S4 段对应重力场变化量为 $(-60 \sim -50) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的区域,而 S1 和 S2 段对应重力场变化量为 $(-30 \sim -10) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的区域。如果考虑扣除地震发生之后重力场的变化量的情况,两者差距可能更加明显。断层分支区域不仅对应了 InSAR 形变量最大的区域,同时还处于重力场变化更大区域。综上分析可以得出,玛多 $M_s7.4$ 地震发生前后区域重力场和 InSAR 同震形变场在形态上和变化剧烈程度上均保持一致。

4 结论

本文结合 2019—2023 年青藏高原中东部及邻区重力场时空变化信息和 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震前后研究区的 InSAR 观测资料,系统分析了玛多 $M_s7.4$ 地震前后的重力场和形变场变化过程及特征,主要得出以下结论:

(1) 研究区不同起算基准的重力场时空变化结果显示了玛多 $M_s7.4$ 地震前后区域重力场相对完整的演化过程。震前研究区重力场异常变化集中在震中附近,以震中区域为中心,其东部地区重力正变化范围随着时间推移逐渐收窄,变化量级减小;0 等值线在震中附近发生偏折,且正负变化之间的重力梯度带向震中附近移动,最终梯度带沿着与断裂带走向垂直的方向展布;区域重力场变化在震中区域形成了类似四象限的分布特征。

震后,研究区重力场发生大范围的反向变化,但随着震后调整,发震断层的南北两侧呈现出不同的变化趋势,其南侧仍以反向变化为主,但其北侧已经显示出要恢复到震前变化状态的趋势,这反映出发震断层南北两侧不同的构造和运动属性。

(2) InSAR 同震形变场升轨、降轨结果表明,地震活动造成 LOS 向形变最大达 1.29 m,发震断层为走滑型。通过断层滑动分布反演得到,发震断层为双断层,最大滑动量达 4.7 m。在地震发震过程中,破裂滑动自西至东逐渐增强,滑动最强区域分布于震中以东区域,在地壳内 20 km 深度内。

(3) 不同起算基准的重力场变化特征反映了玛多地震前后中长期的区域形变特征,而 InSAR 结果则显示出玛多地震的同震形变。在地震前后 1 年期的重力场变化呈现出了近似四象限的变化特征,这与玛多地震震源机制显示的膨胀、压缩区具有对应性,并且与 InSAR 同震形变场以及发震断层的断层属性相吻合。在震后重力场的调整变化,特别是 2 年尺度的重力场累积变化中,震中区域东部的重力场变化量更大,这与双断层滑动模型给出的滑动量分布结果一致。

本研究使用重力数据来源于中国地震局国家重力台网中心, SAR 数据来源于欧洲太空局, SDM 反演程序来源于汪荣江教授,绘图程序来自 GMT,在此一并表示衷心感谢!

参考文献:

- 陈兆辉,张双喜,刘金钊,等. 2021. 地震重力网经典平差与拟稳平差综合分析与研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 46(11): 1693-1702.
- Chen Z H, Zhang S X, Liu J Z, et al. 2021. Comprehensive analysis and research of classic adjustment and quasi-stable adjustment in mobile gravity network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 46(11): 1693-1702. (in Chinese)
- 胡敏章,郝洪涛,韩宇飞,等. 2021. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震的重力挠曲均衡背景与震前重力变化[J]. 地球物理学报, 64(9): 3135-3149.
- Hu M Z, Hao H T, Han Y F, et al. 2021. Gravity flexural isostasy background of the 2021 Madoi (Qinghai) $M_s7.4$ earthquake and gravity change before the earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(9): 3135-3149. (in Chinese)
- 黄江培,曹颖,刘东,等. 2022. 漾濞 $M_s6.4$ 地震前后的重力变化特

- 征及其孕震含义分析[J]. 地震地质, 44(6): 1557 – 1573.
- Huang J P, Cao Y, Liu D, *et al.* 2022. Analysis of gravity variation characteristics and its seismogenic meaning before and after Yangbi $M_{\text{S}}6.4$ earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 44(6): 1557 – 1573. (in Chinese)
- 康帅, 刘传金, 朱良玉, 等. 2021. 基于升降轨 Sentinel-1 SAR 数据研究 2020 年新疆于田 $M_{\text{S}}6.4$ 地震震源机制[J]. 地震, 41(2): 80 – 91.
- Kang S, Liu C J, Zhu L Y, *et al.* 2021. The 2020 $M_{\text{S}}6.4$ earthquake in Yutian Xinjiang based on the ascending and descending Sentinel-1 SAR Data[J]. *Earthquake*, 41(2): 80 – 91. (in Chinese)
- 李永生, 申文豪, 温扬茂, 等. 2016. 2015 年尼泊尔 $M_{\text{W}}7.8$ 地震震源机制 InSAR 反演及强地面运动模拟[J]. 地球物理学报, 59(4): 1359 – 1370.
- Li Y S, Shen W H, Wen Y M, *et al.* 2016. Source parameters for the 2015 Nepal earthquake revealed by InSAR observations and strong ground motion simulation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(4): 1359 – 1370. (in Chinese).
- 潘家伟, 白明坤, 李超, 等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_{\text{S}}7.4$ 地震地表破裂带及发震构造[J]. 地质学报, 95(6): 1655 – 1670.
- Pan J W, Bai M K, Li C, *et al.* 2021. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) $M_{\text{S}}7.4$ earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1655 – 1670. (in Chinese)
- 申重阳, 李辉, 孙少安, 等. 2009. 重力场动态变化与汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震孕育过程[J]. 地球物理学报, 52(10): 2547 – 2557.
- Shen C Y, Li H, Su S A, *et al.* 2009. Dynamic variations of gravity and the preparation process of the Wenchuan $M_{\text{S}}8.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(10): 2547 – 2557. (in Chinese)
- 申重阳, 谈洪波, 郝洪涛, 等. 2011. 2009 年姚安 $M_{\text{S}}6.0$ 地震重力场前兆变化机理[J]. 大地测量与地球动力学, 31(2): 17 – 22.
- Shen C Y, Tan H B, Hao H T, *et al.* 2011. Mechanism of precursory gravity change before Yaoan $M_{\text{S}}6.0$ earthquake in 2009[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31(2): 17 – 22. (in Chinese)
- 孙和平, 徐建桥, 崔小明. 2017. 重力场的地球动力学与内部结构应用研究进展[J]. 测绘学报, 46(10): 1290 – 1299.
- Sun H P, Xu J Q, Cui X M. 2017. Research progress of the gravity field application in Earth's geodynamics and interior structure[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1290 – 1299. (in Chinese)
- 谈洪波, 王嘉沛, 杨光亮, 等. 2021. 2021 年玛多 $M_{\text{S}}7.4$ 地震的震后效应模拟[J]. 地震地质, 43(4): 936 – 957.
- Tan H B, Wang J P, Yang G L, *et al.* 2021. Simulation of post-seismic effects of the Maduo $M_{\text{S}}7.4$ earthquake in 2021[J]. *Seismology and Geology*, 43(4): 936 – 957. (in Chinese)
- 王未来, 房立华, 吴建平, 等. 2021. 2021 年青海玛多 $M_{\text{S}}7.4$ 地震序列精定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1193 – 1202.
- Wang W L, Fang L H, Wu J P, *et al.* 2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 $M_{\text{S}}7.4$ Maduo earthquake, Qinghai, China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 51(7): 1193 – 1202. (in Chinese)
- 徐志国, 梁姗姗, 张广伟, 等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_{\text{S}}7.4$ 地震发震构造分析[J]. 地球物理学报, 64(8): 2657 – 2670.
- Xu Z G, Liang S S, Zhang G W, *et al.* 2021. Analysis of seismogenic structure of Maduo, Qinghai $M_{\text{S}}7.4$ earthquake on May 22, 2021[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(8): 2657 – 2670. (in Chinese)
- 周传义. 2019. 基于 InSAR 技术的伊拉克哈莱卜杰地震发震构造及断层活动研究[D]. 青岛: 山东科技大学.
- Zhou C Y. 2019. Research on seismogenics and fault movement of Iraq Halabjah earthquake based on InSAR technology[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology. (in Chinese)
- 祝意青, 李铁明, 郝明, 等. 2016. 2016 年青海门源 $M_{\text{S}}6.4$ 地震前重力变化[J]. 地球物理学报, 59(10): 3744 – 3752.
- Zhu Y Q, Li T M, Hao M, *et al.* 2016. Gravity changes before the Menyuan, Qinghai $M_{\text{S}}6.4$ earthquake of 2016[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(10): 3744 – 3752. (in Chinese)
- 祝意青, 梁伟锋, 赵云峰, 等. 2017. 2017 年四川九寨沟 $M_{\text{S}}7.0$ 地震前区域重力场变化[J]. 地球物理学报, 60(10): 4124 – 4131.
- Zhu Y Q, Liang W F, Zhao Y F, *et al.* 2017. Gravity changes before the Jiuzhaigou, Sichuan, $M_{\text{S}}7.0$ earthquake of 2017[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(10): 4124 – 4131. (in Chinese)
- Global Centroid Moment Tensor. 2021. Global CMT catalog search[EB/OL]. (2021-05-21)[2024-10-28]. <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Goldstein R M, Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 25(21): 4035 – 4038.
- Rosen P A, Hensley S, Zebker H A, *et al.* 1996. Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 101(E10): 23109 – 23125.
- USGS. 2021. USGS CMT catalog[EB/OL]. (2021-05-21)[2024-10-28]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000e54r/moment-tensor>.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774.
- Wang R J, Motagh M, Walter T R. 2008. Inversion of slip distribution from co-seismic deformation data by a sensitivity-based iterative fitting (SBIF) method[C]//EGU General Assembly. Vienna, Austria: EGU, 34 – 36.
- Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, *et al.* 2000. GAMMA SAR and interferometric processing software[C]//Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium. Gothenburg, Sweden: ERS-E-ENVISAT, 16 – 20.
- Zhang Q Y, Li Y S, Zhang J F, *et al.* 2019. InSAR technique applied to the monitoring of the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(10): 2229 – 2240.

Research on the Deformation features of the 2021 Maduo $M_s7.4$ Earthquake Based on the Gravity Field and InSAR

YU Bo¹, ZHANG Qingyun², LI Yongjiang¹, XU Shunqiang¹, YANG Lipu¹

(1. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, Henan, China)

(2. The First Monitoring Center of China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

Abstract

This paper analyzes the 2021 Maduo $M_s7.4$ earthquake by using the measured mobile gravity data from 2019 to 2023 and the co-seismic InSAR observation data. The gravity values at the measuring points of the mobile gravimetric network in 5 measuring periods were obtained through classical adjustment method, which in turn provided the gravity field changes on different time scales in the study area. The Sentinel-1 data was interferometrically processed with GAMMA software to obtain the co-seismic deformation field of the Maduo $M_s7.4$ earthquake. The results indicate that the changes in the regional gravity field before and after the Maduo $M_s7.4$ earthquake exhibited a distribution pattern similar to “four quadrants” in the epicentral area. Observations of the post-earthquake gravity field adjustments, particularly in the cumulative variation over a two-year scale, proved that the gravity field variations in the eastern part of the epicenter were more significant than those in the western part; this feature was consistent with the slip distribution derived with the double-fault slip model. The InSAR co-seismic deformation showed a maximum displacement of 1.29 m or so in the Line of Sight (LOS) direction. The Maduo earthquake was caused by double seismogenic faults, with a maximum slip of about 4.8 m on the main fault and 2 m on the branch fault. The InSAR deformation field and the gravity field changes from 2020 to 2021 revealed good consistency between the seismogenic structure and the gravity field changes, suggesting that the joint application of gravity data and InSAR data can help better analyze the seismogenic structure and the seismogenic mechanism of major earthquakes.

Keywords: time-varying gravity; InSAR; the Maduo $M_s7.4$ earthquake; co-seismic deformation; fault slip model