

赵磊, 许文斌, 方楠等. 2023. 2021 年青海玛多 $M_w 7.3$ 地震同震和早期震后断层滑动模型及发震构造摩擦属性. 地球物理学报, 66(3): 1086-1097, doi:10.6038/cjg2022Q0189.

Zhao L, Xu W B, Fang N, et al. 2023. Coseismic and early postseismic fault slip model and the seismogenic fault friction properties of the 2021 Qinghai Madoi $M_w 7.3$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 66(3): 1086-1097, doi:10.6038/cjg2022Q0189.

2021 年青海玛多 $M_w 7.3$ 地震同震和早期震后断层滑动模型及发震构造摩擦属性

赵磊, 许文斌*, 方楠, 刘计洪, 冯光财

中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410000

摘要 地震同震和早期震后断层滑动是研究发震断层深浅部孕震形态及摩擦性质的重要手段. 本文基于雷达干涉测量(InSAR)数据获得了玛多地震同震和早期震后形变场, 并反演得到了发震断层的滑动分布模型. 研究结果表明同震滑动主要分布在上地壳浅部, 并且存在多个滑动亏损区域. 发震断层在东端分叉处的倾向与主断裂和西端倾向相反. 基于 N-SBAS 方法获得的震后 4.5 个月形变场显示, 断层近场震中区域的累积形变量达 5 cm, 远场区域累积形变量达 2 cm. 震后早期余滑分布在断层浅部和深部以及两侧的横向延展区域; 部分余滑区域与同震区域重叠. 其中, 上地壳浅部的余滑达 20 cm 且填充了同震滑动亏损. 时序地震矩显示上地壳浅部区域在震后快速余滑而深部稳定滑动, 表明了发震断层区域的复杂摩擦属性.

关键词 断层模型; 余滑分布; 震后形变; 摩擦属性

doi:10.6038/cjg2022Q0189

中图分类号 P315, P228

收稿日期 2022-03-23, 2022-09-15 收修定稿

Coseismic and early postseismic fault slip model and the seismogenic fault friction properties of the 2021 Qinghai Madoi $M_w 7.3$ earthquake

ZHAO Lei, XU WenBin*, FANG Nan, LIU JiHong, FENG GuangCai

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410000, China

Abstract Coseismic slip and early post-earthquake afterslip are important ways to observe seismogenic morphology and friction properties of seismogenic faults. We use InSAR data to obtain the coseismic and early postseismic deformation and estimate the fault slip distribution model. The coseismic slip is mainly distributed in the shallow upper crust and shows several shallow slip deficits. The dip in the eastern branches fault is opposite to the western and main segment. We process 4.5 months postseismic deformation based on the N-SBAS method, which accumulates ~ 5 cm displacement in near-field and ~ 2 cm in far-field. The afterslip distributed in both updip and downdip areas and laterally extended alongside western and eastern ends. The shallow upper crust afterslip fills the shallow slip deficit, and several areas overlap the coseismic slip. The maximum afterslip is ~ 20 cm in the updip region. The temporal-spatial moment shows rapid afterslip in the shallow upper crust and stable afterslip in the downdip area, which indicates

基金项目 国家重点研发项目(2019YFC1509205), 国家自然科学基金项目(42174023)共同资助.

第一作者简介 赵磊,男,1995 年生,博士,主要从事大地测量与地球动力学研究. E-mail: 15653246906@163.com

* 通讯作者 许文斌,男,1985 年生,教授,主要从事 InSAR 大地测量研究. E-mail: wenbin.xu@csu.edu.cn

the complex friction properties of the seismogenic fault.

Keywords Fault model; Afterslip distribution; Postseismic deformation; Friction property

0 引言

2021年5月22日,在青海玛多发生 $M_w 7.3$ 地震,据中国地震台网观测,震源深度为17 km,震中(34.59°N, 98.34°E)位于巴颜喀拉块体内部的江错断裂附近(图1),距离块体北边界的昆仑断裂南侧约70 km(王未来等,2021;潘家伟等,2021)。欧亚板块和印度板块的持续碰撞,在青藏高原形成了多条大型断裂带,这些断裂带把整个高原划分为多个次级块体。巴颜喀拉地块为青藏高原中部的次级地块,是一条狭长的三角构造单元。巴颜喀拉地块南北两侧分别受鲜水河断裂和东昆仑断裂控制。块体向东挤压过程中受到四川盆地的阻挡,形成了龙门山挤压造山带,即青藏高原东边界。在过去20多年时间里,多次中强地震围绕巴颜喀拉块体发生(Klinger et al., 2005; 王卫民等,2008; Xu et al., 2010; Huang et al., 2013; Liu et al., 2014; 季灵运等,2017; 贺鹏超等,2018; Zhao et al., 2018),但鲜有对于该块体内部活动断层的研究。玛多地震为我们研究块体内部断裂的活动方式和构造应力特征提供了很好的机会,而精确的发震断层模型对于分析周缘断层的活动方式和构造应力起到关键作用。

已有研究成果表明,玛多地震的余震分布和InSAR同震形变场呈现一个复杂的发震断层几何结构,东西向延伸约150 km,发震断层在东端分支,在西端改变断层走向(Zhao et al., 2021; Wang et al., 2021; He et al., 2021)。基于大地测量数据解算的同震三维形变场显示垂直形变在断层两侧正负交替,表明了断层倾向在空间分布上的复杂性(Zhao et al., 2021; 姜卫平等,2022)。同震库仑应力扰动表明此次地震对周缘断层具有明显的应力加载作用(祝爱玉等,2021)。静态库仑应力结果显示余震分布与应力加载区域有很好的空间相关性(王迪晋等,2022)。虽然已有的研究提出了多种断层模型(He et al., 2021; Jin and Fialko, 2021; Wang et al., 2021; Zhao et al., 2021; 王阅宾等,2022; 余鹏飞等,2022; He et al., 2022),但大多基于余震和线性反演确定断层几何结构。对于余滑和余震的空间相关性及震后余滑的时空变化特征的研究较少。为了得到精确的断层几何结构,本文联合贝叶斯非线性反演

方法和网格搜索反演方法估计断层几何和滑动分布模型。然后基于观测数据和精确断层模型反演同震和早期震后滑动分布并探讨两者之间的空间相关性,进而研究断层的摩擦属性。

1 数据处理和建模方法

1.1 同震和震后数据处理

本文的InSAR同震形变场和偏移量来自Liu等(2022),而震后4.5个月内的形变场利用GAMMA软件处理得到。采用震后降轨21景和升轨17景影像,通过双轨差分干涉得到差分干涉图。在数据处理过程中,距离向和方位向分别采用10和2进行多视处理提高信噪比,采用90 m分辨率的数字高程模型(SRTM DEM)用于校正地形相位。采用自适应滤波和最小费用流法(Goldstein and Werner, 1998)得到解缠干涉图。之后掩膜相干性低于0.7的像素点和剔除垂直基线大于30 m的干涉对来提高观测区域相干性。最终分别获得77景降轨干涉图和68景升轨干涉图,使用开源软件LICSBAS(Morishita, 2021)进行时序震后形变场解算。首先,将闭环相位值设为1.5 rad并且计算每三个干涉图的闭环相位,剔除具有明显解缠误差的干涉图,然后计算形变速率的标准差及掩膜低相干性和高标准差像素点,最后采用时空滤波得到时序震后形变场(Li et al., 2022)。

1.2 同震和震后滑动分布反演

根据同震干涉图和像素偏移量结果,将断层面分成4个部分:发震断层西端(断层1)、中部的主断裂段(断层2)、东段分叉两段(断层3和断层4)。考虑观测与模型误差的不确定度,使用BEAT软件(Vasyura-Bathke et al. 2020)采用贝叶斯算法来确定发震断层主断裂段的震源参数。在反演过程中,升降轨数据采用相同权重。图2显示了贝叶斯搜索结果直方图,在95%的置信区间内,最优倾角为北倾83°,走向为285°的左旋走滑断层。在确定主断裂段断层参数后,我们采用SDM(Steepest Descent Method,最速下降法,Wang et al., 2013)基于最小二乘线性搜索其余三段断层最优倾向和倾角。基于模型的粗糙度和失配度搜索最优平滑因子为0.13。然后将断层面离散成2 km×2 km的断层块,将滑动角约束在[−45°, 45°]范围内,假设泊松比为0.25来反演每

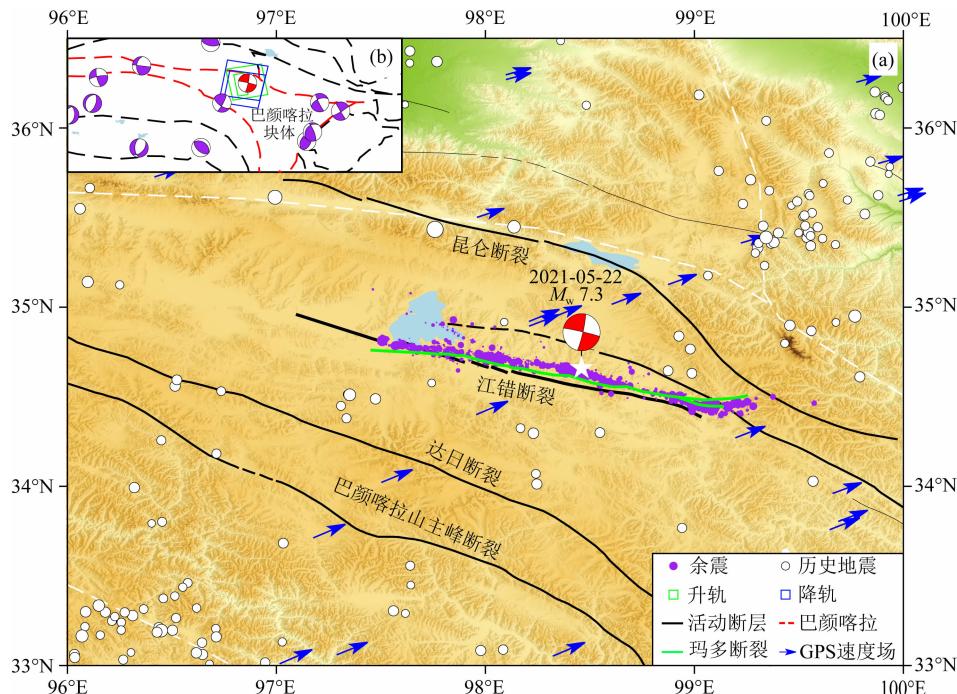


图 1 区域构造背景图

(a) 紫色圆点表示余震分布(Wang et al., 2021),白色五角星代表震中位置,红色沙滩球表示 United States Geological Survey(USGS)玛多地震震源机制解,绿色实线表示断层破裂地表迹线,黑色实线表示活动断层,蓝色箭头表示震间 GPS 速率(Wang and Shen, 2020);(b) 红色虚线表示巴颜喀拉块体,黄色和绿色方框分别表示降轨和升轨数据范围,紫色沙滩球表示历史地震震源机制解(USGS).

Fig. 1 Regional tectonic setting

(a) The purple dots denote the relocation aftershocks (from Wang et al., 2021), the white star represents the location of the epicenter, red beach balls show the focal mechanisms of the Madoi earthquake from United States Geological Survey (USGS), the green line indicates the rupture surface trace, the black lines denote the active faults, the blue arrows indicate the interseismic GPS velocity (Wang and Shen, 2020). (b) The red dotted line represents the Bayan Har block, the blue and green boxes represent the descending and ascending frame respectively, purple beach balls show the focal mechanism of historical earthquakes from the USGS.

个子断层块的滑动,并基于模拟观测值的均方根误差搜索最优倾角.在整个反演过程中,将先搜索的最优断层段作为约束来搜索之后断层段.首先,以断层 2 作为约束来搜索断层 1 的最优倾角,其次以断层 1 和断层 2 作为约束来搜索断层 3 的最优倾角,最后以断层 1,2,3 作为约束搜索断层 4 的最优倾角.因断层 3 和断层 4 位于发震断层东侧分叉处,反演时存在折衷关系,最后将断层 3 和断层 4 一起反演与单独反演做对比保证反演的精确度.

运动学余滑被广泛用来观测早期震后余滑特征,使用同震发震断层模型来反演震后滑动分布,将震后断层模型延伸至 30 km 宽度,其他断层几何参数与同震发震断层相同.

2 结果和讨论

2.1 同震和震后形变场

玛多地震升降轨同震形变场整体呈东西向分布

在断层两侧,断层两侧最大视线向(LOS)形变量约为 1 m(图 3).升降轨相反的形变信号表明玛多地震以走滑运动为主导.发震断层东端分叉处的形变信号阶跃表明发震断层几何结构的复杂性,与昆仑断裂在东端形成多条分支相似(Li et al., 2011; Ceylan et al., 2012).横贯同震形变场的剖面 BB' 在断层两侧信号突变,表明发震断层破裂至地表.图 3g,h 所示为 Sentinel-1 震后 4.5 个月升降轨震后形变场,升降轨形变信号相反表明震后形变依然以走滑运动为主.

图 4 和图 5 为震后降轨、升轨时序形变场,震后形变主要分布在断层两侧近场区域,在远场震后形变量级较小.早期震后形变主要分布在四个区域,区域 2 位于震中西侧同震形变量级较小的区域,在震后阶段呈现明显的震后形变,震后 4.5 个月断层两侧累积形变量达 5 cm.在同震破裂西侧延伸区域(区域 1)震后最大形变量约为 3 cm.而同震时破裂至地表且同震位移最大区域(区域 3)存在明显震后

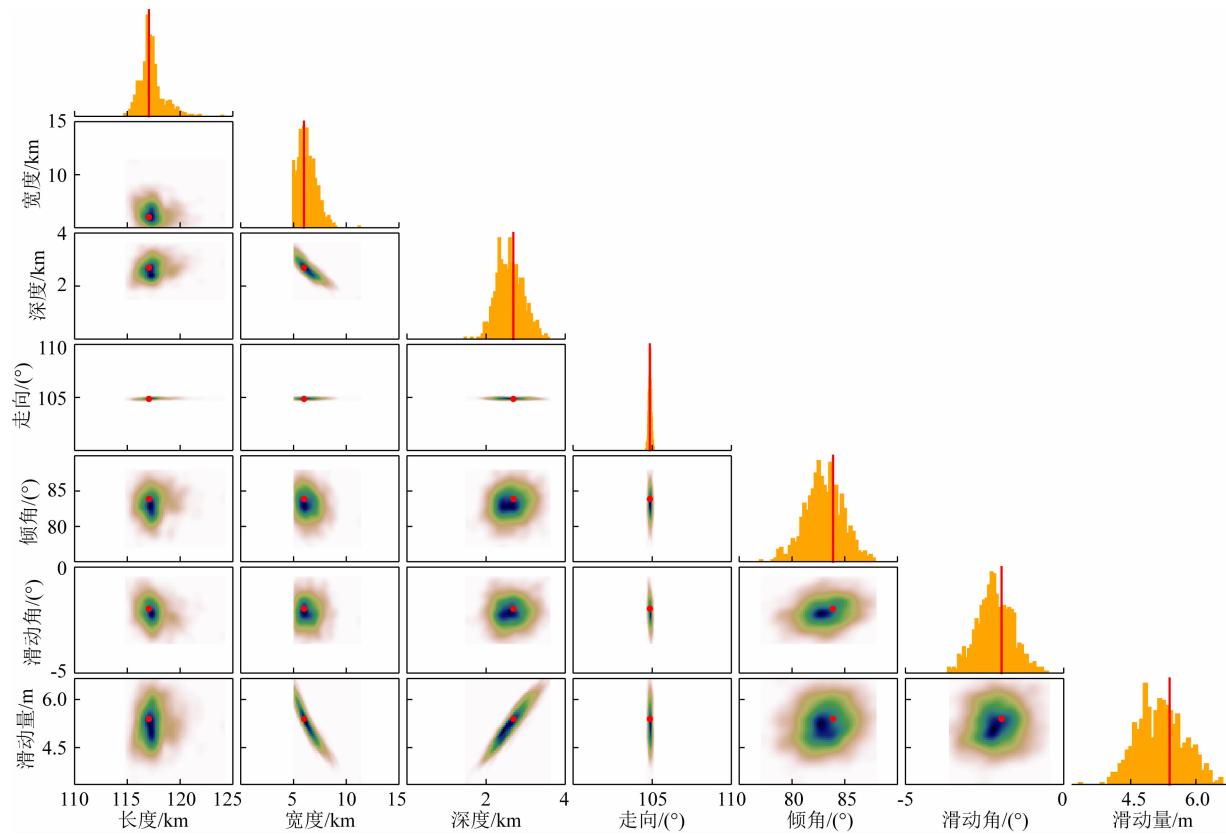


图2 断层几何参数的一维和二维后验概率密度分布图

Fig. 2 1-D and 2-D posterior probability density plots of the fault geometry parameters

形变,最大LOS向形变量达5 cm。总体上,震后形变主要分布在同震形变较小的区域,而区域3震后形变与同震形变区域重叠,表明地震周期内能量释放的连续性和复杂性。

2.2 同震滑动分布

基于非线性和线性反演,得到了玛多地震发震断层的精确几何结构。在非线性反演得到的最优主破裂段几何约束下,断层1最优倾角为北倾75°(图6a),分开搜索结果显示东端分叉处断层3最优倾角为81°(图6b),断层4最优倾角为84°(图6c),两段都为南倾。断层3和断层4联合反演结果(图6d)与单独搜索结果相同,确保了断层倾角搜索结果的准确性。断层1和断层2北倾,断层3和断层4南倾,而震后短期余震分布也呈现在断层中西侧位于发震断层北侧,而在东端分段处位于断层南侧。余震的空间分布特征验证了发震断层的几何特征。

图6e为玛多地震同震滑动分布,整体呈现长条状分布在上地壳浅部。同震滑动分布破裂至地表且主要分为四个区域:断层2中东部和中西部的浅部滑动;断层1和断层3的浅部滑动。最大同震滑动量约为4 m位于断层2中东部,平均滑动角为5°,同震

滑动分布整体呈现左旋走滑运动。模拟残差图如图7所示,较大的残差值主要分布在断层近场相干性较差的区域。假设剪切模量为30 GPa,玛多地震同震释放能量为 $\sim 1.4446 \times 10^{20}$ Nm,等同于矩震级 $M_w 7.37$,与Global Centroid-Moment-Tensor (GCMT)和USGS一致。

同震滑动分布在上地壳浅部不连续并存在多个滑动亏损区域,一处位于断层2的两个主要同震滑动区域之间,以及东端同震滑动未破裂至地表区域。同震滑动分布周围未破裂以及滑动亏损区域通常为速度强化体或者同震时应力未达到破裂阈值的速度弱化体(Yamanaka and Kikuchi, 2004; Miyazaki et al., 2004)。因此,滑动亏损区域以及未破裂区域在震后阶段的活动特征对于区分它们的物理属性具有重要意义。

采用Jackknife重采样技术(Melgar et al., 2015)来评估断层滑动模型的稳定性。随机从数据集中采取50%的数据进行反演,一次反演完成后,将数据放回数据集再重新随机抽取50%数据进行反演,如此重复进行50次并计算每个断层块的标准差。图8a所示为同震滑动分布的子断层标准差,最大标准差大约为0.2 m,位于同震最大滑动处,约占

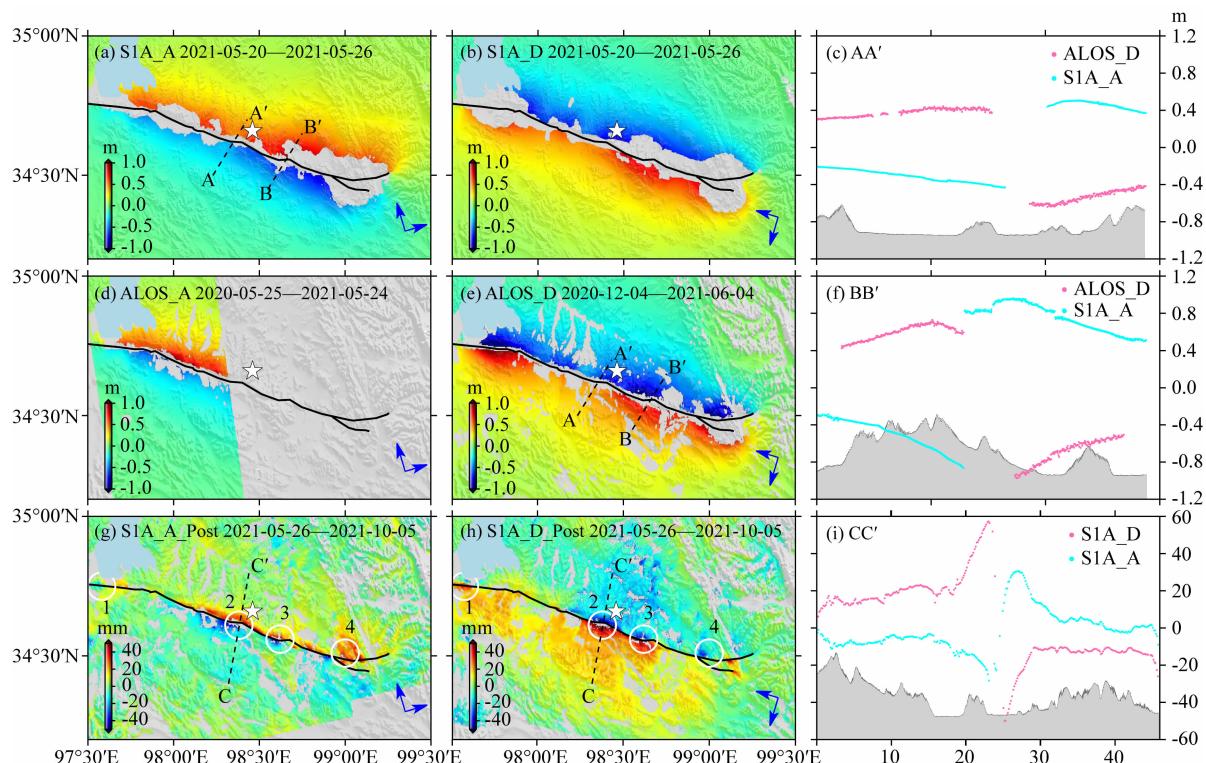


图 3 玛多地震同震和震后形变场

(a), (b), (d), (e) 分别表示 Sentinel-1 升轨、Sentinel-1 降轨、ALOS-2 升轨、ALOS-2 降轨同震形变场, 虚线 AA'、BB' 表示剖面位置, 白色五角星表示震中位置; (c), (f), (i) 表示地表位移剖面; (g) 和 (h) 分别表示 Sentinel-1 升轨和降轨震后形变场, 白色空心圆圈表示复杂形变特征区域.

Fig. 3 The coseismic and postseismic deformation of the Madoi earthquake

(a), (b), (d), (e) represent the coseismic deformation field of the Sentinel-1 ascending orbit, Sentinel-1 descending orbit, ALOS2 ascending orbit, ALOS2 descending orbit respectively, the dashed-lines AA', BB' represent the location of the profiles, the white star represents the epicenter; (c), (f), (i) are the profiles of the surface displacement; (g), (h) represent the postseismic deformation field of the Sentinel-1 ascending orbit, Sentinel-1 descending orbit respectively, the white circles mark the locations with complex deformation characteristics.

同震滑动量级的 4%, 表明了数据与模型的强依赖关系.

2.3 震后滑动分布

震后滑动分布采用的升降轨影像对为 2021-05-26—2021-10-05, 升降轨震后模拟数据都能较好的拟合观测数据(图 9). 震后余滑分布在多个区域(图 6f), 在上地壳浅部, 余滑整体分布在同震滑动亏损区域内, 最大滑动量约为 20 cm. 在中下地壳存在 30 km × 10 km 的深部余滑, 震后 4.5 个月累积余滑量约为 14 cm. 最大余滑位于断层 2 两个主要同震滑动区域之间的滑动亏损区域内. 而多个余滑区域显示较大的同震滑动区域在震后阶段持续滑动. 在发震断层东端和西端延伸区域, 余滑分布在断层 14~15 km 深度范围内, 在断层 3 表现为深部余滑. 早期震后余滑释放能量约为 5.0417×10^{18} Nm, 等同于矩震级 $M_w 6.4$, 震后短期内的快速余滑是同震应力扰动释

放的主要方式. Heki 和 Tamura(1997)发现震后 24 h 内的余滑约占同震滑动的 30%, 多项研究也表明短期余滑在整个震后周期内占据较大比重(Kim and Dreger, 2008; Yano et al., 2014; Liu and Xu, 2019; Ragon et al., 2019). 震后第一景影像距离同震发生时间为震后 4 天, 缺失了短期内的震后形变, 因此我们得到的震后矩震级低于实际量级.

采用相同的方法来评估震后数据与模型的匹配度, 图 8b 所示为震后滑动分布的子断层的均方根误差, 较大的均方根误差主要分布在断层浅部震后余滑较小的区域, 整体均方根误差 ~1 cm, 表明了震后数据与模型的强依赖关系.

2.4 余滑空间分布揭示的摩擦性质

震后余滑一般分布在同震滑动区域周围, 在同震阶段未发生破裂的障碍体上, 以及沿发震断层走向和倾向延伸的区域(孙权等, 2022). 余滑一般分布

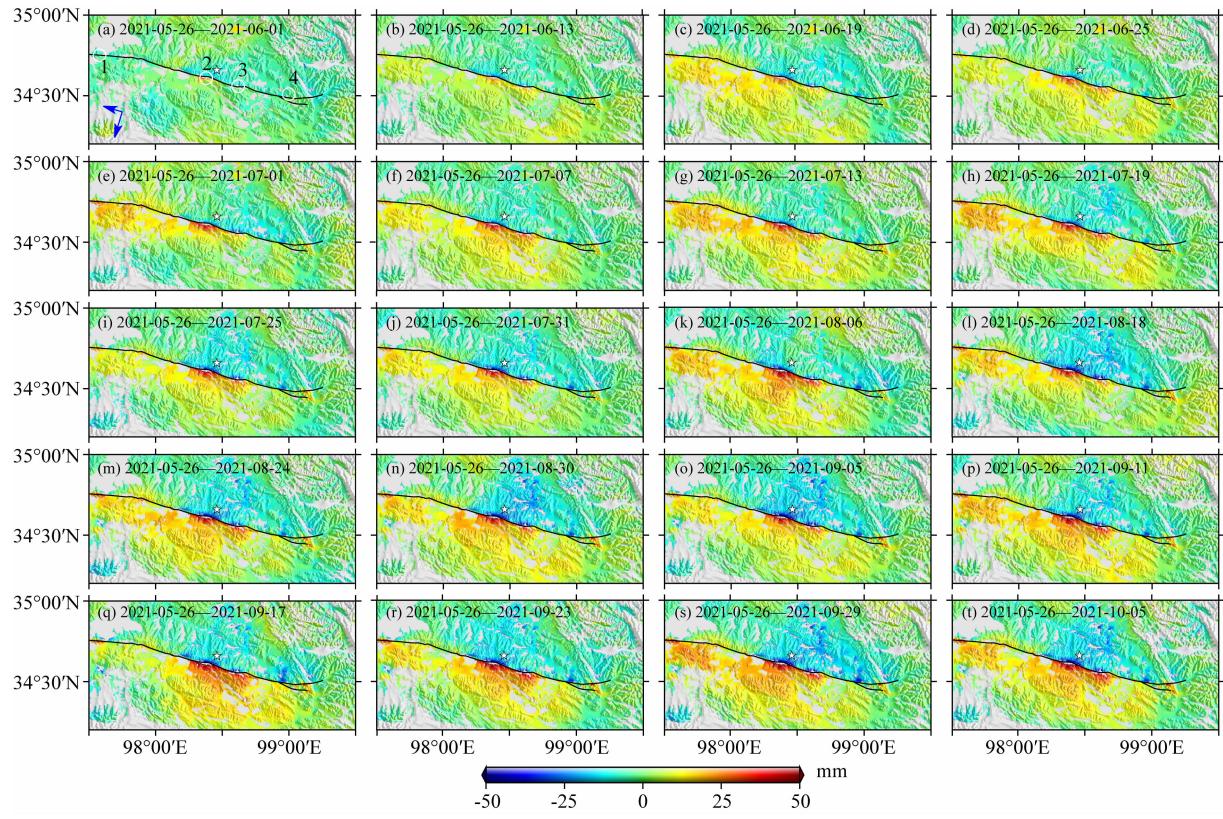


图4 玛多地震 Sentinel-1 降轨震后时序形变场

Fig. 4 Time-series of postseismic deformation after the 2021 Madoi earthquake in Sentinel-1 descending orbit

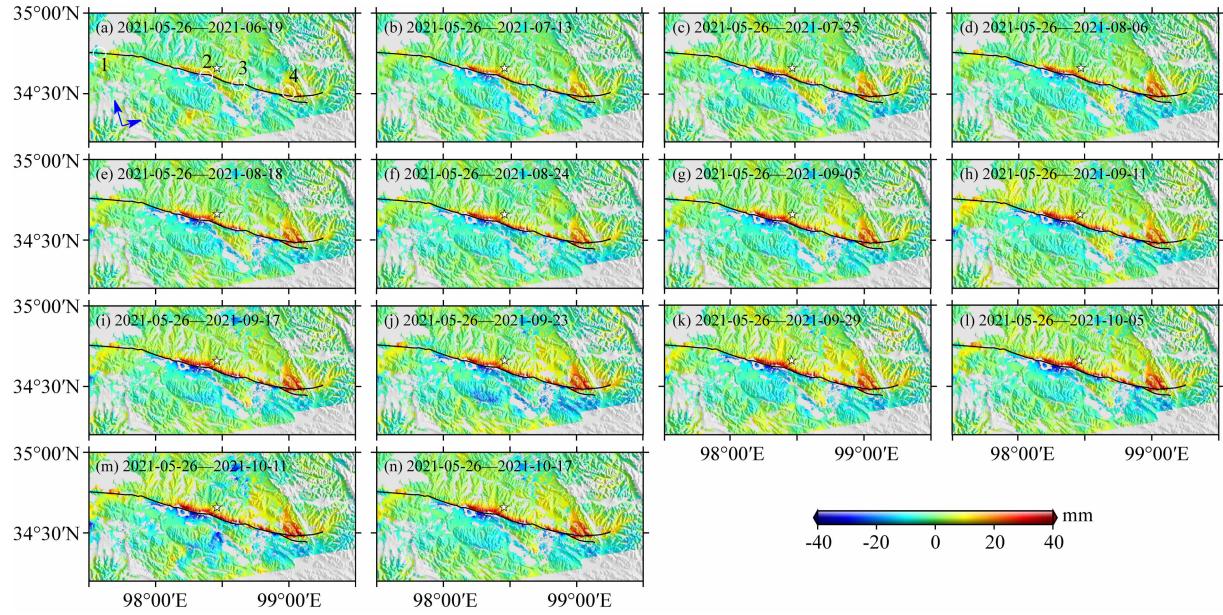


图5 玛多地震 Sentinel-1 升轨震后时序形变场

Fig. 5 Time-series of postseismic deformation after the 2021 Madoi earthquake in Sentinel-1 ascending orbit

在同震库仑应力加载区域内(Dogan et al., 2014; Wallace et al., 2018).运动学余滑通常被用来观测短期震后余滑的时空分布特征.本文使用 Coulomb 3.3 软件计算了玛多地震断层面上的同震库仑应力变化(图 8c),余滑整体分布在同震库仑应力加载区

域内.

为直观观察发震断层深浅部摩擦性质的差异性,我们计算了发震断层深浅部的摩擦参数(图 8d),基于震后观测数据得到震后时序滑动分布模型 $S(t) = A \times \ln(1 + t/\tau)$, 基于速率摩擦状态准则,可

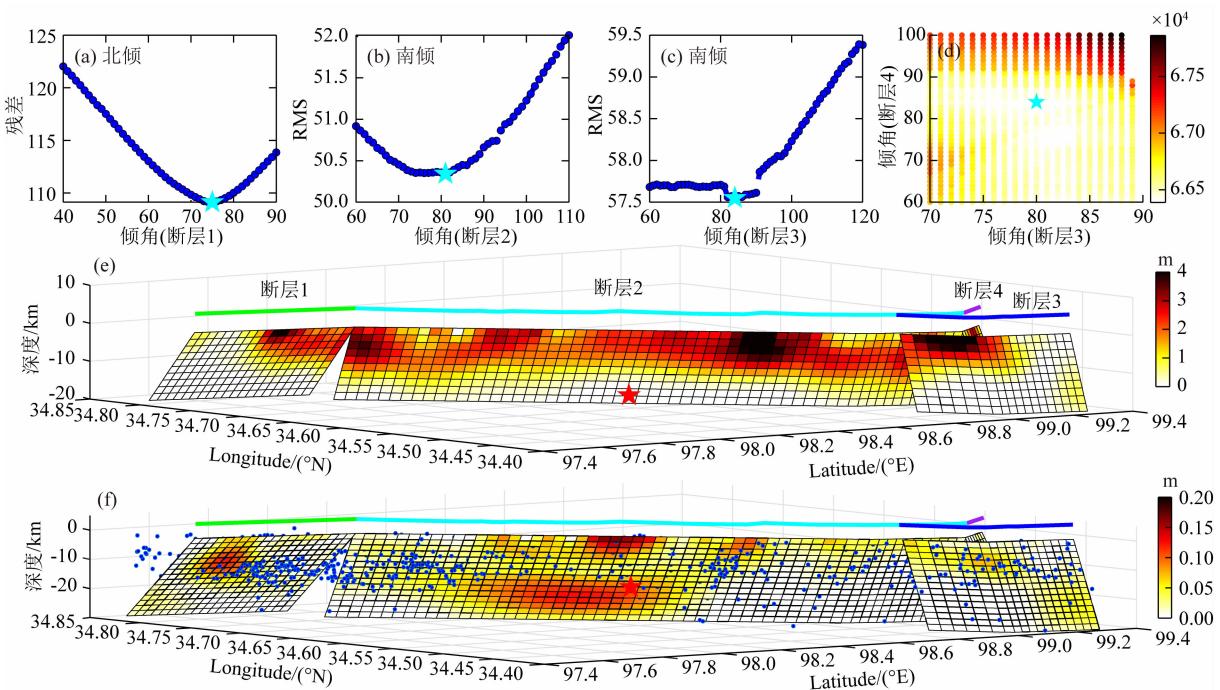


图 6 (a) 断层 1 最优倾角, 蓝绿色五角星表示最优值; (b) 断层 3 最优倾角; (c) 断层 4 最优倾角; (d) 断层 3 和断层 4 联合搜索最优倾角; (e) 玛多地震同震滑动分布; (f) 玛多地震震后滑动分布, 蓝色圆点表示精定位余震, 彩色直线表示断层地表迹线, 红色五角星代表震中

Fig. 6 (a) The optimal dip angle of Seg. 1, the cyan star represents the optimal value; (b) The optimal dip angle of Seg. 3; (c) The optimal dip angle of Seg. 4; (d) The optimal dip angle of jointly inversion of Seg. 3 and Seg. 4; (e) Coseismic slip distribution of the Madoi earthquake; (f) Postseismic slip distribution of the Madoi earthquake, the blue dots represent the aftershocks, the colored lines represent the rupture surface trace, the red star represents the epicenter

以等效为 $S(t) = \frac{\sigma(a-b)}{k} \times \ln\left(1 + \frac{kv}{\sigma(a-b)}t\right)$. 因此 $a-b=Ak/\sigma$, σ 为有效正应力, $a-b$ 为摩擦参数, v 表示震后形变. 假设流体压力为 0, 有效正应力可以表示为 $\sigma = \rho gh \times \cos d$, 其中 ρ 表示地壳岩石密度, 文中统一采用 $\rho=2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $g=9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, h 和 d 分别表示不同子断层的深度和倾角. k 表示地壳刚度, 可以通过 $k=G/H$ 得到. 本文统一采用剪切模量 $G=10 \text{ GPa}$, H 表示速度强化区的厚度, 根据震后滑动分布, 将发震断层浅部和深部的速度强化区域的厚度都设为 6 km. 基于以上假设获得的每一个震后累积滑动量大于 0.05 m 的子断层的摩擦参数 $a-b$ 如图 8d 所示, 深部和浅部摩擦参数 $a-b$ 的值整体位于 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 范围内, 浅部局部区域位于 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 范围内. 浅部摩擦参数比深部更大, 可以直观地反映震后余滑在浅部弹性层震后的快速余滑, 而在深部较小的摩擦参数揭示了深部黏塑性体震后近线性衰减的特征.

同震滑动区域是速度弱化体成核区域, 余滑一般围绕同震滑动区域分布, 主要位于周边的速度强

化体区域. 前面所提及的, 上地壳浅部震后余滑部分位于同震滑动量值最大区域. Yabe 和 Ida(2018)通过摩擦属性非均匀分布的断层面模拟实验表明, 如果同震阶段断层未能充分释放积累的能量, 残余应力会在震后阶段以余滑和余震的方式进行释放. 地下介质在空间分布上是非均匀的, 同震破裂时快速的滑动可以有效的穿过局部的速度强化体. 此外, 断裂带的摩擦属性在地震周期中也会发生变化, 当摩擦属性沿断层发生变化并且同时存在速度弱化体和速度强化体, 这些断层区域会同时参与同震和震后滑动. 综上, 我们认为上地壳浅部同震和震后滑动重叠区域主要是由于残余应力的释放驱动了震后余滑在这些区域的滑动. 相似的震后余滑位于同震滑动区域在很多地震事件中可以观测到(Diao et al., 2014; Iinuma et al., 2016; Liu and Xu, 2019). 震后余滑的传播也会对断层面的应力加载产生影响, 进而引发余震的发生. 余震与余滑在空间上形成很好的互补关系, 基本填充了同震库仑应力加载区域. 位于深部中下地壳的滑动分布, 震后呈现线性滑动状态(图 10b), 其中包含了下地壳黏塑性形变机制

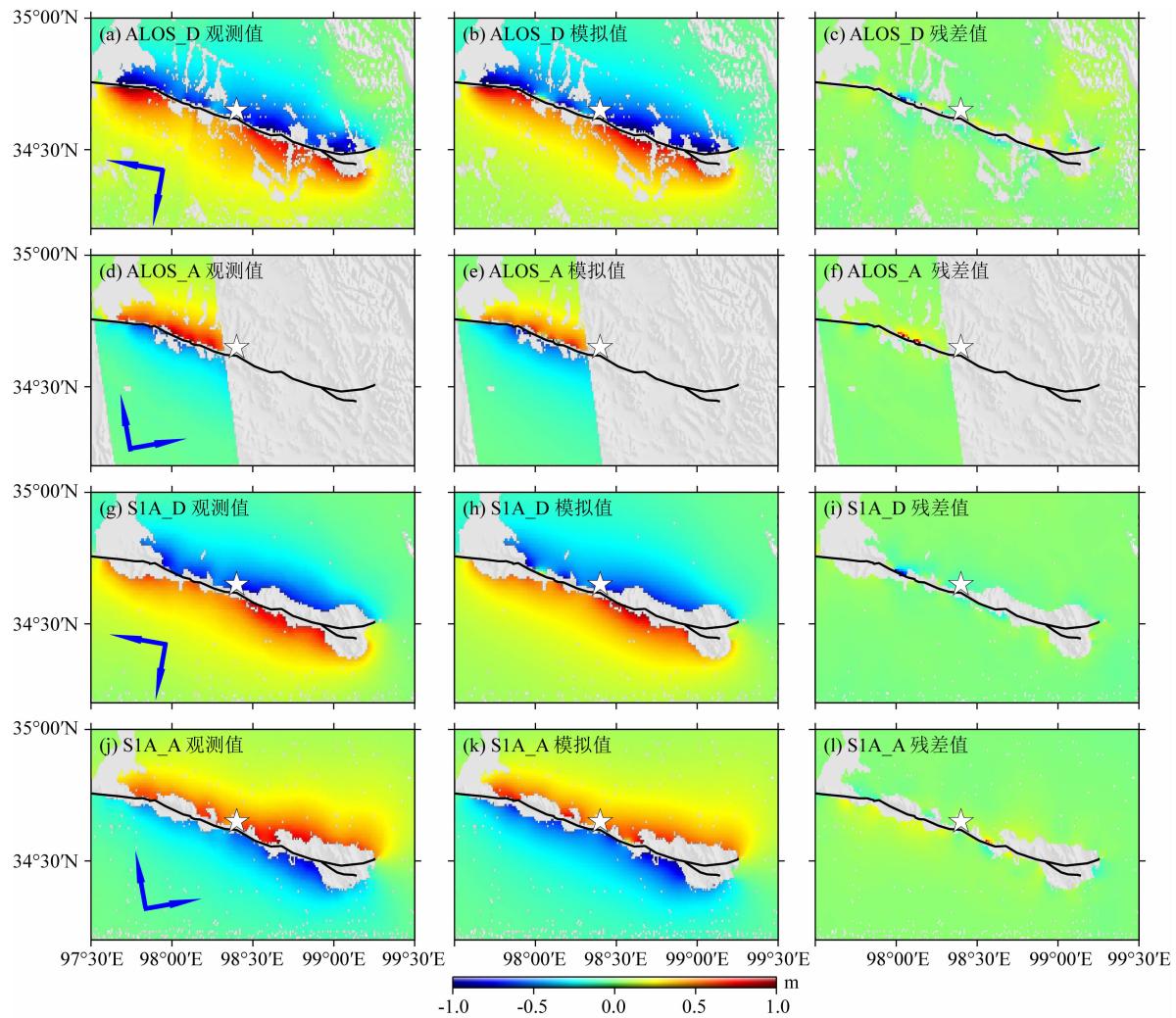


图 7 玛多地震同震形变场

(a)(d)(g)(j)分别为ALOS2降轨、ALOS2升轨、Sentinel-1降轨、Sentinel-1升轨观测值，
(b)(e)(h)(k)相应的模拟值，(c)(f)(i)(l)相应的残差值，白色五角星代表震中。

Fig. 7 Coseismic deformation field of the Madoi earthquake

(a), (d), (g), (j) ALOS2 descending, ALOS2 ascending, Sentinel-1 descending and Sentinel-1 ascending data, respectively; (b), (e), (h), (k) The corresponding modeled data; (c), (f), (i), (l) The corresponding residuals, white star represents the epicenter.

黏弹性松弛的影响,可能意味着中下地壳较为软弱的物质层的存在,因此之后的研究中应重点关注震后远场区域应力驱动余滑和黏弹性松弛的折衷关系,分析青藏高原东北部下地壳和上地幔的流变性。

2.5 震后余滑的时空分布

时序震后余滑模型显示余滑量级随时间逐渐增加。基于震后滑动分布计算的震后时序地震矩(图10b)显示,上地壳浅部余滑在2~8 km深度范围内快速衰减,震后3个月后趋于稳定。归一化的同震和震后滑动分布显示(图10a),震后滑动分布在同震滑动量较小的区域,两者在空间上形成良好的互补关系。Gualandi等(2014)表明长期的余滑位于距离同震破裂较远的区域。实验室模拟实验也表明浅部

和深部余滑速率不同,有效正应力是与深度相关的,深部余滑速率小于浅部余滑(Ariyoshi et al., 2007)。这表明同震库仑应力扰动触发了上地壳浅部的速度强化体产生快速余滑,深部余滑随着距离同震破裂区域的距离增加趋于稳定滑动。对于大地震,余滑可以持续几年到几十年(Barbot et al., 2009),浅部余滑在震后4.5个月基本释放,深部将是未来主要余滑区域。

3 结论

本文基于ALOS-2和Sentinel-1同震形变场反演获得了玛多地震主破裂段断层几何参数,并确定了发震断层在西端和东端分叉段的倾角。同震滑动

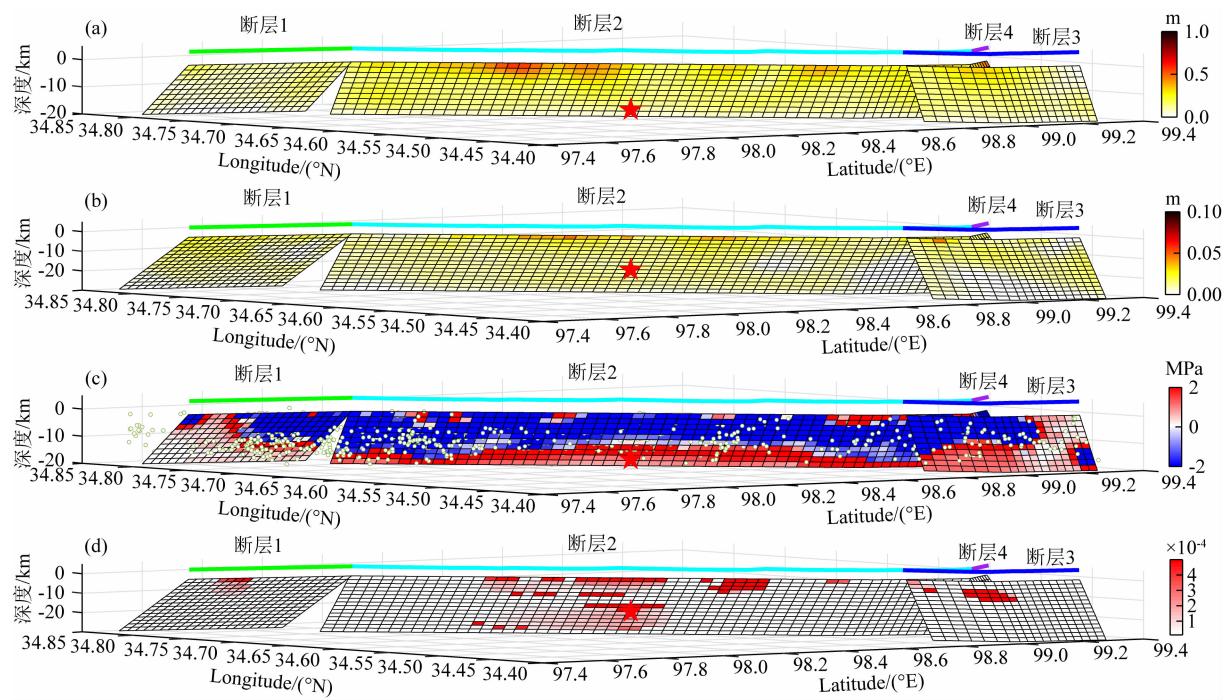


图 8 (a) 同震滑动分布模型不确定度,彩色直线表示断层地表迹线,红色五角星代表震中; (b) 震后早期余滑分布模型不确定度; (c) 同震静态库仑应力变化; (d) 发震断层速率状态摩擦参数 $a-b$

Fig. 8 (a) Model coseismic slip parameter uncertainties, the colored lines represent the rupture surface trace, the red star represents the epicenter; (b) Model early afterslip parameter uncertainties; (c) Coseismic static Coulomb stress change; (d) The calculated rate and state friction parameter $a-b$ of the seismogenic fault

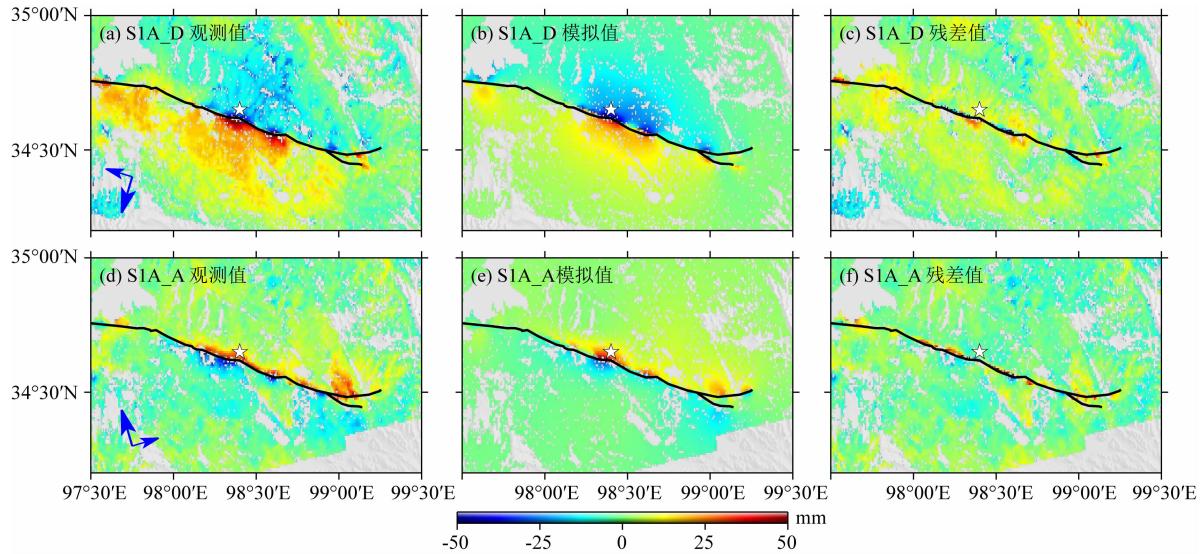


图 9 玛多地震震后形变场

(a)(d) 分别为 Sentinel-1 降轨、升轨观测值; (b)(e) 相应的模拟值; (c)(f) 相应的残差值,白色五角星代表震中.

Fig. 9 Postseismic deformation field of the Madoi earthquake

(a) (d) represent Sentinel-1 descending and ascending data, respectively; (b) (e) The corresponding modeled data;

(c) (f) The corresponding residuals, white star represents the epicenter.

模型显示断层位错主要发生在上地壳浅部并且破裂至地表,最大滑动量为 4 m,位于 2 km 深处. 利用 N-SBAS 技术获得震后 4.5 个月升降轨时序震后形变场,最大震后形变量近场约为 5 cm,远场约为 2

cm,上地壳浅部最大余滑量约为 20 cm. 震后余滑在上地壳浅部分布在多个区域,且在深部存在长条状余滑. 时空分布的震后余滑表明上倾角和下倾角区域不同的摩擦属性,上地壳浅部在震后阶段快速余

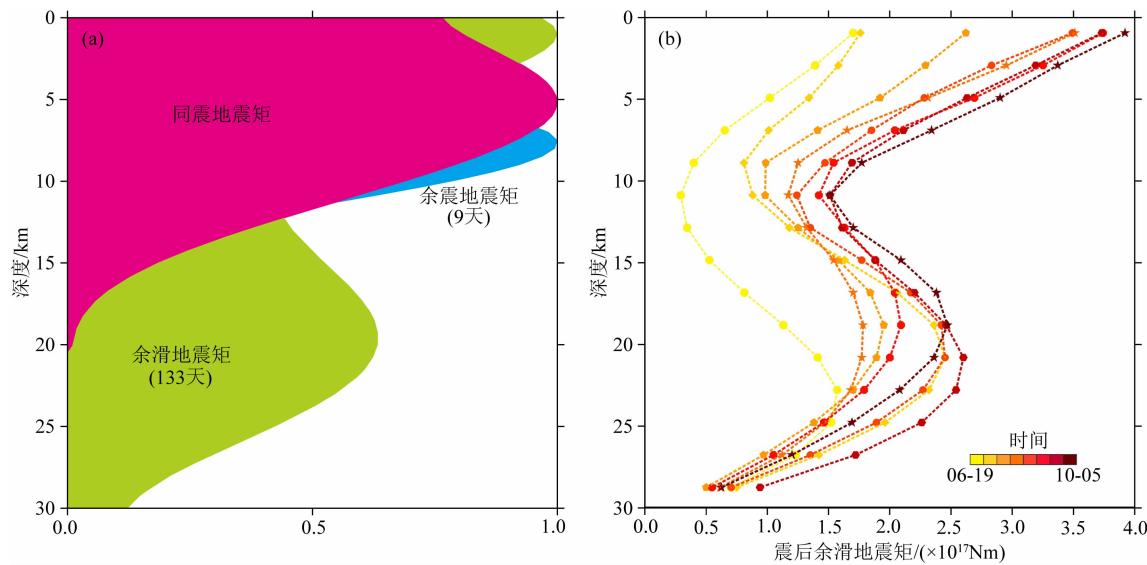


图 10 (a) 同震、震后早期余滑和余震归一化累积地震矩随深度变化;

Fig. 10 (a) The normalized accumulated seismic moment of coseismic, early afterslip and aftershocks with depth;

(b) Temporal evolution of early afterslip seismic moment with depth

滑,而深部余滑可能持续更长时间。

致谢 感谢 European Space Agency (ESA) 提供的免费 Sentinel-1 雷达影像数据,日本 Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA) 提供的 ALOS-2 雷达影像数据(ER3A2N521). 本文所有图片采用 GMT 和 MATLAB 绘制。

References

- Ariyoshi K, Matsuzawa T, Hasegawa A. 2007. The key frictional parameters controlling spatial variations in the speed of postseismic-slip propagation on a subduction plate boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(1-2): 136-146.
- Barbot S, Fialko Y, Bock Y. 2009. Postseismic deformation due to the M_w6.0 2004 Parkfield earthquake: Stress-driven creep on a fault with spatially variable rate-and-state friction parameters. *Journal of Geophysical Research*, 114(B7), B07405, doi: 10.1029/2008jb005748.
- Ceylan S, Ni J, Chen J Y, et al. 2012. Fragmented Indian plate and vertically coherent deformation beneath eastern Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 117(B11): B11303, doi: 10.1029/2012JB009210.
- Diao F Q, Xiong X, Wang R J, et al. 2014. Overlapping post-seismic deformation processes: Afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 M_w9.0 Tohoku (Japan) earthquake. *Geophysical Journal International*, 196(1): 218-229.
- Dogan U, Demir D Ö, Çakir Z, et al. 2014. Postseismic deformation following the M_w7.2, 23 October 2011 Van earthquake (Turkey): Evidence for aseismic fault reactivation. *Geophysical Research Letters*, 41(7): 2334-2341.
- Goldstein R M, Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25: 4035-4038.
- Gualandi A, Serpelloni E, Belardinelli M E. 2014. Space-time evolution of crustal deformation related to the M_w6.3, 2009 L'Aquila earthquake (central Italy) from principal component analysis inversion of GPS position time-series. *Geophysical Journal International*, 197(1): 174-191.
- He K F, Wen Y M, Xu C J, et al. 2022. Fault geometry and slip distribution of the 2021 M_w7.4 Maduo, China, Earthquake inferred from InSAR measurements and relocated aftershocks. *Seismological Research Letters*, 93(1): 8-20.
- He L J, Feng G C, Wu X X, et al. 2021. Coseismic and early postseismic slip models of the 2021 M_w7.4 Maduo earthquake (western China) estimated by space based geodetic data. *Geophysical Research Letters*, 48(24): e2021GL095860.
- He P C, Wang M, Wang Q, et al. 2018. Rheological structure of lithosphere in northern Tibet inferred from postseismic deformation modeling of the 2001 M_w7.8 Kokoxili earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(2): 531-544, doi: 10.6038/cjg2018L0189.
- Heki K, Tamura Y. 1997. Short term afterslip in the 1994 Sanriku-Haruka-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 24(24): 3285-3288.
- Huang Y, Yang S M, Zhao B, et al. 2013. The coseismic displacements of the 2013 Lushan M_w6.6 earthquake determined using continuous global positioning system measurements. *Geodesy and Geodynamics*, 4(2): 6-10.
- Inuma T, Hino R, Uchida N, et al. 2016. Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake. *Nature Communications*, 7(1): 13506, doi: 10.1038/ncomms13506.
- Ji L Y, Liu C J, Xu J, et al. 2017. InSAR observation and inversion

- of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou $M_{\text{S}}7.0$ earthquake in China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 4069-4082, doi: 10.6038/cjg20171032.
- Jiang W P, Xu C J, Li Z W, et al. 2022. Using space observation techniques to study temporal and spatial characteristics of seismogenic process, occurrence and deformation of the Qinghai Maduo $M_{\text{w}}7.4$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(2): 495-508, doi: 10.6038/cjg2022P0732.
- Jin Z, Fialko Y. 2021. Coseismic and early postseismic deformation due to the 2021 $M7.4$ Maduo (China) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 48(21): e2021GL095213, doi: 10.1029/2021GL095213.
- Kim A, Dreger D S. 2008. Rupture process of the 2004 Parkfield earthquake from near-fault seismic waveform and geodetic records. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B7): B07308, doi: 10.1029/2007JB005115.
- Klinger Y, Xu X W, Tappouner P, et al. 2005. High-resolution satellite imagery mapping of the surface rupture and slip distribution of the $M_{\text{w}}7.8$, 14 November 2001 Kokoxili earthquake, Kunlun fault, northern Tibet, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(5): 1970-1987.
- Li C X, Xu X W, Wen X Z, et al. 2011. Rupture segmentation and slip partitioning of the mid-eastern part of the Kunlun Fault, north Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 54(11): 1730-1745.
- Li S W, Xu W B, Li Z W. 2022. Review of the SBAS InSAR time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics*, 13(2): 114-126.
- Liu J H, Hu J, Li Z W, et al. 2022. Complete three-dimensional coseismic displacements due to the 2021 Maduo earthquake in Qinghai Province, China from Sentinel-1 and ALOS-2 SAR images. *Science China Earth Sciences*, 65(4): 687-697, doi: 10.1007/s11430-021-9868-9.
- Liu X G, Xu W B. 2019. Logarithmic model joint inversion method for coseismic and postseismic slip: Application to the 2017 $M_{\text{w}}7.3$ Sarpol Zahab earthquake, Iran. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(11): 12034-12052.
- Liu Y H, Wang C S, Shan X J, et al. 2014. Result of SAR differential interferometry for the co-seismic deformation and source parameter of the $M_{\text{S}}7.0$ Lushan Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(8): 2495-2506, doi: 10.6038/cjg20140811.
- Melgar D, Geng J H, Crowell B W, et al. 2015. Seismogeodesy of the 2014 $M_{\text{w}}6.1$ Napa earthquake, California: Rapid response and modeling of fast rupture on a dipping strike-slip fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(7): 5013-5033.
- Miyazaki S, Segall P, Fukuda J, et al. 2004. Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachioki earthquake: Implications for variations in fault zone frictional properties. *Geophysical Research Letters*, 31(6): L06623, doi: 10.1029/2003GL019410.
- Morishita Y. 2021. Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1): 1-23.
- 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. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 95(6): 1655-1670.
- Ragon T, Sladen A, Bletery Q, et al. 2019. Joint inversion of coseismic and early postseismic slip to optimize the information content in geodetic data: Application to the 2009 $M_{\text{w}}6.3$ L'Aquila earthquake, Central Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(10): 10522-10543.
- Sun Q, Pei S P, Guo Z, et al. 2022. Structure-controlled asperity on the generation of large earthquakes. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics* (in Chinese), 53(2): 138-147. doi: 10.19975/j.dqyx.2021-051.
- Vasyura-Bathke H, Dettmer J, Steinberg A, et al. 2020. The Bayesian earthquake analysis tool. *Seismological Research Letters*, 91(2A): 1003-1018.
- Wallace L M, Hreinsdóttir S, Ellis S, et al. 2018. Triggered slow slip and afterslip on the southern Hikurangi subduction zone following the Kaikoura earthquake. *Geophysical Research Letters*, 45(10): 4710-4718.
- Wang D J, Wang D Z, Zhao B, et al. 2022. 2021 Qinghai Maduo $M_{\text{w}}7.4$ earthquake coseismic deformation field and fault-slip distribution using GNSS observations. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(2): 537-551, doi: 10.6038/cjg2022P0568.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774, doi: 10.1029/2019JB018774.
- Wang R J, Parolai S, Ge M R, et al. 2013. The 2011 $M_{\text{w}}9.0$ Tohoku earthquake: Comparison of GPS and strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2B): 1336-1347.
- 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. *Science China Earth Sciences*, 64(8): 1371-1380, doi: 10.1007/s11430-021-9803-3.
- Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. 2008. Rupture process of the $M_{\text{S}}8.0$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(5): 1403-1410.
- Wang Y B, Li Y, Cai Y, et al. 2022. Coseismic displacement and slip distribution of the 2021 May 22, $M_{\text{S}}7.4$ Madoi earthquake derived from GNSS observations. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(2): 523-536, doi: 10.6038/cjg2022P0436.
- Xu C J, Liu Y, Wen Y M, et al. 2010. Coseismic slip distribution of the 2008 $M_{\text{w}}7.9$ Wenchuan earthquake from joint inversion of GPS and InSAR data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2736-2749.
- Yabe S, Ide S. 2018. Why do aftershocks occur within the rupture area of a large earthquake?. *Geophysical Research Letters*, 45(10): 4780-4787.
- Yamanaka Y, Kikuchi M. 2004. Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B7):

- B07307, doi: 10.1029/2003JB002683.
- Yano T E, Shao G F, Liu Q M, et al. 2014. Coseismic and potential early afterslip distribution of the 2009 M_w 6.3 L'Aquila, Italy earthquake. *Geophysical Journal International*, 199(1): 23-40.
- Yu P F, Xiong W, Chen W, et al. 2022. Slip model of the 2021 M_s 7.4 Madoi earthquake constrained by GNSS and InSAR coseismic deformation. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(2): 509-522, doi: 10.6038/cjg2022P0540.
- Zhao D Z, Qu C Y, Shan X J, et al. 2018. InSAR and GPS derived coseismic deformation and fault model of the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake in the Northeast Bayanhar block. *Tectonophysics*, 726: 86-99.
- Zhao D Z, Qu C Y, Chen H, et al. 2021. Tectonic and geometric control on fault kinematics of the 2021 M_w 7.3 Maduo (China) earthquake inferred from interseismic, coseismic, and postseismic InSAR observations. *Geophysical Research Letters*, 48(18): e2021GL095417, doi: 10.1029/2021GL095417.
- Zhu A Y, Wang Y Z, Li Y H, et al. 2021. Numerical simulation on the mechanism of the Madoi, Qinghai M_s 7.4 earthquake constrained by InSAR deformation. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(12): 4548-4561, doi: 10.6038/cjg2021P0452.
- 6038/cjg20171032.
- 姜卫平, 许才军, 李志伟等. 2022. 利用空间观测技术研究青海玛多7.4级地震孕育发生变形时空特征. 地球物理学报, 65(2): 495-508, doi: 10.6038/cjg2022P0732.
- 刘云华, 汪驰升, 单新建等. 2014. 芦山 M_s 7.0级地震InSAR形变观测及震源参数反演. 地球物理学报, 57(8): 2495-2506, doi: 10.6038/cjg20140811.
- 潘家伟, 白明坤, 李超等. 2021. 2021年5月22日青海玛多 M_s 7.4地震地表破裂带及发震构造. 地质学报, 95(6): 1655-1670.
- 孙权, 裴顺平, 郭震等. 2022. 结构控制的凹凸体对大地震孕育的重要作用. 地球与行星物理论评, 53(2): 138-147. doi: 10.19975/j.dqyxx.2021-051.
- 王迪晋, 王东振, 赵斌等. 2022. 2021年青海玛多 M_w 7.4地震GNSS同震形变场及其断层滑动分布. 地球物理学报, 65(2): 537-551, doi: 10.6038/cjg2022P0568.
- 王未来, 房立华, 吴建平等. 2021. 2021年青海玛多 M_s 7.4地震序列精定位研究. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1193-1202, doi: 10.1360/SSTe-2021-0149.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟等. 2008. 四川汶川8.0级地震震源过程. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1403-1410.
- 王阅兵, 李瑜, 蔡毅等. 2022. GNSS观测的2021年5月22日玛多 M_s 7.4地震同震位移及其约束反演的滑动破裂分布. 地球物理学报, 65(2): 523-536, doi: 10.6038/cjg2022P0436.
- 余鹏飞, 熊维, 陈威等. 2022. 基于GNSS和InSAR约束的2021年玛多 M_s 7.4地震同震滑动分布及应用. 地球物理学报, 65(2): 509-522, doi: 10.6038/cjg2022P0540.
- 祝爱玉, 王永哲, 李永华等. 2021. 基于InSAR地表形变约束的玛多 M_s 7.4地震孕育发生机理数值模拟研究. 地球物理学报, 64(12): 4548-4561, doi: 10.6038/cjg2021P0452.

(本文编辑 何燕)