

王守文,季灵运,朱良玉,等.基于InSAR技术监测2021年青海玛多 M_w 7.4级地震同震形变场与断层滑动[J].地球科学与环境学报,2022,44(6):1016-1026.

WANG Shou-wen,JI Ling-yun,ZHU Liang-yu,et al.Co-seismic Deformation Field and Fault Slip Distribution of the 2021 Maduo M_w 7.4 Earthquake in Qinghai,China Based on InSAR Technology[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2022,44(6):1016-1026.

DOI:10.19814/j.jese.2022.04017

·纪念刘国昌先生诞辰110周年专辑·

基于InSAR技术监测2021年青海玛多 M_w 7.4级地震同震形变场与断层滑动

王守文¹,季灵运^{1,2*},朱良玉²,刘传金²

(1. 长安大学地质工程与测绘学院,陕西西安 710054; 2. 中国地震局第二监测中心,陕西西安 710054)

摘要:2021年5月22日青海省玛多县发生 M_w 7.4级地震。为研究玛多 M_w 7.4级地震的同震形变、滑动分布及同震引起的静态库仑应力变化和影响,选取Sentinel-1 A/B升、降轨SAR卫星影像数据,采用D-InSAR技术获取玛多 M_w 7.4级地震同震形变场;基于梯度下降法(SDM),联合GPS和InSAR同震形变数据,共同约束反演同震滑动分布。结果表明:玛多 M_w 7.4级地震影响范围广,产生了长约170 km的地表破裂;地震造成地表雷达视线向最大形变量约为1.2 m,隆升和沉降最大相对位移量约为2.2 m;发震断层整体走向约 283° ,滑动角约 21° ,倾角约 77° ;断层错动以左旋走滑为主,主要集中在地下12 km深度以内,联合GPS和InSAR数据反演的同震最大滑动量约为3.76 m,同震错动破裂到地表,反演的矩震级为 M_w 7.42。结合同震引起的静态库仑应力结果和地震周围余震的空间分布特征认为:大部分余震发生在断层附近,并在东、西侧库仑应力增加区有少量余震发生;断层东侧和西侧存在一定的库仑应力积累,可能存在较高的地震危险性。

关键词:玛多 M_w 7.4级地震;大地测量;InSAR;同震形变;断层滑动;震源参数;联合反演

中图分类号:P315;P23

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2022)06-1016-11

Co-seismic Deformation Field and Fault Slip Distribution of the 2021 Maduo M_w 7.4 Earthquake in Qinghai, China Based on InSAR Technology

WANG Shou-wen¹, JI Ling-yun^{1,2*}, ZHU Liang-yu², LIU Chuan-jin²

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. The Second Monitoring and Application Center of China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: On May 22, 2021, the M_w 7.4 earthquake occurred in Maduo county of Qinghai province. In order to study the co-seismic deformation, slip distribution, static Coulomb stress changes and effects of Maduo M_w 7.4 earthquake, the image data of sentinel-1 A/B satellite's ascending and descending SAR were selected, and D-InSAR technology was used to obtain the co-

收稿日期:2022-04-11;修回日期:2022-06-27

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41904007)

作者简介:王守文(1998-),男,河南濮阳人,工学硕士研究生,E-mail:wshwenchd@163.com。

*通讯作者:季灵运(1982-),男,内蒙古赤峰人,中国地震局第二监测中心研究员,工学博士,E-mail:dinsar010@163.com。

seismic deformation field of Maduo M_w 7.4 earthquake. Based on the steepest decent method (SDM), combined with GPS and InSAR co-seismic deformation data, the inversion of the co-seismic sliding distribution was constrained jointly. The results show that the co-seismic deformation field caused by Maduo M_w 7.4 earthquake has a very wide range of effects, resulting in surface ruptures of 170 km in length; earthquakes cause the maximum 1.2 m of the LOS on the surface and the maximum relative displacement of 2.2 m for uplift and sedimentation; the overall average direction of Maduo M_w 7.4 earthquake fault is 283° , the average sliding angle is 21° , and the inclination angle is 77° ; fault slip is dominated by left-handed slippage, mainly concentrated within 12 km underground; the maximum sliding amount of joint GPS and InSAR co-seismic data inversion is 3.60 m; the inverted magnitude is approximately M_w 7.42; the causative fault ruptures the surface. Combined with the static Coulomb stress results caused by the same earthquake and the spatial distribution characteristics of the aftershocks around the earthquake, the results show that most of the aftershocks occur near faults, with a small number of aftershocks occurring in the east and west Coulomb stress-increasing zone. There is a certain amount of Coulomb stress accumulation on the east and west sides of the seismic fault, and there may be a high seismic risk.

Key words: Maduo M_w 7.4 earthquake; geodesy; InSAR; co-seismic deformation; fault slip; earthquake source parameter; joint inversion

0 引言

作为一种空间大地测量技术,InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)技术结合了合成孔径雷达成像和干涉测量技术的优势,利用在同一区域但不同时间内获取的两个 SAR 图像之间的相位差,用于构建数字高程模型(DEM)^[1]和测量时间间隔内发生的地面微小形变^[2],能够对地震、火山等灾害进行快速响应^[3]。InSAR 技术以其高分辨率、高精度、覆盖范围广等优势在地震的同震、震后时序和震源机制等研究中得到广泛应用。自 Massonnet 等首次利用 InSAR 技术应用于同震形变监测后^[4],以同震形变场为约束分析地震参数被广泛应用,如海地 M_w 7.0 级地震,智利 M_w 8.2 级地震,中国九寨沟 M_s 7.0 级、于田 M_s 6.4 级、汶川 M_s 8.0 级地震等^[5-8]。

北京时间 2021 年 5 月 22 日 2 时 4 分,青海省果洛藏族自治州玛多县(34.59°N , 98.34°E)发生 M_w 7.4 级地震(以下简称玛多 M_w 7.4 级地震),震源深度 17 km,震区人烟稀少,部分基础设施受到不同程度的损坏。潘家伟等通过野外调查,发现此次地震发震断层为 NW 向,破裂带主要沿江错断裂分布^[9-11];Chen 等分别使用 GNSS 和 InSAR 数据获取了此次地震的同震形变场,使用偏移量跟踪、三维建模等方法获取三维位移场^[12-13];李志才等采用基

于 GNSS 数据的非差 PPP 解算了同震形变场,并反演了断层参数和滑动分布^[14];华俊等使用 SAR 数据获取了此次地震的同震形变场,并进行了断层滑动分布的二维反演,对附近断裂的库仑应力进行了计算^[15];杨君妍等使用 3 个断层滑动模型及不同地球模型的地震位错理论分析了同震形变场,同时与 GNSS 和 InSAR 结果进行对比,并分析其动力学机制^[16];Li 等以同震形变场和 3 个断层为约束反演断层滑动分布,揭示了此次地震以左旋走滑运动为主^[17]。上述研究的发震断层分段各有不同,且较多为 InSAR 或 GPS 数据单独反演;在反演过程中,断层不同的分段情况和参数会对反演结果产生较大的影响,同时单独反演难以进行对比分析。基于此,本文利用 InSAR 技术获取同震形变场,结合 GPS 数据可以准确、快速获取地震同震形变场的特性,以 InSAR 和联合公开发表的 GPS 形变场为约束反演同震滑动分布,对发震区域进行了库仑应力计算,分析了同震引起的静态库仑应力变化,以期对周围区域不同断裂的研究以及玛多 M_w 7.4 级地震对周围地震危险性的影响和发震机理研究提供参考。

1 区域构造背景

巴颜喀拉块体位于青藏高原北部,是青藏高原非常活跃的构造区之一,也是近年来地震活动较强烈的块体^[18]。巴颜喀拉块体周围均被大型断裂带

环绕,如东、西边界的龙门山断裂带和阿尔金断裂带,南、北边界的玉树—甘孜断裂带和东昆仑断裂带^[19-20];块体内部也存在多条断裂,如昆仑山口—江错断裂等;同时,块体内还有部分次生断层。块体和内部诸多断裂的相互活动会导致块体周围和内部强震的频繁发生。近 30 年来,巴颜喀拉块体周围处于比较活跃的状态,块体边缘及内部频发强震,包括 2010 年玉树 M_s 7.1 级地震和 2017 年九寨沟 M_s 7.0 级地震等^[21-22]。

玛多 M_w 7.4 级地震发生在巴颜喀拉块体北部(图 1,由 GMT 软件绘制),是继 2001 年东昆仑 M_s 8.1 级地震和 2008 年汶川 M_s 8.0 级地震之后,围绕巴颜喀拉块体边界带最大的一次强震^[9]。震中区域靠近昆仑山口江错断裂,该断裂与块体内其他分支断裂呈现近 EW 向平行状态,同时震中区域临近玛多—甘德断裂带和东昆仑断裂带。从图 2 可以看出,玛多 M_w 7.4 级地震主震发生后,短时间内在周围又陆续发生了多次余震^[23],且余震以主震为中心,大部分分布在昆仑山口江错断裂;根据余震的空间分布特征,此次地震发震断层可能是昆仑山口江错断裂。本文选取图 1 中部分 GPS 台站数据与 InSAR 数据进行多源数据联合反演,并借此对江错断裂的动力学特征、地震灾害风险评估进行分析。

2 数据来源及分析方法

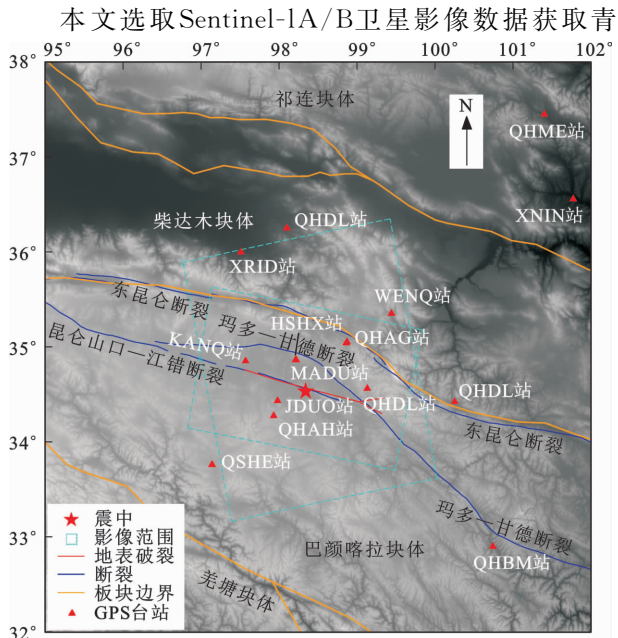


图 1 青海玛多 M_w 7.4 级地震区域构造背景

Fig. 1 Regional Geological Background of Maduo M_w 7.4 Earthquake in Qinghai

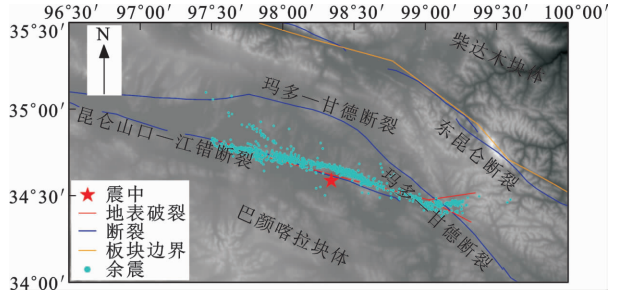


图 2 玛多 M_w 7.4 级地震周围余震分布

Fig. 2 Aftershocks Distributions Around Maduo M_w 7.4 Earthquake

海玛多 M_w 7.4 级地震同震形变场。该影像通过渐进地形扫描方式(Terrain Observation with Progressive Scans, TOPS)获取,为宽幅干涉模式(Interferometric Wide Swath, IW)。升、降轨各选取 4 幅 SAR 影像数据,影像基本参数如表 1 所示。每幅影像包含 3 个条带影像,均进行拼接处理。震前为 A 卫星数据,震后为 B 卫星数据,形成时间基线均为 6 d 的短时间基线干涉对。对于 Sentinel-1 A/B SAR 影像数据的 D-InSAR 数据处理,使用开源软件 GMTSAR 进行;同震干涉和形变场主要通过二轨法^[24-25]处理获得。采用 30 m 分辨率 DEM 数据消除地形相位误差;采用 8 : 2 的多视比(Range \times Azimuth)以提高信噪比;通过滤波和掩膜进一步消除噪声影响,且避免失相干严重区域数据对后续解缠造成更大影响;通过后续解缠、编码等得到玛多 M_w 7.4 级地震升、降轨相对完整的同震形变场。相比 InSAR 数据, GPS 数据量较少且台站分布不均。本文选取 21 个台站震前、震后各 3 d 内低频 GPS 同震数据^[14],对 GPS 数据在反演过程中设置不同的比重进行多次试验。

表 1 玛多 M_w 7.4 级地震 Sentinel-1 A/B 卫星影像数据

Table 1 Sentinel-1 A/B Image Data of Maduo M_w 7.4 Earthquake

模式	轨道号	主影像 (震前)	从影像 (震后)	时间 基线/d	垂直 基线/m
升轨	99	2021-05-20 (A 卫星)	2021-05-26 (B 卫星)	6	140.86
降轨	106	2021-05-20 (A 卫星)	2021-05-26 (B 卫星)	6	64.79

3 结果分析

3.1 同震形变特征

通过数据处理,得到玛多 M_w 7.4 级地震干涉图和同震形变场(图 3)。由图 3 可以看出:玛多 M_w

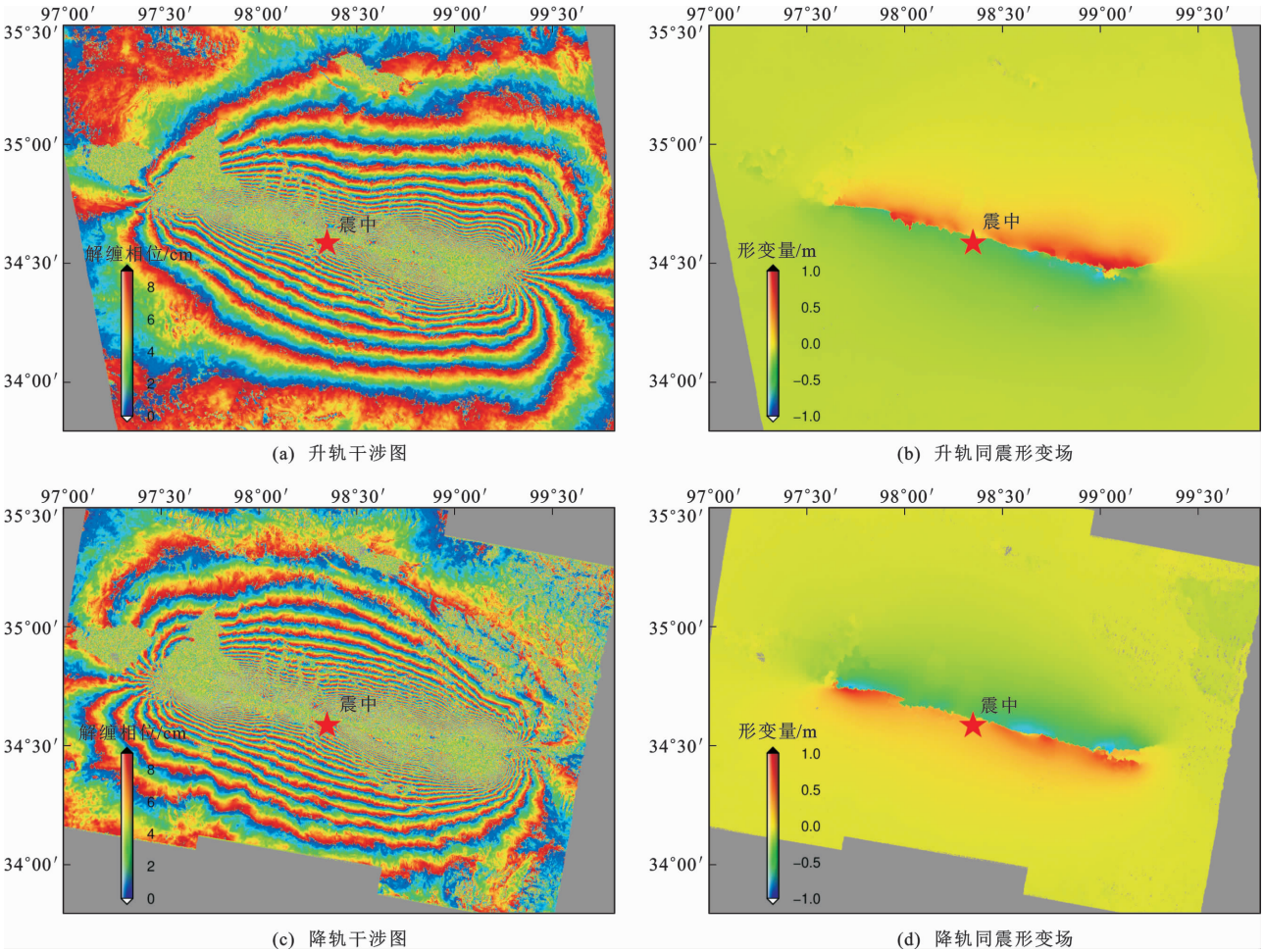


图 3 玛多 M_w 7.4 级地震升、降轨干涉图及同震形变场

Fig. 3 Ascending and Descending Interferograms and Co-seismic Deformation Fields of Maduo M_w 7.4 Earthquake

7.4级地震的影响范围非常广,发震断层周围干涉条纹密集,北盘干涉条纹较之南盘更为密集;地表破裂周围出现了连续的位移不连续情况,可能是地表大幅度破裂产生的小区域低相干造成的,表明地震破裂到地表。升、降轨雷达视线向(Line of Sight, LOS)最大隆升量约为 1.2 m,最大沉降量约为 1.0 m,雷达视线向断层最大相对位错量约为 2.2 m。在形变场中,正值表示地表朝向卫星方向运动,负值表示地表朝远离卫星方向运动。升、降轨形变场在南、北盘的运动趋势呈现相反特征,表明同震造成的形变以水平方向为主。同震形变结果与华俊等的研究结果^[15]较为一致。

3.2 同震滑动分布反演特征

通过 D-InSAR 技术获取的同震形变场一般都具有较大的范围,数据量较大^[26],会影响反演的效率和精度。本文使用均匀采样法^[27]对 InSAR 形变场进行降采样。在反演之前,需要获取地震震源参数^[28-30],以便于对地震进行定量分析。

基于不同机构发布的玛多 M_w 7.4 级地震的震源机制解,如全球矩心矩张量(GCMT)和美国地质勘探局(USGS)(表 2),结合野外地质调查结果,将玛多 M_w 7.4 级地震发震断层总体分为 4 段;同时根据同震形变结果,认为断层东段存在明显的分裂特征,故将发震断层又分为 5 个小断层;结合潘家伟等的研究成果^[9-12],确定每个小断层的基本范围和参数。将 5 个小断层由东至西依次命名为 F1、F2、F3、F4 和 F5,经实验后得到较为理想的结果作为最终反演的参数(表 3)。

本文采用 Wang 等提出的梯度下降法(Steepest Decent Method,SDM)^[31-32]进行滑动分布反演。该

表 2 玛多 M_w 7.4 级地震震源机制参数

Table 2 Earthquake Source Mechanism Parameters of Maduo M_w 7.4 Earthquake

机构	经度/ (°)	纬度/ (°)	深度/ km	走向角/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)
GCMT	98.46	34.65	12	83	282	-9
USGS	98.24	34.61	10	67	92	-40

表 3 5 个小断层反演基本参数

Table 3 Inversion Basic Parameters of Five Minor Faults

断层	起始位置 经度/(°)	起始位置 纬度/(°)	走向/(°)	倾角/(°)
F1	99.35	34.52	261.76	80
F2	99.32	34.35	297.52	85
F3	99.02	34.48	284.19	80
F4	98.50	34.59	284.75	70
F5	98.00	34.70	287.78	70

注:5 个小断层的走向角平均值为 283.20°,倾角平均值为 77°。

方法的主要思想是:每次迭代新的搜寻方向均通过负梯度方向来重新选定,从而不断地对每次迭代结果进行优化,得到最为贴近目标函数的结果^[33]。为了得到更完整的断层滑动分布结果,运用 Okada 弹性半空间位错理论^[34],对整个断层沿走向延长 170 km,沿倾向延长 25 km,同时将其离散为 5 km×5 km 的 170 个小块。

基于梯度下降法的反演结果如图 4 所示。升、降轨的观测和拟合形变场拥有大致相同的形变量和形态分布,且大部分残差在 0 左右,反映断层模型的反演结果能够很好地表征同震形变场;但升轨比降轨的拟合性略差,可能是升、降轨数据的获取角度和轨道之间的参数不同以及处理过程中的误差导致的。可能断层附近有较强的应力干扰,同时在处理过程中多种误差和模型的复杂度以及震后可能存在的少量余滑,都会使得在断层附近产生较大地拟合残差。选取 4 条垂直于断层的剖面线(A—A'、B—B'、C—C'、D—D'),并对 4 条剖面线分别进行升、降轨观测形变和模拟形变对比分析。结果发现:4 条剖面线对应的观测形变和模拟形变在数值上均没有太大偏差,但在剖面线的某一点处会出现数值波动(图 4、5),可能是反演过程中误差和 GPS 台站分布不均导致的。

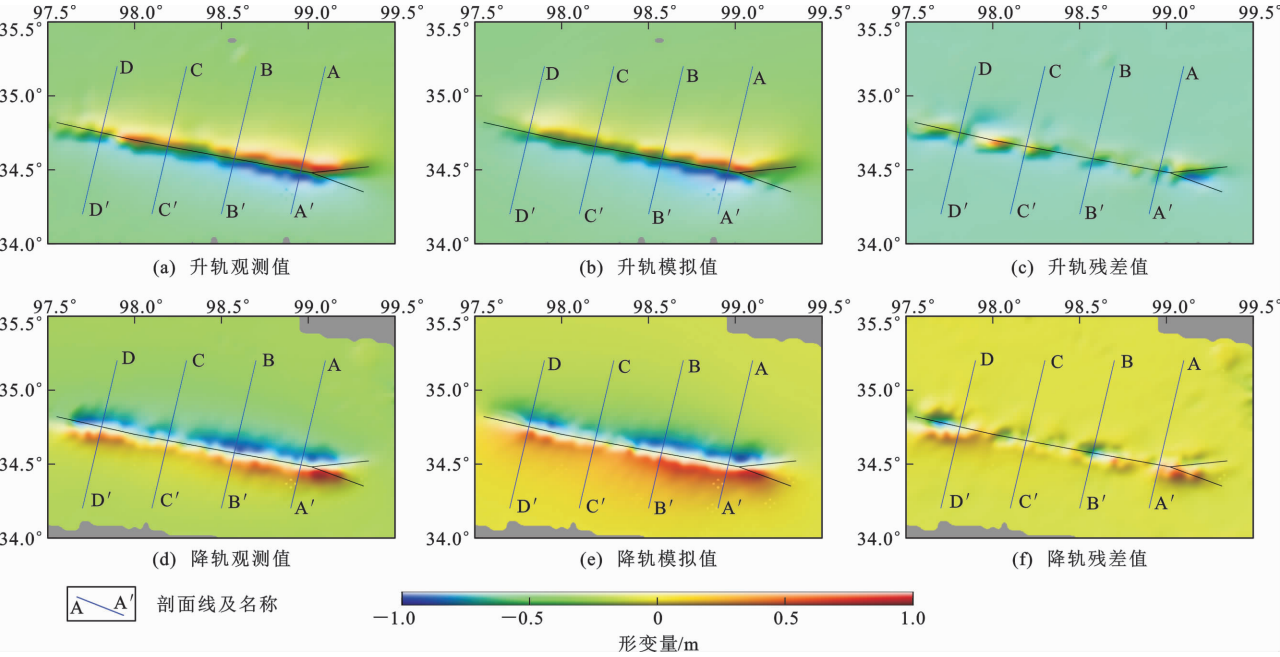
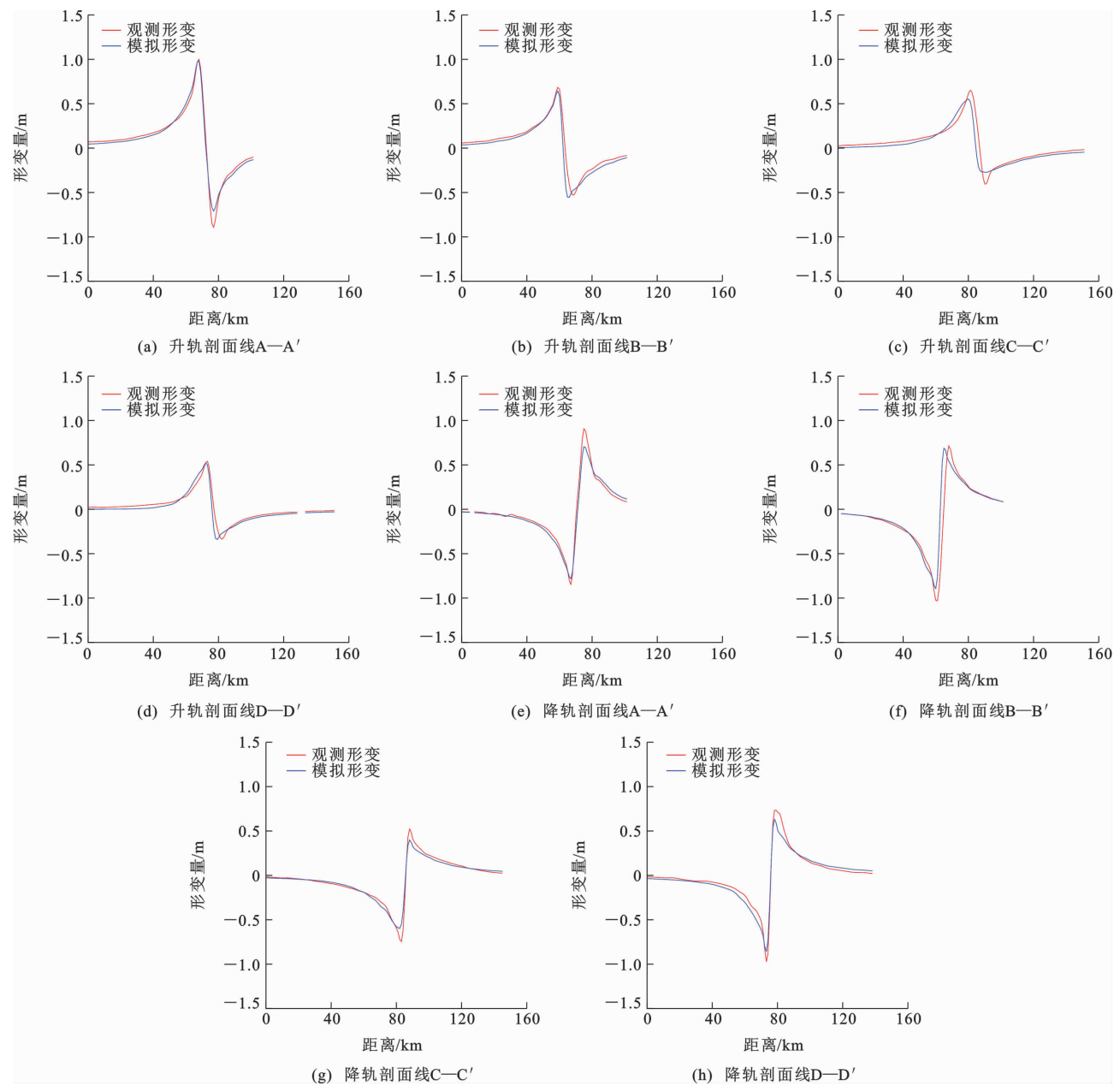


图 4 同震观测形变与滑动分布反演拟合结果

Fig. 4 Simulation Results of Co-seismic Observations Deformation and Slip Distribution Inversion

图 6 为单独使用 GPS 数据反演的滑动分布,存在 3 个明显的形变特征,最大滑动量约为 3.54 m。与李志才等的研究结果^[14]相比,本文得到的滑动量略小,但在中段多出一个明显形变,可能是受到本文使用了 5 个小断层,并且每个小断层参数都存在差异的影响。图 7 为使用 InSAR 数据反演的滑动分布,在西侧有明显的滑动量极值,最大滑动量约为 4.9 m,与华俊等的实验结果^[15]相似;与 GPS 数据反演相比,InSAR 数据反演得到的滑动量更大,但仅在西侧存在滑动量极值。图 8 为使用 InSAR 和

GPS 数据联合反演的滑动分布。从图 8 可以看出:玛多 M_w 7.4 级地震产生的滑动主要集中在地下 12 km 内,最大滑动量约为 3.76 m,集中在断层西侧;相比 GPS 数据的单独反演,InSAR 和 GPS 数据联合反演的形变量略大,且中段并未有明显形变;相比 InSAR 数据的单独反演,InSAR 和 GPS 数据联合反演的断层西侧滑动量明显降低,东侧分裂处存在一个形变极值,但整体形变较小,这可能是受联合反演中 GPS 数据的影响;由于 GPS 数据较少以及台站分布不均,稀疏的台站数据解算结果与野外地质



剖面线 A—A'、B—B'、C—C' 和 D—D' 位置见图 4

图 5 升、降轨 4 条垂直于断层的剖面线形变分布

Fig. 5 Diagrams of Deformation Distribution of 4 Sections Perpendicular to Fault in the Ascending and Descending Orbits

调查、InSAR 数据反演结果有一定差异。

根据断层滑动分布拟合和同震滑动分布结果可知,断层的滑动分布主要集中在地下 12 km 以内,最大滑动量约为 3.76 m,发震断层整体走向约 283° ,滑动角约 21° ,倾角约 77° 。玛多 M_w 7.4 级地震是一次走滑断层破裂事件。

4 讨论

4.1 同震滑动和余震分布

本文使用 GPS 和 InSAR 数据进行联合反演,获取的整体滑动量略小。相对于 GPS 和 InSAR 数

据的单独反演,InSAR 和 GPS 数据联合反演的滑动量有一定变化,尤其是相对于 InSAR 数据的单独反演,联合反演的滑动量减小较多,可能和反演中选取的参数不同以及引入了 GPS 数据有关;同时,GPS 同震形变数据采用了震前、震后 3 d 的平均值,在数据处理中,可能会将震后早期的少量余滑视作同震位移,进而加大残差,影响反演效果。

地震造成地表附近的累积应力可能通过同震产生的形变或者余震和余滑释放,主震产生的应力变化对余震和余滑的触发具有促进效果。玛多 M_w 7.4 级地震产生了长度约 170 km 的地表破裂,且破

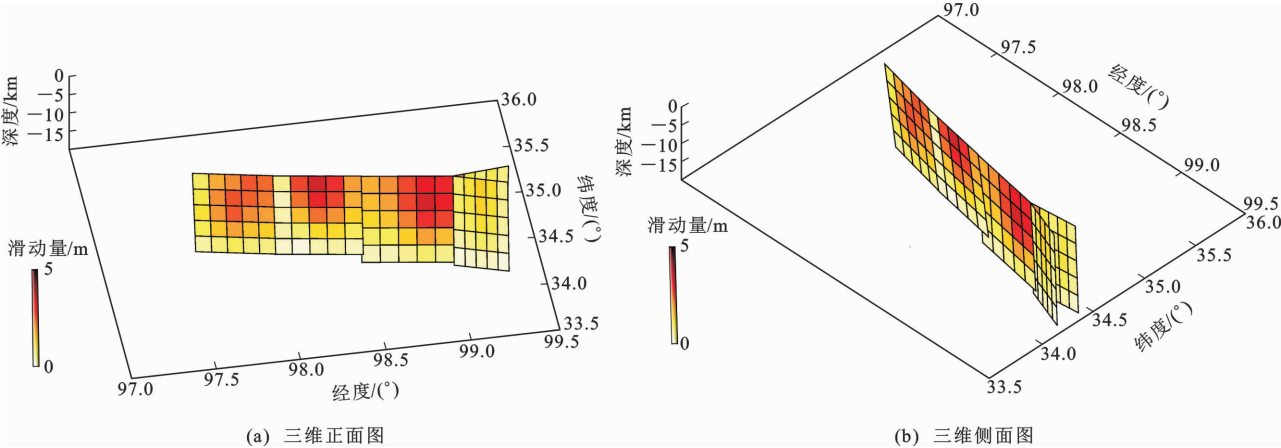


图 6 GPS 数据反演同震滑动分布

Fig. 6 Distributions of Co-seismic Slip Inversed by GPS Data

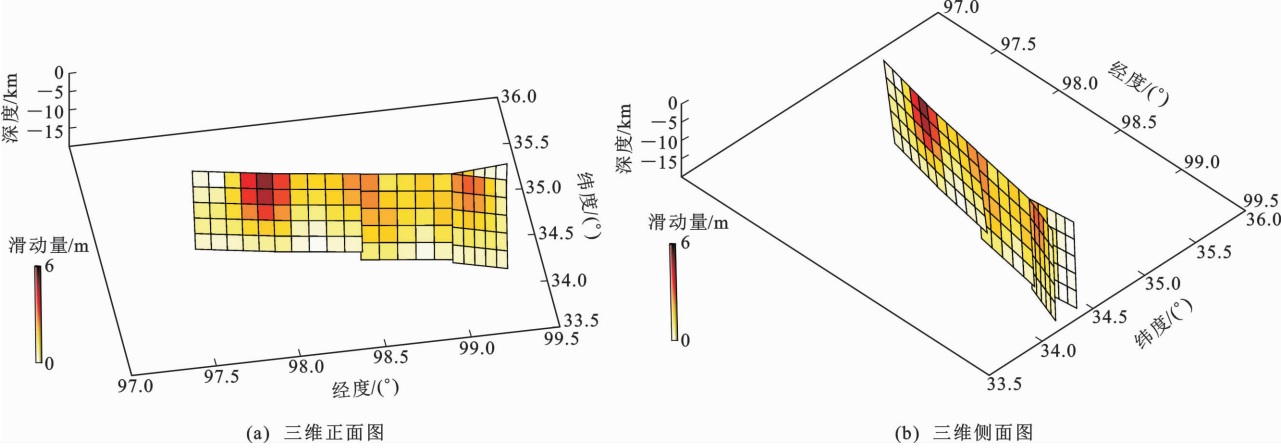


图 7 InSAR 数据反演同震滑动分布

Fig. 7 Distributions of Co-seismic Slip Inversed by InSAR Data

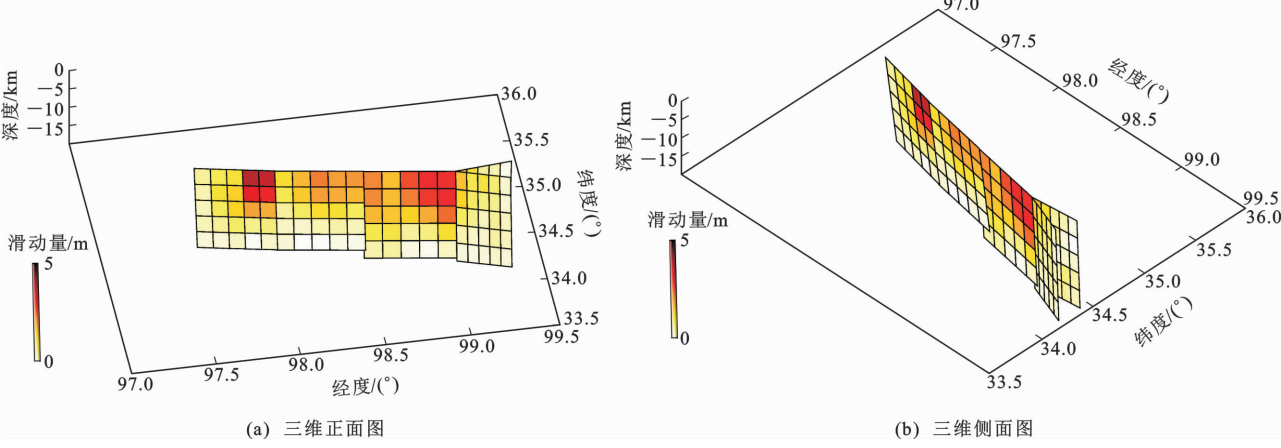


图 8 InSAR 和 GPS 数据联合反演同震滑动分布

Fig. 8 Distributions of Co-seismic Slip Inversed by Joint InSAR and GPS Data

裂较浅,呈现出较长的运动特征,5 个小断层的破裂深度略有不同。选取震后 9 d 部分区域余震(震级大于 0)^[23],探讨沿断层方向周围余震空间分布与深度的关系,以及沿剖面线 C—C' 方向余震分布特征(图 9)。在该时间段内,余震大部分分布在断层周

围且在 15 km 深度内,15 km 深度以下区域余震发生次数明显降低。对发震断层进行静态库仑应力变化计算,发现 15 km 深度内应力始终为负值(图 10),结合玛多 M_w 7.4 级地震较浅的破裂深度,大致认为同震产生的静态库仑应力对此次余震的空间

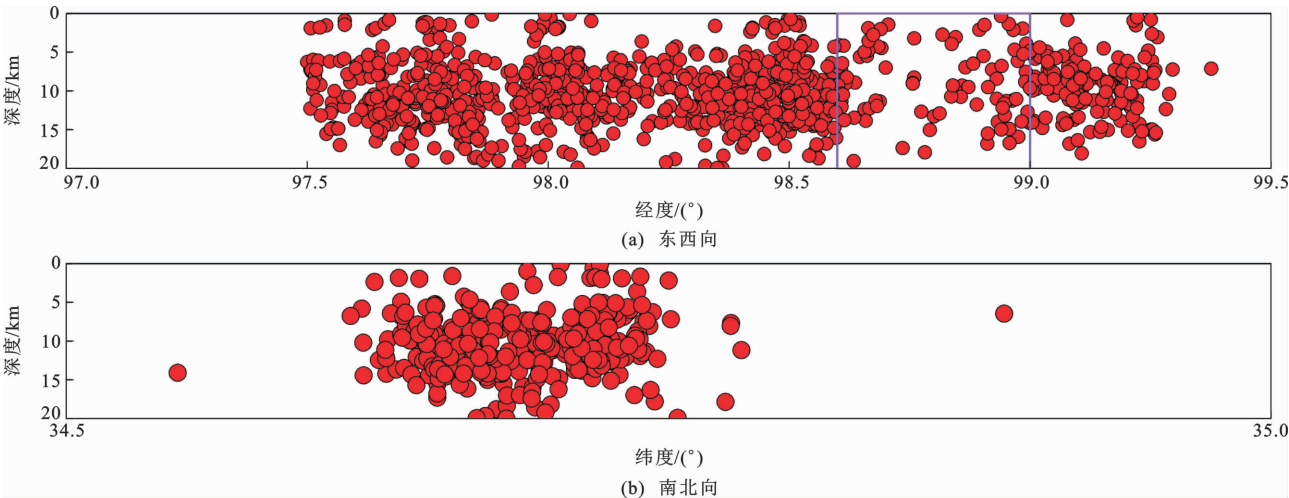


图 9 断层周围余震深度分布

Fig. 9 Depth Distributions of Aftershocks Around Faults

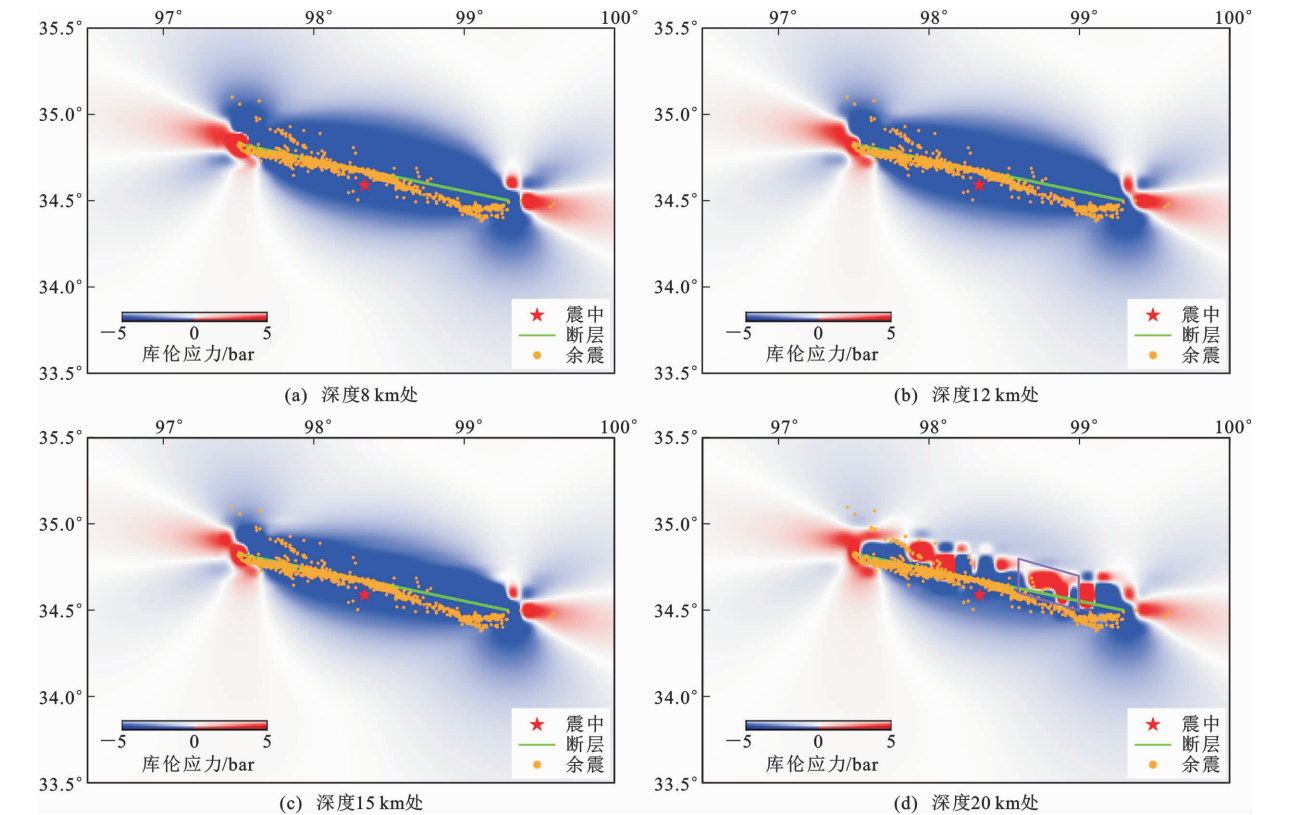


图 10 同震错动造成玛多 M_w 7.4 级地震周围区域静态库仑应力变化

Fig. 10 Static Coulomb Stress Changes Caused by Co-seismic Slip Around Maduo M_w 7.4 Earthquake

分布发挥着重要作用。余滑的演变可以采用时序分析技术,通过震后形变和震后应力变化进行研究。

4.2 库仑应力变化及断裂危险性

部分强震会释放长期积累的库仑应力,同时会引起余震的发生^[35],因此,可以利用余震的空间分布来佐证区域库仑应力的变化。将 5 个小断层视为整体断层,使用 Coulomb 软件^[36-37]对此次同震静态库仑应力进行计算(图 10)。其中,泊松比为 0.25,

摩擦系数为 0.4。库仑应力变化结果如图 10 所示。断层近场周围地下 15 km 深度以内,应力几乎全为负值,仅在东、西两侧有部分正值;在地下 20 km 深度处,断层近场北侧呈现正值、负值交错的情况,这与同震破裂深度较浅有关。断层西侧呈现出应力加载区,直至地下 20 km 深度处,应力加载区逐步扩大;断层西侧有部分余震发生,释放部分应力,但仍有较多应力未释放,存在继续释放的可能,因此,断

层西侧会有较高的地震危险性。断层东侧应力加载区略小但只有零星余震发生,后续也存在发生余震的可能性。图 9(a)中紫色区域内余震发生次数较少,结合库仑应力变化,在图 10(d)中紫色区域附近,断层南侧余震较多且应力为负值,表明其应力已经释放,而断层北侧几乎没有余震且库仑应力大部分为正值,表明断层北侧应力在今后可能会以余震的形式释放,地震危险性较高。

5 结 语

(1) 基于 Sentinel-1 卫星影像数据,使用 D-InSAR 技术获取青海玛多 M_w 7.4 级地震同震形变场。结果表明:地震造成地表雷达视线向最大形变量约为 1.2 m,南、北盘隆升量和沉降量相对最大位移(即雷达视线向断层最大相对位错量)约为 2.2 m;升、降轨同震形变场的形态、形变量在符号上均具有明显对称性。

(2) 断层滑动分布拟合和同震滑动分布结果表明:发震断层整体走向约 283° ,滑动角约 21° ,倾角约 77° ;发震断层整体长度约为 170 km,破裂到地表;最大滑动量约为 3.76 m,主要集中在地下 12 km 深度以内;此次地震为左旋走滑断层破裂事件。

(3) 同震引起断层周围区域静态库仑应力变化的计算结果表明:发震断层周围发生聚集性余震,积累的库仑应力有着明显的释放现象;断层东侧和西侧存在一定的应力加载区,而且西侧更明显,可能存在较高的地震危险性。

季灵运:值此我国工程地质学科奠基人之一、区域工程地质学理论体系创始人刘国昌先生诞辰 110 周年之际,让我们纪念先生为我国工程地质事业做出的卓著贡献!刘国昌先生创立的区域稳定工程地质理论为我国重大工程区域稳定性问题评价奠定了重要的理论基础。先生的满腔热忱、严谨的科研作风激励着一代又一代工程地质学者。向先生致以最崇高的敬意!让我们在先生崇高的科研精神的指引下,不断进取、勇攀高峰,取得新的成就!此外,欧洲航天局(ESA)提供了免费的 Sentinel-1 SAR 卫星影像数据,德国地学中心汪荣江教授提供了 SDM 反演程序,在此一并表示感谢!

参 考 文 献 :

References :

[1] ZEBKER H A, GOLDSTEIN R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar

Observations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B5): 4993-4999.

[2] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B7): 9183-9191.

[3] 郭汝梦, 杨浩哲, 汤雄伟, 等. 卫星大地测量成像地震周期形变研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 799-806.

GUO Ru-meng, YANG Hao-zhe, TANG Xiong-wei, et al. A Review on Satellite Geodesy Applied to Image the Earthquake Cycle Deformation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(6): 799-806.

[4] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. Nature, 1993, 364: 138-142.

[5] 季灵运, 刘传金, 徐 晶, 等. 九寨沟 M_s 7.0 地震的 InSAR 观测及发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4069-4082.

JI Ling-yun, LIU Chuan-jin, XU Jing, et al. InSAR Observation and Inversion of the Seismogenic Fault for the 2017 Jiuzhaigou M_s 7.0 Earthquake in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4069-4082.

[6] 康 帅, 刘传金, 朱良玉, 等. 基于升降轨 Sentinel-1 SAR 数据研究 2020 年新疆于田 M_s 6.4 地震震源机制[J]. 地震, 2021, 41(2): 80-91.

KANG Shuai, LIU Chuan-jin, ZHU Liang-yu, et al. The 2020 M_s 6.4 Earthquake in Yutian, Xinjiang Based on the Ascending and Descending Sentinel-1 SAR Data[J]. Earthquake, 2021, 41(2): 80-91.

[7] 单新建, 屈春燕, 宋小刚, 等. 汶川 M_s 8.0 级地震 InSAR 同震形变场观测与研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 496-504.

SHAN Xin-jian, QU Chun-yan, SONG Xiao-gang, et al. Coseismic Surface Deformation Caused by the Wenchuan M_s 8.0 Earthquake from InSAR Data Analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 496-504.

[8] 徐晓雪, 季灵运, 朱良玉, 等. 漾濞 M_s 6.4 地震同震形变特征及发震构造探讨[J]. 地震地质, 2021, 43(4): 771-789.

XU Xiao-xue, JI Ling-yun, ZHU Liang-yu, et al. The Co-seismic Deformation Characteristics and Seismogenic Structure of the Yangbi M_s 6.4 Earthquake[J].

- Seismology and Geology, 2021, 43(4): 771-789.
- [9] 潘家伟, 白明坤, 李超, 等. 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[J]. 地质学报, 2021, 95(6): 1655-1670.
- PAN Jia-wei, BAI Ming-kun, LI Chao, et al. Coseismic Surface Rupture and Seismogenic Structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) M_s 7.4 Earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(6): 1655-1670.
- [10] 李智敏, 李文巧, 李涛, 等. 2021年5月22日青海玛多 M_s 7.4地震的发震构造和地表破裂初步调查[J]. 地震地质, 2021, 43(3): 722-737.
- LI Zhi-min, LI Wen-qiao, LI Tao, et al. Seismogenic Fault and Coseismic Surface Deformation of the Maduo M_s 7.4 Earthquake in Qinghai, China: A Quick Report [J]. Seismology and Geology, 2021, 43(3): 722-737.
- [11] 盖海龙, 姚生海, 杨丽萍, 等. 青海玛多“5·22” M_s 7.4级地震的同震地表破裂特征、成因及意义[J]. 地质力学学报, 2021, 27(6): 899-912.
- GAI Hai-long, YAO Sheng-hai, YANG Li-ping, et al. Characteristics and Causes of Coseismic Surface Rupture Triggered by the “5·22” M_s 7.4 Earthquake in Maduo, Qinghai, and Their Significance [J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(6): 899-912.
- [12] CHEN H, QU C Y, ZHAO D Z, et al. Rupture Kinematics and Coseismic Slip Model of the 2021 M_w 7.3 Maduo (China) Earthquake: Implications for the Seismic Hazard of the Kunlun Fault [J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3327.
- [13] XU L, CHEN Q, ZHAO J J, et al. An Integrated Approach for Mapping Three-dimensional Coseismic Displacement Fields from Sentinel-1 TOPS Data Based on DInSAR, POT, MAI and BOI Techniques: Application to the 2021 M_w 7.4 Maduo Earthquake [J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4847.
- [14] 李志才, 丁开华, 张鹏, 等. GNSS观测的2021年青海玛多地震(M_w 7.4)同震形变及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1489-1497.
- LI Zhi-cai, DING Kai-hua, ZHANG Peng, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of 2021 M_w 7.4 Maduo Earthquake from GNSS Observation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1489-1497.
- [15] 华俊, 赵德政, 单新建, 等. 2021年青海玛多 M_w 7.3地震InSAR的同震形变场、断层滑动分布及其对周边区域的应力扰动[J]. 地震地质, 2021, 43(3): 677-691.
- HUA Jun, ZHAO De-zheng, SHAN Xin-jian, et al. Coseismic Deformation Field, Slip Distribution and Coulomb Stress Disturbance of the 2021 M_w 7.3 Maduo Earthquake Using Sentinel-1 InSAR Observations [J]. Seismology and Geology, 2021, 43(3): 677-691.
- [16] 杨君妍, 孙文科, 洪顺英, 等. 2021年青海玛多7.4级地震的同震变形分析[J]. 地球物理学报, 2021, 64(8): 2671-2683.
- YANG Jun-yan, SUN Wen-ke, HONG Shun-ying, et al. Coseismic Deformation Analysis of the 2021 Qinghai Maduo M 7.4 Earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(8): 2671-2683.
- [17] LI H X, ZHENG R, ZOU R. Coseismic Slip Distribution of the 2021 M_w 7.44 Maduo, Qinghai Earthquake Estimated from InSAR and GPS Measurements [J]. Journal of Earth Science, 2022, 33(4): 885-891.
- [18] 邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2025-2042.
- DENG Qi-dong, CHENG Shao-ping, MA Ji, et al. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(7): 2025-2042.
- [19] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D辑, 地球科学, 2003, 33(增1): 12-20.
- ZHANG Pei-zhen, DENG Qi-dong, ZHANG Guo-min, et al. Active Tectonic Blocks and Earthquakes in the Continent of China [J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2003, 33(S1): 12-20.
- [20] 陈长云, 任金卫, 孟国杰, 等. 巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义[J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4125-4141.
- CHEN Chang-yun, REN Jin-wei, MENG Guo-jie, et al. Division, Deformation and Tectonic Implication of Active Blocks in the Eastern Segment of Bayan Har Block [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4125-4141.
- [21] 周慧芳, 张景发, 胡乐银, 等. 青海玉树地震的InSAR数据同震形变场模拟与参数反演分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(3): 418-423.
- ZHOU Hui-fang, ZHANG Jing-fa, HU Le-yin, et al. Co-seismic Deformation Field and Parameters Inversion of the Yushu Earthquake from InSAR [J]. Journal of Geo-information Science, 2011, 13(3): 418-423.
- [22] 王家庆, 单新建, 张国宏, 等. 2017年九寨沟 M_s 7.0地震InSAR同震形变场与断层滑动分布反演[J]. 华北地震科学, 2018, 36(2): 1-7.

- WANG Jia-qing, SHAN Xin-jian, ZHANG Guo-hong, et al. Fault Slip Distribution Inversion and Co-seismic Deformation of the 2017 Jiuzhaigou M_s 7.0 Earthquake Based on InSAR[J]. North China Seismic Sciences, 2018, 36(2): 1-7.
- [23] 王未来, 房立华, 吴建平, 等. 2021 年青海玛多 M_s 7.4 地震序列精定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1193-1202.
- WANG Wei-lai, FANG Li-hua, WU Jian-ping, et al. Aftershock Sequence Relocation of the 2021 M_s 7.4 Maduo Earthquake, Qinghai, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2021, 51(7): 1193-1202.
- [24] MASSONNET D, FEIGL K L. Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface [J]. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4): 441-500.
- [25] WRIGHT T J, PARSONS B E, LU Z. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(1): 169-178.
- [26] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- SHU Ning. Principle of Radar Image Interferometry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [27] PRITCHARD M E, SIMONS M, ROSEN P A, et al. Co-seismic Slip from the 1995 July 30 M_w 8.1 Antofagasta, Chile, Earthquake as Constrained by InSAR and GPS Observations[J]. Geophysical Journal International, 2002, 150(2): 362-376.
- [28] 李永生, 冯万鹏, 张景发, 等. 2014 年美国加州纳帕 M_w 6.1 地震断层参数的 Sentinel-1A InSAR 反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2339-2349.
- LI Yong-sheng, FENG Wan-peng, ZHANG Jing-fa, et al. Co-seismic Slip of the 2014 M_w 6.1 Napa, California Earthquake Revealed by Sentinel-1A InSAR [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(7): 2339-2349.
- [29] SONG C, YU C, LI Z, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2019 M_w 7.5 New Ireland Earthquake from the Integration of Multiple Remote Sensing Techniques[J]. Remote Sensing, 2019, 11(23): 2767.
- [30] 季灵运, 朱良玉, 刘传金, 等. InSAR 同震形变场及其在震源参数确定中的应用研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(3): 604-620.
- JI Ling-yun, ZHU Liang-yu, LIU Chuan-jin, et al. Review on InSAR-derived Coseismic Deformation and the Determination of Earthquake Source Parameters [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(3): 604-620.
- [31] WANG R J, DIAO F Q, HOECHNER A. SDM: A Geodetic Inversion Code Incorporating with Layered Crust Structure and Curved Fault Geometry [C] // EGU. EGU General Assembly Conference. Vienna: EGU, 2013: 2411.
- [32] WANG R J, PAROLAI S, ZSCHAU J, et al. The 2011 M_w 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of GPS and Strong-motion Data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103: 1336-1347.
- [33] 赵强, 王双绪, 蒋锋云, 等. 利用 InSAR 技术研究 2016 年青海门源 M_w 5.9 地震同震形变场及断层滑动分布[J]. 地震, 2017, 37(2): 95-105.
- ZHAO Qiang, WANG Shuang-xu, JIANG Feng-yun, et al. Co-seismic Deformation Field and Fault Slip Distribution of the 2016 Qinghai Menyuan M_w 5.9 Earthquake from InSAR Measurement [J]. Earthquake, 2017, 37(2): 95-105.
- [34] OKADA Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 1018-1040.
- [35] KING G C P, STEIN R S, LIN J. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(3): 935-953.
- [36] LIN J, STEIN R S. Stress Triggering in Thrust and Subduction Earthquakes and Stress Interaction Between the Southern San Andreas and Nearby Thrust and Strike-slip Faults[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B2): B002607.
- [37] TODA S, STEIN R S, RICHARDS-DINGER K, et al. Forecasting the Evolution of Seismicity in Southern California: Animations Built on Earthquake Stress Transfer[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110(B5): B003415.