



InSAR数据约束下2016年和2022年青海门源地震震源参数及其滑动分布

李振洪^{1,2,3} 韩炳权^{1,2} 刘振江^{1,2} 张苗苗^{1,2} 余琛^{1,2,4}

陈博^{1,2} 刘海辉^{1,2} 杜静^{1,2} 张双成^{1,2,3}

朱武^{1,2,3} 张勤^{1,3} 彭建兵^{1,3}

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 长安大学地球与卫星大数据研究中心,陕西 西安,710054

3 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

4 英国纽卡斯尔大学工程学院,英国 纽卡斯尔,NE1 7RU

摘要:中国青海省门源县于2016年和2022年分别发生了Mw 5.9和Mw 6.7地震,相距不足40 km。利用欧洲空间局Sentinel-1A升降轨雷达影像,采用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术分别获取两次地震的同震地表形变场,进而利用弹性半空间的位错模型确定上述事件的震源参数,基于分布式滑动模型反演确定两次地震断层面上的滑动分布,并探讨2016年门源地震对2022年门源地震的发震影响及触发机制。结果表明,2016年门源地震为逆冲型地震,并未破裂到地表,升、降轨同震形变场沿视线向的最大形变量分别为6.7 cm和7.0 cm,断层的最大滑动量为0.53 m,主要集中在地下4~12 km区域滑动。2022年门源地震同震形变场沿NW-SEE向破裂,降轨影像最大视线向地表形变量为78 cm,断层的最大滑动值达到3.5 m,处于地下4 km左右,断层滑动分布模型揭示此次地震为左旋走滑型地震;结合冷龙岭断裂的运动性质和几何特征,可初步判定发震断层主要为冷龙岭断裂的西段、且极有可能破裂到了其西北端西侧的托莱山断裂。静态库仑应力触发关系显示,2016年门源地震对2022年门源地震的发生有一定的促进作用。

关键词:2016年门源地震;2022年门源地震;合成孔径雷达干涉测量;同震地表形变;地震断层滑动;地震触发关系

中图分类号:P227;P315

文献标志码:A

据中国地震台网发布,2022-01-08T01:45(北京时间),中国青海省海北州门源地区发生了Mw 6.7地震,震源深度约为10 km;地震震中(101.26°E, 37.77°N)距离门源县城54 km,距离西宁市136 km,距离2016-01-26门源Mw 5.9地震的震中不足40 km。图1为两次门源地震的区域构造背景,其中断层数据参见文献[1-2],白色实线框为不同轨道的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像的覆盖范围。2022年门源地震的孕震背景为青藏高原东北缘的昌马堡-古浪-海原构造带,历史地震资料显示该区域地质

构造背景复杂且强烈,曾发生过两次8级以上和多次7级以上大地震,如1920年8.5级海原地震、1927年8.0级古浪地震(见图1)。该构造带内部断裂纵横,其中冷龙岭断裂带由一组几乎平行的北西西向分布的左旋逆走滑性质的断裂组成,长约120 km,本次地震位于冷龙岭断裂带西北端与托莱山断裂的阶区^[3-4]。自21世纪以来,本次地震震中100 km范围内发生了13次5级及以上的中强震(<https://earthquake.usgs.gov/>)。

距离2022年地震最近的一次地震是震源机制与其完全不同的2016年Mw 5.9门源逆冲型地

收稿日期:2022-01-12

项目资助:国家重点研发计划(2020YFC1512000);陕西省科技创新团队项目(2021TD-51);欧洲空间局-科技部国家遥感中心龙计划5项目(59339)。

第一作者:李振洪,博士,教授,主要研究方向为影像大地测量、地质灾害、人工大型建筑物稳定性和精准农业。Zhenhong.Li@chd.edu.cn

通讯作者:余琛,博士。Chen.Yu@Newcastle.ac.uk

震,震中处于冷龙岭断裂中部以北。2016年地震北侧是民乐-大马营断裂,以挤压逆冲为主、略带左旋走滑性质(见图1)。文献[5]利用高分遥感影像与震前高分影像推测2016年地震的发震断层为冷龙岭北断裂;文献[6]通过对省级固定地震台站及部分流动地震台站记录到的波形资料进行联合精确定位,推测该地震为北西向冷龙岭断裂与北西向

民乐-大马营断裂之间的一条盲断层;文献[7]利用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术精确反演了发震断层的几何参数及滑移分布,并指出冷龙岭断裂复杂的几何形态导致了该地震断层滑移集中在较小区域,因此造成了较高水平的应力降,加剧了局部应力积累,增加了区域地震灾害风险。

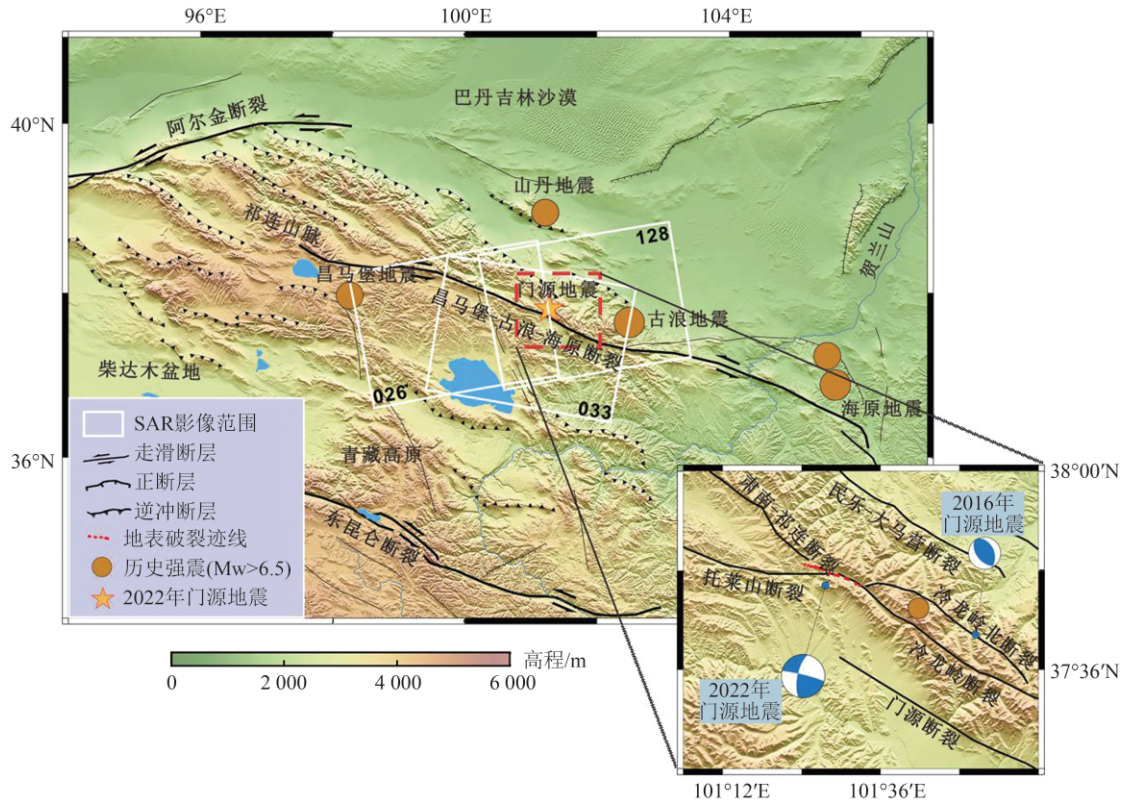


图1 2016年和2022年门源地震的区域构造背景

Fig.1 Topographic Map of the 2016 and 2022 Menyuan Earthquakes

2016年和2022年两次相继发生的门源地震为研究青藏高原东北缘的断层系统提供了机会。亟需解决的关键问题一是2022年地震震源机制的快速解算,二是判断2022年地震是否由2016年地震触发。门源地区位于河西走廊,是“一带一路”的重要纽带,也是诸多重大国家工程的必经之路,如西气东输等工程。因此对2022年门源地震的发震机理进行研究,厘清该区域的断层构造活动特征,亦可为国家重大工程的建设与运维作出贡献。本着快速响应与精确解算的原则,且考虑到发震区域地处高原山区,常规的大地测量手段难以获取连续、全覆盖的地表形变场,本文首先采用了InSAR技术分别获取两次门源地震的同震地表形变场,该技术具有全天时、覆盖范围广等显著优点,经过30余年的探索和发展,已经成为研究同震形变和反演震源参数必不可少

的大地测量技术^[8-13];然后利用弹性半空间的位错模型确定了两次事件的断层几何参数,并基于分布式滑动模型反演确定了两次地震断层面上的滑动分布;最后解算了区域库仑应力场,由此探讨了2016年门源地震对2022年门源地震的触发关系。表1为不同研究机构或学者获取的两次门源地震的震源参数,其中USGS(United States Geological Survey)表示美国地质勘探局,GCMT(global centroid moment tensor)表示全球矩心矩张量项目。

1 InSAR数据处理与同震形变场

1.1 InSAR数据处理

本文获取了覆盖2016年和2022年两次门源地震区域的Sentinel-1A升降轨影像数据,用于InSAR分析的SAR影像参数见表2。Sentinel-1A

表 1 2016 年和 2022 年门源地震震源参数
Tab.1 Source Parameters for the 2016 and 2022 Menyuan Earthquakes

地震	研究来源	Mw	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	长度/km	宽度/km	最大滑动量/m	最大滑动深度/km
2016 年 门源地震	GCMT ^a	5.9	146	43	83	—	—	—	—
			335	47	96				
	USGS ^b	5.9	141	50	79	—	—	—	—
			337	41	103				
	文献[14]	5.9	134	43	68	24	20	0.45	9.5
	文献[7]	5.9	127	45	73	—	—	0.75	—
	本文研究 ^c	5.9	137	46	79	4.4	5.1	0.9	—
2022 年 门源地震	GCMT	6.7	104	82	1	—	—	—	—
			14	89	172				
	USGS	6.6	104	88	15	—	—	—	—
			13	75	178				
	AB 段 ^c	—	104	80	0	8	13.7	1.07	—
	BC 段 ^c	6.6 ^e	109	80	5	8	13.7	2.84	—
	AB 段 ^d	—	104	80	0	10	16	2.5	5
	BC 段 ^d	6.7 ^e	109	80	5	20	16	3	5

注:a 表示数据来源于 <https://www.globalcmt.org/>; b 表示数据来源于 <https://earthquake.usgs.gov/>; c 表示均匀滑动分布; d 表示分布式滑动分布; e 表示 AB、BC 两段断层矩张量之和对应的矩震级

表 2 2016 年和 2022 年门源地震用于 InSAR 分析的 SAR 影像参数
Tab.2 Parameters of SAR Images for InSAR Analysis on the 2016 and 2022 Menyuan Earthquakes

地震发生年份/年	轨道	飞行方向	获取时间		空间基线/m	时间基线/d
			主影像	辅影像		
2016	128	升轨	2016-01-13	2016-02-06	14.2	24
	033	降轨	2016-01-18	2016-02-11	6.0	24
2022	026	升轨	2021-12-29	2022-01-10	—107.6	12
	033	降轨	2021-12-29	2022-01-10	55.1	12

的 SAR 影像处理采用 GAMMA 软件,利用二轨法的 InSAR 技术获取地震同震地表形变场^[15-17]。干涉处理过程中采用美国宇航局发布的 30 m 空间分辨率的 SRTM(shuttle radar topography mission)消除地形相位和进行地理编码。为了提升信噪比(signal-to-noise ratio, SNR),首先采用了距离向:方位向为 10:2 的多视以及滤波处理;然后采用最小费用流(minimum cost flow, MCF)算法进行相位解缠^[18],进而获取视线向的地表形变量,利用通用型卫星雷达大气改正系统(generic atmospheric correction online service for InSAR, GACOS)来降低大气噪声对形变场精度的影响^[19-22];最后分别获取 2016 年、2022 年两次门源地震的同震地表形变场,如图 2 所示。

1.2 同震形变场

许多学者利用 InSAR 技术对 2016 年门源地震进行了研究^[2,7,14]。文献[7]利用 InSAR 技术

获取的升降轨最大视线向的形变为 5.8 cm 和 6.8 cm;并通过反演认为本次地震可能发生在海原断裂的一个次级断裂上,且该断层在地下 10 km 处和海原断裂相连。文献[14]利用升降轨 Sentinel-1 数据获取了同震地表形变场,最大视线向形变均为 7.0 cm;同时综合利用余震信息,确定了发震断层参数,认为发震断层呈铲状。本文得到的形变场与文献[14]类似,图 2(a)和 2(b)分别为 2016 年门源地震同震升、降轨视线向形变场。升降轨同震形变场的形变信息连续,基本完整,表明 2016 年门源地震的活动断层并未破裂到地表,升、降轨影像同震形变场视线向最大隆升值为 6.7 cm 和 7.0 cm。此外,两个轨道的同震形变场结构较为单一均匀,方向较为一致,均显示地表靠近 SAR 卫星,符合逆断层型地震的运动特征。图 2(c)和 2(d)分别为 2022 年门源地震同震升、降轨视线向形变场。由于 026 升轨 SAR 影像的覆盖限制,图 2(c)只覆盖了本次地震的

西部区域,其最大形变为67 cm。完整的降轨视线向同震形变场显示,本次地震造成的地表形变范围达 $30\text{ km}\times 20\text{ km}$,其最大形变为78 cm。形

变场中间分割区大致呈NWW-SEE方向,这与USGS、GCMT等机构发布的震源参数的走向基本一致,且该方向与冷龙岭断裂基本平行。

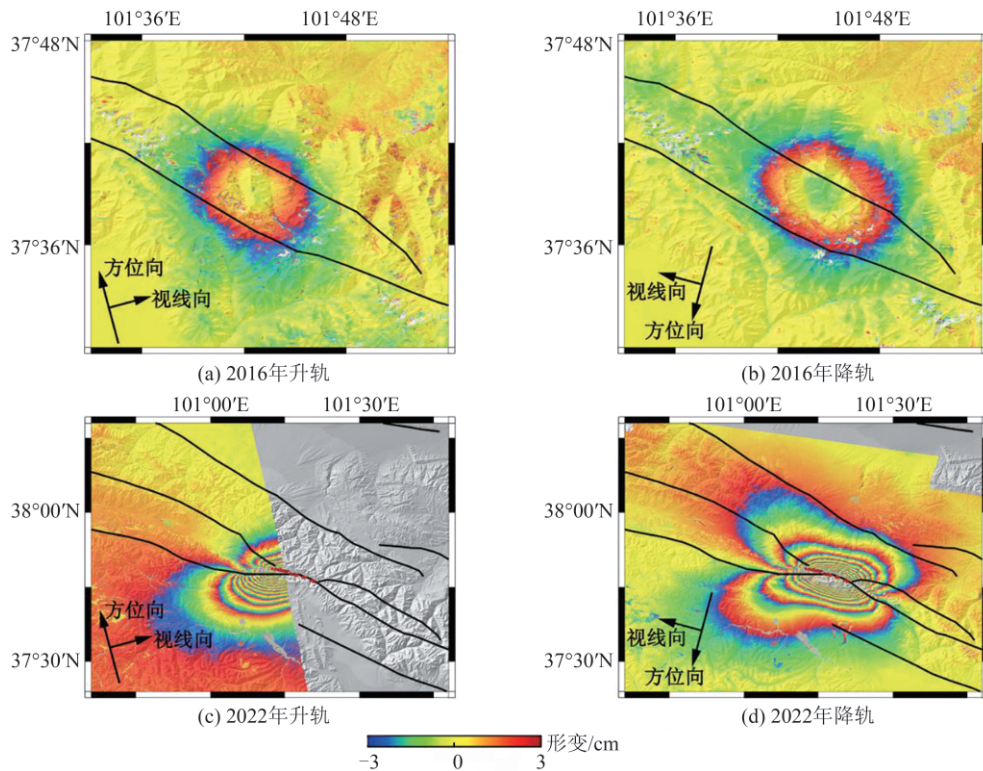


图2 2016年和2022年门源地震同震地表形变场

Fig.2 Co-seismic Surface Displacement Maps of the 2016 and 2022 Menyuan Earthquakes

2022年地震升降轨同震形变场的上下两盘表现出了相反的形变态势,同时同一轨道的形变场上下两盘也表现出了相反的运动状态,这种现象表明本次地震引起的地表形变以水平移动为主,符合走滑断层型地震的运动特征。同震视线向形变场的断层附近出现了较为严重失相干现象,主要原因为发震断层破裂到了地表,形变梯度较大,且引起了形变相位的不连续,这一现象与光学地表解译结果相吻合。图3为2022-01-08高分七号影像探测到的2022年门源地震地表破裂带。从图3可以看出,高分七号地表破裂解译结果显示本次地震造成了大于20 km的地表破裂,其中发震区域的西部地形平缓,地表破裂较连续,出现了较明显的拉张裂隙、挤压鼓包等地表破裂现象(见图3(b)中的(1)~(3)区域);而发震区域的东部因穿过高山、且受山上冰雪覆盖等因素影响,地表破裂呈现零散分布(见图3(b)中的(4)~(8)区域)。另外,通过光学影像解译获得的地表破裂为后续2022年地震的反演,特别是其走向参数提供了重要参考。

2 断层几何参数及滑动分布反演

本文利用Okada提出的弹性半空间位错理论^[23],联合升降轨同震形变场数据,分别反演了2016年和2022年两次门源地震的断层信息。为了抑制噪声和提高反演的效率,反演前对同震形变场进行了四叉树降采样^[24]。反演借助PSOKINV软件包进行了两步法反演策略:(1)假设矩形断层面上为均匀滑动,采用非线性搜索算法获取断层的几何参数,如发震断层的位置、断层走向、断层倾角等;(2)将发震断层面离散为一定尺寸的子断层执行分布式滑动反演,获取子断层各自的运动参数^[25-27]。2016年和2022年门源地震同震滑动分布结果如图4所示。

2.1 2016年门源地震反演

2016年门源地震在进行上述两步法反演的第一步均匀滑动反演时,根据整理的资料信息将断层的长度变化和宽度变化均设置为3~10 km,倾角变化设置为 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。均匀反演得到的断层参数见表1。

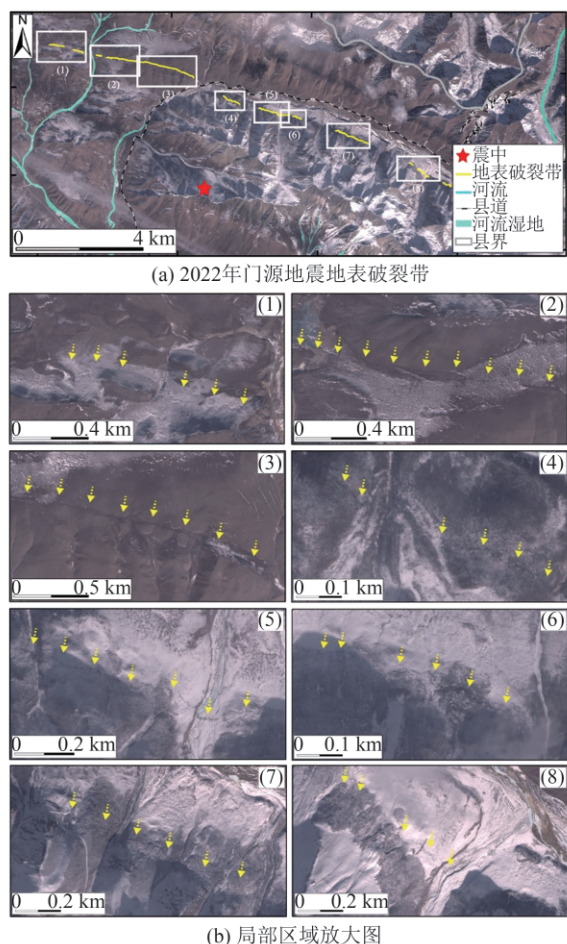


图 3 高分七号影像探测到 2022 年门源地震地表破裂带
Fig.3 Surface Ruptures of the 2022 Menyuan Earthquake
Traced from Gaofen-7 Image

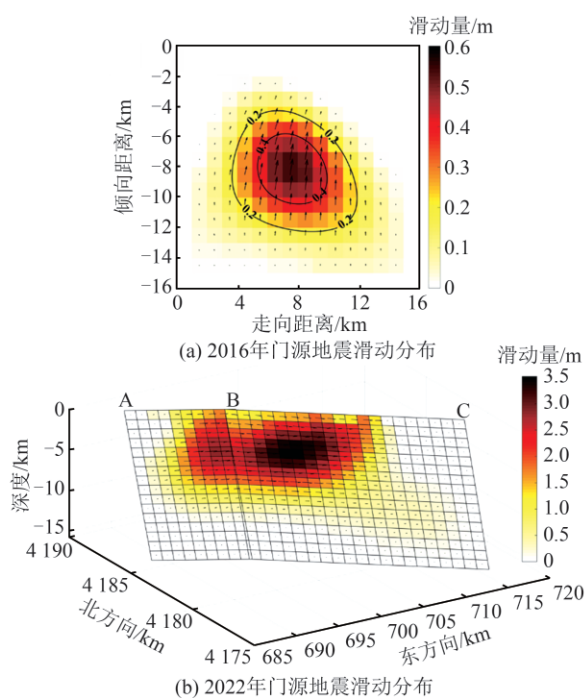


图 4 2016 和 2022 年门源地震同震滑动分布
Fig. 4 Slip Distributions of the 2016 and the 2022
Menyuan Earthquakes

为了获取断层面的精细滑动分布,首先将发震断层沿着走向和倾向分别扩展为 16 km,然后将延长后的发震断层面离散为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的子断层进行分布式滑动反演。由图 4(a)可以看出,2016 年门源地震发震断层的最大滑动量为 0.53 m,位于地下 9 km 深度处,滑动分布主要集中在地下 4~12 km 区域,表明地震活动并未破裂到地表。子断层的滑移方向表明发震断层是一个具有少量左旋走滑分量的逆断层。设置本地区的剪切模量为 30 GPa,则反演得出的矩震级为 5.9。本文反演结果与文献[2,14]公布的数据吻合较好。

图 5 为 2016 年门源地震同震地表形变场、模型拟合形变场及残差,其中左列为地表形变场观测值,中间列为均匀反演或分布式滑动反演结果模拟的同震形变场,右列为拟合残差,黑色矩形为投影到地面的断层面,而蓝色实线为断层面延长与地面的交线。由于 2016 年地震的地表形变较小,故成图时采用了解缠后的结果。由图 5 可以看出,InSAR 观测的升降轨形变场与相应的拟合结果基本一致,验证了本次地震断层反演的可靠性。

2.2 2022 年门源地震反演

虽然 026 升轨影像只提供了 2022 年门源地震的部分地表形变场,但是升降轨 SAR 影像对走滑断层破裂的地表形变成像具有互补的特点,因此,本文联合了升、降轨地表形变场进行反演。在反演时,由于 InSAR 解译的形变场已经破裂到地表,故将断层的上边界设置为 0 m。光学解译的地表破裂结果描绘出一条 NWW-SEE 向的断层迹线(见图 3(a)),结合此迹线走向和 InSAR 同震形变场的分布将反演模型设置为 AB 和 BC 两个断层,其中 AB 段的走向固定为 104° ,BC 段的走向固定为 109° 。长度变化设置为 8~40 km,宽度变化设置为 6~20 km,断层倾角变化变化设置为 $78^\circ \sim 90^\circ$ 。均匀反演得到的断层参数见表 1。

在获得发震断层的几何参数后,将 AB 段发震断层沿着走向延长至 10 km,沿着倾向延伸至 16 km,将 BC 段发震断层沿着走向延长至 20 km,沿着倾向延伸至 16 km,并将延长后的发震断层离散成 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的子断层进行分布式滑动反演。图 4(b)为分布式反演得到的断层滑动分布,子断层的运动方向表明该断层主要受左旋滑动控制,属于高倾角走滑型地震。子断

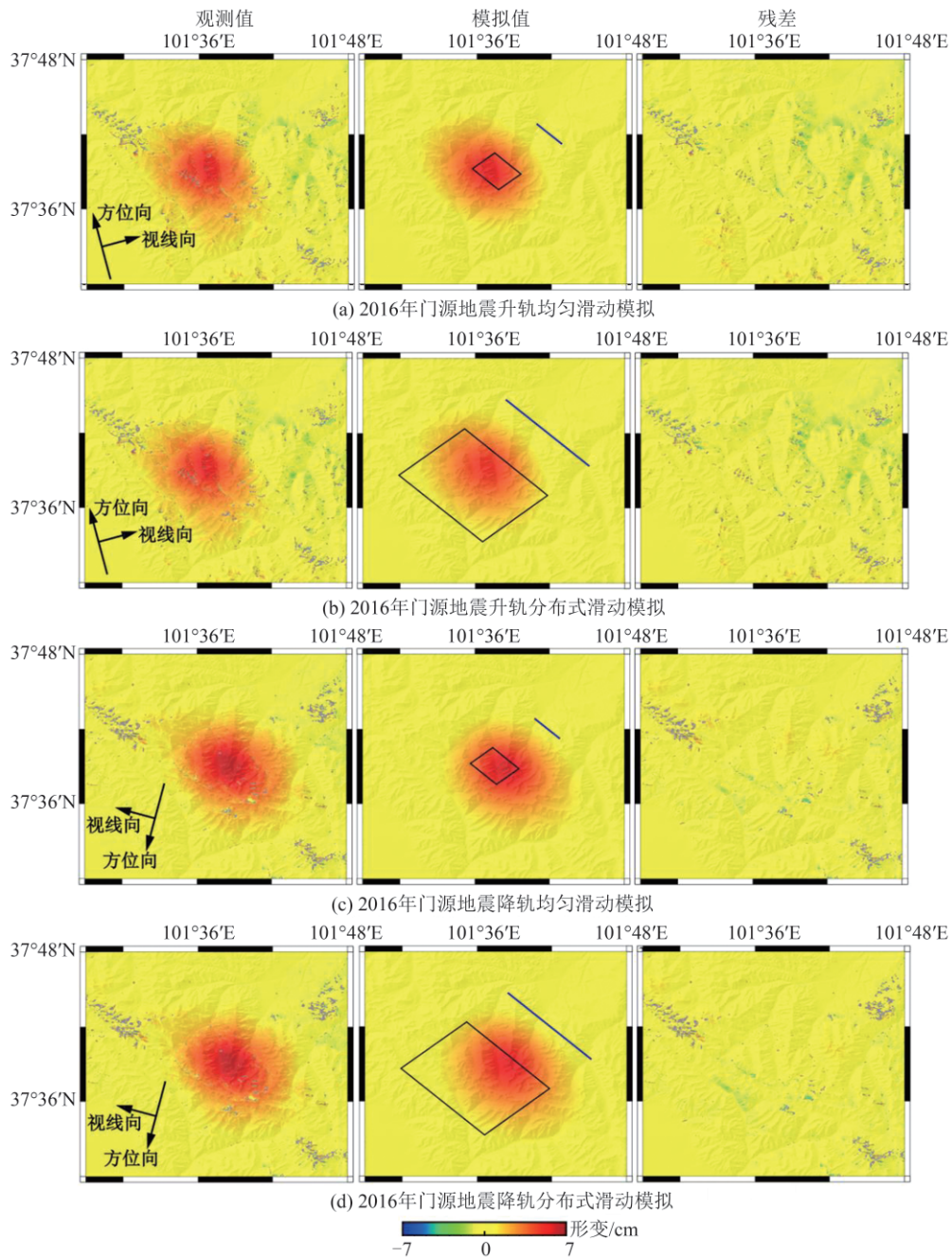


图5 2016年门源地震同震地表形变场、模型拟合形变场及残差

Fig.5 Coseismic Surface Displacements, Simulation and Residual of the 2016 Menyuan Earthquake

层最大滑动量为3.5 m,出现在地下约4 km处,滑动主要集中在地下2~7 km处。反演获得矩震级为6.7,与USGS、GCMT等机构公布的发展断层数据吻合较好。

图6为2022年门源地震同震地表形变场、模型拟合形变场及残差。由图6可以看出,InSAR观测的升降轨形变场与相应的拟合结果基本一致。值得指出的是,最右列的残差在断层近场的两侧较为明显,主要原因包括:(1)近场大梯度形变引起的低相干乃至失相干;(2)低相干引起的解缠误差;(3)活动断层几何结构的

简化。

综合研究结果,可以初步判定2022年门源地震的发震断层主体为冷龙岭西段西北端,且本次地震活动极有可能向西破裂到了其西侧的托莱山断裂。理由如下:(1)基于InSAR同震地表形变场反演确定的震源机制与冷龙岭断裂的运动性质吻合;(2)光学解译结果(图1)显示,本次地震引起地表破裂在冷龙岭断裂西端稍向南偏转,延伸至托莱山断裂(AB段),而且通过滑移分布建模显示该断层表现为左旋走滑类型,与托莱山断裂的运动性质吻合。

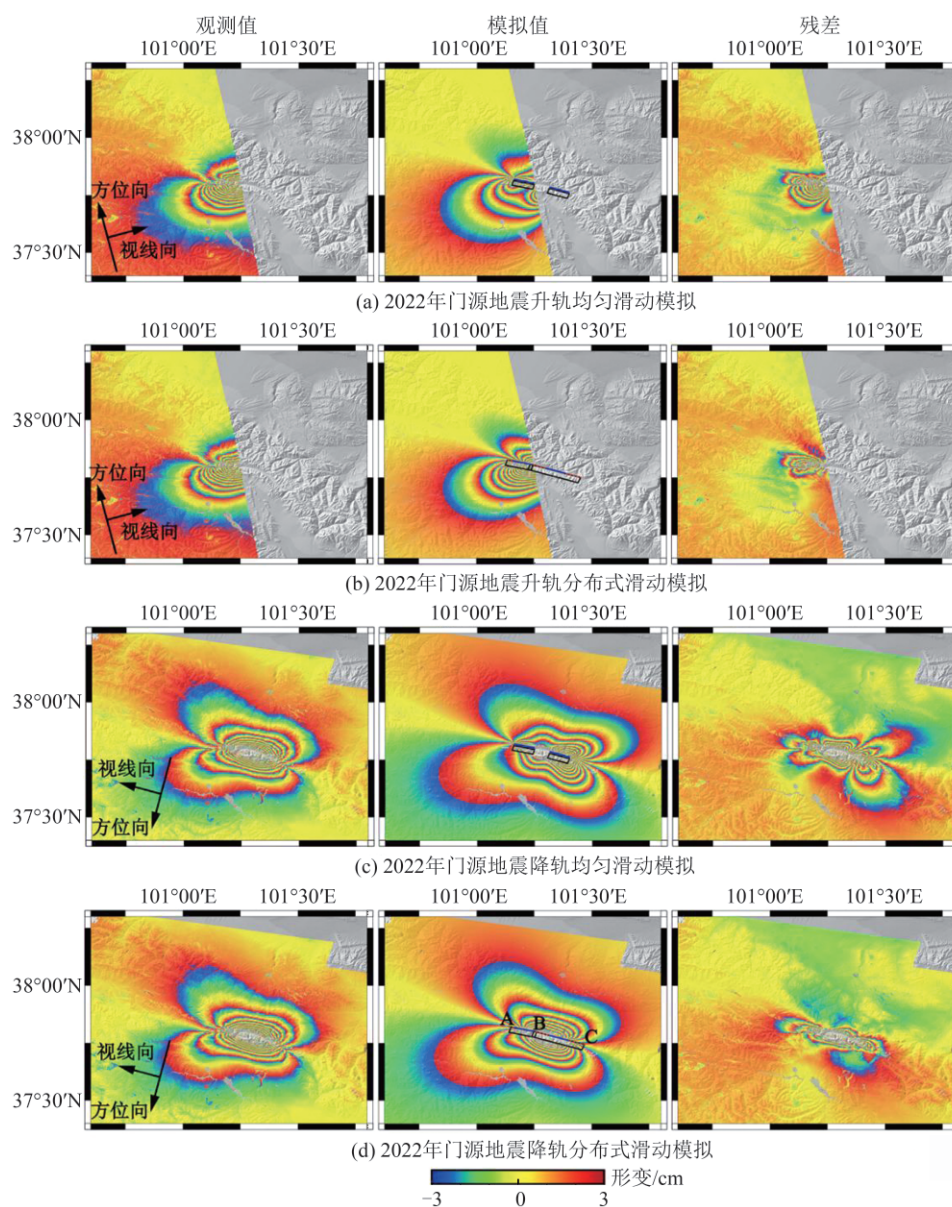


图6 2022年门源地震同震地表形变场、模型拟合形变场及残差

Fig.6 Coseismic Surface Displacements, Simulation and Residual of the 2022 Menyuan Earthquake

3 区域库仑应力变化对2022地震诱发关系探讨

强震发生后,发震区域的应力状态将会发生改变,进而延缓或者促进邻近区域活动断层上地震的发生,大量的地震触发关系研究表明地震之间存在相互作用^[28-30]。本文运用 Coulomb 3.3 软件包进行库仑应力分析,在处理过程中泊松比设置为 0.25,摩擦系数设置为 0.4^[31-33]。以 2016 年门源地震断层滑动分布作为源断层,本文反演得到的 2022 年门源地震的断层几何作为接收断层,分别采用 5 km 和 10 km 的深度计算 2016 年门源地震引起的库仑应力变化对 2022 年门源地震地震的影响。

2022 年门源地震发生在 2016 年门源地震震后的第 6 年,且两次地震震中距离不足 40 km。图 7 为 2016 年门源地震引起的邻近区域静态库仑应力变化。由图 7 可以看出,2016 年地震断层滑移在 5 km 和 10 km 的深度对 2022 年发震断层面上均产生了正库仑应力变化,且 2022 年地震发震断层整体处于库仑应力变化的增强区,这说明 2016 年地震对 2022 年地震的发生具有一定的促进作用。类似的库仑应力触发地震事件在巴颜喀拉块体东端的地震序列、2017 年 Iran 地震、2020 年 Mexico 地震等震例中均有研究^[34-36]。另外,文献[37]发现,发生在冷龙岭断裂北部的 2016 年门源地震的逆冲运动为冷龙岭断裂上地震活动腾出了空间。

因为2022年门源地震所处的构造背景中分布着较多左旋走滑性质的断裂,因此本文计算的库仑应力结果对分析发震区域整体的应力分布也具有参考意义。从图7分析得出,2016年门源地震引起的库仑应力的增强区主要分布在其西北部的I、II区域和东南部的III区域,其中,冷龙

岭北断裂、肃南-祁连断裂、皇城-双塔断裂西端、民乐-大马营断裂东南端、托莱山断裂、冷龙岭断裂东端以及门源断裂东端均存在较为明显的库仑应力增强(大于0.1 bar),地震发生风险增高,灾害风险加大,因此有必要对这些地区开展持续监测和详细的风险评估。

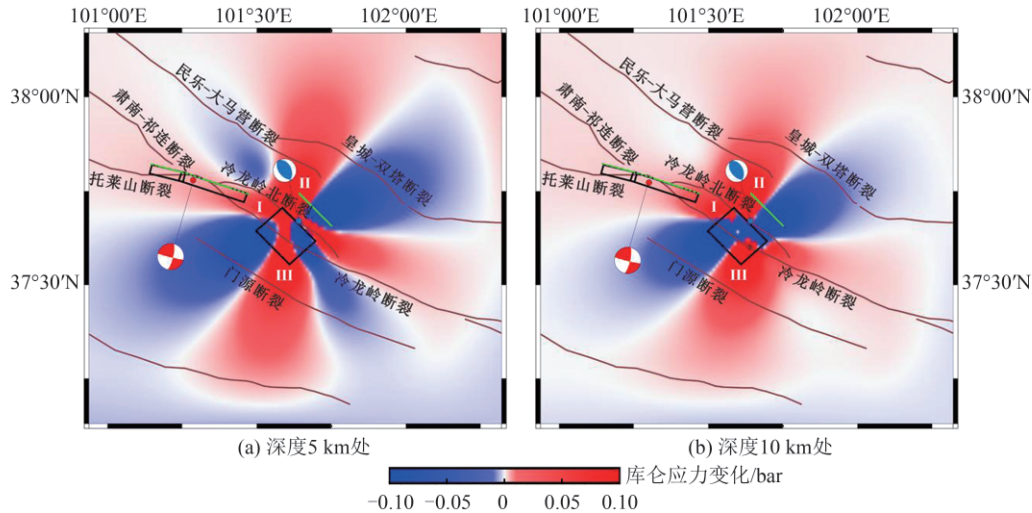


图7 2016年门源地震引起邻近区域静态库仑应力变化

Fig.7 Static Coulomb Stress Changes in Neighboring Regions Caused by the 2016 Menyuan Earthquake

4 结 语

本文对2022年门源地震做了快速响应,利用Sentinel-1A卫星升、降轨影像数据分别获取了2016年和2022年两次门源地震高精度同震地表形变场,经反演确定了两次门源地震发震断层的几何参数和滑动分布模型,探讨了2016年地震事件对2022年门源地震的影响,得出以下结论:

1)2016年门源地震升、降轨最大视线向隆升值分别为6.7 cm和7.0 cm,且同震地表形变场方向较为一致,符合逆断层型地震的运动特征。2022年门源地震同震地表形变场显示,地表破裂沿NNW-SEE方向延伸,地震造成的地表形变范围达30×20 km,其最大形变为78 cm。

2)2016年门源地震的滑动分布显示,发震断层的最大滑动量为0.53 m,断层滑动主要集中在地下4~12 km的区间。根据2022年门源地震的滑动分布,子断层最大滑动量为3.5 m,出现在地下约4 km处。初步判定2022年地震发震断层主要为冷龙岭断裂的西段,且极有可能破裂到了其西北端西侧的托莱山断裂。

3)以2022年门源地震的发震断层为接收断层,计算了2016年门源地震造成的库仑应力变化。结果显示2016年门源地震在2022年地震断

层面上产生了明显的正库仑应力变化,在一定程度上触发了2022年地震的发生。同时,2016年门源地震引起了冷龙岭北断裂、肃南-祁连断裂、皇城-双塔断裂西端、民乐-大马营断裂东南端、托莱山断裂、冷龙岭断裂东端以及门源断裂东端的库仑应力增加,这些断裂的地震危险性在今后需要得到持续关注。

本文利用近实时数据对2022年地震进行快速响应,对发震断层进行了初步建模,为救灾救援、灾害评估、应急响应提供第一手的数据支撑。后期将收集更全面的数据,利用多种技术进行处理,尤其是利用像素偏移量跟踪法获取近场大形变数据,对断层几何模型、滑移分布及震源机制作出更精细的建模和分析,评估研究区域的中长期地震灾害风险。

致谢:感谢欧空局提供Sentinel-1A雷达数据;感谢徐锡伟教授和许强教授的有意义的讨论,感谢审稿人提出的宝贵修改意见,使本文得以完善。

参 考 文 献

- [1] Li Haibing, Pan Jiawei, Sun Zhiming, et al. Continental Tectonic Deformation and Seismic Activity: A Case Study from the Tibetan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(1): 194-213 (李海兵,

- 潘家伟, 孙知明, 等. 大陆构造变形与地震活动: 以青藏高原为例[J]. 地质学报, 2021, 95(1): 194-213)
- [2] Liu Yang, Xu Caijun, Wen Yangmao. InSAR Observation of Menyuan Mw 5.9 Earthquake Deformation and Deep Geometry of Regional Fault Zone[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1035-1042 (刘洋, 许才军, 温扬茂. 门源 Mw 5.9 级地震形变 InSAR 观测及区域断裂带深部几何形态[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 1035-1042)
- [3] Ma Liang. Principal Features and Seismic-Tectonics of Qinghai Menyuan M_s 6.4 Earthquake in 2016[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2017, 38(5): 1-7 (马亮. 2016 年青海门源 M_s 6.4 地震特征与地质构造[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(5): 1-7)
- [4] He Wengui, Liu Baichi, Yuan Daoyang, et al. Research on Slip Rates of the Lenglongling Active Fault Zone [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2000, 22(1): 90-97 (何文贵, 刘百篪, 袁道阳, 等. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. 西北地震学报, 2000, 22(1): 90-97)
- [5] Hu Chaozhong, Yang Panxin, Li Zhimin, et al. Seismogenic Mechanism of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai M_s 6.4 Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(5): 1637-1646 (胡朝忠, 杨攀新, 李智敏, 等. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震的发震机制探讨[J]. 地球物理学报, 2016, 59(5): 1637-1646)
- [6] Liang Shanshan, Lei Jianshe, Xu Zhiguo, et al. Relocation of the Aftershock Sequence and Focal Mechanism Solutions of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai, M_s 6.4 Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(6): 2091-2103 (梁姗姗, 雷建设, 徐志国, 等. 2016 年 1 月 21 日青海门源 M_s 6.4 余震序列重定位和主震震源机制解[J]. 地球物理学报, 2017, 60(6): 2091-2103)
- [7] Wang H, Liu Z J, Ng A H M, et al. Sentinel-1 Observations of the 2016 Menyuan Earthquake: A Buried Reverse Event Linked to the Left-Lateral Haiyuan Fault[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 61: 14-21
- [8] Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, et al. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B10): 19617-19634
- [9] Hanssen R F. Radar Interferometry [M]. Dordrecht, the Netherlands Springer, 2001
- [10] Li Z H, Elliott J R, Feng W P, et al. The 2010 Mw 6.8 Yushu (Qinghai, China) Earthquake: Constraints Provided by InSAR and Body Wave Seismology[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B10): B10302
- [11] Elliott J R, Walters R J, Wright T J. The Role of Space-Based Observation in Understanding and Responding to Active Tectonics and Earthquakes[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13844
- [12] Xu Caijun, Lin Dunling, Wen Yangmao. Extract and Analysis Surface Deformation Caused by Wenchuan Mw 7.9 Earthquake from InSAR Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 1138-1142 (许才军, 林敦灵, 温扬茂. 利用 InSAR 数据的汶川地震形变场提取及分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(10): 1138-1142)
- [13] Han B Q, Yang C S, Li Z H, et al. Coseismic and Postseismic Deformation of the 2016 Mw 6.0 Petermann Ranges Earthquake from Satellite Radar Observations[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(1): 376-385
- [14] Li Y S, Jiang W L, Zhang J F, et al. Space Geodetic Observations and Modeling of 2016 Mw 5.9 Menyuan Earthquake: Implications on Seismogenic Tectonic Motion[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 519
- [15] Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, et al. GAMMA SAR and Interferometric Processing Software [C]//Proceedings of ERS-Envisat Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000
- [16] 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
- [17] Wright T J, Parsons B E, Lu Z. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1): L01607
- [18] Eineder M, Hubig M, Milcke B. Unwrapping Large Interferograms Using the Minimum Cost Flow Algorithm [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, USA, 1998
- [19] Yu C, Li Z H, Penna N T. Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Correction Using a GPS-Based Iterative Tropospheric Decomposition Model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 109-121
- [20] Yu C, Li Z H, Penna N T. Triggered Afterslip on the Southern Hikurangi Subduction Interface Following the 2016 Kaikoura Earthquake from InSAR Time Series with Atmospheric Corrections[J]. *Re-*

- ote Sensing of Environment*, 2020, 251: 112097
- [21] Yu C, Li Z H, Penna N T, et al. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(10): 9202-9222
- [22] Xiao R Y, Yu C, Li Z H, et al. Statistical Assessment Metrics for InSAR Atmospheric Correction: Applications to Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) in Eastern China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 96: 102289
- [23] 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
- [24] Jonsson S. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1377-1389
- [25] Feng Wanpeng, Li Zhenhong. A Novel Hybrid PSO/Simplex Algorithm for Determining Earthquake Source Parameters Using InSAR Data[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1189-1196 (冯万鹏, 李振洪. InSAR资料约束下震源参数的PSO混合算法反演策略[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1189-1196)
- [26] Li Yongsheng, Feng Wanpeng, Zhang Jingfa, et al. Coseismic Slip of the 2014 Mw 6.1 Napa, California Earthquake Revealed by Sentinel-1A InSAR[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(7): 2339-2349 (李永生, 冯万鹏, 张景发, 等. 2014年美国加州纳帕 Mw 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)
- [27] Song C, Yu C, Li Z H, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2019 Mw 7.5 New Ireland Earthquake from the Integration of Multiple Remote Sensing Techniques[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2767
- [28] Stein R S. The Role of Stress Transfer in Earthquake Occurrence[J]. *Nature*, 1999, 402(6762): 605-609
- [29] Shan B, Zheng Y, Liu C L, et al. Coseismic Coulomb Failure Stress Changes Caused by the 2017 M 7.0 Jiuzhaigou Earthquake, and Its Relationship with the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(12): 2181-2189
- [30] Ji Lingyun, Liu Chuanjin, Xu Jing, et al. InSAR Observation and Inversion of the Seismogenic Fault for the 2017 Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 4069-4082 (季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 九寨沟 Ms 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)
- [31] Shan Xinjian, Qu Chunyan, Gong Wenyu, et al. Coseismic Deformation Field of the Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake from Sentinel-1A InSAR Data and Fault Slip Inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12): 4527-4536 (单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等. 2017年8月8日四川九寨沟 7.0 级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4527-4536)
- [32] 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): B05S16
- [33] Toda S, Stein R S, Sevilgen V, et al. Coulomb 3.3 Graphic-Rich Deformation and Stress-Change Software for Earthquake, Tectonic, and Volcano Research and Teaching-User Guide[J]. *US Geological Survey Open-File Report*, 2011, 1060: 63
- [34] Xu Jing, Shao Zhigang, Liu jing, et al. Analysis of Interaction Between Great Earthquakes in the Eastern Bayan Har Block Based on Changes of Coulomb Stress[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 4056-4068 (徐晶, 邵志刚, 刘静, 等. 基于库仑应力变化分析巴颜喀拉地块东端的强震相互关系[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4056-4068)
- [35] Kuang J M, Ge L L, Metternicht G I, et al. Coseismic Deformation and Source Model of the 12 November 2017 Mw 7.3 Kermanshah Earthquake (Iran-Iraq Border) Investigated Through DInSAR Measurements[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(2): 532-554
- [36] Yu C, Li Z H, Song C. Geodetic Constraints on Recent Subduction Earthquakes and Future Seismic Hazards in the Southwestern Coast of Mexico[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(13): e2021GL094192
- [37] Guo Peng, Han Zhujun, An Yanfen, et al. Activity of the Lenglongling Fault System and Seismotectonics of the 2016 Ms 6.4 Menyuan Earthquake[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2017, 47(5): 617-630 (郭鹏, 韩竹军, 安艳芬, 等. 冷龙岭断裂系活动性与 2016 年门源 6.4 级地震构造研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(5): 617-630)

Source Parameters and Slip Distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai Earthquakes Constrained by InSAR Observations

LI Zhenhong^{1,2,3} HAN Bingquan^{1,2} LIU Zhenjiang^{1,2} ZHANG Miaomiao^{1,2} YU Chen^{1,2,4}
CHEN Bo^{1,2} LIU Haihui^{1,2} DU Jing^{1,2} ZHANG Shuangcheng^{1,2,3} ZHU Wu^{1,2,3}
ZHANG Qin^{1,3} PENG Jianbing^{1,3}

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Big Data Center for Geosciences and Satellites (BDCGS), Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 Key Laboratory of Western China's Mineral Resource and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

4 School of Engineering, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, NE1 7RU, UK

Abstract: Objectives: Two earthquakes with a distance less than 40 km occurred in Menyuan, Qinghai Province, China, including Mw 5.9 earthquake on 26th January 2016 and Mw 6.7 earthquake on 8th January 2022. **Methods:** The interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique was utilized to process Sentinel-1A radar images from both ascending and descending tracks to retrieve high resolution coseismic surface displacement maps for these two Menyuan earthquakes. The coseismic surface displacements were then inverted to determine the fault geometry parameters and the non-uniform fault slip distributions with a dislocation model in an elastic half-space. **Results:** The results show that the 2016 Menyuan earthquake was a reverse event on a buried fault with a maximum surface displacement of 6.7 cm and 7.0 cm on the ascending and descending tracks, respectively. The maximum slip on the fault plane reached 0.53 m and concentrated at depths of 4–12 km. The 2022 Menyuan earthquake ruptured along the NWW-SEE strike with a maximum surface displacement of 78 cm in the satellite radar line of sight and a maximum fault slip of 3.5 m occurred at a depth of approximately 4 km. **Conclusions:** Considering the tectonic settings around the Lenglongling fault zone, the 2022 Menyuan earthquake is likely to occur in the western segment of the left-lateral Lenglongling fault, with its western end extending westward to the Tuolaishan fault. By calculating the coulomb failure stress changes (CFS), it is inferred that the 2016 Menyuan earthquake generated considerable positive CFS which might have triggered the 2022 Menyuan earthquake.

Key words: 2016 Menyuan earthquake; 2022 Menyuan earthquake; interferometric synthetic aperture radar (InSAR); coseismic surface displacements; earthquake fault slip; earthquake stress triggering

First author: LI Zhenhong, PhD, professor, specializes in imaging geodesy, geohazards, infrastructure stability and precision agriculture. E-mail: Zhenhong.Li@chd.edu.cn

Corresponding author: YU Chen, PhD. E-mail: Chen.Yu@Newcastle.ac.uk

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2020YFC1512000); Shaanxi Province Science and Technology Innovation Team Program (2021TD-51); ESA-MOST DRAGON-5 Project (59339).

引文格式: LI Zhenhong, HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, et al. Source Parameters and Slip Distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai Earthquakes Constrained by InSAR Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(6): 887–897. DOI: 10.13203/j.whugis20220037 (李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等. InSAR 数据约束下 2016 年和 2022 年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(6): 887–897. DOI: 10.13203/j.whugis20220037)