

吕明哲,陈克杰,柴海山等. 2022. 联合 InSAR 和 高频 GNSS 位移波形反演 2022 年青海门源 M6.9 地震同震破裂过程. 地球物理学报, 65(12):4725-4738, doi:10.6038/cjg2022Q0304.

Lü M Z, Chen K J, Chai H S, et al. 2022. Joint inversion of InSAR and high-rate GNSS displacement waveforms for the rupture process of the 2022 Qinghai Menyuan M6.9 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(12):4725-4738, doi:10.6038/cjg2022Q0304.

联合 InSAR 和 高频 GNSS 位移波形反演 2022 年青海门源 M6.9 地震同震破裂过程

吕明哲¹, 陈克杰^{1*}, 柴海山¹, 耿江辉², 张生鹏^{3,4}, 房立华⁵

1 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518055

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079

3 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016

4 青海省基础测绘院, 西宁 810101

5 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 使用差分干涉测量和像素偏移追踪从 Sentinel-1 SAR 卫星影像中提取了 2022 年青海门源 M6.9 地震视线向位移及近断层距离向偏移, 通过单历元精密单点定位获取了 16 个 GNSS 测站高频位移波形. 基于上述观测资料的同震破裂过程联合反演结果表明, 该地震使两个走向分别为 82° 和 112° 的断层面发生破裂, 为双侧不对称破裂事件, 总破裂长度 ~ 26 km, 滑动集中分布在 $0\sim 5$ km 深度, 最大滑动量为 ~ 4 m, 总地震矩释放量为 8.65×10^{18} Nm (对应矩震级为 $M_w 6.56$), 在 ~ 10 s 内全部释放. 同震库仑应力变化结果表明, 主震使两条发震断层在 10 km 深度处库仑应力增加, 促进了该区域后续余震发生. 滑动分布模型显示门源地震浅层滑动亏损较小, 结合已有 2014 至 2021 年时序 InSAR 结果, 推测在更长震间期内, 与两条发震断层相近的冷龙岭断裂和托莱山断裂不存在明显的浅层蠕滑.

关键词 青海门源 M6.9 地震; InSAR; 高频 GNSS; 联合反演

doi:10.6038/cjg2022Q0304

中图分类号 P228, P315

收稿日期 2022-05-04, 2022-08-11 收修定稿

Joint inversion of InSAR and high-rate GNSS displacement waveforms for the rupture process of the 2022 Qinghai Menyuan M6.9 earthquake

LÜ MingZhe¹, CHEN KeJie^{1*}, CHAI HaiShan¹, GENG JiangHui²,

ZHANG ShengPeng^{3,4}, FANG LiHua⁵

1 Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

2 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 School of Geographic Science, Qinghai Normal University, Xining 810016, China

4 Qinghai Basic Surveying and Mapping Institute, Xining 810101, China

5 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract Using differential interferometric synthetic aperture radar (InSAR) and pixel offset tracking, we obtained both the coseismic displacements along line-of-sight and near-field range

基金项目 国家自然科学基金(42074024)和中国科协青年人才托举工程联合资助.

第一作者简介 吕明哲, 硕士研究生, 主要从事卫星大地测量数据处理及震源参数反演. E-mail: 12032534@mail.sustech.edu.cn

* 通讯作者 陈克杰, 博士, 副教授. E-mail: chenkj@sustech.edu.cn

offsets of the 2022 Qinghai Menyuan $M_{6.9}$ earthquake from Sentinel-1 SAR images, and also got high-rate displacement waveforms at 16 Global Navigation Satellite System stations through epoch-wise precise point positioning solutions. Based on these measurements, we then jointly inverted the rupture process of the 2022 Menyuan $M_{6.9}$ earthquake. Our results show that this earthquake was a bilateral asymmetric event, which ruptured two faults at strikes of 82° and 112° with a total length of ~ 26 km. Most of the slip occurred between 0 and 5 km, and the peak slip was ~ 4 m. A total seismic moment of 8.65×10^{18} Nm (equivalent to $M_w 6.56$) was released within ~ 10 s. Coulomb failure stress change analysis indicates that stress levels of two neighbouring seismogenic faults at 10 km were increased, which was responsible for the subsequent aftershocks in this region. Our slip model implies insignificant shallow slip deficits, considering InSAR time series from 2014 to 2021, so we speculated that there should be negligible shallow creeping along Lenglongling and Tuolaishan segments during the long-term interseismic period.

Keywords Qinghai Menyuan $M_{6.9}$ earthquake; InSAR; High-rate GNSS; Joint inversion

0 引言

据中国地震台网中心 (<https://news.ceic.ac.cn>) 测定, 北京时间 2022 年 1 月 8 日凌晨 1 时 45 分左右, 青海省海北州门源县发生 $M_{6.9}$ 地震, 震源位置为 101.26°E , 37.77°N , 深度 10 km. 此次地震震中海拔高且人烟稀少, 有少量人员受伤, 对当地部分高铁线路和桥梁等造成了严重损坏 (Yang et al., 2022). 野外现场考察结果显示 (潘家伟等, 2022), 门源地震形成了总长约 27 km 同震地表破裂带, 错动方式为左旋走滑, 与全球质心矩张量 (Global Centroid Moment Tensor, GCMT) 给出的震源机制解一致 (图 1c), 发震断层初步确定为冷龙岭断裂西段和托莱山断裂东段 (李智敏等, 2022).

冷龙岭断裂和托莱山断裂位于海原断裂带西段. 海原断裂带是一条长约 1000 km 的左旋走滑断裂带, 具有部分由南向北的逆冲分量, 是柴达木—祁连地块北部边界 (图 1b), 在调节印度板块和欧亚板块碰撞持续变形方面发挥着重要作用 (袁道阳等, 2004; Jolivet et al., 2012). 海原断裂带在 20 世纪发生了两次大地震: 1920 年海原 $M_{8.7}$ 地震 (Deng et al., 1986) 和 1927 年古浪 $M_{8.0}$ 地震 (Gaudemer et al., 1995). 在上述两次强震之间存在一条 260 km 长的未破裂段, 被称为天祝地震空区 (图 1c). 该段断层在过去几个世纪没有记录到 7 级以上地震, 具有孕育大型地震的潜力 (Gaudemer et al., 1995).

2022 年门源地震使天祝地震空区最西端冷龙岭段和托莱山断裂东端发生破裂 (图 1c), 其中冷龙岭断裂周边区域在过去 100 年间发生过两次较大地震:

1986 年门源 $M_{6.0}$ 地震和 2016 年门源 $M_{5.9}$ 地震 (徐纪人等, 1986; 陈兵等, 2003; Zhang et al., 2020), 表明该区域有较强地震活动性. 深入研究本次门源地震的破裂过程对于理解天祝地震空区西端冷龙岭段发震特征和评估该区域未来地震危险性具有重要意义.

门源地震发生后, 国内学者利用 InSAR 和 GNSS 观测资料研究了同震地表静态形变和震源机制 (李振洪等, 2022; Yang et al., 2022; 颜丙国等, 2022; 冯万鹏等, 2022), 但尚未对地震破裂时空演化过程进行分析. 本文首先采用差分干涉合成孔径雷达 (Differential InSAR, DInSAR) 和像素偏移追踪 (Pixel Offset Tracking, POT) 处理 Sentinel-1 数据获取了同震地表形变场和地表破裂迹线, 然后利用单历元精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 获取了震中附近 16 个 GNSS 测站 (图 1) 的 1 Hz 同震位移波形. 最后, 联合上述观测资料反演了本次地震同震滑动分布和时空过程, 并对该区域静态库仑应力扰动进行分析.

1 同震形变获取

1.1 InSAR 同震形变

门源地震发生在海拔 3500~4200 m 的祁连山区, 该区域几乎没有植被覆盖 (潘家伟等, 2022), 这使得欧空局 (European Space Agency, ESA) C 波段 (波长 5.54 cm) SAR 卫星 Sentinel-1 在该地区干涉效果较好. 本研究选取覆盖研究区域的 4 幅基于渐进式扫描地形观测 (Terrain Observation with Progressive Scans, TOPS) 升降轨 Sentinel-1A 干涉宽幅模式 (Interferometric Wide, IW) SAR 影像 (T128A 和

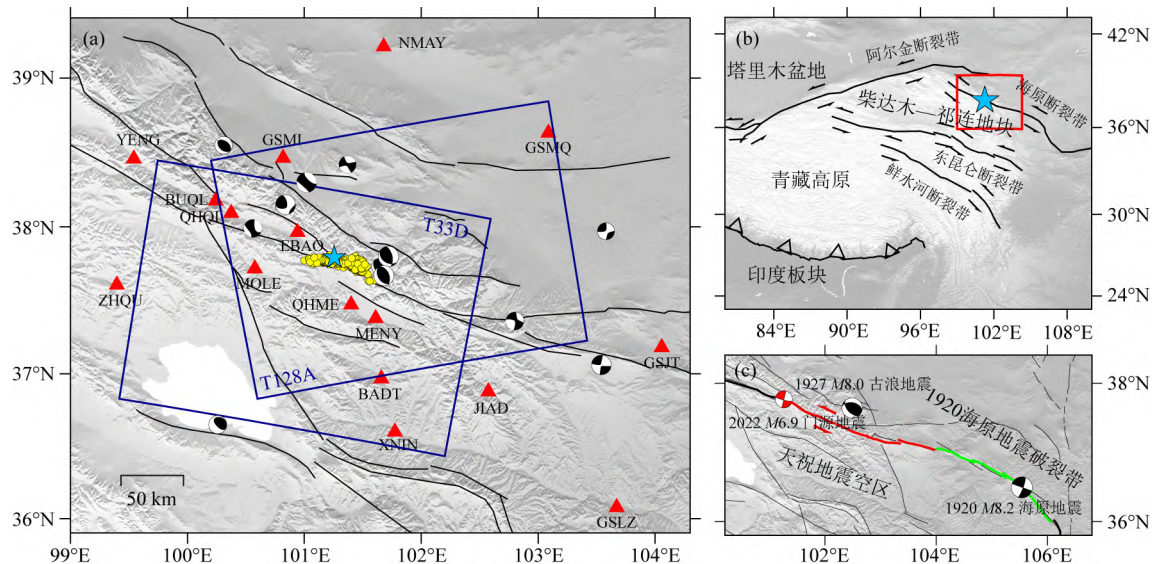


图 1 2022 年门源 M6.9 地震测站分布及构造背景

(a) GNSS 台站分布(红色三角形)和 InSAR 影像覆盖区域(蓝色矩形框). 蓝色五角星为本次地震震中位置,黄色圆点为余震分布(Fan et al., 2022),黑色震源球表示 GCMT 提供的 1976 年到 2022 年 $M_w>5.0$ 地震震源机制解; (b) 研究区构造背景,红色矩形框为图(a) 所处区域; (c) 天祝地震空区在海原断裂带上所处位置(红色断层),绿色断层表示 1920 年海原地震破裂带,红色、黑色震源球分别表示 2022 年门源 M6.9 地震(GCMT 提供)和 1920 年海原 M8.2 地震(Ou et al., 2020)和 1927 年古浪 M8.0 地震(Hou et al., 1999)震源机制解.

Fig. 1 Station distribution and tectonic background of the 2022 Menyuan M6.9 earthquake

(a) GNSS station distribution (red triangles) and InSAR coverage (blue rectangles). The blue star denotes the epicenter, the yellow dots represent the distribution of aftershocks (Fan et al., 2022), and the black beachball represents the focal mechanism solution of historical earthquakes with $M_w>5.0$ provided by GCMT from 1976 to 2022; (b) Tectonic background of the study area, and red rectangle outlines area of figure (a); (c) The location of the Tianzhu earthquake gap on the Haiyuan fault zone (red faults), and the green faults are the rupture fault of the 1920 Haiyuan earthquake. Red and black beachballs show the focal mechanism solutions of the 2022 Menyuan M6.9 earthquake provided by GCMT, the 1920 Haiyuan M8.2 earthquake (Ou et al., 2020) and the 1927 Gulang M8.0 earthquake (Hou et al., 1999), respectively.

T33D),利用开源软件 ISCE2 进行 InSAR 数据处理 (Rosen et al., 2012). SAR 数据基本信息如表 1 所示,升降轨干涉影像标准差是从远离形变区域的像素估计得到(温扬茂等, 2014).

表 1 InSAR 观测信息
Table 1 InSAR data information

飞行方向	轨道号	主影像	辅影像	垂直基线(m)	入射角(°)	方位角(°)	标准差(cm)
升轨	128	2022-01-05	2022-01-17	38	39.05	-10.08	0.77
降轨	33	2021-12-29	2022-01-10	56	38.86	190.11	0.92

本文首先采用两轨法对升降轨 SAR 数据进行差分干涉处理,并使用 ESA 提供的精密轨道数据(https://s1qc.asf.alaska.edu)来调整 SAR 卫星影像轨道参数,以实现 SAR 主辅影像精确配准,然后采用美国宇航局发布的 30 m 分辨率 SRTM DEM 数据(Farr et al., 2007) 去除地形相位. 为了抑制相位噪声和提高信噪比,使用功率谱滤波器对干涉图进行滤波(Goldstein and Werner, 1998),并进行 8×2 (距离向 \times 方位向)多视处理(Vaka et al., 2020). 使用 SNAPHU 软件对滤波后的干涉图进行相位解缠(Chen and Zebker, 2000). 最后,使用

WGS84 坐标系对解缠后的干涉图进行地理编码以获取门源地震同震视线向(Line of Sight, LOS)地表形变场(图 2).

SAR 影像包含相干(干涉相位)和非相干信息(幅度特征)(Jiang et al., 2017). 在地震破裂近场区域,由于地表遭受剧烈破坏导致该区域位移梯度较高,可使 SAR 卫星干涉相位失相干(Schmidt and Bürgmann, 2006). DInSAR 在这些失相干区域无法进行可靠相位解缠,因此 LOS 向形变场在该区域形变信息丢失. 而近场形变信息在同震研究中能提取精确地表破裂迹线,从而有效约束断层长度和走

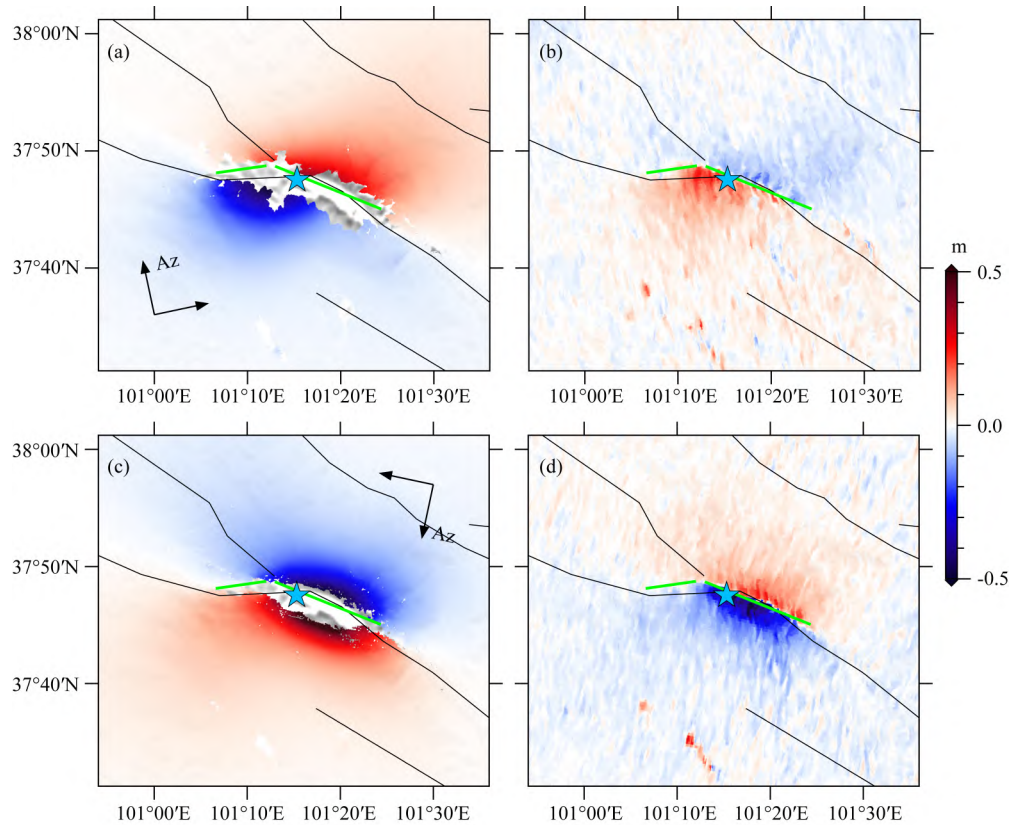


图 2 2022 年门源 M6.9 地震 InSAR 同震形变场

Sentinel-1 升轨和降轨经 DInSAR 处理得到的 LOS 向形变场(a,c)和经 POT 处理得到的距离向位移场(b,d).

蓝色五角星表示震中,绿线为手动绘制的地表破裂迹线.

Fig. 2 Coseismic InSAR deformation field of the 2022 Menyuan M6.9 earthquake

(a),(c) are the LOS deformation field obtained by DInSAR and (b),(d) are the range displacement field obtained by POT of Sentinel-1 ascending and descending tracks, respectively. The blue star indicates the epicenter, and the green line is the manually drawn surface rupture trace.

向等几何信息.为了获取本次地震地表破裂迹线,使用 POT 计算距离向像素偏移.

POT 利用 SAR 影像中非相干信息(幅度特征)来提取位移信息,将震前震后两幅 SAR 影像中 M (通常为几十)个像素进行互相关,从而获取亚像素精度的距离向(相当于 DInSAR 中的 LOS 向)和方位向像素偏移(Simons and Rosen, 2007).这种方法不需要进行相位解缠(Wang et al., 2015; He et al., 2019),因此不受 SAR 影像中相位相干性限制,可以获取近场地表形变.但由于 POT 是基于像素集合实现,故空间分辨率相较于 DInSAR 显著降低(Simons and Rosen, 2007).其中方位向偏移信噪比更低(Jin and Fialko, 2021),因此本研究只采用距离向偏移.

图 2 为分别利用 DInSAR 和 POT 获取的门源地震同震形变场,升、降轨 SAR 影像均完整覆盖了震中区域.具体而言,利用干涉相位获取的升降轨同

震形变(图 2a,2c)分布范围为 60~80 km,最大视线向形变为 0.61 m,发震断层附近部分失相干区域形变被掩膜.降轨干涉形变图在断层南北两侧形变大致呈对称分布,由于升降轨 SAR 卫星影像存在成像几何差异,升轨 LOS 向形变场南侧下沉区偏西,北侧抬升区偏东,并大致以震中为中心呈对称分布.而升轨和降轨 LOS 向形变图上发震断层两侧位移相反,进一步证实了本事件因走滑断层而造成的水平向运动.

利用 POT 获取的升降轨距离向偏移(图 2c, 2d)显示地表破裂最大距离向偏移为 0.79 m,由于其在发震断层附近也连续覆盖,故大于在近断层附近失相干的最大 LOS 向形变(0.61 m).同时,距离向偏移表明发震断层走向自西向东在 $\sim 101.2^\circ\text{E}$ 处发生显著变化,西段断层走向角略小于 90° ,东段断层走向角增大 $\sim 30^\circ$,总地表破裂迹线长度为 $\sim 30\text{ km}$.由于 POT 利用 SAR 影像中的幅度特征信息而不是

高精度干涉相位,所以距离向偏移图较 DInSAR 的 LOS 向形变图存在更多斑点噪声(Hu et al., 2012; He et al., 2019).

InSAR 原始同震形变场数据量达百万级,并且大部分低相位梯度区域的相邻观测数据之间空间相关性较高,考虑到反演效率,使用四叉树降采样法(Jónsson et al., 2002)对原始观测数据进行降采样,该降采样方法可以在发震断层附近高相位梯度区域更加频繁地采样,从而可以保留原始数据中主要形变特征,降采样后的升、降轨 LOS 向形变场数据点为 1305.

1.2 GNSS 数据处理

本文获取了震中附近来自陆态网络和青海省连续运行跟踪站(Continuously Operating Reference Stations, CORS)共计 16 个 GNSS 台站(分布见图 1a)的 1 Hz GPS/GLONASS 双系统 2022 年 1 月 7 日(UTC)当天观测数据,其中来自陆态网络测站接收机型号为 Trimble Net R9,天线型号为 TRM59800.00 或 TRM59900.00,青海省 CORS 站所用接收机型号为中海达 VNet8U-I,天线类型为 AT-2300,上述测站均装备扼流圈以削弱多路径效应.本文采用成熟的 GPS+GLONASS 双系统组合方式(An et al., 2020),GPS 和 GLONASS 两系统定权设置为 2:1(Shi et al., 2013),系统间偏差在计算过程中估计,通过 PRIDE PPP-AR 软件完成动态 PPP 解算(Zumberge et al., 1997; Geng et al., 2018, 2019),使用卡尔曼滤波逐历元求解并反向滤波,每个历元的三维坐标和接收机钟差作为白噪声随机参数估计,以全天平均坐标做站心转换,得到东西、南北和垂向三个时间序列,具体处理策略如表 2 所示.

精密产品选取德国地学中心(GFZ)提供的 30 s

表 2 GNSS 数据处理策略

Table 2 Processing strategies of GNSS data

观测值定权	高度角定权 $\begin{cases} 1, \text{elev} \geq 30^\circ \\ 2\sin(\text{elev}), \text{elev} < 30^\circ \end{cases}$
伪距、载波先验误差	0.6 m、0.01 周
组合方式	无电离层组合
精密产品	GFZ 30 s/15 min 最终精密钟差/轨道
地球自转参数	IGS 产品
对流层估计	分段线性估计
截止高度角	7°
天线改正	IGS14.atx
其他改正	海潮、固体潮等

精密钟差和 15 min 精密轨道.对于 1 Hz 数据解算来说,30 s 时长内钟差高频抖动并不明显,使用 30 s 精密钟差即可满足计算需要(张小红等, 2010).产品日期向前后各延长一天以确保当天开始和结束时轨道内插精度.对每一个连续弧段,设置一个待估模糊度参数.为了减少多路径效应影响,选择基于高度角的观测值定权方式,且设置截止高度角为 7° .电离层使用传统 L1+L2 无电离层组合消除,以减少待估参数总数.以 Saastamoinen 模型计算对流层延迟,并每两小时估计一次对流层延迟残余,投影函数选择 Global Mapping Function(GMF).

天线相位中心偏差(Phase Center Offsets)、天线相位中心变化(Phase Center Variations)以及天线相位缠绕均考虑并改正.固体潮、海潮和极潮通过国际地球自转和参考框架服务(International Earth Rotation and Reference System Service)2010 模型精确改正.接收机硬件码偏差等会被吸收至接收机钟差内,精密产品估计所使用的是无电离层组合,故卫星硬件码偏差可忽略,相位偏差会被吸收至模糊度,导致其失去整数特性.由于动态 PPP 解算需要一定收敛过程,为保证结果不受影响,本文计算了地震发生当日全天时间序列,最后截取各测站 P 波理论到时前 10 s 和到达后 50 s 共计 60 s 同震位移波.经过上述处理,GNSS 同震波拾取精度达到了 1~2 cm.由于门源地震为左旋走滑运动,垂向位移较小,并且 GNSS 水平向精度高于垂向精度,这导致垂向波形信噪比较低,本文仅采用水平向 GNSS 观测波形进行同震反演.

2 滑动分布反演

2.1 断层几何参数

根据 POT 得到的 Sentinel-1 升、降轨距离向偏移(图 2c, 2d)揭示的断层地表破裂迹线,本文使用两个矩形断层 Fault 1(靠近托莱山断裂东段)和 Fault 2(靠近冷龙岭断裂西段)来拟合发震断层(图 3a).两个矩形断层长度分别设定为 10 km 和 20 km,断层宽度均设定为 16 km,走向角分别为 82° 和 112° .高分影像识别的门源地震地表破裂带表明(刘璐等, 2022),沿冷龙岭断裂西段破裂带长度为 21 km,沿托莱山断裂东段破裂带长度为 5 km,说明本文选取的两段断层长度较为合理.根据 GCMT 震源机制解,门源地震矩形断层倾角变化范围初步设定为 $70^\circ \sim 90^\circ$,两个断层设置为等倾角,然后根据步长为 1° 搜索确定最佳倾角

为 80° . 此外, InSAR 形变揭示的门源地震地表破裂迹线与已知冷龙岭断裂和托莱山断裂所处位置并不完全重合, 其中 Fault 2 东侧与冷龙岭断裂部分重合, Fault 2 西侧位于冷龙岭断裂和托莱山断裂交界处, 而 Fault 1 基本平行靠近于托莱山断裂.

震中位置选取对于联合反演中高频 GNSS 位移波形拟合至关重要, 本文根据中国地震台网中心、USGS 和 Fan 等 (2022) 提供的主震震中位置初步划

定格网搜索范围, 然后基于数据拟合程度在由地表破裂迹线构建的断层模型上反演搜索最优震中位置. 格网搜索结果如图 3 所示, 高频 GNSS 位移波形拟合相较于 InSAR 对震中位置更为敏感, 故本文基于高频 GNSS 波形拟合选取最佳震中位置为 101.26°E , 37.79°N . 该震中位于本文选取的矩形断层 Fault 2 上, 在已知断层数据库中位于冷龙岭断裂和托莱山断裂交界处, 并更接近于托莱山断裂.

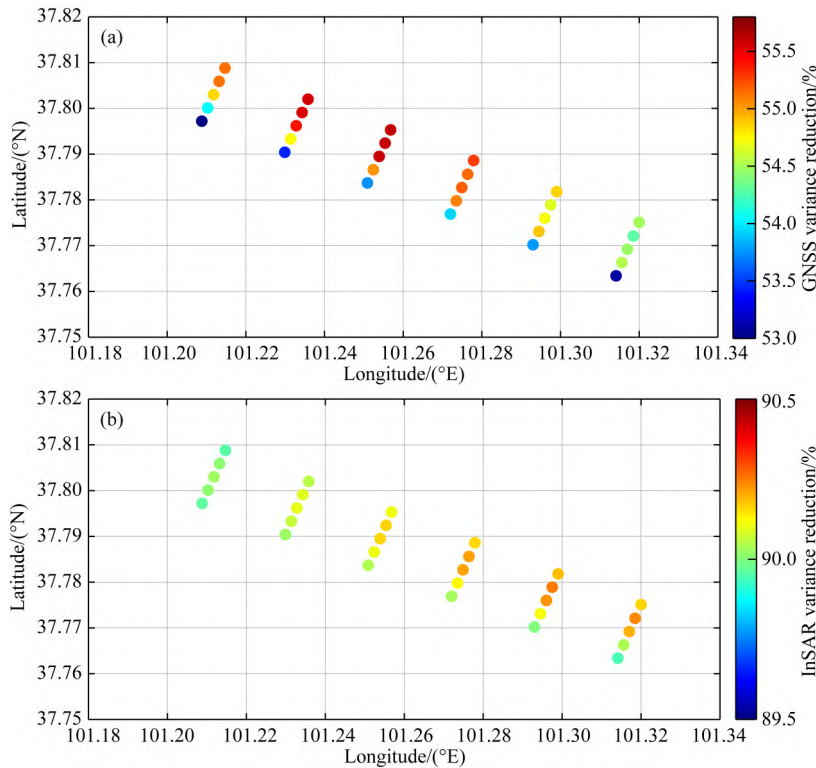


图 3 2022 年门源 M6.9 地震震中位置格网搜索

(a) 高频 GNSS 位移波形拟合方差降; (b) InSAR 数据拟合方差降.

Fig. 3 Epicenter grid search of the 2022 Menyuan M6.9 earthquake

(a) Variance reduction of high-rate GNSS displacement waveforms; (b) Variance reduction of InSAR.

2.2 反演方法

在发震断层几何参数确定之后, 为了细化断层面滑动分布, 将两个断层离散成 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 共计 120 个子断层. 然后采用非负最小二乘算法 (Lawson and Hanson, 1995) 联合 InSAR 和 高频 GNSS 位移波反演每个子断层上的同震滑动分布, 基本线性观测方程可表示为:

$$Gm = d, \quad (1)$$

式中 m 表示每个子断层上的滑动参数, G 表示断层位错和地壳形变之间的线性响应 (格林函数), d 表示 InSAR 和 高频 GNSS 位移波的观测矩阵. 每个子断层用 5 个 50% 时间重叠窗口进行参数化, 每个时间窗口由 2 s 持续时间的三角形滑移率函数描述.

基于门源地区一维地壳速度分层模型 (表 3) (尹欣欣等, 2022), 使用频率-波数积分法 (Zhu and Rivera, 2002) 计算 InSAR 和 高频 GNSS 位移波的格林函数.

表 3 震中附近的地壳速度模型

Table 3 The crustal velocity model near the epicenter

厚度 (km)	P 波速度 ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	S 波速度 ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Q_a	Q_b
5	4.76	2.67	2.50	1500	600
5	5.44	3.34	2.61	1500	600
5	5.56	3.41	2.63	1500	600
5	5.90	3.07	2.70	1500	600
5	5.99	3.63	2.71	1500	600
10	6.05	3.74	2.73	1500	600
10	6.14	4.05	2.75	1500	600

注: Q_a 和 Q_b 分别为 P 波和 S 波衰减因子.

Note: Q_a and Q_b are P-wave and S-wave attenuation factors, respectively.

此外,通过离散化子断层可以将需要反演的无限数量参数减少到有限数量,虽然此时需要反演的参数数量小于观测值数量,但由于在反演过程中位于深部的子断层约束不佳以及部分区域观测值分布稀疏等原因,滑动分布反演问题总是一个不适定问题,因此需要施加正则化约束(Wang et al., 2016). 联合 InSAR 静态位移和 高频 GNSS 动态位移波形进行运动学反演需要同时对空间和时间施加正则化约束,本研究采用一阶拉普拉斯空间正则化矩阵 L_s 和时间一阶导数正则化矩阵 L_t 来对该反演问题进行约束(Melgar Moctezuma, 2014),式(1)可以扩展为:

$$\begin{bmatrix} G \\ \lambda_s L_s \\ \lambda_t L_t \end{bmatrix} m = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 λ_s 和 λ_t 分别表示空间和时间正则化的平滑参数,最佳平滑参数由 ABIC (Akaike's Bayesian Information Criterion, Akaike 贝叶斯信息准则) 方法 (Akaike, 1980; Fukahata et al., 2004) 确定.

本研究尝试利用 高频 GNSS 波形拟合残差来确定地震最佳破裂速度,但由于 GNSS 台站距离震中较远且该地震破裂尺度较小,高频 GNSS 位移波形对破裂速度并不敏感,故本次地震破裂速度取经验值(0.8 倍 S 波速度) $2.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (Heaton, 1990). 确定不同种类数据相对权重比以便每个数据集都能较好拟合对于多源数据联合反演来说至关重要 (Chen et al., 2020). 我们根据经验定权法 (Feng et al., 2010) 将 InSAR 和 高频 GNSS 权重比设置为 1:1, 以确保能对每个数据集都能较好地解释和拟合 (Zhang et al., 2009).

2.3 结果分析

最佳断层滑动分布模型如图 3 所示. 结果表明,门源地震引起的断层破裂长度约为 26 km, 与野外现场考察结果基本一致 (潘家伟等, 2022). 两条发震断层 Fault 1 和 Fault 2 均以左旋走滑运动为主, 其中 Fault 2 中部兼具少量逆冲成分. 门源地震主要滑动沿深度主要分布在震源(5 km)上部, 沿走向则主要集中在 Fault 2 的冷龙岭断裂部分, 其中最大滑动也位于 Fault 2, 最大滑动量为 $\sim 4 \text{ m}$, 所处深度为 $\sim 4 \text{ km}$. Fault 1 存在一个较小的高滑区, 最大滑动量为 $\sim 2 \text{ m}$, 对应深度为 $\sim 4 \text{ km}$.

破裂演化图和震源时间函数表明, 门源地震为双侧不对称破裂事件 (图 4a, 图 5). 地震成核后, 破裂在 Fault 2 由震中向两侧传播, 并在 3.8 s 时达到

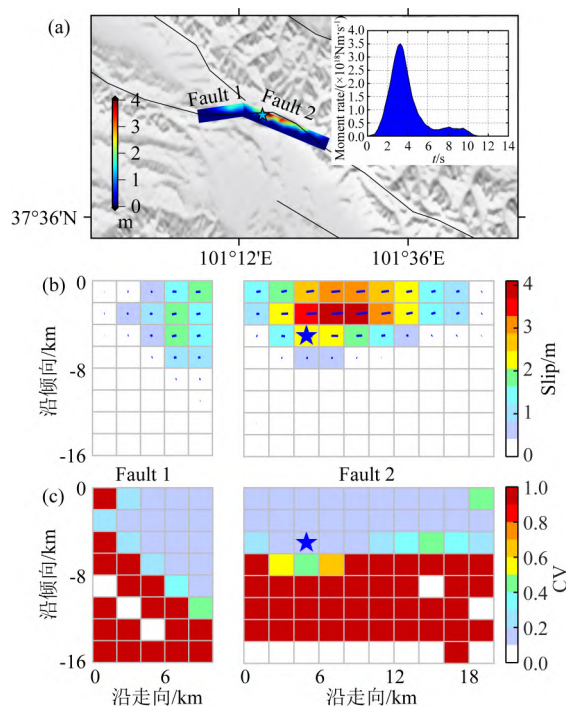


图 4 2022 年门源 M6.9 地震同震滑动分布模型及其不确定性

(a) 滑动分布在地表的投影, 子图为震源时间函数; (b) 同震滑动模型, 蓝色五角星为震中, 蓝色箭头表示滑动方向; (c) Jackknife 测试的方差系数.

Fig. 4 Coseismic slip distribution model of the 2022

Menyuan M6.9 earthquake and its uncertainty

(a) Surface projection of the slip distribution, inset plot shows the source time function; (b) Coseismic slip model, the blue star is the epicenter, and the blue arrows indicate the slip direction; (c) The coefficient of variance from Jackknife test.

地震矩释放速率峰值. 在 5~8 s, 地震破裂在 Fault 2 传播终止, 但是在 8 s 后又继续释放, 推测是由于地震破裂在震源东南侧遇到了某些阻碍导致破裂在该处几乎中断. 西侧 Fault 1 在 5 s 后地震矩继续释放, 但速率快速下降. 门源地震总共在 $\sim 10 \text{ s}$ 内释放了 $8.65 \times 10^{18} \text{ Nm}$ 的地震矩, 对应矩震级为 $M_w 6.56$.

最优同震滑动模型对应的 InSAR 形变场、高频 GNSS 位移波如图 6、7 所示. 从图 6 可以看出, 反演模型预测的 InSAR 升降轨 LOS 向形变与观测值吻合较好, 总体 InSAR 拟合方差降 (Variance Reductions, VR) 为 90.2%. 从 InSAR 降轨 LOS 向拟合残差分布可以看出, 在近断层区域仍有一些残差分布, 推测是由于简化矩形断层模型并不能反映真实断层几何的小规模细节, 以及在最上层地壳中存在沉积层导致出现非弹性响应等多种因素导致 (Fialko et al., 2005; Xu et al., 2010).

从图 7 可以看出, GNSS 水平向预测波形与观

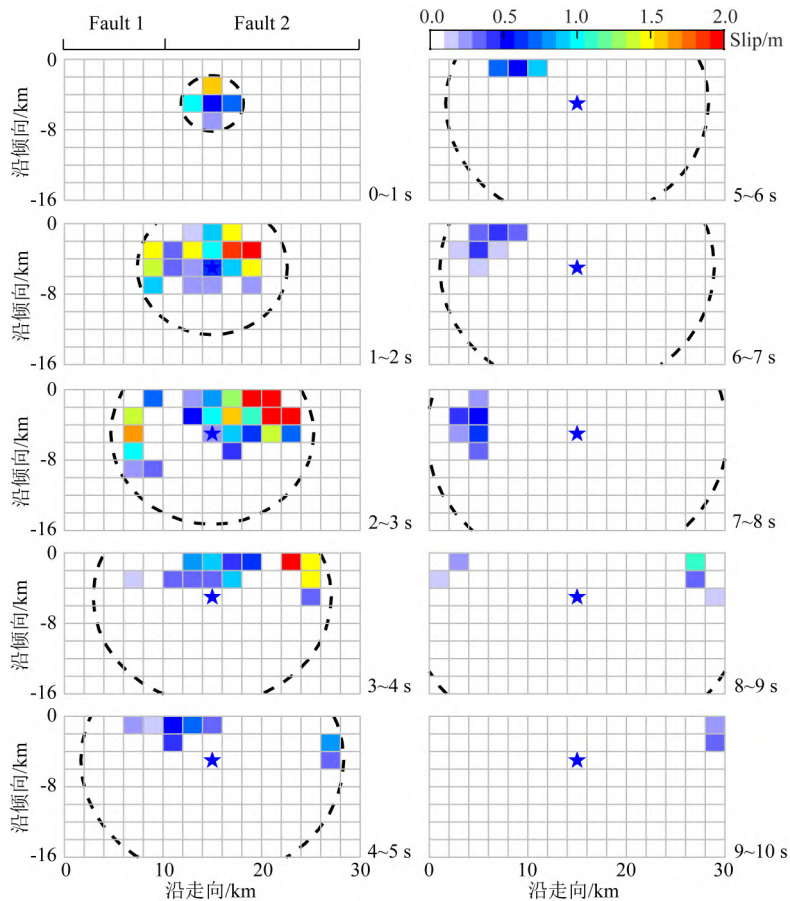


图 5 2022 年门源 M6.9 地震破裂 1s 间隔快照

蓝色五角星为震源, 黑色虚线为破裂速度为 $2.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的破裂前缘等时线.

Fig. 5 Snapshot of the 2022 Menyuan M6.9 earthquake rupture history with 1 s interval

The blue star is the epicenter, the black dotted line is the isochron of the rupture front with a rupture velocity of $2.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

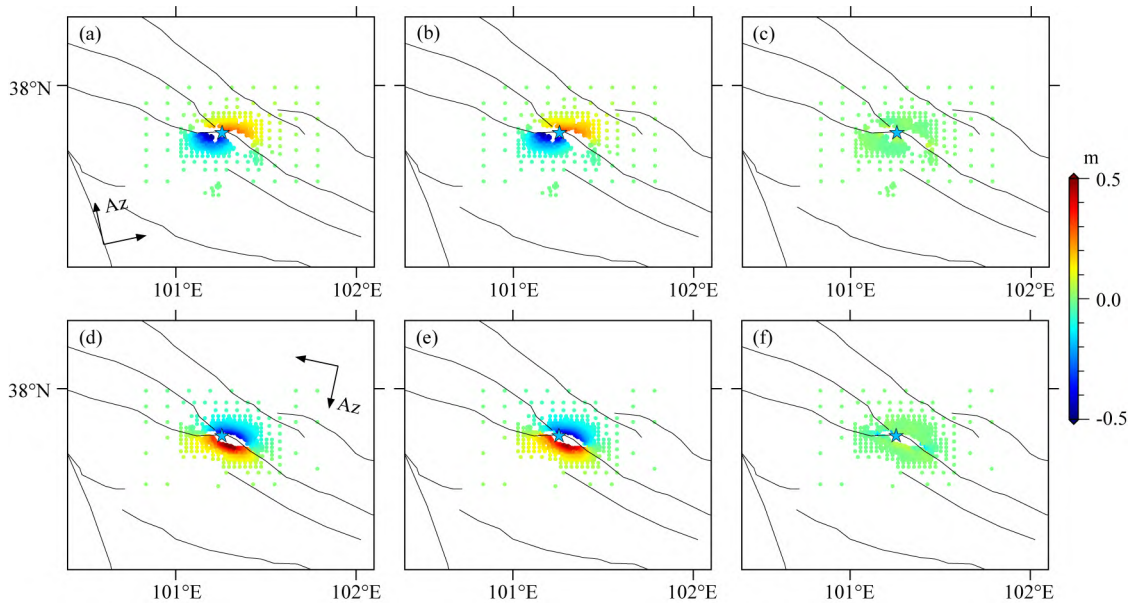


图 6 InSAR 同震形变场的观测、拟合和残差

第一行和第二行分别表示升轨和降轨数据, 蓝色五角星表示震中.

Fig. 6 Coseismic InSAR deformation field, synthetics and residuals

The top and bottom rows show data from ascending and descending tracks, respectively. The blue star represents the epicenter.

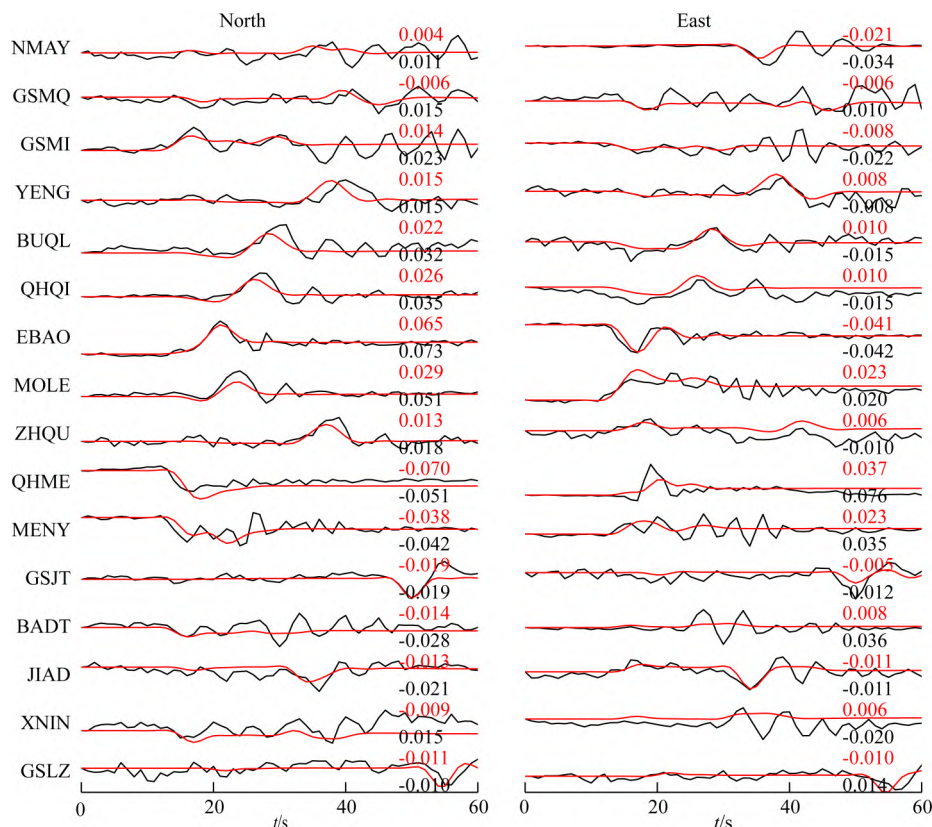


图 7 水平向高频 GNSS 观测(黑色)和模拟(红色)波形

Fig. 7 Horizontal high-rate GNSS recorded (black) and predicted (red) waveforms

测波形整体趋势拟合较好,但部分高频信息拟合较差,这些高频信号可能属于 GNSS 观测噪声,简化的矩形断层模型也可能导致了部分台站拟合较差。

为了评估同震滑动模型的不确定性,本研究对滑动模型中每个子断层进行了 Jackknife 测试(Kim and Dreger, 2008). 首先随机删除 20% 反演数据集(InSAR 升、降轨联合数据随机删除 260 个点,高频 GNSS 位移波数据随机剔除 3 个台站),然后利用每次删除之后的数据集进行 100 次重复反演,模型参数保持不变. 根据这 100 次的反演结果,可以计算得到平均滑动模型以及每一个子断层上的滑动标准差,利用平均滑动模型和滑动标准差可以计算方差系数(Coefficient of Variation, CV). 方差系数为滑动标准差和平均滑动的比值,可用来评估每个子断层上滑动量的变化是否稳健,方差系数越小,滑动量反演越可靠. 结果如图 4c 所示,主滑移区方差系数均小于 0.2,表明断层面上这部分区域滑动稳定。

3 同震库仑应力变化

地震会改变周围断层剪应力和正应力,使得应力增加区域地震活动率上升,应力下降区域地震活

动率下降(Stein, 1999). 基于库仑破裂准则(King et al., 1994),库仑应力变化 ΔCFS 可表示为:

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma_n, \quad (3)$$

式中 $\Delta \tau$ 和 $\Delta \sigma_n$ 分别是接收断层面上剪应力和正应力变化, μ' 是有效摩擦系数. 李振洪等(2022)利用该原理研究了 2016 年门源地震和 2022 年门源地震之间的触发关系,其结果表明 2016 年门源 $M_w 5.9$ 地震增加了 2022 年地震发震断层上的库仑应力变化,对 2022 年门源地震有一定触发作用. 类似地,本文利用库仑破裂准则研究 2022 年门源地震对余震分布和周围区域库仑应力状态的影响. 根据 King 等(1994)的结果,本文将有效摩擦系数 μ' 设置为 0.4,选择 10 km 深度为研究对象。

同震库仑应力变化如图 8 所示. 2022 年门源地震对绝大多数余震分布在 10 km 深度处造成的库仑应力增加均超过了 0.01 MPa,这说明主震对余震有一定的触发作用. 具体而言,本文根据 InSAR 地表破裂迹线选取的两个矩形断层与余震序列显示的破裂面总长度(32 km)基本一致(Fan et al., 2022),但东西两个断层分段长度以及空间位置略有差异,推测是由于两条发震断层均为南倾,且主震使断层 ~ 4 km 处发生破裂,而余震则主要分布在 ~ 10 km,

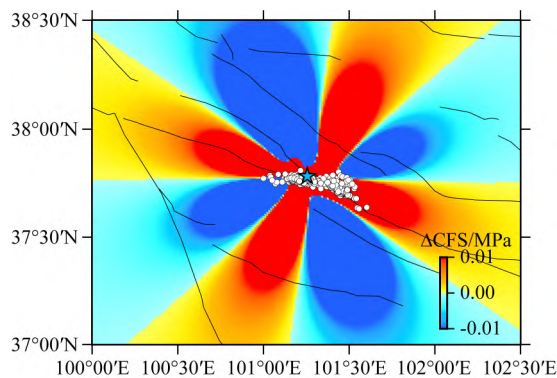


图 8 2022 年门源 M6.9 地震库仑应力变化

蓝色五角星表示震中, 白色圆点表示余震分布.

Fig. 8 Coulomb stress change caused by the 2022 Menyuan M6.9 earthquake

The blue star is the epicenter, and the white dots indicate aftershocks.

故浅部主震的发生可能触发了深部断层几何结构更为复杂的余震. 此外, 2022 年门源地震也使门源断裂西段和民乐—大马营断裂东段部分区域库仑应力增加超过 0.01 MPa, 使得这些区域未来发生地震概率增大.

4 讨论

4.1 分段破裂特征

位于大陆内部的活动断层通常具有分段特征, 断层长度受限于当地地壳厚度, 因此每一段活动断层长度通常在 10~30 km, 而这种固有最大断层尺寸限制了大陆地震震级, 每一段活动断层上潜在最大发震震级被限制在 $M_w 6 \sim 7$ 之间 (Pacheco et al., 1992; Scholz, 1997; Stock and Smith, 2000; Klinger, 2010). 超过该震级阈值的大陆地震通常会有多个断层发生破裂, 比如 2016 年新西兰凯库拉 $M7.8$ 地震至少有 12 个断层发生破裂 (Hamling et al., 2017), 2021 年青海玛多 $M7.4$ 地震发震断层被分为了 4 段 (Chen et al., 2022). 2022 年门源地震产生了两段断层破裂, 其中 Fault 1 长 10 km, Fault 2 长 20 km, 符合一般活动断层分段长度.

地震破裂过程可以用多个具有阻碍或触发地震破裂的障碍体来描述 (Aki, 1979). 这种地震破裂障碍体一般可分为两类: 几何障碍体 (geometric barriers) 和松弛障碍体 (relaxation barriers), 几何障碍体与断层方向发生变化的位置相关, 而松弛障碍体则是低应力积累区域, 震间浅层蠕变或者已有地震发生均会导致活动断层应力降低 (King, 1986; Lauer et al., 2020). 因此, 几何障碍体的出现可以阻碍或触

发在另一条断层上的地震破裂, 而松弛障碍体则一般会阻碍地震破裂. 同震滑动分布模型 (图 4a, 4b) 显示在震源西北侧发生明显的断层走向变化, 滑动分布在该处也发生明显变化; 地震破裂在 Fault 2 向西北侧传播时破裂深度逐渐变小, 但是当破裂传递到 Fault 1 时, 破裂深度有所增大. 同时由动态破裂演化 (图 5) 可以看出, 地震破裂在 5 s 之后主要发生在 Fault 1 上, 这表明断层走向改变和分段特征导致了地震在 Fault 2 上释放完大部分能量之后触发了相邻断层 Fault 1 的后续破裂, 同时也说明 Fault 1 没有阻碍地震的进一步破裂, 因此不是低应力积累松弛障碍体区. 因此综合断层几何学和地震破裂运动学, 推测该断层走向变化导致的断层分段为几何障碍, 它将震中西北侧两个走向不同的断层分开, 这使得地震在震源两侧呈非对称破裂特征.

4.2 无震蠕滑与浅层滑动亏损

活动断层中浅层无震蠕滑段的存在限制了该部分断层孕育大地震的潜力 (Avouac, 2015). 海原断裂带上 260 km 长的天祝地震空区因其具有孕育大地震风险而一直备受关注 (Gaudemer et al., 1995). 该段断层自西向东可以分为 4 个长度相当的部分 (Liu-Zeng et al., 2007): 冷龙岭段、金强河段、毛毛山段和老虎山段. 其中利用 InSAR 观测发现老虎山段存在一条长约 35 km 的无震浅层蠕滑段 (Cavalié et al., 2008; Jolivet et al., 2012; Li et al., 2021), 其主要特征是在该段区域断层两侧速度梯度急剧变化, 而西部冷龙岭断裂和托莱山断裂的相关研究较少. Huang 等 (2022) 利用 Sentinel-1 数据绘制的 2014—2021 年 InSAR 形变速度图首次覆盖了海原断裂带西部的冷龙岭断裂和托莱山断裂, 升降轨 LOS 向速度场显示这两条断裂两侧速度梯度变化较为平缓, 表明在近年来该段没有明显浅层蠕变发生.

在多个地震周期中, 断层不同深度处的滑动量 (同震、震后和震间滑动的总和) 应保持一致 (Tse and Rice, 1986; Xu et al., 2016). 然而利用同震地表形变数据反演大型 ($M_w \sim 7$) 走滑地震结果表明, 地壳最上部的同震滑动通常系统地小于发震深度 (4~10 km) 的同震滑动 (如, Simons et al., 2002; Fialko et al., 2005; Dolan and Haravitch, 2014), 这种现象被称为“浅层滑动亏损” (Shallow Slip Deficit, SSD). 联合滑动分布模型显示门源地震的滑动集中分布在震源上方 (5 km 以上), 计算可得 SSD 为 6.3%, 小于之前发生的大多数大型走滑地

震(图 9). 造成 SSD 的原因目前仍有较大争议, 一种可能的解释是由于浅部断层在震间的无震蠕滑导致(Hussain et al., 2016; Xu et al., 2016). 而冷龙岭断裂和托莱山断裂在近 8 年来并没有观测到明显的浅层蠕变(Huang et al., 2022). 结合 2022 年门源地震相对较小的 SSD, 可以推测这两条断裂浅部断层(0~2 km)应力积累大部分仍以地震的形式释放, 在更长震间期内发生浅层蠕变的概率较小. 同时由 4.1 节讨论的地震分段破裂特征可知, 西侧与 Fault 1 相近的托莱山段不属于低应力松弛障碍体区, 而是一直处于高应力积累状态, 这也表明托莱山断裂在震间期几乎不存在浅层蠕滑. 同时在该区域也没有现代地震活动记录, 因此推测托莱山断裂未来具有孕育大型地震的潜力, 需要对其进行持续的地震危险性跟踪监测.

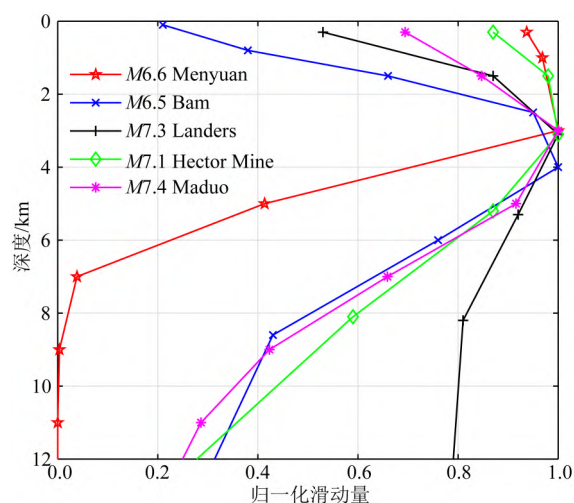


图 9 走滑地震累计同震滑动分布, 数据来源:

Fialko et al. (2005), Jin and Fialko (2021)

Fig. 9 Cumulative coseismic slip distribution of strike-slip earthquakes, data source from Fialko et al. (2005) and Jin and Fialko (2021)

5 结论

本文利用 InSAR 和 高频 GNSS 位移波形数据研究了 2022 年 1 月 8 日门源 M6.9 地震的同震形变和运动学破裂过程, 主要结论如下:

(1) 使用 DInSAR 和 POT 从 Sentinel-1 SAR 卫星影像中提取的形变场显示, 最大 LOS 向(距离向)同震形变达 0.79 m, 地表破裂迹线揭示了走向角分别为 82°和 112°的两个发震断层.

(2) 门源地震为双侧不对称破裂, 主要滑动发生

在 Fault 2 的冷龙岭段, 最大滑动量为 ~4 m, 所处深度为 ~4 km, 西北侧 Fault 1 也存在一个最大滑动量为 ~2 m 的小范围高滑区. 震源时间函数表明地震在 ~10 s 内释放了 8.65×10^{18} Nm 地震矩, 对应矩震级为 $M_w 6.56$.

(3) 本次地震也使门源断裂西段和民乐一大马营断裂东段部分区域的库仑应力增加超过了 0.01 MPa, 应密切关注这些区域未来发生强震的可能性.

(4) 门源地震 SSD 仅 6.3%, 且冷龙岭断裂和托莱山断裂在近 8 年没有明显浅层蠕变, 推测这两条断裂在震间更长时间尺度范围内发生浅层蠕变概率较小. 另外, 震源西北侧几何障碍体导致门源地震分段破裂, 表明托莱山断裂属于高应力积累区域, 未来有孕育中强地震的风险.

致谢 感谢欧空局(ESA)提供 Sentinel-1 A 卫星影像和中国地震局地球物理研究所范莉苹博士提供余震重定位目录. 开源软件 ISCE2 的使用得到了北京大学梁存任教授指导, 论文部分图件由 GMT 绘制.

References

- Akaike H. 1980. Likelihood and the Bayes procedure. *Trabajos de Estadística y de Investigación Operativa*, 31(1): 143-166.
- Aki K. 1979. Characterization of barriers on an earthquake fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84 (B11): 6140-6148, doi: 10.1029/JB084iB11p06140.
- An X D, Meng X L, Jiang W P. 2020. Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination. *Satellite Navigation*, 1(1): 7, doi: 10.1186/s43020-020-0009-x.
- Avouac J P. 2015. From geodetic imaging of seismic and aseismic fault slip to dynamic modeling of the seismic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43 (1): 233-271, doi: 10.1146/annurev-earth-060614-105302.
- Cavalié O, Lasserre C, Doin M P, et al. 2008. Measurement of interseismic strain across the Haiyuan fault (Gansu, China), by InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(3-4): 246-257, doi: 10.1016/j.epsl.2008.07.057.
- Chen B, Jiang Z S, Zhang S X, et al. 2003. Deformation features of Menyuan earthquake (M_s 6.4, 1986) and block model analysis. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 25(3): 240-245.
- Chen C W, Zebker H A. 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *JOSAA*, 17(3): 401-414, doi: 10.1364/JOSAA.17.000401.
- Chen K J, Avouac J P, Aati S, et al. 2020. Cascading and pulse-like ruptures during the 2019 Ridgecrest earthquakes in the Eastern California Shear Zone. *Nature Communications*, 11 (1): 22,

- doi: 10.1038/s41467-019-13750-w.
- Chen K J, Avouac J P, Geng J H, et al. 2022. The 2021 M_w 7.4 Madoi earthquake: An archetype bilateral slip-pulse rupture arrested at a splay fault. *Geophysical Research Letters*, 49(2): e2021GL095243, doi: 10.1029/2021GL095243.
- Deng Q D, Chen S F, Song F N, et al. 1986. Variations in the geometry and amount of slip on the Haiyuan (Nanxihashan) fault zone, China and the surface rupture of the 1920 Haiyuan earthquake. // Das S, Boatwright J, Scholz C H eds. *Earthquake Source Mechanics*. American Geophysical Union, 37: 169-182.
- Dolan J F, Haravitch B D. 2014. How well do surface slip measurements track slip at depth in large strike-slip earthquakes? The importance of fault structural maturity in controlling on-fault slip versus off-fault surface deformation. *Earth and Planetary Science Letters*, 388: 38-47, doi: 10.1016/j.epsl.2013.11.043.
- Fan L P, Li B R, Liao S R, et al. 2022. High-precision relocation of the aftershock sequence of the January 8, 2022, M_s 6.9 Menyuan earthquake. *Earthquake Science*, 35(2): 138-145.
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2004, doi: 10.1029/2005RG000183.
- Feng G C, Hetland E A, Ding X L, et al. 2010. Coseismic fault slip of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake estimated from InSAR and GPS measurements. *Geophysical Research Letters*, 37(1): L01302, doi: 10.1029/2009GL041213.
- Feng W P, He X H, Zhang Y P, et al. 2022. Seismic faults of the 2022 M_w 6.6 Menyuan, Qinghai earthquake and their implication for the regional seismogenic structures. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), doi: 10.1360/TB-2022-0154.
- Fialko Y, Sandwell D, Simons M, et al. 2005. Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit. *Nature*, 435(7040): 295-299, doi: 10.1038/nature03425.
- Fukahata Y, Nishitani A, Matsu'ura M. 2004. Geodetic data inversion using ABIC to estimate slip history during one earthquake cycle with viscoelastic slip-response functions. *Geophysical Journal International*, 156(1): 140-153.
- Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, et al. 1995. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the 'Tianzhu gap', on the western Haiyuan Fault, Gansu (China). *Geophysical Journal International*, 120(3): 599-645, doi: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb01842.x.
- Geng J H, Pan Y X, Li X T, et al. 2018. Noise characteristics of high-rate multi-GNSS for subdaily crustal deformation monitoring. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2): 1987-2002, doi: 10.1002/2018JB015527.
- Geng J H, Chen X Y, Pan Y X, et al. 2019. PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, 23(4): 91, doi: 10.1007/s10291-019-0888-1.
- Goldstein R M, Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21): 4035-4038, doi: 10.1029/1998GL000033.
- Hamling I J, Hreinsdóttir S, Clark K, et al. 2017. Complex multifault rupture during the 2016 M_w 7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand. *Science*, 356(6334): eaam7194, doi: 10.1126/science.aam7194.
- He P, Wen Y M, Xu C J, et al. 2019. High-quality three-dimensional displacement fields from new-generation SAR imagery: application to the 2017 Ezgeleh, Iran, earthquake. *Journal of Geodesy*, 93(4): 573-591, doi: 10.1007/s00190-018-1183-6.
- Heaton T H. 1990. Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64(1): 1-20, doi: 10.1016/0031-9201(90)90002-F.
- Hou K M, Deng Q D, Liu B C. 1999. Research on the tectonic environment and seismogenic mechanism of the 1927 Gulang great earthquake with $M=8.0$. *Earthquake Research in China*, 14(2): 153-163.
- Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. 2012. 3D coseismic Displacement of 2010 Darfield, New Zealand earthquake estimated from multi-aperture InSAR and D-InSAR measurements. *Journal of Geodesy*, 86(11): 1029-1041, doi: 10.1007/s00190-012-0563-6.
- Huang Z C, Zhou Y, Qiao X, et al. 2022. Kinematics of the ~1000 km Haiyuan fault system in northeastern Tibet from high-resolution Sentinel-1 InSAR velocities: Fault architecture, slip rates, and partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, 583: 117450, doi: 10.1016/j.epsl.2022.117450.
- Hussain E, Wright T J, Walters R J, et al. 2016. Geodetic observations of postseismic creep in the decade after the 1999 Izmit earthquake, Turkey: Implications for a shallow slip deficit. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(4): 2980-3001, doi: 10.1002/2015JB012737.
- Jiang H J, Feng G C, Wang T, et al. 2017. Toward full exploitation of coherent and incoherent information in Sentinel-1 TOPS data for retrieving surface displacement: Application to the 2016 Kumamoto (Japan) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 44(4): 1758-1767, doi: 10.1002/2016GL072253.
- Jin Z Y, Fialko Y. 2021. Coseismic and early postseismic deformation due to the 2021 $M_7.4$ Maduo (China) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 48(21): e2021GL095213, doi: 10.1029/2021GL095213.
- Jolivet R, Lasserre C, Doin M P, et al. 2012. Shallow creep on the Haiyuan Fault (Gansu, China) revealed by SAR Interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B6): B06401, doi: 10.1029/2011JB008732.
- Jónsson S, Zebker H, Segall P, et al. 2002. Fault slip distribution of the 1999 M_w 7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4): 1377-1389.
- 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.
- King G C P. 1986. Speculations on the geometry of the initiation and termination processes of earthquake rupture and its relation to morphology and geological structure. *Pure and Applied Geophysics*, 124(3): 567-585, doi: 10.1007/BF00877216.

- King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3): 935-953.
- Klinger Y. 2010. Relation between continental strike-slip earthquake segmentation and thickness of the crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B7): B07306, doi: 10.1029/2009JB006550.
- Lauer B, Grandin R, Klinger Y. 2020. Fault geometry and slip distribution of the 2013 $M_{\text{w}}7.7$ Balochistan earthquake from inversions of SAR and optical data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7): e2019JB018380, doi: 10.1029/2019JB018380.
- Lawson C L, Hanson R J. 1995. Solving Least Squares Problems. Philadelphia: SIAM.
- Li Y C, Nocquet J M, Shan X J, et al. 2021. Geodetic observations of shallow creep on the Laohushan-Haiyuan Fault, Northeastern Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(6): e2020JB021576, doi: 10.1029/2020JB021576.
- Li Z H, Han B Q, Liu Z J, et al. 2022. Source parameters and slip distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai earthquakes constrained by InSAR observations. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 47(6): 887-897, doi: 10.13203/j.whugis20220037.
- Li Z M, Gai H L, Li X, et al. 2022. Seismogenic fault and coseismic surface deformation of the Menyuan $M_{\text{s}}6.9$ earthquake in Qinghai, China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 96(1): 330-335, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022124.
- Liu L, Liu X W, Zhang B, et al. 2022. Recognition of surface ruptures of Menyuan $M_{\text{s}}6.9$ earthquake using GF images. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 44(2): 440-449, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220215004.
- Liu-Zeng J, Klinger Y, Xu X, et al. 2007. Millennial recurrence of large earthquakes on the Haiyuan Fault near Songshan, Gansu Province, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(1B): 14-34, doi: 10.1785/0120050118.
- Melgar Moctezuma D. 2014. Seismogeodesy and rapid earthquake and tsunami source assessment [Ph. D. thesis]. California: University of California.
- Ou Q, Kulikova G, Yu J, et al. 2020. Magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake reestimated using seismological and geomorphological methods. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8): e2019JB019244, doi: 10.1029/2019JB019244.
- Pacheco J F, Scholz C H, Sykes L R. 1992. Changes in frequency-size relationship from small to large earthquakes. *Nature*, 355(6355): 71-73, doi: 10.1038/355071a0.
- Pan J W, Li H B, Chevalier M L, et al. 2022. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2022 $M_{\text{s}}6.9$ Menyuan earthquake, Qinghai Province, China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 96(1): 215-231, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022125.
- Rosen P A, Gurrola E, Sacco G F, et al. 2012. The InSAR scientific computing environment. //EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Nuremberg, Germany: IEEE, 730-733.
- Schmidt D A, Bürgmann R. 2006. InSAR constraints on the source parameters of the 2001 Bhuj earthquake. *Geophysical Research Letters*, 33(2): L02315, doi: 10.1029/2005GL025109.
- Scholz C H. 1997. Size distributions for large and small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(4): 1074-1077.
- Shi C, Yi W T, Song W W, et al. 2013. GLONASS pseudorange inter-channel biases and their effects on combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS Solutions*, 17(4): 439-451, doi: 10.1007/s10291-013-0332-x.
- Simons M, Fialko Y, Rivera L. 2002. Coseismic deformation from the 1999 $M_{\text{w}}7.1$ Hector Mine, California, earthquake as inferred from InSAR and GPS observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4): 1390-1402.
- Simons M, Rosen P A. 2007. Interferometric synthetic aperture radar geodesy. //Schubert G ed. Treatise on Geophysics. Amsterdam: Elsevier, 3: 391-446, doi: 10.1016/B978-044452748-6.00059-6.
- Stein R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, 402(6762): 605-609, doi: 10.1038/45144.
- Stock C, Smith E G C. 2000. Evidence for different scaling of earthquake source parameters for large earthquakes depending on faulting mechanism. *Geophysical Journal International*, 143(1): 157-162, doi: 10.1046/j.1365-246x.2000.00225.x.
- Tse S T, Rice J R. 1986. Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B9): 9452-9472, doi: 10.1029/JB091iB09p09452.
- Vaka D S, Rao Y S, Singh T. 2020. Surface deformation of the 2019 Mirpur earthquake estimated from Sentinel-1 InSAR data. //2020 IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS). Ahmedabad, India: IEEE, 130-133, doi: 10.1109/InGARSS48198.2020.9358915.
- Wang C S, Ding X L, Li Q Q, et al. 2016. Adaptive regularization of earthquake slip distribution inversion. *Tectonophysics*, 675: 181-195, doi: 10.1016/j.tecto.2016.03.018.
- Wang T, Wei S J, Jónsson S. 2015. Coseismic displacements from SAR image offsets between different satellite sensors: Application to the 2001 Bhuj (India) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 42(17): 7022-7030, doi: 10.1002/2015GL064585.
- Wen Y M, Xu C J, Li Z H, et al. 2014. Coseismic and postseismic deformation of the 2008 Wenchuan Earthquake from InSAR. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(6): 1814-1824, doi: 10.6038/cjg20140613.
- Xu C, Liu Y, Wen Y, 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, doi: 10.1785/0120090253.
- Xu J R, Yao L X, Wang J. 1986. Earthquake source mechanisms of Menyuan Earthquake ($M_{\text{s}}=6.4$, on Aug. 26, 1986) and its strong aftershocks. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 8(4): 82-84.
- Xu X H, Tong X P, Sandwell D T, et al. 2016. Refining the shallow slip

- deficit. *Geophysical Journal International*, 204(3): 1867–1886.
- Yan B D, Ji L Y, Jiang F Y, et al. 2022. Seismogenic structure of Menyuan, Qinghai $M_s6.9$ earthquake on January 8, 2022 constrained by InSAR data. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 44(2): 450–457, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220121003.
- Yang H F, Wang D, Guo R M, et al. 2022. Rapid report of the 8 January 2022 $M_s6.9$ Menyuan earthquake, Qinghai, China. *Earthquake Research Advances*, 2(1): 100113, doi: 10.1016/j.eqrea.2022.100113.
- Yin X X, Qiu J T, Li M J, et al. 2022. Three-dimensional velocity structure and seismogenic mechanism of Menyuan $M_s6.9$ earthquake in 2022. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 44(2): 360–369, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220210003.
- Yuan D Y, Zhang P Z, Liu B C, et al. 2004. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 78(2): 270–278.
- Zhang X H, Guo F, Li X X. 2010. Impact of sample rate of IGS satellite clock on precise point positioning. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 35(2): 152–155, doi: 10.13203/j.whugis2010.02.001.
- Zhang Y, Feng W P, Xu L S, et al. 2009. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(2): 145–154, doi: 10.1007/s11430-008-0148-7.
- Zhang Y F, Shan X J, Zhang G H, et al. 2020. The 2016 $M_w5.9$ Menyuan earthquake in the Qilian Orogen, China: A potentially delayed depth-segmented rupture following from the 1986 $M_w6.0$ Menyuan earthquake. *Seismological Research Letters*, 91(2A): 758–769, doi: 10.1785/0220190168.
- Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophysical Journal International*, 148(3): 619–627, doi: 10.1046/j.1365-246X.2002.01610.x.
- Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3): 5005–5017, doi: 10.1029/96JB03860.
- ### 附中文参考文献
- 陈兵, 江在森, 张四新等. 2003. 1986 年门源地震 ($M_s6.4$) 过程地 形演变特征及块体模型解析. *西北地震学报*, 25(3): 240–245.
- 冯万鹏, 何晓慧, 张逸鹏等. 2022. 2022 年青海门源 $M_w6.6$ 地震的发 震断层及孕震构造模式. *科学通报*, doi: 10.1360/TB-2022-0154.
- 李振洪, 韩炳权, 刘振江等. 2022. 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. *武汉大学学报·信 息科学版*, 47(6): 887–897, doi: 10.13203/j.whugis20220037.
- 李智敏, 盖海龙, 李鑫等. 2022. 2022 年青海门源 $M_s6.9$ 级地震发 震构造和地表破裂初步调查. *地质学报*, 96(1): 330–335, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022124.
- 刘璐, 刘兴旺, 张波等. 2022. 利用高分影像识别门源 $M_s6.9$ 地震 地表破裂带. *地震工程学报*, 44(2): 440–449, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220215004.
- 潘家伟, 李海兵, Chevalier M L 等. 2022. 2022 年青海门源 $M_s6.9$ 地震地表破裂带及发震构造研究. *地质学报*, 96(1): 215–231, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022125.
- 温扬茂, 许才军, 李振洪等. 2014. InSAR 约束下的 2008 年汶川地 震同震和震后形变分析. *地球物理学报*, 57(6): 1814–1824, doi: 10.6038/cjg20140613.
- 徐纪人, 姚立珣, 汪进. 1986. 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震及 其强余震的震源机制解. *地震工程学报*, 8(4): 82–84.
- 颜丙国, 季灵运, 蒋锋云等. 2022. InSAR 数据约束的 2022 年 1 月 8 日青海门源 $M_s6.9$ 地震发震构造研究. *地震工程学报*, 44(2): 450–457, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220121003.
- 尹欣欣, 邱江涛, 李敏娟等. 2022. 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震震区三 维速度与发震机制研究. *地震工程学报*, 44(2): 360–369, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220210003.
- 袁道阳, 张培震, 刘百麓等. 2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动 构造的几何图像与构造转换. *地质学报*, 78(2): 270–278.
- 张小红, 郭斐, 李星星. 2010. IGS 卫星钟差产品采样间隔对 PPP 精度的影响. *武汉大学学报(信息科学版)*, 35(2): 152–155, doi: 10.13203/j.whugis2010.02.001.

(本文编辑 何燕)