

基于 InSAR 技术的门源 Ms6.9 地震形变特征分析

马文浩, 孙亚飞, 董昊宸

(河南城建学院 测绘与城市空间信息学院, 河南 平顶山 467002)

摘要:青海省门源县位于青海东北部,地形复杂,高差悬殊,北边与冻龙岭断裂带相邻,向西又与托莱山断裂带相连,在 2022 年 1 月 8 日发生 Ms6.9 级地震。利用 Sentinel-1A 提供的雷达干涉像对,获取此次地震的同震地表形变场和地表沉降数据产品。干涉条纹结果表明,本次门源地震至少有 3 条割裂带,其中主震导致的割裂带最为明显,另外两条割裂带较为明显,长约 3 km,推断是主震后 1 h 内发生的两次余震导致。主震割裂带沿 NWW-SEE 向破裂,此地理位置与冻龙岭西段与托莱山东段同时发生破裂的推论相符。地表形变数据结果显示,西南部抬升明显,最大值为 0.66 m,东北部地表下沉严重,最大值 0.54 m,其形变特征与左旋走滑型特征相吻合。地震震心波及半径为 15~50 km,形变剖面反映出地表形变分布范围远大于垂直断层分布范围。

关键词:青海门源;地震;Ms6.9;地表形变特征

中图分类号:P315.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)08-0303-06

青海省位于中国西部,雄踞世界屋脊青藏高原的东北部,位于喜马拉雅-地中海地震带(又称欧亚地震带)上,主要分布于欧亚大陆,从印度尼西亚开始,一直延伸到大西洋的亚速尔群岛。欧亚地震带所释放的地震能量占全球地震能量的 15%,主要为浅源地震和中源地震^[1]。近年来青海地震频发,其中,2010 年玉树藏族自治州 7.1 级地震^[2]和 2021 年青海省果洛藏族自治州 7.4 级地震^[3]以及最近发生的门源回族自治县 6.9 级地震等备受人们关注。门源回族自治县位于青海东北部,北倚祁连山,南临达坂山,地势西北高,东南低,南北高,中间低,地形复杂,高差悬殊。祁连山脉所在地区是地震的多发地带,所处位置有祁连-海原构造带,其中祁连-海原构造带由冻龙岭断裂带、西部的托莱山断裂带、祁连-肃南断裂带等诸多断裂带共同构成^[4]。门源自治县北临冻龙岭断裂带,又有门源断裂带,往西还有托莱山断裂带,都属于该构造带范围。

据中国地震台网中心(China Earthquake Networks Center, CENC)测定,北京时间 2022 年 1 月 8 日 01 时 45 分 27 秒在青海海北州门源县(北纬 37.77°,东经 101.26°)发生 Ms6.9 级地震,震源深度 10 km,截至 2022 年 1 月 14 日,青海海北州门源县地区发生余震 3 级以上 20 次,4 级以上 7 次。美

国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)给出的震级为 Ms6.6,震源深度 13 km,其震源机制显示此次地震为冻龙岭断裂,图 1 给出了门源地震发生的位置。在地震后如何快速准确地进行调查分析,对抗震减灾、灾后重建和人员疏通等方面有很重要作用。

SAR 干涉测量(InSAR)技术是监控地表沉降的重要手段之一,具有大范围、高精度、成本低等优点,在地震形变监测方面做出很多贡献^[5]。2010 年,沈强等^[6]利用 D-InSAR 技术获取了青海玉树 Mw6.9 地震同震形变场。2021 年,刘超亚等^[7]基于 InSAR 技术得到新疆于田 Mw6.3 地震的同震形变场,采用 SDM 方法获得发震断层非均匀滑动分布,并分析了同震库仑应力变化和对周边断层的应力扰动。

与 2016 年门源地震不同的是,本次地震在冻龙岭断裂的西段发现了长约 22 km 的地表破裂带,地表和冰面可见连续拉张裂隙和挤压鼓包等破裂组合形式,鼓包高达 1.5 m。因此本文使用 InSAR 技术、Sentinel-1A 数据来获取震区的地震形变场和地表形变结果^[8-9],分析地震涉及范围和特征,计算地震破裂分布、长度,为灾情研判和灾后救援提供重要数据基础和决策依据。

收稿日期:2022-02-22

基金项目:河南城建学院青年骨干教师课题项目(990/R-X2020014)。

作者简介:马文浩(1999—),男,河南洛阳人,河南城建学院测绘与城市空间信息学院,学生,研究方向为 InSAR 地表形变监测。

1 研究区域及 SAR 卫星数据

从欧空局(ESA)网站获取覆盖 2022 年 1 月 8 日青海门源 Ms6.9 地震形变区的 Sentinel-1A SAR 数据,包括 Sentinel-1A 的升轨 T026 轨道和降轨 T033 轨道数据,使用两个短时间基线像对的整景数据进行差分干涉测量,影像的基本参数和覆盖范围分别见表 1 和图 1。Sentinel-1A 卫星的 TOP-SAR 雷达数据采用 C 波段成像,由于青海地区裸露

地面较多,植被对 C 波段的影响较小,所以在该地区具有时间和空间上的优势,能快速得到地震形变场。外部 DEM 采用 SRTM(分辨率为 30 m)DEM 数据。

表 1 青海门源地震 SAR 数据基本参数

卫星	轨道类型	主影像日期	从影像日期	极化方式	时间基线/d	垂直基线/m
Sentinel-1A	升轨	2021-12-29	2022-01-10	VV	12	-108
	降轨	2021-12-29	2022-01-10	VV	12	55

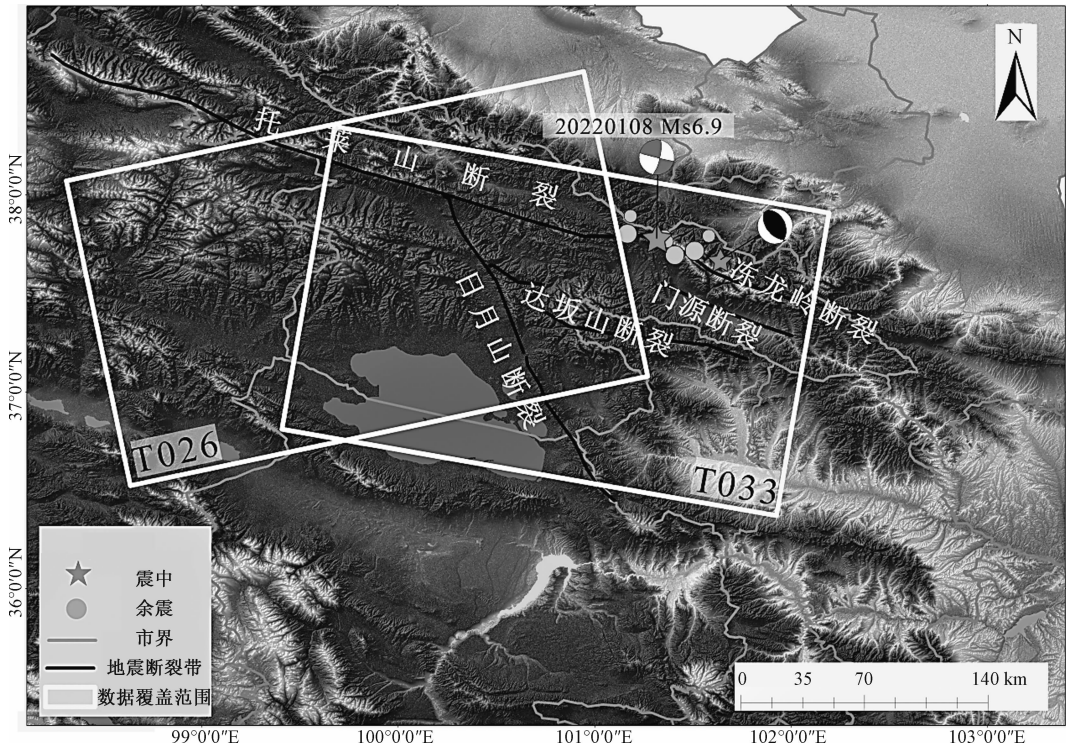


图 1 研究区域范围

2 数据处理技术流程

利用雷达差分干涉处理(D-InSAR)技术,采用 2021 年 12 月 29 日(震前)和 2022 年 1 月 10 日(震后)相隔 12 d 的雷达数据(Interferometric Wide Swath,IW)进行差分干涉处理。用干涉法求出两幅影像的相位差 $\phi_{(z)}$ ^[10] 为

$$\phi_{(z)} = -\frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$$
 (1)

式中: $\phi_{(z)}$ 为两次成像的相位差; λ 为雷达波长; r 为天线到地面点的高度的地表斜距。利用双轨法得到的干涉图像中的相位 ϕ_{dint} 的公式为

$$\phi_{\text{dint}} = \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{atmo}} + \phi_{\text{noise}}$$
 (2)

式中: ϕ_{dint} 为干涉测量差分处理之后的相位; ϕ_{disp} 为由地表形变引起的形变; ϕ_{topo} 为由地形起伏引起的地形相位; ϕ_{atmo} 为两次成像期间大气延迟不同引起的相位; ϕ_{noise} 为由雷达目标散射特性的变化引起的

噪声相位。
利用 SRTM 30 m 分辨率 DEM 数据,以减少地形因素对形变要素带来的影响并用来地理编码;滤波采用 Giodstein 滤波方法^[11],消除由平地相位引起的噪声;相干性是判断干涉条纹的重要指标,相干性的计算公式^[12]为

$$\gamma = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N u_1(m,n) u_2^*(m,n)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |u_1(m,n)|^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |u_2(m,n)|^2}}$$
 (3)

式中: M 、 N 为估计时所采用的窗口大小参数,图像中亮度越高的值相干性越好,反之越差。本文利用 12 d 的影像组成像对,得到质量高的相干图。然后采用最小费用流(MCF)算法进行相位解缠^[13]。为了消除大气效应对相位信息带来的影响,利用通用

型卫星雷达大气改正系统(generic atmospheric correction online service for InSAR,GACOS)来消除大气中的水蒸气 and 气溶胶等在图像上造成的噪声^[14]。另外利用创建的地面控制点文件(ground control point,GCP)来消除可能存在的斜坡相位,对卫星轨道和相位偏移进行纠正,最终获得 2022 年门源地震同震地表形变场和形变数据结果^[15]。

3 地震形变结果与分析

InSAR 技术获取的地震形变场如图 2(降轨)和图 3(升轨)所示,升轨数据由于视向限制,只能观测到震区一部分,而降轨数据则包含整个形变区域。降轨观测结果显示,西南部抬升明显,最大值为 0.66 m,东北部地表下沉严重,最大值为 0.54 m,五角星为门源 Ms6.9 地震震中位置。根据干涉结果显示,形变场中心分隔区沿西北向东南方向延伸,这和美国地质调查局(USGS)发布的震源参数的走向基本一致。在干涉条纹图中还可以看到,由断裂带向西北据震心约 1.2 km 处,还有一条有明显的断裂带(图 2 中 A1—A1'),与托莱山断裂带基本吻合。另外,根据中国地震台网显示,在当天 2 时 9 分 5 秒发生 Ms5.1 级地震,同一时间,沿断裂带向东南据震心约 6 km 处也有较为明显的地表沉降信号(图 2 中 A3—A3'),该地发生了 Ms 3.4 级地震。

由此推断,本次地震形变位于托莱山和冻龙岭断裂交汇区域,可能是托莱山断裂东段与冻龙岭断裂带西段同时发生破裂,导致余震集中在冻龙岭断裂和托莱山附近。地震震心波及半径为 15~50 km,主震和两次余震造成的 3 条破裂带如图 2 所示,其中 A2—A2'为 Ms6.9 地震破裂带,约 10 km 左右,A1—A1',A3—A3'分别为 Ms5.1 和 Ms3.4 余震断裂带,约 3 km。

2016 年 1 月 21 日门源 Ms6.4 级地震未造成大面积的地表破裂带^[16-18]。刘云华等^[17]认为门源 Ms6.4 地震由冻龙岭北侧的弧形次生断层引起,而 2022 年门源 Ms6.9 级地震造成了大于 20 km 的地表破裂;李振洪等^[19]利用高分七号卫星影像进行分析,发现了较为明显的拉张裂隙、挤压鼓包等地表破裂现象。图 4 显示了垂直于断层的形变量剖面,从 F1—F1'、F2—F2'、F3—F3'、F4—F4'、F5—F5'、F6—F6'结果显示,最大地表沉降量在 A2—A2'主破裂带上,抬升量和下沉量相差不大,根据统计结果分析,抬升量较下沉量相比,抬升量比下沉量大 0.12 m 左右(图 5)。除了 F1—F1'和 F5—F5',其他剖面都呈垂直分布,F6—F6'最能反映整体的地震形变,从剖面图推断此次地震影响范围为 40~60 km。

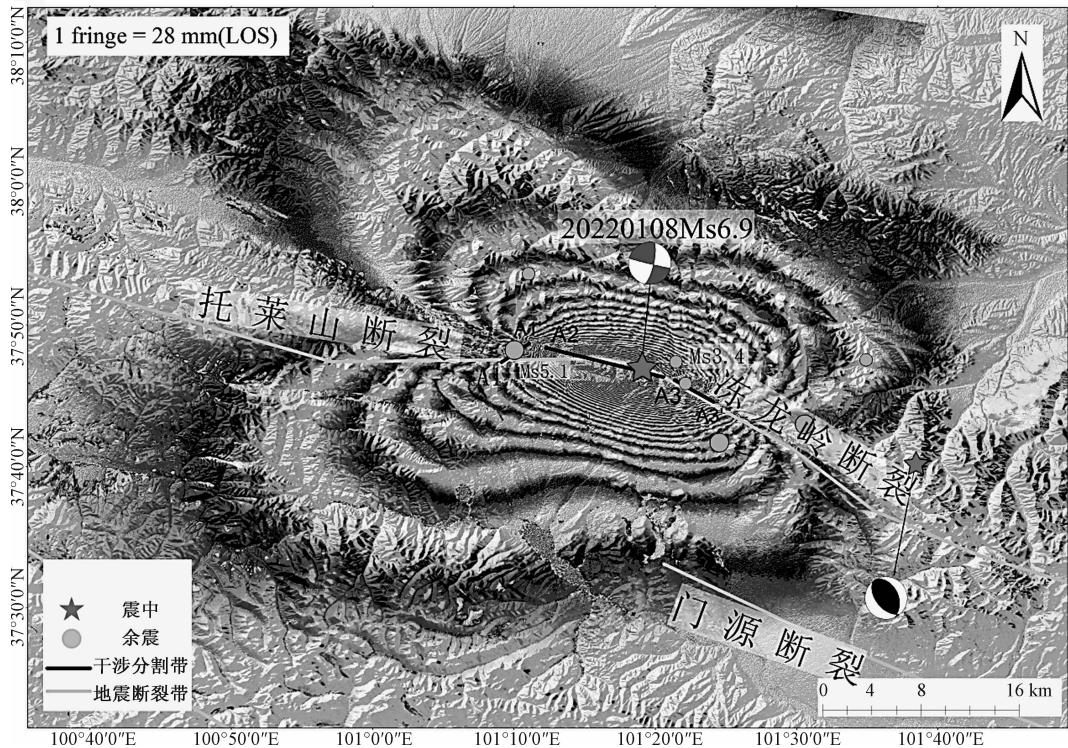


图 2 青海门源 Ms6.9 地震地表形变场(降轨)

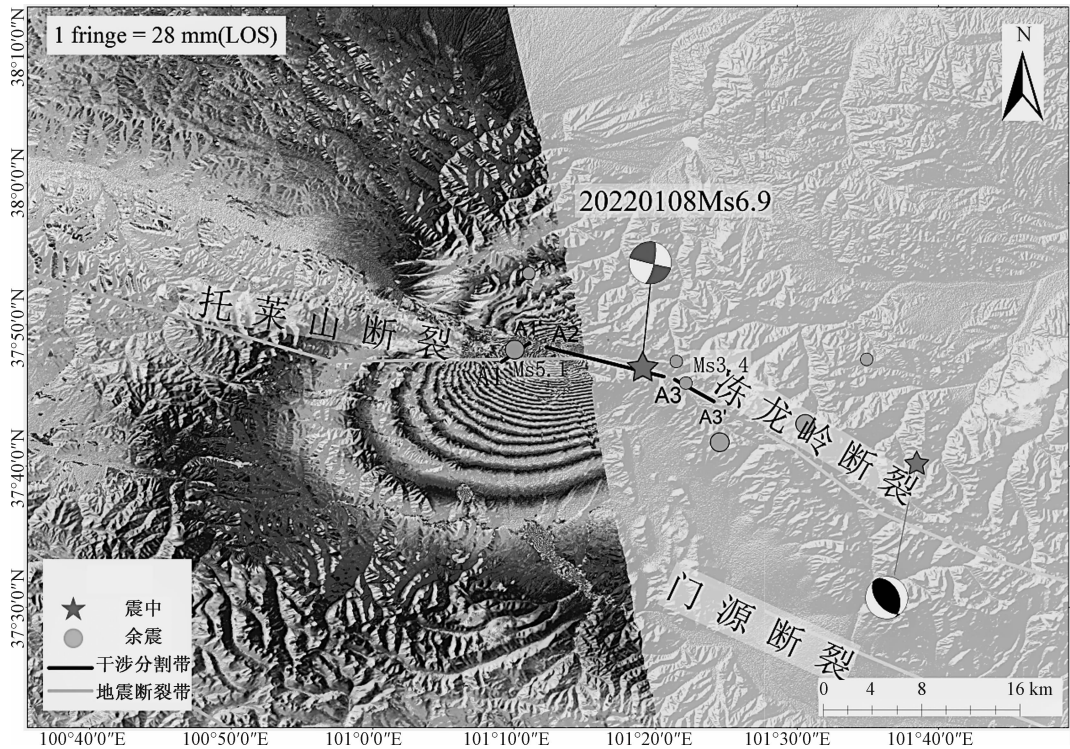


图 3 青海门源 Ms6.9 地震地表形变场(升轨)

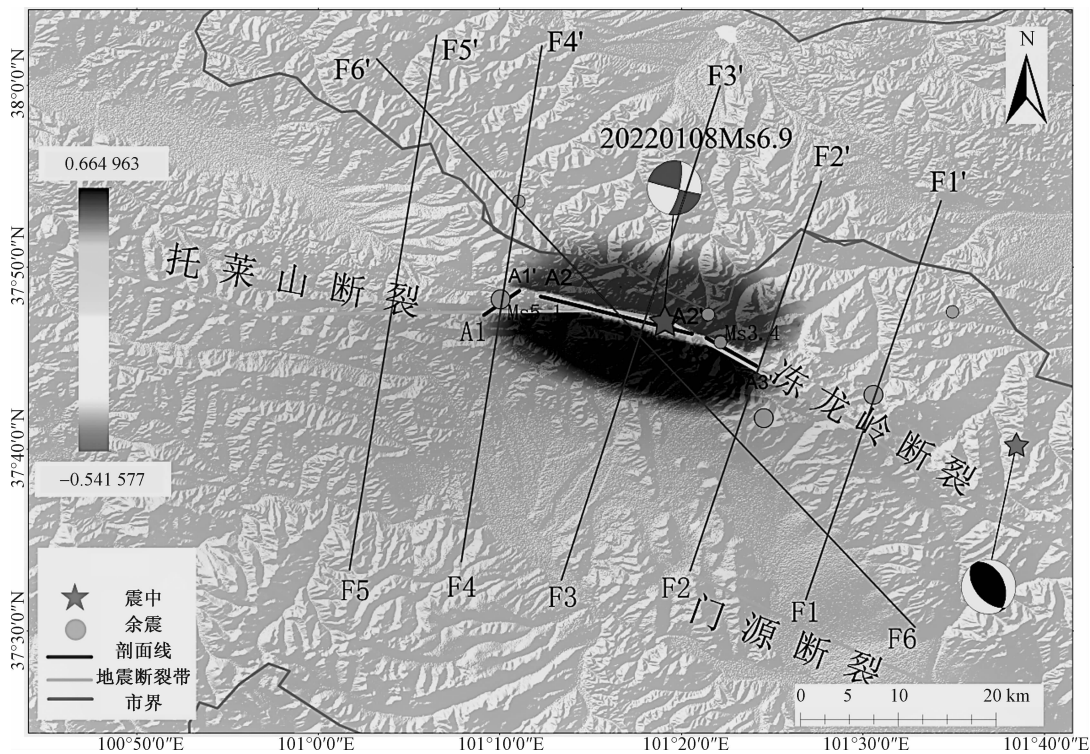


图 4 青海门源 Ms6.9 地震形变结果

4 结论

本文利用欧空局哨兵 Sentinel-1A 升降轨道卫星影像, 获取了青海门源 Ms6.9 级地震结果, 最大

视线内的沉降量为 -0.54 m , 其降轨测得最大隆升量为 0.66 m , 升降轨测得的干涉条纹图基本一致, 根据剖面图显示, InSAR 技术获取的地表形变信号

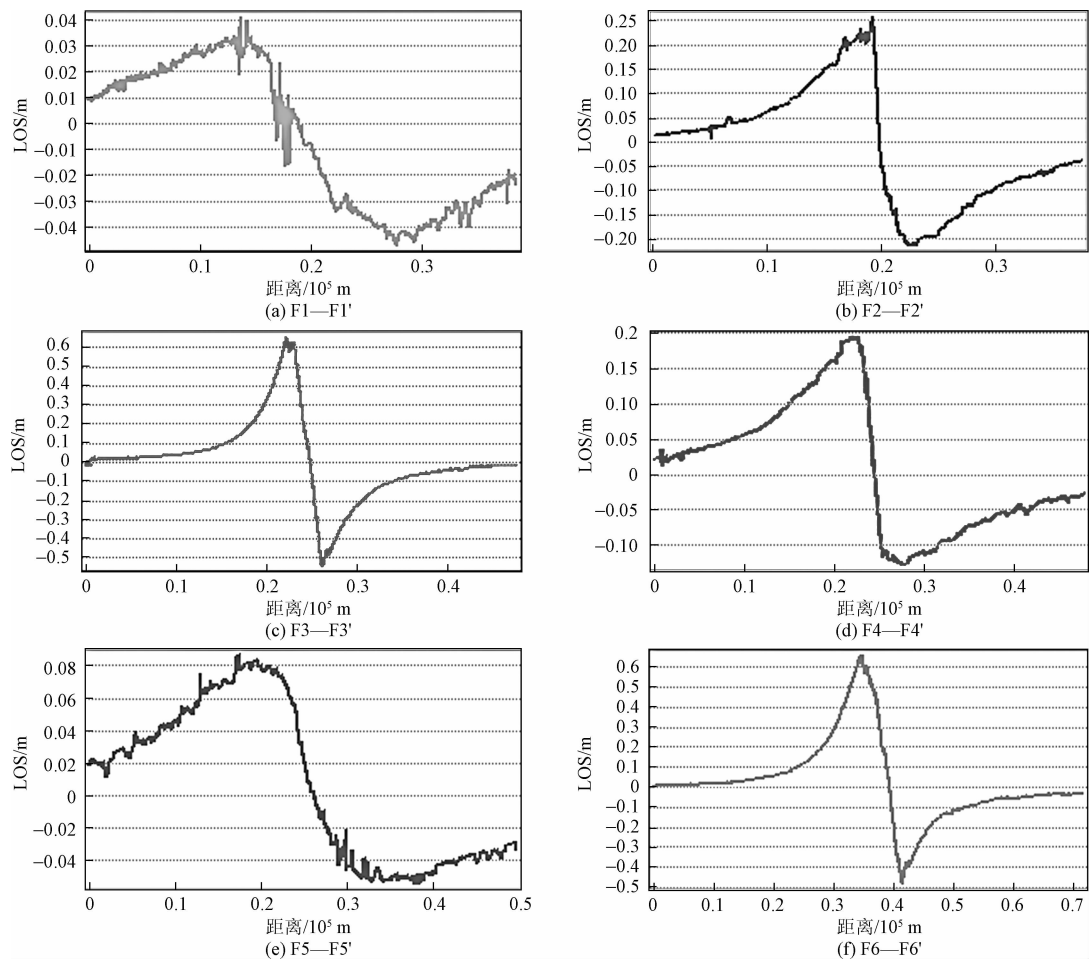


图 5 视线向 LOS 形变量剖面线

明显,其中,断层的下沉量与抬升量相近。根据震级、时间和干涉结果推断,2022 年门源地震断层主要为冻龙岭断裂的西段,并且与托莱山断裂东南段接壤,导致之后在托莱山断裂上造成 Ms5.1 地震,如图 2 中 A1—A1'所示,有较为明显的干涉条纹。干涉条纹图显示形变特征与左旋走滑型特征相吻合,地震震心波及半径为 15~50 km,形变剖面反映出地表形变分布范围远大于垂直断层分布范围。

参考文献

[1] 陈学忠,李艳娥,王恒信. 欧亚地震带地震活动增强与中国大陆地区 7 级以上地震发生的关系分析[J]. 地震, 2014,34(1):34-40.

[2] 刘吉夫,史培军,范一大,等. 2010 年 4 月 14 日青海玉树地震灾害特点与启示[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(5):630-633.

[3] 刘计洪,胡俊,李志伟,等. 融合哨兵 1 号和 ALOS-2 数据的 2021 年青海玛多地震高精度三维同震形变场研究[J]. 中国科学:地球科学,2022,52(5):882-892.

[4] 姜文亮. 冷龙岭断裂带全新世破裂模式、大震复发特征研

究及其区域构造意义[J]. 国际地震动态,2019(9):46-48.

[5] 李春升,王伟杰,王鹏波,等. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报,2016,38(1):229-240.

[6] 沈强,乔学军,王琪,等. 中国玉树 Mw6.9 地震 InSAR 地表形变特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(3):5-9.

[7] 刘超亚,董彦芳,洪顺英,等. 利用 InSAR 获取 2020 年新疆于田 Mw6.3 地震同震形变场与断层滑动分布反演[J]. 地震,2021,41(2):62-79.

[8] 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.

[9] LI Z,ELLIOTT J R,FENG W,et al. The 2010 Mw6.8 Yushu (Qinghai, China) earthquake: constraints provided by InSAR and body wave seismology[J]. Journal Geophys Res,2010,116:B10302.

[10] 穆冬,朱兆达,张焕春. 干涉合成孔径雷达成像技术研究[J]. 遥感技术与应用,2000(4):256-260.

[11] 孙倩,李志伟,朱建军,等. Improved Goldstein filter for InSAR noise reduction based on local SNR[J]. Journal of Central South University,2013,20(7):1896-1903.

[12] 史卫平. DInSAR 技术及其在矿区地面沉降监测中的应

用研究[D]. 青岛:山东科技大学,2010.

[13] EINEDER M,HUBIG M,MILCKE B. Unwrapping large interferograms using the minimum cost flow algorithm [C]// IGARSS'98. Sensing and Managing the Environment, 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing, Symposium Proceedings, IEEE,2002;98CH36174.

[14] CHEN Y,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;JGR,2018,123(10):9202-9222.

[15] 肖宇宁. 基于 SARscape 的 D-INSAR 数据处理分析[J]. 科技资讯,2020,18(18):43,45.

[16] MA L. Principal features and seismic-tectonics of Qinghai Menyuan Ms6. 4 earthquake in 2016 [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38 (5):1-7.

[17] 刘云华,张迎峰,张国宏,等. 2016 年 1 月 21 日门源 M_s6. 4 级地震 InSAR 同震形变及发震构造研究[J]. 地球物理学进展,2019,34(3):896-907.

[18] LIANG S S,LEI J S,XU Z G,et al. Relocation of the aftershock sequence and focal mechanism solutions of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai, Ms6. 4 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(6): 2091-2103.

[19] 李振洪,韩炳权,刘振江,等. InSAR 数据约束下的 2016 年和 2022 年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版): 1-15[2022-04-24]. DOI:10. 13203/j. whugis20220037.

Analysis of Deformation Characteristics of Gate Source Ms6. 9 Earthquake
Based on InSAR Technology

MA Wenhao, SUN Yafei, DONG Haochen

(School of Surveying and Urban Spatial Information, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan Henan 467002, China)

Abstract: Menyuan County is located in the northeast of Qinghai province, where has complex terrain and great height difference, and which is adjacent to the Donglongling fault zone in the north and connected to the Tuolaishan fault zone in the west. The Ms6. 9 earthquake occurred on January 8, 2022 in this region. SAR images provided by Sentinel-1A are used to obtain the coseismic surface deformation field of this earthquake. The results show that there are at least three rift zones in the Menyuan earthquake, among which the main earthquake causes the most obvious rift zone, and the other two obvious rift zones with a length of about 3 km. It is inferred that two aftershocks occurred within 1 hour after the main earthquake. The main fracture zone broke along the NWW-SEE direction. The geographical location is consistent with the inference that the western segment of the Donglongling fault occurred simultaneously with the eastern segment of the Tolai Mountain fault. The results of surface deformation data show that the southwest is uplifted obviously with the maximum value of 0. 66 m, while the northeast is subsidence seriously with the maximum value of 0. 54 m. The deformation characteristics are consistent with the characteristics of left-lateral strike-slip type. The shockwave radius of epicenter is between 15 and 50 km and the deformation profile reflects that the distribution range of surface deformation is much larger than that of vertical fault.

Keywords: Qinghai Menyuan; the earthquake; Ms6. 9; surface deformation characteristics