

万秀红,屠泓为,2022. 2022年1月8日青海门源 M_s 6.9 地震同震形变场及地下位错反演. 中国地震, 38(1): 21~29.

2022年1月8日青海门源 M_s 6.9 地震 同震形变场及地下位错反演

万秀红 屠泓为

青海省地震局, 西宁 810001

摘要 针对2022年1月8日青海门源 M_s 6.9 地震,基于 Sentinel-1A 卫星的 SAR 影像获取了本次地震的同震形变场,并进行计算分析,运用 SDM 程序反演地下静态位错。初步结果如下: ①本次地震震中位于蝴蝶状分布的形变图中心,抬升盘与下降盘之间的破裂迹线明显,破裂迹线长约 24km,形变中心位于托莱山与冷龙岭断裂交汇处。②降轨数据显示,在断层区域视线向(LOS)形变量最小约-0.55m(远离卫星),最大约 0.68m(靠近卫星);升轨数据显示,在断层区域视线向(LOS)形变量最小约-0.49m(远离卫星),最大约 0.42m(靠近卫星)。③对中国地震局发布的门源 6.9 级地震烈度图和本研究获取的地震形变图进行叠加分析,可以看出二者吻合度较高,地表有较明显形变所涉及区域约 0.4 万 km^2 。④运用降轨 InSAR 数据反演得出地下最大位错量约 3.29m,深度 4.75km,在近地表位错破裂长度可达 30km,地表有明显破裂的区域长约 25km,与中国地震局科考工作每日情况的结果基本一致。

关键词: 门源 6.9 级地震 D-InSAR 同震形变 地下位错反演

[文章编号] 1001-4683(2022)01-0021-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网测定,北京时间 2022 年 1 月 8 日 1 时 45 分,青海省门源县发生 M_s 6.9 地震,震中位于 $37.77^\circ\text{N}, 101.26^\circ\text{E}$,震源深度 10km。截至 1 月 20 日,共记录到 3.0 级及以上余震 20 次,其中 5.0~5.9 级地震 2 次,4.0~4.9 级地震 5 次,3.0~3.9 级地震 13 次,震源深度集中于 7~12km。图 1 为主震及余震分布图,余震密集区以主震震中为中心,分为东、西两段,余震区跨度约 50km。本次地震发生后,美国地质调查局(USGS)给出的震中为 $37.828^\circ\text{N}, 101.290^\circ\text{E}$,震源深度 13km,矩震级 M_w 6.9;全球矩心矩张量(GCTM)给出的震中为 $37.78^\circ\text{N}, 101.31^\circ\text{E}$,震源深度 14.8km,矩震级 M_w 6.7。门源 M_s 6.9 地震发生后,众多学者对本次地震进行了科学考察,获取了很多重要信息,但科考工作仅对经过的科考点进行了详

[收稿日期] 2021-02-10 [修定日期] 2021-03-03

[项目类别] 青海省地震局科学基金课题(2022B05)、青海省科技计划(2020-ZJ-752)、青海省重大科技专项(2019-ZJ-A10)共同资助

[作者简介] 万秀红,女,1983 年生,工程师,主要从事地震工程与地震活动性研究。E-mail: xhwan666666@163.com

屠泓为,通讯作者,男,1977 年生,正高级工程师,主要从事地震预测预报及地下位错反演研究工作。

E-mail: tuhongwei33@sian.com

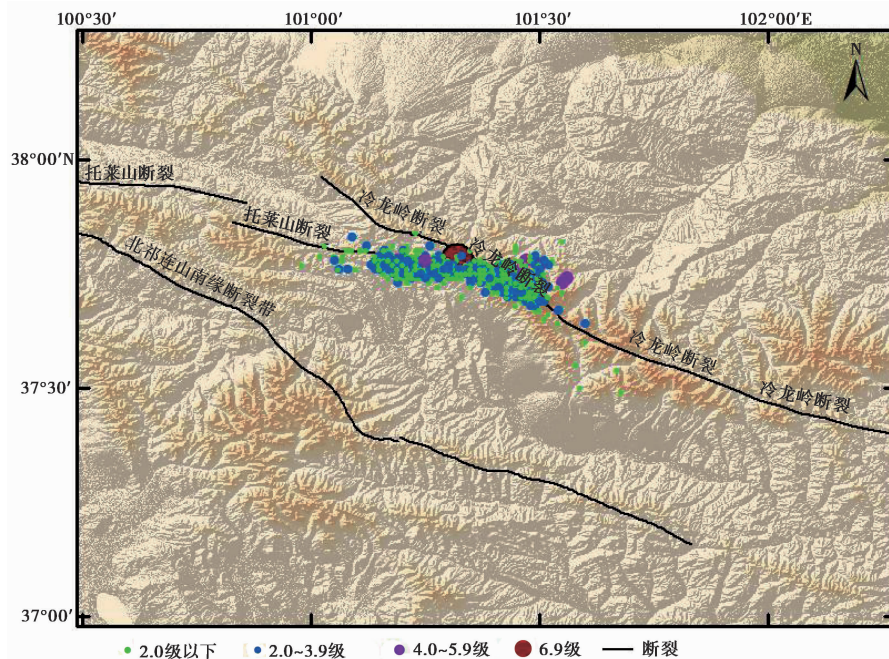


图1 门源 6.9 级地震及 3 级以上余震分布

细的考察工作,很多区域受交通条件限制,较难获取到相应的地表形变信息。

合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)是近几十年发展起来的对地观测技术,能够全天候获取高精度、连续覆盖的地面高程和地表形变信息,是现今地震断层参数研究的重要手段之一。该技术以同一地区的两景 SAR 图像为基本处理数据,通过求取两景 SAR 图像的相位差,获取干涉图像,然后经相位解缠,从干涉条文中获取地形高程或形变信息(张景发等,1998;单新建等,1998;万秀红等,2019)。从近几十年对强震后地表形变的研究可以看出,该技术是研究地表形变的一种快速而有效的方法。2001 年青海昆仑山口西 8.1 级、2008 年四川汶川 8.0 级、2008 年西藏当雄 6.6 级、2008 年西藏改则 6.9 级、2010 年青海玉树 7.1 级、2016 年青海门源 6.4 级、2016 年新疆阿克陶 6.7 级、2017 年四川九寨沟 7.0 级、2021 年青海玛多 7.4 级等地震发生后,众多学者通过 InSAR 技术分别从不同的角度对这些强震进行了研究,并给出了相应的研究结果(万永革等,2008;单新建等,2004;Wan et al,2017;屠泓为等,2016;屈春燕等,2008;伍吉仓等,2020;邵叶等,2011;谈洪波等,2013;乔学军等,2009;洪顺英等,2009;赵强等,2017;邱江涛等,2018;季灵运等,2018;杨君妍等,2021),这些结果为相关地震研究提供了重要的参考。

门源 M_s 6.9 地震发生在海拔较高的无人区,虽然未造成人员伤亡,但此次地震震级较大,造成的地表破裂范围较长,地表影响范围也较大。因此,采用 D-InSAR 技术,利用 Sentinel-1 卫星的 SAR 影像进行计算,分析地表形变场,对于研究该地区地表形变与地下位错具有重要意义。

1 区域构造背景

2022 年 1 月 8 日门源 M_s 6.9 地震发生在冷龙岭断裂与托莱山断裂交汇处,是继 1986 年

6.4 级、2016 年 6.4 级地震后,又一次发生在门源地区的 6 级以上地震事件。

冷龙岭活动断裂是青藏高原东北缘祁连山的重要组成部分,位于青藏高原前缘部位的祁连山断裂带中东段,该断裂全新世以来活动强烈,主要表现为左旋走滑运动,并伴有正倾滑性质,断错地貌特征明显,具有典型的左旋走滑特征,冷龙岭断裂晚更新世以来的平均水平滑动速率为 (4.3 ± 0.7) mm/a,全新世晚期以来的平均水平滑动速率为 (3.9 ± 0.36) mm/a (何文贵等,2010;姜文亮等,2017)。冷龙岭断裂是一条全新世活动断裂,且具有多期活动的特点,晚更新世以来断裂发生过 4 期断层活动,从老至新位错量分别为 45~65m、22~52m、13~27m、7~10m,说明该断裂具有较强的水平活动特性(赵强等,2017;李智敏等,2016)。

本次地震震中位于冷龙岭断裂与托莱山断裂交汇处,相比于前两次 6 级地震,本次地震震级明显偏大,地表破裂明显,已发现约 25km 的地表破裂^①,是迄今该区域地表破裂最为发育的一次强地震。

2 数据资料收集处理及计算方法

2022 年 1 月 8 日门源 6.9 地震发生后,快速获取了覆盖震中区域升降轨数据(欧空局发射的 Sentinel-1A 卫星数据),升轨卫星的两景数据分别为 2022 年 1 月 5 日(震前)和 2022 年 1 月 17 日(震后),轨道号为 128,空间基线约为 39.009m;降轨卫星的两景数据分别为 2021 年 12 月 29 日(震前)和 2022 年 1 月 10 日(震后),轨道号为 33,空间基线约为 55.852m。采用的数据均为宽幅模式的 SLC、IW 数据,极化方式为 VV 极化,时间基线为 12 天,计算使用的外部 DEM 数据均采用于图新地球网采购的 30m 分辨率的 DEM 数据。

3 计算结果分析

图 2 为降轨的干涉图与形变图,图 3 为升轨的干涉图与形变图。根据数据计算结果,可以从图 2、图 3 中明显看出本次地震震中位于蝴蝶状分布的形变图中心,抬升盘与下降盘之间的破裂迹线明显,破裂迹线长约 24km,形变中心位于托莱山与冷龙岭断裂交汇处,即本次地震的震中位置。降轨数据干涉图显示,NW 向形变范围(a-a1)约 90km,SW 向形变范围(b-b1)约

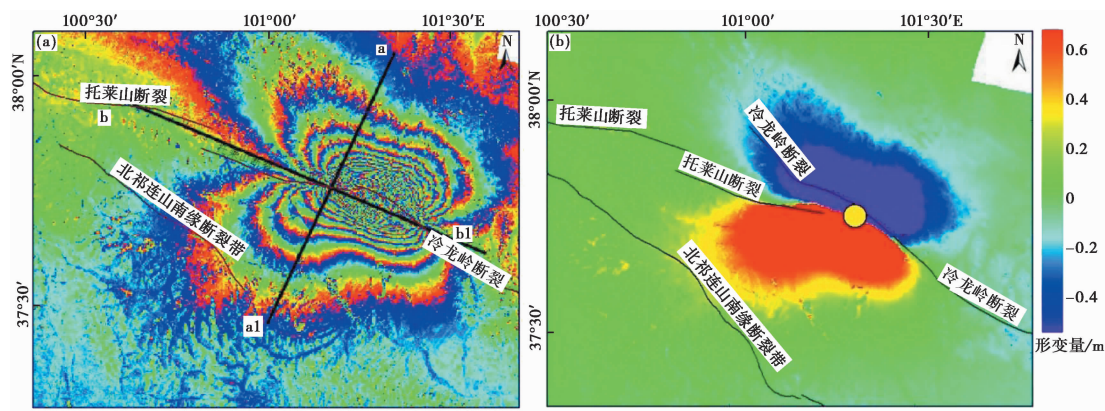


图 2 干涉图(a)和形变图(b)(降轨)

^① 中国地震局,2022. 科考工作每日情况第 9 期. 内部资料.

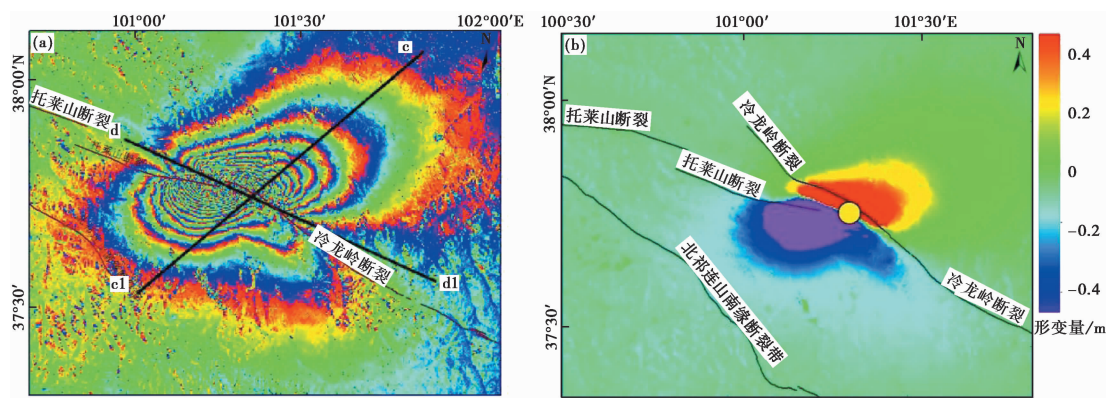


图3 干涉图(a)和形变图(b)(升轨)

72km; 升轨数据干涉图显示, NW 向形变范围(c-c1)约 84km, SW 向形变范围(d-d1)约 93km。

文中选取了水平向和垂直向的剖面绘制了水平向与垂直向剖面沿视线向(LOS)形变量的变化,如图4(降轨)、图5(升轨)所示(纵轴为形变量,横轴为形变点位置的数据),图中右上角的形变图中方框的位置为选取剖线的点,以该点为中心做了水平向和垂直向形变量的变化,图中曲线为该点垂直向与水平向形变量的变化范围。降轨数据显示,在断层区域视线向(LOS)形变量最小约-0.55m(远离卫星),最大约 0.68m(靠近卫星);升轨数据显示,在断层区域视线向(LOS)形变量最小约-0.49m(远离卫星),最大约 0.42m(靠近卫星)。

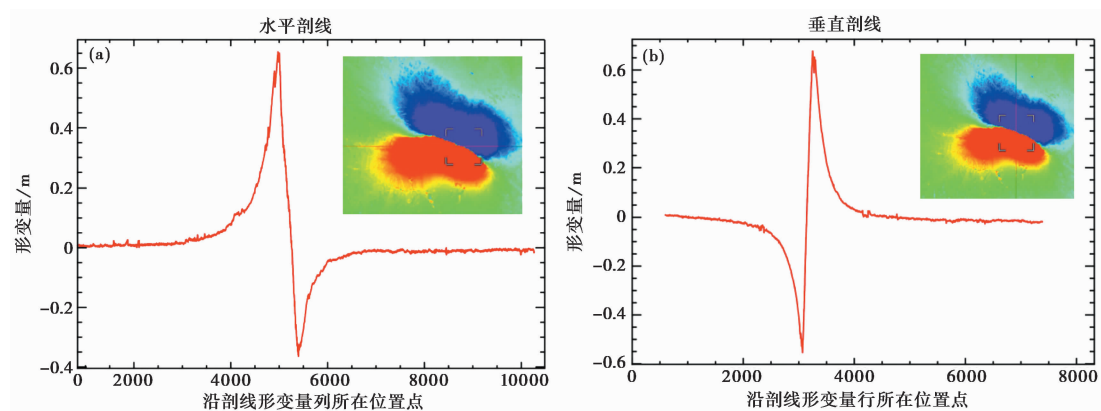


图4 沿水平剖面(a)和垂直剖面(b)形变量的变化(降轨)

结合相关分析认为有较明显形变涉及区域约 0.4 万 km^2 , 范围为 $37.30^\circ\text{N} \sim 38.10^\circ\text{N}$, $100.75^\circ\text{E} \sim 101.66^\circ\text{E}$, 形变较严重的区域位于 $37.77^\circ\text{N}, 101.26^\circ\text{E}$ 及其附近。在本次地震的作用下引起了极震区大范围同震变形, 根据位错反演, 在极震区 ($37.77^\circ\text{N}, 101.26^\circ\text{E}$) EW 向约 10km 范围内形成了 1.3m 以上的变形, 在 10~14km 范围内形成了 0.3m 的变形。对中国地震局发布的门源 6.9 级地震烈度图和本次计算获取的地震形变图进行了叠加对比分析(图6), 可以看出二者破裂影响范围吻合度较高, 进一步说明本研究结果的可靠性。

图7为兰新铁路硫磺沟大桥附近拍摄的地表破裂, 高差约 0.6m, 从下降盘很难一步跨

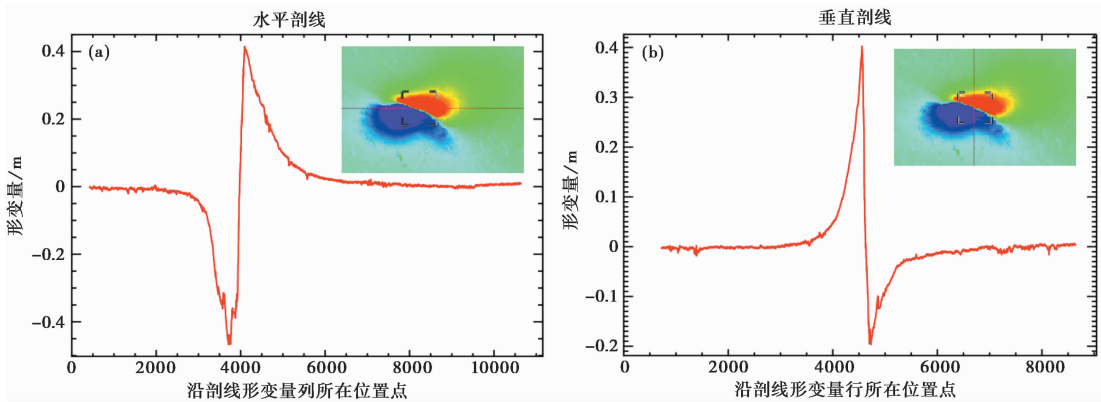


图 5 沿水平剖面(a)和垂直剖面(b)形变量的变化(升轨)

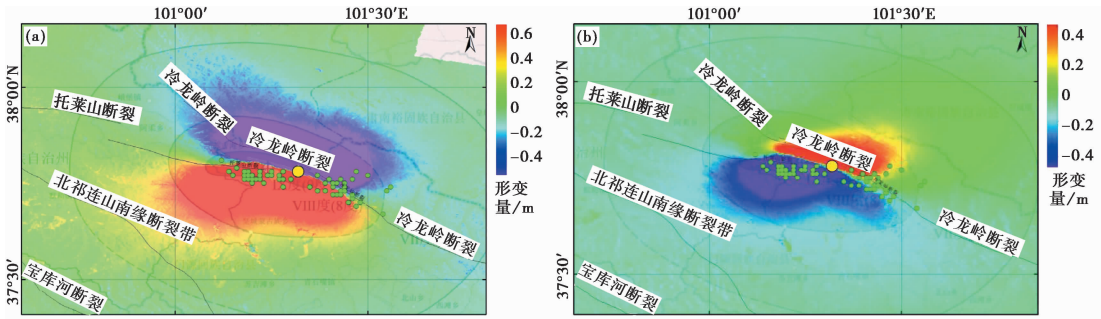


图 6 降轨形变(a)、升轨形变(b)与烈度图叠加示意



图 7 地表破裂照片

到上升盘。距离该破裂 100m 左右的兰新铁路硫磺沟大桥铁轨变形,桥面错开,桥面一侧掉至桥墩中间的凹槽(图 8),这些均可作为计算结果的佐证。

对比邓起东断层分布和 D-InSAR 形变场分布特点,可以看出此次地震发震构造不在冷龙岭断裂,也不在托莱山断裂,而是位于二者之间。而据中国地震局地质研究所野外科考,此次地震的发震构造发育在冷龙岭断裂与托莱山断裂之间阶区中的道沟断裂(韩竹军等,2022)。可见本次计算结果与中国地震局地质研究所现场科考结果基本一致。



图8 硫磺沟大桥桥面变形(a)与位错(b)照片

4 位错反演结果

运用位错反演程序 SDM (Wang et al, 2011、2013; 屠泓为等, 2016), 根据降轨 D-InSAR 数据分布建立断裂迹线, 构建了一个约 $25\text{km} \times 41.5\text{km}$ 的断层面, 为提高分辨率, 将其分解为 273 个 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 的子模块, 考虑到断裂顶部倾角和底部倾角有所差异, 根据众多的震源机制解结果, 顶部倾角设定为 83° , 底部倾角设定在 $66^\circ \sim 83^\circ$ 之间, 通过分角度计算, 得出顶部倾角为 83° 、底部倾角为 66° , 并结合折中曲线等因素分析, 得出光滑因子 $\alpha = 0.02$ 时, 计算得出的相关系数最高, 达到 98.3%, 故以上述参数作为输入参数进行计算。

根据位错反演计算结果 (图 9), 得出平均位错为 0.46m, 最大位错为 3.29m, 位于 $101.29^\circ\text{E}, 37.78^\circ\text{N}$, 深度为 4.75km。对比中国地震台网给出的 6.9 级主震位置, 分析认为本文计算的最大位错破裂位置与主震位置一致性较好。科考工作显示, 门源 6.9 级地震地表最大位错量为 $3.1\text{m}^{(1)}$, 通过对 InSAR 数据位错反演的最大位错与地表科考得出的结果进行对比, 认为二者具有较高的一致性。

从沿经度截面图的地下位错空间分布来看, 在深度 8km 以上位置的位错在 1.3m 以上,

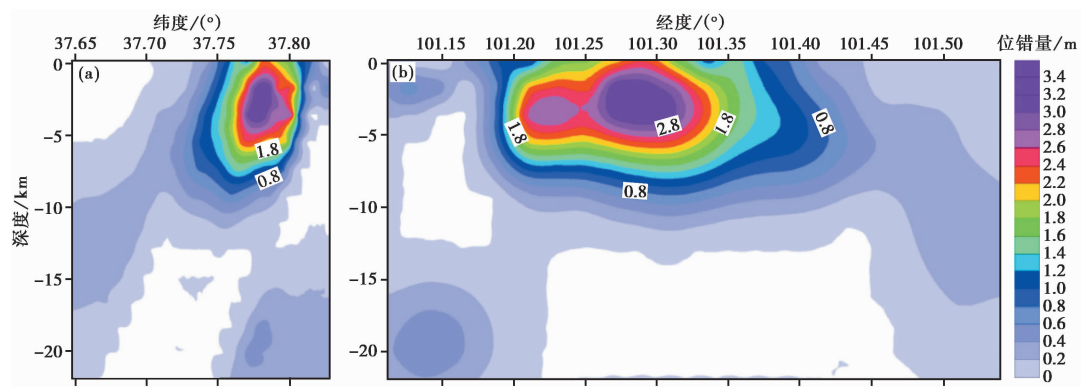


图9 沿纬度(a)、经度(b)方向的地下位错计算结果

一直破裂至地表,在近地表位错破裂长度可达 30km,地表有明显破裂的区域长约 25km,其中 $101.20^{\circ}\text{E}\sim 101.35^{\circ}\text{E}$ 的位错在 1.2m 以上,这与地表科考结果基本一致,其他区域的破裂相对较低。结合断层构造,从沿纬度截面图的地下位错空间分布来看,地表形变的宽度约 10km,但较大形变区域集中在 5km 范围内,同时,地下 10~20km 范围内有明显的破裂分支,表明本次地震应为多条断裂参与了活动,同时也有可能是托莱山-冷龙岭断裂在东部区域有一定拐弯,而造成地下位错反演在截面上的投影。但总体来看,本次地震破裂尺度相对较大。从沿经度的破裂分布来看,在断层的两端均存在小幅度的破裂尺度加深的现象,东部 8~15km 深度破裂明显,西部 15~23km 深度破裂明显。

5 结论

本文采用 Sentinel-1A 卫星数据,利用 D-InSAR 技术获取门源 $M_s6.9$ 地震同震形变场,进行计算分析,运用 SDM 程序反演地下静态位错,并结合现场科考资料进行对比分析,得出如下认识:

(1) 本次地震震中位于蝴蝶状分布的形变图中心,抬升盘与下降盘之间的破裂迹线明显,破裂迹线长约 24km,形变中心位于托莱山与冷龙岭断裂交汇处,即本次地震的震中位置。

(2) 降轨数据干涉图显示,NW 向形变范围约 90km,SW 向形变范围约 72km。升轨数据干涉图显示,NW 向形变范围约 84km,SW 向形变范围约 93km。有较明显的形变所涉面积约 0.4 万 km^2 ,对比已发布的门源 6.9 级地震烈度图和本次地震的形变图,表明二者重合度较高。

(3) 降轨数据显示,在断层区域视线向(LOS)形变量最小约 -0.55m(远离卫星),最大约 0.68m(靠近卫星);升轨数据显示,在断层区域视线向(LOS)形变量最小约 -0.49m(远离卫星),最大约 0.42m(靠近卫星)。

(4) 利用降轨数据计算位错反演结果,得出平均位错为 0.44m,最大位错为 3.29m,位于 $101.29^{\circ}\text{E}, 37.78^{\circ}\text{N}$,深度为 4.75km。在 8km 以上位置位错在 1.3m 以上,一直破裂至地表,近地表位错破裂长度可达 30km,在地表有明显破裂的区域长约 25km。

综合分析认为,本次地下位错在主震区域破裂较为彻底,但在断层两端近地表破裂幅度较小,后续的应力触发作用值得关注。

致谢: 感谢欧空局提供的 Sentinel-1A 卫星影像数据及汪荣江教授提供的反演程序,同时感谢审稿专家提出的修改建议。

参考文献

- 韩竹军,牛鹏飞,李科长,等,(2022-01-18)[2022-03-30]. 2022 年 1 月 8 日青海门源 6.9 级地震的一些初步认识, <https://www.eq-igl.ac.cn/zhxw/info/2022/36632.html>.
- 何文贵,袁道阳,葛伟鹏,等,2010. 祁连山活动断裂带中东段冷龙岭断裂滑动速率的精确厘定. 地震,30(1):131~137.
- 洪顺英,申旭辉,单新建,等,2009. 基于 D-InSAR 技术的西藏改则地震同震形变场特征分析. 地震,29(4):23~31.
- 季灵运,刘传金,徐晶,等,2017. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析. 地球物理学报,60(10):4069~4082.
- 姜文亮,李永生,田云锋,等,2017. 冷龙岭地区 2016 年青海门源 6.4 级地震发震构造特征. 地震地质,39(3):536~549.

- 李智敏,黄帅堂,胡朝忠,等,2016. 2016年青海门源 $M_s6.4$ 地震发震构造遥感解译探讨. 地震研究, **39**(增刊 I):20~27.
- 乔学军,游新兆,杨少敏,等,2009. 当雄 $M_s6.6$ 地震的 InSAR 观测及断层位错反演. 大地测量与地球动力学, **29**(6):1~7.
- 邱江涛,赵强,林鹏,2018. 2016年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 地震 InSAR 同震形变与滑动分布特征. 地震研究, **41**(3):415~422.
- 屈春燕,宋小刚,张桂芳,等,2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震 InSAR 同震形变场特征分析. 地震地质, **30**(4):1076~1084.
- 单新建,柳稼航,马超,2004. 2001年昆仑山口西 8.1 级地震同震形变场特征的初步分析. 地震学报, **26**(5):474~480.
- 单新建,叶洪,1998. 干涉测量合成孔径雷达技术原理及其在测量地震形变场中的应用. 地震学报, **20**(6):647~655.
- 邵叶,申旭辉,洪顺英,等,2011. 基于 D-InSAR 技术的玉树 $M_s7.1$ 地震同震形变场提取与分析. 地震, **31**(3):37~45.
- 谈洪波,申重阳,邢乐林,等,2013. 玉树 $M_s7.1$ 地震同震效应模拟与绝对重力检验. 中国地震, **29**(1):116~123.
- 屠泓为,汪荣江,刁法启,等,2016. 运用 SDM 方法研究 2001 年昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震破裂分布:GPS 和 InSAR 联合反演的结果. 地球物理学报, **59**(6):2103~2112.
- 万秀红,屠泓为,姚生海,等,2019. InSAR 技术在青海地区地震中的应用研究. 高原地震, **31**(4):14~20.
- 万永革,沈正康,王敏,等,2008. 根据 GPS 和 InSAR 数据反演 2001 年昆仑山口西地震同震破裂分布. 地球物理学报, **51**(4):1074~1084.
- 伍吉仓,宋鑫友,胡凤鸣,等,2020. 联合 GNSS 和 InSAR 观测位移反演 2008 年汶川大地震断层位错模型参数. 中国地震, **36**(4):767~779.
- 杨君妍,孙文科,洪顺英,等,2021. 2021 年青海玛多 7.4 级地震的同震变形分析. 地球物理学报, **64**(8):2671~2683.
- 张景发,邵芸,1998a. 干涉成像雷达(INSAR)技术及其应用现状. 地震地质, **20**(3):86~96.
- 赵强,王双绪,蒋锋云,等,2017. 利用 InSAR 技术研究 2016 年青海门源 $M_w5.9$ 地震同震形变场及断层滑动分布. 地震, **37**(2):95~105.
- Wan Y G, Shen Z K, Bürgmann R, et al, 2017. Fault geometry and slip distribution of the 2008 $M_w7.9$ Wenchuan, China earthquake, inferred from GPS and InSAR measurements. Geophys J Int, **208**(2):748~766.
- Wang R J, Parolai S, Ge M R, et al, 2013. The 2011 $M_w9.0$ Tohoku Earthquake: comparison of GPS and strong-motion data. Bull Seismol Soc Am, **103**(2B):1336~1347.
- Wang R J, Schurr B, Milkereit C, et al, 2011. An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong-motion records. Bull Seismol Soc Am, **101**(5):2029~2044.

The Inversion of Co-seismic Deformation Field and Underground Dislocation of the Menyuan $M_s6.9$ Earthquake on January 8, 2022 in Qinghai Province

Wan Xiuhong Tu Hongwei

Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China

Abstract Based on the SAR image of sentinel-1A satellite for the $M_s6.9$ earthquake incident in Menyuan, Qinghai Province on January 8, 2022, we calculated the coseismic deformation field, and applied SDM program to retrieve the underground static dislocation. The preliminary results are as follows: ① The epicenter of the earthquake is located in the center of the deformation map with butterfly shape, and the fracture trace between the lifting plate and the falling plate is obvious. The long of fracture trace is about 24km, with that deformation center is at the intersection of Tolaishan and Lenglongling faults. ② The data from down orbit shows that the shape variable (line of sight, LOS) in the fault area is at least -0.55m (away from the satellite) and at most about 0.68m (close to the satellite); The data from lifting orbit shows that the shape variable (line of sight, LOS) in the fault area is at least about -0.49m (away from the satellite) and at most about 0.42m (close to the satellite). ③ The superposition analysis of the intensity map of the Menyuan $M_s6.9$ earthquake released by the China Earthquake Administration and the deformation map of the earthquake shows that the coincidence between the intensity map and the deformation map is very high, and there exists an obvious deformation area about 4000km^2 . ④ The maximum amount of underground dislocation is about 3.29m at the depth of 4.75km . The dislocation fracture near the surface is about 30km and the area with obvious fracture on the surface is about 25km , which is basically consistent with the field observation.

Keywords: Menyuan $M_s6.9$ earthquake; D-InSAR; Coseismic deformation; Inversion of underground dislocation