



门源 Mw5.9 级地震形变 InSAR 观测及区域 断裂带深部几何形态

刘 洋^{1,2,3} 许才军^{1,2,3} 温扬茂^{1,2,3}

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

摘 要:利用 Sentinel-1A 卫星升轨、降轨合成孔径雷达影像数据,提取了 2016 年门源 Mw5.9 级地震的高精度合成孔径雷达干涉同震形变场,利用单纯形法和非负最小二乘法反演确定了地震断层几何和滑动分布,并构建了区域断裂带的深部几何形态模型。结果表明,门源 Mw5.9 级地震同震形变以地表抬升为主,沿升轨、降轨视线向的最大值分别为 5.3 cm、7.1 cm;地震断层走向、倾角分别为 133°、43°;地震滑动以逆冲为主,主要发生在地下 6.14~12.28 km 处,最大滑动量约 0.5 m,平均滑动角为 66.85°,地震矩为 1.0×10^{18} N·m (Mw5.94);形变观测拟合残差均方根为 0.36 cm;区域断裂带的深部几何形态以花状构造为特征,整体倾向南西,门源地震发震断裂为花状构造中未出露地表的盲断层。相关成果能够为研究区域地壳运动与变形、活动断裂与地震孕育发生等提供参考。

关键词:门源 Mw5.9 级地震;InSAR;滑动分布;深部几何形态;花状构造

中图分类号:P237;P227

文献标志码:A

北京时间 2016-01-21 01:13,位于青藏高原东北缘的青海省门源回族自治县发生 Mw5.9 级地震(图 1)。地震震中位于祁连山-海原断裂带的冷龙岭断裂北侧,区域内断裂几何复杂、构造活动强烈^[1-5]。自 20 世纪 80 年代以来,区域内曾发生多次中强地震(图 1)。其中,门源 1986 年 M6.4 级地震与 2016 年 Mw5.9 级地震在空间上相距不超过 30 km,表明区域内应力积累较高且地震危险性较大。因此,有必要对该地震开展同震形变观测研究,以提高对区域断裂活动构造特征的认识。

门源 Mw5.9 级地震发生后,众多学者基于地震、地质、遥感及形变等数据对震源机制开展了相关研究^[3-12]。然而,由于区域内断裂构造几何复杂、发震破裂未延伸至地表等因素的限制,对地震破裂的几何学和运动学特征、区域断裂带的几何形态等研究结果尚不一致。

震源机制解表明,门源 Mw5.9 级地震为兼具少量走滑分量的逆冲型地震(表 1)。中国地震局地质研究所推测,发震断裂为民乐-大马营断裂

东南段,或者为冷龙岭断裂与民乐-大马营断裂之间的一条逆断层^[3]。文献[8]基于科学台阵探测项目布设在震区附近的台站及青海、甘肃地震台网的数据,认为门源地震走向为 335°,倾向北东,倾角约 75°。文献[3]基于地震前后的高分遥感影像解译、野外考察、余震分布等数据,推测发震断裂为北盘上升、南盘下降的冷龙岭北侧断裂,且在地表为北倾。文献[4,10]同样推测发震断裂为冷龙岭北侧断裂,但其断层几何与中国地震台网中心(China Earthquake Networks Center, CENC)、中国地震局地球物理研究所(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, IGP-CEA)、美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)、全球矩心矩张量(global centroid moment tensor, GCMT)目录发布的震源机制解中的走向 134°~144°、倾角 35°~43°(倾向南西)较为接近,而与文献[3,8]给出的北倾差异较大。文献[6]联合历史地震、余震、活动构造及合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)数据反演确定了断

收稿日期:2019-03-08

项目资助:国家自然科学基金(41874011,41774011,41431069);国家重点研发计划(2018YFC1503603)。

第一作者:刘洋,博士,副教授,主要从事 InSAR 数据处理与地学解释研究。Yang.Liu@sgg.whu.edu.cn

层参数,认为发震断层为冷龙岭北侧断裂,倾向南西,呈铲状,断层上部、下部倾角分别为 85°、40°,断层下部的滑动角为 65°。采用与文献[6]相近的观测及 GPS 数据,文献[5]得出了与文献[6]相近的断层几何和运动学特征。文献[9]利用降轨 InSAR 数据反演确定了发震断层参数,其走向为 130°,倾向南西,倾角为 46°,滑动角为 47°。文献[11-12]认为,发震断层更可能倾向南西。由此可以看出,相关研究对门源地震发震破裂倾向、滑动角的结论尚不一致。

综合已有的大地电磁测深剖面、地表地质调查及门源地震相关研究成果,文献[3-7]研究了区域三维综合地形地质剖面、发震断层铲状结构、发震构造模式等,并分析了区域断裂带的深部几何形态。进一步地,文献[3-6]认为,门源 Mw5.9 级地震发震断裂可能为冷龙岭北侧断裂,而文献[7]认为发震断裂可能为民乐-大马营断裂,产生该差异的原因与对区域断裂带深部几何形态的认识不一致有关。因此,区域断裂带的深部几何形态尚需进一步研究。

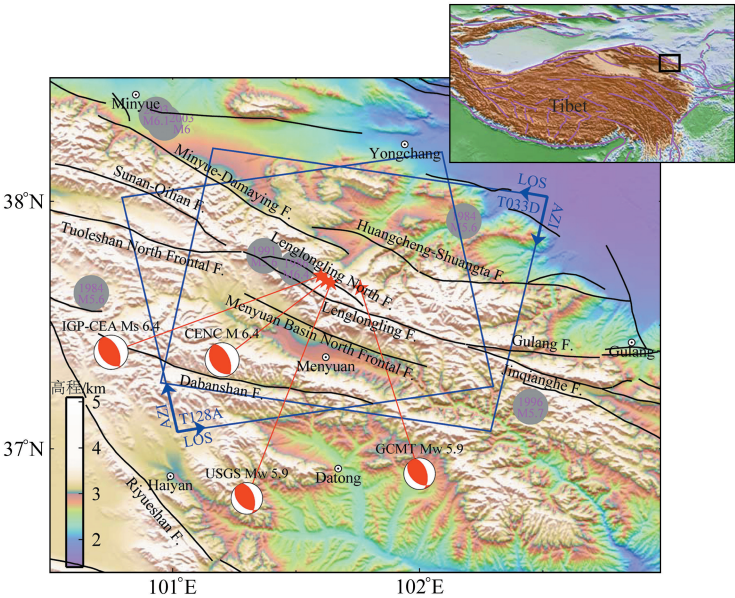


图 1 2016 年门源 Mw5.9 级地震的区域构造背景及 Sentinel-1A 观测范围

Fig. 1 Regional Tectonic Background of the 2016 Menyuan Mw5.9 Earthquake and Sentinel-1A Observation Range

表 1 2016 年门源 Mw5.9 级地震断层参数

Tab. 1 Fault Parameters of the 2016 Menyuan Mw5.9 Earthquake

数据来源	震中位置	长度/km	顶深/底深/km	走向/倾角	滑动角/滑动量	震级
CENC	101.62°E, 37.68°N	—	—	143°/35°	80°/—	M6.4
IGP-CEA	101.6°E, 37.7°N	—	—	141°/38°	79°/—	Ms6.4
USGS	101.641°E, 37.67°N	—	—	144°/36°	75°/—	Mw5.9
GCMT	101.76°E, 37.65°N	—	—	134°/43°	68°/—	Mw5.9
文献[6]	101.65°E, 37.64°N	20	7.29/13.71	134°/40°	65°/—	Mw5.9
文献[7]	—	—	—	128°/43°	78°/—	Mw5.9
文献[8]	101.61°E, 37.67°N	—	—	335°/~75°	97°/—	—
文献[9]	101.69°E, 37.66°N	10.2	6.17/9.63	130°/46°	47°/0.6 m	Mw5.9
文献[11]	101.623°E, 37.657°N	3.5	7.94/10.06	127°/45°	73°/2.256 m	Mw5.891
文献[12]	101.621°E, 37.66°N	16	6.37/13.59	132°/41°	68°/0.41 m	Mw5.905
本研究	101.69°E, 37.72°N	9.12	6.40/11.64	133°/43°	65.66°/0.40 m	Mw5.9

InSAR 技术能够大范围、高精度、高空间分辨率地捕获地表形变,为研究地震、火山、滑坡等自然灾害提供了新的技术手段^[13-17]。Sentinel-1A 卫星具有全球覆盖、快速重访、数据免费等优势,已成功应用于地震等研究^[18]。单纯形法是一种多变量函数的寻优方法,其基本原理是已知一个

基本可行解,判定其是否为最优解,并根据最优条件和可行性条件进行迭代调整、判定,直至得到最优估值,其优点是计算量小、速度快等,已在断层参数非线性反演中得到应用^[13,16]。非负最小二乘法是一种附约束的寻优方法,其基本原理是在最小二乘问题中附加非负性约束条件进行求解,

以避免反演中待求参数出现不满足要求的解,其优点是能够顾及先验信息、操作简便等,已在断层滑动分布线性反演中得到应用^[19-20]。基于这两种方法的优点,本研究将其应用于门源地震断层几何和滑动分布反演中。

本研究首先利用青海门源 Mw5.9 级地震发生前后的 Sentinel-1A 卫星升轨、降轨合成孔径雷达影像数据,采用差分干涉测量技术进行数据处理和分析,获取同震形变场;进一步地,根据同震形变场分布,采用单纯形法和非负最小二乘法反演确定地震断层几何和滑动分布,为鉴别已有结果的合理性和理解该地震的发震破裂属性等提供支持;最后,综合相关研究成果构建地震破裂区域断裂带的深部几何形态模型,分析冷龙岭断裂、冷龙岭北侧断裂、民乐-大马营断裂及发震断裂的深部产状和空间几何关系。相关成果能够为研究区域地壳运动与变形、活动断裂与地震孕育发生等提供参考。

1 InSAR 数据处理与同震形变分析

1.1 InSAR 数据处理

2016 年青海门源 Mw5.9 级地震发生前后,欧洲空间局(European Space Agency,ESA) Sentinel-1A(C 波段)卫星对地震区域进行合成孔径雷达观测,获得了干涉宽幅模式下基于循序扫描地形观测技术采集的雷达数据。综合覆盖范围和时空基线,本研究选取了覆盖震中区域的升轨(轨道号 128)、降轨(轨道号 033)干涉像对,时间基线均为 24 d,空间基线分别为 15 m、6.5 m(表 2)。

表 2 Sentinel-1A 干涉像对参数
Tab.2 Parameters of Sentinel-1A Interferometric Image Pair

序号	轨道	飞行方向	获取时间		时间基线/d	空间基线/m
			主影像	辅影像		
1	128	升轨	2016-01-13	2016-02-06	24	15
2	033	降轨	2016-01-18	2016-02-11	24	6.5

数据处理中,采用瑞士 GAMMA 软件进行两轨法差分干涉处理^[21]。其中,利用 ESA 提供的精密轨道和美国国家航空航天局发布的 90 m 分辨率 SRTM(shuttle radar topography mission)数字高程模型^[22]消除地形相位的影响;采用基于能量谱的局部自适应滤波技术^[23]对干涉图进行滤波,并采用枝切法^[24]进行相位解缠;进一步地,将雷达坐标系下的相位图进行地理编码,最终得到门源 Mw5.9 级地震的同震干涉形变场

(图 2)。

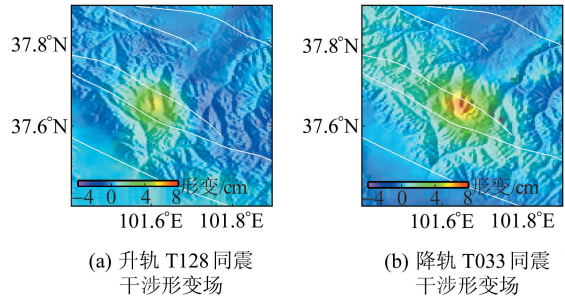


图 2 门源 Mw5.9 级地震同震干涉形变场
Fig.2 Coseismic Interferometric Deformation Field of Menyuan Mw5.9 Earthquake

1.2 同震形变分析

图 2(a)、2(b)分别为基于升轨、降轨 Sentinel-1A 观测得到的同震干涉形变场。将二者进行对比分析可以发现,两者在形变量级及其空间分布上存在一定差异,这主要与升轨、降轨观测的视线向不一致相关^[18]。可以看出,该次地震在冷龙岭断裂北东区域均产生了显著的抬升形变,沿升轨、降轨视线向的形变最大值分别为 5.3 cm、7.1 cm。该抬升形变区域大致沿北西-南东向延伸。结合地震位错模型正演计算分析,可推测发震断层走向可能沿北西-南东方向延伸,这与震源机制解给出的走向、等震线长轴总体走向基本一致^[3-4](表 1)。

升轨、降轨干涉形变图在震中区域整体上连续光滑,可推测发震断层未破裂至地表。然而,与显著的抬升形变不同,在震中区域未观测到显著的下陷形变,表明发震断层的上界面距离地表可能较深,这可能与地震释放能量不足以将破裂延伸至地表有关。综合该形变的分布特征,门源 Mw5.9 级地震的同震破裂可能以逆冲为主,但其断层几何及滑动分布尚需后续反演来确定。

2 地震断层参数非线性反演

图 2 中的 InSAR 形变包含有近百万个观测值,直接用于反演会显著降低计算效率,而且相邻的观测值在空间上具有高度相关性。为了提高反演效率和最大程度地保留形变空间变化特征,本研究采用四叉树采样方法对原始干涉形变场进行降采样^[25]。降采样后,用于反演的升轨、降轨观测值分别有 855 个和 900 个。

非线性反演中,待估计的断层参数包括经度、纬度、长度、顶深、底深、走向、倾角、滑动量及滑动

角。基于单断层和 Okada 弹性半空间位错模型^[26]模拟地表形变场。待求解的方程为:

$$d_{\text{obs}} = G_1(m_1) \quad (1)$$

式中, d_{obs} 表示同震形变观测值; G_1 是断层参数 m_1 的函数。采用单纯形法^[13]求解式(1), 断层参数反演结果见表 1。

从表 1 可以看出, 断层破裂长度为 9.12 km, 顶深、底深分别为 6.40 km、11.64 km, 表明发震断层未延伸至地表, 与前文基于同震形变场推测的结果相一致; 走向、倾角分别为 133°、43°, 倾向南西, 该走向与等震线长轴总体走向基本一致^[3-4]; 滑动角、滑动量分别为 65.66°、0.40 m, 表明震源机制以逆冲为主, 与前文基于同震形变场推测的断层运动属性相一致; 反演给出的矩震级为 Mw5.9。基于该反演模型的升轨、降轨形变观测拟合残差均方根 (root mean square, RMS) 分别为 0.39 cm、0.33 cm, 总体拟合残差 RMS 为 0.36 cm, 小于文献[9, 11]给出的结果。

将本研究确定的断层参数与已有结果进行比较。断层破裂长度 9.12 km 与文献[9]给出的 10.2 km 相近, 但小于文献[6, 12]给出的 20 km、16 km; 顶深、底深介于文献[6, 9, 11-12]的结果之间; 走向、倾角与 GCMT、文献[6-7, 9, 11-12]的结果相差不大, 但与 CENC、IGP-CEA、USGS 有一定的差异, 与文献[8]中的 335°、~75°差异较大; 滑动角 65.66°与 GCMT、文献[6, 12]的结果相近, 小于 CENC、IGP-CEA、USGS、文献[7-8]给出的结果, 大于文献[9]给出的 47°; 矩震级 Mw5.9 与已有地震学及 InSAR 反演结果基本一致。与已有研究结果的比较表明, 单纯形法在门源地震断层参数非线性反演中是有效的。

3 地震断层滑动分布线性反演

在非线性反演确定断层几何的基础上, 线性反演断层面上滑动分布。反演过程中, 将断层面沿走向、倾向分别延伸至 24 km、18 km, 顶深、底深分别为 4.78 km、17.05 km, 并按 1 km × 1 km 的断层单元进行剖分; 基于 Okada 弹性半空间位错模型模拟地表形变场^[26]; 采用二阶拉普拉斯平滑约束以避免滑动分布解的振荡。断层几何确定后, 滑动分布与地表形变呈线性关系, 此时待求解的方程为:

$$\begin{bmatrix} d_{\text{obs}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_2 \\ \kappa^2 \Delta^2 \end{bmatrix} m_2 \quad (2)$$

式中, d_{obs} 表示同震形变观测值; G_2 表示格林函

数; m_2 表示滑动分布; κ^2 表示平滑因子 (本研究采用的值为 350); Δ^2 表示二阶拉普拉斯平滑算子。采用非负最小二乘法^[19-20]求解式(2), 得到较优滑动分布如图 3(a)所示。

从图 3(a)可以看出, 门源 Mw5.9 级地震以逆冲运动为主, 与兼具少量走滑分量的逆冲型震源机制相一致; 滑动分布主要发生在地下 6.14 ~ 12.28 km 处; 最大滑动量约 0.5 m, 稍大于文献[6]给出的 0.45 m; 最大滑动量位于地下约 9 km 处, 与文献[6]给出的 9.5 km、文献[8]基于地震重定位技术得到的震源深度 9.41 km 比较接近; 平均滑动角为 66.85°, 与非线性反演给出的 65.66°及文献[6]、文献[12]分别给出的 65°、68°比较接近; 相应的地震矩为 $1.0 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$, 矩震级为 Mw5.94, 与非线性反演及已有地震学、InSAR 反演结果相当。与已有研究结果的比较表明, 非负最小二乘法在门源地震断层滑动分布线性反演中是有效的。

基于蒙特卡罗方法估计滑动分布的精度 (图 3(b)), 最大误差为 1.4 cm, 平均误差为 0.5 cm。图 4 为滑动分布模型拟合的形变场及拟合残差, 虚线表示断层沿上倾方向在地表的投影迹线。结果显示, 图 3(a)的滑动分布模型能够

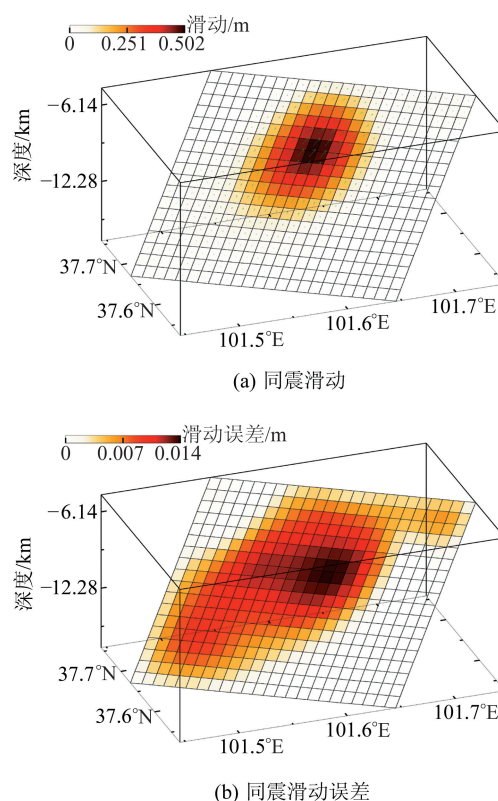


图3 门源 Mw5.9 级地震同震滑动及误差
Fig. 3 Coseismic Slip Distribution and Its Error of Menyuan Mw5.9 Earthquake

较好地解释大部分形变观测。升轨、降轨形变观测拟合残差 RMS 分别为 0.38 cm、0.33 cm, 总体拟合残差 RMS 为 0.36 cm。在震中近场及远场

区域存在一定的拟合残差, 其可能与反演过程中采用的简单断层几何、弹性半空间位错模型、大气相位误差等相关^[27]。

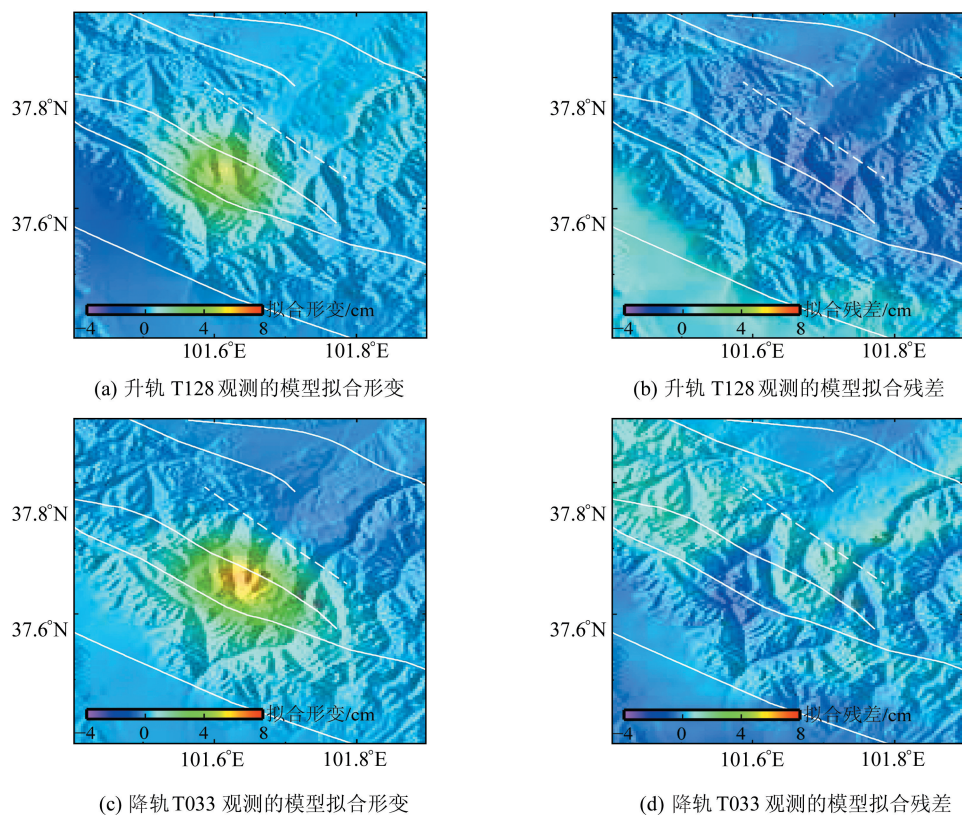


图 4 滑动分布模型拟合的形变场及残差

Fig. 4 Fitted Deformation Fields and Residuals Using Slip Distribution Model

4 区域断裂带的深部几何形态模型

门源 Mw5.9 级地震发生在青藏高原东北缘祁连山-海原断裂带, 区域内发育有多条活动断裂。根据已有的活动构造资料可知, 震中南北两侧主要分布有冷龙岭断裂、冷龙岭北侧断裂、民乐-大马营断裂^[2,4-5] (图 1)。冷龙岭断裂为岩石圈深大断裂, 由多个呈左阶斜列状的子断层组成, 总体走向为 $290^{\circ}\sim 300^{\circ}$, 倾向北东, 倾角为 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 全新世以来, 以左旋走滑运动为主; 冷龙岭北侧断裂倾向南西, 以逆冲运动为主, 其活动性弱于冷龙岭断裂; 民乐-大马营断裂倾向南西, 总体走向为 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}$, 倾角沿走向有显著变化, 以挤压逆冲为主^[1,3-6,28]。综合区域断裂的相关研究成果^[3-7,10] 及门源 Mw5.9 级地震断层的反演结果, 构建了地震破裂区域断裂带的深部几何形态模型 (图 5)。

由图 5 可以看出, 区域断裂在深度剖面上显示花状构造, 与冷龙岭岩石圈深大断裂相伴生; 在断裂带的深部, 断层面整体倾向南西; 门源地震发

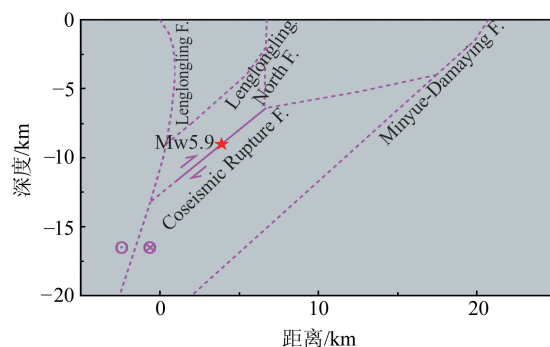


图 5 地震破裂区域断裂带的深部几何形态模型示意图

Fig. 5 Sketch Map of Deep Geometry Model of Regional Fault Zone Around Earthquake Rupture

震破裂是一条没有出露地表、以逆冲运动为主的盲断裂; 冷龙岭断裂的倾向自地下至地表发生反转, 以左旋走滑为主要运动特征; 冷龙岭北侧断裂可能在浅部与冷龙岭断裂相交, 也可能与地震盲发震断裂相交后, 在较深处与冷龙岭断裂相交^[4]; 民乐-大马营断裂可能在浅部与地震盲发震断裂相交^[7], 也可能在较深处与冷龙岭断裂相交。

图 5 中的花状构造与已有结论^[3-4,7,10] 整体一

致。在文献[3-6]中,门源 Mw5.9 级地震发震断裂可能是花状构造中的冷龙岭北侧断裂,而文献[7]认为,发震断裂可能是民乐-大马营断裂。本研究给出的模型倾向于发震断裂为花状构造中未出露地表的盲断层,其可能与冷龙岭北侧断裂相交,也可能与民乐-大马营断裂相交,还有可能为一条未知的隐伏断裂。

5 结 语

本研究利用 Sentinel-1A 卫星升轨、降轨合成孔径雷达影像数据提取了 2016 年门源 Mw5.9 级地震的高精度 InSAR 同震形变场,利用单纯形法和非负最小二乘法反演确定了地震断层几何和滑动分布,进而构建了地震破裂区域断裂带的深部几何形态模型,得出以下结论。

1)提取了门源 Mw5.9 级地震的升轨、降轨 InSAR 同震形变场,其主要位于冷龙岭断裂北东区域,整体沿北西-南东向延伸,以地表抬升为主,沿升轨、降轨视线向的形变最大值分别为 5.3 cm、7.1 cm;地表下降不显著。

2)利用单纯形法非线性反演确定了地震断层几何,断层破裂长度为 9.12 km,发震断层未延伸至地表,顶深、底深分别为 6.40 km、11.64 km;走向、倾角分别为 133° 、 43° ,倾向南西。

3)利用非负最小二乘法线性反演确定了地震断层滑动分布,其以逆冲运动为主;主要发生在地下 6.14~12.28 km 处,最大滑动量约 0.5 m,平均滑动角为 66.85° ,地震矩为 1.0×10^{18} N·m,矩震级为 Mw5.94;形变观测拟合残差 RMS 为 0.36 cm。

4)构建了地震破裂区域断裂带的深部几何形态模型,其以花状构造为特征,整体倾向南西;门源地震发震断裂为花状构造中未出露地表的盲断层。相关成果能够为研究区域地壳运动与变形、活动断裂与地震孕育发生等提供参考。

参 考 文 献

- [1] 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, 刘百簏, 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)
- [2] Deng Qidong, Zhang Peizhen, Ran Yongkang, et al. Basic Characteristics of Active Tectonics of China[J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(12): 1 020-1 031(邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 1 020-1 031)
- [3] Hu Chaozhong, Yang Panxin, Li Zhimin, et al. Seismogenic Mechanism of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai Ms6.4 Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(5): 1 637-1 646(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): 1 637-1 646)
- [4] Guo Peng, Han ZhuJun, An Yanfen, et al. Activity of the Lenglongling Fault System and Seismotectonics of the 2016 Ms6.4 Menyuan Earthquake[J]. *Science China Earth Sciences*, 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)
- [5] Jiang Wenliang, Li Yongsheng, Tian Yunfeng, et al. Research of Seismogenic Structure of the Menyuan Ms6.4 Earthquake on January 21, 2016 in Lenglongling Area of the NE Tibetan Plateau[J]. *Seismology and Geology*, 2017, 39(3): 536-549(姜文亮, 李永生, 田云锋, 等. 冷龙岭地区 2016 年青海门源 6.4 级地震发震构造特征[J]. 地震地质, 2017, 39(3): 536-549)
- [6] Li Y, Jiang W, Zhang J, et al. Space Geodetic Observations and Modeling of 2016 Mw5.9 Menyuan Earthquake: Implications on Seismogenic Tectonic Motion[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 519
- [7] Zheng Bowen. Fault Slip Inversion of 2016 Menyuan Earthquake from InSAR Deformation Fields by Multi-orbit Sentinel-1A Images[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2017(郑博文. 2016 年门源地震 InSAR 形变场及发震断层参数反演[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2017)
- [8] Huang Hao, Fu Hong, Sha Chengning, et al. Relocation of the 2016 Ms6.4 Menyuan, Qinghai Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(2): 176-187(黄浩, 付虹, 沙成宁, 等. 2016 年青海门源 Ms6.4 地震重定位[J]. 地震学报, 2017, 39(2): 176-187)
- [9] Zhang Ming, Gao Han, Niu Yufen, et al. Coseismic Deformation Focal Mechanisms Inversion for 2016 Menyuan Earthquake by DInSAR Observations[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(3): 1 089-1 094(张明, 高涵, 牛玉芬, 等. 2016 年门源地震震源机制 DInSAR 同震形变反演[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1 089-1 094)
- [10] Lei Dongning, Liu Jie, Liu Shumei, et al. Discus-

- sion on the Seismogenic Structure of the 2016 Menyuan M 6.4 Earthquake in Menyuan, Qinghai[J]. *Seismology and Geology*, 2018, 40(1): 107-120 (雷东宁, 刘杰, 刘姝妹, 等. 2016 年 1 月 21 日青海门源 M 6.4 地震发震构造模式[J]. 地震地质, 2018, 40(1): 107-120)
- [11] Wang H, Liu-Zeng 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
- [12] Xiong W, Chen W, Zhao B, et al. Insight into the 2016 Menyuan Mw5.9 Earthquake with InSAR: A Blind Reverse Event Promoted by Historical Earthquakes[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, 176: 577-591
- [13] Wright T J, Lu Z, Wicks C. Source Model for the Mw6.7, 23 October 2002, Nenana Mountain Earthquake (Alaska) from InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): 1 974
- [14] 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 of Geophysical Research*, 2011, 116 (B10): B10302
- [15] Weston J, Ferreira A M, Funning G J. Systematic Comparisons of Earthquake Source Models Determined Using InSAR and Seismic Data[J]. *Tectonophysics*, 2012, 532-535: 61-81
- [16] Liu Yang, Xu Caijun, Wen Yangmao, et al. The InSAR Coseismic Deformation Observations and Fault Parameter Inversion of the 2008 Dachaidan Mw6.3 Earthquake[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(11): 1 202-1 209 (刘洋, 许才军, 温扬茂, 等. 2008 年大柴旦 Mw6.3 级地震的 InSAR 同震形变观测及断层参数反演[J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1 202-1 209)
- [17] Xu Caijun, Deng Changyong, Zhou Lixuan. Coseismic Slip Distribution Inversion Method Based on the Variance Component Estimation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 37-44 (许才军, 邓长勇, 周力璇. 利用方差分量估计的地震同震滑动分布反演[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(1): 37-44)
- [18] Wen Yangmao, Feng Yiting. Three-Dimensional Deformation Field of Ali Earthquake from InSAR Observations and Earthquake Rupture Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1 369-1 375 (温扬茂, 冯怡婷. 地震破裂模型约束的中国阿里地震三维形变场[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(9): 1 369-1 375)
- [19] Lawson C L, Hanson R J. Solving Least Squares Problems[J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 1995, 77: 105-116
- [20] Su Xiaoning, Wang Zhen, Meng Guojie, et al. Pre-seismic Strain Accumulation and Co-seismic Deformation of the 2015 Nepal Ms8.1 Earthquake Observed by GPS[J]. *China Science Bulletin*, 2015, 60(22): 2 115-2 123 (苏小宁, 王振, 孟国杰, 等. GPS 观测的 2015 年尼泊尔 Ms8.1 级地震震前应变积累及同震变形特征[J]. 科学通报, 2015, 60(22): 2 115-2 123)
- [21] Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, et al. Gamma SAR and Interferometric Processing Software[C]. ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000
- [22] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45: RG2004
- [23] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4 035-4 038
- [24] Goldstein R, Zebker H, Werner C. Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720
- [25] Jónsson S, Zebker H, Segall P, et al. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1 377-1 389
- [26] Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1 135-1 154
- [27] Xu C, Liu Y, Wen Y, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2008 Mw7.9 Wenchuan Earthquake from Joint Inversion of GPS and InSAR Data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5B): 2 736-2 749
- [28] Chen Wenbin. Principal Features of Tectonic Deformation and Their Generation Mechanism in the Hexi Corridor and Its Adjacent Regions Since Late Quaternary[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2003 (陈文彬. 河西走廊及邻近地区最新构造变形基本特征及构造成因分析[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003)

InSAR Observation of Menyuan Mw5.9 Earthquake Deformation and Deep Geometry of Regional Fault Zone

LIU Yang^{1,2,3} XU Caijun^{1,2,3} WEN Yangmao^{1,2,3}

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

Abstract: By using Sentinel-1A ascending and descending synthetic aperture radar (SAR) data, this paper extracts the high-precision interferometric SAR (InSAR) coseismic deformation of the 2016 Menyuan Mw5.9 earthquake, inverts the fault geometry and slip distribution using simplex method and nonnegative least squares method, and constructs the deep geometry model of regional fault zone. The results show that coseismic deformation of the Menyuan Mw5.9 earthquake is dominated by surface uplift, and the maximums along the line-of-sight direction of ascending and descending tracks are 5.3 cm and 7.1 cm respectively. The fault strike and dip angles are 133° and 43° respectively. The seismic slip is dominated by thrust component, mainly occurring in 6.14–12.28 km underground. The maximum slip is about 0.5 m, the average slip angle is 66.85° , and the earthquake moment is 1.0×10^{18} N·m (Mw5.94). The fitting residual root mean square of deformation observations is 0.36 cm. The deep geometry of the regional fault zone is characterized by flower structure, which inclines to the south-west as a whole. The Menyuan earthquake rupture is a blind fault which does not appear on the surface in the flower structure. Relevant results can provide the reference for studying regional crustal movement and deformation, active fault and earthquake preparation and occurrence.

Key words: Menyuan Mw5.9 earthquake; InSAR; slip distribution; deep geometry; flower structure

First author: LIU Yang, PhD, associate professor, specializes in InSAR data processing and geophysical interpretation. E-mail: Yang.Liu@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41874011, 41774011, 41431069; the National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFC1503603.