引文格式：蒲颂文,闻鑫,周志伟,等. 基于Sentinel-1的门源Ms 6.9三维同震形变提取与分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(6): 109-112. doi: 10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.06.026

基于Sentinel-1的门源Ms 6.9三维同震形变提取与分析

蒲颂文[1,2]，闻　鑫[1,2]，周志伟[1]，汪汉胜[1]，江利明[1,2]，李晨程[1]
（1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 大地测量与地球动力学国家重点实验室，湖北 武汉 430077；
2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要：基于Sentinel-1升、降轨合成孔径雷达（SAR）数据，利用SAR差分干涉测量（D-InSAR）、像素偏移量追踪（POT）技术，获取了2022-01-08青海门源Ms 6.9地震多角度地表形变，并采用三维形变估算模型提取了三维同震形变场。结果表明：①升、降轨D-InSAR最大形变分别为0.56 m和0.6 m，POT最大形变分别为0.65 m和0.72 m；②地震导致的地表破裂带长度超过20 km，整体呈NWW方向分布，同震形变场呈蝴蝶状，形变按幅度大小相近，方向相反的规律沿对称轴分布；③此次地震以东西向位移为主，水平最大位移超过1.1 m，垂直最大位移幅度约为0.5 m，符合走滑地震的特征。本文结果与实地踏勘结果较为吻合，丰富了该地震同震形变观测结果，并补充查明了地表破碎带的特征。

关键词：门源地震；Sentinel-1数据；三维同震形变场；实地踏勘
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）06-0109-04

Extraction and Analysis of 3D Coseismic Deformation of Menyuan Ms6.9 Earthquake Based on Sentinel-1 Data

PU Songwen[1,2], WEN Xin[1,2], ZHOU Zhiwei[1], WANG Hansheng[1], JIANG Liming[1,2], LI Chencheng[1]
(1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology of CAS, Wuhan 430077, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: On the basis of Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) data of ascending and descending orbits, using differential InSAR (D-InSAR) and pixel offset tracking (POT) techniques, we obtained the LOS deformation of Ms6.9 earthquake in Menyuan, Qinghai on January 8th, 2022, and used 3D model to extract the 3D coseismic deformation field. The results show that ①the maximal deformation results of D-InSAR are 0.56 m and 0.6 m respectively, while the maximal deformation results of POT are 0.65 m and 0.72 m respectively. ②The length of earth surface rupture zone caused by the earthquake is more than 20 km, and it is generally distributed in the NWW direction. The coseismic deformation field is butterfly-shaped, and the deformation is distributed along the symmetry axis according to the law of similar amplitude and opposite direction. ③The earthquake mainly features east-west displacement, with the maximal horizontal displacement exceeding 1.1 m and the maximal vertical displacement about 0.5 m, which is consistent with the characteristics of strike-slip earthquake. The results of this paper are basically in consistent with the field survey, which enrich the observation results of coseismic deformation of this earthquake, and identify and complement the characteristics of surface rupture zone.

Key words: Menyuan earthquake, Sentinel-1 data, 3D coseismic deformation field, field survey

据中国地震台网中心测定，北京时间2022年1月8日01时45分青海省海北州门源县发生Ms 6.9级地震，此次地震震源深度10 km，震中（101.26° E，37.77°N）距离门源县城54 km[1]。由于门源县地处青藏高原东北缘的祁连-海原断裂西段的托莱山断裂带和冷龙岭断裂带的交会之处[2]，复杂的地质构造背景造就了地震频发的现象。

地震的同震形变及地表破裂特征对灾情把握、灾后重建以及认识冷龙岭断裂带地质活动都有着重大的意义。基于此，在此次门源地震发生之后，大量研究团队都投入到了震后分析和实地考察的工作中去。青海地震局首先发布了现场考察结果，据勘测，此次地震破裂带总长超过22 km，整体走向为西北偏西方向[1]。兰州大学的袁道阳团队在实地考察后进一步认定此次地震的破裂带总长为22 km，并包含南、北两支破裂带[3]。中国地质科学院地质研究所的李海兵研究团队经实地考察认

收稿日期：2022-12-27。
第一作者简介：蒲颂文（1999—），硕士研究生，研究方向为InSAR大地测量，E-mail：pusongwen@apm.ac.cn。

定此次地震地表破裂程度严重，总长达到至少20 km，且多见由于地表错动挤压造成的隆起鼓包[4]。总的来说，各团队的调查结果快速获悉了灾情，但受限于现场调查空间范围，对于整个同震形变场的规模和形状认识不足。

合成孔径雷达干涉测量（InSAR）作为一种遥感手段，具有全天候、大范围、高精度的优点，并广泛应用于地面沉降、地震形变以及火山、冰川运动的监测[5]。颜丙囤[6]利用合成孔径雷达干涉测量中的D-InSAR方法，得到此次门源地震卫星视线方向（line of sight, LOS）的最大形变分别为0.61 m与0.62 m。张成龙[7]等利用降轨SAR影像基于像素偏移量追踪（POT）的方法得出门源地震卫星视线方向的最大形变值为1.0 m和1.5 m。余鹏飞[8]等采用D-InSAR的方法处理升、降轨数据得到最大形变值，分别为0.6 m和0.75 m，并结合同震形变场得出门源地震为左旋走滑型地震。

本文基于Sentinel-1 SAR升降轨数据，利用D-InSAR和POT方法提取门源Ms 6.9级地震的形变场特征，并采用三维模型提取三维同震形变，同时结合实地踏勘资料对地表破裂特征进行分析。这对于获悉地震的灾情情况、类型，在灾后工作和研究具有重要意义。

1 实验数据与理论方法

1.1 研究区域与数据

1.1.1 研究区概况

门源地震震中地处我国北部、青藏高原的东北缘，该地区分布有多处褶皱、逆冲带以及走滑断层，具备频繁发生构造运动的条件[9-10]。震中附近分布有冷龙岭断层，该断层整体海拔高，为逆冲断层兼具走滑分量且活动频繁[11]，2016-01-26门源Ms 6.4地震也在此断层附近。

1.1.2 实验数据

欧空局于2014年发射的Sentinel-1卫星因其高重访周期、免费开放等优点，成为了众多InSAR研究选择的对象。故而本文利用Sentinel-1卫星地震前后升、降轨影像数据开展震后研究，参数如表1所示。数据产品类型选择单视复数（single look complex，SLC）形式，采集模式为干涉宽幅（interference width，IW）模式，空间分辨率为5 m×20 m。

表1 升、降轨影像参数

轨道	成像日期	极化方式	入射角/(°)	空间基线/m	时间基线/d
升轨（128）	2022-01-05 2022-01-17	VV	37	38.3	12
降轨（033）	2021-12-29 2022-01-10	VV	37	56.2	12

使用的外部参考数字高程模型（digital elevation model, DEM）为美国航空航天局的SRTM DEM，SRTM数据有现实性强、免费获取等优点，全球许多应用研究都采用SRTM数据开展环境分析。本文使用的SRTM DEM数据分辨率为30 m，用于消除InSAR地形相位的影响。

1.2 D-InSAR

D-InSAR方法一直广泛地应用于地震的同震形变提取[12]，该方法在原理上采用雷达卫星2次不同时间过境获得两景不同时期覆盖同一地区的SAR影像逐个像素复共轭相乘，后通过减去DEM模拟的地形相位得到差分干涉图，进而滤波、解缠，将相位信息转换为距离，最终得到两次采样间隔时间内该区域的形变信息[13]。

本文拟采用二轨法[14]，即利用引入高精度外部DEM去除地形相位，以得到最终的地表形变结果，基于Gamma软件，对升、降轨数据分别进行了D-InSAR处理，采用最小费用流法对干涉图进行相位解缠[10]，以多项式拟合消除残余轨道误差的影响，并将得到的相位转换为形变，最后将雷达坐标系下的形变图编码至WGS84坐标系。

1.3 Pixel Offset Tracking

SAR影像像素偏移量追踪（pixel offset-tracking，POT）方法分为SAR影像强度追踪和InSAR相干性追踪2种实现形式，实际应用中强度追踪算法更为常见。该方法相比D-InSAR方法虽然精度更低，但对相关性低的区域同样适用[10]。原理如图1所示，通过一定窗口大小的互相关计算，获取前后2个时相SAR影像的偏移总量，再通过卫星轨道数据去除其中卫星轨道引起的偏移分量，从而获得地表形变引起的偏移量。

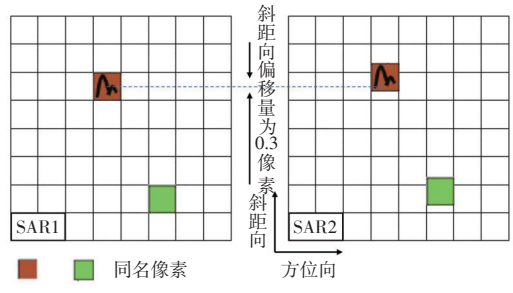


图1 基于强度的偏移量追踪原理

在流程上，首先基于影像和轨道数据对主、副影

像进行粗配准；接着计算中心像元偏移量，作为主、副影像的初始偏移值；以初始偏移值为基础，设置滑动窗口及大于滑动窗口的搜索窗口逐像元搜索同名点；再用后获取的像素偏移量减去初始偏移值得到最后的偏移量，并以复数的形式存储，实部为距离向偏移量，虚部为方位向偏移量；最后使用DEM数据进行地理编码。

1.4　三维形变估算

以上2种方法都只利用了升轨或降轨模式下的一种SAR数据，监测到LOS向形变量，对认识震区形变场不够充分，甚至会造成偏差[10]。为避免上述情况发生，也为了更好地对震区进行分析，获取震区的三维形变是非常必要的。目前获取三维形变场的主流方法有3种[11-12]，结合所在区域的数据，本文选择利用升、降轨的D-InSAR结果，基于三维模型解算三维形变场。

顾及形变场的拟合效果以及计算量大小，本文选择Weibull模型[13]。在两轨InSAR三维形变解算中，首先假设地表无南北向形变，对于影像上任一点（i，j），构建两轨LOS向形变$D'_{\mathrm{LOS}}(i,j)$三维模型为：

$$\begin{cases} D'_{\mathrm{LOS1}}(i,j)=D_V(i,j)\cdot\cos\theta_1-D_E(i,j)\cdot\sin\theta_1\cdot\cos\alpha_1 \\ D'_{\mathrm{LOS2}}(i,j)=D_V(i,j)\cdot\cos\theta_2-D_E(i,j)\cdot\sin\theta_2\cdot\cos\alpha_2 \end{cases} \tag{1}$$

式中，D'_{LOS1}和D'_{LOS2}分别为升、降轨的LOS向形变；D_V和D_E分别为竖直线和东西向形变位移；θ与α分别为雷达传感器的入射角和卫星航线方位角。按照最小二乘算法解算二维形变的结果，具体公式为[13]：

$$\begin{vmatrix} D_V \\ D_E \end{vmatrix}=\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}D'_{\mathrm{LOS}} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{A}$为系数矩阵；$\boldsymbol{P}$为权矩阵。由此可以解算出南北向和竖直向形变，再由三维模型中地表水平位移与地表竖直位移呈线性梯度关系，则可以建立方程[13]：

$$\begin{aligned} D_E(i,j)&=C_E(i,j)\cdot\left[D_V(i,j+1)-D_V(i,j)\right] \\ D_N(i,j)&=C_N(i,j)\cdot\left[D_V(i+1,j)-D_V(i,j)\right] \\ C_E(i,j)&=\frac{R_N}{R_E}C_N(i,j) \end{aligned} \tag{3}$$

式中，C_E和C_N均为三维模型参数；R_N和R_E分别为南北向和东西向的分辨率，将式（2）解算出的D_E和D_V代入式（3）中进行解算，即可得到南北向形变D_N。

2　结果与分析

2.1　LOS向同震形变场

本文基于Gamma软件，对升、降轨数据进行了处理，其中D-InSAR视线向形变表明升、降轨干涉条纹密度较大，意味着震区形变梯度大；干涉条纹连续且光滑，具有较好的相干性；但越靠近中心越不连续，说明靠近断裂发生的位置发生了严重的失相干；同震形变场呈蝴蝶状，沿中线基本对称，对称轴线大体上呈NWW-SEE方向，全长约20 km，同震形变场范围约为30 km×20 km。

升、降轨LOS向最大形变量分别约为0.65 m和0.72 m。POT方法相较于DInSAR受失相干影响小，可以更大程度获取断裂中心失相干区域的形变，但由于POT的精度有赖于图像的分辨率，而IW模式的分辨率仅有5 m×20 m，所以表现出更多的噪点。

表2　LOS向最大形变量

选用方法	LOS向最大形变值/m	
	升轨	降轨
D-InSAR	0.56	0.60
POT	0.65	0.72

升、降轨同震形变场，正值表示靠近卫星的方向，地面呈抬升；负值表示远离卫星的方向，地面显示沉降。

与升、降轨视线方向不一致，升轨和降轨图像上震中断层两侧的形变量数值相近，符号相反。具体形变量如表2所示，升轨最大形变为-0.56 m，降轨最大形变为0.6 m。升轨观测的沉降值略小于降轨，这种差异考虑主要是升、降轨观测角度不同造成的。

地震同震形变监测由于缺少大规模的实地勘测数据作为支撑，结果往往难以验证，故现与国内同样使用sentinel-1数据的其他团队得出的结果进行比对[5-8]。D-InSAR的结果普遍在0.6 m左右，与本文结果基本符合，而POT结果差距较大，可能是因为处理流程的不同。

2.2　三维同震形变场

利用Sentinel-1升、降轨数据，基于D-InSAR方法处理得到的LOS向形变结果，结合三维模型计算门源地震三维同震形变场分析可知：东西向位移幅度远大于南北向和垂直向，印证了此次地震的破裂断层方向几乎是东西向的。东西向与垂直向的最大位移均出现在断层附近，幅度分别约为0.9 m和0.5 m，说明此次地震以水平运动为主。结合位移分布可以看出此次地震明显符合左旋走滑特征，而这也与震中所在的祁连-海原断裂带的构造运动一致[14-16]。南北向的最大形变幅度约为0.6 m，融合东西向与南北向的水平位移

表3 各团队同震形变结果对比

成果来源	使用方法	主影像（YYMMDD）	副影像（YYMMDD）	最大形变量/m
李智敏等,2022	D-InSAR	20211229	20220110	0.5
张成龙等，2022	POT	20211229	20220110	1.5
本文	D-InSAR	20211229 20220105	20220110 20220117	0.60 0.56
	POT	20211229 20220105	20220110 20220117	0.72 0.65
颜丙囤等，2022	D-InSAR	20211229 20220105	20220110 20220117	0.62 0.61
余鹏飞等，2022	D-InSAR	20211229 20220105	20220110 20220117	0.75 0.60

幅度约为1.1 m，但由于在三维形变解算中，SN向形变解算的精度最差，故仅供参考意义；而垂直向和EW向的解算精度相当[17-19]，其主要原因是InSAR技术对地表SN向形变测量敏感度最差[20]。

2.3 震区破裂带典型震害特征分析

为补充说明本次地震的形变范围和影响，本文借用了青海师范大学周强教授及北京师范大学叶涛教授提供的青海门源Ms6.9地震野外实地勘测照片。此次实地踏勘确定门源Ms 6.9级地震的地表破裂带西起于大西沟（101.13°E），东至硫磺沟以东（101.32°E），破裂带总长超过20 km，整体走向为NWW，与本文得出的同震形变场趋势基本一致。此次地震破裂带主要是以挤压脊、挤压鼓包、断层陡坎和张裂式等组成，且呈现从西到东逐渐变强的趋势，到中心断裂带最大。

表4 调查点位置及灾害类型

调查点	位置	灾害类型
a	101.204°E,37.787°N	剪切裂隙
b	101.309°E,37.790°N	桥梁破坏变形
c	101.236°E,37.781°N	剪切破裂
d	101.239°E,37.779°N	冰面破裂

位于青海省海北藏族自治州门源回族自治县道沟东侧（如表4），系本次地震中形变最典型最密集的区域，其特征主要表现为次级破裂与主断裂延伸方向呈现雁列状发育，并在不连续阶区部位形成典型的X型剪切裂隙。地表表现出明显的水平位移，位移量达到1.14 m，这个位移量与三维形变结果中融合南北向、东西向的水平位移幅度是相当的。

本次实地踏勘也对兰新高铁硫磺沟大桥和硫磺沟公路（如表4）进行了考察。地震破裂带沿硫磺沟南侧的山坡向东蔓延，直穿兰新高铁，对大梁隧道造成了位错破损，同时，硫磺沟的大桥也发生了破坏与变形。而在硫磺沟公路大拐弯处，地表破裂带直接切穿了简易公路，在硫磺沟左岸边坡造成位错约1.42 m。同时，在该公路西侧台地上断错地貌清晰，除了主破裂外，还有明显的垂直位移。

3 结 语

本文利用2022年青海门源Ms 6.9地震前后的Sentinel-1 SAR升降轨数据，获取了基于D-InSAR和POT方法的多角度LOS向同震形变和三维同震形变场，并结合实地踏勘资料进行了地震地表破裂带的特征分析。

1）升降轨D-InSAR和POT方法获取的最大LOS向形变（0.56~0.72 m）和形变场分布较为一致，形状对称呈蝴蝶状，主破裂带长度约为20 km，走向为NWW，符合实地考察结果。

2）利用升降轨D-InSAR结果，基于三维模型解算同震三维形变场，得到南北向和东西向最大位移分别为0.6 m和0.9 m，垂直向最大位移为0.5 m。揭示了此次地震主要造成东西向位移且以水平运动为主，结合形变场形状和地面调查资料，可以认定此次地震为左旋走滑，符合震区所在构造的运动特征。

本文采用的Sentienl-1数据分辨率稍低，且由于缺失其他轨道数据，只能结合经验模型进行三维形变场构建，后续将收集其他轨道且精度更高的数据，以

（下转第117页）