

2024 年新疆乌什 Ms 7.1 地震 InSAR 同震形变探测 与断层滑动分布反演

李雨森¹, 李为乐^{1,2}, 许强^{1,2}, 许善森¹

1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 应急管理部滑坡灾害风险预警与防控实验室, 成都 610059

[摘要] 2024 年 1 月 23 日, 新疆维吾尔自治区乌什县发生 Ms 7.1 地震, 快速查明其同震形变场与发震断层滑动特征, 有助于科学认识此次地震发震机理。利用 Sentinel-1 卫星升、降轨雷达影像, 采用合成孔径雷达差分干涉测量技术获取了本次地震的同震形变场, 进而基于 Okada 弹性位错模型, 确定了本次地震的震源参数, 并基于分布式滑动模型反演了本次地震断层面上滑动分布。结果表明, 升、降轨同震形变场沿视线向最大形变量分别为 75 cm 和 48 cm, 断层最大滑动量为 4.2 m, 主要集中在地下 3~20 km 区域; 模型正演结果表明, 此次地震在垂直方向最大抬升约 53 cm, 最大沉降约 12 cm; 发震断层运动以逆冲为主, 兼具少量左旋走滑, 根据 InSAR 结果及地质资料综合判断, 本次发震断层为迈丹断裂。

[关键词] 乌什地震; 合成孔径雷达差分干涉测量; 同震形变; 断层滑动分布反演

[分类号] P237

[文献标志码] A

Coseismic deformation and slip distribution of the 2024 Ms 7.1 Wushi earthquake based on InSAR observations

LI Yusen¹, LI Weile^{1,2}, XU Qiang^{1,2}, XU Shanmiao¹

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Laboratory of Landslide Risk Early-Warning and Control, Chengdu 610059, China

Abstract: An Ms 7.1 earthquake occurred in Wushi County in the Xinjiang Uygur Autonomous Region of China on January 23, 2024. The rapid and accurate identification of its coseismic deformation field and the sliding characteristics of the originating faults can help to scientifically understand the

[收稿日期] 2024-03-07。

[基金项目] 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B03011); 四川省重点研发项目(2023YFS0435); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2022Z007)。

[第一作者] 李雨森(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地质灾害预测评价, E-mail: aysdliyusen@foxmail.com。

[通信作者] 李为乐(1982—), 男, 教授, 研究方向: 地质灾害预测评价, E-mail: liweile08@mail.cdut.edu.cn。

[引用格式] 李雨森, 李为乐, 许强, 等, 2024. 2024 年新疆乌什 Ms 7.1 地震 InSAR 同震形变探测与断层滑动分布反演[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 641-653.

Li Y S, Li W L, Xu Q, et al., 2024. Coseismic deformation and slip distribution of the 2024 Ms 7.1 Wushi earthquake based on InSAR observations[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 641-653.

mechanism of origination of this earthquake. In this study, we obtain the coseismic deformation field of the earthquake by using radar images from the Sentinel-1 satellite in ascending and descending orbits as well as the differential interferometric synthetic aperture radar (D-InSAR). We then identify the parameters of the seismic source of the earthquake based on the Okada elastic dislocation model, and invert the slip distribution on the fault plane of the earthquake by using a model of slip distribution. The results showed that the maximum deformations of the coseismic deformation fields along the line of sight from the ascending and descending orbits were 75 cm and 48 cm, respectively, while the maximum slip on the faults was 4.2 m. The latter was mainly concentrated in the region 3~20 km below the surface of the ground. The results of model normalization showed that the maximum uplift of the earthquake was 53 cm in the vertical direction, while the maximum subsidence was 12 cm. The motion of seismic faults was mainly retrograde, with a small number of left-rotation strike-slip deformations. We used the results of InSAR and geological data to conclude that the Maidan Fault was the main fault of the earthquake.

Key words: Wushi earthquake; differential interferometric synthetic aperture radar; coseismic deformation; slip distribution

2024年1月23日2时9分,在新疆维吾尔自治区阿克苏地区乌什县发生 M_s 7.1地震,震源深度约22 km,震中位于北纬 41.26° ,东经 78.63° ,震中区域最大烈度IX度。截至1月26日8时,共记录到余震4 126次,3.0级以下4 067次,3.0~3.9级地震121次,4.0~4.9级地震21次,5.0~5.9级地震7次,初步判断本次地震属主震-余震型(中国地震局,2024)。截至2024年1月23日20时,此次地震共造成3人遇难,5人受伤(中国新闻网,2024)。

地震震源机制进行反演方法主要包括基于区域地震台网数据的反演方法和同震形变场的反演方法(李雨森等,2024)。使用D-InSAR技术可以快速获取地震同震形变场,对地震造成的破坏程度及破坏范围进行直观描述(Massonnet et al., 1993; Jónsson et al., 2002; 冯万鹏和李振洪, 2010; 李永生等, 2015; 杨莹辉, 2015; 单新建等, 2017; 李振洪等, 2019; Song et al., 2019; 李振洪等, 2022; 王守文等, 2022; 许光煜等, 2022; 冯万鹏等, 2023; 韩炳权等, 2023; 张双成等, 2023; 杨九元等, 2024)。同震形变场与发震断层性质、震源深度、震级大小有密切关系, D-InSAR技术获取的同震形变场可以用于断层滑动反演,从而确定发震断层性质(张庆云, 2019)。本文利用D-InSAR技术获取了2024年新疆乌什 M_s 7.1地震的升、降轨同震形变场,并基于升、降轨形变场反演震源参数及发震断层滑动分布,对分析该地震发震机

制和周边区域地震危险性具有参考价值。

1 研究区地质构造背景

本次地震发生于天山褶皱带,受到印度洋板块碰撞挤压,该区域孕育有大量北东向逆断层、左旋走滑断层(郑民等,2007;朱传庆等,2008;王敏,2014)。据历史地震资料,近50年内在震源100 km范围内发生了131次5.0级及以上的地震,例如1969年2月12日新疆乌什县东北发生6.3级地震,1971年3月23日新疆乌什县北部发生6.0级地震,1971年3月24日新疆乌什东北部发生6.1级地震,1987年1月24日新疆乌什县发生6.4级地震,2005年2月15日新疆乌什县发生6.2级地震(薄万举等,2006)。2024年新疆乌什 M_s 7.1地震震中位于南天山断裂带,临近迈丹断裂,该断裂属于南天山弧形逆冲推覆构造带,为一条北东走向的左旋逆断层(图1)。地震发生后,很多机构利用不同的数据源及方法对本次地震类型解算,给出详细的断层几何参数及震源机制解(表1)。

2 同震形变场探测

2.1 D-InSAR 数据处理

本研究收集了覆盖2024年乌什地震C波段Sentinel-1雷达升、降轨雷达影像,详细信息见表2。基于GAMMA软件,采用InSAR技术获取了2024年1月23日乌什 M_s 7.1地震同震形变场

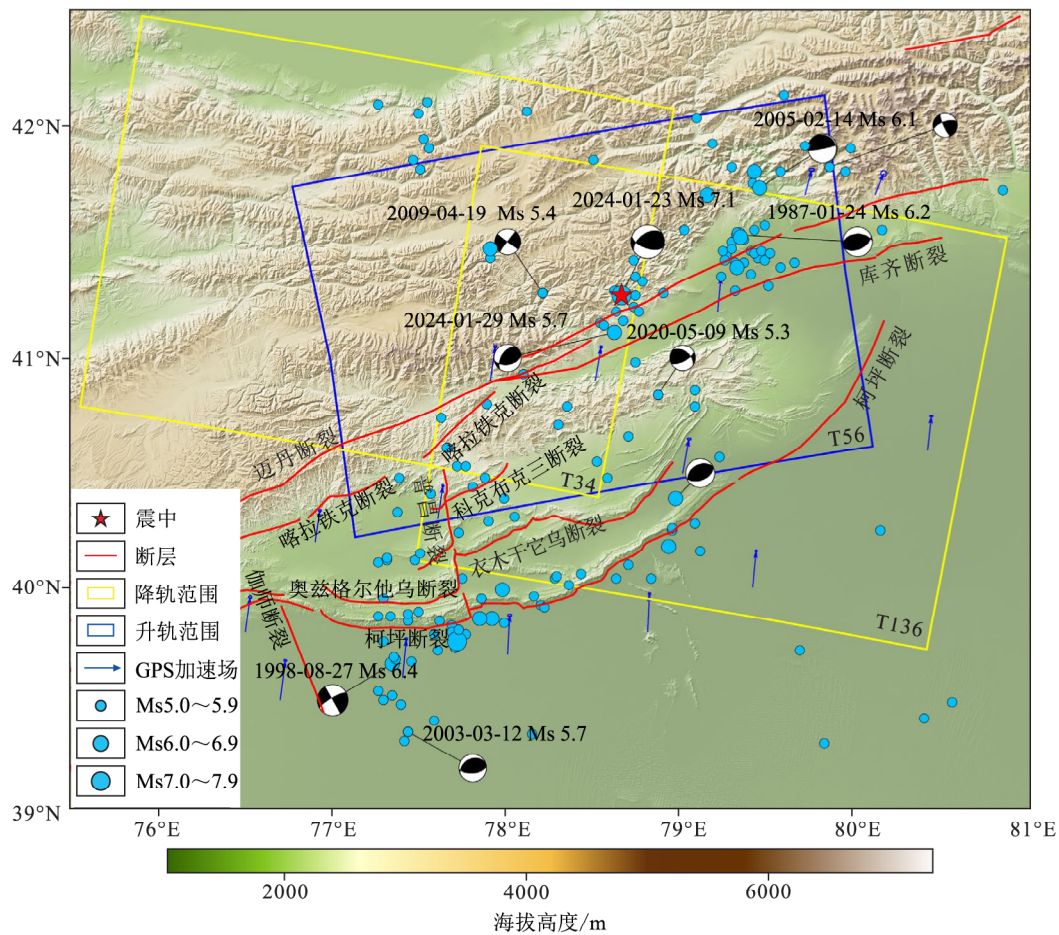


图 1 2024 年新疆乌什 Ms 7.1 地震构造背景图(历史地震信息及震源机制解来自 USGS; 断层信息来自中国地震局;GPS 加速场来自 Zhao et al., 2015)
 Fig. 1 Map of the tectonic background of the 2024 Xinjiang Ms 7.1 Wushi earthquake

表 1 不同机构公布的发震断层参数

Table 1 Parameters of seismogenic faults published by different organizations

研究来源	震中位置	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	长度/km	宽度/km	震级(Mw)
USGS	78.64°E, 41.26°N	13	235	45	42	—	—	7.0
			113	62	126	—	—	
GCMT	78.57°E, 41.19°N	14	236	48	47	—	—	7.0
			110	57	127	—	—	
CEA	78.63°E, 41.26°N	22	250	42	59	—	—	7.0
			109	55	115	—	—	
本文研究	78.65°E, 41.22°N	5.8	229	62.4	50.45	35.4	7.1	7.0

注: USGS (United States Geological Survey):美国地质调查局; GCMT (Global centroid moment tensor):全球矩张量; CEA (China Earthquake Administration):中国地震局。

(Massonnet and Feigl, 1998; Wright et al., 2004)。为去除地形相位和平地相位影响,使用 ALOS World 30 m 分辨率数字高程模型及欧洲航空局的临时轨道数据,采用 10 : 2 的比率进行多视处理以提高信噪比,使用 Goldstein 滤波方法削弱噪声因素影响;使用最小费用流算法

(Eineder et al., 1998)进行相位解缠,对相干性系数大于 0.3 的像元解缠,将相位信息转化成形变信息。基于 GACOS 大气改正系统削弱大气延迟误差(Yu et al., 2018a; Yu et al., 2018b; Yu et al., 2020; Xiao et al., 2021),再经过轨道精炼及重去平纠正相位偏移,消除斜坡相位(Farr et al.,

2007)。最后,通过地理编码将雷达卫星数据坐标系转换为 WGS84 坐标系,得到本次地震升、降轨 LOS 向形变场(图 2)。

由于 T34 降轨雷达影像的覆盖范围有限,形

变结果未覆盖到此次地震南侧影响区域(图 2-C), T56 升轨、T136 降轨影像形变结果完整覆盖了本次地震影响区域(图 2-A,B)。T56 升轨影像干涉条纹近似呈两眼蝴蝶状,T136 降轨影像干涉

表 2 本文采用的 Sentinel-1 卫星数据

Table 2 Data from the Sentinel-1 satellite used in this paper

卫星轨道	轨道号	主影像时间	辅影像时间	极化方式	干涉模式	时间基线/d
升轨	T56	2024-1-14	2024-1-26	VV	IW	12
降轨	T136	2024-1-20	2024-2-25	VV	IW	36
降轨	T34	2024-1-13	2024-1-25	VV	IW	12

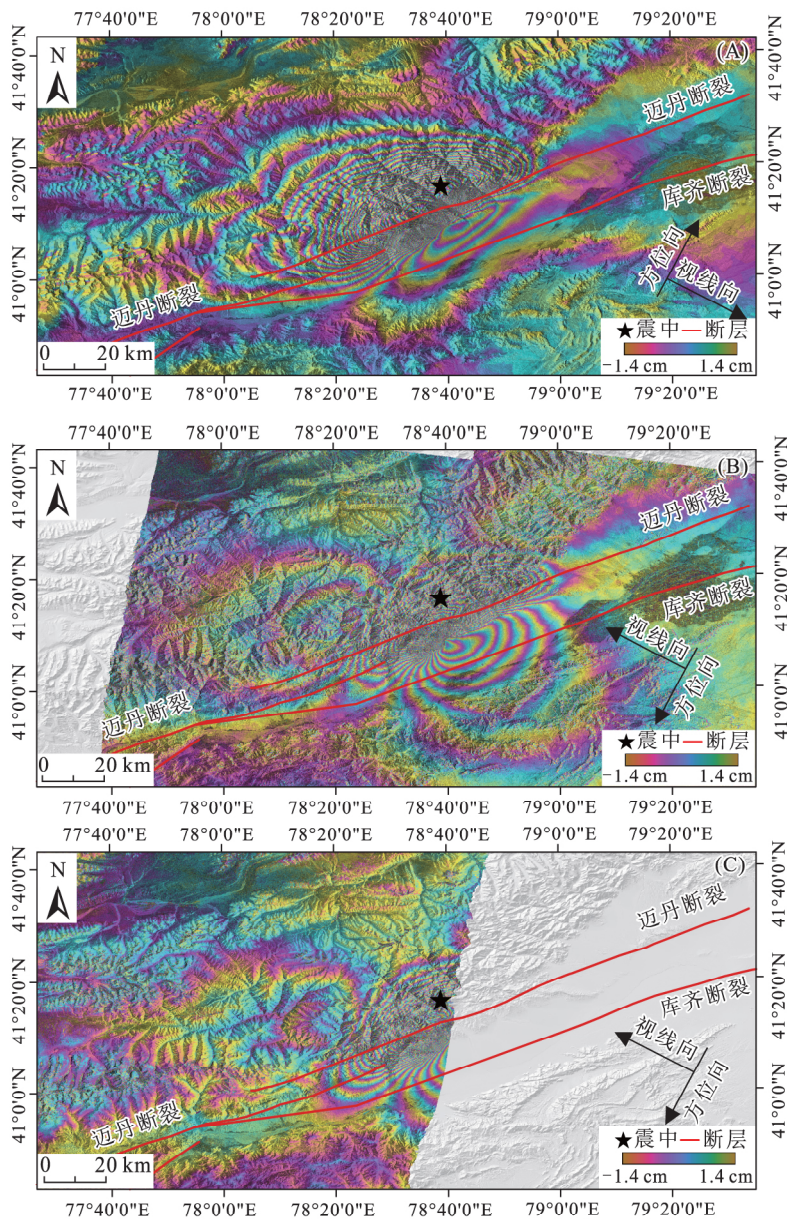


图 2 升、降轨差分干涉条纹图

Fig. 2 Differential interference fringes of the ascending and descending orbits

(A) T56 升轨差分干涉条纹图; (B) T136 降轨差分干涉条纹图; (C) T34 降轨差分干涉条纹图

条纹呈近三眼蝴蝶状,干涉条纹集中分布于迈丹断层北侧,南侧干涉条纹较少。

2.2 同震形变场

由图 3 可知,2024 年新疆乌什 Ms 7.1 地震同震形变场呈两个近椭圆,均沿北东—南西走向,与迈丹断裂平行展布,北侧区域形变大于南侧区域。地震造成的地表形变范围长约 90 km,宽约 70 km,面积约 6 600 km²,与地震烈度 VII 度区域高度重合。沿卫星视线向方向,T56 升轨形变场

最大抬升约 75 cm,T136 降轨形变场最大抬升约 48 cm,T34 降轨形变场最大抬升约 38 cm,这种差异主要是由于观测几何条件的不同造成的。形变场基本以迈丹断裂为界,北侧区域升、降轨形变均为正值,南侧区域升、降轨形变均为负值(正值为地表位移靠近雷达卫星,负值为远离雷达卫星)。说明本次地震产生的形变以垂直方向为主,并且表现为北升南降,符合逆断层型地震的上盘抬升、下盘下降运动特征。

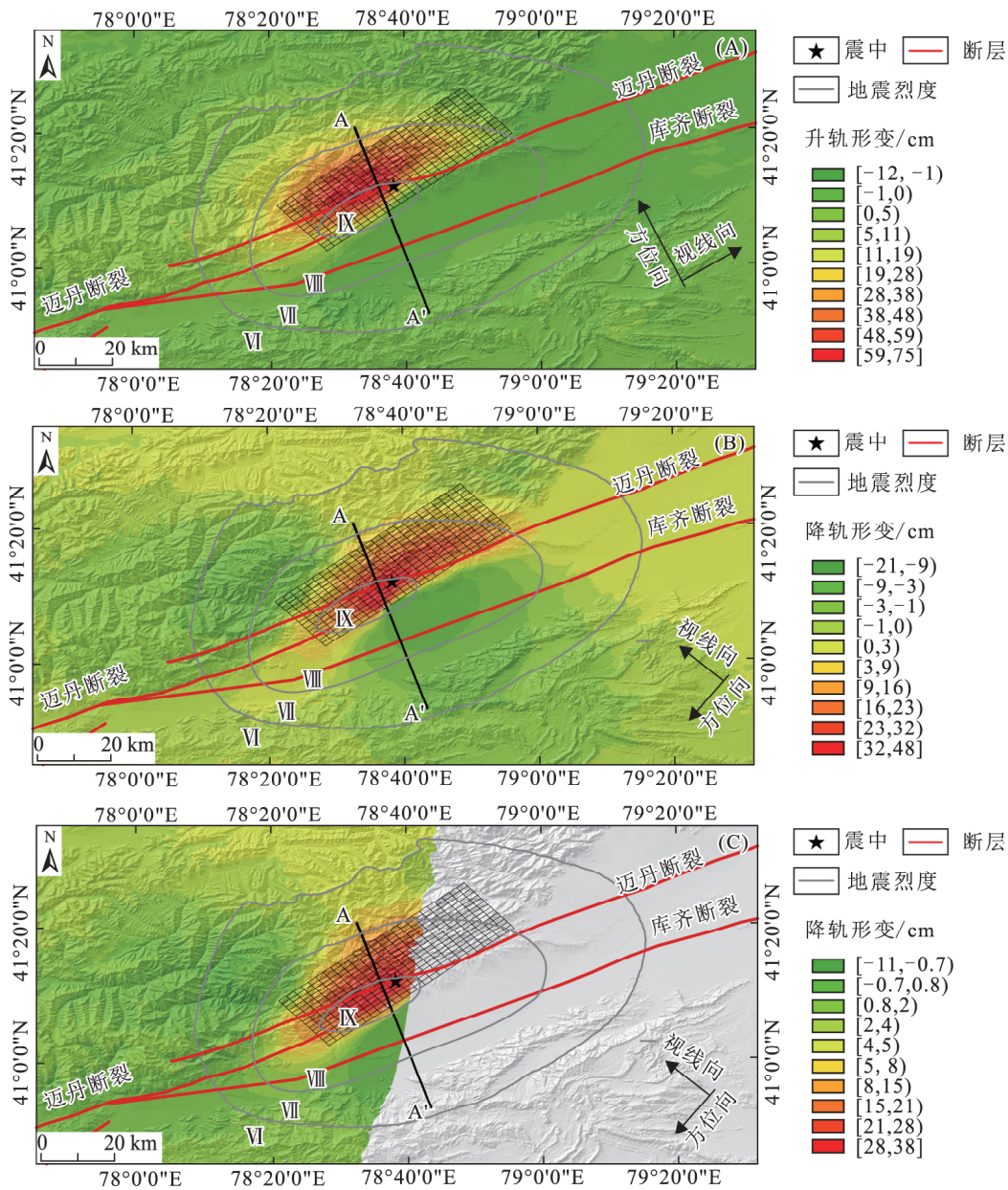


图 3 乌什地震同震地表形变场(图中黑色矩形为后续分布式反演范围)

Fig. 3 Field of coseismic surface deformation of the Wushi Earthquake
 (A) T56 升轨同震形变场; (B) T136 降轨同震形变场; (C) T34 降轨同震形变场

为获取核心形变区域形变信息的空间分布,选取近似垂直迈丹断裂走向的 A-A' 剖面,绘制同震形变位移曲线(图 4)。由形变曲线可知,本次地震升、降轨观测模式 LOS 向形变曲线形态一致。由于 T136 降轨时间基线长,震前、震后两景影像期间又发生数十次余震,其中包括 2024 年 1 月 24 日、1 月 30 日两次 Ms 5.7 强余震,所以最大形变量大于 T34 轨道。值得注意的是, T136 降轨在 22 km 附近位移曲线出现跳跃间断现象,

有可能为断层活动传至地表,但同区间内 T34 降轨形变曲线整体比较连续,虽存在少量形变信息缺失现象,但间断程度明显小于 T136 轨道; T34 影像覆盖 1 月 23 日主震及 1 月 24 日 Ms 5.7 余震,形变曲线连续表明 23 日主震及 24 日强余震并未引发地表破裂,所以推测 T136 轨道曲线跳跃异常现象为 1 月 30 日 Ms 5.7 余震所致。本研究另收集覆盖 1 月 30 日余震的 Sentinel-1 卫星升、降轨影像做 D-InSAR 处理。

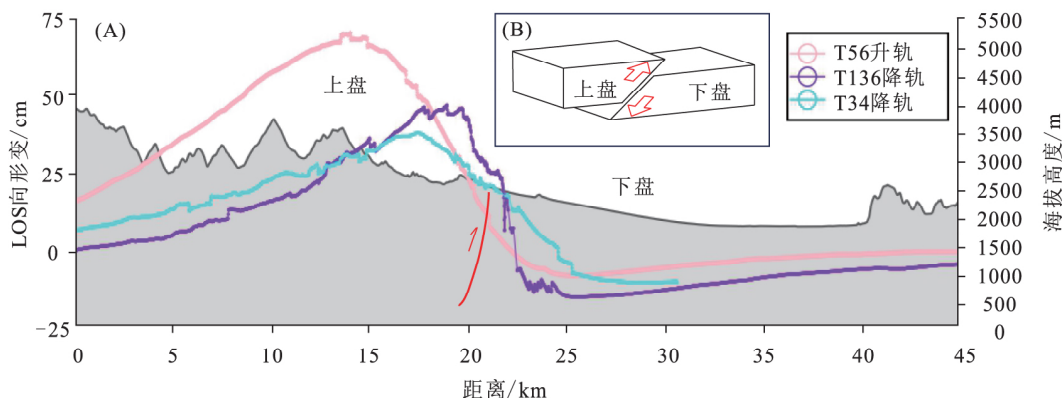


图 4 剖面同震形变曲线图及逆断层活动示意图

Fig. 4 Curves of coseismic deformation and reverse fault activity in the profile

(A) A-A' 剖面升、降轨 LOS 向同震形变曲线图; (B) 逆冲断层活动简图

处理结果显示,此次余震升、降轨差分干涉条纹覆盖区域约 15 km × 20 km,形态复杂(图 5),干涉条纹总体较为连续,仅降轨方向近场存在少许失相干区域。由同震形变场可知,1 月 29 日

Ms 5.7 余震属逆冲型,表现为地表抬升,沿卫星视线向方向, T34 降轨最大抬升约 35 cm, T56 升轨最大抬升约 24 cm(图 6),沿 A-A' 剖面绘制余震降轨形变位移曲线,与 T136 降轨形变位移曲

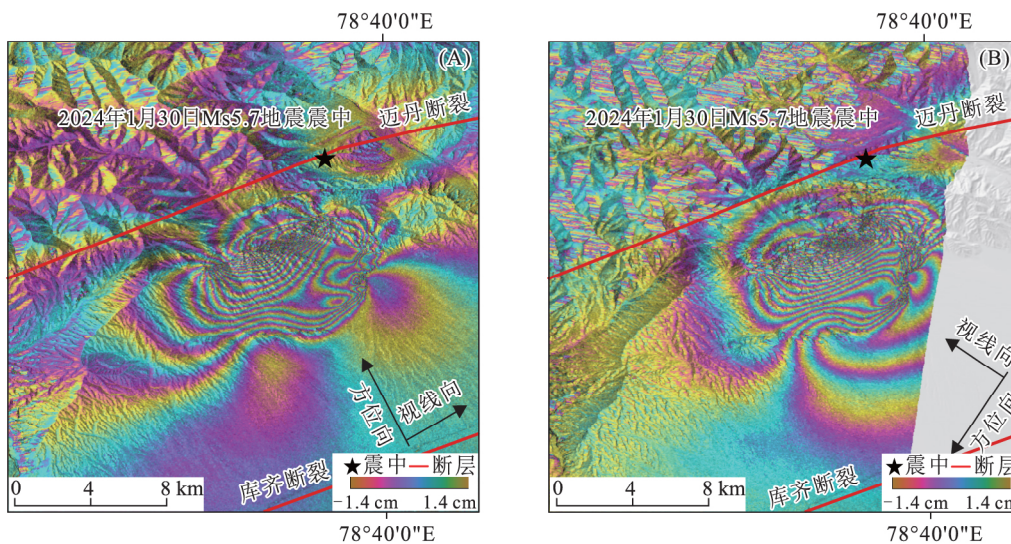


图 5 2024 年 1 月 30 日 Ms 5.7 余震升、降轨差分干涉条纹图

Fig. 5 Differential interferometric fringes of the Ms 5.7 aftershock on January 30, 2024, obtained from the ascending and descending orbits

(A) 升轨差分干涉条纹图; (B) 降轨差分干涉条纹图

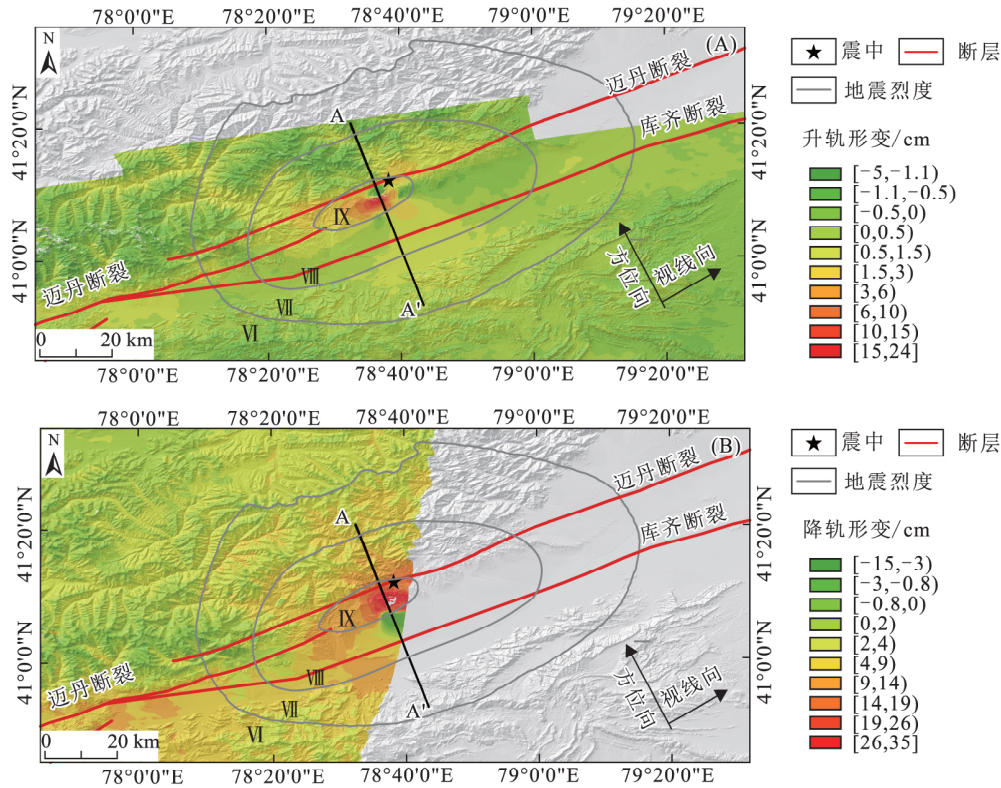


图 6 2024 年 1 月 30 日 Ms 5.7 余震同震地表形变场
 Fig. 6 The coseismic surface deformation field of the Ms 5.7 aftershock on January 30, 2024
 (A) T56 升轨同震形变场; (B) T34 降轨同震形变场

线对比可知:两条曲线在 20~25 km 区间内形态相似,均出现形变信息缺失导致形变曲线不连续(图 7),因此研究认为 T136 轨道异常形变并非受 1 月 23 日

Ms 7.1 主震影响,而是 1 月 30 日强余震所致,与中国地震局地质研究所野外调查结果吻合(张博讓等, 2024; 中国地震局地震预测研究所, 2024)。

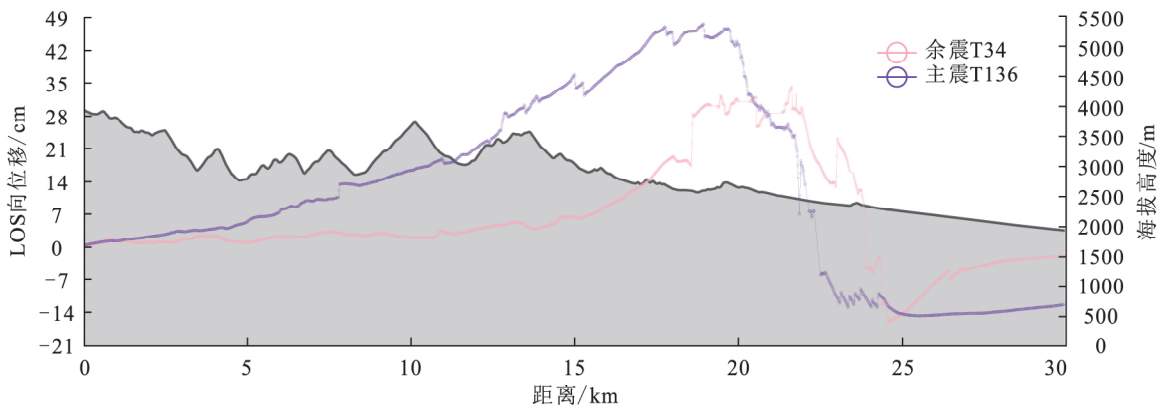


图 7 T136, T34 剖面形变曲线对比图
 Fig. 7 Comparison of curves of deformation of the T136 and T34 orbital profiles

3 断层几何参数及滑动分布反演

3.1 断层几何参数反演

以得到的形变场为限制,借助 Okada 弹性半空间位错模型(Okada, 1992)进行断层几何参数

及滑动分布反演:

(1)考虑到升、降轨 D-InSAR 形变数据的空间连续性,采用矢量图层圈定升、降轨形变场范围,随后采用均匀降采样对圈定的形变场进行降采样处理,保留足够支撑反演的样本点,共获得

5 813个升轨形变点、6 271个降轨形变点。再结合 GCMT 公布的震源区间,本次反演将断层长度区间设置在 30~50 km,宽度区间设置在 5~15 km,倾角变化区间设置为 50°~70°,滑动角变化

区间设置在 35°~60°,在此区间内采用 Okada 模型进行反演,使用 L-M(Levenberg-Marquardt)最小二乘优化算法搜索断层几何参数最优解。本次均匀滑动反演得到的详细断层几何参数见表 3。

表 3 本次断层反演得到的具体参数

Table 3 Parameters obtained from fault inversion

长度/m	宽度/m	深度/m	倾角/(°)	走向/(°)	经度/(°)	纬度/(°)	滑动角/(°)	滑动量/m
35408.2	7143.2	5854.0	62.42	229.36	78.65	41.22	50.45	4.2

(2)在上一步得到断层几何参数的基础上对本次发震断层进行分布式滑动反演。设置反演滑动角固定,将断层长度沿走向设置为 50 km,宽度沿倾向延伸至 30 km,将发震断层划分为 625 个 2 km×1.2 km 的子滑块,将阻尼系数设置为 0.03 进行分布式滑动反演,得到断层面滑动分布模型。断层滑动主要分布在地下 3~20 km 范围内,地下 10 km 附近断层滑动值最大,滑移量达 4.2 m。由每个子滑块移动方向,可知此次地震以逆冲为主,兼有少量左旋走滑分量(图 8)。

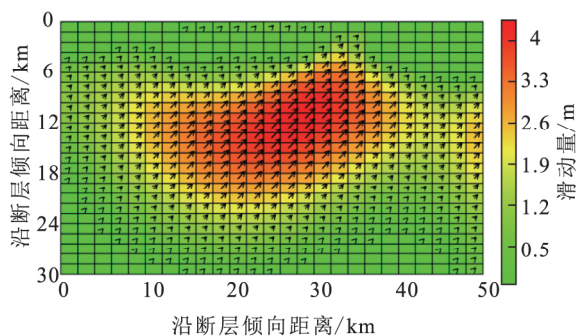


图 8 乌什地震发震断层同震滑动分布

Fig. 8 Distribution of co-seismic sliding along the seismogenic fault of the Wushi Earthquake

图 9~12 展示了此次升、降轨地震同震地表形变场观测值、模拟值及残差。本次反演结果与 D-InSAR 探测形变场基本相同。最右列残差在断层近场的两侧较为明显,可能因为本次地震断层近场形变梯度过大导致低相干甚至失相干现象,从而导致相位解缠时出现解缠误差。

能懿菡等(2024)利用 InSAR 数据得到乌什地震的同震形变场,并进行了发震断层滑动分布的二维反演,断层最大滑动值 4.3 m,略大于本文结果;断层滑动结果主要分布在地下 8~18 km,与本文得到的发震断层滑动分布深度存在差异,可能因为本文滑动受到后续余震影响,再加上形变场采样方法、搜寻最优断层几何参数算法、阻尼系数及各类因子设置不同,导致发震断层滑动分布结果存在差异。

3.2 三维形变分量正演

为探究本次地震在东西向、南北向及垂直方向的形变分量,利用线性反演得到的同震滑动分布,通过正演模型(Wright et al., 2004)模拟三维形变场(图 13)。由正演结果可知,本次地震在三

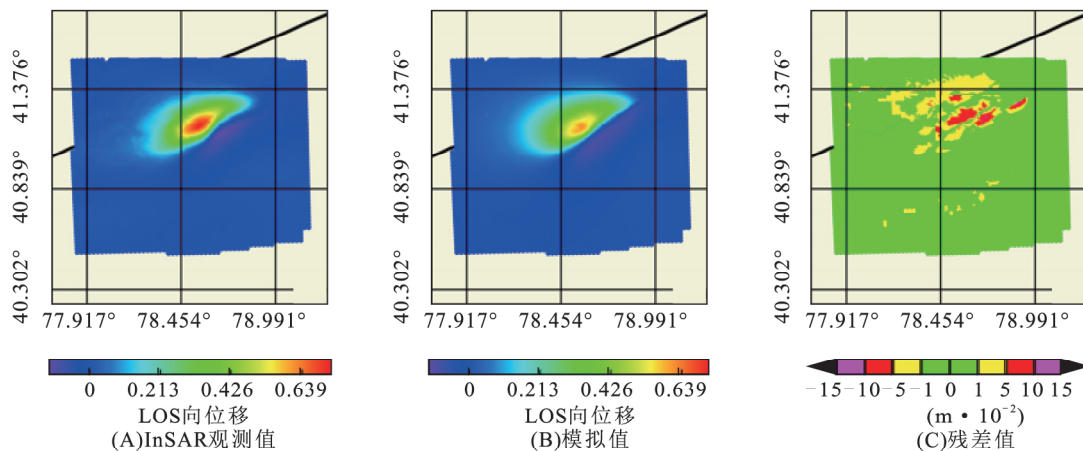


图 9 乌什地震升轨均匀滑动模拟

Fig. 9 Simulation of ascending orbit for the Wushi Earthquake

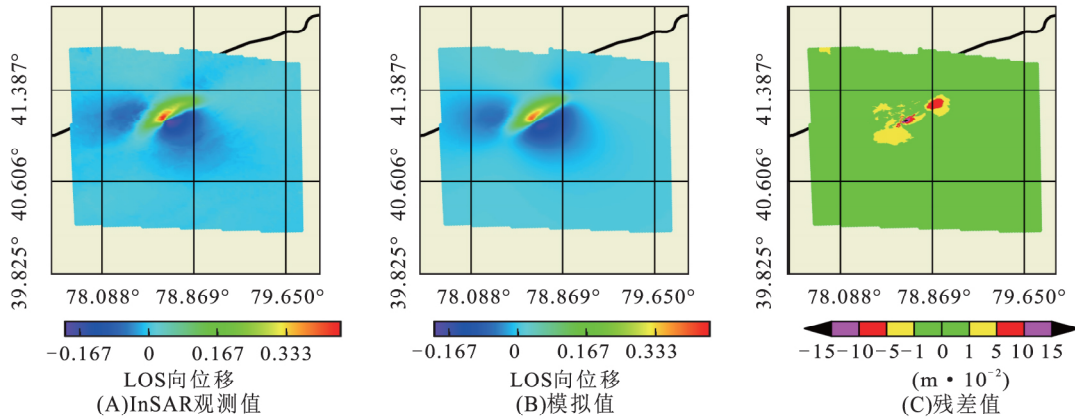


图 10 乌什地震降轨均匀滑动模拟

Fig. 10 Simulation of descending orbit for the Wushi Earthquake

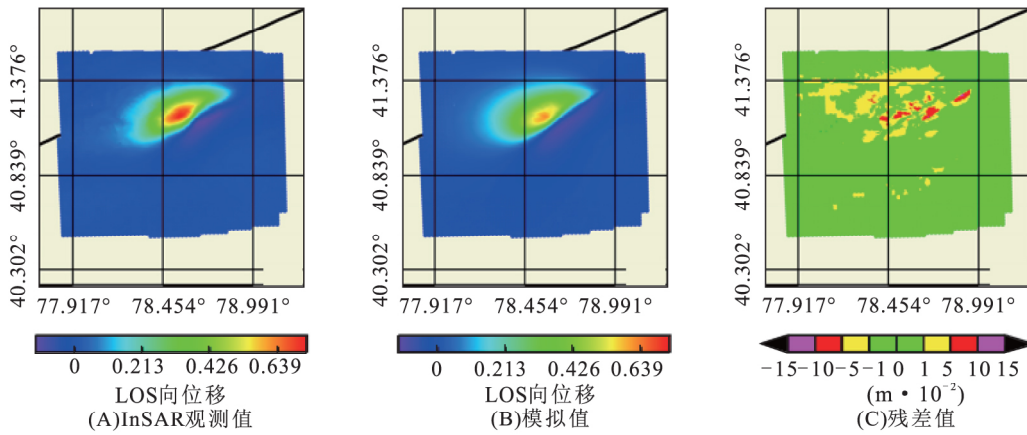


图 11 乌什地震升轨分布式滑动模拟

Fig. 11 Distributed sliding simulation of the ascending orbit for the Wushi Earthquake

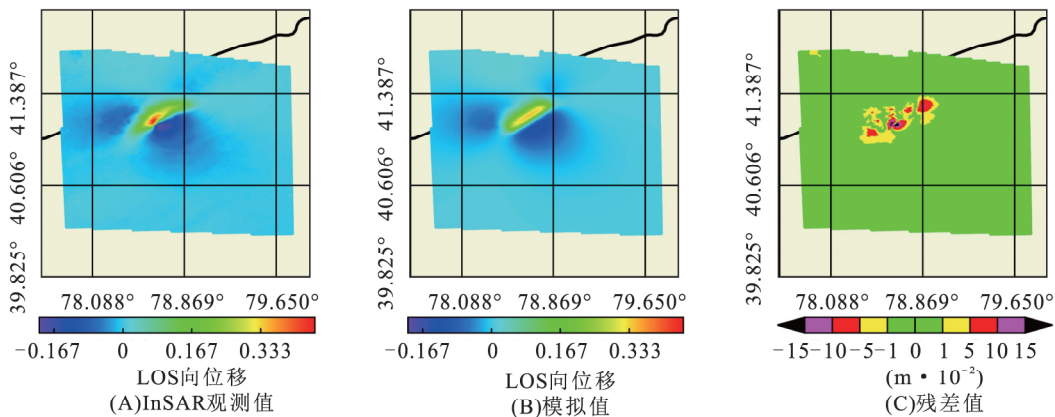


图 12 乌什地震降轨分布式滑动模拟

Fig. 12 Distributed sliding simulation of the descending orbit for the Wushi Earthquake

维方向均有形变分量,地表最大垂直抬升约 53 cm,最大沉降约 12 cm,水平方向上东向最大位移约 4 cm,西向最大位移约 32 cm,南向最大位

移约 19 cm,北向最大位移约 11 cm。垂直方向上位移最大,说明此次地震发震断层运动以逆冲为主,且兼具左旋走滑性质。

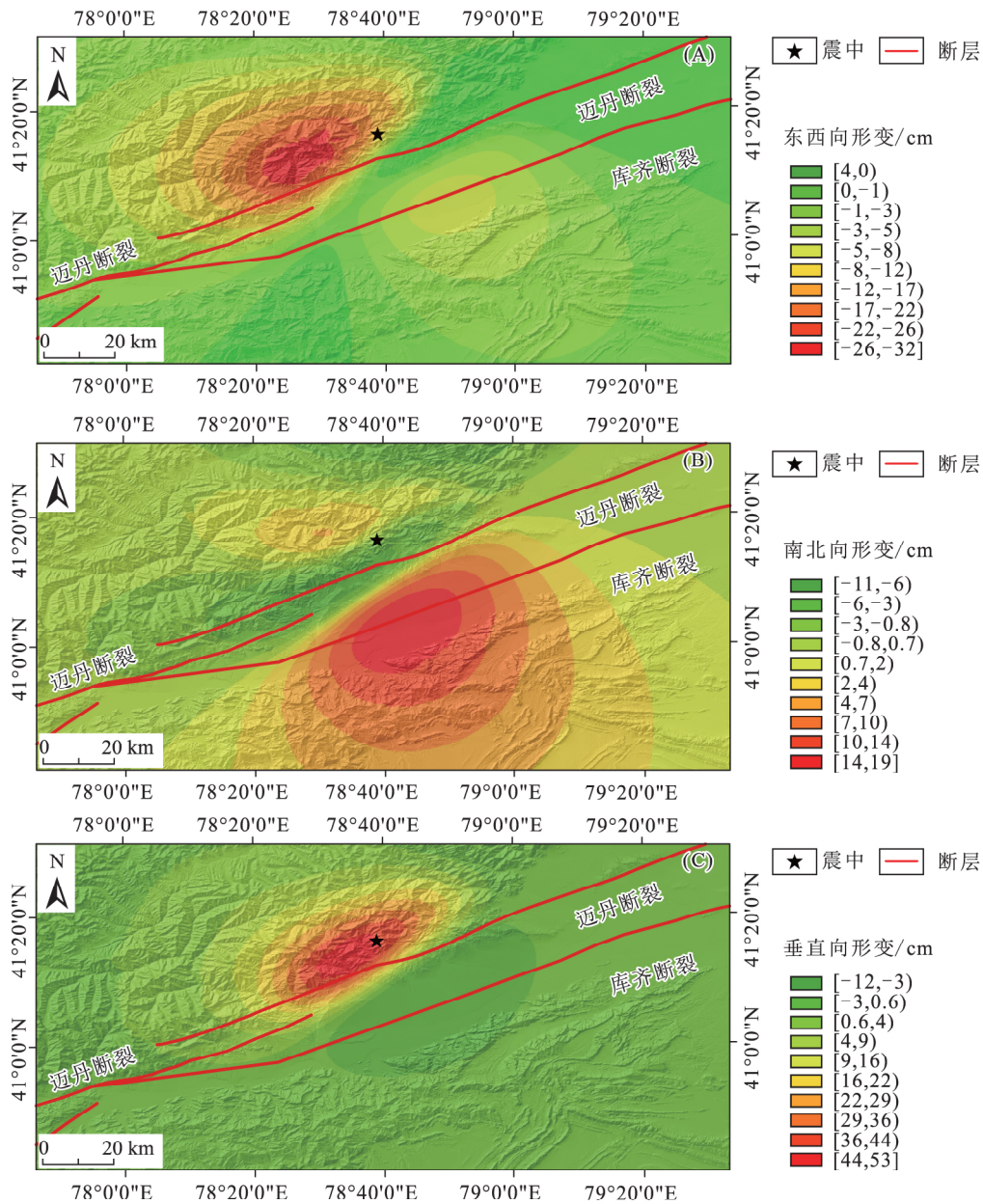


图 13 乌什地震三维同震形变场
 Fig. 13 Three-dimensional co-seismic deformation field of the Wushi Earthquake
 (A) 乌什地震东西向形变; (B) 乌什地震南北向形变; (C) 乌什地震垂直向形变

4 结论

本文通过 InSAR 技术, 利用 2024 年新疆乌什地震发生后的 Sentinel-1 雷达卫星升、降轨影像数据获取了同震地表形变, 查明 T136 轨道异常形变原因, 反演得到了断层几何参数及滑动分布, 模拟了此次地震三维形变场, 取得以下认识:

a. 升、降轨雷达卫星 D-InSAR 干涉图均有效探测到此次地震显著的同震形变场, 同震形变场较为连续。形变场集中分布于迈丹断裂两

侧, 北侧形变明显大于南侧形变, 主形变区域范围达 90 km × 70 km。沿卫星视线向方向, T56 升轨最大抬升约 75 cm, T136 降轨最大抬升约 48 cm, T34 降轨最大抬升 38 cm, 1 月 30 日 Ms 5.7 余震造成的形变场范围达 15 km × 20 km, 沿卫星视线向方向, T56 升轨影像最大抬升约 24 cm, T34 降轨影像最大抬升约 35 cm, 此次余震造成了地表破裂。

b. 以 D-InSAR 形变数据为约束, 反演结果表明此次地震为典型的逆冲断层性质地震, 发震

断层破裂长约 35.40 km, 宽约 7.14 km, 破裂主要集中在地下 3~20 km 深度, 断层倾角约 62.42°, 走向 229.36°, 最大滑动量约 4.2 m。

c. 模拟出的三维形变场在垂直方向上最大抬升约 53 cm, 最大沉降约 12 cm。通过 D-InSAR 同震形变场、发震断层同震滑动分布以及地质背景资料判断, 认为此次地震发震断层为迈丹断裂。

致谢: 感谢欧空局提供 Sentinel-1 雷达卫星影像数据; 感谢审稿人对本文提出的修改意见。文章中部分图件采用 GMT 绘制 (Wessel *et al.*, 2019)。

[参 考 文 献]

- 薄万举, 章思亚, 刘广余, 等, 2006. 新疆乌什 6.2 级地震的中期预测[J]. 大地测量与地球动力学, 26(1): 26-30.
- Bo W J, Zhang S Y, Liu G Y, *et al.*, 2006. Medium-term prediction of Ms 6.2 earthquake in Wushi, Xinjiang [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 26(1): 26-30. (in Chinese)
- 冯万鹏, 何晓慧, 张逸鹏, 等, 2023. 2022 年青海门源 Mw 6.6 地震的发震断层及孕震构造模式[J]. 科学通报, 68(2-3): 254-270.
- Feng W P, He X H, Zhang Y P, *et al.*, 2023. Seismic faults of the 2022 Mw 6.6 Menyuan, Qinghai earthquake and their implication for the regional seismogenic structures [J]. Chinese Science Bulletin, 68(2-3): 254-270. (in Chinese)
- 冯万鹏, 李振洪, 2010. InSAR 资料约束下震源参数的 PSO 混合算法反演策略[J]. 地球物理学进展, 25(4): 1189-1196.
- Feng W P, Li Z H, 2010. A novel hybrid PSO/simplex algorithm for determining earthquake source parameters using InSAR data[J]. Progress in Geophysics, 25(4): 1189-1196. (in Chinese)
- 韩炳权, 刘振江, 陈博, 等, 2023. 2022 年泸定 Mw 6.6 地震 InSAR 同震形变与滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 48(1): 36-46.
- Han B Q, Liu Z J, Chen B, *et al.*, 2023. Coseismic deformation and slip distribution of the 2022 Luding Mw 6.6 earthquake revealed by InSAR observations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 48(1): 36-46. (in Chinese)
- 李永生, 冯万鹏, 张景发, 等, 2015. 2014 年美国加州纳帕 Mw 6.1 地震断层参数的 Sentinel-1A InSAR 反演[J]. 地球物理学报, 58(7): 2339-2349.
- Li Y S, Feng W P, Zhang J F, *et al.*, 2015. Coseismic slip of the 2014 Mw 6.1 Napa, California earthquake revealed by Sentinel-1A InSAR [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(7): 2339-2349. (in Chinese)
- 李雨森, 李为乐, 许强, 等, 2024. 2023 年积石山 Ms 6.2 地震 InSAR 同震形变探测与断层滑动分布反演[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(1): 22-32+75.
- Li Y S, Li W L, Xu Q, *et al.*, 2024. Coseismic deformation and slip distribution of the 2023 Jishishan Ms 6.2 earthquake revealed by InSAR observations [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1): 22-32+75. (in Chinese)
- 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 47(6): 887-897.
- Li Z H, Han B Q, Liu Z J, *et al.*, 2022. Source parameters and slip distribution of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai earthquakes constrained by InSAR observations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 47(6): 887-897. (in Chinese)
- 李振洪, 宋闯, 余琛, 等, 2019. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 44(7): 967-979.
- Li Z H, Song C, Yu C, *et al.*, 2019. Application of satellite radar sensing to landslide detection and monitoring: Challenges and solutions [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44(7): 967-979. (in Chinese)
- 能懿菡, 韩炳权, 刘振江, 等, 2024. InSAR 观测揭示的 2024 年新疆乌什 Mw 7.0 地震地表形变及发震断层模型 [J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). [2024-03-01]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240037>.
- Neng Y H, Han B Q, Liu Z J, *et al.*, 2024. Coseismic surface displacements and source model of the 2024 Mw 7.0 Wushi (Xinjiang, China) earthquake revealed by InSAR observations [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. [2024-03-01]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240037>. (in Chinese)
- 单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等, 2017. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演[J]. 地球物理学报, 60(12): 4527-4536.
- Shan X J, Qu C Y, Gong W Y, *et al.*, 2017. Coseismic deformation field of the Jiuzhaigou Ms 7.0 earthquake from Sentinel-1A InSAR data and fault slip

- inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(12):4527-4536. (in Chinese)
- 王敏, 2014. 新疆乌什县地质灾害发育特征及易发性评价研究[D]. 南京: 南京大学档案馆.
- Wang M, 2014. Study on Geological Characteristics and Susceptibility in Wushi County[D]. Nanjing: The Archive of Nanjing University. (in Chinese)
- 王守文, 季灵运, 朱良玉, 等, 2022. 基于 InSAR 技术监测 2021 年青海玛多 Mw 7.4 级地震同震形变场与断层滑动[J]. 地球科学与环境学报, 44(6):1016-1026.
- Wang S W, Ji L Y, Zhu L Y, *et al.*, 2022. Coseismic deformation on field and fault slip distribution of the 2021 Maduo Mw 7.4 earthquake in Qinghai, China based on InSAR technology[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 44(6):1016-1026. (in Chinese)
- 许光煜, 徐锡伟, 易亚宁, 等, 2022. 2022 年青海门源 Mw 6.6 地震发震构造——来自 InSAR 和高分影像约束[J]. 地球物理学报, 65(12):4704-4724.
- Xu G Y, Xu X W, Yi Y N, *et al.*, 2022. Seismogenic structure of the 2022 Menyuan Mw 6.6 earthquake, Qinghai Province, constrained by InSAR and Gaofen-7 observation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(12):4704-4724. (in Chinese)
- 杨九元, 温扬茂, 许才军, 2024. InSAR 观测揭示的 2023 年甘肃积石山 Ms 6.2 地震发震构造[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). [2024-01-11]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230501>
- Yang J Y, Wen Y M, Xu C J, 2024. Seismogenic fault structure of the 2023 Jishishan (Gansu) Ms 6.2 earthquake revealed by InSAR observations[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. [2024-01-11]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230501> (in Chinese)
- 杨莹辉, 2015. 基于 InSAR 观测同震地表形变场反演汶川地震断层滑移[D]. 成都: 西南交通大学档案馆.
- Yang Y H, 2015. Fault Slip Inversion of Wenchuan Earthquake Using InSAR Coseismic Surface Deformation Observations[D]. Chengdu: The Archive of Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- 张博譔, 钱黎, 李涛, 等, 2024. 2024 年 1 月 23 日新疆乌什 Ms 7.1 地震地质灾害和地表破裂[J]. 地震地质, 46(1):220-234.
- Zhang B X, Qian L, Li T, *et al.*, 2024. Geological disasters and surface ruptures of January 23, 2024 Ms 7.1 Wushi earthquake, Xinjiang, China[J]. Seismology and Geology, 46(1):220-234. (in Chinese)
- 张庆云, 2019. InSAR 同震形变提取关键技术研究及其应用[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Zhang Q Y, 2019. Research and Application of Key Technologies for InSAR Coseismic Deformation Extraction[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 张双成, 赵颖, 张成龙, 等, 2023. 联合光学遥感和 SAR 影像青海玛多 Ms 7.4 级地震同震形变场分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). [2024-02-28]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220615>.
- Zhang S C, Zhao Y, Zhang C L, *et al.*, 2023. Co-seismic deformation analysis of Qinghai Maduo Ms 7.4 earthquake based on optical remote sensing and SAR images[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. [2024-02-28]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220615>. (in Chinese)
- 郑民, 雷刚林, 黄少英, 等, 2007. 南天山西段南缘断裂构造特征及对乌什凹陷发育的控制[J]. 地质科学, 42(4):639-655.
- Zheng M, Lei G L, Huang S Y, *et al.*, 2007. Features of fault structure in southern margin of west segment of the South Tianshan, and its control to evolution of the Wushi Sag[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 42(4):639-655. (in Chinese)
- 中国地震局, 2024. 1 月 23 日 2 时 9 分新疆阿克苏地区乌什县发生 7.1 级地震[EB/OL]. [2024-1-23]. <https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/zqsd/5750423/index.html>.
- 中国地震局地震预测研究所, 2024. 中国地震局地质研究所地震现场科考队发现新疆乌什 7.1 级地震地表破裂带[EB/OL]. [2024-1-30]. <https://www.eq-igl.ac.cn/zhxw/info/2024/38021.html>.
- 中国新闻网, 2024. 新疆乌什地震已致 3 人遇难 5 人受伤[EB/OL]. [2024-1-23]. <https://news.cctv.com/2024/01/23/ARTIQG1RaDPuJ2NgUqRGqFfd240123.shtml>.
- 朱传庆, 杨书江, 李同彬, 等, 2008. 塔里木盆地主要断裂的地球物理特征及与天然地震的关系[J]. 地球物理学进展, 23(6):1685-1691.
- Zhu C Q, Yang S J, Li T B, *et al.*, 2008. Geophysical characters of major faults in the Tarim Basin and the relationships with earthquake[J]. Progress in Geophysics, 23(6):1685-1691. (in Chinese)
- Eineder M, Hubig M, Milcke B, 1998. Unwrapping large interferograms using the minimum cost flow algorithm[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seattle: IEEE, Piscataway, 1:83-87.
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, *et al.*, 2007. The shuttle

radar topography mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 45(2):RG2004.

Jónsson S, Zebker H, Segall P, *et al.*, 2002. Fault slip distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4):1377–1389.

Massonnet D, Feigl K L, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface[J]. *Reviews of Geophysics*, 36(4):441–500.

Massonnet D, Rossi M, Carmona C, *et al.*, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, 364(6433):138–142.

Okada Y, 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2):1018–1040.

Song C, Yu C, Li Z H, *et al.*, 2019. Coseismic slip distribution of the 2019 Mw 7.5 New Ireland earthquake from the integration of multiple remote sensing techniques[J]. *Remote Sensing*, 11(23):1–16.

Wright T J, Parsons B E, Lu Z, 2004. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(1):L01607.

Wessel P, Luis J F, Uieda L, *et al.*, 2019. The generic mapping tools version 6[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 20(11):5556–5564.

Xiao R Y, Yu C, Li Z H, *et al.*, 2021. Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction: Applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in Eastern China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96:102289.

Yu C, Li Z H, Penna N T, 2018a. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 204:109–121.

Yu C, Li Z H, Penna N T, *et al.*, 2018b. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 123(10):9202–9222.

Yu C, Li Z H, Penna N T, 2020. Triggered afterslip on the southern Hikurangi subduction interface following the 2016 Kaikoura earthquake from InSAR time series with atmospheric corrections [J]. *Remote Sensing of Environment*, 251:112097.

Zhao B, Huang Y, Zhang C H, *et al.*, 2015. Crustal deformation on the Chinese mainland during 1998–2014 based on GPS data[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 6(1):7–15.

(责任编辑:甘娟娟)



(上接第 640 页)

解明礼, 巨能攀, 赵建军, 等, 2021. 区域地质灾害易发性分级方法对比分析研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 46(7):1003–1014.

Xie M L, Ju N P, Zhao J J, *et al.*, 2021. Comparative analysis on classification methods of geological disaster susceptibility assessment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(7):1003–1014. (in Chinese)

邢建华, 2017. 基于 Hadoop 的地质云计算平台搭建与应用[D]. 湘潭:湖南科技大学档案馆.

Xing J H, 2017. Construction and Application of Geological Cloud Computing Platform Based on Hadoop Cluster[D]. Xiangtan: The Archive of Hunan University of Science and Technology. (in Chinese)

Colombo A, Lanteri L, Ramasco M, *et al.*, 2015. Systematic GIS-based landslide inventory as the first step for effective landslide-hazard management[J]. *Landslides*, 2:291–301.

Shafizadeh-Moghadam H, Minaei M, Shahabi H, *et al.*, 2019. Big data in geohazard; pattern mining and large scale analysis of landslides in Iran[J]. *Earth Science Informatics*, 12(1):1–17.

(责任编辑:黄维婷)