引文格式:能懿菡,韩炳权,刘振江,等.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].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):368-376.DOI:10.13203/j.whugis20240037

Citation: NAI Yihan, HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, et al. Coseismic Surface Displacement and Source Model of the 2024 Mw 7.0 Wushi (Xinjiang, China) Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2): 368-376. DOI: 10.13203/j.whugis20240037

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

能懿菡[1,2,3] 韩炳权[1,2,3] 刘振江[1,2,3] 李振洪[1,2,4] 宋 闯[1,2,4]
余 琛[1,2,4] 李素菊[5] 彭建兵[1,2,6]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 黄土科学全国重点实验室,陕西 西安,710054
3 长安大学地学与卫星大数据研究中心,陕西 西安,710054
4 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054
5 应急管理部国家减灾中心,北京,100124
6 自然资源部生态地质与灾害防控重点实验室,陕西 西安,710054

摘 要:2024-01-23,新疆维吾尔自治区乌什县发生了Mw 7.0地震,本次地震是天山地震带迈丹-沙依拉姆断裂区域近20年以来发生的最大地震,该地震的发生为深入理解天山地震带断层系统的破裂行为和构造活动提供了机会。为确定2024年乌什地震的断层几何和滑动分布并评估区域危险性,利用合成孔径雷达干涉测量技术研究了乌什地震的发震断层模型。首先利用升、降轨Sentinel-1A卫星雷达影像获取2024年乌什地震的同震地表形变场,然后利用多峰值优化粒子群算法确定本次地震的均匀滑动模型,在此基础上基于非负最小二乘算法反演发震断层的精细滑动分布,最后利用库仑失稳准则评估发震区域周边的地震危险性。研究结果显示,升、降轨视线向最大抬升位移~74 cm,最大沉降位移~14 cm;本次地震的发震断层倾向北北西,倾角55°,走向~230°,滑动角~42°,发震断层呈现逆冲兼具左旋走滑分量的运动性质,符合区域活动断裂的运动模式。综合反演结果以及前人的地震地质研究,初步判断发震断层为迈丹-沙依拉姆断裂带的次级断裂。库仑应力结果表明,阔克萨勒断裂区域、大石峡断裂区域和托什干断裂(震中西北部分)区域都处于应力加载状态,这些区域未来地震风险需要被重点关注。

关键词:2024年乌什地震;合成孔径雷达干涉测量;同震地表形变;断层滑动分布;库仑应力变化

中图分类号:P228;P315 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-30

DOI:10.13203/j.whugis20240037 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0368-09

Coseismic Surface Displacement and Source Model of the 2024 Mw 7.0 Wushi (Xinjiang, China) Earthquake Revealed by InSAR Observations

NAI Yihan[1,2,3] *HAN Bingquan*[1,2,3] *LIU Zhenjiang*[1,2,3] *LI Zhenhong*[1,2,4] *SONG Chuang*[1,2,4]
YU Chen[1,2,4] *LI Suju*[5] *PENG Jianbing*[1,2,6]

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 Key Laboratory of Loess, Xi'an 710054, China
3 Big Data Center for Geosciences and Satellites, Chang'an University, Xi'an 710054, China
4 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China
5 National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100124, China
6 Key Laboratory of Ecological Geology and Disaster Prevention, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives**: On 23 January 2024, an Mw 7.0 earthquake struck Wushi County (Xinjiang, Chi-

基金项目:国家重点研发计划(2020YFC1512000);陕西省科技创新团队(2021TD-51);陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队(2022);中央高校基本科研业务费专项(300102260301,300102261108,300102263717)。

共同第一作者:能懿菡,硕士生,主要从事InSAR形变测量与同震建模分析研究。yihan.nai@chd.edu.cn
韩炳权,博士生,主要从事地震构造形变监测与建模研究。bingquan.han@chd.edu.cn

通信作者:李振洪,博士,教授。zhenhong.li@chd.edu.cn

na). It was the largest earthquake that occurred along the Maidan-Shayilamu fault of the Tianshan seismic belt in the last two decades, which provided an opportunity to further examine the rupture behavior and tectonic activity of the fault system in the Tianshan seismic belt. **Methods:** Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) was used to retrieve coseismic surface deformation from Sentinel-1A images. The multipeak particle swarm optimization was employed to invert for fault geometry parameters and subsequently obtained the refined slip distribution based on a bounded-variable least-squares algorithm. The static Coulomb failure stress change (ΔCFS) was calculated to assess regional seismic hazards. **Results:** The earthquake led to a maximum line of sight uplift displacement of about 74 cm and a maximum line of sight subsidence displacement of about 14 cm. The event had a NNW-dipping fault with a dip of 55°, a strike of about 230°, and a rake of about 42°, indicating that this earthquake was a thrust event with a left-lateral slip component. The slip was concentrated mainly at depths of 8-18 km. The maximum slip was 4.3 m, occurring at a depth of about 10.2 km. The total released moment was 4.25×10^{19} N·m, equivalent to a moment magnitude Mw 7.05. **Conclusions:** Our modeling results together with previous geological researches suggest that the seismogenic fault is a secondary fault of the Maidan-Shayilamu fault zone. ΔCFS results indicate high seismic risks in Kuokesale fault region, Dashixia fault region, and the Tuoshigan fault region northwest of the epicenter, which special attention should be paid to.

Key words: 2024 Wushi earthquake; InSAR; coseismic surface displacements; slip distribution; Coulomb failure stress change

据中国地震台网中心(https://news.ceic.ac.cn/)测定，北京时间 2024-01-23T02:09，新疆维吾尔自治区阿克苏地区乌什县(41.26°N，78.63°E)发生 Mw 7.0 地震，震源深度为 22 km，本次地震是继 2021-05-22 玛多 Mw 7.3 地震发生后，中国大陆区域发生的又一次 Mw 7.0 以上地震。2024 年乌什 Mw 7.0 地震最大烈度达到Ⅸ度，主要涉及阿克苏地区乌什县和克孜勒苏柯尔克孜自治州阿合奇县，地震造成周边阿克苏、阿图什、喀什、伊犁、库尔勒和克拉玛依等地震感强烈，乌鲁木齐亦有震感报告。相较于 2003-02-24 Mw 6.0 的新疆巴楚-伽师地震(距离本次地震～230 km)造成的巨大人员、经济损失(遇难约 268 人，受伤约 4 853 人)，2024 年乌什地震虽然震级高，但是由于震中 5 km 范围内平均海拔约 3 048 m，发震区域 20 km 内无乡镇驻地分布，因此没有造成严重的人员伤亡和财产损失[1]。

2024 年乌什地震发生在天山地震带[2]，地震震中距离迈丹-沙依拉姆断裂带～6 km[3]。截至 2024-01-29 8 时，中国地震台网地震目录公布余震 164 次，其中 3.0～3.9 级 133 次，4.0～4.9 级 24 次，5.0～5.9 级 7 次，最大余震 5.7 级，距主震震中约 22 km(https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml? PAGEID=earthquake_subao)，初期余震结果显示主要呈 NEE-SSW 向线性展布(图 1(c)黄色实心圆所示)。地震发生后，国内外不同机构或者研究团队采用不同的方法和数据发布了本次地震的震源机制解，结合发震区域的孕震环境，可初步判断 2024 年乌什地震是一次逆冲型兼具左旋走滑事件，详细信息见表 1。迈丹-沙依拉姆断裂带上的地震活动相对较弱，20 世纪以来乌什地震震中 50 km 范围内无 6 级及以上地震发生。2024 年乌什地震是迈丹-沙依拉姆断裂带上首次发生的 Mw 7.0 强震事件，深入研究本次地震发震断层的几何结构和滑动分布对更好地理解天山地震带的断层系统的构造活动特征具有重要价值。另外，随着阿克苏地区乌什县区域的经济发展和人口密度的增加，该区域活动断层的地震危险性也更应该得到深入的研究。

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术为地震大地测量学的发展提供了重要的技术保障[4-11]。本文首先利用 Sentinel-1A 卫星雷达的升、降轨影像获取了 2024 年乌什 Mw 7.0 地震的同震地表形变场；其次，基于均匀弹性半空间的位错模型研究了本次地震的断层几何参数和滑动分布；最后，基于本研究获取的断层滑动分布模型计算了邻近区域的静态库仑应力变化，从而评估区域未来地震危险性。

1　地质构造背景与地震危险性

天山地震带位于欧亚大陆内部，其北部为准噶尔盆地和哈萨克地块，其南部为塔里木盆地(图 1(a))。

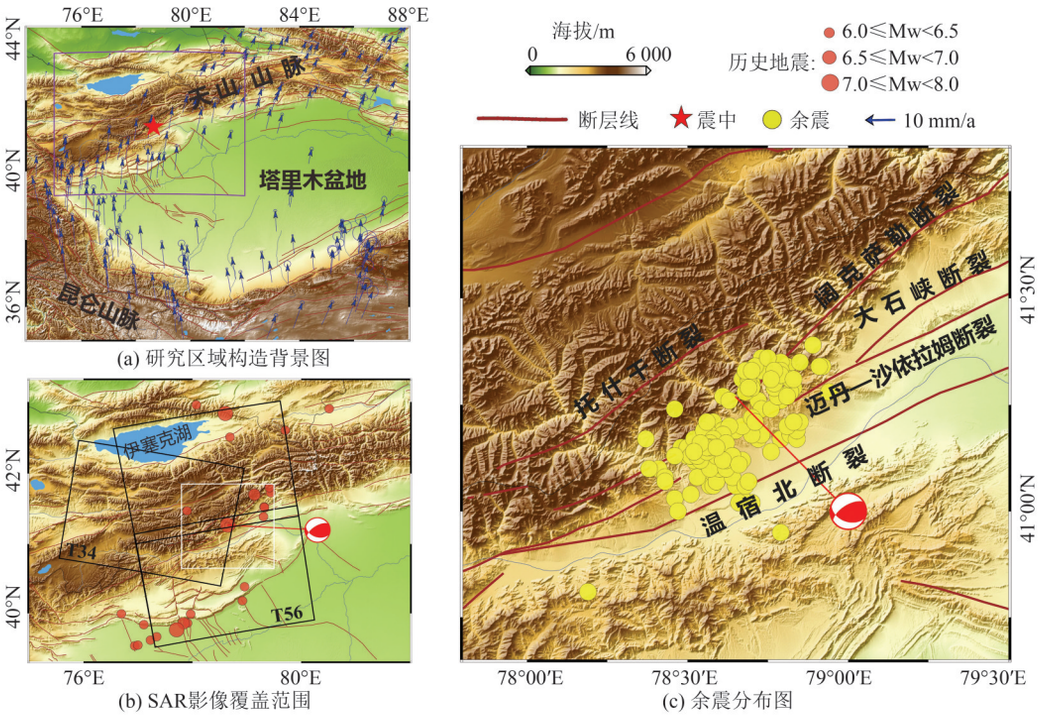


图1 2024年乌什地震区域构造背景图

Fig. 1 Regional Tectonic Setting Map of the 2024 Wushi Earthquake

表1 2024年乌什Mw 7.0地震震源参数

Table 1 Source Parameters for the 2024 Mw 7.0 Wushi Earthquake

研究来源	震中位置			震源机制			长度/km	宽度/km	矩震级(Mw)
	经度/(°E)	纬度/(°N)	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)			
USGS	78.65	41.27	13.0	235 113	45 62	42 126	—	—	7.0
GCMT	78.57	41.19	14.0	236 110	48 57	47 127	—	—	7.0
GFZ	78.70	41.27	15.0	251 92	38 53	72 72	—	—	7.0
IPGP	78.59	41.29	22.0	234 105	50 53	51 127	—	—	7.1
张喆等[a]	78.62	41.17	20.0	250 109	42 55	59 115	—	—	7.0
本文	78.64	41.23	6.6±1.39	230.27±0.23	57.49±3.65	41.67±1.59	34.71±0.30	10.51±3.31	7.10[b]
研究	78.61	41.21	10.2	230.27	55	—	60	30	7.05[c]

注:USGS(United States Geological Survey):美国地质调查局;GCMT(Global Centroid Moment Tensor):全局质心矩张量;GFZ(Helmholtz Centre for Geosciences):德国地学研究中心;IPGP(Institut de Physique du Globe de Paris):巴黎地球物理研究所;上标a表示https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280467.html;b表示均匀滑动模拟;c表示分布式滑动模拟。

自新生代以来,由于受印度板块~46 mm/a的速度向北对欧亚板块强烈的持续挤压的远程效应影响,天山地震带成为中国乃至全球地震活动最为强烈的地区之一[12-13]。迈丹-沙依拉姆断裂带是一组全新世的活动断裂带,该断裂带由多条近平行的次级断裂组合而成,宽度为15~17 km,其活动性质以逆冲兼具左旋走滑为主,断层面倾向北西,倾角30°~80°,沿NEE走向延伸超过400 km,断层迹线构成了西南天山中高山与低山、丘陵的地貌界线[14]。文献[15]利用全球定位系统(global positioning system, GPS)测定跨迈丹-沙依拉姆断裂的地壳平均缩短速率为~20 mm/a[15]。文献[3]分别获取了迈丹-沙依拉姆断裂带GPS的二维速率场,其中垂直于天山方向的地壳缩短速率为17.4±1.8 mm/a,该区域以近NS的挤压逆冲运动为主,水平速度场则显示该区域存在一定的左旋剪切分量[3]。

2　同震形变场

2.1　InSAR 数据处理

使用 GAMMA 软件[16]对覆盖 2024 年乌什地震的 Sentinel-1A 升轨（轨道号 56）、降轨（轨道号 34）卫星雷达影像（https://dataspace.copernicus.eu/）进行二轨法差分干涉处理。影像覆盖范围如图 1(b)黑色矩形框所示，影像数据具体参数见表 2，获取同震视线向（line of sight，LOS）地表位移场。在数据处理过程中，首先对单视复数格式合成孔径雷达（synthetic aperture radar，SAR）影像进行多视处理（距离向因子设置为 10，方位向因子设置为 2），引入 30 m 空间分辨率的 SRTM（shuttle radar topography mission）数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据去除地形效应的影响[17-18]，利用 Goldstein 自适应滤波方法对同震干涉相位进行滤波[19]，将相干性低于 0.3 的数据进行掩膜；然后使用最小费用流算法[20]对同震干涉图进行相位解缠，将同震形变场掩膜后，利用非形变区域的观测数据估计一个和高程相关的平面相位，以削弱地形相关的大气延迟[21-22]；最后对干涉图进行地理编码，得到 WGS84 坐标框架下的 LOS 向同震位移场（图 2(a)、2(b)）。

表 2　本文中使用的 Sentinel-1A 影像

Table 2　Sentinel-1A Images Used in This Study

飞行方向	主影像	辅影像	空间基线/m	时间基线/d
升轨（T56）	2024-01-14	2024-01-26	−19.621 7	12
降轨（T34）	2024-01-13	2024-01-25	−6.381 3	12

2.2　同震形变特征分析

图 2(a)、2(b)显示，2024 年乌什地震升、降轨同震 LOS 向形变图均呈现出以 NEE-SWW 向分开的两个非对称分布的近椭圆状分布的形变场，主要的同震形变场发生在迈丹-沙依拉姆断层带的北西部，完整的升轨形变场东西向跨度～120 km，南北向跨度～80 km，椭圆状形变场整体上连续光滑的形变条纹暗示了本次地震的断层活动并未（或少量）破裂到地表。本研究定义靠近卫星飞行方向为正，远离卫星飞行方向为负，升、降轨均以朝向卫星运动为主，该结果揭示了本次地震事件以逆冲型运动为主，这与 USGS、GCMT 等机构公布的震源机制解相一致。断层数据库里已知的迈丹-沙依拉姆断层带由北东向南西穿过升、降轨同震形变场，表明迈丹-沙依拉姆断层带的运动控制了本次地震的发生（https://www.active-fault-datacenter.cn/）。升轨 InSAR 形变场最大 LOS 向位移约 74 cm，最小 LOS 向位移约 −11 cm；降轨 InSAR 形变场最大 LOS 向位移约 42 cm，最小 LOS 向位移约 −14 cm（图 2）。在 InSAR 形变场中选取跨断层的一条 1 km 宽度的剖线 AB、CD，并绘制其剖线图（图 2(c)、2(d)）。从形变剖线 AB、CD 可以看出，升、降轨同震形变场表现出以抬升形变为主的特点，且形变曲线的几何形态符合逆冲型地震的形变特征。

3　同震震源机制解译

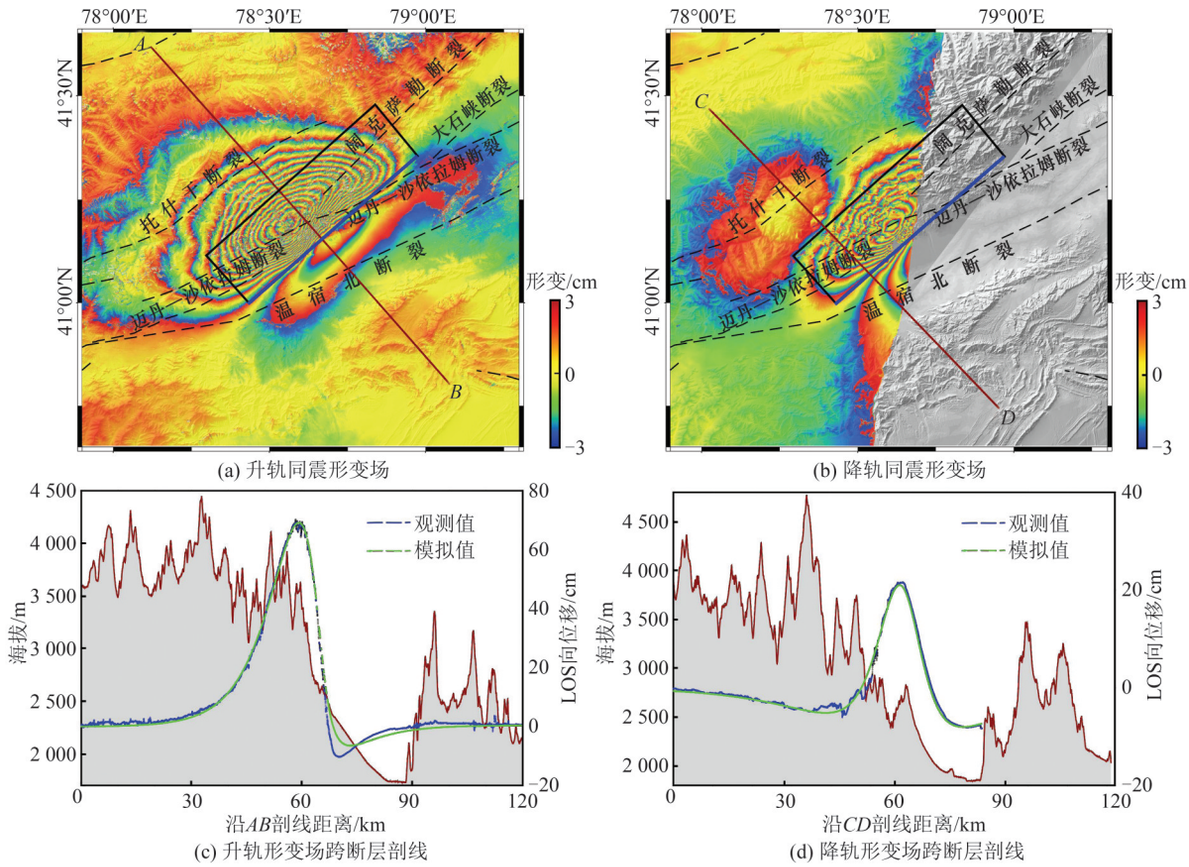
本文采用四叉树降采样方法对§2 获得的 InSAR 升、降轨同震干涉结果进行降采样处理[23]，分别获取升轨 2 781 个数据点和降轨 1 226 个数据点。基于均匀弹性半空间位错理论反演 2024 年乌什地震发震断层的断层几何及其精细滑动分布。结合发震区域的孕震环境以及 InSAR 获取的同震形变场特征（图 2(a)、2(b)），将发震断层设置为北西倾，借助 PSOKINV 软件包[24]，以及两步法进行反演测试，将剪切模量和泊松比分别设置为 3.3×10^{10} N/m^2 和 0.25[10, 25]。

3.1　均匀滑动反演

在反演过程中首先利用多峰值优化粒子群算法对发震断层的空间位置、长度、宽度、深度、走向、倾角、滑动角以及滑动量进行非线性搜索[6]。参考表 1 公布的震源机制解以及 InSAR 同震形变场信息，将发震断层走向的搜索区间设为 210°～270°，倾角设为 10°～80°，滑动角设为 10°～90°，长度设为 5～60 km，宽度设为 4～30 km。其次，通过对观测数据随机产生 100 组噪声，进而利用蒙特卡洛方法对断层几何参数的不确定性进行估算[26]，结果如表 1 所示，即在均匀滑动的约束下，发震断层的长和宽分别约为 34.71 km 和 10.51 km，走向约为 230°，倾角约为 57°，滑动角约为 42°，该滑动角结果反映了发震断层具有逆冲运动且兼具左旋走滑运动性质。

3.2　分布式滑动反演

固定均匀滑动反演得到的发震断层的走向（230°）和断层面中心位置（78.64°E，41.23°N），沿着断层的走向将均匀模型的长度延长至 60 km、沿着断层的倾向将宽度延长至 30 km。根据表 1 中 USGS 等机构发布的震源机制解，将每个子断层的滑动角的搜索范围设置为 0°～90°。为了避免线性反演中断层滑动的振荡，引入光滑因子



(a) 升轨同震形变场 (b) 降轨同震形变场

(c) 升轨形变场跨断层剖线 (d) 降轨形变场跨断层剖线

图2 2024年乌什地震同震地表形变场与地表形变剖线

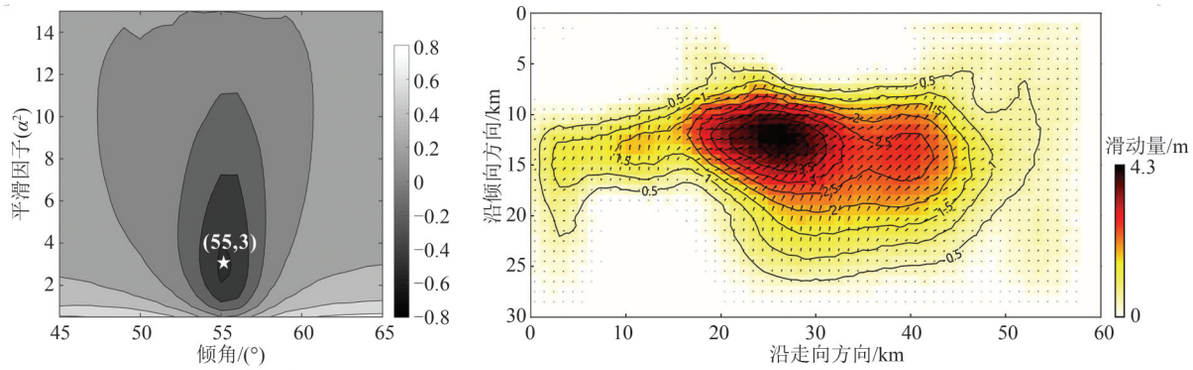
Fig. 2 Coseismic Surface Displacement Maps and Profiles of the 2024 Wushi Earthquake

α^2[23]。此外,均匀滑动假设下确定的断层倾角不一定是空间可变滑动分布的最优断层倾角δ。在线性反演前,断层倾角和光滑因子需要被进一步优化[6]。本文采用文献[6]定义的综合考虑解的粗糙度和模型残差的对数函数模型,将倾角的搜索范围设置为45°~65°(搜索步长为1°),平滑因子的搜索范围设置为0.5~15(搜索步长为0.5)进行对数函数拟合。图3(a)显示搜索得到的平滑因子α^2为3、最优倾角δ为55°。在最优倾角和光滑因子约束下,反演得到同震滑动分布(图3(b))。滑动分布结果显示2024年乌什地震是一次兼具左旋走滑分量的逆冲事件。主要破裂区域长~30 km,宽~10 km,滑动主要分布在8~18 km深度范围,且在距离地表10.2 km的深度产生了4.3 m的最大滑动量,释放地震矩4.25×10^{19} N·m,相当于一次Mw 7.05地震,与USGS、GCMT等机构的结果基本一致(表1)。图4显示了2024年乌什地震的同震地表形变场、最优滑动模型约束下的模拟形变场和残差图。升轨和降轨的观测值与模拟值拟合度分别为99.6%和98.6%,对应残差的均方根分别是1.6 cm和2.1 cm,升、降轨残差的均方根均小于InSAR观测值一个数量级,充分说明了反演结果的可靠性。

4 区域地震危险性评估

强震的发生通常会引起地球内部应力的剧烈变化,进而促进或抑制发震区域活动断层上地震的发生[27]。利用Coulomb 3.3软件快速获取2024年乌什地震同震破裂对邻近区域的静态库仑应力扰动(Coulomb failure stress change, ΔCFS)[28],进而评估区域未来地震危险性。在计算过程中将最优的滑动分布模型作为源断层,将接收断层的走向设置为230°,倾角设置为55°,滑动角设置为42°,另外考虑到本次地震矩心深度以及断层的滑动主要分布在8~18 km深度范围,分别计算10 km、15 km和20 km深度处的静态库仑应力分布[29-31],有效摩擦系数设定为0.4,泊松比为0.25[28,32]。

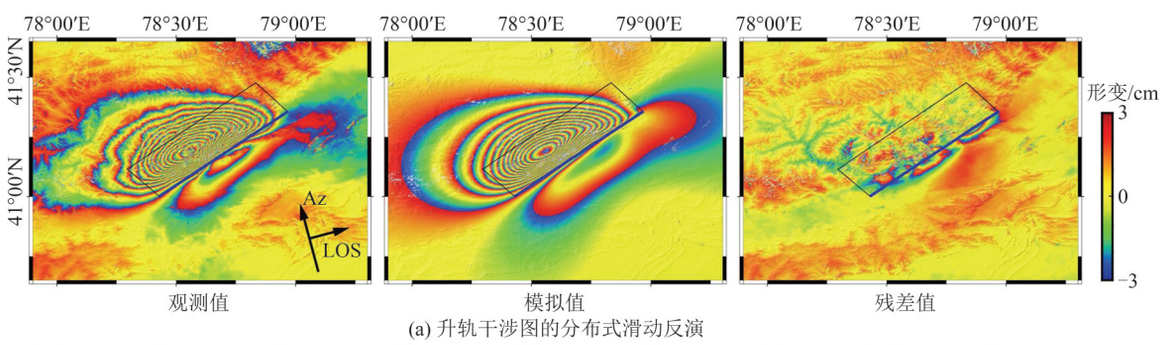
图5为不同深度的计算结果,整体上本次地震在发震断层两端和垂直发震断层区域的ΔCFS表现为正值,即地震的发生使应力向断层沿走向的两端、断层的北西方向以及断层的南东方向转



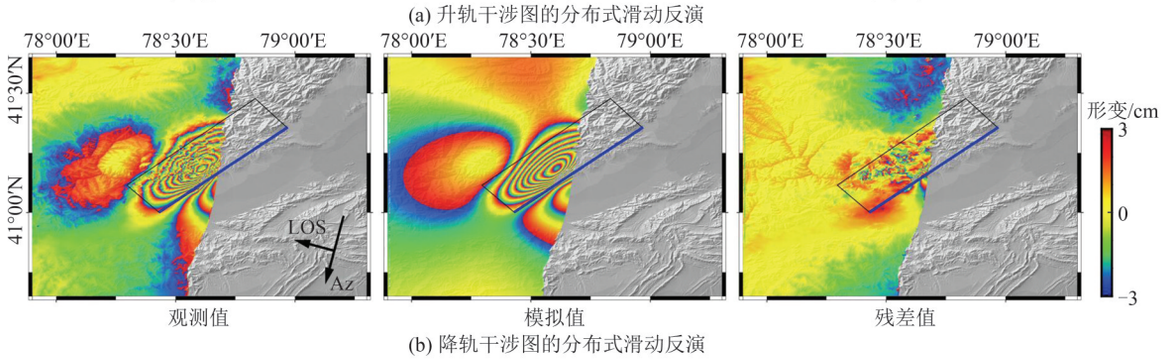
(a) 最优倾角和平滑因子的确定　(b) 同震滑动分布

图 3　2024 年乌什地震的最优倾角和滑动分布

Fig. 3　Optimal Dip Angle and Coseismic Slip Distribution of the 2024 Wushi Earthquake



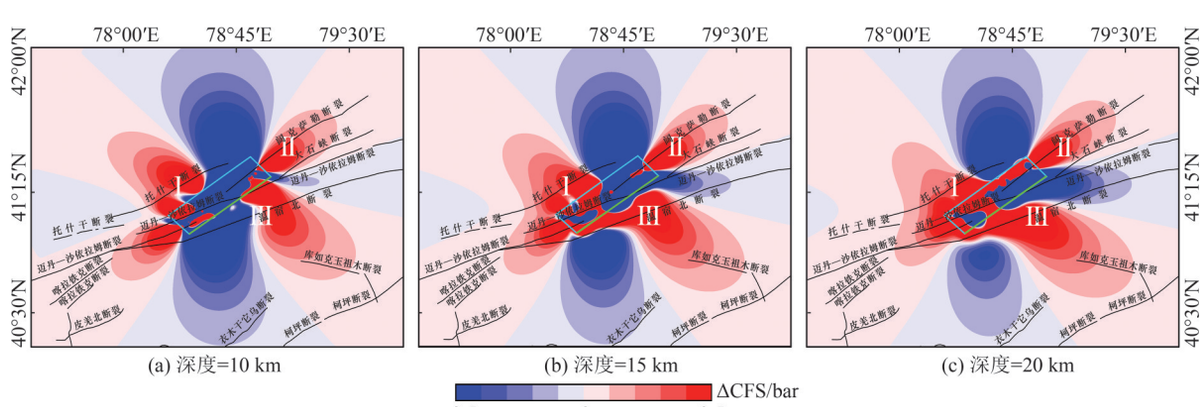
(a) 升轨干涉图的分布式滑动反演



(b) 降轨干涉图的分布式滑动反演

图 4　2024 年乌什地震同震地表形变场观测值、模拟值及残差

Fig. 4　Observed Coseismic Interferograms, Modeled Interferograms of the 2024 Wushi Earthquake, and the Residuals After Subtracting the Modeled Deformation



(a) 深度=10 km　(b) 深度=15 km　(c) 深度=20 km

图 5　2024 年乌什地震引起邻近区域的静态库仑应力变化

Fig. 5　Static ΔCFS in Neighboring Regions Induced by the 2024 Wushi Earthquake

移。2024 年乌什地震的发生充分释放了发震断层上积累的应力，尤其是在发震断层深度 10 km 附近的区域（图 5(a)蓝色阴影区域），另外发震断层区域的近南北向造成了较大区域的应力阴影。

综合分析3个不同深度的库仑应力结果可得,阔克萨勒断裂区域、库如克玉祖木断裂区域、大石峡断裂区域、皮羌北断裂区域、喀拉铁克断裂区域、温宿北断裂位于震中东南方向的部分区域、托什干断裂位于震中西北方向的部分区域以及迈丹-沙依拉姆断裂处于震中以西的部分区域都处于应力加载状态。具体表现为发震断层西北区域(图5中Ⅰ区域)在深度10 km、15 km和20 km处最大应力值分别约为1.2 bar、1.0 bar和0.7 bar,发震断层东北区域(图5中Ⅱ区域)在深度10 km、15 km和20 km处最大应力值分别约为1.1 bar、2.1 bar和2.8 bar,发震断层东南区域(图5中Ⅲ区域)在深度10 km、15 km和20 km处最大应力值分别约为0.6 bar、0.6 bar和0.1 bar。

5 结 语

本文利用升、降轨Sentinel-1A卫星雷达影像获取了2024年乌什地震的同震地表位移场和发震断层的滑动分布,并计算了本次地震造成的震中周边断层上库仑应力的变化,评估了区域地震的危险性。研究得到的主要认识包括:

1)2024年乌什地震的升、降轨Sentinel-1A同震形变场均呈现出近椭圆形的地表抬升变形,地震造成的地表形变范围约120 km×80 km。其中升轨最大LOS向位移~74 cm,降轨最大LOS向位移~42 cm。

2)建模结果表明,2024年乌什地震的断层走向~230°,倾角~55°;断层滑动分布集中在8~18 km的深度,最大滑移量为4.3 m,发生在位于距离地表10.2 km的深度,同震滑动释放的地震矩为4.25×10^{19} N·m,相当于矩震级Mw 7.05,地震的运动模式为逆冲型地震兼具左旋走滑性质,初步判断发震断层为迈丹-沙依拉姆断裂带的次级断裂。

3)根据静态库仑应力变化分析,2024年乌什地震的发生增加了阔克萨勒断裂区域、库如克玉祖木断裂区域、大石峡断裂区域、皮羌北断裂区域、喀拉铁克断裂区域、温宿北断裂位于震中东南方向的部分区域、托什干断裂位于震中西北方向的部分区域以及迈丹-沙依拉姆断裂处于震中以西的部分区域的未来地震风险,后续需要关注此类活动断层的地震危险性。

致谢:感谢欧洲空间局提供的Sentinel-1A雷达影像数据;文中绝大部分图件采用GMT绘制[33]。

参 考 文 献

[1] 赵晓燕,武晔,高方平,等.根据余震资料求解2003年伽师Ms 6.8地震断层面的研究[J].地震,2013,33(3):133-139.
ZHAO Xiaoyan, WU Ye, GAO Fangping, et al. Determination of Fault Plane for the 2003 Jiashi Ms 6.8 Earthquake by Using Its Aftershocks[J]. *Earthquake*, 2013, 33(3): 133-139.

[2] 张博譞,钱黎,李涛,等.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,2024,46(1):220-234.
ZHANG Boxuan, QIAN Li, LI Tao, et al. Geological Disasters and Surface Ruptures of January 23, 2024 Ms 7.1 Wushi Earthquake, Xinjiang, China [J]. *Seismology and Geology*, 2024, 46(1): 220-234.

[3] 吴传勇.西南天山北东东走向断裂的晚第四纪活动特征及在天山构造变形中的作用[J].国际地震动态,2017,47(9):46-48.
WU Chuanyong. Late Quaternary Activity Characteristics of NE-Trending Fault in Southwest Tianshan Mountains and Its Role in Tianshan Tectonic Deformation [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2017, 47(9): 46-48.

[4] LI Z H, ELLIOTT J R, FENG W P, et al. The 2010 Mw 6.8 Yushu (Qinghai, China) Earthquake: Constraints Provided by InSAR and Body Wave Seismology [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B10): B10302.

[5] ELLIOTT J R, WALTERS R J, WRIGHT T J. The Role of Space-Based Observation in Understanding and Responding to Active Tectonics and Earthquakes[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13844.

[6] FENG W P, LI Z H, ELLIOTT J R, et al. The 2011 Mw 6.8 Burma Earthquake: Fault Constraints Provided by Multiple SAR Techniques[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(1): 650-660.

[7] 李振洪,韩炳权,刘振江,等.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),2022,47(6):887-897.
LI Zhenhong, HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, et al. Source Parameters and Slip Distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai Earthquakes Constrained by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 887-897.

[8] 刘洋,许才军,温扬茂,等.杂多Mw 5.9地震断层

滑动的 InSAR 反演及边界元分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1678-1686.
LIU Yang, XU Caijun, WEN Yangmao, et al. InSAR Inversion and Boundary Element Analysis of the Zadoi Mw 5.9 Earthquake Fault Slip[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1678-1686.

[9] 刘振江, 韩炳权, 刘海辉, 等. InSAR 数据约束下的 2023 年赫拉特地震序列发震断层探讨及其建筑物损毁评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 722-733.
LIU Zhenjiang, HAN Bingquan, LIU Haihui, et al. Seismogenic Fault and Building Damage of the 2023 Herat Earthquake Sequence Revelated by Radar Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 722-733.

[10] 韩炳权, 刘振江, 陈博, 等. 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), 2023, 48(1): 36-46.
HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, CHEN Bo, et al. 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*, 2023, 48(1): 36-46.

[11] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报, 2023, 52(11): 1805-1834.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Development Status and Trends of Imaging Geodesy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(11): 1805-1834.

[12] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of Recent Continental Tectonics in Asia Can be Interpreted as Results of the India-Eurasia Collision[J]. *Science*, 1975, 189(4201): 419-426.

[13] MOLNAR P, STOCK J M. Slowing of India's Convergence with Eurasia Since 20 Ma and Its Implications for Tibetan Mantle Dynamics[J]. *Tectonics*, 2009, 28(3): 1-11.

[14] 贾启超, 吴传勇, 沈军, 等. 西南天山迈丹断裂阿合奇段左旋走滑的证据及其最新活动[J]. 地震工程学报, 2015, 37(1): 222-227.
JIA Qichao, WU Chuanyong, SHEN Jun, et al. Evidence of Left-Lateral Strike-Slip Along the Aheqi Segment of Maidan Fault in Southwest Tianshan Mountains, China and Its Latest Activity[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(1): 222-227.

[15] 杨少敏, 李杰, 王琪. GPS 研究天山现今变形与断层活动[J]. 中国科学：地球科学, 2008, 38(7): 872-880.
YANG Shaomin, LI Jie, WANG Qi. Study on Present Deformation and Fault Activity in Tianshan Mountains by GPS[J]. *Science China Earth Sciences*, 2008, 38(7): 872-880.

[16] WEGNÜLLER U, WERNER C, STROZZI T, et al. Sentinel-1 Support in the GAMMA Software[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 100: 1305-1312.

[17] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): RG2004.

[18] WEISS J R, WALTERS R J, MORISHITA Y, et al. High-Resolution Surface Velocities and Strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(17): e2020GL087376.

[19] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035-4038.

[20] CHEN C W, ZEBKER H A. Network Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(3): 401-414.

[21] ZHANG X S, LI Z H, LIU Z J. Reduction of Atmospheric Effects on InSAR Observations Through Incorporation of GACOS and PCA into Small Baseline Subset InSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5209115.

[22] SONG C, YU C, LI Z H, et al. Triggering and Recovery of Earthquake Accelerated Landslides in Central Italy Revealed by Satellite Radar Observations[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7278.

[23] JONSSON S. 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*, 2002, 92(4): 1377-1389.

[24] 冯万鹏, 李振洪. 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, 2010, 25(4): 1189-1196.
FENG Wanpeng, LI Zhenhong. A Novel Hybrid PSO/Simplex Algorithm for Determining Earthquake Source Parameters Using InSAR Data[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1189-1196.

[25] STECK L K, PHILLIPS W S, MACKEY K, et al. Seismic Tomography of Crustal P and S Across Eurasia[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 177(1): 81-92.

[26] PARSONS B, WRIGHT T, ROWE P, et al. The

1994 Sefidabeh (Eastern Iran) Earthquakes Revisited: New Evidence from Satellite Radar Interferometry and Carbonate Dating About the Growth of an Active Fold Above a Blind Thrust Fault[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 164(1): 202-217.

[27] KING G C P, STEIN R S, LIN U J. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes[J]. *Bulletin-Seismological Society of America*, 1994, 84(3): 935-953.

[28] TODA S, STEIN R S, RICHARDS-DINGER K, et al. Forecasting the Evolution of Seismicity in Southern California: Animations Built on Earthquake Stress Transfer[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B5): B05S16.

[29] 汪建军, 许才军, 申文斌. 2010年Mw 6.9玉树地震同震库仑应力变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(10): 1207-1211.
WANG Jianjun, XU Caijun, SHEN Wenbin. The Coseismic Coulomb Stress Changes Induced by the 2010 Mw 6.9 Yushu Earthquake, China and Its Implication to Earthquake Hazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1207-1211.

[30] 单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等. 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, 2017, 60(12): 4527-4536.
SHAN Xinjian, QU Chunyan, GONG Wenyu, et al. Coseismic Deformation Field of the Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake from Sentinel-1A InSAR Data and Fault Slip Inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12): 4527-4536.

[31] 刘博研, 解孟雨, 史保平. 青海玛多Ms 7.4地震对周边活动断裂的库仑应力加载及发震概率增量的计算[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 563-579.
LIU Boyan, XIE Mengyu, SHI Baoping. Effect of Qinghai Madoi Ms 7.4 Earthquake on Coulomb Stress and Earthquake Probability Increment of Adjacent Faults [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 563-579.

[32] POPE N, MOONEY W D. Coulomb Stress Models for the 2019 Ridgecrest, California Earthquake Sequence[J]. *Tectonophysics*, 2020, 791: 228555.

[33] WESSEL P, LUIS J F, UIEDA L, et al. The Generic Mapping Tools Version 6[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(11): 5556-5564.