引文格式:刘振江,韩炳权,能懿菡,等.InSAR观测约束下的2023年甘肃积石山地震震源参数及其滑动分布[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):344-355.DOI:10.13203/j.whugis20240008

Citation:LIU Zhenjiang,HAN Bingquan,NAI Yihan,et al.Source Parameters and Slip Distribution of the 2023 Mw 6.0 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Constrained by InSAR Observations[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(2):344-355.DOI:10.13203/j.whugis20240008

InSAR观测约束下的2023年甘肃积石山地震震源参数及其滑动分布

刘振江[1,2,3] 韩炳权[1,2,3] 能懿菡[1,2,3] 李振洪[1,2,4] 余 琛[1,2,4]
宋 闯[1,2,4] 陈 博[1,2,3] 赵利江[1] 张雪松[1,2,3] 彭建兵[1,2,5]

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 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:2023-12-18,甘肃省临夏回族自治州积石山县发生了Mw 6.0地震,本次地震是青藏高原东北缘拉脊山断裂带上有现代地震记录以来发生的最大地震。快速获取2023年积石山地震的发震断层几何和精细滑动分布对于评估拉脊山断裂带周边区域未来地震危险性具有重要意义。利用Sentinel-1A卫星雷达观测获取了2023年积石山地震的升、降轨同震地表形变场,并以此为约束反演了该事件的发震断层几何和精细滑动分布,结合库仑失稳准则分析了区域地震危险性。合成孔径雷达干涉形变结果表明本次地震的升、降轨同震形变场均以抬升形变为主,升轨最大视线向位移~6.5 cm,降轨最大视线向位移~7.2 cm;同震断层建模测试表明,使用东倾断层几何和西倾断层几何均能较好地解释该次地震引起的地表形变。根据余震以及同震滑坡分布分析结果,更倾向于认为本次地震发生在一条NNW走向的东倾逆冲盲断层;静态库仑应力变化计算结果表明,2023年积石山地震的发生增加了拉脊山南缘断裂、拉脊山北缘断裂的NWW走向分段及其NNW走向的震中以南分段、西秦岭北缘断裂以及倒淌河-临夏断裂的震中以东分段的未来地震风险。

关键词:2023年积石山地震;合成孔径雷达干涉测量;同震地表位移;滑动分布;库仑应力变化

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-09

DOI:10.13203/j.whugis20240008 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0344-12

Source Parameters and Slip Distribution of the 2023 Mw 6.0 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Constrained by InSAR Observations

LIU Zhenjiang[1,2,3] *HAN Bingquan*[1,2,3] *NAI Yihan*[1,2,3] *LI Zhenhong*[1,2,4] *YU Chen*[1,2,4]
SONG Chuang[1,2,4] *CHEN Bo*[1,2,3] *ZHAO Lijiang*[1] *ZHANG Xuesong*[1,2,3] *PENG Jianbing*[1,2,5]

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 Key Laboratory of Ecological Geology and Disaster Prevention, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives**: On 18 December 2023, an Mw 6.0 earthquake struck Jishishan county (Gansu, China). It is the largest earthquake ever recorded in the Lajishan fault zone at the northeastern margin of the Tibetan Plateau since modern seismicity has been recorded and is of great importance to determine seismogenic

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)。

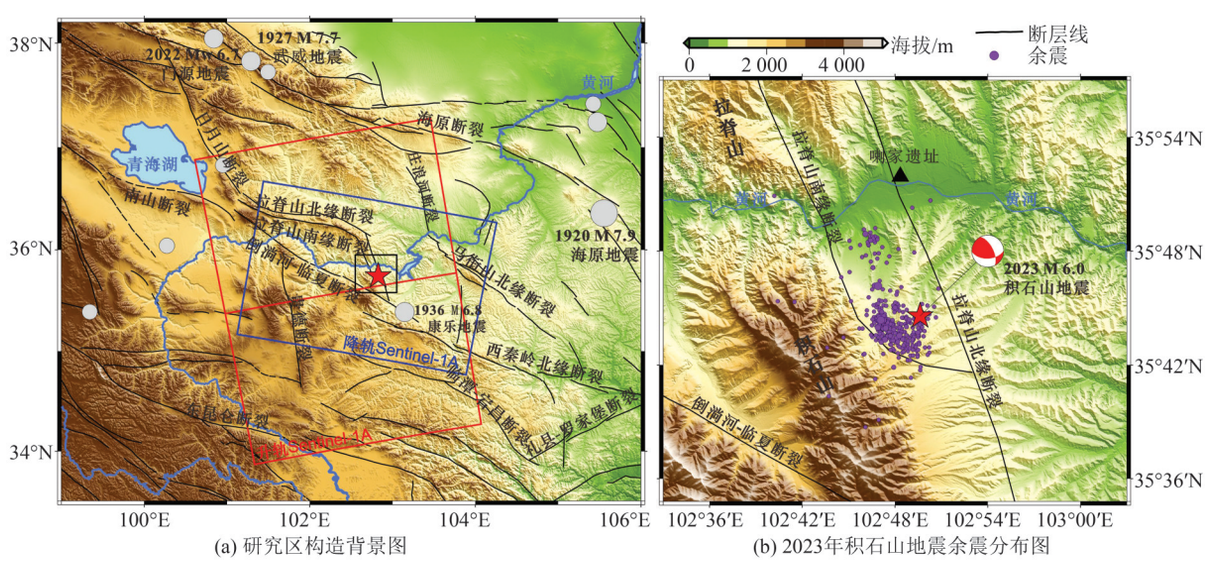
共同第一作者:刘振江,博士生,主要从事InSAR形变测量与地震周期分析研究。zhenjiang.liu@chd.edu.cn
韩炳权,博士生,主要从事地震构造形变监测与建模研究。bingquan.han@chd.edu.cn

通信作者:李振洪,博士,教授。zhenhong.li@chd.edu.cn

fault geometry and refined slip distribution for assessing future seismic hazards in the Lajishan fault zone region. **Methods**: We used Sentinel-1A synthetic aperture radar (SAR) images to acquire coseismic surface deformation and used them as a constraint to invert the fault geometry and refined slip distribution, and analysed the regional seismic risk based on the static Coulomb failure stress change. **Results**: The interferometric SAR results show that the coseismic displacements were dominated by uplift deformation for both ascending and descending tracks, with the maximum line-of-sight (LOS) uplift deformation about 6.5 cm for ascending track, and about 7.2 cm for descending track. Source mode-ling results show that the coseismic surface displacements of this event can be explained well using either east- or west-dipping fault geometry. **Conclusions**: Based on aftershock and coseismic landslide distributions, we prefer to the east-dipping fault model as the seismogenic fault of the event, i.e. this earthquake occurred on a NNW-trending, east-dipping, blind thrut fault. Stress loading in the region indicates that future attention should be paid in: (1) the entire section of the South Laji Mountain fault; (2) the NWW-trending segments of the North Laji Mountain fault and its NNW-trending segments south of the epicentre; (3) the segments east of the epicentre of the northern margin of western Qinling fault and Daotanghe-Linxia fault.

Key words: 2023 Jishishan earthquake; interferometric synthetic aperture radar (InSAR); coseismic surface displacements; slip distribution; Coulomb failure stress change

据中国地震台网中心发布，北京时间 2023-12-18T23:59:30，中国甘肃省临夏回族自治州积石山县（35.70°N，102.79°E）发生 Mw 6.0 地震，震源深度为 10 km，地震最大烈度达到Ⅷ度。本次地震罕见地发生在甘肃省人口较为稠密的地区，相比甘肃全省人口密度的 58.7 人/km^2，积石山县的人口密度为 263 人/km^2。截至 2023-12-22 8 时，地震已造成甘肃省 117 人遇难、青海省 31 人遇难（https://tv.cctv.com/2023/12/22/VIDExGUuoiSYMozQ7n4xInNz231222.shtml?spm=C52507945305.P1Tyk9aHor GZ .0.0），成为甘肃省继 2013 年定西 Mw 6.1 地震以来遭遇的最为严重的一次地震[1]。截至 2023-12-20 7 时，共获取 355 次余震精定位结果，其中 3.0 级以上余震 9 次，初期余震结果显示主要呈 NNW 向分布，震源深度集中在 6～15 km（数据源自中国地震局地球物理研究所房立华研究员课题组，图 1(b)）。地震发生后，国内外不同机构或者个人采用不同的方法和数据对本次地震的震源机制和破裂分布进行了研究，一致认为本次地震是一次典型的逆冲型事件，但就发震断层几何是东倾还是西倾尚存在较大争议，详细信息见表 1。



(a) 研究区构造背景图　　(b) 2023年积石山地震余震分布图

图 1　2023 年积石山地震区域构造背景图

Fig. 1　Regional Tectonic Setting Map of the 2023 Jishishan Earthquake

本次地震发生在青藏高原东北缘的拉脊山断裂带。拉脊山是祁连山南部的支脉，也是青藏高原主体部分与黄土高原之间的地貌分界线，向北与右旋走滑的日月山断裂相接，向南与左旋走

表1 2023年Mw 6.0积石山地震震源参数

Table 1 Source Parameters for the 2023 Mw 6.0 Jishishan Earthquake

研究来源	震中位置			震源机制			长度	宽度	矩震级
	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	/km	/km	(Mw)
USGS	102.83	35.74	10.0	333	62	88	—	—	5.9
				156	28	93			
GCMT	102.81	35.83	18.9	303	52	62	—	—	6.1
				164	46	122			
GFZ	102.81	35.74	18.0	331	52	98	—	—	6.0
				137	38	79			
张喆等[e]	102.79	35.68	10.0	307	50	71	—	—	6.0
				155	44	111			
王卫民等[f]	—	—	10.4	298	61	62	45	33	6.1
				165	39	117			
本文研究	102.75	35.76	7.3	319	43	104	14	8	6.1[a]
	102.79	35.76	9.3	319	42	—	25	15	6.0[b]
	102.81	35.77	6.7	143	38	104	15	10	6.1[c]
	102.80	35.73	9.2	143	37	—	22	15	6.0[d]

注:USGS(United States Geological Survey):美国地质调查局;GCMT(Global Centroid Moment Tensor):全球矩心矩张量;GFZ(Helmholtz Centre for Geosciences):德国地学研究中心;上标a表示东倾模型的均匀滑动模拟;b表示东倾模型的分布式滑动模拟;c表示西倾模型的均匀滑动模拟;d表示西倾模型的分布式滑动模拟;e参见https://www.cea-igp.ac.cn/cxdt/280419.html;f参见http://www.itpcas.cas.cn/new_kycg/new_kyjz/202312/t20231219_6945583.html。

滑的西秦岭北缘断裂相连[2]。据相关研究,历史上在拉脊山南北两侧发生了20余次5级左右的中等强度地震[3-4],但因年代久远,未有对这些中等强度地震的系统研究[3],导致目前对拉脊山断裂带上的发震构造知之甚少。鉴于2023年积石山地震是拉脊山断裂带自有现代地震记录以来的首次中强度地震事件,研究本次地震的发震机制对更好地理解拉脊山断裂带南段的断层系统的构造活动特征和理解青藏高原东北缘北东向扩展运动变形机制具有重要价值。

20世纪90年代初,文献[5]首次利用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术获取了美国Landers地震的同震形变场。自此以后,雷达干涉测量技术在同震形变场获取以及发震断层滑动研究中得到充分的发展和应用[6-16]。本文利用升、降轨Sentinel-1A卫星雷达观测资料为约束,基于弹性半空间的位错模型反演了发震断层几何参数和滑动分布,并基于静态库仑破裂准则评估了区域未来地震危险性,为未来区域性地震防灾减灾提供了量化的参考依据。

1 地质构造背景与地震危险性

受印度板块以~46 mm/a的速度持续向北与欧亚板块的挤压俯冲,青藏高原被不断抬升,成为世界上构造活动最剧烈的区域之一。高原内部与周边地震活动频繁[17-21]。全球定位系统速度场研究结果表明,青藏高原东北部的运动特征为NE向的侧向挤压和地壳缩短[22]。本次地震的孕震背景为青藏高原东北缘拉脊山断裂带,拉脊山断裂带的活动性质体现为向盆地内的挤压逆冲,具备发生中强以上地震的构造条件[2-3]。拉脊山断裂带由拉脊山南缘断裂和拉脊山北缘断裂两条向NE向凸出的弧形挤压逆冲断裂带构成,构造上可解释为NWW向左旋走滑的西秦岭北缘断裂与NNW向右旋走滑的日月山断裂之间的挤压构造变形[23-24]。文献[23]利用水准测量和全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测获取了拉脊山地区的三维地壳形变场,发现拉脊山断裂带受挤压环境控制下的构造变形现今仍在持续进行,西段的垂直运动速率约为1±0.5 mm/a,仍处于持续隆升中。最近的GNSS大地测量观测数据表明,拉脊山断裂黄河以北分段可能不活跃,而黄河以南的分段存在明显的右旋走滑和逆冲运动特征[4]。

据USGS地震目录,2023年积石山地震震中200 km范围发生过的6级以上中强震可追溯到1936年康乐地震[3, 25-26],震中300 km范围内的历史地震有1920年海原M 7.9地震[27]、1927年武威M 7.7地震和2022年门源Mw 6.7地震[10]。此外,据古地震学研究,本次地震震中以北的大河家地

区探槽结果揭露出其附近区域在距今约 3 700 年以来至少发生过两次中强古地震事件，这曾引起黄河阶地变形以及洪水灾害[24]。位于青海民和县官亭镇的喇家遗址就是最直接的证据，尽管其成因存在较大争议[28]，但本区域历史上曾发生过具有破坏性的强震活动是一个共识。此次积石山地震为还原喇家史前灾难发生的客观真实和评估拉脊山断裂带区域断层系统的未来地震危险性提供了重要机会。

2　同震形变场

2.1　InSAR 数据处理

本研究从欧洲空间局（https://dataspace.copernicus.eu/）下载了覆盖 2023 年积石山地震的 C 波段（波长～5.6 cm）Sentinel-1A 升、降轨卫星雷达影像进行差分干涉处理，获取本次地震的同震视线向（line of sight，LOS）地表位移场，影像的具体信息如表 2 所示，影像覆盖范围见图 1。使用 GAMMA 软件[29]进行数据处理，利用空间分辨率 30 m 的航天飞机雷达地形测绘任务（shuttle radar topography mission，SRTM）数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据去除地形效应的影响[30-31]。在数据处理过程中，为了提升信噪比，首先采用了距离向 8 和方位向 2 的多视因子进行多视处理，并采用 Goldstein 自适应滤波器进行干涉相位滤波[32]，然后使用最小费用流（minimum cost flow，MCF）算法[33]对缠绕相位进行解缠，恢复 LOS 向地表位移。在解缠过程中，将相干性低于 0.3 的像素点进行掩膜，以保证形变结果的可靠性。利用 DEM 估计并削弱了与地形相关的大气相位延迟，最后对干涉图进行地理编码，得到地理编码后的 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（T128）	2023-10-27	2023-12-26	63.94	60
降轨（T135）	2023-12-14	2023-12-26	−117.14	12

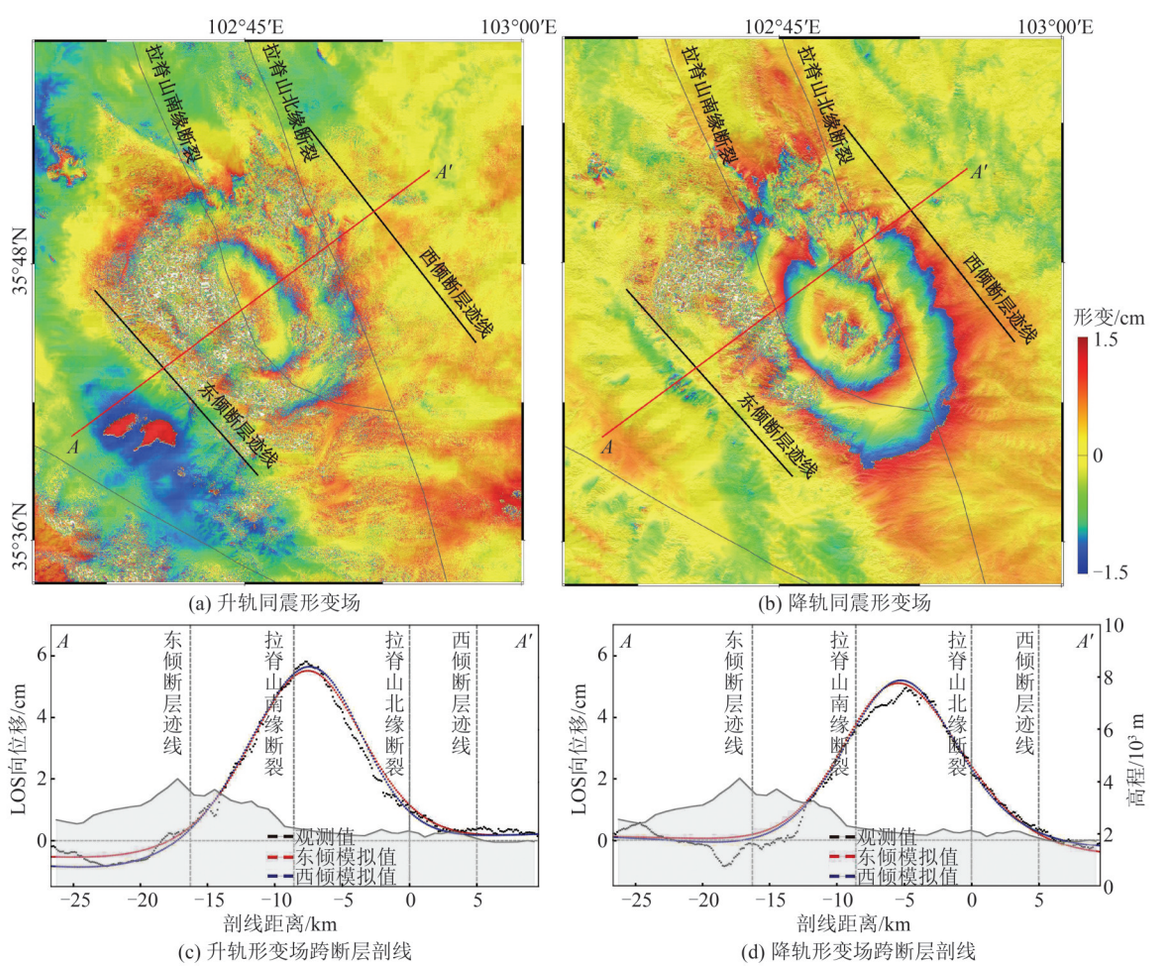


图 2　2023 年积石山地震同震地表形变场与地表形变剖线

Fig. 2　Coseismic Surface Displacement Maps and Profiles of the 2023 Jishishan Earthquake

2.2 同震形变特征分析

图2显示了从Sentinel-1A升、降轨干涉图中获得的2023年积石山地震同震视线向形变图,定义靠近卫星飞行方向为正、远离卫星飞行方向为负。升、降轨同震形变场一致地勾勒出一个朝向卫星运动为主的近似椭圆状形变区域,东西向跨度~18 km,南北向跨度~22 km,主要的同震形变场发生在拉脊山南缘断裂和拉脊山北缘断裂的中间地带。本次地震的升、降轨同震形变场均以抬升形变为主,没有观测到清晰明显的地表沉降信息,升轨最大LOS向位移~6.5 cm,降轨最大LOS向位移~7.2 cm,形变特征反映了2023年积石山地震具有逆断层性质,这与USGS等机构公布的震源机制解相吻合。

在InSAR形变场中选取跨断层的一条1 km宽度的剖线AA',并绘制其剖线图(图2(c)、2(d))。从形变剖线AA'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,升、降轨形变场跨断层的剖线与东倾、西倾对应的发震断层相交处的剖线连续光滑。

3 同震震源机制解译

本研究以升、降轨Sentinel-1A获取的同震形变场为约束,利用弹性半空间位错模型对2023年积石山地震的同震滑动模型进行反演,以期获取发震断层几何及其精细滑动分布。为了充分利用InSAR数据高空间分辨率带来的观测值空间相关性,提高反演的计算效率,同时降低远场噪声对反演结果的影响,在建模之前,使用四叉树降采样方法对InSAR获取的干涉结果进行降采样处理[34],升轨降采样后的数据点为1 204个,降轨降采样后的数据点为1 680个。

不同研究机构和个人给出的地震波反演的震源机制基本一致(表1),其P波初动节面表明,本次地震可能发生在一条NNW向的东倾逆冲断层,也有可能发生在一条SSE向的西倾逆冲断层。由于该次地震较浅且未破裂到地表,使用InSAR观测通常难以判断发震断层倾向。因此,本研究在建模时将USGS给出的两组节面分别作为参考进行东倾和西倾模型的反演测试。断层反演使用PSOKINV软件包[35],采用两步法步骤进行反演测试,具体原理已有众多学者进行相关阐述[36-37],本文不再赘述。

3.1 模型一:东倾发震断层

以USGS第一组节面(走向333°,倾角62°,滑动角88°)为参考,在反演时将断层走向、倾角和滑动角的搜索范围分别设置为[300°,360°]、[30°,90°]和[50°,150°]。基于InSAR形变场信息(图2),在反演时将断层的长和宽的搜索范围分别设置为[0,25] km和[0,15] km。利用优化的多峰值粒子群算法对发震断层几何进行非线性搜索,最终搜索得到的最优均匀滑动断层参数如表1所示。即在发震断层东倾的情况下,断层走向为319°,倾角为43°,滑动角为104°。

确定发震断层的几何参数后,继续进行分布式断层滑动模型反演,进而获取更为精细的断层滑动分布。为了防止可能出现的边界效应,将矩形断层面的长度(沿走向)和宽度(沿倾向)进行适当延长,即进一步将本次地震建立为20 km×15 km的矩形位错模型,并将其离散化为300个1 km×1 km的相同大小子断层。反演过程中固定了断层的走向和位置,设置每个子断层的滑动角在[50°,150°]范围内自由搜索。由于均匀滑动模型对断层倾角的敏感度相对较低,在分布式滑动反演过程中对倾角在[30°,55°]范围内再次进行搜索(搜索步长为1°),同时引入平滑因子以降低反演过程中不稳定因素的影响,平滑因子在[0.5,15]范围进行搜索(搜索步长为0.5)。最终在最优倾角(42°)和光滑因子(2.5)的约束下,得到东倾断层模型的断层面滑动分布。使用地震波反演的东倾断层节面倾角均在50°~60°左右,而本研究搜索得到的最优倾角为42°,与地震学方法得到的倾角相比略小(表1),可能归因于不同类型数据对于断层倾角的敏感性不同。图3展示了发震断层东倾时,2023年积石山地震的同震地表形变场、分布式滑动模型的正演形变场及残差图。从整体上看出,东倾断层模型可恢复出InSAR观测到的地表形变场,升轨和降轨的观测值与模拟值拟合度分别为93.3%和93.0%,对应残差的均方根分别为0.61 cm和0.62 cm。

3.2 模型二:西倾发震断层

以USGS第二组节面(走向156°,倾角28°,滑动角93°)为参考,在反演时将断层走向、倾角和滑动角的搜索范围分别设置为[120°,180°]、[15°,90°]和[60°,150°]。基于InSAR形变场信息(图2),在反演时将断层的长和宽的搜索范围分别设置为[0,25] km和[0,15] km。利用优化的多峰值粒子群算法对发震断层几何进行非线性搜索,最终搜索得到的最优均匀滑动断层参数如表1所示。即在发震断层西倾的情况下,断层走向为143°,倾角为38°,滑动角为104°。

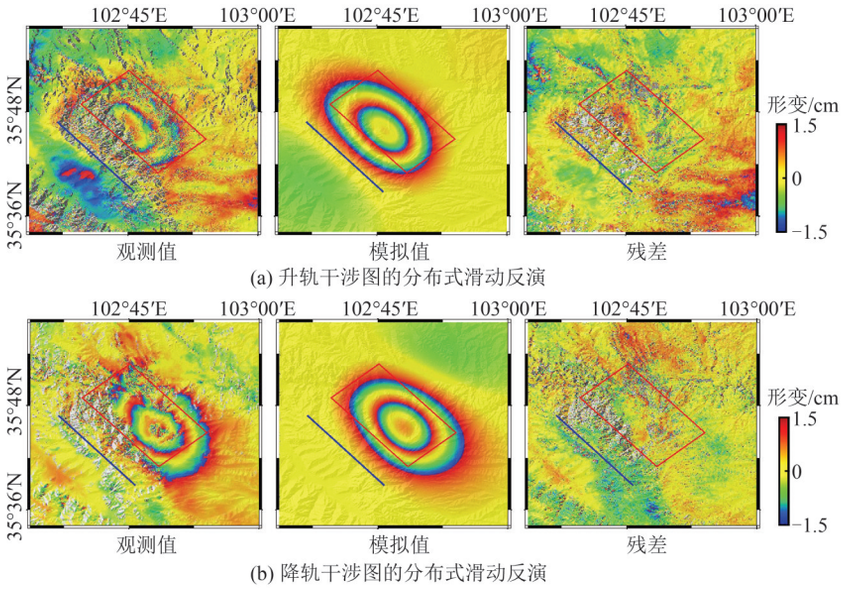


图 3　2023 年积石山地震东倾模型同震地表形变场观测值、模型值及残差

Fig. 3　Observed Coseismic Interferogram, Modeled Interferogram from the East-Dipping Model of the 2023 Jishishan Earthquake, and the Residuals After Subtracting the Modeled Interferogram from Observed Interferogram

同样地，在分布式滑动分布反演之前，对倾角在[25°,50°]范围内再次进行搜索(搜索步长为1°)，平滑因子在[0.5,15]范围进行搜索(搜索步长为0.5)。最终在最优倾角(37°)和光滑因子(2.5)的约束下，得到西倾断层模型的断层面滑动分布。反演得到的最优倾角与王卫民等利用远震波形资料反演的西倾截面的倾角具有较好的一致性，比 USGS 给出的倾角略高，比 GCMT 给出的倾角略低(表 1)，这可能归因于他们采用的不同数据源和反演策略。图 4 展示了发震断层西倾时，2023 年积石山地震的同震地表形变场、分布式滑动模型的正演形变场及残差图。从整体上看出，西倾断层模型亦可模拟出 InSAR 观测到的地表形变场，升轨和降轨的观测值与模拟值拟合度分别为 92.7% 和 93.3%，对应残差的均方根分别为 0.64 cm 和 0.61 cm。

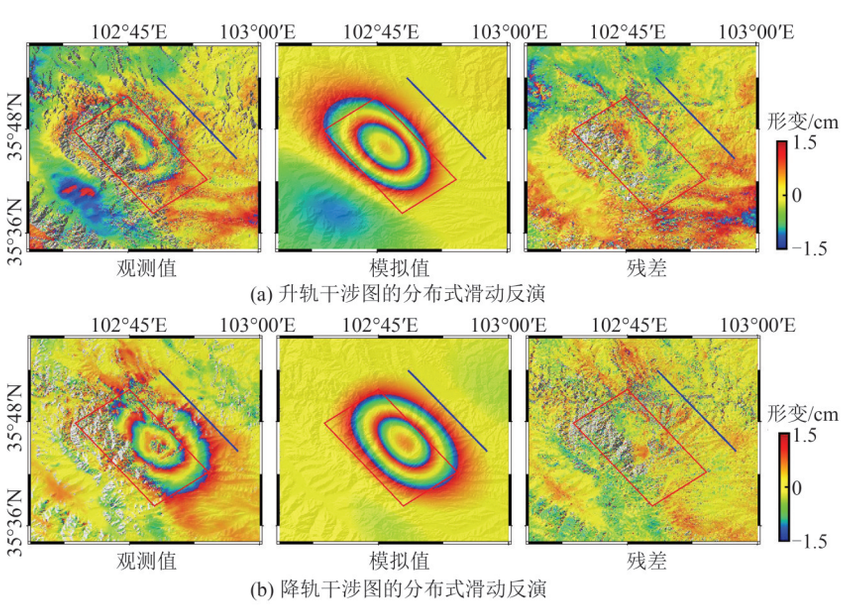


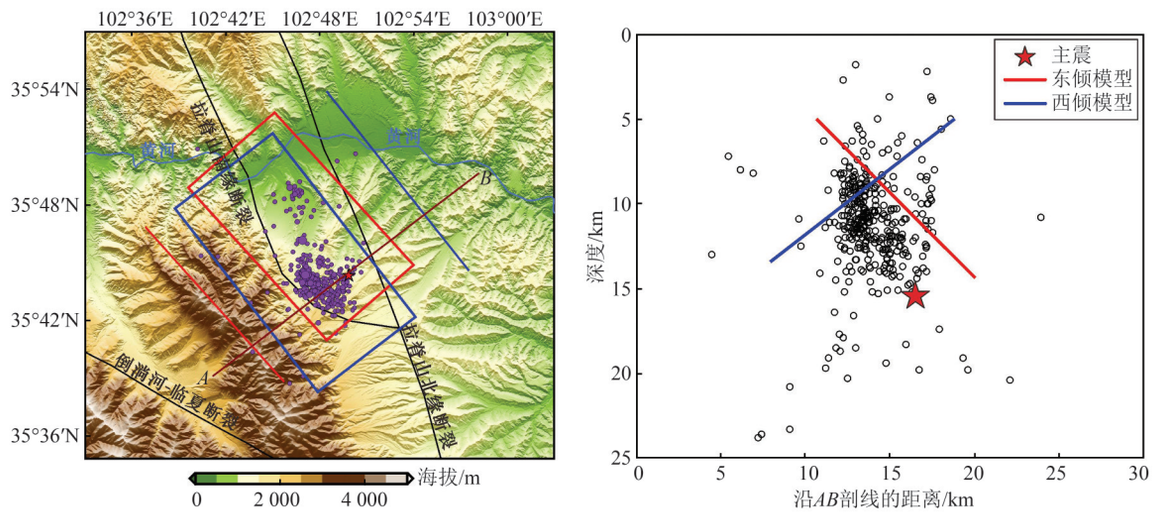
图 4　2023 年积石山地震西倾模型同震地表形变场观测值、模型值及残差

Fig. 4　Observed Coseismic Interferogram, Modeled Interferogram from the West-Dipping Model of the 2023 Jishishan Earthquake, and the Residuals After Subtracting the Modeled Interferogram from Observed Interferogram

3.3　发震构造讨论

从同震建模结果上看，两种断层几何均能较好地解释本次地震引起的地表形变，发震断层东倾或者西倾正演的结果均能再现 InSAR 观测的主要

形变特征（图2(c)、2(d)），相应残差的量级也与InSAR观测误差相当（图3、图4），很难通过InSAR建模直接唯一判定发震断层。为了进一步分析哪个断层模型更加合理，本研究利用余震精定位结果绘制了余震剖面，并将反演得到的东倾和西倾断层平面投影到余震剖面上，结果如图5所示。从余震剖面可以看出，相较于西倾断层模型的断层面切穿了集中分布的余震簇，而当断层面东倾时，余震簇主要集中于断层面的下盘一侧，这似乎更为合理。利用断层面与余震簇空间分布判断逆断层地震断层倾向的方法，在1998年张北地震[38]、2016年中亚的Sary-Tash地震[39]等研究中均有体现。



(a) 余震与断层模型分布　　(b) 垂直于断层模型的余震剖线

图5　2023年积石山地震余震空间分布

Fig. 5　Spatial Distribution of Aftershocks of the 2023 Jishishan Earthquake

通常情况下，强震会在陡峭的山区造成数以万计的滑坡，并且不同震源机制的地震触发的同震滑坡具有不同的分布规律[40-42]，对于逆冲断层，同震滑坡多集中于断层上盘[37, 43-44]，而走滑断层引发的滑坡往往在断层两侧呈对称分布[42]，该规律可作为判断断层倾向的间接证据。笔者团队在2023年积石山地震发生后第一时间利用多源的高分辨率光学遥感影像对震中附近区域的同震滑坡进行了详尽解译和识别，并通过野外实地考察验证了解译的可靠性，共编目同震滑坡3 767处[45]。为进一步验证哪个断层模型更加合理，本研究还绘制了同震滑坡分布图，并将反演得到的东倾和西倾断层面叠加在该图上（图6）。从图6中可以发现，反演得到的西倾断层东西两侧均分布着大量的同震滑坡，而对于东倾断层，滑坡主要集中于断层东侧，即东倾断层的上盘，这与前人研究总结的逆冲断层的同震滑坡上盘效应相吻合。

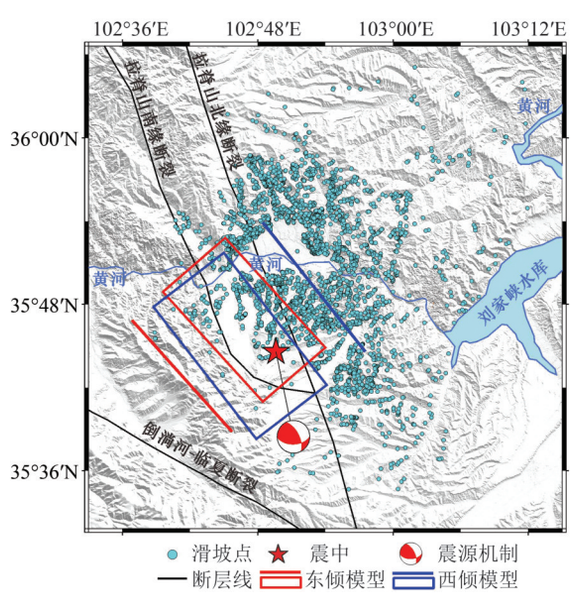


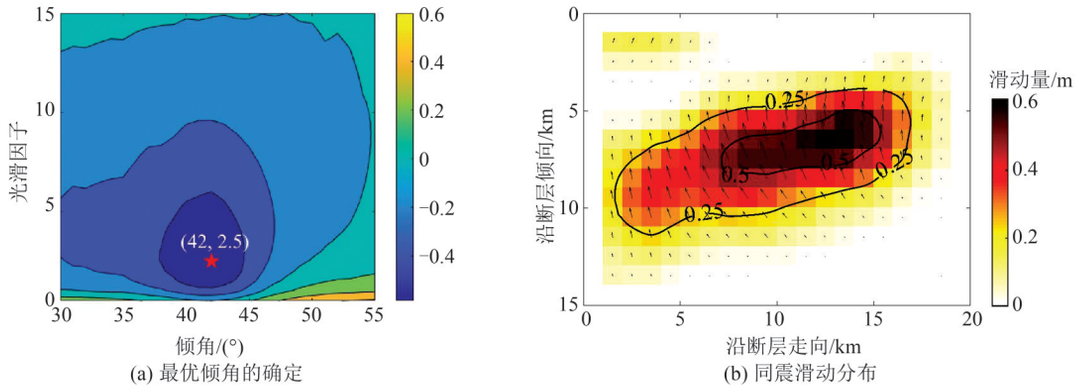
图6　2023年积石山地震同震滑坡分布

Fig. 6　Distribution of Coseismic Landslides of the 2023 Jishishan Earthquake

综合InSAR反演结果以及余震和同震滑坡的空间分布，本研究倾向于认为发震断层东倾更为合理。

3.4　同震滑动特征

基于上述分析，2023年积石山Mw 6.0地震发生在一条NNW走向（走向319°）的东倾逆冲断层几何上（倾角42°，滑动角104°）。同震滑动分布模型如图7所示，注意图7(b)中的二维滑动分布模型从5 km深度处开始计算。从同震滑动分布可以看出，本次地震是一次兼具少量右旋走滑分量的逆冲事件，同震滑动未破裂至地表。主要滑动集中在7～12 km深度范围，最大滑动量为0.6 m，发生在位于距离地表9.3 km的深度，释放地震矩1.29×10^{18} N·m，相当于一次Mw 6.0地震，与USGS、GCMT等机构的结果基本一致。



(a) 最优倾角的确定　　(b) 同震滑动分布

图 7　2023 年积石山地震同震滑动分布

Fig. 7　Coseismic Slip Distribution of the 2023 Jishishan Earthquake

4　区域地震危险性评估

库仑应力通常被用来作为判断断层在不同应力扰动作用下是否破裂的定量判断准则[46]。在地震大地测量研究中，库仑应力被广泛地应用于强震与其余震的触发关系以及评估区域地震危险性等研究[47-49]。2023 年积石山地震发生后，快速获取本次地震的库仑应力变化（Coulomb failure stress change，ΔCFS）有助于评估区域的未来地震危险性。

以本研究确定的东倾断层滑动分布模型作为源断层，以本次地震的发震断层几何作为接收断层，利用 Toda 等[50]开发的 Coulomb 3.3 软件计算 2023 年积石山地震同震破裂对区域的静态库仑应力扰动，进而评估区域未来地震危险性。考虑到本次地震矩心深度以及余震深度，本研究计算了 10 km 深度处的静态 ΔCFS。在计算中，有效摩擦系数设定为 0.4，泊松比为 0.25[50-51]。

图 8 为 2023 年积石山地震引起的周边区域的 ΔCFS，从本次地震对周边区域应力影响态势上看，沿发震断层走向两端区域 ΔCFS 呈正值，而垂直于发震断层走向一定距离区域呈现负值。由于本次地震的震级较小，主震所产生的 ΔCFS 主要集中在震中附近，在超过震中 40 km 范围后迅速衰减。从库仑应力变化分布上看，拉脊山南缘断裂整段、拉脊山北缘断裂的 NWW 走向分段及其 NNW 走向震中以南分段、西秦岭北缘断裂以及倒淌河-临夏断裂的震中以东分段都处于应力加载状态，其 ΔCFS 值均大于 0，最大的 ΔCFS 达到 7.46 bar，位于拉脊山南缘断裂与断层面西北侧边缘交接位置。由于库仑应力处于明显的加载状态，将预示着地震潜在的危险性增强，上述断裂未来需要被重点关注。

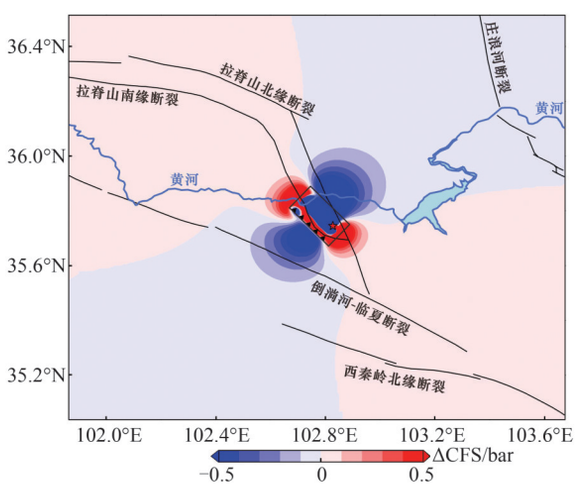


图 8　2023 年积石山地震引起邻近区域 10 km 深度的静态库仑应力变化

Fig. 8　Static ΔCFS at 10 km Depth in Neighboring Regions Induced by the 2023 Jishishan Earthquake

5　结　语

本研究利用 Sentinel-1A 数据获取了 2023 年积石山地震的同震地表位移场，并以此为约束基于弹性半空间矩形位错模型反演了发震断层几何结构和滑动分布。基于库仑应力计算结果，讨论了震中周边断层未来的地震危险性。研究得到的主要认识如下：

1）2023 年积石山地震的升、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 18 km×22 km。其中升轨最大 LOS 向位移～6.5 cm，降轨最大 LOS 向位移～7.2 cm。

2）结合余震和同震滑坡空间分布，本研究更倾向于认为发震断层为东倾。使用东倾断层能较好地解释该次地震引起的地表形变。建模表明，断层走向沿 NNW 方向（走向为 319°，倾角为 42°）；最大滑动量为 0.6 m，发生在位于距离地表

9.3 km的深度,同震滑动释放的地震矩为1.29×10^{18} N·m,相当于矩震级Mw 6.0。

3)根据静态库仑应力变化分析,本次地震的发生增加了拉脊山南缘断裂、拉脊山北缘断裂的NWW走向分段及其NNW走向震中以南分段、西秦岭北缘断裂以及倒淌河-临夏断裂的震中以东分段的地震风险,未来需要被重点关注。

致谢:感谢欧洲空间局提供的Sentinel-1A雷达影像数据;余震定位数据来源于中国地震局地球物理研究所房立华研究员课题组;本文中绝大部分图件采用GMT绘制[52]。

参 考 文 献

[1] 刘成利,郑勇,谢祖军,等. 2013年7月22日甘肃定西地震的震源破裂过程[J]. 地球物理学进展,2015,30(1):99-105.
LIU Chengli, ZHENG Yong, XIE Zujun, et al. Rupture Process of the Gansu Dingxi Earthquake on July 22, 2013[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(1): 99-105.

[2] 袁道阳,张培震,雷中生,等. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究[J]. 中国地震,2005,21(1):93-102.
YUAN Daoyang, ZHANG Peizhen, LEI Zhongsheng, et al. A Preliminary Study on the New Activity Features of the Lajishan Mountain Fault Zone in Qinghai Province [J]. *Earthquake Research in China*, 2005, 21(1): 93-102.

[3] 张波. 西秦岭北缘断裂西段与拉脊山断裂新活动特征研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所,2012.
ZHANG Bo. The Study of New Activities on Western Segment of Northern Margin of Western Qinling Fault and Lajishan Fault[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2012.

[4] ZHUANG W Q, CUI D X, HAO M, et al. Geodetic Constraints on Contemporary Three-Dimensional Crustal Deformation in the Laji Shan - Jishi Shan Tectonic Belt[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2023, 14(6): 589-596.

[5] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364: 138-142.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] HAN B Q, YANG C S, LI Z H, et al. Coseismic and Postseismic Deformation of the 2016 Mw 6.0 Petermann Ranges Earthquake from Satellite Radar Observations [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(1): 376-385.

[10] 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.

[11] 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):1678-86.
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.

[12] 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. Discussion of the Seismogenic Fault of the 2023 Herat Earthquake Sequence and Its Building Damage Assessment Constrained by Radar Interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 722-733.

[13] 杨九元,温扬茂,许才军. 2021年5月21日云南漾濞Ms 6.4地震:一次破裂在隐伏断层上的浅源走滑事件[J]. 地球物理学报,2021,64(9):3101-3110.
YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. The 21 May 2021 Ms 6.4 Yangbi (Yunnan) Earthquake: A Shallow Strike-Slip Event Rupturing in a

Blind Fault [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 3101-3110.

[14] 冯楚豪，严月天，冯万鹏，等. 利用 InSAR 观测揭示 2020 年新疆于田 Mw 6.3 地震发震构造及对藏北裂谷生长的启示[J]. 地球物理学报，2022，65(8)：2844-2856.
FENG Chuhao, YAN Yuetian, FENG Wanpeng, et al. Seismogenic Fault of the 2020 Mw 6.3 Yutian, Xinjiang Earthquake Revealed from InSAR Observations and Its Implications for the Growth of the Rift in the North Tibet[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(8): 2844-2856.

[15] 许光煜，徐锡伟，易亚宁，等. 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，2022，65(12)：4704-4724.
XU Guangyu, XU Xiwei, YI Yaning, et al. Seismogenic Structure of the 2022 Menyuan Mw 6.6 Earthquake, Qinghai Province, Constrained by InSAR and Gaofen-7 Observation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(12): 4704-4724.

[16] 赵磊，许文斌，方楠，等. 2021 年青海玛多 Mw 7.3 地震同震和早期震后断层滑动模型及发震构造摩擦属性[J]. 地球物理学报，2023，66(3)：1086-1097.
ZHAO Lei, XU Wenbin, FANG Nan, et al. Coseismic and Early Postseismic Fault Slip Model and the Seismogenic Fault Friction Properties of the 2021 Qinghai Madoi Mw 7.3 Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(3): 1086-1097.

[17] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294(5547): 1671-1677.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 王锦涵，石许华，陈汉林，等. “V”型共轭走滑断裂：特征、形成机制及其对青藏高原东南缘晚新生代变形的启示[J]. 地球科学，2023，48(4)：1421-1440.
WANG Jinhan, SHI Xuhua, CHEN Hanlin, et al. V-Shaped Conjugate Strike-Slip Faults: Characteristics, Formation Mechanisms and Implications for the Late Cenozoic Deformation in the Southeastern Tibetan Plateau[J]. *Earth Science*, 2023, 48(4): 1421-1440.

[21] 彭建兵，张永双，黄达，等. 青藏高原构造变形圈-岩体松动圈-地表冻融圈-工程扰动圈互馈灾害效应[J]. 地球科学，2023，48(8)：3099-3114.
PENG Jianbing, ZHANG Yongshuang, HUANG Da, et al. Interaction Disaster Effects of the Tectonic Deformation Sphere, Rock Mass Loosening Sphere, Surface Freeze-Thaw Sphere and Engineering Disturbance Sphere on the Tibetan Plateau[J]. *Earth Science*, 2023, 48(8): 3099-3114.

[22] WANG M, SHEN Z K. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and Its Tectonic Implications[J]. *Journal of Geophysical Research* (*Solid Earth*), 2020, 125(2): e2019JB018774.

[23] 周琳，王庆良，李长军，等. 基于 GPS 和水准资料的拉脊山断裂带西段地壳形变研究[J]. 大地测量与地球动力学，2016，36(12)：1056-1059.
ZHOU Lin, WANG Qingliang, LI Zhangjun; , et al. The Study of Crustal Deformation on Western End of Lajishan Fault Based on GPS and Leveling Data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(12): 1056-1059.

[24] 李智敏，李延京，田勤俭，等. 拉脊山断裂古地震与喇家遗址灾变事件关系研究[J]. 地震研究，2014，37(S1)：109-115.
LI Zhimin, LI Yanjing, TIAN Qinjian, et al. Study on the Relationship Between the Ancient Earthquake of Lajishan Fault and the Catastrophic Event of Lajia Site[J]. *Journal of Seismological Research*, 2014, 37(S1): 109-115.

[25] 袁道阳. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[D]. 北京：中国地震局地质研究所，2003.
YUAN Daoyang. Tectonic Deformation Features and Space-Time Evolution in Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau Since the Late Cenozoic Time[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2003.

[26] 张波，何文贵，方良好，等. 1936 年甘肃康乐 6($\frac{3}{4}$)级地震地表破裂带调查[J]. 地震研究，2015，38(2)：262-271.
ZHANG Bo, HE Wengui, FANG Lianghao, et al. Surveys on Surface Rupture Phenomena of Gansu Kangle M 6($\frac{3}{4}$) Earthquake in 1936[J]. *Journal of Seismological Research*, 2015, 38(2): 262-271.

[27] REN Z K, ZHANG Z Q, CHEN T, et al. Clustering of Offsets on the Haiyuan Fault and Their Relationship to Paleoearthquakes[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2016, 128(1): 3 - 18.

[28] 吴庆龙,张培震,张会平,等. 黄河上游积石峡古地震堰塞溃决事件与喇家遗址异常古洪水灾害[J]. 中国科学:地球科学,2009,39(8):1148-1159.
WU Qinglong, ZHANG Peizhen, ZHANG Huiping, et al. Weir Dam Break of Jishixia Ancient Earthquake in the Upper Reaches of the Yellow River and Abnormal Ancient Flood Disaster in Lajia Site[J]. *Science in China Earth Sciences*, 2009, 39(8): 1148-1159.

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

[30] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 1-33.

[31] 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): 1-12.

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

[33] 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, Optics, Image Science, and Vision*, 2000, 17(3): 401-414.

[34] 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.

[35] 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.

[36] FUKAHATA Y, WRIGHT T J. A Non-Linear Geodetic Data Inversion Using ABIC for Slip Distribution on a Fault with an Unknown Dip Angle[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 173(2): 353-364.

[37] 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.

[38] LI Z H, FENG W P, XU Z H, et al. The 1998 Mw 5.7 Zhangbei-Shangyi (China) Earthquake Revisited: A Buried Thrust Fault Revealed with Interferometric Synthetic Aperture Radar[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(4): Q04026.

[39] BLOCH W, METZGER S, SCHURR B, et al. The 2015—2017 Pamir Earthquake Sequence: Foreshocks, Main Shocks and Aftershocks, Seismotectonics, Fault Interaction and Fluid Processes[J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 233(1): 641-662.

[40] FAN X M, SCARINGI G, KORUP O, et al. Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421-503.

[41] MEUNIER P, UCHIDA T, HOVIUS N. Landslide Patterns Reveal the Sources of Large Earthquakes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 363: 27-33.

[42] GORUM T, CARRANZA E J M. Control of Style-of-Faulting on Spatial Pattern of Earthquake-Triggered Landslides[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(10): 3189-3212.

[43] 许冲,徐锡伟,沈玲玲,等. 2014年鲁甸Ms 6.5地震触发滑坡编录及其对一些地震参数的指示[J]. 地震地质,2014,36(4):1186-1203.
XU Chong, XU Xiwei, SHEN Lingling, et al. Inventory of Landslides Triggered by the 2014 Ms 6.5 Ludian Earthquake and Its Implications on Several Earthquake Parameters[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(4): 1186-1203.

[44] SATO H P, HASEGAWA H, FUJIWARA S, et al. Interpretation of Landslide Distribution Triggered by the 2005 Northern Pakistan Earthquake Using SPOT 5 Imagery[J]. *Landslides*, 2007, 4(2): 113-122.

[45] 陈博,宋闯,陈毅,等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024. DOI: 10.13203/j.whugis20230497.
CHEN Bo, SONG Chuang, CHEN Yi, et al. Emergency Identification and Influencing Factor Analysis of Coseismic Landslides and Building Damages induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earth-

quake. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j. whugis 20230497.

[46] 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.

[47] 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.

[48] 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.

[49] 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.

[50] 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(5): 1-17.

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

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