引文格式:杨九元,温扬茂,许才军.InSAR观测揭示的2023年甘肃积石山Ms 6.2地震发震构造[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):313-321.DOI:10.13203/j.whugis20230501

Citation:YANG Jiuyuan,WEN Yangmao,XU Caijun.Seismogenic Fault Structure of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu,China) Earthquake Revealed by InSAR Observations[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(2):313-321.DOI:10.13203/j.whugis20230501

InSAR观测揭示的2023年甘肃积石山Ms 6.2地震发震构造

杨九元[1,2] 温扬茂[2,3] 许才军[2,3]

1 华北水利水电大学测绘与地理信息学院,河南 郑州,450046

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

3 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

摘 要:2023-12-18,中国甘肃省临夏回族自治州积石山县发生了Ms 6.2地震。作为该区域自地震观测记录以来发生的最大地震,此次事件为深入理解区域发震构造及破裂行为提供了宝贵的机会。利用哨兵1A卫星的合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)数据提取了此次地震的同震地表形变,并调查了该地震的发震断层结构。大地测量反演结果显示:西南倾和东北倾发震断层模型均能较好地拟合同震InSAR观测数据。通过对余震序列、区域断层构造特性和同震干涉图的综合分析,认为此次地震破裂在东北倾的发震断层上,可能为拉脊山南缘断裂的一个隐伏分支断层。同震库仑应力变化表明,拉脊山北缘断裂东分支断层中段、拉脊山南缘断裂东分支断层南段和西秦岭北缘断裂西段具有较高的地震危险性。

关键词:青藏高原东北缘;积石山地震;InSAR;库仑应力变化

中图分类号:P227 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-02

DOI:10.13203/j.whugis20230501 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0313-09

Seismogenic Fault Structure of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Revealed by InSAR Observations

YANG Jiuyuan[1,2] *WEN Yangmao*[2,3] *XU Caijun*[2,3]

1 College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

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

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

Abstract: **Objectives**: On December 18, 2023, an Ms 6.2 earthquake struck the Jishishan County, Gansu Province, China. As the largest earthquake to hit this region since seismic record, the 2023 Jishishan earthquake provides an opportunity to improve our understanding of the seismogenic structure and rupture behavior of the regional active fault. **Methods**: We utilize Sentinel-1A interferometric synthetic aperture radar (InSAR) data to extract the coseismic surface deformation associated with this earthquake and investigate the seismogenic fault structure. **Results and Conclusions**: Geodetic inversion result shows that both the SW-dipping and NE-dipping fault models can fit the coseismic InSAR observations better. By a joint analysis of the aftershocks, regional fault kinematics and coseismic interferograms, we infer that the 2023 Jishishan earthquake ruptured the NE-dipping seismogenic fault, which may be a buried branch fault belonging to the south Laji Mountain fault. Coseismic Coulomb stress changes indicate a high seismic risk at the middle segment of the eastern branch fault of the north Laji Mountain fault, the southern segment of the eastern branch fault of the south Laji Mountain fault and the western segment of the northern margin of the western Qinling fault.

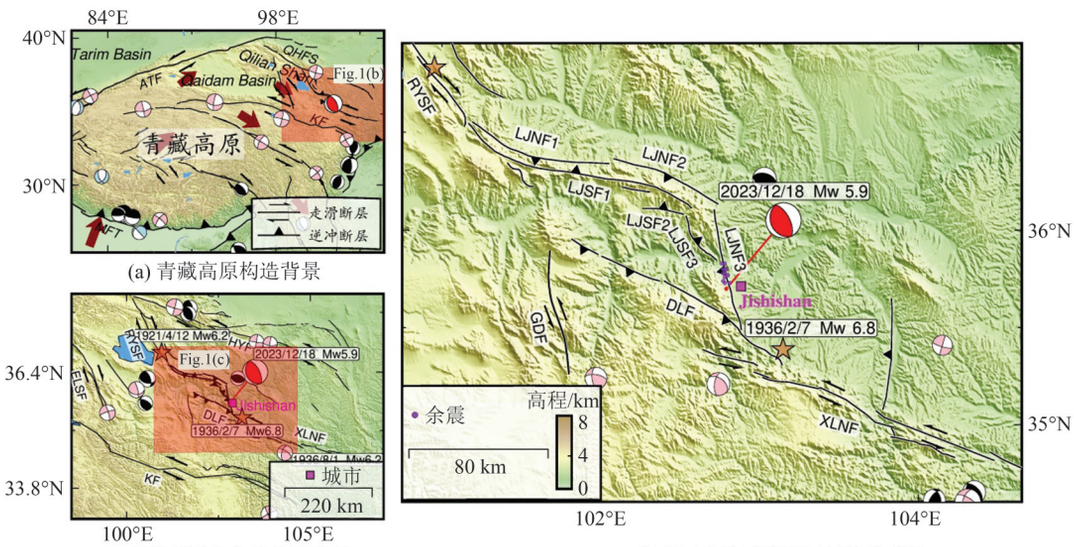
Key words: northeastern Tibetan Plateau; Jishishan earthquake; InSAR; Coulomb stress change

基金项目:国家自然科学基金(42374003,42304007);中央高校基本科研业务费专项资金(2042023kf1035);河南省科技攻关项目(232102320068)。

第一作者:杨九元,博士,讲师,主要从事大地测量反演与构造形变研究。jyyang@whu.edu.cn

通信作者:温扬茂,博士,教授。ymwen@sgg.whu.edu.cn

作为青藏高原向内陆北向延伸的主要边界带,青藏高原东北缘受印度板块与欧亚板块持续碰撞的影响,经历着重要的剪切形变及地壳缩短与增厚,形成了一系列重要的走滑和逆冲断裂带,如海原断裂带、西秦岭北缘断裂带、祁连山褶皱带和拉脊山逆冲断裂带[1-2](图1(a))。作为右旋走滑的日月山断裂与左旋走滑的西秦岭北缘断裂之间的构造转换带,拉脊山断裂带由长约220 km的拉脊山南缘断裂和长约230 km的拉脊山北缘断裂两条向东北凸出的弧形逆冲构造组成[3](图1(a)、1(b))。该断裂带由数条不同规模的次级断裂构成(图1(b)),构造活动强烈,据记载,历史上曾发生约20次5级左右的中等强度地震[3]。但由于地震发生年代较远,历史资料记录较为简单,该区域地下发震构造仍需进一步探究。



注:红色透明区域代表局部构造背景图;MFT:喜马拉雅主前缘逆冲带;ATF:阿尔金断裂;QHFS:祁连海原断裂系统;KF:东昆仑断裂;RYSF:日月山断裂;ELSF:鄂拉山断裂;HYF:海原断裂;XLNF:西秦岭北缘断裂;LJNF:拉脊山北缘断裂;LJSF:拉脊山南缘断裂;GDF:贵德断裂;Jishishan:积石山县;紫色小圆为来自中国地震台网中心震后4天的余震序列;黑、浅蓝和粉色沙滩球分别为来自全球质心矩张量的历史逆冲、正断和走滑地震的震源机制解。

图1 青藏高原及其东北缘和2023年积石山地震附近区域构造背景

Fig. 1 Tectonic Setting of the Tibetan Plateau and Its Northeast Margin, and the 2023 Jishishan Earthquake

据中国地震台网中心(China earthquake networks center, CENC)报道,2023-12-18T23:59:30,中国甘肃省临夏回族自治州积石山县发生了一次Ms 6.2浅源地震,震中深度10 km。此次地震震中位于青藏高原东北缘拉脊山北缘断裂带附近,距积石山县约8 km(图1(c))。作为自地震记录以来拉脊山断裂带附近发生的最大地震,此次地震造成了148人死亡、979人受伤、3人失踪,房屋、道路、农田及电力通信基础设施受损,并引发了严重的次生灾害,如砂土液化、泥石流、滑坡、地裂缝[4-6]。震后4天内共发生12次Ms>3.0余震,均分布于主震北端,且整体呈近西北-东南向线性展布(图1(c)),暗示主震可能发生在一个西北偏北或东南偏南走向的发震断层。依据美国哈佛大学全球质心矩张量(global centroid-moment-tensor, GCMT)和美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)公布的震源机制解(表1),此次积石山地震可能破裂在一个西北偏北走向的高角度逆冲断层或东南偏南走向的低倾角逆冲断层上,与余震序列总体的空间分布基本一致。此次地震为利用卫星大地测量数据深入研究拉脊山断裂带区域地下发震断层结构及破裂行为提供了重要机会。

本文首先利用哨兵1A卫星的升、降轨影像数据获取了2023年Ms 6.2积石山地震的高精度同震形变;然后,基于均匀弹性半空间矩形位错理论研究了此次地震的同震破裂行为,并综合考虑余震序列、区域构造特性和同震干涉图特征分析了此次地震的发震断层倾向及其地下发震构造;最后,计算了附近活动断层上库仑应力的变化,以评估区域潜在地震的危险性。

1 InSAR数据处理

作为自地震记录以来在拉脊山断裂带附近发生的最大地震,提取2023年Ms 6.2积石山地震的高精度同震形变场对深入理解区域发震断层地下结构及其破裂行为具有重要意义。基于

表 1　2023 年 Ms 6.2 积石山地震震源参数

Table 1　Source Parameters of the 2023 Ms 6. 2 Jishishan Earthquake

研究来源	经度/(°)	纬度/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	深度/km	震级
USGS	102.827	35.743	333/156	62/28	88/93	10	Mw 5.9
GCMT	102.81	35.83	303/164	52/46	62/122	18.9	Mw 6.1
CENC	102.79	35.70				10	Ms 6.2
模型 1	$102.92^{+0.24\ km}_{-0.24\ km}$	$35.82^{+0.26\ km}_{-0.26\ km}$	$148.9^{+1.5}_{-1.5}$	$33.6^{+1.5}_{-1.5}$	$116.4^{+3.1}_{-3.1}$	$8.2^{+0.2}_{-0.2}$	Mw 6.1
模型 2	$102.73^{+0.27\ km}_{-0.27\ km}$	$35.71^{+0.27\ km}_{-0.27\ km}$	$311.0^{+1.7}_{-1.7}$	$53.8^{+2.4}_{-2.4}$	$79.6^{+3.8}_{-3.8}$	$6.6^{+0.3}_{-0.3}$	Mw 6.1

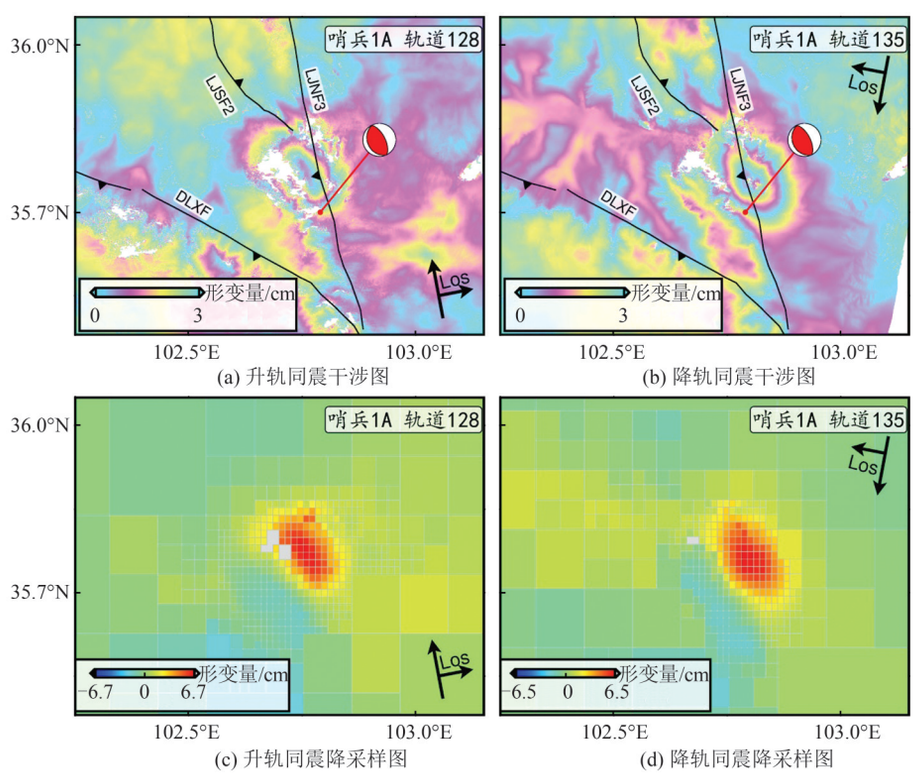
注：均匀滑动模型中深度指破裂断层面上边界中点至地表的深度；模型 1 代表西南倾断层模型，模型 2 代表东北倾断层模型。

GAMMA 商业软件[7]，利用二轨法获取了覆盖此次地震的升、降轨同震视线向(line of sight，LOS)形变(表 2、图 2)。为最大程度地抑制噪声，将哨兵 1A 卫星的方位向与距离向的多视比设为 4∶20，并采用高精度精密轨道数据进行轨道改正。此外，利用 30 m 空间分辨率的数字高程模型剔除了地形相位的影响，并采用多功率频谱滤波方法对同震干涉图进行滤波[8]。使用枝切法解缠同震干涉图[9]，且对同震干涉图进行地理编码，并使其纳入 WGS84 坐标系框架。另外，利用远离同震非主形变区域的观测数据估计一个关于高程、位置和误差相位的线性函数，以进一步剔除残余的轨道残差及地形相关的大气延迟[10]。

表 2　生成同震干涉图的合成孔径雷达数据信息

Table 2　Information of Synthetic Aperture Radar Data Applied for Coseismic Interferograms

卫星	轨道	参考日期	重复日期	垂直基线/m	入射角/(°)	方位角/(°)
哨兵 1A	升轨 128	2023-10-27	2023-12-26	64	41.5	−9.9
哨兵 1A	降轨 135	2023-12-14	2023-12-26	−117	39.4	−169.9



注：图中黑色长箭头代表卫星飞行方向，黑色短箭头代表雷达成像方向；红沙滩球代表来自 USGS 的 2023 年积石山地震震源机制解。

图 2　2023 年积石山地震升、降轨同震干涉图及其对应的降采样图

Fig. 2　Ascending and Descending Coseismic Interferograms and the Corresponding Downsampled Data

图2结果显示,升轨和降轨同震干涉图均表现出一个主要的耳垂状形变条纹,且均以朝向于卫星运动(抬升)为主,暗示此次积石山地震为一次逆冲型地震。现存的拉脊山北缘断裂东分支断层由南向北同时穿过升、降轨同震干涉条纹,暗示此次地震的发生或许与此断裂有关。整体上连续且平滑的同震形变条纹揭示此次地震的同震滑动未(或少量)传播到地表,而少量的失相干区或许与地震引起的地裂缝、滑坡等次生灾害有关。升、降轨同震LOS形变量分别达到~7.5 cm和~7.7 cm。

2 大地测量反演

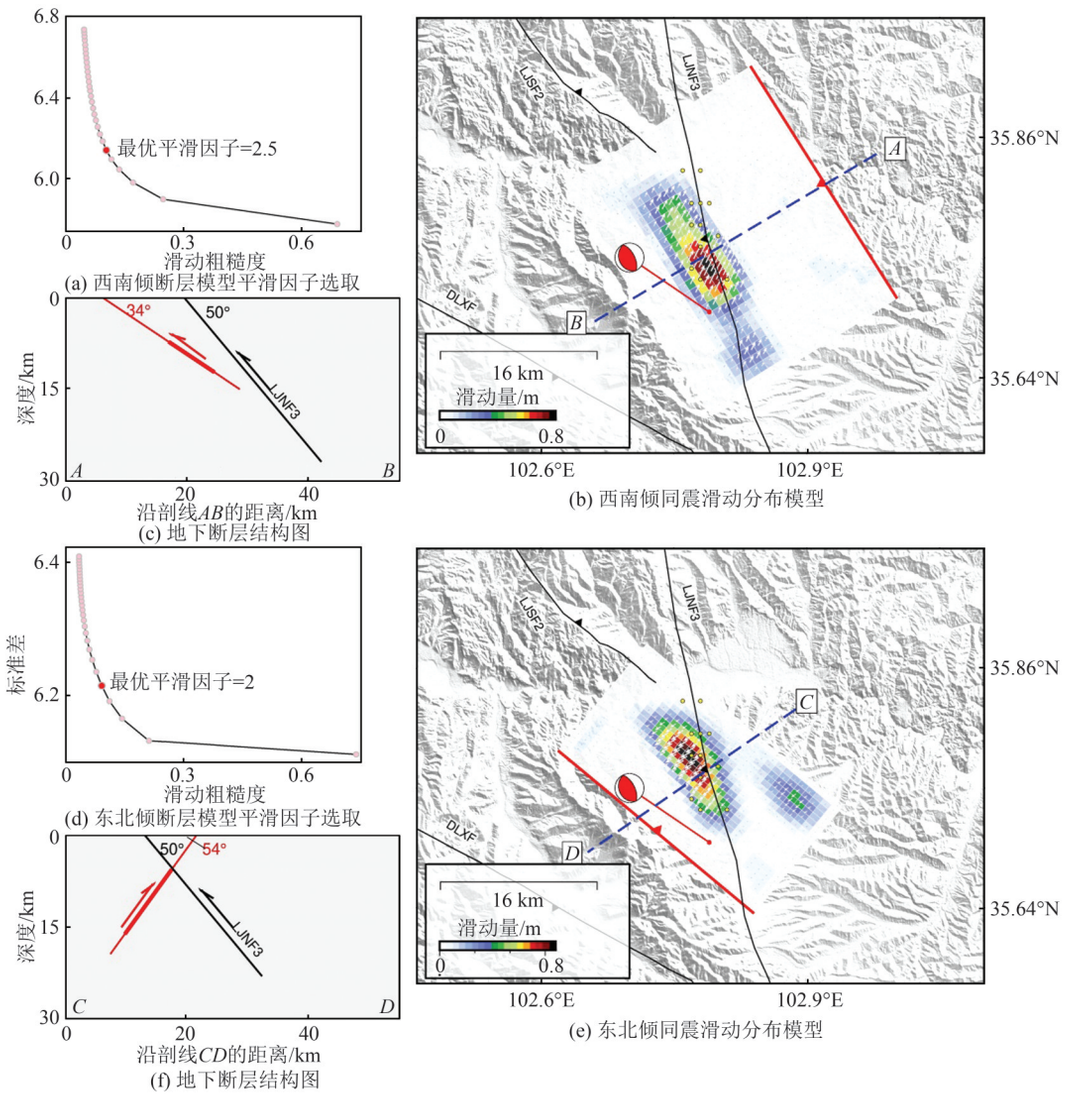
本文采用基于分辨率的降采样方法[11]对2023年积石山地震同震LOS形变进行重采样(图2(c)、2(d)),并基于均匀弹性半空间位错理论[12]反演破裂断层面上的同震滑动。利用非线性反演方法获取最优的发震断层几何,然后利用线性反演方法得到发震断层面上详细的滑动分布。

2.1 均匀滑动反演

在均匀滑动模型反演中,假设剪切模量和泊松比分别为3.32×10^{10} N/m^{2}和0.25[13]。首先,采用多峰值粒子群方法[14],通过获取观测和模拟LOS形变值间的最小均方差来搜索最优的断层走向角、倾角、滑动角、断层上边界埋深深度、宽度、长度、滑动量及断层位置[14];然后,利用蒙特卡洛方法[15]对观测数据进行随机噪声扰动生成100组数据,以估计断层几何参数的不确定性(表1)。由于目前尚未收集到与此次积石山地震有关的地表破裂信息,且GCMT和USGS公布的震源机制解(表1)也显示此次地震可能破裂在走向西北(倾向东北)或东南(倾向西南)的逆冲断层上,因此发震断层的走向(或倾向)难以判定。综合考虑以上情况,为确定合理的震源节面解,分别建立西南倾和东北倾两个断层模型进行大地测量数据反演。对于西南倾断层模型,在保持断层其他几何参数自由搜索情况下,设定走向角搜索区间为(91°,179°)以进行反演,反演结果显示在极窄的断层宽度(0.1 km)上发生了~33 m的高滑动,断层面近似为一个埋深的线源[16],这种现象并不合理。随后,根据经验公式[15],将断层宽度固定为6.4 km再次执行反演。反演结果(表1)显示,发震断层长~16 km且滑动达到0.5 m,而走向角和倾角分别为149°和34°;断层埋深在约8.1 km的深度,暗示同震滑动未传播到地表,而116°的滑动角揭示此次地震以逆冲运动为主,兼有少量的右旋走滑分量。对于东北倾断层模型,在保持断层其他几何参数自由搜索情况下,设定走向角搜索区间为(271°, 359°)以进行反演。反演结果(见表1)揭示,发震断层长~13.9 km且滑动达到0.33 m,而走向角和倾角分别为311°和54°;断层埋深在~6.6 km的深度,反映同震滑动未孕育到地表,而~80°的滑动角揭示地震以逆冲运动为主,且伴随少量的左旋走滑分量。西南倾和东北倾均匀滑动断层模型较小的断层几何参数不确定性(表1)证明了反演结果的稳定性。

2.2 分布式滑动反演

对于西南倾断层模型,固定均匀滑动模型中确定的发震断层位置、倾角和走向角,并沿走向和倾向将其断层面长度和宽度分别扩大至28 km和27 km,然后将断层面离散成756个1 km长、1 km宽的小矩形。为避免子块体间滑动陡然的变化,通过观测数据标准差与滑动粗糙度间的权衡曲线,添加并选取最优平滑因子(图3(a))。反演结果显示,破裂断层以逆冲运动为主,兼有少量的右旋走滑分量;滑动集中分布于7.2~12.2 km的深度,且在9.7 km深度滑动达到最大为0.82 m(图3(b)、3(c))。西南倾同震滑动分布模型产生了~1.9×10^{18} N·m的矩震量,相当于Mw 6.15。升、降轨同震LOS形变观测与模拟数据间的均方根值(root mean square, RMS)分别为5.5 mm和6.8 mm。根据地下断层结构剖面(图3(c)),若此次积石山地震发生在西南倾的破裂断层上,其发震断层可能隶属于拉脊山北缘断裂东分支断层(LJNF3)的一个隐伏次级逆冲断层。对于东北倾断层模型,固定均匀滑动模型中获取的发震断层位置、倾角和走向角,并沿走向和倾向将断层面长度和宽度分别扩大至26 km和24 km,将断层面离散成624个1 km长、1 km宽的小矩形。通过观测数据标准差与滑动粗糙度间的权衡曲线,同样选取最优平滑因子(图3(d))。反演结果显示,破裂断层以逆冲运动为主,且伴随少量的左旋走滑分量;滑动集中分布于5.6~16.1 km的深度,且在10.9 km深度滑动达到最大为0.66 m(图3(e)、3(f))。东北倾同震滑动分布模型产生了~1.8×10^{18} N·m的矩震量,相当于Mw 6.14。升、降轨同震LOS形变观测与模拟数据间的RMS分别为5.5 mm和6.9 mm。根据地下断层结构剖面(图3(f)),若此次积石山地震发生在东北倾的破裂断层上,其发震断层可能归属于拉脊山南缘断裂(LJSF)的一个隐伏逆冲分支断层。总体上,西南倾和东北倾同震滑动分布模型均能较好地拟合观测数据(图4)。地震震中相对于反演获取的同震滑动的位置暗示此次积石山地震的同震破裂由南向北单侧传播。



注：图(b)和(e)中的白色箭头表示断层上盘相对于断层下盘的运动方向；图(c)和(f)中细红线为反演得到的发震断层剖面，叠加在细红线上的粗红线代表主要的滑动区域。

图 3　2023 年积石山地震同震滑动分布模型及地下断层结构剖面图

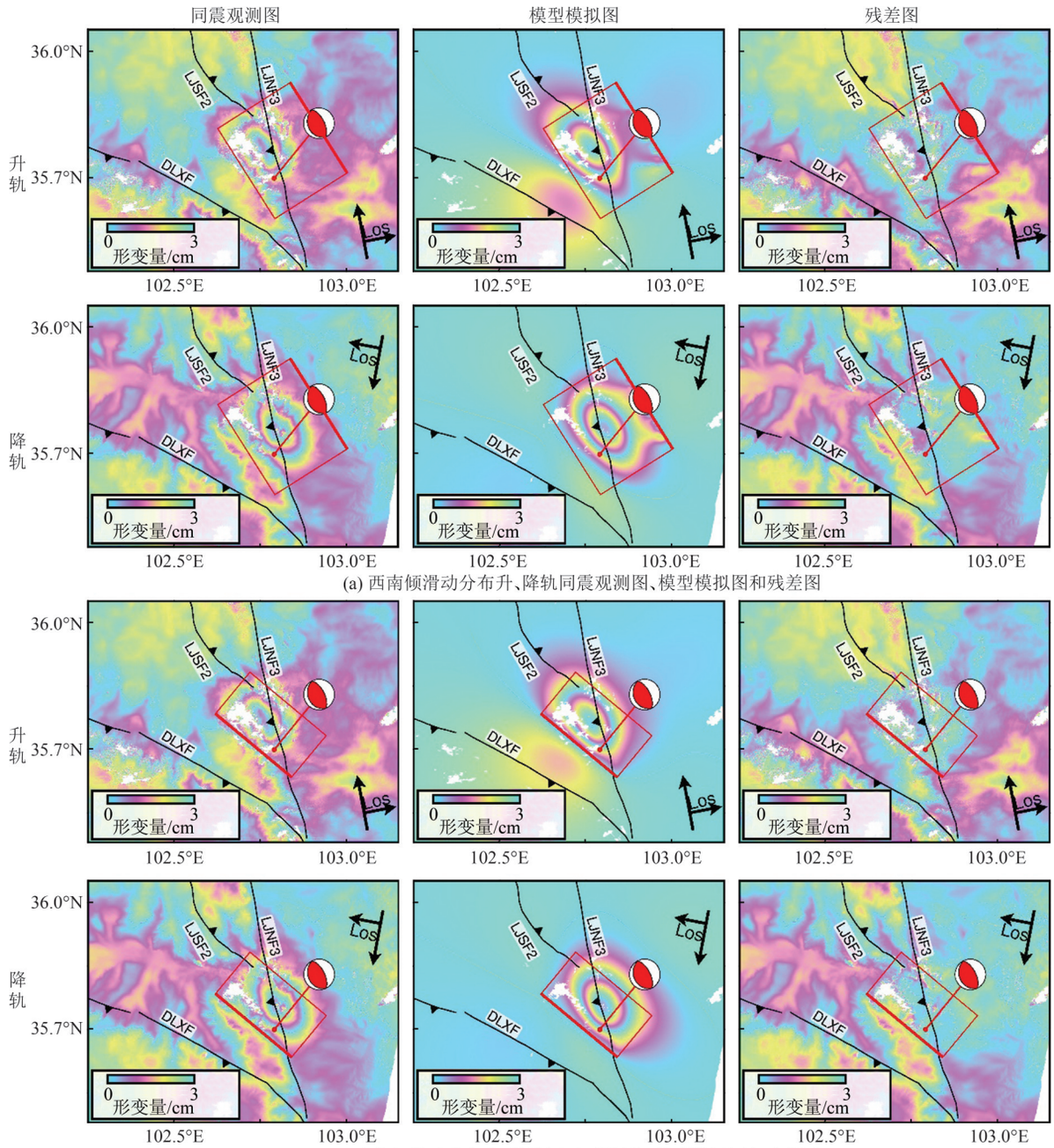
Fig. 3　Coseismic Distribution Models of the 2023 Jishishan Earthquake and the Profile Map of the Subsurface Fault Structure

3　讨　论

识别中强量级地震的发震断层倾向及位置对理解区域活动断层分布及地震灾害评估至关重要。根据大地测量数据反演结果(图 3)，2023 年积石山地震为一次隐伏型逆冲事件。尽管东北倾滑动模型相较于西南倾滑动模型整体上能较好地拟合同震形变条纹，但仅凭残差图(图 4)来判定此次地震的发震断层倾向似乎说服力并不够。为进一步确定积石山地震的发震断层倾向，仍需寻找更多的证据。从 Ms>3.0 余震序列与主震震中的空间分布来看(图 1(c))，余震均位于主震的北部，暗示同震破裂可能沿西北走向的断层从东南向西北传播，这为东北倾发震断层提供了证据。紧邻东北倾发震断层地表迹线，升、降轨同震干涉图(图 2(a)、2(b))均表现出一定的失相干，或许与地震机构报道的地震地表破裂有关，此现象与东北倾发震断层地表迹线位置较一致。

另外，拉脊山断裂带附近孕育着许多分支逆冲断层，但均表现出高倾角(45°～55°)[3]，与大地测量反演(表 1)获取的东北倾发震断层的倾角(54°)较为一致，与西南倾发震断层的倾角(34°)不符。因此，本文更倾向于东北倾破裂断层为此次地震的发震断层，但后续仍需现场调查和地震精定位结果来进一步证实。

积石山地震发生后，许多学者[4, 17]对此次地震的震源机制解和地震灾害特征做了快速的研究，并认为此次地震的发生与拉脊山北缘断裂东分支断层有关。尽管大地测量数据并不能完全排除西南倾破裂断层为此次地震发震断层的可能，但反演结果均揭示此次



(a) 西南倾滑动分布升、降轨同震观测图、模型模拟图和残差图

(b) 东北倾滑动分布升、降轨同震观测图、模型模拟图和残差图

图4 同震观测、模拟图及残差图

Fig. 4 Coseismic Observation, Coseismic Modeling and Residuals

地震的发生与已知现存的拉脊山断裂带分支断层无关,而是破裂在先前未知的隐伏分支断层(图3)。

在震中附近,作为与破裂断层近平行且距离最近的一个断裂,拉脊山北缘断裂东分支断层的总体展布和滑动特性与反演获取的破裂断层较为一致,但反演结果却显示东北倾和西南倾破裂断层的位置与该断裂地表迹线分别相隔~8 km和13 km(图3)。西南倾滑动分布模型(图3(b)和3(c))显示,同震滑动集中分布于破裂断层下倾方向14~22 km处,且位于拉脊山北缘断裂东分支断层地下结构的东侧。鉴于拉脊山北缘主断裂普遍孕育着多个分支断层(图1(c)),且构造活跃,若西南倾破裂断层为此次积石山地震的发震断层,则其可能发生在拉脊山北缘断裂东侧的隐伏分支断层上(图3(c))。而东北倾滑动分布模型(图3(e)、3(f))显示,同震滑动主要分布于破裂断层下倾方向7~21 km处,且位于拉脊山北缘断裂东分支断层地下结构的东侧。由于东北倾发震断层与拉脊山北缘断裂东分支断层的倾向相反,而与拉脊山南缘断裂总体的倾向较为一致(图1(c)),若东北倾破裂断层为此次积石山地震的发震断层,则其可能隶属于拉脊山南缘断裂南

侧的隐伏分支断层。

中强量级地震的同震滑动通常会引起周边地壳应力场的显著变化，从而影响附近活动断层的应力状态，导致未来地震事件的提前或延迟[18-20]。作为自地震记录以来拉脊山断裂带区域发生的最大逆冲型地震，2023 年积石山地震对评估周边地区现存活动断层的潜在地震风险具有重要意义。

为量化该事件对附近断层的应力影响，本文利用 PSGRN/PSCMP 软件[21]，以 InSAR 观测反演获取的东北倾滑动分布模型为输入模型，采用摩擦系数 0.4[22]计算现存活动断层的同震库仑应力变化。根据活动断层的几何分布和活动特性[3]（图 1），设拉脊山北缘断裂带的平均走向角 128°、倾角 50°和滑动角 90°为拉脊山北缘各分支断层的接收断层，而以拉脊山南缘断裂带的平均走向角 314°、倾角 50°和滑动角 90°为拉脊山南缘各分支断层的接收断层。另外，设定倒淌河-临夏断裂（Daotanghe-Linxia fault，DLF）的接收断层为走向角 135°、倾角 50°和滑动角 90°。对于西秦岭北缘断裂，根据已有调查资料及其几何分布和左旋滑动特性[3]，设定其接收断层为平均走向角 300°、倾角 70°和滑动角 0°。分别以 5 km、10 km 和 15 km 为计算深度，计算结果（图 5）表明，DLF 表现出应

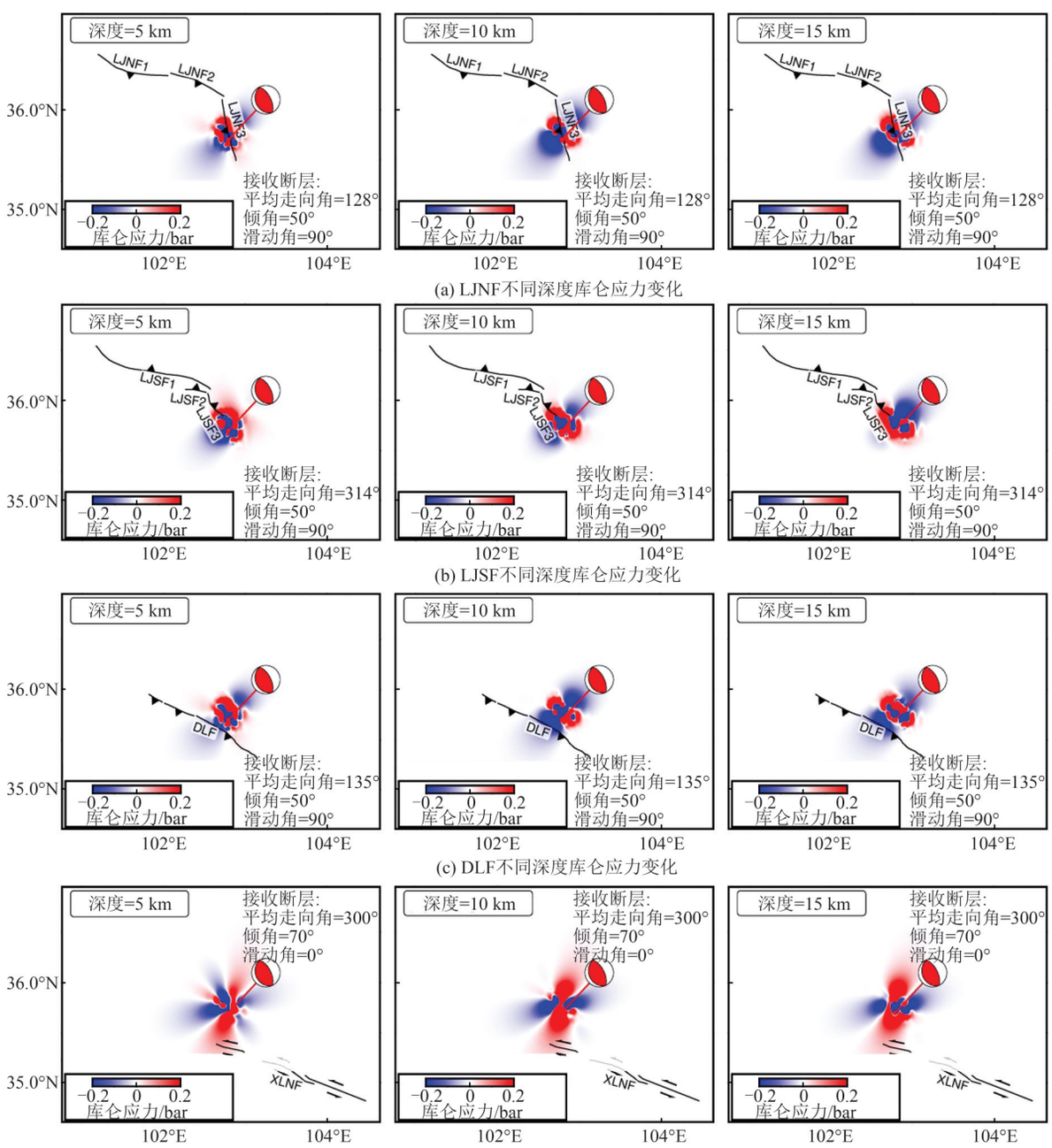


图 5　2023 年积石山地震引起的周边断层同震库仑应力变化

Fig. 5　Coseismic Coulomb Stress Changes Around the Adjacent Faults Induced by the 2023 Jishishan Earthquake

力卸载状态(在深度5 km、10 km和15 km处应力值分别约为－0.16 bar、－0.47 bar和－0.25 bar),而拉脊山北缘断裂东分支断层(LJNF3)中北段(在深度5 km、10 km和15 km处应力值分别约为0.24 bar、0.25 bar和0.32 bar)、拉脊山南缘断裂东分支断层(LJSF3)南段(在深度5 km、10 km和15 km处应力值分别约为0.11 bar、0.21 bar和0.22 bar)和西秦岭北缘断裂(XLNF)最西段(在深度5 km、10 km和15 km处应力值分别约为0.08 bar、0.07 bar和0.06 bar)表现出应力加载状态,且LJNF3中北段和LJSF3南段应力累积均大于地震触发阈值0.1 bar[23]。考虑到这两个断层段具有较大的库仑应力变化,且其构造活动性较强,应着重注意其未来地震破裂的危险性。

4 结 语

本文基于InSAR观测反演了2023年甘肃积石山地震的发震断层几何参数及其同震滑动分布。通过对反演结果、余震序列、区域断层构造特性和同震干涉图的综合分析,认为此次地震破裂在东北倾的发震断层上,可能为拉脊山南缘断裂的一个隐伏分支断层。同震滑动集中分布于深度5.6~16.1 km,在10.9 km深度处滑动达到最大,为0.66 m;同震滑动分布模型产生~1.8×10^{18} N·m的矩震量,相当于Mw 6.14。鉴于较大的应力加载,应着重关注拉脊山北缘断裂东分支断层中段、拉脊山南缘断裂东分支断层南段和西秦岭北缘断裂西段的潜在破裂风险。

致谢:感谢欧洲航天局提供的哨兵1A数据(https://asf.alaska.edu/)。

参 考 文 献

[1] YUAN D Y, GE W P, CHEN Z W, et al. The Growth of Northeastern Tibet and Its Relevance to Large-Scale Continental Geodynamics: A Review of Recent Studies[J]. *Tectonics*, 2013, 32(5): 1358-1370.

[2] ZHENG W J, ZHANG P Z, HE W G, et al. Transformation of Displacement Between Strike-Slip and Crustal Shortening in the Northern Margin of the Tibetan Plateau: Evidence from Decadal GPS Measurements and Late Quaternary Slip Rates on Faults[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 267-280.

[3] 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): 155-165.
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): 155-165.

[4] 王运生,赵波,吉锋,等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震震害异常的启示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2024, 50(1):1-8.
WANG Yunsheng, ZHAO Bo, JI Feng, et al. Preliminary Insights into Hazards Triggered by the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake, Gansu Province[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*(*Science & Technology Edition*), 2024, 50(1):1-8.

[5] 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) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20230497.

[6] 黄观文,景策,李东旭,等. 甘肃积石山Ms 6.2地震对滑坡易发区的变形影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20230490.
HUANG Guanwen, JING Ce, LI Dongxu, et al. Deformation Analysis of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake on the Landslide Hazard Areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230490.

[7] WERNER C, WEGMÜLLER U, STROZZI T, et al. GAMMA SAR and Interferometric Processing Software[C]//The ERS-Envisat Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000.

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

[9] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.

[10] CAVALIÉ O, DOIN M P, LASSERRE C, et al. Ground Motion Measurement in the Lake Mead Area, Nevada, by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry Time Series Analysis: Probing the Lithosphere Rheological Structure[J]. *Journal of Geophysical Research* (*Solid Earth*), 2007, 112(B3): B03403.

[11] LOHMAN R B, SIMONS M. Some Thoughts on the Use of InSAR Data to Constrain Models of Surface Deformation: Noise Structure and Data Downsampling [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(1): Q01007.

[12] 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): 1135-1154.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] ELLIOTT J R, WALTERS R J, ENGLAND P C, et al. Extension on the Tibetan Plateau: Recent Normal Faulting Measured by InSAR and Body Wave Seismology[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(2): 503-535.

[17] 王勤彩，罗钧，陈翰林，等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源机制解[J]. 地震，2024，44(1)：185-188.
WANG Qincai, LUO Jun, CHEN Hanlin, et al. Focal Mechanism for the December 18, 2023, Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province [J]. *Earthquake*, 2024, 44(1): 185-188.

[18] SYMITHE S J, CALAIS E, HAASE J S, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2010 M 7.0 Haiti Earthquake and Resulting Stress Changes on Regional Faults[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(4): 2326-2343.

[19] 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.

[20] 许才军，汪建军，熊维. 地震应力触发回顾与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2018，43(12)：2085-2092.
XU Caijun, WANG Jianjun, XIONG Wei. Retrospection and Perspective for Earthquake Stress Triggering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2085-2092.

[21] WANG R J, LORENZO-MARTÍN F, ROTH F. PSGRN/PSCMP—A New Code for Calculating Co- and Post-Seismic Deformation, Geoid and Gravity Changes Based on the Viscoelastic-Gravitational Dislocation Theory[J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(4): 527-541.

[22] FREED A M. Earthquake Triggering by Static, Dynamic, and Postseismic Stress Transfer[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33(1): 335-367.

[23] ZIV A, RUBIN A M. Static Stress Transfer and Earthquake Triggering: No Lower Threshold in Sight?[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B6): 13631-13642.