引文格式:张文婷,季灵运,陈玉鑫,等.2023年甘肃积石山Ms 6.2地震区域地壳形变特征分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):391-403.DOI:10.13203/j.whugis20240012

Citation:ZHANG Wenting,JI Lingyun,CHEN Yuxin,et al.Analysis of Crustal Deformation of the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province,China[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(2):391-403.DOI:10.13203/j.whugis20240012

2023年甘肃积石山Ms 6.2地震区域地壳形变特征分析

张文婷[1,2,3] 季灵运[1] 陈玉鑫[4] 刘传金[1] 徐 晶[1]

1 中国地震局第二监测中心,陕西 西安,710054

2 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430071

3 中国科学院大学,北京,100049

4 甘肃省地震局,甘肃 兰州,730000

摘 要:2023-12-18甘肃省临夏回族自治州积石山县发生了Ms 6.2地震。震中所在的拉脊山断裂带在调节区域构造变形过程中起着重要作用,研究该地震的地壳形变对认识区域构造活动特征至关重要。利用Sentinel-1合成孔径雷达卫星数据,基于合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术和小基线集技术获取了该地震升、降轨InSAR同震及震间形变场,并融合震间全球导航卫星系统资料获取了震间三维地壳形变场。综合大地测量、地质、大地电磁以及余震精定位数据,认为此次地震是青藏高原北东向扩展过程中一次区域应力调节的结果,发震主断层位于倾向SWW的拉脊山北缘断裂南段,地震发生时,该主冲断层带动着NEE倾的反冲断层共同隆起,地表沿雷达视线方向最大抬升8.9 cm。以InSAR同震形变为约束,反演得到发震断层最大同震滑移0.24 m,位于地下13.4 km,累积地震矩1.93×10^{18} N·m,合矩震级Mw 6.1。此外,以三维地壳形变场为约束,反演得到发震断层震间走滑速率约1.9 mm/a,倾滑速率约2.4 mm/a,闭锁深度约为16.8 km。受此次地震影响,拉脊山断裂东南段、倒淌河-临夏断裂中南段以及西秦岭北缘断裂西端等未来的地震危险性值得关注。

关键词:积石山地震;InSAR;同震滑动分布;震间滑动速率;闭锁深度;库仑应力变化;拉脊山断裂带

中图分类号:P315 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-12

DOI:10.13203/j.whugis20240012 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0391-13

Analysis of Crustal Deformation of the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province, China

ZHANG Wenting[1,2,3] *JI Lingyun*[1] *CHEN Yuxin*[4] *LIU Chuanjin*[1] *XU Jing*[1]

1 The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamic, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

3 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, China

Abstract: **Objectives**: An earthquake with Ms 6.2 occurred in Jishishan County, Gansu Province on December 18, 2023. The epicenter is located at the Lajishan fault zone, which plays an important role in adjusting regional tectonic deformation. Therefore, it is important to research the crustal deformation of this earthquake. **Methods**: We collect coseismic and preseismic Sentinel-1 single look complex images covering the study area, and use differential interferometric synthetic aperture radar (InSAR) and small baseline subset technology to obtain the coseismic and interseismic deformation, respectively. Furthermore, both interseismic InSAR and global navigation satellite system observations are integrated to obtain the high-accura-

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3007303);陕西省自然科学基础研究计划(2023-JC-QN-0324);国家自然科学基金(42104061)。

第一作者:张文婷,工程师,主要从事InSAR形变监测与构造形变研究。wt_zhang93@163.com

通信作者:季灵运,博士,研究员。dinsar010@163.com

cy and high-resolution three-dimensional deformation field. Subsequently, we invert the slip distribution of the seismogenic fault using the steepest descent method program with the constraint of coseismic deformation. The fault model is constructed based on 3D electrical structure, aftershocks, and InSAR deformation field. In addition, we invert the dextral strike slip rate, dip slip, and locking depth of the seismogenic fault with the constraint of three-dimensional deformation. **Results**: Both ascending and descending coseismic InSAR deformation exhibit symmetrical elliptical uplift with a maximum uplift of 8.9 cm along the radar line of sight direction, indicating a thrust earthquake, and there is no obvious surface rupture. The seismogenic fault is mainly characterized by reverse movement and did not rupture the surface, and the peak slip is 0.24 m at the depth of 13.4 km. The geode-tic moment is about 1.93×10^{18} N·m, corresponding to Mw 6.1 event. The dextral strike slip rate and dip slip rate of the seismogenic fault are about 1.9 mm/a and 2.4 mm/a, respectively. The locking depth of the seismogenic fault is about 16.8 km, close the the depth of this earthquake. **Conclusions**: The seismogenic fault may be a SWW-dipping hidden fault near the southern segment of the northern Lajishan fault, which thrusts towards the basin direction and parallel to the Lajishan fault. The main seismogenic fault may be southern segment of the SWW-dipping northern Lajishan fault. This main thrust fault and the NEE dipping back-thrust fault jointly uplift when the earthquake occurs. The static Coulomb stress calculation result indicates that the future seismic risk of the southern section of the northern Lajishan fault, the southern end of the southern Lajishan fault, the central and southern sections of the Daotanghe-Linxia fault, and the western end of the northern west Qinling fault cannot be ignored. This earthquake is the result of a regional stress regulation under the the northeast expansion of the Tibet Plateau.

Key words: Jishishan earthquake; interferometric synthetic aperture radar (InSAR); coseismic slip distribution; interseismic slip rate; locking depth; Coulomb stress change; Lajishan fault zone

据中国地震台网中心测定,北京时间2023-12-18T23:59:30甘肃省临夏回族自治州积石山县发生了Ms 6.2地震,震源深度10 km(https://news.ceic.ac.cn/CC202312182 35930.html),造成了大量人员伤亡和经济损失[1-6]。表1给出了不同机构和不同研究给出的震源机制解,均表明积石山Ms 6.2地震以逆冲运动为主,发震断层走向为近南北向。但是由于此次地震造成的地表变形较小,仅利用形变资料难以确定发震断层究竟是SWW倾的节面1还是NEE倾的节面2,不同学者基于形变资料判定的发震断层节面也存在差异[2-6]。

表1 不同机构及研究提供的震源机制解

Table 1 Focal Mechnism Solutions of the 2023 Jishishan Earthquake from Different Institutions and Studies

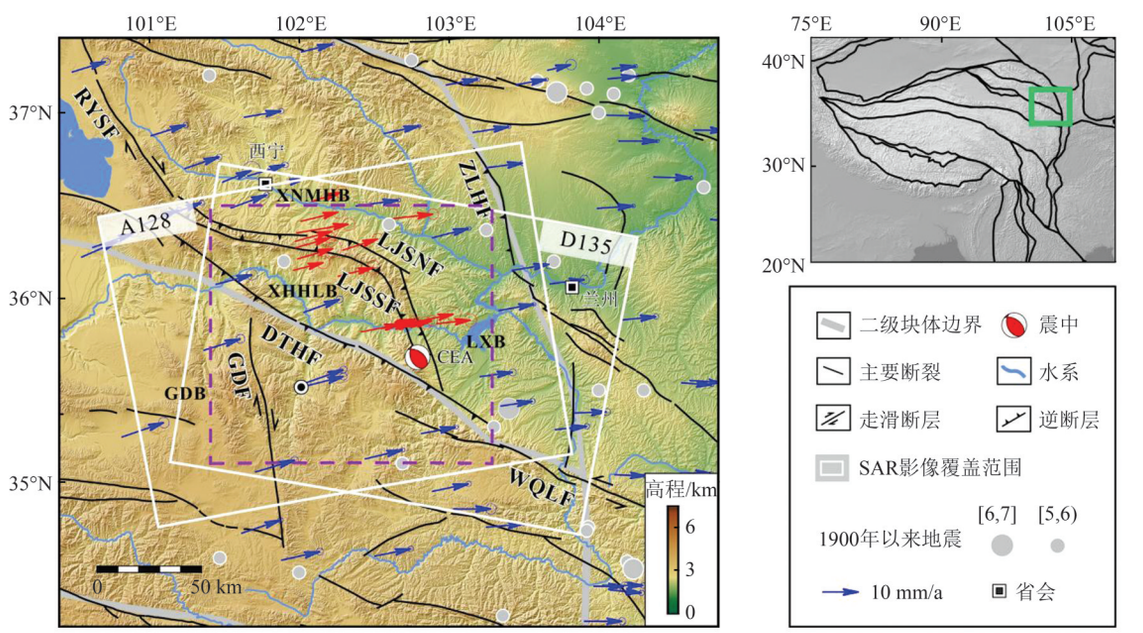
研究来源	震中位置		深度/km	节面1			节面2			震级(Mw)
	经度/(°E)	纬度/(°N)		走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	
IGP-CEA	102.79	35.68	10	155	44	111	307	50	71	5.96
GCMT	102.81	35.83	18.9	164	46	12	303	52	62	6.1
USGS	102.827	35.743	10	156	28	83	333	62	88	5.9
杨九元等[2]	102.73	35.71	6.6	—	—	—	311	54	80	6.1
刘振江等[3]	102.75	35.76	9.3	—	—	—	319	43	104	6.1
李雨森等[4]	102.77	35.78	2.7	—	—	—	310	57	90	6.0
方楠等[5]	102.76	35.77	7.7	—	—	—	325	32	112	6.0
Tang等[6]	—	—	11	146	29	—	—	—	—	6.1

注:IGP-CEA(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration):中国地震局地球物理研究所;GCMT(Global Centroid-Moment-Tensor):全球矩张量;USGS(United States Geological Survey):美国地质调查局。

2023年积石山地震发生在拉脊山构造带,该构造带位于祁连山南部、南北地震带北部,平均宽度仅10 km,是青藏高原东北缘经历多次挤压变形与构造抬升的晚更新世弧形造山带,局部地段活动时代为全新世[7]。拉脊山构造带也是青藏高原与东部陇中盆地的地形边界,是分隔西宁-民和盆地、临夏盆地和循化-化隆盆地之间的边界断裂[7](图1),其西部与右旋走滑的日月山断裂带相连,

东部与左旋走滑的西秦岭构造带相接,是调节两组断裂之间应力应变关系的挤压构造区和构造转换带[7]。地质研究表明,拉脊山断裂带以走滑-褶皱-逆冲运动为主,由两条倾角45°~55°、走向相反的逆断层组成[8],其中北缘断裂倾向SWW,为主控断层,在调节区域变形过程中起着重要作用[7,9]。过去的2 000年里,拉脊山断裂带南部和北部发生了20多次5级左右的中等破坏性地震[7],最近一次为发生在靠近拉脊山断裂带北部边缘的青海省乐都古坦西地区的1944年M $5^1/_2$地震[10-11]。然而,由于年代久远且震级不高,这些地震的发震构造尚不清楚,研究2023年积石山Ms 6.2地震的发震机制及地壳变形特征有助于进一步认识区域构造活动特征。

从区域地壳变形方面看,拉脊山断裂带通过地壳缩短和垂向隆升调节着青藏高原NE方向的应力传递[12],是反映区域构造变形的窗口。文献[13]的水准观测资料表明拉脊山地区正经历着隆升运动,速率为1±0.5 mm/a。文献[14]基于2019—2021年间加密全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)水平观测资料(图1中红色箭头),得到积石山东缘断裂(拉脊山北缘断裂东南段)活动性较强的认识。持续的构造活动说明区域存在应变积累,具备中强地震发生风险,积石山Ms 6.2地震即是在该背景下发生的。



注:LJSNF:拉脊山北缘断裂;LJSSF:拉脊山南缘断裂;DTHF:倒淌河-临夏断裂;WQLNF:西秦岭断裂北缘断裂;RYSF:日月山断裂;ZLHF:庄浪河断裂;GDF:贵德断裂;XNMHB:西宁民和盆地;LXB:临夏盆地;XHHLB:循化-化隆盆地。

图1　2023年积石山Ms 6.2地震构造背景图

Fig. 1　Tectonic Setting of the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术可获取高空间分辨率地表形变场,为断层运动状态反演提供有效约束,已被广泛用于地壳形变分析[15-18]。积石山Ms 6.2地震发生后,已有学者利用InSAR研究了此次地震的发震构造[2-6],其中文献[2-5]认为发震断层倾向北东,而文献[6]认为是发震断层倾向西南,存在争议。地质、大地电磁及大地测量研究表明,区域主控断层为SWW倾的拉脊山北缘断裂[7,9,14]。本文综合考虑大地测量、地质、大地电磁以及余震精定位数据,建立了一个以SWW倾断层为主冲断层,同时具有NEE倾反冲构造的发震断层模型。以InSAR同震及震间形变场为约束,反演了积石山Ms 6.2地震的滑动分布、断层震间滑移速率以及闭锁深度,进一步计算了此次地震产生的静态库仑应力变化及其对周边断层的影响,探讨了发震断层与区域构造模式。技术路线如图2所示。

1　同震-震间形变场的获取

1.1　同震形变场及地震重定位数据

本文使用跨越同震的升、降轨Sentinel-1合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星数据(表2),基于差分InSAR(differential InSAR, D-InSAR)技术获取此次地震的同震形变场。数据处理在GAMMA商业软件平台进行[19],首先基于强度匹配法和增强谱分级方法对单视复数数据(single look complex, SLC)影像进行迭代配

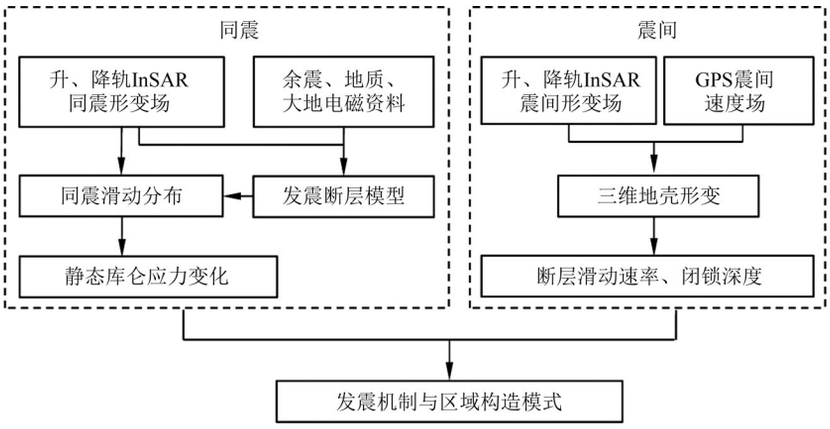


图2 积石山Ms 6.2地震地壳形变特征分析技术路线图

Fig. 2 Flowchart for Crustal Deformation Analysis of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

准[20];然后在差分干涉过程中,使用30 m空间分辨率的哥白尼数字高程模型[21]模拟并消除地形相位;将干涉图进行10×3(距离向×方位向)多视,并使用加权功率谱法进行滤波以抑制相位噪声[22](图3(a)、3(b));采用最小费用流算法对干涉图进行解缠[23],解缠起始点选在远离形变区的稳定点;基于地形相关法估计并去除大气水汽垂直分层引起的相位误差;使用远场数据进行二次多项式拟合并去除残余的轨道及大气等长波长误差[24];最后,根据SAR卫星几何参数获得两个轨道沿雷达视线方向(line of sight,LOS)的InSAR同震形变场并编码至WGS84坐标系。

表2 D-InSAR干涉对参数信息

Table 2 Parameters of D-InSAR Interferograms

编号	模式	轨道号	入射角/(°)	飞行方位角/(°)	获取影像时间		垂直基线/m
					震前	震后	
1	升轨	128	39.15	−13.11	2023-10-27	2023-12-26	63.98
2	降轨	135	33.75	−166.93	2023-12-14	2023-12-26	−117.29

InSAR干涉条纹图呈对称的椭圆形分布(图3(a)),变形区主要位于拉脊山南缘断裂和北缘断裂之间,东西向跨度约15 km,南北向跨度约20 km,总体走向为NNW向。干涉条纹图中一个颜色周期代表2.8 cm的LOS向位移,从暖色到冷色的过渡代表靠近卫星运动,可以看出升、降轨InSAR结果均为抬升运动,升轨数据最大LOS向抬升量8.7 cm,降轨数据最大LOS向抬升量8.9 cm,符合逆冲型地震运动特征,与前人结果接近[2-6]。选取远离形变中心的一个5 km×5 km矩形区域,分别统计升、降轨数据在该区域内的标准差,结果均为0.3 cm,说明形变场可靠性较高。沿着剖线AA'提取的LOS向同震位移剖线具有较好的连续性,意味着地震未造成明显的地表破裂(图3(d))。

利用甘肃台网截至2023-12-28记录的震相报告,选取至少5个震相被记录的地震事件,采用USTClitc2.0速度模型,对地震序列ML≥1的地震进行双差定位,最终获得662个地震重新定位结果。结果显示主震深度为12.95 km。震后十天内共发生3级以上余震26次,最大余震为12月19日的4.6级地震,深度9.5 km,余震沿NNW向分布(图3(c)),其纵剖面结果表明震源区断层结构可能较为复杂(图3(e))。

1.2 震间三维形变获取

1.2.1 InSAR震间形变场的获取

基于2014年10月至2020年4月的Sentinel-1 SAR卫星数据获取覆盖拉脊山断裂带的InSAR震间形变场,包括升轨T128和降轨T135共68景SLC影像,数据处理较D-InSAR技术的不同之处有:

1)限定差分干涉图时空基线阈值以提高震间形变信噪比,令空间基线小于100 m,时间基线大于300 d。

2)对干涉图进行120∶30的多视处理及加权功率谱滤波以提高相干性。

3)使用最小费用流算法对干涉图相位进行解缠,并对解缠误差进行探测与修复。

4)使用通用型大气改正在线服务(generic atmospheric correction online service for InSAR,GACOS)估计并去除大气误差[25]。

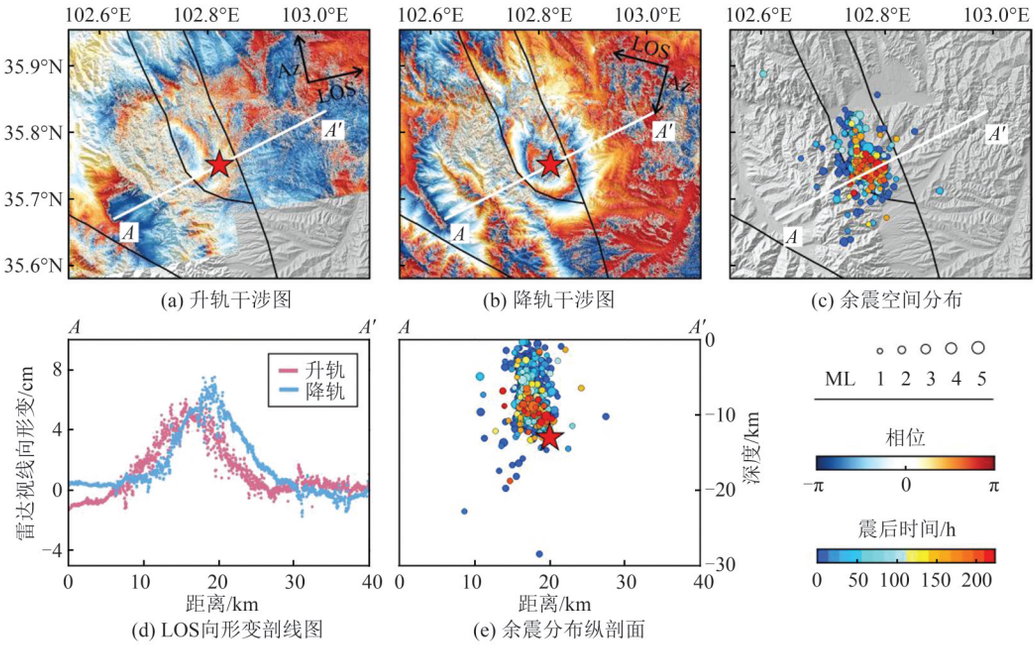


图 3　InSAR同震形变及余震分布图

Fig. 3　InSAR Interferograms and Aftershocks Distribution

5）对远场数据进行二次多项式拟合以估计并去除残余轨道误差等非构造变形。

6）对干涉图进行筛选，得到432幅干涉图，基于小基线集（small baseline subset，SBAS）技术获取LOS向InSAR震间形变场并编码至WGS-84坐标系（图4(a)、4(b)）。

从升、降轨LOS向InSAR震间形变场可以看出，拉脊山断裂带以及倒淌河-临夏断裂带两侧有较明显的差异运动，可能存在震间应力加载。考虑到研究区有垂向形变分量，所以使用包含东（E）、北（N）、垂直（U）3分量的GNSS速度场[26]对InSAR结果进行精度评定，首先将E、N、U 3分量形变速率分别投影到升、降轨数据LOS向，然后计算每个GNSS点与其周边2 km范围内InSAR观测平均值之间的差值，统计得到差值的标准差均为0.9 mm/a，说明InSAR震间形变的可靠性较高。

1.2.2　GNSS震间形变场的获取

为填补拉脊山-积石山构造带GNSS监测的空白，文献[14]分别于2019年和2021年4月对16个加密的站点（图1中紫色虚线框内的红色箭头）进行同步观测和同时期观测，且自2019年4月以来对积石山断裂附近的JS01和JS04站点进行连续GNSS观测。得到的水平速度场结果显示，积石山断裂东缘断裂（拉脊山北缘断裂东南段）和西缘断裂（拉脊山南缘断裂东南段）的右旋走滑速率分别为-0.8 ± 0.2 mm/a和-1.2 ± 0.2 mm/a，挤压速率分别为-0.5 ± 0.2 mm/a和-1.1 ± 0.2 mm/a。本文收集了该速度场以及文献[27]在研究区内的GNSS水平速度场（图1中紫色虚线框内的蓝色箭头），首先利用两类数据的公共观测点求解出数据间平移、旋转及尺度变换参数，然后基于赫尔默特相似变换模型将文献[14]的速度场归算到与文献[27]速度场相同的参考框架下，得到融合的GNSS震间形变场。

1.2.3　融合InSAR-GNSS的三维形变场

拉脊山断裂带同时包含逆冲和走滑运动分量，厘定其现今变形特征需要高精度三维形变场。由于InSAR为一维LOS向观测，且无法获取卫星飞行方向（近南北向）形变，难以直接获取三维形变场。而GNSS长期速度场作为研究地壳运动的有效手段[27-28]，可以为InSAR观测提供有效约束。因此，本文对§1.2.1中震间InSAR形变与§1.2.2中GNSS震间形变场进行融合，获取高分辨率三维形变场。融合前，先对GNSS水平速场进行克里金插值[29]，再将研究区离散为三角网，采用小应变假设，利用三角形3个顶点的三维速度场表示三角形内部任意点观测值，基于升、降轨InSAR与GNSS速度场建立观测方程[30]。采用赫尔默特方差分量估计确定GNSS与InSAR数据间权重比为2.5∶1。

对于得到的三维形变场，基于公式：

$$V_{\text{fault}} = V_{\text{N}}\cos\alpha + V_{\text{E}}\sin\alpha \qquad (1)$$

将其水平运动分量投影到断层平行方向（图4(c)）。式（1）中，V_{fault}代表平行于断层走向的速率；

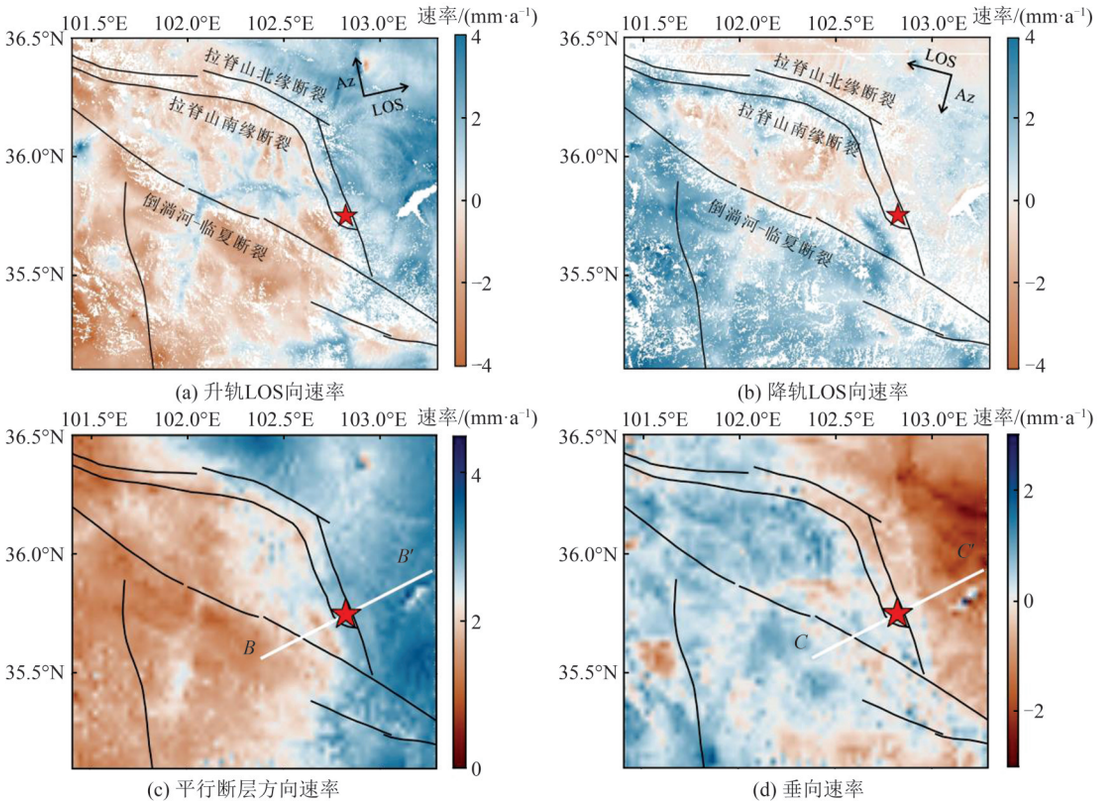


图4 震前InSAR震间形变场及InSAR-GNSS融合的形变场

Fig. 4 Preseismic InSAR Deformation and InSAR-GNSS Integrated Deformation Fields

V_N代表N向速率;V_E代表E向速率;α代表断层走向(153°)。可以看出拉脊山断裂现今具有一定的右旋走滑,该结果将进一步用于反演断层走滑速率及闭锁深度。

垂向形变场如图4(d)所示,可以看出拉脊山断裂两侧具有较显著的垂向差异运动,断裂西侧较盆地内部向上抬升,该结果可直接用于反演断层滑动速率及闭锁深度。

2 同震及震间断层运动反演

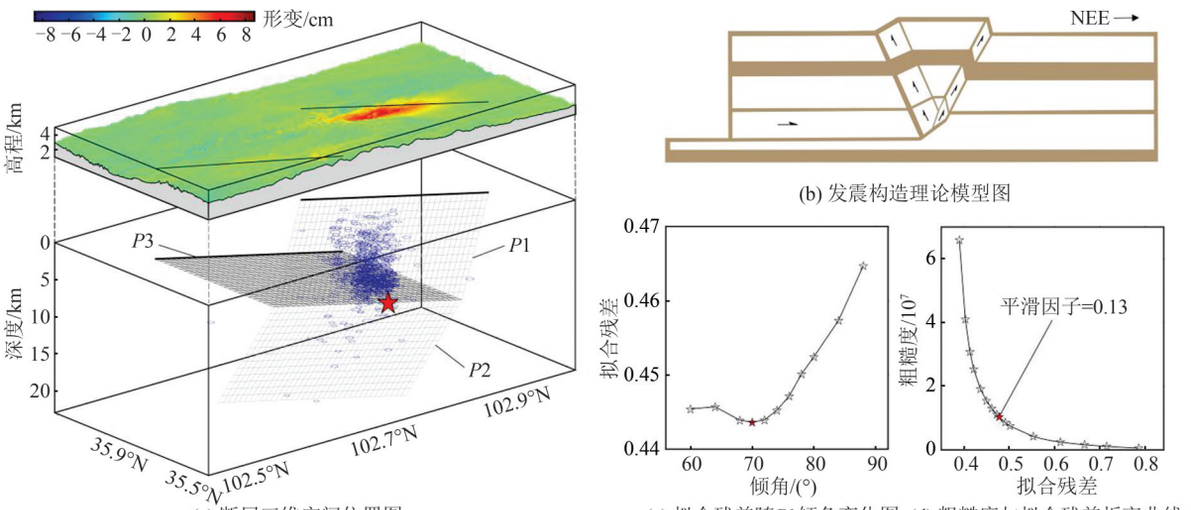
2.1 同震滑动分布反演

以升、降轨InSAR形变场为约束,采用由德国波茨坦地学研究中心汪荣江开发的最速下降法(steepest descent method,SDM)大地测量反演程序[31]反演断层面同震滑动分布。反演前首先要确定发震断层模型,由于此次地震未破裂至地表,难以直接从InSAR同震形变场确定发震断层,所以需要联合其他观测资料综合判定断层模型。大地电磁测深剖面结果显示,西秦岭北缘断裂和拉脊山断裂交汇区下方发育有一个陡峭的高导电层,与青藏高原下方水平高导电层相连,发育了SWW倾的拉脊山北缘逆冲构造环境[5],余震剖面也显示主震深度(12.95 km)以下的余震有SWW倾趋势(图3(e)),所以认为此次地震的主冲断层倾向为SWW。此外,由于主震以西的余震分布相对较多,表明可能存在反倾(NEE)的分支断层活动[32]。

在此基础上,依据逆冲推覆构造及其伴生构造理论模型(图5(b))(改自文献[33]),构建了此次地震的发震断层三维几何模型(图5(a))。发震断层由SWW倾的主冲断层和NEE倾的背冲断层组成。主冲断层靠近拉脊山北缘断裂带,走向153°,分为上下两部分:13 km以上的断层片为第一部分(断层面$P1$),由于其倾角难以直接确定,所以将InSAR观测值作为约束,通过寻找SDM反演的最优模型拟合度确定其倾角,反演时固定$P1$的底部位置(与$P2$连接处),设置倾角变化范围为60°~90°,得到如图5(c)所示的模型拟合残差与倾角变化间关系,可以看出70°倾角能够最好地拟合观测值;13~23 km深的断层片为第二部分(断层面$P2$),其倾角基于小震分布设为45°。背冲断层(断层面$P3$)走向333°,深度设为13 km,其倾角基于小震分布设为32°。

反演过程中,将断层面离散为1 km×1 km的断层片,得到1 874个断层片。对相邻断层片的滑动量施加平滑约束,通过权衡数据拟合程度与断层滑动粗糙度选取平滑因子为0.13

(图 5(d))。对滑动角做逆冲和右旋走滑约束,设置滑动角范围为 0°～180°。图 6 为反演得到的升、降轨 InSAR 观测值、模拟值以及残差图,从整体上看,模型能较好拟合 InSAR 观测值,升、降轨数据拟合残差的中误差分别为 0.7 cm 和 0.5 cm。

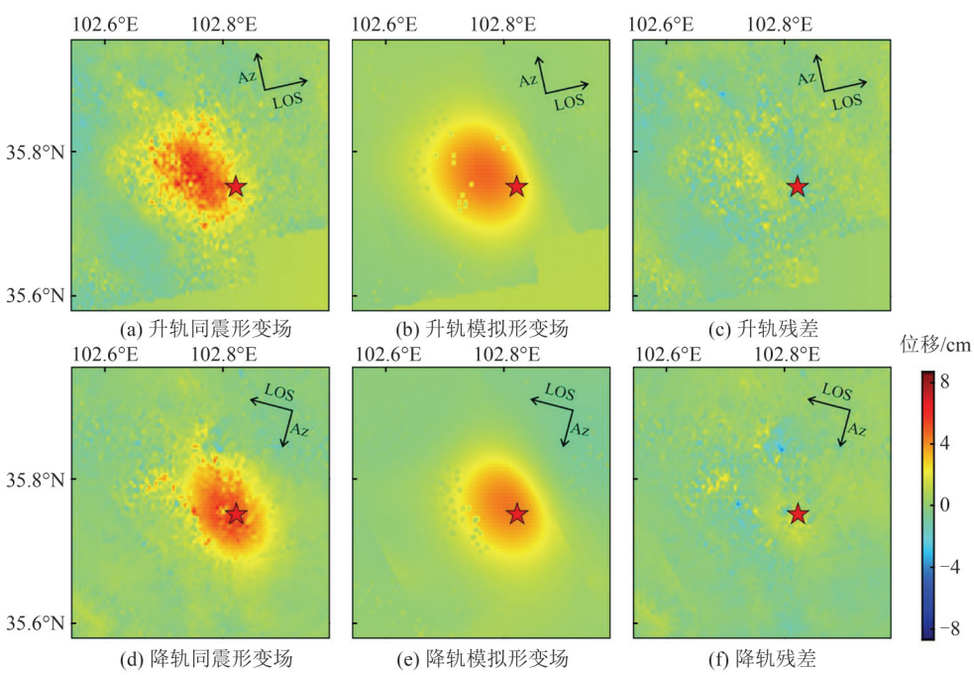


(a) 断层三维空间位置图　(b) 发震构造理论模型图　(c) 拟合残差随P1倾角变化图　(d) 粗糙度与拟合残差折衷曲线

注:蓝色空心圆表示余震的空间位置,震级大小与圆的大小成正比,红色五角星表示主震,黑色粗实线表示地表迹线,走向由余震及 InSAR 形变场给出,长度为 36 km。

图 5　发震断层几何模型

Fig. 5　Seismogenic Fault Geometry Model



(a) 升轨同震形变场　(b) 升轨模拟形变场　(c) 升轨残差

(d) 降轨同震形变场　(e) 降轨模拟形变场　(f) 降轨残差

图 6　同震观测值、模拟值及残差图

Fig. 6　Coseismic Observations, Simulations and Residual Results

积石山 Ms 6.2 地震同震滑动分布如图 7 所示,结果显示,断层片均以逆冲运动为主,带有少量右旋分量,近地表处的滑动量很小,表明同震错动未到达地表。断层面 $P1$ 与 $P2$ 的滑移较为显著,$P1$ 滑移集中在断层下方一个沿走向长度约 14 km、沿倾向宽度约 5 km 的半圆形区域内,最大滑移量为 0.23 m,位于地下 12.5 km;$P2$ 滑移主要集中在一个沿走向长度约 15 km、沿倾向宽度约 6 km 的椭圆形区域内,最大滑移量为 0.24 m,位于地下 13.4 km;$P3$ 滑移主要位于断层面下半部分,沿走向长度约 16 km,沿倾向宽度约 8 km,最大滑移为 0.22 m,位于地下 12.7 km。同震累积地震矩 1.93×10^{18} N·m,合矩震级 Mw 6.1,接近地震学方法给出的结果(表 1)。

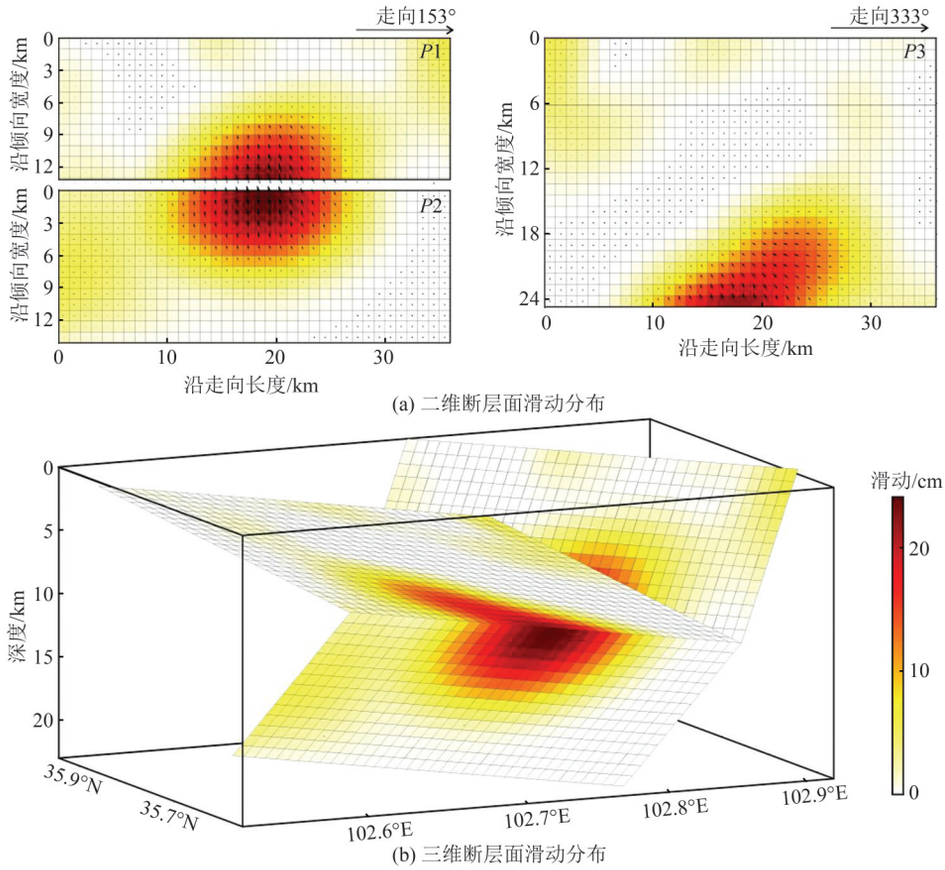


图7 分布式同震滑动模型拟合结果

Fig. 7 Fitting Results of Distributed Coseismic Slip Model

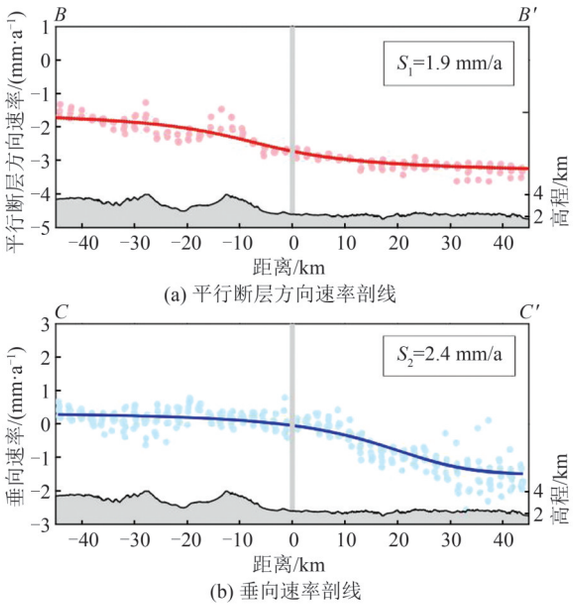
2.2 断层震间滑移速率及闭锁深度反演

震间滑动速率及闭锁已经被广泛地用于评估断层的现今活动性及地震危险性[34-36]。本文以§1.2.2中获取的高分辨率地壳形变观测为约束，联合考虑简化的带倾角的走滑断层震间形变模型[37-38]与带倾角的倾滑断层震间形变模型[37,39]，基于遗传算法反演断层的现今滑动速率与闭锁深度。计算公式为：

$$\begin{cases} S_{\text{fault}} = S_{01} + \dfrac{S_1}{\pi}\tan^{-1}\left(\dfrac{x-\dfrac{D}{\tan\theta}}{D}\right) \\ S_{\text{U}} = S_{02} - \dfrac{S_2}{\pi}\left[\sin\theta\tan^{-1}\left(\dfrac{x-\dfrac{D}{\tan\theta}}{D}\right) + \dfrac{\cos\theta + \dfrac{x-\dfrac{D}{\tan\theta}}{D_2}\sin\theta}{1+\left(\dfrac{x-\dfrac{D}{\tan\theta}}{D}\right)^2}\right] \end{cases} \tag{2}$$

式中，S_{01}代表走滑速率拟合的系统偏移；x代表观测点离开断层的距离；S_{fault}为断层平行方向观测值，即沿图4(c)中BB'剖线提取的平行断层方向形变速率；S_1代表右旋走滑速率；D代表闭锁深度；θ代表断层倾角；S_{02}代表倾滑断层拟合的系统偏移；S_{U}为垂向观测值，即沿图4(d)中CC'剖线提取的垂向速率；S_2代表倾滑速率。

拟合得到的断层右旋走滑速率为1.9 mm/a，倾滑速率为2.4 mm/a，倾角为55.5°，闭锁深度为16.8 km，且模拟值与观测值一致性较好(图8)。较深的闭锁深度说明断层在地震发生之前已经积聚了较高的应变能，积石山Ms 6.2地震最大滑移位于地下13.4 km，与闭锁深度较接近，一定程度上释放了震间期积累的能量。

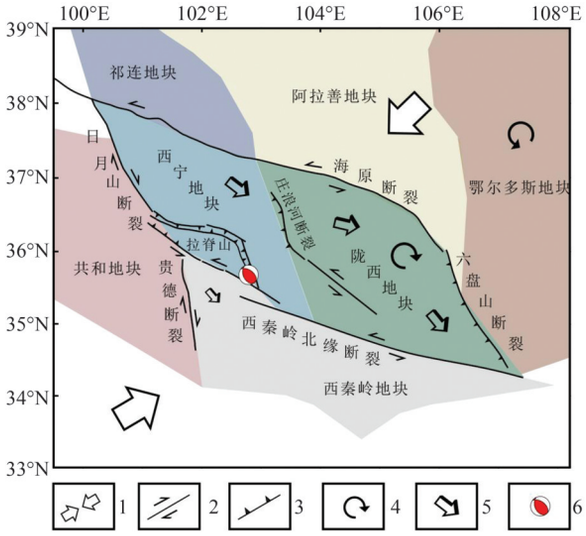


(a) 平行断层方向速率剖线

(b) 垂向速率剖线

图 8　震间形变剖线拟合结果

Fig. 8　Interseismic Velocity Two-Dimensional Profile Fitting Results



注:1.区域应力方向;2.走滑断裂;3.逆断裂;4.块体旋转方向;5.块体挤出方向;6.积石山 Ms 6.2地震震中。

图 9　拉脊山邻近地区构造活动模式图(据文献[40-41]修改)

Fig. 9　The Model of Tectonic Activity in the Lajishan Mountain and Is Adjacent Area (Modified by Reference[40-41])

3　讨　论

3.1　发震断层与区域构造模式分析

综合区域地质背景、大地电磁、余震资料以及 InSAR 同震形变场,认为积石山 Ms 6.2地震的发震断层位于拉脊山北缘断裂南段,倾向 SWW,断层倾角从浅部向深部减小。此外,余震数据还显示该主冲断层西侧可能还发育有一条 NEE 倾的分支断层,可能是主冲断层上盘在向盆地逆冲过程中受到内部的挤压收缩派生出的反冲断层。主震发生时,SWW 倾的主冲断层带动 NEE 倾的反冲断层共同破裂,造成地表隆起。

拉脊山构造带的现今活动主要受控于青藏高原东北缘物质 NE 向扩展、区域内西宁地块的旋转和挤出以及右旋走滑的日月山断裂和左旋走滑的西秦岭断裂挤压和转换共同作用(图 9),以逆冲兼走滑运动为主,拉脊山北缘断裂为主控断裂,并且由于位处多个地块以及多条断层交汇部位,其现今构造特征可能更加复杂。文献[4]认为,西秦岭北缘断裂西端左旋走滑分量可能被积石山或甘加盆地吸收,从而促进了积石山的隆升,且其两侧断裂可能以隐伏断裂或活动褶皱形式向盆地内部扩展,导致了金城-陇西 $6^1/_4$ 级地震及拉脊山南北两侧 20 多次 5 级左右中等破坏性地震的发生。因此判断此次积石山 Ms 6.2地震是青藏高原北东向扩展过程中的又一次区域应力调节,一定程度上释放了长期积累的应变能。

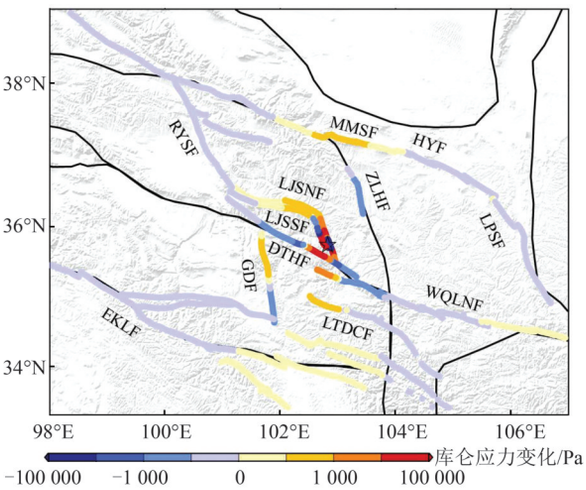
3.2　积石山 Ms 6.2地震对周边断层的静态库仑应力加载

为了评估此次地震对邻近区域断层的应力扰动,利用 InSAR 反演得到的同震滑移分布,采用 PSGRN/PSCMP 程序[42],接收断层参数参考文献[43-47],计算 15 km 深度上同震位错引起的周缘主要活动断裂带上的静态库仑应力变化(图 10)。一般认为,库仑应力增加超过 0.1×10^5 Pa 时可能使处于库仑应力增加区域的地震提前发生[48]。总体来看,本次地震的影响范围不大,超过触发阈值的段落有拉脊山断裂东南段和倒淌河-临夏断裂中南段。此外,库仑应力增加相对比较明显的段落有西秦岭北缘断裂西段、拉脊山断裂中段、贵德断裂北段、临潭-宕昌断裂西段以及毛毛山断裂。应对上述这些段落未来的地震危险性予以关注。

4　结　语

基于 D-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术分别获取了积石山 Ms 6.2地震的同震位移和震间形变速率场,联合 InSAR 与 GNSS 震间观测资料解算了区域高空间分辨率三维形变场。在此基础上反演了同震断层面滑动分布以及震间断层滑动速率与闭锁深度,计算了同震位错引起的库仑应力变化。主要得到以下认识:

1)升、降轨 InSAR 同震形变场表明,此次地



注:LJSNF:拉脊山北缘断裂;LJSSF:拉脊山南缘断裂;DTHF:倒淌河-临夏断裂;WQLNF:西秦岭断裂北缘断裂;MMSF:毛毛山断裂;RYSF:日月山断裂;ZLHF:庄浪河断裂;HYF:海原断裂;LPSF:六盘山断裂;EKLF:东昆仑断裂;LTDCF:临潭-宕昌;GDF:贵德断裂。

图10 积石山Ms 6.2地震引起周边断层的静态库仑应力变化

Fig. 10 Static Coulomb Stress Changes on Surrounding Faults Caused by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

震造成地表沿LOS向最大抬升量8.9 cm,未造成显著地表破裂。滑动分布结果显示,同震位错没有达到地表,断层运动以逆冲为主兼少量右旋错动,最大滑移为0.24 m,位于地下13.4 km,累积地震矩1.93×10^{18} N·m,合矩震级Mw 6.1。

2)发震断层震间走滑及倾滑速率分别为1.9 mm/a与2.4 mm/a,闭锁深度约16.8 km,说明区域在地震之前已经存在较高的应力积累。

3)积石山Ms 6.2地震是青藏高原北东向扩展过程中的一次区域应力调节,发震主断层位于SWW倾的拉脊山北缘断裂南段,地震发生时,该主冲断层带动着NEE倾的反冲断层共同破裂,造成地表隆起。

4)静态库仑应力变化计算结果表明,此次地震导致拉脊山断裂东南段、倒淌河-临夏断裂中南段,以及西秦岭北缘断裂西端等段落的库仑应力增加显著,其未来的地震危险性值得关注。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 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),2024,DOI:10.13203/J.whugis20230501.
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*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230501.

[3] 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),2024,DOI:10.13203/J.whugis20240008.
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*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240008.

[4] 李雨森,李为乐,许强,等. 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),2024,51(1):22-32.
LI Yusen, LI Weile, XU Qiang, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake Revealed by InSAR Observations [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science Technology Edition)*, 2024, 51(1): 22-32.

[5] 方楠,孙凯,黄传超,等. 联合InSAR和地震波数据反演甘肃积石山Ms 6.2地震震源时空破裂过程[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI:10.13203/J.whugis20240036.
FANG Nan, SUN Kai, HUANG Chuanchao, et al. Joint Inversion of Inversion of InSAR and Seismic Data for the Kinematic Rupture Process of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240036.

[6] TANG X W, GUO R M, ZHANG Y J, et al. Rapid Rupture Characterization for the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake[J]. *Earthquake Research Advances*, 2024, 4(2): 100287.

[7] 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 Zhong-

sheng, 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.

[8] 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 Laji Shan Fault[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2012.

[9] ZHAO L Q, ZHAN Y, WANG Q L, et al. 3D Electrical Structure and Crustal Deformation of the Lajishan Tectonic Belt, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 224: 104953.

[10] 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.

[11] 谢虹, 雷中生, 袁道阳, 等. 1944年青海乐都瞿昙寺地震考证[J]. 内陆地震, 2014, 28(4): 305-311.
XIE Hong, LEI Zhongsheng, YUAN Daoyang, et al. Reasearch on Historical Data of Qutan Temple Earthquake in 1944 in Qinghai Province[J]. *Inland Earthquake*, 2014, 28(4): 305-311.

[12] HAO M, WANG Q L, SHEN Z K, et al. Present Day Crustal Vertical Movement Inferred from Precise Leveling Data in Eastern Margin of Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 2014, 632: 281-292.

[13] 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.

[14] 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.

[15] ZHANG W T, JI L Y, ZHU L Y, et al. Current Slip and Strain Rate Distribution Along the Ganzi-Yushu-Xianshuihe Fault System Based on InSAR and GPS Observations[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 821761.

[16] ZHAO Q, JIANG F Y, ZHU L Y, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry - Based Coseismic Deformation and Slip Distribution of the 2022 Menyuan Ms 6.9 Earthquake in Qinghai, China[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2023, 14(6): 541-550.

[17] 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 九寨沟Ms 7.0地震的InSAR观测及发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4069-4082.
JI Lingyun, LIU Chuanjin, XU Jing, et al. InSAR Observation and Inversion of the Seismogenic Fault for the 2017 Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 4069-4082.

[18] GUO R M, LI L N, ZHANG W T, et al. Kinematic Slip Evolution During the 2022 Ms 6.8 Luding, China, Earthquake: Compatible with the Preseismic Locked Patch[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(5): 1-10.

[19] WERNER C, WEGMLLER U, STROZZI T, et al. Gamma SAR and Interferometric Processing Software[C]// ERS-Envisat Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000.

[20] YAGÜE-MARTÍNEZ N, PRATS-IRAOLA P, RODRÍGUEZ GONZÁLEZ F, et al. Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(4): 2220-2234.

[21] The European Space Agency. Copernicus Global Digital Elevation Model (COP-DEM) [EB/OL]. [2023-12-20] https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model.

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

[23] COSTANTINI M. A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813-821.

[24] FIALKO Y, SANDWELL D, SIMONS M, et al. Three-Dimensional Deformation Caused by the Bam, Iran, Earthquake and the Origin of Shallow Slip Deficit[J]. *Nature*, 2005, 435: 295-299.

[25] YU C, LI Z H, PENNA N T, et al. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2018, 123(10): 9202-9222.

[26] LIANG S M, GAN W J, SHEN C Z, et al. Three-

Dimensional Velocity Field of Present-Day Crustal Motion of the Tibetan Plateau Derived from GPS Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(10): 5722-5732.

[27] 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.

[28] 庄文泉,李君,郝明,等. 利用加密GNSS数据和震源机制解分析川滇块体南部现今地壳活动特性[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(7): 732-738.
ZHUANG Wenquan, LI Jun, HAO Ming, et al. Study on the Characteristics of Current Crustal Activity in the Southern Sichuan-Yunnan Block Using Dense GNSS Data and Focal Mechanism Solution [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(7): 732-738.

[29] LIU C J, JI L Y, ZHU L Y, et al. Present-Day Three-Dimensional Deformation Across the Ordos Block, China, Derived from InSAR, GPS, and Leveling Observations[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2890.

[30] WANG H, WRIGHT T J. Satellite Geodetic Imaging Reveals Internal Deformation of Western Tibet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(7): 1-5.

[31] WANG R J, DIAO F, HOECHNER A. SDM —A Geodetic Inversion Code Incorporating with Layered Crust Structure and Curved Fault Geometry[C]// General Assembly European Geosciences Union, Vienna, Austria,2013.

[32] 刘琦,闻学泽,邵志刚. 基于GPS、水准和强震动观测资料联合反演2013年芦山7.0级地震同震滑动分布[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 2113-2125.
LIU Qi, WEN Xueze, SHAO Zhigang. Joint Inversion for Coseismic Slip of the 2013 Ms 7.0 Lushan Earthquake from GPS, Leveling and Strong Motion Observations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(6): 2113-2125.

[33] COOLEY M A, PRICE R A, DIXON J M, et al. Along-Strike Variations and Internal Details of Chevron-Style, Flexural-Slip Thrust-Propagation Folds Within the Southern Livingstone Range Anticlinorium, a Paleohydrocarbon Reservoir in Southern Alberta Foothills, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(11): 1821-1849.

[34] ZHU L Y, JI L Y, LIU C J, et al. The 8 January 2022, Menyuan Earthquake in Qinghai, China: A Representative Event in the Qilian-Haiyuan Fault Zone Observed Using Sentinel-1 SAR Images[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(23): 6078.

[35] JI L Y, ZHANG W T, LIU C J, et al. Characterizing Interseismic Deformation of the Xianshuihe Fault, Eastern Tibetan Plateau, Using Sentinel-1 SAR Images [J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(2): 378-394.

[36] ZHU L Y, JI L Y, LIU C J. Interseismic Slip Rate and Locking Along the Maqin - Maqu Segment of the East Kunlun Fault, Northern Tibetan Plateau, Based on Sentinel-1 Images[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 211: 104703.

[37] 邹镇宇,江在森,武艳强,等. 针对一般倾角的走滑/倾滑位移理论公式的改进[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(3): 460-463.
ZOU Zhenyu, JIANG Zaisen, WU Yanqiang, et al. Improvements for the Strike/Dip-Slip Displacement Theory Formula of General Dip Fault [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(3): 460-463.

[38] SAVAGE J C, BURFORD R O. Geodetic Determination of Relative Plate Motion in Central California[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(5): 832-845.

[39] FREUND L B, BARNETT D M. A Two-Dimensional Analysis of Surface Deformation Due to Dip-Slip Faulting [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1976, 66(3): 667-675.

[40] 赵静,牛安福,李强,等. 陇西块体周边断层闭锁程度与滑动亏损特征研究[J]. 地震研究, 2016, 39(3): 351-358.
ZHAO Jing, NIU Anfu, LI Qiang, et al. Study on Dynamic Characteristics of Fault Locking and Fault Slip Deficit in the Faults Around the Longxi Block [J]. *Journal of Seismological Research*, 2016, 39(3): 351-358.

[41] 刘小凤,梅秀苹,冯建刚,等. 青藏高原北部地区地震基本活动状态定量评价[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 130-136.
LIU Xiaofeng, MEI Xiuping, FENG Jiangang, et al. Quantitative Estimating Basic State of Seismicity in Northern Region of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33(2): 130-136.

[42] 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.

[43] 石富强，熊熊，王朋涛，等. 2016年以来门源2次6级地震的应力触发及其对祁连—海原断裂带地震危险性的指示[J]. 地球物理学报，2023，66(8)：3230-3241.
SHI Fuqiang，XIONG Xiong，WANG Pengtao，et al. Stress Interaction Between the Two M>6 Earthquake Since 2016 and Its Implication on the Seismic Hazard Along the Qilian-Haiyuan Fault Zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*，2023，66(8)：3230-3241.

[44] 汤大委，葛伟鹏，袁道阳，等. 青藏高原北部历史强震对2022年门源Ms 6.9地震及后续地震库仑应力触发作用[J]. 地球物理学报，2023，66(7)：2772-2795.
TANG Dawei，GE Weipeng，YUAN Daoyang，et al. Triggering Effect of Historical Earthquakes in the Northern Tibetan Plateau on the Coulomb Stress of the 2022 Menyuan Ms 6.9 Earthquake and Subsequent Earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*，2023，66(7)：2772-2795.

[45] 徐晶，邵志刚，马宏生，等. 汶川8.0级地震和芦山7.0级地震对周边断层的影响[J]. 地震，2014，34(4)：40-49.
XU Jing，SHAO Zhigang，MA Hongsheng，et al. Impact of the 2008 Wenchuan 8.0 and the 2013 Lushan 7.0 Earthquakes Along the Longmenshan Fault Zone on Surrounding Faults[J]. *Earthquake*，2014，34(4)：40-49.

[46] 岳冲，屈春燕，牛安福，等. 玛多Ms 7.4地震对周边断层的应力影响分析[J]. 地震地质，2021，43(5)：1041-1059.
YUE Chong，QU Chunyan，NIU Anfu，et al. Analysis of Stress Influence of Qinghai Maduo Ms 7.4 Earthquake on Surrounding Faults[J]. *Seismology and Geology*，2021，43(5)：1041-1059.

[47] 程佳，姚生海，刘杰，等. 2017年九寨沟地震所受历史地震黏弹性库仑应力作用及其后续对周边断层地震危险性的影响[J]. 地球物理学报，2018，61(5)：2133-2151.
CHENG Jia，YAO Shenghai，LIU Jie，et al. Visoelastic Coulomb Stress of Historical Earthquakes on the 2017 Jiuzhaigou Earthquake and the Subsequent Influence on the Seismic Hazards of Adjacent Faults[J]. *Chinese Journal of Geophysics*，2018，61(5)：2133-2151.

[48] HARRIS R A，SIMPSON R W. Suppression of Large Earthquakes by Stress Shadows：A Comparison of Coulomb and Rate-and-State Failure[J]. *Journal of Geophysical Research*：*Solid Earth*，1998，103(B10)：24439-24451.