引文格式: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),2025,50(2):333-343.DOI:10.13203/j.whugis20240036

Citation: FANG Nan, SUN Kai, HUANG Chuanchao, et al. Joint 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, 2025, 50(2):333-343.DOI:10.13203/j.whugis20240036

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

方 楠[1] 孙 凯[1] 黄传超[1] 柏承元[1] 陈志丹[1,2] 谢 磊[1]
杨 知[3] 徐英辉[3] 解鸿斌[3] 冯光财[1] 李志伟[1] 许文斌[1]

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083
2 莫斯科国立大学地质系,俄罗斯 莫斯科,119991
3 中国电力科学研究院有限公司,北京,100192

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,该地震发生在祁连山内部的次级断裂拉脊山断裂上,该断裂活动强度较低、发震频率不高,本次地震为人们重新认识祁连山内部这一特殊构造提供了机会。利用Sentinel-1A卫星的升、降轨数据获得了本次地震的同震地表形变,采用贝叶斯反演方法确定了发震断层的几何参数,联合地震波数据反演了该地震的动态滑动分布。本次地震的发震断层朝北东倾,倾角为32.2°,走向为~325.2°,滑动角为~112°,发震断层呈现逆冲兼具右旋走滑分量的运动性质。结合邻区主要活动断裂的断层几何和运动学特征,认为本次积石山地震发生在拉脊山南缘北东倾的断层上。本次积石山地震所在的拉脊山断裂东段可能是青海南山断裂、拉脊山断裂西段和西秦岭断裂的阶区转换构造,该阶区的左行右阶型挤压作用为本次逆冲型地震事件的驱动机制。

关键词:青藏高原东北缘;积石山Ms 6.2地震;联合反演;转换构造;InSAR;时空破裂过程

中图分类号:P315 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-29

DOI:10.13203/j.whugis20240036 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0333-11

Joint Inversion of InSAR and Seismic Data for the Kinematic Rupture Process of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake

FANG Nan[1] *SUN Kai*[1] *HUANG Chuanchao*[1] *BAI Chengyuan*[1] *CHEN Zhidan*[1,2] *XIE Lei*[1]
YANG Zhi[3] *XU Yinghui*[3] *XIE Hongbin*[3] *FENG Guangcai*[1] *LI Zhiwei*[1] *XU Wenbin*[1]

1 School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China
2 Department of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
3 China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Abstract: **Objectives**: On December 18, 2023, an Ms 6.2 earthquake occurred in Jishishan County, Gansu Province, China. This event occurred on the Lajishan fault, a secondary fault with low activity and infrequent seismicity in the Qilian Mountains, which event provides an opportunity to study this special structure within the Qilian Mountains. **Methods**: We derived the coseismic deformation field using both ascending and descending Sentinel-1A data, applied the Bayesian inversion method to determine the source parameters of the seismogenic fault, and combined seismic wave records with interferometric synthetic aperture radar data to model the dynamic slip distribution of this event. **Results**: The event has a northwest-dipping fault with a dip of 32.2°, a strike of 325.2° and a rake of 112°, indicating that this earthquake is a thrust event with a dextral slip component. **Conclusions**: By analyzing the fault geometry and kinematic

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFB3903602);国家自然科学基金项目(42388102, 42174023,42304037);中南大学前沿交叉研究项目(2023QYJC006);湖南省自然科学基金重点项目(2024JJ3031);中南大学研究生自主探索创新项目(2021zzts0249);湖南省研究生科研创新项目(CX20210104)。

第一作者:方楠,博士生,主要从事大地测量资料和地震波的联合反演研究。fangnan@csu.edu.cn

通信作者:许文斌,博士,教授。wenbin.xu@csu.edu.cn

characteristics of the primary active faults in the surrounding region, we found that the Jishishan earthquake occurred on the southern edge of the Laji Mountain. This study concludes that the Jishishan earthquake occurred on a northeast-dipping fault at the southern margin of the Laji Mountains. It also suggests that the eastern section of the Laji Mountain fault, where the Jishishan earthquake occurred, may be a step-over structure between the Qinghai Nanshan fault, the western section of the Laji Mountain fault, and the west Qinling fault. Additionally, it proposes that the left-running, right-step-type extrusion of the step-over zone is the driving mechanism of this retrograde seismic event.

Key words: northeast of Tibetan Plateau; Ms 6.2 Jishishan earthquake; joint inversion; transformation tectonics; InSAR; kinematic rupture process

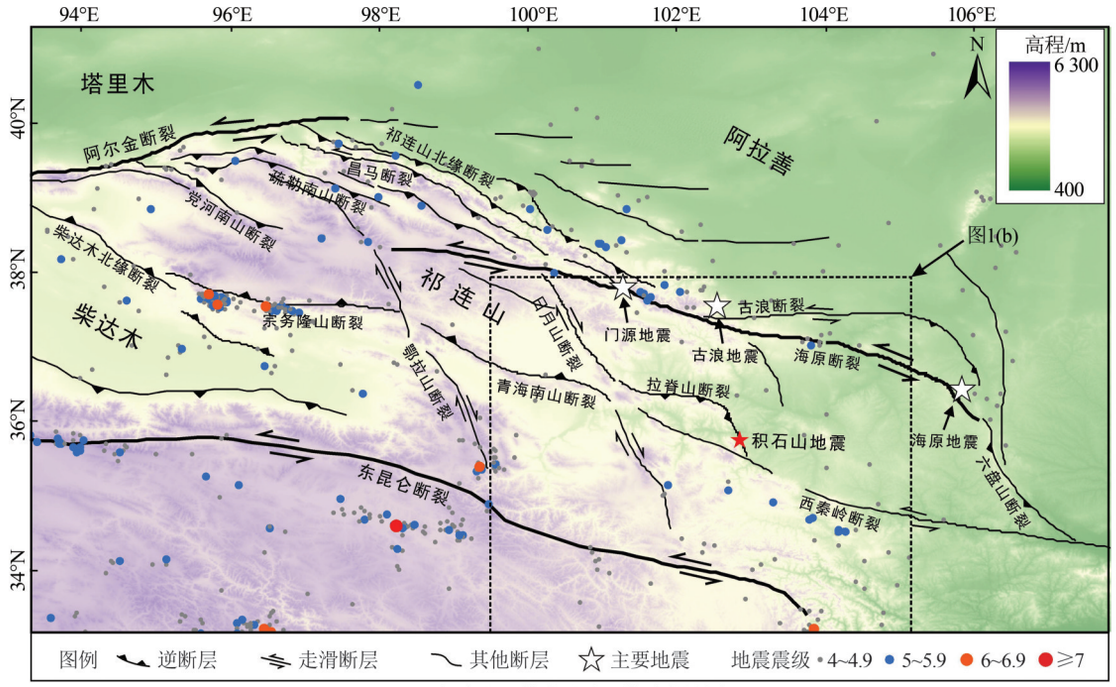
根据中国地震台网中心测定,北京时间2023-12-18T23:59:30,中国甘肃省临夏回族自治州积石山县发生了Ms 6.2地震,震源深度10 km,震中位于35.70°N,102.79°E(图1(a)、1(b))。本次积石山Ms 6.2地震事件位于青藏高原东北缘的拉脊山断裂带上,地震造成约150人遇难、近千人受伤,并伴随着大量的崩塌、滑坡等地质灾害,其致灾程度超过很多7级以上地震[1-2]。根据国内外地震研究机构发布的震源机制和震形图模拟的同震变形场[3],本次积石山Ms 6.2地震为一次典型的逆冲型事件,发震断层走向呈北西-南东向,断层节面Ⅰ为南西倾的低角度(28°~46°)断层,节面Ⅱ为北东倾的高角度(50°~62°)断层(表1)。

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术可捕捉地震周期性活动的高空间分辨率地表形变特征[4-5]。基于InSAR观测获取的积石山Ms 6.2地震升、降轨同震形变场均显示地表变形以抬升为主,表明此次地震为逆冲型事件,但前人研究认为仅依靠InSAR观测无法判定断层的倾向,即东北倾和西南倾断层模型均能较好地拟合同震形变[6-7]。余震精定位结果显示,积石山Ms 6.2地震震中位于祁连山内部的拉脊山断裂东段,震源深度约为13.2 km,余震序列整体呈北西-南东向展布,展布长度约15 km,破裂深度主要集中在地下10~15 km(图1(c))。震源机制、大地测量数据和余震序列显示,发震断层走向与区域内已知的拉脊山断裂东段一致,但无法明确发震构造为拉脊山断裂的南支还是北支。

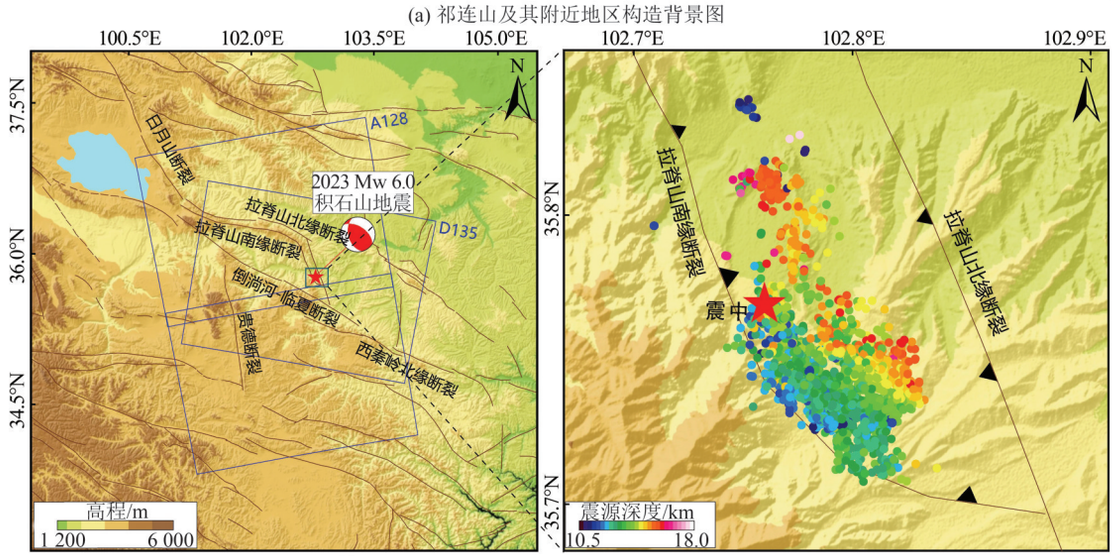
祁连山位于青藏高原向东北扩展的最前缘,印度和欧亚板块碰撞的远程挤压效应在该地区造成强烈的地壳挤压缩短和山体隆升(图1(a))[8-10]。历史研究主要集中在祁连山几条大型的走滑边界断裂和山体内部NWW向的挤压构造带上(图1(a))[11-18]。西祁连山的地壳缩短主要被5条近平行的NWW向褶皱-逆断裂带所吸收,由北向南依次为祁连山北缘断裂、昌马断裂、疏勒南山断裂、党河南山断裂和柴达木北缘断裂[19-20];东祁连山以类块体东向挤出的形式响应地壳缩短,在东祁连山地区构造变形和地震活动主要集中在块体边界断裂带(海原断裂、鄂拉山断裂和日月山断裂)上,块体内部断裂的地震活动较弱[17-18,21]。拉脊山断裂位于东祁连山内部青海南山断裂、日月山断裂和西秦岭断裂的构造衔接带上,断层结构复杂(图1(a))[21-23]。

拉脊山断裂的走向在断层中部发生明显弯曲,由西段的NWW向转变为东段的NNW向,表现为向北东方向凸出的弧形挤压构造(图1(a))[22,24]。地质学研究认为,拉脊山是一条形成于加里东期的古老断裂带,经过多期强烈的构造变动,是一个反映多阶段构造抬升的构造窗[25]。断错地貌显示,晚更新世以来,拉脊山断裂以逆冲活动为主,兼有少量左旋走滑分量[22-24,26-27]。现今拉脊山断裂的活动强度较相邻断裂更弱,基于水准测量和全球定位系统数据限定拉脊山断裂的垂直滑动速率为1±0.5 mm/a[27],明显低于日月山断裂的2.5±0.5 mm/a和西秦岭断裂的2.5±0.3 mm/a的左旋走滑速率[28]。本次积石山Ms 6.2地震所处的拉脊山断裂东段尚未有6级以上强震记录,但存在过5级左右的中等强度地震[22]。无论是断层滑动速率或地震活动强度,拉脊山断裂均不能与其邻近的大型走滑断裂相提并论,考虑到拉脊山断裂的断层规模和特殊发育位置,其更可能表现为某种转换构造。本次积石山Ms 6.2地震为人们重新认识祁连山内部这一特殊构造提供了机会。

本文首先利用Sentinel-1A卫星的升、降轨影像数据获取了本次事件的同震地表变形;然后假设断层面均已滑动,通过贝叶斯反演方法获得发震断层的破裂范围、断层几何和发震方式;进而联合远场体波数据反演了2023年积石山Ms 6.2地震的震源破裂过程;最后综合考虑地震破裂过程、同震变形、断层几何和区域构造特点,分析了本次事件的发震构造和孕震机制。



(a) 祁连山及其附近地区构造背景图



(b) 积石山地震附近区域构造背景图　　(c) 积石山地震震中及余震分布图

图 1　青藏高原东北缘构造背景及积石山地震附近区域构造图

Fig. 1　Tectonic Setting of the Northeastern Tibetan Plateau and the Jishishan Earthquake

表 1　不同机构和本文研究获取的 2023 年积石山 Ms 6.2 地震震源机制

Table 1　Focal Mechanisms of the 2023 Jishishan Ms 6. 2 Earthquake Published by Different Institutions and This Study

研究来源	纬度/(°N)	经度/(°E)	震源深度/km	震级(Mw)	节面Ⅰ			节面Ⅱ		
					走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
GCMT	35.83	102.81	18.9	5.9	303	52	62	164	46	122
USGS	35.74	102.83	10	5.94	333	62	88	156	28	93
GFZ	35.74	102.81	18	6.01	332	53	99	138	38	79
IG-CEA	35.68	102.79	10	5.96	307	50	71	155	44	111
CENC	35.70	102.79	10	5.9	300	45	50	170	57	123
本文研究	35.77	102.76	7.7	6.0	325	32	112	120	61	77

注：GCMT(Global Centroid Moment Tensor)：全球矩张量；USGS(United States Geological Survey)：美国地质调查局；GFZ(Helmholtz-Centre for Geosciences)：德国地学中心；IG-CEA(Institute of Geology, China Earthquake Administration)：中国地震局地质研究所；CENC(China Earthquake Networks Center)：中国地震台网中心。

1 数据处理

1.1 远场体波观测数据

本文使用的远震数据来自IRIS(incorporated research institutions for seismology)数据管理中心。为了尽可能获得震源破裂的精准破裂过程,需扩大地震台站方位角的覆盖范围,本文选取震中距为30°～90°的11个P波震相。首先从原始数据中去除仪器响应获取速度波形记录[29],然后再对远场波形数据进行0.01～0.9 Hz的带通滤波,以及5 Hz的重采样,并截取了P波到达前10 s,总共60 s的数据长度。远场体波的理论格林函数采用Multitel3程序进行计算[30]。计算格林函数过程中,速度模型采用的是基于CRUST1.0模型[31]的地壳结构和AK135参考地球模型[32]的地幔和地核部分。

1.2 InSAR形变场观测数据

为获得积石山地震同震形变场,本文利用GAMMA软件对Sentinel-1A升、降轨数据进行差分干涉处理(表2)。在数据处理过程中,距离向和方位向分别进行10∶2多视处理以提高影像信噪比,并采用30 m空间分辨率的航天飞机雷达地形测绘使命(shuttle radar topography mission, SRTM)高程模型模拟去除地形相位[33]。对干涉图进行自适应滤波并利用最小费用流法完成相位解缠,通过远场稳定区域拟合多项式去除长波长的大气和轨道误差,并对断层近场解缠误差进行手动掩膜。为了提高反演的计算效率,本文采用四叉树采样法对形变场进行降采样以减少数据量[34]。InSAR同震形变的理论格林函数通过频率波数积分[35]并根据区域分层波速模型[36]计算。

表2 本文使用的Sentinel-1A影像

Table 2 Sentinel-1A Images Used in This Study

数据类型	轨道号	飞行方向	影像对
Sentinel-1A	128	升轨	2023-10-27—2023-12-26
Sentinel-1A	135	降轨	2023-12-14—2023-12-26

2 震源破裂过程反演

由于此次地震并未破裂至地表,因此无法根据同震形变场直接确定发震断层迹线。为了确定本次地震发震断层的几何参数和空间位置,本文使用GBIS软件对断层的几何参数和位置进行非线性搜索[37]。剪切模量和泊松比分别设置为3.0 GPa和0.25。为了更好地搜索断层参数,本文对所有参数进行自由搜索,与其他研究不同的是,本文并未对断层的走向进行约束,而是进行0°～360°的全局搜索。

经过100万次反演后,去掉前10万次处于预烧期的采样结果。统计分布表明(表3),发震断层长度12.96 km(12.90～13.03 km,95%置信区间,下同),宽度7.96 km(7.85～8.09 km),走向和倾角分别为325.2°(324.8°～325.5°)和32.2°(31.7°～32.7°),断层向北东倾。断层顶深为5.54 km,说明同震破裂并未到达地表,与地质调查结果相符。断层面滑动量以逆冲分量为主,并伴有少量的右旋走滑分量。从各参数的联合概率密度函数分布中可以看出(图2),各参数接近正态分布,且两两参数之间相关性较小,证明了反演结果的稳定性和参数独立性。

表3 东倾发震断层几何参数

Table 3 Geometric Parameters of East Dipping Fault Model

统计项	长度/km	宽度/km	顶深/km	倾角/(°)	走向/(°)	断层X/km	断层Y/km	走滑分量/m	倾滑分量/m
最优值	12.96	7.96	5.54	32.2	325.2	−6.48	2.87	0.10	−0.249
2.5%	12.90	7.85	5.48	31.7	324.8	−6.51	2.81	0.09	−0.253
97.5%	13.03	8.09	5.60	32.7	325.5	−6.45	2.91	0.11	−0.244

注:走滑分量正值代表右旋,负值代表左旋;倾滑分量正值代表正断,负值代表逆冲;断层X和Y表示断层上边界中点与参考点的偏离。

确定断层的几何参数和位置后,本文将断层面沿走向和倾向方向扩展到40 km×40 km,将其按照2 km×2 km的矩形划分为400个子断层,然后使用多时间窗函数线性波形反演方法联合反演InSAR同震形变场和远场体波数据获得震源破裂过程[38-41]。基于本次地震由逆冲主导的特征,将每个子断层滑动方向的范围限定为90°±45°,得到的最优反演结果如图3所示。

反演结果表明,本次积石山地震的断层滑动分布以逆冲为主,兼具少量右旋分量,主要集中在5～20 km处,未破裂至地表;最大滑动量达～0.2 m,位于～13 km处。滑动分布正演结果显示(图4),波形数据基本全部拟合,InSAR数据在主要形变区还残留少量残差,这可能是由于形变场近场失相干,存在一定的解缠误差及早期震后形变造成的。升、降轨对应残差的均方根分别为5.91 mm和5.36 mm,均小于InSAR观测值一个数量级,说明了反演结果的可靠性。

从震源破裂过程可以看出(图5),破裂从断层面10～15 km深度开始破裂,呈圆盘状向四周

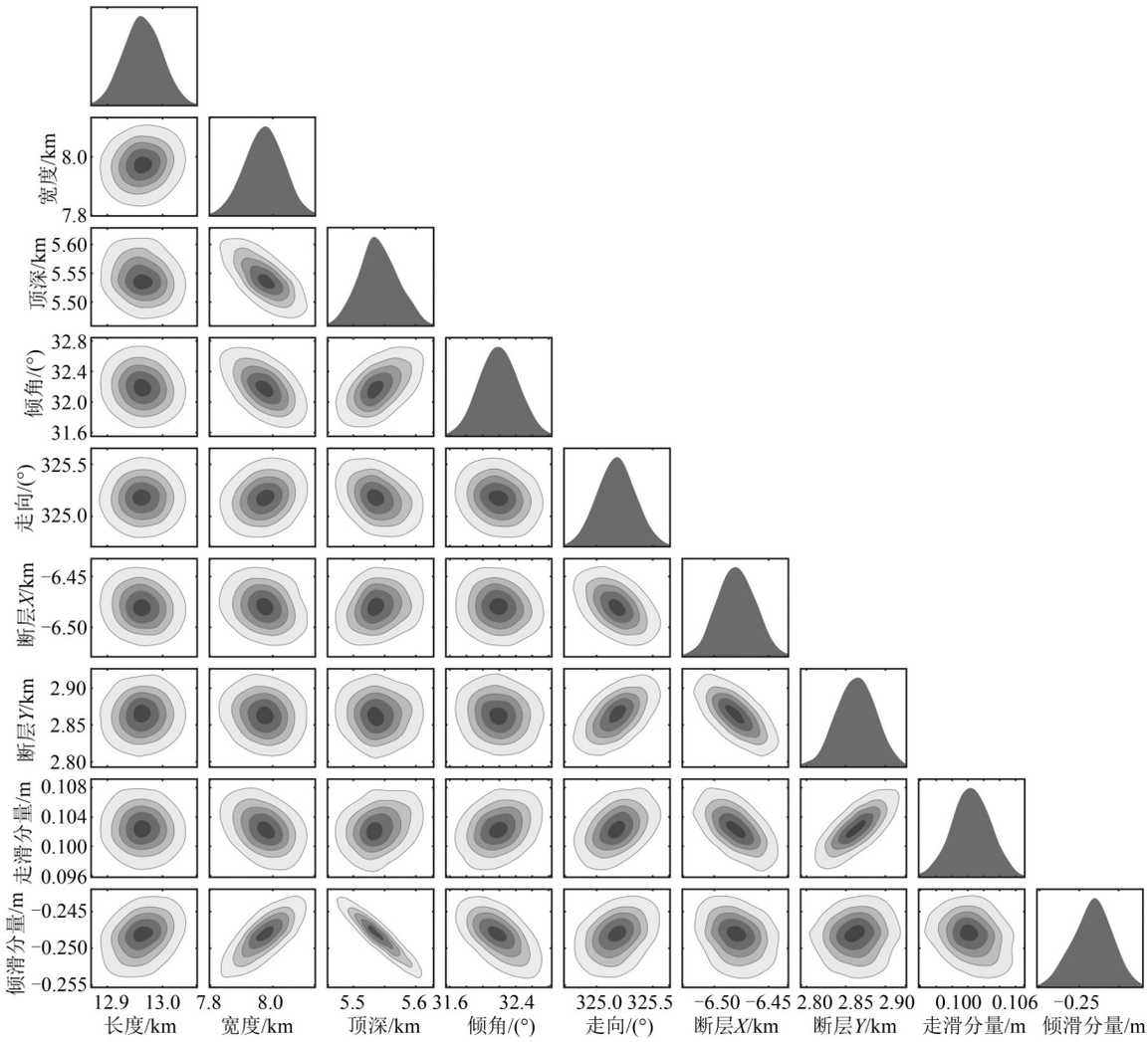


图 2　断层几何参数联合概率密度分布图

Fig. 2　Joint Probability Density Distribution of Fault Geometric Parameters

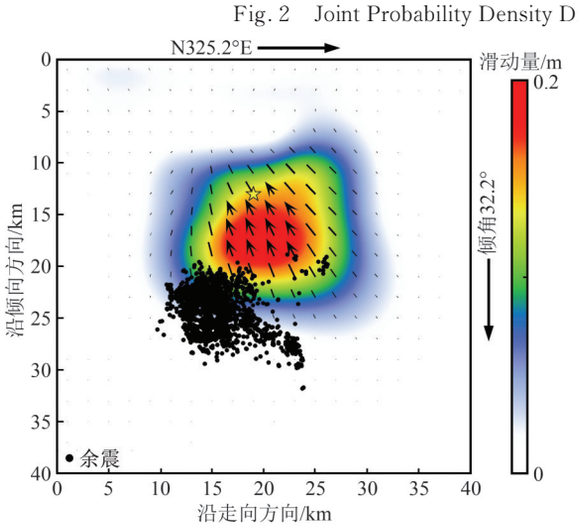


图 3　同震滑动分布模型

Fig. 3　Coseismic Slip Distributed Model

破裂,整体主要向深处破裂,在 5 s 时,矩张量释放达到最大值,之后逐步减小。在破裂结束前 2 s,破裂以圆盘状向外扩展,之后受限于浅部地质构造,破裂演化为不规则破裂。

3　讨　论

3.1　积石山地震发震构造和区域地震风险

本文联合 InSAR 观测和地震波数据确定了积石山 Ms 6.2 地震的发震断层参数和破裂过程。本次地震的 InSAR 同震形变场正好位于拉脊山北缘断裂和南缘断裂的中部,因此无法直接从形变场判别发震断层。基于贝叶斯均一滑动反演结果表明,积石山地震的发震断层为北东倾向,与前人根据余震空间破裂特征、InSAR 同震形变场失相干区空间分布和同震触发滑坡的空间展布等因素得到的断层倾向相同[6-7],因此本文认为此次地震的发震构造为倾向北东的拉脊山南缘断裂。本次地震是一个典型的逆冲事件,地震波约束的破裂过程较为简单,同震滑动集中在 5～20 km 处,最大滑动量达～0.2 m,位于～13 km 处,余震分布主要集中于断层面下方。

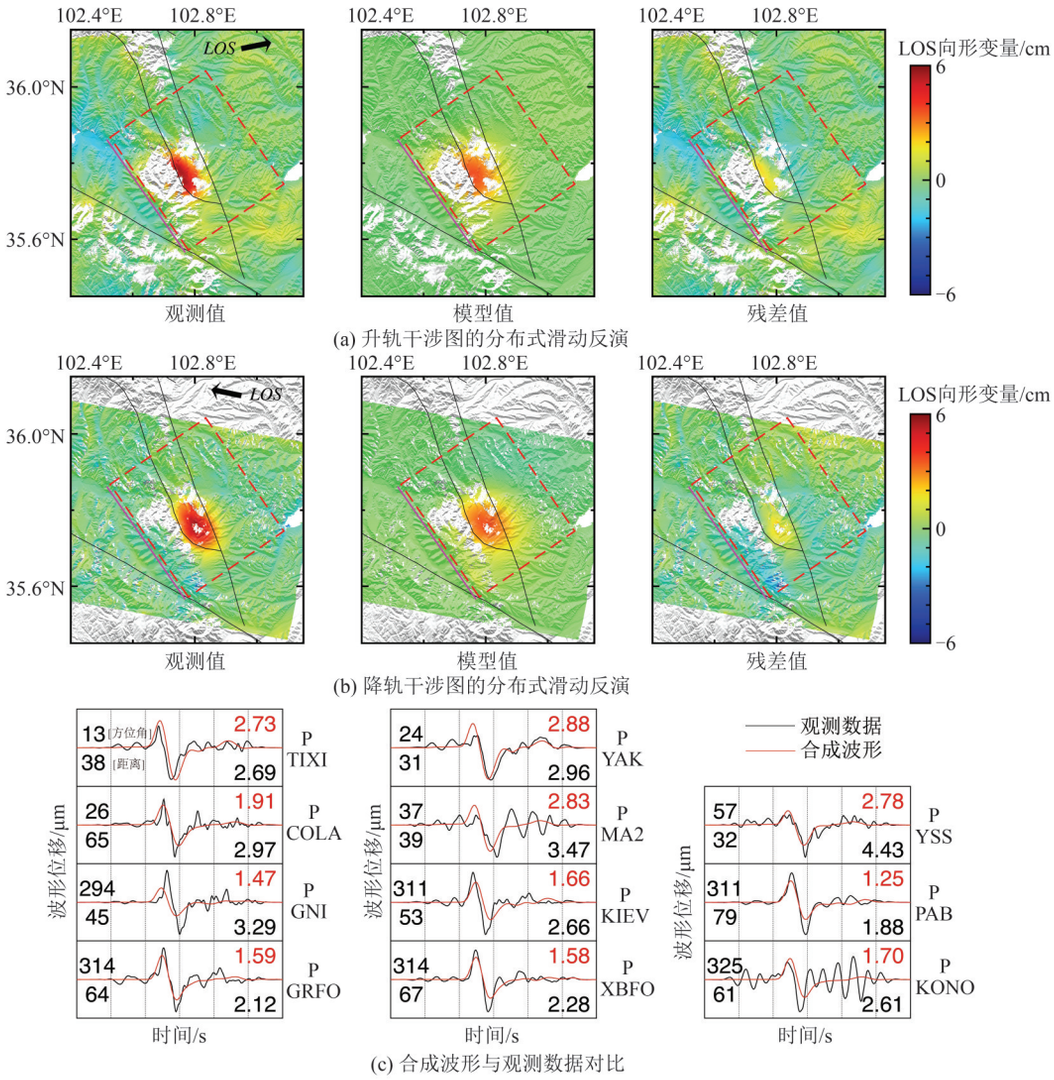


图4 滑动分布反演观测值、模型值及残差值

Fig. 4 Coseismic Observation, Model and Residuals of Inversion of Slip Distribution

地震导致灾害的严重性与地震所引起的地表峰值加速度、地表峰值速度和地表峰值位移紧密相关。为了探究2023年积石山Ms 6.2地震的地表地震动分布,本文使用基于北东倾向断层的最优滑动分布正演获得积石山地震的以0.2 s为时间间隔的地表位移时间序列。通过对位移时间序列进行一次求导和两次求导可以得到速度时间序列和加速度时间序列。如图6所示,基于北东倾向断层的最优滑动分布正演得到的峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)分布和峰值速度(peak ground velocity, PGV)分布与基于InSAR数据得到的地表位移场具有较好的一致性,与USGS发布的PGA、PGV分布的一阶特征基本相似(https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000ljvg/shakemap/),表明本文计算的结果具有较高的可靠性,并且本文的结果具有更加详细的特征。由于正演的频率范围有限,得到的PGA和PGV的值不具有物理意义,但是可以表示相对强度变化。本次积石山地震的影响范围较大,较高的PGA、PGV基本分布在震中附近,与PGA的影响范围相比,PGV的影响区域更大,这可能与浅层岩石的性质与厚度相关。2023年积石山地震震中附近有多个人口聚集区,包括积石山县、官亭镇、吹麻滩镇及其下属乡村,由于本次地震引起了较强的地面加速度运动,并且房屋结构抗震性较弱,导致了严重的人员伤亡和财产损失。2023年积石山地震诱发大量滑坡,前人基于光学卫星影像解译得到同震滑坡3 767处,多为小型的黄土滑坡[2]。滑坡的空间位置与本文根据最优滑动模型计算的PGA、PGV分布具有很好的一致性,这表明由地震引起的地震动是诱发同震滑坡的重要因素之一[2]。沟壑两侧的黄土可能经过较大的加速度运动后变得松散,在重力作用下发生失稳从而发生滑坡。

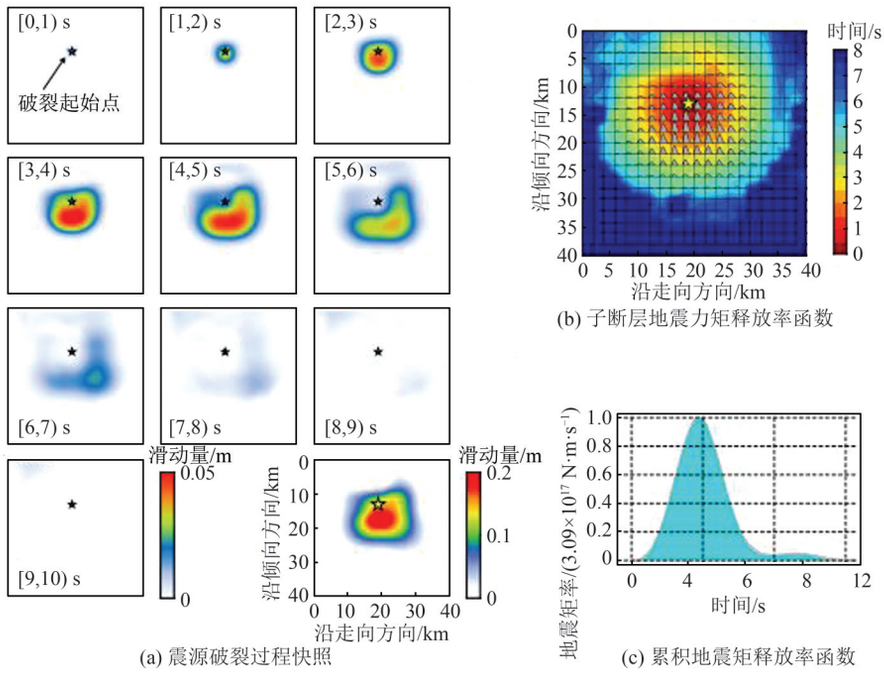


图 5　断层面动态破裂图

Fig. 5　Dynamic Rupture Process on the Fault

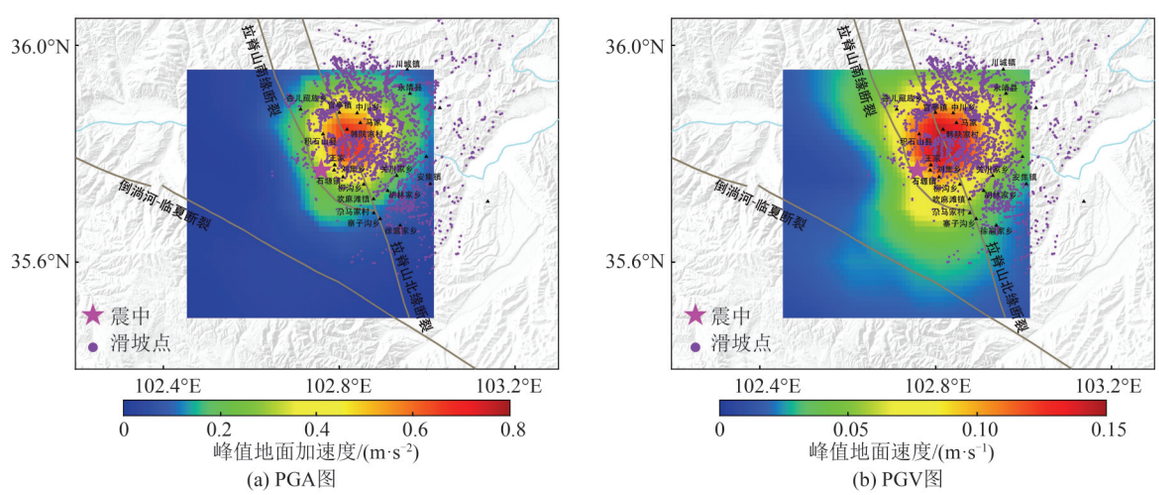


图 6　PGA 图和 PGV 图

Fig. 6　PGA Map and PGV Map

3.2　积石山 Ms 6.2 地震对祁连山内部构造转换的启示

同震形变场和震源机制显示 2023 年积石山 Ms 6.2 地震为一次典型的挤压型地震事件,主压应力轴方向为 NEE 向(N60°～80°E)(表 1)(http://www.ninhm.ac.cn/content/details_104_4376.html),与祁连山 NNE 向的整体挤压方向存在一定的角度偏差[19-20]。祁连山主构造线方向为 N60°～70°W,主要由一系列 NWW 向近平行的条带状挤压山脉、盆地和褶皱断裂带组成,它们的走向大致与印度-欧亚大陆碰撞的方向垂直(N～20°E),说明发生在祁连山地区的挤压构造主要受到板块边界陆-陆碰撞远程效应的影响[10,19]。但是,本次积石山地震的主压应力轴与祁连山整体上的挤压应力方向存在 30°～40°的偏差,说明此次事件的驱动机制可能不是近南北向的挤压,而是其他的构造形式。

本文反演的断层滑动分布模型显示 2023 年积石山 Ms 6.2 地震位于拉脊山断裂的东段。拉脊山断裂走向在其中部发生～30°的偏转,由西段的 NWW 向扭转为东段的 NNW 向[42]。积石山地震的变形方式和震源参数与拉脊山断裂东段的断层几何基本相符。虽然拉脊山断裂东段的断层几何与祁连山整体的挤压主构造线方向不合,

但其西段却与区域内主构造线基本一致。地质学和活动断裂研究认为青海南山断裂和拉脊山断裂西段以逆冲运动为主,并伴随少量的左旋走滑分量[11,21-25,27,43-44]。根据祁连山地区2009—2021年的3.5级以上地震机制,有两次M 4+地震位于青海南山断裂和拉脊山断裂西段,并且这两个地震均显示青海南山断裂和拉脊山断裂西段存在显著的左旋走滑活动[18,45]。

邻近拉脊山断裂有3条规模较大的活动断裂,分别为NWW走向的青海南山断裂、西秦岭断裂以及NNW走向的日月山断裂。日月山断裂以右旋走滑活动为特点,西秦岭断裂以左旋走滑为主兼具一定程度的逆冲分量[11,26,44]。青海南山断裂、拉脊山断裂西段和西秦岭断裂不仅断裂的几何结构相似,断裂的滑动行为也极为相似。如果将青海南山断裂和拉脊山断裂西段视为同一断层系统,那么该断裂带东端和西秦岭断裂西段存在50~80 km阶区,该阶区正好位于拉脊山断裂东段,也是本次积石山Ms 6.2地震的发震位置。根据断层几何分类和运动学特征,在左行左阶的阶区部位会形成张性破裂或者张性正断层,而在左行右阶断裂的阶区部位会形成挤压破裂或者压性逆断层[46-47]。考虑到青海南山断裂、拉脊山断裂和西秦岭断裂的空间分布和运动学特征,左行右阶型的挤压阶区构造与拉脊山断裂东段变形方式相符。走滑断裂之间的阶区部位往往是构造应力容易集中的地方,断层滑动更容易在构造几何的扭曲部位闭锁,有利于地震成核和孕育[46]。同时,阶区构造的规模大小与其所能积累的弹性势能正相关,统计显示尺度超过5 km的阶区能够有效中止破裂的传递,促进地震成核[46]。本次积石山Ms 6.2地震所在的拉脊山断裂东段不仅在构造样式上与阶区构造相符,而且巨大的阶区尺度使其具有较大发震潜能。因此,本次积石山地震很可能发生在东祁连山内部两条大型活动断裂之间的构造转换部位,拉脊山断裂东段是协调青海南山断裂-拉脊山断裂西段和西秦岭断裂左旋走滑作用的阶区构造。

虽然本次积石山Ms 6.2地震发生在祁连山内部一条次级断裂(拉脊山断裂东段)上,但地震强度高、受灾程度重。近20年的地震记录显示,东祁连山的地震活动相对集中,主要分布在海原断裂、鄂拉山断裂、西秦岭断裂和东昆仑断裂等块体边界断裂带上,块体内部的地震活动较弱(图1(a))[18-19,48]。本次积石山地震打破了这种认识,说明青藏高原东北缘地震活动的复杂性。此外,临夏地区为中国西部的黄土覆盖区,该区域地形沟壑纵横、水土流失严重,受外力扰动极易发生滑坡、崩塌等地质灾害[1-2]。因此,在地震危险性评价工作中,除了考虑地下构造对地震强度的控制作用外,地表场地条件也是评估地震危险性不可忽视的因素。

4 结 语

本文联合InSAR和地震波数据反演了2023年甘肃省积石山县地震的断层几何参数、同震滑动分布及其破裂过程。反演结果显示,此次地震发生在一条32.2°北东倾向、325.2°北西走向的断层上,同震滑动分布主要集中在深度5~20 km的范围内。在深度13 km处滑动量最大,为0.2 m,同震滑动产生了1.3×10^{18} N·m的矩张量,相当于矩震级Mw 6.0。基于贝叶斯反演结果及区域构造,认为此次地震破裂在东北倾的拉脊山南缘断裂上,结合邻区主要活动断裂的断层几何和运动学特征,认为本次积石山地震所在的拉脊山断裂东段可能是青海南山断裂、拉脊山断裂西段和西秦岭断裂的阶区转换构造,该阶区的左行右阶型挤压作用为本次逆冲型地震事件的驱动机制。本文强调断层几何的不连续性和区域场地条件在地震危险性评价中的重要性。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所房立华研究员提供的余震精定位数据,欧洲航天局提供的哨兵1A数据(https://asf.alaska.edu/),IRIS数据管理机构提供的远震数据,长安大学李振洪教授提供的滑坡点位数据,活动断裂数据来自www.activefault-datacenter.cn/map;本文中大部分图采用GMT绘制[49]。

参 考 文 献

[1] 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),2024,51(1):1-8.
WANG Yunsheng, ZHAO Bo, JI Feng, et al. Preliminary Insights into the Hazards Triggered by the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science Technology Edition)*, 2024, 51(1): 1-8.

[2] 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.

[3] 倪瑞胜, 许文斌. 震形图 APP: 一种基于 Android 系统的地震形变模拟应用程序[J]. 地球与行星物理论评, 2023, 54(6): 622-632.
NI Ruisheng, XU Wenbin. Codefmap APP: A Seismic Deformation Simulation Application Based on Android System [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, 54(6): 622-632.

[4] LI S W, XU W B, LI Z W. Review of the SBAS InSAR Time-Series Algorithms, Applications, and Challenges[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2022, 13(2): 114-126.

[5] LIU H Z, XIE L, ZHAO G Q, et al. A Joint InSAR-GNSS Workflow for Correction and Selection of Interferograms to Estimate High-Resolution Interseismic Deformations [J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 14.

[6] 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.

[7] 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.

[8] TAPPONNIER P, MEYER B, AVOUAC J P, et al. Active Thrusting and Folding in the Qilian Shan, and Decoupling Between Upper Crust and Mantle in Northeastern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97(3): 382-403.

[9] YIN A, HARRISON T M. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211-280.

[10] WANG Q, ZHANG P Z, FREYMUELLER J T, et al. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements[J]. *Science*, 2001, 294(5542): 574-577.

[11] 袁道阳, 张培震, 刘百篪, 等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 270-278.
YUAN Daoyang, ZHANG Peizhen, LIU Baichi, et al. Geometrical Imagery and Tectonic Transformation of Late Quaternary Active Tectonics in Northeastern Margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 270-278.

[12] 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.

[13] 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.

[14] LI Y H, LIU M, WANG Q L, et al. Present-Day Crustal Deformation and Strain Transfer in Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 487: 179-189.

[15] 徐化超, 王辉, 曹建玲. 青藏高原东北缘主要断裂滑动速率及其动力学意义[J]. 地震, 2018, 38(3): 13-23.
XU Huachao, WANG Hui, CAO Jianling. Slip Rates of the Major Faults in the Northeastern Tibetan Plateau and Their Geodynamic Implications [J]. *Earthquake*, 2018, 38(3): 13-23.

[16] PAN Z Y, YUN Z, SHAO Z G. Contemporary Crustal Deformation of Northeast Tibet from Geodetic Investigations and a Comparison Between the Seismic and Geodetic Moment Release Rates [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2020, 304: 106489.

[17] PAN Z Y, HE J K, SHAO Z G. Spatial Variation in the Present-Day Stress Field and Tectonic Regime of Northeast Tibet from Moment Tensor Solutions of Local Earthquake Data [J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 221(1): 478-491.

[18] CHEN Z D, KORONOVSKII N V, ZAITSEV V A, et al. Active Tectonic Deformation of the Qilian Shan, Northeastern Tibetan Plateau [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2024, 65(7): 779-794.

[19] ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data [J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809.

[20] CHEN Z D, XU W B, LIU R, et al. Tectonic Deformation of the Western Qilian Shan in Response to the North - South Crustal Shortening and Sinistral Strike-Slip of the Altyn Tagh Fault Inferred from Geomorphologic Data[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 808935.

[21] WANG E, SHI X H, WANG G, et al. Structural Control on the Topography of the Laji - Jishi and Riyue Shan Belts in the NE Margin of the Tibetan Plateau: Facilitation of the Headward Propagation of the Yellow River System [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(4): 1002-1014.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 李智敏, 田勤俭, 屠泓为. 拉脊山断裂带遥感特征研究[J]. 高原地震, 2009, 21(1): 26-31.
LI Zhimin, TIAN Qinjian, TU Hongwei. Remote Sensing Characteristics of Lajishan Fault [J]. *Plateau Earthquake Research*, 2009, 21(1): 26-31.

[25] 王二七, 张旗, Clark B. Burchfiel. 青海拉鸡山: 一个多阶段抬升的构造窗[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 493-500.
WANG Erqi, ZHANG Qi, BURCHFIEL C B. The Lajishan Fault Belt in Qinghai Province: A Multi-staged Uplifting Structural Window[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(4): 493-500.

[26] 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: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology, 2012.

[27] 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 Changjun, 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.

[28] LI X N, PIERCE I K D, BORMANN J M, et al. Tectonic Deformation of the Northeastern Tibetan Plateau and Its Surroundings Revealed with GPS Block Modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(5): e2020JB020733.

[29] WALD D J, HEATON T H, HUDNUT K W. The Slip History of the 1994 Northridge, California, Earthquake Determined from Strong-Motion, Teleseismic, GPS, and Leveling Data [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(1B): S49-S70.

[30] QIAN Y Y, NI S D, WEI S J, et al. The Effects of Core-Reflected Waves on Finite Fault Inversions with Teleseismic Body Wave Data[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 211(2): 936-951.

[31] LASKE G, MASTERS G, MA Z, et al. Update on CRUST1.0—A 1-Degree Global Model of Earth's Crust[C]// EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2013.

[32] KENNETT B L N, ENGDAHL E R, BULAND R. Constraints on Seismic Velocities in the Earth from Traveltimes[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122(1): 108-124.

[33] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 2005RG000183.

[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] ZHU L P, RIVERA L A. A Note on the Dynamic and Static Displacements from a Point Source in Multilayered Media [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 619-627.

[36] SHEN W S, RITZWOLLER M H, KANG D, et al. A Seismic Reference Model for the Crust and Uppermost Mantle Beneath China from Surface Wave Dispersion [J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 206(2): 954-979.

[37] BAGNARDI M, HOOPER A. Inversion of Surface Deformation Data for Rapid Estimates of Source Parameters and Uncertainties: A Bayesian Approach [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(7): 2194-2211.

[38] SEKIGUCHI H. Fault Geometry at the Rupture Termination of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(1): 117-133.

[39] HARTZELL S H, HEATON T H. Inversion of Strong Ground Motion and Teleseismic Waveform Data for the Fault Rupture History of the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1983, 73(6A): 1553-1583.

[40] OLSON A H, APSEL R J. Finite Faults and Inverse Theory with Applications to the 1979 Imperial Valley Earthquake[J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, 72(6A): 1969-2001.

[41] ZHENG A, YU X W, XU W B, et al. A Hybrid Source Mechanism of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou Earthquake Revealed by the Joint Inversion of Strong-Motion, Teleseismic and InSAR Data[J]. *Tectonophysics*, 2020, 789: 228538.

[42] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学, 2002, 32(12): 1020-1030.
DENG Qidong, ZHANG Peizhen, RAN Yongkang, et al. Basic Characteristics of Active Structures in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2002, 32(12): 1020-1030.

[43] ZHENG D W, ZHANG P Z, WAN J L, et al. Late Cenozoic Deformation Subsequence in Northeastern Margin of Tibet—Detrital AFT Records from Linxia Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2003, 46(S2): 266-275.

[44] YUAN D Y, CHAMPAGNAC J D, GE W P, et al. Late Quaternary Right-Lateral Slip Rates of Faults Adjacent to the Lake Qinghai, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123(9/10): 2016-2030.

[45] 郭祥云, 蒋长胜, 韩立波, 等. 中国大陆及邻区震源机制数据集(2009—2021年)[EB/OL]. (2022-03-16) https://data.earthquake.cn.
GUO Xiangyun, JIANG Changsheng, HAN Libo, et al. Focal Mechanism Data Set in Chinese Mainland and Its Adjacent Area(2009—2021)[EB/OL]. (2022-03-16) https://data.earthquake.cn.

[46] 邓起东, 朱艾斓, 高翔. 再议走滑断裂与地震孕育和发生条件[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 562-573.
DENG Qidong, ZHU Ailan, GAO Xiang. Re-Evaluation of Seismogenic and Occurrence Conditions of Large Earthquakes on Strike-Slip Faults[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(3): 562-573.

[47] ACOCELLA V. Volcano-Tectonic Processes[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2021.

[48] WANG Y Z, WANG M, SHEN Z K. Block-Like Versus Distributed Crustal Deformation Around the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 140: 31-47.

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