



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：2021年阿克塞 Ms5.5 级地震区形变特征及发震机制研究

作者：邹小波，李兴坚，邵延秀，袁道阳，邱江涛，尹欣欣，寇俊阳

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023125

投稿时间：2023-07-31

录用时间：2024-06-03

预出版时间：2024-11-29

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

引用格式: 邹小波, 李兴坚, 邵延秀, 等, 2024. 2021年阿克塞 $M_s5.5$ 级地震区形变特征及发震机制研究[J]. 地质力学学报, 30(2): 000-000. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023125

Citation: ZOU Xiaobo, Li Xingjian, Shao Yanxiu, et al., 2024. Tectonic deformation and seismic mechanism of the 2021 Aksai $M_s5.5$ earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 30(2): 000-000. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023125

2021年阿克塞 $M_s5.5$ 级地震区形变特征及发震机制研究¹

邹小波^{1,2}, 李兴坚^{1,2}, 邵延秀^{3,4}, 袁道阳⁵, 邱江涛⁶, 尹欣欣^{1,2}, 寇俊阳^{1,2}

ZOU Xiaobo^{1,2}, Li Xingjian^{1,2}, SHAO Yanxiu^{3,4}, YUAN Daoyang⁵, QIU Jiangtao⁶, Yin Xinxin^{1,2}, KOU Junyang^{1,2}

1. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000;
2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000;
3. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072;
4. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;
5. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000;
6. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054;

1. *Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China;*
2. *Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;*
3. *School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*
4. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*
5. *School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;*
6. *The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shanxi, China;*

Tectonic deformation and seismic mechanism of the 2021 Aksai $M_s 5.5$ earthquake

Abstract: [Objective] On August 26, 2021, an $M_s5.5$ earthquake occurred in Aksai, Gansu Province. The epicenter is located along the southern piedmont of the Danghe Nan Shan. This event garnered significant attention because of its deformation characteristics and seismogenic mechanisms. Existing studies have mainly focused on emergency response and seismic activity analyses; however, there is a lack of research on tectonic deformation and seismic mechanisms. This study aimed to fill this gap by analyzing the deformation characteristics of the earthquake zone and revealing its seismogenic mechanism. [Methods] This study employed seismological methods combined with Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology to investigate the tectonic deformation and seismic mechanism of the 2021 Aksai $M_s5.5$ earthquake. Combining focal mechanism solutions, precise earthquake locations, and InSAR results, the seismogenic fault and its geometric and kinematic parameters were determined and validated through geological field surveys. [Results] This study applied joint inversion with both local and teleseismic waveforms (the generalized cut-and-paste joint, gCAPjoint) to source parameters. The fault solutions strike 315° , dip 41° , rake 81° , depth 6.9 km. We relocated the Aksai earthquake and its aftershocks using the hypoinverse and double-difference method (HypoDD), and accurate locations of 88 earthquakes were obtained. The 2021 $M_s5.5$ earthquake sequence in Aksai is distributed near the southern Danghe Nan Shan fault, with a fault dip toward the NE. The co-seismic

¹基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0901); 甘肃省青年科技基金计划(22JR11RA088); 地震动力学国家重点实验室项目(LED2023B04); 甘肃省地震局地震科技发展基金(2021Y12,2019Y05)

This research is financially supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (Grant No. 2019QZKK0901), Science and Technology Plan of Gansu Province (22JR11RA088), State Key Laboratory of Earthquake Dynamics(LED2023B04), and the Earthquake Science and Technology Development Fund, Gansu Earthquake Agency(2021Y12,2019Y05).

第一作者: 邹小波(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事构造地貌和地震学研究。Email: ynzouzou@163.com

通讯作者: 李兴坚(1980—), 男, 高级工程师, 从事地震监测工作。Email: lixj20@163.com

收稿日期: 2023-07-31; 修回日期: 2024-05-29; 录用日期: 2024-06-03; 网络发表日期: ; 责任编辑: 范二平

deformation field indicated by InSAR matched the macro-epicenter with the precise location results, confirming the reliability of the precise location. Both the ascending and descending orbit surface deformation fields showed uplift near the epicenter with similar magnitudes and signs in the line-of-sight direction, indicating that the earthquake rupture was mainly thrusting. Fault scarps near the epicenter along the southern piedmont of the Danghe Nan Shan were recognized in the field and satellite images. Combined data from focal mechanism solutions, precise earthquake locations, and InSAR coseismic deformation fields, along with field geological survey results, indicate that the seismogenic fault of this event was the southern Danghe Nan Shan Fault, with a strike of 315° , dip of 41° , and rake of 81° . [Conclusion] This study indicated that the seismogenic fault of this event was the southern Danghe Nan Shan fault, which is a thrust fault. The fault solutions strike 315° , dip 41° , rake 81° , depth 6.9 km. Because of the northward extrusion thrust of the Qinghai-Xizang block, the seismic activity in the northern part of the Qaidam block has significantly increased. The future seismic risk of the central and eastern sections of the Altyn Tagh Fault and western Qilian Shan should be emphasized. [Significance] This study provides new insights and methods for researching active tectonics. It holds significant scientific importance and innovation in understanding seismogenic mechanisms and structural transformation, as it helps to understand the mode and magnitude of slip transfer between the strike-slipping of the Altyn Tagh fault and the shortening of the Qilian Shan and also contributes to a better evaluation of the seismic risk in this region.

Keywords: Gansu Aksai M_s 5.5 earthquake in 2021; the focal mechanism solutions; seismogenic structure; southern Danghe Nanshan fault

摘要: 2021年8月26日甘肃阿克塞党河南山地区发生了 M_s 5.5 地震,震中位于阿尔金走滑断裂与祁连山西段挤压逆冲断裂的构造转换区。明确此次地震的形变特征及发震机制,有助于认识边界走滑断裂与逆冲断裂系之间应变分配和构造转换的大陆动力学问题,同时对祁连山西段的地震危险性评价具有重要意义。利用远场地震波形联合反演 (the generalized Cut-and-Paste joint, gCAPjoint) 此次地震的震源机制解。通过对地震序列走时信息以及地震前后的合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 影像数据进行处理,得到了此次地震序列的精确空间位置 and 同震形变场;并结合震中附近活动构造和构造地貌实地调查,认为此次地震的发震构造为党河南山南缘断裂,断裂活动性质为逆冲型。该断裂走向为 315° 、倾角为 41° 、滑动角为 81° ,震源矩心深度为 6.9km。随着青藏高原向北东向的挤压扩展,柴达木地块北部地震活动显著增强,未来阿尔金断裂东段和祁连山西段的地震危险性应重点关注。

关键字: 2021年甘肃阿克塞 M_s 5.5 地震;震源机制解;发震构造;党河南山南缘断裂

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (202×) 00-0000-00

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023125

0 引言

根据中国地震台网中心 (CENC) 测定,2021年8月26日7时38分在甘肃省阿克塞县发生了 M_s 5.5 地震,地震震中位于祁连山西段的党河南山地区,该区域主要发育党河南山断裂,该断裂总体呈北西走向,西端与阿尔金断裂相接,是青藏高原巨型走滑断裂向挤压逆冲构造转换的重要区域 (Meyer et al., 1996, 1998; van der Woerd et al., 2001; Tapponnier et al., 2001; 徐锡伟等, 2003)。由于该区域在高原构造变形和构造转换中具有重要作用,相关学者曾对该区域活动构造的几何展布、活动特征、滑动速率和古地震等开展了深入研究 (赵朋, 2009; 邵延秀, 2010; 邵延秀等, 2011; Shao et al., 2017, 2023; 王朋涛, 2016)。但是由于交通条件、数据资料和技术手段等因素的限制,这些研究主要集中在党河南山北缘断裂,并且以地表构造变形研究为主,对于断裂深部的构造特征以及党河南山南缘断裂的研究却很少。厘定此次阿克塞地震的发震构造及其发震机制,对于理解党河南山地区地震的构造成因和未来地震危险性评估具有重要意义。

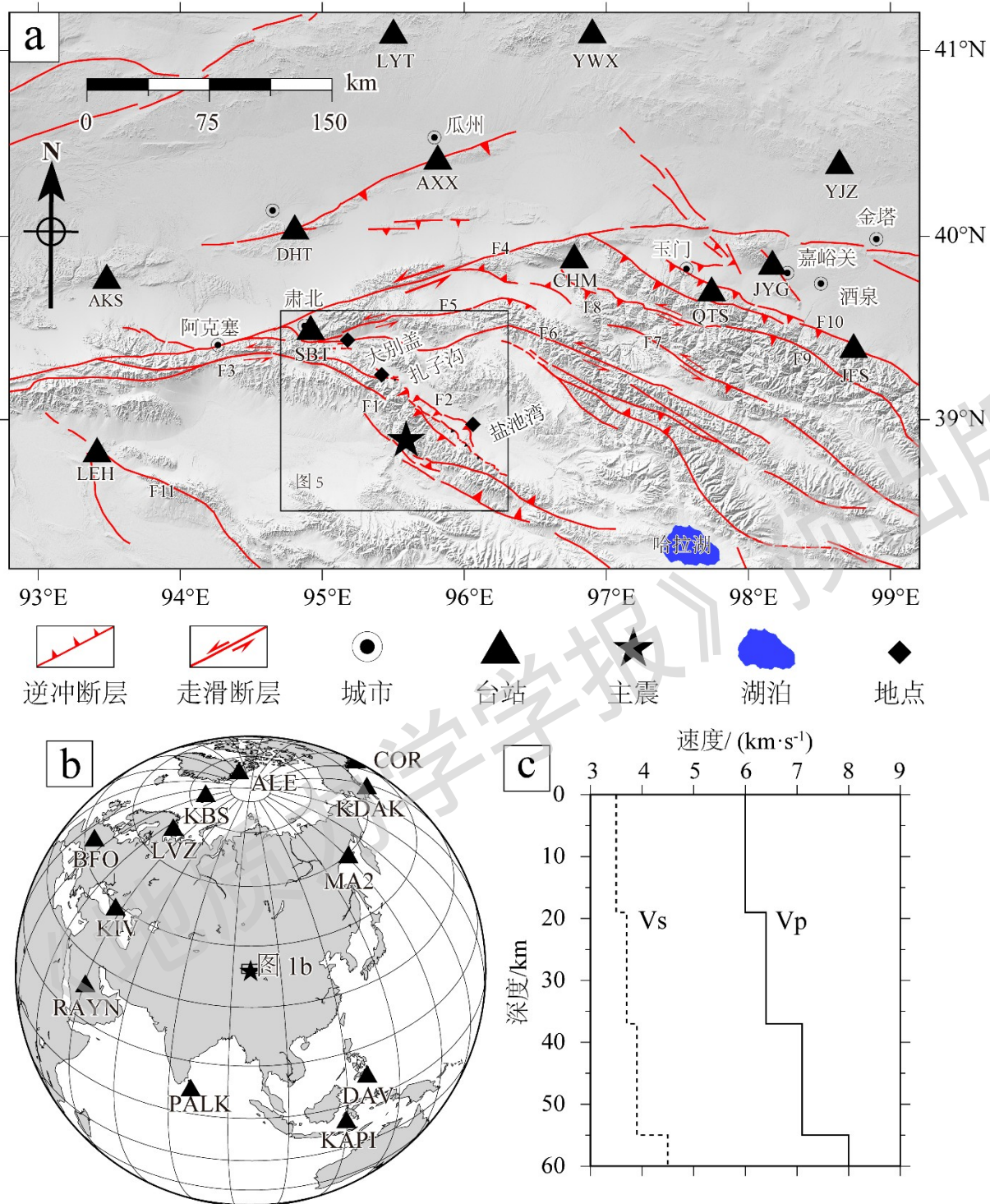
阿克塞 M_s 5.5 地震的发生为探查认识该区域深部构造提供了重要途径。文章采用近远场地震波形联合反演阿克塞 M_s 5.5 地震的震源机制解,并对此次地震序列进行了精确定位,通过地震空间展布特征和震源机制解明确了深部断裂的几何特征和运动学性质;在此基础上,结合卫星影像解译、野外地质调查和合成孔径雷达干涉测量技术 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 等技术获取到地表和近地表的变形特征,并对此次地震的发震构造的变形特征和发震机制进行了探讨,从而可以更好地理解祁连山西段的孕震机理和强震迁移规

律。

1 区域构造背景

新生代以来，受印度板块与欧亚大陆碰撞的影响，青藏高原持续隆升并向周边挤压扩展（Tapponnier et al., 2001；张培震等，2006，2014；Yuan et al., 2013；郑文俊等，2016）。祁连山造山带西段位于青藏高原向北扩展的前缘部位，处于阿尔金断裂和广义海原断裂所围限的右阶挤压区（Hetzel et al., 2002；郑文俊等，2009，2016；Zheng et al., 2013），构造活动十分强烈。边界巨型走滑断裂在此转换形成了一系列挤压逆冲构造，如党河南山断裂、野马河-大雪山断裂、疏勒南山断裂和昌马断裂等（Meyer et al., 1998；van der Woerd et al., 2001）。这些活动断裂都以挤压逆冲为主，部分兼具左旋走滑特征。其中，党河南山断裂西接阿尔金断裂，南部与柴达木地块相邻，由于其特殊地理位置，使得其在阿尔金走滑断裂与祁连山挤压构造区之间的构造转换和应变分配中承担着重要作用（Meyer et al., 1996，1998；van der Woerd et al., 2001；Tapponnier et al., 2001）。

党河南山断裂分布于党河南山南、北两麓，包括党河南山南缘断裂、党河南山北缘断裂。党河南山断裂西端与阿尔金断裂相接，经大别盖、扎子沟向东延伸至哈拉湖，走向呈北西向（图 1a）。Shao et al.（2023）研究认为，党河南山北缘断裂为逆冲性质，倾向南西。基于质量守恒模型计算出西段党河南山北缘的总隆升和缩短速率分别为 1~2 mm/a 和 1 mm/a，东段盐池湾一带的隆升速率和缩短速率为 0.17 ± 0.02 mm/a 和 0.34 ± 0.05 mm/a（van der Woerd et al., 2001）。古地震探槽揭示出 6700 a 以来党河南山北缘断裂至少发生过 4 次古地震事件，最新一次古地震事件的活动时间可能为公元 1289 年，震级约为 $M_w 6.6\pm 0.5$ （Shao et al., 2017）。王朋涛（2016）通过地貌测量和古地震探槽剖面揭示党河南山北缘断裂盐池湾段总体走向为北西向，全长约为 110 km，倾向为南南西，倾角为 $20^\circ\sim 30^\circ$ ，为低角度逆冲断裂。党河南山北缘断裂晚更新世来活动强烈，其隆升速率为 0.3 ± 0.1 mm/a，缩短速率为 0.8 ± 0.2 mm/a。2021 年阿克塞地震震中位于党河南山南麓山前，附近发育党河南山南缘断裂。相较于党河南山北缘断裂，党河南山南缘断裂的相关研究较少；但通过高分辨率遥感影像和野外实地踏勘可以清晰识别其断错山前冲洪积扇地层，并形成断层陡坎。



F1—党河南山南缘断裂；F2—党河南山北缘断裂；F3—阿尔金山南缘断裂；F4—阿尔金山断裂；F5—野马河-大雪山断裂；F6—疏勒南山断裂；F7—中祁连北缘断裂；F8—昌马断裂；F9—肃南-祁连断裂；F10—红崖子-佛洞庙断裂；F11—柴达木北缘断裂

a—远震波形台站分布；b—近震波形台站分布；c—研究区地壳速度模型（ V_p 为 P 波速度， V_s 为 S 波速度）

图 1 震中台站分布图和本文使用的地壳速度模型

Fig. 1 Epicenter and station distribution, and crustal velocity model used in this study

(a) Distribution of teleseismic station; (b) Distribution of local station and active faults; (c) The crustal velocity model for this study (the dashed line represents the S-wave and the solid line represents the P-wave, V_p is the P-wave velocity, and V_s is the S-wave velocity)

F1— Southern Danghe Nan Shan Fault; F2— Northern Danghe Nan Shan Fault; F3 and F4 are the south and north strands of the Altyn Tagh

Fault; F5—Yema He - Daxue Shan Fault; F6—Shule Nan Shan Fault; F7—North Central Qilian Fault; F8— Changma Fault; F9— Sunan-Qilian Fault; F10—Hongyazi—Fodongmiao Fault; and F11—North Qaidam Fault.

2 方法和数据处理

2.1 震源机制解反演

震源机制解可以直观反映发震断裂的几何学和运动学特征，为发震机制研究提供丰富的深部信息（易桂喜等，2016；王光明等，2021）。研究区位于青藏高原北部，地震台站分布稀疏，主要分布于震中北侧，在震中以南半区 350 km 内没有台站，350km 以内台站的最大空隙角达到 190°。远震波形可以很好地弥补近震波形数量和台站分布的不足，有利于优化反演台站分布（图 1a、1b）。同时，由于震中距 30°~90°的远震波形清晰记录了 pP、sP、sS 等对深度敏感的自由表面反射震相，从而可以更好地对震源深度进行约束（Engdahl et al., 1998）。

文章采用 gCAPjoint 方法综合利用近远震波形联合反演震源机制解（陈伟文等，2012；谢祖军等，2013；Bai et al., 2020）。将近震波形分为体波（Pnl）和面波，远震波形分为垂向分量（Z 分量）的 P 波和切向分量的 SH 波，并赋予不同权重，通过网格搜索算法得到理论波形与观测波形拟合的全局最优解，从而得到震源机制解和最佳震源矩心深度（Zhao and Helmberger, 1994, 1996）。

gCAPjoint 方法通过对观测波形与理论波形进行互相关分析获取时移来对齐波形（Zhao and Helmberger, 1994），从而减小速度模型误差的影响。拟合误差函数采用绝对振幅，在引入距离影响因子的同时，赋予不同波形不同的权重，避免近台和面波的主导作用，并保留波形中丰富的震源信息，从而大大降低了反演对速度模型和记录数量的要求。联合反演时，设定相关权重参数满足：

$$w_p \frac{rms_p}{n_p} = w_s \frac{rms_s}{n_s} \quad (1)$$

式中，P—近震体波或远震 P 波，S—近震面波或远震 SH 波， w —反演波形权重， rms —理论波形与记录波形的 L2 范数残差之和， n —反演波形数量。这样设定可以均分近震与远震数据、远震 P 波与 SH 波、近震 Pnl 波与面波在反演中的误差，使得各波形在联合反演中具有相同的权重（Bai et al., 2020）。

近震波形数据选取 350 km 内的宽频带台站波形，来自甘肃和青海地震台网。远震数据为震中距 30°~90°的宽频带台站波形，来自 IRIS 网站（www.iris.edu）。台站分布见图 1a、1b。经过去均值、去趋势和去除仪器响应后，将波形旋转至径向分量（R 分量）、切向分量（T 分量）、垂向分量（Z 分量）。

计算近震和远震格林函数时采用 Crust2.0 速度模型（图 1c），地幔模型采用 PREM 模型。分别使用频率-波数（F-K）程序和 Tel 3 程序计算近震和远震的格林函数。

全局搜索时，Pnl 和 P 波的时移为 5 s，面波和 SH 波的时移为 10 s；近震和远震波形的搜索窗长均为 60 s。为减少速度结构误差和背景噪声的影响，反演时需要将波形进行 Butterworth 带通滤波，Pnl 波和 P 波的滤波频率为 0.02~0.1Hz、面波和 SH 波的滤波频率为 0.02~0.08Hz。

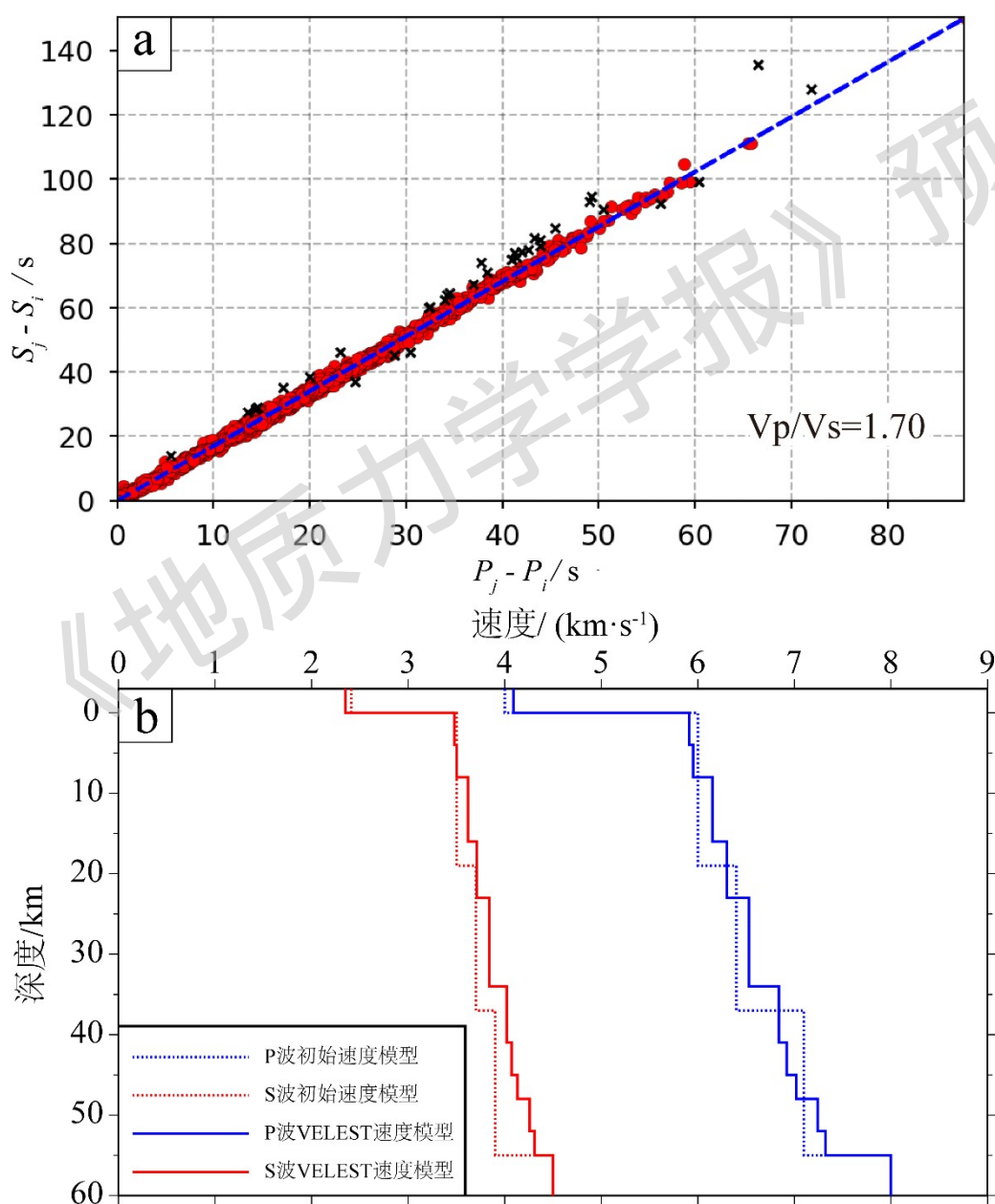
2.2 地震精定位

采用双差定位法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）对此次阿克塞 $M_s5.5$ 地震序列进行重定位。该方法选取 2 个距离非常近的地震事件组成地震对，根据地震对走时残差的差（即走时双差）反演地震对的相对位置。由于地震对到同一台站的射线传播路径几乎相同，双差定位方法降低了传播路径不均匀和速度模型误差的影响，从而极大提高了相对定位的精度（张广伟等，2013；王光明等，2021；薛善余等，2023）。但是该方法比较依赖震源区速度模型和初始地震定位的精度。因此，研究先通过 VELEST 反演研究区最小一维速度模型

(Kissling et al., 1994)，并采用 Hypoinverse 定位法 (Klein, 1978) 对地震序列进行初始绝对定位，再利用双差定位法对重定位结果进行精定位。

地震精定位使用的地震观测报告来自中国地震台网中心的全国地震编目系统，数据时段为 2008 年 1 月—2023 年 7 月。首先挑选记录台站数不少于 5 个、最近台站震中距小于 90km、平均台站震中距小于 250km 的地震事件进行最小一维速度模型反演。根据观测报告绘制的震相走时曲线，对明显偏离理论走时曲线的数据进行剔除 (图 2a)，得到理论波速比为 $V_p/V_s=1.70$ (V_p 为 P 波速度； V_s 为 S 波速度)。然后通过 VELEST 程序反演得到最小一维 P 波、S 波速度模型和台站校正正值 (Kissling et al., 1994, 1995；图 2b)。最后利用最小一维速度模型，绝对定位得到共计 202 次地震事件的初始震源位置。

利用 ph2dt 程序得到目录走时差数据，速度模型为区域最小一维速度模型 (图 2b)，反演方法为共轭梯度法 (LSQR)。双差定位时对不同的地震事件丛集设置不同的参数，考虑人工震相拾取误差，反演过程中 P 波震相权重设定为 1.0，S 波震相权重设定为 0.6，通过调整阻尼因子 (damping factor, DAMP) 使得条件数 (condition number, CND) 始终维持在 40~80。



a—波速比 (横坐标为 P 波走时 (P_j) 与最小 P 波走时 (P_i) 的差，纵坐标为对应 S 波走时 (S_j) 与最小 S 波走时 (S_i) 的差。其中黑色 x 为波速比拟合数据

中的离群点，不参与拟合。红色实心圆为参与波速比拟合的数据点，蓝色虚线为波速比拟合线）；b—文中所使用的地壳速度模型

图2 波速比和地壳速度模型

Fig. 2 Wave velocity ratio and velocity model used in the study

(a) Wave velocity ratio (the horizontal axis represents the difference between P-wave travel time (P_i) and the minimum P-wave travel time (P), while the vertical axis represents the difference between corresponding S-wave travel time (S_i) and the minimum S-wave travel time (S). The black "x" marks indicate outliers in the velocity ratio fitting data and are not included in the fitting process. The blue dashed line represents the fitted velocity ratio line) ; (b) velocity model (the dashed line is the initial velocity model and the solid line is the VELEST velocity model; the red line represents the S-wave, and the blue line represents the P-wave)

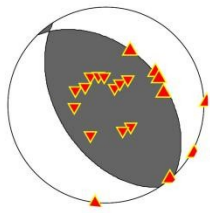
2.3 InSAR 同震形变

合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 利用卫星发射微波在地面的反射进行相位差分，从而可以计算地表微小变形 (Massonnet and Feigl, 1998)，由于其高分辨率、准确高效等优势，在滑坡识别、地表形变监测中得到广泛应用 (肖星光, 2019; 李凌婧等, 2022)。利用覆盖整个震区的 C 波段 Sentinel-1 SAR 影像数据 (干涉宽模式, IW)，采用二轨法进行 D-InSAR 处理 (Massonnet and Feigl, 1998)，外部高程模型采用 30m 分辨率的 SRTM 数据 (Shuttle Radar Topography Mission, <https://dwtkns.com/srtm30m/>)。在生成差分干涉图像的影像配准时，多视比例设置为 10:2 (距离向: 方位向)。采用频率域自适应滤波方法对干涉图像进行滤波，利用枝切法 (Goldstein and Werner, 1998) 解缠得到差分干涉相位，并通过额外的迭代步骤对干涉图中存在的解缠误差进行校正 (邱江涛等, 2019; 邱江涛和孙建宝, 2023)。此外，针对原始干涉图中的相位延迟，利用数字高程模型建立大气相位延迟模型；对于大气水汽引起的相位延迟进行去除，最后进行地理编码输出，最终获取升、降轨同震形变场。

3 分析结果

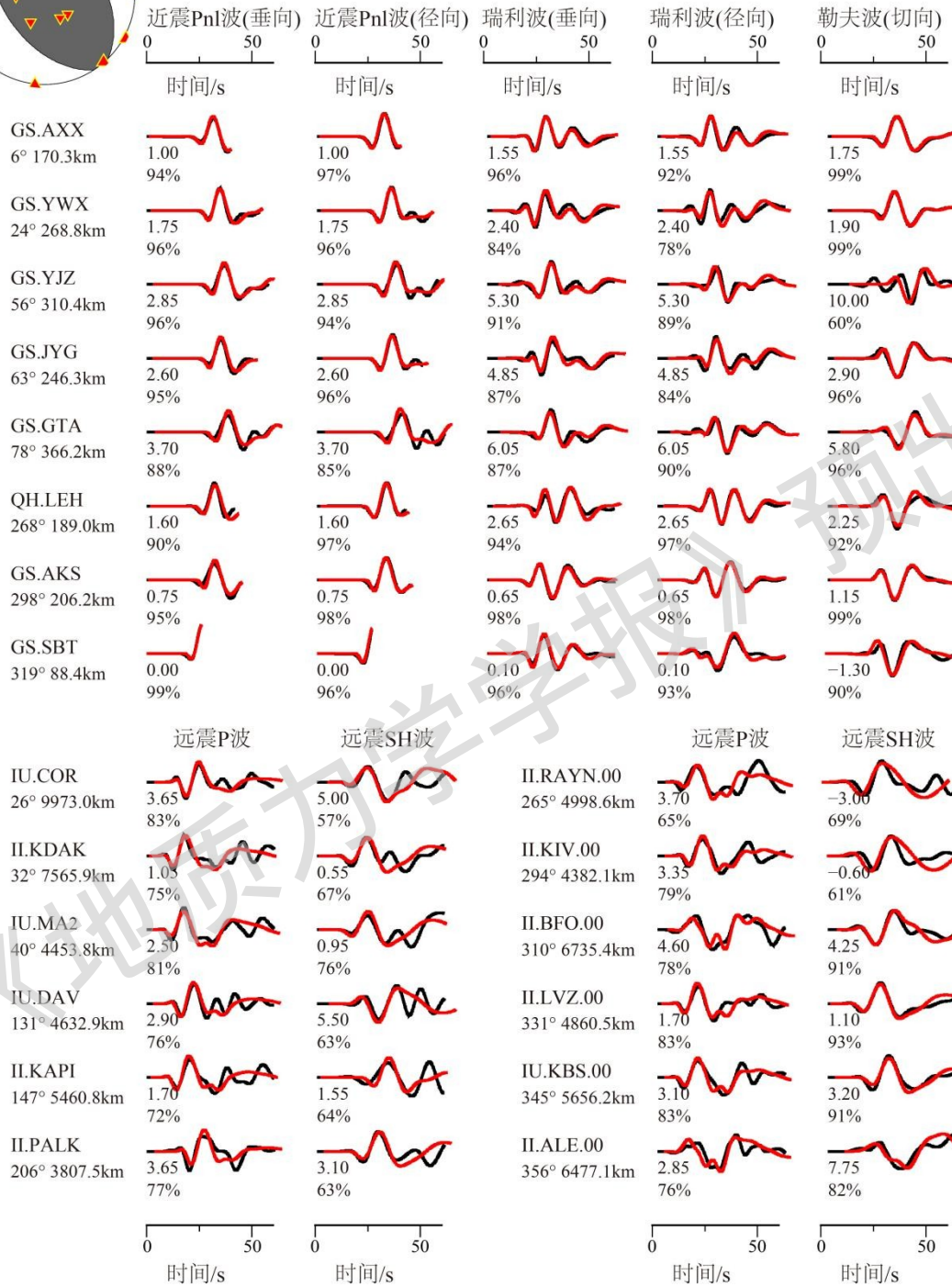
3.1 震源机制解

经过全局搜索，远近震数据联合反演得到最佳震源机制解为：节面 1 走向为 315° 、倾角为 41° 、滑动角为 81° ；节面 2 走向为 146° 、倾角为 49° 、滑动角为 97° ；矩心深度为 6.9 km，矩震级 (M_w) 为 5.3 (图 3, 图 4)。近震和远震射线在震源球的投影分布在震源球的不同区域，其中近震射线主要分布于边缘区域，远震射线则分布于中心区域，联合反演显著增加了对震源球的采样区域 (图 3)，优化了反演台站分布，提升了震源机制反演的准确性。从图 3 可以看出，合成波形与实际波形拟合较好，近震波形互相关系数在 90% 左右，远震波形基本都在 75% 以上。表 1 列出了不同机构震源机制解结果，由于所使用的数据和方法的不同，不同机构给出的震源机制解有显著差异，其中震源矩心深度范围为 6.1~17.4 km，差异达 11.3 km。文中结果与万永革 (2019) 利用最小空间旋转角给出的震源机制中心解比较接近，表明联合反演能更好地利用不同震中距波形对震源参数的约束作用，从而获得更加可靠的震源参数。



深度: 7km Mw: 5.32 节面1: 315°/41°/81° 节面2: 146°/49°/97°

滤波频率: P(0.02–0.1 Hz) SH(0.02–0.08 Hz)



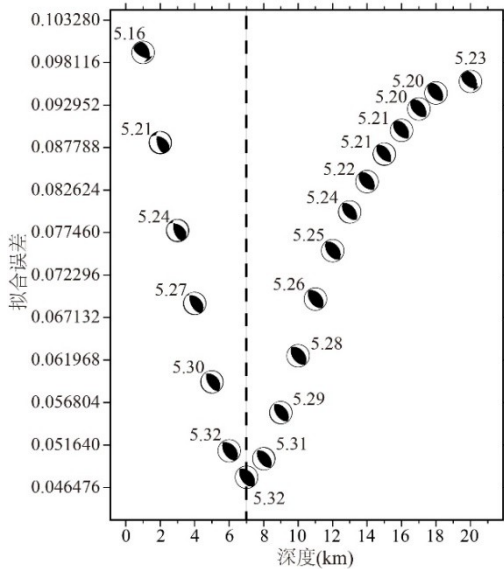
注: 红线和黑线分别代表合成波形和观测波形; 波形下方数字为波形相对时移和互相关系数; 波形左侧为台站名称; 台站名下方为方位角和震中距; 震源球上三角形为P波离源角投影, 正三角为近震Pnl, 倒三角为远震P波

图3 2021年阿克塞地震震源机制反演结果

Fig. 3 The focal mechanism solution of 2021 Aksai mainshock

The red and black lines represent the synthesized and observed waveforms, respectively. The numbers below the waveforms are the time shifts (in seconds) and the maximum cross-correlation coefficients (in percentages). The station codes are shown on the left, and the

azimuth and epicentral distances are shown below the station codes. The triangles on the beach ball are the off-source angle projections of the P-wave, the positive triangles represent the local Pnl, and the inverted triangles represent the teleseismic P-wave.



注：震源球上的数字代表反演所得的矩震级

图 4 反演拟合误差随深度变化图

Fig. 4 The inversion residuals vary with depth

Number above the beach ball represents the corresponding moment magnitude

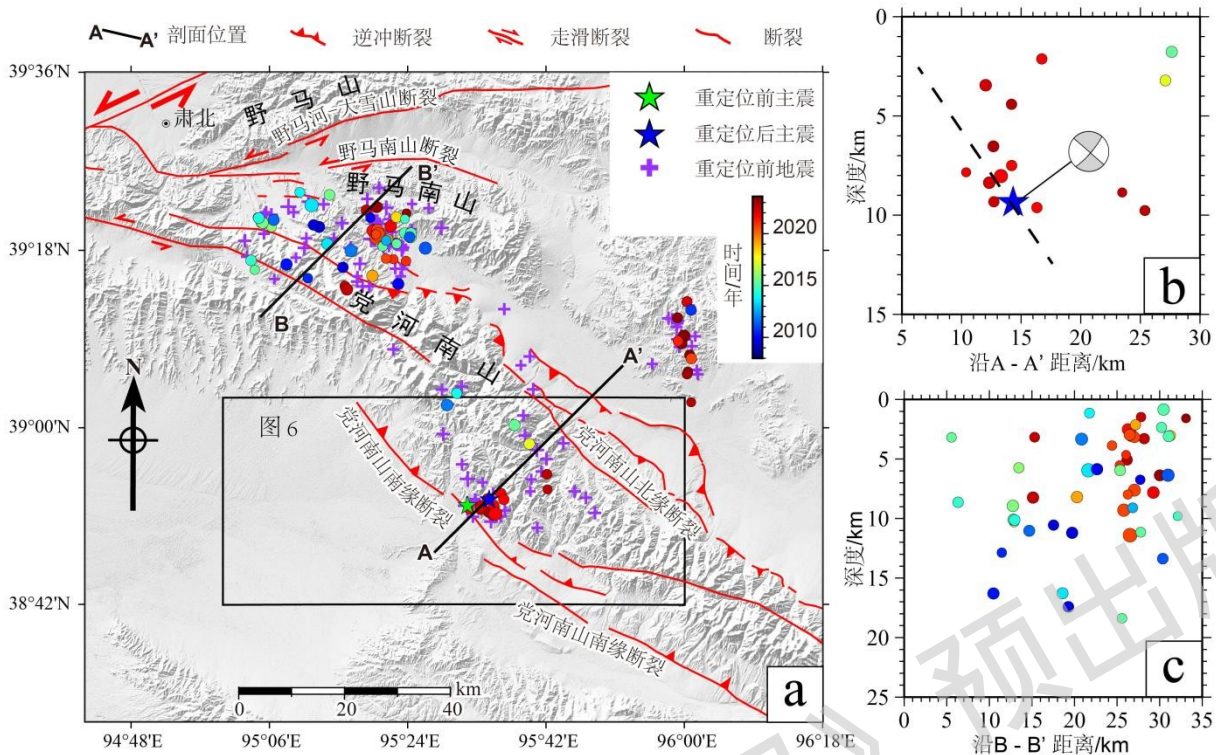
表 1 阿克塞地震震源机制解

Table.1 The results of focal mechanisms by different organizations

节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		深度/ km	数据来源
走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	方位角/ (°)	倾伏角/ (°)	方位角/ (°)	倾伏角/ (°)		
310	39	71	154	54	105	234	8	111	76	17.4	Globe CMT Globe CMT (Ekström et al. , 2012)
331	47	107	127	45	72	49	1	315	78	11.5	美国地质调查局 (USGS)
324.9	40.0	93.6	140.2	50.1	87.0	232.4	5.1	27.9	84.4		万永革, 2019
331.3	37.6	66.6	180	56	107	257.9	9.5	134.9	73	6.1	薛善余等, 2023
315	41	81	146	49	97	231	4	105	83	6.9	文中

3.2 阿克塞地震序列的空间展布特征

此次重定位后共得到 3 个地震丛集，共计 78 个地震精确定位结果（图 5a）。相较于初始定位结果，双差精定位后地震分布更为紧凑，并聚集在断裂带附近。其中丛集 1（54 个地震事件）主要位于党河南山山西段，处于阿尔金南缘断裂和党河南山断裂交汇区域，该地震丛集走时残差(Root Mean Square, RMS)从 0.348s 降低到 0.093s。2021 年阿克塞 $M_s5.5$ 级地震序列所在的丛集 2（15 个地震事件）分布于党河南山南缘断裂，其走时残差从 0.494s 降低到 0.06s，地震序列主震震源位置为 38.878°N、95.577°E，初始破裂深度为 9.3km。丛集 3（9 个地震事件）分布于党河南山北缘断裂东北部区域。丛集 2 深度剖面（图 5b）显示地震主要分布深度范围为 1.5~9.8km，其中主震深度为 9.3 km，倾向北东，倾角约为 44°。该结果与震源机制解节面 I（走向 313°、倾角 41°、滑动角 81°）的倾向、倾角一致。丛集 1 的震中分布和深度剖面（图 5c）显示出地震向北东迁移的特征，2019 年以来的地震主要发生于党河南山北缘断裂，其总体倾向南西。从地震序列的时空分布特征可以看出党河南山地区的地震呈现向北、向东迁移的规律，震源深度越来越浅（图 5）。



a—重新定位地震震中分布；b、c—不同深度剖面上的地震分布

深度剖面上的彩色实心圆为剖面两侧 7km 范围内地震在剖面上的垂直投影，沙滩球的投影剖面为 A-A'，彩色实心圆的颜色表示发震时间，黑色虚线为拟合断层面。

图 5 地震震中重新定位分布图及剖面两侧各 7km 范围内的地震深度分布图

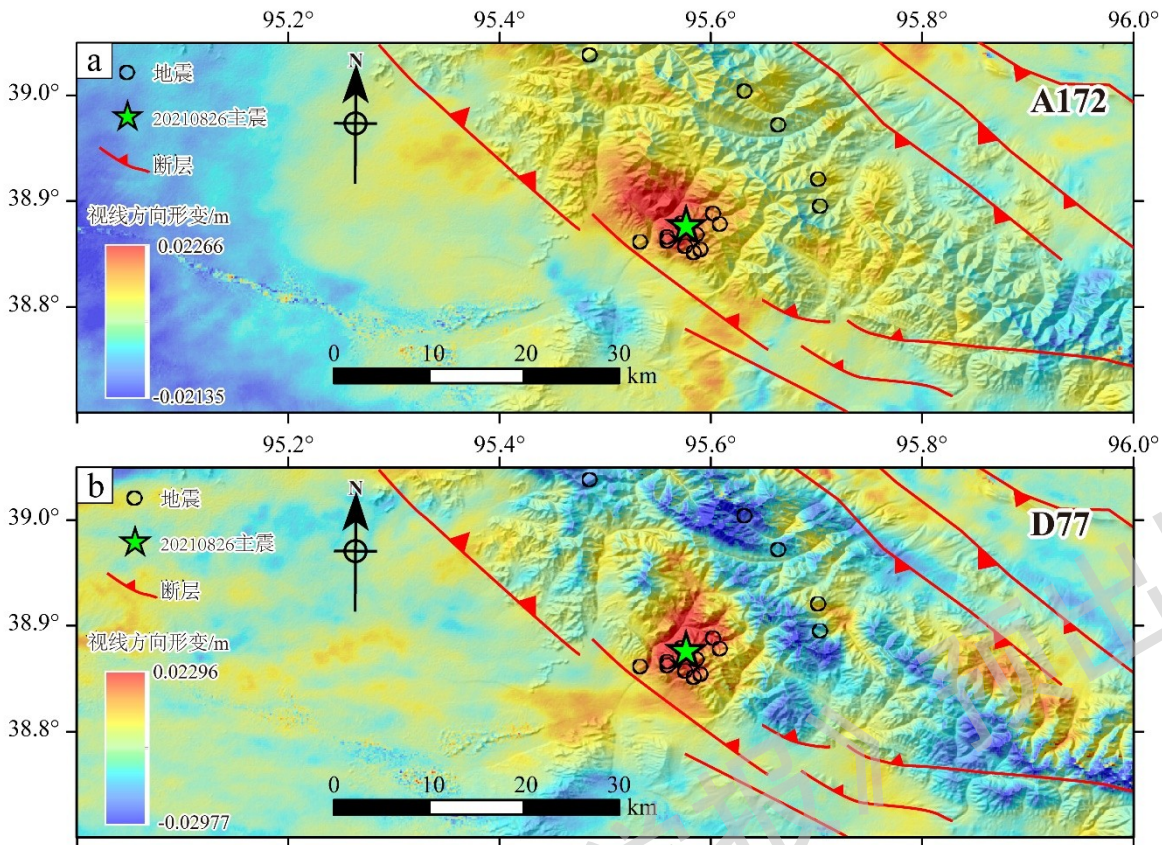
Fig. 5 Map view and depth distribution of the aftershocks along profiles. Earthquakes within 7 km of the line are included

(a) Epicenter distribution of the relocated events; (b-c) Depth distribution of the aftershocks along profiles

Colored solid circles on each depth profile represent the vertical projections of earthquakes within a 7 km range on both sides. The beach balls represent the focal mechanisms, and the projection profile is A-A'; The colors of the solid circles indicate the occurrence time of the earthquakes; The black dashed line represents the fitted fault plane.

3.3 InSAR 地表同震形变场

利用 InSAR 获得的阿克塞地震同震形变场特征显示（图 6a、6b），震中附近雷达视线方向存在显著形变，形变最大位置位于党河南山南缘断裂附近。升降轨道的同震形变均表现为视线方向抬升，最大变形量约为 29mm。这表明地震造成的地表形变以隆升形变为主（王思佳，2020），为逆冲型地震形变的主要特征，可以初步判断党河南山断裂应该是此次地震的发震断裂，断裂活动性质主要为逆冲型。该结果也得到了震源机制解和地震精定位结果的印证。



a—升轨 (A172) 视线方向形变场; b—降轨 (D77) 视线方向形变场

图 6 2021 年阿克塞 $M_s 5.5$ 地震 InSAR 同震形变场特征

Fig. 6 Coseismic deformation fields from InSAR of 2021 Aksai earthquake

(a) and (b) coseismic deformation fields in the ascending(A172) and descending(D77) orbits, respectively

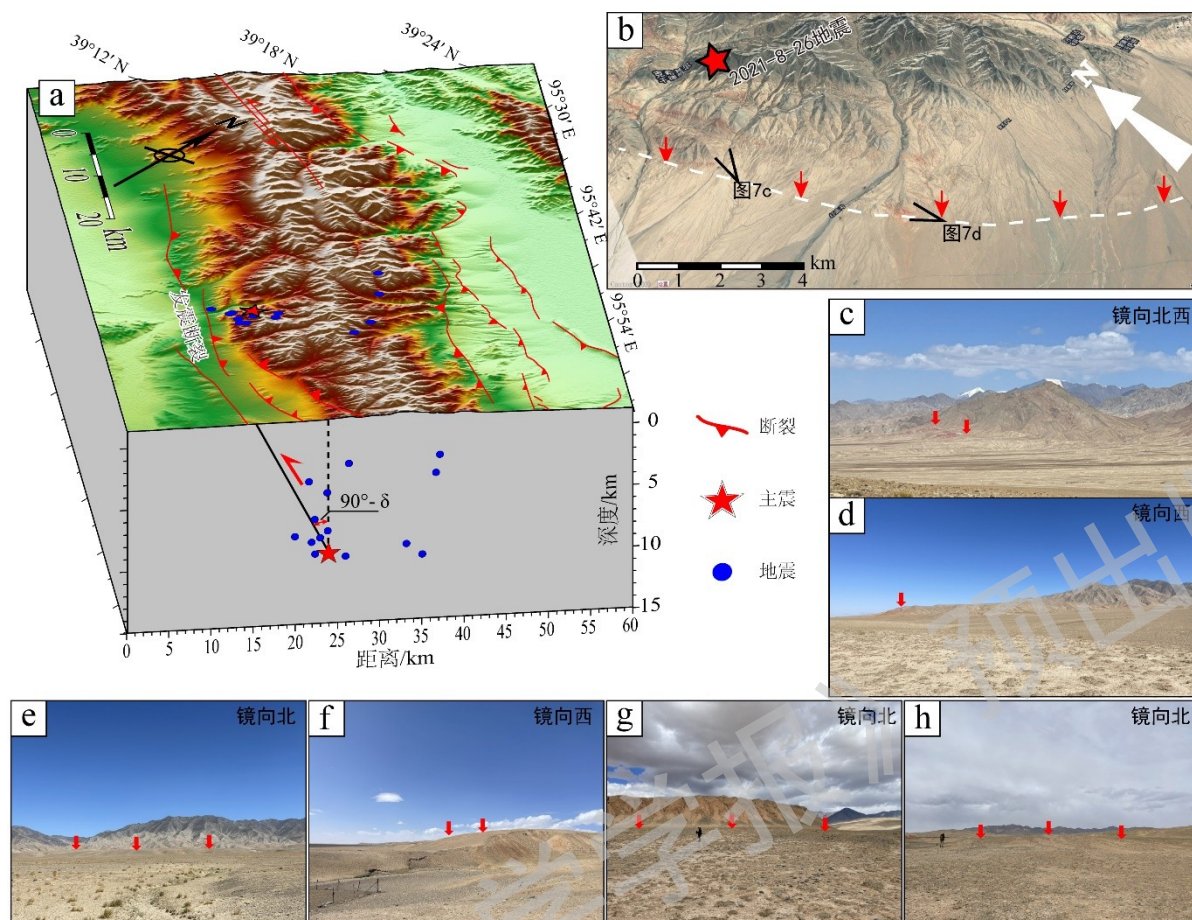
4 讨论

4.1 阿克塞地震的发震构造

地震精定位结果显示, 2021 年阿克塞 $M_s 5.5$ 地震序列分布在党河南山南缘断裂附近 (图 5a), 地震深度剖面显示断裂倾向北东 (图 5b), 这与党河南山北缘断裂位置和几何特征有较大区别 (邵延秀, 2010; 王朋涛, 2016)。InSAR 地表同震形变场指示的宏观震中与精定位结果相同 (图 6), 表明精定位结果较为可靠。同时升降轨的地表形变场均显示震中附近抬升, 且视线方向形变量符号相同、大小近似, 表明此次地震破裂以逆冲为主。在高分辨率数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 山影图和卫星影像上, 党河南山南麓山前可见明显的断层陡坎 (图 7a、7b)。野外实地踏勘也发现山前洪积扇上的断层陡坎, 陡坎展布为北西走向, 倾向北东, 呈逆冲断裂陡坎的地貌特征 (图 7c—7h)。综合震源机制解、地震精定位、InSAR 同震形变场结果以及野外地质调查可以看出, 2021 年阿克塞 $M_s 5.5$ 地震的发震构造为走向北西、倾向北东的逆冲断裂。发震断层面应为震源机制解的节面 1 (走向 315° 、倾角 41° 、滑动角 81°)。

震源机制解给出震源矩心深度为 6.9 km, 地震精定位得到的初始破裂深度为 9.3 km, 2 种手段测定的地震深度较为一致。InSAR 同震形变场指示的宏观震中位置和地震精定位给出的震中位置均位于党河南山南缘, 按照震源深度 6.9 km、断裂倾角 41° 和倾向北东来计算, 若该断裂自深部向地表延伸, 则断层出露地表位置应位于震中西南方向约 8 km, 考虑断裂倾角变化和震源位置误差等因素, 此次地震的发震断裂应为位于震中西南

方向约 5km 的党河南山南缘断裂（图 7a）。



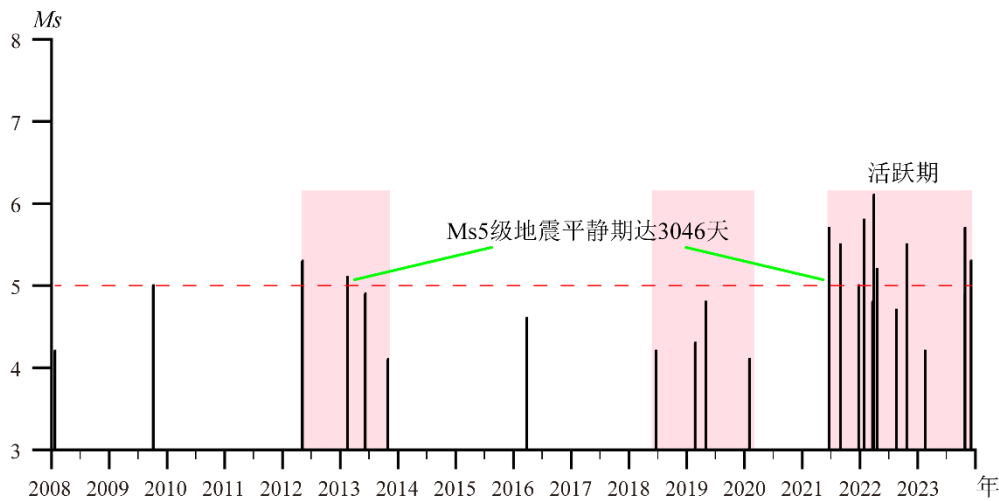
a—地震发震构造和破裂模式（ δ 为断裂倾角）；b—震中卫星影像解译；c—h—党河南山南缘断裂断层陡坎地貌
图 7 阿克塞 $M_s5.5$ 地震发震构造和断层陡坎地貌

Fig. 7 Seismogenic fault of the Aksai earthquake, and fault scarps along the southern Danghe Nan Shan Fault

(a) Seismogenic tectonics and rupture patterns of the Aksai earthquake(δ is the dip of the fault); (b) Geomorph interpretation from satellite image; (c-h)Geomorphology of fault scarps along the southern Danghe Nan Shan fault

4.2 发震机理和地震活动迁移特征

党河南山断裂处于阿尔金断裂与广义海原断裂之间的右阶挤压区，震源机制解显示该区域主压应力轴方向为北东向（P轴方位角为 231° ），在此构造应力场环境中，阿尔金断裂的走滑变形被一系列北西向的挤压逆冲构造所吸收（郑文俊等，2016）。随着阿尔金走滑断裂的构造变形向祁连山西段逆冲断裂系的转化迁移，在党河南山地区发育形成一系列北西向逆冲断裂。2021年阿克塞 $M_s5.5$ 地震是受阿尔金断裂东段左旋走滑活动影响，促使位于祁连山西段构造转换区内的党河南山南缘断裂活动而引发的一次地震。袁道阳等（2020）通过对青藏块体大震迁移规律和最新地震活动趋势分析提出，柴达木块体北部边界构造带存在发生大地震的潜在风险，并指出阿尔金断裂带东段、祁连山西段构造转换区等地震离逝时间较长的空区应重点关注。2013年2月青海海西 $M_s5.1$ 地震后，祁连山西段出现长时间的 $M_s5.0$ 地震平静期（图 8），直到 2021年6月青海茫崖发生 $M_s5.7$ 地震。随着青藏高原向北东方向的挤压扩展，柴达木块体北部地区发生多次中—强地震，且地震频次和强度均有显著增强（图 8）。此外，祁连山西段的地震活动也呈现向北向东迁移的规律（图 5），2023年10月22日甘肃酒泉肃北 $M_s4.7$ 地震、10月24日 $M_s5.5$ 地震和12月1日 $M_s5.0$ 地震的相继发生进一步印证了这一规律。因此，未来阿尔金断裂东段和祁连山西端发生大震的危险性需要高度关注。



黑竖线为震级，粉红色影区示意地震活跃期，红色虚线为 M_s5 示意线

图 8 2008 年至今祁连山西段 ($92^\circ\text{—}100^\circ\text{E}$ 、 $37^\circ\text{—}41.5^\circ\text{N}$) $M_s\geq 4.0$ 地震震级-时间图

Fig. 8 The Magnitude-time ($M-t$) diagram of the western Qilian Shan region

The seismic data used is $M_s\geq 4.0$ earthquakes in the western Qilian Shan region (longitude $92^\circ\text{—}100^\circ$; latitude $37^\circ\text{—}41.5^\circ$), since 2008. Seismic data in the western Qilian Shan region (longitude $92^\circ\text{—}100^\circ$; latitude $37^\circ\text{—}41.5^\circ$) with $M_s\geq 4.0$ magnitude since 2008. The black vertical line represents the magnitude, pink shaded area indicates the active period, and red dashed line represents the symbol line for $M_s 5.0$.

5 结论

(1) 2021 年阿克塞 $M_s5.5$ 地震的精定位结果显示，其主震的震源位置为 38.878°N 、 95.577°E ，初始破裂深度为 9.3km 。InSAR 同震形变场显示该区域存在显著形变，发震构造为党河南山南缘断裂。

(2) 基于 InSAR 同震形变场、震源机制解、地震精定位结果以及震中附近的断错地貌分析，此次阿克塞地震为逆冲型，走向北西，倾向北东，震源矩心深度为 6.9km ，矩震级 (M_w) 为 5.3 。震源机制解节面 1 (走向为 315° ，倾角为 41° ，滑动角为 81°) 为党河南山南缘断裂的断层节面。

(3) 党河南山南缘断裂位于阿尔金断裂和广义海原断裂的右阶挤压区，主压应力方向为北东向 (P 轴方位角为 231°)，此次地震是阿尔金断裂滑动致使祁连山西段的党河南山南缘断裂发生活动引起的。鉴于该区域地震向北东迁移的趋势，未来祁连山西段发生地震的危险性需要重点关注。

致谢：感谢中国地震台网中心提供的地震观测报告和甘肃省地震局提供的波形数据。

References

- BAI Q P, NI S D, CHU R S, et al., 2020. gCAPjoint, a software package for full moment tensor inversion of moderately strong earthquakes with local and teleseismic waveforms[J]. Seismological Research Letters, 91(6): 3550-3562.
- CHEN W W, NI S D, WANG Z J, et al., 2012. Joint inversion with both local and teleseismic waveforms for source parameters of the 2010 Kaohsiung earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(7): 2319-2328. (in Chinese with English abstract)
- EKSTRÖM G, NETTLES M, DZIEWOŃSKI A M, 2012. The global CMT project 2004-2010: centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 200-201: 1-9.
- ENGDAHL E R, VAN DER HILST R, BULAND R, 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 88(3): 722-743.
- GOLDSTEIN R M, WERNER C L, 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. Geophysical Research Letters, 25(21): 4035-4038.

- HETZEL R, NIEDERMANN S, TAO M X, et al., 2002. Low slip rates and long-term preservation of geomorphic features in Central Asia[J]. *Nature*, 417(6887): 428-432.
- KISSLING E, ELLSWORTH W L, EBERHART-PHILLIPS D, et al., 1994. Initial reference models in local earthquake tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10): 19635-19646.
- KISSLING E, KRADOLFER U, MAURER H, 1995. Program VELEST USER'S guide-short introduction[R]. Technical report. Institute of Geophysics, ETH Zuerich.
- KLEIN F W, 1978. Hypocenter location program HYPOINVERSE: part I: users guide to versions 1, 2, 3, and 4. Part II. Source listings and notes[R]. Menlo Park: U.S. Geological Survey: 78-694.
- LI L J, YAO X, ZHOU Z K, et al., 2022. The applicability assessment of Sentinel-1 data in InSAR monitoring of the deformed slopes of reservoir in the mountains of southwest China: a case study in the Xiluodu Reservoir[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 281-293. (in Chinese with English abstract)
- MASSONNET D, FEIGL K L, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface[J]. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 441-500.
- MEYER B, TAPPONNIER P, GAUDEMER Y, et al., 1996. Rate of left-lateral movement along the easternmost segment of the Altyn Tagh fault, east of 96°E (China) [J]. *Geophysical Journal International*, 124(1): 29-44.
- MEYER B, TAPPONNIER P, BOURJOT L, et al., 1998. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau[J]. *Geophysical Journal International*, 135(1): 1-47.
- QIU J T, LIU L, LIU C J, et al., 2019. The deformation of the 2008 Zhongba earthquakes and the tectonic movement revealed[J]. *Seismology and Geology*, 41(2): 481-498. (in Chinese)
- QIU J T, SUN J B, 2023. Characteristics of normal-fault earthquake deformation in the Qinghai-Tibet Plateau revealed by InSAR[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 54(6): 600-611 (in Chinese with English abstract)
- SHAO Y X, 2010. The activity features during late Quaternary of Yema River-Banghe Nan Shan faults in western Qilian Shan[D]. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology. (in Chinese with English abstract)
- SHAO Y X, YUAN D Y, LEI Z S, et al., 2011. The features of earthquake surface rupture zone on northern margin fault of Danghe Nanshan[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 6(4): 427-435. (in Chinese with English abstract)
- SHAO Y X, YUAN D Y, OSKIN M E, et al., 2017. Historical (Yuan Dynasty) earthquake on the North Danghe Nanshan Thrust, western Qilian Shan, China[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3): 1175-1184.
- SHAO Y X, VAN DER WOERD J, LIU-ZENG J, et al., 2023. Shortening rates and recurrence of large earthquakes from folded and uplifted terraces in the Western Danghe Nan Shan foreland, North Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(1): e2021JB023736.
- TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- VAN DER WOERD J, XU X W, LI H B, et al., 2001. Rapid active thrusting along the northwestern range front of the Tanghe Nan Shan (western Gansu, China)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B12): 30475-30504.
- WALDHAUSER F, ELLSWORTH W L, 2000. A Double-Difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6): 1353-1368.
- WAN Y G, 2019. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(12): 4718-4728. (in Chinese)
- WANG G M, WU Z H, PENG G L, et al., 2021. Seismogenic fault and its rupture characteristics of the 21 May, 2021 Yangbi M_s 6.4 earthquake: analysis results from the relocation of the earthquake sequence[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(4): 662-678. (in Chinese with English abstract)
- WANG P T, 2016. A study on the rupture characteristics of great earthquake along Danghenanshan north piedmont fault with high resolution aerial-survey data[D]. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology. (in Chinese)
- WANG S J, 2020. Research on co-seismic and post-seismic deformation of the 2015 Pishan earthquake based on sentinel-1a data[D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese with English abstract)
- XIAO X G, 2019. Study on the evolution law of landslide and seismic deformation field based on InSAR technology —taking Jiuzhaigou Earthquake as an example[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)
- XIE Z J, JIN B K, ZHENG Y, et al., 2013. Source parameters inversion of the 2013 Lushan earthquake by combining teleseismic waveforms and local seismograms. *Science China: Earth Sciences*, 43(6): 1010-1019. (in Chinese)
- XU X W, TAPPONNIER P, VAN DER WOERD J, et al., 2003. Discussion on Late Quaternary left lateral strike-slip rate of Altun fault zone and its transformation model of tectonic movement[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 33(10): 967-974. (in Chinese with English abstract)
- XUE S Y, XIE H, YUAN D Y, et al., 2023.

- Relocation of the 2021 Aksai $M_{5.5}$ earthquake and its tectonic implication[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 45(3): 540-551. (in Chinese with English abstract)
- YI G X, LONG F, VALLAGE A, et al., 2016. Focal mechanism and tectonic deformation in the seismogenic area of the 2013 Lushan Earthquake Sequence, Southwestern China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(10): 3711-3731. (in Chinese with English abstract)
- YUAN D Y, GE W P, CHEN Z W, et al., 2013. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: a review of recent studies[J]. *Tectonics*, 32: 1-13.
- YUAN D Y, FENG J G, ZHENG W J, et al., 2020. Migration of large earthquakes in Tibetan block area and discussion on major active region in the future[J]. *Seismology and Geology*, 42(2): 297-315. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G W, LEI J S, 2013. Relocations of Lushan, Sichuan Strong Earthquake ($M_{7.0}$) and its aftershocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(5): 1764-1771. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P Z, ZHENG D W, YIN G M, et al., 2006. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 26(1): 5-13. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P Z, ZHANG H P, ZHENG W J, et al., 2014. Cenozoic tectonic evolution of Continental eastern Asia[J]. *Seismology and Geology*, 36(3): 574-585. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO L S, HELMBERGER D V, 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(1): 91-104.
- ZHAO P, 2009. Active characteristics study of major faults in the Subregion in the Late Quaternary[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al., 2009. Deformation on the northern of the Tibetan Plateau from GPS measurement and geologic rates of Late Quaternary along the major fault[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(10): 2491-2508. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG W J, ZHANG P Z, HE W G, et al., 2013. 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*, 584: 267-280.
- ZHENG W J, YUAN D Y, ZHANG P Z, et al., 2016. Tectonic geometry and kinematic dissipation of the active faults in the northeastern Tibetan plateau and their implications for understanding Northeastward growth of the plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 36(4): 775-788. (in Chinese with English abstract)
- ZHU L P, HELMBERGER D V, 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(5): 1634-1641.

附中文参考文献

- 陈伟文, 倪四道, 汪贞杰, 等, 2012. 2010年高雄地震震源参数的近远震波形联合反演[J]. *地球物理学报*, 55(7): 2319-2328.
- 李凌婧, 姚鑫, 周振凯, 等, 2022. Sentinel-1数据在西南山区水库变形斜坡InSAR监测中的适用性评价: 以溪洛渡水库为例[J]. *地质力学学报*, 28(2): 281-293.
- 邱江涛, 刘雷, 刘传金, 等, 2019. 2008年仲巴地震形变及其揭示的构造运动[J]. *地震地质*, 41(2): 481-498.
- 邱江涛, 孙建宝, 2023. InSAR揭示的青藏高原近期正断型地震形变特征与指示意义[J]. *地球与行星物理理论评(中英文)*, 54(6): 600-611.
- 邵延秀, 2010. 祁连山西段野马河—党河南山断裂晚第四纪活动特征[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- 邵延秀, 袁道阳, 雷中生, 等, 2011. 党河南山北缘断裂古地震形变带特征研究[J]. *震灾防御技术*, 6(4): 427-435.
- 万永革, 2019. 同一地震多个震源机制中心解的确定[J]. *地球物理学报*, 62(12): 4718-4728.
- 王光明, 吴中海, 彭关灵, 等, 2021. 2021年5月21日漾濞 $M_{6.4}$ 地震的发震断层及其破裂特征: 地震序列的重定位分析结果[J]. *地质力学学报*, 27(4): 662-678.
- 王朋涛, 2016. 基于高分辨航测数据研究党河南山北缘断裂的大震破裂习性[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- 王思佳, 2020. 基于Sentinel-1A的2015年皮山地震同震及震后形变研究[D]. 西安: 长安大学.
- 肖星光, 2019. 基于InSAR技术的滑坡与同震形变场演化规律研究: 以九寨沟地震为例[D]. 成都: 西南交通大学.
- 谢祖军, 金笔凯, 郑勇, 等, 2013. 近远震波形反演2013年芦山地震震源参数[J]. *中国科学: 地球科学*, 43(6): 1010-1019.
- 徐锡伟, TAPPONNIER P, VAN DER WOERD J, 等, 2003. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论[J]. *中国科学(D辑)*, 33(10): 967-974.
- 薛善余, 谢虹, 袁道阳, 等, 2023. 2021年阿克塞 $M_{5.5}$ 地震重定位及构造意义[J]. *地震工程学报*, 45(3): 540-551.

- 易桂喜, 龙锋, VALLAGE A, 等, 2016. 2013年芦山地震序列震源机制与震源区构造变形特征分析[J]. 地球物理学报, 59(10): 3711-3731.
- 袁道阳, 冯建刚, 郑文俊, 等, 2020. 青藏地块区大地震迁移规律与未来主体活动区探讨[J]. 地震地质, 42(2): 297-315.
- 张广伟, 雷建设. 2013. 四川芦山7.0级强震及其余震序列重定位[J]. 地球物理学报, 56(5): 1764-1771.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 等, 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 26(1): 5-13.
- 张培震, 张会平, 郑文俊, 等, 2014. 东亚大陆新生代构造演化[J]. 地震地质, 36(3): 574-585.
- 赵朋, 2009. 肃北地区主要断裂晚第四纪活动特征研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等, 2009. GPS观测及断裂晚第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形[J]. 地球物理学报, 52(10): 2491-2508.
- 郑文俊, 袁道阳, 张培震, 等, 2016. 青藏高原东北缘活动构造几何图像、运动转换与高原扩展[J]. 第四纪研究, 36(4): 775-788.

《地质力学学报》预出版