引用格式：熊国华，季灵运，陈玉鑫，等，2025. 2023 年甘肃肃北 M_S 5.5 地震 InSAR 同震形变场与构造意义[J]. 地质力学学报，31（2）：287−300. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024127

Citation: XIONG G H，JI L Y，CHEN Y X，et al.，2025. InSAR coseismic deformation field and tectonic implications of the 2023 M_S 5.5 Subei Earthquake, Gansu, China[J]. Journal of Geomechanics，31（2）：287−300. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024127

2023 年甘肃肃北 M_S 5.5 地震 InSAR 同震形变场与构造意义

熊国华[1]，季灵运[1]，陈玉鑫[2]，朱良玉[1]，刘传金[1]，徐 晶[1]，蒋锋云[1]，徐国彬[3]
XIONG Guohua[1]，JI Lingyun[1]，CHEN Yuxin[2]，ZHU Liangyu[1]，LIU Chuanjin[1]，XU Jing[1]，JIANG Fengyun[1]，XU Guobin[3]

1. 中国地震局第二监测中心，陕西 西安 710054；
2. 甘肃省地震局，甘肃 兰州 730000；
3. 黑龙江省地质科学研究所，黑龙江 哈尔滨 150036

1. *The Second Monitoring and Application Center*, *China Earthquake Administration*, *Xi'an* 710054, *Shaanxi*, *China*;
2. *Gansu Earthquake Agency*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*;
3. *Heilongjiang Institute of Geological Sciences*, *Harbin* 150036, *Heilongjiang*, *China*

InSAR coseismic deformation field and tectonic implications of the 2023 M_S 5.5 Subei Earthquake, Gansu, China

Abstract: ［**Objective**］On October 24, 2023, an M_S 5.5 earthquake occurred in Subei County, Jiuquan City, Gansu Province. The epicenter was located in the Qilian mountain seismic belt at the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. Understanding the seismogenic mechanism of this earthquake and its relationship with the tectonic stress field is crucial for analyzing the seismic hazard in the region. ［**Methods**］The InSAR coseismic deformation field of the M_S5.5 earthquake in Subei was obtained using ascending and descending Sentinel-1 SAR data, and the parameters of the seismogenic fault were determined based on a uniform slip model. Subsequently, a distributed slip inversion method was applied to obtain a detailed slip distribution of the seismogenic fault. Furthermore, the earthquake-induced changes in the Coulomb stress and the regional interseismic strain rate were determined. ［**Results**］The results indicate that the surface deformation values generated by this earthquake reached 12 cm and 9 cm in the ascending and descending InSAR line of sight, respectively. The deformation primarily manifests as surface uplift; the seismogenic fault is a concealed fault located between the Shule Nanshan Fault and the northern margin fault of the Central Qilian, the strike is approximately 166.97°, the dip angle is around 68.69°, and the slip angle is about 110.39°; the fault slip is primarily concentrated within the depth range of 1.2 km to 4.9 km, with a maximum slip of 0.58 m occurring at a depth of approximately 2.56 km; the moment magnitude obtained from the inversion is M_W 5.6, and the coseismic rupture is primarily characterized by thrust motion with a minor component of right-lateral strike-slip. This seismic event resulted in regional Coulomb stress changes between the northern margin fault of the Central Qilian and the Shule Nanshan Fault, as well as in the northern area of the Shule River Fault Zone. Additionally, the regional surface strain rate exhibited a distinct compressive trend before the earthquake, with higher surface strain and maximum shear strain rates observed on the northern side of the seismic zone. ［**Conclusion**］The continuous accumulation of strain leads to an increased seismic hazard, with historical earthquakes often occurring in gradient zones where strain values transition from high to low. Considering the regional strain distribution characteristics

基金项目：国家自然科学基金项目（42474013，42104061）；中国地震局震情跟踪定向工作任务项目（2024010206）
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42474013 and 42104061) and the Earthquake Tracking Task of CEA (Grant No. 2024010206)

第一作者：熊国华（1996—），女，硕士，工程师，主要从事 InSAR 地表形变监测研究。Email：xiongguohua@smac.ac.cn
通信作者：季灵运（1982—），男，博士，研究员，主要从事构造大地测量学研究。Email: dinsar010@163.com

收稿日期：2024−11−20；**修回日期**：2025−03−06；**录用日期**：2025−03−10；**网络出版日期**：2025−03−10；**责任编辑**：范二平

and seismic activity, the seismic hazard in this area remains significant in the future and should not be overlooked. [**Significance**] The research findings have a certain guiding significance for understanding the tectonic background of the Qilian Block and its seismic hazard.

Keywords: Qilian Block; Subei M_S 5.5 Earthquake; InSAR; slip distribution; Coulomb stress change; strain rate

摘　要：2023年10月24日甘肃酒泉市肃北县发生了M_S 5.5地震，震中位于青藏高原前缘祁连山地震带上。为深入探究此次地震的发震机理及与构造应力场的关系，利用升、降轨Sentinel-1数据获取了此次肃北M_S 5.5地震的InSAR同震形变场，并基于均匀位错模型确定了发震断层参数；在此基础上，采用分布式滑动反演方法获得了发震断层的精细滑动分布，并进一步分析了肃北M_S 5.5地震引起的库仑应力荷载及区域震间应变率变化。研究结果表明：此次地震产生的地表形变场在InSAR升、降轨视线向分别达到12 cm、9 cm，形变主要表现为地表隆升；发震断层为位于疏勒南山断裂与中祁连北缘断裂之间的一条隐伏断层，走向角约为166.97°，倾角约为68.69°，滑动角约为110.39°；断层滑动主要集中在1.2～4.9 km深度范围内，最大滑动量为0.58 m，发生于地下约2.56 km深处；反演得到的矩震级为M_W 5.6，同震破裂以逆冲为主兼少许右旋走滑分量。此次地震事件导致了中祁连北缘断裂与疏勒南山断裂之间区域及疏勒河断裂带北侧地区出现一定程度的库仑应力加载特征。同时，区域面应变率在震间呈现明显挤压态势，在震区北侧面应变与最大剪应变率较高，历史地震多发生于应变高值向低值变化的梯度带上，结合区域的应力分布特征表明，该地区未来地震的危险性不容忽视。

关键词：祁连地块；肃北M_S 5.5地震；InSAR；滑动分布；库仑应力变化；应变率

中图分类号：P315.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)02−0287−14

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024127

0　引言

据中国地震台网测定(https://news.ceic.ac.cn/)，2023年10月24日19时32分，甘肃酒泉市肃北县(39.43°N、97.28°E)发生5.5级地震，震源深度约为10 km。依据多个机构发布的震源机制解初步推测，该地震为逆冲型地震。此次地震发生在青藏高原东北侧的大型边界变形带——祁连山地震带上，受印度板块持续挤压及阿拉善与鄂尔多斯2大地块的隔挡作用，祁连块体不断向青藏高原北东方向扩展隆升(褚永彬，2015)，导致该区域构造活动强烈。1900年以来该区域附近曾发生多起7级以上的地震(万永革等，2007；朱琳等，2022；汤大委等，2023；吴中海，2024)。距离此次地震位置较近的历史强震有1927年的8.0级古浪地震(Guo et al., 2020)、1932年的7.6级昌马地震(万永革等，2007)、1954年的7.3级山丹地震(万永革等，2007)，1932年的7.6级昌马地震为距离此次地震空间距离最近的一次强震。许多研究者针对这些历史强震开展了大量研究，指出强震之间存在显著的应力触发关系，导致周边区域岩石圈的应力状态发生变化，进而引发了该区域地震的频繁发生。

1900年以来，肃北地震周边200 km内曾发生7级以上强震1次，6～6.9级地震6次，5.5～5.9级中强地震8次。截止2023年10月24日，区域最近发生的强震为2022年德令哈6.0级走滑型地震。此次M_S 5.5肃北地震位于德令哈地震北侧的中祁连地块，是该区域近年来较大震级的逆冲型地震，与2021年8月26日阿克塞地区的5.5级地震具有相似的发震背景(邹小波等，2024)，均处于祁连地震带的逆冲挤压缩短区。许多学者和专家利用GNSS(Global Navigation Satellite System)资料对祁连地块的地壳形变特征进行了研究，认为该区域近年来应变分布集中，主要以挤压变形为主(Zhang et al., 2004; Gan et al., 2007; Hao et al., 2014; 张楠等，2020；李抒予，2023)。应变不断积累导致区域地震发生的可能性增强，目前在该活动带上地震活动水平以5～6级为主(程建武等，2020)。此次肃北M_S 5.5地震产生了较为明显的地表变形，可为研究祁连构造带的地震危险性和地震发震机理提供了契机。此次地震所位于的中祁连地块总体呈北西西走向，延伸于疏勒南山和托莱南山之间，南北两侧分别被中祁连南缘断裂和中祁连北缘断裂控制，震中附近发育有中祁连北缘断裂、疏勒南山断裂带。中祁连北缘断裂西起野马山北麓，向东经托莱山，最终归于

祁连山北缘断裂与海源断裂相连，总体走向为北西西，断层特征主要表现为逆冲兼有左旋走滑运动（陈宣华等，2019）。而位于震中南侧的疏勒南山断裂总体走向为北西西，倾向北东，断层类型为左旋走滑兼逆冲活动特征（郭菲等，2023）。由于此次地震的震中区域人口稀少，传统的大地测量监测设备布设较少，难以获取高分辨率的近场同震地表形变数据。近年来，合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）技术因其具有全天时、全天候、覆盖面广的显著优势，在滑坡（（Chen et al., 2023；刘星洪等，2023；Xu et al., 2024）、火山（Ji et al., 2021；熊国华等，2023）及地震周期形变（季灵运等，2017；王金烁和赵宁远，2020；Zhang et al., 2022；Zhao et al., 2023）研究等方面得到了广泛应用。InSAR 技术可以获取较为充足的近场地表形变数据，能够提升对地壳浅层滑动分布的分辨能力（岳汉等，2020），同时为库仑应力等研究提供更为准确的基础数据。

为了解此次肃北 M_S 5.5 地震的破裂特征及区域地震危险性，研究联合 InSAR 技术及弹性位错模型确定了发震断层的位置及几何参数，并反演了同震滑动分布及库仑应力变化，探讨了肃北地震对周边地区的影响。此外，基于 GNSS 与 InSAR 数据获取了祁连地块面应变率与最大剪应变率，结合中强地震分布情况，对区域地震危险性进行分析。

1　InSAR 同震形变场

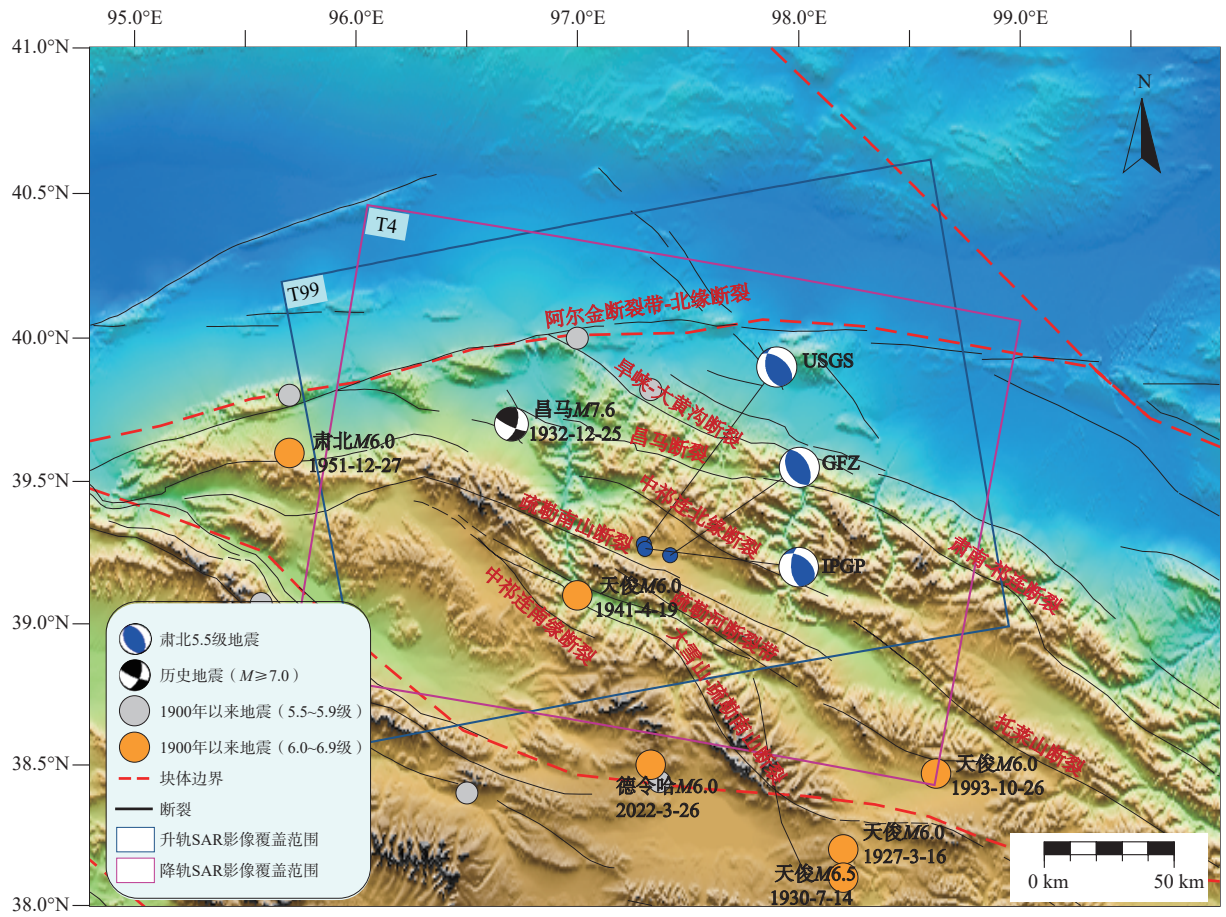
肃北 M_S 5.5 地震发生后，从欧空局（European Space Agency, ESA）查询并下载了覆盖地震区域的 Sentinel-1 数据（图 1），具体的 SAR 影像信息如表 1 所示。利用商用 GAMMA 软件，采用差分干涉测量技术（D-InSAR）获取同震地表形变结果（Gabriel et al., 1989）。在计算过程中，首先对震前、震后的 SAR 数据进行干涉处理，并基于 30 m 空间分辨率的高程数据（SRTM DEM）对地形相位进行模拟和去除，分别获取了升、降轨的差分干涉图；然后，采用 Goldstein 滤波方法对差分干涉图进行滤波处理，以提高干涉图的质量。之后选择相干性≥0.9 且远离震中的区域作为解缠参考点，使用最小费用流方法对滤波后的差分干涉图进行相位解缠。最后，对残余的误差进行处理，采用二次多项式拟合方法去除残余的轨道误差（Fialko et al., 2006），采用通用型卫星雷达大气改正系统（Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR, GACOS）去除大气延迟误差（Yu et al., 2018）。对去除误差后的解缠相位图进行形变转换和地理编码，获取 WGS-84 地理坐标下的视线向（Line-of-sight, LOS）InSAR 同震地表形变场（图 2a—2c）。

覆盖此次肃北 M_S 5.5 地震震前与震后的升轨数据时间间隔较长，在此期间震中周边区域又发生了一次 M_S 5.0 地震（2023 年 12 月 1 日）。为分析获取的升轨地表形变场中是否包含此次 5.0 级地震引起的地表变形，采用仅覆盖 5.0 级地震的降轨数据进行差分干涉处理（图 2c），提取跨地震形变场的剖线，如图 2d 中红色曲线所示。结果表明，此次 12 月 1 日的 M_S 5.0 地震在 10 月 24 日的 M_S 5.5 地震的同震形变区并没有产生明显的地表变形，形变量级小于 0.01 m，表明在升轨数据监测结果中，地表变形主要由 10 月 24 日的肃北 M_S 5.5 地震所引起。

此次肃北 M_S5.5 地震的 InSAR 形变图如图 2a、2b 所示，升轨（图 2b）与降轨（图 2a）的同震形变场是连续的，表明此次地震并未破裂至地表。通常走滑型地震的地表形变主要发生在水平方向，而正断型与逆冲型地震的地表形变主要表现为垂直方向的运动。从此次地震的升轨、降轨 InSAR 监测结果可以看出，地表形变的符号一致，主要表现为在形变区西侧的 LOS 向隆升变形，表明断层滑动以逆冲运动为主。根据剖面形变可知（图 2d），在此次肃北 M_S 5.5 地震中，降轨 InSAR 结果探测到 LOS 向最大地表位移为 9 cm，升轨 InSAR 监测到 LOS 向最大地表位移为 12 cm。此次地震造成的地表变形范围约为 11 km×9 km，变形场的长轴近似为东西向。此外，升轨和降轨形变图之间存在一定的差异。在降轨的形变图中，形变区东侧存在一定程度的 LOS 向沉降变形，量级达到 4 cm，而升轨在对应区域并未观测到显著的地表变形，这种差异可能是由于 SAR 卫星成像几何不同或影像获取的时间范围不同所致。

2　发震断层参数与滑动分布

基于 InSAR 技术获取的地表形变数据，以此为约束，可通过地球物理模型反演确定发震断层的几何参数。均匀滑动分布模型是求解发震断层的几何形态参数常用的方法之一，其基本假设为地震的发震断层为单一断层面，断层两侧区域的介质均匀且各向同性，滑动量和滑动角分布均匀。使用贝叶



断裂数据来源于 Wu et al., 2024; 块体边界数据来源于王辉等, 2003; 蓝色沙滩球分别表示 USGS（美国地质调查局）、GFZ（德国地学中心）、IPGP（法国巴黎地球物理研究中心）公布的震源机制解结果

图 1 2023 年肃北 M_S 5.5 地震的区域构造背景

Fig. 1 Regional tectonic setting of the 2023 Subei M_S5.5 earthquake

Fault data from Wu et al. (2024), block boundary data from Wang et al. (2003), blue beach balls represent the focal mechanism solution results published by the United States Geological Survey (USGS), the German Research Centre for Geosciences (GFZ), and the Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP).

表 1 SAR 干涉图信息表

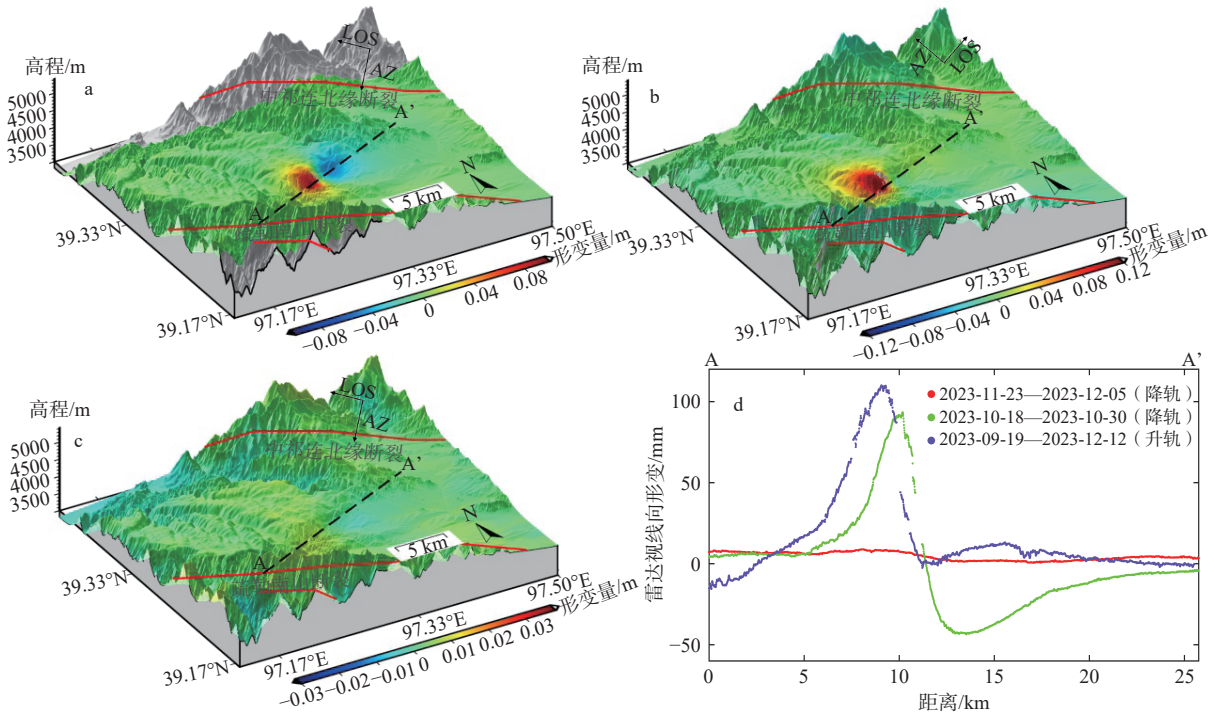
Table 1 Parameters of SAR interferograms

地震时间	轨道方向	轨道号	入射角/(°)	方位角/(°)	影像日期		垂直基线/m	时间基线/d
					震前	震后		
2023-10-24	降轨	4	39°	−170°	2023-10-18	2023-10-30	24	12
	升轨	99	38°	−10°	2023-09-19	2023-12-12	90	84
2023-12-01	降轨	4	39°	−170°	2023-11-23	2023-12-05	88	12

斯方法构建后验概率函数，通过不断迭代优化待求的参数空间，直至达到收敛，最终计算出最佳拟合的断层位置、深度、走向角、倾角等几何信息。在确定断层位置和参数后，通过建立合适的分布式滑动模型，可求解出断层面的精细滑动分布。

2.1 均匀滑动分布

地震发生后，多个机构及个人发布了此次地震的震源机制（表 2），结果显示此次肃北 M_S 5.5 地震为一次逆冲型地震。根据提供的 2 个节面信息，发震断层可能有 2 种几何形态：一种为南南东走向的西倾逆冲断层，另一种为北北西走向的东倾逆断层。由于不同机构及个人给出的断层倾角存在一定差异，且走向具有较大的不确定性，因此利用形变资料对此次地震的发震断层进行深入研究显得



红色线段表示周边断裂；黑色虚线 AA’表示提取的剖线位置；箭头 AZ（Azimuth）表示卫星飞行方向；箭头 LOS（Line-of-sight）表示雷达的视线方向

a—10 月 24 日肃北 M_S 5.5 地震降轨形变场；b—10 月 24 日肃北 M_S 5.5 地震升轨形变场；c—12 月 1 日肃北 M_S 5.0 地震降轨形变场；d—剖面形变

图 2　InSAR 升、降轨同震形变场

Fig. 2　Coseismic deformation fields from InSAR ascending and descending tracks

(a) Deformation field from the descending track of the Subei M_S5.5 Earthquake on October 24; (b) Deformation field from the ascending track of the Subei M_S5.5 Earthquake on October 24; (c) Deformation field from the descending track of the Subei M_S5.0 Earthquake on December 1; (d) Deformation profiles

The red line segments represent the surrounding faults, black dashed line AA’ indicates the location of the extracted profile, the arrow labeled AZ (Azimuth) shows the satellite flight direction, and the arrow labeled LOS indicates the radar line-of-sight direction

尤为重要。在反演断层参数之前，为了提高均匀滑动模型的运算效率，首先需要对同震相位图进行降采样处理。此研究采用四叉树降采样方法，该方法可以有效地减少相位图的数据量，并在保留空间特征的同时，提取相位图中的主要形变信息。经过降采样后的升、降轨 InSAR 同震相位图分别为 924、805 个网格单元。然后，使用大地测量贝叶斯反演软件（Geodetic Bayesian Inversion Software, GBIS）计算

表 2　2023 年肃北 M_S 5.5 地震的震源机制解

Table 2　Focal mechanism solutions of the Subei Earthquake

机构来源	震中位置		震级	深度/km	节面1/(°)			节面2/(°)		
	北纬/(°)	东经/(°)			走向角	倾角	滑动角	走向角	倾角	滑动角
USGS	39.279	97.302	5.43	13.5	309	53	64	168	44	120
CENC	39.43	97.28	5.5	10	—	—	—	—	—	—
GFZ	39.24	97.42	5.4	19	152	39	91	330	50	88
IPGP	39.265	97.308	5.3	12	306	45	49	177	58	123
CEA-IGP	39.43	97.28	5.4	5	170	60	110	313	35	59
张潇等, 2024	39.43	97.28	5.5	4	170	73	108	300	24	42

注 USGS 美国地质调查局（https://earthquake.usgs.gov/earthquakes）；CENC中国地震台网中心（http://www.csi.ac.cn/）；GFZ德国地学中心（https://geofon.gfz-potsdam.de/）；IPGP法国巴黎地球物理研究中心（http://geoscope.ipgp.fr/index.php/en/catalog）；CEA-IGP中国地震局地球物理研究所（https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280278.html）

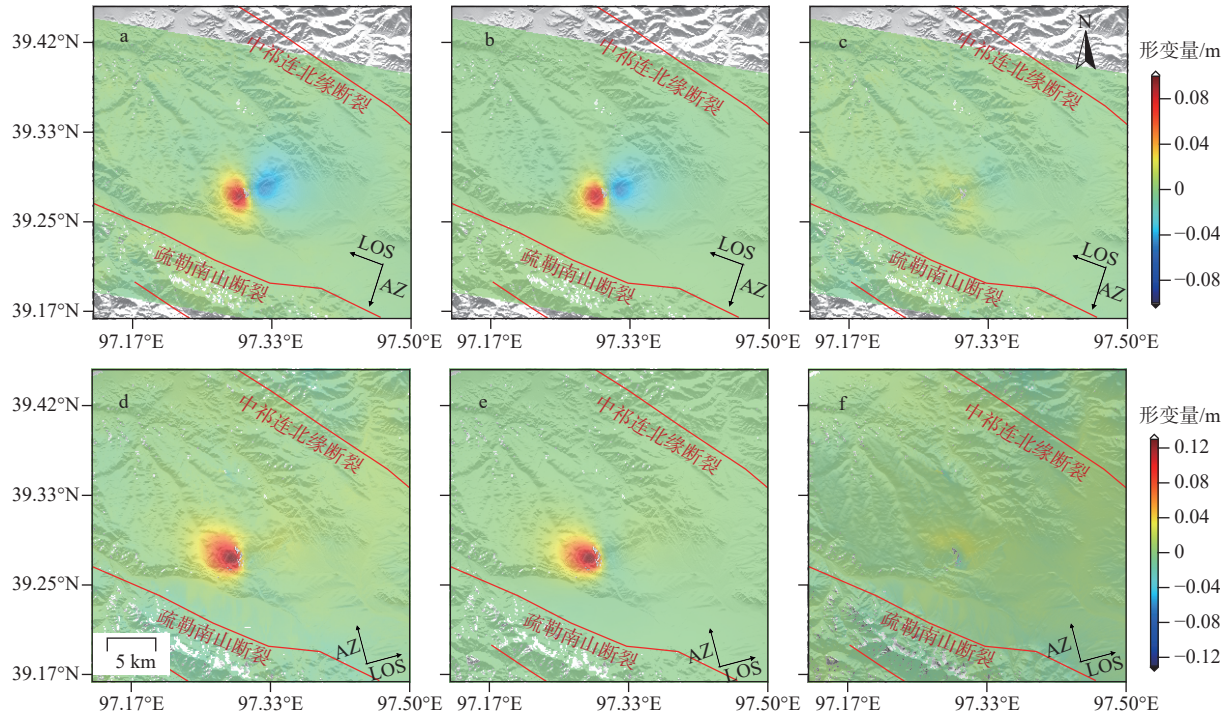
肃北 M_S 5.5 地震的断层参数(Bagnardi and Hooper, 2018),结合区域地质及不同机构发布的震源机制解,初步确定了需反演的断层几何参数的初始参考值。

首先设置较大的初始参数区间,使其覆盖可能的参数范围,然后根据初始搜索结果,多次优化搜索区间,从而获取更为准确的断层参数。经过 10 万次迭代计算后,反演获取了拟合残差最小时所对应的最佳断层参数值(表 3)。降轨与升轨数据的观测值、均匀滑动模型反演得到的降轨与升轨的模拟值以及 模拟值与观测值的差值如图 3 所示,从图中可以看出反演的残差值较小,验证了反演结果的可靠性。升降轨数据拟合残差的均方根误差分别为 0.45 cm 和 0.25 cm。根据反演结果,发震断层走向角约为 166.97°,倾角约为 68.69°,断层下边界深度约为 4.7 km,该断层为位于中祁连北缘断裂与疏勒南山断裂之间的近南北走向且西倾的隐伏断层。

表 3 肃北 M_S 5.5 地震 GBIS 反演参数

Table 3 GBIS inversion parameters for the Subei M_S 5.5 Earthquake

参数	长度/m	宽度/m	深度/m	走向角/(°)	倾角/(°)	走滑/m	倾滑/m	*X*/m	*Y*/m
肃北地震	1260	3568	4723	166.97	68.69	−0.72	0.99	−1810	−761



红色线段表示周边断裂;箭头 AZ(Azimuth)表示卫星飞行方向;箭头 LOS(Line-of-sight)表示雷达的视线方向

a—降轨观测值;b—降轨模拟值;c—降轨残差;d—升轨观测值;e—升轨模拟值;f—升轨残差

图 3 均匀滑动模型的拟合结果

Fig. 3 Fitting results of the uniform sliding model

(a) Descending track observations; (b) Descending track simulations; (c) Descending track residuals; (d) Ascending track observations; (e) Ascending track simulations; (f) Ascending track residuals

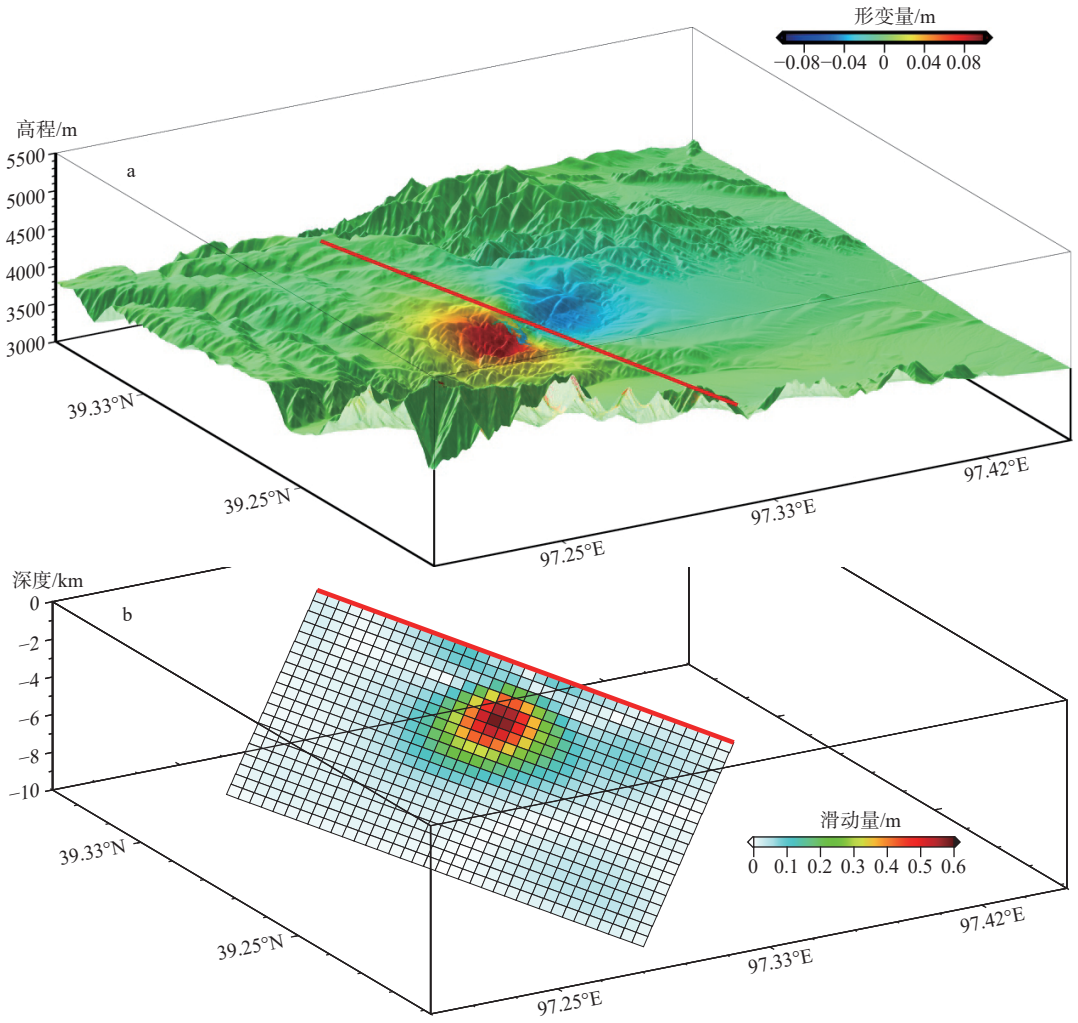
The red line segments indicate the surrounding faults, the arrow labeled AZ (Azimuth) shows the satellite flight direction, and the arrow labeled LOS indicates the radar line-of-sight direction.

2.2 分布式滑动分布

地球介质的不均匀性对同震形变有一定的影响,因此,使用均匀位错模型反演的断层滑动往往偏大(Zhang et al., 2021)。为获取精细的断层滑动分布,采用分布式滑动分布模型(Steepest Descent Method, SDM),基于上述反演确定的发震断层参数进一步反演,并考虑地球的分层结构,将矩形断层模型分割成多个子断层。依据 GBIS 反演获取的断层参

数，将此次地震的发震断层沿走向的长度延伸至 18 km，沿倾向的宽度延伸至 10 km，倾角设置为 68.69°，走向角为 166.97°，滑动角设置为−180°～ 180°，子断层片大小设置为 0.5 km × 0.5 km。为保证反演结果的稳定性，对断层面施加应力降平滑约束，该方法在断层滑动分布计算中已得到广泛使用（Wang et al., 2003; Tu et al., 2016）。研究共使用 25 个平滑因子计算了对应的粗糙度和拟合残差，最终确定了最佳的平滑因子为 0.03。

获取的三维同震滑动分布如图 4 所示，断层滑动方向见图 5。根据反演结果可知，断层面上的最大滑动量约为 0.58 m，在地下约 2.56 km 深处。其中，最大倾滑量约为 0.55 m，最大走滑量约为 0.34 m。基于分布式滑动模型反演的最大地震矩为 3.33 × 10^{17} N · m，对应的矩震级为 M_W 5.6。从图 5 可以看出，此次地震的断层破裂面主要集中在深度 1.2～4.9 km 处，并未破裂至地表，断层滑动主要表现为以逆冲为主兼有少量右旋走滑的特征。



红色实线为发震断层在地表的投影

a—叠加到区域地形图上的同震形变场；b—三维断层滑动分布

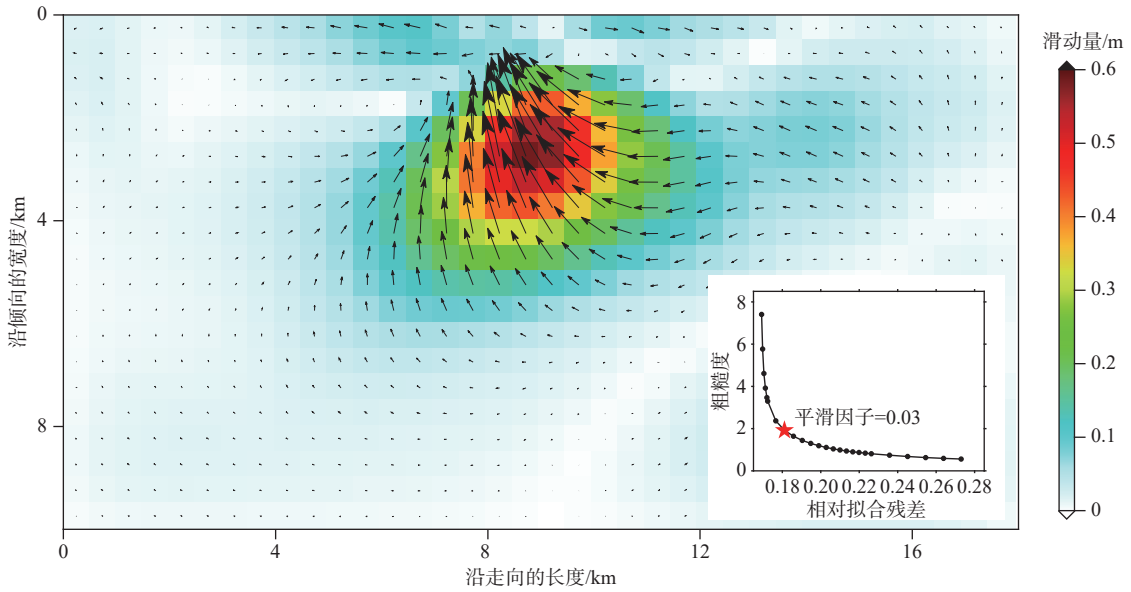
图 4　肃北 M_S 5.5 地震同震滑动分布

Fig. 4　Coseismic slip distribution of the Subei M_S 5.5 earthquake

(a) Coseismic deformation field superimposed on the regional topographic map; (b) Three-dimensional fault slip distribution

The red solid line represents the surface projection of the seismogenic fault.

分布式滑动模型中升轨和降轨数据正演获取的观测值、模拟值及其残差值如图 6 所示。整体而言，观测值与模拟值之间表现出较好的一致性，模拟的地表形变与观测到的 InSAR 结果相符，主要的形变特征被较好地拟合。残差值相对较小，升轨与降轨的均方根误差分别为 0.47 cm 和 0.35 cm，观测



五角星表示选取平滑因子的位置

图 5 肃北 M_S 5.5 地震二维同震滑动分布

Fig. 5 Two-dimensional coseismic slip distribution of the Subei M_S 5.5 earthquake

The pentagram indicates the location for selecting the smoothing factor.

值与模拟值的拟合度为 98%，表明反演结果稳定可靠。

3 讨论

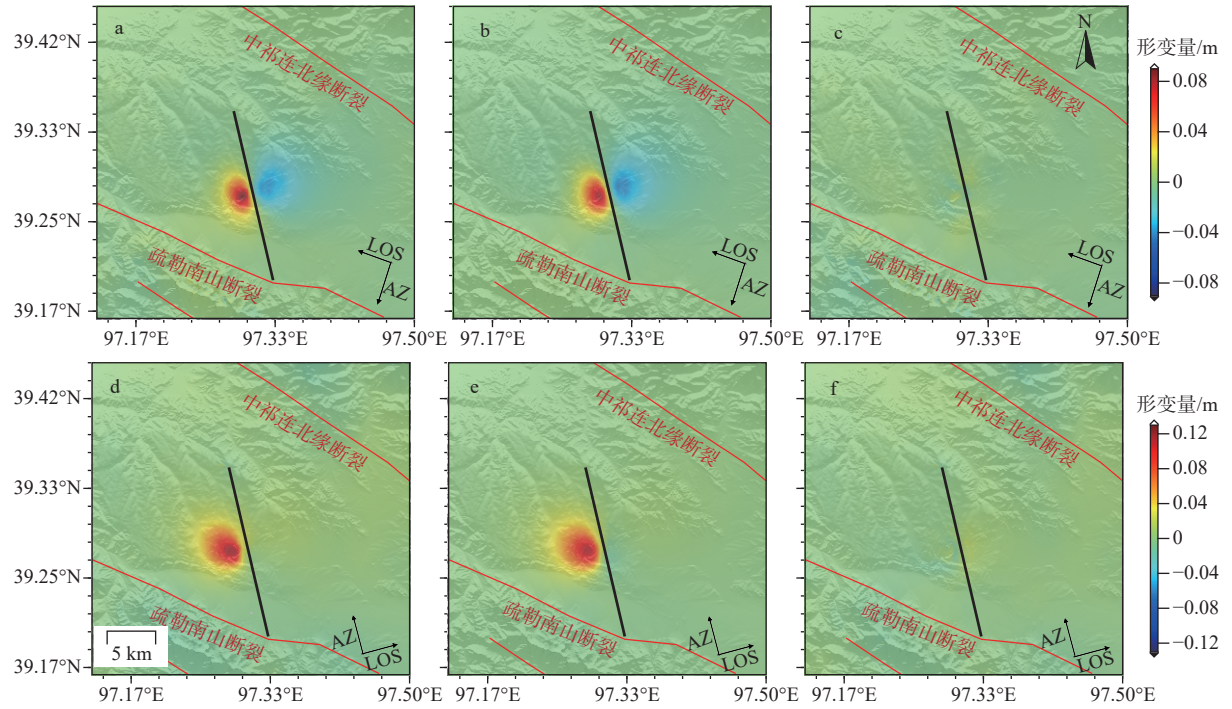
3.1 同震库仑应力变化分析

在肃北 M_S 5.5 地震发生后，主震附近区域发生了大量余震。为分析此次地震对周边区域应力的影响及未来地震的危险性，利用 2023 年 10 月 24 日—2023 年 12 月 4 日期间的小震精定位数据来研究肃北地震触发的库仑应力与余震之间的关系。通常在库仑应力计算中，主要考虑 2 种接收断层设置方式，即给定接收断层方向和最优断层方向（赵立波等，2016），分别用于研究指定断层库仑应力变化与区域库仑应力变化。此研究采用最优破裂面来分析主震对周边区域的影响。计算深度设置为 5 km，使用 PSGRN/PSCMP 软件计算区域的库仑应力变化（Wang et al., 2006）。

此次 M_S 5.5 地震引起的区域库仑应力变化如图 7 所示。其中，正值表示库仑应力加载区，当增加值≥0.01MPa 时，表示具有诱发地震的可能性（Ziv and Rubin, 2000）；负值为库仑应力卸载区，卸载区一般相对稳定，发生大地震的可能性较低。由图 7 可知，库仑应力加载区主要位于断层东西两侧与南侧，应力卸载区主要位于主震断层的西南侧和东南侧。余震分布近似呈现北北西—南南东向，与此次地震的发震断层走向大致相同，且主要集中在发震断层及震中周边的应力加载区域，与同震库仑应力触发机制相符，少部分余震分散在震中西南与东南侧的应力卸载区域。此次地震产生的静态库仑应力变化与余震之间的空间分布具有很强的相关性，主震对其后的余震事件存在明显的触发作用，余震充分吸收了主震释放的能量。此次肃北 M_S5.5 地震发生后，在中祁连北缘断裂与疏勒南山断裂之间，以及疏勒河断裂带以北区域呈现出库仑应力加载特征，上述地区未来发生地震的危险性较大。

3.2 基于 GNSS 与 InSAR 的区域应变率分析

为进一步厘清肃北地震的区域构造运动背景，使用 GPS 与 InSAR 获取了青藏高原的三维位移场、面应变率与最大剪应变率结果（刘传金等，2024）。结合 2015—2023 年期间 5.0 级以上的地震的分布情况，分析应变与区域地震活动性的相关性。由于在肃北地震震中区域的南侧 GNSS 站点分布较为稀疏，仅使用 GNSS 数据计算该区域应变结果会导致地表变化的细节被忽视，所以采用刘传金等（2024）公开发表的结果计算区域应变率，从而分析震间区域的应变率分布特征。其中，面应变率是判断地壳处于膨胀或是压缩状态的特征值，能够反映逆冲断层和正断层的应变积累与释放；最大剪应变率则是



黑色实线为发震断层在地表的投影；红色线段为周边断裂；箭头 AZ（Azimuth）表示卫星飞行方向；箭头 LOS（Line-of-sight）表示雷达的视线方向

a—降轨观测值；b—降轨模拟值；c—降轨残差；d—升轨观测值；e—升轨模拟值；f—升轨残差

图 6　分布式滑动模型的拟合结果

Fig. 6　Fitting results of the distributed slip model

(a) Descending track observations; (b) Descending track simulations; (c) Descending track residuals; (d) Ascending track observations; (e) Ascending track simulations; (f) Ascending track residuals

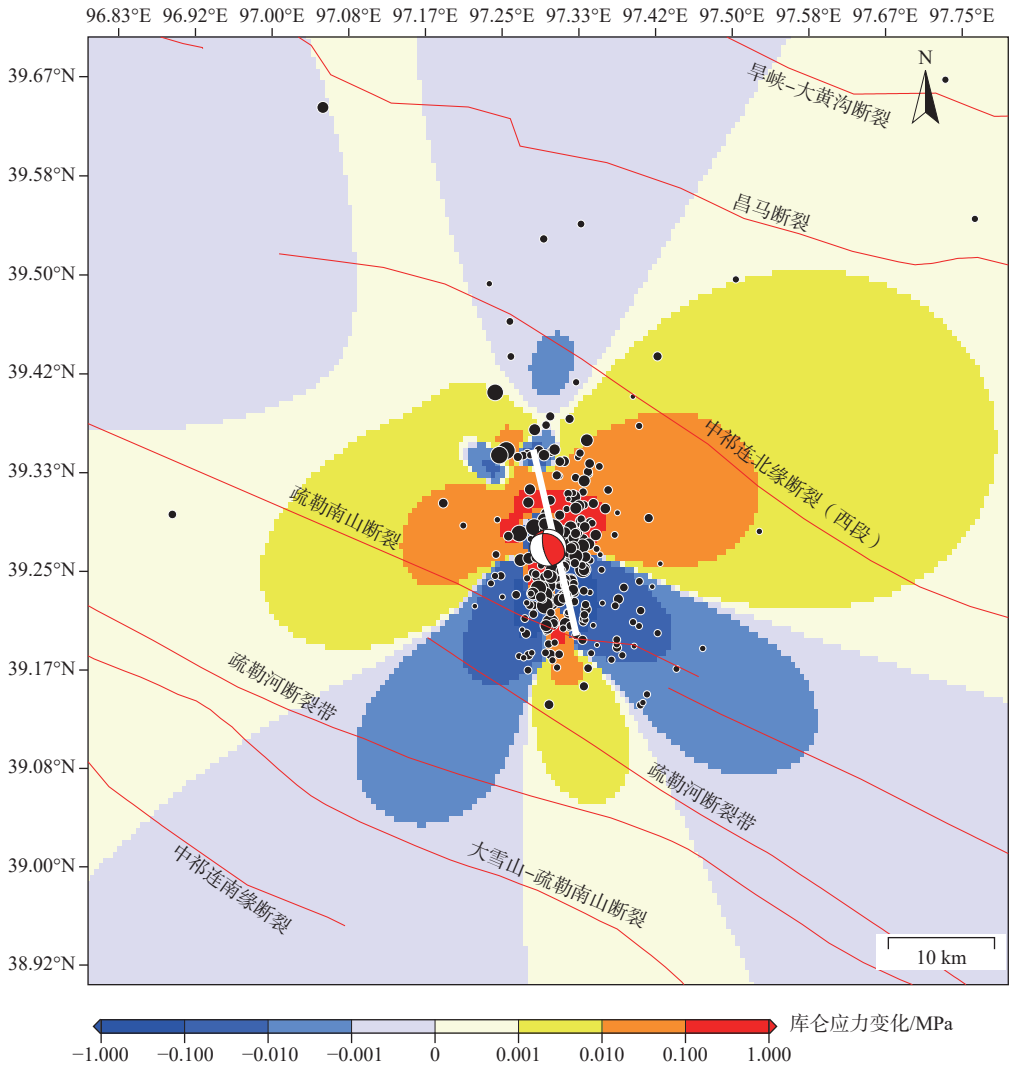
The black solid line represents the surface projection of the seismogenic fault, the red line segments indicate the surrounding faults, the arrow labeled AZ (Azimuth) shows the satellite flight direction, and the arrow labeled LOS indicates the radar line-of-sight direction.

反映剪切应变强度的参数。在面应变率结果中，负值表示挤压状态，正值表示拉张状态（图 8a）。祁连块体整体表现为负值，挤压区呈北西—南东分布，说明区域主要以北东向挤压变形为主。面应变率高值区主要分布在北祁连与中祁连地块，最大值可达 -8.7×10^{-8}/a，区域受到的拉张变形较弱，这与青藏高原在北东向推挤及鄂尔多斯块体的阻挡作用下，东北缘表现出的地壳隆升构造背景相符。震区的北东侧也存在明显的挤压变形作用，附近的中祁连北缘断裂表现为显著的压应变特征，而南部的疏勒南山断裂附近也弥散分布着挤压变形，震中区域的面应变率约为 -2.9×10^{-8}/a。此次肃北地震的发震断层主要表现出的逆冲运动特征与面应变率呈现出的挤压背景一致。应变的不断积累会导致地震危险性增加，值得注意的是，在 2015—2023 年期间 $M_W\geqslant5.0$ 的逆冲地震与面应变率具有较好的对应关系，均处于面应变率高值向低值过渡的区域，表明面应变率过渡带的地震危险性较强。从近几年祁连地块的地震活动性可知，祁连地块的地震活动水平为 5～6 级，发生 6 级以上的地震数量较少，但应变的积累代表现今该地块处于高应力状态，区域的地震危险性需要重点关注。

由最大剪应变率（图 8b）可知，震区所处位置的北西侧，大型左旋走滑的阿尔金断裂东段分布着显著的剪切变形，阿尔金断裂对祁连地块的变形特征与方式具有重要的调控作用。但值得注意的是，在阿尔金断裂的东段，剪应变自肃北以东沿野马山断裂转换至昌马断裂上，而不是聚焦到某一条断裂上。最大剪应变率在区域内呈现出条带分布特征，最大值分布在昌马断裂与玉门断裂之间，量级可达 8.0×10^{-8}/a。靠近震中的中祁连北缘断裂与疏勒南山断裂之间也有明显的剪切变形，此次地震同样也处于最大剪应变率高值向低值过渡的区域，在此构造背景下，发震断层也具有一定的走滑运动特征。

3.3　区域构造及发震断层讨论

祁连造山带北以祁连山北缘与河西走廊为界，



白色实线为发震断层在地表的投影；黑色圆圈为 2023 年 10 月 24 日—2023 年 12 月 4 日期间的小震精定位数据；红色沙滩球为此次肃北 M_S5.5 地震；红色线段为周边断裂

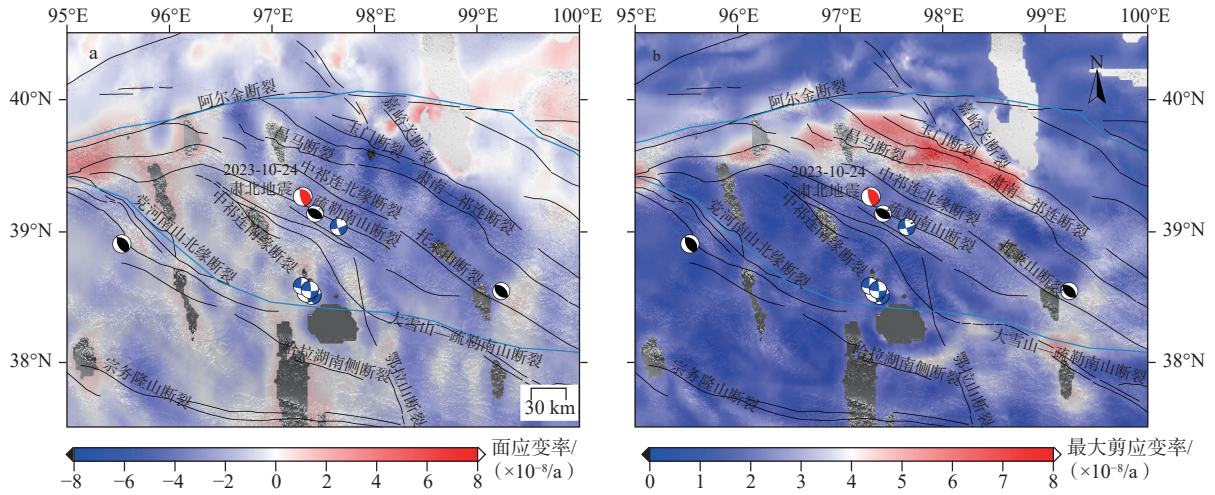
图 7 区域库仑应力变化

Fig. 7 Regional Coulomb stress changes

The white solid line represents the projection of the fault rupture on the ground surface, the black circles indicate the precise locations of small earthquakes from October 24, 2023, to December 4, 2023, the red beach ball represents the focal mechanism solution of the Subei M_S 5.5 earthquake, the red line segments indicate the surrounding faults.

南以柴北缘断裂为界，处于柴达木地块与阿拉善地块之间。块体内以中祁连北缘断裂、中祁连南缘断裂为分割界限，将祁连块体由北向南依次分割为北祁连构造带、中祁连构造带与南祁连构造带 3 个三级构造分区。此次肃北 M_S 5.5 地震所处的地域为中祁连块体，南北分别被中祁连南缘断裂、中祁连北缘断裂所切割（图 9a）。从整个区域构造来看，在肃北县西南方向，阿尔金断裂与党河南山断裂西段斜交（邵延秀等，2011）。肃北地区为阿尔金断裂、野马河–大雪山断裂与党河南山断裂的三联点，阿尔金断裂的滑动速率被区域内部一系列走滑与逆冲断裂所吸收（van der Woerd et al., 2001）。长期的左旋位移导致祁连山北西向山脉受到挤压作用，从而呈现出隆升态势（罗浩等，2020）。在祁连地块内部，地表存在数排近乎平行的逆冲断层，主要表现为由南向北推覆，共同吸收调节着祁连地块的变形。软弱的地壳产生应变传播，由阿尔金断裂的侧向挤出，转变为祁连山的隆升变形（Li et al., 2014）。

此次 M_S 5.5 地震所处区域南部距离最近的断裂为疏勒南山断裂，北部距离最近的断裂为中祁连



黑色、蓝色沙滩球分别为逆冲型地震、走滑型历史地震 (2015—2023 年); 震源机制解数据 (M_W≥5.0) 来自哈佛大学全球矩张量解 (Global Centroid Moment Tensor, GCMT); 红色沙滩球表示此次肃北 M_S5.5 地震; 黑色线段为断裂; 蓝色线段表示地块边界

a—面应变率分布图; b—最大剪应变率分布图

图 8　2015—2020 年祁连地区周边应变率分布

Fig. 8　Strain rate distribution around the Qilian region (2015–2020)

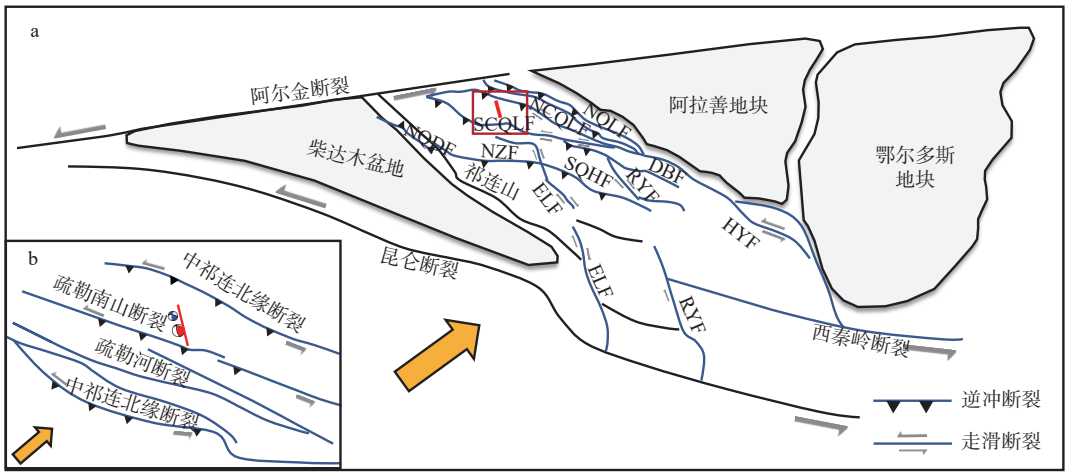
(a) Distribution of plane strain rate; (b) Distribution of maximum shear strain rate

The black and blue beach balls represent thrust and strike slip historical earthquakes (2015–2023), respectively, with focal mechanism solutions (M_W≥5.0) from the Global Centroid Moment Tensor (GCMT) catalog, the red beach ball indicates the focal mechanism of the Subei M_S 5.5 earthquake, black line segments represent faults, and the blue line segments indicate tectonic blocks.

北缘断裂。其中疏勒南山断裂为左旋走滑兼逆冲型断裂，总体走向为北西西，倾向北东，倾角约为 60°，最新一次活动为晚更新世(郭菲等，2023)；中祁连北缘断裂为左旋逆冲断裂，主断裂由南西向北东方向推覆(郑文俊，2009; 陈宣华等，2019; Wu et al., 2024)。此次地震所处的祁连山褶皱冲断带在长期受到北东向挤压和近南北向右旋剪切的背景下，形成了复杂的断裂系统，此次地震的发生为理解该区域的构造变形机制提供了重要契机。通过 InSAR 同震地表形变场及断层滑动分布可知，肃北 M_S 5.5 地震的发震断层为疏勒南山断裂与中祁连北缘断裂之间的 1 条隐伏断层，走向为近南北方向，具有逆冲兼右旋走滑性质，倾角约为 68°。此外，2023 年 12 月 1 日发生的 M_S 5.0 地震的震源机制解也表现出走滑特征，具体分布情况如图 9b 所示。距离此次地震约 80 km 处的 2022 年德令哈 M_S 6.0 地震，其发震断层可能是右旋走滑的鄂拉山断裂的北延部分(Li et al., 2023; Xiong et al., 2024)。结合此次肃北 M_S 5.5 地震的分布位置及断层运动特征，发现其右旋走滑特征与鄂拉山断裂的右旋走滑性质具有一定的相似性。同时，鄂拉山断裂的应力场表现出向北的连续性(图 8)，这可能暗示肃北地区形成了类似的构造环境。但肃北地震的发震断层具有逆冲性质，而鄂拉山断裂主要表现为右旋走滑，这表明肃北地震的发震断层可能在鄂拉山断裂北延的基础上，受到局部构造环境的影响，形成了复杂的逆冲兼右旋走滑运动。此外，此次地震的发震断层与南北两端发育近平行的北西西向逆冲兼走滑断层在空间分布及构造特征上符合共轭断层系统的特征(Li et al., 2023; 杨晓平等，2024)。这些断层可能共同构成了 1 个复杂的断层系统，共轭断层系统的形成与活动也反映了区域北东向挤压应力场的作用。此次地震的构造背景与 2022 年德令哈 M_S 6.0 地震类似，这些断层活动分担了祁连山的北东向地壳缩短及东西向运动变形，对区域应力起到了调节作用，并在一定程度上释放了长期积累的能量。

4　结论

研究基于 D-InSAR 技术利用 Sentinel-1 数据获取了 2023 年 10 月 24 日肃北 M_S5.5 地震的同震形变场，并以此为约束反演了此次地震的发震断层参数和断层面的滑动分布。在此基础上，计算了地震引起的库仑应力变化，结合余震分布分析了此次地震



NQDF—柴达木盆地北缘断裂；NZF—北宗务隆山断裂；ELF—鄂拉山断裂；SQHF—青海南山断裂；RYF—日月山断裂；SCQLF—中祁连南缘断裂；DBF—达坂山断裂；NCQLF—中祁连北缘断裂；HYF—海原断裂；NQLF—祁连山北缘断裂

红色震源机制球为2023年10月24日肃北 M_S 5.5地震；蓝色震源机制球则表示2023年12月1日的 M_S 5.0地震；黄色箭头表示青藏高原的北东向运动；红色实线为发震断层在地表的投影；红色矩形框为图9b的范围

a—青藏高原东北缘地壳形变模式；b—此次肃北 M_S 5.5地震的断层形成机制

图9 祁连块体及邻近地区构造活动模式图（据Cheng et al.，2021修改）

Fig. 9 Tectonic activity pattern of the Qilian Block and adjacent regions (modified after Cheng et al., 2021)

(a) Crustal deformation pattern of the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau; (b) Fault formation mechanism of the 2023 Subei M_S 5.5 Earthquake

The red focal mechanism beach ball indicates the M_S 5.5 earthquake on October 24, 2023, the blue focal mechanism beach ball indicates the M_S 5.0 earthquake on December 1, 2023, the yellow arrow indicates the north-eastward movement of the Qinghai-Tibet Plateau, the red solid line is the projection of the seismogenic fault onto the ground surface, and the red rectangle indicates the area of Figure 9b.

的应力释放情况，并使用GNSS与InSAR获取了区域应变率。得出的主要结论如下：

（1）肃北 M_S 5.5地震的升、降轨InSAR形变方向相同，以LOS向隆升变形为主，表明此次地震破裂类型为逆冲型破裂。降轨监测到的LOS向最大形变量为9 cm，升轨监测到的LOS向最大形变量为12 cm。

（2）通过InSAR数据约束反演获取的断层模型显示，此次肃北 M_S 5.5地震的发震断层走向角为166.97°，倾角为68.69°，断层的最大滑移量为0.58 m，主要发生在1.2～4.9 km深处。此次地震的发震断层为位于疏勒南山断裂与中祁连北缘断裂之间的1条隐伏断层。震源深度较浅，断层错动引起的库仑应力加载程度及影响区域较小，余震主要发生在库仑应力增加区。

（3）GNSS与InSAR数据获取的区域面应变率及最大剪应变率结果表明，2015—2020年期间，中祁连与北祁连地块主要表现为挤压变形，且存在一定程度的剪切变形，应变率较为集中，在应变梯度带上地震发生频率较高，应变的积累表明了区域地震危险性较强，需要重点关注。

References

BAGNARDI M, HOOPER A, 2018. Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: a Bayesian approach[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19(7): 2194-2211.

CHEN H Y, ZHAO C Y, LI B, et al., 2023. Monitoring spatiotemporal evolution of Kaiyang landslides induced by phosphate mining using distributed scatterers InSAR technique[J]. Landslides, 20(3): 695-706.

CHEN X H, SHAO Z G, XIONG X S, et al., 2019. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic Belt, Northwest China[J]. Geology in China, 46(5): 995-1020. (in Chinese with English abstract)

CHENG F, ZUZA A V, HAPROFF P J, et al., 2021. Accommodation of India–Asia convergence via strike-slip faulting and block rotation in the Qilian Shan fold–thrust belt, northern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of the Geological Society, 178(3): jgs2020-207.

CHENG J W, CHEN J F, LIU X Z, 2020. Division of seismic statistical areas and analysis of seismicity trend in the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 41(3): 1-11. (in Chinese with English abstract)

CHU Y B, 2015. The geomorphy characteristic of Qilian Mountains and its response to Tibetan Plateau uplift[D]. Chengdu: Chengdu University of

Technology. (in Chinese)

FIALKO Y, 2006. Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system[J]. Nature, 441(7096): 968-971.

GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7): 9183-9191.

GAN W J, ZHANG P Z, SHEN Z K, et al., 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B8): B08416.

GUO F, WANG Y, XIE M Y, et al., 2023. Summary of the Sunan M_S 5.1 earthquake in Gansu on March 17, 2022[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 44(2): 1-10. (in Chinese with English abstract)

GUO P, HAN Z J, GAO F, et al., 2020. A new tectonic model for the 1927 *M*8.0 Gulang earthquake on the NE Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 39(9): e2020TC006064.

HAO M, WANG Q L, SHEN Z K, et al., 2014. Present day crustal vertical movement inferred from precise leveling data in eastern margin of Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 632: 281-292.

JI L Y, LIU C J, XU J, et al., 2017. InSAR observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou M_S7.0 earthquake in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4069-4082. (in Chinese with English abstract)

JI L Y, XU J D, LIU L, et al., 2021. A review of present-day deformation of active volcanoes in China between 1970 and 2013[J]. Geological Society, London, Special Publications, 510: 215-226.

LI H Y, SHEN Y, HUANG Z X, et al., 2014. The distribution of the mid-to-lower crustal low-velocity zone beneath the northeastern Tibetan Plateau revealed from ambient noise tomography[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(3): 1954-1970.

LI S Y, 2023. Combining GNSS and seismic anisotropy data to constrain upper crustal deformation in the northeastern Tibetan Plateau[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA. (in Chinese with English abstract)

LI W, HE X H, ZHANG Y P, et al., 2023. The 2022 Delingha, China, earthquake sequence and implication for seismic hazard near the western end of the Qilian–Haiyuan fault[J]. Seismological Research Letters, 94(4): 1733-1746.

LIU C J, JI L Y, ZHU L Y, et al., 2024. Kilometer-resolution three-dimensional crustal deformation of Tibetan Plateau from InSAR and GNSS[J]. Science China Earth Sciences, 67(6): 1818-1835.

LIU X H, YAO X, YANG B, et al., 2023. InSAR-based indentification and spatial distribution analysis of active landslides in the Western Sichuan Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 29(1): 111-126. (in Chinese with English abstract)

LUO H, XU X W, LIU X L, et al., 2020. The structural deformation pattern in the eastern segment of the Altyn Tagh fault[J]. Acta Geologica Sinica, 94(3): 692-706. (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)

TANG D W, GE W P, YUAN D Y, et al., 2023. Triggering effect of historical earthquakes in the northern Tibetan Plateau on the Coulomb stress of the 2022 Menyua M_S6.9 earthquake and subsequent earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(7): 2772-2795. (in Chinese with English abstract)

TU H W, WANG R J, DIAO F Q, et al., 2016. Slip model of the 2001 Kunlun mountain M_S8.1 earthquake by SDM: joint inversion from GPS and InSAR data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(4): 404-413.

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.

WAN Y G, SHEN Z K, ZENG Y H, et al., 2007. Evolution of cumulative Coulomb failure stress in northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its effect on large earthquake occurrence[J]. Acta Seismologica Sinica, 29(2): 115-129. (in Chinese with English abstract)

WANG H, ZHANG G M, WU Y, et al., 2003. The deformation of active crustal-blocks on the Chinese Mainland and its relation with seismic activity[J]. Earthquake research in China, 19(3): 243-254. (in Chinese with English abstract)

WANG J S, ZHAO N Y, 2020. Seismogenic structure of 2018 Xietongmen, Tibet M_W5.6 earthquake inferred from InSAR data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 42(2): 384-390. (in Chinese with English abstract)

WANG R J, MARTÍN F L, ROTH F, 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust—FORTRAN programs EDGRN/EDCMP[J]. Computers & Geosciences, 29(2): 195-207.

WANG R J, LORENZO-MARTÍN F, ROTH F, 2006. 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, 32(4): 527-541.

WU X Y, XU X W, YU G H, et al., 2024. The China Active Faults Database (CAFD) and its web system[J]. Earth System Science Data, 16(7): 3391-3417.

WU Z H, 2024. The earthquake-controlling process of continental collision-extrusion active tectonic system around the Qinghai-Tibet Plateau: a case study of strong earthquakes since 1990[J]. Journal of Geomechanics, 30(2): 189-205. (in Chinese with English abstract)

XIONG G H, JI L Y, LIU C J, 2023. Analysing the surface deformation and present-day magma activity of Changbaishan-Tianchi volcano from 2015 to 2022 with InSAR technology[J]. Seismology and Geology, 45(6): 1309-1327. (in Chinese with English abstract)

XIONG W, XU C J, CHEN W, et al., 2024. The 2022 Har Lake earthquake sequence highlights a complex fault system in the western Qilian Shan, northeastern Tibetan Plateau[J]. Geophysical Journal International, 238(2): 1089-1102.

XU H, SHU B, ZHANG Q, et al., 2024. Site selection for landslide GNSS monitoring stations using InSAR and UAV photogrammetry with analytical hierarchy process[J]. Landslides, 21(4): 791-805.

YANG X P, CHEN J, LI A, et al., 2024. Structural deformation characteristics of active anticline and their implications for seismogeological disaster effect under compression setting in the Late Cenozoic[J]. Journal of Geo-

mechanics, 30(2): 225-241. (in Chinese with English abstract)

YU C, LI Z H, PENNA N T, 2018. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model[J]. Remote Sensing of Environment, 204: 109-121.

YUE H, ZHANG Y, GE Z X, et al., 2020. Resolving rupture processes of great earthquakes: reviews and perspective from fast response to joint inversion[J]. Science China Earth Sciences, 63(4): 492-511.

ZHANG B, XU G C, LU Z P, et al., 2021. Coseismic deformation mechanisms of the 2021 M_S 6.4 Yangbi earthquake, Yunnan Province, using InSAR observations[J]. Remote Sensing, 13(19): 3961.

ZHANG N, XU W J, WANG J, et al., 2020. Study on the zonal dynamic characteristics of strain rate field in the north section of the North-South Seismic Belt[J]. Progress in Geophysics, 35(5): 1724-1735. (in Chinese)

ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al., 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. Geology, 32(9): 809-812.

ZHANG W T, JI L Y, ZHU L Y, et al., 2022. Current slip and strain rate distribution along the Ganzi-Yushu-Xianshuihe fault system based on InSAR and GPS observations[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 821761.

ZHANG X, LI Z Y, GUO X Y, et al., 2024. The focal mechanism solution and seismogenic structure of the Subei M_S5.5 earthquake in Gansu on October 24th, 2023[J]. North China Earthquake Sciences, 42(2): 51-58. (in Chinese with English abstract)

ZHAO L B, ZHAO L F, XIE X B, et al., 2016. Static Coulomb stress changes and seismicity rate in the source region of the 12 February, 2014 M_W7.0 Yutian earthquake in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(10): 3732-3743. (in Chinese with English abstract)

ZHAO N Y, JI L Y, ZHANG W T, et al., 2023. Present-day kinematics and seismic potential of the Ganzi-Yushu fault, eastern Tibetan Plateau, constrained from InSAR[J]. Frontiers in Earth Science, 11: 1123711.

ZHENG W J, 2009. Geometric pattern and active tectonics of the Hexi Corridor and its adjacent regions[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator, 1-181. (in Chinese with English abstract)

ZHU L, DAI Y, SHI F Q, et al., 2022. Coulomb stress evolution and seismic hazards along the Qilian-Haiyuan fault zone[J]. Acta Seismologica Sinica, 44(2): 223-236. (in Chinese with English abstract)

ZIV A, RUBIN A M, 2000. Static stress transfer and earthquake triggering: no lower threshold in sight?[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B6): 13631-13642.

ZOU X B, LI X J, SHAO Y X, et al., 2024. Tectonic deformation and seismic mechanism of the 2021 Aksai M_S5.5 earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 978-990. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 等, 2019. 祁连造山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. 中国地质, 46(5): 995-1020.

程建武, 陈继峰, 刘旭宙, 2020. 青藏高原北部地区地震统计区划分及地震活动特征[J]. 地震地磁观测与研究, 41(3): 1-11.

褚永彬, 2015. 祁连山地貌特征及对青藏高原隆升的响应[D]. 成都: 成都理工大学.

郭菲, 王月, 解孟雨, 等, 2023. 2022年3月17日甘肃肃南M_S5.1地震总结[J]. 地震地磁观测与研究, 44(2): 1-10.

季灵运, 刘传金, 徐晶, 等, 2017. 九寨沟M_S7.0地震的InSAR观测及发震构造分析[J]. 地球物理学报, 60(10): 4069-4082.

李抒予, 2023. GNSS与地震各向异性资料联合约束青藏高原东北部上地壳变形[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.

刘传金, 季灵运, 朱良玉, 等, 2024. 联合InSAR和GNSS构建青藏高原千米分辨率三维地壳形变场[J]. 中国科学: 地球科学, 54(6): 1845-1862.

刘星洪, 姚鑫, 杨波, 等, 2023. 川西高原活动性滑坡识别与空间分布特征研究[J]. 地质力学学报, 29(1): 111-126.

罗浩, 徐锡伟, 刘小利, 等, 2020. 阿尔金断裂东段的构造转换模式[J]. 地质学报, 94(3): 692-706.

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.

汤大委, 葛伟鹏, 袁道阳, 等, 2023. 青藏高原北部历史强震对2022年门源M_S6.9地震及后续地震库仑应力触发作用[J]. 地球物理学报, 66(7): 2772-2795.

万永革, 沈正康, 曾跃华, 等, 2007. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响[J]. 地震学报, 29(2): 115-129.

王辉, 张国民, 吴云, 等, 2003. 中国大陆活动地块变形与地震活动的关系[J]. 中国地震, 19(3): 243-254.

王金烁, 赵宁远, 2020. 利用InSAR技术研究2018年西藏谢通门M_W5.6地震发震构造[J]. 地震工程学报, 42(2): 384-390.

吴中海, 2024. 青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震作用: 以1990年以来强震活动为例[J]. 地质力学学报, 30(2): 189-205.

熊国华, 季灵运, 刘传金, 2023. 长白山天池火山2015—2022年InSAR变形与活动状态分析[J]. 地震地质, 45(6): 1309-1327.

杨晓平, 陈杰, 李安, 等, 2024. 新生代晚期挤压作用下活动背斜区的构造变形特征及其地震地质灾害效应[J]. 地质力学学报, 30(2): 225-241.

岳汉, 张勇, 盖增喜, 等, 2020. 大地震震源破裂模型: 从快速响应到联合反演的技术进展及展望[J]. 中国科学: 地球科学, 50(4): 515-537.

张楠, 许文俊, 王静, 等, 2020. 南北地震带北段分区应变率场动态变化特征研究[J]. 地球物理学进展, 35(5): 1724-1735.

张潇, 李振月, 郭祥云, 等, 2024. 2023年10月24日甘肃肃北M_S5.5地震震源机制及发震构造[J]. 华北地震科学, 42(2): 51-58.

赵立波, 赵连锋, 谢小碧, 等, 2016. 2014年2月12日新疆于田M_W7.0地震源区静态库仑应力变化和地震活动率[J]. 地球物理学报, 59(10): 3732-3743.

郑文俊, 2009. 河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 1-181.

朱琳, 戴勇, 石富强, 等, 2022. 祁连—海原断裂带库仑应力演化及地震危险性[J]. 地震学报, 44(2): 223-236.

邹小波, 李兴坚, 邵延秀, 等, 2024. 2021年阿克塞M_S5.5地震区形变特征及发震机制研究[J]. 地质力学学报, 30(6): 978-990.