

引用格式：宋泽尧，万永革，顾培苑，等，2026. 新疆乌什地区构造应力场特征及乌什 7.1 级地震对其的影响[J]. 地质力学学报，32(4)：817–828. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025085

Citation: SONG Z Y, WAN Y G, GU P Y, et al., 2026. Tectonic stress field characteristics in Wushi, Xinjiang, and the stress impact of the M 7.1 Wushi earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 32(4)：817–828. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025085

新疆乌什地区构造应力场特征及乌什 7.1 级地震对其的影响

宋泽尧¹，万永革^{1,2}，顾培苑¹，周明月¹
SONG Zeyao¹，WAN Yongge^{1,2}，GU Peiyuan¹，ZHOU Mingyue¹

1. 防灾科技学院，河北 三河 065201；
2. 河北省地震动力学重点实验室，河北 三河 065201
1. *Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;*
2. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China*

Tectonic stress field characteristics in Wushi, Xinjiang, and the stress impact of the M 7.1 Wushi earthquake

Abstract: [Objective] The Wushi region in Xinjiang is located at the intersection of multiple tectonic units, characterized by frequent tectonic activity, making it a critical region for stress concentration and release. On January 23, 2024, an M 7.1 earthquake struck Wushi (epicenter: 41.26°N, 78.63°E; depth: 22 km), representing the largest event in this area over the past decade. To better understand the regional seismogenic environment and assess future seismic hazards, this study utilizes comprehensive focal mechanism data to investigate the regional tectonic stress field and quantitatively evaluate the impact of the M 7.1 Wushi earthquake on the stress regime. [Methods] Based on 148 focal mechanism solutions (January 1976 to March 2025) compiled from multiple domestic and international institutions, we applied the damped stress tensor inversion method to determine the stress field characteristics across subregions and systematically evaluate changes in the stress field before and after the earthquake. [Results] Stress tensor inversion reveals that the Wushi region is dominated by a compressional stress regime under N–S compression. Except for the area near the Jiashi earthquake cluster where $R > 0.5$, the azimuth of the maximum principal compressive stress (σ_1) gradually rotates from NNW in the south to approximately N–S in the north (azimuth range: 168.75°–183.45°; plunge range: 6.85°–19.58°). The Jiashi seismic cluster exhibits a strike-slip stress regime characterized by NNE–SSW compression and NW–SE extension, with thrust faulting dominating to its north and strike-slip faulting to its south. Comparative analysis shows that the optimal σ_1 direction adjusted from an azimuth/plunge of 178.91°/6.24° before the earthquake to 167.61°/7.98° after the earthquake, corresponding to an azimuth deviation of 12.53° and a total spatial rotation of 15.06°. This indicates that the mainshock exerted a relatively minor impact on the regional stress field, which remains under the dominant compressional regime. [Conclusions] The tectonic stress field in the Wushi region is driven by the northward collision of the Indian plate against Eurasia, which transmits near-N–S horizontal compression northeastward into the Tianshan orogenic belt, causing crustal shortening and thrusting between the Tarim Basin and the Tianshan Mountains. The M 7.1 earthquake caused only localized adjustments, leaving the overall regional stress regime controlled by deep-seated tectonic processes. Furthermore, the northern Jiashi earthquake cluster, located at the boundary between the northern Tarim plate and the Tianshan

基金项目：河北省自然科学基金项目（D2026512030，D2025512035）；河北科技星火计划项目（DZ2025081900032）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of Hebei Province (Grant Nos. D2026512030 and D2025512035) and the Hebei Science and Technology Spark Program (Grant No. DZ2025081900032).

第一作者：宋泽尧（2001—），男，在读硕士，主要从事构造应力场、地震应力触发方面的研究工作。Email: 1402986288@qq.com

通信作者：万永革（1967—），男，博士，研究员，主要从事构造应力场、地震应力触发等方面的研究工作。Email: wanyg217217@vip.sina.com

收稿日期：2025–07–14；修回日期：2025–09–16；录用日期：2025–09–17；网络出版日期：2026–07–27；责任编辑：王婧

Received: 2025–07–14; Revised: 2025–09–16; Accepted: 2025–09–17; Available Online: 2026–07–27; Handling Editor: WANG Jing

Mountains, exhibits a strike-slip stress mechanism, marking a major tectonic transition zone between the Tarim Basin and the Tianshan orogenic belt. [Significance] This study provides a refined characterization of the tectonic stress field in the Wushi region and clarifies the limited impact of the M 7.1 mainshock on regional stress states. These findings deepen our understanding of the tectonic interactions between the Tianshan orogenic belt and the Tarim Basin, providing critical scientific constraints for regional tectonic segmentation and seismic hazard assessment.

Keywords: tectonic stress field; focal mechanism solution; stress field inversion; Wushi area, Xinjiang

摘要: 天山造山带与塔里木板块北部边界构造活动频繁, 导致新疆乌什地区发育复杂构造变形。2024年1月23日乌什7.1级地震(震中 41.26°N , 78.63°E , 震源深度22 km)是该区域近十年来最大震级事件, 为研究区域构造应力场及该地震对其影响提供了有利契机。基于1976年1月至2025年3月来自国内外多家机构发布的148个震源机制解, 采用阻尼应力张量反演方法, 获取了乌什地区构造应力场状态, 并分析了乌什7.1级地震对区域构造应力场的可能影响。结果表明: 乌什地区主要受到南北向挤压作用, 主压应力轴走向 168.77° 、倾伏角 6.85° , 主张应力轴几近垂直, 揭示印度板块向北俯冲背景下, 塔里木盆地与天山之间的地壳发生缩短和逆冲推覆, 整体处于南北向挤压应力环境; 乌什7.1级地震使主压应力轴方向由震前的 178.91° (倾伏角 6.24°)转变为震后的 167.61° (倾伏角 7.98°), 空间旋转角 15.06° , 但对应力场整体影响较小, 区域应力体系仍受深部构造活动的控制; 乌什地区应力场虽具整体一致性, 但位于塔里木板块北缘与天山交界带的伽师北部震群呈现走滑型应力机制, 指示该区域为塔里木盆地与天山造山带的板块构造转换边界。

关键词: 构造应力场; 震源机制解; 应力场反演; 新疆乌什地区

中图分类号: P315.33; P315.5; P55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2026)04-0817-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025085

0 引言

新疆乌什地处帕米尔高原东部, 是塔里木盆地和天山山脉的转换枢纽。区域上, 乌什地区位于多个构造单元的交接地带, 是应力集中和释放的关键区域, 其现今应力场的特征对研究该区板块构造运动状态具有重要意义。南天山构造带地震活动具有高强度、高频度特征, 且空间异质性显著(Li et al., 2023), 区域构造变形强烈。GPS观测揭示, 帕米尔高原东北部正以 20 mm/a 的速率经历南北向地壳缩短(崔华伟等, 2019; 潘正洋等, 2020; 王子韬等, 2020)。受塔里木-天山碰撞和帕米尔构造挤出的双重作用, 乌什地区历史上多次发生中强地震, 其中以1902年阿图什 M_w 7.7地震规模最大(Chen et al., 2022), 其成因被解释为塔里木与南天山两大块体相向对冲挤压的结果(赵瑞斌等, 2001); 其余6级以上强震主要集中在南天山的前陆逆冲挤压构造带内(陈庆宇, 2022), 表现出复杂的地壳变形模式与强震活动机理。早期的构造应力场研究曾揭示, 该区地壳应力状态受北西向的挤压应力和近垂直向的拉张应力的共同作用(徐锡伟等, 2006)。雷啸宇等(2023)利用全球矩心矩张量(GCMT)目录数据,

反演了伽师地震附近($36^{\circ}\text{--}45^{\circ}\text{N}$, $74^{\circ}\text{--}82^{\circ}\text{E}$)的应力场, 其结果将乌什囊括在内, 显示主压应力轴倾伏角普遍较小, 处于近水平挤压状态, 但受限于数据的覆盖范围与精度, 以及可能遗漏局部地震信息等局限性, 该结果无法捕捉到局部细微的应力变化。

2024年1月23日, 乌什发生7.1级地震(震中 41.26°N , 78.63°E ; 震源深度22 km)是该区域近十年来最大震级事件。该地震是否改变了地区构造应力场特征, 对于完善天山造山带和塔里木盆地的应力场研究具有十分重要的意义。张博譔等(2024)通过实地考察, 认为发震断层可能为一条倾向北西的逆冲断层。关兆萱等(2024)基于主震及余震序列震源机制解的聚类分析, 确定乌什地震发震断层的几何形态为北西向。宋泽尧等(2024)通过计算周边断裂上沿滑动方向上的库仑破裂应力变化, 判断发震断层为迈丹断裂, 该结论与Guo et al.(2024)基于InSAR技术的观察结果一致。迈丹断裂属于厚皮构造, 变形微弱、地震活动稀少, 但其近期东段(乌什地区)地震活动增强, 需重新评估其潜在风险(Qiu et al., 2024)。

区域构造应力场特征及强震后应力场变化特征, 可为揭示区域孕震环境及未来的地震活动性提

供科学参考依据(王子韬等, 2020)。目前, 乌什地区构造应力场的研究仍较为薄弱, 尤其缺乏针对乌什7.1级地震前后区域应力场状态变化的系统对比与深入分析。基于此, 文章以乌什地区为研究区, 采用 Hardebeck and Michael(2006)提出的阻尼应力张量时空反演方法, 整合多个机构的地震观测数据, 通过对比地震前后区域构造应力场的变化, 探讨地震对区域应力状态的影响程度, 旨在弥补现有研究对该区构造应力场精细刻画不足, 以及对乌什7.1级地震区域应力场影响机制认识薄弱等问题。研究结果可为深入揭示区域孕震构造环境、精准评估未来地震活动性提供关键依据, 亦能明确该强震是否显著改变了原有区域应力体系, 为后续研究中历史应力场模型的适用性判断提供关键约束。

1 构造背景

新疆乌什地区位于南天山逆冲构造带与塔里木盆地北缘前陆冲断带的交汇地区(图1)。南天山逆冲构造带现今构造格局受控于印度-欧亚大陆碰撞的远程效应, 在印度板块以约46 mm/a的速率持续北向挤压的构造体系下(Wang and Shen, 2020), 已发展为中亚陆内造山带中构造活动最为强烈的地区之一。乌什地区多条活动断裂交汇, 迈丹断裂贯穿其中, 且周边发育柯坪塔格断裂等重要构造。复杂的断裂构造网络使其成为区域构造应力集中与释放的关键场所。

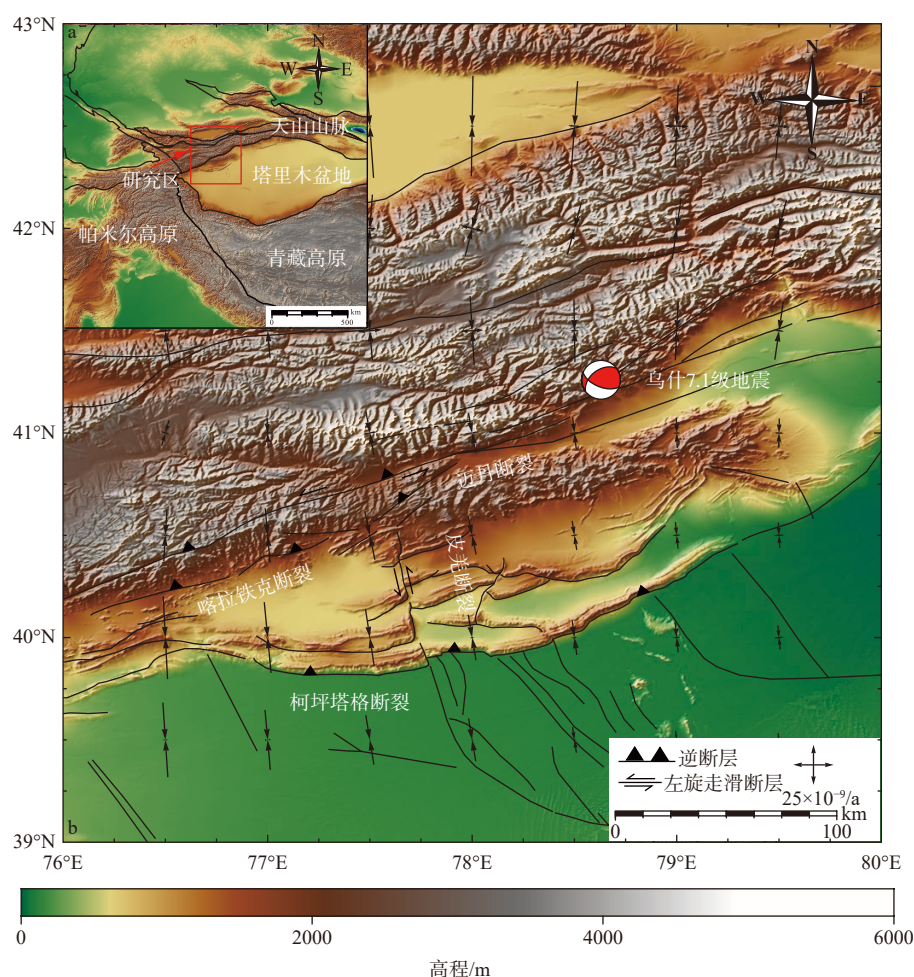
2024年乌什7.1级地震的发震构造为迈丹断裂, 其走向长约400 km, 倾角 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 兼具逆冲和左旋走滑分量(Wu et al., 2019)。这种典型的逆冲-左旋走滑复合型运动特征(吴传勇, 2016), 造成乌什北侧山体持续性差异隆升, 并在盆地边缘诱发一系列褶皱-逆冲构造变形。Guan et al.(2025)反演结果表明, 乌什震源区受到了南北向压应力的影响, 进一步印证了印度-欧亚大陆碰撞的远场效应。柯坪塔格断裂被西北向左旋走滑皮羌断裂分为东、西2段。Li et al.(2022)基于1998—2020年73个GPS站点的地壳运动速度场数据(欧亚参考框架), 获得东段缩短率为 $1.45\pm 0.31\sim 2.10\pm 0.42$ mm/a, 西段为 $2.36\pm 0.23\sim 3.70\pm 0.59$ mm/a, 表明西段构造活动更为强烈, 更易发生地震。此外, 天山造山带内部的地壳缩短和隆升活动仍然非常强烈(Wu et al., 2023)。区域应变率显示该区以南北向挤压为主, 并通过天山南缘

断裂系统的构造传递作用, 在乌什地区形成显著的侧向挤压应力累积(Molnar and Stock, 2009; Wang and Shen, 2020)。伽师震群($39^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $76^{\circ}\sim 77^{\circ}\text{E}$)分为南、北2个震群。南部震群位于塔里木盆地边缘, 地壳厚度较薄(40~52 km); 北部震群地处天山与塔里木盆地交界的推覆褶皱变形区, 地壳厚度较厚(60~76 km)。在 39.75°N 附近, 地壳厚度急剧增大, 地壳内部存在明显变形; 在 76.70°E 附近, 地壳结构及壳幔界面的深度都存在明显变化(刘启元等, 2000; 裴顺平等, 2002)。

2 数据和方法

从中国地震台网中心、全球矩心矩张量(GCMT; Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012)、德国波茨坦地球科学研究中心(GFZ)、美国国家地震信息中心(NEIC)、巴黎地球物理研究所(IPGP)、蔚蓝海岸天文台(OCA)、SC4矩张量系统(SC4)、地震与海啸预测中心(CPPT)数据库, 收集了1976年1月1日—2025年3月1日乌什地区 ≥ 4.0 地震的震源机制解(图2)。通过整合上述多机构数据, 可有效降低单一数据源所致的系统性偏差, 提升后续应力场反演结果的稳健性。针对同一地震不同机构的多组解, 采用万永革(2019)提出的“多个震源机制中心解确定方法”进行统一归并处理, 共获得148个震源机制数据。基于万永革(2024)提出的面应变准则, 将上述震源机制解划分为5类, 各类型数量及占比分别为: 正断型6个(4.08%); 正走滑型4个(2.72%); 走滑型30个(20.41%); 逆走滑型16个(10.88%); 逆断型92个(61.90%)。统计结果表明, 该地区地震活动以逆断型为主, 兼有走滑性质地震。

区域构造应力场反演采用 Hardebeck and Michael(2006)提出的阻尼应力张量时空反演方法(SATSI; Spatial And Temporal Stress Inversion)。该方法通过引入平滑约束, 最小化相邻网格的应力张量差异, 消除人为网格划分导致的应力场假性旋转。数值计算和可视化借助 Martinez et al.(2014)提供的 MATLAB 软件包(MSATSI)实现。为确保反演结果的可靠性, 设置统一约束参数: 每个网格内至少包含5个震源机制解; 应力场参数的置信水平设定为95%。MSATSI支持多维应力场反演, 通过构建应力张量方程并最小化数据拟合残差与模型长度加权后, 输出主应力轴方位角、倾伏角及应力形因子 R 值



沙滩球为震中位置; 十字箭头表示水平主应变率矢量对, 比例尺为 $25 \times 10^{-9}/a$

a—研究区构造位置; b—乌什地震区域应变率与活动断裂

图 1 乌什 7.1 级地震的构造背景与区域应变率 (断裂数据引自 Wu et al., 2024, 应变率数据引自 Wang and Shen, 2020)

Fig. 1 Tectonic setting and regional strain rate of the M 7.1 Wushi earthquake (Fault data from Wu et al., 2024; strain rate data from Wang and Shen, 2020)

(a) Regional tectonic setting of the study area; (b) Strain rate and active faults in the Wushi earthquake region

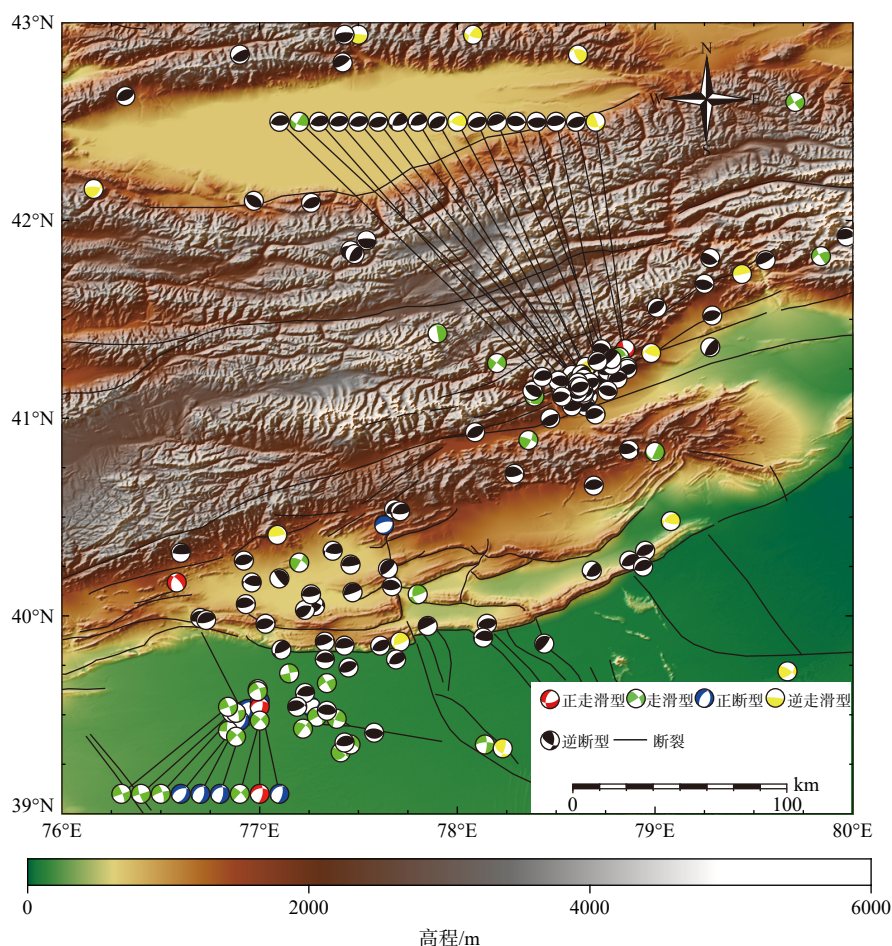
Focal mechanism (beach ball) denotes epicenter locations; The cross-shaped arrows represent pairs of horizontal principal strain-rate vectors, with a scale of $25 \times 10^{-9}/a$.

(Gephart and Forsyth, 1984)。 R 值的计算公式如下:

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (1)$$

式中, σ_1 —主压应力; σ_2 —中间应力, σ_3 —主张应力。 R 取值范围为 0~1。当 $R=0$ 时, 主张应力轴方位保持稳定, 主压应力轴与中间应力轴可在垂直于主张应力轴的平面内自由旋转, 二者均表现为挤压作用; 当 $R=0.5$ 时, 三轴应力状态相对稳定; 当 $R=1$ 时, 主压应力轴方位保持稳定, 主张应力轴与中间应力轴可在垂直于主压应力轴的平面内自由旋转, 二者均表现为拉张作用 (Wan et al., 2016)。

阻尼系数是平衡数据拟合精度与模型空间平滑度的关键参数, 其取值直接影响反演结果的稳定性与可靠性。阻尼系数的选取通常依据数据拟合残差与模型长度的折中曲线 (Trade-off curve; 图 3) 确定。该折中曲线反应了二者之间相互制衡的关系: 当阻尼系数过小时, 虽能减小反演残差, 但会导致计算得出的应力场结果差异变大 (模型长度上升); 反之, 阻尼系数取值过大, 则会导致模型过度简化, 反演残差增大 (万永革等, 2008; 崔华伟, 2017)。因此, 合理选取阻尼系数在应力场反演过程中至关重要 (Hardebeck and Michael, 2006)。MSATSI 软件通



不同颜色震源机制解代表不同破裂类型; 部分震源机制解因震中密集采用细线引出, 细线端点为地震实际震中位置; 震源机制解数据来自中国地震台网中心、全球矩心矩张量 (GCMT)、德国波茨坦地球科学研究中心 (GFZ)、美国国家地震信息中心 (NEIC)、巴黎地球物理研究所 (IPGP)、蔚蓝海岸天文台 (OCA)、SC4 矩张量系统 (SC4)、地震与海啸预测中心 (CPPT) 数据库

图2 乌什地区震源机制解分布

Fig. 2 Distribution of focal mechanism solutions for the Wushi region

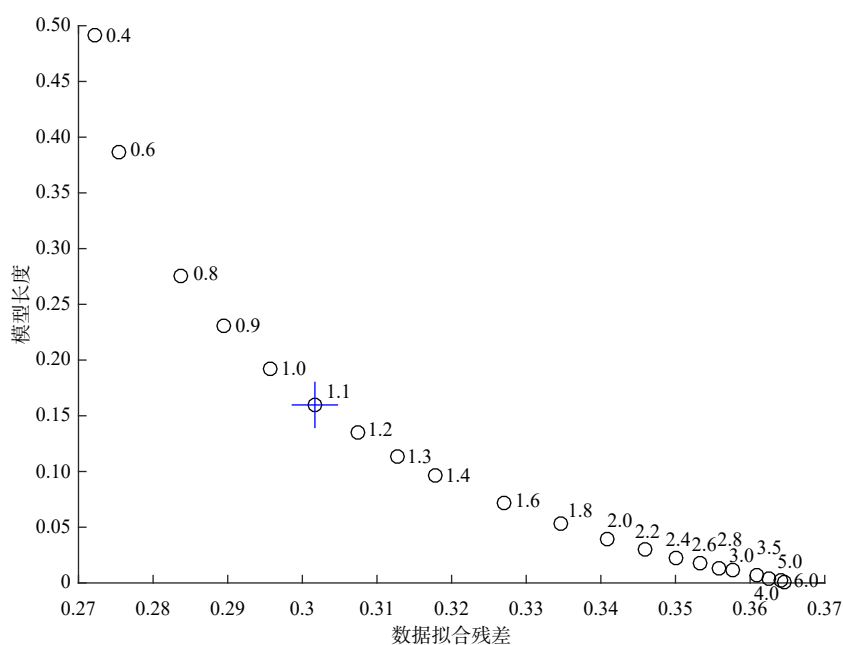
Different colors of focal mechanisms represent distinct faulting types. Due to high epicentral density, some focal mechanisms are connected by thin leader lines, where the endpoints indicate actual earthquake epicenters. Focal mechanism data are compiled from CENC, GCMT, GFZ, NEIC, IPGP, OCA, SC4, and CPPT databases.

过绘制数据拟合残差与模型长度随阻尼参数变化的 L 曲线, 依据最小化数据拟合残差与最大化模型平滑度的准则, 自动选取最优阻尼参数。经该准则判定, 反演最佳阻尼系数为 1.1。该系数可优化反演过程中观测值与理论值之间的权重分配, 且在此值附近微小波动对反演结果影响较小, 表明所选阻尼参数具有较好的稳定性。

3 研究区构造应力场特征

基于获取的 148 个震源机制, 得到区域应力场反演结果 (图 4)。整体上来看, 区域内主压应力

(σ_1) 走向自南向北由北北西向逐渐过渡为南北向, 倾伏角普遍较小 ($6.85^\circ \sim 25.24^\circ$), 表明主压应力轴相对稳定; 主张应力 (σ_3) 走向在空间上呈现出垂直地表的拉张状态。结合应力形因子 R 值的空间分布特征 (图 4b, 表 1) 可知, 除伽师震群所在的 00 子区域外, R 值从西南到东北呈现逐渐递减的趋势, 变化区间为 $0.63 \sim 0.92$, 表明区域整体以挤压作用为主, 主压应力轴较为稳定。该应力场特征与王子韬等 (2020) 使用 GPS 观测的应变速率结果基本一致, 也与李金等 (2015) 利用 ZMAP 程序反演天山地震带应力场得到的南北向挤压结论相符。区域动力学机制上, 该区域受到印度板块与欧亚板块的碰撞作

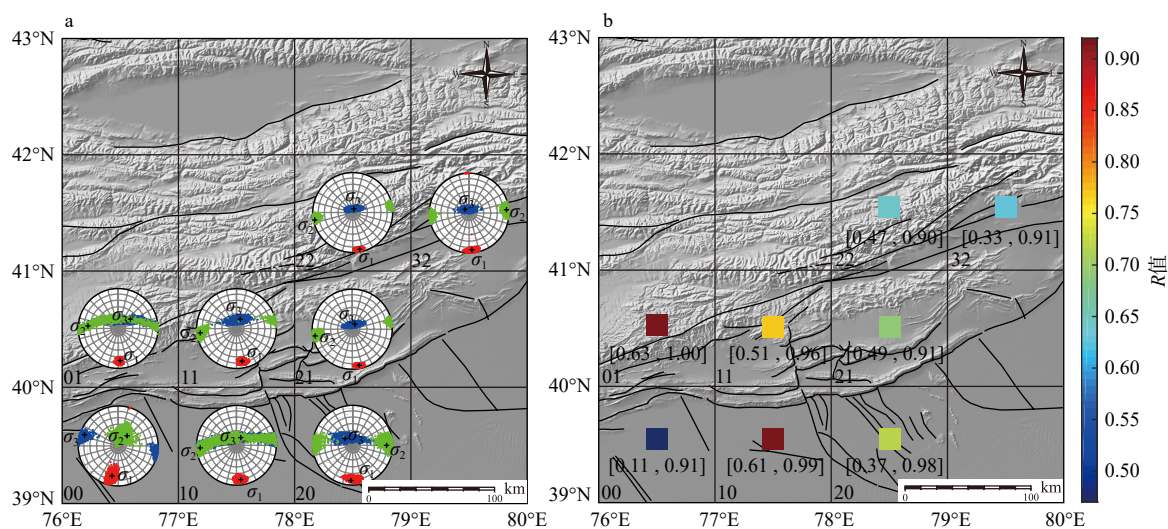


蓝色十字为最佳阻尼系数

图3 数据拟合残差和模型长度的折中曲线

Fig. 3 Trade-off curve between data misfit and model length

The blue cross indicates the optimal damping coefficient.



σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别代表主压应力轴、中间应力轴和主张应力轴；红点、绿点、蓝点分别代表 95% 置信度下 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 应力轴的不确定范围；黑色加号代表各子区域应力张量最优解；各子区域中间矩形的颜色代表对应单元的应力形因子 (R 值)；黑色实线代表断裂

a—应力轴空间分布结果；b— R 值空间分布结果

图4 乌什地区构造应力场反演结果

Fig. 4 Inversion results of stress field in the Wushi region

(a) Results of each axis of the inverted stress field; (b) Results of the inverted R value

σ_1 , σ_2 , and σ_3 represent the maximum compressive, intermediate, and maximum tensile principal stress axes, respectively. Red, green, and blue dots indicate the 95% confidence intervals for σ_1 , σ_2 , and σ_3 , respectively. Black plus signs mark the optimal stress tensor solutions for each subregion. Colored central rectangles depict the stress ratio (R -value) for the corresponding units. Black solid lines denote faults.

用,在青藏高原西缘形成强烈的近南北向水平挤压应力。该应力向东北方向传递至天山造山带,导致

塔里木盆地与天山之间的地壳发生缩短和逆冲推覆。其中,柯坪断裂东、西段推覆速率差异的研究

表 1 乌什地区 1°×1°网格应力场反演参数

Table 1 Stress field inversion parameters on a 1°×1° grid for the Wushi region

分区	σ_1 轴		σ_2 轴		σ_3 轴		R值
	方位角/(°)	倾伏角/(°)	方位角/(°)	倾伏角/(°)	方位角/(°)	倾伏角/(°)	
00	192.25	25.24	40.96	61.74	287.93	11.87	0.47
01	175.64	19.58	275.06	24.72	51.56	57.60	0.92
10	173.47	15.19	29.22	71.50	266.30	10.31	0.92
11	169.94	17.60	263.28	10.40	22.48	69.38	0.77
20	183.45	13.01	89.61	16.13	310.56	69.05	0.72
21	168.75	9.23	259.94	7.30	27.74	78.19	0.69
22	168.77	6.85	259.19	3.47	15.90	82.31	0.64
32	176.35	7.60	85.35	7.47	311.37	79.31	0.63

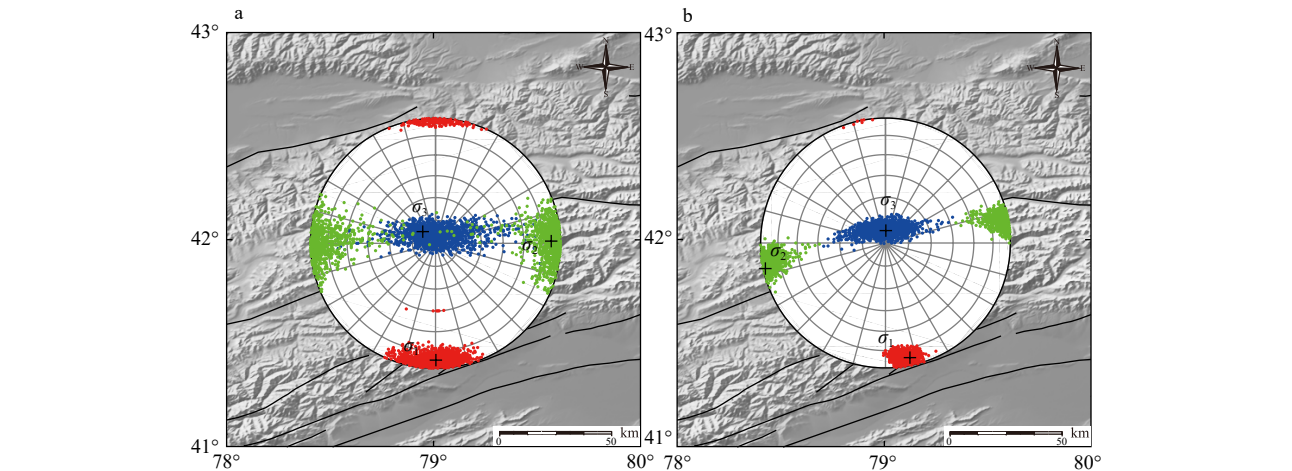
表明,西段的变形速率明显强于东段(李安等, 2016)。这种差异应变造成推覆系统整体沿皮羌断裂发生撕裂。皮羌断裂走向与研究区应力场的主压应力轴走向大致相同,在南北向挤压作用下表现为左旋走滑特征。

值得注意的是,伽师震群所在的 00 子区域(图 4)与其他区域的应力状态不一致。该子区域主压应力轴(σ_1)走向 192.25°,倾伏角 25.24°;主张应力轴(σ_3)走向 287.93°,倾伏角 11.87°;R 值为 0.47(变化范

围 0.11~0.91,跨度较大)。震源机制解类型以走滑型为主,同时包含部分正断型和逆断型。采用最优解分析其区域应力场特征,结果显示北北东向挤压和北西西向拉张的走滑应力环境,这与徐锡伟等(2006)的野外考察结果以及崔效锋(2006)采用逐次收敛法反演得到的“以走滑型为主、兼有正断型地震”的观点一致。此外,在 39.75°N, 76.70°E 附近,地壳结构及壳幔界面的深度均存在明显变化。综合上述证据,推断 00 子区域为塔里木盆地与天山造山带的板块构造转换边界。该认识与李天成等(2026)运用拟合断层方法得到的结论一致。

4 乌什 7.1 级地震对区域构造应力场影响

通过震前与震后应力场特征的对比分析,可揭示 2024 年乌什 7.1 级地震是否对区域应力场产生显著影响。为保证 2 次反演均具有足够的震源机制数据,选取乌什 7.1 级地震及余震主要分布区(78—80°E, 41—43°N; 对应图 4 中 22、32 子区域)分别进行震前与震后应力场反演,结果见图 5 及表 2。震前应力场反演结果显示:主压应力轴走向 180.49°,



σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别代表主压应力轴、中间应力轴和主张应力轴;红点、绿点、蓝点分别代表 95% 置信度下 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 应力轴的不确定范围;黑色加号代表各子区域应力张量最优解;黑色实线代表断裂

a—震前反演结果; b—震后反演结果;

图 5 乌什 7.1 级地震前后构造应力场反演结果

Fig. 5 Tectonic stress fields before and after the Wushi *M* 7.1 earthquake obtained from inversion

(a) Pre-earthquake inversion results; (b) Post-earthquake inversion results

σ_1 , σ_2 , and σ_3 represent the maximum compressive, intermediate, and maximum tensile principal stress axes, respectively. Red, green, and blue dots indicate the 95% confidence intervals for σ_1 , σ_2 , and σ_3 , respectively. Black plus signs mark the optimal stress tensor solutions for each subregion. Black solid lines denote faults.

表 2 乌什 7.1 级地震前后构造应力场反演参数

Table 2 Inverted stress field parameters before and after the Wushi M 7.1 earthquake

阶段	σ_1 轴		σ_2 轴		σ_3 轴		R值
	方位角/(°)	倾伏角/(°)	方位角/(°)	倾伏角/(°)	方位角/(°)	倾伏角/(°)	
震前	180.49	7.36	89.42	8.20	-48.13	78.95	0.79
震后	167.96	7.33	-101.80	1.84	2.22	82.44	0.58

倾伏角 7.36°; 中间应力轴走向 89.42°, 倾伏角 8.2°; 主张应力轴走向-48.13°, 倾伏角 78.95°; 以上各参数均与图 4 中 22、32 子区域的全时段反演结果基本一致。该一致性主要归因于震前地震事件在 32 子区域分布较为密集, 使得该子区域震前应力场与全时段平均应力场高度吻合。

震后构造应力场表现为: 主压应力轴走向 167.96°, 相对震前偏转 12.53°, 倾伏角 7.33°, 变化仅 0.03°; 中间应力轴走向-101.80°, 相对震前偏转 11.22°, 倾伏角 1.84°, 变化仅 6.36°。该结果表明, 此次地震对各应力轴仅造成了轻微的影响。采用万永革(2019)2 个震源机制的空间旋转角的计算程序, 对震前与震后 11 子区域内构造应力场进行空间旋转角计算, 发现震后相对于震前的空间旋转角发生了 15.06°的旋转。但由于该旋转角度较小, 并未改变应力场的整体挤压性质, 应力场仍处于南北向挤压所控制的大背景中。从应力积累与释放的角度分析, 在南北向主压应力的持续作用下, 发震断层迈丹断裂长期处于应力累积状态; 震前该断裂带及其周边区域的应力场保持相对稳定, 受控于南北向挤压的构造格局。迈丹断裂属于厚皮构造, 其构造活动受到深部刚性块体相互作用的严格约束, 难以产生较大的应力场方向改变。因此, 震后观测到的应力轴旋转, 可解释为在厚皮构造的刚性框架内, 地震事件对局部应力场的轻微扰动, 其幅度受制于南北向挤压所形成的区域构造应力格局。综上, 乌什 7.1 级地震引起的空间旋转角较小, 不足以对区域原有的应力体系造成影响。

5 讨论

在乌什地区应力场特征方面, 主张应力轴走向范围为-48.63°~15.9°, 呈现显著离散性。该现象可归因于主张应力轴倾伏角接近直立: 在此状态下, 走向变化主要体现为绕垂直轴的旋转, 尽管走向波

动范围较大, 但轴线的空间三维指向仍保持近似垂直。同样, 对比乌什 7.1 级地震前后的应力场, 震前主张应力轴走向为-48.13°(倾伏角 82.44°), 震后为 2.22°(倾伏角 78.95°), 走向虽变化明显, 但二者均保持高倾伏角特征, 故其空间方位的实际变化不大。此外, R 值作为描述 3 个主应力相对大小的参数, 其微小波动即可引起垂直于地表的主张应力轴走向角的大范围变化。

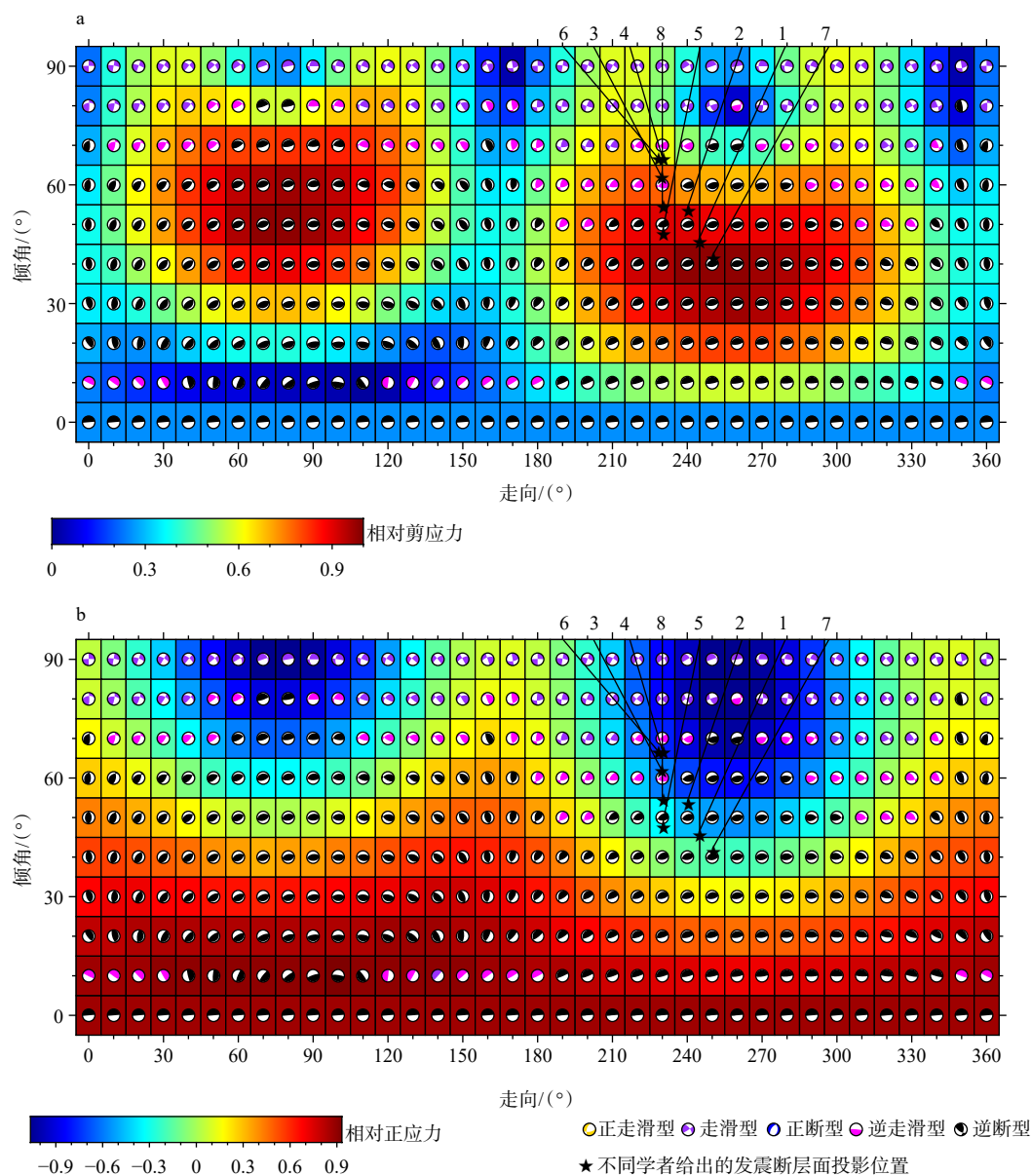
为验证上述结论的准确性, 需从地球动力学意义角度讨论。在天山山脉隆升、各断层逆冲活动的构造背景下, 乌什地区应力场特征反映了天山山脉和塔里木盆地板块之间的碰撞挤压作用, 致使乌什地区处于挤压应力环境。该挤压应力场控制着发震断层的活动方式, 以逆冲或逆走滑运动为主; 长期的挤压作用进一步导致地壳缩短、增厚, 形成褶皱山脉、推覆构造等地质构造形态。就伽师震群而言, 北部震群以逆冲为主, 处在天山块体与塔里木块体交界处, 受二者挤压作用, 发育众多逆断层和褶皱地貌, 地表隆起显著, 地壳明显增厚; 南部震群以走滑为主, 反应塔里木块体内部的深部走滑应力状态。上述分段特征与区域挤压应力场的整体结论相一致。

为进一步佐证“乌什 7.1 级地震事件对区域构造应力场影响较小”的结论, 将不同学者给出的发震断层面(表 3)分别投影至由万永革(2020)方法所确定的构造应力场上, 计算其相对剪应力与正应力, 结果见图 6。投影结果显示, 张喆等(2024)给出的发震断层面的相对剪应力最大为 0.986, 这是由于构造应力场南北向主压应力轴与发震断层面的走向夹角约为 82.39°, 且发震断层面倾角约为 42°, 接

表 3 不同学者发震断层面参数及应力投影结果

Table 3 Seismogenic fault plane parameters and stress projections from different studies

序号	来源	走向/(°)	倾角/(°)	相对剪应力	相对正应力
1	关兆萱等(2024)	244.62	46.19	0.954	-0.337
2	王雪竹等(2025)	240	54	0.856	-0.535
3	李雨森等(2024)	229.36	62.42	0.748	-0.599
4	柳姣姣等(2025)	230	67	0.669	-0.690
5	黄旺等(2024)	230	48	0.931	-0.258
6	赵磊等(2024)	228	67	0.681	-0.657
7	张喆等(2024)	250	42	0.986	-0.224
8	能懿茵等(2025)	230	55	0.857	-0.444



数字编号对应文献: 1—关兆莹等(2024); 2—王雪竹等(2025); 3—李雨森等(2024); 4—柳蛟蛟等(2025); 5—黄旺等(2024); 6—赵磊等(2024); 7—张喆等(2024); 8—能懿菡等(2025)

a—相对剪应力分布; b—相对正应力分布

图 6 乌什地区应力体系下相对剪应力与相对正应力模拟结果

Fig. 6 Simulation results of relative shear stress and relative normal stress under the stress regime of the Wushi region

(a) Relative shear stress distribution; (b) Relative normal stress distribution

The numbers 1–8 represent stress projection results onto the seismogenic fault planes compiled from different studies: 1–Guan et al.(2024); 2–Wang et al.(2025); 3–Li et al.(2024); 4–Liu et al.(2025); 5–Huang et al.(2024); 6–Zhao et al.(2024); 7–Zhang et al.(2024); 8–Nai et al.(2025).

近最优破裂方位(45°),从而承受最大相对剪应力;同时相对正应力较小(−0.224),呈现明显挤压状态。在投影的8个发震断层面中,相对剪应力介于0.669~0.986,多数接近1;相对正应力介于−0.224~−0.690,均显示挤压状态。该结果表明研究区应力场为挤压应力体系,且地震前后并未改变这一原有

的构造应力背景,与前述结论相一致。

6 结论

(1)乌什地区主压应力的走向主要呈现北北西、南北向,倾伏角普遍较小(6.85°~25.24°);主张

应力整体呈现出东西向拉张状态, R 值普遍大于 0.5, 表明区域应力结构以逆断型为主。在印度板块向北俯冲的过程中, 塔里木盆地与天山造山带之间的地壳发生缩短和逆冲推覆, 整体处于南北向挤压应力环境, 且这种挤压应力具有一定的整体性。仅局部区域(图 4 中 00 子区域)存在应力场空间差异: 受伽师南部震群影响, 该区表现为东南向拉张应力背景, 呈现走滑应力特征, 与乌什地震所在的逆断型局部应力场形成显著区别。结合区域构造背景推断, 伽师北部震群可能处于塔里木盆地与天山造山带的板块构造转换边界。

(2) 乌什 7.1 级地震对区域应力场产生局部扰动, 震后主压应力轴走向较震前偏转约 12.53° , 空间旋转角约为 15.06° , 偏转幅度较小, 表明震区受到此次地震的影响较小。迈丹断裂属厚皮构造, 受深部构造活动影响, 乌什地震仅为局部应力释放事件, 难以改变该区域原有的应力体系, 整体仍维持南北向挤压的基本应力框架。这一应力体系的稳定性特征, 为后续相关研究工作的延续性开展提供了关键前提与科学基础。基于震前建立的应力场反演模型、构造活动动力学分析框架等, 可在震后研究中继续沿用。

作者贡献声明: 宋泽尧、万永革负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作; 宋泽尧、顾培苑参与数据分析和手段的实践应用和绘图; 宋泽尧、周明月参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: SONG Zeyao and WAN Yongge conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; SONG Zeyao, WAN Yongge GU Peiyuan participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; SONG Zeyao, WAN Yongge, ZHOU Mingyue were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

- CHEN Q Y, 2022. Tectonic deformation and seismogenic mechanism of the 1902 $M_w 7.7$ Atushi earthquake[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Scienc. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Q Y, FU B H, SHI P L, et al. 2022. Surface deformation associated with the 22 August 1902 $M_w 7.7$ Atushi earthquake in the southwestern Tian Shan, revealed from multiple remote sensing data[J]. Remote Sensing, 14(7): 1663.
- CUI H W, 2017. Application of the method of damped stress tensor inversion in New Britain and Pamir-Hindu kush areas based on the focal mechanisms[D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention. (in Chinese with English abstract)
- CUI H W, WAN Y G, HUANG J C, et al., 2019. Inversion for the tectonic stress field and the characteristic of the stress shape factor of the detachment slab in the Pamir-Hindu Kush area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(5): 1633-1649. (in Chinese with English abstract)
- CUI X F, 2006. Characteristics of recent tectonic stress field in Jiashi, Xinjiang and adjacent regions[J]. Acta Seismologica Sinica, 28(4): 347-356. (in Chinese with English abstract)
- DZIEWONSKI A M, CHOU T A, WOODHOUSE J H, 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 86(B4): 2825-2852.
- EKSTRÖM G, NETTLES M, DZIEWONSKI 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.
- GEPHART J W, FORSYTH D W, 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the san fernando earthquake sequence[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B11): 9305-9320.
- GUAN P H, LEI J S, ZHAO D P, 2025. Relocation of the 2024 $M_s 7.1$ Wushi, Xinjiang, China earthquake sequence and implications for seismogenic structure[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 279: 106456.
- GUAN Z X, WAN Y G, ZHOU M Y, et al., 2024. Seismogenic fault plane and geodynamic discussion of the 2024 Wushi $M_s 7.1$ Earthquake, Xinjiang, China[J]. Earthquake, 44(2): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- GUO N N, WU Y Q, ZHU S, et al., 2024. Coseismic deformation and interseismic strain accumulation of the 2024 $M_s 7.1$ Wushi earthquake in Xinjiang, China[J]. Advances in Space Research, 74(4): 1586-1594.
- HARDEBECK J L, MICHAEL A J, 2006. Damped regional-scale stress inversions: methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B11): B11310.
- HUANG W, LI J, CHEN R L, 2024. InSAR coseismic deformation and sliding distribution characteristics of Wushi $M_w 7.0$ earthquake on January 23, 2024[J]. Inland Earthquake, 38(2): 166-172.
- LEI X Y, LIU Z C, ZHAO P B, et al., 2023. Characteristics of source and its neighborhood post-earthquake tectonic stress field of Jiashi $M_s 6.4$ earthquake in Xinjiang on January 19, 2020[J]. Inland Earthquake, 37(1): 99-105.

- LI A, RAN Y K, LIU H G, et al., 2016. Active characteristics and paleoearthquakes in the west Kalpin nappe since the Holocene, SW Tianshan Mountain[J]. *Advances in Earth Science*, 31(4): 377-390.
- LI J, ZHOU L Q, LONG H Y, et al., 2015. Spatial-temporal characteristics of the focal mechanism consistency parameter in Tianshan (Within Chinese Territory) seismic zone[J]. *Seismology and Geology*, 37(3): 792-803. (in Chinese with English abstract)
- LI J, YAO Y, LI R, et al., 2022. Present-day strike-slip faulting and thrusting of the Kepingtage fold-and-thrust belt in Southern Tianshan: constraints from GPS observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(11): e2022GL099105.
- LI J, JIANG H K, WANG Q, 2023. Crustal attenuation structure of the Tianshan tectonic belt and its spatiotemporal variations[J]. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1094151.
- LI T C, WAN Y G, LI J L, 2026. Seismogenic structure and crustal stress field in Jiashi earthquake zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 69(2): 681-701. (in Chinese with English abstract).
- LI Y S, LI W L, XU Q, et al., 2024. Coseismic deformation and slip distribution of the 2024 M_s 7.1 Wushi earthquake based on InSAR observations[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(4): 641-653. (in Chinese with English abstract)
- LIU J J, ZHANG Y Z, HAO X Y, 2025. Inversion of surface deformation and fault slip distribution of Xinjiang Wushi M_w 7.0 earthquake in 2024 based on Sentinel-1A[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 45(2): 170-176.
- LIU Q Y, CHEN J H, LI S C, et al., 2000. Passive seismic experiment in Xinjiang-Jiashi strong earthquake region and discussion on its seismic genesis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(3): 356-365. (in Chinese with English abstract)
- MARTINEZ-GARZON P, KWIATEK G, ICKRATH M, et al., 2014. MSAT-SI: a MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling, and a visualization tool[J]. *Seismological Research Letters*, 85(4): 896-904.
- MOLNAR P, STOCK J M, 2009. Slowing of India's convergence with Eurasia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics[J]. *Tectonics*, 28(3): TC3001.
- NAI Y H, HAN B Q, LIU Z J, et al., 2025. Coseismic surface displacement and source model of the 2024 M_w 7.0 Wushi(Xinjiang, China) earthquake revealed by InSAR observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(2): 368-376.
- PAN Z Y, SHAO Z G, ZHOU Y, et al., 2020. Present-day crustal deformation of the Pamir constrained by the GPS strain rate, seismic strain rate and earthquake focal stress[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 1143-1154. (in Chinese with English abstract)
- PEI S P, XU Z H, WANG S Y, et al., 2002. Pn velocity tomography of Xinjiang, China and adjacent region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(2): 218-225. (in Chinese with English abstract)
- QIU J T, SUN J B, JI L Y, 2024. The 2024 M_w 7.1 Wushi Earthquake: a thrust and strike-slip event unveiling the seismic mechanisms of the South Tian Shan's thick-skin tectonics[J]. *Remote Sensing*, 16(16): 2937.
- SONG Z Y, WAN Y G, GUAN Z X, et al., 2024. Stress changes on surrounding faults and triggering of aftershocks induced by the M_s 7.1 earthquake in Wushi County, Aksu Prefecture, Xinjiang, on January 23, 2024[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 46(4): 982-991. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y G, SHEN Z K, WANG M, et al. 2008. Coseismic slip distribution of the 2001 Kunlun mountain Pass west earthquake constrained using GPS and InSAR data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(4): 1074-1084. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y G, SHENG S Z, HUANG J C, et al., 2016. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the boundary zone of China, Vietnam and Laos[J]. *Journal of Earth Science*, 27(5): 777-785.
- 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 with English abstract)
- WAN Y G, 2020. Simulation on relationship between stress regimes and focal mechanisms of earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(6): 2281-2296. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y G, 2024. Focal mechanism classification based on areal strain of horizontal strain rosette of focal mechanism and characteristic analysis of overall focal mechanism of earthquake sequence[J]. *Earth Science*, 49(7): 2675-2684. (in Chinese with English abstract)
- WANG M, SHEN Z K, 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774.
- WANG X Z, WU C Y, LIU J M, et al., 2025. Earthquake sequence relocation and seismogenic structure of the 2024 M_s 7.1 Wushi earthquake on January 23, 2024, Xinjiang[J]. *Seismology and Geology*, 47(2): 488-506. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z T, CHENG H H, DONG P Y, et al., 2020. Numerical analysis of seismogenic stress field and fault activity characteristics of Tianshan orogen and its adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(11): 4037-4049. (in Chinese with English abstract)
- WU C Y, 2016. Late Quaternary activity of the East-northeastern trending faults in the southwestern Tianshan and their role in the tectonic deformation of the Tianshan Mountains[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)
- WU C Y, ZHENG W J, ZHANG P Z, et al., 2019. Oblique thrust of the maidean fault and late quaternary tectonic deformation in the Southwestern Tian Shan, Northwestern China[J]. *Tectonics*, 38(8): 2625-2645.
- WU C Y, ZHANG P Z, ZHANG Z Q, et al., 2023. Slip partitioning and crustal deformation patterns in the Tianshan orogenic belt derived from GPS measurements and their tectonic implications[J]. *Earth-Science Reviews*, 238: 104362.
- 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.
- XU X W, ZHANG X K, RAN Y K, et al., 2006. The preliminary study on seismotectonics of the 2003 AD Bachu-jiashi earthquake (M_s 6.8), southern Tian Shan[J]. *Seismology and Geology*, 28(2): 161-178. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B X, QIAN L, LI T, et al., 2024. Geological disasters and surface

- ruptures of January 23, 2024 $M_s 7.1$ Wushi earthquake, Xinjiang, China[J]. *Seismology and Geology*, 46(1): 220-234. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z, FANG L H, CHEN K, et al., 2024. Quick output parameters related to the 23 January 2024 $M_s 7.1$ Wushi earthquake in the Aksu region of Xinjiang[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 54(3): 221-228.
- ZHAO L, CHEN Z D, XIE L, et al., 2024. Coseismic deformation and slip model of the 2024 $M_w 7.0$ Wushi earthquake obtained from InSAR observation[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 55(4): 453-460.
- ZHAO R B, SHEN J, LI J, 2001. Preliminary study on the deformation features and seismogenic model of the 1902 Artux, Xinjiang earthquake of $M_s 8(1/4)$ [J]. *Seismology and Geology*, 23(4): 493-500. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈庆宇, 2022. 1902年 $M_w 7.7$ 级阿图什地震的构造变形和发震机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院), doi:10.44231/d.cnki.gktxc.2022.000063.
- 崔华伟, 2017. 基于震源机制的阻尼应力张量反演方法在新不列颠和帕米尔—兴都库什地区的应用[D]. 廊坊: 防灾科技学院.
- 崔华伟, 万永革, 黄骥超, 等, 2019. 帕米尔—兴都库什地区构造应力场反演及拆离板片应力场因子特征研究[J]. *地球物理学报*, 62(5): 1633-1649.
- 崔效锋, 2006. 伽师及周围地区现代构造应力场特征研究[J]. *地震学报*, 28(4): 347-356.
- 关兆萱, 万永革, 周明月, 等, 2024. 2024年新疆乌什 $M_s 7.1$ 地震发震断层产状及其动力学探讨[J]. *地震*, 44(2): 1-11.
- 黄旺, 李杰, 陈荣柳, 等, 2024. 2024年1月23日乌什 $M_w 7.0$ 地震 InSAR 同震形变与滑动分布特征[J]. *内陆地震*, 38(2): 166-172.
- 雷啸宇, 刘兆才, 赵鹏毕, 等, 2023. 2020年1月19日新疆伽师 $M_s 6.4$ 地震震源及邻区震后构造应力场特征[J]. *内陆地震*, 37(1): 99-105.
- 李安, 冉勇康, 刘华国, 等, 2016. 西南天山柯坪推覆系西段全新世构造活动特征和古地震[J]. *地球科学进展*, 31(4): 377-390.
- 李金, 周龙泉, 龙海英, 等, 2015. 天山地震带(中国境内)震源机制一致性参数的时空特征[J]. *地震地质*, 37(3): 792-803.
- 李天成, 万永革, 李金磊, 2026. 伽师地震区的发震构造及地壳应力场研究[J]. *地球物理学报*, 69(2): 681-701
- 李雨森, 李为乐, 许强, 等, 2024. 2024年新疆乌什 $M_s 7.1$ 地震 InSAR 同震形变探测与断层滑动分布反演[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 51(4): 641-653
- 柳姣姣, 张永志, 郝小叶, 等, 2025. 基于 Sentinel-1A 的 2024 年新疆乌什 $M_w 7.0$ 地震地表形变与断层滑动分布反演[J]. *大地测量与地球动力学*, 45(2): 170-176.
- 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 等, 2000. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速度结构及其地震成因的探讨[J]. *地球物理学报*, 43(3): 356-365.
- 能懿茜, 韩炳权, 刘振江, 等, 2025. InSAR 观测揭示的 2024 年新疆乌什 $M_w 7.0$ 地震地表形变及发震断层模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(2): 368-376.
- 潘正洋, 邵志刚, 周云, 等, 2020. 基于 GPS 应变、地震应变率与震源应力场对帕米尔高原现今构造变形特征的分析[J]. *地球物理学报*, 63(3): 1143-1154.
- 裴顺平, 许忠淮, 汪素云, 等, 2002. 新疆及邻区 Pn 速度层析成像[J]. *地球物理学报*, 45(2): 218-225.
- 宋泽尧, 万永革, 关兆萱, 等, 2024. 2024 年 1 月 23 日新疆阿克苏地区乌什县 $M_s 7.1$ 地震对周围断层的应力影响及对余震的触发作用[J]. *地震工程学报*, 46(4): 982-991.
- 万永革, 沈正康, 王敏, 等, 2008. 根据 GPS 和 InSAR 数据反演 2001 年昆仑山口西地震同震破裂分布[J]. *地球物理学报*, 51(4): 1074-1084.
- 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.
- 万永革, 2020. 震源机制与应力体系关系模拟研究[J]. *地球物理学报*, 63(6): 2281-2296.
- 万永革, 2024. 震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法及序列震源机制总体特征分析[J]. *地球科学*, 49(7): 2675-2684.
- 王雪竹, 吴传勇, 刘建明, 等, 2025. 2024 年 1 月 23 日新疆乌什 $M_s 7.1$ 地震序列重定位与发震构造[J]. *地震地质*, 47(2): 488-506.
- 王子韬, 程惠红, 董培育, 等, 2020. 天山造山带及邻区孕震应力场及断裂带活动性特征的数值实验分析[J]. *地球物理学报*, 63(11): 4037-4049.
- 吴传勇, 2016. 西南天山北东东走向断裂的晚第四纪活动特征及在天山构造变形中的作用[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 徐锡伟, 张先康, 冉勇康, 等, 2006. 南天山地区巴楚-伽师地震 ($M_s 6.8$) 发震构造初步研究[J]. *地震地质*, 28(2): 161-178.
- 张博譔, 钱黎, 李涛, 等, 2024. 2024 年 1 月 23 日新疆乌什 $M_s 7.1$ 地震地质灾害和地表破裂[J]. *地震地质*, 46(1): 220-234.
- 张喆, 房立华, 陈鲲, 等, 2024. 2024 年 1 月 23 日新疆阿克苏地区乌什 7.1 级地震的快速产出参数[J]. *地震科学进展*, 54(3): 221-228.
- 赵磊, 陈志丹, 谢磊, 等, 2024. 2024 年 1 月 23 日 $M_w 7.0$ 乌什地震 InSAR 同震形变场和断层滑动分布[J]. *地球与行星物理理论评(中英文)*, 55(4): 453-460.
- 赵瑞斌, 沈军, 李军, 2001. 1902 年新疆阿图什 8(1/4)级地震形变特征与发震模式初探[J]. *地震地质*, 23(4): 493-500.