引用格式：潘家伟，李海兵，刘富财，等，2026. 青藏高原及周缘近年来典型强震地表破裂特征及其构造指示意义[J]. 地质力学学报，32（3）：509−527. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026053

Citation: PAN J W，LI H B，LIU F C，et al.，2026. Characteristics of surface ruptures produced by recent major earthquakes on the Tibetan Plateau and its surrounding areas, and their tectonic implications[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：509−527. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026053

青藏高原及周缘近年来典型强震地表破裂特征及其构造指示意义

潘家伟[1,2,3,4]，李海兵[1,2,3,4]，刘富财[2,3,4]，Marie-Luce Chevalier[1,2,3,4]，刘栋梁[2,3,4]，卢海建[1,2,3,4]，陈 鹏[2,3,4]，杨少华[2,3,4]

PAN Jiawei[1,2,3,4]，LI Haibing[1,2,3,4]，LIU Fucai[2,3,4]，CHEVALIER Marie-Luce[1,2,3,4]，LIU Dongliang[2,3,4]，LU Haijian[1,2,3,4]，CHEN Peng[2,3,4]，YANG Shaohua[2,3,4]

1. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室，北京 100094；
2. 自然资源部大陆动力学重点实验室，北京 100037；
3. 江苏东海大陆深孔地壳活动国家野外科学观测研究站，江苏 连云港 222300；
4. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037

1. *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration*, *Beijing* 100094, *China*;
2. *Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100037, *China*;
3. *National field observation and research station* (*Jiangsu Donghai*) *for continental deep hole crustal activity*, *Lianyungang* 222300, *Jiangsu*, *China*;
4. *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*

Characteristics of surface ruptures produced by recent major earthquakes on the Tibetan Plateau and its surrounding areas, and their tectonic implications

Abstract: ［**Objective**］Coseismic surface ruptures provide key evidence for identifying the seismogenic structures of earthquakes, elucidating crustal deformation mechanisms, and assessing seismic hazards. To understand the surface deformation and disaster development characteristics associated with different types of fault activity on the Tibetan Plateau, and to reveal the current crustal deformation patterns reflected by a series of strong earthquakes in recent years, we systematically compiled and analyzed the surface rupture characteristics of five M>6.5 earthquakes that have occurred on the Tibetan Plateau and surrounding areas since 2021, based on field surveys. ［**Methods**］We used the 2021 M_W 7.4 Maduo, 2022 M_W 6.6 Menyuan, 2022 M_W 6.6 Luding, 2024 M_W 7.0 Wushi, and 2025 M_W 7.1 Dingri earthquakes as representative cases. We integrated results from remote sensing interpretation, field surveys, and UAV photogrammetry, as well as seismological and geodetic data, to conduct a detailed analysis of the surface rupture and coseismic displacement distribution characteristics of these events. ［**Results**］The strike-slip Maduo and Menyuan earthquakes formed coseismic surface rupture zones approximately 150～160 km and 22～31 km long, respectively, with maximum coseismic surface displacements of ～3.6 m and ～3.7 m. Contrastingly, the Luding earthquake, also a strike-slip event, exhibited a surface

基金项目：科技部科技基础资源调查专项（2021FY100101）；国家自然科学基金项目（42372274，42325207）；中国地质调查局地质调查项目（DD20240100703）

This research was financially supported by Special Project on Basic Resources Investigation of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2021FY100101), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42372274 and 42325207), and the China Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20240100703).

第一作者：潘家伟（1983—），男，博士，研究员，从事活动构造与地震地质研究。Email：jiawei-pan@foxmail.com

通信作者：李海兵（1966—），男，博士，研究员，从事活动构造与断裂作用研究。Email：lihaibing06@163.com

收稿日期：2026−05−12；**修回日期**：2026−05−30；**录用日期**：2026−05−31；**网络出版日期**：2026−06−02；**责任编辑**：吴芳

Received：2026−05−12；Revised：2026−05−30；Accepted：2026−05−31；Available Online：2026−06−02；Handling Editor：WU Fang

rupture only ～450 m long at Ertaizi. The strong, M_W 5.7 aftershock of the thrust-type Wushi earthquake generated a coseismic surface rupture zone ～5 km long with a maximum vertical displacement of ～1.7 m, while the normal-fault-type Dingri earthquake formed a coseismic surface rupture zone 25～36.5 km long with a maximum vertical displacement of ～2.7 m. [**Conclusions**] A comprehensive analysis of the spatiotemporal distribution characteristics of major regional earthquakes indicates that, prior to the 2022 Luding earthquake, major earthquakes on the Tibetan Plateau were primarily clustered around the periphery of the active Bayan Har block. The subsequent Wushi and Dingri earthquakes both occurred far from the Bayan Har block, suggesting that the clustering period of major earthquakes in this active block may have ended. Further analysis of focal mechanism solutions indicates that strike-slip earthquakes have dominated recent moderate-to-strong seismic events on the Tibetan Plateau and its periphery. This may be related to the fact that current crustal deformation on the Tibetan Plateau is primarily regulated and absorbed through the lateral extrusion of active blocks along large strike-slip fault zones. [**Significance**] The above research findings provide fundamental data and references for earthquake early warning, disaster prevention and mitigation, as well as the planning, construction, and seismic design of major regional engineering projects in the Tibetan Plateau region.

Keywords: Tibetan Plateau; strong earthquake; coseismic surface rupture; coseismic displacement; active fault

摘　要：同震地表破裂是确定发震构造、揭示地壳变形机制和评估地震风险的关键依据。为认识青藏高原不同类型断层活动的地表变形与灾害发育特征，并揭示近年来一系列强震所反映的青藏高原现今地壳变形规律，在地表调查的基础上，系统整理和分析了青藏高原及周边地区2021年以来发生的5次M>6.5地震的地表破裂特征。以2021年M_W 7.4玛多、2022年M_W 6.6门源/M_W 6.6泸定、2024年M_W 7.0乌什和2025年M_W 7.1定日地震为典型震例，综合遥感解译、野外调查和无人机摄影测量结果，并结合地震学与大地测量学数据，精细解析了上述震例的地表破裂及同震位移分布特征。结果显示：走滑型的玛多和门源地震分别形成了长约150～160 km和22～31 km的同震地表破裂带，最大同震地表位移量分别为～3.6 m和～3.7 m，但同为走滑型的泸定地震仅在二台子发现长约450 m的地表破裂；逆冲型的乌什地震主震未产生同震地表破裂，但M_W 5.7强余震形成了近5 km长、最大垂直位移约1.7 m的同震地表破裂带；正断型的定日地震形成了长约25～36.5 km、最大垂直位移约2.7 m的同震地表破裂带。综合区域强震的时空分布特征显示，在2022年泸定地震前，青藏高原强震主要围绕巴颜喀拉活动地块周缘发生丛集活动，此后发生的乌什地震和定日地震均远离巴颜喀拉地块，可能指示该活动地块的强震丛集期已经结束。进一步结合震源机制解结果可知，青藏高原及周缘近年来的中—强地震事件中，走滑型地震占主导地位，这可能与青藏高原现今地壳变形主要以活动块体沿大型走滑断裂带发生侧向挤出的方式进行调节与吸收有关。上述研究结果可为青藏高原地区地震监测预警、防震减灾工作及区域重大工程的规划建设与抗震设防等提供基础数据与参考。

关键词：青藏高原；强震；同震地表破裂；同震位错；活动断裂

中图分类号：P315.2; P542　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)03−0509−19

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026053

0　引言

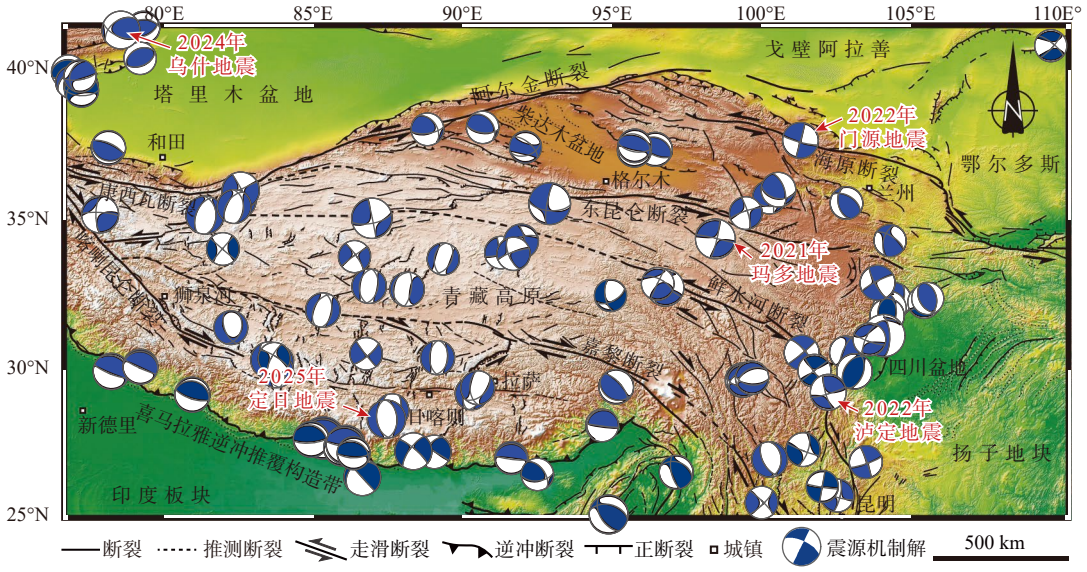
同震地表破裂是指地震发生时地下的断层滑动破裂传至地表所形成的地面永久性错断或变形。震后开展地表破裂调查所获得的地表破裂空间展布与运动学性质，可为及时确定发震构造与震源机制等提供关键依据。同时，现场观测获得的同震位移量及其空间分布、地表破裂长度等定量数据可为开展震源破裂过程反演提供关键的约束参数和成果检验。因此，同震地表破裂调查研究对深入研究发震断裂的破裂行为和强震复发规律具有重要意义(Klinger et al., 2005, 2011; Wesnousky, 2006, 2008; Xu et al., 2006, 2009; Liu-Zeng et al., 2009, 2024; Li et al., 2012, 2016; Rockwell and Klinger, 2013; Pan et al., 2014, 2022)。另外，地表破裂型地震会对隧道、管道等地下工程及地表建筑物造成不可逆的永久损伤或破坏，因此，同震地表破裂的定量参数也是工程抗震、抗断设计与地震风险评估，特别是概率性断层位错风险评估(Probabilistic Fault Displacement Hazard

Assessment, PFDHA; Youngs et al., 2003; Valentini et al., 2025)中的关键参数。

为认识青藏高原典型强震的同震地表变形规律和揭示近年来一系列强震所反映的青藏高原现今地壳变形特征，文章主要基于野外现场实测资料，系统整理分析了中国青藏高原及周边 2021 年以来发生的 5 次不同类型典型强震的同震地表破裂特征，以期为区域防震减灾及重大工程规划建设与抗震设防等提供基础数据支撑。

1　地震构造背景

新生代以来，印度板块与欧亚板块的汇聚碰撞形成了世界屋脊青藏高原(Molnar and Tapponnier, 1975; Yin and Harrison, 2000)。伴随着青藏高原的隆升与扩展(Tapponnier et al., 2001; Wang et al., 2008; Ding et al., 2022)，在高原内部及周缘地区形成了众多不同性质的活动断裂带(Molnar and Tapponnier, 1978; 邓起东等，2002; Taylor and Yin, 2009)，其中，逆冲断裂主要发育在青藏高原周缘边界地带，正断裂主要发育在高原内部的中—南部区域，而走滑断裂则在高原内部及外围广泛发育(图 1)。这些不同性质断裂的活动，必然导致相应构造区域内发生不同性质的地震(张培震等，2003; 李海兵等，2021; 吴中海等，2024; 郑文俊等，2025; 图 1)，使得青藏高原及其周边成为中国强震活动最强烈的地区。据统计，中国大陆 2/3 以上的历史强震(M≥7.0)均发生在青藏高原及其周边地区(张培震等，2013, 2022)。



活动断裂分布图据 Tapponnier et al., 2001 修改；震源机制数据下载自全球矩心矩张量目录(https://www.globalcmt.org/)

图 1　青藏高原及周缘地区活动断裂和 1970 年以来 6 级以上地震分布图

Fig. 1　Map of active faults and distribution of $M \geqslant 6$ earthquakes (since 1970) in the Tibetan Plateau and adjacent areas

Active faults are adopted from Tapponnier et al. (2001); Earthquake and focal mechanism data are from Global Centroid-Moment-Tensor (GCMT; https://www.globalcmt.org/).

21 世纪以来，青藏高原及邻区强震活动十分活跃，相继发生十余例 M≥7.0 地震，其中包括 M≥8.0 地震 3 次(2001 年昆仑山口地震、2008 年汶川地震、2015 年尼泊尔地震)。这些强震不仅造成了惨重的人员伤亡与巨大的经济损失，也为深入研究区域活动断裂的强震孕育机制、破裂行为和复发规律等提供了难得的天然震例。文章分别对 2021 年 M_W 7.4 玛多、2022 年 M_W 6.6 门源/M_W 6.6 泸定、2024 年 M_W 7.0 乌什和 2025 年 M_W 7.1 定日这 5 次不同类型强震的地表破裂特征进行总结和分析(表 1)，旨在初步揭示青藏高原强震活动的时空迁移规律与现今地壳变形特征。

2　2021 年玛多 M_W 7.4 地震

2021 年 5 月 22 日，青海省玛多县发生 M_W 7.4 强震，此次地震是继 2008 年汶川地震后，中国大陆发生的震级最大的地震。地表破裂调查与余震分布

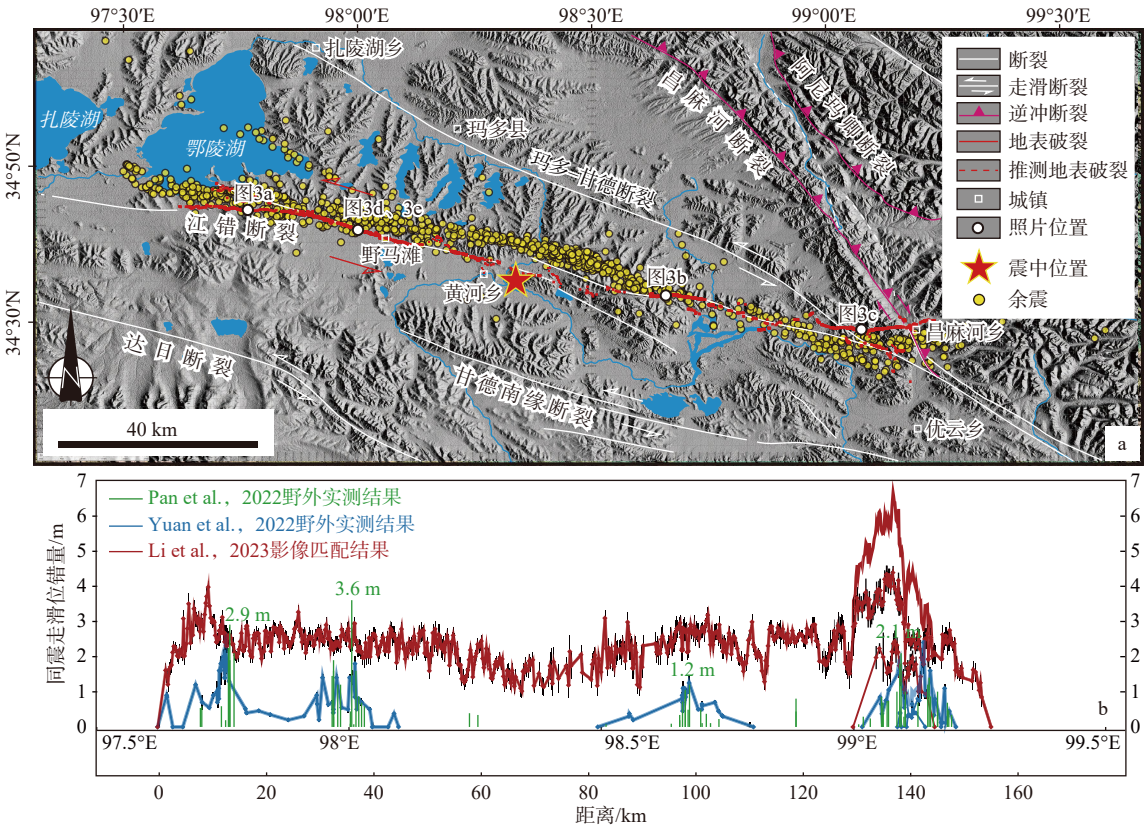
表 1 5 次典型震例基本信息

Table 1 Basic information of the five typical strong earthquake events discussed in this study

地震	震级	震源深度/km	发震断裂	断裂性质	地表破裂长度/km	最大水平位移量/m	最大垂直位移量/m
2021年玛多地震	M_S 7.4/M_W 7.4	17	江错断裂	左行走滑	150～160	3.60 ± 0.20	–
2022年门源地震	M_S 6.9/M_W 6.6	10	冷龙岭断裂、托莱山断裂	左行走滑	22～31	3.70 ± 0.10	–
2022年泸定地震	M_S 6.8/M_W 6.6	16	磨西断裂	左行走滑	～0.45	–	–
2024年乌什地震强余震	M_W 5.7	～2	迈丹断裂反冲断层	逆冲	～5	–	1.7 ± 0.1
2025年定日地震	M_S 6.8/M_W 7.1	10	丁木错断裂	左行正断	25～36.5	1.10 ± 0.05	2.7 ± 0.6

揭示(盖海龙等, 2021; 李智敏等, 2021; 潘家伟等, 2021; 王未来等, 2021; Liu-Zeng et al., 2022, 2024; Pan et al., 2022; Ren et al., 2022; Yuan et al., 2022), 玛多地震的发震断层为北西—南东走向、左行走滑性质的江错断裂(图 2)。该断裂位于巴颜喀拉地块北部主边界东昆仑断裂的南侧, 向西与 2001 年昆仑山地震中发生破裂的东昆仑断裂昆仑山口段相连(Klinger et al., 2005), 可合称为昆仑山口–江错断裂。

地表观测结果显示, 玛多地震沿江错断裂形成了东至昌麻河乡东侧、西至鄂陵湖南侧, N105°E 走向, 总长约 150 ～160 km 的不连续同震地表破裂带(李智敏等, 2021; 潘家伟等, 2021; Liu-Zeng et al., 2022; Ren et al., 2022; 姚文倩等, 2022)。该地表破裂带主要由一系列不连续的张裂隙、张剪裂隙、剪切断层, 以及其间挤压或拉张阶区形成的挤压鼓包和凹陷雁列组合而成(图 3a—3c), 在运动学上表现出典型的左行走滑运动性质, 局部可见垂直运动分量。破裂发育整体上遵循里德尔剪切模型, 其中剪

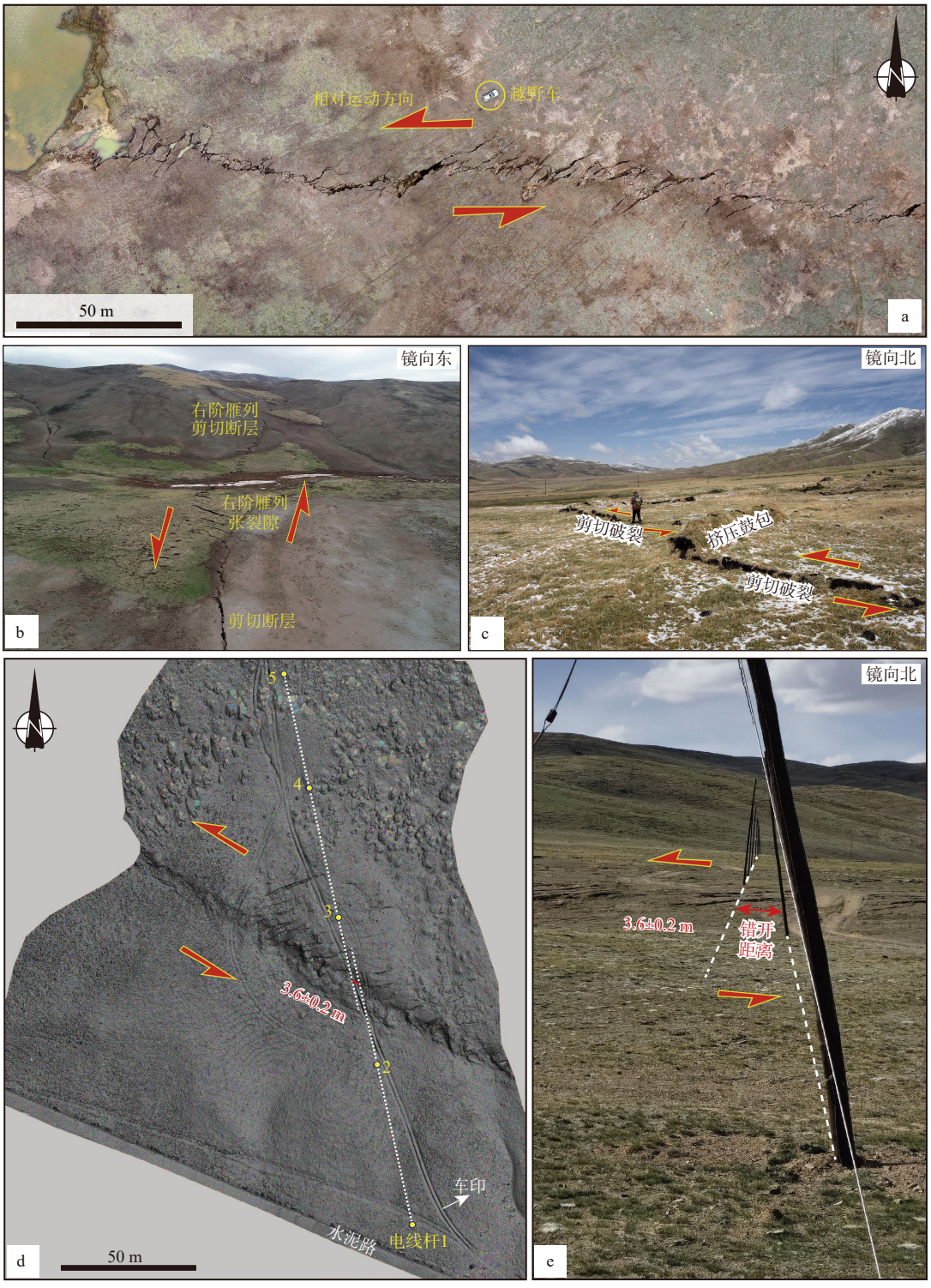


a—玛多地震地表破裂带与区域活动断层分布图; b—玛多地震同震位错量分布及其与光学卫星影像匹配结果的对比

图 2 玛多地震地表破裂与同震位移量分布图

Fig. 2 Distribution of coseismic surface ruptures and coseismic displacements for the Maduo earthquake

(a) Distribution of coseismic surface ruptures for the Maduo earthquake and regional active faults; (b) Distribution of coseismic displacements for the Maduo earthquake and a comparison with results from optical satellite image correlation



a—地表破裂带西段无人机正射影像；b—地表破裂带中东段右阶雁列的张裂隙和剪切断层；c—地表破裂带东段相间分布的剪切破裂和挤压鼓包；d—最大同震走滑位移量（3.6±0.2 m）LiDAR 测量结果；e—野外照片显示线性排列的电线杆被左行错开 3.6±0.2 m

图 3　玛多地震典型地表破裂现象

Fig. 3　Typical coseismic surface ruptures produced by the 2021 Maduo earthquake

(a) UAV orthophoto showing spectacular surface ruptures along the western segment of the rupture zone; (b) Right-stepping en-echelon extensional cracks and shear faults along the eastern central segment of the rupture zone; (c) Alternating shear faults and push-ups along the eastern segment of the rupture zone; (d) Terrestrial LiDAR measurement showing the maximum coseismic sinistral displacement (3.6 ± 0.2 m) observed in the field; (e) Field photo showing aligned electricity poles sinistrally offset by 3.6 ± 0.2 m

切断层主要沿主剪切带(*Y*面)或*R*1面发育,张裂缝主要沿σ_1方向发育,而挤压鼓包主要沿σ_3方向发育在张裂隙或剪切破裂间的挤压阶区。破裂带宽度在不同的位置从约5 m到约100 m不等,主体宽度集中在30～50 m。地表破裂带在东西两侧尾端发散为2～3支,并呈现出反向对称特征(图2a),指示了玛多地震由中间向两侧破裂并释放应力的过程。野外实测获得的最大同震位移约3.6 m(Pan et al., 2022),位于破裂带中西段野马滩西侧附近(图2b)。

沿地表破裂带进行追索,可见多处车辙印、冲沟、河床、线状排列的电线杆、牧场围栏以及池塘边界等不同的标志物被左行错断。综合卷尺实测、地面激光雷达(Riegl VZ-1000)以及无人机(大疆DJI Phantom 4 Pro)摄影测量等方法,Pan et al.(2022)在65个不同位置获得了同震走滑位移数据,据此绘制了同震位移空间分布图,并与Yuan et al.(2022)的野外实测数据,以及Li et al.(2023a)通过震前震后Sentinel-2光学卫星影像相关性匹配技术获得的形变量分布特征进行了对比(图2b)。在破裂带西段南支的错尔加拉附近,有一对车辙印迹被左行错断,现场测量和无人机正射影像测量结果均揭示该处的左行走滑位移量约为2.9±0.2 m(潘家伟等,2021; Pan et al., 2022),这是沿破裂带西段获得的最大位移量。盖海龙等(2021)和邵延秀等(2022)在该点分别获得了～2.8 m和～2.7 m的实测数据,与潘家伟等(2021)的测量结果在误差范围内一致,同时也与Li et al.(2023a)的影像匹配结果相吻合,但是李智敏等(2021)和Yuan et al.(2022)在该点只给出了～1.4 m的近断层测量结果,这可能反映了不同学者对断层局部位错量和整体位错量理解的差异。而野外实测获得的最大位移量为3.6±0.2 m,位于破裂带中西段,野马滩大桥北西西侧约5 km处的一条冲沟附近(97.998278°E, 34.698869°N),测量标志物为线性排列的电线杆(图3d、3e)。另外,在该点还测量到高约1.8 m的断层陡坎(Pan et al., 2022),但尚不确定这是玛多地震的同震垂直位错还是叠加了历史地震的累积垂直位移。

值得注意的是,玛多地震破裂带东段延伸过程中,直接切穿并跨越了昌麻河断裂(图2a),使得原本沿东昆仑断裂带主弯转的“阿尼玛卿挤压弯曲带”被一条新生破裂直接切穿。这一现象表明,玛多地震可能正在绕过阿尼玛卿挤压弯曲带,形成一条更为平直的剪切通道,即表现出“裁弯取直”的特征(Pan et al., 2022),这可能与破裂东段达到超剪切破裂速度有关——超剪切破裂产生的更强应力集中和更高效的断裂贯通能力,使得破裂能够跨越不连续的断裂几何障碍,从而实现“裁弯取直”。

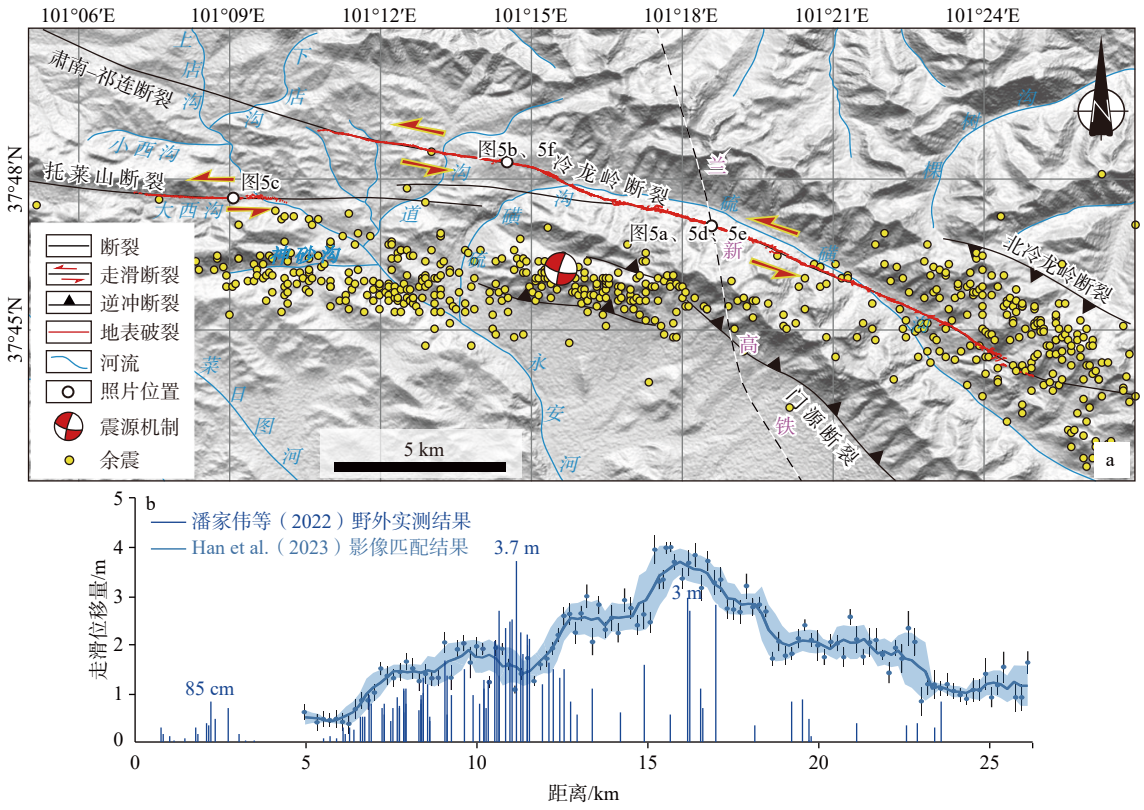
3 2022年门源M_W6.6地震

2022年1月8日青海省门源县发生M_W6.6地震。地震发生在青藏高原东北部的海原断裂带西段的冷龙岭断裂与托莱山断裂交汇段(图4a)。该区附近在1986年和2016年曾先后发生过2次*M*6.4逆冲型地震。不同机构给出的此次门源地震的矩震级为M_W6.6～6.7(潘家伟等, 2022),虽然震级相对偏小,但却导致冷龙岭断裂和托莱山断裂均产生了显著的同震地表破裂带,地表破裂带的总长度被认为从22 km至～31 km不等(盖海龙等, 2022; 韩帅等, 2022; 李智敏等, 2022; 梁宽等, 2022; 潘家伟等, 2022; Li et al., 2023b; 袁道阳等, 2023)。

项目团队沿着门源地震同震地表破裂带进行追踪和测量,确定了地表破裂带的总体展布,并使用小型无人机采集了地表破裂带厘米级分辨率的正射影像和数字高程模型,在此基础上对地表破裂进行详细解译,对同震位错量进行系统测量,最终获得了门源地震同震地表破裂带的精细几何展布(图4a)和走滑位错量分布(图4b)。

野外观察和无人机影像解译所获得的同震地表破裂运动学特征显示(图5),门源地震也属于左行走滑型地震事件,而且破裂带构造组合同样遵循里德尔剪切模型。该破裂带总体呈北西西—南东东走向展布,可分为南北2支,分别沿托莱山断裂东端和冷龙岭断裂西段展布。其中的托莱山破裂带走向近东西(N93°E),沿大西沟北侧山坡展布,全长约4.5 km(图4a)。冷龙岭破裂带长约23 km,在硫磺沟以西走向N102°E,硫磺沟以东走向N110°～120°E,2支破裂呈左阶雁行展布,两者之间存在宽约3 km破裂阶区(图4a)。

潘家伟等(2022)沿同震地表破裂带测量获得的最大走滑位移量为3.7±0.1 m(图4b),位于冷龙岭破裂段硫磺沟以西的山坡处,位错标志物为长线形的牧场围栏。Li et al.(2023b)在该点测量获得的结果为～3.4 m,与潘家伟等(2022)野外测得的结果基本一致。Han et al.(2023)通过震前震后卫星影像相关性匹配结果获得的冷龙岭段最大走滑位错量约



a—门源地震地表破裂带与区域活动断层分布图；b—门源地震同震位错量分布及其与光学卫星影像匹配结果的对比

图 4　门源地震地表破裂与同震位移量分布图

Fig. 4　Distribution of coseismic surface ruptures and coseismic displacements for the Menyuan earthquake

(a) Distribution of co-sesmic surface ruptures for the Menyuan earthquake and regional active faults; (b) Distribution of coseismic displacements for the Menyuan earthquake and a comparison with results from optical satellite image correlation

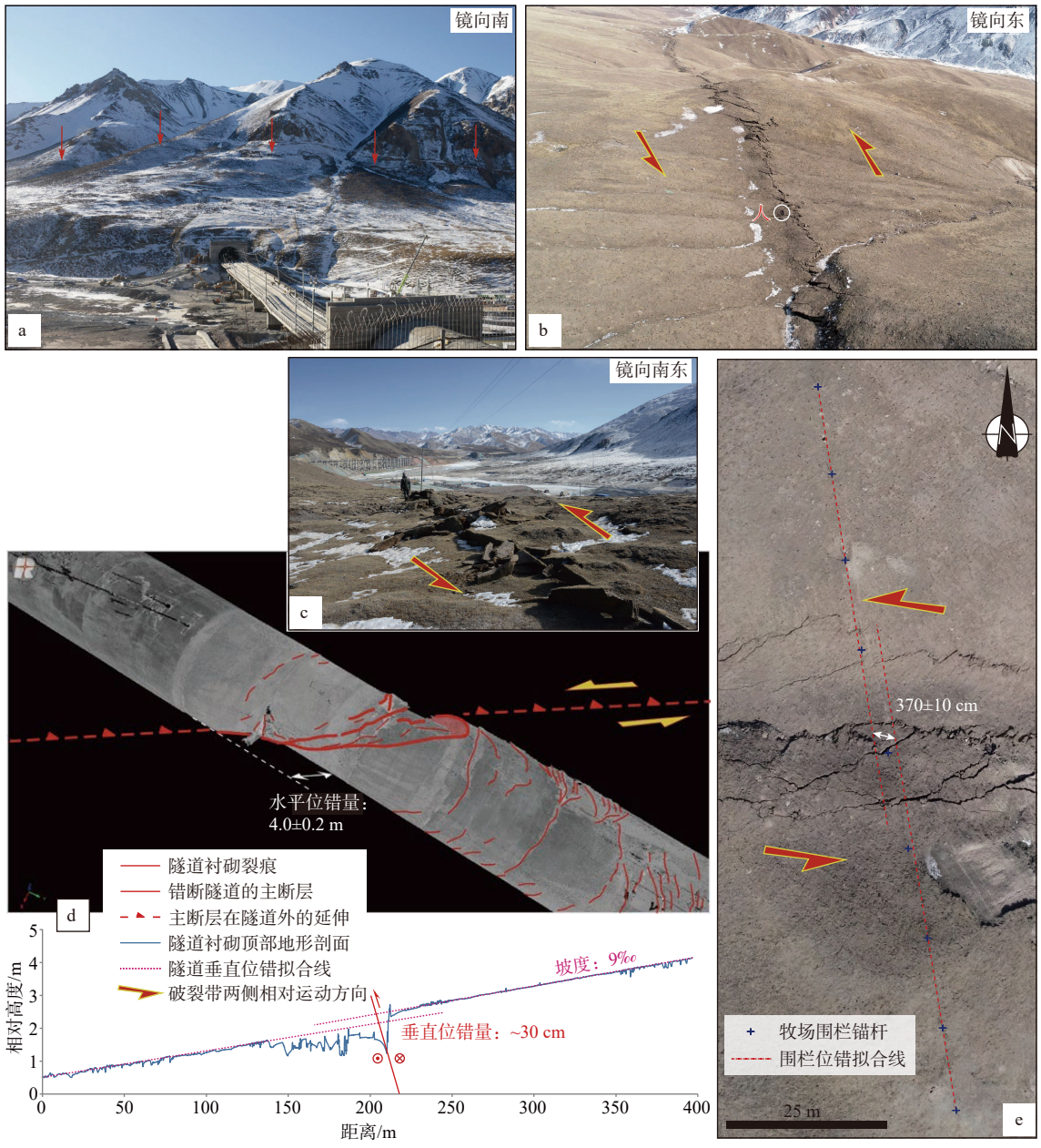
4.0 m，平均位错量 1.9 m（图 4b）。托莱山破裂带的规模相对冷龙岭段要小很多，野外测得的最大同震位错量为～85 cm（图 4b）。

门源地震相关灾害的最大特殊性在于同震破裂直接错断了兰新高铁的大梁隧道（图 5a、5d；张威等，2022；阎渊，2023），从而导致了铁路超过半年的停运，造成了巨大的经济损失。此次野外使用 Riegl VZ-1000 地基雷达在受损的大梁隧道内进行了三维激光扫描，获得的三维模型结果显示大梁隧道水平位错量为 4.0±0.2 m，并伴随约 0.3 m 的垂直位错（图 5d）。

4　2022 年泸定 M_W 6.6 地震

2022 年 9 月 5 日，四川省泸定县发生 M_W 6.6 地震，震中位于磨西镇附近，最高烈度Ⅸ度。地震诱发了严重的滑坡、崩塌等次生地质灾害，导致部分水、电、交通、通信等基础设施及房屋建筑受损，造成了较大的人员伤亡和财产损失。震源机制研究结果显示泸定地震是一次左行走滑型地震事件（徐泰然等，2022），发震断层走向北北西，倾角较陡（≥86°；徐锐等，2023）。结合区域活动断裂展布、地震诱发地质灾害分布和余震序列等特征，可判断泸定地震的发震断层为鲜水河断裂带南段的磨西断裂（图 6a）。尽管地震学和大地测量学反演结果均揭示泸定地震可能产生了地表破裂（Li et al.，2022；徐泰然等，2022；徐锐等，2023），野外调查结果也发现，在二台子至爱国村之间 10～20 km 的范围内发育大量地表裂隙（李传友等，2022；李路伟等，2022），但却没有发现类似于玛多地震和门源地震遵循里德尔剪切模型，包含张剪裂隙和挤压鼓包雁列式相间排列的典型同震地表破裂发育。这可能是由于震中山区地形起伏较大，中小规模滑坡、崩塌密集分布（图 6b、6c），导致同震地表破裂被滑坡、崩塌物质覆盖。

研究团队沿震中的南、北两侧各约 10 km 范围内（大致位于跃进坪至湾东村之间）开展了活动断层构造地貌遥感解译（图 6a），并根据解译出的磨西



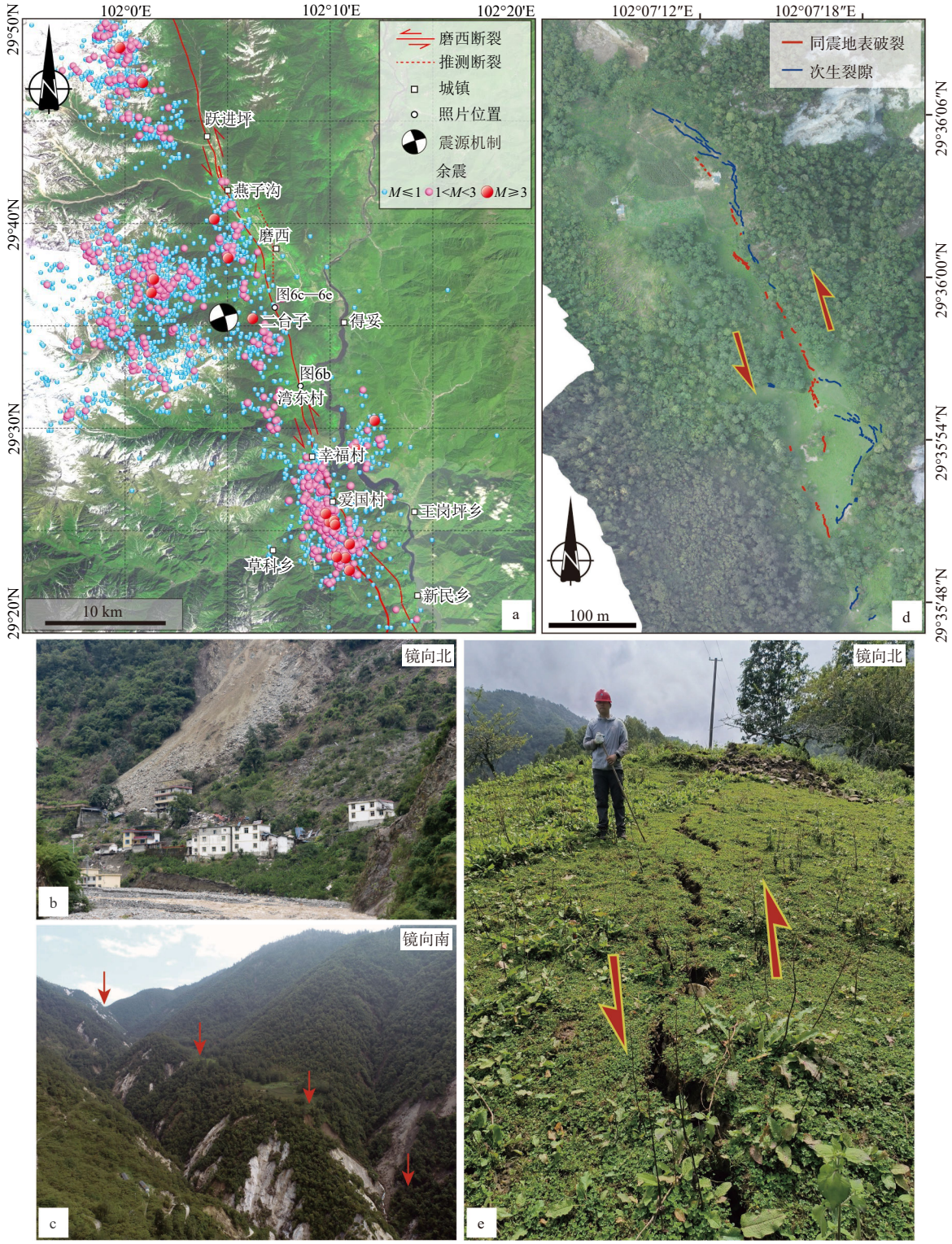
a—地表破裂造成的兰新高铁破坏(红色箭头指示地表破裂带位置)；b—硫磺沟西侧山坡上右阶雁列张裂隙与其间左阶雁列挤压鼓包组合成的同震地表破裂指示左行走滑运动性质；c—大西沟北侧托莱山段地表破裂现象；d—地基 LiDAR 测量结果显示兰新高铁大梁隧道被左行错断 4.0±0.2 m，并伴随～30 cm 的垂直位错；e—以线性排列的牧场围栏为标志物，在地表测得的 3.7±0.1 m 最大同震位错量

图 5　门源地震典型地表破裂现象

Fig. 5　Typical coseismic surface ruptures produced by the 2022 Menyuan earthquake

(a) Damage to the Lanzhou–Xinjiang Railway caused by surface rupture, with red arrows indicating the location of the surface rupture zone; (b) Coseismic surface ruptures along a mountain slope west of Liuhuanggou valley, consisting of alternating right-stepping en-echelon tension cracks and left-stepping push-ups, indicating left-lateral strike-slip motion; (c) Surface ruptures along the Tuolaishan segment, located north of Daxigou; (d) Terrestrial LiDAR measurements show that the Daliang tunnel of the Lanzhou–Xinjiang Railway was left-lateral displaced by 4.0 ± 0.2 m, accompanied by a vertical displacement of ~30 cm; (e) The maximum coseismic displacement of 3.7 ± 0.1 m measured along the surface rupture zone, using aligned ranch fences as markers

断裂进行了追踪调查。结果显示，磨西断裂沿线发育线性断层陡坎、坡中槽谷及冲沟左行位错等典型构造地貌，其中二台子附近的坡中平台和槽谷地貌最为显著(图 6c、6d)，但沿断裂开展的现场调查在二台子以南和以北均未发现典型的，具有构造指示意义的同震地表破裂，仅在二台子发现延伸约 600～700 m



a—泸定地震发震断裂与余震分布图；b—湾东村山体垮塌将楼房掩埋；c—磨西断裂长期活动形成的坡中平台；d—二台子附近长约 450 m 的地表破裂展布；e—二台子附近右阶雁行状排列张裂隙组成的地表破裂带

图 6　泸定地震发震断裂、地表破裂与次生地质灾害图

Fig. 6　Seismogenic fault, surface ruptures, and induced geological hazards of the 2022 Luding earthquake

(a) Distribution of the seismogenic fault and aftershocks; (b) Landslide in Wandong Village, burying a building; (c) A platform in the mountain slope formed by long-term activity of the Moxi Fault; (d) Distribution of the ~450 m long coseismic surface rupture extending at Ertaizi; (e) Field photo showing the surface ruptures at Ertaizi, consisting of right-stepping en-echelon tension cracks

的地表裂隙密集带(图 6d)。通过分析无人机正射影像和野外现场调查,发现二台子破裂密集带中的部分裂缝是台地边缘因边坡效应形成的张裂缝和滑坡后缘裂缝,仅有～450 m 的破裂由规则的右阶雁行状排列张裂隙组成,并沿袭先存的磨西断裂发育,推断应为同震地表破裂带(图 6e)。由于破裂规模不大,并且缺少可靠的位错标志物,未能获得二台子地表破裂带的同震位移。

另外,在 2022 年泸定地震发生前,研究团队曾推测鲜水河断裂带色拉哈–康定段、磨西段和乾宁段具有较高的 7 级左右强震风险(Bai et al., 2018, 2021; 白明坤等, 2022),而泸定地震的发生进一步验证了这一推测,但此次地震的震级(M_S 6.8/M_W 6.6)仍比之前的预估(M_W 7.0～7.1)要小,未能完全释放发震断层上已有的应变积累,因此,可推断磨西断裂及邻近断裂上未来的强震风险仍然存在。

5 2024 年乌什 M_W 7.0 地震及其强余震

2024 年 1 月 23 日,西南天山的乌什地区发生 M_W 7.0 强震,此次地震是自 1992 年吉尔吉斯斯坦 M_W 7.3 地震以来,天山地区的最大地震事件。地震发生在西南天山与塔里木盆地之间的山前逆冲断裂带上,深地震反射剖面揭示区域上发育大规模由北北西(西南天山)向南南东(塔里木)扩展的逆冲构造(Gao et al., 2013),并且在地下 5 km 以浅发育由南东向北西逆冲的反冲构造(王清华等, 2024)。

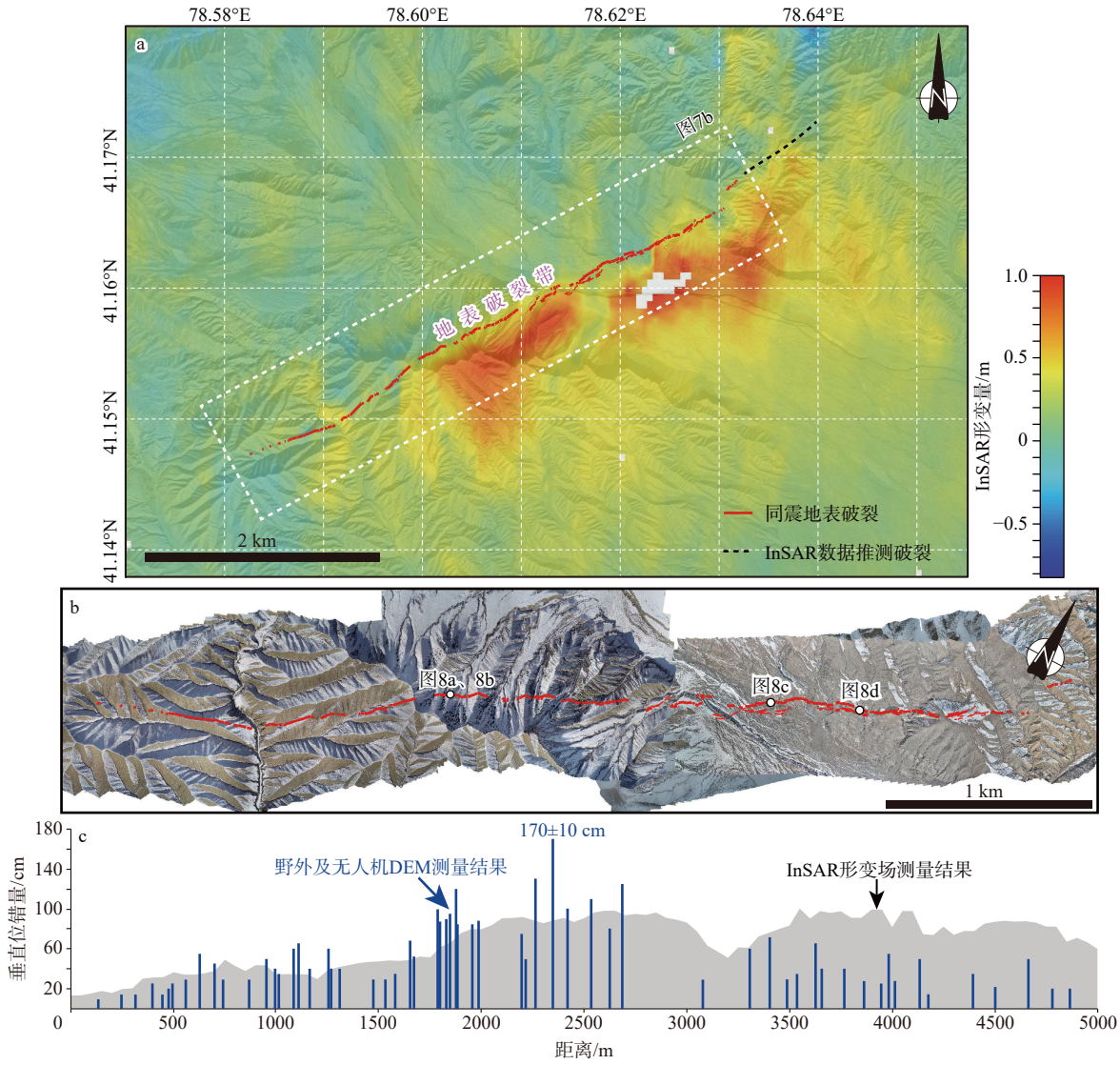
研究人员在震后第三天到达现场,沿震中附近的活动断裂(主要为迈丹断裂及其分支断层; Wu et al., 2019)开展了详细调查,但现场只观察到小规模、随机分布(大多发育在边坡上,且与山前活动断裂走向不一致)的张性裂缝,而没有发现典型的同震地表破裂,这也与 InSAR 反演显示的 M_W 7.0 主震未破裂至地表的结果相一致(Guo et al., 2024; Qiu et al., 2024; Famiglietti et al., 2025; Thompson Jobe et al., 2025; Yin et al., 2025; Yu et al., 2025; Li et al., 2026)。1 月 30 日凌晨,震中地区发生 M_W 5.7 强余震,随后的 2 月 3 日,研究人员在恰勒马提苏河谷开展地表调查过程中,却发现了一条长近 5 km, N55°～60°E 走向,运动学表现为由南东向北西逆冲的新鲜地表破裂带(Li et al., 2026; 图 7),该段破裂带最早由张博譞等(2024)发现。随后的遥感、大地测量和地震学分析,以及现场观察获得的断层运动学数据一致显示,新发现的地表破裂带应是 1 月 30 日 M_W 5.7 余震的产物(Thompson Jobe et al., 2025; Yin et al., 2025; Li et al., 2026; Wang et al., 2026)。

地表观测结果显示,以恰勒马提苏河为界,河西南侧的同震地表破裂带主要沿基岩山体(主要为第四纪砾岩)展布(图 8a、8b),变形集中,造成的同震位错量较大,普遍在 1 m 左右甚至以上(图 7c);河东北侧的破裂带主要分布在河漫滩、冲沟以及晚更新世—全新世松散沉积物中(图 8c、8d),变形弥散,地表分支裂缝发育,破裂带宽度较大,现场实测的同震位错量相对较小,大多在 50 cm 以下。通过无人机摄影测量方法获得了整条破裂带的厘米级分辨率正射影像和数字高程模型(DEM)数据,并利用 DEM 数据测量同震垂直位错量,共获得 61 个位错量数据。此外,还在野外实测了部分点的垂直位移,并与 DEM 测量结果进行了对比,显示两者基本一致。测量结果显示(图 7c),M_W 5.7 余震造成的最大同震位错量约为 1.7 m,位于破裂带西南段。野外实测以及无人机 DEM 测量数据与 InSAR 测量数据(Li et al., 2026)的对比显示,在破裂带西南段两者基本一致,但部分点的野外实测数据比 InSAR 数据要略大(图 7c),指示 InSAR 结果由于数据分辨率的限制,可能均化了断层近场位移结果;在破裂带东北段,InSAR 位移量结果普遍大于野外近断层测量结果(图 7c),反映了该段第四纪松散沉积物中存在弥散式变形。

乌什地震序列修正了“仅有主震才能产生显著地表破裂”的普遍认知,证明即使在主震没有产生地表破裂的情况下,余震同样能造成严重的地表变形。这一发现同时也革新了地震风险评估模型,表明在更为复杂的挤压构造区,那些浅部、次要的断层(如反向断层)也需纳入风险评估体系,因为其可能在主震后的余震中被激活,并对位于其上的建筑物和管道等生命线工程造成直接威胁。

6 2025 年定日 M_W 7.1 地震

2025 年 1 月 7 日,西藏定日县发生 M_W 7.1 地震,震中位于措果乡(28.50°N, 87.45°E),震源深度 10 km。此次地震发生在青藏高原南部近南北向活动裂谷系中的申扎–定结裂谷南段,具体的发震断层为西倾的丁木错断裂(图 9)。卫星影像解译和野外调查结果显示,定日地震同震地表变形带沿拉轨岗日山西侧的南北向谷地东缘和丁木错地堑东缘展布,总



a—乌什地震 M_W 5.7 强余震 InSAR 形变图像与同震地表破裂分布图；b—同震地表破裂带无人机正射影像；c—同震垂直位移量分布及其与 InSAR 形变观测结果的对比

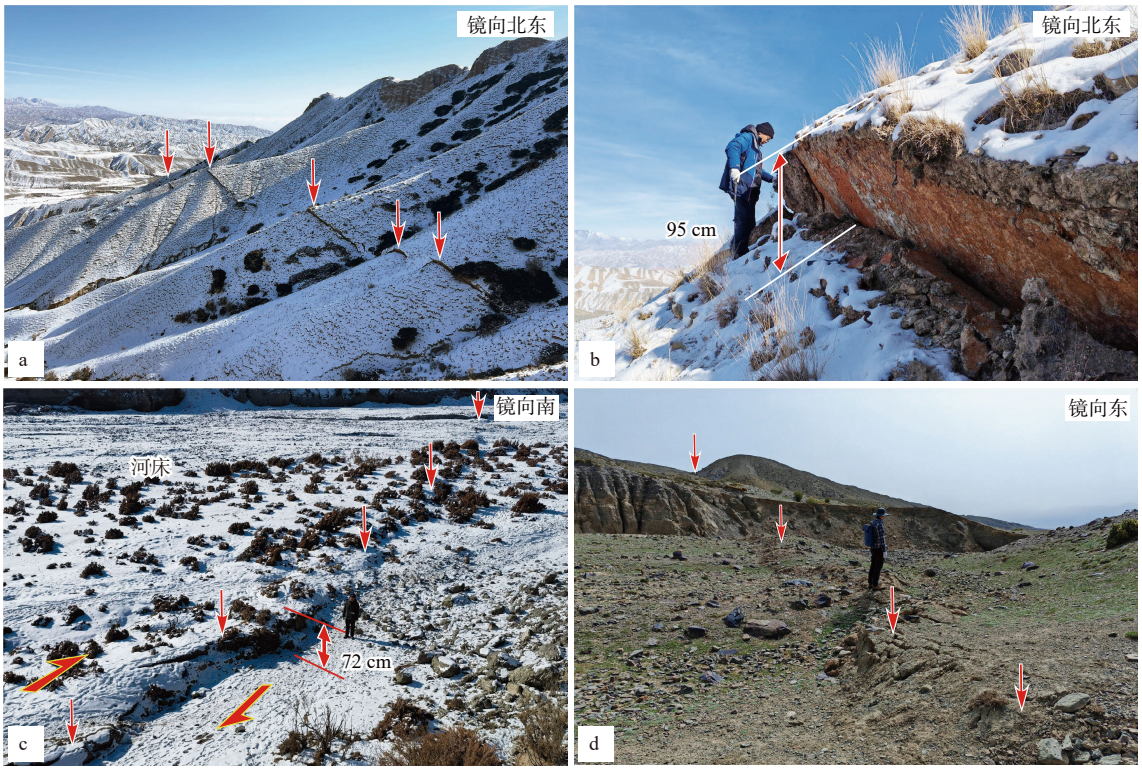
图 7　乌什地震 M_W 5.7 强余震地表破裂与同震位移量分布图

Fig. 7　Distribution of coseismic surface ruptures and coseismic displacements of the M_W 5.7 aftershock in the 2024 Wushi earthquake sequence

(a) InSAR pixel offset deformation map with coseismic surface ruptures marked in red; (b) Orthophoto of the ~4.7 km-long coseismic surface rupture zone captured with an unmanned aerial vehicle (UAV); (c) Distribution of coseismic vertical displacements (blue lines) compared with InSAR deformation results (gray shadow)

体近南北走向，局部走向随先存断层走向和地形变化而发生改变（图 9），不同团队给出的破裂带长度约 25～36.5 km 不等（刘富财等，2025；邵延秀等，2025；石峰等，2025；杨婷等，2025）。

定日地震地表变形带可分为断层错动至地表的同震地表破裂（图 10a）和重力失稳或垮塌导致的浅层次生地表变形（图 10b）。其中，同震地表破裂带南端位于丁木错湖南侧近南北向断层陡坎底部（28.533°N, 87.545 °E），北端位于羊母丁姆错北东侧山坡上（28.844°N, 87.877 °E）。依据破裂规模和连续性的差异可将同震地表破裂带分为较连续的尼辖错段、古荣村段和断续分布的丁木错段、羊母丁错姆段（图 9a）。破裂主要沿袭先存的活动断层陡坎发育（或距离先存断裂较近），走向呈较为稳定的近南北向或略偏北北东方向，由单条或多条西倾的断层陡坎右阶斜列或近平行排列组成，变形相对集中（图 10c—10f），单条破裂宽度一般～30cm 至～5m，多条破裂组合处宽～20cm 至～100m 不等。在随处



a—破裂带南西段山坡上由南东向北西逆冲的断层陡坎；b—新鲜的逆断层陡坎显示山脊被垂直错断～95 cm；c—破裂带北东段恰勒马提苏河床中高约 72 cm 的逆断层陡坎；d—破裂带北东段松散沉积中的挤压鼓包

图 8 乌什地震 M_W 5.7 强余震典型地表破裂图像

Fig. 8 Typical surface rupture of the M_W 5.7 aftershock of the Wushi earthquake sequence

(a) The reverse fault scarp on the hillside along the southwestern segment of the rupture zone, showing clear northwestward thrusting; (b) A fresh reverse fault scarp, showing a vertical displacement of ～95 cm along the ridge crest; (c) A reverse fault scarp ～72 cm high in the riverbed of the Qialemati River along the northeastern segment of the rupture zone; (d) A thrust bulge in loose sediments along the northeastern segment of the rupture zone

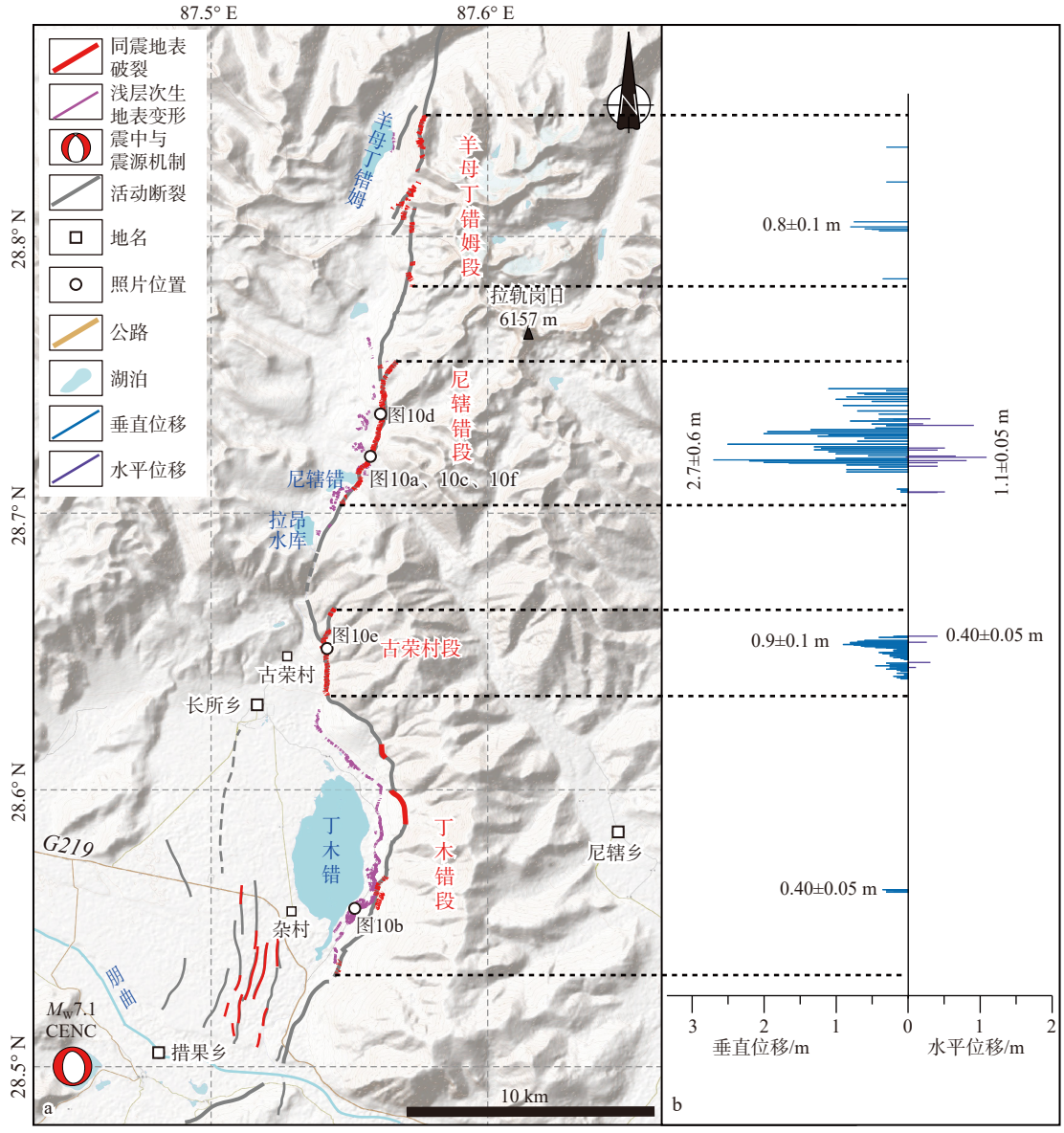
可见的西倾正断层陡坎之外(图 10c—10e)，部分位置还可以观察到破裂左行错断砾石印记或冻融鼓包等现象(图 10f)，表明定日地震是一次局部伴随左行走滑分量的正断型地震事件。而浅层次生地表变形主要弥散分布于先存活动断层西侧(断层上盘)的冲洪积扇上，典型的变形样式为后缘的一系列不同规模张裂隙、地堑和前缘的逆冲挤压鼓包、挤压脊组合而成，具有较典型的滑塌构造特征(图 10b)。其中最为显著的次生变形带位于丁木错湖东岸，总长度超过 10 km，其形成与地震动荷载作用下松散沉积物的液化、剪切失稳及重力驱动变形有关(吴坤罡等，2025)。

从地表破裂展布特征看，定日地震形成的同震地表破裂主要沿着丁木错地堑东侧的西倾正断层展布，同时，地堑内部，丁木错湖南西侧的部分东倾次级正断层在此次地震中也发生了破裂(邵延秀等，2025；杨婷等，2025)。野外测量获得的最大同震垂直位移量为 2.7 ± 0.6 m，最大走滑位移量为～1.1 m，均位于尼辖错破裂段(刘富财等，2025；图 9b)。InSAR 同震和震后形变研究也显示破裂主要沿着丁木错地堑东缘向北单侧传播(Ma et al., 2026)，并且触发了地堑西侧倾向东的断层上的隐伏同震滑移(blind coseismic slip)，其中向西倾的断层(倾角 48°)以正倾滑为主，最大倾滑位移量达 4.7 m(4.0 km 深处)，同时伴随 3.2 m 的左行走滑分量(He et al., 2025)。也有学者提出，上述 2 条倾向相反的断层呈共轭关系，可能是控制丁木错地堑发育的 2 条边界断层(Qiao et al., 2025)。

7 讨论

7.1 青藏高原近年来强震活动时空迁移规律及其块体运动学响应

近 30 年来，中国大陆发生的所有强震均集中



a—定日地震同震地表变形带分布图；b—沿 2025 年定日地震地表破裂带的同震位移分布

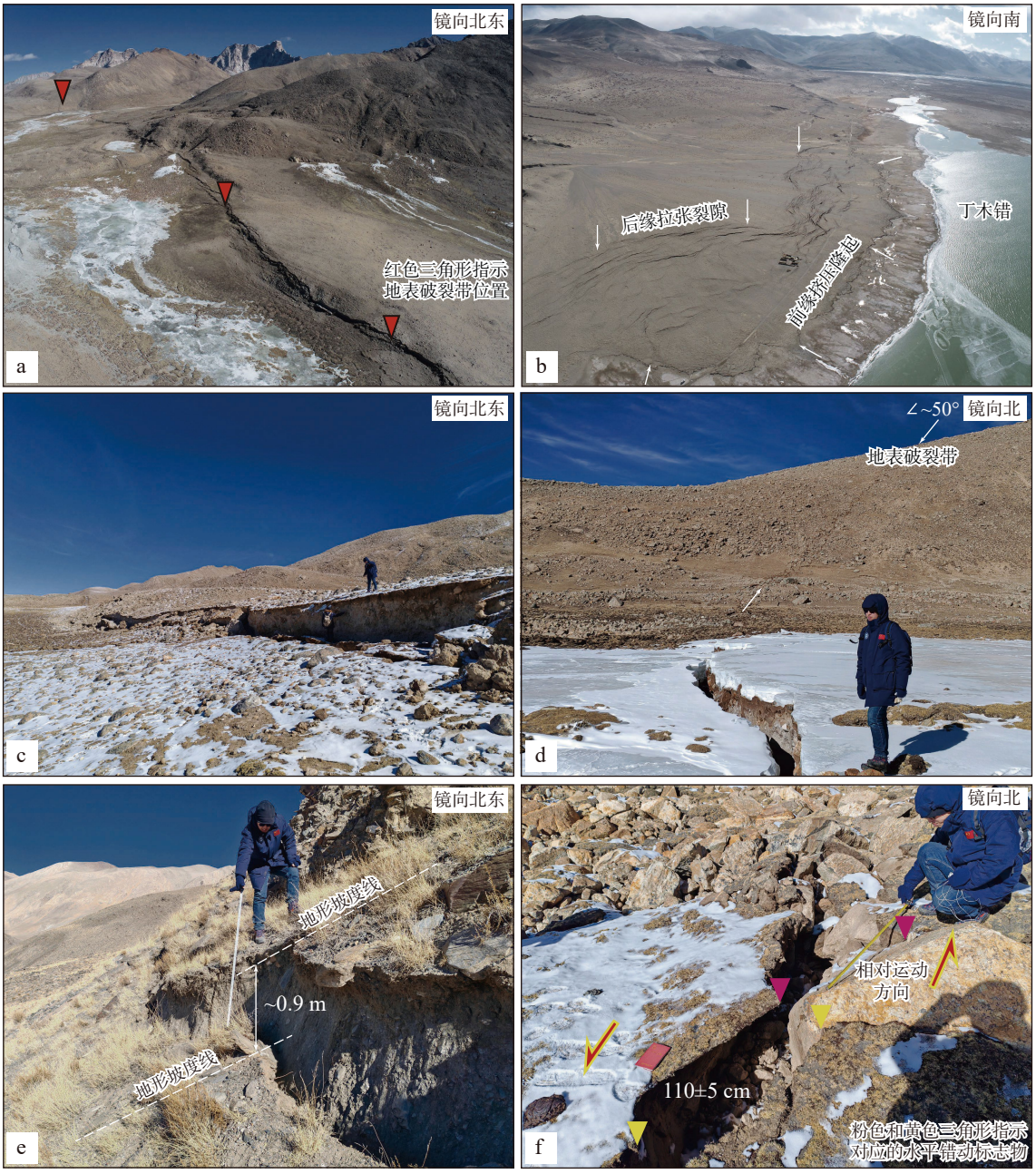
图 9　定日地震同震地表破裂与同震位移分布图

Fig. 9　Distribution of coseismic surface ruptures and coseismic displacements for the Dingri earthquake

(a) Distribution of coseismic surface deformation of the Dingri earthquake; (b) Distribution of coseismic displacements of the 2025 Dingri earthquake

分布于青藏高原及其周缘构造带；尤为关键的是，这些高破坏性强震绝大多数沿巴颜喀拉活动地块边界断裂带孕育发生：1997 年西藏玛尼 M_W 7.4 地震，发生在该地块西南边界玛尔盖茶卡断裂；2001 年昆仑山口 M_W 7.8 地震，发生于地块北部边界东昆仑断裂；2008 年新疆于田 M_W 7.2 地震，沿巴颜喀拉地块西部边界阿尔金断裂带西段拉分阶区内的正断层发生破裂；2008 年汶川 M_W 7.9 地震，发震构造为巴颜喀拉地块东部边界龙门山逆冲断裂带；2010 年玉树 M_W 6.9 地震，发生在地块南部边界玉树–甘孜–鲜水河断裂带的玉树段；2013 年芦山 M_W 6.6 地震，发生在地块东部边界龙门山断裂带的南端；2014 年新疆于田 M_W 6.9 地震再次活动于地块西部边界阿尔金断裂带西段；2017 年九寨沟 M_W 6.5 地震，沿地块北部边界东昆仑断裂带东南端的一条分支断层发生破裂；2021 年玛多 M_W 7.4 地震，发震构造为东昆仑断裂带南侧分支昆仑山口–江错断裂。

上述强震在巴颜喀拉活动地块边界断裂带的持续、往复发生，清晰地揭示了该地块整体向东挤出，西侧伸展拉张、东侧挤压逆冲、南北边界以走



a—尼辖错北东侧沿袭先存断裂线性分布的同震地表破裂，主要由西倾的正断层陡坎组成；b—丁木错东侧沿湖岸分布的大规模浅层次生地表变形；c—尼辖错段高度大于 2 m 的新鲜破裂陡坎；d—尼辖错段地表破裂切割洪积扇和山体，指示断层面倾向西，倾角约 50°；e—古荣村段沿先存断层陡坎上发育的 90 cm 高的新鲜断面；f—尼辖错段砾石印模显示左行走滑位错量约 110 cm

图 10 定日地震典型同震地表变形现象野外照片

Fig. 10 Field photographs of typical coseismic surface deformation for the Dingri earthquake

(a) Coseismic surface ruptures along a pre-existing fault scarp northeast of Nixia Co, consisting of fresh west-dipping normal fault scarps; (b) Large-scale superficial secondary surface deformation along the lakeshore on the eastern side of Dingmu Co; (c) Fresh normal fault scarp showing >2-m-high vertical displacement along the Nixia Co surface rupture segment; (d) Surface rupture cuts proluvial fan and hill along the Nixia Co rupture segment, indicating a ~50° west-dipping fault plane; (e) A fresh ~90-cm-high surface rupture developed along a pre-existing fault scarp along the Gurong Village rupture segment; (f) A boulder and its impression along the Nixia Co rupture segment showing a left-lateral displacement of ~110 cm

滑作用调节的统一运动学特征。同时，强震活动呈现显著的东西、南北交替迁移规律，表明巴颜喀拉地块具备刚性块体特征，一侧边界构造活动后，区域应力可快速传递至地块另一侧边界。基于这一

应力迁移规律，在 2021 年玛多地震后可推测：巴颜喀拉地块南边界鲜水河断裂带未来强震危险性显著升高（潘家伟等，2021；Pan et al., 2022），该预判已被 2022 年泸定 M_W 6.6 地震所验证。

2022 年泸定地震后，青藏高原及周缘强震活动空间格局发生明显转变：2023 年积石山 M_W 6.0 地震已跳出巴颜喀拉地块的范围；2024 年新疆乌什 M_W 7.0 地震则进一步跳出青藏高原主体，发生在印度–欧亚板块碰撞远程效应区的西南天山前陆冲断带；2025 年西藏定日 M_W 7.1 地震虽回归青藏高原，但仍远离巴颜喀拉活动地块。上述震例的空间迁移，是否标志着持续 20 余年的巴颜喀拉地块周缘强震丛集活动期已经结束，青藏高原现今强震活动进入新一轮构造转换阶段？未来青藏高原强震活动将转向哪些关键活动地块与地震构造带？这些重大科学问题，直接关系到区域强震危险性评价与中长期地震趋势判断，亟需基于已发震例的精细剖析、中国大陆活动构造体系的系统研究以及高精度观测数据的综合分析，来逐步揭示和科学回答。

7.2　青藏高原强震震源机制统计与构造变形指示意义

文中初步分析的 5 次强震事件中，走滑型地震占 3 次，正断型与逆冲型地震各 1 次。这一初步结果虽显示青藏高原及周缘强震以走滑型占优，但受限于样本量，尚不具备统计意义。为系统揭示青藏高原及周缘地区强震震源机制的总体特征，文章基于全球矩心矩张量（GCMT）目录，选取 75°～110°E、25°～42°N 的青藏高原及邻区范围，搜集并处理了 797 次 M_W≥5.0 地震的震源参数，采用万永革（2024）提供的 Matlab 程序开展震源机制分类统计与分析。统计结果表明（图 11），青藏高原现今地震活动以纯走滑型为主，共 309 次，占比 38.77%；此外还发生正走滑型地震事件 59 次、逆走滑型地震事件 52 次，分别占总体数量的 7.40% 和 6.52%，三者相加，与断裂走滑运动相关的地震事件占总数量的一半以上，与文中涉及的 2021 年以来 5 次强震的统计结果基本一致。统计到的区域内逆断型地震 223 次，占比 27.98%；正断型地震相对较少，共 154 次，占比 19.32%。对上述目录中 96 个 M_W≥6.0 地震震源机制的统计结果同样显示走滑型运动相关地震事件占比 46.26%（44 次），正断型和逆冲型地震事件分别占 21.88%（21 次）和 32.29%（31 次）。

上述统计规律从宏观角度揭示，印度–欧亚板块碰撞汇聚产生的构造应变，在青藏高原内部仍主要以活动块体沿阿尔金、东昆仑、鲜水河等大型走滑断裂带发生侧向挤出的方式得以调节与吸收（Tapponnier et al., 1982, 2001; Replumaz and Tapponnier, 2003）。这一认识与基于 GNSS（Wang and Shen, 2020）和 InSAR（Wright et al., 2026）观测获得的青藏高原大尺度现今地壳运动与变形格局高度一致。

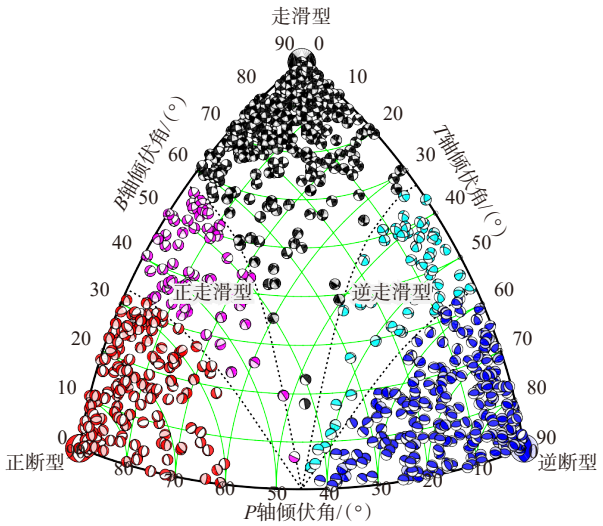


图 11　青藏高原及周缘地区 1970 年以来 M_W≥5.0 地震震源机制分类统计图

Fig. 11　Statistical classification of focal mechanisms for M_W≥5.0 earthquakes in the Tibetan Plateau and surrounding regions since 1970

8　结束语

尽管文章系统梳理了近年来青藏高原及周缘 5 次不同性质强震的地表破裂特征，并初步揭示了强震活动的时空迁移规律与震源机制统计特征，但仍存在以下问题有待深入研究：

（1）地表破裂的完整性与精细几何学。受地形地貌、植被覆盖、次生地质灾害（如滑坡、崩塌）等因素影响，部分地震（如 2022 年泸定地震）的地表破裂可能未被完全揭露。未来需结合高分辨率遥感、LiDAR 及地球物理探测手段，进一步查明破裂带的完整展布。

（2）同震位移的弥散变形贡献。野外实测与 InSAR 结果对比显示（如 2024 年乌什地震），近断层测量与远场反演结果存在差异，部分差异源于第四纪松散沉积物中的弥散式变形。定量评估弥散变形在整个同震位移中的占比，是完善概率性断层位错风险评估（PFDHA）模型的关键。

(3)超剪切破裂的识别与触发条件。玛多地震东段“裁弯取直”特征可能指示超剪切破裂的发生,但目前对超剪切破裂在青藏高原其他走滑断裂上的识别尚不充分,特别是断层的几何结构对超剪切破裂的控制,未来需结合强震地面运动记录、高精度破裂过程反演及数值模拟,系统研究超剪切破裂的触发条件与发育规律。

(4)强震活动格局转变的动力学机制。青藏高原近年来的多次强震时空分布特征符合中国大陆强震的“活动地块”假说,但该假说的动力学机制仍有待进一步深入研究。控制活动地块强震丛集启动和终止的因素是什么,2022年泸定地震后强震活动是否已进入新一轮构造转换阶段?尚需更多震例与高精度观测数据的支撑。未来应加强青藏高原及周缘主要活动地块边界断裂带的强震危险性评价,特别是那些长期未发生大地震的“地震空区”。

致谢:编辑部和审稿专家对本文进行了认真审阅,并提出了建设性修改意见;孙知明老师以及白明坤、王世广、司家亮、李超、吴坤罡、吴琼、李春锐等曾参加部分地震野外调查工作,在此一并表示感谢。

作者贡献声明:潘家伟、李海兵负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作;刘富财、Marie-Luce Chevalier参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图;刘栋梁、卢海建、陈鹏、杨少华参与数据分析、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: PAN Jiawei and LI Haibing conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; LIU Fucai and CHEVALIER Marie-Luce participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; LIU Dongliang, LU Haijian, CHEN Peng, and YANG Shaohua 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

BAI M K, CHEVALIER M L, PAN J W, et al., 2018. Southeastward increase of the late Quaternary slip-rate of the Xianshuihe fault, eastern Tibet. Geodynamic and seismic hazard implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 485: 19-31.

BAI M K, CHEVALIER M L, LELOUP P H, et al., 2021. Spatial slip rate distribution along the SE Xianshuihe fault, eastern Tibet, and earthquake hazard assessment[J]. Tectonics, 40(11): e2021TC006985.

BAI M K, CHEVALIER M L, LI H B, et al., 2022. Late Quaternary slip rate and earthquake hazard along the Qianning segment, Xianshuihe fault[J]. Acta Geologica Sinica, 96(7): 2312-2332. (in Chinese with English abstract)

DENG Q D, ZHANG P Z, RAN Y K, et al., 2003. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(4): 356-372.

DING L, KAPP P, CAI F L, et al., 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 3(10): 652-667.

FAMIGLIETTI N A, CHELONI D, CAPUTO R, et al., 2025. Geodetic model of the 2024 January 22 M_W 7.0 Wushi (northwestern China) earthquake and M_w 5.7 aftershock from inversion of InSAR data[J]. Geophysical Journal International, 241(2): 941-953.

GAI H L, YAO S H, YANG L P, et al. , 2021. Characteristics and causes of coseismic surface rupture triggered by the “5. 22” M_S7.4 Earthquake in Maduo, Qinghai, and their significance[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 899-912. (in Chinese with English abstract)

GAI H L, LI Z M, YAO S H, et al., 2022. Preliminary investigation and research on surface rupture characteristics of the 2022 Qinghai Menyuan M_S6.9 Earthquake[J]. Seismology and Geology, 44(1): 238-255. (in Chinese with English abstract)

GAO R, HOU H, CAI X, et al., 2013. Fine crustal structure beneath the junction of the southwest Tian Shan and Tarim Basin, NW China[J]. Lithosphere, 5(4): 382-392.

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.

HAN N N, ZHANG G H, SHAN X J, et al., 2023. Coseismic surface horizontal deformation of the 2022 M_W 6.6 Menyuan, Qinghai, China, earthquake from optical pixel correlation of GF-7 stereo satellite images[J]. Seismological Research Letters, 94(4): 1747-1760.

HAN S, WU Z H, GAO Y, et al., 2022. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan M_S 6.9 earthquake, Qinghai, China: implications for the fault behavior of the Lenglongling fault and regional intense earthquake risk[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 155-168. (in Chinese with English abstract)

HE L J, FENG G C, JIANG H B, et al., 2025. Coseismic kinematics and early afterslip evolution of the 2025 M_W 7.1 Dingri earthquake (southern Tibet) from space geodesy[J]. Geophysical Research Letters, 52(22): e2025GL118937.

KLINGER Y, XU X W, TAPPONNIER P, et al., 2005. High-resolution satellite imagery mapping of the surface rupture and slip distribution of the M_W ~7.8, 14 November 2001 Kokoxili earthquake, Kunlun fault, Northern Tibet, China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(5): 1970-1987.

KLINGER Y, ETCHEBES M, TAPPONNIER P, et al., 2011. Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun fault in China[J]. Nature Geoscience, 4(6): 389-392.

LI C L, LI T, SHAN X J, et al., 2023a. Extremely large off-fault deformation during the 2021 M_W 7.4 Maduo, Tibetan plateau, earthquake[J]. Seismological Research Letters, 94(1): 39-51.

LI C Y, SUN K, MA J, et al., 2022. The 2022 *M* 6.8 Luding earthquake: a complicated event by faulting of the Moxi segment of the Xianshuihe fault zone[J]. Seismology and Geology, 44(6): 1648-1666. (in Chinese with English abstract)

LI H B, VAN DER WOERD J, SUN Z M, et al., 2012. Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet[J]. Gondwana Research, 21(1): 64-87.

LI H B, PAN J W, LIN A M, et al., 2016. Coseismic surface ruptures associated with the 2014 M_W 6.9 Yutian Earthquake on the Altyn Tagh Fault, Tibetan Plateau[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(2): 595-608.

LI H B, PAN J W, SUN Z M, et al., 2021. Continental tectonic deformation and seismic activity: a case study from the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 95(1): 194-213. (in Chinese with English abstract)

LI H B, PAN J W, CHEVALIER M L, et al., 2026. Aftershock-induced surface ruptures overshadow the 2024 M_W 7.0 Wushi mainshock, China[J]. Geology, 54(2): 105-110.

LI K, TAPPONNIER P, XU X W, et al., 2023b. The 2022, M_S 6.9 Menyuan earthquake: Surface rupture, Paleozoic suture re-activation, slip-rate and seismic gap along the Haiyuan fault system, NE Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 622: 118412.

LI L W, YU Z Y, CHEN B X, et al., 2022. Co-seismic surface deformation characteristics and seismic geological enlightenment of the Luding, Sichuan M_S 6.8 Earthquake in 2022[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 24(4): 75-87. (in Chinese with English abstract)

LI Y C, ZHAO D Z, SHAN X J, et al., 2022. Coseismic slip model of the 2022 M_W 6.7 Luding (Tibet) earthquake: pre- and post-earthquake interactions with surrounding major faults[J]. Geophysical Research Letters, 49(24): e2022GL102043.

LI Z M, LI W Q, LI T, et al., 2021. Seismogenic fault and coseismic surface deformation of the Maduo M_S 7.4 earthquake in Qinghai, China: a quick report[J]. Seismology and Geology, 43(3): 722-737. (in Chinese with English abstract)

LI Z M, GAI H L, LI X, et al., 2022. Seismogenic fault and coseismic surface deformation of the Menyuan M_S 6.9 earthquake in Qinghai, China[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 330-335. (in Chinese with English abstract)

LIANG K, HE Z T, JIANG W L, et al., 2022. Surface rupture characteristics of the Menyuan M_S6.9 earthquake on January 8, 2022, Qinghai Province[J]. Seismology and Geology, 44(1): 256-278. (in Chinese with English abstract)

LIU F C, PAN J W, LI H B, et al., 2025. Co-seismic surface rupture of the 2025 M_W7.1 Tingri earthquake and potential seismic risk in southern Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 99(3): 685-703. (in Chinese with English abstract)

LIU-ZENG J, ZHANG Z, WEN L, et al., 2009. Co-seismic ruptures of the 12 May 2008, M_S 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: east-west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 286(3-4): 355-370.

LIU-ZENG J, YAO W Q, LIU X L, et al., 2022. High-resolution structure-from-motion models covering 160 km-long surface ruptures of the 2021 M_W 7.4 Madoi earthquake in northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Earthquake Research Advances, 2(2): 100140.

LIU-ZENG J, LIU Z J, LIU X L, et al., 2024. Fault orientation trumps fault maturity in controlling coseismic rupture characteristics of the 2021 Maduo Earthquake[J]. AGU Advances, 5(2): e2023AV001134.

MA Z F, LI C L, ZENG H Y, et al., 2026. Deciphering stress perturbations throughout the 2025 M_W 7.1 Dingri, Southern Xizang Earthquake[J]. Nature Communications, 17(1): 1378.

MOLNAR P, TAPPONNIER P, 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision: features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision[J]. Science, 189(4201): 419-426.

MOLNAR P, TAPPONNIER P, 1978. Active tectonics of Tibet[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 83(B11): 5361-5375.

PAN J W, LI H B, SI J L, et al. , 2014. Rupture process of the Wenchuan earthquake (M_W 7.9) from surface ruptures and fault striations characteristics[J]. Tectonophysics, 619-620: 13-28.

PAN J W, BAI M K, LI C, et al., 2021. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo(Qinghai)M_S7.4 earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 95(6): 1655-1670. (in Chinese with English abstract)

PAN J W, LI H B, CHEVALIER M L, et al., 2022. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2022 M_S6.9 Menyuan earthquake, Qinghai Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 215-231. (in Chinese with English abstract)

PAN J W, LI H B, CHEVALIER M L, et al., 2022. Co-seismic rupture of the 2021, M_W7.4 Maduo earthquake (northern Tibet): short-cutting of the Kunlun fault big bend[J]. Earth and Planetary Science Letters, 594: 117703.

QIAO X, LU Z, YAN S Y, et al., 2025. The 2025 M_W7.0 Dingri Earthquake: conjugate normal faulting of a graben structure in the Southern Xainza-Dinggye rift[J]. Geophysical Research Letters, 52(12): e2025GL116154.

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.

REN J J, XU X W, ZHANG G W, et al., 2022. Coseismic surface ruptures, slip distribution, and 3D seismogenic fault for the 2021 M_W 7.3 Maduo earthquake, central Tibetan Plateau, and its tectonic implications[J]. Tectonophysics, 827: 229275.

REPLUMAZ A, TAPPONNIER P, 2003. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B6): 2285.

ROCKWELL T K, KLINGER Y, 2013. Surface rupture and slip distribution of the 1940 imperial valley earthquake, imperial fault, Southern California: implications for rupture segmentation and dynamics[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(2A): 629-640.

SHAO Y X, LIU-ZENG J, GAO Y P, et al., 2022. Coseismic displacement measurement and distributed deformation characterization: a case of 2021 M_W7.4 Madoi earthquake[J]. Seismology and Geology, 44(2): 506-523. (in Chinese with English abstract)

SHAO Y X, WANG A S, LIU-ZENG J, et al., 2025. Preliminary investiga-

tion on surface rupture and coseismic displacement of the January 7, 2025 Dingri Earthquake in Xizang[J]. Earth Science, 50(5): 1677-1695. (in Chinese with English abstract)

SHI F, LIANG M J, LUO Q X, et al., 2025. Seismogenic fault and coseismic surface deformation of the Dingri M_S 6.8 earthquake in Xizang, China[J]. Seismology and Geology, 47(1): 1-15. (in Chinese with English abstract)

TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 10(12): 611-616.

TAPPONNIER P, ZHIQIN X, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau[J]. Science, 294(5547): 1671-1677.

TAYLOR M, YIN A, 2009. Active structures of the Himalayan-Tibetan orogen and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism[J]. Geosphere, 5(3): 199-214.

THOMPSON JOBE J A, HANAGAN C E, HATEM A E, et al., 2025. Surface rupture from an aftershock: remote observations from the January 2024 Wushi (Aykol), China, Earthquakes[J]. Seismological Research Letters, 96(6): 3490-3510.

VALENTINI A, VISINI F, BONCIO P, et al., 2025. Twenty-five years of probabilistic fault displacement hazard assessment[J]. Reviews of Geophysics, 63(3): e2024RG000875.

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 C S, ZHAO X X, LIU Z F, et al., 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(13): 4987-4992.

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 Q H, YANG W, ZHOU H, et al., 2024. The stratigraphic system and structural characteristics of the western subsag of Wushi Sag, NW Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 59(2): 271-287. (in Chinese with English abstract)

WANG S G, FANG L H, CHEVALIER M L, et al., 2026. Seismogenic fault model of the 2024 M_W 7.0 Wushi earthquake, western China, from geomorphology and aftershock relocation[J]. Geological Society of America Bulletin, 138(5-6): 1941-1957.

WANG W L, FANG L H, WU J P, et al., 2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 M_S7.4 Maduo Earthquake, Qinghai, China[J]. Science China Earth Sciences, 64(8): 1371-1380.

WESNOUSKY S G, 2006. Predicting the endpoints of earthquake ruptures[J]. Nature, 444(7117): 358-360.

WESNOUSKY S G, 2008. Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(4): 1609-1632.

WRIGHT T J, HOUSEMAN G A, FANG J, et al., 2026. High-resolution geodetic velocities reveal role of weak faults in deformation of Tibetan Plateau[J]. Science, 391(6784): 499-503.

WU C Y, ZHENG W J, ZHANG P Z, et al., 2019. Oblique thrust of the Maidan fault and late Quaternary tectonic deformation in the southwestern Tian Shan, Northwestern China[J]. Tectonics, 38(8): 2625-2645.

WU K G, LI H B, PAN J W, et al. , 2025. Analysis of secondary surface deformation characteristics and formation mechanisms on the eastern shore of Dingmu Co triggered by the 2025 Tingri M_W 7.1 earthquake[J/OL]. Acta Geologica Sinica, (2025-11-20). https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025286. (in Chinese with English abstract)

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)

XU R, CHEN C, RAO T G, et al., 2023. Interpretation of the 2022 Luding M_W 6.6 earthquake based on GNSS data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(4): 1409-1418. (in Chinese with English abstract)

XU T R, DAI D Q, YANG Z G, et al., 2022. Preliminary study of emergency production and source parameters of the M 6.8 earthquake on September 05, 2022 in Luding, Sichuan Province[J]. Earthquake Research in China, 38(3): 412-424. (in Chinese with English abstract)

XU X W, YU G H, KLINGER Y, et al., 2006. Reevaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake (M_W7.8), northern Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B5): B05316.

XU X W, WEN X Z, YU G H, et al., 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_W 7.9 Wenchuan earthquake, China[J]. Geology, 37(6): 515-518.

YAN Y, 2023. The tunnel damage effects and implications of the coseismic rupture of the Menyuan M_S 6.9 Earthquake in Qinghai, China[J]. Journal of Geomechanics, 29(6): 869-878. (in Chinese with English abstract)

YANG T, WANG S G, FANG L H, et al., 2025. Analysis of earthquake sequence and seismogenic structure of the 2025 M_S 6.8 Dingri Earthquake in Tibetan Plateau[J]. Earth Science, 50(5): 1721-1732. (in Chinese with English abstract)

YAO W Q, WANG Z J, LIU-ZENG J, et al., 2022. Discussion on coseismic surface rupture length of the 2021 M_W7.4 Madoi earthquake, Qinghai, China[J]. Seismology and Geology, 44(2): 541-559. (in Chinese with English abstract)

YIN A, HARRISON T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1): 211-280.

YIN X Z, LI T, ZHANG Y F, et al., 2025. Interlacing ruptures of the 2024 Wushi earthquake (Chinese Tian Shan) controlled by structural inheritance[J]. Communications Earth & Environment, 6(1): 908.

YOUNGS R R, ARABASZ W J, ANDERSON R E, et al., 2003. A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA)[J]. Earthquake Spectra, 19(1): 191-219.

YU S Y, LI Z J, ZHAO P, et al., 2025. Source parameters and seismogenic fault model of the 2024 M_W 7.0 Wushi (Xinjiang, China) earthquake revealed by InSAR observations[J]. Pure and Applied Geophysics, 182(3): 1149-1162.

YUAN D Y, XIE H, SU R H, et al., 2023. Characteristics of co-seismic surface rupture zone of Menyuan M_S 6.9 earthquake in Qinghai Province on January 8, 2022 and seismogenic mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(1): 229-244. (in Chinese with English abstract)

YUAN Z D, LI T, SU P, et al., 2022. Large surface-rupture gaps and low surface fault slip of the 2021 M_W 7.4 Maduo Earthquake along a low-activity

strike-slip fault, Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 49(6): e2021GL096874.

ZHANG B X, QIAN L, LI T, et al., 2024. Geological disasters and surface ruptures of January 23, 2024 M_S7.1 Wushi earthquake, Xinjiang, China[J]. Seismology and Geology, 46(1): 220-234. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(S2): 13-24.

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG Z Q, et al., 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China[J]. Scientia Sinica Terrae, 43(10): 1607-1620. (in Chinese)

ZHANG P Z, WANG W T, GAN W J, et al., 2022. Present-day deformation and geodynamic processes of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 96(10): 3297-3313. (in Chinese with English abstract)

ZHANG W, LI M, JI Y P, et al., 2022. Analysis and enlightenment of typical failure characteristics of tunnels caused by the Menyuan M 6.9 earthquake in Qinghai Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(3): 661-669. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, SUN X, YUAN D Y, et al., 2025. Active faults, seismic activity, and seismotectonic environments in the Tibetan Plateau and its adjacent regions[J]. Journal of Geomechanics, 31(5): 1006-1029. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白明坤, CHEVALIER MARIE-LUCE, 李海兵, 等, 2022. 鲜水河断裂带乾宁段晚第四纪走滑速率及区域强震危险性研究[J]. 地质学报, 96(7): 2312-2332.

邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑), 32(12): 1020-1030.

盖海龙, 姚生海, 杨丽萍, 等, 2021. 青海玛多“5·22”M_S7.4级地震的同震地表破裂特征、成因及意义[J]. 地质力学学报, 27(6): 899-912.

盖海龙, 李智敏, 姚生海, 等, 2022. 2022年青海门源M_S6.9地震地表破裂特征的初步调查研究[J]. 地震地质, 44(1): 238-255.

韩帅, 吴中海, 高扬, 等, 2022. 2022年1月8日青海门源M_S6.9地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示[J]. 地质力学学报, 28(2): 155-168.

李传友, 孙凯, 马骏, 等. 2022. 四川泸定6.8级地震：鲜水河断裂带磨西段局部发起、全段参与的一次复杂事件[J]. 地震地质, 44(6): 1648—1666.

李海兵, 潘家伟, 孙知明, 等, 2021. 大陆构造变形与地震活动：以青藏高原为例[J]. 地质学报, 95(1): 194-213.

李路伟, 余中元, 陈柏旭, 等, 2022. 2022年泸定M_S6.8地震的同震地表变形特征及地震地质启示[J]. 防灾科技学院学报, 24(4): 75-87.

李智敏, 李文巧, 李涛, 等, 2021. 2021年5月22日青海玛多M_S7.4地震的发震构造和地表破裂初步调查[J]. 地震地质, 43(3): 722-737.

李智敏, 盖海龙, 李鑫, 等, 2022. 2022年青海门源M_S6.9级地震发震构造和地表破裂初步调查[J]. 地质学报, 96(1): 330-335.

梁宽, 何仲太, 姜文亮, 等, 2022. 2022年1月8日青海门源M_S6.9地震的同震地表破裂特征[J]. 地震地质, 44(1): 256-278.

刘富财, 潘家伟, 李海兵, 等, 2025. 2025年M_W7.1西藏定日地震地表破裂与同震位移分布特征[J]. 地质学报, 99(3): 685-703.

潘家伟, 白明坤, 李超, 等, 2021. 2021年5月22日青海玛多M_S7.4地震地表破裂带及发震构造[J]. 地质学报, 95(6): 1655-1670.

潘家伟, 李海兵, CHEVALIER M L, 等, 2022. 2022年青海门源M_S6.9地震地表破裂带及发震构造研究[J]. 地质学报, 96(1): 215-231.

邵延秀, 刘静, 高云鹏, 等, 2022. 同震地表破裂的位移测量与弥散变形分析：以2021年青海玛多M_W7.4地震为例[J]. 地震地质, 44(2): 506-523.

邵延秀, 王爱生, 刘静, 等, 2025. 2025年1月7日西藏定日地震地表破裂特征和野外同震位移测量初步结果[J]. 地球科学, 50(5): 1677-1695.

石峰, 梁明剑, 罗全星, 等, 2025. 2025年1月7日西藏定日6.8级地震发震构造与同震地表破裂特征[J]. 地震地质, 47(1): 1-15.

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.

王清华, 杨威, 周慧, 等, 2024. 塔里木盆地西北缘乌什西次凹的地层系统和构造特征[J]. 地质科学, 59(2): 271-287.

王未来, 房立华, 吴建平, 等, 2021. 2021年青海玛多M_S7.4地震序列精定位研究[J]. 中国科学：地球科学, 51(7): 1193-1202.

吴坤罡, 李海兵, 潘家伟, 等, 2025. 2025年定日M_W7.1地震丁木错东岸次生地表变形特征及成因机制分析[J/OL]. 地质学报, (2025-11-20). https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025286.

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.

徐锐, 陈聪, 饶太国, 等, 2023. GNSS资料解译2022年泸定M_W6.6地震[J]. 地球物理学报, 66(4): 1409-1418.

徐泰然, 戴丹青, 杨志高, 等, 2022. 2022年9月5日四川泸定6.8级地震初步研究结果[J]. 中国地震, 38(3): 412-424.

阎渊, 2023. 青海门源M_S6.9地震同震破裂的隧道破坏效应与启示[J]. 地质力学学报, 29(6): 869-878.

杨婷, 王世广, 房立华, 等, 2025. 2025年1月7日西藏定日M_S6.8地震余震序列特征与发震构造[J]. 地球科学, 50(5): 1721-1732.

姚文倩, 王子君, 刘静, 等, 2022. 2021年青海玛多M_W7.4地震同震地表破裂长度的讨论[J]. 地震地质, 44(2): 541-559.

袁道阳, 谢虹, 苏瑞欢, 等, 2023. 2022年1月8日青海门源M_S6.9地震地表破裂带特征与发震机制[J]. 地球物理学报, 66(1): 229-244.

张博諶, 钱黎, 李涛, 等, 2024. 2024年1月23日新疆乌什M_S7.1地震地质灾害和地表破裂[J]. 地震地质, 46(1): 220-234.

张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑), 33(S1): 12-20.

张培震, 邓起东, 张竹琪, 等, 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学：地球科学, 43(10): 1607-1620.

张培震, 王伟涛, 甘卫军, 等, 2022. 青藏高原的现今构造变形与地球动力过程[J]. 地质学报, 96(10): 3297-3313.

张威, 李明, 姬云平, 等, 2022. 青海门源M6.9地震典型隧道破坏特征分析与启示[J]. 地震工程学报, 44(3): 661-669.

郑文俊, 孙鑫, 袁道阳, 等, 2025. 青藏高原及邻区活动断裂、地震活动及地震构造环境[J]. 地质力学学报, 31(5): 1006-1029.