引用格式：刘雨龙，韩龙飞，姚文倩，等，2026. 利用人工标志线约束 2022 年门源 M_W 6.6 地震的同震离断层变形[J]. 地质力学学报，32（3）：563−580. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026017

Citation: LIU Y L，HAN L F，YAO W Q，et al.，2026. Constraining coseismic off-fault deformation of the 2022 M_W 6.6 Menyuan earthquake using man-made linear markers[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：563−580. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026017

利用人工标志线约束 2022 年门源 M_W 6.6 地震的同震离断层变形

刘雨龙[1]，韩龙飞[1]，姚文倩[1]，刘 静[1]，李振洪[2]，邵延秀[1]，刘小利[3]，陈 璇[1]，孙 杰[4]，贺 亮[1]，尹梓霖[1]

LIU Yulong[1]， HAN Longfei[1]， YAO Wenqian[1]， LIU Jing[1]， LI Zhenhong[2]， SHAO Yanxiu[1]， LIU Xiaoli[3]， CHEN Xuan[1]，SUN Jie[4]，HE Liang[1]，YIN Zilin[1]

1. 天津大学地球系统科学学院，天津 300072；
2. 长安大学地质工程与测绘学院，陕西 西安 710054；
3. 中国地震局地震研究所，湖北 武汉 430071；
4. 河南省地震局，河南 郑州 450016

1. *School of Earth System Science*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*;
2. *College of Geological Engineering and Geomatics*, *Chang' an University*, *Xi'an* 710054, *Shaanxi*, *China*;
3. *Key Laboratory of Earthquake Geodesy*, *Institute of Seismology*, *China Earthquake Administration*, *Wuhan* 430071, *Hubei*, *China*;
4. *Henan Earthquake Agency*, *Zhengzhou* 450016, *Henan*, *China*

Constraining coseismic off-fault deformation of the 2022 M_W 6.6 Menyuan earthquake using man-made linear markers

Abstract: ［**Objective**］Accurate constraints on coseismic surface displacement are essential for revealing earthquake rupture processes, assessing regional seismic hazards, and understanding the partitioning of near-surface deformation. Conventional near-field displacement measurements generally capture only localized deformation along visible rupture zones, potentially underestimating total coseismic displacement by not considering off-fault deformation. Long linear anthropogenic markers crossing rupture zones, such as pasture fences, provide a larger measurement aperture and enable us to quantify total coseismic displacement and evaluate the contribution of off-fault deformation. The 8 January 2022 M_W 6.6 Menyuan earthquake along the Haiyuan fault zone displaced multiple pasture fences across the well-preserved surface ruptures, providing an ideal opportunity to investigate total displacement and off-fault deformation. ［**Methods**］In this study, we utilized unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry to acquire high-resolution aerial images along the entire surface rupture zone of the 2022 Menyuan earthquake and to generate digital orthophoto maps (DOMs) and digital elevation models (DEMs) with spatial resolutions of 2–6 cm. Combined with detailed field investigations, we mapped the coseismic surface rupture at a fine scale and selected 12 groups of long, linear pasture fences crossing the rupture zone to conduct multi-aperture displacement measurements. ［**Results**］The coseismic surface rupture extends for approximately 28 km and consists of two main branches: the southern branch along the Tuolaishan fault and the northern branch along the Lenglongling fault. The rupture zone was divided into four segments from west to east, namely S1 to S4, based on the geometric distribution and structural characteristics of the rupture traces, mainly NE-trending, right-stepping en echelon

基金项目：国家自然科学基金项目（W2411033，42502197，42202232，42272242）；天津市科技计划项目（23JCYBJC01380）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. W2411033, 42502197, 42202232, and 42272242) and the Tianjin Science and Technology Project (Grant No. 23JCYBJC01380).

第一作者：刘雨龙（2000—），男，在读硕士，从事活动构造的研究。Email：liuyl219@163.com

通信作者：姚文倩（1985—），女，博士，讲师，从事断层活动性、构造地貌等方面研究。Email：wenqian_08@163.com

收稿日期：2026−01−30；**修回日期**：2026−05−21；**录用日期**：2026−05−25；**网络出版日期**：2026−05−26；**责任编辑**：范二平

Received：2026−01−30；Revised：2026−05−21；Accepted：2026−05−25；Available Online：2026−05−26；Handling Editor：FAN Erping

tensional-shear cracks, oblique compressional bulges, and mole-track-like deformation. The width of the surface rupture zone varies significantly along strike, reaching a maximum of approximately 160 m in the S3 segment. Except for the relatively wide S3, most rupture sections are mainly concentrated within a narrow width range of 10–30 m, indicating strong control by local fault geometry and rupture branching. Multi-aperture measurements using 12 groups of cross-fault pasture fences reveal that visible displacement within the mapped rupture zone ranges from 0 to 2.8 m, whereas the total coseismic displacement measured across the larger aperture of the fences ranges from 1.2 to 4.1 m. The corresponding proportion of off-fault deformation reaches 27%–76%, indicating that a substantial part of the coseismic deformation was accommodated outside the visible principal rupture traces. The maximum total coseismic displacement, approximately 4.1 ± 0.8 m, occurs in the S3 segment of the Lenglongling Fault near the epicenter, where the mean proportion of off-fault deformation is relatively low at approximately 33%. From S3 to S1 along the Tuolaishan branch westward, the total coseismic displacement gradually decreases to a mean of 1.7 ± 0.5 m, while the mean proportion of off-fault deformation increases significantly to about 55%, showing that deformation became progressively less localized and more widely distributed across the surrounding near-surface materials. [**Conclusions**] Compared with previous near-field measurements, the total coseismic displacements obtained in this study are generally larger. This discrepancy is mainly attributed to the larger measurement aperture provided by the long cross-fault fences, which enabled the capture of a more complete deformation field, including both localized displacement on the visible rupture and distributed off-fault deformation. The 2022 Menyuan earthquake produced a complex surface rupture system composed of the Tuolaishan and Lenglongling fault branches, with clear along-strike variations in rupture geometry, rupture-zone width, and displacement distribution. Multi-aperture measurements using long pasture fences indicate that off-fault deformation accounted for a considerable proportion of the total coseismic displacement, especially in the western branch rupture where deformation was more distributed. The comparison with previous near-field measurements demonstrates that relying only on localized rupture offsets may underestimate the total coseismic displacement. [**Significance**] This study highlights the critical importance of incorporating off-fault deformation into coseismic displacement measurements to prevent underestimating seismic slip in hazard assessments. Furthermore, it demonstrates that using long, linear, anthropogenic markers via high-resolution UAV photogrammetry is an effective, innovative approach for capturing complete near-surface deformation fields along complex strike-slip fault systems.

Keywords: 2022 Menyuan earthquake; surface rupture; coseismic displacement; off-fault deformation; strike-slip fault

摘　要：同震地表位移的准确约束对于揭示地震破裂过程、开展区域地震灾害评估以及理解地表变形分配特征具有重要意义。相较于传统基于近场标志的断层位移测量，跨破裂带长尺度人工线性标志物可在更大测量孔径下记录地表永久变形，为约束总同震位移及讨论离断层变形提供补充证据。2022 年 1 月 8 日青藏高原东北缘海原断裂带上的门源 M_W 6.6 地震形成了清晰的地表破裂，并保存了多条跨断层牧场围栏，为开展此类研究提供了有利条件。文章利用覆盖破裂全段的无人机航拍影像生成了 2～6 cm 高分辨率的数字正射影像和数字高程模型；结合野外调查，对门源地震同震地表破裂进行了精细填图，并选取 12 组跨破裂带的长线性围栏开展多孔径位移测量。结果表明，此次同震地表破裂总长约 28 km，由南（托莱山断裂）、北（冷龙岭断裂）2 支构成，依据其几何结构展布特征可自西向东划分为 4 段（S1 段—S4 段）。地震地表破裂主要表现为近北东向右阶雁列状张剪裂缝及斜列挤压鼓包等。破裂带宽度沿破裂传播方向变化明显，最大宽度约为 160 m，除 S3 段较宽外，其余区段主要集中于 10～30 m。基于跨断层的围栏测量获得的断层上位移为 0～2.8 m，总同震位移量为 1.2～4.1 m，由此得到离断层变形占比为 27%～76%。最大同震位移出现在靠近震中的冷龙岭 S3 段，约 4.1±0.8 m，该段离断层变形占比均值约为 33%；从 S3 段向西同震位移量逐渐减小，而离断层变形量的占比则整体增大，至托莱山分支破裂 S1 段，总同震位移均值为 1.7±0.5 m，离断层变形占比均值达到 55%。此次研究获取的同震位移总变形量较以往近场测量结果偏大，这是由于此次测量孔径涵盖了整体变形范围，因此能捕捉到较为完整的同震位移，由此凸显了纳入离断层变形对完整评估总同震位移与地震灾害风险的重要性。

关键词：2022 门源地震；地表破裂带；同震位移；离断层变形；走滑断层

中图分类号：P315.2; P546　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)03−0563−18

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026017

0　引言

同震地表破裂是上地壳脆性断层累积应变通过地震释放的直观地貌表达。基于震后高分辨率影像的精细填图，能够揭示破裂带的几何形态、变形分布与局部复杂结构等同震地表变形特征，从而为认识地震动态破裂过程提供关键参数约束（Wesnousky, 2006, 2008; Oskin et al., 2012; Rockwell and Klinger, 2013; Klinger et al., 2018; Scott et al., 2018; 刘小利等, 2022; 姚文倩等, 2022）。同震地表变形不仅包括主断层上的局部变形，还包括分布在断层外周围介质中的分布式变形或弥散变形（Antoine et al., 2021, 2022）。这些变形分别发生在不同的空间尺度上，共同勾勒出发生非弹性永久变形的区域（Scott et al., 2018; Barnhart et al., 2020）。地震学研究也证实，强震余震并非主要集中于主震断层面，而是广泛分布于主断层两侧数千米范围的损伤带（Liu et al., 2003）。其中发生在主断层外，由次级断层引发的分布式变形和周围介质中的弥散变形共同构成了离断层变形（off-fault deformation, OFD）。OFD 是一种非弹性变形，在物理上表现为弯曲、颗粒流、刚性块体旋转、次级断层破裂等，不仅影响断层的生长发育过程及流变学特征（Vidale and Li, 2003），也会影响震间应变积累（Lyakhovsky and Ben-Zion, 2008）以及地震传播及动力学演化过程（Ben-Zion and Ampuero, 2009）。

多条走滑断层地表破裂的观测与模拟结果表明（Rockwell, 2002; Milliner et al., 2016; Antoine et al., 2022; 邵延秀等, 2022; Visage et al., 2023; Liu-Zeng et al., 2024），OFD 在总变形中的占比可在 0%～100% 之间变化，且与断层结构成熟度、几何结构复杂性、断层发育程度以及沉积物分布等因素存在系统性关联。如 Dolan and Haravitch（2014）指出，结构更成熟的断层往往累积位移更大，破裂更易局限于主断层，从而表现为较低的 OFD 占比；而 Liu-Zeng et al.（2024）则提出断层走向对同震位移及其弥散程度的影响大于断层成熟度。另一方面，断层几何复杂区（弯曲、阶区、分段连接等）能够显著改变局部应力分布，对破裂传播造成阻碍（King and Nabelek, 1985; Schwartz and Coppersmith, 1984; Wesnousky, 1988），并在局部增强离断层变形的贡献，从而提高 OFD 占比（Gold et al., 2015; Milliner et al., 2016; Scott et al., 2018; Antoine et al., 2021）。此外，先存断层的重复利用可能导致更复杂的断层几何及更大范围的分布式变形（Vallage et al., 2016; Antoine et al., 2021），沉积物类型、覆盖厚度与岩体强度等介质属性亦会对 OFD 的分配产生影响（Zinke et al., 2014）。

目前较为广泛获取 OFD 的方法是利用震前、震后高分辨率影像进行匹配计算，得到总同震位移和断层上位移，基于二者的差值计算（Zinke et al., 2014; Gold et al., 2015; Milliner et al., 2015; Antoine et al., 2021; Han et al., 2023; Liu-Zeng et al., 2024; Han et al., 2024）。该方法可覆盖断层两侧千米量级范围，有利于刻画变形带宽度及 OFD 的空间变化。然而，不同影像分辨率与数据源会造成同一地震 OFD 估算结果显著差异，如 2013 年巴基斯坦 M_W7.7 地震就存在多组不一致研究结论（Zinke et al., 2014; Gold et al., 2015; Antoine et al., 2022）。相较于遥感影像像素匹配方法，野外调查通常基于近场投影线测量位移量，可提供精度较高的断层上变形约束，但往往难以完整覆盖 OFD，从而可能低估总同震位移。为了获取更准确的同震位移，结合高精度影像数据和被地表破裂错断的较长的线性标志物可以作为捕捉离断层变形的替代方法（Rockwell, 2002; 邵延秀等, 2022）。

2022 年 1 月 8 日，青海省海北州门源县发生 M_W 6.6 地震。美国地质调查局（USGS）给定震中为 37.828°N、101.290°E，位于青藏高原东北缘海原断裂带西段冷龙岭断裂与托莱山断裂相交的阶区附近。这是继 1986 年与 2016 年门源 M_S 6.4 地震之后冷龙岭地区发生的又一次强震（Wang et al., 2017; 李振洪等, 2022; Zhu et al., 2022），为典型的走滑型地表破裂过程。此次门源地震的同震地表破裂延伸长度约为 28 km，具有较为明显的双支破裂特征。其北支主破裂沿冷龙岭断裂西段展布，南支次级破裂沿托莱山断裂东段展布，两者总体构成左阶斜列组合（韩帅等, 2022; 袁道阳等, 2023; Xu et al., 2024; Li et al., 2026）。地表破裂特征表现为挤压鼓包、拉张裂缝、剪切裂缝等，地表破裂沿线错断有一系列冲沟、道路与牧场围栏等（潘家伟等, 2022; Li et al., 2023b; Wen et al., 2023; 袁道阳等, 2023）。震后多个研究团队利用围栏、车辙印、冲沟与冻土鼓包等标志进行了野外位移测量，获得的最大位移量为 2.4～

3.1 m、平均位移量为 1.0～1.5 m(韩帅等, 2022; 潘家伟等, 2022; Li et al., 2023b; Niu et al., 2023; Wen et al., 2023; 袁道阳等, 2023)。地球物理学方法反演表明此次地震的滑动主要集中于浅部地壳, 同震位移可达 3.5～4.5 m, 主要集中在 0～8 km 深度范围(Huang et al., 2022; Zhao et al., 2023; Li et al., 2026)。门源震区跨破裂带分布的多条长线性人工标志牧场围栏(部分点位长度超过 300 m), 为约束完整的同震位移提供了充分条件(潘家伟等, 2022; Li et al., 2023b)。基于此, 文章充分利用跨断层长尺度围栏标志, 结合野外调查与高分辨率数字正射影像(DOM)数据, 精确提取围栏位置及其错断位移, 获取不同测量孔径内的同震位移与变形分配特征, 进而刻画沿断层的离断层变形空间变化, 讨论门源 M_W 6.6 地震离断层变形的影响因素与意义。

1 地质构造背景

海原断裂带位于青藏高原东北缘, 长约 1000 km, 是一条重要的大型块体边界左旋走滑断层(Tapponnier and Molnar, 1977; Burchfiel et al., 1991; Avouac and Tapponnier, 1993; Tapponnier et al., 2001; Zhang et al., 2004; Han et al., 2021; Han et al., 2026)。该断裂带沿线发育一系列阶区、弯折与分支等复杂几何结构, 自西向东可划分为哈拉湖段(HLH)、托莱山段(TLS)、冷龙岭段(LLL)、金强河段(JQH)、毛毛山段(MMS)、老虎山段(LHS)及海原段(HYF)(Gaudemer et al., 1995; Liu-Zeng et al., 2007; 图 1)。第四纪晚期以来, 海原断裂带地震活动强烈, 先后发生 1920 年海原 M_W7.9 地震(国家地震局地质研究所和宁夏回族自治区地震局, 1990)、1927 年古浪 M 8.0 地震(Guo et al., 2019)以及 1986 年与 2016 年门源 M_S 6.4 地震(李振洪等, 2022; Zhu et al., 2022)等。此次门源 M_W 6.6 地震震中位于冷龙岭断裂西段与托莱山断裂之间的构造转换位置。门源震区整体地势起伏显著, 以中高山、山前冲洪积平原、河谷阶地及冰缘−冰川地貌为主, 区域内广泛发育山脊、水系、冲沟、冰碛垄和洪积扇等地貌单元。这些地貌标志保存较好, 不仅有利于活动断层展布的识别, 也为位移测量和发震构造分析提供了良好的地貌条件(Lasserre et al., 2002; Guo et al., 2019)。

发震断层冷龙岭断裂位于海原断裂带中西段, 西端与托莱山断裂构成左阶雁列结构, 东端与古浪断裂、金强河断裂在三联点附近相接, 沿祁连山分水岭向西延伸至硫磺沟西侧附近终止, 长约 120 km, 整体走向约 NE110°—115°, 倾向北东。冷龙岭断裂晚第四纪以来以左旋走滑为主, 东段局部亦具有一定逆冲分量; 全新世走滑活动强烈, 错断多条山脊、水系与冰碛垄等地貌标志(Lasserre et al., 2002; Guo et al., 2019)。现有滑动速率估算差异较大, 基于断错冰碛垄和宇宙成因核素测年的结果为(11±3)～(19±5) mm/yr(Lasserre et al., 2002); 基于断错冲沟结合热释光(TL)和放射性碳(^{14}C)得到测年结果为 3.3～4.1 mm/yr 和 6.0±0.8 mm/yr(Gao et al., 2022)。

2 数据和方法

2.1 高精度地形数据的获取与处理

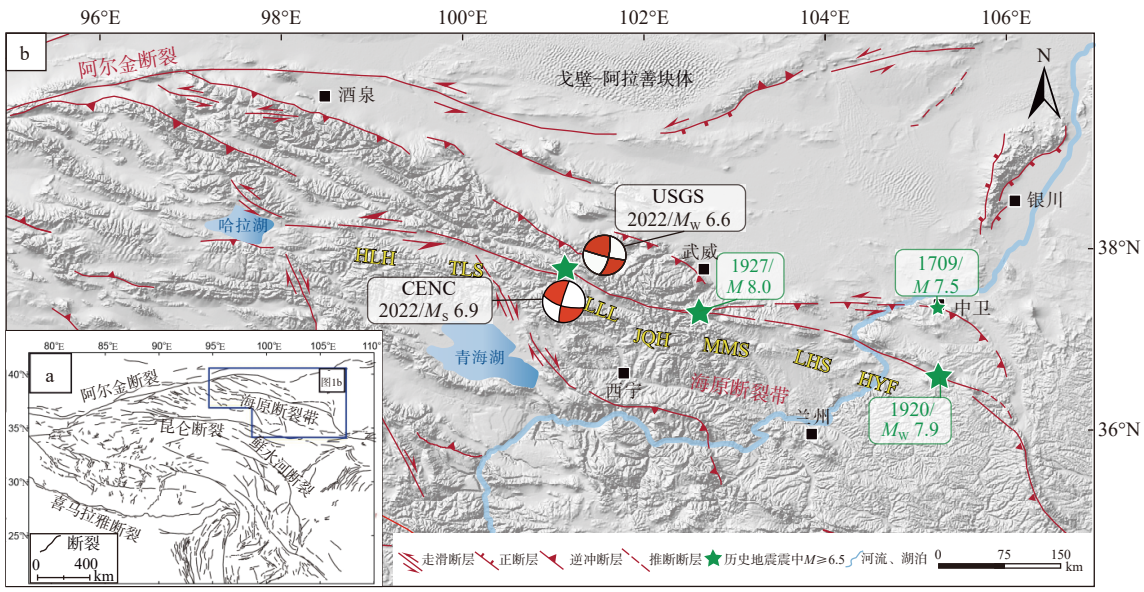
门源地震发生后, 研究团队在震区开展了无人机航空摄影测量与野外调查。野外使用垂直起降固定翼无人机, 搭载 GPS 模块及单反相机, 通过模块与相机的相对位置关系获取航拍照片的精确定位信息。获取了覆盖地表破裂全段的高分辨率航空影像数据与位置信息, 数据廊带总长约 37 km、宽为 1.5～2.0 km, 最终获得覆盖面积约 78 km^2 的高分辨率影像数据, 共 2462 张。

室内处理采用商业软件 Agisoft PhotoScan™ 基于运动结构重建(Structure from Motion, SfM)方法对影像数据进行三维地形重建, 最终输出分辨率达 2～6 cm/pixel 的数字正射影像(DOM)与数字高程模型(DEM)数据。

2.2 离断层变形测量方法

对于走滑型同震地表破裂, 通常是基于断错的天然或人工标志物, 如冲沟、冲洪积扇和车辙印或道路等进行测量, 传统的野外测量一般通过多人协作方式, 利用卷尺等工具获取水平位移, 并将位移标志投影至主破裂带上给出同震走滑位错量。该方法经常会因人为投影误差、地表破裂带复杂性等因素导致测量结果偏差(邵延秀等, 2022; 袁道阳等, 2023), 因此需要结合卫星或无人机影像在更大空间尺度上对同震位移进行补充约束。

震区广泛分布长距离跨断层的牧场围栏, 可以涵盖整个变形范围, 可作为约束总变形量的稳定参照。研究首先在高分辨率 DOM 影像上识别震后围栏轨迹, 假设围栏在震前线性连续且走向一致(图 2a), 地震发生后围栏各位置点相对原始位置发



2022 年门源地震震中及震源机制沙滩球分别引自美国地质调查局 USGS(2022)以及中国地震台网中心 CENC(2022)；HLH—哈拉湖断裂；TLS—托莱山断裂；LLL—冷龙岭断裂；JQH—金强河断裂；MMS—毛毛山断裂；LHS—老虎山断裂；HYF—海原断裂

a—青藏高原主要活动断层分布图(据 Tapponnier et al., 2001 修改)；b—青藏高原东北缘主要活动断层及历史强震(据 Yao et al., 2022a 修改)

图 1　2022 年门源 M_W 6.6 地震区域地震构造背景图

Fig. 1　Regional seismotectonic setting of the 2022 *M*w 6.6 Menyuan earthquake

(a) Distribution map of major active faults on the Tibetan Plateau (modified after Tapponnier et al., 2001); (b) Major active faults and historical strong earthquakes in the northeastern Tibetan Plateau (modified after Yao et al., 2022a).

The epicenter and focal mechanism of the 2022 Menyuan earthquake are from USGS (2022) and CENC (2022); HLH—Halahu Fault; TLS—Tuolaishan Fault; LLL—Lenglongling Fault; JQH—Jinqianghe Fault; MMS—Maomaoshan Fault; LHS—Laohushan Fault; HYF—Haiyuan Fault

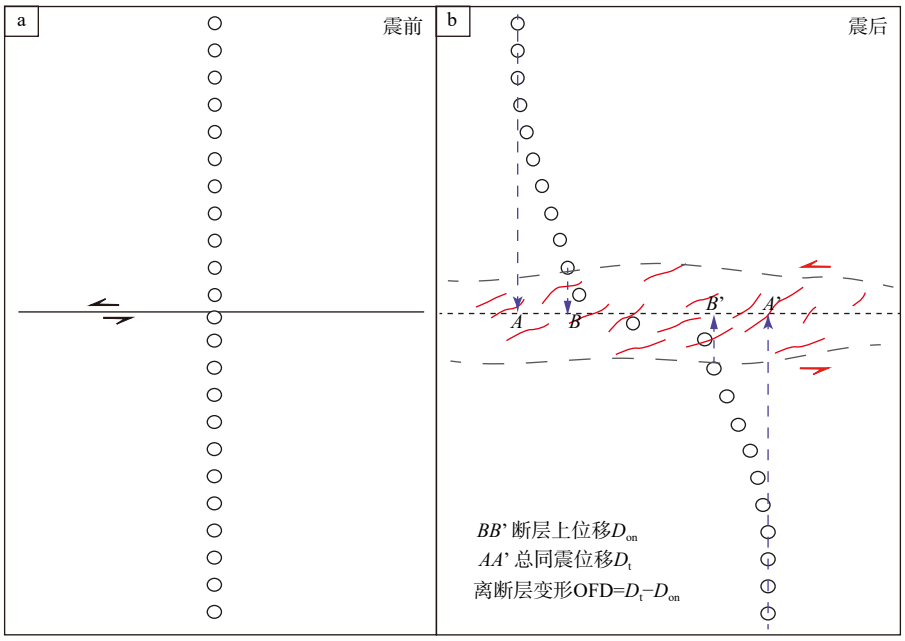
生偏移(图 2b)。一方面，由于围栏在断层两侧延伸较长，可以捕捉更完整的总同震位移，由断层上位移与离断层变形共同组成；另一方面，高分辨率 DOM 可以帮助准确获取断层上变形。因此，借助这些人为线性标志物能够计算不同测量孔径下的位移分布，定量分析离断层变形。

基于野外和高精度影像对围栏进行不同孔径下的同震位移测量步骤如下：①基于野外实测辅助高分辨率 DOM 精准定位线性围栏基座的位置点，确定其坐标信息。②将围栏基座的坐标信息导出，在远离破裂带且趋势相对稳定的区段选取控制点进行走向拟合，拟合过程取决定系数(R^2)最大值对应走向作为围栏初始走向，结合该走向与震后位于破裂带中心的围栏基座点重建震前围栏轨迹。③分别计算每个实际位置点垂直破裂带方向与拟合迹线原始位置点的偏移距离，考虑到不同测点破裂带宽度变化较大(数米至数百米，多数集中在 30～50 m)，文章将位移测量按测量孔径划分为可见破裂带内的断层上位移和跨断层的远场总同震位移 2 类。在可见地表破裂上近断层测量的位移量定义为断层上位移(on-fault deformation, D_{on})，远离可见破裂带经过投影线捕捉到的位移为总同震位移(total deformation, D_t; Antoine et al., 2021, 2022; Liu-Zeng et al., 2024)，二者之间的差值定义为离断层变形(off-fault deformation, OFD)，OFD 与总同震位移的比值即为离断层变形占比。

3　结果

3.1　地表破裂的几何形态

基于高分辨率地形数据和影像，结合野外实地调查，对 2022 年门源 M_W 6.6 地震的地表破裂进行了精细的填图。结果发现，同震地表破裂沿托莱山断裂的东端和冷龙岭断裂的西端分南北 2 支展布，全长约 28 km，其间由宽约 2.5 km 的拉张阶区相接(图 3a)。沿破裂带发育一系列走向近北东的右阶雁列状展布的张剪裂隙以及斜列挤压鼓包，裂缝宽度从几厘米到 2～3 m 不等。依据破裂带几何形态将其划分



a—震前牧场围栏各位置点的初始位置(圆圈为假定初始位置);b—震后牧场围栏迹线上各位置点的实际位置(箭头指示同震错动方向;红色线代表地表破裂;包络线表示地表破裂带宽度)

图 2 围栏迹线上各围栏基座位置点震前分布和同震位移示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the pre-seismic distribution and coseismic deformation of fence-post positions along the fence trace

(a) Assumed initial positions of fence posts at the pasture before the earthquake; (b) Actual post-seismic positions of fence posts along the fence trace, where *AA′* represents the total coseismic displacement D_t, *BB′* represents the near-field displacement D_{on} on the visible rupture zone, red lines represent surface ruptures, and the envelope indicates the width of the surface rupture zone

为 4 段,自西向东包括西南侧沿托莱山断裂上的 S1 段(大西沟段分支破裂),和沿冷龙岭断裂分布的 S2 段、S3 段和 S4 段(图 3b)。

S1 段沿托莱山断裂发育,西起大西沟(37.795°N、101.1199°E),途经羊肠子沟,向东终止于狮子口附近(37.792°N、101.186°E),全长约 6 km。该段主要发育雁列状展布的小型挤压鼓包和张剪性裂隙(图 4a),破裂整体走向近东西向,破裂带裂缝优势方向(Styron and Pagani, 2020)为 48°,裂缝与断层走向夹角约为 42°。

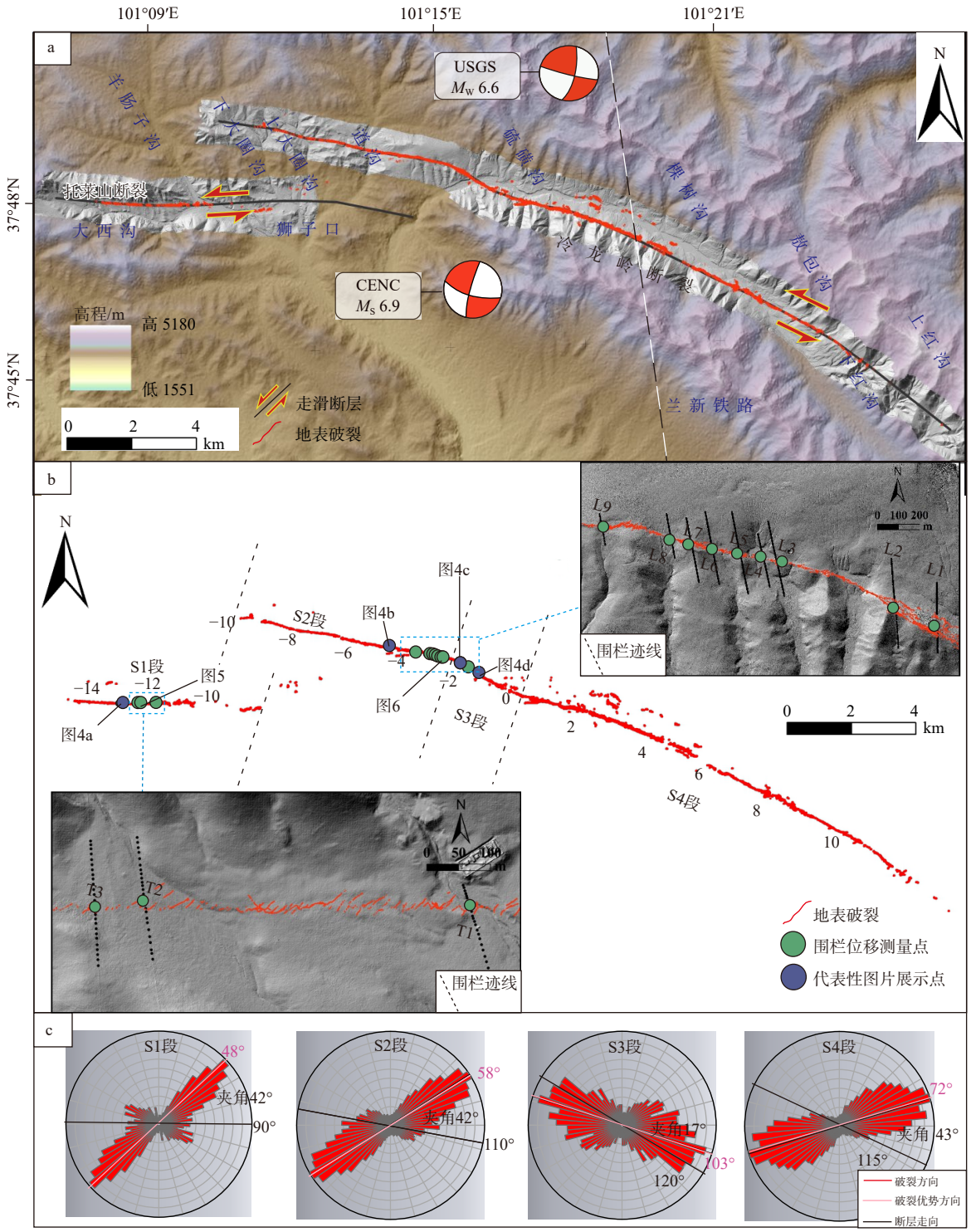
S2 段通过拉张阶区与 S1 段相接,破裂带向东依次穿过下大圈沟、上大圈沟、东至道沟以东约 2 km 处(37.804°N、101.253°E)发生弯曲进入 S3 段。该段全长约 8 km,整体走向近 100°,破裂带裂缝优势方向为 58°,裂缝与断层走向夹角为 42°。主要发育多种典型的走滑地震同震地表形变特征,如拉张裂缝(图 4b)、左旋右阶张剪裂缝、左阶挤压鼓包等。该段分布多条被地震错断的牧场围栏,将在下文详细论述。

继续向东,破裂发生弯曲传播至 S3 段,该段为主破裂中段,长约 2 km,为衔接 S2 段和 S4 段两大平直段的挤压阶区,段内破裂带整体走向 120°,宽度较大约为 160 m。破裂带裂缝优势方向为 103°,裂缝与断层走向夹角为 17°,可见被错断的围栏(图 4c),右阶展布的左旋剪切裂缝(图 4d)和左阶展布的挤压鼓包。

破裂传播至硫磺沟附近(37.794°N、101.276°E)发生弯曲进入 S4 段,向东经过硫磺沟、棵树沟、敖包沟、下红沟,最终终止在上红沟附近(37.739°N、101.409°E),全长约 12 km,走向近 115°,破裂带裂缝优势方向为 72°,裂缝与断层走向夹角为 43°,该段错断标志较少,缺乏可以用来计算离断层变形的跨断层长线性标志。

3.2 同震位移及离断层变形量

长尺度跨断层线性标志物(如围栏、公路等)可为同震位移定量提供稳定约束(邵延秀等, 2022)。研究基于高分辨率正射影像并结合野外调查,选取覆盖震区的 12 条围栏开展精细位移测量(表 1)。通过对震后围栏轨迹进行坐标化提取与长距离拟合,在不同孔径下测量同震位移,包括可见破裂带内和跨越断层的远距离,其中,最长的整体变形带位移测量的孔径超过 350 m,基于不同测量孔径获

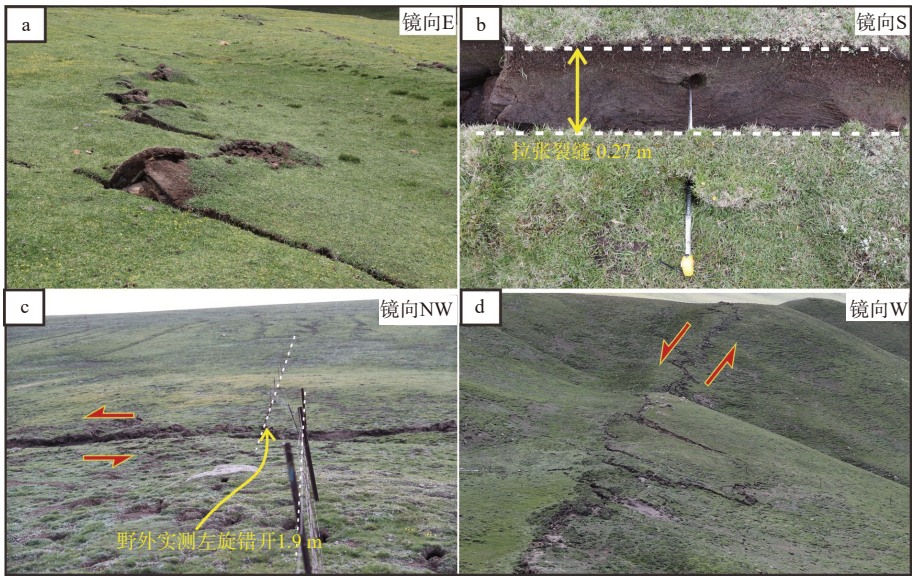


a—同震地表破裂展布图（2022 年门源地震震中及震源机制沙滩球分别引自美国地质调查局 USGS（2022）以及中国地震台网中心 CENC（2022））；b—地表破裂分段图（L1—L9、T1—T3 为围栏编号）；c—各段玫瑰花图（黑线代表破裂带整体走向，粉色线代表裂缝优势方向）

图 3　门源 M_W 6.6 地震同震地表破裂带分布图

Fig. 3　Distribution map of the coseismic surface rupture zone of the Menyuan M_W 6.6 earthquake

(a) General distribution of the coseismic surface ruptures, 2022 Menyuan earthquake data from USGS (2022) and CENC (2022); (b) Detailed surface rupture distribution map (L1–L9 and T1–T3 denote fence numbers); (c) Rose diagrams for each segment, in which black lines represent the overall strike of the rupture zone, and pink lines represent the dominant direction of fractures



a—S1 段雁列状展布的小型挤压鼓包和张剪性裂隙；b—S2 段内的拉张裂缝；c—S3 段内被地震错开的围栏；d—S3 段内右阶展布的左旋剪切裂缝

图 4 门源 M_W 6.6 地震代表性地表破裂特征（具体位置见图 3b）

Fig. 4 Representative coseismic surface rupture characteristics of the M_W 6.6 Menyuan earthquake (see Fig. 3b for specific locations)

(a) Small-scale compressional mole tracks and extensional shear fractures with en echelon distribution within segment S1; (b) Tensional cracks within segment S2; (c) Displaced fence within segment S3; (d) Left-lateral shear fractures with right-stepping within segment S3

表 1 基于围栏测得同震位移沿地表破裂的分布表

Table 1 Distribution of coseismic displacements along the surface rupture measured from fences

围栏编号	坐标位置	距离震中/km	可见破裂带总宽度/m	断层上位移(D_{on})/m	总同震位移(D_t)/m	离断层变形占比
L1	37.801°N、101.256°E	−1.50	100	2.7±0.1	4.0±0.4	33±10%
L2	37.802°N、101.253°E	−1.80	65	2.8±0.1	4.1±0.8	32±13%
L3	37.804°N、101.247°E	−2.40	30	1.8±0.2	3.6±0.5	50±11%
L4	37.804°N、101.246°E	−2.48	10	0.8±0.1	3.3±0.6	76±8%
L5	37.804°N、101.245°E	−2.58	30	2.2±0.2	3.4±0.7	35±15%
L6	37.805°N、101.244°E	−2.71	20	2.1±0.1	3.3±0.6	36±13%
L7	37.805°N、101.243°E	−2.82	20	2.4±0.1	3.3±0.4	27±10%
L8	37.805°N、101.241°E	−2.91	10	2.1±0.1	3.8±0.4	45±7%
L9	37.806°N、101.238°E	−3.27	8	1.3±0.1	3.1±0.2	58±8%
T1	37.793°N、101.149°E	−12.00	20	0.6±0.2	2.1±0.5	71±15%
T2	37.793°N、101.143°E	−12.50	20	1.2±0.1	1.9±0.9	37±23%
T3	37.793°N、101.143°E	−12.60	10	0.5±0.2	1.2±0.1	58±20%

取了可见破裂带上的 D_{on} 以及 D_t。此处优选 3 个点位进行详细说明。

（1）T2 点位（37.7938°N、101.1439°E）

该点位位于托莱山断裂 S1 段上，通过航拍照片可观察到非常清晰的围栏迹线（图 5a）。该点位地表破裂主要表现为少部分拉张裂缝与大量右阶展布的左旋剪切裂缝，地表破裂带宽度为 20 m。研究结合野外和高分辨率正射影像确定出 25 个围栏基座的精确位置，延伸长度约为 210 m。从围栏分布图上可以观察到围栏在地表破裂带的南西侧相对保持连续稳定，而在北西侧发生轻微偏移（图 5b）。通过将相对断层不同距离的位置点逐一投影到原始围栏迹线上，计算每一实测位置点垂直破裂带走向上与原始位置点的相对偏移距离（图 5c），推测最小变形带为 60 m，测

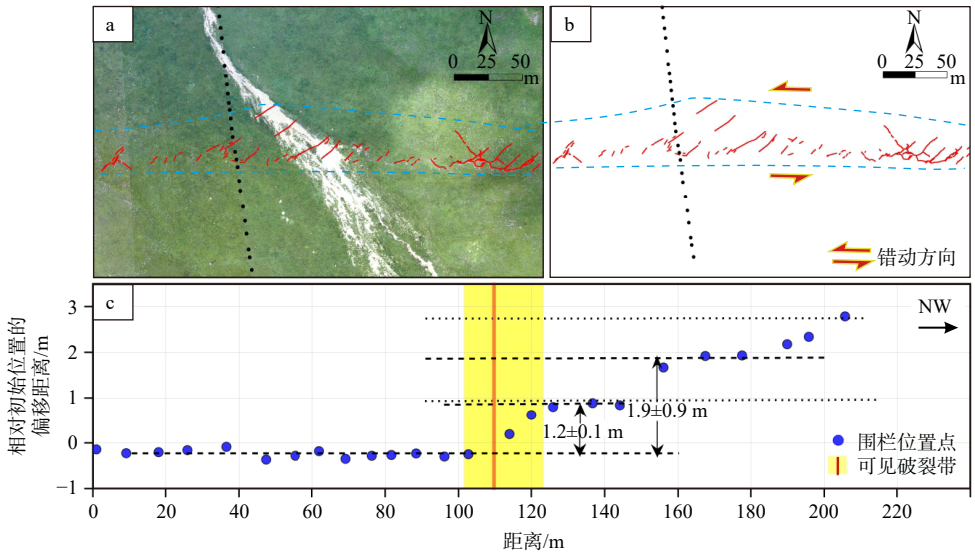


图 5a、5b 中黑色虚线为围栏迹线，红线为地表破裂，蓝色虚线为地表破裂包络线；图 5c 中黑色粗虚线依据拟合的围栏震前原始走向，细虚线为误差范围

a—T2 点位围栏的正射影像分布图；b—地表破裂映射与位置点的投影解译图；c—震后围栏各位置点垂直于地表破裂带走向的位移测量

图 5　T2 点位的同震位移测量图

Fig. 5　Coseismic displacement measurement at site T2

(a) Orthophoto image showing the distribution of the fence at site T2; (b) Interpretation showing surface rupture mapping and the projection of position points; (c) Measurement of post-earthquake fence-point displacements perpendicular to the strike of the surface rupture zone.

In pael a and b, the black dashed lines indicate the fence traces, the red lines indicate surface ruptures, and the blue dashed line indicates the envelope of the surface rupture zone. In panel c, the thick black dashed line represents the fitted original pre-earthquake trend of the fence, and the thin dashed lines indicate the error range.

得 D_t 为 1.9±0.7 m，D_{on} 为 1.2±0.1 m，因此离断层变形为 D_t 与 D_{on} 之差即 0.7 m，该点位 OFD 占比为 37%。

（2）L3 点位（37.8045°N、101.2476°E）

该点位位于冷龙岭断裂上的 S2 段。该点位地表破裂主要表现为右阶展布的剪切裂缝，可见地表破裂带宽度约为 30 m，整体走向为 110°。跨破裂围栏迹线长约 320 m，从围栏分布图（图 6a—6c）上可以观察到围栏在地表破裂带的南西侧相对保持连续稳定。结合野外和高分辨率正射影像选择了震后围栏迹线上的 93 个位置点，将所有位置点沿地表破裂带的主方位角（110°）投影到拟合的原始围栏迹线上，计算每一实测位置点垂直破裂带走向上与原始位置点的相对偏移距离（图 6d），投影到破裂带上得到 D_t 为 3.6±0.5 m；在可见地表破裂带进行测量，得到 D_{on} 只有 1.8±0.2 m，两者相减得到 OFD 为 1.8±0.3 m，计算得到 OFD 占比为 50%。

（3）L2 点位（37.8027°N、101.2539°E）

该点位位于冷龙岭断裂上的主破裂中段 S3 段上，是研究所得到的最大同震位移所在点。该点位地表破裂较为复杂，既有右阶展布的左旋剪切裂缝，还有挤压鼓包与拉张裂缝。结合影像与野外实地（图 7a、7b），测得围栏迹线长约 360 m，在迹线上选择了 73 个位置点，将所有位置点沿地表破裂带的主方位角（110°）投影到拟合的原始围栏迹线上，计算每一实测位置点垂直破裂带走向上与原始位置点的相对偏移距离（图 7c），从远场投影到破裂带上得到 D_t 为 4.1±0.8 m；该点位地表破裂带宽度为 65 m，D_{on} 为 2.8±0.1 m，OFD 为 1.3±0.7 m，计算得到 OFD 占比为 32%。

（4）同震位移沿走向方向的变化

基于错断围栏的测量结果显示，同震位移整体从震中向西沿传播方向逐渐降低，而离断层变形占比呈明显增加的趋势（图 8）。在最靠近震中的冷龙岭断裂 S3 段（L1、L2 点位）具有较大的同震位移，L1 和 L2 点位的 D_t 分别为 4.0±0.4 m 和 4.1±0.8 m，D_{on} 为 2.7±0.1 m 和 2.8±0.1 m，OFD 占比均为 33%。随着破裂向西传播到冷龙岭断裂 S2 段（L3—L9 点位）D_t 为 3.1～3.8 m，仍维持较高水平，该段 OFD 占比为 27%～76%，均值约为 47%。破裂继续向西传播，传播到托莱山分支破裂 S1 段（T1—T3 点位），该段

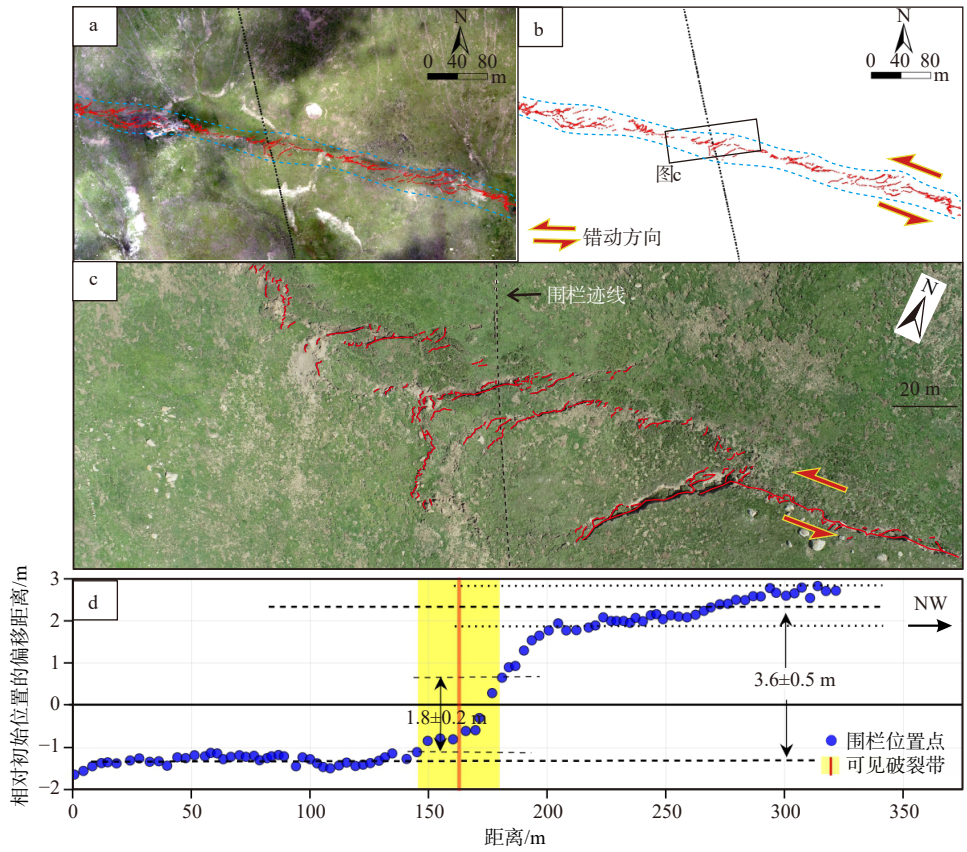


图 6a、6b、6c 中黑色虚线为围栏迹线，红线为地表破裂，蓝色虚线为地表破裂包络线；图 6d 中黑色粗虚线依据为拟合的围栏震前原始走向，细虚线为误差范围

a—围栏基于的正射影像分布图；b—地表破裂映射与位置点的投影解译图；c—基于更高分辨率的 DOM 所描绘的围栏迹线；d—震后围栏各位置点垂直于地表破裂带走向的位移测量示意图

图 6 L3 点位的同震位移测量图

Fig. 6 Coseismic displacement measurement at site L3

(a) Orthophoto showing the distribution of the fence; (b) Interpretation showing surface rupture mapping and the projection of position points; (c) Fence traces mapped from a higher-resolution DOM; (d) Schematic diagram showing the measurement of post-earthquake fence-point displacements perpendicular to the strike of the surface rupture zone

In panels a, b, and c, the black dashed lines indicate the fence traces, the red lines indicate surface ruptures, and the blue dashed line indicates the envelope of the surface rupture zone. In panel d, the thick black dashed line represents the fitted original pre-earthquake trend of the fence, and the thin dashed lines indicate the error range.

D_t 为 1.2～2.1 m，D_{on} 为 0.5～1.2 m，该段 OFD 占比为 47%～71%，均值约为 55%。

4 讨论

4.1 长线性标志测量基准选择对 OFD 计算的影响

此次研究通过对比震后与震前围栏各位置点的空间位置，计算其沿断层走向方向的相对位移，从而获得不同测量孔径下的同震位移。该方法核心假设是震前围栏迹线在研究区内保持线性且走向一致。理想情况下，跨破裂带两侧的围栏在地震前后仅发生相对错动；震后围栏在破裂带两侧远离变形集中区的走向与震前保持一致（图2b），且不存在整体旋转，此时观测到的位移可视为纯粹的相对滑动量。

然而，实际测量显示，破裂带两侧围栏的震后走向并不完全一致（图 9a），其原因可能在于：地表变形主要集中于一定宽度的变形带内，且两侧变形强度存在差异。具体来说，Rockwell（2002）指出，在走滑型地震中，断层两侧的同震位移往往并非镜像分布，而是表现出一侧变形更集中、另一侧更分散的特征。这种不对称性可由多种因素共同控制，包括断层几何形态、近地表介质非均质性以及破裂传

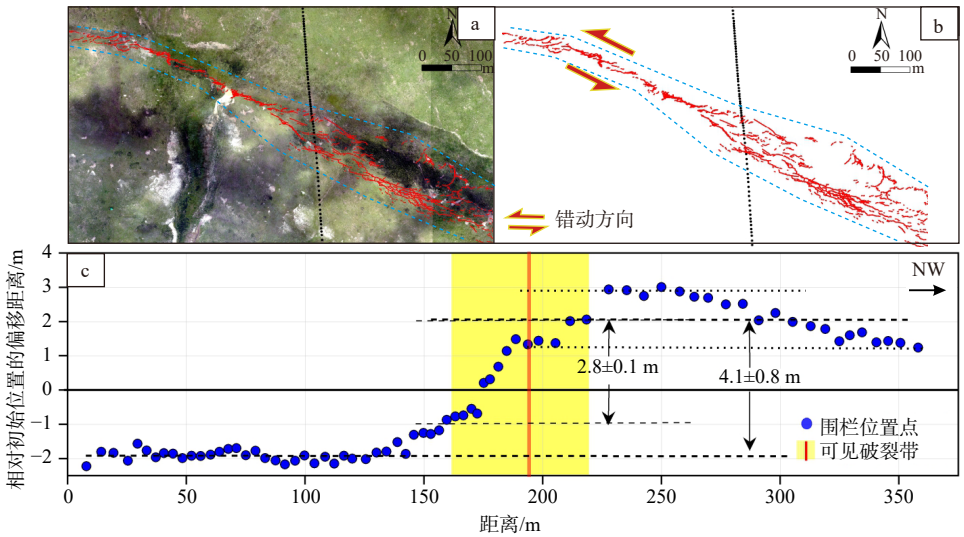


图 7a、7b 中黑色虚线为围栏迹线，红线为地表破裂，蓝色虚线为地表破裂包络线；图 7c 中黑色粗虚线依据为拟合的围栏震前原始走向，细虚线为误差范围

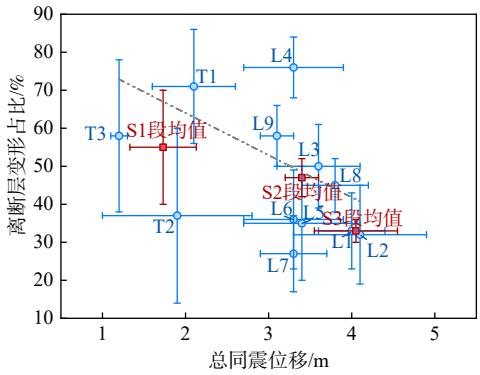
a—L2 点位围栏基于的正射影像分布图 b—地表破裂映射与位置点的投影解译图；c—震后围栏各位置点垂直于地表破裂带走向的位移测量.

图 7　L2 点位的同震位移测量图

Fig. 7　Coseismic displacement measurement at site L2

(a) Orthophoto showing the distribution of the fence at site L2; (b) Interpretation showing surface rupture mapping and the projection of position points; (c) Measurement of post-earthquake fence-point displacements perpendicular to the strike of the surface rupture zone

In panel a and b, the black dashed lines indicate the fence traces, the red lines indicate surface ruptures, and the blue dashed line indicates the envelope of the surface rupture zone. In panel c, the thick black dashed line represents the fitted pre-earthquake original trend of the fence, and the thin dashed lines indicate the error range.



S1 段包含点位 T1—T3，S2 段包含点位 L3—L9，S3 段包含点位 L1、L2；蓝色点为基于围栏的实测点，红色点为 S1—S3 段的测量均值，线段为点位的误差范围，灰色虚线表示线性拟合关系

图 8　总同震位移与离断层变形占比关系图

Fig. 8　Relationship between total coseismic displacement and OFD ratio

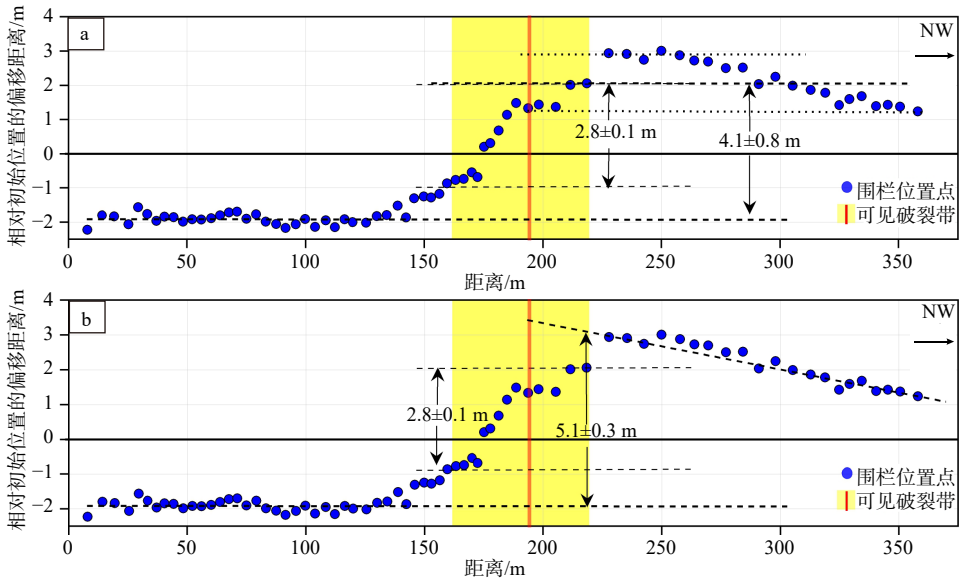
Segment S1 includes sites T1–T3, segment S2 includes sites L3–L9, and segment S3 includes sites L1 and L2. The blue dots represent measured values based on fence offsets; the red dots represent the mean values of segments S1–S3. The line segments indicate the error ranges of the measurements, and the gray dashed line is the linear fit.

播方向等。Yao et al.(2024)指出在复杂断层系统中，地震破裂的分支、偏转与终止会显著影响同震应变的空间分配，使得某一侧离断层变形更为发育，而另一侧则以较为集中的主断层滑动为主。在这种情况下，位于 OFD 较发育一侧的围栏更容易发生走向变化(图 9b)，一侧受控于更强的断层外变形与剪切旋转，而另一侧则主要响应相对集中的断层滑动。

因此，选择恰当的远场投影线是关键。以 L2 点位为例，基于 2 种走向拟合方法得到的 D_t 分别为 4.1±0.8 m 和 5.1±0.3 m。两者在不确定性范围内总体一致，但考虑到走向拟合以及震后围栏可能发生整体旋转带来的系统性偏差，文章采用前者 4.1±0.8 m (图 9a)来计算离断层变形。综上，在利用跨断层长线性标志开展多孔径同震位移测量时，应结合围栏震后几何形态与变形带宽度，合理选择走向拟合与投影策略，以降低由走向差异引入的误差。

4.2　门源地震同震位移分布特征及其对比

此次同震位移结果与以往位移测量成果相比(Li et al., 2023b; Niu et al., 2023; Wen et al., 2023; 图 10)，D_{on} 结果整体较为一致，仅零星点位结果偏小，这可能是由于以往研究团队的结果既包括断层上位移



图中色粗虚线为围栏迹线投影破裂带上的测量示意，细虚线为误差范围，4.1±0.8 m 和 5.1±0.3 m 对应不同测量方法得到的总同震位移

a—L2 点位基于震后围栏走向保持不变假设的位移测量示意图；b—L2 点位基于同震围栏走向发生偏转假设的位移测量示意图

图 9 L2 点位采取不同的围栏走向拟合方式得到的总同震位移结果

Fig. 9 Total displacements obtained by different fitting methods for fence strike at site L2

(a) Schematic diagram of displacement measurements at site L2 under the assumption that the post-earthquake fence orientation remained unchanged; (b) Schematic diagram of displacement measurements at site L2 under the assumption of coseismic deflection of the fence orientation

The thick dashed line in the figure represents the projection of the fence trace on the rupture zone as a measurement indicator, the thin dashed line indicates the error range, and 4.1 ± 0.8 m and 5.1 ± 0.3 m correspond to the total coseismic displacements obtained by different measurement methods.

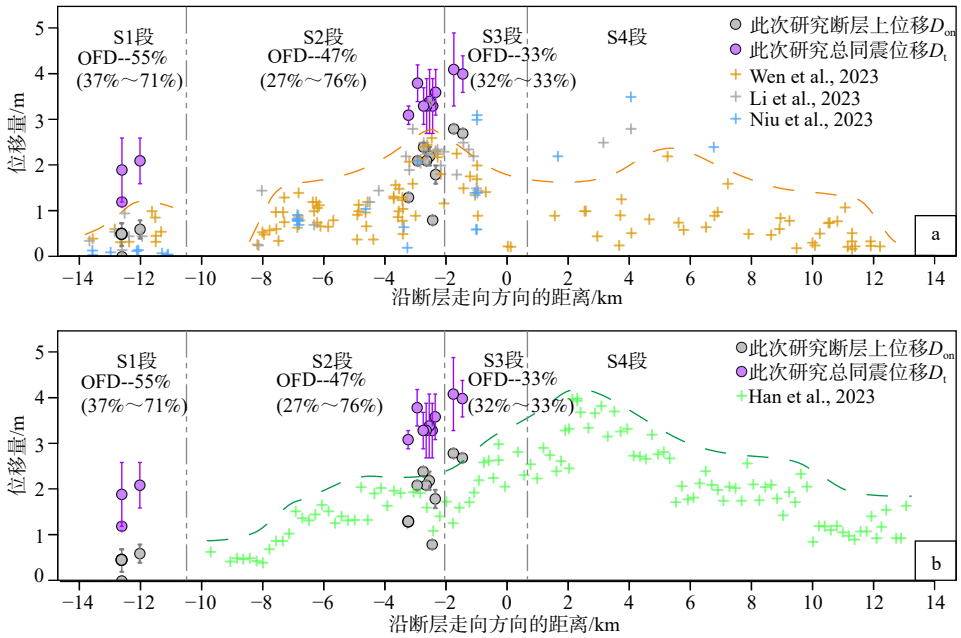
也包括一定范围的离断层变形。研究得到的 D_t 相对以往研究相同点位上的测量结果（Li et al., 2023b; Niu et al., 2023; Wen et al., 2023）来说，整体偏大。这是因为此次研究针对围栏的测量孔径相对更长，部分点位测量孔径超过了 350 m。通过对围栏迹线远场拟合并投影到断层的方法可以更好地约束总同震位移。

Han et al.（2023）利用 GF-7 立体卫星影像的光学像素相关方法，定量刻画了门源地震的同震地表水平变形。从方法原理上看，较大的测量孔径（1～2 km）理论上能够涵盖近场范围内的全部变形，包括断层上及离断层变形。但 Han et al.（2023）的测量值仍低于此次研究在同一区域的结果，这种差异可能是因为在变形带中，水平位移量通常沿垂直于破裂带方向逐渐增大，在距破裂带一定位置达到峰值，随后向未变形区逐渐衰减。此外，光学像素相关的测量精度还受影像空间分辨率，尤其是在变形梯度较大的区域，其测量精度可能不足以完全分辨峰值位移。除此之外，研究进一步对离断层变形占比进行定量计算，能够更完整地量化破裂带的整体变形。

基于跨断层长线性围栏标志物的测量结果，2022 年门源 M_W 6.6 地震的同震位移最大值出现在震中附近的冷龙岭断裂 S3 段，其中 D_{on} 最大值为 2.8±0.1 m，D_t 最大值为 4.1 m。依据全球地震震级与最大同震位移之间的经验关系（Wells and Coppersmith, 1994），计算得到门源 M_W 6.6 地震对应的最大同震位移约为 0.76 m，显著低于此次研究结果（图 11）。这表明在相同震级条件下，门源地震的最大同震位移相对偏大。沿破裂向西传播，总同震位移逐渐减小，至接近西端点的托莱山断裂 S1 段其降至 1.2～2.1 m。类似的“震中附近位移较大、沿破裂传播方向递减”现象亦见于 1968 年美国加州 Borrego Mountain 地震与 1999 年土耳其 Düzce 地震等案例（Wesnousky, 2008）。

4.3 离断层变形的机理分析

断层带内损伤与变形会影响破裂传播速度（Sammis et al., 2009）、传播方向（Shi and Ben-Zion, 2006）、地震辐射特征（Day et al., 2005）以及最终破裂规模（Wesnousky, 2006）。断层系统的长期演化可通过野外断层结构解析（Chester and Chester, 1998）、



圆圈线段代表此次研究的位移测量值与误差范围，黄色和绿色的包络线指示已发表测量结果的最大包络趋势

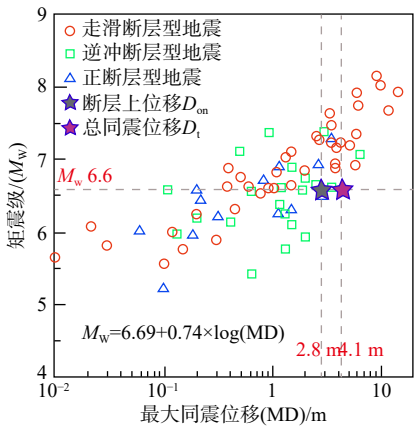
a—研究结果与相关学者基于野外调研（Wen et al., 2023; Li et al., 2023; Niu et al., 2023）的测量结果对比图；b—研究结果与光学影像匹配法 (Han et al., 2023) 的测量结果对比图

图 10　同震位移沿断层走向方向分布图

Fig. 10　Distribution of coseismic displacement along the fault strike

(a) Comparison between the results of this study and previous measurements based on field investigations (Wen et al., 2023; Li et al., 2023; Niu et al., 2023); (b) Comparison between the results of this study and measurements obtained by optical image matching (Han et al., 2023)

Circles with line segments represent the displacement measurements and error ranges of this study; the yellow and green envelopes indicate the maximum envelope trends of published measurements.



经验公式中的最大同震位移（MD）即为断层上位移 D_{on}

图 11　最大同震位移（MD）与矩震级经验公式图（据 Wells and Coppersmith，1994 修改）

Fig. 11　Empirical relationship between maximum coseismic displacement and moment magnitude (modified after Wells and Coppersmith, 1994)

The maximum coseismic displacement in the empirical formula refers to displacement within the visible rupture zone, corresponding to D_{on} in this study

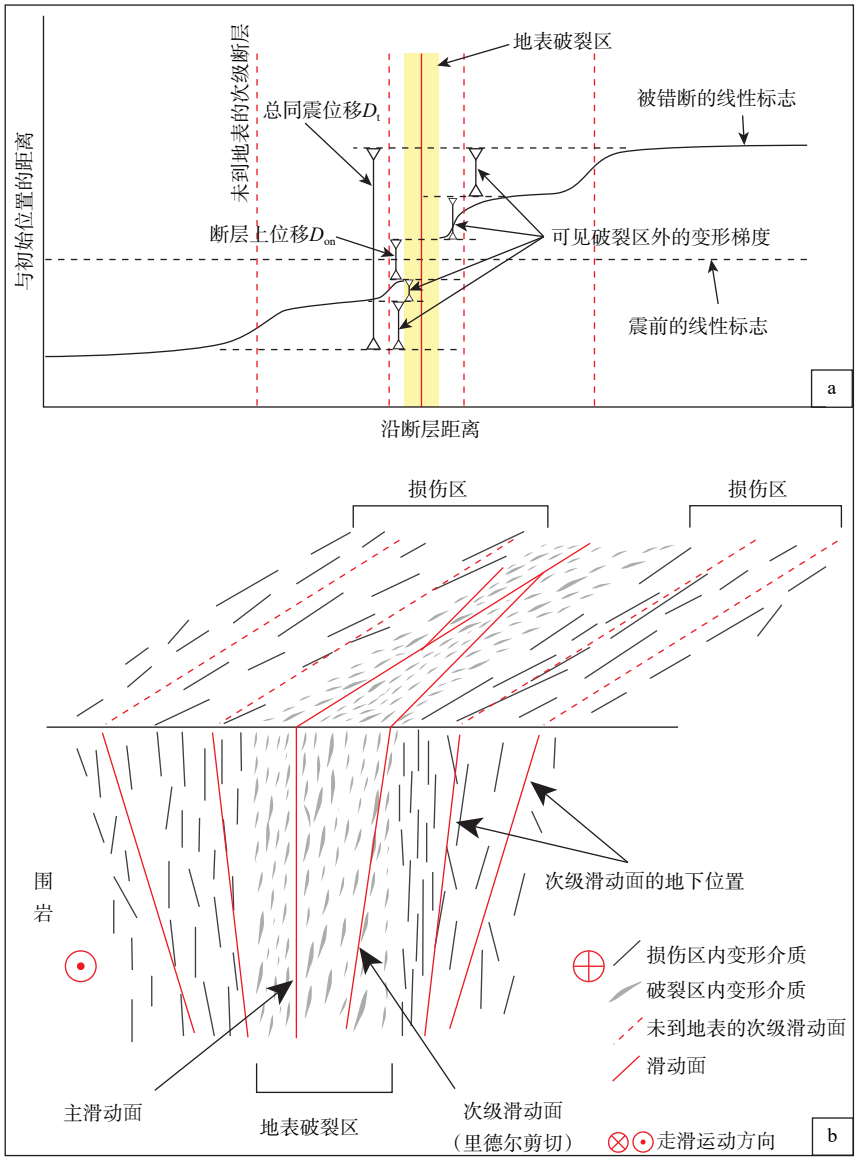
地貌标志位移测定（Titus et al., 2011）、数值模拟（Finzi et al., 2009）与类比实验进行约束。随着多地震周期的累积演化，损伤带趋于局部化并形成更成熟的断层系统（Wesnousky, 1988）。

文章观测到的核心现象是离断层变形的空间分配存在显著的分段差异性：在最靠近震中的冷龙岭断裂 S3 段离断层变形占比均为 33%，随着破裂向西传播到冷龙岭断裂 S2 段离断层变形占比均值约为 47%；破裂继续向西过阶区传播到托莱山断裂分支破裂 S1 段后离断层变形占比均值升高到 55%。这一现象难以单纯归因于近地表介质的差异，而更可能受控于断层系统的结构成熟度与几何复杂性（Dolan and Haravitch, 2014; Milliner et al., 2016）。

冷龙岭断裂作为海原断裂带的主控边界断层，长期滑动速率高，累积位移量大，地质历史上经历了多次大地震破裂（Wang et al., 2017; Guo et al., 2019; 李振洪等，2022; Zhu et al., 2022）。长期的演化使其深部断层面趋于平直光滑，形成了贯通性良好的主滑动区，此类较成熟断层在破裂时能够有效抑制分

支断层的发育，促使应变向主滑动面高度局部化（Wesnousky, 1988），从而表现为较低的离断层变形占比。相比之下，破裂由震中传播至S1段时可能受到与S2段拉张阶区的影响，应力无法集中释放，转而通过次级断层、微块体旋转等方式耗散能量（Nelson and Jones, 1987）。这种复杂的力学过程导致变形在空间上高度弥散，形成了较高的离断层变形占比。这与2013年Balochistan地震（Antoine et al., 2022）、1992年Landers地震（Milliner et al., 2015）和2023年土耳其双震（Liu et al., 2025）中观察到的“几何复杂区OFD增强”现象具有高度的一致性。

结合Faulkner et al.（2003）、Ben-Zion and Sammis（2003）的研究，文章提出离断层变形的概念模型（图12）：断层带内变形主要集中于主地表破裂带内



a—长线性标志的同震位移测量示意（总同震位移包括地表破裂带内及其外部区域的错动）；b—断层带结构的块状图模型（断层上位移主要由主滑动面与次级滑动面所吸收；地下次级滑动面的局部化特征与图12a中所示的多个滑动阶跃相对应）

图12 离断层变形模式图

Fig. 12 Off-fault deformation model

(a) Schematic diagram showing measurements of the displacement of long linear markers caused by coseismic deformation during an earthquake (The total displacement includes slip within and outside the surface rupture zone); (b) Block model of a fault zone structure (The deformation within the surface rupture zone is primarily accommodated by the principal slip plane and secondary slip planes. The localization characteristics of subsurface secondary slip planes correspond to the multiple slip steps shown in panel a)

的主滑动面及其相关次级断层；而离断层变形则主要表现为分布在破裂带外侧、与主滑动面近似平行的地下次级断层及其上覆介质的协同变形。由长线性标志物反演的同震位移（包含离断层变形）进一步表明，同震位移分配严格受控于断层的成熟度与几何结构。类似地表观测到的“滑动亏损”并非真实能量缺失，而是部分同震位移在断层尾端、阶区等构造复杂区，以隐伏离断层变形形式耗散。在此背景下，由次级断层活动及其周围介质分布变形构成的离断层变形，对理解断层滑动行为与几何复杂性具有重要意义，并有助于构建更精确的破裂模型，从而提升地震灾害评估与抗震设防的可靠性（Antoine et al., 2022）。

因此，明确断层上变形与离断层变形的定义及其划分准则至关重要。此次研究基于长线性标志得到的离断层变形可以当作该点位的上限约束值；若将现场可观测到的最大位移简单视为断层带内变形，不同研究者因测量孔径与投影策略差异也可能得到相互不可比的离断层变形。因此，文章建议在相关研究中应明确给出离断层变形的判据（如变形带宽度、位移衰减阈值或几何分区标准），以提高结果的可重复性与可比性。

5　结论

（1）2022 年门源 M_W 6.6 地震形成总长约 28 km 的同震地表破裂，由北侧冷龙岭断裂和南侧托莱山断裂 2 支组成，依据几何展布特征可划分为 4 段（S1 段—S4 段）。地表破裂主要表现为右阶雁列状张剪裂缝、剪切裂缝及挤压鼓包等构造形迹，破裂带宽度沿走向变化明显，最大约 160 m，除 S3 段较宽外，多数区段宽度为 10～30 m。

（2）利用跨破裂带的长基线牧场围栏断错特征，系统测量获得了 12 组跨破裂带长尺度围栏的多孔径测量结果：断层上位移（D_{on}）为 0～2.8 m，总同震位移（D_t）为 1.2～4.1 m，由此获得离断层变形占比为 27%～76%。其中，冷龙岭断裂 S3 段 D_t 最大，约为 4.1±0.8 m，占比均值约为 33%；冷龙岭断裂 S2 段 D_t 为 3.1～3.8 m，占比均值约为 47%；托莱山断裂 S1 段 D_t 降至 1.2～2.1 m，占比均值约为 55%。总体上，总同震位移自震中附近向西逐渐减小，而离断层变形占比则总体增大。

（3）此次研究获得的总同震位移整体高于以往研究结果及经验关系的预测值，主要原因在于测量孔径覆盖了从破裂带内到破裂带外更宽范围的整体变形，既包含断层带内的集中错动，也包含离断层的分布变形贡献。该差异提示，在开展震级评估与灾害分析时，应系统纳入整体变形特征及离断层变形效应，以避免因观测孔径不足而低估地震能量释放与潜在危害。

作者贡献声明： 刘雨龙、韩龙飞、姚文倩负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；刘雨龙、刘静、李振洪、邵延秀、刘小利参与数据分析、研究方法和修改；刘雨龙、陈璇、孙杰、贺亮、尹梓霖参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: LIU Yulong, HAN Longfei, and YAO Wenqian conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; LIU Yulong, LIU Jing, LI Zhenhong, SHAO Yanxiu, and LIU Xiaoli participated in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision; LIU Yulong, CHEN Xuan, SUN Jie, HE Liang, and YIN Zilin participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation. 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

ANTOINE S L, KLINGER Y, DELORME A, et al., 2021. Diffuse deformation and surface faulting distribution from submetric image correlation along the 2019 ridgecrest, California, ruptures[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 111(5): 2275-2302.

ANTOINE S L, KLINGER Y, DELORME A, et al., 2022. Off-fault deformation in regions of complex fault geometries: the 2013, M_W7.7, Baluchistan rupture (Pakistan)[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(11): e2022JB024480.

AVOUAC J P, TAPPONNIER P, 1993. Kinematic model of active deformation in Central Asia[J]. Geophysical Research Letters, 20(10): 895-898.

BARNHART W D, GOLD R D, HOLLINGSWORTH J, 2020. Localized fault-zone dilatancy and surface inelasticity of the 2019 Ridgecrest earthquakes[J]. Nature Geoscience, 13(10): 699-704.

BEN-ZION Y, SAMMIS C G, 2003. Characterization of fault zones[J]. Pure and Applied Geophysics, 160(3-4): 677-715.

BEN-ZION Y, AMPUERO J P, 2009. Seismic radiation from regions sustaining material damage[J]. Geophysical Journal International, 178(3): 1351-1356.

BURCHFIEL B C, ZHANG P Z, WANG Y P, et al., 1991. Geology of the Haiyuan fault zone, Ningxia-Hui Autonomous Region, China, and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 10(6): 1091-1110.

CHESTER F M, CHESTER J S, 1998. Ultracataclasite structure and friction processes of the Punchbowl fault, San Andreas system, California[J]. Tectonophysics, 295(1-2): 199-221.

DAY S M, DALGUER L A, LAPUSTA N, et al., 2005. Comparison of finite difference and boundary integral solutions to three-dimensional spontaneous rupture[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110(B12): B12307.

DOLAN J F, HARAVITCH B D, 2014. How well do surface slip measurements track slip at depth in large strike-slip earthquakes? The importance of fault structural maturity in controlling on-fault slip versus off-fault surface deformation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 388: 38-47.

FAULKNER D R, LEWIS A C, RUTTER E H, 2003. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain[J]. Tectonophysics, 367(3-4): 235-251.

FINZI Y, HEARN E H, BEN-ZION Y, et al., 2009. Structural properties and deformation patterns of evolving strike-slip faults: Numerical simulations incorporating damage rheology[J]. Pure and Applied Geophysics, 166(10-11): 1537-1573.

GAO F, ZIELKE O, HAN Z J, et al., 2022. Faulted landforms, slip-rate, and tectonic implications of the eastern Lenglongling fault, northeastern Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 823: 229195.

GAUDEMER Y, TAPPONNIER P, MEYER B, et al., 1995. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the "Tianzhu gap", on the western Haiyuan Fault, Gansu (China)[J]. Geophysical Journal International, 120(3): 599-645.

GOLD R D, REITMAN N G, BRIGGS R W, et al., 2015. On-and off-fault deformation associated with the September 2013 M_W7.7 Balochistan earthquake: Implications for geologic slip rate measurements[J]. Tectonophysics, 660: 65-78.

GUO P, HAN Z J, MAO Z B, et al., 2019. Paleoearthquakes and rupture behavior of the Lenglongling fault: Implications for seismic hazards of the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(2): 1520-1543.

HAN L F, LIU-ZENG J, YAO W Q, et al., 2021. Coseismic slip gradient at the western terminus of the 1920 Haiyuan M_W7.9 earthquake[J]. Journal of Structural Geology, 152: 104442.

HAN L F, LIU-ZENG J, YAO W Q, et al., 2024. Discontinuous surface ruptures and slip distributions in the epicentral region of the 2021 M_W7.4 Maduo earthquake, China[J]. Remote Sensing, 16(7): 1250.

HAN L F, YAO W Q, LIU-ZENG J, et al., 2026. Reevaluation of geomorphic offsets along the 1920 Haiyuan earthquake rupture, China: a discussion of uncertainties in slip measurements and COPD analyses using high-resolution topography[J]. Tectonophysics, 922: 231071.

HAN N N, ZHANG G H, SHAN X J, et al., 2023. Coseismic surface horizontal deformation of the 2022 M_W6.6 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_S6.9 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)

HUANG C C, ZHANG G H, ZHAO D Z, et al., 2022. Rupture process of the 2022 M_W6.6 Menyuan, China, earthquake from joint inversion of accelerogram data and InSAR measurements[J]. Remote Sensing, 14(20): 5104.

IGCEA, NBCEA, 1990. Active Haiyuan fault zone monograph[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

KING G, NÁBĚLEK J, 1985. Role of fault bends in the initiation and termination of earthquake rupture[J]. Science, 228(4702): 984-987.

KLINGER Y, OKUBO K, VALLAGE A, et al., 2018. Earthquake damage patterns resolve complex rupture processes[J]. Geophysical Research Letters, 45(19): 10279-10287.

LASSERRE C, GAUDEMER Y, TAPPONNIER P, et al. , 2002. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B11): ETG 4-1-ETG 4-15.

LI J, FANG L H, ZHANG L, et al., 2026. Coseismic rupture and aftershock migration governed by multiple fault geometries: the 2022 M_W6.6 Menyuan Earthquake[J]. Seismological Research Letters, 97(2A): 832-844.

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 Z H, HAN B Q, LIU Z J, et al., 2022. Source parameters and slip distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai earthquakes constrained by InSAR observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 47(6): 887-897. (in Chinese with English abstract)

LIU J, SIEH K, HAUKSSON E, 2003. A structural interpretation of the aftershock "cloud" of the 1992 M_W7.3 Landers earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(3): 1333-1344.

LIU J H, JÓNSSON S, LI X, et al., 2025. Extensive off-fault damage around the 2023 Kahramanmaraş earthquake surface ruptures[J]. Nature Communications, 16(1): 1286.

LIU X L, XIA T, LIU J, et al., 2022. Distributed characteristics of the surface deformations associated with the 2021 M_W7.4 Madoi earthquake, Qinghai, China[J]. Seismology and Geology, 44(2): 461-483. (in Chinese with English abstract)

LIU-ZENG J, KLINGER Y, XU X, et al., 2007. Millennial recurrence of large earthquakes on the Haiyuan fault near Songshan, Gansu Province, China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(1B): 14-

34.

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

LYAKHOVSKY V, BEN-ZION Y, 2008. Scaling relations of earthquakes and aseismic deformation in a damage rheology model[J]. Geophysical Journal International, 172(2): 651-662.

MILLINER C W D, DOLAN J F, HOLLINGSWORTH J, et al., 2015. Quantifying near-field and off-fault deformation patterns of the 1992 M_w 7.3 Landers earthquake[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 16(5): 1577-1598.

MILLINER C W D, DOLAN J F, HOLLINGSWORTH J, et al., 2016. Comparison of coseismic near-field and off-fault surface deformation patterns of the 1992 M_W 7.3 Landers and 1999 M_W 7.1 Hector Mine earthquakes: implications for controls on the distribution of surface strain[J]. Geophysical Research Letters, 43(19): 10115-10124.

NELSON M R, JONES C H, 1987. Paleomagnetism and crustal rotations along a shear zone, Las Vegas Range, southern Nevada[J]. Tectonics, 6(1): 13-33.

NIU P F, HAN Z J, LI K C, et al., 2023. The 2022 M_W6.7 Menyuan earthquake on the northeastern margin of the Tibetan Plateau, China: complex surface ruptures and large slip[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 113(3): 976-996.

OSKIN M E, ARROWSMITH J R, CORONA A H, et al., 2012. Near-field deformation from the El Mayor–Cucapah earthquake revealed by differential LiDAR[J]. Science, 335(6069): 702-705.

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)

ROCKWELL T K, 2002. Lateral offsets on surveyed cultural features resulting from the 1999 Izmit and Duzce earthquakes, Turkey[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(1): 79-94.

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.

SAMMIS C G, ROSAKIS A J, BHAT H S, 2009. Effects of off-fault damage on earthquake rupture propagation: experimental studies[J]. Pure and Applied Geophysics, 166(10-11): 1629-1648.

SCHWARTZ D P, COPPERSMITH K J, 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B7): 5681-5698.

SCOTT C P, ARROWSMITH J R, NISSEN E, et al., 2018. The *M*7 2016 Kumamoto, Japan, earthquake: 3-D deformation along the fault and within the damage zone constrained from differential lidar topography[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(7): 6138-6155.

SHAO Y X, LIU J, GAO Y P, et al., 2022. Coseismic displacement measurement and distributed deformation characterization: a case of 2021 M_W 7.4 Madoi earthquake[J]. Seismology and Geology, 44(2): 506-523. (in Chinese with English abstract)

SHI Z Q, BEN-ZION Y, 2006. Dynamic rupture on a bimaterial interface governed by slip-weakening friction[J]. Geophysical Journal International, 165(2): 469-484.

STYRON R, PAGANI M, 2020. The GEM global active faults database[J]. Earthquake Spectra, 36(S1): 160-180.

TAPPONNIER P, MOLNAR P, 1977. Active faulting and tectonics in China[J]. Journal of Geophysical Research, 82(20): 2905-2930.

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

TITUS S J, DYSON M, DEMETS C, et al., 2011. Geologic versus geodetic deformation adjacent to the San Andreas fault, central California[J]. Geological Society of America Bulletin, 123(5-6): 794-820.

VALLAGE A, KLINGER Y, LACASSIN R, et al., 2016. Geological structures control on earthquake ruptures: the M_W7.7, 2013, Balochistan earthquake, Pakistan[J]. Geophysical Research Letters, 43(19): 10155-10163.

VIDALE J E, LI Y G, 2003. Damage to the shallow Landers fault from the nearby Hector Mine earthquake[J]. Nature, 421(6922): 524-526.

VISAGE S, SOULOUMIAC P, CUBAS N, et al., 2023. Evolution of the off-fault deformation of strike-slip faults in a sand-box experiment[J]. Tectonophysics, 847: 229704.

WANG H, LIU-ZENG J, NG A H M, et al., 2017. Sentinel-1 observations of the 2016 Menyuan earthquake: a buried reverse event linked to the left-lateral Haiyuan fault[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 61: 14-21.

WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.

WEN Y M, YUAN D Y, XIE H, et al., 2023. Typical fine structure and seismogenic mechanism analysis of the surface rupture of the 2022 Menyuan M_W 6.7 earthquake[J]. Remote Sensing, 15(18): 4375.

WESNOUSKY S G, 1988. Seismological and structural evolution of strike-slip faults[J]. Nature, 335(6188): 340-343.

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.

XU D Y, LI Z B, ZHANG Z G, et al., 2024. The 2022 M_W 6.6 Menyuan earthquake: an early-terminated runaway rupture by the complex fault geometry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 638: 118746.

YAO W Q, LIU-ZENG J, KLINGER Y, et al., 2022. Late Quaternary slip rate of the Zihong Shan branch and its implications for strain partitioning along the Haiyuan fault, northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(5): e2021JB023162.

YAO W Q, WANG Z J, LIU 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)

YAO W Q, LIU-ZENG J, SHI X H, et al., 2024. Rupture branching, propagation, and termination at the eastern end of the 2021 M_W 7.4 Maduo earthquake, northern Tibetan plateau[J]. Tectonophysics, 876: 230262.

YUAN D Y, XIE H, SU R H, et al., 2023. Characteristics of co-seismic surface rupture zone of Menyuan M_S6.9 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)

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.

ZHAO Q, JIANG F Y, ZHU L Y, et al., 2023. Synthetic aperture radar interferometry–based coseismic deformation and slip distribution of the 2022 Menyuan M_S6.9 earthquake in Qinghai, China[J]. Geodesy and Geodynamics, 14(6): 541-550.

ZHU L Y, JI L Y, LIU C J, et al., 2022. The 8 January 2022, Menyuan earthquake in Qinghai, China: a representative event in the Qilian-Haiyuan fault zone observed using Sentinel-1 SAR images[J]. Remote Sensing, 14(23): 6078.

ZINKE R, HOLLINGSWORTH J, DOLAN J F, 2014. Surface slip and off-fault deformation patterns in the 2013 M_w 7.7 Balochistan, Pakistan earthquake: Implications for controls on the distribution of near-surface coseismic slip[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15(12): 5034-5050.

附中文参考文献

国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局, 1990. 海原活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社.

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.

李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等, 2022. InSAR数据约束下2016年和2022年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 47(6): 887-897.

刘小利, 夏涛, 刘静, 等, 2022. 2021年青海玛多M_W7.4地震分布式同震地表裂缝特征[J]. 地震地质, 44(2): 461-483.

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.

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.