引用格式：刘富财，潘家伟，李海兵，等，2026. 青藏高原中部 1951 年崩错 *M* 8.0 地震同震地表破裂和发震构造背景[J]. 地质力学学报，32（3）：528−544. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026016

Citation: LIU F C，PAN J W，LI H B，et al.，2026. Coseismic surface rupture and seismogenic background of the 1951 *M* 8.0 Beng Co earthquake in the central Tibetan Plateau[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：528−544. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026016

青藏高原中部 1951 年崩错 *M* 8.0 地震同震地表破裂和发震构造背景

刘富财[1,2,3]，潘家伟[1,2,3,4]，李海兵[1,2,3,4]，Marie-Luce Chevalier[1,2,3,4]，孙知明[5]，江晨轶[1,2]，张斯琪[1,2]

LIU Fucai[1,2,3]，PAN Jiawei[1,2,3,4]，LI Haibing[1,2,3,4]，CHEVALIER Marie-Luce[1,2,3,4]，SUN Zhiming[5]，JIANG Chenyi[1,2]，ZHANG Siqi[1,2]

1. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037；
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. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室，北京 100094；
5. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081

1. *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *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. *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration*, *Beijing* 100094, *China*;
5. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*

Coseismic surface rupture and seismogenic background of the 1951 *M* 8.0 Beng Co earthquake in the central Tibetan Plateau

Abstract: ［**Objective**］The coseismic surface rupture formed by an earthquake is the most obvious geomorphological evidence of fault activity. Its spatial distribution and deformation characteristics record essential information about seismic ruptures and fault motion. This information not only aids in understanding the earthquake rupture process and seismogenic mechanism but also contributes significantly to a deeper comprehension of fault evolution and crustal deformation. Therefore, it is of great importance to promptly investigate coseismic surface rupture zones and acquire high-precision geomorphological data.［**Methods**］The November 18, 1951 *M* 8.0 Beng Co earthquake in central Tibet ruptured the Beng Co fault and produced a well-preserved surface rupture zone. We obtained high-precision images by integrating field investigations with high-resolution orthomosaic images and digital elevation models (DEMs) derived from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery based on the Structure from Motion (SfM) method. We measured both coseismic and cumulative

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20240100703）；国家自然科学基金项目（42372274，42325207）；国家重点研发项目（2023YFC3012003）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0901）

This research was financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20240100703), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42372274 and 42325207), the National Key Research & Development Program (Grant No. 2023YFC3012003), and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) of the Science and Technology of China (Grant No. 2019QZKK0901).

第一作者：刘富财（1995—），男，博士，从事活动构造相关研究。Email：liufucai1995@163.com

通信作者：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

收稿日期：2026−01−29；**修回日期**：2026−05−20；**录用日期**：2026−05−22；**网络出版日期**：2026−05−22；**责任编辑**：王婧

Received：2026−01−29；Revised：2026−05−20；Accepted：2026−05−22；Available Online：2026−05−22；Handling Editor：WANG Jing

displacements along the rupture zone to examine the kinematic characteristics of the Beng Co fault and the seismogenic background of the Beng Co earthquake. [**Results and Conclusions**] The earthquake ruptured the eastern segment of the Beng Co fault, forming an approximately 90-km-long coseismic surface rupture zone with an overall strike of 120°. A series of right-lateral offset gullies/terraces, push-ups, and pull-aparts along the rupture zone reveals that the Beng Co fault is an active right-lateral strike-slip fault. Cumulative offset probability distribution (COPD) analysis suggests that large earthquakes have occurred repeatedly along this fault and have been fairly regular in terms of slip accumulation, with a typical lateral slip of ～4.0 m. The Beng Co earthquake occurred as a direct response to the fault's accommodation of regional extrusion deformation caused by the rapid eastward movement of the eastern Qiangtang block. [**Significance**] This work not only facilitates the timely preservation of high-resolution 3D data of the coseismic surface rupture associated with the Beng Co earthquake but also provides a basis for studying tectonic deformation and assessing seismic hazards in central Tibet.

Keywords: M 8.0 Beng Co earthquake; coseismic surface rupture; cumulative offset probability distribution; central Tibetan Plateau; seismogenic background

摘　要：地震形成的地表破裂带是断层活动最为直观的地貌证据，其空间展布及形变特征记录着地震破裂和断层运动的信息。这些信息不仅有助于认识地震破裂过程和发震机制，而且对深入理解断层演化和地壳变形具有重要意义。因此，及时开展同震地表破裂带调查并采集和保存其高精度地形地貌数据尤为重要。1951 年 11 月 18 日青藏高原中部发生的崩错 M 8.0 地震，沿崩错断裂形成了至今仍保存较好的地表破裂。采用无人机运动恢复结构（Structure from Motion，SfM）三维建模技术，获取了沿破裂带厘米级分辨率正射影像和数字高程模型；结合野外实地调查，获得了崩错地震精细的同震破裂分布图像。在此基础上，通过累积位移概率密度分布（Cumulative Offset Probability Distribution，COPD）方法分析了该断裂的历史地震复发行为，并讨论了崩错断裂的运动学特征和此次地震的发震背景。结果表明：此次地震使崩错断裂东段发生破裂，形成了长约 90 km、总体走向 120°的同震地表破裂带。沿破裂带发育的右行位错冲沟/阶地、挤压鼓包、地震陷坑等地震地貌显示，崩错断裂是以右行走滑为主的活动断裂。COPD 统计结果进一步揭示，大地震沿崩错断裂反复发生，每次地震产生的特征位移为～4 m。崩错地震的发生是东羌塘地壳物质向东运移背景下，崩错断裂调节区域挤出变形的直接响应。研究不仅记录了崩错地震同震地表破裂的高分辨率三维数据，也为高原中部构造变形研究和地震危险性评估提供了依据。

关键词：崩错 M 8.0 地震；同震地表破裂；累积位移概率分布；青藏高原中部；发震背景

中图分类号：P315; P546　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)03−0528−17

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026016

0　引言

据统计，陆内约半数 6 级地震可形成地表破裂，8 级以上的地震则 100% 发育地表破裂（Biasi and Weldon, 2006）。在中国境内，特别是青藏高原地区，一般 6.5 级以上的强震才会产生地表破裂（邓起东等，1992），例如 2001 年昆仑山口 M_W 7.8 地震（Klinger et al., 2005）、2008 年汶川 M_S 8.0 地震（李海兵等，2008）、2021 年玛多 M_S 7.4 地震（潘家伟等，2021）、2022 年门源 M_S 6.9 地震（潘家伟等，2022）、2025 年定日 M_W 7.1 地震（刘富财等，2025）等。地震形成的地表破裂带是断层活动最为直观的地貌证据，其空间展布及形变特征记录着地震破裂和断层运动的信息。这些信息不仅有助于认识地震破裂过程和发震机制，也对深入理解断层演化过程和地壳变形具有重要意义（Kaneda et al., 2008; Quigley et al., 2012; Pan et al., 2014; Ren and Zhang, 2019）。由于地表破裂带一般只在震级较大的地震中才能形成，且形成后受自然侵蚀与人工改造影响，破裂的几何形态及展布特征会逐渐模糊，因此及时、详细地记录破裂带的几何形态和变形特征至关重要。

青藏高原的形成是新生代时期印度−欧亚板块碰撞和持续挤压造就的全球最壮观的地质事件（Molnar and Tapponnier, 1975; Harrison et al., 1992; Royden et al., 2008）。青藏高原内部和周缘发育的一系列活动断裂不仅与高原构造演化相关，并且控制着强震的发生（Molnar and Tapponnier, 1978; Ni and York, 1978; 李

海兵等, 2021; 张培震等, 2022)。1951 年 11 月 18 日, 西藏当雄地区发生了强烈地震。不同来源给出的震中和震级存在差异: 中国地震目录记录的震级为 M 8.0, 震中位于 31.1°N、91.4°E(顾功叙, 1983); U.S. Geological Survey(1951)记录的矩震级为 M_W 7.7, 震中位置为 31.056°N、91.261°E, 震源深度为 30 km。由于震区位于青藏高原中部高海拔地区, 自然侵蚀较弱且人类活动影响较小, 此次地震形成的破裂带至今保存较好。20 世纪 80 年代的调查结果显示, 此次强震的发震断层为羌塘地块与拉萨地块之间的崩错断裂(韩同林, 1983; Armijo et al., 1989), 但对地表破裂带长度的认识存在争议(～100 km, 韩同林, 1983; ～85 km, 张德成, 1988; ～90 km, Armijo et al., 1989)。

崩错断裂作为羌塘地块和拉萨地块活动构造边界中的重要组成断裂, 精细刻画其地表破裂细节和三维变形特征, 不仅是深入提取发震断层运动学信息的关键, 也为进一步理解青藏高原晚新生代构造演化过程中羌塘地壳物质向东运移与拉萨地块伸展变形之间的相互作用提供重要的科学依据。因此, 文章采用近年来广泛应用的 SfM 方法(Johnson et al., 2014; Liu-Zeng et al., 2022; 江晨轶等, 2024), 获取了崩错地震地表破裂带厘米级分辨率三维地貌数据。在此基础上, 对地表破裂进行了精细解译, 并沿破裂带开展了详细的野外追踪调查。获得了 1951 年崩错 8.0 级地震的同震地表破裂分布图像, 系统测量了沿线的同震位移量和累积位移量, 分析了发震断层运动学特征和发震背景。该工作不仅及时保存了大陆内部大地震形成的同震地表破裂高分辨率三维数据, 而且为青藏高原中部断裂活动习性研究和区域强震风险分析提供科学数据支撑。

1 区域活动构造背景

青藏高原在近南北向挤压和东西向伸展的构造背景下, 周缘发育大型逆冲推覆构造和走滑断裂带, 而在内部发育一系列近南北走向地堑和北东/北西向走滑断裂(图 1)。这些正断构造和走滑构造被认为是高原内部最年轻的构造变形(Armijo et al., 1986; Taylor et al., 2003; Kapp et al., 2008; Elliott et al., 2010)。由北西—南东向的喀喇昆仑断裂、格仁错断裂、崩错断裂和嘉黎断裂组成的喀喇昆仑−嘉黎断裂带, 在块体挤出模式中被视为青藏高原主体挤出的南边界(Tapponnier et al., 1982; Armijo et al., 1989)。近期研究表明, 雁行状排列的格仁错、崩错等右行走滑断裂是高原中部 V 型共轭走滑断裂系中的南半部分, 与北东向左行走滑断裂(如日干配错断裂、其香错断裂)共同调节青藏高原内部的南北向挤压和东西向伸展变形(Taylor et al., 2003; Taylor and Peltzer, 2006; Taylor and Yin, 2009; Yin and Taylor, 2011)。

崩错断裂从色林错东北部向南东方向延伸至古露地堑北部, 是一条长约 230 km, 走向 110°～120° 的右行走滑断裂(图 2)。大致以达如错地堑南侧为界, 崩错断裂可划分为东段和西段: 西段位于达如错以西; 东段则进一步分为 2 条近于平行、呈右阶排列的分支断层, 分别位于崩错拉分盆地的北缘与南缘(Li et al., 2022)。该断裂与北侧的其香错断裂, 以及二者围限楔体内部的东巧断裂、懂错地堑正断裂和安多地堑正断裂等, 共同组成崩错共轭走滑断裂系(Taylor et al., 2003; Yin and Taylor, 2011; 图 2)。最新的 InSAR 观测结果显示, 崩错断裂右行走滑速率约为 3 mm/a (Tian et al., 2026), 与近年来基于地质学方法和大地测量学方法获得结果基本一致(Garthwaite et al., 2013; Li et al., 2020, 2022), 但低于早期研究获得的约 10～20 mm/a 的走滑速率 (Armijo et al., 1989; 吴中海等, 2006)。1951 年 11 月 18 日, 崩错 M 8.0 地震(M_W 7.7, USGS)沿崩错断裂东段发生破裂, 形成了长 85～100 km 的同震地表破裂带。9 个月后, 与崩错断裂相连的古露地堑内再次发生 M_W 7.4(USGS)强震(图 2)。

2 方法

野外调查、高精度卫星遥感影像解译以及低空无人机摄影测量等被广泛应用于震后同震地表破裂数据获取(潘家伟等, 2021; Liu-Zeng et al., 2022; 邵延秀等, 2025)。为全面、细致地获取崩错地震的同震地表破裂数据, 采取卫星遥感影像解译、无人机摄影测量与野外现场调查相结合的策略。

基于 Google Earth 和 Esri World Imagery 上的高分辨率卫星影像解译, 初步判断同震地表破裂的延伸范围, 并据此确定总长约 100 km 的飞行条带和野外作业范围。2022 年 12 月 28 日—2023 年 1 月 6 日, 利用大疆经纬 M300 无人机(搭载禅思 L1 镜头)对 1951 年崩错地震地表破裂带进行了分块航拍。每块航拍区域长度～5 km, 宽度～1 km。为保证三维

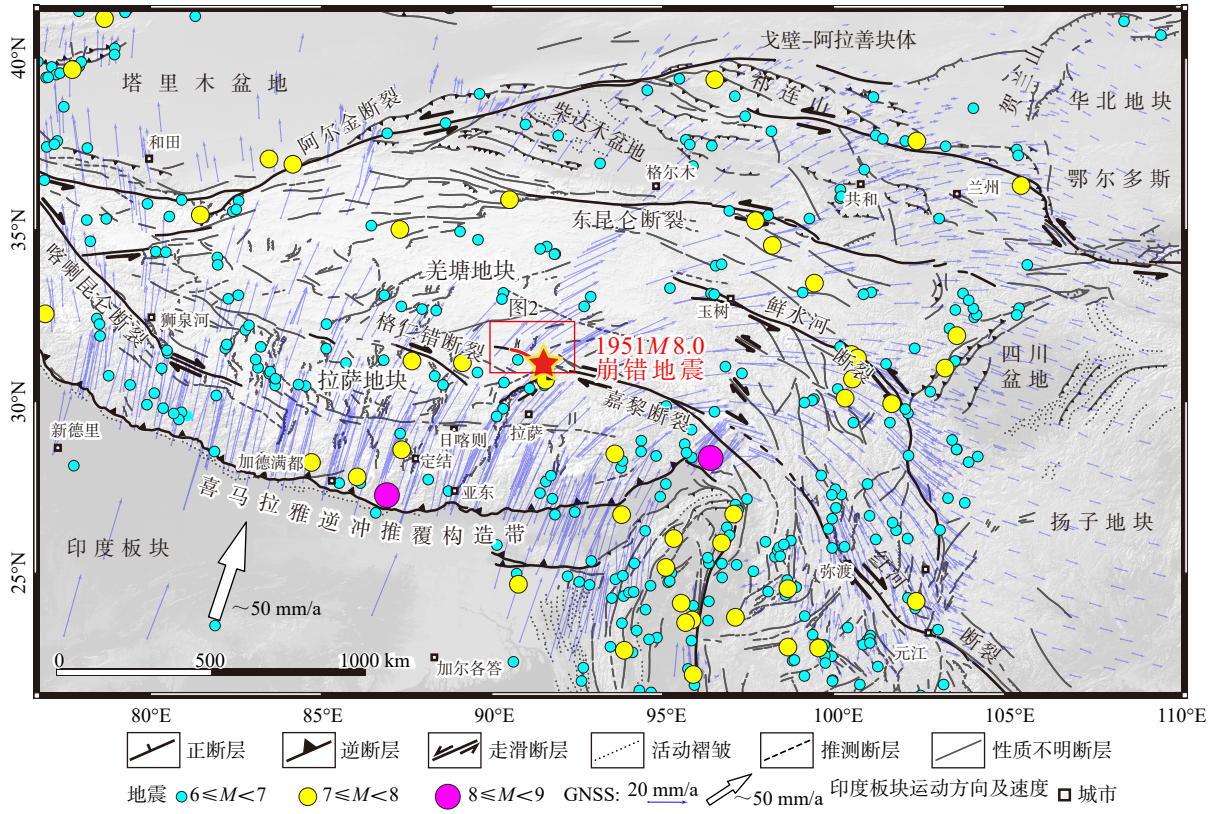


图 1　青藏高原及周边活动构造和地震分布图（青藏高原活动断裂分布图据 Tapponnier et al.，2001 修改；GPS 数据引自 Wang and Shen，2020；地震数据（1900 年 1 月—2026 年 1 月）引自 U.S.Geological Survey, 2026）

Fig. 1　Map of active tectonics and earthquakes on the Tibetan Plateau and adjacent areas (active faults on the Tibetan Plateau modified from Tapponnier et al., 2001; GPS data from Wang and Shen, 2020; Earthquake data (January 1900 to January 2026) from U.S. Geological Survey, 2026)

地貌数据的质量，采用仿地飞行模式采集照片，飞行高度设置为 400 m，航向重叠率为 80%，旁向重叠率为 70%（江晨轶等，2024）。在室内利用 Agisoft Metashape Professional 软件对每块航拍区域的照片进行单独处理，生成地面分辨率（GSD）8.7cm 的高分辨率正射镶嵌图和 GSD16.5cm 的数字高程模型。在此基础上，对崩错地震地表破裂展布及变形特征进行了详细解译，同时沿野外破裂带开展了详细的追踪调查，并系统测量了位错地貌的同震位移量和累积位移量，最终获得崩错地震同震地表破裂带分布情况（图 3）。

3　结果

3.1　地表破裂带整体情况

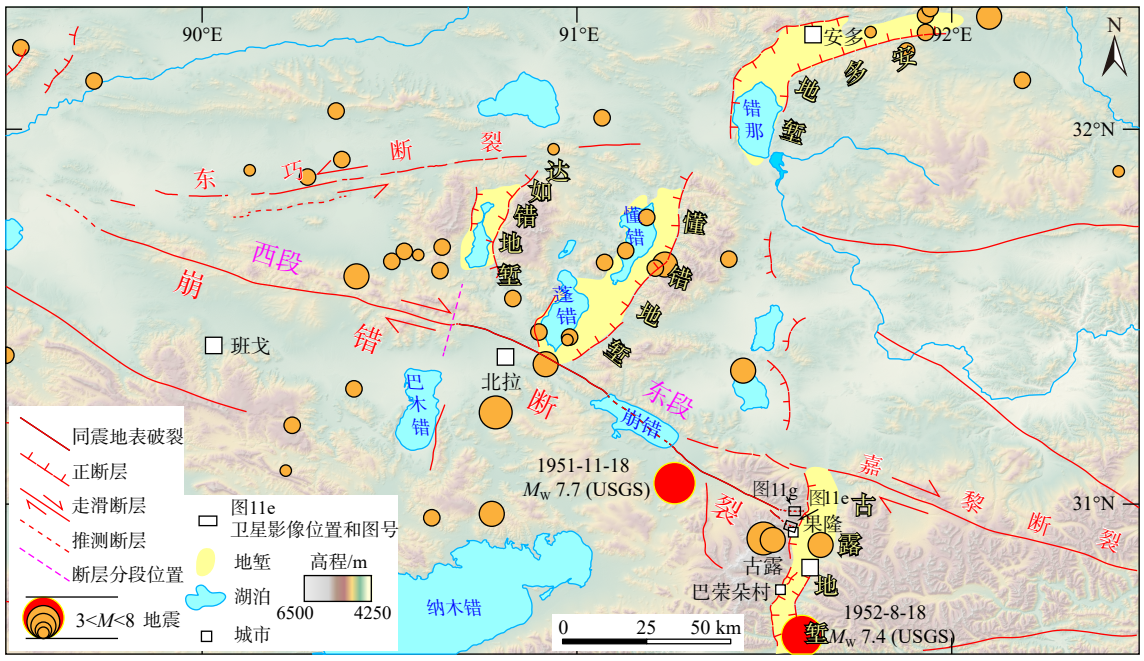
无人机数据的解译和野外调查结果显示，1951 年崩错 M 8.0 地震形成的同震地表破裂带，从北拉镇北西方向约 8 km 处的拉火里浦曲开始，经蓬错南、崩错、打日雄曲，向南东方向延伸至香茂乡达萨村一带。破裂带总长约 90 km，总体走向约 120°，主要分布在海拔 4500 m 以上的第四纪松散沉积物中。根据破裂右阶式分布的几何特点，以崩错为界，将可观察到的地表破裂带分为北西段和南东段，长度分别约为 32 km 和 34 km，淹没在崩错湖水中的破裂长约 24 km（图 3a）。

沿北西段，地表破裂整体走向约 120°，两侧出露白垩纪砂砾岩和花岗岩、侏罗纪板岩和页岩，以及第四纪堆积物（图 3b）；沿南东段，地表破裂总体沿 113°方向延伸，沿线出露白垩纪花岗岩、侏罗纪板岩、页岩和古近纪花岗岩，以及第四纪堆积物（图 3c）。两段地表破裂带较为连续，局部产状有变化，沿线切割基岩和第四纪冲洪积物，形成一系列的张裂隙、挤压鼓包、地震陷坑、位错阶地/湖岸线等特征构造地貌（图 4）。

3.2　典型破裂特征

（1）张裂隙

张裂隙、张剪裂隙在崩错两侧的地表破裂带中均广泛发育，其中规模较大、现象较好的位于各果



USGS—美国地质调查局

图 2 崩错断裂及附近活动断裂分布图

Fig. 2 Map of the Beng Co fault and adjacent active faults

USGS—U.S. Geological Survey

村附近。张裂隙呈左阶雁列展布，其间发育与之垂直的挤压隆起，两者共同形成数米至数十米宽的变形带（图 4c，图 5a、5b）。对局部保存较好的张裂隙进行测量，结果显示张裂隙的走向分布约在 140°～160°，挤压隆起走向约 50°～70°，共同组成走向约 120°的变形带（图 5c）。

（2）地震鼓包

地震鼓包是地表破裂挤压弯曲或挤压阶区内形成的椭圆形的隆起构造。北西和南东段的地表破裂带中均可观察到此次地震形成的鼓包，但北西段鼓包保存更好。文章标绘了崩错北西段约 1 km 长的地表破裂带内 10 余个地震鼓包，其形状各异，呈椭圆形、条形和多边形等，长轴方向与破裂带的总体走向斜交或一致。这些鼓包沿着白垩纪砾岩中先存的断层陡坎、断层凹槽或坡中平台展布，大小不一，高～0.5 m、宽 5～15 m，长 10～30 m（图 6）。

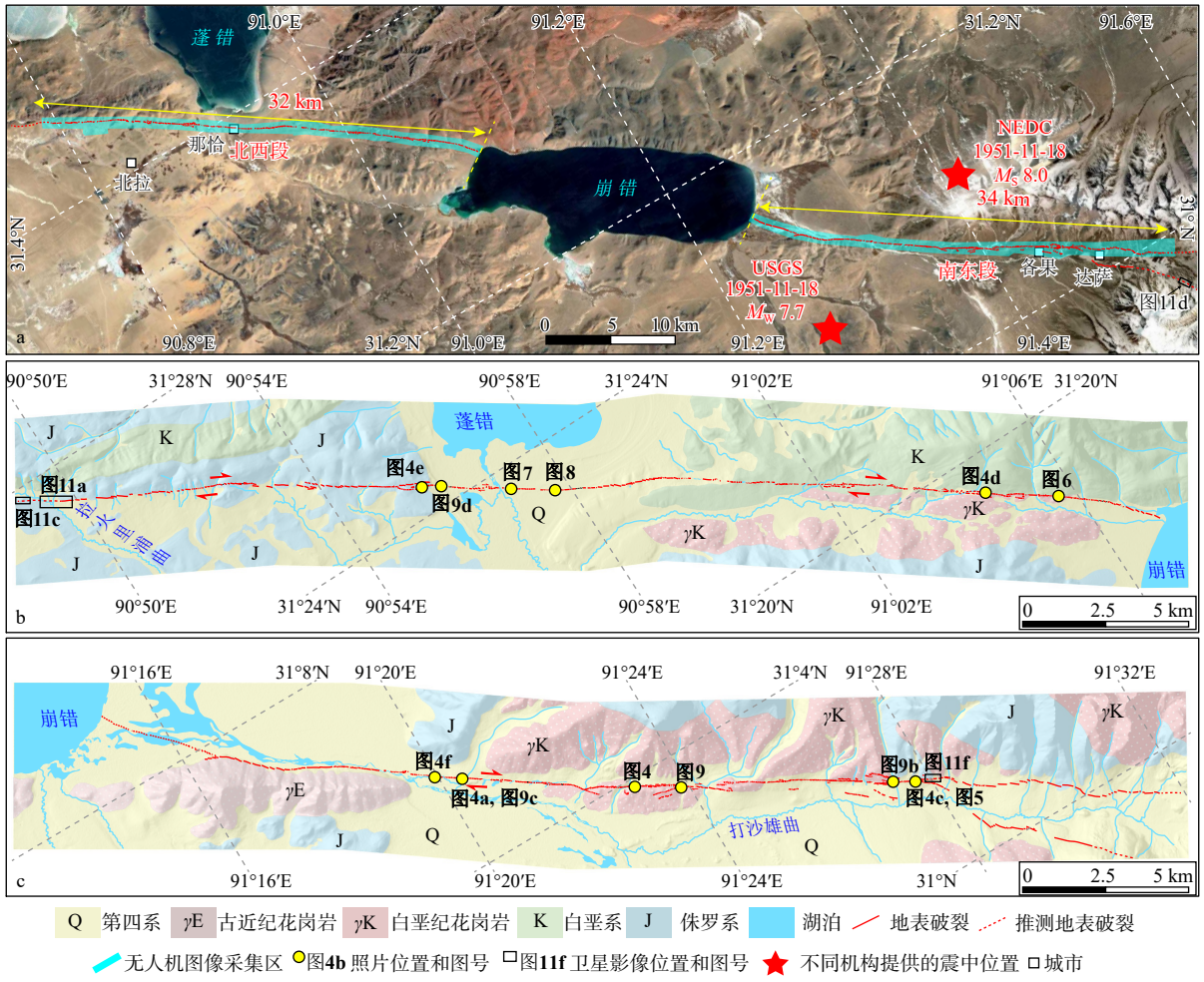
（3）位错阶地

除张裂隙和挤压鼓包外，野外调查过程中在蓬错南观察到右行位错的河流阶地和湖岸阶地（图 7，图 8）。罗可曲切割蓬错早期的湖积物，至少形成了 4 级河流阶地，从新到老依次为 T0、T0’、T1 和 T2（图 7）。走向约 120°的地表破裂切割河流东侧多级阶地，其中保留较好的 T1 和 T2 阶地陡坎明显被右行错断～5 m（图 7c）。此外，在 T2 阶地上观察到破裂阶区部位形成的地震鼓包，其长轴近东西走向（图 7c）。

在罗可曲位错河流阶地南东方向约 1.5 km 处，保留了由阶地面和前缘坡坎组成的多级湖岸阶地（图 8a）。随着阶地逐渐远离湖心，其海拔高度不断升高（图 8b）。从那恰村向南东方向延伸的同震地表破裂线性特征良好，走向约 123°，穿过多级湖岸阶地，并且沿线形成了多个长轴与破裂方向一致或小角度斜交的地震鼓包（图 8c）。对位错地貌特征较明显的 S1、S2 和 S3 湖岸阶地的右行累积位移量进行测量，获得三级湖岸阶地的累积位移量分别约为 8 m、9 m 和 9 m，与已有的测量结果一致（Armijo et al., 1989; Li et al., 2022）。

3.3 累积位移量分布

在走滑断层活动过程中，所有横跨断层的线性标志（例如冲沟、阶地陡坎）都可能被水平错动。在位错地貌被保存的前提下，这些标志将记录多次地震的累积位移。因此，测量和统计得到的最小位移丛集值可能与走滑断层的最后一次地震破裂有关，而较大的位移丛集则对应多个次地震周期的累积位移（McGill and Sieh, 1991; Zielke et al., 2010, 2015）。20 世纪 80 年代末对崩错 M 8.0 地震地表破裂带的调查（Armijo et al., 1989; 吴章明和邓起东，1989）和



a—崩错 *M* 8.0 地震同震地表破裂分段及无人机测区范围（底图为 Google Earth 影像；NEDC 代表国家地震科学数据中心；USGS 代表美国地质调查局）；b—北西段地质简图及同震地表破裂分布图；c—南东段地质简图及同震地表破裂分布图

图 3　崩错 *M* 8.0 地震同震地表破裂带分布图

Fig. 3　Distribution of the coseismic surface rupture zone of the Beng Co *M* 8.0 earthquake

(a) Segmentation of coseismic surface ruptures of the Beng Co *M* 8.0 earthquake and the UAV survey area (base map from Google Earth imagery; NEDC stands for the National Earthquake Data Science Center; USGS stands for the U.S. Geological Survey); (b) Simplified geological map with coseismic surface rupture distribution in the northwestern section; (c) Simplified geological map with coseismic surface rupture distribution in the southeastern section

近些年对该崩错断裂晚第四纪走滑速率的研究（Li et al., 2022）中，报道了部分沿断层分布的同震以及累积位移量。在此基础上，基于高分辨率的无人机摄影测量数据及野外调查，对已有研究中测量过的点位进行重新测量（图 9），并补充测量了大量位移数据，测量结果见附表 1。研究选取的位移标志物以垂直断裂且平直的冲沟或阶地陡坎为主，通过测量冲沟肩部和沟底或阶地陡坎上下边缘得到多个位移量，并采用高斯概率密度函数来限定每个累积位移量值的合理范围（Zielke and Arrowsmith, 2012）。因此，附表 1 中每个位移值对应高斯概率分布函数的均值，而位移值误差则是概率密度函数的标准差。

沿地表破裂带共获得 85 个位移量数据，较均匀地分布在北西段和南东段，其中小于 25 m 的值共有 79 个（图 10a、10b，附表 1），其余的 6 个值均大于 100 m。考虑到大于 100 m 的位移值少，且与其他 79 个值相差较大，若同时统计会使其他小于 25 m 的值难以区分，因此我们通过目前应用比较多的统计学方法对～25 m 以内的累积位移量值进行分析（McGill and Sieh, 1991; Zielke et al., 2010, 2015）。结果显示沿着破裂带分布的累积位移量值的概率密度函数呈现 3 个明显波峰，峰值分别为 3.5 ± 1.0 m、8.8 ± 1.0 m 和～20.0 m（图 10c）。从结果上看，每个峰值呈现出～4.0 m 的整数倍关系，暗示崩错断裂每

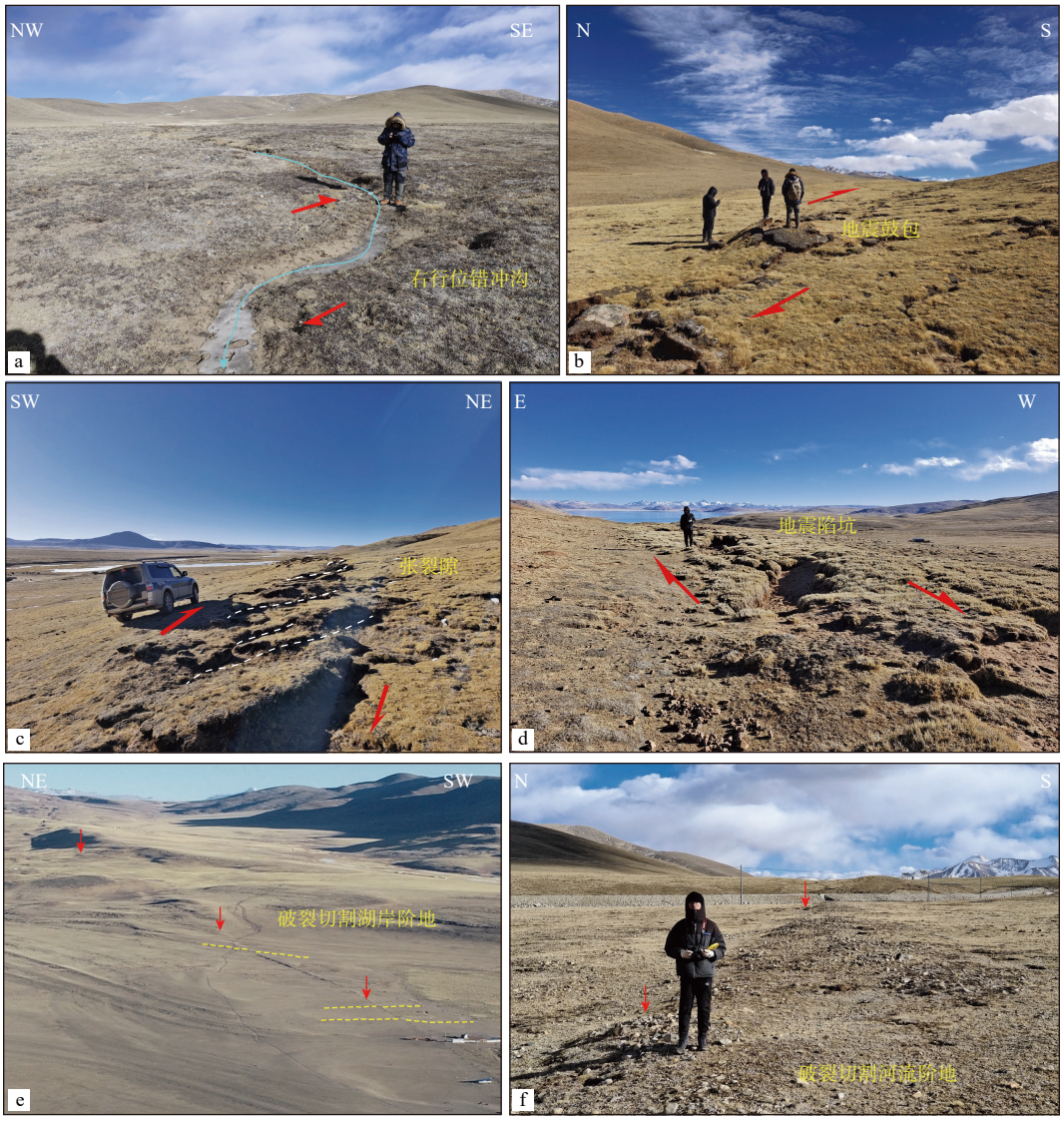


图 a—d 中红色箭头指示断裂两盘右行位错运动方向

a—右行位错量～2 m 的冲沟；b—左阶排列破裂阶区形成的地震鼓包；c—雁行状排列的张裂隙；d—右阶排列破裂阶区形成的地震陷坑；e—地表破裂切割蓬错多级湖岸阶地；f—破裂切割河流阶地

图 4 基于无人机影像解译和野外调查的崩错地震地表破裂带典型特征

Fig. 4 Field photos showing typical characteristics of the surface rupture zone of the Beng Co earthquake interpreted from UAV imagery and field investigation

(a) A gully with a right-lateral offset of ~2 m; (b) Push-ups formed in a left-stepping rupture step-over; (c) En-echelon tension cracks; (d) Pull-aparts formed in a right-stepping rupture step-over; (e) Multiple lacustrine terraces of Peng Co cut by surface ruptures; (f) River terrace of Dashaxiongqu River cut by surface ruptures

Red arrows in panels a–d indicate the right-lateral slip direction between two fault blocks.

次地震造成的位移量可能围绕～4.0 m 形成丛集。

4 讨论

4.1 同震地表破裂尾端延伸

1951 年崩错 M 8.0 地震形成的同震破裂距今已逾 70 年，长期的风化剥蚀作用导致其尾端原本规模就较小的破裂特征现今已不清晰。此次北西段破裂尾端的野外调查结果（图 3b），与现有基于野外调查或卫星影像提出的破裂向北西延伸至拉火里浦曲附近的认识一致（Armijo et al., 1989; 吴章明和邓起东，1989）。地表破裂从蓬错南至拉火里浦曲表

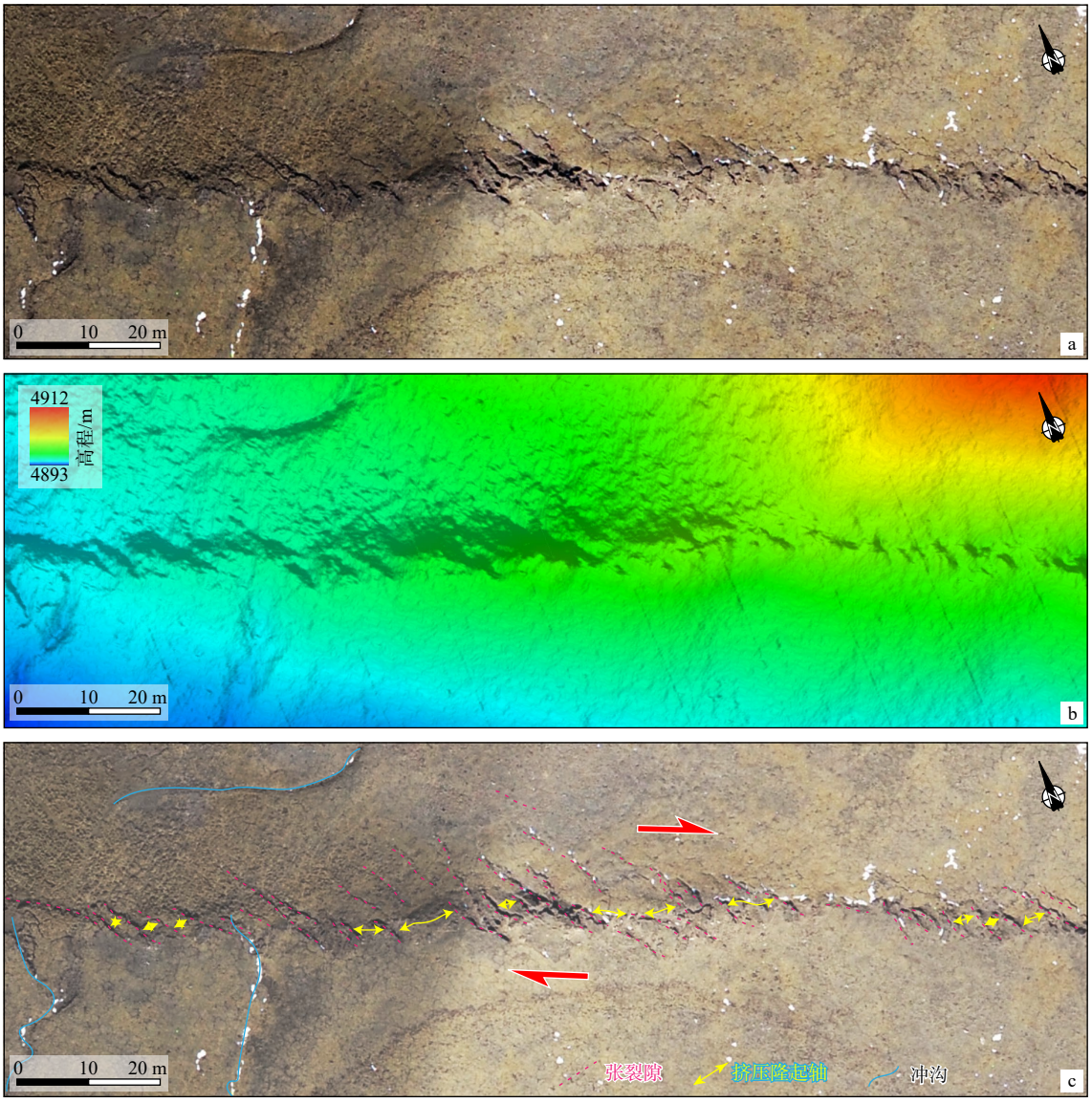


图 c 中红色箭头指示断裂两盘右行位错运动方向

a—张裂隙和挤压脊正射影像；b—张裂隙和挤压脊 DEM 山影图；c—张裂隙和挤压脊构造地貌解译

图 5　南东段张裂隙和挤压脊地貌特征

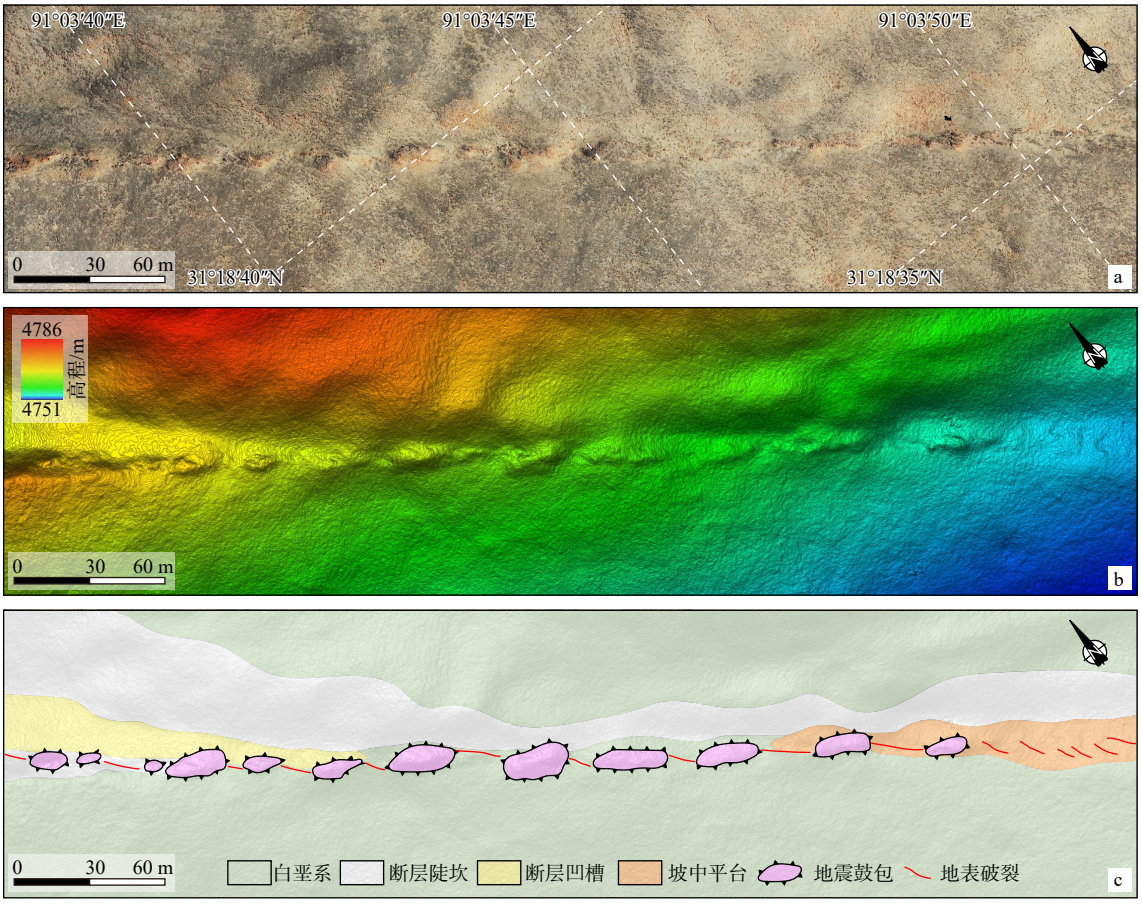
Fig. 5　Geomorphological features of tension cracks and pressure ridges along the southeastern segment

(a) UAV orthophoto of tension cracks and pressure ridges; (b) Hill-shaded DEM image of tension cracks and pressure ridges; (c) Tectonic geomorphological interpretation of tension cracks and pressure ridges

Red arrows in panel c indicate the right-lateral slip direction between two fault blocks.

现为连续的线性形迹(图 3a, 图 11a、11b)。穿过拉火里浦曲后，尽管同震地表破裂不清晰，但卫星影像上仍可见明显的活动断裂迹线(图 11c)。对于南东段破裂尾端，调查结果与现有认识明显不同。吴章明和邓起东(1989) 认为地表破裂带从达萨(也称打沙)附近切过打沙雄曲，沿山前冰碛物展布，向南东延伸至古露地堑西侧，终止于果隆(过龙孔玛)附近(吴章明和邓起东，1989)；Li et al.(2022) 认为此次地震可能沿着古露地堑西侧果隆至巴荣朵村之间发生了近南北向的破裂，破裂尾端延伸至巴荣朵村附近(Li et al., 2022)。而此项研究调查结果显示，地表破裂在达萨附近发散为 2 支(图 3)：南支沿着冰碛物向南东方向延伸，北支沿着约 115°方向继续向古露地堑西侧延伸，表现为不连续的线性形迹。

由于高海拔、交通不便等原因，未获得此次调查范围以外同震地表破裂展布的野外证据。得益



a—线性地震鼓包无人机正射影像；b—线性地震鼓包 DEM 山影图；c—线性地震鼓包构造地貌解译

图 6 北西段线性分布的地震鼓包地貌特征

Fig. 6 Geomorphological features of linearly distributed push-ups along northwestern segment

(a) UAV orthophoto of linearly distributed push-ups; (b) Hill-shaded DEM image of linearly distributed push-ups; (c) Tectonic geomorphological interpretation of linearly distributed push-ups

于高分辨的卫星影像资料(亚米级)，在破裂北西段和南东段两侧尾端附近及更远处均可识别出线性特征较好且沿斜坡展布的活动断层迹线(北西段：图 11a、11c；南东段南支：图 11d、11e，南东段北支：图 11f、11g)。鉴于其线性特征与同震地表破裂非常类似，表明两端卫星影像所显示清晰断层迹线很有可能在 1951 年崩错地震中也发生了破裂。此外，基于 Wells and Coppersmith(1994)提出的走滑断裂地表破裂长度与地震震级的经验关系公式：

$$\log(L) = -3.55 + 0.74 \times M_{\mathrm{W}} \tag{1}$$

式中，M_{W}—矩震级；L—破裂长度。结合美国地质调查局(USGS)提供的震级(M_{W}7.7)，计算得到的破裂长度约为 140 km，远大于文中得到的和现有研究中约 90 km 的破裂长度(Armijo et al., 1989; 吴章明和邓起东，1989)。考虑到 1951 年地震后未及时开展同震地表破裂调查工作，最早的调查开展于 20 世纪 80 年代(韩同林，1983)，经过 30 年的风化剥蚀，两侧尾端规模较小的地表破裂难以识别，可能导致对同震地表破裂带长度的低估。因此，结合卫星影像显示的～90 km 长的线性构造地貌，以及经验公式计算结果，推测 1951 年崩错地震形成的地表破裂长度应大于 90 km，其南东端可能延伸至巴荣朵村附近(Li et al., 2022)，北西端则穿过拉火里浦曲后继续沿先存活动断裂延伸。

4.2 崩错断裂特征滑动行为

重建大地震期间的地表位移分布，可以提供关于断层上强震破裂历史和复发模式的重要见解(Zielke et al., 2010; Klinger et al., 2011; Zielke and Arrowsmith, 2012; De Pascale et al., 2014; Bi et al., 2020)。在走滑断层上，相同年代的地貌标志通常经历相同数量的地震事件错动，且其位移量常呈现相似性。这些位移特征在 COPD 图(Zielke et al., 2010; Zielke

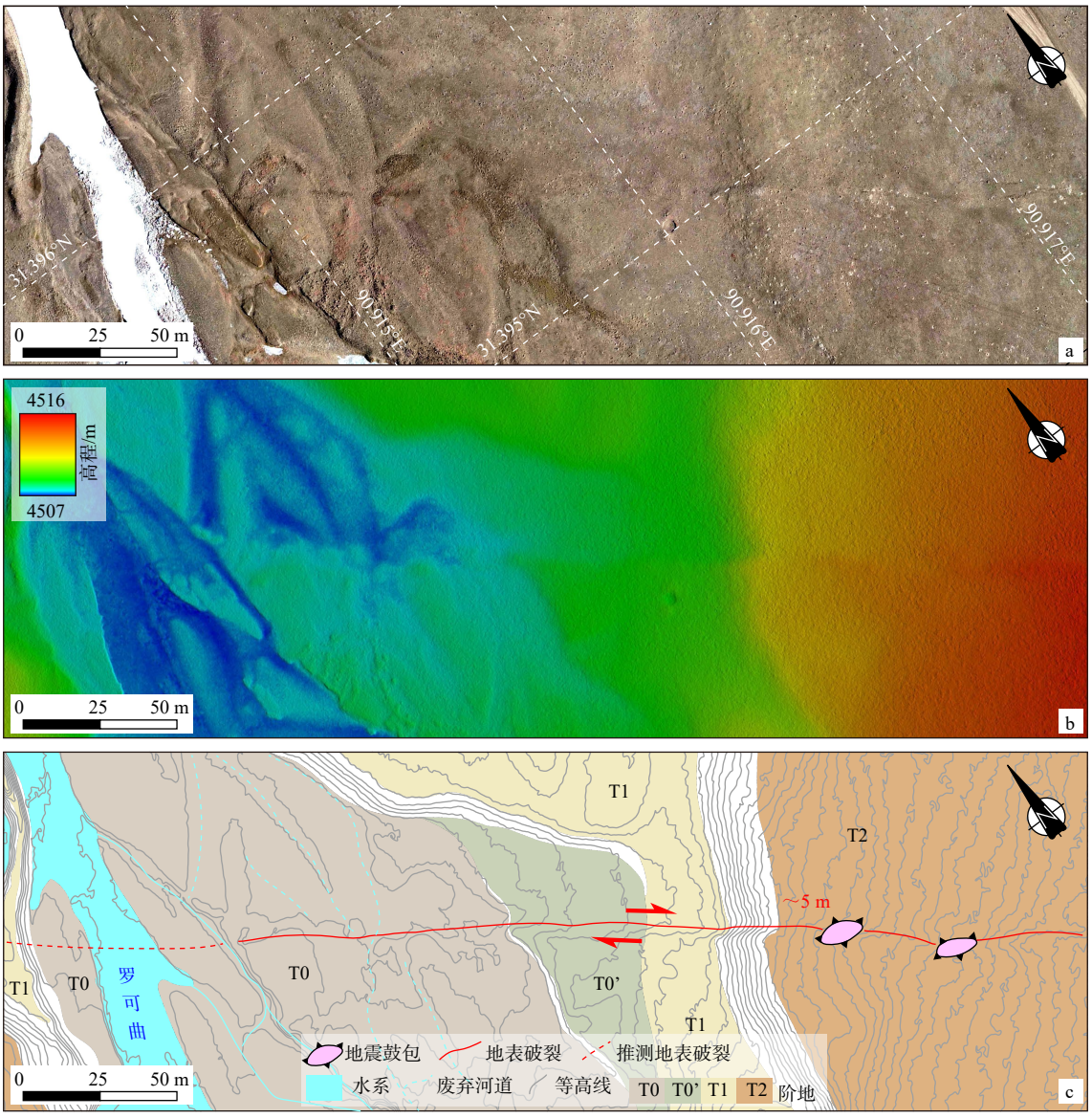


图 c 中红色箭头指示断裂两盘右行位错运动方向，数值～5 m 为河流阶地边缘实测右行位错距离

a—右行位错河流阶地陡坎无人机正射影像；b—右行位错河流阶地陡坎 DEM 山影图；c—右行位错河流阶地陡坎构造地貌解译

图 7　蓬错南右行位错河流阶地陡坎地貌特征

Fig. 7　Geomorphological features of right-offset terrace riser on the southern side of Peng Co

(a) UAV orthophoto of right-offset river terrace risers; (b) Hill-shaded DEM image of right-offset river terrace risers; (c) Tectonic geomorphological interpretation of right-offset river terrace risers

Red arrows in panel c indicate the right-lateral slip direction between two fault blocks. The numerical value of ~5 m represents the measured right-offset along the river terrace margins.

and Arrowsmith, 2012; Ren et al., 2016)中表现为多个分离的波峰，每个波峰被推断与过去不同次数的特定地震事件有关。因此，COPD 图中最小的位移峰值可以归因于最近一次事件的同震位移，而后续更大的位移峰值则可能代表了先前多次地震的累积位移。

沿崩错地震地表破裂带测量统计获得的 COPD 图显示了 3 个明显分离的波峰(3.5 ± 1.0 m、8.8 ± 1.0 m 和～20.0 m)。这些峰值之间的累积位移增量相似，大致约为 4.0 m 的 1、2、5 倍关系，可能分别代表了崩错地震平均位移量和多次地震累积位移量(～12.0 m 和～16.0 m 的波峰不明显与数据量少有关)。COPD 图中～6.0 m 的峰值可能代表了崩错地震形成的最大同震位移量，这与 20 世纪的调查给出的最大同震水

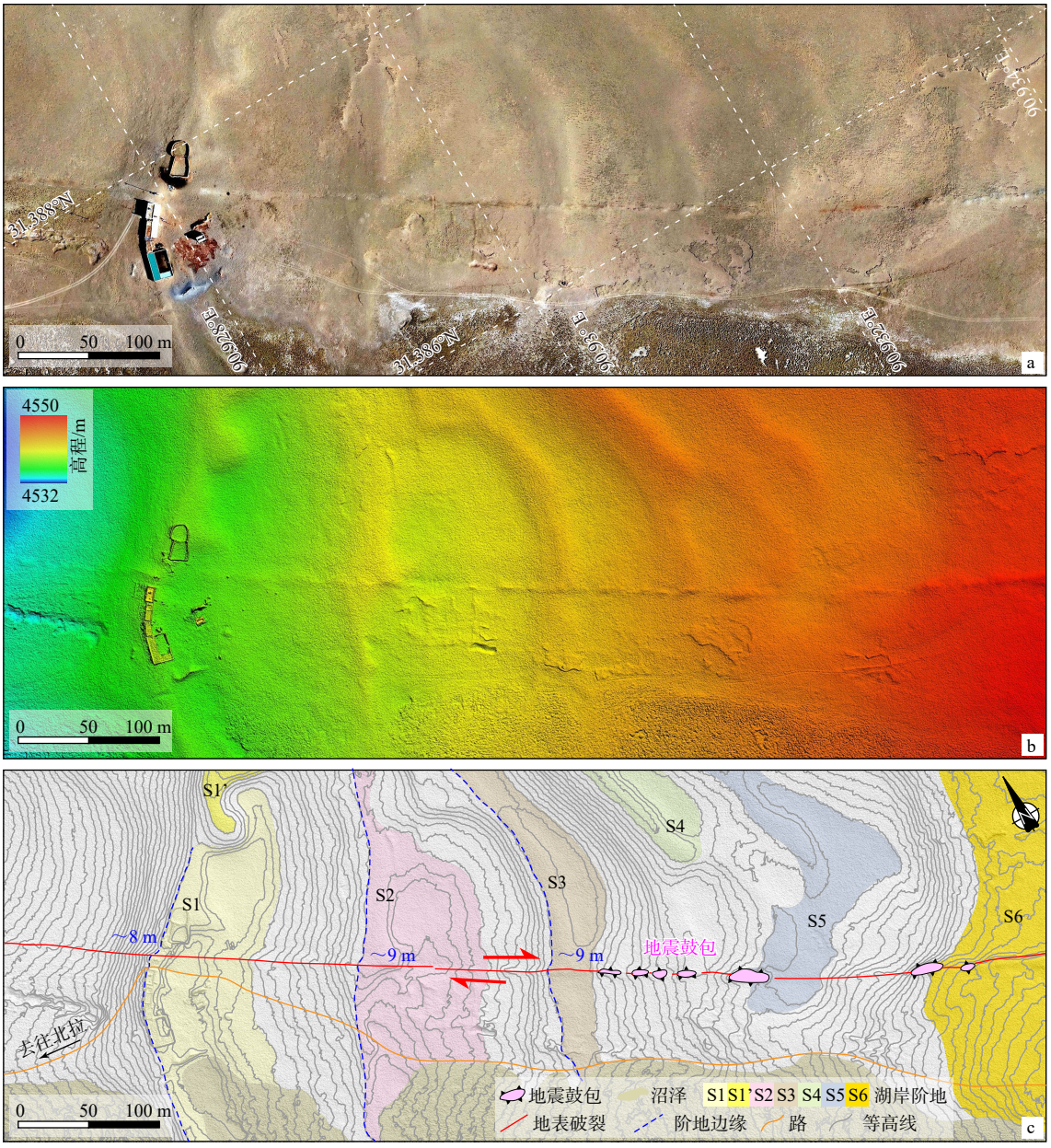


图 c 中红色箭头指示断裂两盘右行位错运动方向，~8 m、~9 m 和~9 m 分别为湖岸阶地边缘实测右行位错距离

a—右行位错湖岸阶地无人机正射影像；b—右行位错湖岸阶地 DEM 山影图；c—右行位错湖岸阶地构造地貌解译

图 8 蓬错南位错湖岸阶地地貌特征

Fig. 8 Geomorphological features of offset lacustrine terraces on the southern side of Peng Co

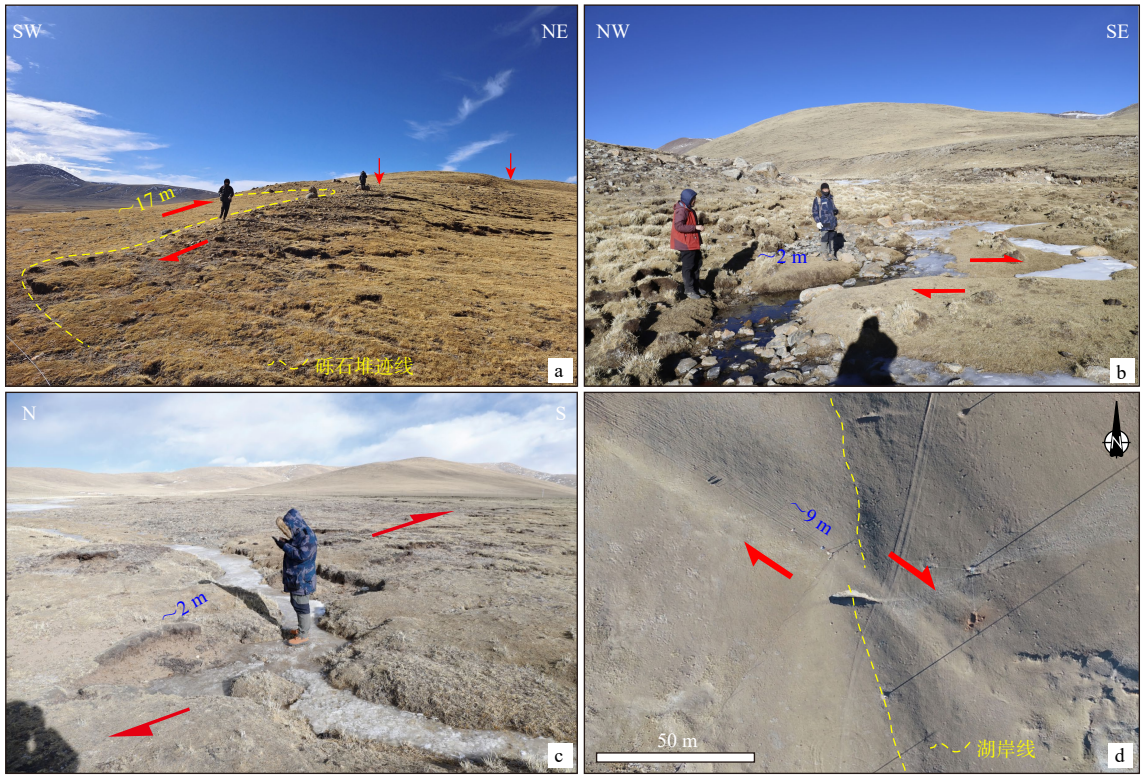
(a) UAV orthophoto of right-offset lacustrine terraces; (b) Hill-shaded DEM image of right-offset lacustrine terraces; (c) Tectonic geomorphological interpretation of right-offset lacustrine terraces

Red arrows in panel c indicate the right-lateral slip direction between two fault blocks. Numerical values (~8 m, ~9 m and ~9 m) denote measured right-offset of lacustrine terrace margins, respectively.

平位移接近（~7 m; 吴章明和邓起东, 1989）。事实上，应用这种方法在美国 San Jacinto 断裂（Salisbury et al., 2012）、新西兰 Hope 断裂（Manighetti et al., 2015）以及中国贺兰山断裂（Bi et al., 2020）、康西瓦断裂（Li et al., 2012）、富蕴断裂（Klinger et al., 2011）均观察到类似的特征滑动现象。因此，我们推测特征地震沿着崩错断裂东段反复发生，每次产生的特征位移为~4.0 m。

4.3 断层运动学特征和发震构造背景

走滑型地震会形成雁行状张裂隙、挤压鼓包、



a—砾石堆被右行位错～17 m; b—达萨村附近冲沟被右行位错～2 m; c—康托村附近冲沟被右行位错～2 m; d—湖岸线被右行位错～9 m

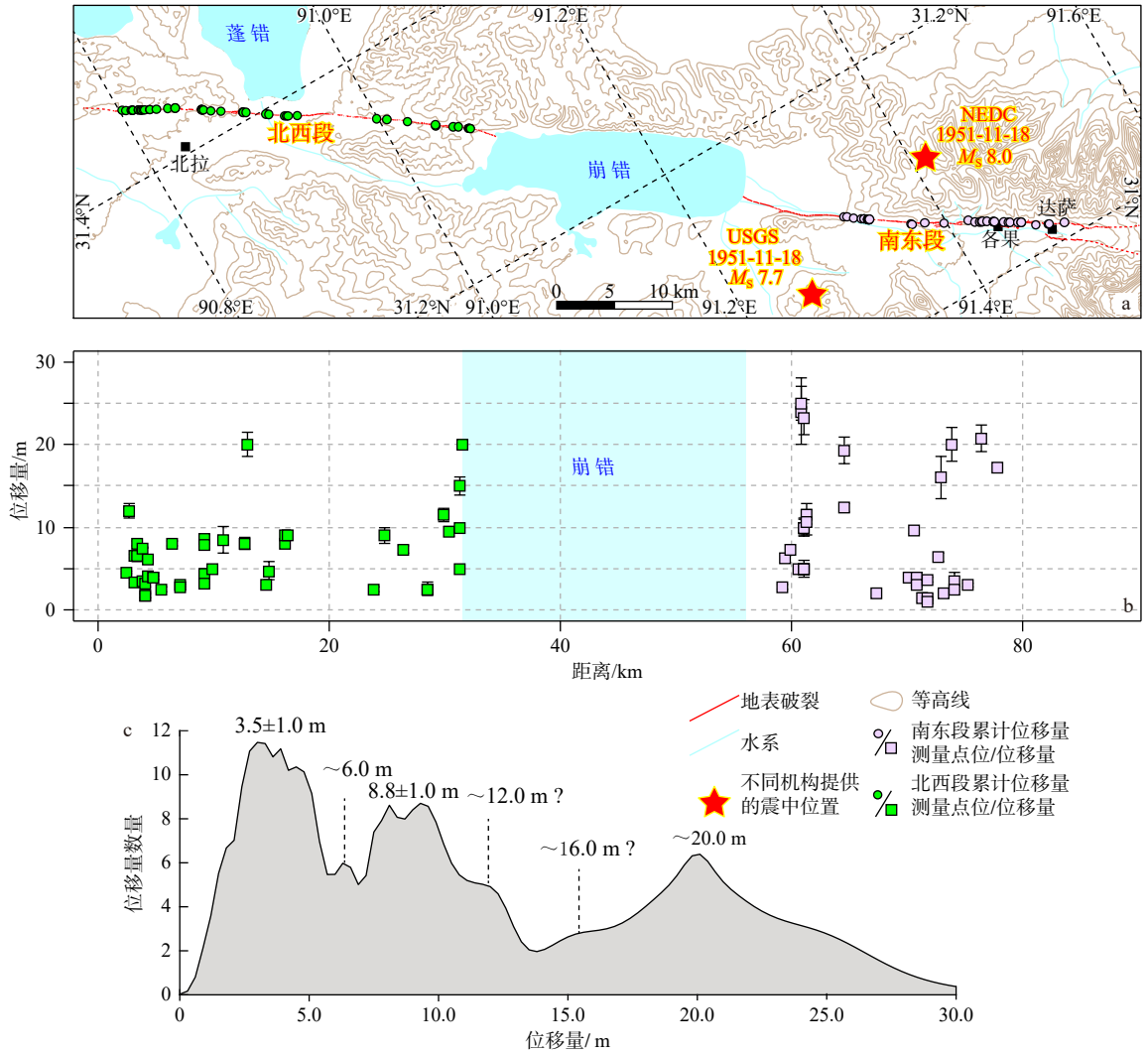
图 9　典型右行位错地貌标志野外照片

Fig. 9　Field photos of geomorphical markers with right-lateral offset

(a) ～17 m right-lateral offset of a gravel pile; (b) ～2 m right-lateral offset of a a gully near Dasa village; (c) ～2 m right-lateral offset of a gully near Kangtuo village; (d) ～9 m right-lateral offset of a shoreline

位错冲沟等地貌，这是约束发震断层运动学特征的关键证据。野外调查显示，1951 年崩错 *M* 8.0 地震形成右行位错的河流阶地、湖岸线、冲沟，左阶雁列式破裂阶区形成的挤压鼓包，右阶雁列式破裂阶区形成的地震陷坑等地貌，直接表明崩错断裂是一条右行走滑为主的活动断层（图 4）。在几何特征方面，崩错断裂东、西段表现为不同的样式（图 2）。西段为走向～110°的单一断裂，而东段表现为 2 支走向～120°、右阶分布且控制崩错拉分盆地的断裂。在近南北向挤压和东西向伸展的应力场作用下，西段以简单剪切变形为主，而东段以张剪切变形为主。对发震断层破裂机制的研究也表明东段断裂以张剪切变形为主（吴章明和邓起东，1989）。此次地震形成的破裂沿着崩错断裂东段拉分盆地两侧的先存活动断裂展布（图 2）。2 支破裂在平面上呈右阶雁列式分布，可能在崩错湖区贯通（国家地震局地质研究所，1992），是崩错断裂东段张剪切变形过程中最新的应力释放事件。现今观察到的长～30 km、宽～6 km 的崩错拉分盆地正是在崩错断裂东段多次强震过程中逐渐形成的。

青藏高原内部的喀喇昆仑–嘉黎断裂带被认为是高原中部物质向东运移的南边界（Tapponnier et al., 1982; Armijo et al., 1989）。崩错断裂作为该构造边界内的一条规模较大的右行走滑断裂，是羌塘活动地块南部边界的重要组成部分（Han et al., 2019; Li et al., 2024）。青藏高原全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）速度场显示，崩错断裂北侧东羌塘块体 GNSS 速度东向分量明显大于南侧拉萨块体（图 1），表明羌塘地块东部以整体向东挤出运动为主，而拉萨–喜马拉雅地块整体向北运动，局部沿亚东–古露等裂谷发生东西向伸展。在晚第四纪时间尺度上，崩错断裂的走滑速率（约 4～5 mm/a; Li et al., 2022）远高于其北侧懂错地堑的伸展速率（～0.6 mm/a; Li et al., 2019），意味着该过渡区域内的变形可能主要集中在边界断裂上。因此，右行走滑性质的崩错断裂分隔了整体向东快速运移的东羌塘地块和局部东西向伸展变形的拉萨地块。此外，崩错地震同震地表破裂带的几何展布显



NEDC—国家地震科学数据中心；USGS—美国地质调查局

a—沿破裂带累积位移量测量点分布；b—沿破裂带小于 30 m 的累积位移量测量结果（每个点代表一个位错的冲沟或阶地陡坎）；c—小于 30 m 的累积位移量概率密度分布函数

图 10 沿地表破裂带的累积位移量丛集

Fig. 10 Inventory of cumulative offsets along the surface rupture zone of the Beng Co earthquake

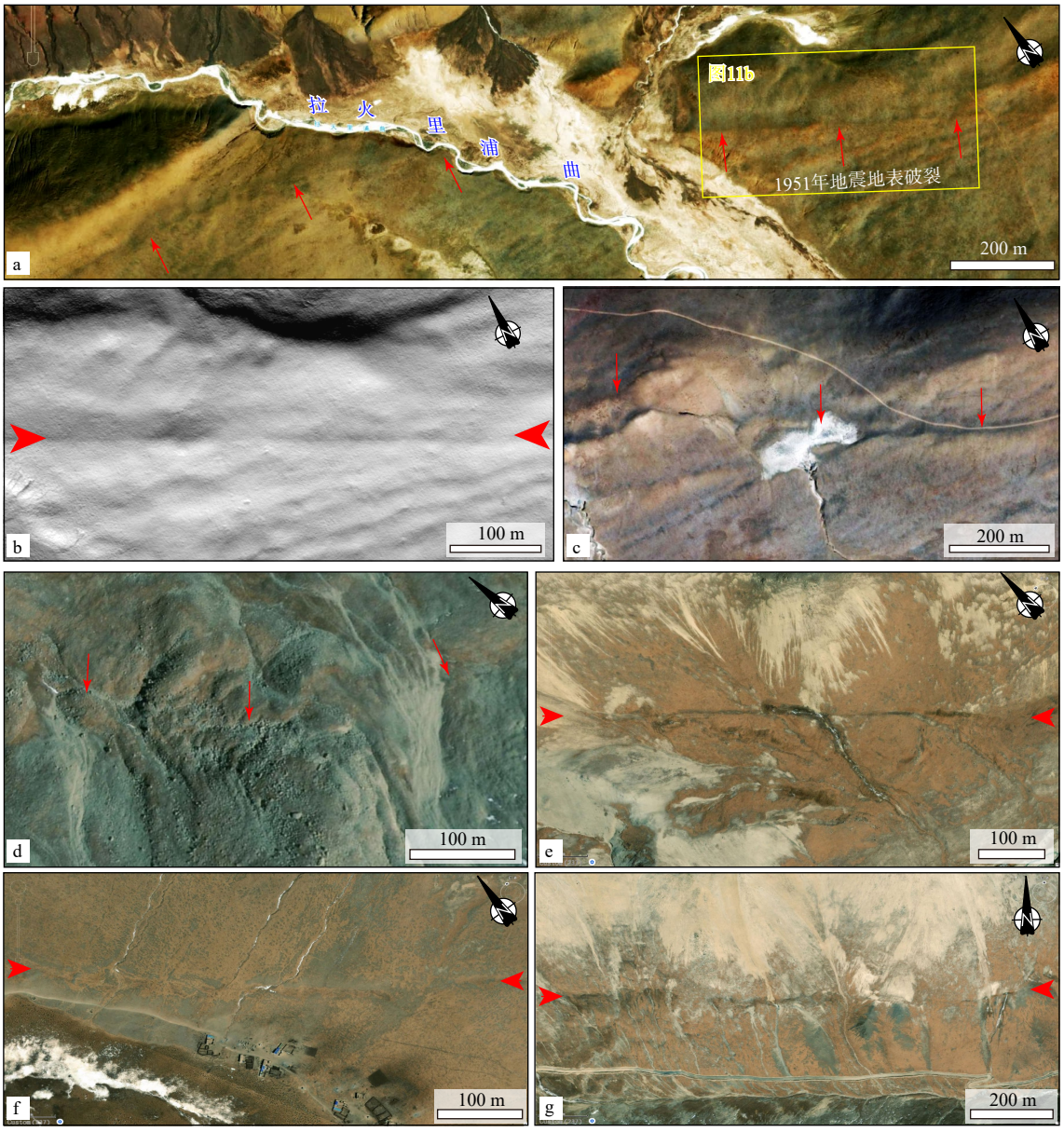
(a) Distribution of measured points of cumulative offsets along the rupture zone; (b) Measured cumulative offsets (<30 m) along the rupture zone (Each point represents an offset channel or a terrace riser); (c) Probability density function of cumulative offsets (<30 m)

NEDC—National Earthquake Data Science Center; USGS—U.S. Geological Survey

示，崩错断裂与亚东−古露裂谷北段的古露地堑相连。该断裂的走滑运动不仅加速了亚东−古露裂谷北段的伸展变形（Chevalier et al., 2020），而且 1951 年 11 月 18 日的崩错地震使古露地堑内库伦应力增加，并触发了 1952 年 8 月 18 日发生在古露地堑内的 M_w 7.4 当雄地震（Yang et al., 2019）。上述研究成果进一步表明，崩错断裂的活动会影响到与之相连的青藏高原中部的南北向裂谷/地堑。综上所述，1951 年崩错地震是羌塘地块东部地壳物质向东快速运移的过程中，应力在青藏高原物质挤出的南边界——崩错断裂上聚集并释放的结果。该断裂的破裂也显著改变了古露地堑内的应力状态，从而触发了藏南裂谷系亚东−古露裂谷北段的正断型强震。

5 结论

（1）崩错地震地表破裂带长～90 km，总体走向～120°，沿线发育的一系列右行位错冲沟/阶地，以及雁列式破裂阶部发育的挤压鼓包和地震陷坑等地



a—北西端必应地图影像图（Microsoft, 2025; 箭头指示线性构造）；b—拉火里浦曲东侧线性地表破裂 DEM 影像；c—拉火里浦曲西侧线性构造；d—南东端南支断裂切割冰碛物；e—南东端南支断裂沿山坡展布；f—南东端北支断裂切割冲沟（箭头指示线性构造）；g—南东端北支断裂沿山坡展布

图 11　崩错地震同震地表破裂尾端构造地貌

Fig. 11　Tectonic geomorphology at the end of the surface rupture zone deformed by the Beng Co earthquake

(a) Bing Maps image (Microsoft, 2025) at the northwestern end, with arrows indicating linear structures; (b) DEM image of linear surface rupture on the eastern side of Lahuolipuqu; (c) Linear structure on the western side of Lahuolipuqu; (d) The glacial deposits cut by the southern branch fault at the southeast end; (e) The southern branch fault at the southeast end extending along the slope; (f) The northern branch fault at the southeast end cutting through gullies, with arrows indicating linear structures; (g) The northern branch fault at the southeast end extending along the slope

震地貌，指示发震断裂是一条以右行走滑为主的活动断裂。

（2）同震地表破裂沿着先存的崩错断裂东段展布，累积位移概率分布图显示了 3 个明显位移峰值（3.5 ± 1.0 m, 8.8 ± 1.0 m 和～20.0 m）。这些峰值之间的累积位移增量相似，指示大地震沿着崩错断裂反复发生，每次产生的特征位移为～4.0 m。

（3）崩错地震的发生是羌塘地块地壳物质向东

运移背景下,崩错断裂调节构造变形的直接响应。

附加材料：附表由作者提供，数据真实性由作者负责，在线查看网址：https://journal.geomech.ac.cn/cn/article/doi/10.12090/j.issn.1006-6616.2026016

数据可用性声明：本文采集的破裂带沿线无人机数据和地表破裂矢量文件可通过联系作者共享。

作者贡献声明：刘富财、潘家伟负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；江晨轶、张斯琪参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；李海兵、Marie-Luce Chevalier、孙知明参与数据分析、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: LIU Fucai and PAN Jiawei conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; JIANG Chenyi and ZHANG Siqi participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; LI Haibing, CHEVALIER Marie-Luce and SUN Zhiming 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

ARMIJO R, TAPPONNIER P, MERCIER J L, et al., 1986. Quaternary extension in southern Tibet: field observations and tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91(B14): 13803-13872.

ARMIJO R, TAPPONNIER P, HAN T L, 1989. Late Cenozoic right - lateral strike - slip faulting in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B3): 2787-2838.

BI H Y, ZHENG W J, LEI Q Y, et al., 2020. Surface slip distribution along the west Helanshan Fault, northern China, and its implications for fault behavior[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(7): e2020JB019983.

BIASI G P, WELDON II R J, 2006. Estimating surface rupture length and magnitude of paleoearthquakes from point measurements of rupture displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(5): 1612-1623.

CHEVALIER M L, TAPPONNIER P, VAN DER WOERD J, et al., 2020. Late quaternary extension rates across the northern half of the Yadong-Gulu Rift: implication for east-west extension in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(7): e2019JB019106.

DE PASCALE G P, QUIGLEY M C, DAVIES T R H, 2014. Lidar reveals uniform Alpine fault offsets and bimodal plate boundary rupture behavior, New Zealand[J]. Geology, 42(5): 411-414.

DENG Q D, YU G H, YE W H. 1992. Relationship between earthquake magnitude and parameters of surface ruptures associated with historical earthquakes[M]//Research of Active Fault. Beijing: Seismological Press: 247-264. (in Chinese)

ELLIOTT J R, WALTERS R J, ENGLAND P C, et al., 2010. Extension on the Tibetan plateau: recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology[J]. Geophysical Journal International, 183(2): 503-535.

GARTHWAITE M C, WANG H, WRIGHT T J, 2013. Broadscale interseismic deformation and fault slip rates in the central Tibetan Plateau observed using InSAR[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(9): 5071-5083.

GU G X. 1983. Catalogue of earthquakes in China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

HAN S, LI H B, PAN J W, et al., 2019. Co-seismic surface ruptures in Qiangtang Terrane: insight into Late Cenozoic deformation of central Tibet[J]. Tectonophysics, 750: 359-378.

HAN T L, 1983. Preliminary investigation of deformation belts caused by earthquakes in 1951—1952 in the Dangxiong-Bengcuo area of Tibet[J]. Seismology and Geology, 5(4): 1-11. (in Chinese with English abstract)

HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F, et al., 1992. Raising Tibet[J]. Science, 255(5052): 1663-1670.

Institute of Geology, China Earthquake Administration, 1992. Active faults in the central Tibet[M]. Beijing: Seismological Press: 154. (in Chinese)

JIANG C Y, PAN J W, ZHANG L J, et al., 2024. Application of UAV SfM technology in active tectonic research: a case study of the Longmu Co Fault, Northwestern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 30(2): 332-347. (in Chinese with English abstract)

JOHNSON K, NISSEN E, SARIPALLI S, et al., 2014. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion[J]. Geosphere, 10(5): 969-986.

KANEDA H, NAKATA T, TSUTSUMI H, et al., 2008. Surface rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, earthquake and its active tectonic implications[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(2): 521-557.

KAPP P, TAYLOR M, STOCKLI D, et al., 2008. Development of active low-angle normal fault systems during orogenic collapse: insight from Tibet[J]. Geology, 36(1): 7-10.

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 H B, WANG Z X, FU X F, et al., 2008. The surface rupture zone distribution of the Wenchuan earthquake (M_S8.0) happened on May 12th, 2008[J]. Geology in China, 35(5): 803-813. (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, 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 K, KIRBY E, XU X W, et al., 2019. Rates of Holocene normal faulting along the Dong Co fault in central Tibet, based on 14C dating of displaced fluvial terraces[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 183: 103962.

LI K, TAPPONNIER P, XU X W, et al., 2022. Holocene slip rate along the Beng Co Fault and dextral strike-slip extrusion of central eastern Tibet[J]. Tectonics, 41(8): e2022TC007230.

LI K, CHEVALIER M L, TAPPONNIER P, et al., 2024. Previously unrecognized, 1000 km-long Qixiang Co fault governs eastward escape of central Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 644: 118928.

LI Y S, TIAN Y F, YU C, et al., 2020. Present-day interseismic deformation characteristics of the Beng Co-Dongqiao conjugate fault system in central Tibet: implications from InSAR observations[J]. Geophysical Journal International, 221(1): 492-503.

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, 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.

MANIGHETTI I, PERRIN C, DOMINGUEZ S, et al., 2015. Recovering paleoearthquake slip record in a highly dynamic alluvial and tectonic region (Hope Fault, New Zealand) from airborne lidar[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(6): 4484-4509.

MCGILL S F, SIEH K, 1991. Surficial offsets on the Central and Eastern Garlock Fault associated with prehistoric earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 96(B13): 21597-21621.

Microsoft, 2025. Bing Maps satellite imagery[EB/OL]. [2025-11-01]. https://www.bing.com/maps.

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.

NI J, YORK J E, 1978. Late Cenozoic tectonics of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 83(B11): 5377-5384.

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_S 7.4 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_S 6.9 Menyuan earthquake, Qinghai Province, China[J]. Acta Geologica Sinica (100th Anniversary), 96(1): 215-231. (in Chinese with English abstract)

QUIGLEY M, VAN DISSEN R, LITCHFIELD N, et al., 2012. Surface rupture during the 2010 M_W 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake: implications for fault rupture dynamics and seismic-hazard analysis[J]. Geology, 40(1): 55-58.

REN Z K, ZHANG Z Q, CHEN T, et al., 2016. Clustering of offsets on the Haiyuan fault and their relationship to paleoearthquakes[J]. GSA Bulletin, 128(1-2): 3-18.

REN Z K, ZHANG Z Q, 2019. Structural analysis of the 1997 M_W 7.5 Manyi earthquake and the kinematics of the Manyi fault, central Tibetan Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 179: 149-164.

ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D, 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. Science, 321(5892): 1054-1058.

SALISBURY J B, ROCKWELL T K, MIDDLETON T J, et al., 2012. LiDAR and field observations of slip distribution for the most recent surface ruptures along the central San Jacinto Fault[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(2): 598-619.

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

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, RYERSON F J, et al., 2003. Conjugate strike-slip faulting along the Bangong-Nujiang suture zone accommodates coeval east-west extension and north-south shortening in the interior of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 22(4): 1044.

TAYLOR M, PELTZER G, 2006. Current slip rates on conjugate strike-slip faults in central Tibet using synthetic aperture radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B12): B12402.

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.

TIAN Y F, LIU-ZENG J, FENG W P, et al., 2026. Deformation pattern and slip rate of the Karakorum-Jiali Fault Zone in Southeastern Tibet from Sentinel-1 InSAR[J]. Tectonophysics, 918: 230976.

U. S. Geological Survey, 1951[2026-2-1]. M 7.7 - 89 km WSW of Nagqu, China[EB/OL]. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/iscg

em894960/executive.

U. S. Geological Survey, 2026[2026-2-1]. Earthquake hazards program[EB/OL]. https://earthquake.usgs.gov/.

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.

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.

WU Z H, WU Z H, HU D G, et al., 2006. Holocene seismogenic faults along the Tanggula-Lhasa section of the Qinghai-Tibet Railway, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(12): 1387-1401. (in Chinese with English abstract)

WU Z M, DENG Q D, 1989. Deformation features and fracture mechanism of surface rupture of 1951 Bengco, Tibet M_S=8 earthquake[J]. Seismology and Geology, 11(1): 15-25. (in Chinese with English abstract)

YANG G, WU J C, HU Q, et al., 2019. Effects of static stress triggering of the strongest earthquakes along the Bengco—southeastern Piedmont of Nyainqentanglha mountain fault zone, Tibet[J]. Journal of Seismology, 23(4): 943-950.

YIN A, TAYLOR M H, 2011. Mechanics of V-shaped conjugate strike-slip faults and the corresponding continuum mode of continental deformation[J]. Geological Society of America Bulletin, 123(9-10): 1798-1821.

ZHANG D C, 1988. Intensity distribution of the 1951 Dangxiong earthquake and its characteristics of seismical deformation[J]. Earthquake Research in China, 4(4): 62-67. (in Chinese with English abstract)

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)

ZIELKE O, ARROWSMITH J R, LUDWIG L G, et al., 2010. Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo Plain, San Andreas Fault[J]. Science, 327(5969): 1119-1122.

ZIELKE O, ARROWSMITH J R, 2012. LaDiCaoz and LiDARimager—MATLAB GUIs for LiDAR data handling and lateral displacement measurement[J]. Geosphere, 8(1): 206-221.

ZIELKE O, KLINGER Y, ARROWSMITH J R, 2015. Fault slip and earthquake recurrence along strike-slip faults — Contributions of high-resolution geomorphic data[J]. Tectonophysics, 638: 43-62.

附中文参考文献

邓起东, 于贵华, 叶文华. 1992. 地震地表破裂参数与震级关系的研究[M]//活动断裂研究. 北京: 地震出版社: 247-264.

顾功叙. 1983. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社.

国家地震局地质研究所, 1992. 西藏中部活动断层[M]. 北京: 地震出版社: 154.

韩同林, 1983. 西藏当雄—崩错一带 1951—1952 年地震形变带的初步考察[J]. 地震地质, 5(4): 1-11.

江晨轶, 潘家伟, 张丽军, 等, 2024. UAV SfM 技术在活动构造研究中的应用: 以青藏高原西北部龙木错断裂为例[J]. 地质力学学报, 30(2): 332-347.

李海兵, 王宗秀, 付小方, 等, 2008. 2008 年 5 月 12 日汶川地震(M_S8.0)地表破裂带的分布特征[J]. 中国地质, 35(5): 803-813.

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.

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_S 7.4 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_S 6.9 地震地表破裂带及发震构造研究[J]. 地质学报(创刊 100 周年), 96(1): 215-231.

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.

吴章明, 邓起东, 1989. 西藏崩错 8 级地震地表破裂的变形特征及其破裂机制[J]. 地震地质, 11(1): 15-25.

吴中海, 吴珍汉, 胡道功, 等, 2006. 青藏铁路唐古拉山—拉萨段全新世控震断裂研究[J]. 地质通报, 25(12): 1387-1401.

张德成, 1988. 西藏当雄 1951 年 8.0 级地震烈度分布及形变特征[J]. 中国地震, 4(4): 62-67.

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.