

2025 年 M_s 6.8 藏南定日地震地表变形特征及控震构造

刘德民¹, 张妍¹, 汪海明¹, 姜淮¹, 赵悦¹, 王墩^{1、2*}, 杨巍然¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学(武汉)未来技术学院, 湖北武汉 430074

摘要: 破坏性地震等自然灾害不仅会引起区域生态环境恶化, 导致水土流失和地方贫困化, 更为直接的影响就是人民生命财产的损失及对民居等地面建筑的破坏和地表变形。通过野外现场地面调查综合分析了 2025 年 1 月 7 日藏南定日 6.8 级地震形成的地表变形特征, 地面沉降及造成的建筑物倒塌破坏情况。沿丁木错断裂从北海拔 5500 多米垂向位移>185 cm 向南至丁木错东海拔 4200 多米垂向位移<120 cm, 整体由北向南的垂向位移强度有所减小; 北段断层陡坎倾向西, 丁木错断裂上盘整体下降, 局部地段呈台阶式依次下降, 导致冰蚀 U 型谷中冰水沉积物及坡脚冲洪积物出现最高可达 3 m 的陡坎; 干枯的牛粪、冻土鼓包及巨大的冰漂砾被左行错断, 显示此次地震还有较明显的走滑特征。丁木错东更新世洪冲积物中出现南北延伸较长且东西宽度达 50 m 的地表变形, 以中部塌陷呈地堑式张性破裂为主, 张性破裂出现的陡坎高度一般不超过 120 cm, 在张性破裂的前缘端即靠近丁木错局部地段还发育高约 50 cm 的挤压隆起和地震鼓包。位于地表地裂缝中心地带的吉翁村和古荣村等村庄是本次地震受灾最为严重的村区。结合区域地质背景分析表明, 定日地震是伸展构造控制的浅源破坏性地震, 新生代地幔热物质的底辟上涌, 活化了以南北向丁木错平移正断层及近东西向藏南拆离系为代表的伸展构造, 从而在这些伸展构造交汇部位释放能量引起地震。

关键词: 藏南, 定日地震, 地表变形, 成因机制, 伸展构造

中图分类号: P315.2 **文章编号:** 1000-0000(2025)00-0000-00 **收稿日期:** 2025-4-25

Surface deformation characteristics and seismotectonics of the 2025 Dingri earthquake in southern Tibet

LIU Demin¹, ZHANG Yan¹, WANG Haiming¹, JIANG Huai¹, ZHAO Yue¹, WANG Dun^{1、2*},
Yang Weiran¹

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Future Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Destructive earthquakes and other natural disasters not only cause deterioration of the regional ecological environment, but also lead to soil erosion and local poverty, but also have a more direct impact on the loss of people's lives and property, as well as the destruction and deformation of ground buildings such as residential buildings. The Surface deformation characteristics, ground subsidence, and building collapse caused by the M_s 6.8 earthquake occurred in Dingri County, southern Tibet on January 7, 2025 were comprehensively

基金项目: 深地国家科技重大专项(2024ZD1000205-03-04), 基于动力学模型的中长期地震数值预测关键技术研究(20230110115)。

作者简介: 刘德民(1975-), 男, 副教授, 博士, 从事构造地质学与地热地质学研究及相关教学工作。E-mail: 5guc@163.com, ORCID: 0000-0002-5038-4802.

通讯作者简介: 王墩(1982-), 教授, 主要从事震源破裂过程与活动构造的教学和研究。E-mail: wangdun@cug.edu.cn

引用格式: 刘德民, 张妍, 汪海明, 等. 2025. 2025 年 1 月 7 日定日地震地表变形特征及地震成因. 地球科学, 00(00) 000—000.

analyzed through field investigations. The vertical displacement intensity along the Dingmu Co fault decreases from vertical displacement of over 185 cm at an altitude of over 5500 meters in the north to vertical displacement of less than 120 cm at an altitude of over 4200 meters in the east of Dingmu Co; The northern section has a westward drop, which is due to the overall descent of the upper plate of the Dingmu Co fault, with some sections descending in a stepped manner, resulting in steep slopes of up to 3 meters for ice water sediments and slope foot alluvial deposits in the ice eroded U-shaped valley; Occasionally, dry cow manure, Permafrost bulge, and huge ice debris being left displaced, indicating that this earthquake also had obvious strike slip characteristics. A Surface deformation with a north-south extension and an east-west width of up to 50 meters appeared in the alluvial deposits of the eastern Pleistocene in Dingmu Co, characterized by a central collapse and overall westward subsidence. The steep slope of the tensile rupture generally does not exceed 120 cm, and up to 50 cm squeezing uplift and seismic bulges are also developed at the leading edge of the tensile rupture, near the local section of Dingmu Co. The villages of Jiweng and Gurong, located in the center of the surface fissure, were the most severely affected by the Dingri earthquake. Except for a few cement and brick houses, most of the houses collapsed, making them the most severely affected villages in this earthquake. Based on the analysis of regional geological background, the Dingri earthquake is a shallow source destructive earthquake controlled by extensional structures. The upwelling of mantle thermal material in the Cenozoic era activated extensional structures represented by the north-south Dingmu Co strike-slip normal fault and the nearly east-west Tibetan southern detachment system, releasing energy at the intersection of these extensional structures and causing earthquakes.

Key Words: South Tibet; Dingri Earthquake; Surface deformation; Genetic mechanism; Extensional structure

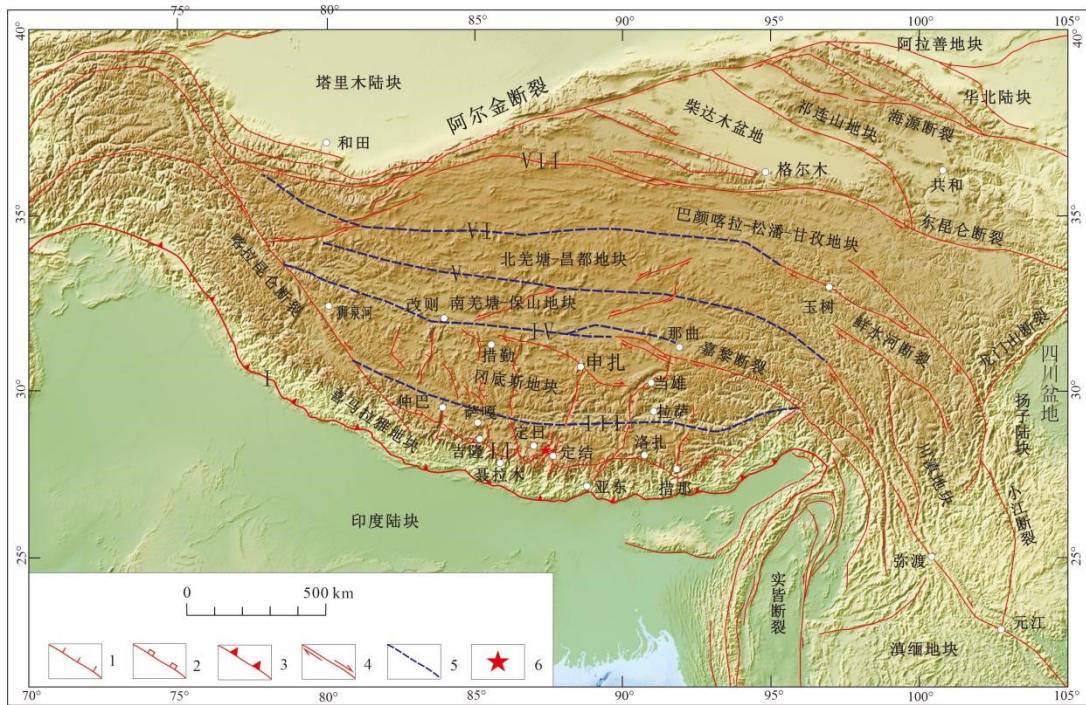
2025 年以来,先后发生 1 月 7 日西藏定日 M_s 6.8 级大地震,3 月 28 日缅甸曼德勒 M_s 7.9 级大地震和 3 月 30 日汤加群岛 M_s 7.3 级大地震。这些破坏性的大地震在这么短的时间内相继发生,在全球引起了较大的关注;特别是这些大地震瞬间夺走了人类大量生命,摧毁了无数房屋、道路等建筑,同时,在极震区还导致生态环境恶化,水土流失,贫困及疾病等对人类极为不友善的次生灾害。地震成因机理,短临预报及中、长期观测预测成为地震研究中非常重要的研究内容。新生代以来,印度板块与亚洲大陆长期的汇聚挤压,形成世界上最高的高原—青藏高原,同时,也形成了世界上著名的喜马拉雅地震带。2025 年 1 月 7 日青藏高原南部日喀则市定日县发生 M_s 6.8 级地震(简称定日地震),震源深度 10 km,震中位置北纬 $28^{\circ} 30'$,东经 $87^{\circ} 27'$,震中烈度为 IX 度。主震发生后,后续余震不断,最大震级达 M_s 5.0 级。此次地震导致定日县长所乡、措果乡、加措乡、曲洛乡、尼辖乡等地近 4 千户房屋整体坍塌,造成 126 人遇难、188 人受伤,4 万多人转移安置。定日地震发震位置属于喜马拉雅地震带,是地震相对高发区,此次地震也是近些年来该区域破坏性最大的灾害事件。

大的破坏性地震的发生,必然会在地面形成明显的地表变形,如 2025 年 1 月 7 日定日 M_s 6.8 级地震形成了超过 35 km 的地表变形(刘富财等, 2025),2014 年 4 月 14 日玉树 M_s 7.1 级地震形成超过 50 km 的地表变形(潘家伟等, 2011),2008 年 5 月 12 日汶川 M_s 8.0 级地震形成超过 300 km 的地表变形(李海兵等, 2002),2001 年 11 月 14 日昆仑山 M_s 8.1 级地震形成超过 350 km 的地表变形(党光明和吴赞军, 2002)。这些地表变形绝大多数是地震发生时断层活动引起,称之为同震地表变形;还有部分地表变形是地震发生时引发的浅层次生地表变形。其中,同震地表变形的长度与震级有较大的关系,一般震级越大同震地表变形长度越大。同震地表变形的观测研究是地震发生后研究发震构造性质、破裂演化过程及地震成因的重要手段。

本文通过野外现场观察与测量,详细解析地表变形展布特征,结合发震部位地质构造背景分析,探讨发震构造的运动学特征及致灾机制,相关研究对喜马拉雅地震带及整个青藏高原地震灾害预测与预防具有重要的意义。

1 地质构造背景

古近纪，随着新特提斯洋的最终闭合，大洋南侧的印度陆块与北侧的亚洲大陆发生汇聚碰撞；持续的汇聚挤压导致地壳缩短、增厚以及隆升，形成了构造单元复杂、构造边界典型的青藏高原（图 1），因其极高的地势，又称为地球第三极。新近纪，高原内部发生了近东西向的伸展（Yin et al., 1999; Yin, 2000），在藏南的冈底斯地块和喜马拉雅地块中形成了近南北向展布的地堑带，自西向东包括霍尔巴-仓木错地堑、仲巴-达雄地堑、聂拉木-吉隆-措勤地堑、空错-当惹雍错地堑、申扎-定结地堑、谷露-羊八井-亚东地堑和日多-沃卡-错那地堑（吴中海等，2008; 卞爽等，2021）。地堑带由断陷盆地和控制盆山结构的正断裂组成，由西向东近平行展布，间隔约 150~200 km；南北向地堑带晚新代表现出强烈的构造活动性，不仅控制现今盆地地貌格局，还控制着高温温泉的形成和高原内部地震的发生（Armijo et al., 1986; 吴章明等，1994; Tapponnier et al., 2001; 卞爽等，2021）。位于青藏高原最南缘的喜马拉雅地块夹于主逆冲断裂带和藏南拆离系之间（图 1），是青藏高原新生代最为活跃的构造单元，是世界著名的地震带—地中海—喜马拉雅地震带的核心地带，地震的频率和震级相对于该地震带其它地方要强。2025 年 1 月 7 日定日地震就发生在喜马拉雅地块中申扎一定结地堑带南段（图 1，图 2）。



1-正断层；2-拆离断层；3-逆冲断层；4-走滑断层；5-缝合带；6-定日地震；I-主前缘逆冲推覆构造带；II-藏南拆离系；III-雅鲁藏布江缝合带；IV-班公湖-怒江缝合带；V-龙木错-双湖-沧江缝合带；VI-西昆仑-金沙江缝合带；VII-木孜塔格-玛沁-广济断裂带

图 1 青藏高原大地构造格架图

Fig.2 Geotectonic framework map of the Qinghai Tibet Plateau

申扎一定结地堑是青藏高原典型的伸展构造，总体走向 NE20°，全长约 350 km，地貌上形成统一的狭长带状负地形，主期活动时间为~13-11 Ma（Leloup et al., 2010; 黄婷等，2024; 高扬，2024）。申扎一定结地堑北起冈底斯地块中的申扎县，南至喜马拉雅地块中的定结县，切割了冈底斯地块、雅鲁藏布江缝合带、藏南拆离系和喜马拉雅地块（包括特提斯喜马拉雅和高喜马拉雅），控制该地堑发育的是申扎一定结断裂。申扎一定结断裂是一条兼具走滑性质的正断裂，该断裂具有分段特征，各段产状不同。雅鲁藏布江缝合带以北的北段为倾向南东东的正断层体系，主要为脆性断层；雅鲁藏布江缝合带至藏南拆离系的中段为北西西倾斜的正断层，藏南拆离系以南的南段则为倾向南东东的正断层（张进江等，2002; 刘德民和李德威，2003; 张进江等，2007）。南段发育在定结县，又称为定结断裂（F3）。定结断裂（F3）总体走向 NE15°左右，具正断性质，倾向 E，倾角 50°~65°，为控岩控貌构造（图 2）。在定结县，该断裂与郭加断裂（F2）分别位于日玛那隆起山地的东西两侧，形成典型的地垒式伸展构造（图 2）。定结县城北西断层活动形成的陡崖呈线状展布，断层下盘地质体呈陡崖突出地面，显示断层上盘相对下降。

定结断裂晚第四纪垂直滑动速率为 0.6~2.0 mm/a (Kali, 2010; 高扬, 2024), 总体显示定结断裂全新世活动强烈。断裂活动影响范围较大, 在距离断裂 EW 两侧~20-50 km 范围内均有历史中强震发生, 主要以正断型地震为主 (Wang et al., 2014; 田婷婷, 2021)。

藏南拆离系 (F4) 是藏南最为醒目的走向东西的区域性伸展拆离断裂构造, 由多条分支断裂组成。藏南拆离系 (F4) 在定日地震极震区受到定结-申扎断裂的截切, 被错断成东、西两段, 错断距离达 30 km, 整体具有右行正断特征 (张进江等, 2002; 刘德民等, 2003)。拆离断层下盘顶部为由糜棱岩组成的韧性剪切带; 在拆离断层上盘为脆性断层岩, 主要是断层角砾岩, 碎裂岩和断层泥, 由于脆性断层岩风化剥蚀, 呈负地形; 造成部分地层构造缺失, 导致石炭系、三叠系浅变质岩与基底结晶岩系直接接触 (刘德民和李德威, 2003; 张进江等, 2007)。

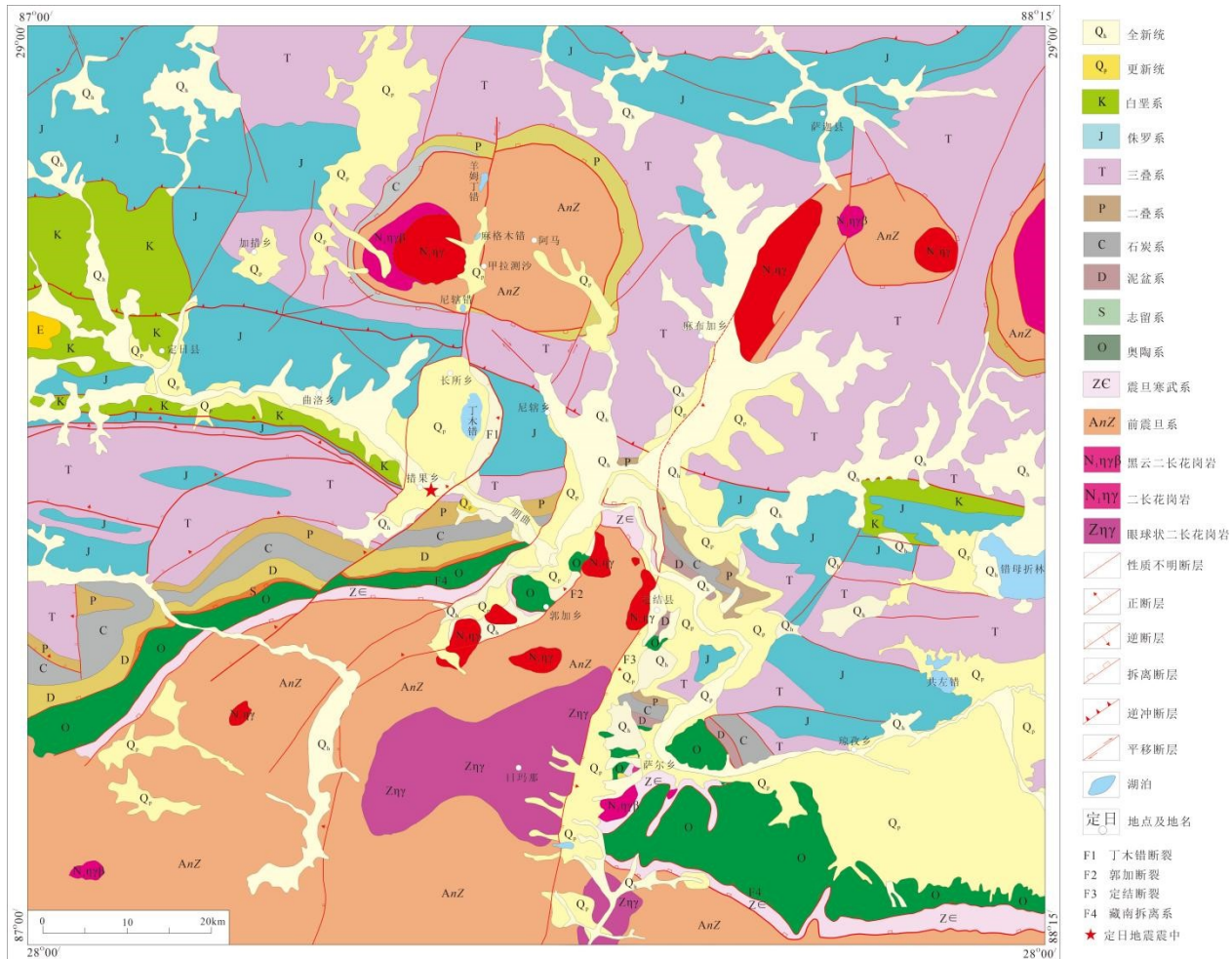


图2 定日地震及邻区地质构造图

Fig.2 Geological Structure Map of the Dingri earthquake and adjacent Areas

丁木错断裂 (F1) (又称登么错断裂) 是申扎一定结断裂中段西侧规模较大的近南北向伸展构造。丁木错断裂是丁木错地堑与其东缘山体的边界, 该断裂发育在定结-申扎断裂和郭加断裂的西侧, 是一条控貌的全新世活动平移正断层。丁木错断裂总体延伸长度达 60 km, 南起措果乡以南, 向北经丁木错东侧直达长所乡以北的拉轨岗日变质核杂岩, 断裂带宽 30~300 m (田婷婷, 2021; 田婷婷和吴中海, 2023; 邹俊杰等, 2025)。丁木错断裂整体走向和倾向略有变化, 在朋曲河以北走向近 NS, 倾向 W; 在朋曲河以南走向 NE, 倾向 NW, 倾角 50°~70°。从北向南, 该断裂可以分为三段, 北段即长所乡以北, 其将拉轨岗日变质核杂岩左行错切, 中部沿断裂发育冰蚀 U 型谷 (图 2)。中段发育在长所乡以南至朋曲, 此处, 该断裂明显控制了盆山地貌, 即断裂沿东部山地和西部新生代洪冲积物分界发育, 西部的冲洪积扇体上发育多级断层陡坎或断层陡崖。南段发育在朋曲以南, 主体将一套顺序沉积的古生代地层切穿, 同时明显将藏南拆离系错移, 晚第四纪以来有明显的垂直滑动 (徐心悦, 2019; 田婷婷和吴中海, 2023;

黄婷等, 2024; 李楠等, 2024)。此次定日 Ms 6.8 级地震震中位于近南北向丁木错断裂上盘, 指示该断裂是本次定日地震的发震断层, 定日地震也是申扎-定结地堑带有历史记录以来的最大地震 (刘富财等, 2025; 石峰等, 2025)。

2 地表变形特征

定日地震震中位于定日县措果乡, 地震造成 126 人遇难, 多条道路损毁和包括吉定村 (图 3a), 强嘎村 (图 3b), 嘎布村 (图 3c) 和玉白村 (图 3d) 等村庄在内的大量的房屋倒塌, 给当地人民群众的生命财产安全带来了巨大损失。地震还引起了地面各种变形, 主要表现为同震地表变形和次生地表变形。定日地震引起的地表变形发育在丁木错 (登么错) 周边, 主体断续展布在丁木错东侧的控盆断裂—丁木错断裂 (登么错断裂) 上盘, 不同地段, 地表变形样式、结构、性质、垂向位移、形态及组合特征等均有较大的差异。



图3 定日地震对不同村庄房屋破坏影响照片

Fig.3 Photos of house damage of the several villages

(a)吉定村房屋破坏照片; (b)强嘎村房屋破坏照片; (c)嘎布村房屋破坏照片; (d)玉白村房屋破坏照片

野外通过不同调查点对地表变形的垂向位移、水平位错、几何形态、展布样式、组合特征等进行观察描述, 发现定日地震形成的地表变形围绕丁木错分布, 主要发育在近南北向的丁木错断裂上盘 (图 4)。定日地震地表变形基本都发育在第四纪松散沉积物中, 其几何形态非常复杂, 有主破裂带, 也发育支破裂雁列, 挤压鼓包与张裂缝相间排列或雁列式张裂缝, 具有南北分段特征 (图 4)。在丁木错湖北边的地表变形呈南北向延伸较远 (杨婷等, 2025), 终止于羊姆丁错, 地表变形相对连续; 本次野外测得垂向位移量主要集中在 10~120 cm, 地堑式或台阶式地表变形中各条地表变形的垂向位移量不等, 最大垂向位移量达 185 cm (图 4); 而前人野外实际测得这一带的垂向位移最大达 270 cm 左右 (邵延秀等, 2025), 因而, 地裂缝北段整体垂向位移较大, 并具有台阶式正断特征。在丁木错湖东边地表变形较发育, 由古荣村断续延伸到朋曲河, 水平位错量较小, 垂向位移最大达 120 cm 左右, 地堑式正断特征明显, 兼具明显重力垮塌成因。在丁木错西岸和南边也有零星分散近东西向和南北向展布的地表变形, 但延伸距离较短不连续, 水平位错不明显, 垂向位移最大仅 50 cm 左右 (图 4)。下面根据野外不同调查点上单条地表变形形态及其组合样式进行描述。

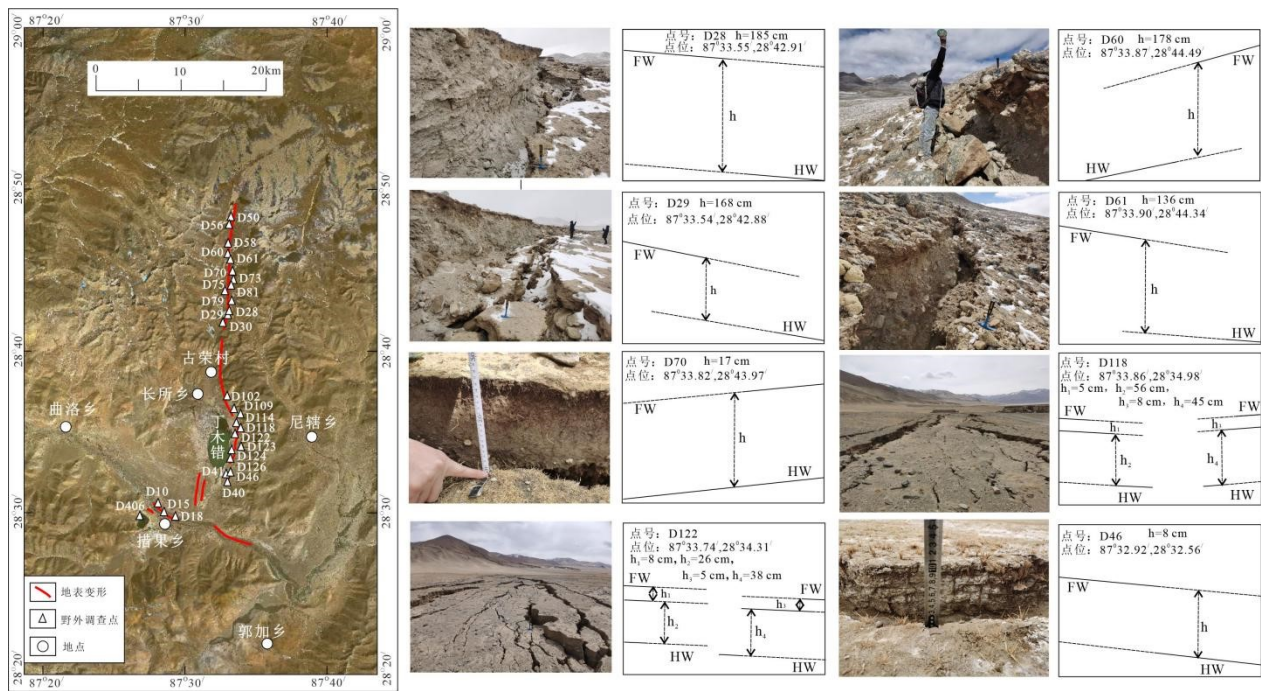


图4 定日地震地表变形带的展布，野外调查点的分布及垂向位移测量对比图

Fig.4 Distribution map of Surface deformations, field survey points and vertical displacement measurement of the Dingri earthquake

2.1 锯齿状与平直状地表变形

陆地地震发生后，往往会在地表形成各种各样的同震地表变形，据其几何形态，锯齿状地裂缝和平直状地裂缝是在地质现象中较为常见的两种不同形态的地裂缝表现形式。定日地震引起的地裂缝多为锯齿状地裂缝，极少数为平直状地裂缝；少量锯齿状地裂缝局部地段呈现弧形，但整体依然是锯齿状。如发育在丁木错东强嘎村附近全新统洪冲积相砂砾层中的锯齿状地裂缝，其齿尖呈尖棱角，齿尖高 3~8 cm，具有明显左行滑动特征，但滑动距离较小（图 5a）。发育在丁木错西南错果湖附近全新统湖相砂土层中的锯齿状地裂缝，其齿尖呈圆弧状，齿尖高 2~10 cm，左行滑动特征不明显（图 5b）。发育在丁木错北尼辖错附近全新统洪冲积相砂砾层中的锯齿状地裂缝，其齿尖有呈尖棱角，也有呈圆弧状，齿尖高 1~10 cm，绝大多数具有明显左行滑动特征（图 5c, d）。发育在丁木错南朋曲河边全新统湖相砂土层中的锯齿状地裂缝，其齿尖多呈圆弧状，齿尖高 2~6 cm，左行滑动特征不明显（图 5e）；并且由于河岸土质松散，地震发生引起地表变形时伴随重力垮塌变形（邵延秀等，2025），这种地裂缝与前面四种地裂缝成因不一样，其不是地震活动直接形成的构造成因的地表变形，而往往是地震活动触发了松软沉积物失稳滑动而形成次生地地表变形。

在丁木错湖东靠近湖的野外调查点 D41 ($E87^{\circ} 32.78'$, $N28^{\circ} 32.37'$) 及附近发育多条界面平直光滑的地表变形，有两条直角相交呈 T 字形（图 6a），有三条相交呈 Y 字形（图 6b），还有三条相交呈三角形（图 6c）。这些地表变形单条发育宽度沿走向基本不变，但延伸不远就突然终止，野外仅在此地发现这种特征的地表变形。这些平直地裂缝有可能是在局部较为单一方向且相对稳定的应力作用下产生的，应力使得岩石沿着某个特定方向较为整齐地裂开，从而形成了相对平直的裂缝形态。

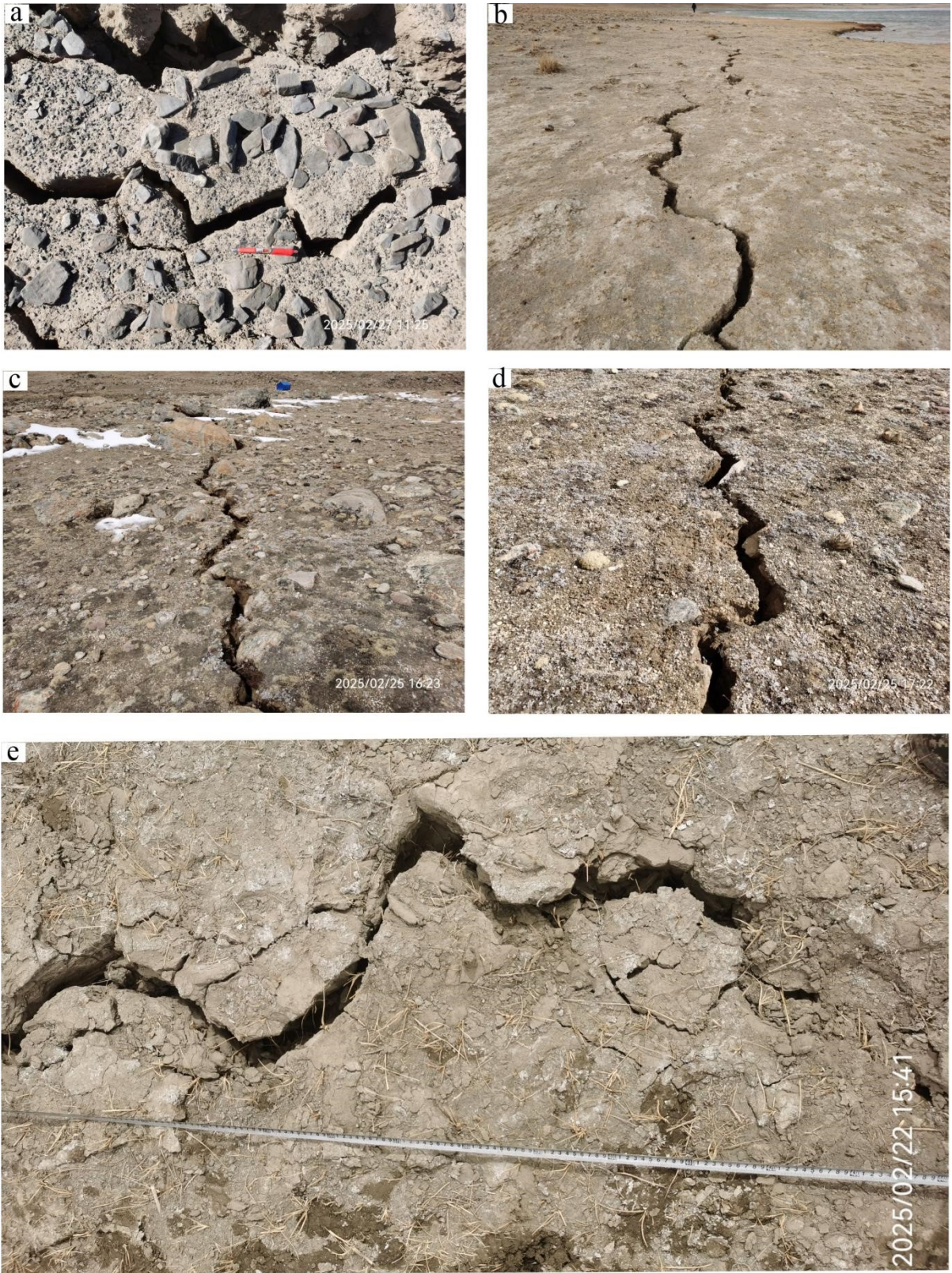


图5 锯齿状张性地表变形野外照片

Fig.5 Field photos of serrated tensile Surface deformations

(a)强嘎村左行特征明显的地表变形；(b)错果湖左行特征不明显的地表变形；(c)和(d)尼辖错左行特征明显的地表变形；(e)朋曲河旁左行特征不明显的地表变形

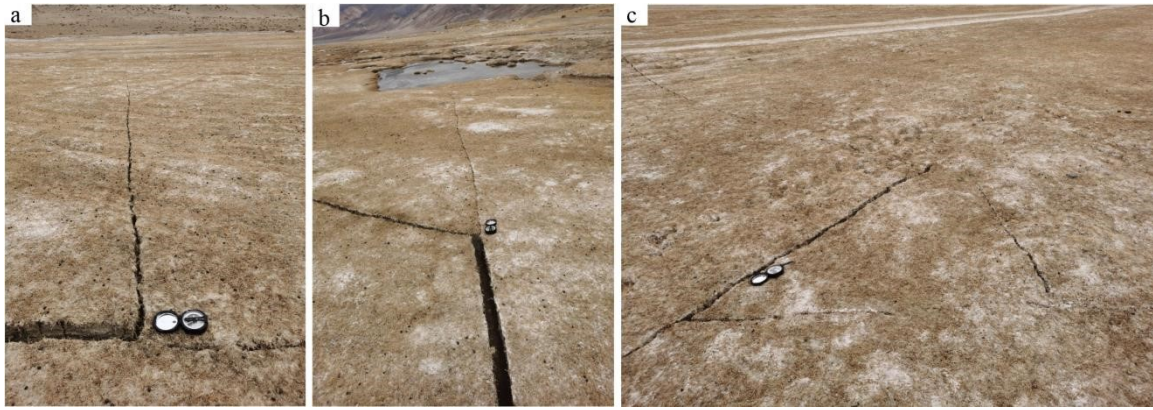


图6 平直地裂缝野外照片

Fig.6 Field photos of flat Surface deformations

(a)T字形地表变形；(b)Y字形地表变形；(c)三角形地表变形

2.2 台阶式或地堑式地表变形

定日地震地表变形北段发育在丁木错断裂北段（图 4），也就是拉轨岗日变质核杂岩发育区，地表变形在冰蚀 U 型谷中冰水沉积物和洪冲积物中穿过，地表变形宽度与地形关系密切。在地形较陡处，地表变形宽度小，而在地形较缓处，特别是洪冲积平台或冰碛垄较宽缓处，地表变形宽度大。地表变形发育宽度较大处的地表变形往往呈台阶式组合特征，发育由东向西依次下降的台阶式破裂陡坎，陡坎垂向位移不等。野外调查点 D75（E87°33.76′，N28°43.82′）及附近发育多条走向平行的地表变形，垂向位移 15~65 cm 不等，洪冲积平台被地表变形分割成若干条块状台阶，阶面宽 5~35 m 不等（图 7a）。野外调查点 D79（E87°33.66′，N28°43.15′）及附近发育多条走向平行的地表变形，洪冲积平台被地表变形分割成干条块状台阶，阶面宽 5~50 m 不等，垂向位移 10~85 cm 不等，显示由东向西依次下降特征（图 7b）。

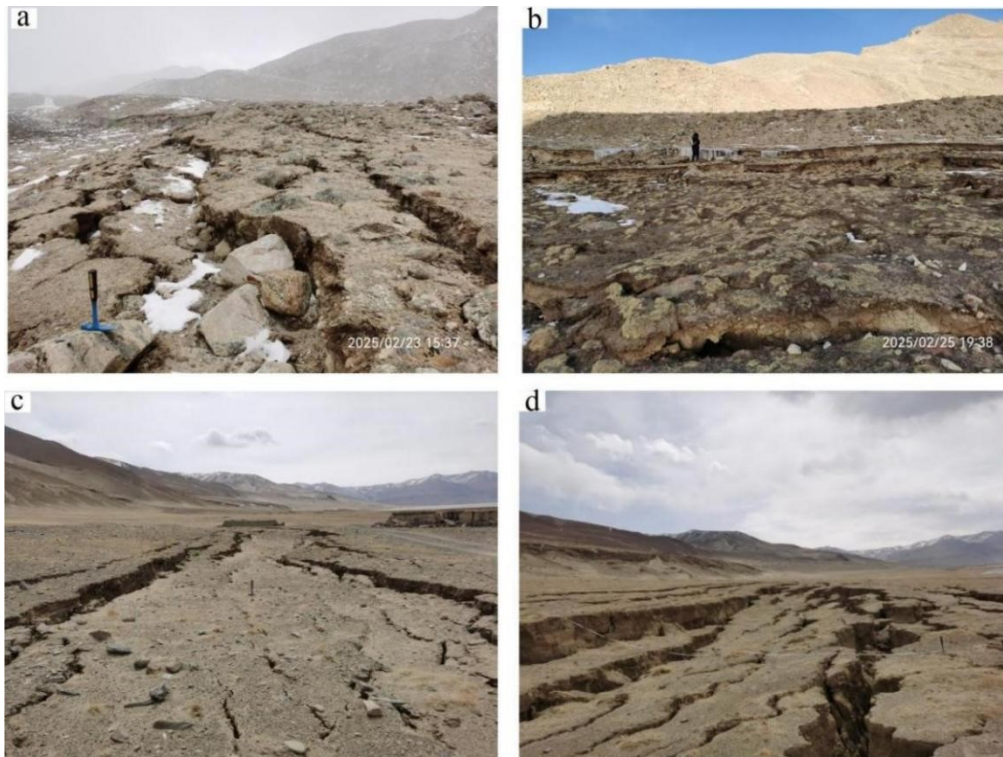


图7 不同组合特征的地表变形野外照片

Fig.7 Field photos of surface fractures with different combinations of features

(a)和(b)台阶式组合特征的地表变形；(c)和(d)地堑式组合特征的地表变形

定日地震不仅引起了以上台阶式同震地表变形,同时还造成浅层次生变形,从而在丁木错湖东盆山接合处洪冲积扇体和洪冲积平台中形成弥散型次生地表变形。野外调查点 D118(E87°33.82', N28°34.98') 及附近发育多条走向近南北向的地表变形,走向近于平行对称发育,中间整体下陷,垂向位移由两侧 5 cm 左右向中间增大到 65 cm 左右,构成典型地堑式地裂缝组合特征(图 7c)。野外调查点 D124(E87°33.63', N28°33.93') 及附近发育多条走向近南北向的地表变形,走向近于平行对称发育,垂向位移由两侧 5 cm 左右向中间增大到 132 cm 左右,缝间距最大达 164 cm 左右,能见缝深最大达 200 cm 左右,除中间由于差异性塌陷引起局部微微隆起外,整体也构成地堑式地裂缝组合特征(图 7d)。此类地堑式地表变形虽然不属于同震破裂,但也往往是地震活动时,第四系松散堆积物在重力作用下受地震作用触发而形成,是地震引起的破坏性较强的次生灾害。

2.3 平移地裂缝

定日地震地表裂缝样式复杂多样,除了大量表现伸展特征的张性裂缝外,在地表变形带内部和前缘还少量发育左行走滑特征的平移裂缝和挤压特征的挤压鼓包、挤压隆起。前面介绍的锯齿状、平直状、台阶式以及地堑式地裂缝有一部分兼具有平移特征,只是有些平移特征明显,有些平移特征不明显。此次野外调查在多处发现了平移特征较明显的地表裂缝。野外调查点 D73(E87°33.78', N28°43.86') 在地表变形北段甲拉测沙南 100 米处,地裂缝不仅将干枯的牛粪撕裂成两半,还将其左行错移 3 cm 左右(图 8a)。野外调查点 D81(E87°33.76', N28°43.81') 在调查点 D73 南 120 m 处,地裂缝不仅将冻土鼓包撕裂成两半,还将其左行错移 10 cm 左右(图 8b)。野外调查点 D30(E87°33.34', N28°42.63') 在地表变形北段尼辖错旁,由湖边向公路方向由南向北线状稳定延伸,地裂缝不仅将冻土鼓包撕裂成两半,还将其左行错移 0~8 cm 不等(图 8c)。野外调查点 D40(E87°33.19', N28°36.31') 位丁木错湖东北边,锯齿状地裂缝边缘指示右行错移,但错移量不大(图 8d)。

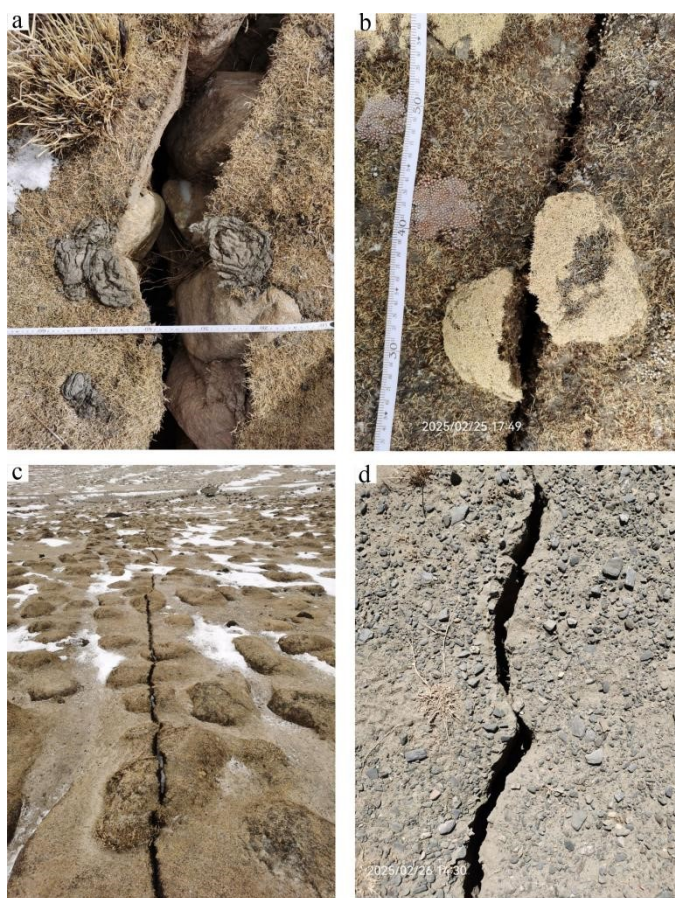


图8 平移地表变形野外照片

Fig.8 Strike-slip Surface deformations

(a)干枯的牛粪指示左行滑动; (b)和(c)冻土鼓包指示左行滑动; (d)松散的洪冲积物指示微弱右行滑动

2.4 地震挤压隆起

定日地震地表变形不仅具有张性特征，局部地段还发育有具有挤压特征的地震挤压隆起，此次野外调查过程中仅在地表变形中段，即丁木错东的盆山接合部位发现多条地震挤压隆起。地震挤压隆起走向整体与此地发育的地堑式地表变形走向一致，但发育位置更靠近丁木错湖，处于全新统湖积物和更新统冲洪积物交界部位，沿走向均呈波状左右弧形延伸。野外调查点D123 (E87°33.71', N28°34.17') 挤压隆起呈锯齿状，脊高5~25 cm，断断续续延伸30 m左右(图9a)。野外调查点D126 (E87°33.59', N28°33.76') 挤压隆起呈锯齿状，挤压隆起中部虚脱空间较大，脊高15~40 cm，连续延伸达100 m左右(图9b)。野外调查点D102 (E87°32.41', N28°37.31') 挤压隆起呈锯齿状，脊高15~35 cm，连续延伸达200 m左右，脊间虚脱空间不发育(图9c)，两条挤压隆起近平行南北向展布，中间未见锯齿状张性破裂发育(图9d)。挤压隆起反映地壳有挤压缩短现象，对大小不同的挤压隆起进行统计分析，其缩短距离为10~50 cm不等，一般在30 cm左右。



图9 挤压隆起野外照片

Fig.9 Field photos of squeezing uplift

(a)和(b)锯齿状挤压隆起；(c)和(d)平行发育的挤压隆起

3 初步认识与讨论

2025年1月7日定日地震是一次较严重的破坏性地震，震中烈度IX度。从破裂强度来看，沿主破裂带地表处穿越的所有土坯建筑物，均有较严重的损坏。图10显示丁木错湖东几处破旧民居被损毁的情况，可见有些墙体中的破裂缝与地表变形有明显错移，说明地表变形并未直接穿过墙体导致倒塌(图10a)；有些墙体中的破裂缝与地面破裂缝完全重合且均呈拉张锯齿状，说明地表变形直接穿墙而过导致墙体张裂(图10b)；多组地表变形在墙体部位汇合或者间距突然变小导致缝间墙体全部倒塌(图10c)，方向不稳定的张性地表变形交织在墙根处导致墙体也出现多条错位的破裂(图10d)。由此可知，地震引起的地表变形直接穿过土坯墙体，导致墙体发生多处撕裂缝，这种情况下，土坯房就会发生错位整体倒塌。所以，位于地震破裂带中心的古荣村、强嘎村，措果乡的吉翁村等村庄损毁严重。

定日地震中有大量锯齿状张性地裂缝形成，这是由于地壳岩石受到强大的伸展拉张应力作用而产生。这种伸展拉张应力使得岩石在拉伸过程中逐渐破裂形成裂缝，其呈现出锯齿状的形态可能是因为在应力释放过程中并非均匀扩展，不同部位的岩石抵抗能力存在差异，导致裂缝边缘出现类似锯齿般的不规则形状。这类锯齿状张性地裂缝通常在张性构造区域较为多见，并且张性地裂缝组合而成的台阶式地裂缝、地堑式地裂缝均指示定日地震是受到张性构造控制，其发震断层应该就是具有正断性质的丁木错断裂。

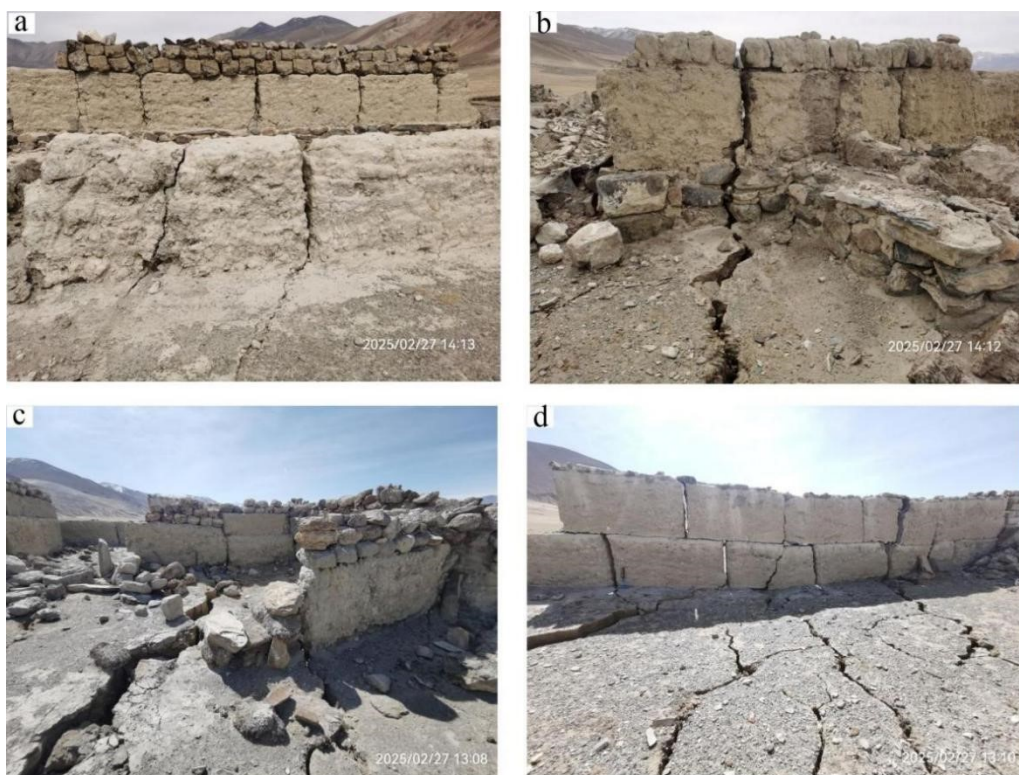


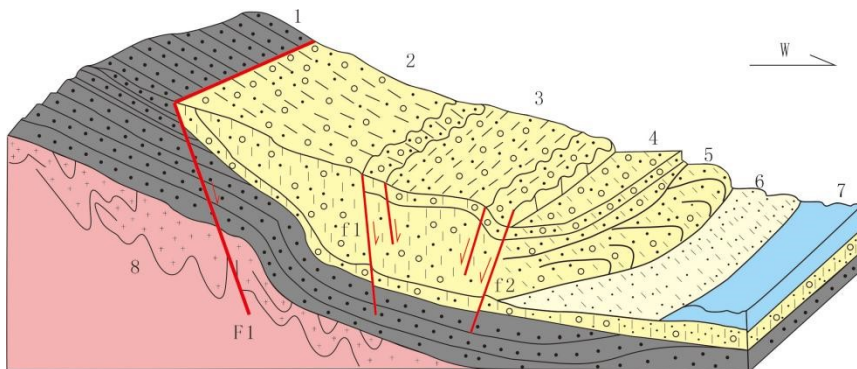
图10 地表变形与房屋裂缝对比照片

Fig.10 Comparison photos of surface deformation house fissures

(a)墙体中的破裂缝与地表变形有明显错移；(b)墙体中的破裂缝与地表变形重合；(c)多组地表变形交汇于墙体；(d)张性地表变形导致墙体中形成多条错位的破裂

多个指向标志显示，非构造成因的次生地表变形水平位移不明显，而同震地表变形具有较明显的左行平移特征，说明发震断裂也具有左行平移特征，因而发震断层丁木错断裂不仅具有正断性质，还具有左行走滑性质（刘富财等，2025；盛书中等，2025），是一条具有复合性质的活动断裂。

丁木错湖东洪冲积扇体中发育的地表变形整体构成后缘端沿着丁木错断裂向下滑动，中间受到地震活动引起的次生地表变形伸展拉张形成地堑，前缘沿着晚更新世洪冲积平台与全新世湖积物湖漫滩边界挤压缩短形成地震挤压隆起和挤压鼓包（刘富财等，2025；石峰等，2025）。这种构造主要发育在斜坡带上，后缘端坡度较大，由于先存断裂作用或地震活动导致后缘出现强烈拉张特征；前缘端坡度小或平坦，在地震作用触发下，斜坡体重力失稳整体向下滑，后缘端受拉张力作用易形成台阶式、地堑式伸展构造；前缘端受阻而易形成褶皱、挤压隆起、鼓包等挤压缩短构造，为典型重力滑动构造（图 11）。



1—古生界碎屑岩山体；2—早更新世洪冲积扇体；3—张性地裂缝发育带；4—晚更新世洪冲积平台；5—挤压隆起与鼓包发育区；6—全新世湖积物；7—丁木错；8—前震旦系花岗质片麻岩；F1—丁木错断裂带；f1—顺坡向正断层；f2—逆坡向正断层

图11 地震引起的重力滑动构造示意图

Fig.11 Schematic diagram of gravity sliding structure caused by the Earthquake

从区域尺度上来看,定日地震发生在藏南喜马拉雅地震带南北向地堑带与东西向伸展正断层交汇处,即申扎—定结地堑与藏南拆离系的交叉部位。形成于新近纪的藏南 7 条地堑带均将早期形成的藏南拆离系切割错移,这是青藏高原内部新生代伸展拉张的重要表现,也是地堑带高温温泉的形成和高原板内地震发生的机制(Armijo et al., 1986; 吴章明等, 1994; Molnar et al., 1993; 吴中海等, 2008; Wang et al., 2019; 田婷婷等, 2023)。新生代中、晚期,藏南地幔热物质的底辟上涌及中、下地壳高温热流层流作用,构成了藏南高喜马拉雅构造带后缘端强烈伸展拉张背景,活化了以藏南拆离系为代表的近东西向断裂系统和以丁木错断裂、定结—申扎断裂为代表的近南北向断裂系统及其控制的地堑带。伸展构造新生代的强烈活动引起的附加应力能促使地球深部的热能、地球内部的重力势能在不同方向活动构造集中区域出现快速扰动,并在断裂交汇处释放导致了以定日地震为代表的高原震害(卢占武等, 2006; 刘德民等, 2020, 2024; 刘富财等, 2025)。

4 结论

通过对 2025 年 1 月 7 日西藏定日地震的野外观察测量和地质背景分析,得出如下主要认识:

(1) 定日地震导致的地表变形主要分布在丁木错断裂上盘,单条破裂几何形态多呈锯齿状,个别呈光滑平直状;地表变形由北向南可以分为三段,北段以台阶式组合特征为主,中段以地堑式组合特征为主;多个指向标志显示,地表变形具有平移特征;地表变形中段具有重力滑动构造特征,在前缘端发育有地震挤压隆起;同震位移以垂向运动为主,垂向位移沿走向变化较大,地表变形北段垂向位移大,最大可达 185 cm,中段次之,最大可达 120 cm,南段垂向位移最小。

(2) 定日地震的发震构造是丁木错断裂,该断裂以正断性质为主,兼有左行平移性质,是一条复合型的活动断裂。

(3) 定日地震导致大量人员伤亡和房屋损毁,是一次破坏性较大的浅源构造地震,是喜马拉雅地震带中南北向丁木错平移正断层及近东西向藏南拆离系新生代活动引起的。

致谢:感谢审稿专家对本文进行了认真审阅,并提出了宝贵的修改建议。

References

- Armijo, R., Tapponnier, P., Mercier, J.L., et al., 1986. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B14):13808-13872.
- Bian, S., Yu, Z.Q., Gong J.F., et al., 2021. Spatial-temporal distribution and geodynamic mechanism of the nearly NS trending rifts in the Tibetan plateau. *Journal of Geomechanics*, 27(2):178-194 (In Chinese with English abstract).
- Dang, G.M., Wang, Z.J., 2002. Characteristics of the surface rupture zone and main seismic hazards caused by the $M_s8.1$ earthquake west of the Kunlun pass, China-Constraints on the regional stability of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 21(2):105-108 (In Chinese with English abstract).
- Gao, Y., 2024. Spatial-temporal characteristic of the Quaternary NS trending normal faulting in the Dinggye Gyrong area, southern Tibet. *Beijing: Pekin University* (In Chinese).
- Kali, E., Leloup, P.H., Arnaud, N., et al., 2010. Exhumation history of the deepest central Himalayan rocks, Ama Drime range: Key pressure-temperature-deformation-time constraints on orogenic models. *Tectonics*, 29(2). doi:10.1029/2009TC002551.
- Huang, T., Wu, Z.H., Han, S., et al., 2024. The basic characteristics of active faults in the region of Xigaze, Xizang and the assessment of potential earthquake disaster risks. *Progress in Earthquake Sciences*, 54(10): 696-711 (In Chinese with English abstract).
- Leloup, P.H., Mahéo, G., Arnaud, N., et al., 2010. The South Tibet detachment shear zone in the Dinggye area Time constraints on extrusion models of the Himalayas. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1~2): 1-16.

- Li, H.B., Fu, X.F., Jérme, V.D.W., et al., 2008. Co-seismic Surface Rupture and Dextral-slip Oblique Thrusting of the MS 8.0 Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1623-1643 (In Chinese with English abstract).
- Li, N., Liu, L.Q., Zhu, L.D., et al., 2024. Quaternary soft-sediment deformation structures in the Dingmucuo graben, northern Himalaya. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(6): 1048-1069 (In Chinese with English abstract).
- Liu, D.M., Li, D.W., 2003. Detachment faults in Dingjie area, middle segment of Himalayan orogenic belt. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(1): 37-42 (In Chinese with English abstract).
- Liu, D.M., Li, D.W., Yang, W.R., 2003. Study of mylonite and deformation of ductile shear zone, Dingjie area. *Earth Sciences Frontiers*, 10(2): 479-486 (In Chinese with English abstract).
- Liu, D.M., Yang, W.R., Guo, T.Y., 2020. Discussion on Cenozoic tectonic development and dynamics in South Tibet. *Earth Sciences Frontiers*, 27(1): 194-203 (In Chinese with English abstract).
- Liu, D.M., Wang, J., Jiang, H., et al., 2024. Evolutionary geodynamics and remote effects of the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 31(1): 154-169 (In Chinese with English abstract).
- Liu, F.C., Pan, J.W., Li, H.B., et al., 2025. Co-seismic surface rupture of the 2025 Mw7.1 Tingri earthquake and potential seismic risk in southern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 99(3): 685-703 (In Chinese with English abstract).
- Lu, Z.W., Gao, R., Li, Q.S., et al., 2006. Deep geophysical probe and geodynamic study on the Qinghai-Tibet Plateau (1958-2004). *Chinese Journal of Geophysics*, 49(3): 753-770 (In Chinese).
- Molnar, P., England, P., Martinod, J., 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan plateau, and the Indian Monsoon. *Reviews of Geophysics*, 13(4): 357-396.
- Pan, J.W., Li, H.B., Wu, F.X., 2011. Surface rupture characteristics, rupture mechanics, and rupture process of the Yushu earthquake (Ms7.1), 14/04/2010. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3449-3459 (In Chinese with English abstract).
- Shao, Y.S., Wang, A.S., Liu, J., et al., 2025. Preliminary Investigation on Surface Rupture and Coseismic Displacement of the January 7, 2025 Dingri Earthquake in Xizang. *Earth Science*, <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20250305.1144.002>.
- Sheng, S.Z., Wang, Q.R., Li, Z.Y., et al., 2025. Investigation of the seismogenic structure of the 2025 Dingri Ms 6.8 earthquake in Xizang base on the tectonic stress field perspective. *Seismology and Geology*, 47(1): 49-63 (In Chinese with English abstract).
- Shi, F., Lian, M.J., Luo, Q.X., et al., 2025. Seismogenic fault and coseismic surface deformation of the Dingri Ms 6.8 earthquake in Tibet, China. *Seismology and Geology*, 47(1): 1-15 (In Chinese with English abstract).
- Tapponnier, P., X, Z.Q., Roger, F., et al., 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- Tian, T.T., 2021. Dating of late Quaternary paleoseismic events of the DingmuCuo Fault in the southern section of Shenzha-Dingjie Rift. *Beijing: China University of Geosciences* (In Chinese).
- Tian, T.T., Wu, Z.H., 2023. Recent prehistoric major earthquake event of Dingmucuo Normal fault in the southern segment of Shenzha-Dingjie Rift and its seismic geological significance. *Geological Review*, 69(s1): 53-55 (In Chinese with English abstract).
- Wang, H., Elliott, J.R., Craig, T.J., et al., 2014. Normal faulting sequence in the Pumqu-Xainza Rift constrained by InSAR and teleseismic body-wave seismology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(7): 2947-2963.
- Wang, H., Wright, T.J., Liu, Z.J., et al., 2019. Strain rate distribution in south central Tibet from two decades of InSAR and GPS. *Geophysical Research Letters*, 46(10): 5170-5179.

- Wu,Z.H., Zhang,Y.S., Hu,D.G.,et al., 2008. Quaternary normal faulting and its dynamic mechanism of the Cona-Nariyong Co graben in south-eastern Tibet. *Quaternary Sciences*, 28(2): 232-242 (In Chinese with English abstract).
- Wu,Z.M., Cao, Z.Q., Shen,T.B.M.,et al., 1994. Seismogenic tectonics in the central Tibet. *Earthquake Research in China*, 10(1): 19-27 (In Chinese).
- Xu, X.Y., 2019. Late Quaternary activity and its environmental effects of the N-S trend Kharta fault in Shenzha-Dingjie Rift, Southern Tibet. *Beijing: Institute of Geology, China Earth quake Administration* (In Chinese).
- Yang, T., Wang, S. G., Fang, L. H.,et al.,2025.Aftershock sequence characteristics and seismogenic structure of the Ms 6.8 Dingri earthquake in Tibet. *Journal of Earth Science*, <http://doi.org/10.3799/dqkx>. 2025. 033.
- Yin, A., Kapp, P.A., Murphy, M.A., et al., 1999. Significant late Neogene east-west extension in northern Tibet. *Geology*, 1999, 27:787-790.
- Yin, A., 2000.Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9): 21745-21759.
- Zhang,J.J., 2007. Review on the extensional structures in the northern Himalaya and southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 639-649 (In Chinese with English abstract).
- Zhou, J.J., Shao, Z.G., He, H.L., et al., 2025. Surface rupture interpretation and building damage assessment of Xizang Dingri M_s 6.8 earthquake on January 7, 2025. *Seismology and Geology*, 47(1):16-35 (In Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 卞爽, 于志泉, 龚俊峰, 等, 2021. 青藏高原近 SN 向裂谷的时空分布特征及动力学机制. *地质力学学报*, 27(2): 178-194.
- 党光明, 吴赞军, 2002. 青海昆仑山口西 $M_s8.1$ 级地震地表破裂带特征与主要震害—对青藏高原区域稳定性评价的制约. *地质通报*, 21(2): 105-108.
- 高扬, 2024. 藏南定结—吉隆地区第四纪近SN向正断层作用的时空特征. 北京: 北京大学.
- 黄婷, 吴中海, 韩帅, 等, 2024. 西藏日喀则地区的活断层基本特征及地震灾害潜在风险评估. *地震科学进展*, 54(10): 696-711.
- 李海兵, 付小方, Jérme Van Der Woerd, 等, 2008. 汶川地震($M_s8.0$)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用. *地质学报*, 82(12): 1623-1643.
- 李楠, 刘陇强, 朱利东, 等, 2024. 喜马拉雅北缘丁木错地堑第四纪软沉积物变形构造. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 51(6): 1048-1069.
- 刘德民, 李德威, 2003. 喜马拉雅造山带中段定结地区拆离断层. *大地构造与成矿学*, 27(1): 37-42.
- 刘德民, 李德威, 杨巍然, 2003. 定结地区韧性剪切带变形特征与糜棱岩研究. *地学前缘*, 10(2): 479-486.
- 刘德民, 杨巍然, 郭铁鹰, 2020. 藏南地区新生代多阶段构造演化及其动力学的探讨. *地学前缘*, 27(1): 194-203.
- 刘德民, 王杰, 姜淮, 等, 2024. 青藏高原形成演化动力机制及其远程效应. *地学前缘*, 31(1): 154-169.
- 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. *地质学报*, 99(3): 685-703.
- 卢占武, 高锐, 李秋生, 等, 2006. 中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究(1958—2004). *地球物理学报*, 49(3): 753-770.
- 潘家伟, 李海兵, 吴富饶, 等, 2011. 2010年玉树地震($M_s7.1$)地表破裂特征、破裂机制与破裂过程. *岩石学报*, 27(11): 3449-3459.
- 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. *地球科学*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20250305.1144.002>.
- 盛书中, 王倩茹, 李振月, 等, 2025. 基于构造应力场研究 2025 年西藏定日 6.8 级地震的发震构造. *地震地质*, 47(1): 49-63.

- 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. 地震地质, 47(1): 1-15.
- 田婷婷, 2021. 申扎一定结裂谷南段丁木错断裂晚第四纪古地震事件研究. 北京: 中国地质大学(北京).
- 田婷婷, 吴中海, 2023. 西藏申扎一定结裂谷南段丁木错正断层的最新史前大地震事件及其地震地质意义. 地质论评, 69(s1): 53-55.
- 吴中海, 张永双, 胡道功, 等, 2008. 西藏错那-拿日雍错地堑的第四纪正断层作用及其形成机制探讨. 第四纪研究, (2):232-242.
- 吴章明, 曹忠权, 申屠炳明, 1994. 西藏中部的发震构造. 中国地震, 10(1): 19-27.
- 徐心悦, 2019. 藏南申扎一定结断裂系卡达正断裂晚第四纪活动性及其环境效应. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 杨婷, 王世广, 房立华, 等, 2025. 西藏定日 Ms 6.8地震余震序列特征与发震构造. 地球科学, <http://doi.org/10.3799/dqkx.2025.033>.
- 张进江, 郭磊, 丁林, 2002. 申扎一定结正断层体系中、南段构造特征及其与藏南拆离系的关系. 科学通报, 47(10): 738-743.
- 张进江, 2007. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述. 地质通报, 26(6):639-649.
- 邹俊杰, 邵志刚, 何宏林, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 M_S 6.8 地震地表破裂解译与建筑物震害损毁统计. 地震地质, 47(1): 16-35.