**引用格式**：黄婷，吴中海，韩帅，等，2026. 2025 年 1 月 7 日定日 $M_S$ 6.8 地震诱发的液化大变形特征及其成因机制[J]. 地质力学学报，32（3）：581−602. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026047

**Citation:** HUANG T，WU Z H，HAN S，et al.，2026. Liquefaction-induced large-scale ground deformation triggered by the 7 January 2025 $M_S$ 6.8 Dingri earthquake: characteristics and formation mechanisms[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：581−602. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026047

# 2025 年 1 月 7 日定日 $M_S$ 6.8 地震诱发的液化大变形特征及其成因机制

黄　婷[1,2]，吴中海[1,3]，韩　帅[1,3]，李智超[1,3]，凡福新[1,3]，高　扬[1]，田婷婷[1,3]，陆诗铭[1,3]

HUANG Ting[1,2]，WU Zhonghai[1,3]，HAN Shuai[1,3]，LI Zhichao[1,3]，FAN Fuxin[1,3]，GAO Yang[1]，TIAN Tingting[1,3]，LU Shiming[1,3]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 北京大学地球与空间科学学院，北京 100871；
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081

1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *School of Earth and Space Sciences*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *China*;
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*

## Liquefaction-induced large-scale ground deformation triggered by the 7 January 2025 $M_S$ 6.8 Dingri earthquake: characteristics and formation mechanisms

**Abstract:** ［**Objective**］In liquefaction-susceptible geological settings, the spatial superimposition of earthquake-induced liquefaction and coseismic fault rupture renders the genetic attribution of surface deformation highly ambiguous, yet systematic field diagnostic criteria and a unified geomechanical framework remain elusive.［**Methods**］Integrating field emergency surveys, high-resolution remote sensing image interpretation, unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, and borehole–trench investigations with regional geological and hydrogeological context, this study systematically characterizes the spatial distribution and controlling mechanisms of large-scale surface deformation triggered by the 7 January 2025 $M_S$ 6.8 Dingri, Tibet earthquake.［**Results**］Our results show that the extensive surface deformation along the eastern shore of Dengmecuo Lake to the Pengqu River is dominated by liquefaction-induced lateral spreading rather than coseismic tectonic surface rupture; small-scale coseismic surface ruptures occur locally along the eastern lake shore; and north of Nixiacuo, coseismic surface rupture predominates, with superimposed liquefaction deformation. The spatial extent of liquefaction-induced lateral spreading is governed by two topographic configurations: free-face conditions in river valleys, and gently sloping ground on low-gradient alluvial–lacustrine plains. Earthquake-induced liquefaction substantially reduces the shear strength of water-saturated sandy sediments and, driven by the combined effects of seismic inertia and gravity, triggers lateral spreading that generates lateral compressive forces and horizontal displacement. At the trailing edge

**基金项目**：国家自然基金青年科学基金项目（42402229）；国家自然科学基金项目（42472287，42202259）；中国地质调查项目（DD202601103304）

This research was financially supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42402229), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42472287 and 42202259), and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD202601103304).

**第一作者**：黄婷（1992—），男，在读博士，从事活动构造与地质灾害研究。Email：2201112483@stu.pku.edu.cn

**通信作者**：吴中海（1974—），男，博士，研究员，从事活动构造与第四纪地质研究。Email：wzhh4488@sina.com

**收稿日期**：2026−04−14；**修回日期**：2026−05−14；**录用日期**：2026−05−20；**网络出版日期**：2026−05−20；**责任编辑**：王婧

Received：2026−04−14；Revised：2026−05−14；Accepted：2026−05−20；Available Online：2026−05−20；Handling Editor：WANG Jing

of the deformation zone, tensional ground cracks and graben-like subsidence develop, whereas the leading edge is characterized by pressure ridges and shallow thrust structures formed by lateral compression. Tensile fissures generated by lateral spreading further provide conduits for the upward injection of liquefied sand from depth, giving rise to abundant sand volcanoes. The systematic coexistence of trailing-edge extension, leading-edge compression, and sand volcanoes constitutes a diagnostic deformation assemblage of liquefaction-induced lateral spreading, which is fundamentally distinct in geometry and kinematics from tectonic coseismic surface ruptures. The development of liquefaction deformation is jointly controlled by seismic intensity, micro-topography, the spatial distribution of liquefiable sand layers, and the depth of the shallow groundwater table. Importantly, lateral spreading can impose additional displacement onto active fault zones, and compressional liquefaction deformation may overprint fault traces, systematically biasing the identification of the geometry and kinematics of coseismic surface ruptures. Accordingly, we propose three field criteria for identifying liquefaction-induced deformation: (1) macroscopic plastic flow or fluid-like deformation features; (2) highly consistent deformation patterns along watercourses across both fault and non-fault zones under comparable depositional conditions; and (3) systematic spatial association with liquefaction indicators such as sand volcanoes. [**Conclusions**] We conclude that the large-scale deformation triggered by the 2025 Dingri earthquake should not be classified as coseismic surface rupture; rather, trailing-edge extension, leading-edge compression, and sand boils together constitute a unified lateral spreading system. Liquefaction-induced deformation exerts a pronounced overprinting effect on coseismic surface ruptures, and rigorously distinguishing the two in liquefaction-prone seismotectonic settings is essential for accurately assessing fault activity. [**Significance**] This study provides the first systematic mechanistic framework for liquefaction-induced large-scale deformation associated with the Dingri earthquake, and the field criteria and conceptual model established herein offer a scientific basis for seismic hazard assessment, post-earthquake reconstruction, and major engineering siting in the southern Tibetan rift system.

**Keywords:** Dingri earthquake; large deformations induced by liquefaction; liquefaction of sand; deformation mechanism

**摘　要：**为探究2025年1月7日西藏定日$M_S$ 6.8地震诱发的大规模复杂地表变形带的形成机制与变形过程，基于现场应急调查、高分辨率遥感影像解译、无人机航测、钻孔及探槽等多源数据，结合区域地质背景分析，系统研究了地表变形带的空间展布特征及成因机制。结果表明：登么错湖东岸至朋曲河沿线的地表变形带主要为地震诱发的液化变形，湖东岸局部可见小规模同震地表破裂；而尼辖错北则以同震地表破裂为主导变形模式，叠加地震诱发的液化变形现象。砂土液化显著降低了沉积物抗剪强度，诱发沉积物发生横向扩展，产生横向推挤效应和水平位移。液化区的整体位移使变形带后缘发生伸展变形，前缘因推挤作用形成挤压缩短构造。横向扩展形成的地裂缝为沙火山的喷发提供了运移通道，从而造成了挤压变形、伸展变形及沙火山等构造共生的特殊变形现象。地震动是这些变形的主要触发因素，丰富的砂质沉积物及较浅的地下水位为地震液化提供了必要的基础条件。研究成果不仅揭示了地震诱发液化变形的机制，也为震后重建规划、重大工程选址和施工提供了科学依据，在藏南裂谷地区具有重要的参考意义。

**关键词：**定日地震；液化大变形；砂土液化；变形机制

**中图分类号：**P315; P546　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)03−0581−22

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026047

## 0　引言

砂土液化是指饱和砂层的孔隙水压力快速增加时，其抗剪强度显著降低或完全丧失，导致饱和砂层呈现类液态流动行为的地质过程(Allen, 1977)。地震波通过时产生的循环应力是诱发砂土液化的主要因素(Seed, 1979)。地震引起的砂土液化，不仅表现为“喷砂”和“涌水”现象，还可能形成包括地基沉降、边坡失稳、堤岸液化滑塌等大规模地表变形，对地面建筑物和工程设施构成严重威胁。这种变形因造成大规模不可恢复的永久位移且持续存在，被称为液化侧向扩展变形或液化后大变形(Vaid and Thomas, 1995; Shahbodagh et al., 2020; Hoang et al., 2024)，文中简称液化大变形。历史上，诸如1964年新泻地震、1975年海城地震、1976年唐山地震、1995年神户地震、2011年基督城地震及2018年印尼帕鲁地震等多次破坏性地震均记录了液化大变形现象及其对工程设施造成的毁灭性破坏，这一现象在岩土工程领域已引起广泛关注。

目前，国内外研究主要集中于运用物理模拟和数值模拟手段解析液化大变形的形成机制、还原其形成过程，以及预测最大可能位移及其发生时限（Iwatate et al., 1999; Liu et al., 2021; Maghsoudi et al., 2022; Gong et al., 2024）。在野外变形特征研究方面，现有研究已涉及液化“喷砂”展布（Obermeier, 1996）、液化侧向扩展的地形控制效应（Youd et al., 2002）及液化诱发地裂缝形态（Tokimatsu and Seed, 1987）等方面。然而，对液化变形内部不同变形样式共生关系的成因解释，至今仍缺乏统一的地质力学模型；对液化变形带内部构造序列的精细刻画与定量表征亦鲜有系统性研究。

更为重要的是，在地震事件中，当液化变形与同震地表破裂叠加发育时，二者之间的相互改造效应使得复杂变形的成因解释面临巨大挑战。一方面，液化大变形产生的地裂缝、侧向扩展及地面沉降在局部形态上与同震地表破裂高度相似，加剧了变形成因归属的复杂性（Bardet et al., 2002; Green et al., 2014）。另一方面，液化流动变形对同震地表破裂具有不可忽略的二次改造效应，侧向扩展在断裂带上叠加额外位移，挤压性液化变形则可能导致断层行迹遭受改造，使原始破裂带的几何展布与位移特征趋于模糊，给同震地表破裂的识别与构造解释带来极大困难（Bray and Travasarou, 2007; Quigley et al., 2012, 2016; Bastin et al., 2015）。2011 年基督城地震中，液化侧向扩展对同震地表破裂产生了强烈改造，已被证实导致局部断层行迹的净位移量难以从液化累计位移中有效区分；2018 年印尼帕鲁地震中液化流变与断层滑动变形的空间耦合造成断裂规模评估存在相当大的不确定性。这些案例表明，在液化敏感地质环境中，厘清液化大变形与同震地表破裂之间的成因边界，精细刻画变形特征并重建发震断裂地表破裂过程，建立系统性的野外识别标准与地质力学模型，是当前地震灾害研究的迫切需求。

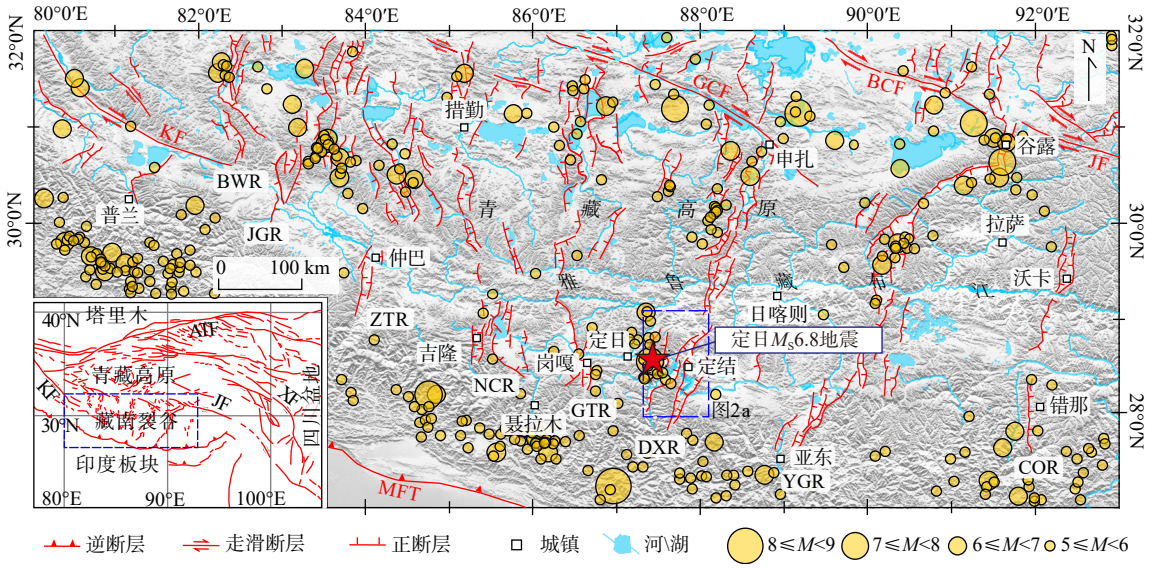
北京时间 2025 年 1 月 7 日 9 时 5 分，西藏自治区日喀则市定日县（87.45° E、28.50° N）发生 $M_S$ 6.8 地震（$M_W$ 6.9），震源深度 10 km。此次地震的发震断裂为藏南定结−申扎裂谷南段的登么错断裂，极震区位于长所乡—措果乡—曲洛乡一带，烈度最高达Ⅸ度。地震共造成 2.69 万间房屋倒塌、21.5 万间房屋损坏、126 人不幸遇难（中华人民共和国应急管理部，2025）。该地震在登么错断裂沿线及非断裂带的水系沿岸诱发了显著的地表变形带（早期考察报道中多称之为同震地表破裂），特别是登么错湖东岸沿线，变形带最宽>300 m，带内伸展变形与挤压变形共存，且伴随大量“喷砂涌水”现象。这些地表变形是否为同震地表破裂？其主控因素是什么？砂土液化在该此次地表变形中承担了什么样的角色？众多疑问阻碍了对此次地震地表破裂过程、发震断层构造活动特征及地震灾害特征的系统理解。

基于以上，此次研究在震后应急科考过程中，针对定日地震发震断裂——登么错断裂沿线及朋曲河沿岸，开展了地震液化大变形的专项调查。通过野外考察与高精度遥感影像解译、无人机航测、钻探及探槽等多源数据综合分析，以期查明该地震诱发的液化大变形特征及其空间分布规律，并尝试建立相应的判别标准和地质力学模型，旨在为震后重建和防震减灾提供科学依据，并为藏南类似地质背景地区的重大工程规划提供基础资料，具有重要的战略意义。

## 1　区域地质背景

随着印度板块向欧亚板块的持续汇聚，青藏高原地区发生了复杂的构造响应，包括南北向缩短、东西向伸展及显著的走滑断裂活动，使得青藏高原成为全球地壳活动最为活跃的地区之一（Molnar and Tapponnier, 1975; Armijo et al., 1989）。藏南 8 条近南北向展布的裂谷体系（图 1），作为印度−欧亚板块汇聚过程中东西向伸展的直接产物，与青藏高原的隆升过程密切相关（Armijo et al., 1986; 哈广浩，2019; Chevalier et al., 2020; 高扬等，2024）。目前关于藏南裂谷的活动构造研究，主要集中在东部交通条件相对较好的几条，其第四纪晚期垂直活动速率多在 0.28～2.00 mm/a 之间（吴中海等，2015; 哈广浩，2019; 田婷婷，2021; 左嘉梦，2021; 高扬，2024; 高扬等，2025）。

定结−申扎裂谷位于亚东−谷露裂谷西侧，总体走向 N20° E，全长约 350 km。该裂谷南起于定结盆地南侧的日屋镇南部，北抵申扎县城南侧，并由北西走向的格仁错断裂带截断。第四纪晚期以来，该裂谷构造活动显著，且具有全新世活动性。历史地震记录和现代地震目录显示，裂谷内地震频发，1930 年至 20 世纪末共发生 4 次 $M \geqslant 6.0$ 地震，最高震级 $M$ 6.6；2015 年尼泊尔 $M$ 8.1 地震后，在定日−定结地区发生 13 次 $M \geqslant 4.0$ 地震，最高震级 $M$ 5.9（侯丽燕等，2020）。定日 $M_S$ 6.8 地震发生后，该地区又发生




COR—错那–沃卡裂谷；YGR—亚东–谷露裂谷；DXR—定结–申扎裂谷；GTR—岗嘎–当惹雍错裂谷；NCR—聂拉木–措勤裂谷；ZTR—仲巴–塔若错裂谷；JGR—曲江藏布–改则裂谷；BWR—普兰–文布当桑裂谷；BCF—崩错断裂；GCF—格仁错断裂；KF—喀喇昆仑断裂；XF—鲜水河断裂；JF—嘉黎断裂；ATF—阿尔金断裂；MFT—主前锋逆冲断裂

图 1 藏南裂谷构造简图（据高扬等，2025 修改）

Fig. 1 Simplified tectonic diagram of the southern Tibet Rift Valley (modified after Gao et al., 2025)

COR—Cona–Oiga Rift; YGR—Yadong–Gulu Rift; DXR—Dinggye–Xainza Rift; GTR—Gangga–Tangra Yumco Rift; NCR—Nyalam–Coqen Rift; ZTR—Zhongba–Taro Co Rift; JGR—Jiangqu Zangbo–Gerze Rift; BWR—Burang–Wenbudangsang Rift; BCF—Beng Co Fault; GCF—Gyaring Co Fault; KF—Karakorum Fault; XF—Xianshuihe Fault; JF—Jiali Fault; ATF—Altyn Tagh Fault; MFT—Main Frontal Thrust

2 次 $M$ 5 余震。

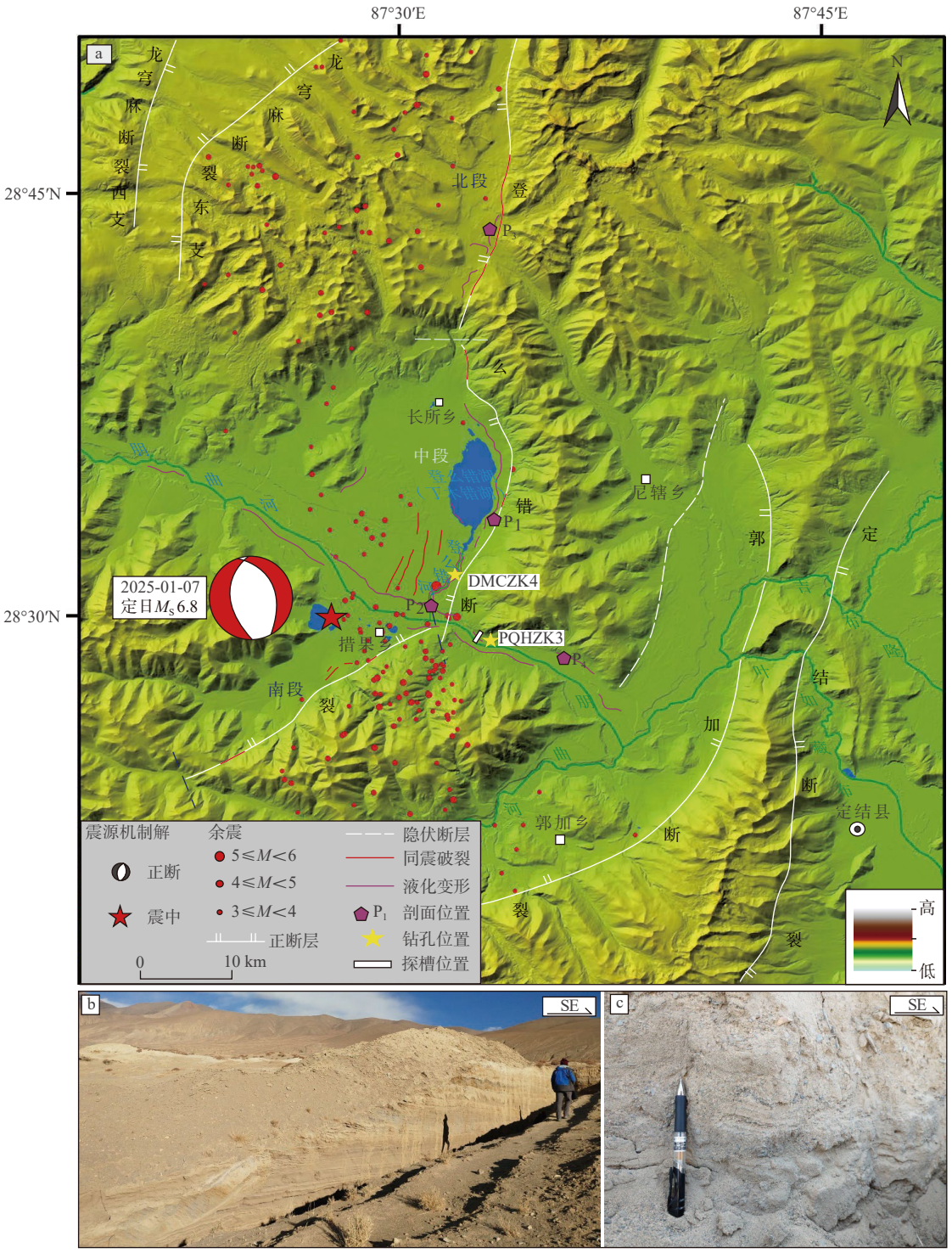
登么错断裂（也称之为丁木错断裂），位于定结–申扎裂谷南部，与郭加断裂、定结断裂、龙穹麻断裂共同构成近南北向展布的正断层系（图 2a，表 1）。该断裂南起野江村南约 7 km，向北经登么错、郎阿错、空摸错、错欧木厂、涅木丁错木，止于格巴错—萨巴错一带，全长约 60 km，走向近南北，地貌特征显著。以郎阿错为界可分为南北两支，北支表现为山间谷地与基岩山地的线性边界，山前发育线性展布的湖泊；南支为登么错地堑的东边界断裂。其中，南支断裂第四纪晚期构造活动显著，50 ka 以来的垂直活动速率为 0.28±0.04 mm/a，跨断裂地表陡坎的探槽至少揭示了 11 期古地震事件，其中全新世 10.8±1.2～11.0±1.3 ka 和 4800～4968 a 期间发生过显著的古地震事件，大震复发周期约为 5500±1100 a（田婷婷，2021），具有较高的强震危险性，最大潜在震级约为 $M_W$ 6.8～7.2（田婷婷等，2023）。地震灾害风险评估结果显示，临近该断裂的长所乡、措果乡存在较高的地震灾害潜在风险，主要震害为地震震动和砂土液化（黄婷等，2024）。

定结–申扎裂谷南部及其邻区的地层自下而上可概括为：前新生代以沉积岩系、低变质岩和花岗岩为主；古近系以石英砂岩、石灰岩和钙质页岩为主；新近系以河湖相泥岩、砂岩、砾岩为主；第四系沉积主要包括冰碛物、冲洪积物和湖相层。其中冰碛物多见于高海拔山间谷地，砂砾石混杂堆积，粒径大小悬殊；松散冲洪积物主要分布在裂谷内盆地边缘地带；盆地沉积物主要发育中更新世—晚更新世湖相沉积（邵兆刚等，2013），盆缘山麓地带多发育风成砂沉积。登么错湖及朋曲河流域广泛发育多套细砂、粉砂、黏土质粉砂等松散细碎屑沉积物（图 2b、2c），且地下水位较浅，为砂土液化提供了理想条件。

## 2 液化大变形判别及其空间分布

此研究基于震后最新高精度遥感影像解译和无人机航测，在发震断裂——登么错断裂沿线和朋曲河沿岸发现大规模较为连续的地表变形带，流化特征显著，与同震地表破裂存在显著的差异性（图 3）。

地表变形带主要特征包括：①宏观尺度上，整个变形带呈现明显的流态变形特征；②空间分布上，除断裂北段沿主断层呈线性展布外，登么错湖东岸及其以南地区主要沿山前冲积扇及河谷展布，




a—定日地震区域地震构造背景；b—登么错湖东岸砂层沉积特征；c—砂层粒度特征

图 2　定日地震区域地震构造背景图及砂层沉积特征

Fig. 2　Regional seismic tectonic background and sedimentary characteristics of sand layers of the Dingri earthquake

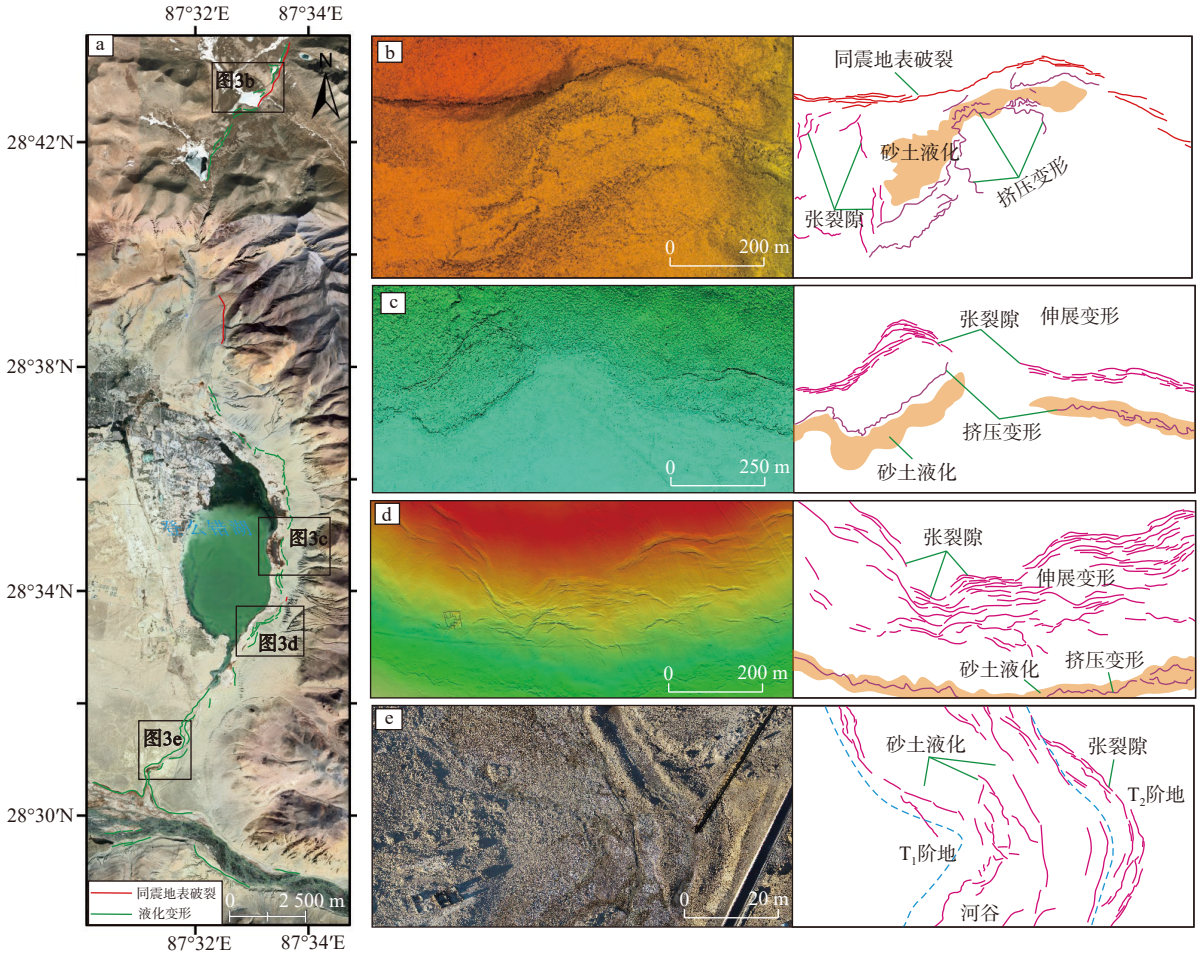
(a) Seismotectonic background of the Dingri earthquake region; (b) Sedimentary characteristics of the sand layer on the east shore of Dengmecuo Lake; (c) Sand particle size characteristics

远离主断层，且不具线性特征；③构造形态上，变形带后缘发育弧形张裂构造，前缘则发育弧形挤压逆冲边界；④地貌表现上，变形区地势平坦，变形后未形成显著地貌陡坎，变形带以外的低地势地区也未见变形迹象和显著地貌变化；⑤变形带伴生显著的“喷砂涌水”现象。

表 1 定结–申扎裂谷南部主要活动断层信息

Table 1 Information on major active faults in the southern part of the Dinggye–Xainza Rift Valley

| 裂谷名称 | 断裂名称 | 长度/km | 走向 | 运动性质 | 活动速率/(mm/a) | 5≤*M*<6 地震次数 | 6≤*M*<7 地震次数 | 最新活动时代 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 定结–申扎裂谷 | 登么错断裂 | 60 | 近南北 | 正断层 | 0.28±0.04(田婷婷, 2021)<br>0.6±0.1(高扬等, 2025) | 2 | 1 | 全新世 |
| | 郭加断裂 | 95 | 近南北 | 正断层 | 1.4±0.3(高扬, 2024) | 1 | – | 全新世 |
| | 定结断裂 | 70 | 近南北 | 正断层 | 0.9±0.2～1.4(+0.3/−0.2)<br>(高扬, 2024) | 2 | – | 全新世 |
| | 龙穹麻断裂东支 | 40 | 北东东 | 正断层 | – | – | – | 全新世 |
| | 龙穹麻断裂西支 | 15 | 北东东 | 正断层 | – | – | – | 全新世 |




DEM 渐变色系代表高程变化，绿色系对应低地势区域，红棕色系代表高地势区域

a—定日地震震区液化变形空间分布特征；b—登么错断裂北段同震地表破裂及液化变形无人机低空摄影 DEM 及素描；c—登么错湖东岸液化变形无人机低空摄影 DEM 及素描；d—登么错湖东岸南段液化变形无人机低空摄影 DEM 及素描；e—登么错河谷液化变形无人机低空摄影影像及素描

图 3 定日地震震区液化变形空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of liquefaction deformation induced by the Dingri earthquake

(a) Spatial distribution characteristics of liquefaction deformation in the Dingri earthquake area; (b) UAV-based DEM and sketch of coseismic surface rupture and liquefaction deformation in the northern segment of the Dengmecuo Fault; (c) UAV-based DEM and sketch of liquefaction deformation on the eastern shore of Dengmecuo Lake; (d) UAV-based DEM and sketch of liquefaction deformation in the southern segment of the eastern shore of Dengmecuo Lake; (e) UAV photographs of liquefaction deformation in the Dengmecuo Valley and its sketch

The DEM color gradient represents elevation variation: green for low-relief zones, reddish-brown for high-relief terrain.

这些变形特征与全球多个典型地震事件中记录的液化大变形现象高度相似，诸如 1964 年新泻地震（Toyota and Kazama, 2024）、1975 年海城地震、1976 年唐山地震（刘惠珊等，1997）、1995 年神户地震（Esper and Tachibana, 1998）、2011 年基督城地震（Robinson et al., 2012）、2018 年印尼帕鲁地震（Cilia et al., 2021）、2023 年土耳其双强震（陈龙伟等，2024）等。尤其是登么错湖东岸特征最为显著的液化大变形，与唐山地震液化变形最强烈地区的地貌特征一致（方鸿琪等，1983），均主要集中在冲积扇扇中—扇缘一带。

综合野外考察认识和国内外强震事件的资料对比，基本判定登么错断裂南段登么错湖东岸及其以南登么错河谷一带特征显著的地表变形，为典型的地震诱发液化大变形。该变形在登么错断裂北段尼辖错附近也有一定程度发育。除登么错断裂带沿线外，这些液化大变形在远离构造带的朋曲河杰塘—左措村沿岸也同样广泛发育（图 4）。

## 3　液化大变形的宏观特征

根据地震液化大变形的空间分布，研究设计了登么错断裂沿线（措果乡南—尼辖错—空摸错西，近 40 km）和朋曲河沿岸（杰塘—雄扎勒，近 35 km）2 条液化大变形专项调查路线，对此次定日地震诱发的液化大变形特征进行了系统分析。

### 3.1　登么错断裂沿线

#### 3.1.1　登么错湖东岸（P1，位置见图 2）

登么错湖东岸主断面在此次地震中未见激活迹象，仅在山前冲积扇群上形成南北长约 12 km 的液化大变形带，带宽一般 100～250 m，在杂村对岸处最宽（约 300 m），且变形特征最为显著，与同震地表破裂有着明显的差异（图 5）。

该地区变形带未沿主断面或者次级断层的地貌陡坎发育，主要集中在山麓冲积扇地势坡降较缓的扇中—扇缘一带，表现为不连续的弧形变形条

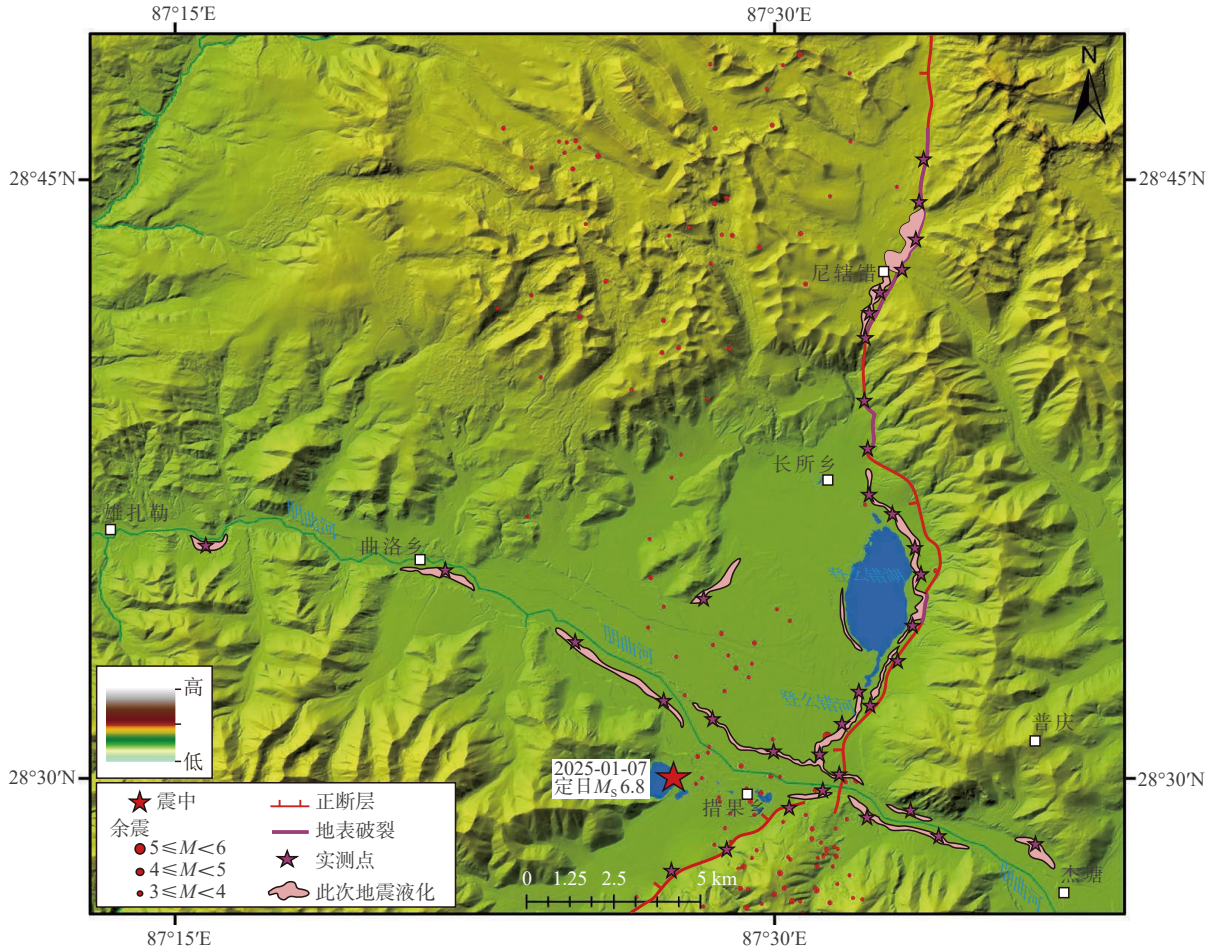
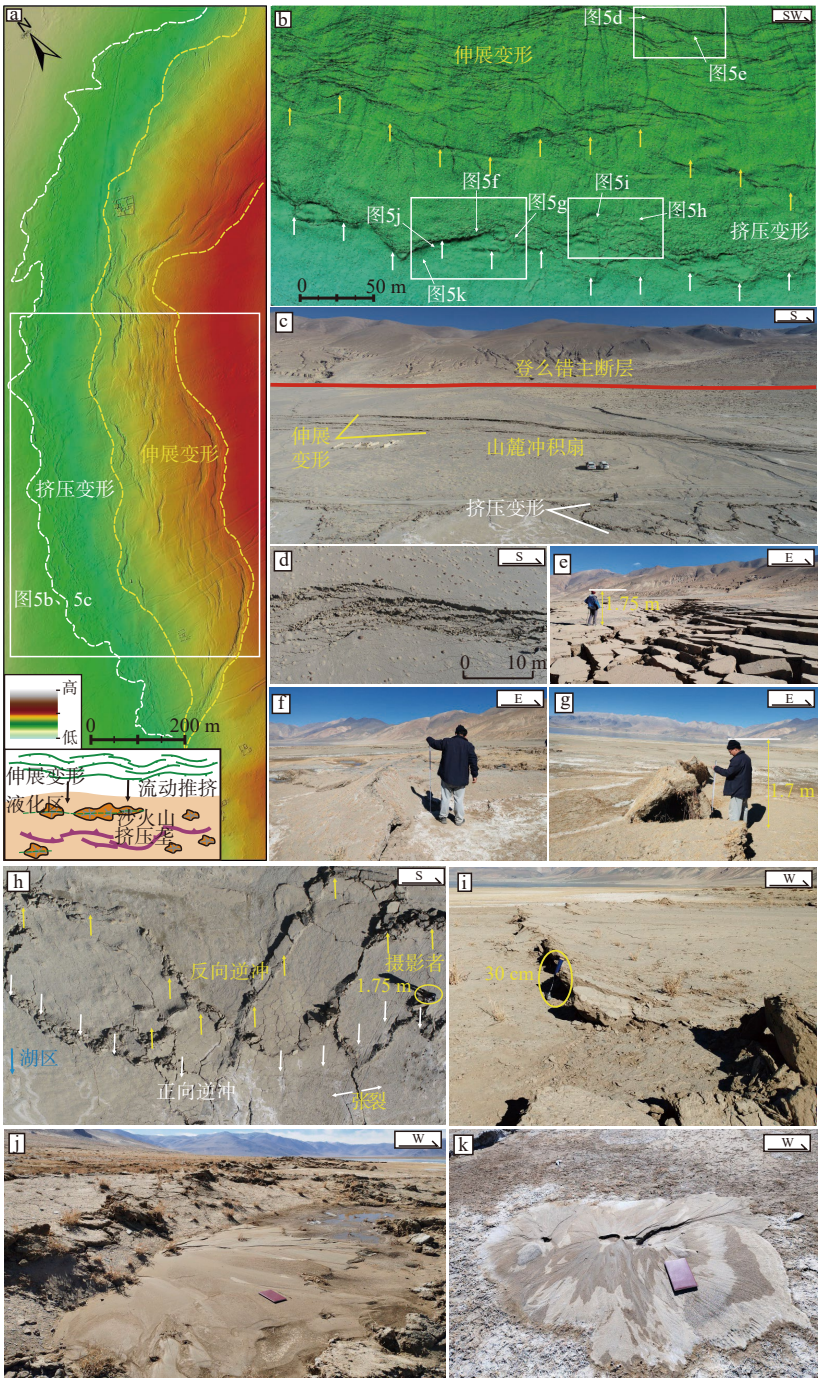



图 4　定日地震震区液化变形构造空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of liquefaction deformation induced by Dingri earthquake




a—登么错湖东岸液化变形区无人机低空摄影 DEM(液化变形空间展布与高程变化一致)；b—液化变形区伸展变形–挤压变形共存特征；c—液化变形区所在地形地貌特征；d—伸展变形宏观特征；e—伸展变形局部特征；f—挤压垄；g—薄皮对折构造；h—逆冲构造宏观特征；i—逆冲构造局部特征；j—挤压缩短区外缘的砂土液化特征；k—单个沙火山特征

图 5 登么错湖东岸地震液化变形特征

Fig. 5 Characteristics of earthquake-induced liquefaction deformation on the east shore of Dengmecuo Lake

(a) UAV low-altitude photogrammetric DEM of the liquefaction deformation zone on the eastern shore of Dengmecuo Lake (the DEM color scheme represents elevation variation, and the spatial distribution of liquefaction deformation is consistent with this variation); (b) Coexistence of extensional and compressional deformation features in the liquefaction deformation zone; (c) Topographic and geomorphic characteristics of the liquefaction deformation zone; (d) Macroscopic features of extensional deformation; (e) Local features of extensional deformation; (f) Compressional ridge; (g) Thin-skinned fold structure; (h) Macroscopic features of thrust structures; (i) Local features of thrust structures; (j) Sand liquefaction features at the outer margin of the compressional shortening zone; (k) Characteristics of an individual sand volcano

带，空间上整体走势与冲积扇等值线近似平行。变形带后缘、前缘变形样式不同，后缘以伸展变形为主，前缘以挤压变形为主，整体在宏观上呈现明显的流态变形特征（图 5a—5d）。

伸展变形区，在宏观上广泛发育弧形张裂，局部以伸展塌陷为主要特征（图 5d）。而单个变形中，地层呈阶梯状、反阶梯状发生垂向塌陷，未见倾斜滑动面，露头尺度的断块边界锯齿状特征显著（图 5e）。这种伸展塌陷在空间上并非连续线性展布，在冲积扇扇中最为发育，横、纵向尺度最大，向冲积扇边缘迅速减弱并消亡。单个塌陷条带的深度和宽度变化较快，宽度一般为 7～10 m，最大可达 27.3 m；最大深度接近 3 m；延伸约 200 m 后逐渐尖灭，并被临近的塌陷条带所取代。各塌陷带呈雁列展布，整体在纵向上并未造成显著的垂直位错和明显的地貌陡坎，其横向伸展效应显著。

挤压变形区，主要分布在伸展变形区向湖方向的下侧地带。该区域地层发生显著的横向缩短，浅表地层以发育挤压垄、挤压鼓包和向湖方向的正向逆冲、反向逆冲、对折及侧向逆冲等挤压变形构造为主要特征。挤压垄规模变化较大，宽度一般为 0.1～1.5 m，最宽可达 2.4 m；部分表部地层对折高度可达 1.2 m（图 5f—5h）。其规模与地层岩性、黏土质含量、植被根系发育程度及冻结厚度密切相关。一般而言，浅表黏土质含量高且胶结良好的地层，或植被根系发育且冻结厚度较大的地表，形成的挤压垄规模更大。局部区域可见地层在纵向推挤楔入作用下形成浅表横向张裂的次生构造。多条跨变形带的剖面测量结果显示，挤压变形区整体的变形强度与后缘伸展变形的规模呈正相关，挤压缩短量仅为后缘伸展量的 50%左右。

该区域广泛发育的砂土液化，是登么错湖东岸变形区的又一显著特征。沙火山沿变形带前缘的裂隙呈线性展布，直径 0.4～2.8 m 不等，规模差异明显（图 5j）；局部可见多火山口呈线性展布的复合型沙火山零星展布（图 5k）。盆地边缘遗留的早期探槽（田婷婷，2021）揭示该变形区整体岩性以湖相细砂、粉砂为主，局部可见含砾细砂；地表勘察发现，该地区地下水位相对较浅，且存在山麓地带的河流补给。

3.1.2　登么错河沿岸（P2，位置见图 2）

登么错河，是登么错湖泄水口至朋曲河之间的季节性河流谷地，其沿岸的液化变形主要为河谷两侧边坡及河心滩两侧小规模伸展变形和河谷地带大规模线性展布的沙火山。朋曲河北岸边坡也呈现出一致的变形特征，且伸展变形−砂土液化在河流交汇处相互连接贯通（图 6a）。

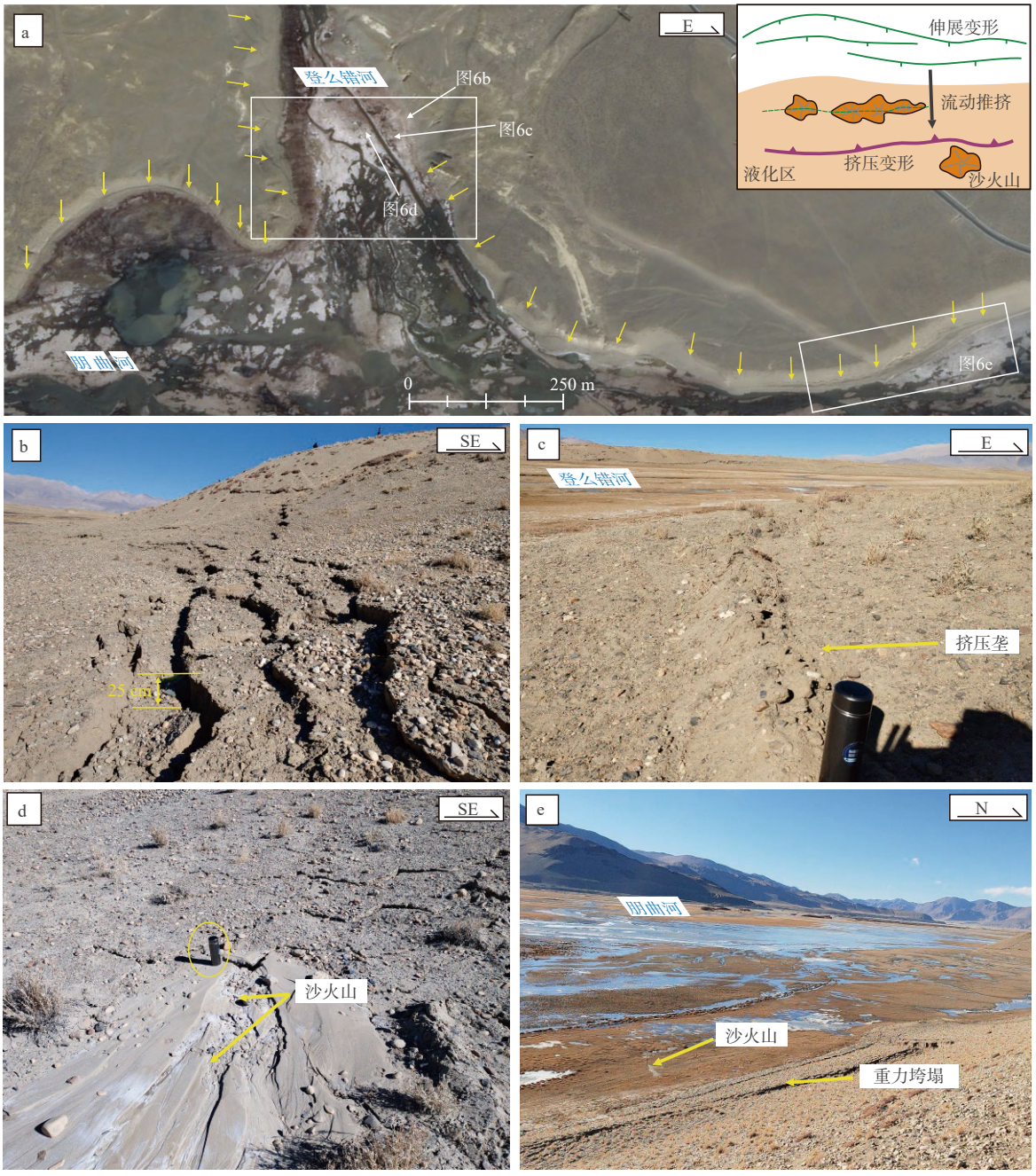
该地区液化变形特征与登么错湖东岸沿线一致（图 5，图 6）。变形带后缘发生伸展变形，表现为局部连续的张裂缝和塌陷、滑塌，整体垂直位移显著。其中，落差较大的边坡多见滑塌体旋转倾斜现象；河床及河漫滩上则发育小规模挤压垄。伸展变形的规模和垂直位移、伸展量往往在接近现今河床处达到最大。如登么错河出口处，现今河床偏向西岸，而西岸的伸展变形规模明显大于东岸，其最大垂直位移可达 2.5 m，最大伸展量接近 1 m。稍有差异的是，该区段河床地表岩性松散，河谷内挤压垄的规模相对较小，其空间连续性也相对较差。挤压垄一般高 2～5 cm，最高可达 10 cm，延伸 5 m 左右便迅速消亡。

该区段最为显著的地震砂土液化特征为沙火山广泛发育（图 7）。沙火山均沿地裂缝呈线状展布，其走向与河道走向基本一致或小角度相交，局部区域可见沙火山沿近东西向调节性裂隙展布。沙火山多集中在河床及河漫滩沉积区。形态上，沙火山主要呈现 2 种类型：一类呈同心圆状喷出，中心发育规则圆形火山口，口径与沙火山规模成正比（图 7a）；另一类则沿地裂缝呈线性喷出、带状展布（图 7b—7d）。沙火山喷出物以细砂为主，规模较大，最大直径达 7.8 m，高近 0.4 m，延伸超 10 m；局部可见喷出物为含砾粗砂的沙火山，但其规模相较前者明显减小。

钻孔揭示（DMCZK4，位置见图 2），登么错河沿岸地下水位深度为 6.7 m，位于浅层地下，为液化提供了必要的水文条件。岩芯显示：地下 9.6～11.5 m 深度的深灰色细砂层相对密实，但其原生层理结构已不可辨识，推测为液化后二次沉淀形成；而 11.5～13.1 m 深度的细砂层，含盐度高，虽略显疏松，但其层理清晰，偶见微小变形构造。通过地表沙火山喷出物与钻孔岩芯的岩性特征、色调对比分析，初步确定此次地震中该区域主要液化层位位于地下 9.6～11.5 m 深度范围内（图 7e）。

3.1.3　尼辖错北（P3，位置见图 2）

尼辖错至空摸错西其间 1.5 km 的区段，在此次地震中沿着主断面形成较为连续的地表变形带，以同震地表破裂为主，叠加一定程度地震诱发的液化




a—登么错河与朋曲河交汇处震后遥感影像(黄色箭头指示了河谷边坡地带的伸展变形);b—登么错河沿岸伸展变形;c—登么错河河床上的挤压垄;d—登么错河谷沿线的砂土液化;e—朋曲河沿线的伸展变形与砂土液化现象(近EW向展布)

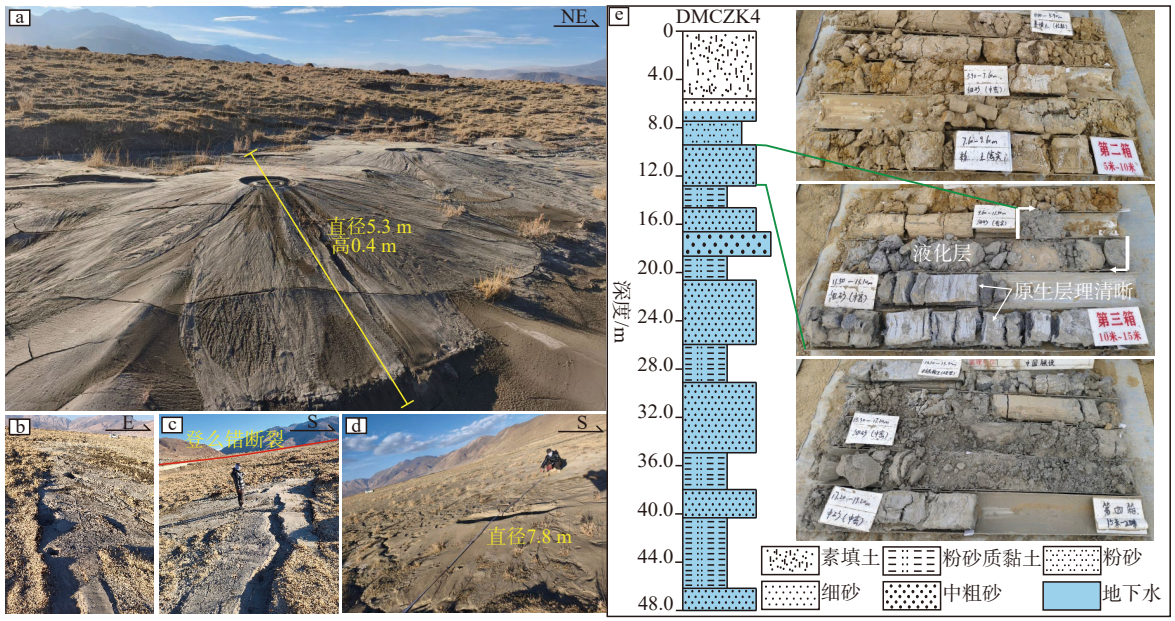
图 6 登么错河与朋曲河交汇处地震液化变形特征

Fig. 6 Characteristics of earthquake-induced liquefaction deformation at the confluence of Dengmecuo River and Pengqu River

(a) Post-earthquake remote sensing image of the confluence of the Dengmecuo River and Pengqu River (yellow arrows indicate extensional deformation along the valley slope zones); (b) Extensional deformation along the banks of the Dengmecuo River; (c) Compressional ridges on the riverbed of the Dengmecuo River; (d) Sand liquefaction along the Dengmecuo River valley; (e) Extensional deformation and sand liquefaction phenomena along the Pengqu River (distributed in a nearly EW orientation)

大变形作用(图 8)。

登么错断裂北段的主断层沿山谷与基岩山地过渡带呈线性延伸,局部可见断层切过山梁鞍部,在山麓边坡形成小规模垭口和湖泊,整体正断层地貌特征显著。在断层下降盘的山谷地带,发育一系列湖泊和沼泽地沿山谷呈阶梯状展布,且在主断层




a—登么错河谷点状喷出的沙火山；b—线性展布的沙火山；c—沿伸展变形带线性喷出的沙火山；d—局部线性喷出的沙火山；e—登么错河谷液化变形区 DMCZK4 钻孔揭示的地层结构及岩芯照片

图 7　登么错河谷地震砂土液化特征

Fig. 7　Characteristics of earthquake-induced sand liquefaction in the Dengmecuo River Valley

(a) Pointedly distributed sand volcanoes in the Dengmecuo River valley; (b) Linearly distributed sand volcanoes; (c) Sand volcanoes linearly erupted along the extensional deformation zone; (d) Locally linearly erupted sand volcanoes; (e) Stratigraphic sequence and core photographs revealed by the DMCZK4 borehole in the liquefaction deformation zone of the Dengmecuo River valley

附近泉水广泛出露，整体地下水位较浅。该地表破裂带以垂直位错为主，地表砾石层垂直位移一般为 2.3～2.7 m，最大处接近 3.0 m；在破裂带处可见显著的伸展裂缝，最宽可达 1.1 m（图 8a），其中位移量最大的地表破裂位于尼辖错北约 1.0 km 处的无名湖沼边缘。

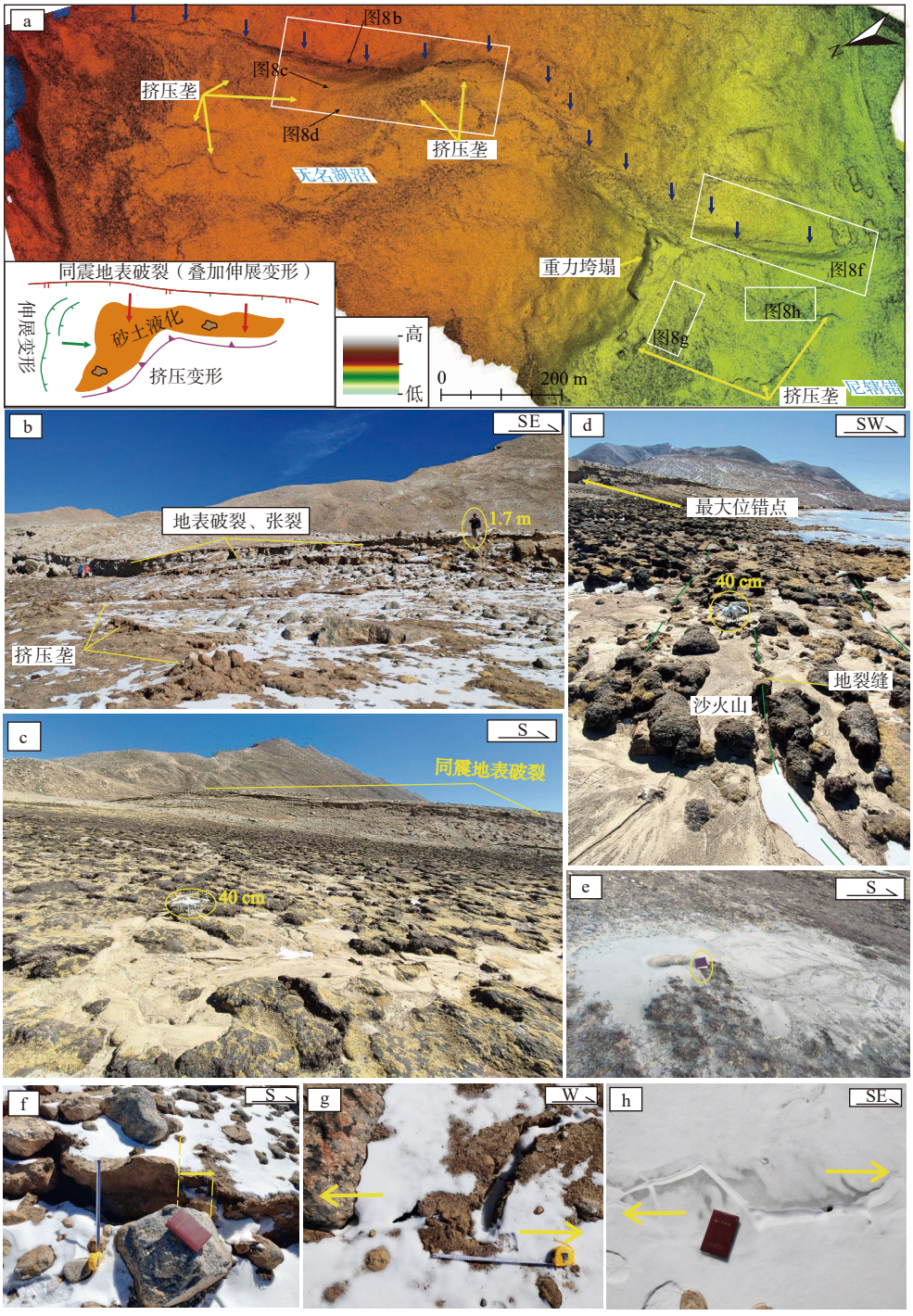
地震液化大变形在该区段地表变形中具有一定的贡献。在断层下盘发育宽 50～250 m 的液化大变形带，主要被围限在同震地表破裂带、垂直断层走向的阶梯状地貌陡坎前缘和湖沼之间，液化带内伸展变形、挤压变形及砂土液化共存，其特征与登么错湖东岸一致。伸展变形主要集中在主断层沿线和垂直主断层的地貌陡坎前缘。其中，沿断层方向的伸展变形叠加在同震地表破裂之上，暂时难以区分量化；垂直断层走向的伸展变形最大垂直位移接近 45 cm，单条伸展量最大可达 38 cm。挤压变形以挤压垄为主，其规模和空间展布由液化区沿断层方向和垂直断层方向的流化伸展共同控制，挤压垄最高可达 50 cm（图 8a、8b）。

此次地震诱发的砂土液化现象在登么错断裂北段同样普遍存在，主要体现在断裂上盘地区线性展布的沙火山和湖沼边缘广泛分布的星点状圆形含沙结冰体。其中，尼辖错北最大位移剖面处可见，断层上盘沙火山虽单个规模不大，但成片展布或沿次级地裂缝呈带状展布（图 8c、8d）。最新的圆形结冰体是“涌水”活动的产物，其发黄的色泽表明其包含少量的喷砂过程；此外，在液化区高处的局部位置，还可见喷砂量较小且未完全成形的沙火山。

此区段地表破裂带上存在小规模的左旋走滑分量，而这种走滑运动可能是液化大变形的表现。在主破裂带上可见砾石、土块及植被等标志物存在小规模的左旋位错，其位移一般在 10～20 cm，最大处可达 45 cm（图 8f）。在对液化区的详细勘察过程中，发现断层上盘地层受构造运动、地震液化大变形及重力因素的共同作用，具有向湖沼低地势地区流态变形的趋势。这不仅在液化区前缘形成显著的挤压垄，还在变形体运移方向的右侧边缘发育左旋走滑破裂、左侧发育右旋走滑破裂（图 8g、8h）。因此，主破裂带上的走滑位移，可能来自地形控制下的流态变形。

### 3.2　朋曲河沿岸

朋曲河沿岸在此次地震中也形成了显著的液化




a—尼辖错北地表破裂无人机低空摄影 DEM; b—同震地表破裂带附近的液化变形特征; c—断层上盘成片展布的沙火山; d—线性展布的沙火山; e—单个发育的沙火山; f—地表破裂带上的左旋走滑运动特征; g—断层上盘滑塌体右前方的左旋走滑特征; h—滑塌体左前方的右旋走滑特征

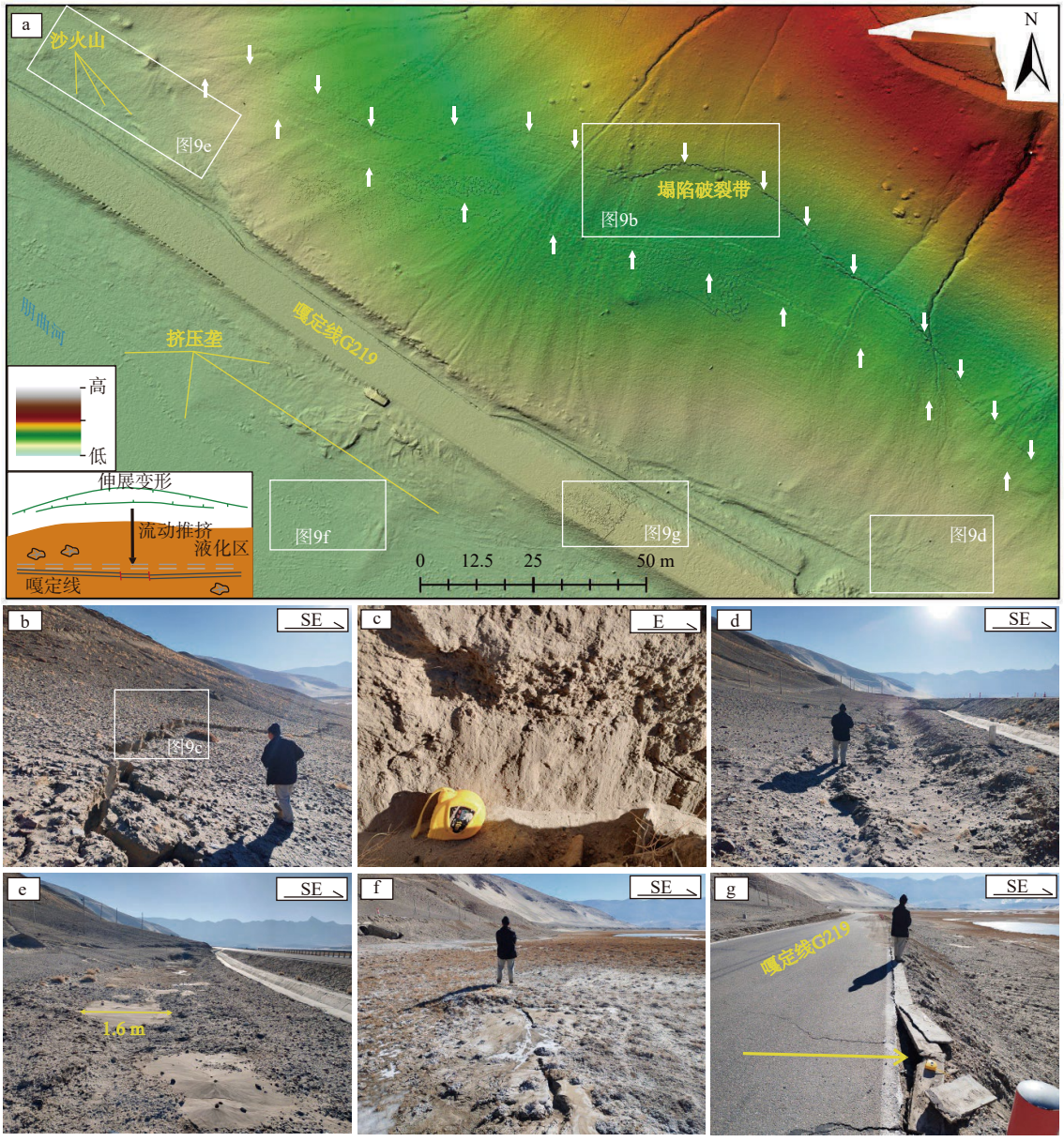
图 8 尼辖错–空摸错一带的地震液化变形特征

Fig. 8 Characteristics of earthquake-induced liquefaction deformation in the Nixiacuo-Kongmecuo area

(a) UAV-based Low-altitude photogrammetric DEM of surface ruptures north of Nixiacuo; (b) Liquefaction and deformation features near the coseismic surface rupture zone; (c) Sand volcanoes distributed in patches on the hanging wall of the fault; (d) Linearly distributed sand volcanoes; (e) An individually developed sand volcano; (f) Left-lateral strike-slip movement characteristics along the surface rupture zone; (g) Left-lateral strike-slip features at the right front of the landslide mass on the hanging wall of the fault; (h) Right-lateral strike-slip features at the left front of the landslide mass

大变形，主要分布在登么错断裂下盘杰塘西（距断裂约 8 km）至断裂上盘曲洛乡堆扎勒（距断裂约 30 km）之间的河谷两岸及沿线河床一带。文章选取登么错断裂下盘距断裂 7.5 km 处的北岸剖面（P4，位置见图 2），与断裂带沿线的液化变形进行对比研究。

该液化大变形发育在朋曲河北岸高阶地前缘的冲积扇扇中—扇缘部位，冲积扇岩性以搬运再沉积的风成细砂为主。变形带后缘可见宽约 7.2 m 的伸展变形构造，由正向陡坎和反向陡坎围限，后缘最大垂直位移可达 70 cm（图 9a、9b），在后缘破裂面上可见垂向塌陷过程中的摩擦行迹（图 9c）。变形带前缘形成多条小规模挤压垄，最高可达 20 cm（图 9d）。




a—朋曲河北岸液化变形无人机低空摄影 DEM；b—伸展变形宏观特征；c—伸展变形带后缘的垂向滑动面；d—挤压垄；e—点状喷出的沙火山；f—沿地裂缝呈线性喷出的沙火山；g—公路地面遭受推挤变形

图 9　朋曲河北岸地震液化变形特征

Fig. 9　Characteristics of earthquake-induced liquefaction deformation on the north shore of the Pengqu River

(a) UAV-based low-altitude photogrammetric DEM of liquefaction and deformation on the north shore of the Pengqu River; (b) Macroscopic characteristics of extensional deformation; (c) Vertical slip surface at the rear margin of the extensional deformation zone; (d) Compressional ridge; (e) Point-source erupted sand volcanoes; (f) Linearly erupted sand volcanoes along ground fissures; (g) Compression deformation of the road surface

砂土液化在该剖面临近地区也显著发育，主要表现为规模不一的沙火山呈线性展布，其直径最大可达 1.6 m，延伸距离 5～10 m 不等（图 9e、9f）。国道嘎定线 G219 因液化诱发的横向推挤作用发生挤压弯曲变形和多处路基破坏（图 9g）。

除此次地震诱发的液化大变形外，在朋曲河沿岸还发现了多处古液化变形遗迹，也主要集中发育在山口冲积扇扇中—扇缘部位，整体特征与此次液化大变形高度相似，可能是早期地震事件的触发产物。

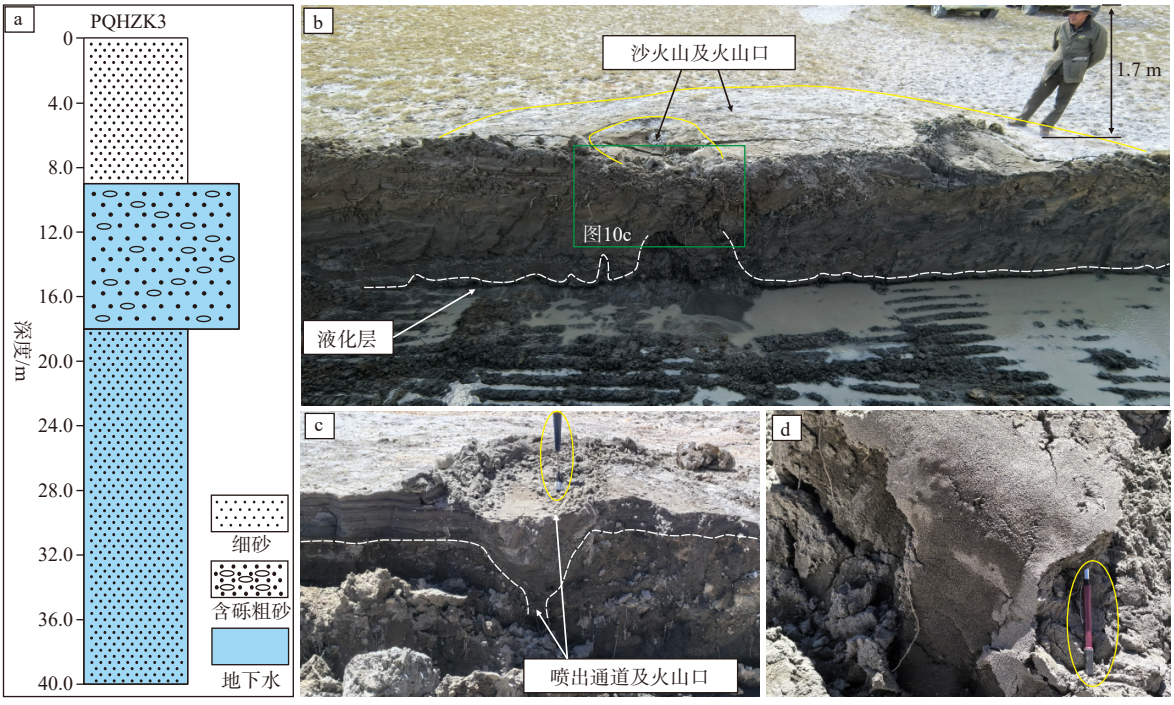
朋曲河北岸山麓坡脚地区的钻孔揭示（PQHZK3，位置见图 2），未发生液化大变形地区地下水位深度为 9.0 m，其中 9.0～18.0 m 深度为密实的含砾粗砂，18.0～50.9 m 深度为细砂层，易液化层位内的物性条件未达到可液化要求（图 10a）。而朋曲河北岸 T1 阶地沙火山处探槽显示，T1 阶地地下水位埋深 1.2 m，于地下 1.5 m 深度处可见液化层，其岩性为青灰色细砂层，其顶界呈不规则状起伏（图 10b）；沙火山喷涌通道清晰，其喷出物与地下液化层岩性一致（图 10c、10d）。

## 4 液化大变形诱发次生灾害特征

此次定日地震在震区诱发了广泛的砂土液化及大变形现象，在地表产生了“喷砂涌水”、砂体横向位移、地面开裂、塌陷等次生地质灾害，主要对该地区的房屋、道路和水利设施造成了一定的破坏效应。

液化大变形对房屋的损害主要集中在长所乡强嘎村东部地区。登么错湖东岸的液化变形带向北穿过强嘎村北东部，造成地面开裂、塌陷，导致房屋地基塌陷、圈梁及墙体破裂和房屋倒塌（图 11a）。

道路损坏主要集中在邻河、邻湖地区。国道嘎定线 G219 杰塘—杂村区段，在朋曲河北岸出现一处路基外侧滑塌，破坏长度约 100 m，路面可见多处未中断交通的破裂（图 11b）；跨登么错湖东南泄水口处，因液化塌陷导致路面出现 2 处垂直位错大于 30 cm 的破裂（图 11c）。登么错湖东岸的长所乡线，因液




a—钻孔揭示的朋曲河北岸未发生液化变形地区的地层结构与岩性特征；b—探槽揭示的朋曲河北岸 T1 阶地液化变形区的地层特征及沙火山与液化层的关系；c—探槽揭示的沙火山结构特征；d—液化层的岩性及粒度特征

图 10 钻孔及探槽揭示的朋曲河北岸地层结构及砂土液化特征

Fig. 10 Stratigraphic structure and sand liquefaction characteristics of the north shore of the Pengqu River revealed by drilling and trenching

(a) Stratigraphic structure and lithological characteristics of the non-liquefaction deformation area on the north shore of the Pengqu River revealed by boreholes; (b) Stratigraphic characteristics of the liquefaction deformation zone on the T1 terrace of the north shore of the Pengqu River and the relationship between sand volcanoes and liquefied layers revealed by trenches; (c) Structural characteristics of sand volcanoes revealed by trenches; (d) Lithological and grain size characteristics of the liquefied layer




a—登么错湖东岸地表塌陷破坏建筑物；b—液化变形造成朋曲河北岸嘎定线路基大面积破坏；c—液化变形破坏跨登么错河谷的交通主干道；d—尼辖错水库坝基差异性沉降；e—尼辖错水库坝基破裂；f—长所拉昂水库坝基破裂

图 11　地震液化诱发次生灾害特征

Fig. 11　Characteristics of secondary disasters induced by earthquake liquefaction

(a) Surface subsidence damaging buildings on the eastern shore of Dengmecuo Lake; (b) Large-scale damage to the Gading route subgrade on the north bank of the Pengqu River caused by liquefaction deformation; (c) Liquefaction deformation damaging the main traffic artery across the Dengmecuo River Valley; (d) Differential settlement of the dam foundation of Nixiacuo reservoir; (e) Dam foundation rupture of Nixiacuo reservoir; (f) Dam foundation rupture of Changsuo La'ang reservoir

化变形被全段破坏。震后高精度影像可见朋曲河南岸措果乡东部不知名公路出现多处明显断错。

液化大变形对登么错断裂北段山谷地区的长所拉昂水库、尼辖错水库的坝基均造成一定程度的破坏，其中尼辖错水库最为严重。砂土液化及液化大变形造成地表不均衡塌陷，导致尼辖错水库坝基出现差异性沉降及多处破裂，水库围栏因此出现拉断错位或挤压折断（图 11d、11e）。其南侧的长所拉

昂水库库区东缘边滩出现大量沿地裂缝呈线性展布的砂土液化现象，沙火山直径最大可达 2.5 m，地裂缝上穿坝基，造成坝基破裂（图 11f）。

## 5 讨论

### 5.1 液化大变形的形成机制及影响因素

#### 5.1.1 液化大变形形成机制的简要综述

地震事件中的液化大变形因其广泛的破坏性，已成为岩土工程和地震地质灾害研究领域的重要课题，其研究认识经历了从现象描述到机制解析的演进过程。早期研究聚焦于液化现象的描述及其对工程设施的破坏影响。通过系统梳理近现代（1920 年以来）破坏性地震的震害特征，揭示了液化导致的地基沉降、倾滑、横向扩展及其引起的大规模地面位移等破坏形式（刘惠珊等，1997; Bird and Bommer, 2004），并将砂土沸腾、横向扩展及地面沉降视为液化发生的直接证据（Park et al., 1995; Yuan et al., 2004）。袁晓铭等（2009）对 2008 年汶川 $M$ 8.0 地震砂土液化的研究指出，液化主要发育在地下水位较浅的全新世地层上，明确了地质条件和水文条件对液化发生的控制作用。

近年来的研究则侧重于液化变形的成因机制解释。Yuan et al.（2021）将 2014 年新疆于田 $M_S$ 7.3 地震中滨湖地区非线性展布的地裂缝和砂土液化现象判别为与深部断层无关的地震伴生浅地表变形，同时将与 2025 年定日 $M_S$ 6.8 地震特征相似的伸展变形与挤压变形共存现象解释为滨湖盐层上的地层失稳滑动，类似于被动型大陆变形三角洲中发育的重力滑脱构造。刘小利等（2022）将 2021 年青海玛多 $M_W$ 7.4 地震跨越发震断层数千米范围内的砂土液化伴生变形构造归类为微弱地裂缝或重力变形，认为其与同震地表变形相关。闫纪元等（2025）则将 2024 年新疆乌什 $M_S$ 7.1 地震中沿水系展布的地裂缝、挤压鼓包和砂土液化变形解释为隐伏断裂活动的表现，强调了深部构造对表层变形的控制作用。然而，近些年的研究可能过度强调了构造活动对液化变形的贡献，而对变形区域的地形地貌背景、地层岩性特征、变形样式组合及其内在联系等方面关注不足，导致对此类变形的成因机制解释存在显著差异，制约了对复杂地表变形过程的系统理解。

正确认识和判别地震事件中的变形类型对深入理解发震断层的地震行为及地震灾害特征至关重要。2025 年 1 月 7 日定日 $M_S$ 6.8 地震中，地表变形样式丰富且规模宏大，场景震撼，包括伸展变形、薄皮挤压构造及“喷砂涌水”现象，为地震诱发液化变形构造研究提供了经典的现代实例。然而，目前对于这些变形构造的成因机制及不同变形样式之间的内在联系，学术界尚未形成统一的认识。石峰等（2025）将登么错湖东岸的复杂地表变形归类为成因不明的地裂缝；邹俊杰等（2025）认为这些变形具有构造成因，其中伸展变形可能是未达地表的正断层破裂延伸所致，挤压变形则是局部应力调整的结果；梁明剑等（2025）强调其构造成因，将伸展构造解释为次一级同震地表破裂带，挤压构造则归因于上盘地层在含水层上的滑移推挤效应；邵延秀等（2025）则认为登么错湖东岸的线性张裂缝为重力失稳产物，反映松散沉积物沿浅表软弱面发生的横向扩展，但未能阐明不同变形样式之间的成因联系。

#### 5.1.2 此次地震诱发液化大变形的形成机制

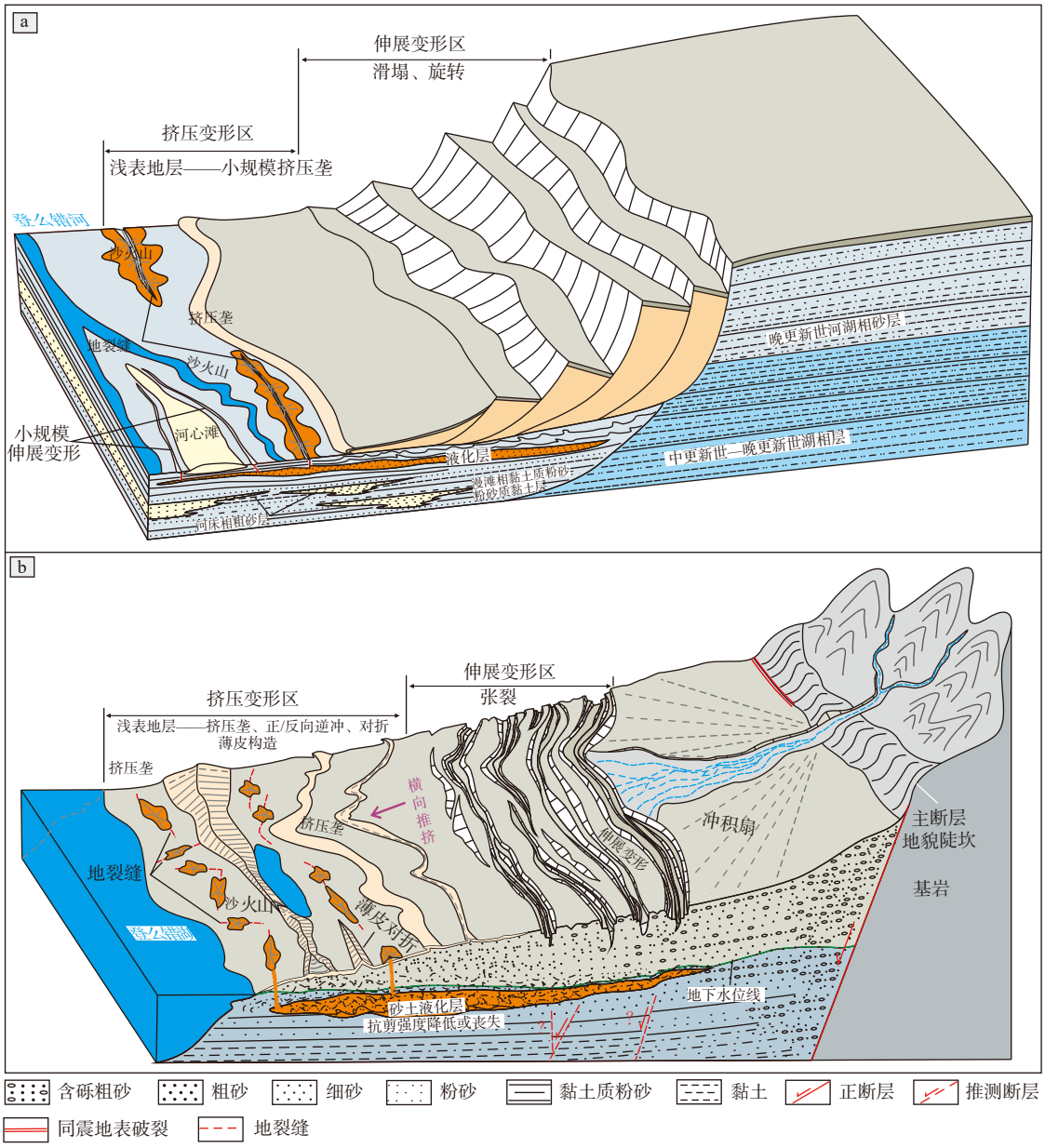
文章基于野外考察、高精度遥感解译、无人机航测等多源数据，结合钻探及探槽技术，为此次地震的地表变形研究提供三维空间数据，弥补了现有研究的不足。野外调查结果显示，此次地震造成的地表变形并非完全沿着主断层或次级断层线性分布（图 3, 图 4）。在断裂带北段，确实观测到沿主断层线性展布的同震地表破裂。然而，其他区段，如冲积扇扇中—扇缘及河谷地带，地表变形表现为伸展、挤压、砂土液化等变形样式的复杂共生，尤以登么错湖东岸变形最为显著。类似的变形构造也不仅局限于断裂带附近，还在登么错河及朋曲河两岸广泛分布（图 6, 图 9）。尤其是登么错河与朋曲河交汇处，变形特征相似、规模相当，且相互连接贯通（图 6）。更为关键的是，在登么错断裂下盘的东西向朋曲河南、北岸，同样发育着与登么错湖东岸特征一致的地表变形带，其中北岸的普庆山南侧区域距发震断裂约 8 km（图 5, 图 9）。钻探和探槽结果揭示，液化变形所在区域地下水位较浅，液化敏感的细砂层广泛分布且厚度较大（图 7e, 图 10b）。

基于上述地质事实，研究认为登么错湖东岸—登么错河—朋曲河沿线的地表变形为地震诱发的液化大变形，并非构造控制的同震地表破裂范畴。根据场地条件差异，这些液化变形可分为 2 种类型：临空场（Free face）液化大变形和缓倾斜场（Gently sloping ground）液化大变形（Bartlett and Youd, 1995; Chen et al., 2023），二者在动力学机制和诱发条件上

不尽相同。

临空场液化大变形主要分布在登么错河及朋曲河阶地前缘等坡度较陡的坡脚地区。河床及边坡下方饱和砂层在地震震动的过程中发生液化，导致地层抗剪强度显著降低或者完全丧失，引发阶地边坡后缘地层重力失稳，产生剪切滑塌、旋转，河床边部在出现“喷砂涌水”现象的同时，因边坡滑移的横向推挤作用形成挤压垄构造（图 12a）。这种变形机制与大坝上游地区的滑塌变形构造类似（Shahbodagh et al., 2020; Zhang and Wang, 2024）。

缓倾斜场液化大变形在登么错湖东岸山前冲积扇扇中—扇缘一带最为发育，地势平缓（坡度<5%），符合典型的近岸水平场地液化大变形特征。由于地面坡度很小或近于平坦，这类变形常被误判为与液化无关的地裂构造（王钟琦，1983）。近岸水平场的液化大变形实质是液化层和上覆非液化沉积




a—登么错河—朋曲河沿线临空场液化大变形模式；b—登么错湖东岸缓倾斜场液化大变形模式

图 12　定日地震诱发液化大变形模式

Fig. 12　Patterns of deformation induced by liquefaction of the Dingri earthquake

(a) Liquefaction-induced large deformation model under free-face conditions along Dengmecuo River and Pengqu River; (b) Liquefaction-induced large deformation model under gently sloping ground conditions along the eastern shore of Dengmecuo Lake

物的整体变形，其水平位移并非沿着液化层和非液化层界面的剪切滑动，而是贯穿整个液化层，自液化层底部向上呈线性增加并在顶部达到最大值，且具有显著的横向推挤效应（Yasuda et al., 1992; Towhata et al., 1999; 蔡晓光, 2005）。液化大变形的总体水平位移量是变形带内各伸展量的累积（Zhuang et al., 2025）。

此次地震引发的地表变形中，地震震动导致冲积扇扇中—扇缘一带饱和水砂层液化，致使地层抗剪强度显著降低甚至丧失，导致液化层“托举”或“背负”上覆非液化层在重力和地震震动的双重作用下产生横向扩展，形成横向推挤效应和水平位移。在该过程中，液化区的整体位移使变形带后缘发生伸展张裂和塌陷，前缘则因推挤作用形成挤压缩短的薄皮构造；同时，横向扩展过程中形成的地裂缝则为沙火山的喷涌提供了运移通道，从而在登么错湖东岸及登么错河河谷—朋曲河沿岸缓倾斜地区形成了挤压变形、伸展变形及沙火山等构造共生的特殊变形现象（图 12b）。伸展变形和挤压变形反映了液化横向扩展作用下不同部位的不同响应方式，通常呈现同步或者连续发生的特征。

当然，也不排除存在断层活动叠加作用的可能。理论上，液化大变形后缘的伸展量，由以下因素共同代偿：前缘浅表地层的挤压缩短、液化砂土层地表喷发，及液化层强度降低所导致的整个液化区的横向推挤和水平位移。然而，登么错湖东岸的液化大变形中，伸展变形的伸展量远大于挤压变形的缩短量。这一现象暗示，登么错湖东岸冲积扇下部可能存在隐伏的次级断层。该断层在此次地震中虽未错断地表，但对浅表地层产生了一定程度的撕裂作用。因此，这种早期同震地表破裂极有可能在后续液化变形中被改造或者掩盖。

#### 5.1.3 液化大变形的影响因素

此次定日地震诱发液化大变形的空间展布和规模主要受控于地震烈度、地形地貌条件、地质条件和水文条件等因素。

震级烈度方面，现代研究表明，震级 $M_S$ >5 的地震具有引发松散沉积物液化的潜力（Seed et al., 1983）。$M \geqslant 5$ 地震能在震中附近引起软沉积变形，$M$ >7 地震能在 20 km 范围内引发区域液化，而 $M$ >8 级地震则可能导致超过 100 km 范围的区域液化（Scott and Price, 1988）。此次液化大变形主要集中在登么错断裂上下盘的 38 km 范围内，其规模在断裂带沿线最大，向两侧递减；且在上盘的分布范围明显大于下盘。

地形地貌条件方面，不同地形导致液化变形在样式、规模、空间展布上存在显著差异。坡度较大的河谷地区（临空场）地液化变形以垂直位错为主，伴生明显的水平伸展和小规模挤压变形；滨湖地区缓倾斜场液化以显著横向扩展为主，伴生明显挤压变形。

地质条件方面，可液化砂层的广泛分布为液化大变形提供了物质基础。研究表明，黏土质粉砂、粉砂及细砂等低渗透性地层有利于空隙压力累积，促进砂土液化的发生；可液化沉积物的平均粒径通常在 0.01～1.00 mm 之间，且细颗粒含量需要达 25%～45%，最易液化的细颗粒含量接近 70%（Seed et al., 1983; McCalpin, 2009; Jalil et al., 2021; Tanjung et al., 2023）。此次地震诱发的液化大变形主要集中在冲积扇扇中—扇缘和河谷地区，丰富的砂层沉积为其提供了必要条件，砂层厚度变化可能是液化变形在空间上差异显著的重要因素。

水文条件方面，此次地震液化大变形主要集中在地下水位较浅的湖岸、河岸等滨水区域，表明地下水位对液化大变形的形成和分布有重要的约束作用。

### 5.2 液化大变形对同震地表破裂研究的影响

当前关于此次地震诱发地表变形的研究主要聚焦于断裂带沿线，这种研究范围的局限性可能导致对地震引发地表变形特征认识存在一定程度偏差。特别是，液化大变形对同震地表破裂的叠加影响尚未被有效区分，这可能会导致对发震断裂地表破裂过程、规模及震害特征的误判。

此研究在朋曲河沿岸识别出大规模连续展布的液化大变形，其表现为显著的横向扩展和一定程度的垂直位移。这种液化大变形现象在登么错断裂沿线同样广泛发育，且对断裂带沿线的同震地表破裂产生了重要的改造作用。刘富财等（2025）通过分析地表破裂排列形式和地表标志物水平位移，指出登么错断裂北段存在一定左旋走滑分量。然而，邵延秀等（2025）基于露头尺度的研究认为，登么错断裂在此次定日地震中主要表现为垂向正断，二者揭示的断层运动学性质存在明显差异。此研究在断裂带沿线的早期断层面和同震地表破裂带上同样发现了垂向滑动行迹，这与盆山地貌格局和早期探槽尺度观察结果一致（田婷婷, 2021）。

这种地物标志和露头尺度所揭示断层运动性

质的差异，很可能源于液化大变形对同震地表破裂的叠加改造作用。在液化诱发的横向扩展和地形地势的双重控制下，液化层及上覆地质体向低地势区域产生定向运动及位移，在地表形成雁列状破裂和间断分布的走滑运动分量，文中称之为“假走滑”现象。尤其是在登么错断裂北段尼辖错—空摸错一带，走滑运动在垂直断层走向的地貌陡坎与断层陡坎之间的滑移体上弥散分布，且左旋走滑与右旋走滑并存，这应解释为液化变形造成侧向调节性扩展的结果。

虽然登么错断裂带在此次地震中可能存在一定的左旋走滑分量，但液化大变形造成地表地物“假走滑”的叠加现象不容忽略。除此之外，液化层及其上覆地质体在变形过程中产生的垂直位移也对同震地表破裂的垂向位错具有显著的叠加效应和重要贡献。

因此，在分析登么错断裂带沿线的地表变形时，应充分认识到液化大变形与同震地表破裂的叠加作用，可能导致对垂直位移、水平位移以及滑动速率测量结果存在一定程度的高估。准确评估液化大变形对地表变形的贡献程度，需要开展更为深入的定量研究。

### 5.3　对藏南地区的防震减灾工作的启示

地震液化相关研究表明，液化场地对地震动有着显著的放大效应，且砂土相对密度越小，其放大效应越大（高广运等，2022）。这种放大作用很可能是登么错湖西部村庄在此次地震中遭受严重震害的关键因素之一。藏南地区，特别是藏南裂谷及其邻近地区，地震活动频繁，裂谷内第四纪松散沉积物广泛分布，山麓/山口冲积扇、湖泊沿岸及河流沿线区域地下水位普遍较浅，为地震液化提供了理想的地质条件，这对该地区的防震减灾工作构成重大挑战。

准确查明液化砂层的深度分布、空间展布特征及地下水位深度是减轻液化次生灾害的首要任务。虽然，液化现象主要发生在埋藏深度不超过 5 m 的浅层地层中（Owen et al., 2011），国内现行建筑抗震设计规范的液化判别方法也主要适用于 20 m 以浅的砂土液化评估，但是深层砂土（埋深超过 20 m）的地震液化现象同样客观存在，对重大工程建设构成显著威胁。朋曲河沿线及登么错地堑沉积区广泛发育河湖相地层，钻孔揭示其厚度普遍超过 50～100 m（图 7e, 图 10a），且地下水层位较浅（地堑平原区为 6～9 m, T1 阶地地下水位为 1.2～1.5 m; 图 10b），是砂土液化的主要易发区。

基于液化灾害风险评估，区域房屋及工程建设应规避地势较低、地下水位较浅的高风险区域，优先选择冲积扇扇中—扇根部位及地下水位较深的高级阶地作为建设场地。然而，钻探结果显示不同区域地下砂层及粗砾石层的层位和展布特征也存在明显空间差异。因此，对于无法避开的液化敏感区，应当根据工程需求增加钻探密度，全面揭示建设用地所在区域的地下砂层厚度及展布特征，并采取挖换、加密、排水、上覆压重、围封或桩基础等针对性工程处理措施。这些防治策略同样适用于藏南裂谷其他具有相似地质背景的地区，应在区域防震减灾规划中予以特别关注。

## 6　结论

（1）2025 年定日 $M_S$ 6.8 地震在登么错湖东岸—登么错河谷及朋曲河沿岸诱发的大规模地表变形，主体属于地震液化大变形，而非构造成因的同震地表破裂，是砂土液化后在地震动与重力共同作用下发生横向扩展与滑移的产物。

（2）震区液化大变形呈现后缘伸展、前缘挤压、伴生沙火山的共生组合特征。砂土液化导致沉积物抗剪强度骤降，引发横向推挤与水平位移；地裂缝为沙火山喷发提供运移通道；伸展变形与挤压变形是液化侧向扩展在不同部位的差异响应，三者通常同时发生，构成统一的液化大变形系统。

（3）液化大变形的发育受地震烈度、地形条件、砂层分布与浅埋地下水位共同控制，其对同震地表破裂的位错测量与运动学性质识别具有叠加改造效应，在藏南裂谷强震变形研究中应严格加以甄别与区分。

**作者贡献声明：** 黄婷参与野外调查并负责资料整理、数据处理和论文写作；吴中海负责项目管理、研究方法与理论指导；韩帅参与野外调查，并负责项目管理和理论指导；李智超和凡福新参与野外调查、资料整理和数据处理；高扬、田婷婷和陆诗铭分别参与理论指导、基金支持、数据处理等工作。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

**Author's Contributions:** HUANG Ting participated in

field investigations and was responsible for data collection, data processing, and manuscript writing; WU Zhonghai was responsible for project management, research methodology, and theoretical guidance; HAN Shuai participated in field investigations and was responsible for project management and theoretical guidance; LI Zhichao and Fan Fuxin participated in field investigations, data collection, and data processing; GAO Yang, TIAN Tingting, and LU Shiming contributed to theoretical guidance, funding acquisition, and data processing, respectively. 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


ALLEN J R L, 1977. The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds[J]. Journal of the Geological Society, 134(1): 19-31.

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.

BARDET J P, TOBITA T, MACE N, et al., 2002. Regional modeling of liquefaction-induced ground deformation[J]. Earthquake Spectra, 18(1): 19-46.

BARTLETT S F, YOUD T L, 1995. Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 121(4): 316-329.

BASTIN S H, QUIGLEY M C, BASSETT K, 2015. Paleoliquefaction in Christchurch, New Zealand[J]. GSA Bulletin, 127(9-10): 1348-1365.

BIRD J F, BOMMER J J, 2004. Earthquake losses due to ground failure[J]. Engineering Geology, 75(2): 147-179.

BRAY J D, TRAVASAROU T, 2007. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(4): 381-392.

CAI X G, YUAN X M, LIU H L, et al., 2005. Mechanism and softening modulus approach for liquefaction-induced lateral spreading of ground near river bank or seashore[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 25(3): 125-131. (in Chinese with English abstract)

CHEN L W, LIU H R, REN Y F, et al., 2024. In-situ investigation of site liquefaction and liquefaction-induced damages triggered by two strong Türkiye earthquakes on Feb. 6th, 2023[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 46(7): 1541-1548. (in Chinese with English abstract)

CHEN Z X, CHEN Y H, ZHANG Y M, et al., 2023. Assessment of liquefaction-induced lateral spread using soft computing approaches[J]. Gondwana Research, 123: 265-279.

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.

CILIA M G, MOONEY W D, NUGROHO C, 2021. Field insights and analysis of the 2018 Mw 7.5 Palu, Indonesia earthquake, tsunami and landslides[J]. Pure and Applied Geophysics, 178(12): 4891-4920.

ESPER P, TACHIBANA E, 1998. Lessons from the Kobe earthquake[J]. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 15: 105-116.

FANG H Q, ZHAO S D, HUANG Z L, 1983. Controlling influence of geomorphological features on seismic liquefaction[J]. Geotechnical Investigation & Surveying(2): 11-15. (in Chinese with English abstract)

GAO G Y, HONG Y, GENG J L, et al., 2022. Numerical simulation of saturated sand liquefaction discrimination and amplification effect[J]. Journal of Engineering Geology, 30(6): 1874-1881. (in Chinese with English abstract)

GAO Y, 2024. Spatial-temporal characteristics of the Quaternary NS-trending normal faulting in the Dinggye-Gyrong area, southern Tibet[D]. Beijing: Peking University. (in Chinese with English abstract)

GAO Y, WU Z H, ZUO J M, et al., 2024. Spatial-temporal activity of Quaternary faults at southern end of Nyalam-Coqen rift, southern Tibet[J]. Earth Science, 49(7): 2552-2569. (in Chinese with English abstract)

GAO Y, WU Z H, HAN S, et al., 2025. Late quaternary throw rate of the seismogenic fault (Dengmecuo Fault) of the 2025 $M_S$6.8 Dingri earthquake in Shigatse[J]. Seismology and Geology, 47(3): 689-706. (in Chinese with English abstract)

GONG J, ZOU D G, KONG X J, et al., 2024. Liquefaction-induced large deformation method with automatic time-step mapping and interfacial interpolation improvement: case study of the San Fernando Dam[J]. Computers and Geotechnics, 171: 106351.

GREEN R A, CUBRINOVSKI M, COX B, et al., 2014. Select liquefaction case histories from the 2010-2011 Canterbury earthquake sequence[J]. Earthquake Spectra, 30(1): 131-153.

HA G H, 2019. Normal faulting of central-southern Yadong-Gulu rift Since late Cenozoic, southern Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

HOANG T N, NGUYEN T T, NGUYEN T V, et al., 2024. SPH simulation of earthquake-induced liquefaction and large deformation behaviour of granular materials using SANISAND constitutive model[J]. Computers and Geotechnics, 174: 106617.

HOU L Y, SHAN X J, GONG W Y, et al., 2020. Characterizing seismogenic fault of 2016 Dingjie earthquake based on multitemporal DInSAR[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(4): 1357-1369. (in Chinese with English abstract)

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[J]. Progress in Earthquake Sciences, 54(10): 696-711. (in Chinese with English abstract)

IWATATE T, KOBAYASHI Y, KUSU H, et al. , 1999. Investigation and shaking table tests of subway structures of the Hyogoken-Nanbu earthquake[C]//Proceedings of the 4th international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics.

JALIL A, FATHANI T F, SATYARNO I, et al., 2021. Liquefaction in Palu: the cause of massive mudflows[J]. Geoenvironmental Disasters, 8(1): 21.

LIANG M J, DONG Y X, ZUO H, et al., 2025. Surface deformation characteristics and causes of the Dengmecuo segment in the Xizang Dingri $M_s$6.8 earthquake[J]. Seismology and Geology, 47(1): 80-89. (in Chinese with English abstract)

LIU F C, PAN J W, LI H B, et al., 2025. Co-seismic surface rupture of the 2025 $M_w$7.1 Tingri earthquake and potential seismic risk in southern Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 99(3): 685-703. (in Chinese with English abstract)

LIU H S, XU F P, LI P C, 1997. The influence of large ground displacement caused by liquefaction on engineering and its research status[J]. Earthquake Resistant Engineering(2): 21-26. (in Chinese with English abstract)

LIU S, TANG X W, LUAN Y X, et al., 2021. Seismic response analysis of subway station in deep loose sand using the ALE method[J]. Computers and Geotechnics, 139: 104394.

LIU X L, XIA T, LIU-ZENG J, et al., 2022. Distributed characteristics of the surface deformations associated with the 2021 $M_w$7.4 Madoi earthquake, Qinghai, China[J]. Seismology and Geology, 44(2): 461-483. (in Chinese with English abstract)

MAGHSOUDI M S, JAMSHIDI CHENARI R, FARROKHI F, 2022. Liquefaction induced permanent ground deformations and energy dissipation analysis based on smoothed particle hydrodynamics method (SPH): validation by large-scale model tests[J]. Granular Matter, 24(4): 104.

MCCALPIN J P, 2009. Paleoseismology[M]. 2nd ed. Burlington: Academic Press.

Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, 2025. Office of the national committee for disaster prevention, mitigation and relief, ministry of emergency management releases national natural disaster situation in January 2025[EB/OL]. (2025-03-06)[2025-05-13]. https://www.119.gov.cn/qmxfxw/xfyw/2025/48608.shtml. (in Chinese)

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.

OBERMEIER S F, 1996. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis - An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes[J]. Engineering Geology, 44(1-4): 1-76.

OWEN G, MORETTI M, ALFARO P, 2011. Recognising triggers for soft-sediment deformation: current understanding and future directions[J]. Sedimentary Geology, 235(3-4): 133-140.

PARK R, BILLINGS I J, CLIFTON G C, et al., 1995. The Hyogo-ken Nanbu earthquake (the Great Hanshin earthquake) of 17 January 1995: report of the NZNSEE reconnaissance team[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 28(1): 1-98.

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.

QUIGLEY M C, HUGHES M W, BRADLEY B A, et al. , 2016. The 2010-2011 Canterbury earthquake sequence: environmental effects, seismic triggering thresholds and geologic legacy[J]. Tectonophysics, 672-673: 228-274.

ROBINSON K, BRADLEY B A, CUBRINOVSKI M, 2012. Analysis of liquefaction-induced lateral spreading data from the 2010 Darfield and 2011 Christchurch earthquakes[C]//Proceedings of the NZSEE annual technical conference & AGM. Christchurch: University of Canterbury.

SCOTT B, PRICE S, 1988. Earthquake-induced structures in young sediments[J]. Tectonophysics, 147(1-2): 165-170.

SEED H B, 1979. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105(2): 201-255.

SEED H B, IDRISS I M, ARANGO I, 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 109(3): 458-482.

SHAHBODAGH B, SADEGHI H, KIMOTO S, et al., 2020. Large deformation and failure analysis of river embankments subjected to seismic loading[J]. Acta Geotechnica, 15(6): 1381-1408

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)

SHAO Z G, ZHU D G, MENG X G, et al., 2013. The definition and classification of Quaternary Lacustrine strata and the establishment of Dingjie Group in Dingjie basin, Tibet[J]. Geology in China, 40(2): 449-459. (in Chinese with English abstract)

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

TANJUNG M I, IRSYAM M, SAHADEWA A, et al., 2023. Overview of Flowslide in Petobo during liquefaction of the 2018 Palu earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 173: 108110.

TIAN T T, 2021. Dating of late Quaternary paleoseismic events of the Dingmu Cuo fault in the southern section of Shenzha-Dingjie Rift[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

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[J]. Geological Review, 69(S1): 53-55. (in Chinese with English abstract)

TOKIMATSU K, SEED H B, 1987. Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 113(8): 861-878.

TOWHATA I, ORENSE R P, TOYOTA H, 1999. Mathematical principles in prediction of lateral ground displacement induced by seismic liquefaction[J]. Soils and Foundations, 39(2): 1-19.

TOYOTA H, KAZAMA M, 2024. Liquefaction traces on the Shinano River left bank after the 1964 Niigata Earthquake - Liquefaction research issues suggested by geoslicer survey results-[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 10(10): 253-258.

VAID Y P, THOMAS J, 1995. Liquefaction and postliquefaction behavior of sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 121(2): 163-173.

WANG Z Q, 1983. Introduction to earthquake engineering geology[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

WU Z H, YE P S, WANG C M, et al., 2015. The relics, ages and significance

of prehistoric large earthquakes in the Angang Graben in South Tibet[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 40(10): 1621-1642. (in Chinese with English abstract)

YAN J Y, FENG J, ZHANG X H, et al., 2025. Preliminary investigation on surface deformation characteristics of the Ms 7.1 earthquake in Wushi County, Aksu Prefecture, Xinjiang, on January 23, 2024[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 61(2): 388-402. (in Chinese with English abstract)

YASUDA S, NAGASE H, KIKU H, et al., 1992. The mechanism and a simplified procedure for the analysis of permanent ground displacement due to liquefaction[J]. Soils and Foundations, 32(1): 149-160.

YOUD T L, HANSEN C M, BARTLETT S F, 2002. Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(12): 1007-1017.

YUAN H M, YANG S H, ANDRUS R D, et al., 2004. Liquefaction-induced ground failure: a study of the Chi-Chi earthquake cases[J]. Engineering Geology, 71(1-2): 141-155.

YUAN X M, CAO Z Z, SUN R, et al., 2009. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(6): 1288-1296. (in Chinese with English abstract)

YUAN Z D, LIU-ZENG J, LI X, et al., 2021. Detailed mapping of the surface rupture of the 12 February 2014 Yutian $M_s$7.3 earthquake, Altyn Tagh Fault, Xinjiang, China[J]. Science China Earth Sciences, 64(1): 127-147.

ZHANG J M, WANG R, 2024. Large post-liquefaction deformation of sand: mechanisms and modeling considering water absorption in shearing and seismic wave conditions[J]. Underground Space, 18: 3-64.

ZHUANG H Y, LI X X, ZHANG K, et al., 2025. Liquefaction-induced lateral spreading characteristics of the fluvial terraces at the lower reaches of Yangtze River[J]. Engineering Geology, 346: 107900.

ZOU 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[J]. Seismology and Geology, 47(1): 16-35. (in Chinese with English abstract)

ZUO J M, 2021. Late Quaternary activity characteristics of the Chongba Yumtso normal fault in the southern section of the Yadong-Gullu Rift, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

蔡晓光, 袁晓铭, 刘汉龙, 等, 2005. 近岸水平场地液化侧向大变形机理及软化模量分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 25(3): 125-131.

陈龙伟, 刘昊儒, 任叶飞, 等, 2024. 2023年2月6日土耳其双强震场地液化及其震害特征现场调查分析[J]. 岩土工程学报, 46(7): 1541-1548.

方鸿琪, 赵树栋, 黄振录, 1983. 地貌特征对地震液化的控制性影响[J]. 工程勘察(2): 11-15.

高广运, 洪洋, 耿建龙, 等, 2022. 饱和砂土液化判别与放大效应数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 30(6): 1874-1881.

高扬, 2024. 藏南定结-吉隆地区第四纪近南北向正断层作用的时空特征[D]. 北京: 北京大学.

高扬, 吴中海, 左嘉梦, 等, 2024. 藏南聂拉木-措勤裂谷南段第四纪正断层作用的时空特征[J]. 地球科学, 49(7): 2552-2569.

高扬, 吴中海, 韩帅, 等, 2025. 2025年定日 $M_S$6.8地震发震断层(登么错断裂)晚第四纪垂直滑动速率[J]. 地震地质, 47(3): 689-706.

哈广浩, 2019. 藏南亚东—谷露裂谷中—南段晚新生代正断层作用[D]. 北京: 中国地质科学院.

侯丽燕, 单新建, 龚文瑜, 等, 2020. 基于多期DInSAR数据的2016年定结地震序列发震断层特征研究[J]. 地球物理学报, 63(4): 1357-1369.

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[J]. 地震科学进展, 54(10): 696-711.

梁明剑, 董芸希, 左洪, 等, 2025. 2025年西藏定日6.8级地震登么错段地表变形特征及其成因[J]. 地震地质, 47(1): 80-89.

刘富财, 潘家伟, 李海兵, 等, 2025. 2025年 $M_w$7.1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.

刘惠珊, 徐凤萍, 李鹏程, 1997. 液化引起的地面大位移对工程的影响及研究现状[J]. 工程抗震(2): 21-26.

刘小利, 夏涛, 刘静, 等, 2022. 2021年青海玛多 $M_W$7.4地震分布式同震地表裂缝特征[J]. 地震地质, 44(2): 461-483.

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.

邵兆刚, 朱大岗, 孟宪刚, 等, 2013. 西藏定结盆地第四纪湖相地层的厘定、划分和定结群的建立[J]. 中国地质, 40(2): 449-459.

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

田婷婷, 2021. 申扎-定结裂谷南段丁木错断裂晚第四纪古地震事件研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

田婷婷, 吴中海, 2023. 西藏申扎—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[J]. 地质论评, 69(S1): 53-55.

王钟琦, 1983. 地震工程地质导论[M]. 北京: 地震出版社.

吴中海, 叶培盛, 王成敏, 等, 2015. 藏南安岗地堑的史前大地震遗迹、年龄及其地质意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 40(10): 1621-1642.

闫纪元, 冯军, 张雪华, 等, 2025. 2024年1月23日新疆阿克苏地区乌什Ms 7.1级地震地表变形特征初步调查[J]. 北京大学学报(自然科学版), 61(2): 388-402.

袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等, 2009. 汶川8.0级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 28(6): 1288-1296.

中华人民共和国应急管理部, 2025. 国家防灾减灾救灾委员会办公室、应急管理部发布2025年1月全国自然灾害情况[EB/OL]. (2025-03-06)[2025-05-13]. https://www.119.gov.cn/qmxfxw/xfyw/2025/48608.shtml.

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[J]. 地震地质, 47(1): 16-35.

左嘉梦, 2021. 西藏亚东-谷露裂谷南段冲巴雍错正断层晚第四纪活动特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).