引用格式：刘汉琳，陈涛，袁兆德，2026. 阿尔金断裂中段南侧白干湖断裂遥感影像特征及地震危险性[J]. 地质力学学报，32（4）：919−932. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025187

Citation: LIU H L，CHEN T，YUAN Z D，2026. Remote sensing image characteristics and seismic hazard of the Baiganhu Fault on the south side of the central Altyn Tagh Fault[J]. Journal of Geomechanics，32（4）：919−932. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025187

阿尔金断裂中段南侧白干湖断裂遥感影像特征及地震危险性

刘汉琳[1,2]，陈　涛[3]，袁兆德[1,2]
LIU Hanlin[1,2]，CHEN Tao[3]，YUAN Zhaode[1,2]

1. 中国地震局地质研究所，北京 100029；
2. 地震动力学与强震预测全国重点实验室，北京 100029；
3. 浙江省地震局，浙江 杭州 310007

1. *Institute of Geology*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100029, *China*;
2. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics and Strong Earthquake Prediction*, *Beijing* 100029, *China*;
3. *Zhejiang Earthquake Agency*, *Hangzhou* 310007, *Zhejiang*, *China*

Remote sensing image characteristics and seismic hazard of the Baiganhu Fault on the south side of the central Altyn Tagh Fault

Abstract: ［**Objective**］Accurately delineating the spatial distribution and geometric scale of active faults is essential for understanding crustal deformation and assessing regional seismic hazards. While the Altyn Tagh Fault (ATF) has been extensively studied, its adjacent secondary structures—such as the Baiganhu Fault—remain poorly constrained regarding their geometry, slip history, and seismic potential. This study aims to systematically characterize the offset geomorphology of the Baiganhu Fault, establish its segmentation, and evaluate its potential for generating large earthquakes, including multi-fault cascading ruptures with the ATF. ［**Methods**］Using multi-source high-resolution satellite imagery and digital topographic data, we conducted detailed geomorphic mapping of the Baiganhu Fault. Displaced landforms (e.g., offset gullies, alluvial fans, pressure ridges, and sag ponds) were measured. We constrained displacement variations at individual measurement points using Gaussian cumulative probability density (COPD) distributions to interpret the displacement accumulation pattern and evaluate coseismic slip. ［**Results**］The Baiganhu Fault extends for approximately 247 km along a general northeast–east (NEE) strike, displaying prominent left-lateral strike-slip geomorphic features. Based on fault geometry and deformation patterns, it is divided into western, central, and eastern segments. The central segment hosts a well-preserved ～50-km-long surface rupture zone with an average coseismic displacement of 4.8 m. Statistical analysis of 99 offset gullies yields an average horizontal offset of 4.3–4.8 m for the most recent event, corresponding to a moment magnitude of M_W 7.4±0.3. A full-segment rupture could generate an earthquake of M_W 7.8±0.3. Furthermore, the ～5-km-wide stepover separating the Baiganhu Fault from the main strand of the ATF is unlikely to act as a permanent barrier, making a cascading rupture mechanically plausible. ［**Conclusions**］The Baiganhu Fault is a highly active left-lateral structure capable of generating M_W 7.4 events. Regional seismic hazard models must incorporate the scenario of cascading ruptures between the Baiganhu Fault and the Altyn Tagh Fault to avoid underestimating seismic risk to surrounding infrastructure. ［**Significance**］This study provides critical quantitative constraints on the geometry, slip behavior, and

基金项目：国家自然科学基金项目（41902216）
This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41902216).
第一作者：刘汉琳（2002—），女，在读硕士，构造地质学。Email：liuhanlin3058@163.com
通信作者：陈涛（1984—），男，高级工程师，从事地震研究、工程地震方向研究。Email：chentao0528@126.com
收稿日期：2025−12−29；**修回日期**：2026−02−23；**录用日期**：2026−04−14；**网络出版日期**：2026−06−17；**责任编辑**：王婧
Received：2025−12−29；Revised：2026−02−23；Accepted：2026−04−14；Available Online：2026−06−17；Handling Editor：WANG Jing

seismic potential of a previously under-studied secondary structure within the ATF system. By highlighting the potential for multi-fault cascading ruptures, our findings underscore the need to update regional seismic hazard models, which is vital for risk mitigation and infrastructure safety in the region.

Keywords: active tectonic block; strike-slip fault; Altyn Tagh Fault; Baiganhu Fault; seismic surface rupture

摘　要：准确厘定活动断层的空间分布和发育规模，是开展区域构造变形分析和地震危险性评价的重要基础。文章基于多源高分辨率卫星影像，系统解译了阿尔金断裂中段南侧白干湖左旋走滑断裂的断错地貌特征。结果表明，该断裂全长约247 km，总体呈北东东走向，第四纪晚期以来活动强烈，沿线广泛发育断错洪积扇、张剪性裂隙、挤压脊（鼓包）、错断冲沟及断塞塘等典型断错微地貌。依据几何结构与空间展布特征，可将白干湖断裂划分为西段、中段与东段3个次级段落，其中中段保存长约50 km的地震地表破裂带，平均同震水平位移达4.8 m，指示该段曾发生M_W 7.4±0.3强震。对99组左旋位错冲沟的统计分析显示，该断裂最新一次地震的平均水平位错为4.3～4.8 m。若发生全段贯通破裂，白干湖断裂可产生M_W 7.8±0.3地震；其与阿尔金断裂之间约5 km宽的阶区无法完全阻挡地震破裂的贯穿扩展，表明2条断裂存在级联破裂的可能。因此，需高度重视白干湖断裂的地震危险性，在区域地震危险性评估中应充分考虑其与阿尔金断裂发生级联破裂的潜在风险。

关键词：活动地块；走滑断裂；阿尔金断裂；白干湖断裂；地震地表破裂

中图分类号：P546; P315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)04−0919−14

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025187

0　引言

活动地块是受新生代晚期(尤其第四纪晚期)强烈活动的构造带围限、内部运动方式相对统一的地质单元。这一概念已成为解析中国大陆新生代晚期与现代构造变形规律的基本框架(邓起东, 1980; 张培震, 2003; 郑文俊等, 2022)。张培震等(2003)提出的中国大陆活动地块分级划分方案,以第四纪晚期强烈活动构造带为地块边界,将中国大陆划分为6个一级活动地块区和20余个二级活动地块。后续研究进一步明确了地块内部相对稳定、边界变形集中的核心特征(张培震等, 2013; 郑文俊等, 2019; 邵志刚等, 2022)。统计显示,中国大陆有历史记载以来的8级强震,以及≥80%的7级以上强震均发生于活动地块边界带,证实地块间的差异运动是大陆强震孕育和发生的直接控制因素(张培震等, 2003; 郑文俊等, 2022; 吴中海, 2024)。而活动地块内部发育的各级次级活动断裂,作为调节地块内部变形、传递边界构造应变的关键构造,其地震潜能同样不容忽视。巴颜喀拉块体内部的达日断裂、川滇菱形块体内部的理塘断裂、昆仑山口−江错断裂均曾发生7级以上强震(梁明剑等, 2020; Chen et al., 2021; 盖海龙等, 2021; Jin et al., 2021; 刘亢等, 2021; Xu et al., 2021; Yuan et al., 2021; He et al., 2022; 张献兵等, 2024; 杨镇等, 2025),充分说明地块内部次级断裂的强震危险性需纳入区域地震风险评价体系。

白干湖断裂位于柴达木块体内部、阿尔金断裂南侧,是一条重要的次级断裂,总体呈北东东向延伸,全长约247 km。该断裂在早期研究中曾存在多种命名。Tapponnier and Molnar (1977)将其命名为祁曼塔格走滑断层; Cowgill et al. (2004)称其为卡齐断层; 邵延秀等(2016)近年采用库木巴彦断裂一名。而白干湖断裂的名称最早见于《新疆维吾尔自治区地质志》(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。以往对该断裂的研究多聚焦于古生代岩浆活动、成矿背景及新生代活动特征。宋茂德等(2010)指出,白干湖断裂对区内钨、锡等矿产的分布起着关键控制作用; Liu et al. (2021)通过锆石与磷灰石裂变径迹测年结合热历史模拟,首次定量限定了该断裂自中新世中期(约15～10 Ma)以来经历了快速构造隆升−冷却事件,揭示了其新生代的阶段性活动特征。但迄今为止,针对白干湖断裂第四纪晚期活动特征的研究仍处于空白状态,其空间展布、破裂分段、发震能力及与阿尔金断裂的构造关联均未明确,制约了柴达木块体内部的地震危险性评价。

文章利用水经微图软件中的天地图、谷歌地球、ArcGIS及吉林一号卫星等多源米级—亚米级高分辨率遥感影像,对白干湖断裂及其两侧的第四纪

地貌进行了精细解译，明确了断裂的空间展布与几何分段特征，厘定了地震地表破裂带的发育规模与走滑位移参数，估算其潜在发震能力，并探讨该断裂与阿尔金断裂发生级联破裂的可能性，以期为柴达木块体北部的地震危险性评价提供基础地质依据。

1　地震构造背景

柴达木地块位于青藏高原东北缘，是青藏高原活动地块区内的一个重要次级地块（图 1a），其周缘被多条巨型活动断裂带围限，构造背景复杂。地块北边界为阿尔金走滑断裂，主体长约 1600 km，分隔柴达木盆地与塔里木盆地，不仅控制了青藏高原北缘的几何形态与基本构造格局，更是调节印度–欧亚大陆碰撞所引发地壳变形的关键构造（国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组，1992；丁国瑜，1995；Li et al., 2020；袁兆德等，2020；肖坤泽等，2025；衣可心等，2025）。阿尔金断裂带地震活动性极强，1924 年民丰曾发生 2 次 M 7¼地震，于田地区亦在 2008 年、2014 年先后发生 M_S 7.3 地震，均伴随数十千米的地表破裂（顾功叙，1983；Yuan et al., 2021；刘雷等，2024）。地块东边界为祁连–海原断裂带，总体呈北西西向展布，西端与阿尔金断裂带相接，向东延伸至海原一带，是调节高原向北东方向扩展的核心构造（袁道阳等，2004）。该断裂带现今地震活动频繁，自 1900 年以来先后发生 1920 年海原 M 8½、1927 年古浪 M 8 及 2022 年门源 M_S 6.9 等多次强震（李振洪等，2022；石富强等，2023；阎渊，2023）。地块南边界受昆仑断裂带控制，该断裂为巨型左旋走滑断裂，整体呈东西向延伸，长度超过 1600 km，是柴达木地块与巴颜喀拉地块的主要构造边界（张培震，2003），历史上曾发生 1937 年花石峡 M 7½、1963 年都兰 M 7 及 2001 年昆仑山口西 M_S 8.1 等强震。相较于周缘边界断裂带的强地震活动水平，柴达木地块内部仅记录到 1 次 M 7 地震，整体表现出“内部相对稳定”的构造特征（图 1b）。但近期研究表明，柴达木块体内部发育柴达木盆地北缘断裂系、夏日哈断裂、英德尔康断裂及热水–桃斯托河断裂等一系列第四纪晚期活动断裂。尽管这些断裂的滑移速率较低，但其共轭的几何结构暗示了未来可能会发生类似 2019 年美国里奇克雷斯特（Ridgecrest）地震序列的复杂破裂，预示柴达木地块内部的地震危险性可能高于以往认知（Bao et al., 2024）。

2　白干湖断裂几何分段与地貌影像特征

断层分段的概念与研究始终围绕地震危险性预测与评价展开。随着断层活动性与古地震研究的深入，其内涵不断拓展，核心目标是识别并划分断层上具有独立破裂特性的结构单元或基本破裂单元（丁国瑜等，1993）。断层分段主要包括 4 种类型：①几何学分段，依据断层的空间分布、走向变化等几何特征划分；②结构分段，基于断层带内部及两盘岩性、地层的结构差异划分；③活动性分段，根据断层长期活动性的显著差异界定；④破裂分段，依据断层历史上的实际破裂行为划分，旨在确定未来地震破裂的潜在位置与规模（丁国瑜等，1993）。

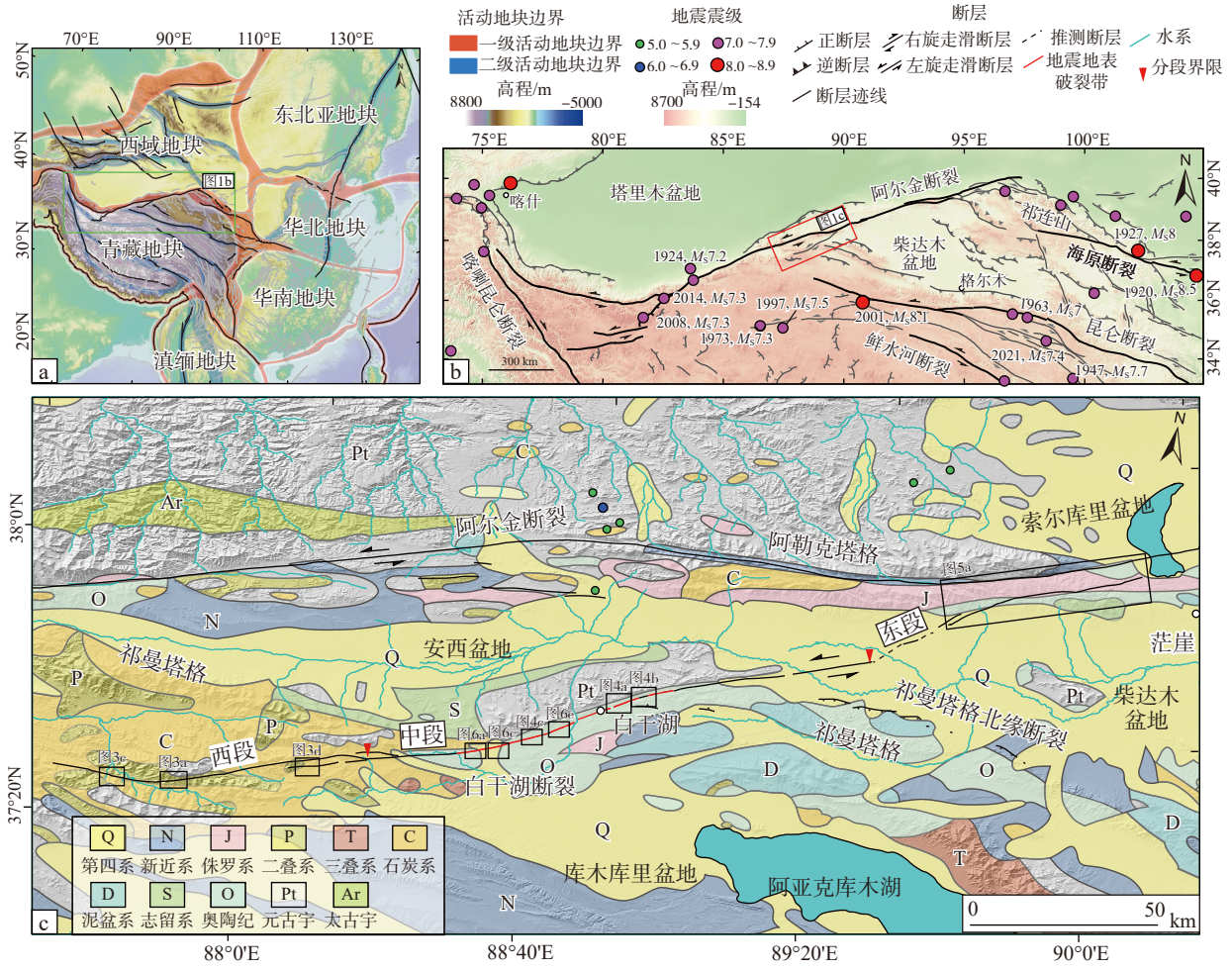
白干湖断裂的空间展布具有显著的几何学分段特征。结合断裂走向、构造变形特征及地貌发育差异，可将其整体划分为西段、中段与东段 3 个次级段落（图 1c）。西段与中段以挤压双弯（restraining double bend）为分界标志，该挤压双弯的弯曲角为 19°，衔接段长 6 km，表现为断裂走向发生 2 次转折，并在转折部位形成局部挤压环境；中段与东段则以断裂走向的显著偏转为分界依据，中段平均走向约为 68°，东段向北偏转 14°，走向变为 54°（图 1，图 2）。

2.1　西段

白干湖断裂西段总体呈近东西走向，延伸长度约 68 km，西端止于基岩山区，东侧以挤压双弯与中段相接。该段断裂主要发育于基岩山区内，第四纪沉积层不发育，因此第四纪晚期活动地貌面的表现较为微弱，地表断层迹线也呈断续分布特征。但遥感影像中仍可识别出受断裂活动控制的典型微地貌组合，主要表现为沿断裂线断续分布的断层垭口、线性槽谷及断错冲沟等（图 3）。其中断层垭口及伴生的线性槽谷发育最为典型（图 3a—3c）。除主断裂迹线外，西段还发育多条与主断裂近平行的次级断裂，一系列横跨次级断裂的冲沟均表现出同步的左旋位错特征，位错量多介于 20～68 m（图 3d），且多数位错点集中于挤压弯曲附近。上述微地貌证据充分表明，白干湖断裂西段在第四纪晚期期间仍保持一定的构造活动性。

2.2　中段

白干湖断裂中段总体呈东西向至北东东向延



a—中国及邻区活动地块划分(据 Zhang et al., 2025 修改); b—青藏高原北部地震构造图(据 Yuan et al., 2024 修改); c—白干湖断裂展布图

图 1 白干湖断裂地震构造背景图

Fig. 1 Seismotectonic setting of the Baiganhu Fault

(a) Active tectonic block division of China and adjacent regions (modified from Zhang et al., 2025); (b) Seismotectonic map of the northern Tibetan Plateau (modified from Yuan et al., 2024); (c) Structural map of the Baiganhu Fault

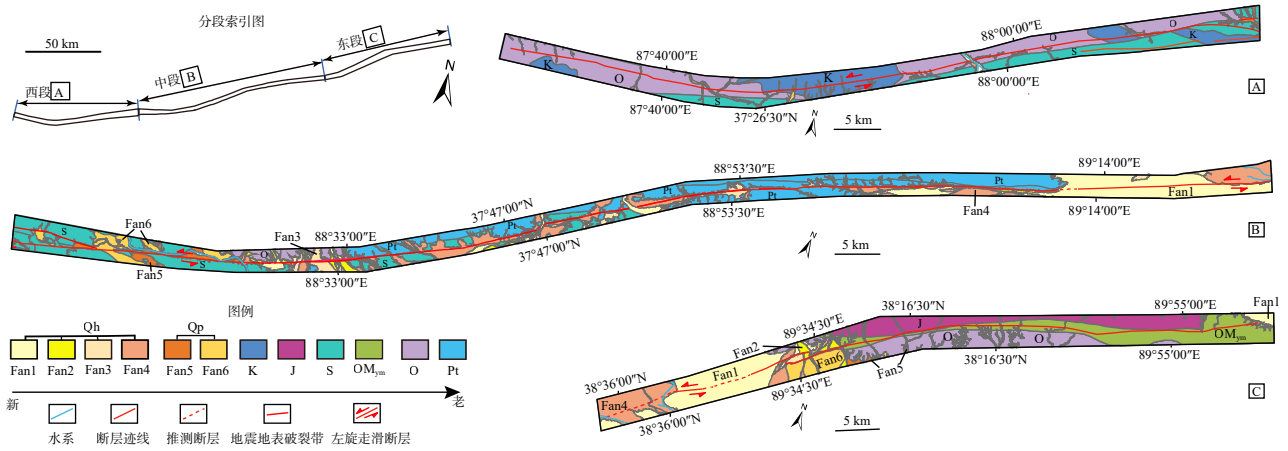
伸, 长约 115 km, 是整条断裂带中断错地貌表现最显著、线性形迹最清晰的段落。高分辨率遥感影像显示, 该段断裂迹线连续完整, 贯穿于山体与山前洪积扇之间, 形成一条特征鲜明的构造−地貌带。

中段部分区域可见明显的色调与植被边界异常, 推测为断层泉等地下水出露点所致(图 4a、4b); 同时发育大规模水系左旋位错, 部分冲沟在断错点上游形成典型的“肘状”拐弯, 并在拐点处伴生“闸门脊”地貌。对冲沟位错量的系统测量表明, 其位错具有明显的分级特征: 次级冲沟的位错量主要集中于 26～52 m(图 4a), 反映断裂第四纪晚期以来的构造活动性; 一级主干水系(如主干沟)的最大累积位错量可达约 331 m(图 4b), 揭示该断裂具有长期的构造活动历史。

断裂的线性构造清晰分隔了两侧地貌单元, 其西北侧为基岩山, 东南侧则为广泛发育的山前洪积扇群(图 4c)。洪积扇体本身也完整记录了断层的左旋断错变形。断裂活动导致多期洪积扇面与小型冲沟发生侧向偏移, 形成连续的地貌陡坎与位错标志。遥感解译与测量显示, 洪积扇体与小型冲沟的水平位错量为 6～55 m。该位错范围与次级冲沟的位错量(26～52 m)高度重叠, 二者相互印证, 共同指示了断裂第四纪晚期的强烈活动。值得注意的是, 该区间内还识别出 6～7 m 的位错量, 推测为断裂最新古地震事件的同震位移(图 4d、4e)。

2.3 东段

白干湖断裂东段与中段的走向存在显著差异, 中段平均走向 68°, 东段则以 54°向北北东方向延



Qh—全新统；Qp—更新统；K—白垩系；J—侏罗系；S—志留系；O—奥陶系；Pt—元古宇；OM_{ym}—奥陶纪蛇绿混杂岩；Fan1—Fan6—洪积扇不同期次

图 2　白干湖断裂分段地质简图

Fig. 2　Geological sketch map showing the segmentation of the Baiganhu Fault

Qh–Holocene; Qp–Pleistocene; K–Cretaceous; J–Jurassic; S–Silurian; O–Ordovician; Pt–Proterozoic; OM_{ym}–Ordovician ophiolitic mélange; Fan1–Fan6–successive alluvial fans

伸，末端可能至乌尊硝尔盐湖南侧，延伸长度约 64 km。该段进入基岩区后，断层迹线与阿尔金断裂近平行展布（图 5a、5b），二者水平距离约 5 km。遥感影像显示，东段断层在盆地内断错了晚更新世—全新世洪积扇，形成了典型的反向断层陡坎（图 5c、5d）。从盆地进入基岩山区后，断层发育于古生代蛇绿岩中，地形上可见清晰的线性构造特征（图 5a），但大部分段落因缺少第四纪沉积层，未识别出明显的断错微地貌。苏吾什杰幅 1:25 万区域地质图中亦显示该区域蛇绿岩中发育断层构造，表明白干湖活动断裂是在古断层基础上活化形成的新生构造（西安地质矿产研究所，2005）。

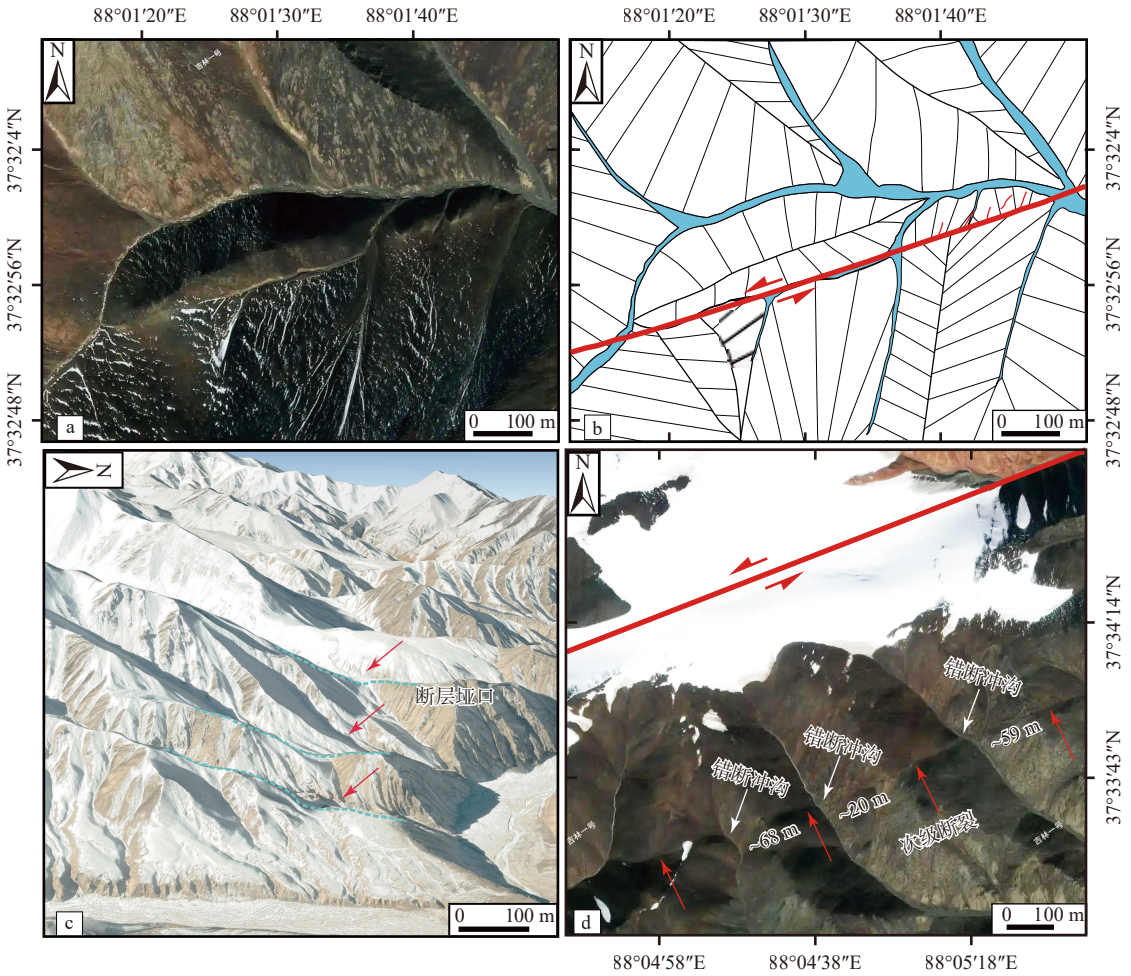
3　地震地表破裂带

3.1　地震地表破裂特征

白干湖断裂的地表破裂带仅发育于中段，西起 88°14′49″E、37°36′18″N，向东延伸至 89°23′45″E、38°4′12″N，全长约 50 km，是一条相对连续、线性特征显著的破裂带，断错了晚更新世—全新世洪积扇、冲沟等多种地貌单元。该地表破裂带的主要破裂样式包括：①挤压鼓包，发育于相邻断层之间的挤压区，呈长椭圆形或透镜状隆起，长轴方向多与断裂带斜交；②雁列式裂隙，大量张剪性裂隙以左阶或右阶斜列排列，是指示断裂左旋走滑运动的典型地表标志；③张性及张剪性裂隙，常呈狭长的线性沟槽或裂缝，为断层局部拉张作用的直接产物。破裂单元在空间上并非均匀分布，其发育程度、组合样式与局部地貌密切相关。以下选取 3 处典型破裂段落进行深入剖析。

第 1 处破裂段发育于中段开阔的洪积扇上（图 6a、6b），破裂组合完整，清晰揭示了断裂左旋走滑兼挤压–拉张的活动性质，且破裂样式具有明显的空间分异特征。西段以挤压鼓包与同步左旋位错冲沟为主，单个挤压鼓包规模较大，长 30～125 m、宽 15～40 m，呈狭长透镜状，长轴方向约为北东 65°，与断裂主走向呈约 3°夹角，符合左旋走滑运动局部产生挤压变形的理论模型。鼓包表面物质颗粒较粗，无植被覆盖，在遥感影像中呈现亮白色调，与周围深色扇面形成鲜明对比，指示新鲜断层的出露或近地表扰动。与挤压鼓包伴生的小型冲沟均表现出系统性左旋错断特征，位错量 5～46 m。破裂带中部发育由左旋左阶错动形成的拉分盆地，盆地内发育小型断塞塘，形态近似平行四边形，断塞塘在遥感影像中呈棕色，指示植被发育较好。东段则以张性及张剪性裂缝为主，且可见重力作用形成的变形带，张剪切裂缝走向北东 30°—85°，单条长 10～70 m、宽 1～2 m。

第 2 处地表破裂以张剪性裂缝为主要特征，破裂带内发育断层泉（图 6c、6d）。该段内一条大型冲沟发生左旋错断，累积位错量达 233 m，为整条破裂带中的最大位错量之一，指示断裂的长期构造活动性。位错冲沟西侧保存多条完整的张性裂缝，走向



红色实线及相对位移箭头代表断层及断层方向，图 c 中红色箭头指向断层垭口，蓝色虚线指示该构造地貌的轮廓，图 d 中白色箭头指向错断冲沟，图 d 中红色箭头指向次级断层，数字代表冲沟的水平位错值

a—断层槽谷遥感影像图；b—断层槽谷遥感影像解译图；c—断层垭口遥感影像图；d—错断冲沟遥感影像图

图 3 白干湖断裂西段典型断错地貌

Fig. 3 Typical offset landforms along the western segment of the Baiganhu fault

(a) Remote-sensing image of fault valley; (b) Interpreted image of the fault valley; (c) Remote-sensing image of fault saddle; (d) Remote-sensing image of offset gully

The red solid lines and relative displacement arrows denote faults and fault kinematics. In (c), the red arrow points to the fault saddle, the blue dashed line outlines the geomorphic feature. In (d), the white arrows indicate offset gullies, the red arrow marks a secondary fault, and the numbers represent the horizontal offset values of the gullies.

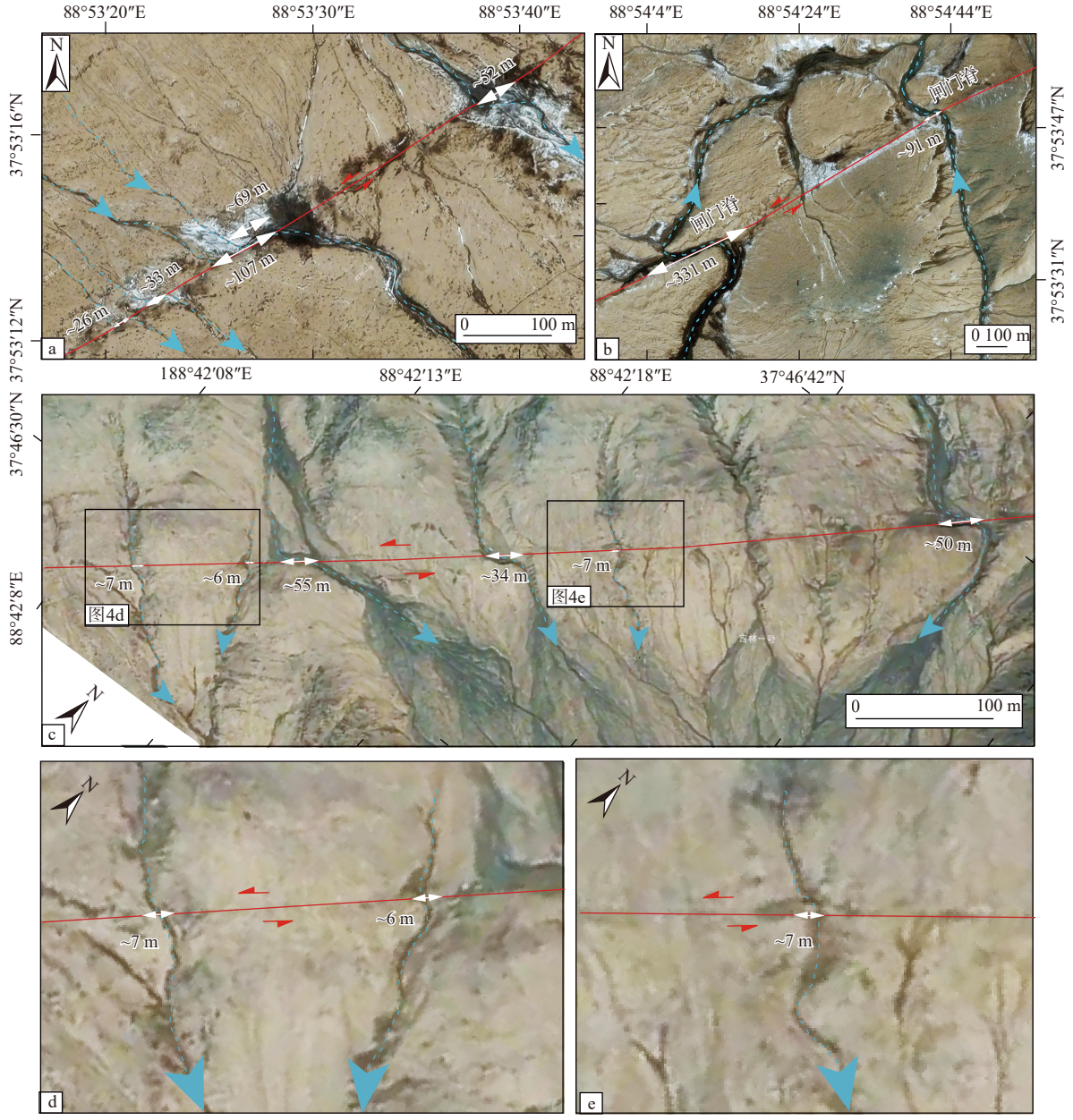
约北东 85°，单条长 20～60 m，宽 1～3 m。水系断错与张剪性裂缝的组合特征表明，该段破裂以左旋走滑为主，兼具局部拉张的构造变形特征。

第 3 处典型地震地表破裂带发育于平坦的洪积扇之上，破裂构造保存完好，组合样式典型，直观反映了以左旋走滑为主的构造变形特征（图 6e、6f）。走向北东 60°—70°的张剪性裂缝以右阶斜列方式排列，单条长约 8～25 m。阶区内部受斜列裂缝端部的局部挤压作用，地表发生扭曲隆起，形成了逆冲陡坎地貌。

3.2 白干湖断裂冲沟位错分布特征

为定量评估白干湖断裂的第四纪晚期活动性，基于遥感影像对断裂沿线发育的位错冲沟进行了精细解译与测量。受影像分辨率及缺乏高精度数字高程模型（DEM）的限制，部分冲沟位错的解译与测量结果存在一定误差。共提取了 123 个冲沟位错数据，其中位错量大于 60 m 的 17 个、小于 60 m 的 106 个，断裂最大左旋位错＞600 m。

冲沟位错数据的空间分布具有明显的段落差异，位错数据主要集中于中段，共 78 个，平均位错



红色实线及相对位移箭头代表断层及断层方向；蓝色虚线表示冲沟，蓝色箭头表示冲沟流向；白色箭头指示冲沟位错距离，数字指示冲沟的位错值

a—错断冲沟遥感影像图；b—大型错断冲沟与闸门脊遥感影像图；c—错断冲沟与洪积扇遥感影像图；d—西侧冲沟放大图；e—东侧错断冲沟放大图

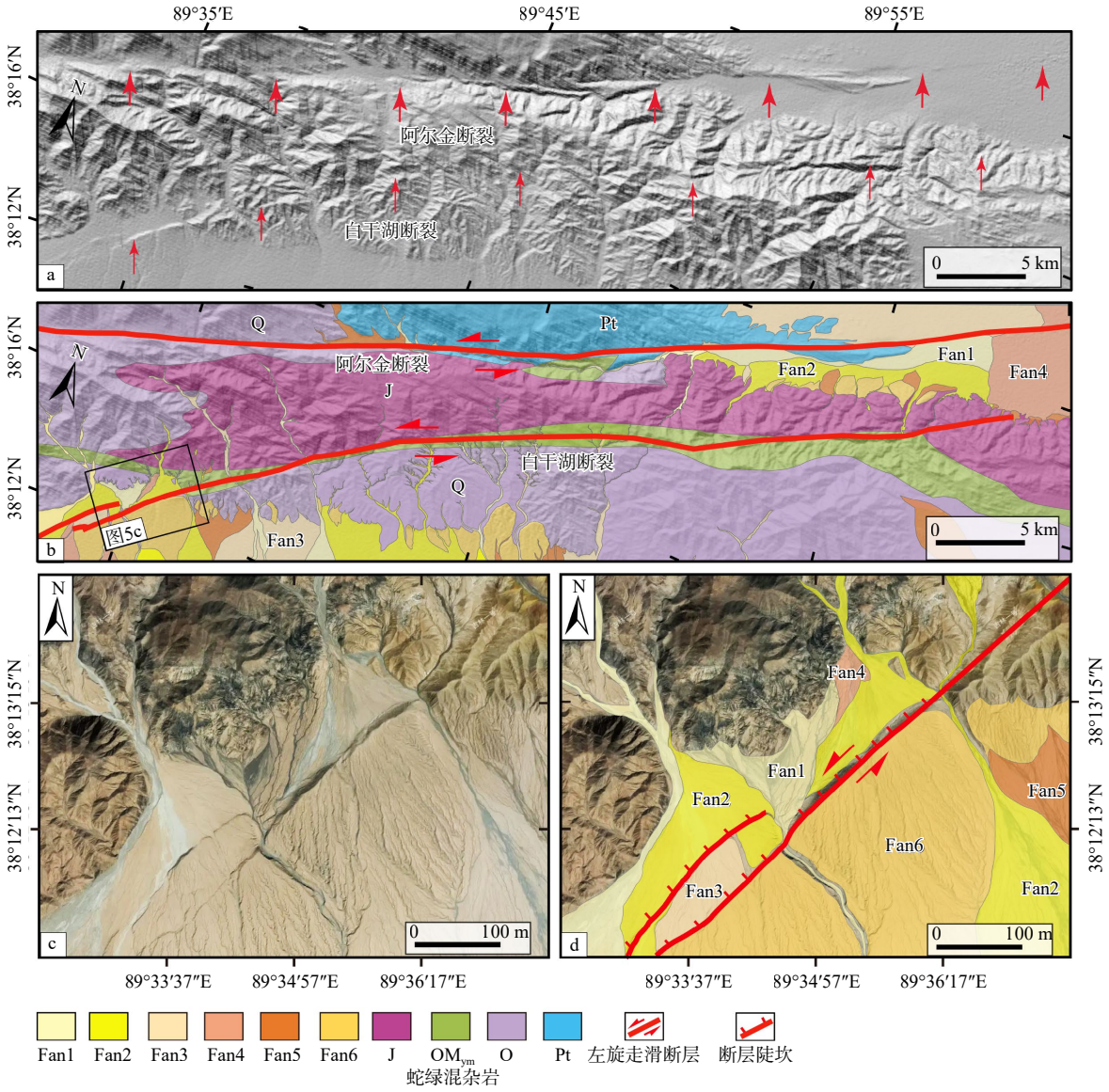
图 4　白干湖断裂中段典型断错地貌

Fig. 4　Typical offset landforms along the central segment of the Baiganhu fault

(a) Remote-sensing image of offset gullies; (b) Remote-sensing image of large-scale faulted gullies and shutter ridges; (c) Remote-sensing image of offset gullies and alluvial fans; (d) Close-up of the western gullies; (e) Close-up of the the eastern offset gullies

Red solid lines and relative‑displacement arrows represent faults and their kinematics; blue dashed lines outline gullies, with blue arrows indicating flow directions; white arrows point to gully offsets, and numbers give offset magnitudes.

量 23.2 m，显著低于西段（86.2 m）和东段（37.5 m）。西段与东段的平均位错量较高，反映这两段缺乏新近活动的直接地貌证据；而中段洪积扇广泛发育，保存了丰富的断错地貌标志，因此可测量的位错数据更多。整体而言，白干湖断裂冲沟位错的空间分布特征指示不同段落的最新活动时间存在明显差



O—奥陶系；Pt—元古宇；OM_{ym}—奥陶纪蛇绿混杂岩；Fan1—Fan6 代表洪积扇不同期次

a—东段局部山影图（箭头指向线性断错地貌）；b—东段局部解译图；c—被切割的洪积扇遥感影像图；d—洪积扇解译图

图 5 白干湖断裂东段典型断错地貌特征

Fig. 5 Typical offset landforms along the eastern segment of the Baiganhu fault

(a) Local hillshade map of the eastern segment (arrows indicate linear fault landforms); (b) Local interpreted map of the eastern segment; (c) Remote-sensing image of dissected alluvial fan; (d) Interpreted map of the alluvial fan in panel c

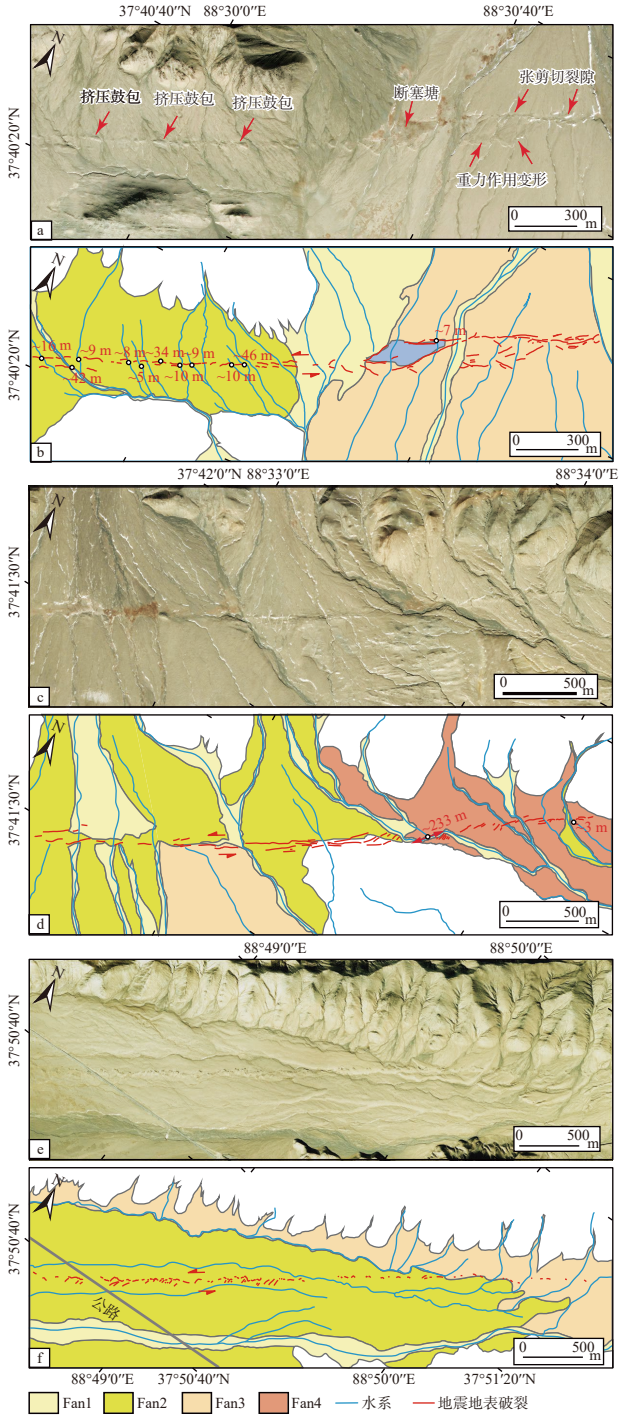
O–Ordovician; Pt–Proterozoic; OM_{ym}–Ordovician ophiolitic mélange; Fan1 to Fan6 represent successive alluvial fans

异，其中中段的最新活动离逝时间最短，活动特征最显著。

4 讨论

4.1 白干湖断裂的活动性与强震能力

遥感影像解译与位错分析表明，白干湖断裂是一条在全新世仍持续活动的左旋走滑活动断层。为进一步分析断裂的位移累积特征，利用高斯概率密度函数（PDF）约束测量点位移变化，对各测量点的 PDF 进行累加求和，获得了累积位错概率密度分布（COPD）曲线，以此解析断裂的位移累积规律（Bi et al., 2018; Lin et al., 2020）。选取 80～165 km 断裂段内位错量小于 60 m 的 99 个数据进行统计分析（图 7）。结果显示：全部位移数据生成的 COPD 曲线呈现 7 个丛集峰，分别为 4.8 m、7.8 m、10.5 m、



Fan1—Fan4 代表洪积扇不同期次；红色水平箭头指示破裂方向，黑色圆圈指示错断冲沟，数值指示冲沟位错值

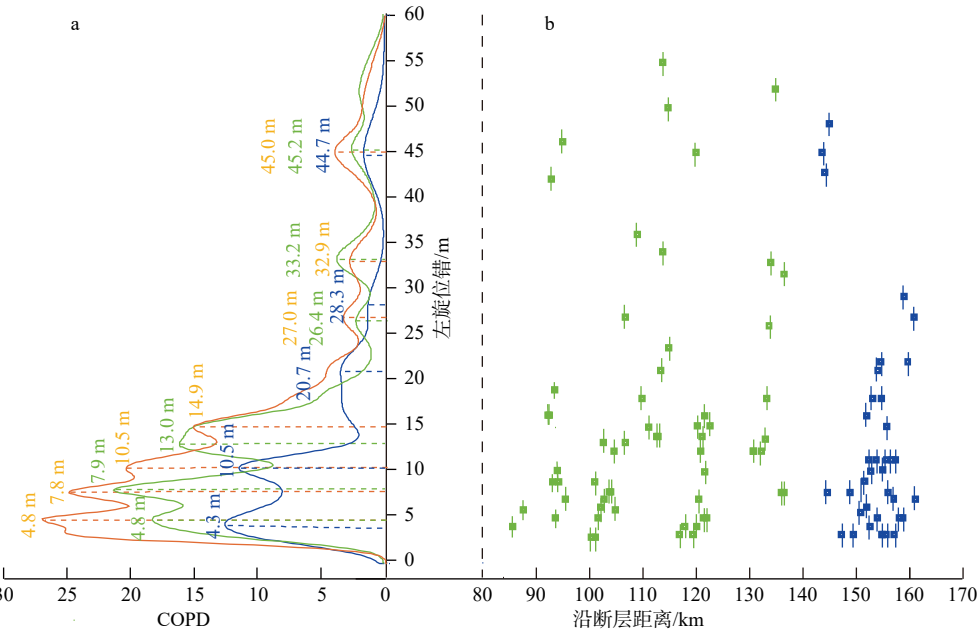
a—挤压鼓包与张性裂缝遥感影像图；b—挤压鼓包与张性裂缝解译图；c—大型错断冲沟与线性张裂隙缝遥感影像图；d—大型错断冲沟与线性张裂隙解译图；e—雁列式走滑破裂缝遥感影像图；f—雁列式走滑破裂解译图

图 6　白干湖断裂典型地震地表破裂特征

Fig. 6　Typical seismic surface rupture features along the Baiganhu fault

(a) Remote-sensing image of pressure ridges and extensional fissures; (b) Interpreted map of pressure ridges and extensional fissures; (c) Remote-sensing image of large offset gully and linear extensional fissures; (d) Interpreted map of large offset gully and linear extensional fissures; (e) Remote-sensing image of en échelon strike-slip ruptures; (e) Interpreted map of en échelon strike-slip raptures

Fan1 to Fan4 represent successive alluvial fans, red horizontal arrows indicate the direction of rupture, black circles mark offset gullies, with numbers denoting their offset magnitudes.



a—COPD 曲线(橙色代表全部冲沟位错点，绿色代表地震地表破裂带位错点，蓝色代表非地震地表破裂带位错点)；b—80～165 km 断层段冲沟位错分布(绿色方块为地震地表破裂带内冲沟位错点，蓝色方块为非地震地表破裂带冲沟位错点，竖线代表位错测量误差)

图 7 白干湖断裂 80～165 km 断层段冲沟位错分布和累积位错概率密度(COPD)图

Fig. 7 Distribution of gully offsets and COPD plots for the 80–165 km segment of the Baiganhu Fault

(a) COPD plots(The yellow curve represents all offset gullies, the green curve represents offsets along the coseismic surface rupture zone, and the blue curve represents the offsets outside the surface rupture zone.); (b) Gully offset distribution along the 80–165 km fault segments(Green squares represent offset gullies within the coseismic surface rupture zone, blue squares represent o those outside the surface rupture zone, and vertical bars denote offset measurement uncertainties.)

14.9 m、27 m、32.9 m 和 45.0 m；地震地表破裂段位移 COPD 曲线呈现 6 个丛集峰，分别为 4.8 m、7.9 m、13.0 m、26.4 m、33.2 m 和 45.2 m；非地震地表破裂段位移的 COPD 曲线呈现 5 个丛集峰，分别为 4.3 m、10.5 m、20.7 m、28.3 m 和 44.7 m。3 条 COPD 曲线最小丛集峰值为 4.3～4.8 m，指示白干湖断裂最新一次强震事件平均同震水平位错约 4.5 m；其余较大的丛集峰值则记录了断裂早期多次古地震事件的累积位移。因位移数据仅由卫星影像解译获取，缺乏地形参数支撑且未开展野外验证，数据存在一定的不确定性。因此，文章仅聚焦于数据点聚集度最高、离散性最小的第一个显著峰值(4.5 m)进行地质解释，认为其代表了断裂最近一次地震地表破裂事件的平均同震位移；其余较大丛集峰因数据点离散性较高，峰值可能为假象，暂不做进一步的古地震含义探讨。

在明确断裂活动性特征的基础上，依据 Wells and Coppersmith(1994)利用全球历史地震数据建立的走滑型断层矩震级(M_W)与地表破裂长度、同震位移的经验关系，定量评估白干湖断裂的潜在发震能力。走滑型断层的经验公式为：

$$M_W = 5.16 + 1.12 \times \log(SRL) \quad (1)$$

$$M_W = 7.04 + 0.89 \times \log(AD) \quad (2)$$

式中，SRL—同震地表破裂长度，km；AD—同震地表破裂平均位移量，m。

将白干湖断裂中段的地表破裂参数代入公式计算：按破裂长度(50 km)估算，震级为 M_W 7.1±0.3；按平均同震位移(4.8 m)估算，震级为 M_W 7.7±0.3。综合 2 个经验公式的计算结果，确定白干湖断裂最新一次古地震事件的震级为 M_W 7.4±0.3。若白干湖断裂发生全段贯通破裂，按总长度(247 km)代入公式(1)计算，其潜在震级可达 M_W 7.8±0.3，表明该断裂整体具备发生 M_W 7.4 以上强震的构造潜力。目前，针对白干湖断裂的古地震活动历史、滑动速率等关键参数的研究仍为空白，无法对其未来地震危险性进行定量评估。因此，未来亟需在该断裂开展系统的古地震勘探与滑动速率测定工作，明确地震复发间隔、最新地震事件离逝时间以及累积的同震

位移等参数，为地震危险性定量评价提供基础数据支撑。

4.2　白干湖断裂与阿尔金断裂发生级联破裂潜力

白干湖断裂东段末端与阿尔金断裂近平行展布，二者水平距离约 5 km。该阶区是否能阻挡破裂传播、2 条断裂是否存在级联破裂的可能，直接影响柴达木地块北部的区域地震危险性评价。目前，关于走滑断层阶区对破裂传播的阻挡效应，国内外学者基于历史地震数据统计与数值模拟开展了大量研究，形成了一系列认识。

Wesnousky（2006）通过分析 22 次走滑型地震的地表破裂数据，发现约 2/3 的破裂终止于断层阶区或断层末端，提出 4 km 宽的阶区为阻挡破裂通过的阈值，即超过该宽度的阶区可完全阻挡破裂的贯穿扩展。Biasi and Wesnousky（2017）统计分析 66～67 次历史地震数据（以 46 次走滑型地震为主），认为阶区宽度与破裂突破概率呈负相关：阶区宽度为 3 km 时，强震破裂突破障碍体的概率约 50%；阶区宽度大于 6 km 时，破裂基本无法突破该几何复杂部位。Elliott et al.（2009）则指出，当地震破裂扩展至阶区附近时，若同震位移变化梯度较大（>20 cm/km），破裂易从阶区一侧跳跃至另外一侧继续传播。上述基于历史地震数据的统计认识存在一定局限性：统计所涉最早历史地震为 1857 年美国加州 M_W 8.2 地震，距今仅 166 年；而断裂强震的复发周期从数十年至数千年不等，历史地震数据难以涵盖少见的突破大型障碍构造的强震事件。近年来的多次强震已突破传统认识，如 2016 年新西兰凯库拉 M_W 7.8 地震，共有 21 条断裂参与破裂，突破的阶区宽度达 15～20 km（Hamling et al., 2017; Stirling et al., 2017; 耿亚清等，2022），表明断层阶区对破裂的阻挡效应并非绝对。

除历史地震统计外，学者们还针对断层阶区开展了 3D、2D 地震动力学数值模拟，获得了以下核心认识：①强震破裂一般难以突破宽度＞5 km 的阶区，且破裂速度在阶区具有减缓效应（Harris and Day, 1999）；②阶区一侧的位移变化梯度影响破裂突破的难易程度，梯度越大则破裂越易突破（Oglesby, 2008）；③前期的地震破裂会在阶区附近累积不均匀应力，对后续地震破裂的起始、扩展和终止产生显著影响，且破裂能突破 4 km 宽的挤压阶区和 8 km 宽的拉张阶区（Duan and Oglesby, 2006）；④地震破裂可突破 20 km 宽的拉张阶区和 7 km 宽的挤压阶区（Wang et al., 2020）。尽管历史地震统计与数值模拟的结果存在一定差异，但均表明 5 km 宽的阶区存在被破裂突破的可能性。因此，白干湖断裂与阿尔金断裂之间约 5 km 宽的阶区无法完全阻挡破裂传播，2 条断裂存在发生级联破裂的构造潜力。

近年来的地震学研究揭示了大陆走滑型大地震的重要破裂模式：许多大地震的破裂并非起始于主干断裂，而是成核于位移累积较小的次级或分支断裂，随后跃迁至主干断裂并引发多条断层级联破裂（Litchfield et al., 2018; Bird and Stein, 2024; Stein and Bird, 2024）。2000 年以来，全球 5 次 $M_W \geqslant 7.8$ 的走滑地震均遵循该模式，如 2001 年昆仑山口西 M_S 8.1 地震、2002 年阿拉斯加 M_W 7.9 地震均起始于主断裂端部约 40 km 的次级断裂；2016 年凯库拉 M_W 7.8 地震、2023 年土耳其 M_W 7.8 地震也清晰展示了分支断裂的成核作用（Litchfield et al., 2018 董仁东等, 2022; Liu et al., 2023; Stein and Bird, 2024; Mukhopadhyay and Dasgupta, 2025; Wang et al., 2025）。Stein and Bird（2024）将该模式解释为：主断裂因长期滑动形成低摩擦的碎裂岩损伤带，在静态条件下处于高应力状态而不易直接破裂；分支断裂则可能保持较高的静态强度，更易积累应力并达到破裂临界条件。这种“高静态强度分支断裂”与“低静态摩擦但具动态弱化能力主干断裂”的组合，是分支断裂成核的核心机制。白干湖断裂发育于阿尔金断裂阿勒克塔格大型挤压双弯南侧，其主要构造作用是调节挤压双弯对阿尔金断裂南侧块体向东运动的阻挡效应，从空间展布与构造变形调节的角度，可将其视为阿尔金断裂的一条大型分支断裂。若上述分支断裂成核机制适用于该区域，那么白干湖断裂的破裂极有可能“解锁”相邻且处于高应力状态的阿尔金断裂，进而引发跨越 2 条断裂的灾难性级联破裂事件。

研究仅基于遥感影像解译明确了白干湖断裂的基本活动特征，未来亟需在白干湖断裂上开展古地震和滑动速率相关研究工作，确定地震复发间隔、最新事件离逝时间、以及累积的同震位移等参数。同时，还需与阿尔金断裂古地震数据进行对比，探讨 2 条断裂发生级联破裂的概率。此外，白干湖断裂与阿尔金断裂在深部是否存在构造关联，仍需高精度地球物理勘探数据的进一步佐证。

5　结论

（1）白干湖断裂为一条总体走向北东东，长约

247 km的大型左旋走滑断裂,第四纪晚期以来活动强烈。根据几何特征,断裂可分为西段、中段与东段3个次级段落,各段的地貌发育与断错特征存在显著差异。

(2)白干湖断裂中段保存了约50 km的地震地表破裂带,平均同震位移约4.8 m。基于地表破裂带规模和同震位移数据,白干湖断裂具备发生M_W 7.4以上强震的构造潜力;若发生全段贯通破裂,潜在震级可达M_W 7.8。

(3)白干湖断裂与阿尔金断裂之间存在一个约5 km宽的阶区,该阶区无法完全阻挡地震破裂的贯穿扩展。此外,白干湖断裂可视为阿尔金断裂的大型分支断层,2条断裂存在发生级联破裂的潜在可能。

作者贡献声明:刘汉琳负责论文构思、相关地貌解译分析,相关图件绘制,初稿撰写;陈涛参与参与相关地貌解译分析,协助修改稿件;袁兆德协助修改稿件,最终稿审阅。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: LIU Hanlin contributed to conceptualization, geomorphic interpretation and analysis, figure preparation, and writing of the original draft. CHEN Tao participated in geomorphic interpretation and analysis and assisted in revising the manuscript. YUAN Zhaode assisted in revising the manuscript and reviewed the final draft. 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

BAO G D, REN Z K, HA G H, et al., 2024. New evidence of late Quaternary tectonic activity along the eastern margin of the Qaidam Basin[J]. Tectonics, 43(1): e2023TC007906.

BI H Y, ZHENG W J, GE W P, et al., 2018. Constraining the distribution of vertical slip on the South Heli Shan Fault (northeastern Tibet) from high - resolution topographic data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(3): 2484-2501.

BIASI G P, WESNOUSKY S G, 2017. Bends and ends of surface ruptures[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 107(6): 2543-2560.

BIRD P, STEIN R S, 2024. Majority of ruptures in large continental strike - slip earthquakes are unilateral: permissive evidence for hybrid brittle - to - dynamic ruptures[J]. Seismological Research Letters, 95(6): 3306-3315.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993. Regional geology of Xinjiang Uygur autonomous region[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

CHEN H, QU C Y, ZHAO D Z, et al., 2021. Rupture kinematics and coseismic slip model of the 2021 Mw 7.3 Maduo (China) earthquake: implications for the seismic hazard of the Kunlun fault[J]. Remote Sensing, 13(16): 3327.

COWGILL E, YIN A, ARROWSMITH J, et al., 2004. The Akato Tagh bend along the Altyn Tagh fault, northwest Tibet 1: smoothing by vertical-axis rotation and the effect of topographic stresses on bend-flanking faults[J]. GSA Bulletin, 116(11-12): 1423-1442.

DENG Q D, 1980. Main characteristics of Cenozoic block structures in China[M]//International exchange geological academic papers - 26th international geological congress. Beijing: Geological Publishing House: 101-108. (in Chinese)

DING G Y, TIAN Q J, KONG F C, et al. , 1993. Active fault segmentation: principles, methods, and applications[M]. Beijing: Seismological Press: 4-5. (in Chinese)

DING G Y, 1995. Paleoearthquakes along the Altun active fault and its segmentation[J]. Quaternary Sciences, 15(2): 97-106. (in Chinese with English abstract)

DONG R D, YAO Q, SHI H Q, et al., 2022. An unified model of spatiotemporal rupture process for the 2001 west of Kunlun Mountain pass earthquake[J]. Earthquake Research in China, 38(1): 80-90. (in Chinese with English abstract)

DUAN B C, OGLESBY D D, 2006. Heterogeneous fault stresses from previous earthquakes and the effect on dynamics of parallel strike - slip faults[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B5): B05309.

ELLIOTT A J, DOLAN J F, OGLESBY D D, 2009. Evidence from coseismic slip gradients for dynamic control on rupture propagation and arrest through stepovers[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 114(B2): B02312.

GAI H L, YAO S H, YANG L P, et al. , 2021. Characteristics and causes of coseismic surface rupture triggered by the '5.22' M_S7. 4 Earthquake in Maduo, Qinghai, and their significance[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 899-912. (in Chinese with English abstract)

GENG Y Q, ZHANG Y, SHAO Z G, et al., 2022. Co-seismic rupture and the interaction between sub-faults of the 2016 Kaikoura M_W7.8 earthquake in New Zealand[J]. Earthquake, 42(2): 123-139. (in Chinese with English abstract)

GU G X, 1983. Catalogue of Chinese earthquakes: 1831 BC - 1969 AD[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

HAMLING I J, HREINSDÓTTIR S, CLARK K, et al., 2017. Complex multifault rupture during the 2016 M_W 7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand[J]. Science, 356(6334): eaam7194.

HARRIS R A, DAY S M, 1999. Dynamic 3D simulations of earthquakes on en echelon faults[J]. Geophysical Research Letters, 26(14): 2089-2092.

HE K F, WEN Y M, XU C J, 2022. Fault geometry and slip distribution of the 2021 M_W7.4 Maduo, China, earthquake inferred from InSAR measurements and relocated aftershocks[J]. Seismological Research Letters, 93(1): 8-20.

JIN Z Y, FIALKO Y, 2021. Coseismic and early postseismic deformation due

to the 2021 M7.4 Maduo (China) earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 48(21): e2021GL095213.

LI B, ZUZA A V, CHEN X H, et al. , 2020. Cenozoic multi-phase deformation in the Qilian Shan and out-of-sequence development of the northern Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 782-783: 228423.

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

LIANG M J, YANG Y, DU F, et al., 2020. Late quaternary activity of the central segment of the Dari fault and restudy of the surface rupture zone of the 1947 *M*7¾ Dari earthquake, Qinghai province[J]. Seismology and Geology, 42(3): 703-714. (in Chinese with English abstract)

LIN Z, JING L Z, WELDON II R J, et al. 2020. Modeling repeated coseismic slip to identify and characterize individual earthquakes from geomorphic offsets on strike-slip faults[J]. Earth and Planetary Science Letters, 545: 116313.

LITCHFIELD N J, VILLAMOR P, VAN DISSEN R J, et al., 2018. Surface rupture of multiple crustal faults in the 2016 M_w 7.8 Kaikōura, New Zealand, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 108(3B): 1496-1520.

LIU C L, LAY T, WANG R J, et al., 2023. Complex multi-fault rupture and triggering during the 2023 earthquake doublet in southeastern Türkiye[J]. Nature Communications, 14(1): 5564.

LIU D L, LI H B, CHEVALIER M L, et al., 2021. Activity of the Baiganhu Fault of the Altyn Tagh Fault System, northern Tibetan Plateau: insights from zircon and apatite fission track analyses[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 570: 110356.

LIU K, LI Y F, GUO H W, et al., 2021. Determination of surface rupture length and analysis of Riedel shear structure of the Litang *M*7.3 earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 95(8): 2346-2360. (in Chinese with English abstract)

LIU L, LI Y J, JI L Y, 2024. Interaction mechanism of strong earthquakes in the tectonic transition zone: a numerical study of four M_S>6.0 Yutian earthquakes from 2008 to 2020[J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(1): 156-171. (in Chinese with English abstract)

MUKHOPADHYAY B, DASGUPTA S, 2025. A note on seismotectonics of the 2023 turkey earthquakes (Mw 7.8 and 7.7) highlighting the unique damage pattern of building structures[J]. Journal of the Geological Society of India, 101(10): 1530-1536.

OGLESBY D, 2008. Rupture termination and jump on parallel offset faults[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(1): 440-447.

SHAO Y X, GE W P, ZHANG B, et al. , 2016. Primary study of late quaternary active features of northern margin fault of Qimantag[J]. China Earthquake Engineering Journal, 38(6): 970-976, 984. (in Chinese with English abstract)

SHAO Z G, WU Y Q, JI L Y, et al. 2022. Comprehensive determination for the late stage of the interseismic period of major faults in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(12): 4643-4658. (in Chinese with English abstract)

SHI F Q, XIONG X, WANG P T, et al., 2023. Stress interaction between the two *M*>6 earthquake since 2016 and its implication on the seismic hazard along the Qilian-Haiyuan fault zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(8): 3230-3241. (in Chinese with English abstract)

SONG M D, LIU Z, LI H M, et al., 2010. Geological background and potentiality analysis of Baiganhu Metallogenic Belt in East Kunlun, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 43(4): 44-52. (in Chinese with English abstract)

State Seismological Bureau, 1992. The Altyn Tagh active fault zone[M]. Beijing: Seismological Press: 166-187. (in Chinese)

STEIN R S, BIRD P, 2024. Why do great continental transform earthquakes nucleate on branch faults?[J]. Seismological Research Letters, 95(6): 3406-3415.

STIRLING M W, LITCHFIELD N J, VILLAMOR P, et al., 2017. The M_W7.8 2016 Kaikōura earthquake: Surface fault rupture and seismic hazard context[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 50(2): 73-84.

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

WANG F B, ZHANG Y W, YANG B, et al., 2025. Stochastic finite fault simulation of 2023 M_W 7.8 and M_W7.5 Turkey earthquakes and its application to regional buildings damage estimation at Kahramanmaras City[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 23(3): 867-892.

WANG H, LIU M, DUAN B C, et al., 2020. Rupture propagation along stepovers of strike - slip faults: Effects of initial stress and fault geometry[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 110(3): 1011-1024.

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.

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

WU Z H, 2024. The earthquake-controlling process of continental collision-extrusion active tectonic system around the Qinghai-Tibet Plateau: a case study of strong earthquakes since 1990[J]. Journal of Geomechanics, 30(2): 189-205. (in Chinese with English abstract)

Xian Institute of Geology and Mineral Resources, 2005. 1: 250, 000 regional geological survey of the Suwushijie sheet (J45C002004)[Z]. (in Chinese)

XIAO K Z, TONG H M, XU X K, et al., 2025. Advances in research on the Altyn Tagh fault: its sinistral strike-slip mechanism and developmental patterns[J]. Geotectonica et Metallogenia, 49(6): 1324-1348. (in Chinese with English abstract)

XU L, CHEN Q, ZHAO J J, et al., 2021. An integrated approach for mapping three-dimensional CoSeismic displacement fields from sentinel-1 TOPS data based on DInSAR, POT, MAI and BOI techniques: application to the 2021 M_W 7.4 maduo earthquake[J]. Remote Sensing, 13(23): 4847.

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

YANG Z, ZHONG N, ZHANG X B, et al., 2025. Avoidance distance and influence range of active faults: a case study of Litang fault[J]. Journal of Geomechanics, 31(1): 124-138. (in Chinese with English abstract)

YI K X, JOLIVET M, GUO Z J, 2025. Tectonic transition and extension at the eastern and western ends of the Altyn Tagh fault: insights from triple junctions[J]. Journal of Geomechanics, 31(1): 24-38. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, ZHANG P Z, LIU B C, et al., 2004. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northeast-

ern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 78(2): 270-278. (in Chinese with English abstract)

YUAN Z D, LIU J, ZHOU Y, et al., 2020. Paleoseismologic record of earthquakes along the Wuzunxiaoer section of the Altyn Tagh fault and its implication for cascade rupture behavior[J]. Science China Earth Sciences, 63(1): 93-107.

YUAN Z D, JING L Z, LI X, et al., 2021. Detailed mapping of the surface rupture of the 12 February 2014 Yutian M_S7.3 earthquake, Altyn Tagh fault, Xinjiang, China[J]. Science China Earth Sciences, 64(1): 127-147.

YUAN Z D, HUANG J GAN J F, et al., 2024. New constraints for slip rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet Plateau[J]. Journal of Structural Geology, 186: 105221.

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(2): 13-24.

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

ZHANG X B, YANG Z, ZHONG N, et al., 2024. Late Quaternary activity and paleoearthquake recurrence characteristics of the Litang fault in western Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 98(7): 2084-2100. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y P, WANG Y WANG W T, et al., 2025. Active block tectonics and intracontinental deformation within the India-Eurasia oblique convergence zone[J]. Tectonics, 44(10): e2025TC009029.

ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al., 2019. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 699-721. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, ZHANG Z Q, HAO M, et al., 2022. Physical basis for prediction of continental strong earthquakes: development and prospect of active tectonic block theory[J]. Chinese Science Bulletin, 67(13): 1352-1361. (in Chinese with English abstract)

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

附中文参考文献

邓起东, 1980. 中国新生代断块构造的主要特征[M]//国际交流地质学术论文集-第26届国际地质大会. 北京: 地质出版社: 101-108.

丁国瑜, 田勤俭, 孔凡臣, 等, 1993. 活断层分段: 原则、方法及应用[M]. 北京: 地震出版社: 4-5.

丁国瑜, 1995. 阿尔金活断层的古地震与分段[J]. 第四纪研究, 15(2): 97-106.

董仁东, 姚强, 施贺青, 等, 2022. 2001年昆仑山口西M_S8.1地震破裂时空过程的统一模型[J]. 中国地震, 38(1): 80-90.

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

耿亚清, 张勇, 邵志刚, 等, 2022. 2016年新西兰凯库拉M_W7.8地震同震破裂及子断层间相互影响[J]. 地震, 42(2): 123-139.

顾功叙, 1983. 中国地震目录: 公元前1831——公元1969年[M]. 北京: 科学出版社.

国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组, 1992. 阿尔金活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社: 166-187.

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

梁明剑, 杨耀, 杜方, 等, 2020. 青海达日断裂中段晚第四纪活动性与1947年M7¾地震地表破裂带再研究[J]. 地震地质, 42(3): 703-714.

刘亢, 李岩峰, 郭辉文, 等, 2021. 1948年川西理塘M7.3地震地表破裂特征及Riedel剪切构造分析[J]. 地质学报, 95(8): 2346-2360.

刘雷, 李玉江, 季灵运, 2024. 构造转换区强震间相互作用机制的数值模拟研究: 以2008—2020年4次M_S>6.0于田地震为例[J]. 地球物理学报, 67(1): 156-171.

邵延秀, 葛伟鹏, 张波, 等, 2016. 祁漫塔格北缘断裂晚第四纪以来活动特征初步研究[J]. 地震工程学报, 38(6): 970-976, 984.

邵志刚, 武艳强, 季灵运, 等, 2022. 中国大陆活动地块边界带主要断层的强震震间晚期综合判定[J]. 地球物理学报, 65(12): 4643-4658.

石富强, 熊熊, 王朋涛, 等, 2023. 2016年以来门源2次6级地震的应力触发及其对祁连—海原断裂带地震危险性的指示[J]. 地球物理学报, 66(8): 3230-3241.

宋茂德, 刘忠, 李洪茂, 等, 2010. 新疆东昆仑白干湖成矿带成矿地质背景及找矿方向[J]. 西北地质, 43(4): 44-52.

吴中海, 2024. 青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震作用: 以1990年以来强震活动为例[J]. 地质力学学报, 30(2): 189-205.

西安地质矿产研究所, 2005. 苏吾什杰幅(J45C002004)1:25万区域地质调查[Z].

肖坤泽, 童亨茂, 许晓科, 等, 2025. 阿尔金断裂研究进展及其左旋走滑成因机制和发育模式探讨[J]. 大地构造与成矿学, 49(6): 1324-1348.

新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.

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

杨镇, 钟宁, 张献兵, 等, 2025. 活动断层的避让距离与影响范围: 以理塘断裂为例[J]. 地质力学学报, 31(1): 124-138.

衣可心, JOLIVET M, 郭召杰, 2025. 阿尔金断裂带东西两端构造转换与扩展过程: 从三联点谈起[J]. 地质力学学报, 31(1): 24-38.

袁道阳, 张培震, 刘百篪, 等, 2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 78(2): 270-278.

袁兆德, 刘静, 周游, 等, 2020. 阿尔金断裂中段乌尊硝尔段古地震记录与级联破裂行为[J]. 中国科学: 地球科学, 50(1): 50-65.

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

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

张献兵, 杨镇, 钟宁, 等, 2024. 川西理塘断裂晚第四纪活动性及古地震复发特征[J]. 地质学报, 98(7): 2084-2100.

郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等, 2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制[J]. 地质力学学报, 25(5): 699-721.

郑文俊, 张竹琪, 郝明, 等, 2022. 强震孕育发生的大陆活动地块理论未来发展与强震预测探索[J]. 科学通报, 67(13): 1352-1361.

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