

巴颜喀拉地块内部五道梁-长沙贡玛断裂晚第四纪活动速率

王越¹, 李安^{1*}, 黄雄南¹, 计昊旻¹

1. 中国地震局地质研究所, 地震动力学与强震预测全国重点实验室, 北京 100029

摘要: 五道梁-长沙贡玛断裂是巴颜喀拉地块内部 NW 向大型走滑断裂之一, 已有研究表明其中段为全新世活动断裂并发生过多古地震, 获得其晚第四纪以来的变形速率, 对了解巴颜喀拉地块内部变形分配和强震风险具有重要意义。本文结合高分辨率影像解译、地震地质野外考察、无人机摄影测绘、光释光定年等方法对断裂中段开展了精细研究, 获得中段的空间展布和多个位错量, 结合阶地沉积物的定年, 获得断裂中段晚第四纪左旋走滑速率为 $1.8 \pm 0.2 \text{ mm/a}$ 。变形速率与地块内部的其他断裂基本相当, 明显低于地块边界断层。但内部断裂长期持续活动表明, 除边界断裂带外地块内部也承担了一部分地壳形变, 且具备发生 7 级左右地震的能力, 因此内部断裂的地震危险性仍需持续关注。

关键词: 青藏高原; 巴颜喀拉地块; 五道梁-长沙贡玛断裂; 晚第四纪活动速率
中图分类号: P65 收稿日期: 2026-1-23

Late Quaternary slip rate of the Middle Segment of

Wudaoliang-Changshagongma Fault Inside the Bayan Har Block

Wang Yue¹, Li An^{1*}, Huang Xiongnan¹, Ji Haomin¹

1. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics and Forecasting, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

Abstract: The Wudaoliang-Changshagongma fault is one of the large-scale NW-trending strike-slip faults inside the Bayan Har block. Previous studies have indicated that the middle segment of this fault is an active fault since the Holocene

基金项目: 国家重点研发计划资助 (项目编号: 2023YFC3012001-4)

作者简介: 王越 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事活动构造与地震地质研究。E-mail: wangyue@ies.ac.cn, ORCID: 0009-0004-3584-119X.

* 通讯作者: 李安 (1983-), 男, 博士, 研究员, 主要从事活动断层和地震地质研究。E-mail: lian@ies.ac.cn, ORCID: 0000-0001-9843-8059.

and has occurred multiple paleoearthquakes. Determining the rate of deformation since the Late Quaternary is of great significance for understanding the distribution of deformation inside the Bayan Har block and the seismic risk associated with it. This paper combines high-resolution image interpretation, unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, and optically stimulated luminescence(OSL) dating techniques to conduct a detailed study of the middle segment of this fault. As a result, the spatial distribution of this segment of the fault, as well as several cross-fault rivers' terrace displacement, were determined. By combining the dating results of the terrace sediments, it was concluded that the left-lateral strike-slip rate of this fault since the late Quaternary was 1.8 ± 0.2 mm/a. This rate of deformation is roughly comparable to that of other faults inside the Bayan Har block, but it is significantly lower than the activity rates of other faults at the boundaries of Bayan Har block. Nevertheless, the long-term continuous activity of these internal faults indicates that, in addition to the boundary fault zones, the interior of the block also contributes to crustal deformation and has the potential to generate earthquakes of magnitude 7 or higher. Therefore, the seismic hazard posed by these internal faults continues to require attention.

Key words: Tibet Plateau; the Bayan Har block; the Wudaoliang-Changshagongma Fault; the slip rate since the Late Quaternary

引言

青藏高原是我国现代最新构造活动与地震活动最强烈的地区,主要强震都发生在活动地块区和地块的边界带上(Tapponnier et al., 1982; 张培震等, 2003; 邓起东等, 2014)。巴颜喀拉地块位于青藏高原中部,南北介于昆仑山与唐古拉山之间,其边界断裂带由于大地震频发,一直以来是地震构造研究的热点之一。自地块北边界东昆仑断裂带发生 2001 年昆仑山口 Mw7.8 级地震之后,巴颜喀拉块体各边界断裂带相继发生强震,构成了一个强震序列,学者们围绕边界断裂进行了大量研究。相比于关注度极高的巴颜喀拉地块边界断裂带,地块内部断裂因活动速率偏低且历史强震记录不多,而未被重点关注。然而 2021 年玛多 Mw7.4 级地震发生在巴颜喀拉地块内部的东昆仑-江错断裂上,形成逾 148km 的地表破裂

带，最大走滑位移量可达 2.6m（Yuan, 2022），这使我们意识到巴颜喀拉地块内部的构造活动与地震风险可能被忽视，地块内部同样具备积累和释放巨大应变能的能力，其规模虽不及边界断裂，但依然可以孕育高震级的破坏性地震，其潜在的强震能力需要被重新评估。巴颜喀拉地块除边界断裂强烈活动外，地块内部也有复杂的断裂系统，内部断裂亦具有能够产生强震的构造条件（Tapponnier and Molnar, 1977; Tapponnier et al., 1982; Yin and Harrison, 2000; 詹艳等, 2021）。地块内部发育多条 NW 向走滑断裂（图 1），由东北至西南方向，分布有阿万仓断裂、玛多-甘德断裂、达日断裂、五道梁-长沙贡玛断裂、五道梁-曲麻莱断裂等（梁明剑等, 2022）。前人研究表明，地块内部的阿万仓、玛多-甘德、达日和五道梁-长沙贡玛断裂均发现了全新世活动证据，并获得了部分断裂或断层段晚第四纪以来的活动速率。地块内部断裂活动速率与边界断裂带相比明显较小，阿万仓断裂晚第四纪以来的水平走滑速率为 3mm/a(李陈侠等, 2016); 玛多-甘德断裂甘德段第四纪以来的水平走滑速率约为 4.68mm/a(熊仁伟等, 2010); 达日断裂晚第四纪以来的水平走滑速率约为 3mm/a(梁明剑等, 2023)。达日断裂晚第四纪走滑速率虽然仅有 3mm/a，却发生过 1947 年 $M_{7.4}^{3/4}$ 级地震。因此，地块内部断裂的构造活动特征对于全面认识巴颜喀拉地块的强震危险性意义重大。

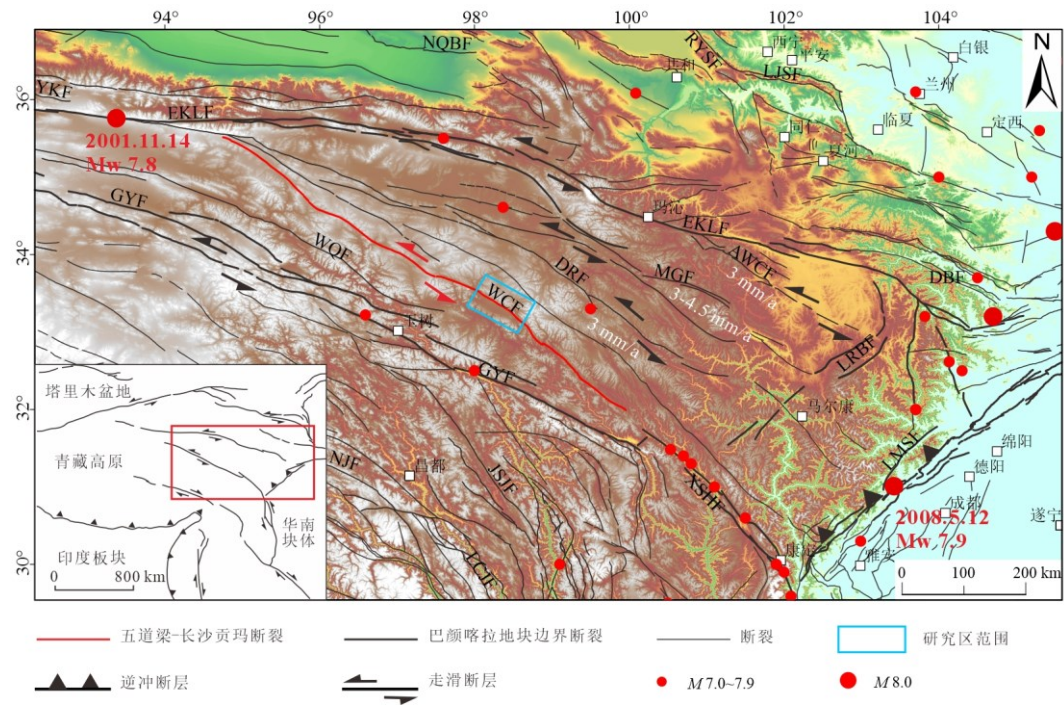


图 1 巴颜喀拉地块中东部活动断裂及地震情况

Fig. 1 Active faults and seismic activities in the central and eastern parts of the Bayan Har block

断裂数据修改自徐锡伟等（2016）；左下图件修改自梁明剑等（2022）。图中断裂：YKF：隐流河—昆仑山口断裂；NQBF：柴达木盆地北缘断裂；RYSF：日月山断裂；LJSF：拉脊山断裂；DBF：迭部-白龙江断裂；EKLf：东昆仑断裂带；AWCF：阿万仓断裂；MGF：玛多-甘德断裂；DRF：达日断裂；WCF：五道梁-长沙贡玛断裂；WQF：五道梁-曲麻莱断裂；GYF：甘孜-玉树断裂带；XSHF：鲜水河断裂；LRBF：龙日坝断裂；LMSF：龙门山断裂带；JSJF：金沙江断裂带；LCJF：澜沧江断裂；NJF：怒江断裂带

五道梁-长沙贡玛断裂是位于青藏高原巴颜喀拉地块中南部 NW 走向的大型走滑断裂。该断裂虽然在历史上强震不多，但由于其南临甘孜-玉树断裂，东南端延伸可能衔接鲜水河断裂的特殊构造条件，地震危险性也不容低估（梁明剑等，2022）。五道梁-长沙贡玛断裂的活动段落过去颇有争议：上世纪研究认为其仅西北段小部分为全新世活动，其他段落在晚更新世以来活动情况不明（张裕明等，1996；邓起东等，2007）；徐锡伟等在《中国及邻近地区地震构造图》的断裂数据库，将断裂划为早中更新世断层（徐锡伟等，2016）；吴中海等通过遥感解译，认为该断层西北段活动较弱，中段与东南段活动较强（吴中海和周春景，2017）。最新研究表明五道梁-长沙贡玛断裂中段（石渠县长沙贡玛乡至宜牛乡）表现为连续左旋走滑地貌，如冲沟位错、阶地位错、山脊位错、断塞塘和断层陡坎等（Liang et al., 2023）。但总的来说，目前针对五道梁-长沙贡玛断裂晚第四纪构造活动研究仍显不足，缺乏精准晚第四纪活动速率。

本文聚焦五道梁-长沙贡玛断裂中段，通过高分辨率遥感解译、地震地质调查、无人机摄影测绘、新年代学方法等多学科技术，厘定该断裂的晚第四纪构造活动特征并计算断裂晚第四纪走滑速率，进一步探讨巴颜喀拉地块内部变形分配模式及地震危险性。

1 构造背景

巴颜喀拉地块位于青藏高原东缘，是青藏高原在新生代最活跃的区块之一。该地块经历了与印支期、燕山期和喜马拉雅期运动相关的构造变形，由广泛分布的浅变质三叠系砂岩组成（许志琴等，1992；青海省地震局，1999；Ding et al., 2013）。该地块的构造框架形成于印支期晚期，其构造变形的特点是喜马拉雅时期的差异性和间歇性隆起（Roger et al., 2010；宋博文等，2020）。

五道梁-长沙贡玛断裂是巴颜喀拉地块内部一条主要的 NW 向左旋走滑断裂，其南西侧为玉树-甘孜断裂，向南东侧延伸可能与鲜水河断裂相连（图 1）。

本次研究区域位于五道梁-长沙贡玛断裂中段，由长沙贡玛乡至宜牛乡，可见明显断裂地表迹线，沿线一系列冲沟、山脊、阶地、冲洪积扇被左旋位错，同时可见明显断层陡坎、挤压脊、断塞塘等典型地貌。断裂中段控制着长沙贡玛盆地的北界（图 2），该盆地地层为古近系热鲁组紫红色含砾岩砂岩，上部夹泥岩。断裂东北方向地层为三叠系两河口组和新都桥组灰黑色炭质绢云板岩、千枚岩、粉砂质板岩，夹变砂岩。断裂作为盆地古近系与基岩山体三叠系的分界，表明该断裂具有很长的活动历史（梁明剑等，2022）。石渠县长沙贡玛盆地西起玛木考河，东至约达沟，长 50 余公里，北东、南西方向被山体围限，海拔在 4400m-5200m。长沙贡玛盆地海拔约 4000-4400m，盆地内多条河流穿过，如玛木考河、哈曲贡玛沟、哈曲巴玛沟、合拉柯河、俄布绒河、约达沟等，区内海拔较高，河流的下切侵蚀能力相对较弱，最多只发育有三级阶地，玛木考河、哈曲贡玛沟、俄布绒河等只发育有二级阶地，拔河高度 3-30m 不等。

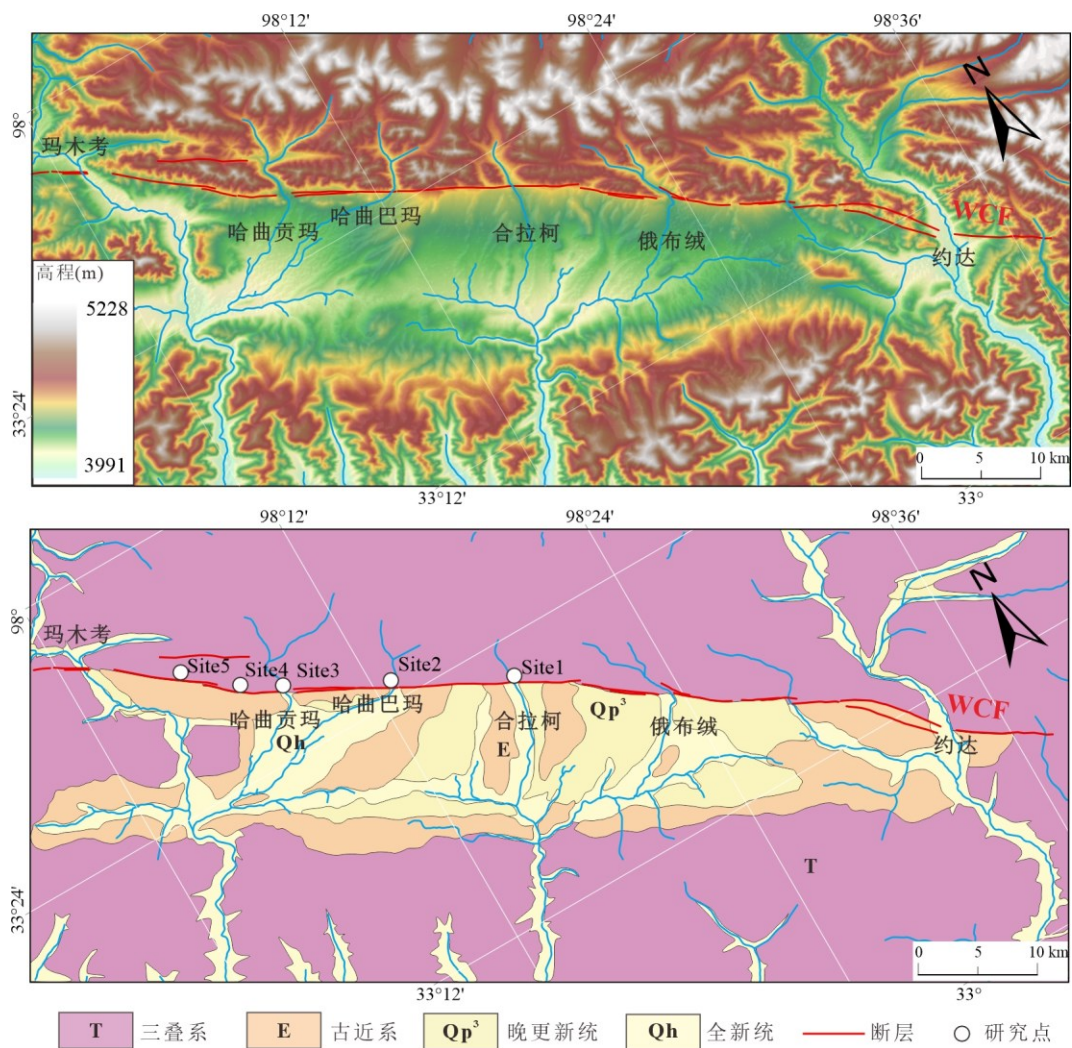


图 2 五道梁-长沙贡玛断裂中段断层分布图

Fig. 2 Fault distribution map of the middle segment of the Wudaoliang-Changshagongma Fault

根据 1:50 万地层数据与 STRM 90m DEM 数据绘制

2 研究方法

基于亚米级高分辨率卫星影像，识别五道梁-长沙贡玛断裂迹线和微地貌断错标志（如左旋位错冲沟、左旋位错山脊、挤压鼓包、断层陡坎等），对典型河流阶地和冲沟位错进行大致测量，并结合地震地质调查验证其准确性。

无人机摄影航拍是地学工作者快速获取高分辨率数据的有效手段，近年来得到越来越多的应用（Bi et al., 2017）。此次研究使用搭载 12 毫米焦距、2000 万像素数码相机的 DJI Matrice 4E 无人机获取低空航拍照片，航测照片分辨率 3-6cm。通过 SfM 方法获得约 10cm 分辨率的数字高程模型（DEM）。

断裂沿线的地表变形及位错能直观地反映活断裂的多期构造活动特征（萧千皓等，2026）。对于标志性断层位错，我们使用 LaDiCaoz_V2 程序获得其位移值，通过多次测量与测量不同参考特征获取误差。LaDiCaoz_V2 是 Zielke 等开发的一款专门用于走滑断裂位错测量的专业软件，通过高精度 DEM 数据对断层两侧的地形剖面形态进行整体评估，对上下游的形态进行拟合，寻找最优位移值（Zielke and Arrowsmith, 2012; Haddon et al., 2016）。

本研究使用光释光测年方法确定断错地貌面形成时代。此方法是通过测量石英等矿物中自然产生的光释光信号所对应的等效剂量（De）以及样品每年所接收到的环境剂量率（D），来确定沉积层的年龄。晶体矿物的释光年代可以简略地表示为： $A=De/D$ 。（A.释光年代，ka; De.等效剂量，Gy; D.环境剂量率,Gy/ka）（Murray and Wintle, 2000; Wintle and Murray, 2006）。本次野外工作采集的所有样品被采集并封存在不透明的铁管中，采集过程中采用严格避光措施避免干扰，最后由应急管理部国家自然灾害防治研究院测试完成。样本的前处理过程遵循了 Aitken（1998）和 Lu et al.（2007）提出的实验方法，最终得到的纯石英颗粒制成单层测片用于测试。等效剂量 De 的测定则采用了 Murray et al.（2000，2003）提出的方法。同时考虑了放射性核素、宇宙射线以及样品含水量的影响，从而确定样品每年所接收到的环境剂量率 D。每个样品的 De 值由 26-29 个有效测片的结果统计得出，不同年龄模型的结果在晒退较好的样品中非常接近。abnico 图中大部分样品的 De 值呈正态或近正态分布，表明其石英颗粒在沉积前得到了较

好的晒退，支持所获年龄代表了沉积物最后一次曝光后埋藏的时间。

研究走滑断层活动性的重要手段之一就是寻找扇体或者阶地面的断错地貌，获取其位移量，结合年代学计算断裂滑动速率（陆诗铭等，2025）。位移量可以通过获取的高精度数据测量，但位移发生时间很难准确获得，因此阶地的年龄被用以代替位移开始发生的年龄。为接近位移发生的实际年龄，使用高阶地的年龄还是低阶地的年龄需要视情况而定。假定某河发育 T1、T2、T3，低阶地模型认为，T2 废弃后 T2/T3 阶地坎才开始记录断裂的变形，所以 T2 的废弃年龄作为 T2/T3 阶地位移开始发生的年龄（Tapponnier et al., 2001）。高阶地模型则是考虑了低阶地废弃前，阶地坎已有累积位移，高阶地记录了所有位移（Cowgill, 2007）。两个方法都基于一定的前提条件，低一级阶地废弃前阶地坎是否开始记录位移，如若不符实际结果会有很大差别，但真实年龄应处于两者之间。获得位移量、时间后，我们就可以计算走滑断裂的滑动速率，即 $V=L/T$ 。（V.滑动速率，mm/a; L.位错量，m; T.事件发生时间，ka）。L 和 T 在测量、测试时均会产生误差，由此获得的速率 V 也存在误差，因此需要考虑误差 S_v ，通过公式 $S_v \approx V \cdot \sigma_v$ 求解，其中 $\sigma_v = \sqrt{(\sigma_L^2 + \sigma_T^2)}$ ， $\sigma_L = S_L/L$ ， $\sigma_T = S_T/T$ ， S_L 、 S_T 分别是位移量、时间的标准差。

3 晚第四纪活动证据

本次研究在五道梁-长沙贡玛断裂中段选取了五个研究点开展野外地质调查（图 2）。通过无人机摄影测量获取高分辨率 DEM，测量获得各点的断层位错量。本研究在合拉柯河、哈曲巴玛沟和哈曲贡玛沟不同阶地上共采集了 7 个光释光样品（图 3-5）并测试获得了年龄结果（表 1）。我们选择在阶地坎或者阶地面上开挖采样坑采集样品。阶地坎处采样需清除表面暴露的沉积物，并且考虑到阶地上可能存在附近高阶地或山前加积的坡洪积物，样品均采集自砾石层顶面以下的砂质透镜体或砂层。采样坑则是在阶地面上开挖长宽 0.8-1.0m 的方坑，向下开挖至阶地砾石层顶面后，继续向下挖至见到砂质透镜体或砾石层下的砂层。样品使用直径 8cm，长度 25cm 的不锈钢管敲入砂层或砂质透镜体。因此，采样深度多为 0.5-0.7m。

在合拉柯河（图 2 中 Site1，经纬度：98.29°, 33.36°）发育三期地貌面，T1、T2 和 T3 面分别拔河约 3m、11m 和 36m。断层位于盆山边界位置，该处也是古近系紫红色砂岩与三叠系地层的分界。沿山前发育断层陡坎，陡坎位置可见阶地

边缘和冲沟位错。在 T1 阶地上断层陡坎坡向西南，高度约 0.9m。T1/T2 边界和 T2/T3 边界均发生了左旋位错（图 3）。利用无人机获取的高精度 DEM 数据，测量合拉柯河 T1/T2 边界被断层左旋位错约 $26\pm2.2\text{m}$ ，T2/T3 边界被断层左旋位错 $109\pm10\text{m}$ （图 3b、c）。在合拉柯河东岸 T1 采集光释光测年样品 SQ-03，T2 采集光释光样品 SQ-01、SQ-02，T3 采集光释光样品 SQ-04（图 3d），测试结果见表 1。

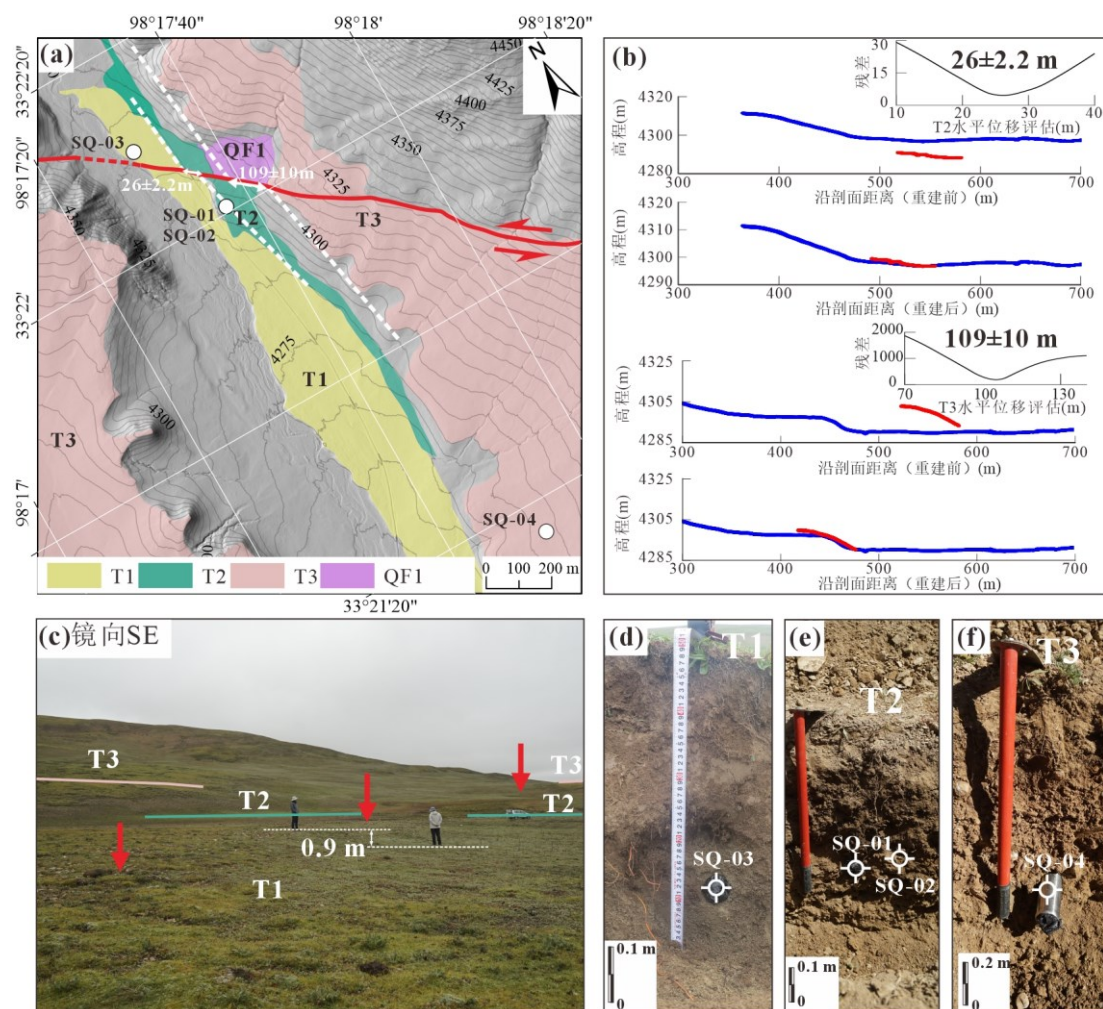


图 3 合拉柯河附近的断层地貌

Fig. 3 The fault landforms in the vicinity of the Helake River

a. 合拉柯河阶地解译图；b. 使用 LaDiCaoz_v2 程序，基于坡度特征将平行于断层的 T2、T3 剖面投影到断层平面上，并根据最优的位移量对 T2、T3 进行重建；c. 断层陡坎实景照片；d. T1 阶地采样 SQ-03；e. T2 阶地采样 SQ-01、SQ-02；f. T3 阶地采样 SQ-04

在哈曲巴玛沟（图 2 中 Site2，经纬度： $98.21^{\circ}, 33.41^{\circ}$ ）同样发育三级阶地，但阶地拔河高度与合拉柯河相差较大。哈曲巴玛沟的 T1 至 T3 阶地的拔河高度

分别约 8m、11m 和 13m。断裂沿北西-南东走向切过阶地，造成 T1/T2 和 T2/T3 两级阶地边缘发生左旋位错。T1/T2 边界被断层左旋位错约 $10.4\pm1.0\text{m}$ ，在 T2 阶地上形成断层槽谷，T2 被左旋位错 $10.4\pm1.0\text{m}$ ，在阶地上形成谷地，东侧高台地的侵蚀坎左旋位错明显；T2/T3 被左旋位错 $12.4\pm1.3\text{m}$ ，其南侧坎缓北侧坎较陡，向东南方向过 T3 阶地坎与山前陡坎迹线相接。在 T1 阶地采集光释光样品 SQ-09（图 4）。

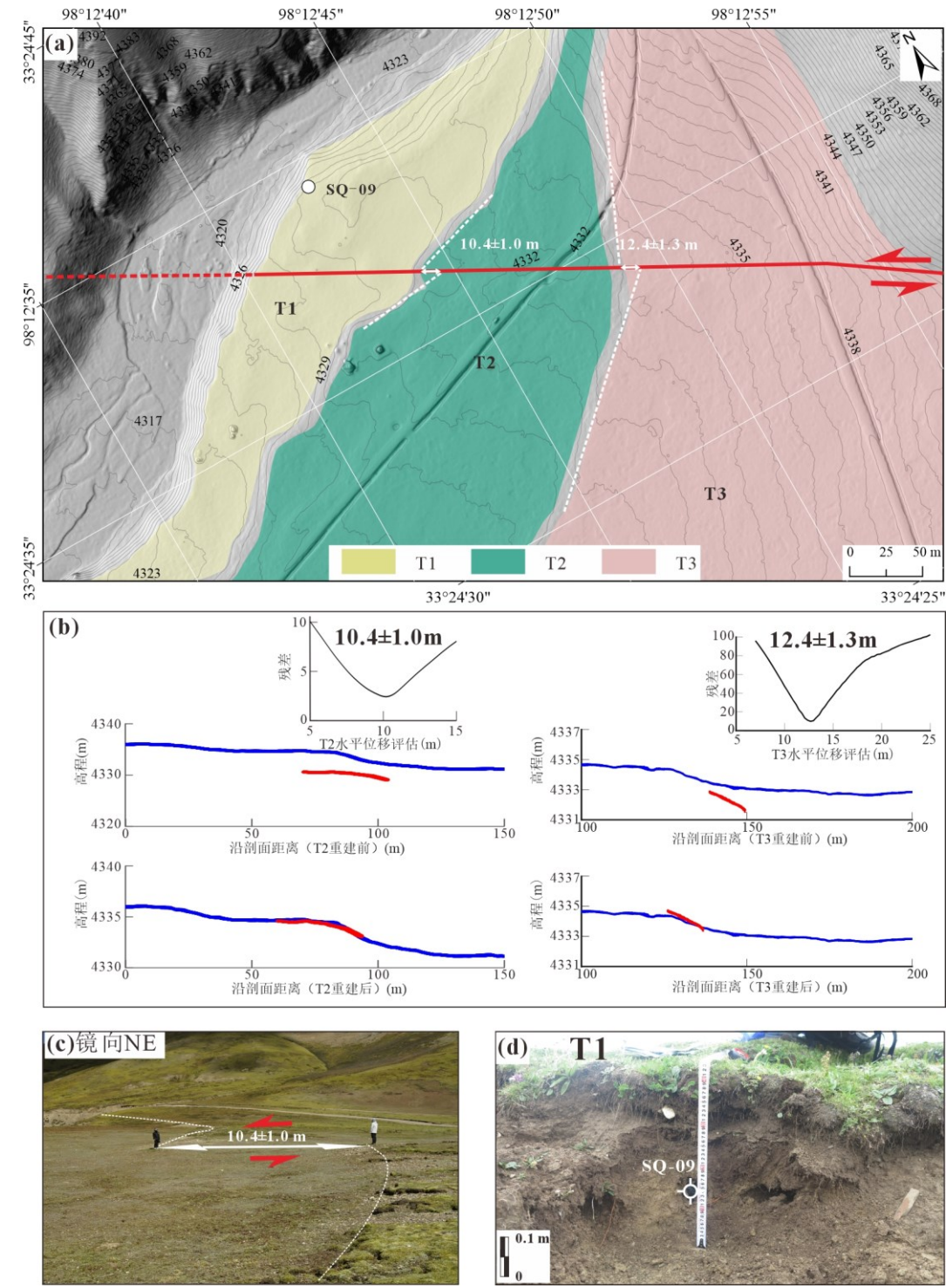


图 4 哈曲巴玛沟附近断层地貌

Fig. 4 The fault landforms in the vicinity of the Haqubama River

a. 哈曲巴玛沟阶地解译图；b. 使用 LaDiCaoz_v2 程序，基于坡度特征将平行于断层的 T2、T3 剖面投影到断层平面上，并根据最优的位移量对 T2、T3 进行重建；c. T2 阶地被左旋位错 $10.4\pm1.0\text{m}$ ；d. T1 阶地采样

SQ-09

哈曲贡玛沟（图 2 中 Site3，经纬度： $98.14^\circ, 33.45^\circ$ ）东岸发育两级阶地。T1 和 T2 阶地分别拔河 3m 和 11m。断层同样在盆山边界位置通过，穿过哈曲贡玛沟 T2 阶地。由于断层通过位置没有形成 T1 阶地，所以 T2 阶地边缘一直受到河水侵蚀，未能保留下断层位错量。但是 T2 阶地上保留了两条冲沟位错分别为 $22.2\pm2.0\text{m}$ 与 $32.3\pm3.1\text{m}$ 。断层向东南延伸至山前洪积扇面同样使一系列冲沟发生了同步左旋位错，左旋位错量 $14.4\pm1.1\text{m}$ 至 $44.6\pm4.6\text{m}$ 不等。在哈曲贡玛沟东岸 T2 阶地取光释光样品 SQ-05，T1 阶地取光释光样品 SQ-08（图 5）。

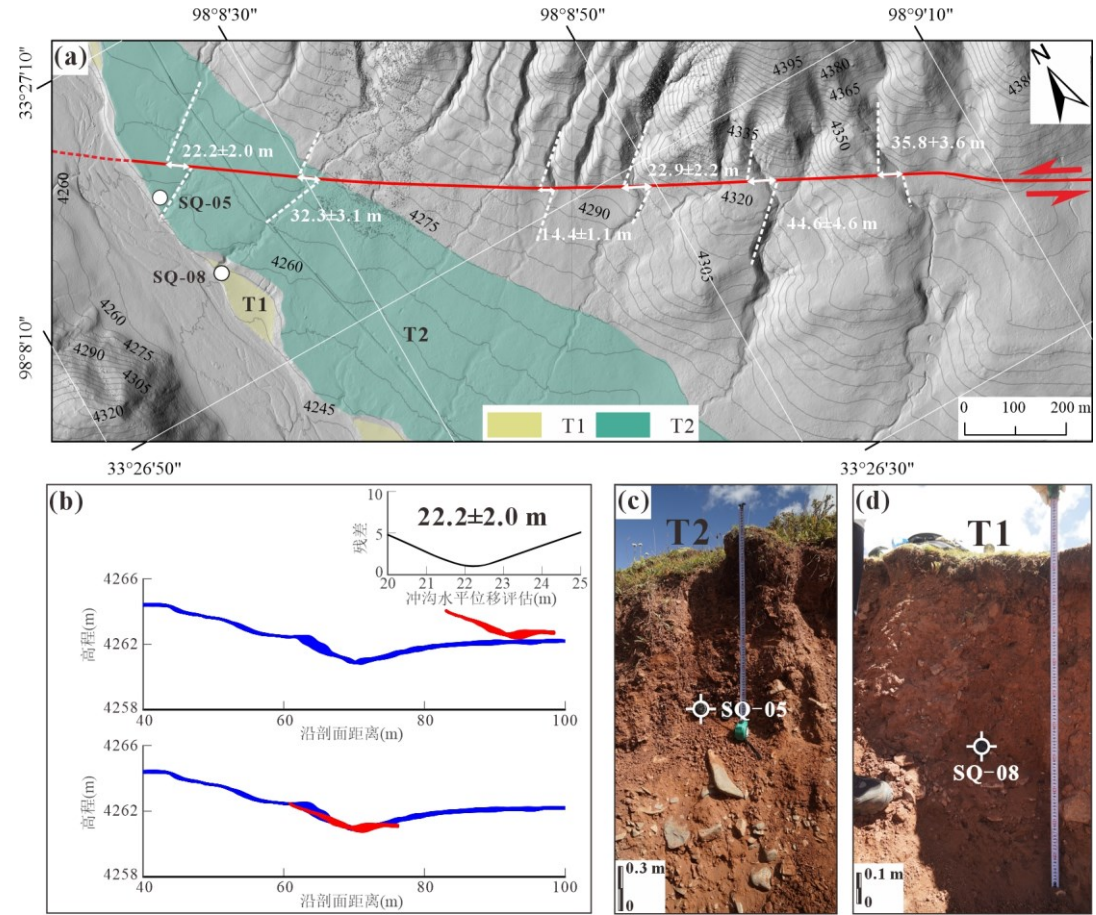


图 5 哈曲贡玛沟附近断层地貌

Fig. 5 The fault landforms in the vicinity of the Haqubama River

a. 哈曲贡玛沟阶地解译图；b. 使用 LaDiCaoz_v2 程序，基于坡度特征将平行于断层的冲沟剖面投影到断层

平面上，并根据最优的位移量对冲沟进行重建；c. T2 阶地采样 SQ-05; d. T1 阶地采样 SQ-08

色朱玛西南处（图 2 中 Site4，经纬度：98.11°,33.46°），山前可观察到显著线性断层陡坎，陡坎坡向西南，高度为 $3.9\pm0.4\text{m}$ 。同时此处可观察到多条冲沟发生左旋位错，冲沟左旋位错量分别为 $4.9\pm0.6\text{m}$ 、 $10.2\pm1.0\text{m}$ （图 6c）和 $3.8\pm0.4\text{m}$ 。

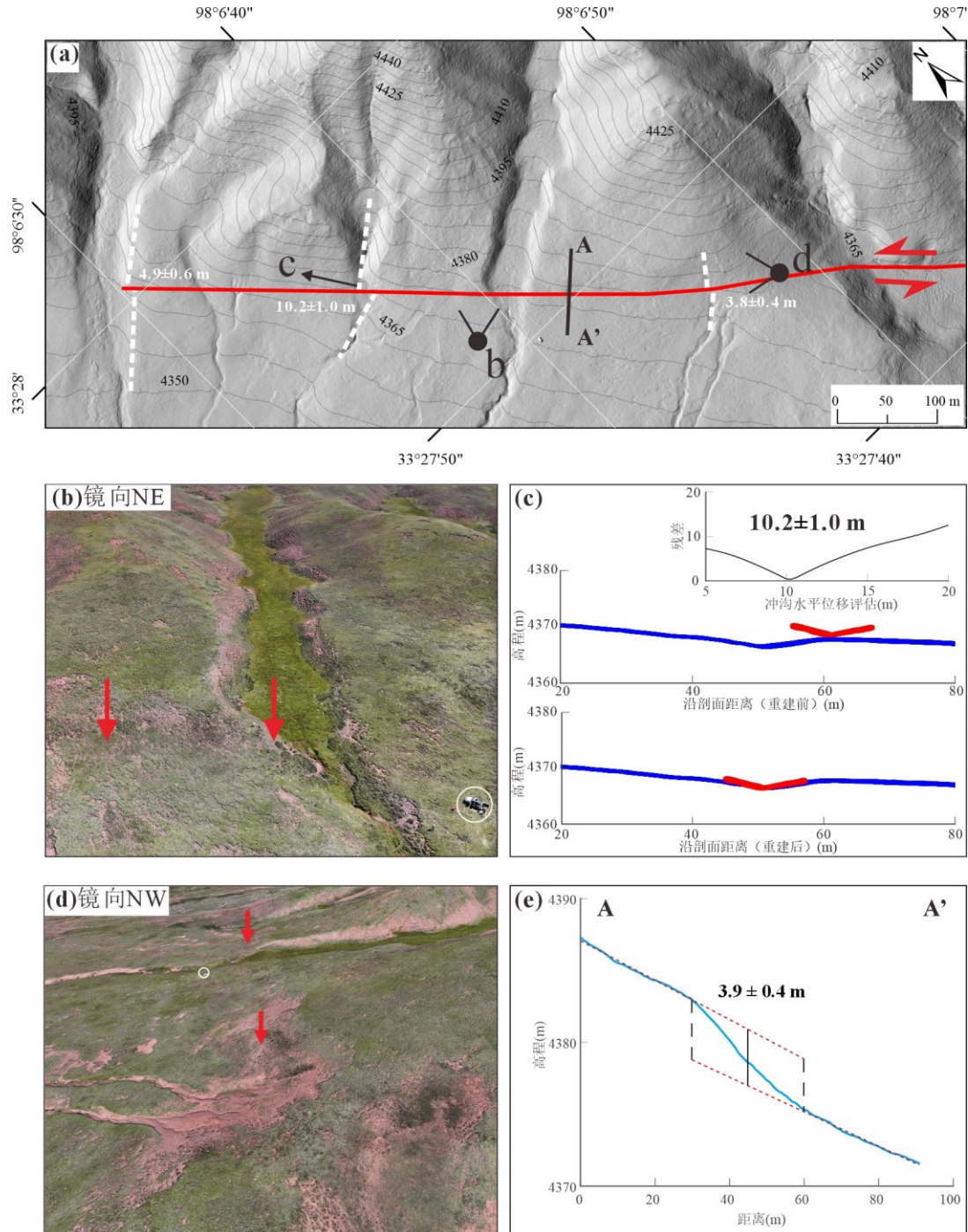


图 6 色朱玛西南断层陡坎与冲沟位错

Fig. 6 The fault scarp and gullies displacement along the southwest of Sezhuma

a. 色朱玛西南陡坎与冲沟位错点 DEM 图；b, d. 由无人机获取的陡坎影像，白色圆圈为同一辆车；c. 使用

LaDiCaoz_v2 程序，基于坡度特征将平行于断层的冲沟剖面投影到断层平面上，并根据最优的位移量对冲沟进行重建；c. A-A' 地形剖面。

觉达玛朱玛南（图 2 中 Site5，经纬度：98.08°,33.49°），山前可观察到两支断层陡坎，高度分别为高陡坎 6.4±0.7m，低陡坎 3.1±0.4m。在洪积扇边缘可见断层露头，断层面陡立，东北盘为古近系砖红色砂岩，西南侧为三叠系地层（图 7）。

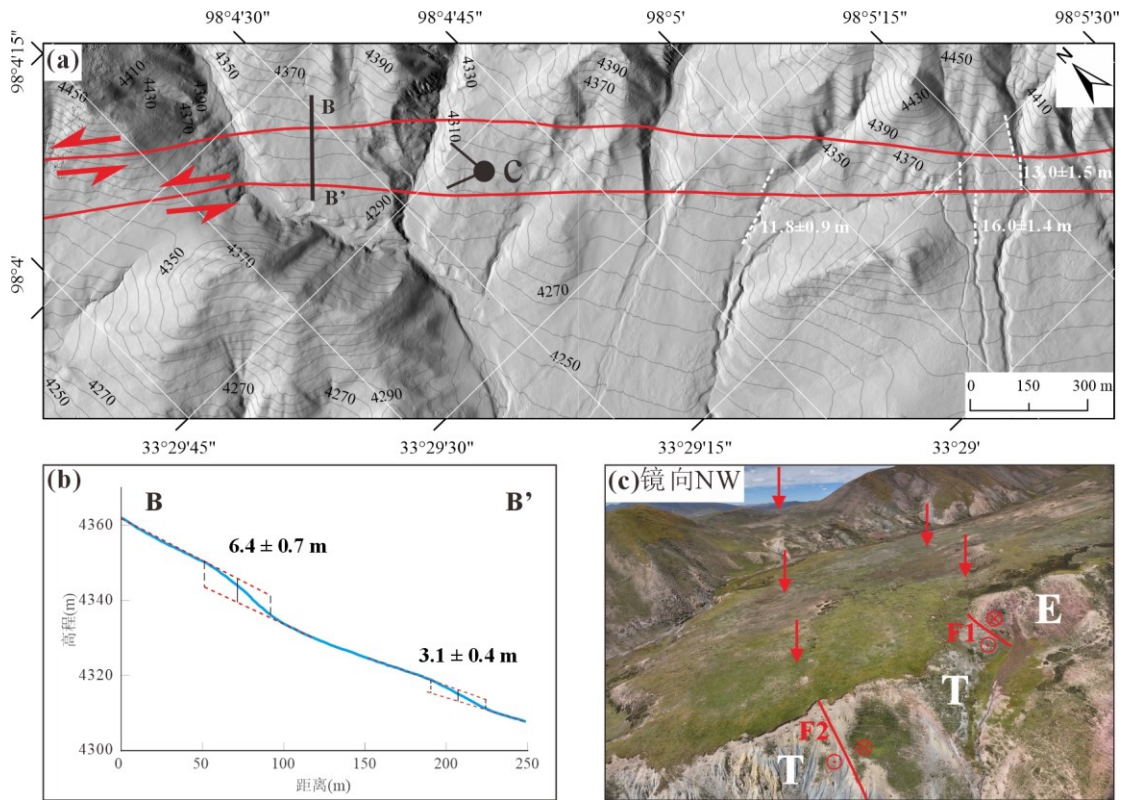


图 7 觉达玛朱玛南断层陡坎与地层剖面

Fig. 7 The fault scarp and stratigraphic profile along the south of Juedamazhuma

a. 觉达玛朱玛南 DEM 图；b. B-B'陡坎测量剖面；c. 断层剖面 and 陡坎照片。

根据测年结果，各条河流的阶地年龄序列没有倒转情况，从相似拔河高度的合拉柯河 T2 和哈曲贡玛沟 T2 采集的 SQ-01、SQ-02 和 SQ-05，年龄结果较为一致，均在 14-15ka。表明研究区范围内河流下切速率基本一致。此外，根据合拉柯河 T2 阶地同一采样坑中采集的 SQ-01 和 SQ-02 样品年龄结果保持一致，表明室内测试过程可靠，年龄样品结果可信。

表 1 年代样品测试结果

Table 1 The results of the chronological samples

野外	埋深	U	Th	K	含水量	D	DeAVG	AgeAVG
----	----	---	----	---	-----	---	-------	--------

编号	(m)	(ppm)	(ppm)	(%)	(%)	(Gy/ka)	(Gy)	(ka)
SQ-01	0.45	2.64±0.51	11.41±0.67	1.53±0.08	12.63	2.99±0.15	43.21±0.92	14.46±0.77
SQ-02	0.45	2.93±0.39	9.89±0.59	1.51±0.08	13.38	2.92±0.13	40.78±0.85	13.98±0.7
SQ-03	0.50	2.43±0.39	9.89±0.59	1.44±0.07	24.13	2.51±0.11	20.79±0.43	8.29±0.4
SQ-04	0.45	3.68±0.51	11.58±0.69	1.66±0.09	8.98	3.43±0.17	237.29±6.83	69.09±3.88
SQ-05	0.75	0.73±0.22	12.69±0.74	2.02±0.1	7.47	3.22±0.15	49.65±1.18	15.43±0.82
SQ-08	0.60	3.26±0.45	8.85±0.54	1.3±0.07	5.61	2.91±0.14	10.92±0.39	3.75±0.23
SQ-09	0.30	3.09±0.4	14.61±0.81	1.98±0.1	26	3.28±0.14	17.66±0.62	5.38±0.29

4 左旋走滑速率

在研究区计算水平走滑速率需考虑以下几点影响因素（Zhang et al., 2007）：

（1）测年样品选择，需考虑区内河流为高海拔弱侵蚀河流，阶地坎形成后长期稳定，低阶地形成前高阶地坎可能已累积位移；（2）河流阶地位错量选择，需考虑断裂活动对河流保护岸与侵蚀岸的影响，这将进一步影响走滑速率的计算；（3）同一河流的不同阶地使用相同计算模型情况下，走滑速率差异巨大时，代表该模型不适用。

采用高阶地模型方法，在合拉柯河 T1/T2 边界的左旋位错量 $26\pm2.2\text{m}$ ，对应的 T2 面年龄 $13.98\pm0.7\text{ka}$ ，获得其水平走滑速率为 $1.9\pm0.2\text{mm/a}$ 。T2/T3 边界的左旋位错量 $109\pm10\text{m}$ ，对应 T3 面的年龄 $69.09\pm3.88\text{ka}$ ，获得的水平走滑速率为 $1.6\pm0.2\text{mm/a}$ 。采用低阶地模型方法，T1 阶地年龄 $8.29\pm0.4\text{ka}$ 和 T1/T2 边界的左旋位错量 $26\pm2.2\text{m}$ 计算的走滑速率为 $3.1\pm0.3\text{mm/a}$ ；T2 阶地年龄 $13.98\pm0.7\text{ka}$ 和 T2/T3 边界的左旋位错量 $109\pm10\text{m}$ ，得到的速率为 $7.8\pm0.8\text{mm/a}$ ，两级阶地位错量适用低阶地模型计算的速率差异大。因此，该处的高阶地模式水平走滑速率更为适用。

在哈曲巴玛沟东岸 T1 采集的光释光样品 SQ-09，测试年龄为 $5.38\pm0.29\text{ka}$ 。结合 T1/T2 位错量 $10.4\pm1.0\text{m}$ ，获得其水平走滑速率为 $1.9\pm0.2\text{mm/a}$ 。

在哈曲贡玛沟 T2 阶地边缘未保存位错，但在 T2 面的两个冲沟 G1、G2 位

错分别为 $22.2\pm2.0\text{m}$ 和 $32.3\pm3.1\text{m}$ ，T2 阶地年龄为 $15.43\pm0.82\text{ka}$ ，分别计算得到的水平走滑速率为 $1.4\pm0.1\text{mm/a}$ 和 $2.1\pm0.2\text{mm/a}$ 。

综合上述结果，去除合拉柯河低阶地模型结果，其他 5 个水平走滑速率的平均水平走滑速率为 $1.8\pm0.2\text{mm/a}$ （图 8）。

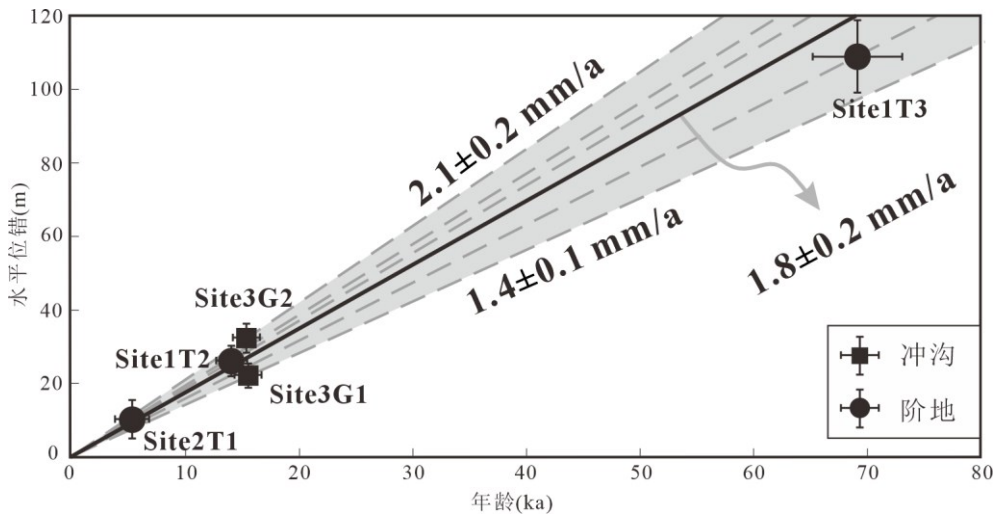


图 8 五道梁-长沙贡玛断裂中段晚第四纪水平走滑速率图

Fig. 8 The horizontal slip rate since the late Quaternary in the middle segment of the Wudaoliang-Changshagongma Fault

5 讨论

5.1 滑动速率结果可靠性与区域对比

巴颜喀拉地块作为青藏高原重要的构造单元，其变形模式一直是地学界研究热点。地球物理数据模拟发现巴颜喀拉地块现今变形并非简单的刚性块体运动，而是深受深部物质流动和地表重力作用影响的复杂过程（姚生海等，2018）。联合 InSAR 和 GNSS 构建青藏高原千米分辨率三维地壳形变场，通过应变率场分析发现，巴颜喀拉地块内部剪应变率分布不均，东西两端的剪切和挤压运动存在明显差异，块体中东部多条 NW 方向的断裂承担了约 5mm/a 的剪切运动，也说明该地块可能并非一个稳定的刚性地块。研究发现，青藏高原长波长变形在空间上连续，短波长变形不连续，地块内部变形可能兼具连续性与非连续性（刘传金等，2024）。在剪应变率图像上五道梁-长沙贡玛断裂中段表现出较为明显的高值，与本次研究野外地质调查的结果较为一致。中段活动性较北西段与南东段更强。本研究获得的晚第四纪以来活动速率 $1.8\pm0.2\text{mm/a}$ ，与前人估计的全新世水

平滑动速率为 $2.6 \pm 0.6 \text{ mm/a}$ 相差不大。Liang et al. (2023) 对断裂中段进行了古地震研究, 通过开挖三个探槽识别出四次古地震事件, 时间分别为 42,378-32,975 cal BP、33,935-20,663 cal BP、5052-4862 cal BP, 以及 673-628 cal BP 之后, 前三次事件复发间隔达上万年, 而末次事件距今仅约 600 年, 故前人获取的全新世速率略高, 或与全新世时段包含更多同震位移有关。

5.2 地块内部变形分配与构造意义

巴颜喀拉块体边界断裂水平滑动速率高, 南边界为甘孜-玉树断裂与鲜水河断裂, 前人研究获得的甘孜-玉树断裂中南段走滑速率一般为 $5 \sim 8 \text{ mm/a}$ (Chevalier et al., 2017); 鲜水河断裂左旋走滑速率由北西至南东递增, 由北西至南东为 8 mm/a 、 $10 \sim 12 \text{ mm/a}$ 、 $9.6 \sim 13.4 \text{ mm/a}$ (白明坤等, 2022)。为评估区域构造运动的协调性, 我们将邻近断裂的滑动速率矢量分解至鲜水河断裂的走向上, 结果显示五道梁-长沙贡玛断裂 (约 1.8 mm/a)、甘孜-玉树断裂中南段 (约 $5 \sim 8 \text{ mm/a}$) 及五道梁-曲麻莱断裂 (约 0.5 mm/a) 共同贡献了鲜水河断裂上约 $5.2 \sim 7.9 \text{ mm/a}$ 的左旋滑动分量, 加上附近其他断层的影响, 综合速率或与鲜水河断裂炉霍段约 8 mm/a 的速率大致相当, 这也支持了块体东南部鲜水河断裂作为主要应变释放通道的认识, 表明区域应变分配具有一致性。

5.3 古地震与地震危险性启示

根据经验公式 (Wells and Coppersmith, 1994), 结合本次研究发现的五道梁-长沙贡玛断裂中段约 $50 \sim 60 \text{ km}$ 的长度, 可产生 $M_w 7.2$ 级左右的大震, 能产生最大约 2.4 m 的水平位错。Liang et al. (2023) 对断裂中段进行的古地震研究, 识别出四次古地震事件的复发间隔很长, 结合最近一次距今约 600 年的事件, 该断裂中段近期发生独立型同震破裂的概率相对较低。本次研究获得较低活动速率也表明五道梁-长沙贡玛断裂具有低频率、高能量释放的特征。但是古地震事件并没有表现出明显的周期性特征, 并不能排除受相邻断裂地震的应力扰动发生触发破裂。从近年来石渠县小震频发, 仅 2020 年至今就发生了 3 级及以上地震 32 次, 2020 年 4 月 1 日还发生了 5.6 级地震, 这种中强震与小震丛集活动的现象可能反映了断裂带局部闭锁区在区域构造应力持续加载下, 通过微破裂或局部破裂的方式调整应力, 是断裂带处于活跃应变积累阶段的重要证据, 所以不能简单地因其

低频率的特性而忽视其潜在危险性，未来需持续加强该断裂的研究和监测，为区域防震减灾提供更坚实的科学依据。

6 结论

(1) 五道梁-长沙贡玛断裂是巴颜喀拉地块内部一条大型 NW 向左旋走滑断裂，断裂活动性通过一系列左旋走滑地貌证据得到直接证实，沿线大量地貌如冲沟、河流阶地、山脊等均被左旋位移。

基于地震地质调查和高分辨率等手段获得了多条河流阶地位错量，结合阶地的光释光测年数据，综合得出其中段的晚第四纪以来水平走滑速率为 $1.8 \pm 0.2 \text{ mm/a}$ 。

(2) 五道梁-长沙贡玛断裂的活动速率显著低于巴颜喀拉地块边界断裂，与地块内部其他 NW 向走滑断裂速率基本相当。滑动速率矢量分解显示，该断裂与附近其他断裂共同贡献了鲜水河断裂走向上约 $5.2\text{-}7.9 \text{ mm/a}$ 的滑动分量，支持区域应变向东逐渐集中、并最终鲜水河断裂为主要释放通道的构造模式。基于古地震复发间隔与末次事件离逝时间，该断裂中段近期发生独立型同震破裂的概率相对较低，但是仍不能排除受附近断裂发生地震的应力扰动造成触发破裂。

References

- Aitken, M. J., 1998. An Introduction to Optical Dating: The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-stimulated Luminescence. Oxford University Press Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198540922.001.0001>
- Bai, M. K., Chevalier M., Li, H. B., et al., 2022. Late Quaternary slip rate and earthquake hazard along the Qianning segment, Xianshuihe fault. *Acta Geologica Sinica*, 96(7):2312~2332 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022144>
- Bi, H., Zheng, W., Ren, Z., et al., 2017. Using an unmanned aerial vehicle for topography mapping of the fault zone based on structure from motion photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10): 2495-2510. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1249308>
- Chevalier, M.-L., Leloup, P. H., Replumaz, A., et al., 2017. Temporally constant slip rate along the Ganzi fault, NW Xianshuihe fault system, eastern Tibet. *GSA Bulletin*, 130(3-4): 396-410. <https://doi.org/10.1130/b31691.1>
- Cowgill, E., 2007. Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting: Revisiting the Cherchen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(3): 239-255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.015>
- Deng, Q. D., Ran, Y. K., Yang, X. P., et al. 2007. Distribution Map of Active Faults in China (1:4 000 000). Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Deng, Q. D., Cheng, S. P., Ma, J., et al. 2014. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 57: 2025-2042 (in Chinese with English abstract).
- Ding, L., Yang, D., Cai, F. L., et al., 2013. Provenance analysis of the Mesozoic Hoh - Xil - Songpan - Ganzi turbidites in northern Tibet: Implications for the tectonic evolution of the eastern Paleo - Tethys Ocean. *Tectonics*, 32(1): 34-48. <https://doi.org/10.1002/tect.20013>
- Haddon, E. K., Amos, C. B., Zielke, O., et al., 2016. Surface slip during large Owens Valley earthquakes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(6): 2239-2269. <https://doi.org/10.1002/2015gc006033>
- Li, C. X., Yuan, D. Y., Yang, H., et al., 2016. The Tectonic Activity Characteristics of Awancang Fault in the Late Quaternary, the sub Strand of the Eastern Kunlun Fault. *Seismology and Geology*, 38(1): 44-64 (in Chinese with English abstract).
- Liang, M. J., Huang, F. P., Sun, K., Zhang et al., 2022. The Holocene Activity and Its Evidence from Paleoseismicity of the Middle Segment of Wudaoliang-Changshagongma Fault Inside the Bayan Har Block. *Earth Science*, 47(3): 766-778 (in Chinese with English abstract).
- Liang, M. J., Zhou W. Y., Dong, Y., et al., 2023. New Progress of Research on NW-trending Active Faults within the Bayan Har Block. *Earthquake Research in Sichuan*: 12-17 (in Chinese with English abstract).
- Liang, M., Dong, Y., Liao, C., et al., 2023. Holocene Activity of the Wudaoliang-Changshagongma Fault of the Eastern Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/rs15092458>
- Liu, C., Ji, L., Zhu, L., et al., 2024. Kilometer-resolution Three-dimensional Crustal Deformation

- n of Tibetan Plateau from InSAR and GNSS. *Science China Earth Sciences*, 67(6): 1818-1835. <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1289-4> (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. M., Wu, Z. H., Han, S., et al., 2025. Quaternary Activity Characteristics of the Yiong-Zayu Segment of the Jiali Fault Zone. *Earth Science*, 50(08): 3052-3069. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.065>
- Lu, Y. C., Wang, X. L., Wintle, A. G., 2007. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130,000 yr for the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 67(1): 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.08.003>
- Murray, A. S., Wintle, A. G., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32(1): 57-73. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00253-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00253-X)
- Murray, A. S., Wintle, A. G., 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements*, 37(4): 377-381. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(03\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(03)00053-2)
- Roger, F., Jolivet, M., Malavieille, J., 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: A synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254-269. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.03.008>
- Seismological Bureau of Qinghai Province, Institute of Crustal Dynamics of China Earthquake Administration. 1999. East Kunlun Active Fault Zone. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Song, B. W., Zhang, K. X., Xu, Y. D., et al., 2020. Paleogene Tectonic Stratigraphic Realms and Sedimentary Sequence in China. *Earth Science*, 45(12): 4352-4369 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier, P., Molnar, P., 1977. Active faulting and tectonics in China. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/JB082i020p02905>
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12): 611-616. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1982\)10<611:Petian>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1982)10<611:Petian>2.0.Co;2)
- Tapponnier, P., Zhiglin, X., Roger, F., et al., 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibetan Plateau. *Science*, 294. <https://doi.org/10.1126/science.105978>
- Wang, M., Shen, Z. K., 2020. Present - Day Crustal Deformation of Continental China Derived From GPS and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2). <https://doi.org/10.1029/2019jb018774>
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002. <https://doi.org/10.1785/bssa0840040974>
- Wintle, A. G., Murray, A. S., 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements*, 41(4): 369-391. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.11.001>
- Wu, Z. H., Zhou, C. J., 2017. Distribution Map of Active Faults in China and Its Adjacent Sea Area (1: 5 000 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xiao, Q. H., Yuan, D. Y., Wen, Y. M., et al., 2026. Late Quaternary Tectonic Deformation Characteristics of Daxue Shan Bei Shan Fault in the Western Qilian Mountains. *Earth Science*

- ience, 51(01): 329-344. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.235>
- Xiong, R. W., Ren, J. W., Zhang, J. L., et al., 2010. Late Quaternary Active Characteristics of the Gande Segment in the Maduo Gande Fault Zone. *Earthquake*, 30(4): 65-73 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Han, Z. J., Yang, X. P., et al., 2016. Seismotectonic Map in China and Its Adjacent Regions. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Hou, L. W., Wang, Z. X., et al., 1992. Orogenic Processes of the Songpan-Garze Orogenic Belt of China, 190pp., Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yao, S. H., Cheng, J., Yao, Q., et al., 2018. 利 Preliminary Study on the Division of the Bayan Har Block Using GPS Data and a Block Model and the Tectonic Implications of the Division. *China Earthquake Engineering Journal*, 40(5):1042-1051 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1042>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(Volume 28, 2000): 211-280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Yuan, Z., Li, T., Su, P., et al. 2022. Large surface-rupture gaps and low surface fault slip of the 2021 Mw 7.4 Maduo earthquake along a low-activity strike-slip fault, Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL096874. <https://doi.org/10.1029/2021GL096874>
- Zhan, Y., Liang, M. J., Sun, X. Y., et al., 2021. Deep Structure and Seismogenic Pattern of the 2021.5.22 Maduo(Qinghai) Ms 7.4 Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(7): 2232-2252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., Deng, Q. D., Zhang, G. M., et al. 2003. Active Tectonic Blocks and Strong Earthquakes in the Continent of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(2): 13-24 (in Chinese).
- Zhang, P. Z., Molnar, P., Xu, X., 2007. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn-Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 26(5): TC5010. <https://doi.org/10.1029/2006TC002014>
- Zhang, Y. M., Li, M. F., Meng, Y. Q., et al., 1996. Research on Fault Activities and Their Seismogeological Implication in Bayan Har Mountain Area. *Research on Active Fault*, 5: 154-171 (in Chinese with English abstract).
- Zielke, O., Arrowsmith, J. R., 2012. LaDiCaoz and LiDARimager -MATLAB GUIs for LiDAR data handling and lateral displacement measurement. *Geosphere*, 8(1). <https://doi.org/10.1130/GES00686.1>

附中文参考文献

- 白明坤, Marie-Luce, C., 李海兵等, 2022. 鲜水河断裂带乾宁段晚第四纪走滑速率及区域强震危险性研究. *地质学报*, 96(07): 2312-2332.
- 邓起东, 冉勇康, 杨晓平等, 2007. 中国活动构造图(1:400 万). 北京: 地震出版社
- 邓起东, 程绍平, 马冀等, 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. *地球物理学报*, 57: 2025-2042.
- 李陈侠, 袁道阳, 杨虎等, 2016. 东昆仑断裂带东段分支断裂——阿万仓断裂晚第四纪构造活动特征. *地震地质*, 38: 44-64.
- 梁明剑, 黄飞鹏, 孙凯等, 2022. 巴颜喀拉块体内部五道梁-长沙贡玛断裂中段全新世活动及最新古地震证据. *地球科学*, 47: 766-778.

- 梁明剑, 周文英, 董云等, 2023. 巴颜喀拉块体内部NW向主要断裂研究新进展. 四川地震: 12-17.
- 刘传金, 季灵运, 朱良玉等, 2024. 联合 InSAR 和 GNSS 构建青藏高原千米分辨率三维地壳形变场. 中国科学:地球科学, 54: 1845-1862.
- 陆诗铭, 吴中海, 韩帅等, 2025. 嘉黎断裂带易贡-察隅段第四纪活动性特征. 地球科学, 50(08): 3052-3069.
- 青海省地震局, 1999. 东昆仑活动断裂带. 北京: 地震出版社
- 宋博文, 张克信, 徐亚东等, 2020. 中国古近纪构造-地层区划及地层格架. 地球科学, 45: 4352-4369.
- 吴中海, 周春景, 2017. 中国及毗邻海区活动断裂分布图(1:500 万). 北京: 地质出版社
- 萧千皓, 袁道阳, 文亚猛等, 2026. 祁连山西端大雪山北山断裂晚第四纪构造变形特征. 地球科学, 51(01): 329-344.
- 熊仁伟, 任金卫, 张军龙等, 2010. 玛多-甘德断裂甘德段晚第四纪活动特征. 地震, 30: 65-73.
- 徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平等, 2016. 中国及邻区地震构造图. 北京: 地震出版社
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀等, 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社
- 姚生海, 程佳, 姚琪等, 2018. 利用 GPS 资料和块体模型对巴颜喀拉块体划分合理性的初步探究和构造意义. 地震工程学报, 40: 1042-1051.
- 詹艳, 梁明剑, 孙翔宇等, 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 MS7.4 地震深部环境及发震构造模式. 地球物理学报, 64: 2232-2252.
- 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. 中国科学(D 辑:地球科学): 12-20.
- 张裕明, 李闽峰, 孟勇琦等, 1996. 巴颜喀拉山地区活动断层活动性研究及其地震地质意义. 活动断裂研究, 5: 154-171.