doi:10.3799/dqkx.2026.250

玛多-甘德断裂（玛多段）全新世滑动速率新约束及其构造意义

李文巧[1,2] 任晓凯[2*] 梁朋[2] 胡贵明[2] 刘浩[3]
徐岳仁[2] 付国超[2] 杨会丽[1] 崔新志[2] 邹俊杰[2]

1. 地震动力学与强震预测全国重点实验室（中国地震局地质研究所），北京 100029
2. 地震预测与风险评估应急管理部重点实验室（中国地震局地震预测研究所），北京 100036
3. 中山大学地球科学与工程学院，广东珠海 519082

摘 要 本研究以巴颜喀拉地块内部重要活动断裂——玛多-甘德断裂（玛多段）为研究对象，通过详细的野外地质考察、构造地貌分析以及地貌年龄测试，首次对断裂全新世的活动特征与滑动速率进行了定量精细研究。在玛多县郎喀塞塘村以北发现保留较完整的断层陡坎和阶地左旋位错，结合 T2、T3 阶地采集的光释光（OSL）测年数据，计算得出玛多-甘德断裂（玛多段）全新世以来的平均水平滑动速率为 2.37+0.34/-0.31 mm/a（95%置信区间）；垂直滑动速率为 0.18+0.08/-0.06mm/a （95%置信区间）。结果表明巴颜喀拉地块内部存在显著的弥散性连续变形，一系列 NW 向慢速滑动的东昆仑断裂带的次级断裂分担了块体内部的应变积累，与北边界高滑动速率的东昆仑断裂协同运动，调节地块的宏观形变，为理解青藏高原构造变形模式与活动地块内部大震孕育潜力提供了可靠的数据支撑。

关键词 玛多-甘德断裂 巴颜喀拉地块 青藏高原 断裂滑动速率

中图分类号：P534.63 收稿日期：2026-3-26

New Constraints on the Holocene Slip Rate of the Mado-Gande Fault (Mado Segment) and Their Tectonic Implications

LI Wenqiao[1,2] Ren Xiaokai[2*] Liang Peng[2] Hu Guiming[2] Liu Hao[3]

基金项目：地震动力学与强震预测全国重点实验室开放基金课题（LED2023B10，LED2024B03）、国家重点研发计划（2023YFC3012001-2，2023YFC3012003-3）、国家自然科学基金（42202255）、中央级公益性科研院所基本科研业务专项（CEAIEF20230403、CEAIEF20250701）共同资助。

作者简介：李文巧（1978-），男，高级工程师，研究方向活动构造与地震构造。E-mail：lwq3278@163.com，ORCID：0009-0009-0451-0626

*通讯作者：任晓凯（1999-），男，硕士研究生，研究方向为活动构造与地震活动性。E-mail：1178965673@qq.com，ORCID：0009-0006-9839-9540

Xu Yueren[2] Fu Guochao[2] Yang Huili[1] Cui Xinzhi[2] Zou Junjie[2]

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

2.Key Laboratory of Earthquake Forecasting and Risk Assessment, Ministry of Emergency Management, Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat‑sen University, Zhuhai 519082, China

Abstract: This study focuses on the Maduo-Gande Fault (Maduo segment), an important active fault within the Bayan Har Block, and presents the first quantitative and detailed investigation of its Holocene activity characteristics and slip rates through systematic field geological surveys, tectonic geomorphological analysis, and geochronological dating. Newly discovered, well-preserved fault scarps and left-laterally offset terraces were identified for the first time north of Langkasaitang Village, Maduo County. Combined with optically stimulated luminescence (OSL) dating of sediments collected from T2 and T3 terrace surfaces, the mean Holocene horizontal left-lateral strike-slip rate of the Maduo-Gande Fault (Maduo segment) is calculated to be 2.37 +0.34/−0.31 mm/a (95% confidence interval); the vertical slip rate is 0.18 +0.08/−0.06 mm/a (95% confidence interval) . The results indicate that significant distributed continuous deformation exists within the interior of the Bayan Har Block, whereby a series of NW-trending slowly slipping secondary faults of East Kunlun Fault accommodate strain accumulation within the block interior, acting in concert with the high-slip-rate East Kunlun Fault along the northern boundary to jointly regulate the macroscopic deformation of the block. These findings provide reliable quantitative constraints for understanding the tectonic deformation pattern of the Tibetan Plateau and the seismogenic potential of large earthquakes within active tectonic blocks.

Key words: Mado-Gande fault; Bayan Har block; Tibetan Plateau; fault slip rate

0 引言

新生代以来，印度板块与亚欧板块的持续碰撞使青藏高原不断隆升和扩展（Tapponnier and Molnar,1976; Tapponnier et al.，2001）。巴颜喀拉活动地块位于青藏高原向东、向东南扩展的关键部位，地块以北的青藏高原东北缘的强烈挤压隆升作用和块体以南地区的强烈东向挤出作用

使得巴颜喀拉块体周缘断裂带的活动极其强烈，是中国大陆现今强震活动最集中的区域之一。地块周缘在近百年内发生了一系列大地震（即“昆仑-汶川”地震系列），如2001年昆仑山M_S8.1地震和2008年汶川M_S8.0 地震（邓起东等，2010）。自2000年以来，中国大陆共发生 10 次 7 级以上强震，其中有 8 次就发生在该地块及其周缘构造带。活动地块理论认为强震多发生在活动地块边界带上（张国民和张培震，2000；张培震等，2003），此类强震的震例较多，相关的大型边界断裂的研究也较为充分。而地块内部的历史强震震例较少，如巴颜喀拉地块内部有过仪器记录的强震只有 1947年达日M_S7.7级地震（戴华光，1983；梁明剑等，2020）和 2021 年 5 月 22日玛多M_S7.4地震（李智敏等，2021；潘家伟等，2021；盖海龙等，2021；张喆和许力生，2021；Li et al., 2025），表明块体内部同样存在显著的应变积累与变形破裂，但由于强震发生在地块内部滑动速率较慢的次级断裂上，深处高原腹地，高寒高海拔的环境条件恶劣，前人研究程度较低。在玛多地震发生后，学界才重新重视起块体内部发育的滑动速率较慢的东昆仑断裂带次级走滑断裂的构造意义。近期的研究表明，巴颜喀拉块体内部的玛多-甘德断裂、昆仑山口—江错断裂、达日断裂、五道梁-长沙贡玛断裂等NW 向断裂均显示出晚第四纪活动特征，它们在分配和传递块体内部连续变形方面扮演着重要的角色（梁明剑等，2020；梁明剑等，2023）。

因此，准确限定这些次级断裂的晚第四纪以来活动性和滑动速率，是认识巴颜喀拉地块北边界宽变形带应变分配方式的关键。玛多—甘德断裂位于东昆仑活动断裂带和昆仑山口—江错断裂之间，前人仅对其甘德段做过较为精细的研究，发现其具有晚第四纪活动特征（熊仁伟，2010）。但对其玛多段精细研究仍属空白。本研究在高精度遥感影像解译的基础上，通过详细的野外现场考察、无人机摄影测量与构造地貌分析，精细刻画错断的晚第四纪地质体与阶地地貌，结合光释光测年技术，对玛多—甘德断裂（玛多段）几何展布和全新世以来的滑动速率开展研究，为理解该区主边界断裂与内部次级断裂之间的变形协调关系提供新的定量约束，进而讨论巴颜喀拉地块北边界宽变形带中的应变分配。

1 区域地震构造背景

研究区位于巴颜喀拉活动地块北缘，在大地构造上属于松潘-甘孜地体向北东扩展的前缘地带，自西向东岩层走向从NWW向逐渐转变为NW向，主体地层为三叠系巴颜喀拉山群，岩性以深褐、灰黑色碎屑岩、砂岩、板岩为主，经历了多期褶皱和冲断变形。第四系主要分布在河谷和冲沟等低洼地带，主要受冻融作用和河流演化控制，发育阶地、冰缘楔及湖相沉积序列（韩建恩，2010）。

该区域的深部电性结构为电阻值高—低—次低的三元结构，中下地壳为高导层且埋深呈现波浪起伏（詹艳等，2021）,表明中下地壳广泛遭受到了构造变形或缩短，反映中下地壳物质的流动或地壳缩短过程中的重复楔形叠置。区域内玛多-甘德断裂和昆仑山口-江错断裂等几条走滑断裂带的破碎程度高，是具有良导电性的高导层，但其力学性质弱，在区域应力作用下易发生剪切运动及缩短，导致上、下地壳间拆离或地壳增厚从而引发地震（詹艳等，2021）。基于地震台站数据反演所得的三维速度结构显示，研究区下地壳存在显著低速异常区，且该低速带厚度向东急剧减薄，构建的库伦应力数值模型表明区域高应力和应变能区域位于低速异常体的包络面之上（Zhang et al., 2022)。由于中下地壳软弱塑性层的存在促进了应力向刚性上地壳的传递，导致研究区内产生显著的应变能积累和应力集中（Zhang et al., 2022)。

玛多-甘德断裂总体走向 280°~300°，表现为高角度左旋走滑兼具逆冲分量（图 1）。前人通过遥感影像解译与深部构造分析认为，玛多-甘德断裂与昆仑山口-江错断裂、西藏大沟-昌麻河断裂等在几何上均可视为东昆仑断裂向南发散的次级分支，共同构成了一个宽阔的变形边界带（Ha et al., 2022)。

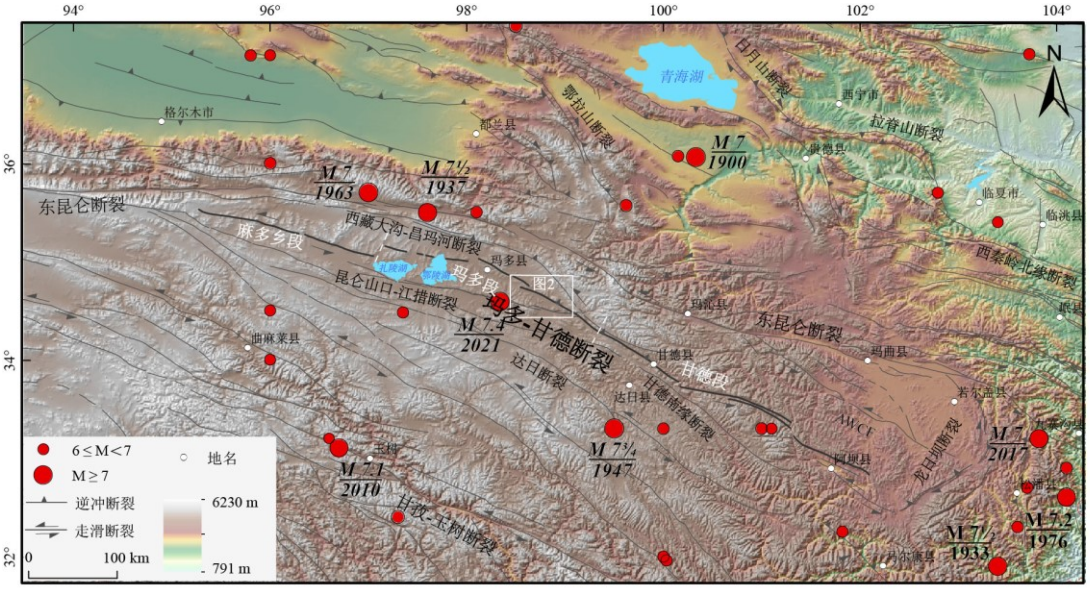


图 1 研究区地震与断裂分布

Fig. 1 Seismicity and active fault distribution in the study area

该断裂带西起昆仑山口，向东经野马滩、鄂陵湖以北在玛多县城西北部转为北西向经过黄河乡，穿过阿尼玛卿山南麓延伸至甘德县一带，东至阿坝盆地，全长超过 650 km（熊仁伟，2010；梁明剑等，2023）。断裂各段地貌差异显著，麻多乡段为高山丘陵；玛多段多见河流切割微地貌，发育断层槽谷；甘德段差异升降运动强烈，发育深切峡谷与山间断陷盆地。该断

裂早期活动见于老地层（三叠系砂岩）逆冲于古近系红层之上，反映了早期的挤压收缩性质。进入晚第四纪，断裂转变为显著的左旋走滑性质，兼具明显的逆冲分量。在甘德段，存在宽度达 80~200 m 的地震地表破碎带，保留多期地震活动的痕迹，最新活动切割了一系列全新世冲沟及洪积扇（熊仁伟，2010）。全新世以来的平均水平滑动速率约为3.38±0.08mm/a，平均垂直滑动速率约为 0.78mm/a。第四纪以来的平均水平滑动速率约为4.68mm/a，平均垂直滑动速率约为0.15mm/a~0.23mm/a（熊仁伟，2010）。

2 玛多-甘德断裂（玛多段）晚第四纪活动特征

在玛多县朗喀塞塘村北东方向的公路沿线，发育一段长约 30 km、线状展布清晰的断裂带（图 2）。野外地质调查证实了其地表主要表现为雁列状排列的反向断层陡坎（图 5d）。该断裂段连续且一致地左旋位错了数条冲沟，并显著错断了自北东向南西发育的岔昌贡玛曲东岸的 T1－T3 阶地序列，从而提供了良好的晚第四纪地层与地貌错断标志。因此，本文选取该段开展滑动速率精细研究（图 2）。

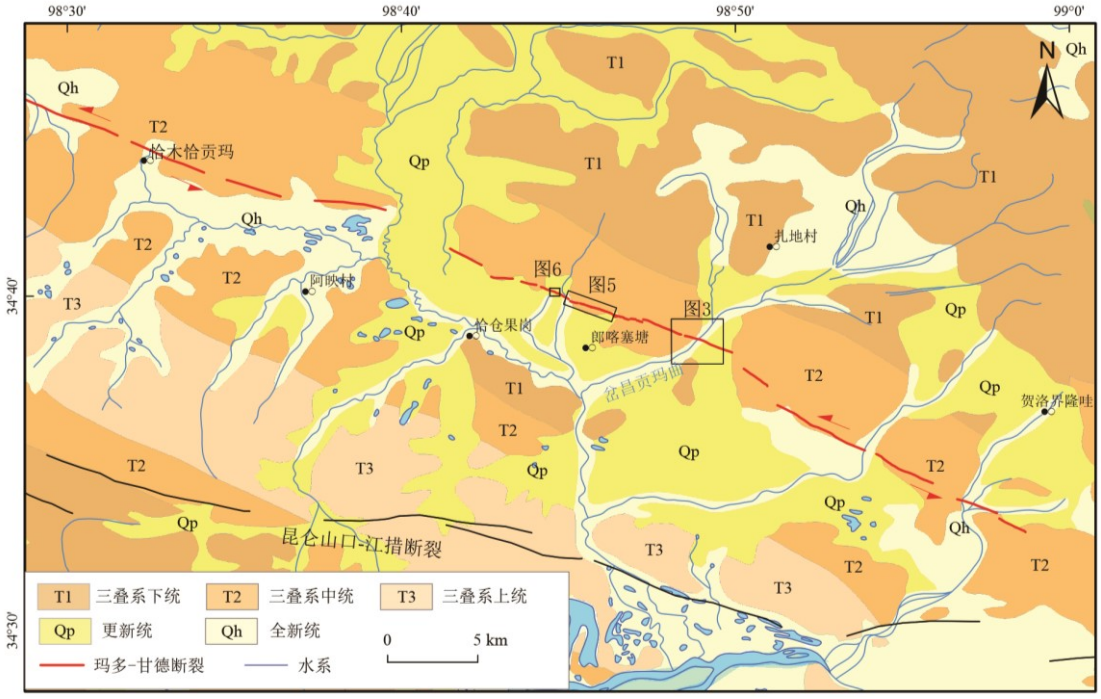


图 2 玛多-甘德断裂（玛多段）展布特征与区域地层分布

Fig. 2 Distribution characteristics and regional stratigraphy of the Mado-Gande fault (Mado segment)

2.1 岔昌贡玛曲大桥（研究点 1）

在研究点 1，玛多-甘德断裂显著错断了岔昌贡玛曲东岸级序分明的多级阶地（图 3a，c）。无人机高精度地形测量显示（图 3b，A-A’和 B-B’），各级阶地面（T0 至 T3c）的高程依次为：T0~4195 m、T1~4196 m、T2~4198

m、T3a~4202 m、T3b~4205 m 及 T3c~4206m。

该处跨 T2 阶地陡坎，开挖清理探槽剖面（图 3d），剖面揭示断层南倾，高角度逆冲；共划分 4 套地层，断层活动断错 U1 至 U3 层，其中 U2 和 U3 层内发生了明显的挤压揉皱变形，沿着断层带两侧呈现多个不规则团块，表明断层活动具有明显的走滑特征；剖面中采集了光释光样 MDOSL30-32。在 T3 地貌面开挖的探坑采集了光释光样品 MDOSL35（图 3e；表 1）。

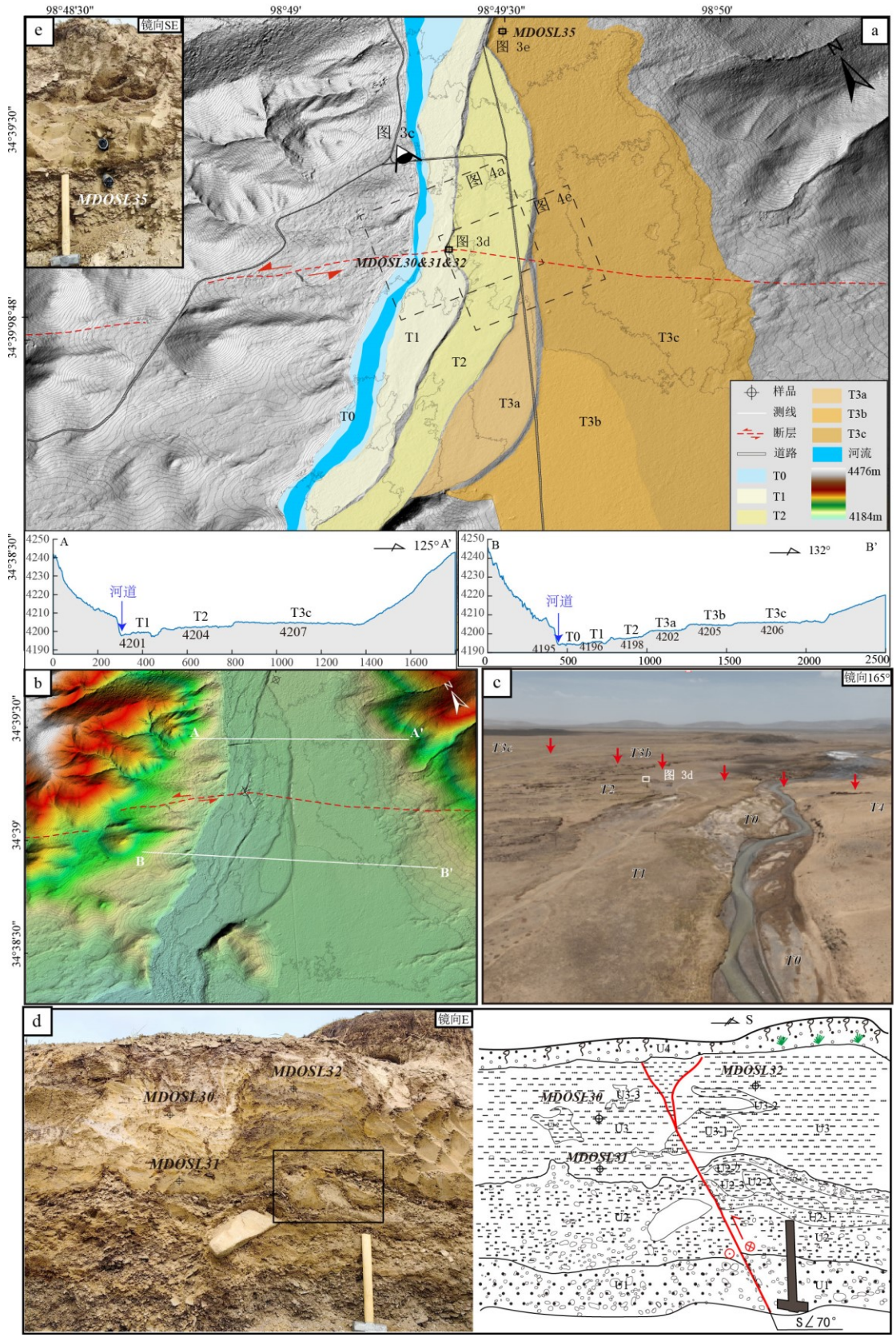


图 3 研究点 1 地形地貌与探槽

Fig. 3 Topography, geomorphology and trench at study site 1

a 断层展布与地貌单元划分；b 数字高程模型（DEM）；c 断层附近航拍；d 跨 T2 阶地的探

槽及解译；U1 含砾粗砂层，U2 含砾砂质粘土，U2-1 细砂质粘土夹层，U2-2 粉砂，U2-3 粘土，U2-4 砾石层，U3 粉质粘土，U3-1 含砾粉砂团块，U3-2 粘土团块，U3-3 粉砂团块，U4 风积相砂砾石盖层； e T3 阶地采样探坑剖面

为精细刻画变形系统并量化地貌的精确位错量，使用 LaDiCaoz_v2 工具（Zielke and Arrowsmith, 2012；Haddon et al., 2016)对断层左旋位错区域的数字高程模型（DEM）数据进行了定量分析。结果表明，断裂带在该测量点造成的 T2 阶地陡坎左旋水平位错量为 18.3±2.8 m，而较高一级的 T3 阶地陡坎的左旋水平位错量则达到了 30.7±4.1 m（图 4）。

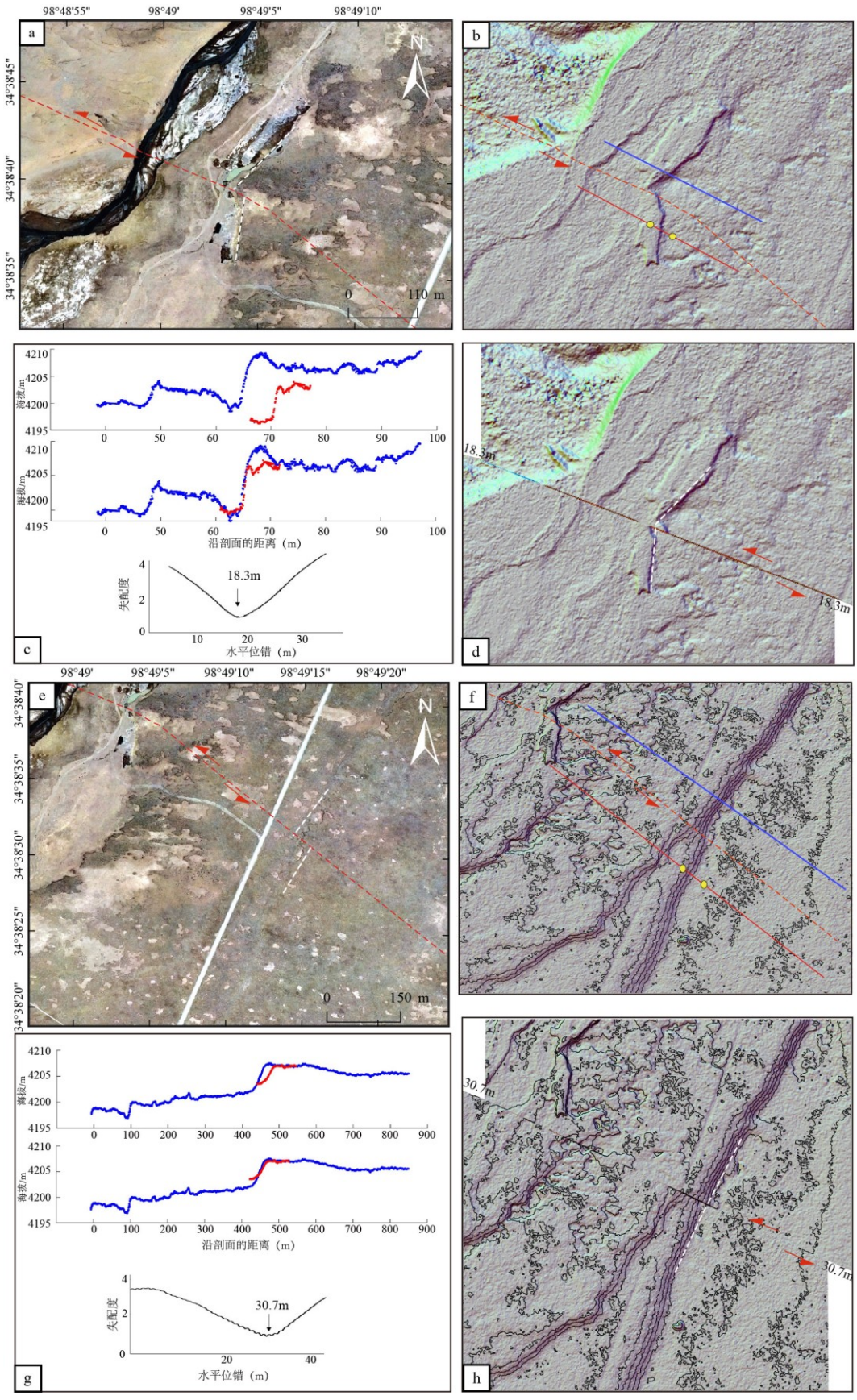


图 4 研究点 1 阶地水平位错测量

Fig. 4 Horizontal displacement measurement of terrace at study site 1

a、e 陡坎位错正射影像；b、f 陡坎位错 DEM；c、g 断层两盘最佳位错评估；d、h 断层两盘位错平衡恢复

2.2 郎喀塞塘村东县道沿线（研究点 2）

在研究点 2 的县道沿线附近，发育有一段长约 2km 的连续反向断层陡坎（图 5d）。鉴于此处积累的地表垂直位错量相对较小（一般低于 2 米量级），直接布设传统线状测线极易受高分辨率地貌模型噪点与地表植被细微起伏的干扰。为获取更可靠的高程差值，本研究生成了分辨率为 0.5m 的 DEM。利用包含一定宽度内地表高程均值的“条带状测线”（swath profiles）替代单一线型测线，有效平滑并剥离了局部形貌起伏和随机噪点带来的数值突变（Zhang et al., 2011)。通过跨断层陡坎两侧的 T2 地貌面和 T3 地貌面分别布设了长约 200m，宽 5m 的条带状测线 Pa1-Pa16 和 Pb1-Pb9（图 5b）。将所得高程数据输入艾明（2019）开发的 Pointfit 工具进行测量，该软件通过同时拟合断层两侧阶地面的趋势坡度来消除地表自然坡度的影响，所得垂直位错量的不确定度即包含了拟合过程中的残差。为最大程度地抑制空间数据异常波动和削减测量极值不确定性的影响，最终引入基于概率框架的累积偏移概率分布模型（COPD）方法（Lin et al., 2020)来评估各地貌面垂直断距的收敛结果（图 5c）。概率密度函数的峰形参数指示：较窄的峰值频段映射出低方差分布，具有较高的确定度。测量结果显示研究点 T2 地貌面的垂直位错量为 1.1±0.4 m，而 T3 地貌面由于受断层活动影响的时间更长，其垂直位错总量对应达 1.8±0.7 m。在断层陡坎北盘的 T2 地貌面采集了光释光样品 MDOSL27（图 5；表 1）。

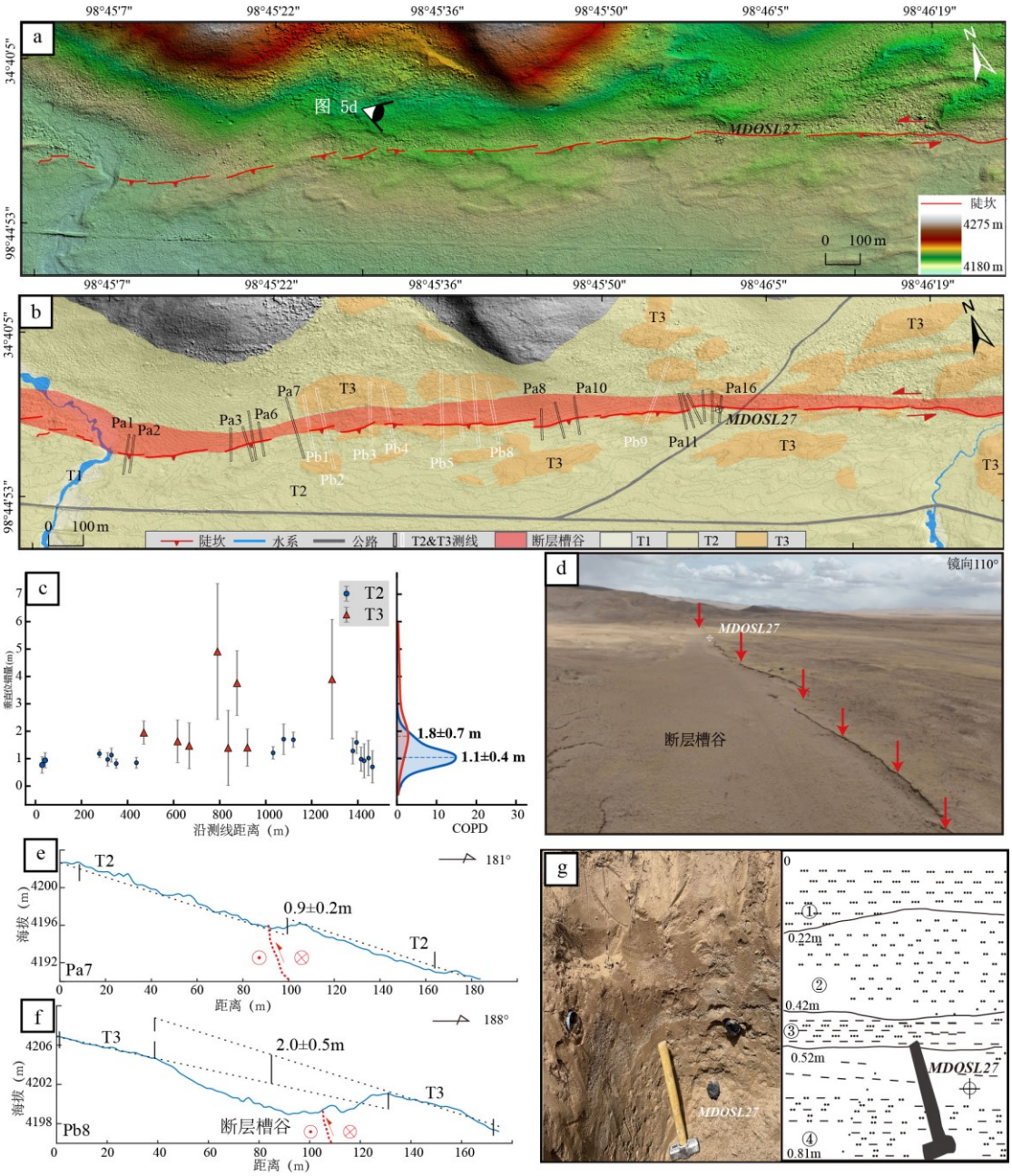


图 5 研究点 2 垂直位错测量

Fig. 5 Vertical displacement measurement at study site 2

a 数字高程模型（DEM）；b 断层展布与地貌单元；c 垂直位错量统计；d 断层陡坎航拍；e T2 阶地典型地形位错剖面；f T3 阶地典型位错剖面；g 采样剖面及解译（①冲积相粉砂；②冲积相细砂；③粉土夹层；④河流相含砾粉质粘土）

2.3 郎喀塞塘村北西（研究点 3）

在研究点 3，调查发现了玛多-甘德断裂的活动左旋位错了一处溯源侵蚀冲沟（图 6a）。对区内的高程进行统计分析，共划分出 3 级地貌面，分别为：T1~4188m，T2~4189m，T3~4191m。

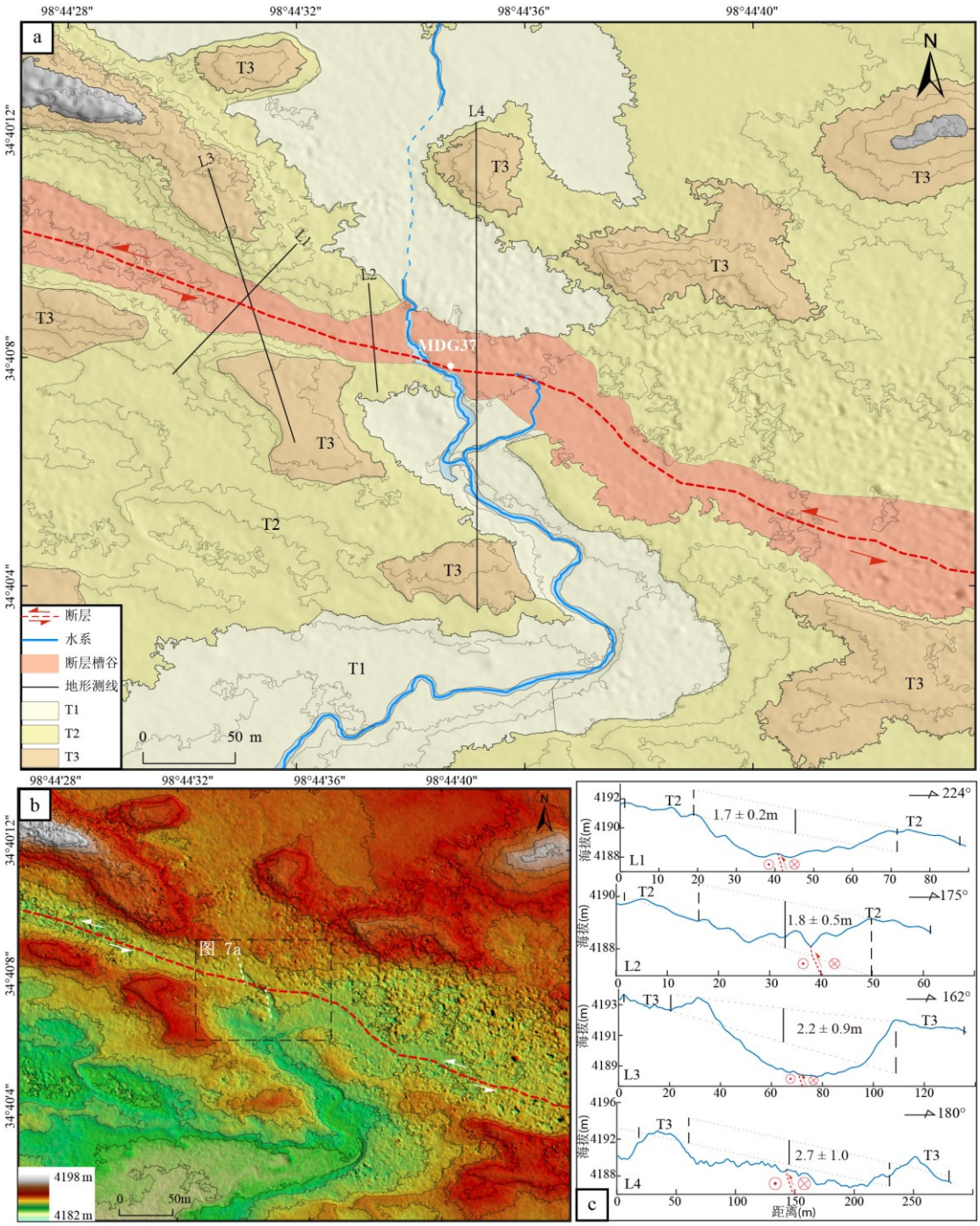


图 6 研究点 3 地形及地貌解译

Fig. 6 Topography and geomorphological interpretation at study site 3

a 断层展布与地貌单元划分；b 数字高程模型（DEM）；c T2 与 T3 阶地典型位错剖面

L1 和 L2 测线显示 T2 地貌面高差为 1.7±0.2m 和 1.8±0.5m；L3 和 L4 测线显示 T3 地貌面高差为 2.2±0.9m 和 2.7±1.0m（图 6c）。综上，断层槽谷两侧 T2 地貌面垂直位错量为~1.9m，T3 地貌面垂直位错量~2.5m。断裂左旋断错了 T2 地貌面的一处冲沟，位错量为 21.3±2.2m（图 7）。

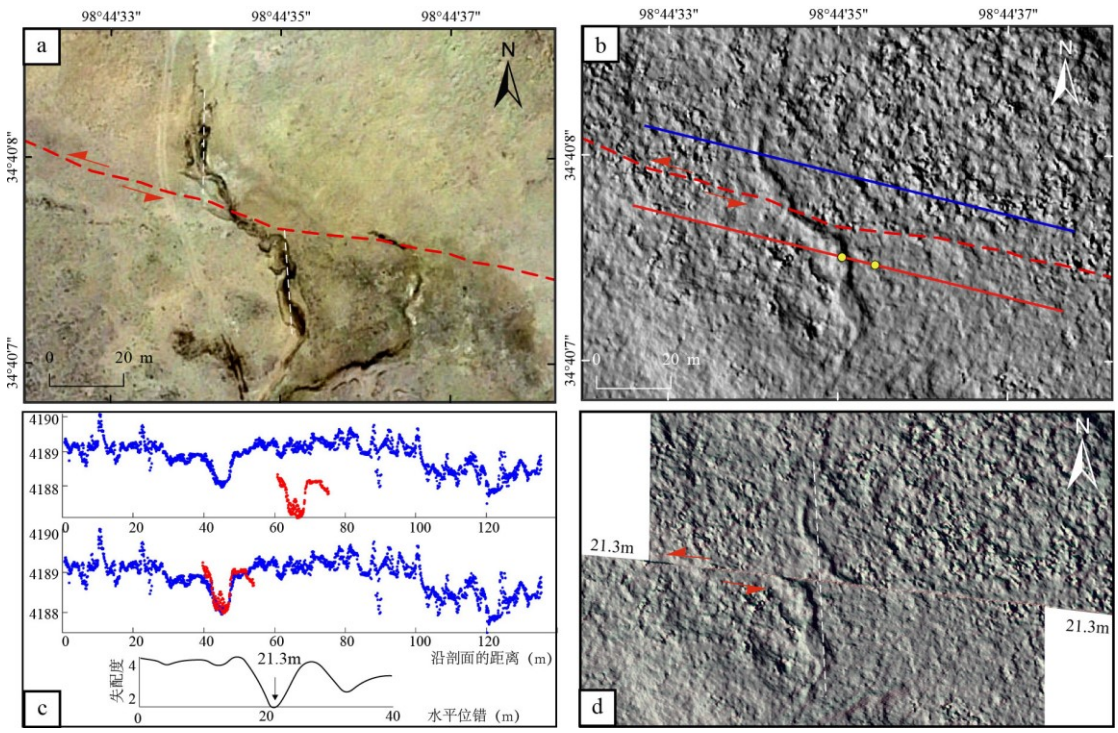


图 7 研究点 3 水平位错测量

Fig. 7 Horizontal displacement measurement at study site 3

a 冲沟正射影像；b 冲沟 DEM；c 断层两盘最佳位错评估；d 断层两盘位错平衡恢复

2.4 玛多-甘德断裂（玛多段）滑动速率计算

利用构造地貌方法研究走滑断裂晚第四纪活动习性的方法较为成熟（王子君等，2024；Chen et al.，2026）。为确定玛多-甘德断裂（玛多段）具体滑动速率，除了准确的地貌位错量外，还需要获得对应地貌面的确切形成时代。我们在郎喀塞塘进行了年代学样品采样与测年工作（采样点位见图 3，图 5），共获得 5 个测年结果（表 1）。

表 1 地貌面光释光年龄结果及相关参数

Table. 1 OSL dating results and relevant parameters of geomorphic surfaces at Langkasetang

样品编号	埋深(m)	含水量%	环境剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	年龄(ka)
MDOSL30	1.3	10±5	2.9±0.2	16.6±0.3	5.6±0.3
MDOSL31	1.5	12±5	3.1±0.2	18.6±0.4	6.0±0.4
MDOSL32	1.2	10±5	3.1±0.2	18.2±0.5	5.9±0.4

MDOSL35	0.5	10±5	2.1±0.1	27.8±0.5	13.3±0.8
MDOSL27	1.0	10±5	3.1±0.2	18.5±0.5	6.0±0.8

其中，MDOSL30、31、32 均采集自研究点 1 岔昌贡玛曲大桥东岸的 T2 阶地，MDOSL35 采集自岔昌贡玛曲大桥东岸的 T3 阶地（图 3a）。MDOSL27 采集自研究点 2 郎喀塞塘村北西断层谷地 T2 地貌面（图 5）。经实地踏勘与无人机测绘地貌分析，相距较近的研究点 3 被位错的 T2 地貌面与研究点 2 采集年龄的 T2 地貌面为同一级地貌面，因此后续滑动速率计算中使用 MDOSL27 的年龄来代表研究点 2 的 T2 地貌面年龄。

定量限定断层滑动速率是揭示区域构造演化历史的关键步骤。以往的研究多依赖于简单的位错/年龄比值法或二元线性回归分析。但这些常规方法往往难以全面考量样本代表性偏差及数据内在误差，导致估算精度受限。

马尔可夫链蒙特卡洛模拟（MCMC）作为一种基于概率密度的统计学手段，能有效克服上述局限。它通过大规模随机抽样来模拟符合地质逻辑的断层滑动序列，将各项参数的不确定性转化为概率分布，从而使变形速率的评估结果更为客观和可靠（Gold and Cowgill, 2011)。其通过量化分析多期地貌面错断过程的合理性，已成功应用于多条活动断裂的速率限定中。研究证实，该模型得出的地质速率与现今 GPS 观测结果吻合度极高，现已成为构造地貌学领域的标准分析手段之一（李涛，2013；刘金瑞等，2018）。

将每个数据点扩展成矩形误差窗，边界用被断错地貌面的年龄和位错最大最小值确定。基于本研究的实测数据，我们将岔昌贡玛曲大桥东岸 T2 阶地 15.5~21.1m 的水平位错区间与 MDOSL31 样品 6.0±0.4 ka 的年龄作为第一组误差窗，将岔昌贡玛曲大桥东岸 T3 阶地的 26.6~34.8 m 的水平位错区间与 MDOSL35 样品 13.3±0.8 ka 的年龄作为第二组误差窗输入模型，将郎喀赛塘村北西 T2’阶地 19.1~23.5m 的水平位错区间与 MDOSL27 样品的 6.0±0.8 ka 的年龄作为第三组误差窗输入模型；将郎喀塞塘村东县道沿线的 T2’地貌面的垂直位错区间 1.1±0.4 m 和 MDOSL27 样品的 6.0±0.8ka 的年龄作为一组误差窗输入模型。分别进行 1000 次随机抽样的模拟结果（图 8a；8c）表明，玛多-甘德断裂（玛多段）的水平走滑速率为 2.37+0.34/-0.31 mm/a（95%置信区间），2.37+0.21/-0.17 mm/a（68%置信区间）（图 8b）；垂直滑动速率为 0.18+0.08/-0.06mm/a （95%置信区间），0.18±0.04mm/a（68%置信区间）（图 8d）。

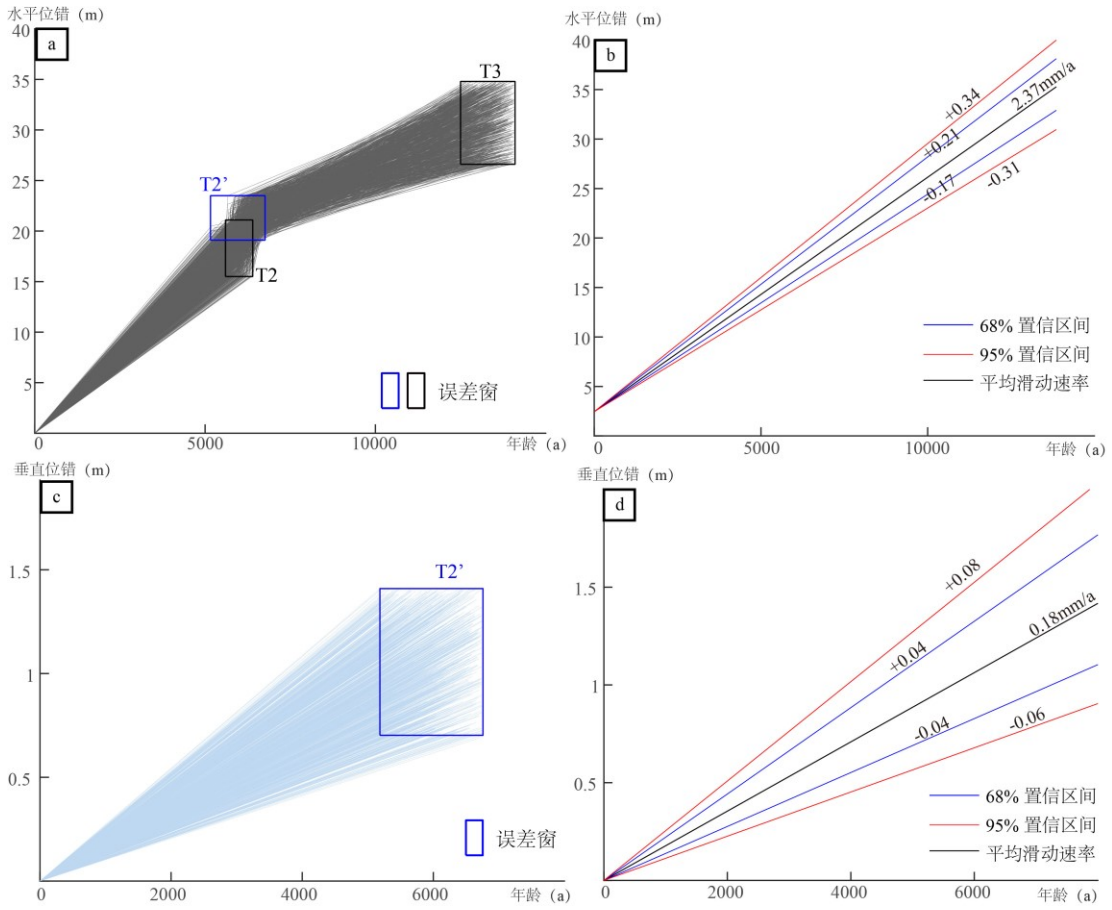


图 8 马尔可夫链蒙特卡洛方法模拟的断裂平均滑动速率

Fig. 8 Average slip rate of the fault simulated by the Markov Chain Monte Carlo method

a/c 断裂水平/垂直滑动历史路径 ； b/d 不同置信区间的水平/垂直滑动速率

3 讨论

3.1 玛多-甘德断裂（玛多段）滑动速率可靠性

在野外和高精度 DEM（图 3b）中均可见，研究点 1 的整体地形呈现“北东高、西南低”的倾斜地貌格局。在地形高差驱动下，来自东侧斜坡上的多条源头冲沟地表径流，沿着坡向往岔昌贡玛曲主河床方向汇聚。在此过程中，地表的流水冲刷对 T2 和 T3 阶地表面的断层陡坎和错断标志线造成了持续且强烈的侧向侵蚀作用。我们在 T3 和 T2 阶地跨断层布设的条带状地形测线显示，与研究点 2 和研究点 3 垂直位错＞1m 的量相比几乎无法识别，因为流水侵蚀作用已经将断层成因的垂直位错夷平。同理，其对 T2 和 T3 阶地陡坎的侧向侵蚀也是较为强烈的。现今观察到的左旋位错量，必然小于断裂自阶地废弃以来发生的真实累积构造位错量，计算所得水平滑动速率（2.37+0.34/-0.31 mm/a）也只代表下限。

3.2 地块内部次级走滑断裂的区域构造意义及深部动力学响应

东昆仑断裂在昆仑山口以东受阿尼玛卿挤压弯曲构造带阻挡后，向南

侧块体内部发生分散，形成由主干断裂和多条次级分支断裂共同组成的马尾状弥散变形系统。东昆仑断裂承担了区域左旋剪切变形的主体部分，而玛多-甘德断裂、昆仑山口-江错断裂和达日断裂等近 NW-NWW 向次级走滑断裂，具有晚第四纪以来的活动性。并在全新世以来持续参与了区域左旋剪切变形。巴颜喀拉地块北边界可理解为由东昆仑主断裂及其南侧多条低速率次级断裂共同组成的宽变形带，其中应变在不同断裂之间发生差异化分配；东昆仑断裂承担了主要的左旋走滑变形量，其滑动速率可达 8～12 mm/yr；宽变形带中次级断裂滑动速率为 1-4mm/yr（熊仁伟，2010；Liang et al., 2023；李建军等，2024)。这种浅表地壳的弥散性应变分配格局，深刻受控于青藏高原中下部软弱地壳的流变结构与深浅耦合机制。跨越玛多震区的大地电磁探测剖面揭示，巴颜喀拉块体内部呈现出经典的“高阻-低阻-次低阻”三明治结构，其中下地壳广泛赋存高导层。该高导层的埋深表现出显著的波浪状起伏，明确指示了中下地壳在遭受挤压时强烈的缩短与流变变形（詹艳等，2021）。以 2021 年发生 Ms 7.4 级地震的昆仑山口-江错断裂为例，其深部位于壳内高导层向上凸起并与上覆高阻脆性介质交界的薄弱地带。从地球动力学视角来看，在青藏高原向东北推挤的作用下，力学性质极为软弱的壳内高导层发生折曲与剪切，其作为应力传导的载体，将深部构造应力持续运移、储存在浅部的高阻脆性边界带中（Zhang et al., 2022)。研究区内深浅部地壳运动状态的差异性（下地壳流快速塑性流动）导致了浅层刚性地壳内极高的应力集中与应变能积累（Yang et al., 2022)，为玛多-甘德断裂等块体内部低速率断裂的孕震提供了深部驱动力。

在上述深部流变加载机制的驱动下，低速率的次级走滑断裂系统展现出了极高的孕震能力。从应变分配模型来看，玛多-甘德、江错、达日等内部断裂的滑动分配有限，单条断裂的平均加载速率仅为 0.5~2 mm/a。这意味着要积累类似玛多地震约 2~4 米的同震滑移量（盖海龙等，2021；李智敏等，2021；潘家伟等，2021；邵延秀等，2022；Liu-Zeng et al., 2024)，需要数千年的应变积累（Yue et al., 2022)，使得这些断裂上特征大地震的复发间隔远比块体边界快速滑动的断裂更长，所以现今可供研究的震例更少。基于黏弹性有限元模型的数值模拟研究表明，由于深浅构造的耦合加载，地块内部如达日断裂的震间库仑应力年累积速率高达 206 Pa/a，与部分边界断裂（如甘孜-玉树断裂）相当（刘雷等，2021）。

总之，这类地块内部次级断裂，长期地质滑动速率偏低，因此大震复发周期长；但在当前区域构造加载和断层相互作用背景下，其库仑应力仍可持续有效积累，仍具备孕育强震的能力。在进行青藏高原陆内强震危险性评价时，必须将这些处于弥散变形网络中、由深部滑脱层直接驱动的低

速率次级走滑断裂系，作为区域应变吸收与突发性应力释放的主体纳入考量。

4 结论

（1）玛多-甘德断裂（玛多段）全新世以来具有强烈的活动性，以左旋走滑运动为主，局部兼具逆冲分量。断裂在玛多县朗喀塞塘村附近断错了一系列晚更新世—全新世地层与地貌面，发育有断层陡坎、断层槽谷、以及典型的水系和阶地左旋位错等地貌特征。

（2）结合河流阶地及地貌面沉积物的光释光（OSL）测年结果，计算得出玛多-甘德断裂玛多段全新世以来的平均左旋走滑速率为 2.37+0.34/-0.31 mm/a（95%置信区间）；垂直滑动速率为 0.18+0.08/-0.06mm/a（95%置信区间）。

（3）在此研究中获得的玛多-甘德断裂（玛多段）低滑动速率（约 2.37 mm/a）特征，这类块体内部次级走滑断裂，在下地壳软弱层深浅耦合流变驱动下，长期分担并调节着青藏高原东向推挤的宏观形变，具备孕育如 1947 年达日 M_S 7.7 和 2021 年玛多 M_S 7.4 强震的能力。

References

Ai, M., 2019. Application of High-Precision Photogrammetry Method in Obtaining Quantitative Parameters of Active Tectonics--A Case Study of the Faults on the Two Sides of the Caka Basin (Dissertation). Institute of Geology,China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract).

Chen, Y., Yuan, D., Sun, H., et al., 2026. Characteristics of the recently identified seismic surface rupture zone along the eastern segment of the kunzhong fault and its seismogeological significance, northern tibetan plateau. Journal of Earth Science, 37(2):427 ~ 442.doi:10.1007/s12583-025-0232-3.

Deng, Q.D., Gao, X., Chen, G.H., et al., 2010. Recent Tectonic Activity of Bayankala Fault-Block and the Kunlun-Wenchuan Earthquake Series of the Tibetan Plateau. *Earth Science Frontier*, 17(5):163 ~ 178 (in Chinese with English abstract).

Gai, H.L., Yao, S.H., Yang, L.P., et al., 2021. Characteristics and causes of coseismic surface rupture triggered by the "5. 22" MS 7. 4 Earthquake in Maduo, Qinghai, and their significance. Journal of Geomechanics, 27(6):899 ~ 912 (in Chinese with English abstract).

Gold, R.D., Cowgill, E., 2011. Deriving fault-slip histories to test for secular variation in slip, with examples from the kunlun and awatere faults. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2):52 ~ 64. doi: 10.1016/j.epsl.2010.10.011.

Ha, G.H., Liu, J.R., Ren, Z.K., et al., 2022. The Interpretation of Seismogenic Fault of the Maduo Mw 7.3 Earthquake, Qinghai Based on Remote Sensing Images—A Branch of the East Kunlun Fault System. Journal of Earth Science, 33(4):857 ~ 868. doi:10.1007/s12583-021-1556-2.

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. doi: 10.1002/2015GC006033.

Han, J.E., 2010. The Sedimentary and Environmental Evolution on Yellow Riversource Area During Late Cenozoic Era (Dissertation). Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).

Li N., Ji L.Y., Jiang F.Y., et al., 2024. Analysis of Future Strong Earthquake Activity at the Boundary Faults of the Bayan Har Block Based on Gps Data. *Journal of Seismological Research*, 47(3):405 ~ 418. doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.

2024.0041 (in Chinese with English abstract).

Li, J.J., Li, W.Q., Gong, Q.Z., et al., 2024. An Overview of Activity Rate Along the East Kunlun Fault zone. Earthquake, 44(1):118 ~ 140 (in Chinese with English abstract).

Li, T., 2013. Active thrusting and folding along the Pamir Frontal Thrust System(Dissertation). Beijing: Institute of Geology,China Earthquake Administration (in Chinese with English abstract).

Li, Z., Ji, Z., Sun, J., et al., 2025. High-probability ground motion simulation in maduo county for the maduo MS7.4 earthquake in 2021: A possible supershear earthquake. Journal of Earth Science, 36(2):781 ~ 800. doi: 10.1007/s12583-024-0092-2.

Li, Z.M., Li, W.Q., Li, T., et al., 2021. Seismogenic Fault and Coseismic Surface Deformation of the Maduo Ms7.4 Earthquake in Qinghai,China: a Quick Report. *Seismology and Geology*, 43(3):722 ~ 737 (in Chinese with English abstract).

Liang, M.J., Yang, Y., Du, F., et al., 2020. *Seismology and Geology*, 42(3):703 ~ 714 (in Chinese with English abstract).

Liang, M., Wu, W., Yang, Y., et al., 2023. Late quaternary fault activity and deformation mechanism in the eastern tibet plateau (dari fault, bayan har block). *Quaternary International*, 656:26 ~ 36. doi: 10.1016/j.quaint.2022.09.009.

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*, (1):12 ~ 17. doi: 10.13716/j.cnki.1001-8115.2023.01.002 (in Chinese with English abstract).

Lin, Z., Liu-Zeng, J., Weldon, R.J., et al., 2020. Modeling repeated coseismic slip to identify and characterize individual earthquakes from geomorphic offsets on strike-slip faults. *Earth and Planetary Science Letters*, 545:116313. doi: 10.1016/j.epsl.2020.116313.

Liu, J.R., Ren, Z.K., Zhang, H.P., et al., 2018. Late Quaternary Slip Rate of the Lao Hu Shan Fault Within the Haiyuan Fault Zone and its Tectonic Implications. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(4):1281 ~ 1297 (in Chinese with English abstract).

Liu, L., Li, Y.J., Zhu, L.Y., et al., 2021. Influence of the 1947 Dari M7.7 earthquake on stress evolution along the boundary fault of the Bayan Har block: insights from numerical simulation. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(7):2221 ~ 2231. doi: 10.6038/cjg2021P0194. (in Chinese with English abstract).

Liu-Zeng, J., Liu, Z., Liu, X., et al., 2024. Fault orientation trumps fault maturity in controlling coseismic rupture characteristics of the 2021 maduo earthquake. AGU Advances, 5(2):e2023AV001134. doi: 10.1029/2023AV001134.

Pan, J.W., Bai, M.K., Li, C., et al., 2021. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) Ms7.4 earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 95(6):1655 ~ 1670. doi: 10.19762 (in Chinese with English abstract).

Shao, Y.X., Liu, J., Gao, Y.P., et al., 2022. Coseismic displacement measurement and distributed deformation characterization: A case of 2021 MW7. 4 Madoi earthquake. SEISMOLOGY AND GEOLOGY, 44(2):506 ~ 523 (in Chinese with English abstract).

Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field.,1976.theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264(5584): 319-324.

Tapponnier, P., Zhiqin, X., Roger, F., et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the tibet plateau. *Science*, 294(5547):1671 ~ 1677. doi: 10.1126/science.105978.

Wang, Z.J., Yao, W.Q., Liu, J., et al., 2024. Application of Tectonic Geomorphology Method for Constraining the Slip Rate Uncertainty and Implication of Strike-Slip Faults:An Example from the Haiyuan Fault Zone. Earth Science, 49(2):759. doi: 10.3799/dqkx.2022.405 (in Chinese with English abstract).

Xiong R.W., 2012. A Study on the Activity of Maduo-Gande Fault(Dissertation). Institute of Earthquake Forecasting,China (in Chinese with English abstract).

Yang, Z., Zhao, D., Dong, Y., et al., 2022. Crustal flow and fluids affected the 2021 M7.4 maduo earthquake in northeast tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 225:105050. doi: 10.1016/j.jseaes.2021.105050.

Yue, H., Shen, Z.-K., Zhao, Z., et al., 2022. Rupture process of the 2021 M7.4 maduo earthquake and implication for deformation mode of the songpan-ganzi terrane in tibetan plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(23):e2116445119. doi: 10.1073/pnas.2116445119.

Zhan, Y., Liang, M.J., Sun, X.Y., et al., 2021. Deep Structure and Seismogenic Pattern of the 2021.5.22 Madoi(Qinghai)ms7.4 Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(7):2232 ~ 2252 (in Chinese with English abstract).

Zhang, G.M., Zhang, P.Z., 2000. Academic Progress on the Mechanism and Forecast for Continental Strong Earthquake in the First Two Years. *China Basic Science*, (10):6 ~ 12 (in Chinese with English abstract).

Zhang, G.W., Li, Y.J., Hu, X.P., 2022. Nucleation mechanism of the 2021 mw 7.4 maduo earthquake, NE tibetan plateau: Insights from seismic tomography and numerical modeling. *Tectonophysics*, 839:229528. doi: 10.1016/j.tecto.2022.229528.

Zhang, H., Zhang, P., Kirby, E., et al., 2011. Along-strike topographic variation of the longmen shan and its significance for landscape evolution along the eastern tibetan plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4):855～864. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.05.015.

Zhang, P.Z., Deng, Q.D., Zhang, G.M., et al., 2003. Chinese Strong Seismic and Active Blocks. *Science in China seris D*, (S1):12～20 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z., Xu, L.S., 2021. The Centroid Moment Tensor Solution of the 2021 Mw7.5 Maduo,Qinghai,Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 43(3) (in Chinese with English abstract).

Zielke, O., Arrowsmith, J.R., 2012. LaDiCaoz and LiDARimager—MATLAB GUIs for LiDAR data handling and lateral displacement measurement. 8(1):206～221. doi: 10.1130/GES00686.1.

中文参考文献

艾明，2019. 高精度摄影测量方法在活动构造定量参数获取中的应用——以茶卡盆地两侧断裂为例（硕士学位论文）.北京：中国地震局地质研究所.

戴华光，1983. 1947 年青海达日 73/4 级地震. 西北地震学报，(3):71～77.

邓起东，高翔，陈桂华，等，2010. 青藏高原昆仑—汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动. 地学前缘，17(5):163～178.

盖海龙，姚生海，杨丽萍，等，2021. 青海玛多“5·22”MS7.4 级地震的同震地表破裂特征、成因及意义. 地质力学学报，27(6):899～912.

韩建恩，2010. 黄河源区晚新生代沉积与环境演化研究（博士学位论文）.北京：中国地质科学院.

李建军，李文巧，贡秋卓玛，等，2024. 东昆仑断裂带活动速率研究概观. 地震，44(1):118～140.

李涛，2013. 帕米尔前缘逆冲推覆系活动断层和活动褶皱作用（博士学位论文）.北京：中国地震局地质研究所.

李智敏，李文巧，李涛，等，2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 ms7.4 地震的发震构造和地表破裂初步调查. 地震地质，43(3):722～737.

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 m73/4 地震地表破裂带再研究. 地震地质，42(3):703～714.

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，(1):12～17.

刘金瑞，任治坤，张会平，等，2018. 海原断裂带老虎山段晚第四纪滑动速率精确厘定与讨论. 地球物理学报，61(4):1281～1297.

刘雷，李玉江，朱良玉，等，2021. 1947年达日m7.7地震对巴颜喀拉块体边界断裂应力影响的数值模拟. 地球物理学报，64(7):2221～2231. .

潘家伟，白明坤，李超，等，2021. 2021年5月22日青海玛多MS7.4地震地表破裂带及发震构造. 地质学报，95(6):1655～1670. doi: 10.19762.

邵延秀，刘静，高云鹏，等，2022. 同震地表破裂的位移测量与弥散变形分析——以2021年青海玛多MW7.4地震为例. 地震地质，44(2):506～523.

王子君，姚文倩，刘静，等，2024. 利用构造地貌方法限定走滑断裂第四纪滑动速率的不确定性及意义：以海原断裂带为例. 地球科学，49(2):759.

熊仁伟，2010. 玛多—甘德断裂活动性研究(硕士学位论文).北京：中国地震局地震预测研究所.

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(7):2232～2252.

张国民，张培震，2000. “大陆强震机理与预测”中期学术进展. 中国基础科学，(10):6～12.

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)，(S1):12～20.

张喆，许力生，2021. 2021年青海玛多MW7.5地震矩心矩张量解. 地震学报，43(3).