



## 论文

# 东昆仑断裂带中东部地震破裂分段性与走滑运动分解作用

李陈侠<sup>①②</sup>, 徐锡伟<sup>①\*</sup>, 闻学泽<sup>③</sup>, 郑荣章<sup>①</sup>, 陈桂华<sup>①</sup>, 杨虎<sup>①</sup>, 安艳芬<sup>①</sup>, 高翔<sup>①</sup>

① 中国地震局地质研究所, 国家地震活动断层研究中心, 北京 100029;

② 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000;

③ 四川省地震局, 成都 610041

\* 联系人, E-mail: xiweixu@vip.sina.com

收稿日期: 2010-11-24; 接受日期: 2011-03-10

国家科技支撑计划项目(编号: 2006BAC13B0120101)资助

**摘要** 基于卫星影像解译和野外考察测量, 对东昆仑断裂带中东部托索湖段、玛沁段和玛曲段的晚更新世晚期以来滑动速率以及全新世以来的古地震活动特征进行了分析研究. 阿尼玛卿山双挤压弯曲和西贡周断裂交汇区为这3条段落的破裂分段标志, 也成为1937年托索湖7.5级地震地表破裂带的终止点. 通过构造地貌方法获得这3条段落自西向东晚第四纪晚期以来的平均水平滑动速率分别为(11.2±1), (9.3±2)和(4.9±1.3) mm/a; 垂直滑动速率分别为(1.2±0.2), (0.7±0.1)和0.3 mm/a. 断裂水平滑动速率从西至东呈梯度下降, 递减的滑动速率主要转换到了与东昆仑断裂相交的阿万仓断裂上. 通过构造转换矢量分解获得阿万仓断裂带西支和东支构成一个滑动分解模式, 断裂西南盘相对北东盘的滑动速率为4.6 mm/a, 滑动方向为112.1°. 3条段落的活动均产生独立地表破裂, 西侧托索湖段1937年发生了M7.5级地震, 往东玛沁段发生了514~534 cal a BP和距今(1070±180) a(格萨尔王时期)的地表破裂, 玛曲段地表破裂发生在1055~1524 a BP, 显示出段落之间与应力触发有关的地震破裂事件沿断裂带单向迁移的特征. 同时利用断裂单次地震位移和古地震复发周期获得断裂的长期滑动速率, 结果显示与构造地貌方法获得的滑动速率几乎一致, 也显示自西向东逐渐递减的趋势. 断裂滑动速率的递减与几何结构走向的弯曲以及横向断裂的相交一一对应, 因此东昆仑断裂带的滑动速率梯度递减的主要原因是东昆仑断裂带东延与横向断裂相交和构造转换所致.

**关键词**东昆仑断裂带  
地表破裂分段  
滑动速率  
滑动分解  
古地震

东昆仑断裂带是青藏高原北部一条近东西向大型左旋走滑断裂带, 也是昆仑-柴达木块体和巴颜喀拉块体间边界断裂, 晚第四纪活动十分强烈<sup>[1]</sup>. 据历史记载, 在东昆仑断裂带玛尔盖茶卡段、库赛湖段、秀沟段、阿拉克湖段和托索湖段曾发生过5次7.0~7.9

级地震和1次8.1级地震<sup>[2~5]</sup>, 在地表留下了不同规模的地表破裂带, 其中2001年昆仑山口西M<sub>s</sub>8.1级地震地表破裂带长约426 km<sup>[6,7]</sup>. 目前东昆仑断裂带上还存在着两个无历史地表破裂的地震空段: 东西大滩段和玛沁-玛曲段<sup>[7~10]</sup>. 由于玛沁-玛曲段地处人口较

多的地震空段, 引起了国内外学者的高度重视, 从历史地震地表破裂带展布、古地震复发序列、长期滑动速率和地震前兆异常等方面对东昆仑断裂带玛沁-玛曲地震空段进行分析和讨论, 深化了对东昆仑断裂带长期滑动习性和沿走向不均匀性的认识<sup>[5,9-19]</sup>。但由于累积位移量测准则、求取滑动速率的起始年代取值和古地震识别标志等差异, 不同学者给出的反映长期滑动习性的定量参数, 如滑动速率和古地震复发间隔等千差万别, 且缺乏对东昆仑断裂带地震破裂分段性和滑动分解研究等, 给东昆仑断裂带的地震危险性评估带来了很大不确定性, 也阻碍了对青藏高原大型走滑断裂带左旋走滑运动与横向构造隆升之间转换过程的深入了解。

本文通过对高分辨率卫星影像解译, 在确定东昆仑断裂带托索湖以东玛沁-玛曲地震空段及其附近地带的空间展布和几何结构的基础上, 结合典型断错地貌的实地测量、古地震探槽开挖和古地震事件识别等, 分析研究了东昆仑断裂带托索湖以东晚第四纪长期滑动速率、滑动矢量转换与分解、地震破裂分段性和地震复发模型等问题, 其结果对探讨东昆仑断裂带地震危险性、滑动速率沿走向的变化和青藏高原东部大型走滑断裂走滑运动与横向构造隆升之间转换关系, 检验青藏高原现有运动学模型优劣等, 具有十分重要的科学意义, 对减轻玛沁-玛曲地震空段

及其邻近区段可能遭遇的地震灾害损失和人员伤亡数量也具有十分重要的现实意义。

本文所用 <sup>14</sup>C 年龄数据由荷兰 Utrecht 大学 R.J. Van de Graaff 实验室和中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测定, 利用美国西雅图华盛顿大学第四纪同位素实验室 Minze Stuiver 等编写的 CALIB 程序 5.0.1 版本软件进行了校正; 释光年龄由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室和中国地震局地壳应力研究所新年代学实验室测定。

## 1 东昆仑断裂带中东部几何结构特征

ETM, Quickbird 和 Worldview 卫星影像解译及其野外调查显示, 东昆仑断裂带中东部西自怀德水外向东, 经阿拉克湖盆地、洪水川谷地、托索河谷地、托索湖盆地、下大武、玛积雪山北麓、东倾沟、玛沁县城南侧、西贡周和玛曲县城南侧, 穿过若尔盖盆地止于若尔盖县城以北, 全长约 500 km(图 1)。断裂走向平直稳定 280°~310°, 倾向以南西为主, 倾角 70°~80°, 局部近直立, 以左旋走滑为主, 兼有倾滑性质<sup>[5]</sup>, 发育在石炭系灰岩、二叠、三叠和白垩系长石石英砂岩及印支期似斑状黑云母花岗岩中<sup>[20]</sup>。在切割年札河西岸的 T<sub>1</sub>/T<sub>0</sub> 阶地坎剖面上可见向南陡倾的灰色碳酸盐断层泥带, 倾向 SE, 倾角 85°, 带有逆

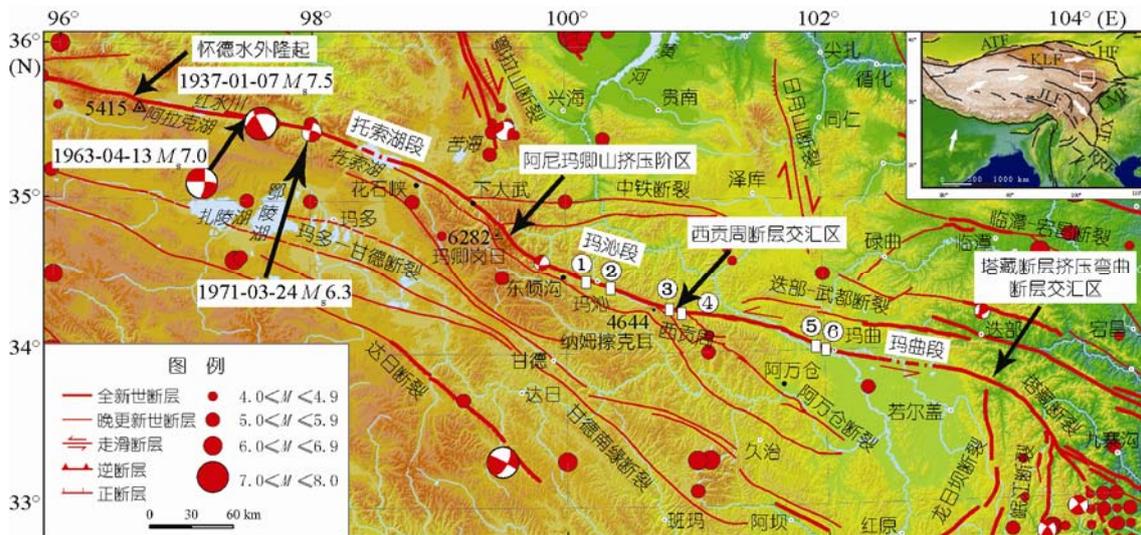


图 1 东昆仑断裂带中东部几何展布图

东昆仑断裂带据文献<sup>[5, 9, 12]</sup>, 迭部武都断裂和阿万仓断裂据文献<sup>[12]</sup>, 其他断裂据文献<sup>[20, 21]</sup>和 ETM 解译, 底图 SRTM 数据来自 <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/listImages.asp>. 1~6 表示观测点. ATF, 阿尔金断裂带; RRF, 红河断裂带; KLF, 东昆仑断裂带; XJF, 小江断裂带; JLF, 嘉黎断裂带; LMF, 龙门山断裂带; HF, 海原断裂带

倾滑成分<sup>[9]</sup>. 在东科河西岸  $T_2/T_1$  阶地坎剖面上可见下二叠统长石石英砂岩逆冲到全新统砂砾石层之上, 倾向 SW, 倾角  $70^\circ$ , 带有逆倾滑分量; 在断裂带横切玛沁盆地和玛曲盆地时表现为正倾滑性质, 左旋切割了末次冰期以来的各种地貌单元, 形成断层陡坎、地震鼓包、闸门脊和断塞塘等典型断错地貌. 因此, 研究区范围内东昆仑断裂带是一条兼有倾滑分量的晚第四纪左旋走滑断裂<sup>[5]</sup>.

在研究区范围内, 东昆仑断裂带中东部自西向东分别由托索湖、玛沁和玛曲 3 条段落组成. 托索湖段总体走向  $280^\circ\sim 290^\circ$ , 在地那染北坡逐渐转为  $310^\circ$ , 呈向北东方向凸出的弧形, 位于阿尼玛卿山挤压阶区以西, 线性特征明显, 晚更新世晚期以来的左旋走滑速率为  $4\sim 10.9\text{ mm/a}$ <sup>[5,9]</sup>; 在阿尼玛卿山北东侧与近东西向中铁断裂相交后走向为  $310^\circ\sim 330^\circ$ , 走向向北偏转约  $20^\circ$ , 在阿尼玛卿山东侧断裂走向又向西偏转约  $30^\circ$ , 形成带有较大逆冲分量的挤压双弯曲, 挤压阶区内山体隆升, 地壳缩短<sup>[22]</sup>, 形成东昆仑断裂带中东部最高的山峰——阿尼玛卿山主峰, 海拔  $6282\text{ m}$  的玛卿岗日.

玛沁段走向  $290^\circ\sim 300^\circ$ , 倾向 SW, 倾角  $60^\circ\sim 80^\circ$ , 位于阿尼玛卿山挤压阶区以东, 断层谷地沿线断错地貌发育, 玛沁附近晚更新世晚期以来的左旋滑动速率为  $6\sim 12.5\text{ mm/a}$ <sup>[5,9,10]</sup>, 在莫哈汤南侧和西贡周西侧与阿万仓断裂的东、西两支相交, 夹角约  $40^\circ$ , 形成西贡周断层交汇区, 同时断裂走向往南西偏转了  $10^\circ$ , 形成一个拉张阶区(莫哈汤小盆地), 走向变为  $280^\circ$ .

玛曲段断裂走向  $280^\circ\sim 305^\circ$ , 断层纵穿玛曲盆地, 在黄河南侧展布于当日北侧洪积扇前缘, 黄河以北展布于哲合拉布肖南侧山前<sup>[5]</sup>, 控制黑河河流, 在若尔盖以北出沼泽地, 与塔藏断裂相交, 断裂的走向往南偏转约  $20^\circ$ , 并逐渐往南偏转到  $330^\circ$ , 呈向北东方向凸出的弧形弯曲, 并与龙日坝、岷江和虎牙断裂南北向构造形成马尾状撒开的收缩构造<sup>[22]</sup>. 晚更新世晚期以来左旋滑动速率相差甚大, 介于  $2\sim 12\text{ mm/a}$  之间, 不确定性相当大<sup>[5,12,14,16,18]</sup>. 断裂在克生托洛和玛曲县城产生了一个较缓的挤压双弯曲, 走向偏转角度分别为  $20^\circ$  和  $15^\circ$ .

由上可知, 东昆仑断裂带中东部几何结构较复杂, 存在双挤压弯曲、单弯曲、断层交汇区和马尾状尾端构造等, 形成了该区域高耸的阿尼玛卿山、岷山隆起、单断型盆地(玛沁盆地和玛曲盆地)、拉张的西

贡周和莫哈汤盆地等, 这些局部构造构成了断裂带上不同级别的障碍体和应力集中部位(图 1).

## 2 长期滑动速率

确定走滑断裂的滑动速率需要两个变量: 位移量和位移量的起始时间. 滑动速率可以通过构造地貌方法和古地震复发间隔法获得.

构造地貌方法主要通过  $S=D/T$  公式获得, 式中,  $S$  为滑动速率,  $D$  为线性地貌标志断错位移量,  $T$  为累积位移的起始时间. 阶地坎线性特征较好, 可以得到很好的刺穿点(Pierce point), 通常被用来测量断裂的水平位移量<sup>[23]</sup>. 这些位移量可通过航、卫片的解译、全站仪、差分 GPS 和 3D 激光扫描仪等仪器来测量得到. 对于阶地坎累积位移起始时间的计算, 由于很难获得产生位移的阶地陡坎的年龄, 通常用阶地坎上下两级阶地年龄作为位移起始的年龄, 但这一年龄与累积位移起始时间之间符合到什么程度则是需要进一步讨论的一个问题: 即到底是高阶地面年龄还是低阶地面年龄更接近累积位移的起始年龄? 目前主要存在 3 种认识: 1) 低阶地模型<sup>[9,23,24]</sup>, 适用于侵蚀速率较大, 河道较直, 水流较大的情况<sup>[16]</sup>; 2) 高阶地模型<sup>[25,26]</sup>, 适用于断裂附近的地貌和地质体对于断错的阶地陡坎构成保护使其免受侵蚀; 3) 高、低阶地年龄综合限定<sup>[16,27,28]</sup>, 适用于高、低阶地年龄相差不大时, 可将滑动速率限制在一个很小的范围之内. 我们认为, 在正常阶地形成过程中, 低一级阶地的终积年龄应该为阶地坎最终形成年龄, 阶地形成后遭受侵蚀除外; 在无法确定时, 高一阶地年龄可用来代表阶地坎可能年龄的最大值. 同时, 在断裂带上尽可能多选一些观测点, 通过最小二乘法来拟合断裂带的长期滑动速率<sup>[9]</sup>.

古地震方法主要通过  $R_x=D/(S-C)$ <sup>[29]</sup> 公式获得, 式中  $R_x$  为地震的平均复发间隔,  $D$  为一次地震事件中的位错量,  $S$  为长期滑动速率,  $C$  为构造蠕滑速率(假设为 0, 除非有历史的蠕滑记录), 简化为  $S=D/R_x$ . 古地震方法可以获得古地震复发序列, 从而获得古地震事件的平均复发周期  $R_x$ , 通过调查可以获得断裂单次地震产生的位移  $D$ (可能为最大值), 从而获得断裂的滑动速率. 这种方法要求古地震复发序列比较完整, 近期地表破裂型地震事件需要完整记录, 否则复发周期变大, 造成滑动速率偏小.

这两种方法可以结合起来共同验证断裂长期滑动速率的可靠性. 玛沁和玛曲段断裂沿线断错地貌十分发育, 保存完好, 记录了晚第四纪以来断裂的断错历史. 研究区属于黄河上游汇水区, 河流的侵蚀速度较大, 河道较直, 低阶地的年龄更接近断裂累积位移的起始年龄<sup>[16]</sup>. 如果没有低阶地的年龄, 以高阶地的年龄来计算出最小值, 恢复断裂晚第四纪断错过程, 计算平均滑动速率.

## 2.1 玛沁段

玛沁段西起阳靠沟西侧, 向东经日让、东倾沟、桑曲河、大武滩和大武牧场北侧至肯定那东, 走向 $290^{\circ}\sim 300^{\circ}$ , 长约 110 km, 断错地貌现象发育. 我们对大武滩桑曲河右岸和玛沁东 2.1 km 等观测点(1 和 2)进行了详细分析研究(图 1).

### 2.1.1 大武滩桑曲河右岸观测点( $34^{\circ}28'30.2''N$ , $100^{\circ}11'39.1''E$ )

断裂在该处走向 $285^{\circ}$ , 切割大武滩桑曲河  $T_2$  阶地, 形成北高南低的断层陡坎, 陡坎南侧有地震鼓包带, 其中较大的地震鼓包长约 60 m, 宽 10 m, 高 1 m, 长轴方位角 $120^{\circ}$ , 与断裂走向夹角为 $15^{\circ}$ <sup>[11]</sup>. 在分辨率为 0.6 m 的 Quickbird 影像上获得断裂两侧桑曲河  $T_2/T_0$  阶地坎被左旋错动了( $85\pm 5$ ) m(图 2(a)~(c)). 通过全站仪实测, 断层陡坎高 4.5 m(图 2(d)).

$T_2$  拔河高度为 10 m, 具有二元沉积结构, 在断层陡坎南北两侧的  $T_2$  阶地剖面上分别取了释光样品, 在断层北盘距离地表 35 cm 的土黄色含砾粘土质粉砂层与砾石层交接部位采取的粉砂样品的光释光年龄为( $7.1\pm 0.6$ ) ka(图 2(e)); 在断层南盘的  $T_2$  距离地表 50 cm 的土黄色含砾粘土质粉砂层与砾石层交接部位采集到的粉砂样品, 其光释光年龄为( $7.7\pm 0.6$ ) ka(图 2(f)); 取二者的平均值来代表  $T_2$  阶地形成的年龄. 由于该处桑曲河  $T_1$  并不发育, 断裂左旋位移为  $T_2$  形成以来的累积位移, 获得观测点全新世早期以来水平滑动速率为( $11.5\pm 1.2$ ) mm/a, 垂直滑动速率为( $0.6\pm 0.1$ ) mm/a. 这一左旋滑动速率值与肯定那东用冰碛物左旋位移推算得到的断裂滑动速率一致<sup>[9]</sup>.

### 2.1.2 玛沁东 2.1 km 观测点( $34^{\circ}26'49.2''N$ , $100^{\circ}17'34.6''E$ )

断裂穿过玛沁到甘德的公路后展布在玛沁盆地北缘, 在玛沁县城东侧 2.1 km 处( $100^{\circ}17'33.8''E$ ,

$34^{\circ}26'48''N$ )将一基岩山脊断错形成闸门脊(图 3(a)和(b)), 在其北侧由于下雨积水存在一个地势低洼的断塞塘, 并将横穿断裂的冲沟沟壁断错. 利用全站仪实测, 获得冲洪积扇上冲沟沟壁  $T_1/T_0$  左旋断错( $15\pm 0.5$ ) m(图 3(c)和(d)). 在冲沟东侧断裂表现为两条相向的断层陡坎形成断层沟槽, 并有断层泉出露. 在冲沟东侧沟壁,  $T_1$  阶地剖面距地表 50 cm 砾石层顶部灰黑色粘土层中的木炭样品经测定其  $^{14}C$  年龄为 1327~1409 cal a BP(图 3(e)), 求得全新世末期左旋滑动速率( $11.0\pm 0.5$ ) mm/a.

## 2.2 西贡周断裂交汇区

东昆仑断裂带在该处走向 $280^{\circ}\sim 290^{\circ}$ , 倾向南西, 倾角 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ , 长约 30 km, 在莫哈汤南侧( $34^{\circ}15'32.8''N$ ,  $100^{\circ}56'24.2''E$ )和西贡周西侧分别与阿万仓断裂的东、西两支相交. 阿万仓断裂东支走向 $320^{\circ}$ , 与东昆仑断裂带 $40^{\circ}$ 交汇, 在 ETM 卫星影像上线性特征明显, 向南东方向延伸过黄河, 至采日玛一带进入若尔盖草地逐渐消失, 全长约 180 km, 倾向 SW, 在地貌上表现为明显的断层陡坎、断陷槽、切割冲积扇和水系, 形成断头沟和断尾沟, 断层陡坎一般高 2 m, 最高达 15 m<sup>[12]</sup>. 我们对西贡周和莫哈汤南侧等观测点(3 和 4)进行了详细研究(图 1).

### 2.2.1 西贡周观测点( $34^{\circ}17'20.6''N$ , $100^{\circ}47'40.8''E$ )

断裂将西贡周谷地内冲洪积面上的冲沟断错, 形成“眉脊”式断层陡坎和断塞塘. 在谷地东侧, 断裂表现为几条分支的羽列, 左旋左阶, 重叠距长约 4 km(图 4(a)), 断错了华耳科河 II 级阶地, 造成华耳科河  $T_2/T_1$  阶地坎被左旋错动了( $140\pm 10$ ) m(图 4(b)~(d)), 并在山前形成南高北低的断层陡坎, 断层陡坎高约 3 m.

在华耳科河  $T_2$  距地表 1.3 m 的砾石层顶部上覆盖条带状土黄色粉细砂层采取释光样品, 获得  $T_2$  阶地年龄为( $53.5\pm 6.3$ ) ka(图 4(e)); 在华耳科河  $T_1$  距地表 0.4 m 的砂砾石层顶部的土黄色粉砂层中取释光样品, 获得  $T_1$  阶地的年龄为( $18.8\pm 1.6$ ) ka(图 4(f)), 从而获得该处晚更新晚期以来断裂左旋滑动速率为( $7.4\pm 0.8$ ) mm/a.

### 2.2.2 莫哈汤南侧观测点

莫哈汤南测观测点( $34^{\circ}15'39.1''N$ ,  $100^{\circ}56'04.9''E$ )附近一条冲沟自南向北流, 在山前形成较大的冲洪积扇, 断裂将该洪积扇面断错, 形成南高北低的断层

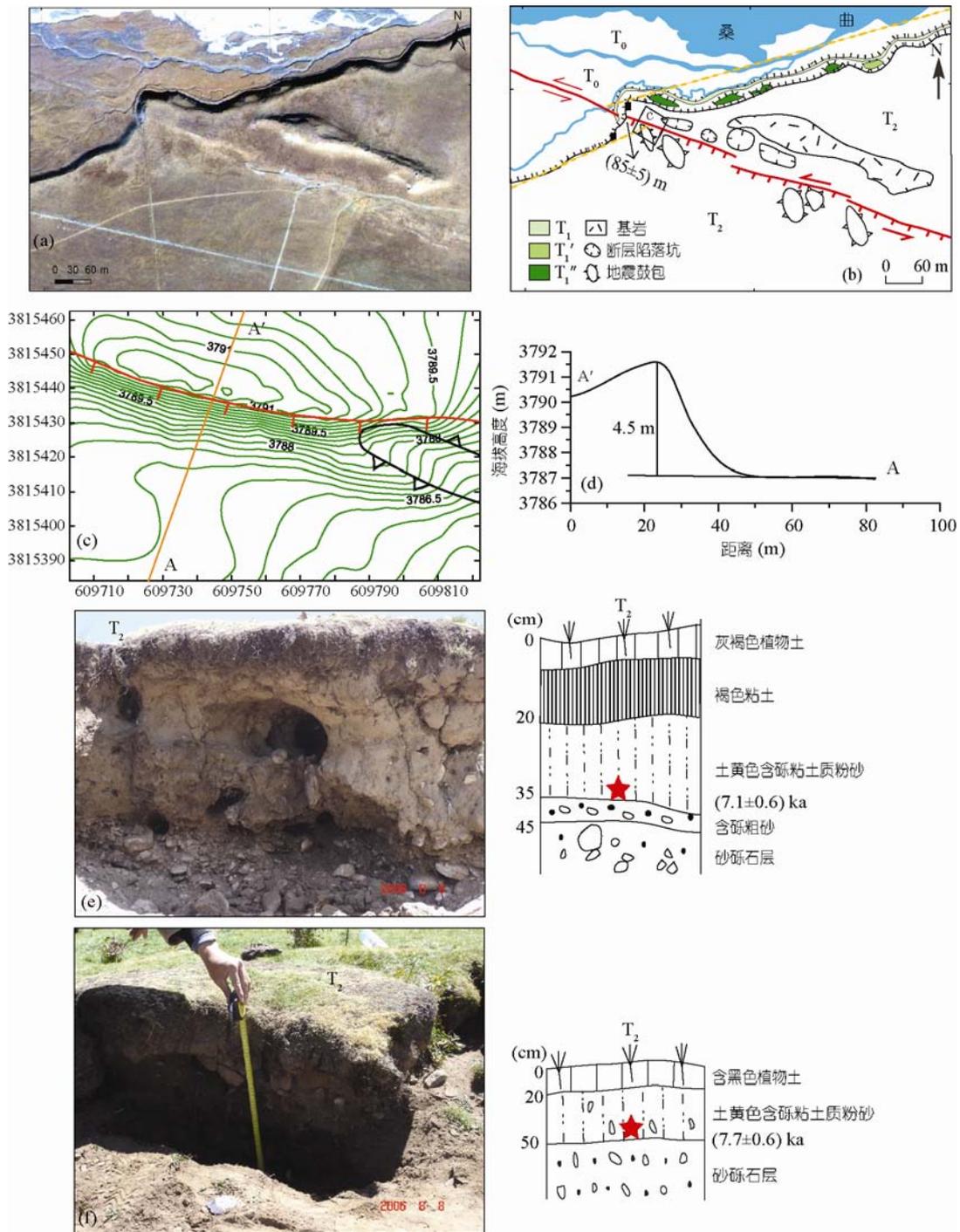


图2 桑曲河东岸阶地断错地貌图

位置见图1 观测点1. (a) Quickbird 卫星影像; (b) 构造地貌解译图; (c) 实测断错地貌平面图; (d) 断层陡坎剖面图; (e) 断层北侧 T<sub>2</sub> 阶地采样剖面图, 镜向 E; (f) 断层南侧 T<sub>2</sub> 阶地采样剖面图, 镜向 SE

陡坎, 高约(11±1) m, 并将冲洪积扇上的冲沟阶地断错, 造成 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub> 阶地坎左旋位移(51±1) m(图 5(a)~(c)).

D<sub>2</sub> 阶地海拔高度 8 m, 阶地剖面显示明显的二元沉积结构, 在断层北盘 D<sub>2</sub> 距离地表 1.6 m 的砂砾石层顶部

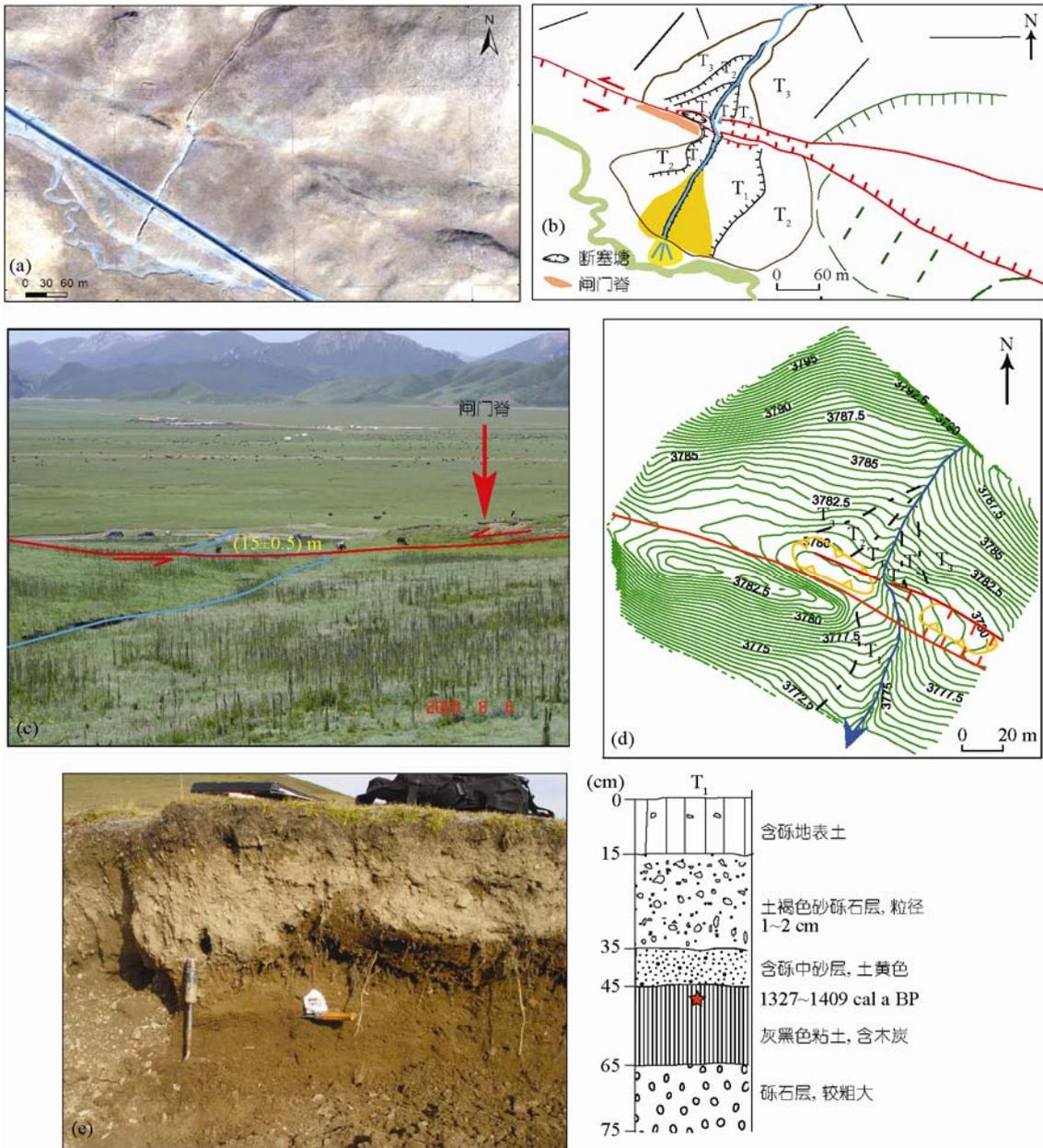


图3 玛沁东 2.1 km 处断错地貌图

位置见图1 观测点2. (a) 玛沁东 Quickbird 卫星影像; (b) 构造地貌解译图; (c) 断裂断错基岩形成闸门脊, 并将一条冲沟壁左旋断错(15±0.5) m, 镜向 S; (d) 实测地貌图; (e) 冲沟东侧沟壁 T<sub>1</sub> 阶地采样剖面图, 镜向 E

的褐黄色粉砂质粘土中取光释光样品, 经测定可知该 D<sub>2</sub> 洪积台地的年龄为(7.47±0.29) ka(图 5(d)). 利用北盘 D<sub>2</sub> 的光释光年龄数据, 获得该处全新世早期以来左旋滑动速率为(6.8±0.3) mm/a, 垂直滑动速率为(1.2±0.1) mm/a.

### 2.3 玛曲段

玛曲段西起莫哈汤南侧观测点, 即与阿万仓断裂交汇的三联点东侧, 沿西科河上游, 经哈拉汶、西科河羊场、唐地、克生托洛和玛曲县城南侧至若尔盖盆地东侧. 走向 280°~305°, 倾向南西, 倾角 60°~75°,

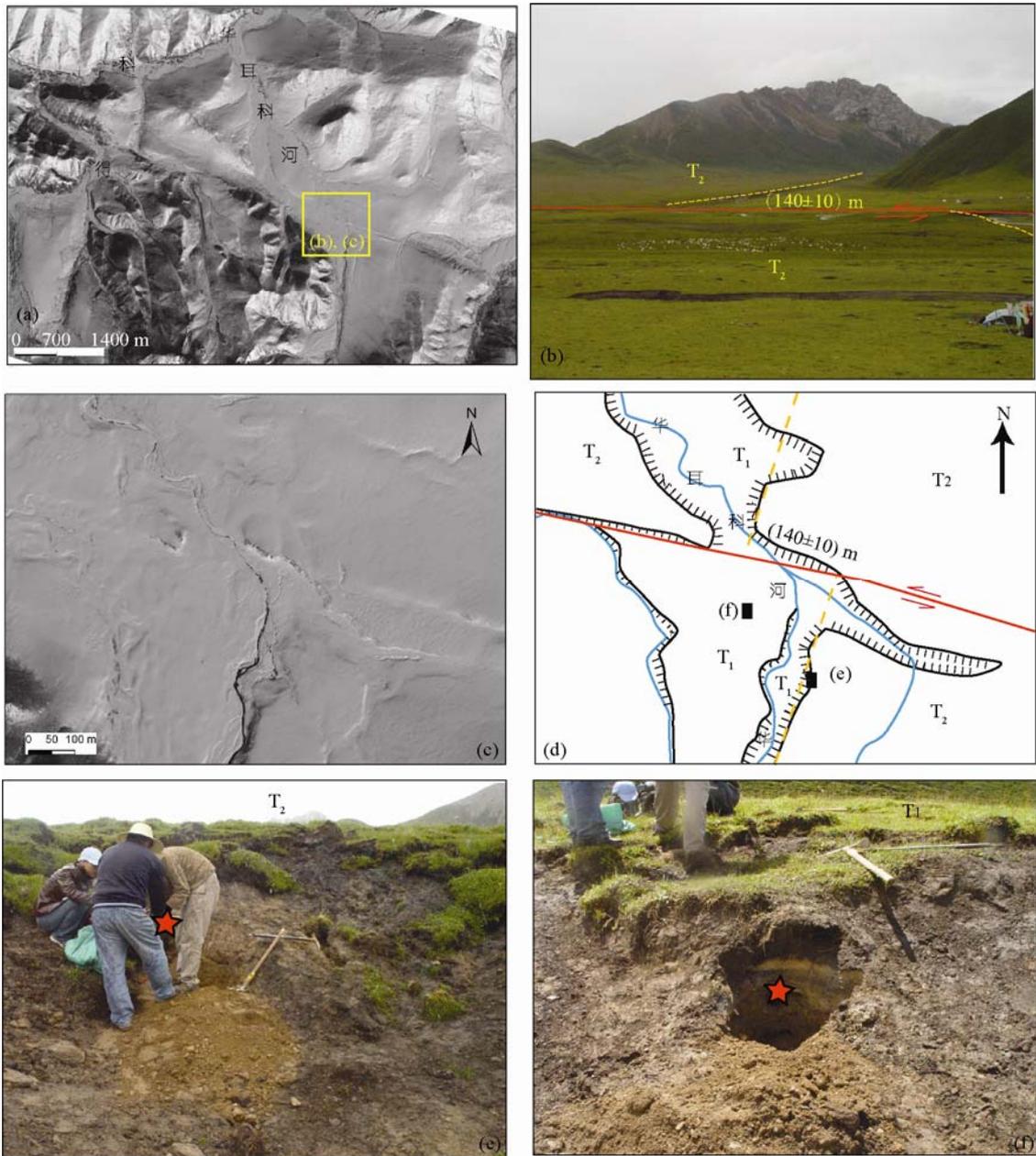


图4 西贡周西侧断错地貌图

位置见图1观测点3。(a) 西贡周 Worldview 卫星影像; (b) 西贡周华耳科 T<sub>2</sub>/T<sub>1</sub> 阶地坎被断错(140±10) m, 镜向 SE; (c) 华耳科河 Worldview 卫星影像; (d) 构造地貌解译图; (e) T<sub>2</sub> 阶地采样剖面, 镜向 NE; (f) T<sub>1</sub> 阶地采样剖面, 镜向 N

长约 110 km, 沿断裂有一系列古地震形变遗迹, 为一条发震断层<sup>[5]</sup>, 显示出具有左旋走滑和倾滑两种运动分量. 我们对棍曲西侧和棍曲等观测点(5 和 6)进行了详细研究(图 1).

### 2.3.1 棍曲西侧观测点 (34°00'24.8"N, 102°00'47.7"E)

在棍曲西侧, 断裂展布在黄河北岸的 I 级阶地上, 表现为单条断层陡坎, 将棍曲西侧一条冲沟的两

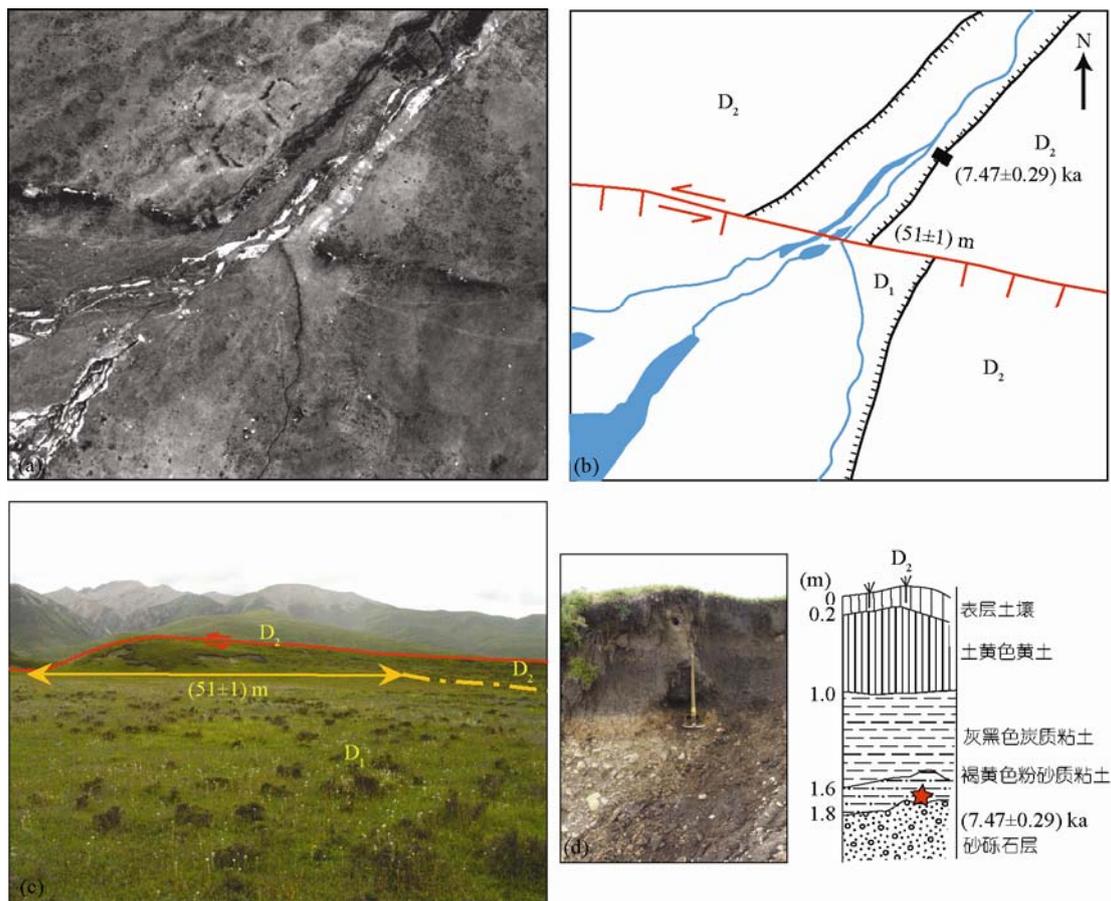


图 5 莫哈汤南侧观测点大冲沟断错地貌图

位置见图 1 观测点 4. (a) Worldview 卫星影像; (b) 构造地貌解译图; (c) 冲沟 D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub> 阶地坎被左旋断错(51±1) m, 并形成南高北低的断层陡坎, 高(11±1) m, 镜向 S; (d) 断层北盘 D<sub>2</sub> 阶地的采样剖面, 镜向 E

条小支沟同步左旋断错(图 6(a)~(c)), 并伴随有正断层倾滑分量. 通过全站仪实测, 东侧支沟东壁左旋位移(19±1) m, 西壁左旋位移(15±1) m; 西侧支沟东壁左旋位移 10.3 m, 西壁约 8.3 m. 根据河流凹岸侵蚀凸岸堆积的原理, 西壁位移较好地代表冲沟沟壁的位移. 获得该处东侧支沟的左旋位移为(15±1) m, 西侧支沟的左旋位移为 8.3 m, 并形成倾向南高约 7.9 m 的断层陡坎(图 6(d)).

东侧支沟下切深度约 3 m, 在东壁的 T<sub>3</sub> 阶地面上洪积层顶部距离地表 60 cm 的深黑色古土壤层取得古土壤样品, 其 <sup>14</sup>C 年龄为 2698~2795 cal a BP(图 6(e)); 该点西侧, 可以看到冲沟 T<sub>3</sub> 阶地拔河高度为 8 m, 在距地表 60 cm 的湖沼相沉积的黑色泥炭层中采集到泥炭样品, 其 <sup>14</sup>C 年龄为 5727~5903 cal a BP(图

6(f)), 对应于断层陡坎北侧的 T<sub>3</sub> 年龄. 东侧支沟沟壁(I 级阶地)的水平位移(15±1) m, 利用断层南侧 T<sub>3</sub>(东侧支沟沟壁)的年龄, 获得断层全新世晚期以来水平滑动速率为(5.6±0.1) mm/a. 利用断层北侧 T<sub>3</sub> 的年龄可获得断裂全新世中期以来水平滑动速率为 2.7~2.6 mm/a, 与 Kirby 等<sup>[16]</sup>在该段西侧鄂尔戈斯曲获得的全新世早期以来的滑动速率(2.0±0.4) mm/a 相一致. 断裂在此处伴随有正断倾滑分量, 垂直位移为 7.9 m, 利用断层北盘 T<sub>3</sub> 的年龄, 可以获得断裂全新世中期以来的垂直滑动速率为 1.3~1.4 mm/a. 由于断层南侧的 T<sub>3</sub> 年龄代表了支沟 T<sub>1</sub> 阶地的形成年龄, 更接近位移开始累积的时间, 应该用这个最大的估计值来代表断裂在此处的滑动速率. 因此, 断裂在此处的全新世晚期以来的滑动速率为(5.6±0.1) mm/a.

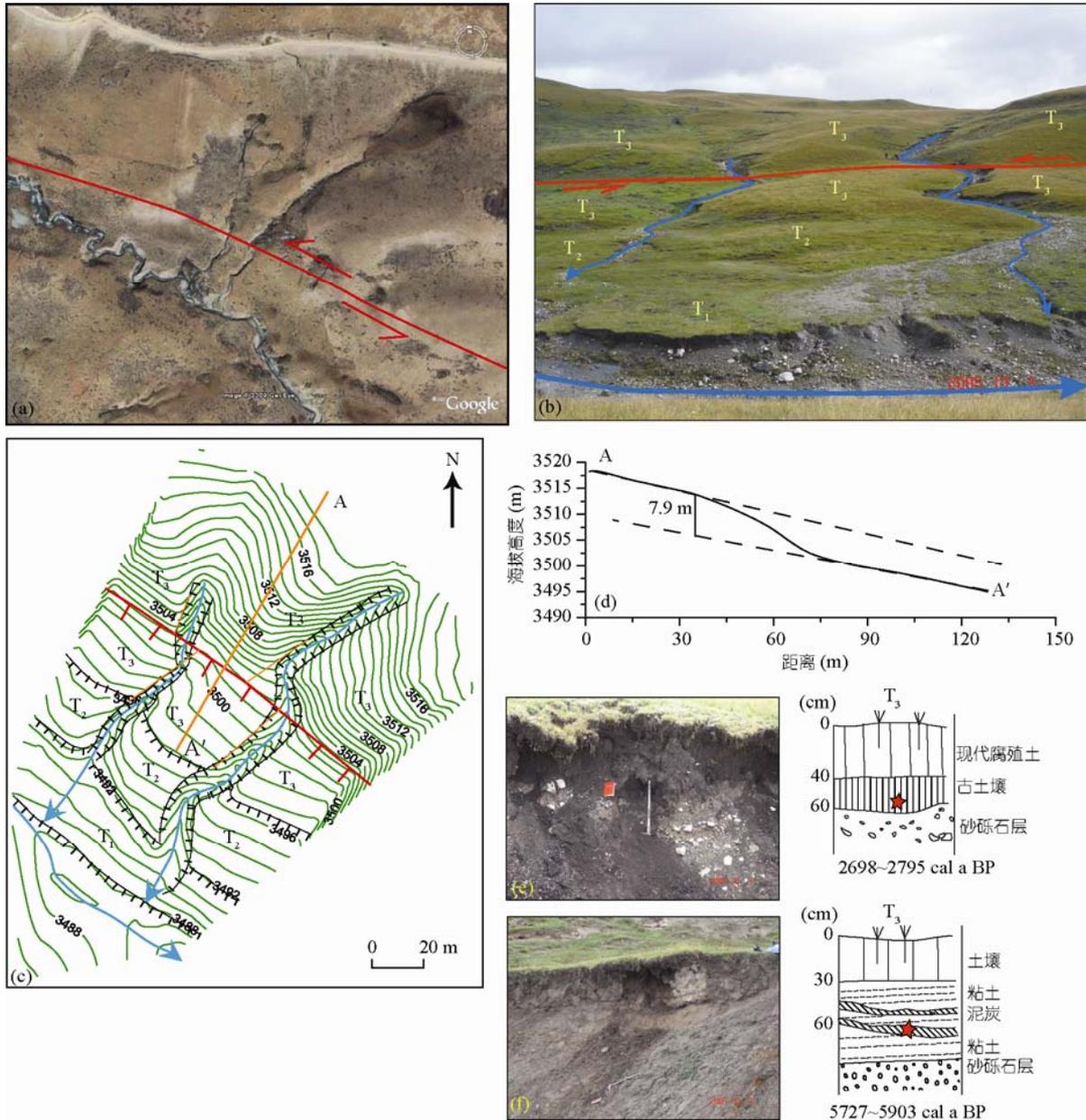


图6 棍曲西侧断错地貌图

位置见图1观测点5。(a) 卫星影像; (b) 两条冲沟同时断错地貌, 镜向NE; (c) 全站仪实测平面图; (d) 断层陡坎剖面; (e) 断层南侧T<sub>3</sub>阶地剖面(东侧支沟沟壁)剖面, 镜向E; (f) 主沟T<sub>3</sub>阶地采样剖面, 镜向N

### 2.3.2 棍曲观测点(33°59'45.6"N, 102°03'10.7"E)

棍曲为玛曲县城西侧的黄河I级阶地上的一条冲沟, 断裂将棍曲东侧的T<sub>3</sub>/T<sub>2</sub>阶地坎左旋错动(图7(a)和(b)), 同时伴有拉张分量, 形成倾向南的正断陡坎。通过用全站仪进行实测, 获得T<sub>3</sub>/T<sub>2</sub>阶地坎的左旋位移量为(75±5)m(图7(c)); 在T<sub>3</sub>阶地上截取了

断层陡坎剖面, 获得T<sub>3</sub>阶地上的断层陡坎高约2.7m(图7(d))。

在玛曲县城所在地貌面(黄河T<sub>1</sub>阶地, 相当于棍曲T<sub>3</sub>阶地)上距离地表2m的河流相砾石层中的青灰色粉砂质粘土中取得木炭样品(图7(e)), 其<sup>14</sup>C年龄为11949~12384 cal a BP。利用T<sub>3</sub>/T<sub>2</sub>的阶地坎位移

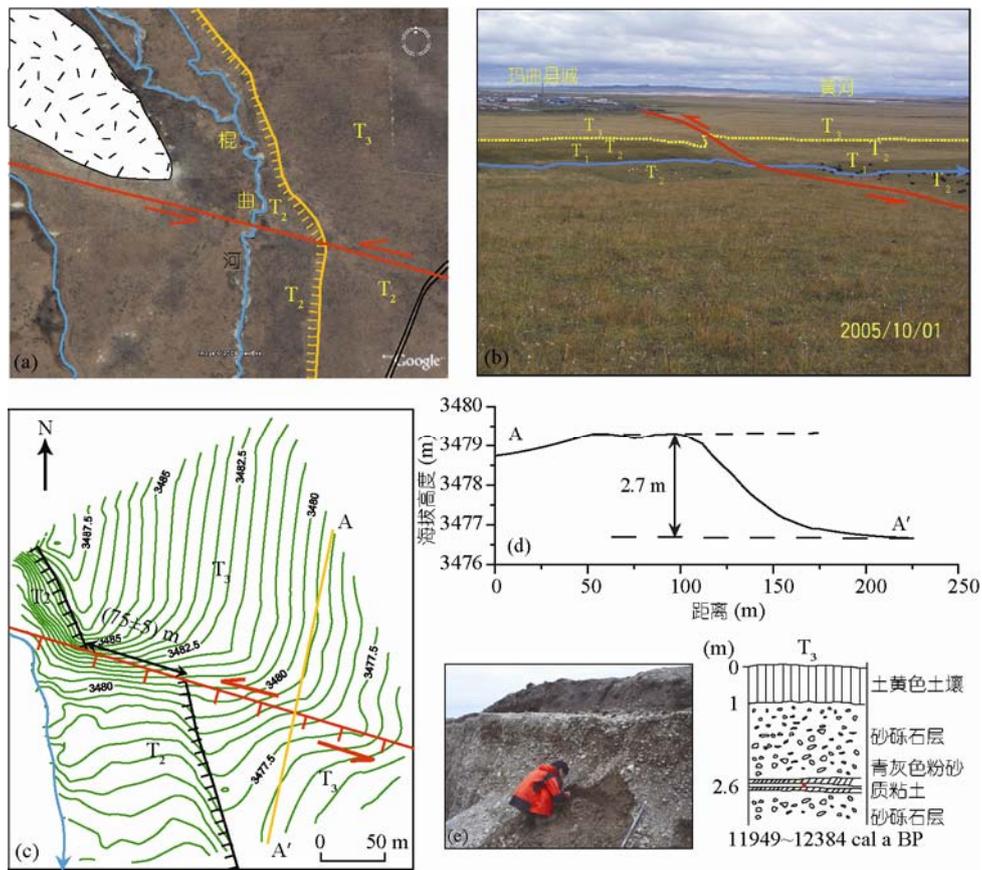


图7 棍曲东侧  $T_3/T_2$  阶地坎断错地貌图

位置见图1 观测点6。(a) 卫星影像; (b) 棍曲东侧  $T_3/T_2$  阶地坎被左旋断错(75±5) m, 镜向 SE; (c) 实测平面图; (d) 玛曲县城西南侧垃圾场揭示的阶地采样剖面, 镜向 NWW

(75±5) m 和  $T_2$  阶地的年龄, 得到此处断裂晚更新世末期以来水平滑动速率为 6.05~6.27 mm/a, 垂直滑动速率为 0.2 mm/a。

此外, Kirby 等<sup>[16]</sup>在玛曲段的肯目达和鄂尔戈斯曲通过阶地位移和低一级阶地的年龄获得的断裂水平滑动速率分别为(5±1)和(2.0±0.4) mm/a。Harkins 和 Kirby<sup>[18]</sup>在当穹  $T_2/T_4$  阶地坎测得的累积位移为(60±6) m, 通过搬运系数模拟陡坎退化来约束陡坎的年龄为 9.1~14.5 ka, 获得晚更新世晚期至全新世早期以来的水平滑动速率为(5.5±1.7) mm/a。

#### 2.4 构造运动的转换与分解

在对 3 条段落的断错量及其年代数据的搜集整理基础上<sup>[5,9,10,14,16,18]</sup>, 结合我们的野外测量数据, 拟合得到各段晚第四纪以来长期水平滑动速率(表 1)。

从表 1 中可以看到, 长期水平滑动速率从西向东

呈现阶梯状下降, 托索湖段与玛沁段的滑动速率相差不多, 大约递减了 2 mm; 递减的滑动速率可能转换为中铁断裂的挤压逆冲或阿尼玛卿山的地壳缩短。西贡周断层交汇区水平滑动速率下降了 2 mm/a; 玛曲段水平滑动速率下降了 2 mm/a(图 8), 水平滑动速率的下降主要集中在西贡周断裂交汇区的两侧, 我们推测断裂速率下降的原因与阿尔金断裂带滑动速率从南西往北东不断递减<sup>[24]</sup>类似, 三联点东西两侧左旋滑动速率的减少量转换、分解到阿万仓断裂上。通过对玛沁段、玛曲段和阿万仓断裂进行滑动矢量分解<sup>[24,30]</sup>, 得到阿万仓断裂西支的左旋滑动速率为 2.4 mm/a(图 9(a)); 东支的滑动速率为 2.7 mm/a(图 9(b)); 滑动分解后, 东支的左旋滑动速率为 1.4 mm/a, 地壳水平缩短速率为 2.3 mm/a; 阿万仓断裂西支和东支构成一个滑动分解模式(图 9(c))<sup>[31]</sup>, 断裂的斜滑变形分解成西支的纯走滑运动和东支的斜滑运动, 向南

表1 东昆仑断裂带中东部长期滑动速率(mm/a)

段落名称	水平滑动速率	垂直滑动速率
托索湖段	11.2±1.2	1.2±0.2
玛沁段	9.3±2	0.7±0.1
西贡周断层交汇区	7.4±1	1.2±0.1
玛曲段	4.9±1.3	0.3

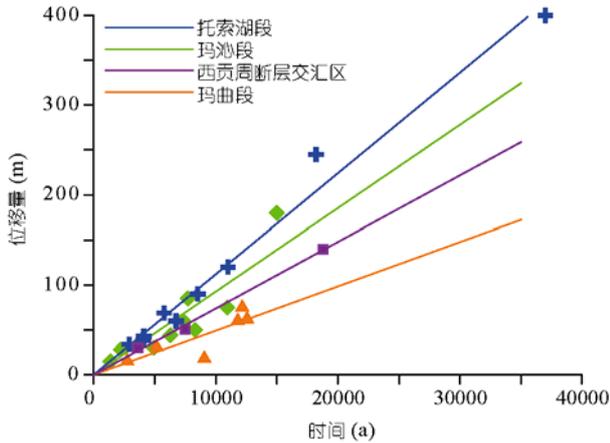


图8 东昆仑断裂带中东部水平位移量以及起始时间与滑动速率拟合值的关系

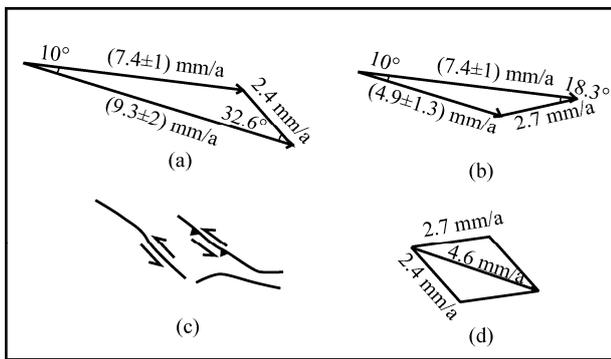


图9 东昆仑断裂带中东部各段水平滑动速率及其与阿万仓断裂之间的构造转换示意图

东合成为一条断裂。通过矢量合成, 断裂南西盘相对北东盘的滑动速率为 4.6 mm/a, 滑动方向为 112.1°(图 9(d))。

### 3 地震破裂分段性与分段特征

野外构造地貌考察表明, 东昆仑断裂带中东部 3 段均发生过地表破裂型地震事件, 但最晚一次地震地表破裂的离逝时间和累积断错地貌可辨识程度等

有显著差别, 具有明显的地震破裂分段特征。

#### 3.1 托索湖段

在近 100 多年的历史记载中, 托索湖段发生过 3 次地震, 1937 年托索湖  $M7.5$  级地震在地表造成了 150 km<sup>[17]</sup>, 180 km<sup>[5,32,33]</sup> 或 230~300 km 的地表破裂带<sup>[13,34]</sup>, 最大水平左旋位移达到 7~8 m<sup>[5,11,13,33]</sup>, 最大垂直位移达到 2~3.5 m<sup>[5,13,33]</sup>。1963 年洪水川  $M7.0$  级地震地表破裂带长 40 km<sup>[9,17]</sup>。虽然关于 1937 年托索湖  $M7.5$  级地震地表破裂长度问题依然存在分歧, 但最新的地表破裂从阿尼玛卿山脚下延续到阿拉克湖西侧的怀德水外是大家认可的<sup>[5,9,13,17,32~34]</sup>。1937 年地震地表破裂虽然已经过去了约 70 a, 由于该区地处青藏高原腹地, 人烟稀少, 破裂形迹仍清晰可辨, 主要表现为地震断层陡坎、地震鼓包、地震凹坑、地震裂缝、地震崩塌、断塞塘和冲沟及其阶地的断错<sup>[5,13,17,32~34]</sup>。年札河阶地发生不同程度的位错,  $T_0/T_0$  阶地坎水平位移为 4.1~4.4 m,  $T_1/T_0$  阶地坎水平位移(11.3±0.5) m,  $T_1'/T_1$  阶地坎水平位移(57±2) m,  $T_1''/T_1''$  阶地坎水平位移(90±10) m<sup>[9]</sup>。通过对托索湖西侧古地震探槽的开挖<sup>[5,17]</sup>, 获得托索湖段上的古地震有 9 次, 即公元 1937, 1270~1390, 650~770 和 0~120 年间, 以及公元前 1495~1405, 3350~3020, 5210~4960, 6210~6030 和 7585~7515, 距今 2000 a 以来的复发周期为(630±130) a。综合分析, 断裂的复发间隔大约为 600~2000 a。

1937 年托索湖  $M7.5$  级地震的最大水平位移量为 7~8 m, 2000 a 以来的复发周期为(630±130) a, 利用复发周期、滑动速率和位移之间的关系式  $S=D/R$ <sup>[29]</sup>, 我们取 1937 年  $M7.5$  级地震水平位移的最大值 7 和 8 m 的算术平均值 7.5 m, 可以得到断裂的滑动速率大约为(11.9±2.5) mm/a, 比年札河和下大武处构造地貌获得的断裂滑动速率要大一些, 但与东昆仑断裂带中部均一的滑动速率(11.5±2) mm/a 相一致<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 玛沁段

玛沁段也发现了近代地表破裂, 玛沁县城南侧的大武滩上可以看到地震鼓包(图 2(b))。格曲河东侧的 II 级阶地上可以看到高约 50 cm 的断层陡坎(图 10(a)), 陡坎北侧有长约 2 m, 走向 NNW 的地震鼓包, 新鲜程度不及 1937 年的地表破裂, 破裂带宽 3~10 m(图 10(b))。果姆河东侧的  $T_1/T_0$  阶地坎左旋断错位移为 4 m(图 10(c)),  $T_1$  的 <sup>14</sup>C 年龄为 514~534 cal a BP。

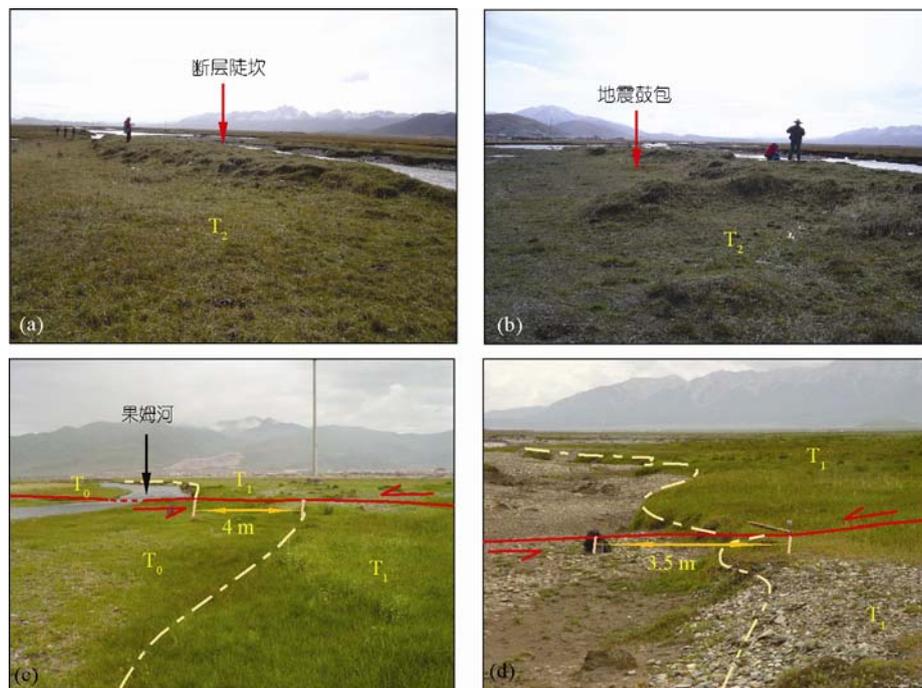


图 10 玛沁段典型地表破裂及其阶地断错地貌

(a) 格曲河北岸  $T_2$  阶地上的断层陡坎, 镜向 SE; (b) 断层陡坎南侧的地震鼓包, 镜向 SE; (c) 格曲河西侧的果姆河  $T_1/T_0$  阶地坎被左旋断错 4 m; 镜向 NE; (d) 格曲河西侧  $T_1/T_0$  阶地被左旋断错 3.5 m, 镜向 S

格曲河西侧  $T_1/T_0$  阶地坎被左旋断错 3.5 m (图 10(d)),  $T_1$  的  $^{14}\text{C}$  年龄为 511~530 cal a BP, 因此可以肯定大约 500 a 以来该处至少发生过一次古地震事件。

综合前人资料<sup>[5,11]</sup>和在玛沁开挖的 5 个探槽<sup>[35]</sup>, 获得玛沁段全新世早期以来主要发生了 7 次古地震事件, 即 514~534 cal a BP 以来, (1070±180) a BP, (1689~1736) cal a BP~(2.0±0.3) ka BP, (2.6±0.2) ka BP~(4612~4709) cal a BP, (6.6±0.7)~(7.2±0.8) ka BP, (7971~8050)~(8451~8632) cal a BP 和 (9.9±1.0)~(10.1±1.0) ka BP. 另藏族史诗《格萨尔王传》中, 出现了很多次“山崩地裂”的描写, 虽然有些神话色彩 (<http://www.tianyabook.com/gesaer/index.htm>), 但格萨尔王生于 1037 年, 卒于 1124 年, 正好在第二次事件发生的年龄范围内。全新世早期以来古地震复发周期为 500~1000 a, 2000 a 以来古地震复发周期为 (600±100) a。

大武滩上果姆河  $T_1/T_0$  阶地坎的水平左旋位移为 4 m, 格曲河西岸  $T_1/T_0$  阶地坎水平左旋位移为 3.5 m, 通过这些可以获得断裂的单次位移为 (4±0.5) m, 利用公式  $S=D/R$ <sup>[29]</sup> 及最近发生的 3 次古地震的复发周

期 (600±100) a, 获得断裂的水平滑动速率为 (7±1) mm/a, 比构造地貌获得的长期滑动速率稍小一点。

### 3.3 玛曲段

与托索湖和玛沁段相比较, 玛曲段的地震活动性明显要弱, 但在地表存在着比较典型的断错地貌现象, 主要有断层陡坎、断层泉和冲洪积扇及其冲沟阶地错动, 很少见到断塞塘、地震鼓包和地裂缝等地表破裂现象。在玛曲县城西侧的垃圾场附近发现了断层露头, 可见厚约 3 m 左右的土黄色次生黄土、黑色淤泥质土层与阶地砾石层断层接触, 主断层走向 295°, 倾向 N, 倾角 70°。通过对该剖面揭露的淤泥质土层互层的土壤层进行采样测量<sup>[19]</sup>, 并综合玛曲西侧的探槽剖面<sup>[14,19]</sup>, 获得玛曲段的古地震事件共有 7 次, 分别为: 1055~1524 a BP 以来, (1210±40)~(1730±50), (1730±50)~(2530±40), (2530±40)~(4850±40), (4850±40)~(7460±60), (7460±60)~(8690±40) 和 9000~10000 a BP, 最近 3 次的古地震复发间隔为 1000 a, 前 4 次的古地震复发间隔为 1500~2000 a。

该点西侧的最新地表破裂造成的平均水平位移为 3 m, 通过最近 3 次的大震复发间隔 1000 a, 计算

出来的滑动速率为  $3 \text{ mm/a}^{[19]}$ , 比构造地貌方法获得的长期滑动( $4.9 \pm 1.3$ )  $\text{mm/a}$  偏小一点。

从上述古地震资料可知, 玛曲段最晚一次地震破裂时间在 1055~1524 cal a BP, 玛沁段为 514~534 cal a BP, 托索湖段为公元 1937 年, 这种时空顺序显示出沿东昆仑断裂带的地表破裂具有从南东向北西向迁移的特征, 很可能说明上述 3 段落之间存在着强相互作用, 南东段的同震错动对相邻段产生应力-应变加载, 触发或加速相邻段落上地震的发生。依次类推, 造成地震破裂沿断裂带有规律的时空-迁移, 这种现象已在理塘断裂<sup>[36]</sup>、San Andreas 断裂<sup>[37]</sup>和 North Anatolian 断裂<sup>[38]</sup>观察到。

### 3.4 地震破裂分段特征

综上所述, 东昆仑断裂带中东部是一条具有发生地表破裂型地震能力的活动断裂带, 其 3 段最晚地震地表破裂的离逝时间自西向东越来越久远, 依据地震破裂段落划分原则<sup>[39-42]</sup>, 托索湖段、玛沁段和玛曲段均为独立的地震破裂段落。托索湖段与玛沁段之间形成挤压双弯曲, 走向分别偏转了  $20^\circ$  和  $30^\circ$ , 造成长  $40 \text{ km}$ , 宽  $10 \text{ km}$  的玛积雪山隆起, 可作为障碍体和应力的集中点, 可作为地表破裂的终止点<sup>[43]</sup>, 如 1937 年托索湖  $M_{7.5}$  级地震地表破裂的东端点<sup>[5,13]</sup>。玛沁段与玛曲段之间长  $30 \text{ km}$  的西贡周断层交汇区, 在西贡周西侧和莫哈汤南侧分别与阿万仓断裂相交, 夹角  $40^\circ$ , 是造成此地震破裂分段的构造原因(图 1)。玛曲段与塔藏段在若尔盖以北形成一个较大的挤压弯曲, 进入岷山隆起区后, 不到  $100 \text{ km}$  断裂走向偏转了  $60^\circ$ , 成为近南北向, 形成向北东方向凸出的弧形, 并与龙日坝、岷江和虎牙断裂等相交并发生构造转换, 东昆仑断裂带的走滑运动转换为岷江-龙门山断裂带区域隆升<sup>[44-46]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 滑动速率的可靠性讨论

在单次地表破裂位移已知的情况下, 如果古地震研究程度较高, 古地震复发序列比较完整, 得到古地震的复发周期较为准确, 断裂的滑动速率就比较可靠; 如果古地震研究程度不高, 古地震复发序列不够完整, 得到的复发周期就偏大<sup>[11,15]</sup>, 造成滑动速率偏小。将构造地貌方法和古地震复发间隔法得到的

滑动速率相比较, 我们发现在用最大位移作为  $D$  来计算的时候, 两种方法在托索湖段得到的滑动速率几乎一致; 用平均位移作为  $D$  来计算, 古地震方法得到的滑动速率在玛沁和玛曲段比构造地貌法的都要偏小一些。有可能最大位移值反映了地震能量释放的信息, 与地震能量累积及释放周期有关, 也就是与复发周期密切相关。两种方法得到的滑动速率相比较而言, 都比较可靠, 构造地貌方法需要在断裂带上选择较多的观测点, 拟合一个长期的滑动速率, 可以减少因位移和测年等造成的不确定性; 古地震方法中只有获得比较完整的大震序列和断裂带上最新地表破裂的位移, 才可以得到较为可靠的滑动速率。

### 4.2 最新构造运动分解作用

无论是构造地貌还是古地震方法计算的滑动速率, 东昆仑断裂带中东部滑动速率都呈梯度下降, 下降主要集中在断裂走向的弯曲和横向构造的交汇部位, 与断裂的几何结构变化一一对应。托索湖段与玛沁段之间水平滑动速率下降大约有  $2 \text{ mm/a}$ , 转换为与其相交的中铁断裂或者阿尼玛卿山山体隆升。断裂通过西贡周断层交汇区后, 滑动速率锐减了大约  $4 \text{ mm/a}$ , 锐减的部分主要转换到阿万仓断裂带上的逆冲和左旋走滑。通过对构造转换的矢量分解<sup>[24,30]</sup>, 得到阿万仓断裂西支的左旋滑动速率为  $2.4 \text{ mm/a}$ , 东支的左旋滑动速率为  $1.4 \text{ mm/a}$ , 地壳水平缩短速率为  $2.3 \text{ mm/a}$ ; 阿万仓断裂带西支和东支构成一个滑动分解模式<sup>[31]</sup>, 断裂的斜滑变形分解成西支的纯走滑运动和东支的斜滑运动, 断裂向南东合成为一条断裂, 通过矢量合成, 断裂西南盘相对北东盘的滑动速率为  $4.6 \text{ mm/a}$ , 滑动方向为  $112.1^\circ$ 。

### 4.3 滑动速率梯度递减的构造意义

围绕青藏高原的现今变形模式有大陆逃逸说<sup>[47-49]</sup>和地壳增厚说<sup>[50,51]</sup>两种很重要的假说, 其争论的焦点都集中在青藏高原内部大型走滑断裂和周边断裂的滑动速率上。东昆仑断裂带作为青藏高原北部一条重要的活动断裂带, 在青藏高原内部(玛沁以西)以大约  $11 \text{ mm/a}$  速率向东侧向滑移, 过阿尼玛卿山挤压双弯曲后, 水平滑动速率递减了  $2 \text{ mm/a}$ , 仍以侧向挤出为主; 过西贡周断层交汇区后, 水平滑动速率递减了  $4 \text{ mm/a}$ , 玛曲县城西侧棍曲全新世早期以来的水平左旋滑动速率大约为  $5 \text{ mm/a}$ 。由此可

见, 东昆仑中东部水平滑动速率的确存在明显的梯度<sup>[16]</sup>, 但是并没有那么快(150 km 内从 $(12.5 \pm 2.5)$  mm/a 迅速衰减到 2 mm/a<sup>[16]</sup>). 往东穿过若尔盖盆地, 在塔藏段, 断裂走向在不到 100 km 的范围内向北偏转了 60°, 变为近南北向, 形成向北东方向凸出的弧形挤压弯曲, 断层走向变化产生的应力集中导致地壳缩短, 同时与龙日坝断裂、岷江断裂和虎牙断裂相交, 形成帚状散开的东昆仑断裂带尾端收缩构造(图 1). 龙日坝断裂的水平右旋滑动速率为 $(5.4 \pm 2.0)$  mm/a, 垂直滑动速率为 0.7 mm/a, 地壳缩短率为 0.55 mm/a<sup>[52]</sup>; 岷江断裂的左旋水平滑动速率 $<1$  mm/a, 岷山水平缩短速率大约为 2~3 mm/a<sup>[44]</sup>; 虎牙断裂的平均左旋滑动速率为 1.4 mm/a, 垂直滑动速率为 0.3 mm/a<sup>[53]</sup>. 通过这些断裂的滑动速率, 我们推测东昆仑断裂带与阿尔金和海原断裂带一样, 在尾端发生了构造转换, 转换为岷山-龙门山地区横向构造的地壳缩短<sup>[44-46]</sup>, 在青藏高原边缘被地壳缩短所吸收. 东昆仑断裂带中东部的构造运动转换是驱使青藏高原周边抬升的动力来源<sup>[48]</sup>, 也是四川盆地与青藏高原边界的龙门山断裂带发生 2008 年 5.12 汶川  $M_s 8.0$  级地震的动力来源<sup>[49]</sup>.

#### 4.4 地球物理场特征

通过深地震反射剖面、大地电磁剖面、深地震测深剖面和接收函数反演 S 波速度结构, 得知东昆仑断裂带(玛沁断裂)是一条岩石圈断裂, 是巴颜喀拉与秦祁昆地块之间的分界断裂, 为莫霍面和 C 界面复杂的过渡带; 莫霍面为厚达 20 km 以上由多个叠层构成

的复杂壳幔过渡带, 地壳内没有明显的低阻层, 自浅而深似有一个高阻的岩墙将巴颜喀拉和秦祁昆地块两个区块分隔<sup>[54-61]</sup>. 库赛湖-玛沁断裂在 P 波和 S 波速度分布上均显示向南倾的明显低速条带, 延伸深度达 8 km, 断裂两侧基底埋深急剧变化<sup>[62]</sup>. 断裂与昆仑山重力梯度带和昆仑山南缘磁力梯度带大体一致, 两侧地壳厚度相差 7~10 km, 阿尼玛卿山一带为线状分布的链状异常带<sup>[5]</sup>.

## 5 结论

东昆仑断裂带中东部主要由托索湖段、玛沁段和玛曲段组成, 几何结构特征较为复杂, 阿尼玛卿山挤压双弯曲、西贡周断层交汇区、塔藏单弯曲和岷山马尾状散开构造, 形成了东昆仑断裂带特殊的尾端构造及其构造地貌现象. 通过构造地貌方法和古地震方法, 获得断裂的滑动速率都是自西向东呈梯级递减, 且与其独特的几何结构、挤压弯曲和横向断裂交汇一一对应. 东昆仑断裂带向东延伸将青藏高原内部动力转换到了青藏高原周边, 是周边区域抬升的主要动力来源. 3 条断裂的近 2000 a 以来的古地震复发间隔自西向东分别为 $(630 \pm 130)$ ,  $(600 \pm 100)$ 和 1000 a, 且现今的离逝时间分别为 74, 500 和 1000 a. 玛曲段和玛沁段的离逝时间已经超出和接近其复发周期, 同时 2008 年汶川  $M_s 8.0$  级地震对玛沁和玛曲段造成了应力的加载<sup>[63,64]</sup>, 提高了该区的地震危险性, 因此玛沁和玛曲段的地震危险性需要引起重视.

**致谢** 法国地球物理研究所的 Yann Klinger 教授参加了野外考察, 考察期间与作者的交流和讨论使作者深受启发, 特此致谢; 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

## 参考文献

- 1 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 1020-1030
- 2 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年). 北京: 地震出版社, 1995. 3-471
- 3 中国地震局震害防御司. 中国历史强震目录(公元前 1912—公元 1990 年,  $M_s \geq 4.7$ ). 北京: 中国科学技术出版社, 1999. 59-233
- 4 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库赛湖地震( $M_s 8.1$ )地表破裂带的基本特征. 地震地质, 2002, 24: 1-13
- 5 青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所. 东昆仑活动断裂带. 北京: 地震出版社, 1999. 12-164
- 6 Xu X W, Chen W B, Ma W T, et al. Surface rupture of the Kunlun earthquake ( $M_s 8.1$ ), northern Tibetan Plateau, China. Seismol Res Lett, 2002, 73: 884-892
- 7 Xu X W, Yu G H, Klinger Y, et al. Reevaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake ( $M_w 7.8$ ), northern Tibetan Plateau, China. J Geophys Res, 2006, 111: B05316, doi: 10.1029/2004JB003488

- 8 Wen X Z, Yi G X, Xu X W. Background and precursory seismicities along and surrounding the Kunlun fault before the  $M_s 8.1$ , 2001, Kokoxili earthquake, China. *J Asian Earth Sci*, 2007, 30: 63–72
- 9 Van der Woerd J, Tapponnier P, Frederick J R, et al. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{10}\text{Be}$ , and  $^{14}\text{C}$  dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology. *Geophys J Int*, 2002, 148: 356–388
- 10 李春峰, 贺群禄, 赵国光. 东昆仑活动断裂带东段全新世滑动速率研究. *地震地质*, 2004, 26: 676–687
- 11 李春峰, 贺群禄, 赵国光. 东昆仑活动断裂带东段古地震活动特征. *地震学报*, 2005, 25: 60–67
- 12 马寅生, 施炜, 张岳桥, 等. 东昆仑活动断裂带玛曲段活动特征及其东延. *地质通报*, 2005, 24: 30–35
- 13 李陈侠, 戴华光, 陈永明, 等. 对 1937 年托索湖 7.5 级地震若干问题的讨论. *地震地质*, 2006, 28: 12–21
- 14 何文贵, 袁道阳, 熊振, 等. 东昆仑断裂带东段玛曲断裂新活动特征及全新世滑动速率研究. *地震*, 2006, 26: 67–75
- 15 何文贵, 熊振, 袁道阳, 等. 东昆仑断裂带东段玛曲断裂古地震初步研究. *中国地震*, 2006, 22: 126–134
- 16 Kirby E, Harkins N, Wang E Q, et al. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault. *Tectonics*, 2007, 26: TC2010, doi: 10.1029/2006TC002033
- 17 Guo J M, Lin A M, Sun G Q, et al. Surface ruptures associated with the 1937  $M 7.5$  Tuosuo Lake and the 1963  $M 7.0$  Alake Lake earthquakes and the paleoseismicity along the Tuosuo Lake Segment of the Kunlun Fault, northern Tibet. *Bull Seismol Soc Am*, 2007, 97: 474–496, doi: 10.1785/0120050103
- 18 Harkins N, Kirby E. Fluvial terrace riser degradation and determination of slip rates on strike-slip faults: An example from the Kunlun fault, China. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L05406, doi: 10.1029/2007GL033073
- 19 Lin A M, Guo J M. Nonuniform slip rate and millennial recurrence interval of large earthquakes along the eastern segment of the Kunlun Fault, northern Tibet. *Bull Seismol Soc Am*, 2008, 98: 2866–2878, doi: 10.1785/0120070193
- 20 青海省第二区域地质调查队, 青海省地质矿产局. 中华人民共和国区域地质调查报告(比例尺 1:200000), 优云公社幅和果洛藏族自治州幅(地质部分). 1986. 210–221
- 21 邓启东, 冉勇康, 杨晓平, 等. 中国活动构造图(比例尺 1:4000000). 北京: 地震出版社, 2007
- 22 Cunningham W D, Mann P. Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. *Geol Soc London Spec Publ*, 2007, 290: 1–12, doi: 10.1144/SP290.1
- 23 Meiraux A S, Ryerson F J, Tapponnier P, et al. Rapid slip along the central Altyn Tagh fault: Morphochronological evidence from Cherchen He and Sulamu Tagh. *J Geophys Res*, 2004, 109: B06401, doi: 10.1029/2003JB002558
- 24 徐锡伟, Tapponnier P, Van der Woerd J, 等. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 967–974
- 25 Cowgill E. 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 Planet Sci Lett*, 2007, 254: 239–255, doi: 10.1016/j.epsl.2006.09.015
- 26 Zhang P Z, Molnar P, Xu X W. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2007, 26: TC5010
- 27 Sieh K, Jahns R H. Holocene activity of the San Andreas fault at Wallace Creek, California. *Geol Soc Am Bull*, 1984, 95: 883–896, doi: 10.1130/0016-7606
- 28 张培震, 李传友, 毛凤英. 河流阶地演化与走滑断裂滑动速率. *地震地质*, 2008, 30: 44–57
- 29 Wallace R E. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. *Geol Soc Am Bull*, 1970, 81: 2875–2890, doi: 10.1130/0016-7606
- 30 陈文彬. 河西走廊及邻近地区最新构造变形基本特征及构造成因分析. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003. 94–100
- 31 Bowman D, King G, Tapponnier P. Slip partitioning by elastoplastic propagation of oblique slip at depth. *Science*, 2003, 300: 1121–1123, doi: 10.1126/science.1082180
- 32 刘光勋. 东昆仑活动断裂带及其强震活动. *中国地震*, 1996, 12: 119–126
- 33 刘光勋, 肖振敏, 谢新生, 等. 1937 年花石峡 7.5 级地震地表破裂带及有关问题. 见: 国家地震局地质研究所, 主编. 活动断裂研究(5). 北京: 地震出版社, 1996. 136–153
- 34 李龙海, 贾云鸿. 一九三七年青海托索湖 7.5 级地震形变带特征. *西北地震学报*, 1981, 3: 61–65
- 35 李陈侠. 东昆仑断裂带东段(玛沁-玛曲)晚第四纪长期滑动习性研究. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009. 101–117
- 36 徐锡伟, 闻学泽, 于贵华, 等. 川西理塘断裂带平均滑动速率、地震破裂分段与复发特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35: 540–551
- 37 Sanders C O. Interaction of the San Jacinto and San Andreas fault zones, southern California: Triggered earthquake migration and coupled recurrence intervals. *Science*, 1993, 260: 973–976
- 38 Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys J*

- Int, 1997, 128: 594–604, doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x
- 39 DePolo C M, Clark D G, Slemmons D B, et al. Historical surface faulting in the Basin and Range province, western North America: Implications for fault segmentation. *J Struct Geol*, 1991, 13: 123–136, doi: 10.1016/0191-8141(91)90061-M
- 40 Machette M N, Personius S F, Nelson A R, et al. The Wasatch fault zone Utah segmentation and history of Holocene earthquake. *J Struct Geol*, 1991, 13: 137–149, doi: 10.1016/0191-8141(91)90062-N
- 41 丁国瑜, 田勤俭, 孔凡臣, 等. 活动断层分段: 原则、方法及应用. 北京: 地震出版社, 1993. 1–143
- 42 邓起东, 张培震. 活动断裂分段研究的原则和方法(一). 见: 国家地震局地质研究所, 主编. 现代地壳运动研究(6). 北京: 地震出版社, 1995. 196–207
- 43 King G, Nabelek J. Role of fault bends in the initiation and termination of earthquake rupture. *Science*, 1985, 228: 984–987
- 44 Kirby E, Whipple K X, Burchfiel B C, et al. Neotectonics of the Min Shan, China: Implications for mechanisms driving Quaternary deformation along the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Geol Soc Am Bull*, 2000, 112: 375–393, doi: 10.1130/0016-7606
- 45 Chen S F, Wilson C J L, Deng Q D, et al. Active faulting and block movement associated with large earthquakes in the Min Shan and Longmen mountains, northeastern Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 1994, 99: 24025–24038
- 46 张培震. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1041–1056
- 47 Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 1976, 264: 319–324
- 48 Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Geology-oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, 294: 1671–1677
- 49 Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 2009, 37: 515–518
- 50 England P C, Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet. *Nature*, 1990, 344: 140–142
- 51 England P, Molnar P. Active deformation of Asia: From kinematics to dynamics. *Science*, 1997, 278: 647–650
- 52 徐锡伟, 闻学泽, 于贵华, 等. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 529–542
- 53 周荣军, 李勇, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘活动构造. *矿物岩石*, 2006, 26: 40–51
- 54 李松林, 张先康, 张成科, 等. 玛沁-兰州-靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究. *地球物理学报*, 2002, 45: 210–217
- 55 赵国泽, 汤吉, 詹艳, 等. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34: 908–918
- 56 汤吉, 詹艳, 赵国泽, 等. 青藏高原东北缘玛沁-兰州-靖边剖面地壳上地幔电性结构研究. *地球物理学报*, 2005, 48: 1205–1216
- 57 詹艳, 赵国泽, 王继军, 等. 青藏高原东北缘海原弧形构造区地壳电性结构探测研究. *地震学报*, 2005, 27: 431–440
- 58 赖晓玲, 李松林, 张先康, 等. 玛沁-兰州-靖边剖面壳幔复杂性的研究. *地球物理学进展*, 2001, 16: 65–72
- 59 赖晓玲, 张先康, 方盛明. 青藏高原东北缘壳幔过渡带研究. *地震学报*, 2004, 26: 132–139
- 60 姚志祥, 王椿镛, 裴正林. 昆仑山断裂带围陷波的有限差分数值模拟解释. *地球物理学报*, 2007, 50: 760–769
- 61 段永红, 张先康, 刘志, 等. 阿尼玛卿缝合带东段地壳结构的接收函数研究. *地震学报*, 2007, 29: 483–491
- 62 张先康, 杨卓欣, 徐朝繁, 等. 阿尼玛卿缝合带东段上地壳结构——马尔康-碌曲-古浪深地震测深剖面结果. *地震学报*, 2007, 29: 592–604
- 63 Parsons T, Chen J, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increase hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 2008, 454: 509–510
- 64 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2008 年 5 月 12 日  $M_w$ 7.9 汶川地震导致的周边断层应力变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 537–545