

陈长云, 占伟, 郑智江, 等. 2022. 利用 GPS 和水准数据分析东昆仑断裂带东部及其邻区构造变形特征[J]. 地震研究, 45(1): 36–47, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0005.

Chen C Y, Zhan W, Zheng Z J, et al. 2022. Analyzing the tectonic deformation characteristics of the eastern part of the East Kunlun Fault and its adjacent areas using GPS and leveling data[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(1): 36–47, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0005.

## 利用 GPS 和水准数据分析东昆仑断裂带东部 及其邻区构造变形特征<sup>\*</sup>

陈长云, 占伟, 郑智江, 唐毅

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:** 基于 1999—2016 年 GPS 数据和 1980—2010 年区域精密水准数据, 获取了东昆仑断裂带东部及其邻区主要断裂的滑动速率和区域构造变形特征。结果表明: 东昆仑断裂带自西向东的走滑速率衰减非常明显, 走滑速率从西大滩—东大滩和阿拉克湖段的约 10 mm/a 向东到塔藏段衰减至约 2 mm/a, 速率自西向东每 100 km 下降梯度约 1 mm/a; 东昆仑断裂带阿拉克湖段、托索湖段、下大武段和塔藏段均表现出一定的弱挤压特征。跨岷山断裂剖面显示区域挤压变形自西向东由龙日坝断裂至龙门山断裂带有逐渐减弱的特征。区域最大主应变方向为 E–NE 向, 最大剪切应变高值区位于阿拉克湖段和托索湖段交汇区域以及巴颜喀拉块体的龙日坝断裂中段区域。分析东昆仑断裂带东部及其邻区主要断裂间的构造转换关系认为, 岷山地区的隆起变形主要是因为巴颜喀拉块体自西向东的运动受到了华南块体的阻挡, 而非东昆仑断裂带向东延展引起的构造转换。

**关键词:** 东昆仑断裂带; 滑动速率; 构造转换; 全球定位系统数据; 水准数据

**中图分类号:** P315. 241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2022)01–0036–12

doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0005

### 0 引言

印度板块、太平洋板块、菲律宾板块与欧亚板块的相互作用及欧亚板块内部的地球动力作用, 造就了中国大陆不同类型的活动构造, 控制着中国大陆强震的空间展布格局 (Molnar, Tapponnier, 1975)。青藏高原现今构造地貌特征是 50 ~ 60 Ma 以来印度板块和欧亚板块碰撞的结果 (Tapponnier et al., 2001), 其中最显著的特征之一就是巨大的晚第四纪活动断裂十分发育, 它们的运动变形特征在调节欧亚板块与印度板块汇聚和青藏高原隆升过程中起着十分重要的作用。东昆仑断裂带即为青藏高原中北部一条大型左旋走滑断裂带, 以左旋走滑运动为主, 总体走向 270° ~ 290°, 全长约 2 000 km (青海省地震局, 1999)。

断层活动速率特别是晚第四纪以来的滑动速率是断层最新运动的表现, 也是分析区域变形特征的重要参数。前人对于东昆仑断裂带中西段 (约 98°E 以西) 运动变形特征的认识基本是一致的, 断裂带西段具有较为均一的 10 ~ 12 mm/a 的左旋滑动速率 (青海省地震局, 1999; 任金卫等, 1993; Van der Woerd et al., 2000), 而断裂带东段的滑动速率相对西段变低, 由托索湖段附近的 6 ~ 7 mm/a (Harkins et al., 2010; Kirby et al., 2007) 下降至玛曲附近的 2 ~ 5 mm/a (Harkins et al., 2010; Kirby et al., 2007; 何文贵等, 2006; 李陈侠等, 2011)。东昆仑断裂带东段 (玛沁—玛曲) 滑动速率相对于中西段较低的原因是断裂的滑动速率分解到了南北两侧的分支断裂带上 (李陈侠等, 2009)。对东昆仑断裂带在玛沁—玛曲段以东的运动变形特征有 3 种主要观点: ①东昆仑断裂带

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021–03–14.

基金项目: 国家重点研发专项 (2018YFC1503606、2017YFC1500501) 资助.

第一作者简介: 陈长云 (1981–), 高级工程师, 主要从事活动构造与现代地壳形变研究. E-mail: ccy–666@163.com.

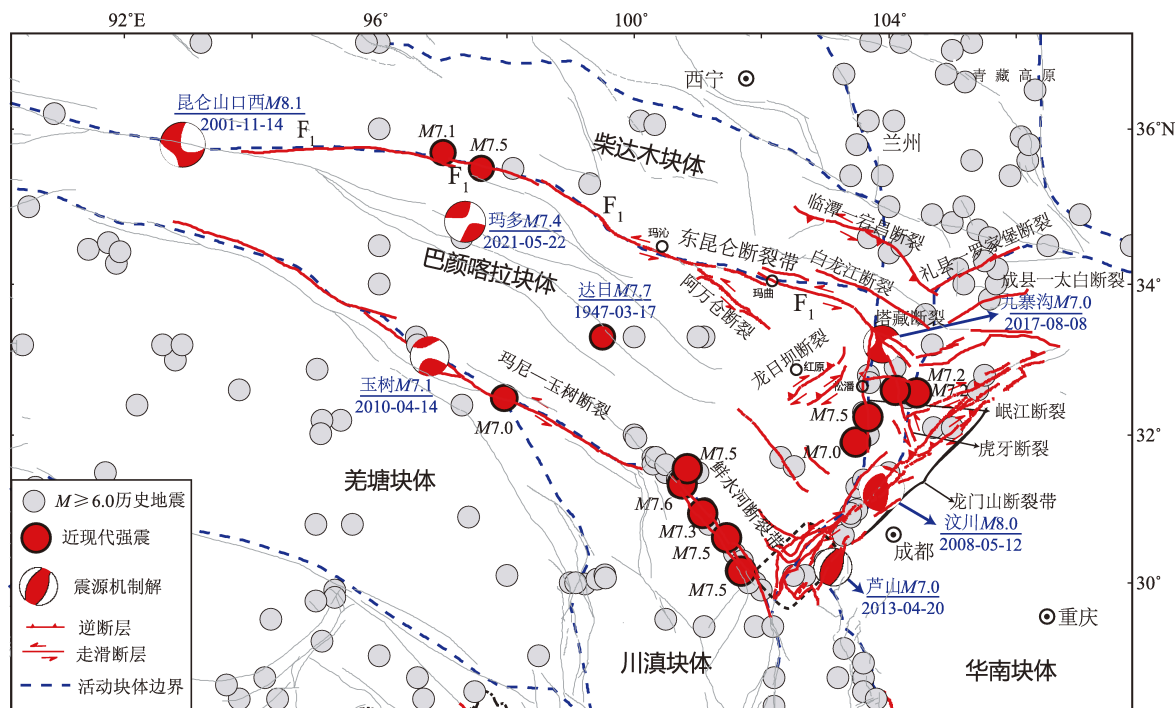
过玛曲向东延伸, 终止于若尔盖盆地附近 (Kirby *et al.*, 2007); ②东昆仑断裂带过了玛曲向东延伸, 与塔藏断裂、龙日坝断裂、岷江断裂、虎牙断裂交会 (徐锡伟等, 2008; Ren *et al.*, 2013; 张军龙等, 2014; 李陈侠等, 2016), 转换为岷山和龙门山近 EW 向的地壳缩短 (Chen *et al.*, 1994); ③东昆仑断裂带部分左旋走滑变形越过西秦岭构造区继续向 NE 向扩展, 并且可能影响了整个华北地区的构造格局 (Zhang *et al.*, 1995), 其中成县—太白断裂、文县断裂和康县—略阳断裂是东昆仑断裂带晚新生代向 NE 向扩展的主要通道。

东昆仑断裂带东部第四纪和现今构造变形主要受 NW 向的东昆仑断裂带东段、白龙江、临潭—宕昌等断裂带, NE 走向的龙门山、礼县—罗家堡、成县—太白、龙日坝等断裂带和近 SW 走向的岷江、虎牙断裂 3 组构造所控制。不同走向的活动断裂、不同性质的晚新生代构造和不同断裂的位移速率分布为研究走滑断裂尾端活动特征及其在大陆内部构造变形中所起的作用提供了理想的研究对象。本文

通过总结基于多源资料获取的东昆仑断裂带东部地区主要断裂滑动速率, 同时利用中国地壳运动观测网络所获得的观测资料, 获得了区域主要断裂的 GPS 观测水平走滑和垂向缩短速率, 通过对比地质滑动速率与 GPS 速率, 研究其所反映的断层活动特征及构造关系, 旨在为东昆仑断裂带所在的巴颜喀拉块体东北端的变形模式提供定量依据。

## 1 数据资料

本文基于多年观测的 GPS 数据和区域精密水准数据分析东昆仑断裂带东部地区 (图 1) 地壳变形特征、主要断裂的运动特征以及各断裂间的相互作用。所用 GPS 速度场 (图 2) 来源于 Wang 和 Shen (2020) 基于中国地壳运动观测网获取的相对于欧亚参考框架下的 1999—2016 年中国大陆地壳运动速度场结果, 共计 343 个 GPS 测站, 包括连续站点 55 个、流动站点 288 个, 具体处理流程参考 Wang 和 Shen (2020) 的研究。



注: 断裂资料来源于邓起东等 (2002) 和徐锡伟等 (2008); 震源机制解资料来自 Harvard CMT (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>); 块体边界依据张培震等 (2003); 历史地震来源于国家地震局震害防御司 (1995) 和中国地震局震害防御司 (1999)。

图 1 研究区活动构造背景及地震活动图

Fig. 1 Active structures and seismicity in the study area

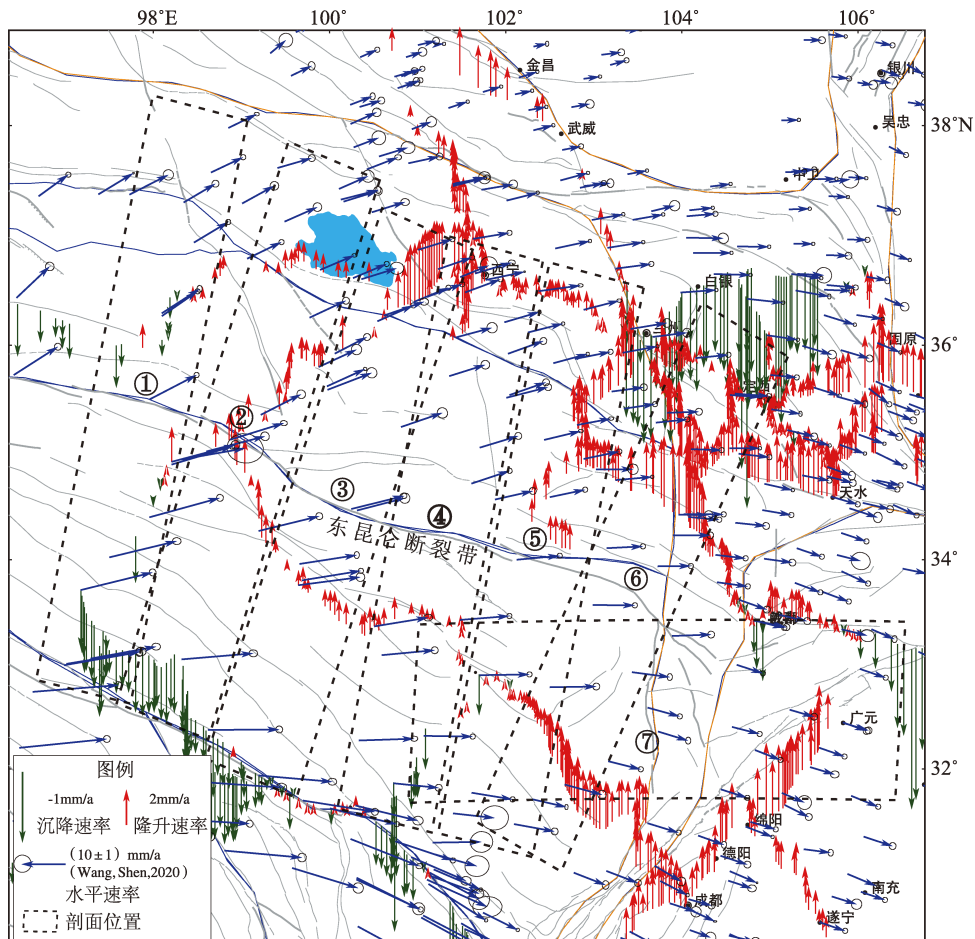
中国大陆近 20 年的 GPS 连续观测, 使得基于空间大地测量技术获得高精度垂直形变场成为现实 (Liang *et al.*, 2013), 但是由于目前 GPS 测量

仍以流动观测为主, 获取的观测结果仍然以高精度水平运动为主 (Zhang *et al.*, 2004; Shen *et al.*, 2005; Gan *et al.*, 2007, 2021; 葛伟鹏等, 2013),

大尺度范围内的垂向运动分量精度相对较低,重复高水准测量依然是获取大尺度、高精度地壳垂直运动的主要方法。精密水准测量的垂向观测精度非常高,但是数据处理过程中存在维持参考基准难度较大和误差传递与积累过快的问题。GPS 连续站获得的高精度垂向运动结果可以作为水准数据处理约束。通过融合 GPS 连续观测获取的高精度垂向运动,一方面可以有效解决单一水准观测资料存在的速率参考基准缺失问题,另一方面可大大改善速率误差传递及积累过快的问题(黄立人等,2012)。

本文使用的水准资料为1980、1990和2010年代的3期复测数据,为了确定水准平差的起算基准、抑制水准误差随测网尺度增大而快速增大的现象,数据处理过程中以与区内水准网进行联测

的GPS连续站高精度垂向运动作为约束。将GPS资料的坐标时间序列解算作为垂向运动信息提取的基础,为了保持多期数据解算结果的自洽性,采用统一策略对全球IGS站和中国大陆GPS数据进行联合解算,数据处理采用GAMIT/GLOBK软件,获取了ITRF2014框架下的测站坐标时间序列,基准转换估计平移量、旋转量和尺度因子等7个参数,以减小未模型化非潮汐大气压荷载造成的基准扭曲。解算过程中为了保持多期观测数据解算结果的自洽性,选用了全球均匀分布的77个IGS站作为框架点,对测站坐标水平向误差超过5 mm或垂向误差超过20 mm的结果进行剔除。最后以ITRF2014框架下的GPS垂直运动结果为约束,采用赫尔默特平差方法(Wu *et al.*, 2021)获得相对于ITRF2014框架的垂直速度场结果(图2)。



注:蓝色箭头为相对于欧亚板块的GPS水平速度场(Wang, Shen, 2020);绿色和红色箭头为水准垂直速度场(1980—2010年),其中红色代表上升、绿色代表下降;图中序号①~⑥表示东昆仑断裂带不同段:①阿拉克湖段;②托索湖段;③下大武段;④玛沁—玛曲段;⑤若尔盖段;⑥塔藏段;⑦岷江断裂

图2 东昆仑断裂带东部及邻区现今水平地壳运动特征和水准垂直速度场

Fig. 2 Characteristics of present-day horizontal crustal motion and leveling vertical rate in the eastern part of the East Kunlun Fault and its adjacent regions



## 2 地壳形变场变形特征分析

GPS 水平速度场的空间差异性主要反映在运动强度的差异性和运动方式的差异性上(王双绪等, 2013), 1999—2016 年东昆仑断裂带东部及其邻区水平运动速度场(图 2)显示, 其运动强度的差异性主要表现在: ①高原内部 GPS 速率明显大于周缘 GPS 速率; ②块体边界带两侧的 GPS 速率呈现明显的阶跃变化, 如巴颜喀拉块体和华南块体的交汇区域。其运动方式的差异性主要体现在 GPS 速度场运动方向自西向东由北东、北东东逐渐转向近东西方向, 再转向东南的顺时针旋转。

水平运动速度场空间分布的不一致性是地壳形变的直接反映, 而应变场是地壳形变的主要参数, 是描述区域形变的重要指标, 该指标不受参考框架的影响, 并且能从不同分辨率反映区域变形特征(孟国杰等, 2009)。利用 GPS 资料进行应变分析, 可以监测研究区应变场随着时间和空间

的变化过程(任金卫, 2002)。本文利用 1999—2016 年的 GPS 速度场(Wang, Shen, 2020), 采用最小二乘配置获得东昆仑断裂带东部及其邻区的主应变率场(图 3)。图 3 显示东昆仑断裂带东部主要受 NEE 向的主压应变或 NNW 向的主张应变控制。其中, GPS 主应变场显示沿东昆仑断裂带自西向东, 尽管各断裂段所受主压应变的方向基本一致, 均为 NEE 向, 但是主压应变的量值变化较为明显, 北西段断裂所受主压应变明显大于南东段, 并且以 NEE 向主压应变为主, 而南东段断裂 NEE 向挤压明显减弱, NNW 向拉张作用增强。最大剪切应变率的结果表明(图 3), 1999—2016 年研究区的剪切变形的高值区主要位于阿拉克湖段、托索湖段交汇区域, 以及巴颜喀拉块体的龙日坝断裂中段区域。

1980—2010 年东昆仑东部地区较大时空尺度垂直形变速度场(图 2)显示总体上呈现差异性的隆升运动, 隆升相对较快的区域包括龙门山地区、西秦岭—六盘山地区。高原内部的隆升速率较边缘地区低, 部分区域表现为沉降运动。

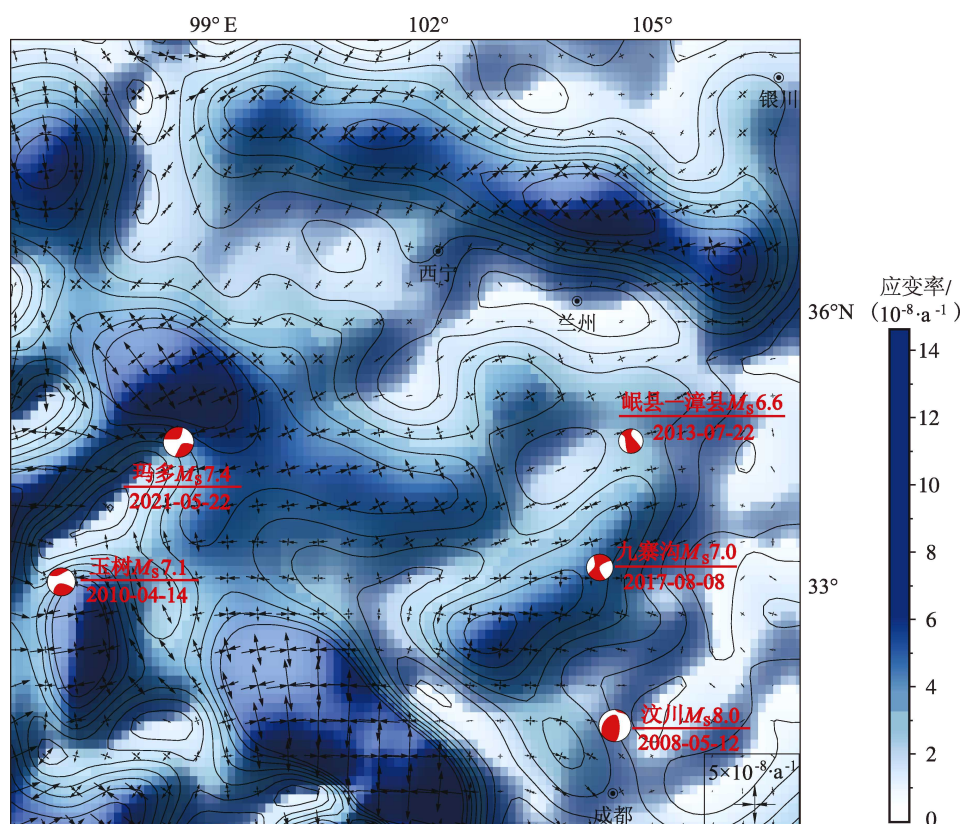


图 3 1999—2016 年东昆仑断裂带东部及其邻区主应变率和最大剪切应变率

Fig. 3 Distribution of principal strain rate and maximum shear strain in the eastern part of the East Kunlun Fault and its adjacent regions from 1999 to 2016

2008 年汶川地震以来,在巴颜喀拉块体中东部发生了一系列中强地震,包括 2010 年玉树 7.1 级地震、2013 年芦山 7.0 级地震和岷县—漳县 6.6 级地震、2017 年九寨沟 7.0 级地震和 2021 年玛多 7.4 级地震。其中岷县—漳县 6.6 级地震、九寨沟 7.0 级地震和玛多 7.4 级地震发生在巴颜喀拉块体的东北边界及其附近地区(图 3)。图 3 显示玛多地震位于最大剪切应变率局部高值区边缘;岷县—漳县地震位于最大剪切应变率局部高、低值过度区域;九寨沟地震位于最大剪切应变高值区内部。从三维运动特征来看(图 2),玛多地震位于隆升和沉降过渡区域,其北侧和东侧区域为隆升运动,西侧和南侧为沉降运动;九寨沟地震和岷县—漳县地震所处区域均为隆升运动。

### 3 基于 GPS 资料断层运动特征分析

剖面投影方法是一种简单有效的研究构造形变场的方法,通过投影得到的 GPS 站点速度分量剖面能够直观反映由于断层发生走滑(挤压或拉伸)运动造成的站点速率随着站点与断层之间距离的变化情况。为了分析东昆仑断裂带东部各分段运动变形特征、更加清晰地获取断裂带两侧 GPS 站点速度所表现出的空间特征,笔者对不同断裂段进行 GPS 剖面分析, GPS 剖面范围及 GPS 站点分布情况见图 2。对断裂带两侧站点速度分别沿剖面方向投影和沿垂直于剖面方向投影,由剖面两侧站点速度平均值之差估算断层的滑动或张/压速

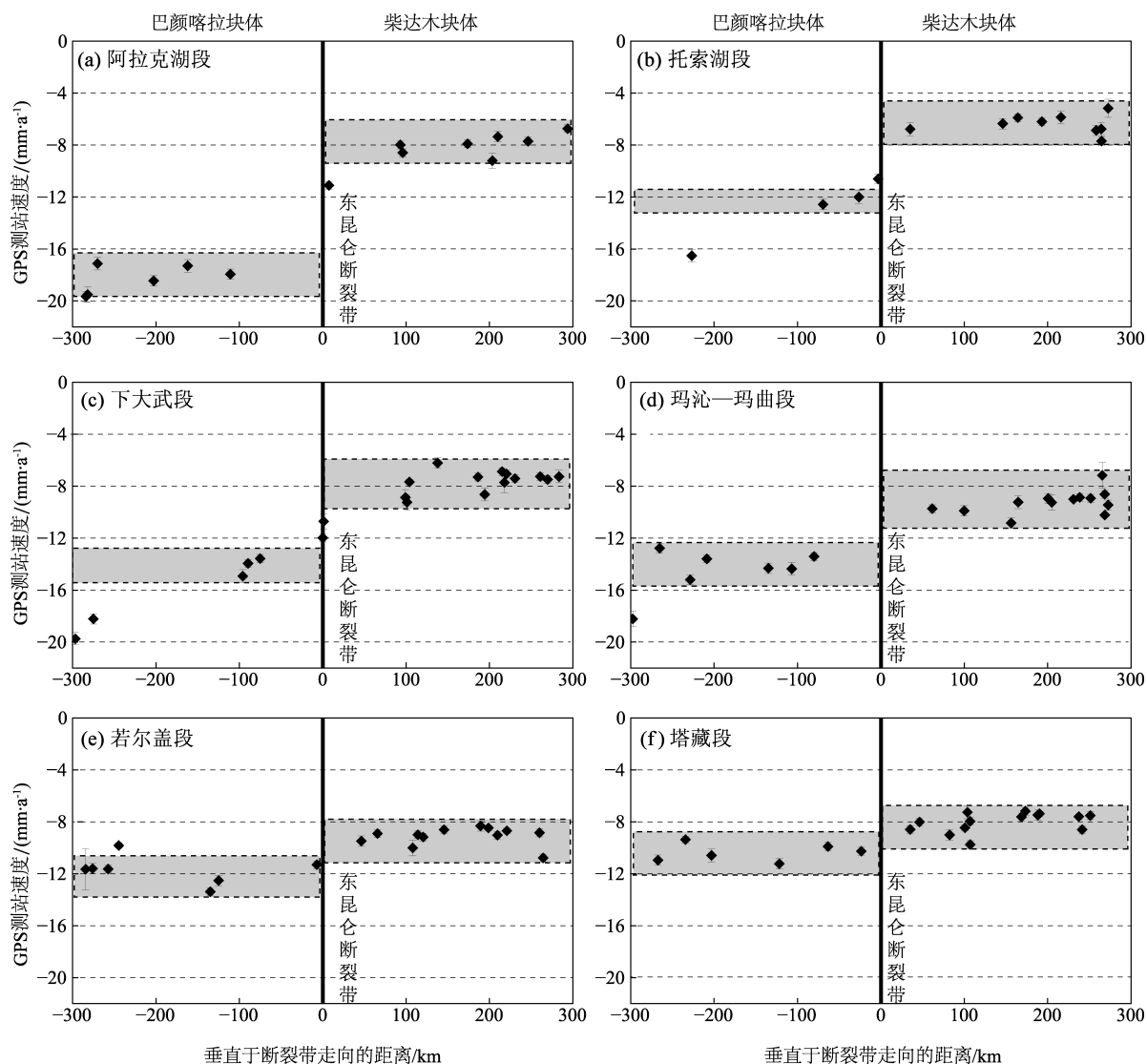


图 4 横跨东昆仑断裂带东段的平行于断裂的 GPS 速度剖面

Fig. 4 GPS velocity profiles that reflect the strike-slip rate of the East Kunlun Fault

率,并且利用误差传播定律计算速率误差。

图4为横跨东昆仑断裂带东段的平行于断裂的GPS速度剖面,灰色方框内的点为参与水平速率估算选用的GPS站点。其中左旋走滑速率在阿拉克湖段为 $(10 \pm 1.1)$  mm/a,托索湖段为 $(6.0 \pm 0.6)$  mm/a,下大武段为 $(6.5 \pm 0.8)$  mm/a,玛沁—玛曲段为 $(4.7 \pm 0.9)$  mm/a,若尔盖段为 $(3.1 \pm 0.8)$  mm/a,塔藏段为 $(2.4 \pm 0.8)$  mm/a。东昆仑断裂带自阿拉克湖段向东至塔藏段全长约650 km,左旋走滑速率由 $(10 \pm 1.1)$  mm/a降至 $(2.4 \pm 0.8)$  mm/a,速率自西向东每100 km下降梯度约为1.2 mm/a。

图5为横跨东昆仑断裂带东段的垂直于断裂的GPS速度剖面。垂直于断层的GPS速度分量

表明东昆仑断裂带阿拉克湖段、托索湖段和下大武段表现出挤压运动特征,其他段张压特征不明显,其中阿拉克湖段挤压缩短速率为 $(0.7 \pm 0.5)$  mm/a、托索湖段挤压缩短速率为 $(1.3 \pm 0.4)$  mm/a,下大武段左旋走滑速率为 $(0.7 \pm 0.5)$  mm/a。东昆仑断裂带北侧为柴达木块体,南侧为巴颜喀拉块体。柴达木块体西段挤压特征明显,过青海南山北缘断裂向东挤压特征基本消失;而巴颜喀拉块体内部表现出明显的张性特征,且自西向东张性特征明显增强,主要表现在达日断裂和阿坝断裂的运动特征上,拉张速率为2~3 mm/a。跨断层剖面所反映的块体内部存在明显的拉张作用与GPS应变率场分布特征是一致的。

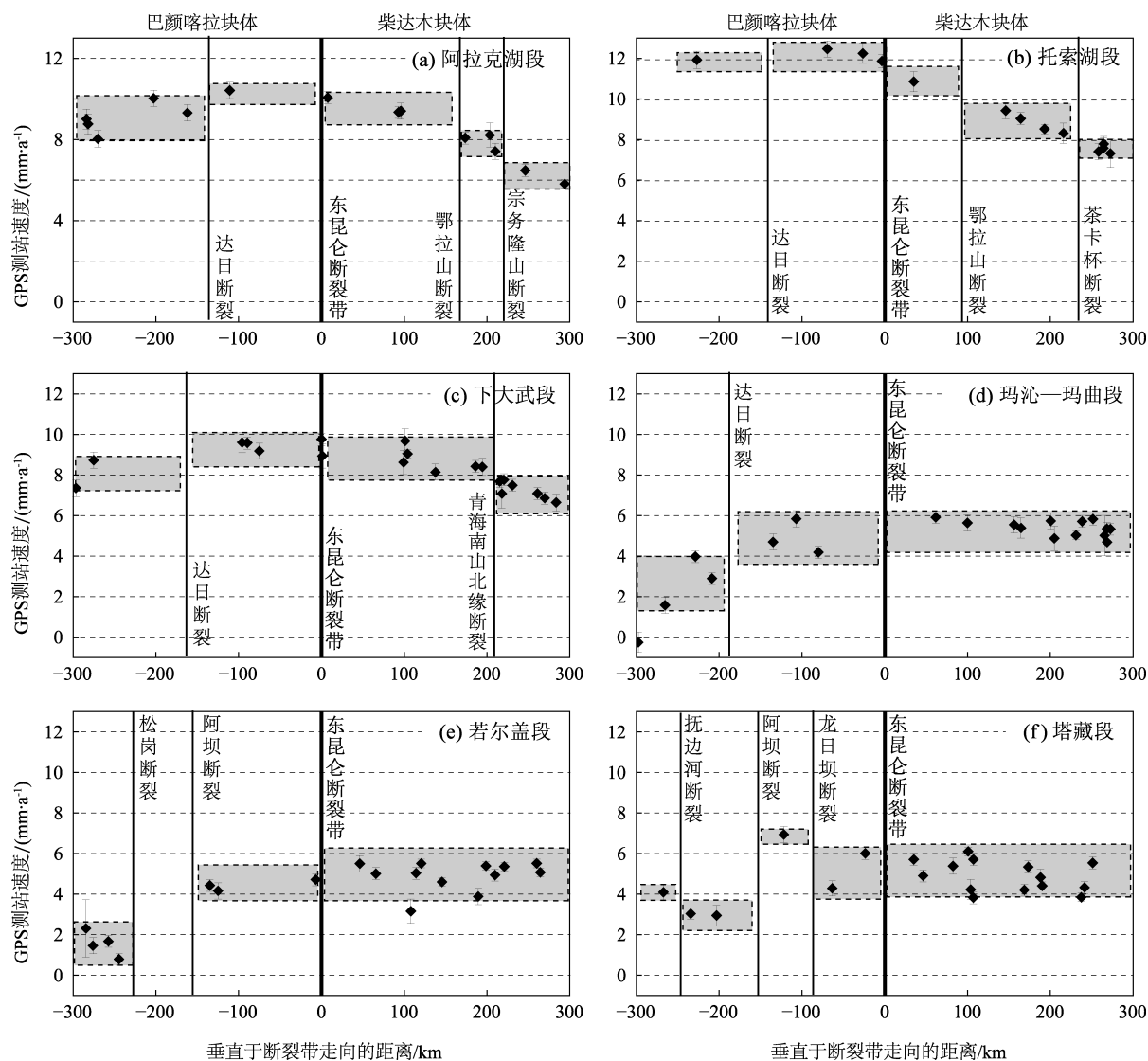


图5 横跨东昆仑断裂带东段的垂直于断裂的GPS速度剖面

Fig. 5 GPS velocity profiles of vertical faults normal to the eastern segments of the East Kunlun Fault

图6为横跨岷江断裂的GPS速度剖面。剖面显示近南北向岷江断裂以逆冲挤压运动为主,右旋滑动速率仅约为0.36 mm/a,龙日坝断裂的右旋走滑速率约为3.1 mm/a。在岷江断裂两侧各300 km的剖面内,整体挤压速率约为6.9 mm/a,

其中龙日坝断裂挤压速率约为3.8 mm/a,岷江断裂挤压速率约为1.4 mm/a。虎牙断裂及其右侧约90 km处的青川断裂的挤压速率分别为1.0 mm/a和0.7 mm/a,同样存在挤压变形由龙日坝断裂自西向东至龙门山断裂带逐渐减弱的特征。

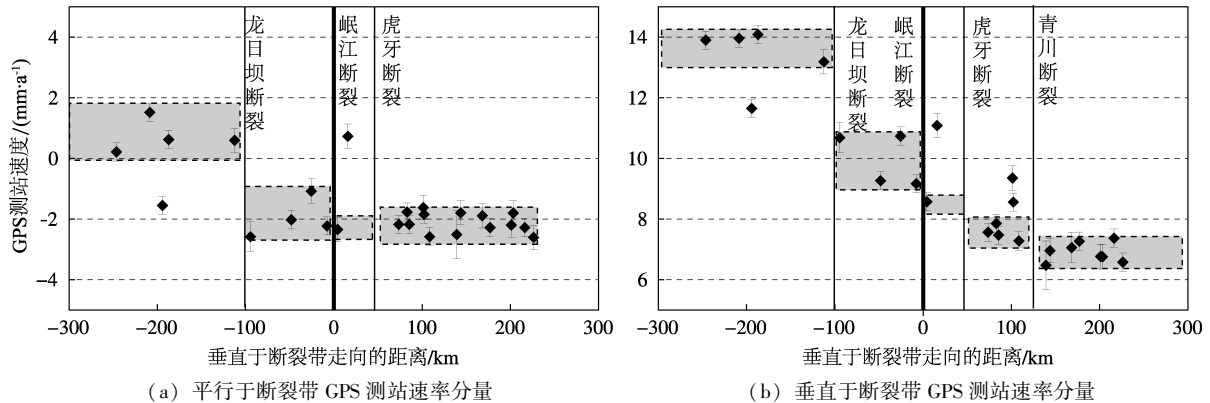


图6 横跨岷江断裂的GPS速度剖面

Fig. 6 GPS velocity profiles across the Minjiang Fault

## 4 讨论

### 4.1 东昆仑断裂带东部及其邻区断裂的晚第四纪活动特征

东昆仑断裂带东部及其邻区各断裂之间的构造关系比较复杂,前人的研究给出了该区主要断裂的运动学定量结果。对于区域主要控制断裂东昆仑断裂带,一些学者通过河流阶地及断错地貌结合年代学结果分析得出:西大滩—东大滩段全新世晚期滑动速率为10~12 mm/a(任金卫,1993;青海省地震局,1999; Van der Woerd *et al.*, 2000);托索湖段滑动速率为6~7 mm/a(Harkins *et al.*, 2010; Kirby *et al.*, 2007);下大武段滑动速率为6~7 mm/a(青海省地震局,1999);玛沁—玛曲段全新世以来的滑动速率为3~5 mm/a(青海省地震局,1999;何文贵等,2006; Kirby *et al.*, 2007);若尔盖段的滑动速率为1~3 mm/a(付俊东,2012);塔藏断裂全新世右旋滑动速率为0.8 mm/a,逆冲速率约为0.3 mm/a(Ren *et al.*, 2013)。基于类似的方法,李陈侠等(2016)获得阿万仓断裂晚第四纪以来的平均左旋水平滑动速率为3 mm/a;垂直滑动速率为0.07 mm/a;刘兴旺等(2015)获得迭部白龙江断裂左旋走滑速率

为 $(1.3 \pm 0.1)$  mm/a,垂直滑动速率为 $(0.39 \pm 0.04)$  mm/a;俞晶星等(2012)获得了光盖山—迭山断裂晚第四纪以来的垂直滑动速率为 $(0.49 \pm 0.08) \sim (1.15 \pm 0.28)$  mm/a,左旋走滑速率为 $(0.51 \pm 0.13)$  mm/a;韩竹军等(2001)得到礼县—罗家堡断裂的左旋走滑速率为0.95 mm/a;贾伟等(2012)得到的康县—略阳断裂全新世以来左旋走滑速率从0.68 mm/a增大至1.48 mm/a;Zheng等(2016)获得成县—太白断裂的左旋走滑速率为 $(0.71 \pm 0.18)$  mm/a,逆冲速率为 $(0.43 \pm 0.13)$  mm/a。徐锡伟等(2008)通过卫星影像解译和野外考察得出龙日坝断裂北东段晚更新世以来平均右旋滑动速率为 $(5.4 \pm 2.0)$  mm/a,垂直运动速率约为0.7 mm/a。最新的地震调查结果认为龙日坝断裂上长期地质滑动速率大于4.0 mm/a(Ren *et al.*, 2013)。第四纪以来,岷江断裂为具有左旋走滑位移的逆断裂,晚更新世以来具有强烈的活动性,断层左旋水平滑动速率等于或大于1 mm/a,根据阶地的海拔高度变化推测其垂直滑动速率等于或大于1 mm/a(邓起东等,1994)。周荣军等(2006)根据涪江一、二级阶地位错和洪积扇位错及阶地面年龄,推测横跨虎牙断裂的左旋走滑速率为1.4 mm/a,垂直运动速率为0.3 mm/a。

## 4.2 断裂地质滑动速率和基于 GPS 剖面计算的断裂滑动速率的分布特征

东昆仑断裂带作为高原内部大型走滑断裂,其活动习性和滑动速率分布特征是高原的变形模式的直接反映。图7为总结了前人研究的东昆仑断裂带地质滑动速率和基于GPS跨断层剖面所确定的平行于断裂的走滑速率和垂直于断裂的张压速率。图中不同断裂段,基于GPS获取的断层滑动速率和基于地质方法获取的断层滑动速率一致性相对较好,说明两者是可以相互补充的。东昆仑断裂带阿拉克湖段的相关研究较少,本文基于跨断层GPS获取的滑动速率弥补了该处的滑动速率缺失问题。

总体来看,东昆仑断裂带自西向东的走滑速率衰减是非常明显的,从西大滩—东大滩和阿拉克湖段约为10 mm/a,向东到塔藏段衰减到约2 mm/a。东昆仑断裂带并不是一条纯走滑断裂,阿拉克湖段、托索湖段、下大武段和塔藏段均表现出一定的弱挤压特征。断裂东部尾端及其北东方向的次级断裂均表现出逆冲左旋走滑的特征。巴颜喀拉块体内部的次级断裂除虎牙断裂外,均表现出右旋走滑兼有逆冲的运动特征。

## 4.3 滑动速率所反映的区域变形分配特征

规模巨大的断裂往往是由多条小型断裂通过不同的几何结构和活动形式组合,并在多次的断裂活动后逐渐贯通形成的。断裂带滑动速率的分布特征直接反映了断裂及其两侧邻区一定范围内的地壳变形(Stein *et al.*, 1988; Alexander *et al.*, 1994)。东昆仑断裂带滑动速率在阿拉克湖段以西均为10 mm/a,向东到托索湖段降为6~7 mm/a,挤压速率为 $(1.3 \pm 0.4)$  mm/a,缺失的滑动速率一部分转为断裂的逆冲运动,另一部分推测转换到托索湖段和下大武段之间的中铁断裂上;下大武段和托索湖段滑动速率相近;过下大武段后的玛沁—玛曲段的滑动速率降为3~5 mm/a,缺失的速率转换到阿万仓断裂上(李陈侠等, 2016);过玛沁—玛曲段后的若尔盖段的滑动速率略小于玛沁—玛曲段;过若尔盖段后为东昆仑断裂带的尾端塔藏段,滑动速率一部分转为塔藏断裂的逆冲运动。

岷山隆起带处于东昆仑断裂带塔藏段南侧,西边以南北向岷江断裂为界,东边以南北向虎牙断裂为界。关于岷山隆起的原因主要有两种认识,一是认为岷山隆起是由东昆仑断裂带尾端转化作用形成(Chen *et al.*, 1994; Kirby *et al.*, 2000; Van

der Woerd *et al.*, 2000),其理论依据是断裂段之间的相互转换是通过拉分或挤压的阶区、雁列斜接、尾端散开等形式进行的,特别是走滑断裂端部的位移分布是通过拉分的盆地或是隆起的山脉来调整 and 降低的(Keller *et al.*, 1982; Deng *et al.*, 1986)。另一种是认为青藏高原内部的软流圈物质向NE和SSE向流动(Royden *et al.*, 2008; Clark *et al.*, 2000, 2005),驱动巴颜喀拉块体东缘上地壳沿中上地壳低阻层东向运移,受到阻挡作用,软弱的岷山隆起带发生地壳褶皱变形并向东逆冲推覆从而形成高耸的岷山山脉,岷江断裂与虎牙断裂的走滑运动加速了岷山的隆起(闵刚等, 2017)。本文分析东昆仑断裂带东部及其邻区断裂之间滑动速率转换关系认为,岷山地区的隆起变形主要是巴颜喀拉块体自西向东的运动受华南块体的阻挡所致,而不是东昆仑断裂带向东延展引起的构造转换。

甘东南地区位于东昆仑断裂带若尔盖段和塔藏段以北的区域,区内构造变形复杂,主要发育了NW和NE走向的两组活动断裂,共同组成“V”型构造体系。NW走向的断裂主要包括临潭—宕昌断裂、光盖头—迭山断裂和白龙江断裂;NE走向的断裂主要包括礼县—罗家堡断裂、成县—太白断裂、康县—略阳断裂和康县断裂。两组断裂的运动变形主要受控于东昆仑断裂带和西秦岭北缘断裂带两大活动断裂。图7b、c给出了总结前人研究结果的甘东南地区主要断裂的滑动速率。对于断裂滑动速率等运动学参数所反映的区域构造变形特征,甘东南地区组成“V”型断裂体系的两组断裂,通过各条断裂相对较低的滑动速率(包括走滑和逆冲),以及断裂之间隆起山脉及不同时代盆地的变形,共同承担了自东昆仑断裂带向西秦岭北缘断裂带过渡过程中运动分量的吸收和转换(Zheng *et al.*, 2013)。从区域构造的几何特征及运动学特征分析认为东昆仑断裂带的向北挤压和向东的运动是甘东南地区构造应力集中的主要动力,但是考虑到东昆仑断裂带过玛沁—玛曲段后的若尔盖段的滑动速率略小于玛沁—玛曲段,分析认为区内主要断裂滑动速率并不是由东昆仑断裂带转换而来,而是由于区内主要断裂承担了东昆仑断裂带向北东推挤和扩展到西秦岭北缘断裂带的过渡作用,青藏高原向北东扩展过程中两大断裂体系的相互作用是区内主要断裂运动变形的动力来源。



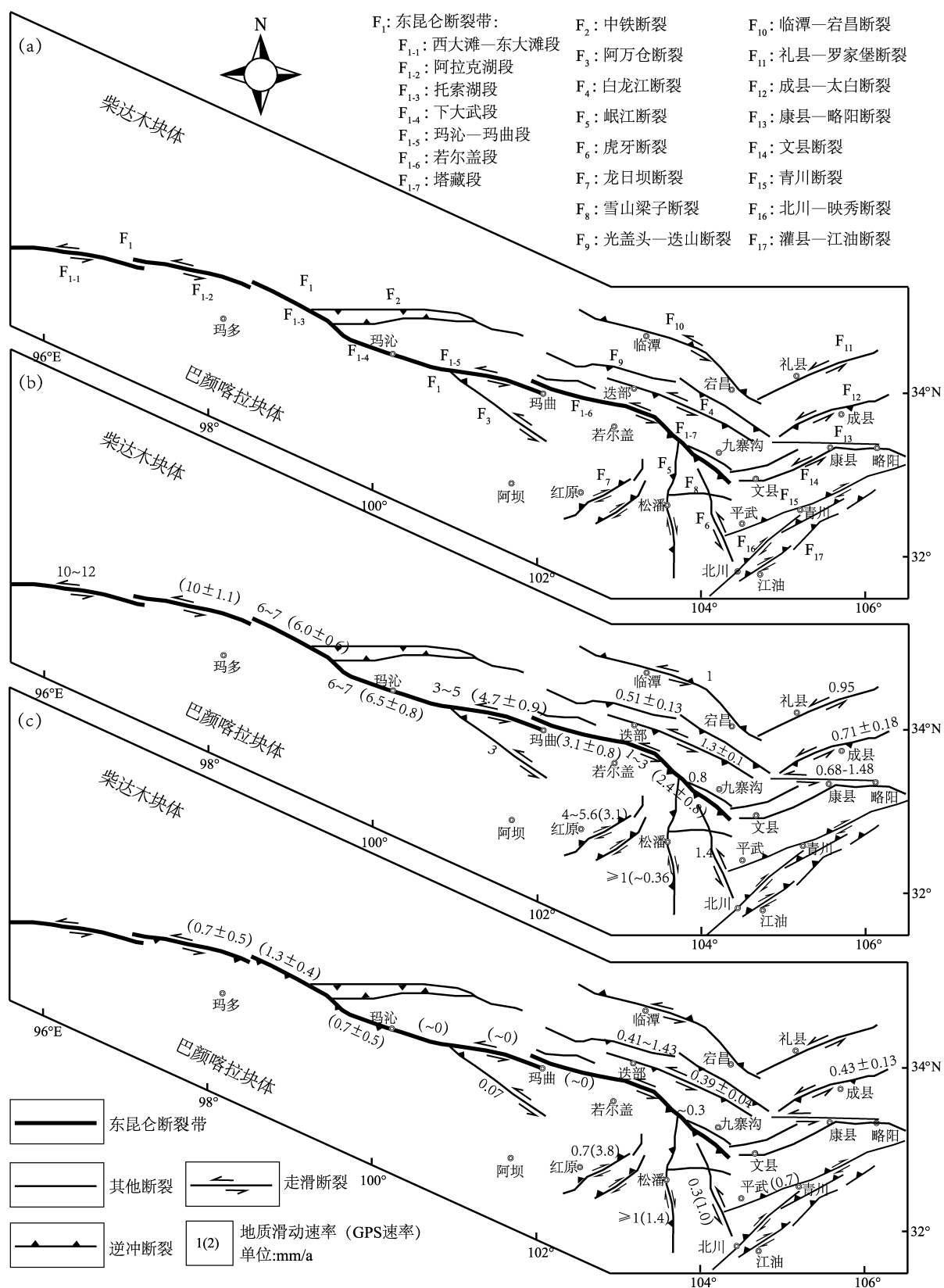


Fig. 7 Distribution of the faults in the study area (a), and Late Quaternary slip rates of faults and GPS slip rates parallel to faults (b), and Late Quaternary thrust rate of faults and GPS shortening rates perpendicular to faults (c)

## 5 结论

本文基于1999—2016年GPS数据和1980—2010年区域精密水准数据,获取了研究区内主要断裂滑动速率,在与基于地质资料获取的滑动速率对比的基础上,分析了东昆仑断裂带东部及其邻区的构造变形特征,得到以下结论:

(1) 东昆仑断裂带自西向东的走滑速率衰减是非常明显的,走滑速率从西大滩—东大滩和阿拉克湖段的约10 mm/a,向东到塔藏段衰减到约2 mm/a;东昆仑断裂带阿拉克湖段的相关研究较少,本文基于GPS数据计算出该段的滑动速率约为 $(10 \pm 1.1)$  mm/a。东昆仑断裂并不是一条纯走滑断裂,阿拉克湖段、托索湖段、下大武段和塔藏段均表现出一定的弱挤压特征。跨岷江断裂剖面显示近南北向的岷江断裂以逆冲挤压运动为主,同样存在挤压变形自西向东由龙日坝断裂至龙门山断裂逐渐减弱的特征。在岷江断裂两侧各300 km的剖面内,整体挤压速率约6.9 mm/a,其中龙日坝断裂挤压速率约3.8 mm/a,占比超过50%。

(2) 区域最大主应变方向为E-NEE向,整体上主压应变率大于主张应变率,且量值明显表现出区域上的差异性;最大剪切应变高值区位于阿拉克湖段与托索湖段交汇区域,以及龙日坝断裂中段区域,与跨断层剖面给出的逆冲运动强烈的断裂段结果一致。

(3) 基于水准资料获取的垂直形变场显示区域整体处于隆升阶段,但东昆仑断裂带东部及邻区抬升速率小于其北侧的西秦岭北缘断裂带和岷江断裂以南的区域。

(4) 从滑动速率衰减特征来看,东昆仑断裂带滑动速率自西向东到塔藏段已经衰减至约2 mm/a,结合区域变形特征分析,认为岷山地区的隆起变形主要是巴颜喀拉块体自西向东的运动受华南块体的阻挡所致,而非东昆仑断裂带向东延伸引起的构造转换。东昆仑断裂带过玛沁—玛曲段后的若尔盖段的滑动速率略小于玛沁—玛曲段,分析认为甘东南地区主要断裂滑动速率并不是由东昆仑断裂带转换而来,而是由于区内其承担了东昆仑断裂带向北和东推挤和扩展到西秦岭北缘断裂带的过渡作用,青藏高原向北东扩展过程中两大断裂体系的相互作用是区内主要断裂运动变形的动力来源。

论文绘图使用了GMT软件(Wessel *et al.*, 2013);审稿专家对本文提出了宝贵的意见,在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- 邓超东,陈社发,赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 16(4): 389-403.
- 邓超东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学, 32(12): 1020-1032.
- 付俊东. 2012. 东昆仑断裂带东段塔藏断裂罗叉段古地震及大震重复间隔研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 葛伟鹏,王敏,沈正康,等. 2013. 柴达木—祁连山地块内部震间上地壳块体运动特征与变形模式研究[J]. 地球物理学报, 56(9): 2994-3010.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录[M]. 北京:地震出版社.
- 韩竹军,向宏发,冉勇康. 2001. 青藏高原东缘礼县—罗家堡断裂带晚更新世以来的活动性分析[J]. 地震地质, 23(1): 43-48.
- 何文贵,周志宇,马尔曼,等. 2006. 2004年9月7日岷县—卓尼5.0级地震的基本特征和地质背景研究[J]. 地震研究, 29(4): 373-378.
- 黄立人,韩月萍,高艳龙. 2012. GNSS连续站坐标的高程分量时间序列在地壳垂直运动研究中的若干问题[J]. 大地测量与地球动力学, 32(4): 10-14.
- 贾伟,刘洪春,柳煜,等. 2012. 武都—康县断裂带活动性初步研究[J]. 西北地震学报, 34(2): 142-148.
- 李陈侠,徐锡伟,闻学泽,等. 2009. 东昆仑断裂东段玛沁—玛曲段几何结构特征[J]. 地震地质, 31(3): 441-458.
- 李陈侠,徐锡伟,闻学泽,等. 2011. 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[J]. 中国科学:地球科学, 41(9): 1295-1310.
- 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[J]. 地震地质, 38(1): 44-64.
- 刘兴旺,袁道阳,邵延秀,等. 2015. 甘肃迭部—白龙江南支断裂中东段晚第四纪构造活动特征[J]. 地球科学与环境学报, 37(6): 111-119.
- 孟国杰,申旭辉, Vladimir Smirnov, 等. 2009. 堪察加地区现今地壳运动与变形特征研究[J]. 地球物理学报, 52(3): 720-731.
- 闵刚,王绪本,夏时斌,等. 2017. 岷山隆起带与西秦岭构造带中段上地壳电性结构特征[J]. 地球物理学报, 60(6): 2397-2413.
- 青海省地震局. 1999. 东昆仑活动断裂带[M]. 北京:地震出版社.
- 任金卫,汪一鹏,吴章明,等. 1993. 青藏高原北部库玛断裂东、西大滩段全新世地震形变带及其位移特征和水平滑动速率[J]. 地震地质, 15(3): 285-288.
- 任金卫. 2002. 利用GPS观测结果反演中国大陆及邻区现代构造变形运动[J]. 地球物理学报, 45(S1): 123-135.
- 王双绪,蒋锋云,郝明,等. 2013. 青藏高原东缘现今三维地壳运动特征研究[J]. 地球物理学报, 56(10): 3334-3345.
- 徐锡伟,闻学泽,陈桂华,等. 2008. 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[J]. 中国科学:地球科学, 38(5): 529-542.

- 俞晶星,郑文俊,袁道阳,等. 2012. 西秦岭西段光盖山—迭山断裂带坪定—化马断裂的新活动性与滑动速率[J]. 第四纪研究, 32(5): 957–967.
- 张军龙,任金卫,陈长云,等. 2014. 东昆仑断裂带东部晚更新世以来活动特征及其大地构造意义[J]. 中国科学:地球科学, 44(4): 654–667.
- 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:地球科学, 33(4): 12–20.
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代强震目录[M]. 北京: 中国科学技术出版社.
- 周荣军,李勇,Densmore,等. 2006. 青藏高原东缘活动构造[J]. 矿物岩石, 26(2): 40–51.
- Alexander J, Bridge J S, Leeder M R, *et al.* 1994. Holocene meander – belt evolution in an active extensional basin southwestern Montana [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 64(4b): 148–154.
- Chen S F, Wilson C J L, Deng Q D, *et al.* 1994. Active faulting and block movement associated with large earthquakes in the Min Shan and Longmenshan, northeastern Tibetan Plateau [J]. *J Geophys R*, 99(12): 24025–24038.
- Clark M K, Bush J, Royden L H. 2005. Dynamic topography produced by lower crustal flow against rheological strength heterogeneities bordering the Tibetan Plateau [J]. *Blackwell Science Ltd*, 162(2): 575–590.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow [J]. *Geology*, 28(8): 703–706.
- Deng Q D, Zhang P Z, Chen S F. 1986. Structure and deformation character of strike – slip fault zones [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 124(1): 203–223.
- Gan W J, Peter Molnar, Zhang P Z, *et al.* 2021. Initiation of clockwise rotation and eastward transport of southeastern Tibet inferred from deflected fault traces and GPS observations [J]. *GSA Bulletin*, doi: <https://doi.org/10.1130/B36069.1>.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, *et al.* 2007. Present – day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements [J]. *J Geophys Res*, 112: B08416.
- Harkins N, Kirby E, Shi X, *et al.* 2010. Millennial slip rates along the eastern Kunlun fault: Implications for the dynamics of intracontinental deformation in Asia [J]. *Lithosphere*, 2(4): 247–266.
- Keller E A, Bonkowski M S, Korsch J, *et al.* 1982. Tectonic geomorphology of the San Andreas fault zone in the southern Indio Hills, Coachella Valley, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 93(1): 46–56.
- Kirby E, Harkins N, Wang E Q, *et al.* 2007. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault [J]. *Tectonics*, 26: TC2010.
- Liang S M, Gan W J, Shen C Z, *et al.* 2013. Three – dimensional velocity field of present – day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements [J]. *J Geophys R*, 118(10): 5722–5732.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision [J]. *Science*, 189(4201): 419–426.
- Ren J X, Xu X W, Yeats R S, *et al.* 2013. Latest Quaternary paleoseismology and slip rates of the Longriba fault zone, eastern Tibet: Implications for fault behavior and strain partitioning [J]. *Tectonics*, 32(2): 216–238.
- Royden L H, Burchfiel B C, Robert D, *et al.* 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Science*, 321(5892): 1054–1058.
- Shen Z K, Lv J N, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast border – land of the Tibetan Plateau [J]. *J Geophys R*, 110: B11409.
- Stein R S, King G C P, Rundle B. 1988. The growth of geological structure by repeated earthquake. Field examples of continental dip – slip fault [J]. *Journal of Geophysical research*, 93(B11): 13319–13331.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, *et al.* 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. *Science*, 294(5547): 1671–1677.
- Van der Woerd J, Ryerson F J, Tapponnier P, *et al.* 2000. Uniform slip – rate along the Kunlun fault: Implication for seismic behaviour and large – scale tectonics [J]. *Geophysical Research Letters*, 27(16): 2353–2356.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present – day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774.
- Wessel P, Smith W H F, Scharroo R, *et al.* 2013. Generic Mapping Tools: Improved version released [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(45): 409–410.
- Wu Y, Jiang Z, Guo B, *et al.* 2021. Joint adjustment for large – area, multi – source vertical data: method, validation and application [J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 56(1): 113–131.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, *et al.* 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. *Geology*, 32(9): 809–812.
- Zhang Y Q, Pierre V, Jacques M. 1995. Active faulting in and along the Qinling range (China) inferred from SPOT imagery analysis and extrusion tectonics of south China [J]. *Tectonophysics*, 243(1–2): 69–95.
- Zheng W J, Liu X W, Yu J X, *et al.* 2016. Geometry and late Pleistocene slip rates of the Liangdang – Jiangluo fault in the western Qinling mountains, NW China [J]. *Tectonophysics*, 687(26): 1–13.
- Zheng W, Zhang P, He W, *et al.* 2013. Transformation of displacement between strike – slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults [J]. *Tectonophysics*, 584(22): 267–280.

## Analyzing the Tectonic Deformation Characteristics of the Eastern Part of the East Kunlun Fault and Its Adjacent Areas Using GPS and Leveling Data

CHEN Changyun, ZHAN Wei, ZHENG Zhijiang, TANG Yi

(*The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

### Abstract

Based on the GPS data in the period of 1999—2016 and the regional precision leveling data from 1980 to 2010, the slip rates and regional tectonic deformation characteristics of the major faults in the eastern part of the East Kunlun Fault and its adjacent regions are obtained. The attenuation of slip rate from west to east along the East Kunlun Fault is very obvious: from  $\sim 10$  mm/a in the Xidatan-Dongdatan section, and the Arak Lake section eastward to  $\sim 2$  mm/a in the Tazang section, with a rate decrease gradient of  $\sim 1$  mm/a every 100 kilometers from west to east; the Arak Lake, the Tuosuo Lake, the Xia Dawu and the Tazang sections show certain weak extrusion characteristics. GPS profiles across the Minjiang Fault show that the regional extrusion deformation gradually weakens from the west of the Longriba Fault to the east of the Longmenshan Fault. The maximum main strain direction is N-NEE; the high value of the maximum shear strain is located in the intersection area of the Arak Lake and the Tuosuo Lake, and the middle part of the Longriba Fault in the BayanHar block. The analysis of the tectonic transformation relationship between the eastern part of the East Kunlun Fault and its adjacent regions shows that the uplift and deformation in the Minshan area is mainly caused by the west-to-east movement of the BayanHar block blocked by the South China block due to the continuous collision of the Indo-European plate, rather than the tectonic transformation caused by the eastward extension of the East Kunlun Fault.

**Keywords:** the East Kunlun Fault; slip rate; tectonic transformation; GPS data; leveling data