

郑文俊, 张培震, 袁道阳等. GPS 观测及断裂晚第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2491~2508, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.008

Zheng W J, Zhang P Z, Yuan D Y, et al. Deformation on the northern of the Tibetan plateau from GPS measurement and geologic rates of Late Quaternary along the major fault. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(10):2491~2508, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.008

## GPS 观测及断裂晚第四纪滑动速率 所反映的青藏高原北部变形

郑文俊<sup>1,2</sup>, 张培震<sup>1</sup>, 袁道阳<sup>2</sup>, 郑德文<sup>1</sup>

1 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

**摘 要** 断裂晚第四纪滑动速率及现今 GPS 观测揭示了青藏高原向北扩展与高原边缘隆升的运动特征. 主要断裂晚第四纪滑动速率及跨断裂 GPS 应变速率的结果表明, 青藏高原北部边缘的断裂以低滑动速率( $<10$  mm/a)为主, 特别是两条边界断裂: 阿尔金断裂和海原—祁连山断裂. 两条主要边界断裂上的滑动速率分布显示了断裂间滑动速率转换及调整特征. 阿尔金断裂自  $95^{\circ}\text{E}$  以西的  $8\sim 12$  mm/a 稳定滑动速率, 向东逐渐降低到最东端的约  $1\sim 2$  mm/a, 而海原断裂自哈拉湖一带开始发育后滑动速率为  $1\sim 2$  mm/a, 到祁连一带( $101^{\circ}\text{E}$  以东)增大到相对稳定的  $4\sim 5$  mm/a, 直到过海原后转向六盘山一带, 滑动速率降低到  $1\sim 3$  mm/a, 甚至更低. 滑动速率的变化及分布特征显示, 阿尔金断裂滑动主要是通过祁连山内部隆起及两侧新生代盆地变形引起的缩短来吸收的, 海原—祁连山断裂的低滑动速率及沿断裂运动学特征表明断裂尾端的陇西盆地变形及六盘山的隆起是断裂左旋走滑速率的主要吸收方式. 这一变形特征表明, 青藏高原北部边缘的变形模式是一种分布式的连续变形, 变形发生自高原内部, 边界断裂的走滑被高原内部变形所吸收.

**关键词** GPS 观测, 晚第四纪滑动速率, 边界断裂, 连续变形, 青藏高原北部

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.008

中图分类号 P541

收稿日期 2009-05-25, 2009-07-24 收修定稿

### Deformation on the northern of the Tibetan plateau from GPS measurement and geologic rates of Late Quaternary along the major fault

ZHENG Wen-Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Pei-Zhen<sup>1</sup>, YUAN Dao-Yang<sup>2</sup>, ZHENG De-Wen<sup>1</sup>

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

2 Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

**Abstract** GPS measurements and late Quaternary fault slip rates reveal the kinematic pattern of outward growth of the northern margin of the Tibetan Plateau. Base on the geologic data and GPS velocity slip rates of major boundary faults are less than 10 mm/a including the Altyn-Tagh fault and Haiyuan- Qilianshan fault. The distributions of slip rates along the two major faults show constant slip rate along their middle portion and decrease toward their ends. For example, the left-lateral slip rates on the central segment of Altyn-Tagh Fault appear to be in the range of  $8\sim 12$  mm/a, but decreases eastward to only  $1\sim 2$  mm/a near  $97^{\circ}\text{E}$ . On the Haiyuan-Qilianshan

**基金项目** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418400)、地震动力学国家重点实验室基金重点课题(LED2000801)和自主课题(LED2009A05)、中国地震局地震科学联合基金(B07007)、中国地震局地质研究所基本科研业务专项(DFIGCEA0607122)共同资助.

**作者简介** 郑文俊, 1972 年生, 男, 副研究员, 博士, 主要从事活动构造和新构造等方面的研究工作. E-mail: gszhwj@163.com

fault, slip rates are 1~2 mm/a in its western segment, and increase to 4~5 mm/a in its eastern and middle segments, and then decrease to 1~3 mm/a near its eastern end near the Liupan Shan. This kind of slip distribution suggests that almost all motion along a strike-slip fault is accommodated by crustal shortening or convergence near the ends of the strike-slip fault. The crustal shortening across the Qilian Shan absorbs strike-slip along the Altyn Tagh fault. The convergence in Liupan Shan accommodates left-lateral slip along the Qilian-Haiyuan fault. Our studies show that tectonic deformation occurred mainly within the northern Tibetan Plateau, and that the rule of strike slip faulting has been reconciling differences of crustal shortening or crustal thickening rather than extruding crustal blocks out of the plateau interior.

**Keywords** GPS measurements, Late Quaternary slip rate, Boundary fault, Continuous deformation, The northern margin of Tibetan Plateau

## 1 引言

自从 Molnar & Tapponnier<sup>[1]</sup> 在其开拓性的经典论文中展示了亚洲新生代构造变形过程中走滑断裂可能起到的重要作用以来,走滑断裂在成山过程和大陆变形中的作用就一直是地球科学界普遍关心的重要问题之一. 其中被认为最重要的作用之一是调节不同刚性地块之间的相对运动<sup>[2~7]</sup>, 由于刚性地块内部不发生或只发生很小的构造变形, 大陆内部刚性地块间的差异运动主要发生在其边界走滑断裂上, 以沿巨大断裂的走滑运动和块体的横向滑移为主要方式, 走滑断裂往往具有很大的滑动速率. 走滑断裂的另一种潜在的重要作用是调节大陆内部构造变形, 通过走滑变形吸收不均匀的大陆内部变形, 或通过构造转换重新调整大陆的地壳厚度<sup>[8~11]</sup>. 走滑断裂的变形是怎样分布的和如何消失的? 变形是如何被吸收转换成不同走向、不同性质构造的? 变形是如何迁移到与其平行构造上而不发生衰减的? 这些和其他许多有关走滑断裂的问题不仅对于研究大陆内部构造变形, 而且对于研究走滑断裂本身的活动性质都具有十分重要的意义.

另一方面, 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<sup>[12~15]</sup>, 断裂带上滑动位移的分布特征直接反映了断裂附近乃至断裂两侧一定范围内的地壳变形<sup>[15~19]</sup>. 关于断裂带上位移的分布, 不同的学者给出了不同的模型, Scholze et al.<sup>[20]</sup> 通过实验模拟认为, 断裂带上位移与断裂长度是在受应变影响下的线性关系, 这一结果仅在实验室内进行而没有具体的实例所证实; 而 Dawers et al.<sup>[15]</sup> 通过均匀介质下的物理模拟实验得出, 断裂长

度与位移之间存在弧形的对应关系, 在断裂长度 1/3 左右, 位移迅速增大, 而到断裂尾端时逐渐减小, 这一结果与其他科学家通过实验、野外位移测量等结果是一致的<sup>[12,13,15,21~23]</sup>, 现代地震的同震位移分布也证实了这一点<sup>[24,25]</sup>, 说明这一模型比较符合断裂的发育和发展过程. 而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相互间转换的<sup>[14,26~30]</sup>, 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和降低的<sup>[27,28,31]</sup>.

青藏高原北部地区是由几条大型走滑断裂所围限的区域, 是研究复杂组合系统下的高原边缘断裂活动和地壳变形的天然实验室<sup>[2,4,7,8,32~38]</sup>. 活动的青藏高原北部地区, 可以分为三部分: 95°E 以西的左旋走滑为主的阿尔金断裂, 中间是以缩短变形和隆起为主的祁连山区, 101°E 以东是同样以左旋走滑为主的海原—祁连山断裂, 其中的两大走滑断裂均由多条次级断裂或是多个断裂分段组成, 中间的祁连山区则有多条近于平行的逆冲断裂及隆起的山体 and 山间谷地组成<sup>[2,39,40]</sup> (图 1). 以往的研究中, 对高原北部的认识存在两种截然不同的分歧: 一种强调的是不同块体之间的刚性特征, 不同块体主要通过大型走滑断裂上的高速滑动来调节青藏高原近南北向的缩短和北东方向的挤出<sup>[2,4,7,32,33]</sup>, 不存在断裂端部的吸收; 而另一种则强调分布式的连续变形, 认为高原边缘走滑断裂上位移是通过高原内部的变形和边缘山脉的隆起(也就是断裂端部的缩短)来逐步吸收的<sup>[8,35~38]</sup>. 因此, 青藏高原北部地区大量的大型走滑断裂及逆冲断裂之间的转换关系, 以及对大陆变形的调节作用等的研究, 有利于揭开高原边缘断裂间的相互关系及高原变形模式等大陆动力学的主要问题.

阿尔金、祁连山及河西走廊是构成青藏高原北部的主体边界,前人曾对此处开展了关于构造特征及变形等方面的大量研究工作<sup>[39~44]</sup>.近年来的研究表明,在这些地区特别是河西走廊地区普遍发育逆冲断层、活动褶皱,同时引起了不同程度的构造隆升,造成了祁连山地区强烈的构造变形<sup>[40,45~49]</sup>.而中国地壳运动观测网络的多期 GPS 复测结果,不仅给出了阿尔金—祁连山及其邻区的现今地壳运动状态和已知活动断裂带的应变速率,同时还揭示了阿尔金断裂自西南向东北应变速率的变化规律,以及河西走廊北部断裂和海原—祁连山断裂带上应变速率的变化及分配规律<sup>[11,50~52]</sup>,而活动断裂研究的结果也给出了不同断裂段的活动习性及其滑动速率(位移分布特征)<sup>[3,53~62]</sup>.

所以,青藏高原北部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的活动性质及其在大陆构造变形中的作用提供了非常难得的研究对象.本文通过总结青藏高原北部地区主要断裂地质滑动速率(位移分布),结合主要断裂带的野外考察,同时使用已发表的中国 GPS 观测网络所获得的观测资料,获得了主控边界断裂的 GPS 观测水平走滑和垂向缩短速率,将地质速率与 GPS 速率进行对比,总结其所反映的断层活动特征及构造关系,旨在为高原边缘的变形模式提供定量的证据.

## 2 青藏高原北部断裂晚第四纪地质滑动速率及现今 GPS 观测速率

断层滑动速率特别是晚第四纪以来的滑动速率,是断层最新运动特征的一种表现,同时也反映了区域动力学的主要特征.国内外地学界在近些年来对阿尔金断裂和海原—祁连山断裂进行了大量的定性定量研究工作,同时也在河西走廊和祁连山内部开展了基础研究工作,特别是在断层滑动速率研究方面取得了很大的突破和进展<sup>[3,53~62]</sup>.随着活动构造研究领域近年来在理论上的新发展,提出了构造转换、应力分配等概念,来解释构造之间的转换关系<sup>[53,64~67]</sup>.我们近年来在断层滑动速率的研究中取得一些新认识,特别是 Zhang 等<sup>[11]</sup>对阿尔金断裂滑动速率的重新解释,为断裂滑动速率的研究提供了一种相对确定的模式,而现今 GPS 观测网络也为研究断裂滑动速率提供了一个相对连续的观测系统.

本文讨论断裂两侧 GPS 滑动速率时,选用的主

要数据来自中国“九五”期间建设的重大科学工程“中国地壳运动观测网络”1999~2004 年的观测结果,包括 25 个基准站的连续观测数据、56 个基本站每年一次的观测数据和近 1000 个区域站的 3 期流动观测数据,还用到了 2001 年昆仑山地震后在青藏高原及阿尔金断裂两侧进行应急补测的数据<sup>[51,52,68~70]</sup>.除了特殊说明之外,本文使用的 GPS 数据都转换到相对于阿拉善地块的参考框架下(图 1),有关 GPS 数据、数据处理和参考框架转换等参见王敏等<sup>[71]</sup>,Zhang 等<sup>[51]</sup>,Shen 等<sup>[70]</sup>,Gan 等<sup>[72]</sup>文章中相关内容.这里需要简单说明的是跨断层 GPS 缩短速率和走滑速率的估算方法,该方法是将断层两侧所选一定范围内(100 km 左右甚至更长)的 GPS 应变速率分别投影到垂直和水平两个方向上,在断层两侧选定的估算测量站(点)(各剖面图中的虚线框)内选择上盘相对最大值和下盘相对最小值进行最大缩短速率和最大水平滑动速率的估算,其误差是两个测量点(站)均方差的平方和再开方求得,所选测量站(点)的编号在剖面图中标出.

### 2.1 海原—祁连山断裂带

在这里所讨论的海原—祁连山断裂带包括了海原断裂、老虎山—毛毛山断裂、冷龙岭断裂、哈拉湖断裂及这些规模较大断裂之间的相互转换的次级小断裂(图 2).海原—祁连山断裂是青藏高原北缘一条主控边界断裂,对该断裂的研究自 20 世纪以来就一直在延续<sup>[39,57,61,73~76]</sup>.国家地震局地质研究所等<sup>[60]</sup>在海原断裂南西华山段测得的最大水平位移为 12~14.5 km,由此得到的断层水平滑动速率是 5~8 mm/a, Zhang 等<sup>[61]</sup>和 Burchfiel 等<sup>[59]</sup>给出的左旋滑动速率为 8~10 mm/a,李传友<sup>[76]</sup>通过对海原断裂上多个点地貌位错的精密测量和<sup>14</sup>C 测年后,得到的平均滑动速率为(4.7±0.1)mm/a~(5.0±0.2)mm/a. Lasserre 等<sup>[58]</sup>给出的冷龙岭断裂的左旋走滑速率为(19±5)mm/a,其中部老虎山—毛毛山一带为(12±4)mm/a.但何文贵等<sup>[77,78]</sup>、袁道阳等<sup>[79]</sup>通过河流阶地的测量和区域对比所得的阶地年龄,得出了自冷龙岭—老虎山一带滑动速率为 4~5 mm/a.而我们在老虎山断裂金强河段的研究结果为左旋滑动速率为 4.4 mm/a,与何文贵等<sup>[77,78]</sup>、袁道阳等<sup>[79]</sup>的研究结果非常一致.针对滑动速率的差异,我们仔细分析和观察了 Lasserre 等<sup>[58]</sup>获得滑动速率的观测点,认为不论是年代样品的采集位置还是位移测量标志的选取上都有讨论的余地,因而这些大滑动速率具有很大

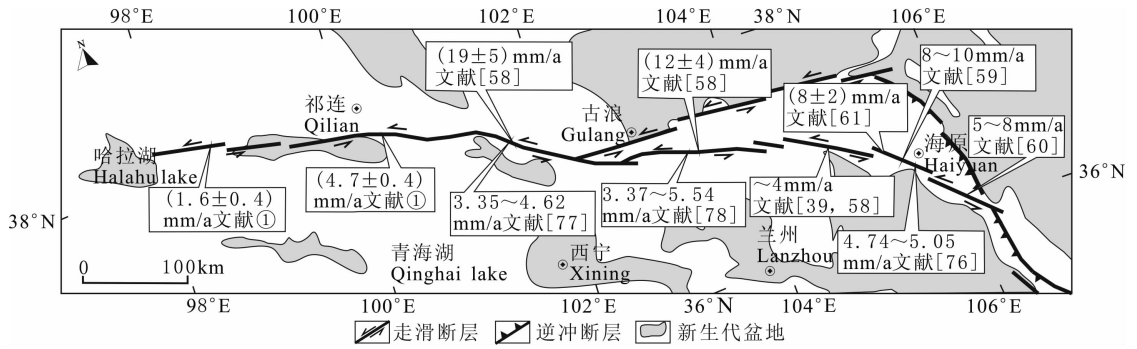


图2 海原断裂带几何结构及滑动速率分布

图中①来自 Yuan et al. (2009)<sup>1)</sup>。

Fig. 2 Distribution and slip rate on the Haiyuan fault

The data on Halahu fault and Qilian fault from Yuan et al. (2009)<sup>1)</sup>。

的不确定性,而较低的滑动速率值与整个断裂带上的滑动速率值比较一致.海原—祁连山断裂带最西段的哈拉湖断裂以往研究程度较低,仅从一些高精度卫星影像资料上给出了断层的存在<sup>[4,39,40]</sup>,近几年来, Yuan 等<sup>1)</sup>通过对哈拉湖断裂的研究,得到的滑动速率为 $(1.6 \pm 0.4)$  mm/a,而祁连段的滑动速率为 $(4.7 \pm 0.4)$  mm/a.图2汇总了沿海原—祁连山断裂带的滑动速率,除断裂带端部的速率值较小外,整个带上大多数滑动速率值集中在4~6 mm/a.

利用早期的GPS资料,横跨整个祁连山东段的走滑速率被估算为 $(7.5 \pm 1.5)$  mm/a<sup>[80]</sup>,支持了地质学方法所得到的低滑动速率的结果.为了获得可靠的海原断裂滑动速率,我们利用更完整的GPS数据,自西向东横穿海原断裂及祁连山东段切了4个剖面(图1中A、B、C、D),将其垂直于断裂的缩短率(左侧)及平行于断裂走滑速率(右侧)分别表示于图3中.剖面A位于海原断裂祁连段,B剖面穿越了冷龙岭段,剖面C位于海原断裂东段的老虎山一带,剖面D位于海原断裂最东段海原一带,其中剖面A、B横穿了祁连山区,得到横穿整个祁连山的GPS地壳缩短率为 $(9.3 \pm 2.8)$  mm/a和 $(7.0 \pm 2.1)$  mm/a.从图3给出的速度剖面可以清楚地看出,断裂所在的位置确实是速度梯度带或高应变带,断裂所分隔的块体内部似乎不发生地壳缩短,总地壳缩短主要通过断裂的逆冲而实现(图3左边所示的剖面);而左旋走滑则分布在海原—祁连山断裂和阿拉善地块之间的广大地区(图3右边所示的剖面).由剖面A、B、C、D得到海原断裂上垂直于断裂的GPS地壳缩短率

分别为: $(2.1 \pm 2.2)$  mm/a、 $(3.1 \pm 2.2)$  mm/a、 $(3.7 \pm 2.2)$  mm/a、 $(4.4 \pm 2.2)$  mm/a, GPS水平滑动速率分别为: $(4.3 \pm 2.2)$  mm/a、 $(4.6 \pm 2.2)$  mm/a、 $(4.4 \pm 2.2)$  mm/a、 $(6.3 \pm 3.0)$  mm/a,由于断裂最西端没有足够的GPS观测点,我们不好估算其最西端的速率.由此可以看出,跨海原断裂的GPS水平滑动速率的变化结果,与其各段的地质速率基本是吻合的.

这里需要说明的是图3C、D两个剖面中海原断裂(HYF)和其北侧的古浪断裂(GLF)及中卫—同心断裂(ZTF)间滑动速率的分配关系,垂直于断层地壳缩短速率是分布在两条断层之间的,在几十公里的范围内通过山脉的隆起来调节其缩短,而水平走滑速率从图中右侧剖面可以看出,不论是古浪断裂还是中卫—同心断裂, GPS应变速率在其两侧都没有明显的变化,而GPS应变速率的明显变化是在接近海原断裂带及其两侧时才反映出来,经过不同位置的GPS速率的反复估算,认为两个剖面上的平行于断裂的GPS走滑速率主要来自海原断裂,而其北侧的断裂仅分配了少量的走滑速率,这一结果与地质速率的结果是一致的.

## 2.2 河西走廊北部断裂带

河西走廊北部断裂以往研究程度较低,仅局部地段进行过选择性的研究<sup>[81,82]</sup>.我们对走廊西段的几条主要断裂带进行了调查、测量和探槽开挖,发现河西走廊北部断裂的基本特征均表现为逆冲性质,仅在局部表现出少量的左旋走滑,通过地貌测量和测年所得到的不同断裂第四纪晚期以来的逆冲滑动速率分别为:嘉峪关黑山断裂: $0.2 \sim 0.3$  mm/a;嘉

1) Yuan D Y, Zhang P Z, Liu X W, et al. Late Quaternary strike-slip features along the Halahu fault, western segment of Haiyuan-Qilianshan fault, NE Tibetan Plateau. 2009. (In preparation)

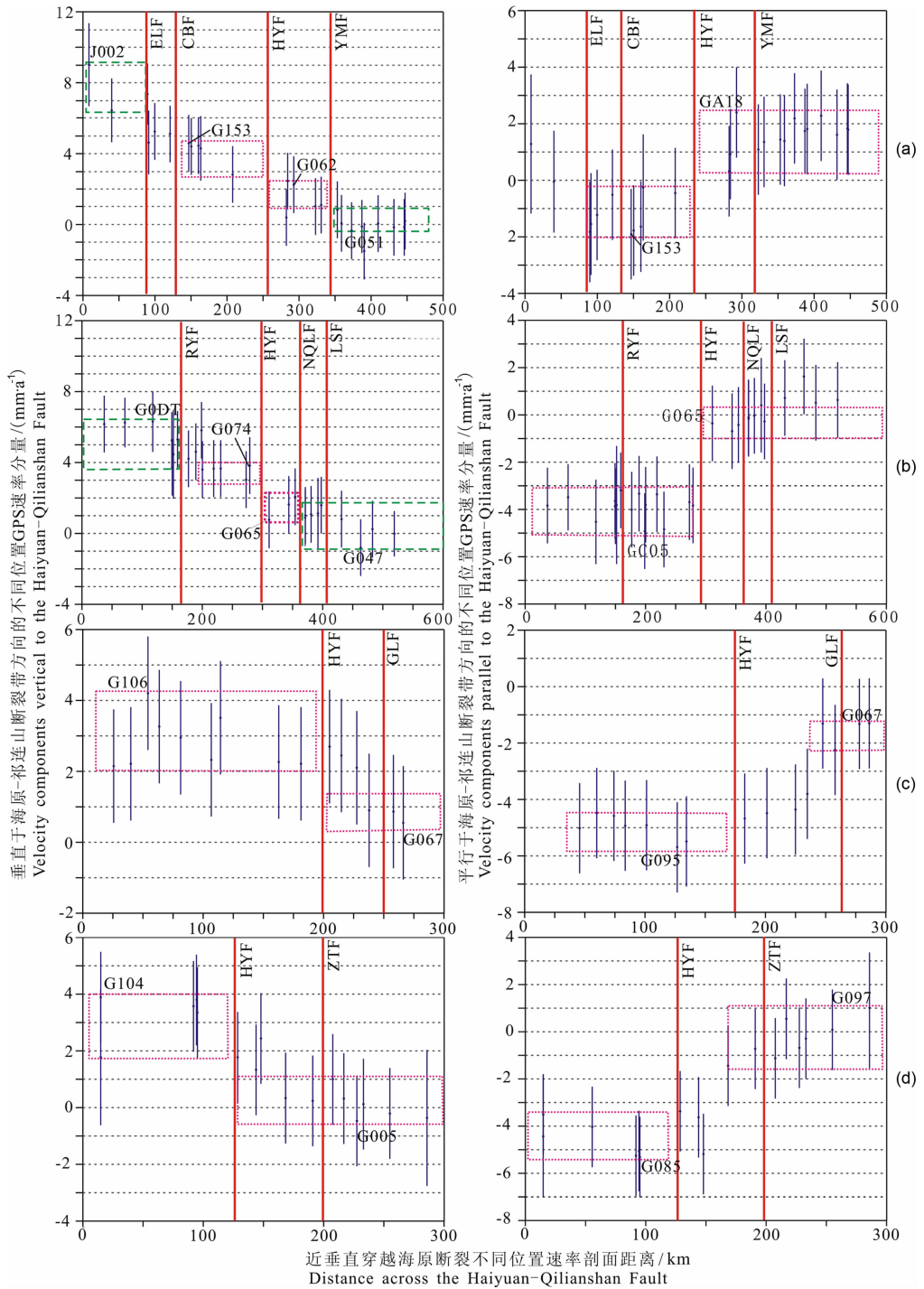


图 3 横穿海原断裂不同位置的 GPS 速率剖面

(a), (b), (c), (d) 对应 A、B、C、D 剖面。左栏: 垂直于断裂的缩短率, 右栏: 平行于断裂走滑速率。图中绿色短虚线方框为横穿祁连山的缩短速率估算选用台站; 紫红色点线方框为横穿海原断裂的缩短速率及水平速率估算选用台站。

Fig. 3 GPS slip rates of the Haiyuan Fault(HYF) along the four profiles across the fault. The station in green dash-line rectangle would be used for estimating shortening - rate across Qilianshan. The station in violet-red dotted-line rectangle would be used for estimating striking-rate and shortening-rate.

峪关断裂: 0.2~0.3 mm/a; 金塔南山断裂: 0.15~0.35 mm/a; 合黎山南缘断裂: 0.15~0.5 mm/a。另外, 据闵伟等<sup>[83]</sup>对酒西盆地内部断裂的研究给出了盆地内部北侧的阴洼山断裂和新民堡断裂的逆冲滑

动速率分别为 0.18 mm/a 和 0.24 mm/a, 而向东延伸进入阿拉善块体内部的几条断裂, 经现场调查没有明显的晚第四纪活动特征, 其晚第四纪滑动速率相对比活动的走廊北部边缘断裂要低得多, 甚至趋

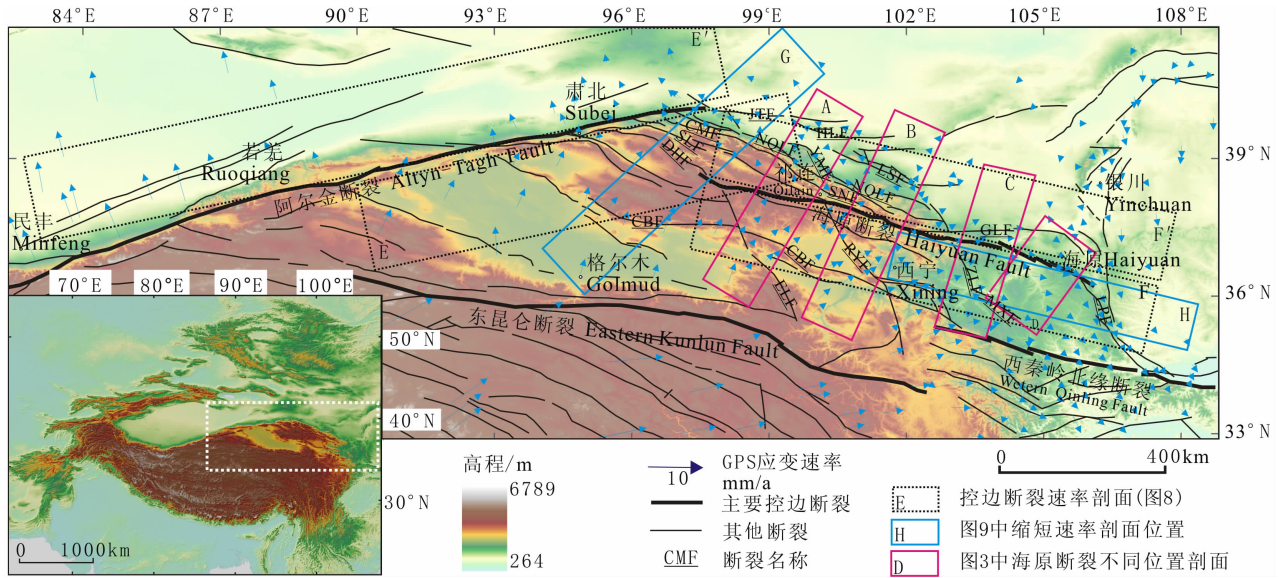


图 1 青藏高原北部主要断裂分布及 GPS 速率

图中的 GPS 速率是相对阿拉善板块参考框架下的运动状态, 断裂根据邓超东等<sup>[63]</sup>修改。除主要控边断裂外, 其他断裂均用简写标出: CBF: 柴达木盆地北缘断裂; CMF: 昌马断裂; DHF: 党河南山断裂; ELF: 鄂拉山断裂; GLF: 古浪断裂; HLF: 合黎山南缘断裂; JTF: 金塔南山断裂; LPF: 六盘山断裂; LSF: 龙首山断裂; MXF: 马衔山断裂; NQLF: 祁连山北缘断裂; RYF: 日月山断裂; SLF: 疏勒南山断裂; SNF: 肃南断裂; YMF: 榆木山断裂; ZLF: 庄浪河断裂; ZTF: 中卫-同心断裂。本文后面图件中的断裂均用简写表示, 不再一一说明。

Fig. 1 Map of active fault and GPS velocity on the northern of Tibetan plateau

The blue arrows are GPS velocity in the reference frame fixed to the Alxa block. Active faults are altered from “Map of active faults in China” by Deng et al. <sup>[63]</sup> Beside major fault ( Altyn-Tagh fault and Haiyuan Fault), we have simplified name of other fault. CBF: the northern margin of Qaidam basin fault, CMF: Changma fault, DHF: Danghenanshan fault, ELF: Elashan fault, GLF: Gulang fault, HLF: the southern margin of Helishan fault, JTF: Jintananshan fault, LPF: Liupanshan, LSF: Longshoushan fault, MXF: Maxieshan fault, NQLF: the northern margin of Qilianshan fault, RYF: Riyueshan fault, SLF: Shulenshan fault, SNF: Sunan fault, YMF: Yumushan fault, ZLF: Zhuanglanghe fault, ZTF: Zhongwei-Tongxin fault. In this paper, these simplified name is same.

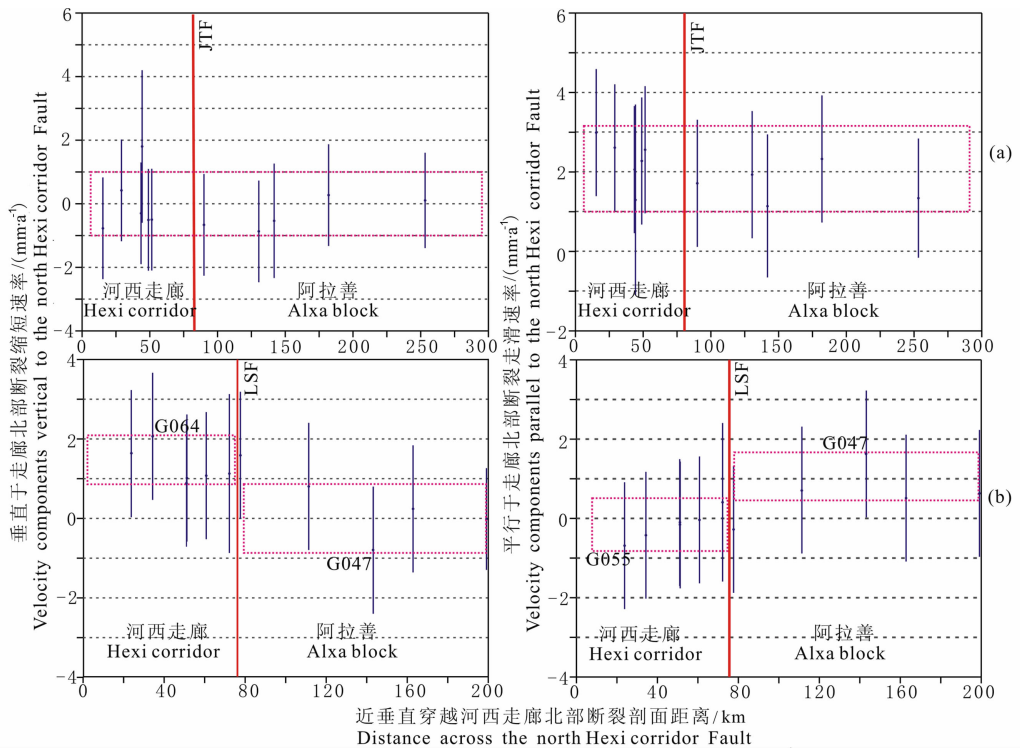


图 4 横穿河西走廊北部断裂 GPS 速率剖面

(a), (b) 表示不同的剖面。紫红色点线框为横穿不同断裂的缩短速率及水平速率估算选用台站。

Fig. 4 GPS slip rates of the northern Hexi Corridor Fault across the fault

The station in violet-red dotted-line rectangle would be used for estimating striking-rate and shortening-rate.

于静止。河西走廊东端的龙首山南缘断裂据前人的研究为晚第四纪活动的逆断层,其晚第四纪滑动速率为  $0.4 \text{ mm/a}^{[82]}$ 。

河西走廊西端北部断裂的地质滑动速率均小于  $1 \text{ mm/a}$ ,这与 GPS 观测的无明显水平滑动及跨断层缩短的结果相一致(图 4a)。而位于走廊东部的龙首山断裂带, GPS 速率剖面则表现出  $(2.9 \pm 2.2) \text{ mm/a}$  的垂直于断裂的缩短速率及  $(2.3 \pm 2.2) \text{ mm/a}$  左旋走滑速率(图 4b),这一结果可能与龙首山的隆起相关,也可能是分配了祁连山东段山前断裂上滑动速率的结果。

### 2.3 祁连山北缘及内部断裂

祁连山北缘断裂是阿拉善地块与青藏地块的主要分界断裂,多年来积累了大量的研究成果和资料。Hetzel 等<sup>[62,84]</sup>通过地貌面测量和宇宙成因核素测年的方法得到了位于走廊最西端的玉门断裂的垂直滑动速率为  $(0.35 \pm 0.05) \text{ mm/a}$ ,位于走廊中段的张掖断裂的垂直滑动速率为  $(0.64 \pm 0.08) \text{ mm/a}$ ,陈文彬等<sup>[85]</sup>通过阶地地貌对比及测年给出了位于酒泉盆地南缘的佛洞庙—红崖子断裂的平均逆冲滑动速率为  $0.55 \text{ mm/a}$ ,Tapponnier 等<sup>[86]</sup>通过洪积扇变形测量得出了榆木山北缘断裂的逆冲滑动速率为  $0.4 \sim 1.9 \text{ mm/a}$ 。在河西走廊盆地的最东端,诸多学者对不同断裂的滑动速率进行了研究,皇城—双塔断裂的逆冲滑动速率为  $(0.76 \pm 0.06) \text{ mm/a}^{[44]}$ ,而古浪断裂的左旋走滑和逆冲滑动速率分别为  $(3.47 \pm 0.12) \text{ mm/a}$  和  $(0.16 \pm 0.2) \text{ mm/a}^{[87]}$ ,该断裂与海原断裂相似,表现出明显的左旋走滑特征。

而位于祁连山内部的断裂,研究程度相对较低,其西段的昌马断裂表现为左旋走滑为主兼具逆冲的活动习性,地貌水平位错测量得到走滑速率为  $3.3 \sim 4.3 \text{ mm/a}^{[88]}$ ,但据最新野外调查,该滑动速率可能偏大,其主要原因可能是所选择的地貌面年龄偏年轻所致。至于党河南山断裂和疏勒南山断裂,由于自然条件恶劣,至今也只有在少数几个点上的地貌特征描述,或是从遥感影像上进行判断,闵伟等(个人交流)曾于 2006 年对这两条断裂重点地段进行了考察,发现存在明显连续的逆冲陡坎和冲沟左旋,根据区域对比相同地貌面的年龄,其逆冲速率均应该小于  $1 \text{ mm/a}$ ,走滑速率小于  $2 \text{ mm/a}$ 。祁连山中东段的肃南断裂同样表现出左旋走滑特征,其最大左旋滑动速率为  $5 \text{ mm/a}^{[89]}$ ,但我们通过对其基础资料的分析认为,其全新世以来位移量的总计应为文中 C 级水系的位移,而非 B 级水系位移,由此可以得

出,该断裂的左旋滑动速率应为  $0.8 \sim 2 \text{ mm/a}$ ,也是以低滑动速率为主要特征。

由于祁连山内部断裂相邻较为紧密, GPS 观测点较少,我们仅从垂直于祁连山走向的横穿剖面上估算其内部断裂的缩短速率及水平走滑速率均在  $1 \text{ mm/a}$  左右,大多以缩短速率为主,仅少量断裂存在走滑速率(图 3A、B 剖面)。对祁连山北缘断裂带, GPS 测量显示了不同段具有不同的垂直于断裂的缩短速率和平行于断裂的水平走滑速率(图 5),自西向东分别为:佛洞庙—红崖子断裂西段(图 5a):  $(2.1 \pm 2.2) \text{ mm/a}$ 、 $(2.3 \pm 2.2) \text{ mm/a}$ ;榆木山北缘断裂(图 5b):  $(1.4 \pm 2.2) \text{ mm/a}$ 、 $(0.8 \pm 2.2) \text{ mm/a}$ ,永昌南山断裂(图 3B 剖面)断裂则接近于零。前面的估算中(图 4b)已经得出了永昌南山北侧的龙首山断裂的逆冲滑动速率和左旋走滑速率,明显比河西走廊北部其他断裂的要大,其主要原因可能是到河西走廊的东端,滑动速率主要转换到了走廊北部的断裂上。

另外,横穿党河南山断裂的剖面也显示了较大幅度的缩短速率和水平走滑速率(右旋)(图 5c):  $(7.7 \pm 2.4) \text{ mm/a}$ 、 $(1.5 \pm 2.3) \text{ mm/a}$ ,由于没有确定的地质滑动速率,因此不好进行对比。对青藏高原东部边缘的六盘山断裂,断裂的地质滑动速率仅在少量的研究中提及<sup>[90]</sup>,断裂北段与海原断裂相斜接的部位具左旋逆走滑特性,据断错水系及山脊等地貌的测量,其平均水平滑动速率为  $1 \sim 3 \text{ mm/a}$ ,逆冲速率为  $0.9 \text{ mm/a}$ 。我们在该断裂北段的 GPS 速率剖面显示,以垂直于断裂的缩短速率为主,兼具一定的左旋走滑速率(图 5d),其结果是:  $(2.7 \pm 2.2) \text{ mm/a}$ 、 $(2.6 \pm 3.1) \text{ mm/a}$ 。

### 2.4 阿尔金断裂带

阿尔金断裂带是青藏高原北缘的另一条主控边界断裂,阿尔金断裂带的左旋走滑及其邻近地区的挤压逆断裂—褶皱作用可能吸收了印度板块向北运移量的  $20\% \sim 25\%$ <sup>[55]</sup>,曾作为青藏高原物质大幅度向东侧向挤出运动学模型的重要证据<sup>[2,44,91,92]</sup>,推测其晚第四纪左旋走滑速率高达  $(30 \pm 20) \text{ mm/a}^{[3,54,55]}$ ,或者仅为  $(5 \pm 2) \text{ mm/a}^{[56,93]}$ ,具有很大的不确定性,引起了对青藏高原侧向挤出模型的质疑和侧向挤出量有多大的争论<sup>[2,4,7,8,32~38]</sup>。同时,这种对滑动速率的解释与现今 GPS 所测量的沿阿尔金断裂中段约  $10 \text{ mm/a}$  的滑动速率结果存在较大的差异<sup>[11,51]</sup>。徐锡伟等<sup>[53]</sup>曾通过高精度 SPOT 卫星影像资料结合地貌特征解释及野外考察的基础上得出,

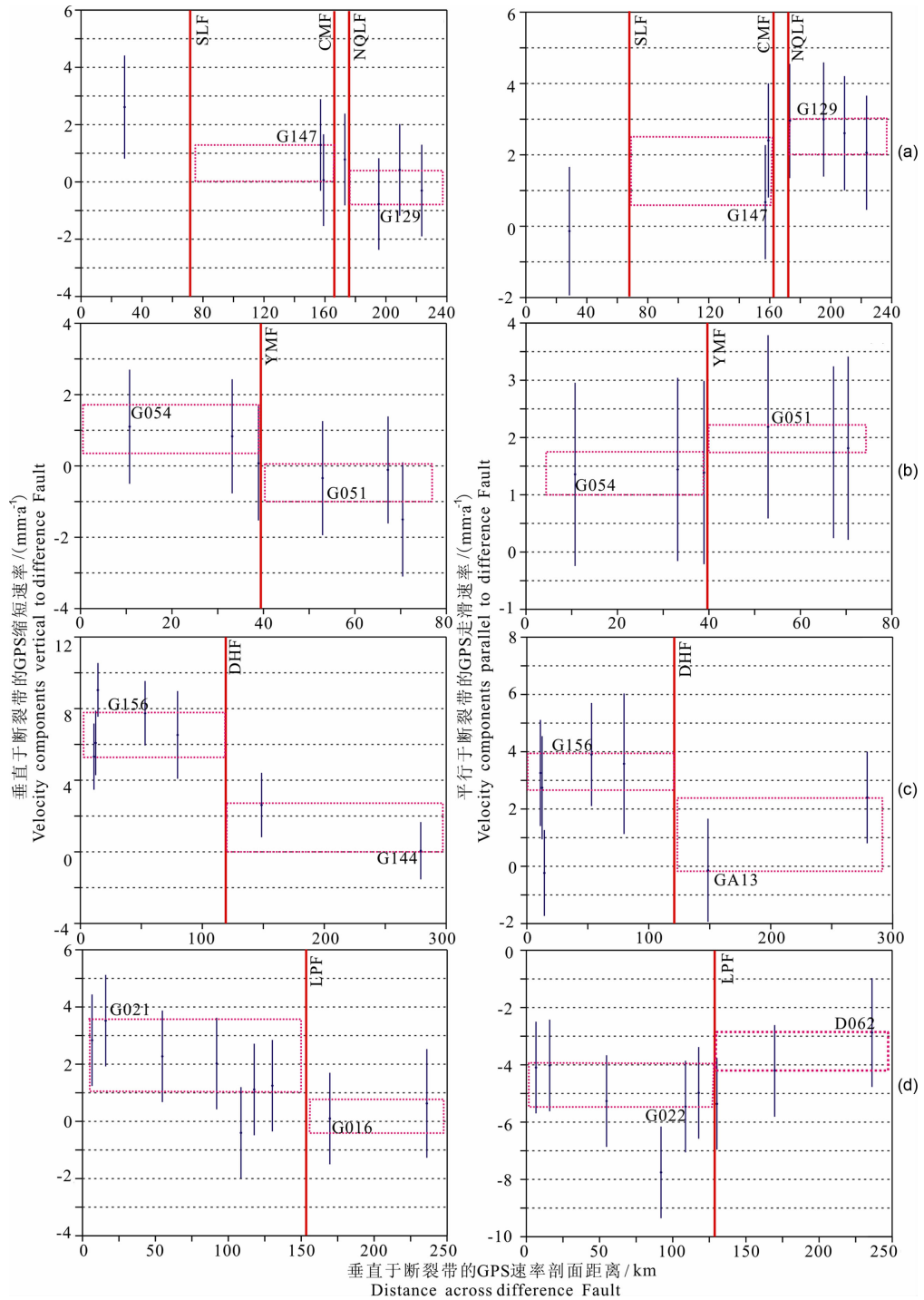


图5 祁连山北缘断裂(a、b)、党河南山断裂(c)及六盘山断裂(d)横穿断裂的GPS速率剖面，

紫红色点线方框为横穿不同断裂的缩短速率及水平速率估算选用台站

Fig. 5 GPS slip rates of the northern Qilianshan Fault(a,b), the Danghenanshan fault

(c) and the Liupanshan fault(d) across the fault. The station in Violet-red dotted-line

rectangle would be used for estimating striking-rate and shortening-rate

阿尔金断裂的滑动速率在西段为 17.5 mm/a,中段为 11 mm/a,东段为 4.8 mm/a,到最东端约为 2.2 mm/a,滑动速率自西向东呈现明显的递减趋势, Zhang 等<sup>[11]</sup>通过对河流阶地地貌的重新分析,得出阿尔金

断裂的滑动速率在肃北以西为 10 mm/a 左右,向东呈现明显的递减趋势,到断裂最东端约为 2 mm/a 左右,我们认为这一结果更确定地分析了地貌形成演化的过程,比较符合实际地貌发育过程,因此,我



们其他断层滑动速率判断过程中,是以此为主要依据的。

从 1994 年起,美国科罗拉多大学开始与新疆地震局合作,横跨阿尔金断裂布设了 GPS 观测线,该观测线起自柴达木盆地,横跨阿尔金断裂,止于塔里木盆地的若羌以北。据 Bendick 等<sup>[94]</sup>对该观测线观测资料的分析,阿尔金断裂的 GPS 左旋滑动速率为  $(9 \pm 5)$  mm/a。Chen 等<sup>[95]</sup>利用布设在青藏高原东部的 GPS 观测站,获得了阿尔金断裂东段的左旋滑动速率为 10 mm/a,缩短速率小于 5 mm/a。美国加州大学洛杉矶分校在阿尔金断裂两侧布设了 GPS 观测网,Shen 等<sup>[52]</sup>利用这些资料获得了其左旋滑动速率约 9 mm/a。所有这些 GPS 观测结果都与中国科学家的结果相近,而与 Peltzer 等<sup>[3]</sup>的 20~30 mm/a 结果相去甚远。Zhang 等<sup>[11]</sup>综合近十几年以来该地区 GPS 观测的数据,特别是“中国地壳运动观测网络”的观测结果,得到阿尔金断裂  $95^\circ\text{E}$  以西为 8~12 mm/a,向东逐渐降低到 1~2 mm/a,这与其重新解释的地质速率是完全吻合的。

### 2.5 断裂地质滑动速率与 GPS 估算速率的分布特征

我们根据前面总结将由阿尔金断裂与海原—祁连山断裂所围限的范围内断层的地质滑动速率(逆冲速率及走滑速率)及 GPS 所确定垂直于断层的缩短速率和平行于断裂的走滑速率标注于图 6 中,图中显示各主要断裂的逆冲速率与 GPS 所确定的垂直于断裂的缩短速率及地质走滑速率与 GPS 所确定的平行于断裂的走滑速率表现出一致性,说明地质方法晚第四纪长期滑动速率与现今 GPS 短期观测是可以相互补充的。

首先我们讨论断裂的晚第四纪逆冲速率与 GPS 地壳缩短速率的符合情况,对于以走滑为主的两大主控边界断裂(阿尔金和海原—祁连山断裂),其逆冲速率在地质表现上不是太明显,同时由于以往的研究中总是以这两条断裂的走滑为主要研究目标,对其逆冲速率没有太多的明确结果,但从目前我们用 GPS 跨断层地壳缩短速率所得到的结果,断裂上的逆冲速率与走滑速率表现出相同的特征,且逆冲速率的值大多小于走滑速率,这也进一步说明断裂是以走滑为主要特征的。对于祁连山内部断裂, GPS 所确定的逆冲速率大多小于 1 mm/a,这与地质滑动速率是吻合的,但祁连山最西端的玉门断裂及昌马断裂二者之间距离较近, GPS 所确定的缩短速率可能由两条断层所提供,因此数值上明显偏大。党河南山断裂的东段 GPS 所确定的缩短速率较大,

但由于处于人迹罕见的地区,至今没有地质逆冲速率的研究报道。而河西走廊北部的断裂,除龙首山断裂最东段 GPS 速率没有地质速率的对比外,其他断裂上是完全符合的,这一现象的原因可能是走廊东端两侧断裂上滑动速率转移分配的结果。青藏高原东北缘六盘山断裂上的 GPS 缩短速率明显大于地质逆冲速率的原因是 GPS 缩短速率包括了两侧盆地缩短与变形,而地质速率仅表明的是断裂带上的逆冲分量。

最主要的是反映青藏高原北部地区运动特征的走滑速率分布,两条主控边界断裂上不同段落平行于断裂的 GPS 水平走滑速率与地质滑动速率结果是完全符合的,二者反映了一个共同的分布趋势和运动特征。在祁连山最西端的山前断裂带上, GPS 观测的水平走滑速率与地质方法确定的走滑速率虽然不一致,但二者所表现出的共同特征是阿尔金断裂在其东端开始将其走滑速率分别转移到祁连山内部和边缘断裂带上,其本身滑动速率迅速降低,而到了祁连山中段,主要断裂特别是边缘断裂的运动特征则以逆冲为主,仅存在较小的水平走滑速率。中祁连的肃南断裂在其接近海原断裂时表现出明显的左旋走滑特征,这在地质速率结果及 GPS 速率中都得到了印证。而河西走廊北部的断裂,平行于断裂的 GPS 走滑速率表明,这些断裂没有明显的水平运动特征,这在地质地貌调查结果上也得到了证实,与逆冲速率结果相似的是,在走廊东段的龙首山断裂上表现出相对较大的 GPS 走滑速率,这一结果与逆冲速率的特征可能是相同的原因所致。高原东北部的六盘山断裂上地质速率与 GPS 速率是基本吻合的。这里还需要说明的是,党河南山断裂的东段 GPS 所确定的水平走滑是以右旋为主要特征的,这一结果与周边的断层性质都不相配,可能是因为用来确定该速率的 GPS 台站均距断层较远,反映的可能不完全是该断层的特征,另外,地质上也没有相应的地质速率对比。

## 3 断裂晚第四纪滑动速率及 GPS 速率所反映的高原北部变形的讨论

青藏高原北部变形特别是第四纪以来的构造变形,可能主要受主控边界断裂的运动特性及高原边缘及内部的构造变形的影响。晚第四纪地质滑动速率是作为断裂构造运动特征的最直接表现,而现今 GPS 观测是将空间卫星定位系统应用于地壳变形

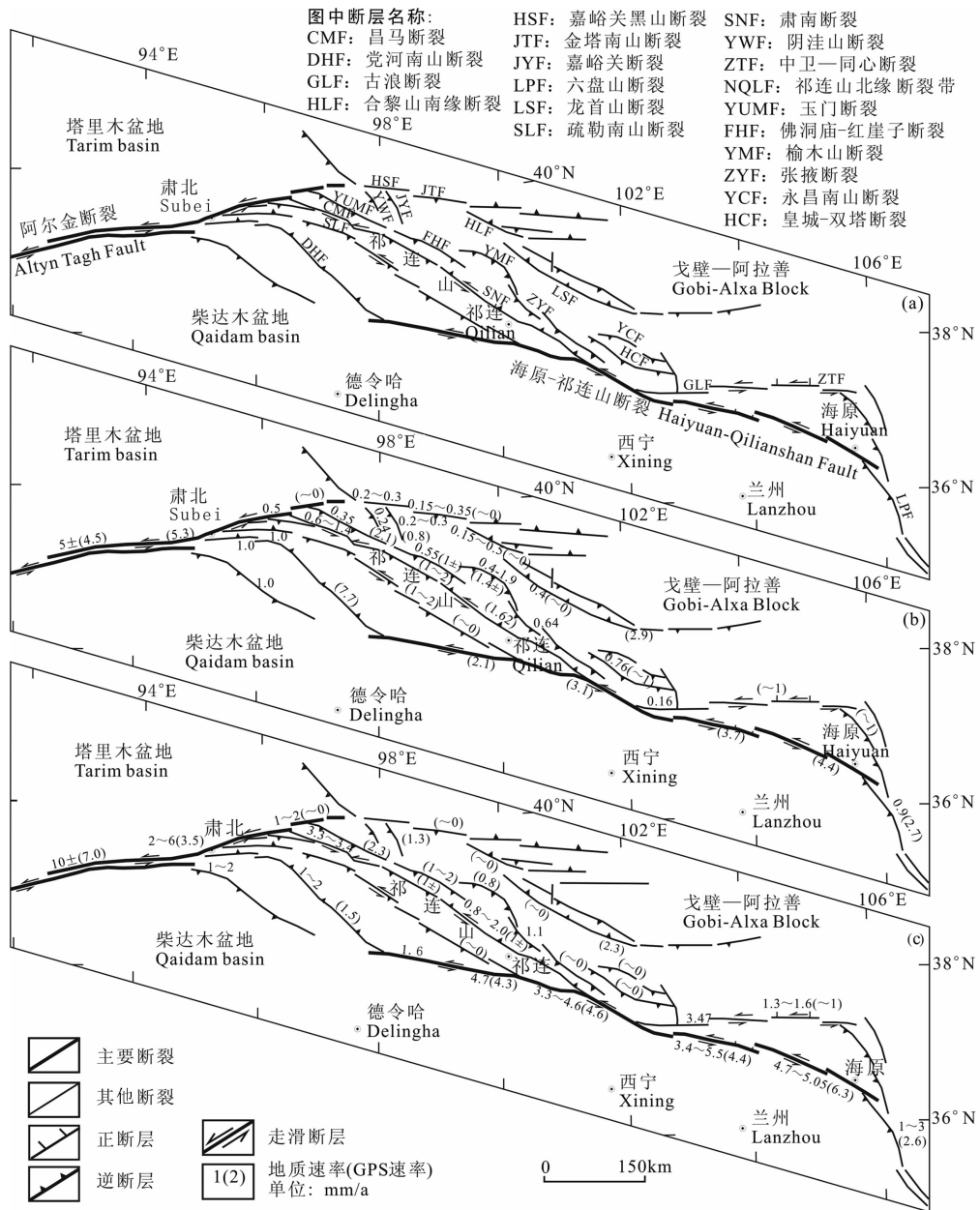


图 6 青藏高原北部地区晚第四纪地质滑动速率及 GPS 跨断裂速率分布图

- (a) 青藏高原北部断裂名称;
- (b) 断裂晚第四纪逆冲速率与 GPS 跨断裂缩短速率;
- (c) 断裂晚第四纪走滑速率与平行于断裂 GPS 走滑速率.

Fig. 6 Distribution map on the geological rate of late Quaternary and GPS rate along major fault

(a) Name of fault at the northern Tibet; (b) The thrust rate of late Quaternary on fault and the GPS shortening rate across fault (Unit: mm/a); (c) The strike rate late Quaternary on fault and the GPS rate parallel to fault (Unit: mm/a).

的连续观测上,来监测区域范围内的构造运动特征,我们将二者所得到的数值结合起来,通过断裂上滑动速率的分布特征,来讨论断裂构造之间的转换,以及边缘断裂间滑动速率的迁移和转换吸收特征,分析高原边缘变形模式.

### 3.1 主控边界断裂上晚第四纪滑动速率分布

作为青藏高原北部边缘的两条主控边界断裂,其活动习性及其断裂上滑动速率的分布特征直接地反

映着高原边缘的变形模式,关于边界断裂的滑动速率的争论也正是两种高原边缘变形主导模型的分歧所在<sup>[2,4,7,8,32~38]</sup>.根据 Zhang 等<sup>[11]</sup>对阿尔金断裂滑动速率重新解释的结果,阿尔金断裂的左旋走滑由西段稳定的 10 mm/a 左右到肃北以东开始快速降低,到最东端为 2 mm/a 左右,而与之对应的海原断裂由西向东则呈现逐渐增大的趋势,由哈拉湖一带的 1~2 mm/a,到了祁连、冷龙岭断裂增大到

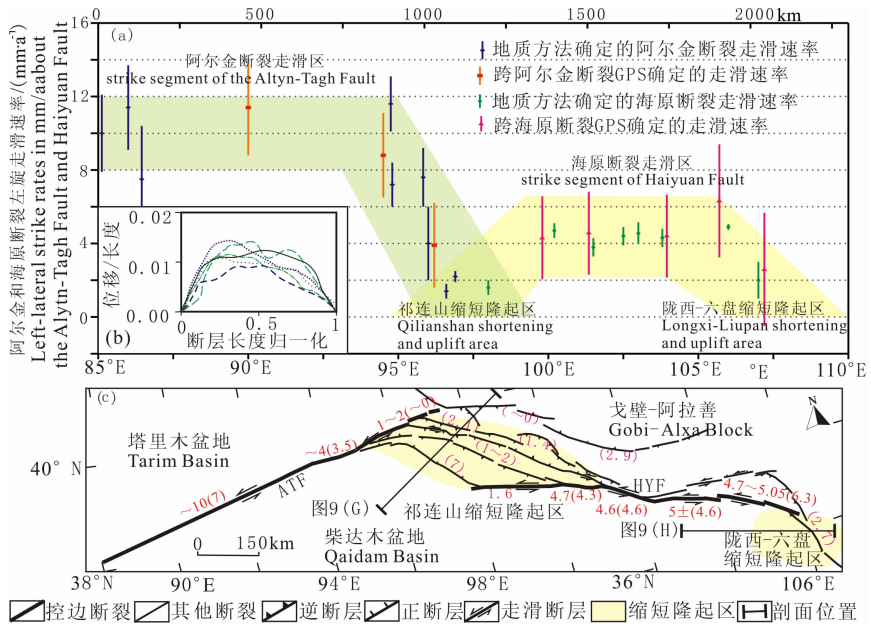


图 7 沿阿尔金断裂(绿色)和海原断裂(黄色)走滑速率变化

(a) 速率变化(阿尔金断裂数据来源于 Zhang 等<sup>[11]</sup>, 2007); (b) 断裂位移与长度弧形对应关系(据 Dawers 等<sup>[15]</sup>, 1993), 图中不同线型表示不同断层长度与位移; (c) 活动构造简化示意图, 图中沿主控边界断裂上的数值表示为其各段地质方法得到的走滑速率和 GPS 确定的水平走滑速率(括号中), 祁连山北缘及内部、河西走廊北侧及六盘山断裂的数字为 GPS 确定的垂直断层的缩短速率, 单位 mm/a.

Fig. 7 Slip rates along the Altyn-Tagh Fault (green) and the Haiyuan Fault (yellow) from various data sources

(a) Variation of slip rates (the data on Alytn-Tagh fault from Zhang et al. <sup>[11]</sup>, 2007). (b) Displacement versus distance along fault ( modified from Dawers et al. , 1993<sup>[15]</sup>), the different line represent different length of fault and displacement. (c) Simplified map on the active fault. The number along the Altyn-Tagh fault and Haiyuan fault is slip rate from geological method on major active fault and GPS rate parallel to fault in bracket. The number is GPS shortening rate at the Qilianshan, Hexi corridor and Liupansha. Unit: mm/a.

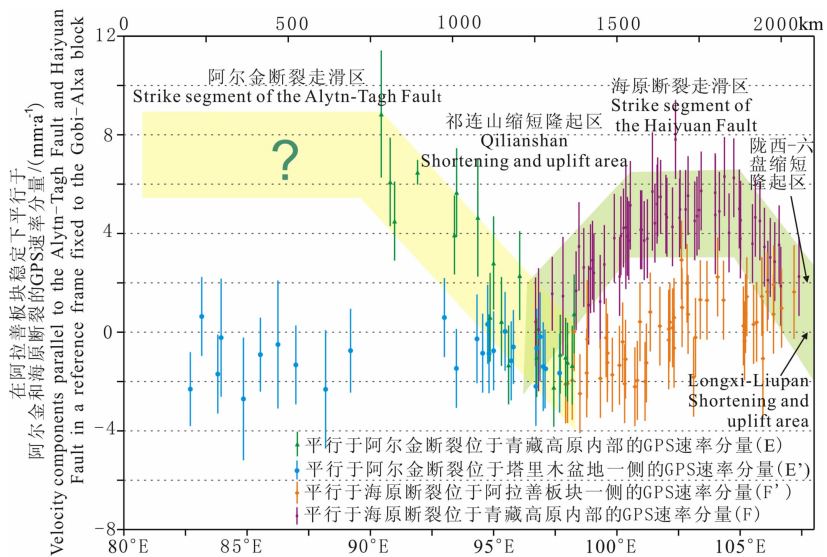


图 8 平行于阿尔金断裂和海原断裂的 GPS 速率剖面

Fig. 8 GPS velocity component parallel to the Altyn-Tagh fault and Haiyuan fault

4 mm/a±后逐渐稳定,沿老虎山—毛毛山断裂和海原断裂的滑动速率一直稳定延续着 4~5 mm/a,再转向北北西向六盘山断裂时,其左旋走滑速率降低到 1~3 mm/a,呈现了一条断裂从开始发育到稳定再到逐渐被转换吸收的过程(图 7),是完全符合 Dawers 等<sup>[15]</sup>所确立的断层长度与位移分布的模型. 同样,跨这两条断裂不同的 GPS 速率剖面的结果也显示了与地质滑动速率相同的结果,阿尔金断裂自西段的 8~12 mm/a 水平走滑速率,向东到 95°E 以东开始降低,逐渐过渡到最东端时趋于零<sup>[11]</sup>,海原—祁连山断裂带最西端由于缺乏足够的 GPS 观测点,我们不能估算出其跨断层的应变速率,但自祁连县开始向东, GPS 跨断层的水平走滑速率基本保持在 4~5 mm/a,一直到海原以东,断裂向北北西方向转换到六盘山断裂上,其滑动速率也降低到了 1~3 mm/a,甚至更低(图 7).

图 7 中所反映的另一个特征是主控边界断裂是如何通过中间的山脉隆起完成相互间的转换. 图 6 及图 7 中均显示,阿尔金断裂自 95°E 以东开始,滑动速率迅速降低,而此时祁连山内部以逆冲为主的断裂开始大规模地发育,到了祁连山北缘断裂带,阿尔金断裂上的滑动速率已接近于零,说明祁连山断裂系的党河南山断裂、疏勒南山断裂、昌马断裂及祁连山北缘断裂调整分配了阿尔金断裂上绝大部分走滑速率,这些断裂在与阿尔金断裂的分叉位置表现出左旋走滑兼逆冲的运动特征<sup>[44,56]</sup>,向东发展过程中断裂逐渐转换为以逆冲为主的运动特征. 而海原断裂的发展过程更是说明,断裂是通过一个完整的分布模型来完成自身转换的,断裂自西端开始发育时,继承了由阿尔金断裂通过祁连山区的多条断裂上的速率转换和调整所传递过来的速率,同时开始自身的发育和发展,这一点在肃南断裂上的表现就足以说明,到了断裂的东端也就是高原东北边界,六盘山两侧新生代盆地的发育及六盘山断裂向东逆冲及左旋走滑<sup>[90,96,97]</sup>,就基本转换了海原断裂上的左旋滑动速率.

对于阿尔金断裂向北东方向进入河西走廊西端以后,其地质滑动速率和 GPS 速率的结果都是逐渐趋于零或是很小<sup>[11]</sup>,说明断裂上的绝大部分走滑速率都已通过一系列的逆冲断层转换到了北西向的祁连山断裂带上,河西走廊北部断裂并非是阿尔金断裂向东北方向延伸的结果,阿尔金断裂可能就终止于河西走廊西端的宽滩山一带,河西走廊北部断裂的低逆冲速率和无明显走滑特征也证明了这一点.

### 3.2 GPS 速率反映主控边界断裂上滑动速率的迁移与转换

为了更好地判断主控边界断裂的滑动速率的迁移和重新分配特征,将阿尔金断裂两盘一定范围内相对于稳定阿拉善板块的 GPS 速度矢量投影到平行于断裂的方向上(图 8),这里首先说明的是阿尔金断裂东南盘的青藏高原腹地,由于缺少观测点,我们只能推测其分布和迁移规律,但其东段的 GPS 数据,也足以说明其特征了. 图 8 可以看出,平行于边界主要断裂阿尔金断裂及海原断裂的 GPS 速率剖面,与图 7 所给出的晚第四纪不同位置的地质滑动速率及跨断层 GPS 速率剖面所确定的走滑速率分布反映了相同的迁移和转换特征. 阿尔金断裂在相对稳定的塔里木盆地阻挡下,其主动盘青藏高原沿断裂向北北东方向推挤,其水平走滑速率向尾端逐渐降低,而稳定的塔里木盆地一侧则显示近乎一致的静止状态.

海原—祁连山断裂两侧的 GPS 应变速率首先被转换为相对于稳定的阿拉善板块的运动矢量,然后再将断裂两侧平行于断裂的速度分量分别表示在图 8 上. 与塔里木板块上 GPS 速率都分布在(0~−2) mm/a 区间内所反映出的无变形的状态略有不同,阿拉善板块西部的平行于断裂的 GPS 速率也分布在(0~−2) mm/a 区间,但东部却逐渐变为分布在(0~2) mm/a 区间,这反映了阿拉善地块中部可能存在(2~4) mm/a 的近东西向拉张作用. 断裂南盘青藏高原内部的 GPS 滑动速率的特征说明断裂自西端开始发育,滑动速率开始增加,到祁连县一带达到相对稳定的 4~5 mm/a,一直延伸到最东端海原,向东南开始降低,而在稳定的阿拉善板块一侧, GPS 应变速率表现为海原以西向西运动,海原以东向东运动的特征,这与区域构造应力条件下的板块运动是相吻合的,也就是阿拉善板块、鄂尔多斯板块这两个相对稳定的块体在相对于青藏高原块体向北东挤压过程中各自表现出的应变转换和迁移特征.

上述两条主控边界断裂上 GPS 速率所反映的速率迁移和转换特征,与 Dawers 等<sup>[15]</sup>所确立的断层长度与位移分布的模型是完全相似的. 从断层发育和发展过程来看,其位移的极值与滑动速率的极值都不会出现在其端部,而是断裂的中段. 因此由 GPS 应变速率所确定的断层水平滑动速率的迁移,反映了断裂上滑动位移到达断裂的端部后往往转换到其断层衔接区及阶区内的山脉隆起区内(图 7),通过隆起区或是盆地变形区后,其部分的滑动位移

再迁移到另一个方向的控边断裂上. 作为观测现今地壳形变的 GPS 观测系统, 最直接反映的近几十年以来地壳的运动状态, 同时也是局部断层运动特征的反映, 其连续多个台站的结果, 直接反映了沿主控边界断裂现今滑动速率的迁移和转换特征.

### 3.3 断裂尾端高原边缘山脉的隆起对高原边缘主控边界断裂滑动速率的吸收

当然, 断裂晚第四纪滑动速率的变化特征及 GPS 应变速率特征所反映的是高原边缘运动学的形式, 那么高原边缘断裂上低走滑速率和尾端速率逐渐降低之间是如何协调一致, 这关系到高原边缘变形模式的建立. 我们横穿阿尔金断裂东端的祁连山西段及海原断裂的最东端的陇西盆地及六盘山北段的 GPS 垂直于山脉走向的剖面(图 9, 位置为图 1 及图 7 中 G、H)得到, 祁连山最西段垂直于山脉走向的缩短速率是  $(9.9 \pm 2.4)$  mm/a, 而六盘山最北端及陇西盆地垂直于山脉走向的缩短速率是  $(5.9 \pm 2.2)$  mm/a, 与两条断裂稳定的水平滑动速率  $8 \sim 12$  mm/a 及  $4 \sim 5$  mm/a 是配套的, 说明边界断裂上的走滑速率到断裂的尾端是通过山脉的隆起、高海拔及新生代盆地变形引起的地壳缩短的方式吸收

的, 并没有完全沿边界断裂延续传播.

另外, 祁连山内部断裂表现出的以逆冲为主的运动特征, 逆冲速率自内向外均为小于  $1$  mm/a, 或  $1$  mm/a 左右, 而仅少有部分断裂表现出不明显的左旋走滑特征, 也同样说明高原边缘的变形是通过一种连续变形的模式来完成的, 横穿祁连山 GPS 速率的变化明显显示, 在祁连山内部及北缘, 应变速率相对较大, 而在祁连山以北河西走廊与阿拉善地区已接近于零. 六盘山由于山脉宽度较窄, 其变形是通过山脉隆起与两侧新生代盆地变形共同来完成的, 也是一种连续变形的模式. 这一特征与 Zhang 等<sup>[11]</sup>所建立的连续变形过程中平行于断裂的速率变化模型是完全一致的.

在高原的边缘(大型走滑断裂的尾端), 走滑断裂滑动速率的吸收是分布在一个相当宽的范围之内, 图 9 显示, 阿尔金断裂尾端的祁连山隆起和缩短的宽度大概不小于  $200$  km, 而海原—祁连山断裂尾端的陇西盆地及六盘山的缩短与隆起更是分布在大约  $300$  km 的范围内, 这进一步说明了高原边缘大型走滑断裂是通过高原内部的变形来调节其平衡的, 高原边缘的挤出过程, 是一种内部变形的调整过程, 是一种分布式的连续变形.

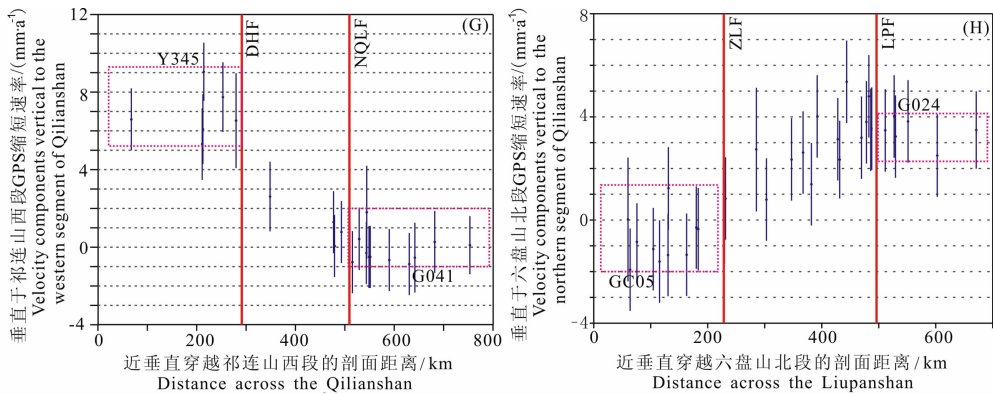


图 9 祁连山西段及六盘山北段的垂直于山脉走向的缩短速率剖面

紫红色点线方框为横穿不同位置的缩短速率估算选用台站.

Fig. 9 GPS shortening rate across the western segment of Qilianshan and the northern segment of Liupanshan

The station in violet-red dotted-line rectangle would be used for estimating shortening-rate.

## 4 结论

从断裂晚第四纪滑动速率及 GPS 跨断裂应变速率的结果显示, 青藏高原北部边缘的主要断裂以低滑动速率( $<10$  mm/a)为主, 特别是两条主要的边界断裂阿尔金断裂和海原—祁连山断裂. 阿尔金断裂自  $95^{\circ}\text{E}$  以西的  $8 \sim 12$  mm/a 稳定滑动速率, 向东开始逐渐降低到最东端约为  $1 \sim 2$  mm/a, 而海原

断裂自哈拉湖一带开始发育后, 滑动速率从  $1 \sim 2$  mm/a, 到祁连一带( $101^{\circ}\text{E}$  以东)增大到相对稳定的  $4 \sim 5$  mm/a, 直到过海原后, 转向六盘山一带, 滑动速率开始降低到  $1 \sim 3$  mm/a, 甚至更低. 这一结果与断裂长度与位移的弧形对应关系完全一致, 表明了断裂滑动速率弧形分布及尾端吸收模式和滑动速率在断裂间相互转换和调节的关系.

阿尔金断裂的滑动速率向北逐渐减小, 跨祁连山 GPS 缩短速率剖面结果说明祁连山的隆起(缩

短)可能吸收了阿尔金断裂的大部分稳定滑动速率,同时阿尔金断裂在空间分布上向北可能延伸不太远;海原—祁连山断裂的低滑动速率及沿断裂的运动特征,也说明断裂尾端的陇西盆地变形及六盘山的隆起是海原断裂上 4~5 mm/a 左旋走滑速率的主要吸收方式. 祁连山北缘和内部断裂及河西走廊北部的断裂所表现的逆冲为主的活动性质,对地壳增厚模式所强调的由逆冲断层和地壳增厚及局部高海拔来分解吸收地壳变形的说法是支持的.

以上结论对地壳增厚学说所强调的印度板块向北推挤导致韧性下地壳增厚和上地壳发育大量缓慢滑动断层,发生分布式的连续变形,其对青藏高原的变形吸收强调的是逆冲和地壳增厚及局部边缘的高海拔的结论给出了相应的证据. 当然,高原边缘的变形是复杂的过程,我们仅从目前断裂滑动速率及 GPS 应变速率来总结变形模式,更深层次的问题有待进一步研究和讨论.

**致谢** 感谢所在研究组全体成员在成文过程中提出的宝贵建议. 甘肃省地震局葛伟鹏、刘兴旺、汪万红,中国地震局地质研究所刘建辉、王伟涛、王志才等参加了野外工作,在此表示感谢. 同时感谢两位匿名评审人对文章的修改提出的宝贵意见.

## 参考文献(References)

- [ 1 ] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 1975, **189**: 419~426
- [ 2 ] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extronics in Asia: new insights from experiments with plasticine. *Geology*, 1982, **10**(12): 611~616
- [ 3 ] Peltzer G P Tapponnier, Armijo R. Magnitude of Late Quaternary left-lateral displacements along the north edge of Tibet. *Science*, 1989, **246**: 1285~1289
- [ 4 ] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, **294**(5574): 1671~1677
- [ 5 ] Me'riaux A S, Ryerson F J, Tapponnier P, et al. Rapid slip along the central Altyn Tagh fault: morphochronologic evidence from Cherchen He and Sulamu Tagh. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, B06401, doi 06410. 01029/02003JB002558
- [ 6 ] Me'riaux A S, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. The Aksay segment of the northern Altyn Tagh fault: tectonic geomorphology, landscape evolution, and Holocene slip rate. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, B04404 doi 04410. 01029/02004JB003210
- [ 7 ] Replumaz A, Tapponnier P. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks. *J. Geophys Res.*, 2003, **108**(B6): 2285, doi:10. 1029/2001JB000661
- [ 8 ] Royden L, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in Eastern Tibet. *Science*, 1997, **276**(5313): 788~790
- [ 9 ] England P, Molnar P. Active deformation of Asia: from kinematics to dynamics. *Science*, 1997, **278**(5338): 647~650, DOI:10. 1126/science. 278. 5338. 647
- [ 10 ] England P, Molnar P. Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, B12401, doi: 10. 1029/2004JB003541
- [ 11 ] 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, VOL. **26**, TC5010, doi:10. 1029/2006TC002014
- [ 12 ] Corne A J, Machette M N. Surface faulting accompanying the Borah Peak earthquake, central Idaho. *Geology*, 1984, **12**: 664~667
- [ 13 ] Cartwright J A, Trudgill B D, Mansfield C S. Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands grabens of SE Utah. *Journal of Structural Geology*, 1995, **17**: 1319~1326
- [ 14 ] Burbank D B, Anderson R S. *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science, Inc. 2001. 60~83
- [ 15 ] Dawers N H, Anders M H, Scholz C H. Growth of normal faults: Displacement-length scaling. *Geology*, 1993, **17**: 607~614
- [ 16 ] Plafkar G. Alaskan earthquake of 1964 and Chilean earthquake of 1960: implications for arc tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 1972, **77**: 901~924
- [ 17 ] Lajoie K R. *Coastal Tectonics, Active Tectonics*. Washington, D. C., National Academy Press, 1986. 95~124
- [ 18 ] Stein R S, King G C P, Rundle J B. The growth of geological structure by repeated earthquake. Field examples of continental dip-slip fault. *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93**: 13319~13331
- [ 19 ] Alexander J, Bridge J S, Leeder M R, et al. Holocene meander-belt evolution in an active extensional basin, southwestern Montana. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, **64**: 148~154
- [ 20 ] Scholze C H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, 1990. 439
- [ 21 ] Dawers N H, Anders M H. Displacement-length scaling and fault linkage. *Journal of structural Geology*, 1995, **17**: 607~614
- [ 22 ] Pollard D D, Segall P. Theoretical displacements and stresses near fractures in rock; with applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surface. In: Atkinson B K ed. *Fracture Mechanics of Rock*; London Academic Press, 1987. 277~349
- [ 23 ] Schlische R W, Young S, Ackermann R V, et al. Geometry and scaling relations of a population of very small rift-related normal faults. *Geology*, 1996, **24**: 683~686
- [ 24 ] Xu X, Yu G, Klinger Y, et al. Re-evaluation 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
- [25] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 汶川  $M_s$  8.0 地震地表破裂带及其发震构造. *地震地质*, 2008, **30**(3): 597~629  
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3): 597~629
- [26] Wesson R L, Helley E J, Lajoie K R, et al. Faults and future earthquakes. In: Borchardt R D ed. Studies for Seismic Zonation of the San Francisco Bay Region. U. S. Geological Survey Professional Paper 941A, 1975. 5~30
- [27] Christie-Blick N, Biddle K T. Deformation and basin formation along strike-slip faults. In: Biddle K T, Christie-Blick N eds. Strike-slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Spec. Pub. 37, 1985. 1~34
- [28] Deng Q, Zhang P, Chen S. Structure and deformation character of strike-slip fault zones. *Pure and Applied Geophysics*, 1986, **124**: 203~223
- [29] Machette M N, Persoius S F, Nelson A R. Paleoseismicity of the Wasatch Fault zone: a summary of recent investigation, interpretations, and conclusion. In: Gori P L ed. Assessment of Regional Earthquake Hazards and Risk Along the Wasatch Fault. Utah; United States Geological Survey Professional Paper 1500, 1992. 1~30
- [30] Machette M N, Persoius S F, Nelson A R. The Wasatch Fault zone. *USA Annales Tectonicae*, 1992, **6**: 5~39
- [31] Keller E A, Bonkowski M S, Korsch R J, et al. Tectonic geomorphology of the San Andreas fault zone in the southern Indio Hills, Coachella Valley, California. *Geological Society of America Bulletin*, 1982, **93**: 46~56
- [32] Peltzer P, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, and basins during the India-Asia collision—An experimental approach. *J Geophys Res*, 1988, **93**(B10): 15085~15117
- [33] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia. *Geophys Res Lett*, 1993, **20**: 895~898
- [35] England P C, McKenzie D. A thin viscous sheet model for continental deformation. *Geophys Int*, 1982, **70**(2): 295~321
- [36] Houseman G, England P C. A lithospheric thickening model for the Indo-Aisan collision. In: Yin A, Harrison T M, eds. Tectonic Evolution of Asia. New York: Cambridge University Press, 1996. 3~17
- [37] England P C, Molnar P. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on fault. *Geophys. J. Int.*, 1997, **130**(3): 551~582
- [38] Shen F, Leigh H R, Burchfiel B C. Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(B4): 6793~6816
- [39] Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, et al. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian shan, and evidence for a major seismic gap, the 'Tianzhu gap', on the western Haiyuan Fault, Gansu (China). *Geophysical Journal*, 1995, **120**(3): 599~645
- [40] 袁道阳. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[博士论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003. 6~145  
Yuan D Y. Tectonic deformation features and space-time evolution in northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau since the Late Cenozoic time [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, CEA, 2003. 6~145
- [41] Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along Altyn Tagh fault. *Science*, 1998, **282**: 74~76
- [42] Molnar P, Burchfiel B C, Liang K, et al. Geomorphic evidence for active faulting in the Altyn Tagh and qualitative estimates of its contribution to the convergence of the India and Eurasia. *Geology*, 1987, **15**: 249~253
- [43] Cavalié O, Lasserre C, Doin M P, et al. Measurement of interseismic strain across the Haiyuan fault (Gansu, China) by InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, **275**: 246~257
- [44] Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, et al. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet Plateau. *Geophys. J. Int.*, 1998, **135**: 1~47
- [45] 袁道阳, 张培震, 刘百麓等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造研究的几何图像与构造转换. *地质学报*, 2004, **78**(2): 270~278  
Yuan D Y, Zhang P Z, Liu B C, et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northern margin of Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2004, **78**(2): 270~278
- [46] 万景林, 王瑜, 李齐等. 阿尔金北段晚新生代山体隆升的裂变径迹证据. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, **20**(4): 222~224  
Wan J L, Wang Y, Li Q, et al. FT evidence of Northern Altyn uplift in late-Cenozoic. *Bull. Mineral. Petrol. Geochem* (in Chinese), 2001, **20**(4): 222~224
- [47] George A D, Marshaalless S J, Wyrwoll K, et al. Miocene cooling in the northern Qilian shan, northeastern margin of the Tibetan Plateau, revealed by apatite fission-track and vitrinite-reflectance analysis. *Geology*, 2001, **29**(10): 939~942
- [48] Zheng H, Powell C, An Z, et al. Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau. *Geology*, 2000, **28**(8): 715~718
- [49] 杨景春, 谭利华, 李有利等. 祁连山北麓河流阶地与新构造演化. *第四纪研究*, 1998, (3): 229~237  
Yang J C, Tan L H, Li Y L, et al. River terraces and neotectonic evolution at north margin of the Qilianshan Mountains. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 1998, (3): 229~237

- [50] Wang Q, Zhang P, Freymueller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System (GPS) measurements. *Science*, 2001, **294**:574~577
- [51] Zhang P, Shen Z, Wang M, et al. continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, **32**(9):809~812
- [52] Shen Z K, Wang M, Li Y, et al. Crustal deformation associated with the Altyn Tagh fault system, western China, from GPS. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**:30607~30621
- [53] 徐锡伟, Tapponnier P, Van Der Wored 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), 2003, **33**(10):967~974  
Xu X W, Tapponnier P, Van Der Wored J, et al. Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn-Tagh Fault and its structural transformational model. *Sci. China (Ser. D; Earth Sci.)* (in Chinese), 2003, **33**(10):967~974
- [54] Meyer B, P Tapponnier, Y Gaudemer, et al. Rate of left lateral movement along the easternmost segment of the Altyn Tagh Fault, east of 96°E (China). *Geophys. J. Int.*, 1996, **124**:29~44
- [55] Molnar P, Burchfiel B C, Liang K Y, et al. Geomorphic evidence for active faulting in the Altyn Tagh and northern Tibet and qualitative estimates of its contribution to the convergence of India and Eurasia. *Geology*, 1987, **15**:249~253
- [56] 国家地震局阿尔金活动断裂带课题组. 阿尔金活动断裂带. 北京:地震出版社, 1992. 1~165  
The Group of The Altyn Tagh Active Fault System, CEA. The Altyn Tagh Active Fault System(in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1992. 1~165
- [57] Lasserre C, Morel P H, Gaudemer Y, et al. Postglacial left slip rate and past occurrence of  $M \geq 8$  earthquakes on the western Haiyuan fault, Gansu, China. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:17633~17651
- [58] Lasserre C, Y Gaudemer, P Tapponnier, et al. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Longling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(B11): 2276, doi:10.1029/2000JB000060
- [59] Burchfiel B C, Zhang P, Wang Y, et al. Geology of the Haiyuan fault zone, Ningxia Autonomous Region, China and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 1991, **10**:1091~1110
- [60] 国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局. 海原活动断裂带. 北京:地震出版社, 1990. 99~138  
Institute of Geology, CEA, and Ningxia Seismological Bureau of China. Haiyuan Active Fault System(in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1990. 99~138
- [61] Zhang P, Molnar P, Burchfiel B C, et al. Bounds on the Holocene slip rate along the Haiyuan fault, north-central China. *Quaternary Research*, 1988, **30**:151~164
- [62] Hetzel R, Tao M, Stephen Stokes, et al. Late Pleistocene// Holocene slip rate of the Zhangye thrust(Qilian Shan, China) and implications for the active growth of the northeastern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2004, **23**:TC6006~6023
- [63] 邓起东, 张培震, 冉勇康等. 中国大陆活动构造基本特征. 中国科学(D), 2002, **32**(12):1020~1030  
Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Basic characteristics of active tectonics of China. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2002, **32**(12):1020~1030
- [64] Braun J, Beaumont C. Three-dimensional numerical experiments of strain partitioning at oblique plate boundaries: implications for contrasting tectonic styles in the southern Coast Ranges, California and central South Island, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**:18059~18074
- [65] Norris R J, A F Cooper. Late Quaternary slip rate and slip partitioning on the Alpine Fault, New Zealand. *Journal of Structural Geology*, 2000, **23**:507~520
- [66] Nicol A, Disen R Van. Up-dip partitioning of displacement components on the oblique-slip Clarence Fault, New Zealand. *Journal of Structural Geology*, 2002, **4**(9):1521~1535
- [67] 田勤俭, 丁国瑜, 申旭辉. 青藏高原东北隅强震构造模型. 地震, **22**(1):9~16  
Tian Q J, Ding G Y, Shen X H. Seismic tectonic model of the northeastern corner of the Tibet Plateau. *Earthquake* (in Chinese), 2002, **22**(1):9~16
- [68] 牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连等. 中国地壳运动观测网络. 大地测量与地球动力学, 2002, **22**(3):88~93  
Niu Z J, Ma Z J, Chen X L, et al. Crustal observation network of China. *Crustal Deformation and Geodynamics* (in Chinese). 2002, **22**(3):88~93
- [69] Shen Z K, Zhao C, Yin A, et al. Contemporary crustal deformation in East Asia constrained by global positioning system measurements. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:5721~5734
- [70] Shen Z K, Lü J N, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, B11409, doi: 10.1029/2004JB003421
- [71] 王敏, 沈正康, 牛之俊等. 现今中国陆地地壳运动与活动块体模型. 中国科学(D辑:地球科学), 2003, **33**(增刊): 21~32  
Wang M, Shen Z K, Niu Z J, et al. Contemporary crustal deformation of the Chinese continent and tectonic block model. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2003, **33**(Suppl.):21~32
- [72] Gan W, Zhang P, Shen Z, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: B08416, doi: 10.1029/2005JB004120
- [73] Deng Q, Song F, Zhu S, et al. Variations in the geometry and amount of slip on the Haiyuan (Nanxihashan) fault zone, China, and the surface rupture of the 1920 Haiyuan



- earthquake. In: Das S, Boatwright J, Scholz C H eds. *Earthquake Source Mechanics*. American Geophysical Monograph, 1986, **37**:169~182
- [74] 刘百箴,周俊喜. 海原活断层上的史前大地震. *地震地质*, 1985, **7**(4):11~21
- Liu B C, Zhou J X. The prehistoric major earthquakes for Haiyuan active fault. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1985, **7**(4):11~21
- [75] 冉勇康,段瑞涛,邓起东等. 海原断裂高湾子地点三维探槽的开挖与古地震研究. *地震地质*, 1997, **19**(2):7~107
- Ran Y K, Duan R T, Deng Q D, et al. 3-D trench excavation and paleoseismology at Gaowanzi of the Haiyuan fault of the Haiyuan fault. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1997, **19**(2):97~107
- [76] 李传友. 青藏高原东北部几条主要断裂带的定量研究[博士学位论文]. 北京:中国地震局地质研究所. 2005. 193~203
- Li C Y. Quantitative studies on major active fault zones in Northeastern Qinghai-Tibet Plateau [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, CEA, 2005. 193~203
- [77] 何文贵,刘百箴,袁道阳等. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究. *西北地震学报*, 2000, **22**(1):90~97
- He W G, Liu B C, Yuan D Y, et al. Research on slip rates of the Lenglongling active fault zone. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 2000, **22**(1):90~97
- [78] 何文贵,刘百箴,吕太乙等. 老虎山断裂带分段性研究. *西北地震学报*, 1994, **16**(3):66~72
- He W G, Liu B C, Lü T Y, et al. Study on the segmentation of Laohushan fault zone. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1994, **16**(3):66~72
- [79] 袁道阳,刘百箴,吕太乙等. 北祁连山东段活动断裂带的分段性研究. *西北地震学报*, 1998, **20**(4):27~34
- Yuan D Y, Liu B C, Lü T Y, et al. Study on the segmentation in east segment of the northern Qilianshan Fault zone. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1998, **20**(4):27~34
- [80] 张培震,王敏,甘卫军等. GPS 观测的活动断裂滑动速率及其对现今动力学的制约. *地学前缘*, 2003, **10**(特刊):81~92
- Zhang P Z, Wang M, Gan W J, et al. Slip rates along major active faults from GPS measurements and constraints on contemporary continental tectonics. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, **10**(Suppl.):81~92
- [81] Hetzel R, S Niedermann, S Ivy-Ochs, et al.  $^{21}\text{Ne}$  versus  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  exposure ages of fluvial terraces: The influence of crustal Ne in quartz. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, **201**:575~591
- [82] 国家地震局地质研究所,国家地震局兰州地震研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂系. 北京:地震出版社, 1993. 148~174
- Institute of Geology, CEA, and Lanzhou Institute of Seismology, CEA. The Qilian Mountain-Hexi Corridor Active Fault System (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993. 148~174
- [83] 闵伟,张培震,何文贵等. 河西盆地断层活动特征及古地震研究. *地震地质*, 2002, **24**(1):35~44
- Min W, Zhang P Z, He W G, et al. Research on the active faults and paleoearthquakes in the western Jiuquan basin. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2002, **24**(1):35~44
- [84] Hetzel R, Niedermann S, Tao M, et al. Low slip rates and long-term preservation of geomorphic features in Central Asia. *Nature*, 2002, **417**:428~432
- [85] 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. 21~87
- Chen W B. Principal tectonic deformation features and their generation mechanism in the Hexi Corridor and its adjacent regions since the late Quaternary [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, CEA, 2003. 21~87
- [86] Tapponnier P, Meyer B, Avounc J P, et al. Active thrusting and folding in the Qilianshan, and decoupling between upper crust and mantle in the Northeastern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, **97**:382~403
- [87] 郑文俊,袁道阳,何文贵. 祁连山东段天桥沟—黄羊川断裂古地震活动习性研究. *地震地质*, 2004, **26**(4):645~657
- Zheng W J, Yuan D Y, He W G. Characteristics of palaeo-earthquake activity along the active Tianqiaogou-Huangyangchuan fault on the eastern section of the Qilianshan mountains. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2004, **26**(4):645~657
- [88] 国家地震局兰州地震研究所. 昌马活动断裂带. 北京:地震出版社, 1992. 46~66
- Lanzhou Institute of Seismology, CEA. The Changma Active Fault System (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1992. 46~66
- [89] 刘建生,刘百箴,袁道阳. 肃南断裂晚第四纪活动特征及古地震初步研究. *中国活动断层研究*. 北京:地震出版社, 1994. 36~41
- Liu J, Liu B C, Yuan D Y. Preliminary study of palaeoearthquakes and active features of Sunan fault since late quaternary. In: *Study on Active Fault of China* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1994. 36~41
- [90] 向宏发,魏顺民,张秉良等. 六盘山东麓活动逆断裂构造带晚第四纪以来的活动特征. *地震地质*, 1998, **20**(4):321~327
- Xiang H F, Guo S M, Zhang B L, et al. Active features of the eastern Liupanshan piedmont reverse fault zone since late Quaternary. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1998, **20**(4):321~327
- [91] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 1976, **264**:319~324
- [92] Avounc J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia. *Geophys. Res. Letters*, 1993, **20**(10):895~898
- [93] Zheng J. Significance of the Altun Fault of China. *Episodes*, 1991, **14**:307~312
- [94] Bendick R, Bilham R, Freymueller J, et al. Geodetic evidence

for a low slip rate in the Altyn Tagh Fault system. *Nature*, 2000, **404**:69~72

- [95] Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *Jour Geophys Res*, 2001, **105**:16215~16227

- [96] Zhang P, Burchfiel B C, Molnar P, et al. Rate, amount, and style of late Cenozoic deformation of southern Ningxia,

northeastern margin of Tibetan Plateau. *Tectonics*, 1991, **10**: 1111~1129

- [97] Zheng D, Zhang P, Wan J, et al. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupanshan thrust from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **248**:183~193

(本文编辑 胡素芳)

## 欢迎订阅《地球物理学报》

《地球物理学报》创刊于 1948 年,是中国科学院地质与地球物理研究所、中国地球物理学会联合主办的有关地球物理科学的综合性学术刊物。主要刊载固体地球物理、应用地球物理、地磁和空间物理、大气和海洋地球物理,以及与地球物理密切相关的交叉学科研究成果的高质量论文。SCI 等国际著名检索系统收录,国内外公开发行人。2010 年《地球物理学报》为月刊,每期定价 70 元,全年定价 840 元(含邮资)。国内邮发代号 2-571。也可直接从编辑部订购,保证快捷准时。

订阅地址:北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮编:100029

电话:010-82998105 传真:010-82998107

电子邮件:prog@mail.igcas.ac.cn xtq@mail.igcas.ac.cn

联系人:刘少华 肖台琴

开户行:中国农业银行北京健德支行

银行帐号:190901040000456

收款单位:中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学报》款,同时写上您的姓名和联系地址及发票单位)