

李杰, 陈刚, 魏文薪, 帕尔哈提·再努拉, 王晓强, 刘代芹, 李桂荣, 方伟, 陈述江, 孙小旭. 2016. 基于 GPS 观测的北天山主要断裂现今构造运动特征研究. 地震学报, 38(5): 751-760. doi:10.11939/jass.2016.05.009.  
Li J, Chen G, Wei W X, Paerhati·Zainula, Wang X Q, Liu D Q, Li G R, Fang W, Chen S J, Sun X X. 2016. Characteristics of present-day tectonics movement of typical faults in northern Tianshan mountain deduced from GPS observation. Acta Seismologica Sinica, 38(5): 751-760. doi:10.11939/jass.2016.05.009.

## 基于 GPS 观测的北天山主要断裂 现今构造运动特征研究<sup>\*</sup>

李 杰<sup>1),\*</sup> 陈 刚<sup>2)</sup> 魏文薪<sup>3)</sup> 帕尔哈提·再努拉<sup>1)</sup> 王晓强<sup>1)</sup>  
刘代芹<sup>1)</sup> 李桂荣<sup>1)</sup> 方 伟<sup>1)</sup> 陈述江<sup>1)</sup> 孙小旭<sup>1)</sup>

1) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

2) 中国武汉 430074 中国地质大学(武汉)信息工程学院

3) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

**摘要** 借助分布在北天山地区最新 GPS 点位的运动观测资料, 利用 GAMIT/GLOBK 数据处理软件获取了北天山地区现今地壳的运动位移场。以该位移场为基础, 利用弹性半空间位错理论, 估算了研究区内博罗科努—阿其克库杜克断裂和准噶尔盆地南缘断裂两条具有代表性的主要断裂的现今活动速率。结果表明: 博罗科努—阿其克库杜克右旋走滑断裂东、西两段滑移速率的差异性不明显, 1944 年 3 月 10 日乌苏南  $M_s 7.2$  强震发生后, 该断层现今表现为震后微蠕滑运动, 东、西两段滑动速率均在 1—2 mm/a 之间; 准噶尔盆地南缘断裂现今滑动速率为  $(5.6 \pm 1.0)$  mm/a。

**关键词** 北天山断裂 GPS 观测 构造活动 位错模型

doi:10.11939/jass.2016.05.009

中图分类号: P315.72<sup>+</sup>5

文献标志码: A

## Characteristics of present-day tectonics movement of typical faults in northern Tianshan mountain deduced from GPS observation

Li Jie<sup>1),\*</sup> Chen Gang<sup>2)</sup> Wei Wenxin<sup>3)</sup> Paerhati·Zainula<sup>1)</sup> Wang Xiaoqiang<sup>1)</sup>  
Liu Daiqin<sup>1)</sup> Li Guirong<sup>1)</sup> Fang Wei<sup>1)</sup> Chen Shujiang<sup>1)</sup> Sun Xiaoxu<sup>1)</sup>

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830011, China

2) Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

**Abstract:** Based on the latest multiple-epoch observation data of the GPS sites in northern Tianshan mountain, this paper obtained the present-day GPS sites velocity fields of the crustal movement in northern Tianshan mountain, using GAMIT/GLOBK processing software. Based on an elastic half-space dislocation

<sup>\*</sup> 基金项目 国家自然科学基金(41374030, 41274036)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012IES0308)和地震科技星火计划(XH11030, XH14054Y, XH16042Y)共同资助。

收稿日期 2015-11-22 收到初稿, 2016-04-12 决定采用修改稿。

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: lijie@sohu.com



model, slip rate of the two typical faults are constrained by GPS-derived crustal deformation displacement velocities of the northern Tianshan mountain. One fault is Boluokenu-Aqikekuduke (BoA for short) fault, and the other is southern margin fault of Junggar basin. The GPS results show that the slip rate difference between east and west segment of right-lateral strike-slip BoA fault is not obvious. The fault exhibited creeping slightly with micro-seismicity within 1—2 mm/a since  $M_s 7.2$  south Wusu earthquake occurred on March 10, 1944. The present-day slip rate in southern margin fault of Junggar basin almost keeps  $(5.6 \pm 1.0)$  mm/a.

**Key words:** northern Tianshan mountain faults; GPS observation; tectonic activity; dislocation model

## 引言

天山作为新生代内陆大型造山带之一,经历了古生代若干次造山运动和夷平作用后,受印度板块向欧亚大陆碰撞和持续挤压楔入的影响,再度复活隆升. 天山西起哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦等国家,东至我国新疆哈密尖灭,东西全长 2500 km,宽度平均为 300 km,是亚洲大陆最宏伟的年轻山系之一(邓起东等, 2000).

由于受南北地块(南侧以塔里木盆地、帕米尔高原为主,北侧为准噶尔盆地和哈萨克地台)的夹击(张培震等, 1996),天山的现今活动以山体隆升向南北两侧的双向逆冲推覆为主,山前-盆地过渡带内存在着众多的逆冲褶皱构造,其造山运动过程伴随着由逆冲断层和大规模褶皱带的产生而造成山体地壳缩短并转换为地壳增厚或隆升的垂直运动(Tapponnier, Molnar, 1979; 冯先岳, 1986; Avouac *et al.*, 1993; Yin *et al.*, 1998);但同时也发育着规模巨大的斜切天山的走滑断裂和分界断裂,这些断裂起到了重要的力学调整作用(Burtman *et al.*, 1996; 沈军等, 2003). 当断裂规模巨大、错动幅度剧烈时,断裂两侧的地壳会发生强烈的褶皱构造变形以及形成挤压逆冲推覆构造,推覆成山. 开展这些典型断裂的滑移速率研究对区域构造运动规模和地震危险性判定将起到重要的参考和支撑作用,北天山与中天山的分界断裂——博罗科努—阿其克库杜克断裂(以下简称为博阿断裂)和天山造山带北缘与准噶尔地块的分界断裂——准噶尔盆地南缘断裂就属于这两类断裂(邓起东等, 2000)(图 1).

对于北天山地区这两条规模巨大、发育良好的断裂活动的研究认识,基本来自前人从地质学角度通过古地震形变带及第四纪断层活动性和利用河流阶地错位等方法进行的考察和论证(沈军, 杨晓平, 1998; 邓起东等, 2000; 杨晓平, 沈军, 2000; 沈军等, 2003),较少有空间大地测量方面的研究. 虽然杨少敏等(2008)和李杰等(2010)通过 GPS 观测对天山地区开展了研究分析工作,但局限于观测资料的时空分布密度和研究区域的重点关注程度,对北天山地区分界断裂的研究目前仍处于初步研究阶段. 本文拟利用最新的 GPS 观测资料对博阿断裂和准噶尔盆地南缘断裂这两条分界断裂的现今构造活动进行分析,利用断层滑动模型通过 GPS 速度场来定量研究断裂的滑动幅度和分布情况.

## 1 GPS 测网与数据处理

北天山 GPS 流动测网最初由乌鲁木齐地区附近 3 个建于 20 世纪 80 年代的红外激光

测距网合并改造而成，主要集中在乌鲁木齐地区(仅 9 个测点)(王晓强等，2002)。随着北天山地区地壳形变和构造活动研究的深入，新疆维吾尔自治区地震局对最初的乌鲁木齐观测网进行了优化设计。借助在北天山地区开展的基金课题，陆续将乌鲁木齐观测网扩大到西至温泉、昭苏，南至库车、轮台，北至独山子，东至阜康、达坂城等地，最大程度地覆盖了近年来地震活动频度相对较低，但仍有潜在中强震危险的北天山地震带上的主要断层。使用的 GPS 观测仪器早期为 Trimble 4000SST 和 5700 等，后期主要使用天宝系列的 R7，NET R8 和 NET R9 等，观测时间为 36—48 小时，观测点位 31 个(王晓强等，2005，2007；李杰等，2010)。近年来，随着“中国大陆构造环境监测网络”(简称陆态网络)项目的开展(李强等，2012)，研究区内新增近 30 个 GPS 测点(图 1)，极大地提高了北天山地区地壳形变研究分析的点位密度。同时借助与中亚国家开展的科技合作交流，我们同时也获取了境外周边地区的 GPS 观测资料(王晓强等，2007；Zubovich *et al*，2010)。

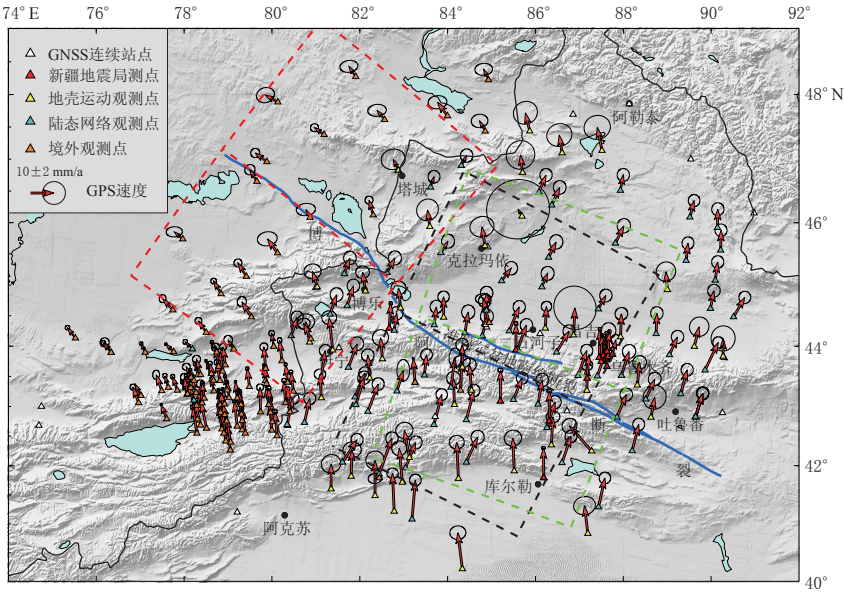


图 1 北天山及其邻区 GPS 点位速度场分布图

黑色和红色虚线框分别为博阿断裂东、西段速度场覆盖区域，绿色虚线框为准噶尔盆地南缘断裂速度场覆盖区域，蓝色实线为博阿断裂和准噶尔盆地南缘断裂

Fig. 1 Distribution of GPS velocity fields in north Tianshan mountain and its adjacent areas  
The black and red dashed rectangle zones delineate the velocity fields in eastern and western segments of BoA fault, respectively; green dashed rectangle zone delineates the velocity field in southern margin fault of Junggar basin. The blue lines represent the BoA fault and the southern margin fault of Junggar basin

在数据处理方面，本文将研究区内外的连续国际 GNSS 服务组织(IGS)跟踪站观测数据纳入到全网之中，进行联合处理。通过高精度轨道定位，提高数据处理精度，统一参考框架，保持解算结果的一致，从而获得最终可靠的变形结果。使用 GAMIT/GLOBK 软件对观测数据进行处理，其处理方案参见李杰等(2012)文章。所使用的数据资料为 1998—2014 年的 GPS 观测结果，计算得到的速度场考虑了近期中强地震的影响，包括 2012 年 6 月 30 日新源—和静  $M_s6.6$  地震的同震影响。

天山的构造演化离不开新生代时期印度大陆与欧亚大陆的碰撞，由南北地块的双向夹

击而成(王琪等, 2000). 可以说, 天山的变形与构造机理完全来源于印度板块与欧亚大陆的碰撞, 因此在利用 GPS 对地观测技术研究天山地区形变时, 以刚性的哈萨克地台及东部稳定的西伯利亚地块作为地壳运动的参考基准较为合适, 计算得到的研究区域地壳运动结果也可代表其相对欧亚板块的运动状态, 能客观地反映在远程作用力推动下的断层活动信息(Kogan *et al.*, 2000).

博阿断裂属于右旋走滑断裂(沈军等, 2003). 对于走滑断层, 本文根据杨少敏等(2008)文章, 假定区域地形变资料服从弹性位错理论, 采用无限长走滑断层弹性位错模型, 可以利用下式(二维扭旋模型公式)近似得到走滑断层的滑移运动信息(Savage, Burford, 1973; Freymueller *et al.*, 1999):

$$v = \frac{s}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{h}\right), \quad (1)$$

式中,  $v$  为测站速率,  $s$  为断层滑动速率,  $x$  为测站与断层的距离,  $h$  为断层闭锁深度.

准噶尔盆地南缘断裂带作为构造单元的分界线, 在新构造运动时期表现为强烈的逆断裂活动, 为重要的边界断裂, 控制着其南北两侧的地质构造. 对于倾滑断层, 地表位移可以用下式来表示(Freund, Barnett, 1976):

$$v = s \left[ \frac{h^2 \sin \alpha - x h \cos \alpha}{\pi(h^2 + x^2)} + \arctan\left(\frac{x}{h}\right) \cos \alpha \right], \quad (2)$$

从而求得最终的断层滑移速率. 式中,  $\alpha$  为断层倾角.

## 2 北天山主要活动构造的现今运动特征研究

### 2.1 博阿断裂运动特征

博阿断裂是划分准噶尔盆地—北天山褶皱系与天山褶皱系的分界断裂, 是一条具有代表性的斜贯天山的大规模活动断裂. 该断裂在哈萨克斯坦境内沿阿拉套山北麓与阿拉湖相连接, 从阿拉山口进入我国. 博阿断裂全长近 1400 km, 其中在新疆境内长约 1000 余千米, 走向为 NW 向, 但大致以精河东为界呈向南突出的弧形, 西段走向为  $310^\circ$ — $320^\circ$ , 东段走向从精河东至吐鲁番盆地南部转向为  $300^\circ$ . 作为重要的构造分界线, 该断裂历史上曾发生过多次中强地震(沈军等, 2003), 如 1944 年 3 月 10 日的乌苏南  $M7\frac{1}{4}$  强震, 以及 1971 年 8 月的乌苏南  $M4.8$  地震等.

借助式(1), 利用多期分布在断层两侧的 GPS 点位运动速度资料, 本文得到了断层现今活动的滑移速率, 如图 2 所示. 沈军等(2003)研究结果表明, 总长超过 1000 km 的博阿断裂在整个北天山地区的构造演化过程中, 在不同的区域有着不同程度的构造变形. 依据其对博阿断裂的分段研究, 本文以穿过阿拉山口抵达精河后继续向东南延伸至与喀什河断裂交汇处的断层节点为界, 将博阿断裂分为西、东两段.

根据新疆地震目录<sup>①</sup>统计, 天山地区中强地震的震源深度多集中在 5—25 km, 卢德源等(2000)对横跨天山的人工爆破地震剖面的研究结果表明, 北天山山前下部结晶基底顶界面最大深度也在该范围内, 因此我们固定断层闭锁深度, 参考杨少敏等(2008)结果, 取其平均值为 15 km. 利用 GPS 点位的运动速率, 根据式(1)反演得到闭锁深度为 15 km 的博

<sup>①</sup> 地震数据管理与服务系统. <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm>

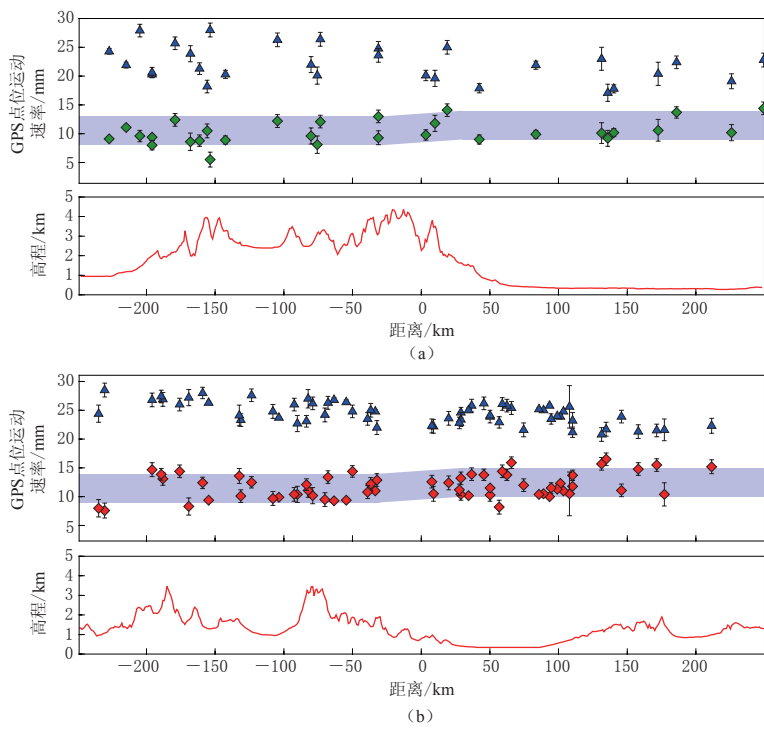


图 2 博阿断裂的 GPS 速度场剖面

(a) 以(85.0°E, 43.0°N)为中心, 沿 NE27°方向投影的 GPS 速度剖面; (b) 以(80.8°E, 46.0°N)为中心, 沿 NE38°方向投影的 GPS 速度剖面. 红色和绿色菱形分别为平行于博阿断裂东段和西段的 GPS 点位的速度; 蓝色三角形为垂直于博阿断裂的 GPS 点位的速度

Fig. 2 The profiles of GPS velocity fields along the BoA fault

(a) GPS velocity profile along the NE27° direction with the centered-point (85.0°E, 43.0°N); (b) GPS velocity profile along the NE38° direction with the centered-point (80.8°E, 46.0°N). Red and green diamonds represent the velocities of GPS sites parallel to eastern and western segment of BoA fault, respectively. Blue triangle represents the velocities of GPS site perpendicular to BoA fault

阿断裂东段的滑移速率为 $(1.3 \pm 0.6)$  mm/a, 西段为 $(1.7 \pm 0.8)$  mm/a, 与杨晓平和沈军(2000)根据野外地质调查, 利用河流阶地错动得出的博阿断裂西部断裂的右旋走滑速率为 4.7—5 mm/a 的结果出入较大, 但与沈军等(2003)得出的博阿断裂东段滑移速率为 1—2 mm/a 的结果较为接近, 与 Campbell 等(2013)利用最新地质钻探资料通过光释光测年法得到的该断裂右旋走滑量为 1.4—3.0 mm/a 的结果也较为接近.

为了进一步验证 GPS 反演结果的可靠性, 在同一参考体系下, 断裂的滑动速率可以用分布在断层两侧的 GPS 测站的速度差来表示(张培震等, 2003). 利用 GPS 速度矢量分解法, 以断层西段走向为 335°, 东段走向为 280°—300°为参考, 按 GPS 站点的分布情况, 求得博阿断裂西部现今右旋走滑速率约为 1.7—2.4 mm/a, 东部右旋走滑速率约为 1.5—1.8 mm/a; 同时根据地表 GPS 基线变化情况, 利用断层上下盘聚合滑动公式(郭良迁, 2000), 计算得到博阿断裂西段的右旋走滑速率为 1.80 mm/a, 与李杰等(2006)的反演结果基本一致. 由 GPS 大地测量得到的断层活动变化可以看作是震间弹性蠕滑和构造变形的现今综合响应, 而地质学上得出的结果则是依据第四纪以来的阶地位错等方法得到的百

万年尺度上构造演化下的平均变化。

沈军等(2003)根据河流阶地错量和冰阶时代的估算,得到博阿断裂东段第四纪以来的平均位错速率与本文利用 GPS 点位运动资料计算得出的结果基本一致,这表明现今博阿断裂东段的活动情况自第四纪以来基本维持平稳活动。地震目录统计也显示天山中东部至吐鲁番地区的历史地震相对天山西部地区的强震活动性明显较弱,断裂东段附近基本无  $M7$  地震发生。但沈军等(2003)根据地质勘查得出的断层西段的右旋走滑速率约为  $4-5\text{ mm/a}$ ,而通过 GPS 大地测量得到的结果仅为  $1.7\text{ mm/a}$ ,表明现今断层西段的活动不强。陈建波(2008)根据野外地质调查可知,距今 1 万年前的全新世时期,位于精河东南侧和艾比湖南侧的博阿断裂切割了全新世地层,博阿断裂西段频繁的强震活动使得这一地区的断层仍在进行震后调整。

## 2.2 准噶尔盆地南缘断裂运动特征

作为天山与准噶尔地块的分界线,近东西走向且向南呈弧形突出的准噶尔盆地南缘断裂控制着其南北两侧地质构造单元的演化。在晚新生代时期该断裂活动强烈,区域内中强地震不断,最大的历史地震为 1906 年 12 月 22 日玛纳斯  $M7.7$  地震(周伟新等, 2003)。卢华复等(2006)通过对准噶尔盆地南缘逆冲断裂生长地层的研究,推断该断裂活动时期开始于 15 百万年前的中新世中期,主要活动发生在 3—10 百万年前,而南天山南麓的逆冲断裂的活动始于 23 百万年前。因此天山中部地区的构造变形在空间上应该是由南向北传递挤压应力,即接近印度板块的塔里木刚性地块受到板块驱动力的作用在向北运动过程中首先与天山山体发生碰撞、俯冲楔入天山下部,造成天山造山带隆升,并形成了南天山南麓逆冲断裂;然后推挤天山发生褶皱变形,挤压应力通过几百万年的时空传递,使得同样具有刚性特征的准噶尔地块对天山的北移形成阻挡,在天山北麓发育了准噶尔盆地南缘断裂,形成了天山与准噶尔盆地的分界线。

历史地震分布表明天山山体内部少有中强地震发生,  $M>5$  地震大部分集中分布在准噶尔盆地南缘断裂以北的逆断裂-褶皱带上(邓起东等, 2000)。杨少敏等(2008)研究表明:垂直于准噶尔盆地南缘断裂呈南北展布的 GPS 速度剖面反映出该断裂南盘地区(山体内部)的点位运动速率的南北向分量基本处于平稳状态,山间无大幅度的挤压缩短变形;断裂北盘盆山结合带附近则有明显的地壳缩短趋势,继续向北深入至准噶尔地块内部后, GPS 所反映出的地壳缩短量基本为零,这与地震活动有着很好的一致性。

本文利用式(2)估算出准噶尔盆地南缘断裂的移滑速率为  $(5.6 \pm 1.0)\text{ mm/a}$ ,反映了塔里木盆地楔入北天山基底后与准噶尔地块的相对滑动幅度(图 3),这与 Burchfiel(1999)估算的第四纪以来该断裂的平均缩短速率为  $2-6\text{ mm/a}$  以及邓起东等(2000)估算的全新世以来的缩短速率为  $2-5\text{ mm/a}$  的最大值接近,与 Avouac 等(1993)在北天山玛纳斯附近根据地质调查,利用新生代山前活动断层资料计算出的全新世天山东段( $85^\circ\text{E}$ )的地壳缩短速率  $(6 \pm 3)\text{ mm/a}$  基本接近;不过本文结果与 Molnar 和 Deng(1984)利用地震矩模型计算得到的东天山地区地壳缩短速率  $(13 \pm 7)\text{ mm/a}$  相差较大,这是由于历史地震的震级误差使得计算误差较大,从而导致其结果不准确。无论从地质平衡剖面估算的百万年尺度的缩短速率还是从现今地壳运动缩短速率来看,天山与准噶尔地块之间的逆冲缩短态势基本不变。

准噶尔盆地南缘断裂以接近  $6\text{ mm/a}$  的速度北倾运动,遇到坚硬的准噶尔地块阻挡后,在北天山山前由北向南相应地产生了若干排褶皱背斜带:独山子背斜、霍尔果斯—玛



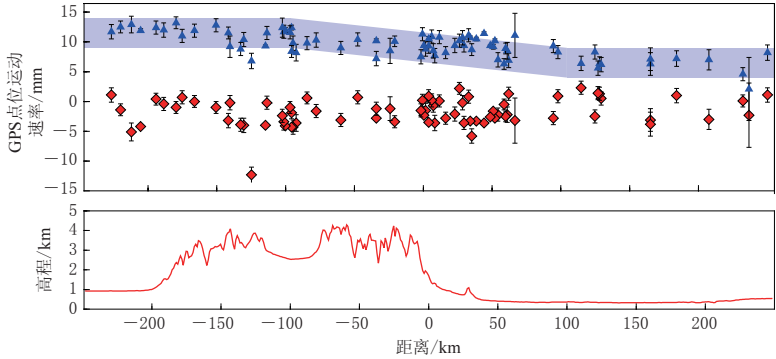


图 3 以(85.7°E, 43.9°N)为中心, 沿 NE20°方向投影的准噶尔盆地南缘断裂的 GPS 速度场剖面  
红色菱形和蓝色三角形分别代表平行于和垂直于准噶尔盆地南缘断裂的 GPS 点位的速度

Fig. 3 The profile of GPS velocity of the southern margin fault of Junggar basin along the NE20° direction with the centered-point (85.7°E, 43.9°N)  
Red diamond and blue triangle represent the velocities of GPS sites parallel to and perpendicular to the southern margin fault of Junggar basin, respectively

纳斯—吐谷鲁背斜带和齐古背斜。根据李杰等(2010)的 GPS 结果, 这 3 排背斜带的缩短速率自南向北分别为: 东南部的齐古背斜的地壳缩短速率为 0.6 mm/a, 中部的霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁背斜带的地壳缩短速率约为 0.8 mm/a, 最西北部的独山子背斜的地壳缩短速率为 1.0 mm/a。虽然该值约为邓起东等(1999)结果的 1/3, 但由南向北从北天山山前逆冲幅度上可以看出其变形逐步增大, 符合山体构造发育模式。张培震等(1993)研究表明位于乌鲁木齐西南的齐古褶皱-逆断裂带在早更新世仍在活动, 最老的褶皱地层为侏罗系岩层。齐古褶皱-逆断裂带现今虽有活动, 但活动幅度和强度均明显减弱, 这也表明乌鲁木齐—石河子地区历史上未发生过  $M>7$  大震。位于第二排的霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁逆断裂褶皱带从早更新世末(1 百万年)开始至今活动一直强烈, 从 1906 年 12 月的玛纳斯  $M7.7$  地震来看, 该断裂基本控制着北天山地区大震的发生。独山子逆断裂-背斜带虽然形成时代相对较晚, 大概在早更新世末—中更新世初(1—0.7 百万年前), 但根据邓起东等(1991)和杨晓平等(1995)的研究可知, 其构造活动性十分强烈, 平均缩短速率超过前两排, 约为 1.7—1.9 mm/a(邓起东等, 1999)。

由于缺乏准确的年代资料, 仅凭现今 GPS 观测得到的地壳缩短速率很难对天山山前活动何时开始有清晰的界定, 但无论地质学还是大地测量的研究结果均表明在乌鲁木齐山前坳陷所形成的几排逆断裂-褶皱带上的活动是有强弱之分和先后之分的, 从而也说明了天山新生代构造变形活动也是有规律可循的。

3 讨论与结论

GPS 观测研究表明, 受印度板块向北推挤发生碰撞造成帕米尔高原与塔里木地块双重挤压楔入的影响, 天山在新生代后期上升隆起, 形成强烈的变形挤压褶皱构造带。由于天山两侧的塔里木和准噶尔地块的逆冲推覆碰撞, 天山的变形以南北地块夹击、山体抬升缩短变形为主, 但变形幅度由西向东随经度增加基本呈均匀递减分布。

利用最新得到的天山及中亚地区现今地壳形变位移场, 借助弹性半空间位错理论, 由

GPS 计算得到的博阿右旋走滑断裂东段的滑移速率为 $(1.3 \pm 0.6)$  mm/a, 西段为 $(1.7 \pm 0.8)$  mm/a, 反映出在 1944 年 3 月 10 日乌苏西南发生的  $M_s 7.2$  地震后的几十年内, 该断层仍表现为震后微蠕滑运动; 准噶尔盆地南缘断裂的断层滑动速率为 $(5.6 \pm 1.0)$  mm/a.

如果通过位错模型, 借助 GPS 观测资料得到的活动速率能够代表全新世以来博阿断裂的平均运动速率, 那么其西段水平错距总和为 17 m, 这与沈军和杨晓平(1998)根据野外地质调查得到的博阿断裂西段最后一次古地震事件所造成的走滑运动幅度接近.

如果卢华复等(2006)关于准噶尔盆地南缘断裂活动期的推断成立, 则利用 GPS 得到的地壳缩短速率, 通过活动期上下限(3—10 百万年前)可以计算出整个北天山地区的地壳缩短量接近 16.8—56 km. 而杨晓平等(2008)利用平衡地质剖面技术, 通过大比例尺地质填图得到的该地区地壳缩短量约为 8.5—10.5 km, 并没有 50 km 那么大的缩短量, 由此可以判定整个北天山地区逆断裂-褶皱带的形成时间大致为上新世末, 距今约 2.5 百万年. 因此结合二者研究与 GPS 计算结果, 本文认为准噶尔盆地南缘断裂的变形活动时间可能始于 3 百万年前, 地壳缩短量为 16.8 km, 这与邓起东等(2000)得到的北天山中段山前地区地壳缩短量为 17 km 的结论一致.

## 参 考 文 献

- 陈建波. 2008. 新疆地震构造特征研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所: 57–67.
- Chen J B. 2008. *Study on Characteristics of Earthquake Tectonic in Xinjiang* [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration: 57–67 (in Chinese).
- 邓起东, 冯先岳, 尤惠川. 1991. 新疆独山子—安集海活动逆断裂-褶皱带的变形特征及其形成机制[G]//活动断裂研究(1). 北京: 地震出版社: 17–36.
- Deng Q D, Feng X Y, You H C. 1991. Characteristics and mechanism of deformation along the Dushanzi–Anjihai active reverse fault and fold zone, Xinjiang[G]//*Research on Active Fault* (1). Beijing: Seismological Press: 17–36 (in Chinese).
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 杨晓平, 徐锡伟, 彭斯震, 李军. 1999. 乌鲁木齐山前拗陷逆断裂-褶皱带及其形成机制[J]. 地质前缘, 6(4): 191–201.
- Deng Q D, Feng X Y, Zhang P Z, Yang X P, Xu X W, Peng S Z, Li J. 1999. Reverse fault and fold zone in the Urumqi range-front depression of the northern Tianshan and its genetic mechanism[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 191–201 (in Chinese).
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 徐锡伟, 杨晓平, 彭斯震, 李军. 2000. 天山活动构造[M]. 北京: 地震出版社: 1–399.
- Deng Q D, Feng X Y, Zhang P Z, Xu X W, Yang X P, Peng S Z, Li J. 2000. *Active Tectonics of the Chinese Tianshan Mountains*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–399 (in Chinese).
- 冯先岳. 1986. 天山的活动断层[J]. 中国地震, 2(2): 84–89.
- Feng X Y. 1986. The active faults in Tianshan mountains[J]. *Earthquake Research in China*, 2(2): 84–89 (in Chinese).
- 郭良迁. 2000. 对中国大陆地壳水平变形的初步探索[J]. 中国地震, 16(2): 126–134.
- Guo L Q. 2000. Preliminary study on the horizontal crustal deformation in Chinese mainland[J]. *Earthquake Research in China*, 16(2): 126–134 (in Chinese).
- 李杰, 方伟, 朱治国, 刘代芹. 2006. 中部天山地壳活动的 GPS 初步分析[J]. 内陆地震, 20(3): 239–244.
- Li J, Fang W, Zhu Z G, Liu D Q. 2006. Preliminary analysis on crust action by GPS in middle Tianshan mountain[J]. *Inland Earthquake*, 20(3): 239–244 (in Chinese).
- 李杰, 王晓强, 谭凯, 刘代芹, 帕尔哈提, 蒋靖祥, 方伟. 2010. 北天山现今活动构造的运动特征[J]. 大地测量与地球动力学, 30(6): 1–5.
- Li J, Wang X Q, Tan K, Liu D Q, Paerhati, Jiang J X, Fang W. 2010. Analysis of movement characters of present-day active tectonics of northern Tianshan region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(6): 1–5 (in Chinese).
- 李杰, 王琪, 王晓强, 帕尔哈提, 刘代芹, 朱治国, 蒋靖祥. 2012. 南天山—帕米尔现代地壳形变特征与应变场分布[J].



大地测量与地球动力学, **32**(1): 1–4.

- Li J, Wang Q, Wang X Q, Paerhati, Liu D Q, Zhu Z G, Jiang J X. 2012. Characteristics of present crustal deformation and distribution of strain field in southern Tianshan–Pamir region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **32**(1): 1–4 (in Chinese).
- 李强, 游新兆, 杨少敏, 杜瑞林, 乔学军, 邹蓉, 王琪. 2012. 中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测: 现今速度场[J]. 中国科学: 地球科学, **42**(5): 629–632.
- Li Q, You X Z, Yang S M, Du R L, Qiao X J, Zou R, Wang Q. 2012. A precise velocity field of tectonic deformation in China as inferred from intensive GPS observations[J]. *Science China Earth Sciences*, **55**(5): 695–698.
- 卢德源, 李秋生, 高锐, 李英康, 李德兴, 刘文, 张之英. 2000. 横跨天山的人工爆炸地震剖面[J]. 科学通报, **45**(9): 982–988.
- Lu D Y, Li Q S, Gao R, Li Y K, Li D X, Liu W, Zhang Z Y. 2000. A deep seismic sounding profile across the Tianshan mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, **45**(22): 2100–2107.
- 卢华复, 王胜利, 罗俊成, 舒良树, 桑洪, 朱文斌, 李毓丰, 金英爱. 2006. 塔里木盆地东部断裂系统及其构造演化[J]. 石油与天然气地质, **27**(4): 433–441.
- Lu H F, Wang S L, Luo J C, Shu L S, Sang H, Zhu W B, Li Y F, Jin Y A. 2006. Fault systems and their tectonic evolution in the eastern Tarim basin[J]. *Oil & Gas Geology*, **27**(4): 433–441 (in Chinese).
- 沈军, 杨晓平. 1998. 博洛科努断裂西北段古地震形变带初步研究[J]. 内陆地震, **12**(3): 248–255.
- Shen J, Yang X P. 1998. A preliminary study on the paleoearthquake rupture belt on the northwestern section of Bolokenu fault[J]. *Inland Earthquake*, **12**(3): 248–255 (in Chinese).
- 沈军, 汪一鹏, 李莹甄, 姜慧, 向志勇. 2003. 中国新疆天山博阿断裂晚第四纪右旋走滑运动特征[J]. 地震地质, **25**(2): 183–194.
- Shen J, Wang Y P, Li Y Z, Jiang H, Xiang Z Y. 2003. Late Quaternary right-lateral strike-slip faulting along the Bolokenu–Aqikekuduke fault in Chinese Tian Shan[J]. *Seismology and Geology*, **25**(2): 183–194 (in Chinese).
- 王琪, 丁国瑜, 乔学军, 王晓强, 游新兆. 2000. 天山现今地壳快速缩短与南北地块的相对运动[J]. 科学通报, **45**(14): 1543–1547.
- Wang Q, Ding G Y, Qiao X J, Wang X Q, You X Z. 2000. Recent rapid shortening of crust across the Tianshan Mts. and relative motion of tectonic blocks in the north and south[J]. *Chinese Science Bulletin*, **45**(21): 1995–1999.
- 王晓强, 张永岗, 海力·阿不都热依木, 李杰. 2002. 乌鲁木齐地区近期地壳水平形变初步研究[J]. 内陆地震, **16**(2): 154–159.
- Wang X Q, Zhang Y G, Haili·Abudureyimu, Li J. 2002. Preliminary study on recent horizontal crustal deformation in Urumqi area[J]. *Inland Earthquake*, **16**(2): 154–159 (in Chinese).
- 王晓强, 李杰, 王琪, Zubovich A. 2005. 天山现今地壳运动的形变场分析[J]. 大地测量与地球动力学, **25**(3): 63–68.
- Wang X Q, Li J, Wang Q, Zubovich A. 2005. Analysis of present-day crustal deformation of Tianshan[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **25**(3): 63–68 (in Chinese).
- 王晓强, 李杰, Zubovich A, 王琪. 2007. 利用 GPS 形变资料研究天山及邻近地区地壳水平位移与应变特征[J]. 地震学报, **29**(1): 31–37.
- Wang X Q, Li J, Zubovich A, Wang Q. 2007. Horizontal movement and strain characteristics in Tianshan and its adjacent region with GPS deformation data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(1): 31–37 (in Chinese).
- 杨少敏, 李杰, 王琪. 2008. GPS 研究天山现今变形与断层活动[J]. 中国科学: D 辑, **38**(7): 872–880.
- Yang S M, Li J, Wang Q. 2008. The deformation pattern and fault rate in the Tianshan mountains inferred from GPS observations[J]. *Science in China: Series D*, **51**(8): 1064–1080.
- 杨晓平, 邓起东, 张培震, 冯先岳, 彭斯震. 1995. 利用阶地变形资料研究北天山吐谷鲁逆断裂-背斜带晚更新世以来的褶皱变形特征[G]//活动断裂研究(4). 北京: 地震出版社: 46–62.
- Yang X P, Deng Q D, Zhang P Z, Feng X Y, Peng S Z. 1995. Fold deformation along the Tugulu reverse fault-fold zone since Late Pleistocene, North Tianshan[G]//*Research on Active Fault* (4). Beijing: Seismological Press: 46–62 (in Chinese).
- 杨晓平, 沈军. 2000. 天山内部博罗可努断裂精河—阿拉山口段晚更新世以来的活动特征[J]. 地震地质, **22**(3): 305–315.
- Yang X P, Shen J. 2000. Late Quaternary activity of Jinghe–Alashankou section of the Bolokenu fault, interior Tian-

- shan[J]. *Seismology and Geology*, **22**(3): 305–315 (in Chinese).
- 杨晓平, 邓起东, 张培震, 徐锡伟. 2008. 天山山前主要推覆构造区的地壳缩短[J]. *地震地质*, **30**(1): 111–131.
- Yang X P, Deng Q D, Zhang P Z, Xu X W. 2008. Crustal shortening of major nappe structures on the front margins of the Tianshan[J]. *Seismology and Geology*, **30**(1): 111–131 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 徐锡伟. 1993. 新疆玛纳斯褶皱-逆断裂带晚第四纪变形和地壳缩短[G]//活动断裂研究(3). 北京: 地震出版社: 18–32.
- Zhang P Z, Deng Q D, Xu X W. 1993. Deformation and crustal shortening of the Manas thrust and fold belt since Late Quaternary in northern Tianshan mountains[G]//*Research on Active Fault* (3). Beijing: Seismological Press: 18–32 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 杨晓平, 彭斯震, 徐锡伟, 冯先岳. 1996. 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题[J]. *中国地震*, **12**(2): 127–140.
- Zhang P Z, Deng Q D, Yang X P, Peng S Z, Xu X W, Feng X Y. 1996. Late Cenozoic tectonic deformation and mechanism along the Tianshan mountain, northwestern China[J]. *Earthquake Research in China*, **12**(2): 127–140 (in Chinese).
- 张培震, 王敏, 甘卫军, 邓起东. 2003. GPS 观测的活动断裂滑动速率及其对现今大陆动力作用的制约[J]. *地学前缘*, **10**(特刊): 81–92.
- Zhang P Z, Wang M, Gan W J, Deng Q D. 2003. Slip rates along major active faults from GPS measurements and constraints on contemporary continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(Suppl): 81–92 (in Chinese).
- 周伟新, 杨主恩, 孙君秀, 赵瑞斌. 2003. 1906 年玛纳斯 7.7 级地震孕震过程的数值模拟研究[J]. *地震地质*, **25**(4): 609–616.
- Zhou W X, Yang Z E, Sun J X, Zhao R B. 2003. Numerical modeling of the generation process of the 1906 Manas  $M_s 7.7$  earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **25**(4): 609–616 (in Chinese).
- Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, You H, Wang G. 1993. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan[J]. *J Geophys Res*, **98**(B4): 6755–6804.
- Burchfiel B C, Brown E T, Deng Q D, Feng X Y, Li J, Molnar P, Shi J B, Wu Z M, You H C. 1999. Crustal shortening on the margins of the Tien Shan, Xinjiang, China[J]. *Int Geo Rev*, **41**(8): 665–700.
- Burtman V S, Skobelev S F, Molnar P. 1996. Late Cenozoic slip on the Talas-Ferghana fault, the Tien Shan, central Asia[J]. *Geol Soc Am Bull*, **108**(8): 1004–1021.
- Campbell G E, Walker R T, Abdrakhmatov K, Schwenninger J L, Jackson J, Elliott J R, Copley A. 2013. The Dzhungarian fault: Late Quaternary tectonics and slip rate of a major right-lateral strike-slip fault in the northern Tien Shan region[J]. *J Geophys Res*, **118**(10): 5681–5698.
- Freund L B, Barnett D M. 1976. A two-dimensional analysis of surface deformation due to dip-slip faulting[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **66**(3): 667–675.
- Freymueller J T, Murray M H, Segall P, Castillo D. 1999. Kinematics of the Pacific-North America Plate boundary zone, northern California[J]. *J Geophys Res*, **104**(B4): 7419–7441.
- Kogan M G, Steblov G M, King R W, Herring T A, Frolov D I, Egorov S G, Levin V Y, Lerner-Lam A, Jones A. 2000. Geodetic constraints on the relative motion and rigidity of Eurasia and North America[J]. *Geophys Res Lett*, **27**(14): 2041–2044.
- Molnar P, Deng Q D. 1984. Faulting associated with large earthquakes and average rate of deformation in central and eastern Asia[J]. *J Geophys Res*, **89**(B7): 6203–6227.
- Savage J C, Burford R O. 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California[J]. *J Geophys Res*, **78**(5): 832–845.
- Tapponnier P, Molnar P. 1979. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal regions [J]. *J Geophys Res*, **84**(B7): 3425–3459.
- Yin A, Nie S, Craig P, Harrison T M, Ryerson F J, Qian X L, Yang G. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan[J]. *Tectonics*, **17**(1): 1–27.
- Zubovich A V, Wang X, Scherba Y G, Schelochkov G G, Reilinger R, Reigber C, Mosienko O I, Molnar P, Michalajow W, Makarov V I. 2010. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions[J]. *Tectonics*, **29**: TC6014.