

文章编号: 0253-3782(2007)01-0031-07

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^{*}

王晓强^{1),*} 李 杰¹⁾ Alexander Zubovich²⁾ 王 琪³⁾

1) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

2) Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek Kyrgyzstan 720049

3) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

摘要 以天山及邻近地区的 230 个 GPS 观测站长期水平运动速率为基础, 计算并绘制了该地区 GPS 站速度场及地壳水平应变场分布图, 得到了以下结论: 在以欧亚板块为参考基准的背景下, 天山及邻近地区 GPS 速度场表明, 天山地壳缩短方式由南向北, 以东经 $77^{\circ} \pm 1^{\circ}$ (北纬 $38^{\circ} \sim 42^{\circ}$) 为界向两侧逐渐递减; 同时表明, 板块的推挤作用力随着天山的褶皱变形减小相应趋缓. 天山及邻近地区的主压应变方向分布近北北西向, 基本与天山山体走向正交. 反映了在印度板块碰撞推挤的强烈构造运动影响下天山及邻近地区的最大主应力分布与变化情况. 其最大剪应变场集中分布在两个区域: 北天山的吉尔吉斯斯坦依赛克湖附近; 南天山伽师与帕米尔弧形断裂交会地带. 整个地区多年来的地震震中分布, 反映了该区域大地震通常发生在剪应变高值区或其边缘地带.

关键词 GPS 天山及邻近地区 水平应变场 最大剪应变

中图分类号: P315.72⁺7 **文献标识码:** A

引言

天山是现今亚洲地区最年轻的山系之一. 自新生代以来, 其构造演化不断受到印度板块与欧亚板块在喜马拉雅山地区碰撞、挤压楔入的影响, 使已被夷平的早期造山带又迅速隆升, 形成再生造山带, 并不断向北逆推. 帕米尔高原也大幅度向北推移旋转, 并使碰撞带两侧及其以北的天山、阿勒泰—贝加尔一带成为大陆内部现今构造运动十分强烈的地区. 因此, 研究该地区的地壳水平形变与应变更具有现实意义.

传统意义上分析地壳活动的应变性质、应变场大小以及活动方式的手段大致分为两种: 一种是根据断层活动与岩石学特征来推断(谢富仁等, 1993; Molnar, Tapponnier, 1975, 1977); 另一种则是经典的大地测量方式(胡明城, 鲁福 1994). 虽然这两种方法在一定程度上为我们研究地壳应变特征、局部构造活动机制和构造运动的规律提供了很大的帮助(彭树森, 1993; 傅容珊等, 2000), 但前者是大(时间)尺度上累计的平均结果, 只能作为背景场来进行分析; 而经典测量方法的观测范围、观测规模的局限性则限制了研究的深

^{*} 国家自然科学基金(40074024)和新疆维吾尔自治区自然科学基金(200321101)资助.

2006-03-06 收到初稿, 2006-10-09 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者. e-mail: cldwxqlj@263.net

度. 随着 GPS 技术在大地形变测量中的广泛应用, 大范围、高精度、高时空分辨率的地壳运动观测则成为确定块体变形机制以及探索地震孕育触发与区域应变积累关系的极有力的手段之一. 利用天山及邻近区域的 GPS 形变观测量, 我们进行了位移场计算, 并配合最小二乘平差方法建立连续分布位移函数, 再由应变与位移的偏导关系即可获得应变场分布.

1 利用 GPS 形变资料研究地应变特征的方法

由地形变观测资料求解地壳应变场的方法, 首先是建立邻近点间相对形变量与地壳应变张量的线性关系

$$\mathbf{U} = \mathbf{A}\mathbf{T} \quad (1)$$

式中, \mathbf{U} 是邻近点相对形变量(位移增量)向量, \mathbf{T} 是应变张量, \mathbf{A} 为转换系数矩阵.

由于本文主要研究的是水平位移场, GPS 的结果为空间矢量, 将其投影到水平面上, 上式的具体形式可以表示为(陈健, 陶本藻, 1987)

$$\begin{bmatrix} du_x \\ du_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, du_x 和 du_y 为变形体内两测点间的位移增量, Δx_{ij} 和 Δy_{ij} 分别为两测点间的坐标增量; ϵ_x , ϵ_y , ϵ_{xy} 为应变状态分量, ω 为变形体的转动量.

在 GPS 测量中, 由于有大量的测点可以利用, 所以应变参数的解算可以根据最小二乘法求解. 在具体计算中, 可以利用测点运动速率的方差-协方差以及测点离开所求区域的中心点距离进行定权. 在上述应变参数被确定后, 就可以求出研究区域的最大主应变、最大剪应变等值(陈健, 陶本藻, 1987).

2 GPS 观测结果初步揭示的天山及邻近地区的水平应变特征

本文将东天山(中国新疆境内)和西天山(哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦)各自多年观测的 GPS 重复观测成果作统一处理, 利用 MIT 的 GPS 处理软件(GAMIT/GLOBK10.06)对原始观测成果(中国原始文件)及前期处理结果(国外 h 文件)进行再处理, 获得了整个天山全境的现今地壳水平位移和应变图象. GPS 观测资料在我国共有 7 期, 时间跨度从 1998—2004 年, 每年观测一次. 通过国际合作我们获得了由俄罗斯驻比什凯克科学考察站提供的哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦的部分 GPS 观测资料, 时间跨度也是从 1998—2004 年, 共有 7 年的观测资料, 其采用仪器、作业方式与我国基本相同. 在资料处理时, 为保证分析结果的可靠性, 平差中略去观测期数少于 2 期的流动测站及一些受外界环境干扰较大的点位, 共获得 230 个 GPS 站的速度场结果. 其中, 国内 126 个点, 国外 104 个点(图 1). 同时利用整个天山区域的 GPS 水平位移场的连续分布, 通过求偏导获得空间点位的应变张量. 通过计算获得了天山及邻近地区的最大主应变、最大剪应变等主要应变参量分布图.

图 1 反映了在以欧亚板块为参考基准的状态下, 天山及邻近地区各 GPS 点的运动速率大小分布状况. 在印度板块和欧亚板块强烈碰撞的影响下, 帕米尔高原、南天山及塔里木块体均向北运动, 但它们运动的速率不同, 以东经 $77^\circ \pm 1^\circ$ (北纬 $38^\circ \sim 42^\circ$) 为分界, 各点运动速度向两侧逐渐递减(王晓强等, 2005). 其西部递减较快, 东部递减较慢, 形成明显

的块体特征. 我国的运动速率西部地区明显高于东部地区, 南部地区又高于北部地区. 吉尔吉斯斯坦境内天山各点运动则是西部弱于东部. 由于缺乏北纬 39°以南、东经 75°以西地区的资料, 我们无法判明这一地区的 GPS 速度场是如何变化的, 但根据南亚地区不断发生的强烈地震, 我们认为这一地区的 GPS 速度场也应该是从较高的速率在经过复杂的构造地质环境和能量被吸收后, 到达塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦南部地区已经变得很小了.

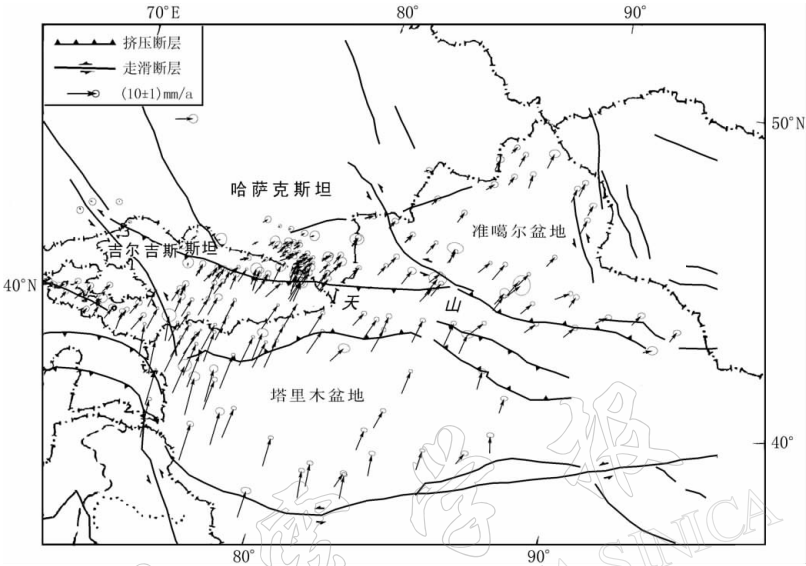


图 1 1998—2004 年天山及邻近地区相对欧亚板块 GPS 运动速率图

在北纬 39°、东经 76°沿帕米尔—西昆仑弧形断裂处, 速率场有一个较明显的分界线, 界线以南各 GPS 点位运动速率基本在 20 mm/a, 而以北至北纬 40.5°线, 各 GPS 点位运动速率基本在 10~15 mm/a 左右. 该区域的运动速率从平均每年 20 mm 左右减少至 10~15 mm. 沿东经 75.0°~76.0°作剖面(图 2), 可以看出, 从南到北 GPS 速率从(21±1)mm/a 缩减为(1±0.5)mm/a. 位于帕米尔弧形断裂上的 GPS 点(37.0°N, 75.0°E)的南北向速率分量为 22.0 mm/a; 向北位于南天山推覆构造带上的南北向速率分量为 14~15.0 mm/a, 天山山体内部的山间盆地(41.0°N, 75.0°E)附近的 GPS 点南北向速率分量为 11.0 mm/a; 跨过北天山褶皱带之后, GPS 点(43.0°N, 75.0°E)的南北向运动速率减为 2.0 mm/a. 天山在这一经度上的南北向地壳缩短的幅度大约为 18.0~20 mm/a. 这与地质学 Avouac 模型(Avouac, Tapponnier, 1993)、GPS 结果(王琪等, 2000)基本一致. 反映出天山在该经度上的缩短特征.

中部天山地区(79°E~86°E)整体性向北偏东推移, 年平均运动速率约 9.4 mm/a. 这与塔里木块体对天山的正向挤压所造成的运动方式保持了很好的一致性. 准噶尔盆地南缘 GPS 点(44.2°N, 87°E)仍然具有(6.4±0.9)mm/a 的南北向运动速率, 说明东部天山也正经历着地壳缩短. 图 3 是一条自西向东覆盖整个天山的 GPS 点运动速率剖面图. 其最西部(中亚国家)GPS 点运动速率在 5 mm/a 左右, 往东逐渐增大至天山中部(83°E~88°E), 达到最大 15.0~20.0 mm/a, 随后逐渐递减, 且各点还向东北方向运动. 反映了天山的水平运动存在着绕东部某一中心作顺时针旋转运动的总体趋势, 同时也显示了天山中部受塔里

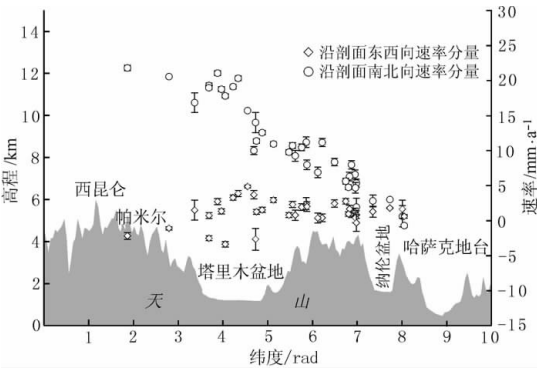


图 2 沿(35°N, 75°E)~(45°N, 76°E)方向投影跨天山的 GPS 速率剖面

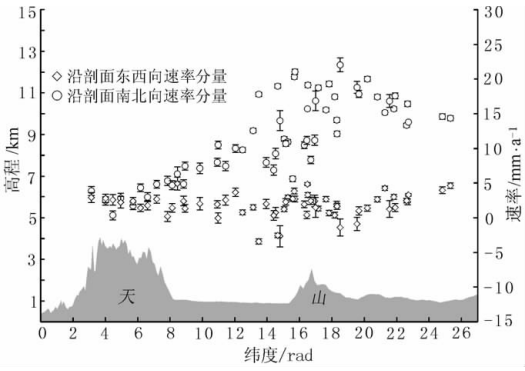


图 3 沿(40°N, 68°E)~(43°N, 95°E)方向投影覆盖天山的 GPS 速率剖面

木块体向北推挤时, 南北方向变形沿东西方向向两侧呈规律性递减。

天山及邻近地区 GPS 速率场结果表明, 天山地壳缩短方式具有由南向北、以东经 77°±1°(北纬 38°~42°)为界向两侧逐渐递减的特征。同时表明了板块的推挤作用力随着天山从西到东逐步远离板块边界, 推挤作用力逐渐减弱, 天山的褶皱变形相应趋缓(王晓强等, 2005)。

作为新生代构造演化的结果, 天山受板块碰撞及持续挤压楔入的强烈影响, 已成为新构造变动的现今构造运动十分强烈的地区之一。其山体两侧如何受力, 方向如何, 是我们目前关注的问题。通过计算, 表明天山南北两侧及邻近地区以压应变为主, 主压应力分布与山脉走向基本正交(图 4)。主压应变率较大的地区集中分布在天山褶皱带上, 其中以北天山吉尔吉斯斯坦依赛克湖以西地区、南天山与西昆仑北缘及帕米尔高原结合部地区较为明显, 而历史上的几次较大的地震也基本上分布在这里。天山及邻近地区应变场的主压应

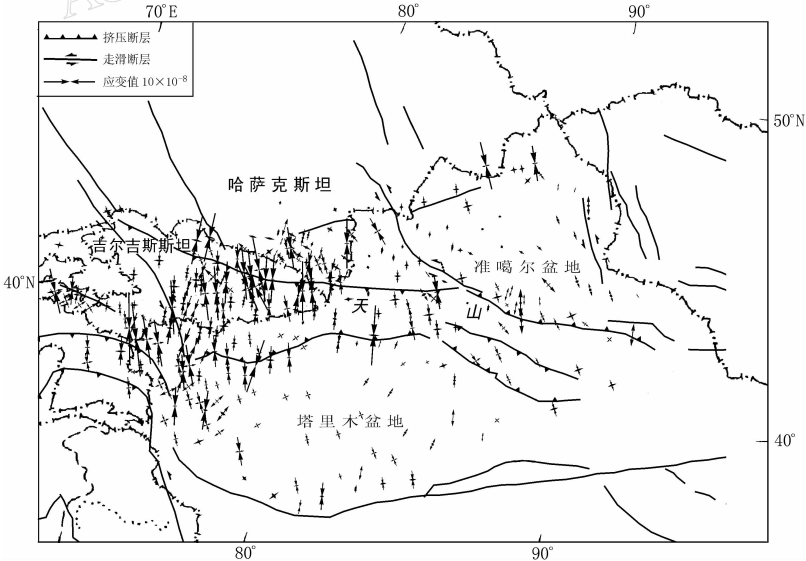


图 4 天山及邻近地区 GPS 监测网最大(最小)主应变率分布图

变率优势分布方向为北北西向，主要集中在天山地震断裂带周围。塔里木块体整体虽受到南北主压、东西主张的应力作用，但整体压或张应变率的量较小，准噶尔盆地内部主压应变率更小。充分显示了印度板块的快速推挤作用力在经过昆仑山、塔里木、天山块体的多次碰撞挤压后，能量已经被大量吸收。

图 5 给出了天山及邻近地区当前最大剪切应变率分布结果。从整体分布来看，帕米尔弧形断裂与西昆仑北缘断裂及南天山推覆带，塔里木盆地所构成的地区，以及北天山依赛克湖与伊犁盆地地区剪应变率最为突出，最大为 $(24 \pm 2) \times 10^{-8}/a$ 。虽然最大剪切应变率等值线分布图无法反映最大剪切应变方向，但从最大主应变反向与最大剪切应变方向之间的关系中可以得出该地区的剪应变方向为北北东向。从天山地区历史上的强地震震源机制解的分布中，我们还可以看到这里是强地震的主要分布区，高剪应变率的集中出现，体现了该地区的地质构造活动的复杂性和今后发生强震的可能性。2003 年 2 月巴楚—伽师 6.8 级地震的发生就反映了其能量迅速积累导致破裂而发生地震来释放(江在森等，2003)。

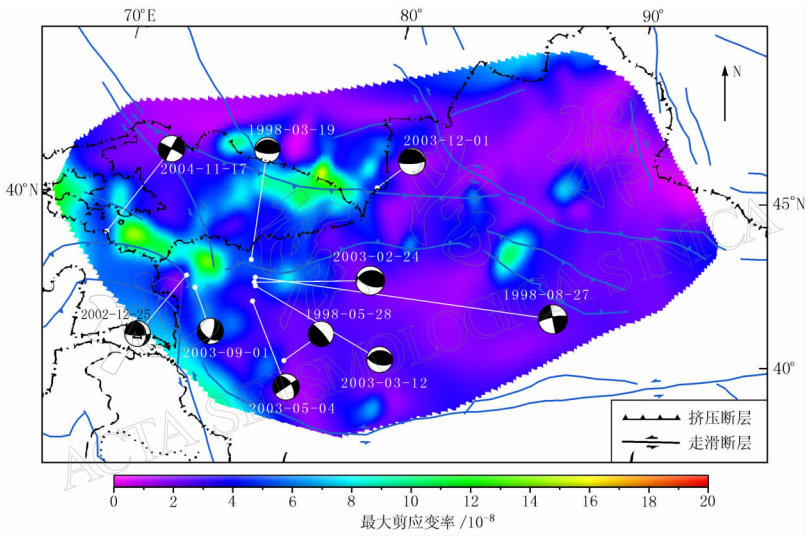


图 5 天山及邻近地区最大剪应变率分布图

通过研究发现，印度板块的快速向北推挤运动使得帕米尔—西昆仑北缘断裂带与南天山山前地震构造带积累了大量的应变能量，且这里本身构造运动复杂，地壳缩短速率大，地震构造能量的积累和释放速率较高，活动断裂密集、规模较大，具有发生强地震的构造条件，从而造成了目前的强震危险区。江在森等(2003)指出，大部分 6 级地震发生在剪应变率(最大剪应变)的高值区或边缘区。1999 年 9 月 21 日台湾省的集集 $M_s 7.6$ 地震即发生在 GPS 观测给出的水平剪应变率的高值区边缘。

3 结论

本文首次较大规模地将中国大陆天山地区的 GPS 数据与境外天山地区的 GPS 观测数据联合解算，给出了天山及邻近地区的整体水平应变特征和空间分布。这无疑拓宽了我们对天山地区新构造运动的认识，扩大了原仅限于新疆地区数据资料的应用，改变了以往对新疆天山南北两侧地震成因研究的局限性，将研究视野拓展到了整个天山及中亚腹地。

天山及邻近地区运动速率表明, 天山地壳缩短具有由南向北, 以东经 $77^{\circ} \pm 1^{\circ}$ (北纬 $38^{\circ} \sim 42^{\circ}$) 为界向两侧逐渐递减的特征. 进行区域水平运动状态的研究, 绘制剪应变率等值线分布图, 可以清楚地发现在高剪应变率集中区或其边缘地带确实存在着发生中强地震的可能. 新疆地域辽阔, 由于我们在天山区域内布设 GPS 点数量有限, 要全面地监测天山的构造活动性是远远不够的, 尚不能很好地满足区域研究的需要. 希望在今后的工作中, 增加点位的时空密度, 同时结合多种地球物理、大地测量资料和研究手段, 对该地区的现今地壳运动和构造活动作更深入地研究, 更好地为防震减灾事业服务.

本文在撰写过程中得到了中国地震局武汉地震研究所吴云研究员的热情帮助, 在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- 陈健, 陶本藻. 1987. 大地形变测量学[M]. 北京: 地震出版社: 447-464.
- 傅容珊, 徐耀民, 黄建华, 等. 2000. 青藏高原挤压隆升过程的数值模拟[J]. 地球物理学报, **43**(3): 346-359.
- 胡明城, 鲁福. 1994. 现代大地测量学[M]. 北京: 测绘出版社: 761-787.
- 江在森, 马宗晋, 牛安福, 等. 2003. GPS 技术应用与中国地壳运动研究的方法及初步结果[J]. 地学前缘, **10**(1): 71-79.
- 彭树森. 1993. 大地形变测量所反映的天山最新构造运动[J]. 内陆地震, **7**(2): 136-141.
- 王琪, 丁国瑜, 乔学军, 等. 2000. 用 GPS 研究南天山(伽师)地区现今地壳形变[J]. 地震学报, **22**(3): 263-271.
- 王晓强, 李杰, 王琪, 等. 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.
- 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等. 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征[J]. 地震学报, **15**(4): 407-417.
- Avouac J P, Tapponnier P. 1993. Kinematic model of active deformation in central Asia[J]. *Geophys Res Lett*, **20**: 895-898.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. *Science*, **189**: 410-426.
- Molnar P, Tapponnier P. 1977. Relation of the tectonics of eastern China to the Indian-Eurasia collision: Application of slip line field theory to large-scale continental tectonic[J]. *Geology*, **5**: 212-216.

HORIZONTAL MOVEMENT AND STRAIN CHARACTERISTICS IN TIANSHAN AND ITS ADJACENT REGION WITH GPS DEFORMATION DATA

Wang Xiaoqiang¹⁾ Li Jie¹⁾ Alexander Zubovich²⁾ Wang Qi³⁾

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

2) *Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek 720049, Kyrgyzstan*

3) *GPS Laboratory, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China*

Abstract: Based on the multiple-term horizontal velocity solutions of 230 GPS monitoring sites in Tianshan and its adjacent region, the GPS site velocity fields and crustal horizontal strain fields in the area have been obtained. The results show that the crustal shortening rate of Tianshan, with the longitude ($77^{\circ}\pm 1^{\circ}$)E as the boundary, gradually decreased towards two sides, from the south to the north, indicating that the pushing force of plate becomes weaker along with the fold deformation decreasing of the Tianshan. The direction of principal compressive strain of Tianshan and its adjacent area, nearly NNW, is basically perpendicular to the Tianshan cordillera trend, suggesting the distribution and variation of maximum principal compressive stress in Tianshan and its adjacent region resulted from collision and extrusion of Indian Plate. This paper indicates that the maximum shear strain field mainly concentrates on two areas, one is Isyk lake of North Tianshan, Kyrgyzstan, and the other is the juncture of Jiashi (South Tianshan) and Pamir arc faults. In the above areas, it can be shown from the epicentral distribution that the strong earthquakes mostly occurs at the high shearing strain accumulation filed or its edge.

Key words: GPS; Tianshan and its adjacent region; horizontal strain filed; maximum shear strain