

天山现今地壳快速缩短与南北地块的相对运动

王 琪^① 丁国瑜^② 乔学军^① 王晓强^③ 游新兆^①

(^①中国地震局地震研究所, 武汉 430071; ^②中国地震局分析预报中心, 北京 100036; ^③新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011. Email: whgps@public.wh.hb.cn)

摘要 基于天山及塔里木地区 1992~1999 年间多次全球定位系统(GPS)大地测量, 直接观测到跨天山西段(76°E)约 20 mm/a 的地壳快速缩短及天山东段(87°E)约 4 mm/a 的汇聚变形, 且跨天山带的南北向汇聚变形从西到东递减. 天山南缘 GPS 点所代表的现今运动方向基本与天山褶皱带走向正交, 塔里木盆地整体上对天山褶皱带形成正向挤压. 塔里木盆地内部变形较小或基本不变形, 整体上作为刚性块体, 以 95.7°E, 40.3°N(甘肃省安西)为欧拉极, 相对于稳定的西伯利亚地块作顺时针旋转, 角速率为 0.64°/Ma. 哈萨克地台及准噶尔盆地间有明显相对运动, 在亚洲构造运动格架上, 准噶尔盆地可能是一个独立的活动地块.

关键词 天山 地壳运动 GPS 测量

天山山脉东西绵延 2 500 km, 南北宽 300~500 km, 是世界上最大的内陆造山带之一. 天山南北两翼为具有重要构造意义的活动地块(塔里木、准噶尔盆地及哈萨克地台), 天山是这些板内块体间的重要边界带^[1]. 从亚洲构造运动看, 包括天山在内的中国大陆及中亚地区的现代构造格架是印度板块向欧亚板块碰撞挤压的结果, 大陆碰撞不仅造就了喜马拉雅山脉和青藏高原, 而且引起了亚洲大陆内部天山等古老造山带的复活及帕米尔高原大幅度向北推移旋转, 并使碰撞带两侧及其以北的天山、阿勒泰以至贝加尔一带成为大陆内部新构造运动十分强烈的地区^[2]. 通过 GPS 监测天山及塔里木地区的现今地壳运动, 可部分地为亚洲大陆地壳运动模式的研究提供有效的运动学边界约束^[3].

1 GPS 观测及数据处理

天山及塔里木地区 GPS 形变监测网建设始于 1992 年, 在天山及塔里木盆地边缘共设有 16 个测站, 其中南天山(喀什地区)有 9 个站, 天山及塔里木(76°E 以东)东部地区有 7 站(图 1). 1992 年 7 月国家 A 级网会战期间, 该网中喀什、和田和库尔勒 3 站首次观测^[4], 每站观测 6 天, 每天 16 小时. 1994 年 9 月该网首期整体观测, 每站观测 3~9 天不等, 每天 10~12 小时^[5]. 1996 年 7 月复测和田、若羌、喀什、库尔勒和乌鲁木齐 5 站, 每站观测 7 天, 每天 12~24 小时^[6]. 1998 年 1~11 月间, 我们以喀什地区为重点, 分批对早期 GPS 监测网进行时空加密观测(东部 6 站除外), 共增加观测点 35 个. 此次观测会战中, 作为固定站的乌鲁木齐、喀什、乌什和塔什库尔干 4 站连续观测, 其他各站累积观测时间至少 72 小时. 1999 年 5~8 月又对早期监测网及 1998 年加密网全面复测, 每站累积观测时间平均在 48 小时以上.

我们将 1992~1999 年间天山及塔里木地区监测网资料(包括境外天山 GPS 观测资料)与全球分布的部分 IGS 跟踪站资料联合解算, 数据处理以天为单位, 采用美国喷气推进实验室研制的 GIPSY-OASIS II 软件, 以无基准(no-fiducial)方式解算出各测站的瞬时三维坐标及方差-协方差矩阵, 形成单日时段解^[7]. 具体算法是: 卫星截止高度角在 15°以上双频载波相位和伪距在剔除初差、修补跳周后, 被压缩成采样间隔为 300 s 的非差观测值. 在进一步消除由于电

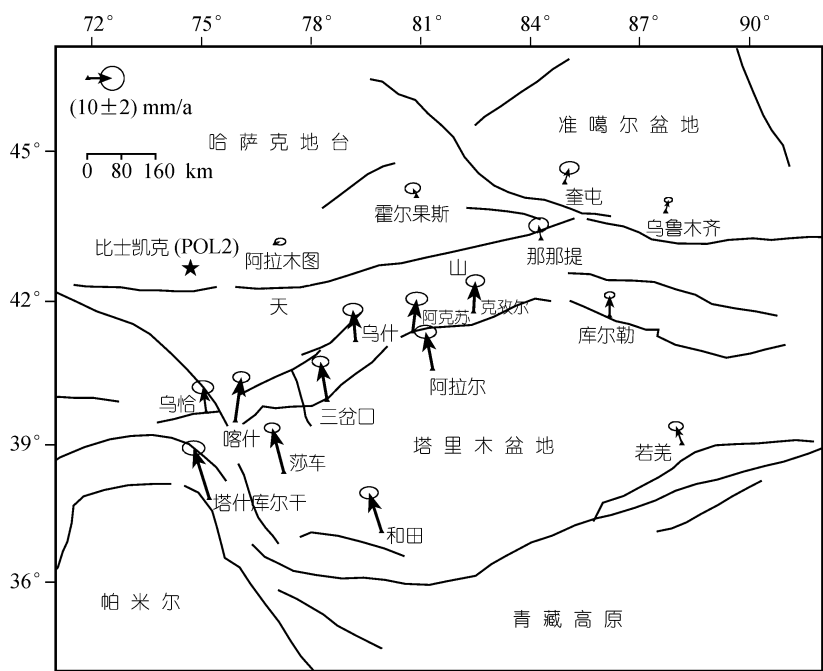


图 1 天山及塔里木地区 GPS 测定的现今地壳水平位移场

图中误差椭圆代表 95%置信区域, 折线为主要活动断层, ★表示位移场的运动基准, 其运动速率设定为零

离层、对流层引起延迟偏差, 并扣除潮汐、地球自转及卫星轨道等因素影响后, 观测值通过 Kalman 滤波主要用于估算测站三维坐标、初始相位模糊度和天顶方向对流层残余偏差等参数. 这里对 GPS 轨道的处理分两种: 1996 年前单日时段解采用轨道松弛算法, 精密轨道直接产生; 1996 年后的单日时段解, 轨道来自 IGS 公布的精密星历, 在解算中不作轨道改正. 解算中, 通过一定先验方差对所有测站坐标进行加权约束, 对相位模糊度也不作整周固定. 如果以测站坐标重复率来衡量定位精度, 1992~1994 年间每期观测的测站定位精度大致为 8~15 mm, 1996 年后的精度提高到 5~9 mm.

2 位移场

用 GPS 测站运动速率来表征区域位移场, 分 3 步生成: (1) 将单日时段解进行七参数坐标转换, 全部归化到 ITRF96 坐标框架上, 保证不同时期单日时段解的坐标基准具有一致性; (2) 将单日时段解各测站三维坐标及其方差-协方差作为伪观测值, 通过最小二乘平差估算各测站三维运动速率. 为保证结果可靠, 平差中略去观测时间不足 1 年的测站, 仅保留 18 测站用于研究; (3) 将位于比士凯克的 IGS 跟踪站(POL2)作为区域位移场的参考点, 计算其他测站相对于比士凯克的位移速率. 因为 GPS 高程测定精度较差, 且该地区以水平构造运动为主, 所以我们忽略垂直位移场, 主要分析水平位移场. 由此得到的水平位移场的平均精度: 南北向速率优于 2.2 mm/a, 东西向优于 3.8 mm/a (95% 置信度), 以现有观测精度, GPS 测定的运动速率已能较准确地反映该地区的构造运动基本特征.

位移场内地壳现今构造变形的变化幅度高达 22 mm/a, 且基本表现在南北方向上, 东西向变动方面, 整个场区变化不超过 7 mm/a. 就区域而言, 西部地区的现今变动又明显大于东部地区, 如塔什库尔干、莎车一带相对哈萨克地台以 19~22 mm/a 的速率快速移动, 代表了位移场内最大位移. 而若羌、库尔勒一线的移动仅 7~9 mm/a, 还不到西部的一半. 环塔里木盆地周边 6 点(西区: 阿拉尔、三岔口、莎车、和田; 东区: 库尔勒、若羌)在各区内的速率变化很小, 方向也基本一致, 说明塔里木盆地内部变形较小或基本不变形. 在西南天山, 喀什、乌什两点的运动形态与周邻测站有所不同, 其中喀什站运动方向为北北东, 而该地区总的运动趋势是北北西. 乌恰点与比邻的喀什点变动幅度又有明显差异(约 7~8 mm/a), 两点沿塔拉斯-费尔干纳断裂末端形成左旋错动. 1996 年 3 月阿图什发生 6.9 级地震, 1 年后伽师又发生一系列 6 级以上强震; 我们不能排除近期地震活动对局域地壳变形的扰动, 但以上两点的变形异常是否确实因以上地震引起, 或因 GPS 观测误差所为, 或者是区域构造方面的复杂因素所致^[8], 还需进一步研究, 并靠后续 GPS 观测来确定. 在北天山一线, 奎屯和乌鲁木齐位于准噶尔盆地南缘乌鲁木齐山前凹陷, 相对哈萨克地台现今运动仍十分明显, 幅度在 5~7 mm/a, 指向北北东. 相比之下, 霍尔果斯和阿拉木图因具有不同的构造背景, 其变形幅度已明显降低, 约为 2~4 mm/a. 但综合比较, 北天山的现今变动幅度仍然偏小, 难以与南天山相提并论.

3 讨论

天山地区山前或盆地边缘俯冲及逆掩断层十分发育, 地壳运动基本表现为近南北向的变形和大量强震地表破裂, 全新世活动断裂、褶皱及现今地震活动表明天山地壳仍处于持续缩短中^[8, 9]. 根据本文 GPS 结果, 天山南缘各 GPS 站主要运动方向为北北西, 基本上与天山褶皱带走向正交, 形成对天山的正向挤压, 明显受印度板块向北推移的影响. 哈萨克地台和准噶尔盆地均与稳定的西伯利亚地块相接, 但在北天山一侧被北西走向的婆罗科努-依连哈比尔朵山隔开, 从 GPS 速率分析, 哈萨克地台及准噶尔盆地间相对运动比较明显(约 (5 ± 2) mm/a), 虽然其现今变动幅度难以与塔里木-哈萨克地台间的相对运动比拟, 但从活动地块角度考虑, 将它视为一个独立的活动地块仍基本合理.

通过欧拉转动矢量法模拟天山以南 GPS 站相对于北天山的位移速率(喀什和乌恰两点除外), 塔里木块体相对哈萨克地台顺时针旋转运动的欧拉极为 $(95.7 \pm 2.3)^\circ\text{E}$, $(40.3 \pm 0.2)^\circ\text{N}$ (大致位于甘肃省的安西), 角速度 $(0.64 \pm 0.02)^\circ/\text{Ma}$ (图 2). 而根据亚洲地区主要活动断层滑动速率确定的转动速率^[10] $0.65^\circ/\text{Ma}$ (95.7°E , 43.5°N , 大致在新疆哈密一带). 两者在欧拉极经度上差异明显, 反映在东西向速率估算上, 两种方法存在系统偏差(图 2 左上插图). 不过 GPS 速率拟合精度相当高(图 2 右下插图), 残余速率均没有超出误差椭圆范围(95% 置信度), 既表明 GPS 确定的欧拉矢量相当可靠, 又从另一角度验证了塔里木块体的刚性特征.

从比士凯克、喀什、乌鲁木齐和库尔勒测站观测到的速率, 跨天山西段(76°E)的汇聚速率为 (17.9 ± 0.9) mm/a, 指向北偏东 $(3.8 \pm 4.5)^\circ$, 天山东段(87°E)为 (3.5 ± 0.7) mm/a, 指向北偏东 $(18 \pm 16)^\circ$, 天山东西两段的地壳缩短变形量有明显差异, 从西到东地壳汇聚幅度呈递减的势态. 这一结果表明随着天山从西到东逐步远离板块边界, 板块的推挤作用力逐渐减弱, 天山的褶皱变形相应趋缓. Avouac 等人^[9]根据北天山玛纳斯地区新生代山前活动断层和褶皱的多种地质资料, 估算出全新世以来天山东段(85.5°E)的缩短速率为 (6 ± 3) mm/a, 尽管大地测量学与

地质学所对应的时间尺度差异极大,但两者对天山东段的推断基本吻合,可以认定该区域现今地壳变动仍是晚新生代天山构造变形的延续.如果顾及比士凯克相对西伯利亚腹地约 $1\sim 2\text{ mm/a}$ 现今变动^[11],以喀什站速率推算,整个天山西段变形幅度大致在 20 mm/a 左右,与地质学模型所推断的结果(20 mm/a ,北偏西 28°)基本相似^[9](仅变形方位上有差异,见图 2 左上插图),反映出天山西部现今地壳的快速缩短.

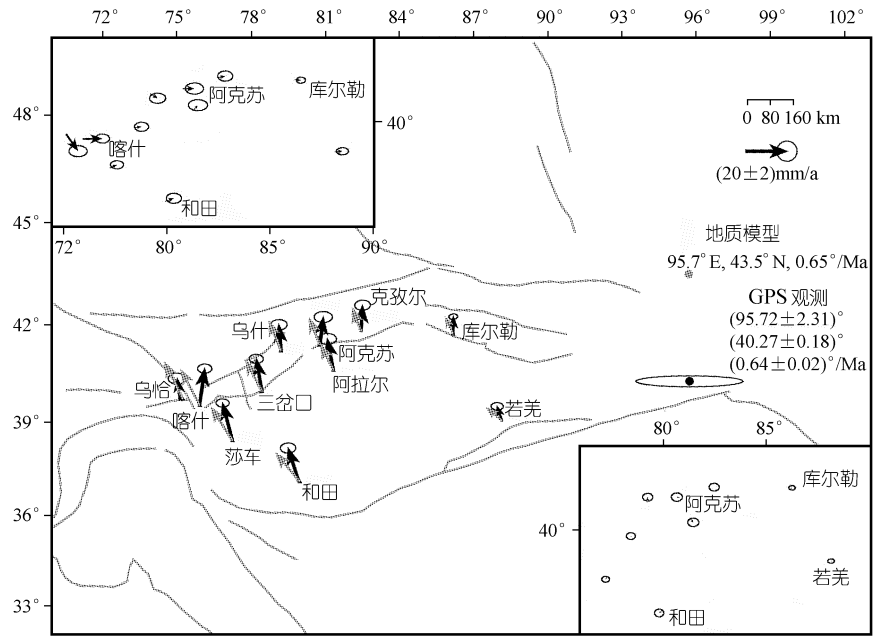


图 2 塔里木块体相对于哈萨克地台的旋转运动
黑色箭头为 GPS 测定速率, 浅色箭头为地质模型估算速率, 实心圆点各自代表相应的欧拉极. 左上插图反映了 GPS 对地质模型速率的修正量. 右下插图表示欧拉矢量法拟合 GPS 速率的残差. 图中所有误差椭圆代表 95% 的置信区域

在欧亚板块内部的天山地区,近 400 km 范围内地壳变形近 20 mm/a ,大致占喜马拉雅西北角(75°E , 35°N , 南迦帕尔巴特峰地区)印度板块向西伯利亚(75°E , 50°N)推移速率(43.2 mm/a , 北偏东 4.6°)的一半^[12,13],且与板块边界带印度板块向喜马拉雅下挤入欧亚板块的速率 19 mm/a 相当^[14,15],表明天山地区现今构造运动的最重要特征之一就是南北向地壳快速缩短,而且塔里木盆地相对于哈萨克地台和准噶尔盆地的现今构造运动整体上表现为刚性块体运动,可以用欧拉转动矢量来表示.

致谢 本工作为国家科技攻关(96-913-07)、攀登计划及地震科学联合基金会(No. 19708)资助项目.

参 考 文 献

1 丁国瑜, 卢演俦. 对我国现今板内运动状态的初步探讨. 科学通报, 1986, 31(18): 1412~1415
2 Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of continental collision. Science, 1975, 189: 419~426
3 England P C, Molnar P. Active deformation of Asia: From kinematics to dynamics. Science, 1997, 278: 647 ~ 650
4 党亚民, 陈俊勇, 刘经南, 等. 利用国家 A 级网资料对中国大陆现今水平形变场的初步分析. 测绘学报, 1998, 27(3): 267~273
5 游新兆, 王 琪. GPS 网整体平差与精度评定. 地壳形变与地震, 1995, 15(增刊): 68~75
6 游新兆, 王 琪, 乔学军, 等. 中国大陆地壳运动 GPS 监测网. 地壳形变与地震, 1998, 18 (增刊): 128~136

- 7 Larson K, Freymueller J T, Philipsen S. Global plate velocities from the Global Positioning System. *J Geophys Res*, 1997, 102: 9961~9981
- 8 张培震, 邓启东, 杨晓平, 等. 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题. *中国地震*, 1996, 12(2): 127~140
- 9 Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, et al. Active faulting and folding in the northern Tian Shan and rotation of Tarim relative to Dzungarian and Kazakhstan. *J Geophys Res*, 1993, 98: 6755~6804
- 10 Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 895~898
- 11 Abdrakhmatov K Y, Aldazhanov S A, Hager B H, et al. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 1996, 384: 450~453
- 12 Argus D, Gordon R. No-net rotation model of current plate velocities incorporating motion model NUVEL-1. *Geophys Res Lett*, 1991, 18: 2039~2042
- 13 DeMets C, Gordon R, Argus D, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on the estimates of current plate motions. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 2191~2194
- 14 Bilham R, Larson K, Freymueller J T, et al. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. *Nature*, 1997, 386: 61~64
- 15 王 琪, 游新兆, 王文颖, 等. 跨喜马拉雅的 GPS 观测与现代地壳运动. *地壳形变与地震*, 1998, 18(3): 43~50

(2000-02-24 收稿, 2000-04-07 收修改稿)