

基于 GPS 技术研究新疆巴楚—伽师 6.8 级地震的地壳形变特征*

王晓强¹, 江在森², 杨国华³, 李 杰¹, 杨少敏⁴

(1. 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;
3. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 4. 中国地震局武汉地震研究所, 武汉 430071)

摘要: 利用多期流动 GPS 观测成果及乌什、塔什库尔干 GPS 站连续观测资料结果, 对 2003 年 2 月 24 日巴楚—伽师 6.8 级地震前后的地壳形变特征进行了讨论。认为震前震中附近各点以 15~20 mm 左右的速率向 NNW 或 NNE 方向运动并在震中及邻近地区产生高剪应变值集中区, 震后震中附近各点运动速率却减为几毫米; 震前出现的高剪应变值集中区震后消失。同时乌什、塔什库尔干 GPS 连续观测站时间序列在震前 2~3 月也表现出大幅度突跳。

关键词: 地壳运动; GPS; 剪应变; 巴楚—伽师 6.8 级地震

中图分类号: P315.72+5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2009)02-0175-07

0 前言

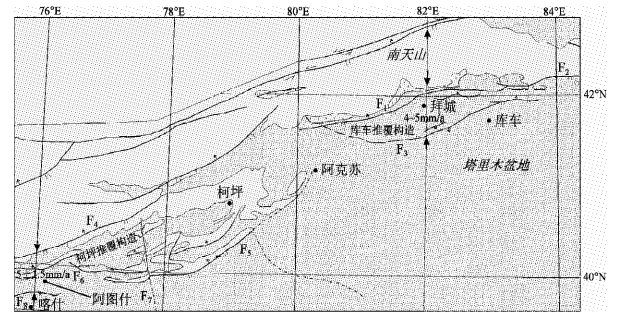
新疆乌恰、伽师地区在 1998 年强震群结束后经过一个相对平静期, 于 2003 年 2 月 24 日又发生了 6.8 级地震及其强余震。这是建国以来新疆地区伤亡人员最多的一次地震, 给当地人民群众的生产和经济发展造成了重大损失。从某种意义上讲, 这种接连发生地震的现象预示着该区域进入了新一轮的地震活跃期(龙海英等, 2007; 赵俊猛等, 2006)。

随着空间大地测量技术的迅速发展, 目前 GPS 相对测量精度已达到 $10^{-8} \sim 10^{-9}$, 完全可以满足地壳形变观测与分析的需要。我们在新疆南天山地区布设了数十个 GPS 流动观测点和两个连续观测站, 主要目的就是监测地震活动在地球表面引起的异常运动, 从地形变学的角度研究、认识地震的孕育、发生过程。利用这些观测资料, 我们对巴楚—伽师 6.8 级地震的地壳形变特征进行分析研究, 试图发现其中的变化和规律。

1 区域构造背景介绍

新疆乌恰、伽师、巴楚等地区位于天山褶皱带、帕米尔弧形构造和塔里木块体三个构造单元的交接

地带, 是印度板块向中亚大陆楔入最深、受板块动力作用最强烈的地区之一。该区域现代地壳运动异常强烈, 中强地震频繁发生, 自 1996 年以来连续发生多次 6 级以上强震, 这是南天山最新构造运动的结果和最重要特征。南天山的最新构造活动以逆冲运动为主, 主要分布在山前和山间盆地的边缘, 其主要逆冲构造有库车推覆构造和柯坪推覆构造(图 1)。巴楚—伽师 6.8 级地震的主要发震构造是普昌断裂带向南延伸的巴什托普隐伏断裂(沈军等, 2006; 徐锡伟等, 2006; 吴传勇等, 2006)。



F₁: 喀桑托开断裂; F₂: 东却勒塔格断裂; F₃: 却勒塔格断裂; F₄: 迈丹断裂带; F₅: 柯坪断裂; F₆: 托特拱拜孜—阿尔帕雷克断裂; F₇: 普昌断裂(巴什托普); F₈: 阿图什背斜北缘断裂

图 1 南天山地质构造图
Fig. 1 The geological tectonics map of the south Tianshan

* 收稿日期: 2008-03-29.
基金项目: 新疆维吾尔自治区科学研究与技术开发(含攻关)计划(200741121)、“十五”国家重点科技攻关项目子专题(2004B601B01-02-01)及中国地震局科技支撑计划子专题(2006BAC01B-03-01-01)资助。

表 1 区域主要活动断裂情况
Tab. 1 The Sketch of main active faults in the research aera

编号	断裂名称	长度/km	产状 走向/倾向/倾角	断层 性质	活动证据	活动 时代	地震活动
F ₁	喀桑托开	70	275°/5°/20°~40°	逆冲	错断上更新统	Q ₄	1999 年 3 月 15 日 5.7 级地震
F ₂	东却勒塔格	90	78°/N/20°~60°	逆冲(逆掩)	错断Ⅱ级阶地	Q ₄	1949 年 2 月 24 日 7¼、5 月 25 日 6¼级, 1973 年 3 月 29 日 6.0 级地震
F ₃	却勒塔格	264	75°/NNW (或 S) /20°~82°	左旋逆冲	错断Ⅱ级阶地	Q ₄	1893 年 12 月 18 日 6.7 级、1916 年 6 级、1947 年 8 月 24 日 6¼级地震
F ₄	迈丹	480	NE/333°/60°~80°	左行走滑逆断层	切割 Q ₃ 堆积	Q ₃₋₄	5.0~5.9 级地震, 区外有 6.4 级地震
F ₅	柯坪	460	近 EW/340°或 170°/38°~80°	左行走滑逆断层	断错 Q ₃₋₄	Q ₄	1961 年 6.8 级强震群, 1972 年、1977 年 6.2 级地震, 1991 年 6.5 级地震
F ₆	托特拱拜孜— 阿尔帕雷克	270	NEE/350°或 170°/25°~80°	左行走滑逆断层	断错 Q ₃ , 断错水系	Q ₄	有古地震活动遗迹, 1902 年阿图什 8 级地震
F ₇	巴什托普	60	EW/N	隐伏逆断层			1998 年震群, 2003 年巴楚 6.8 级地震
F ₈	阿图什北翼	100	NEE/140°~150°/40°	逆断层	断错阶地	Q ₄	1896 年 6¼级地震

2 资料概括及数据处理

我们截取了新疆 GPS 监测网 1998~2005 年共 8 期观测的成果, 除第 1 期使用的是美国 TRIMBLE 4000 双频 GPS 接收机外, 其它 7 期均使用美国 ASHTECH Z-12 双频 GPS 接收机。1998~2001 年每年观测 1 期, 时间在 7~8 月份; 2002~2003 年 1 月观测了第 5 期; 2003 年 2 月 24 日巴楚发生 6.8 级地震后, 3 月份我们对震区进行了 GPS 复测; 2004 年 2 月根据南天山地震情况又进行了第 7 次观测; 2005 年 2~3 月对南天山及塔里木西侧又作了较大规模的观测。另外, 我们还使用了 1999~2007 年间乌什和塔什库尔干基准站的连续观测成果。

后续资料采用美国麻省理工学院的 GAMIT/GLOBK 解算软件进行分析处理。以天为单位 (24 小时为一个单日时段), 参考框架采用目前最新的 ITRF2000 框架, 星历采用 IGS 精密星历 (SP3 格式) 定轨。流动站坐标约束 10 m (松弛约束坐标)。解算采取松弛解模式, 利用 AUTCLN 自动修复周跳同时辅以 CVIEW 进行手工干预剔除周跳残差, 最终获得 O 文件解与 H 文件解。网平差 (GLOBK) 计算步骤: 固定极移参数, 卫星轨道约束 20 m, 测站约束 10 m。综合全球 H 文件以及本次计算的 H 文件, 由 GLOBK 求多天整体解, 以 IGS 核心站为参考站建立地球参考框架, 由统一基准下的各期的平差结果, 按坐标求差方法分别求出 GPS 监测网中各测站在 ITRF2000 框架下的速度

场, 将 NNR-NUVEL-1A 的速率作为形变场的基准, 计算各测站相对于欧亚板块的速度。同时以喀什等点为参考站, 计算出相对喀什等地的各点运动速率。精度分析是对 GPS 结果可靠性的重要评价, 多期重复观测表明, 网内点位水平分量的精度为 $\pm 1 \sim \pm 2$ mm。相邻点位组成的基线边水平分量重复观测精度为 ± 3 mm 左右。

计算应变时, 我们假定地球介质 (地壳) 是一个弹性体并且连续、均匀和形变小, 因此可通过建立协方差函数模型, 运用最小二乘法由 GPS 站点观测位移 (运动速率) 来获得水平位移速度场的空间分布函数, 从而由位移与应变的偏导关系获得应变场率的空间分布 (党亚明等, 2001)

在 GPS 测量中, 由于有大量的监测点可以利用, 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, 可以利用监测点运动速率的方差—协方差以及监测点离开所求区域的中心点距离进行定权。确定应变参数后, 就可以求出最大剪应变 γ_{\max} 、面应变 (面膨胀) Δ 、最大主应变 ε_1 、最小主应变 ε_2 、最大主应变方位角 α 等数值。

3 异常信息的探讨和分析

3.1 形变场分析

图 2 反映了测区各点相对欧亚板块的运动情况。在震前, 震中区两侧各点形成两大块体向不同的方向运动, 以 77°E 为界, 西侧块体以 20 mm/a 左右的速度向 NNW 方向运动, 东侧块体以 15 mm/a

左右的速度向 NNE 方向运动（特别是巴楚（I076））。我们认为印度板块通过昆仑山、塔里木块体向北推挤的过程中，在巴楚—伽师中间一带受到一个坚硬地块的阻挡，使其分解成两个不同方向的力，这两个力带动着此处的地壳向两侧运动。GPS 观测数据直接反映出了这种地壳运动现象，这里两侧块体运动速度相差约 5 mm 左右，2001 年以前该地区的运动除方向略有差别外速度基本相同（王治民等，2007），而现在这里西侧运动速度快、异常面积大，东侧运动速度小，整个区域相对右旋运动，NNW 方向的推挤力占据了主导作用。这种现象与其震源机制解所反映的主压应力方向一致（高国英等，2004）。图 2b 是巴楚 6.8 级地震后进行复测的结果，我们发现该地区的地壳运动速度已变得很小，只有几毫米，没有了震前的那种大幅度运动现象，运动方向的一致性也较震前差。

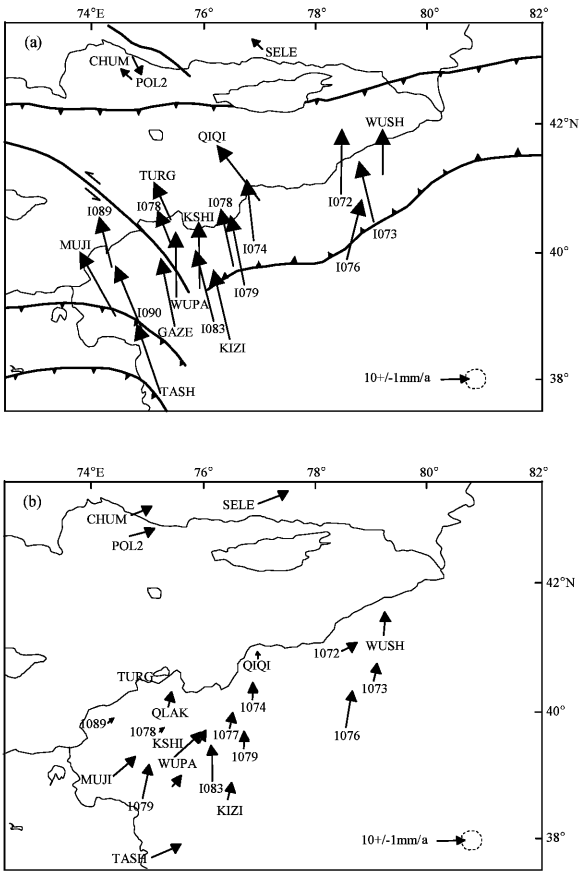


图 2 2001 年 6 月至 2003 年 1 月 (a)、2003 年 1 ~3 月 (b) GPS 点位相对欧亚板块的运动
Fig. 2 Horizontal velocities map of GPS stations relative to Eurasia plate 2001. 6 - 2003. 1 before earthquake (a) and 2003. 1 - 2003. 3 after earthquake (b)

图 3a 是震前的各点位相对于喀什的运动图。巴楚（I076）与周围各点的运动不一样，方向东南，而伽师（I079）等地的点方向是西北，整个地区的 GPS 点围绕着震中区做逆时针运动（除 MUJI 等点外），且震中区周边的点（QIQI 等点）运动速度在 10 mm/a 以上。图 3b 是震后相对于喀什 GPS 点位运动速度图，图中各点运动速度极小，其中巴楚的运动方向向西。巴楚（I076）及邻近 GPS 点位的这种奇特变化，可能代表了强地震前的一种地壳异常，反映出了这一地区震前、震后复杂的地壳运动状态。

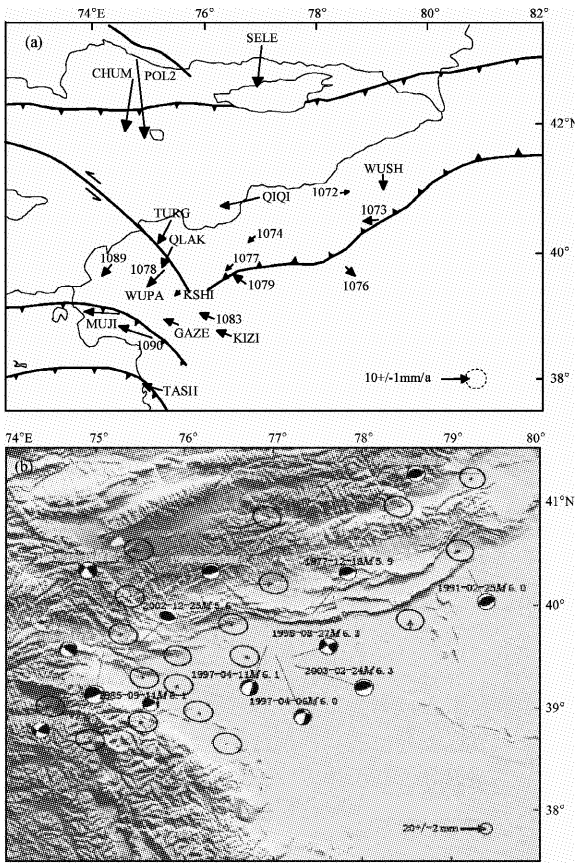


图 3 2001 年 6 月至 2003 年 1 月 (a)、2003 年 1 ~3 月 (b) GPS 点位相对喀什的运动
Fig. 3 Horizontal velocities map of GPS stations relative to Kashgar station 2001. 6 - 2003. 1 before earthquake (a) and 2003. 1 - 2003. 3 after earthquake (b)

3.2 时间序列的变化分析

GPS 观测资料的位移时间序列是研究 GPS 观测精度的可靠依据，也是研究 GPS 观测点位移的另一种手段，并且还能提取与地震孕育过程有关的信息。图 4 反映了震中区周围各流动点 GPS 观

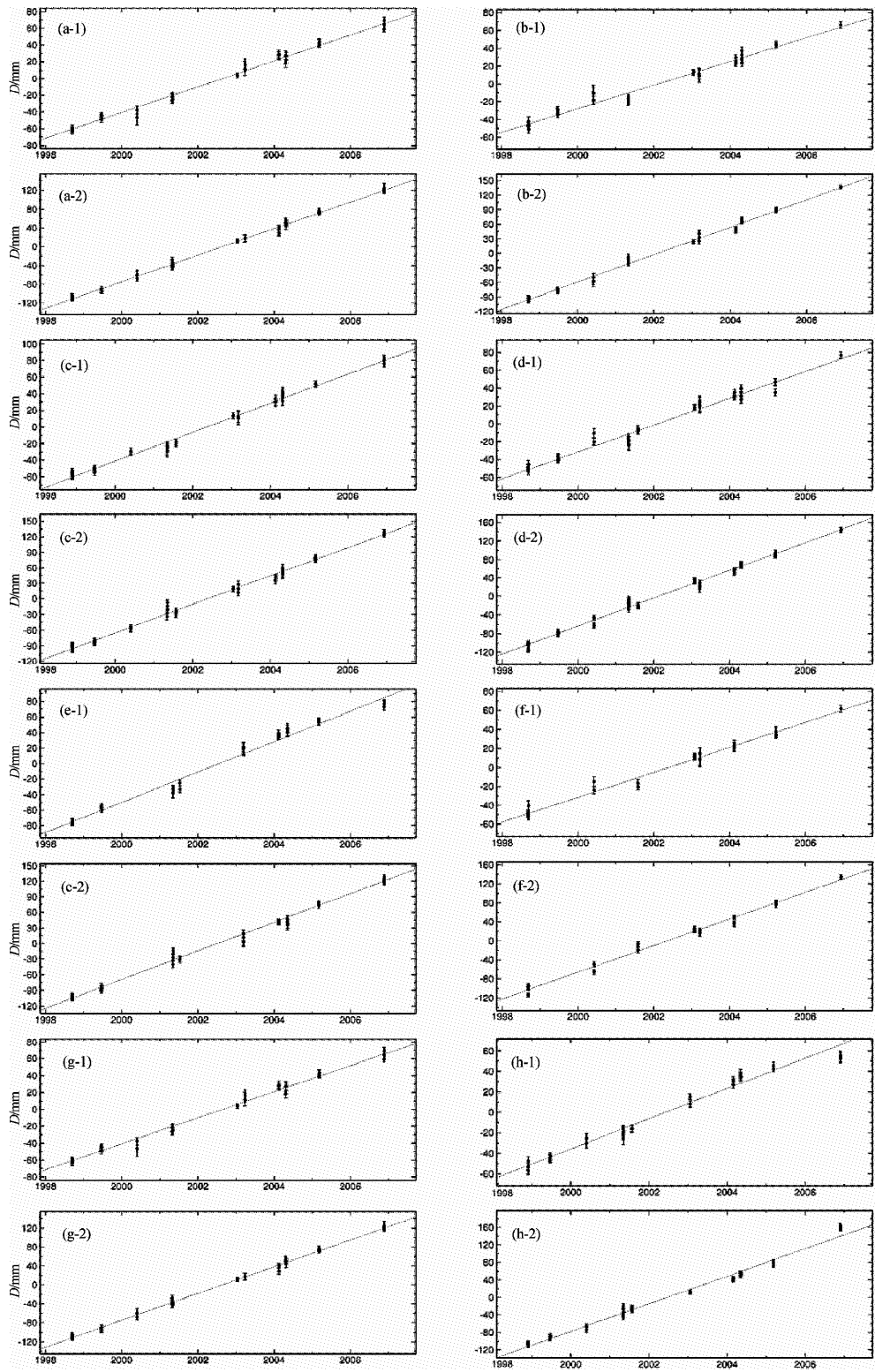


图 4 震区周围流动 GPS 点位移时间序列图

Fig. 4 Time-series graph of mobile GPS stations around earthquake region

(a-1)、(a-2) I076 点北方向、东方向时间序列图；(b-1)、(b-2) I073 点北方向、东方向时间序列图；
(c-1)、(c-2) I079 点北方向、东方向时间序列图；(d-1)、(d-2) I072 点北方向、东方向时间序列图；
(e-1)、(e-2) I082 点北方向、东方向时间序列图；(f-1)、(f-2) QIQI 点北方向、东方向时间序列图；
(g-1)、(g-2) I074 点北方向、东方向时间序列图；(h-1)、(h-2) I077 点北方向、东方向时间序列图

测点的时间序列。巴楚（I076）、柯坪（I073）、伽师（I079）、阿合奇（I072）、麦盖提（I082）、契恰尔（QIQI）、哈拉峻（I074）、苏滚（I079）等点 2001 年、2003 年 1 月、2003 年 3 月北方向、东方向的运动与其它时间的运动不符，不成线性关系，出现了突跳，这个突跳随震中距的大小而改变，异常值约为 10 ~ 15 mm，巴楚离震中最近，北方向突变了近 20 mm，哈拉峻离震中约一百多公里，北方向也突变了近 10 mm，而通常上述各站的运动规律线性相关性很好。

图 5 是乌什 GPS 基准站的时间序列图，可以看出，在北方向和东方向上，在巴楚—伽师 6.8 级地震发生前 2 ~ 3 个月，曲线出现突跳，其中北方

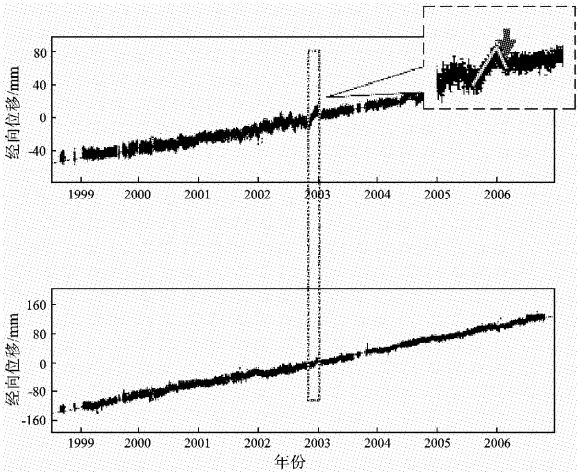


图 5 乌什 GPS 基准站时间序列

Fig. 5 Time-series graph of Wushi fiducial station

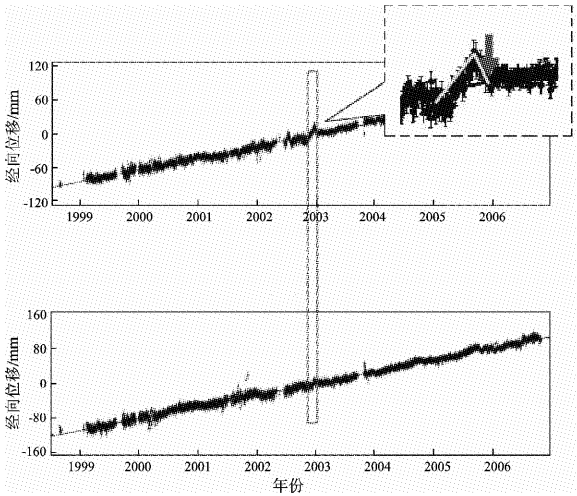


图 6 塔什库尔干 GPS 基准站时间序列

Fig. 6 Time-series graph of Tashkuergan fiducial station

向变化较大，其偏离均值线变化幅度在 25 mm 左右，在东方向上偏离均值线变化幅度约 20 mm 左右。图 6 中塔什库尔干 GPS 基准站时间序列的表现也是如此，北方向上偏离均值线变化幅度在 23 mm 左右，在东方向也有变化，反映出震前地壳运动加速变化的异常信息。

3.3 应变场分析

我们可以通过 GPS 各点之间的基线变化计算出研究区域的应变场情况。从图 7、图 8 中可以看出，在巴楚—伽师 6.8 级地震前，木吉、乌帕尔、喀什、伽师、巴楚等地区主压应变明显大于其它地方，特别是在伽师、巴楚之间，应变强度最大，主压应变呈近 NWW 向。剪应变也在这里得到大量积累，约为 5.8×10^{-7} （图 8b）。而在此之前，该地区尚无如此大的应变场变化（图 8a），剪应变也只有 10^{-7} ，体现出该地区能量迅速积累需求破裂释放的现象。地震发生后，剪应变在这一区域大量积累的现象迅速消失并回到了 $1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-7}$ （图 8c），这说明剪应变高度集中的地区与强震确实存在密切的关系。在 2004 年的 GPS 复测中，我们同样在乌什西北地区发现了一个剪应变高度集中区（图 8d），并据此做了预报，指出乌什西北地区是一个值得关注的地区，有可能发生较大震级的地震，结果 2005 年 2 月 15 日发生了 6.2 级地震（震级预报偏差较大）。震后，我们立即进行复测，该区的剪应变聚集区已经消失，并在柯坪西部又

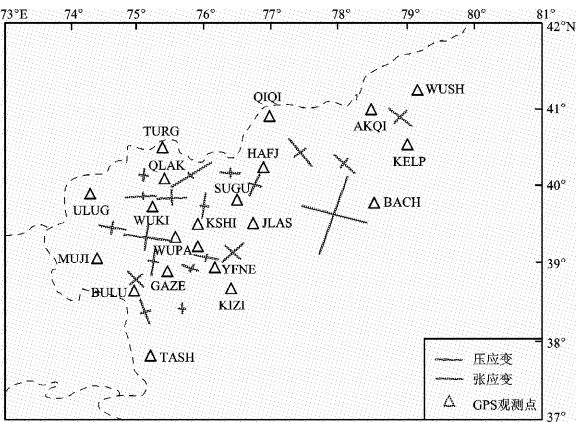


图 7 2001 年 8 月至 2003 年 1 月伽师地区压应变、张应变分布图

Fig. 7 Distribution of principal compressive and tensile strain rate in Jiashi and its adjacent region from 2001.08 to 2003.01 (before earthquake)

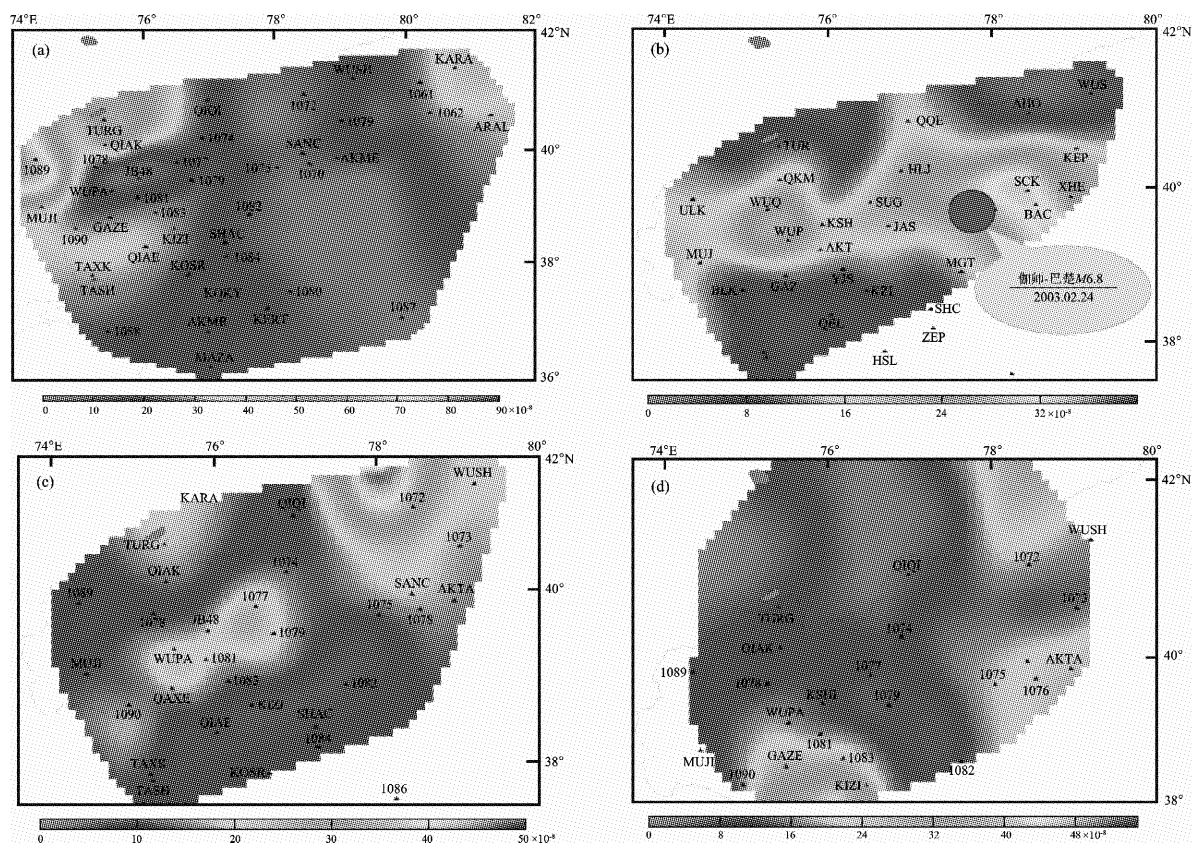


图 8 伽师地区剪应变分布图

Fig. 8 Distribution of the maximum shear strain rate in Jiashi and its adjacent region

(a) 1998 年 8 月至 2001 年 8 月; (b) 2001 年 8 月至 2003 年 1 月;
(c) 2003 年 1 月至 2003 年 3 月; (d) 2003 年 3 月至 2004 年 2 月

形成了一个新的高剪应变聚集区。由此可以看出, 高剪应变聚集区或其边缘是发生强地震的危险区 (王晓强等, 2005; 江在森, 2003)。

4 结论

(1) 大地震前震中区及附近地壳出现大范围的向某一方向的整体运动, 这一现象在伽师—巴楚地震前的地形变中已得到证实。

(2) GPS 观测点的时间序列在强地震前一段时间内也会表现出跳跃, 这种跳跃会随离震中区的距离增大或减小, 特别是在基准站的时间序列中表现更为明显。

(3) 在高剪应变集中区及主应变增大区, 其周围及中心区将非常有可能是下次强地震的发震区。

GPS 观测技术对于强地震的中、长期预报是一个非常有效的手段, 但对于临震预报, 只有建立

大范围的、密集的连接 GPS 观测站并结合众多的短周期流动 GPS 观测, 才能有效解决这个问题。

参考文献:

- 党亚民, 晁定波, 许才军, 等. 2001 利用 GPS 形变资料确定地壳形变的应变特征 [J]. 测绘科学, 26 (3): 11-13.
- 高国英, 聂小红, 夏爱国. 2004. 2003 年伽师 6.8 级地震序列特征和震源机制的初步研究 [J]. 中国地震, 20 (2): 179-186.
- 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 (中国地质大学), 10 (1): 71-79.
- 龙海英, 聂晓红, 高国英. 2007. 新疆天山地区与川滇地区中强地震震源机制解对比分析 [J]. 地震研究, 30 (3): 229-234.
- 沈军, 陈建波, 王翠, 等. 2006. 2003 年 2 月 24 日新疆巴楚—伽师 6.8 级地震震构造 [J]. 地震地质, 28 (2): 205-212.
- 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.
- 王治民, 王晓强, 李杰, 等. 2007. 南天山及帕米尔高原现代地壳水平形变 [J]. 高原地震, 19 (3): 29-34.
- 吴传勇, 沈军, 陈建波, 等. 2006. 新疆南天山库车坳陷晚第四纪

以来地壳缩短速率的初步研究 [J]. 地震地质, 28 (2): 279 - 288.

赵俊猛, 卢芳, 嘉世旭, 等. 2006. 伽师强震群的深部力学条件 [J]. 地震研究, 29 (4): 338 - 342.

徐锡伟, 张先康, 冉勇康, 等. 2006. 南天山地区巴楚—伽师地震 ($M_s6.8$) 发震构造初步研究 [J]. 地震地质, 28 (2): 161 - 178.

Study on Characteristics of Crustal Deformation of the Bachu-Jiashi $M_s6.8$ Earthquake in Xinjiang Based on GPS Technique

WANG Xiao-qiang¹, JIANG Zai-sen², YANG Guo-hua³, LI Jie¹, YANG Shao-min⁴

(1. *Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China*)

(2. *Institute of Earthquake Prediction, CEA, Beijing 100036, China*)

(3. *First Crust Deformation Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China*)

(4. *Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China*)

Abstract

We discussed the characteristics of crustal deformation before and after the $M_s6.8$ BaChu-JiaShi earthquake, using multiple mobile GPS observation results and continuous observation results in WuShi、Taxkorgan GPS stations. We believe that each point near the epicenter moves to the NNW or NNE direction with the velocity of 15-20mm before the earthquake, which engendering high shear strain concentration area in the epicenter and adjacent area. However, the moving velocity of each point near the epicenter decrease to several millimeters after the earthquake and high shear strain concentration area disappears. At the same time, the time series of Wushi、Taxkorgan GPS continuous observation station appear wide-range sudden jump 2-3 months before the earthquake.

Key words: Crustal motion; GPS; shear strain; Bachu-Jiashi $M_s6.8$ earthquake