

文章编号: 0253-3782(2005)04-0394-08

GPS 时间序列及其对昆仑山口西 8.1 级地震的响应^{*}

敬少群^{1, 2)} 吴 云¹⁾ 乔学军¹⁾ 周硕愚¹⁾ 施顺英¹⁾

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

2) 中国长沙 410012 湖南省地震局

摘要 采用 GIPSY 软件解算的站点坐标时间序列, 对我国 25 个 GPS 基准站的观测数据进行了分析. 结果表明, 该时间序列存在明显的趋势变化, 经向坐标与纬向坐标的趋势变化反映了各站点在全球板块中的运动; 垂直方向的趋势变化揭示的可能是大尺度的构造信息, 也可能是站点周围局部运动的反映. 分析还表明, 该时间序列存在明显的近乎 1 年的年变周期, 但具体原因还有待于进一步研究. 最后, 就该时间序列对昆仑山口西 8.1 级地震的响应进行了分析. 结果表明: GPS 时间序列对该地震的孕育过程反映明显, 并根据时间进程及异常特点将昆仑山口西 8.1 级地震的孕育过程分为 3 个阶段: 块体受力状态的变化、应力积累和能量的快速积累与缓慢释放. 在 8.1 级地震孕育的初始阶段和临震、同震及震后恢复阶段, 垂直方向的异常占据主导地位, 初始阶段垂直方向的异常运动导致断层间闭锁; 而在地震孕育的中期, 各块体间水平方向的差异运动则占主导地位, 它是引起能量在断层闭锁段积累的重要原因.

关键词 GPS 时间序列 趋势变化 周期变化 地震孕育 断层间闭锁 能量积累

中图分类号: P315.72⁺5 **文献标识码:** A

引言

随着国家攀登计划和“中国地壳运动观测网络”工程的实施, GPS 观测规模迅速扩大. 目前, GPS 监测网络有 25 个基准站、56 个流动站和 1 000 多个区域站. 其中基准站自 1999 年 3 月中旬起开始 GPS 连续观测. 本文利用 GPS 基准站 1999 年 3 月 10 日~2002 年 4 月 2 日 3 年多的连续观测数据, 分析了中国大陆 GPS 站点坐标随时间变化的规律, 并以此为基础, 对 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震的响应进行了研究. 有关 GPS 基准站站点分布情况见顾国华和张晶(2002)文章.

1 数据的前期处理

数据的前期处理分两步进行: ① 对所有观测的 GPS 相位数据, 采用 GIPSY 软件进行批量处理. 数据处理的流程分为预处理、相位观测值拟合、参数解算及坐标转换 4 个步骤. 以单日时段(24 h)观测数据为基本单位, 采用无基准算法, 一次性同步解算出各个测站的

^{*} 国家自然科学基金项目(40074024, 40304002)和国家“十五”科技攻关项目(2001BA601B02)联合资助.
2003-12-17 收到初稿, 2005-04-15 收到修改稿并决定采用.

三维坐标. 有关数据处理内容见牛之俊等(2003)文章. 本文采用的为 ITRF 坐标系; ② 对 GPS 站点坐标时间序列连续缺数少于 3 日的情况, 按形变观测规范中提供的插值法进行补插(国家地震局科技监测司, 1995); 对连续缺数大于 3 日的情况, 为便于进行相应的数据处理, 采用线性插值法, 顺其趋势变化迹线将缺失数据补齐.

2 GPS 站点坐标随时间的变化规律

2.1 趋势变化

在 GPS 站点坐标时间序列中, 无论经向、纬向还是垂直向均存在有趋势性变化. 我们用线性函数 $y=ax+b$ 分别对各基准站三分量坐标的时间序列进行拟合, 提取各基准站三分量年趋势变化的大小和方向(表 1). 可以看出, 各站点的经向坐标都存在明显的向东的趋势变化; 纬向坐标的趋势变化也很明显, 只是由于站点所处的构造单元不同, 其趋势运动的方向和大小各有差异. 其中位于印度板块契入点附近的 TASH, LHAS, WUSH 和 URMG 站为趋势性向北运动, 其余各站均为趋势性向南运动. 各站点年趋势性变化结果与 Wang 等(2000)应用两期 GPS 资料解算的运动速度相比, 除 XNIN, XIAA 站略有差异外, 其余各站基本一致.

表 1 GPS 各站点趋势变化一览表

站名(代码)	连续率	经向 /mm·a ⁻¹	纬向 /mm·a ⁻¹	高程 /mm·a ⁻¹	站名(代码)	连续率	经向 /mm·a ⁻¹	纬向 /mm·a ⁻¹	高程 /mm·a ⁻¹
十三陵(BJSH)	74%	33.1	-12.4	-12.34	乌什(WUSH)	79%	31.9	12.4	-3.56
房山(BJFS)	84%	33.0	-14.0	-1.31	泸州(LUZH)	71%	36.0	-10.6	-2.62
蓟县(JIXN)	76%	32.6	-12.1	-6.55	昆明(KUNM)	78%	33.1	-19.7	3.09
绥宁(SUIY)	57%	27.0	-16.8	4.11	下关(XIAG)	70%	29.0	-17.3	-7.47
海拉尔(HLAR)	74%	28.9	-12.9	-13.91	西宁(XNIN)	74%	33.1	-12.1	1.05
长春(CHAN)	50%	28.1	-11.3	-10.98	琼中(QION)	70%	32.4	-9.0	7.24
泰安(TAIN)	67%	38.2	-15.1	-3.89	盐池(YANC)	78%	33.6	-11.6	-8.73
武汉(WUHN)	90%	35.1	-13.6	3.74*	厦门(XIAM)	70%	33.4	-14.9	-4.29
拉萨(LHAS)	57%	43.7	15.1	-0.72	上海(SHAO)	71%	34.0	-15.7	0.7
德令哈(DLHA)	77%	35.3	-1.9	-7.98*	鼎新(DIXN)	75%	32.2	-6.4	-11.29
塔什库尔干 (TASH)	77%	28.8	21.0	3.96	乌鲁木齐 (URMG)	60%	32.5	6.5	-0.96
西安(XIAA)	74%	31.8	-7.0	-11.4					

注: 经向向东为正, 纬向向北为正, 高程升高为正. 带 * 的数据为累计下降的年平均值得.

相对水平方向来说, 垂直方向的趋势变化则显得参差不齐. 这些或快、或慢、或升、或降的趋势变化, 可能是大尺度构造运动的反映, 也可能与站点周围的局部运动, 如季节性湿度变化、降雨, 在东部地区还可能与注水、抽水等有关.

2.2 周期变化

对 GPS 站点坐标时间序列消除趋势变化后的结果作傅里叶变换, 以分析其变化周期(傅里叶频谱分析及其图件均用 matlab 完成). 图 1 给出了北京十三陵(BJSH)垂直向及昆明(KUNM)站经向去除趋势变化后的曲线及其能量谱. 十三陵站经、纬分量, 昆明站纬向、高程, 以及其它站点坐标各分量的时间序列的傅利叶变换结果见表 2. 可以看出, 所有站点的垂直向, 和大部分站点的经向、纬向都存在近乎 1 年的变化周期. 其中也有许多站点存在半年的变化周期, 个别站点还有其它周期成分存在. 具有年变周期的站点, 其年变

的初相位和年变幅度各不相同. 对年变周期的影响因素, 由于目前资料的限制, 还不能给出一个完满合理的解释. 它究竟是源于解算过程中使用的模型对流层参数的偏离, 还是直接源于地壳变形的荷载效应, 如气压荷载等, 或是源于其它因素, 还有待于进一步的研究.

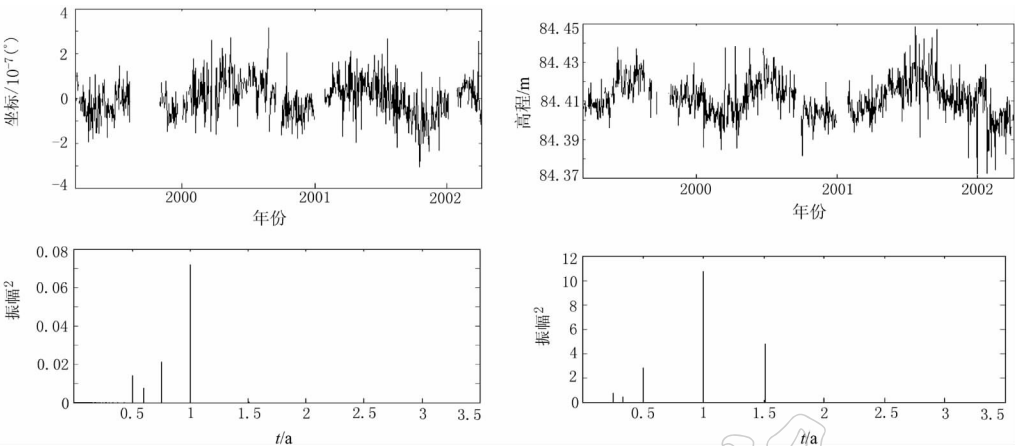


图1 BJSH(垂向)(右图)及 KUNM 站(经向)(左图)的坐标随时间变化及其能量谱图

表 2 相关站点的主要周期

站名	周 期						站名	周 期					
	0.51 a			1.02 a				0.51 a			1.02 a		
	经向	纬向	垂向	经向	纬向	垂向		经向	纬向	垂向	经向	纬向	垂向
BJSH			✓		✓	✓	KUNM				✓	✓	✓
BJFS			✓		✓	✓	YANC		✓	✓		✓	✓
JIXN			✓		✓	✓	DIXN			✓		✓	✓
WUHN						✓	XIAA				✓	✓	✓
DLHA			✓	✓	✓	✓	XNIN	✓		✓	✓	✓	✓
TASH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	WUSH		✓	✓	✓	✓	✓
HLAR					✓	✓							

3 GPS 站点坐标时间序列对昆仑山口西 8.1 级地震的响应

2001 年 11 月 14 日, 昆仑山口西(91.04°E, 36.04°N)发生了 8.1 级地震. 震后, 在对资料进行分析中发现, 部分 GPS 站点坐标时间序列对这次地震有很好的震前、同震及震后响应.

3.1 垂直方向的异常变化

垂直异常在此次地震的孕育、发生和发展过程中都非常明显, 它们不仅影响范围广, 而且变化幅度大, 在曲线上易于辨认.

异常最早出现在 2000 年 1 月 26 日的 WUSH 站, 随后 KUMN, DLHA, BJSH, XIAA, TASH, DIXN 和 YANC 站陆续出现异常变化. 这次异常以下降型为主, 在 GPS 时间序列图上表现为台阶状(图 2). 累计异常变化幅度最大的为 DLHA 站, 下降幅度 30 天达 44.3 mm. 其次为 TASH 站, 9 天下降了 29.4 mm.

第二轮异常从 2001 年 8 月 8 日起, 这一次出现异常变化的基准站数量更多、范围更大. 出现异常变化的站点有 URMG, XNIN, YANC, DLHA, DXIN, WUHN, WUSH, XIAA, LHAS, BJFS, SHAO, TASH. 此次异常与同震、震后图象连在一起, 除 WUHN 与 SHAO, TASH 与 WUSH 的异常图象两两相似外, 其余图象均相类似(图 2), 在 GPS 时间序列图上呈“鞍形”.

3.2 水平方向的异常变化

与垂直向相比水平方向的异常变化要弱得多. 只有在震中附近的 DLHA, DXIN, XNIN 站自 2001 年 11 月 11 日起, 记录到了明显的与此次地震有关的震前、同震及震后调整过程信息, 且三者的图象在 GPS 时间序列图上也很相似, 呈“倒鞍形”(图 3).

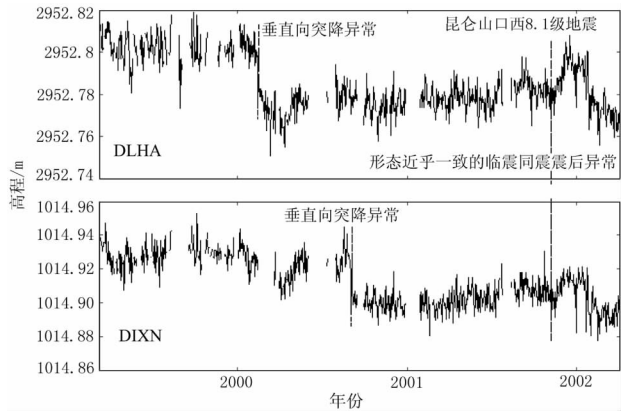


图 2 GPS 站点坐标时间序列的垂直向异常

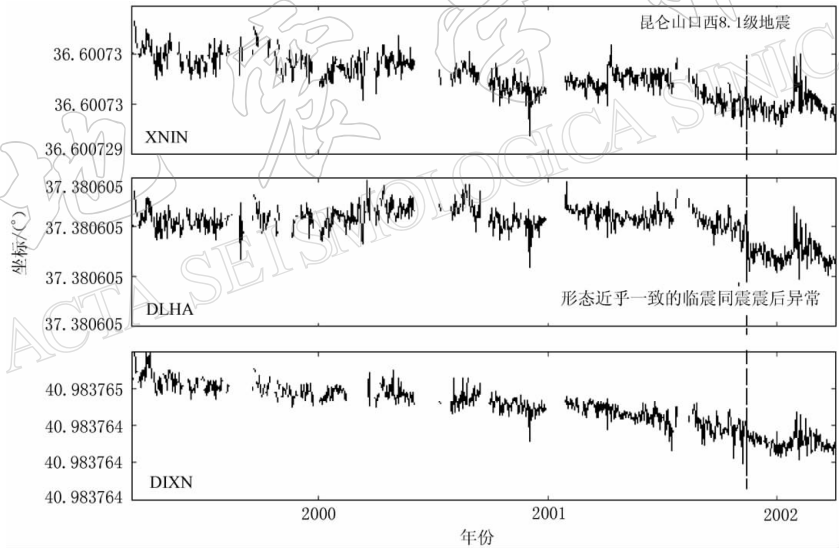


图 3 GPS 站点坐标时间序列的水平向异常

4 有关 8.1 级地震孕育发生时间进程的讨论

为了获取昆仑山口西 8.1 级地震的孕育信息, 我们计算了西部各 GPS 基准站两两之间位置坐标相对变化的时间序列.

若 A 站点某方向 GPS 站点坐标随时间的变化为 $y_i=f_i(t)$, B 站点某方向 GPS 站点坐标随时间的变化为 $x_i=g_i(t)$, 则站点 A 相对于站点 B 某方向坐标随时间的变化规律可表示为

$$h_i(t)=f_i(t)-g_i(t) \quad i=l_o, l_a, h_t \tag{1}$$

其中, l_o , l_a , h_i 分别代表经向、纬向和高程.

从式(1)不难看出, $h_i(t)$ 消除了两站点间背景场的变化信息, 而保存了各站点周围的局部变化信息及两站点间的差异运动信息. 在下面的表述中我们把 $h_i(t)$ 称为基线向量.

由 $h_i(t)$ 时序图结合上述分析, 并结合板内块体的现代运动图(丁国瑜, 卢演涛, 1989 年)(图 4), 我们认为从时间进程上可以把此次地震的孕育过程分为 3 个阶段:

第一阶段: 块体受力状态的变化. 在这一阶段, 记录到的异常现象多数源于作用在板块上的力的形式或大小的改变. 它有两种表现形式:

1) 垂直方向的异常变化. 具体表现在 2000 年 3 月前后, 各 GPS 基准站大范围的垂直向突然下降(图 2).

若假设地球为半径 6 370 km 的球体, 且在地壳范围内其沿半径方向、不同深度的垂直升降幅度一致, 那么平均 1 cm 的地面下沉, 将使地壳各圈层产生约 1.6 km² 的面积减小. 若这种情况出现在部分地区, 则首先会使该地区在易于变形处收缩. 按照板块理论, 块体边界的断裂带是最易于发生变形的地方. 断裂带的收缩变形导致断层“闭锁”, 并使相邻块体的相对运动受到限制.

2) 水平方向的异常变化. 具体表现在从 2000 年 3 月起, 位于拉萨块体的 LHAS 站与位于拉萨、塔里木两块体交界的 TASH 站两站点间经、纬向基线向量出现加速拉张(图 5a). 基线向量的加速拉张可能源于拉萨块体的加速膨胀, 也可能源于印度板块向北推进过程中施于欧亚板块东西两端作用力或推进速度的不均衡(图 4).

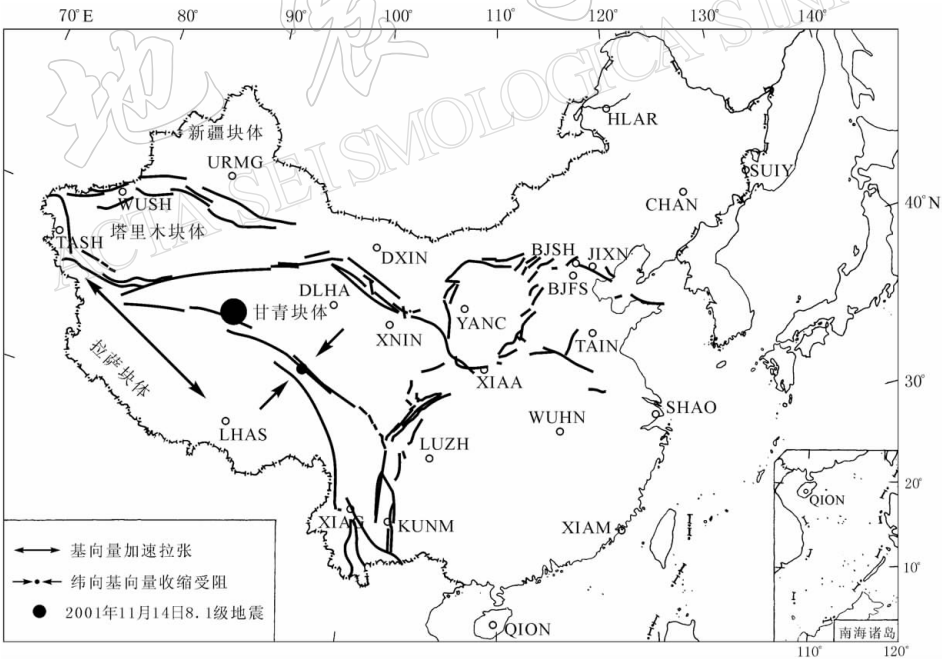


图 4 中国西部块体划分及孕震过程示意图

第二阶段: 应力的积累. 由于在第一阶段, 部分断层间出现了“闭锁”, 相邻块体间的相对运动受到限制. 如果此时相邻块体之间的差异运动持续存在或加强, 那么在块体边界就一定会出现应力积累. 表现为 2000 年 8 月起位于新疆块体的两站点 URMG—DXIN 站

纬向基线向量伸展受阻,而同样位于新疆块体的 URMG—WUSH 两站纬向基线向量却加速收缩(图 5b, c). 接着位于甘青块体与拉萨块体的 DLHA—LHAS、XNIN—LHAS 这两条纬向基线向量也同时出现了收缩受阻(图 5d, e). 这意味着: ① 甘青块体上、下两边界都受到了来自外部的挤压; ② 在甘青块体下边界的中西部—昆仑山东部,来自拉萨块体的向北的挤压力在西部得到了吸收,而在东部受到了抵制,也就是说昆仑断裂的东西部出现了受力不均衡现象.

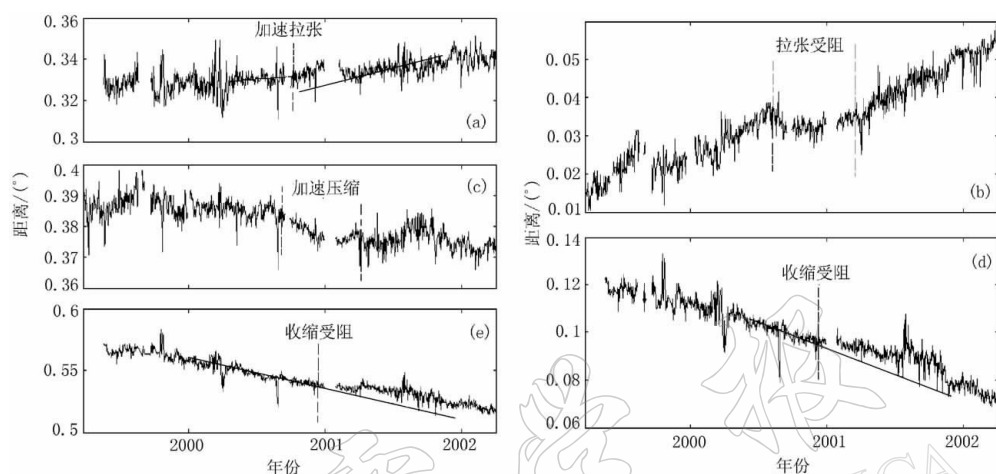


图 5 孕震中期的异常变化图象

(a) TASH—LASH 两站纬向距离的加速拉张; (b) URMG—DXIN 两站纬向距离的拉张受阻;
(c) URMG—WUSH 两站纬向距离的加速收缩; (d) DLHA—LHAS 两站纬向距离的收缩受阻; (e) XNIN—LHAS 两站纬向距离的收缩受阻

第三阶段: 应变能的快速积累与缓慢释放. 具体表现在 2001 年 11 月~2002 年 1 月, 各 GPS 站点垂直分量时序图上大体一致的“鞍形”异常. 它由临震异常、同震异常及震后恢复组成. 这一阶段完成的是从临界状态下应变的快速积累到临界点能量突然释放及其后应变的缓慢恢复.

5 讨论和结论

1) 本文对我国 25 个 GPS 基准站的观测数据, 采用 GIPSY 软件解算的站点坐标时间序列进行了分析. 从时间序列的形态看, 使用 GIPSY 软件解算的结果, 无论对进行地球动力学的研究, 还是为地震预报服务, 其精度似乎都已足够.

2) GPS 时间序列经纬向具有明显的趋势运动, 水平方向的趋势运动反映了各站点在全球板块框架中的运动; 垂直向的趋势变化相对水平方向来说要弱得多, 它所揭示的可能是大尺度的构造信息, 也可能是站点周围局部运动的反映.

3) 大部分站点的时间序列显示出近乎 1 年的变化周期, 有些站点还存在半年甚至其它尺度的变化周期. 对具有年变周期的站点而言, 不同站点年变周期的初相位和变化幅度各不同, 其影响因素及其在地学研究中的意义还有待于进一步的研究.

4) 利用 GPS 站点坐标时间序列对昆仑山口西 8.1 级地震的响应进行了分析, 并从时间进程上对本次地震的孕育过程进行了讨论, 发现大震前许多 GPS 站点坐标的时间序列

都有异常变化. 在大震孕育的初始阶段和临震、同震及震后恢复阶段, 垂直异常占主导地位. 初始阶段垂直方向的异常运动导致断层间出现相对“闭锁”; 而在地震孕育中期, 水平方向运动的相互制约、彼此牵制占主导地位, 它是引起能量在断层“闭锁”处积累的重要原因.

5) 在地震孕育发生的第三阶段, 各 GPS 站点坐标的垂直向和部分 GPS 站点坐标的水平向都记录到了形态近乎一致的“鞍形”或“倒鞍形”异常. 我们能否把它称为“形变波”? 用它来表征区域 GPS 站点对震源区应变场变化的响应, 还需要更多的大震资料来验证.

6) GPS 时间序列为我们提供了前所未有的大空间尺度的地壳运动新信息, 从“场”的角度揭示了昆仑山口西 8.1 级地震从孕育、发展到发生的历程. 从它所揭示的现象中, 我们感到, 如果这样的孕震历程在其它的大震中也能被观测到, 那么它对地震预报及指导抗震减灾工作无疑具有深刻的科学和现实意义.

由于资料的限制, 为本研究的进一步深入增加了困难. 在研究中我们感觉到, 迫切需要加强对 GPS 观测工作的管理, 出台统一的、切实可行的管理办法, 以确保观测资料及必须的辅助资料的连续完整.

衷心感谢在我进行访问交流期间, 给我关心和帮助的中国地震局武汉地震研究所人教处、大地测量研究室、机关服务中心的领导和同事们.

参 考 文 献

- 丁国瑜, 卢演传. 1989. 板内块体的现代运动[A]. 见: 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学图集[C]. 北京: 中国地图出版社, 21
- 顾国华, 张晶. 2002. 中国地壳运动观测网络基准站 GPS 观测的位移时间序列结果[J]. 大地测量与地球动力学, 22(5): 61~67
- 国家地震局科技监测司. 1995. 地震监测技术系统系列教材——地震地形变观测技术[M]. 北京: 地震出版社, 359
- 牛之俊, 游新兆, 王琪, 等. 2003. 中国地壳运动速度场——GAMIT 和 GIPSY 解算结果对比[J]. 大地测量与地球动力学, 23(3): 8~16
- Wang Qi, Zhang Peizhen, Jeffrey T, *et al.* 2000. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. *Science*, 294(3): 574~600

GPS TIME-SERIES AND ITS RESPONSE TO $M_s=8.1$ KUNLUNSHAN EARTHQUAKE

Jing Shaoqun^{1, 2)} Wu Yun¹⁾ Qiao Xuejun¹⁾ Zhou Shuoyu¹⁾ Shi Shunying¹⁾

1) *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China*

2) *Earthquake Administration of Hu'nan Province, Changsha 410012, China*

Abstract: In this paper, observation data in 25 GPS reference stations of China have been analyzed by calculating GPS position coordinate time-series with GIPSY. Result shows there is an obvious trend variation in such time-series. The trend variations of time series along the longitudinal and latitudinal coordinates reflect the motion of each position in the global-plate, in which the trend variation in the vertical direction reveals some large-scale construction information or reflects the local movement around the positions. The analysis also shows that such time-series have a variation cycle of nearly 1.02 year, but the reason still remains to be further studied. At the end of this paper, response of the time-series to $M_s=8.1$ Kunlunshan earthquake was analyzed, and the earthquake preparation of $M_s=8.1$ Kunlunshan earthquake, according to the time proceeding and the feature of anomaly, was divided into 3 phases-forces change exerted on blocks, strain accumulation, quick accumulation and slow release of energy. At the initial stage of seismogenic process of $M_s=8.1$ earthquake and at the imminent earthquake, coseismic process as well as during the post earthquake recovery, anomaly in vertical direction is always in a majority. The anomalous movement in vertical direction at the initial stage resulted in a blocking between faults, while at the middle stage of seismogenic process, the differential movement between blocks are in a majority, which is the major reason causing energy accumulating at the blocking stage of faults.

Key words: GPS time-series; trend variation; periodic variation; earthquake preparation; blocking between faults; energy accumulation