

GPS 连续观测站基线与地震危险性分析

张风霜¹, 武艳强², 韩月萍¹, 孙东颖¹

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180;

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要: 根据中国地壳运动观测网络基准站 1999—2009 年的资料, 文中应用小波方法对中国大陆的有关 GPS 基线时间序列进行了分离, 通过对各个频段小波分解结果的分类分析, 我们获得如下看法: ①在 2001 年昆仑山口西 $M_s8.1$ 级与 2008 年汶川 $M_s8.0$ 级强震前, 部分 GPS 基线小波分解中低频段(A8, D8, D7, D6, D5)在数月至 1 年以上的时间内发生较明显的变化, 说明浅源大地震的孕育发生与大区域构造活动增强相关; ②与北京十三陵(BJSH)相连的 BJSH—YANC, BJSH—JIXN, BJSH—TAIN, HLLR—BJSH, CHUN—BJSH 基线近期都存在一定程度的异常, 显示北京周围地区压性活动增强, 首都圈地区 2006—2008 年大面积垂直形变结果也反映该地区存在一定的异常。目前尚无足够的证据证明这种形变异常变化是否与汶川地震有关。但也许提示 2008 年华北北部地区的构造活动已从常态活动开始转向异态活动, 有可能是强震孕育的信号, 应给予密切跟踪研究。

关键词: GPS 时间序列; 小波方法; 基线变化; 垂直形变; 大地震

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A

0 引言

随着中国地壳运动观测网络工程的实施, 1999 年在中国大陆建立的 25 个基准站开始运行, 至今积累了 10 年多的资料。为中国大陆地壳运动及其动态变化^[1-3], 以及震情预测研究^[4-5] 提供了非常宝贵的资料。1999 年以来, 中国大陆发生了 2 次 8.0 级以上强震, 即 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_s8.1$ 级与 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s8.0$ 级强震, 在 GPS 时间序列的有效观测时段内, 这 2 次强震的孕震形变信息是否具有一些共同的特征? 由于 GPS 基准站时间序列包含各种信息^[6-7], 不仅含有观测噪声(主要为白噪声和闪烁噪声的叠加), 还有孕震信息。如何有效地提取孕震形变信息是分析和预测预报工作的重要基础和前提条件, 根据噪声与孕震信息的一些特点, 本文利用小波方法^[8] 对中国大陆的有关 GPS 基准站坐标分量和 GPS 基线时间序列结果进行了分离, 因为小波方法具有频率多分辨和分离的特点, 可以使由粗到细地观察信号, 通过对各个频段分解结果的进一步分析, 捕捉强震前各个小波频段的变化, 由此探讨强震临震前兆的可能状态。

1 GPS 数据处理

本文使用的数据是中国地壳运动观测网络连续站 1999 年初至 2009 年 10 月的观测资料, GPS 连续站观测值的数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件完成。数据处理的基本流程^[9] 是首先利用 GAMIT 获得网络工程 28 个连续站及中国大陆周围 IGS 测站的区域单日松弛解。GAMIT 计算中加入周边 16 个 IGS 站 IRKT、KIT3、USUD、SUWN、ULAB、TSKB、TWTF、DAEJ、KHAJ、IISC、MIZU、PIMO、POL2、SELE、YAKT 和 YSSK 相应时间段内的数据一并进行处理。计算中适当紧约束 IGS 站坐标, 而对网络工程基准站给予较松弛的约束, 完成 GAMIT 计算之后, 利用 GLOBK 将 SOPAC 给出的全球单日松弛解和计算所得的区域单日松弛解进行综合平差计算, 在此基础上通过 IGS 核心站求解相对于全球参考框架 ITRF2005 的相似变换 7 参数, 从而获得 ITRF2005 下的单日解。

2 GPS 基线时间序列小波分析

本文对 GPS 基线时间序列采用 sym8 小波进行分解, 分解尺度为 8, 根据观测资料的频率不同按

收稿日期: 2010-04-09

基金项目: 中国地震局 2010 年度震情跟踪合同制定向工作任务和第一监测中心青年人才培养基金

作者简介: 张风霜(1980—), 女(汉族), 湖南邵阳人, 中国地震局第一监测中心工程师, 主要从事 GPS 应用技术与地震预测研究。

E-mail: zfs915@126.com

8 个频率尺度进行分解, 从 D1 ~ D8 信号频率逐级降低, A8 所反映的是信号的趋势性部分。由于白噪声和闪烁噪声被认为是 GPS 观测中所固有的噪声^[10-11], 所以依据噪声的特性、前兆信息的识别和地壳水平运动在正常情况下一般具有低频的特点等, 可对分解结果做简单的分类^[12]: 高频, 包括 D1, D2, D3, 以白噪声为主要成分; 中频, 包括 D4, D5, D6, 具有闪烁噪声的特征; 较低频, 包括 D7, D8, 主要包含非构造形变(如年周期、半年周期等周期成分)、随机漫步噪声和构造形变; 低频, A8, 主要反映信号的低频趋势性部分, 突出的是构造形变成分, 这部分的变化体现的是趋势性运动的转折。

我们一共分析了 47 条 GPS 基线(图 1), 距离 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_s8.1$ 级与 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s8.0$ 级强震最近的 GPS 测站分别为德令哈(DLHA)和泸州(LUZH), 下面首先重点分析与这 2 个测站相连的 GPS 基线。与德令哈(DLHA)站相连的基线主要跨昆仑山和祁连山构造带, 与泸州(LUZH)站相连的基线主要跨南北地震构造带。图 2 ~ 11 分别给出了部分测站间的 GPS 基线小波分解 A8 ~ D5 频段的结果, 对于小波分解的 D1, D2, D3, D4 频段, 由于白噪声所占的比例较高, 异常信息较难识别, 所以这几个频段的结果没有给出。

DLHA—YANC 基线跨越祁连山构造带, 图 2 给出了 DLHA—YANC 基线小波分解中低频段的

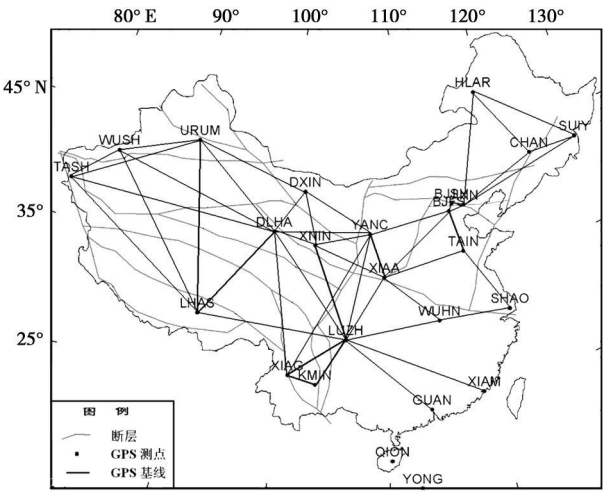


图 1 GPS 基准站与站点间基线分布

结果。2001 年 11 月之前, 基线快速缩短, 反映了祁连山构造带挤压增强, 这是伴随昆仑山口西 8.1 级地震的孕育而发生的, 显示了应变能的积累。在 2001 年 11 月 14 日基线陡升了约 10 mm, 为昆仑山地震的同震变化, 小波分解的 D5, D6, D7, D8 频段震前振幅明显增大。另外, 与祁连山构造带大致垂直的 DXIN—DLHA 基线也发生了明显的昆仑山地震同震形变, 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震后, DLHA—YANC 与 DXIN—DLHA 基线都回复到匀速伸长状态, 2003—2009 年各频段曲线变化幅度相对较小, 说明祁连山构造带未产生较大的挤压或拉张活动。

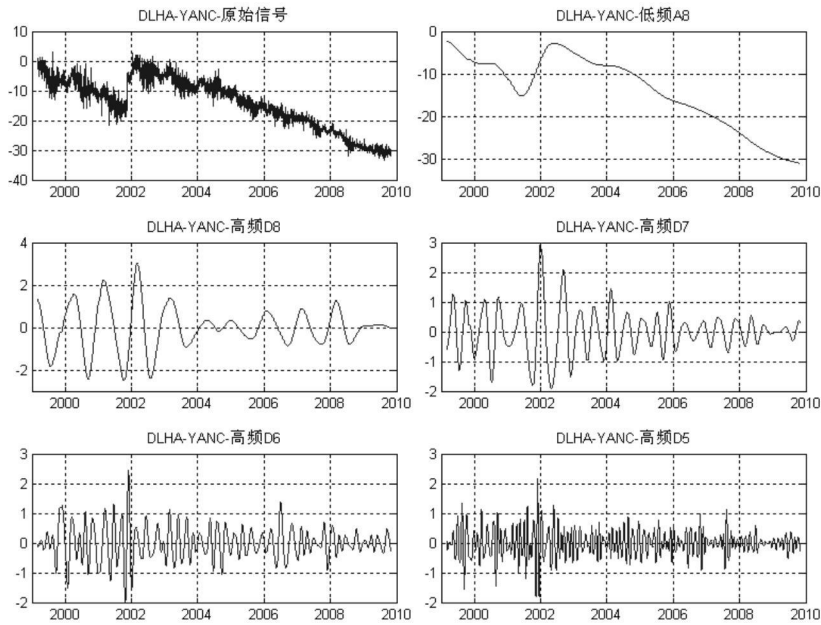


图 2 DLHA—YANC 基线小波分解中低频结果图

DLHA—LUZH 基线与龙门山断裂斜交,由图 3 可以看出,在 1999—2001 年,基线匀速上升,2002—2007 年,基线上升速率较 1999—2001 时段的速率有所增大。2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震使基线缩短约 10 mm,小波分解的 D5、D6、D8 频段也都捕捉到了这种同震变化。另外,和 DLHA—LUZH 基线的时

序变化状态类似,XNIN—LUZH 和 DXIN—LUZH 基线在汶川地震时的同震形变也非常显著,2008 年 5 月 12 日 2 条基线陡降,数值分别约为 8 mm 和 6 mm。震后至今,DLHA—LUZH、XNIN—LUZH 和 DXIN—LUZH 基线都恢复到匀速伸长状态,表明目前断裂带活动相对稳定。

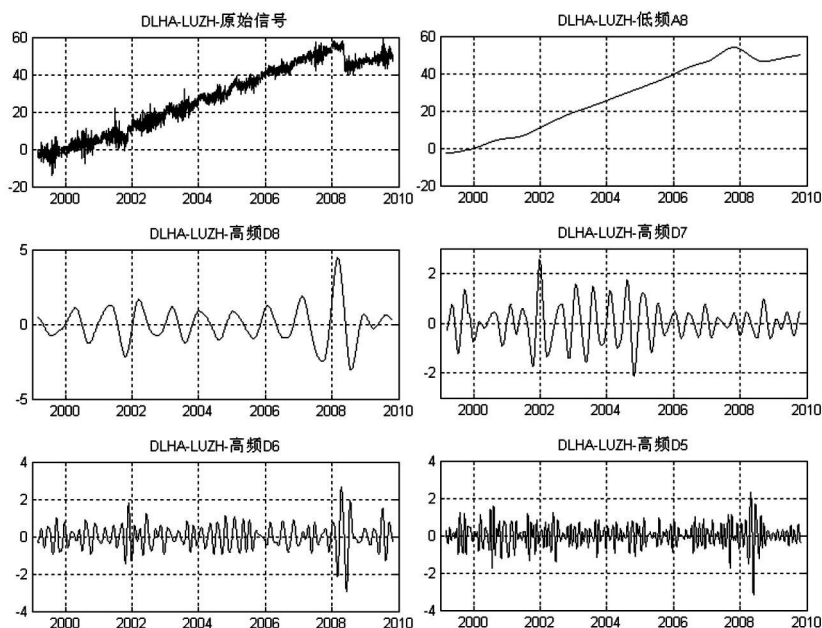


图 3 DLHA—LUZH 基线小波分解中低频结果图

由图 4, XIAA—LUZH 基线 1999—2001 年处于相对闭锁的缓慢缩短状态,从 2001 年开始转折加速伸长,2001 年 11 月 2 日发生了昆仑山 $M_s8.0$ 级强震,震后基线又发生了转折,从 2002—2006 年基线都处于平稳的匀速伸长状态,2006 年开始转折进入缩短状态,2007 年下半年再次转折伸长,2008 年 5 月 12 日发生了汶川 $M_s8.0$ 级强震,从 2009 年开始基线伸长的状态有转折缩短的迹象,但时间尚短,还需进一步观察。不难发现,在 2 次强震发生前,XIAA—LUZH 基线的变化有一些共同的特点:首先,震前都有 1~2 年的时间内基线缩短;其次,震前半年~1 年基线转折伸长,强震发生在基线伸长的过程中。另外,小波分解的 D5、D6、D7、D8 频段的振幅在昆仑山地震前显著增大,在汶川地震前,除了 D5 频段的振幅明显增大外,其他频段的振幅没有明

显的变化。

图 5 显示,LUZH—XIAG 基线 2000—2006 年处于平稳的匀速上升状态,断裂带无显著的加速变化,2006 年基线发生转折,至汶川地震前 2 年多的时间内,LUZH—XIAG 基线一直处于闭锁的状态,位移亏损约 30 mm,说明这个时段内,应力场能量持续积累,地震后至今,基线变化平稳。与 LUZH—XIAG 基线变化状态类似的还有 YANC—LUZH 基线。LUZH—XIAG 与 YANC—LUZH 这 2 条基线变化的共同特征是:匀速伸长—转折(缩短)—伸长,在 2006 年之前,基线处于匀速伸长状态,从 2006 年开始,转折缩短,这种缩短的状态一直持续到汶川地震前,地震后至今,基线又恢复到匀速伸长的状态。

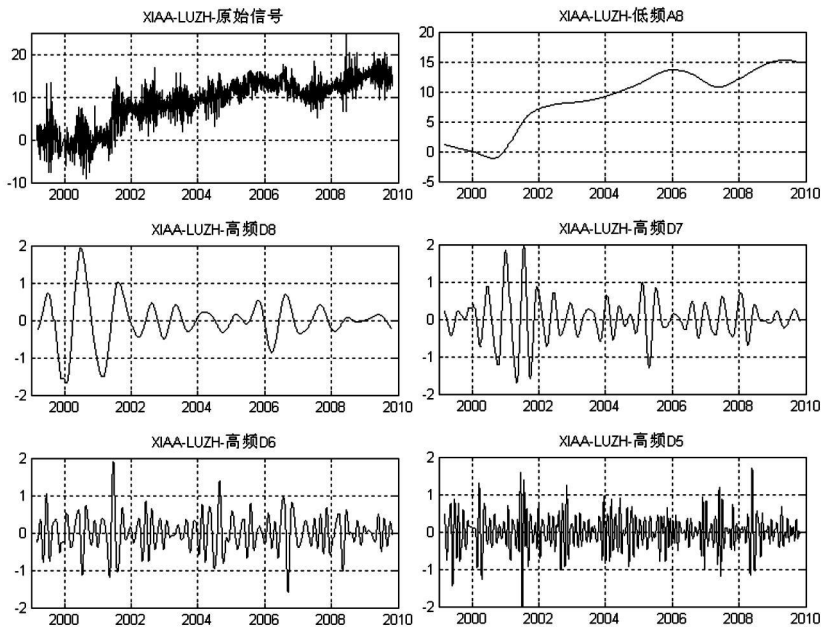


图 4 XIAA—LUZH 基线小波分解中低频结果图

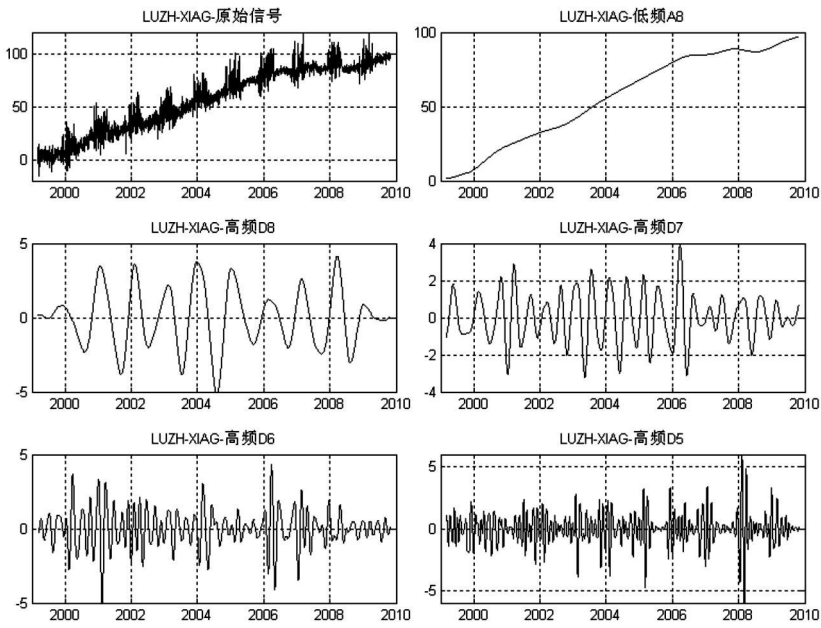


图 5 LUZH—XIAG 基线小波分解中低频结果图

LUZH—GUAN, LUZH—XIAM, LUZH—WUHN 这几条基线的变化特点: 平稳波动—加速缩短—伸长—平稳。由图 6~7 可以看出, LUZH—GUAN 与 LUZH—XIAM 基线自 2000—2005 年一直处于平稳的波动状态, 这个状态我们不能说是闭锁状态, 因为基线的闭锁与否的判断依据并不能唯一的只看基线的状态, “水平的就是闭锁的”是不对的, 而是应该结合基线端点的位置、基线长时间以来的变化状态, 并结合基线变化的物理意义来判断是

否处于闭锁状态。我们知道, GUAN、XIAM、WUHN 这几个测站都位于非常稳定的华南块体, 而 LUZH 测站位于四川盆地, 在汶川地震前, 也是一个非常稳定的测点, 所以这 2 个测点之间的基线变化应该是平稳的波动状态, 这是它的正常变化状态, 而从 2005 年开始至 2008 年, 基线开始转折进入加速缩短状态, 显示 LUZH 站在这段时间内持续加速向东南运动, 使得基线的变化偏离了正常的运动轨迹, 这是一个非正常的运动状态, 反映了区域应力积

累加速。2008 年基线再次转折伸长,在伸长过程中发生了汶川地震,震后基线又转折进入了它的正常运动轨迹(平稳)。LUZH—GUAN、LUZH—XI-AM 和 LUZH—WUHN 这几条基线在汶川地震前后体现了“平稳波动—转折加速缩短—伸长—平稳”的共同变化特征,与汶川 8.0 级大震的孕育—发生—调整的时间相吻合。LUZH—GUAN 基线从

2005 年开始出现明显的趋势异常变化,应该是汶川 8.0 级大震在孕育过程中产生的地壳形变,震后经过调整又回复到正常的变化状态,说明 GPS 基线时间序列具有一定的捕捉强震孕震形变信息的能力,同时也说明浅源大地震的孕育发生与大区域构造活动增强相关。

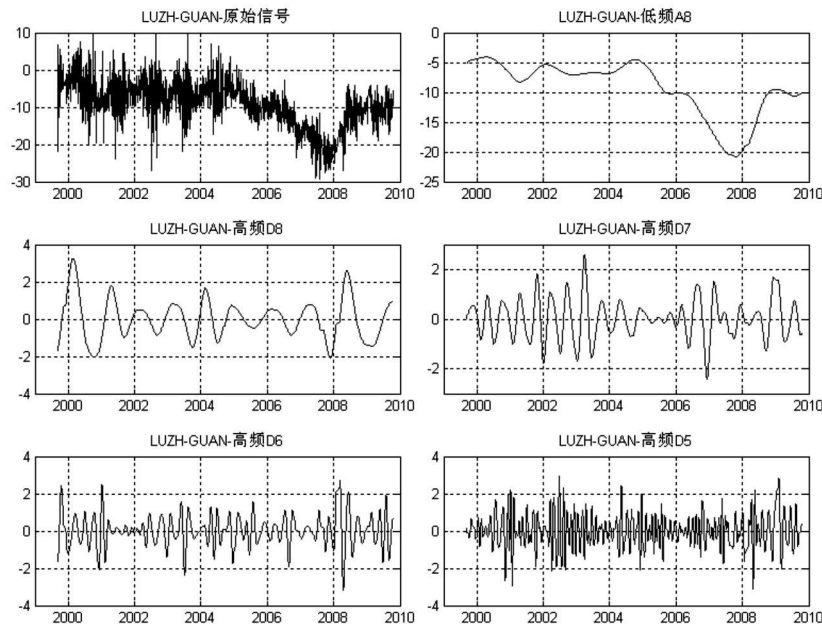


图 6 LUZH—GUAN 基线小波分解中低频结果图

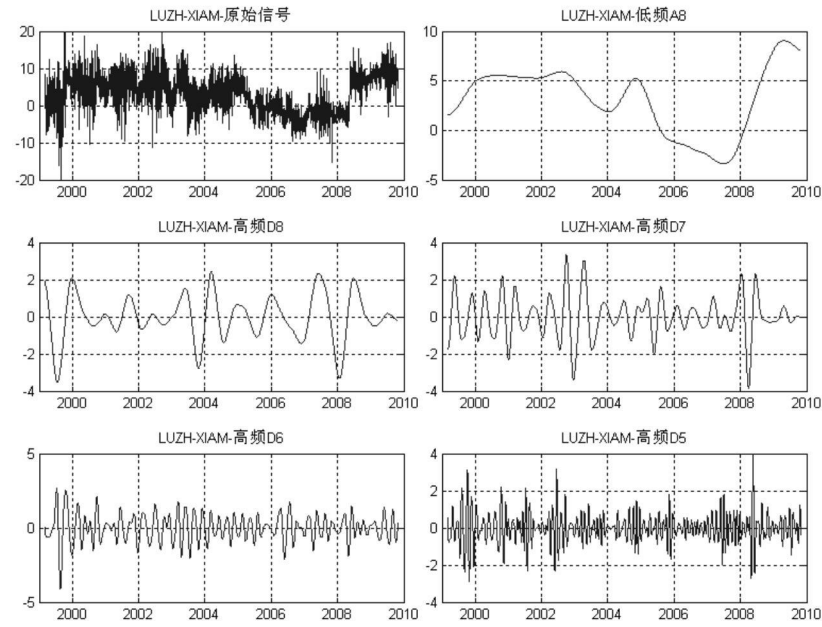


图 7 LUZH—XIAM 基线小波分解中低频结果图

从各条基线的小波分解中低频 (A8, D8, D7, D6, D5)时序结果来看, 跨南北地震构造带的基线在汶川 8.0 级地震前后变化较大, 跨昆仑山和祁连山构造带的基线在昆仑山口西 8.1 级地震前后变化较显著。

3 以 BJSH 为中心的东部地区 GPS 基线近期变化情况

图 8 显示, BJSH—YANC 基线在 1999—2005 年一直处于平稳波动状态, 说明该时段内构造带未产生较大的挤压或拉张活动, 2006 年开始转折加速

缩短, 2008 年开始, 缩短速率进一步增大, 与 BJSH—YANC 基线的变化状态非常类似的还有 BJSH—JIXN(图 9)、JIXN—YANC 和 CHUN—YANC 基线, 这几条基线都从 2006 年开始由平稳波动转折进入加速缩短状态, 2008 年至今缩短速率有所增大。汶川地震是在 2006 年以来中国大陆大尺度北东向地壳缩短运动增强的动态背景下发生的, 本文所分析讨论的 GPS 基线 2006 年以来的缩短在汶川地震后都有所缓解或解除, 但是 BJSH—YANC, BJSH—JIXN, JIXN—YANC 和 CHUN—YANC 基线至今仍处于缩短的状态中。

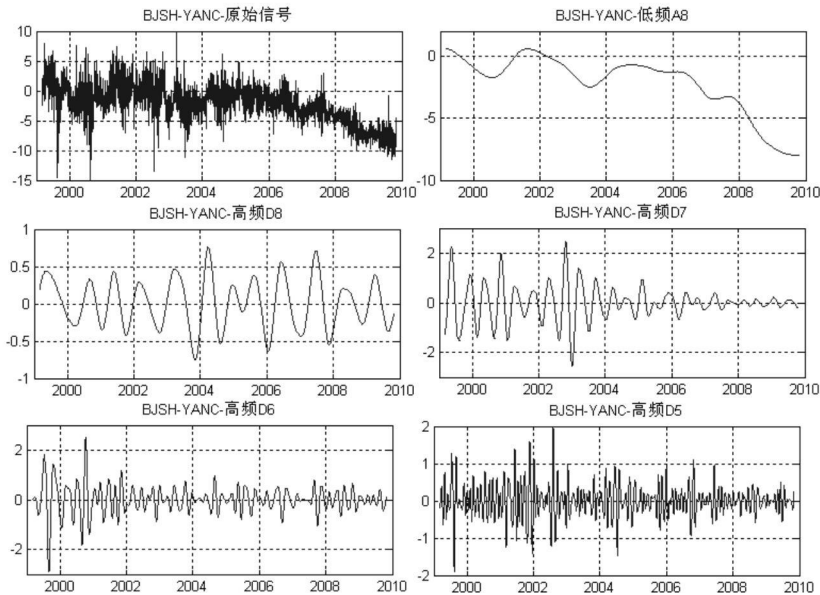


图 8 BJSH—YANG 基线小波分解中低频结果图

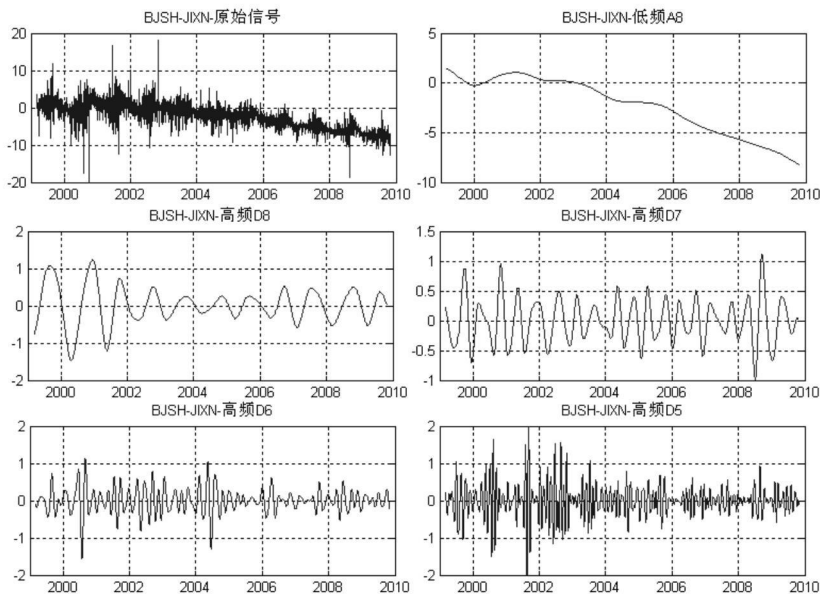


图 9 BJSH—JIXN 基线小波分解中低频结果图

由图 10, BJSH-TAIN 基线在 2004-2008 年一直处于非常稳定的匀速上升状态, 2008 年开始, 基线转折进入相对闭锁的缩短状态, 至 2009 年 7 月, 基线有恢复上升的迹象, 但时间尚短。图 11 显示, HLAR-BJSH 基线在 2002-2006 年相对平稳

伸长, 2006 年开始基线转折, 处于相对闭锁的状态, 一直到 2008 年, 基线恢复到加速伸长状态, 2009 年开始至今基线再次转折进入相对闭锁状态。CHUN-BJSH 基线 2009 年以来加速缩短, 说明压性活动有所增强, 虽然量值较小, 但值得注意。

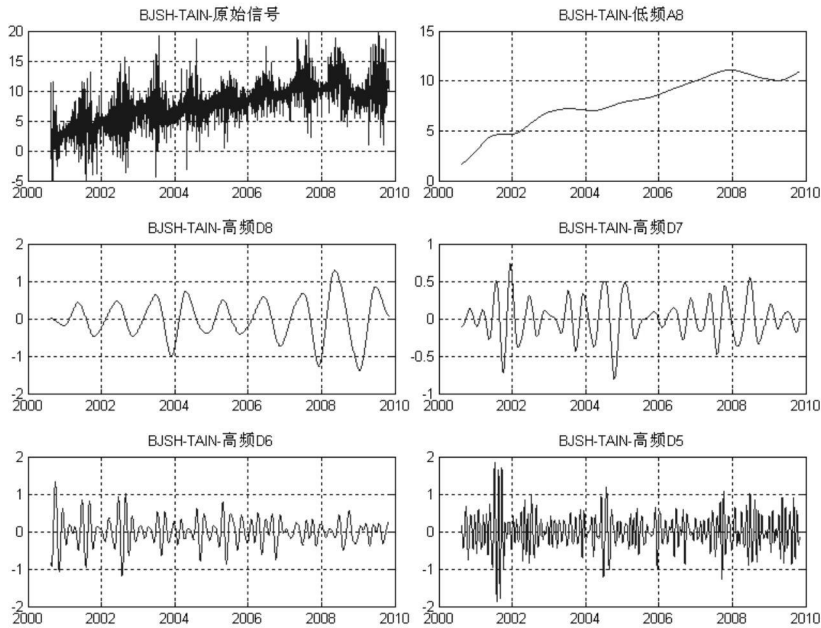


图 10 BJSH-TAIN 基线小波分解中低频结果图

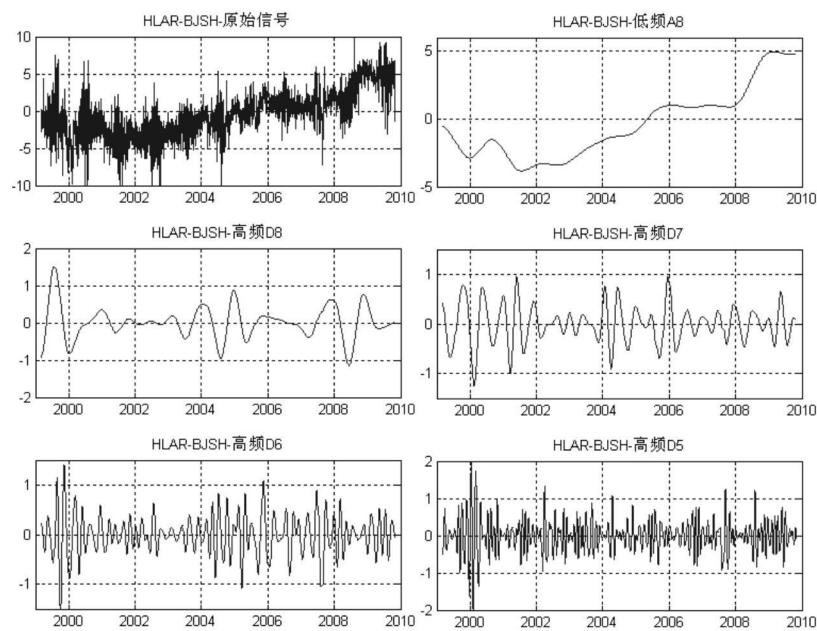


图 11 HLAR-BJSH 基线小波分解中低频结果图

通过分析, 发现与北京十三陵(BJSH)相连的 BJSH-YANC, BJSH-JIXN, BJSH-TAIN, HLAR-BJSH, CHUN-BJSH 基线近期都存在一

定程度的异常, BJSH-YANC、BJSH-JIXN 和 CHUN-BJSH 基线缩短, BJSH-TAIN 和 HLAR-BJSH 基线处于闭锁状态, 显示近期北京周围地

区压性活动有加强的趋势。另外,2006—2008 年首都圈地区大面积垂直形变结果(图 12)也显示首都圈地区形变形态为“南升北降”、“东升西降”与该区“北高南低”、“西高东低”的地形地貌不相符,反映出典型的逆继承性活动特征^[13],该地区具备发生中强地震的垂直形变背景。北京以东的黄庄—高丽营断

裂、小汤山—东北旺断裂附近的区域出现了小范围的隆升,隆升的最大速率为 4 mm/a,位于北京西北处的昌平附近。目前尚无足够的证据证明这种形变异常变化是否与汶川地震有关,但至少提示 2008 年华北北部地区的构造活动已从常态活动开始转向异态活动。

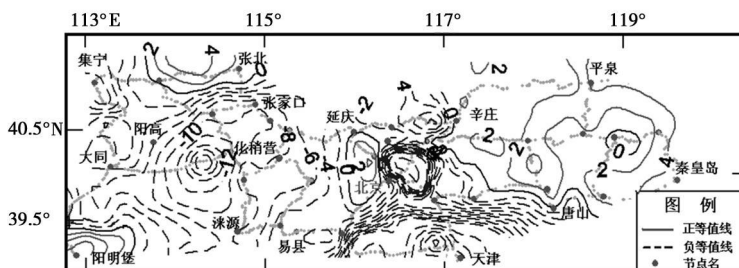


图 12 首都圈地区地壳垂直运动速率图^[13] (2006—2008 年)

4 认识与讨论

(1) 2001 年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 级与 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级强震前,跨南北地震构造带、跨昆仑山和祁连山构造带的部分 GPS 基线小波分解中低频部分(A8, D8, D7, D6, D5)在数月至 1 年以上的时间内发生较明显的变化,显示 GPS 基线时间序列小波分解中低频段具有一定的捕捉强震孕震形变信息的能力,同时也说明浅源大地震的孕育发生与大区域构造活动增强相关。

(2) 与 LUZH 相连的 LUZH—GUAN、LUZH—XIAM、LUZH—WUHN 等测线在 2008 年汶川地震前后体现了“平稳波动—转折加速缩短—伸长—平稳”的共同变化特征,在汶川地震前 2~3 年出现了明显的趋势异常变化,应该是汶川 8.0 级大震孕育产生的地壳形变,震后经过调整又回复到正常的变化情况,这几条基线在汶川地震前后的变化与汶川 8.0 级大震的孕育—发生—调整的时间相吻

合。

(3) 汶川地震是在 2006 年以来中国大陆大尺度北东向地壳缩短运动增强的动态背景下发生的,本文所分析讨论的 GPS 基线 2006 年以来的缩短在汶川地震后都有所缓解或解除,但是 BJSH—YANC、BJSH—JIXN、JIXN—YANC 和 CHUN—YANC 这几条基线至今仍处于缩短的状态中;

(4) 与北京十三陵 (BJSH) 相连的 BJSH—YANC、BJSH—JIXN、BJSH—TAIN、HLAR—BJSH、CHUN—BJSH 基线近期都存在一定程度的异常,显示近期北京周围地区压性活动增强,首都圈地区 2006—2008 年大面积垂直形变结果也反映该地区存在一定的异常,目前尚无足够的证据证明这种形变异常变化是否与汶川地震有关,但也许提示 2008 年华北北部地区的构造活动已从常态活动开始转向异态活动,有可能是强震孕育的信号,我们应给予密切跟踪研究。

参考文献:

- [1] 顾国华,张晶.中国地壳运动观测网络基准站 GPS 观测的时间序列结果[J].大地测量与地球动力学,2002,22(2):61-67.
- [2] 黄立人,杨国华,王敏.用速度场得到的华北地区活动块体及变形[J].地震学报,2003,25(1):72-81.
- [3] 杨国华,韩月萍,王敏.近 10 年华北地壳水平运动的若干特征[J].中国地震,2003,19(4):324-333.
- [4] 敬少群,吴云,乔学军等.GPS 时间序列及其对昆仑山口西 8.1 级地震的响应[J].地震学报,2005,27(4):394-401.
- [5] 杨国华,张风霜,武艳强等.利用 GPS 连续观测资料进行强震危险性预测的探讨[J].地震,2008,28(1):33-39.
- [6] Bock Y. Environmental issues and monumentation[C]// IGS workshop. Bern March, 2004.
- [7] Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system[D]. University of California, 2002, San Diego.
- [8] 北京飞思科技产品研发中心.小波分析理论与实现[M].北京:电子工业出版社,2005.

- [9] 王敏, 张祖胜, 许明元. 2000 国家 GPS 大地控制网的数据处理和精度评估[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 817-823.
- [10] 黄立人. GPS 基准站时间序列的噪声特性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(2): 31-33.
- [11] 黄立人, 符养. GPS 连续观测站的噪声分析[J]. 地震学报, 2007, 29(2): 197-202.
- [12] 杨国华, 张风霜, 武艳强, 等. GPS 基准站坐标分量噪声的时间序列与分类特征[J]. 国际地震动态, 2007, (7): 80-86
- [13] 韩月萍, 陈阜超, 杨国华, 等. 华北北部地区现今地壳垂直形变特征与地震危险性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 25-28.

Analysis of GPS Baseline of Continuous Stations and Earthquake Risk

ZHANG Feng-shuang¹, WU Yanq-iang², HAN Yue-ping¹, SUN Dong-ying¹

(1. First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China;

2. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract: By the use of the data of 1999—2009 from continuous stations of the Project of “China Crust Movement Measuring Network”, the paper applies the wavelet method to separate the GPS baseline time-series of continuous stations in the mainland of China. By classified analyzing of the results of different frequency, we gain opinions as follows: (1) Before the West Kunlun mountain $M_s8.1$ earthquake and the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, part of the medium-low frequency (A8, D8, D7, D6, D5) of GPS baselines showed obviously anomalous variations during a period of several months to more than a year early before the earthquake, which reflects that the occurrence of large earthquake with shallow focus is associated with the intensification of large-area tectonic movement; (2) There exists some anomalous variations of the baselines connected to BJSH, such as BJSH-YANC, BJSH-JIXN, BJSH-TAIN, HLAR-BJSH and CHUN-BJSH, which shows the increasing of compressive activities around the neighborhood of Beijing area recently, the vertical deformation results of Capital Area of 2006—2008 also reflects there exists certain anomalous variations in this area. Up to now, there was no sufficient evidence implying such deformation variation was induced by Wenchuan Earthquake. It maybe reminds us that the tectonic movement in northern region of North China is shifting from normal fashion to abnormal fashion since 2008. This might be a kind of signal of strong earthquake preparation which needs further investigation and study.

Key words: GPS time series; wavelet method; baseline variation; vertical deformation, strong earthquake