

中国大陆内部 GPS 连续观测站基线分析*

张风霜¹, 武艳强²

(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 年初至 2010 年 4 月的资料, 对中国大陆内部 80 条 GPS 基线时间序列进行了分析, 讨论了这些基线在正常情况下的趋势性运动特征, 总结了 2001 年昆仑山口西 $M_s8.1$ 和 2008 年汶川 $M_s8.0$ 两次大震前 GPS 基线时间序列的异常变化情况, 并在此基础上分析了 GPS 基线近期变化情况。

关键词: GPS 基线时间序列; 同震形变; 前兆异常; 大震

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)03-0337-07

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 GPS 基准站开始运行, 至今积累了 10 多年的资料。这些资料为研究中国大陆地壳运动及其动态变化 (顾国华, 张晶, 2002; 江在森等, 2009; 武艳强等, 2009), 以及为震情预测研究 (敬少群等, 2005; 杨国华等, 2008; 方颖等, 2010) 提供了非常宝贵的资料。1999 年以来, 中国大陆发生了两次 8 级以上强震, 即 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_s8.1$ 与 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s8.0$ 强震。那么, GPS 时间序列在有效观测时段内, 是否揭示了这两次强震的前兆形变信息? 本文通过对中国大陆内部几乎所有的 GPS 基线时间序列在两次八级大震前变化情况的总结, 分析中国东部地区部分 GPS 基线近期的异常变化情况, 期望为未来地震活动性的分析研究提供有参考价值的结果。

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 2010 年 4 月 24 日的观测资料, GPS 连续站观测值的数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件完成 (King, Rock, 2006; Herring *et al*,

2006)。数据处理的基本流程 (王敏等, 2005, 2007) 是首先利用 GAMIT 软件处理获得网络工程 28 个连续站及中国大陆周围国际 GPS 服务 (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 软件将南太平洋应用地理协会 (SOPAC) 给出的全球单日松弛解, 并计算得到的中国大陆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 个参数, 从而获得 ITRF2005 下的单日解。

2 中国大陆内部 GPS 基线时间序列运动特征分析

在探讨两次八级大震前的 GPS 基线时间序列的异常变化特征之前, 我们先要从整体上把握 GPS 基线时间序列 10 多年来的趋势性运动特征, 也就是它们的正常运动轨迹是否具有一些共同的特征, 在此基础上才能发现并讨论“异常”。笔者对中国大陆内部 80 条 GPS 基线 (图 1) 10 多年的时间序列结果进行了趋势性运动特征分析, 并拟合得到

* 收稿日期: 2010-07-07.

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 (2010020504) 和第一监测中心青年人才培养基金联合资助。

这些基线的运动速率(表1),发现其中50条北东—南西向和北西—南东向展布的GPS基线分别具有NE—SW向缩短、NW—SE向伸长的共同运动特征,且西部地区GPS基线缩短或伸长的速率明显大于东部地区。缩短最快的DXIN—LHAS基线年速率约22.8 mm/a,伸长最快的DLHA—KMIN基线年速率达16.7 mm/a。表1中给出的单位权中误差是用最小二乘法对较长时间段的基线时间序列(10多年)进行直线拟合得到的误差,表示的是拟合精度。所有基线时间序列线性拟合的单位权中误差为0.3~1 mm。GPS基线时间序列自身误差的消除与GPS定位精度的提高紧密相关,如GPS卫星系统的改进、完善和GPS接收机技术的进步,以及数据处理方法的改进和各种参数、模型的精化等(王敏,2007)。长期时间序列的拟合速率反映的是GPS基线的低频趋势性运动特征,

这是本文讨论的重点,因此对时间序列中的误差和噪声等高频信息的剔除问题未详加论述(黄立人,2006;黄立人,符养,2007;杨国华,2007)。

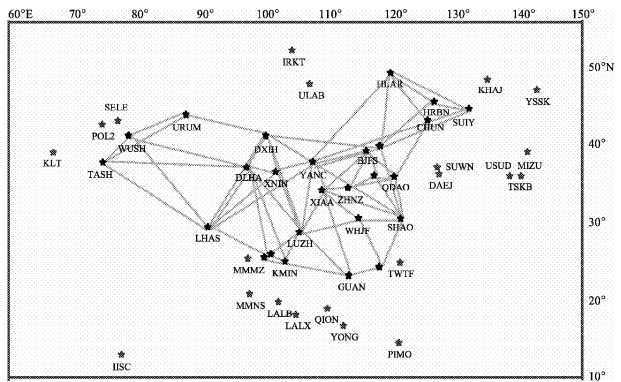


图1 中国大陆内部GPS基准站与基线分布
Fig. 1 Distribution of GPS stations and baselines in the Chinese mainland

表1 中国大陆内部GPS基线运动速率
Tab. 1 Motion rate of GPS baselines in the chinese mainland

基线	走向	状态	速率 /mm·a ⁻¹	单位权中误差 /mm	基线	走向	状态	速率 /mm·a ⁻¹	单位权中误差 /mm
DXIN—LHAS	北东向	缩短	-22.826 2	0.631 7	DLHA—KMIN	北西向	伸长	16.708 7	1.015 1
YANC—LHAS	北东向	缩短	-22.600 6	0.617 9	TASH—LHAS	北西向	伸长	16.489 6	0.737 3
DLHA—LHAS	北东向	缩短	-17.444 3	0.972 1	DLHA—XIAG	北西向	伸长	15.478 8	1.100 4
XNIN—LHAS	北东向	缩短	-17.090 7	0.810 9	DLHA—TASH	北西向	伸长	7.029 8	1.008 6
YANC—XNIN	北东向	缩短	-6.531 3	0.315 2	XIAG—KMIN	北西向	伸长	5.693 6	1.072 1
DXIN—DLHA	北东向	缩短	-5.390 7	0.676 2	WUSH—LHAS	北西向	伸长	5.691 4	0.731 4
URUM—TASH	北东向	缩短	-3.923 6	0.706 5	DLHA—LUZH	北西向	伸长	5.391 3	1.381 2
WUSH—URUM	北东向	缩短	-2.902 7	0.623 3	DLHA—WUSH	北西向	伸长	5.214 9	0.811 7
WUSH—TASH	北东向	缩短	-2.006	0.596 7	XIAA—SHAO	北西向	伸长	5.208 3	0.606 8
BJFS—JIXN	北东向	缩短	-1.761 7	0.493 4	DXIN—LUZH	北西向	伸长	4.797 8	0.858 5
BJSH—BJFS	北东向	缩短	-1.450 1	0.774 9	XIAA—GUAN	北西向	伸长	4.623 6	0.861 4
CHUN—YANC	北东向	缩短	-1.390 1	0.468 9	XIAA—WUHN	北西向	伸长	4.545 1	0.913 3
HRBN—QDAO	北东向	缩短	-1.366 4	0.764 5	XIAA—WHJF	北西向	伸长	4.537 7	0.635 6
JIXN—YANC	北东向	缩短	-1.273 6	0.530 9	URUM—DLHA	北西向	伸长	4.491 3	1.048 4
SUYI—JIXN	北东向	缩短	-0.984 4	0.437 5	JIXN—SHAO	北西向	伸长	4.085 4	0.931 8
BJSH—YANC	北东向	缩短	-0.891 5	0.460 7	XNIN—LUZH	北西向	伸长	3.422 5	1.084 9
QDAO—ZHNZ	北东向	缩短	-0.757 5	0.466 5	DLHA—XNIN	北西向	伸长	3.030 8	0.466
HRBN—JIXN	北东向	缩短	-0.578 6	0.505 6	DXIN—YANC	北西向	伸长	2.814	0.308 1
HLAR—JIXN	北东向	缩短	-0.545 1	0.497 5	URUM—DXIN	北西向	伸长	1.900 1	0.712
BJSH—XIAA	北东向	缩短	-0.427 4	0.575 8	LHAS—KMIN	北西向	伸长	1.731	0.736 4
CHUN—BJSH	北东向	缩短	-0.410 8	0.309 5	YANC—SHAO	北西向	伸长	1.523 3	0.599 4
SHAO—XIAM	北东向	缩短	-0.366	0.819 6	BJSH—TAIN	北西向	伸长	0.764 1	0.674
WHJF—LUZH	北东向	缩短	-0.266 7	0.721 9	WUHN—XIAM	北西向	伸长	0.710 5	0.992 8
SUYI—CHUN	北东向	缩短	-0.265 8	0.332 9	DXIN—XNIN	北西向	伸长	0.500 5	0.366 5
HLAR—YANC	北东向	缩短	-0.207 7	0.557 4	DXIN—BJSH	北西向	伸长	0.351 1	0.40 98

表1的结果反映了中国大陆内部的GPS基线具有北东向缩短、北西向伸长的共同的长趋势运动特征。在阿拉伯板块和印度板块以NE方向对欧亚板块的碰撞和推挤的共同作用下，亚洲的西南部形成了NE向压缩和NW—SE向扩张的强烈形变区，同时使广阔的欧亚板块内部形成了NW—SE方向扩张、NE—SW方向压缩的应变场（李延兴等，2006）。正是由于这种大的构造应力场的影响，中国大陆内部的GPS基线时间序列才表现为NE—SW向缩短、NW—SE向伸长的共同运动特征。

3 两次8级大震前GPS基线时间序列变化情况总结分析

由于GPS基线时间序列能在一定程度上削弱系统误差和共模噪声的影响，因此它比单站坐标时间序列能更灵敏地反映周围构造环境的变化。笔者对中国大陆内部80条GPS基线进行总结分析后发现，2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 地震发生时，发生同震变化的基线有3条，分别是DLHA—LUZH、XNIN—LUZH和DXIN—LUZH（图2），这

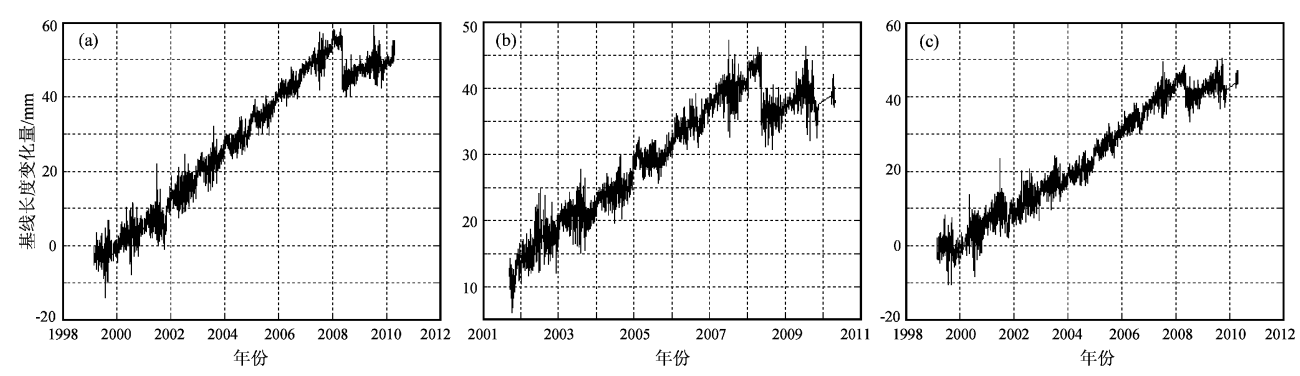


图2 汶川地震发生同震形变的GPS基线时间序列
(a) DLHA—LUZH基线；(b) XNIN—LUZH基线；(c) DXIN—LUZH基线
Fig. 2 Coseismic deformation of GPS baseline timeseries of Wenchuan earthquake

3条基线都是北西向的，正常的运动轨迹是近匀速的伸长。2008年5月12日，3条基线都陡降约10 mm，震后至今，又恢复到匀速的伸长状态。DLHA—LUZH、XNIN—LUZH和DXIN—LUZH这3条基线都与龙门山断裂斜交，虽然在汶川地震时都发生了显著的同震形变，但是在汶川地震前，都没有出现趋势性异常或者短临异常。

在所分析的这80条GPS基线中，汶川地震前出现前兆异常的基线只有LUZH—GUAN和XIAG—LUZH基线（图3）。由图3可以看出，2000~2005年LUZH—GUAN基线一直处于平稳的波动状态，这个状态不能称为闭锁状态，因为判断基线的闭锁与否并不能只看基线的运动状态，不是水平的就是闭锁的，而应该把基线端点的位置、基线长时间以来的趋势性变化状态以及基线变化的物理意义结合起来，判断基线是否处于闭锁状态。GUAN测站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，所以这两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。从2005年初至2008年，基线开始转折进入加速缩短状态，LUZH站的基线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的现象。2008年1月基线再次转折伸长，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（平稳波动）。2009年上半年虽然数据中断缺失，但整体来看震后至今基线还是处于平稳波动的运动状态，没有出现大幅的加速伸长或缩短。LUZH—GUAN基线从2005年开始出现明显的趋势异常变化，这应该是汶川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。这条基线在汶川地震前后的变化体现了平稳波动—转折加速缩短—伸长—恢复平稳的特征，与汶川8.0级大震的孕育—发生—调整的特征相吻合。图3显示，XIAG—

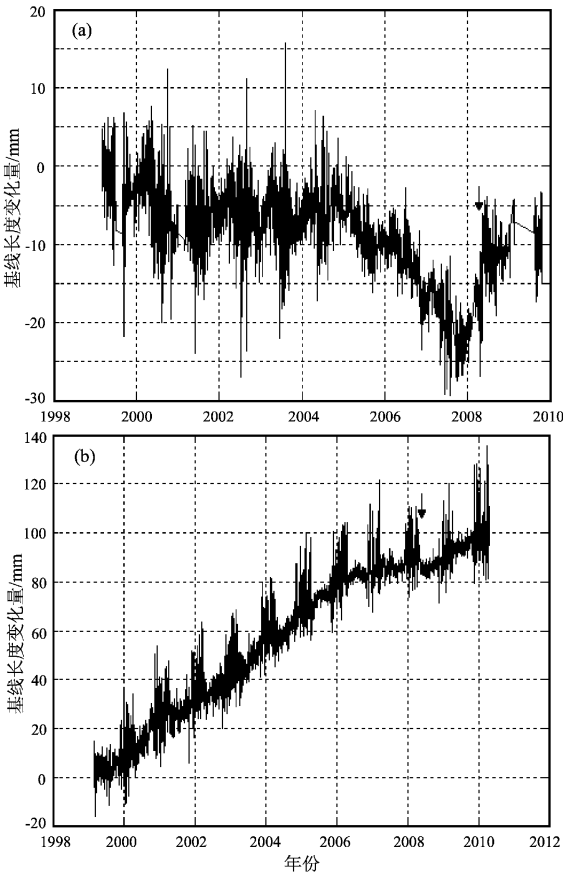


图3 汶川地震前出现前兆异常的GPS 基线时间序列

(a) LUZH—GUAN 基线; (b) XIAG—LUZH 基线

Fig. 3 Precursory anomaly of GPS baseline timeseries before Wenchuan earthquake

LUZH 基线 2000 ~ 2006 年处于平稳的匀速伸长状态, 无显著的加速变化。2006 年基线发生转折, 至汶川地震前两年多的时间内, XIAG—LUZH 基

线一直处于相对闭锁的状态, 位移亏损约 30 mm, 说明这个时段内, 应力场能量持续积累。汶川地震后至今, 基线恢复匀速伸长的正常运动状态。

2001 年 11 月 6 日昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震发生时, 中国大陆内部 80 条 GPS 基线中发生同震变化的也有 3 条, 分别是 DLHA—YANC、DXIN—DLHA 和 DLHA—XNIN (图 4), 其中前两条基线近北东向, 正常的运动状态是近匀速缩短, 而 DLHA—XNIN 基线是北西向, 趋势性的运动状态为近匀速伸长。2001 年 11 月 6 日这 3 条基线都陡升了约 10 mm, 震后至今, 又恢复到各自正常的运动轨迹。DLHA 基准站与 XNIN 基准站位于昆仑山构造带以北, DXIN 基准站位于祁连山构造带以北, 这 3 个站是距离昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震相对较近的 GPS 基准站。YANC 基准站位于祁连山与南北地震构造带交汇处以东, DLHA—YANC、DXIN—DLHA 和 DLHA—XNIN 这 3 条基线距昆仑山和祁连山构造带较近, 虽然在昆仑山口西地震时都发生了显著的同震形变, 但是在地震前, 都没有出现趋势性异常或者短临异常。

本文所分析的这 80 条 GPS 基线中, 昆仑山口西地震前出现前兆异常的只有 DLHA—TASH 和 DLHA—WUSH 基线 (图 5)。DLHA—TASH 和 DLHA—WUSH 基线近北西向, 这两条基线趋势性的运动状态为近匀速伸长, 但是从 2001 年 3 月开始, 基线运动状态偏离了正常的运动轨迹, 转折缩短, 在缩短过程中发生了昆仑山地震, 震后基线又恢复到匀速伸长的趋势性运动状态。

通过对上述两次 8 级大震前中国大陆内部 80

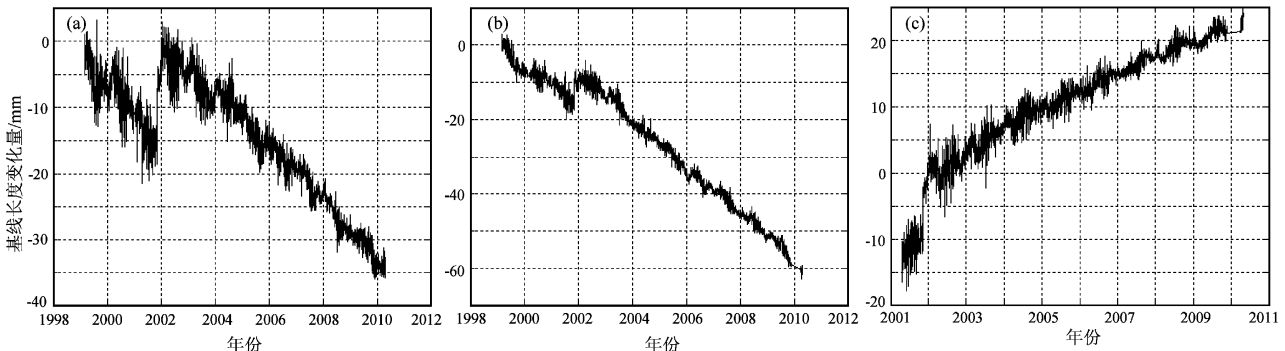


图4 昆仑山口西地震发生同震形变的 GPS 基线时间序列

(a) DLHA—YANC 基线; (b) DXIN—DLHA 基线; (c) DLHA—XNIN 基线

Fig. 4 Coseismic deformation of GPS baseline timeseries of West Kunlun mountain Pass earthquake

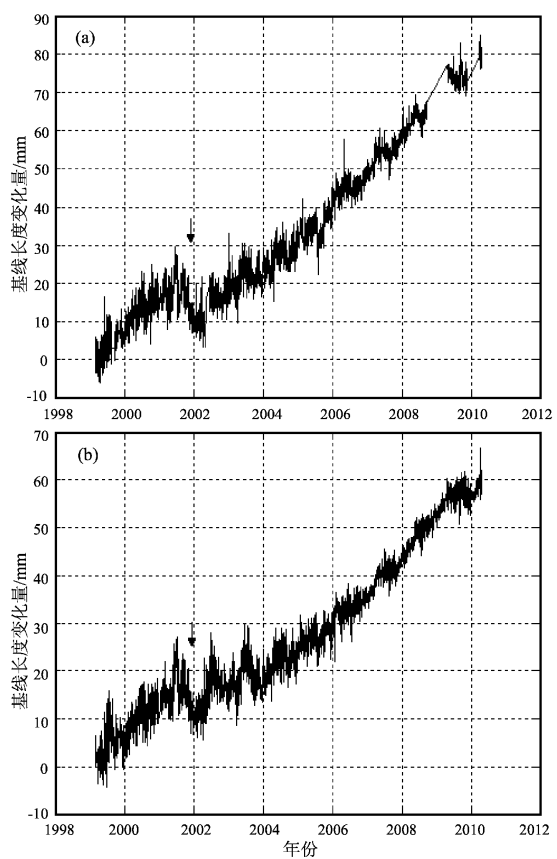


图5 昆仑山口西地震前出现前兆异常的 GPS 基线时间序列

(a) DLHA—TASH 基线; (b) DLHA—WUSH 基线

Fig. 5 Precursory anomaly of GPS baseline timeseries before West Kunlun Mountain Pass earthquake

条 GPS 基线时间序列变化情况的总结分析, 笔者认为, 虽然在两次大震前出现前兆异常变化的 GPS 基线很少, 但是 LUZH—GUAN 基线在汶川地震前后的变化和 DLHA—TASH 基线在昆仑山地震前后的变化说明 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。另外, 笔者也发现, 对于这两次大震, 发生同震变化的基线 (部分是跨越发震断裂的, 如 DLHA—LUZH 和 XNIN—LUZH 与龙门山断裂斜交) 在震前都没有任何趋势性或短临的前兆异常变化。由于每个地震都有其各自的特点, 从孕震到发震, 机制非常复杂, 可能出现前兆异常变化的基线只位于断裂带的同一侧 (如 LUZH—GUAN 基线位于稳定的华南块体内部), 而未跨越断裂带, 因此进行全局搜索, 全面分析所有 GPS 基线的变化很有必要。

4 中国大陆内部 GPS 基线近期变化情况

在上述利用 GPS 基线对两次八级强震进行震例总结分析的基础上, 笔者分析近期中国大陆内部 GPS 基线的变化情况。在这 80 条 GPS 基线中, 近期出现一定程度异常变化的基线有 BJSH—YANC、BJFS—JIXN、BJSH—TAIN 和 BJSH—BJFS (图 6)。由图 6 可以看出, 1999 ~ 2005 年 BJSH—YANC、BJFS—JIXN 和 BJSH—BJFS 基线一直处于平稳波动状态, 2006 年开始这 3 条基线都转折加速缩短, 偏离了正常的运动轨迹, 至 2008 年 6 月底, 3 条基线分别缩短了约 10 mm, 其中 BJSH—BJFS 和 BJFS—JIXN 两条基线在 2008 年下半年再次发生转折, 由缩短状态转折进入相对伸长的状态, 并一直保持至今。BJSH—TAIN 基线 2006 年前一直保持匀速伸长的趋势性运动, 2007 年开始基线的运动轨迹发生转折, 进入了类似闭锁的状态, 至今位移亏损约 5 mm。虽然这几条基线变化的绝对量值不大, 但由于这几个 GPS 测站都是稳定的基岩点, 长期以来的趋势性背景运动速率也非常小, 因此这几条基线近期的变化还是不能轻视的, 尤其是 BJSH—BJFS 和 BJFS—JIXN 这两条基线的变化也经历着平稳波动—转折加速缩短—伸长的过程, 与汶川地震前 LUZH—GUAN 基线 (图 3) 的变化具有很高的相似性, 因此需要继续密切关注这几条基线的变化。

5 认识与讨论

(1) 由于阿拉伯板块和印度板块 NE 方向对欧亚板块的碰撞和推挤, 使广阔的欧亚板块内部形成了 NW—SE 方向扩张、NE—SW 方向压缩的应变场, 因此中国大陆内部的 GPS 基线时间序列才表现出 NE—SW 向缩短、NW—SE 向伸长的共同运动特征。

(2) 部分跨南北地震构造带的基线在汶川 8.0 级地震时的同震形变显著, 而距离昆仑山和祁连山构造带较近的部分基线在昆仑山口西 8.1 级地震时的同震变化明显; 2001 年昆仑山口西 M_s 8.1 强震前半年开始, DLHA—TASH 基线转折缩短, 震

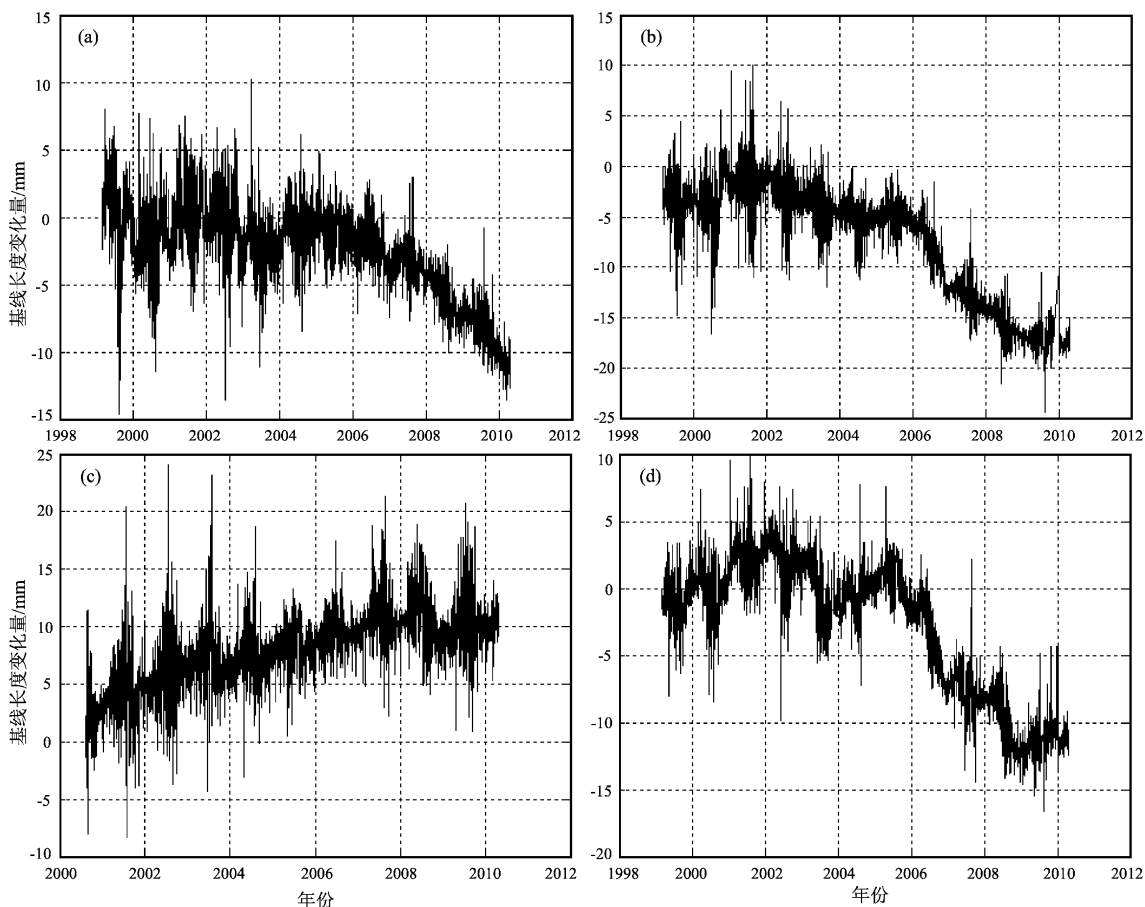


图6 近期出现一定程度异常变化的 GPS 基线时间序列

(a) BJSH—YANC 基线; (b) BJFS—JIXN 基线; (c) BJSH—TAIN 基线; (d) BJSH—BJFS 基线

Fig. 6 Abnormal changes to a certain extent of GPS baseline timeseries during the recent period

后即恢复到平稳伸长状态。

(3) LUZH—GUAN 基线在汶川地震前 2~3 年出现了明显的趋势异常变化,这应该是汶川 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。这条基线在汶川地震前后的变化体现了平稳波动—转折加速缩短—伸长—恢复平稳的特征,与汶川 8 级大震的孕育—发生—调整的过程相吻合。

(4) 由于地震孕震过程的复杂性,进行 GPS 基线分析时,不仅要分析跨越断裂带的基线,也要分析断裂带同侧的、位于稳定板块内部的 GPS 基线,因此进行全局搜索,全面分析所有基线的变化很有必要。

(5) BJSH—BJFS、BJFS—JIXN、BJSH—YANC 基线从 2006 年开始由平稳波动状态转折进入加速缩短状态,其中 BJSH—BJFS 和 BJFS—JIXN 基线 2008 年下半年再次转折,由缩短状态转折进入相

对伸长的状态,这两条基线的变化也经历着平稳波动—转折加速缩短—伸长的过程,与汶川地震前 LUZH—GUAN 基线的变化具有较高的相似性,因此需要继续密切关注这几条基线的变化。

参考文献:

- 方颖,江在森,顾国华. 2010. 汶川大地震前 GPS 时间序列的振荡分析[J]. 地震研究,33(2):125-130.
- 顾国华,张晶. 2002. 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,22(2):61-67.
- 黄立人,符养. 2007. GPS 连续观测站的噪声分析[J]. 地震学报,29(2):197-202.
- 黄立人. 2006. 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,26(2):31-33.
- 江在森,方颖,武艳强,等. 2009. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J]. 地球物理学报,52(2):505-518.
- 敬少群,吴云,乔学军,等. 2005. 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,27(4):394-401.
- 李延兴,张静华,李智,等. 2006. 太平洋板块俯冲对中国大陆的影响

- [J]. 测绘学报, 35(2): 99 – 105.
- 王敏, 沈正康, 董大南. 2005. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正[J]. 地球物理学报, 48(5): 1045 – 1052.
- 王敏, 张祖胜, 许明元. 2005. 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, 48(4): 817 – 823.
- 王敏. 2007. GPS 数据处理方面的最新进展及其对定位结果的影响[J]. 国际地震动态, 343(7): 3 – 8.
- 武艳强, 江在森, 杨国华. 2009. 利用 GPS 时间序列对块体运动进行空间信息分离[J]. 地震研究, 32(3): 306 – 311.
- 杨国华, 张风霜, 武艳强, 等. 2007. 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, (7): 80 – 86.
- 杨国华, 张风霜, 武艳强, 等. 2008. 利用 GPS 连续观测资料进行强震危险性预测的探讨[J]. 地震, 28(1): 33 – 39.
- 杨国华, 张晓东, 张风霜, 等. 2008. 昆仑山口西 8.1 级地震震后中国西部地壳水平位移场的变化特征[J]. 地震研究, 31(1): 77 – 82.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2006. GLOBK: Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program, Version 10.3. Cambridge: Internal Memorandum, Massachusetts Institute of Technology.
- King R W, Bock Y. 2006. Documentation for the GAMIT Analysis software Version 10.3. Cambridge: Internal Memorandum, Massachusetts Institute of Technology.

Baselines Analysis of GPS Continuous Observation Stations in Chinese Mainland

ZHANG Feng-shuang¹, WU Yan-qiang²

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

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

Abstract

Selecting the data from early 1999 to Apr. , 2010 recorded by the continuous observational stations of the project of China Crust Movement Measuring Network, we analyze 80 GPS baselines time series in Chinese mainland. Then we discuss the tendency variation of all these baselines in normal condition and summarize the abnormal changes of GPS baseline time series before 2001, West Kunlun Mountain Pass $M_s 8.1$ earthquake and 2008, wenchuan, Sichuan $M_s 8.0$ earthquake. On this basis, we analyze the recent variation of GPS baseline time series.

Key words: GPS baselines time series; co-seismic deformation; earthquake precursory; strong earthquake