

# GPS 测得的汶川大地震前后的地壳运动

顾国华<sup>1</sup> 王武星<sup>1</sup> 孟国杰<sup>1</sup> 徐岳仁<sup>1</sup>

(1 中国地震局地震预测研究所,北京市复兴路 63 号,100036)

**摘要:**采用趋势曲面拟合和统计方法研究了汶川地震前 1999~2007 年区域网的应变积累,寻找震中的大致区域。除了昆仑山口西大地震震中及其周围地区外,2004~2007 年震前区域网的应变积累的趋势曲面拟合表明,汶川地震发生在中国大陆第一剪应变积累大、范围最广的区域的东侧。应变分量的统计分析表明,震前,其分布在此区域及其附近同样有明显的异常,剪应变和面膨胀积累均增强。震前,震中周围的 GPS 连续观测站 30 s 采样率的单历元解表明,震前地壳运动还有临震异常,特别是有垂直位移异常。

**关键词:**汶川大地震;地壳运动;GPS;地震预测;时间序列;同震位移

**中图法分类号:**P228.42;P227

2008 年 5 月 12 日,汶川(31.0°N,103.4°E) 8.0 级大地震造成极其巨大的损失。大地震前,大量的 GPS 观测为研究此次地震前大范围的异常地壳运动提供了丰富的资料。由于 GPS 观测的地壳垂直运动的复杂性<sup>[1]</sup>,本文重点分析了水平地壳运动,包括水平位移和应变积累,并对网络数据中心用 GAMIT/GLOBK 软件作 GPS 数据处理得到的结果作了进一步处理和分析。不同时期的 GPS 观测数据处理先后采用了不同时期的全球坐标参考框架,包括 IGS97、IGS00、IGb00 和 IGS05 参考框架<sup>[2,3]</sup>。由于参考框架的改变、数据处理模型的改进、软件的升级,网络数据中心曾对 GPS 连续观测数据作过重新处理,精度总体上有所提高,且与以往处理的结果基本一致。本文采用最新的处理结果,利用基准网或区域网全球参考框架的解,通过相似变换,获取区域参考框架(或基准)<sup>[4]</sup>的水平位移分量或其时间序列。为消除高程变化对水平位移的影响,计算中所有点的大地高都取为 0,由此作(局部)椭球面上的 6 参数(3 个平移和 3 个旋转参数)相似变换<sup>[5]</sup>。

## 1 汶川地震前后 GPS 连续观测站水平位移时间序列

利用 1999 年 3 月至 2008 年 7 月 GPS 连续

观测站每周的全球框架综合静态平差结果,选区域稳定点组基准,通过相似变换,求得各周各站相对于 2002 年 1 月 20~26 日(1150GPS 周)GPS 观测期间在椭球面上的水平位移时间序列。

基准站水平位移时间序列表明,我国东部地区很稳定,如 BJSH、BJFS、JIXN、LUZH、WUHN、YANC 等观测站的水平位移量很小,位移分量年速率多数在 1 mm/a 以内。自 2007 年初以来,这几个观测站的水平位移量更小,如 BJSH、BJFS、LUZH 和 YANC 站,其位移向量的变化范围分别在半径为 1 mm、1.5 mm、2 mm 和 2.5 mm 的圆之内,YANC 站周解 *N* 向和 *E* 向分量的中误差仅为 0.5 mm。在计算水平位移时间序列时,取这组点作为基准。为便于比较,图 1 同时给出了 YANC 站的水平位移分量。震前水平位移表明,汶川地震主要是印度板块向北对中国大陆中西部强烈挤压而发生的,同时还受到中国大陆南部与东部板块挤压的作用,而华北及其邻近地区是目前中国大陆十分稳定的地区。

位移分量的时间序列表明,汶川震区外震前变化不明显的观测站,同震水平位移一般也不明显;几乎有同震水平位移的所有观测站震前都有较为明显的变化,且同震水平位移方向和震前的总体变化趋势相反,是一种弹性回跳<sup>[6]</sup>,同震水平位移恢复到趋势变化前的水平,主要集中在中

大陆东部及其邻近地区。图 1 为 4 个 GPS 连续观测站 (DLHA, 离震中 898 km; DXIN, 离震中 1143 km; XNIN, 离震中 639 km 和 XIAA, 离震中 631 km) 在汶川大地震中同震水平位移的  $N$  分量和  $E$  分量。XIAA 观测站是连续观测站中唯一位于覆盖层的站, 未出现明显的同震位移。

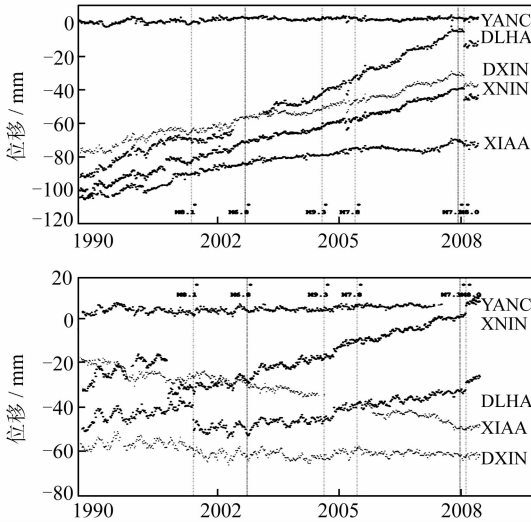


图 1 4 个 GPS 连续观测站的同震水平位移的  $N$  分量和  $E$  分量

Fig. 1 Time Series of  $N$  and  $E$  Horizontal Displacement Components at DLHA, DXIN, XNIN and XIAA Stations

震区外的 GPS 连续观测站未观测到此次地震明显的同震垂直位移, 这表明汶川大地震主要是地壳水平运动造成的。一些站水平运动的同步特征说明, 块体水平运动是地震前后地壳水平运动的主要方式, 影响范围相当大。尽管震前有些站有异常的垂直运动, 但其分布与变化规律更复杂。大范围 GPS 连续观测站同震位移弹性回跳表明, 汶川大震前就应有大范围的前兆地壳运动积聚弹性应变能量。西部基准站 (如 DLHA、DXIN、XNIN 和 XIAA 等站) 地震前出现快速向北的位移异常, 在印度板块的挤压下, 西部的强烈形变中有相当大的不可恢复的变形释放了其中部分能量, 但仍包含一部分弹性能量的积聚。在汶川大地震释放了巨大的弹性应变能后, 广大地区的作用力松弛, 发生弹性回跳, 出现大范围的同震水平位移。对地震前只有平移及兼有平移与旋转的相似变换解的比较表明, 震前就已出现旋转位移。实际上, 旋转位移在全球板块运动中是普遍存在的, 地震前后的位移对比说明, 此种快速旋转位移的产生不是不可能的。由于同震位移和震前位移的密切关系可知, 震前的异常地壳运动也是非常复杂的。尽管许多观测站出现了同震位移, 震前

这些观测站应有震前地壳运动, 但有些观测站的变化不明显。由于经验少, 震前异常判断很困难。水平位移有异常的观测站主要集中在中国大陆的西部、华南及云南等地区, 其中只有西部的站变化基本一致, 如 DLHA、DXIN、XNIN 和 XIAA 等观测站, 其异常识别相对容易些。然而, 震前很难将西部的观测站和华南的 GUAN、QION 及云南的 KMIN、XIAG 等观测站的变化作综合判断。汶川地震前 2008 年 3 月 21 日, 新疆于田 ( $35.6^{\circ}N, 81.6^{\circ}E$ ) 发生的 7.3 级地震更影响了震情的判断。

## 2 汶川大地震前区域网水平位移与应变积累

本文利用 2004~2007 年区域网 GPS 观测结果得到近 1 000 个 GPS 观测站的水平位移, 其中有极少数国外的站。在水平位移计算的基准中, 共选取了近 100 个相互间位移很小的稳定站点, 主要分布在中国大陆的东部, 其中多数站点在华北地区, 且多数站年速率在 1 mm/a 以内。此前用同样的方法分析了基本网和区域网的水平运动<sup>[7-9]</sup>。图 2 为 2004~2007 年间中国大陆的水平位移。可以看出, 水平位移空间分布有明显的规律性, 显示不同块体或地区地壳运动的相互作用与制约。2001 年, 昆仑山口西 8.1 级地震震中附近 GPS 站的同震和震后位移非常显著, 离震中 231 km 的 JB51 站 2001~2004 年测得的同震位移达 334.5 mm, 2004~2007 年震中附近的站仍有明显的震后位移。图 2 表明, 汶川大地震的主

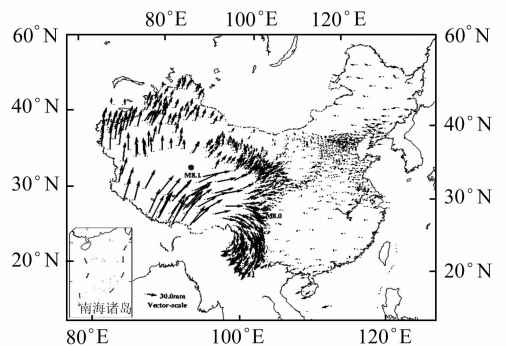


图 2 2004~2007 年间中国大陆的水平位移  
Fig. 2 Horizontal Displacements on Chinese Mainland from 2004 to 2007

要力源是印度板块向北对中国大陆的挤压, 但同时也受到东部与南部板块对中国大陆的挤压。同其他地区相比, 震中附近的水平位移最显著的特

点是汶川地震发生在南北地震带上位移分叉的部位,即震中北部明显向东北位移,震中南部明显向东南位移,而震中附近的水平位移明显小于其北面 and 南面的水平位移。水平位移表明,震前震中附近向东的水平位移受到的阻力更大。

采用椭球面上计算应变的方法<sup>[7,10]</sup>,利用 Delauney 方法自动组成互不覆盖的三角形,由各三角形三点的位移计算以三角形中心为代表的各种应变变量。计算得到 2 个主应变变量、最大主应变方向、最大剪应变、第一和第二剪应变、面膨胀和旋转量。第一剪应变  $\gamma_1$  表示  $N45^\circ E$  方向上的左旋剪切或  $N45^\circ W$  方向上的右旋剪切,南北挤压与东西张;第二剪应变  $\gamma_2$  表示南北方向上的左旋剪切或东西方向上的右旋剪切,NW 挤压与 NE 张。第一剪应变、第二剪应变和面膨胀为与地震发生的关系最密切的标量。对稳定地块的应变结果分析表明,几种应变变量计算结果的中误差至少不大于  $1.0 \times 10^{-7}$ 。将第一剪应变及其中误差太大的删除,且删除第一剪应变较大(取大于  $2.0 \times 10^{-7}$ )并大于其 2 倍中误差的计算结果,得到 2004~2007 年间区域网约 2 000 个三角形的应变计算结果。实际仅删除了少数三角形。

各三角形应变离散结果表明,数年间,应变积累的空间分布同地震活动一样,是不均匀的,分布极为复杂,局部有一定的趋势变化,总体上有明显的随机性。为探索未来的地震区,试图寻找突出应变积累显著的区域的方法。2001~2004 年间,区域网内发生了 2001 年的昆仑山口西 8.1 级地震,震中周围有相当大的同震应变和震后应变积累。用 GMT 绘图软件对有关量作趋势曲面拟合,拟合结果分布图中,昆仑山口西地震区及其周围应变积累最为突出。此方法与绘等值线图的方法基本一致。本文采用此种方法分析汶川地震前区域网的应变计算结果。

图 3 为趋势曲面拟合得到的 2004~2007 年间第一剪应变  $\gamma_1$  积累分布。为更加突出汶川地震震前的变化,且不影响分析结果,拟合时,删除了如昆仑山口西地震等产生的大的应变积累值(大于  $1.0 \times 10^{-6}$ )。图 3 中,中国大陆内应变积累最突出的是 2001 年昆仑山口西地震区附近和 2005 年九江地震西侧(震后结果),而汶川大地震西面,第一剪应变积累量大,范围最广。尽管删除了更大的应变积累值,图中昆仑山口西地震区附近仍可见震后地壳变形。汶川大地震震中的西面,第一剪应变为  $N45^\circ E$  方向上的左旋剪切,趋势曲面拟合累积量最大约为  $-4.0 \times 10^{-7}$ ,异常区

条带方向与鲜水河断裂带走向基本一致。拟合结果表明,变化突出的区域内,第一剪应变以  $N45^\circ E$  方向上的左旋剪切为主,这与实际的离散结果一致。1999~2001 年、2001~2004 年和 2004~2007 年区域网全网应变计算结果表明,第一剪应变的异常范围与量值逐渐增大。此外,还计算了面膨胀。由于中国大陆周边的拟合计算涉及的点少,拟合结果受到一定影响,本文只考虑中国大陆内部的应变计算结果。

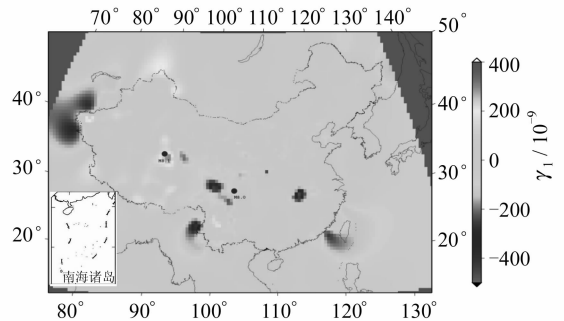


图 3 2004~2007 年间第一剪应变  $\gamma_1$  积累,黑色圆点为 2 次大地震  
Fig. 3 Accumulation of the First Shear Strains ( $\gamma_1$ ) from 2004 to 2007

用同样的方法对 1999~2001 年的区域网结果进行分析,未得到昆仑山口西 8.1 级地震前震中和其周围或其他地区有与上述类似的突出的应变积累。其原因可能主要有震中区域站数量少、密度低、观测间隔仅 2 a、应变积累量值较小、分布复杂及地震类型不同。

考虑到地震活动与一定时期内应变积累的时空分布有相似的复杂性,笔者曾采用统计方法,利用基本网 GPS 观测结果研究了 2001 年昆仑山口西地震前后应变积累的时空变化规律<sup>[11]</sup>。笔者还用统计方法研究了 1999~2007 年区域网中的应变积累<sup>[12]</sup>,本文只给出了 2004~2007 年的统计结果。

为进一步说明汶川地震前震区周围的应变异常,对 1999~2007 年 4 个时期全区域网、东部地区、华北地区、汶川地震周围、云南地区和西部地区第一剪应变、第二剪应变和面膨胀应变量的分布按应变值的区间作了统计,将汶川地震前的应变异常区包括在内,同时考虑到孕震区的范围要比余震显示的地震区范围大,将  $(98^\circ \sim 105^\circ) E$ 、 $(28^\circ \sim 36^\circ) N$  范围内 217 个三角形的应变分量计算结果进行了统计。统计的应变区间长取为  $1.0 \times 10^{-7}$ ,得到统计区域各区间内的三角形数与三角形总数的比例。区域网全网和无震区应变计算

结果的统计表明,对第一剪应变、第二剪应变和面膨胀 3 种应变分量的统计分布几乎重合(如图 4(a)所示),均呈正态分布,而最大剪应变呈泊松分布。中国大陆东部和汶川地震周围的统计结果如图 4 所示。图 4 表明,在汶川震区周围,震前 2004~2007 年负的第一剪应变的数目明显多于负的第二剪应变或负的面膨胀的数目。除基本网的结果<sup>[11]</sup>外,区域网 1999~2001 年的应变计算结果表明,中国大陆西部应变积累在 2001 年昆仑山口西地震前也有类似的统计结果。

震前震中周围的 GPS 连续观测站 30 s 采样率的 Bernese 软件单历元解表明,震前地壳运动还有临震异常,特别是有垂直位移异常。如离震中 305 km 的 LUZH 站在 5 月 9 日的日变化明显不同于其他时间;而离震中更近的站在震前 1 h 内出现大幅度的变化,特别是垂直位移更为显著。这为探索大地震前的短临前兆提供了新的途径。

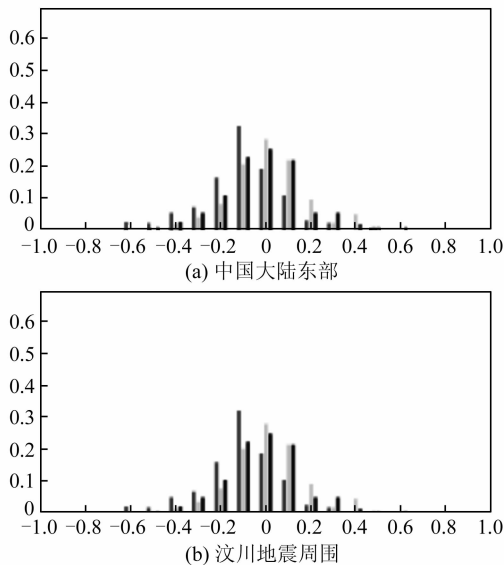


图 4 2004~2007 年 4 个时期中国东部地区和汶川地震周围第一剪应变(深灰)、第二剪应变(浅灰)和面膨胀(黑色)的分布统计

Fig. 4 Distributions of Accumulations of the First Shear Strains, the Second Shear Strains and the Areal Dilatations in Ascending Order from 2004 to 2007 in East China and the Wenchuan Earthquake Area

### 3 结 语

中国大陆西部及邻近地区的地震活动同印度板块网络基准站的连续 GPS 观测表明,汶川大地

震前,印度板块向北运动加速,临震前,速率明显变缓,甚至反向,最后发生地震。此过程相应于印度板块的向北挤压,达到某种极限,导致岩石失稳,发生地震。地震后,震区外作用力松弛,介质变形出现弹性回跳,表现为与震前总体位移趋势相反的同震位移。

### 参 考 文 献

- [1] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from GPS Derived Site Position Time Series[J]. JGR, 2002, 107(B4): 1-16
- [2] 顾国华. 参考框架、坐标变换和地壳运动[J]. 测绘通报, 2006(8): 24-28
- [3] 顾国华. GNSS(GPS)观测研究地壳运动的新进展[J]. 国际地震动态, 2007, 7: 9-15
- [4] Blewitt G. Overview of the SNARF Working Group, Its Activities, and Accomplishments[C]. The 8th SNARF Workshop AGU Fall Meeting, San Francisco, 2007
- [5] 顾国华, 张晶. 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, 2002, 22(2): 61-67
- [6] 顾国华, 王武星. GPS 测得的汶川大地震同震位移[J]. 地震, 2009, 29(1): 92-99
- [7] 顾国华, 申旭辉, 王敏, 等. 中国大陆地壳水平运动基本特征[J]. 地震学报, 2001, 23(4): 362-369
- [8] 顾国华, 符养, 王武星. 1999 至 2001 年中国大陆现今地壳水平运动[J]. 地震学报, 2004, 26(增刊): 58-63
- [9] 顾国华, 张晶, 王武星. 关于 2001 年 8.1 级昆仑山大地震前后中国大陆的地壳运动的讨论[J]. 地震学报, 2003, 25(6): 653-660
- [10] 顾国华, 孙汉荣, 孙惠娟, 等. 利用 GPS 地形变资料在大地坐标系中计算应变[J]. 地壳形变与地震, 1998, 18(3): 26-31
- [11] 顾国华, 王丽凤. GPS 观测得到的 1998 至 2000 年中国大陆地壳应变[J]. 地震, 2006, 26(3): 1-8
- [12] 顾国华, 王武星, 徐岳仁, 等. 区域网 GPS 观测得到的汶川大地震前的地壳水平运动[J]. 地震学报, 2009, 29(1): 92-99

第一作者简介:顾国华,研究员,主要从事 GPS 数据处理方法和软件、地壳运动与地震预测方法研究。

E-mail: ggh@seis. ac. cn

(下转第 1349 页)