

顾国华, 孟国杰, 方颖. 2011. 汶川大地震前后 GPS 观测的精密单历元解得到的震区地壳运动. 地震学报, 33(3): 319-326.

Gu Guohua, Meng Guojie, Fang Ying. 2011. Crustal movement in the earthquake area before and after 2008 Wenchuan earthquake as detected by precise single epoch positioning of GPS observations. *Acta Seismologica Sinica*, 33(3): 319-326.

汶川大地震前后 GPS 观测的精密单历元解得到的震区地壳运动^{*}

顾国华[†] 孟国杰 方 颖

(中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所)

摘要 利用 BERNESE 软件的单历元观测值双差定位功能, 获取了接近 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 大地震震中 5 个 GPS 观测站 (PIXI, CHDU, JYAN, NEIJ 和 LUZH 站) 震前的短临位移过程及震后短时间的位移. 通过拟合和对比分析, 讨论了单历元解的精度. 计算结果表明, 以 YANC 站为固定站, LUZH 站震前 5 月 9 日 N(南北向)、E(东西向)和 U(垂直向)3 个分量日变化明显异常; 而近震中的 PIXI, JYAN 和 NEIJ 站震前 1 小时内垂直位移非常显著, 特别是离震中 36 km 的 PIXI 站在震前不到 1 小时的时间内垂直位移变化达 300 mm 以上. 震后, PIXI 站的水平位移更为突出, 2 个分量均超过 400 mm, 十分接近高精度的周解结果. 这些变化均显著大于单历元解的误差水平. 尽管目前的 GPS 数据处理尚不能实时获取单历元解, 但所得到的结果为观测研究大地震近震中临震前的地壳运动提供了依据.

关键词 GPS 地壳运动 单历元解 汶川大地震 垂直位移

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.03.005

中图分类号: P313.4

文献标识码: A

Crustal movement in the earthquake area before and after 2008 Wenchuan earthquake as detected by precise single epoch positioning of GPS observations

Gu Guohua[†] Meng Guojie Fang Ying

(Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract: Displacement time series of precise single epoch positioning imminent-ly before the great Wenchuan earthquake on May 12, 2008, and shortly after the earthquake at 5 GPS stations of PIXI, CHDU, JYAN, NEIJ and LUZH are obtained from the double difference positioning of the BERNESE software. Through analysis on the best fit result and comparison of different results the accuracy of the single epoch solutions is discussed. The result of data processing with YANC used as a fixed station show that there were significant anomalies in

^{*} 基金项目 公益性行业科研专项(200708030)和基础科研业务专项(0207690201)资助.

收稿日期 2010-03-09 收到初稿, 2010-11-03 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: ggh@seis.ac.cn

3 displacement components of NEU at LUZH station on May 9 before the earthquake, while the vertical displacements at stations of PIXI, JYAN and NEIJ, close to or near the epicenter, were quite significant within 1 hour before the earthquake, especially the vertical displacement at PIXI station, 36 km to the epicenter, accumulated to more than 300 mm within 1 hour before the earthquake. The post seismic horizontal displacements at PIXI station were even more striking with more than 400 mm displacement for both components, quite close to the result of more precise weekly solutions. All these changes are significantly larger than the RMS (rooted mean squares) of the single epoch positioning solutions. Though the real time single epoch positioning solutions can not be obtained at present, the result may be used as an evidence in the study on crustal movement close to or near the epicenter imminently before great earthquakes.

Key words: GPS; crustal movement; single epoch positioning solution; great Wenchuan earthquake; vertical displacement

引言

某些大地震震前的 GPS 观测结果表明,大地震,如 2008 年 5 月 12 日汶川大地震,可能有大范围、较长周期的前兆(顾国华,王武星,2009;顾国华等,2009)。地震预报研究一直期望能得到时空密度尽可能高的地壳运动观测结果,探寻尽可能接近震中的短临前兆。随着 GPS 观测与数据处理技术的不断发展,地壳运动观测空间范围早已扩展到了全球,观测点不断加密,接收机的观测数据的采样率可达每 1 秒 10—50 个采样点,每日解算结果水平分量精度达 1—2 mm,垂直分量精度达 3—5 mm 高精度。目前已从获得每周、每日解,发展到已可得到数秒或每秒一个甚至数个解(即所谓的单历元解),而其精度可达 cm 甚至亚 cm 量级。全球已有 100 多个数据采样率为每 1 秒 1 个采样点,且近实时传输观测数据的 GPS 地面连续观测站,可获得近实时观测结果(顾国华,2007)。在大地震的震中附近有 GPS 连续观测站时,高采样率的观测数据经后处理(post processing)已获得了这些地震较长周期的地震波(Bock *et al*, 2004)。单历元观测数据快速、实时解算是 GPS 数据处理软件发展趋势。美国 JPL(喷气推进实验室)的 GIPSY 软件具有用精密单点定位获取单历元解的功能;美国 MIT(麻省理工学院)的 GAMIT 软件具有用双差定位获取单历元解的功能;而瑞士伯尔尼大学天文研究所的 BERNESE 软件同时具有用精密单点定位和双差定位获取单历元解的功能,且其中的双差解精度较高。

本文试图采用汶川大地震前后的 GPS 观测数据,通过 BERNESE 软件处理得到单历元解,了解此次大地震可能的短临地壳运动前兆现象及震后变化。

1 GPS 观测数据及其处理

同一般 GPS 观测数据的后处理相比,利用 BERNESE 软件处理得到的单历元解,须有与所用的观测数据采样率一致的 GPS 卫星钟差文件。从 IGS 分析中心网站可获得 IGS(国际 GPS 服务)每 30 秒 1 个采样点的 GPS 卫星钟差文件,而从其 CODE(欧洲定轨中心)分析中心已可得到每 5 秒 1 个采样点的 GPS 卫星钟差文件。在 BERNESE 软件数据处理中,

必须先作精密单点定位处理获取近似的单历元解，然后通过双差处理获取最后的单历元解。与一般的后处理一样，在数据处理中采用无电离层延迟影响的双频观测组合值观测值，作接收机天线相位中心改正、对流层延迟改正和估计、地球潮理论位移改正、海洋负荷位移改正等，采用精密星历；而在双差处理中则用准无电离层影响的方法解算整周模糊值等(Dach *et al* , 2007)。

汶川地震的发生时间是北京时间 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 04 秒。本文主要处理分析了我国地壳运动观测网络(下称网络)的 4 个基准站(YANC(盐池)、WUHN(武汉)、BJFS(北京房山)和最接近震中的 LUZH(泸州)站)2008 年 4 月 6 日—5 月 17 日的观测数据。汶川大地震震中附近四川地震局设立的 PIXI(郫县)、JYAN(简阳)和 NEIJ(内江)等 3 个 GPS 连续观测站地震当天北京时间 8 时至震后 14 时 29 分、CHDU(成都)站 8 时至震后 14 时 28 分 30 秒，观测数据均为每 30 秒 1 个采样点，即此 4 站至少获得了震后 1—2 个历元的观测数据。由于获取资料所限，未能计算这 4 个站早些天的单历元解，且可惜的是当天地震 1 分多钟后由于断电无观测数据。计算中取远离震中，且震前、震时和震后位移均较小的 YANC、WUHN 和 BJFS 站为固定站，获得了 PIXI、CHDU、JYAN、NEIJ 和 LUZH 站汶川地震前后的单历元解。尽管除 LUZH 站外其它站有每 1 秒 1 个采样点的观测值，可处理每 5 秒 1 个采样点的观测数据，但数据处理结果表明，仅每 30 秒 1 个采样点的处理结果是可靠的。表 1 给出了这些 GPS 观测站的震中距。图 1 给出了汶川地震震中与 GPS 连续观测站分布，b 图为 a 图中虚线方框的放大图。

表 1 GPS 观测站及其震中距

Table 1 GPS stations and their distance to the epicenter

观测站	震中距/km	观测站	震中距/km	观测站	震中距/km
PIXI	36	NEIJ	225	WUHN	1049
CHDU	75	LUZH	305	BJFS	1478
JYAN	129	YANC	838		

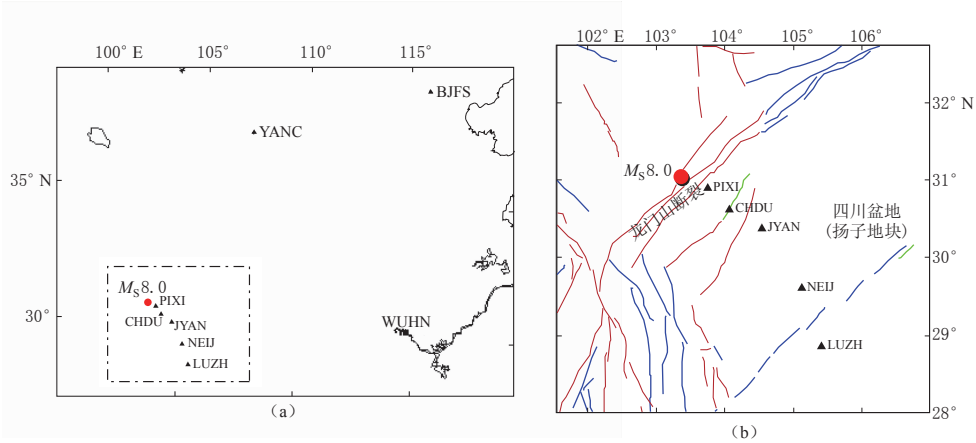


图 1 GPS 观测站和汶川地震震中。(b)图为(a)图中虚线方框的放大图

Fig.1 GPS observation stations and the Wenchuan earthquake. (b) map is the amplified part framed by dashed lines on the (a)

在用双差处理求单历元解时,可用单一基线求解.其中一个站(如近震中的 LUZH 站)为需获得单历元解的动态站,另一站(如远离震中的 YANC 站)为固定站;也可用多基线求解,一个站(LUZH 站)为需获得单历元解的动态站,多个站(如 YANC, WUHN 和 BJFS 等 3 个站)同时作为固定站.所得到的结果是动态站相对固定站的位移.显然,相对于动态站而言,选取的固定站越稳定越好.对自开始观测以来基准站的位移时间分析表明,汶川地震前 YANC、WUHN 和 BJFS 站是相当稳定的,且由于远离震中,地震前后的位移也较小.数据处理中,取 LUZH 站作为动态站,在单基线法中分别采用 YANC、WUHN 和 BJFS 站作为固定站,而在多基线法中同时取 YANC、WUHN 和 BJFS 作为固定站. YANC, WUHN 和 BJFS 至 LUZH 的距离分别为 1005, 884 和 1527 km. 数据处理结果对比分析表明,单一基线法求解,获得的单历元解数目多、位移变化平稳,且分别以 YANC、WUHN 和 BJFS 站为固定站获得的 3 组位移解基本一致.多基线法求解,获得的单历元解数目少.其原因是多基线法中采用的固定站较多,对不同站采用的约束条件相同,但各站实际所处条件不同,变化因素增多,影响增大,删除的观测数据较多.因此,本文采用单一基线法的计算结果.

对 2008 年 5 月 4—8 日 LUZH—YANC 站单历元解作线性拟合的精度统计表明, N 和 E 分量的中误差约为 10 mm, U 分量的中误差约 30 mm. 由于单历元观测值数据量大,各种复杂因素随机影响,少数数据处理结果出现突变,偏差明显较大,幅度可达数 10 cm(但持续时间仅几分钟).基于上述原因,本文不考虑这些结果.

2 汶川大地震震中附近 GPS 观测站的短临位移和震后位移

对网络基准站位移周解时间序列的分析表明, LUZH 站是中国大陆东部稳定的 GPS 观测站之一,汶川大地震前无明显的趋势异常,而同震位移仅为 4 mm(顾国华,王武星,2009),震后的变化依然不明显.

以 YANC 站为固定站, LUZH 站临震前变化特点为, 2008 年 5 月 9 日 N(南北向)、E(东西向)、U(垂直向)3 个分量日变化异常明显(图 2). 同一天震中周围的站还显示有电离层异常.但在其它有电离层异常的时间未见此现象.目前还无法说明两者之间是否有关.

同样以 YANC 站为固定站,得到更接近震中的 4 个站(PIXI, CHDU, JYAN 和 NEIJ)震前 1 小时内的垂直位移(图 3).在震前不到 1 小时的时间内离震中 36 km 的 PIXI 站的垂直位移变化达 300 mm 以上,且几乎是直线变化(图 4); JYAN 和 NEIJ 站的异常同样显著;而 CHDU 站临震前的垂直位移不显著.

30 s 单历元计算结果均未发现临震前此 4 站及 LUZH 站的水平位移有显著的变化,表明震前垂直位移和水平位移无明显相关性.

由于未能得到 PIXI, CHDU, JYAN 和 NEIJ 站的原始 GPS 观测值,不能计算地震前较长时间的单历元解.但获得的自 2008 年 1 月 1 日起上述 4 个站的每日解 3 个位移分量(N, E, U)时间序列表明, 2008 年 5 月 12 日前均无明显变化. PIXI 的垂直位移最大变化为 19 mm,而震前 1 周内的变化仅 10 mm.

PIXI, JYAN 和 NEIJ 站地震前后 3 个位移分量(N, E, U)的变化如表 2 所示.震后 PIXI 和 JYAN 站仅有的 2 个单历元结果反映了极为明显的震后水平位移.

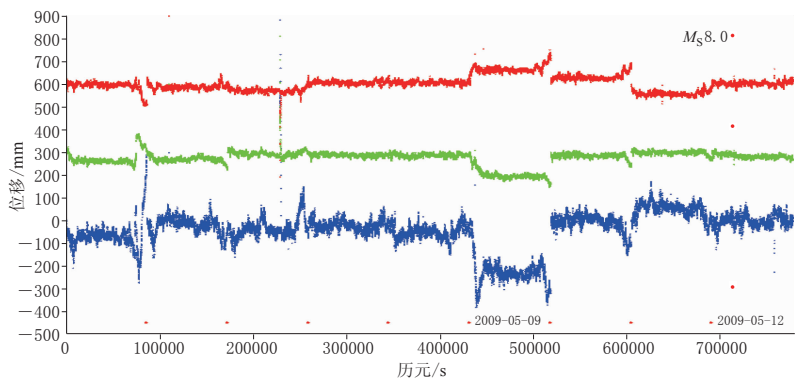


图 2 LUZH 站 2008 年 5 月 4—12 日汶川地震前水平与垂直位移(mm). 红色表示 N 分量, 绿色表示 E 分量, 蓝色表示 U 分量; 纵坐标位移每格为 100 mm, 横坐标为历元, 单位为 s; 下方相邻 2 个红点表示为一天, 右侧 3 个红点表示地震时间

Fig. 2 Horizontal and vertical displacements in mm at LUZH station from May 4 to 12, 2008, before and after the Wenchuan earthquake. Red denotes N component, green E component and blue U component. Scale of the ordinate is 100 mm and the abscissa is for epochs in seconds. The interval between 2 red dots in lower part is one day. Three red dots on right part indicate the earthquake time

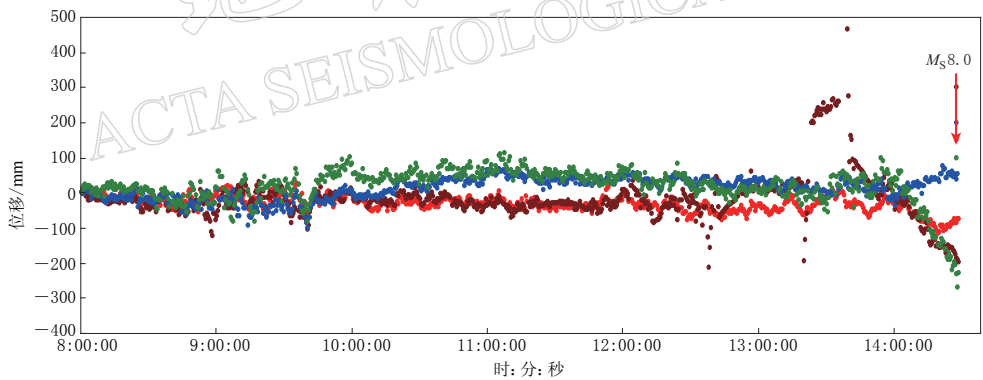


图 3 郫县、成都、简阳和内江 4 个站 2008 年 5 月 12 日汶川地震临震前垂直位移. 绿色表示 PIXI, 蓝色表示 CHDU, 红色表示 JYAN, 棕色表示 NEIJ; 横坐标为北京时间

Fig. 3 Vertical displacements at 4 stations imminently before the Wenchuan earthquake on May 12, 2008. Green color stands for PIXI station, blue for CHDU, red for JYAN and brown for NEIJ. The ordinate is for displacements in mm and the abscissa is the Beijing time

表 2 中仅有的震后 2 个历元解表明, PIXI 站震后的水平位移急剧加大, 2 个分量均大于 400 mm, 大于临震前的垂直位移量; JYAN 站水平位移滞后于 PIXI 站; NEIJ 站未显示震后位移; PIXI 和 JYAN 站震后的垂直位移也不明显.

尽管 LUZH 站是这 5 个站中离震中最远的, 且图 2 中在较长的时间序列中 LUZH 站的震后位移不明显, 但该站汶川地震后 2—6 min 的水平位移与此前后多个历元相比变化是明显的. N 分量最大变化达 35 mm; E 分量最大变化达 62 mm, 而此后均很快恢复到震前的水平, E 分量的变化最典型, 短时间内未显现残留位移(图 5); U 分量的同震位移不

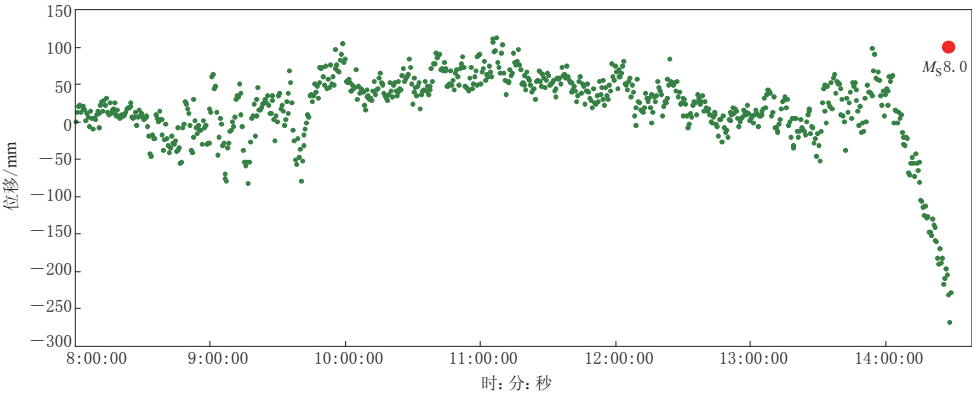


图 4 PIXI 站 2008 年 5 月 12 日汶川地震临震前垂直位移. 横坐标为北京时间

Fig. 4 Vertical displacements at PIXI station imminently before the Wenchuan earthquake on May 12, 2008. The ordinate denotes displacement in mm and abscissa represents Beijing time

表 2 地震前后 3 个站单历元 N, E 和 U 位移分量变化及同震位移

Table 2 Displacement N, E, U component variation and coseismic displacement of single epoch positioning solutions before and after the earthquake at 3 stations

历元/s	PIXI			JYAN			NEIJ		
	N/mm	E/mm	U/mm	N/mm	E/mm	U/mm	N/mm	E/mm	U/mm
23280	20.8	0.6	-231.9	9.1	-20.2	-85.8	-47.4	119.4	-186.8
23310	34	-69.6	-268.3	8.2	-21.3	-73.1	-44.2	115.5	-189.4
23340	430.5	-437.9	-228.3	89.2	-92.5	-72.0	-49.1	107.1	-199.2
同震 C	421.4	-562.2	-87.4	37.0	-69.5	-7.3	6.0	-18.1	-2.7

注: 历元 23280 为震前 4s; 23310 和 23340 分别为 23280 后 30 s 和后 60 s; 同震指由地震前后的 GPS 周解得到的同震位移, 其解的时间跨度相对较长(顾国华, 王武星, 2009), 反映的位移过程与单历元解会有所不同, 得到的位移与震后极短时间的位移会有差别.

明显. 这与上述几站水平同震位移大是相应的.

尽管时间跨度不同, 但 PIXI 和 JYAN 站震后第 2 个历元的解的水平位移与高精度周解同震位移相当接近, 表明震时的位移大部分残留为永久位移.

图 2—4 中非异常变化部分的离散度与所述的精度统计是一致的. 地震前后的地壳运动远大于观测精度, 且震后的单历元解与高精度的同震位移非常接近, 也充分说明了单历元计算结果的可靠性.

相对 YANC 站, CHDU 站周解 N、E 和 U 同震位移分量分别为 111.8, -155.2 和 -22.6 mm. 同样, 相对 YANC 站, PIXI、CHDU、JYAN、NEIJ 和 LUZH 站周解同震 3 个位移分量随离发震断层距离而指数衰减, 这与弹性位错模型的规律一致.

3 讨论

本文利用 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s8.0$ 大地震近震中 5 个站的 GPS 连续观测资料, 计算了时间分辨率为 30 s 的单历元解, 获得了该地震临震前后地壳运动结果. 通过对

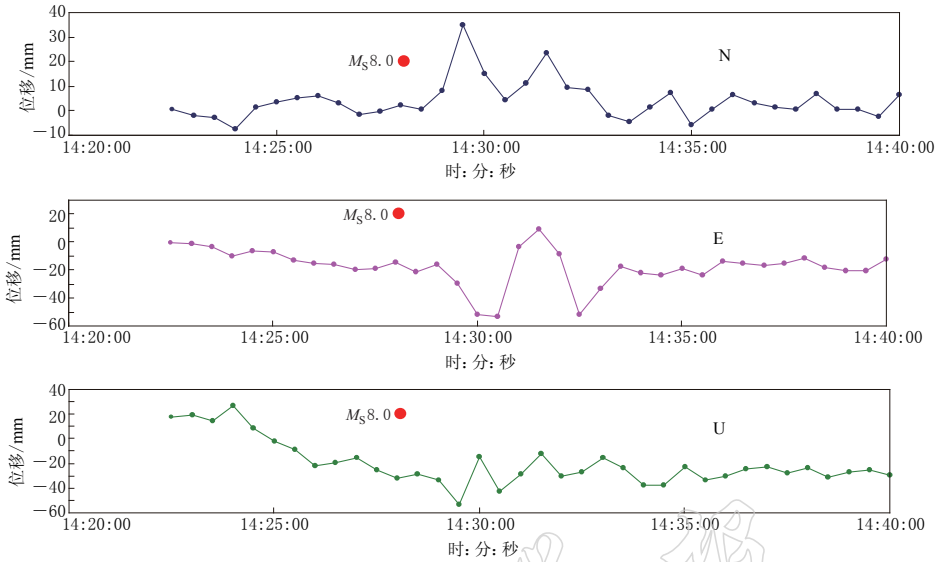


图 5 汶川地震前后 LUZH 站多个历元的单历元 N, E 和 U 位移时间序列. 大圆点为汶川地震发生时刻; 各位移点的时间间隔为 30 s; 横坐标为北京时间

Fig. 5 NEU displacement time series for several epochs at LUZH station before and after the Wenchuan earthquake. Large red dots show the time of earthquake. The time interval between 2 consecutive epochs is 30 s. Ordinate shows displacement in mm and abscissa denotes Beijing time

LUZH 站用不同的固定站作大量计算结果的统计分析, LUZH 站地震前后多个历元结果的分析, 以及 PIXI、CHDU、JYAN 和 NEIJ 站震前垂直位移和水平位移单历元解的对比及此 4 站震后单历元解与周解同震位移的比较, 充分说明了所得结果的可靠性. 近震中的 PIXI、JYAN 和 NEIJ 震前 1 小时内垂直位移异常非常显著. 特别是 PIXI 站离震中仅 36 km, 临震前 1 小时内垂直位移量达 300 mm 以上; 震后, PIXI 站的水平位移更为突出, 2 个分量均超过 400 mm, 非常接近时间跨度较长的高精度周解结果.

无疑, 对观测研究大地震前后地壳运动, 高采样率的单历元解非常有意义. 然而必须指出, 目前 GPS 数据处理还不可能实时获得每 30 秒 1 个采样点甚至更高采样率的单历元解. 因此, 在相当一段时间还不能将此方法用于短临预报, 更不必说还有不少有待研究的问题.

本文研究结果表明, 汶川大地震临震前 1 小时内震中附近确有相当显著的地壳垂直运动. 在一些地震多发区布设密度较高、精度相对低一点的垂直地壳运动连续观测仪器, 可能是观测短临前兆一条经济实用的途径.

汶川大地震临震前震中附近地壳垂直运动显著, 可能与此次地震为逆冲断层运动有关, 但震后水平位移更为显著. 地震前后地壳运动两种不同表现, 表明此次地震过程相当复杂. 显然, 积累更多、更好的观测结果, 仍是地震预测研究的必然过程.

本研究采用了中国地壳运动观测网络和四川地震局的部分 GPS 观测数据, 并用网络数据中心少量计算结果作了处理, 对此表示谢意.

参 考 文 献

- 顾国华. 2007. GNSS(GPS)观测研究地壳运动的新进展[J]. 国际地震动态, (7): 9-15.
- 顾国华, 王武星. 2009. GPS测得的汶川大地震同震位移[J]. 地震, **29**(1): 92-99.
- 顾国华, 王武星, 徐岳仁, 李文军. 2009. 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, **31**(6): 597-605.
- Dach R, Hugentobler U, Fridez P, Meindl M. 2007. *User Manual of the Bernese GPS Software Version 5.0* [M]. AIUB Astronomical Institute, University of Bern.
- Bock Y, Prawirodirdjo L, Melbourne T I. 2004. Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network[J]. *Geophys Res Lett*, **31**: L06604, doi: 10.1029/2003GL019150.

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA