

顾国华, 王武星, 占伟, 梁洪宝, 朱爽. 2015. 芦山  $M_S 7.0$  地震前水平位移和同震水平位移研究. 地震学报, 37(1): 53-64. doi:10.11939/jass.2015.01.005.

Gu G H, Wang W X, Zhan W, Liang H B, Zhu S. 2015. Preseismic and coseismic horizontal crustal movements of the 2013  $M_S 7.0$  Lushan earthquake in Sichuan. *Acta Seismologica Sinica*, 37(1): 53-64. doi:10.11939/jass.2015.01.005.

# 芦山 $M_S 7.0$ 地震前水平位移和同震水平位移研究<sup>\*</sup>

顾国华<sup>1),\*</sup> 王武星<sup>1)</sup> 占伟<sup>2)</sup> 梁洪宝<sup>2)</sup> 朱爽<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国天津 300180 中国地震局第一监测中心

**摘要** 本文利用“中国地壳运动观测网络(二期)”多个 GPS 连续观测站观测数据处理结果, 将 2013 年 4 月 20 日四川芦山  $M_S 7.0$  地震区域参考框架同震水平位移与全球参考框架同震水平位移进行比较, 结果表明两组框架解一致, 说明两种参考框架均可当作位错参考框架, 也即全球参考框架同震水平位移也可视为区域参考框架同震水平位移. 区域参考框架下 GPS 连续观测站地震前的水平位移和同震水平位移结果表明, 震前数年, SCTQ 站西侧的 GPS 站构造运动十分显著, 而该站水平位移却很小, 即出现反常的闭锁, 但该站的同震水平位移使其弹性回跳至正常构造水平位移水平, 因此 SCTQ 站震前的位移闭锁是水平位移空间分布中的异常, 是芦山  $M_S 7.0$  地震的前兆. 水平位移时空变化表明, 该站震前和震时位移完全符合里德的弹性回跳理论. 区域参考框架中位移时间系列和同震水平位移的综合研究有助于对芦山地震地壳运动前兆的认识和解释. 尽管本文未能直接采用其它 GPS 连续观测站的资料, 但结合本文和其它研究结果可以证实, 震中附近其它站地震前后变化与 SCTQ 站类似. 基于芦山地震前水平位移和同震水平位移及其与前兆关系的研究, 本文进一步讨论了 GPS 监测网的布设、数据处理和分析等问题.

**关键词** GPS GNSS 同震水平位移 弹性位错模型 芦山地震 地震前兆 地震预测

doi:10.11939/jass.2015.01.005 中图分类号: P315.72<sup>+</sup>5 文献标志码: A

## Preseismic and coseismic horizontal crustal movements of the 2013 $M_S 7.0$ Lushan earthquake in Sichuan

Gu Guohua<sup>1),\*</sup> Wang Wuxing<sup>1)</sup> Zhan Wei<sup>2)</sup> Liang Hongbao<sup>2)</sup> Zhu Shuang<sup>2)</sup>

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

2) First Monitoring Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

**Abstract:** In this paper the coseismic horizontal displacements of the  $M_S 7.0$  Lushan earthquake on April 20, 2013 in Sichuan, China are obtained in the global and regional reference frames from continuous GPS observations at some

\* 基金项目 国家自然科学基金项目(41274098)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2013IES0407)和中国地震局老专家科研基金课题共同资助.

收稿日期 2014-05-23 收到初稿, 2014-07-24 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: ggh@seis.ac.cn

stations in the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) and other stations. Comparison of the two sets of solutions for the coseismic horizontal displacements shows that they are in good agreement and both of the reference frames can be taken as the dislocation reference frame for the coseismic horizontal displacements of this event. So the coseismic horizontal displacements in the global reference frame can be used as coseismic horizontal displacements in the regional reference frame. The relationship between the coseismic horizontal displacements and the preseismic horizontal displacements can be analyzed reasonably with the results in the regional reference frame so as to study the crustal movements precursory to this event.

Time series of preseismic displacements and the coseismic displacements in the regional reference frame at continuous GPS observation stations show that the tectonic horizontal crustal movements were quite significant at some stations west to the station SCTQ near epicenter of the Lushan earthquake, while this station showed abnormal locking in the horizontal movement. The coseismic horizontal displacements at the station SCTQ and other stations were elastic rebound to their normal horizontal tectonic movements. Therefore the locked horizontal displacements at these stations were anomalous in the spatial distribution of the horizontal displacements at the GPS stations and were precursors to the earthquake. The horizontal displacement change in time and space show that the preseismic and coseismic displacements at the station SCTQ are in good agreement with Reid's elastic rebound model. The combined studies on time series of the horizontal displacements and the coseismic horizontal displacements in the regional reference frame are important for the reasonable explanation on the crustal movements precursory to the earthquake. Though the data used in this study are limited, combination of the results in this paper with other papers suggests that the result obtained from data at the station SCTQ can be verified by the data at other GPS stations. Based on the studies on the preseismic and coseismic horizontal displacements, some problems in the GPS monitoring networks and the data processing and analyses are discussed.

**Key words:** GPS; GNSS; coseismic horizontal displacement; elastic dislocation model; Lushan earthquake; earthquake precursor; earthquake prediction

## 引言

2012年3月“中国地壳运动观测网络(二期)”(以下简称网络二期)建成。该网络仍以全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, 简称为GNSS)为主要观测技术,以地震预报为主要目的,建成260个GNSS连续观测站(包括一期的25个站),2000个不定期观测的GNSS区域站。240多个连续观测站已从2010年7月开始进行GPS观测。此外,各地区根据不同目的,也建有相当多的GPS连续观测站。这些GPS观测站为观测研究大地震前后不同范围的地壳运动,探索不同震级地震前兆提供了丰富的观测资料。

网络二期GPS站连续观测期间,发生了2011年3月11日东日本  $M_w 9.0$  大地震和2013年4月20日我国四川芦山  $M_s 7.0$  地震( $30.3^\circ\text{N}, 103.0^\circ\text{E}$ )。2008年汶川  $M_s 8.0$  地震后不久国内外曾对龙门山断裂带南段,包括芦山及其周围地区的地震危险性进行过预测。

为此,中国地震局地震预测研究所在汶川地震后不久在此地区布设了多个 GPS 连续观测站. 四川省地震局在汶川地震前已布设了多个 GPS 连续观测站. 据统计, 在离芦山地震震中 300 km 内有 50 个 GPS 连续观测站、200 km 内有 34 个站、100 km 内有 14 个站、50 km 内有 8 个站, 其中最近的站离芦山地震震中仅 17 km, 另一个站也不到 18 km. 一个  $M_s 7.0$  地震前后在近震中四周有较长时间、如此密集的 GPS 连续观测站进行观测, 实属难得, 为研究这次地震提供了丰富的 GPS 观测数据. 本文主要研究芦山地震周围 GPS 连续观测站的水平位移结果, 得到了距离  $M_s 7.0$  地震震中较近 GPS 观测站的震前位移和同震位移结果, 特别是同震水平位移结果. 然而, 除了网络二期 GPS 站连续观测站, 研究区域内所有其它 GPS 连续观测站的数据处理结果尚不能直接采用.

利用 GPS 观测手段, 对芦山  $M_s 7.0$  地震已有不少研究成果(武艳强等, 2013; Du *et al*, 2013; Tan *et al*, 2013; 牛安福等, 2013a; 金明培等, 2014; Jiang *et al*, 2014), 其中包括与 GPS 观测得到的同震水平位移非常一致的弹性位错模型结果, 也有涉及 GPS 观测得到的前兆地壳运动. 问题是, GPS 是地震预测利器吗? 本文仅利用网络二期部分 GPS 连续观测站得到的芦山地震同震水平位移时间序列, 分析和讨论此次地震的前兆地壳运动, 为地震前兆探索提供新的证据和思考.

本文采用中国地震局第一监测中心提供的美国麻省理工学院等单位研制的 GAMIT/GLOBK 和董大南的 QOCA 数据处理软件, 得到全球参考框架 GPS 观测的每日解, 由此作进一步处理和分析. 数据处理中采用网络二期 245 个 GPS 连续观测站和中国大陆周边 IGS(国际 GNSS 服务)全球网一些 GPS 连续观测站的数据处理结果, 观测时间为从 2010 年 7 月—2013 年 4 月 24 日.

## 1 GPS 数据处理

本文所说的 GPS 数据处理, 是指对利用 GPS 观测数据处理得到的全球参考框架下的坐标时间序列作进一步的处理和分析. 首先涉及的问题是参考框架(或称为基准)的选择和变换.

大地测量中参考框架是建立坐标系统的基本要素, 但任何参考框架都无法由自身确定其坐标和运动, 而必须附加外部或内部条件才能确定, 以适应不同需要.

全球参考框架须符合牛顿定律描述的 GPS 卫星运动的要求, 采用地固地心坐标系统和维持此坐标系统必需的地壳板块运动模型, 选取全球分布的有良好线性运动的核心站(即框架站). 此参考框架是 GPS 观测精密数据处理所必需的, 是研究全球地壳板块运动的依据, 也是通过相似变换获取其它各种参考框架解的基础. 由于站点的变化, 特别是站点运动状态的变化等原因, 全球参考框架核心站数量会因时而变. 自 GPS 观测开始以来, 国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, 简称为 ITRF)已推出过不同版本, 即使是所采用的 IGS08 参考框架也有第二个版本 IGB08, 甚至是同一版本的参考框架, 其核心站的数量通常也会逐渐减少.

区域参考框架有赖于区域内水平运动速率很低的稳定核心站, 符合研究区域相对运动的要求. 为了区域大地测量和区域地壳相对运动研究的需要, 各地区采用区域参考框架, 如稳定的北美参考框架(stable North American reference frame, 简称为 SNARF)(Blewitt, 2007)和欧洲参考框架(European reference frame, 简称为 EUREF)等. 在利用

大量我国及其周边地区 GPS 观测结果研究中国大陆及周边位移场时, 作者一直采用以中国大陆内部, 且主要在中国大陆东部的稳定站为核心站的区域参考框架, 得到了许多研究成果(Gu *et al*, 2001, 2009, 2011; 顾国华等, 2004, 2009; 顾国华, 王武星, 2009, 2011). 大量研究结果表明, 与全球参考框架不同的是, 区域参考框架核心站不仅水平位移速率低, 且可保持长期不变, 位移时间序列噪声水平低, 有更好的稳定性, 其结果有利于区域地壳运动过程的分析和研究(Gu *et al*, 2011). 区域参考框架不仅有利于分析大地震前的地壳运动异常, 也有利于显示同震水平位移是震前位移的弹性回跳, 易于证明大地震存在地壳运动前兆.

地震断层破裂的弹性位错理论是研究同震形变(主要是位移)的理论模型. 弹性位错模型表明, 地震震级越大、离震中越远处, 同震位移才接近于0(黄立人, 顾国华, 1982). 因此, 对于震级越大的地震, 为获取与弹性位错理论模型一致的位移场, 应当采用离震中更远的(多个)站作为观测得到的同震位移的参考框架. 由于同震位移是断层位错的结果, 因此, 本文将同震位移参考框架称之为(断层)位错参考框架. 这是一种以物理理论模型为依据、利用观测结果确定的参考框架, 是一种稳定的参考框架, 是获取同震位移的理想选择. 而当地震震级不太大时, 当不同参考框架的核心站均远离震中时, 所得到的同震位移有可能十分一致. 这些参考框架相互通用, 都可视为位错参考框架.

在利用 GPS 观测结果研究大地震, 甚至巨大地震的同震位移时, 以往几乎所有的研究均直接采用全球参考框架的解. 由于全球参考框架的核心站在全球的分布较为分散, 相距较远, 离大地震震中一般也较远, 可将全球参考框架当作位错参考框架, 且采用此方法计算最为简单. 由于同震位移是极短时间内发生的现象, 全球框架核心站缓慢的运动速率对获得同震位移的影响非常小, 地震前后两个时刻越接近, 此种影响越可忽略不计. 通常在 GPS 观测数据处理中, 会即时删除靠近震中同震位移很大的核心站. 然而, 对全球参考框架的另一种影响是, 短时间快速急剧的地壳运动有可能明显改变处于变形区内的参考框架核心站的空间位置. 对于大地震, 特别是巨大地震, 同震水平位移对离震中相对较近的核心站的影响是否可以忽略, 也即全球参考框架, 甚至区域参考框架是否可作为位错参考框架, 必须作具体分析. 利用位错参考框架的位移场反演巨大地震弹性位错模型时, 由于此时远离震中的位移已与模型一致, 因此, 无须估计观测得到的位移场相对于模型位移场的相似变换参数.

各种框架除其它特殊要求外, 均要求核心站有一定数量和质量, 分布尽可能合理等. 根据自由网平差理论, 位移场在数学上是多解的, 同一时刻、不同参考框架的位移解保持相似变换关系, 只要得到任何一种参考框架的解即可得到其它参考框架的解. 因此, 在利用位移反演形变模型时, 需估计不同参考框架的位移场相对于模型位移的相似变换参数, 由此得到一致的形变模型. 显然, 由于区域参考框架、全球参考框架与位错参考框架的同震位移都是自由网平差解, 在反演弹性位错模型时, 所得到的模型可完全一致. 传统大地测量观测技术制约了同震位移的观测范围, 常常只能采用小范围内的局部地区参考框架, 无法得到同震位移接近于0的位错参考框架核心站, 因此在模型反演, 如位错模型反演时, 必须采用模型参考框架(或模型基准)(顾国华, 1990), 在位错模型反演时即为位错模型参考框架, 将观测位移场作相似变换, 使之与模型得到的数值位移在最小二乘意义上保持最佳拟合.

如何确定地壳运动位移场的参考框架是形变测量长期争论不休的问题. 其原因是运动的相对性, 数学上可有各种解. 源于古代人们的直觉和基于数学上不同的相对运动描述, 历史上天文学中曾长期存在关于行星运动的日心说与地心说的争论. 此争论由于牛顿力学物理解释了行星运动规律, 而最终确立了日心说. 可见对于运动的描述最根本的选择原则是物理原则或物理事实. 同样, 应根据物理原则, 合理确定测量平差得到的位移解.

与网络一期 25 个 GPS 连续观测站相比, 网络二期观测站数量显著增多, 区域参考框架核心站的选择余地更大. 本文所用核心站数增加至 21 个站(位于东部地区, 即  $104^{\circ}\text{E}$  以东和  $27^{\circ}\text{N}$  以北, 包括网络一期时作者所用的 5 个核心站), 分布更为合理. 如上所述, 区域参考框架核心站的增加有助于改善区域参考框架的稳定性, 更有助于数据分析.

本文采用高精度的周解和区域参考框架研究芦山地震的同震水平位移和位移时间序列, 探讨此次地震同震水平位移的成因、特点以及地壳运动前兆及其监测. GPS 观测得到的周解水平位移分量精度已达 1—2 mm, 垂直位移精度约为 3 mm.

## 2 芦山 $M_s7.0$ 地震同震水平位移

利用芦山地震震中四周相当密集的 GPS 连续观测站的观测结果, 武艳强等(2013)获得了 ITRF2005 全球框架下此次地震丰富的同震位移, 特别是同震水平位移, 并利用 ITRF2005 参考框架下的 GPS 速度场扣除华南地块的整体运动, 得到了此种区域参考框架的 GPS 水平位移速度场.

由于本文采用的区域参考框架有利于获得区域内的地壳相对运动, 且其核心站远离芦山地震震中, 采用此种参考框架既可获取此次地震 GPS 连续观测站符合弹性位错模型的同震水平位移, 又可获得这些站的水平位移或水平位移时间序列. 图 1 给出了芦山地震同震水平位移(中国地震局地震预测研究所, 2013). 可以看出, 两种框架解差别很小, 图中同震水平位移小的站几乎看不出差别, 而位移大的 SCTQ 站(天全站)是说明两种框架解一致性最明显的例子. 这表明, 由于全球参考框架和本文采用的区域参考框架的核心站均远离芦山地震震中, 且地震震级不算巨大, 因此对于芦山地震, 两种参考框架都可作为位错参考框架, 所得同震位移的结果一致. 同时也表明, 基于弹性位错模型推断所得到的关于某些情况不同参考框架下同震位移解一致的结论是符合实际的. 造成图中差别很小的原因主要是由于两种框架解所取的地震前后时间不同造成的. 比较采用同一全球框架数据处理计算结果获得的区域框架解, 可看出两种参考框架得到的芦山地震同震水平位移差别较图 1 中的差别更小. 显然, 图 1 中武艳强等(2013)的全球框架同震位移也可当作区域框架同震位移. 根据其同震水平位移结果, 表 1 给出了芦山地震水平位移向量长大于 2 mm 的一些 GPS 站的同震水平位移和垂直位移. 图 1 中 SCTQ 站的同震水平位移达 20.8 mm. 由于 GPS 观测水平位移的精度约为 1—2 mm, 表中给出大于 2 mm 的同震水平位移是 GPS 能观测得到的. 垂直位移的观测精度要低一些, 约 3 mm 左右. 表中也给出离震中很近但同震位移很小的 LS02 站的结果. 多数站的同震垂直位移小于同震水平位移, 变化更为复杂.

表 1 中 GPS 观测站的同震水平位移随震中距的衰减如图 2 所示. 随着震中距的增大, 同震水平位移迅速衰减. 当震中距小于 50 km 时, 位移量大于 10 mm; 当震中距大于 80 km 时, 位移量已小于 5 mm. 关于芦山地震同震位移的详细情况见武艳强等(2013)的文章.

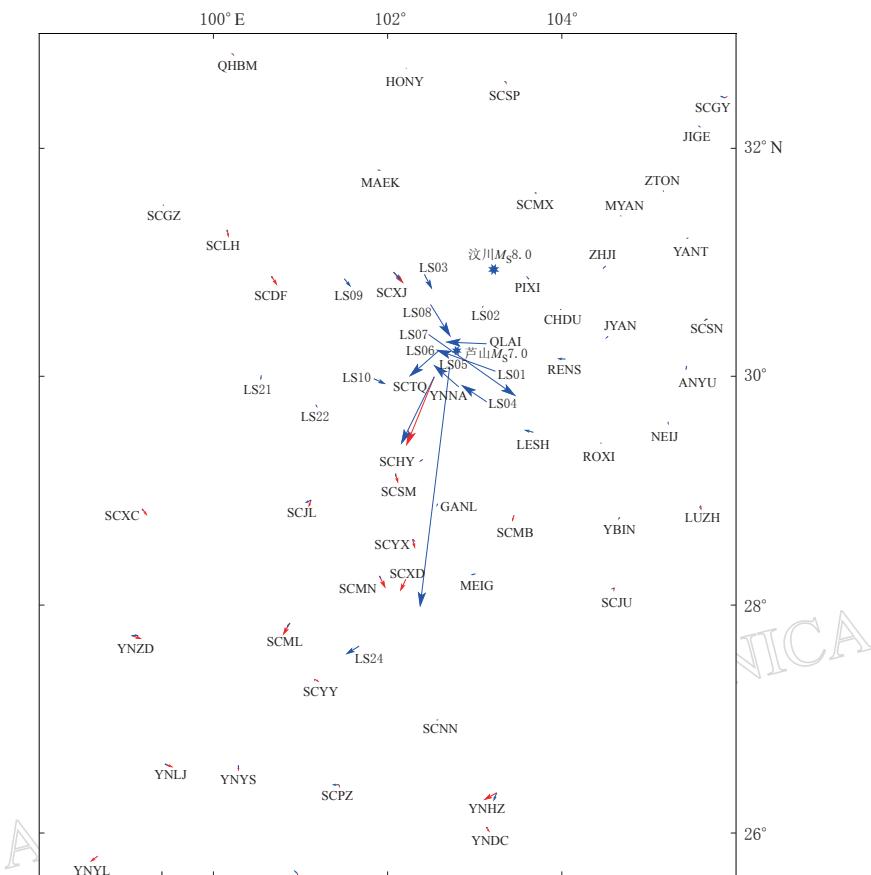


图 1 芦山  $M_s 7.0$  地震同震水平位移

红色表示本文区域框架解, 蓝色表示武艳强等(2013)的全球框架解

Fig. 1 Coseismic horizontal displacements associated with the Lushan  $M_S 7.0$  earthquake

The red arrows are from the solutions in the regional reference frame in this paper, and the blue arrows are from the solutions in the global reference frame obtained by Wu *et al* (2013)

表 1 芦山  $M_{\text{S}} 7.0$  地震周围部分 GPS 站的同震水平位移和垂直位移(水平位移向量长大于 2 mm)

Table 1 Coseismic horizontal and vertical displacements detected at GPS stations around the Lushan  $M_s 7.0$  earthquake (The vector lengths of the horizontal displacements are larger than 2 mm)

GPS 站	$L/\text{mm}$	$L_E/\text{mm}$	$L_N/\text{mm}$	$L_U/\text{mm}$	$D/\text{km}$	GPS 站	$L/\text{mm}$	$L_E/\text{mm}$	$L_N/\text{mm}$	$L_U/\text{mm}$	$D/\text{km}$
LS05	67.5	-9.9	-66.8	83.6	17.2	LS03	4.8	2.1	-4.3	5.6	80.8
LS07	30.0	24.1	-17.8	-4.6	31.9	LS24	4.5	-3.9	-2.3	1.3	303.5
SCTQ	21.1	-9.8	-18.7	5.8	33.8	LS10	3.8	3.4	-1.6	1.7	85.8
LS01	17.7	-16.5	6.5	0.3	42.8	SCXJ	3.3	2.2	-2.4	-1.5	98.3
QLAI	11.6	-11.6	0.8	-4.9	30.0	LS09	3.1	1.9	-2.4	9.3	130.4
LS06	11.1	-8.5	-7.1	16.3	17.8	LESH	2.8	-2.7	0.8	0.3	109.4
LS08	10.8	5.5	-9.3	2.2	51.8	RENS	2.4	-2.4	0.2	-3.0	106.7
YAAN	9.5	-7.0	6.4	-3.5	35.4	SCJL	2.0	-1.8	-0.8	5.6	204.0
LS04	8.7	-7.1	5.0	0.5	57.9	LS02	0.7	0.3	0.6	0.2	48.9

注:  $L$  为水平位移向量长度,  $L_E$  为水平位移东西向分量,  $L_N$  为水平位移南北向分量,  $L_U$  为垂直位移,  $D$  为 GPS 站到震中的距离.

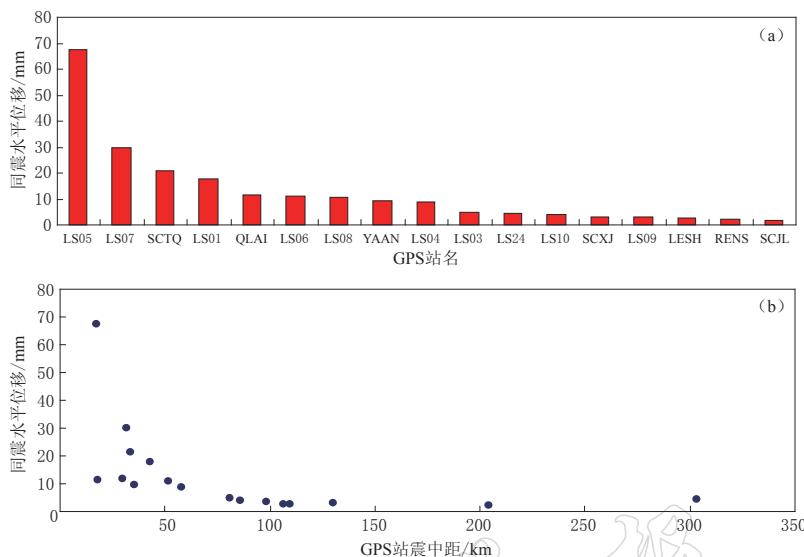


图 2 芦山  $M_s 7.0$  地震同震水平位移随震中距的衰减

Fig. 2 Attenuation of coseismic horizontal displacements with the distances from the epicenter of the Lushan  $M_s 7.0$  earthquake, where abscissa represents the GPS stations in Fig. (a), and represents the epicentral distances of the GPS stations in Fig. (b)

### 3 水平位移时间序列中芦山地震同震水平位移与地壳运动前兆

以上讨论和比较了 GPS 观测站芦山地震两种框架解的同震水平位移的空间分布。同震位移为研究震源机制提供了大地测量观测结果。然而, 更重要的是如何利用位移时间序列研究包括同震水平位移在内的水平位移过程, 探索地震前兆及其监测。

大地震同震位移独具突然出现、(几乎)同步变化、量值显著、不受地面沉降等干扰影响、同源产生并有弹性位错理论模型等特点, 是公认的大地震特有的地壳运动现象, 是探索地震前兆地壳运动的关键。同震位移也是评价 GPS 观测精度的可靠资料。2008 年汶川  $M_s 8.0$  大地震和 2011 年东日本  $M_w 9.0$  巨大地震的同震水平位移研究表明, 在区域参考框架中同震水平位移是震前水平位移过程的弹性回跳, 证明大地震前是有地壳运动前兆的(顾国华, 王武星, 2009; Gu, Wang, 2011)。由于这两次大地震前, GPS 连续观测站水平位移时间序列在稳定背景下出现显著变化或异常, 据此很容易判别同震水平位移是震前水平位移异常的弹性回跳。对于缓慢的区域地壳运动研究而言, 由于全球参考框架的解包含区域的整体运动, 不利于区域地壳相对运动研究, 因此, 本研究依然基于区域参考框架的位移时间序列, 以便直接地反映区域内的相对运动。

除了上述的同震位移外, 本文着重以离芦山地震震中 33.8 km、同震水平位移比较大的 SCTQ 站的 GPS 连续观测结果为例加以分析。图 3 为区域参考框架下 SCTQ 站自开始观测直至芦山地震时的水平位移时间序列。2012 年 6—9 月中旬该站数据有中断。尽管该站有观测中断, 但参考其它站的长期变化, 可以看出震前 SCTQ 站的水平位移无明显变化。据此时间序列, 无法用对汶川或东日本大地震的同震位移分析方法, 说明该站的同震水平位移是震前水平位移过程的弹性回跳。图 2 中水平位移分量时间序列清楚表明, 在区

域参考框架中 SCTQ 站自开始观测以来一直仅有很小的水平位移, 表明芦山地震震中区域震前处于闭锁状态。由于区域参考框架核心站具有高度的稳定性, 且整个中国大陆东部就是十分稳定的区域, 这表明震前 SCTQ 站的闭锁状态是确实的。关于震前震中区处于闭锁状态, 早就是地震学研究的结论。SCTQ 站的变化是 GPS 连续观测地壳运动资料得到的大地震震中区域处于闭锁状态最直接的观测证据。尽管本研究未能给出近震中其它 GPS 连续观测站的水平位移时间序列, 但已有研究表明震前靠近震中的其它站的水平位移也处于闭锁状态(牛安福等, 2013a)。

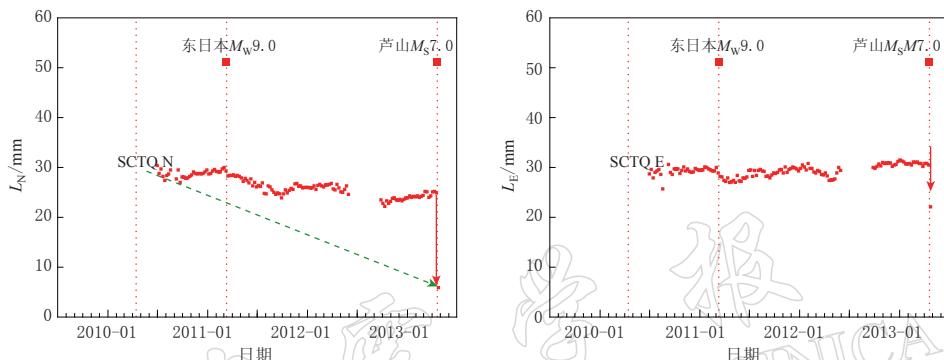


图 3 SCTQ 站区域参考框架解水平位移南北分量(左)和东西分量(右)的时间序列。图中包括芦山  $M_s 7.0$  地震的同震水平位移, 用红色箭头表示; 绿色虚线表示该站的正常构造运动趋势

Fig. 3 Time series of the N (left) and E (right) horizontal displacement components at the station SCTQ in the regional reference frame with coseismic horizontal displacement components shown by arrows in red. The green dashed line shows the normal trend of tectonic movement at the station. The dates of the Wenchuan and Lushan earthquakes are shown in the figure

由于芦山地震震级相对较小, 且区域参考框架核心站离震中足够远, 非常有利于在同一区域参考框架下研究地震前水平位移和同震水平位移及其时间序列。区域参考框架中芦山地震前四川地区网络二期 GPS 连续观测站至临震前累积的水平位移、同震水平位移及包括同震水平位移在内累积的水平位移如图 4 所示。图中网络二期的 GPS 连续观测站已包括在图 1 中。

图 4 清楚地显示, 芦山地震位于南北向与北西向构造运动带的交汇处, 但主要受芦山地震断层西侧南北向构造运动和北西向构造运动的影响。图 4a 显示, SCTQ 站震前处于闭锁状态, 而其南部和西北部的 GPS 站震前则保持显著的正常构造运动。图 4b 显示该站的同震水平位移十分显著, 达 20.8 mm, 而其它站的同震水平位移均较小, 其中部分站的同震水平位移见表 1。图 4c 显示, SCTQ 站同震水平位移恰好弥补了震前亏缺的正常构造运动量, 使该站恢复到与其南面 GPS 站(如 SCML, SCYX 等站)一致的正常构造运动水平, 南北分量最为一致。

图 4 显示的水平位移时空变化表明, SCTQ 站同震水平位移也是一种形式的弹性回跳, 即从闭锁状态瞬间回复到正常构造运动水平。图 3 中 SCTQ 站南北分量时间序列图上的虚线表示该站与 SCML、SCYX 等站一致的正常缓慢构造运动趋势。可见, 震前 SCTQ 站水平位移所反映的震中区闭锁是芦山地震前兆地壳运动的表现形式。从图 4 中可以看出地震断层西侧震前形变较为强烈, 位于地震断层西侧的该站震前和震时位移时空发展完全

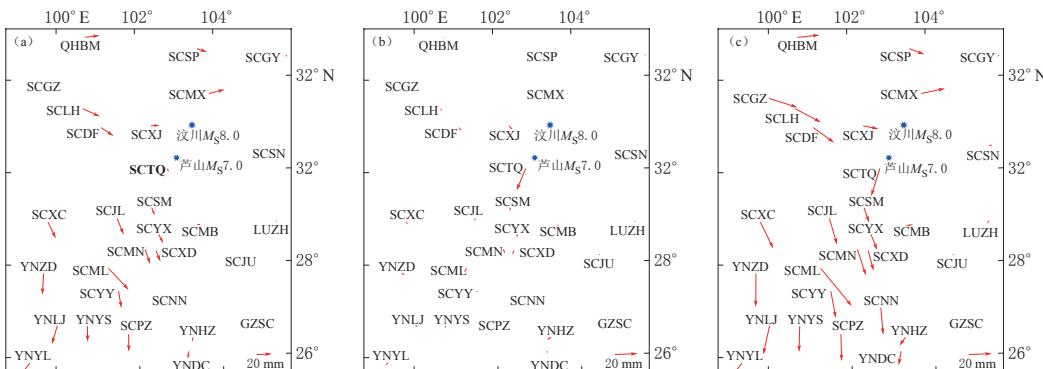


图 4 四川地区芦山  $M_S 7.0$  地震前 2010 年 7 月—2013 年 2 月 GPS 连续观测站累积的水平位移(a)、同震水平位移(b)及 2010 年 7 月—2013 年 4 月包括同震水平位移在内累积的水平位移(c)

Fig. 4 Evolution of horizontal displacements before 2013  $M_S 7.0$  Lushan earthquake in Sichuan

(a) Accumulated horizontal displacements at the GPS continuous observations stations from July 2010 to February 2013; (b) Coseismic horizontal displacements; (c) Accumulated horizontal displacements, including coseismic horizontal displacements, at the stations from July 2010 to April 2013.

The blue asterisks are the Wenchuan  $M_S 8.0$  and Lushan  $M_S 7.0$  earthquakes

符合里德的弹性回跳模式。尽管本文不能直接利用图 1 中网络二期外的 GPS 连续观测站的数据处理结果, 但利用图 1 中武艳强等(2013)的同震水平位移结果, 结合牛安福等(2013a, b)文中图 10 的位移速率(采用与本文相同的区域参考框架)结果, 可以说明其它站的同震位移也是弹性回跳。其中与 SCTQ 站同在地震断层西侧的站的弹性回跳规律一致, 同样说明震前这些站的水平位移闭锁是芦山地震前兆。尽管不能直接给出时间序列结果, 但由此间接结果表明, 同震水平位移大的 LS05、LS07 和 LS01 等站(表 1)的时间序列变化与 SCTQ 站相似。地震断层东侧的 GPS 站震前水平位移和同震水平位移变化比较复杂。图 4a 显示, 芦山地震震前断层东侧受西侧的挤压是明显的。据此推断, 同震水平位移理应向西回跳, 但却无法由已有的资料(牛安福等, 2013a)得以证明。需要指出的是, 根据同震位移, 离震中最近的 LS05 站的回跳远超出(即大于)观测期间正常的构造运动水平(对比图 1 与图 4c), 这与其它大地震(如东日本  $M_w 9.0$  大地震)近震中 GPS 站点的情况一致。LS02 站离芦山地震震中仅 48.9 km, 但震前不在闭锁区(牛安福等, 2013a), 应与其它不在闭锁区的站一样无明显同震水平位移。弹性位错模型反演结果与该观测结果一致(Jiang *et al*, 2014)。表 1 给出的结果不仅说明芦山地震同震水平位移比较复杂, 同时也说明震前水平位移也是比较复杂的。

## 4 讨论与结论

芦山  $M_S 7.0$  地震震中周围有密集的近场 GPS 连续观测站, 且分布于不同部位, 对于研究大地震前后的地壳运动、同震位移和震源机制, 特别是前兆地壳运动而言, 所得的 GPS 观测结果十分有利。本文利用网络二期多个 GPS 连续观测站观测资料, 并参考其它多个 GPS 连续观测站的同震水平位移结果, 得到了 2013 年 4 月 20 日芦山  $M_S 7.0$  地震区域参考框架下震前四川地区的水平位移和同震水平位移。综合区域参考框架水平位移时间系列和同震水平位移, 有助于对芦山地震地壳运动前兆的认识和解释。

对于芦山地震,由于区域框架和全球框架核心站均远离震中,两种框架下的同震水平位移解应该一致(实际上也是一致的),因此两种参考框架均可视为位错参考框架,全球参考框架的同震位移也可为区域参考框架的同震位移。除 LS05 站外, GPS 观测获得的芦山地震同震垂直位移不如水平位移显著,且垂直位移变化更为复杂。

芦山地震的 GPS 连续观测结果表明,区域参考框架中同震水平位移在时空上也是震前水平位移的弹性回跳,在震中附近其表现形式是水平位移从闭锁迅速回复到正常构造运动水平,因而震前这些站的水平位移闭锁是芦山地震的前兆。

根据芦山地震同震水平位移的空间分布,可为 GPS 监测网的布设提供一定的依据。由于 GPS 观测精度要求相当高,目前布设 GPS 监测网最主要的问题是站点的密度。站点密度与不同震级大地震所能观测到的前兆位移量级有关,也即与同震位移量级有关,同时也与构造有关。如上所述,对于芦山地震同震水平位移,当震中距小于 50 km 时,位移量大于 10 mm;当震中距大于 80 km 时,位移量已小于 5 mm。弹性位错模型反演结果表明,同震位移受构造制约。根据以往 GPS 观测结果,在利用位移时间序列作前兆分析时,若考虑位移时间序列中的其它不确定因素,则水平位移时间序列中累积(相对)位移 5—10 mm 时,比较有可能判别异常。此外,须考虑异常分析的可靠性,必须有较多的站(如至少有 3 个站)才能观测到异常。基于这些考虑,对于监测 M7.0 地震, GPS 连续观测站的间距最大不应超过 50 km,间距在 30 km 左右时比较有利于获取多个站点的异常。站点越密集越有助于分辨震级相对小一点的地震的前兆。

尽管 M7.0 地震的地壳形变前兆范围相对较小,可在此相对较小范围内布设较为密集的 GPS 连续观测站,若采用稳定的区域参考框架,仍需要较大范围的 GPS 连续观测和数据处理。在 GPS 连续观测数据分析中不仅要考虑各观测站的时间异常,同时必须分析观测结果的空间异常,特别是在运动背景下的位移闭锁区。

M7.0 左右地震的发生频率相对较高,到目前为止芦山地震的 GPS 观测资料是最为丰富的,积极开展研究意义重大。由于无法直接采用其它 GPS 连续观测站(如同震水平位移大的 LS05, LS07 和 LS01 等站)的资料,本文无法提供更为翔实的研究结果,如无法得到多站的位移时间序列以及作应变分析等。

迄今为止的地震预测探索表明,地壳形变依然是地震预报中最值得重视的主要学科, GPS 是最具优势的地壳形变观测技术,是至今最适合地震预测的观测技术之一(顾国华, 2012; Gu, Wang, 2013)。本文的研究再次说明:GPS 观测获得大地震的同震位移场有利于大地震发生机理的研究,有利于大地震的地壳形变前兆研究;利用芦山地震同震位移可进行弹性位错模型反演,并能获得很好的结果。因而再次表明,利用弹性位错模型有助于研究地震的形变前兆。

震中近场 GPS 观测对于探索其它类型的形变前兆,特别是短临前兆必不可少(顾国华等, 2011)。芦山 M<sub>s</sub>7.0 地震表明,中国大陆大范围的 GPS 观测可覆盖包括内陆地震震中在内的广大区域,有利于监测大地震的时空孕育过程。

本项目采用中国地震局第一监测中心提供的网络 GPS 连续观测站数据处理结果。本文使用 GMT 软件绘图。

## 参 考 文 献

- 顾国华. 1990. 形变监测网的基准与形变模型反演[J]. 地壳形变与地震, **10**(1): 21–29.
- Gu G H. 1990. Datum definition in geodynamic network and inversion of deformation models[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **10**(1): 21–29 (in Chinese).
- 顾国华, 申旭辉, 王敏, 郑贵明, 方颖, 李鹏. 2001. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征[J]. 地震学报, **23**(4): 352–369.
- Gu G H, Shen X H, Wang M, Zhen G M, Fang Y, Li P. 2001. General characteristics of the recent horizontal crustal movement in Chinese mainland [J]. *Acta Seismologica Sinica*, **14**(4): 384–393.
- 顾国华, 符养, 王武星. 2004. 1999—2001年中国大陆现今地壳水平运动[J]. 地震学报, **26**(增刊): 50–57.
- Gu G H, Fu Y, Wang W X. 2004. Horizontal crustal movement in Chinese mainland from 1999 to 2001 [J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(Suppl.): 50–57.
- 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.
- Gu G H, Wang W X. 2009. Coseismic displacements of the 2008 Wenchuan  $M_8.0$  earthquake observed by GPS[J]. *Earthquake*, **29**(1): 92–99 (in Chinese).
- 顾国华, 王武星, 孟国杰, 徐岳仁. 2009. GPS 测得的汶川大地震前后的地壳运动[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, **34**(11): 1336–1339.
- Gu G H, Wang W X, Meng G J, Xu Y R. 2009. Crustal movements before and after the Wenchuan earthquake as detected by GPS observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **34**(11): 1336–1339 (in Chinese).
- 顾国华, 王武星. 2011. 区域网 GPS 观测得到的汶川大地震前后的地壳垂直运动[J]. 地震, **31**(3): 1–8.
- Gu G H, Wang W X. 2011. Vertical crustal movement before and after the great Wenchuan earthquake obtained from GPS observations in the regional network[J]. *Earthquake*, **31**(3): 1–8 (in Chinese).
- 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[J]. 地震学报, **33**(3): 319–326.
- Gu G H, Meng G J, Fang Y. 2011. Crustal movement in the earthquake area before and after 2008 Wenchuan earthquake as detected by precise single epoch positioning of GPS observations [J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(3): 319–326 (in Chinese).
- 顾国华. 2012. GPS: 地震预测利器[G]//科学与中国(第4卷). 北京: 北京大学出版社: 163–184.
- Gu G H. 2012. GPS: Useful technique for earthquake prediction[G]// *Science in China* (Vol. 4). Beijing: Peking University Press: 163–184 (in Chinese).
- 黄立人, 顾国华. 1982. 静力位错理论[M]. 北京: 地震出版社: 111–177.
- Huan L R, Gu G H. 1982. *Theory of Static Dislocation*[M]. Beijing: Seismological Press: 111–177 (in Chinese).
- 金明培, 汪荣江, 屠泓为. 2014. 芦山 7 级地震的同震位移估计和震源滑动模型反演尝试[J]. 地球物理学报, **57**(1): 129–137.
- Jin M P, Wang R J, Tu H W. 2014. Slip model and co-seismic displacement field derived from near-source strong motion records of the Lushan  $M_s7.0$  earthquake on 20 April 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(1): 129–137. doi: 10.6038/cjg20140112 (in Chinese).
- 牛安福, 顾国华, 曹景鹏, 张凌空, 同伟, 赵静, 吉平. 2013a. 芦山  $M_s7.0$  地震前远、近场形变时空演化特征研究[J]. 地震学报, **35**(5): 670–680.
- Niu A F, Gu G H, Cao J P, Zhang L K, Yan W, Zhao J, Ji P. 2013a. On the preseismic deformation changes prior to the Lushan  $M_s7.0$  earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(5): 670–680 (in Chinese).
- 牛安福, 张凌空, 李媛, 同伟, 赵静, 吉平. 2013b. 芦山  $M_s7.0$  级地震前的形变空区特征研究[J]. 震灾防御技术, **8**(4): 341–350.
- Niu A F, Zhang L K, Li Y, Yan W, Zhao J, Ji P. 2013b. On the weak deformation area prior to the Lushan  $M_s7.0$  earthquake[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **8**(4): 341–350 (in Chinese).

- 武艳强, 江在森, 王敏, 车时, 廖华, 李强, 李鹏, 杨永林, 向和平, 邵志刚, 王武星, 魏文薪, 刘晓霞. 2013. GPS 监测的芦山 7.0 级地震前应变积累及同震位移场初步结果[J]. 科学通报, 58(20): 1910–1916.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, Che S, Liao H, Li Q, Li P, Yang Y L, Xiang H P, Shao Z G, Wang W X, Wei W X, Liu X X. 2013. Preliminary results pertaining to coseismic displacement and preseismic strain accumulation of the Lushan  $M_{\text{S}}7.0$  earthquake, as reflected by the GPS surveying[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(28/29): 3460–3466. doi: 10.1007/s11434-013-5998-5.
- 中国地震局地震预测研究所. 2013. GPS 连续站测定的芦山“4·20” $M_{\text{S}}7.0$  地震同震位移场数据公开[EB/OL]. [2013-11-27]. [http://www.seis.ac.cn/manage/html/8a9080a125b29b1b0125b2a3093a0002/kydt/index\\_3.html](http://www.seis.ac.cn/manage/html/8a9080a125b29b1b0125b2a3093a0002/kydt/index_3.html).
- Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration. 2013. Open release of the data of the coseismic displacement field of the  $M_{\text{S}}7.0$  Lushan earthquake on April 20, 2013, as detected at stations of continuous GPS observations[EB/OL]. [2013-11-27]. [http://www.seis.ac.cn/manage/html/8a9080a125b29b1b0125b2a3093a0002/kydt/index\\_3.html](http://www.seis.ac.cn/manage/html/8a9080a125b29b1b0125b2a3093a0002/kydt/index_3.html) (in Chinese).
- Blewitt G. 2008. Overview of the SNARF Working Group, its activities, and accomplishments[C]//8th SNARF Workshop AGU Fall Meeting. San Francisco, December 11, 2008.
- Du Y J, Wang Z M, Yang S J, An J C, Liu Q, Che G W. 2013. Co-seismic deformation derived from GPS observations during April 20th, 2013 Lushan earthquake, Sichuan, China[J]. *Earthquake Science*, 26(3/4): 153–160.
- Gu G H, Wang W, Xu Y R, Li W J. 2009. Horizontal crustal movement before the great Wenchuan earthquake obtained from GPS observations in the regional network[J]. *Earthquake Science*, 22(5): 471–478.
- Gu G H, Meng G J, Wang W X. 2011. Anomalous crustal movements before great Wenchuan earthquake observed by GPS[J]. *Geod Geodyn*, 2(2): 13–22.
- Gu G H, Wang W X. 2011. Far-field crustal movements before and after the 2011  $M_{\text{S}}9.0$  Japan earthquake from GPS observations[J]. *Geod Geodyn*, 2(3): 1–7.
- Gu G H, Wang W X. 2013. Advantages of GNSS in monitoring crustal deformation for detection of precursors to strong earthquakes[J]. *Positioning*, 4(1): 11–19. doi: 10.4236/pos.2013.41003.
- Jiang Z S, Min W, Wang Y Z, Wu Y Q, Che S, Shen Z K, Bürgmann R, Sun J B, Yang Y L, Liao H, Li Q. 2014. GPS constrained coseismic source and slip distribution of the 2013  $M_{\text{W}}6.6$  Lushan, China, earthquake and its tectonic implications[J]. *Geophys Res Lett*, 41(2): 407–413. doi: 10.1002/2013GL058812.
- Tan H B, Shen C Y, Wei J, Zhao B, Wang J, Xuan S B. 2013. Simulation of coseismic effects of the  $M_{\text{S}}7.0$  Lushan earthquake[J]. *Geod Geodyn*, 4(3): 12–18.