

刘琦, 张晶, 池顺良, 闫伟. 2014. 2013年芦山 $M_S 7.0$ 地震前后姑咱台四分量钻孔应变时频特征分析. 地震学报, 36(5): 770-779. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.002.

Liu Q, Zhang J, Chi S L, Yan W. 2014. Time-frequency characteristics of four-component borehole strain at Guzan station before and after 2013 Lushan $M_S 7.0$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 36(5): 770-779. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.002.

2013年芦山 $M_S 7.0$ 地震前后姑咱台 四分量钻孔应变时频特征分析^{*}

刘 琦^{1,2),*} 张 晶^{1,2)} 池顺良³⁾ 闫 伟⁴⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测重点实验室

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

3) 中国北京 100049 中国科学院计算地球动力学重点实验室

4) 中国北京 100045 中国地震台网中心

摘要 2013年4月20日芦山 $M_S 7.0$ 地震前, 四川省姑咱台四分量钻孔应变仪再度记录到类似于2008年汶川 $M_S 8.0$ 地震前的高频应变畸变信号。为了对该畸变信号各频率成分的时频演化特征进行细致分析, 讨论应变异常的可信度及其与芦山地震的相关性, 本文利用S变换方法对应变数据进行了处理。结果表明, 研究时段内时频域中共出现两簇高能量异常, 一簇开始于2012年10月并持续了约4个月, 另一簇则开始于芦山 $M_S 7.0$ 地震前数天。同时段远震的影响及施工干扰并不能构成该异常的主体, 因此该异常可信度较高。异常中包含了周期由数分钟至数小时的信号成分, 其中较短周期的信号成分震前出现较晚, 震后衰减较快。震后异常信号的整体能量开始逐步衰减, 异常信号成分减少, 至2013年8月末应变观测记录已基本恢复至正常状态, 整个应变异常显示的时频演化过程与芦山 $M_S 7.0$ 地震具有较高相关性。

关键词 2013年芦山 $M_S 7.0$ 地震 钻孔应变 S变换 地震前兆 慢滑移

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.002 中图分类号: P315.72⁺7 文献标志码: A

Time-frequency characteristics of four-component borehole strain at Guzan station before and after 2013 Lushan $M_S 7.0$ earthquake

Liu Qi^{1,2),*} Zhang Jing^{1,2)} Chi Shunliang³⁾ Yan Wei⁴⁾

1) China Earthquake Administration Key Laboratory of Earthquake Prediction, Beijing 100036, China

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

3) Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: The four-component borehole strainmeter at Guzan station in Sichuan Province recorded abnormal strain signals with high frequency before the 20

* 基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2012IES0202)和中国地震局地震行业科研专项(201108009)共同资助。

收稿日期 2013-09-05 收到初稿, 2013-12-17 决定采用修改稿。

* 通讯作者 e-mail: liu-qi1985@hotmail.com

April 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake, which were similar to the signals before the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake. The strain data were processed in the way of S transform in order to analyze the evolutionary process of each component of abnormal signals in time-frequency domain, and study the validity of the anomalies and its relation with Lushan earthquake. The result shows that two clusters of anomalies with high energy appeared during the research period, one in October of 2012 lasting for four months, and the other several days before the earthquake. The validity of the anomalies is high, considering that the disturbance of teleseismograms and engineering construction during this period are not the main cause for the anomalies. The anomalies are composed of all kinds of signals with various periods from several minutes to hours, of which the short-period signals appeared later and decayed sooner. The whole energy of the anomalies after the earthquake began to decay gradually, and the signal components began to reduce, too. The strain observation had returned to normal by the end of August 2013. The whole evolutionary process of strain anomalies in time-frequency domain has very close relations to the Lushan $M_s 7.0$ earthquake.

Key words: 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake; borehole strain; S transformation; earthquake precursor; slow slip

引言

2013 年 4 月 20 日四川芦山发生了 $M_s 7.0$ 地震, 距此次地震震中约 80 km 的姑咱台四分量钻孔应变仪记录在震前数月出现一些畸变异常(图 1), 并在震前数天出现巨幅应变变

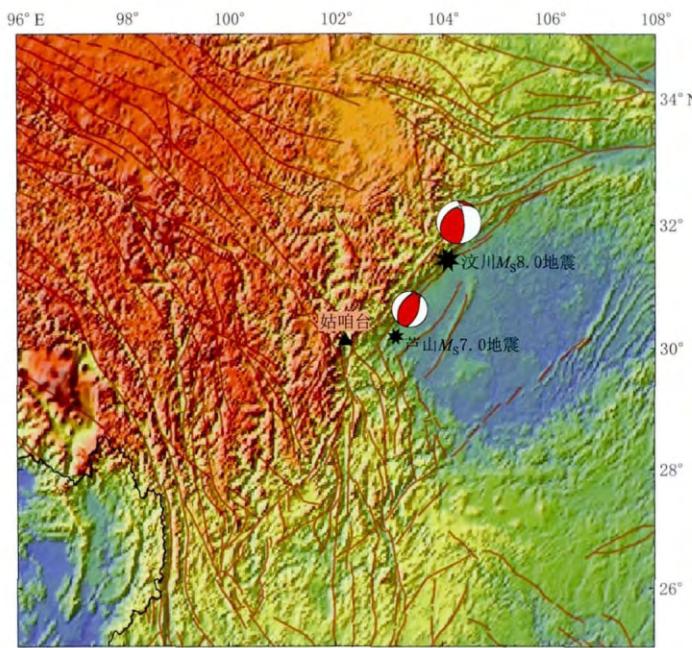


图 1 姑咱台位置以及 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 和 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震震中与震源机制解分布图

Fig. 1 The location of Guzan station and the epicenters and focal mechanism solutions of 2008 Wenchuan $M_s 8.0$ and 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquakes

化, 其变化幅度是仪器观测以来短周期应变变化之最(池顺良等, 2013). 但是由于该异常出现时段内恰好有几次远震同时发生, 且台站周边还存在施工干扰, 因此一些学者对于该异常的可信度持怀疑态度.

2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前, 姑咱台四分量钻孔应变仪同样记录到了很多畸变信号, 研究人员经过处理分析, 认为这些畸变信号与汶川 $M_s 8.0$ 地震相关, 属于地震前兆(池顺良等, 2009; 邱泽华等, 2010; 刘琦, 张晶, 2011). 芦山 $M_s 7.0$ 地震同样发生在龙门山断裂带, 且震中距更近. 因此, 对于芦山 $M_s 7.0$ 地震前出现的畸变信号是否为地震前兆, 远震及施工的干扰影响到底有多大, 这些干扰是否会是畸变信号主要的产生原因等一系列问题的研究讨论是很有必要的.

1 姑咱台四分量钻孔应变仪概况

姑咱台 YRY 型四分量钻孔应变仪于 2006 年 10 月 28 日安装, 至今已积累了近 7 年的观测数据, 观测期间(1+3)路面应变与(2+4)路面应变符合自检关系, 仪器工作状态良好

(图 2).

该仪器在安装初期能够记录到清晰的固体潮背景, 在 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前 1 年左右开始频繁出现一些应变畸变信号, 并在震后逐渐衰减消失. 在记录基本恢复正常的情况下, 2012 年 10 月前后, 应变记录又开始出现畸变信号, 并以张性为主, 持续时间约 4 个月. 2013 年 4 月 16—19 日, 应变记录出现大幅畸变信号, 且形态复杂, 继而 4 月 20 日发生芦山 $M_s 7.0$ 地震. 从自检关系上判断, 上

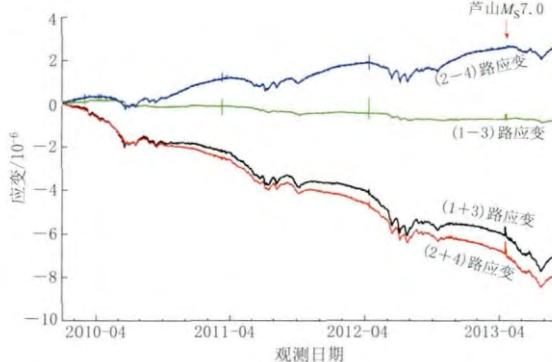


图 2 姑咱台应变记录曲线

Fig. 2 Strain recordings at Guzan station

述应变畸变异常信号满足自检, 反映的是真实受力情况下的应变变化. 但是由于 4 月 16, 17 和 19 日接连发生 3 次 $M_s \geq 6.5$ 远震, 且震前数天台站周边存在施工放炮影响, 因此这些应变异常究竟反映的是构造活动还是干扰因素影响, 一时尚无法确定.

为此, 本文从信号特征入手, 采用时频分析的方法来研究对比不同频率信号成分随时间的演化过程, 期望能够使上述疑问得到解答.

2 利用 S 变换方法分析芦山 $M_s 7.0$ 地震前后应变变化

2.1 S 变换原理

S 变换方法属于时频分析类方法的一种, 可以将一维的观测数据时间序列转换成二维的时频域信号, 从而增加获取的信息量, 为研究数据中各类频率信号的频谱动态演化提供了便利. 这种方法是在短时窗傅里叶变换和小波变换的基础上发展起来的, 采用的是尺度可变的局部高斯窗, 使其时频分辨率具有频率相关性, 既具有小波变换的多尺度特性, 又具有傅里叶变换的无损可逆性(Stockwell *et al*, 1996). 这里只简要给出相关的基本公式.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right] \exp(-i2\pi ft) dt, \quad (1)$$

式中, $h(t)$ 为原始的一维观测数据时间序列, f 为频率, τ 为高斯窗在时间轴上的位置, $S(\tau, f)$ 为相应的 S 正变换结果, t 为观测时间.

2.2 大尺度时间范围整体分析

作者曾针对 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震, 对姑咱台四分量钻孔应变数据出现的畸变信号采用 S 变换方法进行过处理分析(刘琦, 张晶, 2011), 数据处理的时间范围为 2007 年 1 月 1 日—2009 年 12 月 31 日. 本次针对 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震数据处理选取的时间范围为 2010 年 1 月 1 日—2013 年 8 月 24 日, 这样即可较完整地研究芦山 $M_s 7.0$ 地震前后的应变变化, 又能够与汶川 $M_s 8.0$ 地震的分析结果有一定的衔接性和对比性. 对原始观测数据同样先进行截止周期为 4 h 的高通滤波, 将数据分离成周期小于 4 h 的高通项和大于 4 h 的残余低频项, 之后再针对高通项数据进行大尺度时间范围的 S 变换处理分析. 本次对处理过程进行了一定程度的改进, 提高了结果的时频域分辨率. 通过本文的处理分析, 发现姑咱台钻孔应变 4 路分量对两次地震的计算结果基本类似, 反映的是同样的演化特征, 因此文中主要以第 4 路分量的结果为代表进行分析.

图 3a 给出了姑咱台钻孔应变第 4 路分量的高通项数据在大尺度时间范围(2010 年 1 月 1 日—2013 年 8 月 24 日)的 S 变换结果. 2010 年 1 月—2012 年 9 月的大部分时间内, 高通项数据内包含的信号能量整体偏弱, 反映出汶川 $M_s 8.0$ 地震后一年半的时间内, 与之相关的一些畸变信号基本衰减殆尽. 但又可以看出, 在处理结果的后半段时间即从 2012 年 10 月开始, 时频域中出现了两簇明显的高能量团(图 3a 中用红色方框圈出, 并放大显示于图 3b 和图 3c). 其中, 第一簇高能量团大致起始于 2012 年 10 月, 持续了约 4 个月; 第二簇高能量团大致起始于芦山 $M_s 7.0$ 地震发震前数天, 并在震后逐步衰减. 本次反映的应变异常特征与汶川 $M_s 8.0$ 地震前后的应变时频演化特征存在一些区别: ① 本次表现为两簇

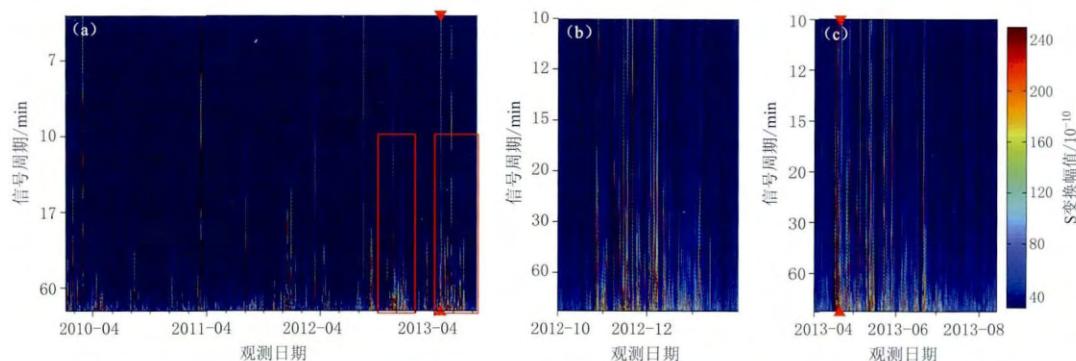


图 3 姑咱台第 4 路应变分量高通项数据的 S 变换结果

(a) 2010 年 1 月 1 日—2013 年 8 月 24 日; (b) 2012 年 10 月 1 日—2013 年 1 月 31 日;

(c) 2013 年 4 月 1 日—2013 年 8 月 24 日. 红色三角表示芦山 $M_s 7.0$ 地震的发震时刻

Fig. 3 S transformation result of the fourth strainmeter component's high-pass data recorded at Guzan station

(a) Result from 1 January 2010 to 24 August 2013; (b) Result from 1 October 2012 to 31 January 2013; (c) Result from 1 April 2013 to 24 August 2013. Red triangle denotes the origin time of Lushan $M_s 7.0$ earthquake

高能量团, 其高频信号增强和减弱的速率都较快, 而汶川 $M_s 8.0$ 地震前后的高频信号在时频域内则更为连续, 表现为震前 1 年高频信号逐步增强, 之后经过大致 1 年半的时间逐步衰减殆尽的一个整体连续过程; ② 本次分析时段内, 整个时频图中信号能量偏弱, 有效可辨识信号稀少, 仅在两簇高能量团出现后才较为明显, 而汶川 $M_s 8.0$ 地震前后, 强能量信号占据了时频图内较大部分, 即信号持续时间和信号的频谱丰富程度更为显著。

图 4 给出了从相应的四分量高通项数据 S 变换结果中抽取每一时刻所有频率信号里具有的最大幅值后得到的结果。可见: 2010 年 1 月—2012 年 9 月的大部分时间内, S 变换最大幅值基本维持在一个较低的水平; 但从 2012 年 10 月开始, S 变换最大幅值突增, 之后经过数月时间逐步衰减; 芦山 $M_s 7.0$ 地震发生前数天, S 变换最大幅值再次突增, 震后再次开始衰减, 截止到处理时段末, 基本已衰减到 2010 年 1 月—2012 年 9 月的水平。这种演化过程同样与汶川 $M_s 8.0$ 地震前后 S 变换最大幅值反映的能量逐步增强和减弱的连续演化过程不同。

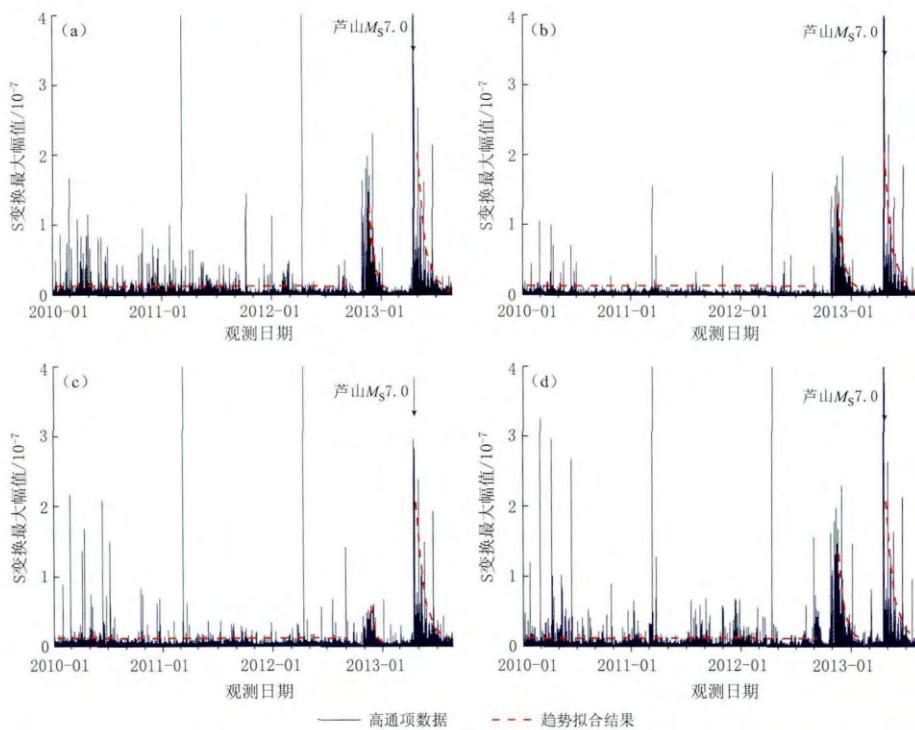


图 4 姑咱台四分量应变高通项数据的 S 变换最大幅值

(a) 第 1 路分量结果; (b) 第 2 路分量结果; (c) 第 3 路分量结果; (d) 第 4 路分量结果

Fig. 4 Maximum magnitude results of S transformation of the strainmeter's high-pass data recorded at Guzan station

(a) Result of the first component; (b) Result of the second component;

(c) Result of the third component; (d) Result of the fourth component

2.3 小尺度时间对比分析

大尺度时间范围的整体分析给出了关于芦山 $M_s 7.0$ 地震前后应变变化的一个宏观认识。为了进行更细致的分析, 我们尝试采用小尺度时间高分辨率处理的方法同时对高通项数据和残余低频项数据进行处理, 对不同时段进行对比研究, 以发现更多有益信息。

结合大尺度时间范围分析的结果, 我们决定选取以下几个小尺度时段进行对比分析: 2010年4月10—17日(图5), 2011年3月8—15日(图6), 2012年11月14—21日(图7), 2013年4月15—22日(图8), 2013年4月21—28日(图9), 2013年5月8—15日(图10), 2013年8月13—20日(图11)。

在图5选取的时段中, 其间发生了玉树 $M_s 7.1$ 地震, 震中距约630 km。可以看出, 该时段主要能量集中在周期为720 min频段(半日波周期), 其次为周期1440 min频段(日波周期)。玉树 $M_s 7.1$ 地震的同震效应只影响了周期小于10 min的频段, 且能量较弱。总体上, 这一时间段应变观测以正常的固体潮汐形态为主, 畸变信号较弱, 与大尺度时间范围的分析结果吻合。

在图6选取的时段中, 其间发生了日本 $M_w 9.0$ 地震, 震中距约3802 km。可以看出, 该时段主要能量同样集中在半日波周期, 其次为日波周期。与玉树 $M_s 7.1$ 地震的同震效应不同, 日本 $M_w 9.0$ 地震的同震效应影响了周期小于60 min的整个频段, 但是其同震能量最强的信号仍然集中于周期小于10 min的频段。两次地震的对比为我们识别其它地震的影响提供了参考。总体上, 这一时间段应变记录也以正常的固体潮汐形态为主。

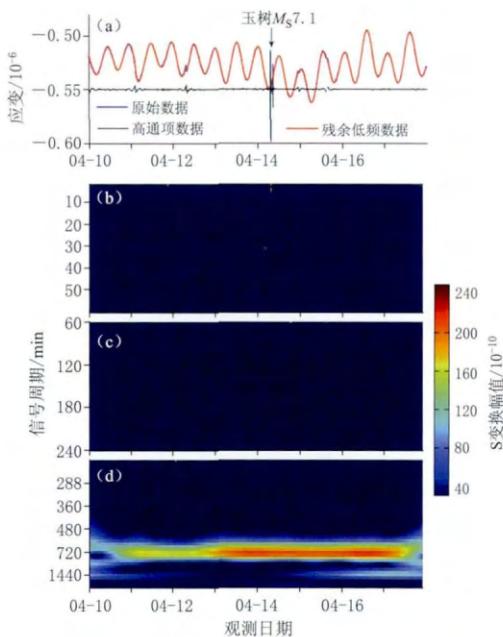


图5 2010年4月10—17日应变
数据的S变换结果

Fig. 5 S transformation result of strain data
from 10 to 17 April 2010

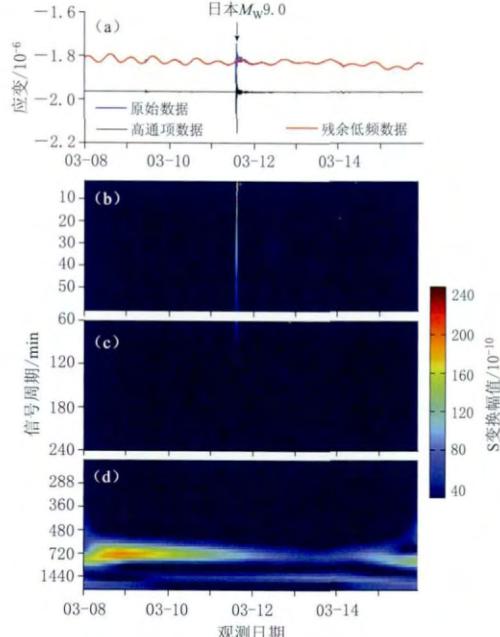


图6 2011年3月8—15日应变
数据的S变换结果

Fig. 6 S transformation result of strain data
from 8 to 15 March 2011

图7选取的时段处于前面分析时提到的第一簇高能量团发生的时段内, 大约在芦山 $M_s 7.0$ 地震前5个月。与图5, 6对比可见, 这一时间段在正常的固体潮汐半日波、日波背景上叠加了更加高频的信号。该信号在周期10—720 min频段内出现, 在周期小于10 min的频段内未见较强能量, 因此这一时间段出现的高频异常应该与地震同震效应无关, 数十分钟至数小时周期的畸变信号属于比较可靠的异常变化。

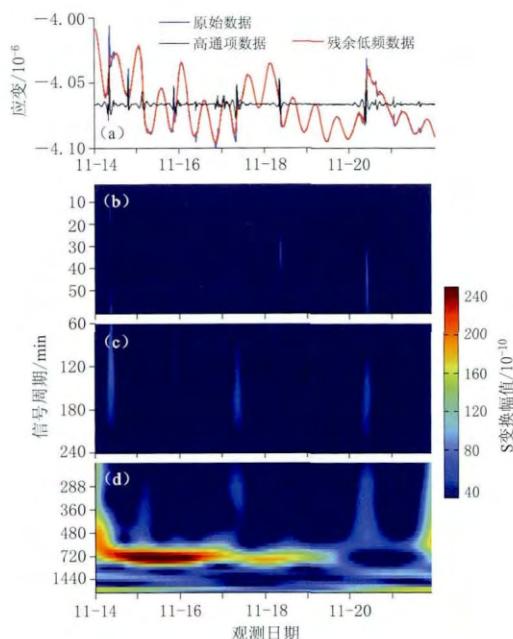


图 7 2012 年 11 月 14—21 日应变数据的 S 变换结果

Fig. 7 S transformation result of strain data from 14 to 21 November 2012

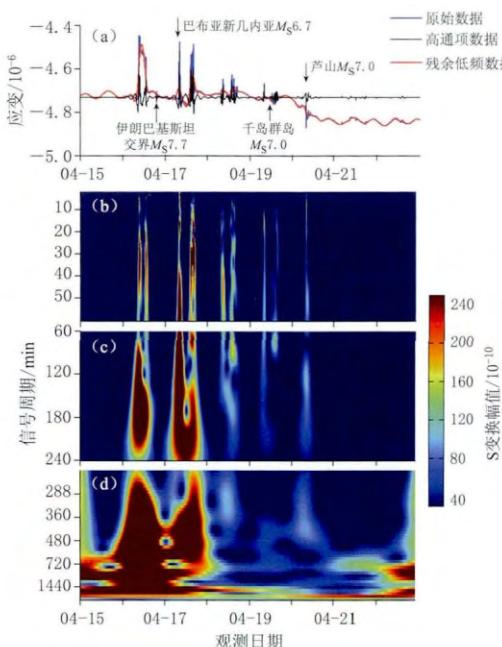


图 8 2013 年 4 月 15—22 日应变数据的 S 变换结果

Fig. 8 S transformation result of strain data from 15 to 22 April 2013

图 8 选取的时段包含了发生巨幅异常变化的芦山 $M_s 7.0$ 地震震前数天及同震时段, 处于前面分析时提到的第二簇高能量团发生的时段内. 这一时间段除了 4 月 20 日发生的芦山 $M_s 7.0$ 地震外, 还发生了 4 月 16 日 18 时 44 分 13 秒伊朗与巴基斯坦交界地区 $M_s 7.7$ 地震(震中距约 3 887 km, 震源深度 75 km), 4 月 17 日 6 时 55 分 25 秒巴布亚新几内亚 $M_s 6.7$ 地震(震中距约 5 655 km), 以及 4 月 19 日 11 时 5 分 53 秒千岛群岛 $M_s 7.0$ 地震(震中距约 4 543 km, 震源深度 100 km)(中国地震台网中心, 2013). 此外, 在这一时段内, 横穿姑咱台站后山距台站约 50 m 处正在进行修路施工, 存在断续的施工放炮影响. 远震与施工的影响使人们对于这一时段异常的可信度产生了质疑. 必须承认, 远震与施工是客观存在的, 但它们对这一时段的异常贡献究竟有多大则需要分析讨论. 由于这几次远震距离台站都大于数千千米, 震级相对较低, 且两次 $M \geq 7.0$ 地震的震源深度均较深, 因此其最大影响可类似图 5 中玉树 $M_s 7.1$ 地震的影响, 即最有可能的影响周期在小于 10 min 的频段. 从图 8 中可见, 4 月 16 和 19 日两次远震发生的时段内, 周期小于 10 min 的频段基本没有信号能量出现, 表明这两次地震的同震效应对本次异常现象基本没有贡献. 4 月 17 日远震发生的时段内虽然存在周期小于 10 min 的信号能量, 但由于该远震是巴布亚新几内亚发生的 $M_s 6.7$ 地震, 其震级在 3 次远震中最小, 震中距在 3 次远震中最大, 因此推断这次地震应该对本时段的异常现象贡献不大, 4 月 17 日出现的周期小于 10 min 的信号应该是其它因素所致. 4 月 18—20 日台站附近存在施工放炮干扰, 但由图 8 可见, 除了 20 日芦山 $M_s 7.0$ 地震同震影响外, 18 和 19 日在周期小于 10 min 的频段并没有显著信号能量, 而没有进行施工的 16 和 17 日在相应频段却存在几次比较明显的信号能量, 因此通过类比及排

除法认为, 台站周边的施工放炮没有对周期小于 10 min 信号产生干扰。综上认为, 3 次远震及施工放炮对于本时段出现的异常现象均没有显著贡献, 本时段内出现的周期小于 10 min 的异常属于可靠异常。本时段内其它周期频段的异常将在后面分析。

图 9 选取时段内, 4 月 21—23 日修路施工暂停, 24 日施工 1 天, 25—27 日未施工。可见, 4 月 24 日施工时段在各个频段并没有显著能量信号出现, 反而是 27 日未施工时段在周期 240—480 min 的频段内出现了高能量异常信号。因此与图 7, 8 对比认为, 4 月 16—20 日出现的周期从数分钟到数小时的高能量信号均为可靠异常。施工放炮能够影响的频段虽然未能直接判定, 但是对于芦山 $M_S 7.0$ 地震前后姑咱台出现的应变异常而言, 施工放炮的贡献并不显著, 施工放炮和远震影响并不能构成本次应变异常的主体, 因此该时段内出现

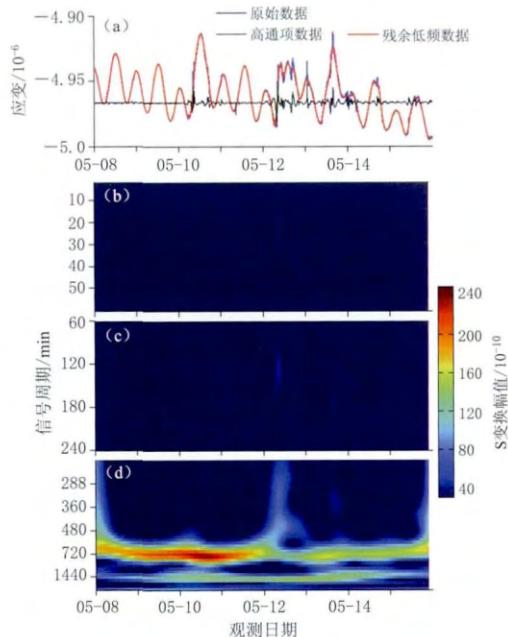


图 10 2013 年 5 月 8—15 日应变数据的 S 变换结果

Fig. 10 S transformation result of strain data from 8 to 15 May 2013

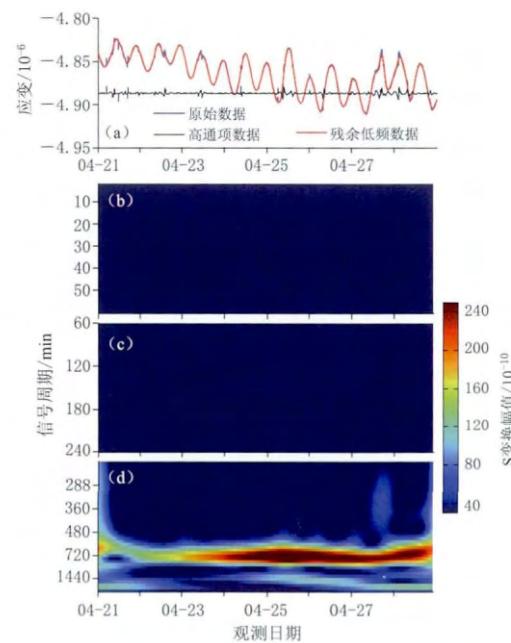


图 9 2013 年 4 月 21—28 日应变数据的 S 变换结果

Fig. 9 S transformation result of strain data from 21 to 28 April 2013

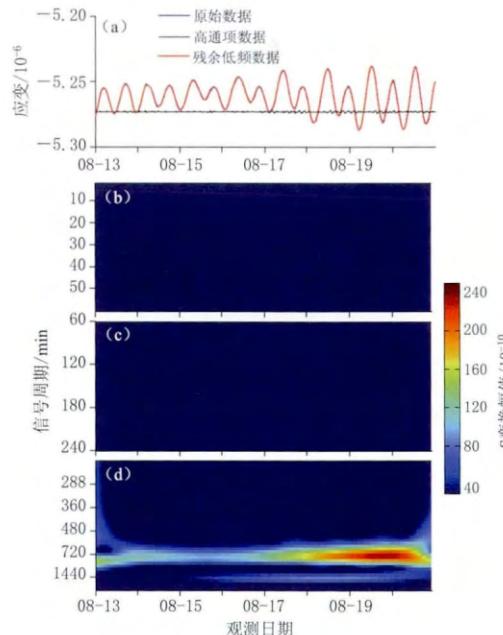


图 11 2013 年 8 月 13—20 日应变数据的 S 变换结果

Fig. 11 S transformation result of strain data from 13 to 20 August 2013

的高能量异常的可信度应该得以肯定。

图 10 中给出的处理结果与图 7 即 2012 年 11 月 14 日—21 日时段的处理结果较为相似, 应变异常信号在周期 10—720 min 频段内出现, 但是异常信号数量和幅度均较小。与图 8 相比, 图 10 更加体现了芦山 $M_s 7.0$ 地震之后, 应变异常信号开始逐步衰减的过程。

从图 11 选取的时段中可以明显看出, 该时段异常信号基本衰减殆尽, 应变记录又恢复到以正常固体潮汐信号为主的形态。这种异常信号的衰减态势使我们更有理由相信, 所观测到的应变异常变化是与地震相关的, 而远震及施工等一些外在干扰并不是引起应变异常显著变化的主要原因。

3 讨论与结论

本文利用 S 变换方法对芦山 $M_s 7.0$ 地震前后姑咱台四分量钻孔应变仪记录到的应变异常变化进行了分析, 初步认为分析时段内时频域中出现的两簇高能量团属于可靠异常, 远震及施工干扰并不能构成本次异常的主体。该异常中包含了周期从数分钟到数小时的信号成分, 频带较宽, 其中较短周期的信号成分在震前出现较晚, 震后衰减较快。震后应变异常信号能量逐步衰减, 异常信号成分减少, 至 2013 年 8 月末该畸变信号基本消失, 记录又恢复到正常的固体潮形态。这些异常现象可能与芦山 $M_s 7.0$ 地震有关, 有可能反映了震前、临震及震后应变的整个变化过程。

地震的大小、类型、震中距、孕震区构造, 以及观测仪器周边的构造环境等因素可能共同决定了是否能观测到类似的高频异常及其特征。本文的震例分析表明, 这类异常变化还是以中短期为主, 震前和震后一般可持续数月。

对于这种异常信号的来源, 目前尚无法确定。认为一种可能是这类信号直接来自孕震区或其附近地区, 包括孕震区前兆性破裂、预滑动等产生的异常, 或者是来自孕震区下方脆延转换带附近发生的慢滑移等现象 (Scholz, 1998), 目前慢滑移现象在板块边界俯冲带地区比较多见 (Rogers, Dragert, 2003; Shelly *et al.*, 2006), 而中国大陆地区记录到慢滑移现象的例子较少 (杨又陵等, 2003; 余怀忠, 2006), 另一种可能则是这类异常信号是来自孕震过程中区域应变场的变化引起的台站周边的次生异常, 包括局部范围的岩层破裂及次生裂隙等。对于这种异常信号来源的确定有赖于较精确的定位, 目前以单台低采样率的钻孔应变仪的处理结果是无法对本文中提到的这些异常进行较精确定位的。今后只能通过加密仪器布设、提高仪器性能, 并积累更多震例来验证上述异常信号来源假设的真实性。

参 考 文 献

- 池顺良, 池毅, 邓涛, 廖成旺, 唐小林, 池亮. 2009. 从 5·12 汶川地震前后分量应变仪观测到的应变异常看建设密集应变观测网络的必要性 [J]. 国际地震动态, (1): 1—13.
- Chi S L, Chi Y, Deng T, Liao C W, Tang X L, Chi L. 2009. The necessity of building national strain-observation network from the strain abnormality before Wenchuan earthquake [J]. *Recent Developments in World Seismology*, (1): 1—13 (in Chinese).
- 池顺良, 刘琦, 池毅, 邓涛, 廖成旺, 阳光, 张贵萍, 陈洁. 2013. 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震的震前及临震应变异常 [J]. 地震学报, 35(3): 296—303.
- Chi S L, Liu Q, Chi Y, Deng T, Liao C W, Yang G, Zhang G P, Chen J. 2013. Borehole strain anomalies before the 20 April 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 296—303 (in Chinese).

- 刘琦, 张晶. 2011. S 变换在汶川地震前后应变变化分析中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, **31**(4): 6—9.
- Liu Q, Zhang J. 2011. Application of S transform in analysis of strain changes before and after Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **31**(4): 6—9 (in Chinese).
- 邱泽华, 张宝红, 池顺良, 唐磊, 宋茉. 2010. 汶川地震前姑咱台观测的异常应变变化[J]. 中国科学: 地球科学, **40**(8): 1031—1039.
- Qiu Z H, Zhang B H, Chi S L, Tang L, Song M. 2010. Abnormal strain changes observed at Guzan before the Wenchuan earthquake[J]. *Scientia Scinica Terrae*, **40**(8): 1031—1039 (in Chinese).
- 杨又陵, 赵根模, 高国英, 杨港生, 韩润泉. 2003. 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 M_8 .1 地震前的缓慢地震事件[J]. 国际地震动态, (9): 1—4.
- Yang Y L, Zhao G M, Gao G Y, Yang G S, Han R Q. 2003. The slow earthquake event occurring before west to Kunlun Mountain Pass earthquake of M_8 .1 on November 14, 2001[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (9): 1—4 (in Chinese).
- 余怀忠. 2006. 地震前兆物理模型与地震预测初步研究[R]. 博士后出站报告. 北京: 中国地震局地质研究所: 41—51.
- Yu H Z. 2006. *Preliminary Studies on Mechanical Models of Earthquake Precursors and Earthquake Prediction*[R]. Postdoctorate research report. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 41—51 (in Chinese).
- 中国地震台网中心. 2013. 国家台网大震速报目录[EB/OL]. [2013-05-01]. <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm#>.
- China Earthquake Networks Center. 2013. Quick reports for strong earthquake of China networks[EB/OL]. [2013-05-01]. <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm#> (in Chinese).
- Rogers G, Dragert H. 2003. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip[J]. *Science*, **300**(5627): 1942—1943.
- Scholz C H. 1998. Earthquakes and friction laws[J]. *Nature*, **391**(1): 37—41.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S, Nakamura S. 2006. Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip[J]. *Nature*, **442**(7099): 188—191.
- Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. 1996. Localization of the complex spectrum: The S transform[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, **44**(4): 998—1001.

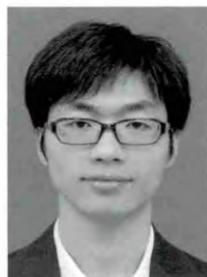
作者简介



金明培 中国地震局滇西地震预报实验场高级工程师. 2007 年云南大学固体地球物理专业毕业, 获理学硕士学位. 长期从事地震监测、预报、实验研究工作; 现主要从事接收函数、震源新参数和震源滑动模型等数字地震学方面的研究工作. 中国地震学会和云南省地球物理学会会员.



赵旭 中国地震台网中心助理研究员, 中国科学院地质与地球物理研究所读博生. 2007 年中国地震局地震研究所防震减灾与防护工程专业毕业, 获硕士学位. 曾从事地震波形数据快速处理、地震精定位方法研究以及地球三维速度结构反演方面的研究. 现主要从事数字地震学方面的研究工作. 美国地球物理学会会员.



刘琦 中国地震局地震预测研究所助理研究员, 中国地震局地质研究所构造地质专业在读博士. 2007 年吉林大学应用地球物理专业毕业, 获工学学士学位; 2009 年吉林大学地球探测与信息技术专业毕业, 获工学硕士学位. 曾从事应用地球物理学和地震勘探学方面的研究, 现主要从事地应变观测与地震关系等方面地壳形变研究, 以及地球物理与构造地质方面的交叉研究. 欧洲地球科学联合会、中国地震学会和中国地球物理学会会员.



叶庆东 成都理工大学地球探测与信息技术专业博士后. 2011 年武汉大学固体地球物理专业毕业, 获硕士学位; 2014 年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业, 获博士学位. 目前主要从事面波成像与微地震定位方面的研究.



张小涛 中国地震台网中心助理研究员. 2006 年青岛科技大学信息科学技术学院计算机专业毕业, 获工学学士学位; 2009 年中国地震局地震预测研究所固体地球物理专业毕业, 获理学硕士学位. 现主要从事地震预测新方法的研究.



沈玉松 广东省地震局工程师. 2001 年中国科学技术大学地球与空间科学学院地球物理专业毕业, 获理学学士学位; 2012 年中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理专业毕业, 获博士学位. 主要从事地震监测和数字地震资料的分析处理工作, 现从事地震震源机制分析、三维区域地震震相走时表及地震定位精度评价等方面的研究.