

池顺良, 刘琦, 池毅, 邓涛, 廖成旺, 阳光, 张贵萍, 陈洁. 2013. 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震的震前及临震应变异常. 地震学报, 35(3): 296–303.

Chi Shunliang, Liu Qi, Chi Yi, Deng Tao, Liao Chengwang, Yang Guang, Zhang Guiping, Chen Jie. 2013. Borehole strain anomalies before the 20 April 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 296–303.

2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震的震前 及临震应变异常^{*}

池顺良^{1),*} 刘 琦²⁾ 池 毅³⁾ 邓 涛⁴⁾
廖成旺⁴⁾ 阳 光⁵⁾ 张贵萍⁵⁾ 陈 洁⁵⁾

- 1) 中国北京 100049 中国科学院计算地球动力学重点实验室
- 2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所
- 3) 中国河南鹤壁 458000 鹤壁市防震技术研究所
- 4) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所
- 5) 中国四川康定 626001 四川省地震局姑咱地震台

摘要 距离芦山地震震中 70 km 的姑咱地震台 YRY 四分量钻孔应变仪 2013 年 4 月 16—19 日记录到 8 次幅度达到十倍固体潮幅的张性应变阶跃, 这在该仪器 6 年多运行期间尚属首次. 这些应变异常与芦山地震在时间、空间上相关; 应变异常的主压应力方向与震前宝兴水压致裂地应力测量主压应力方向相近, 并与震前 5 个月中长达 3 个月的应变异常主压应力方向一致; 应变阶跃起始与远震震波同时到达. 综上所述, 4 月 16—19 日的应变异常有可能是芦山地震发震断裂在破裂错动前地层蠕滑的反映.

关键词 芦山地震 四分量钻孔应变仪 应变异常 地震前兆 远震触发

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.002 中图分类号: P315.72 文献标志码: A

Borehole strain anomalies before the 20 April 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake

Chi Shunliang^{1),*} Liu Qi²⁾ Chi Yi³⁾ Deng Tao⁴⁾ Liao Chengwang⁴⁾
Yang Guang⁵⁾ Zhang Guiping⁵⁾ Chen Jie⁵⁾

- 1) Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Computational Geodynamics, Beijing 100049, China
- 2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China
- 3) Hebi Institute of Technology for Prevention of Earthquake Disaster, Hebi 458000, China
- 4) Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China
- 5) Guza Seismic Station, Earthquake Administration of Sichuan Province, Guza 626001, China

Abstract: The YRY four-component borehole strainmeter of Guzan Station, 70 km away from the epicenter of Lushan earthquake, recorded eight tensile strain steps with the range of ten times of tidal amplitude on April 16–19, which has

* 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)资助.

收稿日期 2013-05-06 收到初稿, 2013-05-27 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: chisl@263.net

never happened over the past 6 years' observation. The strain anomalies are related to Lushan earthquake both in time and space. The principal stress direction deduced by the abnormal strain, similar to that of in-situ stress measurement by hydrofracturing at Baoxing before the earthquake, is in accordance with 3-months-records during the five months before the Lushan earthquake. Some of the strain steps occurred when teleseismic waves arrived. As mentioned above, we presume the strain anomalies of April 16—19 probably reflect the strata creeping before the rupturing of the Lushan earthquake generating fault.

Key words: Lushan earthquake; four-component borehole strainmeter; strain anomaly; earthquake precursor; teleseismic triggering

引言

2013 年 4 月 20 日四川芦山地震的前 4 天(即 4 月 16—19 日), 距芦山约 70 km 的姑咱台 YRY 四分量钻孔应变仪共接收到 8 次幅度超过十倍潮幅的临震应变异常. 最后一次应变异常结束 16 小时后, 芦山 $M_s7.0$ 地震发生. 弄清 4 月 16—19 日的应变异常与芦山强震之间有何联系, 认识这种应变异常的特点, 分析其是否为这次强震的应变前兆, 对地震预测研究具有重要意义.

1 姑咱台及 YRY 型四分量钻孔应变仪运行概况

姑咱地震台位于四川省甘孜藏族自治州康定县姑咱镇, 为国家级台站, 隶属于四川省地震局康定地震中心站.

姑咱台处于北西向鲜水河断裂带、北东向龙门山断裂带和北南向安宁河断裂带复合部位靠北的地段, 座落于姑咱镇西面鸡心梁子山背斜的核部. 位于南北走向的大渡河西岸, 在大渡河边古河床冲积堆层上, 此处出露岩性为花岗闪长岩.

姑咱台 YRY 四分量钻孔应变仪于 2006 年 10 月 28 日安装. 钻孔深 40 m, 花岗岩地层, 岩芯完整, 应变探头用水泥砂浆耦合于钻孔底部. 1 路应变方位 51° (近 NE 向), (2—4)路方位依次顺时针加 45° . 钻孔应变仪安装后记录了 5 个月正常潮汐背景. 图 1 是仪器安装稳定后, 2007 年 2 月 1—3 日清晰而光滑的固体潮曲线, 表明应变记录有正常背景. 图 1—9 中曲线应变值拉伸向正, 压缩向负.

YRY 四分量钻孔应变仪至今已运行 6 年半, 图 2 给出了 2011 年 1 月 1 日—2013 年 5 月 2 日共 2 年 4 个月分钟值数据曲线. 芦山 $M_s7.0$ 地震前夕的应变异常是 6 年来观测中幅度最大的短周期应变异常.

姑咱台周围没有抽水机井等干扰, 记录的应变固体潮十分光滑和规则. 但台站附近百米外是南北向的大渡河, 地层受到河水位变化对河岸地层压力的影响, 每到雨季记录就出现与河水位相关的变化. 这种干扰的周期约半个月, 并不影响短周期频段的信号. 在芦山 $M_s7.0$ 地震中出现的应变阶跃异常位于数分钟到数十分钟频段. 河水位变化的干扰没有影响芦山 $M_s7.0$ 地震异常信号的接收. 该台在 2008 年 5 月 12 日汶川地震前也有异常应变记录(池顺良等, 2009; 邱泽华, 周龙寿, 2009; 邱泽华等, 2010; 刘琦, 张晶, 2011).

2 芦山 $M_s7.0$ 地震前的应变异常

姑咱台在芦山 $M_s7.0$ 地震前记录到两种应变异常. 一种是在 2013 年 4 月 20 日地震发

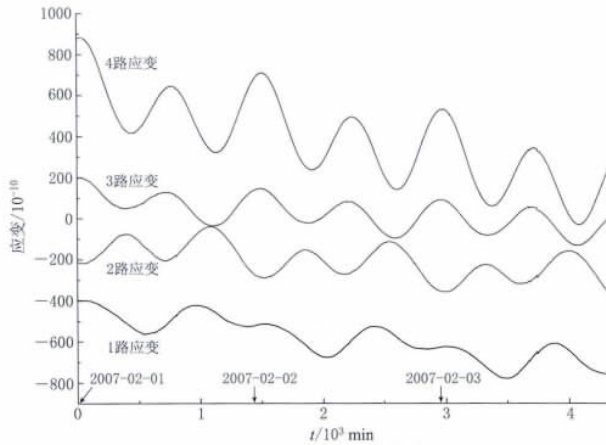


图 1 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前 15 个月时, 姑咱台 YRY 四分量钻孔应变仪 2007 年 2 月 1—3 日连续 3 天的记录曲线

Fig. 1 Three days (2007-02-01, 00:00—2007-02-03, 23:59) tidal recordings of YRY four component borehole strainmeter at Guzan station, drawn out from the records at the time 15 months before Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake

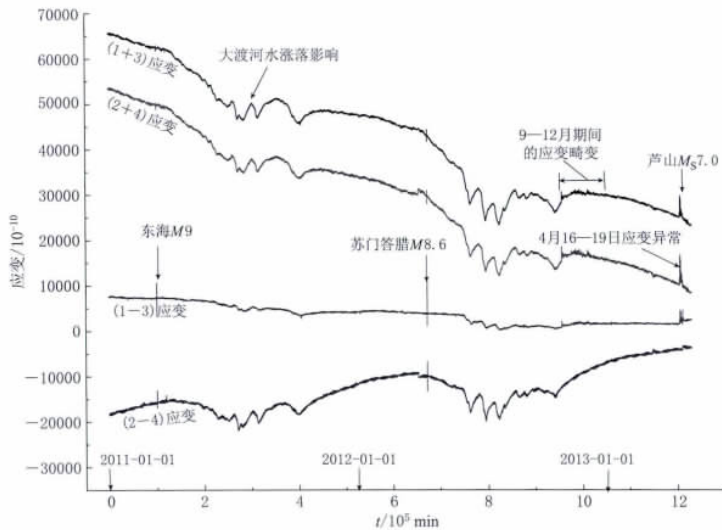


图 2 姑咱台应变曲线(2011-01-01—2013-05-02)

Fig. 2 Guzan station strain recordings (2011-01-01—2013-05-02)

生前 5—8 个月, 连续出现 3 个月幅度较小的“张性脉冲”及“潮汐畸变”异常(图 2、图 3), 另一种是在震前 4 天出现的幅度很大的临震应变异常(图 2、图 4)。

2012 年 9—12 月, 应变记录中不时出现“脉冲异常”和“潮汐畸变”。图 3 是 2012 年 11 月 14—17 日 4 天的应变观测数据。异常大都具有张性应变形态。

2013 年 4 月 15 日 18 时 20 分, 姑咱台 4 路应变同时出现突跳, 应变幅度达 1.2×10^{-7} ; 4 月 16—19 日, 4 路应变又同时出现大幅度变化, 应变幅度超过了 3×10^{-7} 。

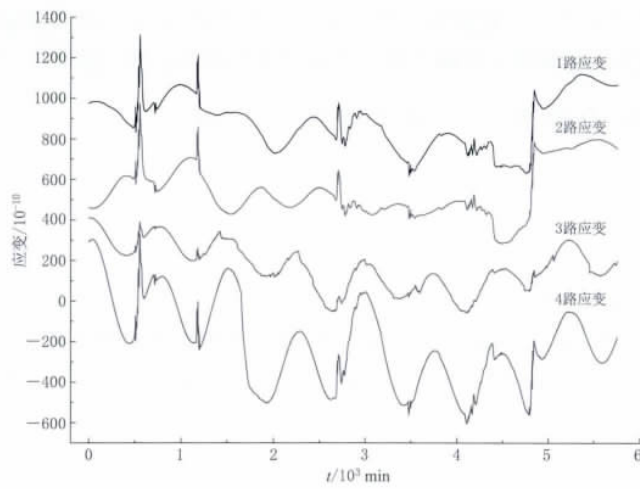


图 3 芦山 $M_s7.0$ 地震前 5 个多月，姑咱台 2012 年 11 月 14—17 日 4 天的应变记录
Fig. 3 Four day strain recordings (2012-11-14, 00:00—2012-11-17, 23:59)
at Guzan station, drawn out from the records at the time five months
before Lushan $M_s7.0$ earthquake

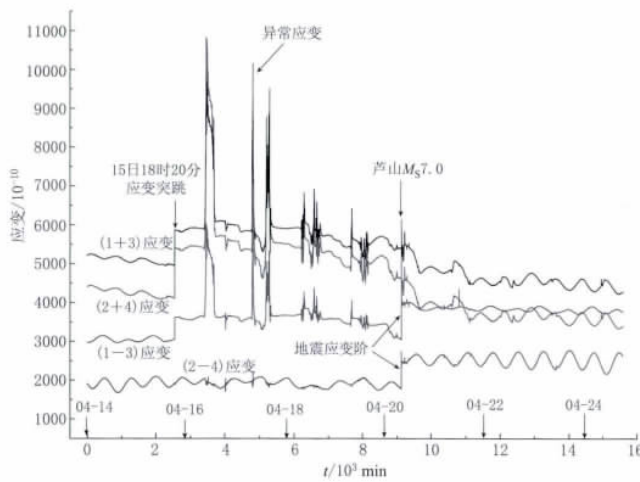


图 4 姑咱台应变曲线(2013 年 4 月 14—24 日 20 时)
Fig. 4 Guzan station strain recordings (2013-04-14, 00:00—2013-04-24, 20:00)

YRY 四分量钻孔应变仪器运行 6 年多来，从未记录过如此大幅度的应变异常。要确定是地震前兆异常，首先要排除各种干扰的可能，正当调查进行中时，4 月 20 日 8 时 2 分芦山 $M_s7.0$ 强震发生。

图 4 是 2013 年 4 月 14—24 日 20 时的应变数据，分离成球量(体应变)和偏量(差应变)绘出的曲线。4 月 20 日芦山 $M_s7.0$ 地震的震波已在图上标出。

YRY 四分量应变仪的分量数比观测对象平面应变三分量多一路观测数据，可用于观测数据自检，条件是(1+3)体应变与(2+4)体应变曲线图形相似。满足自检条件(图 2、图 4)，说明这些应变异常是地层的真实应变，而非仪器故障所致。

强震过后,这类大幅度干扰消失.图4还记录了芦山 $M_s7.0$ 地震的震时应变阶,由此可获得强震后区域应力的调整,有助于确定应力增强与减弱区域(邱泽华,石耀霖,2003).

3 对姑咱台芦山地震应变异常性质的认识

3.1 姑咱台应变异常与芦山地震在空间与时间上相近

姑咱台距芦山 $M_s7.0$ 地震震中约 70 km,是距震中最近的应变观测站.2013 年 4 月 20 日地震前 4 天到震前 16 小时,记录到幅度达到 3×10^{-7} 张性应变异常,地震后大幅度张性应变异常消失.这种应变异常与芦山 $M_s7.0$ 地震的发生在时间和空间上均接近.

3.2 2013 年 4 月 16—19 日临震异常应变与中期异常应变的附加主压应力方向相同

图5是图3的应变观测数据分离成球量(体应变)和偏量(差应变)绘出的曲线图.

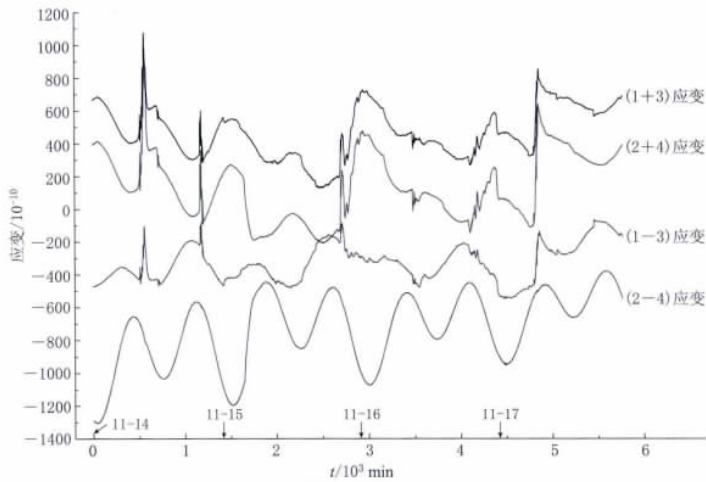


图5 姑咱台 2012 年 11 月 14—17 日 4 天的应变记录

Fig. 5 Four day strain recordings at Guzan station
(2012-11-14, 00:00—2012-11-17, 23:59)

图5和图4两图的(1+3)体应变与(2+4)体应变高度相关,表明记录到的异常应变是地层应变的真实变化,两者的应变突跳大都是张应变.两图的(2-4)差应变上均没有明显的与体应变同步的应变阶跃.若记(2-4)异常应变幅度为 U_a , (1-3)异常应变幅度为 U_b , 1路应变的方位为 ψ .引起异常应变的主压应力方位 ϕ 可由下式中解出.

$$\frac{U_a}{U_b} = -\tan 2(\psi - \phi) \quad (1)$$

计算结果表明,临震前4天和2012年11月14—17日应变突变的主压应力方向都为 -41° (NW—SE向),与宝兴钻孔水压致裂地应力测量主压应力为NW—SE向的结果相近(丰成君,2013).表明在强震发生前的半年中应力场的主方向是稳定的.

3.3 8次应变突变异常中有3次突变的起点与远震面波到时重合

2013年4月16—19日出现了8次应变突变,其中有3次突变的起始与远震震波到时重合.4月16—19日,全球发生大于6.5级的地震3次:2013年4月16日18时44分13秒伊朗、巴基斯坦交界地区发生的7.7级地震;2013年4月17日6时55分25秒巴布亚新几内亚发生的6.7级地震;2013年4月19日11时5分53秒千岛群岛7.0级地震.

图 6 中 4 月 16 日 18 时 55 分开始出现的应变突变同伊朗、巴基斯坦交界地区发生的 7.7 级地震震波到达时间一致, 这次突变的幅度不大. 4 月 17 日 7 时 20 分开始出现的应变突变, 其起始时间同巴布亚新几内亚发生的 6.7 级地震震波到达时间一致.

图 7 是 4 月 19 日 11 时 20 分开始出现的应变突变, 其起始时间与 2013 年 4 月 19 日 11 时 5 分 53 秒千岛群岛 7.0 级强震的震波到达时间一致.

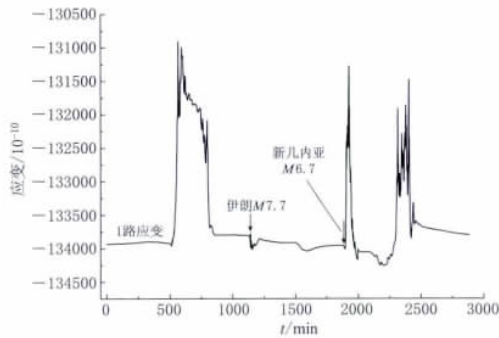


图 6 姑咱台第 1 路应变的突变异常
(2013 年 4 月 16—17 日)

Fig. 6 Component 1 strain anomaly of Guzan station (2013-04-16, 00:00—2013-04-17, 23:59)

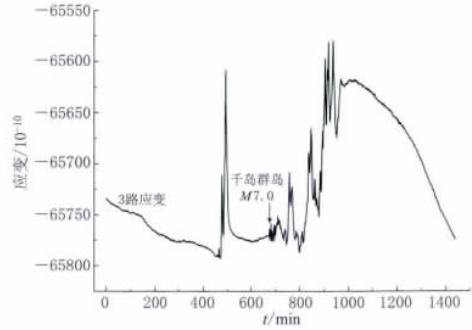


图 7 姑咱台第 3 路应变的突变异常
(2013 年 4 月 19 日全天)

Fig. 7 Component 3 strain anomaly of Guzan station (2013-04-19, 00:00—23:59)

远震震波的到时与应变阶跃的起始时间如果是互不相关的独立事件, 两者重合的概率正比于事件重合段时间的偏差(约 15 分钟)与时间区间总宽度之比. 一次地震震波到时与 8 次阶跃中一次阶跃的起始时间重合的概率约 0.05, 还可看成巧合. 但连续出现 3 次这样的巧合, 概率就只有万分之一了, 应该寻找更有可能的解释.

一种可能的解释是: 临震前夕, 造成芦山 $M_s7.0$ 强震的断裂已处于极不稳定的临界状态, 很小的应力扰动和起伏都能触发引起有限的变动, 远震震波的扰动就是一种触发因素. 因此, 震波的到达与阶跃的起始就不是相互独立的事件.

这 3 次应变突变事件, 从突变开始上升至极值的时间大约需 10—20 分钟, 应是震源区地层缓慢的蠕滑调整而非破裂或断层快速滑动过程. 姑咱台记录到的应是震源区地层蠕滑调整导致应变场近场变化传来的部分.

构造地震的突然发生表明地震是一种力学失稳现象. 无论是完整岩石破裂或已有断层的粘滑产生的地震, 临震前都出现介质强度或摩擦强度降低而进入失稳状态. 在这种状态下, 外场极小的位移扰动就可引起有限的滑动(张国民等, 2001). 在芦山地震这个震例中, 这种极不稳定的状态竟可以维持 3—4 天, 然后再也无法支撑而发生地震. 这 3—4 天时间对于人们避免强震的袭击无疑是极其宝贵的.

3.4 震后应变曲线的变化

图 8 是芦山 $M_s7.0$ 地震后, 姑咱台 4 月 20 日至 5 月 7 日的应变观测曲线.

图 4 所示的 16—19 日的应变异常活动中, 体应变出现张性应变时, (1—3)差应变上均有同步的变化. 图 8 中显示芦山地震后, (1+3)和(2+4)体应变上仍有张性应变阶跃出现, 但(1—3)和(2—4)差应变上却没有相应的反映. 出现这种变化的原因有待今后继续观测与探讨.

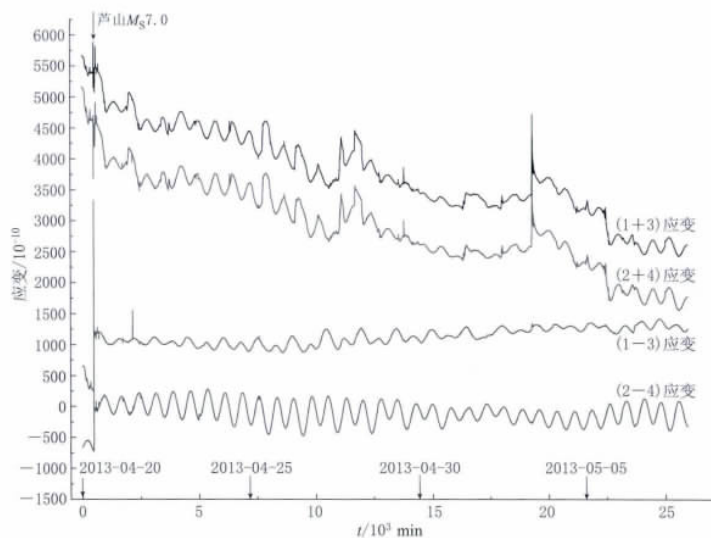


图 8 芦山 4 月 20 日地震后, 姑咱台的应变观测曲线(2013 年 4 月 20 日—5 月 7 日)

Fig. 8 Guzan station strain recordings after the Lushan earthquake
(2013-04-20, 00:00—2013-05-07, 23:59)

3.5 关于震前应变阶跃是否施工干扰的讨论

2013 年 4 月 20 日芦山 $M_s 7.0$ 地震震前激烈的应变变化十分明显, 当时离台站 50 m 外正在公路施工, 这种强烈的应变变化会不会是公路施工干扰? 如果这些激烈的应变变化不是人为干扰而是强震即将发生前的某种应变信号, 对强震的预测和预报无疑十分重要. 明确这些应变异常的性质, 只有依靠专业、科学、权威机构的调查.

根据对全国 40 个分量钻孔应变台站 6 年观测数据的了解和对这次异常应变数据的认识, 认为公路施工干扰不能解释. 原因如下:

- 1) 施工干扰提出的理由是干扰都出现在白天. 4 月 16—19 日 4 天中, 第一次阶跃分别出现在 07:20, 08:17, 07:05 和 07:14. 因此认为是施工干扰的可能大. 但却忽视了 4 月 20 日 02:39 与 05:26 也出现了张性应变阶跃的事实(图 9).

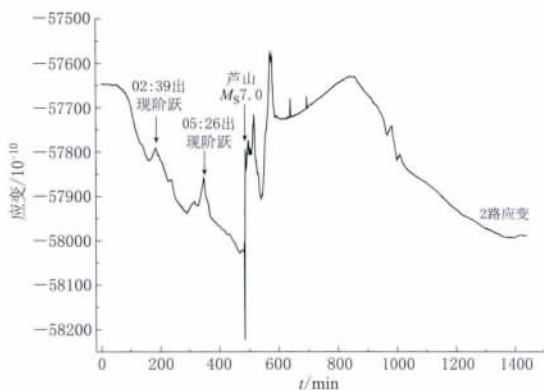


图 9 姑咱台第 2 路应变的突变异常
(2013 年 4 月 20 日全天)

Fig. 9 Component 2 strain anomaly of Guzan station (2013-04-20, 00:00—23:59)

- 2) 施工的人为干扰不可能在 10 分钟短时间内产生 10^{-7} 如此巨大的应变. 要让安装在坚硬花岗岩地层深 40 m 钻孔中的应变探头产生 10^{-7} 应变, 在地表需要对地层施加的外力极其巨大. 香山地震台有过如下经历. 香山台应变探头也安装在 40 m 深井底, 该台冬天取暖, 大卡车拉来 20 t 煤卸在钻孔旁 5—8 m 远处, 潮幅达 150 mm 的模拟记

录曲线上只出现了约 1.5 mm 的压性小台阶. 要在 5—8 m 的距离处加载产生十倍潮幅的应变变化, 对地表施加的外力要有 20 000 t, 而姑咱台院外施工的公路距钻孔的距离约 40 m, 没有一种施工设备能在地表给地层施加如此大的力量.

3) 忽视了异常大都为张性应变异常的事实. 大量挖走土方是产生张性应变最可能的原因. 山东省地震局王梅等(2013)曾报道烟台台站 30 m 外公路施工引起的形变记录, 20 万方土石的开挖与回填产生的形变, 是长达数月的缓慢变化. 与 4 月 16—19 日的应变张性阶跃完全不同.

4) 芦山 $M_s7.0$ 地震震后半个月中, 附近公路仍在施工, 但并未出现 4 月 16—19 日那样的应变变化.

4 讨论与结论

本文对四川芦山 $M_s7.0$ 震前出现的明显的应变阶跃异常特点作了初步分析, 这种震前异常有可能是强震的临震前兆信号. 强震究竟是否存在临震前兆对于强震预测具有重要的意义, 这些异常是否确实与芦山 $M_s7.0$ 地震的临震发生过程有关, 我们等待进一步的观测及继续的调查及研究.

地震前兆的确定需要排除所有可能干扰的影响. 我们期待之后的调查能进一步搞清这些异常应变的性质. 这种调查往往需要不短的时间, 对于迫在眉睫需要尽快确定异常性质的临震异常判断, 更好的解决方案是在仪器的布置上考虑拉开数百至数千米距离双份比对测量, 因为能引起相距千米的两台仪器产生同步记录的只有大自然的力量. 美国 PBO 项目中采用的是三份比对, 慢地震现象就是由三份同步变化的资料确认的. 否则, 即使能记录到强震前极其重要的临震异常信息, 也会因判断延误时间而失去预报的机会.

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的必要性[J]. 国际地震动态, (1): 1—12.
- 丰成君. 2013. 宝兴钻孔地应力绝对测量与相对监测结果与芦山 7.0 级地震[EB/OL]. 科学网. [2013-05-06]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-921682-687097.html>
- 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.
- 邱泽华, 石耀霖. 2003. 地震造成远距离应力阶变的观测实例[J]. 中国科学: D 辑, 33(增刊): 60—64.
- 邱泽华, 张宝红, 池顺良, 唐磊, 宋荣. 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.
- 邱泽华, 周龙寿. 2009. 用超限率分析法研究汶川地震的前兆应变变化[J]. 大地测量与地球动力学, 29(4): 1—9.
- 王梅, 季爱东, 徐长鹏, 王鹏. 2013. 环境干扰事件引起的“形变异常变化”[J]. 国际地震动态, (1): 15—19.
- 张国民, 傅征祥, 桂斐泰. 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社: 366—378.