

格尔木地震台钻孔应变仪映震性能分析*

李玉丽¹, 安黎霞², 李启雷¹, 杨晓霞¹, 孙春玲¹

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810000; 2. 西宁市地震局, 青海 西宁 810000)

摘要: 利用格尔木钻孔应变可靠的观测资料, 通过分析典型震例前的分量日均值、差应变、日分钟值曲线变化特征, 发现 $M \geq 7$ 地震前有中短期异常, $M \geq 6$ 地震前有短临异常。通过分析震时分钟值曲线变化特征, 发现钻孔应变仪同震阶变明显, 两次海西地震的阶变幅度不尽相同。

关键词: 格尔木地震台; 钻孔应变; 同震阶变; 体应变; 差应变

中图分类号: P315.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)增刊-0083-05

0 引言

我国从 20 世纪 60 年代中期开始使用钻孔方法观测地壳应变变化进行地震预报研究。李四光首先倡导在地震预报研究中使用钻孔式的应力—应变观测方法, 是我国钻孔应变观测技术发展的先驱者 (邱泽华, 2010)。2003 年, 美国地球透镜计划在美国西部布设钻孔应变仪和 GPS 观测站, 对北美大陆西部地区板块边缘变形的演化、地震的孕育等科学问题的解答提供观测数据。卢双玲等 (2008) 提出应变固体潮在震前会伴随异常和畸变的发生。彭华等 (2008) 用多种方法对 TYB-2000A 体应变仪记录的应变地震波、同震应变阶跃等进行深入分析, 揭示地震前后应变波的变化规律。本文利用格尔木台钻孔应变仪 2007 年以来的观测资料, 结合邻区发生的强震, 主要分析了分钟值、分量日均值、差应变曲线, 研究了该仪器的同震阶变和震前异常特征。

1 台站概况

格尔木地震台位于柴达木盆地南部, 东昆仑断裂带北部, 位于青海省格尔木市西郊小岛, 离市区 3 km。格尔木西南的昆仑山及可可西里区域是中国西部现代构造最活跃地带和中强地震的主要发育场所之一, 发育有布喀达坂峰—库赛湖—

昆仑山口全新世活动断裂带和勒斜武担湖—太阳湖活动断裂带 (哈辉, 2005)。

2006 年 9 月 21 日, 格尔木台 YRY-4 型四分量钻孔应变仪架设于台站西南约 20 km 的南山口。钻孔深 40 m, 井孔 0~40 m, 为红棕色花岗岩, 钻孔岩芯坚硬完整, 环境干扰小, 水位距井口 28 m。四分量应变探头电缆长 60 m^①。仪器应变分辨率为 5×10^{-11} , 应变探头频响为 DC-20 Hz, 数采采样率为 1 次/分钟 (汪发耀等, 2011; 池顺良等, 2009)。分量钻孔应变仪有 4 个径向位移传感器, 互成 45° 夹角, 呈米字型布置。1 路分量的方位为 28°, 2、3、4 路分量的方位顺时针依次递加 45°^①。从 4 个位移传感器的输出信号中, 可获得完整的平面应变 3 分量 (体应变、剪应变、主应力方向), 并有一个冗余分量, 具有检验观测数据真实性的自检功能, 自检条件为: 1 路数据 + 3 路数据 \cong 2 路数据 + 4 路数据 (池顺良等, 2009)。这一性能对地震分析预报工作有重要意义。

2 钻孔应变仪资料可靠性分析

由应变地震波记录计算地震波到时、震级、距离等参数与摆式地震仪的记录结果十分一致 (池顺良, 1993)。固体潮记录调和分析的相对精度最高已达到千分之一的高精度, 表明从数秒到数天频段分量钻孔应变仪的记录数据是可靠的。

* 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 中国地震局“三结合”课题 (152903) 资助.

①池顺良. 2006. YRY-4 钻孔应变仪台站安装情况记录表.

格尔木台 YRY-4 型四分量钻孔应变仪观测资料自 2007 年 7 月至今, 固体潮汐清晰, 记录到的应变清楚, 每天的数据都有波峰和波谷, 且台基较好, 周围干扰少, 应变观测资料连续、完整、稳定性好, 资料质量较好。

图 1 是 2007 年 7 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日格尔木钻孔应变仪 1 路数据 +3 路数据和 2 路数据 +4 路数据的日均值曲线, 由图中可以看出, S1 + S3 和

S2 + S4 曲线形态相似, 格尔木台的分量钻孔应变仪数据符合自检条件, 数据真实可靠。选取 2008 ~ 2014 年数据计算相关系数, 结果如表 1 所示, 相关系数 $r = 0.5 \sim 0.7$ 表示相关程度显著, $r = 0.7 \sim 0.9$ 表示相关程度高, $r = 0.9 \sim 1.0$ 表示相关程度极高。从表 1 中可看出, 除 2008 年 1 ~ 3 月的相关系数略低, 其余相关系数都在 0.9 以上, 说明 S1 + S3 和 S2 + S4 数据相关性非常好, S1 + S3 和 S2 + S4 相似性极高。

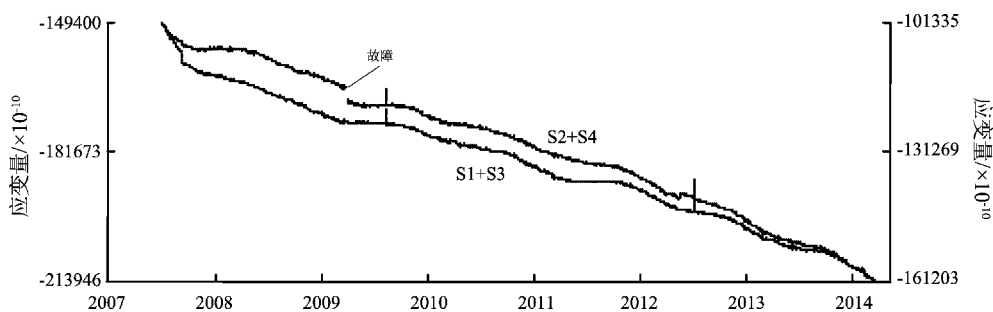


图 1 体应变日均值曲线 (2007-07-01 ~ 2013-12-31)

Fig. 1 The daily mean value curve of the volume strain from Jul. 1, 2007 to Dec. 31, 2013

表 1 2008 ~ 2014 年 S1 + S3 和 S2 + S4 相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient between S1 + S3 and S2 + S4 from 2008 to 2014

2008 年 1 ~ 3 月	2008 年 4 ~ 6 月	2009 年 1 ~ 3 月	2010 年 1 ~ 3 月	2011 年 1 ~ 3 月	2012 年 1 ~ 3 月	2013 年 1 ~ 3 月	2014 年 1 ~ 3 月
0.502 8	0.971 4	0.808 7	0.979 3	0.968 3	0.999 3	1.000 0	0.989 1

3 钻孔应变仪同震分析

同震阶变是体应变分钟值观测曲线中记录阶跃变化的特例, 包括标准型同震阶变和非标准型同震阶变。

标准型同震阶变是在地震波到达之前瞬间出现的阶跃上升或阶跃下降, 在记录曲线上有明显的台阶, 称之为标准型同震阶变。其特点为: (1) 突发性, 目前的观测手段看不到一个逐渐积累的变化过程; (2) 不可逆性, 变化一旦发生, 阶变曲线将保持在一个新水平上, 不再恢复 (杨成元等, 2007, 2008)。基于这些特点, 此类标准型同震阶变易于判断。由图 2a 可见, 2010 年 4 月 14 日青海玉树 $M_s 7.1$ 地震和 $M_s 6.3$ 余震是标准型同震阶变, 地震首次波形成的标准型同震阶变十分清晰。

非标准型同震阶变是在地震发生过程中的地

下构造的错动变化, 其地质构造机制错综复杂, 反映为体应变记录波形中的阶变时间不等、大小不一、参差不齐、上下无序、错落不定等复杂形态。非标准型同震阶变是阶变的普通类型, 多数复杂变化型均属于非标准型阶变。从应变分钟值曲线图中可以看到有多种类型: 超前型、滞后型、连续上升阶变、脉冲与阶变、畸变与阶变 (杨成元, 李哲, 2008; 刘厚明等, 2005)。由图 2b 可见, 2009 年 8 月 28 日青海海西 $M_s 6.4$ 地震, 震后畸变明显, 为非标准型同震阶变。

2008 年海西 $M_s 6.3$ 地震 (图 3a) 和 2009 年海西 $M_s 6.4$ 地震 (图 3b), 两次地震震中距相同, 震级接近, 震中毗邻, 同震阶变明显, 后者较前者同震曲线复杂; 2008 年海西 $M_s 6.3$ 地震的 4 分量同震阶变幅度 $(6.7 \sim 30.9) \times 10^{-8}$ 。2009 年海西 $M_s 6.4$ 地震的 4 分量同震阶变幅度为 $(3.6 \sim 14.1) \times 10^{-8}$ 。前者同震阶变幅度是后者的约 2 倍, 两次地震的同震响应均是东西分量阶变幅度最大, 北东分量阶变幅度最小。

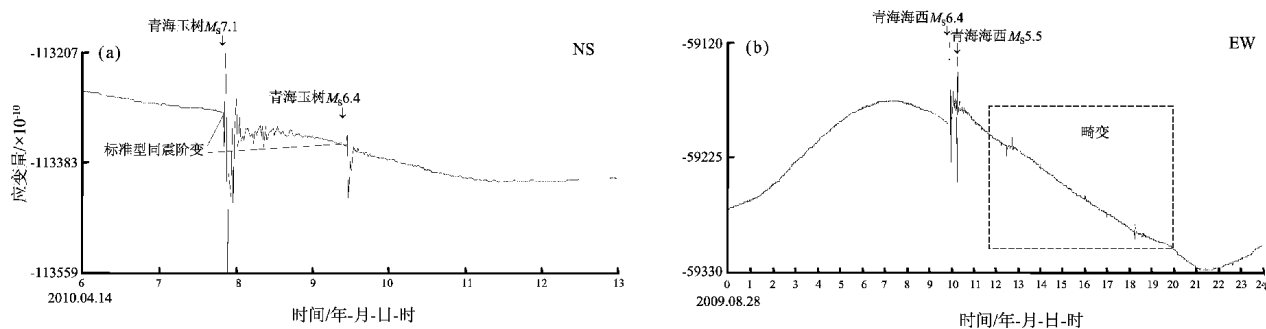
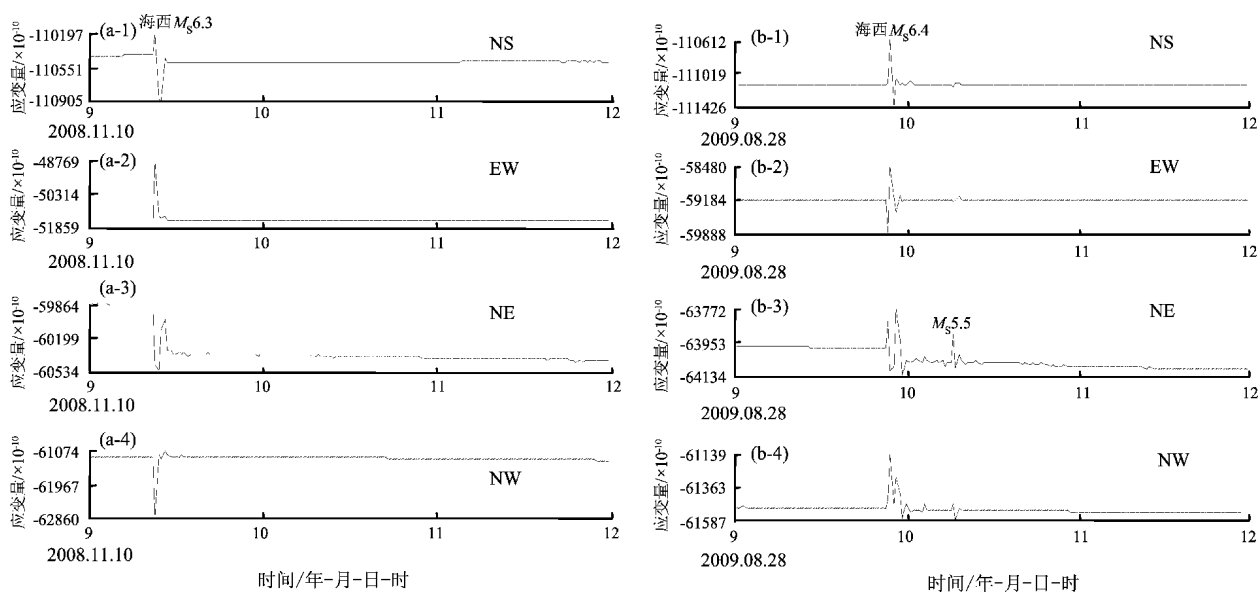


图2 标准型 (a) 和非标准 (b) 同震阶变分钟值曲线

Fig. 2 The minute value curve of standard (a) and non-standard (b) step change of coseismic response

图3 2008年海西 $M_s 6.3$ (a)、2009年 $M_s 6.4$ (b) 地震同震响应曲线Fig. 3 The coseismic response curve of Haixi $M_s 6.3$ earthquake in 2008 (a) and Haixi $M_s 6.4$ earthquake in 2009 (b)

4 典型震例分析

2007年7月以来,格尔木台周围100 km范围内 $M \geq 7$ 地震有3次。即:2008年5月12日四川汶川 $M_s 8.0$ 地震,震中距约998 km;2010年4月14日青海玉树 $M_s 7.1$ 地震,震中距约390 km;2013年4月20日四川芦山 $M_s 7.0$ 地震,震中距约1017 km。图4中,2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震前,2007年9月3日钻孔应变仪3个分量均阶降,在北西分量数据回升,东西、北东分量数据下降过程中发震。2006年12月格尔木台钻孔应变仪基本稳定(池顺良等,2009),2007年以来的变化可能是汶川 $M_s 8.0$ 地震前的中期异常信息。2010年玉树 $M_s 7.1$ 地震前,钻孔应变仪3个分量数据都

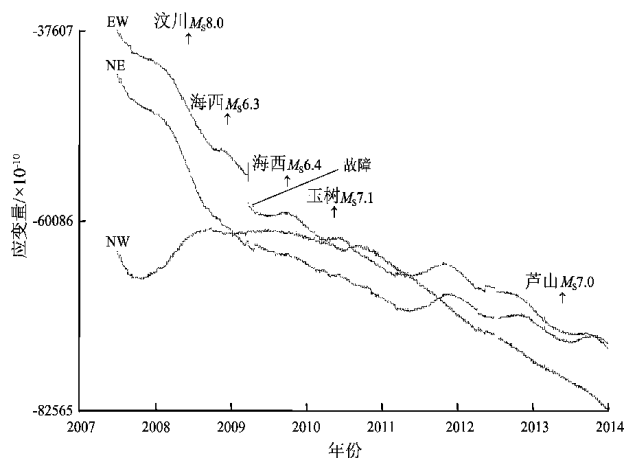


图4 2007~2013年钻孔应变仪分量日均值曲线

Fig. 4 The daily mean value curve of borehole strainmeter components from 2007 to 2013

呈下降趋势,东西分量于2010年3月9日出现转平短期异常趋势,并在此过程中发震。2013年芦山 $M_s7.0$ 地震前,钻孔应变仪3分量均呈下降趋势,东西分量于2012年5月17日阶升,7月10日阶降,至发震一直呈下降趋势。北东分量于2012年4月10日阶降。这属于中期异常。

S1-S3 和 S2-S4 差应变曲线总体趋势如图5所示,2007年7月至2011年6月, S1-S3 和 S2-S4 差应变逐渐靠近,2011年6月至2014年5月, S1-S3 和 S2-S4 差应变逐渐分离。差应变曲线震前异常情况如下:2008年汶川 $M_s8.0$ 地震前出现中期异常,2007年7月15日 S1-S3 差应变阶降,2007年9月1日再次阶降,直至2007年11月回升,在回升过程中发震。2007年9月6日 S2-S4 应变差阶降,在下降过程中发震;2010年玉树 $M_s7.1$ 地震前出现短期异常,2010年2月10日 S1-S3 差应变由上升转为下降,于2010年3月8日回升,在回升过程中发震。2009年9月 S2-S4 差应变下降,2010年3月20日在趋势转平过程中发震;2013年芦山 $M_s7.0$ 地震前长期异常,2012年4月12日 S1-S3 差应变阶升后呈缓降趋势,2013年1月在趋势转平过程中发震。2012年5月17日至7月9日 S2-S4 差应变出现台阶。

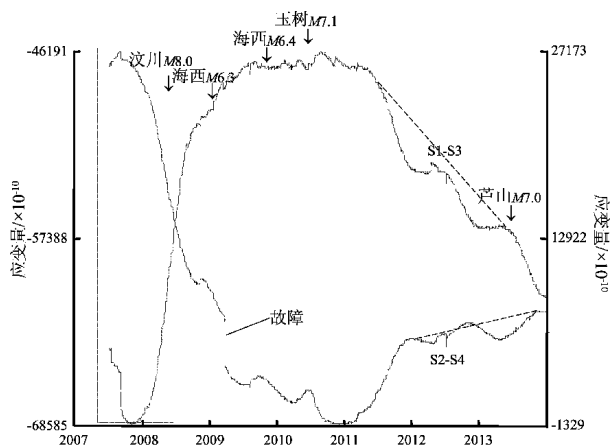


图5 2007~2013年差应变日均值曲线

Fig. 5 The daily mean curve of the difference strain from 2007 to 2013

2007年7月后,格尔木台200 km范围内6级以上地震有2次:2008年11月10日青海海西 $M_s6.3$ 地震,2009年8月28日青海海西 $M_s6.4$ 地震,两次震中相距约159 km。2008年海西 $M_s6.3$ 地震前,东

西分量应变于2008年9月30日发生转向(图4)。2008年9月20日 S2-S4 应变转向,距离发震50天(图5)。2009年8月28日海西 $M_s6.4$ 地震前,北东分量应变于2009年2~4月发生趋势突变(图4)。2009年3~7月 S1-S3 差应变发生趋势突变(图5)。两次海西地震,震级接近,震中毗邻,异常表现形式不同。

图6是2008年海西 $M_s6.3$ 和2009年 $M_s6.4$ 海西地震前北南分量日变曲线对比图。2008年海西 $M_s6.3$ 地震前,2008年10月31日至11月3日曲线形态和1日相似,有1个波峰1个波谷。11月4日曲线形态转变为2个波峰2个波谷,4~9日曲线波峰波谷数目不固定,且曲线形态没有前几天平滑,2008年11月9日比1日曲线波峰和波谷数都多;2009年海西 $M_s6.4$ 地震前,2009年8月21、23日曲线有2个波峰1个波谷,25~27日曲线有1个波峰1个波谷。25日曲线形态转变。两次海西地震前,日变形态均改变,但改变方式和时间不同,2008年海西 $M_s6.3$ 地震前6天日变形

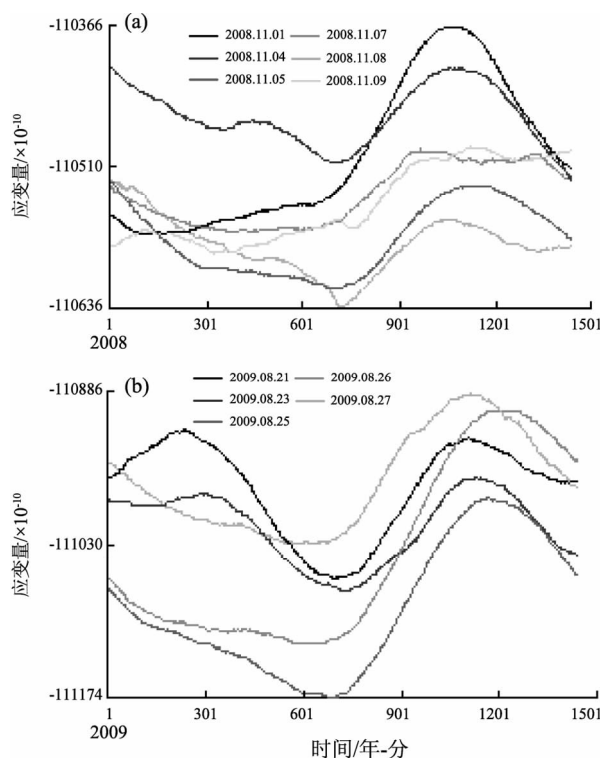


图6 2008年海西 $M_s6.3$ 地震(a)和2009年海西 $M_s6.4$ (b)地震前日变曲线

Fig. 6 The curve of diurnal variation before Haixi $M_s6.3$ earthquake in 2008 (a) and Haixi $M_s6.4$ earthquake in 2009 (b)

态发生改变, 曲线波峰波谷数目由 1 个波峰 1 个波谷变为不固定, 2009 年海西 $M_s6.4$ 地震前 3 天日变形态发生改变, 日曲线波峰波谷数目由 2 个波峰 1 个波谷变为 1 个波峰 1 个波谷。

5 结论

利用 2007 年以来的格尔木钻孔应变资料, 通过分析分钟值、分量日均值、差应变曲线, 研究了该仪器记录的应变资料区震前和震时的异常特征。得出以下结论:

格尔木台周围 100 km 范围内 3 次 $M \geq 7$ 地震前, 分量日均值、差应变曲线均出现异常。2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前有中期阶变异常, 2010 年玉树 $M_s7.1$ 地震前有短期趋势转折异常, 2013 年庐山 $M_s7.0$ 级地震前有中期阶变异常。

格尔木台 200 km 范围内, 两次海西 $M \geq 6.0$ 地震前, 分量日均值曲线、差应变曲线均有短期异常, 2008 年海西 $M_s6.3$ 地震前应变发生转向, 2009 年海西 $M_s6.4$ 地震前出现趋势突变。日变曲线在震前均有临震异常, 日变形态均有改变, 改变方式、改变的时间不同。

格尔木钻孔应变仪同震分钟值曲线, 2008 年海西 $M_s6.3$ 和 2009 年海西 $M_s6.4$ 地震, 震中距相

同, 震级接近, 震中毗邻, 同震阶变明显, 后者较前者同震曲线复杂, 前者同震阶变幅度是后者的 2 倍左右, 两次地震的同震响应特点均是东西分量阶变幅度最大, 北东分量阶变幅度最小。

参考文献:

- 池顺良, 池毅, 邓涛, 等. 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): 1-5.
- 池顺良. 1993. 一种浅孔安装的 YRY-2 型钻孔应变仪在中国华北地区 8 个台站实验观测的结果[J]. 地震学报, 15(2): 224-231.
- 哈辉. 2005. 青海省地震监测志[M]. 北京: 地震出版社, 23-38.
- 刘厚明, 王强, 于庆民, 等. 2005. 山东省泰安地震台钻孔同震应变变化资料的初步分析[J]. 地震地磁观测与研究, 26(3): 56-61.
- 卢双苓, 李峰, 王强. 2008. 泰安地震台钻孔应变固体潮畸变的分析探讨[J]. 华北地震科学, 26(2): 49-64.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 2008. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应[J]. 地质力学学报, 14(2): 98-108.
- 邱泽华. 2010. 中国分量钻孔地应力—应变观测发展重要事件回顾. 大地测量与地球动力学[J]. 30(5): 42-47.
- 汪发耀, 杨积礼, 俞伟, 等. 2011. 青海地区钻孔应变观测及资料分析[J]. 高原地震, 23(1): 44-48.
- 杨成元, 李哲, 查楠. 2007. 锦州台体应变观测资料阶变分析[J]. 形变学科通讯, (2): 58-63.
- 杨成元, 李哲. 2008. 锦州地震台钻孔应变同震变化观测资料分析[J]. 地震地磁观测与研究, 29(3): 70-71.

Analysis on Earthquake Response Ability of the Borehole Strain Meter in Golmud Seismic Station

LI Yu-li¹, AN Li-xia², LI Qi-lei¹, YANG Xiao-xia¹, SUN Chun-ling¹

(1. Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

(2. Earthquake Administration of Xining Municipality, Xining 810000, Qinghai, China)

Abstract

Using the reliable observation data of the borehole strain at Golmud Seismic Station, we analyzed the variation characteristic of the component daily average, the difference strain and the day-minute value before the typical earthquakes, and found that there were anomaly in medium-term and short-term anomaly before $M \geq 7.0$ earthquakes and short impending before $M \geq 6.0$ earthquakes. Analyzing the variation characteristic of the minute value curve, we found that the coseismic step change of the borehole strain meter was obvious, and the amplitude of step change before two Haixi earthquakes was not the same.

Key words: Golmud Seismic Station; borehole strain; coseismic step change; volume strain; difference strain