

李玉丽,李启雷,孙春玲,等.青海钻孔应变映震效能研究[J].地震工程学报,2017,39(1):0126-0132.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0126

LI Yu-li,LI Qi-lei,SUN Chun-ling,et al.Prediction Capability Analysis of Borehole Strain in Qinghai Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(1):0126-0132.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0126

## 青海钻孔应变映震效能研究<sup>①</sup>

李玉丽<sup>1</sup>,李启雷<sup>1</sup>,孙春玲<sup>1</sup>,杨晓霞<sup>1</sup>,安黎霞<sup>2</sup>

(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:**利用青海省 6 套 YRY-4 分量钻孔应变仪 2007—2015 年的观测资料,将该地区符合扫描范围的地震从震前异常和同震特征两方面进行研究。结果显示:湟源、德令哈分量钻孔应变差应变曲线地震前大多有短期超差异常;分量钻孔应变仪的同震响应幅度与震级、震中距都有关。同一地震,多台仪器多数情况同震响应幅度与震中距成反比,少数成正比;一般单台仪器同震响应幅度与地震震级成正比关系,震级越大同震响应幅度越大;分量钻孔应变仪的同震响应延迟时间大多与地震震中距成正比,震中距越远同震响应延迟时间越长;分量钻孔应变仪同震响应持续时间与震级基本成正比,震级越大同震持续时间越长。

**关键词:** 钻孔应变; 差应变; 去趋势; 剩余曲线; 同震特征

**中图分类号:** P315.72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2017)01-0126-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0126

## Prediction Capability Analysis of Borehole Strain in Qinghai Province

LI Yu-li<sup>1</sup>, LI Qi-lei<sup>1</sup>, SUN Chun-ling<sup>1</sup>, YANG Xiao-xia<sup>1</sup>, AN Li-xia<sup>2</sup>

(1. Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810000, Qinghai, China;

2. Earthquake Administration of Xining City, Xining 810000, Qinghai, China)

**Abstract:** Since 2007, component borehole strain observations have been carried out in Qinghai province. Because the observation environment is characterized by low interference levels and the observation instrument is stable, the observation data is continuous and reliable. During the observation period, several earthquakes with magnitude > 6 occurred in Qinghai and the region nearby. To study the earthquake reflection ability of the borehole strain observation data, in this study, we analyze the observation data recorded by six 4-component borehole strainmeters in Qinghai from two aspects: the presence of anomaly prior to earthquakes and the coseismic characteristics. Our results show that the amplitude of the coseismic response of the 4-component borehole strainmeter bears a relationship to the magnitude and epicentral distance. In individual earthquakes, we found the coseismic response amplitude of multiple instruments to be inversely proportional to the epicentral distance in most cases and proportional in a few cases. The amplitude of the coseismic response of a single instrument is proportional to the general magnitude, whereby the larger is the earthquake magnitude, the greater is the amplitude of the coseismic response. The coseismic response delay time of the 4-component borehole strainmeter is mostly proportional to the

① 收稿日期:2015-11-13

基金项目:中国地震局“地震监测、预报、科研”三结合课题(152903)

作者简介:李玉丽(1981—),女(汉族),工程师,主要从事前兆观测与资料分析。E-mail:282000724@qq.com。

earthquake epicentral distance, whereby the greater is the epicentral distance, the longer is the coseismic response delay time. The coseismic response duration of an instrument is basically proportional to the magnitude, whereby the greater is the magnitude, the longer is the duration of the coseismic response.

**Key words:** borehole strain; differential strain; detrending; residual curve; coseismic characteristics

0 引言

青海省格尔木、德令哈、门源、湟源、乐都和玉树 6 个台站于 2006—2007 年先后架设了 1 套 YRY-4 分量钻孔应变仪。目前均已连续观测 7 年有余。在仪器正常观测期间,青海省及周边发生了 2008 年四川汶川 M8.0、2008—2009 年青海海西 M6.3、6.4 地震、2010 年青海玉树 M7.1 和 2013 年四川芦山 M7.0 等强地震,为研究分量钻孔应变仪的映震效能提供了很好的震例。

20 世纪 60 年代中期开始,我国学者使用钻孔方法观测地壳应变的变化来进行地震预报研究。近年来,随着观测资料的积累,许多专家开展了对钻孔应变异常特征和映震效能的研究。李四光是倡导使用钻孔式应力-应变观测方法进行地震预报研究的先驱者,也是钻孔应变观测技术发展的领先者<sup>[1]</sup>。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,其观测数据用以诠释北美大陆西部地区板块边缘变形的演化和地震的孕育等<sup>[2]</sup>。在国内,王玉莹等<sup>[3]</sup>发现朝阳地震台地倾斜观测在多次中强地震前有中短期异常;夏孝田<sup>[4]</sup>对高淳县地震台的分量钻孔应变仪从观测资料质量和同震特征两方面进行了效能研究;薛生瑞等<sup>[5]</sup>对山西离石中心地震台的水管仪与水平摆倾斜仪两套仪器记录到的同震曲线进行研究,总结了其同震响应的基本特征。

本文从震前和震时两方面利用曲线拟合、剩余曲线、同震响应幅度对比、同震响应延迟时间对比及同震响应持续时间对比,对青海地区符合扫描范围的地震进行研究,并对青海钻孔应变资料进行分析,以研究其映震效能。

1 青海钻孔应变观测环境和仪器状况

1.1 观测环境和仪器情况

青海省位于我国西部,青藏高原的北部。该省地形地貌复杂,垂直分布明显,既有高山,又有盆地、草原。青

海省气候属典型的高原大陆性气候,紫外线强,昼夜温差大,冬季时间长,夏季凉爽,降雨较少,地域差异大。该省及其毗邻地区长期处于古欧亚大陆的边缘活动带,对地壳活动反应敏感,是全国地震多发区之一<sup>[6]</sup>。

青海省架设的 6 套 YRY-4 分量钻孔应变仪具有灵敏度高、抗干扰、频带宽、功耗低等特点,且有利于地震分析预报工作的自检功能。但这 6 套仪器分布比较稀疏,主要架设在人口密集地区,即东部架设于门源、湟源、乐都三个台,西部架设于格尔木台,南部为玉树台,北部为德令哈台。青海省大部分应变仪同倾斜仪架设在同一山洞内,台址多选在活动断裂带附近,台基岩性坚硬完整、致密均匀。仪器观测数据潮汐变化明显,能呈现类似理论日变化的正弦波态势,有清晰的波峰波谷出现。无大地震时,日变幅波动不大,月变化平稳。

1.2 观测资料情况

青海省这 6 套分量钻孔应变仪自架设以来,除个别仪器短期故障造成少量断记外,观测资料连续率都在 90% 以上,年变稳定。选取格尔木、德令哈、湟源、乐都及玉树 5 个台 2007 年 7 月—2014 年 12 月分量钻孔应变仪整点值数据计算 S1+S3 与 S2+S4 的相关系数(S1、S2、S3 及 S4 分别为 1~4 路观测分量数据,门源台钻孔应变仪一个分量坏,无法自检),结果如表 1 所列。相关系数  $r=0.5\sim0.7$  表示相关程度显著, $r=0.7\sim0.9$  表示相关程度高, $r=0.9\sim1.0$  表示相关程度极高。除德令哈的相关系数略低,其余台的相关系数都在 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。说明这 5 个台的钻孔应变资料满足自检条件,数据真实可靠,因此这 5 个台的差应变数据应相当准确地反映了仪器地点的受力状态<sup>[7]</sup>。

2 震前异常情况

文中选取 2007 年 1 月—2014 年 12 月的地震作

表 1 各台 S1+S3 和 S2+S4 相关系数  
Table 1 The correlation coefficient between S1+S3 and S2+S4 for each station

| 台站                     | 格尔木    | 德令哈    | 门源      | 湟源     | 乐都     | 玉树     |
|------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 相关系数 $r$ (2007—2014 年) | 0.998  | 0.692  |         | 0.996  | 0.998  | 0.977  |
| 连续率 (2010—2014 年)      | 99.34  | 99.36  | 99.87   | 99.96  | 92.86  | 97.55  |
| 平均年变幅 ( $10^{-10}$ )   | 19 174 | 32 561 | 183 780 | 41 822 | 40 070 | 39 547 |

为震例。选取的依据为:观测点周围 1 000 km 内  $M_s \geq 7$  的地震,观测点周围 500 km 内  $7 > M_s \geq 6$  的地震,观测点周围 300 km 内  $6 > M_s \geq 5$  的地震,观测点周围 200 km 内  $5 > M_s \geq 4$  的地震,观测点周围 100 km 内  $4 > M_s \geq 3$  的地震<sup>[8]</sup>。

分量钻孔应变仪观测数据可以分解为面应变和差应变。面应变为两路互相垂直的径向位移之和,差应变为两路垂直的径向位移之差。差应变数据不受测长基准杆本身长度变化造成的漂移和探头处地层温度变化引起的漂移影响<sup>[7]</sup>,可以更好地反映地壳应力场变,也更有利于分析前兆异常。

2.1 湟源台分量钻孔应变差应变去趋势曲线分析

湟源台分量钻孔应变的差应变 1 的去趋势曲线如图 1 所示,呈缓慢下降年变趋势,曲线光滑、平稳。2008 年汶川 M8.0 地震、2008 和 2009 年海西地震、2010 年玉树 M7.1 地震、2013 年甘肃省定西市岷

县、漳县交界 M6.6 地震及 2013 年 9 月甘肃南裕固族自治县、青海门源自治县交界 M5.1 地震前,湟源台分量钻孔应变差应变 1 与一般多项式分段曲线拟合值之差有超 2 倍标准差异异常,且多数异常出现在发震前半年内,属于短期异常。2012 年甘肃省肃南裕固族自治县、天祝藏族自治县、青海省门源回族自治县交界 M4.9 地震和 2013 年芦山 M7 地震前无超差异异常。可见湟源台分量钻孔应变差应变 1 去趋势曲线在大部分地震前有短期超差异异常。

2.2 德令哈台分量钻孔应变剩余曲线分析

德令哈台分量钻孔应变仪自架设以来,观测资料连续,但 4 路应变曲线起伏大、不太稳定,可能是由于特定的地层条件使得该仪器的气压影响系数较大,而曲线起伏基本上是长周期气压影响所致。因此选取德令哈分量钻孔应变的差应变曲线进行分析。

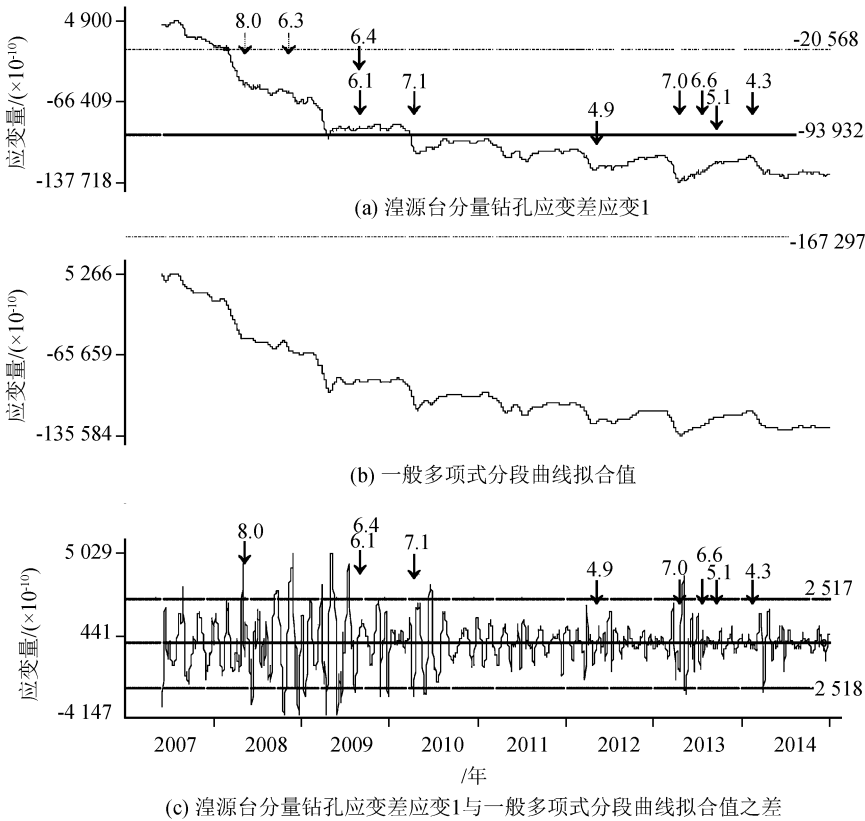


图 1 湟源台分量钻孔应变差应变去趋势曲线

Fig.1 Detrending curves of the shear strain recorded by the borehole strainmeter at Huangyuan station

县、漳县交界 M6.6 地震及 2013 年 9 月甘肃南裕固族自治县、青海门源自治县交界 M5.1 地震前,湟源台分量钻孔应变的差应变 1 的剩余曲线见图 2。2008 年汶川 M8.0 地震、2008 年海西 M6.3 地震、2010 年玉树 M7.1 地震、2013 年海西 M5.0 地震、2014 年 1 月德令哈市 M3.1 地震及 2014 年海西乌兰县 M5.1 地震前,德令哈台分量钻

孔应变差应变 1 剩余曲线有超 2 倍标准差异异常,且多数异常出现在发震前半年内,属于短期异常。2009 年海西 M6.4 地震、2013 年 3 月德令哈市 M4.0 地震(震中距 18 km)、2013 年 4 月德令哈市 M3.8 地震(震中 18 km)震前无超差数

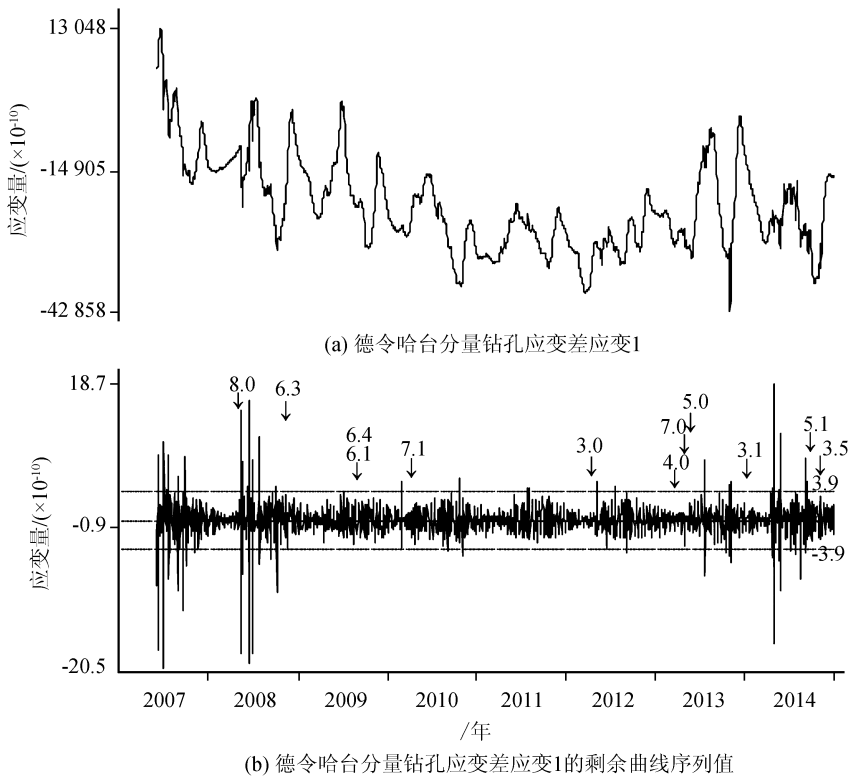


图 2 德令哈台分量钻孔应变差应变 1 剩余曲线序列值

Fig.2 The residual curve's sequence value of shear strain 1 recorded by the borehole strainmeter at Delingha station

据。可见德令哈台分量钻孔应变差应变剩余曲线在大部分地震前有短期超差异常<sup>[9]</sup>。

3 同震研究

3.1 同震响应幅度对比

青海分量钻孔应变仪观测质量较好,符合扫描范围内的地震都有清晰的同震响应曲线,甚至有不少超过规范扫描范围的地震也有较好的同震曲线。中强地震同震曲线多表现为震荡,震级小的近震多表现为阶跃<sup>[10]</sup>。

分量钻孔应变仪的同震响应幅度与震级、震中距两因素都有关。多台仪器同震幅度分析,震级相同时,多数情况同震响应幅度与震中距成反比,少数成正比。从表 2 青海省 6 套分量钻孔应变仪 NS 分量的同震情况统计中可以看出,2008 年汶川地震、2009 年青海海西地震和 2010 年青海玉树地震的同震响应幅度大多与震中距成反比,即震中距越大,仪器同震幅度越小;2008 年青海海西地震和 2013 年四川庐山地震的同震响应幅度大多与震中距成正比,即震中距越大,同震响应幅度越大。单台仪器同震幅度分析,对于同一个观测系统,一般同震响应幅

度与震级成正比关系,震级越大,仪器同震幅度就越大。图 3 是 3 套仪器几次强震时的同震幅度曲线,图中 2008—2009 年三次青海海西地震,震中距接近,三个台站的同震幅度关系都是  $A_{6.4} > A_{6.3} > A_{6.1}$ 。震中距接近,震级与同震幅度成正比关系,即震级越大,同震幅度越大<sup>[11-12]</sup>。

3.2 同震响应延迟时间

从图 4 中可以看出,分量钻孔应变的同震响应延迟时间多数与地震的震中距成正比,即与震中距离越远,分量钻孔应变的同震响应延迟时间越长。因前兆台网数据库中分量钻孔应变仪数据是分数数据,响应延迟时间统计只能精确到分钟。

3.3 同震持续时间

分量钻孔应变的同震响应持续时间(统计到分钟)与震级基本成正比。对于同一台站,震级越大,地震越强,分量钻孔应变的同震响应持续时间越长。震级大的地震引起的同震持续时间比震级小的地震引起的同震持续时间长。不同台站,仪器、测点环境等各方面有差异,目前未发现明显规律。

4 结论和讨论

对青海省 6 套分量钻孔应变仪资料质量与震

前、震时映震效能进行分析,初步得到如下认识:

(1) 青海省分量钻孔应变仪除门源台外,观测数据连续率、相关系数较高,观测资料稳定、可靠,可为预报分析、研究所用。

(2) 湟源台分量钻孔应变差应变去趋势曲线大部分地震前有短期超差异常。德令哈台分量钻孔应变差应变剩余曲线大部分地震前有短期超差异常。

(3) 分量钻孔应变仪的同震响应幅度与震级、震中距都有关。多台仪器对同一地震,多数情况同震响应幅度与震中距成反比,少数成正比。单台仪器,震中距接近,同震幅度与震级成正比关系,即震

级越大,同震幅度越大;分量钻孔应变仪的同震响应延迟时间大多与地震的震中距成正比,震中距越远,同震响应延迟时间越长;分量钻孔应变仪同震持续时间与震级基本成正比,震级越大,地震越强,同震响应持续时间越长。

因前兆台网数据库中分量钻孔应变仪数据是分钟数据,做延迟、持续时间分析时,只能统计到分钟。统计结果误差较大,如果记录的数据有秒数据,可以做较为精确的同震分析,更有助于总结同震特征。若积累更长时段的资料作分析,将会更有价值和说服力。

表 2 青海省分量钻孔应变仪强震同震情况统计

| Table 2 Statistics of coseismic responses to strong shocks recorded by the boreholes strainmetes in Qinghai province |             |               |     |         |                                       |              |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------|-----|---------|---------------------------------------|--------------|----------------|
| 发震时间                                                                                                                 | 震级 <i>M</i> | 发震地点          | 台站  | 震中距 /km | NS 分量同震响应<br>幅度/( $\times 10^{-10}$ ) | 响应延迟<br>分钟/m | 响应持续<br>时间分钟/m |
| 2008-05-12 T14:28                                                                                                    | 8           | 四川汶川县         | 乐都  | 634     | 40 968                                | 1            | 241            |
|                                                                                                                      |             |               | 湟源  | 662     | 21 480                                | 2            | 190            |
|                                                                                                                      |             |               | 门源  | 742     | 9 010                                 | 2            | 243            |
|                                                                                                                      |             |               | 德令哈 | 900     | 7 212                                 | 3            | 192            |
|                                                                                                                      |             |               | 格尔木 | 996     | 1 790                                 | 5            | 217            |
|                                                                                                                      |             |               | 玉树  | 597     | 11 230                                | 2            | 193            |
| 2008-11-10 T9:22                                                                                                     | 6.3         | 青海省海西蒙古族藏族自治州 | 乐都  | 833     | 410                                   | 2            | 47             |
|                                                                                                                      |             |               | 湟源  | 481     | 1 082                                 | 1            | 48             |
|                                                                                                                      |             |               | 门源  | 485     | 1 336                                 | 4            | 55             |
|                                                                                                                      |             |               | 德令哈 | 133     | 549                                   | 1            | 33             |
|                                                                                                                      |             |               | 格尔木 | 186     | 708                                   | 1            | 12             |
|                                                                                                                      |             |               | 玉树  | 522     | 448                                   | 2            | 50             |
| 2009-08-28 T9:52                                                                                                     | 6.4         | 青海海西          | 乐都  | 833     | 302                                   | 2            | 42             |
|                                                                                                                      |             |               | 湟源  | 481     | 776                                   | 1            | 43             |
|                                                                                                                      |             |               | 门源  | 485     | 1 880                                 | 4            | 40             |
|                                                                                                                      |             |               | 德令哈 | 133     | 7 168                                 | 1            | 54             |
|                                                                                                                      |             |               | 格尔木 | 200     | 814                                   | 0            | 42             |
|                                                                                                                      |             |               | 玉树  | 522     | 598                                   | 2            | 51             |
| 2009-08-31 T18:16                                                                                                    | 6.1         | 青海海西          | 乐都  | 826     | 157                                   | 2            | 18             |
|                                                                                                                      |             |               | 湟源  | 475     | 544                                   | 2            | 21             |
|                                                                                                                      |             |               | 门源  | 476     | 454                                   | 1            | 17             |
|                                                                                                                      |             |               | 德令哈 | 127     | 296                                   | 0            | 9              |
|                                                                                                                      |             |               | 格尔木 | 200     | 100                                   | 1            | 12             |
|                                                                                                                      |             |               | 玉树  | 530     | 138                                   | 2            | 27             |
| 2010-04-14 T7:49                                                                                                     | 7.1         | 青海玉树          | 乐都  | 868     | 2 268                                 | 2            | 63             |
|                                                                                                                      |             |               | 湟源  | 569     | 2 044                                 | 2            | 70             |
|                                                                                                                      |             |               | 门源  | 653     | 7 518                                 | 3            | 70             |
|                                                                                                                      |             |               | 德令哈 | 480     | 3 176                                 | 2            | 63             |
|                                                                                                                      |             |               | 格尔木 | 381     | 352                                   | 2            | 57             |
|                                                                                                                      |             |               | 玉树  | 33      | 84 104                                | 0            | 靠摆             |
| 2013-04-20 T8:02                                                                                                     | 7           | 四川省雅安市芦山县     | 乐都  | 720     | 388                                   | 5            | 104            |
|                                                                                                                      |             |               | 湟源  | 728     | 402                                   | 3            | 105            |
|                                                                                                                      |             |               | 门源  | 811     | 1 004                                 | 4            | 98             |
|                                                                                                                      |             |               | 德令哈 | 942     | 1 004                                 | 2            | 80             |
|                                                                                                                      |             |               | 格尔木 | 1 017   | 220                                   | 5            | 54             |
|                                                                                                                      |             |               | 玉树  | 641     | 302                                   | 2            | 100            |

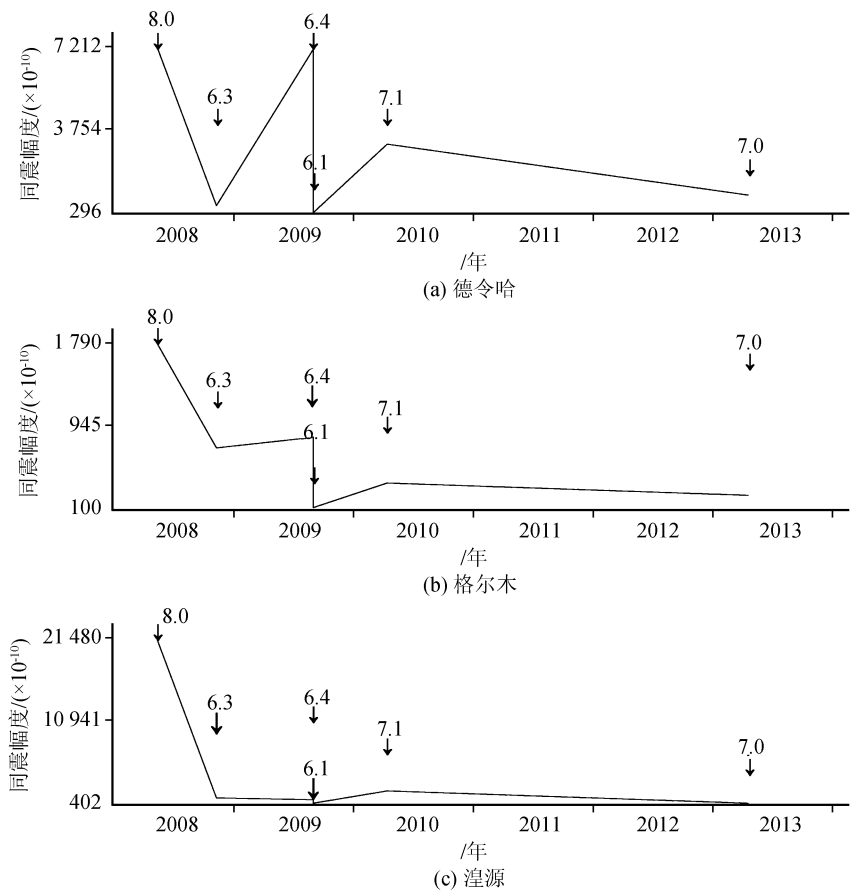


图 3 多台同震幅度曲线

Fig.3 Coseismic amplitude curves of three stations

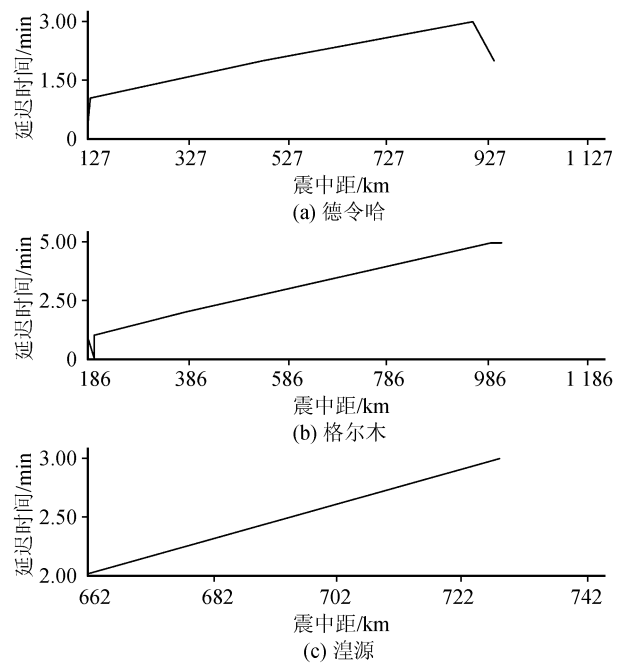


图 4 多台同震响应延迟与震中距关系图

Fig.4 The relationship diagram between coseismic response delay time and epicentral distance of three stations

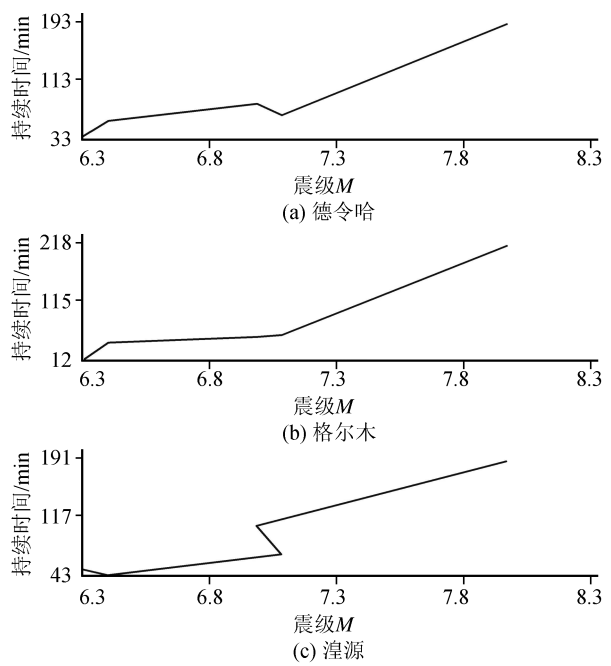


图 5 震级与同震持续时间关系图

Fig.5 The relationship diagram between coseismic response duration and magnitude

## 参考文献(References)

- [1] 邱泽华.中国分量钻孔地应力-应变观测发展重要事件回顾[J].大地测量与地球动力学,2010,30(5):42-47.  
QIU Ze-hua.A Review of Component Borehole Observation of Stress-strain in China[J].Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010,30(5):42-47.(in Chinese)
- [2] 卢双玲,李峰,王强,等.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,2008,26(2):49-64.  
LU Shuang-ling,LI Feng,WANG Qiang,et al.Analysis on the Aberrance of Solid Tide from Borehole Strain in Tai'an Seismic Station[J].North China Earthquake Science, 2008,26(2):49-64.(in Chinese)
- [3] 王玉莹,王爱东,赵永志,等.中强地震前朝阳地震台地倾斜异常特征分析[J].东北地震研究,2008,24(1):1-7.  
WANG Yu-ying,WANG Ai-dong,ZHAO Yong-zhi,et al.Analysis on the Anomalous Characters of Ground Tilt before Moderately-strong Earthquake at the Chaoyang Seismic Station[J].Seismological Research of Northeast China,2008,24(1):1-7.(in Chinese)
- [4] 夏孝田,高淳县地震台钻孔分量应变观测质量评价和映震效能研究[J].高原地震,2011,23(2):44-48.  
XIA Xiao-tian.Observation Quality Evaluation and Seismic Reflection Efficiency of the Component Borehole Strainmeter in Gaochun Seismic Station[J].Plateau Earthquake Research, 2011,23(2):44-48.(in Chinese)
- [5] 薛生瑞,高翠珍,王晓霞,等.山西离石中心地震台水管仪与水平摆倾斜仪同震响应对比析[J].山西地震,2014(3):1-4.  
XUE Sheng-rui,GAO Cui-zhen,WANG Xiao-xia,et al.Comparison of Coseismic Response of Water Tube Tiltmeter and Horizontal Pendulum Tiltmeter at Lishi Central Seismological Station in Shanxi Province[J].Shanxi Earthquake Research, 2014(3):1-4.(in Chinese)
- [6] 青海省地震局.青海省地震监测志[M].北京:地震出版社,2005:1-6.  
Earthquake Administration of Qinghai Province.Earthquake Monitoring of Qinghai Province[M].Beijing:Seismological Press,2005:1-6.(in Chinese)
- [7] 池顺良,池毅,邓涛,等.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,2009(1):1-13.  
CHI Shun-liang,CHI Yi,DENG Tao,et al.The Necessity of Building National Strain-Observation Network from the Strain Abnormality before Wenchuan Earthquake[J].Recent Development in World Seismology,2009(1):1-13.(in Chinese)
- [8] 乔子云,陈建国.应变固体潮 Nakai 拟合检验及潮汐变化的映震效果[J].地震,2001,21(3):85-90.  
QIAO Zi-yun,CHEN Jian-guo.The Earthquake-reflecting Effect of Nakai Fitting and Tidal Analysis of Earth Strain Tide Data[J].Earthquake,2001,21(3):85-90.(in Chinese)
- [9] 姜振海,翟伟,王小娟.甘肃岷县漳县  $M_s6.6$  地震与甘肃形变异常情况探讨[J].地震工程学报,2013,35(3):549-556.  
JIANG Zhen-hai,ZHAI Wei,WANG Xiao-juan.Analysis of the Relationship between Abnormal Groud Deformation of Gansu and the Minxia-Zhangxiang  $M_s6.6$  Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):549-556.(in Chinese)
- [10] 李希亮,刘希强,张玲,等.高阶统计量在形变固体潮汐异常信息提取中的应用[J].地震工程学报,2012,34(4):359-364  
LI Xi-liang,LIU Xi-jiang,ZHANG Ling,et al.Application of Higher-order Statistics on Extracting the Tidal Deformation Anomalies[J].China Earthquake Engineering Journal,2012,34(4):359-364.(in Chinese)
- [11] 郭明瑞,郭昱琴,胡久常,等.琼中地震台重力仪记录同震响应特征分析[J].地震工程学报,2013,35(3):698-701.  
GUO Ming-rui,GUO Yu-qin,HU Jiu-chang,et al.Analysis of the Characteristics of the Coseismic Response of the Gravity Instrument at the Qiongzong Seismostation[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):698-701.(in Chinese)
- [12] 牛安福,张晶,吉平,等.强地震引起的同震形变响应[J].内陆地震,2005,19(1):1-7.  
NIU An-fu,ZHANG Jing,JI Ping,et al.Coseismic Deformation Response of Strong Earthquake[J].Inland Earthquake, 2005,19(1):1-7.(in Chinese)