

- plex Topography under Incident SV Seismic Waves[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 60(7): 2779-2790.
- [4] 王海云, 谢礼立. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1631-1638.  
WANG Haiyun, XIE Lili. Effects of Topography on Ground Motion in the Xishan Park, Zigong City[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(7): 1631-1638.
- [5] YUAN Xiaoming, MEN Fulu. Scattering of Plane SH Waves by a Semi-cylindrical Hill[J]. Earthq Eng Struct Dyn, 1992, 21: 1091-1098.
- [6] 袁晓铭, 廖振鹏. 任意圆弧形凸起地形对平面 SH 波的散射[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(2): 1-13.  
YUAN Xiaoming, LIAO Zhenpeng. Scattering of Plane SH Waves by a Cylindrical Hill of Circular-arc Cross-section[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(2): 1-13.
- [7] 梁建文, 张郁山, 顾晓鲁, 等. 圆弧形层状凹陷地形对平面 SH 波的散射[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 158-165.  
LIANG Jianwen, ZHANG Yushan, GU Xiao-lu, et al. Scattering of Plane SH Waves by a Circular-Arc Layered Canyon[J]. Journal of Engineering Vibration, 2003, 16(2): 158-165.
- [8] FUYUKI M, MATSUMOTO Y. Finite Difference Analysis of Rayleigh Wave Scattering at Trench. Bull Seism Soc Am, 1980, 70: 2051-2069.
- [9] GE Zengxi, CHEN Xiaofei. An Efficient Approach for Simulating Wave Propagation with the Boundary Element Method in Multi Layered Media with Irregular Interfaces[J]. Bull Seism Soc Am, 2008, 98(6): 3007-3016.
- [10] 蒋涵, 周红, 高孟潭. 山脊线于坡度和峰值速度放大系数的相关性研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(1): 229-237.  
JIANG Han, ZHOU Hong, GAO Mengtan. A Study on the Correlation of Ridge Line and Slope with Peak Ground Velocity Amplification Factor[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1): 229-237.
- [11] 蒋涵, 周红, 高孟潭. 三维地形中地震动的频域特征——以庐山地区为例[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(1): 59-67.  
JIANG Han, ZHOU Hong, GAO Mengtan. A Study on the Correlation of Ridge Line and Slope with Peak Ground Velocity Amplification Factor[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(1): 59-67.
- [12] 刘晶波. 局部不规则地形对地震地面运动的影响[J]. 地震学报, 1996, 18(2): 239-245.  
LIU Jingbo. Impact on Earthquake Ground Motion by Local Irregular Terrain[J]. Journal of Earthquake, 1996, 18(2): 239-245.
- [13] 荣棉水, 李小军. 局部地形对入射 P 波谱特性的影响分析[J]. 西北地震学报, 2007, 29(4): 297-302.  
RONG Mianshui, LI Xiaojun. Effect Analysis of Topography on the Spectrum Property of Incident P Waves[J]. North Western Seismological Journal, 2007, 29(4): 297-302.
- [14] 李英民, 王丽萍, 赵耀. 岩质坡地建筑设计水平地震动放大系数的确定[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(4): 11-17.  
LI Yingmin, WANG Liping, ZHAO Yao. Amplification Factors of Design Horizontal Ground Motions for Structures on Rock Slopes[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(4): 11-17.
- [15] 金丹丹, 陈国兴, 董菲. 多地貌单元复合场地非线性地震效应特征二维分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1818-1824.  
JIN Dandan, CHEN Guoxing, DONG Feifan. 2D Analysis of Nonlinear Seismic Effect Characteristics of Multi-geomorphic Composite Site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1818-1824.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [17] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.  
LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent Viscous-spring Artificial Boundaries and Viscous-spring Boundary Elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075.

张昱,冯建刚,范兵,等.岷县—漳县  $M_S6.6$  地震前后甘肃前兆异常及响应特征[J].地震工程学报,2021,43(1):19-27.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.019

ZHANG Yu, FENG Jian'gang, FAN Bing, et al. Precursor Anomalies and Response Characteristics in Gansu Province Before and After the Minxian—Zhangxian  $M_S6.6$  Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(1): 19-27. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.019

## 岷县—漳县 $M_S6.6$ 地震前后甘肃 前兆异常及响应特征

张昱, 冯建刚, 范兵, 曹玲玲, 郑卫平, 陈瑶, 李春燕, 姜佳佳

(甘肃省地震局, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 分析总结了2013年7月22日甘肃岷县—漳县  $M_S6.6$  地震前后甘肃前兆台网观测资料变化情况,发现该地震前有7个台站、4种观测手段、14个测项出现了明显的异常,既有长期、中长期异常,也有短期和短临异常,说明对资料的分析既要看短期变化,还要看中期和长期变化。出现异常测点的震中距多数在200 km范围之内。另外部分水位、流量和水温测点的资料记录到不同程度的同震效应;形变观测多数测点记录到比较明显的同震响应,记录同震响应的测点与震中位置、方向、距离无明显关系。

**关键词:** 甘肃; 岷县—漳县地震; 前兆异常; 同震响应

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)01-0019-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.019

## Precursor Anomalies and Response Characteristics in Gansu Province Before and After the Minxian—Zhangxian $M_S6.6$ Earthquake

ZHANG Yu, FENG Jian'gang, FAN Bing, CAO Lingling, ZHENG Weiping,

CHEN Yao, LI Chunyan, JIANG Jiajia

(Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** In this study, we analyzed and summarized the observation data from the Gansu precursor network before and after the Minxian—Zhangxian  $M_S6.6$  earthquake in Gansu on July 22, 2013, and found that there were obvious anomalies at seven stations, 4 observation methods, and 14 test items before the earthquake, including long-term, mid-term, short-term, and impending anomalies. Most epicenter distances with anomalous measuring points were within 200 km. In addition, different degrees of co-seismic effects were recorded by the water level, flow rate, and water temperature measuring point data. Obvious co-seismic responses were recorded by most measuring points of the deformation observation. The measuring points of the recorded co-seismic responses have no obvious relation with the location, direction, and distance of the epicenter.

收稿日期: 2019-02-05

基金项目: 甘肃省地震局地震科技发展基金(2014Q04); 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地基本科研业务费专项(2017IESLZ07)

第一作者简介: 张昱(1963—), 女, 甘肃秦安人, 高级工程师, 主要从事地下流体地震分析预报等研究。E-mail: zhangy@gsdzj.gov.cn。

通信作者: 冯建刚(1977—), 男, 山西屯留人, 副研究员, 主要从事地震预测、预报方面研究。

**Keywords:** Gansu; Minxian—Zhangxian  $M_s6.6$  earthquake; precursory anomalies; co-seismic response

## 0 引言

地震的孕育与发生不是一个孤立的发展过程,而是一个非常复杂的物理化学过程。地震往往伴随着地壳介质物理化学特性和物理化学场的异常信息,我们把这种地震前出现的与地震发生孕育有关的自然现象称之为前兆现象<sup>[1]</sup>。通常地震前兆分为宏观前兆和微观前兆,宏观前兆是人能直接觉察到的现象,微观前兆是人无法觉察的,必须通过专业的观测仪器才能测量到的前兆现象<sup>[1]</sup>,如地形变、地电、地磁、地下流体物理量与化学量的变化。要捕捉前兆异常信息,必须要具有一定规模的前兆观测台网,并进行长时间的动态跟踪。

几十年来,甘肃前兆观测积累了丰富的资料,也有不少震例资料<sup>[2-5]</sup>,表明前兆异常是客观存在的。但地壳实际构造介质条件相当复杂,震中附近不同台站(甚至同一台站的不同测项)异常时间、幅度也不尽一致<sup>[4]</sup>,这也说明地震前兆异常的复杂性。

甘肃及周边均是多震省份,历史上发生过不少大地震。20世纪80年代以来,发生过多次 $M_s5.0$ 以上地震,比如1990年共和 $M_s7.0$ 地震、天祝—景泰 $M_s6.2$ 地震,2000年景泰 $M_s5.9$ 地震,2003年民乐—山丹 $M_s6.1$ 地震,2013年岷县—漳县 $M_s6.6$

地震等,而且在多次地震前,甘肃及周边地区的前兆观测资料出现了不少的变化,不少学者也做过分析研究<sup>[2-5]</sup>。

本文总结了2013年甘肃岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震前后甘肃前兆异常及响应特征,发现该地震前有14个测项出现了异常,既有长期、中长期异常,也有短期和短临异常,部分流体测项和大多数形变测项出现同震响应。本文希望通过对这次地震前后资料变化的总结,能给予以后的地震预报工作中有一定的借鉴作用。

## 1 台网基本情况

甘肃地区前兆观测台网共有6个中心台,33个台站,包括50多个子台,分流体、形变、电磁三大学科,20多种观测手段,300多个测项。震中500 km范围内,共有25个前兆观测台站,包括40个子台;主要观测项目有:(1)地下流体:包括水位(流量)、水温、水氡、气氡、气汞、气体、离子等观测手段;(2)电磁类:包括地电阻率、自然电位、电场、低频电磁扰动、地磁不同观测等手段;(3)形变类:包括水管倾斜、钻孔倾斜、水平摆、钻孔应变、洞体应变、重力等观测手段。图1为500 km范围观测台站及异常(彩色)台站分布图。

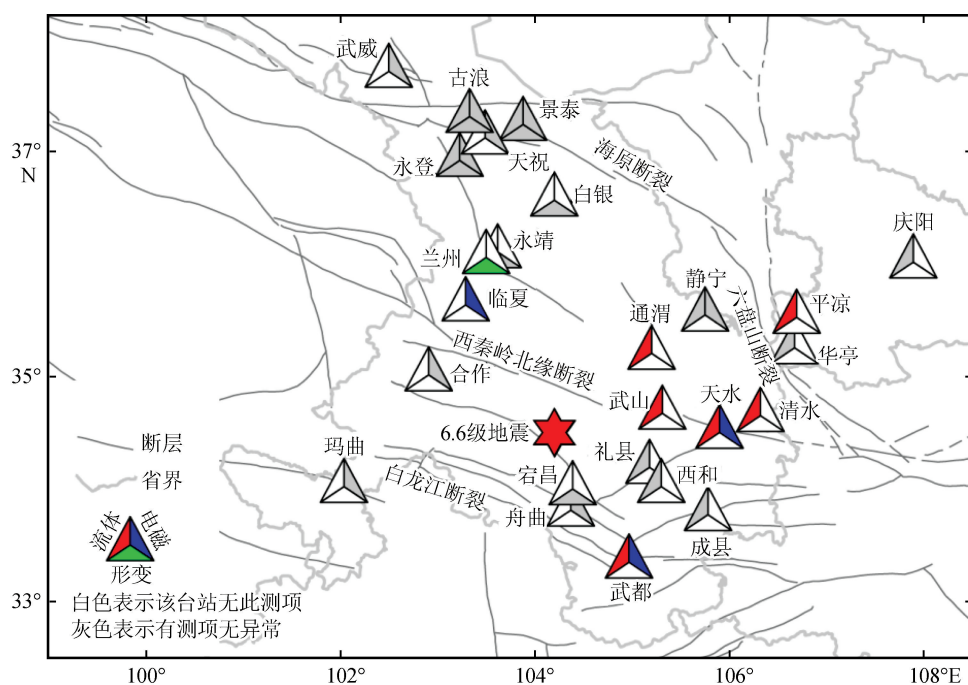


图1 观测台站及异常台站分布图

Fig.1 Distribution map of observation stations and abnormal stations

## 2 $M_s6.6$ 地震震前异常分析讨论

### 2.1 前兆异常

本文分析总结了2013年7月22日甘肃岷县—漳县  $M_s6.6$  地震前甘肃前兆台网观测资料变化情况,发现该地震前甘肃前兆观测台网有7个台站、4

种观测手段、14个测项出现了比较明显的异常变化(表1),既有长期、中长期异常,也有短期异常和短临异常,出现异常的测点震中距多数在200 km范围之内。以往甘肃前兆台网也出现过一些不同时间尺度的异常<sup>[2-5]</sup>。

出现异常变化的流体测项有9个,其中流量

表1 岷县—漳县  $M_s6.6$  地震前兆异常登记表

Table 1 Precursor anomalies before the Minxian—Zhangxian  $M_s6.6$  earthquake

异常项目	测点	异常特征	震前异常起止时间	震中距/km
水氡	武山1号泉	转折上升	2012-02—2013-09	83
水氡	武山22号井	转折上升	2012-02—2013-09	83
水氡	通渭温泉	上升加速下降	2011-01—2013-02	120
电阻率	临夏(2道)	破年变 低值	2013-12—2013-06	126
电阻率	天水(3测道)	振荡波动	2013-04—2013-07	150
水氡	武都	趋势下降	2011-05—2013-12	150
水氡	天水花牛	高值	2013-04—2013-08	155
流量	清水李沟	高值	2012-04—2012-07	179
水温	清水温泉	低值	2013-07—2012-07	185
水氡	平凉北山1号泉	破年变 低值	2012-10—2013-04	260
水氡	平凉北山2号泉	高值	2013-02—2013-12	260

1项、水温1项、水氡7项。清水流量观测资料不受当地降雨影响,地震前观测资料稳定,资料可信度较高。清水水温观测井深402 m,观测仪器稳定,周围环境无干扰,水温资料真实可靠。7个水氡观测点只有通渭温泉水氡部分时段存在抽水干扰,而这个测点出现的是长期异常,抽水干扰对资料的长期变化影响不是很大,观测资料的变化可以作为参考异常。

#### 2.1.1 短临异常

该地震前明显出现短临异常的测点只有清水温泉水温,而天水电阻率为短期至短临异常。

清水温泉水温观测资料始于2007年7月,多年来资料连续稳定,整体呈上升趋势。岷县—漳县  $M_s6.6$  地震前11天资料出现下降,下降幅度为 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,显示出震前短临异常(图2),期间观测仪器正常,环境无干扰,异常可信度较高。

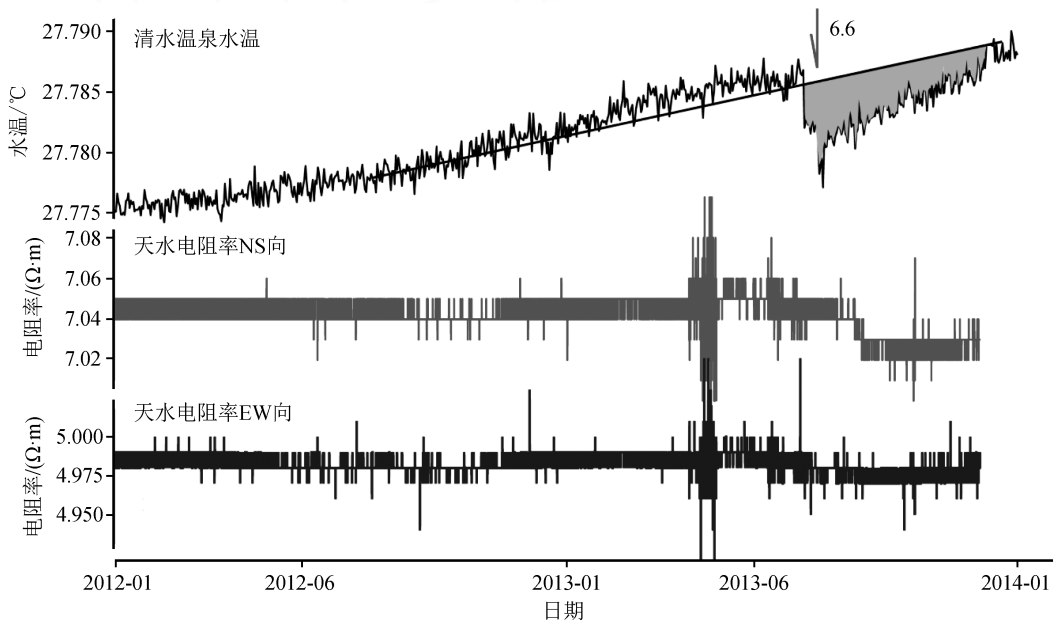


图2 清水温泉水温、天水深井电阻率整点值曲线

Fig.2 Hourly value curves of water temperature at Qingshui hot spring and earth resistivity at Tianshui deep well

天水深井电阻率观测始于2011年11月,自观测以来,测值比较平稳,变化幅度很小。2013年4月10日整点值曲线开始出现小幅振荡,18日开始较大幅度振荡,20日发生四川芦山7.0级地震,震前最大幅度为4.4%,日均值曲线也表现为短时间的大幅度振荡,真正大幅度的波动出现在4月21日至5月2日(图2),之后EW、NS两道陆续出现一些小幅波动,6月12日开始整点值曲线再次出现比较连续的小幅振荡,6月15日至7月8日间歇性出现振荡和突跳,其中NS道、EW道比较明显,NW道资料震前异常没有另外两道明显,震前最大幅度为2.6%,7月14日后振幅减小,7月22日发生岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震,认为天水井下地电阻率较大幅度波动变化为岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震的短期至短临

前兆异常。

### 2.1.2 短期及中短期异常

出现短期异常的测点有天水花牛水氡、平凉北山2号泉水氡。临夏电阻率两道开始上升时间为2013年1月左右,快速下降时间为2013年5月初,为中期至短期异常;平凉北山1号泉水氡为中期异常。

#### (1) 短期异常

天水花牛水氡以往观测资料正常背景呈下降速率比较稳定的趋势,趋势下降中出现高值时为震前异常。2013年4月开始出现了比较快速的上升变化,测值明显偏高,属于短期异常变化,这种变化一直持续到地震发生,震后测值基本恢复(图3),异常持续时间为3个月左右。

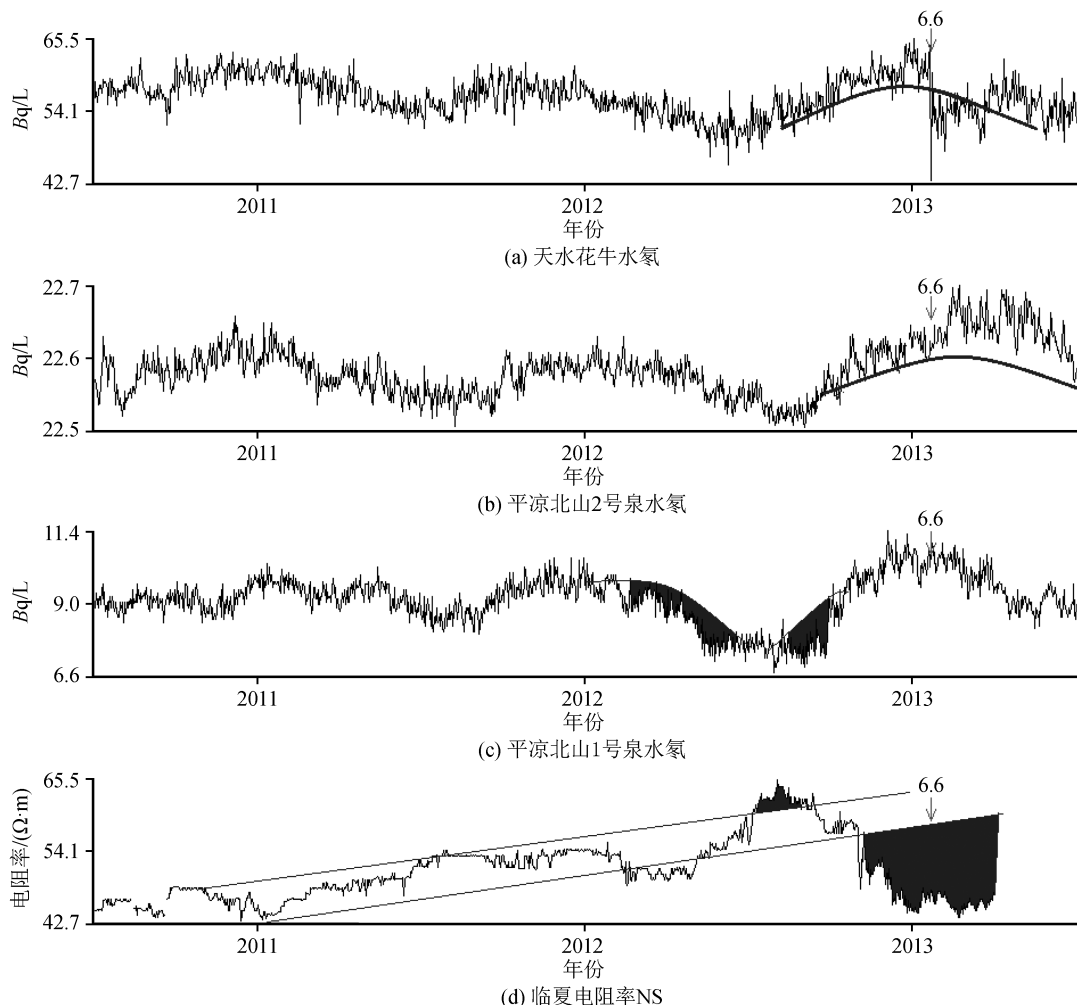


图3 天水花牛水氡、平凉北山2号泉水氡、平凉北山1号泉水氡、临夏电阻率NS向观测曲线

Fig.3 Observation curves of Huaniu water radon in Tianshui, and Beishan No.1, No.2 spring in Pingliang, and NS-direction resistivity in Linxia

平凉北山2号泉水氡以往观测资料有比较明显的年变形态,略有逐年下降的趋势,并且年初上升比

较缓慢。2013年3月份转折后,上升速率快于正常年份,并且4月份测值已经达到以往正常年份的最

高值,高值异常持续到地震发生(图3)。震后的8月3日开始,测值又出现大幅上升变化,异常出现在震前4个月,2013年底资料基本恢复正常。

### (2) 中短期异常

临夏电阻率观测始于1981年,以往也有过震前异常。期间多次出现环境线路影响,进行过线路改造。2011年以来测值基本稳定,2012年底NS、EW两道出现上升(图3),测值明显高于2011年至2012年,2013年5月初开始快速下降,地震之后两个多月转折回返(后续线路改造,资料至9月底)。

平凉北山1号泉与北山2号泉相距较近,2012年10月中旬左右出现下降速率增大的异常变化(图3),11月开始转平,测值偏低,一直持续到2013年3月18日之后测值恢复,出现正常年变,异常出现在震前9个月左右,异常持续时间5个月左右。

### 2.1.3 长期异常

该地震前出现长期异常的测项有武山1号泉水氡、武山22号井水氡,清水流量,通渭温泉水氡和武都殿沟水氡。图4为部分测项的观测曲线。

武山1号泉水氡在2008年汶川地震之后整体

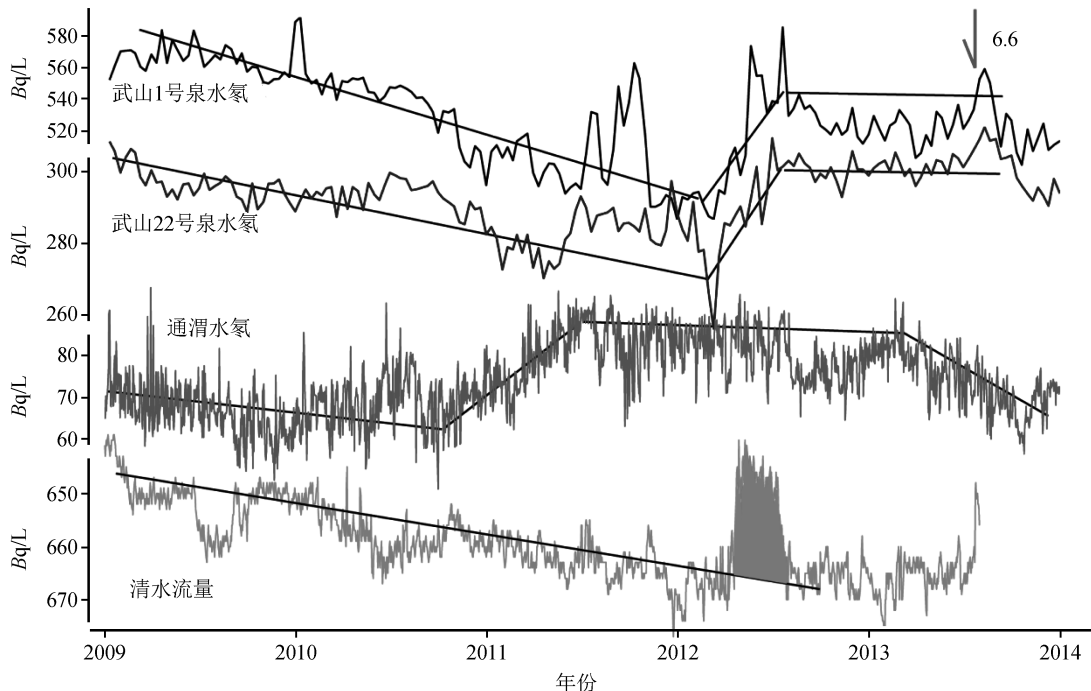


图4 武山1号泉、武山22号井水氡、通渭水氡、清水流量观测曲线

Fig.4 Observation curves of water radon of Wushan No.1 spring and No.22 well and Tongwei hot spring, and discharge of Qingshui hot spring

为下降趋势;2011年6月下旬至最低,之后出现波动,2011年11月初结束,2012年3月出现快速转折上升,6月达到最高值,之后转平,在平稳变化过程中发生岷县—漳县  $M_s6.6$  地震,震后测值缓慢恢复(图4)。

武山22号井距离武山1号泉几十米,也是在2008年汶川地震之后出现趋势下降,2011年4月底之后出现一些高值波动,2012年3月开始出现上升,6月转平,地震之后持续高值,2013年9月底至10月初开始下降,测值基本恢复到震前水平。异常出现时间在震前1年4个多月。武山1号泉水氡和武山22号井水氡两个测点异常出现的时间和形态比较相似(图4)。

清水流量观测资料多年来整体呈下降趋势,以往震例为在下降的基础上出现高值或高值结束之后发生地震。2012年4月出现的高值异常比较明显,持续时间为3个月,至2013年7月下旬结束(在这期间,进行过现场调查,未发现明显的环境干扰和人为影响),上升幅度达到26 s,以往该测点出现异常结束至震前最长时间为9个月,这次在异常结束一年后发生地震,测点距震中180 km左右,地震之后的上升为同震引起。

武都殿沟水氡在汶川地震时同震引起大幅上升,之后测值持续偏高;至2009年7月左右快速下降,下降到2009年底时达到了震前的水平,之后测值比较平稳;2011年5月开始又出现了快速的下降

变化直至地震发生,这个快速的下降变化认为是岷县—漳县  $M_s6.6$  地震的长期异常,地震之后出现转折波动略有上升。

通渭温泉水氡距离震中 120 km 左右。从旬均值曲线可以看出(图 4),观测资料为平稳变化的背景,2011 年 3 月左右开始出现快速的转折上升变化,7 月份达到最高值后又转平,一直持续至 2013 年 4 月底,之后快速下降;长期异常出现在震前两年半左右。由于该点受抽水影响,异常信度作为参考。

## 2.2 前兆异常特征讨论

综上所述,岷县—漳县  $M_s6.6$  地震前兆异常主要特征如下:

空间上大部分异常测点分布在西秦岭北缘断裂带及以北地区,多数测点震中距在 200 km 以内,只有平凉北山水氡震中距在 260 km 左右。异常的分布特征也受到监测台站分布的影响。从该地震看出,距离震中位置越近的台站,出现异常的测项较多。

时间上既有短临异常,又有短期、中短期、中期及长期异常,短临异常为清水水温,天水深井电阻率为短期至短临异常;短期至中短期异常有水氡、电阻率等,长期异常有流量、水氡等,虽然岷县—漳县  $M_s6.6$  地震前出现了部分可能的临震异常现象,但由于地震前兆的复杂性,在目前的认识水平下真正识别临震异常还是比较困难,比如清水温泉水温,以前也出现过一次类似这样的低值变化,但附近地区并无 5.0 级以上地震发生。

异常种类以流体异常为主,水氡测项异常形态主要有破年变、上升、下降和转折性变化;电阻率为整点值振荡、上升及下降异常。

这次  $M_s6.6$  地震多数观测点在 400 km 以内,从以上的讨论知道,出现明显异常的测点较少,异常观测项数占总观测项数的比例较低,这就说明地震前兆异常的复杂性,当然,这可能关系到多个方面的问题,如观测仪器的稳定性、观测环境的好坏、观测点自身的条件等。

另一方面,中短期异常也可能反映了南北地震带中北段的整体构造活动特征。异常出现后发生了 2013 年 4 月 20 日芦山  $M_s7.0$  和 7 月 22 日岷县—漳县  $M_s6.6$  地震,也就是说甘东南地区的中短期异常也可能是 2 次强震孕育过程,因为甘东南地区的几个异常测点距离芦山地震在 500 多公里,武都在 400 km 左右。同时,由于芦山  $M_s7.0$  地震发生,引起了南北地震带中北段应力场的调整和触发作用,

因此岷县—漳县  $M_s6.6$  地震的短期异常可能存在部分芦山  $M_s7.0$  地震的震后调整变化。

## 3 同震响应分析讨论

此次地震时,流体和形变学科有 17 个台站的 50 多个测项出现同震响应,流体学科主要出现在 200 km 以内,个别台站超过 300 km,形变学科出现同震响应的台站不受震中距限制。

### 3.1 流体观测资料同震响应分析

#### 3.1.1 流体观测资料同震响应

流体学科有 8 个台站的 10 个测项出现同震响应,其中水位(流量)有 8 个测项,清水李沟流量、礼县流量、平凉柳湖水位 3 个测项记录到比较明显的同震现象,另外 5 个水位测点记录到很微弱的同震现象。水温观测资料中,只有平凉柳湖水温和成县水温记录到比较明显的同震响应,其余资料基本不明显。

清水李沟流量、礼县流量每天早上 8 点钟观测,7 月 22 日那天观测时就观测到明显的同震响应,清水流量上升幅度为 15 s/L(图 5),以往观测资料在正常时段(环境无干扰、无异常)不会出现这么大幅度的变化,持续时间约 40 天,之后略有恢复。礼县流量观测资料平时波动较大,当天观测到 31 s/L 的上升变化,持续时间较短,20 天左右恢复到上升前的水平。平凉柳湖井这次地震时记录到比较明显的同震现象,地震的同时观测资料快速下降,3 小时之后基本恢复原来的趋势。其余几个水位测点记录到比较微弱的同震变化,形态有突降、脉冲,但幅度较小,持续时间很短,10 分钟之内基本恢复。

平凉柳湖水温观测资料变幅较大,但地震前后资料比较平稳,地震的同时快速下降,8 时 11 分左右下降至最低,下降幅度为 0.025 °C,之后缓慢恢复,两小时之内基本恢复正常(图 5)。成县水温观测资料多年来比较稳定,整体呈上升趋势。同震形态为缓慢下降,下午 14 时之后快速恢复,20 时开始基本恢复至正常水平,下降幅度为 0.011 °C。

#### 3.1.2 流体观测资料同震响应机理讨论

地下水位(流量)的同震变化,反映了地壳形变和地面震动引起地下介质贮层变形、孔隙疏通、裂缝的清理、产生裂缝等变化。地震引起水位同震变化主要有振荡和阶变两种形态,也有振荡中出现上升或下降变化的,也有上升或下降后随之发生振荡的。振荡型变化是指在地震波作用下水位快速来回波动,地下水位出现类似地震波的高频振荡,地震波经

过后水位很快平静下来。阶变型的同震变化是指在地震振动的作用下,地下水位阶变式的上升或下降变化,它反映了地下介质的孔隙、裂隙被疏通或地下

水力学特征发生改变,可能是塑性变化的结果。这种变化通常需要十几分钟多至几个月的时间才能恢复,也有同震引起永久性变化的<sup>[6-7]</sup>。

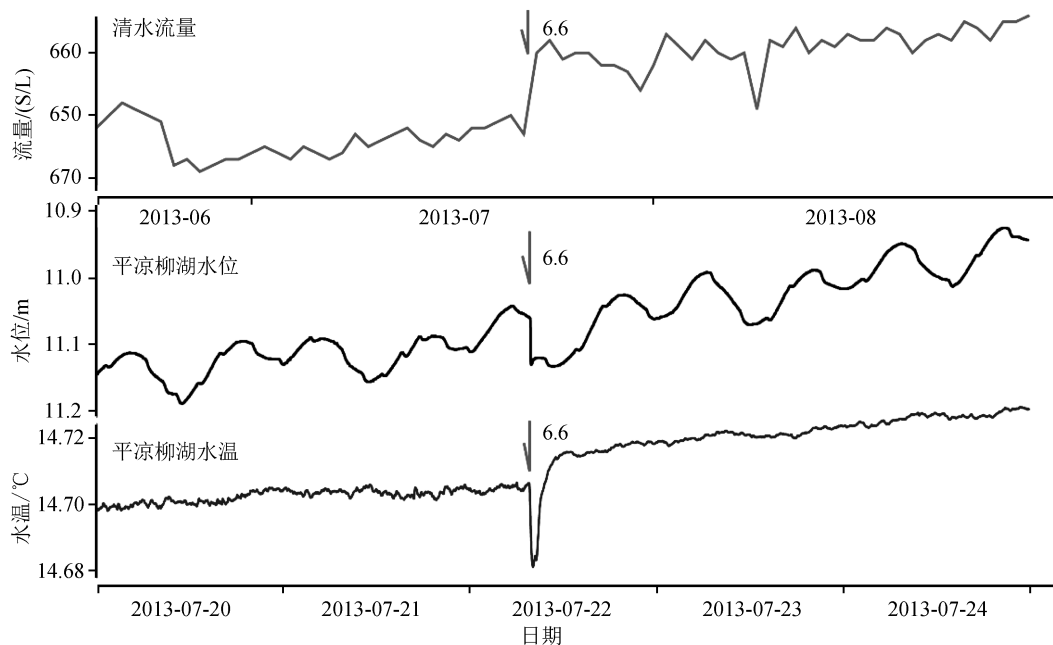


图 5 清水流量,平凉柳湖水位、水温同震图

Fig.5 Coseismic responses of discharge of Qingshui hot spring, and water level and temperature of Liuhu Lake in Pingliang

地震波作用引起的含水层介质形变可促使其孔隙压力发生变化,这种孔隙压力的变化会导致水流速度及水体与围岩间的热量变化。如果这种作用持续时间较长,则观测井内水体温度是一持续的变化过程;如果井-含水层系统在地震波作用下发生了塑性形变,那么井-含水层系统会在短时间内达到新的平衡,则井水温度会很快达到新的稳定状态。当然,井水温度的变化与井-含水层系统参数改变密切相关。地震发生时,地震波作用于含水层系统后,使其介质发生了变形,这种应力作用一方面激活了孔隙、裂隙中的充填物(如气体、滞水等),使得在空隙内运移的水体流动状态发生变化,导致各水体间及水体与围岩的热量交换加强或减弱,从而导致观测井内水体温度产生变化。多年来,前人对水位同震变化已有比较多的研究,而水温的同震响应现象近年来才引起地震学家的关注,而且比较复杂,这也说明水温的同震响应受多种因素的制约<sup>[6-8]</sup>。

### 3.2 形变观测同震响应分析讨论

形变学科有 11 个台站的 40 个测项出现不同程度的同震响应,多数测项很快恢复原来的动态,个别测项恢复时间较长,达到 2~3 个月左右的时间。观测仪器有洞体应变、钻孔应变、水管倾斜、钻孔倾斜、水平摆及重力等。图 6 为不同观测仪器记录的同震

响应。

#### 3.2.1 形变资料同震响应

##### (1) 洞体应变

洞体应变观测有 5 个台站,6 套仪器,所有仪器都记录到该地震的同震响应,只是个别测项不明显,记录同震响应的形态有突升、突降、正负脉冲、波动,也有突升、突降的同时出现正负脉冲,多数在几分钟之内恢复原来的动态,只有宕昌东西方向持续一天半之后恢复原来的动态。

##### (2) 水管倾斜仪

水管倾斜观测有 5 个台站,所有观测仪器都记录到该地震的同震响应。同震形态有突降、脉冲、波动、脉冲波动等。宕昌两个方向分别在震后 5 天和半年恢复原来动态,其余测点在几分钟至 1 小时内恢复原来动态。

##### (3) 钻孔应变

钻孔应变只有高台和临夏两个台站。高台钻孔应变 4 个分量均记录到同震响应,记录同震响应的形态均为短时波动。临夏钻孔应变 4 分量观测资料整体为下降趋势,地震时均记录到同震响应,北南向和北东向为短时波动,东西向和北西向为负脉冲波动,两个台站记录同震响应后在 20 分钟左右均恢复原来状态。



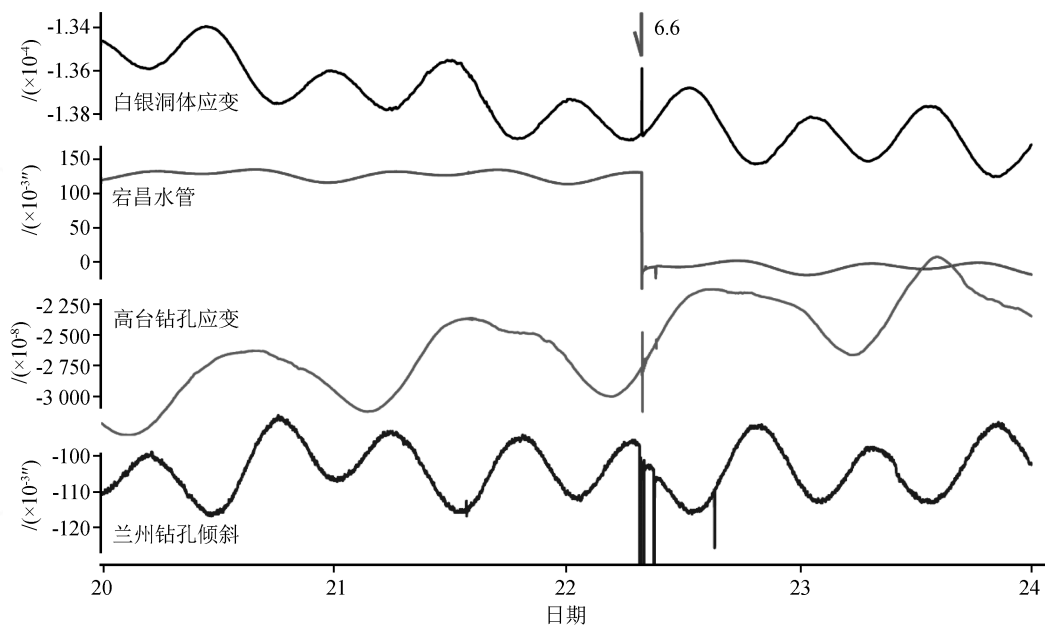


图6 形变不同观测仪器同震图

Fig.6 Coseismic map of different deformation observation instruments

### (1) 钻孔倾斜

地震前钻孔倾斜观测仪器正常的有6个台站,都记录到该地震的同震响应。同震形态以正负脉冲为主,只有高台钻孔倾斜为突升、突降变化,多数在10分钟之内恢复原来动态。

### (2) 水平摆

水平摆只有兰州十里店一个测点,两个方向均记录到明显的同震响应现象,北南向先突降后快速上升,下降幅度大于上升幅度,10分钟之内快速恢复原来动态,东西向出现正脉冲,也是快速恢复原来的变化形态。

### (3) 重力观测

重力观测有兰州十里店和高台2个台站。兰州重力在地震前观测资料稳定,地震的同时缺数,也许是地震引起的。高台重力记录到明显的同震响应现象,同震形态为波动,很快恢复原来的状态。

### 3.2.2 形变资料同震响应特征讨论

地壳形变提供了地壳运动直接的证据和定量的特征,是地震孕育发生过程中最直接的伴生现象。地震发生时,地倾斜和地应变观测都可观测到地震的同震响应。同震响应主要集中在面波频段,其主要特征包括面波延迟时间、最大变形幅度及同震持续时间等<sup>[9-10]</sup>。

数字化形变前兆观测在多测点观测到的地震时倾斜、应变或应力的波动现象称为震时形变波。区别于地震波,震时形变波主要是倾斜、应变或应力的

瞬间波动,其震时持续时间依据震中距离的远近主要集中在几十分钟到几小时范围内;地震引起的同震形变波包括了地震破裂及传播过程中的大部分信息。因此可以应用这些信息进行一些震源参数的计算。研究震时形变波与地震震源的关系可以为识别地震短临前兆和短临预报提供重要的方法途径<sup>[9-11]</sup>。

岷县—漳县地震时,形变观测资料中多数测项记录到很明显的同震响应,除个别测项记录的同震响应不明显,说明形变观测手段记录2013年7月22日甘肃岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震的同震响应不受观测仪器、观测地点、震级、震中位置、地震波传播路径及发震构造等多种因素的影响,而且同震形态及持续时间与震中距无明显的关系,这可能是该地震对多数台站来说,其震中距较近造成的,其距离最远的嘉峪关台在900 km左右,同震记录的并不是远震意义的面波。

## 4 结论与讨论

从以上的讨论可知,该地震前甘肃前兆台网出现明显异常的测项较少。异常测点震中距基本在200 km范围之内,说明该地震可能对震中距较近的测点反映灵敏。异常时间上有短临、短期、中期、中长期异常,这就启示我们一个较强地震的孕育不是短期的,可能需要较长时间,我们对资料的分析也不能只看短期变化,还要看中期变化和长期变化。

观测手段上流体异常较多,这可能与台网的布局有一定的关系,因为甘东南地区流体测项较多,而且多数台站观测时间长,观测环境较好,所以这次地震前出现异常的测点较多。

该地震时,流体学科有10个测项记录到不同程度的同震响应,其中水温2个测项、水位8个测项。水温2个测项记录到的同震比较明显,水位观测资料有3个测项记录的同震响应比较明显,另外5个测项记录到比较微弱的同震响应。

对形变观测资料而言,大多数测项记录到比较明显的同震响应,说明形变观测手段记录2013年7月22日甘肃岷县—漳县  $M_s6.6$  地震的同震响应不受观测仪器、发震地点、震级、震中位置、地震波传播路径及发震构造等多种因素的影响。

虽然该地震前出现了部分可能的临震异常现象,由于地震前兆的复杂性,在目前的认识水平下真正识别该区域的临震异常仍存在一定困难。

当然,在地震预报中,我们不能只看前兆观测,还要与其他方法、其他资料结合,才可能为地震预报提供比较可靠的依据。

#### 参考文献(References)

- [1] 梅世蓉,冯德益,张国民,等.《中国地震预报概论》[M].北京:地震出版社出版社,1993.  
MEI Shirong, FENG Deyi, ZHANG Guomin et al. Introduction to Earthquake Forecasting in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [2] 刘耀炜,张元生.共和7.0级地震前地下流体前兆的动态演化特征[J].西北地震学报,1998,20(1):59-64.  
LIU Yaowei, ZHANG Yuansheng. Dynamic Evolution Characteristics of Ground Fluid Precursors before the Gonghe  $M_s7.0$  Earthquake 1990 in Qinghai Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20(1): 59-64.
- [3] 常千军,张昱,周志宇.兰州形变台潮汐形变观测结果与甘肃永登、天祝地震[J].西北地震学报,1998,20(3):33-38.  
CHANG Qianjun, ZHANG Yu, ZHOU Zhiyu. Analysis on Observation Results of Lanzhou Deformation Station before and after the Yongdeng and Tianzhu Earthquakes[J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20(3): 33-38.
- [4] 杜学彬,薛顺章,郝臻,等.地电阻率中短期异常与地震的关系[J].地震学报,2000,22(4):368-376.  
DU Xuebin, XUE Shunzhang, HAO Zhen, et al. On the Relation of Moderate-short Term Anomaly of Earth Resistivity to Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 22(4): 368-376.
- [5] 张昱,刘小凤,常千军,等.大震前水氡同步异常变化及其预测意义探讨[J].地震研究,2010,33(3):253-258.  
ZHANG Yu, LIU Xiaofeng, CHANG Qianjun, et al. Analysis of Pre-and Post-earthquake Water-radon Anomaly[J]. Journal of Seismological Research, 2010, 33(3): 253-258.
- [6] 中国地震局监测预报司.2004年印度尼西亚苏门答腊8.7级大地震及其对中国大陆地区的影响[M].北京:地震出版社,2005:131-258.  
China Seismological Bureau Monitoring and Forecasting Department. The Magnitude 8.7 Earthquake in Sumatra, Indonesia in 2004 and Its Impact on Mainland China[M]. Beijing: Seismological Press, 2005: 131-258.
- [7] 张昱,李春燕,吴建华,等.印尼8.6级地震甘肃地区流体观测资料同震响应分析[J].地震工程学报,2016,38(5):830-837.  
ZHANG Yu, LI Chunyan, WU Jianhua, et al. Co-seismic Response in Fluid Observation Data from Gansu during the Indonesia  $M_s8.6$  Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5): 830-837.
- [8] 孙小龙,刘耀炜,王博,宾川井对印尼大震的同震响应特征及其机理解释[J].地震,2008,28(3):69-78.  
SUN Xiaolong, LIU Yaowei, WANG Bo. Feature and Mechanism of Co-seismic Response in Binchuan Well to Indonesia Earthquakes[J]. Earthquake, 2008, 28(3): 69-78.
- [9] 牛安福,张晶,吉平.强地震引起的同震形变响应[J].内陆地震,2005,19(1):1-7.  
NIU Anfu, ZHANG Jing, JI Ping. Co-seismic Deformation Response of Strong Earthquake[J]. Inland Earthquake, 2005, 19(1): 1-7.
- [10] 王秀文,刘瑞春,宋美琴,等.山西形变台网对汶川8.0级地震的响应及异常特征[J].山西地震,2010(1):11-17.  
WANG Xiuwen, LIU Ruichun, SONG Meiqin, et al. Response of Crustal Deformation Network of Shanxi Province to the Wenchuan  $M_s8.0$  Earthquake and Anomaly Characteristics [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2010(1): 11-17.
- [11] 张肖,崔泽岩,赵慧琴,等.河北易县地震台水管倾斜仪与垂直摆倾斜仪同震响应分析[J].地震工程学报,2016,38(增刊1):96-100.  
ZHANG Xiao, CUI Zeyan, ZHAO Huiqin, et al. Comparative Analysis of the Co-seismic Response between Water-tube and Vertical Pendulum Tiltmeters in Yixian Seismic Station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(Suppl1): 96-100.