

# 中国大陆井水位观测网对甘肃岷县漳县 6.6 级地震同震响应特征分析<sup>①</sup>

周志华, 黄辅琼, 马玉川

(中国地震台网中心, 北京 100045)

**摘要:**基于全国地下流体前兆台网数据库的统计, 本文整理了中国大陆井水位观测网中对甘肃岷县漳县 6.6 级地震水位同震响应的台站特征。分析结果是: (1) 岷县漳县 6.6 级地震烈度 VI 度区的 1.5 倍的范围内主要由静态应变引起的水位同震变化仅有一个台站, 水位同震阶升幅度仅 1.5 cm, 静态应变触发地震的可能性不大; (2) 震中距大于 1 000 km 的远震响应均为水位阶升, 但是其同震变化幅度小于 0.3 cm, 为含水层被压缩引起; (3) 该地震引起的水位同震变化的观测井较少, 分布范围大, 整体上以水位同震阶升占据主体, 其分布主要在静态应力变化引起的范围之外, 并且与构造带的对应关系无规律可循, 此次地震静态应变范围内的应力应该已经得到释放。

**关键词:** 岷县漳县 6.6 级地震; 水位; 同震响应

中图分类号: P315.723

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0529-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0529

## Coseismic Changes of Water Level Caused by the Mianxian—Zhangxian $M_s$ 6.6 Earthquake

ZHOU Zhi-hua, HUANG Fu-qiong, MA Yu-chuan

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

**Abstract:** On the basis of research reported during the past few decades and data from the national underground fluid precursory network, this study examines the coseismic changes of water level caused by the Mianxian—Zhangxian  $M_s$  6.6 earthquake. Coseismic change was observed in only one water well level in the static strain field with an epicentral distance of  $\leq 1.5$  the fault rupture length, and its amplitude was only 1.5 cm. Such static strain is not likely to trigger further earthquake activity. The total water level changes in observation wells indicated that the distance between the water level changes to the epicenter was distributed from 230 km to 1470 km. In the far field, in which the epicentral distance was larger than 1 000 km, coseismic changes were observed in two observation well, both of which showed abrupt water level changes. The mechanism and characteristics of this result could indicate the dominant factor between the elastic-plastic spread and shutting of the rock fracture shown by the influence of quaking around the wells. When the elastic-plastic spread was less than the shutting, the decreased rock porosity resulted in a jump in observation well water level. Moreover, eight observation wells showed coseismic changes of water level in the entire Chinese mainland, which is less than the number of the earthquake coseismic changes. The distribution of the coseismic changes of water level in the wells was

① 收稿日期: 2013-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(41274061); 中国地震局 2013 年度震情跟踪合同制定向工作任务(2013020306); 中国地震台网中心青年科技基金(QNJJZ-YBB-1308)

作者简介: 周志华, 博士, 从事地下流体监测工作. E-mail: zhouzhihua@seis.ac.cn

large and irregular with geologic structure. From the perspective of all the coseismic changes in observation wells, six observation wells showed abrupt changes in water level. Such increases were the main type of change and were attributed to 75% of the total coseismic changes in water level. Regional tectonic stress should have been released by the Minxian—Zhangxian  $M_s6.6$  earthquake. In addition, the structure and hydrogeological conditions of the observation wells were key to the coseismic changes in the water level, and the lithology effect of the observation wells on the coseismic changes was far less than the distance effect.

**Key words:**  $M_s6.6$  Minxian—Zhangxian earthquake; water level; coseismic changes

## 0 引言

地下流体同震效应能够有效、直接揭示地壳介质对应力—应变的响应。在过去几十年里,地震能引起较大范围的水位同震响应和较强的振幅变化,是国内外地震学家普遍关注的焦点问题<sup>[1-6]</sup>。地震引起的同震响应对了解研究区域的构造应力释放情况,对研究区域未来地震危险性的分析都具有十分重要的研究意义<sup>[1-2,7-8]</sup>。有研究表明<sup>[1,97]</sup> 当一个构造带区域上井水位普遍上升,代表构造应力场压性增强张性减弱;水位下降代表构造应力场压性减弱

张性增强。因此水位同震阶变的观测井空间分布与构造区域的相互关系对判断构造应力场的变化也具有积极的意义。据 Zhang Yan 和 Huang<sup>[10]</sup> 的研究结果,大约在地震烈度 1.5 倍的范围内主要由静态应变引起的水位同震阶变;在震中距远于 1 000 km 的远震水位同震响应更多的是由动态应变引起。水位同震变化振幅除了与震中距、震级密切相关外,还可能与观测井含水层系统自身特性、震源方位、震源机制以及地震波的传播途径有关<sup>[9]</sup>。

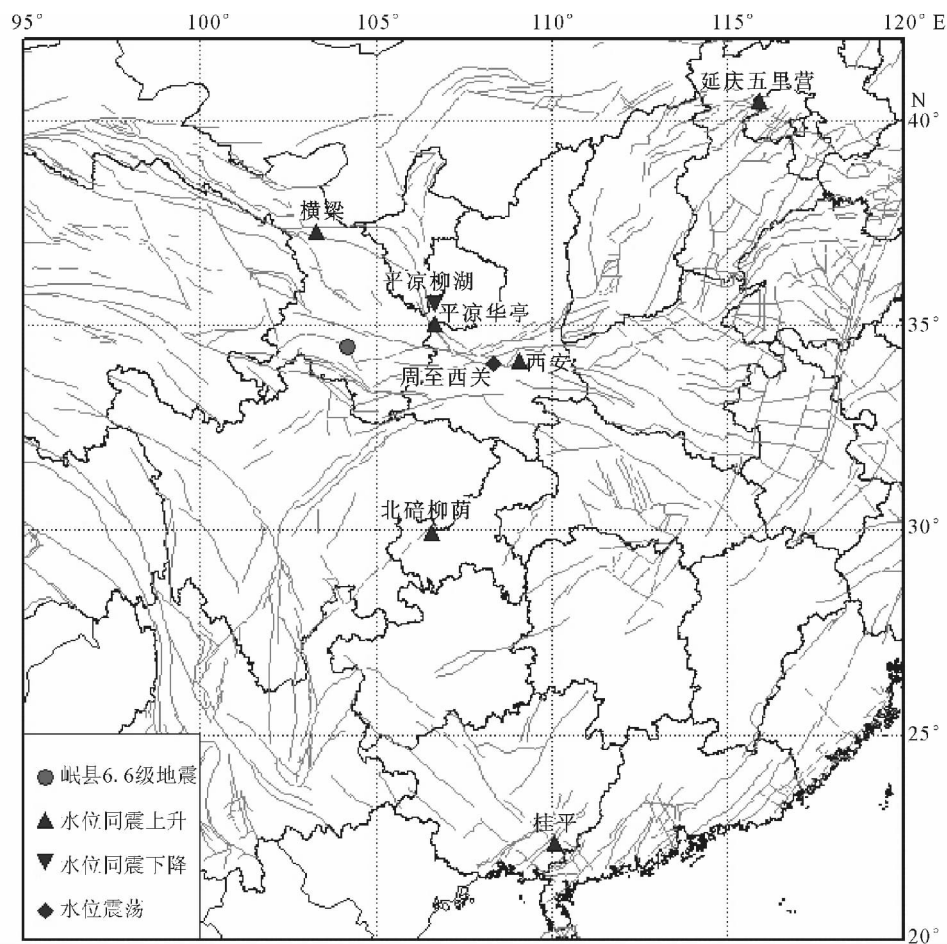


图 1 岷县漳县 6.6 级地震引起水位同震变化分布图

Fig. 1 Distribution of water level variations showing the coseismic effects of the  $M_s6.6$  Minxian—Zhangxian earthquake

2013 年 7 月 22 日 7 时 45 分,甘肃岷县漳县交界地区(东经  $104.2^{\circ}$ , 北纬  $34.5^{\circ}$ )发生  $M_s 6.6$  级地震。本文通过统计全国地下流体台网数据库内全部水位观测网的数据,分析水位同震变化特征,根据水位同震阶变振幅,观测井空间分布与构造带间的关系,静态应变引起的水位变化范围等,试图探讨此次地震对区域地应力的释放,以及对静态应变触发地震可能性进行分析。

## 1 水位同震响应特征

地震引起水位同震变化有震荡和阶变两种,震荡型变化是指在地震波作用下水位快速来回波动,地震波经过后水位很快平静下来,仍沿原来的形态变化;阶变则改变了水位背景,使得水位出现阶梯式的抬升或者下降,这种变化通常需要十几分钟多至几个月的时间才能恢复,有时甚至产生永久性的改变<sup>[4]</sup>。本文着重讨论水位阶变的分析结果。

根据全国地下流体前兆台网库统计,此次地震

具有水位同震响应的共 8 个台站,如图 1 所示,分别是平凉华亭、平凉柳湖、横梁、周至西关、西安地震台、北碚柳荫、延庆五里营、桂平,分布在 5 个省市自治区。距离最近的是平凉华亭,震中距约 230 km;距离最远的是桂平,震中距约 1 470 km。震中距小于 300 km 的台站仅有 2 个;震中距大于 300 km 小于 500 km 的有 3 个;震中距大于 500 km 的有 3 个。水位同震响应的观测井分布与构造带无明显对应性。下面按照震中距由小到大的顺序依次阐述井孔的基本情况及其水位同震响应特征。

(1) 平凉华亭井位于甘肃省华亭县马峡村马峡河边( $106.52^{\circ}\text{E}$ ,  $35.24^{\circ}\text{N}$ ),震中距约 230 km。处于祁吕贺山字形脊梁柱南端盘山构造带上。井深 225.49 m,观测含水层为层间承压水,是第四系以下的前寒武纪灰岩岩溶水。水位同震响应呈现震荡阶变上升,变化幅度约 1.5 cm(图 2(a))。

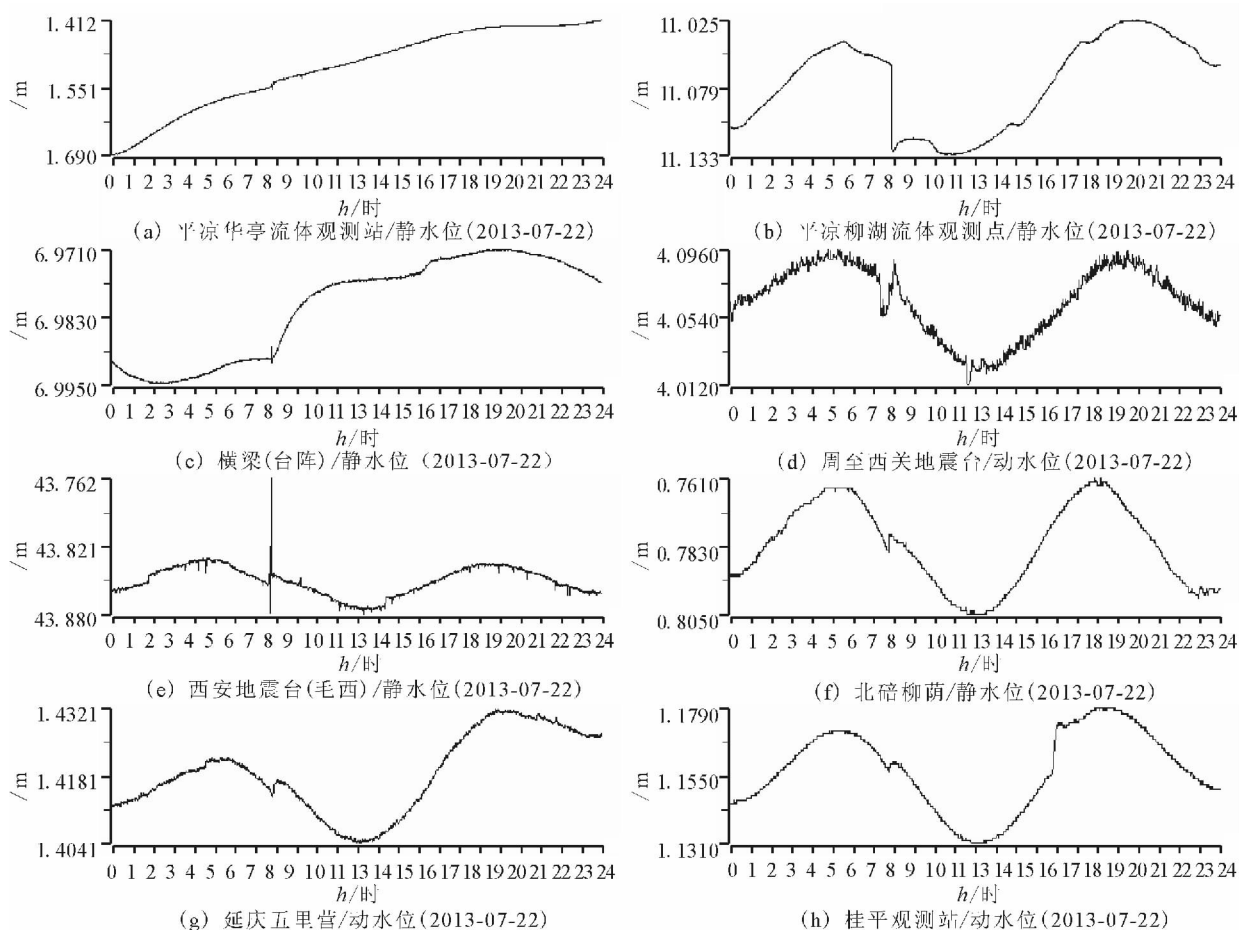


图 2 岷县漳县 6.6 级地震引起的全国地下流体台站井水位同震变化

Fig. 2 Water level variations caused by the  $M_s 6.6$  Minxian—Zhangxian earthquake based on the national underground fluid precursory network database.

(2) 平凉柳湖井位于平凉市崆峒区柳湖公园内(106.40°E, 35.33°N), 震中距约 260 km, 地处祁、吕、贺山字形构造和陇西旋卷构造的交汇部位, 宏观上属于南北地震带中北段。该井为柳湖公园的补给水井, 海拔 1 356.9 m, 井深 301 m, 探头深度 150 m。主要含水层为白垩纪(K1s)砂砾岩, 补给来源为泾河上游和尚堡断裂带裂隙水。水位同震响应呈现阶变下降, 变化幅度约 7.5 cm(图 2(b))。

(3) 横梁井位于甘肃省古浪县横梁乡石峡子村(103.33°E, 37.30°N), 震中距约 320 km。地处天桥沟—黄羊川断裂带的南侧。高程 2 418 m, 井深 193 m。观测含水层是承压水, 含水层岩性为灰白色中粗砂岩及砂岩。水位同震响应呈现震荡阶变上升, 变化幅度约 1.4 cm(图 2(c))。

(4) 周至井位于陕西省西安市周至县县城西关(108.10°E, 34.15°N), 震中距约 382.1 km, 构造上属于汾渭断陷盆地西安—周至凹陷西端。秦岭北缘大断裂与岐山—马召断裂交汇地带。该井属深部承压水, 观测含水层埋深 2 340~2 658 m, 含水层岩性为老第三系渐新统砂岩, 该井远离补给区, 水位变化不受旱涝和人工取水等因素的影响<sup>[10]</sup>。水位同震响应呈现震荡型变化, 变化幅度约  $\pm 2$  cm(图 2(d))。

(5) 西安(毛西)井位于陕西省西安市灞桥区杨圪塔村(109.07°E, 34.15°N), 震中距约 448.5 km, 构造上位于骊山隆起西侧, 毗邻灞河断裂带。补给主要来自秦岭山前洪积扇上部河流渗漏及降雨渗入。观测含水层是第三系砂岩或泥岩。水位同震响应呈现震荡阶变上升, 变化幅度约 1.2 cm(图 2(e))。

(6) 北碚柳荫位于重庆市北碚区柳荫镇江山村(106.60°E, 29.96°N), 震中距约 554 km, 构造上位于观音峡冲断背斜与悦来场向斜之间。水位观测的是泥岩夹砂岩的裂隙水。水位同震响应呈现阶变上升变化, 变化幅度约 0.9 cm(图 2(f))。

(7) 延庆五里营井位于北京市延庆北缘深大断裂上(115.94°E, 40.47°N), 距离震中约 1 230 km, 观测层为上元古界蓟县系白云灰质岩岩溶含水层, 位于承压水层, 井水自流。水位同震响应呈现阶变上升变化, 变化幅度约 0.3 cm(图 2(g))。

(8) 桂平井(动水位)井孔位于广西桂平市西山村西山脚(110.06°E, 23.39°N)<sup>[17]</sup>, 震中距约 1 470 km, 井深 186.97 m, 主要含水层属泥盆系砂、页岩。地表水和地下水向郁江排泄, 地下水经深部循环积

聚承压, 沿接触变质带上升<sup>[11]</sup>。水位同震响应呈现阶变上升变化, 变化幅度约 0.24 cm(图 2(h))。

据上述特征, 可以看出水位震荡的只有一口井(周至西关井), 震中距约 382.1 km。水位阶变的有 6 口井, 占水位同震变化台站的 75%, 震中距由小变大的过程, 变化幅度也是由大到小非常规律的变化。震中距小于 500 km 的水位同震阶升变化幅度在 1~1.5 cm 之间; 超过 1 000 km 的震中距水位同震阶升变化就在 0.3 cm 左右。全部 6 口水位阶升变化的井同震阶升变化幅度均较小。而此次地震中, 全国大陆范围内同震阶降也仅有 1 口井(平凉柳湖), 变化幅度 7.5 cm, 震中距约 260 km。

## 2 水位同震响应分析与讨论

通常情况下, 阶变型水位同震响应一般为地方震及近地震。震荡型水位同震响应一般为远地震, 振幅与震级呈正比关系<sup>[12]</sup>。但是也有远震能引发同震阶变现象<sup>[1]</sup>。水位同震升降的方向不因地震的远近、大小、震源机制或地震方位的变化而改变, 更多地受控于本地的地质构造环境和水文地质条件。地震波能量的变化不能改变水位同震变化的方向, 当地震波能量足够大时, 会使一些原来仅产生震荡或者无同震响应的井孔的水位发生阶变<sup>[13]</sup>。水位的同震阶变可视为大震后区域应力调整的表现, 井水位同震阶升说明井区压应力作用增强, 意味着井区应力状态的加强<sup>[7]</sup>。根据 Zhang Yan 和 Huang<sup>[10]</sup>研究结论, 震中距小于 1.5 倍烈度长轴的范围主要由静态应变引起的水位同震阶变; 大于 1 000 km 的远震同震变化更有可能是动态应力引起的变化。那么在静态应力引起的水位同震阶变范围内, 观测井的分布与构造带的关系是判断区域危险性的方法之一。纵观此次地震的水位同震响应特征, 分析如下。

(1) 静态应变触发地震的可能性不大。甘肃岷县漳县 6.6 级地震Ⅵ度区长轴为 161 km, 在其 1.5 倍左右的范围内由静态应变引起的水位变化仅有一个观测井平凉华亭, 此观测井的水位阶升幅度仅仅 1.5 cm, 静态应变触发地震的可能性不大。

(2) 岷县漳县 6.6 级地震的水位同震响应多取决于所处构造环境。据上述水位同震响应特征统计(表 1), 可以看到仅有的一个震荡变化台站周至西关台, 震中距 382.1 km, 并不是最大震中距的台站。唯一的一个水位同震阶降的台站平凉柳湖, 同震幅度变化却是最大的, 但是其震中距不是最小的, 岩性

却是同震幅度相对最小的砂砾岩。超过 1 000 km 震中距的延庆五里营和桂平台站水位同震呈现的是阶升,而不是震荡型变化。远震的机理可能是,当地震波到达时,引起含水层岩石原有裂缝系统出现弹—塑性的张开和闭合,而张开程度小于闭合程度,结果含水层被压缩,岩石的孔隙度减少,致使井水位出现明显的阶升<sup>[13]</sup>。种种表现均体现出震荡与阶变的变化不仅仅是震中距的关系,更多取决于所处的地质构造环境<sup>[18]</sup>和水文地质条件。

表 1 岷县漳县 6.6 级地震引起的水位同震响应分类统计

Table 1 Types of water level changes caused by the  $M_s$  6.6 Minxian—Zhangxian earthquake

台站	同震变化	变化幅度/cm	震中距/km	测点岩性
平凉华亭	阶升	1.5	230	灰岩
平凉柳湖	阶降	7.5	260	砂砾岩
横梁	阶升	1.4	320	砂岩
周至	震荡	$\pm 2$	382.1	砂岩
西安	阶升	1.2	448.5	砂岩或泥岩
北碚柳荫	阶升	0.9	554	泥岩夹砂岩
延庆五里营	阶升	0.3	1230	白云灰质岩
桂平	阶升	0.24	1470	砂页岩

(3) 岩性对同震振幅变化有一定的影响,但是其影响力远远小于震中距的影响。通常情况下,在含水层埋深大致相同时,水位同震振幅大小取决于含水层岩性:一般灰岩>变质岩>砂岩>第四系砂砾岩<sup>[12]</sup>。在震中距差别很大的情况下岩性对振幅的影响可以忽略不计。在 6 个阶升变化的台站资料中,振幅变化由大到小全部吻合于震中距的由近及远。阶降和震荡的幅度与阶升变化幅度没有关系。

### 3 结论

(1) 在甘肃岷县漳县 6.6 级地震烈度Ⅵ度区长轴 161 km 的 1.5 倍范围内,主要由静态应变引起水位同震变化的观测井仅有一个,水位同震阶升的幅度小,静态应变触发地震的可能性不大。

(2) 以全国台网流体观测数据的统计结果来看,此次岷县漳县 6.6 级地震中具有水位同震响应的台站数量非常少,水位同震阶变观测井分布与构造带没有良好的对应关系,静态应变范围内的应力得到释放。

(3) 岷县漳县 6.6 级地震水位同震效应的震荡或者阶升变化,更多的取决于台站所处的构造条件和水文地质条件,与震中距的关系相对有限。

(4) 台站水位监测层位的岩性对水位同震幅度的影响远远小于震中距对同震变化的影响。

致谢:甘肃地震局张煜高工,陕西地震局赵小茂

工程师和重庆地震局巩浩波为本文提供资料。

### 参考文献(References)

- [1] 黄辅琼,迟恭财,徐桂明,等.大陆地下流体对台湾南投 7.6 级地震的响应研究[J]. 地震,2000,20(增刊):119-125.  
HUANG Fu-qiong, CHI Gong-cai, XU Gui-ming, et al. Research on the Response Anomalies of Subsurface Fluid in Mainland Monitoring Network to the Nantou Earthquake with  $M_s$  7.6[J]. Earthquake, 2000, 20(Supp): 119-125. (in Chinese)
- [2] Huang F Q, Jian C L, Tang Y, et al. Reaponse Changes of Aome Wells in the Mainland Subsurface Fluid Monitoring Network of China, Due to the September 21, 1999,  $M_s$  7.6 Chi—Chi Earthquake [J]. Tectonophysics, 2004, 390: 217-234.
- [3] 晏锐,黄辅琼.黄骅井水位对苏门答腊 5 次地震的同震响应初步研究[J]. 中国地震,2009,25(3):325-332.  
YAN Rui, HUANG Fu-qiong. Preliminary Study on Coseismic Response of Huanghua Well Water Level to 5 Times of Sumatra Earthquakes[J]. Earthquake Research in China, 2009, 25(3): 325-332. (in Chinese)
- [4] 杨竹转,邓志辉,刘春国,等.中国大陆井水位与水温动态对汶川  $M_s$  8.0 地震的同震响应特征分析[J]. 地震地质,2008,30(4):895-905.  
YANGg Zhu-zhuan, DENG Zhi-hui, LIU Chun-guo, et al. Coseismic Changes of Water Level and Water Temperature Caused by  $M_s$  8.0 Wenchuan Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4): 895-905. (in Chinese)
- [5] Matsumoto N, Roeloffs E A. Hydrological Response to Earthquakes in the Haibara Well, Central Japan; II, Possible Mechanism Inferred from Time-varying Hydraulic Properties [J]. Geophysical Journal International, 2003, 155(3), 899-913.
- [6] 张昭栋,刘庆国,刘涛,等.由井水位资料反演大同—阳高 6.1 级地震前后应力场的动态演化过程[J]. 西北地震学报,2001,23(1):66-68.  
ZHANG Zhao-dong, LIU Qing-guo, LIU Tao, et al. Dynamic Evolution of Stress Field Inverted by Using Data of Well Water Level before and after the Datong—Yanggao  $M_s$  6.1 Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(1): 66-68. (in Chinese)
- [7] Kitagawa Y, Koizumi N, Takahashi M, et al. Changes in Groundwater Levels or Pressures Associated with the 2004 Earthquake off the West Coast of Northern Sumatra ( $M_9.0$ ) [J]. Earth Planets Space, 2006, 58: 173-179.
- [8] 郭安宁,郭增建,张津,等.发震构造呈复杂空间关系下相互影响发震的机理研究——以汶川地震为例[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 196-202.  
GUO An-ning, GUO Zheng-jian, ZHANG Jin, et al. Reearth on the Effect of Seismogenic Structure with Complex Spatial Relationship on Earthquake Mechanism with the Wenchuan Earthquake as An Example[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 196-202. (in Chinese)

- [9] 王华,王伟,张军,等. 郯庐带中南段及邻区井水位同震响应特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(3/4): 67-71.  
WANG Hua, WANG Wei, ZHANG Jun, et al. The Water Level Coseismic Effect Characteristics and Its Significance in Earthquake Prediction of mid-south Segment and Its Adjacent Area of Tanlu Fault Belt[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012, 33(3/4): 67-71. (in Chinese)
- [10] ZHANG Yan, HUANG Fu-qiong. Mechanism of Different Coseismic Water-level Changes in Wells with Similar Epicentral Distances of Intermediate Field[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(4): 1531-1541.
- [11] 罗俊秋,孙伶俐,李明,等. 水位、水温对汶川 8.0 和日本 9.0 级地震的同震响应特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(增刊): 2-5.  
LUO Jun-qiu, SUN Ling-li, LI Ming, et al. Analysis of Coseismic Changes of Water Level and Water Temperature in Observation Wells Responding of Hubei to Wenchuan  $M_s 8.0$  Earthquake and Hapan  $M_s 9.0$  Earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(Supp): 2-5. (in Chinese)
- [12] 张世民,方炜,舒优良,等. 汶川地震前周至深井观测数据的异常特征[J]. 防灾科技学院学报, 2009, 11(1): 20-27.  
ZHANG Shi-min, FANG Wei, SHU You-liang, et al. Study on the Anomaly Characteristics of Observation Data in Zhouzhi Deep Borehole before Wenchuan Earthquake[J]. J. of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, 2009, 11(1): 20-27. (in Chinese)
- [13] 李柳英,史水平. 广西地下水位数字与模拟观测对比分析[J]. 南地震, 2008, 28(4): 104-112.  
LI Liu-ying, SHI Shui-ping. Comparison and Analysis for Digital and Analogue Observations of Groundwater Levels in Guangxi[J]. South China journal of seismology, 2008, 28(4): 104-112. (in Chinese)
- [14] 付虹,刘丽芳,王世芹,等. 地方震及近震地下水同震震后效应研究[J]. 地震, 2002, 2(4): 55-66.  
FU Hong, LIU Li-fang, WANG Shi-qin, et al. Research on Coseismic and Post seismic Effect of Ground Water for the Local and Near Earthquake[J]. Earthquake, 2002 2(4): 55-66. (in Chinese)
- [15] 武晓东,王志惠,王春媛,等. 五里营井水位与水温对汶川及日本地震的同震响应[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(增刊): 22-24.  
WU Xiao-dong, WANG Zhi-hui, WANG Chun-yuan, et al. Coseismic Response Analysis of Water level and Temperature at Wuliying Well for Wenchuan and Japan Earthquakes[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32 Supplement: 22-24. (in Chinese)
- [16] 杨竹转. 地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究[J]. 国际地震动态, 2012, 11: 42-47.  
YANG Zhu-zhuan. Water Level and Temperature Coseismic Response Caused by Earthquake Wave and Its Mechanism[J]. Recent Developments in World Seismology, 2012, 11: 42-47. (in Chinese)
- [17] 高玲,林元武,杨明波. 延庆五里营稀有气体地球化学特征[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 274-276.  
GAO Ling, LIN Yuan-wu, YANG Ming-bo. Geochemistry Characteristics of the Minor Gases in Wuliying Well at Yanqing County, Beijing[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 274-276. (in Chinese)
- [18] 赵凌云,张辉,刘小凤. 甘肃平凉地区地震活动特征及其发震机理研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 186-190.  
ZHAO Ling-yun, ZHANG Hui, LIU Xia-feng. Study on Seismicity Characteristics and Mechanism in Pingliang Area, Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 3(2): 186-190. (in Chinese)