

印尼8.6级地震甘肃地区流体观测 资料同震响应分析^①

张 昱, 李春燕, 吴建华, 冯 博, 李晓峰, 张 辉, 张向红

(甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要:2012年4月11日印尼苏门答腊发生8.6级、8.2级地震,我国大量地下流体台站记录到丰富的同震响应现象,甘肃地下流体观测资料也出现不同程度的同震响应。本文分析两次大地震时甘肃地区数字化水位、水温同震变化特征和响应能力,得到大部分井水位的同震响应有较一致的变化规律,且以振荡变化为主,震后较快恢复到原有状态,响应程度也与震级密切相关,即震级越大响应能力越强;由于水温和水位有不同的响应机理,因此水温不遵循这种规律,水温观测只有2个井点记录到同震响应,且记录的幅度基本相当,变化周期较大,恢复时间也较慢。

关键词:印尼强震; 同震响应; 甘肃地区; 水位; 水温

中图分类号:P315.72⁺3

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2016)05-0830-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0830

Co-seismic Response in Fluid Observation Data from Gansu during the Indonesia M8.6 Earthquake

ZHANG Yu, LI Chun-yan, WU Jian-hua, FENG Bo, LI Xiao-feng, ZHANG Hui, ZHANG Xiang-hong

(Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: During the occurrence of two strong earthquakes (M8.6 and M8.2) in Sumatra, Indonesia, on April 11, 2012, a large number of underground fluid stations in China recorded abundant co-seismic response data, and data from underground fluid observations in Gansu also showed various degrees of co-seismic response. The co-seismic changes and the digital response of water levels and temperatures in Gansu during these two great earthquakes are analyzed in this study. The results show that the water level co-seismic response in most wells followed a relatively consistent change law, i.e., the change was main oscillation variation, and rapidly recovered to its original state after the earthquake. The degree of response is closely related to the magnitude; the greater the magnitude, the stronger the response. Owing to the different response mechanisms of water level and temperature, water temperature does not follow this rule. In water temperature observations, only two wells had a record of co-seismic response, they showed approximate amplitudes and a relatively long cycle time (change period), but a slower recovery time.

Key words: Indonesia strong earthquake; co-seismic response; Gansu area; water level; water temperature

① 收稿日期:2015-07-23

基金项目:甘肃省科技计划(145RJZA186、1506RJZA85);国家自然科学基金项目(41304048)

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。E-mail:zhangy@gsdzj.gov.cn。

通信作者:李春燕(1971—),女,甘肃兰州人,工程师,主要从事地震分析预报等。E-mail:175232150@qq.com.cn。

0 引言

地下流体是地壳中最活跃的介质,具有分布的广泛性、易流动性和不可压缩性等特征,当井-含水层系统处于封闭性良好的承压体系中时,它能够客观、灵敏地反映地壳的应力应变信息,起到“灵敏测压计”的作用。水位不仅对含水层受力有所反映,对井水温度也有灵敏的响应。井-含水层系统所受的动力加载作用方式有多种,地震波作用就是其中重要的一种,地下流体观测中水位与水温对大震的同震响应是地震波作用于井-含水层系统最直接的体现^[1]。

近年来,不少学者对远场大震引起水位的同震响应现象进行了大量的研究^[2-6],但由于没有获取足够的观测资料,针对远场大震引起的水温同震响应的研究并不太多。上世纪 90 年代后,中国地下流体水温观测网进行了高精度数字化仪器的改造使用,近几年收集了大量的同震响应观测资料,针对这些资料国内

学者进行了系统的分析和深入的研究讨论^[7-9]。

据中国地震台网测定,北京时间 2012 年 4 月 11 日 16 时 38 分印尼苏门答腊(2.3°N,93.1°E)发生 M_s 8.6 地震,2 小时后发生 8.2 级强余震。我国大陆多数流体观测井记录到了此次地震引起的同震响应现象,甘肃地区部分水位、水温观测井也记录到了其同震响应和震后效应。本文选取此次大震中记录到同震、震后效应井点的水位、水温资料,对其同震响应特征进行分析讨论。

1 甘肃数字化水位、水温观测井概况

甘肃地区数字化流体水位、水温观测最早始于 2001 年“九五”改造,之后 2007 年“十五”改造,直至汶川地震灾后恢复重建,多数资料从 2007 年下半年“十五”数字化改造开始,最短的为汶川地震灾后重建项目。现有 19 口地下流体观测井(表 1),其中水位 16 个测项,水温 23 个测项。

表 1 观测点基本概况
Table 1 The basic situation of measurement points

井点名称	井点构造部位	井深/m	地层岩性	地下水类型	观测项目
武都樊坝	西秦岭北缘断裂	200.03	砂质泥岩	承压水	水位、水温
武都两水	西秦岭北缘断裂	75.92	灰岩、片岩	裂隙水	水位、水温
天水	西秦岭北缘断裂	402.99	沙质泥灰岩	半承压水	水位、水温
成县	西秦岭北缘断裂	264.48	含砾砂岩	孔隙承压水	水温
清水李沟	西秦岭北缘断裂	165.01	砾砂岩	孔隙承压水	水温
清水温泉	西秦岭北缘断裂	443.8	花岗岩	承压水	水位、水温
平凉铁路小区	六盘山断裂东侧	610.3	砂岩、砾岩	承压水	水位、水温
平凉柳湖	六盘山断裂东侧	301	砂砾岩	承压水	水位、水温
平凉华亭	六盘山断裂	225.5	灰岩	裂隙承压水	水位
平凉威戎	六盘山断裂西南	400.82	石英砂岩	承压裂隙孔隙水	水位、水温
庆阳	鄂尔多斯地台	222.61	砂岩	孔隙承压水	水温
兰州大滩	I 级阶地	82.0	第四系砂卵石层	局部承压水	水位、水温
兰州观象台	黄河北岸Ⅲ级阶地	168	砂岩、砂砾岩		水温
临夏 1	Ⅱ级阶地	200.1	花岗岩	承压水	水位、水温
临夏 2	Ⅱ级阶地	70.52	花岗岩、砂质泥岩	承压水	水位、水温
景泰卢阳	断陷盆地	194.29	砂岩、砂质泥岩	承压水	水位、水温
永登英鸽	沟台地	74.0	灰岩	半承压水	水位、水温
古浪横梁	沟台地	193.01	砂岩、石英岩、灰岩	承压水	水位、水温
高台	龙首山南缘	99.0	花岗岩	半承压水	水位、水温

分别采用 LN-3A 型数字化水位仪、SZW-1A 型水温仪和 ZKGD-3000 型水位、水温综合观测仪进行水位、水温观测。LN-3A 型水位仪和 SZW-1A 型水温仪观测服务时间由仪器自带时钟提供,ZKGD-3000 型仪器的服务时间为:当网络连通时数据记录的时间为服务器时间,当网络断开时为仪器自带时钟提供。水温观测 SZW-1A 型仪器的时钟精度优于 0.1 s/d,其他两套仪器对时间精度没有明确的

说明。

从甘肃地区多年来连续观测的资料来看,多数井点的井水位观测资料表现出比较明显的年变规律,年动态以年变型为主,也有平稳波动型,多数井点具有记录固体潮的能力,但程度不同,部分井点有明显的气压效应。井水温度年动态曲线类型形态复杂,有渐升型、年变型、缓降型、平稳型、波动型或在波动和缓降的基础上表现出年变形态。

2 水位同震响应分析

水位同震响应是指强烈地震发生后,地震波向外传播时发生水位“共振”现象。地震波通过时引起含水层的瞬时变形,激发孔隙压力改变,使孔隙水没有足够的时间与外界交换,因此可认为地震波引起含水层变形时近似为不排水条件。对井-含水层系统而言,该系统是开放型的,含水层与井之间的水量交换与含水层的渗透系数有很大的关系。地震波通过时,渗透系数越大水位振荡幅度越大,映震效果越明显^[5-7]。另外井径、井孔水柱高度及水位仪频率特性等均与记录水震波有关。地下水位的震时和震后效应从形态上分为两类:一类是急速的阶跃变化,这主要是近震的井水位效应;另一类是水位的振荡变化,即为水震波效应,这种变化一般在震中距大于 2 000 km 的井孔中比较常见^[5-7]。

本文中同震响应指 2012 年 4 月 11 日印尼 8.6 和 8.2 级两次强震发生后甘肃水位台站观测到的同震响应信息。目前甘肃水位观测井有 15 个,包含

16 个水位测项,其中 11 个测项采用 LN-3 型水位仪,5 个测项采用 ZKGD 型水位仪进行观测,这之中有 9 个测项在地震中记录到同震响应,不同测项记录同震响应的能力明显不同。

2.1 振荡型同震反应

本次印尼地震距甘肃台网所有测点的距离均大于 3 000 km,测点记录到的同震响应形态主要为振荡型,只有平凉柳湖井和华亭井在振荡中分别有所上升和下降。

从图 1~3 中看出不同测点记录同震响应的能力明显不同。其中临夏 1 号井(两套仪器),临夏 2 号井(图 1),平凉柳湖井、华亭井(图 2)记录到两次地震的同震响应比较明显,平凉威戎(图 2)、平凉铁路小区、武都两水(图 3)记录到的同震信息很弱,古浪横梁井(图 3)只记录到 8.6 级地震微弱的同震响应信息。最大同震变化幅度是资料日变幅的数倍(临夏 1 号井),而最小的只为日变幅的数十分之一(平凉铁路小区井)。

同一测点不同仪器记录同震响应的能力也有一

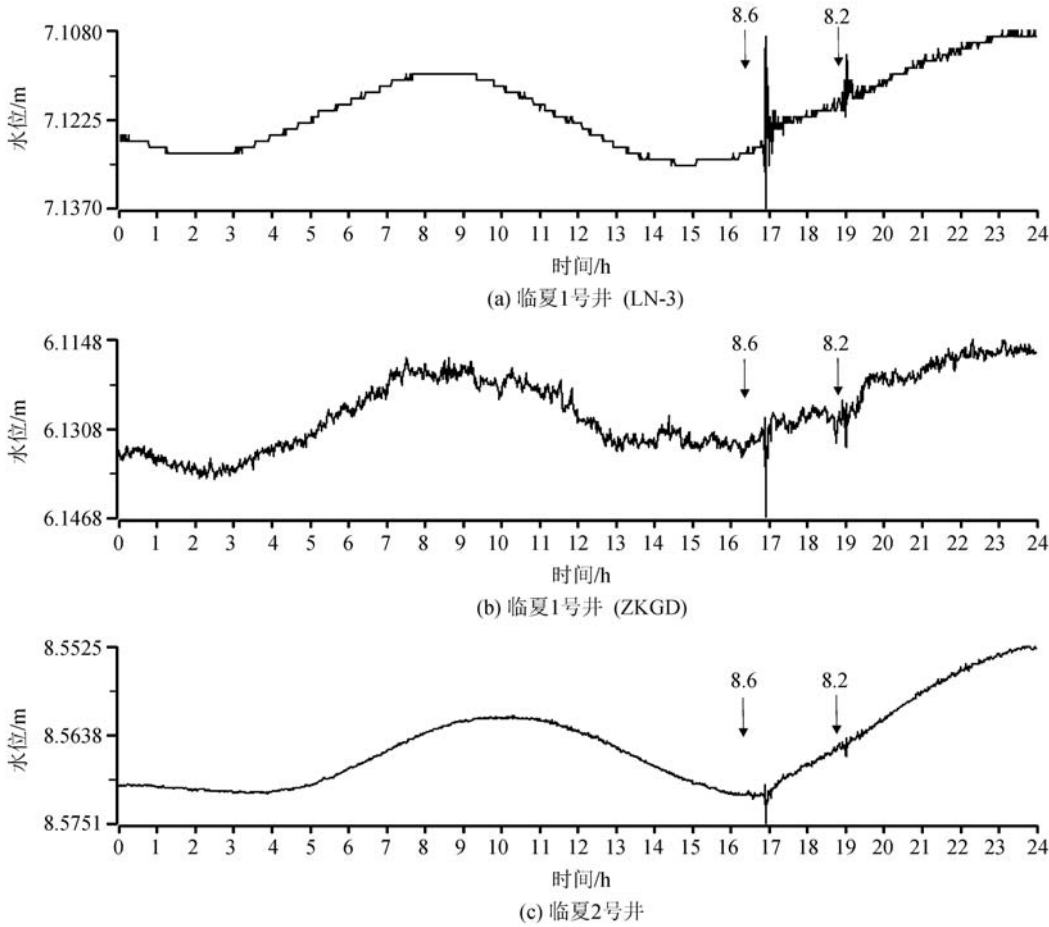


图 1 临夏 1 号井、临夏 2 号井分钟值观测曲线
Fig.1 Minute value curve of water level of Linxia 1# Well and 2# Well

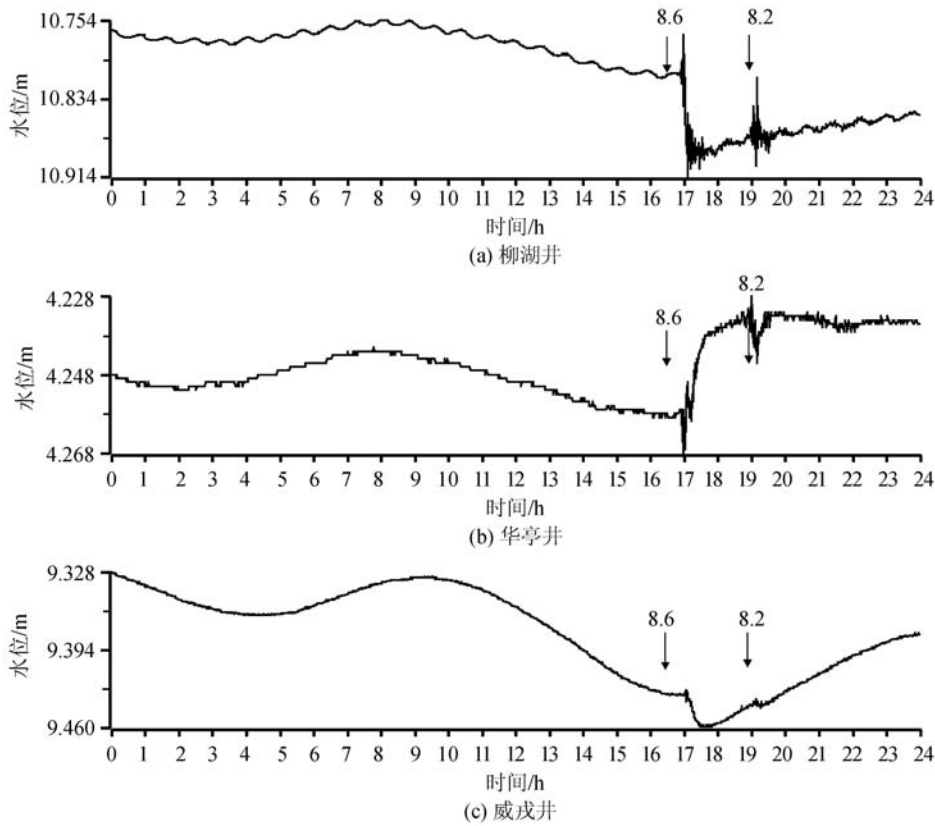


图 2 平凉柳湖井、华亭井、威戎井水位观测曲线

Fig.2 Water level curve of Liuhu,Huating and Weirong Well in Pingliang

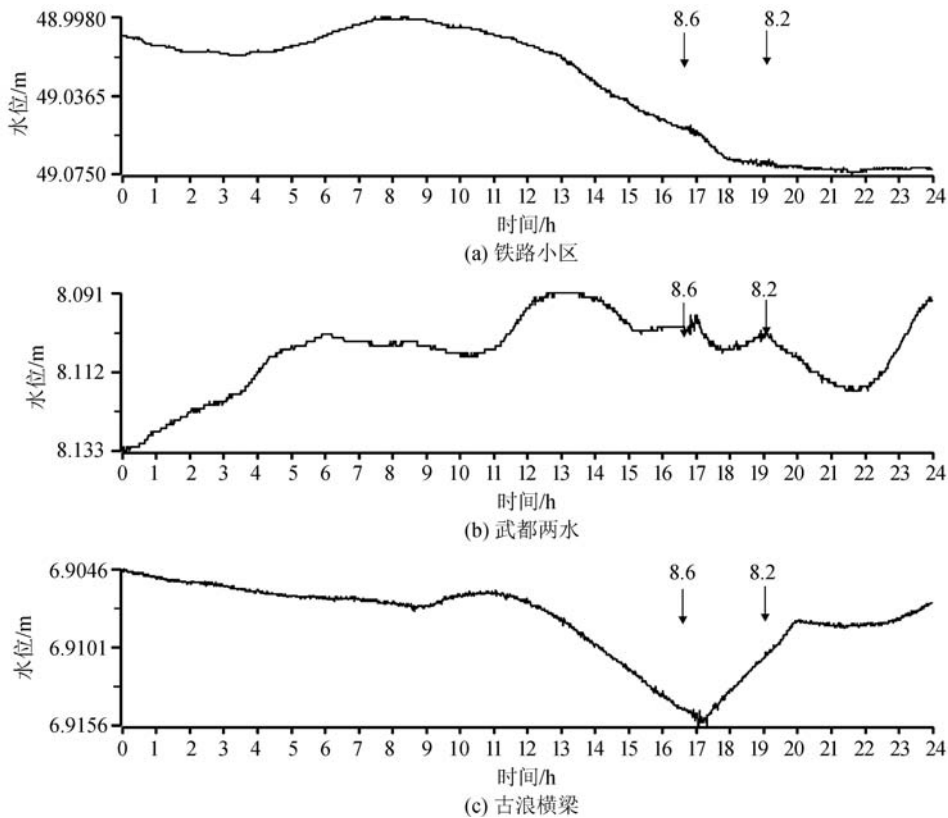


图 3 平凉铁路小区、武都两水、古浪横梁观测曲线

Fig.3 Water level curve of Railway community in Pingliang,Liangshui in Wudu, and Hengliang in Gulang

定的差别。临夏 1 号井两种仪器(LN-3、ZKGD)[图 1(a)、(b)]记录到同震响应的幅度与资料本身的变化幅度相比有明显差别,两套仪器同震变化的绝对幅度基本相当,而记录的同震响应的最大幅度分别为 0.019 m 和 0.018 9 m,由于 ZKGD 水位仪资料波动幅度大于 LN-3 水位仪,所以 LN-3 水位仪同震响应更明显。不管是哪个测点,同震响应引起的变化均恢复较快。

2.2 水位同震响应分析与讨论

地下水位的同震变化反映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。振荡型的同震变化是指在地震振动作用下地下水位出现类似地震波的高频振荡,它反映了地下含水层介质弹性模量较大、岩层透水性好,是地震波传播过程中含水介质的一种弹性变化的结果。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。

地震引起水位同震变化有振荡和阶变两种。振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至几个月的时间才能恢复,有时甚至产生永久性的改变^[6]。

通常情况下,阶变型水位同震响应一般为地方震及近地震,振荡型水位同震响应一般为远大震,但也有远震能引发同震阶变现象。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振荡或无同震响应的井孔水位发生阶变^[6]。

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意义。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。振幅与震级呈正比关系,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^[6]。

3 水温同震响应特征分析

地震波作用可导致井-含水层系统介质发生一定的形变,还会引起流经含水层的水流运移通道发生相应的变化。这种变化一方面会影响地下水的流动速度和路径,另一方面也会影响它与周围岩体的热量交换,从而影响到观测井中水体的温度变化^[7-9]。

甘肃流体台网有水温观测井点 18 个,其中平凉铁路小区在不同深度架设两个探头,景泰卢阳井、古浪横梁井分别在不同深度架设三个探头,目前共有水温测项 23 个。

3.1 水温同震响应

2012 年 4 月 11 日印尼两次强震发生后,甘肃只有平凉柳湖和威戎水温井记录到同震响应(图 4)。

平凉柳湖观测井位于六盘山东侧泾河 I 级阶地,完钻井深 301.07 m,套管深度 198.14 m,8.14 m 以上井径 300 mm,至 190 m 井径 190 mm,下段井径 160 mm,观测含水层为白垩纪砂砾岩层。平凉威戎井位于海源—六盘山断裂西南,完钻井深 400.82 m,套管深度 56.77 m,56.71 m 以上井径 130 mm,至 313.88 m 井径 110 mm,下段井径 91 mm,观测层为 56.77 m 以下的志留系石英砂岩裂隙承压水。

从图 4 中可以看出,在地震波到达观测井时,平凉柳湖井水温表现为突然下降,其下降时间较快,持续约 15 分钟,之后缓慢恢复,在恢复的过程中(两小时)后又发生了 8.2 级地震,20 时 40 分左右恢复至最高值,之后缓慢下降,至 12 日 3 时左右基本恢复正常,恢复的时间较下降的时间稍长(可能与再次发生地震有一定的关系),水温恢复至最高值的幅度大约是下降幅度的 3 倍,且恢复后的温度值略高于下降前的温度值。

在地震波到达时,平凉威戎井与柳湖井在形态上比较相似:首先是快速下降,大概 30 分钟之后恢复,在 17 时 28 分左右恢复至最高值,持续一小时之后,于 20 时 40 分左右快速下降,至 22 时恢复正常,水温恢复至最高值的幅度大约是下降幅度的 4 倍左右。恢复之后的水温测值与下降前基本持平。

3.2 水温同震响应机理探讨

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,这种变化会导致水流速度及水体与围岩间的热量变化。岩体介质孔隙压力在地震波

作用下发生改变后,会出现压力弥散及恢复的过程,此过程即为含水层系统中水流调节的过程^[9]。如果这种调节作用持续时间较长,那么井-含水层系统的水流状态不会在短时间内趋于稳定,则观测井内水

体温度呈持续变化的过程;若井-含水层系统在地震波作用下发生塑性形变,那么井-含水层系统水流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,并持续此平衡至新的扰动出现。

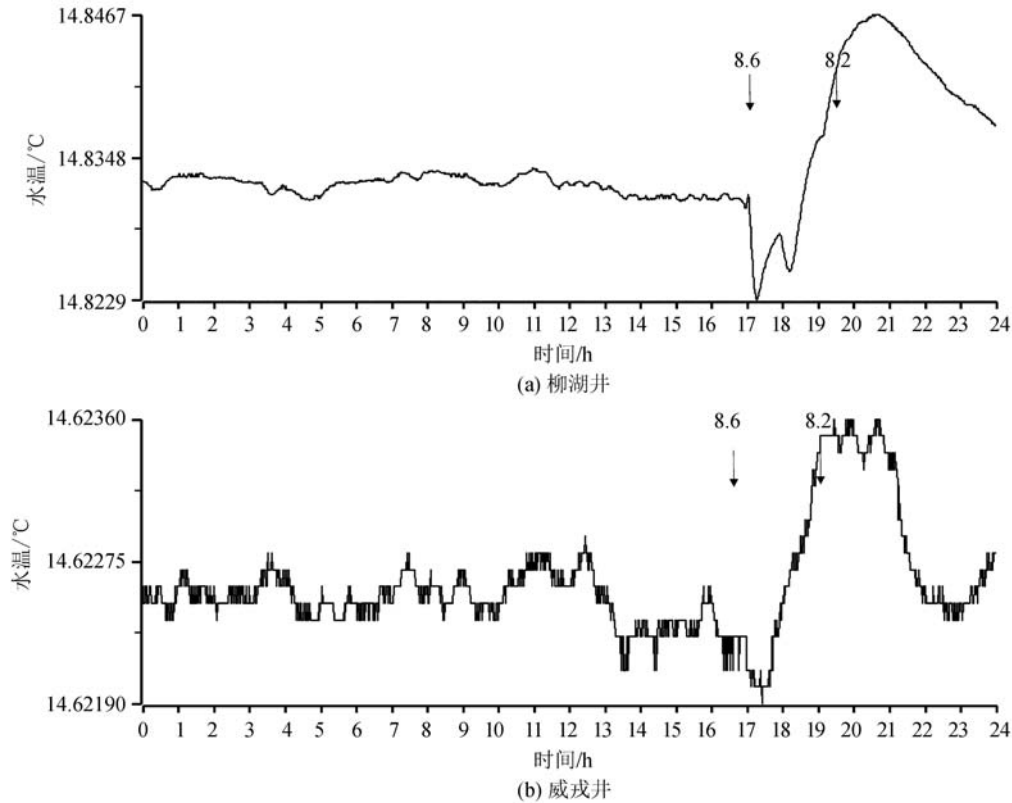


图 4 平凉柳湖、威戎水温分钟值观测曲线

Fig.4 Minute value wurve of uater temperature of Liuahu and Weirong Well in Pingliang

井水温度的变化也与井-含水层系统参数改变密切相关。地震发生时,地震波周期性张压作用于含水层系统,使其介质发生变形。这种应力的加卸载作用一方面激活了孔隙、裂隙中的填充物(如气体、滞水等),另一方面也促使局部裂隙的串通,使得空隙内运移的水体流动状态发生变化,各水体间及水体与围岩的热量交换呈现加强或减弱,导致观测井内水体温度产生变化^[9]。

近年来随着数字化水温观测的推广,远场大震引起的观测井水温响应机理的研究越来越多^[7-8]。就目前来看,各学者提出的不同观点概括起来主要有以下 3 点:

(1) 气体逸出说:研究者据现场观察发现,井水温度大幅度下降的同时井水面上有大量气泡上涌,故认为井水温度的同震突降机制可归因于井水气体的释放^[7-9]。即当井水气体释放时,同时释放出井水中的热量,从而降低了井水温度。

(2) 井内水体热弥散说:石耀霖等^[7]在统计分析唐山矿井水温同震响应资料后提出了水温下降变化的热弥散模型,认为其主要机理为水分子的弥散效应,即弥散系数与水的宏观速度密切相关,在静水中弥散系数很低,在同震水位振荡时大大增加,温度较高的水分子弥散到冷的低分子动能的水中,以及温度较低处一些低分子动能的水分子弥散到温度较高处,形成水温的变化。

(3) 冷水下渗说:刘耀炜等^[9]对远场大震引起水位振荡—水温下降现象的解释是,井孔含水层周边上层地下水随着振动效应的作用,加大了向下垂直运动的速率,低温水快速混入观测含水层中,引起温度的快速下降。由于这些上层低温水是赋存于孔隙或裂隙中的附着水,一般来说不产生长距离的运移,其下渗只引起短时间、短距离地下水的运移,因此不会产生井孔水位的上升。

由此可见,水温同震响应机理的研究目前还处

于探讨阶段,各学者所提出的机理皆能解释一定的观测现象,但究竟是哪种机理最具合理性有待于更进一步的研究。且同井同震响应特征并不是固定不变的,也与当时的井-含水层状态密切相关。

4 两次地震的同震响应对比分析

4.1 不同测项的对比

水位的同震响应变化与水温存在一致性,但有很大的差别。总体而言,水温的响应能力明显低于水位。甘肃流体台网观测井只有个别井点是单测项观测,绝大多数井点水位、水温同时观测,在记录到水位同震响应的 8 个井点中,除平凉华亭无水温观测外,其余均为水位、水温同时观测,但记录到水温同震响应的只有平凉柳湖和威戎 2 个井点。从数量上看,水位响应能力明显高于水温。对于同一井点而言,水位的响应能力不一定高于水温,如平凉威戎井水位同震响应很弱,而水温同震响应比较明显。水位同震响应主要是振荡波动型、快速恢复,而水温以缓慢变化为主,其同震响应的持续时间和震后调整时间大于水位。

水位和水温记震能力的强弱与各自的变化机制有很大关系。水位的变化主要受含水层系统内孔隙压力及水流速度的影响,如果井-含水层系统的承压性和封闭性好,那么应力-应变十分微弱的变化均能体现在水位的变化上;而水温的变化是地下水与其周围介质之间能量的交换,不受地下水存贮空间的限制,水温的变化除了受水流速度的影响外,还受水流路径、围岩介质的传热性能以及观测井内水温探头所处的深度等多种因素的控制,水位和水温不同的变化机理导致同井观测对同一地震的响应能力和响应图像有较大差异。

4.2 同一测项的对比分析

从上述讨论可知,水位观测中有 8 个井点(9 项)记录到同震响应,不同井点记录同震响应的能力不同,同一井点对不同地震的响应程度也完全不同。水位同震响应程度与远场地震的震级密切相关,震级越大则响应程度越高,振荡或阶变幅度越大,恢复时间也较长。水温观测只有 2 个井点记录到同震响应,且不遵循这种规律,两个井点记录同震响应的幅度基本相当,变化周期较大,恢复时间也较慢。由于温度变化通常取决于该处的岩石透水率、温度梯度、探头的温度响应滞后时间等因素,更多地体现一种持续性的影响,其变化更加复杂。

5 结论

针对 2012 年 4 月 11 日印尼两次 8 级以上大震对甘肃地区数字化地下流体观测井网中水位、水温观测资料的同震变化特征和响应能力进行了分析讨论,得出以下结论:

(1) 根据甘肃地区流体观测井的同震响应资料可知:16 个水位观测项中有 9 个记录到同震响应,而 23 个水温测项只有 2 个记录到同震响应,这说明该区各测点相对于印尼地震而言,水位测项的记震能力明显强于水温。

(2) 大部分井水位的同震响应有比较一致的变化规律,同时与震级密切相关,震级越大则响应程度越高,对井区的应力状态的影响越表现为瞬时特征,以振荡为主,震后较快恢复原来状态。而水温的响应机理与水位不同,因此其响应程度与形态也不同,表现为缓慢的恢复变化,即当水位停止振荡后,含水层水体与井水的横向水力作用并未停止,含水层水体仍存在相对缓慢的对流换热过程,这也许减缓了井水温度的恢复速率。

(3) 部分观测井水位振荡的同时水温未见明显变化,主要是由于此类观测井水温探头的观测含水层封闭性不好,气体脱逸的通道并不集中在井孔,所以温度变化不明显,再加上被其水温较大的日变化幅度所掩盖。对于这类观测井可以通过调整水温探头的位置来优化观测系统。

(4) 由于水位动态的物理意义明显,含水层受压时水位上升,受拉张时下降,因此震后阶跃上升的水井水位可能包含有区域应力场的信息,水位阶跃上升集中区可能也是区域压应力相对集中区,对未来该区域发生较显著的地震具有空间上的指示意义。当今许多观测资料明显受仪器和外界环境干扰,严重影响预报效能,而远震产生的水位阶跃上升集中区可以作为一种补充手段。

参考文献(References)

- [1] 孙小龙,刘耀炜,王博,等.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 Xiao-long, LIU Yao-wei, WANG Bo, et al. Feature and Mechanism of Co-seismic Response in Binchuan Well to Indonesia Earthquakes[J].Earthquake, 2008, 28(3): 69-78. (in Chinese)
- [2] 赵栋,易立新,王广才,等.地下水位中地震前兆信息提取方法研究[J].地震工程学报,2013,35(2):334-341.
ZHAO Dong, YI Li-xin, WANG Guang-cai, et al. Research on

- the Technology of Extracting Earthquake Precursor Information from Groundwater Level[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(2):334-341.(in Chinese)
- [3] 刘成龙,王广才,张卫华,等.三峡井网井水位对汶川 8.0 级地震的同震响应特征研究[J].地震学报,2009,31(2):188-194.
LIU Cheng-long, WANG Guang-cai, ZHANG Wei-hua, et al. Coseismic Response of Well Water Level in Three Gorges Well-network to M_s 8.0 Earthquake in Wenchuan[J]. Acta Seismologica Sinica,2009,31(2):188-194.(in Chinese)
- [4] 张素欣,杨卫东,张子广.唐山矿井模拟与数字水位的记震能力对比分析[J].西北地震学报,2007,29(2):170-173
ZHANG Su-xin, YANG Wei-dong, ZHANG Zi-guang. Comparison of the Ability of Recording Seismic Wave between Digital and Analogue Groundwater Level Observation in Tangshan Mine Well[J]. Northwestern Seismological Journal,2007,29(2):170-173.(in Chinese)
- [5] 耿杰,陈安方,潘双进.山东地下水动态观测井对 2007 年印尼 8.5 级地震的响应特征[J].西北地震学报,2008,30(2):173-178.
GENG Jie, CHEN An-fang, PAN Shuang-jin. Responding Characteristics of Dynamic Underground Water in Observation Wells of Shandong Province to Indonesia M 8.5 Earthquake in 2007[J]. Northwestern Seismological Journal,2008,30(2):173-178.(in Chinese)
- [6] 周志华,黄辅琼,马玉川.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[J].地震工程学报,2013,35(3):529-534.
ZHOU Zhi-hua, HUANG Fu-qiong, MA Yu-chuan. Coseismic Changes of Water Level Caused by the Minxian—Zhangxian M_s 6.6 Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):529-534.(in Chinese)
- [7] 石耀霖,曹建玲,马丽,等.唐山井水温的同震变化及其物理解释[J].地震学报,2007,29(3):265-273.
SHI Yao-lin, CAO Jian-ling, MA Li, et al. Tele-seismic Coseismic Well Temperature Changes and Their Interpretation[J]. Acta Seismologica Sinica,2007,29(3):265-273.(in Chinese)
- [8] 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.
Department of Monitoring and Forecasting, China Earthquake Administration. Effects of Indonesia M_s 8.7 Earthquake in 2004 on the Mainland of China[M]. Beijing: Seismological Press,2005:131-258.(in Chinese)
- [9] 孙小龙,刘耀炜.苏门答腊 8.5 级地震引起的水温响应变化[J].华北地震科学,2008,26(1):35-40.
SUN Xiao-long, LIU Yao-wei. Water Temperature Variation Caused by Sumatra M_s 8.5 Earthquake[J].North China Earthquakes Sciences,2008,26(1):35-40.(in Chinese)