

秦双龙, 刘水莲, 廖丽霞, 等. 福州连江江南井水位水温同震响应变化特征及机理探讨[J]. 华南地震, 2016, 36(4): 50–57. [QIN Shuanglong, LIU Shuilian, LIAO Lixia, et al. The Characteristics and Mechanism of Coseismic Response of Wellwater Level and Water Temperature of Jiangnan Well in Liangjiang, Fuzhou [J]. South china journal of seismology, 2016, 36(4): 50–57.]

福州连江江南井水位水温 同震响应变化特征及机理探讨

秦双龙, 刘水莲, 廖丽霞, 洪旭瑜

(福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 分析了福州连江江南井水位、水温对多次大地震的同震响应资料, 该井在多次大地震后同震形态表现为水位震荡–水温下降–水温上升或水位震荡–水温上升型。分析研究表明: 该井水位的同震变化幅度随着震中距的增大而衰减, 随着震级的增大而增大。并进一步探讨了震后该井呈现水位震荡–水温下降–水温上升和水位震荡–水温上升两种同震现象的机理, 结合前人提出的同震响应机理, 分析认为, 在地震波的作用下, 井水位产生振动效应, 可能导致地下水向下垂直运动速率增大, 上层冷水快速混入观测含水层中, 引起温度快速下降, 同时, 由于地震波激发了井深部较热的含水层中的热流体混入井孔中, 导致水温上升, 震后由于水位振动停止, 较热的含水层混合通道闭合, 井水温通过井壁及井水间的热传递而使水温逐渐恢复到背景水平。

关键词: 井水位; 水温; 同震响应; 同震机理; 含水层

中图分类号: P315.723

文献标志码: A

文章编号: 1001–8662 (2016) 04–0050–08

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.04.008

The Characteristics and Mechanism of Coseismic Response of Wellwater Level and Water Temperature of Jiangnan Well in Liangjiang, Fuzhou

QIN Shuanglong, LIU Shuilian, LIAO Lixia, HONG Xuyu

(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

Abstract: This paper analyzes the coseismic response of well water level, water temperature data of Jiangnan well in Lianjiang for multiple large earthquakes, and the coseismic form of Jiangnan well in several large earthquakes is water level shock–water temperature falling–water temperature rising type or water level shock–water temperature rising type. Analysis shows that: the amplitude of coseismic changes of water level decreases with the epicentral distance increases, and increase of the magnitude increase. Combining with the previous proposed coseismic response mechanism, the paper further explores the mechanism of coseismic phenomena of

收稿日期: 2015–10–26

基金项目: 中国地震局 2016 年度震情跟踪定向工作任务 (2016020304) 及福建省地震局 2014 年科研专项资助 (SF201418)

联合资助

作者简介: 秦双龙 (1984–), 男, 工程师, 主要从事地下流体和地震预报研究。

E-mail: slqin0624@126.com.

well water level. The results show that: vibration effect of well water level of Jiangnan well resulted by the seismic wave lead to increase of the downward vertical velocity of groundwater and the rapid mixing of upper cold water mixing rapid with the observation aquifer, which cause the temperature decreased rapidly; because of the earthquake wave stimulates the hot water in the deeper layers of the well to be mixed into the wellbore, resulting in an increase in water temperature. After the earthquake, the vibration stopped and the hot aquifer mixing channel is closed. The water temperature was gradually returned to the background level by the heat transfer between the borehole wall and well water.

Key words: Water level; Water temperature; Coseismic response; Coseismic mechanism; Aquifer

0 引言

地下水是地球系统中重要的组成部分,具有广泛、易流动和不可压缩等特征,当地下水处于封闭性良好的承压体系统中时,就能客观、灵敏地反映地壳中应力-应变的变化信息。地下水位、水温的同震响应特征,反应了在地震波作用下,地下含水层系统中介质贮层变形、孔隙或裂隙以及地下水垂向运移等变化,由于产生同震水位、水温的变化机理不同,因而产生形态变化也不同。近些年来,一直也是研究人员关注的焦点问题。

地下井孔水位、水温的同震响应变化是一个比较复杂的现象,它与地震、井孔水文地质环境条件、观测系统等多种因素有关,具有一定的个体研究特征。综合前人的研究成果,水位的同震机理一般可解释为:由于地震波的作用,含水层受到压缩或扩展变形而引起水位的变化;而水温的同震机理变化则较为复杂,综合前人当前的研究成果,可主要归纳为三类:(1)冷水下渗机理:由于地震波的激发作用,地下井水位产生振动效应,向下垂直运动的速率加大,低温水快速混入观测含水层中,从而引起水温快速下降;(2)气泡逸出机理:由于地震波作用,井水位产生震荡,水中气体得到释放,同时释放出了井水中的热量,从而导致井水温降低;(3)热弥散机理:在水位同震的震荡作用下,热弥散系数增加,温度较高的一些高动能的水分子弥散到较冷的低动能水分子中,以及温度较低一些低动能水分子弥散到温度较高处,形成水温的变化,在一定条件下,形成了同震水温下降现象。

本文主要分析福州连江江南井水位、水温资料对多次大地震的同震响应变化,该井水位、水温的同震响应变化特征有与观测台网记录到的该区域其它井孔的水位、水温同震现象有些区别。福州连江江南井井孔水位、水温在一些大震后的

同震现象主要表现为水位震荡-水温下降-水温上升和水位震荡-水温上升两种类型。结合前人所提出的同震响应机理以及该区域的水文地质构造环境特征,对该井的水位、水温同震变化加以分析研究,并试图对该井水位、水温的同震响应现象机理作出一个较为合理的解释。

1 福州连江江南井水文地质环境及井孔特征

福州连江江南井位于福州盆地热异常区,该区内地温梯度较大,最高达 $72.9^{\circ}\text{C}/\text{km}$,且区域内有多处温泉出露(图1)。该井井孔地理位置坐标为: 119.53°E , 26.19°N ,井深 100.3 m,海拔高程 5.5 m。井孔附近主要有 NE 向的福州一连江断裂和 NW 向蓼沿一东塘断裂通过,在其交汇部位温泉十分发育。该井地下水类型为基岩裂隙承压水,富水性中等,上部松散层用井管隔绝至 59.20 m,并用水泥封堵井管外壁,井孔柱状图见图2。2006年10月完成数字化改造后,水温记录仪采用 TDT-36 地温传感器,探头置于 90 m 处,井水温梯度变化见图3;水位仪器采 HM21F-C1-1-A1 水位传感器,探头埋深 6 m。自观测以来,周边无环境干扰,水位、水温一直变化稳定,固体潮记录清楚,也积累了许多典型震例的水震波及震后效应现象。

2 福州连江江南井水位、水温同震响应特征

福州连江江南井自数字化观测以来,水位、水温观测仪器记录到中国大陆及其周边多次大地震的同震响应变化(表1),其中包括 2007年9月12日苏门答腊 M_s 8.5级、2007年9月13日苏门答腊 M_s 8.3级、2008年5月12日中国汶川 M_s 8.0级、2011年3月11日日本本州 M_s 9.0级和 2012



图 1 福州温泉及连江江南井分布图

Fig.1 Distribution map of hot spring in Fuzhou and Jiangnan Well in Lianjiang

地层时代 ^{a)}	层底 ^{b)} 深度/m	井孔结构与 ^{c)} 地层柱状图 ^{d)}				岩性简述 ^{e)}
Q ₄ ^{al}	2.60 ^{d)}	+	+	+	+	粉质粘土：暗灰黄色，软-可塑，饱和，表层为耕植土，为不透水层。 ^{e)}
	11.80 ^{d)}	+	+	+	+	淤泥：暗灰色，流塑，饱和，为不透水层。 ^{e)}
Q ₂ ^{al+pl}	15.20 ^{d)}	+	+		+	孔深 22.30m 处，有一构造新裂隙，倾角约 70 度，当钻探至该处时及此后钻探过程，钻探并滋生黑涌水，孔口无出水。 ^{e)}
	21.40 ^{d)}	+	+		+	
Q ₃ ^{al}		+	+		+	聚积土：灰黄色，可塑，饱和，粉质土状，含球状风化岩，球状风化岩径 200—400mm 占 30—40%，为弱透水层。 ^{e)}
		+	+		+	微风化花岗岩，浅肉红色—浅灰色，花岗岩结构，块状构造，岩石可见晶洞。 ^{e)}
R ₃ ^{pl}		+	+		+	泥质中砂：灰黄色，稍密—中密，饱和，≥0.25mm 占 50%以上，含泥量约为 30%，分选性较差，为弱不透水层。 ^{e)}
		+	+		+	卵石：灰黄色，稍密—中密，饱和，20—200mm 占 50%以上，次圆状，花岗岩岩性为主，中风化状，充填物为粉土，透水性，富水性中等。 ^{e)}
	53.40 ^{d)}	+	+		+	
	57.00 ^{d)}	+	+		+	中风化花岗岩，浅肉红色—浅灰色，花岗岩结构，块状构造，岩石可见晶洞。 ^{e)}
	72.00 ^{d)}	+	+		+	孔深 75—80m 间可遇分布 5 条裂隙，倾角 65—70 度，裂面附着铁锰质物。 ^{e)}
	92.00 ^{d)}	+	+		+	孔深 92m 以下，岩石完整，岩石长 500—1200mm。 ^{e)}
J _{2a} ^{f)}	100.30 ^{d)}	+	+		+	
		+	+	+	+	

图 2 福州连江江南井柱状图

Fig.2 The column map of Jiangnan well in Lianjiang

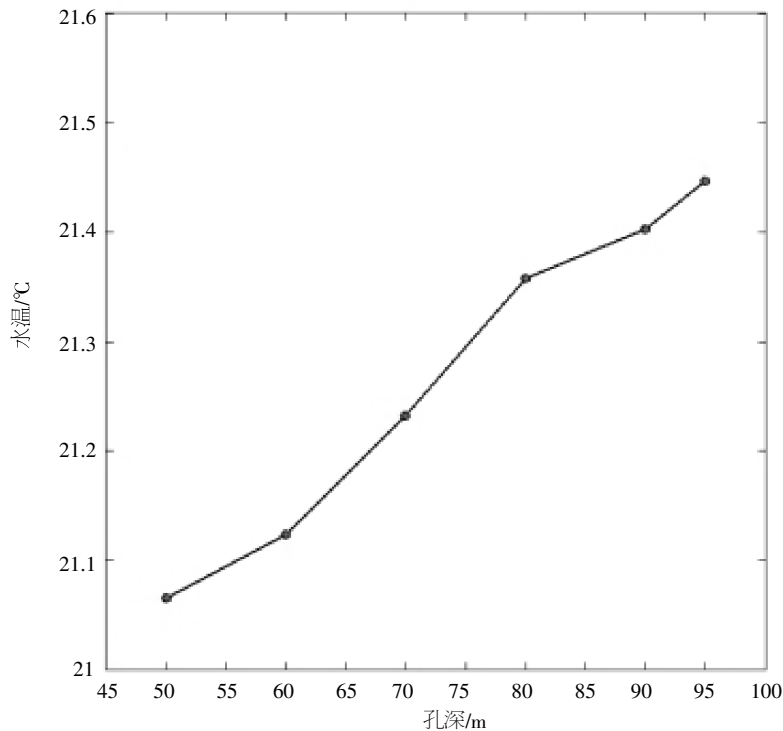


图 3 福州连江江南井水温梯度曲线

Fig.3 Water temperature gradient curve of Jiangnnan Well in Lianjiang

表 1 福州连江江南井水位、水温对 6 次巨震的同震变化统计

Table 1 The coseismic variation of well water level and water temperature of Jiangnan well in Lianjiang during the 6 huge earthquakes

序号	时间/年-月-日-时:分	经度/°	纬度/°	震中距/km	震级	水位同震变化	水位变幅/m	水温同震变化	水温变幅/°C
1	2007-09-12-19:10	101.5	-4.4	3 049	8.5	震荡	0.025 5	下降	0.002 3
2	2007-09-13-07:49	100.9	-2.5	3 254	8.3	震荡	0.012 3	下降-上升	0.004 0
3	2008-05-12-14:28	103.4	31.0	1 648	8.0	震荡-上升	0.012 1	下降-上升	0.010 2
4	2011-03-11-13:46	142.6	38.1	2 507	9.0	震荡	0.099 6	下降-上升	0.003 4
5	2012-04-11-16:38	93.5	2.3	3 794	8.6	震荡	0.051 4	无变化	无变化
6	2012-04-11-18:43	92.6	0.8	4 000	8.2	震荡	0.013 2	上升	0.002 3

年 4 月 11 日苏门答腊 M_s 8.6 级等典型全球震例,下面对这几次强震同震变化特征进行逐个分析。

2.1 2007 年 9 月 12 日苏门答腊 M_s 8.5级和 2007 年 9 月 13 日苏门答腊 M_s 8.3级地震同震变化

2007 年 9 月 12 日、9 月 13 日印尼苏门答腊南部海域相继发生了 M_s 8.5 和 M_s 8.3 级地震,震后,福州连江江南井水位均记录到了震荡型的同震响应。井水温曲线在 M_s 8.5 级地震后表现为快速下降和小幅上升,持续时间较短;在 M_s 8.3 级地震后则表现为快速下降、缓慢上升型,持续时间较长,上升幅度约 0.004 °C(图 4)。可以看到,在同一地区发生的两次大震,水温表现形态却有所差别,震级大,震中较近 M_s 8.5 级地震所引起

水温上升的幅度反而更小,持续时间也更短,这可能与该井所处的含水层特征有一定的关系。

2.2 2008 年 5 月 12 日中国汶川 M_s 8.0级地震同震变化

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,在中国汶川发生了 M_s 8.0 级强烈地震,这次地震后福州连江江南井水位同震响应形态为震荡-上升型,表明地震对该井含水层介质造成的影响较大。井水温在这次地震中表现为快速下降-缓慢上升型,上升幅度达 0.010 2 °C,持续时间较长(图 5)。

2.3 2011 年日本本州 M_s 9.0级地震同震变化

2011 年 3 月 11 日日本东北部海域发生了 M_s 9.0

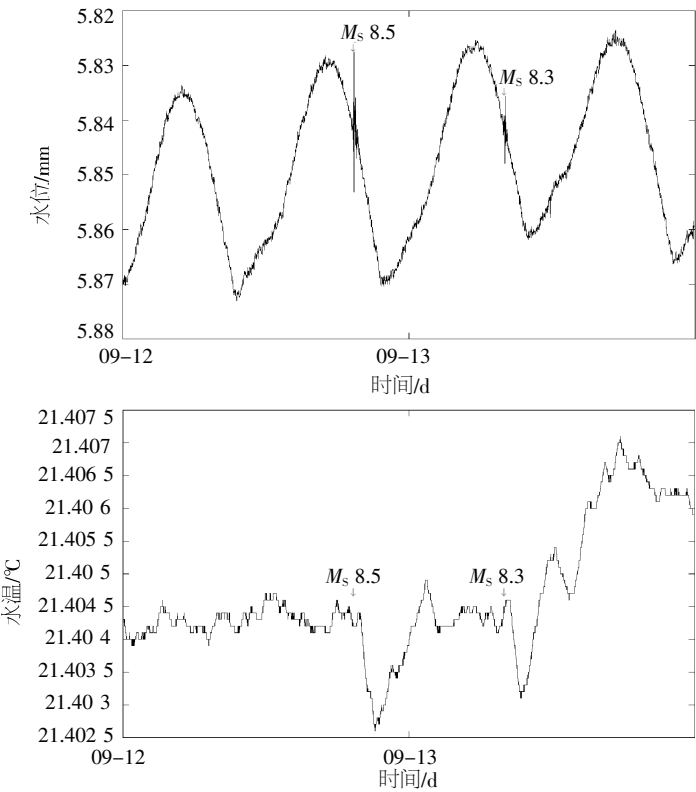


图 4 福州连江江南井水位、水温对苏门答腊 8.5 级、8.3 级地震同震响应图

Fig.4 The coseismic response diagrams of well water level and water temperature of Jiangnan well in Lianjiang during Sumatra M 8.6 and M 8.3 earthquakes

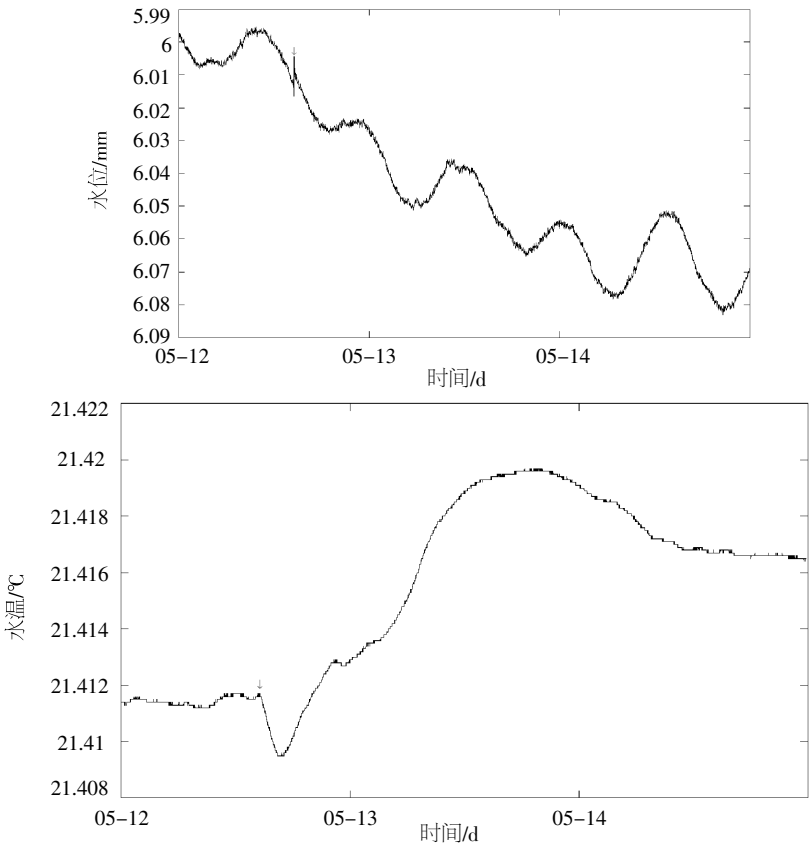


图 5 福州连江江南井水位、水温对中国汶川 8.0 级地震同震响应图

Fig.5 The coseismic response diagrams of well water level and water temperature of Jiangnan well in Lianjiang during Wenchuan M 8.0 earthquake

级地震,地震引发了海啸,地震灾害较严重。震后,福州连江江南井水位同震形态为震荡型,最大双振幅 0.099 6 m;水温表现形态为快速下降-缓慢上升型,上升幅度约 0.003 4 °C,持续时间较长(图 6)。

2.4 2012 年 4 月 11 日苏门答腊 M_s 8.6 级、 M_s 8.2 级地震同震变化

2012 年 4 月 11 日在苏门答腊北部海域相继发生了 M_s 8.6 级、 M_s 8.2 级地震,两次都地震后,福州连

江江南井水位同震形态为震荡型。在 M_s 8.6 级地震后,井水温并没有立刻出现明显变化,而是在 M_s 8.2 级地震后,井水温才开始上升,持续时间较长(图 7)。

3 福州连江江南水位、水温同震变化分析

六次大地震的详细信息如表 1 所示。依据 Roeloffs 的研究结果,笔者运用回归分析方法,分

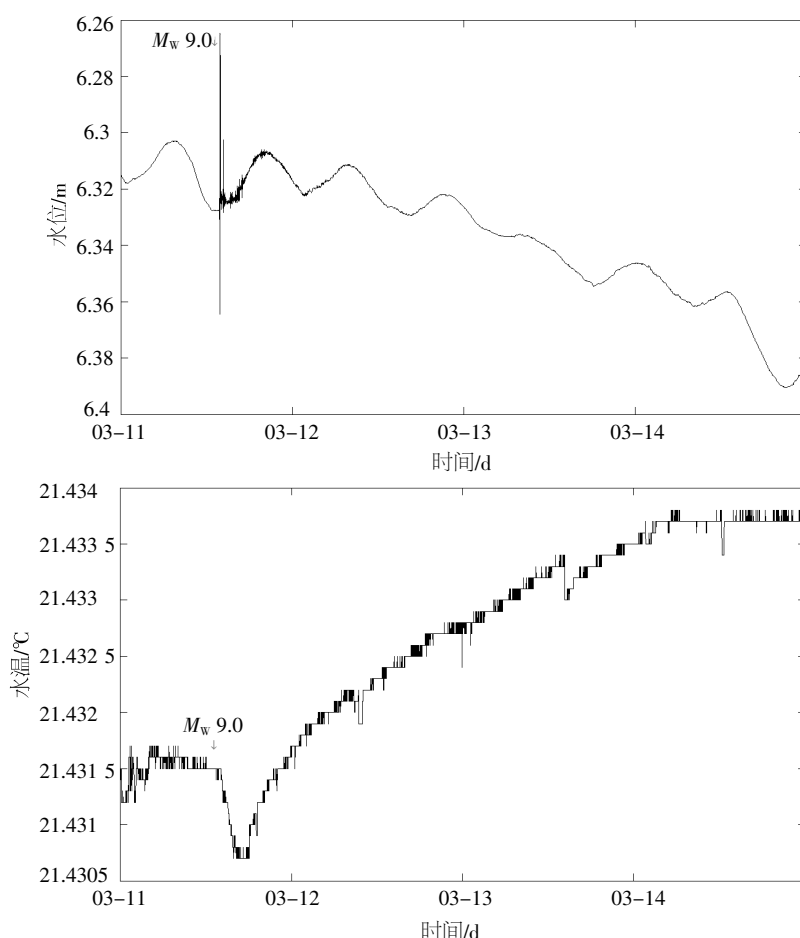


图 6 连江江南井水位、水温对日本 9.0 级地震同震响应图

Fig.6 The coseismic response diagrams of well water level and water temperature of Jiangnan well in Lianjiang during Japan M 9.0 earthquake

别对水位变化幅度、震级(M)、震中距(D)相互之间的关系进行了分析,各参量之间存在以下关系:

$$\lg(\Delta H) = -0.3427 \lg D + 1.056M - 9.3511 \quad (1)$$

式(1)反映了六次强震中福州连江江南井水位同震变化幅度与震中距、震级的关系,通过公式中各参量系数可以看出水位同震振幅随着震中距的增大而衰减,随着震级的增大而增大,其相关系数约为 0.904 8。

2007 年 9 月 12 日苏门答腊 M_s 8.5 级地震引起

了福州连江江南井的水位震荡和水温下降,但下降结束后上升的幅度较小,而 9 月 13 日的苏门答腊 M_s 8.3 级地震不仅引起了井水位震荡和水温下降,且井水温下降结束后以持续长时间上升。2012 年 4 月 11 日苏门答腊 M_s 8.6 级地震后,引起了井水位震荡,但井水温并没有显著变化,之后紧接着发生的 M_s 8.2 级地震,则出现井水位震荡和水温显著上升的同震现象,这表明该井水温的同震变化及震后效应形态不仅只受地震震级和震中距离的

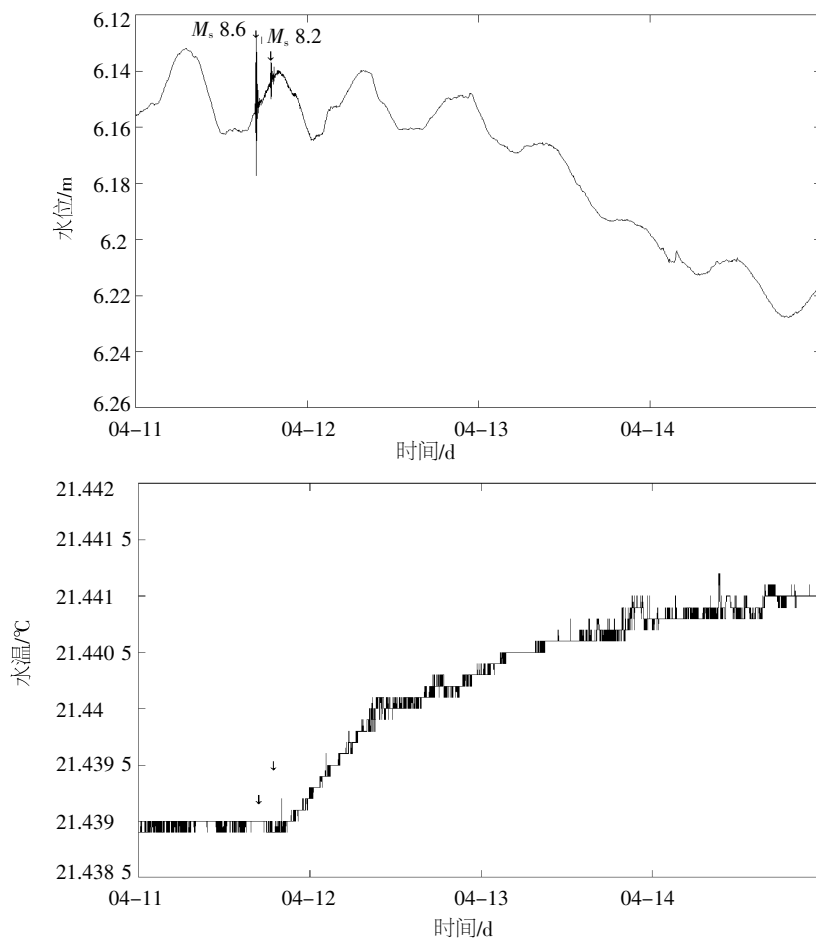


图7 福州连江江南井水位、水温对2012年4月11日苏门答腊 M_s 8.6级、 M_s 8.2级地震同震响应图

Fig.7 The coseismic response diagrams of well water level and water temperature of Jiangnan well in Lianjiang during Sumatra M 8.6 and M 8.2 earthquakes on April 11th, 2012

大小影响,还可能与该井所处的水文地质情况和含水层地质构造环境有关。

4 井孔水位、水温同震变化机理解释

对井水位、水温同震响应机理已有前人给出了一些的合理解释。车用太等研究认为:当地震波经过含水层中时,含水层中发生交替的压缩与扩张变化,使井-含水层间不断发生水交替,造成井水位的不断振荡,同时,随着井筒内水体的上、下震荡运动,一方面促使上部低温水与下部高温水不断对流,使高低不同温度的井水发生混合,另一方面加剧了井水面上热扩散作用,使井水中的热扩散到大气中去,同时井水释放带“热”的气泡,从而导致井水温度的下降;刘耀伟等认为:井-含水层中上层地下水由于地震波的作用,发生振动效应,向下垂直运动速率增强,温度较低的低温水快速混入下层的高温观测含水层中,引起

温度快速下降。石耀霖等研究认为:地震波的激发,引起水位的震荡,在同震水位震荡过程中,引起热弥散系数增加,温度较高的一些高分子动能的水分子弥散到冷的低分子动能水中,以及温度较低一些低分子动能的水分子弥散到温度较高处,引起水温的变化,在一定条件下,形成了同震水温降低现象。

结合福州连江江南井地下富含温泉含水层的特殊水文地质构造环境特征、井孔温度梯度资料,还综合分析了前人所提出的同震响应机理。笔者认为福州连江江南井的同震机理为:由于地震波的激发作用,导致井孔所处的含水层孔隙压力发生变化,当作用力不够大,含水层孔隙在弹性应变范围内压缩和扩张,出现水位震荡现象,上层低温水快速混入观测含水层中,从而引起水温快速下降。由于福州连江江南井位于福州盆地热异常区,附近多处温泉出露,说明该区至少存在有显著温度差异的两层地下水。上层水主要来自与

地表降水补给,下层水来自深部的地下热矿水。由于地震波作用,激发该处的较热含水层泄流补给热水混合而产生水温升高,震后随着较热含水层混合通道的闭合,井水温通过井壁和井水之间热传递致水温缓慢恢复至原有背景值。利用这种机理也可以合理的解释 2007 年印尼苏门答腊 M_s 8.5、 M_s 8.3 级地震和 2012 年印尼苏门答腊 M_s 8.6、 M_s 8.2 级地震的水温同震现象,由于地震距离该井较远,首次大震后,激发的地震波使得该井较深处的含水层孔隙压发生松弛变形,但含水层通道并没有打开,之后紧接着发生的地震引起的地震波使得较深处的含水层孔隙压在松弛变形的基础上发生了塑性变形,含水层通道被打开,较热含水层中的热水补给到观测含水层中,使得温度缓慢上升,之后孔隙压力发生缓慢变化,较热含水层混合通道缓慢闭合,井水温通过井壁和井水之间热传递致水温缓慢恢复到背景值。

5 结语

(1) 通过福州连江江南井水位、水温对全球六次强震的同震特征分析,连江江南井水位同震响应形态主要表现为震荡或震荡-上升型,水温同震响应形态主要表现为下降-上升型和上升型。

(2) 结合前人的研究成果,认为福州连江江南井水位在地震后出现震荡,是由于地震波的作用,使含水层受到交替的压缩和扩张,从而使地下水从含水层中进出造成的井孔中水位的变化,水位震荡的幅度变化随着震中距的增大而衰减,随着震级的增大而增大。福州连江江南井水温的同震形态变化较为复杂,与该井的水文地质以及含水层所处的地热环境情况有关,首先由于地震波影响造成井水垂直震荡,加大了不同含水层间的垂直运动速率,引起水温下降,之后由于地震波激发该处较热含水层泄流补给热水混合使水温升高,随着较热含水层混合通道的闭合,井水温通过井壁和井水之间的热传递导致水温逐渐恢复至原有水平。

参考文献:

- [1] 黄辅琼,迟恭财,徐桂明.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.
- [2] 孙小龙,刘耀伟,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,2008,8(3):69-78.

- [3] 廖丽霞,王玫玲,吴绍祖.福建省流体台网井水位的同震效应及其地震预测意义[J].地震学报,2009,31(4):432-441.
- [4] 杨竹转,邓志辉,陶京玲,等.北京塔院井数字化观测水温的同震效应研究[J].地震学报,2007,29(2):203-213.
- [5] 陈大庆,刘耀伟,杨选辉,等.远场大震的水位、水温同震响应及其机理研究[J].地震地质,2007,29(1):122-132.
- [6] 付子忠.地热动态观测与地热前兆[J].地壳构造与地壳应力,1988,14(1):1-7.
- [7] 袁玉松,马永生,胡圣标,等.中国南方现今地热特征[J].地球物理学报,2006,49(4):1118-1126.
- [8] Roeloffs E A. Persistent water level changes in a well near Parkfield California, due to local and distant earthquakes[J]. J Geophys Res, 2003, 108 (B8): 108-125. doi: 10.1029/2002JB002321.
- [9] 车用太,何案华,鱼金子.水温微动态形成的水热动力学与地热动力学机制[J].地震学报,2014,36(1):106-117.
- [10] 刘耀伟,杨选辉,刘永铭,等.地下流体对苏门答腊 8.7 级地震的响应特征[M]//中国地震局监测预报司编.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.北京:地震出版社,2005.
- [11] 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(5):265-273.