

王俊, 王行舟, 缪鹏, 等. 皖 14 井水温响应机理浅析[J]. 华南地震, 2019, 39 (2): 71-78. [WANG Jun, WANG Xingzhou, MIU Peng, et al. Study on Water Temperature Response Mechanism of Wan 14 Well[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2): 71-78]

## 皖 14 井水温响应机理浅析

王 俊, 王行舟, 缪 鹏, 李军辉, 何 康, 郑海刚, 王雪莹  
(安徽省地震局, 合肥 230031)

**摘要:** 通过巢湖皖 14 井高精度水温观测环境及数字化改造以来的观测资料, 分析不同深度(-160 m、-195 m)处水温变化特征。以 2012 年 4 月 11 日印尼 8.6 级地震为例, 巢湖皖 14 井水温同震响应所获得的数据为分析基础, 利用 Ansys 中的热分析模型进行数值模拟, 研究了同震响应过程中井孔系统水温度变化与热量传递间的关系及机理。模拟结果显示: 水温数值模拟曲线与实际测量数据曲线一致, 该井水温同震响应表现为下降特征, 主要是热对流所致。

**关键词:** 高精度水温; Ansys 数值模拟; 机理; 同震响应; 热对流

**中图分类号:** P315.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662(2019)02-0071-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.02.011

## Study on Water Temperature Response Mechanism of Wan 14 Well

WANG Jun, WANG Xingzhou, MIU Peng, LI Junhui, HE Kang, ZHENG Haigang, WANG Xueying  
(Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China)

**Abstract:** According to the high-precision observation environment of water temperature in well Wan 14 of Chaohu Lake and the observation data since digital transformation, the characteristics of water temperature variation at different depths (-160 m, -195 m) are analyzed. Taking the Indonesian M8.6 earthquake occurred on April 11<sup>th</sup>, 2012 as an example, and based on data got from the co-seismic response of water temperature in Wan 14 well, the relationship and mechanism between water temperature changes and heat transfer in the borehole system during the co-seismic response are studied by using numerical simulation based on thermal analysis model in Ansys. The simulation results show that the numerical simulation curve of water temperature is consistent with the actual measured data, and the co-seismic response of the well water temperature, shown to be a decreasing one, is mainly caused by thermal convection.

**Keywords:** High-precision water temperature; Ansys numerical simulation; Mechanism; Co-seismic response; Thermal convection

**收稿日期:** 2017-12-27

**基金项目:** 中国地震局震情跟踪课题(2019010306)资助

**作者简介:** 王 俊(1984-), 工程师, 主要从事地震地下流体及分析预报科研工作。

**E-mail:** renshi1314@126.com.

## 0 引言

近几年来,远场大震引起地震地下水同震响应的现象越来越受到国内外学者们的关注,特别是 2004 年印度尼西亚苏门答腊大震后,研究者更加重视对其机理的探讨<sup>[1]</sup>。鱼金子等<sup>[2]</sup>研究了北京太平庄井水温的同震效应,将水温的同震突降机制归因于井水气体的释放;车用太等<sup>[3]</sup>认为,其成因主要是热对流,而不是热传导,是由于井-含水层系统中水流运动与井筒内不同温度的水混合引起的;刘耀炜等<sup>[4]</sup>广泛收集了大陆地下流体台网对 2004 年 12 月 26 日及 2005 年 3 月 29 日印尼苏门答腊地震的同震响应资料,分析了水位与水温的同震响应特征;杨竹转等<sup>[5-6]</sup>收集了云南思茅大寨井和北京塔院井一井多震的水位和水温同震响应资料,并探讨了其响应的机理;石耀霖等<sup>[7]</sup>数值模拟了唐山井水温下降变化,认为水温同震下降是由于热弥散作用引起的;Kitagawa et al<sup>[8]</sup>研究了 Yudani 温泉的 3 个含水层对地壳应变和气压的不同反映,以及流量、水温对地震、潮汐和气压的反映,模拟了 Yudani 温泉的同震阶变上升变化,推导温度变化模型;顾申宜等<sup>[9]</sup>通过正演方法,研究了同震响应过程中井孔水温度变化与热传导之间的关系及相关热力学机制,得出了沿井深方向不同时刻水温同震响应变化水温模拟曲线与实际测量曲线一致,其研究结果表明,井孔中水温同震响应方式(上升、下降或不变),与水温传感器的位置、热源的位置和分布、传感器与热源之间的相对空间等因素有关。汪成国等<sup>[10]</sup>对新 30 井水位水温同震响应及震后效应特征进行了研究,其结果表明,水温的同震响应不仅与地处的构造环境、水文环境条件有关,还与地震波引起的井水中水的运动方式、水温探头的位置等因素有关。综合上述,水温的同震响应特征并不是由单一因素引起的,它是多种因素的综合表现。但总的来说,上述研究中对某井孔-含水系统某一深度处的水温同震响应变化机制探讨较多,对于同井不同深度处的水温变化机理研究的文献较少。孙小龙等<sup>[11]</sup>研究得出,观测井内不同层位布置水温探头来记录同一地震引起的井水同震响应现象,通过分析同井不同层位水温的变化特征,有利于揭示合理的水温响应机理。基于此,本文对高精度观测仪器下的巢湖皖 14 井水温变化机理进行了探讨,主要开展以下工作:一是利用同型号水温仪器在不同深度(-160 m、-195 m)处进行对比观测,获

取水温的微动态特征;二是根据两套不同深度水温记录到的响应,得到了大震激发下,井孔中水的流速,为水温对远场的响应数值模拟提供实际参数,并选择合适的物理模型,进行数值模拟,对目前水温所观测到的现象进行物理解释。

## 1 观测井概况及水温对比观测特征

### 1.1 巢湖皖 14 观测井概况

巢湖皖 14 井位于安徽省巢湖市区内,构造部位为庐庐断裂带东侧,滁河断裂与东关—桥头集断裂交汇处。井深 331 m,观测段为 270.73~301 m,水温 20℃ 左右。井孔观测系统为敞开式(图 1a),观测含水层岩性为泥盆纪石英岩,地下水类型为孔隙裂隙承压水,水文地质条件为江淮剥蚀丘陵,丘陵见构成向斜谷地,山岭多由泥盆纪石英岩组成,斜坡为石灰岩,岩溶发育<sup>[12]</sup>。巢湖皖 14 井数字化水温为“十五”观测项目,于 2007 年 9 月正式观测,仪器型号为 SZW-1A 型,水温探头放置在井下 195 m 处。多年观测资料表明,该井水温日动态属于随机波动型,长期动态属于复合型,主要的干扰因素为降雨,由于该井处于灰岩地区,岩溶发育,地下径流路径短,一定量( $\geq 10$  mm)的降雨后 6~12 h 该井水温、水位会出现相应变化且呈反向变化特征,即水位上升、水温下降(图 2)。此外受降雨影响,该井下层水温出现下降滞后于上层水温。2013 年 8 月安徽省地下流体测项地震预报效能评估显示,该井水温测项为 B 类,水位测项为 A 类。

### 1.2 巢湖皖 14 井水温对比观测特征

#### 1.2.1 井孔水温梯度

为了解巢湖皖 14 井井孔结构及井孔水温梯度变化特征,2009 年 2 月 28 日对该井进行了水温梯度测量,结果显示:110 m 以上的水温线性较差,表明井孔封闭性不好,可能有地表水混入;110 m 以下水温线性较好(图 1b),说明井管下部封闭性较好,100~200 m 之间的温度差为 1.46℃,以每百米垂直深度上增加的温度数表示,通常为(1℃~3℃)/100 m,与之相比表明,巢湖皖 14 井属于低梯度井孔<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.2 同井水温对比观测实验

(1) 第一次水温比测。第一次水温比测试验时间段为 2009 年 2 月 28 日至 2009 年 5 月 3 日,

比测探头投放至井口 170 m 处。比测水温运行了 2 个多月, 两套仪器测得的水温变化趋势一致。在不同深度的两套同型号(SZW-1A 型)的水温观测仪均记录到了异常过程, 但细节有所不同, 上层水温(170 m)先上升后下降, 下层水温(195 m)直接下降。此次比测期间共记录到两次水温异常现象, 第一次于 2009 年 3 月 13 日原探头水温(195 m)突降幅度为  $0.0133^{\circ}\text{C}$ , 比测探头水温(170 m)下降幅度为  $0.0120^{\circ}\text{C}$ , 2009 年 4 月 6 日距该井 53 km 的肥东县发生  $M_s$  3.5 级地震; 第二次于 2009 年 4 月

17 日水温再次出现突降异常变化, 原探头水温(195 m)突降幅度为  $0.0212^{\circ}\text{C}$ , 比测探头水温(170 m)下降幅度为  $0.0107^{\circ}\text{C}$ (图 3, 表 1)。这两次异常期间均未出现显著的降雨影响(图 3)。不同深度的两套水温仪并行期间, 两套仪器均记录到了相同形态的异常变化过程, 且整个比测时段内两者总体变化趋势一致, 这也表明该井原水温观测仪工作状态正常, 产出的观测数据可信度较高, 为后续的数据分析奠定了基础。

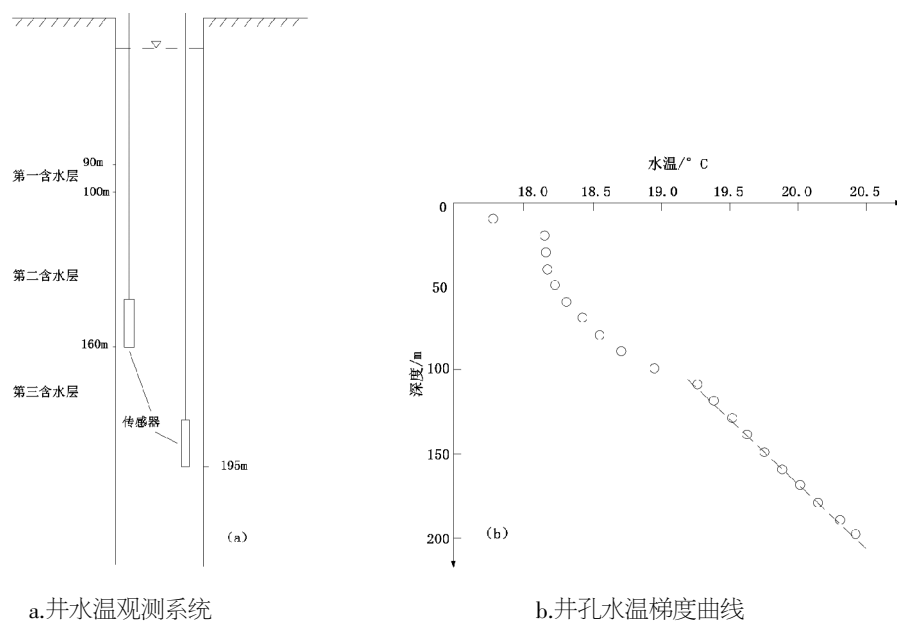


图 1 皖 14 井水温观测系统及水温梯度测试曲线

Fig.1 Water temperature observation system and water temperature gradient test curve in Wan 14 well

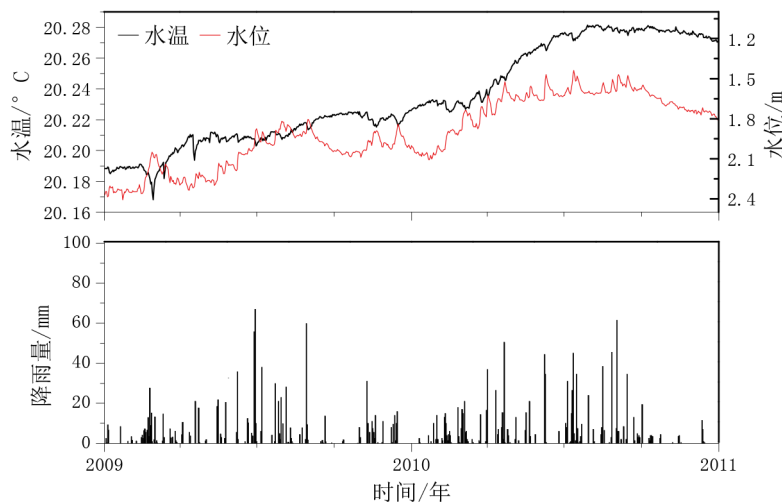


图 2 皖 14 井水温、水位及降雨量关系曲线

Fig.2 Relation curve of water temperature, water level and rainfall in Wan 14 well

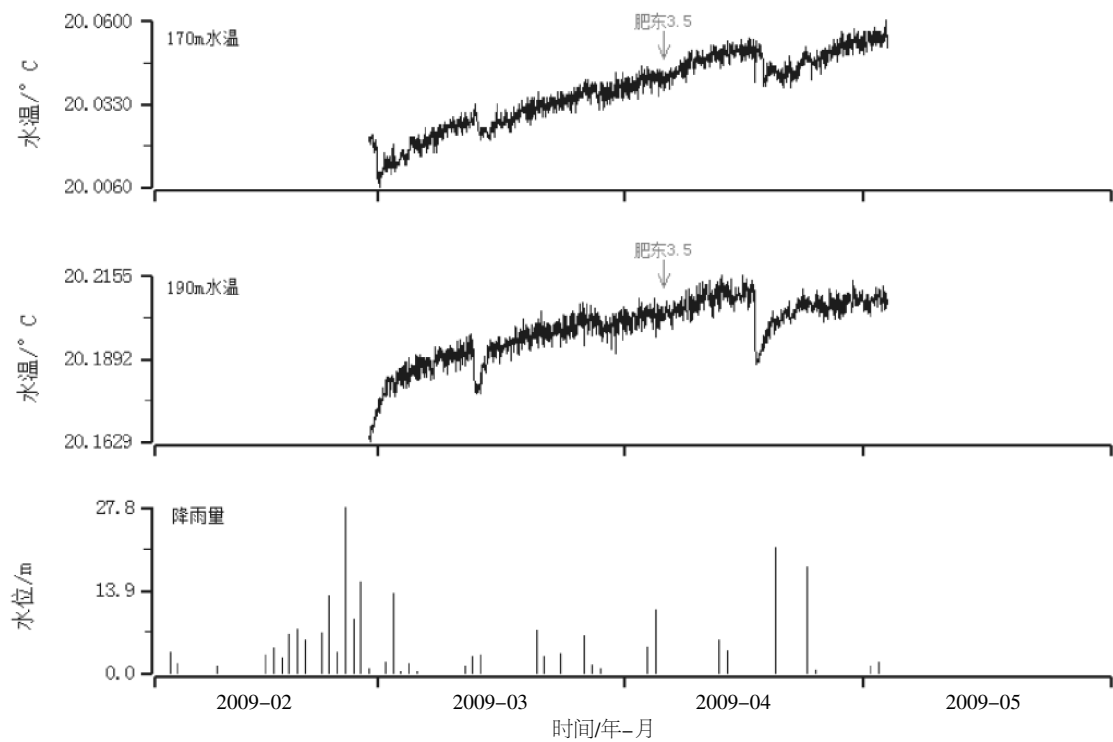


图 3 皖 14 井第一次不同深度处水温比测曲线

Fig.3 Curves of the first water temperature measurement at different depths in Wan 14 well

表 1 皖 14 井水温在地震前后的异常变化特征统计表

Tabel 1 Statistical table of anomalous change characteristics of water temperature before and after the earthquake in Wan 14 well

地震事件		时间特征	水温探头/m	水温降幅/°C	两水温变化时间差/min	震中距/km
2009-04-06 肥东 $M$ 3.5 级地震	震前	2009-03-13 03:56	下层 195 m	0.0133	下层水温先突降，1 min 后 上层水温才逐渐下降	53
		2009-03-13 10:44				
		2009-03-13 03:57	上层 170 m	0.0120		
		2009-03-13 10:56				
2012-04-11 印尼 $M$ 8.6 级地震	震后	2012-04-11 17:14	下层 195 m	0.003	下层水温先突降，3 min 后 上层水温才逐渐下降	4170
		2012-04-11 17:21				
		2012-04-11 17:17	上层 160 m	0.002		
		2012-04-11 17:28				

(2) 第二次水温比测。第二次水温比测试验时间段为 2012 年 4 月 10 日至 2012 年 12 月 29 日，将比测水温探头放在井口下 160 m 处，原水温探头仍放置在 195 m 处，两套水温变化总体变化趋势一致(图 4)。

据中国地震台网测定，2012 年 4 月 11 日 16 时 38 分印尼苏门答腊北部海域发生 M 8.6 级强烈地震，破裂过程持续 160 s，其后约 2 h

(18h43min)主震西南方向再次发生 8.2 级余震<sup>[14]</sup>。巢湖皖 14 井两套水温均记录到该次地震的全过程，在远地震激发下，水位先出现振荡，而后于 17 时 17 分水位开始下降(图 5a)，水温同步下降，但细节有所不同。下层水温(195 m)变现为突降，突降幅度为 0.003℃，时间上略早于上层水温(160 m)；而上层水温表现为逐步下降，水温下降幅度为 0.002℃(表 1，图 5b、图 5c)。

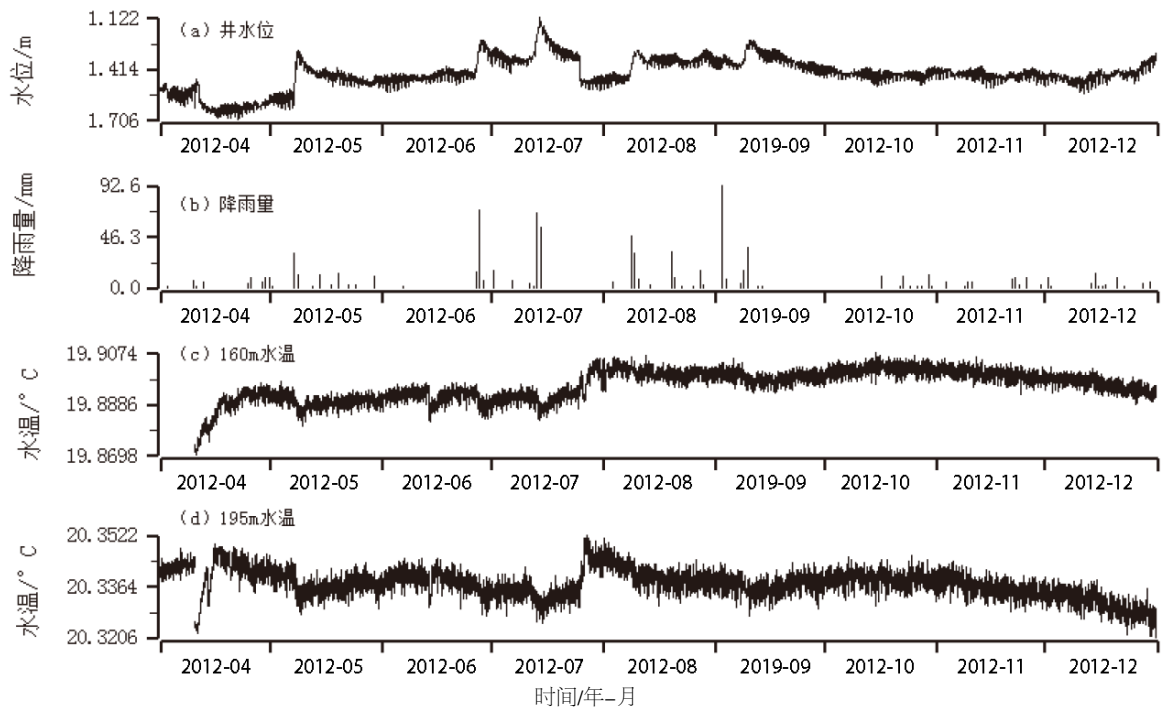


图 4 皖 14 井第二次不同深度处水温比测曲线

Fig.4 Curves of the second water temperature measurement at different depths in Wan 14 well

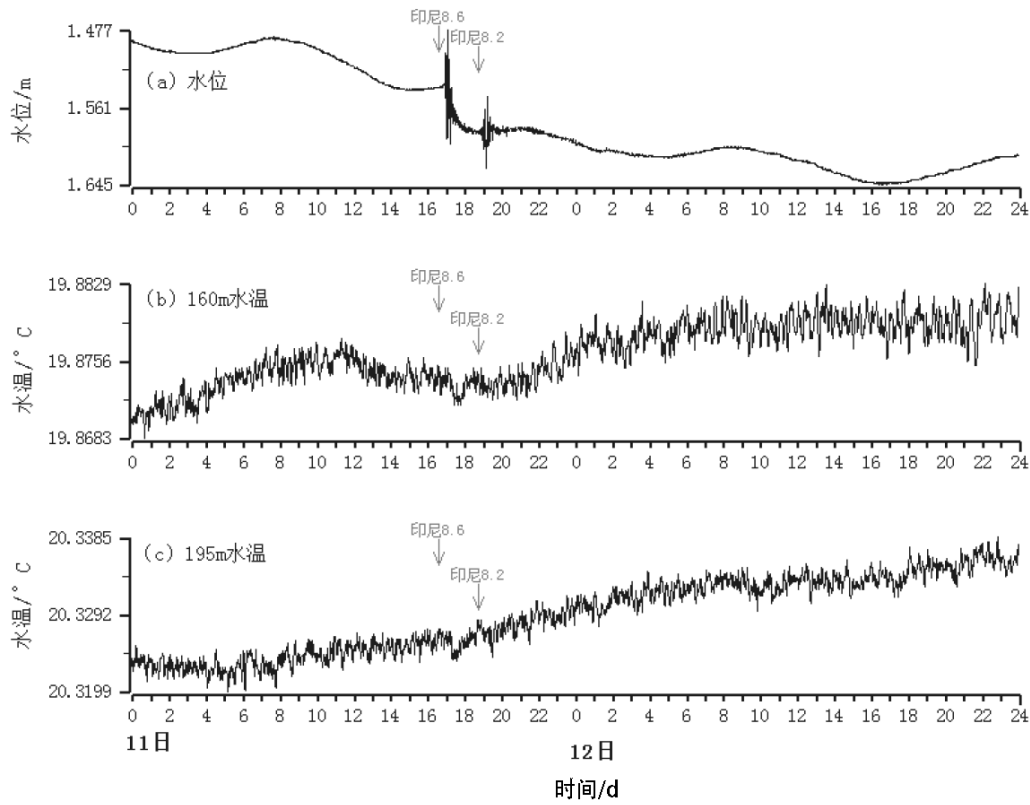


图 5 苏门答腊 M8.6 级地震前后巢湖皖 14 井水位、水温同震响应时间曲线  
Fig.5 Co-seismic response time curve of water level and water temperature of Wan 14 well in Chaohu before and after Sumatra M8.6 earthquake

在第二次水温比测中,不同深度的两套水温仪器于 2012 年 6 月 14 日又同时记录到了该井水温的微动态变化(图 4),与该井降雨影响水温下降形态特征相似(图 4a、图 4b),但两套水温变化的先后时间顺序不同(图 4c、图 4d),观测结果表明:受降雨干扰影响,浅层水温先记录到变化;而异常动态是深层水温先记录到,且下层水温的变化幅度较大,这对于水温前兆异常的性质判定是有益的。这种观测事实与理论是相符的,一次降雨后,大气降雨渗入地下,随着时间的推移,雨水不断补给地下含水层,上部含水层先接受补给,井孔内混入冷水,水温下降,下部含水层补给滞后,水温变化也滞后于上层水温。而目前对水温震后效应或同震响应的机理研究尚不成熟,但据张慧等<sup>[15-16]</sup>研究认为,井孔水温的变化可能反映出井孔-含水层系统的应力、应变状态,远大震引起的观测井的震后效应,可归因于地震波导致井孔-含水层系统参数的改变,同一井筒系统不同深度的水温变化特征各异,可能与不同深度(层位)所处的不同频率段有关。设想巢湖皖 14 井井筒热系统处于相对平衡状态,当远大震激发时,有较短、有限时间内含水层中发生交替的压缩、膨胀变形,深部热流上涌,使井孔-含水层系统中水流、水量发生变化,井水位的激烈震荡,引起水温变化。160 m 观测层处于第二含水层,195 m 观测层处于第三含水层,两个观测层频率不一样、背景噪声强弱不同,对远大震响应时间产生差别,下部含水层高低频噪声弱,易于反应远场大震。董蕾等<sup>[17]</sup>通过重庆荣昌井对比观测发现,由于不同层位频率谱特征不同,对于同一地震,随着深度的增加,水温记录能力更强,浅层水温反映地震能力较弱,深部水温反映地震能力较强,且随着深度增加,同震响应的幅度加大。本文通过对比观测获得的水温异常特征,也尝试用前人的理论去解释这一现象,但目前水温异常动态特征较复杂,仍无法对其有明确的机理解释与定论,有待进一步研究。

综合上述观测事实,分析认为巢湖皖 14 井不同深度水温在震前、震后均表现下降变化,且总体变化趋势一致,但细节略有差异,下层水温为突降,上层水温为逐渐下降变化形态特征。时间上,下层水温变化略早于上层水温;幅度上,下层水温降幅略大于上层水温。为进一步研究该井水温变化机理,以苏门答腊 M 8.6 级地震为例,在

巢湖皖 14 井水温同震响应所获取的参数和边界条件的基础上,利用 Ansys10.0 软件,选择合适的物理模型,进行数值模拟,以期对所观测到的水温变化现象进行物理解释。

## 2 水温同震响应的变化机理与数模研究

### 2.1 水温同震响应机理的定性分析

热能传递的方式只有三种:热辐射,热对流和热传导。杨竹转等<sup>[18]</sup>利用北京塔院井数字化水温观测资料,分析了远大震引起的水温同震效应,认为井孔水体受振荡激发而加速对流与掺混是导致水温同震下降的主要原因。杨竹转等<sup>[18]</sup>研究得出水温的同震变化总是对应同井的水位同震变化,即水位的同震变化是水温同震变化的必要条件,且因水温梯度差异及其含水层的相对位置是不同深度水温动态复杂性的重要原因。在深部正梯度段,水温水位是同向变化的,水温梯度越大,潮汐效应和同震变化幅度越大。汪成国等<sup>[19]</sup>研究了新疆新 30 井水温探头在 150 m、180 m 时水温同震变化特征,分析认为水温的同震变化不仅受控于当地的地构造环境和水文地质条件,还与地震波引起的井孔中的运动方式、水温探头放置的位置等因素有关。

在 2012 年苏门答腊 M 8.6 级地震后,巢湖皖 14 井水位先出现震荡变化再下降,水温同步下降(图 6),这一过程与前人的研究成果是相符的,也就是说巢湖皖 14 井水温同震变化是由于水位的同震响应变化引起的。顾申宜等<sup>[9]</sup>以海口 ZK26 井水温同震响应的观测数据为基础,利用相关热动力学方程分析认为,在井孔水环境条件下,水体质量交换引起温度的变化,即热对流引起井水的温度变化。

由此可见,水温同震响应机理的研究当前还在探索阶段,各种解释能解释一定地观测现象,但哪一种机制更具有合理性仍需进一步研究与验证。这也表明了同井水温的同震响应特征不是固定不变的,与井孔水温梯度、井孔构造、水文地质条件、井孔间分布和热源的相对位置等多种因素有关。

石耀霖等<sup>[7]</sup>利用有限单元模型计算了唐山井水温下降变化,认为水温同震下降后不断恢复是由于热传导作用所致,这与我们实际观测到的事实相符合。基于上述研究成果和观测事实,以热对

流的传导方式作为本次数值研究的模型。

## 2.2 模拟参数

巢湖皖14井架设了一套LN-3A型水位仪,两套SZW-1A型水温仪,以水温探头分别在-160 m、-195 m含水层为对象,两套水温探头相距35 m。当远震(2012年印尼M 8.6级地震)发生时,水位、水温的同步响应,利用不同深度水温仪记录下降的时间间隔为3 min,可以计算出井孔内瞬时水的对流速度为19.4 cm/s。铁的导电率17.3%,井孔外径0.12 m,内径0.05 m。

## 2.3 水温数值模拟结果与分析

本次数值模拟研究中,利用Ansys10.0有限元分析软件,进行温度场的瞬态分析。为简化模拟过程,本次选用PLANE55有限元对巢湖皖14井井孔在同一时刻不同深度的井孔温度变化形态进行数值模拟,针对2012年4月11日印尼M 8.6级地震,得到在该远震激发过程中井孔不同深度处的温度变化的数值模拟曲线,其中 $T=0$  min,  $T=17$  min,  $T=25$  min井水温度随深度的变化(图6)。模拟结果显示,在远震的激发下(同震响应),不同深度处的水温变化存在差异,下层水温先下降且变化的幅度较大。

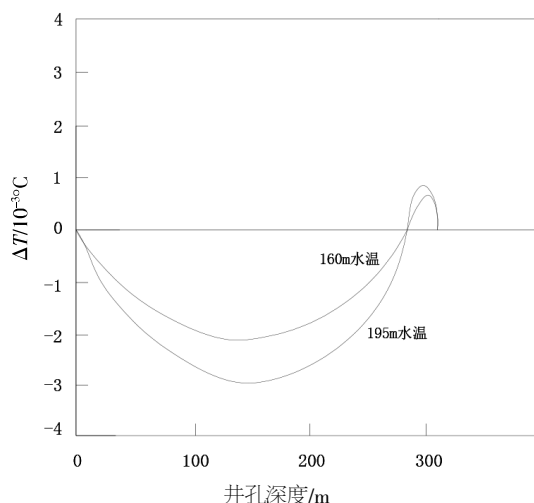


图6 不同深度水温在印尼地震不同时刻变化的时间曲线  
Fig.6 Time curves of water temperature in different depths at different times during Indonesian earthquake

此外,在下层水温-195 m附近剖分网格中取一微小单元格,研究印尼地震后,单元格内瞬态温度时间变化曲线情况,初始温度取为下降前1

min 的温度  $20.3271^{\circ}\text{C}$ ,通过数值模拟,结果显示:震后30 min后水温开始明显下降(即17h08min),震后于17时45分开始回升,温度下降最低值为  $20.2045^{\circ}\text{C}$ 。而下层水温实际情况是,17时14分开始下降,17h21min时降到最低值  $20.3243^{\circ}\text{C}$ ,17h38min开始恢复。模拟结果与实际情况存在一定差异,但总体变化趋势相同(图7)。

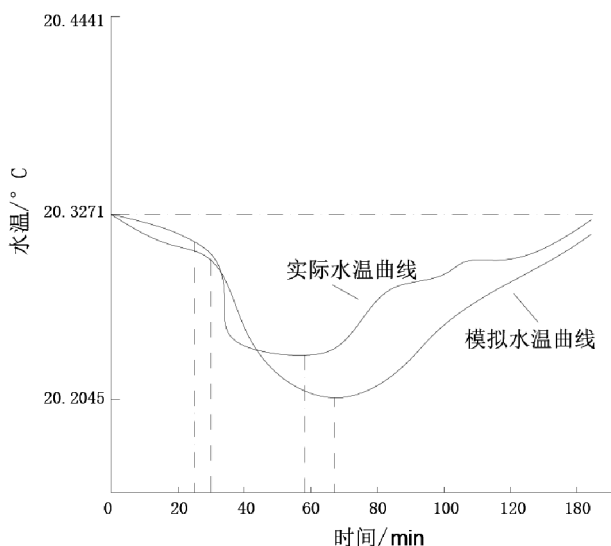


图7 195 m 水温探头附近印尼地震后瞬态温度时间变化模拟曲线

Fig.7 Simulated curve of temporal transient temperature change after Indonesia earthquake around 195 m water temperature probe

## 3 结论与讨论

本文主要以印尼M 8.6级地震在巢湖皖14井不同深度处观测到的水温同震响应观测数据为基础,运用Ansys10.0软件中的FLOTTRAN CFD流体分析热对流模型进行瞬态温度变化数值模拟。通过数值模拟获得了垂向(井孔深度方向)上同震效应后不同时刻的井孔水温的变化规律,结果表明,垂向温度数值模拟曲线与实际温度变化曲线趋势基本一致。通过本次研究得到以下几点认识:

(1)从不同深度两套水温比测时记录的降雨及微动态特征分析认为:受降雨影响时,上层水温先下降,下层水温滞后(仪器观测到的事实);而异常微动态总是下层水温先记录到下降,上层水温滞后,这是由于不同层位频率谱特征不同,上部水温反映地震能力相对较弱,下部深层水温反映地震能力强,且同震响应幅度大。这样的观测事实对判定异常是有益的。

(2)车用太等<sup>[13]</sup>在分析了我国各类观测井特征

后提出,井水温的背景值主要取决于当地的温度场,但在有限的时间内井水温度的变化则主要取决于水流的运动,无论是其正常动态还是异常动态的成因与机理主要是热对流,而不是热传导。基于这样的研究成果,再结合本次水温观测事实及数值模拟曲线与实际曲线的一致性,分析认为巢湖皖 14 井水温远大震后出现下降主要是井内出现热对流所致,其根本原因是地震发生后,含水层骨架发生变形使得井孔含水层的孔隙水压力上升(下降),引起含水层中地下水向井孔中吸收(注入)水,引起高精度温度传感器附近热量转移,从而导致井孔水温发生变化。

(3)井孔含水层温度变化的同震变化形态(下降、上升或不变)与井孔水温梯度、井孔空间分布和热源之间相对位置、井孔构造条件等因素有关<sup>[10,18]</sup>。

本文通过在观测井不同深度进行水温对比观测获得了井孔实际参数;采用获得的参数,对水温在远大震的激发下出现下降的机理进行了探讨,给出了水温变化机理的物理解释,但对于径向温度模拟变化还需要进一步研究才能给出合理解释。此外,通过同井中不同深度两套仪器记录到了同形态的异常变化,不仅可以说明水温仪工作状态,也能捕捉到一些短临微动态信息。建议在今后的研究工作中在综合深井的多层位架设多个温度传感器以获取深井孔垂向上温度变化特征,尽可能为短临预报提供更为可靠地前兆信息。

#### 参考文献:

- [1] 孙小龙,刘耀炜. 塔院井水位和水温的同震响应特征及其机理探讨[J]. 中国地震,2008,24(2):105-115.
- [2] 鱼金子,车用太,刘五洲. 井水温度微动态形成的水动力学机制研究[J]. 地震,1997,17(4):389-396.
- [3] 车用太,刘成龙,鱼金子. 井水温度微动态及其形成机制[J]. 地震,2008,28(4):20-28.
- [4] 刘耀炜,杨选辉,刘用铭,等. 地下流体对苏门答腊 8.7 级地震的响应特征[C]//中国地震局监测预报司编. 2004 年印度尼西亚苏门答腊 8.7 大地震及其对中国大陆地区影响. 北京:地震出版社,2005.
- [5] 杨竹转,邓志辉,赵云旭,等. 云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究[J]. 地震学报,2005,27(5):569-574.
- [6] 杨竹转,邓志辉,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.
- [7] 石耀霖,曹建玲,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.
- [8] Kitagawa Y, Koizumi N. Comparison of post-seismic groundwater temperature changes with earthquake induced volumetric strain release: Yudani hot spring, Japan [J]. Geophys Res Lett, 1996(23):3147-3150.
- [9] 顾申宜,刘博维,张慧,等. 井孔水温对远场巨震同震响应及其机制的数模研究[J]. 地震,2013,33(1):29-39.
- [10] 汪成国,盛琰,高守权,等. 日本 9.0 级地震引起新 30 井水位水温同震响应及震后效应特征分析[J]. 内陆地震,2015,29(1):37-41.
- [11] 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]. 地震,2008,26(1):35-40.
- [12] 张军,陶月潮,孙盼盼,等. 安徽巢湖井数字化水温资料分析[J]. 地震研究,2011,34(2):131-135.
- [13] 车用太,刘喜兰,姚宝树. 首都圈地区井水温的动态类型及其成因分析[J]. 地震地质,2003,25(3):403-420.
- [14] 杨文,刘杰. 2012 年 4 月 11 日苏门答腊 8.6 级地震前后川滇地区波速变化研究[J]. 地震,2013,33(4):248-256.
- [15] 张慧. 海口 ZK26 井多层位水温对比观测[J]. 地震地磁观测与研究,2011,32(1):85-90.
- [16] 张慧,顾申宜,李志雄. 单井多层位水温微动态初步研究[J]. 地震,2012,33(1):101-110.
- [17] 董蕾,陈敏,马伟. 荣昌华江井水温多层微动态特征[J]. 地震地磁观测与研究,2017,38(6):72-78.
- [18] 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.