

秦双龙, 廖丽霞, 洪旭瑜, 等. 福建永春桃东井水位同震响应特征及记震能力分析[J]. 华南地震, 2017, 37(S1): 126-132. [QIN Shuanglong, ZHAO Wenbo, LIAO Lixia, et al. Analysis on Coseismic Response Characteristics and Seismic Recording Capacity of Water Level of Taodong Well in Yongchun, Fujian[J]. South China journal of seismology, 2017, 37(S1): 126-132.]

福建永春桃东井水位同震响应特征及记震能力分析

秦双龙, 廖丽霞, 洪旭瑜, 赵文波

(福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 利用福建永春桃东观测井 2004—2013 年的数字化水位资料, 分析该井的同震响应变化特征, 同时结合该区的降雨及地震活动性资料, 分析该井的水位变化动态和井孔水位的记震能力变化得到以下主要结论: 永春桃东井水位的同震响应特征主要表现为震荡型、震荡-上升型和阶升型, 且以震荡型为主; 井水位同震变化幅度主要随震级增大而增大, 随井震距增大而减小, 三者之间呈现出良好的相关性; 在 2006—2007 年该井水位呈现出高值现象, 可能反映了该区域构造应力活动在该时段增强的迹象, 具有一定的前兆性质; 该井水位记震能力在 2007 年 8 月 29 日永春 4.6 级地震前后存在一个明显的变化, 记震能力显著增强。震源机制解表明, 该井在震时处于压应力范围内, 震后可能随着井区所在范围压应力的减弱, 张应力的增强, 井-含水层系统导水能力增强, 从而使得含水层对地震波响应能力增强。

关键词: 井水位; 同震响应变化; 记震能力; 震源机制

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) S1-0126-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.S1.020

Analysis on Coseismic Response Characteristics and Seismic Recording Capacity of Water Level of Taodong Well in Yongchun, Fujian

QIN Shuanglong, LIAO Lixia, HONG Xuyu, ZHAO Wen bo

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Based on the digital water level data of Taodong well in Yongchun from 2004 to 2013, the paper analyzes the coseismic response, variation of well water level, change of seismic capacity and geological structural condition of well of Yongchun Taodong well. The results show that the coseismic response characteristics of well water are mainly the shock type, the shock-rise type and the ascending type, and the shock type is the main type; The coseismic variation of well water increases with the increase of magnitude, and decrease with the increase of well spacing, and there is a good correlation between the three; the well

收稿日期: 2017-07-30

基金项目: 2017 年度中国地震局震情跟踪定向工作任务(2017020303)

作者简介: 秦双龙(1985-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事地下流体、地球物理学等应用研究。

E-mail: slqin0624@126.com.

water appears high value phenomenon during 2006 and 2007, which may reflect the regional stress activity enhancement phenomenon in the period, and have a certain precursor nature; The seismic capacity of the well water has a significant change after Yongchun M 4.6 earthquake on August 29th, 2007, that markedly enhance its seismic capacity. Focal mechanism solution show that the well was in compressive stress range when the earthquake occurred. With the weakening of the compressive stress in the area of the well area, the tensile stress of the well-aquifer system is enhanced by the increase of the tensile stress, which enhances the seismic response of the aquifer.

Keywords: Water level; Coseismic changes; Yongchun Taodong Well; Shock; Seismic capacity

0 引言

地下流体是地壳中最活跃的介质, 当它形成一个具有一定封闭条件的承压系统时, 就能客观灵敏地反应地壳应力和应变信息^[1]。大地震产生的应力能够瞬时改变地壳的应力状态, 引起含水层中地下水的流动, 井水位的同震效应可以有效地揭示地壳介质对应力-应变过程响应过程, 能够一定程度地反应地壳动力作用下地下介质应变和孔隙压的变化特征, 从而使我们便于深入了解地下介质的动力学过程。此外, 近年来有学者利用井水位同震响应变化的异常空间丛集区, 用来研究未来某一区域或者断裂带未来发生地震的可能性^[2-3]。

井水位同震响应特征是指井水位在地震波作用下所表现出来的异常形态。汪成民等^[4]根据中国大量记录资料研究了同震水位变化特征与震中距的关系, 表明, 震中距小于 500 km 时, 水位以阶变型为主, 震中距大于 2 000 km 时, 水位变化以震荡型为主。杨竹转等^[5]分析了汶川地震引起中国大陆的井水位同震变化特征, 认为汶川地震在中国大陆引起的水位同震变化以上升为主, 且水位同震上升和下降的井点空间分布具有一定的分区性; 鱼金子等^[6]系统介绍了金沙江 6 口水位观测井网对日本 9.0 级地震的同震响应, 分析了同震响应的特征与同震响应的机理, 认为井孔水位的同震响应幅度、持续时间主要取决于含水层系统的导水系数; 缪阿丽等^[7]以 2008—2013 年江苏流体观测网记录到的同震响应为例, 分析了井水位的同震响应特征, 结果表明, 该区井水位同震变化以震荡形态为主, 同一口井对不同地震的响应特征不受地震方位和震源机制的影响, 并进一步分析了该井水位同震变化幅度与震级和震中距的关系, 认为, 井水位的变化幅度随震级的增大而增大, 随着震中距的增大而减小; 宋洋等^[8]以北京八宝山断裂带中段大灰厂两水位观测井为例, 研究了两口井水位的同震响应次数、形态、幅度、记震能

力, 发现两口井的同震响应特征存在明显的差异性, 认为与井所处断层的屏蔽作用和井含水层的渗透性质变化有关。

综合上述研究, 多数学者主要是从面上对一个区域或构造带上的井水位同震变化特征来进行分析研究, 对单井的同震变化深入研究的并不多。本文将在分析福建永春桃东井水位同震变化的基础上, 结合该井井孔水位的变化动态、井孔水文地质构造条件、区域附近地震活动, 来研究该井水位对多次远大地震的同震响应特征和记震能力随时间的变化以及对该现象可能的机理进行分析。

1 观测井概况及井水位动态特征介绍

永春桃东动水位观测井位于福建省泉州市永春县桃城镇桃东村管区内, 属于温泉自流井, 井点位置为 $E118.30^\circ$, $N25.32^\circ$, 该井孔深 5 m, 直径 1.5 m, 日出水量 5 吨, 井孔高出地面约 1 m。构造上处于东南沿海地震活动较强的 NE 向长乐-诏安断裂带中段(莆田-厦门)西侧、NW 向的永安-晋江断裂带和沙县-南日岛断裂带中间部位(图 1)。1984 年 5 月开始正式观测, 并纳入省区域观测台网, 2003 年 3 月进行数字化改造后, 同年 9 月安装了 LN-3 水位仪。该井水温约 46°C , 井水矿化度 0.75mg/L , $\text{PH}7.8$ 。

该井水位年变化动态相对稳定(图 2), 水位受强降雨影响不明显, 具有夏高冬低的年变形态, 固体潮响应动态非常明显, 日最大潮差可以达到 0.9 m。根据该井水位多年来的观测实践研究表明, 该井是该地区映震能力最好的井孔之一, 素有“震哨泉”之称, 周边无强干扰源, 对周边及其全球大震同震响应敏感。

2 井水位同震响应特征变化分析

统计了 2004—2013 年全球发生的 $M_s \geq 7.0$ 级

地震，永春桃东井记录到 44 地震同震变化(图 3)，该井水位同震响应特征分为震荡、震荡-上升和阶升型，但以震荡型为主。其中阶升型的同震水位变化有 2 次，为 2006 年台湾南部海域 7.2 级和 2008 年中国汶川 8.0 级地震所引起的井水位同

震变化，这两次地震距离该井相对较近；震荡-上升型的同震水位变化有 5 次，主要为印尼苏门答腊 8 级以上巨震(4 次)和 2011 年日本本州 9.0 级地震所引起的井水位同震变化；其余均为震荡型同震水位变化。部分井水位同震变化图见图 4。

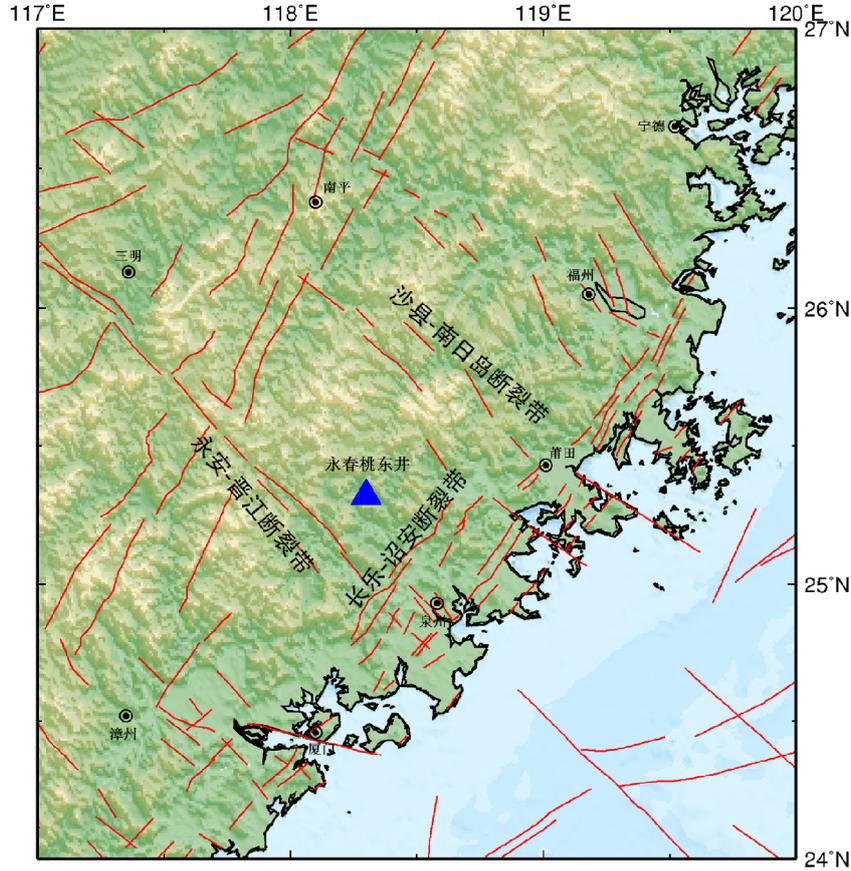


图 1 永春桃东井所处区域地质构造图
Fig.1 Geological structure map of the study area

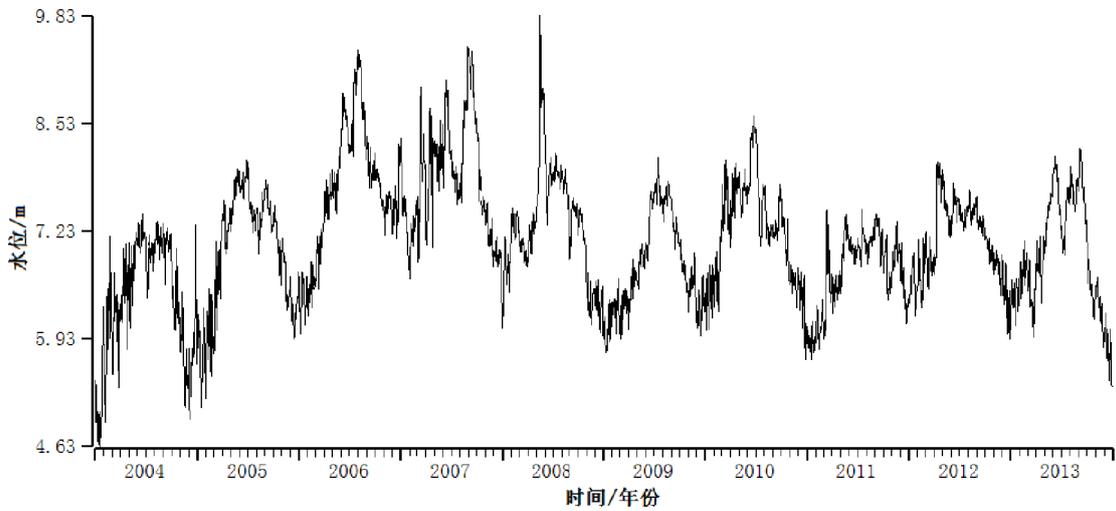


图 2 2004-2013 年永春桃东井水位变化图
Fig.2 Water level change map of Yongchun well from 2004 to 2013

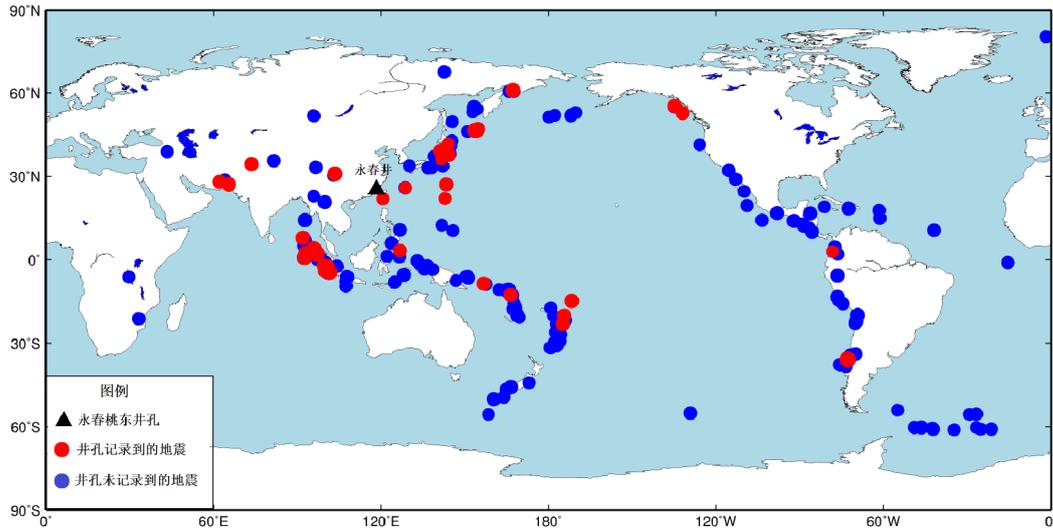


图 3 2004–2013 年全球 7 级以上地震分布图与永春桃东井孔位置图

Fig.3 Distribution map of earthquakes worldwide with $M \geq 7.0$ and location of Taodong well

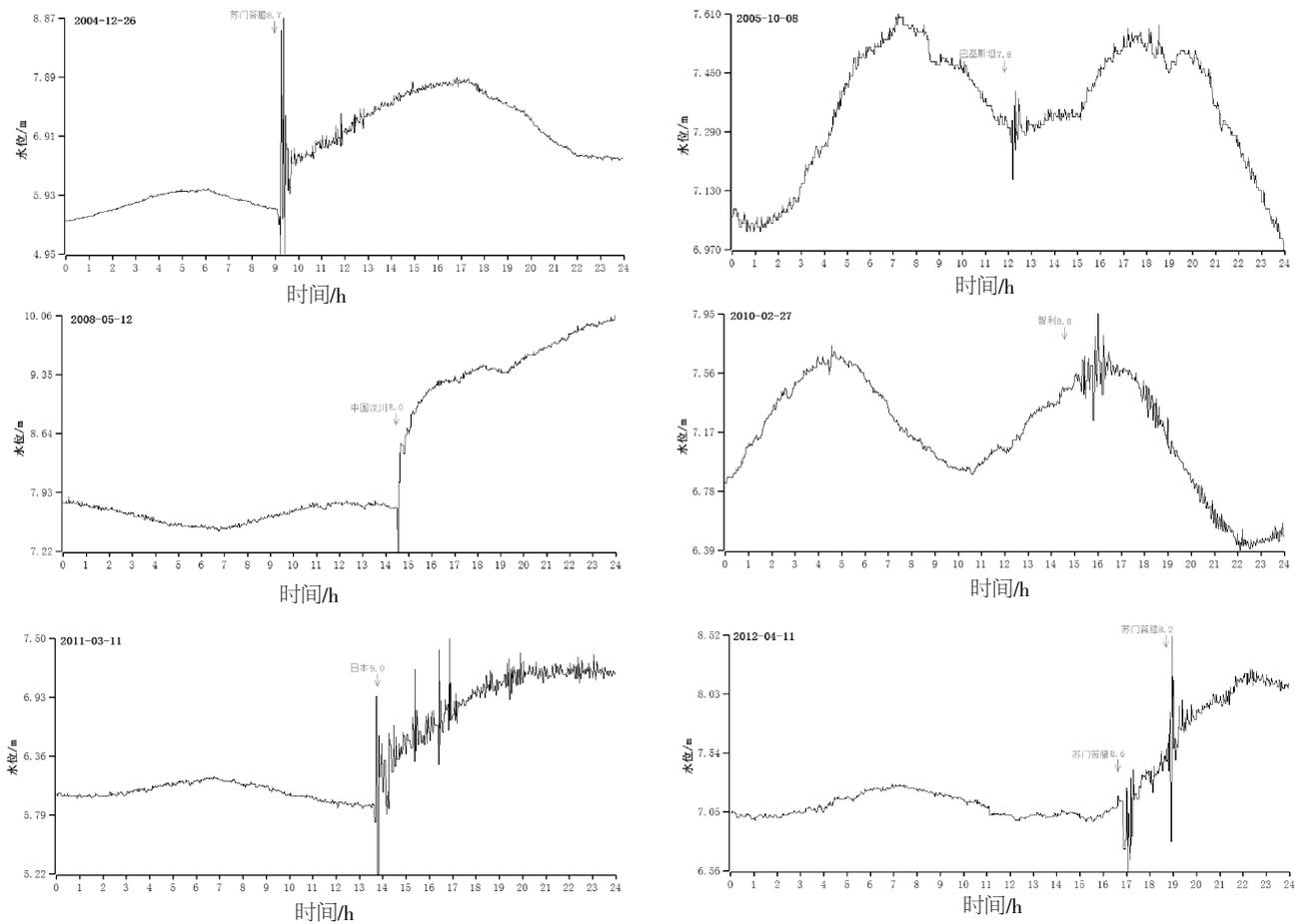


图 4 部分永春桃东井水位同震响应图

Fig.4 Coseismic response map of part of water level in Taodong well, Yongchun

3 水位变化幅度与震级、井震距之间的关系

依据 Roeloffs^[9]的研究结果，井水位的同震

响应幅度与地震震级、震中距之间可以如下公式拟合：

$$\lg \Delta H = w_1 M + w_2 \lg D + w_3 \tag{1}$$

式(1)中， w_1 ， w_2 ， w_3 为常数， ΔH 为水位变化幅

度, M 为地震震级, D 为震中距。

笔者运用多元线性回归方法, 分别对永春桃东井水位同震响应变化中水位同震变化幅度 (ΔH)、震级 (M) 及震中距 (D) 相互之间的关系进行了分析, 各参量之间存在以下关系:

$$\lg \Delta H = 2.1496M - 0.5802 \lg D - 15.2299 \quad (2)$$

式(2)中, 井水位变化幅度与震级、震中距的相关系数分别为 2.1496, -0.5802, 表明: 井水位同震变化幅度与震级呈正相关, 与井震距对数呈负相关, 即随震级的增大而增大, 随井震距的增大而减小, 且水位变化幅度受震级大小影响较大。但并不是所有的地震所引起水位的变化幅度随震级的增大而增大, 随井震距的增大而减小, 还可能受到震源深度、发震构造及区域的地质构造环境等因素所影响。

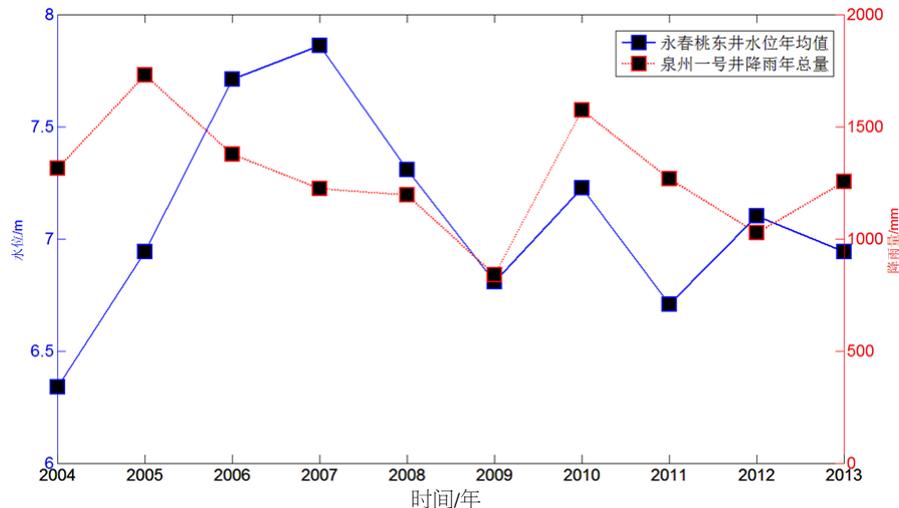


图5 永春桃东井水位与降雨量对比分析

Fig.5 Comparative analysis on water level and rainfall of Taodong well in Yongchun

4.2 井水位记震能力变化与地震活动性

井水位记震能力是指井孔水位对远大震的面波(周期 10~20 s)的响应能力, 可以用地震百分比、震荡幅度、与震荡持续时间等参数表示强弱。丁仁杰等^[10]研究认为: 在地震孕育过程中, 当含水层处于压应力状态时, 含水层孔、裂隙受阻, 导水能力减弱, 井孔的记震能力会减小甚至消失; 反之, 当含水层处于张应力状态时, 记震能力会增强, 还能记录到更远、震级更小的地震。因此, 这种与地震活动有关的井孔记震能力随时间的异常变化, 可以作为附近地区中强地震的地震前兆。关于井水位记震能力的变化的研究, 前人也做过不少的研究, 例如汪成民等^[11]对比了 1973—1980 年北京洼里井与山东鲁 10 井共同记录到的水震

4 井水位变化与记震能力的分析

4.1 井水位变化与降雨量分析

由于永春桃东井没有降雨量记录, 选取了离该井较近、统计比较准确的泉州一号井(距离约 50 km) 降雨资料进行分析研究(图 5)。经过对比统计分析, 整体来说, 永春桃东井水位年均值与降雨量具有一定的相关性, 但在 2006—2007 年该井水位存在高值且上升的时段, 降雨量却呈现明显的下降变化, 并且低于 2005 年的降雨量, 这表明, 2006—2007 年永春桃东井的水位高值不是受降雨量的影响, 可能与该井附近区域构造应力活动变化有关, 即构造应力的增强, 使井-含水层系统受到挤压, 从而导致水位呈现出高值异常变化。

波, 唐山 7.8 级地震前后存在一个明显的变化, 震前洼里井水位记震能力一般大于鲁 10 井, 而在唐山大地震后, 鲁 10 井的记震能力却明显大于洼里井; 鱼金子等^[12]系统分析了大同 6.1 级地震前山西静乐井水位记震能力增强的异常现象, 提出了利用井水位记震能力的异常变化进行中强地震危险性判定的方法; 并讨论了建立这种方法的科学依据; 胡先明^[13]分析了四川 3 口井的记震能力变化, 发现它们在一系列 5 级以上地震前有明显的变化, 认为深井水位的记震能力变化作为地震前兆进行地震预报是一种比较理想的方法。

笔者以 2007 年 9 月为界限, 分析了 2004 年 1 月至 2007 年 8 月(44 个月)和 2007 年 9 月至 2010 年 12 月(40 个月)及 2011 年 1 月至 2013 年 12 月

(36个月)三个时段永春桃东井水位的记震能力统计图(表 1),从表 1 可以看出,无论用 $M_s \geq 7.0$ 地震统计,还是用 $M_s \geq 7.5$ 地震统计,2007 年 9 月

至 2010 年 12 月期间该井水位的同震记震能力都明显大于前后两个时段。甚至能记录到较远距离的 7.0~7.7 级地震。

表 1 永春桃东井不同时期的记震能力分析

Table 1 Analysis on seismic recording ability in different periods of Taodong well in Yongchun

震级	项别	时间范围		
		2004-01~2007-08	2007-09~2010-12	2011-01~2013-12
≥ 7.0	震次	56	83	69
	记震次	9	24	8
	记震百分比	16.07%	28.92%	11.59%
≥ 7.5	震次	21	24	25
	记震次	8	13	8
	记震百分比	38.10%	54.17%	32.00%

对比分析了福建及邻近沿海地区的地震活动性强弱,在 2002—2006 年期间,在该区域仅厦门海域发生过一次 $M_L 4.5$ 级地震,在 2007—2010 年期间该区域中强地震频发,共发生地震 $M_L \geq 4.0$ 级地震 10 次,其中 $M_L \geq 4.5$ 级地震 5 次,表明着该区域构造应力活动变化比较剧烈,尤其是 2007 年 8 月 29 日发生的永春 4.6 级地震,可能是引起 2007 年 9 月以后的永春桃东井水位记震能力变化增加的直接原因。根据震源机制解资料,永春 4.6

级地震的主压应力(P)轴方位为 123° ,主张应力(T)轴方位为 220° ,按此资料勾绘出区域应力分布图,永春桃东井正好处于压应力区部位内(图 6)。

据震源机制的物理意义,这个应力分布应代表的是震时的应力状态,按照弹性回跳理论来解释,震后随着压应力区的减弱,张应力区的增大,在永春桃东井区张应力增强的条件下,含水层岩体中的裂隙被拉张,井-含水层的扩张使得导水能力增强,从而引起井水位记震能力增强。



图 6 2007 年 8 月 29 日永春 4.6 级地震震源机制与永春桃东井分布图

Fig.6 Focal mechanism of Yongchun $M 4.6$ earthquake on August 29th, 2007 and distribution map of Taodong well in Yongchun

5 结语

通过对福建永春桃东井水位同震响应特征及记震能力的分析研究,得到以下主要结论与认识:

(1) 永春桃东井水位同震响应特征主要为震荡、震荡-上升和阶升型,以震荡型为主。井水位同震幅度与震级呈正相关,与震中距呈负相关,且受震级影响较大。

(2) 通过对永春桃东井位与该区的降雨量资料对比分析,该井在2006—2007年期间呈现出的高值水位异常,不是受降雨量大小的干扰,可能与该区域在该时段的区域应力活动增强有关。

(3) 在2007年8月29日永春4.6级地震后,永春桃东井记震能力显著增强,可能与井周围所在区域应力状态变化有关。通过对该地震的震源机制解分析,在震时井处于压应力范围区域,震后随着压应力范围区的减弱,张应力范围区的增大,该井含水层系统通道打开,导水能力增强,使得该井对地震波的响应能力增强,导致该井水位记震能力增强。

参考文献:

- [1] Bodvarsson G. Confined fluids as strain meter [J]. *Geophys Res*, 1970, 75(4): 2 711-2 718.
- [2] 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1): 119-125.
- [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] 汪成民,车用太,万迪.地下水微动态研究[M].北京:地震出版社,1988.
- [5] 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地震的同震响应特征分析[J]. *地震地质*, 2008, 30(4): 895-905.
- [6] 鱼金子,车用太,刘成龙,等.金沙江水网对日本9.0级地震的同震响应及特征与机理[J]. *地震*, 2012, 32(1): 59-69.
- [7] 缪阿丽,张艺,叶碧文,等.江苏网水温水位对几次大地震的同震响应特征及机理分析 [J]. *地震*, 2014, 34(4): 78-87.
- [8] 宋洋,谷洪彪,李海君,等.断裂两盘井水位同震响应特征对比分析-以北京八宝山断裂带中段大灰厂两观测井为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(6): 1 815-1 822.
- [10] 丁仁杰,黄才中,毛正毅.深井水位记震特征研究[J]. *地震学刊*, 1988, (4): 35-46.
- [11] 汪成民,卓明葆,郭一新,等.地震引起深井水位的震荡现象[J]. *地震*, 1988, (2): 34-38.
- [12] 鱼金子,车用太,王爱英,等.大同-阳高地震前静乐井水位记震能力的异常及其意义 [J]. *山西地震*, 1995, 1(1): 50-53.
- [13] 胡先明.深井水位记震能力与地震预报[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(9): 74-78.