

洪旭瑜, 陈祥开, 秦双龙, 等. $M_s \geq 6.0$ 地震引起的永安井水位同震响应特征研究[J]. 华南地震, 2023, 43(3): 39–45. [HONG Xuyu, CHEN Xiangkai, QIN Shuanglong, et al. Study on Coseismic Response Characteristics of Water Level in Yong'an Well Caused by $M_s \geq 6.0$ Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(3): 39–45]

$M_s \geq 6.0$ 地震引起的永安井水位同震响应特征研究

洪旭瑜¹, 陈祥开², 秦双龙¹, 林加宝¹

(1. 福建省地震局, 福州 350003; 2. 海南省地震局, 海口 570203)

摘要: 利用永安井秒采样水位仪记录到的地震波形数据, 与 CMG-3ESPC-60 地震计比较, 对井水位同震响应特征、响应能力、地震波加载响应等方面进行分析。结果表明: 秒采样水位仪也可记录到地震体波(P波、S波)和面波R, 面波频散现象清晰, 较好反映地震波作用过程及震源破裂过程中能量的释放; 井水位对近场地震和远场地震响应程度存在差异, 其同震响应能力与震级、震中距无必然联系; 同 CMG-3ESPC-60 地震计相比, 二者都存在明显周期信号, 面波频段波幅变化最大, 为主要中心频率, 与 CMG-3ESPC-60 地震计速度值积分振幅谱形态一致, 也具有较宽频带, 但低于 CMG-3ESPC-60 地震计。

关键词: 秒采样水位仪; 井水位; 地震波; 同震响应

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0039-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.05

Study on Coseismic Response Characteristics of Water Level in Yong'an Well Caused by $M_s \geq 6.0$ Earthquake

HONG Xuyu¹, CHEN Xiangkai², QIN Shuanglong¹, LIN Jiabao¹

(1. Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China; 2. Hainan Earthquake Agency, Haikou 570203, China)

Abstract: Using the seismic waveform data recorded by the second sampling water level instrument of Yong'an well and compared with the CMG-3ESPC-60 seismometer, the coseismic response characteristics, response capability and seismic wave loading response of the well water level are analyzed. The results show that: The second sampling water level meter can also record the seismic body wave (P wave, S wave) and surface wave R, and the dispersion phenomenon of surface wave is clear, which can better reflect the action process of seismic wave and the release of energy in the process of source rupture; well water level has different responses to near-field earthquakes and far-field earthquakes, and its coseismic response capability was not necessarily related to magnitude and epicentral distance; compared with the CMG-3ESPC-60 seismometer, both of them have obvious periodic signals, and the amplitude of the surface wave band changes the most, which is the main center frequency. The water level waveform is consistent with the velocity value integral amplitude spectrum of the CMG-3ESPC-60 seismometer, and also has a wider frequency band, but lower than that of the CMG-3ESPC-60 seismometer.

Keywords: Second sampling water level instrument; Well water level; Seismic wave; Coseismic response

收稿日期: 2023-02-06

基金项目: 中国地震科技星火计划项目(XH231305YA)和福建省地震局青年科技基金(Y202207)联合资助

作者简介: 洪旭瑜(1987-), 男, 硕士, 主要从事地球物理台网及数据跟踪分析研究工作。

E-mail: hongxuyu@126.com

0 引言

地壳介质含有的松散沉积物、坚硬的基岩具有大小不同、形状不一的空隙，地下流体观测中井水位是地壳中最活跃的介质，地震波引起井水位震荡是井水位对大震同震响应最直接的表现，反映了地壳动力作用下地下介质应变和空隙压的变化特征^[1]，1毫米静水位变化对地壳体应变响应灵敏度可达 10^{-10} 量级^[2]。近年来，国内外学者对井水位的同震响应特征及机理开展了一系列相关研究，多数研究结果显示井水位对远场大震同震变化形态以震荡为主，阶变为辅^[3-5]，且变化形态与震中距、观测井相对地震方位的相关性较低，而同震响应幅度除了受震中距和震级的影响外，还与观测井所处的构造带方位、井—含水层的水文介质参数等密切相关^[6-7]。井水位同震响应能力受井孔条件、含水层渗透性参数以及地震波类型的影响^[8]，与观测井所处的区域构造有一定的相关性，当区域构造应力增强、张性减小则水位阶升，反之阶降^[9]。在同震机理研究上，Brodsky等论证地震波引起井水位震荡的同时也改变了井与含水层系统的导水系数和储水系数^[10]，向阳等对新疆阿克陶6.7级地震引起新10井水震波进行研究表明地震波作用过程中含水层的水文参数也存在波动，同震响应机理较为复杂^[11]。这些研究表明井水位同震效应在一定程度揭示地壳介质对应力应变的响应，反映水文地质参数的动态变化过程，因此研究井水位的同震响应问题有助于对水文地质条

件和区域应力场相关性的认识及其在地震预测实践中水位前兆异常现象识别的应用研究。

当前，随着福建省“十二五”、“十三五”项目的建设、验收，福建省数字化水位观测网更加完善，水位数据采集技术也进一步提升，采样率从当前分钟值记录发展到0.1 Hz、1 Hz记录，观测资料更加丰富，分辨率更高水位值记录到水震波信息蕴含的信息更加丰富^[12-13]。本文利用永安井砂采样水位仪记录到的地震波形数据，并同CMG-3ESPC-60地震计对比，从井水位同震响应特征、响应能力、地震波加载响应等方面分析永安井水位同震响应情况，以期进一步理解井水位在地震孕育和发生过程中的动态变化情况。

1 资料选取

1.1 观测背景及井孔条件

福建永安井位于永安市城区(117°36′ E，25°58′ N)，处于东南沿海地震带孕震构造政和—海丰构造带西侧永安—晋江断裂带上，NNE向压性断裂与NW向张扭性断裂交汇处(图1a)，成井时间1978年12月，井孔深度1000.44 m，水位埋深6.9 m，其井孔结构如图1b。观测井岩性大致分为三层，第一层从0至5.2 m，为不含水的第四系砂质粘土覆盖层，第二层从5.2 m至400 m，为第三系—白垩系上统赤石群，地层岩性为紫红色砂岩，砾岩和砂砾岩混合为主，裂隙较发育，

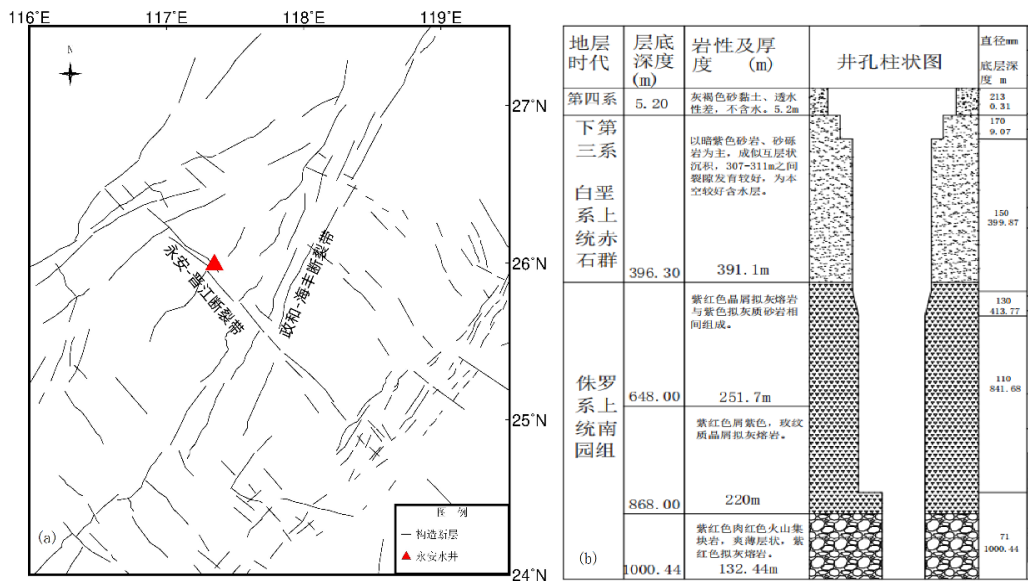


图1 永安井构造背景及井孔条件

Fig.1 Structural background and borehole conditions of Yong'an Well

含水段在 89.2 ~ 153.76 m、307 ~ 311 m, 第三层从 400 m 至 1000.44 m, 为侏罗系上统南园组(J3n), 地层岩性以紫灰色、肉红色晶屑状凝灰熔岩为主, 基本不含水。

1.2 观测数据

永安井水位在 2013 年 7 月对观测仪器系统进行数字化改造, 采用中国地震局地壳应力研究所研制的 SWY-2 型数字水位仪, 采样率由原来 1 min 提升至 1 s, 波形蕴含信息更为丰富。该仪器自观测以来数据资料稳定、可靠、完整性好。井水位观测的原始秒值数据中包括潮汐、非潮汐信号(含地震波信息)以及其他干扰信息^[1](如气压干扰), 为有效提取地震波信息, 对井水位采取以下预处理: ①滤除主要的固体潮汐成分, 提取水位非潮汐量; ②对水位值时间序列进行零漂处理。

选取距该井 1 km 左右 CMG-3ESPC-60 地震计做同震响应特征对比, 对该型号地震计观测数据做以下预处理: ①对 CMG-3ESPC-60 地震计观测数据进行基线校正, 消除直流分量; ②根据该仪器响应文件提供的数采灵敏度, 将原始速度时间序列电压值单位转换为 mm/s, 得到速度值地震波信号。

2 同震响应分析

地震波对井水位的加载引起水位波动称为水

震波, 本文从初至波、波幅变化、同震响应持续时间以及响应能力等方面来分析永安井水位的同震响应特征。

2.1 同震响应特征

据中国地震台网测定, 2021 年 5 月 22 日 02:04 在青海果洛州玛多县发生 7.4 级地震, 震源深度 17 km。地震发生前, 永安台井水位(距震中约 2058 km)观测数据曲线光滑, 固体潮汐清晰(图 2a 为秒值曲线, 图 2b 为分钟值曲线)。图 2c 为去除固体潮汐后的秒值波形曲线, 从图 2a 和 2c 可以看出 02 时 09 分 33 秒观测数据曲线出现小幅向下跳动, 即 P 波初至到达, 02 时 14 分 53 秒地震面波到达, 观测曲线波动幅度较大, 出现最低突跳点, 最低幅值为 6.66 m, 02 时 15 分 11 秒突升到最高点, 最高幅值为 6.92 m, 波幅最大变化达 0.26 m, 随后从高频到低频逐渐震荡衰减, 05 时 19 分 29 秒左右震荡结束, 恢复到原始光滑曲线。永安井水位能够较明显记录到青海玛多县 7.4 地震的地震波初至时刻、水层介质弹性最大变形、面波信息以及持续响应时间等同震响应特征, 这说明永安井水位井孔条件、含水层介质能够较好地反映地震波作用过程, 但这些映震特征从分钟值曲线上看(图 2b)较不明显, 在 03 时 06 分左右观测曲线就恢复震前趋势线, 较长周期面波衰减信息记录不全, 反映了更高频率秒采样井水位值相比分钟值采样记录到的同震波形信息更加完整。

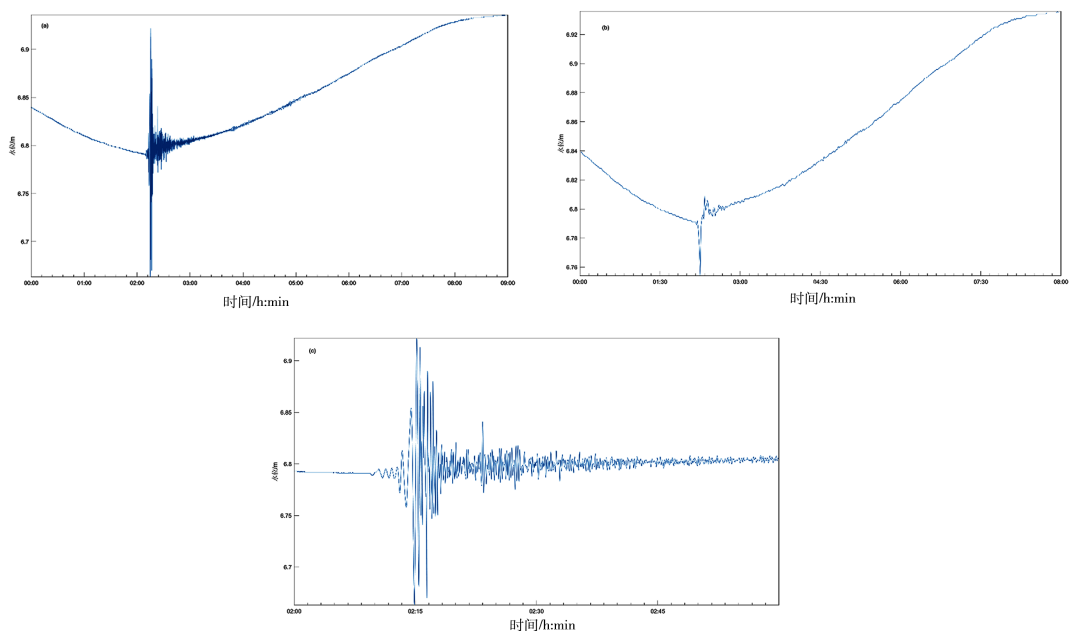


图2 永安井水位记录到青海玛多县 7.4 级地震的同震响应曲线

Fig.2 The coseismic response curve of Maduo $M7.4$ earthquake in Qinghai Province recorded by Yong'an well water level

2.2 同震响应能力

统计2021年以来永安井水位同震响应信息，主要选取全球 $M\geq 6.0$ 级部分地震相关信息，通过井震距(震中距)、水震波振幅(波幅)、同震响应持续时间以及响应形态来分析永安井水位的同震响应特征，具体的同震响应及地震参数见表1，图3为永安井水位记录到这6次地震的同震响应曲线。井水位的同震响应能力可表征为响应幅度和持续

时间，幅度越大，持续时间越长，说明映震能力越强，该特征对分析地震震前异常特点及研究短临地震预测具有一定意义^[5,14]。从表1分析可知，井水位的同震响应能力与震级、震中距无必然的联系，震级越大或者震中距越近，响应能力不一定越强，但在一定条件下，如同一震中距地震的震级越大，同震响应能力越强，映震效能越好；井水位对近震和远震的响应程度存在差异，对台湾花莲6.1级近震同震响应持续时间为696 s，波幅

表1 永安井水位记录到不同震级和震中距地震的同震响应参数
Table 1 Coseismic response parameters of earthquakes with different magnitudes and epicentral distances recorded by Yong'an well water level

地点	发震时刻/年-月-日 h:min:s	震级/ M	震中位置		震源深 度/km	震中距/ km	波幅/ m	持续 时间/s	响应形态
			经度/(°)	纬度/(°)					
台湾花莲县	2021-04-18 22:14:38	6.1	121.43	23.29	5	468	0.021	696	高频震荡
青海玛多县	2021-5-22 02:04:11	7.4	98.34	34.59	17	2 055	0.273	3 311	高频震荡
美国阿拉斯加州 以南海域	2021-7-29 14:15:46	8.1	-158.05	55.46	10	7 336	0.168	12 396	高频震荡
美国阿拉斯加州 以南海域	2021-10-11 17:10:23	6.9	-156.74	56.51	40	7 338	0.028	3 076	高频震荡
弗洛勒斯海	2021-12-14 11:20:24	7.3	122.22	-7.62	80	3 776	0.198	2 821	高频震荡
青海门源县	2022-01-08 01:45:27	6.9	101.26	37.77	10	2 011	0.060	3 556	高频震荡

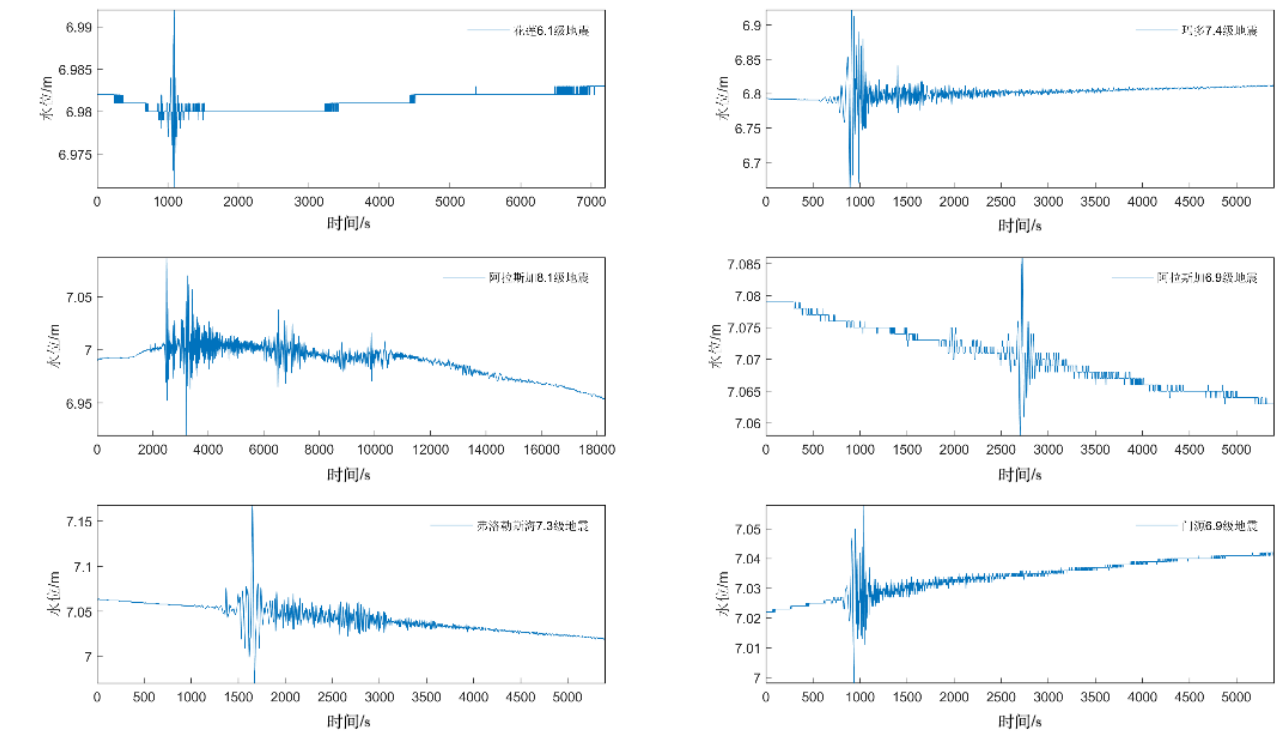


图3 永安井水位记录到不同震级、震中距的同震波形响应信号
Fig.3 Coseismic waveform response signals with different magnitudes and epicentral distances recorded by the Yong'an well water level

0.021 m, 远小于对其他6级以上远震的响应结果, 这是由于井水位的同震信号是地震波作用于井-含水层系统引起水位波动的结果, 而近场地震激发的长周期瑞利波(R波)信号由于传播时间短而不能被井水位全部记录到, 记录到的大部分地震波信息是P波和S波, 远场大震除P波和S波被记录到, 不同传播方向R波由于传播时间足够长, 衰减信息大部分会被高频采样井水位所记录到, 同井水位的共振强度由于地下介质密度不均匀结果可能不一致。因此, 井水位的同震响应能力在一定程度上反映了地震波引起的地壳介质密度变化与井-含水层地质参数、地震波周期等密切相关, 这与前人的研究结果是一致的^[8]。

3 地震波加载响应

为了分析永安井水位对地震波的频带响应特征, 以2021年5月22日青海玛多县7.4级地震为例(地震参数见表1), 选取永安燕西台CMG-3ESPC-60地震计记录到的垂直向速度值波形进行对比分析。永安井水位和永安燕西台相距约2 km左右, 距该地震的震中距约2055 km, 震中距远大于两个台站之间距离, 因此可将永安燕西台和永安井水位看作同一地点的台站。

3.1 时间域特征

图4a和图4b为青海玛多县7.4级地震引起永安井水位和燕西台CMG-3ESPC-60地震计垂直向速度波形数据曲线, 从图中可以看出二者几乎同时记录到体波(P波、S波)和面波R, 面波频散现象清晰, 说明秒采样水位仪也具有较高的映震响应灵敏度。

为了更加清晰对比二者波形响应特征及信号相似性, 利用S变换提取二者的时频特征^[15], S变换能根据频率的变化自适应的调整分析时宽和提供直观的时间频率特征, 从而能观察到信号一些细微部分, 图5c和图5d为二者S变换结果, 采用归一化振幅, 其中主频为高幅值时频成分对应分布频段, 主频段的中心为中心频率。从图4c和4d可看出, 井水位和地震波均存在明显的周期信号(中心频率), 即8~67 s(0.015~0.125 Hz)和5~25 s(0.04~0.2 Hz), 且在10~50 s(0.02~0.1 Hz)和7~20 s(0.05~0.15 Hz)水位和地震波的波幅变化最大, 这也是面波的主要频段, 持续时间均约为15 min, 说明井水位在10~50 s周期内对地震波映震效能最强, 反映对地壳变形放大作用最大, 且二者波形特征和时间频率特征相关性高, 信号高度重合, 说明井水位也能较好反映地震震源破裂过程中能量的释放。

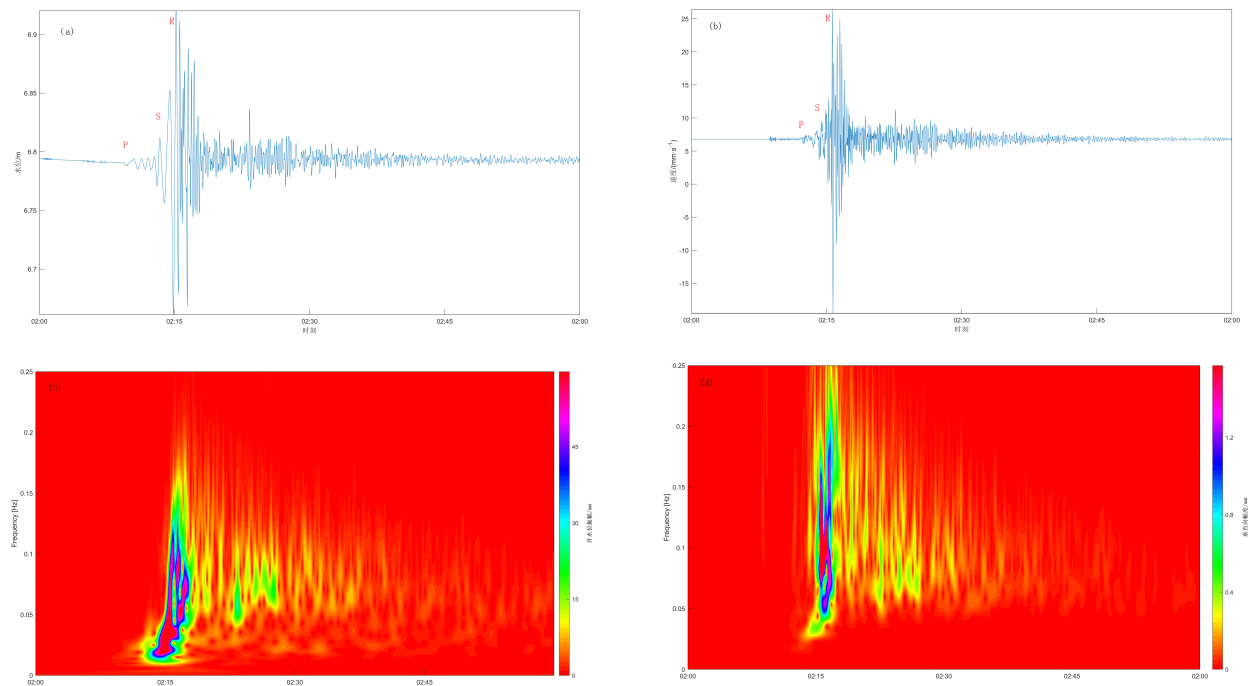


图4 永安井水位与CMG-3ESPC-60地震计波形及S变换时频特征对比
Fig.4 Comparison of waveform and S-transform time-frequency characteristics between Yong'an well water level and CMG-3ESPC-60 seismometer

3.2 频率域特征

图4中永安井水位和CMG-3ESPC-60地震计波形S变换结果显示二者波形叠加不同周期成分,在一定程度上反映二者之间的相关性特征,但不能完整表示叠加信号不同特征情况,短时快速傅里叶变换(FFT变换)可将信号在时域上无法体现的周期特征从频域上体现出来,图5为利用FFT变换

对二者同震波形进行时频转换,得到井水位和CMG-3ESPC-60地震计速度值积分振幅谱。振幅谱显示两者频谱形态一致,频率在0.02~0.13 Hz(8~50 s周期内),频谱幅值变化最大,但频率高于0.15 Hz,两者频谱幅值变化较小,且水位整体低于CMG-3ESPC-60地震计垂直向速度积分值。分析认为,秒采样水位仪对地震波也具有较宽的频带,但低于CMG-3ESPC-60地震计。

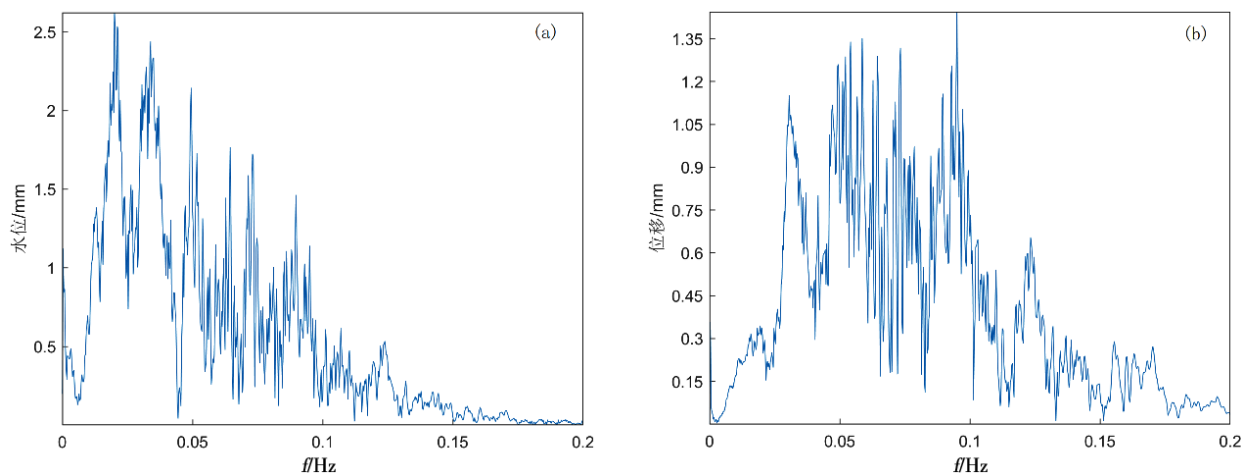


图5 永安井水位(a)与CMG-3ESPC-60地震计速度值积分(b)振幅谱对比

Fig.5 Comparison of the water level of Yong'an well(a) and amplitude spectrum of CMG-3ESPC-60 seismometer velocity value integration(b)

4 结论与讨论

通过对福建永安井水位同震响应和地震波加载特征分析,得到以下认识:

(1)永安井水位井孔条件、含水层介质能够较好地反映地震波作用过程及地震震源破裂过程中能量的释放,秒采样水位仪较分钟值采样记录到同震波形信息更加完整。

(2)井水位对近场地震和远场地震响应程度存在差异,其同震响应能力与震级、震中距无必然联系,但对相同地方的地震同震响应能力与震级呈正相关关系。

(3)同CMG-3ESPC-60地震计相比,秒采样水位仪也具有较高地震灵敏度和较宽频带,时间域,水震波和地震波都存在明显周期信号,面波频段波幅变化最大,为主要中心频率;频率域,井水位和CMG-3ESPC-60地震计速度值积分振幅谱频谱形态一致。

(4)当前水位仪采样率基本是分钟采样,关于

井水位同震响应或是震前异常研究多数基于分钟数据开展,得到的结果可能不够准确。由于地震震源破裂所激发地震波周期远大于1 min,因此提高水位采用率有助于更加科学对水位同震响应特征进行研究。

(5)本文还存在许多不足,目前仅讨论水位同震响应特征,未涉及同震响应机理,因此如何利用秒采样水位数据分析其同震响应机理有待后续进一步研究。

参考文献

- [1] 孙小龙,向阳,李源.深井水位对地震波、固体潮和气压的水力响应——以范县井为例[J].地震学报,2020,42(06):719-731.
- [2] 晏锐.影响井水位变化的几种因素研究[D].北京:中国地震局地震预测研究所,2008.
- [3] 刘凯,张辉,张军,等.山东省井水位对几次大地震同震响应的比较分析[J].地震学报,2019,41(01):69-79.
- [4] 张彬,刘耀伟,高小其,等.2015年尼泊尔 M_s 8.1地震引起的井水位与井水温同震效应及其相关性分析[J].地震学报,2015,37(04):533-540+711.

- [5] 董博,纪春玲,周安聘,等.河北无极井同震响应特征分析[J].地震工程学报,2021,43(05):1077-1086.
- [6] Shi Z, Wang G, Manga M, et al. Continental-scale water-level response to a large earthquake[J]. *Geofluids*, 2015, 15(1/2): 310-320.
- [7] Barbour A J. Pore pressure sensitivities to dynamic strains: Observations in active tectonic regions[J]. *J Geophys Res*, 2015, 120(8):5863-5883.
- [8] Jr H H C, Bredehoeft J D, Papadopoulos I S, et al. The response of well-aquifer systems to seismic waves[J]. *J Geophys Res*, 1965, 70(16):3915-3926.
- [9] 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(S1):119-125.
- [10] Brodsky E E, Roeloffs E A, Woodcock D, et al. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(B8):2390.
- [11] 向阳,孙小龙,杨朋涛.新疆阿克陶 $M_s 6.7$ 地震引起的新10井水位同震响应研究[J].地震学报,2017,39(06):899-909+975.
- [12] 舒优良,张世民,黄辅琼.汶川8.0级地震周至深井水震波的记录特征[J].震灾防御技术,2014,9(S1):572-580.
- [13] Sun X L, Wang G C, Yang X H. Coseismic response of water level in Changping well, China, to the $M9.0$ Tohoku earthquake[J]. *J Hydrol*, 2015(531):1028-1039.
- [14] 付虹,邬成栋,刘强,等.印尼巨大地震引起的云南水位异常记录及其意义[J].地震地质,2007,29(04):873-882.
- [15] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: The S transform[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 1996, 44(4):998-1001.