

许英霞,丁俊柯,马传璧,等. 基于集合经验模态分解的河北唐山井同震响应特征[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(2): 252-268.
XU Ying-xia, DING Jun-ke, MA Chuan-bi, et al. Co-seismic Response Characteristics of Water Level in Well Tangshan of Hebei, China Based on EEMD[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(2): 252-268.

DOI: 10.19814/j.jese.2023.11002

基于集合经验模态分解的河北唐山井同震响应特征

许英霞¹, 丁俊柯², 马传璧^{2,3}, 郭建芳³, 尹宝军⁴, 曹冲², 左文喆⁵

(1. 山西工程技术学院 地球科学与工程系, 山西 阳泉 045000; 2. 华北理工大学 应急管理与安全工程学院, 河北 唐山 063210; 3. 河北省地震局 唐山地震监测中心站, 河北 唐山 063003; 4. 唐山市应急管理局, 河北 唐山 063099; 5. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要:集合经验模态分解(EEMD)能够客观真实地从非线性、非平稳信号中提取有用信息,地震观测井的井水位表征的波形信号也是典型的非线性、非平稳信号,因此,集合经验模态分解在获取井水位同震响应信息方面具有重要的应用潜力。通过观测河北唐山井2016~2023年多次井水位同震响应,研究集合经验模态分解对井水位分析处理的优缺点,识别唐山井对远震、近震的井水位同震响应特征,应用地震能量密度经验公式推测唐山井记震能力。结果表明:唐山井水位观测数据秒值在经过集合经验模态分解后,对合适的高频分量进行重构可以压制噪声干扰,有利于观察井水位同震响应特征;对于远场大震引起的振荡型同震响应可以客观真实地进行识别和提取;对于近场地震引起的脉冲型和阶变型同震响应,需结合原始数据进行研究;井水位观测数据秒值有利于揭示区域应力场的变化,因观测数据秒值记震精度提高,唐山井能够记录到地震能量密度为 $1.77 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 的地震,观测井对不同方位地震的敏感度可用于研究其所在断裂带的裂隙走向。对于超过一定距离的远场地震,井-含水层系统能够记录到的井水位同震响应频率可在一定的范围内估算观测井的固有振动频率,唐山井固有振动频率和地震瑞丽面波频率接近。

关键词:同震响应;唐山井;集合经验模态分解;观测数据秒值;固有频率;地震方位;裂隙走向;地震能量密度

中图分类号:P315

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2024)02-0252-17

Co-seismic Response Characteristics of Water Level in Well Tangshan of Hebei, China Based on EEMD

XU Ying-xia¹, DING Jun-ke², MA Chuan-bi^{2,3}, GUO Jian-fang³,
YIN Bao-jun⁴, CAO Chong², ZUO Wen-zhe⁵

(1. Department of Earth Science and Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, Shanxi, China; 2. School of Emergency Management and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 3. Tangshan Seismic Monitoring Center Station, Hebei Earthquake Agency, Tangshan 063003, Hebei, China; 4. Tangshan Emergency Management, Tangshan 063099, Hebei, China; 5. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: Ensemble empirical mode decomposition (EEMD) can objectively and truly extract

收稿日期:2023-11-03;修回日期:2024-02-22

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:山西工程技术学院科研项目(2023QD-01);国家自然科学基金项目(42002098)

作者简介:许英霞(1973-),女,河北石家庄人,副教授,理学博士,E-mail: xuyx516319@163.com。

useful information from nonlinear and non-stationary signals, and the waveform signal characterized by water level in seismic observation well is also a typical nonlinear and non-stationary signal, so that EEMD has important application potential in obtaining the co-seismic response information of well water level. Taking well Tangshan in Hebei as an example, the advantages and disadvantages of EEMD for well water level analysis and processing through its co-seismic response of multiple well water levels from 2016 to 2023 were analyzed, the co-seismic response characteristics of well Tangshan were identified to teleseismic and near-seismic well water levels, and the seismic recording ability of well Tangshan was inferred by using the empirical formula of seismic energy density. The results show that after EEMD processing, the reconstruction of appropriate high-frequency components can suppress noise interference, which is more conducive to observing the co-seismic response characteristics of well water level. The oscillating co-seismic response caused by far-field large earthquakes can be identified and extracted objectively and truly. For the study of step-varying co-seismic response caused by near-field earthquakes, it is necessary to combine the original data to identify through high-frequency components. The second value of well water level observation data is more conducive to revealing the change of regional stress field. Due to the improvement of the recording accuracy of second value of observation data, the earthquake with energy density of $1.77 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ could be record by water level of well Tangshan. The sensitivity of observation wells to earthquakes in different orientations can be used to study the orientation of the fracture in which they are located. For far-field earthquakes over a certain distance, the co-seismic response frequency of well water level recorded by the well-aquifer system can calculate the natural vibration frequency of observation well within a certain range, and the natural vibration frequency of well Tangshan is close to the seismic Rayleigh wave.

Key words: co-seismic response; well Tangshan; EEMD; second value of observation data; natural frequency; seismic orientation; fracture orientation; seismic energy density

0 引言

对于封闭性良好的承压井-含水层系统,可观测到气压荷载、固体潮和构造应力引起的井水位动态变化^[1]。将气压荷载、固体潮和构造应力等视为输入信号,作用于井-含水层系统,引起井水位变化,井水位可视为输出信号。不同影响源引起的井水位变化特征有所区别,且由于井-含水层系统所在地质环境的差异性,影响源作用于不同井-含水层系统,引起的井水位变化不同^[2]。井水位作为输出信号,一方面能够反映影响源的变化特征,另一方面可以反映井-含水层系统特性。井水位同震响应现象能够有效揭示区域应力状态变化^[3-4],利用水震波可以反演含水层水文地质参数^[5-6],通过井-含水层系统记震能力的变化可以得到一些地震前兆异常^[7-8]。目前,中国观测井测水位异常大多采样率为分值,因此同震响应一般通过采样率为分值的井水位观测数据来进行研究。秒值数据记录到的信息更多,有更高

的科研价值,但更易受到观测井所处环境、人类活动干扰和背景噪声的影响^[1],使得井水位同震响应观察较为困难。

井水位变化是多因素共同作用的结果,水位表征信号是典型的非平稳、非线性信号,秒值观测数据中干扰因素较多^[9],可能影响同震响应特征的观察,因此如何客观、真实地提取同震响应信息十分重要。集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)能够对非平稳、非线性信号进行自适应的分解,可用于井水位同震响应特征的识别及提取。谭潜等通过经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)提取了地震信号长周期和短周期分量,并与小波分析和平滑滤波方法进行比较,验证了该方法的有效性和合理性^[10]。薛思敏等通过经验模态分解得到多个固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)对天然地震和人工爆炸信号的区分,得到了较好的结果,信号通过经验模态分解后根据需要对固有模态函数进行重构,可用

作自适应滤波器^[11]。孙和平等通过集合经验模态分解,从理论重力极潮中提取 Chandler 项和周年项,进而估算极潮潮汐因子;区别于傅里叶变换和小波变换以数学函数为基,集合经验模态分解是基于自身信号获得的基,能更客观、更真实地反映非线性、非平稳的物理过程^[12]。张亮等通过多元集合经验模态分解(Multivariate Ensemble Empirical Mode Decomposition, MEEMD)从海潮中提取了日潮、半日潮和余水位幅值信息,可用于水位数据缺失和其他原因不满足时进行调和和分析或准调和与分析,与传统的调和和分析方法相比,有一定优势^[13]。余丹等通过集合经验模态分解对河北沧县隆起张道口-1井水位观测数据进行分解,得到高频分量在重构后更容易观察到地震引起的井水位变化^[14]。

本文依据河北唐山井数字化水位观测资料,统计 2016~2023 年多次近震、远震引起的井水位同震响应观测数据秒值,运用集合经验模态分解提取井水位同震响应特征,与原井水位观测数据进行对比,并分析集合经验模态分解应用于井水位数据处理的优缺点,同时结合地震能量密度经验公式,讨论唐山井的记震能力,以期能为地震预报提供基础资料和技术手段。

1 唐山井概况

唐山井位于河北省唐山市,地理坐标为(39.62°N, 118.18°E),处于华北东北部Ⅱ级活动块体的边界区域、华北平原地震带和张渤地震带交汇区域、唐山矿Ⅰ-Ⅲ断裂附近[图 1(a)],为区域应力-应变集中区域,对地震形变的反映十分灵敏^[15],因此,唐山井的井水位易受地壳应力变化和地震的影响。唐山地区位于燕山余脉与冀东平原的接壤处,地势由东北向西南倾斜,区内大部分为平原,仅东北部为丘陵山地,山地南边为呈弧形排列的低山,弧形山脉以北的山脉走向多为 NW 向,以南有基岩裸露的残山分布,发育海拔高 40~80 m 剥蚀面或台地,向南为中晚更新世山前冲洪积倾斜平原和以全新世冲洪积为主体的平原。唐山市处于构造升降变化地带,市区内仍有残丘出露,第四系由北向南、从西到东厚度不断加大。

唐山地区断裂以 NE—NEE 向为主,次为 NW 向和 NEE—近 EW 向。主体断裂为 NNE—NE 向唐山断裂带,由一系列相互平行的 NNE—NE 向断裂组成,展布于碑子院背斜和开平向斜间的陡倾,是一系列大致平行的断裂与褶皱相伴生的复杂断裂

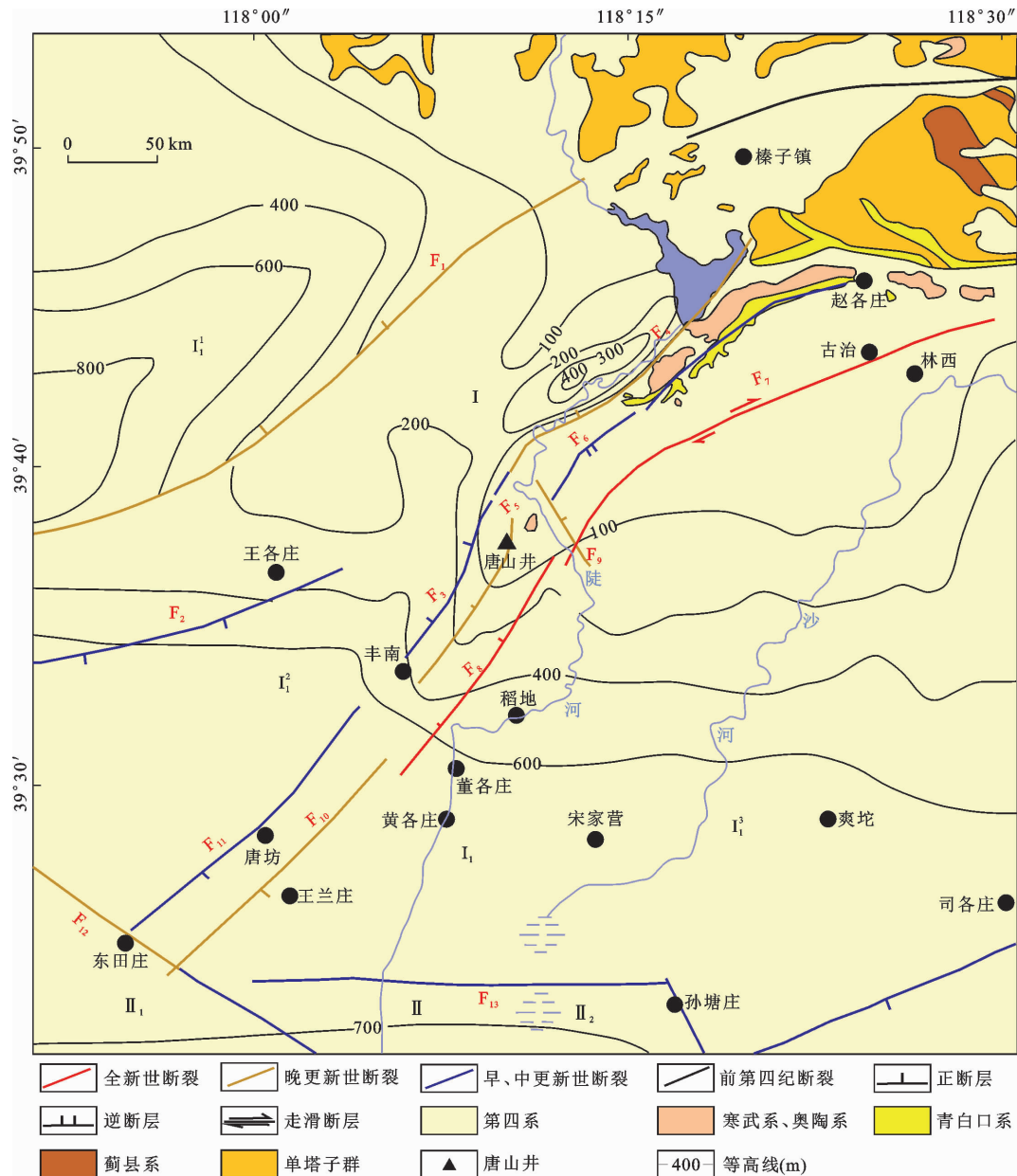
带,断裂带内全新世强烈逆冲右旋走滑断层——唐山断层是发震断层^[16]。

唐山井井口标高 23 m,井深 286 m,观测井水位为静水位,地层为第四系、二叠系、石炭系、奥陶系,台基岩性为砂岩、页岩及石灰岩,含水层为奥陶系灰岩承压水^[17]。该井无地表水体影响,受降雨间接影响小,固体潮和气压效应明显。因此,观测井的结构和地质构造环境使其观测到的地下水动态可记录到十分广泛的地壳运动和地质构造活动信息^[18]。唐山井水位观测主要使用 TDL-15 型数字水位仪,传感器分辨率为 1 mm,采样率为 1 s。

2 资料选取与分析方法

2.1 资料选取

本文选取 2016~2023 年 24 个远场大震和 4 个近场地震,井水位同震响应信息如表 1 所示。其中,震例 1~11 为观测数据秒值,震例 12~28 为观测数据分值,井水位观测数据来源于河北省地震局唐山地震监测中心站。比较井水位观测数据秒值和分值记震能力差异,结果如图 2 所示。由图 2(a)、(b)可以看出,秘鲁 M 7.3 地震后井水位观测数据秒值记录到 6.52 mm 小幅值振荡,井水位观测数据分值无明显变化;日本 M 6.4 地震后井水位观测数据秒值记录到同震响应最大双振幅 156.32 mm,井水位变化较为明显,而井水位观测数据分值记录到振幅 5.3 mm,井水位变化不明显。由图 2(c)、(d)可以看出,在唐山市滦州市 M 4.3 地震前一天井水位有持续 1 h 的异常上升。为研究此次井水位异常变化的原因,比较 2021 年 4 月 15 日~17 日井水位和气压观测数据分值,观察到气压在井水位上升同一时期出现一次下降,持续时间约 1 h,这次井水位异常变化可能是由剧烈变化的气压引起。井水位观测数据秒值记录到在地震发震前后出现较明显的脉冲,查询中国地震台网地震目录,期间仅发生新疆 M 3.1 地震,且距离唐山井较远,不至于引起井水位大幅度变化。受气压影响,井水位观测数据秒值中杂讯较多,震前井水位脉冲较难判别是否为临震前兆异常。唐山 M 4.3 地震发震时刻井水位观测数据秒值和分值均没有观测到明显变化,观测数据秒值中白噪声较多,可能影响有用信息观察。因此,井水位观测数据秒值可记录到的同震响应信息更丰富、更完整,但会受到背景噪声的影响。如何处理井水位观测数据秒值,辅助识别、提取地震引起的井水位同震响应特征十分重要。



I 为燕山断块隆起区; I₁ 为燕山山前断隆; I₁¹ 为鸦鸿桥断凹; I₂¹ 为新军屯—唐山断凹; I₃¹ 为唐山东断凹; II 为华北盆地断拗; II₁ 为沧县隆起; II₂ 为黄骅凹陷。F₁ 为榛子镇断裂; F₂ 为岳龙庄断裂; F₃ 为碑子院—丰南断裂; F₄ 为陡河断裂; F₅ 为唐山—丰南断裂; F₆ 为巍山—长山断裂; F₇ 为唐山—古冶断裂; F₈ 为唐山断裂; F₉ 为西缸窑断裂; F₁₀ 为王兰庄断裂东支; F₁₁ 为王兰庄断裂西支; F₁₂ 为蓟运河断裂; F₁₃ 为宁河—吕黎断裂

图 1 河北唐山井相关资料

Fig. 1 Relevant Information About Well Tangshan in Hebei

2.2 分析方法

经验模态分解是由 Huang 等提出的一种信号分析方法,其主要作用是将具有复杂成分的信号变成频率由高到低的信号分量^[19]。通过经验模态分解处理后,将时间序列信号分解为有限个固有模态函数,从而对信号进行分析,在处理非平稳、非线性信号时可以得到较好的效果。

其原理是:求取原始输入信号 $s(t)$ 上的所有极

大值点和极小值点,通过三次样条函数插值,拟合出上包络线 $x_1(t)$ 和下包络线 $x_2(t)$,且需要满足 $x_2(t) \leq s(t) \leq x_1(t)$,取其和的平均值,记作 $m_1(t)$ 。其表达式为

$$m_1(t) = \frac{1}{2}(x_1(t) + x_2(t)) \quad (1)$$

式中: $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 为原始输入信号 $s(t)$ 的局部极值由三次样条函数插值拟合的上包络序列和下包络

表1 唐山井同震响应特征统计

Table 1 Statistics of Co-seismic Response Characteristics of Well Tangshan

序号	发震地点	发震日期	时间	震中位置		井震距/ km	震源 深度/ km	震级	最大 双振幅/ mm	持续 时间/ min	水位 形态	地震能量 密度/ ($J \cdot m^{-3}$)
				纬度/ (°)	经度/ (°)							
1	中国唐山市开平区	2016-09-10	18:09:37	39.69	118.32	14	10	M 4.0	52.3	0.6	脉冲-振荡	
2	中国唐山市开平区	2016-09-10	18:19:15	39.69	118.32	14	6	M 2.5	0.5		振荡	
3	中国唐山市滦州市	2021-04-16	16:06:06	39.75	118.71	48	9	M 4.3	3.3		脉冲	
4	秘鲁	2021-11-28	18:52:11	-4.50	-76.70	15 839	100	M 7.3	6.5	135.0	振荡	4.46×10^{-7}
5	日本	2021-11-29	20:40:40	31.15	142.61	2 400	10	M 6.4	156.3	5.0	振荡	6.66×10^{-6}
6	秘鲁	2022-05-26	20:02:18	14.85	70.30	17 136	210	M 7.2	5.2	105.0	振荡	2.51×10^{-7}
7	法国洛亚蒂群岛	2022-05-26	23:37:58	22.55	172.15	8 875	10	M 6.5	12.6	97.0	振荡	1.77×10^{-7}
8	土耳其	2023-02-06	09:17:37	37.15	36.95	6 844	20	M 7.8	716.0	40.0	振荡	3.03×10^{-5}
9	土耳其	2023-02-06	09:28:32	37.35	36.85	6 840	20	M 6.7			振荡	7.61×10^{-7}
10	土耳其	2023-02-06	18:24:50	38.00	37.15	6 782	20	M 7.8	593.7	80.0	振荡	3.11×10^{-5}
11	土耳其	2023-02-06	20:02:17	28.00	36.20	6 854	20	M 5.9				5.20×10^{-8}
12	中国唐山市古冶区	2020-07-12	06:38:25	39.78	118.44	28	10	M 5.1	1.3		脉冲	
13	印度尼西亚马鲁古海	2019-01-07	01:27:19	2.25	126.69	4 227	40	M 6.6	2.3	20.0	振荡	2.34×10^{-6}
14	日本	2019-01-08	20:39:29	30.64	131.16	1 543	20	M 6.2	10.5		振荡	1.30×10^{-5}
15	中国台湾省	2019-04-18	13:01:05	24.02	121.65	1 760	24	M 6.7	4.2	7.0	振荡	4.66×10^{-5}
16	中国西藏自治区	2019-04-24	04:15:48	28.40	94.61	2 496	10	M 6.3	0.8		脉冲	4.23×10^{-6}
17	菲律宾	2019-05-06	10:48:39	18.65	121.10	2 341	20	M 5.2	2.1		振荡	1.29×10^{-7}
18	巴布亚新几内亚 新不列颠岛	2019-05-14	20:58:28	-4.15	152.52	5 987	30	M 7.6	13.3	58.0	振荡	2.32×10^{-5}
19	俄罗斯科曼多尔群岛	2019-06-25	17:05:41	56.18	164.34	3 815	10	M 6.1	1.3	7.0	振荡	5.99×10^{-7}
20	菲律宾	2019-10-29	09:04:44	6.80	125.15	3 702	10	M 6.6	1.4	19.0	振荡	3.50×10^{-6}
21	俄罗斯千岛群岛	2020-03-25	10:49:19	48.93	157.74	3 281	30	M 7.5	21.2	44.0	振荡	1.02×10^{-4}
22	美国阿拉斯加州	2020-07-22	14:12:41	54.74	-159.75	6 066	40	M 7.5	23.1	30.0	振荡	1.59×10^{-5}
23	中国青海省玛多县	2021-05-22	02:04:11	34.59	98.34	1 845	17	M 7.4	28.7	60.0	脉冲-振荡	4.21×10^{-4}
28	中国青海省门源 回族自治县	2022-01-08	01:45:27	37.77	101.26	1 470	10	M 6.9	12.9	9.0	振荡	1.57×10^{-4}

注:数据来源于河北省地震局唐山地震监测中心站。

序列; $m_1(t)$ 为每个时刻的 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 取平均得到的瞬时平均值。

取 $s(t)$ 与 $m_1(t)$ 的差值,记作 $h_1(t)$ 。其表达式为

$$h_1(t) = s(t) - m_1(t) \quad (2)$$

判断 $h_1(t)$ 是否满足构成固有模态函数的限定条件包括:①在整个信号波形中,极值点的个数和过零点的个数必须相等,或最多相差不超过1个;②在任意时刻,由局部极大值构成的上包络线和局部极小值构成的下包络线的平均值为0,即上、下包络线关于时间轴局部对称。这两个条件必须同时满足,若 $h_1(t)$ 不满足构成固有模态函数的条件,则将 $h_1(t)$ 视作新的信号序列重复上述算法,直到满足构成固有模态函数的条件,此时记 $c_1(t) = h_1(t)$,取 $s(t)$ 与 $c_1(t)$ 的差,记作 $r_{e1}(t)$ 。其表达式为

$$r_{e1}(t) = s(t) - c_1(t) \quad (3)$$

式中: $c_1(t)$ 为分解得到的第一个固有模态函数分量,为高频分量; $r_{e1}(t)$ 为去除 $s(t)$ 中第一个高频分量后剩余的序列。

将 $r_{e1}(t)$ 作为新的时间序列,重复上述分解过程,分离出下一个固有模态函数,分离出来的固有模态函数的频率由高到低依次从原始信号中剔除,直到获得1个单调、正交、唯一且收敛的函数 $r_{en}(t)$,结束计算过程。得到的 $r_{en}(t)$ 代表了信号的平均趋势。原始输入序列 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_{en}(t) \quad (4)$$

式中: $c_i(t)$ 为分解得到的第 i 个固有模态函数分量; $r_{en}(t)$ 为残余项,代表原始输入信号的变化趋势。

为改善经验模态分解存在模态混叠、末端效应

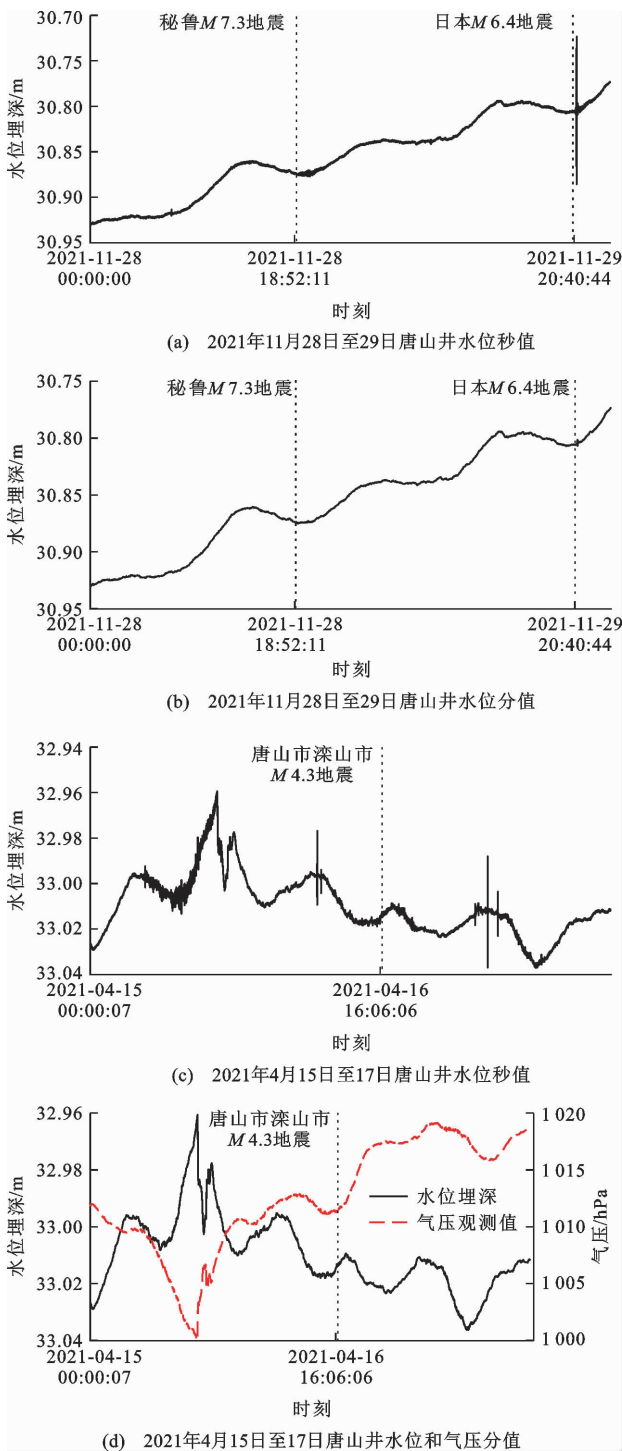


图 2 唐山井水位同震响应特征

Fig. 2 Co-seismic Response Characteristics of Water Level in Well Tangshan

等问题,集合经验模态分解在分解过程中多次加入均值为 0 的高斯白噪声^[20]。在原始输入信号中多次加入均值为 0 的随机高斯白噪声信号,得到含噪信号 $x(t)$ 。其表达式为

$$x(t) = s(t) + kn_i(t) \quad (5)$$

式中: k 为随机噪声的幅值系数; $n_i(t)$ 为第 i 次加入

的白噪声, $i=1,2,\dots,N$; N 为加入的白噪声次数。

含噪信号 $x(t)$ 通过经验模态分解,取平均值得到 1 组固有模态函数。其表达式为

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{i,j}(t) \quad (6)$$

式中: $c_j(t)$ 为集合经验模态分解得到的第 j 个固有模态函数分量; $c_{i,j}(t)$ 为第 i 次添加白噪声后经验模态分解后得到的第 j 个固有模态函数分量。

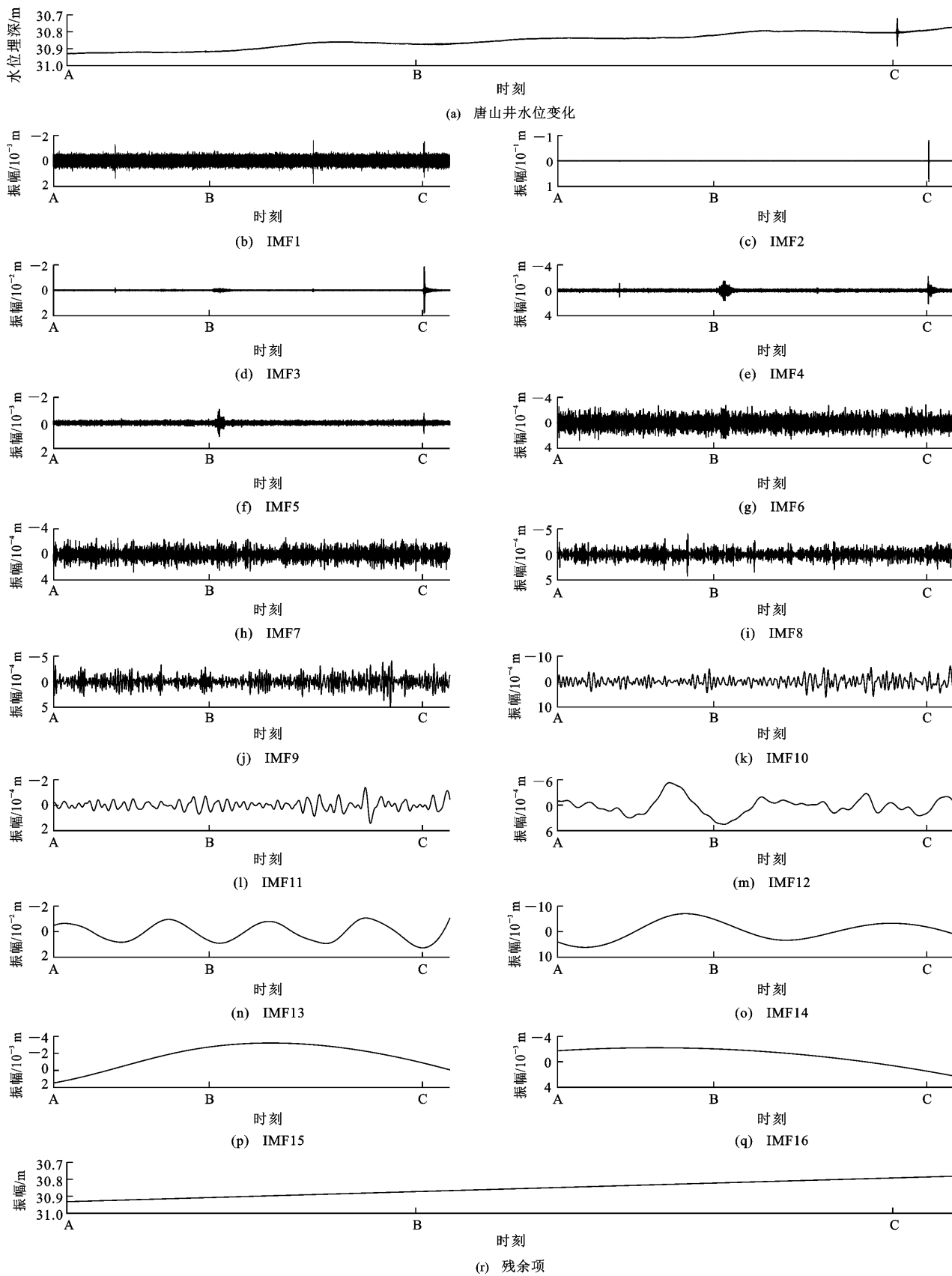
原始输入信号 $s(t)$ 经过集合经验模态分解后,可表示为

$$s(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (7)$$

式中: $r_n(t)$ 为原始输入信号的趋势分量。

井水位观测数据能够记录到的频段较宽,不同频段具有不同的应用价值^[14]。集合经验模态分解将井水位观测数据分解为频率由高到低的固有模态函数分量和 1 个表征井水位变化趋势的残余项。井水位高频分量可以用来研究同震响应;中频分量有周期性变化特征,可以用于研究固体潮和气压引起的井水位动态响应特征,长周期信号用来研究震前井水位变化趋势^[20]。地震波引起的井水位变化是一种高频加载,在井水位观测数据秒值中易受白噪声影响,在经过集合经验模态分解后,可以分离地震引起的井水位变化和其他因素引起的井水位变化。与小波分析以数学函数为基进行分解不同,集合经验模态分解是以井水位自身为基进行分解,意味着井水位通过集合经验模态分解后可以统一使用统一的流程,在井水位观测数据进行分解后可以对需要分析的频段进行研究,其作用相当于自适应滤波器。井-含水层系统不同程度地受到观测井所在水文地质环境、自然环境和人类活动等多因素的干扰。不同频段的干扰源对井水位观测数据产生的干扰所在频段存在差异,在不同频段尺度对特定信息源进行研究更有意义^[14]。

以 2021 年 11 月 28 日至 29 日井水位秒值观测数据为例,对井水位观测数据进行集合经验模态分解处理,结果如图 3 所示。唐山井水位在经过集合经验模态分解后得到频率由高到低的 16 个固有模态函数(IMF1~IMF16)和 1 个残余项。高频分量 IMF1 中主要为白噪声。IMF2 可以观察到日本 M 6.4 地震引起的井水位变化,观察不到秘鲁 M 7.3 地震后井水位变化,说明日本 M 6.4 地震引起的井水位同震响应频率比秘鲁 M 7.3 地震高。IMF3、IMF4、IMF5 中可以观察到两个高频事件,分别由



A为2021年11月28日00:00:00;B为2021年11月28日18:52:11;C为2021年11月29日20:40:44

图3 唐山井水位的集合经验模态分解结果

Fig. 3 EEMD Results of Water Level in Well Tangshan

秘鲁 $M 7.3$ 地震和日本 $M 6.4$ 地震引起。其中,秘鲁 $M 7.3$ 地震引起的井水位同震响应在水位观测数据中分辨率较差,在经过集合经验模态分解后分辨率较好,可直接观察到。IMF5 中观察到两次高频事件的分辨率较差。IMF6、IMF7、IMF8、IMF9 主要为白噪声,频率低于地震引起的井水位同震响应,因此井水位在经过集合经验模态分解后,通过高频分量观察井水位同震响应特征可不受白噪声影响。IMF10、IMF11、IMF12、IMF13 中有周期性变化信息,其中可观察到固体潮、气压引起的井水位动态变化特征。IMF14、IMF15、IMF16 主要是低频变化趋势。IMF2、IMF3、IMF4、IMF5 表征的井水位变化仅由地震引起,对 IMF2、IMF3、IMF4、IMF5 相加重构可得到井水位同震响应信息。重构 IMF2、IMF3、IMF4、IMF5,并与原井水位观测数据进行对比,结果如图 4 所示。由图 4(a)可知,秘鲁 $M 7.3$ 地震引起的井水位变化几乎观察不到,日本 $M 6.4$ 地震引起的井水位变化较明显。观察高频重构分量,秘鲁 $M 7.3$ 地震引起井水位持续性小幅值振荡[图 4(b)],日本 $M 6.4$ 地震持续时间约 5 min,震后井水位变化幅值高于震前[图 4(c)],因此,井水位在经过集合经验模态分解后,对高频分量进行相加重构,可获得井水位同震响应信息。

3 井水位同震响应特征

3.1 远场大震引起的井水位同震响应特征

本文依次对震例 1~11 通过集合经验模态分解进行处理,对震例所在高频分量相加重构,与原井水位观测数据对比,结果如图 5 所示,虚线标注处为地震发震时刻。图 5(a)、(b)中,在 2021 年 11 月 28 日秘鲁 $M 7.3$ 地震发震后 23 min 观察到持续时间 135 min、最大双振幅 6.52 mm 的井水位振荡,在井水位原始观测数据中分辨率较差,在高频重构分量中水震波分辨率较高。图 5(c)、(d)中,在 2021 年 11 月 29 日日本 $M 6.4$ 地震发震后 12 min 观察到持续时间为 5 min 的水震波。图 5(e)、(f)中,在 2022 年 5 月 26 日秘鲁 $M 7.2$ 地震和洛亚蒂群岛 $M 6.5$ 地震后,通过高频分量可以观察到两次地震引起的井水位持续振荡时间分别为 105 和 97 min。图 5(g)、(h)中,2023 年 2 月 6 日 09:17:37 土耳其 $M 7.8$ 地震和 09:28:32 土耳其 $M 6.7$ 地震引起的井水位振荡持续时间约为 62 min,这两次地震发震时间相近,较难判断井水位振荡是否由两次地震共同引起。图 5(i)、(j)中,在 2023 年 2 月 6 日 18:24:50

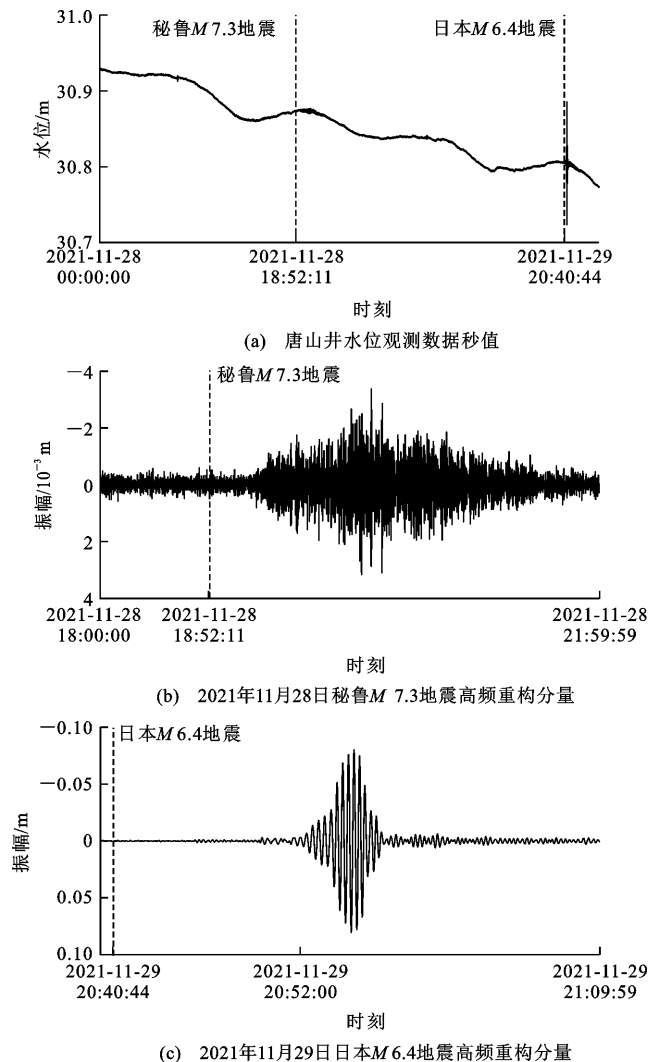


图 4 唐山井水位原始观测数据和高频重构分量
Fig. 4 Primary Observation Data and High Frequency Reconstruction Components of Water Level in Well Tangshan

土耳其 $M 7.8$ 地震和 20:02:17 土耳其 $M 5.9$ 地震后,井水位振荡由土耳其 $M 7.8$ 地震引起,振荡持续时间约 80 min,在土耳其 $M 5.9$ 地震发震后未见明显井水位变化。土耳其地震引起井水位振荡幅值较大,受秒值观测数据白噪声影响较小,分辨率较高,高频重构分量与井水位观测数据变化趋势差异较小,通过井水位观测数据可直接观察到。

3.2 近场地震引起的井水位同震响应特征

对比近场地震引起的唐山井水位同震响应观测数据秒值及其高频分量可知:唐山市开平区 $M 4.0$ 地震后井水位出现方向为下、幅值较大的脉冲,最大双振幅约 5 cm,脉冲后水位发生持续时间较短的小幅值振荡,之后井水位恢复原变化趋势;唐山市开平区 $M 2.5$ 地震为唐山市开平区 $M 4.0$ 地震的余震,唐

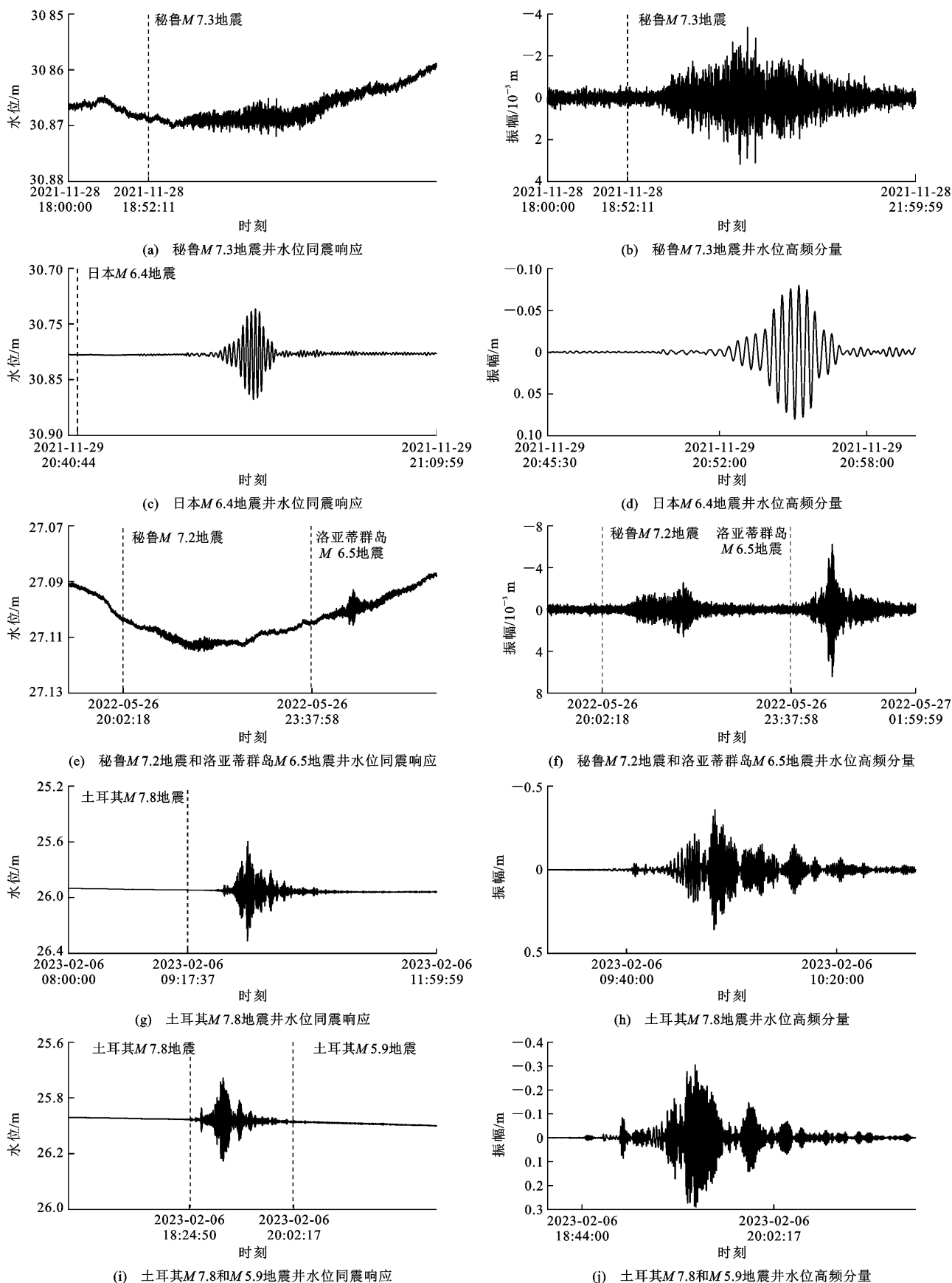


图5 远场大震引起的井水位同震响应特征

Fig. 5 Co-seismic Response Characteristics of Well Water Level Caused by Far-field Large Earthquake

山市开平区 $M 2.5$ 地震引起的井水位变化幅值较小,分辨率较差,辨认较为困难[图 6(a)]。由图 6(b)可知,通过高频重构分量可以观察到唐山市开平区 $M 4.0$ 地震后井水位出现两次振荡,第二次振荡幅值较小。为对第二次井水位振荡进行更好的观察,避免 IMF1 中可能存在部分残留白噪声影响观察,仅对高频分量 IMF2 和 IMF3 进行相加重构,图 6(b)中第二次振荡幅值较小,在高频分量中分辨率较高,但频率分布范围和唐山市开平区 $M 4.0$ 地震以及唐山市开平区 $M 2.5$ 地震所在频段较为一致,推测这次振荡由地震波引起,唐山市开平区 $M 2.5$

地震后出现持续时间较短的小幅值振荡。唐山市滦州市 $M 4.3$ 地震后,观察到井水位出现一次向下的脉冲,在选取的时间段内,井水位观测数据秒值出现了多次脉冲,且震前出现了一次井水位小幅值阶降后恢复的现象,井水位同震响应特征分辨率较低,辨认较为困难[图 6(c)]。在井水位重构高频分量中观测到唐山市滦州市 $M 4.3$ 地震后出现了一次脉冲,地震前后均出现井水位高频事件[图 6(d)]。在 2021 年 4 月 15 日至 17 日期间,唐山井 500 km 范围内无地震发生,震前以及震后的井水位脉冲可能由气压引起。

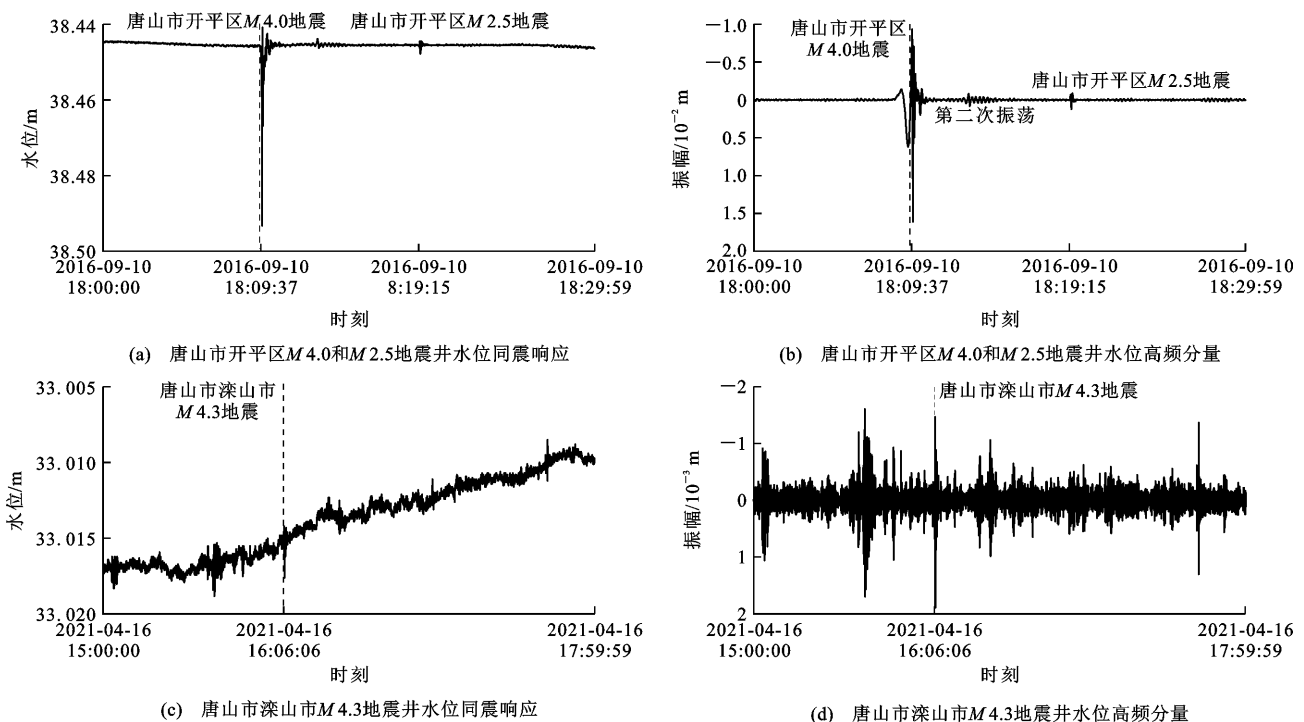


图 6 近场地震引起的井水位同震响应特征

Fig. 6 Co-seismic Response Characteristics of Well Water Level Caused by Near-field Earthquake

比较图 6(a)、(b),重构后同震响应信息和水位变化差异较大。IMF2 和 IMF3 重构信号出现幅值丢失、相位偏移现象,因集合经验模态分解对井水位进行分解时,计算井水位极值包络线的均值会导致高频分量上幅值变化较大的相位往均值偏移,重构后的分量虽然较为容易观察到地震引起的井水位变化,但是阶变型和脉冲型井水位同震响应在高频分量中会丢失部分相位信息。由于仅对高频分量 IMF2 和 IMF3 进行重构,没有对记录到同震响应所有高频分量进行重构,所以出现振幅丢失的现象。

唐山井距唐山市开平区 $M 4.0$ 地震 14 km,发震后地震改变地壳静应力,并引起来自于地震波的动力,地震静应力首先作用于井-含水层系统,改

变了井-含水层系统渗透性,而后发生井水位脉冲,之后在地震波的作用下井水位产生第二次振荡。通常,近场地震由于震级较小,地震波不发育,由地震波引起的井水位幅值变化较小,背景噪声掩盖了地震波引起的井水位变化,直接观察较为困难,经过集合经验模态分解处理后,对高频分量进行重构可以观察到。

4 讨论

4.1 唐山井水位同震响应时频分析

对远场地震引起的唐山井水位同震响应观测数据秒值的高频分量进行时频分析,结果如图 7 所示。地震震级和震中距能够影响地震波的频率和持续时

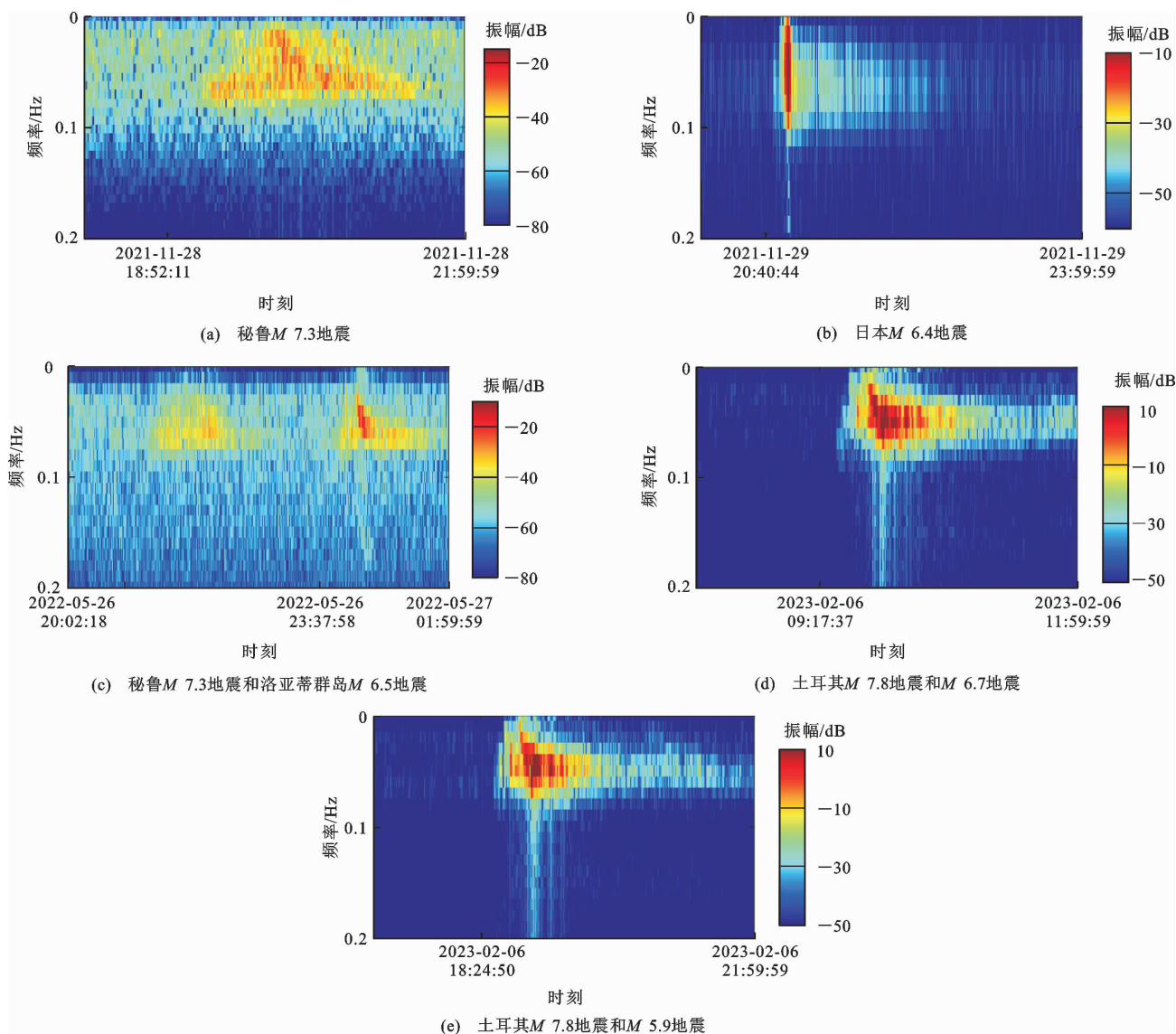


图7 远震引起的井水位同震响应高频分量时频分析结果

Fig. 7 Time-frequency Analysis Results of High Frequency Component of Well Water Level Coseismic Response Caused by Teleseismic

间,含水层可看作低通滤波器^[21]。震级较大的远震产生地震波低频成分更多,持续时间更长。相同地震能量密度条件下,含水层渗透性变化对震级较大的远震更敏感,低频地震波更容易引起含水层渗透性变化^[22]。

2021年11月29日日本M 6.4地震引起的井水位同震响应频率高于其余地震,日本M 6.4地震同震响应频率范围为0.010~0.125 Hz(周期为8~100 s),震后水位能量条颜色较震前较亮,震后井水位振幅高于震前,呈小幅值的持续振荡,振荡频率为0.03~0.10 Hz(周期为10~32 s)[图7(b)];2021年11月28日秘鲁M 7.3地震引起唐山井水位同震响应频率较低,振荡时间较长,频率范围为0.010~

0.078 Hz(周期为12.8~100.0 s)[图7(a)];2022年5月26日秘鲁M 7.2地震同震响应频率范围为0.015~0.090 Hz(周期为11.1~66.6 s),震后井水位频率为0.05~0.09 Hz(周期为11.1~20.0 s),2022年5月26日洛亚蒂群岛M 6.5地震引起井水位同震响应频率范围为0.02~0.08 Hz(周期为12.5~50.0 s),震后井水位频率为0.05~0.08 Hz(周期为12.5~20.0 s)[图7(c)];2023年2月6日土耳其两次M 7.8地震引起井水位同震响应频率主要为0.01~0.08 Hz(周期为12.5~100.0 s),震后井水位周期性变化频率主要为0.04~0.06 Hz(周期为16.6~25.0 s)[图7(d)和(e)];另外,两次土耳其地震后井水位有周期性变化,且井水位振幅

高于震前,在图中也表现得比较明显,随震中距的距离变大,井水位同震响应频率逐渐变小。在震波的作用下,断裂带内沉积物(颗粒沉降物质、胶体、气泡等)的运移和重新分布导致断裂带渗透性的变化,地震波沿与储水裂隙走向平行的方向进行传播,改变了含水层水平渗透率^[23],因此震后井水位变化高于震前,震后沉积物(颗粒沉降物质、胶体、气泡等)重新连接含水层裂隙的孔隙,含水层渗透率逐渐恢复,水位恢复到震前水平^[24-25]。

井-含水层系统作为低通滤波器,能阻隔高频地震波或使其衰减^[21]。对于超过一定距离的地震,观测井记录到的井水位同震响应频率可能在一定范围内,观测井映震能力可能与其本身的固有振动频率有关。井-含水层系统固有振动频率越接近瑞丽面波的振动频率,振动阻尼系数越小,含水层渗透系数越大,井水位对地震波的响应越明显^[26]。唐山井记录到超过 6 000 km 的地震引起的井水位振荡频率为 0.01~0.08 Hz,由地震波生成的瑞丽面波频率为 0.05~0.06 Hz,推测唐山井固有振动频率与瑞丽面波频率相近,其对于距离较远、地震能量密度较低的地震波有较好的映震能力。

4.2 唐山井记震能力

崔瑾等研究认为,远场地震能够引起井水位同震响应的地震能量密度存在一个阈值^[7]。当地震能量密度高于这个阈值时,井水位产生同震响应,否则井水位不受影响。若地震能量密度小于阈值仍能引起井水位同震响应,表明观测井含水层受区域应力影响,含水层介质孔隙度发生改变使得井水在井-含水层之间流动。因此,井水位记震能力的变化一定程度上能够反映区域应力场的变化^[3],为研究地震的孕育和发震提供数据资料^[27]。对于震级为 M ,井震距为 r 处的地震能量密度经验公式^[28]为 $\lg r = 0.48M - 0.33 \lg e - 1.4$,式中 e 为地震能量密度。地震能量密度经验公式适用于估算远场地震能量密度,对于近场和中场地震难以精确估算^[23]。

将远场大震相关参数代入上述公式可以得到:2021 年 11 月 28 日秘鲁 $M 7.3$ 地震能量密度为 $4.46 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,最大双振幅为 6.52 mm;2022 年 5 月 26 日秘鲁 $M 7.2$ 地震能量密度为 $2.51 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,最大双振幅为 5.15 mm;2021 年 11 月 29 日日本 $M 6.4$ 地震能量密度为 $6.66 \times 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,最大双振幅为 156.31 mm。秘鲁 $M 7.3$ 和 $M 7.2$ 地震的震源深度较深,地震波对地表作用不如日本 $M 6.4$ 地震明显。2022 年 5 月 26 日洛亚蒂

群岛 $M 6.5$ 地震能量密度为 $1.77 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,最大双振幅为 12.64 mm。日本 $M 6.4$ 地震同震响应振幅约为洛亚蒂群岛 $M 6.5$ 地震的 12 倍;秘鲁 $M 7.3$ 和 $M 7.2$ 地震能量密度均高于洛亚蒂群岛 $M 6.5$ 地震,但最大双振幅约为洛亚蒂群岛 $M 6.5$ 地震的一半,且洛亚蒂群岛地震同震响应形态更清晰,可能是不同方位的地震波引起唐山井水位同震响应变化有所差异。2023 年 2 月 6 日 9:17:37 土耳其 $M 7.8$ 地震和 9:28:32 土耳其 $M 6.7$ 地震能量密度分别为 3.03×10^{-5} 和 $7.61 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,震后井水位振荡可能由这两次地震共同引起,但主要由土耳其 $M 7.8$ 地震引起,土耳其 $M 6.7$ 地震同震响应井水位振幅较小。2023 年 2 月 6 日 18:24:50 土耳其 $M 7.8$ 地震和 20:02:17 土耳其 $M 5.9$ 地震能量密度分别为 3.11×10^{-5} 和 $5.2 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,由于在 20:02:17 后未观察到井水位同震响应,故这次同震响应主要由土耳其 $M 7.8$ 地震引起,而土耳其 $M 5.9$ 地震能量密度低于洛亚蒂群岛 $M 6.5$ 地震,故推测唐山井能量密度阈值为 $1.77 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

震例 13~28 的井水位观测数据分值受记震精度的限制,记录到的井水位同震响应形态可能不够完整(图 8)。除 2019 年 4 月 24 日中国西藏 $M 6.3$ 地震井水位同震响应表现为向下脉冲外,其余地震引起的井水位同震响应多为振荡型。2022 年 1 月 8 日中国青海门源 $M 6.9$ 地震能量密度约为 2020 年 7 月 22 日美国阿拉斯加州 $M 7.5$ 地震能量密度的 10 倍,但最大双振幅约为美国阿拉斯加州 $M 7.5$ 地震的一半。统计 2019~2022 年 8 月间唐山井震级在 5 级以上,距离在 1 000 km 以上的井水位同震响应信息,发现 5 级以上能引起同震响应的地震有 58 个,对同震响应幅值(A)、震级(M)和井震距(D)进行拟合,得到关系式 $\lg A = -0.51 \lg D + 0.7M - 5.25$,判定系数 $R^2 = 0.33$,说明唐山井水位同震响应振幅和震级、井震距的相关性较差。

地震波引起含水层介质渗透性变化。导水系数发生变化,进而导致井水位变化。石云认为观测井的渗透性变化与地震波传播方位有关,地震波引起的断裂带渗透性的变化类型与地震波传播方位之间的选择性有关,能够反映含水层介质各向异性^[22]。由于瑞丽面波的弥散性质,唐山井水位同震响应记录能力对从东南洋壳传播地震波比从西北陆壳传播地震波的记录能力更好,记录更清晰,振幅更大,持续时间更长^[29],故唐山井能记录到距离较远的秘鲁

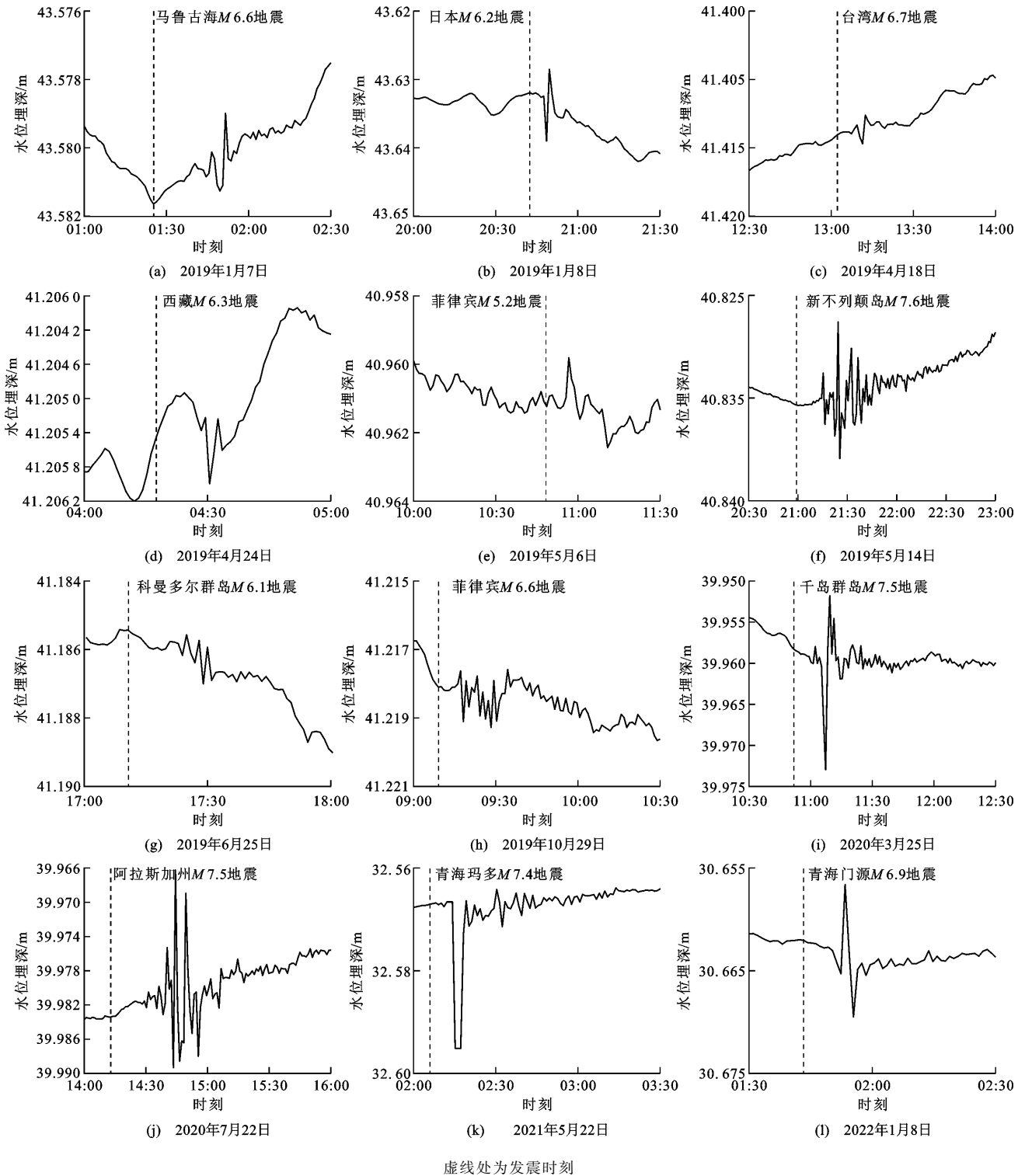


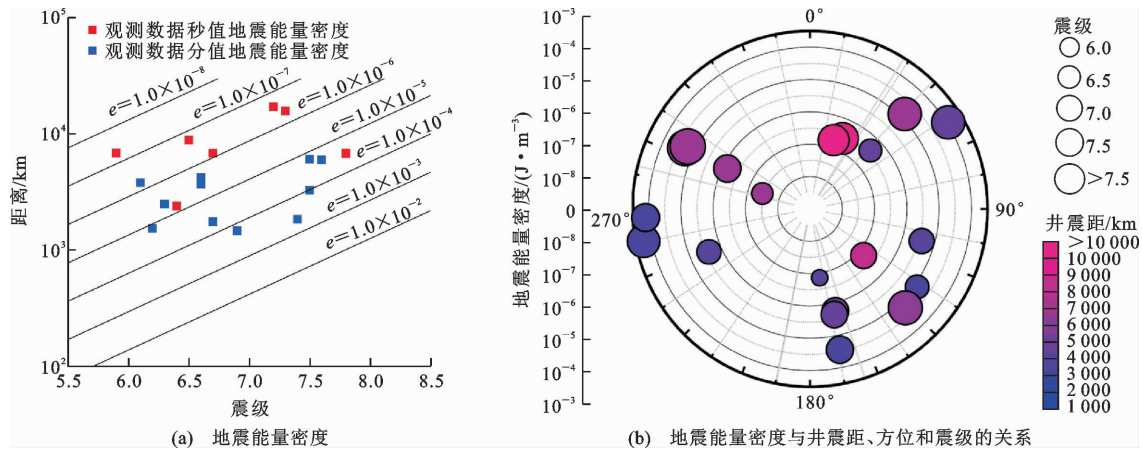
图8 唐山井水位同震响应分值数据

Fig. 8 Minute Value Data of Co-seismic Response of Water Level in Well Tangshan

M 7.3 和 M 7.2 地震以及洛亚蒂群岛 M 6.5 地震, 日本 M 6.4 地震引起的水震波波形更清晰且振幅更大。图 9 为唐山井地震能量密度与井震距、震级和方位的示意图。洛亚蒂群岛 M 6.5 地震与秘鲁 M 7.3 和 M 7.2 地震传播方位不同, 虽然秘鲁 M 7.3 和 M 7.2 地震能量密度高于洛亚蒂群岛 M

6.5 地震, 但是同震响应振幅低于洛亚蒂群岛, 因为唐山井含水层的各向异性对不同方位的地震波有选择性, 所以引起的井水位变化有差异。

远场地震引起的地震波应力较小, 不同方位的地震引起的井水位同震响应可能与观测井所在断裂带的裂隙走向有关, 含水层渗透性变化可能取决于



图(b)中,圆心为唐山井,距离圆心越远表示地震能量密度越大;圆圈大小表示震级,圆圈越大说明震级越大,颜色条表示井震距

图 9 唐山井地震能量密度特征

Fig. 9 Characteristics of Seismic Energy Density of Well Tangshan

断裂带特性^[24,29]。2020年7月22日美国阿拉斯加州M 7.5地震在唐山井45°方向,地震传播方位与唐山井所在的唐山断裂带平行,其地震能量密度与2022年1月8日中国青海门源M 6.9地震相比较小,但是同震响应幅值与青海门源M 6.9地震相比较大。结合表1和图9(b)得到唐山井对于方位角在18°~45°、126°~168°和259°~297°间的地震映震能力较好。井水位对沿观测井所在断裂带裂隙走向近平行传播的地震波更为敏感,通过观测井水位对不同方位的地震波响应敏感度,可以研究观测井所在断裂带的裂隙走向^[24]。18°~45°的地震波与唐山断裂带走向近平行,126°~168°和259°~297°的地震波成对分布于—组方位,可能指示唐山井所在唐山断裂带的裂隙走向。

4.3 集合经验模态分解同震响应特征

对于震级较大、引起的井水位振幅较为明显且持续时间较长的地震,通过井水位观测数据可以直接观察到;对于震级较小、引起井水位振幅不明显的地震,通过集合经验模态分解后,在高频重构分量可以观察到。远场地震引起的井水位同震响应高频重构分量与井水位观测数据表征信号形态、变化趋势一致。对2021年11月29日日本M 6.4地震、2023年2月6日9:17:37和20:02:17土耳其两次M 7.8地震井水位观测数据和高频重构分量进行相关性分析,得到Pearson相关系数分别为0.997、0.967和0.858,显著性检验均小于0.05,说明相关性显著。远场地震引起的井水位变化和高频重构分量表征信号变化趋势基本一致,说明集合经验模态分解后高频重构分量不会改变井水位波形,可以客观、真实地提取地震引起的井水位表征波形,降低井

水位观测数据秒值背景噪声的影响,高频重构分量数据得到的井水位同震响应最大双振幅和原井水位观测数据基本一致,误差约为0.1 mm。2023年2月6日20:02:17土耳其M 7.8地震相关性结果相对较差的原因可能是高频重构信号去低频趋势,而井水位观测值表征信号低频趋势变化幅度较大。地震引起的井水位变化形态差异较大,类型较多,对于振荡型井水位同震响应,在集合经验模态分解后高频重构信号中可真实、客观地反映。对于阶变型和脉冲型井水位同震响应,井水位阶变、突变在高频分量表征波形表现为较大的振幅,仅对高频分量进行观察会损失低频变化趋势项,因此远场地震引起的井水位同震响应可通过集合经验模态分解后高频重构分量进行识别,近场地震引起的同震响应变化特征需要结合井水位观测数据进行研究。

集合经验模态分解处理阶变型井水位同震响应观测数据过程中,仅观察井水位高频重构分量时会丢失一部分信息。本文对数据丢失现象较明显的震例——2020年7月12日唐山市古冶区M 5.1地震引起的唐山井水位同震响应数据分值进行集合经验模态分解,比较井水位观测数据分值和高频重构分量IMF1、IMF2(图10),黑色虚线标注处为发震时刻。董博等通过弹性线性孔理论得到唐山市古冶区M 5.1地震前,唐山井处于应力积累阶段,震前井水位处于上升阶段,地震发生时井水位下降,处于应力释放阶段,井水位同震响应表现为向下的脉冲^[30]。图10(a)中,井水位观测数据分值显示井水位在B点(地震前45 s)开始下降,C点发生地震,D点(震后75 s)到达最低点后开始恢复,最大双振幅为1.3 mm。由图10(b)可知,高频重构分量中,井水位震

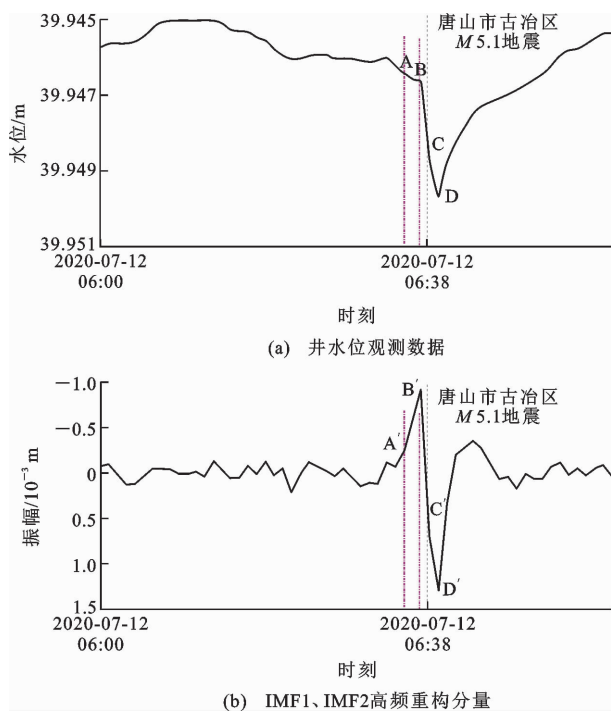


图 10 唐山市古冶区 M 5.1 地震引起的唐山井水位同震响应特征及其高频重构分量

Fig. 10 Co-seismic Response Characteristics and High Frequency Reconstruction Components of Water Level in Well Tangshan Caused by Tangshan Guye M 5.1 Earthquake

前小幅上升,从 A'点到 B'点上升幅值为 0.7 mm,对应原始井水位数据 A 点到 B 点呈下降趋势,两者变化趋势相异。原始井水位观测数据中,震前从 B 点开始下降到最低点 D,对应在高频重构分量中的阶降量为从 B'点到 D'点,由于高频重构分量去水位变化趋势表现为阶降现象的井水位波形从均值向上偏移,从 A'点到 B'点震前井水位上升实际上是井水位阶变数据从均值往上偏移的虚假量,B'点向上偏移量为 0.7 mm。区别于正常的井水位变化量,井水位在经过集合经验模态分解后,同震响应在高频分量中较明显,虽然集合经验模态分解在处理阶变型井水位同震响应会产生虚假分量,但可用于识别地震引起的井水位变化,在特定情况下可以识别井水位临震异常。

5 结语

(1)井水位同震响应在经过集合经验模态分解后,通过高频重构分量可以客观、真实地提取振荡型同震响应,有利于分析地震波与水震波之间的响应机制。仅通过高频分量分析阶变型和脉冲型同震响应可能会丢失低频趋势变化特征,需要结合原始水位观测数据资料进行研究。在特定情况下,集合经

验模态分解可以用于井水位临震异常提取,为地震预报提供基础数据资料。

(2)井水位观测数据秒值能够记录到更完整的同震响应变化形态,有利于揭示孕震过程和区域应力场的变化。

(3)唐山井水位同震响应特征机理与井孔所在地质构造环境密切相关。因观测数据秒值记震精度提高,初步得到唐山井水位同震响应与地震传播方位有关。探讨井水位对不同方位地震波响应特征有助于研究观测井所在断裂带裂隙的走向。唐山井能记录到的地震能量密度为 $1.77 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(4)井-含水层系统记录到超过一定距离的地震瑞丽面波反映其低通特性,可以推算观测井的固有振动频率。

(5)因唐山井观测数据秒值震例样本较小,未来将结合唐山玉田井水位同震响应与地震波的方位选择性进行研究。经过集合经验模态分解后,井水位同震响应在高频分量中比较明显,且分布频带尺度较宽,与干扰信号引起的井水位变化有明显区别。基于此特性可以将集合经验模态分解与深度学习结合起来,训练一套井水位同震响应实时动态拾取模型,这也是下一步的研究方向。

感谢河北省地震局唐山地震监测中心站提供的数据!

参考文献:

References:

- [1] 孙小龙,刘耀炜,付虹,等.我国地震地下流体学科分析预报研究进展回顾[J].地震研究,2020,43(2):216-231,417.
SUN Xiao-long, LIU Yao-wei, FU Hong, et al. A Review of Study in the Analysis and Prediction of Seismic Subsurface Fluids During Past Ten Years in China[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(2): 216-231, 417.
- [2] 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(1):69-79.
LIU Kai, ZHANG Hui, ZHANG Jun, et al. Comparative Analysis on Coseismic Response of Water Level in Shandong Province to Several Major Earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 2019, 41(1): 69-79.
- [3] 杨秋野,张艳,符力耘,等.应力变化与流体(水位、水温、水化学、土壤气等)变化的耦合机理及其在川滇地区地震前兆研究中的应用[J].地球物理学进展,2020,35(6):2124-2133.

- YANG Qiu-ye, ZHANG Yan, FU Li-yun, et al. Coupling Mechanism of Stress Variation and Groundwater (Water Level, Water Temperature, Hydrochemistry, Soil Gas, etc.) and Its Application in Earthquake Precursors Research in Sichuan and Yunnan Regions [J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(6): 2124-2133.
- [4] 鲁明贵, 谷洪彪, 巩浩波, 等. 基于 Molchan 图表法的流体监测井水位地震预测效能检验[J]. *地震研究*, 2024, 47(2): 200-211.
- LU Ming-gui, GU Hong-biao, GONG Hao-bo, et al. Effectiveness Test of Seismic Prediction of Water Level in Fluid Monitoring Well Based on the Molchan Diagram Method [J]. *Journal of Seismological Research*, 2024, 47(2): 200-211.
- [5] 孙小龙, 向阳. 基于同震水震波的水文地质参数求取方法探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 22-29.
- SUN Xiao-long, XIANG Yang. A Discussion of the Method of Estimating Hydraulic Parameters Based on Groundwater Responses to Seismic Waves [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 22-29.
- [6] SUN X L, WANG G C, YANG X H. Coseismic Response of Water Level in Changping Well, China, to the M_w 9.0 Tohoku Earthquake [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 1028-1039.
- [7] 崔瑾, 丁风和, 曾宪伟, 等. 宁夏井水位观测同震响应特征研究及机理探讨[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4): 1281-1287.
- CUI Jin, DING Feng-he, ZENG Xian-wei, et al. Study on Coseismic Response Characteristics and Mechanism of Well Water Level Observation in Ningxia [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1281-1287.
- [8] 崔瑾, 司学芸, 孙小龙, 等. 宁夏井水位记震能力变化与周边地震关系研究[J]. *地震*, 2021, 41(3): 131-143.
- CUI Jin, SI Xue-yun, SUN Xiao-long, et al. The Relationship Between the Co-seismic Response Capability of Well Water Level and the Surrounding Earthquake [J]. *Earthquake*, 2021, 41(3): 131-143.
- [9] 廖丽霞, 秦双龙, 陈昌泳. 不同采样率水位同震响应能力及其特征分析[J]. *地震地磁观测与研究*, 2013, 34(增 2): 150-155.
- LIAO Li-xia, QIN Shuang-long, CHEN Chang-yong. Comparison of the Ability for Recording Coseismic Response Using Water Level of Different Sampling Ratio [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2013, 34(S2): 150-155.
- [10] 谭潜, 李英民, 杨永斌. 基于 EMD 的长周期地震动分量提取方法[J]. *土木与环境工程学报*, 2021, 43(3): 119-127.
- TAN Qian, LI Ying-min, YANG Yong-bin. Method of Long Period Ground Motions Component Extraction Based on Empirical Mode Decomposition [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(3): 119-127.
- [11] 薛思敏, 黄汉明, 施佳鹏, 等. 基于 EMD 的 IMF 时域统计特征提取及其应用于震动事件源类型识别研究[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(1): 100-107.
- XUE Si-min, HUANG Han-ming, SHI Jia-peng, et al. Extraction of IMF Time-domain Features Based on EMD and Its Application to Recognition of Vibration Event Source Type [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(1): 100-107.
- [12] 孙和平, 张苗苗, 徐建桥, 等. 基于集合经验模态分解法的重力极潮提取与研究[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 521-530.
- SUN He-ping, ZHANG Miao-miao, XU Jian-qiao, et al. Extraction and Study of the Gravity Pole Tide Using EEMD [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(2): 521-530.
- [13] 张亮, 张佳丽, 张学峰, 等. 基于希尔伯特-黄变换的潮汐分析方法研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(7): 725-735.
- ZHANG Liang, ZHANG Jia-li, ZHANG Xue-feng, et al. Study of the Analysis of Tides Based on the HHT Method [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2020, 53(7): 725-735.
- [14] 余丹, 刘春国, 王晓, 等. 集合经验模态分解 (EEMD) 在地下水水位数据处理中的应用初探[J]. *中国地震*, 2019, 35(2): 337-346.
- YU Dan, LIU Chun-guo, WANG Xiao, et al. Application of Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) in Underground Fluid Data Processing [J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 35(2): 337-346.
- [15] 张珊珊, 万永革, 王晓山, 等. 1976 年唐山大地震库仑破裂应力对唐山及邻近地区地震的影响[J]. *华北地震科学*, 2022, 40(1): 7-14.
- ZHANG Shan-shan, WAN Yong-ge, WANG Xiao-shan, et al. The Influence of the Coulomb Failure Stress Following the 1976 Tangshan Earthquakes on Earthquakes in Tangshan and Its Adjacent Area [J]. *North China Earthquake Sciences*, 2022, 40(1): 7-14.
- [16] 张素欣, 边庆凯, 张子广, 等. 唐山断裂北段地震分布特征及其构造意义[J]. *地震研究*, 2020, 43(2): 270-277, 417.
- ZHANG Su-xin, BIAN Qing-kai, ZHANG Zi-guang,

- et al. Seismic Distribution and Tectonic Significance of the Northern Segment of the Tangshan Fault [J]. *Journal of Seismological Research*, 2020, 43(2): 270-277, 417.
- [17] 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, 337.
SHI Yao-lin, CAO Jian-ling, MA Li, et al. Teleseismic Coseismic Well Temperature Changes and Their Interpretation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(3): 265-273, 337.
- [18] 马玉川, 晏 锐, 王广才, 等. 1976年唐山7.8级地震前地下水位变化与地震成核过程的关系[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(4): 1325-1335.
MA Yu-chuan, YAN Rui, WANG Guang-cai, et al. Groundwater Level Changes Before the 1976 Tangshan M_s 7.8 Earthquake and Its Relation with the Earthquake Nucleation Process[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(4): 1325-1335.
- [19] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454: 903-998.
- [20] WU Z H, HUANG N E. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-assisted Data Analysis Method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [21] 张 璜, 谷洪彪, 张 艳, 等. 渗流条件下振动对测压水位的影响实验[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(4): 1857-1866.
ZHANG Huang, GU Hong-biao, ZHANG Yan, et al. Effect Experiment of the Vibration on Piezometric Level Under Seepage Condition[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4): 1857-1866.
- [22] 石 云. 基于井水位潮汐分析研究地震引起断裂带渗透性变化[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020.
SHI Yun. Study on Permeability Changes in Fault Zones Caused by Earthquakes Based on the Tide Analysis of Water Level[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020.
- [23] ZHANG Y, WANG C Y, FU L Y, et al. Unexpected Far-field Hydrological Response to a Great Earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 519: 202-212.
- [24] ZHANG Y, MANGA M, FU L Y, et al. Changes of Hydraulic Transmissivity Orientation Induced by Teleseismic Waves[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(11): e2022WR033272.
- [25] MOHR C H, MANGA M, WANG C Y, et al. Regional Changes in Streamflow After a Megathrust Earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 458: 418-428.
- [26] 沈 平, 敬少群, 姚海东, 等. 湖南长沙井动水位对远大地震的同震响应特征分析[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(1): 74-83.
SHEN Ping, JING Shao-qun, YAO Hai-dong, et al. Analysis on Co-seismic Response Characteristics to Teleseism Recorded by Changsha Well's Dynamic Water Level in Hunan Province[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(1): 74-83.
- [27] 刘 凯, 陈其峰, 张 军, 等. 2021年玛多 M_s 7.4和2022年门源 M_s 6.9地震引起的山东井水位同震响应特征分析[J]. *内陆地震*, 2023, 37(2): 210-216.
LIU Kai, CHEN Qi-feng, ZHANG Jun, et al. Coseismic Response Analysis of Well Water Level in Shandong Province Caused by 2021 Maduo M_s 7.4 and 2022 Menyuan M_s 6.9 Earthquakes[J]. *Inland Earthquake*, 2023, 37(2): 210-216.
- [28] WANG C Y. Liquefaction Beyond the Near Field[J]. *Seismological Research Letters*, 2007, 78(5): 512-517.
- [29] 王 妍, 符泽宇, 赵建明, 等. 唐山地区数字化井水位对远场大震同震响应特征分析[J]. *防灾科技学院学报*, 2019, 21(3): 31-38.
WANG Yan, FU Ze-yu, ZHAO Jian-ming, et al. Analysis of Far-field Earthquake Co-seismic Responses to Water Level of Digital Well in Tangshan[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2019, 21(3): 31-38.
- [30] 董 博, 纪春玲, 杨东辉. 地震静应力作用与井水位孔压响应分析: 以唐山古冶5.1级地震为例[J]. *大地测量与地球动力学*, 2022, 42(3): 321-325.
DONG Bo, JI Chun-ling, YANG Dong-hui, et al. Analysis of Seismic Static Stress and Response of Well Water Level and Pore Pressure: A Case Study of Tangshan Guye M_s 5.1 Earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(3): 321-325.