

刘凯, 张辉, 张军, 宋磊, 陈燕娥, 夏岩, 田兆阳, 海长洪. 2019. 山东省井水位对几次大地震同震响应的比较分析. 地震学报, 41(1): 69–79. doi: 10.11939/jass.20170161.
Liu K, Zhang H, Zhang J, Song L, Chen Y E, Xia Y, Tian Z Y, Hai C H. 2019. Comparative analysis on coseismic response of water level in Shandong Province to several major earthquakes. Acta Seismologica Sinica, 41(1): 69–79. doi: 10.11939/jass.20170161.

山东省井水位对几次大地震同震响应的比较分析*

刘 凯^{1),†} 张 辉²⁾ 张 军³⁾ 宋 磊⁴⁾ 陈燕娥¹⁾
夏 岩¹⁾ 田兆阳¹⁾ 海长洪¹⁾

1) 中国山东德州 253000 山东省地震局德州地震台

2) 中国山东潍坊 261300 山东省地震局昌邑地震台

3) 中国山东菏泽 274026 菏泽市地震局

4) 中国山东枣庄 277800 枣庄市地震局

摘要 采用多井对多震的方式, 选取山东省地下流体观测井网中同震响应较好的 6 口观测井作为研究对象, 分别从水位变化形态和幅度对比分析 2011 年日本 M_w 9.0 地震、2012 年苏门答腊 M_w 8.6 地震和 2015 年尼泊尔 M_w 7.8 地震引起的井水位变化特征, 探讨引起该变化的可能机理. 研究结果显示: 水位同震变化形态以振荡为主; 通过定量分析认为聊古一井井水位的阶升是由含水层渗透系数增大所致; 位于同一断裂带上的聊古一井和鲁 27 井井水位在同一地震中所表现的变化形态不同, 可能与两个观测井所处的地质构造条件和地震活动背景不同有关; 区域应力场的变化会影响栖霞鲁 07 井的水位同震变化形态; 水位同震变化幅度与震级、井震距存在一定关系, 同时也取决于含水层水文地质条件的变化量.

关键词 水位 地震 同震响应 含水层 山东

doi: 10.11939/jass.20170161 中图分类号: P315.72⁺3 文献标识码: A

Comparative analysis on coseismic response of water level in Shandong Province to several major earthquakes

Liu Kai^{1),†} Zhang Hui²⁾ Zhang Jun³⁾ Song Lei⁴⁾ Chen Yan'e¹⁾
Xia Yan¹⁾ Tian Zhaoyang¹⁾ Hai Changhong¹⁾

1) Dezhou Seismic Station of Shandong Earthquake Agency, Shandong Dezhou 253000, China

2) Changyi Seismic Station of Shandong Earthquake Agency, Shandong Weifang 251300, China

3) Earthquake Agency of Heze City, Shandong Heze 274026, China

4) Earthquake Agency of Zaozhuang City, Shandong Zaozhuang 277800, China

Abstract: In the form of multi-well to multi-earthquake, six wells with good coseismic responses in the underground fluid observation network of Shandong Province are selected to analyze the coseismic variations of water level caused by the Japan M_w 9.0 earthquake, the Sumatra M_w 8.6

* 基金项目 2017 年度山东省地震局合同制项目(17Y18)资助.
收稿日期 2018-02-06 收到初稿, 2018-10-31 决定采用修改稿.
† 通信作者 e-mail: LK8822@126.com



earthquake and the Nepal $M_w7.8$ earthquake. We analyze the characteristics in the aspects of type and amplitude, and discuss the response mechanism. The results show that the major type of coseismic variations is oscillation. With quantitative analysis, we find that the rise of Liaogu-1 water level is due to the increase of permeability coefficient of aquifer. The different types between Liaogu-1 well and Lu-27 well on the same fault zone are due to the different regional geological conditions and seismic activities. The water level coseismic variation type of Lu-07 well is affected by local tectonic stress. The amplitude of water level coseismic variation is related to the magnitude and the distance between well and epicenter, and also depends on the change of hydrogeological condition.

Key words: water level; earthquake; coseismic response; aquifer; Shandong Province

引言

地下流体观测中,地震引起的井水位同震响应是目前研究的热点之一.自1899年意大利的一口深井首次记录到地震引起的水位震荡开始,国内外的研究人员开展了一系列的相关研究.例如:Blanchard 和 Byerly (1935)提出了水位波动反映地震波的理论;Cooper 等 (1965)认为水位对地震波的响应程度取决于井孔的尺寸、含水层的导水系数、储水系数、孔隙度以及波的类型.自20世纪70年代首次在北京注里井观测到水震波之后,水位同震响应在我国受到越来越多的关注.一些研究人员利用水位观测数据进行多井对一震(耿杰等, 2008; 鱼金子等, 2012; 李俊超等, 2016; 尹宏伟等, 2016)、一井对多震(晏锐, 黄辅琼, 2009; 尹宝军等, 2009; 冯恩国等, 2016)以及多井对多震(兰双双等, 2011; 杨竹转等, 2014)的同震变化特征研究及机理分析.另有部分研究人员对水位同震响应的研究不仅仅局限于形态、幅度的分析,开始探索其在地震预测实践中的应用(黄辅琼等, 2000; 刘成龙等, 2009; 杨竹转等, 2010).井水位对远场大震的同震响应是地震波作用于井-含水层系统最直接的体现.水位同震效应可以有效地反映含水层孔隙的压力变化,揭示地壳介质对应力应变的响应,有助于加深对区域应力场和水文地质条件的认识,促进对地震孕育过程中流体前兆现象的识别与研究.

水位同震响应是一个复杂的过程,虽然总体上有一定的规律,但在变化形态和变化幅度方面又有着明显的不同.同一口井对不同地震的响应特征不同,不同井对同一地震的响应也不同.受水文地质条件、地质构造环境等因素的影响,每口井的水位同震响应特征均具有独特性.目前,关于山东省井水位同震响应的研究比较少.耿杰等(2008)曾利用2007年9月12日印尼苏门答腊南部海域 $M_s8.5$ 地震引起的水震波资料,分析和讨论了不同类型仪器对水震波的响应特征.王学聚等(2013)总结了山东地下流体井网对汶川 $M_s8.0$ 地震的响应情况.随着“十一五”、“十二五”项目的建设、验收,山东省数字化水位观测网更加完善,观测资料更加丰富,可以更加系统地、深入地分析山东省井水位的同震响应特征,特别是变化机理的分析.

本文拟采用多井对多震的方式,选取山东省地下流体观测井网中同震响应较好的6口观测井作为研究对象,分别从水位变化形态和幅度的角度对比分析日本 $M_w9.0$ 地震、苏门答腊 $M_w8.6$ 地震和尼泊尔 $M_w7.8$ 地震引起的井水位变化特征,并探讨可能的变化机理.

1 区域地质构造与地下流体观测井网概况

山东地区地质构造复杂,主要构造带从西向东分别为聊考断裂带、沂沭断裂带和张家口

一蓬莱断裂带. 聊考断裂带是鲁西断块隆起和华北断块拗陷的分界断裂, 其东西两侧巨大的地质构造差异使得该区成为地震孕育的有利场所. 沂沭断裂带是郯庐断裂带在山东境内的区段, 由昌邑一大店断裂、安丘一莒县断裂、沂水一汤头断裂和郯郯一葛沟断裂等构成, 组成了“两壑夹一垒”的构造格局. 历史上著名的 1668 年郯城 $M_S8.5$ 地震就发生在此断裂带上. 张家口—蓬莱断裂带是华北地震构造区中一条具有相当规模的北西向活动构造带, 它西起张家口以西, 往东南经怀来、南口、顺义、三河和天津等地, 穿渤海向东南一直延伸到蓬莱和烟台北边的北黄海海域. 强震活动多发生在与北东向的汾渭地震构造带、河北平原地震构造带和郯庐地震构造带的交会地段上.

有历史地震记录以来, 山东及邻区共发生 $M_S \geq 6.0$ 地震 17 次. 其中, 4 次发生在聊考断裂带, 最大地震为 1937 年菏泽 $M_S7.0$ 地震; 5 次发生在沂沭断裂带, 最大地震为郯城 $M_S8.5$ 地震; 5 次发生在胶东半岛北部海域, 最大地震为 1969 年渤海 $M_S7.4$ 地震.

本文拟选取近年来发生在我国大陆周边地区, 且具有较大影响力的日本 $M_W9.0$ 地震、苏门答腊 $M_W8.6$ 地震和尼泊尔 $M_W7.8$ 地震作为目标地震(图 1), 以同震响应显著的山东省地下流体水位观测井作为研究对象(图 2), 分析同震响应差异, 探讨可能的同震响应机理.

选取对 3 次远场大震均具有明显同震响应的聊古一井、昌邑鲁 02 井、栖霞鲁 07 井、商河鲁 09 井、枣庄鲁 15 井和菏泽鲁 27 井作为研究对象, 井点基本情况列于表 1.

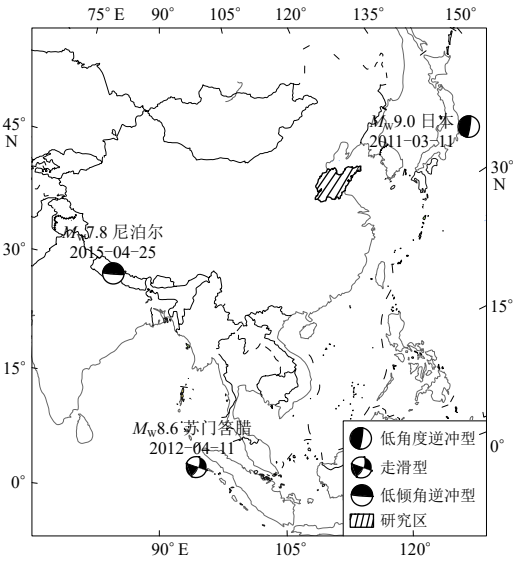


图 1 目标地震分布图

Fig. 1 Distribution of target earthquakes

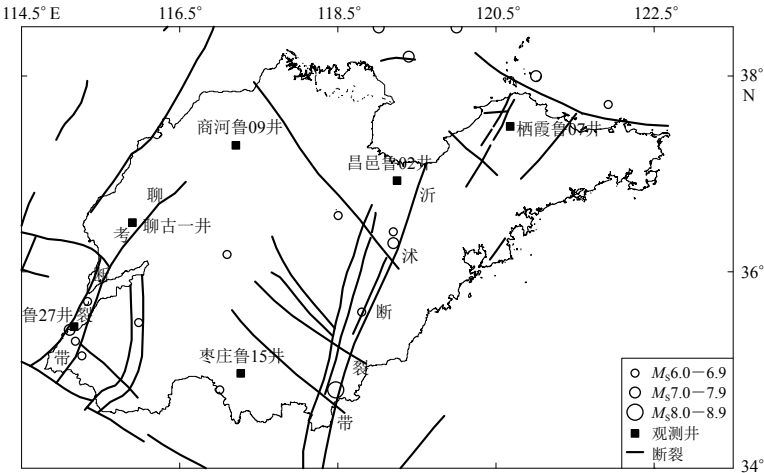


图 2 区域地质构造及井点分布图

Fig. 2 Regional tectonics and monitoring wells distribution

表 1 观测井基本参数
Table 1 Basic parameters of six wells

井孔名称	井深/m	所处断裂带	含水层岩性	观测仪器型号	采样率/(次·分钟 ⁻¹)
聊古一井	2 337	聊考断裂带北段	灰岩	LN-3A	1
昌邑鲁 02 井	1 172	昌邑一大店断裂	砂岩	LN-3A	1
栖霞鲁 07 井	600	莱阳、栖霞、福山断裂交会处	花岗岩	LN-3A	1
商河鲁 09 井	2 836	济阳凹陷	灰岩	LN-3A	1
枣庄鲁 15 井	501	韩庄断裂北侧	砂岩	LN-3A	1
菏泽鲁 27 井	2 000	聊考断裂带东侧	灰岩	LN-3A	1

2 同震响应特征

三次地震引起的 6 口观测井水位同震响应变化形态与幅度见图 3 与表 2. 可以看出：水

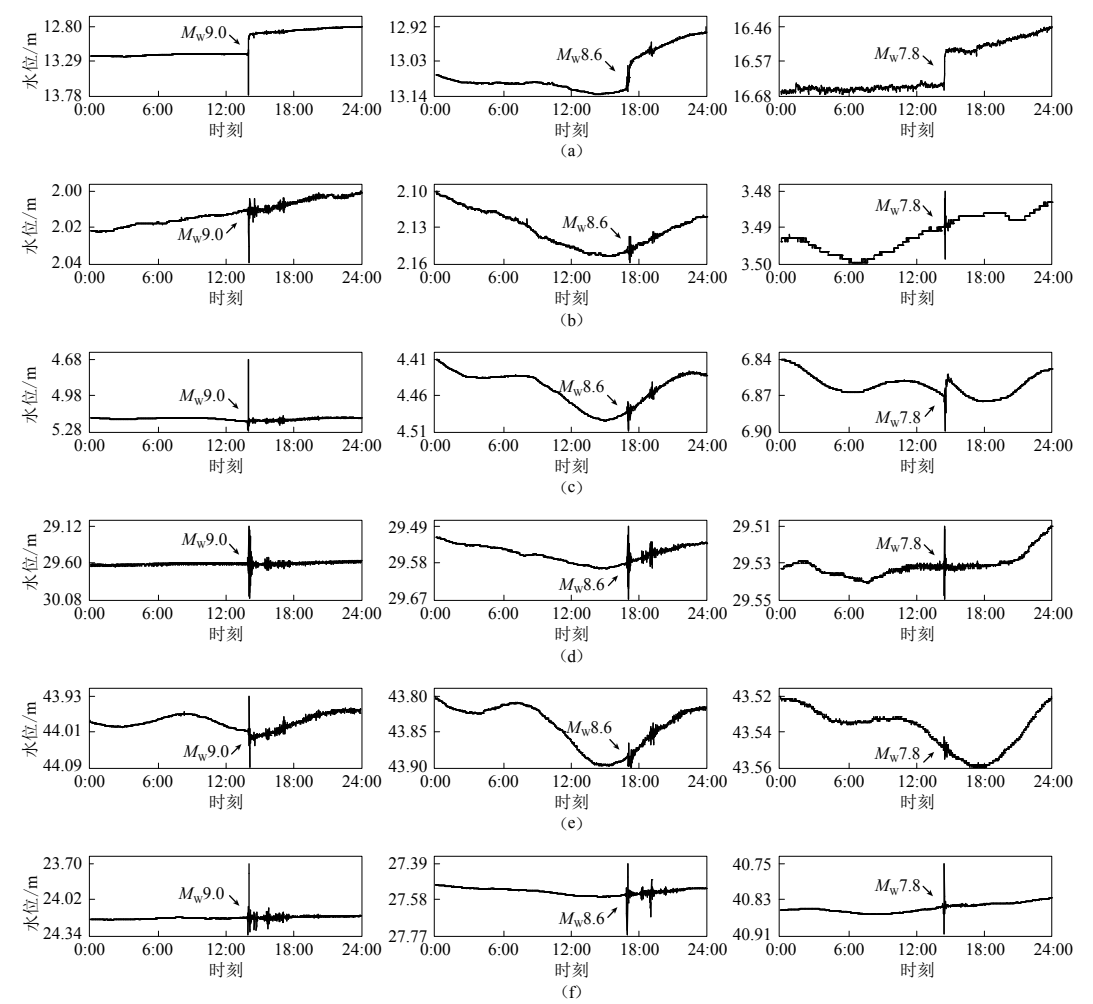


图 3 6 口观测井的水位同震变化曲线图

(a) 聊古一井; (b) 昌邑鲁 02 井; (c) 栖霞鲁 07 井; (d) 商河鲁 09 井; (e) 枣庄鲁 15 井; (f) 菏泽鲁 27 井

Fig. 3 Coseismic variations of water level for six observation wells

(a) Liaogu-1 well; (b) Changyilu-02 well; (c) Qixialu-07 well; (d) Shanghelu-09 well; (e) Zaozhuanglu-15 well; (f) Hezelu-27 well

表 2 水位同震变化主要参数

Table 2 Main parameters of water level coseismic variations

	日本 $M_W9.0$ 地震			苏门答腊 $M_W8.6$ 地震			尼泊尔 $M_W7.8$ 地震		
	井震距/km	形态	振幅/cm	井震距/km	形态	振幅/cm	井震距/km	形态	振幅/cm
聊古一井	2 353	阶升	26.5	4 471	阶升	9.3	3 072	阶升	12.1
昌邑鲁 02 井	2 050	振荡	3.4	4 697	振荡	1.1	3 374	振荡	1.0
栖霞鲁 07 井	1 914	振荡	51.7	4 828	振荡	2.9	3 508	阶升	1.1
商河鲁 09 井	2 220	振荡	48.7	4 612	振荡	9.3	3 200	振荡	2.4
枣庄鲁 15 井	2 275	振荡	7.7	4 415	振荡	1.8	3 176	振荡	0.6
菏泽鲁 27 井	2 445	振荡	48.1	4 337	振荡	21.3	2 990	振荡	9.6

位同震变化形态以振荡型为主，首先出现大幅上下脉冲，随后快速恢复至背景值高频振荡；聊古一井的水位同震变化形态全部为阶变上升，而且在震后较长时间内未恢复至震前正常动态变化值；栖霞鲁 07 井的水位同震变化形态两次振荡，1 次阶升。其它观测井的水位同震变化形态全部为振荡。日本 $M_W9.0$ 地震引起的水位同震变化幅度明显大于其它两次地震。例如聊古一井(图 3a)，其受日本地震影响水位阶升 26.5 cm，而受其它两次地震影响水位分别阶升 9.3 cm 和 12.1 cm，幅度明显较小。

3 同震响应特征分析

6 口观测井到震中的距离在 1 914—4 828 km 范围内，如此远距离的断层破裂所导致的静态应变很难影响水位变化。有研究表明，远场大震所引发的水位同震响应是地震波传播过程中产生的动态应力与井-含水层系统相互作用的结果(尹宝军等, 2009; 兰双双等, 2011)。地震波作用于井-含水层，导致原有的水位动态平衡被打破，含水层孔隙压力与层间的连通性和渗透性的改变均有可能引起水位变化。水位同震响应能力与井孔周边的水文地质条件密切相关(Huang et al, 2015)。

3.1 变化形态分析

昌邑鲁 02 井、商河鲁 09 井、枣庄鲁 15 井和菏泽鲁 27 井的水位同震变化形态均为振荡型，变化形态与地震波相似。当地震波经过井-含水层系统时，含水层介质发生有规律的弹性变形，导致孔隙压力出现周期性变化，从而引起与含水层相连的井水位振荡变化。而震后随着地震波能量的衰减，水位慢慢恢复至震前水平。水位振荡是含水层对地震波的弹性响应。

聊古一井水位阶变上升，最直接的原因是井孔内水流量增大，水流量增大意味着含水层渗透系数的增大。地震波产生的动态应力作用于含水层，改变了含水层的水文地质条件，从而引起含水层渗透系数等发生变化(Huang et al, 2004)，导致水位上升或下降。水位阶变是地震波与含水层交互作用的结果。

本文利用聊古一井井水位的固体潮效应定量分析地震前后含水层水文地质参数的变化。去除长期趋势和气压效应后，对水位数据进行维尼迪科夫调和分析，计算固体潮参数，推断井孔含水层的渗透能力在地震前后的变化。本文利用 M_2 波进行分析，计算结果列于表 3。

2011 年日本 $M_W9.0$ 地震发生后，聊古一井井水位的 M_2 波潮汐因子增大 6.95%，相位差几乎无变化；2012 年苏门答腊 $M_W8.6$ 地震后，潮汐因子变化较小，相位差减少 13.15%；2015 年尼泊尔 $M_W7.8$ 地震后，潮汐因子小幅增大 2.16%，相位差明显减少 22.47%。

水位潮汐因子与含水层储水率互为倒数关系(王金维, 2013)。潮汐因子越大，储水率越

表 3 聊古一井井水位 M₂ 波潮汐参数

Table 3 Tidal parameters of M₂ wave for the water level of Liaogu-1 well

	日本 M _W 9.0 地震		苏门答腊 M _W 8.6 地震		尼泊尔 M _W 7.8 地震	
	震前	震后	震前	震后	震前	震后
潮汐因子	2.05	2.19	2.15	2.14	2.01	2.05
相位差/°	-5.20	-5.20	-6.83	-5.93	-9.67	-7.49

注: 相位差为“-”代表相位滞后.

小. 日本 $M_W9.0$ 地震后, 聊古一井井水位潮汐因子上升, 说明含水层储水率下降, 水量得到释放, 进而使得井孔水位上升. 相位滞后主要取决于含水层厚度、井管半径及渗透系数(丁风和等, 2015). 渗透系数越小, 相位滞后越大. 苏门答腊 $M_W8.6$ 地震与尼泊尔 $M_W7.8$ 地震后, 聊古一井井水位相位滞后均大幅减小, 说明受地震影响, 含水层渗透系数变大, 导水能力增强. 以上论述说明聊古一井的水位阶变与含水层水文地质条件变化密切相关.

同一断裂带上不同井点的井水位同震变化形态不同. 菏泽鲁 27 井与聊古一井均位于聊考断裂带东南盘(下盘), 两者相距约 135 km, 其含水层岩性和井深等基本条件相近, 采用的观测仪器也相同, 但二者的水位同震响应形态却大相径庭. 推测产生该现象的原因很可能是由聊考断裂带南北段地质构造条件不同所致.

按照断裂带地球物理异常、新构造运动特点及地震分布等方面的差异, 可以将聊考断裂带划分为北、中、南 3 段, 聊城莘县以北为北段, 范县一带为中段, 鄄城以南区域为南段. 向宏发等(2000)曾利用宽频数字浅层地震仪探测了聊考断裂带距地表 400 m 以内的第四纪地层中断层埋深及断距, 具体数据列于表 4.

表 4 聊城—兰考断裂带各段上下盘地层厚度分布与断层特征表

Table 4 The strata thickness and fault characters of the Liaocheng-Lankao fault

层底	北段			中段			南段		
	上盘厚度/m	下盘厚度/m	落差/m	上盘厚度/m	下盘厚度/m	落差/m	上盘厚度/m	下盘厚度/m	落差/m
下第三系	14×10^3	0	14×10^3	4.5×10^3	0	4.5×10^3	7×10^3	0	7×10^3
上第三系	1 800	800	1 000	2 000	800	1 200	2 600	1 400	1 200
第四系	300	200	≤100	300	200	100	≥400	250	≥150
上更新统	60	50	10	80	65	15	80	60	20

注: 数据来源于向宏发等(2000).

聊考断裂带各段地震活动水平不一, 南段最强, 中段次之, 北段最弱. 南段曾发生 1937 年 $M_S7.0$ 地震和 1983 年 $M_S5.9$ 地震, 中段发生过 1654 年 $M_S5.5$ 地震, 北段至今无中强以上地震发生. 2000 年至 2017 年 9 月 30 日, 聊考断裂带附近共发生 $M_L\geq4.0$ 地震 7 次, 最大震级为 $M_L4.7$, 震中均位于范县—鄄城一带(图 4).

鲁 27 井附近中小地震活跃, 周边断层发育, 地质条件复杂; 聊古一井所处区域鲜有地震发生, 断层活动不明显. 虽然同处聊考断裂带, 但是不同的地质构造条件及地震活动背景不同导致鲁 27 井与聊古一井井水位对同一地震的响应形态不一样.

从以上论述可以得出, 水位同震变化的形态主要受控于区域地质构造环境和水文地质条件. 变化形态是振荡还是阶变, 取决于含水层对地震波的响应方式. 地震波只是起到触发作用, 水文地质条件是否改变才是决定因素. 这也决定了同一口井对不同地震的水位响应形态基本一致, 不受震源机制及震中方位的影响.

栖霞鲁 07 井井水位对 3 次地震的响应形态不一致, 日本地震与苏门答腊地震引起井水位振荡, 而尼泊尔地震引起井水位阶变(图 5)。按上文所述, 水位同震变化形态是地震波与含水层交互作用的结果。变化形态不同, 表明含水层对地震波的反馈方式出现了变化。对含水层能够产生影响的因素中, 区域应力场的变化是主要因素。

检索 2011 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日栖霞鲁 07 井 200 km 范围内 $M_L \geq 5.0$ 地震, 共检索到两次, 分别为 2013 年 11 月 23 日烟台莱州 $M_L 5.0$ 地震(井震距 80 km)和 2015 年 5 月 22 日威海文登 $M_L 5.0$ 地震(井震距 100 km)。

从发震时间来看(图 6), 日本地震和苏门答腊地震与莱州地震发震时间相距较远。当两次远场大震发生时, 鲁 07 井所处区域的构造应力尚处于积累阶段, 远未达到发震前的临界状态; 而尼泊尔地震发生不到 1 个月则发生了文登地震, 说明含水层对尼泊尔地震的同震响应受本地构造环境孕震状态影响的可能性较大。

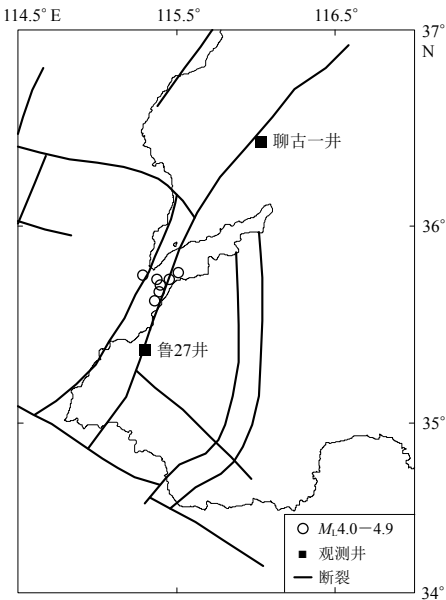


图 4 2000 年至 2017 年 9 月 30 日聊考断裂带附近 $M_L \geq 4.0$ 地震分布图

Fig. 4 Distribution of $M_L \geq 4.0$ earthquakes near Liaocheng-Lankao fault from 2000 to September 30, 2017

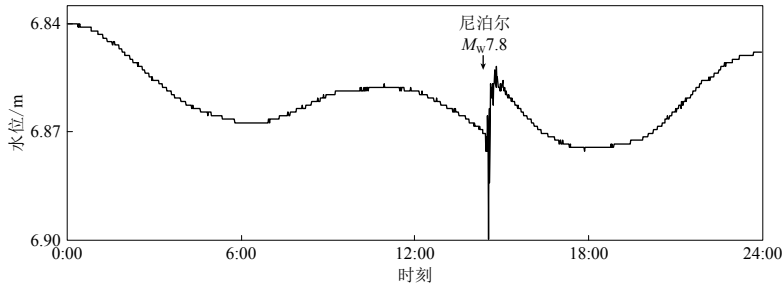


图 5 栖霞鲁 07 井井水位同震变化曲线图

Fig. 5 Coseismic variation of water level for Lu-07 well in Qixia city

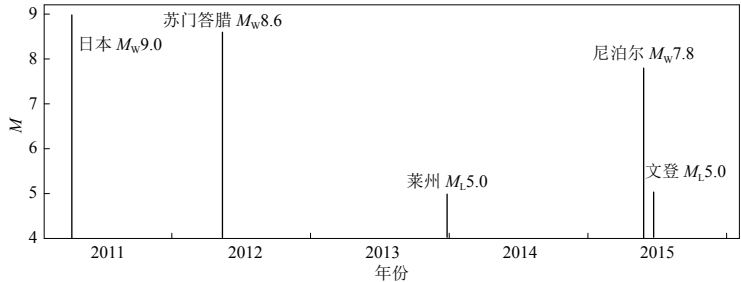


图 6 目标地震 $M-t$ 图

Fig. 6 $M-t$ diagram of target earthquakes

井孔周边处于孕震状态,含水层受压应力作用产生闭锁,孔隙减小,渗透能力下降.当远场大震地震波经过时,断层解锁,渗透系数瞬间变大,水流量增多,导致井孔内水位上升;震后,含水层水文地质条件恢复,观测井水位变化便恢复正常动态.这一解释符合Elkhoury等(2006)提出的大地震引起浅层地壳渗透率增加模型,地震波能使含水层的渗透系数瞬时增加,从而引起井水位上升.同时,水位同震变化形态的异常可以作为一种地震前兆异常,用于地震预测研究,这对未来的显著地震具有短期或中短期的时间指示意义(黄辅琼等,2000).

3.2 变化幅度分析

水位的同震响应源于远场大震地震波产生的动态应力,地震波能量的大小直接影响水位的响应幅度.震级、井震距与水位变化幅度之间存在一定关系.一般来说,水位变化幅度随震级的增大而增大,但随井震距的增大而减小.一些研究人员从统计的角度给出了水位变化幅度与震级、井震距的关系(尹宝军等,2009;杨竹转,2011):

$$\lg \Delta h_i = b_1 M_W + b_2 \lg D + a, \tag{1}$$

式中: Δh_i 为水位变化幅度,单位为 cm; M_W 为矩震级; D 为井震距,单位为 km; a, b_1, b_2 为常数.

本文利用表2的参数进行类似的推算.由于栖霞鲁07井井水位出现一次异常变化,为提高数据的准确性,本文仅对其它5口同震变化形态不变的观测井进行计算,得到关系式为:

① 聊古一井

$$\lg \Delta h_i = 0.1465 M_W - 1.4206 \lg D + 4.8944; \tag{2}$$

② 昌邑鲁02井

$$\lg \Delta h_i = 0.247 M_W - 1.087 \lg D + 1.908; \tag{3}$$

③ 商河鲁09井

$$\lg \Delta h_i = 0.948 M_W - 1.07 \lg D - 3.26; \tag{4}$$

④ 枣庄鲁15井

$$\lg \Delta h_i = 0.7918 M_W - 1.0925 \lg D - 2.5718; \tag{5}$$

⑤ 菏泽鲁27井

$$\lg \Delta h_i = 0.543 M_W - 0.548 \lg D - 1.35. \tag{6}$$

上述关系式表明水位同震变化幅度与震级成正比,与井震距的对数成反比.进一步推导关系式,可以得出水位同震变化幅度所对应的远场大震震级和井震距的下限.例如当震级与井震距满足 $M \geq 1.1293 \lg D + 3.4407$ 时,商河鲁09井井水位会产生1 cm以上的振幅.

为进一步验证关系式的准确性,选用2013年4月20日芦山 $M_W 6.7$ 地震引起的水位同震变化参数进行检验,结果列于表5.

表5 响应形态固定的观测井井水位同震变化幅度
Table 5 Coseismic variation amplitude of water level for observation wells with constant response type

井点名称	井震距/km	实际变幅/cm	预测变幅/cm
聊古一井	1 389	2.2	25.79
昌邑鲁02井	1 682	0.4	1.14
商河鲁09井	1 533	0.4	0.48
枣庄鲁15井	1 443	0.3	0.19
菏泽鲁27井	1 280	1.2	3.86

商河鲁09井和枣庄鲁15井的井水位预测变幅与实际变幅最接近,而聊古一井的差别最大.对于这种情况,我们认为水位同震变化幅度虽与震级和井震距密切相关,但主要还是受场地水文地质条件的影响.同震变化形态不同,说明含水层对地震波动态应力的反馈模式不同.水位变化幅度大小取决于含水层水文地质参数的变

化量. 商河鲁 09 井与枣庄鲁 15 井的振荡型水位是对地震波的弹性响应, 含水层水文地质条件变化小, 水位振荡幅度与地震波能量相关性好, 随震级的增大而增大, 随井震距的增大而减小; 聊古一井的阶变型水位表明含水层水文地质条件发生了明显变化, 水位变幅与地震波能量之间并非简单的统计关系. 由于水文地质条件受动态应力影响的过程十分复杂, 使得水位预测变幅与实际变幅差别较大. 昌邑鲁 02 井与菏泽鲁 27 井的水位变幅检验介于上述两种情况之间, 很可能表明场地含水层水文地质条件发生了变化, 但是变化程度较小, 只影响到水位的变化幅度, 但未达到改变同震响应形态的程度.

4 讨论与结论

通过对比分析山东省 6 口水位观测井在日本 $M_W 9.0$ 地震、苏门答腊 $M_W 8.6$ 地震和尼泊尔 $M_W 7.8$ 地震这三次远场大震中引发的同震响应差异, 初步得到以下几点认识:

1) 受场地水文地质条件的影响, 大部分观测井对不同地震的水位同震变化形态一致, 不受地震方位与震源机制的影响. 水位振荡是含水层对地震波的弹性响应; 水位阶变表明含水层水文地质条件发生变化.

2) 不同的地质构造条件及地震活动背景导致同一断裂带上的观测井的水位同震变化形态不同.

3) 本地构造应力状态的变化会对观测井的水位同震变化形态产生影响, 对地震预测具有一定的指示意义.

4) 水位同震变化幅度与震级、井震距存在一定关系, 随震级的增大而增大, 随井震距的增大而减小; 同时也受含水层水文地质条件变化量的影响.

上述认识是笔者对目标对象初步分析后得出的. 水位同震响应是一个复杂的现象, 今后的研究中, 我们将积累更多的资料与震例, 进一步检验上述认识, 并开展更深层次的研究.

本文的研究工作在山东省地震局的资助下完成, 在本文的撰写过程中审稿专家提出了宝贵的意见, 作者在此一并表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 丁风和, 戴勇, 宋慧英, 魏建民, 查斯. 2015. 大甸子井-含水层系统水文地质参数间的变化关系[J]. *地震地质*, **37**(4): 982-990.
- Ding F H, Dai Y, Song H Y, Wei J M, Cha S. 2015. The changing relationship of hydrogeological parameters of Dadianzi well-aquifer system[J]. *Seismology and Geology*, **37**(4): 982-990 (in Chinese).
- 冯恩国, 连凯旋, 陈其锋, 温丽媛, 李月强, 赵杰锋, 刘保华. 2016. 聊古一井水位同震效应研究[J]. *高原地震*, **28**(1): 19-24.
- Feng E G, Lian K X, Chen Q F, Wen L Y, Li Y Q, Zhao J F, Liu B H. 2016. Study on the coseismic effect of the Liaogu-1 well[J]. *Plateau Earthquake Research*, **28**(1): 19-24 (in Chinese).
- 耿杰, 陈安方, 潘双进. 2008. 山东地下水动态观测井对 2007 年印尼 8.5 级地震的响应特征[J]. *西北地震学报*, **30**(2): 173-178.
- Geng J, Chen A F, Pan S J. 2008. Responding characteristics of dynamic underground water in observation wells of Shandong Province to Indonesia $M 8.5$ earthquake in 2007[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **30**(2): 173-178 (in Chinese).
- 黄辅琼, 迟恭财, 徐桂明, 简春林, 邓志辉. 2000. 大陆地下流体对台湾南投 7.6 级地震的响应研究[J]. *地震*, **20**(增刊 1): 119-125.
- Huang F Q, Chi G C, Xu G M, Jian C L, Deng Z H. 2000. Research on the response anomalies of subsurface fluid in mainland

- monitoring network to the Nantou earthquake with $M_s 7.6$ [J]. *Earthquake*, **20**(S1): 119–125 (in Chinese).
- 兰双双, 迟宝明, 姜纪沂. 2011. 地下水位对近震和远震异常响应的比较—以汶川地震和苏门答腊地震为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, **41**(1): 145–152.
- Lan S S, Chi B M, Jiang J Y. 2011. Comparison of groundwater-level response to near earthquake and distant earthquake: Taking Wenchuan earthquake and Sumatra earthquake for example[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, **41**(1): 145–152 (in Chinese).
- 李俊超, 康波, 陈星星, 王秋良. 2016. 丹江口井网流体动态与尼泊尔 $M 8.1$ 地震同震响应分析[J]. 大地测量与地球动力学, **36**(11): 1025–1030.
- Li J C, Kang B, Chen X X, Wang Q L. 2016. Fluid dynamic and seismic response analysis of Nepal $M 8.1$ earthquake with the Danjiangkou well network[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **36**(11): 1025–1030 (in Chinese).
- 刘成龙, 王广才, 张卫华, 梅建昌. 2009. 三峡井网井水位对汶川 8.0 级地震的同震响应特征研究[J]. 地震学报, **31**(2): 188–194.
- Liu C L, Wang G C, Zhang W H, Mei J C. 2009. Coseismic response of well water level in Three Gorges well-network to $M_s 8.0$ earthquake in Wenchuan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(2): 188–194 (in Chinese).
- 王金维. 2013. 由井水位的固体潮效应反演含水层参数[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 34–39.
- Wang J W. 2013. *Obtaining Aquifer Parameter by Earth Tidal Effect*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 34–39 (in Chinese).
- 王学聚, 殷海涛, 王鹏. 2013. 山东地下流体数字化井网对汶川 8.0 级地震的响应分析[J]. 地震地磁观测与研究, **34**(1/2): 225–231.
- Wang X J, Yin H T, Wang P. 2013. Analysis on the responses of Shandong ground fluid digitalized well network to Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **34**(1/2): 225–231 (in Chinese).
- 向宏发, 王学潮, 魏顺民, 郝书俭, 张辉, 王基华, 李今朝, 李如成, 李洪武. 2000. 聊城—兰考隐伏断裂第四纪活动性的综合探测研究[J]. 地震地质, **22**(4): 351–359.
- Xiang H F, Wang X C, Guo S M, Hao S J, Zhang H, Wang J H, Li J Z, Li R C, Li H W. 2000. Integrated survey and investigation on the quaternary activity of the Liaocheng-Lankao buried fault[J]. *Seismology and Geology*, **22**(4): 351–359 (in Chinese).
- 晏锐, 黄辅琼. 2009. 黄骅井水位对苏门答腊 5 次地震的同震响应初步研究[J]. 中国地震, **25**(3): 325–332.
- Yan R, Huang F Q. 2009. Preliminary study on coseismic response of Huanghua well water level to 5 times of the Sumatra earthquakes[J]. *Earthquake Research in China*, **25**(3): 325–332 (in Chinese).
- 杨竹转, 邓志辉, 高小其, 黄辅琼. 2010. 新疆乌鲁木齐 04 号井数字化水位同震阶变的研究[J]. 中国地震, **26**(3): 329–339.
- Yang Z Z, Deng Z H, Gao X Q, Huang F Q. 2010. Study on coseismic drop steps of water level based on the digital observation from Xin-04 well, Urumqi, Xinjiang[J]. *Earthquake Research in China*, **26**(3): 329–339 (in Chinese).
- 杨竹转. 2011. 地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 40–45.
- Yang Z Z. 2011. *Coseismic Variations of Well Water Level and Temperature Caused by Earthquake Waves and Their Generating Mechanisms*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 40–45 (in Chinese).
- 杨竹转, 邓志辉, 杨贤和, 陶京玲. 2014. 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震和 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震井水位同震变化的比较分析[J]. 地震地质, **36**(2): 380–391.
- Yang Z Z, Deng Z H, Yang X H, Tao J L. 2014. Comparison and analysis of well water-level variations caused by Lushan $M_s 7.0$ earthquake in 2013 and Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake in 2008[J]. *Seismology and Geology*, **36**(2): 380–391 (in Chinese).
- 尹宝军, 马丽, 陈会忠, 黄建平, 张晃军, 王武星. 2009. 汶川 8.0 级地震及其强余震引起的唐山井水位同震响应特征分析[J]. 地震学报, **31**(2): 195–204.
- Yin B J, Ma L, Chen H Z, Huang J P, Zhang C J, Wang W X. 2009. Characteristics of coseismic water level change in Tangshan well induced by $M_s 8.0$ wenchuan earthquake and its large aftershocks[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(2): 195–204 (in Chinese).
- 尹宏伟, 梁丽环, 韩文英, 李凤, 刘静. 2016. 河北省数字水位对尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震的同震响应特征研究[J]. 地震工程学报, **38**(增刊 1): 73–80.

- Yin H W, Liang L H, Han W Y, Li F, Liu J. 2016. Co-seismic response characteristics of digital water levels in Hebei Province during the 2015 Nepal $M_s8.1$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **38**(S1): 73–80 (in Chinese).
- 鱼金子, 车用太, 刘成龙, 李万明. 2012. 金沙江水网对日本 9.0 级地震的同震响应及其特征与机理[J]. *地震*, **32**(1): 59–69.
- Yu J Z, Che Y T, Liu C L, Li W M. 2012. Coseismic responses of water level and temperature in wells of the Jinshajiang ground-water observation network to the Japan $M_s9.0$ earthquake: Characteristics and mechanism[J]. *Earthquake*, **32**(1): 59–69 (in Chinese).
- Blanchard F B, Byerly P. 1935. A study of a well gauge as a seismograph[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **25**(4): 313–321.
- Cooper Jr H H, Bredehoeft J D, Papadopoulos I S, Bennett R R. 1965. The response of well-aquifer systems to seismic waves[J]. *J Geophys Res*, **70**(16): 3915–3926.
- Elkhoury J E, Brodsky E E, Agnew D C. 2006. Seismic wave increase permeability[J]. *Nature*, **441**(9/9): 1135–1138.
- Huang F Q, Jian C L, Tang Y, Xu G M, Deng Z H, Chi G C. 2004. Response changes of some wells in the mainland subsurface fluid monitoring network of China, due to the September 21, 1999, $M_s7.6$ Chi-Chi earthquake[J]. *Tectonophysics*, **390**(1/4): 217–234.
- Huang F Q, Chen Y, Ji P, Ren K X, Gao F W, Zhang L K. 2015. Co-seismic changes of well water level and volume strain meter in capital area and its vicinity, due to the Nov. 14, 2001 $M_s8.1$ Kunlun mountain earthquake, China[J]. *Geodesy and Geodynamics*, **6**(6): 460–466.