

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.吉林大学学报(地球科学版),2016,46(6):1815-1822. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201606205.

Song Yang, Gu Hongbiao, Li Haijun, et al. Comparison Analysis of Co-Seismic Response Characteristics of Groundwater Level at Two Sides of Fault: A Case Study of Dahuichang Observation Well in the Middle of Babaoshan Fault in Beijing. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2016, 46 (6): 1815 - 1822. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201606205.

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

宋 洋^{1,2}, 谷洪彪¹, 李海君^{1,2}, 迟宝明^{1,2}

1. 防灾科技学院地震科学系, 河北 三河 065201
2. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

摘要:地震常引起分布于断层两盘观测井的水位同震响应动态变化特征不同。而研究断裂两盘观测井同震响应能力、水位变化特征的差异性及其控制因素,有助于揭示断裂带的渗透性演化过程、可深化地下水对地震响应机理的认识,对于指导地震观测井网布局具有重要意义。本文尝试从北京八宝山断裂带中段(大灰厂)上下两盘井的水位同震响应次数、形态、幅度、记震能力等方面进行对比分析,通过去除趋势项,采用数字滤波求取井孔气压系数,采用 Baytap - G 程序求取潮汐参数,并反演出 7 次大地震对大灰厂两口井所在含水层产生的体应变量,进而判别两盘震前震后渗透性的变化。结果显示,两口井同震响应特征具有明显差异,上盘井对大震的同震响应次数较多、能力较强;这不仅与断裂带起屏蔽作用有关,而且与井所处含水层渗透性呈不同规律变化密切相关。

关键词:八宝山断裂;井水位;跨断层;同震响应

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201606205 中图分类号: P641.7; P315.723 文献标志码: A

Comparison Analysis of Co-Seismic Response Characteristics of Groundwater Level at Two Sides of Fault: A Case Study of Dahuichang Observation Wells in the Middle of Babaoshan Fault in Beijing

Song Yang^{1,2}, Gu Hongbiao¹, Li Haijun^{1,2}, Chi Baoming^{1,2}

1. Department of Earthquake Science, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China
2. Institute of Engineering Mechanics of China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract: Earthquake often causes different co-seismic response of groundwater level in observation wells at two sides of the fault. The research on the difference of co-seismic response ability, groundwater

收稿日期: 2016 - 03 - 02
作者简介: 宋洋(1982 —), 女, 博士研究生, 主要从事地下水位同震响应研究, E-mail: songy0433@126.com
通信作者: 谷洪彪(1984 —), 男, 副教授, 博士, 主要从事地震地下水流体研究, E-mail: Hongbiaosw@126.com
基金项目: 国家自然科学基金项目(41302198); 河北省教育厅高等学校科学研究计划项目(QN20132004); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH16059)

Supported by National Natural Science Foundation of China(41302198), Science Research Project of Hebei Provincial Department of Education(QN20132004) and Earthquake and Technology Spark Program of China Earthquake Administration(XH16059)

level variation at different sides of the fault and its governing factors is helpful to reveal evolution process of fault zone permeability, to deepen understanding the response mechanism of groundwater level to earthquake, and to guide the layout of earthquake observation networks. This paper has made a try to analyze the times, form, amplitude and shock ability of co-seismic response of groundwater level to earthquake in the observation wells in upper and lower side of the middle section of Babaoshan fault zone in Beijing. The borehole pressure coefficient has been calculated with digital filter by trend removing and the tidal parameters have been calculated using Baytap-G program. The volumetric strain of the two aquifers where the observation well is located has also been inverted for the last 7 earthquakes and the permeability variation before and after the earthquake can thereby be discriminated. The results show that the co-seismic response of groundwater level to earthquake in these two observation wells is different and the co-seismic response times of groundwater level in upper side of the fault zone in Beijing has more times and stronger ability than that in lower side, which is in relation to fault belt shielding effect and the different variation of aquifer permeability where the observation well is located.

Key words: Babaoshan fault; well water level; cross-fault; co-seismic response

0 引言

大地震释放的巨大能量会瞬间改变地壳介质的受力状态,从而引起含水层中的地下水流动,使水位发生变化^[1-2]。同震水位变化往往受井震距、震级、井深、井径、构造环境、所处活动地块边界距离、含水层岩性、水文地质条件、地震波频率、加速度幅值、持时等诸多因素的影响。现有研究多以井-含水层系统弹性响应等理论为基础,采用统计学、潮汐分析等方法从一震多井、一井多震、多震多井等角度对同震水位变幅、空间分布、同震水位响应类型、同震水位变幅与井震距及震级的关系等方面进行研究,认为水文地质条件与构造环境是同震水位响应的重要因素^[3-11]。断裂带往往是地震频发的地带,因此相关学者对其两侧分布的观测井水位同震响应特征进行了重点研究。黄辅琼^[12]通过对地下水井网及钻孔体应变观测台网的变化进行了归一化分析与对比,发现同震地下水位的变化幅度随震中距的增加并非单纯地减小,而是沿着构造带附近或构造带的特殊地区变化幅度大,位于相对稳定地区的台站变化幅度则比较小。史浙明^[11]对华蓥山断裂带上不同部位的三口井地震前后水位演化与含水层参数动态变化之间的变化规律开展了初步研究。然而,前人对于同一断裂带两盘井水位同震响应特征变化的对比研究较少。鉴于地质构造(断裂带)在地震监测中的重要意义,加强同一断裂带上下两盘不同井孔-含水层系统同震水位响应研究有助于阐明构造应力与地下水之间的相互作用关系。本文选取八宝

山断裂带活动性最强的部位——断裂带中段上、下两盘大灰厂地区的两口观测井,对比分析其对不同地震响应形态、幅度、记震能力等的差异性,并采用统计学、数字滤波、Baytap-G 程序等方法,通过求取井孔气压系数、固体潮等参数判定断层两盘含水层对应力变化响应灵敏度不同的原因,尝试揭示两井响应特征不同的控制因素,以期对指导观测井网布局提供参考。

1 研究背景

1.1 观测井位地质概况

八宝山断裂带为一压性逆冲断裂带,倾向 SE135°,全长 100 余 km,宽度 20~30 m,切割深度约 1.5 km^[13]。上盘为结构完整的震旦系灰岩,下盘为石炭系砂页岩,断裂破碎带表层风化严重,以断层角砾岩千枚岩为主^[14]。1 号井位于该断层下盘破碎带上,井口距断层面的水平距离约 20 m,井深 99.0 m,观测层为砂页岩孔隙裂隙混合含水层。2 号井处于断裂的上盘,两井间距约 200 m,井深 67.6 m,观测层为雾迷山组灰岩(图 1)。

1.2 井水位年动态特征

两观测井于 1969 年投入观测使用,本次选取的数据起止时间为 2007.12.05—2012.11.11,观测精度和观测方式为分钟值静水位观测。两口井水位日均值年动态总体变化趋势基本一致,2 号井变幅略大于 1 号井(图 2)。大灰厂井水位多年动态与年降雨量关系密切^[15],1994—2003 年数据显示,1 号井水位变化依赖于每年降雨总量变化:年降雨总量低于

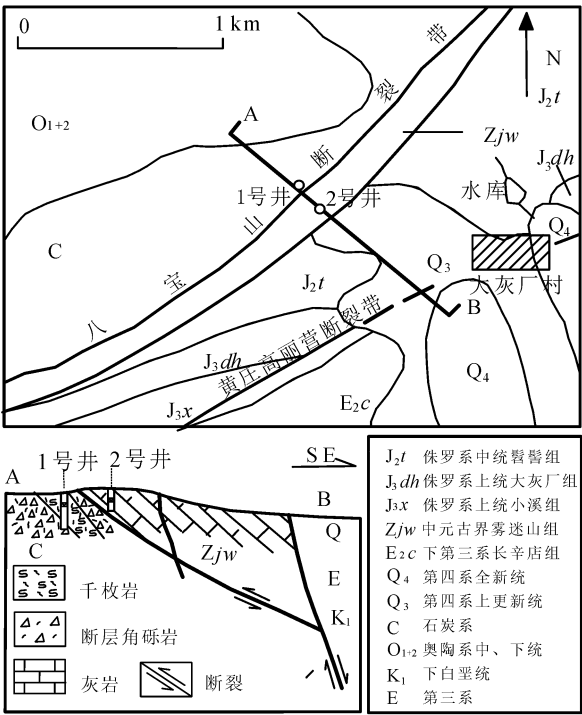


图 1 大灰厂水位观测井构造背景示意图

Fig. 1 Tectonic background of groundwater level observation wells in Dahuichang

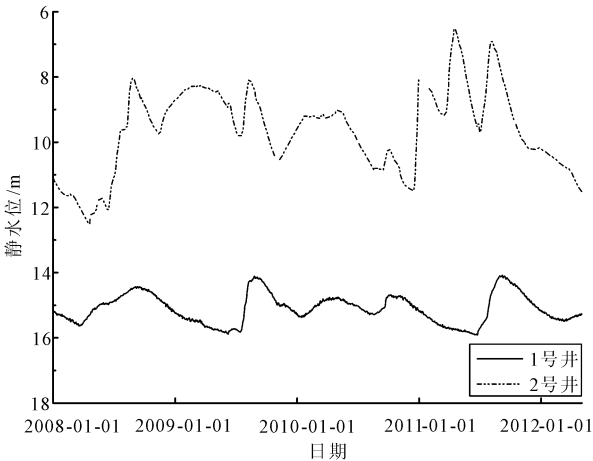


图 2 地下水位日值年动态曲线对比图

Fig.2 Correlation curve of years dynamic of groundwater levels' daily value data

370 mm 时,水位明显的上升变化总是伴随着大降雨量的出现;降雨量为 370~430 mm 时,雨季后水位有所上升,但每年总体变化量多呈下降趋势^[16],且其月均值与降水量年变化规律时间同步^[17]。因地处山前地下水径流的上游,大灰厂井受区域超采干扰较小,除低频次之外无其他低频干扰,地震引起

的水位动态变化较易识别。

1.3 地震基本信息选取

为提高研究准确性,本次研究筛选出几乎覆盖了可能引起地下水位同震响应的所有地震,如表 1 所示。具体选取标准为:我国东部大陆(东经 105° 以东地区) M_s (面波震级)4.0 级以上、其他地区 M_s 5.0 级以上、边境地区 M_s 6.0 级以上和全球 M_s 7.0 级以上的地震,共计 449 次。

表 1 2007 年 12 月—2012 年 11 月地震次数统计表
Table 1 Statistics of earthquake frequency from December 2007 to November 2012

M_s	3.5~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	7.0~7.9	≥ 8.0
次数	113	171	52	107	6

2 井水位同震响应特征

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升降。以下将从井水位同震响应的次数、分布、同震响应形态、响应幅度以及井水位记震能力等方面揭示两口井的同震响应特征。研究前提是,以发震时刻为基点,甄别井水位动态数据、识别井水位具有同震响应的地震、搜集地震相关参数、确定井水位的响应类型、计算井震距。筛选及计算结果见表 2。

2.1 同震响应地震次数及分布

在选取的 449 次地震中,1 号井呈现同震响应 3 次,2 号井为 7 次。两口观测井除对汶川 M_s 8.0 地震均有响应外,对其他地震的响应均不同,出现同震响应现象所占比例分别为 0.67% 和 1.56%。同震响应比是指统计分析期内井水位同震响应地震数与地震发生总数之比。1 号井和 2 号井对远震($M_s \geq 8.0$)的同震响应比分别为 16.67% 和 100.00%。1 号井水位有响应的地震次数少,统计发现其仅对我国大陆 2008 年汶川特大地震有响应;相比之下,2 号井水位响应则以远震($M_s \geq 8.0$)为主,且分布范围较为集中(图 3)。

2.2 同震响应形态及响应幅度

对比井水位对地震的响应幅度及响应形态,两口观测井表现迥异。从汶川、智利及日本三次地震来看,两口井的最大响应幅度及其出现时间均不同(表 2,图 4):1 号井响应最大幅度为 0.044 m;而 2 号井为 0.209 mm,出现时间在 M_s 9.0 日本地震时。

表 2 大灰厂井同震响应地震相关参数一览表

Table 2 Related parameters of the co-seismic response of Dahuichang well in worldwide earthquake

测点	发震日期	发震时刻	纬度/ (°)	经度/ (°)	水位波动幅度/m	M_s	同震响应形态类型	参考地点	井震距/km
1 号井	* 2008-05-12	14:28:04	31.0	103.4	0.033	8.0	振荡-阶升型	①四川省汶川县	1 513
	2009-03-28	19:11:18	38.9	112.9	0.044	4.2	振荡型	②山西省原平市	296
	2010-04-04	21:46:43	40.0	113.9	0.023	4.5	振荡型	③大同市阳高县、大同县交界	190
2 号井	2008-02-20	16:08:33	2.8	96.0	0.005	7.7	振荡-阶升型	④印尼苏门答腊	4 592
	* 2008-05-12	14:28:04	31.0	103.4	0.022	8.0	振荡-阶降型	⑤四川省汶川县	1 513
	2009-09-30	01:48:15	-15.5	-172.2	0.024	8.0	振荡-阶降型	⑥萨摩亚群岛地区	9 617
	2010-02-27	14:34:16	-35.8	-72.7	0.042	8.8	振荡型	⑦智利	19 120
	2011-03-11	13:46:21	38.1	142.6	0.209	9.0	振荡-阶降型	⑧日本本州东海岸附近海域	2 289
	2012-04-11	16:38:37	2.3	93.1	0.021	8.6	振荡-阶降型	⑨苏门答腊北部附近海域	4 778
	2012-04-11	18:43:12	0.8	92.4	0.021	8.2	振荡-一阶降型	⑩苏门答腊北部附近海域	4 962

注:数据来源为中国地震台网中心(CENC)地震数据管理与服务系统;* 为两口井均有响应的地震。

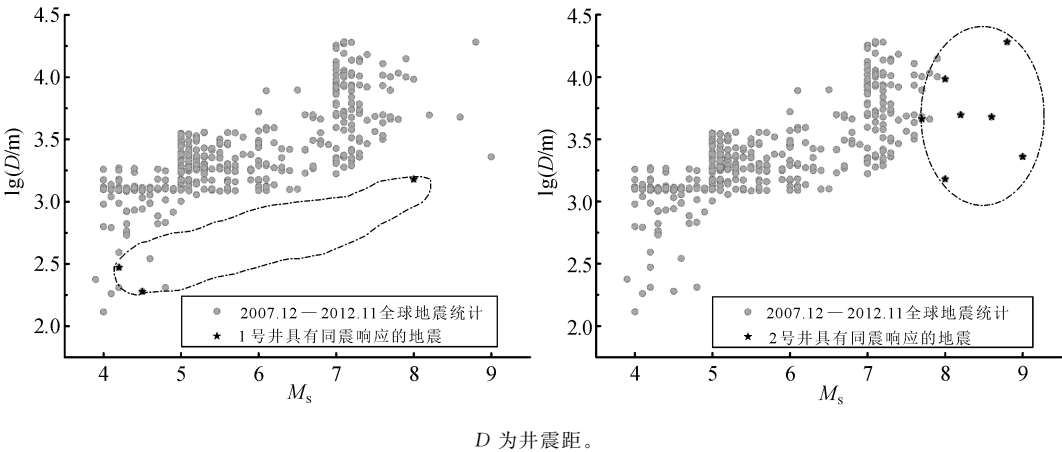


图 3 两井同震响应地震分布图

Fig.3 Distribution of earthquake leading to Dahuichang wells' co-seismic response

另外,两井水位的同震响应类型及形态各异。图 4a 中两口井水位均为振荡-阶变型;但 1 号井为水位变化速率逐渐减小的阶升型,2 号井为阶降型,且 1 号井阶变幅度大于 2 号井。图 4 b、c 中 1 号井几乎无响应;2 号井则同震响应显著,水位以水震波振荡形态为主,并出现多期振荡。

2.3 井水位记震能力方向性

井水位记震能力一般指井孔水位对远大地震面波(周期 10~20 s)的响应能力。

井水位记震能力具有明显的方向性^[19],本次研究也验证了这一点。本研究中,以八宝山断裂带为界,1 号井和 2 号井对各自所在断盘一侧地震的记震能力较强,而对另一盘的地震几乎不响应;但二者

对沿断裂带走向的汶川地震均响应良好(图 5)。因此认为,对八宝山断裂带两盘的观测井而言,断层屏蔽作用是存在的,但该作用是否在跨断层井中普遍存在,需有大量震例加以验证。

3 同震响应特征成因

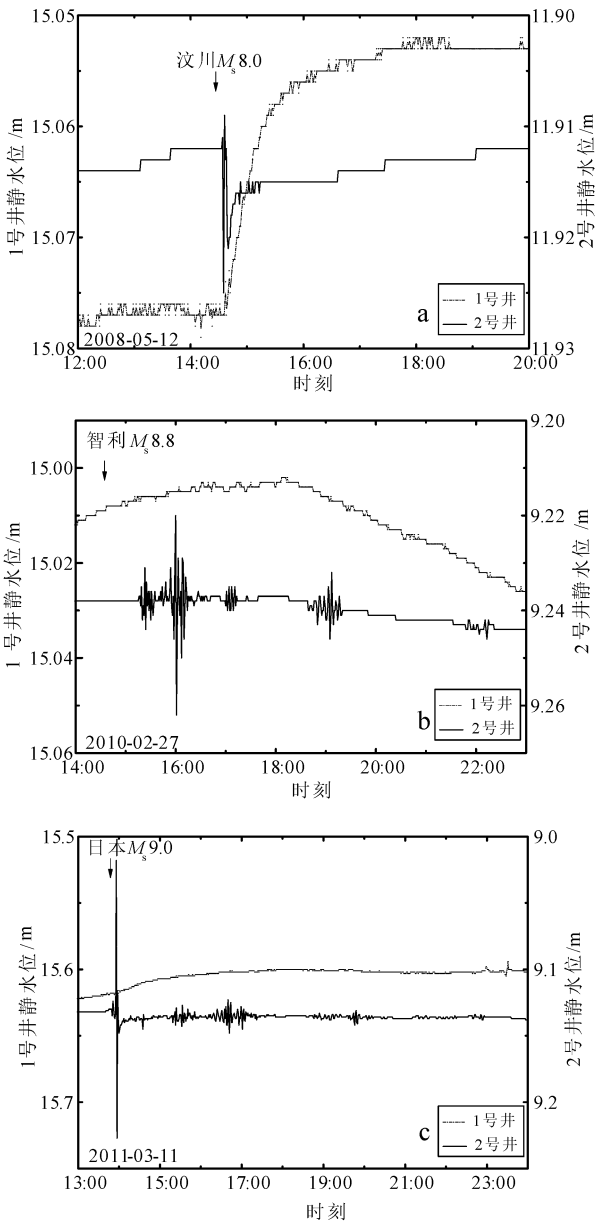
3.1 水位与井震距、震级、含水层岩性之间的关系

根据以往研究,水位的响应幅度与地震震级、震中距之间可以用如下公式^[6]拟合:

$$\lg \Delta h = w_1 M_s + w_2 \lg D + w_3 \quad (1)$$

式中: w_1, w_2, w_3 为常数; Δh 为水位变化幅度。

对于大灰厂井,采用多元线性回归法分别拟合震级、震中距和水位之间的关系式,可得水位变幅与



数据来源为国家地震前兆台网中心。

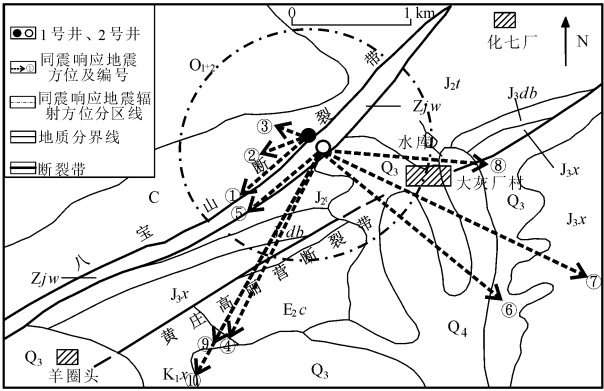
图 4 两井水位同震响应对比曲线图

Fig. 4 Correlation curve of co-seismic response of groundwater levels between well 1 and well 2

上述参数之间的关系：

$$\lg \Delta h = 0.173 M_s - 0.47 \lg D - 1.257 \quad (2)$$

式(2)的相关系数为 0.173,显示水位与震级、井震距之间没有呈现很强的相关性。另外,据史浙明^[11]对中国大陆 194 口井分岩性(砂岩含水层 105 口、灰岩含水层 42 口、火成岩含水层 47 口)统计其对汶川地震响应的结果可知,大灰厂断裂带两口井所处地带岩性不是控制水位响应幅度大小的主要因素。



①—⑩对应的同震响应地震信息见表 2;由于图幅的限制,图中箭头指示震中方位。图例同图 1。

图 5 两口井记震能力对比分析图
Fig. 5 Analysis of the recording earthquake ability of Dahuichang wells

3.2 两口井对含水层应力变化的灵敏度

断层两盘应力状态及灵敏度定量估算的理论和方法较为成熟,本文利用井水位固体潮效应和气压系数判断断层两盘应力状态变化的灵敏度,以揭示跨断层井水位同震响应特征差异的原因。假设含水层不排水,井水位变化 Δh 与含水层应力变化有如下关系^[10, 20]：

$$\Delta \sigma = -(3\lambda + 2\mu)\Delta \theta = -\frac{3\lambda + 2\mu}{B_0} \Delta h = \frac{1}{k_w} \Delta h \quad (3)$$

$$\Delta \sigma_v = \frac{\rho g \Delta h}{1 - B_p} \quad (4)$$

式中: $\Delta \sigma$ 、 $\Delta \sigma_v$ 分别为含水层体应力变化和含水层垂向应力变化,压应力为正值,张应力为负值; λ 、 μ 为拉梅系数; $\Delta \theta$ 为近地球表面的潮汐体应变变化量; k_w 为井所在含水层的应力响应系数; B_0 、 B_p 分别为井水位固体潮系数、气压系数; ρ 为密度; g 为重力加速度。对于给定的含水层系统, λ 、 μ 和 k_w 均为常数,可由井孔含水层的平均潮汐力主应力引起的井水位潮汐幅度与主应力最大幅度之比求得。

在承压井-含水层系统为不排水、忽略海潮和降雨影响的条件下,井水位实测值由潮汐成分、气压成分、趋势项以及观测噪声四部分组成。以 1 号井 2012 年 1 月数据为例,采用最佳逼近正交多项式拟合法剔除井水位观测数据趋势项,拟合阶数为 2,水位残差值即为去趋势后的剩余水位(图 6)。

本文采用数字滤波提取,通过相关分析试算确定窗口长度 $L = 50$ 。采用带通滤波,根据体应变固

体潮的周期确定带通为 12~25 h。提取井水位固体潮,与体应变固体潮理论值比较,二者走势一致,但峰值大小和极值出现时刻存在明显不同,见图 7。此时的残差水位为气压波动引起的井水位变化,由此将井水位固体潮和由气压波动引起的井水位变化分离。为了进一步定量分析气压与固体潮对井水位的影响程度,采用一阶差分法和一元回归法计算井水位固体潮系数 B_θ 和气压系数 B_p 。计算结果显示,1 号井井水位 $B_p=3.31\text{ mm}/10^{-9}>B_\theta=0.056\text{ mm}/10^{-9}$,即其常态高频变化主要受气压变化控制,固体潮效应次之(图 8,图 9)。

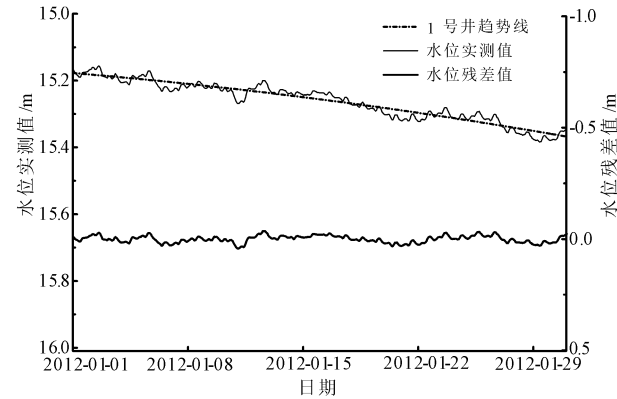


图 6 1 号井水位去趋势图

Fig.6 Water level removing trend of well 1

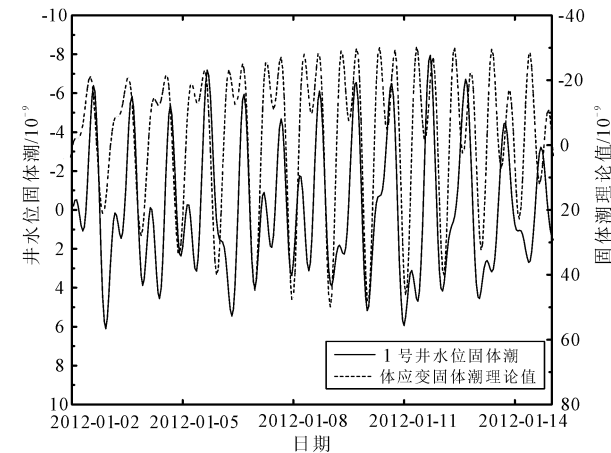


图 7 1 号井水位对固体潮的响应曲线图

Fig.7 Water level response curve for tidal well 1

按上述步骤分别计算 2011 年 12 月、2012 年 1 月以及 2012 年 2 月两口井水位固体潮系数和气压系数,大灰厂两口井气压系数 $B_{p1}>B_{p2}$,计算结果见表 3。根据公式(4)及对气压系数理论的研究^[4],井径相同且井水位变化相同时,气压系数与含水层应力变化

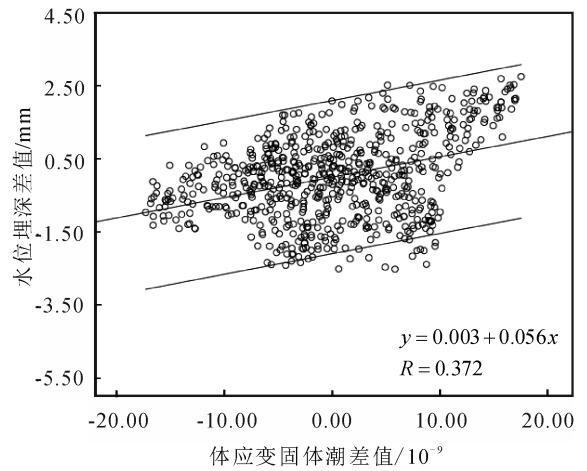


图 8 1 号井水位差值与体应变固体潮关系图

Fig.8 Relationship between level earth difference value and tidal volume strain of well 1

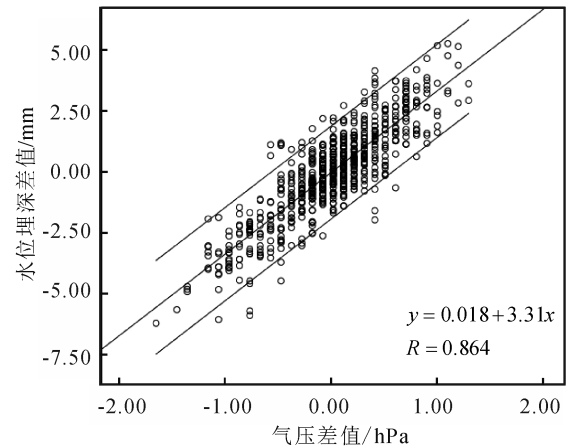


图 9 1 号井剩余井水位差值与气压关系图

Fig.9 Relationship between remaining level's difference value and barometric pressure of well 1

呈负相关;由此可判定位于断层上盘的 2 号井对其含水层应力变化的灵敏度高于位于断层下盘的 1 号井,与上述同震响应曲线特征相符。

此外,本文采用 Hsieh 等^[21]提出的利用承压井水位对潮汐引力响应反演含水层体应变、地震前后相位变化,目的是估算断裂带两盘两井所处含水层地震前后的渗透性变化。根据相位滞后与渗透系数的关系可以判断,相位增大意味着含水层渗透性的增加。本次对所选数据利用 Baytap-G 程序提取潮汐参数,得到表 4。从计算结果来看:1 号井从 2008 年至 2010 年相位先减小(滞后)后增大(超前),对应该盘相位先减小后增大,表明含水层渗透

表 3 固体潮系数与气压系数计算结果

Table 3 Stress variation and barometric efficiency of the two monitoring wells

时间段	$B_{\theta 1}$	B_{p1}	$B_{\theta 2}$	B_{p2}
2011 年 12 月	0.068	3.486	0.005	0.301
2012 年 1 月	0.056	3.310	0.004	0.290
2012 年 2 月	0.057	2.998	0.007	0.246
均值	0.060	3.265	0.005	0.279

系数先减小后增大,但震后未恢复到震前水平;相比之下,2 号井相位表现为先增大后减小再增大再减小的变化过程,对应该盘含水层渗透系数也发生了同样的变化。这也是解释同震水位变化特征不同的一个可能机理。

表 4 两口井相位变化与体应变计算结果

Table 4 Phase change and volumetric strains of the two monitoring wells

观测井	时间	震前相位/震后相位/相位变化/ 体应变/			
		($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	10^{-6}
1 号井	2008-05-12	3.522	-7.538	-11.06	3.49
	2009-03-28	-9.088	-14.27	-5.182	4.32
	2010-04-04	-4.972	5.198	10.17	2.27
2 号井	2008-02-20	26.267	36.962	10.695	2.11
	2008-05-12	21.58	34.079	12.499	8.37
	2009-09-30	73.935	52.951	-20.984	1.6
	2010-02-27	24.483	5.076	-19.407	2.27
	2011-03-11	91.173	150.237	59.064	0.50
	2012-04-11	70.391	66.828	-3.563	8.37
	2012-04-11	70.391	66.828	-3.563	8.37

4 结论

通过对北京大灰厂断裂带中段上下盘相距仅 200 m 的两井水位的地震响应形态、响应幅度等进行对比研究,得出如下结论:

- 1)北京大灰厂断层上盘观测井对大地震响应能力优于下盘观测井,但井水位记震能力具有明显的方向性和差异性,证实存在断层屏蔽作用。
- 2)含水层岩性、井震距、震级并非影响两井响应能力不同的原因,而含水层应力变化的灵敏度与两盘井-含水层系统的渗透系数变化则是主要原因。
- 3)综合考虑本文研究结果及影响监测井映震能

力及其受外界干扰程度等井位选址影响因素,对八宝山断裂带而言,地震流体监测井布于该断裂带上盘,井水位同震响应更加灵敏。本研究的某些结果对其他断裂带地震流体监测井布设在一定程度上具有借鉴意义。

参考文献(References):

[1] Wang C Y, Manga M. Earthquakes and Water, Encyclopedia of Complexity and System Science [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010:1-25.

[2] 刘志宏,孙理难,王超,等. 松辽盆地伏龙泉断陷构造特征及演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2015,45(3):663-673.

[2] Liu Zhihong, Sun Linan, Wang Chao, et al. Structural Features and Evolution of the Fulongquan Sag in Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(3): 663-673.

[3] 车用太. 关于地下流体学科“九·五”科技攻关的几点想法[J]. 地震地质, 1994,16(1): 79-82.

[3] Che Yongtai. Discussion on“9·5”Key Scientific Study of Underground Fluid Branch [J]. Seismology and Geology, 1994,16(1): 79-82.

[4] 张昭栋,郑金涵,张广城,等. 承压井水位对气压动态过程的响应[J]. 地球物理学报, 1989, 32(5): 539-549.

[4] Zhang Zhaodong, Zheng Jinhan, Zhang Guangcheng, et al. Response of Water Level of Confined Well to Dynamic Process of Barometric Pressure [J]. Acta Geophysica Sinica, 1989, 32(5): 539-549.

[5] 张昭栋,王吉易,耿杰. 唐山 7.8 级地震前后地下水位应力场的动态图象[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(2): 53-59.

[5] Zhang Zhaodong, Wang Jiyi, Geng Jie. Dynamic Patern of Stress Field of Groundwater Level Before and After the Earthquake in Tangshan (M_s 7.8) [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1999, 19(2): 53-59.

[6] Roeloffs E A. Persistent Water Level Changes in a Well Near Parfiel, California, Due to Local and Distant Earthquakes [J]. Geophysical Research, 1998, 103(B1): 869-889.

[7] 晏锐,黄辅琼,陈颢. 小波分析在井水位的气压和潮汐改正中的应用[J]. 中国地震, 2007, 23(2): 204-210.

[7] Yan Rui, Huang Fuqiong, Chen Yong. Application of Wavelet Decomposition to Remove Barometric and Tidal Response in Borehole Water Level [J].

- Earthquake Research in China, 2007, 23(2): 204 - 210.
- [8] Chia Y, Chiu J J, Chiang Y H, et al. Spatial and Temporal Changes of Groundwater Level Induced by Thrust Faulting [J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165: 5 - 16.
- [9] Chia Y, Chiu J J, Chiang Y H, et al. Implications of Coseismic Groundwater Level Changes Observed at Multiple-Well Monitoring Stations [J]. Geophysical Journal International, 2008, 172: 293 - 301.
- [10] 兰双双. 深层地下水位动态对地震活动响应关系的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
Lan Shuangshuang. Research on the Relationship of Deep Groundwater Level Dynamic Response to Seismic Activity [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [11] 史浙明. 地下水位同震响应特征及机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
Shi Zheming. Characteristic and Mechanism of Coseismic Hydrological Response Induced by Earthquakes [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [12] 黄辅琼. 中国大陆地震地下水观测井对大地震的响应[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2008.
Huang Fuqiong. Response of Wells in Groundwater Monitoring Network in Chinese Mainland to Recent Large Earthquakes [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2008.
- [13] 徐杰, 汪良谋, 方仲景, 等. 北京八宝山断裂和黄庄—高丽营断裂构造活动性的初步分析[J]. 华北地震科学, 1992, 10(3): 1 - 10.
Xu Jie, Wang Liangmou, Fang Zhongjing, et al. Analysis on Tectonic Activity of Babaoshan-Huangzhuang-Gaoliying Fault [J]. North China Earthquake Sciences, 1992, 10(3): 1 - 10.
- [14] 徐平. 北京市地震监测志[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
Xu Ping. Earthquake Monitoring Records in Beijing [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2006.
- [15] 杨明波, 车用太, 王力, 等. 大灰厂井水位上升异常及其震兆意义[J]. 地震地磁观测与研究, 2005, 26(2): 68 - 74.
Yang Mingbo, Che Yongtai, Wang Li, et al. The Earthquake Omen Significance of Raised Abnormality of Beijing Fengtai Station Dahuichang Water Level [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2005, 26(2): 68 - 74.
- [16] 黄辅琼, 陈颢, 白长清, 等. 八宝山断层的变形行为与降雨及地下水的关系[J]. 地震学报, 2005, 27(6): 637 - 646.
Huang Fuqiong, Chen Yong, Bai Changqing, et al. The Correlation of Deformation Behavior with Precipitation and Groundwater of the Babaoshan Fault in Beijing [J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(6): 637 - 646.
- [17] 刘耀伟, 陆明勇, 付虹, 等. 地下流体动态信息提取与强震预测技术研究[M]. 北京: 地震出版社, 2010.
Liu Yaowei, Lu Mingyong, Fu Hong, et al. Extraction of Underground Fluid Dynamic Information and the Study on Strong Earthquake Prediction Technology [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2010.
- [18] 杨明波, 康跃虎, 张庆, 等. 北京地下水位趋势下降动态及地震前兆信息识别[J]. 地震学报, 2009, 31(3): 282 - 289.
Yang Mingbo, Kang Yuehu, Zhang Qing, et al. Tendencious Fall of Groundwater Table in Beijing Region and Recognition of Earthquake Precursor Information [J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(3): 282 - 289.
- [19] 付虹, 刘丽芳, 王世芹, 等. 地方震及近震地下水同震震后效应研究[J]. 地震, 2002, 22(4): 55 - 66.
Fu Hong, Liu Lifang, Wang Shiqin, et al. Research on Coseismic and Post Seismic Effect of Ground Water for the Local and Near Earthquake [J]. Earthquake, 2002, 22(4): 55 - 66.
- [20] 张昭栋, 赵淑平, 董传富. 井水位阶变与含水层所受应力之间的定量关系[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增刊 1): 222 - 229.
Zhang Zhaodong, Zhao Shuping, Dong Chuanfu. Quantitative Relationship Between the Step Variation in Well Water Level and the Bulk Stress in the Aquifer [J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(Sup. 1): 222 - 229.
- [21] Hsieh P A, Bredehoeft J D, Farr J M. Determination of Aquifer Transmissivity from Earth Tide Analysis [J]. Water Resource Research, 1987, 23: 1824 - 1832.