

尹宝军, 马丽, 陈会忠, 黄建平, 张晔军, 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. 地震学报, 31(2): 195-204.

Yin Baojun, Ma Li, Chen Huizhong, Huang Jianping, Zhang Chaojun, Wang Wuxing. 2009. Characteristics of coseismic water level change in Tangshan well induced by $M_s8.0$ Wenchuan earthquake and its large aftershocks. *Acta Seismologica Sinica*, 31(2): 195-204.

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^{*}

尹宝军^{1,2,3),†} 马 丽²⁾ 陈会忠²⁾
黄建平^{2,4)} 张晔军⁵⁾ 王武星^{2,4)}

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

3) 中国河北唐山 063000 唐山市地震局

4) 中国北京 100049 中国科学院研究生院

5) 中国北京 100045 中国地震台网中心

摘要 统计了汶川 8.0 级地震及其强余震引起的唐山井水位同震变化的幅度参数(最大振幅、阶变量)和时间参数(最大振幅时刻, 同震持续时间), 以及邻近的陡河台记录的地震波的体波和面波的到时. 计算分析了同震参数与震级(M_L , M_s 和 M_w 三种震级)、井-震距、震源深度的相关方程及同震参数间的相关关系. 结果表明, 同震变化量与 M_s 震级的相关性最好, 与震源深度和井-震距相关性较弱; 同震最大幅度与同震阶变量、同震持续时间相关性很高, 水位同震振荡和阶变均来自地震波引起的动应变; 水位同震振荡的最大振幅发生在 S 波至瑞利波时段, 水位同震响应是地震波与水文地质环境等多种因素共同作用的结果.

关键词 汶川 8.0 级地震 唐山井 水位同震变化 模拟水位

文章编号: 0253-3782(2009)02-0195-10

中图分类号: P315.72⁺ 3

文献标识码: A

Characteristics of coseismic water level change in Tangshan well induced by $M_s8.0$ Wenchuan earthquake and its large aftershocks

Yin Baojun^{1,2,3),†} Ma Li²⁾ Chen Huizhong²⁾ Huang Jianping^{2,4)}
Zhang Chaojun⁵⁾ Wang Wuxing^{2,4)}

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3) Earthquake Administration of Tangshan City, Tangshan 063000, China

4) Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(40574020)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务项目(0207690236)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 09AC1010.

收稿日期 2008-09-12 收到初稿, 2009-03-13 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: yinbaoju@163.com

Abstract: Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake and its 15 large aftershocks ($M_s \geq 5.4$) induced coseismic water level change in the Tangshan well. We statistically analyzed the correlation between the coseismic variation parameters (such as maximum amplitude of oscillations, duration of variation, coseismic stepwise change and difference of variation time) and earthquake parameters (such as magnitude, epicenter distance and focal depth, and corresponding seismic phase type at the same time when the maximum variation amplitude appeared. Seismic phases were recorded by Dohe station, about 16.3 km away from the well). We drew the following conclusions: The main factor affecting water level change is earthquake magnitude, and the epicenter distance and focal depth have a little affection. M_s magnitude is the best choice for analyzing coseismic water level variation in comparison with M_w and M_L . There exists good correlation between the stepwise change amplitude and duration of water level oscillation and the maximum water level change amplitude. They are all caused by dynamic strain induced by seismic waves. The appearing time of maximum amplitude of seismic oscillation is between the arrival of S wave and Rayleigh wave. The water level response is the co-effect of the arrived seismic waves and hydro-geological environment variation.

Key words: $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake; Tangshan well; coseismic water level variation; analog water level record

引言

2008年5月12日14时28分04秒,在四川省龙门山断裂带西南段发生了汶川8.0级地震,其后至8月5日沿断裂带在200多公里长的范围内又发生15次 $M_s \geq 5.4$ 强余震.这16次来自同一发震断裂带的地震引起了唐山井水位同震变化,其同震数据为深入研究水位同震现象提供了宝贵的素材.

一些学者曾对唐山井水位和水温变化作了多方面的研究(曹新来,1988;张子广等,1998,2002;车用太,鱼金子,2004;石耀霖等,2007;马丽等,2008).张素欣等(2005,2007)对比了唐山井模拟和数字水位的记震能力,认为数字化水位因分种采样对以秒为周期的同震记录存在畸变;而模拟水位在记录振幅和振荡时间都存在优势.在水位对大地震的同震响应研究方面,一些学者研究了台湾集集地震和苏门答腊地震时多井水位对应一次地震的同震响应特征与机理(黄辅琼等,2000;刘耀炜等,2005;张国民等,2005;Kitagawa *et al*, 2006).然而一口井对一个地震序列10多次主余震的同震响应的统计研究尚未见到,唐山井因其同震响应高灵敏性为此研究提供了可能.

本文采用模拟水位的同震记录,分析来自同一震源区的汶川地震主震和15次强余震引起的唐山井的水位同震变化的时间和幅度参数,计算了地震参数对同震变化量的统计关系,并讨论了同震变化的可能机理.

1 观测概况

1.1 唐山井水位观测

唐山井(也称山西水2井、唐山矿井)位于唐山市大钊公园内,井孔口标高25.43 m.

该井于 1969 年 10 月 30 日终孔，完钻井深 285.6 m，现井深 207 m，观测层深度为 154—207 m。观测含水层岩性为奥陶系灰岩，含水层揭露厚度 50 m 左右。该井位于燕山褶皱带与华北平原沉降带的结合部，北东向唐山断裂与北西西向隐伏断裂于此交汇。唐山井现今水位埋深约 60 m。

唐山井 1981 年安装 SW40 型模拟水位仪，1993 年更换为 SW40-1 型模拟水位仪，2001 年 9 月又安装了 LN-3 型数字水位仪，两种水位仪同时运行。SW40-1 型水位仪是由浮漂响应的机械式水位，机械时钟带动记录笔的滚筒式记录，每天定时人工更换记录曲线起点或记录图纸，其观测精度 1 mm，走时日误差 2 min。由于 LN-3 型水位传感器采样率为每分钟 1 次，秒级周期的同震变化量记录不全，因此本文分析的 16 个同震变化数据取自连续记录的模拟水位图纸(图 1)。

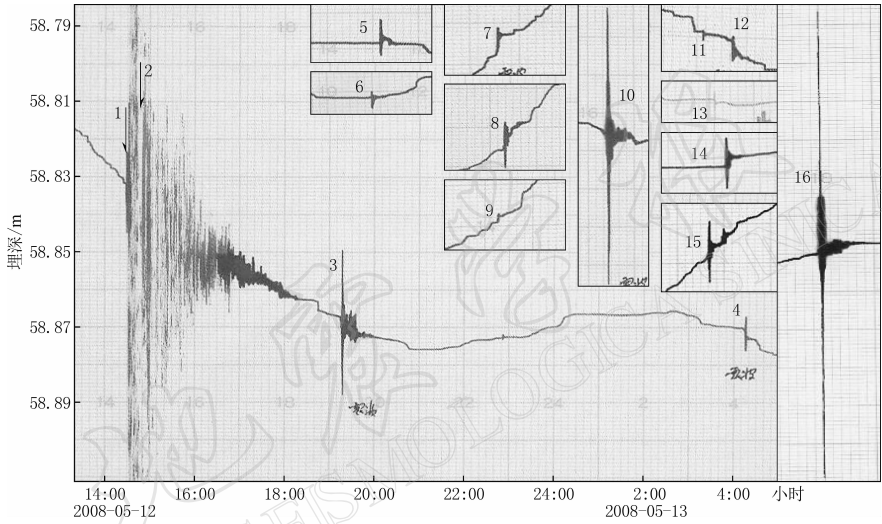


图 1 唐山井水位对汶川 8.0 级地震及 15 次 $M_s \geq 5.4$ 余震的同震模拟记录(地震参数见表 1)

Fig. 1 Analogue records of coseismic water level response to the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake and its 15 large aftershocks at Tangshan well

唐山井水位具有明显的年变动态和气压、固体潮效应，但这些变化与秒级周期的地震波相比周期相差很大，因此这些影响因素相对水位同震变化时间范围内影响很小，应用原始记录图研究同震变化时误差很小，对统计结果不会造成显著影响。

1.2 陡河台测震观测

陡河地震台位于唐山市东北陡河水库南峰山坡基岩体上，台点标高 55.42 m，直线距离唐山井约 16.3 km。该台为数字化宽频带测震台，三分向宽频带地动速度响应为 0.05—20 Hz，地震计动态范围优于 120 dB。采用港震公司 EDAS-C24 采集器，采样率为 50 Hz，采集器动态范围优于 130 dB。GPS 授时精度 ≤ 1 ms。

2 汶川地震参数及水位同震变化

2.1 汶川地震参数

汶川地震发生于龙门山断裂带西南端，龙门山断裂带从北西向南东可分为：沿汶川—

茂汶展布的后山断裂,沿映秀—北川展布的中央主断裂,沿都江堰—安县展布的前山断裂,这 3 条断裂最后在深度 20—30 km 处收敛合并成一条剪切带(王卫民等,2008).主震后从 5 月 12 日—5 月 27 日在汶川主震区发生了 11 次 $M_s \geq 5.4$ 余震,从 7 月 24 日—8 月 5 日在东北部青川一带又发生了 4 次 $M_s \geq 5.4$ 余震.这些地震以逆冲型地震为主,理县附近震源机制解以走滑型地震为主,青川以东区域既有走滑型地震,也有逆冲型地震(胡幸平等,2008).

表 1 给出了汶川 16 次 $M_s \geq 5.4$ 地震的基本参数.除了 M_w 震级和深度来自哈佛大学 CMT 目录外,其余采用 CAPNET 网上的中国地震台网中心汶川地震序列目录和陕西台网的 M_L 震级,用台网中心目录计算的井-震距.表中列出了陡河台记录的 16 次地震的体波和勒夫波、瑞利波的最大振幅的到时.

2.2 水位同震响应

汶川系列地震引起的唐山井水位同震变化的基本形态为,在地震波到达后,很快出现一个最大振幅的上下脉冲,其后水位持续上下振荡,在振荡过程伴随出现阶变(图 1).对于汶川 8.0 级特大地震,水位图纸显示,在地震后 3 分钟左右出现了 19 mm 振幅持续 2 分钟左右的上下振荡,经与 NEIC 程序计算的理论震相对比,该振荡时间与汶川 8.0 级地震的 P_n 及 P 波震相到时基本一致;其后水位振幅加大,在 10 分钟左右达到了最大振幅 2.434 m(取自数字化水位记录),水震波持续时间约为 240 分钟,伴随同震阶降约为 11 mm(水位振荡开始时值与水位振荡趋于结束时段均值之差).对于其余 15 次较强余震,若为 $M_s 6.0$ 左右余震时,同震变化表现为首先出现最大双振幅的同震脉冲,随后表现为持续一段时间的振幅较小的上下振荡(图 1 中地震 3),并伴有阶变;若为 $M_s 5.5$ 左右的余震时,同震水位开始出现一快速阶变,并维持其趋势,一直持续按原趋势水位应到的位置,其间伴有微弱振荡.查阅了 $M_s < 5.4$ 的汶川余震后唐山井的模拟水位图纸,未发现可区别于背景噪音的同震变化.

表 1 列出了汶川系列地震引起的唐山井水位同震变化最大振幅的到时,所处震相时段,以及阶变幅度和持续时间等参数(地震 2 被 8.0 级主震同震变化遮掩,无法读出数值).其中,最大同震振幅所处的震相时段分为 4 种类型($P-S$, $S-Q_m$, Q_m-R_m , $>R_m$),为便于图 3—6 中表示,依次编号为 1—4 型.

3 水位同震响应特征分析

3.1 水位同震响应与 3 种震级及井震距关系

国内外一些学者研究了地下水位同震响应的震级-井震距关系.例如,Matsumoto (1992)得出日本 Haibara 井产生同震下降的关系为 $M=2.45 \lg D+0.69$; Kitagawa 等 (1996)分析日本东海区域一口井水位出现同震响应的关系式为 $M=2.62 \lg D$. King 等 (1999)研究日本 TONO 井引起的水位同震变化关系式为 $M=2.5 \lg D$; 杨竹转等 (2005)分析云南思茅大寨井水位同震变化得出的同震响应关系式为 $M=1.176 \lg D+3.104$. 这些研究所用地震目录和震级形式不同,结果也有差别.为此,我们用 3 种震级计算了唐山井的同震关系.

将表 1 中能够引起唐山井水位同震响应的地震,作地震震级与井震距(D)关系图,采

表 1 汶川 8.0 级地震及其 15 次余震 ($M_s \geq 5.4$) 的地震参数、陡河台地震
 Table 1 Parameters of $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake and its 15 large
 seismogram at Douhe station, and water level coseismic 1

序 号	日期		发震时刻		$\varphi_N/^{\circ}$	$\lambda_E/^{\circ}$	M_S	M_L	M_W	深度/ km	井震距/ km	地 点	陡河地震台	
	年-月-日	时:分:秒	P 波 /时:分	S 波 /时:分										
1	2008-05-12	14:28:04	31.0	103.4	8.0	7.7	7.9	12.0	1659.5			四川汶川	14:31.5	14:34.5
2	2008-05-12	14:43:15	31.0	103.3	6.0	6.4	*	*	1637.5			四川汶川	*	*
3	2008-05-12	19:10:58	31.4	103.6	6.0	6.8	5.7 ^s	11 [#]	1602.0			四川汶川	19:14.5	19:17.3
4	2008-05-13	04:08:50	31.4	104.0	5.7	6.5	5.6	28.4	1572.5			四川什邡	04:12.3	04:14.8
5	2008-05-13	15:07:11	30.9	103.4	6.1	6.6	5.8	14.1	1652.0			四川汶川	15:10.7	15:13.6
6	2008-05-14	10:54:37	31.3	103.4	5.6	5.9	5.5	12.0	1623.7			四川汶川	10:58.2	11:01.1
7	2008-05-16	13:25:49	31.4	103.2	5.9	6.2	5.6	24.5	1631.7			四川理县	13:29.4	13:32.3
8	2008-05-18	01:08:23	32.1	105.0	6.0	6.3	5.7	14.0	1450.0			四川江油	01:11.6	01:14.1
9	2008-05-19	14:06:55	32.5	105.3	5.4	5.5	5.3 ^s	17 [#]	1400.3			四川青川	14:10.0	14:12.4
10	2008-05-25	16:21:47	32.6	105.4	6.4	6.5	6.0	15.0	1386.1			四川青川	16:24.9	16:27.3
11	2008-05-27	16:03:24	32.7	105.6	5.4	5.8	5.3 ^s	10.0	1364.5			四川青川	16:06.3	16:08.7
12	2008-05-27	16:37:53	32.8	105.6	5.7	6.2	5.5	15.0	1357.7			陕西宁强	16:40.9	16:42.6
13	2008-07-24	03:54:47	32.8	105.6	5.6	5.9	5.5	12.0	1357.7			宁强—广元	03:57.7	04:00.0
14	2008-07-24	15:09:29	32.8	105.5	6.0	6.1	5.6	12.2	1365.1			青川—汉中	15:12.5	15:14.9
15	2008-08-01	16:32:00	32.1	104.7	6.1	6.2	5.7	20.2	1472.1			平武—北川	16:35.8	16:38.6
16	2008-08-05	17:49:19	32.8	105.5	6.1	6.2	6.0	12.0	1365.1			平武—北川	17:52.1	17:54.9

注: ① M_L 震级: 来自陕西台网目录; ② M_w 震级: 来自哈佛大学 CMT 目录, \$ 号前面的数值为根据类似地
 目没有给出, 其数值为陕西台网 M_L 目录的深度值; ④ * 表示有同震变化, 但同震数据因被主震同震
 ⑤ & 前面同震阶变为负值表示阶变下降, 其余为阶变上升; ⑦ Q_m 表示勒夫波最大振幅, R_{ms} 表示瑞利

用以 M_S , M_L 和 M_W 震级分别计算绘图(图 2). 在 3 种震级的相关关系中, 用中国地震台网中心 M_S 震级和美国哈佛大学 M_W 震级所得的结果很接近, 两者关系式的斜率也十分接近, 只不过 M_S 比 M_W 震级的曲线略为偏高, 而由陕西台网 M_L 震级计算的结果与两者差别较大. 在计算最低同震下限的关系式中也能得出同样的结果. 对比唐山井与上述井的计算结果, 若以相同的井震距计算所需的同震震级, 则唐山井所需震级最小, 显示了唐山井

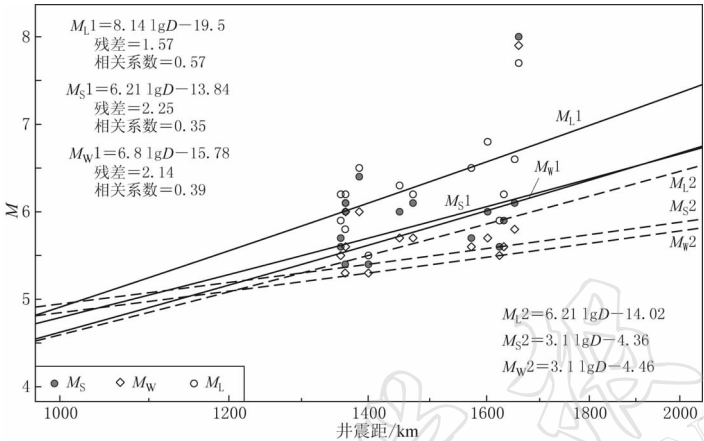


图 2 引起唐山井水位同震响应的汶川系列地震的震级与井震距关系图

M_{L1} , M_{S1} 和 M_{W1} 表示所有地震的相关分析结果, M_{L2} , M_{S2} 和 M_{W2} 表示同震下限的相关分析结果

Fig. 2 Relations between epicenter distances and magnitudes of the Wenchuan earthquakes inducing coseismic water level response at Tangshan well

M_{L1} , M_{S1} and M_{W1} are the relations for all earthquakes, while M_{L2} , M_{S2} and M_{W2} are correlative results of minimum limit of causing coseismic

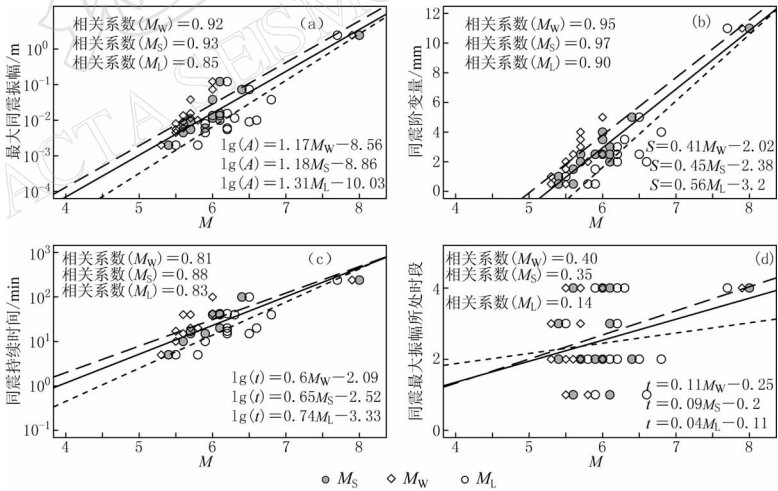


图 3 唐山井水位同震响应参数与震级的相关分析图

(a) 最大同震振幅(A)-震级(M); (b) 同震阶变量(S)-震级(M); (c) 同震持续时间(t)-震级(M); (d) 同震最大振幅所处时段(t)-震级(M)

Fig. 3 Correlation between water level responses of Tangshan well and earthquake magnitudes

(a) Maximum response amplitude (m) vs. magnitude; (b) step amplitude (mm) vs. magnitude; (c) duration of coseismic variation (min) vs. magnitude; (d) corresponding seismic phase types of maximum amplitude vs. magnitude

同震响应的灵敏度较高.

3.2 三种震级与水位同震响应量的关系

图 3 为汶川系列地震引起的唐山井水位同震参数与 3 种震级的相关关系. 与 3 种震级的系统差一致, 从 M_w 震级、 M_s 震级至 M_L 震级的相关曲线从上到下依次排列. 在 4 个同震参数中, 同震幅度参数的最大振幅和阶变量与震级的相关度很高, 相关系数基本在 0.9 以上. 时间参数的同震持续时间的相关性也达 0.8 以上, 而最大振幅时刻所处地震波时段和震级的相关性较差. 比较 3 种震级对各同震参数的相关系数大小, 除最大振幅时刻一项 M_w 略为偏高外, M_s 震级均比另两种震级的相关性高, M_w 震级的结果与 M_s 震级的结果很接近, 而 M_L 震级的结果均为最低.

3.3 井震距与水位同震响应量的关系

图 4 为汶川系列地震引起的唐山井同震变化参数与井震距的相关关系. 由图 4 可见, 水位同震的最大振幅、同震阶变量、同震持续时间、最大振幅时刻所处时段与井震距的相关系数普遍不好, 且相关趋势与正常变化规律不一致. 这可能与统计的地震井-震距差别很小、主余震震级差别大有关.

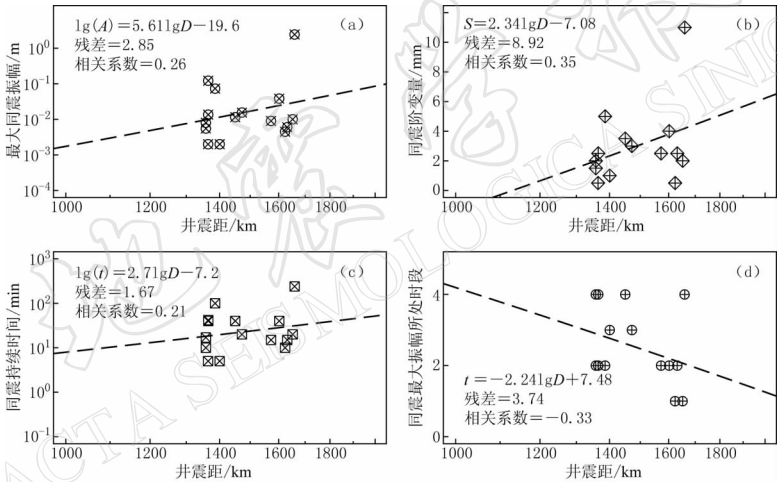


图 4 唐山井水位同震响应参数与井震距的相关分析图

(a) 最大同震振幅(A)-井震距(D); (b) 同震阶变量(S)-井震距(D); (c) 同震持续时间(t)-井震距(D); (d) 同震最大振幅所处时段(t)-井震距(D)

Fig. 4 Correlation between water level responses of Tangshan well and well-epicenter distances

(a) Maximum response amplitude (m) vs. well-epicenter distance (km); (b) step amplitude(mm) vs. well-epicenter distance (km); (c): duration of variation (min) vs. well-epicenter distance (km); (d) corresponding seismic phase types of maximum amplitude vs. well-epicenter distance (km)

3.4 震源深度与水位同震响应量的关系

图 5 为汶川系列地震引起的唐山井同震变化参数与震源深度的相关关系分析. 结果表明, 虽然 4 种同震参数与震源深度的相关性并不高, 但各相关曲线变化趋势一致性很好. 同震最大振幅、同震阶变量、同震持续时间随深度变化数值变小的趋势较为明显. 分析最大振幅时刻所处时段相关结果, 显示了当震源深度大于 15 km 时, 同震最大振幅时刻更接近面波震相时间, 而最大振幅时刻发生在 P 波—S 波范围的地震, 震源深度都小于 15 km.

3.5 水位同震响应特征参数之间的关系

图 6 显示了水位同震最大振幅与同震阶变量、同震变化持续时间的相关系数均大于 0.9，具有很好的线性相关性，最大振幅所处时段与最大振幅之间也有一定的相关性。

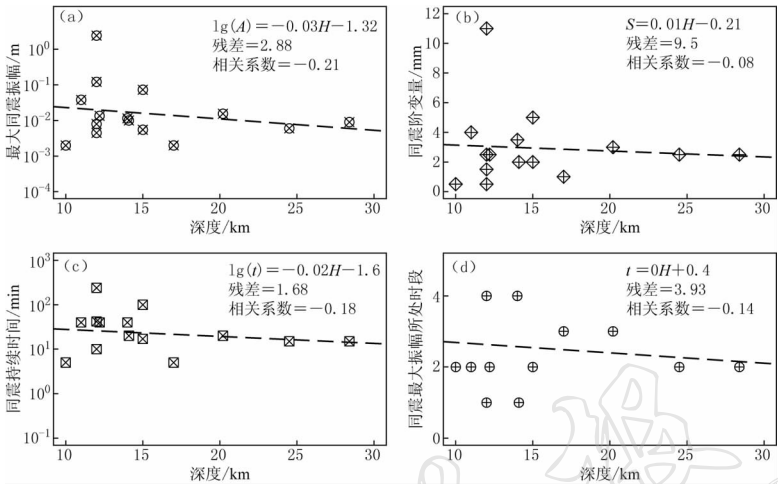


图 5 唐山井水位同震响应参数与震源深度的相关分析图

(a) 最大同震振幅(A)-震源深度(H); (b) 同震阶变量(S)-震源深度(H); (c) 同震持续时间(t)-震源深度(H); (d) 同震最大振幅所处时段(t)-震源深度(H)

Fig. 5 Correlation between water level responses of Tangshan well and earthquake focal depths (a) Maximum response amplitude (m) vs. earthquake focal depths (km); (b) step amplitude (mm) vs. focal depths (km); (c) duration of variation (min) vs. focal depth (km); (d) corresponding seismic phase types of maximum amplitude vs. focal depths (km)

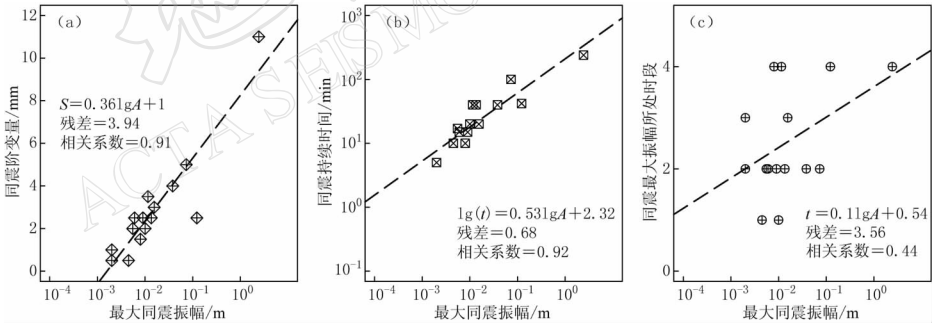


图 6 唐山井水位同震响应参数与震源深度的相关分析图

(a) 同震阶变量(S)-最大同震振幅(A); (b) 同震持续时间(t)-最大同震振幅(A); (c) 同震最大振幅所处时段(t)-最大同震振幅(A)

Fig. 6 The correlations between coseismic parameters of Tangshan well

(a) Coseismic step amplitude (mm) vs. maximum variation amplitude (m); (b) duration of coseismic variation(min) vs. maximum amplitude (m); (c) corresponding seismic phase types of maximum amplitude vs. maximum amplitude (m)

4 讨论和结论

汶川 8.0 级地震及 15 次余震引起了唐山井水位的同震变化，计算分析这些地震的震级与井震距的相关公式，显示了唐山井具有很高的同震响应能力。进一步分析井水位的同

震响应参数(同震最大振幅、同震阶变量、同震持续时间)与震级、井震距、震源深度的相关关系,表明同震响应参数与震级相关性很高,与震源深度、井震距相关性不强.分析其原因认为,汶川系列地震为来自同一震源区的地震,井震距和震源深度相对变化较小,震级大小成为影响到同震响应参数的主要因素.另外,通过对比 M_w , M_s 和 M_L 三种震级与水位同震响应参数的关系,可看出应用 M_s 震级相关结果最好,应用 M_L 震级的结果最差.说明地震面波震级在中远震同震变化中的影响较大,从水位同震最大振幅与同震阶变、同震持续时间具有很高相关性分析,这 3 个同震响应参数可能都是受地震波传播中产生的动应变变化的影响,与震源断层破裂产生的静应变关系不大.

分析水位同震变化的时间过程表明:① 汶川 8.0 级巨震引发了水位长达 4 个小时的波动,对比该过程陡河地震台的记录,这与 Woodcook 和 Roeloffs(1996),以及舒优良等(2006)比较水位变化和宽频带地震仪后,认为水位可相当于宽频带地震仪的结果一致.同时显示出地震波各震相都能引起水位同震响应,而不仅仅是垂直方向振动的地震波,如 P 波、SV 波、瑞利波(张子广等,1998);② 对比分析汶川系列余震引起的水位同震最大振幅时刻与地震波震相到时,从 P 波之后至面波前后都有水位同震最大振幅出现.除图 1 中 5 和 6 号地震对应的水震波最大振幅时刻十分接近 S 波到时外,有 7 次地震(图 1 中 3, 4, 7, 10, 11, 12 号地震)的水震波最大振幅位于 S 波—勒夫波之间,而位于瑞利波前后的有 6 次地震(图 1 中 1, 8, 9, 13, 15, 16 号地震).若考虑到模拟水位时间精度 2 min 左右的误差,可认为水震波最大振幅时刻分布在地震波 S 波至瑞利波震相时段.意味着水位同震最大振幅并非单独由具有最大垂直向震动的瑞利波这一因素的影响.一方面井孔水位变化可能与井-含水层的特性在某一特定周期被放大有关(Cooper *et al.*, 1965; Kunugi *et al.*, 2000),另一方面同震变化也可能与地震波到达井孔的特性有关.因此,地震波在井孔处产生的动应变与地震波的性质,地震波的传播,地震波各震相的耦合、以及井孔周围水文构造环境有关,是多种因素共同作用的结果.

对于水位同震阶变,由于汶川系列地震的井震距大约为 1350—1650 km,属于来自同一发震断裂带的中远震.有关计算表明,在这样的距离断层破裂产生的静应变影响已经十分微小,难以解释水位的同震阶变变化.从水位同震阶变量与震级、同震最大振幅、持续时间都有很强的相关性分析,这些变化可能源自相同的力源,即来自地震波.分析汶川系列地震引起的水位同震阶变方向与地震的震源机制解的相关性,显示同震阶变方向与震源机制解的相关性不大.但通过分析阶变方向与阶变前后水位的变化趋势,则两者具有极高的一致性(表 1).这也说明了同震阶变与地震波传播和井孔水文地质环境关系更加密切.这与一些学者的研究结果具有相似之处.例如, Koizumi 等(2002)认为应用震源机制解释同震变化与实际相差较大. Wang 等(2005)认为同震变化原因在于地震波引起的地面运动及其后效; Lai 等(2004)认为阶变量可能受动应变和水文地质环境共同影响.将来若能提高数字化水位数据采样率(舒优良等, 2006)和时间精度,结合宽频地震仪、应变仪及井孔周围水文构造环境,则可进一步研究水位同震响应的机理.

感谢唐山井观测人员提供的高质量观测资料,感谢审稿人对本文提出的中肯意见和建议.

参考文献

- 曹新来. 1988. 唐山地下水趋势性上升变化及成因分析[J]. 华北地震科学, **6**(3): 89-92.
- 车用太, 鱼金子. 2004. 地下流体典型异常的调查与研究[M]. 北京: 气象出版社: 337-349.
- 胡幸平, 俞春泉, 陶开, 崔效锋, 宁杰远, 王艳华. 2008. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. 地球物理学报, **51**(6): 1711-1718.
- 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): 119-125.
- 刘耀炜, 杨选辉, 刘永铭, 陈大庆. 2005. 地下流体对苏门答腊 8.7 级地震的响应特征[G]// 2004 年印度尼西亚苏门答腊 8.7 级大地震及其对中国大陆地区的影响. 北京: 地震出版社: 131-258.
- 马丽, 尹宝军, 黄建平, 陈会忠, 张晔军. 2008. 唐山井的水温同震变化特征[G]// 中国地震预报探索. 北京: 地震出版社: 356-363.
- 石耀霖, 曹建玲, 马丽, 尹宝军. 2007. 唐山井水温的同震变化及其物理解释[J]. 地震学报, **29**(3): 265-273.
- 舒优良, 张世民, 黄辅琼. 2006. 印尼 8.7 级和 8.5 级两次强震周至深井的震时效应研究[J]. 地震地磁观测与研究, **27**(2): 16-22.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 姚振兴. 2008. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, **51**(5): 1403-1410.
- 杨竹转, 邓志辉, 赵云旭, 朱培耀. 2005. 云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究[J]. 地震学报, **27**(5): 569-574.
- 张国民, 张晓东, 刘杰, 刘耀炜, 田勤俭, 郝平, 马宏生, 焦明若. 2005. 印尼苏门答腊 8.7 级大震对中国陆区的影响[J]. 地震, **25**(4): 15-25.
- 张素欣, 张子广, 张跃刚, 孙佩卿, 骆艳欣. 2005. 2004 年 12 月 26 日印尼大地震河北省数字水位、地热记震能力分析[J]. 华北地震科学, **23**(3): 27-30.
- 张素欣, 杨卫东, 张子广. 2007. 唐山矿井模拟与数字水位的记震能力对比分析[J]. 西北地震学报, **29**(2): 170-173.
- 张子广, 万迪堃, 董守玉. 1998. 水震波与地震面波的对比研究及其应用[J]. 地震, **18**(4): 399-404.
- 张子广, 张素欣, 郑贞贞, 王贺生. 2002. 山西水 2 井和岳 42 井水位记震能力分析[J]. 西北地震学报, **24**(3): 262-266.
- Cooper H H, Brredehoeft J D, Papadopolous I S, Bennett R R. 1965. The response of well-aquifer systems to seismic waves[J]. *J Geophys Res*, **70**(16): 3915-3926.
- King C Y, Azuma S, Igarashi G, Ohno M, Saito H, Wakita H. 1999. Earthquake-related water-level changes at 16 Closely clustered wells in Tono, central Japan[J]. *J Geophys Res*, **104**(B6): 13073-13082.
- Kitagawa G, Norio Matsumoto. 1996. Detection of coseismic changes of underground water Level[J]. *Journal of the American Statistical Association*, **91**(434): 521-528.
- Kitagawa Y, Koizumi N, Takahashi M, Matsumoto N, Sato T. 2006. Changes in groundwater levels or pressures associated with the 2004 earthquake off the west coast of northern Sumatra (M9.0)[J]. *Earth Planets Space*, **58**: 173-179.
- Koizumi N Y, Kitagawa M, Takahashi M, Sato T, Natsumoto N, Ito H, Kuwahara Y, Cho A. 2002. Changes in groundwater level and crustal strain in and around the Kinki district related to the 2001 geiyo earthquake[J]. *Zishin*, **55**: 119-127.
- Kunugi T, Fukao Y, Ohno M. 2000. Underdamped responses of a well to nearby swarm earthquakes off the coast of Ito City, central Japan, 1995[J]. *J Geophys Res*, **105**: 7805-7818.
- Lai W J, Koizumi N, Matsumoto N, Kitagawa Y, Lin C W, Shieh C L, Lee Y P. 2004. Effects of seismic ground motion and geological setting on the coseismic groundwater level changes caused by the 1999 Chi Chi earthquake, Taiwan [J]. *Earth Planets Space*, **56**: 873-880.
- Matsumoto N. 1992. Regression analysis for anomalous changes of ground water level due to earthquake[J]. *Geophys Res Lett*[J], **19**(12): 1193-1196.
- Wang C H, Wang C Y, Kuo C H, Chen W F. 2005. Some isotopic and hydrological changes associated with the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan[J]. *Island Arc*, **27**: 37-54.
- Woodcock D, Roeloffs E A. 1996. Seismically induced water-level oscillation in a fractured-rock aquifer well near Grants Pass, Oregon[J]. *Oregon Geology*, **58**: 27-33.