

三峡井网地下水同震效应特征研究^{* 1}

张卫华^{1,2)} 王秋良^{1,2)} 李井冈^{1,2)} 罗俊秋^{1,2)} 郭熙枝^{1,2)}

(1)中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071
(2)中国地震局地壳应力研究所武汉创新基地,武汉 430071

摘 要 基于三峡水网的监测数据,以2007年9月12日印尼苏门答腊 $M8.5$ 、2011年3月11日日本 $M9.0$ 、2008年5月12日汶川 $M8.0$ 地震及2008年9—11月三峡地区地方震为对象,研究了三峡井网的水位同震变化特征,初步得到了三峡井网井水位同震效应与远、近震地震参数的对应关系。

关键词 三峡井网;同震效应;地震参数;远震;近震

中图分类号:P315.72+3

文献标识码:A

ANALYSIS ON COSEISMIC EFFECT OF GROUNDWATER FROM THREE GORGES WELL NETWORK

Zhang Weihua^{1,2)}, Wang Qiuliang^{1,2)}, Li Jinggang^{1,2)}, Luo Junqiu^{1,2)} and Guo Xizhi^{1,2)}

(1)Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071
(2)Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071

Abstract The paper studies the different coseismic changes of water level caused by the $M8.5$ Sumatra earthquake on Sep. 12 in 2007, the $M9.0$ Japanese earthquake on Mar. 11 in 2011 and the $M8.0$ Wenchuan earthquake on May. 12 in 2008 and local earthquakes in the Three Gorges area between Sep and Nov in 2008 through the Three Gorges well network, the mechanism is explained. Corresponding relationship between coseismic changes of water level and parameters of teleseism and local earthquakes is deduced.

Key words: Three Gorges well network; coseismic effect; earthquake parameter; teleseism; local earthquake

1 引言

自1899年意大利一口深井首先记录到远震地震波引起的水位震荡以来,国内外地震学家和水文地质学家对此进行了多方面研究^[1-5]。但这些研究基于单个井台,对比研究的井台岩性和构造都不同。三峡井网八口井分布于坝区和库首区^[6],井台岩性和构造类似,井距在15 km范围内,如此密集的井网布局为研究井水位同震变化特征提供了便利条件,为此,本文将在前人研究的基础上,选取2007年9

月12日印尼苏门答腊 $M8.5$ 、2011年3月11日本 $M8.6$ 远震、2008年5月12日汶川 $M8.0$ 近震以及2008年9—11月三峡发生的四起地方震引起的水位同震变化特征作对比,推导了三峡井网井水位同震效应与远、近震地震参数的对应关系。

2 远震及近震效应

2.1 印尼苏门答腊 $M8.5$ 地震

2007年9月12日印尼苏门答腊 $M8.5$ 地震,

* 收稿日期:2013-03-27

基金项目:中国长江三峡工程开发总公司专项基金(SXSN/2377)

作者简介:张卫华,男,1972年生,硕士,助研,从事地下流体、地壳形变与地震预报方向的研究. E-mail: zwh@eqhb.gov.cn

三峡井网有 6 口井井水位出现同震效应(图 1),响应特征因井而异,表现为阶降型的有 W2、W4、W6,阶升型的有 W7,振荡型为 W1、W5。震后效应差异性也各不相同,其中 W2、W4 与 W6 井水位同震下降后未恢复到震前水位,W1 与 W5 井水位振荡后恢复到原水位,W7 井则上升后没有恢复到原水位,各井阶升与阶降的幅度也不等(表 1)。

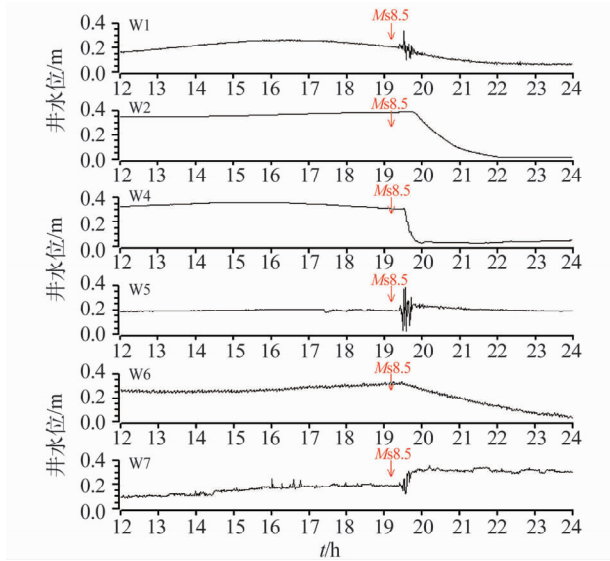


图 1 三峡井网井水位对印尼 8.5 级地震的同震响应
Fig.1 Water level coseismic response to Ms8.5 Indonesia earthquake in Three Gorges well network

表 1 三峡水网井水位对印尼 8.5 级地震同震阶变幅度值
Tab.1 Water level amplitude value of Ms8.5 Indonesia earthquake in Three Gorges well network

井号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
水位降幅 (mm)	40	340	—	57	131	54	16	—
后效特征	振荡	阶降	—	阶降	振荡	阶降	阶升	—

注:“—”表示缺失

2.2 日本 Ms8.6 地震

日本 2011 年 3 月 11 日 8.6 级地震,距三峡井网各井点距离在 3 000 千米左右,部分井水位同震效应幅度较大(图 2)。W1、W6 井水位同震响应特征为振荡型、W8、W7 分别为陡降与阶升型。W2、W3、W4 井未出现同震效应,值得注意的 W1 与 W6 井水位同震下降-上升后均恢复到震前水位,W7 井水位上升后没有恢复,W8 井则下降后没有恢复到原水位,表现出阶降后效特征。而且各井阶升与阶降的幅度也不等(表 2)。

2.3 汶川 Ms8.0 地震

2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震距三峡井网各井点距离在 700 千米左右,整个井网井水位

全部表现为剧烈的同震效应(图 3)。井水位同震响应特征分为陡降-陡升型(W4、W7)、陡降-缓升型(W1、W6)与缓降型(W2、W3)与起伏型(W5)等 4 种类型,W8 井因水位记录不全暂不归类。除 W5 井之外,均以先下降为特征,下降的幅度各井不等(表 3)。W1 与 W4 井水位同震后效表现为下降-上升后均恢复到震前水位,W2 与 W3 井水位下降后没有恢复,W6 井则下降后虽有恢复,但没有恢复到原水位,表现出阶降后效,而 W5 与 W7 井则水位恢复到比原水位还高,表现出阶升后效,而且阶升与阶降的幅度也不等(表 3)。

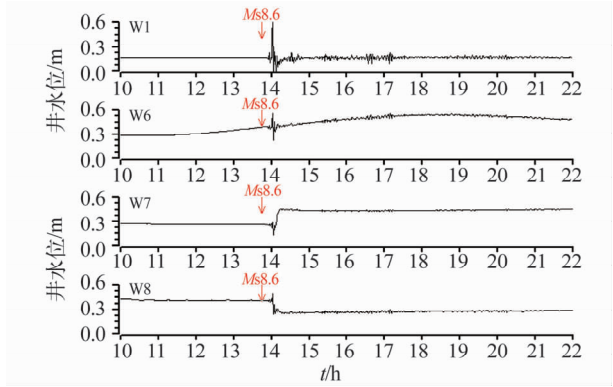


图 2 三峡井网井水位对日本 8.6 级地震的同震响应
Fig.2 Water level coseismic response to Ms8.6 Japan earthquake in Three Gorges well network

表 2 三峡水网井水位对日本 8.6 级地震的同震阶变幅度值
Tab.2 Water level amplitude value of Ms8.6 Japan earthquake in Three Gorges well network

井号	W1	W2	W3	W4	W6	W7	W8
水位降幅 (mm)	600	—	—	—	56	160	67
后效特征	振荡	—	—	—	振荡	阶升	阶降

注:“—”表示缺失

表 3 三峡水网井水位对汶川 8.0 级地震的同震阶变幅度值
Tab.3 Water level amplitude value of Ms8.0 Wenchuan earthquake in Three Gorges well network

井号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
水位降幅 (mm)	120	150	30	7	110	54	61	160
后效特征	振荡	阶降	无	阶降	振荡	阶降	阶升	无

3 地方震效应

2008-09-27—11-30 日,三峡地区发生 2 级以上地震 3 次(9 月 27 日郭家坝 M3.2、11 月 22 日香溪 M4.1 地震和 11 月 30 日屈原镇 M2.4)。3 起地震发生前,整个三峡井网的水位、水温各测项未出现中

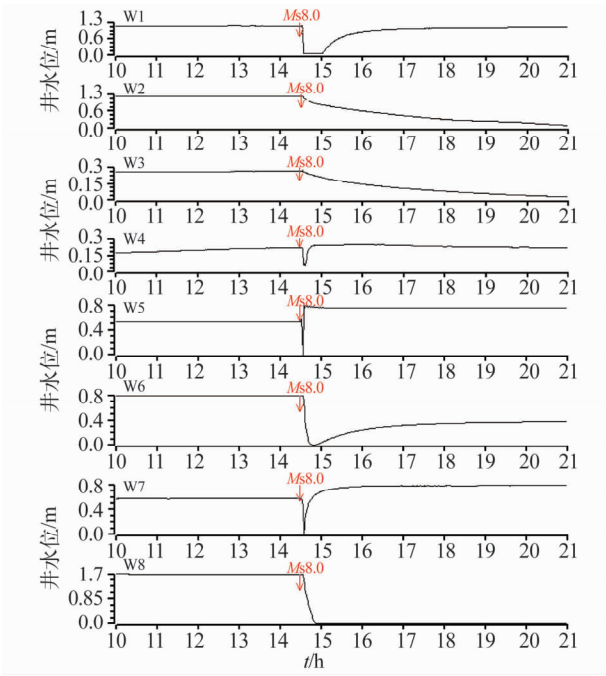


图3 三峡井网井水位对汶川8.0级地震的同震响应
Fig.3 Water level coseismic response to Ms8.0 Wenchuan earthquake in Three Gorges well network

长期、短临异常,地震发生时部分井水位出现同震效应。11月30日屈原镇M2.4地震周坪井出现较弱同震效应,另两起地震发生时部分井水位和水温同震效应明显。这3起地震震中都位于三峡井网监测范围内。

3.1 郭家坝M3.2地震

距震中分别为5 km、13 km、23 km和26 km的郭家坝、周坪、大河口和茅坪井同时记录到郭家坝M3.2地震的同震效应(图4和表4)。其中周坪、大河口井水位曲线为阶升型,反映出含水层呈受力挤压状态;茅坪井、郭家坝为阶降型,体现出含水层呈受力拉张状态。结合震中分布图、井台所处仙女山断裂带的位置,各井含水层应力变化与该地震的左旋走滑震源机制一致。

表4 2008-09-27日M3.2地震同震效应参数
Tab.4 Water level coseismic response to M3.2 earthquake in Three Gorges well network on Sep. 27 in 2008

台站名称	阶跃幅度 (cm)	同震滞后时间 (分钟)	同震特征
茅坪	11.6	1	阶降
周坪	0.8	4	阶升
大河口	6.88	5	阶升
郭家坝	7.36	4	阶降

3.2 香溪M4.1地震

11月22日香溪M4.1地震发生时,震中距分别为12 km、17 km、19 km和26 km的郭家坝、周坪、韩

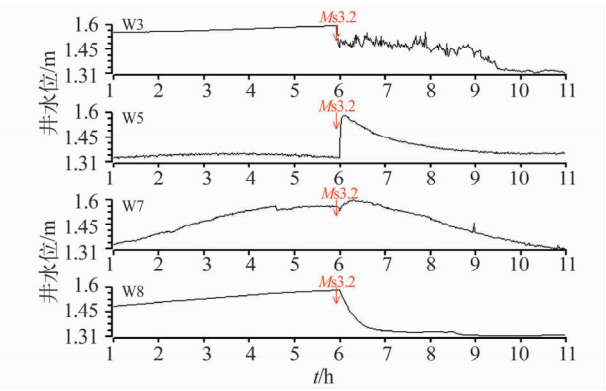


图4 茅坪、大河口、周坪和郭家坝井记录的2008-09-27日M3.2地震水位曲线
Fig.4 Water level coseismic response to M3.2 earthquake in Moaping, Dahekou, Zhouping and Guojiaba wells on Sep. 27 in 2008

家湾和大河口井水位皆记录到同震效应(图5和表5)。其中仙女山断裂带左侧的周坪井、大河口和郭家坝井水位曲线为阶升型,体现出含水层呈受力挤压状态;韩家湾井的阶降体现为含水层呈受力拉张状态,与该地震的震源机制解一致。大河口井水温也记录到同震效应(图6)。

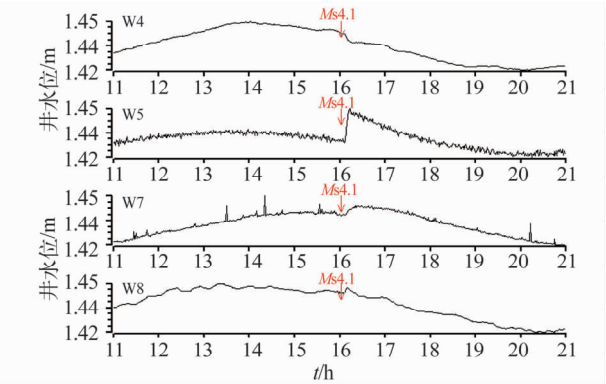


图5 韩家湾、大河口、周坪、郭家坝井记录的4.1级地震水位曲线
Fig.5 Water level coseismic response to M4.1 earthquake in Hanjiawan, Dahekou, Zhouping and Guojiaba wells

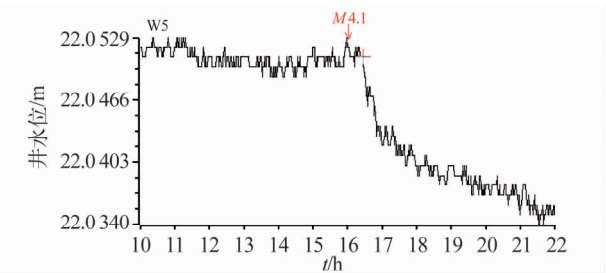


图6 大河口井记录的M4.1地震水温曲线
Fig.6 Temperature curve of M4.1 earthquake recorded by the Dahekou well

表 5 三峡井网对 M4.1 地震同震效应参数

Tab.5 Water level coseismic response to M4.1 earthquake in Three Gorges well network

台站名称	测项	阶跃幅度	同震滞后时间 (分钟)	同震特征
韩家湾	水位	1.6 cm	6	阶降
周坪	水位	0.6 cm	7	阶升
大河口	水位	3 cm	6	阶升
	水温	25℃	阶降	
郭家坝	水位	1.3 cm	6	阶升

3.3 屈原镇 M2.4 地震

11 月 30 日 M2.4 地震发生时,仅距震中 18 km 的周坪井水位出现阶升同震效应(图 7)。其他井未表显出同震效应。

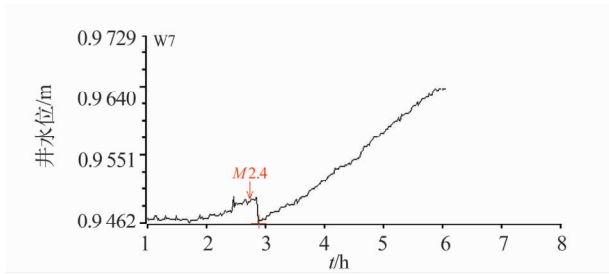


图 7 周坪井 2008 年 11 月 30 日屈原镇 M2.4 地震水位曲线

Fig.7 Water level coseismic response to M2.4 earthquake in the Zhouping well (2008-11-30)

表 6 三峡水网井水位观测层的导水系数值

Tab.6 Values of transmissibility in observational layer of the Three Gorges well network

参数	W3	W5	W7	W8
$K(m/d)$	0.01	0.691	0.170	0.698
$M(m)$	2	28	0.5	16
$T(m^2/d)$	0.02	19.3	0.085	3.4

各井台井水位地方震响应幅度与各井含水层渗透系数(导水系数)的大小成正比,含水层的渗透系数或导水系数大的井水位同震响应幅度大,如郭家坝、大河口和茅坪井;含水层的渗透系数小的周坪井水位同震响应幅度就小。滞后时间与震中距基本一致。

4 井水位同震变化关系

据研究,井水位变化量级与震级大小、井震距的关系为^[7]:

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

式中, Δh_i 为水位上升的幅值, M 为面波震级; b_1 、

b_2 、 a 为常数; D 为井震距。Roeloffs^[7]得到的美国加利福尼亚州 Parkfield BV 井的水位变化与震级大小、井震距的关系为:

$$\lg \Delta h_i = 0.89 M - 1.63 \lg D - 1.69 \tag{2}$$

对三峡井网井水位同震变化做类似分析研究,排除丁家坪、茅坪和韩家湾等没有地震水位没有变化的井,仅对地震引起显著水位变化的高家溪、大河口、屈家湾、周坪和郭家坝 5 口井进行回归计算, Δh_i 表示水温变化幅度, M 为震级,表 1-6 中对应参数代入式(1)进行二元回归分析,得出上述 5 口井的近似关系式为:

$$\lg \Delta h_i = 5.1384 M - 3.8598 \lg D - 29.0656 \tag{3}$$

$$\lg \Delta h_i = 0.0783 M - 0.0141 \lg D + 0.3892 \tag{4}$$

$$\lg \Delta h_i = -3.6841 M - 3.5976 \lg D + 19.9861 \tag{5}$$

$$\lg \Delta h_i = 0.4354 M - 0.2561 \lg D - 3.4302 \tag{6}$$

$$\lg \Delta h_i = 0.5356 M - 0.9084 \lg D - 0.6147 \tag{7}$$

式(3)~(7)表明,高家溪、大河口、屈家湾、周坪和郭家坝 5 口井水位同震变化幅度与震级正相关,与震中距对数反相关,也即随震级的增大而增大,随震中距的增大而减小。

5 结论

1)三峡井网各井台井水位的远近与地方震震时阶变类型不一致,表现为震荡型、阶降型和阶升型。

2)水井含水层系统对近震的响应不如远震,经研究主要是由于远震面波比较发育所致。三峡水网井孔含水层的固有周期大多为 20 s 左右,正好处于面波发育的周期范围内;地方震和近震主要是体波的振动,体波的振动周期一般小于几秒。

3)井水位同震幅度与含水层岩性有直接关系。坝区高家溪、丁家坪、茅坪和韩家湾四口井含水层岩性是花岗岩,渗透性较差,远震瑞雷波激不起井水位振荡响应,通常记录不到全球 6 级以上同震效应。

4)坝区茅坪井水位对近震和地方震记录较好,主要是该井孔固有振荡周期为 10.9 s,在体波周期的边缘,共振效果较好。坝区的大河口井几乎能记录到所有全球 6 级以上地震和地方震同震效应,该井孔含水层岩性为灰岩,水体相当大,且含水层内有许多溶洞,含水层内水的连通性非常好。

5)井水位同震阶变同方向说明,地震波可能只起触发作用,其变化方式是由观测井局部的地质构造和水文地质条件决定的。同一口井井水位总是以其固有的方式响应,而触发能量的大小——地震波,则受震级和井震距的影响。

参 考 文 献

1 Blanchard F B and Byefly. A study of a well gauge as a seismograph[J]. Buletion of the Seismological Society of America,1935,25:38-46.

2 Rexin E E, Oliver J and Prentiss D. Seismically-induced fluctuation of the water level in the Nunn-Bush Well in Milwaukee[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1962,52(1):17-25.

3 车用太,等. 我国水震波研究的现状与动向[J]. 地震, 1989(20):70-72. (Che Yongtai, et al. The current situation and trend of coseismic responses of water level in China [J]. Earthquake,1989,20(1):70-72)

4 张昭栋,等. 井水位的振荡与地震波[J]. 地震研究,2000, 23(4):41-42. (Zhang Zhaodong, et al. Shake and earthquake wave of water in well[J]. Earthquake Research,2000, 23(4):41-42)

5 张卫华,等. 三峡井网井水位固体潮汐和气压响应特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,(5):46-48. (Zhang Weihua, et al. Study on water-well earth tidy and atmospheric response in Three Georges well network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2008,(5):46-48)

6 张卫华,等. 长江三峡水库二期蓄水前后地下水动态特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2007,(5):92-93. (Zhang Weihua, et al. Analysis of dynamic characteristics of groundwater before and after second impoundment of Three Georges Reservoir[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2008,(5):46-48)

7 Roeloffs E A. Persistent water level changes in a well near Parkfield California, due to local and distant earthquakes [J]. J Geophys Res. ,1998,103(B1):869-889.

(上接第 25 页)

January 2010 *M7* Haiti earthquake[J]. J Geophys Res. , 2011, 116, A04302, doi:10.1029/2010JA015704.

5 Liu J Y, et al. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 *Mw*7. 9 Wenchuan earthquake [J]. J Geophys Res. , 2009, 114, A04320, doi:10.1029/2008JA013698.

6 Liu J Y, et al. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly [J]. J Geophys Res. , 2006, 111, A05304, doi:10.1029/2005JA011333.

7 余涛,等. 汶川特大地震前电离层主要参量变化[J]. 科学通报,2009, 54(4):493-499. (Yu Tao, et al. Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(4):493-499)

8 吴云,乔学军,周义炎. 利用地基 GPS 探测震前电离层 TEC 异常[J]. 大地测量与地球动力学,2005,(2):36-40. (Wu Yun, Qiao Xuejun and Zhou Yiyao. Preseismic ionospheric ionospheric TEC abinaly detected by ground-based GPS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005,(2):36-40)

9 丁鉴海,等. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系[J]. 空间科学学报,2005,25(6):536-542. (Ding Jianhai, et al. Phenomena of geomagnetic and ionospheric anomalies and their relation to earthquakes[J]. Chinese Journal of Space Science, 2005, 25(6):536-542)

10 丁鉴海,卢振业,余素荣. 地震地磁学概论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2011. (Ding Jianhai, Lu Zhenye and Yu Surong. A brief treatise on seismomagnetism[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2011)

11 Yao Yibin, et al. Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 *Mw* 9.0 Japan earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(5):500-510.

12 Lin J W. Ionospheric total electron content anomalies associated with earthquakes through Karhunen-Loeve transform [J]. Terr Atmos Ocean Sci. , 2010, 21(2):253-265.