

顾申宜、刘阳、张慧等 2011, 海南琼海加积井水位对远大震的同震响应特征研究, 中国地震 27(1) 83~91。

# 海南琼海加积井水位对远大震的同震响应特征研究

顾申宜 刘阳 张慧 解晓静 叶向顶

海南省地震局, 海口市美苑路 49 号 570203

**摘要** 本文收集整理 2001~2010 年海南琼海加积井水位对震中距小于 8000km、 $M_s \geq 7.8$  的远大震的同震响应资料, 统计了水位变化的形态, 分析了同震响应水位变化的幅度与震级及井震距的关系, 核对了出现水位变化时的地震波震相。结果表明, 同震响应形态表现为以阶升为主, 无振荡类型的变化; 水位的变化幅度与井震距、震级有一定的关系; 该井的同震响应表现出一定的方向性; 引起同震响应的地震波大多为面波, 有一部分为周期较长的 S 波。

**关键词:** 井水位 同震响应 海南加积井

[文章编号] 1001-4683(2011)01-083-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震引起井水位变化的事实已有广泛报道。有的研究者循着一次地震引起一定范围内的多个井孔水位变化的思路, 研究这些变化的空间分布特征(汪成民等, 1988; 黄辅琼等, 2000; 郑江蓉等, 2005); 还有循着单一井孔的历史变化特征的思路, 研究各次地震引起水位变化的特征及其与震级、震中距的关系(刘耀炜等, 2005 年; 杨竹转等, 2005; 晏锐等, 2009); 部分学者把井水位同震响应特征与未来地震危险性联系起来, 把那些水位阶跃变化集中的区域视为未来地震活动危险区(付虹等, 2007a)。2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊发生的  $M_s 8.9$  特大地震, 使我国数以百计的地震观测井水位出现同震响应。此后, 有关水位同震效应的研究工作引起越来越多的关注。

海南省地震地下水观测网自建成以来, 记录了大量地震引起地下水变化的现象。本文对“九五”数字化改造以后记录的井震距小于 8000km、 $M_s \geq 7.8$  的远大震引起海南井网中琼海加积井水位变化特征以及水位震波震相特征进行了研究, 讨论了地震引起水位变化的机理。

## 1 琼海加积井概况

琼海加积井坐标为  $19.24^\circ\text{N}$ ,  $110.46^\circ\text{E}$ , 井孔处在海南岛中生代隆起构造的东部边缘,

[收稿日期] 2011-01-07; [修定日期] 2011-02-05

[项目类别] 中国地震局 2011 年星火计划项目(XH1020)资助

[作者简介] 顾申宜, 女, 1961 年生, 高级工程师, 主要从事地下流体监测与预报工作。E-mail: gsy33@163.com

位于文昌 - 三亚断裂带上,其东南侧约 2km 处有北东向的龙江-温泉断裂通过。加积井并孔柱状剖面如图 1 所示。井深 525.93m,套管口径 273mm,套管下至井口以下 11.50m 深的基岩处,11.50m 以下为裸孔,观测段深度为 11.50 ~ 525.93m 的静水位。该井观测层为白垩系上统(K<sub>2</sub>)砂砾岩含水层。地下水类型为孔隙裂隙承压水,含水层渗透系数  $K = 0.212\text{m/d}$ ,水温 29.4℃,pH 值 7.5,矿化度小于 1g/L。观测层地下水主要由雨水渗入补给,经短途径流后排泄入万泉河。自 2001 年 5 月 18 日起,该井开始地下水位的数字化观测。

地层编号	地层时代	层底深度 (m)	分层厚度 (m)	井孔柱状图 (mm)	岩土名称	水位深度 (m) 观测日期
①	Q <sub>4</sub>	11.14	11.14		亚粘土亚砂土	3.281 2011.3.29
②	K <sub>2bw</sub>	80.80	69.66		紫红色巨-粗砾杂砾岩	
③		135.02	54.22		紫红色粗-中砾杂砾岩	
④		158.80	23.78		细砾杂砾岩	
⑤		224.34	65.54		紫红色中-粗砾杂砾岩	
⑥		244.34	20.00		细砾杂砾岩	
⑦		315.04	70.70		紫红色粗-中砾杂砾岩	
⑧		370.69	55.65		紫红色细砾杂砾岩与不等粒砾岩互层	
⑨		438.59	67.90		灰白色不等粒砾岩及角砾岩	
⑩		482.49	43.90		灰白色不等粒砾岩	
⑪		505.00	22.51		构造角砾岩	
⑫		525.93	20.93		粉砂岩中砾岩	

图 1 加积井孔柱状剖面图

## 2 水位正常动态基本特征

依据多年数字化观测资料,琼海加积井水位正常动态可分为多年、年、月和日等不同时间层次的变化。多年动态呈趋势性上升-下降态势(图 2(a));年动态主要受季节性降水的影响(图 2(b)),每年 3 月左右出现水位谷值,10 月左右出现水位峰值,水位年变幅度约 0.7 m;水位 5 日动态具有显著的固体潮效应(图 2(c)), $M_2$  波潮汐因子平均 2.5。

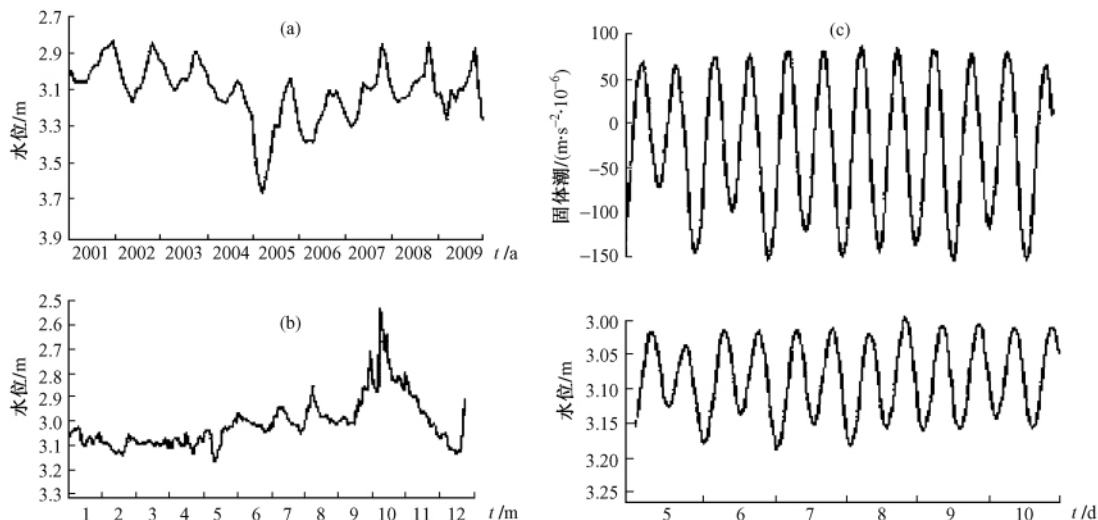


图 2 琼海加积井水位正常动态图

(a) 水位多年月均值曲线(2001~2009年);(b) 水位日均值曲线(2008年1~12月);

(c) 水位与理论固体潮的5日整点值对比(2008年3月5~9日)

## 3 水位同震响应特征

### 3.1 基本特征

琼海加积井水位对远大震的同震响应记录如图 3。各次同震响应的特征列于表 1。由表 1 可知,在 2001~2010 年期间,距该井 8000km 范围内,共发生 14 次  $M_s \geq 7.8$  的大震,其中 12 次地震后出现同震响应 2 次无响应。由图 3 可见,井水位的同震响应以井水位的上升为主,仅有 1 次出现阶降,但其后的特征各有不同。从响应形态上看,可分为陡升-陡降型、缓升-缓降型、陡升-缓降型和缓降-陡升型等 4 种。按陡(缓)升的后效特征,可分为完全恢复型、残留阶升型和残留阶降型等 3 种。各井水位的上升幅度也不等,最大的达 631 mm,最小的 4mm,相差近百倍;响应持续时间为 4~170min。

### 3.2 同震响应的幅度与震级、井震距的关系

2001 年 1 月~2010 年 5 月间,琼海加积井水位的同震响应幅度为 0.004~0.631m。

Roeloffs(1998)对井水位的同震阶变幅度( $\Delta h$ )与震级( $M$ )和井震距( $D$ )的关系进行了统计,得到如下公式

$$\lg \Delta h = b_1 M + b_2 \lg D + a \quad (1)$$

表 1 加积井水位同震响应特征统计表

序号	地点	发震时间 (年-月-日,时:分)	井震距 (km)	震级 $M_s$	水位变幅 (mm)	震中方位	同震响应形态
1	中国昆仑山口西	2001-11-14, 17:26	2872	8.2	37	西北	阶升-缓降
2	印尼苏门答腊海中	2002-11-02, 09:26	2397	7.8	7.5	西南	阶升-阶降 恢复原始动态
3	日本北海道	2003-09-26, 03:50	4493	8.2	56	东北	阶升 未恢复原始动态
4	俄蒙中交界	2003-09-27, 19:23	4224	7.8	4	西北	阶降 未恢复原始动态
5	印尼苏门答腊近海	2004-12-26, 08:58	2346	8.9	378	西南	阶升-阶降 未恢复原始动态
6	印尼-尼亚斯岛	2005-03-29, 00:09	2409	8.6	631	西南	阶升-缓降 未恢复原始动态
7	堪察加半岛东北地区	2006-04-21, 07:25	7820	8.3	37	东北	阶升 未恢复原始动态
8	千岛群岛	2006-11-15, 19:14	5643	8.0	无	东北	—
9	千岛群岛	2007-01-13, 12:23	5737	8.1	12	东北	上升-下降
10	所罗门群岛	2007-04-02, 04:39	5986	7.8	无	东南	—
11	印尼苏门答腊南部海中	2007-09-12, 19:10	2805	8.6	224	西南	阶升-缓降
12	印尼苏门答腊南部海中	2007-09-13, 07:49	2635	8.2	71	西南	阶升-缓降
13	中国四川汶川	2008-05-12, 14:28	1512	8.2	48	西北	阶升-缓降 未恢复原始动态
14	印尼苏门答腊北部	2010-04-07, 06:15	2385	7.8	52	西南	阶升 未恢复原始动态

注:表中地震参数来源于中国地震台网中心

其中  $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为常数。

应用 matlab 软件将表 1 数据进行拟合,得到加积井水位变化幅度与震级、井震距的统计关系如下

$$\lg \Delta h = 1.536M - 0.821gD - 8.052 \quad (2)$$

利用式(2)计算的水位变化幅度理论值与实际记录到的变化幅度拟合结果的对比如图 4 所示。

由图 4 可见,大多数水位同震响应的理论变幅和实测变幅拟合较好,但也存在部分明显偏离的情况。如 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊近海地震(图 4 中 5 号地震)的实测值比理论值偏小,而 2005 年 3 月 29 日印尼-尼亚斯岛地震(图 4 中 6 号地震)的实测值却比理论值偏大。它们同是发生在印尼地区的地震,其震源机制解基本相同(付虹等, 2007b)。然而,由表 1 可知,苏门答腊地震震级比印尼-尼亚斯岛的震级大,井震距要小,产生同震响应的水位实测变幅却比后者小。对于这种拟合效果不好的现象可以这样解释:在前一次地震发生后,因为间隔时间相对较短,前一次地震引起的加积井区的应力变化和含水层系统的水动力条件变化,在后一次地震发生时,还未恢复到正常的背景状态,影响了水位对后一次地

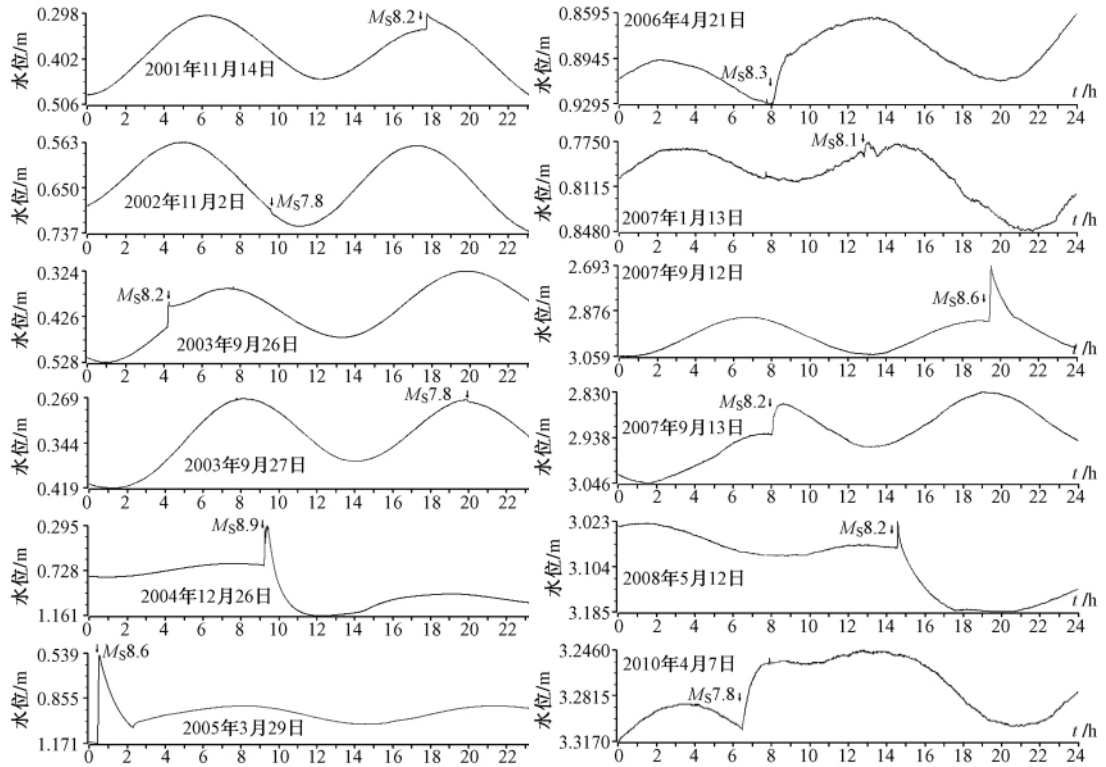


图3 2001年1月~2010年4月琼海加积井水位对远大震 ( $M_s \geq 7.8$  级) 的同震响应图

震的同震响应效果,导致该井水位对两次地震的响应幅度不一致。

### 3.3 同震响应的方向性

加积井水位记录地震波的能力也表现出明显的方向性,对于来自不同方向的地震,同震响应特征有所不同。从表1可看出,对来自东北、西南、西北等3个方向的大多数地震,该井水位均有较好的同震响应,且西南和西北两方向的地震响应曲线比东北方向的更清晰,响应幅度更大,持续时间更长;而对于来自东南方向的地震,却没有同震响应,这与中国大陆内的观测井对来自东南方向的地震响应更好的现象(汪成民等,1988)不同。分析井孔周围的地质构造环境后认为,此现象的产生可能与该井东南方向的龙江-温泉断裂有关,该断层的存在可能削弱了地震波的传播能量,起到一种阻隔的作用。另外,该方向上大震震中距离井孔较远,因此也不排除井震距大的因素。这一现象值得进一步研究。

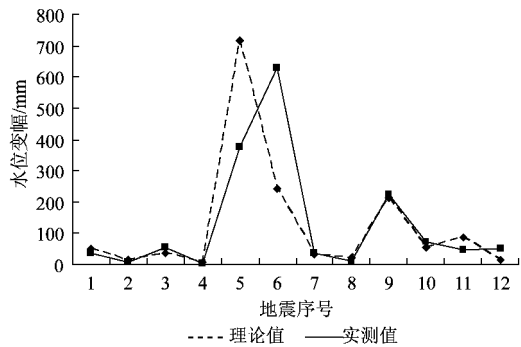


图4 加积井水位同震阶变的变幅实测值与理论值的对比

## 4 关于井水位同震响应机制的讨论

### 4.1 两次苏门答腊地震时的水位变化方向相反的机制

2004年12月26日印尼苏门答腊  $M_s$ 8.9 地震和 2005年3月29日印尼-尼亚斯岛  $M_s$ 8.6 地震时,加积井水位均出现陡升-陡降型变化(图3)。然而前一个地震引起的水位阶升-阶降后,水位没有恢复到原来的背景值,而是下降了一个台阶,后一个地震引起的水位上升台阶使水位恢复到原来的背景值(图5)。据哈佛大学网站<sup>①</sup>提供的结果,印尼2次巨大地震都发生在苏门答腊断层上,震源机制一致,均为逆断层,同一构造上破裂方式相同的地震对同一观测井孔的水位影响方式应是相同的。这两次地震的水位同震阶变的幅度基本一致(均为0.25m),但变化的方向却相反,前者为阶降,后者突升(图5(a))。若经移动曲线,水位几乎又回到了原来趋势性“下降-上升”的正常背景上(图5(b))。

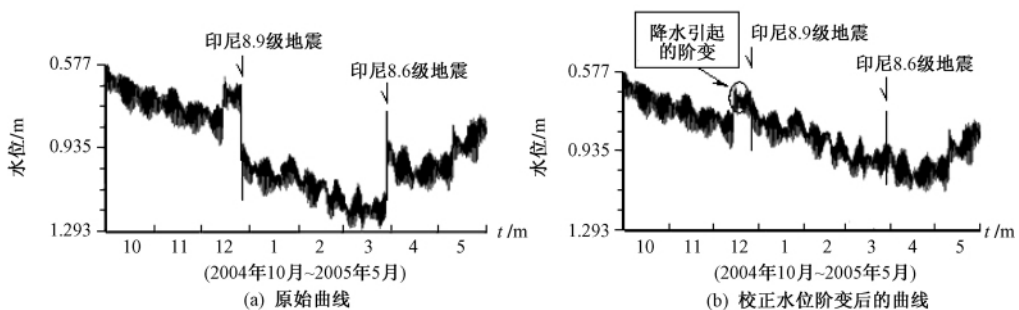


图5 加积井两次地震前后的水位整点值变化图  
(2005年4月下旬后出现的上升为降水引起的正常年变化)

对于此现象,目前尚难给出科学的解释。笔者认为,可能是第一个地震的地震波作用改变了加积井的井-含水层系统的某些特征,井与含水层间水的交替能力变弱,无法使井水位恢复到原始的背景值;也可能是第一个地震的地震波作用改变了井区的应力状态,使含水层发生“永久”性的拉张,其孔隙压力变小,导致井水位“永久”性下降;而由于第一个地震时的地震破裂呈向北发展,第二次地震时的破裂是向西南发展,两次地震对加积井区的影响不同,第二次地震引起的无论是加积井区的应力状态还是井-含水层系统的水动力条件与第一次地震的影响量相当,方向相反。然而,究竟属于上述两种推测中的哪一种,尚待今后的研究。

另外,同是发生在千岛群岛相隔仅3个月的两次地震,加积井水位对2007年1月13日8.1级地震有较好的同震响应,阶变幅度达12mm,但对2006年11月15日8.0级地震未产生同震响应。据哈佛大学网站<sup>①</sup>的结果,发现2006年11月15日地震断层是逆断层兼右旋走滑为主,而2007年1月13日地震为正断层兼左旋走滑,表明地震破裂类型也可能是影响同震响应特征的另一因素,一口井复杂的响应现象可能受本地区局部应力状态的影响,也可能是多次大地震引起的含水层参数变化,或是一些未知因素共同作用的结果(晏锐等,

<sup>①</sup> [http://www.csdmc.ac.cn/newweb/data/hrv\\_cmt\\_p002.jsp](http://www.csdmc.ac.cn/newweb/data/hrv_cmt_p002.jsp).

2009) ,还有待进一步研究。

#### 4.2 引起井水位同震响应的地震波类型

为深入研究加积井水位同震响应与地震波之间的关系 ,笔者将加积井水位同震响应记录与海南琼中(19.0°N ,109.8°E)地震台的地震波记录进行了对比分析。该测震台站与该井之间的距离约为 70km ,可以忽略不计。水位观测中使用的时间校测方法是网络 IP 地址授时 ,误差在 0.1s 级 ,自带的 PC-104 工控机时钟每天的误差在 ms 级 ,能满足与地震波记录对比分析的精度。这里仅举出两个地震波形与水位同震响应曲线的对比实例(图 6、7)。通过分析统计(表 2)得出水位同震响应的时间与各类波到时的对应关系(表 2)。在产生同震响应的 12 次地震中 ,10 次是面波到达之时产生同震响应 ,2 次同震响应的时间与 S 波的到时相符 ,而 P 波到达时水位没有表现出同震响应。故同震响应主要发生在面波到达之时。

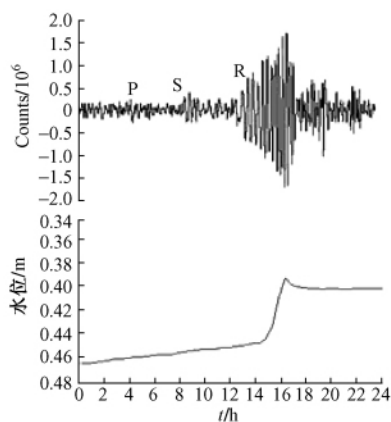


图 6 2003 年 9 月 26 日加积井水位同震响应曲线与相应的面波波形

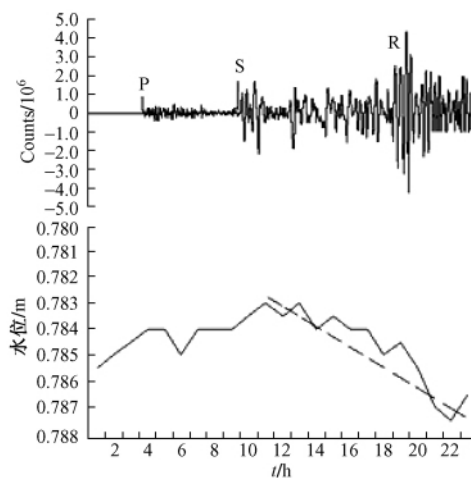


图 7 2007 年 1 月 13 日加积井水位同震响应曲线与相应的 S 波波形

由表 2 可见 ,当地震面波的周期为 20 ~ 35s ,振幅大于 2400 $\mu$ m 时才引起井水位同震响应 ,周期小于 20s 和大于 35s 的地震波没有引起井水位的同震效应。这与 Cooper(1965)的研究结果基本一致 ,即引起井水位同震响应的地震波作用周期为 15 ~ 20s ,而与舒优良等(2003)研究结果相差较大。这种差异可能是观测井的具体条件不同引起的 ,不同的井对不同频带的地震波具有响应能力。

#### 4.3 为什么井水位同震响应为非振荡型

前人的研究结果显示 ,井水位对地震波的响应形态多为振荡型 (Cooper ,1965 ;汪成民等 ,1988) ,但琼海加积井水位的响应形态没有振荡型 ,全为升降型或阶降型。为什么加积井水位振荡不起来呢 ?

如前所述 ,井水位对地震波的响应首先取决于井的固有周期 ,琼海加积井的固有周期为 20 ~ 30s ,该井水位对具有与此周期相对应的频带的地震波会作出响应 ,然而响应的形态 ,则与地震波的作用不同。这样的特征 ,可能是该井的特殊条件决定的 ,即该井含水层系统因含水层渗透性能弱 ( $K = 0.212\text{m/d}$ ) ,加上井孔的直径大且多变 (110 ~ 273mm ,主要含水层段

表 2 井水位同震响应与地震波的震相、振幅和周期

序号	地震名称	与同震响应 相对应的 波型	P 波		S 波		面波	
			振幅 ( $\mu\text{m}$ )	周期 (s)	振幅 ( $\mu\text{m}$ )	周期 (s)	振幅 ( $\mu\text{m}$ )	周期 (s)
1	2001 年昆仑山口西 8.2 级地震	面波	0.15	1.54	483.91	12.38	5068.17	21.61
2	2002 年印尼苏门答腊海中 7.8 级地震	面波	—	—	—	—	—	—
3	2003 年日本北海道 8.2 级地震	面波	0.31	1.26	504.90	23.53	2421.59	22.30
4	2003 年俄蒙中交界 7.8 级地震	面波	0.81	1.73	88.62	24.29	4515.82	20.23
5	2004 年麦阔里岛以北地区 7.8 级地震	无响应	0.14	1.2	307.27	42.09	805.31	44.36
6	2004 年印尼苏门答腊近海 8.9 级地震	面波	1.53	0.93	883.08	19.32	5322.68	22.52
7	2005 年印尼 - 尼亚斯岛 8.6 级地震	面波	0.06	1.2	451.22	11.64	4980.71	22.39
8	2006 年堪察加半岛东北地区 8.3 级地震	S 波	0.31	2.3	115.98	20.96	2289.09	22.98
9	2006 年汤加 7.9 级地震	无响应	0.34	2.22	122.51	33.59	255.32	46.86
10	2006 年千岛群岛 8.0 级地震	无响应	7.27	9.8	393.35	26.05	792.03	41.74
11	2007 年千岛群岛 8.1 级地震	S 波	25.88	12.55	455.82	21.55	922.66	26.78
12	2007 年所罗门群岛 7.8 级地震	无响应	—	—	376.84	28.47	1351.37	34.75
13	2007 年印尼苏门答腊南部海中 8.6 级地震	面波	0.17	1.64	1606.50	22.80	4400.37	29.75
14	2007 年印尼苏门答腊南部海中 8.2 级地震	面波	1.01	2.8	—	—	3441.08	34.51
15	2008 年四川汶川 8.2 级地震	面波	7.03	0.81	85.337	7.3	4100.11	20.40
16	2008 年新西兰南岛西海岸近海 7.7 级地震	无响应	—	—	—	—	—	—
17	2010 年苏门答腊北部 7.8 级地震	面波	0.133	1.07	704.24	24.03	2650.99	22.49

注:此表中地震波的周期与振幅数据均来自琼中基准地震台(19.0°N, 109.8°E)数字化地震波记录

直径为 110 ~ 130mm,而井水位变动在井孔直径 273mm 处,相差 2 倍之多),导致井筒内水柱的运动具有很大阻力。前人认为,井-含水层系统对水位振荡的阻尼  $\alpha$  的大小,大体可用  $\alpha = \sqrt{r_w(\omega S_s/K)}$  表示(Cooper, 1965),式中  $r_w$  为观测井半径,  $\omega$  为振荡频率,  $S_s$  为含水层单位储水率,  $K$  为渗透系数,当  $\alpha$  等于 2 时,高频信息将迅速衰减。由于不知道含水层的单位储水率  $S_s$ ,因而无法确切计算  $\alpha$  值,但由经验可知(地质矿产部水文工程地质技术方法研究队, 1998),泥质胶结的砂砾岩的单位储水率  $S_s$  大体与渗透系数  $K$  的量级相同,由此可推测频率  $\omega$  一定时,阻尼  $\alpha$  主要取决于观测井的直径( $d_w = 2r_w$ )。由于加积井的直径很大,  $\alpha$  远大于 2,即井-含水系统对井筒内水体的上下运动阻尼很大,只能表现为脉冲或阶升。

## 5 认识与问题

(1) 加积井水位对远震的同震响应形态一致,以上升阶变为主,属非振荡型变化,这种特征可能与加积井直径过大,井含水层系统对水位的振荡阻力很大有关。

(2) 加积井对地震波的响应能力具有明显的方向性。其中对于来自东北、西南、西北等 3 个象限的大多数地震,井水位有同震响应;对来自西南、西北的地震,其同震响应曲线比东北方向的更清晰,振幅更大,持续时间更长。

(3) 引起加积井水位同震响应的地震波主要是面波(R 波),部分是横波(S 波),其响应周期为 20 ~ 35s。

(4) 加积井水位同震响应幅度的大小,一般随震级的增大而增大,随井震距的增大而减小。但在特定情况下,可能还与震源破裂类型、井区应力状态等有关。



## 参考文献

- 地质矿产部水文工程地质技术方法研究队,1998,水文地质手册,552~553,北京:地质出版社。
- 付虹、刘强、邬成栋等,2007a,印尼8.7、8.5级远震对云南地区小震的激发和地下流体异常响应初探,地震研究,30(1),8~13。
- 付虹、邬成栋、刘强等,2007b,印尼巨大地震引起的云南水位异常记录及其意义,地震地质,29(4),873~881。
- 黄辅琼、迟恭财、徐桂明等,2000,大陆地下流体对台湾南投7.6级地震的响应研究,地震,20(增刊),119~125。
- 刘耀炜、杨选辉、刘永铭等,2005,地下流体对苏门答腊8.7级地震的响应特征,见:中国地震局监测预报司,2004年印度尼西亚苏门答腊8.7大地震及其对中国大陆地区的影响,131~258,北京:地震出版社。
- 舒优良、张世民,2003,周至深井水震波数字化记录与地震波记录的对比分析,地震地磁观测技术与研究,24(5),26~31。
- 汪成民、车用太、万迪堃等,1988,地下水微动态研究,81~93,北京:地震出版社。
- 杨竹转、邓志辉、赵云旭,2005,云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究,地震学报,27(5),569~574。
- 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,中国地震,25(3),8~13。
- 郑江蓉、徐桂明、李鸿宇等,2005,2004年12月26日印尼8.7级强震后江苏地区同震效应分析,防灾减灾工程学报,25(1),105~113。
- Cooper, H H, 1965, The Response of Well—Aquifer systems to Seismic Waves, J Geophys Res, 70(16), 3915~3926.
- Roeloffs, E A, 1998, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes, J Geophys Res, 103 (B1), 869~889.

## The characteristics analysis on co-seismic response of water level in the Jiaji well , Hainan

Gu Shenyi Liu Yang Zhang Hui Xie Xiaojing Ye Xiangding

Earthquake Administration of Hainan Province , Haikou 570203 , China

**Abstract** In this study , we analyzed co-seismic responses of water level in the Jiaji well during the strong earthquakes ( $M_s \geq 7.8$ ) from 2001 to 2010 with the epicentral distance less than 8000km. We counted the co-seismic form of the water level , and analyzed the relationship among the amplitude of water level , the magnitude and the epicentral distance , and then checked the seismic wave phases during the changes of water level. It was shown that : (1) the co-seismic forms of water level mainly represented step-increase with no oscillation; (2) the amplitude of water level had a certain connection with epicentral distance and magnitude; (3) co-seismic responses of Jiaji well showed a certain direction ; (4) the most of co - seismic responses were caused by surface waves , some of which had long period.

**Key words:** Water level Co-seismic response to strong earthquakes Jiaji well in Hainan