

# 北京塔院井数字化观测水温的 同震效应研究<sup>\*</sup>

杨竹转 邓志辉<sup>\*</sup> 陶京玲 谷圆珠 王志敏 刘成龙

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所)

**摘要** 基于北京塔院井数字化水温观测资料,分析了远震引起的水温同震效应,注意到塔院井水温同震变化总是具有下降—上升—恢复的过程,不受地震方位和震源机制的影响;水温同震下降幅度随震级的增大而增大,随震中距的增大而减小,三者之间有良好的关系;震后水温后效恢复上升幅值受水位动态影响。最后,对塔院井水温同震效应机理进行了探讨,初步研究结果显示,井孔中的水体受震荡激发而加速对流与掺混是导致水温先下降的主要原因;当井水受到地震波的作用时,对流加速,井内深部较热的水体上涌,而浅部较冷的水体下沉,水温探头将先观测到温度下降现象;震后水震波逐渐平息,探头附近井水温逐步恢复上升。

**关键词** 塔院井 水温变化 地震 同震效应

**中图分类号**: P332.6 **文献标识码**: A

## 引言

地下流体同震效应研究是揭示地壳介质对应力-应变过程响应最有效和直接的手段之一,近年来一直是研究的热点。前人对水位同震变化已进行过不同程度的研究(Quilty, Roeloffs, 1997; Roeloffs, 1998; King *et al*, 1999; Brodsky *et al*, 2003; David, Michael, 2003; 李有才, 1995; 黄辅琼等, 2000; 付虹等, 2002; 刘耀炜等, 2005; Huang, 2006)。对于水温同震变化也有学者做过一些研究。例如,付子忠(1989)首次用仪器观测到水温同震变化现象;车用太等(1996, 2003)和鱼金子等(1997)对首都圈一些观测井的水温同震变化进行过报道与研究;刘耀炜等(2005)广泛收集了大陆地下流体台网对 2004 年 12 月 26 日苏门答腊地震的同震响应,分析了水温响应特征的基本类型。但是,对于多次地震在同一口井的水温同震变化研究,国内还未见有报道。本文依据 2002 年以来塔院井数字化改造后的观测资料(仪器分辨率达到  $10^{-4}$  °C, 采样率 1 次/分钟),研究 1 000 km 以上多次大震引起的井水温同震效应的特征,并试图对其可能的成因机理进行分析讨论。

## 1 井区构造及水文地质条件

塔院井位于北京市海淀区花园东路 34 号院内,地质构造上处于近似平行的两条断裂

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(40372131)和科技部“十五”攻关项目(2004BA601B01-02-02)资助。

2006-07-26 收到初稿, 2007-01-08 决定采用修改稿。

<sup>+</sup> 通讯作者。e-mail: zhihui@ies.ac.cn

——八宝山断裂与黄庄—高丽营断裂之间的楔形地块上(图 1)。楔形地块西部边界的八宝山断裂起自北京市西南的房县长沟,经八宝山穿过海淀、中关村向清河延伸;断层面倾向东南,倾角在  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$  之间变化,断层性质为蓟县系雾迷山组逆掩于奥陶系之上的压性断裂,断裂距井孔最小水平距离为 4.5 km。地块东部边界的黄庄—高丽营断裂,起自河北

涿县西城坊,经大灰厂、黄庄、八里庄、高丽营直至怀柔,断层面倾向东,倾角较大,一般为  $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,向下延伸 50~60 km 切割到上地幔中,是一条北东向的张扭性断裂;两侧岩性差异较大,近地表处,断层上盘为晚新近纪,下盘为中侏罗统,断层两盘的相对垂直断距可达 1 200 m 以上;该断裂大体上生成于中生代后期,距井孔最小水平距离为 100 m 左右<sup>①</sup>。两条断层都具有较好的垂向导水性,但对于横穿的地下水流表现出相对的阻水性。

井区周围地表均被第四系松散层覆盖,主要含水层有:① 第四系砂砾孔隙含水层,一般由 3~6 层砂砾石、砂组成,含水层顶板埋深小于 20 m;② 洼里砾岩含水层,岩性为灰白、深灰、土黄、紫红等杂色砾岩,砾石成分主要为蓟县系白云岩、燧石等,浅埋于第四系下,一般埋深 70~80 m,该层溶蚀发育,含水丰富;③ 侏罗系火山岩孔隙裂隙含水层,岩性致密,裂隙不很发育,含水层渗透性、富水性较差(北京市地质局水文地质工程地质大队,1980)。以上含水层均具有承压性。

塔院井观测层为侏罗系安山质凝灰岩裂隙承压含水层,同位素测定结果表明为大气降水渗入成因,受西部山区的地下水侧向补给。该含水层地下水水力坡度小,约为 0.5‰,流速缓慢<sup>②</sup>。

2 井孔结构与观测

塔院井 1971 年由北京市地质局水文地质工程大队负责施工完成,原系地热勘探井孔,因为在预定深度段内增温不显著和出水量不大,所以既没有作为热水井也没有作为供水井利用。该井完钻井深 361.62 m,0~179.0 m 段第四系松散层部位用 168 mm 口径的套管封住,179.0~252.0 m 段中侏罗统泥质板岩隔水层有 146 mm 口径的套管,252 m 以下为中侏罗统安山质凝灰岩裂隙承压含水层,为主要观测层,过水段井径 130 mm(图 2),原始水位埋深为 3.29 m;该含水层单位涌水量为  $10\sim 20\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$ ,系贫水层;其渗透性较差,渗透系数为  $0.104\ 4\text{ m/d}$ ;塔院井水温  $22^{\circ}\text{C}$  左右,水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{-CaMg}$  型,矿化度小

①,② 田竹君,车用太,朱清钟,等. 1983. 塔院井孔水位动态实验站建设. 国家地震局地质研究所: 1-10.

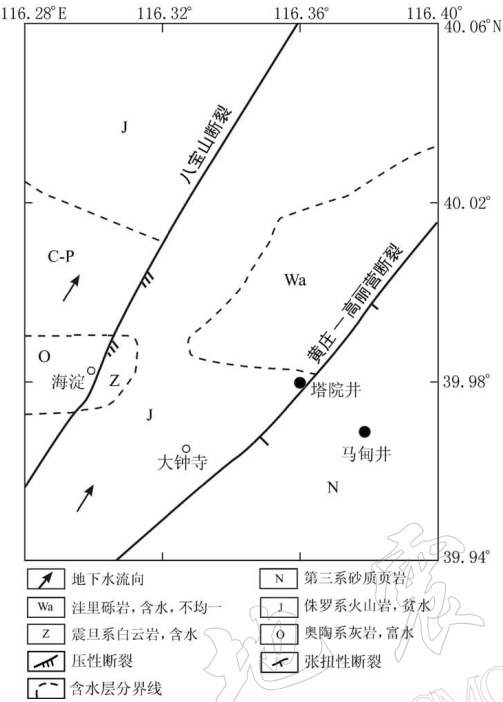


图 1 塔院井区水文地质简图

于1 g/L<sup>①</sup>.

塔院井水位动态模拟观测始于 1977 年 8 月, 2001 年 7 月数字化改造后, 使用 LN-3 型水位仪观测. 水温微动态观测始于 1991 年 9 月, 2001 年 7 月增加一台新的 SZW-1A 型数字式石英温度计, 新旧温度传感器分别置于 178 m 和 272 m 处(图 2), 改造后采样率由 1 次/小时提高到 1 次/分钟; 新增水温仪器分辨率为 10<sup>-4</sup> ℃, 时间误差在 1 分钟以内.

车用太和鱼金子(2004)以及谷圆珠等(2003)依据旧水温探头取得的观测数据, 分析了塔院井水温微动态正常变化规律、干扰和典型震例等. 因新旧探头放置位置不同, 采样率不同, 本文仅着重于数字化改造后的新探头观测资料进行分析研究.

3 水温变化基本特征

2002—2005 年塔院井水温水位日均值图(图 3)显示, 水温水位总体上呈缓慢下降趋势, 没有明显的季节变化特征, 水温平均日变幅度达到 0.000 1~0.000 2 ℃.

新探头记录到塔院井水温潮汐现象, 井水位上升, 温度上升, 温度的日潮差为 0.002~0.004 ℃. 水温的日起伏与水位潮汐的相位表现出较好的同步性, 其形态亦相似, 但没有水位潮汐形态规则.

塔院井水位水温对全球范围的远震有很好的同震效应. 水位同震效应表现为井水位波动, 记录到水震波, 水震波过后水位恢复到震前值. 井水温同震效应表现为快速下降, 然后回升, 回升后水温分为两种情况: 回升到震前值; 回升后水温值大大超过了震前值, 需要数周乃至数月时间才能恢复. 以 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚

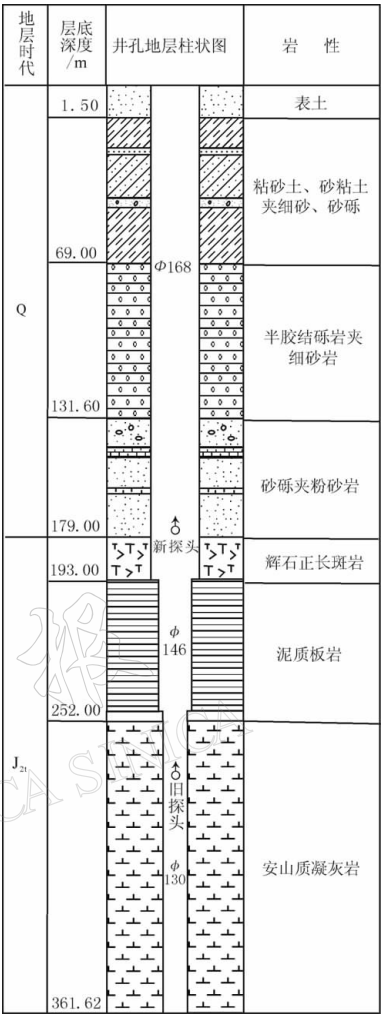


图 2 塔院井孔柱状图

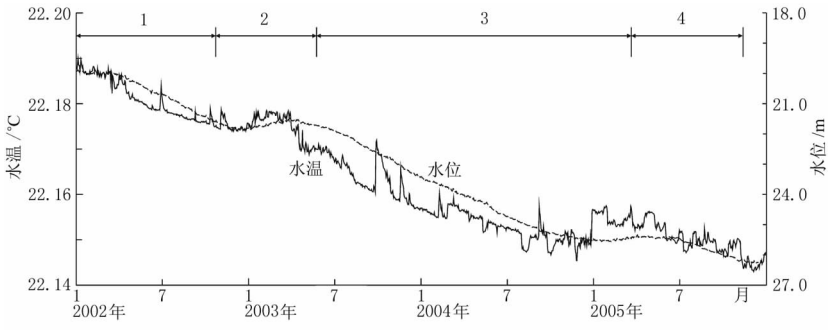


图 3 塔院井 2002—2005 年水温、水位日均值图

① 田竹君, 车用太, 朱清钟, 等. 1983. 塔院井孔水位动态实验站建设. 国家地震局地质研究所: 1-10.

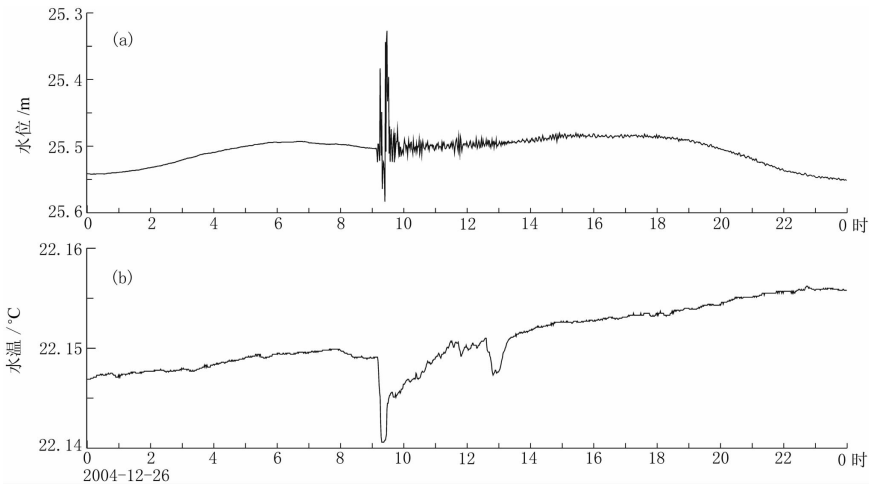


图 4 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚  $M_w9.0$  地震塔院井水位(a)、水温(b)同震效应分钟值曲线图

$M_w9.0$ 地震引起的同震效应为例(图 4). 该震发震时刻为 08 时 58 分 53 秒, 塔院井水位 09 时 08 分开始振荡, 之后很快恢复到原来的量值附近波动; 水温 09 时 10 分开始下降, 至 09 时 17 分降至最低值, 7 分钟时间内水温下降了  $0.0082\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 然后逐步上升, 并抬升到一个台阶, 大大超过了震前值.

4 水温同震效应

2002—2005 年塔院井水温记录到了井区外围  $1\ 255\sim12\ 253\text{ km}$  左右范围的多次中强震同震效应(图 5), 其中同震效应阶变幅度超过  $0.0020\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的有 25 次地震(表 1). 以阶变幅度  $0.0020\text{ }^{\circ}\text{C}$  作为最低值是为了保证同震异常的显著性和足够多的样本数.

由图 5 可见, 无论地震方位和震源机制如何, 25 次地震引起的塔院井水温同震变化总是下降后回升, 形态相似.

表 1 给出了各次地震到达塔院井的理论 P 波、S 波到时, 标注在图 5 曲线图上. 此外, 收集了白家疃地震台(距塔院井约  $22\text{ km}$ )2003—2004 年相应地震的 P 波、S 波、最大面波(图上标注为 R)到时资料, 其中 P 波、S 波与理论计算值基本相符.

我们注意到, 25 次地震中, 2002 年 6 月 29 日吉林汪清  $M_w7.3$ , 2003 年 9 月 26 日日日本北海道  $M_w8.3$ , 2004 年 12 月 26 日苏门答腊  $M_w9.0$ , 以及 2005 年 3 月 29 日苏门答腊  $M_w8.7$  级地震在 P 波之后、S 波到达之前水位开始震荡、水温开始下降; 其余地震在 S 波到达之后水位震荡、水温出现下降变化, 特别是 2003 年 1 月 22 日墨西哥哈利斯科州近海  $M_w7.5$  地震甚至是在最大面波到达之后水位、水温才开始变化.

对同一地区不同震级的成对地震而言, 例如 2003 年 9 月 26 日日本北海道地区  $M_w8.3$  和  $M_w7.4$  地震, 2004 年 12 月 26 日苏门答腊  $M_w9$  地震和 2005 年 7 月 5 日同一地区  $M_w6.7$  地震, 每对地震前者是在 P 波之后水温开始变化, 后者在 S 波列后水温开始变化.

因此, 认为水温响应起始时间受震级和距离的影响. 当震级足够大, 且距离较近时, 首先到达的 P 波即可引起水位波动和水温下降, 而且水震波的起始时间总是早于或等于水温下降起始时间.

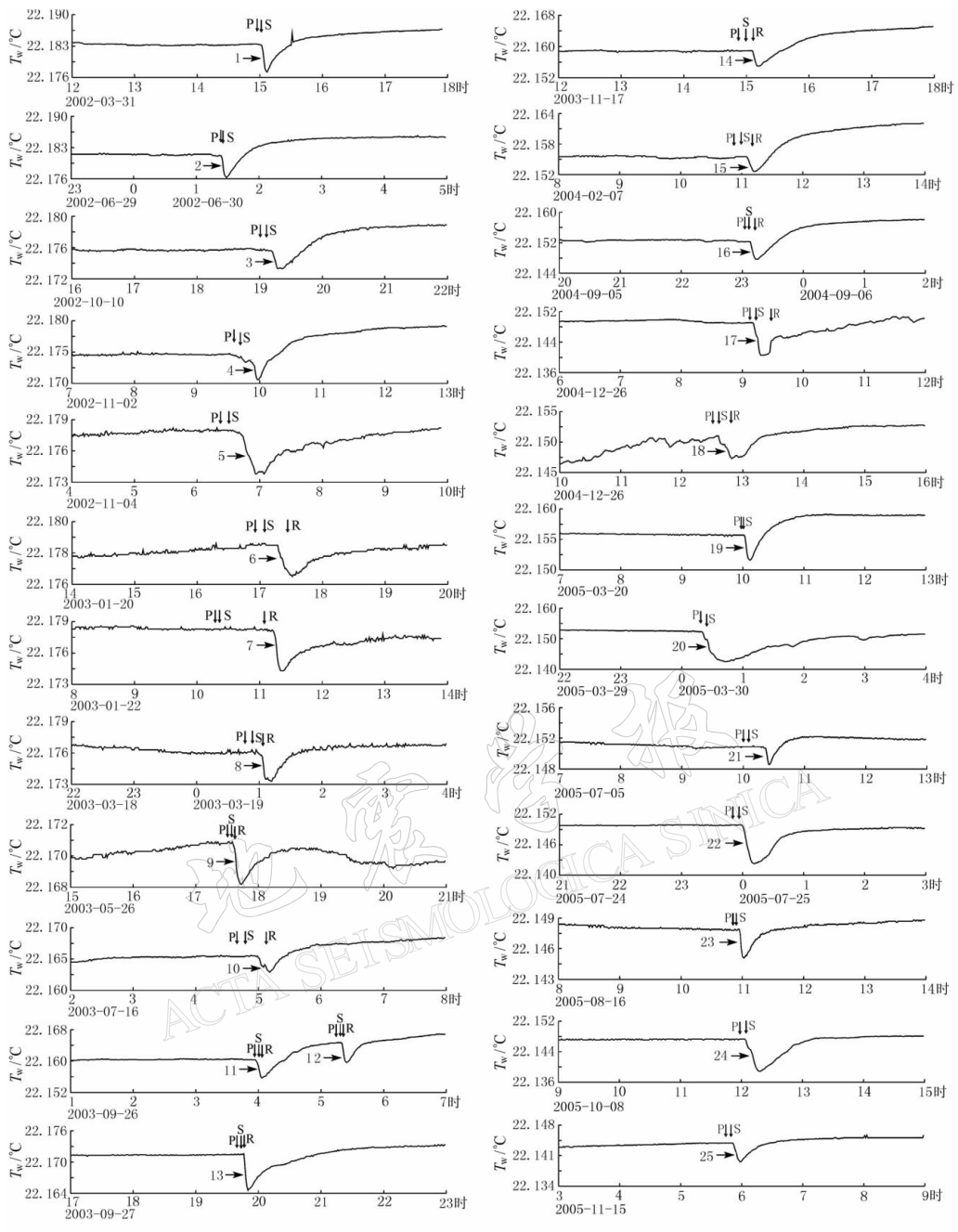


图5 2002—2005年地震引起的塔院井水温( $T_w$ )同震变化分钟值图

1. 台湾以东海中  $M_w 7.1$ , 震中距 1 829 km; 2. 吉林汪清  $M_w 7.3$ , 震中距 1 255 km; 3. 印尼伊里安地区  $M_w 7.6$ , 震中距 4 987 km; 4. 印尼苏门答腊北部海中  $M_w 7.4$ , 震中距 4 609 km; 5. 美国阿拉斯加  $M_w 7.9$ , 震中距 6 387 km; 6. 所罗门群岛  $M_w 7.3$ , 震中距 7 237 km; 7. 墨西哥哈利斯科州近海  $M_w 7.5$ , 震中距 12 253 km; 8. 拉特群岛  $M_w 7.0$ , 震中距 4 802 km; 9. 日本本州近海  $M_w 7.0$ , 震中距 2 162 km; 10. 卡尔斯伯格海岭  $M_w 7.6$ , 震中距 6 794 km; 11. 日本北海道地区  $M_w 8.3$ , 震中距 2 315 km; 12. 日本北海道地区  $M_w 7.4$ , 震中距 2 288 km; 13. 俄、蒙、中交界  $M_w 7.3$ , 震中距 2 487 km; 14. 拉特群岛  $M_w 7.8$ , 震中距 4 851 km; 15. 印尼伊里安岛  $M_w 7.3$ , 震中距 5 249 km; 16. 日本本州南部近海  $M_w 7.4$ , 震中距 1 992 km; 17. 印尼苏门答腊西北近海  $M_w 9.0$ , 震中距 4 565 km; 18. 尼科巴群岛  $M_w 7.2$ , 震中距 4 354 km; 19. 日本  $M_w 6.6$ , 震中距 1 401 km; 20. 苏门答腊北部  $M_w 8.7$ , 震中距 4 639 km; 21. 印尼苏门答腊  $M_w 6.7$ , 震中距 4 668 km; 22. 尼科巴群岛  $M_w 7.3$ , 震中距 4 298 km; 23. 日本本州东海岸近海  $M_w 7.2$ , 震中距 2 215 km; 24. 巴基斯坦  $M_w 7.6$ , 震中距 3 796 km; 25. 日本本州以东海中  $M_w 7.0$ , 震中距 2 463 km

表 1 2002—2005 年引起塔院井水温同震变化超过 0.002 ℃ 的地震及水温变化

序 号	日 期 年-月-日	发震时刻		震中位置		震源 深度 /km	$M_w$	震中距 /km	$t_p$ /时:分	$t_s$ /时:分	$t_{wl}$ /时:分	$t_i$ /时:分	$\Delta h_r$ / $10^{-4}$ ℃	$\Delta h_o$ / $10^{-4}$ ℃	$\Delta h_e$ / $10^{-4}$ ℃	地 点
		时:分:秒		$\varphi_N/^{\circ}$	$\lambda_E/^{\circ}$											
1	2002-03-31	14:52:50	24.28	122.18	32	7.1	1829	14:56	15:00	14:59	15:00	15:00	37	59	43	台湾以东海中
2	2002-06-29	01:19:30	43.75	130.67	566	7.3	1255	1:22	1:24	1:22	1:22	1:23	39	49	54	吉林汪清
3	2002-10-10	18:50:20	-1.76	134.3	10	7.6	4987	18:59	19:05	19:08	19:08	19:11	29	23	39	印尼伊里安地区
4	2002-11-02	09:26:10	2.82	96.08	30	7.4	4609	9:34	9:40	9:45	9:45	9:50	48	31	37	印尼苏门答腊北部海中
5	2002-11-04	06:12:41	63.52	-147.44	4	7.9	6387	6:22	6:30	6:31	6:31	6:37	无	41	42	美国阿拉斯加
6	2003-01-20	16:43:06	-10.49	160.77	33	7.3	7237	16:54	17:03	17:08	17:08	17:16	无	20	30	所罗门群岛
7	2003-01-22	10:06:34	18.77	-104.104	24	7.5	12253	10:21	10:25	11:01	11:01	11:17	无	39	28	墨西哥哈利斯科州近海
8	2003-03-18	00:36:17	51.27	177.98	33	7	4802	0:45	0:52	0:55	0:55	0:59	无	27	29	拉特群岛
9	2003-05-26	17:24:33	38.85	141.57	68	7	2162	17:29	17:33	17:33	17:33	17:35	无	27	39	日本本州近海
10	2003-07-16	04:27:50	-2.6	68.38	10	7.6	6794	4:38	4:46	4:52	4:52	4:58	20	25	35	卡斯伯伯格海岭
11	2003-09-26	03:50:06	41.81	143.91	27	8.3	2315	3:55	3:59	3:54	3:54	3:56	44	46	73	日本北海道地区
12	2003-09-26	05:08:00	41.77	143.59	33	7.4	2288	5:13	5:17	5:17	5:17	5:19	62	50	46	日本北海道地区
13	2003-09-27	19:33:25	50.04	87.81	16	7.3	2487	19:38	19:42	19:42	19:42	19:45	16	69	43	俄、蒙、中交界
14	2003-11-17	14:43:06	51.15	178.65	33	7.8	4851	14:51	14:58	15:02	15:02	15:05	62	40	44	拉特群岛
15	2004-02-07	10:42:35	-4	135.02	10	7.3	5249	10:51	10:58	10:59	10:59	11:05	65	29	33	印尼伊里安岛
16	2004-09-05	22:57:18	33.18	137.07	10	7.4	1992	23:01	23:05	无记录	无记录	23:07	57	46	49	日本本州南部近海
17	2004-12-26	08:58:53	3.3	95.98	30	9	4565	9:06	9:12	9:08	9:08	9:10	大幅上升	82	82	印尼苏门答腊西北近海
18	2004-12-26	12:21:29	6.91	92.96	39	7.2	4354	12:29	12:35	无法辨认	无法辨认	12:36	无法分辨	37	34	尼科巴群岛
19	2005-03-20	09:53:41	33.81	130.13	10	6.6	1401	9:57	9:59	9:59	9:59	9:59	32	40	37	日本
20	2005-03-29	00:09:36	2.09	97.11	30	8.7	4639	0:17	0:23	0:18	0:18	0:20	无	97	70	苏门答腊北部
21	2005-07-05	09:52:03	1.82	97.08	21	6.7	4668	10:00	10:06	10:11	10:11	10:19	11	23	26	印尼苏门答腊北
22	2005-07-24	23:42:06	7.92	92.19	16	7.3	4298	23:49	23:55	23:56	23:56	0:00	无	74	36	尼科巴群岛
23	2005-08-16	10:46:28	38.28	142.04	36	7.2	2215	10:51	10:55	10:55	10:55	10:57	无	28	42	日本本州东海岸近海
24	2005-10-08	11:50:40	34.54	73.59	26	7.6	3796	11:57	12:03	12:02	12:02	12:03	无	84	43	巴基斯坦
25	2005-11-15	05:38:51	38.11	144.9	11	7	2463	5:43	5:48	5:49	5:49	5:50	无	43	37	日本本州以东海中

注: 矩震级  $M_w$  来源于网上哈佛大学的结果, 发震时刻为北京时间,  $t_p$  表示理论 P 波到时,  $t_s$  表示理论 S 波到时,  $t_{wl}$  表示水位响应起始时间,  $t_i$  表示水温响应起始时间,  $\Delta h_r$  表示升降后升幅度,  $\Delta h_o$  表示实际变化幅度,  $\Delta h_e$  表示预测变化幅度。

由表 1 中水温实际变化幅度一栏注意到水温下降幅度随震级的增大而增大, 随震中距的增大而减小。其中印尼苏门答腊 2004 年 12 月 26 日  $M_w 9.0$  地震和 2005 年 3 月 29 日  $M_w 8.7$  地震引起的温度变化幅度最大。

Roeloffs(1998)、杨竹转等(2005)对井水位同震阶变与震级的大小和震中距进行了统计, 得到如下关系:

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

式中,  $\Delta h_i$  为水位变化幅值;  $M$  为震级;  $D$  为震中距;  $a, b_1, b_2$  为常数。

对塔院井水温同震变化做类似分析研究,  $\Delta h_i$  表示水温变化幅度,  $M$  为矩震级, 表 1 中对应参数代入式(1)进行二元回归分析, 得到如下关系式:

$$\lg \Delta h_i = 0.219M - 0.342 \lg D + 1.196 \quad (2)$$

式(2)表明水温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。表 1 中预测变化幅度  $\Delta h_e$  即是将震级和震中距代入式(2)计算出的结果。与实际变化幅度  $\Delta h_o$  相比, 大多数结果还是很相近的。

到达井区的地震波能量大小受震级和震中距影响。震级越大, 震中距越小, 地震波能量越大, 井水掺混强烈, 水温变化幅度也相对较大。所以水温变化幅度与震级、震中距之间具有式(2)的关系。

## 5 分析与讨论

### 5.1 水温同震效应具有下降—上升—恢复过程的机理分析

无论震源机制和地震方位如何, 塔院井水温同震效应总是具有相同的形态特征: 先下降, 然后上升恢复。这与 Kitagawa *et al* (1996)报道的日本一个温泉震后水温总是上升的研究结果相类似。

塔院井水位同震效应记录到水震波, 一些学者(Quilty, Roeloffs, 1997; Roeloffs, 1998; Brodsky *et al*, 2003)研究认为, 承压含水层对发生在几千公里乃至上万公里外地震的同震响应无法用静态应力场的变化来解释, 而应解释为地震波与含水层交互作用的结果。地震波引起的含水层体膨胀和井—含水层系统垂直运动造成的压力水头波动都可引起井水位的变化, 其中以可同时引起膨胀和垂直运动的瑞雷波造成的井水波动最大。

井水位震荡, 同井水温下降—上升—恢复的特征也与一些学者的研究报道相一致。据刘耀炜等(2005)的统计, 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊地震后, 井水位出现振荡的 24 口井孔中, 没有发现同井深部温度振荡(温度石英传感器响应频率小于 1 s)或者快速上升的情况。其温度的变化可以分为两种情况: 17 口井温度下降, 部分井孔下降后温度上升; 其余 7 口观测层水温日变化较大的井水温度无变化。

塔院井水位水温固体潮表现为水位上升时水温上升, 水位下降时水温也下降; 来源于深部含水层的水温较高, 倘若以井水与深部含水层的热交换为主, 水温同震效应应该是上升, 而实际上水温总是先下降, 因此无法用井水与深部含水层的热交换来解释。也有学者认为地下水振荡过程中, 水中的气体从溶液中分离、逸出, 伴随着吸收周围的热量做功的弹性膨胀过程, 导致了温度的下降。水中气体的积累需要时间, 依照此种观点的解释, 对于发震时间相距很近的两次地震, 后一次地震因分离、逸出气体的减少, 损失的热量少, 下降幅度会变小。在本研究中, 作者发现 2003 年 9 月 26 日不到两个小时内在日本北海道

地区连续发生 2 次地震,前一次较大震级的地震引起的水温下降幅度反而小于后一次地震.表 1 中其它发震时间间隔较短的地震也没有出现后续地震水温阶变小的现象,因此很难全部用水中的气体从溶液中分离、逸出的理论来解释.

作者认为,导致塔院井水温下降的因素可能是多方面的,其中井孔中的水体受震荡激发而加速对流与掺混是导致水温同震下降的主要原因.水温探头一般放置在较深的部位,在正常情况下温度较高.当受到地震波的作用时,井孔中水体对流加速,深部热水体上涌,而浅部较冷水体下沉,水温探头将先观测到温度下降现象.随着水震波的逐渐平息,探头附近井水温逐步恢复上升.

震后水位与水温效应的时间关系也支持了作者的认识.由表 1 中可见,除去两个震例以外(2004 年 9 月 5 日本州东海岸近海  $M_w7.4$  因水位仪故障水震波记录缺失;由于 2004 年 12 月 26 日 08 时 58 分印尼苏门答腊  $M_w9.0$  地震的水震波影响,同日 12 时 21 分尼克巴群岛  $M_w7.2$  地震水震波起始时间无法分辨),塔院井的水震波响应起始时间总是早于或等于水温响应起始时间.两者时间相差最大的是 2003 年 1 月 22 日距塔院井 12 253 km 的墨西哥哈利斯科州近海 7.5 级地震,水温响应起始时间 16 分钟前水位就开始波动.这一现象说明,地震波激发井水震荡,深浅不同温度水体混合,导致了深部水温探头附近水体温度下降.

## 5.2 下降后水温回升幅度

表 1 中水温下降后回升幅度一栏为回升后的水温值减去下降前的量值.可以看出,有些地震后水温回升到下降前的量值,另一些地震后水温回升超过下降前的量值.通过对比分析发现,此类现象具有阶段性.在 2002 年 1 月—2005 年 12 月的 4 年内,可划分出 4 个时间段.以发震日期来区分,4 个时段分别为:2002 年 11 月 4 日之前、2002 年 11 月 4 日—2003 年 5 月 26 日、2003 年 7 月 16 日—2005 年 3 月 20 日和 2005 年 3 月 29 日—2005 年 11 月 15 日.其中,第一和第三时段发生的地震震后水温回升幅度较大,第二和第四时段震后水温无明显升高.

2002—2005 年水位和水温日均值观测曲线图上(图 3)标出了 4 个时间段.对照表 1 水温下降后回升幅度一栏,我们注意到:第一和第三时段,水位水温同步下降,下降速率较快,该时段发生的地震震后水温上升幅度较大(超出震前  $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上);在第二和第四时段,水位不再快速下降,相对稳定,甚至出现小幅上升,深部水温也处于相对高值状态,该时段发生的地震震后水温无明显升高(与震前水温差异  $<0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).这一观测事实说明,地震后水温回升幅度很可能与水位水温动态有关:当水位相对稳定,水温相对高值,震后水温回升到下降前的量值;而当水位水温处于下降较快时期,深部含水层地下水的交换过程及特征不同于稳定阶段,含水层与井孔水体的热流交换不断减少,受到地震波的激发时,两者的热流交换加速,井孔水体温度回升将可能超过地震前的量值.可能还有其它的因素影响到水温回升幅值,需要进一步积累资料进行研究.

此外,有些巨大地震的作用也可能引起井孔水温动态发生大的变化.例如,2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊  $M_w9.0$  地震后,水温上升到了一个新的水平,并保持了相当长的时间.

## 5.3 水温实际变化幅度与预测幅度误差分析

由表 1 可以看出,水温实际变化幅度与预测变化幅度差异较大的有 4 次地震.其中



2003 年 9 月 27 日俄、中、蒙交界处  $M_w 7.3$  地震、2005 年 7 月 24 日尼科巴群岛  $M_w 7.3$  地震和 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦  $M_w 7.6$  地震, 实际变化幅度大于预测变化幅度; 而 2003 年 9 月 26 日 03 时 50 分日本北海道  $M_w 8.3$  地震, 实际变化幅度远小于预测变化幅度. 初步分析认为, 水温实际变化幅度与预测变化幅度的差异可能受震源构造方位、地震波传播路径的影响, 使得井孔受到地震波作用的方向和方式不同所致.

前文已述, 塔院井距离黄庄—高丽营断裂只有 100 m, 该断裂西侧为刚性较大的侏罗系安山质凝灰岩, 东侧为刚性较小的巨厚的隔水性较强的新近系泥质岩层. 断裂两侧介质的差异对不同方向的地震波产生不同的影响, 进而影响井水温效应的幅度.

当地震波来自西部时, 将首先作用于黄庄—高丽营断裂西侧刚性较大的侏罗系安山质凝灰岩, 使井水发生较强混合, 导致水温探头附近温度发生较大的下降. 当地震波来自东部时, 将首先作用于黄庄—高丽营断裂东侧塑性较大的新近系泥质岩层, 部分能量被吸收, 井水混合作用减弱, 水温探头附近温度下降幅度也减少. 在 25 个震例中, 西部有 2 个: 2003 年 9 月 27 日俄、中、蒙交界处  $M_w 7.3$  地震和 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦  $M_w 7.6$  地震. 它们都导致了水温实际下降幅度大于预测变化幅度. 2005 年 7 月 24 日尼科巴群岛  $M_w 7.3$  地震虽然发生在南部, 但其震源机制解不同于这一地区其它逆冲型地震, 地震波的作用方式类似于西部, 引起了较大的水温下降幅度.

2003 年 9 月 26 日 03 时 50 分日本北海道  $M_w 8.3$  地震使塔院井水温下降幅度远小于预测变化幅度, 可能也是由于特殊发震构造部位所致.

上述分析是初步的, 实际的原因有待进一步研究.

## 6 初步结论

基于塔院井 2002 年以来数字化观测资料, 通过对水温同震效应的分析研究, 得到以下认识:

- 1) 水温同震变化形态总是具有下降—上升—恢复的过程, 不受地震方位和震源机制影响.
- 2) 水温同震下降幅度随震级的增大而增大, 随震中距的增大而减小.
- 3) 水温响应起始时间受震级和距离的影响. 当震级足够大, 且距离较近时, 首先到达的 P 波即可引起水位波动和水温下降.
- 4) 塔院井的水位同震效应表现为水震波, 水震波起始时间总是早于水温同震变化的起始时间. 井孔中的水体受震荡激发而加速对流与掺混可能是导致水温同震下降的主要原因.

总结上述结果, 水温同震变化机理可以作如下解释: 地震波向外传播, 到达井区所在的含水层. 受到地震波的作用, 井孔内对流加速, 井孔深部较热的水体上涌, 而浅部较冷的水体下沉, 水温探头将先观测到温度下降现象. 随着水震波的逐渐平息, 探头附近井水温逐步恢复上升.

鉴于高采样率的数字化观测资料时间较短, 及目前其它资料有限, 所得到的认识只是初步的. 如果能记录到时间分辨率更高的水震波, 与同型号不同深度上井水温度的同震变化加以对比, 结合距井点最近的地震波记录, 将能够深入研究, 得到更多的认识.

本研究得到车用太研究员、徐道一研究员和白家疃地震台郭襄云的帮助,在此一并深表感谢。

## 参 考 文 献

- 北京市地质局水文地质工程地质大队. 1980. 平原区第四系含水层分布图[M]//北京市水文地质图集. 上海: 中华印刷厂: 25.
- 车用太, 鱼金子, 刘春国. 1996. 我国地震地下水温度动态观测与研究[J]. 水文地质工程地质, (4): 34-37.
- 车用太, 刘喜兰, 姚宝树, 等. 2003. 首都圈地区井水温度的动态类型及其成因分析[J]. 地震地质, 25(3): 404-419.
- 车用太, 鱼金子. 2004. 塔院井水温的大幅度奇异变化[G]//地下流体典型异常的调查与研究. 北京: 气象出版社: 414-418.
- 付子忠. 1989. 地热动态观测与地热前兆[G]//国家地震局地壳应力所编. 地壳构造与地壳应力文集. 北京: 地震出版社: 1-7.
- 付虹, 刘丽芳, 王世芹, 等. 2002. 地方震及近震地下水同震震后效应研究[J]. 地震, 22(4): 55-66.
- 谷元珠, 车用太, 鱼金子, 等. 2003. 塔院井水温微动态研究[J]. 地震, 23(1): 102-108.
- 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[J]. 地震, 20(增刊): 119-125.
- 李有才. 1995. 四川深井水位同震阶变异常与地震预报[J]. 四川地震, (3): 32-35.
- 刘耀炜, 杨选辉, 刘用铭, 等. 2005. 地下流体对苏门答腊 8.7 级地震的响应特征[G]//中国地震局监测预报司编. 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. 北京: 地震出版社: 131-258.
- 杨竹转, 邓志辉, 赵旭旭, 等. 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.
- 鱼金子, 车用太, 刘伍洲. 1997. 井水温度微动态形成的水动力学机制研究[J]. 地震, 17(4): 389-396.
- Brodsky E E, Roeloffs E A, Woodcock D, *et al.*, 2003. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 108(B8): 2 390.
- David R M, Michael M. 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes[J]. *Science*, 300(27): 2 047-2 049.
- Huang F. 2006. Groundwater changes in Yunnan, China induced by the 2004 Sumatra earthquake[C]. *EOS Trans AGU*, 87(52): Fall Meet Suppl, Abstract S13C-0256.
- King C Y, Azuma S, Igarashi G, *et al.*, 1999. Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan[J]. *J Geophys Res*, 104(B6): 13 073-13 082.
- Kitagawa Y, Koizumi N, Tsuskuda T. 1996. Comparison of post-seismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain release: Yudani hot spring, Japan[J]. *Geophys Res Lett*, 23(22): 3 147-3 150.
- Quilty E G, Roeloffs E A. 1997. Water level changes in response to the December 20, 1994 M4.7 earthquake near Parkfield, California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 87: 310-317.
- Roeloffs E A. 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield California, due to local and distant earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 103(B1): 869-889.

## COSEISMIC EFFECTS OF WATER TEMPERATURE BASED ON DIGITAL OBSERVATION FROM TAYUAN WELL, BEIJING

Yang Zhuzhuan Deng Zhihui Tao Jingling Gu Yuanzhu  
Wang Zhimin Liu Chenglong

*(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)*

**Abstract:** On the basis of digital records from Tayuan well, we study coseismic effects of water temperature caused by remote earthquakes. The records show that the water temperature changes are consistently following the process of drop-rise-recovery regardless of focal mechanism or epicentral directions. The step amplitude of water temperature increases with the increase of earthquake magnitude, and decreases with the decrease of epicentral distances. They have rather well correlation. Water temperature rising after earthquake is influenced by water level variations. Finally, the mechanisms of coseismic effects of water temperature have been discussed. Preliminary study shows that accelerated convection and mixing of different temperature water in virtue of seismic wave are the main causes of water temperature drops. Seismic wave accelerates water convection, which causes warm water to move up from deeper part of the well and cold water to go down from the upper part. Temperature probe will detect water temperature drops at early stage. After the occurrence of earthquake, as the fluctuation of water level gradually quiets down, water temperature near the probe begins to rise.

**Key words:** Tayuan well; water temperature; earthquake; coseismic effects