

马玉川、王博, 2014, 祁县井水温和水位的奇异潮汐关系探讨, 中国地震, 30(1), 55~63。

# 祁县井水温和水位的奇异潮汐关系探讨

马玉川 王博

中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

**摘要** 山西祁县井水温潮汐相位超前于水位, 异于正常的水温和水位潮汐的动态关系。本文介绍了此现象的记录图像, 通过水温和水位同震响应数据核实仪器时间系统, 证实此现象是客观的; 利用调和分析方法计算出逐月水温与水位潮汐变化的时间差, 表明此现象存在于整个观测中。根据水温和水位潮汐相位相关性分析及观测条件调查, 认为祁县井水温潮汐相位超前于水位的现象是在特定观测条件下, 因井水流动不畅引起的特殊的水温水位关系。

**关键词:** 水位 水温 潮汐 同震

[文章编号] 1001-4683(2014)01-055-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

我国地震地下流体观测实践中, 同井水温和水位的对比观测已有 30 多年历史, 分析二者之间的关系, 对认识井水温度的动态及其机理(鱼金子等, 1997; 车用太等, 2008)、了解应力加载作用引起的地下介质变化(刘耀炜, 2009; 杨竹转, 2011; 鱼金子等, 2012)、甚至捕捉地震前兆异常等(曹新来等, 2001; 张立等, 2009), 都具有重要的意义。

水温观测和水位观测一样, 也能记录到地球固体潮汐, 而水温潮汐现象是在高精度水温观测技术出现后, 才被报道和关注(Shimamura et al, 1984; 付子忠, 1988)。之后, 学者们对各类地质环境中的水温潮汐机理进行了解释, 包括体应变原理(Shimamura et al, 1984; Kitagawa et al, 1996; 赵刚等, 2009)、流量潮汐变化成因(Furuya et al, 1988; Koizumi, 1990; Mogi et al, 1989; 马玉川等, 2010)、水动力学模式(车用太等, 2004、2008; 鱼金子等, 1997; 张子广等, 2007; Demezhko et al, 2012)等。我们在山西祁县测井观测到井水温潮汐相位超前于水位的奇异现象, 这无法用现有的机理进行解释, 对这种特殊的井水温和水位关系进行分析, 可为认识同井水温和水位的关系、水温动态及其机理和水温前兆观测等提供参考。

本文报道了祁县井水温和水位的奇异潮汐关系, 从时间序列的角度, 对祁县井资料进行了比较全面的分析, 并对水温和水位潮汐关系可能的成因机理进行了讨论。

## 1 祁县井及其地下水动态观测

祁县井位于山西省晋中断陷盆地中部, 井点坐标为 112. 29°E、37. 35°N, 井点地面海拔

[收稿日期] 2013-01-04; [修定日期] 2013-01-16

[项目类别] “十二五”国家科技支撑项目(2012BAK19B02-04)资助

[作者简介] 马玉川, 生于 1985 年, 男, 研究实习员, 从事地震地下流体动力学方面的研究。

E-mail: mayuchuan07@126.com

高程为 753m。该井地处山西“多字型”构造的中部,附近有 NE 向的平遥、太古、交城断裂,距平遥断裂约 3km。井区地下水受东部山区径流补给,排泄于西部的汾河(图 1(a))。

观测井位于祁县县城赵镇常家堡村东侧,附近为耕地,在观测井 100m 外的西北、东北和东南方向有 3 口民用地下水开采井,深约 100m,对祁县井的地下水动态有影响<sup>①</sup>。

祁县井完钻井深 442.19m,井孔由地面以下至 291.65m 段的第四系、第三系松散层用直径 146mm 的钢管封固井壁;291.65m 以下为裸孔,为三叠系变质火山碎屑岩、页岩及凝灰岩裂隙承压含水层;291.65 ~ 349.33m 段井径为 130mm;349.33 ~ 442.19m 段井径为 110mm (图 1(b))。成井时,水位埋深 6.09m(山西省地震局 2004)。

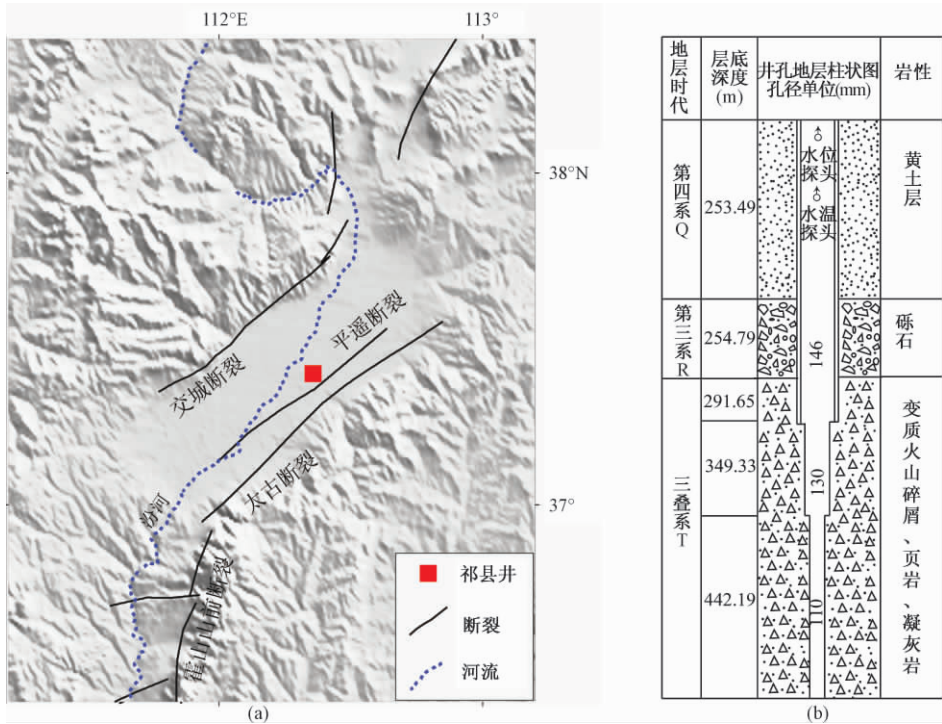


图 1 祁县井区地质(a)与观测井地层岩性图(b)

祁县井水位观测始于 1986 年,2007 年 5 月开始数字化观测,观测仪器为 LN-3A 型水位仪,水位探头置于地面以下 37.7m,后因仪器校测等原因多次在 31 ~ 38m 之间调整探头位置。祁县井为静水位观测井,观测值实为水位埋深(本文简称水位)。多年观测结果表明,该井水位多年趋势变化平稳,年变规律清晰,每年 4 ~ 8 月为下降期、8 月至次年的 4 月为上升期,年变幅为 10.5m 左右。依据介休气象观测站(坐标为 111.917°E、37.03°N,距祁县井 60km)的气压和降水量资料(数据源自中国气象科学数据共享服务网),气压对水位多年动态影响不大,因为几十百帕的气压变化不足以引起几十米的水位波动。降水量与水位呈反向变化,表明祁县井水位的多年变化可能与井区附近地下水开采有关(图 2(a)、图 2(c)、图

① 国家地震前兆台网中心网站(<http://qzweb.seis.ac.cn>)

2(d))。该井水位有周期性的日变化,日变幅为 7~12cm,功率谱估计表明这种周期性的日变化为潮汐效应(图 3(a)、图 3(c))。

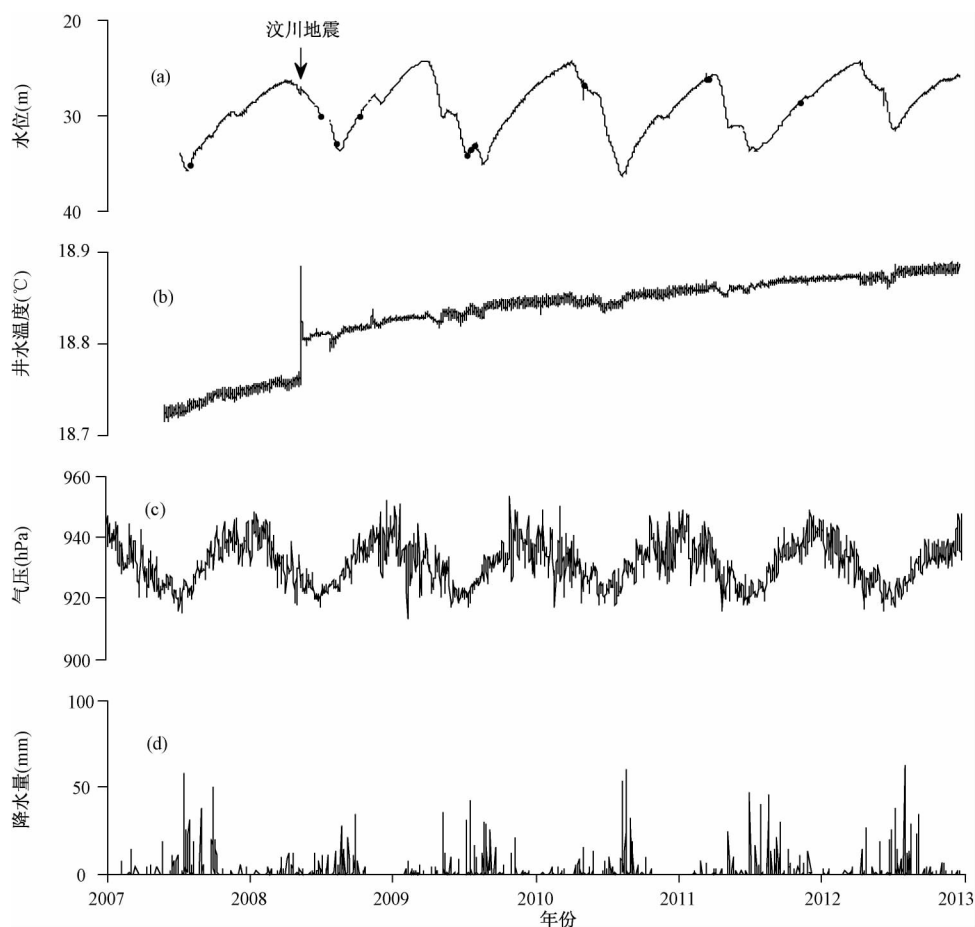


图 2 2007~2012 年祁县井水位 (a)、水温 (b) 与介休气象观测站气压 (c)、降水量 (d) 的观测曲线

祁县井水温观测始于 2007 年 5 月,观测仪器为 SZW-1A 型数字式温度计。探头置于地面以下 112m。多年观测结果表明,水温多年变化较平稳,有逐年小幅度上升的趋势;汶川 8.0 级地震对其水温动态有影响(本文采用中国地震台网中心速报目录),引起了 0.05℃ 的阶升(图 2(b));该井水温有周期性的日变化,日变幅为 0.02~0.012℃,功率谱估计表明这种周期性的日变化为潮汐效应(图 3(b)、图 3(d))。

## 2 水温和水位的奇异潮汐关系

如图 4 所示,同一时间坐标下的祁县井水位、水温观测曲线,有水温潮汐相位超前于水位的奇异现象,超前时间为一个多小时。

为了检验上述现象的可靠性,我们对观测数据进行了核实。首先,根据祁县井水温和水位对 2007 年 9 月 12 日印尼苏门答腊  $M_s$ 8.5 地震(图 4(a))、2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s$ 8.0 地震(图 4(b))、2010 年 2 月 27 日智利  $M_s$ 8.8 地震(图 4(c))、2011 年 3 月 11 日日本

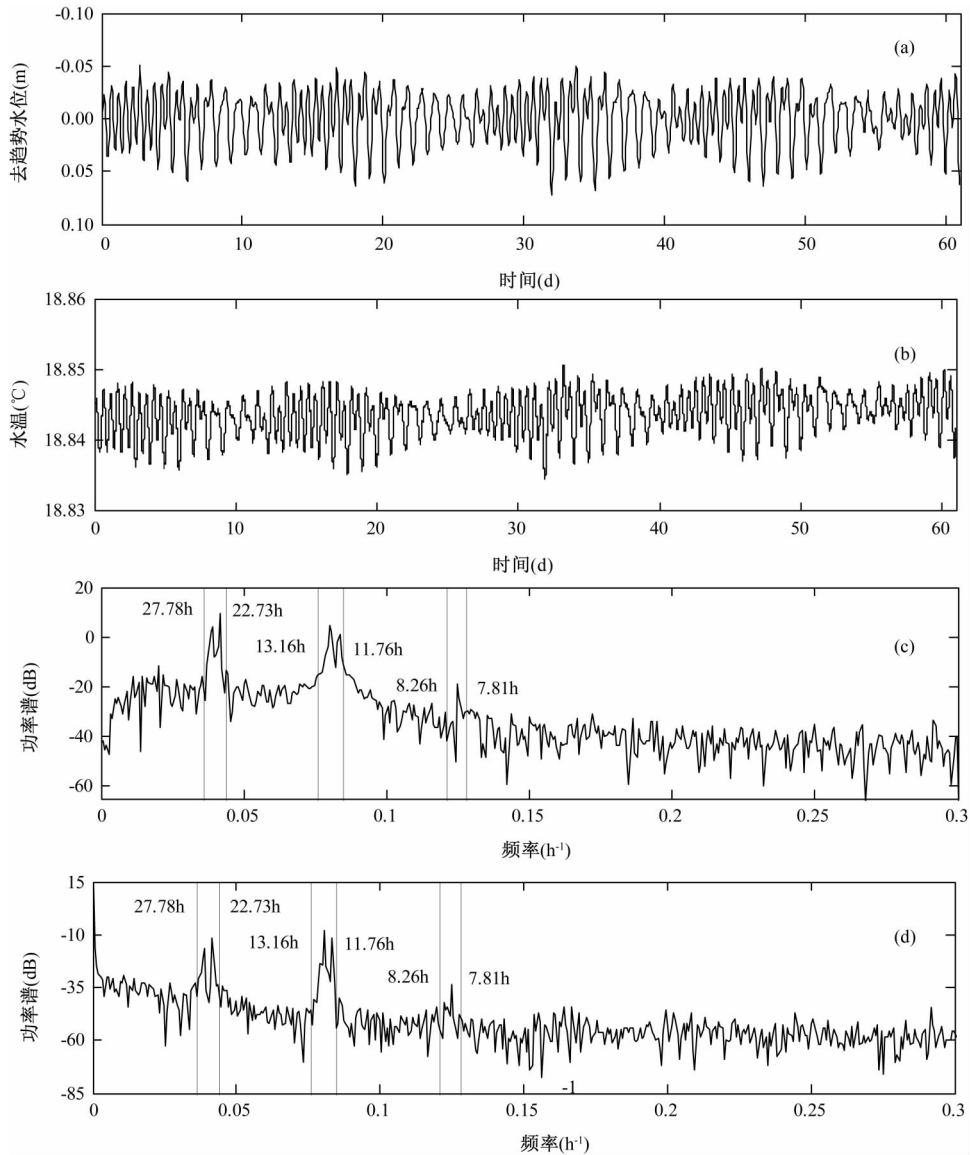


图3 祁县井2009年10~11月去趋势水位(a)、水温(b)、去趋势水位功率谱估计(c)、以及水温功率谱估计(d)动态对比曲线

$M_s 9.0$ 地震(图4(d))的同震响应资料进行分析后认为,水位和水温仪的时间服务系统工作正常。其次,依据祁县井水温与水位的日、半日起伏特征来判断是否有水温潮汐相位滞后于水位20多个小时的可能。祁县井水温、水位有同震响应(图4),说明水温温度计记录的是水体温度。地球固体潮汐引起的水温变化,其热传递方式为对流、传导或对流-传导。据相关研究(石耀霖等2007;孙小龙等2008;顾申宜等2013)可知,井筒水体的对流、传导效率较快,可在数小时内完成,因而排除了水温潮汐相位滞后于水位20多个小时的可能。再次,依据祁县井多年水位、水温整点值数据的逐月调和(唐九安,1999),得出潮汐分波的相

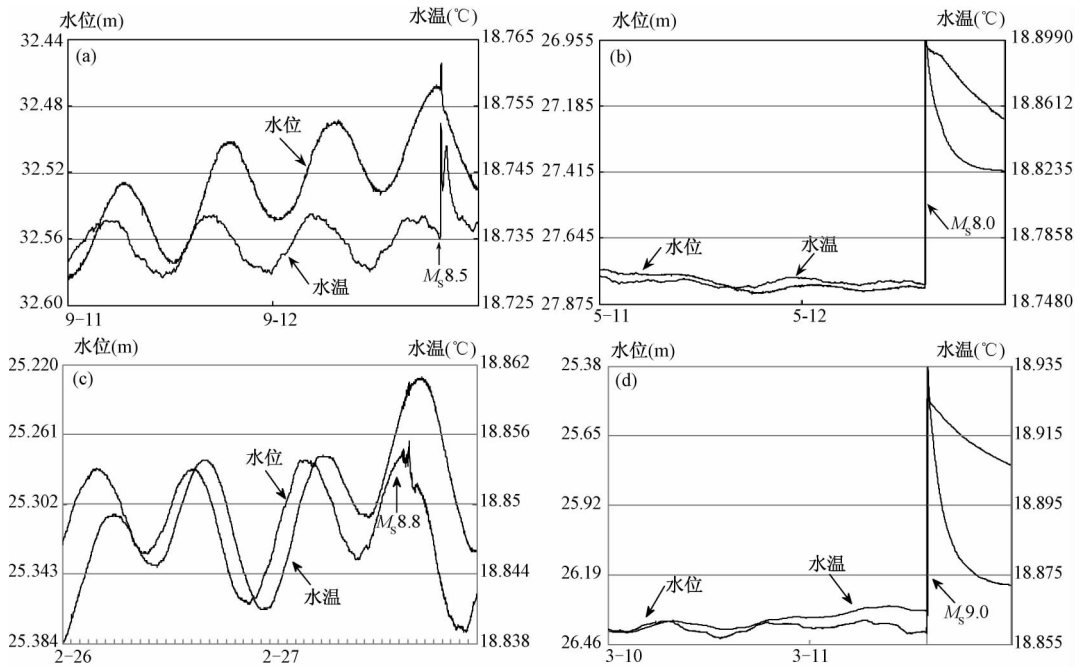


图 4 祁县井 2007 年 9 月 11 日 ~ 12 日 (a)、2008 年 5 月 11 日 ~ 12 日 (b)、2010 年 2 月 26 日 ~ 27 日 (c) 以及 2011 年 3 月 10 日 ~ 11 日 (d) 水位、水温对比曲线

位差, 选取分波中精度较高、受气压干扰较少的  $M_2$  波, 水温与水位  $M_2$  波相位差的差值可以换算成时间差 ( $M_2$  波的度/时 =  $28.98410^\circ/h$ , 据汪成民等 (1988)), 以表示水温与水位潮汐变化的时间差, 计算结果在 1.6h 左右波动, 说明祁县井水温潮汐相位超前于水位在整个观测中都是存在的 (图 5)。上述分析表明, 祁县井水温潮汐相位超前于水位的现象是客观的。

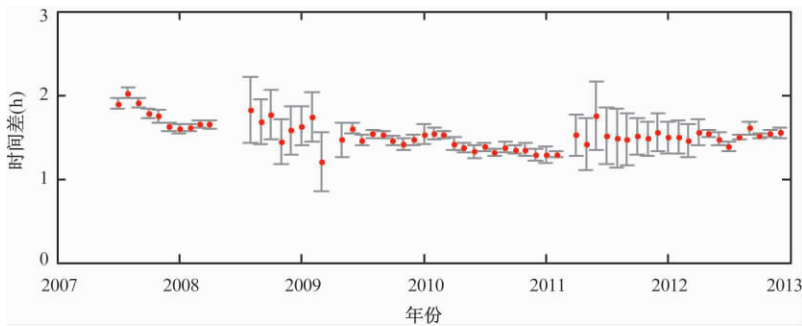


图 5 祁县井水温与水位潮汐变化的时间差 ( $M_2$  波, 竖线表示计算误差)

### 3 奇异关系成因讨论

已有许多学者对水温潮汐现象进行过研究, 并提出了不同的模型来解释水温潮汐现象。Shimamura 等 (1984)、Kitagawa 等 (1996)、赵刚等 (2009) 先后提出体应变原理, 认为体应变变化是引起水温变化的原因, 即井水随体应变变化而变化, 由于温度梯度的存在, 就能观测

到潮汐形态的温度变化。Furuya 等(1988)、Koizumi(1990)、Mogi 等(1989)、马玉川等(2010)先后提出流量潮汐变化成因,该模型认为固体潮引起了地下水流量的潮汐变化,而流量变化又导致了水温的潮汐变化。鱼金子等(1997)、车用太等(2004、2008)、张子广等(2007)、Demezhko 等(2012)先后提出了水动力学模式,认为在地球潮汐力作用下首先是含水层岩体发生应变并引起孔隙压力的变化,由此导致井-含水层内水流状况的变化;然后由于井孔内水体热量随水流量的变化导致了井水温度的升降变化。这一模式下,水温潮汐效应是水位潮汐的次生效应。不管是体应变原理、流量潮汐变化成因,还是水动力学模式都难以解释祁县井水温潮汐相位超前水位的观测事实。

针对祁县井的观测事实,或许能假设出其它模型来解释,但要合理解释这一现象,首先要明确:水温和水位潮汐动态有无相关性?

已有的研究表明(Elkhoury et al 2006; Lai et al 2011; 晏锐等 2012),井水位潮汐相位是反映含水层参数的有用信息。对于水温和水位潮汐动态是否相关的疑问,我们通过分析水温、水位潮汐相位的时间序列来论证。利用调和分析方法,得出了水温和水位  $M_2$  波潮汐相位差的逐月变化图像,显示无论是地震或人为扰动,二者的变化趋势都是一致的(图6)。这样的结果说明,祁县井水温和水位的潮汐动态有相关性,可能都是当地含水层信息的反映,故排除了水温潮汐变化与水位潮汐变化无关的可能。

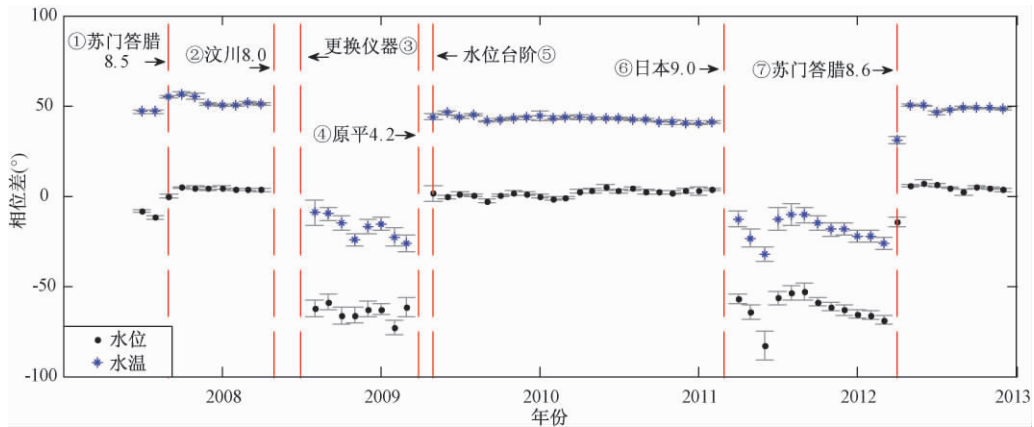


图6 祁县井水位和水温的  $M_2$  波相位变化曲线

垂直红色虚线表示祁县井观测中的几次事件:①震中距 3820km 的 2007 年 9 月 12 日苏门答腊 8.5 级地震;②震中距 1080km 的 2008 年 5 月 12 日汶川 8 级地震,震后水位、水温潮汐消失;③2008 年 7 月 25 日更换因雷击(2008 年 7 月 1 日)损坏的水位仪,更换后水位、水温潮汐出现;④震中距 180km 的山西原平 4.2 级地震,震前 11 天水位潮汐消失;⑤2009 年 3 月 28 日水位台阶(原因不明),后水位潮汐出现;⑥震中距 2660km 的 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级地震;⑦震中距 4400km 的 2012 年 4 月 11 日苏门答腊 8.6 级地震。

如图6所示,祁县井水位  $M_2$  波相位差的时间序列有如下特征:地震后相位差有升高也有下降;地震后相位差没有明显恢复;更换仪器引起的水体扰动影响水位潮汐变化形态。这些与已报道的震后水位相位差升高-恢复特征有差异(Elkhoury et al 2006; Lai et al 2012; 晏锐等 2012)。虽然地震引起的水位相位差变化的原因仍在探索当中,但祁县井的计算结果使我们有这样的疑问:祁县井及其水位、水温观测有无特殊性?

经过调查得知,祁县井及其水位、水温观测的确存在特殊性:2007年7月安装水温温度计时,因探头在地面以下112m处无法下放,后置于112m处<sup>②</sup>。那么112m以下是什么状况?112m上下的井水有无水力联系?依据水位和水温的同震响应资料(图4),注意到地震能引起套管封闭段的井水水量和温度发生变化,说明井孔内水体是流通的,112m上下的井水存在水力联系。

基于以上分析,建立了如图7所示的祁县井水观测系统示意图。结合前人的研究结果,我们认为祁县井水温和水位的奇异潮汐关系可能与井筒堵塞引起的水流不畅有关:固体潮产生的潮汐应力使含水层变形,引起含水层和井孔之间的水流运动,水流在112m附近因井孔堵塞而受阻,使受阻段水体涨落较快,而受阻段以外的井筒水体涨落较慢;水温是其探头处水体温度的反映,水温探头置于受阻段水体,所以温度变化较快;水位是其探头以上水体压力的反映,水位探头置于受阻段以外的井筒水体,所以水位变化较慢,因而出现了水温潮汐相位超前于水位的现象。

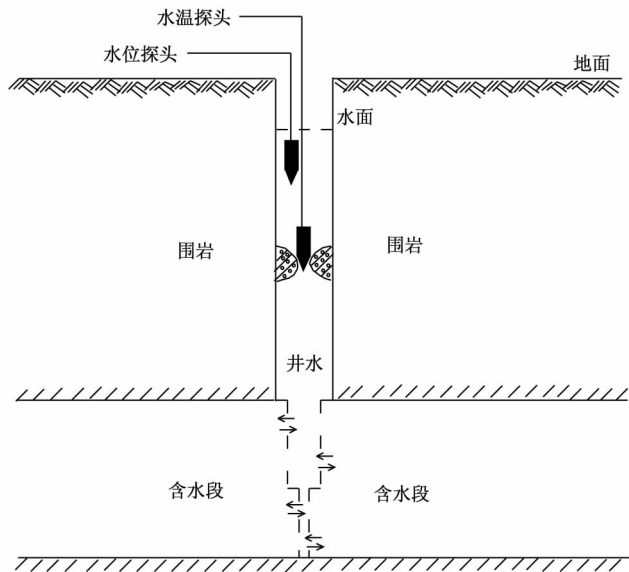


图7 祁县井水观测系统示意图

## 4 结语

我国有300多个水温地震前兆观测井,记录到了丰富的地球物理信息,祁县井水温潮汐动态信息是其中之一,但其观测结果和机理比较复杂,可能与水温的“点”观测特性有关,因而在分析水温观测资料时,查明水温探头位置、井孔特征、含水层状态和水温梯度等观测环境是深入研究的前提。

已积累的多年观测资料表明,大多数情况下同井水位和水温存在相关性,因而对比观测

<sup>②</sup> 何案华与本文作者的私人通讯

和分析是必要的;同井水位和水温的动态关系在长(多年动态)、短(同震或潮汐微动态)时间尺度上表现出差异性(例如祁县井),因而二者的关系有待深入研究。

地震后祁县井水位、水温潮汐相位差的变化可能反映地震对含水层参数的影响,也可能反映地震对井孔受阻段的影响,或是一些其它因素共同作用的结果,有待于进一步深入研究。

致谢:本研究得到刘耀炜、车用太、何案华和范雪芳的帮助,在此一并深表感谢!

## 参考文献

- 曹新来、王贺生、张素欣等 2001, 昌黎井含水层系统的水位水温动态关系与地震活动, *华北地震科学*, **19**(2), 55~61。
- 车用太、刘成龙、鱼金子 2008, 井水温度动态及其形成机制, *地震*, **28**(4), 20~28。
- 车用太、王吉易、李一兵等 2004, 首都圈地下流体监测与地震预测, 36~73, 北京: 气象出版社。
- 付子忠 1988, 地热动态观测与地热前兆, 地壳构造与地壳应力文集, 国家地震局地壳应力研究所, 北京: 地震出版社, 1~7。
- 顾申宜、刘博维、张慧等 2013, 井孔水温对远场巨震同震响应及其机制的数模研究, *地震*, **33**(1), 29~39。
- Koizumi N, 1990, 固体潮引起流量变化的地下水化学组分与温度分析, *地震地质译丛*, **1**(1), 29~35。
- 刘耀炜 2009, 动力加载作用与地下水物理动态过程研究, 学位论文, 1~10, 北京: 中国地质大学。
- 马玉川、刘耀炜、任宏微等 2010, 自流井水温固体潮效应及其应变响应能力, *中国地震*, **26**(2), 172~182。
- 山西省地震局 2004, 山西省地震监测志, 277~281, 北京: 地震出版社。
- 石耀霖、曹建玲、马丽等 2007, 唐山井水温的同震变化及其物理解释, *地震学报*, **29**(5), 265~273。
- 孙小龙、刘耀炜 2008, 塔院井水位和水温的同震响应特征及其机理探讨, *中国地震*, **24**(2), 105~115。
- 唐九安 1999, 计算固体潮潮汐参数的非数字滤波调和解析方法, *地壳形变与地震*, **19**(1), 49~55。
- 汪成民、车用太、万迪堃等 1988, 地下水微动态研究, 10~12, 北京: 地震出版社。
- 晏锐、张立、简春林 2012, 云南曲靖井水位潮汐动态特征分析, *地震学报*, **34**(3), 363~373。
- 杨竹转 2011, 地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究, 学位论文, 1~2, 北京: 中国地震局地质研究所。
- 鱼金子、车用太、刘成龙等 2012, 金沙江水网对日本 9.0 级地震的同震响应及其特征与机理, *地震*, **32**(1), 59~69。
- 鱼金子、车用太、刘五洲 1997, 井水温度微动态形成的水动力学机制研究, *地震*, **17**(4), 389~396。
- 张立、赵洪声、刘耀炜等 2009, 云南会泽井水位与水温相关关系及其变异的地震预测意义, *地震研究*, **32**(3), 228~230。
- 张子广、张素欣、李薇等 2007, 昌黎井水温潮汐形成机理分析, *地震*, **27**(3), 34~40。
- 赵刚、王军、何案华等 2009, 地热正常动态特征的研究, *地震*, **29**(3), 109~116。
- Demezhko D Y, Yurkov A K, Utkin V I, 2012, On the nature of temperature variations in borehole kun-I (Kunashir Island), *Russian Geology and Geophysics*, **53**, 313~319。
- Elkhoury J E, Brodsky E E, Agnew D C, 2006, Seismic waves increase permeability, *Nature*, **441**(7097), 1135~1138。
- Furuya I, Shimamura H, 1988, Groundwater microtemperature and strain, *Geophys J*, **94**, 345~353。
- Kitagawa Y, Koizumi N, Tsuskutta T, 1996, Comparison of post-seismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain release: Yundani hot spring, Japan, *Geophysical Research Letters*, **23**(22), 3147~3150。
- Lai G J, Huang F Q, Ge H K, 2011, Apparent permeability variation of underground water aquifer induced by an earthquake: A case of the Zhouzhi well and the 2008 Wenchuan earthquake, *Earthq Sci*, **24**, 437~445。
- Mogi K, Mochizuki H, Kurokawa Y, 1989, Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes, *Tectonophysics*, **159**, 95~108。
- Shimamura H, Ino M, Hikawa H, 1984, Groundwater microtemperature in earthquake regions, *Pageoph*, **122**, 933~946。



## Abnormal tidal phase relationship between water level and water temperature in Qixian wells

*Ma Yuchuan Wang Bo*

China Earthquake Networks Center , Beijing 100045 , China

**Abstract** The abnormal phenomenon that water temperature tidal phase ahead of water level in the wells of Qixian , Shanxi , has been studied. We first checked the instrument's time system , using water temperature and water level changes in response to some big earthquakes. Then we calculated the phase lags between water temperature and water level through harmonic analysis. The result shows that water temperature tidal phase ahead of water level is objective and this phenomenon exists in all the recording history. It also shows that the water temperature changes are caused by water level changes , since they have the same rhythm of phase lag variations over time. By surveying the observation conditions , the study reveals that the fact that water flow is not smooth in the wells is the reason for the abnormal phenomenon.

**Key words:** Water level Water temperature Tide Co-seismic changes