

车用太、鱼金子, 2013, 井水温度观测中有待解决的若干基本问题, 中国地震, 29(3), 306 ~ 315。

# 井水温度观测中有待解决的若干基本问题

车用太 鱼金子

中国地震局地质研究所, 北京市朝阳区华严里甲 1 号 100029

**摘要** 我国井水温度观测已初具规模, 在地震监测与预测中发挥重要作用, 也已记录到十分有价值的地球动力学信息, 但同时也暴露出一些问题。主要问题有测项的命名、仪器的稳定性、传感器的最佳置深等。不解决这些基本问题, 必然会影响水温监测技术的进一步发展及其在地震监测预测中发挥更加有效的作用。

**关键词:** 水温观测 测项名称 仪器稳定性 传感器最佳置深

[文章编号] 1001-4683 (2013) 03-0306-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 1 我国井水温观测概况

井水温度(简称水温)作为地下水的主要物理特性早就引起国内外地震监测与预测人员的关注, 但高精度的水温观测是 20 世纪 80 年代才开始的。我国的高精度水温观测自 1985 年利用中国地震局地壳应力所研制的 SZW-1 型高精度温度计(付子忠, 1988)在云南省与首都圈地区布设区域性地热(水温)台网并获得一些典型震例之后得到大力发展。经过“九·五”与“十·五”2 个国民经济与社会发展 5 年规划之后, 此测项在全国得到大规模推广应用, 现已成为我国地震地下流体监测台网中的第二大测项。

我国地热(水温)台网已拥有 300 多口观测井(泉)(冯恩国等, 2012), 分布在 31 个省、市、自治区; 观测用仪器以 SZW-1 型与 SZW-1A 型温度计为主, 另有一些少量的 ZKGD3000T 型、DRSW-1 型、SW-5 型、TDT-25 型、TDP-08411 型等。各类仪器的温度分辨力为  $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ , 观测精度为  $(2 \sim 5) \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ , 采样率为 1 次/分。全测网已实现计算机网络化运行管理。该测网的技术水平达到或接近国际同类观测网的先进水平。

该网自 1988 年 11 月 6 日云南澜沧 7.6、耿马 7.2 级强震前首次获得一组水温前兆异常数据以来(付子忠, 1990), 分别在 1989 年 10 月山西大同  $M_s 6.1$ (陈沅俊等, 1994)、1998 年 1 月河北张北 6.2 级(车用太等, 1998)、2007 年 6 月云南宁洱 6.4 级(刘耀炜等, 2008)等多次破坏性地震前获得了多井同步异常资料, 特别是在张北地震与宁洱地震前为提出较为准确的短临预测意见提供了十分重要的依据(图 1)

我国的水温观测还记录到大量的同震效应(图 2)与一定的地球固体潮效应(图 3)。据刘耀炜(2009)统计, 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊  $M_s 8.7$  地震前在全国 69 口井记录到

[收稿日期] 2013-05-26

[项目类别] 中国地震局计划项目(JH-13-07)资助

[作者简介] 车用太, 男, 1942 年生, 研究员, 主要从事地震地下流体监测预报研究。Email: che@ies.ac.cn

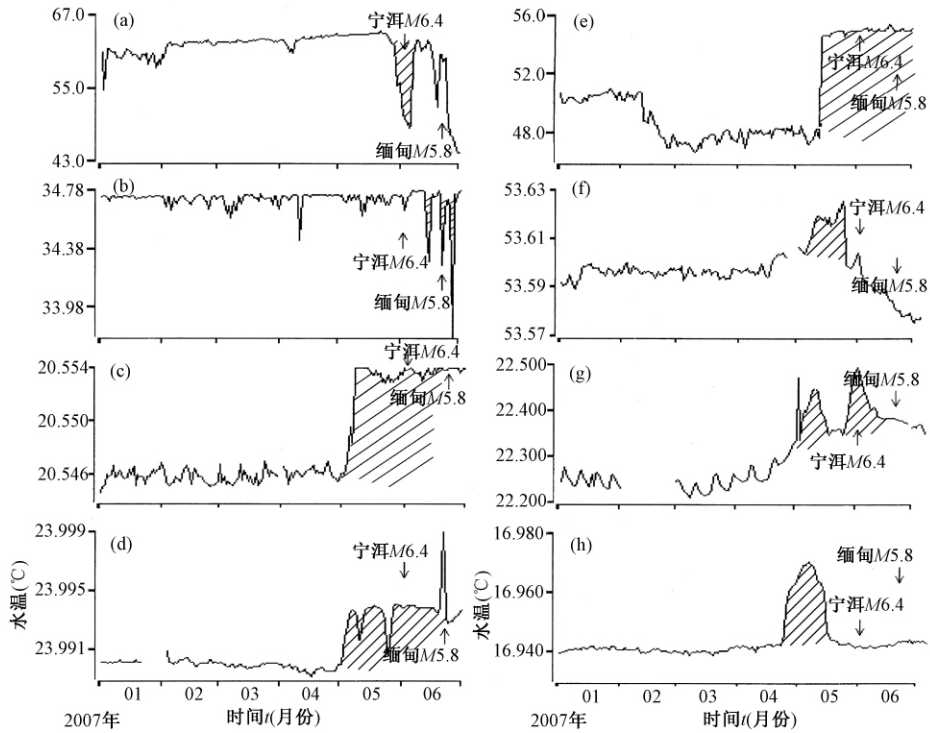


图1 宁洱 6.4 级地震前一组水温短临异常(据刘耀炜等(2008))

(a) 孟连 ( $\Delta 130\text{km}$ ); (b) 临沧 ( $\Delta 130\text{km}$ ); (c) 峨山 ( $\Delta 120\text{km}$ ); (d) 景东 ( $\Delta 190\text{km}$ ); (e) 曲江 ( $\Delta 210\text{km}$ ); (f) 弥渡 ( $\Delta 260\text{km}$ ); (g) 大姚 ( $\Delta 298\text{km}$ ); (h) 丽江 ( $\Delta 435\text{km}$ )。图中阴影区表示异常段

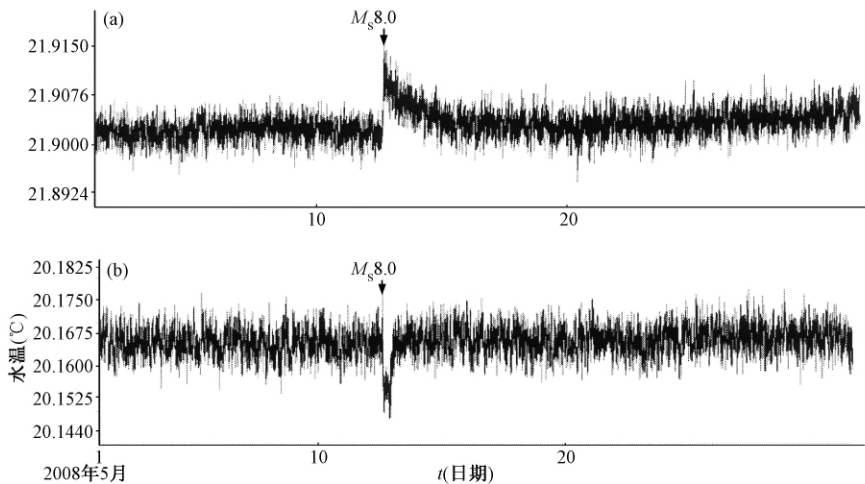


图2 汶川 8.0 级地震前两口井的水温同震效应记录图①

(a) 云南思茅井同震上升型; (b) 陕西渭南井同震下降型

① 赵刚等,2008,全国地热前兆台网对汶川  $M_s 8.0$  地震响应的研究报告附件 1(中国地震局地壳应力所地热组编)

水温的同震响应,2008年5月12日四川汶川  $M_s 8.0$  地震前在全国132口井记录到水温的同震效应,其数量之多仅次于水位潮汐效应。这些现象都说明水温动态对地球动力作用也具有较强烈的响应能力。

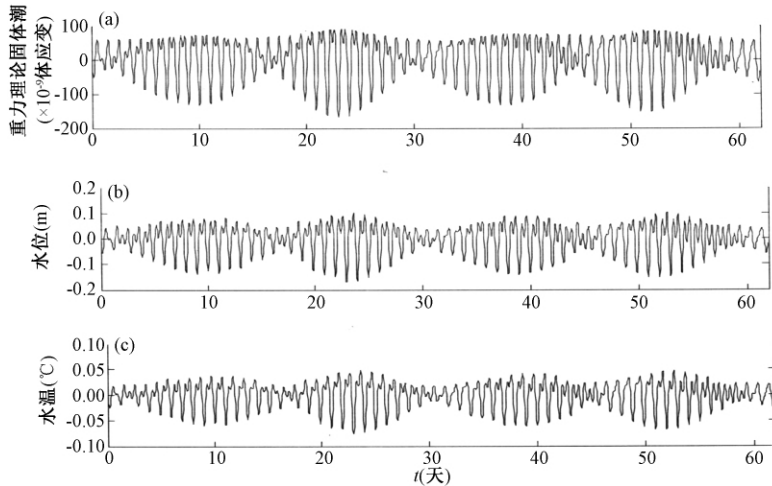


图3 本溪井2007年12月~2008年1月应变理论固体潮(a)、井水位(b)与井水温(c)时均值动态对比(据马玉川(2010)绘制)

综上所述,我国水温观测已具相当的规模,且已获较好的观测效果,展现出其在地震监测和预测及地球科学研究中的美好前景。然而,随着观测时间的推移,同时也暴露出有待解决的一些基本问题,这主要有观测项目(测项)的名称不规范、观测仪器性能不够稳定与传感器最佳置深的技术要求不明确等。

## 2 关于测项名称的统一问题

我国地热台网所观测的项目是温度(动态),即把温度传感器(探头)放置在观测井的水中,观测传感器放置处井水温度随时间的变化,其观测的物理量是水的温度。然而,目前对这一测项的名称使用还很不规范,在有关观测数据报表、数据库及相关论文中出现地热、地温、水温等不同的名称,这种不规范的现象亟待纠正。

地热一般指地球内部的热,常用热流密度( $q$ ),即单位时间内流过单位面积上的热流量表述,其大小可表示为

$$q = \kappa \frac{\Delta T}{\Delta Z}$$

式中, $T$ 为地温, $Z$ 为深度, $\Delta T/\Delta Z$ 为地温梯度, $\kappa$ 为岩石热导率。常用热流单位是HFU,  $1\text{HFU} = 10^{-6}\text{mCal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} = 41.868\text{mW}/\text{m}^2$ 。由此可见,地热不是可直接观测的物理量,其单位也不是 $^{\circ}\text{C}$ 。因此,不能把“地热”作为我们的测项名称。

地温是地球内部某一位置上的温度,与地热密切相关,但它不等同于地热。地温是可观测的物理量,但我国地热台网中放置温度传感器的观测井绝大多数是有水的,传感器直接接触的是井水温度,而不是井筒外围岩中的岩土温度;尽管井孔中某一深度的井水温度与井筒

外的地温密切相关,但一般情况下水温不完全等同于地温,水温动态则与地温动态有很大差异。因此我们的测项一般也不能称为“地温”。然而,有些观测井是无水的“干孔”,温度传感器放置在井底岩土中,传感器感触的是地温的变化,此时观测的是井底岩土的溫度,可称为井中地温,如青海省的西宁、德令哈、都兰、大都、平安、同仁等 6 口井及金沙江水库地震地下水动态观测网中的四川省雷波的南田井的温度观测就属此类。

水温指井筒内某一深度上的井水温度,其背景值主要取决于那个深度上井筒外围岩土的地温,但井筒内的水流运动也对该值有一定影响;其动态特性主要取决于井筒内水的运动状态,动态形成机理以水热动力学机制为主,动态特征相对不够稳定。个别井的温度传感器原放置在井底水中,但由于井内泥土的沉淀,或被埋入饱水的泥土中。这种情况下,观测的温度既不是典型的水温,也不是典型的地温,其动态形成的机理与动态特征介于水温与地温之间。目前,把这种温度观测可暂归于水温观测。

由上可见,我国地热台网中的测项主要为井水温度观测,个别井为地温观测,并没有严格意义上的地热观测。因此笔者建议,尽快统一我国目前地热台网中的测项名称,力求做到名称与实际观测的物理量一致,尽快纠正二者不一致,甚至“张冠李戴”的不规范局面。

### 3 观测仪器的稳定性问题

目前我国的水温观测由于缺少有效的平行检测系统,尚不能给出有关仪器稳定性的科学评定结果,只能从观测数据与动态特征方面作间接的分析。从分析结果看,目前使用的仪器的稳定性问题主要表现在 2 个方面,一是“零飘”,二是瞬时“阶变”或“剧变”,即长期稳定性与短期稳定性均存在一定问题。

#### 3.1 长期稳定性的问题

仪器长期稳定性问题多表现为“零飘”,即在几个月~几年的中长期动态曲线上有稳定的趋势性变化。据全国随机抽查的资料可知<sup>①</sup>,汶川 8.0 级地震前表现出疑似前兆异常的 40 口观测井中,有水温多月趋势性变化的有 26 口,占 65%,较为典型的例子示于图 4。有水温趋势性变化的井中,趋势性上升的占 61.5%,趋势性下降的占 39.5%;趋势性变化的幅度(统一换算成年趋势性变化幅度)多为 0.010~0.099℃/a,占趋势性变化井总数的 65.38%,变幅为 0.10~0.99℃/a 的占 19.23%,变幅 0.0010~0.0099℃/a 的占 15.38%。据京津冀地区 29 口水温观测井的调查<sup>②</sup>,呈明显趋势性变化的有 10 口,其中趋势性上升井有 3 口,升幅为 0.02~0.24℃/a,趋势性下降井有 7 口,降幅为 0.01~0.26℃/a。上述 2 个独立的研究结果都表明,约有 1/3 到 2/3 的观测井水温有趋势性变化,变化的年变幅多为 0.01~0.10℃/a。

上述的研究结果还不能肯定观测仪器全都存在“零飘”的问题,也不能排除井水温度确有长期趋势性的上升或下降的变化。然而问题是,按每年变化 0.05℃/a(中间值)考虑,上升 0.05℃/a 意味着目前水温为 20℃ 的井水不足 1000a 之后将达到沸点(100℃),下降 0.05℃/a 意味着目前水温为 20℃ 的井水 200a 之后将达到冰点(0℃),显然这是不可能的。故此可以反推出目前的水温观测仪器可能存在“零飘”问题,而且其结果必将影响水温观测

<sup>②</sup> 中国地震局地质研究所,2006,京津冀地区地下流体数字化观测的运行状况与前兆效能评估

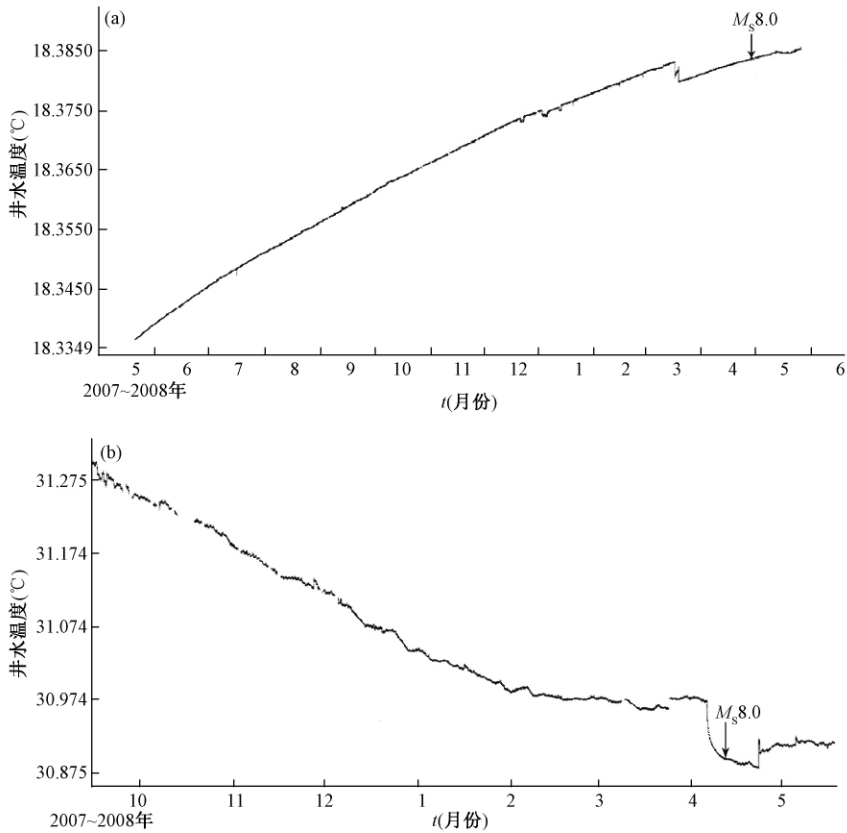


图 4 典型的井水温度趋势性变化曲线

- (a) 江西九江井 2007 年 5 月~2008 年 6 月上升型趋势性变化;
- (b) 广西贵港井 2007 年 10 月~2008 年 5 月下降型趋势性变化

的地震中长期监测与预测的效能。

### 3.2 短期稳定性问题

仪器短期稳定性主要是瞬时“阶变”问题,表现在几小时~几天的分钟值短期动态曲线上出现不明原因的瞬时阶变或剧变,如图 5 所示。这类动态特征在全国地热台网中较为常见。对于这种动态特征目前也难以全部归因于仪器的不稳定性,但从理论上推测这种变化的起因是仪器的不稳定性问题也有一定的依据。如图 5(a)所示,重庆大足井 2008 年 1~6 月间出现的 20 多次瞬态阶变,变幅可达 0.02℃;又如图 5(b)中山东大山井 2008 年 2~5 月间频繁出现的起伏,变幅大体上也是 0.02℃ 上下。这种瞬时的大幅度变化,无论用地热动力学机制(热传导)还是用水热动力学机制(热对流)都是无法解释的,因为无论热传导还是热对流引起井水温度变化由传感器感触到,均需要有一定的时间过程,不应出现瞬时阶变动态。

由于观测到的水温动态中,存在可能与仪器的不稳定性有关的瞬时“阶变”,明显阻碍着井水温度观测在地震短临前兆监测与预测中发挥更大的作用。因此,除了进一步查明这些动态的成因之外,进一步提升水温观测仪器的稳定性(包括抗外界干扰性)是极为重要的

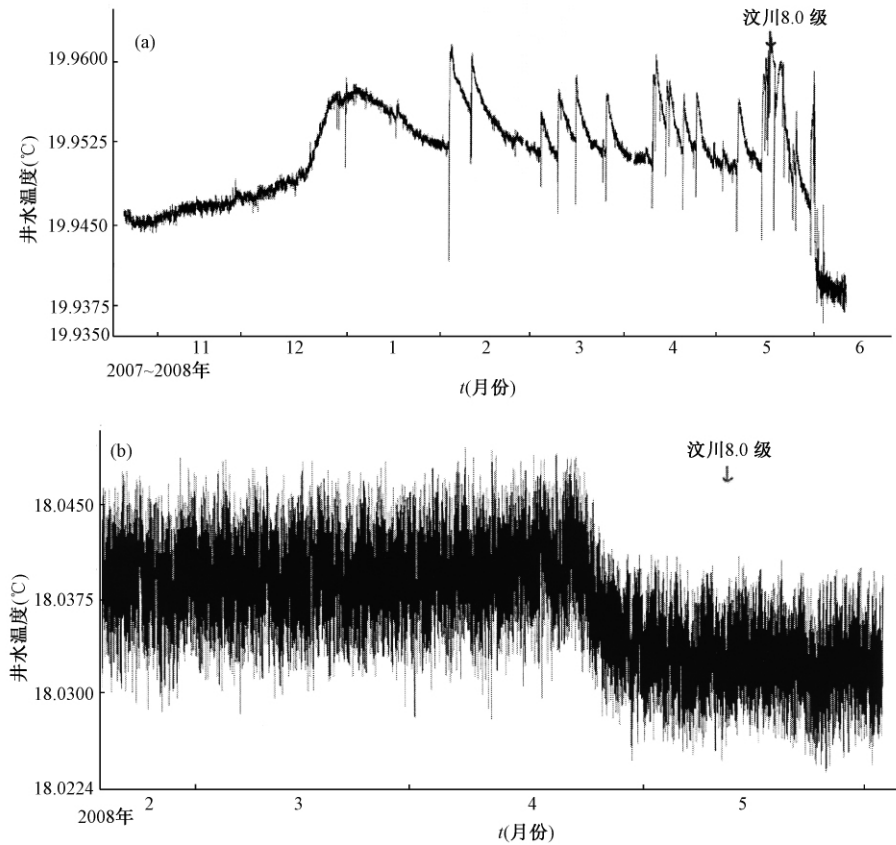


图5 典型的井水温度瞬态变化曲线

(a) 重庆大足井 2008 年 1~6 月 15 分钟值动态; (b) 山东大山井 2008 年 2~5 月 15 分钟值动态

任务,而且查明成因也离不开高稳定性的仪器观测。

#### 4 水温传感器的最佳置深问题

水温传感器的置深,以往的有关规定的处理原则是:避开太阳辐射热影响深度下(一般为几十米)尽可能放置深度大一些,一般要求置深大于 100m,多在 100~200m 间。然而,近几年一井多深度试验观测结果表明,传感器放置深度对观测结果(动态特征)影响很大(刘耀炜,2009;杨竹转,2011;汪成国等,2012;张慧等,2013)。

图 6 所示为四川西昌川 03 井(深 769m,套管深 40m)水温传感器置深 395m、595m、765m 等 3 个不同深度时记录到的 2008 年 5 月 6~15 日分钟值动态曲线。由图 6 可见,3 个不同深度同步观测到的水温固体潮,在汶川  $M_s 8.0$  地震的同震阶变及震后变化特征差异明显。395~765m 深度范围内,随传感器置深的增加水温潮汐形态变得越来越不明显,日潮差越来越小;井水温度的同震响应特征也随传感器置深的增大而逐渐减弱,震后变化特征的差异则更明显,变化的形态都各不相同。

图 7 所示为北京塔院井(深 361m,套管深 252m)水温传感器分别置深 48m、85m、130m、

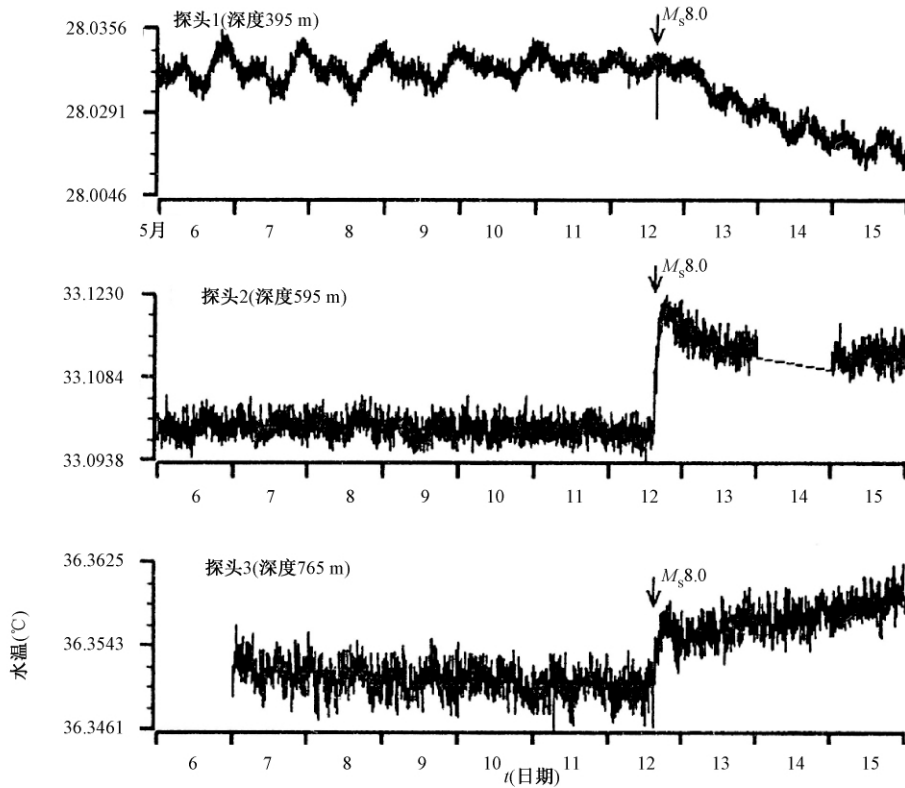


图 6 川 03 井 3 个不同深度水温 2008 年 5 月 6 ~ 15 日分钟值动态对此曲线(据刘耀炜(2009)绘制)

178m、184m、187m 等 6 个深度上时观测到的潮汐效应及其与同期水位潮汐的比较(杨竹转, 2011)。由图 7 可见,48m 与 85m 深度上没有水温潮汐显示,130m 以下 4 个深度均有潮汐显示,184m 处的水温日潮差最大。然而有趣的是 130m 与 178m 处的水温潮汐与水位潮汐的相位相反,而此段正是水温的负梯度段;184m 与 187m 处的水温潮汐与水位潮汐的相位一致,此段水温为正梯度(表 1)。

表 1 塔院井 6 个不同深度水温潮汐特征比较

传感器置深(m)		48	85	130	178	184	187
观测时间	公历	2008 年 04 月 04 ~ 08 日	2008 年 08 月 12 ~ 16 日	2008 年 01 月 11 ~ 15 日	2007 年 12 月 21 ~ 25 日	2008 年 11 月 12 ~ 16 日	2008 年 11 月 26 ~ 30 日
	农历	二月二十八日 ~ 三月三日	七月十二日 ~ 十六日	十二月四 ~ 九日	十一月十二 ~ 十六日	十月十五 ~ 十九日	十月二十九日 ~ 十一月三日
	月相	朔	望	上弦	望	望	朔
水温潮汐特征	日潮差 ( $\times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ )	0	0	0.05	0.07	0.35	0.20
	与水位潮汐关系	—	—	相位相反	相位相反	相位一致	相位一致

类似的情况,在新疆温泉井与博乐井(汪成国等,2012)、海南的 ZK26 井(张慧等,2013)

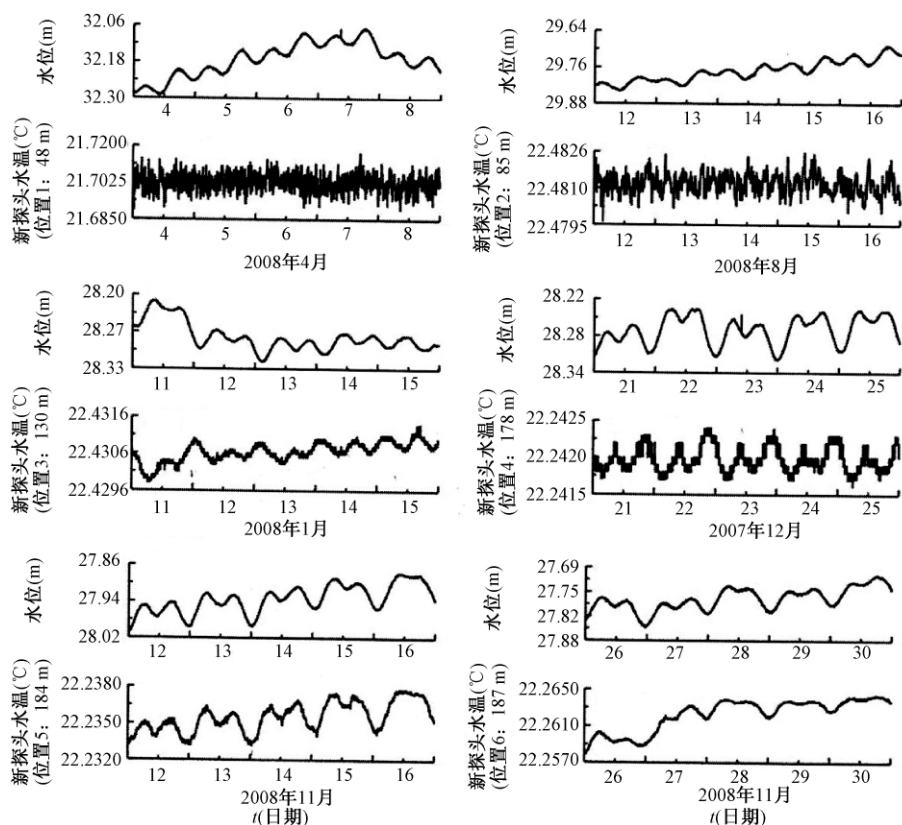


图7 塔院井6个不同深度水温潮汐与同期水位潮汐特征对比图(据杨竹转(2011)绘制)

也有发现。

以上的观测事实说明,水温传感器放置深度对水温动态特征的影响十分明显。初步分析表明,不同置深的传感器记录到的水温动态特征的差异,可能与传感器所置处的水温梯度、围岩的热传导率及大地热流特征等多种因素有关。现在需解答的问题是在不同的井-含水层系统中,水温传感器放置在什么样的位置(不是简单的深度问题)最佳,即如何放置可最有效地观测到地壳动力作用(包括地震孕育与发育过程)的信息?这是目前我国水温观测中亟待解决的重大问题。

## 5 认识与讨论

对我国地热台网水温观测中存在的问题,提出如下认识与讨论:

(1) 关于井孔温度观测的测项名称的不规范、不统一的现象不应再延续下去,无论在相关的观测与预测领域还是在相关的科学研究中,特别是在省级与国家级前兆台网数据库中,应坚决力推规范测项名称。按照 DB/T49-2012(地震地下流体观测方法——井水与泉水温度观测)的行业标准规定,温度传感器放置在井水中时应称为井水温度(简称水温);温度传感器放置在不水的干井中,且与围岩(包括井底岩土或被充填的干砂等)直接接触时建议称为井中地温。我国地热台网中98%以上的观测井目前观测的是水温。



(2) 关于仪器的稳定性问题是有理由被怀疑为普遍存在的,这涉及到观测数据的可靠性与真实性问题,直接影响水温观测在地震中长期与短临监测及预测中发挥应有的作用。因此积极开发井水温度现场检测与标定技术的同时,在目前技术上还不能很快实现现场仪器标定或检测,无法最终判别观测数据的可靠性与真实性的情况下,笔者主张发展双探头(传感器)观测技术或进行2台仪器平行观测(何案华等,2009)。

(3) 关于水温传感器最佳置深问题是近年来新出现的突出问题,即涉及到观测技术本身,也关系到水温动态形成机理的科学问题,应积极推进相关的科技攻关研究。目前,按照相关标准(DB/T49-2012)的规定,应放置在水温梯度变化大的区段、水温背景噪声小的区段与水温潮汐明显的区段。为了筛选出更加合理与科学的置深,还建议强化水温传感器最佳放置位置的试验观测,即开展井孔水温梯度的精细测量,提高测量点的密度(至少1个测点/每10~20m),加长每点上测量的时间(至少1小时),在查清井水温度梯度及其变化的基础上寻找井水温度梯度大、水温动态相对稳定的深度部位,作为传感器置深;从科学研究上讲,建议在弄清各观测井区与井-含水层系统的水文地质、地热地质条件的基础上,开展影响水温动态特征的因素的研究,各井中弄清哪些因素影响井水温度动态对地壳动力作用的响应能力,确立水温传感器最佳放置深度(位置),从而推进水温观测的科学化。

## 参考文献

- 车用太、王基华、林元武等,1998,张北-尚义地震的地下流体异常及其跟踪预报,地震地质,20(2),99~104。
- 陈沉俊、杨修信、刘永铭等,1994,首都圈精密地温动态观测研究,见:国家地震局科技监测司,首都圈地震短临预报新方法观测与研究,134~140,北京:地震出版社。
- 冯恩国、王华、车用太等,2012,我国地震地下流体观测现状的调查与分析,地震地磁观测与研究,33(5/6),202~207。
- 付子忠,1988,地热动态观测与地热前兆,见:国家地震局地壳应力研究所编,地壳构造与地壳应力文集(1),北京:地震出版社。
- 付子忠,1990,澜沧-耿马7.6级地震的地热前兆异常,见:国家地震局地壳应力研究所编,地壳构造与地壳应力文集(4),北京:地震出版社。
- 何案华、赵刚、薛娜等,2009,沙河地震台地热对比观测分析,大地测量与地球动力学,29(4),51~54。
- 刘耀炜、孙小龙、王世芹等,2008,井孔水温异常与2007年宁夏6.4级地震关系分析,地震研究,31(4),347~353。
- 刘耀炜,2009,动力加载作用与地下水物理动态过程研究(博士学位论文),北京:中国地质大学(北京)。
- 马玉川,2010,井水温度潮汐效应及其应变响应能力研究(硕士学位论文),北京:中国地震局地壳应力研究所。
- 汪成国、赵刚、高守权等,2012,新30井不同深度下的水温观测试验及其结果,地震,32(3),37~46。
- 杨竹转,2011,地震引起的井水温度变化及其机理研究(博士学位论文),北京:中国地震局地质研究所。
- 张慧、顾申渲、李志雄等,2013,单井多层位水温微动态初步研究,地震,33(1),101~110。

## Some basic problems in well water temperature observation

*Che Yongtai Yu Jinzi*

Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

**Abstract** The observation scale of well water temperature is already large in China, which plays an important role in the monitoring and prediction of earthquake by providing valuable information of geodynamics. However, some important problems are also exposed simultaneously, which include the naming of observation items, the stability of observation instruments, and the optimum place of temperature sensors in a well. If these problems are not solved, the further development of observation technology of well water temperature and its effects of earthquake monitoring and prediction will certainly be affected.

**Key words:** Observation of well water temperature   Name of observation item   Stability of observation instrument   Optimum place of temperature sensor in a well