

王博、马玉川、马玉虎, 2016, 玉树台井水温变化及其与青藏块体周缘大地震间的关系, 中国地震, 32(3), 563~570。

玉树台井水温变化及其与青藏块体周缘大地震间的关系

王博¹⁾ 马玉川¹⁾ 马玉虎²⁾

1) 中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

2) 青海省地震局, 西宁 810001

摘要 分析了 2008~2015 年间玉树台井水温变化趋势, 发现有 5 次异常变化, 其中 4 次与青藏块体及周缘的大地震活动有一定相关性。对水温异常变化幅度、异常出现时间与震级以及井震距的进一步分析发现, 玉树台井水温变化幅度随井震距的减小而增大; 从异常出现时间来看, 震级越大, 从异常出现到地震发生的时间间隔越短。

关键词: 玉树 水温 青藏块体 地震

[文章编号] 1001-4683(2016)03-0563-08

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

基于板块构造学说或断层面错动所引起的地震现象, 从理论上讲, 都应能观测到地下物质某种程度的变化, 这也是地震前兆观测研究的基础, 地下水即是存在于地壳介质中能较灵敏地反映地壳应力变化的物质。随着对地震孕育过程研究的不断深入, 关于地下水温度变化与地震间关系的研究也越来越引起研究者的关注。

我国地震前兆观测研究已有 50 年历史, 高精度水温观测也开展了 30 多年。地震前后水温变化现象在以往的研究中多有涉及, 在这些研究中, 有的集中研究地震引起的水温同震变化(杨竹转等, 2007; 张彬等, 2013); 有的对水温变化的可能机理进行了分析(孙小龙等, 2006; 石耀霖等, 2007); 也有的对地震前水温观测曲线形态及变化幅度等进行了分析(鱼金子等, 1997; 刘耀炜等, 2008; 车用太等, 2014), 但对水温观测资料在地震前的变化特征研究较少, 尤其是缺少同一观测台对特定区域的前兆变化指示性研究。

本文选取玉树台水温井作为研究对象主要基于 2 个方面的考虑, 一是玉树台观测井数据质量较好, 且地理位置偏远, 基本不受人为活动干扰; 二是青藏高原地区是我国最大的地震活动区, 也是地震活动最强烈、大地震频发的地区, 在青藏块体及周缘发生的多次大地震(包括汶川、玉树地震)之前, 玉树井水温资料都存在较为相似的形态变化特征(何案华等, 2012), 故对玉树台水温震前异常变化与周边大地震间的关系进行分析, 可为前兆观测研究

[收稿日期] 2016-05-11; [修定日期] 2016-06-20

[项目类别] 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2016030302)、地震监测预报专项(20160107)共同资助

[作者简介] 王博, 男, 1984 年生, 助理研究员, 研究方向为地震地下流体。E-mail: wangbo313@163.com

积累一些经验。

1 观测井孔概况

玉树台(33.01°N,97.02°E)位于青海省玉树藏族自治州结古镇,所在区域地处巴颜喀拉山南麓及唐古拉山东端,山脉呈 NW-ES 向展布,以密集发育的 NWW 走向并向 NE 凸起的弧形右旋走滑断裂为主,主要断裂构造有东昆仑断裂、达日断裂、甘孜-玉树-风火山断裂带等(图 1)。该区强烈的新构造活动不仅控制了本区的地貌形态,而且与区域构造线方向一致,地震活动十分频繁。故该台对于监测青、川、藏交界地区的地震活动具有重要意义。

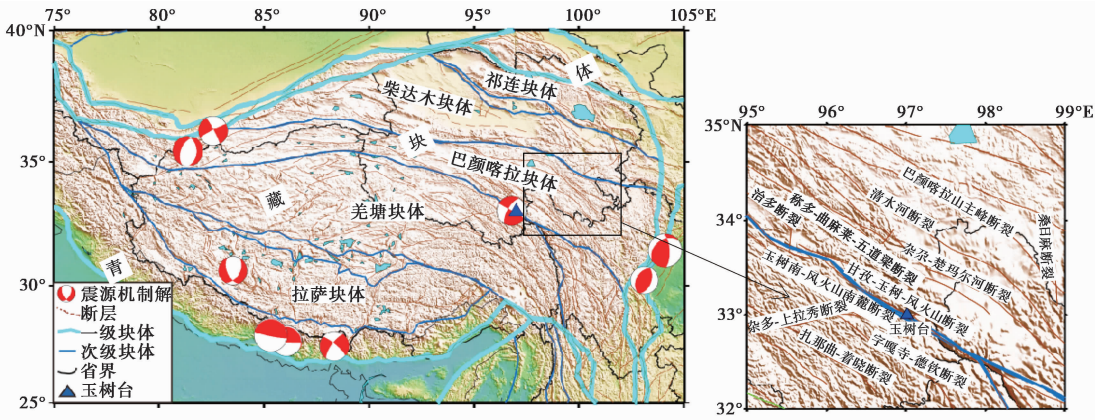


图 1 玉树台位置及研究区内 $M_w>6.5$ 地震分布
研究时段 2007 年 9 月 1 日~2015 年 9 月 30 日

玉树水温观测井井深 105m,孔口标高 3725m。地面至其下 0.4m 间以粉土为主,夹有小砾石等;0.4~3.6m 以碎石为主,骨架颗粒呈交错式排列,成分主要为花岗岩、石英岩,中等风化,粒径一般 20~90mm,棱角状,充填物为砾砂,含大量泥质;3.6m 以下为花岗岩,具细晶结构,块状构造,主要成分为石英,含长石、云母等矿物,岩性完整、坚硬,地下 81m 处见裂隙水,井孔套管深度 11m,探头深度 100m。

2 观测数据

2.1 水温

玉树台水温观测使用 SZW-1A 型数字式石英温度计,其分辨率为 0.0001℃,观测精度优于 0.05℃,短期变化小于 0.0001℃/d,长期变化小于 0.001℃/a,传感器耐压性大于 10MPa,采样频率为 1 次/min。玉树台自 2007 年 8 月开始观测水温,除了仪器探头维修及更换的时段外,其他时段内水温观测资料连续,整体观测较好。因仪器维修或更换而导致数据空缺的时段为 2009 年 2 月 6 日~4 月 9 日、2009 年 6 月 21~25 日、2012 年 6 月 12 日~2013 年 7 月 19 日。2012 年 6 月 12 日仪器探头损坏,更换同类型备用仪器,经仪器重新标定后,改正后的多年水温观测曲线如图 2 所示。

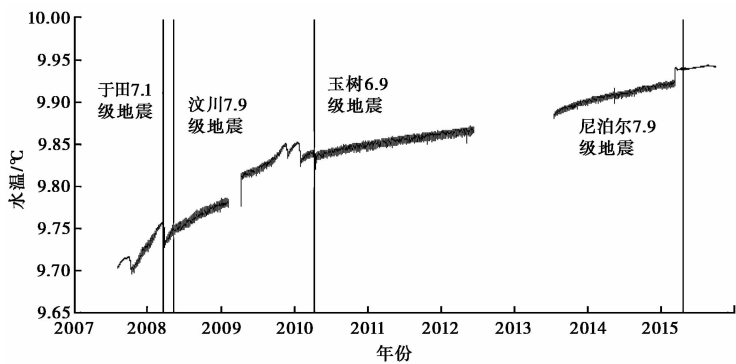


图2 玉树台井水温观测数据
竖线代表地震

2.2 研究区内地震

青藏高原是中国现代新构造活动与地震活动最强烈的地区(邓起东等,2002),青藏高原从南缘喜马拉雅板块边界构造带北至北缘河西走廊的广大地区,自有历史记载以来已发生8.0级以上地震18次,7.0~7.9级地震100余次,其中,8.0级以上地震全部发生在喜马拉雅板块边界构造带、青藏断块区边界构造带及板内次级断块的边界活动构造带上,且具有分布广、频度高、强度大、震源浅的特点(邓起东等,2014)。

青藏块体是我国板内6个Ⅰ级块体之一,也是中国地震活动最为强烈的块体。喜马拉雅板块边界构造带为其南部边界,青藏块体内又分为Ⅱ级块体,分别为拉萨、羌塘、巴颜喀拉、东昆仑-柴达木、祁连等块体(张培震等,2003)。本研究中对青藏高原的分块即采用了张培震等(2003)的研究结果,具体范围为25°~40°N、75°~105°E,地震目录及震源机制解均采用哈佛大学目录(<http://www.globalcmt.org/>)(Dziewonski et al,1981;Ekström et al,2012),时间调整为北京时间。2007年9月~2015年10月上述区域共发生9次 $M_w>6.5$ 地震,详见图1、表1。

表1 研究区内地震

日期 (年-月-日)	东经 /(°)	北纬 /(°)	震级 M_w	地 点	震中距 /km	震源深度 /km	震源机制解/(°)					
							走向Ⅰ	倾向Ⅰ	倾角Ⅰ	走向Ⅱ	倾向Ⅱ	倾角Ⅱ
2008-03-21	81.37	35.43	7.1	中国新疆于田	1464	12.0	358	41	-110	203	52	-74
2008-05-12	104.10	31.44	7.9	中国四川汶川	689	12.8	231	35	138	357	68	63
2008-08-25	83.51	30.61	6.7	中国西藏仲巴	1304	17.3	30	48	-48	157	56	-127
2010-04-14	96.79	33.05	6.9	中国青海玉树	22	15.7	210	67	178	300	88	23
2011-09-18	88.35	27.44	6.9	印度锡金	1038	46.0	216	72	-12	310	79	-162
2013-04-20	103.12	30.22	6.6	中国四川芦山	656	21.9	212	42	100	19	49	81
2014-02-12	82.57	36.22	6.9	中国新疆于田	1370	18.3	332	85	-176	242	86	-5
2015-04-25	85.33	27.91	7.9	尼泊尔博克拉	1256	12.0	287	6	96	101	84	89
2015-05-12	86.08	27.67	7.2	尼泊尔博克拉	1206	12.0	307	11	117	99	81	85

3 水温异常及其与地震间的关系

3.1 水温多年及震前短期变化

水温的多年观测资料表明,玉树台井水温呈稳定的小幅上升变化。由 2008~2015 年同期观测资料的对比可见(图 3),水温观测值呈逐年增大的趋势,2010 年之前年增幅较大,2010~2012 年增幅较小。这种水温逐年上升的趋势性变化在我国其他地区的多口地震地下流体观测井中也被观测到(马玉川等,2015)。以往的研究认为,井水温的多年趋势性变化,可能是由观测仪器存在的“零飘”所致(车用太等,2013),但也不排除气温逐年升高的可能性。扎西尼玛等(2009)通过对玉树地区近 50 年气温资料的分析得出,年平均气温以 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速度升高,该变化速率与本文中玉树台观测井水温的上升速率(约 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{a}$)较接近。此外,在我国其他地区也观测到了类似的气温逐年上升的现象(施能等,2001;于淑秋等,2003),虽然没有证据表明 100m 深的地温变化与大气温度变化间有直接联系,但它们的热量来源应都为地球内部放射性元素产生的热以及太阳辐射热,前述观测事实或许表明两者间有一定的关联性。

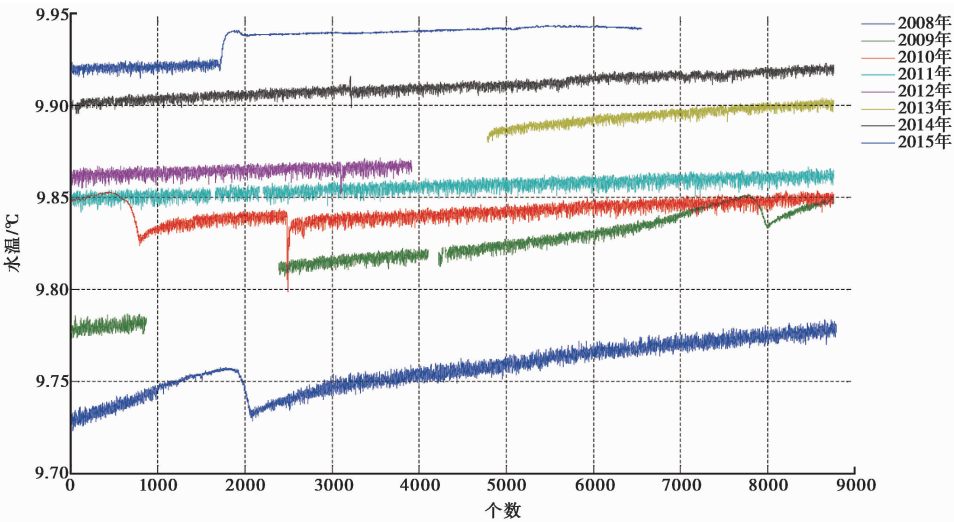


图 3 玉树台井水温逐年对比观测曲线(时值)

玉树台井水温多年观测曲线共出现 5 次明显起伏变化,即 2007 年 10 月 4~13 日、2008 年 3 月 21~27 日、2009 年 11 月 24~29 日、2010 年 1 月 23 日~2 月 2 日的下降变化,以及 2015 年 3 月 13~17 日的上升变化。除 2009 年 11 月 24~29 日的变化没有大震对应外(该变化与后面的另一次变化时间上较为接近),其它几次起伏变化与研究时段内的 7.0 级以上地震均对应较好(表 2)。

将每次异常出现前、后 31 天的数据进行对比分析可知(图 4),除 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_w 7.9 地震以外,其它几次地震前玉树台井水温观测曲线都出现非常类似的下降-缓升变化形态,下降幅度为 $0.018\sim 0.029^{\circ}\text{C}$ 。何案华等(2012)曾对该台井水温异常出现前、后约 20 天的数据进行过相关性分析,得到的相关系数均大于 0.95,这表明异常曲线的变化形态具有

表 2 玉树台井水温异常变化与大地震间的关系

变化时段 (年-月-日)	变化幅度 /(10 ⁻² ℃)	对应的地震					异常持 续时间 /天	距发震 时间 /天
		发震日期 (年-月-日)	地点	震级 M _W	井震距 /km	震源深度 /km		
2007-10-04~2007-10-13	-1.98	2008-03-21	中国新疆于田	7.1	1464	12.0	10	160
2008-03-21~2008-03-27	-2.88	2008-05-12	中国四川汶川	7.9	689	12.8	7	46
2009-11-24~2009-11-29	-1.8	—	—	—	—	—	6	—
2010-01-23~2010-02-02	-2.94	2010-04-14	中国青海玉树	6.9	22	15.7	11	71
2015-03-13~2015-03-17	+2.24	2015-04-25	尼泊尔	7.9	1256	12.0	5	39

高度相似性,仅在幅度上存在一定的差异。2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_W 7.9 地震前,玉树台井水温变化与以往相比呈不同形态,具体表现为快速上升,并且异常持续时间较短,仅为 5 天。对于这种变化是否与地震震中位置和震源机制解等有关,由于研究样本较少,不能给出定论。但在所有对应较好的震例中,除玉树地震之外,其他 3 次 7.0 级以上地震都分布在中国 I 级构造块体边缘地区,表明玉树台井水温对 I 级构造块体边缘的大地震有较好的响应。

为探究玉树台井水温对中等地震响应的灵敏性,笔者分析了 2007 年 8 月 1 日~2015 年 10 月 31 日青海及邻区(32°~40°N,90°~102°E) 31 次 $M_s \geq 5.0$ 地震。除 2009 年 12 月 21 日青海德令哈 5.0 级地震前出现了与 2009 年 11 月 24~29 日类似的下降变化外,其他地震前玉树

台井水温均无异常。由此可见,玉树台井水温对周边中等及以下地震的前兆响应并不灵敏,但对青藏高原及周边强震的前兆响应较好,且对应性也较好。这很可能表明大震前兆响应的区域相关性以及大的构造块体边界的特殊性,即表现为一定的场兆信息(车用太等,1997)。

3.2 异常变化与震级、井震距间的关系

由上述 4 次变化的水温变化幅度与震级、井震距间的关系可见(表 2),水温变化幅度与震级间并没有较好的线性关系,但随着井震距的减小,水温变化幅度明显增大。但是由于样本量很小,该结论还有待更多类似变化的检验。如果上述结论正确的话,则玉树台井水温变化幅度的大小对未来地震地点的判定具有较好的指示意义,即如果玉树台井水温变化幅度较大,则地震发生地点可能距玉树井较近;反之,则地震发生地点可能距玉树井较远。

由异常变化开始距地震发生的时间与震级、井震距间的关系可见,异常从出现到发震的时间与井震距间的统计关系并不显著,但从与震级间的关系来看,震级较大的地震通常在异

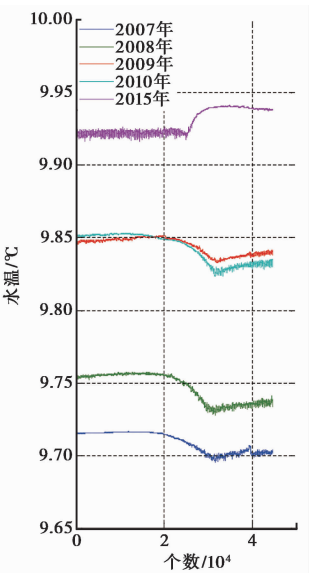


图 4 异常变化前后 31 天观测曲线(分钟值)

常出现后很短的时间内发生,譬如,2008 年 5 月 12 日汶川 M_w 7.9 地震前,异常从出现最大变化到地震发生只有 46 天;2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_w 7.9 地震前,只有 39 天。从局限于本文统计的结果来看,异常变化起始时间与地震震级间可能有较好的相关性。

由此,根据玉树井水温变化幅度和异常出现的时间,似可以分别对地震发生的地点和震级作较好的判定,从而明确玉树井水温变化的前兆指示意义,为判定青藏块体及周边地区大地震提供流体前兆依据。

3.3 异常变化分析

在一定深度下,温度受太阳辐射的影响会变得很小,观测井的温度主要取决于地球由内部向外部的热释放,而对于含水的观测井,井-含水层中水体的流动会对水温产生一定的影响,故一些观测井的水温与水位间相关性较好。2014 年 6 月,玉树台开始水位观测,但前期水位测值不稳定,由 2015 年 1~9 月玉树台井水位、水温观测数据可见(图 5),水位显示较好的固体潮形态,表明该井承压性较好,但水温变化与水位变化间的相关性不好。对于观测井中水温变化的原因,车用太等(2008)总结出了 3 种可能的作用机制,即含水层受力变形引起的水流运动产生的热对流作用、观测井所在地区大地热流的上涌变化、断层活动产生的摩擦热作用等。玉树台井水温在多次地震前的变化,很可能表明了应力的缓慢变化过程,由于裂隙出现在 80m 左右,而水温探头放置在 100m 处,故当应力发生变化、井底部水有微弱流动时,或水平向水流速度远大于垂向时,部分水从裂隙流出,引起局部热交换,导致水温发生变化,但水位并未随之改变。对这种由水温探头置深不同所引起的同井水位、水温观测曲线的对比已有报道(杨竹转,2011;张慧等,2013)。由玉树台成井时实测水温随探头埋深的变化可见(图 6),在观测井深度范围内,随着深度的增加,地下水温度逐渐降低,在 80m 深之下,温度变化幅度逐渐减小。依此,则玉树井在多次地震前出现的水温下降-回返过程可能

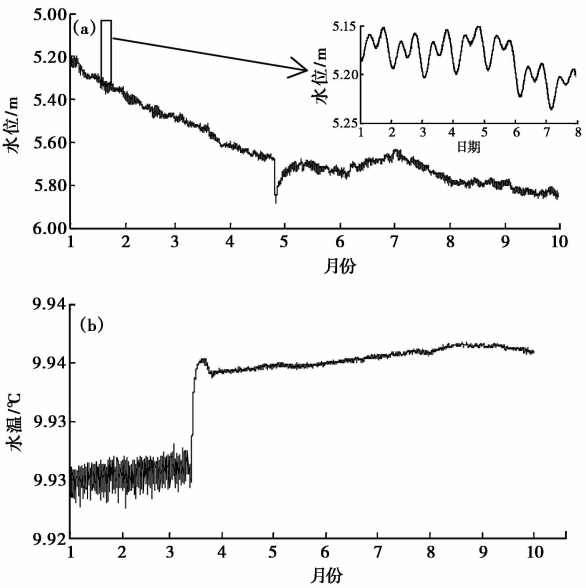


图 5 2015 年玉树台观测曲线
(a)井水位;(b)水温

表明探头下方存在部分低温水的混合,推测在于田、汶川、玉树等地震前玉树附近地区受挤压作用;而在尼泊尔地震前,水温出现的上升变化或许表明附近地区受拉张作用。

4 结论与讨论

在青藏块体及周边多次大地震之前,玉树台井水温都出现较为显著的、呈重复性的前兆短临异常变化。玉树台井水温具有逐年小幅上升的特点,对周边中等地震响应并不灵敏,但对青藏块体及周缘地区 $M_w \geq 7.0$ 地震响应较为灵敏,在震前 1~2 个月到半年时间,会出现较为明显的幅度约为 0.02°C 的异常变化。

玉树台井水温异常变化幅度与井震距间有较好的线性关系。井震距越小,水温变化幅度越大,故由水温变化幅度可较好地推断地震发生地点的远近。

水温异常从开始出现到地震发生的时间与地震震级间有较好的相关性,震级越大,从异常出现到地震发生的时间间隔越短。

本文通过对玉树台井水温在青藏块体及周缘地区几次大地震前的异常变化进行分析认为,两者具有较好的对应关系。但地震前兆研究是一个较为复杂的过程,尤其是水温前兆机理的研究仍存在很多不确定性。受限于观测数据和周边大地震次数,本文统计样本较少,因此对玉树台井水温的大震前变化特征仍有待更多的观测数据来验证。一般来说,水温变化的原因有 2 个方面:一是介质中水的运移引起不同温度水的混合;二是由于介质受力状态变化引起的,前人通过对理想材料和岩石样本的实验研究得出,体应变等会引起岩石介质温度的增加,且在康定地温的观测研究中得出应力调整引起温度变化的结论(陈顺云等,2009、2013)。由于玉树台在成井时并没有水位的同步观测,所以,玉树台井水温变化的具体原因仍有待水位资料的积累及更多的研究工作。但对玉树台井水温震前典型异常变化的研究,可明确该变化特征作为前兆异常的可靠性,进而为其他水温观测提供参考,也可为青藏块体及周缘大地震的发生提供流体判定依据。

致谢:中国地震局地壳应力研究所何案华在水温数据改正方面提供了帮助,青海省地震局杨晓霞提供了玉树台井孔的部分资料,两位审稿人对本文的修改提出了较好建议,在此一并致谢。

参考文献

- 车用太、李万明、刘成龙等,2014,金沙江水网地下水动态在彝良 $M_s 5.7$ 地震前的异常及其特征,地震,34(1),104~111。
- 车用太、刘成龙、鱼金子,2008,井水温度微动态及其形成机制,地震,28(4),20~28。
- 车用太、鱼金子,1997,地下流体的源兆、场兆、远兆及其在地震预报中的意义,地震,17(3),283~289。
- 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。
- 陈顺云、刘力强、刘培洵等,2009,应力应变与温度响应关系的理论与实验研究,中国科学:D 辑,39(10),1446~1455。
- 陈顺云、刘培洵、刘力强等,2013,芦山地震前康定地温变化现象,地震地质,35(3),634~640。

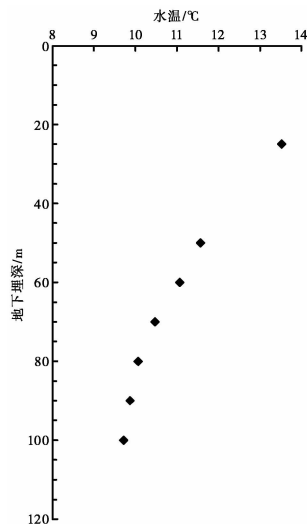


图6 玉树台水温梯度
测试时间 2007 年 5 月 15 日

邓起东、程绍平、马冀等,2014,青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势,地球物理学报,57(7),2025~2042。

邓起东、张培震、冉勇康等,2002,中国活动构造基本特征,中国科学:D辑,32(12),1020~1030。

何案华、赵刚、刘成龙等,2012,青海玉树与德令哈地热观测井在汶川与玉树地震前的异常特征,地球物理学报,55(4),1261~1268。

刘耀炜、孙小龙、王世芹等,2008,井孔水温异常与2007年宁洱6.4级地震关系分析,地震研究,31(4),347~353。

马玉川、黄辅琼、薛艳等,2015,泉水和井水温度长期观测资料的初步统计,震灾防御技术,10(2),367~377。

施能、马丽、袁晓玉等,2001,近50a浙江省气候变化特征分析,南京气象学院学报,24(2),207~213。

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(3),265~273。

孙小龙、刘耀炜,2006,应力加载作用引起地下水微温度场变化的研究综述,国际地震动态,(7),17~26。

杨竹转、邓志辉、陶京玲等,2007,北京塔院井数字化观测水温的同震效应研究,地震学报,29(2),203~213。

杨竹转,2011,地震引起的井水位水温变化及其机理研究,硕士学位论文,70~73,北京:中国地震局地质研究所。

于淑秋、林学椿、徐祥德等,2003,中国西北地区近50年降水和温度的变化,气候与环境研究,8(1),9~18。

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。

扎西尼玛、陈付统、娜吉,2009,玉树地区近50年气温变化分析,青海气象,20(4),21~24。

张彬、刘耀炜、杨选辉,2013,中国大陆井水温对汶川8.0级、玉树7.1级、芦山7.0级和岷县6.6级地震响应特征的对比研究,地震工程学报,35(3),535~541。

张慧、顾申宜、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。

张培震、邓起东、张国民等,2003,中国大陆的强震活动与活动地块,中国科学:D辑,33(增刊),12~20。

Dziewonski A M, Chou T A, Woodhouse J H, 1981, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J Geophys Res, 86, 2825~2852.

Ekström G, Nettles M, Dziewonski A M, 2012, The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13, 017 earthquakes, Phys Earth Planet Inter, 200–201, 1~9.

Variation of water temperature in the Yushu well and its correlation with the strong earthquakes in the Qinghai-Tibetan block

Wang Bo¹⁾ Ma Yuchuan¹⁾ Ma Yuhu²⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China
2) Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, China

Abstract We analyze the water temperature changes in the Yushu well, and found that four of five abnormal changes show a certain relevance with the earthquakes in the Qinghai-Tibetan block. We conclude the results as follows: with the decrease of the distance between the epicenter and the observation well, the amplitude of the water temperature in observation well increases; the bigger the earthquake is, the shorter the time interval between the occurrence of changes and earthquakes is. The results show that, the typical changes in the Yushu well are earthquake precursors, which also have a good monitoring significance of the earthquakes in the Qinghai-Tibetan block.

Key words: Yushu; Water temperature; Qinghai-Tibetan block; Earthquake