

两种不同类型测汞仪对比观测实验结果分析*

杨丽¹, 刘峰¹, 官朝康², 张淑华², 朱培耀¹

(1. 云南省地震局, 云南昆明 650224; 2. 弥勒市地震局, 云南弥勒 652300)

摘要: 在相同观测条件下, 选用弥勒弥东哨井, 用 ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪与 DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪进行对比观测实验, 由观测数据曲线和仪器参数对比分析结果得出: ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪检出限、灵敏度、稳定性等较 DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪好, ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪观测数据曲线有明显的日变形态, 能记录到同震变化。

关键词: 汞观测; 测汞仪; 对比分析; 同震响应

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)03-0479-07

0 引言

汞作为一种敏感的地震前兆指标, 其观测数据在地震前会出现不同程度的异常变化, 尤其在短临预报方面有着重要作用(张素欣等, 2006)。因此, 汞是地下流体预报地震的灵敏组分之一, 在地震监测预报方面受到了广泛的重视。全国很多地震台站开展汞观测, 汞观测点主要集中在南北地震带、华北、东北等主要地震监视地区, 密度最高的为川滇和华北地区, 监测点最多的省份是云南省。

全国汞观测主要经历了模拟和数字化汞观测两个阶段。模拟汞观测始于 20 世纪 90 年代初, 主要观测仪器有 XG-3 型、XG-4 型、XG-5 型测汞仪与 XG-5Z 型塞曼测汞仪等, 目前在台站应用最为广泛的是北京地质仪器厂早期研制的 XG-4 型测汞仪。随着测汞技术的飞速发展以及汞浓度连续自动化观测的现实需求, 汞观测的技术和设备不断向数字化观测推进。在“九五”与“十五”期间, 实现了数字化连续观测, 主要的观测仪器是 DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪。由于这两种数字化观测仪器都是在 10 年前研制生产的, 仪器老化现象严重, 稳定性能差, 抗干扰能力变弱, 经常出现故障, 导致数据缺数, 加之研制单位的解散, 老化仪器得不到维修、维护和更换, 长期使用导致灵敏度下降, 这些问题严重影响了观测数据的连续性与质量(中国地震局监

测预报司, 2007; 刘耀炜等, 2006; 王铁城等, 1994)。

为了进一步提高地震监测预报水平和汞观测数据质量, 必须选取灵敏度更高、抗干扰能力更强、性能更加稳定的新型汞观测仪器。本文所选取的 ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪就是一款最新研发的高精度数字化汞测量仪器。在该款仪器投入使用前, 有必要将其与现阶段地震监测中常用的数字化智能测汞仪器进行对比研究, 以确定其使用功能、成果质量、稳定性及抗干扰能力等各方面的优劣性。

1 测汞仪现状与发展

1.1 DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪

DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪是目前数字化汞测量的主要观测仪器, 这类数字化测汞仪由单光束光路系统、气路系统、光电转换系统、检测电路、计算机控制电路、显示和键盘电路及响应软件组成。它是根据基态汞原子对于汞原子被激发所产生的 2537Å 特征谱线选择吸收原理工作的。透射光的强度与基态汞原子的浓度成正比, 即服从比耳-朗伯定律:

$$I = I_0 e^{-KCL} \quad (1)$$

其中: I 为透射光强度, I_0 为入射光强度, K 为吸收系数, C 为基态汞原子浓度, L 为吸收层长度(中国地震局监测预报司, 2007; 张素欣等,

* 收稿日期: 2015-09-08.

基金项目: 地震科技星火计划项目——痕量汞在线自动分析仪与智能测汞仪的对比观测分析研究资助。

2006)。该类型仪器精确度为 2.5% ~ 3.0%，检出限为 0.008 ng (汞)，灵敏度为 0.008 ng (汞)，基线稳定度为 0.000 8 ~ 0.001 ng/30 min。仪器适用温度为 10℃ ~ 40℃，供电电压为 AC220 ± 15%、DC11 ~ 13.5 V。

DFG-B 型数字化智能测汞仪为中国地震局分析预报中心研制，该仪器在实际观测过程中，由于电路发生短路或其他原因，经常发生显示屏字符混乱等情况，其抗干扰能力与自身稳定性较差，仪器故障率较高。由于仪器的原研制生产单位已经停产或解散，相关仪器配件也已不再生产，导致一些观测台站的 DFG-B 型数字化智能测汞仪得不到养护和维修，一旦出现故障或元件损坏，无法购买到相应的配件，致使仪器设备无法恢复到正常工作状态。RG-BQZ 型数字化智能测汞仪故障率也较高，且灵敏度偏低，观测数据曲线多有毛刺，动态规律性差。

1.2 ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪

ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪是杭州超距科技有限公司最新研发的汞测量仪器。该仪器对汞具有极高的灵敏度，检出限高达 5×10^{-13} g (汞)，可以直接测量，无需富集，在仪器最低检出限时，基线零点漂移 < 2 mV/8 h，电压要求为 AC220 V、50 Hz，温度范围在 0 ~ 50℃ 之间，湿度范围在 10% ~ 95% 之间（非冷凝）。在运行时，其内置气泵会通过电磁阀精确地抽取一定体积的空气样品，通过专制的金丝捕汞线圈吸收样品中的汞，仪器自动控制系统自动对吸收了样品中汞气的金丝捕汞线圈通电加热，将捕集的汞蒸气瞬时释放出来，被黄金薄膜传感器测定，然后通过计算，将最终浓度值显示在液晶屏幕上。ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪中的黄金薄膜传感器对于汞元素具有良好的稳定性和选择性。此外，该仪器自身还配有环境温度传感器和气压传感器，可同步进行环境温度和气压的辅助观测。

2 对比观测方法

2.1 观测井的选取

本次对比观测实验所选用的观测井为弥勒东哨井，该观测井位于弥勒—师宗断裂带上，其地理位置为 (24.41°N, 103.40°E)，测点高程

1 423.0 m。该井于 2003 年 12 月下旬完工成井，终孔深度 614.40 m，孔径 216 mm。花管安装至 355.04 m 处，自 355.04 m 以下为裸孔，过水段管径 121 ~ 168 mm。根据钻探资料，含水层地层岩性为层状砂岩及白云岩。其中 102.16 m 以上为白云岩，该段地层节理裂隙及岩溶管道极为发育。根据地质资料及地下水情况分析，该观测井井水为沿弥勒—师宗断裂带上涌的深循环地下热水与浅层基岩裂隙承压水的混合水，井水温度随深度逐渐升高，表现为正梯度。该观测井数字化、辅助测项齐全，陆续开展了水位、水温、气氦、气汞、水汞、流量、水电流、氦气、气温、气压、降水量等十几个模拟观测和数字化观测项目。

2.2 对比观测仪器布置

在同一井孔的相同观测深度，同时放置 3 套独立测汞仪进行连续对比观测，见图 1。从图 1 中可以看出，两套数字化智能测汞仪沿用以往气路观测方式，并列连接在“九五”SD-3 测氦仪的排气口上，测氦仪不抽气，只是作为通气管路使用；ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪为在井口下方新铺设的一条单独管路，与两套数字化智能测汞仪形成并联模式。为了避免 3 套测汞仪同时抽气对彼此的测量值造成影响，3 套仪器的抽气开始时间先后间隔 5 min，以保证足够的气量。3 套测汞仪采样率设置相同，均为 1 次/h。

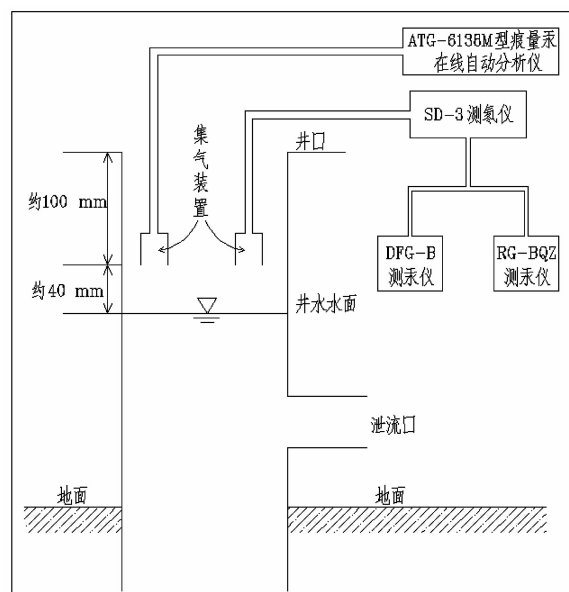


图 1 3 套测汞仪器气路连接示意图
Fig. 1 Gas circuit connection diagram of three sets of mercury detectors

3 观测数据及仪器参数对比分析

3.1 观测数据分析

对2015年4月11日至5月20日3套测汞仪的整点值观测数据曲线进行对比分析。由图2可见, DFG-B型和RG-BQZ型数字化智能测汞仪的测值变化幅度较大, 观测数据曲线均有较大的突跳或起伏, 且形成较多毛刺, 观测数据曲线动态规律性不强。而ATG-6138M型痕量汞在线自动分析仪观测数据曲线可以看到明显的日变形态, 且无毛刺。由此可见, DFG-B型和RG-BQZ型

数字化智能测汞仪的数据质量和观测稳定性较ATG-6138M型痕量汞在线自动分析仪差。从图中还可以看出, 在2015年4月25日尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震前后, ATG-6138M型痕量汞在线自动分析仪清晰地记录到了同震变化, 这也是国内首次观测到了地下流体汞的同震效应, 而DFG-B型和RG-BQZ型数字化智能测汞仪未能记录到同震响应, 也进一步证实了ATG-6138M型痕量汞在线自动分析仪比DFG-B型和RG-BQZ型数字化智能测汞仪灵敏度更高, 且痕量汞还能记录到地震波引起的深部流体中汞含量变化的异常信息。

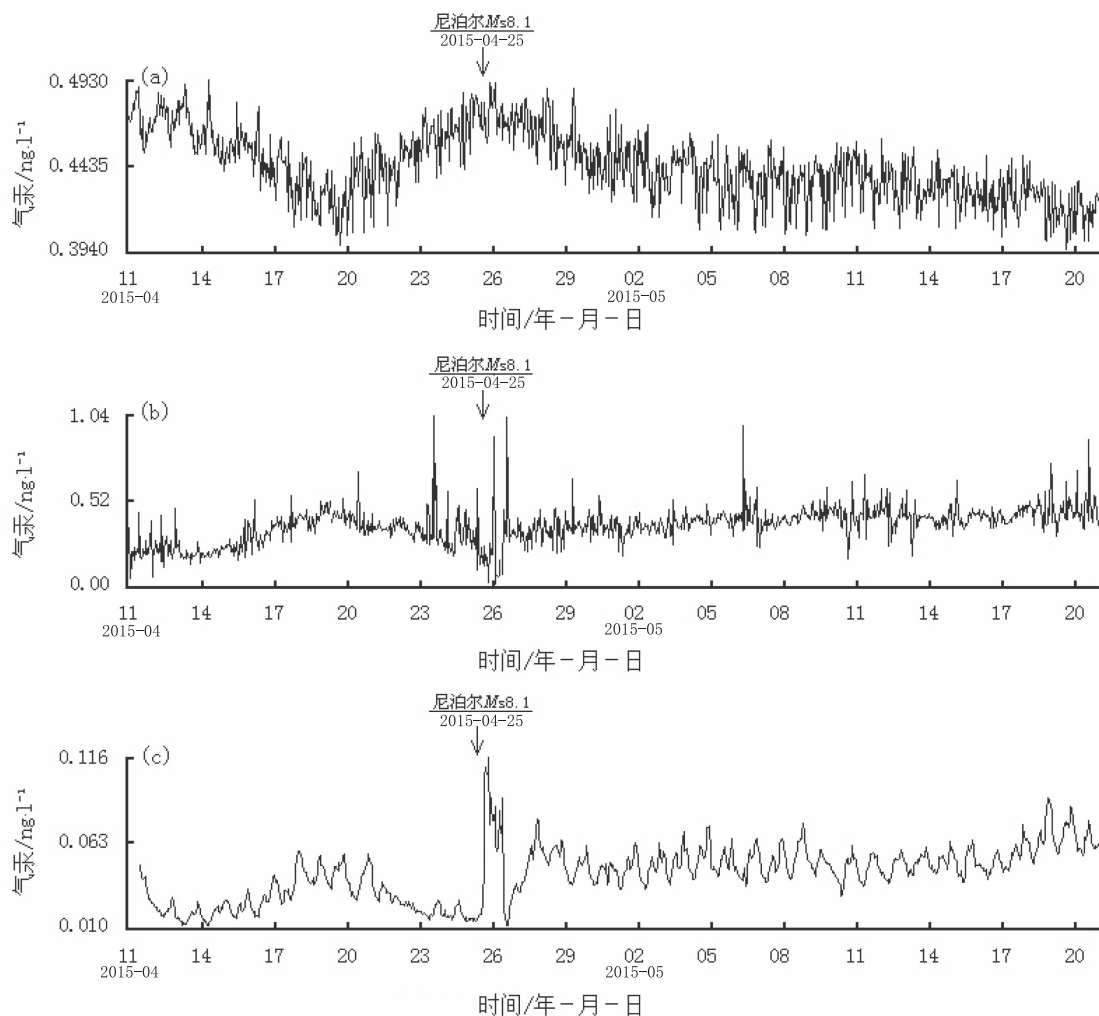


图2 3套测汞仪的同步观测数据曲线

(a) DFG-B 气汞整点值; (b) RG-BQZ 气汞整点值; (c) ATG-6138M 痕量汞整点值

Fig. 2 The synchronous observation data curve of three sets of mercury detectors

(a) integral point value of DFG-B; (b) integral point value of RG-BQZ;

(c) integral point value of ATG-6138M Trace Mercury

3.2 仪器参数对比分析

测汞仪的主要技术指标和参数能够反映该台仪器性能优劣，主要包括仪器的检出限、灵敏度、精密度、稳定性和准确度等。根据出厂时主要技

术指标和参数标准对比，ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪的检出限、灵敏度比 DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪高出一个数量级，具体见表 1。

表 1 仪器出厂时的技术指标和参数标准
Tab. 1 Technical index and parameter standard of mercury detectors given by their manufacturers

仪器型号	检出限/ng (汞)	灵敏度/ng (汞)	精确度	基线稳定度
DFG-B 型/RG-BQZ 型	0.008	0.008	2.5~3%	0.000 8~0.001 ng/30min
ATG-6138M 型痕量汞	0.000 5	0.000 5	≤5%	<2 mV/8 h

进一步对这 3 套测汞仪的观测数据进行数学处理，一方面利用软件对两个多月的观测整点值进行一阶差分分析，如图 3 所示；另一方面计算观测日均值的标准偏差，DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪的日均值标准偏差分别为 0.023 和 0.102，而 ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪的日均值标准偏差为 0.008。通过对观测数据做差分分析，并结合计算出的标准偏差结果不难看出，

DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪观测数据的离散程度较 ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪的离散程度大，尤其 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪的日均值标准偏差达到了 0.102，其测值较为分散，表现出较多大的突跳。而 ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪的测值相对集中，观测数据曲线平滑，没有大的突跳、毛刺，呈现出日变动态。

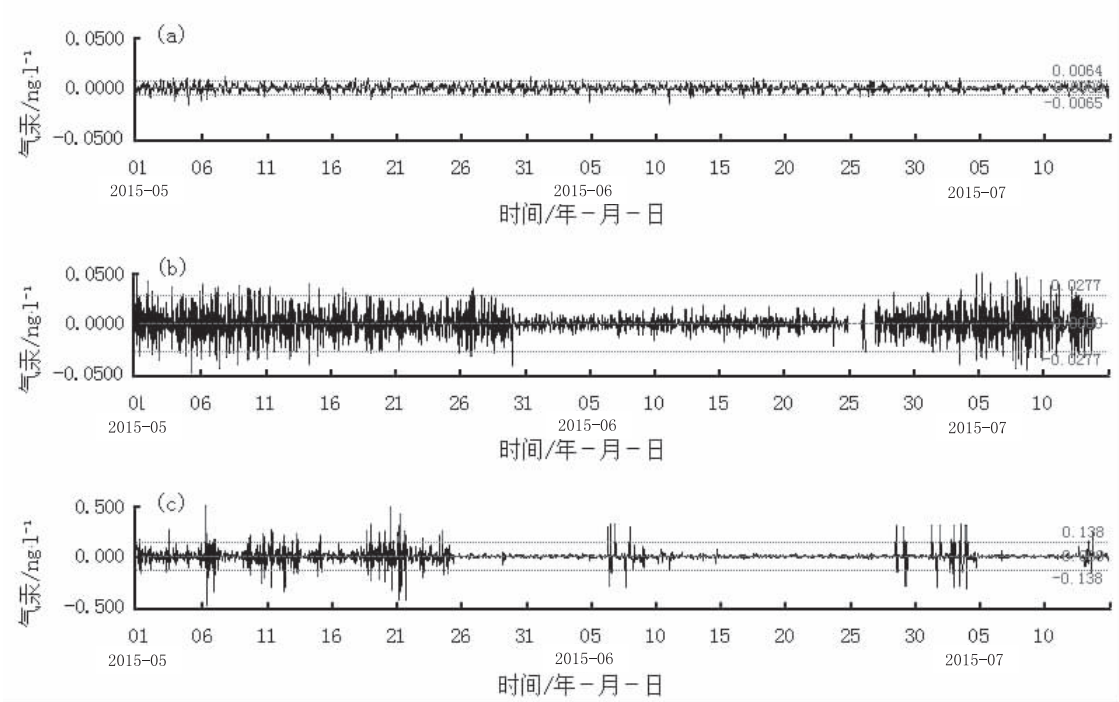


图 3 3 套测汞仪的整点观测数据一阶差分图
(a) ATG-6138M 痕量汞一阶差分；(b) DFG-B 气汞一阶差分；(c) RG-BQZ 气汞一阶差分
Fig. 3 The first order difference diagram of the integral point value of three sets of mercury detectors
(a) the first order difference diagram of ATG-6138M Trace Mercury; (b) the first order difference diagram of DFG-B; (c) the first order difference diagram of RG-BQZ

3.3 动力加载作用信息分析

2015年4月25日尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震，弥勒弥东哨井的水位、水温、痕量汞清晰记录到了阶变上升的同震响应，如图4所示。水位从3.282 m上升至3.843 m后到达井口，直至溢出，水温升高了 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，气汞上升了 $0.09\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。但是 DFG-B

型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪却未能记录到同震响应。尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震后，该井水位一直上升，并从井口上方逸出，4月26日台站人员不得不人为加大了泄流口的泄流量，导致水位急剧下降；由于人为干扰泄流口流量，水位的下降引起了水温、汞的同时刻急剧变化。

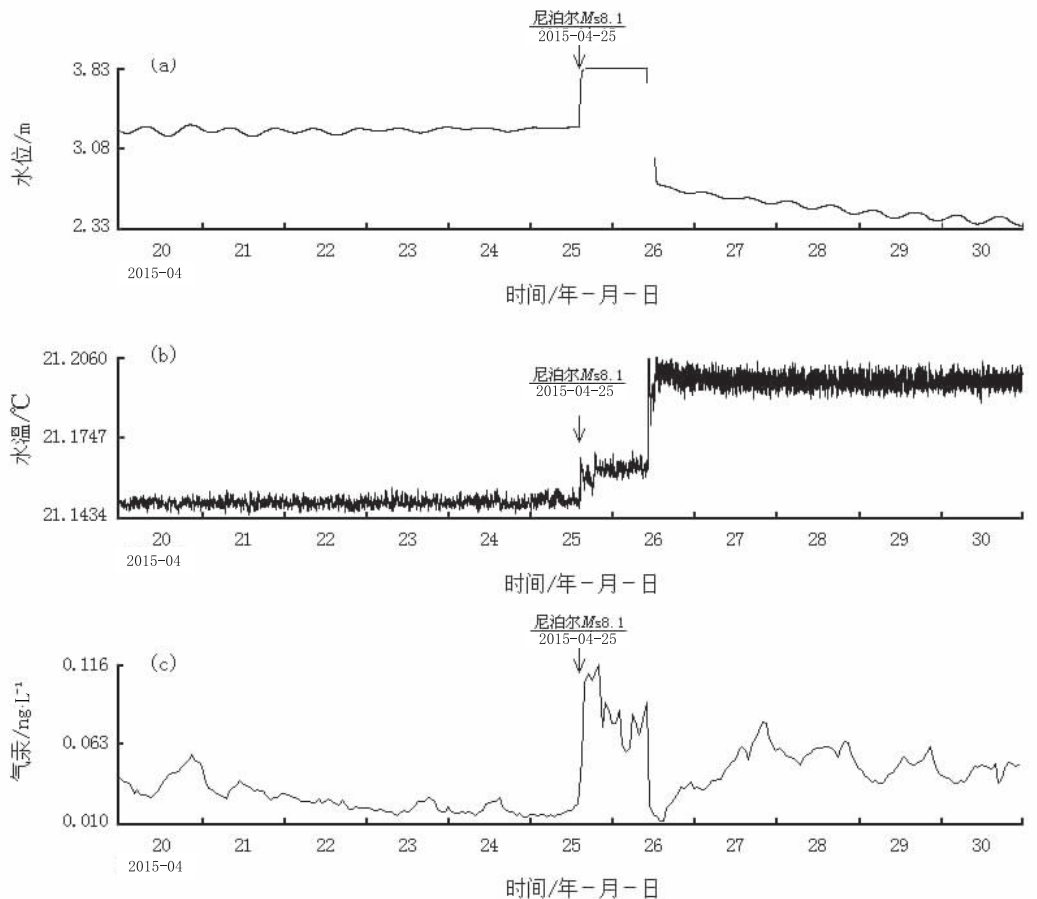


图4 弥勒弥东哨井水位、水温、痕量汞同震变化图

(a) ZKGD3000 水位分钟值；(b) ZKGD3000 水温分钟值；(c) ATG-6138M 痕量汞整点值

Fig. 4 The co-seismic variation of water level, water temperature and trace mercury in Midongshao Well in Mile

(a) minute-value of ZKGD3000 water level; (b) minute-value of ZKGD3000 water temperature; (c) integral point value of ATG-6138M Trace Mercury

对于水位、水温同震响应机理，前人已有一定的研究。水位同震变化可分为振荡和阶变（包括上升和下降），均是地震波与含水层交互作用的结果，即含水层对地震波的弹性响应（杨竹转等，2010，2007，2012）。水温的同震效应，有上升和下降变化，但没有观测到振荡现象。目前水温下降响应居多，主要归为冷水下渗、气体逸出说以及井内水体热弥散效应3种观点（缪阿丽等，

2014；周红艳等，2012）。刘耀炜等（2005）提出水位振荡有可能导致上部冷水下泄，低温水快速混入观测含水层中，从而造成温度下降。鱼金子等（1997）观察到水温的同震突降是由于井水气体的释放造成的。陈大庆等（2007）建立气泡脱逸模型，也指出在气泡脱逸上升过程中，对外做功吸热，以及气泡本身携带热量的散失最终导致地下水温度下降。石耀霖等（2007）通过有限单

元法模型计算,认为热弥散效应是造成同震水温变化的主要原因,后续的热传导作用可以解释水温的复原过程。对于水温同震上升型,杨竹转(2012)对一井多震的研究结果表明,水温同震变化与水位变化关系密切,水位同震上升是水温同震上升的直接原因,水温探头附近为随深度增加的正梯度区,地震波过后井水沿断层外泄减少,而含水层中的热水继续流向井内,井水位上升,温度上升。综观前人的研究成果,各观点的提出都是基于一定的观测事实和分析方法,都具有其合理性,但各类机理只能解释特定的观测现象。无论从热力学角度,还是水动力学角度等,都显示出不同井同一含水层观测系统对地震的同震响应特征各不相同,它主要受井孔及周边介质的构造环境和水文地质条件影响,随着井一含水层系统状态的变化,响应特征也会不相同,同震响应机理十分复杂,也可能是不同机理综合作用的结果。

在本次对比观测试验中,水位、水温、汞记录到的均为上升型的同震响应,结合前人井水位、水温同震响应机理的研究经验,笔者认为:弥勒弥东哨井水位、水温、痕量汞的同震变化,可能是由于该井周围介质的应力环境发生了一定程度的变化,当作用于井孔周围介质的作用力使其发生塑(脆)性变形时,含水层介质的孔隙度发生了变化,从而导致含水层中的地下水进入井孔内,就出现了井水位的上升,同时深部含水层温度较高的深循环地下热水上涌,使水温探头测试的温度同步上升;随着深部含水层水的不断上涌,把深部流体介质中的汞带出,新型痕量汞仪器灵敏度较高,监测到了汞含量的异常变化,即同震上升响应。

4 结论

通过对弥勒弥东哨井 ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪与 DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪观测数据的对比观测实验分析,得到以下认识:

(1) 从仪器出厂时主要技术指标和参数标准对比及对仪器的实测数据进行数学处理结果可见,ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪检出限高出

DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪一个数量级单位,且 ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪的测值较 DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪的测值离散度小,仪器稳定性好。

(2) 从观测数据曲线上来看,ATG-6138M 型痕量汞在线自动分析仪可以看到明显的规律性的日变形态,同时记录到了尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震的同震变化,灵敏度较 DFG-B 型和 RG-BQZ 型数字化智能测汞仪高。

(3) 结合前人对井水位、水温的同震响应机理研究经验,笔者认为:地震波使弥勒弥东哨井周围介质的应力环境发生变化,含水层孔隙度改变,导致含水层中水进入井孔,水位上升;同时深部含水层水温呈正梯度的水上涌,使水温探头测试的温度同步上升;随着深部含水层的水上涌,把深部流体介质中的汞带出,汞浓度发生变化。

参考文献:

- 陈大庆,刘耀炜,杨选辉等. 2007. 远场大震的水位、水温同震响应及其机理研究[J]. 地震地质,29(1):122-132.
- 刘耀炜,陈华静,车用太. 2006. 我国地震地下流体观测研究 40 年发展与展望[J]. 国际地震动态,(7):3-12.
- 刘耀炜,杨选辉,刘永铭. 2005. 地下流体对苏门答腊 8.7 级地震的响应特征[M]//中国地震局监测预报司. 2009 年印度尼西亚苏门答腊 8.7 级大地震及其对中国大陆地区的影响. 北京:地震出版社,131-258.
- 缪阿丽,张艺,叶碧文等. 2014. 江苏井网水温水位对几次大地震的同震响应特征及机理分析[J]. 地震,34(4):78-87.
- 石耀霖,曹建玲,马丽. 2007. 唐山井水温的同震变化及其物理解释[J]. 地震学报,2(3):265-273.
- 王铁城,鄂秀满,陈建民等. 1994. 中国地震地下流体监测系统的现状与展望[J]. 中国地震,10(3):277-286.
- 杨竹转,邓志辉,高小其等. 2010. 新疆乌鲁木齐 04 号井数字化水位同震阶变的研究[J]. 中国地震,26(3):329-339.
- 杨竹转,邓志辉,陶京铃等. 2007. 北京塔院井数字化观测水温的同震效应研究[J]. 地震学报,29(2):203-212.
- 杨竹转. 2012. 地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究[J]. 国际地震动态,(11):42-47.
- 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[J]. 地震,17(4):389-396.
- 张素欣,王宝坤,翟彦忠等. 2006. 热水井数字化气汞观测影响因素讨论[J]. 华北地震科学,24(1):23-26.
- 中国地震局监测预报司. 2007. 地震地下流体理论基础与观测技术[M]. 北京:地震出版社,156-179.
- 周红艳,赵爱平,王敏等. 2012. 九江 1 井水位与水温对大震的同震响应特征及机理浅析[J]. 高原地震,24(4):44-49.

Analysis on Comparison Observation Test Results of Two Different Types of Mercury Detector

YANG Li¹, LIU Feng¹, GUAN Chaokang², ZHANG Shuhua², ZHU Peiyao¹

(1. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *Earthquake Administration of Mile Multiple, Mile 652300, Yunnan, China*)

Abstract

Under the same observation condition, we selected Midongshao Well in Mile and compared the observation curves recorded by ATG – 6138M Trace Mercury Automatic Analyzer and DFG – B and RG – BQZ Digital Intelligent Mercury Detectors. The comparison result of observation curve and the instrument parameter showed that the detection limit, sensitivity and stability of ATG – 6138M Trace Mercury Automatic Analyzer were better than that of DFG – B and RG – BQZ Digital Intelligent Mercury Detectors. The observation curve recorded by ATG – 6138M Trace Mercury Automatic Analyzer had the obvious the daily variation, and could record the co-seismic variation.

Key words: Hg observation; mercury detector; comparative analysis; co-seismic response