

张惠菊,付虹,张翔,等. 2023. 云南开远井水温高频波动异常特征与机理讨论[J]. 地震研究,46(1):74-81,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0009.

Zhang H J, Fu H, Zhang X, et al. 2023. Discussion of the feature and mechanism of the high-frequency fluctuation anomaly of the water temperature in Kaiyuan Well in Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 46(1):74-81, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0009.

云南开远井水温高频波动异常特征与机理讨论^{*}

张惠菊¹, 付虹^{1,2♣}, 张翔², 胡小静²

(1. 云南省红河州开远市地震局, 云南 开远 661699; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 针对云南开远井水温 2020 年 3 月开始出现的高频波动异常, 排查了观测环境、供电电源等可能的影响因素, 开展不同层位水温对比观测实验, 并根据井孔结构及观测含水层特征, 探讨了引起不同层位井水温波动异常的物理机制。结果表明: 观测环境及供电系统不是引起水温变化的因素, 主要是由于井孔储水裂隙受到岩体变形而发生闭合与开启, 造成了进入井孔内高温水的减少与增加, 从而引起井水温下降与快速上升, 这可能是区域构造活动增强引起的, 周边发生的一系列中强以上地震是区域构造活动增强的结果。

关键词: 水温异常; 高频波动; 机理分析; 云南

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2023)01-0074-08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0009

0 引言

地震的发生常常伴随着地壳深部热流体的运动。水作为地壳中最活跃的介质对地下物质热活动更为敏感, 因此, 通过地热(井水温或泉水温)动态观测来监测地震孕育过程是有坚实的理论基础的(付子忠, 1988)。经过几十年的发展, 我国已建设成规模较大的地震地热(井水温或泉水温)观测网(国家地震局科技监测司, 1995), 为我国地震监测预报研究与应用提供了丰富的观测资料(刘耀炜, 2006; 刘春国等, 2022)。

随着观测技术的发展, 我国目前在井水温观测中采用了高灵敏度及高分辨率的水温传感器, 其观测精度优于 0.02℃, 分辨力达到 0.000 1℃, 具有灵敏的水温动态响应能力(孙小龙, 刘耀炜, 2006; 张彬等, 2015), 因此获取了显著的地震前兆信息(刘耀炜等, 2008; 付虹, 赵小艳, 2013; 李琼等, 2017; 芮雪莲等, 2022), 以及丰富的井

水温度动态特征(刘耀炜等, 2010; 马玉川, 2014)。由于井水温具有动态信息丰富、变化机理复杂的特点(车用太等, 1996, 2008; 鱼金子等, 2012), 在分析井水温观测异常变化资料时, 需要考虑观测环境、仪器系统及其井-含水层系统等因素的影响, 排除能够确定的干扰成分, 分析反映地震孕育过程的前兆信息, 同时也需要对异常变化的可能物理机制给出合理的科学解释。

云南开远井水位和水温自观测以来积累了长期的资料, 观测环境干扰相对较小, 资料可信度高, 在多次中强地震前均有异常出现, 为地震分析预报工作提供了丰富的信息(付虹等, 2007, 2014)。2020 年以来, 开远井水温出现了高频波动异常变化, 而且与井水位没有明显的对应关系, 不同于前人总结的井水温异常特征(孙小龙, 刘耀炜, 2006), 因此很难借用已有成果给出合理解释。开远井水温高频波动异常是观测环境影响或观测系统问题, 还是水温动态的另一种特征? 本文针对此异常变化特征, 寻找异常成因

^{*} 收稿日期: 2022-06-30.

基金项目: 中国地震局星火计划(XH21030Y)和科技部重点研发子专题项目(2018YFC150330505)联合资助。

第一作者简介: 张惠菊(1969-), 高级工程师, 主要从事地震监测预报工作. E-mail: 584485331@qq.com.

♣ 通讯作者简介: 付虹(1963-), 研究员, 主要从事地震综合预报工作. E-mail: 280460086@qq.com.

与可能的机制, 丰富井水温动态特征, 以期为地震异常判定方法提供参考依据。

1 构造背景与观测井概况

1.1 构造背景

开远井位于云南省开远市北郊十里村 (103.25°E, 23.75°N), 海拔 1 050 m, 构造位置处于开远陷落盆地北部边缘的小江断裂与建水—石屏弧形断裂交叉、复合部位, 即石屏建水山字型构造弧顶及朋普—开远一个旧断裂上 (图 1)。开远井所处的开远盆地面积约 40 km², 地势平坦, 四周山地环绕, 盆地中主要为第四系孔隙含水层和岩溶含水层。第四系含水层埋藏浅, 直接出露地表, 接受大气降水补给, 而岩溶水埋藏较深。观测井含水层为埋藏较深的岩溶含水层径流区, 主要受东山区降雨渗入补给 (付虹, 赵小艳, 2013)。

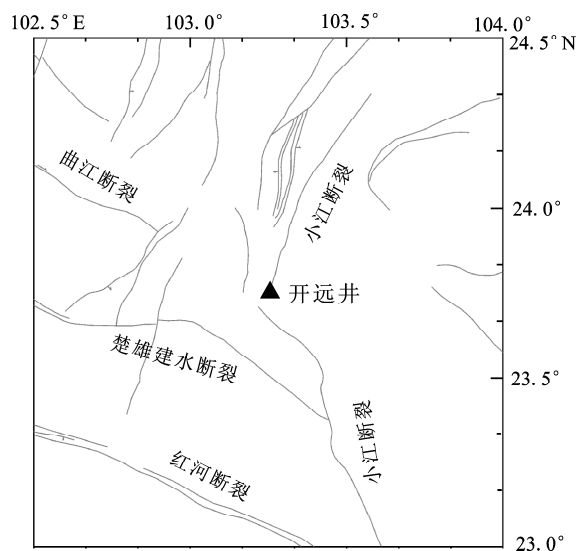


图 1 开远井区域构造背景示意图

Fig. 1 Geotectonic settings of the region in which Kaiyuan Well is located

1.2 观测井概况

开远井于 1984 年成井, 成井深度 224 m, 套管共 169.38 m, 井管 96.00 ~ 100.36 m 段为花管, 169.38 ~ 224.0 m 为裸井, 水位埋深约 4.78 m, 水温约 24.2 °C。图 2 为观测井结构及井孔柱状图, 从图中可以看出, 该井的观测含水层段为花管段加裸孔段, 观测含水层岩性为三叠

系灰岩, 部分层位含断层破碎物及深灰色致密状炭质, 地下水类型属于基岩裂隙承压水 (付虹, 赵小艳, 2013)。

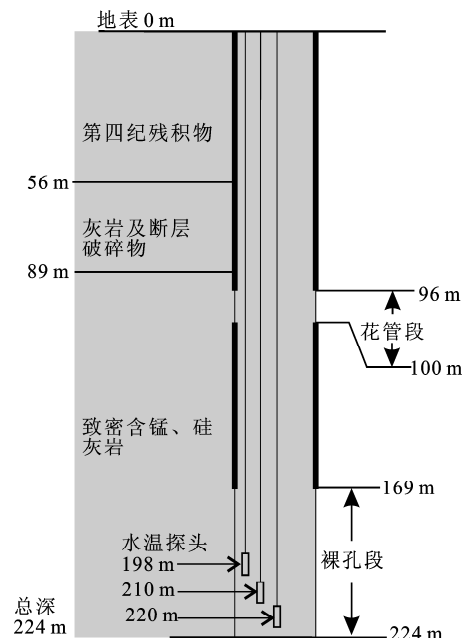


图 2 开远井井孔柱状图

Fig. 2 Borehole histogram of Kaiyuan Well

由图 2 可以看出, 其含水层以灰岩为主, 碳酸钙溶解应为地下水矿物质主要来源。而从图 3a 给出的井水化学组分 Piper 图中可以看出, 开远井水属于 $\text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水, 地下水中 Na^+ 含量略高于 Ca^{2+} , 说明其地下水发生了阳离子交替吸附作用, Ca^{2+} 置换了岩土所吸附的一部分 Na^+ , 使地下水中 Na^+ 增多、 Ca^{2+} 减少, 说明井中地下水补给径流路径较长并经历了与含钠岩层的离子交换过程。从图 3b 氢氧同位素大气降水线分布可以看出, 开远井水的氢氧同位素存在偏离大气降水线现象, 也佐证了该井地下水补给径流过程中可能发生了较强的水岩反应。

开远井 1986 年开始用于地震观测, 主要观测项目为静水位、井水温、气象三要素等。井水温观测始于 1988 年, 于 2002 年进行“九五”数字化改造, 安装了高精度测温仪 (SZW-1A), 探头置于井下 220 m, 数据采样间隔为 1 h。2014 年 11 月安装了“十五”高精度测温仪 (ZKGD3000-NT), 探头置于井下 210 m, 数据采样间隔为 1 min, “十五”仪器与“九五”仪器进行长期对比观测。

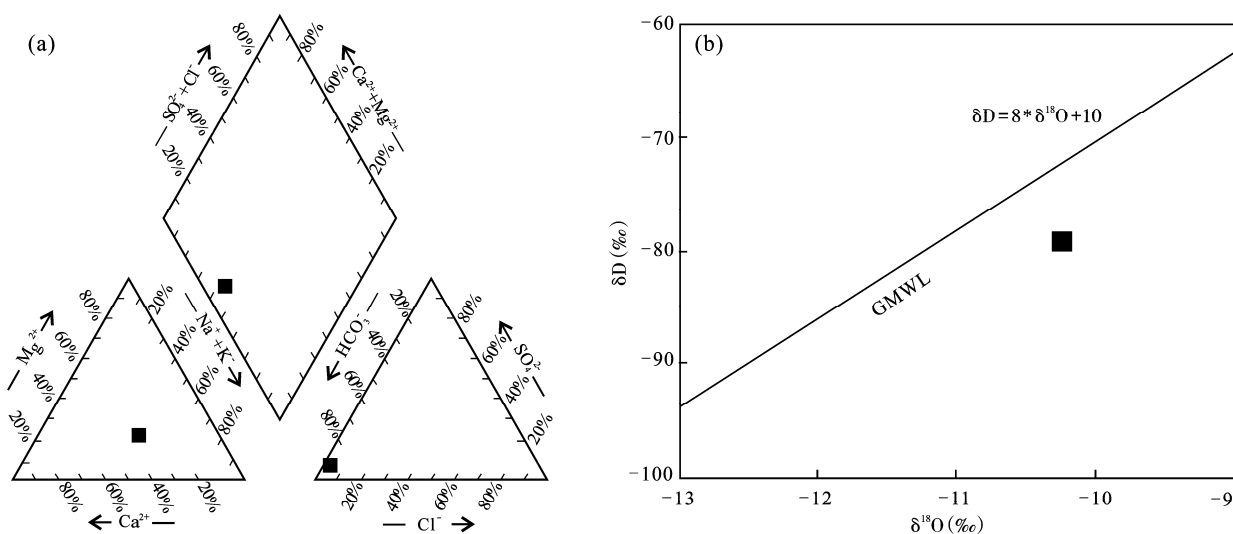


图3 开远井水化学组分图 (a) 与氢氧稳定同位素分析结果 (b)

Fig. 3 Chemical composition (a) and the stable isotopes of hydrogen and oxygen (b) of the water in Kaiyuan Well

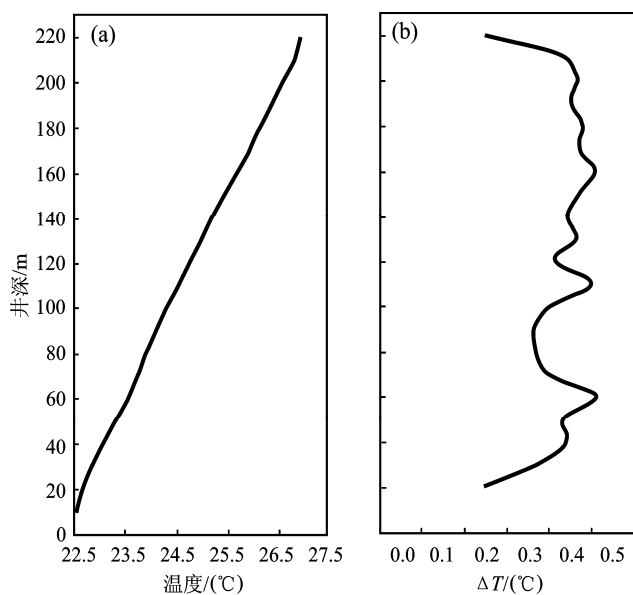


图4 开远井温度(a)与温度梯度(b)随深度变化的曲线

Fig. 4 Water temperature versus depth (a) and the gradient of water temperature versus depth (b) in Kaiyuan Well

图4为开远井温度及温度梯度随深度变化的曲线,从图中可以看出,井水温度随深度变化呈现线性增加特征,观测含水层段中110~120 m、150~170 m及190~220 m为水热交换比较剧烈段,这类含水层常见于低渗透率基岩裂隙含水层中,表现为裂隙涌水量不大但有一定的温度差异。井水温动态与井水位变化呈长

周期动态相关,但水温短周期乃至高频波动与井水位升降无对应关系,这一特征在开远井表现得尤为突出。

2 水温动态特征及震例分析

2.1 水温动态主要影响因素分析

开远井观测含水层属径流较长的大气降雨渗透补给,井水位的升降受降雨缓慢补给影响。从图5可以看出,降雨量增多季节,井水位及水温升高;降雨量减少季节,水位及水温降低,水位及水温年动态表现为正相关关系。使用2012—2014年开远井水温与水位旬均值作一元线性回归分析,得到开远井水温(y)与水位(x)的线性回归方程为: $y = 12.285 + 1.839x$,相关系数 $r = 0.7301$,说明水温和水位趋势变化具有显著的正相关特征。

2.2 水温异常特征的震例分析

对2007年以来开远井水温资料分析发现,该井在区域中强以上地震前均有显著的水温异常现象,异常多出现在震前几天或几十天,短临异常特征明显(图6a);形态上表现为在上升或下降背景下出现转折,在有些地震前水温出现单点或连续高值突跳异常,多出现在短临阶段(图6b),表明开远井水温有一定的映震能力。

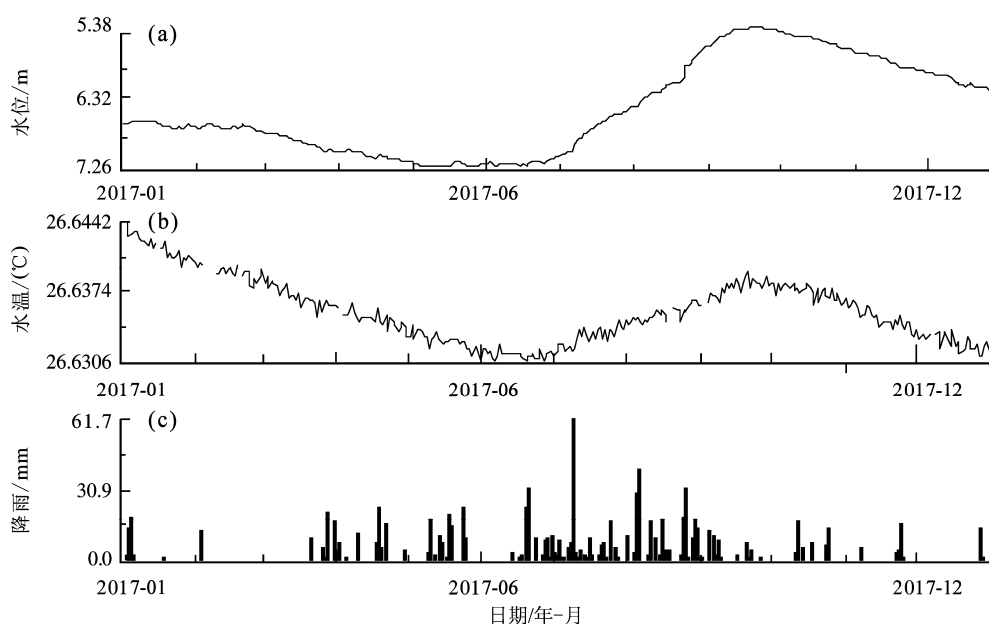


图5 2017年开远井水位 (a)、水温 (b)、降雨 (c) 年动态曲线对比图

Fig. 5 Variation of water table (a), water temperature (b) in Kaiyuan Well and precipitation (c) in the region in 2017

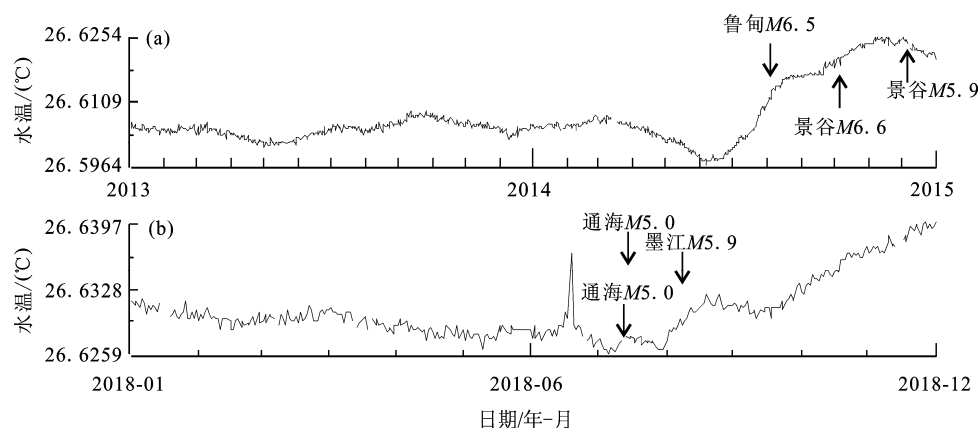


图6 开远井水温 (220 m 深处) 短期 (a) 与短临 (b) 异常震例图

Fig. 6 The short-term (a) and impending (b) anomalies of the water temperature at 220 m depth in Kaiyuan Well corresponding to some earthquake cases

3 井水温高频波动现象分析

3.1 水温异常变化

自2020年3月8日开始,开远井220 m深处井水温出现了不定期的快速下降后转折回升的短期波动变化,波动升降幅度在 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间间隔也疏密不同,密集时最短间隔时间为4 d左右,稀疏时最长间隔时间为50 d左右,井水位短期动态无显著变化(图7)。

图8为井深220 m处“九五”探头与210 m处

“十五”水温探头观测的数据曲线,这两个探头相差10 m,但变化过程、变化形态及上升速率几乎完全一致,只是上升或下降转折时间相差40多个小时,推断认为这一特征应该为同一因素造成的。210 m探头水温变化为 $26.801\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 26.846\text{ }^{\circ}\text{C}$ (幅值 $0.045\text{ }^{\circ}\text{C}$),220 m探头水温变化为 $26.623\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 26.671\text{ }^{\circ}\text{C}$ (幅值 $0.048\text{ }^{\circ}\text{C}$)。从绝对温度可以看出210 m水温略高于220 m水温,二者的温度绝对量相差约 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$,这个温度大于仪器绝对温度精度的 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此认为这两个探头的温度是真实的。

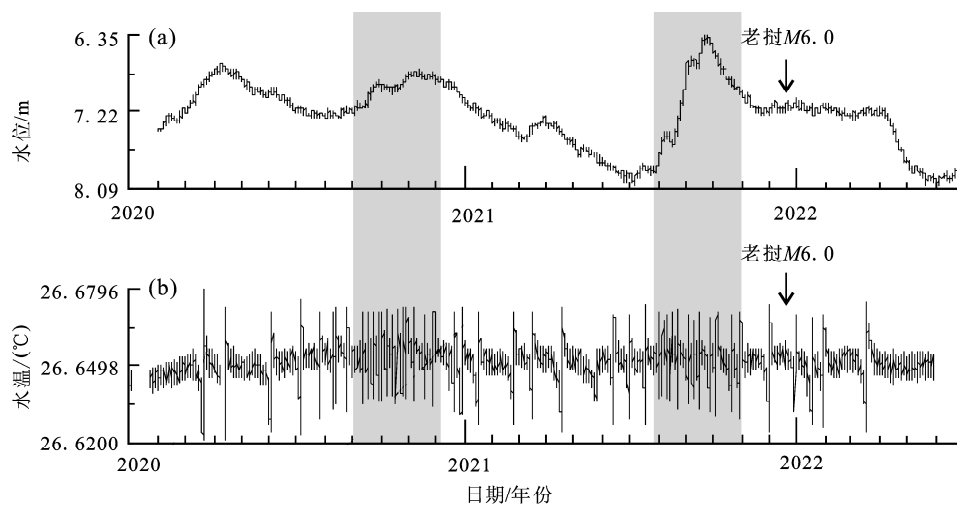


图7 开远井 220 m 深处水位 (a) 与水温 (b) 小时值观测曲线对比图

Fig. 7 Hourly-value curves of the water temperature at 220 m depth (a) and the water table (b) in Kaiyuan Well

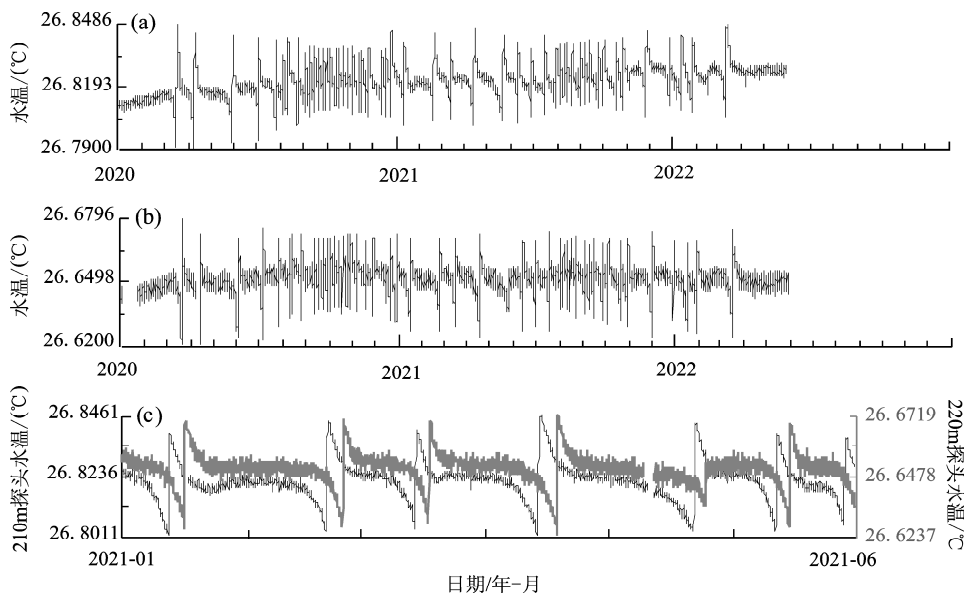


图8 开远井 210 m (a)、220 m (b) 深处水温观测长期动态变化与两者短期特征对比 (c)

Fig. 8 The long-term variation at 210-meter depth (a) and 220 meter-depth (b) and the short-term features of the water temperature at different depths (c) in Kaiyuan Well

对于开远井水温的该异常特征, 根据《地震观测异常现场核实报告编写 地下流体 (DB/T 70—2018)》提出的技术要求, 首先考虑是否存在观测环境干扰, 譬如抽水、注水或蓄水等; 其次需要考虑观测系统是否受到干扰, 譬如台站电源故障、仪器接地问题、仪器故障、仪器的相互干扰等。如果没找到以上干扰源, 且排除了可能的干扰因素, 则需要从井水温自身变化给出合理的机理解释, 并从区域地震活动状态分析是否与区

域构造活动增强有关。

3.2 干扰因素分析

笔者通过现场踏勘调研了观测井周边环境, 发现周边存在居民浅层抽水点, 但这些抽水点不存在异常抽水现象, 抽水方式与规模没有发生显著改变, 因此可以排除抽水干扰的影响。

供电系统的稳定性也是影响观测的重要环节。2019 年开远井完成标准化台站改造后, 所有仪器设备采用市电引入后经过同一个 UPS 稳压

之后供电。为排除井水温波动异常受供电系统影响的因素,210 m 和 220 m 深度的 2 个水温观测仪器采用了不同的供电方式。210 m 深度的观测仪器由 UPS 交流供电系统改为电瓶直流供电系统,220 m 深度仪器仍保持 UPS 交流供电。为了避免井水温观测系统中某一部位漏电造成数据干扰,将主机电路板公共负极接地,温度传感器(探头)屏蔽层连接井口管接地。采取以上措施近 2 个月内,所有的观测状态均未因供电方式的改变而发生变化,异常现象继续出现,说明异常

现象不是由供电系统所致。

3.3 实验观测分析

为了查明观测井的水-热动力学环境,又在井深 198 m 处新安装 1 套 SZW-II 型水温仪进行对比观测,同样记录到了类似的异常变化(图 9)。从图 9 可以看出,首先是 210 m 处的水温出现下降回升变化,其次是 220 m 的水温处出现下降回升变化,最后是 198 m 的水温处出现下降回升变化。从 3 套仪器观测结果分析认为,这种独立的水温变化过程可以排除仪器故障因素。

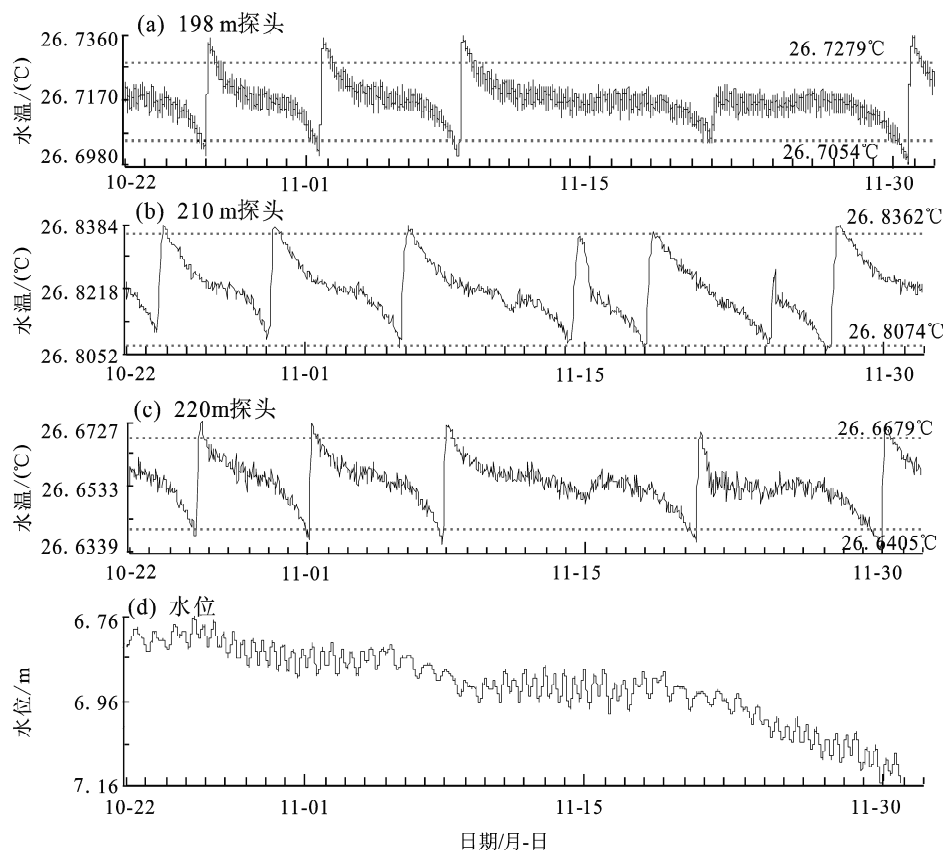


图9 开远井3套水温探头观测资料对比曲线

Fig. 9 Comparison of the observational data from 3 sets of water-temperature sensors in Kaiyuan Well

3.4 机理分析

前人对井水温变化的物理过程进行过大量研究,也解释了井水温动态变化的机理。鱼金子等(2012)提出了井水温变化的水动力学模型,认为水温微动态变化很可能是由于水流量所携带的井孔内热量变化引起的,这一观点被大量观测事实所验证。车用太等(1996)认为,当区域应力加载到地壳浅层的含水岩体时,会引起岩体一定的变形,这种变形必将导致含水层孔隙压力的改变,从而影响含水层系统内部的水流状况,使井水温

度发生变化。以上研究成果的核心是水-热动力学机制,也就是说地下水补给源的温度和水动力大小作用是影响井水温升高或下降以及变化速度的主要因素(李旭茂等,2020)。

开远井的观测含水层为花管+裸孔,由于花管长度仅为4 m左右,且水温梯度没有显著变化,因此认为169.38~224.0 m裸孔段为该井的主要观测含水层。从图4可以看出,210 m处存在水温梯度较大的水-热交换层位,由于210 m处裂隙中的水温较其上下层井水温高(图4b中温度梯度为

“凸型”)，在储水裂隙受到岩体变形作用发生闭合时，会造成进入井孔内的热量减少，使得该层位及周边井水温逐渐降低，当裂隙突然开启时会释放出相对与周边较高温度的水至井孔，引起了210 m处及其上下层位水温的快速上升，之后水温缓慢恢复至正常状态。由于水-热对流与传导作用，使得220 m处水温在约40 h后也发生同样形态的变化，而198 m处水温约在50 h后发生同样形态的变化，这可能是由于198 m探头比220 m探头距离210 m探头稍远一点，或井水向上对流要比向下对流速度较慢所致。另外，这种异常变化现象在193 m处的实验观测也得到验证，只是水温变化幅度较198 m处小，时间也较198 m处滞后十几个小时。从图9还可以看到，当210 m处水温变化幅度较小时，220 m及198 m处的水温变化幅度很小(2022年11月13日)或没有变化(2022年11月23日)，也验证了210 m处是引起井水温变化的主要层位。综上，上述3个层位的井水温波动异常变化是由于井下210 m深度处裂隙闭合与开启过程造成的，并可以用水-热动力学的热传导及热对流机制给予合理解释。

开远井水温发生短期变化，但井水位并没有发生同步变化，分析其原因主要为：井水位与水温出现趋势性动态相关(图5)，表明该井的观测含水层主要是较高温度补给为主，因此表现为水位与水温出现同步升高变化特征(李旭茂等，2020)。但从2020年3月开始，观测井深层含水层裂隙出现闭合与开启而导致井观测层状态发生改变，由于该井含水层具有显著的不均匀性特征，这种含水层裂隙的闭合与开启不是发生在整个井观测含水层，推断认为210 m处的水量增减不足以引起整个观测井水位的短期波动，因此没有观测到水位出现下降及上升这样一个短期变化过程，但从图7可以看出该阶段出现了水位下降趋势，表明井含水层状态的变化对水位的趋势动态是有一定影响的。

以上从井孔结构条件及水-热动力学原理解释了开远井水温高频波动的机理，但引起该井深含水层发生变化的力学机制是否与区域构造活动有关呢？自2020年3月出现水温波动异常以来，开远井200 km范围内先后发生了2020年6月12日老挝4.7级、7月12日云南绿春4.8级和

2021年6月10日云南双柏5.1级等3组5级左右地震。2021年12月24日在距离井孔220 km的老挝又发生了6.1级地震(图7)，而从2022年3月下旬开始至今，未出现类似井水温波动异常。因此推测认为，该井深部含水层出现闭合与开启造成井水温波动异常，可能是区域构造活动增强引起的，周边发生的一系列中强以上地震是构造活动增强的结果。当然，要证明该阶段研究区域构造活动增强状态，还需要更多地球物理观测资料的佐证。

4 结论

云南开远井水温对井孔周边的地震有一定的映震能力，曾多次对应发生在观测井附近或周围的地震，之前的水温异常以上升、下降或转折为主，但2020年3月以来开远井水温出现了不定期的高频波动变化。本文介绍了观测井结构与观测含水层概况，分析了不同层位水温观测结果，解释了这种井水温异常形态的可能机理，通过对比观测实验及水-热动力学机制分析，得出以下主要结论：

(1) 通过对观测井周边环境进行调研，排除了抽注水对观测含水层的可能影响；对3套观测系统分别使用市电经UPS稳压之后的电源和电池直流供电方式，发现不同的供电方式对井水温观测动态无影响，排除了供电系统的因素。

(2) 观测井出现高频波动异常的主要机理是储水裂隙受到岩体变形作用发生闭合，造成进入井孔内的热量减少引起该层位水温逐渐降低，当裂隙突然开启时会释放出相对较高温度的水至井孔引起了水温的快速上升，该层位水温的降低与升高过程在热传导及热对流作用下影响到其上下层位的水温动态。

(3) 由于引起水温变化层位的水量在短时间内不足以影响整个观测井水量的变化，因此井水位没有出现与水温同步波动的变化过程，但该井观测含水层受变形作用影响，打破了井水位与井水温趋势动态相关的关系，在井水温出现密集波动阶段，井水位出现了上升变化动态。

(4) 对观测井周边200 km范围内的中强地震活动特征分析表明，在井水温出现高频波动阶段，中强地震活动具有加强的趋势，推测认为该井深

层含水层出现闭合与开启而造成井水温波动异常,可能是区域构造活动增强作用的结果,周边发生的一系列中强以上地震,特别是2021年12月24日在距离井孔220 km发生的老挝6.1级强震,都是构造活动增强的直接响应。

参考文献:

- 车用太,刘成龙,鱼金子. 2008. 井水温度动态及其形成机制[J]. 地震,28(4):20-28.
- 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,23(4):34-37.
- 付虹,王世芹,秦嘉政. 2007. 2007年5~6月滇西南地区 $M \geq 5$ 成组地震活动中、短临异常特征及预测[J]. 地震研究,30(4):303-310.
- 付虹,郭成栋,赵小艳,等. 2014. 云南开远井水位异常分析[J]. 地震学报,36(2):292-298.
- 付虹,赵小艳. 2013. 汶川 $M_s 8.0$ 地震前云南地区显著前兆观测异常分析[J]. 地震学报,35(4):477-484.
- 付子忠. 1988. 地热动态观测与地热前兆[J]. 地壳构造与地壳应力,(1):1-7.
- 国家地震局科技监测司. 1995. 地震地下水手册[M]. 北京:地震出版社.
- 李琼,付虹,毛慧玲,等. 2017. 云南水温异常与 $M_s \geq 5.0$ 地震关系研究[J]. 地震研究,40(2):233-240.
- 李旭茂,刘耀伟,张磊,等. 2020. 井水温观测分析中的水-热动力学研究综述[J]. 地震,40(1):34-51.
- 刘春国,晏锐,樊春燕,等. 2022. 我国地震地下流体监测现状分析及展望[J]. 地震研究,45(2):161-172.
- 刘耀伟,陆明勇,付虹,等. 2010. 地下流体动态信息提取与强震预测技术研究[M]. 北京:地震出版社,39-40.
- 刘耀伟,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[J]. 地震研究,31(4):347-353.
- 刘耀伟. 2006. 我国地震地下流体科学发展40年探索历程回顾[J]. 中国地震,22(3):210-222.
- 马玉川. 2014. 中国大陆井水温度潮汐动态的统计与调和分析[J]. 地震,34(2):55-64.
- 芮雪莲,杨耀,官致君,等. 2022. 四川理塘毛垭51泉水温在青藏高原东南缘中强地震前的异常特征及机理分析[J]. 地震研究,45(2):318-328.
- 孙小龙,刘耀伟. 2006. 应力加载作用引起地下水微温度场变化的研究综述[J]. 国际地震动态,(7):17-26.
- 鱼金子,车用太,何案华. 2012. 井水温度动态的复杂性及其机制问题讨论[J]. 国际地震动态,(6):274.
- 张彬,刘耀伟,高小其,等. 2015. 2015年尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震引起的井水位与井水温同震效应及其相关性分析[J]. 地震学报,37(4):533-540.
- DB/T 70—2018,地震观测异常现场核实报告编写 地下流体[S].

Discussion of the Feature and Mechanism of the High-frequency Fluctuation Anomaly of the Water Temperature in Kaiyuan Well

ZHANG Huiju¹, FU Hong^{1,2}, ZHANG Xiang², HU Xiaojing²

(1. Earthquake Agency of Kaiyuan Municipality, Honghe Prefecture of Yunnan Province, Kaiyuan 661199, Yunnan, China)

(2. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

The water temperature in Kaiyuan Well started to rise and drop anomalously since March, 2020. To find the cause, we checked the possible influencing factors like the observational environment of the Well, the power supply system of the water-temperature instrument, and further conducted a comparative monitoring of the water temperature at different depths in the Well. On the basis of the structure and the aquifer of the Well, we discussed the physical mechanism causing the anomalous fluctuation of the water temperature in the Well. We found that the environmental factors or the power supply system did not cause the variation of the water temperature; the main reason was that the rock mass deformation caused the reservoir fissures to close or open, then the hot water in the reservoir fissures became less or more. As a result, the water temperature in the Well consequently fell or rose rapidly. The regional tectonic activity intensified, giving rise to the rock mass deformation and causing medium- and strong-earthquakes in the vicinity.

Keywords: water-temperature anomalies; high-frequency fluctuation; analysis of the physical mechanism; Yunnan