

黎已余, 张清秀, 刘水莲, 等. 宁德地震台2号井水温最佳测段研究[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 25–33. [LI Jiyu, ZHANG Qingxiu, LIU Shuilian, et al. Study on the Best Temperature Measurement Position of Well No.2 in Ningde Seismic Station[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 25–33]

宁德地震台2号井水温最佳测段研究

黎已余, 张清秀, 刘水莲, 林慧卿, 郑辰禾, 程庆斌
(福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 地下水温观测井自身特征及观测环境的变化影响着水温的正常动态变化, 水温传感器投放位置附近的温度梯度特征也在很大程度上影响着水温微动态变化及其所反映的地震前兆信息判定。通过井下探测和水质分析等手段, 补充和丰富了宁德地震台2号井的基础资料, 并在此基础上对2号井进行水温梯度测试、背景噪声分析和潮汐效应观测, 确定其最佳观测段。

关键词: 宁德地震台2号井; 水温梯度; 背景噪声; 测段; 水质分析

中图分类号: P315.723

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)04-0025-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.04.004

Study on the Best Temperature Measurement Position of Well No.2 in Ningde Seismic Station

LI Jiyu, ZHANG Qingxiu, LIU Shuilian, LIN Huiqing,
ZHENG Chenhe, CHENG Qingbin
(Fujian Earthquake Agency, FuZhou 35003, China)

Abstract: The characteristics of underground water temperature observation wells and the changes of observation environment affect the normal dynamic changes of water temperature. The temperature gradient near the place where the water temperature sensor is put into operation also affects the micro-dynamic changes of water temperature and the determination of earthquake precursor information. In this paper, the basic data of Well No. 2 of Ningde Seismic Station are supplemented and enriched by means of underground exploration and water quality analysis. On this basis, the water temperature gradient test, background noise analysis and tide effect observation of Well 2 are carried out to determine the best observation section.

Keywords: Well No. 2; Ningde seismic station; Water temperature gradient; Background noise; Measurement position; Water quality analysis

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 福建省地震局台站基金专项(T2017003)

作者简介: 黎已余(1990-), 男, 助理工程师, 主要从事地震监测分析预报工作。

E-mail: 723976263@qq.com.

0 引言

地下流体广泛存在于地壳中,具有流动性,对地壳活动的响应十分灵敏,因此地下水动态活动对于地震活动和构造活动的响应也非常灵敏^[1]。近年来,我国在地震研究中大力发展地下流体监测工作,发现地下流体井水位的异常变化主要受区域应力或构造应力对井含水层系统作用,观测井所在区域的降水及地下水开采等因素的影响。通过研究地下水微温度场的变化能够揭示出地壳应力及其热变化对地震的响应,有助于理清应力-流体-地震的可能关系及其机制^[2]。同时也存在同一口井不同深度段上观测观测井水温观测到的同震响应和潮汐响应的特征截然不同的情况。地下水在循环过程中不断产生混合及水岩相互作用,其水化学成分可作为判断地下水运移、转化过程等地下水类型成因的判断依据之一。综合物理、化学手段对观测井井水进行因地制宜的针对性研究,有利于更加深入地了解含水层系统中的地下水动态活动,为合理观测点的选取提供更加有利依据。

水温观测层位选择对地震活动及构造运动的响应具有重要的意义,目前多数地震台站在开展水温观测前,主要根据《地震地下流体观测方法井水和泉水温度观测》进行水温梯度测试,计算背景噪声及选择潮汐明显层位进行观测;对于观测条件特殊,场地背景复杂的观测井选择水温观测层位时也各有着重点和特殊性。津张道口热水井在选择水温最佳观测层位时结合场地水文地质调查、水资源及热能开采对观测井影响程度来确定最佳观测层位;塔院井水温观测通过深、浅水温对比观测,找到了水温观测最佳测段;盘锦红 25 井和于 105 井通过对水温分布进行分析,提出对于套管直至人工井底这样的井孔结构的井口,水温探头投放位置越接近于射孔部位为宜;宝坻台新井通过地震前记录到的水温异常机制结合水温梯度、背景噪声及潮汐现象等因素确定水温观测层。2018 年宁德地震台 2 号井拟进行水温仪器安装,本文通过井孔柱状图、井下探测仪、水物理和化学试验等方式结合探讨了如何选取最佳观测层位。

1 研究区域概况

宁德地震台位于我国东南沿海地区,台站北侧为北东东向丘陵,南侧为海滩,台站海拔高程

约 7 m。宁德地震台 2 号井位于宁德地震台院内,该井地处长乐—诏安断裂带北端,水井表层岩石主要由花岗岩为主的侵入岩和中酸性为主的喷出岩组成。台站所在地区在漫长的地质发展史经历了多次地壳运动,形成了一系列北北东和北东向展布的构造行迹(图 1)。宁德地震台 2 号井井深 102.36 m,开孔孔径 133 mm,终孔孔径 75 mm。该井密闭套管分为两段,第一段:0~49.36 m,第二段:53.82~68.00 m,在两段套管之间(49.36~53.82 m)用水泥砂浆将其抹敷,其中含水层位于 51.64~53.82 m 和 55.57~68.00 m。该井井水属于弱承压水基岩裂隙水,水位埋深 1.7770 m。该井自 2004 年开井以来,仅于 2004 年 2006 年用于科研试验,2018 年宁德地震台因工作需要拟启用该井进行水温观测。

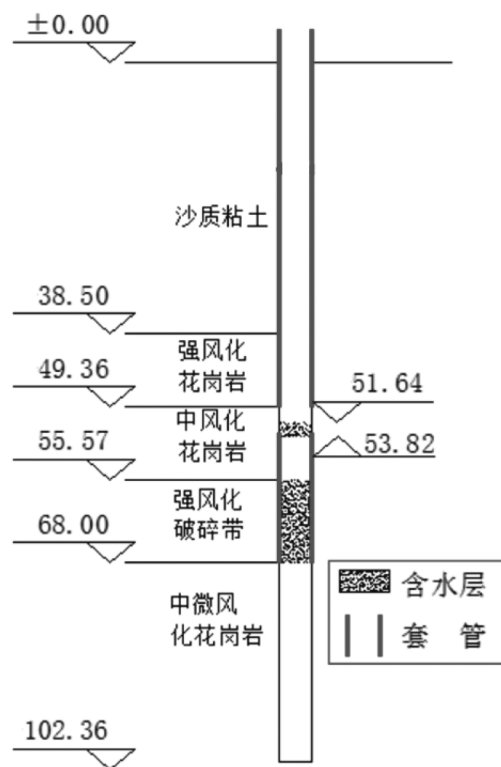


图 1 宁德地震台 2 号井钻孔柱状图

Fig.1 Borehole histogram of No. 2 well in Ningde Seismic Station

2 基础资料调查

多年的地下流体观测资料研究表明,地下水既带有丰富的地壳运动信息,同时也由于运动的复杂性,导致其物理特性和化学特性也随之发生改变。譬如井水温度微动态变化形成条件及其机理十分复杂,在一口井的不同深度观测到的井水

温度微动态特征差异明显, 不仅其变化幅度不同, 设置变化形态、变化过程与持续时间也不同^[2]。

宁德地震台2号井自开井以来至今并未正式进行地震前兆观测, 现拟进行投入水温观测, 因此在启用前应做好井壁、观测环境调查、水化学化验和水温梯度测试等工作, 补充和完善观测井的基础资料, 以备在异常核实时提供数据参考。本研究在上述工作的基础之上, 结合背景噪声和潮汐效应分析探究最佳观测层位。

2.1 井下探测仪分析

井下探测仪在地震地下流体观测井可发挥着及其重要的作用。探测仪主要由防水耐高压探头、彩色监视器、光盘刻录机及单根视频输送线缆等组成, 能探明井下可视情况, 为观测井的调研提供可靠参考资料。

宁德地震台2号井在井壁调查中正是利用该项技术, 结合钻孔柱状图和井下探测仪, 对井的

现状进行逐层逐点调查, 并对存在异常位置进行标记, 以便在调查其他指标时重点排查和分析。

根据井下探测仪录像显示, 该井水质在未搅动时较为清澈, 搅动后水质混浊, 存在少量漂浮物, 井壁套管分布与柱状图分布描述一致, 套管表面不存在明显锈迹和破裂现象, 但48.450~51.129 m之间存在大面积的井壁破裂迹象, 但在井壁破裂处未观察到水流流动现象; 井下探测仪受探头直径和井孔直径的限制, 观测深度只能到达68.00 m (图2~4)。为了能更加全面地了解该井现状, 本研究在进行后续水温梯度测试时, 对该层位水温梯度进行了加密观测。结合水温分布曲线图(图5), 观测数据显示该处的梯度变化幅度较为平缓, 且与深度具有一定的线性相关性, 可见在该破裂处水温测值较稳定, 受干扰程度较小。这些现象说明了该井在48.450~51.129 m处井壁虽然有存在破裂迹象, 但隔水性较好。



图2 48.685 m处井壁破裂
Fig.2 Fracture of shaft lining at 48.685 m



图3 50.403 m处井壁破裂
Fig.3 Fracture of shaft lining at 50.403 m

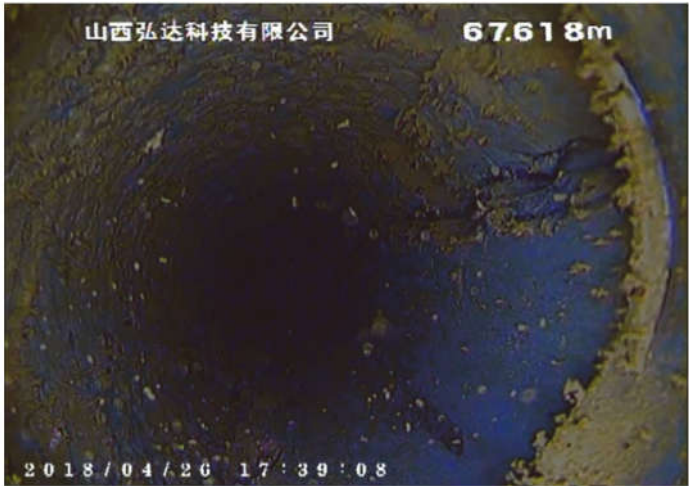


图4 67.618 m处岩石井壁
Fig.4 Rock shaft lining at 67.618 m

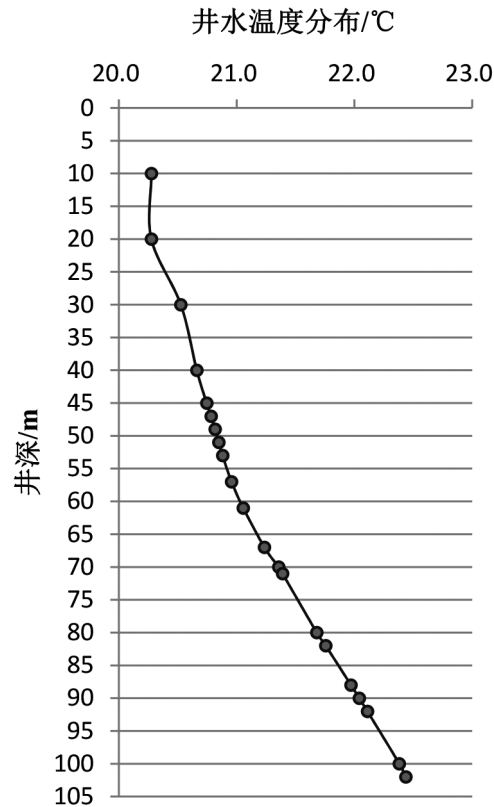


图 5 井水温分布图

Fig.5 Well water temperature distribution

2.2 水质分析

水质分析在地震前兆观测方面发挥着及其重

要的作用。水质分析项目因地震监测预报工作需要进行选择。本次水质旨在补充该井基础资料及判断水样基本属性，为今后该井的前兆异常判断提供辅助。本次采样根据井下探测仪录像和钻孔柱状图等有关资料确定采样层位，采样层位为：5 m、50 m、63 m 和 75 m，主要分析项如表 1 所示：

本研究利用 Piper 三线图和 Na-K-Mg 三角图法，结合巴克水文化学相的分类，分析了宁德地震台 2 号井不同层位的水化学性质。

Piper 三线图由 2 个△和 1 个◇组成，左边△表示阳离子的离子交换容量(meq%)，右边△表示阴离子的离子交换容量(meq%)。该方法利用阴阳离子对表示水的相对成分。任一水样，先根据阴、阳离子分别在两个△中表示出来，再从两个△对应的位置向上方◇延伸得出交点，并用同一符号进行标注，按一定比例根据含量(矿化度)来确定符号的大小。其中根据离子类型及含量等可将◇划分为 9 个区(图 6)，便于研究不同层位井水的化学性质。Piper 三线图显示 2 号井 5 m、50 m 和 63 m 处数据点均集中在 1、3、5 区域内，说明水样呈现出碱土金属超过碱金属，弱酸超过强酸和碳酸硬度超过 50%，地下水化学性质一碱土金属和弱酸为主。75 m 处数据点集中在 2、3、9 区域内，说明水样呈现碱金属超过碱土金属、弱酸超过强酸和不存在阴阳离子对超过 50%(图 7)。

表 1 宁德地震台 2 号井水质分析项目

Table 1 Water quality analysis project of well No. 2 at Ningde Seismic Station

检测项目	阳离子(mg/L)				阴离子(mg/L)				
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
5 m	23.390	2.384	4.158	21.158	1.023	15.553	7.740	0.452	115.322
50 m	23.774	2.522	3.839	22.130	0.823	15.862	7.087	0.519	119.814
63 m	23.926	2.577	4.009	22.592	0.824	16.258	6.724	0.549	120.244
75 m	42.732	4.585	5.355	23.541	1.486	16.814	9.500	0.476	120.802

注：检测依据：DZ/T0064-1993<《地下水水质检验方法》，检测仪器：ICS-2100 离子色谱仪

据水文化学相的分类(巴克)，该井不同层位水样可划分为以下两种类型：5 m、50 m 和 63 m 处以重碳酸-氯化物-硫酸、钙-钠型水为主，75 m 处以重碳酸-氯化物-硫酸、钠-钙型水为主(表 2)。

研究利用 Na-K-Mg 三角图(图 8)评价水-岩平衡状态和分析不同深度的水样，由完全平衡线和部分平衡线将三角形分为完全平衡水、部分平衡水和未成熟水三个部分。将数据投在 Na-K-Mg 三

角图中，显示该井不同层位水的补给源均来自浅层地表，为未成熟水，且均集中在 Mg 端。

3 测点位置选择

3.1 水温梯度测试—传感器放置区段的初选

水温梯度应严格依据《地震地下流体观测方

法井水和泉水温度观测》(地震行业标准 DB/T 49-2012)进行测试。本井井深 102.36 m, 小于传感器电缆长度 300 m, 在选取拟放置探头位置时, 结合了本井的钻孔柱状图、井深及井下探测仪影像资料进行大尺度水温测试。本次井水温测试期间天气晴朗, 观测时段和前期, 观测井及其周边不存在场地和自然等因素干扰。本次观测段间距根据规范要求为 10 m, 每个测点观测时长不小于 30

min, 将测值进行水温梯度计算并绘制水温梯度图进行分析, 根据探头初选原则(水温梯度较为平缓处), 在探头拟放置层位(82~102 m)和井壁破裂处(48.450~51.129 m)进行加密测试。加密测试段间距为 2 m, 时长不小于 60 min, 再绘制加密后的水温梯度(图 9)。最终探头初选的位置应用加密水温梯度和钻孔柱状图分析确定拟放置最为平缓的 82 m、92 m 和 102 m 处(表 3~4)。

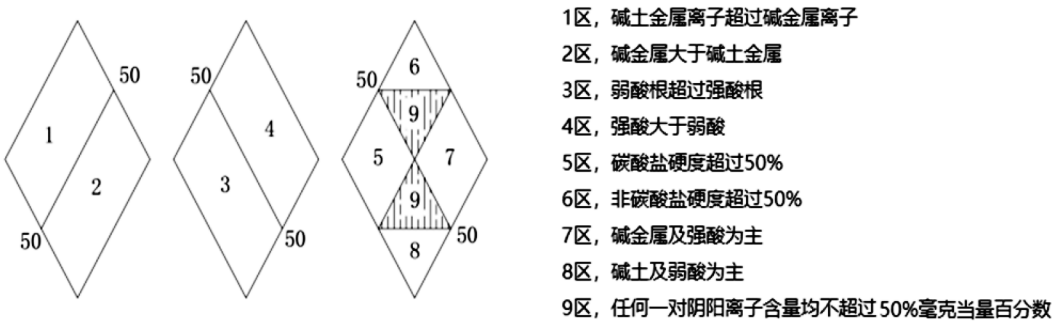


图 6 三线图菱形域分区(Piper)
Fig.6 Three line graph diamond domain partition

表 2 水文化学相的分类(据巴克)

阳离子	成分的百分量,毫克当量/升		阴离子	成分的百分量,毫克当量/升 Ca+Mg	
	Ca+Mg	Na+K		HCO ₃ +CO ₃	Cl+SO ₄
钙-镁	90~100	0<10	重碳酸	90~100	0<10
钙-钠	50~90	10~50	重碳酸-氯化物-硫酸	50~90	10~50
钠-钙	10~50	50~90	氯化物-硫酸-重碳酸	10~50	50~90
钠-钾	0~10	0<100	氯化物-硫酸-重碳酸	0~10	0<100

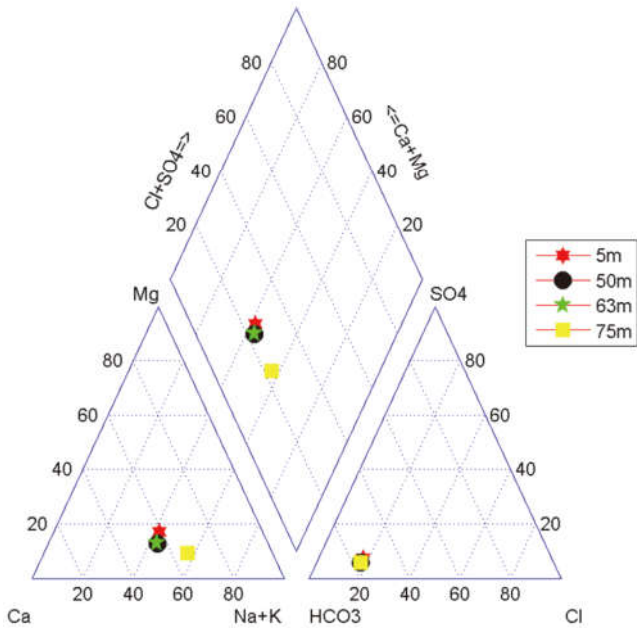


图 7 不同井深 Piper 三线图
Fig.7 Piper three line map with different well depth

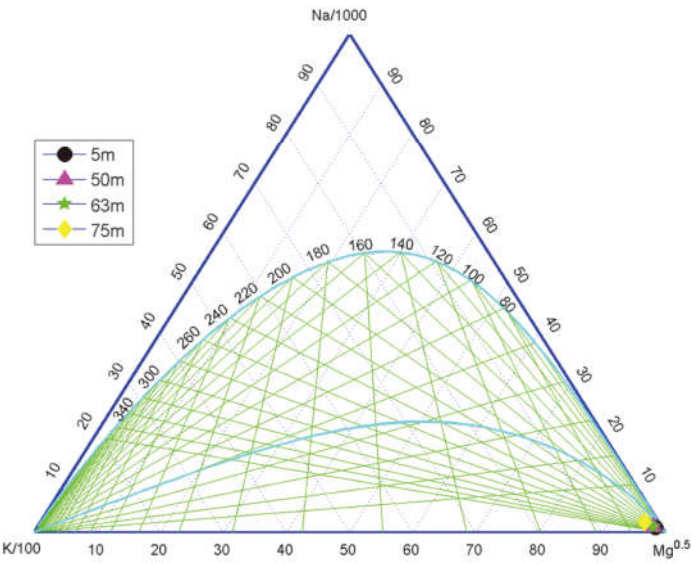


图 8 不同井深 Na-K-Mg 三角图

Fig.8 Na-K-Mg triangulation with different well depth

表 3 不同井深水温测试的要求

Table 3 Requirements for water temperature testing at different depths

井深 H/m	全层测量		加密测量		备注
	测量间距点 $\Delta D/\text{m}$	测试时间 t/min	测量间距点 $\Delta d/\text{m}$	测试时间 t/min	
<200	10	≥ 30	2 m	≥ 60	全层测量时,距井底 测量小于规定的测量 间距时,应在井底设 一个测点
200~500	20		3 m		
500~1000	30		4 m		
>1000	40		5 m		

表 4 宁德地震台 2 号井水温分布值

Table 4 Water temperature distribution in well No. 2 of Ningde Seismic Station

深度/(m)	温度/($^{\circ}\text{C}$)	水温梯度/($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	深度/(m)	温度/($^{\circ}\text{C}$)	水温梯度/($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)
10	20.275 6	0.000 0	69*	21.309 1	0.036 5
20	20.275 8		70*	21.356 4	0.047 3
30	20.526 0		71*	21.389 7	0.033 3
40	20.661 4		75	21.511 6	0.031 0
45*	20.745 9	0.016 9	80	21.679 8	0.033 6
47*	20.783 1	0.018 6	82*	21.755 9	0.038 1
49*	20.816 6	0.016 8	84*	21.830 3	0.037 2
51*	20.848 7	0.016 1	86*	21.892 3	0.031 0
53*	20.880 7	0.016 0	88*	21.970 9	0.039 3
55*	20.922 1	0.020 7	90*	22.040 5	0.034 8
57*	20.956 5	0.017 2	92*	22.110 1	0.034 8
59*	21.006 9	0.025 2	94*	22.177 4	0.033 6
60*	21.039 9	0.033 1	96*	22.246 9	0.034 8
61*	21.055 7	0.015 8	98*	22.323 2	0.038 2
63*	21.109 6	0.026 9	100*	22.380 7	0.028 7
65*	21.173 0	0.031 7	102*	22.435 9	0.027 6
67*	21.236 0	0.031 5			

注:* 为加密测段

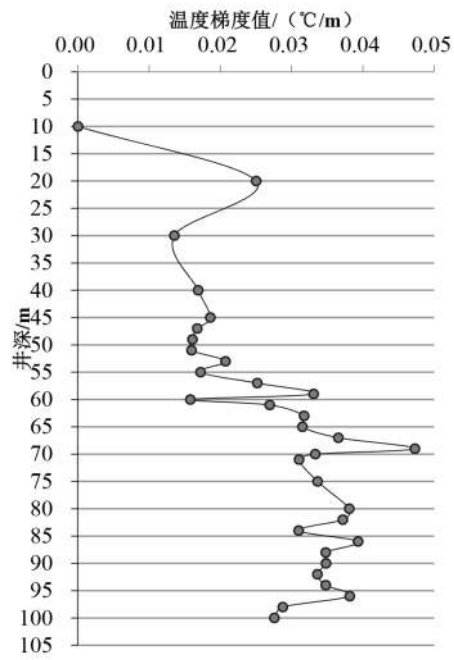


图9 加密测试后水温梯度
Fig.9 Water temperature gradient after encryption test

3.2 背景噪声分析

本研究观测发现水温数据在时间序列中存在较为明显的噪声效应,为了观测数据能较好的反应水温变化的真实性和可靠性,本研究在水温传感器拟放区和水温梯度加密区段的观测分钟值数据进行水温背景噪声计算分析,作为传感器拟放置点重要参考依据。背景噪声根据分钟值的均方

差的大小确定,计算过程如下:

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$$

其中: \bar{x} 为平均值, $\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, x_i 为观测井水温分钟值; $i=1,2,3\cdots,n$, i 为观测井水温分钟值的序号, σ 为计算的水温分钟值均方差值, n 为参与计算的分钟值的数目。取 2σ 为背景噪声,选择背景噪声小的点作为传感器的拟放置点。通过计算拟放区段的背景噪声计算如表 5:

表 5 拟放区段背景噪声
Table 5 Background noise of proposed section

深度/m	σ	2σ
82	0.0028	0.0056
92	0.0031	0.0062
102	0.0007	0.0014

3.3 潮汐效应显著点的选择

在水温探头拟放位置(低背景噪声点)进行最佳潮汐效应观测点选择,根据规范要求,每个测点连续观测 2~3 d,对水温与水位曲线进行对比分析,找出潮汐效应显著点(图 10~12)。通过分析发现,该井探头拟放位置水温曲线潮汐效应均不明显。故而,水温传感器的放置应综合考虑多个因素进行确定。

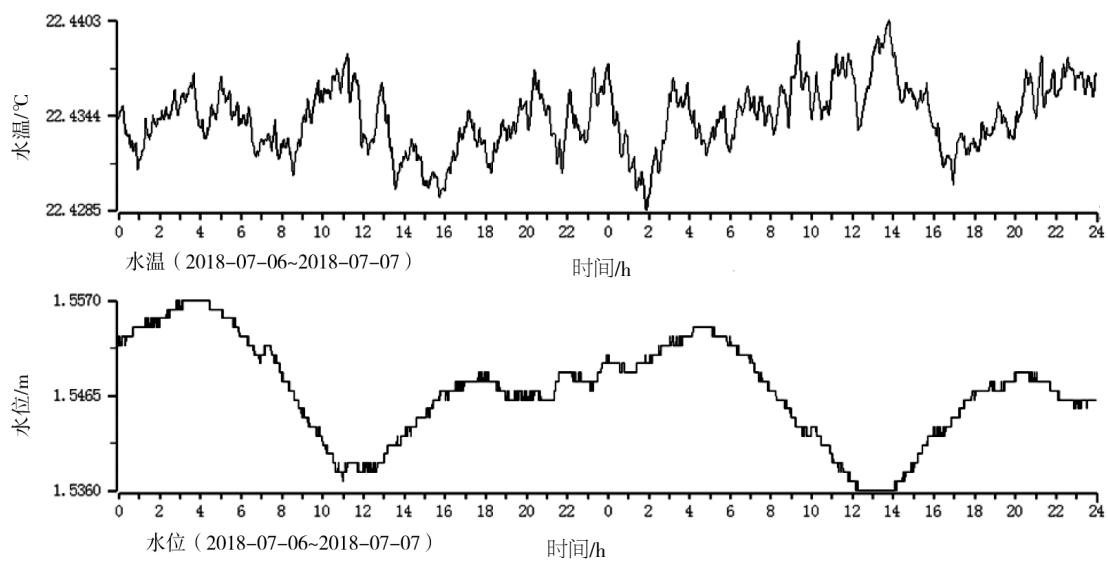


图 10 102 m 水温与水位对比图
Fig.10 Comparison of water temperature and water level at 102 m

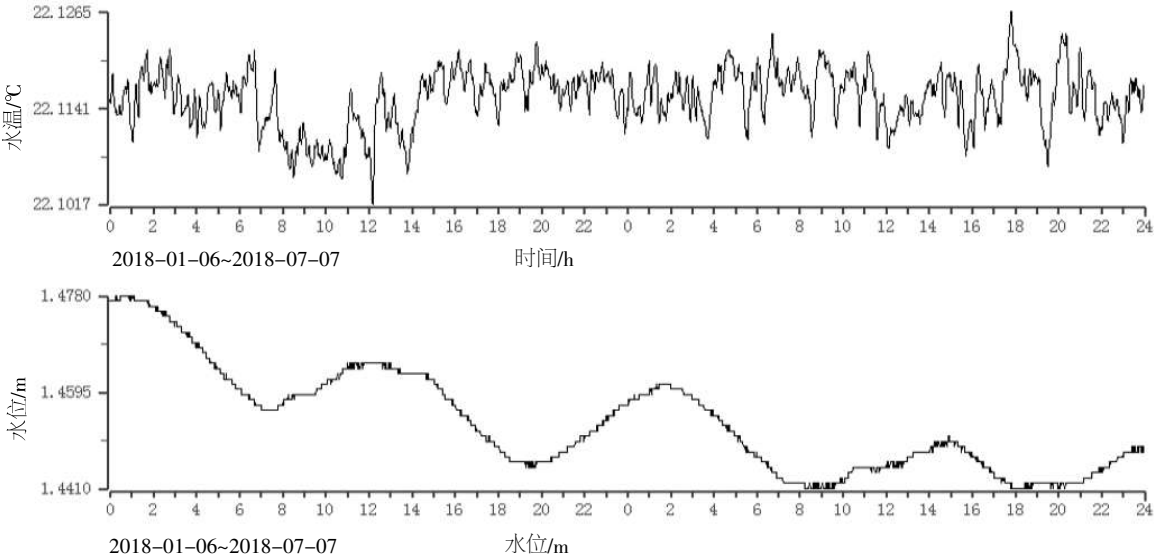


图 11 92 m 水温与水位对比图
Fig.11 Comparison of water temperature and water level at 92 m

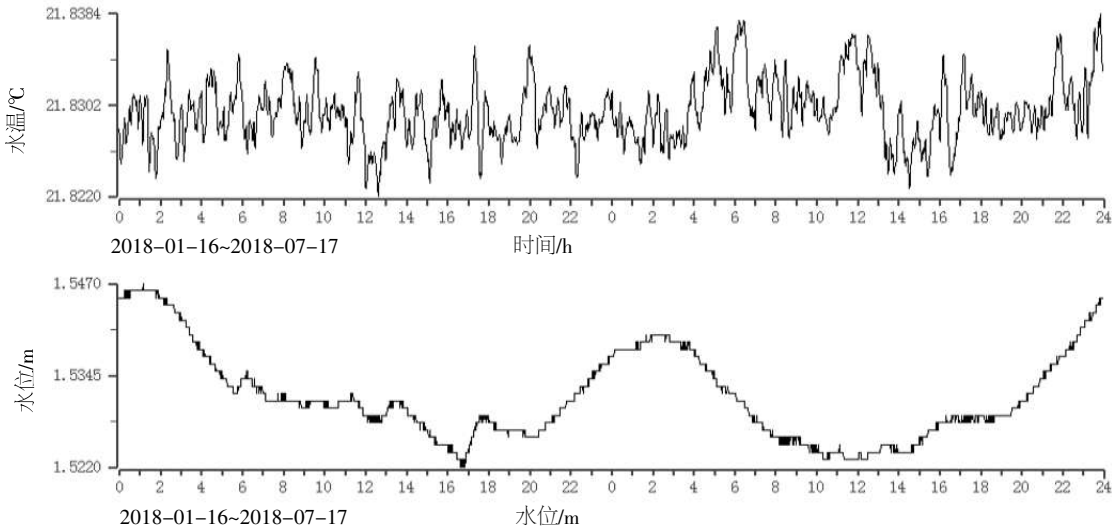


图 12 82 m 水温与水位对比图
Fig.12 Comparison of water temperature and water level at 82 m

3.4 测点位置确定

水温传感器放置位置的确定，一般以温度梯度观测、水温观测值低背景噪声且潮汐效应显著等特点为主要判断依据。本观测井在传感器拟放位置进行潮汐效应观测，数据分析发现拟放位置潮汐效应不显著，故主要考虑水温梯度观测结果和背景噪声影响。研究结果表明水温梯度变化较平缓 and 背景噪声最小的 102 m 处，即临近井底。该井在进行基础资料重新勘察时，利用备用探头

进行深度测量，探头下落至井底时并未感觉到明显的缓冲和阻力，结合井孔柱状图分析，该井无套管处井壁为中微风化花岗岩，即围岩结构基本未变，仅节理面有渲染或略有变色，有少量风化裂隙，强度基本保持；且该井自 2006 年试验停用至今长达十几年，探头触底仍无明显缓冲和阻力作用，说明井底不易形成淤泥堆积，不会对今后水温观测产生较大影响。综上所述，可将探头放置 102 m 处进行水温观测，且为该井水温观测最佳层位。

4 结语

水温观测井的基础资料、水补给源及水温梯度等因素决定着水温观测质量优劣,其对地震前兆信息的捕捉判别更具有重要的意义。传感器放置位置的梯度特征也为进行水温微动态特征的研究及水温前兆信息的捕捉提供重要依据。本文对水温观测井的井壁条件、水质分析、水温梯度测试、背景噪声和潮汐效应等方面进行了综合分析,深入探明该井的物理和化学性质,丰富、完善了该井基础资料,并确定该井水温观测的最佳观测段。本文研究结果认为将水温传感器放置于102 m处,更有利于获得稳定、受干扰少,具有较好的日变动态现象的观测数据,能更好地为地震前兆信息的捕捉服务。

参考文献:

- [1] 车用太,刘成龙,金金子,等.汶川ms8.0地震的地下流体与宏观异常及地震预测问题的思考[J].地震地质,2008,30(4):828-838
- [2] 张彬,刘耀伟,杨选辉.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[J].地震工程学报,2013,35(3):535-541
- [3] 王俊,王行舟,缪鹏,等.皖14井水温响应机理浅析[J].华南地震,2019,39(2):71-78
- [4] 刘丽,何案华,刘建光,等.盘锦红25井和于105井水温梯度观测试及其结果分析[J].防灾减灾学报,2017,33(4):66-69
- [5] 谷元珠,车用太,金金子,等.塔院井水温微动态研究[J].地震,2003,23(1):102-108
- [6] 李悦,邵永新,张建新,等.宝坻新井不同深度水温变化特征及异常机制分析[J].地震工程学报,2016,38(S1):535-541
- [7] 何案华,汪成国,李晓东,等.新疆温泉井水温梯度观测试验及结果分析[J].大地测量与地球动力学,2014,34(1):51-54
- [8] 韩晓雷,哈里白,戴勇,等.通辽井水位和水温动态变化影响因素分析[J].华南地震,2017,37(1):49-53
- [9] 张清秀,陈莹,李毅伟,等.福建省仙游郊尾井水位、水温异常成因探讨[J].华南地震,2018,38(3):8-16