

字承柱, 张翔, 张源, 等. 洱源滇20井水温异常特征分析与机理研究[J]. 华南地震, 2025, 45(1): 59-67. [ZI Chengzhu, ZHANG Xiang, ZHANG Yuan, et al. Characteristics and Mechanism of Water Temperature Anomalies in Eryuan Dian 20 Well [J]. South China journal of seismology, 2025, 45(1): 59-67]

## 洱源滇20井水温异常特征分析与机理研究

字承柱, 张翔, 张源, 杨树锋

(云南省地震局, 昆明 650224)

**摘要:** 基于震例对洱源滇20井水温观测资料进行分析, 结果表明, 水温异常与测点周边200 km区域中强地震的发生具有良好的中短期指示意义, 震前异常多表现为下降变化, 持续时间2~6个月, 变化幅度在100‰~400‰ $^{\circ}\text{C}$ , 在异常持续过程中或结束后2个月以内发震。根据总结的异常特征并结合水化学分析、温度梯度分析、水位观测分析, 对异常可能的原因进行了研究, 洱源滇20井水温异常的原因可能是区域构造活动增强所致, 拉张力作用下, 孔隙压力减小造成井水回流到含水层中, 井筒内发生热对流, 导致传感器所处的水温出现下降。

**关键词:** 洱源滇20井; 水温观测; 异常特征; 异常机理

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)01-0059-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.01.08

## Characteristics and Mechanism of Water Temperature Anomalies in Eryuan Dian 20 Well

ZI Chengzhu, ZHANG Xiang, ZHANG Yuan, YANG Shufeng

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Based on the earthquake cases, the water temperature observation data of the Eryuan Dian 20 well were analyzed. The results showed that the water temperature anomaly has a good short-term indicating significance for the occurrence of medium strong earthquakes in the 200 km area around the measurement point. Before the earthquake, the anomalies mostly showed a downward change, lasting for 2-6 months, with a change range of 100‰ to 400‰ $^{\circ}\text{C}$ . Earthquakes occurred either during the ongoing thermal anomaly phase or within two months after the anomaly continued. Based on the summarized abnormal characteristics and combined with hydrochemical analysis, temperature gradient analysis, and water level observation analysis, the possible causes of the anomalies were studied. The reason for the abnormal water temperature in the Eryuan Dian 20 well may be due to enhanced regional tectonic activity. Under the action of tension, the decrease in pore pressure causes the well water to flow back into the aquifer, leading to thermal convection inside the wellbore and the decrease of the water temperature at the sensor location.

**Keywords:** Eryuan Dian Well 20; Water temperature observation; Anomaly characteristic; Anomaly mechanism

收稿日期: 2024-05-18

作者简介: 字承柱(1988-), 男, 工程师, 主要从事地震监测、运维工作。

E-mail: 610996163@qq.com

## 0 引言

地壳表层的热,主要来自于太阳辐射,但地壳中的热主要来自地球内部,又称地下热,主要是地壳岩石中放射性元素的蜕变与地幔热流上涌形成,地壳深部的热在地震孕育与发生过程中起到十分重要的作用,地壳浅层的水温与地温可较灵敏地反映地震孕育与发生的信息,因此在地震地下流体观测中水温作为重要的观测手段之一<sup>[1]</sup>。我国地下流体观测自20世纪80年代开始经过多年的建设发展,观测精度逐渐提高,并观测到越来越多的震前异常、同震响应及潮汐效应<sup>[2-3]</sup>。总结前人研究成果,中强震前水温异常明显<sup>[4]</sup>,如2021年云南漾濞  $M_s6.4$ 地震<sup>[5]</sup>、2021年青海玛多  $M_s7.4$ 地震<sup>[6]</sup>、2010年青海玉树  $M_s7.1$ 地震<sup>[7]</sup>、2007年云南宁洱  $M_s6.4$ 地震<sup>[8]</sup>等地震前水温观测均出现显著异常变化。根据车用太等<sup>[2]</sup>对井泉水温异常出现的时间与震前异常过程发生转折或结束时间的统计资料表明,水温异常绝大多数属于短临异常,但根据刘耀炜等<sup>[8]</sup>的研究,部分强震前会出现中短期异常。水温动态变化极其复杂,对水温异常变化机理不同学者有不同的解释,目前主要有水热和地热动力学机制<sup>[3]</sup>、断层摩擦热机制<sup>[9]</sup>、应力加载作用机制<sup>[10]</sup>等。

本文主要结合历史震例对洱源滇20井水温异常变化特征进行分析,同时结合水文地球化学分析了进水的补给来源,对其异常机理开展分析研究。

## 1 洱源滇20井水温概况

### 1.1 地质构造

滇20井位于大理州洱源盆地中西部,地理坐标:  $99^{\circ}57'04''$  E,  $26^{\circ}06'49''$  N,井口标高2060 m,1984年10月成井时井深266.56 m(井孔柱状图见图1),成井后自流,井下80.22~144.02 m、165.55~266.56 m为滤水管,为主要观测的含水层,含水层岩性为苍山变质岩,属基岩裂隙承压水,成井时测得出水口水温  $20.0 \pm 3$  °C,流量稳定(0.006~0.01 L/s),pH值7.60,水质类型为  $\text{HCO}_3\text{-K}\cdot\text{Na}$ ,2008年9月5日水位缓慢下降,逐渐断流至今。该井在大地构造上位于扬子板块与印度板块的结合部位,周边红河断裂、金沙江断裂和剑

川—丽江断裂等多条断裂交汇此处,位于地热异常区边缘<sup>[11]</sup>(图2)。该区域地震活动强烈,历史上曾发生  $M_s6.0$ 以上强震6次,其中  $M_s7.0$ 以上地震2次。

### 1.2 观测系统

滇20井建成于1987年7月,1988年1月正式投入使用,主要开展地下流体观测。目前该井观测项有水位、水温、氢气和汞。水温1993年1月1日至2009年4月6日为“模拟”观测,2007年6月15日改造为“十五”数字化观测,探头放置在井下190 m处,使用SZW-1A型水温仪,2015年10月水温探头损坏,10月13日更换中科光大ZKGD3000-NT水温仪进行观测,探头重新放置在井下90 m处。

## 2 资料分析

本文按照《中国震例》给出的震例判定范围,以2015年11月1日—2023年12月31日的水温数据为基础,分别选取了滇20井200 km、300 km、500 km范围内的  $M_s5.0\sim5.9$ 、 $M_s6.0\sim6.9$ 、 $M_s7.0\sim7.9$ 地震,整理该时段,从水温动态变化特征、干扰因素分析、前兆异常特征、预测效能检验、水化学分析、温度梯度分析等方面研究水温异常变化特征和地震的关系及异常变化机理。

### 2.1 水温正常背景特征

滇20井8年来观测环境无变化,无重大干扰源,观测系统稳定,资料连续可靠。从2015年11月1日至2023年12月31日水温日均值(图3a)可以看出,年变规律明显,多年趋势动态为趋势下降,年动态表现为1~4月、11~12月缓慢下降,5~10月缓慢上升,呈现随季节夏秋偏高、冬春偏低起伏型变化,年变幅为50%~90% °C;从2016年6月1日至30日水温分钟值(图3b)可以看出,日动态表现为高频振荡起伏型,日变幅度为1%~10% °C。

### 2.2 水温异常特征分析

#### 2.2.1 干扰因素分析

2015年10月13日更换探头至2023年12月,观测井周边无重大环境变化,受环境干扰较小,期间2018年4月22日、2018年7月8日至7月11日数采故障造成数据突升和突降的台阶变化,其他

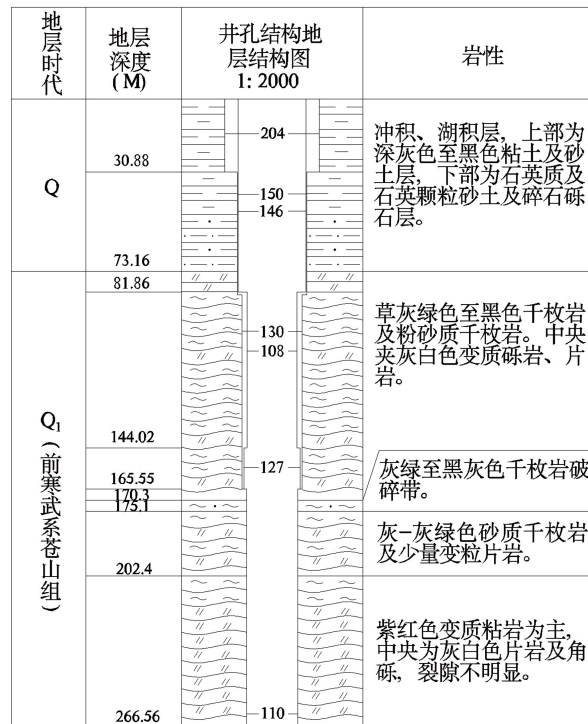


图1 洱源滇20井井孔柱状图

Fig.1 Well bore column of the Eryuan Dian 20 well

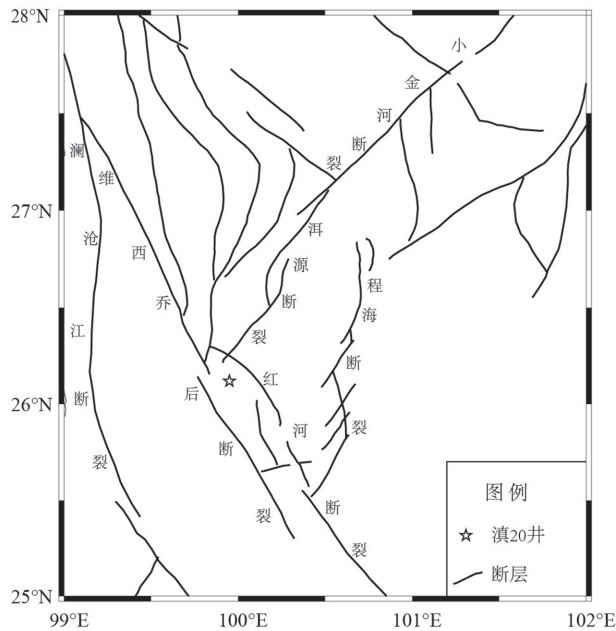


图2 洱源滇20井构造位置

Fig.2 Tectonic position of the Eryuan Dian 20 Well

时段仪器运行正常稳定, 无人干扰, 8年多观测数据基本稳定、连续、可靠。一般来说, 排除人为干扰, 降雨和水位变化可能是影响水温波动的主要因素。

从水温、水位、降雨量关系图(图4)可以看出, 滇20井水温与季节性降雨量的关系不明显, 水温和水位趋势上存在同步变化的相关性。本文

收集了2016年水温和水位以及降雨量数据, 采用一元回归分析法计算水温和水位、降雨量相关系数, 水温和降雨量的相关系数为0.26(图5a), 水温和水位相关系数为0.90(图5b)。由此认为, 水温变化受季节性降雨直接影响很小, 水温变化与水位变化相关性很高。

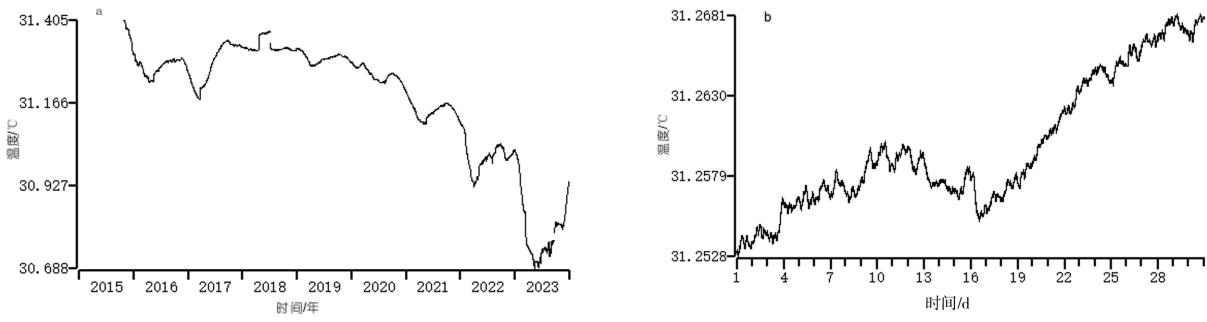


图3 洱源滇20井水温日均值(a)和分钟值(b)曲线图

Fig.3 Curves of daily mean value water (a) and minute value of water temperature (b) of the Eryuan Dian 20 Well

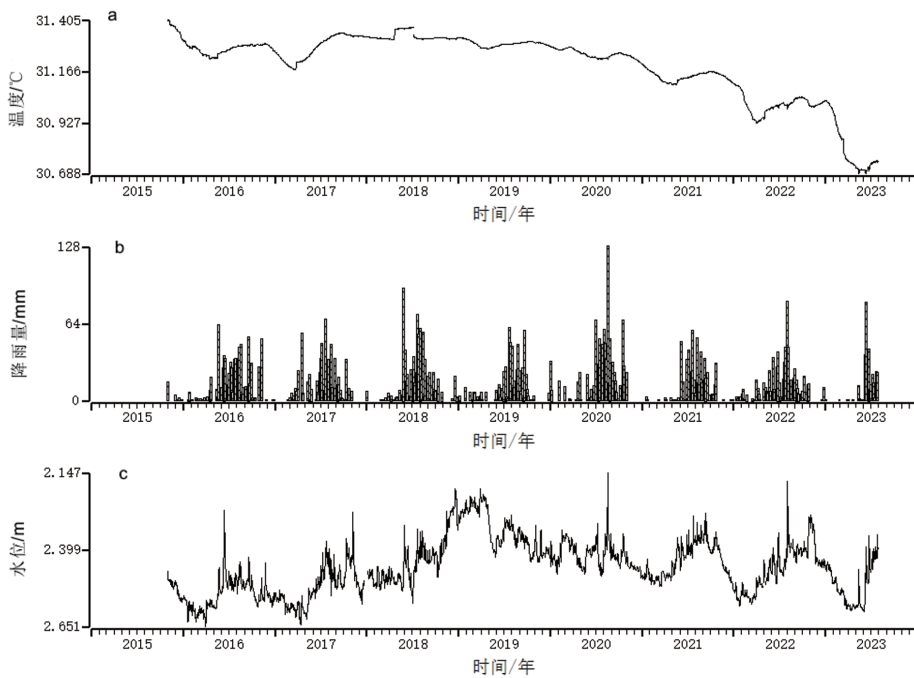


图4 洱源滇20井水温(a)、降雨量(b)、水位(c)对比曲线

Fig.4 Curves of water temperature (a), rainfall (b) and water level (c) of the Eryuan Dian 20 Well

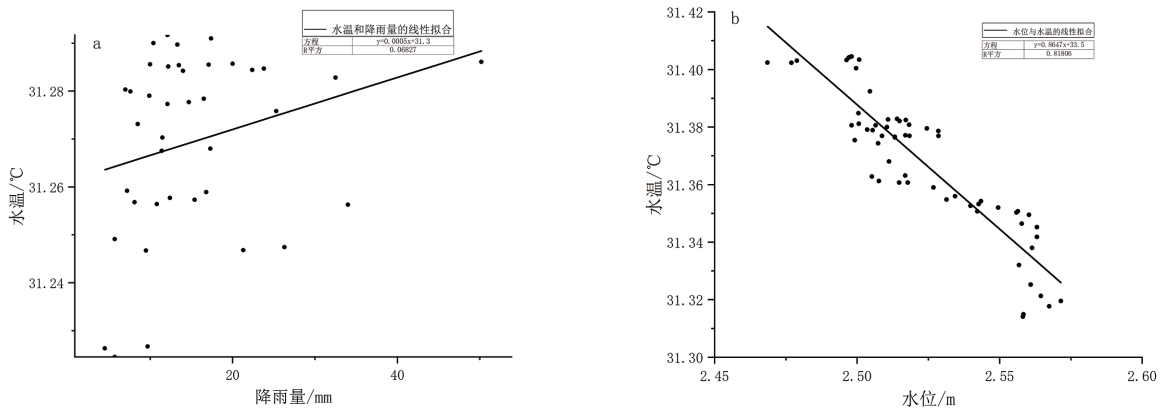


图5 洱源滇20井降雨量(a)及水位变化(b)和水温变化的关系图

Fig.5 The relationship of rainfall (a), water level changes (b) with water temperature changes of the Eryuan Dian 20 Well

2.2.2 地震前兆异常特征分析

根据《中国震例》异常与地震筛选原则，分别选取2015年11月1日至2023年12月31日距离测点半径200 km内  $M_s$ 5.0~5.9地震、300 km内  $M_s$ 6.0~6.9地震、500 km内  $M_s$ 7.0~7.9地震，共7次地震。其中2021年5月21日漾濞发生的三次  $M_s$ 5.0以上地震视为一组地震事件，共发生5组地震(表1)。从震前水温日均值变化曲线(图6)看出：除了2022年1月2日宁蒗  $M_s$ 5.5地震，其余四组地震水温均表现为快速大幅下降，在下降过程中或结束后发震，

4组地震水温异常形态一致。刘耀炜等<sup>[8]</sup>研究得出2007年宁洱  $M_s$ 6.4地震前洱源滇20井水温出现快速下降的短期异常，马玉川等<sup>[5]</sup>研究了洱源滇20井水温在2021年漾濞  $M_s$ 6.4地震前的异常特征并统计了距离井孔100 km范围内的历史中强震震例得出：水温自2015年观测以来在三次地震事件前均出现下降异常，水温异常与地震一一对应，重复性极好。综合本文分析以及其他专家的研究，滇20井水温前兆异常特征主要为快速下降。

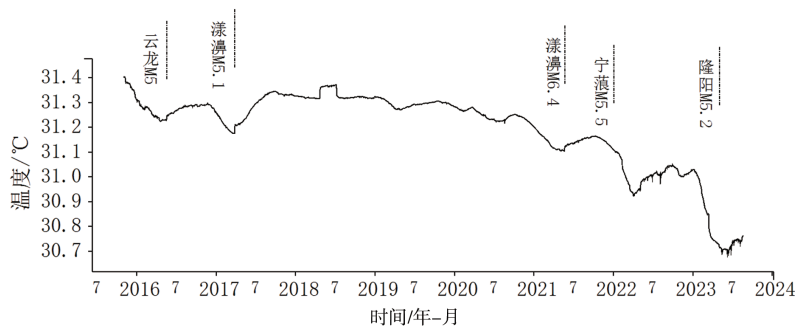


图6 洱源滇20井水温和地震关系图

Fig.6 Relationship between water temperature and earthquakes at the Eryuan Dian 20 Well

2018—2020年三年间距离测点400 km区域内无中强震发生，将这三年的年变幅度作为正常动态背景，年变化幅度在50‰~90‰℃之间，11~4月水温有下降的年动态，但是下降速率缓慢，变幅≤90‰℃，根据正常年动态规律以及历史震例中水温重复性出现的形态，将水温下降幅度超过90‰℃时作为异常阈值，快速下降作为主要变化特

征，统计异常与中强震对应关系(表1)：共出现了5次异常，持续时间2~6个月，变化幅度100‰~400‰℃，其中4次异常有对应地震发生，一次异常无震，震中距≤200 km，主要震区为滇西北地区，异常开始至发震时间在70~200 d之间，平均时间为111 d。异常时间和幅度与震级不成比例关系。

表1 洱源滇20井水温典型异常基本特征

Table 1 The characteristics of water temperature anomalies of the Eryuan Dian 20 Well

异常开始—结束时间/ (年-月-日)	异常形态	异常幅度 /(℃)	对应地震		震中距 /(km)	异常开始至发 震时间/(d)	发震时段/ (d)
			时间/(年- 月-日)	地点震级/ ( $M_s$ )			
2015-11-08—2016-04-19	持续下降	0.1788	2016-05-18	云龙5.0	42	192	异常结束29
2016-12-10—2017-03-20	持续下降	0.1069	2017-03-27	漾濞5.1	38	107	异常结束7
2020-11-20—2021-03-30	持续下降	0.1182	2021-05-21	漾濞5.2	50	181	异常结束69
				漾濞6.4			
	无明显异常		2022-01-02	宁蒗5.5	199		
2022-01-20—2022-04-03	持续下降	0.1747					无震
2023-01-08—2023-06-18	持续下降	0.3234	2023-05-02	隆阳5.2	108	114	异常持续过程中

### 2.3 预测效能检验

洪敏等<sup>[12]</sup>基于许绍燮提出的  $R$  值理论编写了预测效能评估分析软件—《跨断层数据分析平台》，该软件在流体观测数据处理和预测效能评估方面有着广泛的应用。其原理为：统计检验中，当设定某一时间序列的异常阈值后，则超出该阈值的情况被视为异常，假设预报窗长为  $W$ ，某一个异常出现的时间点位为  $T_1$ ，异常结束的时间点位为  $T_2$ ，对该异常进行预测占用的时间为  $T=T_2-T_1+W$ ，当地震时间处于该时间段内时，视为准确预报。假设该时间序列共出现了  $k$  次异常，任意异常的时间占用为  $T_i$  ( $i=1, \dots, k$ )，通过对所有异常与地震事件的对应情况进行扫描，得到准确预测的地震次数为  $m$ ，地震发生的总次数为  $n$ ，时间序列总的时间跨

度为  $T_{\text{total}}$ ，则  $R$  可表示为：

$$R = \frac{m}{n} (\text{预测准确率}) - \sum_{i=1}^k T_i / T_{\text{total}} (\text{时间占有率}) \quad (1)$$

计算获得  $R$  值后，可根据预测准确数和漏报次数获得  $R_0$ 。如果  $R > R_0$ ，说明该预测指标有效，可以认为其能作为预测地震的重要参考指标。

本文用该软件处理水温数据并作预测效能评估，根据水温年变规律和震兆异常特征，对水温日均值作窗长 120 d 差分处理，以 3 个月为预测窗长，差分值小于 1 倍标准差低值视为异常，以此条件作预报效能评估 (图 7)，评估结果为：准确预报地震 4 次 (云龙 M5.0、漾濞 M5.1、漾濞 M6.4、隆阳 M5.2)，漏报地震 1 次 (宁蒗 M5.5)，虚报地震为 1， $R$  值 0.635， $R_0$  值 0.515， $R > R_0$ ，预测指标有效。

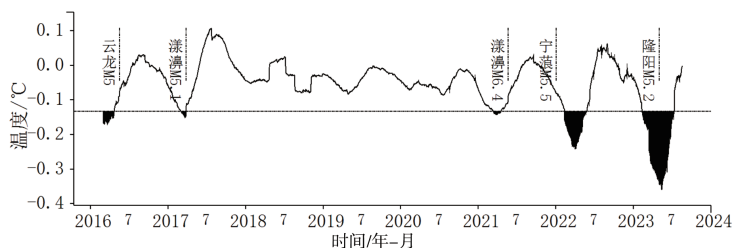


图 7 洱源滇 20 井水温差分和地震关系图

Fig.7 Relationship between water temperature difference and earthquake at the Eryuan Dian 20 Well

### 2.4 异常机理讨论

根据车用太等<sup>[9]</sup>的研究，水温前兆异常可能存在于三种机制，一是含水层受到力的作用而变形，促使井—含水层间产生水对流运动和热对流，即水热动力学机制；二是观测井所在地区大地热流发生变化，深部热流上涌，使井—含水层系统的热状态发生变化，即地热动力学机制；三是断层活动产生的摩擦热作用导致井水温度发生变化。本文从水温梯度、水化学分析、水温与同井水位相互关系，探讨水温异常变化的机理。

#### 2.4.1 水温梯度分析

滇 20 井水温梯度于 2010 年 12 月 2 日由云南省地震局仪器安装调试工作组和洱源台工作人员一起测量。对井下 10 ~ 190 m 采用 10 m 步长进行温度梯度测量，测量结果图 8。从井基础资料和温度梯度测量结果可以得出：温度梯度为正梯度，平均值 1.0358 °C/10 m，显著高于一般沉积盆地的平均地温梯度 (0.3 °C/10 m)。这可能是滇 20 井处于构造活跃的地热区，其大地热流值较高导致的。如前所

述，该井有两个含水层分别位于井下 80.22 ~ 144.02 m 和 165.55 ~ 266.56 m 处，从图 8(b)可以看出水温度变化拐点和梯度最低值处于第一含水层 100 m 处，刚好是第一含水层位置。此处水流横向交替剧烈，温度变化敏感，水温探头放置在井下 90 m 处，处于第一含水层上部位置，可以较好的监测到井水温度微动态变化。从图 8(a)中也可以看出，在井下约 100 m 位置处，水温曲线明显向低温方向偏移。表明含水层此处有一水温相对较低的补给。

#### 2.4.2 水化学分析

水化学特征分析能够探明地下流体的来源与补给过程，是区别地下流体是否受构造活动影响的重要技术方法之一<sup>[13]</sup>。下面从 Piper 图、Na-K-Mg 三角图、氢氧同位素组成图、Schoeller 图判定滇 20 井水化学类型、水—岩平衡特征以及组分来源。

2018 年 7 月、2019 年 7 月、2021 年 6 月、2022 年 1 月、2022 年 5 月分别对滇 20 井进行水样采集分析 (样品按时间顺序分别编号为 1、2、3、4、5)，测定水样阴阳离子组分和氢氧同位素组成，测定均

由应急管理部国家自然灾害防治研究院完成。分析结果表明(表2),该井优势阳离子成分为Na<sup>+</sup>,优势阴离子成分为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,水化学类型为HCO<sub>3</sub>-Na(图9a)。Na-K-Mg三角图(图9b)显示,几次水样结果均落在未成熟水区域,靠近右下角Mg端元,均未达到饱和状态,离“部分平衡水”区域较远,说明水循环周期相对较快,水-岩之间尚未达到离

子平衡状态,水-岩反应程度较低,其水源主要是大气降水或浅部冷水混入补给。氢氧同位素结果显示(图9c),测值接近大气降水线并偏右,表明为浅层地下水,主要来源为大气降水。从Schoeller图(图9d)可以看出,近几年各离子浓度变化不大,表明补给未发生较大变化,水源没有受到较大干扰影响。

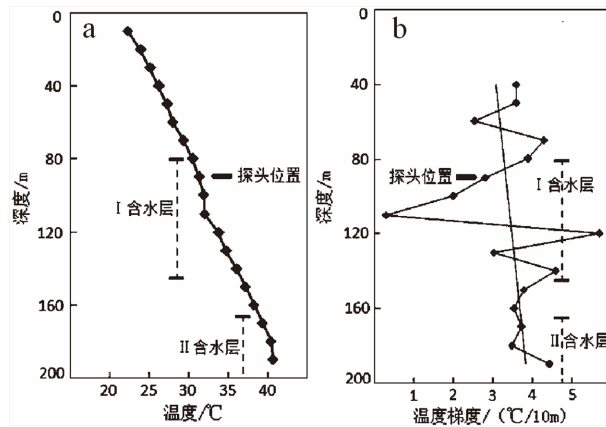


图8 洱源滇20井温度(a)与温度梯度(b)随深度变化的曲线

Fig.8 Variation of water temperature (a) and water temperature gradient (b) with depth of Eryuan Dian Well 20

表2 洱源滇20井水体水化学成分及同位素分析结果

Table 2 Chemical composition and isotope analysis of water in Eryuan Dian 20 Well

样品	取样时间/ (年-月)	水化阴、阳离子/(mg·L <sup>-1</sup> )									氢、氧同位素	
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	δD <sub>V-SMOW</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	δ <sup>18</sup> O <sub>V-SMOW</sub> (×10 <sup>-3</sup> )
1	2018-07	173.676	14.603	3.373	19.077	5.326	1.385	27.332	3.28	565.627	-115.54	-15.27
2	2019-07	176.88	14.01	3.07	17.60	5.30	1.51	23.54	2.04	543.05	-115.05	-15.03
3	2021-06	167.808	14.437	4.042	26.562	3.861	6.012	12.103	0	497.95	-109.743	-15.175
4	2022-01	168.993	13.157	3.953	22.922	3.381	3.305	11.195	0	557.052	-111.485	-14.62
5	2022-05	174.29	13.02	4.51	24.93	3.95	1.39	11.05	0	501.16	-116.81	-15.7

### 2.4.3 水温异常变化机理讨论

车用太等<sup>[2]</sup>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。车用太等<sup>[3]</sup>对水温微动态形成的水热动力学机制分析中指出:水热动力学机制的核心是井水中某一点的温度变化是由井一含水层间与井筒内伴随着水流运动产生的热对流作用引起的,这种机制作用下井水温度的变化与井水位的变化密切相关,在这种机制作用下,在水温梯度为正值观测井中,当水温传感器放置在观测含水层上半部时,井水位上升时,观测到的水温上升,井水位下降时,观测到的水温下

降。这种情况与滇20井观测到的水温变化是一致的。由图8(a)和上面的讨论可以看出,水温探头位于该井补给层上方。虽然补给水温度略低,正常时候,少量水从含水层流出,可能会使探头下方相对较热的水向上运移,经过探头时表现为水温升高,水位上升。值得注意的是,这种情况只适用于少量地下水补给,否则水温应该会出现剧烈下降。但从滇20井水位变化幅度极小(几厘米),以及水温、水位良好的正相关性,结合图8(a)中100 m处不太显著的水温“拐点”,我们推断这些现象符合地下水少量补给的假设。因此,少量水从含水层流出,使水温、水位升高的结论是合理的。但在异常时间段,情况则刚刚相反。李腊月等<sup>[14]</sup>对滇西北地

区地壳形变特征的研究指出近年红河断裂北段应力为拉张，武永彩等<sup>[15]</sup>对滇西北地区近年来应力场的研究指出洱源鹤庆断裂—红河断裂—程海断裂区域为张性应力区，当构造增强，拉张应力增强，进而

含水层孔隙压减小，井孔内水回流至含水层，这就导致水位下降，同时水温探头上方相对较冷的水向下运移，最终导致水温下降。这就很好解释了水温异常总是表现出下降的形态。

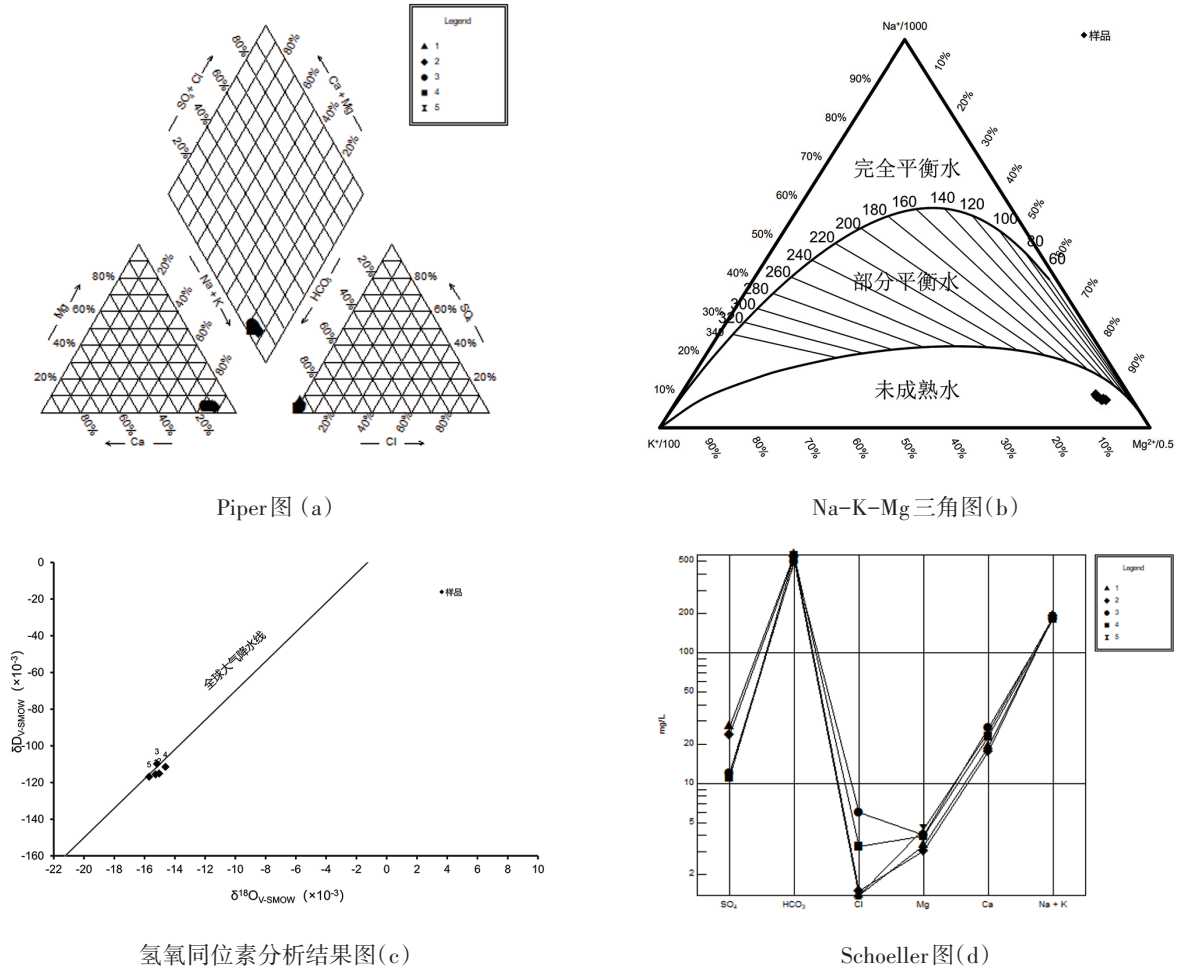


图9 洱源滇20井水体水化学成分及同位素分析结果图

Fig.9 Chemical composition and the stable isotopes of hydrogen and oxygen of water in Eryuan Dian 20 Well

从震前水温异常变化和同井水位变化曲线(图10)可看出，水温和水位同步下降，这说明水温变化和同井水位变化密切相关，从井水温度及温度梯度随深度变化的曲线(图8)可看出，井水温度随深度变化呈线性增加，第一含水层在80~120m处，温度梯度变化大，说明水—热交换剧烈，温度探头在该含水层上部可以敏锐的捕捉到水温微动态变化信息，结合水热动力学机制的核心和水温与水位的变化关系以及井所处构造位置近年的应力状态，初步分析认为滇20井水温异常变化机理可能是区域构造活动增强所致，拉张力作用下，地壳浅层含水岩体发生形变造成井水回流到含水层中，井筒内发生热对流，导致传感器所处的水温出现下降，然而水温异常变化机理复杂多样，有时候可能是几种机制

共同作用的结果，要确定为何种机理所致，需要更多的地球物理观测资料来佐证。

### 3 结论

本文通过对洱源滇20井水温在中强震前异常特征开展分析，认为其水温下降异常对测点周边200km范围中强地震具有较好的指示意义，并针对异常机理进行了讨论，主要结论如下：

(1)震前异常表现为快速下降，持续时间为2~6个月，变化幅度在100‰~400‰℃之间。

(2)异常开始至发震时间在70~200d之间，震中距在200km以内，表明该井水温异常对测点周边200km区域内中强地震的发生具有良好的中短期指示意义。

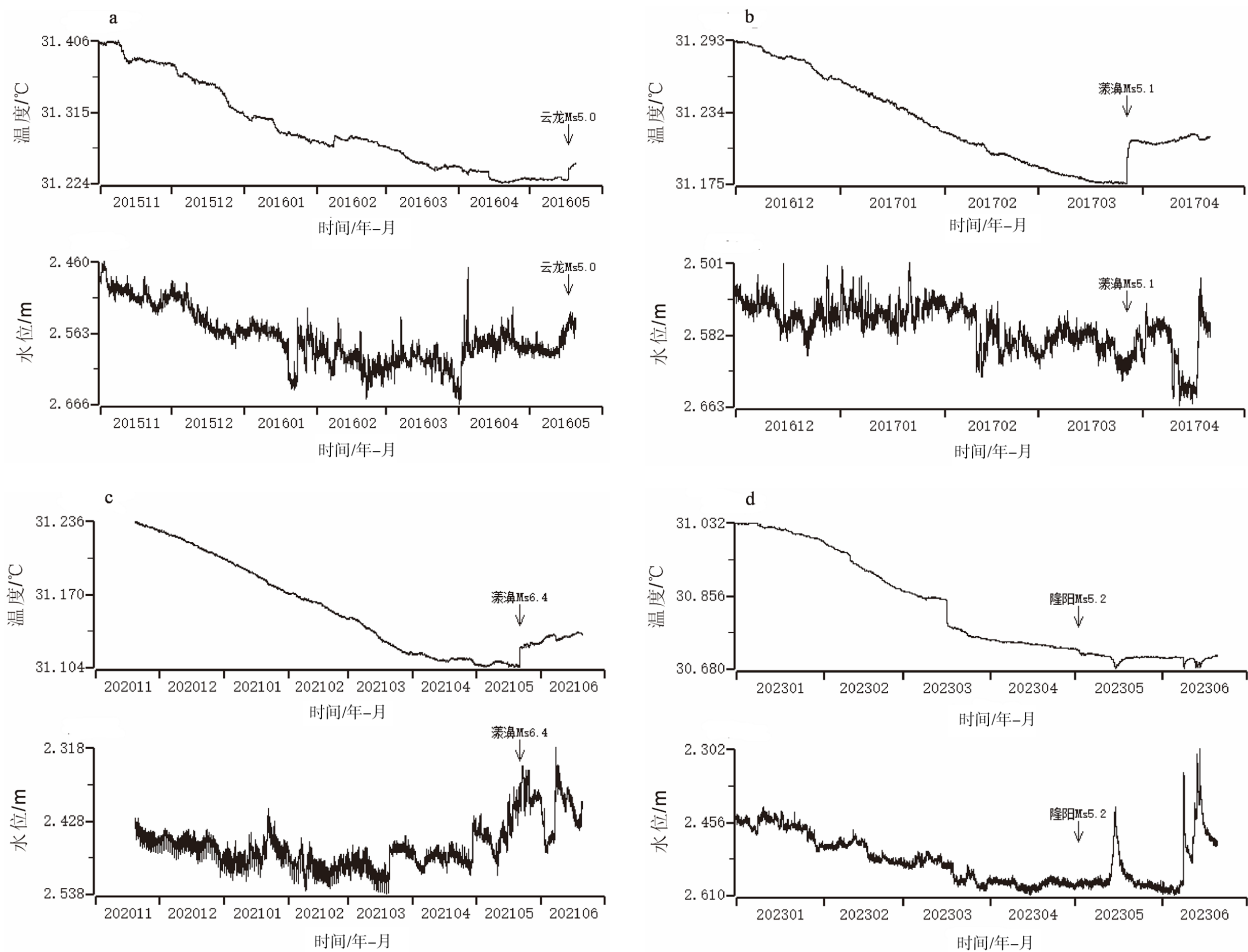


图10 洱源滇20井水温、水位、地震关系图

Fig.10 Relationship of water temperature, water level with earthquake in Eryuan Dian 20 Well

(3)异常机理初步分析认为可能是区域构造活动增强所致,拉张力作用下,孔隙压力减小造成井水回流到含水层中,井筒内发生热对流,导致传感器所处的水温出现下降。

参考文献

[1] 中国地震局监测预报司. 地下流体分析预测技术方法工作手册[M]. 北京:地震出版社,2020.  
 [2] 车用太,鱼金子,刘春国. 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,1996(4):34-37.  
 [3] 车用太,何案华,鱼金子. 水温微动态形成的水热动力学与地热动力学机制[J]. 地震学报,2014,36(1):106-117.  
 [4] 叶碧文,王维,缪阿丽,等. 江苏苏05井、苏06井水温近年来典型异常特征分析及其机理讨论[J]. 震灾防御技术,2018,13(1):126-137.  
 [5] 马玉川,晏锐,胡小静. 云南洱源井水温在2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震前的异常特征[J]. 地震学报,2021,43(5):674-677.  
 [6] 苏维刚,刘磊,袁伏全,等. 2021年玛多 $M_s7.4$ 地震前玉树地震台井水温异常特征[J]. 地震学报,2021,43(3):392-396.

[7] 何案华,赵刚,刘成龙,等. 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[J]. 地球物理学报,2012,55(4):1261-1268.  
 [8] 刘耀炜,孙小龙,王世芹,等. 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,2008,31(4):347-353.  
 [9] 车用太,刘成龙,鱼金子. 井水温度微动态及其形成机制[J]. 地震,2008,28(4):20-28.  
 [10] 鱼金子,车用太,何案华. 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,2012(06):274.  
 [11] 郭绍忠,黄绍裘,张鸿飞,等. 滇西水汞观测的地震短临预报指标[J]. 地震研究,1998,21(1):50-57.  
 [12] 洪敏,张勇,王伶俐,等. 跨断层扰动协调比异常提取方法与效能评估及其在云南地区的应用[J]. 地震研究,2023,46(1):99-106.  
 [13] 蒋凤亮,李桂如,王基华,等. 地震地球化学[M]. 北京:地震出版社,1989.  
 [14] 李腊月,刘峡,万永魁,等. GPS观测与数值模拟揭示的滇西北地区地壳形变特征及主要断层运动变化[J]. 地质学报,2021,95(11):3205-3219.  
 [15] 武永彩,李昂,唐红涛. 滇西北地区近年来应力场的数值模拟研究[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(12):1238-1240+1279.