

云南德宏法帕井数字化观测资料动态及前兆异常特征分析

王金霞, 吴玉卫, 周 洋, 王洪英, 钟开荣

Analysis of observation data dynamics and precursor anomalies of digital observation data of the Dehongfapa well

Wang Jinxia, Wu Yuwei, Zhou Yang, Wang Hongying, and Zhong Kairong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

甘肃景泰 $M_s4.7$ 地震前芦阳水温异常分析

Analysis on water temperature anomalies at Luyang well before the Jingtai $M_s4.7$ earthquake in Gansu Province

地震科学进展. 2018(5): 12–19

德令哈台尔海井水位异常分析

Analysis on the water level anomaly at Delingha Gahai well in Qinghai Province

地震科学进展. 2020(2): 36–39

初建永安井水温动态大幅度起伏及其原因的调查与分析

Investigation and analysis of the dynamic anomaly of deepwater temperature in Yong'an well

地震科学进展. 2019(3): 7–14

无极井水位同震效应特征浅析

Analysis on characteristics of coseismic effect of Wuji well

地震科学进展. 2018(1): 17–20

豫01井水位急剧下降原因调查与分析

Investigation and analysis on the cause of the sharp drop of water level in well Yu-01

地震科学进展. 2020(9): 16–19

福建永安井水温观测中的干扰因素浅析

Analysis of affecting factors on water temperature of Yong'an well in Fujian

地震科学进展. 2020(12): 7–14



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王金霞, 吴玉卫, 周洋, 等. 云南德宏法帕井数字化观测资料动态及前兆异常特征分析 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(4): 209-217. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-032

Wang J X, Wu Y W, Zhou Y, et al. Analysis of observation data dynamics and precursor anomalies of digital observation data of the Dehongfapa well[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(4): 209-217. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-032

学术论文

云南德宏法帕井数字化观测资料动态及 前兆异常特征分析

王金霞 吴玉卫^{*} 周 洋 王洪英 钟开荣

(德宏傣族景颇族自治州防震减灾局, 云南芒市 678400)

摘要 以 2008—2023 年德宏法帕井水位、水温观测资料为研究对象, 整理分析观测资料动态变化、固体潮形态、同震响应及地震前兆异常特征等。结果显示, 德宏法帕井水位固体潮汐形态清晰, 年变规律为明显的夏高冬低型; 水温年变幅度均不足 0.01°C , 呈趋势平稳型; 井水位、水温同震响应较为明显, 对于研究区域内 $M_s \geq 6.0$ 地震同震响应比达 78.6%; 井水位、水温能记录到部分明显的前兆异常现象, 时间上主要以短临异常为主, 空间上以近震和地方震为主。通过对德宏法帕井流体观测资料进行系统的整理和分析, 发现德宏法帕井含水层有良好的弹性, 观测资料能够很好的反应地壳的应力应变, 是较为理想的流体观测井, 可为后续开展地震预测预报提供一定的科学依据。

关键词 德宏法帕井; 水位; 水温; 前兆异常; 同震响应

中图分类号: P315.63 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2025)04-0209-09

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2024-032

Analysis of observation data dynamics and precursor anomalies of digital observation data of the Dehongfapa well

Wang Jinxia, Wu Yuwei, Zhou Yang, Wang Hongying, Zhong Kairong

(Dehong Dai and Jingpo Autonomous Prefecture Earthquake Prevention and Disaster
Reduction Administration, Yunnan Mangshi 678400, China)

Abstract Based on observation data of the water level and water temperature in the Dehongfapa well from 2008 to 2023, we analyzed the characteristics of the dynamic change of observation data, pattern of earth tides, coseismic response, and earthquake precursor anomaly. The results showed that the water level of the Dehongfapa well has a clear pattern of earth tides and that the annual variation is obvious highness of level in summer and lowness in winter. The annual variation of water temperature was less than 0.01°C , indicating a stable trend type. The coseismic response of the well water level and water temperature was obvious. The coseismic response ratio of $M_s \geq 6.0$ earthquakes in the study

收稿日期: 2024-02-14; 采用日期: 2024-04-10。

第一作者: 王金霞(1989-), 女, 工程师, 主要从事地震预报工作。E-mail: 646788466@qq.com。

^{*} 通信作者: 吴玉卫(1986-), 男, 工程师, 主要从事地震应急互联互通、信息网络管理工作。E-mail: 1263986907@qq.com。



area was 78.6%. The well water level and water temperature can record some obvious precursor anomalies, mainly characterized by short-term anomalies in time and proximal and local earthquakes in space. We systematically studied, cleaned, and analyzed the fluid observation data of the Dehongfapa well and found that the aquifer of the Dehongfapa well has good elasticity. The observation data of the well can effectively reflect the underground stress and strain change, so the Dehongfapa well is an ideal fluid observation well. It can provide information useful for earthquake prediction.

Keywords Dehongfapa well; water level; water temperature; precursor anomaly; coseismic response

0 引言

地震地下流体观测是地震监测的重要手段之一,通过观测地下水位、水温、气体等成分的参数变化,可以了解地下流体的动态和变化规律,进而推断地震活动的趋势和规律。地震地下流体井水位、水温观测是地震地球物理台网的主要观测手段,能为地震预测预报和科学研究提供重要的数据支持^[1]。目前,已有多人利用地震地下流体水位、水温观测资料开展前兆异常研究、同震响应研究、区域应力变化特征研究、含水层参数反演以及观测机理研究等^[2-8]。

云南德宏法帕井(滇 22 井)自“十五”数字化升级改造以来,积累了大量连续、可靠的观测资料,但截至目前并未对该井观测资料进行过系统的整理和分析。因此,笔者结合前人的研究,以 2008—2023 年德宏法帕井水位、水温观测资料为研究对象,整理分析观测资料动态变化、固体潮形态、地震波效应及地震前兆异常等特征,以此为德宏及周边地区地震预测预报提供一定的科学参考依据。

1 观测井基本情况及观测仪器安装情况

德宏法帕井始建于 1985 年,1987 年正式投入观测。台站位于芒市风平镇法帕村,距芒市 7.5 km,地理坐标为(24.39°N, 98.55°E),高程为 882 m,占地面积 110 m²,现有井深 200.17 m。观测井附近地表水埋藏浅,含水层埋深 92.61 m,岩性为中层状泥灰岩,

含承压岩溶水,水位 2.5 m,上顶板厚 24.26 m,岩性为粉砂质岩,属弱含水层,地下水接受侧向补给和上层第四系空裂隙水越流补给;井水水温在 22.4793~24.2746℃ 之间,随深度的增加而升高。观测站位于龙陵—瑞丽大断裂下盘,芒市断陷盆地东南缘,南为畹町大断裂,东为怒江大断裂。

2007 年年中完成了对德宏法帕井的“十五”数字化升级改造。水位观测采用 LN-3A 型水位仪,2019 年因仪器老化严重,更换为 SWY-II 型数字化水位仪,对比观测 1 年后, LN-3A 型水位仪正式停测。水温观测采用 SZW-1A 型水温仪,2019 年因仪器老化严重,更换为 SZW-II 型数字化水温仪(Windows 操作系统),对比观测 1 年后, SZW-1A 型水温仪正式停测;2022 年因该仪器稳定性不好,更换为新型的 SZW-II 型数字化水温仪(Linux 操作系统)。水位探头深度位于井口下 7.313 m 处,水温探头深度位于井口下 165 m 处。另外,该井还安装有一套气象三要素观测仪器。

2 观测资料动态特征分析

2.1 水位动态变化特征

法帕观测站周边无人工抽水点,观测井附近地表水埋藏浅,加上水位探头放置较浅,所以水位变化受大气降雨影响比较大,季节性较为明显,多年趋势变化呈现出趋势平稳型动态变化,如图 1 所示。

水位年变特征突出呈现出动态起伏型,总体变

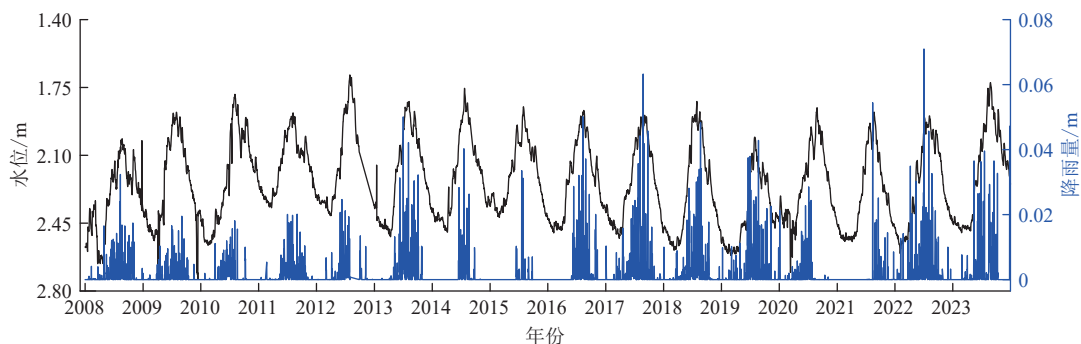


图 1 2008—2023 年德宏法帕井水位及降雨量动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of water level and rainfall in the Dehongfapa well from 2008 to 2023

化较为复杂, 表现为1—4月前后, 水位小幅度下降, 且维持在低值, 4—8月前后上升, 8—12月下降; 动态是单峰单谷型, 特征表现为降—升—降(先谷后峰), 年变化范围在0.49~0.78 m之间。由于仪器在观测过程中出现了故障送修、更换, 预处理过程中剔除错误数据等导致出现部分缺数现象。

2.2 水温动态变化特征

对德宏法帕井水温观测资料进行分析后发现, 年变幅度均不足0.01℃, 年或多年趋势动态呈现出趋势平稳型(图2)。2012年10—12月, 仪器因雷击损坏送修导致记录缺数; 2018年6月19日台站改造过程中碰到过探头线, 水温呈转折下降趋势; 2020年11月, 因仪器更换, 新仪器观测数据降低。

2.3 水位日、月动态—固体潮效应

井水位固体潮效应是体应变固体潮的次生效应, 是在日、月引力作用下, 随着含水层体积的压缩

和膨胀变形而引起的水位有规律变化^[9]。德宏法帕井观测站水位年变特征表现为1—4月前后有小幅度下降, 且井水位上升前1~2个月内井水位测值相对稳定, 文中选取了2023年3月井水位观测的分钟值进行分析(图3a), 在朔日(3月22日, 农历初一)、望日(3月6日, 农历十五)呈双峰双谷型变化, 其动态特征表现为升—降—升—降, 水位日潮差值较大, 达11 mm; 在上弦日(3月28日, 农历初七)、下弦日(3月14日, 农历廿三)呈单峰单谷型变化, 其动态特征表现为降—升—降, 水位日潮差值较小。总体来看, 德宏法帕井水位观测到的固体潮汐形态清晰, 潮汐效应显著, 能够很好地反映出地壳的应力应变情况。

德宏法帕井水温短期动态呈现出高频振荡特征, 可能与仪器自身的噪声有关^[10], 无明显固体潮汐现象(图3b)。

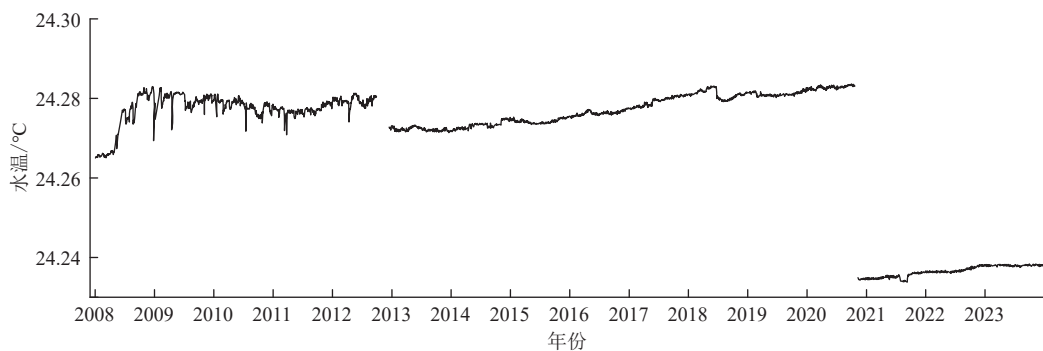


图2 2008—2023年德宏法帕井水温动态变化

Fig. 2 Dynamic change of water temperature in the Dehongfapa well from 2008 to 2023

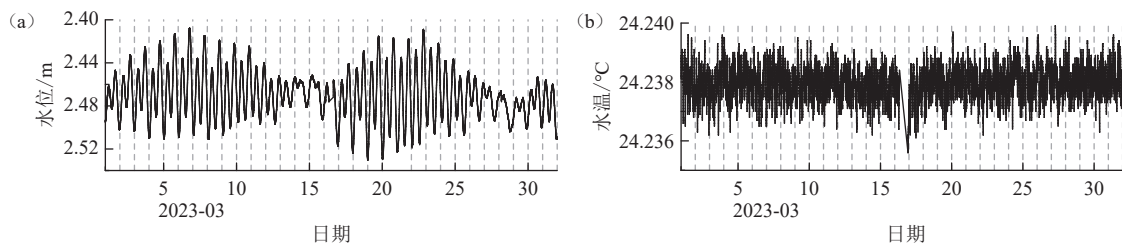


图3 2023年3月德宏法帕井水位和水温动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of water level and water temperature in the Dehongfapa well in March 2023

3 同震响应特征

含水层系统对地震波的响应非常灵敏, 中强以上地震发生后, 其外围的含水层系统经常可以记录到显著的同震响应^[7]。井水位、水温同震效应是揭示地壳介质对应力、应变过程响应的有效手段, 能够反映地壳动力作用下地下介质应变和孔隙压的变化特

征^[1]。本文结合德宏法帕井观测数据, 从中国地震局监测预报司组织整理编写的《中国5级以上地震目录汇编》中, 选取了距离该井1000 km范围内 $M_S \geq 6.5$ 地震和云南及邻区($21^\circ\text{N} \sim 29^\circ\text{N}$, $97^\circ\text{E} \sim 106^\circ\text{E}$)发生的 $M_S \geq 5.0$ 地震共54次(不含余震)进行分析, 其中 $M_S 5.0 \sim 5.9$ 地震40次、 $M_S \geq 6.0$ 地震14次。结果显

示,研究时段内德宏法帕井共记录到同震响应 17 次(表 1),其中 $M_S5.0\sim 5.9$ 地震 6 次、同震响应比为 15%, $M_S\geq 6.0$ 地震 11 次、同震响应比为 78.6%,表明德宏法帕井观测资料对于研究区域内 $M_S\geq 6.0$ 地震记震能力较强。

从同震形态来看,德宏法帕井静水位主要有上升型、水震波型和脉冲型 3 种,文中又把水震波型和脉冲型统称为振荡型,除 2008 年盈江 5.9 级地震、2011 年盈江 5.8 级地震之后表现出上升变化以外,其他均表现出振荡型变化(图 4),这可能主要是因为地方震和近震与远震同震响应机理不同所致。同震变化幅度为 0.5~34 cm,最大为 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震,幅度约为 34 cm;最小为 2009 年 7 月 9 日姚安 6.0 级地震,幅度约为 0.5 cm,主要与震级和井震距有关系,震级越高,井震距越小,变化幅度越大。另外,发现德宏法帕井水位对于全球 7 级及以上地震响应能力较强,主要表现出水震波型变化。

德宏法帕井水位同震响应形态表现为阶变(上升)和振荡,2008 年和 2011 年两次盈江地震以后水

位同震响应形态为阶变(上升),但是两次水位变化幅度都不大,所以笔者认为可能是因为地震使得含水层应力状态改变而引起含水层介质孔隙、裂隙被疏通或地下水力学特征发生改变,使水位相对长时间的维持在一个新的平衡状态。而振荡变化是由于地震波传递后引起了含水层中的地下水发生自由震动,使含水层内孔隙压力发生升降交替变化,导致井—含水层系统之间交替产生水流运动,最终表现为井孔内水柱的反复升降变化^[8, 11]。这种地震波经过后水位能从剧烈波动形态快速恢复到之前的正常波动状态,说明该井含水层有良好的弹性,岩层透水性也相对较好。

德宏法帕井水温主要表现为下降后缓慢恢复变化或下降后快速恢复变化两种,除 2008 年汶川 8.0 级地震、2008 年盈江 5.9 级地震、2009 年姚安 6.0 级地震、2011 年缅甸 7.2 级地震后表现出下降后缓慢恢复变化外,其他均表现为下降后快速恢复变化(图 5)。同震变化幅度为 0.0028~0.0109℃,最大为 2011 年缅甸 7.2 级地震,幅度约为 0.0109℃;最小为 2008 年盈江 5.9 级地震,幅度约为 0.0028℃。

表 1 2008—2023 年德宏法帕井水位和水温同震阶变表

Table 1 Water level and water temperature changes in coseismic response of the Dehongfapa well from 2008 to 2023

序号	发震日期	发震地点	震级	震中距/km	静水位		水温	
					变化幅度/cm	响应类型	变化幅度/℃	响应类型
1	2008-05-12	汶川	8.0	876	34	水震波	0.006 6	下降后缓慢恢复
2	2008-08-21	盈江	5.9	98	1.7	上升	0.002 8	下降后缓慢恢复
3	2009-07-09	姚安	6.0	290	0.5	脉冲	0.003 4	下降后缓慢恢复
4	2010-04-14	玉树	7.1	985	20.8	水震波		
5	2011-03-10	盈江	5.8	74	1.3	上升	0.003 2	下降后快速恢复
6	2011-03-24	缅甸	7.2	419	16.2	水震波	0.010 9	下降后缓慢恢复
7	2013-04-20	芦山	7.0	790	3.2	水震波		
8	2014-05-24	盈江	5.6	100	震前毛刺严重 断数		0.005 1	下降后快速恢复
9	2014-05-30	盈江	6.1	98			0.003 3	下降后快速恢复
10	2014-08-03	鲁甸	6.5	563	1	脉冲	0.003 5	下降后快速恢复
11	2014-10-07	景谷	6.6	225	3.7	水震波	0.006 3	下降后快速恢复
12	2015-03-01	沧源	5.5	110			0.005 1	下降后快速恢复
13	2017-11-18	米林	6.9	691	5.4	水震波		
14	2021-05-21	漾濞	6.4	195	1.5	脉冲	0.008 2	下降后快速恢复
15	2022-09-05	泸定	6.8	676	1.3	水震波	0.004 9	下降后快速恢复
16	2023-11-17	缅甸	5.9	364			0.003 9	下降后快速恢复
17	2023-12-02	芒市	5.0	50			0.008 6	下降后快速恢复

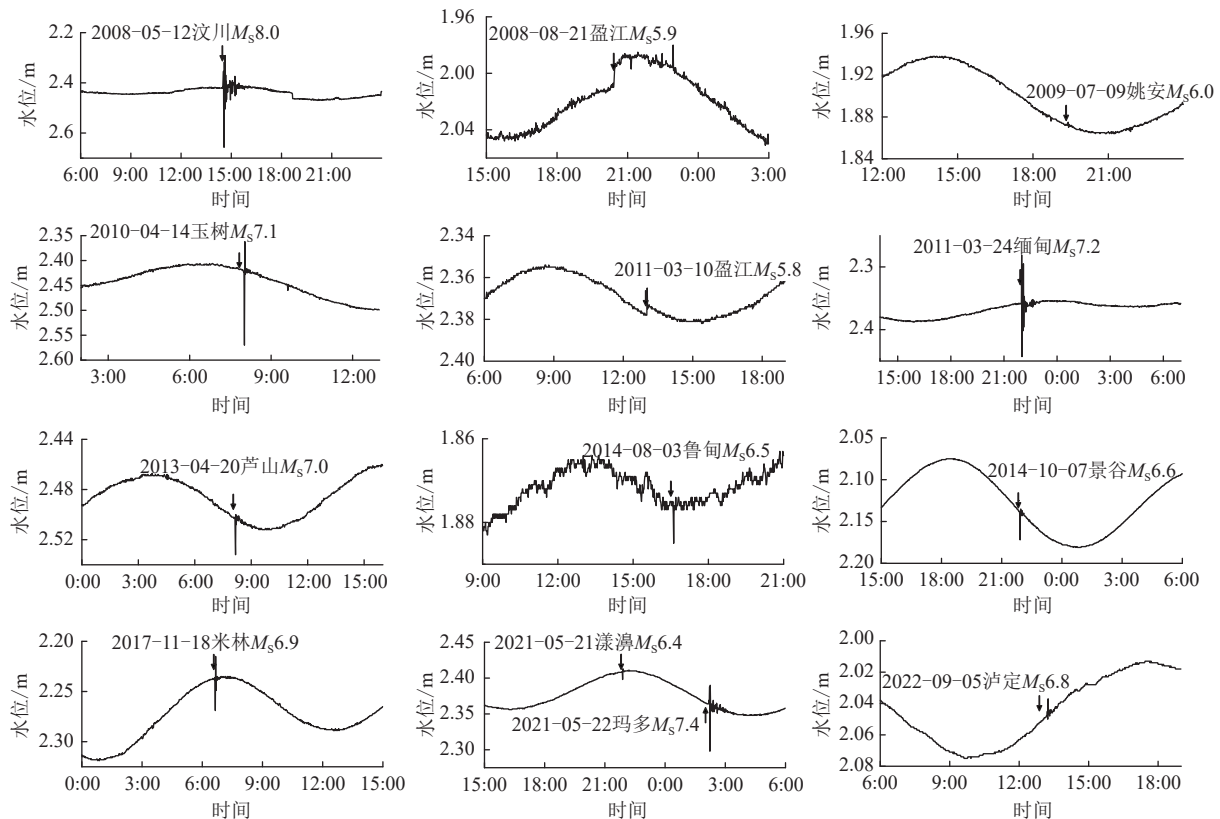


图4 德宏法帕井静水位同震响应

Fig. 4 Coseismic response curves of water level of the Dehongfapa well

井水温与井水位同震响应是密切相关的, 刘耀炜等^[12]认为水位振荡—水温下降是由于井孔含水层周边上部的地下水, 由于振荡加快了垂直向下运动的速率, 低温水快速混合到观测井水中, 引起了水温的下降^[13]。德宏法帕井水温同震响应为下降—恢复变化, 其背景值随深度增加而升高、呈正梯度变化, 结合井孔结构来看, 水温传感器处于井孔裸管段, 所以水温下降可能是由于上下层水产生混合作用引起, 该井孔含水层间具有交替的可能。

多数有水位同震响应的地震, 水温也有响应, 从响应时间上看井水位响应时间通常比井水温时间要提前, 这主要是因为水位变化使井内水上下流动, 从而水温也发生改变。但是也有德宏法帕水位和水温同震响应并没有同时出现的现象, 产生这种现象可能主要有3个方面的原因: ①因为观测井水位仪器为分钟采样率, 对于振荡型不能完全记录水震波的全部形态, 水位变化幅度不能真实地反映水震波的变化幅度^[8]; ②地震发生之前井水位表现出明显的前兆异常状态, 掩盖了同震响应的变化幅度; ③水位和水温探头位置不同, 二者所在的含水层封闭性不一样所引起。总之, 同震响应产生因素复杂, 水位同震

升降性质受控于当地地质构造环境和水文地质条件; 而水温同震变化还与地震波引起的井孔中水的运动方式、水温探头位置等因素有关, 其机理更为复杂^[13-16]。因此德宏法帕水温同震响应机理还需要进一步研究。

4 地震前兆异常特征

地下流体异常表现为地下水动力学前兆机制的异常。在地震孕育过程中, 区域应力不断增强, 导致地质构造发生形变, 进而引起地壳内部出现微破裂, 促使地下流体出现异常。本文结合德宏法帕井观测资料选取了云南及邻区 ($21^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\text{E}\sim 106^{\circ}\text{E}$) 发生的 $M_s\geq 5.0$ 地震 48 次 (38 组) (表 2 和图 6) 进行了分析。在中强地震发生之前出现明显异常的地震有 5 组, 时间上主要以短临异常为主 (震前 1~6 个月、震前 1 个月内); 空间上以近震和地方震为主, 震中距主要在 300 km 范围内。水位异常形态主要为下降期水位上升; 分钟值破坏正常动态, 呈脉冲或毛刺状。水温异常形态主要为快速上升持续高值; 下降波动破坏正常动态 (图 7)。对于同一个地下流体观测

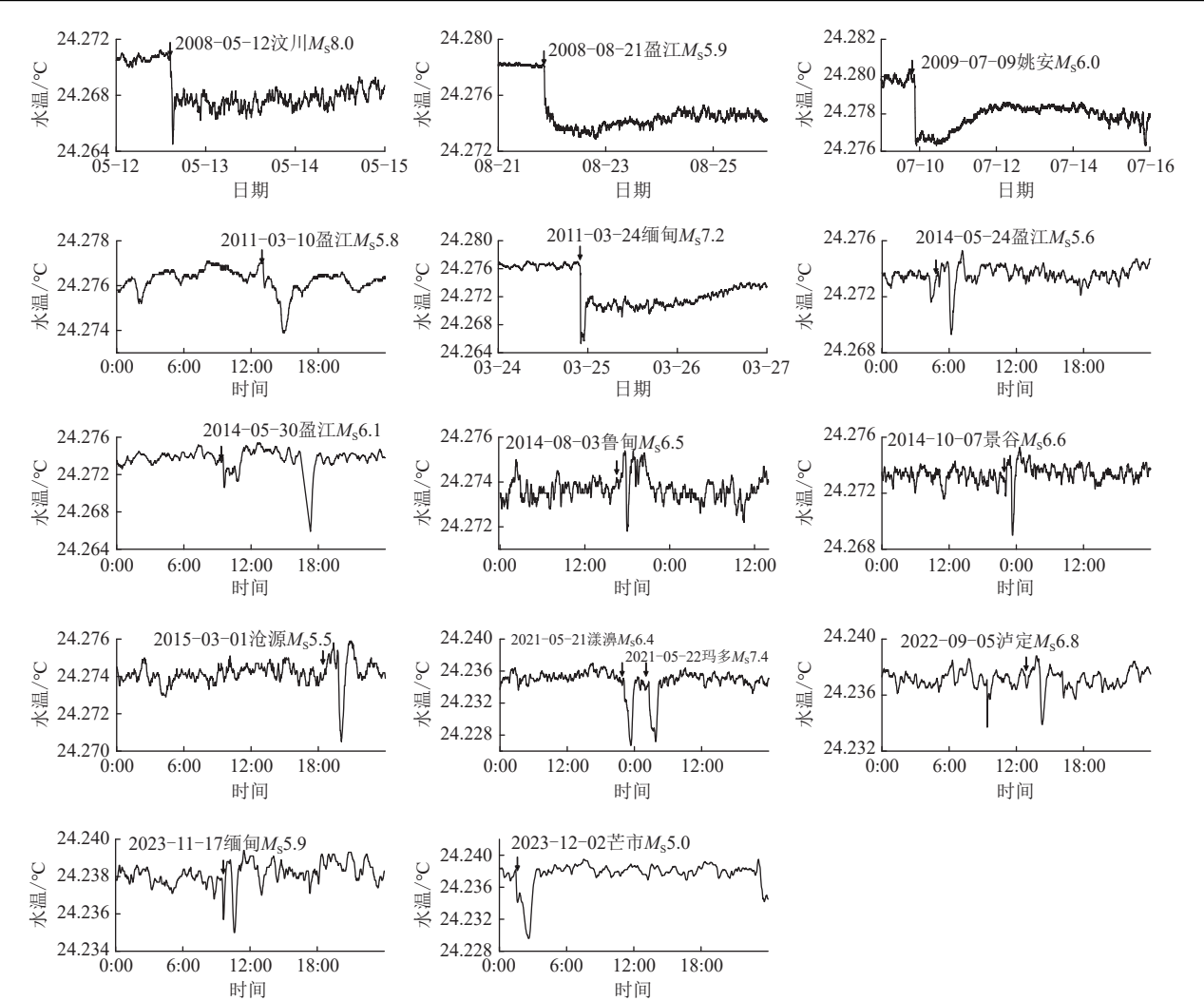


图5 德宏法帕井水温同震响应

Fig. 5 Coseismic response curves of water temperature of the Dehongfapa well

表2 地震参数及前兆异常特点

Table 2 Characteristics of precursory anomalies and seismic parameters

序号	地震 时间	地震 地点	震中位置		震级	震中距/ km	异常特点	
			北纬/°	东经/°			静水位	水温
1	2008-03-21	盈江	24.58	97.67	5.0	92	分钟值破坏正常动态, 呈毛刺状; 日均值上升	
	2008-08-20	盈江	25.12	97.93	5.0	103	2008年3月21日5.0级地震后, 分钟 值毛刺状持续出现	2008年4月29日快速上升, 5.9级 地震发生以后仍维持在高值
	2008-08-21	盈江	25.08	97.95	5.9	98		
2	2009-07-09	姚安	25.60	101.10	6.0	290	震前轻微毛刺一直持续	持续高值, 震前多次下降
3	2011-03-10	盈江	24.70	97.90	5.8	74	2010年12月水位下降期, 在无降雨 的情况下, 快速上升	2010年12月8—20日水温震前多 次下降, 分钟值破坏正常动态
4	2014-05-24	盈江	25.01	97.82	5.6	100	分钟值破坏正常动态, 呈毛刺状	
	2014-05-30	盈江	25.03	97.82	6.1	98		
5	2014-08-03	鲁甸	27.10	103.34	6.5	563	分钟值破坏正常动态, 呈毛刺状	

点对同一(或相近)地区相似(或相同)震级的地震前兆异常特征有较大差异的现象,可能是由于地震的

构造环境存在差别,在地震的孕育、发展及发震过程中,造成的前兆敏感区改变或不同所致^[17]。

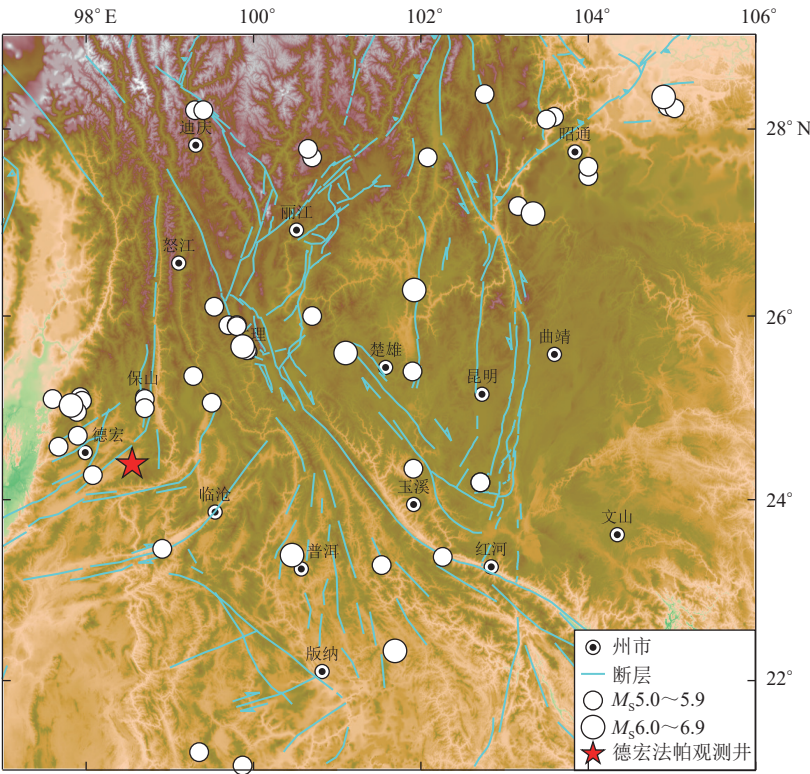


图 6 云南及邻区 $M_S \geq 5.0$ 地震空间分布图

Fig. 6 Distribution of $M_S \geq 5.0$ earthquakes occurred in Yunnan Province and adjacent areas

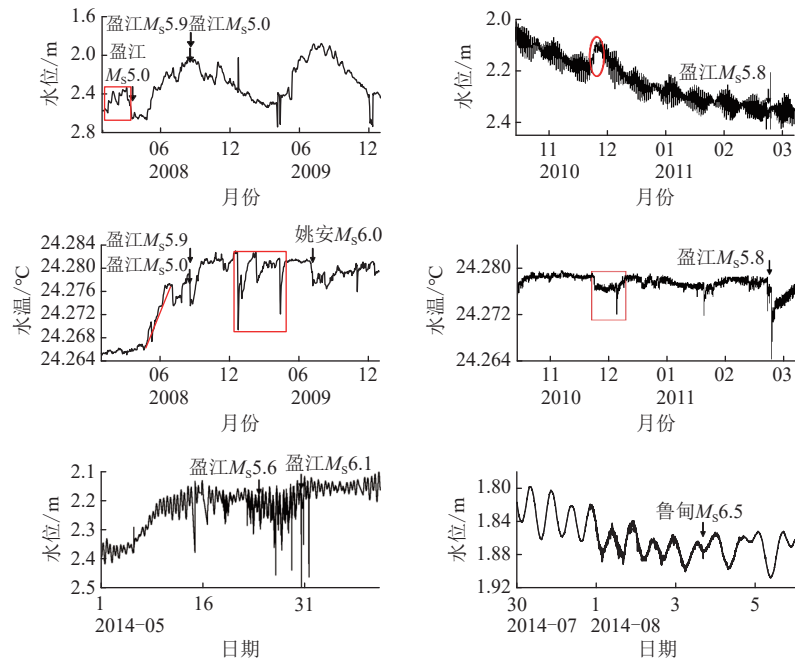


图 7 德宏法帕井水位和水温前兆异常

Fig. 7 Abnormal water level and water temperature precursors in the Dehongfapa well

5 结论

本文通过对德宏法帕井“十五”数字化改造升级之后的观测资料进行分析, 结果表明:

(1) 法帕观测井附近地表水埋藏较浅, 水位受降雨、灌溉补给等影响较大, 其年变规律为“夏高冬低”型; 水温年变规律为趋势平稳型。水位固体潮汐形态清晰, 潮汐效应显著, 能够很好的反映出地壳应

力应变的情况。

(2) 水位资料同震响应形态为上升和振荡型, 以振荡型为主, 这种地震波经过后水位能从剧烈波动形态快速恢复到之前的正常波动状态, 从侧面反映了该井含水层有良好的弹性, 岩层透水性也相对较好。

(3) 水温资料同震响应形态为下降—恢复变化, 其符合水动力学机制, 水温下降可能是由于上下层水产生混合作用引起, 该井孔含水层间具有交替的可能。而恢复时间的长短可能与地震造成不同含水层压力变化不同, 使得各含水层混入井内水量不同所致。

(4) 地震孕育过程中, 区域应力加载, 使德宏法帕井水位、水温在周边的部分中强地震发生之前出现明显异常现象, 时间上主要以短临异常为主, 震中距主要在 300 km 范围内。水位异常形态主要为下降期水位上升、分钟值破坏正常动态呈脉冲或毛刺状; 水温异常形态主要为快速上升持续高值和下降波动破坏正常动态。

总体而言, 德宏法帕井静水位、水温观测数据连续可靠, 能够有效捕捉到地下应力变化的部分信息, 是较为理想的流体观测井, 可为地震分析预报提供科学的参考依据。

参考文献

- [1] 陶志刚. 地震地下流体井水位、水温观测数据集[J]. 地震地磁观测与研究, 2022, 43(3): 128-133
Tao Z G. Seismic underground fluid well water level and water temperature observation data set[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2022, 43(3): 128-133
- [2] 孙小龙, 刘耀炜, 晏锐. 利用水位资料反演华北地区构造应力场变化[J]. 地震, 2011, 31(2): 42-49
Sun X L, Liu Y W, Yan R. Inversion of tectonic stress field in the North China region based on groundwater level data[J]. Earthquake, 2011, 31(2): 42-49
- [3] 李琼, 付虹, 朱荣欢, 等. 滇东北 $M_S \geq 5.0$ 地震前地下流体异常特征与 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震研究[J]. 地震研究, 2014, 37(4): 495-502
Li Q, Fu H, Zhu R H, et al. Characteristics of underground fluid anomalies before $M_S \geq 5.0$ earthquakes in northeast of Yunnan and Yunnan Ludian $M_S 6.5$ earthquake in 2014[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(4): 495-502
- [4] 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
Che Y T, He A H, Yu J Z. Mechanisms of water-heat dynamics and earth-heat dynamics of well water temperature micro-behavior[J]. Acta Seismologica Sinica, 2014, 36(1): 106-117
- [5] 刘耀炜, 任宏微, 张磊, 等. 鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 307-318
Liu Y W, Ren H W, Zhang L, et al. Underground fluid anomalies and the precursor mechanisms of the Ludian $M_S 6.5$ earthquake[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(1): 307-318
- [6] 孙小龙, 王俊, 向阳, 等. 基于《中国震例》的地下流体异常特征统计分析[J]. 地震, 2016, 36(4): 120-130
Sun X L, Wang J, Xiang Y, et al. Statistical characteristics of subsurface fluid precursors based on *Earthquake Cases in China*[J]. Earthquake, 2016, 36(4): 120-130
- [7] 胡小静, 付虹, 李涛, 等. 云南普洱大寨井水位同震响应研究及预测意义[J]. 地震研究, 2020, 43(2): 340-347
Hu X J, Fu H, Li T, et al. Study on co-seismic response and prediction significance of groundwater level in the Dazhai well[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(2): 340-347
- [8] 陶志刚, 刘春国, 赵德杨. 2022 年芦山 $M_S 6.1$ 、马尔康 $M_S 6.0$ 地震井水位、水温同震响应特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2022, 43(4): 123-130
Tao Z G, Liu C G, Zhao D Y. The comparative analysis of coseismic response characteristics of water level and water temperature in a well with Sichuan Lushan $M_S 6.1$ earthquake and Maerkang $M_S 6.0$ earthquakes[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2022, 43(4): 123-130
- [9] 张明哲, 王静, 凌燕, 等. 衡水冀 16 井水位观测数据质量分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(4): 136-142
Zhang M Z, Wang J, Ling Y, et al. Quality analysis of water level observation data at Hengshui Ji No.16 well[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2020, 41(4): 136-142
- [10] 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: 124-192
Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. Workbook on technical methods for underground fluid analysis and prediction[M]. Beijing: Seismological Press, 2020: 124-192

- [11] 付虹, 刘丽芳, 王世芹, 等. 地方震及近震地下水同震震后效应研究 [J]. 地震, 2002, 22(4): 55-66
Fu H, Liu L F, Wang S Q, et al. Research on coseismic and post seismic effect of ground water for the local and near earthquake[J]. Earthquake, 2002, 22(4): 55-66
- [12] 刘耀伟, 杨选辉, 刘永铭. 地下流体对苏门答腊 8.7 级地震的响应特征 [C]//中国地震局监测预报司. 2004 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, 2005: 131-258
Liu Y W, Yang X H, Liu Y M. Response characteristics of underground fluids to the Sumatra 8.7 magnitude earthquake[C]//Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration. The 2004 Sumatra 8.7 magnitude earthquake in Indonesia and its impact on mainland China. Beijing: Seismological Press, 2005: 131-258
- [13] 倪昊琦, 张朋, 陈浩, 等. 江苏地下流体对青海玛多 $M_{7.4}$ 地震的同震响应分析 [J]. 地震科学进展, 2023, 53(9): 393-402
Ni H Q, Zhang P, Chen H, et al. Analysis on co-seismic response of underground fluids in Jiangsu related to Qinghai Maduo $M_{7.4}$ earthquake[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(9): 393-402
- [14] 张立, 段胜朝, 李圣. 2021 年漾濞 $M_{6.4}$ 地震在云南地区流体测项的同震变化 [J]. 地震地磁观测与研究, 2021, 42(增刊 1): 125-127
Zhang L, Duan S C, Li S. Coseismic change of fluid in Yunnan region of Yangbi $M_{6.4}$ earthquake in 2021[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2021, 42(S1): 125-127
- [15] 刘凯, 陈其峰, 张军, 等. 2021 年玛多 $M_{7.4}$ 和 2022 年门源 $M_{6.9}$ 地震引起的山东井水位同震响应特征分析 [J]. 内陆地震, 2023, 37(2): 210-216
Liu K, Chen Q F, Zhang J, et al. Coseismic response analysis of well water level in Shandong province caused by 2021 Maduo $M_{7.4}$ and 2022 Menyuan $M_{6.9}$ earthquakes[J]. Inland Earthquake, 2023, 37(2): 210-216
- [16] 方园, 白翔宇, 杨魁, 等. 双王井数字化观测资料前兆及干扰异常分析 [J]. 地震科学进展, 2023, 53(9): 403-408
Fang Y, Bai X Y, Yang K, et al. Analysis of precursors and interference anomalies of digital observation data in Shuangwang well[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(9): 403-408
- [17] 高小其, 许秋龙. 2003 年 2 月 14 日新疆石河子 5.0、5.4 级地震地下流体前兆异常特征的分析 [J]. 内陆地震, 2004, 18(1): 64-71
Gao X Q, Xu Q L. Analysis of the prognostic anomaly characteristics about the underground fluid for Shihezi earthquakes with $M_{5.0}$ and $M_{5.4}$ on Feb. 14, 2003 in Xinjiang[J]. Inland Earthquake, 2004, 18(1): 64-71