

冯琼松, 李琼, 刘东, 等. 缅甸 $M_s7.9$ 地震引起的云南地区水位与水温同震响应分析[J]. 华南地震, 2026, 46(4): 18–26. [FENG Qionsong, LI Qiong, LIU Dong, et al. Analysis of Co-Seismic Responses of Water Level and Water Temperature in Yunnan Region Induced by the Myanmar $M_s7.9$ Earthquake[J]. South China journal of seismology, 2026, 46(4): 18–26]

缅甸 $M_s7.9$ 地震引起的云南地区水位与 水温同震响应分析

冯琼松, 李 琼, 刘 东, 杨 祺

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 地下流体的响应能比较直观地反映地下断层深部流体的变化。2025年3月28日缅甸发生 $M_s7.9$ 地震, 云南井网水位、水温不同形态出现同震异常响应, 水位振荡形态主要表现为阶变型和水震波振荡型两种形态, 水温主要表现为阶变型。从同震响应的分布、时间、幅度等分析各水位、水温的响应特征。研究这次水位、水温同震响应有助于更深认识地震和流体之间的相互作用, 对以后中强地震的发生具有一定的指示意义。

关键词: 缅甸 $M_s7.9$ 地震; 云南地区; 水位水温; 同震异常响应

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2026)04-0018-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2026.04.03

Analysis of Co-Seismic Responses of Water Level and Water Temperature in Yunnan Region Induced by the Myanmar $M_s7.9$ Earthquake

FENG Qionsong, LI Qiong, LIU Dong, YANG Qi

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

Abstract: The response of subsurface fluids can more intuitively reflect changes in deep-seated fluids along underground faults. On March 28, 2025, an $M_s7.9$ earthquake occurred in Myanmar, triggering co-seismic anomalous responses in various forms of water level and water temperature within the Yunnan well network. The water level oscillations primarily manifested as step-like changes and seismic wave oscillations, while the water temperature mainly exhibited step-like variations. This paper analyzes the response characteristics of water level and water temperature in terms of distribution, timing, patterns, and amplitude of the co-seismic responses. Studying these co-seismic responses of water level and water temperature contributes to a deeper understanding of the interaction between earthquakes and fluids, providing certain indicative significance for the occurrence of moderate to strong earthquakes in the future.

Keywords: Myanmar $M_s7.9$ earthquake; Yunnan; Water level and water temperature; Co-seismic anomalous responses

收稿日期: 2025-09-10

基金项目: 云南省地震局科技专项(2024X04)

作者简介: 冯琼松(1976-), 女, 高级工程师, 主要从事地下流体监测与研究。

E-mail: 779773296@qq.com

0 引言

据中国地震台网测定 2025 年 3 月 28 日 14 时 20 分 56 秒缅甸发生 $M_s7.9$ 地震。云南震感强烈,同时水位和水温不同形态出现明显同震异常响应。经分析井网水位和水温资料,发现全省水位测项均记录到同震异常变化,异常形态为阶变型和水震波振荡型,阶变型:水位在地震后瞬间发生突变并保持稳定;水震波振荡型:水位随地震波呈现周期性波动后逐渐恢复。有水位响应的井不一定有水温响应,但出现水温同震响应的井都出现了水位同震响应。

近几十年来,许多研究者一直认为水位和水温是地震前兆监测和同震响应观测中最为显著的地震地下流体监测指标^[2-3],此次缅甸的同震响应是史上罕见的。为更好地监测和提高井水位、水温同震响应认识水平及云南地区地震活动性与观测井的同震变化情况,本文结合“十五”数据库观测的同井水位和水温观测资料,采用“一震多井”的研究方式,以地下流体的主要观测项水位和水温为研究对象,进一步分析缅甸 $M_s7.9$ 地震引起的井水位和水温在地震孕育和发生过程中的动态变化情况,并在此基础上对水位和水温同震响应机理进行了探讨,从而积累震例资料,对未来中短临地震预测具有借鉴意义。

1 云南流体区域及与缅甸交界基本情况

在云南前兆台网“十五”国家数据库地下流体水位、水温观测中,观测仪器主要型号有 LN-3A 型和 SWY-II 型数字化水位水温观测仪,观测数据连续可靠,动态变化背景相对稳定,本文选用“十五”国家数据库正常观测的同井水位和水温资料数据为基础作为研究对象。云南水位和水温主要是州市县局占绝大部分,且分布广泛,观测范围涉及滇西—滇西北及滇南地区的主要地震活动断裂带等曾有中强地震背景的重点区域。

缅甸位于云南省西南方向,共享横断山脉,怒江、澜沧江等河流流经两地,地质活动频繁,属于地震带。缅甸与云南的边界线长约 2000 km,涉及怒江、保山、德宏、临沧、普洱、西双版纳 6 个州市,与云南交界最近的德宏州瑞丽市仅 300 多 km。历史上,云南边境多次因缅甸强震受损,缅甸地震的区域应力场变化可能会影响云南地区活动性,调整地壳应力,诱发云南本地地震应力传递,从而引发小规模余震,如果缅甸发生强震,且距离云南较近,那么触发云南地震的可能性会更大。所以 3 月 28 日缅甸 $M_s7.9$ 大地震引起我们极大的关注。图 1 为缅甸地震时云南同井网水位和水温观测同震响应井分布图。

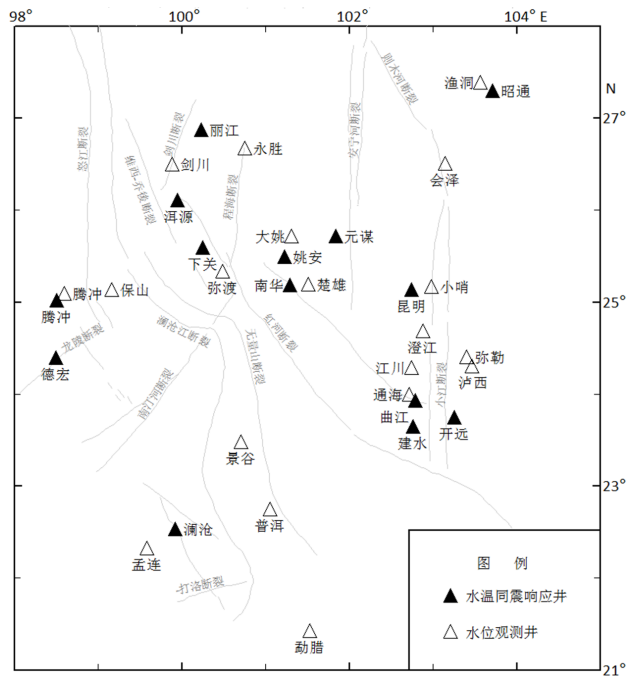


图 1 缅甸 $M_s7.9$ 地震时云南水位和水温同震响应井分布图

Fig.1 Distribution map of coseismic response wells for water level and water temperature in Yunnan during the Myanmar $M_s7.9$ earthquake

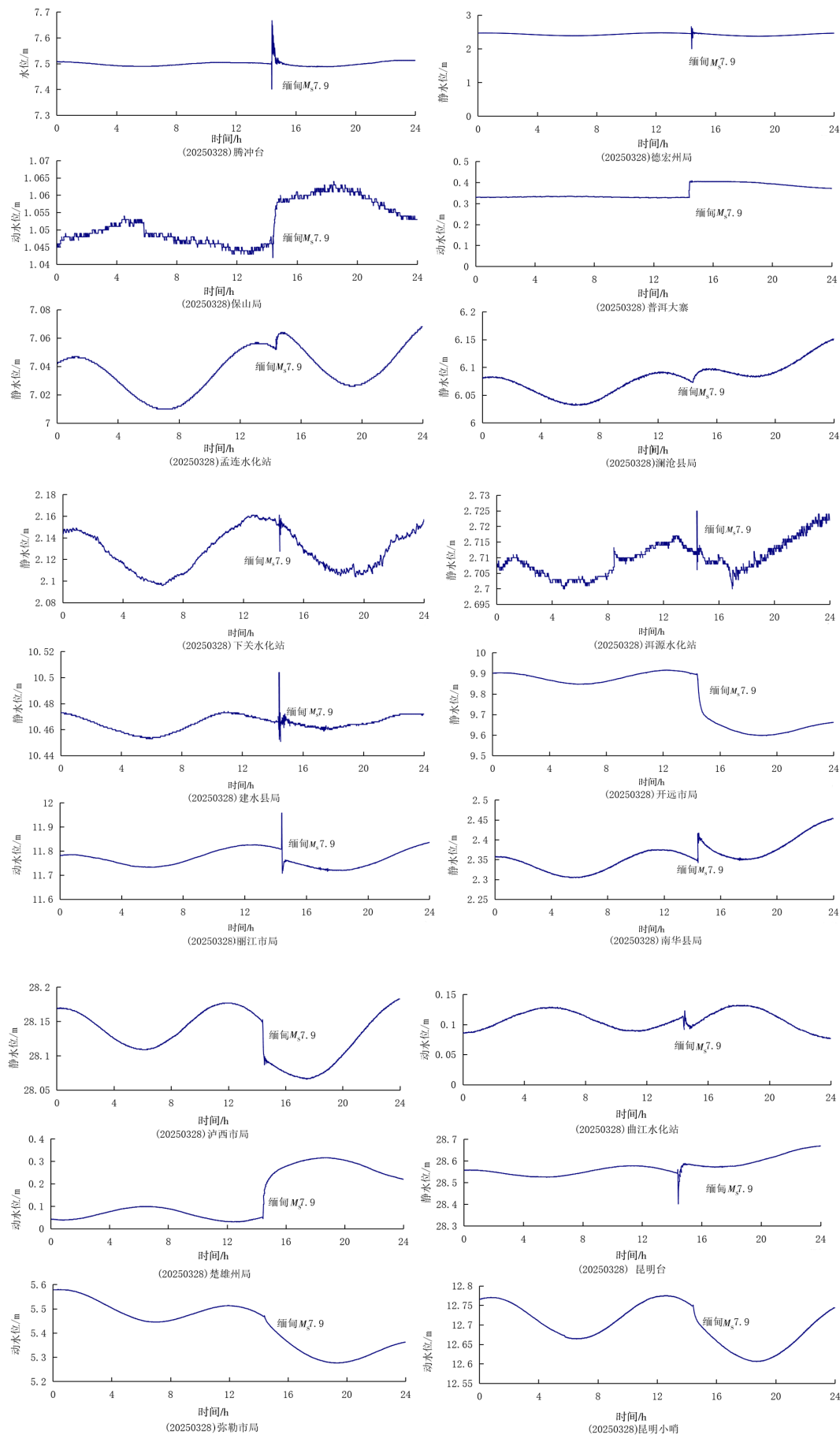
2 水位和水温同震响应特征及分析

2025 年 3 月 28 日 14 时 20 分 56 秒缅甸 $M_s7.9$ 地震，震源深度 30 km，属浅源地震，能量释放高，破坏力极强，引起地震破裂长度约 300 km，是二十世纪以来缅甸最大的一次地震。地震后笔者通过对云南省地球物理台网“十五”数据库水位和水温观测项，选择正常运行且固体潮汐清晰，水

位和水温仪同井观测的 24 套采样率是分钟值的观测资料进行分析，结果发现云南水位原始观测数据曲线都清晰记录到同震响应，水位观测响应能力几乎占总水位观测的 100%，而水温观测到的同震响应只占总观测井的 58%，可以看出在相同震级同井的情况下，水位响应的能力远比水温响应大，这些特征反映了云南省内井水位对边境强震的记震能力大于井水温的记震能力。云南水位、水温同震响应变化特征见表 1、图 2 和图 3。

表 1 缅甸 $M_s7.9$ 地震引起云南水位、水温同震响应特征
Table 1 Coseismic response characteristics of water level and temperature in Yunnan following the Myanmar $M_s7.9$ earthquake

井点名称	井震距/ km	水位-响应 形态	水位-变化幅度/ m	水位-持续时间/ min	水温-响应 形态	水温-变化幅度/ m	水温-持续时间/ min
德宏法怕	350	水震波	0.250	51.6	下降	0.008	76.2
腾冲台	400	阶变型	0.624	55.2	下降	0.064	195.6
孟连水化站	500	阶变型	0.012	11.3	未响应	未响应	未响应
保山市局	600	阶变型	0.017	15.0	未响应	未响应	未响应
澜沧县局	600	阶变型	0.019	7.8	上升	0.006	120.6
下关水化站	650	水震波	0.010	7.2	上升	0.047	106.2
普洱大寨	700	阶变型	0.080	9.0	上升	0.009	104.4
洱源水化站	700	水震波	0.018	10.2	上升	0.044	134.4
建水县局	700	水震波	0.052	18.6	上升	0.009	79.2
开远市局	700	阶变型	0.213	15.6	上升	0.005	63
丽江市局	700	阶变型	0.250	9.0	下降	0.012	168
曲江水化站	700	阶变型	0.031	22.2	下降	0.032	67.2
永胜县局	700	阶变型	0.033	6.0	未响应	未响应	未响应
昆明台	800	阶变型	0.186	22.2	下降	0.031	181.8
昆明小哨	800	阶变型	0.110	20.4	未响应	未响应	未响应
弥勒市局	800	阶变型	0.151	7.8	未响应	未响应	未响应
通海高大	900	水震波	0.006	5.4	未响应	未响应	未响应
南华县级	900	阶变型	0.032	7.8	下降	0.128	181.2
泸西县局	900	阶变型	0.061	12.0	未响应	未响应	未响应
楚雄州局	900	阶变型	0.238	16.2	未响应	未响应	未响应
大姚县级	900	阶变型	0.110	13.2	未响应	未响应	未响应
姚安县局	900	水震波	0.032	4.2	下降	0.011	62.4
昭通渔洞	900	阶变型	0.135	6.6	未响应	未响应	未响应
昭通 sk3 井	900	水震波	0.293	13.8	上升	0.078	64.8



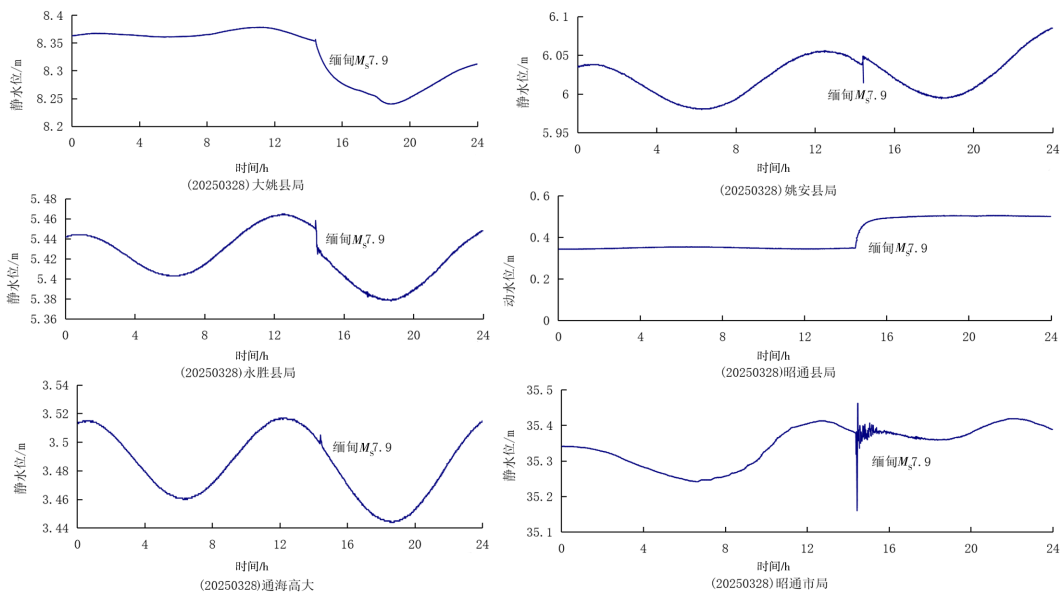
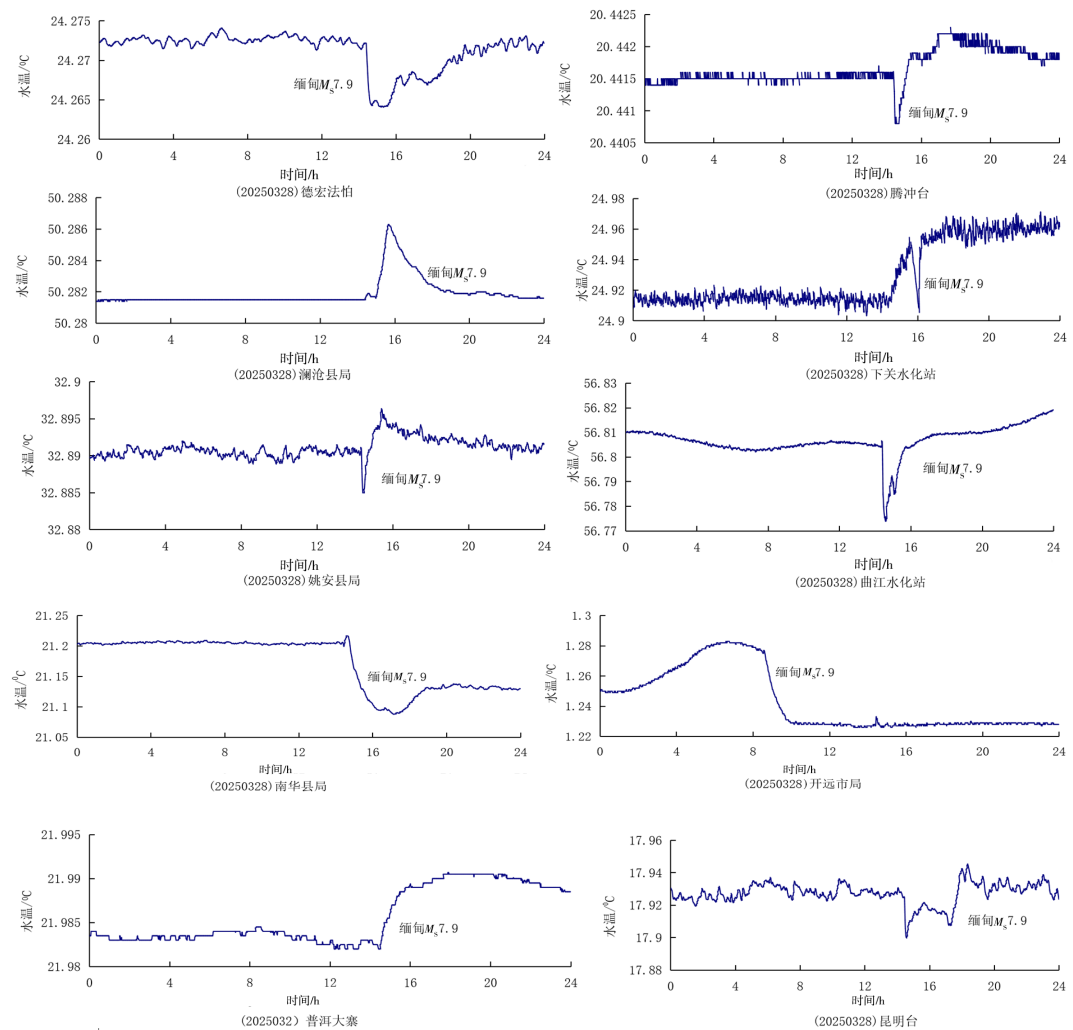
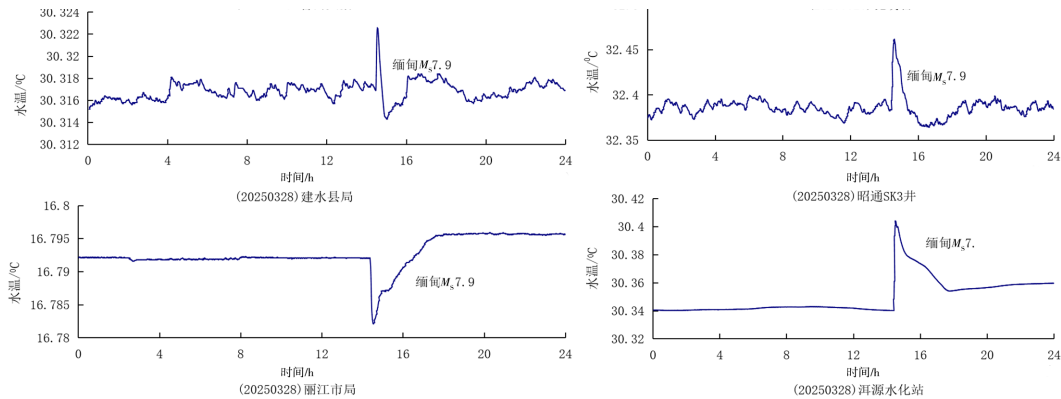


图 2 缅甸 $M_s7.9$ 地震引起云南水位曲线同震响应变化

Fig.2 Variations in coseismic responses of water level curves in Yunnan caused by the Myanmar $M_s7.9$ earthquake



图3 缅甸 $M_s7.9$ 地震引起云南水温曲线同震响应变化Fig.3 Variations in coseismic responses of water temperature curves in Yunnan caused by the Myanmar $M_s7.9$ earthquake

2.1 流体同震响应分布

云南断裂十分发育,主要活动断裂超过40条,境内主要有小江、通海—石屏、中甸—大理、澜沧—耿马、马边—大关、南华—楚雄、腾冲—龙陵、思茅—普洱等地震带。“十五”数据库在线观测流体仪主要沿地震带布设,监测范围涉及滇西—滇西北及滇南地区的主要活动断裂带等曾有中强地震背景的重点区域,能较好地监测云南境内主要断裂带地下活动情况。

缅甸位于印度洋板块和亚欧板块交界,云南位于亚欧板块内部。如果印度洋板块挤压亚欧板块导致印度洋板块和亚欧板块交界的缅甸发生大地震时,地震触发的库仑力释放会导致部分地壳应力逃逸进入中国云南境内的地壳断裂带中,继而引起云南境内地震断裂带活动做出调整,从而引发强烈活动。所以此次缅甸 $M_s7.9$ 大地震时云南布设的流体观测井明显记录到了同震响应。

2.2 水位和水温同震响应时间

3月28日14时20分56秒缅甸发生 $M_s7.9$ 地震,云南水位、水温不同形态出现同震响应,由于地震震级大,有响应的水位、水温观测项响应特征表现相当明显,表1按地震震中距从近到远排列,从表1、图2和图3可明显看出水位、水温同震响应持续时间不尽相同,本文将同震响应持续时间定义为从响应开始到恢复至背景值的时间。

一般井水位、水温同震响应时间变化有两种主要类型,一类是发震时水位、水温响应快慢,从各井流体观测数据对本次地震的响应时间进行统计,水位、水温响应时间在地震发生后介于1~4 min之间占比达100%(图2和图3),云南水位、水温均在

4 min内发生同震响应,分析对比所有井水位、水温观测数据对发震时刻的响应时间,发现此次地震水位、水温数据记录响应时间快慢跟震中距没有太大联系,不管最近震中距是350 km,还是最远震中距900 km,几乎同时记录到异常响应。另一类是水位、水温随地震波振荡后短时间内发生明显上升、下降、振荡的持续变化,要经过一段时间才能恢复到之前的值。对比同井观测中水位和水温同震响应时间,发现有水温响应的观测井中水温和水位几乎都是同时响应,响应时间滞后都在1~4 min范围内,这跟以往的一些地震中专家论述水温同震响应开始时间都滞后水位同震响应时间5~10 min的观点不太一致,但水温响应结束时间都滞后水位响应结束时间,这与前人的研究结果是一致的^[1-2]。

由表1可知,此次地震水位响应持续时间介于4~55 min之间,水温响应持续时间介于62~195 min之间,不管最近震中距是350 km的德宏瑞丽法帕同震响应时间水位是51.6 min,水温是76.2 min,还是响应时间最长的水位55 min、水温195.6 min距离震中距400 km的腾冲台,响应时间跟震中距没有明显的规律。瑞丽市与腾冲地震台均位于滇西断裂带复杂体系中,两者并非完全处于同一条单一断裂线上,但在地质构造上属于同一断裂系统;同理昭通市局sk3井水位同震响应时间是13.8 min,水温同震响应时间是64.8 min,昭通县局渔洞水位同震响应时间是6.6 min,而水温无响应,它们距离地震震中距均是900 km,昭通市局sk3井与昭通渔洞井同属昭通地震带,两者不在同一条单一断裂线上,但在地质构造上属于同一断裂系统。从水位、水温同震响应时间持续变化的特征,分析对比其它井水位、水温响应时间,发现此次水位和水温同震响应时间长短、快慢跟是否在同一条大断裂带

上不呈现正负相关性,与井震中距没有明显的单一递增递减的关系,震中距越远,响应时间不一定越迟或越短,它们之间无明显的必然联系,这也跟以往的一些地震中专家论述响应时间不同是因为井震距远近的观点不太一致^[4-6]。

根据缅甸 $M_s7.9$ 地震记录波形,主要波形是体波和面波,它们传播特征是相位延迟,而地震波引起的地壳介质应变是同震响应的物理本质和驱动力,地震波的周期决定了这一驱动力的作用效率和放大程度,两者共同作用,决定了某一口井对某一次地震的水位和水温响应能力的强弱。面波主导持续波动,井水位和水温的同震响应能力在一定程度跟地震波引起的地壳介质密度变化与地震波周期等密切相关,与含水层水力扩散和固体骨架被快速压缩时间相关。

2.3 水位和水温同震响应幅度

水位和水温同震响应幅度是指在地震发生时,水位和水温对地震波动态响应的强度或变化量,反应的是此次地震对水位和水温的剧烈程度。从表1看出此次缅甸地震的地震波引起云南水位异常幅度范围为6~624 mm,响应幅度最大是腾冲台水位观测624 mm,震中距为400 km,而震中距最远为900 km的昭通市局sk3井水位观测响应幅度为293 mm,再分析德宏州法怕水位响应幅度为250 mm,震中距为350 km;水温异常幅度范围为0.005~0.128 °C,响应幅度最大是南华县局水温观测0.128 °C,震中距为900 km,而震中距为350 km德宏法怕井水温观测响应幅度为0.008 °C。同样分析其它观测井水位和水温同震响应变化幅度与震中距的关系。结果表明,云南观测井水位和水温同震响应幅度对缅甸地震震中距的远近没有明显相关性。

根据云南复杂的地质构成和多断裂带以及专家们对以往大地震的分析研究结果,认为造成水位和水温同震响应幅度相差较大原因可能是地震波的触发,还有井孔所处地质构造不同,地震波产生的动态应变改变了地壳介质的应力状态,导致孔隙压力变化和热动力学平衡被打破。地震波通常会引起含水层的瞬时压缩和拉伸,当地震波压缩和拉伸含水层介质时,促使深部较热的水与浅部较冷的水发生混合,地震波也会使流体和固体骨架被快速压缩和拉伸,从而导致井孔内水位和水温的突然变化。断层带附近的水位和水温观测对地震能量的加载更为敏感,具有更强的同震响应能力,深井和浅井的响

应幅度也不同等原因,这种复杂关系使得水位和水温地震响应呈现有无敏感区,而非简单的随距离衰减^[7-9]。

2.4 井水位同震响应明显而井水温无同震变化

缅甸地震时,云南部分观测井水位记录到明显的同震响应,而水温无同震变化。水位响应是岩石骨架变形直接导致孔隙水压力变化的结果,响应速度非常敏感和快速,它们与地震波、压力波与流体运动的响应差异有关,地震波(尤其是P波)传播时,会瞬间改变含水层的应力状态,导致孔隙压力变化,这种压力波动可通过弹性介质快速传递至井孔,直接引起水位的瞬时振荡或阶变变化。而水温响应是一个间接的、依赖于流体运移和热交换的热力学过程,通常需要热量的传递或地震触发的不同温度含水层的水体混合,但这一过程需要流体持续流动,响应时间远滞后于压力波传递;另外井-含水层系统的水文地质特征影响,如封闭性含水层和渗透性含水层差异都会导致水温变化受限^[2],例如图4给出了缅甸地震时永胜县局井水位响应而水温无变化记录曲线图,永胜县局井震中距700 km,水位呈阶变型响应(变化幅度0.033 m,持续时间6.0 min),而水温曲线无明显波动(变化幅度<0.001 °C),进一步验证水温响应的滞后性与条件依赖性。

3 云南水位和水温同震响应动态特征及其机理分析

2025年3月28日缅甸 $M_s7.9$ 地震,震源深度仅30 km,属于浅源地震,能量释放高,破坏力极强,云南观测井水位和水温同震响应有显著动态特征:①快速触发,地震波到达后,几乎所有水位和水温在震后1~4 min内出现明显震荡,与长周期面波远距离传播主频同步;②振荡型波动,水位和水温呈现准正弦波动,周期约20~30 min,与地震面波周期一致,持续时间达数百秒和数十分钟(如云南腾冲承压井记录到持续55 min和195 min的波动);③阶变式变化,部分高渗透性裂隙含水层出现水位永久性抬升(如楚雄、保山等井抬升约0.5 m),可能与渗透率不可逆改变相关;④近场强响应,距震中400 km内的德宏、腾冲等地承压井水位和水温波动幅度最大(达0.6 m)。

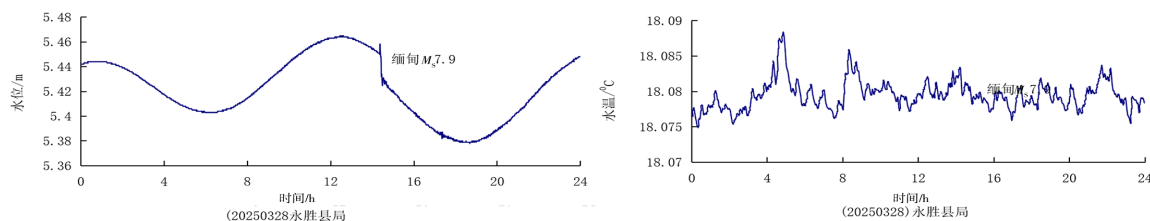


图4 永胜县局水位响应水温无变化记录曲线图

Fig.4 Recorded curves of water level response with no change in water temperature at the Yongsheng County Station

对于缅甸地震引起云南水位和水温同震响应变化作用机理,目前还没有统一论。付虹等通过研究云南水位对印尼巨大地震同震响应,认为大震引起水位特征可能是地震波的作用改变了构造单元的应力所致,并与井点的地质构造部位有关,在区域应力场和地震波传播的附加应力场的综合作用下,引起井孔含水层的震后应力调整,因此出现了水位和水温上升或者下降的变化^[3]。

根据水位同震响应动态特征及其机理与地震波传播特性、含水层水文地质条件及孔隙弹性耦合效应密切相关,结合观测数据和理论模型进行机理分析,地震波引起孔隙压力变化与含水层体积应变之间的关系,通过 Biot 方程表示:

$$\Delta p = -BK_u \epsilon_v \quad (1)$$

$$\Delta h = \Delta p / \rho g \quad (2)$$

式(1)、(2)中, B 为孔隙压力系数(0~1,表征流体饱和和多孔介质的压缩性,砂岩约0.6~0.8), K_u 为不排水体积模量, ϵ_v 为地震波引起的体积应变($\epsilon_v \sim 10^{-6}$),当 $\epsilon_v < 0$ 时,表示压缩,当 $\epsilon_v > 0$ 时,表示膨胀, ρ 为水密度, g 为重力加速度。如:若 $\epsilon_v = 3 \times 10^{-6}$, $B = 0.7$, $K_u \approx 2 \text{ GPa}$,则理论水位变化 $\Delta h \approx 0.42 \text{ m}$,与云南水位观测值吻合。

水温响应(ΔT)是一个更复杂的热力学过程,要完整解释一个井孔的同震水温响应,必须引入额外的热物理学机制,比如:绝热压缩/膨胀、对流与混合、热弹性效应等机制,这个复杂的过程待后续研究^[3-4]。

综上所述可知,云南地质构造复杂,受多个断裂带、多个承压含水层与潜水层类型控制,如龙陵—瑞丽断裂带等共轭断裂受地震应力加载,增强局部渗透性,导致腾冲台水位和水温明显异常。上述这些作用机理分析在一定程度上能够解释缅甸 $M_s7.9$ 地震引起云南水位和水温同震响应变化形态的形成原因。

4 讨论与结论

通过云南井网水位和水温观测数据对缅甸 $M_s7.9$ 地震同震响应特征进行分析,得到以下几点认识:

1)云南省“十五”数据库流体观测井水位观测全部记录到同震异常响应,水温对强震的记震能力小于水位的记震能力,范围涉及云南主要活动断裂带等曾有中强地震背景的重点区域。

2)缅甸 $M_s7.9$ 地震云南震感强烈,引起云南井网水温、水位观测同震响应特征是快速振荡,可能与面波的传播有关,尤其是长周期面波在远距离传播中衰减较慢,导致对远距离结构影响显著,其变化特征可以用孔隙弹性耦合效应来进行解释。

3)同井水位和水温同震响应时间和幅度与地震震中距的远近没有明显关系,同震响应幅度相关性也不明显,同震响应时间滞后都在1~4 min范围内,水温响应结束时间都滞后水位响应结束时间。

4)有水温同震响应的井都出现了水位同震响应,部分观测井水温没有记录到同震响应,这可能与井含水层、水温仪器探头安装位置、井点地质构造等条件有关,有待大量的近场大地震事件来分析其原因。

5)不同井水位、水温的同震响应最大振幅、持续时间相差很大,水位多是振荡和阶变特征,以阶变为主,水温主要表现为阶变型的变化形态。不同的观测井同震响应表现出一定的差异性,这主要与地震波特性、含水层、井孔深度、井点地质构造等多因素有关。如井孔深的井对应的是承压层,响应幅度大,持续时间长,可能无法完全恢复至震前状态;浅井对应的是潜水层,响应幅度小,持续时间短,能较快恢复至震前动态^[1-3]。

6)本文研究的结论建立在单次地震事件(缅甸 $M_s7.9$ 地震)的分析基础上,其震源机制等只是基于云南地区复杂的地质构造和水文地质环境,如活跃的断裂带(红河断裂、小江断裂等)。因此本文所总结的响应模式(如响应时间与震中距的关系等)只能是为后续对比研究提供了一定的基础资料。鉴于上述的局限性,是否能直接适用于其他震级或不同区域不同构造背景下的地震,仍需多地震事件对比分析和深入理解不同地质构造在流体响应中的核心作用,从而提炼出更具普适性的流体响应规律。

参考文献

- [1] 张立,罗睿洁,高文斐,等. 云南地下流体对尼泊尔8.1级地震的同震响应特征分析[J]. 地震研究,2016,39(1):31-36.
- [2] 刘耀炜,高小其,杨选辉. 2015年尼泊尔 $M_s8.1$ 地震引起的井水位与井水温同震效应及其相关性分析张彬[J]. 地震学报,2015,32(1):59-69.
- [3] 付虹,邬成栋,刘强,等. 印尼巨大地震引起的云南水位异常记录及其意义[J]. 地震地质,2017,29(4):873-882.
- [4] 李利波,姚休义,李智蓉,等. 云南地区水位、水温对尼泊尔 $M_s8.1$ 地震的响应特征研究[J]. 地震工程学报,2018,40(2):155-165.
- [5] 莫佩婵,阎春恒,李蕾,等. 广西桂平西山井水位同震特征和机理初探[J]. 地震学报,2018,34(3):525-533.
- [6] 顾申宜,李志雄,张慧. 海南地区五口井水位对汶川地震的同震响应及其频谱分析[J]. 震灾防御技术,2021,33(1):36-43.
- [7] 黄辅琼,迟恭财,徐桂明. 大陆地下流体对南投7.6级地震的响应研究[J]. 地震,2018,20(S1):119-125.
- [8] 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,2016,36(1):106-117.
- [9] 廖丽霞,王玫玲,吴绍祖. 福建省流体台网井水位的同震效应及其地震预测意义[J]. 地震工程学报,2022,31(4):432-441.