

王利亚, 李春富, 郭晓辉. 云南石林井水位同震响应特征分析[J]. 华南地震, 2025, 45(3): 51–58. [WANG Liya, LI Chunfu, GUO Xiaohui. Coseismic Response Characteristics of Water Level of Shilin Well in Yunnan Province[J]. South China journal of seismology, 2025, 45(3): 51–58]

## 云南石林井水位同震响应特征分析

王利亚<sup>1</sup>, 李春富<sup>2</sup>, 郭晓辉<sup>1</sup>

(1. 昆明市晋宁区防震减灾局, 昆明 650600; 2. 昆明市石林县防震减灾局, 云南 石林 652200)

**摘要:** 统计近6年来云南石林井水位记录到的同震响应情况, 结合实际案例对石林观测井进行同震响应特征分析及机理研究, 初步探讨得出远大地震时, 表现为水位快速高频振荡、且可多次振荡, 逐步衰减, 再恢复正常, 近距离大地震时, 表现为水位出现阶升、阶降变化, 两者持续时间及振幅均与震级、井震距有关。结果表明石林井水位的同震响应震幅的变化与井震距和震级有相关性, 但不完全是线性的关系。同震响应时间都晚于地震发生时间, 有滞后性, 震级、井震距与滞后时间三者的关系正相关, 震级越大, 距离越远, 滞后时间越长, 震级越小, 距离越近, 响应时间越短。

**关键词:** 石林观测井; 水位; 同震响应; 特征分析

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)03-0051-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.03.07

## Coseismic Response Characteristics of Water Level of Shilin Well in Yunnan Province

WANG Liya<sup>1</sup>, LI Chunfu<sup>2</sup>, GUO Xiaohui<sup>1</sup>

(1. Jinning District Earthquake Prevention and Disaster Reduction Bureau of Kunming, Kunming 650600, China;  
2. Shilin County Earthquake Prevention and Disaster Reduction Bureau of Kunming, Shilin 652200, China)

**Abstract:** Based on the coseismic response recorded by the water level of Shilin well in Yunnan Province in the past six years, this paper analyzed the characteristics and mechanism of the coseismic response of Shilin observation well in combination with actual cases. It was preliminarily discussed that the water level showed rapid high-frequency oscillation and multiple oscillations during distant major earthquakes, gradually attenuated, and then returned to normal. In short-distance major earthquakes, the water level showed steps up and down. The duration and amplitude of both were related to the magnitude and well-to-epicenter distance. The results show that the coseismic response amplitude of water level of Shilin well is correlated with well-to-epicenter distance and magnitude, but it is not completely linear. The coseismic response time is later than the time when the earthquake occurs, and there is a lag. The relationship between magnitude, well-to-epicenter distance, and lag time is positively correlated. The larger the magnitude, the farther the distance, the longer the lag time; the smaller the magnitude, the closer the distance, the shorter the response time.

**Keywords:** Shilin observation well; Water level; Coseismic response; Characteristic analysis

收稿日期: 2025-03-17

作者简介: 王利亚(1976-), 女, 高级工程师, 主要从事地震监测预报及地震灾害预防等工作。

E-mail: 416648151@qq.com

## 0 引言

地下水在震后有同震响应已经是不可置疑的事实,地下水具有普遍性、流动性和不可压缩性的特点,当井—含水层系统受到力的作用时,往往会引起地下水的动态变化<sup>[1]</sup>,井水位的同震响应指地震引起的井水位振荡或阶变现象,其动态变化能够较直接地反映地震作用于井—含水层系统的过程,对其进行科学研究是揭示地壳介质对应力—应变过程响应直接、有效的手段<sup>[2]</sup>。早期研究认为水震图以浅震、远震为主,“一井多震”常具有明显的方向性,井孔的记震能力取决于井—含水层系统的固有频率、水流调节能力与观测仪器的记录能力等多种条件,水位振荡的幅度同震级、震中距等相关<sup>[3]</sup>。地震时观测到的变化意味着地震引起的应力影响了水井含水层系统。地震波引起的静应力场变化和动态应力二者都有可能<sup>[4]</sup>。一般认为,远场地震的井水位同震响应主要是由于地震波中的瑞利波作用引起井—含水层渗透性的改变,而近场地震的井水位同震响应变化与静态应力有关,并且对于不同地震其同震响应形态不同<sup>[5]</sup>。地震波引起的同震响应基本以水位振荡—恢复的形态出现,水位振荡的幅度与震中距、震级有着一定的量化关系,机理比较复杂,通常研究解释主要有三种看法,一是气体逸出说,二是热弥散,三是冷水下渗,各种观点均具有合理性,也能解释一定的观测现象,但哪种机理更具普适性和合理性,有待于更进一步的研究<sup>[6]</sup>。本文对石林地下水观测井进行分析,探讨石林井水位的记震能力,分析石林井的同震响应特征,试探索不同观测井水位的同震响应变化机理。

## 1 云南石林井基本概况

石林县位于小江断裂带附近,县城距离小江断裂仅约 11 km,石林观测井位于石林县城映月街石林县地震预防中心内,场地原为庄稼地,属于缓坡地形。观测井 2008 年建设完成,井口位置位于东经 103°16'03",北纬 24°45'24",井口高程 1706.56 m,水位仪探头置于井下 35 m,年均值约 27.44 m,年平均气温 15.6℃,最低气温 0.8℃,降水量 954.2 mm。井深 401.35 m,0~284 m 采用水泥封闭,284~401.35 m 采用筛管,观测地层为二叠系阳兴

组含水层,属岩溶裂隙间承压水,观测井位于石垭口附近,距石垭口断层约 3.4 km,属于石垭口断层影响带。

## 2 资料选取和分析方法

本文选取石林观测井 2017—2022 年的水位观测数据进行数据整理,石林观测井附近 150 km 内的 4.0~5.9 级地震共 9 个,云南省(20°~30°N, 97°~105°E)范围内  $M \geq 5.0$  地震共 78 个,全国范围内  $M \geq 6.0$  级共 32 个,全球  $M \geq 7.0$  级共 76 个,有同震响应地震的震级,井震距,响应振幅、滞后时间及同震响应形态见表 1。

## 3 同震响应特征分析

对于石林观测井附近 150 km 内的 4.0~5.9 级地震没有出现同震响应,在云南省内发生的 5.5 及以上地震只有 1 次 6 级地震有同震响应,全国范围内的 6.0 及以上地震有 4 次有同震响应,占 12.5%,全球 7.0 级以上地震有 12 次有同震响应,占 15.8%。

研究发现,石林井有同震响应的最小地震为 2021 年 5 月 21 日云南漾濞发生的 6.6 级地震,距离石林井约 345 km,特征为水位下降如图 2。距离石林井小于 1000 km 的有 3 次,为云南漾濞发生 6.6 级地震、2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7 级地震、2022 年 9 月 5 日四川泸定 6.8 级地震,水位特征反应分别为下降,上升、先降后升,1000 km 以上有 11 次,水位特征反应均为震荡型,并且有多次震荡,逐步衰减的过程如图 3。由于全国范围内 7 级以上地震较少,但全球范围内,同震响应最小震级为 2018 年 01 月 10 日洪都拉斯北部海域 7.6 级地震,最大震级为 2017 年 09 月 08 日墨西哥沿岸近海 8.2 级地震。

对石林井响应震幅进行统计,发现振幅幅度变化介于 1~12.2 cm 之间,振幅大于 10 cm 的分别为 11.36 cm、11.63 cm、12.2 cm,所对应的震级分别为  $M_s 7.4$ 、 $M_s 8.1$ 、 $M_s 8.0$ ,所对应的井震距分别为 1200 km、8300 km、8900 km,振幅最小的三次分别为 1.0201 cm、1.3701 cm、1.41 cm,所对应的震级分别为  $M_s 7$ 、 $M_s 7.8$ 、 $M_s 6.6$ ,所对应的井震距分别为 950 km、5700 km、345 km,可以看出石林井同震响应振幅幅度不完全受控于震级、井震距,如图 4。

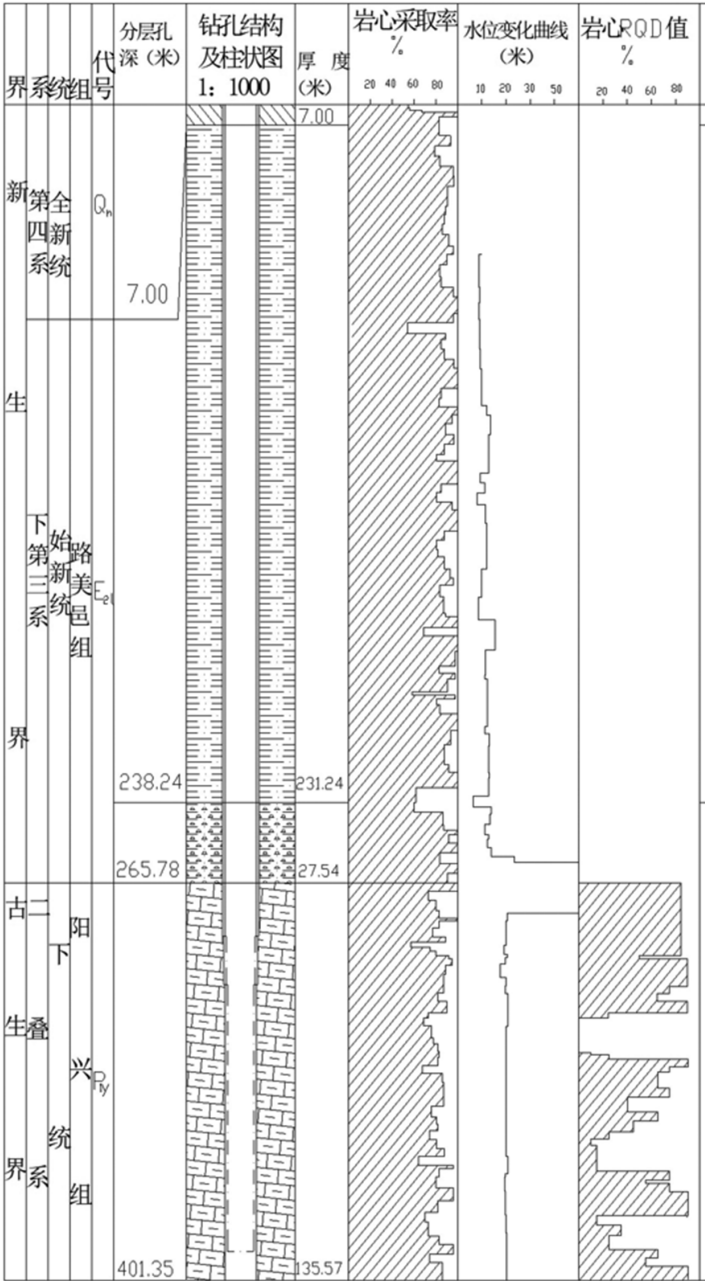


图1 石林观测井井孔情况

Fig.1 Borehole conditions of the Shilin observation well

表1 石林观测井2017—2022年的水位同震响应观测数据

| Table 1 Observation data of coseismic response of water level recorded by Shilin observation well from 2017 to 2022 |            |           |                   |         |      |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|-------------------|---------|------|----------|
| 震级                                                                                                                  | 日期/年-月-日   | 地点        | 震级震中与观测井<br>距离/km | 振幅/(cm) | 特征   | 滞后时间/(s) |
| 6.6                                                                                                                 | 2021-05-21 | 漾濞        | 345               | 1.41    | 下降   | 145      |
| 6.8                                                                                                                 | 2022-09-05 | 泸定        | 430               | 4.23    | 先降后升 | 42       |
| 7.0                                                                                                                 | 2017-08-08 | 四川阿坝州九寨沟县 | 950               | 1.0201  | 上升   | 193      |
| 7.4                                                                                                                 | 2021-05-22 | 青海果洛州玛多县  | 1200              | 11.36   | 震荡   | 228      |
| 7.6                                                                                                                 | 2018-01-10 | 洪都拉斯北部海域  | 15 200            | 1.77    | 震荡   | 2311     |
| 7.8                                                                                                                 | 2017-11-13 | 伊拉克       | 5700              | 1.3701  | 震荡   | 867      |

(转下表)

( 接表1 )

| 震级  | 日期/年-月-日   | 地点          | 震级震中与观测井<br>距离/km | 振幅/(cm) | 特征 | 滞后时间/(s) |
|-----|------------|-------------|-------------------|---------|----|----------|
| 7.8 | 2017-07-18 | 科曼多尔群岛地区    | 6000              | 5.0899  | 震荡 | 947      |
| 7.8 | 2023-02-06 | 土耳其         | 6400              | 2.4198  | 震荡 | 1150     |
| 7.8 | 2023-02-06 | 土耳其         | 6400              | 5.66    | 震荡 | 1163     |
| 7.8 | 2019-05-26 | 秘鲁北部        | 17 900            | 3.4901  | 震荡 | 2868     |
| 7.9 | 2017-01-22 | 所罗门群岛       | 7500              | 1.87    | 震荡 | 855      |
| 8.0 | 2018-01-23 | 阿拉斯加湾       | 8900              | 12.2    | 震荡 | 1219     |
| 8.1 | 2018-08-19 | 斐济群岛地区      | 9800              | 4.02    | 震荡 | 1223     |
| 8.1 | 2021-07-29 | 美国阿拉斯加州以南海域 | 8300              | 11.63   | 震荡 | 1274     |
| 8.2 | 2017-09-08 | 墨西哥沿岸近海     | 15 300            | 9.64    | 震荡 | 2145     |

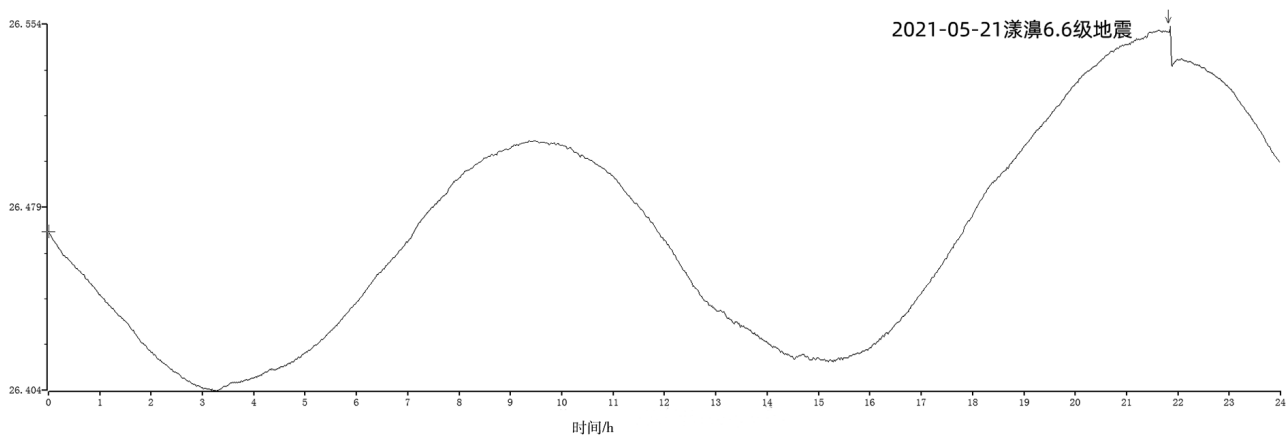


图2 漾濞6.6级地震水位分钟值  
Fig.2 Minute value of water level during the Yangbi M6.6 earthquake

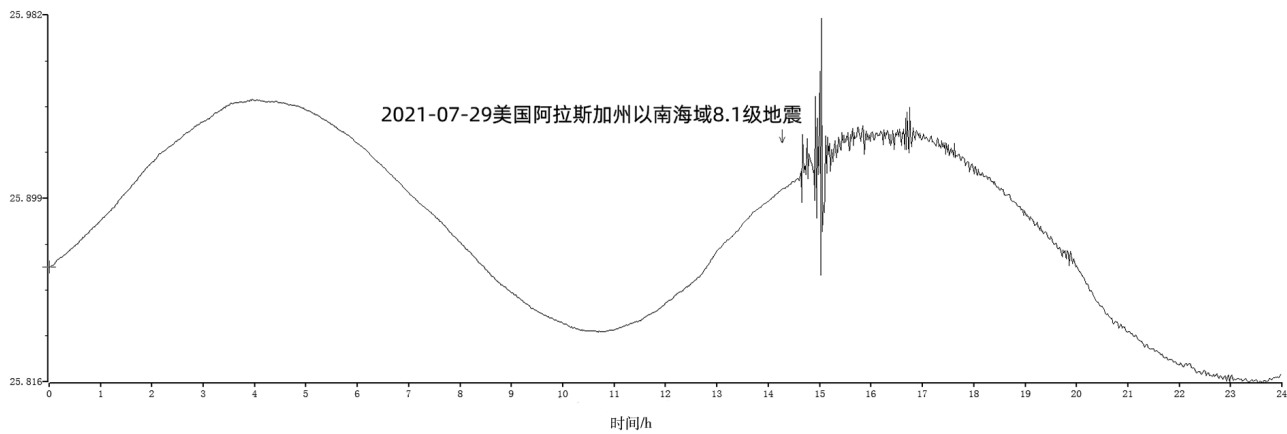


图3 美国阿拉斯加州以南海域8.1级地震水位分钟值  
Fig.3 Minute value of water level during the M8.1 earthquake in the waters south of Alaska, USA

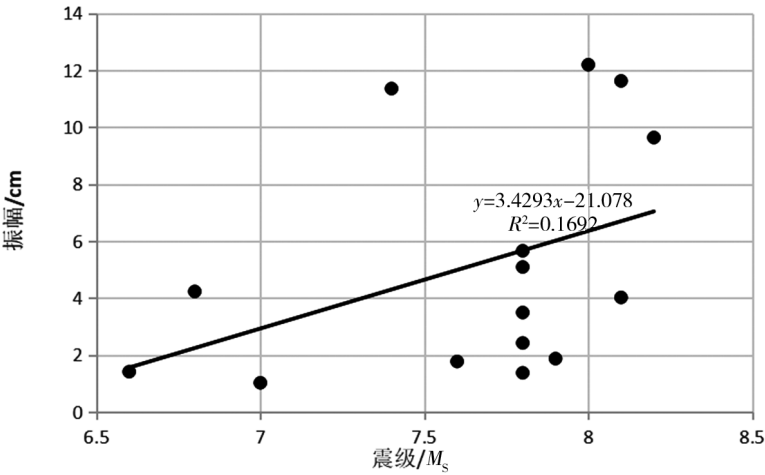


图4 石林井响应振幅与震级关系

Fig.4 Relationship between the response amplitude of Shilin well and earthquake magnitude

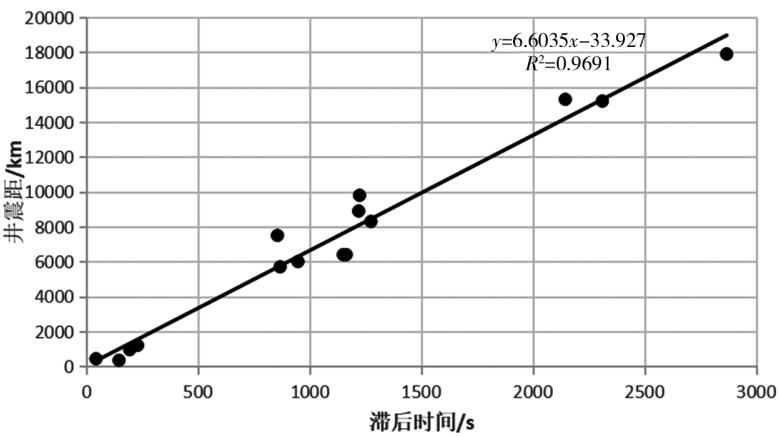


图5 石林井响应滞后时间与井震距关系

Fig.5 Relationship between the response lag time of the Shilin well and the well-to-epicenter distance

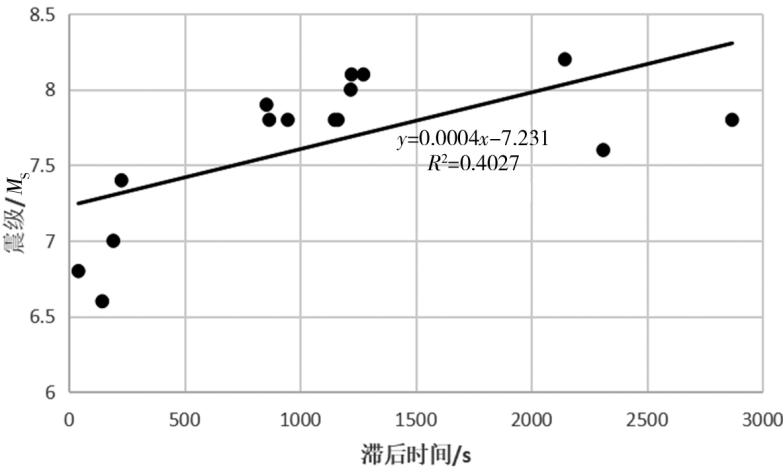


图6 石林井响应滞后时间与震级关系

Fig.6 Relationship between the response lag time of Shilin well and earthquake magnitude

对石林井同震响应时间进行统计,同震响应时间都晚于地震发生时间,有滞后性,滞后时间最短为42 s,对应的震级为 $M_s6.8$ ,井震距为430 km,滞后时间最长为2868 s,对应的震级为 $M_s7.8$ ,井震距为17 900 km,如图5根据井震距与滞后时间关系拟合曲线,斜率约为6.6,相关系数 $R^2$ 约为0.97,拟合关系最好,说明井震距、滞后时间两者的关系正相关,距离越远,滞后时间越长,距离越近,响应时间越短。如图6根据震级与滞后时间关系拟合曲线,斜率为0.0004,相关系数 $R^2$ 约为

0.4,可以看出滞后时间并不受震级控制,依据“距离=速度\*时间”,假定地震波速度相对稳定(严格来说地震波P波、S波和面波的速度依据速度不同而略有差异),响应滞后时间应该只与震中距有关,而与震级无关。如图7石林井响应震级与井震距关系发现,当井震距小于10 000 km时,拟合曲线相关性较好,表明石林井水位同震响应能力与震级、井震距有关,地震波起到了主控作用。

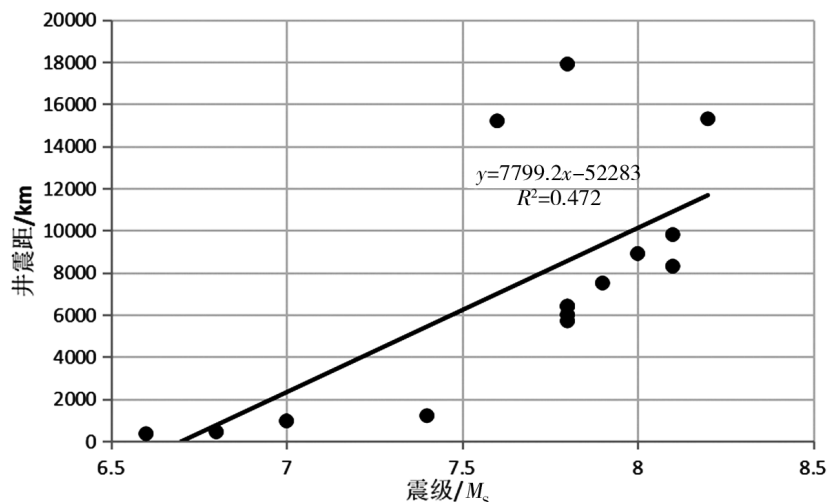


图7 石林井响应震级与井震距关系

Fig.7 Relationship between response earthquake magnitude and well-to-epicenter distance for Shilin well

#### 4 同震响应振幅与震级、井震距的差异性

有研究表明,井水位同震响应振幅随震级增大而增大,随井震距增大而减小<sup>[7]</sup>井水位同震响应幅度( $\Delta h$ )与震级( $M$ )和井震距( $D$ )之间存在下面定量关系的关系<sup>[8]</sup>

$$\lg(\Delta h) = \omega_1 M + \omega_2 \lg D + \omega_3 \quad (1)$$

式(1)中, $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 为常数。

统计2017—2022年期间,石林井水位同震响应振幅在1.0201~11.63 cm之间。运用多元线性回归方法,对同震响应事件的响应振幅( $\Delta h$ )与震级( $M$ )和井震距( $D$ )的关系运用公式(1)进行拟合,得到各参量间的统计关系,公式如下

$$\lg(\Delta h) = 0.1226 M - 0.0365 \lg D - 0.5796 \quad (2)$$

式(2)表明,石林井水位同震响应振幅与震级呈正

相关变化,与井震距呈负相关变化,即井水位同震响应振幅随震级增大而增大,随井震距增大而减小,且水位变化受震级与井震距的影响力基本相当。

利用式(2)进行计算,石林井同震响应事件水位变化幅度拟合值,与水位变化实测值进行对比分析,对比曲线见图8。在所选震例中共有5次地震( $M_s6.6$ 、 $M_s7$ 、 $M_s7.9$ 、 $M_s7.8$ 、 $M_s7.6$ )拟合值合实际值基本一直,其他地震的拟合值均高于实际值,拟合值明显偏离实测值。深度、发震构造以及地质构造等有关,也可能与震源受观测技术的限制,前期研究中得到的响应幅度均为分钟值采样,但分钟采样率得到的井水位响应幅度可能略有误差,尤其在井水位振荡的情况下,因为,水震波的周期有可能小于一分钟,导致分钟值得到的响应幅度可能失真。

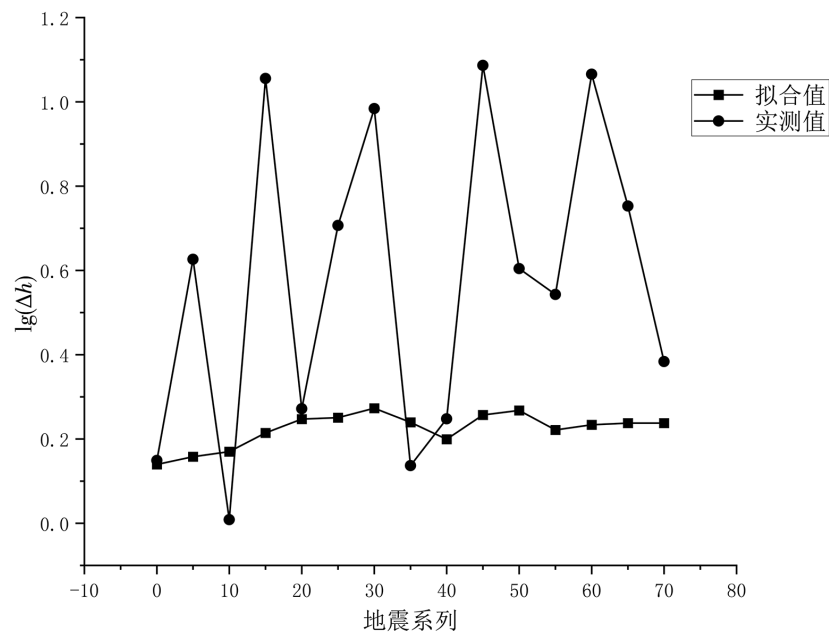


图8 石林井水位同震响应幅度实测值与拟合值对比

Fig.8 Comparison of measured and fitted values of the coseismic response amplitude of water level of Shilin well

5 地震能量密度分析

地震能量密度表示地震波在传播过程中作用在单位体积地层介质上的最大能量值，能量密度与震级、井震距直接相关，因此能量密度的大小直接影响了井水位响应的幅度。相关研究表明，地震能量密度( $e$ )达到一定阈值才能触发同震响应，它与地震的震级( $M$ )、震中距( $h$ )紧密相关，推导出地震能量密度计算公式<sup>[9]</sup>

$$\lg(h)=0.48M-0.33\lg(e)-1.4$$

(3)

式(3)中，当震中距一定时，地震能量密度随震级增大而增大；当震级一定时，则随震中距的增加而减少。触发同震响应的地震能量密度越小，观测井映震能力越强<sup>[10]</sup>。有研究表明，作用于地质单元的地震能量密度大于 $10^{-4}\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ 就可实现水位响应<sup>[11]</sup>。根据2017—2022年期间石林井同震响应数据，对该井的同震响应能量密度进行计算得到表2，可以看出达到理想效果的震例有8次，有7次与实际震例不相符，因此石林井水位同震变化的实际情况不能完全用此理论解释。

表2 石林观测井2017—2022年的水位同震响应能量密度

Table 2 Energy density of coseismic response of water level recorded by Shilin observation well from 2017 to 2022

| 震级  | 日期/年-月-日   | 能量密度/(J·m <sup>-3</sup> ) | 震级  | 日期/年-月-日   | 能量密度/(J·m <sup>-3</sup> ) |
|-----|------------|---------------------------|-----|------------|---------------------------|
| 6.6 | 2021-05-21 | 8.13×10 <sup>-4</sup>     | 7.8 | 2023-02-06 | 6.61×10 <sup>-4</sup>     |
| 6.8 | 2022-09-05 | 1.70×10 <sup>-3</sup>     | 7.8 | 2019-05-26 | 2.88×10 <sup>-5</sup>     |
| 7.0 | 2017-08-08 | 8.13×10 <sup>-5</sup>     | 7.9 | 2017-01-22 | 2.63×10 <sup>-6</sup>     |
| 7.4 | 2021-05-22 | 2.09×10 <sup>-3</sup>     | 8.0 | 2018-01-23 | 1.26×10 <sup>-4</sup>     |
| 7.6 | 2018-01-10 | 1.15×10 <sup>-6</sup>     | 8.1 | 2018-08-19 | 5.13×10 <sup>-5</sup>     |
| 7.8 | 2017-11-13 | 4.90×10 <sup>-6</sup>     | 8.1 | 2021-07-29 | 2.04×10 <sup>-4</sup>     |
| 7.8 | 2017-07-18 | 9.12×10 <sup>-4</sup>     | 8.2 | 2017-09-08 | 5.01×10 <sup>-4</sup>     |
| 7.8 | 2023-02-06 | 8.71×10 <sup>-5</sup>     |     |            |                           |

## 6 结论及认识

2017—2022年,石林井水位对15次地震有同震响应,据此推测,对于井震距在5000 km以上、7.8级以上的远震同震响应的事件较多,周边6级以下地震没有同震响应,因为没有样本,猜测可以距离不能大于100 km,周边7级以下地震距离在400 km左右有同震响应。可见随着震级的增大,石林井水位产生同震响应的地震事件井震距逐渐加大,同时,随着井震距地增大,井孔产生同震响应的震级下限不断升高<sup>[12]</sup>。

井震距小于1000 km水位同震响应阶变特征下降,上升、先降后升均有,属于阶变形,1000 km以上水位同震响应特征反应均为震荡型。石林井水位的同震响应震幅的变化与井震距和震级有相关性,但不完全是线性的关系。同震响应时间都晚于地震发生时间,有滞后性,震级、井震距与滞后时间三者的关系正相关,震级越大,距离越远,滞后时间越长,震级越小,距离越近,响应时间越短。通过计算能量密度发现,15次地震中共有8次地震能量密度阈值大于 $10^{-4} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ ,表明石林井触发水位的同震变化率为53%。

初步讨论得出远大地震时,表现为水位快速高频振荡、且可多次振荡,逐步衰减,再恢复正常,近距离大地震,表现为水位出现阶升、阶降变化,两者持续时间及振幅均与震级、井震距有关。所以地下水同震响应是一种形态多样、分布不均、时间分层、传播多途径的十分复杂的自然现象<sup>[13-14]</sup>。可能受震源机制、发震构造等因素影响<sup>[15]</sup>,即使是发生在同一地区,具有相同震源机制解的地震引起井水位的同震变化也不具有固定的响应模式,其响应方式和响应幅度的复杂性可能与井孔所处地区的局部应力应变状态有关<sup>[16]</sup>。从而对井水位同震响应进行深入研究,对认识地震的孕育与发生、区域应力场的变化以及水位前兆分析都具有重要科学意义。

致谢:感谢云南省地震局付虹老师在本文撰写过程中给予的指导和帮助。

## 参考文献

- [1] 汪成民,车用太,万迪堃,等.地下水微动态研究[M].北京:地震出版社,1988.
- [2] 胡米东,毛华锋,陈启林,等.江苏流体井网水位对青海玛多7.4级地震同震响应特征差异及原因分析[J].四川地震,2021,45(3):22-27.
- [3] 汪成民,贾化周,殷积涛,等.地下水微动态研究在我国的进展[J].水文地质工程地质,1987,31(2):15-19.
- [4] Elkhoury J E, Brodsky E E, Agnew D C. 地震波增大渗透性[J].世界地震译丛,2007(3):48-53.
- [5] 杨竹转.地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究[J].国际地震动态,2012(4):42-47.
- [6] 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(4):537-543.
- [7] 杨竹转,邓志辉,赵云旭,等.云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究[J].地震学报,2005,27(5):569-574.
- [8] Roeloffs E A. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes[J]. J Geophys Res Solid Earth, 1998, 103(B1):869-889.
- [9] Wang C Y, Manga M. Hydrologic responses to earthquakes and a general metric[J]. Geofluids, 2010, 10(1/2):206-216.
- [10] 赵娜,贾东辉,梁卉,等.新疆新21号泉水位同震响应研究及预测意义初探[J].内陆地震,2022,36(2):148-155.
- [11] Brodsky E E, Roeloffs E, Woodcock D, et al. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, 108(B8):2390.
- [12] 段胜朝,张立,孙自刚,等.腾冲地震台观测井水位同震响应特征分析[J].地震地磁观测与研究,2019,40(6):100-110.
- [13] 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.
- [14] 杨竹转,邓志辉,赵云旭,等.云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究[J].地震学报,2005,27(5):569-574.
- [15] 李圣,张立,卿元华,等.昆明井水位同震响应特征分析[J].高原地震,2021,33(2):28-31.
- [16] 宴锐,黄辅琼.黄骅井水位对苏门答腊5次地震的同震响应初步研究[J].中国地震,2009,25(3):825-832.