

# 云南普洱大寨井水位同震响应研究及预测意义<sup>\*</sup>

胡小静, 付虹, 李涛, 李琼

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

**摘要:** 通过研究 1990—2019 年云南普洱大寨井水位的同震响应特征, 分析井水位响应特征的变化与后续中强地震的关系, 并探讨含水层渗透性对区域构造活动的影响。结果显示: 当同震响应幅度偏离统计关系时, 井孔周边区域后续地震活动有所增强; 固体潮相位差由负值变为正值, 表明观测井孔含水层渗透性参数发生改变, 这与区域地震活动的变化可能存在一定的相关性。分析认为, 井水位同震响应和含水层渗透性参数变化可作为探索区域构造和地震活动的参考指标。

**关键词:** 同震响应; 含水层渗透性; 地震预测; 普洱大寨井

**中图分类号:** P315.723

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2020)02-0340-08

## 0 引言

井-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, 其外围的井-含水层系统经常可以记录到显著的同震响应(汪成民等, 1988; 车用太等, 1989; 付虹等, 2002)。过去几十年, 国内外地震学家和水文地质学家对此广泛关注(Leggette, Taylor, 1935; Wang, Manga, 2010; Yan *et al.*, 2014), 并取得了很多成果: 如同震响应的机理机制研究方面, Elkhoury 等(2006)认为地震波可增加渗透率, Wang 和 Manga(2010)提出地震引起的渗透率变化可能是解释同震水位阶变的主要机制, 同时构造因素与水文地质因素对于控制地下水同震响应特征具有重要作用(史浙明, 2015); 晏锐和黄辅琼(2009)认为同震响应方式可能与井孔所处地区的局部应力应变状态或井-含水层系统的结构变化有关; Liao 等(2015)认为大地震能打破隔水层是导致井水位同震大幅变化的主要原因。在井水位的映震能力方面, 万登堡(1992)发现在 1983 年越南 7.0 级、1988 年澜沧 7.6 级和 1991 年缅甸 7.6 级地震前部分井孔的计震能力发生了改变, 认为井水位映震能力变化可能是地下水预报中强地震的一种新方法; 鱼金子等(1993, 2012)认为, 当含水层受

压应力作用时, 空隙率变小、渗透性变弱, 井孔水震波响应能力可能降低; 相反, 含水层受张应力作用时, 空隙率变大、渗透性变强时, 井孔水震波响应能力加强。

观测井同震响应过程与其井含水层、周边区域应力场变化可能存在一定关系, 当它的响应过程发生改变时, 有可能预示着含水层所处区域的应力状态发生变化, 或是与区域构造活动有一定联系。本文以云南普洱大寨井为例, 试图通过分析该井同震响应的差异变化与区域中强以上地震活动之间的关系, 进而探索井水位同震响应变化对后续地震的预测意义。

## 1 观测井基本概况

云南普洱大寨井位于普洱市东南向倚象坝区南端地处 NW 向的景谷—普文断裂西侧 5 km 处(图 1a)。井孔标高 1 490 m, 井深 112.27 m, 套管下至 12.66 m, 以下为裸孔, 其中 85.05~90 m 处为强含水层, 岩性为白垩系砂岩。该井富水性较强, 为自流井, 流量为 0~0.5 L/s, 随着雨季有一定的年变; 地下水化学类型为  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$  型, 水源补给来自于大气降水(图 1b)。该井水位观测最早始于 1983 年, 之后陆续架设多种地下流体测项, 具体观测情况见表 1。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-01-03。

**基金项目:** 基于地下流体资料震例回朔的亚失稳状态识别研究(2018YFC150330505)、云南省地震局科技人员传帮带培养任务(C3-201707)和 2019 年度震情跟踪定向工作任务(2019010312)联合资助。

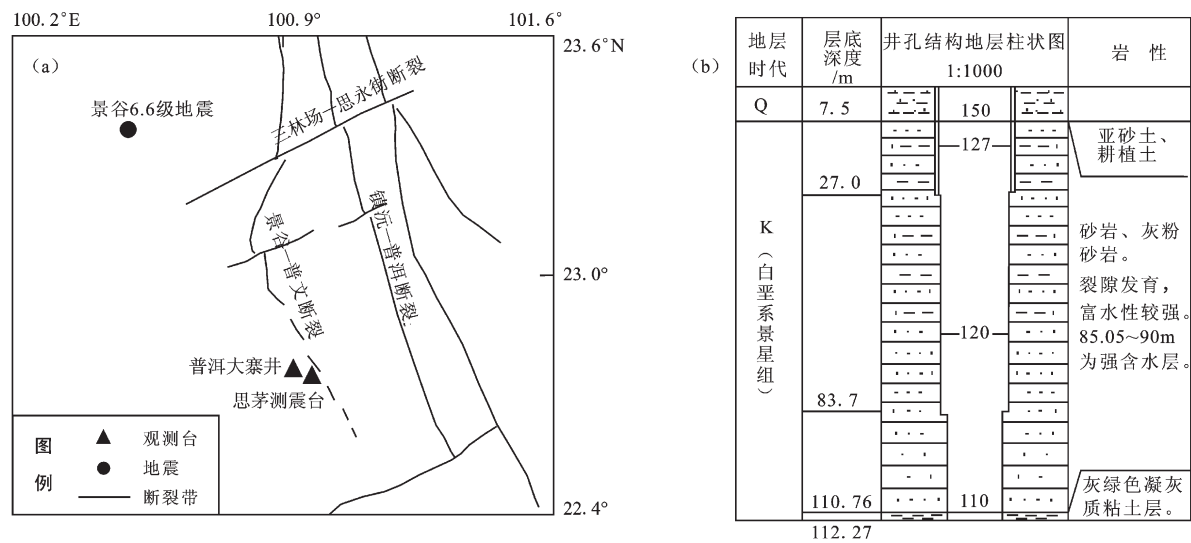


图1 普洱大寨井构造位置图 (a) 及井孔柱状图 (b)  
Fig. 1 Geological setting and location of the Dazhai well (a) and its bore structure (b)

表1 普洱大寨井地下流体观测情况  
Tab. 1 Observation items of underground fluids in the Dazhai well

序号	观测项目	观测起始时间	观测仪器	采样率	备注
1	水位	1983 - 11 - 01	SW40 - 1	日值	目前采用本设备
		2001 - 07 - 15	LN - 3	分钟值	
		2013 - 12 - 12	ZKGD3000	分钟值	
2	水温	2001 - 07 - 15	SZW - 1A	分钟值	目前采用本设备
		2013 - 12 - 12	ZKGD3000	分钟值	
3	流量	1984 - 01 - 01	秒表、水桶	日值	
4	气象三要素	2004 - 01 - 15	WXY - 1	分钟值	
5	水氢	1984 - 02 - 27	FD - 105K	日值	
6	水汞	1992 - 01 - 01	XG - 4 型测汞仪	日值	
7	Ca <sup>2+</sup> 和 Mg <sup>2+</sup>	1997 - 05 - 20	EDTA 容量法	日值	
8	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1997 - 05 - 20	酸、碱中和滴定法	日值	
9	F <sup>-</sup>	1997 - 05 - 20	氟电极法	日值	
10	pH 值	2011 - 04 - 01	PXJ - IC	日值	目前采用本设备
		1997 - 05 - 20	pHS - 25C 型酸度计	日值	

普洱大寨井水位观测资料显示 (图 2a), 2001—2011 年井水位呈小幅度的趋势下降, 2012—2017 年表现为小幅度趋势上升, 但整体水位变化动态相对平稳; 从年动态来看, 每年雨季 (5 月前), 水位出现快速上升的过程, 于 9 月前达到峰值, 在雨季结束后 (10 月左右) 开始缓慢下降, 并于次年 4 月左右到达谷值, 呈现出明显的年变形态 (图 2b)。

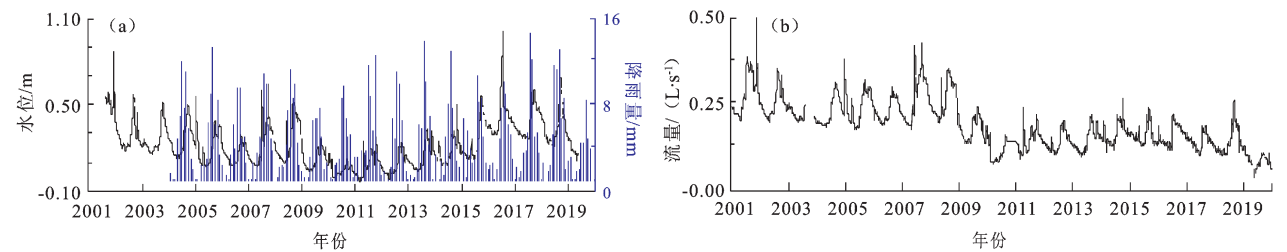


图2 普洱大寨井动水位 (a) 及辅助流量 (b) 观测曲线 (日均值)  
Fig. 2 Curve of groundwater level (a) and water - flow quality (b) of the Dazhai well (daily value)

2 同震响应的特征

2.1 统计特征

1990—2018 年, 思茅大寨井水位共记录到同震响应 26 次, 选取距该井 1 000 km 范围内的 22 次地震 (表 2) 作为本文研究对象。从空间分布来看, 有同震响应的地震主要为滇西南及邻区的 6 级地震、观测井附近的 3~5 级地震以及 8 级远震 (图 3)。从同震响应的幅度来看最大为 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震, 幅度约为 60.8 cm; 最小为 2014 年景谷 5.8 级地震, 幅度为 1.1 cm; 2000 年姚安 6.5 级地震、1995 年武定 6.6 级地震的同震响应幅度分别为 2.0 和 3.4 cm。从同震响应形态来看, 2000—2018 年所有井水位的同震响应全部表现为同震阶升现象 (图 4), 与其他研究者的

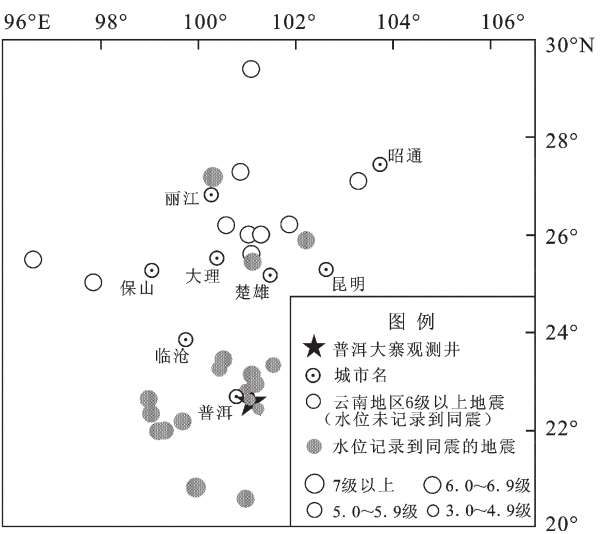


图3 1990—2018年云南及邻区6级以上震中分布图  
Fig. 3 Distribution of  $M \geq 6.0$  earthquakes in Yunnan and its adjacent area from 1990 to 2018

表2 1990—2018年普洱大寨井水位同震阶变表

Tab. 2 Co-seismic water level step-like changes in the Dazhai well from 1990 to 2018

序号	发震日期	发震地点	震级	震中距/km	实测水位变化幅度/cm	计算水位变化幅度/cm	差值/cm
1	1991-01-05	缅甸	7.4	534	12.5	14.67	2.19
2	1992-04-23	缅甸	6.5	218	12	10.57	1.439
3	1993-01-27	普洱	6.2	38	20.9	29.68	8.789
4	1995-07-10	缅甸	6.2	214	8.4	7.59	0.81
5	1995-07-12	缅甸	7.3	212	28.2	27.13	1.06
6	1995-10-24	武定	6.6	385	3.4	7.60	4.17
7	1996-02-03	丽江	7.0	519	10.4	9.48	0.92
8	2000-01-15	姚安	6.5	318	2	6.99	4.99
9	2000-06-08	缅甸	6.9	610	23	7.446	15.56
10	2003-09-22	缅甸	7.1	665	12.3	8.743	3.55
11	2003-09-22	缅甸	7.2	690	13.4	9.53	3.87
12	2007-05-16	老挝	6.6	240	13.4	10.99	2.41
13	2007-06-03	普洱	6.4	36	42.6	39.00	3.60
14	2008-05-12	汶川	8.0	950	36.8	18.60	18.20
15	2011-03-24	缅甸	7.2	260	27.6	20.59	7.01
16	2012-11-11	缅甸	7.0	510	5.5	9.619	4.11
17	2014-01-28	景洪	4.6	30	10.6	5.67	4.93
18	2014-02-05	思茅	4.2	4	11	17.54	6.54
19	2014-10-07	景谷	6.6	100	33.2	21.93	11.27
20	2014-12-06	景谷	5.8	90	6.4	9.49	3.09
21	2014-12-06	景谷	5.9	90	1.1	10.64	9.54
22	2018-09-08	墨江	5.9	82	21	11.46	9.54

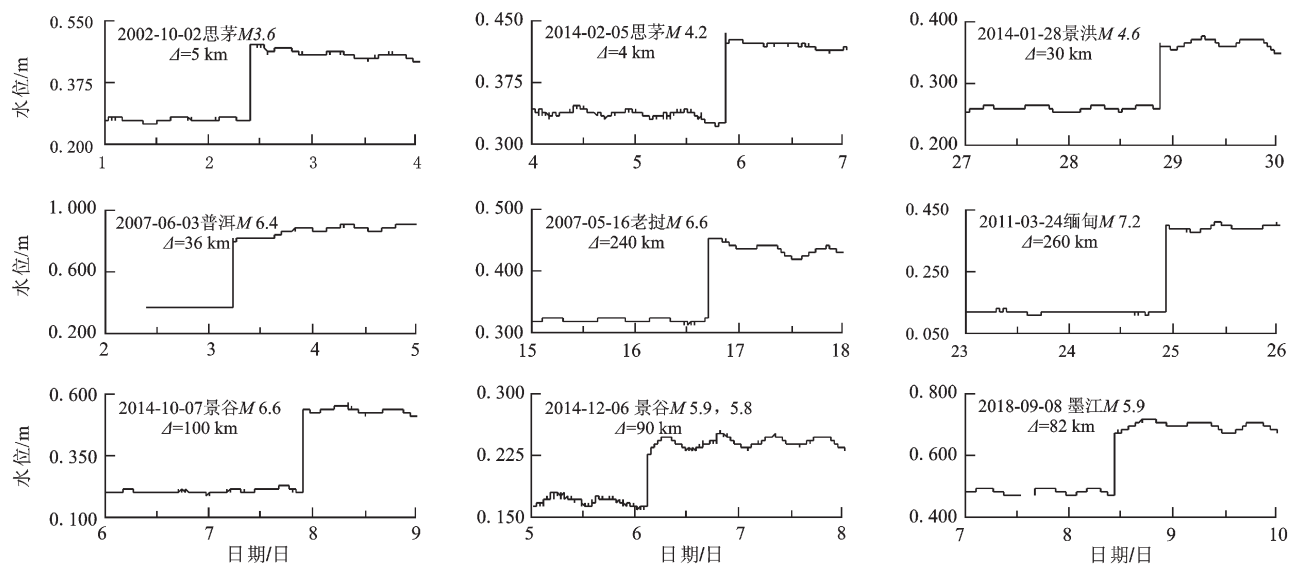


图4 普洱大寨井动水位同震响应

Fig. 4 Co-seismic hydrological response of the Dazhai well induced by earthquakes

研究结果一致（杨竹转等，2006；毛巍颖，2018），表明自观测以来普洱大寨井水位的同震响应形态未曾发生改变。

## 2.2 差异性特征及后续预测意义分析

### 2.2.1 同震响应幅度的差异性

井水位同震响应幅度与震级、井震距之间关系为（Roeloffs, 1998）：

$$\lg \Delta h = b_1 M + b_2 \lg D + a \quad (1)$$

式中： $\Delta h$  为水位变化幅度，单位为 cm； $M$  为震级； $D$  为震中距； $a$ ， $b_1$ ， $b_2$  为常数。

对 1990—2018 年普洱大寨井记录到的其周围 1 000 km 范围内的 22 次同震响应作回归计算：

$$\lg h = 0.5 M + 0.789 \lg D - 0.381 \quad (2)$$

可以计算出不同震级和震中距地震引起的井水位变化幅度，计算值与实测值之差表示同震响应偏离均值的状态（表 2）。当同震响应的计算值与实测值相差超过 8 cm 时，认为同震响应的变化幅度与正常状态存在明显差别。由表 2 可见，有 6 次地震的差值超过 8 cm，其中包含 2014 年景谷 6.6 级地震，其后 2 个月在原震区发生了 5.9 级，5.8 级强余震；其它 4 次地震后约 6 个月在澜沧江以西的滇西南一小滇西地区均有 5 级以上地震发生（图 5）。

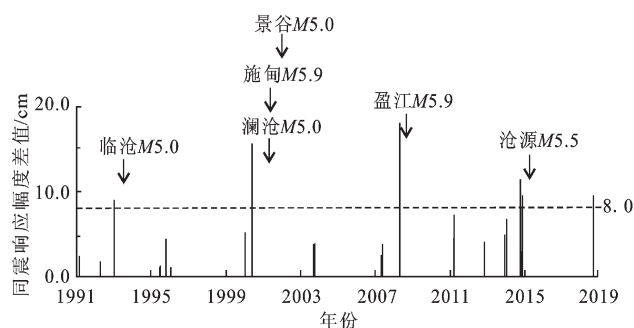


图5 同震响应计算幅度与实际幅度差值

Fig. 5 Difference between theoretical and actual amplitudes of co-seismic response

### 2.2.2 同震响应幅度与地震波振幅

考虑到远震发生后，地震波到达观测台站时可能同时携带有多种类型的地震波，难以辨识，因此本文只选取普洱大寨井震中距 1 000 km 以内的云南及其周边地震；根据已有的认识，水位同震响应一般与 S 波关系更为密切，因此从台站记录的引起同震响应的地震波中读取 S 波的最大振幅记录结果，并与同震响应振幅进行比较。

思茅台距离普洱大寨井约 5 km，2000—2018 年普洱大寨井水位共记录到同震响应 13 次，从思茅台收集到其中 9 次地震的地震波形，统计每次地震同震响应的最大幅度与本次地震波形最大振幅速度（表 3），对二者作线性回归拟合，并计算其残差（图 6）。理论上，当周围介质状态

处于正常状态时,在小区域范围内每一次地震发生时测震台所记录的 S 波最大振幅与水位同震响应幅度应该呈一定的正比关系。图 6a 显示,大多数地震过程中,地震波形最大振幅速度越大,所引起的同震响应幅度也越大。图 6b 显示,景谷 6.6 级地震所引起的水位响应幅度和地震波形最大振幅速度之间偏离最为明显,其计算残差超过 10 cm,表现为较小的波形最大振幅速度引起了极大的同震响应幅度,即普洱大寨水位观测对本次地震过程的响应较为强烈。在上次 9 次地震

中,仅有景谷 6.6 级地震后 2 个月发生了景谷 5.8,5.9 级强余震,这 2 次余震的响应幅度与地震波形振幅最大速度之间吻合程度较好。这种较为显著的偏离现象可能表明在地震发生时,能量并未完全释放,区域内应力水平仍然较高,后续为了完成能量的释放仍存在发生强余震的危险。

综合分析上述差异性特征,当同震响应幅度与计算响应幅度、波形最大振幅速度协调性中出现一些较为显著的差异时,与该区域的后续地震活动有一定的相关性。

表 3 2000—2018 年思茅台记录的 9 次地震的同震响应幅度和波形最大振幅速度  
Tab. 3 Co-seismic response amplitude and maximum seismic wave amplitude velocity  
of 9 earthquakes recorded by the Simao well from 2000 to 2018

序号	震例	震中距/km	同震响应幅度/cm	波形最大振幅速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	回归残差/cm
1	2002-10-02 思茅 3.6 级地震	5	21.6	3.307 28	-1.703
2	2003-09-22 缅甸 7.2 级地震	690	13.4	1.662 83	-3.750
3	2007-05-16 老挝 6.6 级地震	240	13.4	2.833 33	-8.130
4	2008-05-12 汶川 8.0 级地震	950	36.8	5.773 96	-4.528
5	2012-11-11 缅甸 7.0 级地震	510	5.5	0.184 55	-9.828
6	2014-10-07 景谷 6.6 级地震	100	33.2	0.448 86	9.198
7	2014-12-06 景谷 5.8 级地震	90	6.4	0.000 02	-6.119
8	2014-12-06 景谷 5.9 级地震	90	1.1	0.000 04	4.268
9	2018-09-08 墨江 5.9 级地震	82	21	0.233 44	20.592

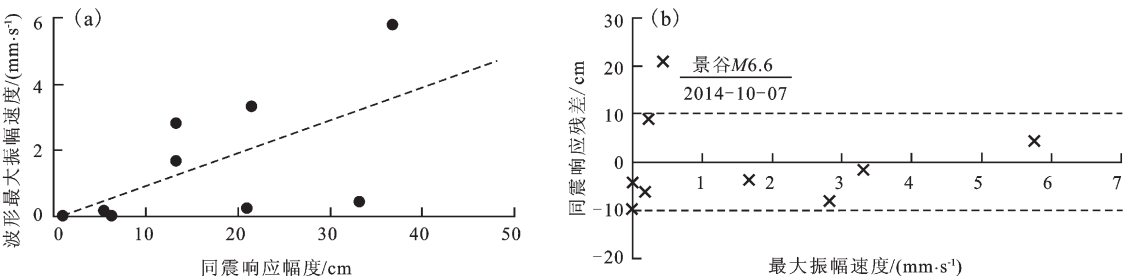


图 6 同震响应幅度与地震波形振幅速度散点分布图 (a) 及残差 (b)  
Fig. 6 Scatter distribution (a) and residual (b) of co-seismic response amplitude and seismic wave amplitude velocity

3 同震引起的井-含水层系统渗透性变化分析

井孔对地震响应能力的强弱与渗透性的强弱密切相关(鱼金子等,2012),井水位 M2 波的相位差反应了含水层渗透性的变化状态特征(Elk-

houry *et al*, 2006; Xue *et al*, 2013; Yan *et al*, 2020; 孙小龙, 向阳, 2018)。为了进一步研究普洱大寨井水位对地震的响应能力与井-含水层系统渗透性的关系,笔者计算了该井井水位 M2 波相位差(图 7)。图 7 显示,2000 年以来,大寨井水位 M2 波相位差整体比较平稳,在 -20°附近波动;2011 年缅甸 7.2 级地震发生时,井孔含水层渗透



性发生变化，相位差出现了明显的波动过程，持续约2个月后恢复正常；2012年印尼8.6级地震发生时，引起相位差瞬时变化，之后很快恢复正常；2012年缅甸7.0级地震发生时，相位差发生小幅度改变，2个月后恢复正常；2013年6月起，相位差出现显著的改变，由负值变为正值，表明期间含水层可能存在垂直向水流交换，之后在滇西南地区分别于2014年1月28日、2014年2月5

日和2014年10月7日发生了景洪4.6级、思茅4.2级和景谷6.6级地震，震中距分别为30 km，4 km和100 km，之后相位差恢复正常；2015年尼泊尔8.1级地震发生时，同样是引起相位差瞬时变化，之后很快恢复正常。2018年1月至2020年1月，大寨井水位相位差再次出现了与2013年6月相类似的变化，表明渗透性发生了明显的改变，且可能存在垂向水流交换。

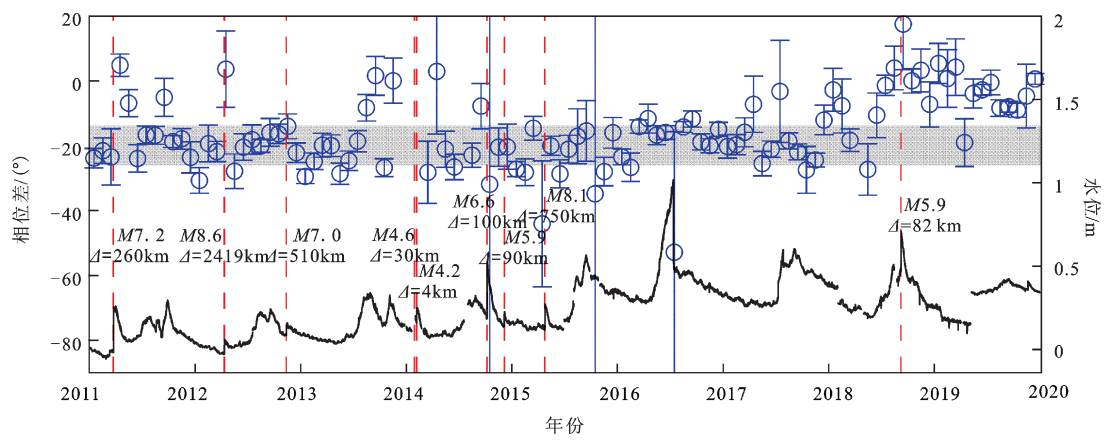


图7 普洱大寨井含水层相位差时间进程（月值）

Fig. 7 Time series of phase - lag angle of aquifer in the Dazhai, well (monthly value)

图8显示，自2018年以来，大寨井 $Mg^{2+}$ ， $Ca^{2+}$ 和 $HCO_3^-$ 浓度出现大幅度下降变化，该变化与井水位观测到的含水层渗透性变化基本同步，

表明这种渗透性结构的变化与区域构造作用密切相关，渗透性结构的变化也影响到了水岩相互作用，进而引起了水化学离子的变化。

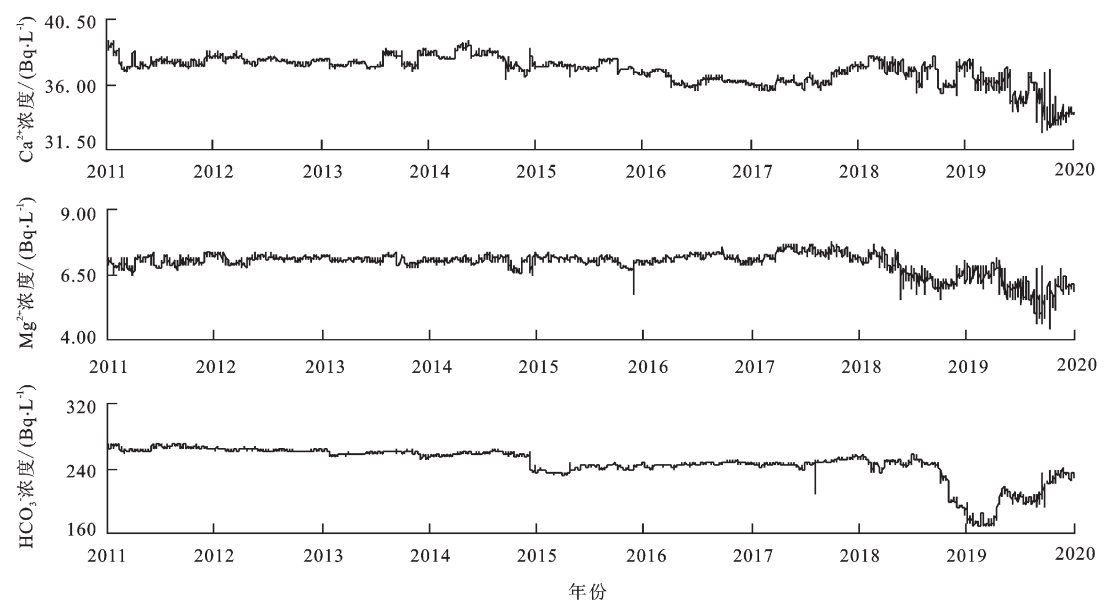


图8 普洱大寨井水化学离子测项观测曲线（日值）

Fig. 8 Curves of geochemical items in the Dazhai well (daily value)

从上述记录到同震响应和相位差的结果可见,有同震响应的地震发生之后,整个含水层渗透性会出现一定的调整和恢复过程:其中远震( $\Delta > 2\ 000\text{ km}$ )主要表现为瞬时的相位差改变,在很短时间内便恢复正常;周边区域( $\Delta < 500\text{ km}$ )的中强震恢复过程会持续 2~3 个月。这也在一定程度上表明周边地区的中强震发生后,区域应力状态会有一些的改变、调整、恢复过程,而远震对区域应力状态的影响则相对较小。

## 4 结论

本文通过研究 1990—2018 年云南普洱大寨井水位记录到的多次地震的同震响应变化特征,分析不同地震引起的井水位变化差异与后续井孔周边地区中强地震的关系,探讨了含水层渗透性变化对区域构造活动的可能影响,得到以下结论:

(1) 当地震波引起的同震响应计算值与实测值相差超过 8 cm 时,普洱大寨井所处的滇西南及附近的小滇西地区未来半年左右多有 5 级以上地震发生,这可能反映出地下介质受力发生变化时可能会导致含水层渗透性改变,这种状态下有利于区域内的中强地震发生。

(2) 当一次地震所记录的波形最大振幅速度与引起的水位同震响应幅度二者之间偏离较大,其残差超过 10 cm 时,有可能是应力状态导致的含水层渗透性变化,使地下水位对地震波的响应发生改变,这种情况下有利于区域内中强震的发生。

(3) 2018—2019 年,普洱大寨井含水层渗透性发生了明显的改变,与此同时该井的水化学离子浓度也出现了显著变化,表明区域构造作用的增强,可能导致含水层渗透性变化,同时也引起其他测值的同步变化。当含水层渗透性与同井的其他多种观测出现准同步变化时,异常信度更高。

综上所述,同震响应的变化可能反应含水层渗透性的变化,对后续的区域地震活动有一定预测意义,可以作为探索区域介质受力变形、应力状态变化以及地震活动的新的参考指标。

## 参考文献:

- 车用太,王铁城,鱼金子. 1989. 我国水震波研究的现状与动向[J]. 地震,20(1):70-72.
- 付虹,刘丽芳,王世芹,等. 2002. 地方震及近震地下水同震震后效应研究[J]. 地震,22(4):55-64.
- 毛巍颖. 2018. 云南思茅大寨井水位地震同震响应特征分析[J]. 地震研究,41(4):577-582.
- 史浙明. 2015. 地下水位同震响应特征及机理研究[D]. 北京:中国地质大学.
- 孙小龙,向阳. 2018. 基于同震水震波的水文地质参数求取方法探讨[J]. 水文地质工程地质,45(3):22-29.
- 万登堡. 1992. 井孔水位计震能力变化与近大地震关系研究[J]. 地震研究,15(4):381-391.
- 汪成民,车用太,万迪. 1988. 地下水微动态研究[M]. 北京:地震出版社.
- 晏锐,黄辅琼. 2009. 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,25(3):325-332.
- 杨竹转,邓志辉,赵云旭,等. 2005. 云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究[J]. 地震学报,27(5):569-575.
- 鱼金子,车用太,刘成龙. 2012. 金沙江水网对日本 9.0 级地震的同震响应及其特征与机理[J]. 地震,32(1):59-69.
- 鱼金子,车用太,王爱英. 1993. 水震波异常与中期强震危险性关系初探[J]. 地震,(4):30-37.
- Elkhouy J E, Brodsky E E, Agnew D C. 2006. Seismic waves increase permeability[J]. Nature,441(7097):1135-1138.
- Leggette R M, Taylor G H. 1935. Earthquakes instrumentally recorded in artesian wells[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 25(2):169-175.
- Liao X, Wang C Y, Liu C P. 2015. Disruption of groundwater systems by earthquakes[J]. Geophysical Research Letters, 42(22):9758-9763.
- Roeloffs E A. 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield California, due to local and distant earthquakes[J]. J Geophys Res, 103(B1):869-889.
- Wang C Y, Manga M. 2010. Earthquakes and water. Lecture notes in earth sciences[M]. Berlin-Heidelberg:Springer,225.
- Xue L, Li H B, Brodsky E E, et al. 2013. Continuous permeability measurements record healing Inside the Wenchuan earthquake fault zone[J]. Science,340(6140):1555-1559.
- Yan R, Wang G, Ma Y, et al. 2020. Local groundwater and tidal changes induced by large earthquakes in the Taiyuan Basin, North China from well monitoring[J]. Journal of Hydrology,582:124479.
- Yan R, Woith H, Wang R. 2014. Groundwater level changes induced by the 2011 Tohoku earthquake in China mainland[J]. Geophysical Journal International,199(1):533-548.

## Study on Co-seismic Response and Prediction Significance of Groundwater Level in the Dazhai Well

HU Xiaojing, FU Hong, LI Tao, LI Qiong

(*Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

### Abstract

In this paper, we studied the commonalities and differences of the co-seismic responses recorded in the water level of the Pu'er well, analyzed the relationship between the change in the earthquake recording ability of the observation well and the subsequent earthquakes, and discussed the response of the aquifer permeability to regional tectonic activity. The results show that, when there were some significant differences in co-seismic response amplitude from the statistical relationship and the maximum amplitude of the waveform, there was a certain correlation with subsequent seismicity in the area. The phase – lag changed from negative to positive, while the permeability of the observation wellbore aquifer changed, which also had certain correlation with the seismicity or other fluid observations in the area. It shows that the changes in co-seismic response and aquifer permeability can be used as parameters for judging regional structure and seismic activity.

**Keywords:** co-seismic response; aquifer permeability; earthquake prediction; Dazhai well in Pu'er