

毛巍颖. 云南思茅大寨井与大理月溪井水位同震响应对比分析[J]. 华南地震, 2022, 42(1): 31–37. [MAO Weiying. Comparative Analysis of Coseismic Response Characteristic of Water Level Between Simao Dazhai Well and Dali Yuexi Well in Yunnan[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(1): 31–37]

## 云南思茅大寨井与大理月溪井水位 同震响应对比分析

毛巍颖

(云南省地震局, 昆明 650224)

**摘要:** 云南思茅大寨井和大理月溪井分别位于云南西南和西北部, 是云南地区主要地震流体观测井。通过水位观测数据分析, 思茅大寨井水位和大理月溪井水位同震响应差异明显。思茅大寨井水位同震响应能力较好, 主要表现为阶升, 阶变幅度达 10 cm 以上的有 16 次, 最大可达 57.1 cm。大理月溪井水位同震响应能力较弱, 阶变幅度小, 主要表现为阶降。思茅大寨井含水层为中生界白垩系砂岩, 结构致密、孔隙率小, 有利于地震波传播导致含水层孔隙压力波动, 井水位同震响应能力强。大理月溪井含水层为新生界第四系松散层, 结构疏松、孔隙率大, 地震波传播导致含水层孔隙压力波动能力弱, 水位同震响应能力相应也就弱。

**关键词:** 同震响应; 井孔含水层; 密度和孔隙度

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)01-0031-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.01.05

## Comparative Analysis of Coseismic Response Characteristic of Water Level Between Simao Dazhai Well and Dali Yuexi Well in Yunnan

MAO Weiying

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Simao Dazhai well and Dali Yuexi well, located in southwest and northwest of Yunnan, are the main seismic fluid observation wells in Yunnan. Through the analysis of water level observation data, the coseismic response of water level of Dazhai well and Yuexi well are significantly different. The coseismic response ability of water level in Dazhai well is good, which is mainly characterized by step rise. There are 16 times of step change with amplitude more than 10 cm, and the maximum is 57.1 cm. The co-seismic response ability of the water level in Yuexi well is weak, and the magnitude of the order change is small, which is mainly characterized by step decline. The aquifer of Dazhai well is Mesozoic Cretaceous sandstone with compact structure and small porosity, which is conducive to the fluctuation of pore pressure of aquifer caused by seismic wave propagation, and the well

收稿日期: 2021-09-10

基金项目: 中国地震局星火计划, 滇南-滇西南地区地下流体异常深浅耦合关系研究(XH21030Y)项目资助

作者简介: 毛巍颖(1985-), 女, 工程师, 主要从事地震预报工作。

E-mail: 897162514@qq.com

water level has strong coseismic response ability. The aquifer of Yuexi well is a Quaternary loose layer in the Cenozoic, with loose structure and large porosity. The seismic wave propagation leads to weak pore pressure fluctuation in the water layer, and the co-seismic response of water level is correspondingly weak.

**Keywords:** Dazhai well in Simao and Yuexi well in Dali; Coseismal response; Well aquifers; Density and porosity.

0 引言

井水位同震响应是井水位观测的普遍现象<sup>[1-5]</sup>。不同地区不同观测井的同震响应特点不同,与井孔所在的构造环境和水文地质条件有关,井孔含水层岩体结构的不同可能是主导因素<sup>[6]</sup>。

井孔的地质构造环境是一个十分宽泛的概念,涉及井孔周围的地质、构造等方面。就地质环境而言,主要包括地层时代和岩性等,其中地层时代相对于岩性具有唯一性。对于同一时代地层可以有多种岩性;同一岩性不仅可以存在于不同时代地层,而且在同一时代地层中可以重复出现,但他们的物理性质却存在差异。这种情况在地下流体观测井网中是比较普遍的。

为了研究井孔岩石的地质时代和岩性对水位同震响应的影响,本文对比分析了含水层为中生界白

垩系砂岩的云南思茅大寨井和含水层为新生界第四系松散层的云南大理月溪井水位同震响应差异,分析了导致差异的含水层地层学和岩石学原因。

1 思茅大寨井与大理月溪井观测概况

1.1 思茅大寨井

云南思茅大寨井地处云南西南部普洱市思茅区城区东南,地理坐标为东经 101°03′,北纬 22°45′,位于红河断裂以南主要出露中生代地层的的兰坪思茅褶皱带,构造上位于无量山断裂带。井深 112.27 m,井孔 7.5 m 以上为第四系残坡积沙土层,7.5 m 以下均为白垩系泥质粉砂岩、石英碎屑砂岩、凝灰质泥岩(图 1a)。该井水位观测始于 1984 年,自投入观测后水位观测质量一直比较稳定。

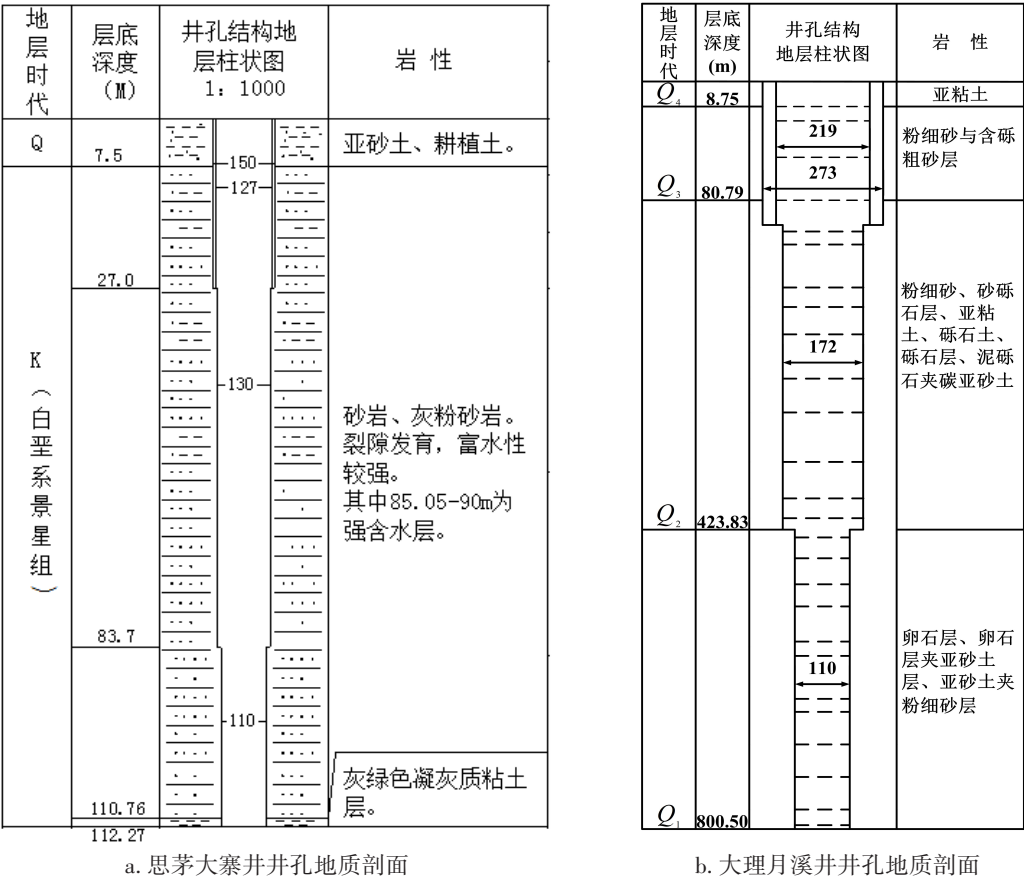


图1 思茅大寨井和大理月溪井井孔地质剖面图

Fig.1 The geological profile nap of Dazhai well and Yuexi well

1.2 大理月溪井

大理月溪井地理坐标  $100^{\circ}10' E$ 、 $25^{\circ}41' N$ ，地处云南西北部大理古城月溪村，位于主要由古生代地层出露的丽江台缘褶皱带，构造上位于红河断裂北侧。井深800.50 m，井孔地层均为第四系砾石、砂和粘土层(图1b)。该井的水位观测始于1990年1月，仪器为SW40-1水位仪。该井井水潮汐效应好，能记录到远震水震波(2001年11月14日昆仑山口西  $M 8.1$ )。认为投入观测至2000年间，该井水位出现过8次异常，其中有5次对应了200 km范围内的5次地震，包括1991年4月12日宁蒗  $M 5.1$ 、1992年12月18日永胜  $M 5.4$ 、1996年2月3日丽江  $M 7.0$ 、1998年11月19日宁蒗  $M 6.2$ 、2000年4月2日施甸  $M 5.9$ 。该井水位数据在2007年5月

16日老挝  $M 6.6$ 、2008年5月12日四川汶川  $M 8.0$  地震前有明显变化。

2 思茅大寨井与大理月溪井水位同震响应

2.1 思茅大寨井水位同震响应

思茅大寨井是云南记录同震响应最多的井，杨竹转等(2005)对1990—2003年该井的阶升现象进行研究<sup>[7]</sup>。毛巍颖(2018年)增加研究样本，对1988—2017年思茅大寨井的水位资料进行全时段的分析<sup>[8]</sup>。这些研究，思茅大寨井水位同震响应现象明显(图2)，1988—2017年共出现27次的同震响应(表1)。

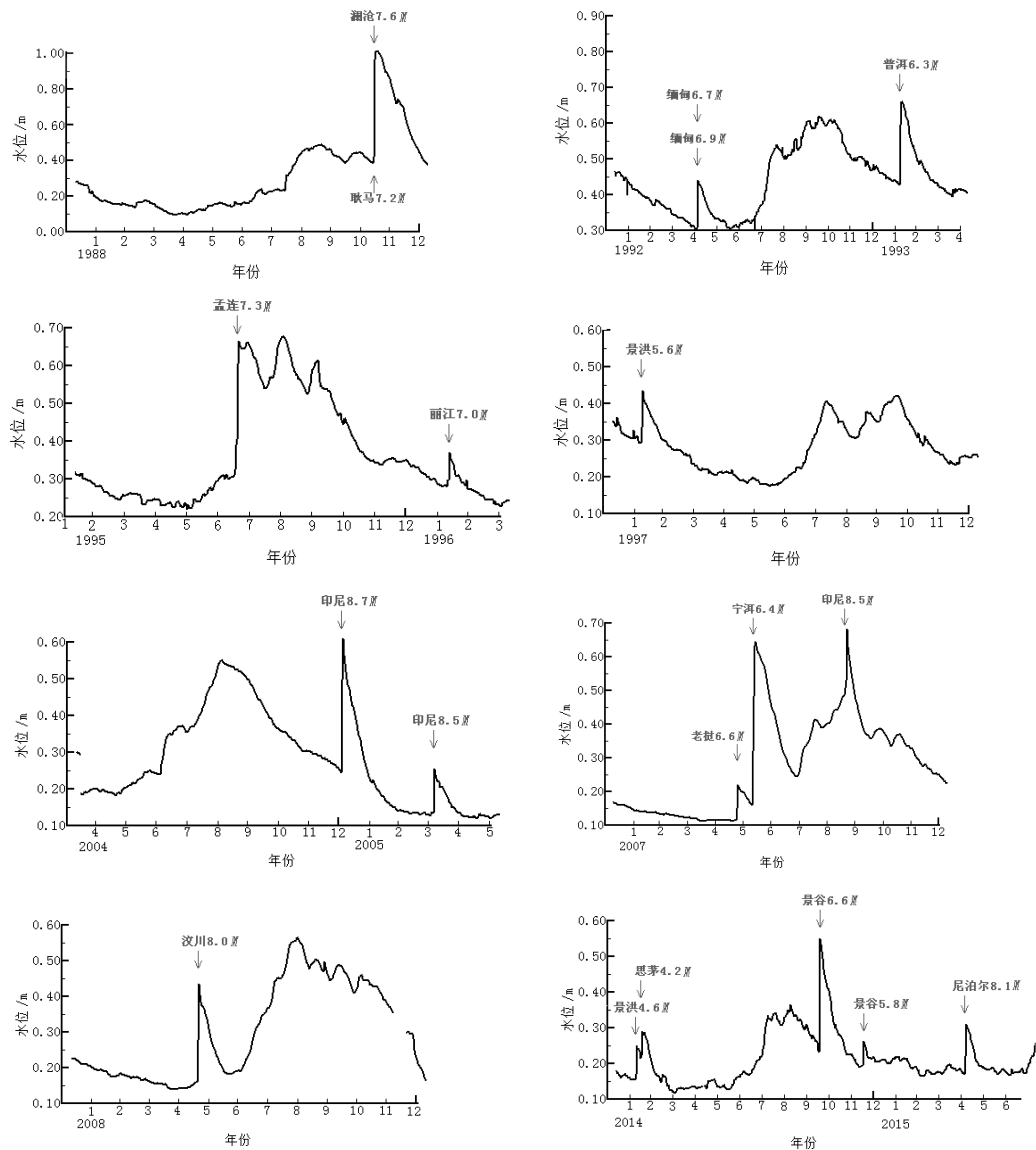


图2 思茅大寨井部分同震响应图  
Fig.2 Coseismic response map of water level in Dazhai well

表 1 思茅大寨水位同震响应一览表  
Table 1 List of Coseismal response of water level of Dazhai well

序号	震级范围	发震时间、地名和震级/M	震中与观测井 距离/km	同震阶变幅 度/m	同震阶 变特征
1	3.0 ~ 3.6	2002-10-02 思茅 3.6	5	0.176	上升
2	4.0 ~ 4.9	2014-01-28 云南景洪 4.6	30	0.099	上升
3	4.0 ~ 4.9	2014-02-05 云南思茅 4.2	4	0.069	上升
4	5.0 ~ 5.9	1990-01-27 云南双江 5.0	120	0.025	上升
5	5.0 ~ 5.9	1997-01-30 云南景洪 5.6	60	0.121	上升
6	5.0 ~ 5.9	2014-12-06 云南景谷 5.8	90	0.064	上升
7	6.0 ~ 6.9	1992-04-23 中缅边境 6.7、6.8	200	0.132	上升
8	6.0 ~ 6.9	1993-01-27 云南普洱 6.3	23	0.234	上升
9	6.0 ~ 6.9	2000-01-15 云南姚安 6.5	300	0.02	上升
10	6.0 ~ 6.9	2007-05-16 老挝 6.6	240	0.034	上升
11	6.0 ~ 6.9	2007-06-03 云南普洱 6.4	36	0.473	上升
12	6.0 ~ 6.9	2014-10-07 云南景谷 6.6	100	0.289	上升
13	7.0 ~ 7.9	1988-11-06 云南澜沧、耿马 7.6、7.2	170	0.571	上升
14	7.0 ~ 7.9	1991- 01-05 缅甸曼德勒 7.6	560	0.106	上升
15	7.0 ~ 7.9	1995-07-12 云南孟连西 7.3	200	0.251	上升
16	7.0 ~ 7.9	1996-02-03 云南丽江 7.0	510	0.091	上升
17	7.0 ~ 7.9	2003-09-22 缅甸 7.2	690	0.099	上升
18	7.0 ~ 7.9	2011-03-24 缅甸 7.2	260	0.258	上升
19	7.0 ~ 7.9	2012-11-11 缅甸 7.0	510	0.063	上升
20	8.0 ~ 8.9	2001-11-14 昆仑山口西 8.1	1840	0.398	上升
21	8.0 ~ 8.9	2004-12-26 印度尼西亚 8.7	2180	0.365	上升
22	8.0 ~ 8.9	2005-03-29 印度尼西亚 8.5	2300	0.115	上升
23	8.0 ~ 8.9	2007-09-12 印度尼西亚 8.5	3000	0.165	上升
24	8.0 ~ 8.9	2008-05-12 四川汶川 8.0	950	0.277	上升
25	8.0 ~ 8.9	2012-04-11 印度尼西亚 8.6	2430	0.07	上升
26	8.0 ~ 8.9	2015-04-25 尼泊尔 8.1	1780	0.139	上升
27	9.0	2011-03-11 日本 9.0	4300	0.023	上升

思茅大寨井水位同震响应主要有以下特点：

(1)自 1988 年至 2017 年的 30 年中出现的 27 次同震响应不受震源机制、发震构造等因素影响，响应形式均为阶变上升。

(2)响应幅度大，27 次同震上升阶变中有 16 次阶变幅度达 10 cm 以上，其中 1988 年 11 月 6 日云南澜沧耿马 7.6、7.2 级地震的同震阶变幅度为 57.1 cm。

(3)对 10 km 范围内的 3、4 级地震有同震响应。对井震距 2000~3000 km 的 8.5 级以上地震有同震响应。

(4)思茅大寨井水位对主震和强余震均可记录到同震响应。

(5)震中距对思茅井水位同震响应有明显影响。对 10 km 范围内的 3、4 级地震都可能出现同震响应。可能引起思茅井水位出现同震响应的地震的震级所对应的震中距为：5.0~5.9 级地震是 120 km、6.0~6.9 级地震是 300 km、7.0~7.0 级地震是 600 km、8.0~8.9 级地震 3000 km。

2.2 大理月溪井水位同震响应

大理月溪井水位在表1中思茅大寨井水位11次同震响应时有观测数据,其余地震时无观测数

据。通过对这11次地震期间大理月溪井水位数据分析,大理月溪井水位只对其中的5次地震有同震响应(图3),而对2008年5月12日四川汶川8.0级地震没有出现同震响应(图4)。

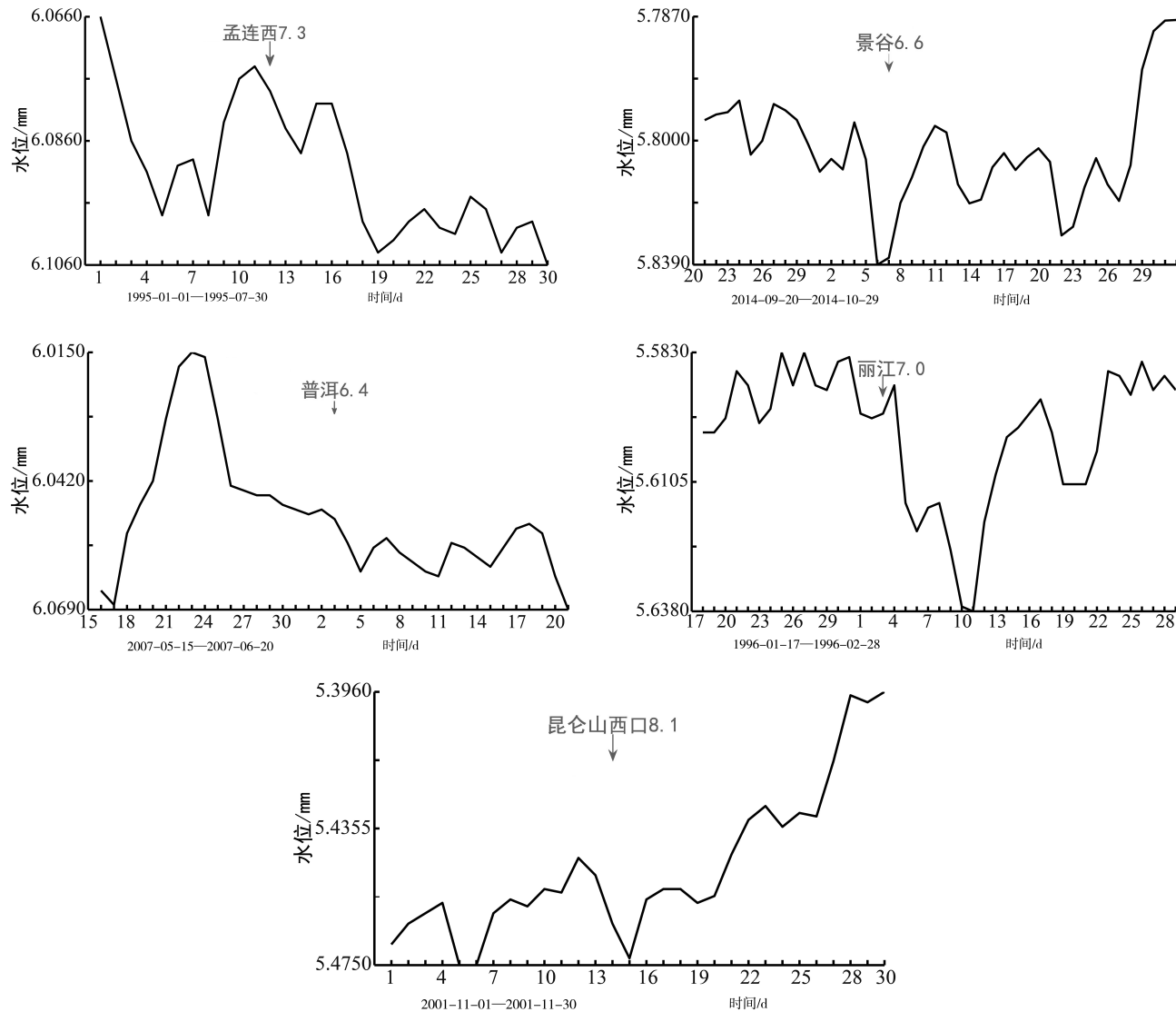


图3 大理月溪井5次同震响应曲线图

Fig.3 5 coseismic response curve of Yuexi Well

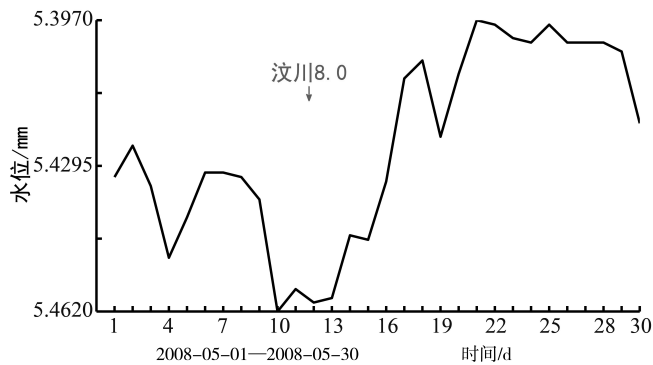


图4 大理月溪井在汶川8.0级地震期间的水位数据曲线

Fig.4 The water level data curve of Yuexi well during the Wenchuan M8.0 earthquake

大理月溪井水位同震响应特点是：同震响应现象少，响应幅度小，一般在 1~3 cm。对一些云南省内的中强地震和 8 级以上远震一般没有同震响应。

3 讨论与结论

3.1 思茅大寨井水位同震响应效能明显高于大理月溪井

与大理月溪井相比，思茅大寨井水位同震响应能力明显高于大理月溪井。主要体现在：

思茅大寨井水位同震响应数量多、响应幅度大，自 1988 年 11 月 6 日澜沧耿马地震以来的 30 年中对 27 次地震有明显的同震响应，响应幅度达 10 cm 以上的为 16 次，最大可达 57.1 cm

3.2 井孔含水层地质时代和岩性可能是影响井水位同震响应的主要因素

目前认为井水位同震响应是地震波传播中沿途井孔含水层发生应变引起变化，地震波引起水位变化即含水层内孔隙介质体膨胀的结果，受控于当地的地质构造环境和水文地质条件。

表 2 思茅大寨井和大理月溪井水位同震响应一览表  
Table 2 List of coseismic response of water level of Dazhai well and Yuexi well

序号	发震时间地名和震级(M)	思茅大寨井		大理月溪井	
		震中与观测井 距离/km	同震阶变幅度/m	震中与观测井 距离/km	同震阶变幅度 /m
1	1997-01-30 云南景洪 5.6	60	0.121	390	0
2	2014-12-06 云南景谷 5.8	90	0.064	270	0
3	1993-01-27 云南普洱 6.3	23	0.234	300	0
4	2007-06-03 云南普洱 6.4	36	0.473	320	0.01
5	2014-10-07 云南景谷 6.6	100	0.289	270	0.03
6	1995-07-12 云南孟连西 7.3	200	0.251	430	0.02
7	1996-02-03 云南丽江 7.0	510	0.091	190	0.02
8	2001-11-14 昆仑山口西 8.1	1840	0.398	1470	0.01
9	2004-12-26 印度尼西亚 8.7	2180	0.365	2460	0
10	2005-03-29 印度尼西亚 8.5	2300	0.115	2630	0
11	2008-05-12 四川汶川 8.0	950	0.277	650	0

从地震波作用的角度，地震波作用与岩石密度有关。无论地震波的 P 波还是 S 波的传播速度都与传播介质密度(  $\rho$  )有关<sup>[9]</sup>：

$$V_p=\frac{1}{\rho}\sqrt{k-\frac{4}{3}\mu}$$
 (1)

$$V_s=\sqrt{\mu/\rho}$$
 (2)

式中  $V_p$  为纵波波速， $V_s$  为横波波速， $\rho$  为岩石密度， $\mu$  为岩石刚度， $K$  为体模量。

井孔岩石是由岩石骨架和流动的孔隙流体组成的二相体，由孔隙和骨架构成。不同种类岩石和不同岩性的岩石密度不同<sup>[9]</sup>，其中沉积岩是 1.2~3.0 g/cm<sup>3</sup>、岩浆岩是 2.6~3.5 g/cm<sup>3</sup>，变质岩是 2.4~3.1 g/cm<sup>3</sup>，砂岩密度是 2.1~2.5 g/cm<sup>3</sup>、干沙土密度是 1.4~1.7 g/cm<sup>3</sup>。岩石密度除取决于岩石种类和岩

性外，还与岩石形成的年代有关，形成时代越早，成岩作用越长，岩石密度就越大，即新生代岩石密度<中生代岩石密度<古生代岩石密度。因此，不同地质时代和岩性的井孔含水层由于岩石密度变化可以影响地震波作用<sup>[10]</sup>。岩石时代越老、密度越大，对地震波的传播速度就越慢，地震波作用于岩体的时间就越长，引起的含水层内孔隙介质体积膨胀就应越大。

从井水位同震响应能力角度，地震波作用和井孔含水层特性是决定井水位同震响应的两个关键因素。地震波作用改变地下水文系统，其中包括井水位急剧变化。同时地震波作用可以增加岩石的渗透性。地震波的可透性与岩石的渗透性的关系为<sup>[11]</sup>：



$$k = \frac{\mu}{\rho g d} T \quad (3)$$

式中  $K$  为岩石的渗透率,  $\mu$  为动力粘滞度,  $\rho$  为密度,  $g$  为重力加速度,  $d$  为含水层厚度,  $T$  为地震波的可透性。

Jean E. Elkhoury 的关系表明, 地震波的可透性 ( $T$ ) 和含水层有关, 与含水层厚度 ( $d$ ) 呈正比。

根据向阳等<sup>[12]</sup>, 地震波作用下含水层孔隙压力波动引起的水位变化幅度 ( $h$ ) 与地表垂向运动引起的水位变化幅度 ( $s$ ) 之比 ( $R$ ) 关系为:

$$R = \frac{h}{s} = \frac{2.7 E_w}{r g n v \tau} \quad (4)$$

式中  $E_w$  为水的弹性模量,  $\rho$  为密度,  $g$  为重力加速度,  $n$  为含水层孔隙度,  $v$  和  $\tau$  分别为地震波的波速和周期。

这个关系说明地震波作用下含水层孔隙压力波动引起的水位变化幅度与含水层孔隙度和地震波速应呈反比关系。

岩石密度和孔隙率是描述岩石特性的重要指标, 二者间具有密切联系, 具有相同孔隙类型优势的岩石密度随孔隙度的增大而降低<sup>[13]</sup>。不同岩性的岩石密度和孔隙度是不同<sup>[9]</sup>, 因此, 岩石孔隙度与岩石形成的地质时代关系则与岩石密度相反, 即新生代岩石孔隙度 > 中生代岩石孔隙度 > 古生代岩石孔隙度。

含水层岩石密度和孔隙率影响含水层导水性。含水层对地震波的响应与其导水系数有关, 导水系数越大, 其渗透性能越好, 对地震波的响应性也就越好, 基岩含水层导水系数明显大于松散含水层<sup>[13]</sup>。

综上所述, 地震波作用是井孔水位同震响应主导因素, 而地震波的传播与岩石密度有关。地震波作用下的井孔含水层响应, 是井水位同震响应的结果, 而井孔含水层的响应与井孔含水层的含水性有关, 含水层岩石孔隙度又决定了井孔含水层的含水性。

思茅大寨井水位同震响应效能力明显高于大理月溪井, 主要原因是思茅大寨井与大理月溪井含水层因地质年代和岩性的明显差异导致的含水层密度和孔隙度差异引起。思茅大寨井含水层为中生界白

垩系砂岩, 大理月溪井含水层为新生界第四系松散砂砾层, 二者密度和孔隙度差异明显。前者结构致密、孔隙率小, 有利于地震波传播导致水层孔隙压力波动, 井水位同震响应能力强。后者岩体结构疏松、孔隙率大, 地震波传播导致水层孔隙压力波动能力也就相对弱, 水位同震响应能力相应也就弱。

## 参考文献

- [1] 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): 55-64.
- [2] 晏锐, 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): 325-332.
- [3] 车用太, 李万明, 刘成龙, 等. 金沙江网地下水动态在彝良  $M_s 5.7$  地震前的异常及其特征[J]. 地震, 2014, 34(1): 104-111.
- [4] 刘成龙, 王广才, 张卫华, 等. 三峡井网井水位对汶川 8.0 级地震的同震响应特征研究[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 188-194.
- [5] 陈玲, 高小其, 朱成英, 等. 新疆地区地下水位同震及震后效应的研究[J]. 华南地震, 2009, 29(3): 43-55.
- [6] 尹宏伟, 梁丽环, 韩文英, 等. 河北省地下流体水位对远场大地震的响应特征研究[J]. 防灾科技学院学报, 2015, 17(3): 28-41.
- [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): 569-575.
- [8] 毛魏颖. 云南思茅大寨井水位地震同震响应特征分析[J]. 地震研究, 2018, 41(4): 577-582.
- [9] 杜建国. 高压地球科学[M]. 北京: 地震出版社, 2010.
- [10] 刘蓓莉. 四川省岩石密度数据的分析及应用[J]. 物探与化探, 1994, 18(3): 232-237.
- [11] Jean E. Elkhoury, Emily E. Brodsky, Duncan C. Agnew. Seismic wave increase permeability[J]. Nature, 2006, 1441(29): 1135-1138.
- [12] 向阳, 孙小龙, 杨朋涛. 新疆阿克陶  $M_s 6.7$  地震引起的新10井水位同震响应研究[J]. 地震学报, 2017, 39(6): 899-909.
- [13] 赵子斌, 侯读杰, 陈皓禹. 页岩气储层岩石孔隙特征对岩石密度作用机理探究[J]. 科技通报, 2017, 33(10): 23-28.
- [14] 张昭栋, 迟镇乐, 陈会民, 等. 水井含水层导水系数及其对地震波的响应[J]. 内陆地震, 1999, 13(3): 23-28.