

毛巍颖. 云南开远井和思茅大寨井水位同震响应动态差异分析[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 48–56. [MAO Weiying. Analysis of the Dynamic Difference of Coseismic Response of Water Level Between Kaiyuan Well and Simao Dazhai Well in Yunnan[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 48–56]

云南开远井和思茅大寨井水位同震 响应动态差异分析

毛巍颖

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 云南开远井和思茅大寨井分别位于滇东南褶皱带、滇西南的兰坪—思茅褶皱带, 其中滇东南褶皱带地壳基底稳定、地震活动性较弱、区域构造应力场方向为南东东。兰坪—思茅褶皱带在地质时期构造活动一直十分强烈、历史上6级多地震频繁发生、区域构造应力场方向为南东。通过水位观测数据分析, 开远井和思茅大寨井均有明显的同震响应现象, 同震响应均表现为阶变, 但他们的同震响应动态差异明显, 其中开远井同震阶变次数和阶变幅度明显低于思茅大寨井, 主要为阶变下降。而思茅大寨井均为阶变上升。井孔所在地区应力应变环境差异是导致井水位同震响应动态差异的原因, 震源机制和GPS观测结果显示, 思茅大寨井所在地区构造应力为挤压, 开远井地区则处于拉张。地震时地震波使一直处于挤压状态下的思茅大寨井含水层发生孔隙挤压, 含水层发生同震收缩, 导致井水位发生一致的阶变上升。地震使一直处于张应力环境的开远井含水层发生同震膨胀, 导致井水位主要表现为阶变下降。由构造活动和地震活动水平反映出的构造应力强度差异可能是开远井和思茅大寨井同震阶变次数和幅度差异的原因之一。

关键词: 开远井和思茅大寨井; 同震响应动态; 应力应变环境

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0048-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.07

Analysis of the Dynamic Difference of Coseismic Response of Water Level Between Kaiyuan Well and Simao Dazhai Well in Yunnan

MAO Weiying

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

Abstract: The Kaiyuan well and Simao Dazhai well are located in the Southeastern Yunnan folded belt and Lanping-Simao folded belt in Southwestern Yunnan. In the Southeastern Yunnan folded belt, the crust basement is stable, the seismicity is weak, and the direction of regional tectonic stress field is SEE. The tectonic activity of Lanping-Simao folded belt has been very strong in geological era, with multiple earthquakes of magnitude 6 occurring frequently in history and the direction of regional tectonic stress field is southeast. Through the analysis of water level observation data, it is found that both Kaiyuan well and Simao Dazhai well have obvious coseismic

收稿日期: 2023-03-11

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)

作者简介: 毛巍颖(1985-), 女, 工程师, 主要从事地震监测预报研究。

E-mail: 897162514@qq.com

response phenomenon, and both coseismic responses show step changes with obvious dynamic differences. The frequency and amplitude of coseismic step changes of Kaiyuan well is obviously lower than that of Simao Dazhai well. Most of the coseismic response of Kaiyuan well are step drop, and all of the coseismic response of Simao Dazhai Well are step rise. The difference of stress-strain environment in the area where the wells are located is the reason for the dynamic difference of coseismic response of well water level. Focal mechanism and GPS observation results show that the tectonic stresses in the areas where Simao Dazhai well and Kaiyuan well are located are compression and tension respectively. During the earthquake, the seismic wave caused the pore squeezing of the aquifer in the Simao Dazhai well, which has been in the squeezing state, and the aquifer was coseismic contracted, resulting in a consistent step rise of the well water level. The earthquake caused the coseismic expansion of the aquifer in the Kaiyuan well, which has been in a tensile stress environment, resulting in a step drop of the well water level. The intensity difference of tectonic stress reflected by the level of tectonic activity and seismic activity may be one of the reasons for the difference in the frequency and amplitude of coseismic step changes between Kaiyuan well and Simao Dazhai well.

Keywords: Kaiyuan well and Simao Dazhai well; Coseismic response dynamic; Stress-strain field.

0 引言

地下水广泛、普遍存在于地壳上部或表层,对上地壳各种动力作用响应灵敏,能够客观、灵敏、广泛地反映地壳应力应变信息,不仅记录了地震孕育发生的许多信息,使其成为震情跟踪和地震短临预报的重要手段之一,同时也记录了由地震波激发的同震响应现象,因此地下水观测数据中不仅包括地震孕育发生信息,而且还包含了大量同震响应数据^[1-3]。加强对地下水观测中同震响应现象研究和去除,对震情跟踪和地震短临预报十分重要。井水位观测是地下水观测重要方式,井水位同震响应十分普遍,迄今为止井水位同震响应研究一直被重视^[1-7]。井水位同震响应十分复杂,不同地区不同观测井水位同震响应特点不同^[4],就同一观测而言,有的观测井同震响应阶变方向一致好,即总是阶变上升或下降^[5-6,9];有的观测井水位对不同地震的同震响应形态不同,有的上升、有的下降^[7-8]。同震响应机理认识也是复杂的,认为含水层的岩体结构、岩性、导水系数、渗透性等对井水位同震响应幅度影响大,灰岩或花岗岩、导水系数大、渗透性能好的井水位同震响应幅度大^[5]。近些年来,井孔区地质构造环境影响井水位同震响应,特别是井孔及周围地区构造应力应变与水位同震响应关系研究不断得到重视,认为井孔所在区构造应力—应变环境对井水位同震响应有影响^[1-3,10-12]。目前,井水位同震响应研究主要采取一井多震研究和一震多井研究^[1]。本文用一井多震和一震多井相结合方

式,分析了云南开远井和思茅大寨井水位对多次地震的同震响应及其动态差异、两口井所在地区构造应力—应变环境,分析了两口井水位同震响应动态差异的主要原因。对利用井水位同震响应特点揭示井孔地区构造应力—应变状态,分析井孔地区构造应力—应变积累动态和地震预测具有一定意义。

1 开远井和思茅大寨井概况

思茅大寨井和开远井是云南地区重要的地下流体观测井,两井之间相隔 250 km。

1.1 开远井

开远井地理位置为北纬 23°45′、东经 103°15′,地处滇东南开远盆地北缘,井深 224.0 m。开远井孔于 1984 年 1 月完工,1985 年 7 月开始观测,观测仪器为 SW40-1 型水位计。井孔含水层为三叠系法郎组灰岩(图 1b),水体为裂隙承压水,主要由地下径流补给。该井对固体潮汐、气压效应及某些附加应力反应灵敏,固体潮潮差最大为 91 mm,气压效率为 1:5.5。根据 2014 开展的温度梯度测试,开远井水温随井孔深度增加,呈现出持续上升,不同深度差别不大。开远井水化学类型为 HCO₃-Ca-Na,其中 Ca²⁺、Mg²⁺与 Na⁺、K⁺之间有少量的阳离子置换过程^[13]。该井能记录到省内 5.0 级以上地震。

根据图 2,开远井位于小江断裂以东、红河断裂以北,这两条均为深大断裂,井孔所在地区属滇东南褶皱带。滇东南褶皱带在古生代为稳定的地台

发展时期，广泛发育厚达万米的碳酸盐建造和部分陆屑岩建造；中生代时期转化为地槽，沉积了巨厚的复理石建造。表明该地区地壳基底稳定，地震活动性较弱，历史上只发生过5级多地震。开远井所在地区构造应力场方向为南东东^[14]。

1.2 思茅大寨井

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′，井深112.27 m。该井水位观测始于1984年，观测仪器为SW40-1型水位仪。井孔7.5 m以上为第四系残坡积沙土层，7.5 m以下主要为白垩系泥质粉砂岩(图1a)。思茅大寨井水温随井孔深度增加缓慢上升，在80 m处水温开始快速上升，表明井孔在80 m以下流体交换较为明显。该井成井之初的水化学类型为HCO₃-Ca型，近些年随着周边环境变化，2017年背景值普查时，水化学类型已演化为HCO₃-Ca-Na型水，氢氧同位素结果显示含水层主要为大气降水补给^[13]。

根据图2，思茅大寨井位于属深大断裂的红河断裂以南、澜沧江断裂以东，这两条断裂之间属兰坪—思茅褶皱带。在地质时期，兰坪—思茅褶皱带

一直处于构造活动十分强烈的冒地槽、地槽发展，发育局厚的复理石建造、磨拉石建造、火山岩建造。该期地震活动强烈，历史上6级多地震频繁发生。思茅大寨井所在地区构造应力场方向为南东^[14]。

2 思茅大寨井与开远井水位同震响应

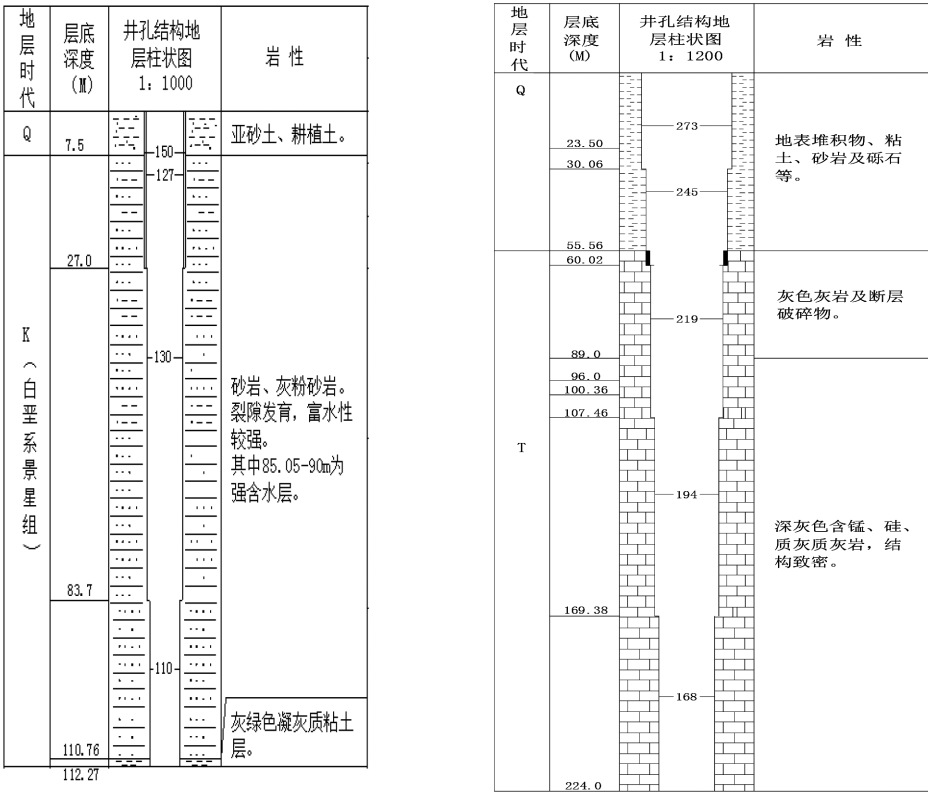
2.1 思茅大寨井水位同震响应

思茅大寨井是云南记录同震响应最多的井，1988—2017年共出现27次的同震响应^[9, 19](图3)。

思茅大寨井水位具有很强的同震响应能力。对距离台站5 km范围内的3、4级地震具有较高响应率。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3 000 km。

思茅大寨井水位同震响应主要有以下动态特点：

(1)阶变是思茅大寨井水位同震响应方式，自1988年至2017年的30年中出现的27次同震响应均为阶变上升(表1)。



a. 思茅大寨井井孔地质剖面 b. 开远井井孔地质剖面

图1 思茅大寨井和开远井井孔地质剖面图

Fig.1 The borehle geological profile map of Simao Dazhai well and Kaiyuan well

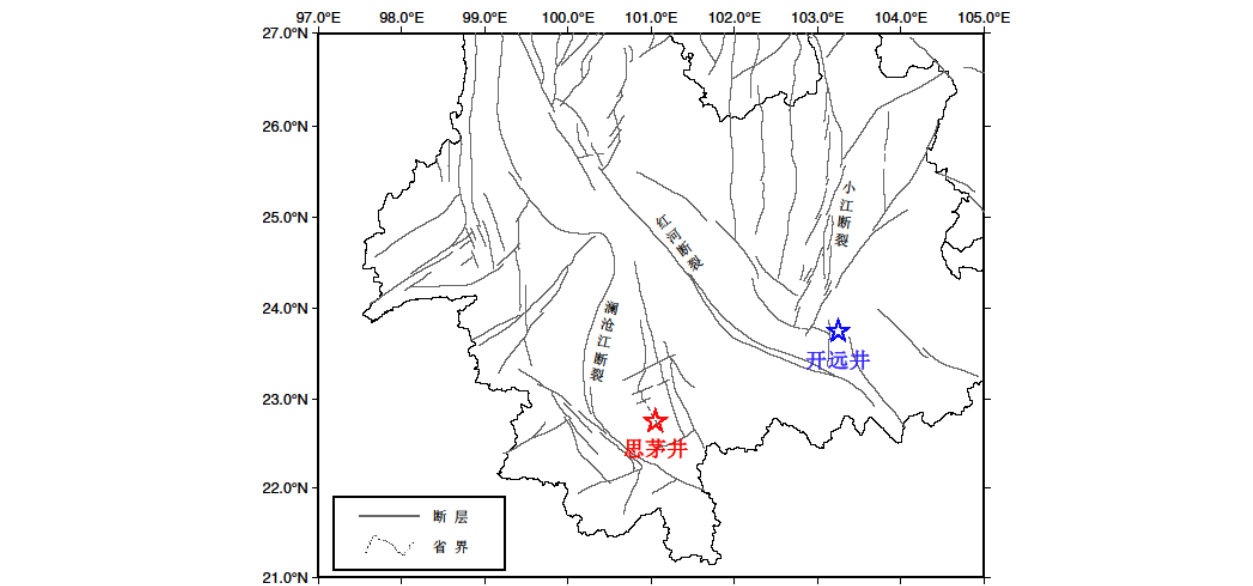
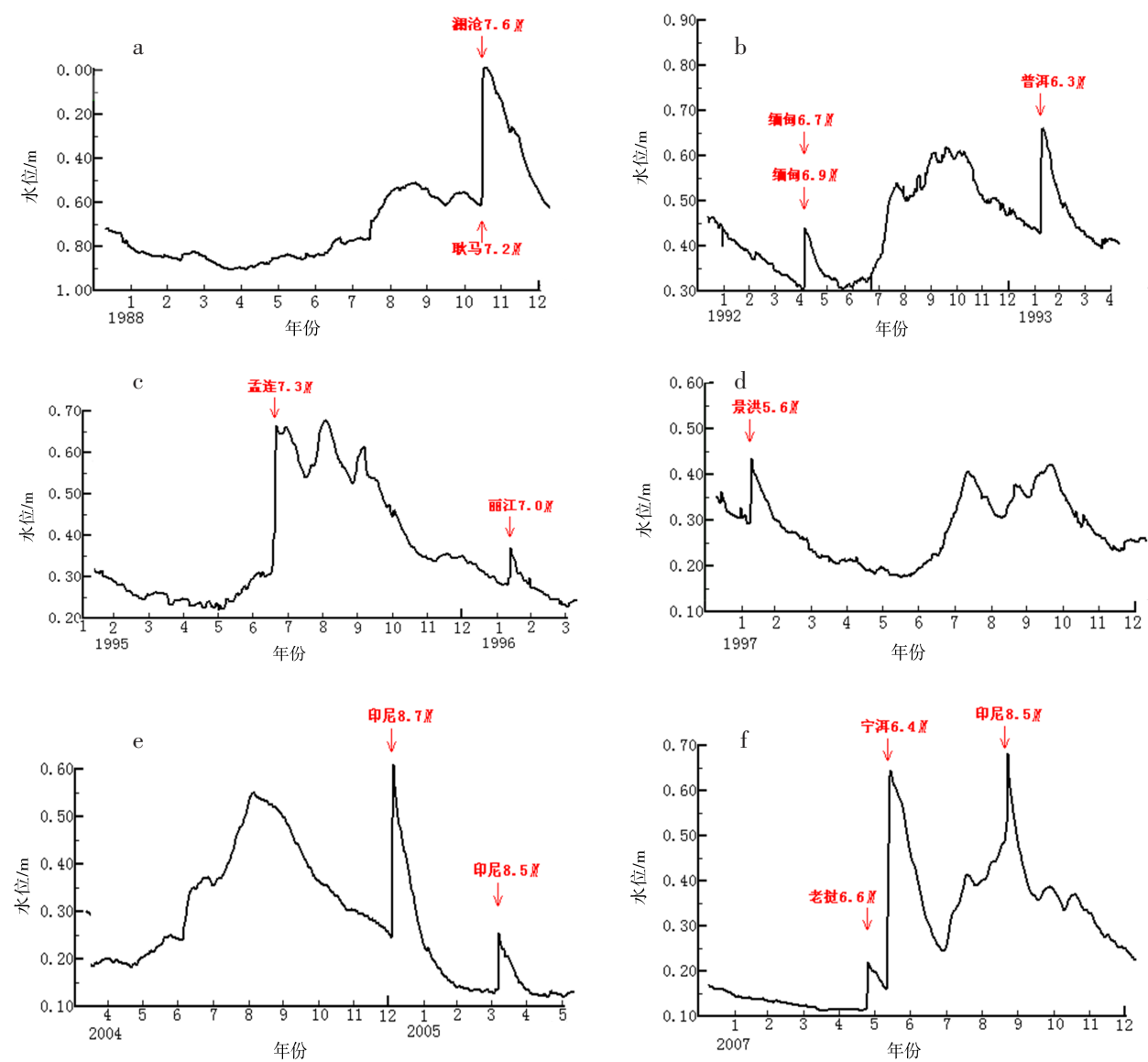


图2 开远井和思茅井地质构造环境

Fig.2 The geological tectonic map of Kaiyuan well and Simao Well



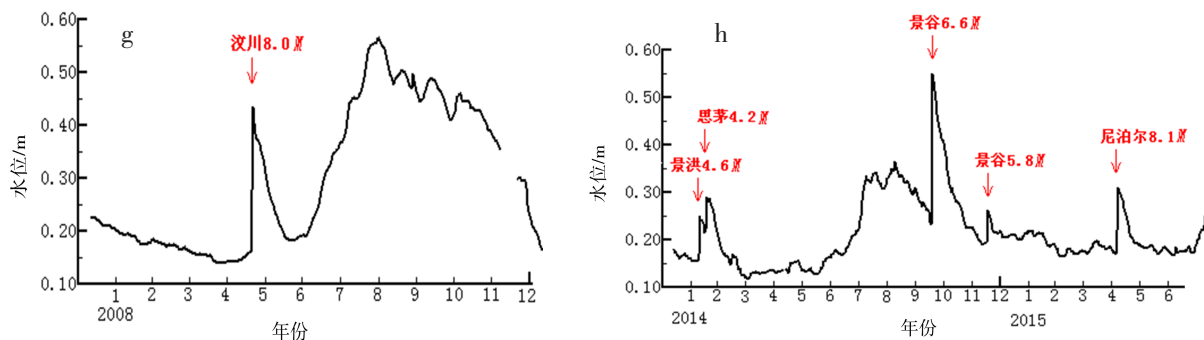


图3 思茅大寨井部分水位同震响应图

Fig.3 Some coseismic response diagrams of water level in Simao Dazhai well

(2) 27次同震上升阶变中有16次阶变幅度达0.10 m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0.571 m。

2.2 开远井水位同震响应

开远井有比较明显的同震响应, 在思茅大寨井出现的23次5级以上地震同震响应中, 开远井对其中的17次地震发生同震响应(图4), 对另外6次地震没有同震响应现象出现。

开远井水位同震响应主要有以下特点:

(1) 开远井水位对云南及周边300 km范围5级以上地震可能出现同震响应现象。从震中距的角度, 对井震距500 km以内的5~7级地震不出现同震响应的比例仅50%, 1 000 km以外的8级以上地震出现同震响应比例高。

(2) 开远井水位同震响应均为阶变, 阶变幅度与震级和井震距相关。开远井水位出现的最大同震响应是井震距为380 km的1988年11月6日澜沧耿马7.6、7.2级地震的0.231 m, 除此之外, 2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震、2008年5月12日四川汶川8.0级地震、2015年4月25日尼泊尔8.1级地震对开远井形成的同震响应幅度分别为0.116 m、0.171 m和0.117 m。阶变幅度在0.05~0.10 m的同震响应7次, 其中6级多地震2/6次、7级多地震2/7次、8级多地震3/8次,

(3) 从响应动态角度, 开远井水位同震响应以阶变下降为主。除2007年老挝6.6级地震外, 开远井其余水位同震响应均为阶变下降(表1)。

3 思茅大寨井与开远井水位同震响应动态特征及其机理分析

图3和图4分别给出了思茅大寨井和开远井记录到的典型同震响应。表1列出了开远井和思茅大

寨井水位对23次地震的同震响应情况。

根据图3、图4和表1, 开远井水位除对2007年5月16日老挝6.6级地震同震响应为阶变上升、水位的上升幅度0.091 m外, 开远井水位的其他16次同震响应均为下降阶变。思茅大寨井水位出现的同震响应全部为阶变上升。反映出开远井和思茅大寨井水位同震响应动态明显不同。

开远井和思茅大寨井水位同震响应都不随震级、震中距、震源破裂机制不同而变化, 均表现为同震阶变, 并且思茅大寨井水位一直为阶变上升, 开远井除2007年老挝地震外, 一直为阶变下降。说明开远井和思茅大寨井水位同震响应动态一致性明显。

开远井水位同震阶变幅度最大为0.231 m, 思茅大寨井最大同震阶变幅度是0.571 m。

井水位同震响应反映地壳形变和地面震动引起地下介质变形、孔隙梳头、裂隙的清理等机制, 响应方式主要由井孔区地质构造和水文地质条件决定^[15]。

地下水的动态变化是含水层系统受到力的作用的结果, 与静态应力有关。水位同震响应变化的类型和其所处区域应力一应变场状态的变化有关^[8]。

地下水的各种应力响应分为断层位错产生的静应力和来自地震波的动应力, 其中地震波的动应力对水位同震响应的影响有限。水位阶梯状变化是多孔弹性的含水层介质对静态应力场的响应, 静态应变引起水位同震阶变。对于水位动态而言, 含水层受压时上升, 拉张时下降^[1-3, 16]。

井水位同震响应能力和形态特征改变, 可能揭示地下水动力学作用过程。井孔区区域应力增强, 地震波激发含水层受力发生应变, 引起含水层应力一应变状态改变, 导致含水层导水能力和孔隙水压变化, 从而产生水位阶变上升^[17]。

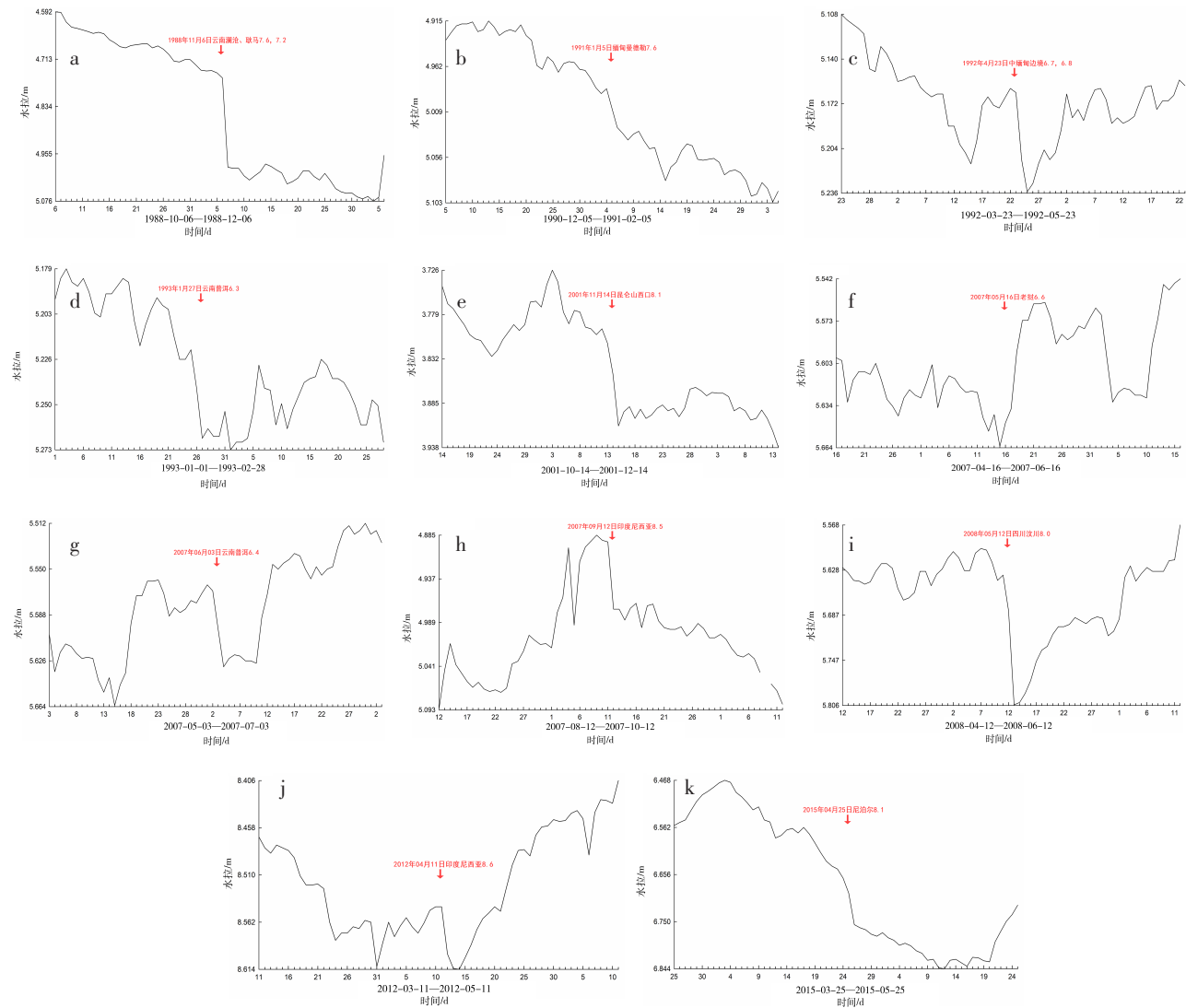


图4 开远井水位同震响应图

Fig.4 Some coseismic response diagrams of water level in Kaiyuan Well

表1 思茅大寨井和开远井水位同震响应对比一览表

Table 1 Comparison of coseismic response of water level between Simao Dazhai well and Kaiyuan well

| 序号 | 震级范围 | 发震时间/年-月-日 | 地点 | 震级/M | 思茅大寨井 | | 开远CK3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 幅度/m |
| 1 | 5.0 ~ 5.9 | 1997-01-30 | 云南景洪 | 5.6 | 60 | +0.121 | 241 | 0 |
| 2 | 5.0 ~ 5.9 | 2014-12-06 | 云南景谷 | 5.8 | 90 | +0.064 | 284 | -0.042 |
| 3 | 6.0 ~ 6.9 | 1992-40-23 | 中缅边境 | 6.7、6.8 | 200 | +0.132 | 454 | -0.068 |
| 4 | 6.0 ~ 6.9 | 1993-01-27 | 云南普洱 | 6.3 | 23 | +0.234 | 230 | 0 |
| 5 | 6.0 ~ 6.9 | 2000-01-15 | 云南姚安 | 6.5 | 300 | +0.02 | 291 | 0 |
| 6 | 6.0 ~ 6.9 | 2007-05-16 | 老挝 | 6.6 | 240 | +0.034 | 643 | +0.091 |
| 7 | 6.0 ~ 6.9 | 2007-06-03 | 云南普洱 | 6.4 | 36 | +0.473 | 230 | -0.024 |
| 8 | 6.0 ~ 6.9 | 2014-10-07 | 云南景谷 | 6.6 | 100 | +0.289 | 284 | 0 |
| 9 | 7.0 ~ 7.9 | 1988-11-06 | 云南澜沧耿马 7.6、7.2 | | 170 | +0.571 | 380 | -0.231 |

(转下表)

(接表 1)

| 序号 | 震级范围 | 发震时间/年-月-日 | 地点 | 震级/ <i>M</i> | 思茅大寨井 | | 开远 CK3 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 |
| 10 | 7.0 ~ 7.9 | 1991-01-05 | 缅甸曼德勒 | 7.6 | 560 | +0.106 | 776 | -0.053 |
| 11 | 7.0 ~ 7.9 | 1995-07-12 | 云南孟连西 | 7.3 | 200 | +0.251 | 448 | -0.013 |
| 12 | 7.0 ~ 7.9 | 1996-02-03 | 云南丽江 | 7.0 | 510 | +0.091 | 484 | -0.053 |
| 13 | 7.0 ~ 7.9 | 2003-09-22 | 缅甸 | 7.2 | 690 | +0.099 | 890 | 0 |
| 14 | 7.0 ~ 7.9 | 2011-03-24 | 缅甸 | 7.2 | 260 | +0.258 | 483 | -0.034 |
| 15 | 7.0 ~ 7.9 | 2012-11-11 | 缅甸 | 7.0 | 510 | +0.063 | 747 | 0 |
| 16 | 8.0 ~ 8.9 | 2001-11-14 | 昆仑山口西 | 8.1 | 1840 | +0.398 | 1589 | -0.116 |
| 17 | 8.0 ~ 8.9 | 2004-12-26 | 印度尼西亚 | 8.7 | 2180 | +0.365 | 2343 | -0.029 |
| 18 | 8.0 ~ 8.9 | 2005-03-29 | 印度尼西亚 | 8.5 | 2300 | +0.115 | 2623 | -0.027 |
| 19 | 8.0 ~ 8.9 | 2007-09-12 | 印度尼西亚 | 8.5 | 3000 | +0.165 | 3141 | -0.08 |
| 20 | 8.0 ~ 8.9 | 2008-05-12 | 四川汶川 | 8.0 | 950 | +0.277 | 862 | -0.171 |
| 21 | 8.0 ~ 8.9 | 2012-04-11 | 印度尼西亚 | 8.6 | 2430 | +0.07 | 2623 | -0.069 |
| 22 | 8.0 ~ 8.9 | 2015-04-25 | 尼泊尔 | 8.1 | 1780 | +0.139 | 1916 | -0.117 |
| 23 | 9.0 | 2011-03-11 | 日本 | 9.0 | 4300 | +0.023 | 4040 | -0.077 |

(注:同震阶变幅度“+”为上升,“-”为下降)

地震孕育过程影响井孔所在区域含水层应力状态的变化,从而影响含水层的导水系数。应力增大,含水层孔隙率变小,岩石渗透性降低。含水层受张应力作用,孔隙率变大,渗透性变强,导水系数变大,井水位记震能力可能增加^[18]。

常见的井水位同震响应是水位上降^[20],这一点和思茅大寨井相一致。但开远井同震响应却以阶变下降为主,说明开远井和思茅大寨井水位同震响应动态完全不同。

井水位同震响应机理是复杂的。Brodsky E E^[20]、Elkhoury J E^[21]、Quilty E G^[22]等从井孔含水层应力、应变角度分析了水位同震响应机理。

Brodsky E E^[20]认为,地震导致的井水位变化可以解释为静态应力改变,地震波作用于含水层导致孔隙压力持续变化,产生水位阶变。数百公里以外的地震可以产生 10 cm 以上的持续性井水位变化,这种变化与井孔含水层的特征储水量 S_s 有关,特征储水量又与含水层和流体的压缩率相关^[20]:

$$S_s = \rho g (\alpha + \phi \beta) \tag{1}$$

式(1)中, ρ 为水的密度, g 为重力加速度, α 为含水层的压缩率, β 为流体的压缩率, ϕ 为含水层岩石的孔隙度。

Elkhoury J E^[21]认为,地震波作用改变含水层

渗透率,渗透率变化与含水层的应变响应有关^[21]:

$$\Delta k = R \frac{v}{c} \tag{2}$$

式(2)中, Δk 为地震时的岩石渗透率变化, R 为渗透率对应变的响应, v 为地面峰值速度的垂直分量, c 为地震波相速。

构造应力作用不仅可以改变岩石渗透率,而且还改变岩石孔隙率^[28]。作用于井孔含水层地震应力包括静态应力场和动态应力,其中静态应力场可能是拉张、也可能是挤压^[18]。Quilty E G^[22]认为,同震水位是上升还是下降取决于井孔地区是同震收缩还是同震膨胀,井水位的变化量应当与静态应力场振动幅度一致^[22]。

水位或孔隙压力的同震变化与地震引起的体应变有关。含水层孔隙压力的变化幅度 ΔP 与体应变变化幅度 $\Delta \epsilon$ 有关,并且与井水位变化幅度 Δh 有联系^[15]:

$$\Delta P = -\frac{B \Delta \sigma_{kk}}{3} = -BK_u \Delta \epsilon \tag{3}$$

式(3)中, ΔP 为含水层孔隙压力变化幅度, B 为不排水条件下的平均应力引起的孔隙压力变化与应力变化间的比值, K_u 为体积弹性模量, $\Delta \epsilon$ 为体应变变化幅度。

$$\Delta P = \rho g \Delta h \tag{4}$$

式(4)中 Δh 为井水位变化幅度, ρ 为水的密度或浓度, g 为重力加速度。

综上所述,井孔地区应力应变环境是影响井水位同震响应动态特征的重要因素^[23-26],可以解释开远井和思茅大寨井水位同震响应阶变相反的现象。开远井水位受地壳应力应变影响,井孔附近地区GPS观测结果显示开远井处于拉张状态^[27]。从现代构造应力场角度,开远井位于小江断裂以东地区,小江断裂以西构造应力场为南东向,以东为南东东,这种差异导致开远井孔地区张应力形成。思茅大寨井地处红河断裂和澜沧江断裂之间的兰坪—思茅褶皱带,受澜沧江断裂以西地区北东向挤压的构造应力场作用下,兰坪—思茅褶皱带处于挤压状态,也使思茅大寨井含水层处于挤压应力环境^[14]。根据洪敏等对10年来GPS观测分析,思茅大寨井孔所在地区10年来一直处于收缩状态,开远井地区10年来一直处于膨胀状态。

由于开远井处于张性应力环境,地震时地震波激发含水层张应力,使整个含水层产生同震膨胀、孔隙率变大、渗透性变强、导水系数变大,导致井水位阶变下降。相反,思茅大寨井处于压性应力环境,地震时地震波使挤压状态下的含水层孔隙挤压,使含水层产生同震收缩、含水层孔隙率变小、岩石渗透性降低,导致井水位发生阶变上升。

上述开远井和思茅大寨井水位同震响应特征反映了两个井孔区现代构造应力场特点,前者以持续性张应力作用为主,后者则一直处于持续性挤压应力作用。

4 结论

(1)开远井和思茅大寨井水位同震响应动态明显不同,同震响应阶变相反。开远井水位对2007年5月16日老挝6.6级地震同震响应为阶变上升,水位的上升幅度0.091 m。除此之外,开远井水位的其他16次同震响应均为下降阶变。与之相反,思茅大寨井水位出现的同震响应全部为阶变上升。反映出开远井和思茅大寨井水位同震响应动态明显不同。

(2)开远井和思茅大寨井水位同震响应动态一致性明显,同震响应都不随震级、震中距、震源破裂机制不同而变化,均表现为同震阶变,并且思茅大寨井水位一直为阶变上升,开远井除2007年老挝地震外,一直为阶变下降。

(3)思茅大寨井水位同震响应幅度大于开远井,其中思茅大寨井同震阶变有15次达到0.10 m以上,而开远井0.10 m以上的同震阶变只有4次。

(4)开远井和思茅大寨井分别位于不同地质构造单元,其中开远井位于地壳基底稳定、构造活动较弱、地震活动水平较低的滇东南褶皱带,井孔所在地区构造应力场方向为南东东。思茅大寨井位于地质时期构造运动十分强烈、历史上6级多地震频发的兰坪—思茅褶皱带,井孔所在地区构造应力场方向为南东。震源机制和GPS观测结果显示,思茅大寨井所在地区构造应力为挤压,开远井则处于拉张环境。井孔地区应力-应变环境差异是开远井和思茅大寨井水位同震响应动态差异的主要原因,由于思茅大寨井处于挤压环境,其同震响应表现为一致的阶变上升;而开远井处于拉张环境,其同震响应表现为一致的阶变下降。由构造活动和地震活动水平反映出的构造应力强度差异可能是开远井和思茅大寨井同震阶变幅度差异的原因之一。

参考文献

- [1] 陶志刚,王晓,祝杰,等. 青海门源 $M_s6.9$ 地震井水位与水温同震响应特征分析[J]. 中国地震,2022,38(3):399-411.
- [2] 姜佳佳,冯建刚,张昱. 玛多 $M_s7.4$ 级地震引起的甘肃地区水位、水温同震响应特征分析[J]. 高原地震,2022,34(1):1-7.
- [3] 王秋宁,李媛媛. 陕西区域流体台网记录玛多7.4级、门源6.9级地震远场同震响应特征对比[J]. 高原地震,2022,34(2):10-15.
- [4] 郑江蓉,杨从杰,江昊琳. 江苏流体井网对汶川和日本地震的同震响应特征研究[J]. 地震研究,2013,36(1):34-41.
- [5] 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):37-45.
- [6] 缪阿丽,张艺,叶碧文,等. 江苏井网水温水位对几次大地震的同震响应特征及机理分析[J]. 地震,2014,34(4):78-87.
- [7] 向阳,孙小龙,高小其,等. 新10井水位对九寨沟 $M_s7.0$ 、精河 $M_s6.6$ 地震同震响应[J]. 中国地震,2017,33(4):563-574.
- [8] 颜龙,梁卉,向阳,等. 新疆北天山地区井水位同震响应特征分析研究[J]. 内陆地震,2019,33(1):59-67.
- [9] 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.
- [10] 段胜朝,张山元,番绍辉,等. 2021年漾濞 M_s 地震云南数字化井水位同震响应特征分析[J]. 地震地磁观测与研究,2022,43(4):131-138.

- [11] 陶志刚, 刘春国, 赵德扬. 2022 年芦山 $M_s6.1$ 、马尔康 $M_s6.0$ 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): 121–130.
- [12] 魏海滨, 谷洪彪, 孔慧敏, 等. 云南会泽井水位对 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震同震响应过程模拟[J]. 地震研究, 2022, 45(2): 329–339.
- [13] 胡小静, 付虹, 卞跃跃, 等. 云南红河地区地下流体井-含水层系统特征研究[J]. 地震研究, 2022, 45(2): 300–309.
- [14] 毛玉平. 云南地区强震 ($M \geq 6$) 研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003: 15–18.
- [15] 李颖, 殷伟伟, 胡玉良, 等. 山西洪洞井水位对远场大地震的响应特征分析[J]. 中国地震, 2018, 34(1): 93–103.
- [16] 周志华, 黎明晓, 马玉川. 芦山 $M_s7.0$ 地震引起的水位同震响应特征分析[J]. 四川地震, 2014(2): 20–25.
- [17] 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]. 中国地震, 2018, 34(3): 525–533.
- [18] 崔瑾, 司学芸, 孙小龙, 等. 宁夏井水位记震能力变化与周边地震关系研究[J]. 地震, 2021, 41(3): 131–143.
- [19] 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.
- [20] Brodsky E E, Roeloffs E, Woodcock D, et al. A mechanism for sustained groundwater pressures changes induced by distant earthquakes[J/OL]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (B8) [2023–3–10]. <https://doi.org/10.1029/2002JB002321>.
- [21] Elkhoury J E, Brodsky E E, Agnew D C. Seismic wave increase permeability[J]. Nature, 2006, 441 (29): 1135–1138.
- [22] Quilty E G. Water level changes in response to the December 20, 1994 $M4.7$ earthquake near Parkfield, California[J]. Bulletin of the Seismological of America, 1997, 87(2): 310–317.
- [23] Zhang Y, Wang C Y, Fu L Y, et al. Mechanism of the coseismic change of volumetric strain in the far field of earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2017, 107(1): 475–481.
- [24] 廖丽霞, 秦双龙, 莫佩婵. 华南流体预测指标提取及应用实例[J]. 华南地震, 2022, (04): 67–77.
- [25] 莫佩婵, 袁媛, 文翔, 等. 广西九塘井水位突变异常映震效能分析[J]. 华南地震, 2022, (04): 94–101.
- [26] 毛魏颖. 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, (01): 31–37.
- [27] 付虹, 邬成栋, 赵小艳, 等. 云南开远井水位异常分析[J]. 地震学报, 2014, 36(2): 292–298.
- [28] 仵彦卿. 岩石孔隙率随地层深度变化规律研究[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(1): 6–8.