

重庆井网水位水温同震响应特征分析¹

巩浩波 郭卫英 李光科 陈敏 杨林

(重庆市地震局, 重庆 401147)

摘要 本文以 2008 年以来全球范围内发生的 5 次大地震为例, 对重庆井网水位和水温同震响应特征进行了分析, 结合井孔水文地质条件和自身观测条件, 探讨了不同同震响应现象的可能成因并对其机理进行了探讨。结果表明, 水位的记震能力优于水温, 水位同震响应形态主要包括上升、下降和振荡三种类型, 且同一口井水位对不同地震的响应形态不同; 水温的同震响应形态主要包括上升和下降两种类型, 其中只有荣昌华江和北碚柳荫井水温对 5 次地震均有同震响应, 且同一口井水温对不同地震的响应形态相同。进一步分析表明, 北碚柳荫井水位的同震响应能力优于荣昌华江井水位, 北碚柳荫井水位的同震振幅与地震能密度成正比, 并给出了其同震变化幅度与地震能量密度的对应关系。最后分别对水位和水温同震响应机理进行了探讨。

关键词: 水位 水温 同震响应 能量密度 重庆井网

前言

地下水具有普遍性、流动性和难以压缩性, 当它成为一个封闭的受压系统时, 可以客观灵敏地描绘地壳中的应力变化状态 (Bodvarsson, 1970)。对地下水位、水温同震效应的研究是揭示地壳介质对应力-应变过程响应最直接和最有效的手段之一 (Roeloffs, 1998)。一次大地震所产生的能量足以引起数千公里地壳介质的动态变化, 地下流体对远大地震的响应, 则可以反映出地下介质孔隙压力、贮层应变的变化特征 (Montgomery 等, 2003)。

国内外众多学者对水位和水温的同震响应做了大量的研究工作。关于水位同震响应的机理, 如: Eaton 等 (1959) 在研究中发现, 当高频瑞利波通过含水层时, 使得含水层中压力水头产生快速变化, 进而使地下水快速流出或流入井筒中, 造成井中水位快速震荡; Hsieh 等 (1987) 指出, 受压含水层的水井对不同周期范围的波动会有不同程度振幅的效应, 因而井中同震水位的振幅并不一定等于波动的振幅; 杨竹转等 (2008) 指出, 水位同震升降性质受控于当地的地质构造环境和水文地质条件, 而水温同震变化还与地震波引起的井孔中水的运动方式、水温探头放置的位置等因素有关, 其机理更为复杂; 杨竹转等 (2014) 分析了 8 个井水位对汶川、芦山地震的同震变化, 重点分析了 3 口同震变化反向的井点, 指出汶川地震时这 3 口井水位同震变化与井点位置处的同震体应变一致, 而芦山地震时则不一致, 因此提出了有同震体应变以外的影响因素在起作用。对水温同震响应机理的研究也有很多, 如: 陈大庆等 (2007) 提出了同震水温下降的气体

1 基金项目 2015 年度震情跟踪定向工作任务 (2015010303); 重庆市地震局 2015 年度科研课题

[收稿日期] 2015-05-26

[作者简介] 巩浩波, 女, 生于 1985 年。硕士, 助理研究员。主要从事地震地下流体监测与研究。E-mail: gsqyhb@163.com

脱逸模式；孙小龙等（2008）指出，水温突降-缓升型的响应机理主要有气体逸出说、井内水体热弥散说和冷水下渗说三种；鱼金子等（2012a）指出，井水位对地震波响应的时延、振荡的幅度、振荡的持续时间等的差异主要取决于井-含水层系统的导水系数，各井水温升降的幅度、持续时间等不同，主要是井水温度梯度与水岩热传导系数不同引起的。

本文以 2008—2015 年期间发生的 5 次重大地震为例，研究了重庆井网观测井水位和水温同震响应的特征，并结合井孔水文地质条件和井孔自身观测条件，探讨了不同井水位和水温同震响应现象的可能成因。

1 重庆井网概况及水位水温变化基本特征

重庆地下流体前兆监测台网目前有 6 口水位和水温同井运行观测，各台均有气象三要素辅助观测，均为“十五”架设无人值守数字化观测台点（图 1）。观测井主要集中在渝西，沿华蓥山基底断裂带分布。观测井孔的基本参数见表 1（因万州溪口台井水位受长江三峡的影响，无同震记录，此文不做研究）。水位观测使用 LN-3A 或 SWY-1 型数字水位仪，传感器分辨率为 1mm，水温观测使用 SZW-1A 型数字水温仪，传感器分辨率为 0.0001℃。

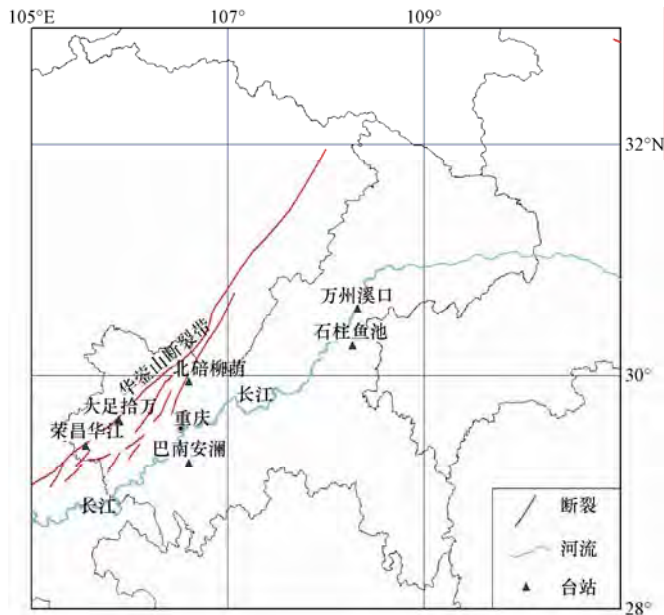


图 1 重庆地下流体观测台站分布图

Fig. 1 Distribution of the subsurface fluid stations in Chongqing

表 1 重庆地下流体观测台站基本情况

Table 1 General information of the subsurface fluid stations in Chongqing

井点名称	构造部位	观测层岩性	井深(m)	井泉类型	地下水类型	始测时间(年-月)
荣昌 华江	华蓥山断裂西南	砂岩	251	非自流	裂隙 承压水	2007-11

续表

井点名称	构造部位	观测层岩性	井深(m)	井泉类型	地下水类型	始测时间(年-月)
北碚柳荫	观音峡冲断背斜东翼	泥岩夹砂岩	105.36	非自流	裂隙承压水	2007-11
大足拾万	西山背斜北西翼	泥岩夹砂岩	108.7	非自流	裂隙承压水	2007-11
巴南安澜	南温泉背斜右翼	泥岩夹砂岩	201.58	自流	基岩承压水	2007-11
石柱鱼池	石柱向斜与方斗山冲断背斜间	砂岩、泥岩	250.58	非自流	裂隙承压水	2008-07
万州溪口	万州向斜	砂岩页岩互层	112.2	非自流	裂隙承压水	2008-07

说明：巴南安澜 2007 年 11 月—2008 年 11 月为静水位观测，2008 年 12 月改造为动水位观测。

2 水位水温同震响应特征分析

重庆数字化水位、水温自观测以来记录到了多次同震响应变化，有地方震、近震和远震，为研究同震响应特征提供了有利的资料。基于此，本文选取 2008 年以来 5 次有影响的大地震，所选地震基本信息见表 2。对比研究这几次地震对重庆井网 5 口观测井水位水温造成的同震响应变化，见表 3。

表 2 所选地震基本信息

Table 2 Basic information of selected earthquakes

序号	地点	发震时间(年-月-日)	矩震级 M_w	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ E	地震破裂尺度/km
1	四川汶川	2008-05-12	$M_w 7.9$	31.00	103.40	194
2	日本本州东海岸附近海域	2011-03-11	$M_w 9.0$	38.10	142.60	1063
3	苏门答腊北部附近海域	2012-04-11	$M_w 8.6$	2.30	93.10	573
4	四川芦山	2013-04-20	$M_w 6.6$	30.30	103.00	27
5	尼泊尔	2015-04-25	$M_w 7.9$	28.20	84.70	194

表 3 重庆井网水位水温同震响应参数统计表

Table 3 Parameters coseismic response of water level and water temperature

测项	井位	汶川地震		日本地震		苏门答腊地震		芦山地震		尼泊尔地震	
		形态	震中距/km	形态	震中距/km	形态	震中距/km	形态	震中距/km	形态	震中距/km
静水位	荣昌华江	下降	269	振荡	3540	振荡	3280	上升	266	上升	2040
	北碚柳荫	下降	326	上升	3430	上升	3390	上升	349	上升	2140
	大足拾万	下降	281	下降	3495	下降	3330	上升	288	下降	2070
	石柱鱼池	—	—	振荡	3270	振荡	3500	振荡	507	振荡	2290

续表

测项	井位	汶川地震		日本地震		苏门答腊地震		芦山地震		尼泊尔地震	
		形态	震中距/km	形态	震中距/km	形态	震中距/km	形态	震中距/km	形态	震中距/km
动水位	巴南安澜	上升	361	上升	3460	下降	3320	上升	367	上升	2140
	荣昌华江	上升	269	上升	3540	上升	3280	上升	266	上升	2040
	北碚柳荫	下降	326	下降	3430	下降	3390	下降	349	下降	2140
水温	大足拾万	下降	281	/	3495	/	3330	/	288	/	2070
	石柱鱼池	—	—	/	3270	/	3500	/	507	/	2290
	巴南安澜	上升	361	/	3460	/	3320	/	367	/	2140

说明：表中“/”表示无反应，“—”表示无数据；巴南安澜在汶川地震时为静水位观测，于2008年12月改造为动水位观测。

在做对比分析前，首先根据地震的断层破裂长度和井震距的大小划分出近震和远震。一般以1—2个断层破裂长度为标准（Roeloffs, 1998; Wang 等, 2008），断层破裂长度是根据经验公式通过地震矩求得的（Wells 等, 1994），划分原则是2个断层破裂长度范围内为近震或近场地震，大于2个断层破裂长度的为远震或远场地震（杨竹转等, 2014）。地震破裂长度参数见表2。重庆井网中记录到汶川地震的井位井震距最大为361km，在2个断层破裂长度范围内，汶川地震为近震，其他井震距均超过了相应地震的2个断层破裂长度，因此，日本、苏门答腊、芦山、尼泊尔地震称为远震。

2.1 水位同震特征分析

从表3水位同震响应参数统计可知，重庆井网水位对地震的同震响应形态主要包括上升、下降和振荡三种类型，而同一口井水位对不同地震的变化形态也不一致。其中，符合近震同震变化与远震同震变化方向相反或不同的有北碚柳荫和荣昌华江井。北碚柳荫井水位在汶川地震时表现为下降，而在日本地震等4次远震时均表现为上升；荣昌华江井水位在汶川地震时表现为下降，而在日本和苏门答腊地震时表现为振荡，芦山和尼泊尔地震时表现为上升，同震变化形态呈多样化。汶川地震时，荣昌华江和北碚柳荫井位于体应变膨胀区，水位同震表现为下降，符合应变-水位的变化规律（杨竹转等, 2014）。大足拾万和巴南安澜井水位对5次地震的同震变化则不符合近震与远震同震变化方向不同的现象，大足拾万井同震变化方向多为下降型变化，只在芦山地震时表现为上升；巴南安澜井同震变化方向则多为上升型变化，只在苏门答腊地震时表现为下降。石柱鱼池因在2008年7月开始观测，未记录到汶川地震，因此没有较大的近震记录，对日本地震等远震的同震响应变化形态均表现为振荡型。

从以上的分析可知，水位的同震响应变化复杂，并没有特定的规律可循，与以往同一口井对不同地震的同震响应变化形态基本相同的研究结果（杨竹转等, 2008; 2010; 缪阿丽等, 2014）是不一致的。

2.2 水温同震特征分析

相比水位的同震响应变化,水温同震响应变化的形态则相对单一。从表 3 水温同震响应参数统计可知,重庆井网水温对地震的同震响应形态主要包括上升和下降两种类型。水温记录同震的能力要小于水位,其中只有荣昌华江井和北碚柳荫井水温对 5 次地震均有同震响应,且 2 口井对 5 次不同地震的同震方向始终保持一致,即荣昌华江井水温同震变化均为上升,北碚柳荫井水温同震变化均为下降。而大足拾万和巴南安澜 2 口井只对汶川地震有同震响应,对其他 4 次远震均无响应。其中,石柱鱼池井水温自观测以来未记录到同震变化。

3 荣昌和北碚的井水位同震响应对比研究

地震波传播的过程即是能量释放的过程,所以对于同一口观测井,震中距越小、释放能量越大的地震所能引起的井水位变化越明显。由此,可引入地震能量密度 $e(r)$,即指地震能量释放后,单位体积内的地震能量。地震能量密度 $e(r)$ 、震中距 r 、地震震级 M 之间有如下关系式 (Wang 等, 2008):

$$e(r) = 10^{1.45M - 3.03\log r - 4.24} \quad (1)$$

利用式 (1) 计算表 2 中所选地震对荣昌华江井和北碚柳荫井的地震能量密度,并作出各井的地震震级-震中距对数图,可确定不同地震的能量阈值。

3.1 单井同震响应研究

不同地震震地点不同,震级不同,释放能量不同,从而造成同一口观测井对于不同地震的响应有所差异。下面分别研究荣昌华江井和北碚柳荫井水位对于不同地震的响应差异,从震级、震中距、能量密度等方面分析产生差异的原因。

(1) 荣昌华江井

荣昌华江井深 251.0m,顶板埋深 8.76m,过水断面为钢管圆孔,安装深度 4.66—73.46m。荣昌井位于螺观山东南麓,水井点北面是螺观山背斜形成的走向东北-南西低山山地,南面是向斜形成的平缓丘陵。荣昌井所处地势利于汇水集水,且裂隙发育,有很好的导水通道。对多次地震都记录到同震,汶川地震时,荣昌水位震时阶降 0.922m,之后水位回升至略高于震前,日本地震等远震时水位出现振荡或小幅上升 (图 2)。

图 3 表示荣昌华江井能量密度分布与震级和震中距的关系,横轴表示震中距,纵轴表示震级,图中的直线是满足公式 (2) 的能量密度阈值线。坐标轴内的每个红色实心方块代表 1 次地震,图中 a、b、c、d、e 所代表的地震见表 2 所选地震,分别是汶川 M_w 7.9、日本 M_w 9.0、苏门答腊 M_w 8.6、芦山 M_w 6.6、尼泊尔 M_w 7.9。由图 3 可知,震级相同,地震能量密度与震中距呈反相关关系,如汶川地震 a 和尼泊尔地震 e;震中距相同,地震能量密度与地震震级呈正相关关系,如汶川地震 a 和芦山地震 d。随着震中距的增大 (d→a→e→c→b),荣昌华江井对地震的响应能力明显降低,水位形态由阶变→振荡,水位阶变的幅度与震级有关,水位阶变的方向从目前已有的震例总结为近震时水位下降,远震时水位上升。

(2) 北碚柳荫井

北碚柳荫观测井井深 105.36m,套管深 41.9m,观测含水层岩性为泥岩夹砂岩。由于砂岩含水层受透水性极弱的泥岩所分隔,砂、泥层间相互越流作用微弱,含水砂岩体呈孤立的含水单元。汶川地震时,北碚水位震时阶降约 0.936m,之后水位稍有回升,但未达

到震前；日本地震等远震时水位均出现阶升或振荡上升变化，日本地震振荡上升约 0.068m，苏门答腊地震振荡上升约 0.034m，芦山地震阶升约 0.063m，尼泊尔地震阶升约 0.042m（图 4）。

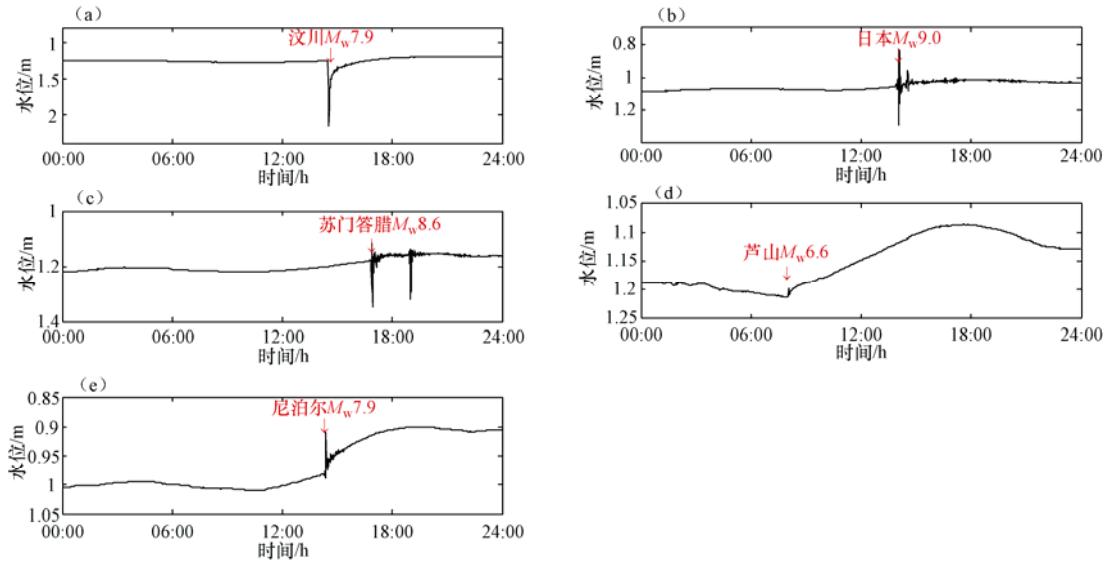


图 2 重庆荣昌华江井水位同震变化

Fig. 2 Coseismic groundwater level changes at Huajiang well of Rongchang county, Chongqing city

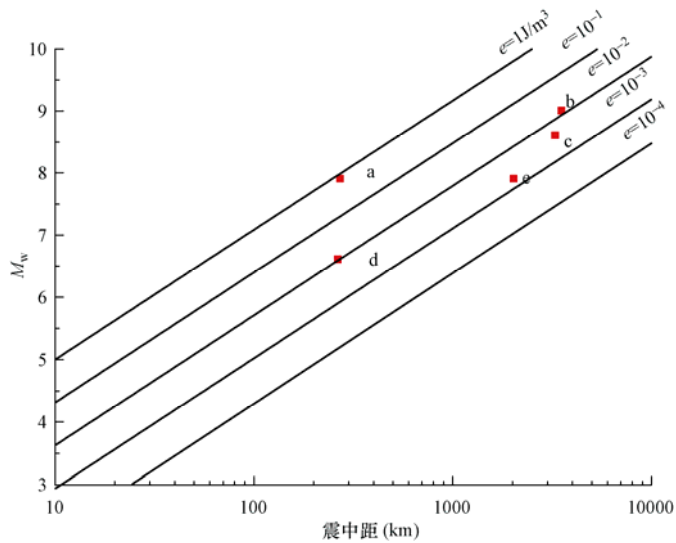


图 3 荣昌华江井能量密度分布与震级和震中距之间的关系

Fig. 3 Relationship among energy density distribution, magnitude and epicenter distance at Huajiang well of Rongchang county, Chongqing city

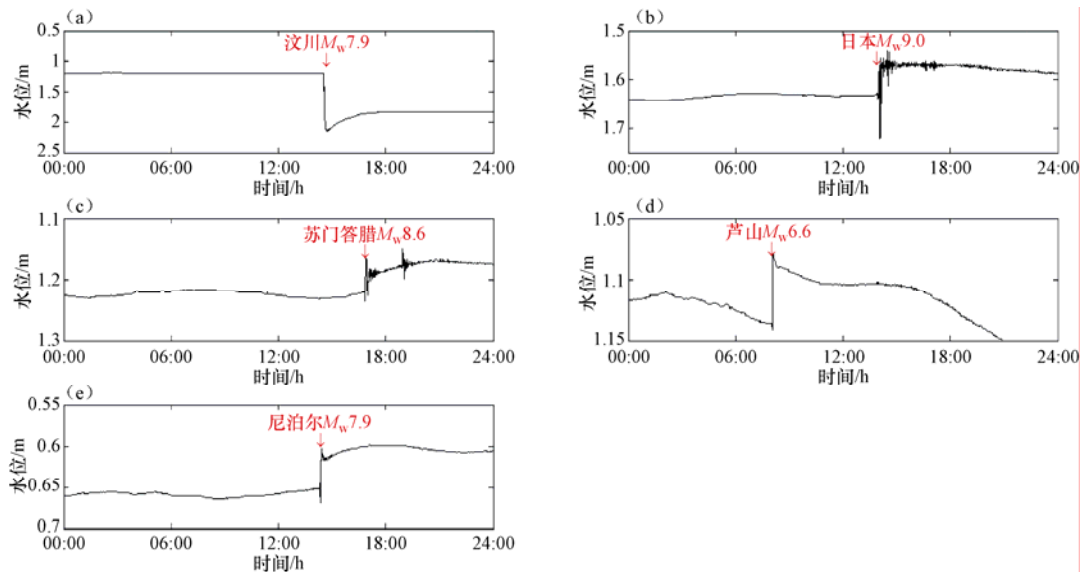


图 4 重庆北碚柳荫井水位同震变化

Fig. 4 Coseismic groundwater level changes at Liuyin well in Beibei district, Chongqing city

图 5 为北碚柳荫井地震能量密度分布与震级和震中距的关系，由图可知，苏门答腊地震 c、芦山地震 d、尼泊尔地震 e 的能量密度 $e(r)$ 在 10^{-3} — 10^{-2}J/m^3 间，而芦山地震的同震阶变幅度均大于其他两个地震，约为苏门答腊地震的 1 倍，这是因为芦山地震的震中距较小的原因，约为苏门答腊地震的 1/10；当震中距相近时，如日本地震 b 和苏门答腊地震 c，日本地震的能量密度为苏门答腊地震的 3.7 倍，而同震阶变幅度为苏门答腊地震的 1 倍。

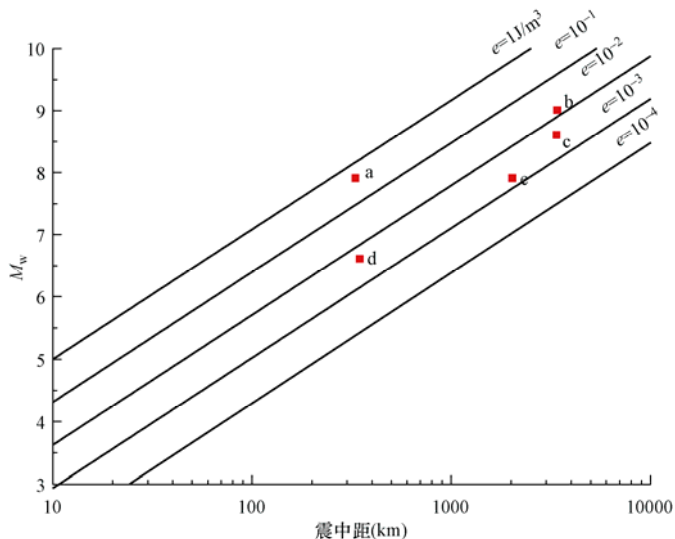


图 5 北碚柳荫井地震能量密度分布与震级和震中距之间的关系

Fig. 5 Relationship among seismic energy density distribution, magnitude and epicenter distance at Liuyin well in Beibei district, Chongqing city

图 6 为北碚柳荫井地震能量密度与井水位同震幅度关系，由图可知，地震能密度越大，北碚柳荫井水位的同震振幅也越大，其井水位同震幅度 Δh 与地震能量密度 $e(r)$ 的关系见式 (2)。据此可推算，该井水位变化与地震能量密度的对应关系为：能量密度 $e(r) < 0.01$ 时，引起北碚柳荫井水位同震振幅小于 0.063m；能量密度 $e(r)$ 为 0.01—0.1 时，该井水位同震变化振幅范围为 0.063—0.28m；能量密度 $e(r) > 0.1$ 时，该井水位同震变化振幅范围为大于 0.28m。

$$e(r) = -0.11\Delta h^2 + 2.41\Delta h + 0.0387 \quad (2)$$

总体而言，北碚柳荫井对于近震、远震的响应都较为明显，根据已有的震例总结，该井对远震的响应形态通常为阶升或振荡上升，可能是地震波引起的渗透系数减小导致的。其对近震的响应明显，水位同震振幅更大。

3.2 两井对同一地震的响应对比研究

对于近震，荣昌和北碚两口井水位均记录到汶川地震的同震响应变化，且同震方向均为下降，但在同震幅度和震后形态上表现为有所不同。荣昌井的震中距 ($\Delta=269\text{km}$) 虽小于北碚井的震中距 ($\Delta=326\text{km}$)，但同震幅度却略小于北碚井；荣昌井水位震后 2 小时即恢复到震前水平，而北碚井水位震后 3 小时恢复到一个稳定的水平，但仍低于震前约 0.65m，说明汶川地震静态应力造成北碚柳荫井含水层介质发生了非弹性形变，含水层参数改变而产生了变化。对于远震，两口井水位的同震形态也较为相似。对芦山地震和尼泊尔地震均表现出阶升，荣昌井水位同震幅度小于北碚井；而对较远的日本地震和苏门答腊地震，北碚井水位表现出振荡-阶变的形态，荣昌井则无阶变，呈振荡型同震响应变化。

总体而言，这两口井水位对近震和远震的同震响应都较好，北碚柳荫井水位的响应能力优于荣昌华江井。

4 讨论

水位和水温的同震响应能力和形态的差异与其变化机制有关。井水位瞬时上升、下降或振荡的主要影响因素是地震所产生的地震动现象。近场地震中，水位的同震响应可能是因为地震时因应力传递造成含水层的变化，或是因为地壳在地震发生瞬间使含水层破裂或地下水流的阻塞造成的。在远场地震中，地应力的传递及造成区域地壳发生应变的现象，对地下水位变动的直接影响较小，但地震所产生的能量释放却能将地震波传递到很远的距离，地震波引起的动态应力本身不能引起井水位的持续变化，但是能够清除裂隙中的障碍物，从而改变含水层的渗透系数并导致孔隙压力的重新分布 (Roeloffs, 1998; Brodsky 等, 2003; Elkhoury 等, 2006)。井水位同震幅度变化大小取决于井孔尺寸，含水层的传导性、储存系数和孔隙度，也取决于地震波的类型、周期和振幅等多种因素 (Cooper, 1965)。地震波引起含水层渗透系

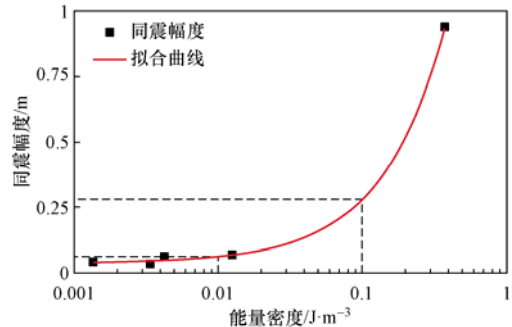


图 6 北碚柳荫井地震能量密度与井水位同震幅度关系
Fig. 6 Relationship between seismic energy density and the amplitude of the water level at Liuyin well in Beibei District, Chongqing City

数变化的能量密度下限约为 $10^{-4}\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ 。其中当能量密度大于 $10^{-3}\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,地震波能量能更有效地清除裂隙中的障碍物,从而引起含水层渗透系数的变化更为显著(Wang 等, 2010)。荣昌华江井和北碚柳荫井水位对几次大震的同震响应变化也符合这一规律。而水温的同震变化是探头周围的地下水与其周围介质进行能量交换的结果,与水位变化幅度及运动方式、水流速度、井孔周围孔隙度、井孔温度梯度、水位探头放置位置等有关(杨竹转等, 2008),荣昌华江井和北碚柳荫井水温对几次大震的同震响应变化方向总是上升或下降,与地震的大小和距离等均无关,说明水温的同震更依赖于井孔自身观测条件的影响。每口井不同层位的响应能力可能不同,应根据井区的水温地质条件和井孔柱状图等基础资料对水温观测的层位进行评价观测,从而找到更适合的层位。水温的同震响应机理相比水位的更为复杂。

石柱鱼池井井深 250.58m,套管深 120.05m,该井所处地层为侏罗系中统沙溪庙组,钻井揭露岩性为砂岩与泥岩不等厚互层。该井揭露的含水岩层延伸远,分布稳定,石柱鱼池井水位是重庆井网中记录固体潮效应最好的。石柱鱼池井水温探头置于井下 240m 处,该井 205.85—250.58m 为含砂质泥岩厚层状构造。观测仪器为 SZW-1A 型水温仪,传感器分辨率为 0.0001°C 。石柱鱼池水温自观测以来呈现上升趋势变化,长期动态属于漂移上升型,年变幅度约 0.0035°C ,日变幅小于 0.0001°C ,对多次地震均无响应,这一现象引起我们的思考,究竟哪个层位的观测才能更多的捕捉到震兆信息?研究表明,同一口井的不同深度段上观测的水温同震响应与潮汐响应的特征差异明显,井孔水文地质条件是影响井水温度各类有效信息特征的重要因素,观测井中观测含水层的深度、厚度、导水性及其地下水的温度,水温传感器相对于观测含水层的放置位置及其上、下的水温梯度特征等直接决定井水温度的同震响应与潮汐响应的特征(鱼金子等, 2012b)。如何提升水温观测在地震预测中的效能,目前最重要的是研究水温动态成因的复杂性及动态形成的机制问题,从而规范和指导水温观测。

荣昌华江井和北碚柳荫井均沿华蓥山断裂带展布,两井相距 118km,荣昌井较深,两口井含水层岩性均为砂岩或泥岩夹砂岩,地下水类型均为裂隙承压水。荣昌为背斜储水构造,北碚为单斜储水构造。荣昌华江井渗透系数为 0.25m/d ,北碚柳荫井渗透系数为 0.0149m/d 。这两口井水位对近震和远震的响应既有相似处,也有不同处,造成两口井对于地震的响应能力存在差异的原因可能是多方面的,如含水层埋藏条件(承压性和封闭性),岩石力学性质、水动力学性质等。

5 结论

本文通过对重庆井网水位水温对 5 次典型大震的同震响应特征的分析,特别是单井对多个地震的响应特征及两口井对于同一地震的响应差异性对比,分析了荣昌华江井、北碚柳荫井对地震的响应幅度、形态的差异性。得到以下结论和初步认识:

(1) 分析重庆井网的同震响应变化表明,该区井网水位和水温对近震和远震的响应能力都较好,水位的同震响应好于水温。水位的同震响应形态包括上升、下降和振荡三种类型,同一口井水位对不同地震的变化形态也不一致。水温同震响应形态包括上升和下降两种类型,荣昌华江井和北碚柳荫井水温对不同地震的变化方向总是一致,与震级和震中距等均无关。

(2) 随着震中距的增大,荣昌华江井对地震的响应能力明显降低,水位形态由阶变→振荡,水位阶变的幅度与震级有关,水位阶变的方向从目前已有的震例总结为近震时水位下降,远震时水位上升。

(3) 北碚柳荫井水位同震变化与地震能量密度的对应关系为：能量密度 $e(r) < 0.01$ 时，引起水位同震振幅小于 0.063m；能量密度 $e(r)$ 为 0.01—0.1 时，该井水位同震变化振幅范围为 0.063—0.28m；能量密度 $e(r) > 0.1$ 时，该井水位同震变化振幅范围为大于 0.28m。

(4) 北碚柳荫井水位的响应能力优于荣昌华江井。造成两口井对于地震的响应能力存在差异的原因可能是多方面的，如含水层埋藏条件（承压性和封闭性），岩石力学性质、水动力学性质等，具体原因有待进一步研究。

致谢：由于重庆地区井位观测年限短，震例数量有限，文中存在着一些欠妥之处，谨望专家批评指正。感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献

- 陈大庆, 刘耀炜, 杨选辉等, 2007. 远场大震的水位、水温同震响应及其机理研究. 地震地质, **29**(1): 122—132.
- 缪阿丽, 张艺, 叶碧文等, 2014. 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. 地震, **34**(4): 78—87.
- 孙小龙, 刘耀炜, 2008. 苏门答腊 8.5 级地震引起的水温响应变化. 华北地震科学, **26**(1): 35—39.
- 杨竹转, 邓志辉, 刘春国等, 2008. 中国大陆井水位与水温动态对汶川 $M_S 8.0$ 地震的同震响应特征分析. 地震地质, **30**(4): 895—905.
- 杨竹转, 邓志辉, 高小其等, 2010. 新疆乌鲁木齐 04 号井数字化水位同震阶变的研究. 中国地震, **26**(3): 329—339.
- 杨竹转, 邓志辉, 杨贤和等, 2014. 2013 年芦山 $M_S 7.0$ 地震和 2008 年汶川 $M_S 8.0$ 地震井水位同震变化的比较分析. 地震地质, **36**(2): 380—391.
- 鱼金子, 车用太, 刘成龙等, 2012a. 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. 地震, **32**(1): 59—69.
- 鱼金子, 车用太, 何案华等, 2012b. 井水温度动态的复杂性及其机制问题讨论. 国际地震动态, (6): 274.
- Bodvarsson G., 1970. Confined fluids as strain meter. *J. Geophys. Res.*, **75**(14): 2711—2718.
- Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall Manga M., 2003. A mechanism for groundwater pressure changes induced by distant earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **108**(B8): 2390.
- Cooper H.H., 1965. The response of well-aquifer systems to seismic waves. *J. Geophys. Res.*, **70**(16): 3915—3926.
- Eaton J.P. and Takasaki K.J., 1959. Seismological interpretation of earthquake-induced water-level fluctuations in well. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **49**: 227—245.
- Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C., 2006. Seismic waves increase permeability. *Nature*, **441**(7097): 1135—1138.
- Hsieh P.A., Bredehoeft J.D., Farr J.M., 1987. Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis. *Water Resour. Res.*, **23**(10): 1824—1932.
- Montgomery D.R., Manga M., 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes. *Science*, **300**(27): 2047—2049.
- Roeloffs E.A., 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield California, due to local and distant earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **103**(B1): 869—889.
- Wang C.Y., Chia Y., 2008. Mechanisms of water level changes during earthquakes: near field versus intermediate

field. *Geophys. Res. Lett.*, **35**: 12402.10.1029/2008GL034227.

Wang C.Y., Manga M., 2010. Hydrological response to earthquakes and a general metric. *Geo. Fluids*, **10**: 206—216.

Wells D.L., Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**: 974—1002.

Characteristics of Coseismic Responses Groundwater Level and Temperature of Chongqing Well-Net

Gong Haobo, Guo Weiyong, Li Guangke, Chen Min and Yang Lin

(Earthquake Administration of Chongqing City, Chongqing 401147, China)

Abstract Taking five strong earthquakes occurred worldwide since 2008 as examples, we analyzed the coseismic response of Chongqing groundwater level and temperature. Combined wellbore hydrogeological conditions and its own observation conditions, we explored the possible causes of different phenomena with coseismic response and possible mechanism. The results show that groundwater level is more sensitive to earthquake than the temperature, and the main coseismic change for groundwater level includes three types of rise, fall and oscillation. For a single well, the response features vary with different earthquakes. The main coseismic change for groundwater temperature includes two types of rise and fall. The Huajiang well in Rongchang and the Liuyin well in Beibei have coseismic response to 5 earthquakes, and for each well, the response features are consistently to different earthquakes. Further analysis indicates that the groundwater level of Huajiang well in Rongchang is more sensitive to earthquake than the Liuyin well in Beibei. The amplitude of coseismic groundwater level of Liuyin well in Beibei is proportional to the seismic energy density, and shows the corresponding changes in their relationship with the magnitude of the earthquake and the seismic energy density. Finally, we analyzed the mechanism of groundwater level and temperature.

Key words: Water level; Water temperature; Coseismic response; Energy density; Chongqing well network