

陶志刚, 王晓, 祝杰, 等, 2022. 青海门源 $M_s 6.9$ 地震井水位与水温同震响应特征分析. 中国地震, 38(3): 399~411.

青海门源 $M_s 6.9$ 地震井水位 与水温同震响应特征分析

陶志刚 王晓 祝杰 刘洋洋 王阅兵

中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 基于全国地震地下流体台网数据库, 分析了 2022 年 1 月 8 日青海海北藏族自治州门源县 $M_s 6.9$ 地震引起的地下流体井水位、水温同震响应特征。结果表明: 本次地震引起的水位同震响应观测井数量远大于水温; 水位同震响应开始时间、结束时间均优先于水温, 水温同震响应是水位同震响应的次生变化。对比门源 2022 年 1 月 8 日 $M_s 6.9$ 和 2016 年 1 月 21 日 $M_s 6.4$ 地震, 发现地震能量不同是造成两次地震同震响应差异的主要原因。

关键词: 青海门源 地下流体 水温同震 水位同震

[文章编号] 1001-4683(2022)03-0399-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地下流体同震效应是揭示地壳介质对应力-应变过程响应最有效和最直接的方式之一, 井水位和井水温同震效应能够间接反映地震发生时的地下介质应变和孔隙压的变化特征, 从而便于深入了解地下介质的动力学过程 (Roeloffs, 1998; Montgomery et al, 2003)。同震响应的研究不仅有助于对地下流体前兆现象的认识和理解, 对于减轻次生灾害、追溯地震前兆、跟踪后续地震以及研究地壳活动规律等也有一定的理论和实际意义 (杨竹转等, 2005)。

由于地下流体同震响应分布的广区域性、响应特征的易识别性 (陈大庆等, 2007), 同震响应的研究成果相对较多, 主要包括两方面: 一方面是一井多震的研究, 即对同一口井进行研究, 分析记录不同地震的同震响应变化特征 (杨竹转等, 2010; 尹宝军等, 2009; 杨学锋等, 2021); 另一方面是一震多井的研究, 即研究一次地震所引起的全国范围内的同震响应分布特征 (晏锐, 2009; 周志华等, 2013、2014; 杨竹转等, 2008; 张彬等, 2015; 李滔等, 2020)。水位同震效应研究的文献较多, 已有的研究表明: 水位同震响应主要由周期为 15~20s 的瑞雷面波引起, 震中附近同震响应幅度较大, 但与震中距无显著关系。同震响应特征有振荡和阶变 2 种形态特征。井水位对地震波响应幅度与井孔的结构、含水层的导水系数、储水系数、含水层孔隙度和井-含水层固有频率等因素有关。水位对地震响应的机理也一直被探

[收稿日期] 2022-06-20 [修定日期] 2022-08-05

[项目类别] 中国地震局监测运维项目 (12150411023) 资助

[作者简介] 陶志刚, 男, 1986 年生, 工程师, 主要从事地震地下流体研究工作。E-mail: 464788781@qq.com

讨,最初发现了井水位与板块应变间的关系(Wakita,1975;Roeloffs,1995),后续又发现地震改变渗透率从而造成井水位变化等机制(Roeloffs,1998;King et al,1999;Brodsky et al,2003;Lai et al,2021)。而对于水温同震响应的研究相对较晚,付子忠(1988)提出应力加载模式,鱼金子等(1997)提出水动力学模式,陈大庆等(2007)提出同震水温下降的气体脱逸模式,杨竹转(2011)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。车用太等(2014)以井-含水层系统分析为基础,结合井水温度动态观测到的实际结果,提出了水温微动态形成的2类基本机制,即水热动力学机制和地热动力学机制,并对此进行了定性研究。

2022年1月8日1时45分青海海北藏族自治州门源县(37.77°N,101.26°E)发生6.9级地震,震源深度10km。本文基于全国地下流体台网记录的水温、水位同震变化,从同震响应形态、响应幅度、响应时间、空间分布特征等方面进行了分析,并对水温、水位同震响应变化的机理进行了探讨。

1 观测概况

目前,全国地震地下流体台网数据库中有约491个台站,1200余套观测仪器,观测项目包括水位、水温、氦、汞、氡、离子等。其中水位观测点约有383个,观测仪器主要为SWY系列、ZKGD3000系列、LN-3A等数字化压力式水位仪,采样率为1次/min,分辨率优于1mm,观测精度为0.2%F·S。水温观测点约有453个,观测仪器主要为SZW-1、SZW-2、ZKGD3000NT、TDT-56等测温仪,已全部为数字化观测,采样率为1次/min,观测精度优于0.05℃,分辨率为0.0001℃,短期漂移稳定性小于0.001℃/月。水位和水温观测站主要沿我国主要地震带分布,东部较密,西部稀疏。

从全国地震地下流体台网数据库获取2021年1月7日—2022年1月8日原始观测数据,通过逐一对全国台网水位和水温观测数据的分钟值时间序列进行分析和统计,获得了同震响应形态类型、同震响应幅度、日背景变化幅度(以1月7日作为背景)、响应开始时间、滞后发震时间等同震响应参数。

2 水位同震响应

2.1 同震形态特征

按照水位同震响应的形态特征,将同震响应变化分为振荡、上升和下降3种类型。振荡型变化指在地震波作用下,水位快速来回波动,地震波经过后,水位很快平静下来,仍沿原来的形态变化(杨竹转等,2008);上升和下降变化则改变了水位的正常动态变化背景,使得水位出现了快速或阶梯式的抬升或下降,这种变化通常需要十几分钟、多至几天的时间才能恢复,有时甚至产生永久性的改变。

门源 M_s 6.9地震引起了全国51口井水位出现同震响应变化,其中水位下降的有6口井,水位上升的有18口井,振荡的有27口井。动水位同震有10口井,同震响应形态只有振荡和上升2种,振荡有6口井,上升有4口井;静水位同震有41口井,同震振荡有21口井,同震上升有14口井,同震下降有6口井。就本次地震而言,同震响应形态中,振荡响应的数

量最多,其次是同震上升,同震下降的最少,水位同震响应信息见表1(同震响应时间均为2022年1月8日),同震响应典型观测曲线见图1。

表1 门源 $M_s6.9$ 地震水位同震响应台项清单

台站名称	测点	震中距 /km	测项名称	响应开始时间 (时:分)	滞后时间 /min	同震响应类型	同震变化幅度 /m	日变化幅度 /m	同震响应程度
左家庄台	1	1336	静水位	01:53	8	下降	0.79	0.1181	6.69
平谷赵各庄	1	1390.2	静水位	01:53	8	上升	0.056	0.058	0.97
延庆五里营	H	1298.9	动水位	01:54	9	上升	0.009	0.008	1.13
辛庄井	1	1406.7	静水位	01:52	7	上升	0.0062	0.0172	0.36
宝坻新台	3	1414.3	静水位	01:52	7	上升	0.038	0.064	0.59
永年北杜观测站	1	1177.7	静水位	01:50	5	振荡	0.0281	0.0546	0.51
夏县中心地震台	6	933.7	静水位	01:49	4	振荡	0.0031	0.0093	0.33
静乐地震观测站	1	944.3	静水位	01:48	3	振荡	0.087	0.019	4.58
沁县漫水地震台	1	1005.6	静水位	01:49	4	振荡	0.026	0.015	1.73
朔州地震台	1	992.4	静水位	01:47	2	振荡	0.041	0.064	0.64
八一观测站	2	608.8	静水位	01:55	10	振荡	0.061	0.006	10.17
马头台(通州)	2	1365.9	静水位	01:52	7	振荡	0.013	0.025	0.52
鞍山井	1	1889.5	静水位	01:55	10	上升	0.061	0.086	0.71
锦州沈家台	1	1726.5	静水位	01:53	8	振荡	0.017	0.102	0.17
三岗地震台	0	2094.4	静水位	01:55	10	振荡	0.0096	0.0382	0.25
密山市地震局	2	2669.1	静水位	02:01	16	下降	0.0041	0.0301	0.14
溧阳苏22井观测站	4	1821.8	动水位	01:53	8	振荡	0.068	0.062	1.10
庐江地震台	1	1614	动水位	01:52	7	振荡	0.055	0.081	0.68
九江	1	1632.9	静水位	01:52	7	振荡	0.007	0.019	0.37
聊城水化站	5	1317.5	静水位	01:55	10	上升	0.036	0.064	0.56
栖霞鲁07井地震台	1	1739.4	静水位	01:57	12	振荡	0.06	0.07	0.86
诸城昌城井	1	1611.9	静水位	01:53	8	振荡	0.004	0.002	2.00
鹤壁	a	1167.1	静水位	01:49	4	振荡	0.032	0.052	0.62
房县三海村	1	1070	静水位	01:49	4	振荡	0.024	0.034	0.71
钟祥马岭	1	1278.6	静水位	01:48	3	振荡	0.018	0.015	1.20
长沙	3	1521.3	动水位	01:52	7	上升	0.1107	0.0226	4.90
桂平观测站	2	1908.4	动水位	01:55	10	上升	0.026	0.023	1.13
荣昌华江	1	1013	静水位	01:47	2	振荡上升	0.02	0.031	0.65
北碚柳荫	1	1002.8	静水位	01:49	4	上升	0.011	0.026	0.42
西昌川32井	1	1106.7	动水位	01:50	5	振荡	0.0081	0.0255	0.32
腾冲地震台	2	1440.2	静水位	01:51	6	振荡	0.024	0.011	2.18
建水县局	2	1576.5	静水位	01:56	11	振荡	0.007	0.01	0.70
昭通市局	2	1185.5	静水位	02:04	19	振荡	0.091	0.323	0.28
泾阳地震台	4	746	静水位	01:46	1	上升	0.0556	0.0486	1.14
西安地震台	4	809.6	动水位	01:49	4	振荡	0.3026	0.0522	5.80

续表 1

台站名称	测点	震中距 /km	测项名称	响应开始时间 (时:分)	滞后时间 /min	同震响应类型	同震变化幅度 /m	日变化幅度 /m	同震响应程度
石泉流体台	1	797.7	静水位	01:49	4	上升	0.1702	0.0725	2.35
平凉华亭观测站	1	548.7	静水位	01:47	2	上升	0.026	0.018	1.44
横梁(台阵)	3	190.3	静水位	01:46	1	上升	0.402	0.005	80.40
格尔木	e	584.2	动水位	01:47	2	振荡	0.0062	0.0039	1.59
佐署	2	130.2	动水位	01:57	12	上升	0.287	0.01	28.70
湟源	6	127.57	静水位	01:47	2	上升	0.012	0.006	2.00
门源	1	35.4	静水位	01:45	0	上升	0.374	0.006	62.33
平安	6	159.9	静水位	01:46	1	振荡	0.01	0.003	3.33
玉树	8	654	静水位	02:02	17	上升	0.012	0.008	1.50
海原红羊	A	423.5	静水位	02:00	15	下降	0.01	0.007	1.43
银川胜利	6	424.7	动水位	01:45	0	振荡	0.011	0.004	2.75
灵武大泉	1	444.6	静水位	01:52	7	振荡	0.015	0.006	2.50
中卫倪滩	1	348.8	静水位	01:46	1	下降	0.01	0.011	0.91
海原甘盐池	1	380.5	静水位	01:46	1	振荡下降	0.014	0.01	1.40
平罗崇岗井	2	453.5	静水位	02:02	17	下降	0.011	0.009	1.22
新 10 井	0	1322.5	静水位	01:51	6	振荡	0.0228	0.0048	4.75

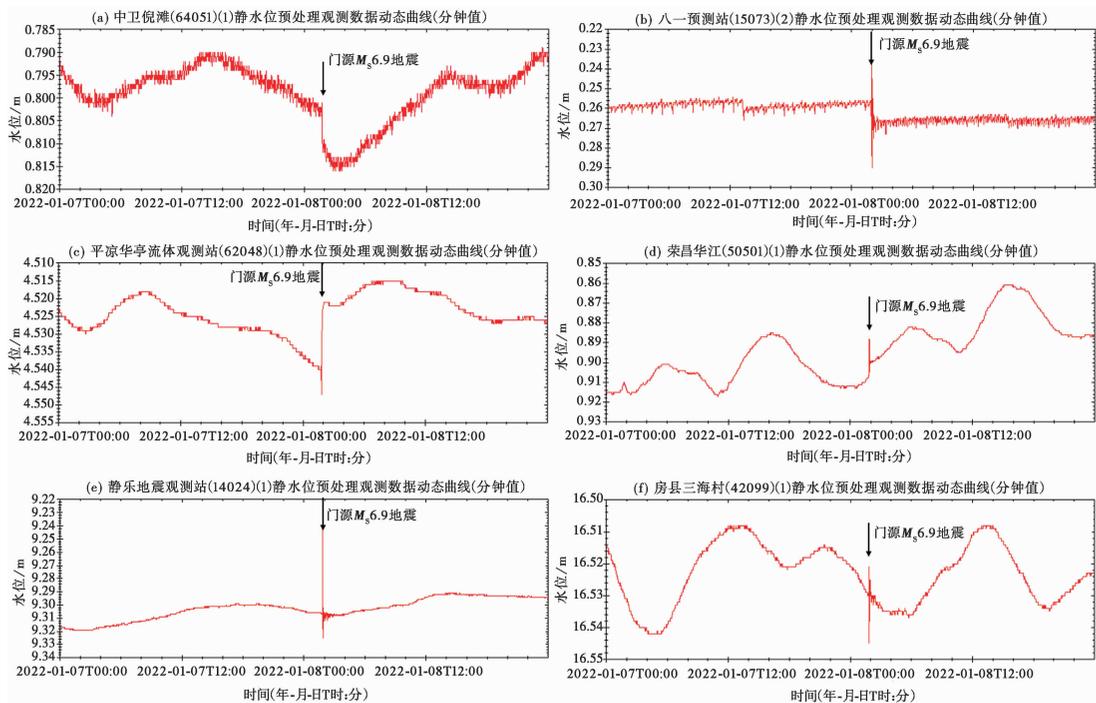


图 1 水位同震响应典型观测曲线

2.2 同震空间分布特征

水位同震响应台项清单中,震中距最近的为门源地震台,震中距 35.4km,最远的为黑龙江密山市地震台,震中距 2669.1km。水震波(振荡)分布范围在 159.9~2094.4km 之间;同震上升变化分布在 35.4~1908.4km 之间;下降变化分布在 348.8~2669.1km 之间。从全国分布来看,水位同震响应的观测井没有明显的空间分布规律(图2)。



审图号: GS(2019)1832号

注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1832 号的标准地图制作,底图无修改

图2 全国水位同震响应分布

统计了51口井的水位同震变化幅度,变化幅度在 0.0031~0.79m 之间,平均 0.0707m,从全国角度来看,震中距与同震响应变化幅度相关系数为 0.0454,其中振荡变化幅度与震中距相关系数只有 0.2283,同震上升或下降的变化幅度与震中距相关系数为 0.061。对本次地震而言,同震响应变化幅度与震中距相关性较差。每口井水位对应力-应变的响应程度不同,日变化动态特征也不同,为消除日正常变化幅度差异的影响,凸显同震响应的变化程度,计算了同震响应变化幅度与前一日正常变化幅度的比值,即同震响应程度。发现震中距 200km 范围内的同震响应程度较大,200km 之外的同震响应程度相对较低(图3)。

震中200km 范围内的水位观测井总计 7 口,其中有 5 口井记录到了同震变化(英鸽井、共和井未记录到同震响应),4 口井水位呈上升变化、1 口井水位呈振荡变化,除平安井外,近震的水位同震响应变化均为上升变化,佐署、横梁、门源井水位上升后在高位持续时间较长(图4)。

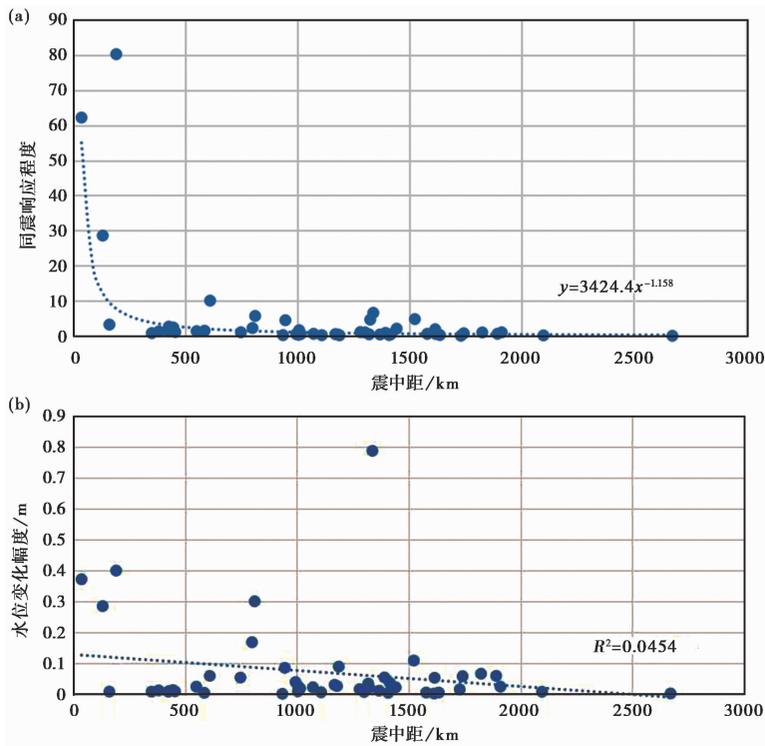


图3 地下流体水位同震响应程度(a)和变化幅度(b)与震中距关系

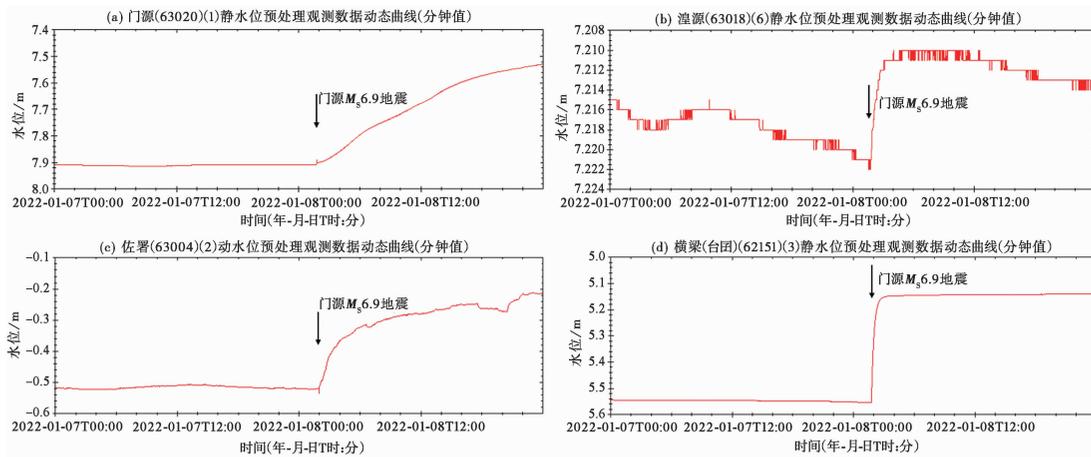


图4 震中 200km 近震水位同震上升变化曲线

英鸽观测井为一口封闭井,井深仅 74m,井口封死,不能定期进行水位校测,其观测数据不能完全反应含水层应力状态的真实变化,未记录到同震响应,但该井水温测项记录到了同震变化,且英鸽钻孔体应变井记录到了显著的同震响应变化(图 5),说明该台站附近发生了应力变化,但该井井口被封死,降低了井水位对应力应变的响应程度,这也有可能同观测井孔太浅、含水层承压性较差有关。

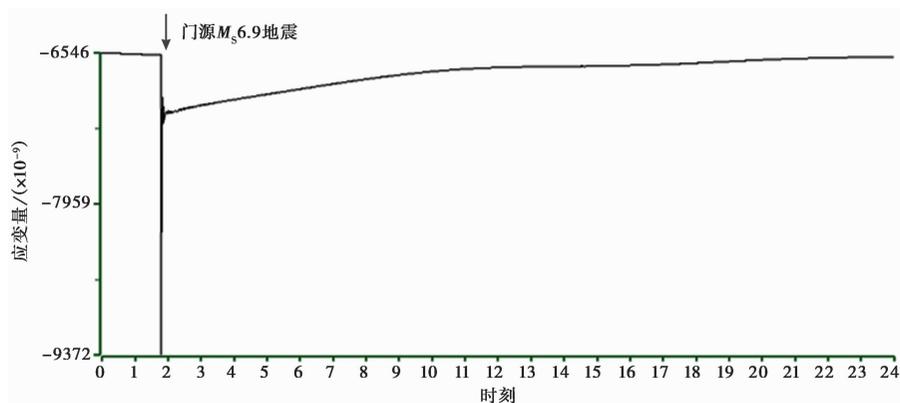


图5 2022年1月8日英鸽钻孔体应变观测数据同震响应曲线

共和观测井为自流井,深度超过 200m,观测项目有水温(测点 2 和 4 测点)、水位、气氦观测。水温探头分别下至观测井 196m(测点 2)和 190m(测点 4)。该井含水层承压性较好,震中距 184km,但未记录到水位、水温同震变化,玛多 7.4 级地震(震中距 276km)也未记录到同震响应,对于这种现象很难给出合理的解释,可能与井区水文地质条件和观测井的结构及其所处的地质构造环境有关。

此外,笔者查询了英鸽、共和 2 口井近 5 年的观测数据,发现水温、水位观测数据不仅未记录到同震响应信息,也未记录到固体潮效应,说明这两口井对应力-应变的响应能力较差,本次地震未记录到同震响应也就得以解释。

2.3 同震响应时间特征

本次地震引起的水位同震响应时间发生在震后 0~19min 之间,除去昭通、平罗、海源红羊、八一、佐署 5 个观测站,其他台站的同震响应滞后时间与震中距有较明显的关系,随着震中距的增加,滞后时间逐渐增长,相关系数为 0.78(图 6)。但也存在震中距接近的井,其同震响应时间差别较大的现象。地壳结构的非均质性可能会造成地震波在传播速度上存在差异,此外,仪器可能存在时间误差,尽管观测仪器均具备自动校时功能,但因网络等因素,有可能出现自动校时失败,仪器出现时间误差而导致同震响应时间的不同。

2.4 水位同震响应机理

井孔水位发生变化有两种情况,第一种为地下含水层储水量发生变化会引起井孔水位变化;第二种为含水层储水量未变,含水层应力状态发生变化引起水位波动,应力加载引起井孔水位上升,应力卸载引起井孔水位下降。

水位同震响应是地震波在地壳传递过程中所引起的井孔水位变化,含水层的储水量未发生变化。在不排水条件下,孔隙压对地震产生的静态应力响应是地震近场水位阶跃变化的主要机制(曹梦涵等,2022),地震孕育过程中,断层破裂会造成含水层静态应力改变,进而引起水位长期维持在一个新的动态平衡中,所以同震响应以上升或者下降为主,变化幅度与体应变大小成比例,体应变为压缩区水位上升,拉张区水位下降。而远震的同震响应是因为地震波传递后引起了含水层中的地下水发生自由震动,由于水的不可压缩性,在水的震动过程中,导致井-含水层系统之间交替产生水流运动,最终表现为井孔内水柱的反复升降变化,

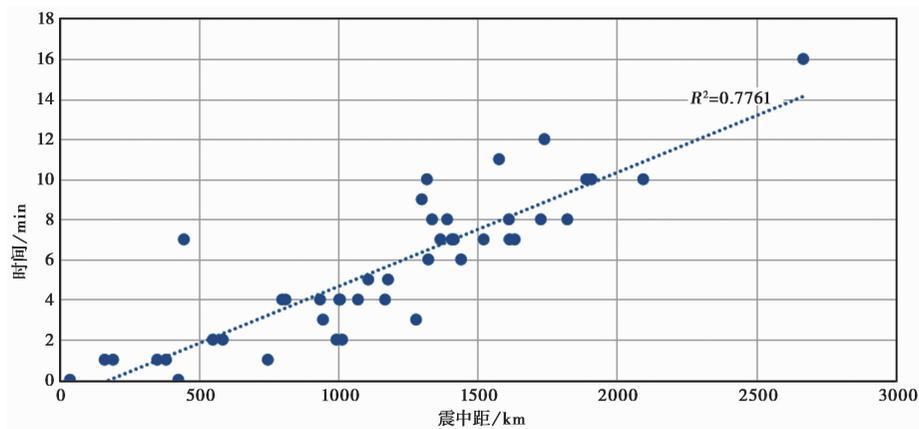


图6 同震响应时间与震中距的关系

也就是振荡变化(鱼金子等,2012)。如果含水层裂隙中的颗粒物含量较高,当井-含水层快速交替变化,会冲刷开含水层骨架裂隙中的颗粒,进而引起含水层的渗透率发生改变。当水位变化由渗透性变化引起时,其大小及上升或下降都有一定的随机性,没有统一的规律(Yan et al,2014),这同时也解释了八一观测井会先出现振荡又发生了阶变现象的原因。

此外,也有部分观测井没有发生振荡而直接发生阶变,主要是因为水位采样率是分钟值,当水位在两个采数间隔内发生振荡,观测仪器记录不到振荡变化,对于含水层来说,几十秒钟的快速振荡完全可以改变含水层的渗透性,所以有的井记录不到振荡变化,而直接发生阶变。如果观测仪器采用秒采样率,可能会有更多的井能够记录到同震振荡变化,地震波引起的同震变化幅度和同震响应时间也会记录得更加完整。

3 水温同震响应

3.1 同震形态特征

本次地震只有10口井、11个水温测点(房县三海村有2个水温测点)记录到了同震响应(表2)。这10口井除都兰、恒口流体台站为单独水温观测外,其他8口观测井均为水温、水位同井观测,且这些同井观测中,水位测点均记录到了同震响应,即水温同震响应的观测井其水位均有同震响应。水温同震响应形态分为上升、下降2种形态,3口井呈上升变化(房县三海村测点2上升),8口井呈下降变化(房县三海村测点4下降变化),典型同震响应变化曲线见图7。

3.2 同震空间分布特征

水温同震台项清单中,震中距最近的为佐署观测井,最远的为左家庄观测井,震中距分布在130.2~1336km之间,平均718km,空间分布没有规律。水温同震变化幅度在0.0011~0.0256℃之间,平均0.0143℃,同震变化幅度与震中距相关性较差,同震响应程度(水温同震变化幅度与日常动态变化幅度比值)与震中距也无相关性(图8)。

3.3 同震响应时间特征

所有水温同震响应的开始时间滞后地震发震时间3~34min,同震响应开始时间和结束时间也远远滞后水位。在同井观测中,水温同震响应滞后水位同震3~26min,平均14min,说

表 2 门源 6.9 级地震水温同震响应台项清单

台站名称	测点	测项分量	震中距 /km	开始响应时间 (时:分)	滞后地震时间 /min	响应结束时间 (时:分)	同震形态	同震变化幅度 / $^{\circ}\text{C}$	日动态变化幅度 / $^{\circ}\text{C}$	同震响应程度
左家庄台	2	深层水温	1336	02:19	34	11:11	下降	0.0256	0.014	1.83
房县三海村	2	深层水温	1070	02:15	30	13:22	上升	0.0135	0.0018	7.50
房县三海村	4	深层水温	1070	01:55	10	08:10	下降	0.0209	0.0122	1.71
北碚柳荫	2	中层水温	1002.8	02:02	17	09:19	下降	0.0118	0.0096	1.23
西昌川 32 井	1	中层水温	1106.7	01:56	11	14:44	下降	0.0251	0.01	2.51
恒口流体台	1	深层水温	880.6	01:49	4	02:36	下降	0.0118	0.0097	1.22
英鸽(台阵)	5	中层水温	198.9	01:51	6	07:02	上升	0.0067	0.0027	2.48
佐署	5	浅层水温	130.2	02:02	17	04:35	上升	0.0195	0.0102	1.91
银川胜利	2	深层水温	424.7	02:13	28	02:37	下降	0.0124	0.0123	1.01
中卫倪滩	2	深层水温	348.8	01:49	4	09:47	下降	0.0093	0.0049	1.90
都兰	4	浅层水温	330.65	01:48	3	03:14	下降	0.0011	0.0005	2.20

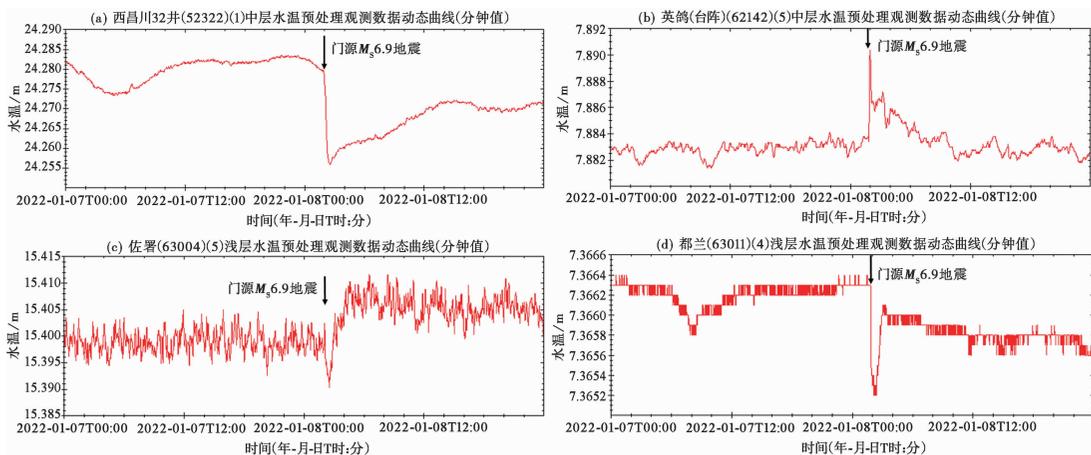


图 7 水温同震响应典型观测曲线图

明地震波会先引起水位变化,然后水温发生变化。因为水位变化是通过压力传感器观测,而水温变化是通过水介质热传导引起的,压力传递要远远快于水介质中的温度传导,所以水位的响应时间和结束时间要早于水温,而水温平衡被同震响应打破后,恢复到一个新的平衡需要的时间也会更长,水温基本上都是恢复到正常的背景动态中。

3.4 水温同震响应机理

水温观测受两种机理影响,一种是水热动力学机制,当含水层受力作用,会引起井-含水层之间的水流动,在温度梯度的作用下,会产生井孔中各深度上的温度变化;一种是地热动力学机制,井水温度的变化是由固体岩层介质的热传导引起的(车用太等,2014)。通常情况下,水温同震响应主要受水热动力学机制影响,当地震波传递过来后,井孔内的水位变化会间接引起水温的变化,水温观测是监测井孔中某一深度处的温度随时间的变化,由于井孔内

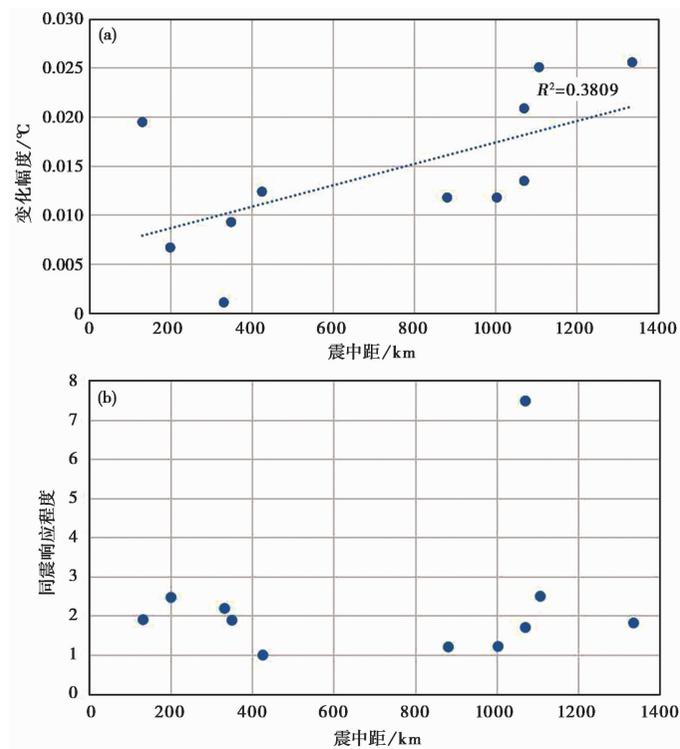


图8 井水温变化幅度(a)和同震响应程度(b)与震中距关系

不同深度处的温度梯度不同,水温动态变化特征也不相同。

房县三海村观测井的2个水温测点均记录到了同震响应,水位同震呈振荡变化,测点2水温呈上升变化,测点4水温则呈下降变化。测点4传感器投放深度为65m,温度梯度为正,测点2传感器投放深度为105m,温度梯度为负。同一口井的2个水温测点对同一地震的同震响应形态完全不同(图9)。水位振荡引起了井孔内水的上下快速对流运动,不同深度处的水温掺混会引起传感器处的水温变化,温度梯度为正,水温表现为上升变化,温度梯度为负,水温表现为下降变化。

水温发生同震响应的观测井中水位均记录到了同震响应,水温同震响应的时间明显滞后于水位,说明水温同震响应是水位同震响应的次生变化。我国地下流体观测井,水温、水位均为同井观测,水温观测点数量比水位多,仪器观测精度指标很高,但是水温记录同震响应的能力却远远小于水位,推断可能存在如下两种原因:每口井引起水温同震响应的最小水位变化幅度是不同的,即触发阈值不同,当地震引起的水位变化幅度未到达触发阈值时候,水温是没有响应的,触发阈值可能与井孔的温度梯度、井半径、含水层渗透性等因素有关;此外,每口井水温的背景噪声不同,背景噪声过大可能会淹没同震响应信息。

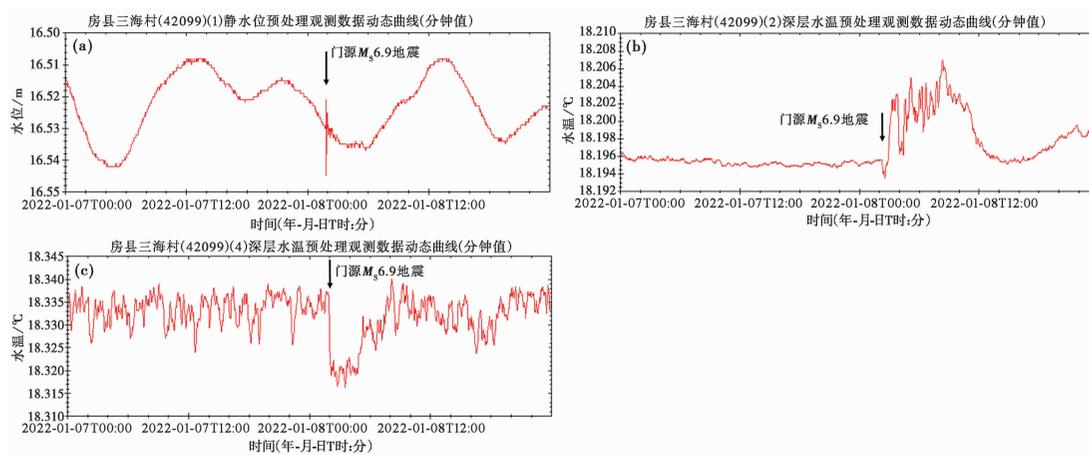


图9 房县三海村水位、水温同震响应观测曲线

4 门源两次地震对比

2016年1月21日,门源发生 $M_s6.4$ 地震(37.68°N,101.62°E),震源深度约10km。扫描地下流体台网发现,仅有4口井记录到水位同震响应,3口井记录到水温同震响应。与门源 $M_s6.9$ 地震相比,两组地震震中距相距仅33.2km,发震构造均与冷龙岭断裂相关,震源深度均为10km,但记录同震响应的观测井数量和同震变化幅度却差别较大,详见表3。

表3 两次地震引起井水位同震响应差异对比

台站名称	测点	测项分量	门源 6.4 级地震				门源 6.9 级地震			
			震中距 /km	滞后时间 /min	响应类型	变化幅度 /m	震中距 /km	滞后时间 /min	响应类型	变化幅度 /m
静乐观测站	1	静水位	914.2	6	突跳	0.009	944.3	3	突跳	0.087
佐署	6	静水位	116.4	5	下降	0.009	130.2	12	上升	0.287
平凉华亭站	1	静水位	516.3	6	上升	0.007	548.7	2	上升	0.026
房县三海村	1	静水位	1038.2	5	突跳	0.005	1070	4	突跳	0.024

对比两次地震的震源机制解,门源 $M_s6.4$ 地震节面1走向143°,倾角35°,滑动角80°;节面2走向335°,倾角56°,滑动角97°,发震构造为冷龙岭北侧断裂,属逆冲型断裂(胡朝忠等,2016)。门源 $M_s6.9$ 地震节面1走向290°,倾角81°,滑动角16°;节面2走向197°,倾角74°,滑动角171°,发震构造为冷龙岭断裂西段,属左旋走滑型(许英才等,2022)。两次地震均与冷龙岭断裂相关,但发震构造不是同一条断层,震源机制解也不同,可能会造成同震响应的差异。

对比台站分布密度,门源 $M_s6.9$ 地震发生时,全国观测井数量要比 $M_s6.4$ 地震时的多64口井(64口井中有6口井记录到水位同震响应),除去新增观测井,这两次地震震中600km范围内的台站密度几乎相同,但记录同震的数量却相差较多。

记录到 $M_s6.4$ 地震同震响应的观测井均记录到了 $M_s6.9$ 同震响应,震级越大,同震响应变化幅度越大,除佐署井外,其他3口井的2次地震同震响应形态相同,推断其可能与地

震能量有关。地震在地下水响应处的能量与震级和震中距有关, Roeloff(1998)通过分析不同地震引起水位变化的最远距离,得到了震级和可观测水位变化距离之间的经验关系式,并且计算出引发地下水改变的最小地震震级,发现引起不同观测井发生同震响应的最小震级均不同,门源两次地震震级虽然仅相差 0.5 级,但释放的地震能量可能相差十几倍,地震能量不同是造成两次地震同震响应差异的主要原因。

5 结论与思考

通过对门源 $M_s6.9$ 地震引起的水位、水温同震响应特征进行统计分析,得到以下几点认识:①水位同震响应以振荡为主,其次是上升变化,下降变化最少;近震区以上升为主,远震区以振荡为主;水温同震响应以下降变化为主,上升变化次之。②同井观测中,水位同震响应能力要远高于水温,水位同震变化幅度与震中距之间无明显的规律。③水温同震响应的开始时间、恢复时间明显滞后于水位,水温的同震变化是水位同震变化的次生反映,由水热动力学机制引起。④对比门源 $M_s6.4$ 和 $M_s6.9$ 地震,发现地震能量是造成同震响应差异的主要原因。

以上认识来源于门源地震引起全国井水位和水温变化的初步分析结果,实际上井水位与水温的同震响应机理非常复杂,井水位与水温的同震响应变化特征不仅与地震参数、震源机制有关,而且受制于观测井孔结构、水文地质及构造地质等因素,此外,井水温的同震响应还受到井-含水层系统热分布与热迁移机制的影响。未来在查清观测井水文地质及井孔自身条件的基础上建立井-含水系统水热动力学模型,结合形变与测震学的观测成果开展研究,可能会得出更为科学和有价值的认识。

致谢: 本文撰写过程中得到车用太研究员、刘春国研究员的指导和帮助,在此表示感谢,感谢审稿专家给出的意见和建议。

参考文献

- 曹梦涵,薛莲,2022. 井水位同震响应特征与机理研究进展. 地震研究,45(2):173~186.
- 车用太,何案华,鱼金子,2014. 水温微动态形成的水热动力学与地热动力学机制. 地震学报,36(1):106~117.
- 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.
- 付子忠,1988. 地热动态观测与地热前兆. 见:国家地震局地壳应力研究所. 地壳构造与地壳应力文集(1). 北京:地震出版社,1~7.
- 胡朝忠,杨攀新,李智敏,等,2016. 2016年1月21日青海门源6.4级地震的发震机制探讨. 地球物理学报,59(5):1637~1646.
- 李滔,马建新,丁宁霞,等,2020. 夏河5.7级地震前青海地下流体台网异常特征研究. 地震工程学报,42(3):791~798.
- 英才,郭祥云,冯丽丽,2022. 2022年1月8日青海门源 $M_s6.9$ 地震序列重定位和震源机制解研究. 地震学报,44(2):195~210.
- 晏锐,2009. 汶川8.0级地震引起的中国大陆井水位同震响应特征分析. 国际地震动态,(4):32.
- 杨学锋,师海阔,张立恒,等,2021. 中卫倪滩井数字化水位同震响应特征分析. 地球科学前沿,11(11):1435~1441.
- 杨竹转,2011. 地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究. 博士学位论文. 北京:中国地震局地质研究所,70~73.
- 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,刘春国,等,2008. 中国大陆井水位与水温动态对汶川 $M_s8.0$ 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, 赵云旭, 等, 2005. 云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究. 地震学报, **27**(5): 569~574.
- 尹宝军, 马丽, 陈会忠, 等, 2009. 汶川 8.0 级地震及其强余震引起的唐山井水位同震响应特征分析. 地震学报, **31**(2): 195~204.
- 鱼金子, 车用太, 刘成龙, 等, 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. 地震, **32**(1): 59~69.
- 鱼金子, 车用太, 刘五洲, 1997. 井水温度微动态形成的水动力学机制研究. 地震, **17**(4): 389~396.
- 张彬, 刘耀炜, 高小其, 等, 2015. 2015 年尼泊尔 $M_s8.1$ 地震引起的井水位与井水温同震效应及其相关性分析. 地震学报, **37**(4): 533~540.
- 周志华, 黄辅琼, 马玉川, 2013. 中国大陆井水位观测网对甘肃岷县漳县 6.6 级地震同震响应特征分析. 地震工程学报, **35**(3): 529~533.
- 周志华, 黎明晓, 马玉川, 2014. 芦山 $M_s7.0$ 地震引起的水位同震响应特征分析. 四川地震, (2): 21~25.
- Brodsky E E, Roeloffs E, Woodcock D, et al, 2003. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes. J Geophys Res, **108**(B8): 2390.
- King C Y, Azuma S, Igarashi G, et al, 1999. Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan. J Geophys Res, **104**(B6): 13073~13082.
- Lai G J, Lei X L, Jiang C S, et al, 2021. Multiple mechanisms of coseismic water level changes at the Rongchang Well in a seismically active area in China. Tectonophysics, **819**: 229083.
- Montgomery D R, Manga M, 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes. Science, **300**(5628): 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.
- Roeloffs E A, Bredehoeft J D, 1995. Coseismic response of water wells near Parkfield, California to the August 4, 1985 North Kettleman Hills. Earthquake. EOS Trans Am Geophys Union, **66**(46): 986.
- Wakita H, 1975. Water wells as possible indicators of tectonic strain. Science, **189**(4202): 553~555.
- Yan R, Woith H, Wang R J, 2014. Groundwater level changes induced by the 2011 Tohoku earthquake in China mainland. Geophys J Int, **199**(1): 533~548.

Coseismic Response Changes of Water Level and Water Temperature Caused by the Menyuan $M_s6.9$ Earthquake

Tao Zhigang, Wang Xiao, Zhu jie, Liu Yangyang, Wang Yuebing
China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract Based on the database from underground fluid national network, this paper analyzes the coseismic response changes of underground fluid water level and water temperature caused by the $M_s6.9$ earthquake in Menyuan. The results show that the number of coseismic responses of water level is much larger than that of water temperature. The start and end time of the coseismic response of the water level is prior to the water temperature. The coseismic response of water temperature is the secondary change of the coseismic response of water level. Finally, by comparing the two earthquakes in Menyuan, it is found that the seismic energy is the main reason for the difference in the coseismic response of the two earthquakes.

Keywords: Qinghai Menyuan; Underground fluid; Water temperature coseismic; Water level coseismic