

# 2016 年青海门源 6.4 级地震周边的地下流体 同震响应特征研究<sup>\*</sup>

王永刚, 孙 丽<sup>♣</sup>

(青海省地震局 西宁地震台, 青海 西宁 810001)

**摘要:**通过对门源 6.4 级地震周边的地下流体同震响应特征进行研究, 分析门源地震发生时有响应井孔的水(地)温或静水位变化情况, 结果表明: 门源 6.4 级地震震中周边 600 km 范围内有 4 个水温、1 个静水位的井孔出现了同震响应, 水温井孔同震响应变化形态为下降—回升, 静水位井孔同震响应的变化形态为突升。同震变化的台站分布、变化形态与震中距、方位的关系不明显。通过同震变化机理的探讨, 认为 5 个观测井的同震变化原因不尽相同。

**关键词:** 门源 6.4 级地震; 地下流体; 同震响应

**中图分类号:** P315.723

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)增刊 1-0083-06

## 0 前言

巨大地震产生的地震波传播过程可以看做是一次范围广泛的动力过程, 不同地下流体的同震响应特征是对应力应变过程最直接的反映。近十几年来, 几次特大地震引起的全国范围地下流体观测井的同震响应现象引起了众多学者的关注。学者们分析了水位、水温同震响应的特征并对其机理进行了探讨。付虹等(2002)通过多年预报、研究、实践后认为, 分析同震效应的机理、特征, 提出震后效应的单井、密集、条带、迁移等空间分布, 可对老震区余震、外围区及井位附近牵动性后继地震地点预报有指示意义, 亦可对中短期预报及后继地震震型判定提供线索。刘耀炜等(2005)广泛收集了大陆地下流体台网对 2004 年 12 月 26 日苏门答腊地震的同震响应, 分析了水温响应特征的基本类型, 提出地下水水温的同震下降变化是因为井孔含水层周边上层地下水随着振动效应的作用, 加大了向下垂直运动的速率, 低温水快速混入观测含水层中, 从而引起水温的快速下降变化。鱼金子等(1997)研究了北京太平庄井水温的同震响应现象, 并提出了另一种同震响应机制, 认为北京太平庄井水温的同震突降是由于井水气体的释放造成的。陈大庆等(2007)在

总结分析 2004 年 12 月 26 日苏门答腊地震所引起的中国大陆 121 个观测井水位与水温同震响应特征时, 也提出了气体逸出导致水位振荡—水温下降的机制。杨竹转等(2007)收集并分析了北京塔院井一井多震的水位和水温同震响应资料, 认为井孔中的水体受振荡激发而加速对流与掺混是导致水温同震下降的主要原因。孙小龙等(2007)研究认为, 地震波作用过后井水水位和水温出现阶变且不会在短时间内恢复, 则可能是由于地震波作用过程中使含水层局部地区介质发生了塑性形变, 从而使得流向观测井孔的地下水流流程或流速(流量)发生变化所致。

2016 年 1 月 21 日 1 时 13 分, 青海省海北州门源县(37.7°N, 101.6°E)发生 6.4 级地震, 震源深度 10 km, 极震区烈度为Ⅷ度, 震中距门源县城 33 km, 门源县城震感强烈, 西宁市区普遍有感。本文通过收集门源 6.4 级地震震中周边 600 km 范围内的 46 个地下流体水温和水位井的观测资料, 分析研究同震响应变化特征, 并对其变化的机理进行了探讨。

## 1 地下流体观测井孔基本情况

门源 6.4 级地震震中周边 600 km 范围内共有青海、甘肃、宁夏 3 省流体观测井孔 46 个, 其中

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-08-23.

<sup>♣</sup> 通讯作者: 孙丽(1968~), 主要从事地震监测工作. E-mail: 937158534@qq.com.

水温观测井 43 个，水位观测井 32 个，部分井孔同时具备水温和水位观测条件。从震中距看，200 km 内有 9 个井孔，200 ~ 300 km 和 300 ~ 400 km 范围内各 6 个井孔，400 ~ 500 km 内有 10 个井孔，500 ~ 600 km 内有 15 个井孔。

通过对地震前后 43 个水温井、32 个水位井的分钟值观测数据进行分析，发现有 5 个井孔在门源地震震后有同震变化响应，其中水（地）温 4 个（平安、民和、都兰和中卫倪滩）、水位 1 个（平凉华亭），出现同震响应的井孔占有流体井孔的 11%。出现同震响应的测项占总测项数的 6.7%，其中水温井占 9%，水位井占 3%，具体情况如图 1 和表 1 所示。图 1 中实心图标为门源 6.4 级地震同震响应井孔，空心图标为无响应井孔。参予统计分析的流体井孔中，震中距最小的为平安井（140 km），震中距最大的为平凉华亭井（469.6 km）。这 5 个同震响应井孔，水（地）温观测仪器为 SZW-1A 型，仪器分辨率小于 0.000 1℃，静水位观测仪器为 SW40-1 型水位仪，仪器分辨率小于 0.001 m。

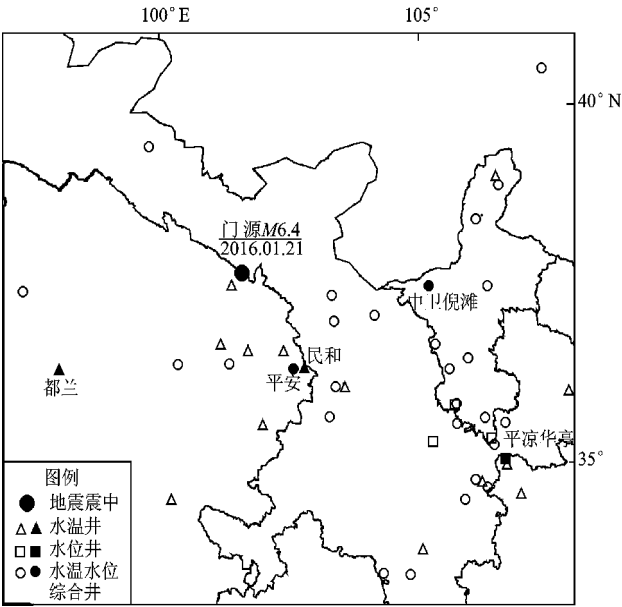


图 1 2016 年门源 6.4 级地震前后周边有响应的流体井孔分布图

Fig. 1 Distribution of coseismic responsive fluid wells before and after the Menyuan  $M_{\text{s}}6.4$  earthquake

表 1 2016 年门源 6.4 级地震周边流体响应情况统计表

Tab. 1 Statistics of fluid response around the epicenter of Menyuan  $M_{\text{s}}6.4$  earthquake in 2016

井名	测项	井深/m	震中距/km	变化类别	变化形态	开始时间	持续时间/min	变化幅度	备注
平安	水温	105.3	141	同震变化	下降—回升	01:14	7	0.001	有水
民和	地温	105.8	185.2	同震变化	下降—回升	01:33	399	0.001 1	无水
都兰	地温	105.3	348.6	同震变化	下降—回升	01:17	20	0.000 3	无水
中卫倪滩	水温	195.7	330.5	同震变化	下降—回升	01:18	55	0.004 4	有水
平凉华亭	静水位	225.5	469.6	同震变化	突升	01:18	5	0.006	有水

2 同震变化响应特征分析

门源 6.4 级地震后，震中周边有 4 个井孔的水（地）温和 1 个井孔的水位出现了明显的同震变化响应。

2.1 平安台水温

平安水温井距离门源地震震中 141 km，井深 105.3 m，岩性主要以湟水河冲洪积卵石层和泥岩为主，地下水分两层，浅部（水位埋深 11.30 m）属径流型地下水，深部（水位埋深 40 m 以下）为基岩孔隙、裂隙含水层。

门源 6.4 级地震发生后，平安水温从 01:14 的 10.425℃ 快速下降至 01:21 的 10.424℃，7 min

内水温变化幅度达 0.001℃，低值持续到 04:27，之后又逐步回升至 10.425℃（图 2a）。

平安水温自 2007 年 7 月正式观测以来一直比较稳定，呈现缓慢上升趋势。8 年来，水温从 10.082℃ 升至 10.427℃，累计上升 0.345℃，日均变化幅度为 0.000 1℃。而门源地震后短时间的数据变化量是长期变化平均日变幅（0.000 1℃）的 10 倍，因此判定平安水温的异常变化是门源地震的同震变化响应。

2.2 民和台地温

民和地温井距离门源地震震中 185.2 km，井深 105.8 m，上部主要为黄土状土和卵石土，深部为棕红色泥岩，有少量原生和次生裂隙发育，无水。

门源 6.4 级地震发生后，民和台水温从 01:33

的 14.922 ℃ 快速下降至 01:35 的 14.921 2 ℃，之后数据低值起伏，最低值为 01:39 的 14.921 1 ℃，累计下降幅度达 0.001 1 ℃，之后低值一直持续到 08:12，随后逐步回升，数值变化趋于正常。该井水温变化形态与平安水温的变化幅度和形态均类似（图 2b）。

民和地温井自 2007 年 6 月正式投入观测以来，数据稳定，形态为缓慢上升趋势，截至门源地震

前，累计上升 0.072 ℃，日均上升 0.000 03 ℃。门源 6.4 级地震后民和地温的即时变化量（0.001 1）远超过长期日均变化量（0.000 03 ℃），因此，民和地温的异常变化可判定为门源地震的同震变化响应。

2.3 都兰台地温

都兰地温井距离门源地震震中 348.6 km。井深 105.3 m，浅部为角砾，深部为坡积角砾，无水。

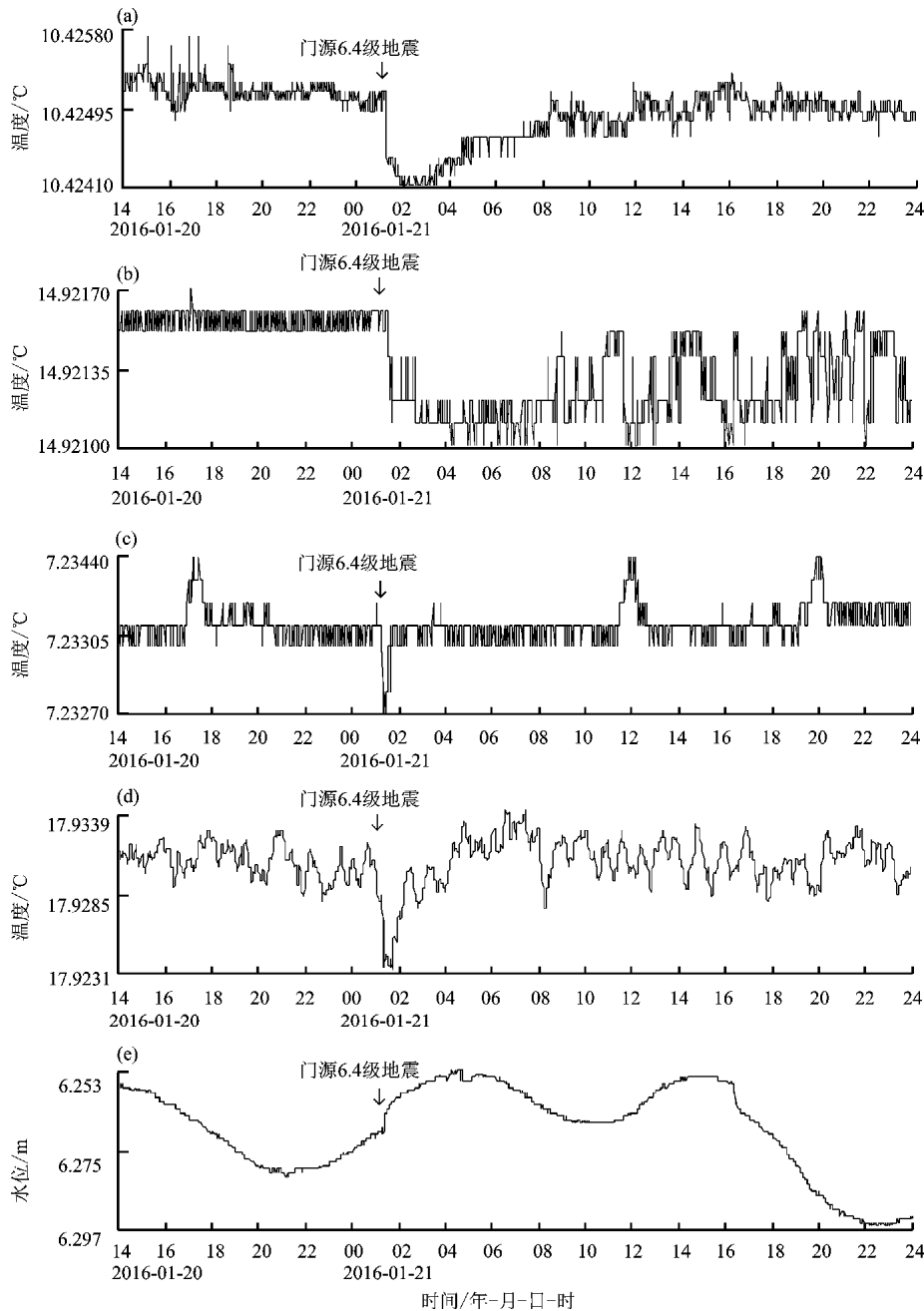


图 2 门源 6.4 级地震震中周边台站同震响应动态变化曲线

Fig. 2 The coseismic response dynamic change curve of the seismic stations around the epicenter of Menyuan  $M_s6.4$  earthquake

门源 6.4 级地震发生后,都兰井地温从 01:17 的 7.233 °C 快速下降至 01:23 的 7.232 7 °C,下降幅度 0.000 3 °C,低值持续至 01:37 后逐步回升(图 2c)。

都兰井的长期变化形态为缓慢上升,平均每日上升幅度约 0.000 06 °C。变化形态清晰,幅度明显,为门源地震同震变化响应。

#### 2.4 中卫倪滩台水温

中卫倪滩水温井距离门源地震震中 330.5 km,井深 195.7 m,上部为洪积层,下部为第三系沉积层,地下水属潜水—承压水。

门源 6.4 级地震后,中卫倪滩水温从 01:18 的 17.927 7 °C 快速下降至 01:24 的 17.923 3 °C,随之转折回升,数据起伏变化,02:13 数据恢复正常 17.927 7 °C,变化幅度达 0.004 4 °C(图 2d)。

此台水温观测数据的长期变化中虽有起伏,但变化幅度远远小于此次的突降,可判定为门源地震同震响应。

#### 2.5 平凉华亭台静水位

平凉华亭台距离门源地震震中 469.6 km,井深 225.5 m,静水位埋深 2.97 m,含水层岩性为上元古界灰岩。

门源 6.4 级地震后,静水位观测值从 01:18 的 6.269 m 出现上升,01:23 达到 6.266 m 后,恢复为以前的变化形态。变化幅度值达到 0.006 m(图 2e)。

门源 6.4 级地震的同震变化叠加在该台的静水位趋势变化之中,显示出加速的特征。

由以上分析发现,门源地震前有 4 个水(地)温井均出现了以下降—回升为主要形态的同震变化响应,但变化持续时间不一致,最长的民和井达 7 h,最短的都兰井仅 20 min。静水位井同震反应形态为突升,变化持续时间仅有数分钟。1 个静水位井出现了突升形态的同震变化响应。通过分析,发现出现同震变化的台站分布、变化形态与震中距、方位的关系不明显。周志华等(2013)认为:与此次地震类似的是,甘肃岷县漳县 6.6 级地震后,水位同震响也以水位同震升降为主,且与构造带的对应关系无规律可循。从变化幅度来看,有水井的平均同震响应幅度要明显大于无水井,这可能跟流体与气体对介质的响应灵敏度有关。

### 3 同震变化机理探讨

#### 3.1 水温水位同震变化机理

此次门源地震中有同震反应的几口水温井,仪器探头都是置于 100 多米深的观测井中,数据变化稳定(杨竹转,2012)。地震发生后,地震波作用在井孔介质上时,会使井孔含水层发生振荡,导致含水层渗透率的增大,从而诱使含水层上部的水体下渗(缪阿丽等,2014)。由于垂向地温梯度的存在,上部相对低温的冷水的混入会使含水层下部的水体温度降低,最终导致水温探头处井水温度的下降。当地震波经过后,水位振荡逐步减弱至停止,下渗作用也就随之逐渐消失。水温下降过程也随即结束。之后,井水会与周围岩体发生热传导作用而逐渐恢复温度,这一过程显示在观测数据中则出现回升现象。民和和中卫倪滩台水温探头均处于含水层,且同震响应变化幅度最明显、形态最显著,其同震变化现象与上述机理吻合。

地震波作用于井孔周围的介质时,原来的含水层系统的动态平衡被打破,出现孔隙压力的改变、层间连通性变化等,从而引起井孔水与周围含水层的水重新调整,包括冷水的下渗、深部热水的涌入、井孔水流向周围介质等(汪成国,2011)。地震发生后由于地震波的作用,进入井孔的水量大于井孔流出的水量,井孔水位就出现了明显的变化。平凉华亭台静水位的同震变化现象与该机理的阐述吻合。

#### 3.2 地温同震变化机理

地震发生后地震波的波动改变了区域地应力场的作用,使岩体周围受力平衡再次发生改变,岩体围压发生变化,岩体内裂隙、节理、孔隙压也随之发生变化(姚宝树,2004),岩体裂隙、孔隙里空气受压情况也发生变化,导致通过岩体裂隙、孔隙进入井孔的冷空气增多,和井孔内的空气温度相互交换,井孔内的温度随之发生变化上升或下降,内置的仪器探头温度也跟随发生变化。都兰、平安两个观测井探头所处位置均无含水层,且同震响应幅度低于有水井的同震响应,其同震响应变化现象可能是井孔内空气的相互交换所致。

## 4 结论与讨论

对门源 6.4 级地震震中周边 600 km 范围 46 个地下流体井同震响应特征进行分析研究, 并探讨了同震变化机理, 得出如下结论:

(1) 2016 年门源 6.4 级地震震中周边 500 km 范围内, 震后有 4 个井孔水(地)温和 1 个井静水位出现明显的同震变化, 水(地)温同震变化以下降—回升为主, 静水位的变化形态为突升。

(2) 出现同震变化的台站分布、变化形态与震中距、方位的关系不明显。

(3) 从形态上看, 静水位同震变化形态以振荡型为主, 表现形式为向上的突跳, 同震响应时间较短; 水(地)温以阶跃或趋势变化为主, 表现形式为向下的阶变, 之后数据基本恢复到同震前相当的水平。从变化幅度上看, 有水井的数值变化幅度较无水井要大。

(4) 门源 6.4 级地震后, 周边流体井孔出现同震响应的比例仅 10% 左右, 大部分井孔没有出现同震变化, 水(地)温的同震响应现在还是一种小概率事件, 可能跟各井孔的分布、井孔的地质构造、环境、仪器探头置深有一定的关系。这一现象也值得进一步研究探讨。

(5) 基于 4 个水温和 1 个井水位的同震响应井孔的基础资料, 结合前人的研究成果, 探讨了水温和水位同震变化的机理。本文认为, 由于井孔中的水体受振荡激发而加速对流与掺混是导致民和和中卫倪滩台水温同震下降的主要原因。而地震发生时, 在地震波的作用下导致观测井井孔内空气的相互交换是都兰和平安 2 个水温同震变化的主要原因。地震发生后由于地震波的作用, 进入井孔的水量大于井孔流出的水量, 导致华亭井孔水位出现上升的主要原因。

本文结合已有的研究成果探讨 2 个有水井、2 个无水井和 1 个水位的变化机理, 探讨比较粗浅, 没有具体考虑每个观测井的温度梯度、孔隙压力、层间连通性、以及观测井所处的区域应力场变化等多种因素。每个观测井水温、水位变化的同震变化机理可以进一步通过数值模拟进行更为深入的研究。

本文在撰写过程中, 得到了青海省地震局李国佑、甘肃省平凉地震台杨晓鹏、天水地震台周建华和宁夏自治区地震局蔡新华同志的帮助, 在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- 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, 2(4): 55-66.
- 刘耀炜, 杨选辉, 刘永铭. 2015. 地下流体对苏门答腊 8.7 级地震的响应特征[C]. 中国地震局监测预报司, 北京: 地震出版社, 131-258.
- 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[J]. 地震, 34(4): 78-87.
- 孙小龙. 2007. 水位与水温对远场巨震同震响应的机理研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- 汪成国. 2011. 新 30# 数字化水位、水温远场大震同震响应初析[J]. 内陆地震, 25(4): 354-359.
- 杨竹转, 邓志辉, 陶京铃等. 2007. 北京塔院井数字化观测水温的同震效应研究[J]. 地震学报, 29(2): 203-212.
- 杨竹转. 2012. 地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究[J]. 国际地震动态, (11): 42-47.
- 姚宝树. 2004. 不同埋深地温探头的观测效应及异常机制的初步研究[J]. 华北地震科学, 22(2): 23-26.
- 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[J]. 地震, 17(4): 389-396.
- 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[J]. 地震地质, 29(1): 122-132.
- 周志华, 黄辅京, 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[J]. 地震工程学报, 35(3): 529-534.

## Study on Coseismic Response Characteristic of Underground Fluid in and around the Epicenter of Qinghai Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in 2016

WANG Yonggang, SUN Li

(*Xining Seismic Station, Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China*)

### Abstract

We study the coseismic response of underground fluid in and around Menyuan  $M_s6.4$  earthquake, and analyze the variation of the water temperature and static water level of observation wells with coseismic response when the Menyuan earthquake occurred. The results show as follow: there appeared coseismic response of water temperature in four observation wells and static water level in one observation well in the area of 600 km around the epicenter. The coseismic response variation shape of water temperature shows decrease – rise, and that of water level shows jump. The relation between station distribution, the variation shape of coseismic response and epicenter, azimuth is not obvious. Through the study of the mechanism of coseismic response change, we deduce that the reason of the coseismic response variation of the 5 observation wells is not the same.

**Key words:** Menyuan  $M_s6.4$  earthquake; underground fluid; coseismic response