

苏维刚,刘磊,孙玺皓.玛多7.4级地震和门源6.9级地震前佐署地下流体异常特征分析[J].地震工程学报,2022,44(3):700-706.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220215005

SU Weigang, LIU Lei, SUN Xihao. Characteristics of underground fluid anomalies in Zuoshu station before Maduo $M_s7.4$ and Menyuan $M_s6.9$ earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 700-706. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220215005

玛多7.4级地震和门源6.9级地震前佐署 地下流体异常特征分析

苏维刚, 刘磊, 孙玺皓

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

摘要: 2021年5月22日青海玛多发生了 $M_s7.4$ 地震,该次地震打破了中国大陆长时间的7级地震平静,随后在2022年1月8日发生青海门源 $M_s6.9$ 地震,分析这两次地震前的前兆异常变化对于青藏高原强震孕震过程和强震短临跟踪具有重要意义。通过对两次地震前青海西宁佐署地震台地下流体异常变化特征、同震响应和震后效应特征分析,发现:佐署动水位异常在2021年2月25日和2021年8月25日出现突降异常变化,较好地对应了玛多 $M_s7.4$ 和门源 $M_s6.9$ 地震;佐署动水位、水温在2021年7月10日同步出现的趋势性转折异常对门源 $M_s6.9$ 地震有一定的时空指示意义。佐署台作为构造敏感点,其地下流体异常变化对青海及邻区次级块体上强震具有较好的短期指示意义。

关键词: 玛多 $M_s7.4$ 地震; 门源 $M_s6.9$ 地震; 水位; 水温; 异常特征; 佐署地震台

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)03-0700-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220215005

Characteristics of underground fluid anomalies in Zuoshu station before Maduo $M_s7.4$ and Menyuan $M_s6.9$ earthquakes

SU Weigang, LIU Lei, SUN Xihao

(Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: The Maduo, Qinghai $M_s7.4$ earthquake on May 22, 2021 broke the long-term $M7$ earthquake quiescence in Chinese Mainland, followed by the Menyuan, Qinghai $M_s6.9$ earthquake on January 8, 2022. Understanding the precursory anomaly evolution before the two earthquakes is of great significance for the seismogenic process and short impending tracking of strong earthquakes in the Tibetan Plateau. In this paper, the anomaly characteristics, coseismic response, and post-earthquake effect of underground fluid at Zuoshu station in Xining City, Qinghai Province before the two earthquakes were analyzed, and the results show that the sudden drop of dynamic water level in Zoshu on February 25 and August 25, 2021 corresponds to the Maduo $M_s7.4$ and Menyuan $M_s6.9$ earthquakes, respectively. Furthermore, the trend turning anomaly of the dynamic water level and water temperature, which simultaneously appeared at Zuoshu station on July 10, 2021, has a certain spatio-temporal significance for the subsequent

收稿日期:2022-02-15

基金项目:2022年度震情跟踪定向工作任务(2022010218)

第一作者简介:苏维刚(1989—),男,宁夏固原人,硕士,工程师,从事定点前兆资料分析研究。E-mail:yangyuwan_su@163.com。

Menyuan $M_s6.9$ earthquake. Through a discussion on the mechanism of water level and water temperature precursory anomalies at Zuoshu seismic station, it is found that the abnormal changes of underground fluid have a good short-term indication for strong earthquakes in the secondary block of Qinghai Province and its surrounding areas.

Keywords: Maduo $M_s7.4$ earthquake; Menyuan $M_s6.9$ earthquake; water level; water temperature; anomalous characteristics; Zuoshu seismic station

0 引言

地震活动过程中常伴有地下流体的水温和水位变化,地下水具有流动性、难压缩等特点,通过地下水微动态观测,可以研究含水岩体受力、变形、破坏过程等现象^[1]。地下水的水温、水位观测目前是我国地震地下流体观测中重要的观测项目,已开展了 30 多年^[2-3]。水温、水位变化机理^[4-6]、同震响应^[7-10]等现象受到有关学者的关注,汶川 8.0,玉树 7.1,九寨沟 7.0 等多次强震前均有水温、水位的异常变化出现^[11-13],目前针对地震前水温、水位前兆异常已有较多的研究成果,包括地震前的区域水温异常特征、单一水温测项在不同地震前的异常变化以及水温、水位异常变化的可能机理等^[11,14-17]。

2021 年 5 月 22 日青海果洛州玛多县发生 $M_s7.4$ 地震,震中位于 $34.59^{\circ}\text{N},98.34^{\circ}\text{E}$,震源机制解显示为高倾角走滑型地震^[18]。发震构造为昆仑山口—江错断裂,地震震中位置在佐署地震台 SW

方向,震中距 210 km,2022 年 1 月 8 日青海海北州门源县发生 $M_s6.9$ 地震,震中位于 $37.77^{\circ}\text{N},101.26^{\circ}\text{E}$ 。发震构造为冷龙岭断裂,此次地震发震位置处于佐署台的 NW 方向,距台站 132 km(图 1)。两次地震前青海西宁佐署地震台水温、水位都有不同程度不同形态的异常变化出现,而且两次地震发生时水温、水位出现不同程度的同震阶升响应。佐署观测井是唯一在两次地震前均出现异常响应,震时出现显著同震阶跃的测点,作为两次地震前最为优势的响应测点,深入分析佐署地下流体异常特征对于认识这两次地震的孕震过程及其之间的动态联系具有重要意义。本文通过地球化学取样分析、异常特征对比分析,同震响应及震后调整性异常特征分析等多角度对佐署水温、水位异常资料进行深入分析,期望认识异常资料变化、同震响应等特征与两次地震之间的关系,同时为震前前兆异常信息的提取和震后趋势判定提供参考依据。

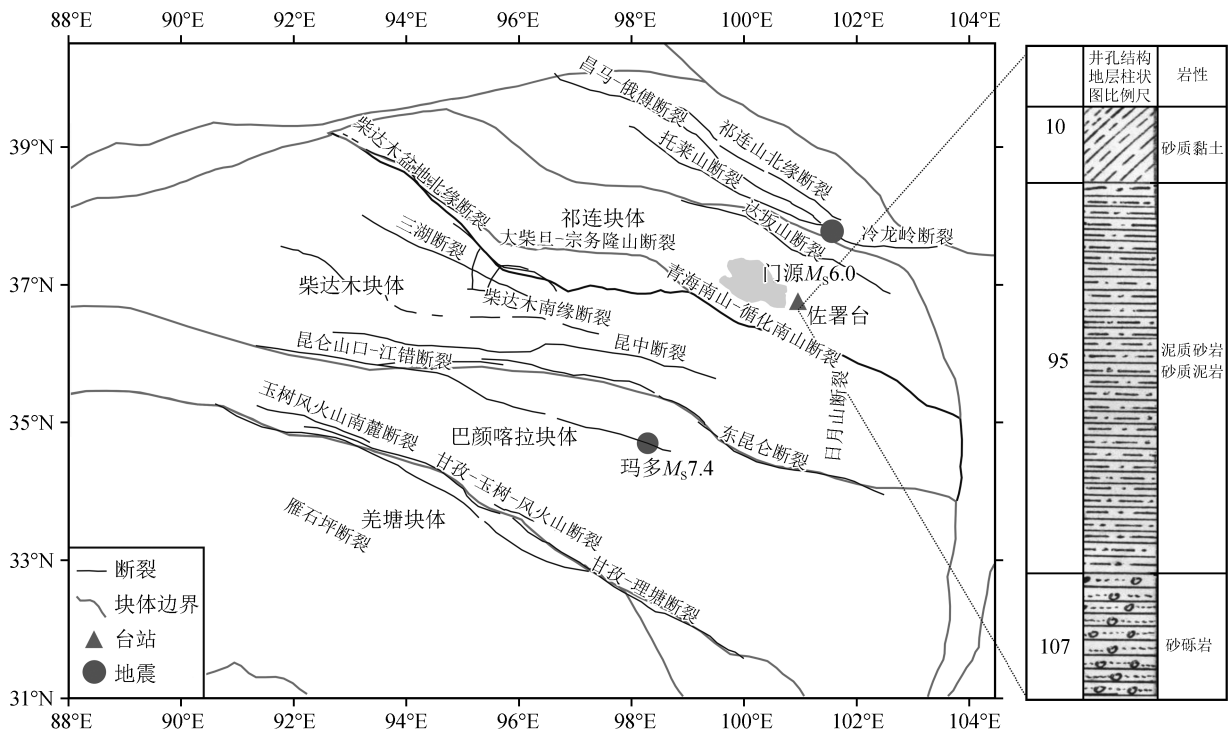


图 1 佐署地震台观测井地质概况^[20]

Fig.1 The geological overview of observation well at the Zuoshu seismological station

1 观测台站及测项概况

佐署地震台所处大地构造位置属于秦祁昆造山带中段,地质构造复杂,变形变质作用较为强烈。台站位于日月山断裂和拉脊山断裂交汇区域,其北侧为达坂山构造带,西侧为日月山构造带,南侧为拉脊山构造带^[19]。台站所在地区属于高原大陆性气候,具有四季不分明、冬长夏短、昼夜温差大及干旱多风的特点。区内水系发育,支流均常年流水,但水量受季节影响明显,水流流入湟水河,台站地处湟水流域,台址岩性为砂岩。观测井属自流井,井深 107 m,套管下设深度 100 m,水头约 15 m,属深层层间承压水。含水层岩性为砂砾岩,上覆隔水层主要以砂质泥岩为主,厚度约 95 m。

佐署台自 2016 年架设 SWY-2 型水位仪和 SZW-II型水温仪,进行动水位和水温观测,二者为同井观测,仪器均为分钟值采样,水位探头距离泄流口中心线 8.4 m,水温探头位于井下约 100 m 的位置。观测资料一直受到高速路施工干扰(距台站直线距离不到 50 m),2019 年 10 月施工结束,数据恢复正常观测。动水位自稳定观测以来呈缓慢下降变化,年降幅约 0.5 m,水温自稳定观测以来呈缓慢上升变化,年增幅约 0.03 ℃(图 2)。台站周边无河流经过,但临近高速公路,容易受施工影响,此外有泄洪渠从台站前经过,可能会受降水影响。2021 年 8 月 16 日水位下降至泄流口以下,泄流口无水流出,2021 年 8 月 20 日架设一套 SWY-2 型水位仪进行动水位对比观测。

2 佐署水位、水温异常特征

佐署动水位自 2021 年 2 月 25 日 21~24 时出现突降变化,最大下降幅为 0.27 m,2021 年 5 月 22 日发生玛多 $M_s7.4$ 地震,震后 50 天,即 7 月 10 佐署动水位和水温同步出现趋势转折变化,动水位呈趋势下降,水温呈趋势上升。2021 年 8 月 25 日动水位出现突降变化,最大降幅 0.27 m,2022 年 1 月 8 日发生门源 $M_s6.9$ 地震(图 2)。

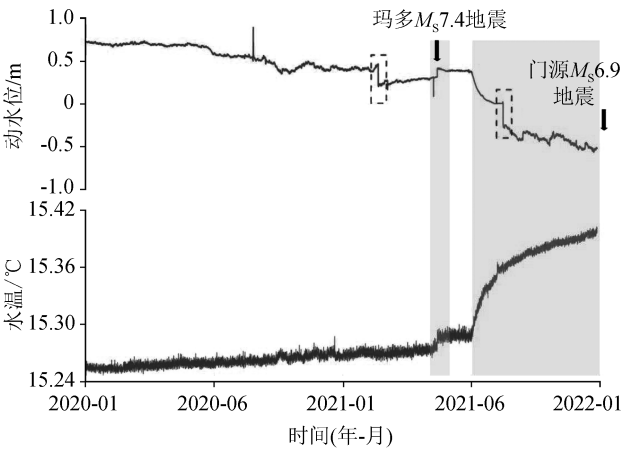


图 2 水位水温 2020 年以来整点值曲线

Fig.2 Integral hour value curves of water level and water temperature since 2020

异常出现后进行现场核实:2021 年 8 月 20 日架设动水位对比观测仪器,两套动水位观测资料连续稳定,变化同步一致,表明仪器工作状态正常;此外通过台站周边调查,附近无施工和灌溉抽水情况,最近的环境干扰源高速公路处于正常通行状态,无施工干扰;最后分析气象资料,在 2021 年全年日均降水量最大(3 mm)的时段(2021 年 7 月 20 日至 23 日)水温、水位均未出现变化,表明佐署观测井受到降水的影响较小,并且 2021 年 1 月以来气温、气压和降水观测资料变化稳定,未出现比较极端的寒冷天气和大范围降水天气,基本排除了观测系统、人为活动和自然环境造成的干扰^[21]。

3 佐署水位水温异常演化与两次地震的响应关系

3.1 地球化学特征分析

2021 年 3 月、7 月和 8 月分别在佐署观测井进行水样采集,每次采集水样 50 mL,密封低温保存并及时送往中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心进行测试^[22],结果列于表 1。3 次采样期间均无降水情况。

表 1 佐署地震台观测井水样结果对比(单位:mg/L)

Table 1 Comparison between observation results of different water samples at Zuoshu seismic station (unit:mg/L)								
取样时间	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
2021-03-15	<0.43	<0.43	2.29	165.3	26.64	12.54	119.1	251.7
2021-07-20	29.85	545.22	1.404	583	3.412	2.281	421.2	221.6
2021-08-25	69.15	522.46	1.456	593.9	3.976	1.571	430.2	203.5

佐署水位水温观测井井水-岩化学平衡(图 3)显示:玛多 $M_s7.4$ 地震前 2021 年 3 月测试结果在

“未成熟水”范围内,表明其为浅层地下水,主要接受大气降水的补给,循环周期相对较快,水-岩之间尚

未达到离子平衡状态,水岩作用仍在进行^[23]。2021 年 7 月测试结果在“部分平衡水”范围,表明水-岩作用程度变高,Piper 图(图 4)显示水化学类型从 Na-Cl 型转变为 Na-HCO₃ 型,震前震后的水化学类型和水-岩反应程度均出现明显变化表明含水层补给发生变化,2021 年 8 月测试结果接近“部分平衡水”与“完全平衡水”的交界区域,水-岩反应程度进一步变高,说明佐署观测井受到玛多 M_s7.4 和门源 M_s6.9 地震的显著影响。而且自 2021 年 3 月以来佐署观测井水体中的 HCO₃⁻ 浓度持续增大,考虑其水体溶解的 CO₂ 浓度增加,可能指示区域存在断裂活动增强的迹象^[24],随后在 2021 年 5 月 22 日和

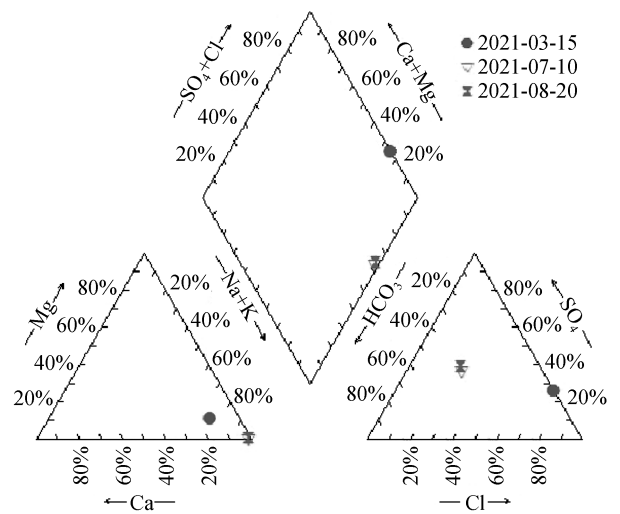


图 4 佐署观测井水化学 Piper 图

Fig.4 The hydrochemical Piper map of Zuoshu observation well

2022 年 1 月 8 日分别发生玛多 M_s7.4 和门源 M_s6.9 地震。

3.2 异常特征对比分析

佐署地震台动水位测项自 2020 年正常观测以来,异常变化一共出现 3 次,异常开始时间分别为 2021 年 2 月 25 日、2021 年 7 月 10 日和 2021 年 8 月 25 日。为获得更为明确的时空强指示信息,以本次“突降”的异常形态对震例进一步梳理,异常变化共出现 2 次,异常对应率 100%,对应于 M6.5 以上地震(图 5),加入模拟观测资料的震例结果,列于表 2,可见:震例指示异常开始的 4 个月内青藏高原次级地块边界及其附近的 M6.5 以上地震。

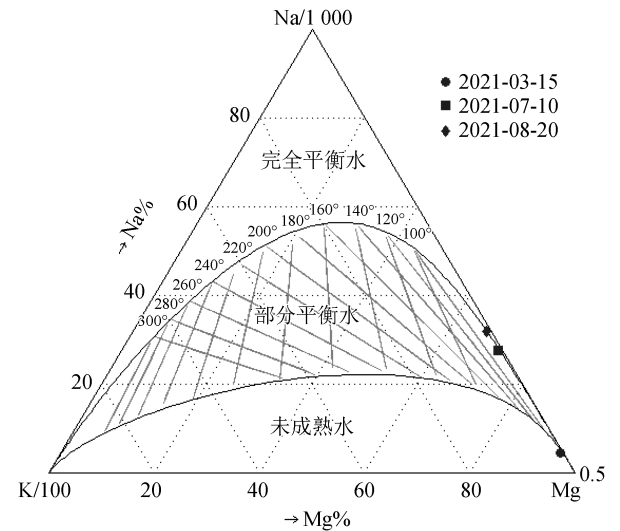


图 3 佐署观测井水-岩化学平衡图

Fig.3 Water-rock chemical equilibrium diagram of Zuoshu observation well

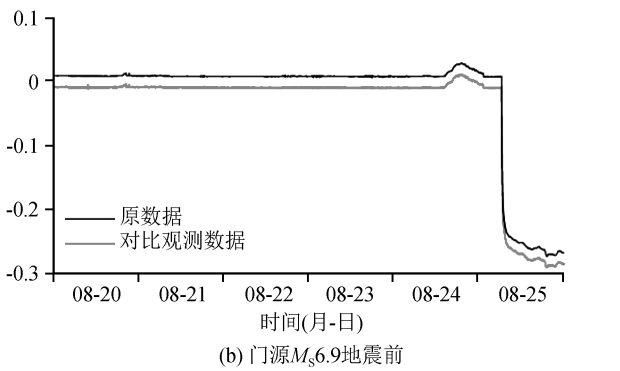
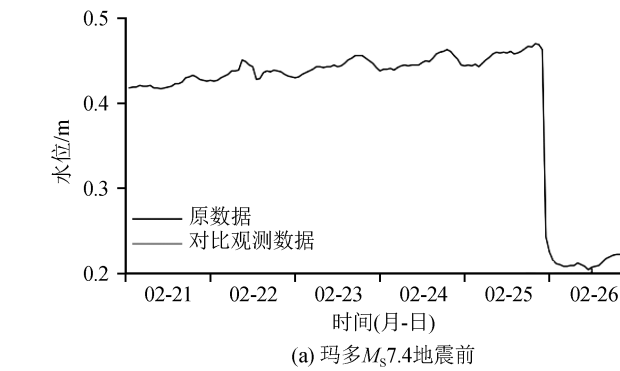


图 5 佐署动水位异常整点值曲线

Fig.5 Integral hour value curve of dynamic water level anomalies at Zuoshu station

表 2 佐署动水位震例统计						
Table 2 Statistics of earthquake cases corresponding to dynamic water level anomalies at Zuoshu station						
序号	异常起始时间	异常形态	异常幅度/m	持续时间/d	井震距/km	对应地震
1	2008-03-15	突降	0.60	41	135	1990-04-26 共和 7.0
2	2021-02-25	突降	0.27	85	210	2021-05-22 玛多 7.4
3	2021-08-25	突降	0.27	135	132	2022-01-08 门源 6.9

地震后区域应力调整、应力转移而引起应力场扰动,可能引起井孔-含水层变形、孔隙压力变化^[25-27],因此震后短时间内相应震级对应范围内出现的异常变化称之为震后调整性异常或震后效应。付虹等^[26]通过对云南 20 余年记录到的地震后效井孔及后继震的特征分析发现震后效应与后继震有一

定关系,前期地震后效井与后继震具有地震地质构造的紧密联系。佐署水位水温在玛多 $M_s7.4$ 地震后不足 50 天水位水温同步出现趋势性异常变化,考虑该变化为震后的调整性异常变化即震后效应,佐署观测井作为玛多 $M_s7.4$ 地震的后效井,其与 2022 年 1 月 8 日门源 $M_s6.9$ 地震的关系列于表 3。

表 3 地震后效与后继地震结果统计

Table 3 The statistical results of post-earthquake effect and subsequent earthquakes					
观测井	前期地震	后继地震	异常开始距发震时间/月	震中距/km	文献来源
佐署	玛多 $M_s7.4$	门源 $M_s6.9$	6	132	本次研究
云南地区	$M>6.5$	$M5.1\sim M7.3$	8.5~10.4	72~135	文献[26]

通过对比可以看出佐署观测井作为后效井,其与门源 $M_s6.9$ 地震同处于祁连次级块体,异常出现距发震时间与震中距分别为 6 个月和 132 km,与前人研究结果的时空尺度相当^[26]。

3.3 同震响应特征分析

地下流体同震效应能够有效、直接揭示地壳介质对应力-应变的响应^[8,26,28],地震引发的水位同震

阶升地区可能是构造应力集中的脆弱区,存在地震危险性^[29]。玛多 $M_s7.4$ 和门源 $M_s6.9$ 地震发生后,佐署水位水温观测均发现明显的同震阶升现象(图 6),且同震响应还未恢复,其中佐署水位在两次地震时的同震阶升幅度分别为 0.11 m 和 0.31 m,水温的同震阶升幅度均为 0.01 $^{\circ}\text{C}$,因此需要关注与佐署地震台构造相关联的区域地震危险性。

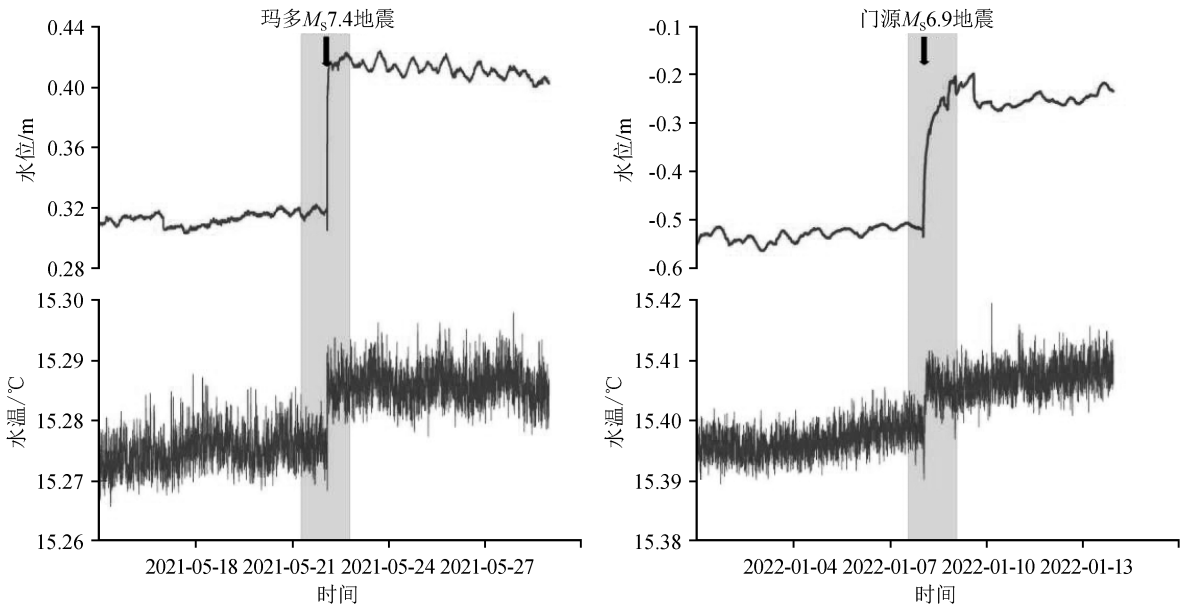


图 6 佐署观测井在玛多 $M_s7.4$ 和门源 $M_s6.9$ 地震时的同震响应特征
Fig.6 The coseismic response characteristics of Zuoshu observation well during the Maduo $M_s7.4$ and Menyuan $M_s6.9$ earthquakes

4 水位水温异常机理讨论

在地震孕育过程中,区域应力应变状态发生改变,在应力加载作用下,含水层岩体变形、相应的孔隙压力发生变化,导致井-含水层系统水动力条件改变^[2,4,16]。通过地球化学分析结果来看,玛多 $M_s7.4$ 地震前后,佐署观测井水-岩反应程度明显增大,水

质类型也发生明显变化,表明地震改变了井-含水层的水动力环境,2021 年 8 月的水样结果指示水-岩反应程度仍处于部分平衡水至完全平衡水边界,说明水动力环境并未恢复至原来状态,而且有进一步改变的迹象,可能表征区域应力增强的状态并未缓解,之后发生门源 $M_s6.9$ 地震。在玛多 $M_s7.4$ 和门源 $M_s6.9$ 地震孕震后期临近发震时,可能造成佐署

地震台所在区域的瞬时应力加载作用,浅层隔水层破裂,使不同含水层串联混通,因此造成震前短期内水位的突降,之后井-含水层系统趋于稳定,水位保持稳定的变化趋势。

玛多 $M_s7.4$ 地震后在部分区域造成动态的应力加载和卸载^[30],断裂力学性质改变或者发生调整,引起流体不同方向的运移,导致水位、水温等在震后出现调整性异常变化。玛多 $M_s7.4$ 地震后,通过梳理甘青两省具有同震响应变化的地球物理场观测台站,发现同震响应优势区域主要集中在青海东部至甘青交界区域,佐署地震台在优势区范围内,而且佐署水位、水温在玛多 $M_s7.4$ 地震中出现明显的同震阶升响应,因此玛多 $M_s7.4$ 地震后可能造成佐署台所在区域的应力加载,使得水位、水温出现趋势性调整性异常变化。

5 结论与思考

通过对佐署地震台水位、水温观测资料的深入分析,综合异常核实和异常分析结果,得出:

(1) 佐署动水位在 2021 年 2 月 25 日和 2021 年 8 月 25 日出现的突降异常变化分别从时空强三要素较好的对应了玛多 $M_s7.4$ 和门源 $M_s6.9$ 地震。动水位突降异常变化具有较好的短期指示意义,一般指示未来三个月左右次级块体边界及附近的 $M6.5$ 左右的强震。

(2) 佐署动水位和水温在 2021 年 7 月 10 日同步出现的趋势性转折异常变化为玛多 $M_s7.4$ 的震后调整性异常,其对后继地震门源 $M_s6.9$ 有一定的时空指示意义。

(3) 佐署观测井水化学类型和水-岩作用程度在玛多 $M_s7.4$ 和门源 $M_s6.9$ 地震前后发生显著变化,说明强震孕育及发生能够显著改变含水层水动力环境,应关注后期水化学类型和水-岩作用程度的恢复过程。

(4) 佐署动水位、水温在两次地震时均具有明显的同震阶升响应,作为同震响应的优势测点需重点关注未来可能出现的异常变化。

通过对水位、水温前兆异常的可能机理探讨分析,佐署台是地球物理场观测的一个构造敏感点,佐署台水位、水温的异常变化对青海及邻区次级块体上强震具有较好的短期指示意义,在未来震情跟踪过程中应该重点关注。另外需要持续跟踪佐署观测井的同震阶升恢复情况及其震后后效,重点关注其构造关联区的震情发展。

参考文献(References)

- [1] 汪成民,陈建民,宇文欣,等.沂沭断裂带地下流体微动态与断层溢气气的研究[J].中国地震,1988,4(3):179-187.
WANG Chengmin, CHEN Jianmin, YUWEN Xin, et al. Study on subsurface fluid microdynamics and fault gas overflow in the Yimu fault zone[J]. Earthquake Research in China, 1988, 4(3):179-187.
- [2] 车用太,鱼金子,刘春国.我国地震地下水温度动态观测与研究[J].水文地质工程地质,1996(4):34-37.
CHE Yongtai, YU Jinzi, LIU Chunguo. Dynamic observation and study of groundwater temperature during earthquake in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996(4):34-37.
- [3] 杜建国,李占维,王翠萍,等.2003 年呼和浩特城区流体异常特征及其地震地质意义[J].地震,2004,24(1):27-33.
DU Jianguo, LI Zhanwei, WANG Cuiping, et al. Seismological significance and features of fluid anomalies occurred in Hohhot City in 2003[J]. Earthquake, 2004, 24(1):27-33.
- [4] 鱼金子,车用太,刘五洲.井水温度微动态形成的水动力学机制研究[J].地震,1997,17(4):389-396.
YU Jinzi, CHE Yongtai, LIU Wuzhou. Preliminary study on hydrodynamic mechanism of microbehavior of water temperature in well[J]. Earthquake, 1997, 17(4):389-396.
- [5] 车用太,刘喜兰,姚宝树,等.首都圈地区井水温度的动态类型及其成因分析[J].地震地质,2003,25(3):403-420.
CHE Yongtai, LIU Xilan, YAO Baoshu, et al. Well water temperature behaviors in capital circle and their formation mechanism[J]. Seismology and Geology, 2003, 25(3):403-420.
- [6] 车用太,刘成龙,鱼金子.井水温度微动态及其形成机制[J].地震,2008,28(4):20-28.
CHE Yongtai, LIU Chenglong, YU Jinzi. Micro-behavior of well-water temperature and its mechanism [J]. Earthquake, 2008, 28(4):20-28.
- [7] 石耀霖,曹建玲,马丽,等.唐山井水温的同震变化及其物理解释[J].地震学报,2007,29(3):265-273.
SHI Yaolin, CAO Jianling, MA Li, et al. Tele-seismic coseismic well temperature changes and their interpretation [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(3):265-273.
- [8] 杨竹转,邓志辉,刘春国,等.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[J].地震地质,2008,30(4):895-905.
YANG Zhuzhuan, DENG Zhihui, LIU Chunguo, et al. Coseismic changes of water level and water temperature caused by $M_s8.0$ Wenchuan earthquake [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4):895-905.
- [9] 王熠熙,孙小龙,邵永新,等.天津王 3 井水位异常机理[J].地震学报,2019,41(6):757-768.
WANG Yixi, SUN Xiaolong, SHAO Yongxin, et al. Mechanism of abnormal water level changes in the Wang 3 well of Tianjin [J]. Acta Seismologica Sinica, 2019, 41(6):757-768.
- [10] 向阳,孙小龙,杨朋涛,等.2019 年长宁 $M6.0$ 和 2018 年兴文 $M5.7$ 地震引起的井水位同震响应对比分析[J].地震,2020,40(2):155-165.

- XIANG Yang, SUN Xiaolong, YANG Pengtao, et al. Comparative analysis of coseismic well water level response caused by 2019 Changning M6.0 and 2018 Xingwen M5.7 earthquakes [J]. Earthquake, 2020, 40(2): 155-165.
- [11] 晏锐, 田雷, 王广才, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震前地下流体异常回顾与统计特征分析 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 1907-1921.
YAN Rui, TIAN Lei, WANG Guangcai, et al. Review and statistically characteristic analysis of underground fluid anomalies prior to the 2008 Wenchuan M_s8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 1907-1921.
- [12] 何案华, 赵刚, 刘成龙, 等. 青海玉树与德令哈地热观测井在汶川与玉树地震前的异常特征 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1261-1268.
HE Anhua, ZHAO Gang, LIU Chenglong, et al. The anomaly characteristics before Wenchuan earthquake and Yushu earthquake in Qinghai Yushu and Delingha geothermal observation wells [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4): 1261-1268.
- [13] 付虹, 赵小艳. 汶川 M_s8.0 地震前云南地区显著前兆观测异常分析 [J]. 地震学报, 2013, 35(4): 477-484.
FU Hong, ZHAO Xiaoyan. Analysis on remarkable precursory anomalies observed in Yunnan area before Wenchuan M_s8.0 earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(4): 477-484.
- [14] 刘耀炜, 孙小龙, 王世芹, 等. 井孔水温异常与 2007 年宁洱 6.4 级地震关系分析 [J]. 地震研究, 2008, 31(4): 347-353.
LIU Yaowei, SUN Xiaolong, WANG Shiqin, et al. Relationship of bore-hole water temperature anomaly and the 2007 Ning'er M6.4 earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2008, 31(4): 347-353.
- [15] 王博, 马玉川, 马玉虎. 玉树台井水温变化及其与青藏块体周缘大地震间的关系 [J]. 中国地震, 2016, 32(3): 563-570.
WANG Bo, MA Yuchuan, MA Yuhu. Variation of water temperature in the Yushu well and its correlation with the strong earthquakes in the Qinghai-Tibetan block [J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(3): 563-570.
- [16] 孙小龙, 刘耀炜. 应力加载作用引起地下水微温度场变化的研究综述 [J]. 国际地震动态, 2006, 36(7): 17-26.
SUN Xiaolong, LIU Yaowei. Summaries of the micro temperature variations of underground water caused by loading stresses [J]. Recent Developments in World Seismology, 2006, 36(7): 17-26.
- [17] 李利波, 张立, 付虹, 等. 水位前兆异常特征分析 [J]. 地震研究, 2016, 39(3): 436-443.
LI Libo, ZHANG Li, FU Hong, et al. Statistic and analysis on precursory anomalies of water level [J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(3): 436-443.
- [18] 张喆, 许力生. 2021 年青海玛多 M_w7.5 地震矩心矩张量解 [J]. 地震学报, 2021, 43(3): 387-391.
ZHANG Zhe, XU Lisheng. The centroid moment tensor solution of the 2021 M_w7.5 Maduo, Qinghai, earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2021, 43(3): 387-391.
- [19] 袁道阳. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003.
YUAN Daoyang. Tectonic deformation features and space-time evolution in northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau since the late Cenozoic time [D]. Beijing: Institute of Geology, Seismological Bureau of China, 2003.
- [20] 苏维刚, 马茹莹, 马震, 等. 钻孔应变的干扰源及其干扰机制的多方法分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(8): 871-876.
SU Weigang, MA Ruying, MA Zhen, et al. The multi-method analysis of interference source and interference mechanism of borehole strain [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(8): 871-876.
- [21] 孙小龙, 刘耀炜, 付虹, 等. 我国地震地下流体学科分析预报研究进展回顾 [J]. 地震研究, 2020, 43(2): 216-231, 417.
SUN Xiaolong, LIU Yaowei, FU Hong, et al. A review of study in the analysis and prediction of seismic subsurface fluids during past ten years in China [J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(2): 216-231, 417.
- [22] 孔凡翠. 镭同位素示踪青海湖西岸水体运移和地下水排放的研究 [D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2015: 36-37.
KONG Fancui. The research of tracing water transport and groundwater discharge in the western coast of Qinghai Lake by Radium isotopes [D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2015: 36-37.
- [23] 苏维刚, 刘磊, 袁伏全, 等. 2021 年玛多 M_s7.4 地震前玉树地震台井水温异常特征 [J]. 地震学报, 2021, 43(3): 392-396.
SU Weigang, LIU Lei, YUAN Fuquan, et al. The anomaly characteristics of well water temperature in Yushu seismic station before the 2021 Maduo M_s7.4 earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2021, 43(3): 392-396.
- [24] 康来迅, 张新基, 黄杏珍, 等. 西秦岭北缘断裂带排气活动的比较研究 [J]. 地震学报, 1999, 21(6): 657-664.
KANG Laixun, ZHANG Xinji, HUANG Xingzhen, et al. Comparative study of degassing activity along the north fault zone of western Qinling [J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 21(6): 657-664.
- [25] 陈立德, 罗平, 傅虹, 等. 震后异常与新地震异常的识别方法研究 [J]. 地震, 1995, 15(增刊 1): 125-135.
CHEN Lide, LUO Ping, FU Hong, et al. Method study on distinguishing anomalies of post-earthquakes and forthcoming earthquakes [J]. Earthquake, 1995, 15(Suppl01): 125-135.
- [26] 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): 55-66.
FU Hong, LIU Lifang, WANG Shiqin, et al. Research on coseismic and post seismic effect of ground water for the local and near earthquake [J]. Earthquake, 2002, 22(4): 55-66.
- [27] 张慧. 西北地区水氡震后调整性异常与新地震异常的识别方法研究 [J]. 西北地震学报, 1997, 19(1): 38-43.
ZHANG Hui. The indices for distinguishing the adjustment radon anomalies after an earthquake and the radon anomalies of a future earthquake in northwestern China [J]. Northwestern Seismological Journal, 1997, 19(1): 38-43.

[8]

尹祥础,张晖辉,彭克银,等.加卸载响应比理论的新进展及其对中国大陆未来地震趋势在预测[C]//中国地震局分析预报中心.中国地震趋势研究(2004 年度).北京:地震出版社,2003:282-285.

[9]

尹祥础,张晖辉,张浪平,等.多时空尺度加卸载响应比扫描预测 2005 年中国大陆地震趋势[C]//中国地震局分析预报中心.中国地震趋势研究(2005 年度).北京:地震出版社,2003:285-292.

[10]

尹祥础,张浪平,张永仙,等.从加卸载响应比的时空演化预测中国大陆未来 1—3 年地震趋势的初步研究[C]//中国地震局地震预测研究所.中国地震趋势研究(2007 年度).北京:地震出版社,2006:91-95.

[11]

文亚猛,袁道阳,张波,等.青藏高原东北隅弧形构造区现代中小地震密集区与历史强震的关系探讨[J].地震工程学报,2021,43(3):594-606.
WEN Yameng,YUAN Daoyang,ZHANG Bo,et al.Discussion on the relationship between modern medium-small earthquake-intensive areas and historical strong earthquakes in arcuate tectonic region of the northeastern Tibetan Plateau[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(3):594-606.

[12]

李佐唐.门源 6.4 级地震前后加卸载响应比的异常变化[J].西

北地震学报,1997,19(4):47-50.

LI Zuotang.Abnormal change in the loading and unloading response ration before and after the Menyuan 6.4 earthquake[J].Northwestern Seismological Journal,1997,19(4):47-50.

[13]

姜彤,马莎,许兵,等.边坡在地震作用下的加卸载响应规律研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3803-3807.
JIANG Tong,MA Sha,XU Bing,et al.Study on laws of load-unload response of slope under seismic load[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(22):3803-3807.

[14]

贺可强,周敦云,王思敬.降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2665-2670.
HE Keqiang,ZHOU Dunyun,WANG Sijing.Features of load-unload response ratio and its significance in predication of col-luvial landslide induced by rainfall[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(16):2665-2670.

[15]

HE Keqiang,ZHOU Dunyun,WANG Sijin,et al.Characteristics of response and significance of rainfall accumulation land-slide[J].Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(16):2665-2669.



(上接第 706 页)

[28]

黄辅琼,迟恭财,徐桂明,等.大陆地下流体对台湾南投 7.6 级地震的响应研究[J].地震,2000,20(增刊 1):119-125.
HUANG Fuqiong,CHI Gongcai,XU Guiming,et al.Research on the response anomalies of subsurface fluid in mainland monitoring network to the Nantou earthquake with $M_s7.6$ [J].Earthquake,2000,20(Suppl01):119-125.

[29]

周志华,田雷,晏锐,等.玛多 7.4 级和漾濞 6.4 级地震水位同震阶变响应特征[C]//中国地震学会地震流体专业委员会 2021 年学术年会论文摘要,2021:71.
ZHOU Z H,TIAN L,YAN R,et al.Response characteristics

of coseismic changes of water level in Maduo 7.4 and Yangbi 6.4 earthquakes[C]//Abstract of the paper presented at the 2021 Annual Meeting of Seismic Fluid Committee,Seismological Society of China,2021:71.

[30]

王志欣,信荃麟.关于地下断层封闭性的讨论:以东营凹陷为例[J].高校地质学报,1997,3(3):293-300.
WANG Zhixin,XIN Quanlin.Discussion on the sealing property of deeply buried faults[J].Geological Journal of Universities,1997,3(3):293-300.