

苏鹤军,曹玲玲,张慧,等.近场水位、水温同震响应特征及对地震的预测[J].地震工程学报,2020,42(1):98-106.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.098
SU Hejun, CAO Lingling, ZHANG Hui, et al. Co-seismic Response Characteristics of Near-field Water Level and Water Temperature and Associated Prediction of Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 98-106. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.098

近场水位、水温同震响应特征及对地震的预测

苏鹤军^{1,2}, 曹玲玲², 张 慧^{1,2}, 李晨桦^{1,2}, 周慧玲^{1,2}

(1.中国地震局兰州岩土地震研究所,甘肃 兰州 730000;

2.甘肃省地震局,甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了掌握 $M_s 7$ 以下强震近场流体的同震变化特征,以岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震为例,分析震中 300 km 范围内数字化水位和水温的同震变化特征及与未来 4 级以上地震发震区域的关系,结果显示: $M_s 7$ 以下强震引起的水位、水温同震相对变化幅度不大,且持续时间短,形态以突跳型变化为主;同震变化的相对幅度在空间上没有显著的差异;同震变化的初始方向在空间上具有四象限分布特征,且与震源机制解的四个区域配套;同震变化初始方向向上台站集中的区域与未来 4 级以上地震的发生区域有关。由于震级偏低的地震相对于 $M_s 7$ 以上地震其发生频率高,且近场研究范围较小,因此其在未来地震的预测上具有更加重要的意义。

关键词: 岷县漳县; 同震; 近场; 水位水温; 预测

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0098-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.098

Co-seismic Response Characteristics of Near-field Water Level and Water Temperature and Associated Prediction of Earthquakes

SU Hejun^{1,2}, CAO Lingling², ZHANG Hui^{1,2}, LI Chenhua^{1,2}, ZHOU Huiling^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Geotechnical Earthquake, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To understand the co-seismic response characteristics of near-field water level and water temperature in strong earthquakes with magnitude less than 7, the Minxian—Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake was studied. The co-seismic response characteristics of digital water level and water temperature within 300 km of the epicenter were analyzed, and their associated relationship with the region where $M_s 4.0$ earthquakes may occur was studied. Main analytical conclusions were as follows: co-seismic relative changes in amplitude in water level and water temperature induced by $M_s < 7.0$ earthquakes were not large, and were of short duration during the last event, with sudden-jump being the main effect. Relative amplitudes of the co-seismic changes were not clearly different in different regions. Initial directions of the co-seismic changes were distributed in a four-quadrant form. The station concentration region where the

收稿日期: 2018-05-24

基金项目: 甘肃省科技计划资助(1606RJYA218)

第一作者简介: 苏鹤军(1973—),男,硕士,副研究员,主要从事地下流体和地震预测方面的研究。E-mail: suhejun@126.com。

通信作者: 曹玲玲(1972—),女,硕士,副研究员,主要从事地下流体预测地震方面的研究。E-mail: caoll@gdszj.gov.cn。

initial direction was up was related to the region where $M_s 4.0$ earthquakes may occur. Because the frequency of $6 < M_s < 6.9$ earthquakes was relatively higher than that of $M_s \geq 7.0$ earthquakes, and the scope of the near-field study was relatively small, the near-field earthquakes were found to be more advantageous than the far-field ones in predicting future earthquakes.

Keywords: Minxian—Zhangxian; co-seismic; near-field; water level and water temperature; prediction

0 引言

地震引起的水位、水温同震变化不仅在时间上具有确定性,而且在形态还具有易识别性,同时大量流体观测台站的建设以及高频采样(1次/min)数据的产出为同震变化的研究提供了条件,因此流体同震变化近些年被广泛研究,且形成了多种研究思路:如一次地震引起的多个台站的同震变化特征研究^[1-3],多次地震引起同一台站的同震变化特征研究^[4-8],一次地震及其余震引起的同一台站的同震变化特征研究^[9],多次地震引起的成批台站的同震变化特征研究^[10]及通过研究同震变化特征来预测未来地震的震中^[11-12]等。同时在同震变化形成的机理上也进行过研究^[13-18]。

虽然对流体同震变化特征和形成机理等方面的研究已持续了很多年,但从数字化流体台站大量建设以来的研究来看,几乎都是对 7 级及以上地震的研究,且对其研究范围较广泛,但没有区分近场和远场,但鲜有对 7 级以下强震近场的研究,其主要原因是由于台站分布不合理造成的,且大多 $M_s 6 \sim 6.9$ 地震不能引起大批且相对集中的流体测点出现同震变化。2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县($104.2^\circ E$, $34.5^\circ N$)发生 $M_s 6.6$ 地震,这次地震距离震中 300 km 范围内有大量的数字化水位、水温台站,这个距离也是《中国震例》中规定的 $M_s 6 \sim 6.9$ 地震前兆异常的研究范围^[19],且通过初步扫描发现这次地震周围大多数字化水位、水温台站出现了同震变化,这将为进行 7 级以下地震近场流体同震变化特征的研究提供了条件。

本文拟以岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震震中 300 km 范围内的数字化水位、水温为研究对象,深入分析 $M_s 7$ 级以下地震近场的同震变化特征,进而分析同等震级引起的流体同震变化特征与未来 4 级以上地震发震区域的关系,为震后地震的预测提供依据。

1 台站分布及资料概况

1.1 台站分布概况

岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震震中 300 km 范围内共有 22 个流体台站,其中水位测项 16 个,水温测项 19

个,13 个台站水位和水温并行观测。台站的具体分布见图 1。从图 1 可以看出,震中 100 km 范围内没有台站分布,100~200 km 范围内分布有 7 个台站,其他都分布在 200~300 km 范围内。空间上除在震中西南方向没有台站之外,其他方位分布都比较均匀,并且这些台站都位于主要断裂带附近。

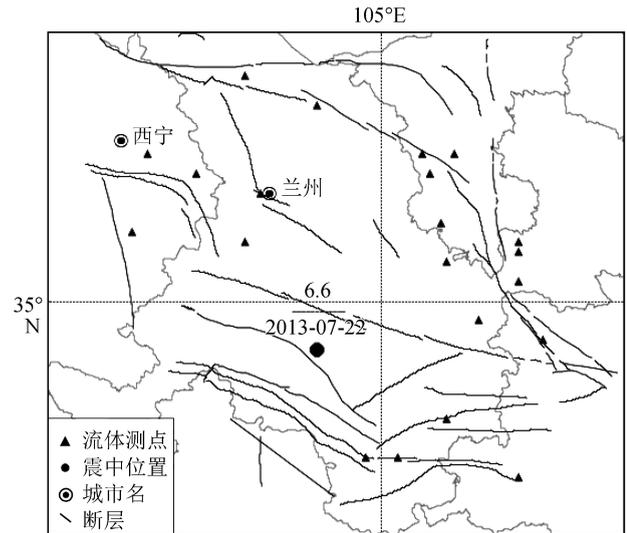


图 1 数字化水位水温观测台站分布图

Fig.1 Distribution of digital water level and temperature observation stations

1.2 资料观测概况

研究区水位、水温都为水井观测,观测深度差别比较大,最浅的仅 76 m,为武都两水观测井;最深的达到了 400 m,为静宁威戎观测井,但大多数的观测深度在 200 m 左右,均为静水位观测井。它们的采样频率都为 1 次/min。使用的仪器有 ZKGD3000 水位水温综合观测仪, LN-3A 型水位仪和 SZW-1A 型水温仪。水位观测仪的分辨率都为 1 mm,水温观测仪的分辨率都为 $0.000 1^\circ C$ 。

水位、水温观测产出的数据记录的时间为仪器采集部分时钟记录的时间,随着时间的推移采集器的时间会与标准时间产生偏差,因此分析时需要的时间进行校正,校正依据距流体测点最近的测震台站记录到的地震波的到时时间。由于水位、水温为分钟采样,因此这种校正结果能够满足

精度要求。

对研究区内所选流体数据进行了全时空扫描,其结果显示共有 12 个水位测项、3 个水温测项在这

次地震时出现了同震变化,这些台站的具体参数列于表 1。从表 1 可以看出,这些台站水位正常情况下都能记录到潮汐,表明观测资料可靠、可信。

表 1 数字化水位水温同震变化台站

Table 1 The stations with co-seismic variation of digital water level and water temperature

台站名称	井深/m	含水层岩性	测点类型	地下水类型	测项	观测仪器	潮汐反应
* 武都樊坝	180	砂质泥岩	静水位	裂隙水	水位 水温	LN-3A SZW-1A	不显著 无
* 武都两水	76	灰岩	静水位	裂隙水	水位 水温	LN-3A SZW-1A	不显著 无
* 临夏 1	200	花岗岩	静水位	孔隙承压水	水位	ZKGD3000L	较显著
* 临夏 2	70	花岗岩	静水位	裂隙承压水	水位	LN-3A	较显著
* 兰州大滩	82	砂卵石	静水位	孔隙承压水	水位	LN-3A	显著
* 静宁威戎	400	石英砂岩	静水位	裂隙承压水	水位	LN-3A	非常显著
平凉华亭	310	砂砾石	静水位	裂隙承压水	水位	LN-3A	显著
* 铁路小区	270	砂砾石	静水位	裂隙承压水	水位	LN-3A	非常显著
* 古浪横梁	193	砂岩	静水位	裂隙水	水位	ZKGD3000L	不显著
* 景泰芦阳	194	砂岩	静水位	孔隙承压水	水位	ZKGD3000L	显著
* 平凉柳湖	301	砂砾岩	静水位	裂隙承压水	水位 水温	LN-3A SZW-1A	较显著 无
* 西吉王民	351	砂岩	静水位	孔隙承压水	水位	LN-3A	非常显著

注: * 为水位水温并行观测的台站

2 资料处理方法

同震变化的幅度分为绝对幅度和相对幅度。对于不是单调变化的曲线形态,绝对幅度为同震变化的最高值减去最低值的所得值;对于单调变化形态,绝对变化幅度为变化的最大值与变化前测值差值的绝对值。目前基本用绝对变化值表示同震变化幅度。但是在正常背景下,水位、水温测值是波动变化的,并且不同的台站变化幅度差异较大,因此,绝对变化幅度包含了背景波动变化幅度,在未剔除背景变化值的情况下进行不同测点同震变化幅度的对比显然不合理。

采用相对变化幅度可以消除测值背景值的影响。其具体方法为:先计算出同震变化的绝对幅度和变化持续时间;然后选择正常背景下该测项相同时间段测值的变化幅度(水位要考虑潮汐的差异);再用同震绝对变化幅度除以正常背景下的变化值,得到一无量纲的相对变化值,这种归一化处理消除了测值背景值变化的影响,使不同台站同震变化幅度的对比更为合理。用该方法重新计算了研究对象的同震变化幅度,结果列于表 2。对比相对幅度和绝对幅度的变化,显示两者有显著的差别,这进一步证明测值背景变幅对同震变化绝对幅度的影响是不能忽略的。

表 2 数字化水位水温同震变化参数

Table 2 Co-seismic variation parameters of digital water level and water temperature

台站	测项	形态	持续时间 /min	变化幅度		初始方向	震中距 /km
				绝对幅度	相对幅度		
武都樊坝	水位	正突跳	1	21 mm	7	向上	150
	水温	阶升-快速回复	28	0.000 2 °C	2	向上	150
武都两水	水位	正突跳	1	2 mm	2.5	向上	132
	水温	阶升-阶降-恢复	51	0.002 °C	5	向上	132
临夏 1	水位	正突跳	1	3 mm	3	向上	145
临夏 2	水位	正突跳	1	1 mm	4	向上	145
兰州大滩	水位	水震波	2	3 mm	3	向上	178
西吉王民	水位	正突跳	1	9 mm	9	向上	202
静宁威戎	水位	快速下降	22	36 mm	1.3	向下	173
平凉华亭	水位	水震波-上升	8	16 mm	6	向上	238
平凉柳湖	水位	阶降	26	69 mm	69	向下	254
	水温	阶降-快速上升	188	0.033 °C	4.5	向下	254
平凉铁路	水位	缓慢下降	20	20 mm	4.5	向下	253
景泰芦阳	水位	转平	24	1 mm	0.25	向上	278
古浪横梁	水位	水震波	5	3 mm	27	向上	300

3 水位水温同震变化特征

3.1 水位同震变化特征

在震中 300 km 范围内的 16 个水位台站中有 12

个出现了明显的同震变化,占水位台站总数的 75%。

3.1.1 同震变化形态特征

水位同震变化有四种形态,即水震波型、阶变型、突跳型和固体潮畸变型(图 2)。

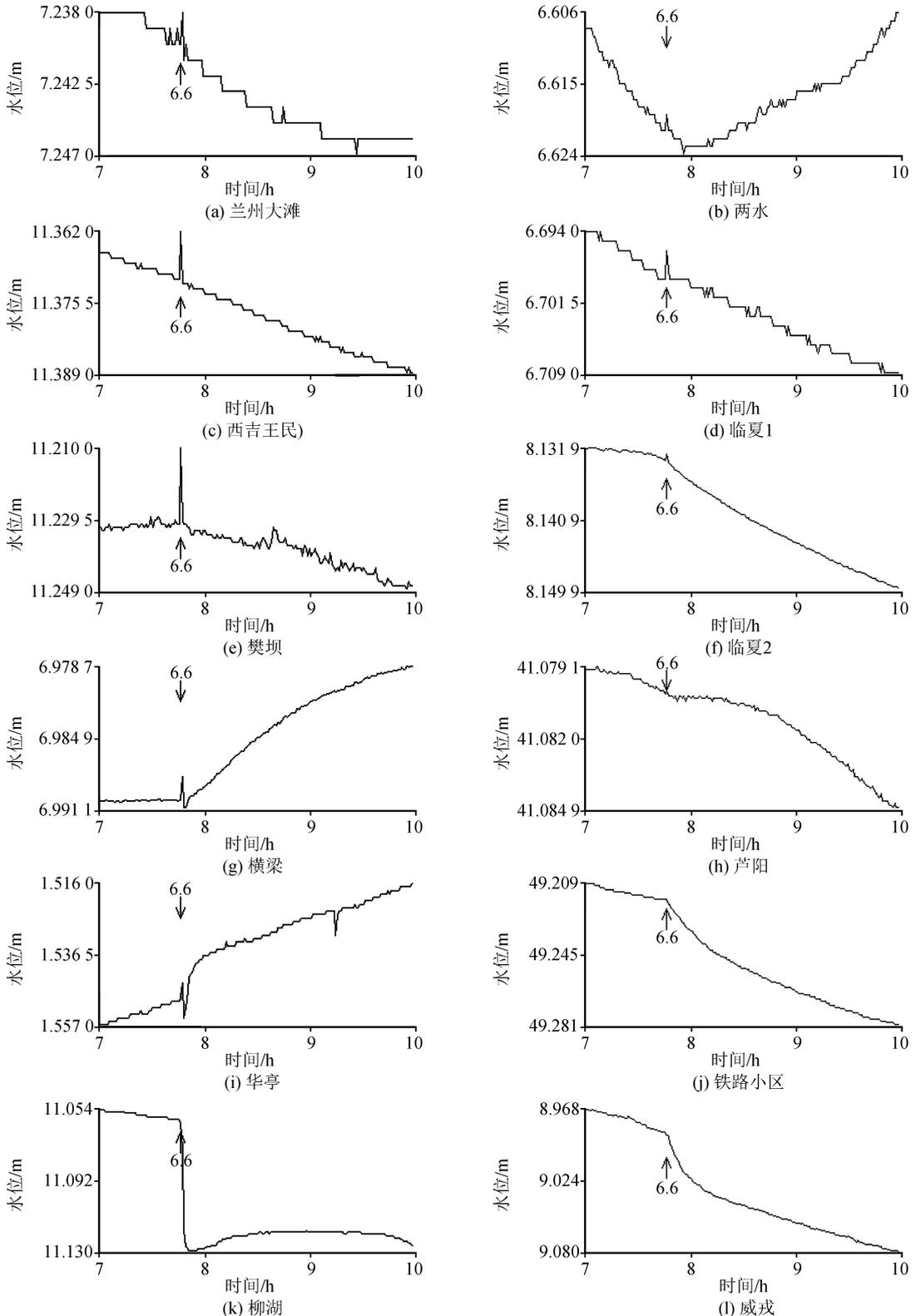


图 2 数字化水位同震变化曲线(2013-07-22)

Fig.2 Co-seismic variation curves of digital water level (2013-07-22)

水位同震变化以突跳型为主,出现这类变化的台站总共有 5 个,占水位同震变化台站总数的 42%,为临夏(2 个台站)、西吉王民,武都樊坝和两水水位,它们都为正突跳。水震波变化的台站和固体潮畸变的台站一样多,都为 3 个,分别占变化台站总数的 25%,水震波变化的台站有兰州大滩水位、华亭水位和古浪横梁水位,它们的形态非常相似,初始变化方向都为上升,且都持续了一个完整的波形。一个波形结束后,大滩水位恢复到正常水平,而华亭和横梁水位持续了一段较为快速的上升变化,当恢复到正常水平时,其测值超过了水震波的峰值。固体潮畸变型变化的台站有景泰芦阳、平凉铁路小区和静宁威戎。虽然都为缓变,但平凉铁路小区和静宁威戎井水位为缓慢下降的背景下下降加快,即为相对下降变化,而景泰芦阳水位为下降的背景下转平,即为相对上升变化。阶变型变化的台站只有 1 个,为柳湖水位,它开始为一个单点的阶降,之后缓慢上升,恢复到正常值后,按正常趋势变化。

3.1.2 同震变化空间分布特征

从水位同震变化的初始方向来看(图 3),位于震中北西方向(第二象限)的水位都为上升变化,其相对区域的水位同样为上升变化(第四象限),位于震中北东方向(第一象限)水位除华亭和王民水位为上升外,其他三个为下降变化,其对顶角区域(第三象限)没有水位台站分布,无法判断这个区域水位的同震变化方向。由此可以看出,水位的初始变化方

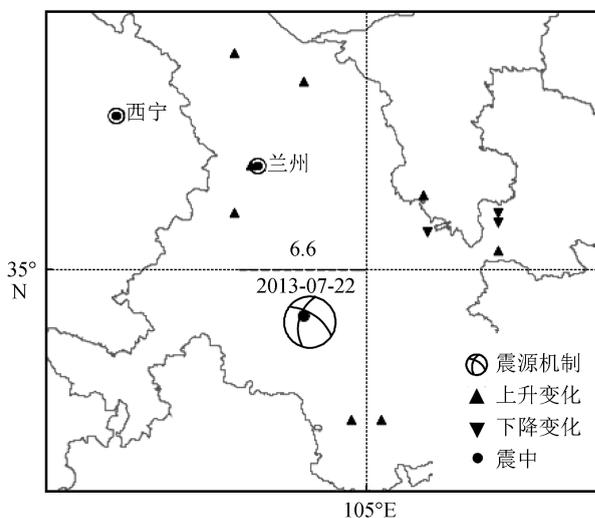


图 3 数字化水位水温同震变化方向与岷县漳县 $M_S6.6$ 震源机制空间关系

Fig.3 The spatial relation between coseismic variation direction of digital water level and water temperature and focal mechanism of Minxian-Zhangxian $M_S6.6$ earthquake

向呈现出显著的四象限分布特征。

从水位同震变化的持续时间来看(表 2),位于第一象限的台站几乎都明显长于相邻的第二和第四象限的台站。

图 4 为水位同震相对变化幅度与震中距的关系。可以看出它们之间并没有一定的规律,从空间分布来看,除古浪衡量和平凉柳湖两个观测点同震相对变化幅度显著之外,其他台站的差别并不大,也不具有象限性分布。

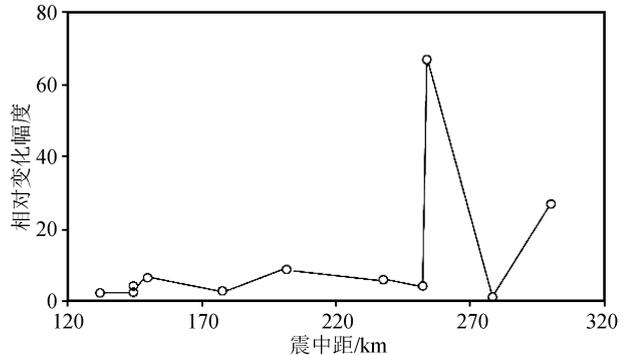


图 4 数字化水位同震变化幅度与震中距的关系

Fig.4 Relation between coseismic variation amplitude of digital water level and epicenter distance

由此可以看出,水位同震初始变化方向和持续时间具有明显的四象限分布,而相对变化幅度不具备此特征。

3.2 水温同震变化特征

水温出现同震变化的台站仅有 3 个,为武都樊坝、武都两水和平凉柳湖井(图 5)。从整体变化形态来看,平凉柳湖井与武都两水井变化非常相似。从初始变化方向来看,武都樊坝和两水水温一致,都为单点上升,之后武都樊坝水温波动结束,但测值都高于正常值,两水水温上升后快速下降到低于背景值,然后缓慢恢复。平凉柳湖水温开始为快速下降变化,下降到最低后缓慢上升到快速上升,与下降前的趋势变化一致时,测值略高于下降前的。

从同震变化持续的时间来看(表 2),三者差别较大,武都樊坝井最短,其次为两水井,柳湖持续时间最长,它们恢复的时间都长于最初变化的时间。从同震变化的相对幅度来看,三个台站差别不大。

由于水温出现同震变化的台站很少,无法进行空间关系的分析,但台站的初始变化方向分布与水位的一致性很好,即第四象限为上升变化,第一象限为下降变化。

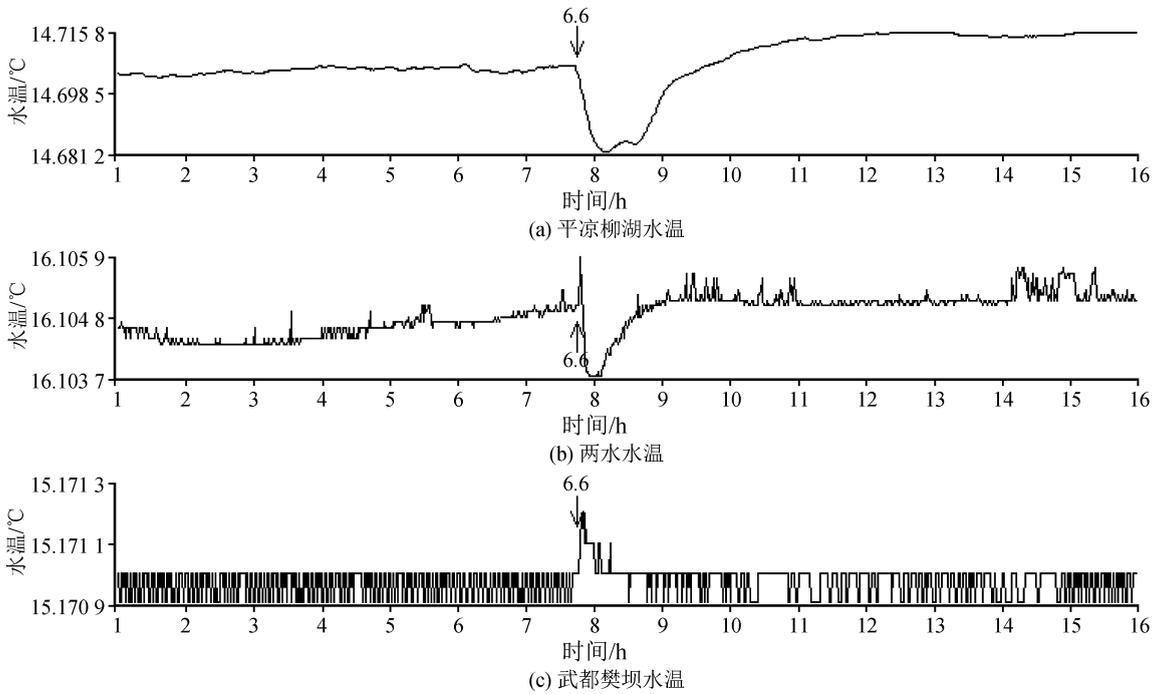


图 5 数字化水温同震变化曲线图(2013-07-22)

Fig.5 Co-seismic variation curves of digital water temperature (2013-07-22)

3.3 水位、水温同震变化特征与未来 4 级以上地震发震区域的关系

已有地震学者对流体同震变化特征与未来地震的关系进行过研究,如刘耀炜等^[20]对汶川地震引起的全国流体的变化研究后,认为流体集中变化的区域可能与未来地震的震中有关。廖丽霞等^[12]对福建水位同震变化的研究发现,水位阶升变化的集中区域可能为未来地震的发生区域。

从图 2 可以看出,本次地震引起的水位出现阶变的台站并不多,只有柳湖水位,且为阶降变化,因此没有形成阶升台站的集中区域。但从初始变化方向来看,初始变化为上升的台站较多,且分布在二、四象限内(图 3)。水温同震初始变化向上的两个台站也位于水位向上台站的集中区域(图 3)。

图 6 为 $M_S6.6$ 地震后两个月内发生在该地震周围的 M_S4 以上地震分布图。该图显示,震源区外第一个 $M_S4\sim4.9$ 地震发生在震后 5 天,为 2013 年 7 月 27 日文县的 $M_S4.6$ 地震,第一个 M_S5 以上地震发生在震后 60 天,为 2013 年 9 月 20 日门源 $M_S5.1$ 地震,这两次地震震中正好位于水位、水温同震初始变化方向向上台站集中的两个区域,并且岷县漳县 $M_S6.6$ 地震距离文县 $M_S4.6$ 地震仅为 180 km,距离门源 $M_S5.1$ 地震 430 km,都发生在同震变

化上升台站集中区的边缘,对地震预测而言,距离并不远。

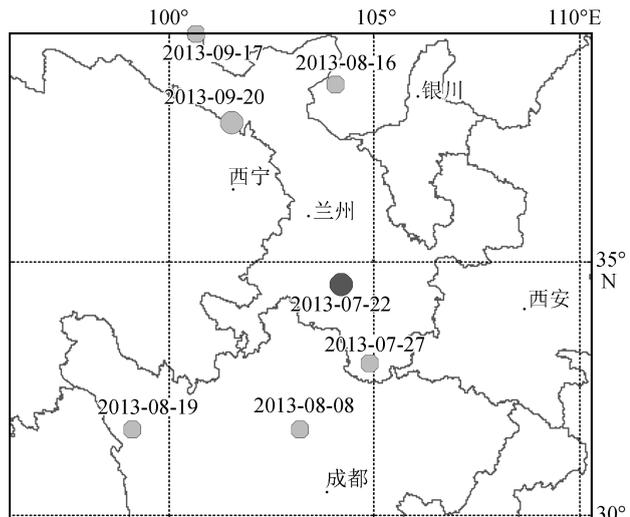


图 6 岷县漳县 $M_S6.6$ 震后两个月内 M_S4 以上地震震中分布图

Fig.6 Distribution of epicenters of $M_S\geq 4$ earthquakes within two months after Minxian-Zhangxian $M_S6.6$ earthquake

从以上分析可以看出, M_S6 地震近场水位水温同震变化特征对未来 M_S4 以上地震的发震位置具有很好的指示意义,且地震发生在同震变化初始方向向上的台站的集中区域。

4 分析与讨论

4.1 水位同震变化的象限性分布

在平凉地区及周边,水位同震初始变化大多为向下,而在与之相邻的两个区域水位同震初始变化都为向上,具有明显的象限性分布。这种象限性分布究竟是观测井的固有属性决定的还是与不同地震的特性有关?

临夏水位 2008 年 5 月 1 日开始观测,汶川 $M_s 8.0$ 、日本 $M_s 9.0$ 和岷县漳县 $M_s 6.6$ 都引起该水位出现同震变化。具体形态为:汶川 8.0 地震水位为快速下降变化^[21],日本 $M_s 9.0$ 地震后水位首先成水震波形态,之后为上升,总体为上升变化,岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震水位为单点的正突跳变化。由此可以看出,这三次地震引起的临夏水位的同震变化形态完全不同。

同时从图 2 可以看出,岷县漳县 $M_s 6.6$ 主震和之后的 $M_s 5.6$ 余震都引起了平凉华亭水位出现了同震变化,但两次地震引起的水位的同震变化形态和初始变化方向都不相同。

综合以上分析,对同一水位测点,其同震变化形态不仅对不同地震表现不同,而且对一次地震的主震和余震的反映也存在着差异,这表明流体同震变化形态并不是由观测井的固有属性决定的,它们呈现出的四象限分布特征是由外部因素决定的。

岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震后多位学者给出了多个震源机制解^[22],结果表明发震断层面的走向为 $302^\circ \sim 320^\circ$,共轭节面的走向为 $180^\circ \sim 198^\circ$,P 轴方位角为 $65^\circ \sim 71^\circ$,T 轴方位角为 $160^\circ \sim 174^\circ$ 。可以看出,它们之间的差别并不大。这里选取陈继锋等^[22]计算的震源机制解结果来分析水位同震变化与震源机制解的关系。从图 3 可以看出,水位同震变化初始方向为上升台站的两个集中区域位于震源机制解压缩区的两个延升区域,水位为下降变化台站的集中区域处在震源机制解的膨胀区的延升区域,它们与震源机制解的四个区域高度一致,这说明水位同震变化方向与各个区域的受力密切相关。压缩区为应力集中区,观测井含水层受到挤压,含水层进入井孔的水增加,水位出现上升;膨胀区为拉张区,观测井含水层的压力下降,含水层进入井孔的水减少,水位出现下降变化。进而形成水位、水温同震变化初始方向的四象限分布。

由此可以看出,水位同震变化初始方向是由其所在区域的应力状态决定的,应力集中区同震变化方向为上升,否则为下降。

4.2 近场与远场水位同震变化特征对未来地震发震区域预测的差异性分析

远场大震流体同震变化特征与未来地震发震区域的关系已有学者进行过研究,由于研究角度的不同,结论不尽相同,陈大庆等^[15]认为同震变化相对集中的区域与未来地震的发生区域有关,廖丽霞等^[12]认为同震阶升台站集中的区域可能为未来地震的发震区域。岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震周围由于台站分布比较均匀,空间上并没有明显的集中性但在同震变化的初始方向上、相同变化方向台站的集中性比较明显,且同震变化初始方向向上的区域与未来 $M_s 4$ 以上地震的发生区域紧密相关。由此可以看出,对未来地震的预测中流体近场同震变化指标似乎与远场存在差异。

但从图 2 可以看出,集中分布在两个区域且同震变化初始方向向上的 7 个水位测项,虽然都不是阶升变化,可其中 6 个为上升-恢复性下降过程,横梁水位虽然为上升-下降(低于同震变化前值)-快速上升-恢复正常,但快速上升阶段其值已经超过变化前的测值,即整体为测值升高。由此可以看出,同震变化初始方向上升台站集中区域的水位都为高值变化,远场大震水位的阶升变化也为高值变化过程,因此从测值整体的变化上,两者是一致的。

在形态上或者描述上出现差别主要与地震的大小有关,地震震级大,引起水位同震变化的幅度大,持续时间长,通常分析时,选择的数据时段更长,同震变化的初始变化方向并不被关注。地震震级偏低时,引起的水位同震变化的幅度小,不易识别,且持续时间短,很快恢复到正常背景,因此需要选择更短的时间段才能体现出同震的变化形态。这样造成了同一变化形态因选择时间长短的变化而出现差异。

综合以上分析可以发现,无论是远场大震还是近场强震,引起的水位高值台站的集中区域与未来 4 级以上地震的发震区域有关,形态的差别主要是由震级的差别引起的。但是偏小震级的发生频率高,且近场研究范围小,对未来地震的跟踪在区域上更具有重要意义。

5 结论

本文以岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震为例,研究了 $M_s 7$

以下强震引起的近场水位、水温同震变化特征以及它与未来 M_S4 以上地震的关系,得出了以下主要结论:

(1) 提出了用相对同震变化幅度代替绝对同震变化幅度,这样可以剔除背景值变化幅度的影响。结果也显示研究区水位、水温同震相对变化幅度不大,这也进一步证明水位、水温的同震绝对变化幅度是由观测井的属性决定的。

(2) 近场水位同震变化以突变型为主,阶变型比较少,但变化幅度小,持续时间短,不易识别。水温同震变化形态主要为快速变化,慢速恢复,变化持续时间较长。

(3) 水位、水温同震初始变化方向具有明显的四象限分布特征,冰凉及周边地区主要表现为下降变化,而与之相邻的两个区域都为上升变化。这种变化并不是观测井的固有属性决定的,而是与震源机制紧密相关,在震源机制解压缩区的延伸区域为上升变化,膨胀区的延伸区域为下降变化。

(4) 水位、水温同震初始变化方向与未来 M_S4 以上地震发生的区域有很好的对应关系,它们都发生在初始变化向上台站集中的区域。

(5) 在预测未来地震的发生区域上,流体在强震近场变化与大震远场变化上没有本质的区别,但由于近场同震研究的区域较小,地震发生频率相对较高,因此它比远场地震同震变化对未来地震发震区域的预测上更具有优势。

参考文献(References)

[1] 刘耀炜,杨选辉,刘用铭,等. 地下流体对苏门答腊 8.7 级地震的响应特征[A]//中国地震局监测预报司编.2004 年印度尼西亚苏门答腊 8.7 级大地震及其对中国大陆地区的影响.北京:地震出版社.2005:131-258.
LIU Yaowei, YANG Xuanhui, LIU Yongmin, et al. Response Characters of Subsueface Fluid to the $M_w9.0$ Earthquake in Sumatra[A].Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration, ed. The 2004 $M_S8.7$ Earthquake in Sumatra, Indonesia and Its Influence on China mainland. Beijing: Seismological Press, 2005: 131-258.

[2] 杨竹转,邓志辉,刘春国等.中国大陆井水位和水温动态对汶川 $M_S8.0$ 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.

[3] 鱼金子,车用太,刘成龙,等.金沙江网对日本 9.0 级地震的同震响应及其特征与机理[J].地震,2012,32(1):59-69.
YU Jinzi, CHE Yongtai, LIU Chenglong, et al. Coseismic Responses of Water Level and Temperature in Wells of the Jinshajiang Groundwater Observation Network to the Japan $M_S9.0$ Earthquake: Characteristics and Mechanism[J]. Earthquake, 2012, 32(1): 59-69.

[4] 杨竹转,邓志辉,高小其,等.新疆乌鲁木齐 04 号井数字化水位同震阶变的研究[J].中国地震,2010,26(3):329-339.
YANG Zhuzhuan, DENG Zhihui, GAO Xiaoqi, et al. Study on Coseismic Drop Steps of Water Level Based on the Digital Observation from Xin-04 Well, Urumqi, Xinjiang[J]. Earthquake Research in China, 2010, 26(3): 329-339.

[5] 顾申宜,刘阳,张慧等.海南琼州海峡加积井水位对远大震的同震响应特征研究.中国地震,2011,27(1):83-91.
GU Shenyi, LIU Yang, ZHANG Hui, et al. The Characteristics Analysis on Co-seismic of Water Level in the Jiaji Well, Hainan[J]. Earthquake Research in China, 2011, 27(1): 83-91.

[6] 武晓东,王志惠,王春媛,等.五里营井水位与水温对汶川及日本地震的同震响应[J].大地测量与地球动力学,2012,32(增刊):22-24.
WU Xiaodong, WANG Zhihui, WANG Chunyuan, et al. Coseismic Response Analysis of Water Level and Temperature at Wuliying Well for Wenchuan and Japan Earthquakes[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(Supp): 22-24.

[7] 秦双龙,廖丽霞,洪旭瑜,等.福建永春桃东井水位同震响应特征及记震能力分析[J].华南地震,2017,37(增刊 1):126-132.
QIN Shuanglong, LIAO Lixia, HONG Xuyu, et al. Analysis on Coseismic Response Characteristics and Seismic Recording Capacity of Water Level of Taodong Well in Yongchun, Fujian[J]. South China Journal of Seismology, 2017, 37(z1): 126-132.

[8] 王俊,王行舟,缪鹏,等.皖 14 井水温响应机理浅析[J].华南地震,2019,39(2):71-78.
WANG Jun, WANG Xingzhou, MIU Peng, et al. Study on Water Temperature Response Mechanism of Wan 14 Well[J]. South China Journal of Seismology, 2019, 39(2): 71-78.

[9] 尹宝军,马丽,陈会忠,等.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[J].地震学报,2009,31(2): 195-204.
YIN Baojun, MA Li, CHEN Huizhong, et al. Characteristics of Coseismic Water Level Change in Tangshan Well Induced by $M_S8.0$ Wenchuan Earthquake and Its Large Aftershocks[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(2): 195-204.

[10] 李志雄,顾申宜,袁锡文,等.海南地区 3 口井水位对苏门答腊两次大地震的同震记录及其特征分析[J].地震地质,2007,29(4):883-893.
LI Zhixiong, GU Shenyi, YUAN Xiwen, et al. Analysis on Characteristics of Coseismic Response of Water Level Recorded in Three Wells in Hainan Area to the Two Sumatra-Andaman Strong Earthquakes[J]. Seismology and Geology,

- 2007, 29(4): 883-893.
- [11] 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 Co-seismic and Post Seismic Effect of Ground Water for the Local and near Earthquake[J]. Earthquake, 2002, 22(4): 55-66.
- [12] 廖丽霞, 王玫玲, 吴绍祖. 福建省流体台网井水位的同震效应及其地震预测意义[J]. 地震学报, 2009, 31(4): 432-441.
LIAO Lixia, WANG Meiling, WU Shaozu. Study on Coseismic Effects of Water Level as Observed by Fujian Well Network and Its Implication to Earthquake Prediction[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(4): 432-441.
- [13] 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, 337.
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, 337.
- [14] 孙小龙, 刘耀炜. 本溪自流井水位与水温同震变化关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(6): 100-104.
SUN Xiaolong and Liu Yaowei. Relation of Coseismic Changes between Water Level and Water Temperature of Benxi Artesian Well[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(6): 100-104.
- [15] 陈大庆, 刘耀炜, 杨选辉, 等. 远场大震的水位、水温同震响应及其机理研究[J]. 地震地质, 2007, 29(1): 122-132.
CHEN Daqing, LIU Yaowei, YANG Xuanhui, et al. Co-Seismic Water Level, Temperature Responses of some Wells to Far-Field Strong Earthquakes and Their Mechanisms[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(1): 122-132.
- [16] 李晨桦, 张慧, 苏鹤军, 等. CO₂ 气体在地震孕育与发生过程中的作用及其机理研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(3): 750-756.
LI Chenhua, ZHANG Hui, SU He jun, et al. Effect and mechanism of CO₂ gas in the genesis and occurrence of earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 750-756.
- [17] 周慧玲, 苏鹤军, 张慧, 等. 基于孕震模式的断层气流动监测网络布设技术[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 1052-1060.
ZHOU Huiling, SU Hejun, ZHANG Hui, et al. Mobile monitoring network layout technique for fault gas based on seismogenic Mode[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 1052-1060.
- [18] 刘星云, 范柱子, 陈阳, 等. 基岩地温异常变化与地震关系初探[J]. 地震工程学报, 2018, 40(增刊): 59-64.
LIU Xingyun, FAN Zhuzi, Chenyang, et al. Preliminary study on the relationship between abnormal bedrock ground temperature changes and earthquake occurrence[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(Supp): 59-64.
- [19] 张绍诚, 主编. 中国震例(1989—1991)[M]. 北京: 地震出版社, 2002: 3-4
ZHANG Zhaocheng. Earthquake Cases in China (1989—1991)[M]. Beijing: Seismological Press, 2002: 3-4.
- [20] 刘耀炜, 任宏微. 汶川 8.0 级地震氡观测值震后效应特征初步分析[J]. 地震, 2009, 29(1): 121-131.
LIU Yaowei, REN Hongwei. Preliminary Analysis of the Characteristics of Post-Seismic Effect of Radon after the Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Earthquake, 2009, 29(1): 121-131.
- [21] 曹玲玲, 高安泰. 汶川 M_S8.0 地震引起的甘肃数字化水位、水温同震响应特征分析[J]. 地震学报, 2010, 32(3): 290-299.
CAO Lingling, Gao Antai. Coseismic Response Characteristics of Digital Records of Water Level and Water Temperature in Gansu Caused by Wenchuan M_S8.0 Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(3): 290-299.
- [22] 陈继锋, 林向东, 何新社. 2013 年甘肃岷县 M_S6.6 地震矩张量反演及发震构造初探[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 425-431.
CHEN Jifeng, LIN Xiangdong, HE Xinshe. Moment Tensor Inversion and Seismogenic Tectonics of the 2013 Minxian M_S6.6 Earthquake in Gansu[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 425-431.