

中国大陆井水温对汶川 8.0 级、玉树 7.1 级、芦山 7.0 级和岷县 6.6 级地震响应特征的对比研究^①

张 彬^{1,2}, 刘耀炜^{1,2}, 杨选辉¹

(1. 中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室), 北京 100085;

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要:收集和统计了 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震、2010 年玉树 $M_s 7.1$ 地震和 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 、岷县 $M_s 6.6$ 地震引起的中国大陆井水温同震响应现象, 分析了其特征。结果显示: 这 4 次地震对中国大陆地下流体影响显著, 井水温同震响应特征有很大差异, 后三次水温同震响应范围、幅度和持续时间远不及汶川地震, 即使震级相差不大的玉树和芦山地震, 同震响应的特征也不尽相同。最后探讨了这种现象的成因机理。

关键词: 井水温; 同震响应; 汶川地震; 玉树地震; 芦山地震; 岷县地震

中图分类号: P315.723

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0535-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0535

Contrastive Study on Co-seismic Response Characteristics of Well Water Temperature in Wenchuan($M8.0$), Yushu($M7.1$), Lushan($M7.0$) and Minxian($M6.6$) Earthquakes

ZHANG Bin^{1,2}, LIU Yao-wei^{1,2}, YANG Xuan-hui¹

(1. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085 China;

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The study of co-seismic response is one of the most direct and effective methods of revealing the stress and strain response law of the crust, which a key issues in Earth science. To some extent, the co-seismic response of groundwater temperature reflects the crustal deformation and ground vibrations caused by subsurface deformation, pores, or fissure changes, and vertical migration of groundwater. The 2008 Wenchuan ($M_s 8.0$), 2010 Yushu ($M_s 7.1$), and 2013 Lushan ($M_s 7.0$), and Minxian ($M_s 6.6$) earthquakes had substantial impacts on subsurface fluids in the Chinese mainland; however, the co-seismic response characteristics caused by the four earthquakes differed significantly. The range, magnitude, and duration caused by the last three earthquakes were far lower than those of the Wenchuan earthquake. Although the response characteristics caused by the Yushu and Lushan earthquakes differed, they had essentially the same magnitude.

The co-seismic effect caused by the Wenchuan earthquake was significantly higher than that of the other earthquakes. Although seismic responses were noted throughout the entire Chinese mainland after the Wenchuan earthquake, similar shock responses were detected mainly near the

① 收稿日期: 2013-08-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2012-08); “十一五”国家科技支撑项目(2008BAC38B04-02-01)

作者简介: 张彬(1981-), 男, 山东济宁人, 助理研究员, 主要从事地下流体动力学研究. Email: zhangbin150006@163.com

epicenters of the earthquakes. The co-seismic effects caused by the same-magnitude Yushu and Lushan earthquakes also differed. For example, the effect was observed in North China, central China, Sichuan, Yunnan, and Tibet after the Yushu earthquake; however, that of the Lushan earthquake was concentrated mainly near the epicenter in Sichuan, Yunnan, Chongqing, and other areas. Therefore, the influence of Yushu earthquake may be much larger than the Lushan earthquakes. The co-seismic amplitude of the Wenchuan earthquake was generally higher than that of the other three earthquakes; however, it was significantly higher near the epicenter of the earthquake. The depth of sensors in the well water had a very strong influence on co-seismic response because the co-seismic direction and magnitude differed when the water temperature sensor was placed at different depths in the same well.

This phenomenon may be related to epicentral distance and magnitude and may be affected by the rupture mechanism and the stress and strain sensitive extent response to aquifer media of the observation points.

Key words: well water temperature; co-seismic responses; Wenchuan earthquake; Yushu earthquake; Lushan earthquake; Moxian earthquake

0 引言

巨大地震产生的地震波传播过程可以看作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应。对这类问题的研究也一直是国际上研究的热点^[1-3]。同震响应研究是揭示地壳介质对应力—应变过程响应规律最直接和最有效的手段之一,也是揭示地球科学一些关键问题的主要技术途径^[4-5]。地下水微温度的同震变化,反应了地壳变形和地面震动引起地下介质贮层变形、孔隙或裂隙的变化和地下水垂向运移的作用等。付子忠^[6]首次用仪器观测到水温同震变化现象;车用太等^[7-8]对首都圈一些观测井的水温同震变化进行了报道与研究;陈大庆等^[9]在总结 2004 年 12 月 26 日苏门答腊地震所引起的我国大陆 121 个观测井水位与水温同震响应特征的同时,分析了河北唐山矿井 39 次远场大震水位与水温的同震响应资料,提出了气体逸出导致水位振荡—水温下降的机制;刘耀炜等^[10]广泛收集了大陆地下流体台网对 2004 年 12 月 26 日苏门答腊 8.7 级地震的同震响应资料,分析了井孔水温响应特征的基本类型。国内很多学者对于水温同震变化的物理机制开展过不同方面的研究。纵观国内外的研究结果,有关地震波作用引起井—含水层系统水温的上升和下降可归纳为 2 个主要机理:(1)地下水动力学模式:井—含水层系统地下水动力条件改变造成的热对流作用^[7-8,11-13];(2)逸出气吸热模式:观测井水中气体逸出的吸热作用造成水温快速下降^[15-16]。2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震、2010 年 4 月 14 日青

海玉树 7.1 级地震、2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震和 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县、漳县 6.6 级地震是进入新世纪以来中国大陆造成人员伤亡和破坏最严重的 4 次强震,也是全国“十五”前兆台网正式运行以来对中国大陆地下流体影响最显著的四次地震。本文收集和整理 4 次大震在中国大陆引起的井水温同震响应现象,分析其特征,并探讨可能的成因机理。

1 全国水温台网概况

1979 年我国开始研究高精度温度测量技术,进行地震水温前兆的探索研究工作,并于 1984 年在云南开展地下水温度观测研究。1988 年 11 月 6 日首次用仪器观测到云南澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震的水温同震变化现象^[6]。此后我国大陆地区陆续建立了一批数字化井下温度监测台站,观测仪器分辨率达到 10^{-4}°C ,采样率为 1 次/分钟。

我国水温监测台网由国家台、区域台和市县台(包括市县台和企业台)组成,涵盖 32 个省市自治区,据不完全统计观测网由近 400 井孔水温观测点组成,共计 500 套仪器,其中包括地震地下流体台阵监测。水温站点分布并不均匀,从图 1 可以看出,全国范围内水温前兆观测台站大体上呈条带状分布:从黑龙江开始,经吉林、辽宁、北京、山西、陕西、甘肃东部、四川东部到云南。条带以西除青海东部和新疆有少量台站外基本上是空白,条带以东的山东、江苏、福建有一定数量的台站,而其他省、市、自治区水温前兆台站数量并不多,仅有一个或几个^[16-17]。观

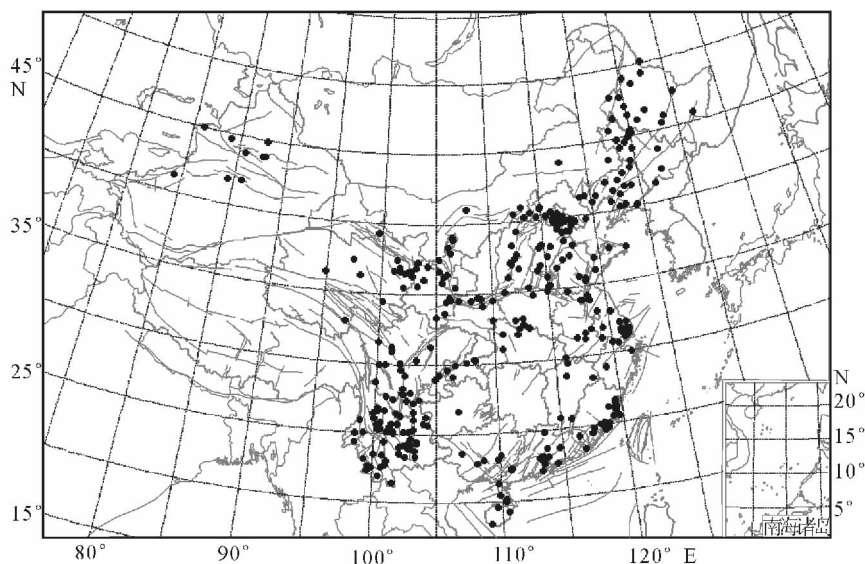


图 1 中国大陆水温前兆观测点分布图

Fig. 1 Distribution of observation points of water temperature in Chinese mainland

测网为全数字化观测技术,观测仪器大部分为中国地震局地壳应力研究所生产的 SZW 系列水温仪。

2 四次地震引起中国大陆水温同震效应和特征

当地震面波到达观测点后引起井孔观测点处的强烈振动,也引起孔隙水(含井水)的强烈振动,观测点处的温度也随之变化。根据观测曲线的变化形态可将大地震引起台站水温微变化类型分为阶变上升型和阶变下降型。阶变上升型是指在地震振动作用下井孔水温总体出现阶变式的上升(图 2(a)),在水温上升的持续过程中一部分井孔水温会在短期(几小时)内恢复到正常温度水平,有些井孔水温则在数天或数月内才恢复正常温度;阶变下降型是指在地震振动作用下地下水温度出现明显的下降变化(图 2(b))。一般在数小时或数天内恢复正常温度。

我国水温观测网中的井孔水温观测一般温度探头在 100~400 m,主要是观测井孔含水层及其周围地下水的微温度变化,地下流体观测台网记录地下水微温度为 $10^{-1} \sim 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ 。2008 年 5 月 12 日四川汶川 $M_s 8.0$ 级大地震是发生在我国大陆内部的浅源地震,波及面广,破坏力度大,除吉林、黑龙江、新疆无震感报告外,其他省区市均有不同程度震感。邱鹏成等^[18]对汶川 8.0 级地震震中周围 800 km 范围内 73 个井孔的表层水温资料进行了分析。地震发生时在观测网的 216 个水温观测井中,记录到同震变化的井点 132 个,占 61%,没有变化的井点 84 个,占 39%,从井孔水温同震变化类型的比例来看,

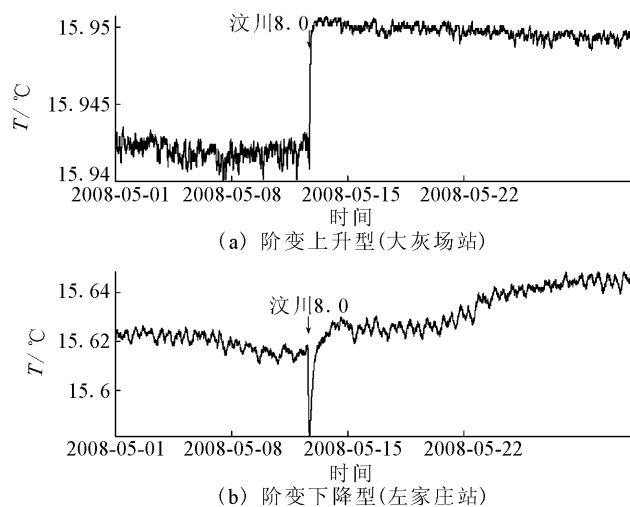


图 2 水温同震变化类型图

Fig. 2 Type of co-seismic response in water temperature

阶变上升型 59 个,占 45%;阶变下降型 73 个,占 55%。空间分布见图 3(a)。

玉树地震是继汶川地震后中国大陆发生的一次强震,造成了很大人员伤亡,波及范围也比较广。地震后收集了中国大陆地下水水温观测网 272 个水温观测井资料,记录到玉树 7.1 级地震同震变化的井温点有 10 个,其中水温阶变上升型 4 个,占 40%;水温阶变下降型 6 个,占 60%,空间分布见图 3(b)。

芦山地震后收集了中国大陆地热观测网 294 个水温观测井资料,记录到芦山 7.0 级地震同震变化井点有 10 个,观测点分布见图 3(c),可以看出水温同震或震后效应主要集中在四川、重庆和云南等地区。在 10 个井点中,水温阶变上升型 3 个,水温阶

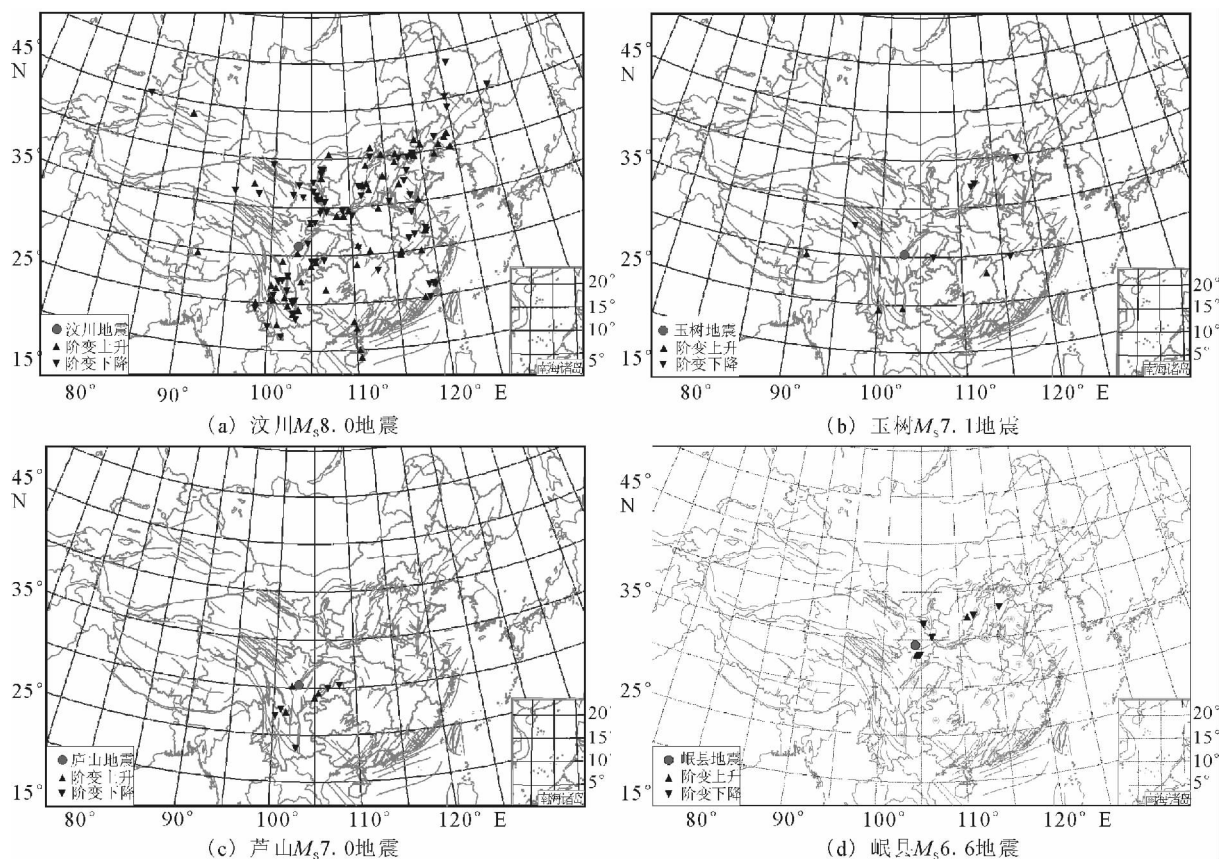


图3 4次大震引起的中国大陆井孔水温同震响应分布

Fig. 3 Distribution of co-seismic response of well water temperature in Chinese mainland to 4 strong earthquakes

变下降型7个。

岷县地震后收集了中国大陆地热观测网近300项水温观测井资料,并整理分析了其同震响应特征。记录到该地震同震变化的井点6个,其中水温阶变上升2个,阶变下降为4个。从图3(d)中可以看出同震响应点主要集中在山西地震带和甘肃境内。

通过对比分析这4次地震对中国大陆井水温的同震响应,可以看出以下特征。

(1) 从图3来看,汶川 $M_s8.0$ 地震引起的水温同震效应的范围远远超过了其它地震,地震发生后基本上整个中国大陆都记录到同震响应,而其它地震时只有震中附近或部分灵敏井点记录到同震响应,东北、华南以及新疆地区台站没有发现明显水温同震响应。一方面其它3次地震比汶川8.0级地震能量小得多,影响范围也相对小,另一方面可能与地震发生的断裂构造有关^[19]。

(2) 从水温阶变上升型或阶变下降的幅度来看(表1),汶川 $M_s8.0$ 地震均普遍高于其它3次地震,其它地震时只有部分发生在震中附近的井点变化幅度高于汶川地震。这与杨竹转、孙小龙等^[20-21]分析了北京塔院井水温同震观测资料得出的结论是一致

的;伴随着井水位的振荡出现井水温同震变化的幅度和震级、井震距等有关,一般情况下震级越大,井震距越小,同一口井水温同震响应幅度越大。

(3) 从震级基本相同的玉树和芦山地震的同震效应看,玉树地震后华北、华中、川滇和西藏等地区井水温出现同震变化,而芦山地震后的同震效应主要集中在震中附近的四川、云南和重庆等地区,所以玉树地震对中国大陆的影响可能远大于芦山地震。

(4) 分析四次地震中共同出现水温响应的类型可以看出,山西祁县和孝义、重庆北碚和忠县、湖南长沙、江西九江、云南建水和丽江等井点水温反映灵敏,多次地震时都有明显同震变化,但对不同地震反应类型和幅度也不尽相同。

3 同震响应温度变化有关机理的分析

水位同震变化并非是水温同震变化的必要条件。在两次地震同时出现水温同震变化的井孔中并非都存在水位同震变化,如唐山井水位。即使有水位变化,水位和水温也并非出现一致性变化,水位振荡变化时水温有升有降,水位阶变下降时水温也是有升有降,但水位阶变上升时水温基本都是上升。

表 1 4 次大震井水温同震效应特征

Table 1 The co-seismic responses characteristics of well temperature (more than one time) to 4 strong earthquakes

台站名称	汶川地震		玉树地震		芦山地震		岷县地震	
	类型	幅度/℃	类型	幅度/℃	类型	幅度/℃	类型	幅度/℃
河北唐山	下降	0.008 3	下降	0.002 8	—	—	—	—
山西祁县	上升	0.146 2	下降	0.006 9	—	—	上升	0.001
山西孝义	上升	0.003 3	下降	0.002 4	—	—	下降	0.001 3
湖南长沙	上升	0.098 2	上升	0.019 3	—	—	—	—
江西九江	上升	0.000 8	下降	0.004	—	—	—	—
甘肃樊坝	上升	0.003 9	—	—	—	—	上升	0.000 2
甘肃两水	下降	0.006	—	—	—	—	下降	0.002 3
甘肃柳湖	未安装仪器	—	—	—	—	—	下降	0.024 8
宁夏海原	下降	0.023 6	—	—	—	—	下降	0.033 4
四川 32 井(中)	无数据	—	—	—	下降	0.109 2	—	—
四川 32 井(中)	无数据	—	—	—	下降	0.059 1	—	—
四川泸沽湖	下降	0.011	—	—	下降	0.001 1	—	—
四川南溪	上升	0.148 8	—	—	上升	0.049 3	—	—
四川盐源	下降	0.000 6	—	—	上升	0.0015	—	—
西藏拉萨	上升	0.006 5	上升	0.021	—	—	—	—
云南丽江	上升	0.004 5	—	—	下降	0.001 8	—	—
云南昭通	上升	0.110 3	上升	0.007	—	—	—	—
云南建水	下降	0.114	—	—	下降	0.063	—	—
重庆北碚	下降	0.018 7	下降	0.011 9	下降	0.002 1	—	—
重庆荣昌	上升	0.026 4	—	—	上升	0.005	—	—
重庆忠县	无数据	—	—	—	下降	0.0061	—	—

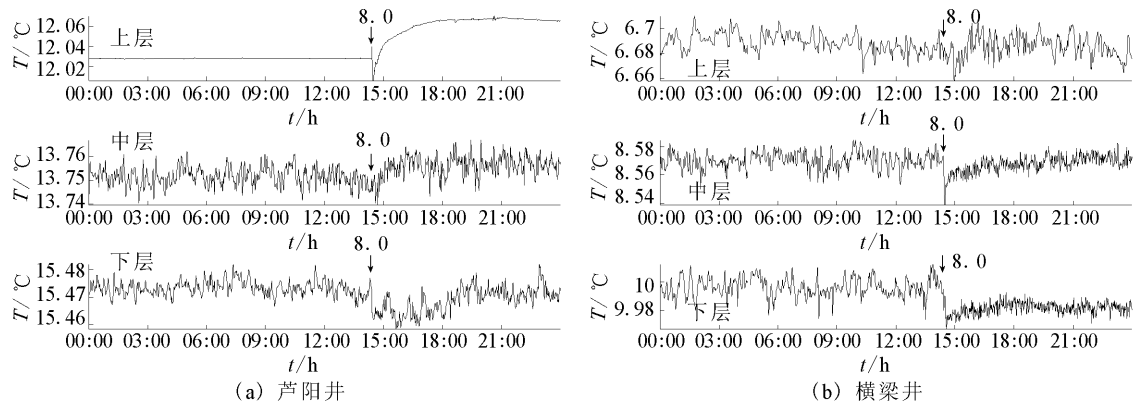


图 4 汶川 8.0 级地震时横梁与芦阳井水温同震响应曲线

Fig. 4 Co-seismic response curves of water temperature at Hengliang and Luyang well in Wenchuan 8.0 earthquake

但这也不能说明水位上升时水温一定上升。汶川地震时沙河和昌平等水位上升时,水温同震表现为阶变下降,这些现象其变化机理值得深入探讨。

(1) 井孔气体释放吸热机理

鱼金子等^[8]在北京太平庄井发现井水温度大幅度下降的同时井水面上有大量气泡上涌,认为井水温度的同震突降机制可归因于井水气体的释放。即当井水位振荡时引起井水气体释放,被释放的气泡带走了井水中的热量,从而降低了井水温度。与此观点类似,陈大庆等^[9]认为水位振荡—水温下降是由于井水中吸附气体在脱逸过程中自身携带热量的散失,以及气泡上升过程中减压膨胀对外界做功需

要吸收热量,此两种途径造成周围地下水温度下降。

水震波引起的井水震荡促进了饱含于下层井水的气体的释放,气体在快速上升后介质中的裂隙(或孔隙)出现“让位”空间,增加了介质渗透率,促进了地下水垂向运动的作用;气体“让位”作用和应力变化可以引起渗透率、孔隙度和孔隙水压的改变,导致流体在岩层中的运移,既有有水平向的,又有垂直向的。垂向的运移效能增强引起井水温度的变化。

该模式的着眼点在于有大量气体逸出从而导致水温下降,但无法解释为什么有些井孔会出现水位震荡而水温上升的现象。

(2) 地下水动力学机理

刘耀炜^[22]提出地下水垂直渗流作用为主要因素的“热对流—传导模式”。岩层压力释放—裂隙(断裂)闭合—低渗地层向高渗地层中的流体流动及压力传递—裂隙(断裂)再度开启。断裂下部的渗透性地层起着蓄水池的作用,当断裂开启其中的流体释放,流体压力降低;当断裂闭合,其周围的低渗透性地层中向其释放流体、传递压力,其本身的压力也可能在各种增压机制的作用下不断升高。开启断裂内流体的垂向流动极大地改变了地层中流体压力场的分布。由于地层温度在垂向上的差异,这种流动将可能引起地下温度的对流传导,造成局部的温度变化(升高或降低)。

4 结论

(1) 通过对比研究汶川 $M_s 8.0$ 地震、玉树 $M_s 7.1$ 地震、芦山 $M_s 7.0$ 地震和岷县 $M_s 6.6$ 地震水温同震响应范围和幅度可以看出,四次地震水温响应范围和幅度有较大差异性。因为水温同震变化的幅度不仅受动力加载作用强弱(距离)的影响,而且很可能与区域构造活动状态因素有关,而应力状态的变化会直接影响到含水层孔隙度等直接导致地下水动力特征的变化。2013年芦山和岷县地震对中国大陆地下流体场的影响虽然没有汶川地震显著,但其也改变了部分具有弹性变形特征的含水层,表明这些地区的应力状态与汶川地震发生阶段有一定差异性,是否预示着中国大陆地震活动特征有新的特点,需要密切关注和加强研究。

(2) 传感器放置深度对井水温同震响应有很大影响,因为同一口井不同深度上放置的水温传感器记录到的同震阶变方向和幅度不尽相同。如汶川地震时,景泰芦阳井水温上下两个测点出现了地震响应,中部没出现明显响应变化,上部的水温变化幅度小于下部的水温变化幅度,形态上两者均为下降—上升的变化过程。古浪横梁井水温也只有两套数据出现同震变化,但与景泰芦阳井不同的是,出现同震变化为位于观测井中部和下部的两个测点,形态表现为下降—上升—平稳变化(图4)。综合以上分析可以看出,同井不同深度观测的水温对地震的响应灵敏性存在明显的差别,深部的响应能力强,响应变化形态两者很相似,具有明显的同向变化协调性特征。

(3) 井孔水温能灵敏的反映出地震的孕育和发生过程。通过研究地下水微温度场的变化能够揭示出地壳应力及其热变化对地震的响应,尤其是水温

同震效应,有助于厘清应力—流体—地震的可能关系及其机制。井水温度变化的水动力学机制被大家广泛接受,但是具体的关于地震波引起的水温变化机理研究还处在定性分析的基础上,需要在广泛的观测资料上开展进一步工作,以验证温度场、应力场和渗流场的相互关系。通过研究井水温同震效应特征,可以加深对中国大陆地壳应力场动态变化过程的深入认识,进而对中国大陆地震活动趋势判定提供相关的科学依据和判定意见。

(4) 水温的变化与水位的变化存在一定的关联性,但并非正相关。观测井水温度位同震变化与井孔水文地质、井—含水层特征、含水层参数、介质裂隙因素的有关很大关系。具体到每一井孔条件,需要通过水文地质和井孔条件详细调查,进行细致分析和研究,必要时还需进行数值模拟,这将在今后工作中进一步展开。

鸣谢:本研究收集的资料主要来源于中国地震台网中心前兆台网,各省(市)地震局水温前兆观测工作人员为本项研究提供了宝贵的数据,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- [1] Asteriadi G, Liverato E. Pre-seismic Responses of Underground Water Level and Temperature Concerning a 4.8 Magnitude Earthquake in Greece on October 20, 1988[J]. *Tectonophysics*, 1989, 170: 165-169.
- [2] SKD Y, C Y Wang. Pore Pressure Generation in Sedimentary Basins, Overloading Versus Geothermal[J]. *J. G. R.*, 1996, 91: 2158-2162.
- [3] Valiva M Hamza. Tectonic Leakage of Fault Bounded Aquifers Subject to Non-isothermal Recharge: a Mechanism Generating Thermal Precursors to Seismic Events[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126: 163-177.
- [4] Roeloffs E A. Persistent Water Level Changes in a Well near Parkfield, California, Due to Local and Distant Earthquakes[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 869-889.
- [5] Sergei V Zatsepin, Stuart Crampini. Modelling the Compliance of Crustal Rock—I: Response of Shear—Wave Splitting to Differential Stress[J]. *RAS. GJI*, 1997, 129: 477-494.
- [6] 付子忠. 地热动态观测与地热前兆[G]//地壳构造与地壳应力文集. 北京:地震出版社, 1988.
FU Zhi-zhong. Dynamic Observation and Geothermal Precursor[G]//Bulletin of the Institute of Crustal Dynamic. Beijing: Seismological Press, 1998. (in Chinese)
- [7] 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, 23(4): 34-37.
CHE Yong-tai, YU Jin-zi, LIU Chun-guo. Observation and Study of Dynamic Groundwater Temperature Earthquakes in

- China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996, 23(4):34-37. (in Chinese)
- [8] 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 Jin-zi, CHE Yong-tai, LIU Wu-zhou. Preliminary Study on Hydrodynamic Mechanism Microbehavior of Water Temperature in Well[J]. Earthquake, 1997, 17(4):389-396. (in Chinese)
- [9] 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 Da-qing, LIUYao-wei, YANG Xuan-hui et al. Co-seismic Water Level, Temperature Responses of Some Wells to Far-field Strong Earthquake and Their Mechanisms[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(1):122-132. (in Chinese)
- [10] 中国地震局监测预报司编. 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[M]. 北京:地震出版社, 2005.
Monitoring and Prediction Department of CEA(ed). The Indonesia Sumatra Earthquake with Magnitude 8.7 and Its Effect in China's Mainland[M]. Beijing: Seismological Press, 2005. (in Chinese)
- [11] 邓孝. 地下水垂直运动的地温场数值模拟与实例剖析[J]. 地质科学, 1989, (1):131-141.
DENG Xiao. Temperature Field Numerical Simulation and Analysis of Examples of Vertical Ground Water Movement[J]. Geological Sciences, 1989, (1):131-141. (in Chinese)
- [12] 熊亮萍, 汪集旻. 钻孔地温分布与地下水活动[J]. 地质科学, 1992, A12(增刊):313-321.
XIONG Liang-ping, WANG Ji-yang. Geotemperature Distribution in Borehole Groundwater Activity[J]. Scientia Geologica Sinica, 1992, A12(Supp):313-321. (in Chinese)
- [13] 罗晓容. 断裂开启与地层中温压瞬态变化的数学模拟[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1):1-6.
LUO Xiao-rong. Mathematical Modeling of Temperature-pressure Transient Variation in Opening Fractures and Sedimentary Formations[J]. Oil&Gas Geology, 1999, 20(1):1-6. (in Chinese)
- [14] 鱼金子, 车用太, 朱清钟, 等. 北京太平庄井水的超远强震异常(远兆)研究[J]. 地震研究, 1998, 21(1):42-49.
YU Jin-zi, CHEYong-tai, ZHU Qing-zhou, et al. Study on Groundwater Anomalies at Taipingzhuang Well, Beijing before Strong Earthquake Occurred in Ultra-far Places[J]. Journal of Seismological Research, 1998, 21(1):42-49. (in Chinese)
- [15] 陈大庆, 刘耀炜. 我国在井一含水层系统对地震波同震响应方面的研究进展[J]. 国际地震动态, 2006, (7):27-31.
CHEN Da-qing, LIU Yao-wei. Summaries of the Research of the Co-seismic Response of Well-aquifer Systems to Seismic Waves in China[J]. Recent Developments in World Seismology, 2006, (7):2-31. (in Chinese)
- [16] 赵刚, 何案华, 王军, 等. 地热前兆台网对汶川地震的同震响应及震后调整[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(2):28-32.
ZHAO Gang, HE An-hua, WANG Jun, et al. Co-seismic Response and Postseismic Effect of Geotherm on Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(2):28-32. (in Chinese)
- [17] 赵刚, 马文娟, 王军, 等. 我国地热前兆观测台网的现状及对汶川地震的响应[J]. 地震研究, 2009, 32(3):248-252.
ZHAO Gang, MA Wen-juan, WANG Jun, et al. Geothermal Earthquake Precursor Network and Its Response to $M_s8.0$ Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2009, 32(3):248-252. (in Chinese)
- [18] 邱鹏成, 王永刚, 杨广华, 等. 汶川8.0级地震前后表层水温的异常变化研究[J]. 西北地震学报, 2010, 32(4):367-375.
QIU Peng-cheng, WANG Yong-gang, YANG Guang-hua, et al. Research on the Anomalous Changes of Water Surface Temperature before and after Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake [J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(4):367-375. (in Chinese)
- [19] 贾鹏, 张希, 张晓亮, 等. 汶川地震前后川滇及其邻区GPS水平运动演化特征[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3):264-263.
JIA Peng, ZHANG Xi, ZHANG Xiao-liang, et al. Evolution Features of Crustal Horizontal Movement from GPS Observation in Sichuan-Yunnan Region and Its Adjacent Area before and after the Wenchuan Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3):264-263. (in Chinese)
- [20] 孙小龙, 刘耀炜. 塔院井水位和水温的同震响应特征及其机理探讨[J]. 中国地震, 2008, 24(2):105-115.
SUN Xiao-long, LIU Yao-wei. Characteristics and Mechanism of Co-seismic Responses in the Tayuan Well[J]. Earthquake Research in China, 2008, 24(2):105-115. (in Chinese)
- [21] 杨竹转, 邓志辉, 陶京玲, 等. 北京塔院井数字化观测水温的同震效应研究[J]. 地震学报, 2007, 29(2):203-213.
YANG Zhu-zhuan, DENG Zhi-hui, TAO Jing-ling, et al. Co-seismic Effects of Water Temperature Based on Digital Observation from Tayuan Well, Beijing[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(2):203-213. (in Chinese)
- [22] 刘耀炜. 动力加载作用与地下水物理动态过程研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所, 2009.
LIU Yao-wei. Dynamic loading and Physical Dynamics Process of Groundwater[D]. Beijing: Institute of Geophysics, CEA, 2009. (in Chinese)