

张彬, 刘耀炜, 高小其, 杨选辉, 任宏微, 李旖雯. 2015. 2015年尼泊尔 M_s 8.1 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. doi:10.11939/jass.2015.04.001.

Zhang B, Liu Y W, Gao X Q, Yang X H, Ren H W, Li Y W. 2015. Correlation analysis on co-seismic response between well water level and temperature caused by the Nepal M_s 8.1 earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 37(4): 533-540. doi:10.11939/jass.2015.04.001.

2015年尼泊尔 M_s 8.1 地震引起的井水位 与井水温同震效应及其相关性分析^{*}

张彬^{1,2),*} 刘耀炜¹⁾ 高小其³⁾

杨选辉¹⁾ 任宏微¹⁾ 李旖雯⁴⁾

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

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

3) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

4) 中国南京 210095 南京农业大学生命科学学院

摘要 尼泊尔 M_s 8.1 地震引起中国大陆大量地震观测井水位和水温的同震响应。从宏观结果看, 在 54 个同时存在水位和水温同震效应的观测井中, 有 51 口观测井的变化类型为水位上升-水温上升、水位下降-水温下降、水位振荡-水温上升或下降(以下降为主), 井水位与井水温同震效应表现出良好的相关性, 这可能与地下水动力学作用有关; 有 3 口观测井的水位变化与水温变化方向相反, 且水温变化均为震后效应。另外, 有 1 口观测井水位无变化而水温同震效应明显, 这些不同类型的同震变化与井孔条件、水温梯度、传感器位置及水位埋深等多种因素有关。从微观结果看, 井水位同震效应出现的时间及变化幅度与井水温同震效应出现的时间及变化幅度之间的关联性比较复杂, 这与井孔条件和温度梯度等因素有关。

关键词 尼泊尔 M_s 8.1 地震 同震效应 地下水动力学 机理

doi:10.11939/jass.2015.04.001 中图分类号: P315.72⁺3 文献标志码: A

Correlation analysis on co-seismic response between well water level and temperature caused by the Nepal M_s 8.1 earthquake

Zhang Bin^{1,2),*} Liu Yaowei¹⁾ Gao Xiaoqi³⁾

Yang Xuanhui¹⁾ Ren Hongwei¹⁾ Li Yiwen⁴⁾

1) Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

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

3) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830011, China

4) College of Life Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

* 基金项目 国家自然科学基金项目(41404036)和中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2012-23, ZDJ2012-08)共同资助。

收稿日期 2015-05-08 收到初稿, 2015-06-08 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: zhangbin150006@163.com

Abstract: It were recorded that a large number of co-seismic responses of well water level and temperature in Chinese mainland caused by the Nepal $M_{\text{S}}8.1$ earthquake. There is good correlation between well water level and water temperature for 51 observation wells, which appears as water level rise to water temperature rise, water level drop to water temperature drop or water level oscillation to water temperature rise/drop (most of the co-seismic water temperatures drop). The good correlation is resulted from the groundwater dynamics. As for three observation wells, the change in water level is in the opposite direction to the change in water temperature, which is the post-seismic effect. Meanwhile, one observation well has only water temperature co-seismic change but no water level change, which may have great relation to the borehole condition, water temperature gradient, sensor position and water level depth. The results also show that there is complex relationship between the initial time and amplitude of groundwater level change and those of groundwater temperature change, which is affected by borehole condition and temperature gradient.

Key words: Nepal $M_{\text{S}}8.1$ earthquake; co-seismic response; groundwater dynamics; mechanism

引言

大地震产生的应力能够瞬间改变地壳介质状态，引起含水层中地下水的流动(Wang, Manga, 2014)。井水位和井水温同震效应是揭示地壳介质对应力-应变过程响应的有效手段，能够反映地壳动力作用下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, Manga, 2003)。早在 20 世纪 60 年代，Cooper 等(1965)研究认为，开口井孔中水位波动对地震波响应的程度取决于井孔的尺寸、含水层的导水系数、储水系数、孔隙度以及波的类型等。关于水温同震变化的研究相对水位研究较晚。Mogi 等(1989)描述了日本伊豆半岛东北部一口温泉在地震发生时，井孔水温出现阶梯状上升，并将其解释为当强震发生时，由于地震波的能量疏通了井孔，使得地下热水涌入导致水温突然升高。国内外对水位和水温的同震效应均开展了大量研究，在其变化机理方面取得了较大进展，认为地下水同震阶变是在地震静态应变作用下含水层压缩与膨胀的结果，水温同震变化与水位变化有关(Brodsky *et al.*, 2003; 尹宝军, 2010; 鱼金子等, 2012; 张彬等, 2013)。车用太等(2014)以井-含水层热系统分析为基础，结合井水温度(水温)动态观测到的实际结果，提出了水温微动态形成的两类基本机制，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。

2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_{\text{S}}8.1$ 地震后，中国大陆很多地震流体观测井均记录到了水位和水温同震效应。该地震是中国地震背景场项目正式运行以来经历的第一次大地震，记录到的该地震引起的同震资料，为研究地下流体同震响应特征提供了良好机会。

本文以地下流体两大测项水位和水温为研究对象，分析尼泊尔 $M_{\text{S}}8.1$ 地震的井水位和井水温的同震效应特征以及二者之间的相关性，并在此基础上进一步探讨其变化机理。

1 井水位和井水温同震响应特征

根据水位曲线变化形态，将水位同震变化的类型分为振荡型和阶变型进行统计分析。

水位振荡型是指在地震振动作用下, 井水位在一个相对稳定的“基线”上出现类似地震波的高频振荡; 水位阶变型是指在地震波作用下, 井水位出现阶变式上升或下降, 分为阶升(上升)型和阶降(下降)型。

根据井孔水温曲线的变化形态, 水温同震变化可分为上升型和下降型, 指在地震振动作用下, 井孔水温总体出现阶变式上升和下降。

经过“九五”、“十五”和中国地震背景场项目的建设, 目前国家地震前兆台网中心数据库中, 同口井既有水位也有水温观测的有 251 口, 其空间分布如图 1 所示。尼泊尔 M_s 8.1 地震发生时, 其中 94 口观测井均未记录到明显的水位和水温同震效应, 102 口观测井只记录到水位同震变化, 1 口观测井只记录到水温同震变化, 54 口观测井同时记录到水位和水温同震变化。

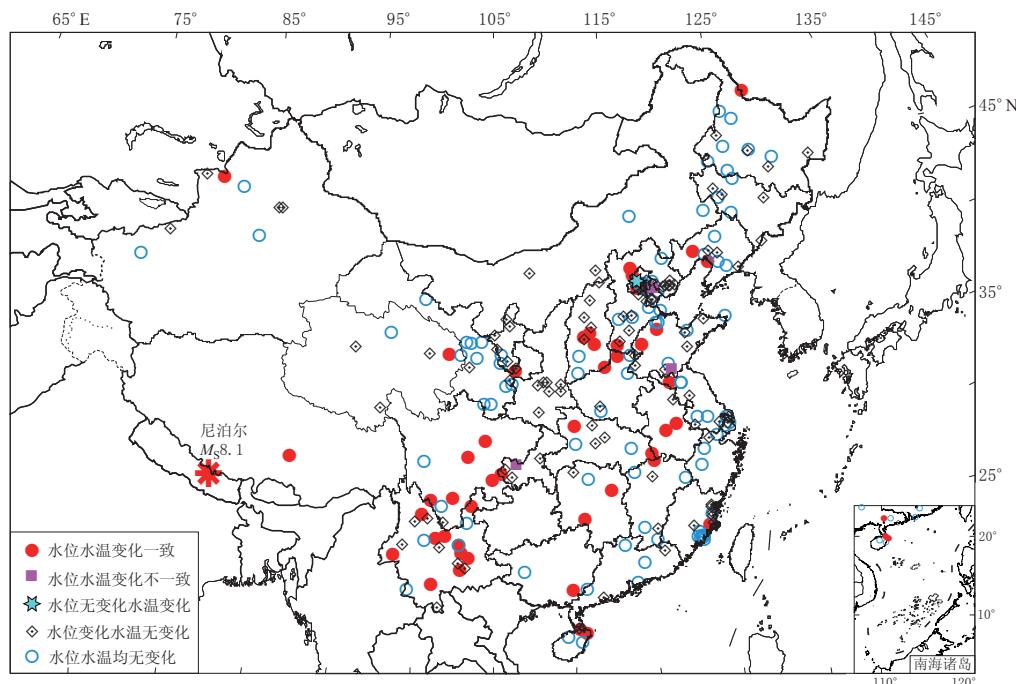


图 1 尼泊尔 M_s 8.1 地震引起的中国大陆井水位和井水温同震响应井的空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of the wells with co-seismic response of water level and temperature in Chinese mainland caused by the Nepal M_s 8.1 earthquake

表 1 给出了尼泊尔 M_s 8.1 地震时中国大陆井水位和井水温同时出现阶变的 33 口观测井。可以看出: 18 口观测井的水位和水温变化均表现为上升; 12 口观测井的水位下降, 水温下降; 1 口观测井的水位表现为上升, 水温却出现下降; 2 口井的水位表现为下降, 水温则出现上升。另外, 还有 21 口观测井的水位变化表现为震荡型, 水温变化表现为上升或下降; 1 口观测井的水位没有明显变化, 水温却出现明显的同震效应。

2 井水位与井水温同震变化相关性及其机制分析

在同时出现水位和水温同震效应的 54 口观测井中, 有 30 口井表现为水位上升、水温上升(图 2a), 水位下降、水温下降(图 2b), 水位振荡、水温下降或上升, 表明水位与水温

表 1 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震引起的中国大陆井水位和井水温同震效应统计表

Table 1 Statistics of simultaneous co-seismic step change of well water level and temperature in Chinese mainland caused by the Nepal $M_s 8.1$ earthquake

所在地区	台站名	水位		水温	
		变化形态	变化幅度/m	变化形态	变化幅度/℃
北京	五里营	上升	0.041	上升	0.014
安徽	巢湖台	下降	0.085	下降	0.003
北京	左家庄	上升	0.019	上升	0.002
福建	福清江兜	上升	0.001	上升	0.002
甘肃	平凉柳湖	下降	0.107	下降	0.005
广西	桂平	上升	0.150	上升	—
海南	文昌	上升	0.010	上升	0.004
河南	焦作	上升	0.009	上升	0.001
黑龙江	黑河	上升	0.007	上升	0.011
湖北	黄梅独山	下降	0.014	下降	0.025
湖南	长沙	上升	0.017	上升	0.028
辽宁	瓦房店	上升	0.250	上升	0.006
辽宁	丹东变电	上升	0.047	上升	0.008
辽宁	沈家台	上升	0.016	上升	0.0005
山东	聊城	上升	0.115	上升	—
山东	蒙阴	下降	0.010	上升	—
山西	祁县	上升	0.180	上升	0.020
山西	沁县漫水	下降	0.058	下降	0.003
山西	孝义	下降	0.033	下降	0.010
四川	南溪	上升	0.072	上升	0.005
四川	邛崃	上升	0.010	上升	0.003
四川	泸沽湖	下降	0.136	下降	0.002
四川	西昌川 32 井	下降	0.022	下降	0.092
四川	德阳	下降	0.005	下降	0.002
天津	宝坻新台	下降	0.192	上升	0.020
西藏	拉萨地磁台	下降	0.0244	下降	0.005
北京	沙河	下降	0.131	下降	0.017
云南	弥勒局	上升	0.624	上升	0.012
云南	普洱大寨	上升	0.140	上升	0.010
云南	丽江局	下降	0.008	下降	0.009
云南	元谋	下降	0.004	下降	0.001
重庆	北碚柳荫	上升	0.037	下降	—
重庆	荣昌华江	上升	0.074	上升	0.003

注：“—”代表震后效应。

同震变化方向具有较好的一致性，这与地下水热动力学作用有关。

地下水热动力学作用是指井水温度的变化是由井-含水层中水流运动所引起，表现为含水层受压时，含水层中地下水流入井筒中，使井水由下向上运动，水位上升；相反，则水位下降。当井水温度为正梯度时，井中水温传感器温度上升；水温为负梯度时，井中水温传感器温度下降。用地下水热动力学可解释井水位与井水温同向阶变的现象，即水位上升、水温上升，水位下降、水温下降。

当井水位变化为振荡型时，井水上下混合，使得井筒内上下温度发生变化。当井水温

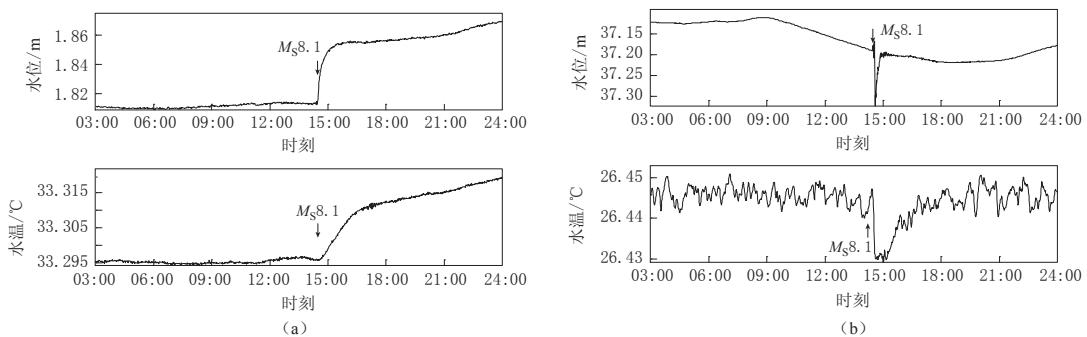
图 2 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震引起的延庆五里营井(a)和沙河台(b)水位和水温同震效应

Fig. 2 The co-seismic response of well water level and temperature at the stations Yanqing (a) and Shahe (b) caused by the Nepal $M_s 8.1$ earthquake

度为正梯度时,上层水温会有所上升,中点水温变化很小,接近于零,下层水温表现为下降。此时若水温传感器位于水温上升段,则水位振荡后水温上升;若水温传感器位于水温下降段,则水温下降。由于大多数井水温梯度为正,且水温传感器放置深度大,结果多表现为水位振荡后水温下降(杨竹转,2011)。这可以解释水位同震变化为振荡型时,水温变化既有上升也有下降,但以下降为主的现象。

3 井水位与井水温不一致性分析

尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震前后,少数观测井的水位与水温变化不一致,表现为:井水温同震效应明显,而井水位无同震变化;井水位同震下降,而井水温同震上升;井水位同震上升,而井水温同震下降。下面分别对这 3 种情况进行分析。

3.1 井水温同震效应明显而井水位无同震变化

尼泊尔地震时,中国地震局地壳应力研究所昌平地震台观测井两个水温传感器记录到明显的同震效应,而水位无同震变化。昌平地震台具有专门进行水位和水温观测的井孔(西 1 井),该井中不同深度安装两套水位仪和 3 套水温仪,其中 1 套水温仪和水位仪为中科光大生产的 ZKGD3000 地下水数据监测系统,其余水温仪和水位仪均为中国地震局地壳应力研究所生产的 SZW-1 数字化温度计和 SWY-II 数字化水位仪。西 1 井的井孔地层柱状图及水温仪探头位置如图 3 所示。

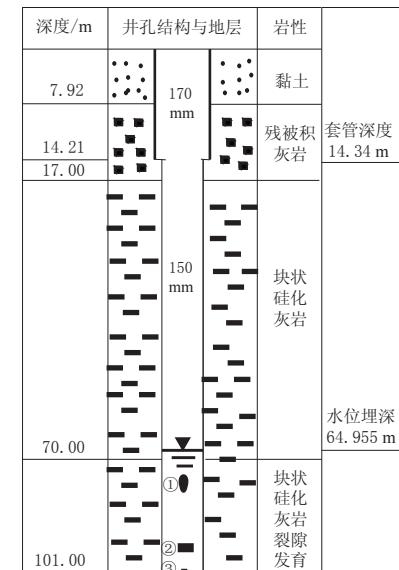


图 3 昌平地震台西 1 井井孔地层

柱状图及水温仪探头位置

① SZW-1 水温仪探头(浅); ② ZKGD3000 地下水数据监测系统; ③ SZW-1 水温仪探头(深, 放置底部, 现已深埋泥中)

Fig. 3 Borehole stratigraphic column and water temperature analyzer probe position of the west 1 well at the seismic station Changping

① SZW-1 water temperature probes (shallow); ② ZKGD3000 groundwater data monitoring system; ③ SZW-1 water temperature probes (deep, buried in the bottom mud now)

图 4 给出了 2015 年 4 月 25 日昌平地震台西 1 井井水温和井水位的变化曲线。可以看出，放置在井水中不同层位的两套水温仪(不同厂家)同时记录到了同震效应，且二者在变化形态上非常相近，但是井水中两套水位仪均未记录到明显的同震变化，深埋泥土中的水温仪也未记录到同震效应。

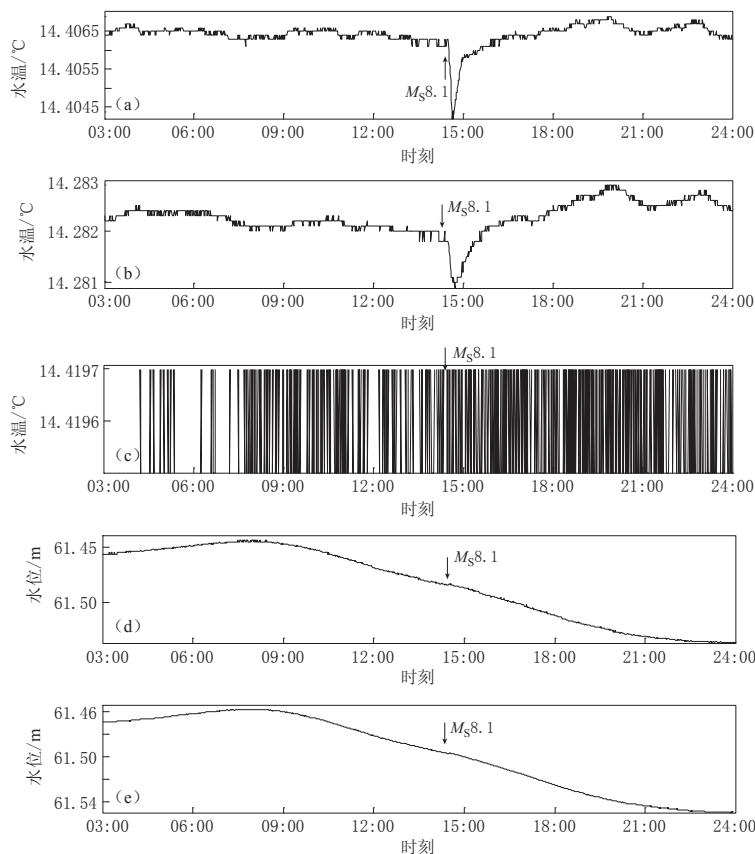


图 4 2015 年 4 月 25 日昌平地震台西 1 井井水温和井水位记录曲线图

(a) SZW-1 水温曲线(浅); (b) ZKGD3000 地下水数据监测系统水温曲线; (c) SZW-1 水温曲线(深);
(d) SWY-II 水位曲线; (e) ZKGD3000 地下水数据监测系统水位曲线

Fig. 4 The curves of water temperature and water level in the west 1 well at the seismic station Changping on 25 April 2015

(a) The curve of SZW-1 water temperature (shallow); (b) The water temperature curve of ZKGD3000 groundwater data monitoring system; (c) The curve of SZW-1 water temperature (deep); (d) The curve of SWY-II water level; (e) The water level curve of ZKGD3000 groundwater data monitoring system

昌平地震台西 1 井没有记录到水位的同震变化，可能与套管下设深度和井水位埋深很大(64.955 m)有关。当地震波作用在含水层时，同样受到力的作用，孔隙压力也会发生变化，但观测含水层地下水因套管下设深度浅而井水位埋深又很大时，井孔观测含水层出现自由水面(类似于潜水面)，孔隙压力变化信息通过大面积自由水面表现而水位变化量极小，最终表现为同震响应不明显。当含水层出现了自由水面，地震波作用时含水层中的上层低温水下渗引起水温下降(刘耀炜, 2009)。埋在淤泥中的水温传感器无响应，是由于传感器外围没有水流运动，因而未产生水热力学作用所致。

3.2 井水位与井水温同震反向变化

尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震时, 山东蒙阴台的观测井出现了水位下降和水温上升的异常现象(图 5), 而重庆北碚柳荫台观测井则出现了水位上升和水温下降的异常现象(图 6)。经调查这两口井水温传感器处水温均为正梯度。车用太等(2014)研究汶川 $M_s 8.0$ 地震时, 发现山东蒙阴台水温同震变化时水温同震效应为下降, 但震后水温很快转为上升, 这是由固体(岩土)介质的热传导引起的, 其与井筒或井-含水层系统中水热运动无关。这种机制可以合理地解释井水温度同震响应“长久”不消失, 或井水温度背景值发生变化的震后效应。同理, 该机制也能很好地解释尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震后山东蒙阴台观测井水温出现趋势上升, 而重庆北碚柳荫台观测井出现水温趋势下降的现象。

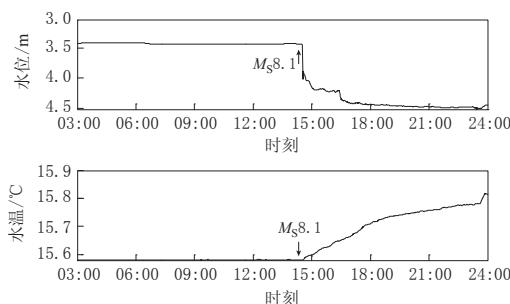


图 5 山东蒙阴台井水位和井水温同震响应

Fig. 5 The co-seismic response of well water level and water temperature at the station Mengyin in Shandong Province

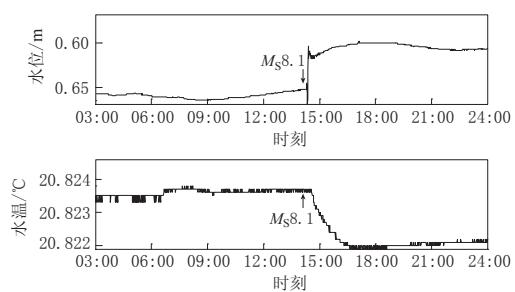


图 6 重庆北碚柳荫台井水位和井水温同震响应

Fig. 6 The co-seismic response of well water level and water temperature at the station Liuyin in Beibei district, Chongqing

4 讨论与结论

尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震时大部分观测井记录到的水位和水温同震响应方向具有较好的相关性, 具体表现为水位上升-水温上升、水位下降-水温下降、水位振荡-水温变化。这说明水热动力学作用在水温变化中起到了主要作用。

井水位同震变化幅度与震中距的关系不明显。西藏拉萨地磁台距尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震震中最近, 其水位变化幅度却没有震中距更远的祁县地震台水位变化幅度大。同样, 井水温同震变化幅度与震中距的关系也不明显, 拉萨地磁台水温变化幅度却小于河北邯郸峰峰冀 24 井水温变化幅度。井水位变化幅度与井水温变化幅度之间的相关性也较差, 井水位变化最大的云南弥勒井, 其水温变化幅度较小, 而水位为振荡型的澄江井, 其水温变化幅度达 1°C 。

一般情况下, 震中距越小, 井水位和井水温出现同震响应的时间越早。但井水位与井水温同震变化出现的时间间隔存在很大差异性, 并非井水位同震效应出现得越早, 井水温同震变化就出现得越早, 这可能与井孔本身条件有关。井-含水层条件如何影响同震响应幅度和时间问题, 尚待进一步研究。

从井水位和井水温同震效应空间分布看, 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震对川滇地区、张渤地震带和郯庐地震带南端影响较大, 对南北地震带北端和新疆地区影响较小。由于西藏地区地下流体观测井较少(仅拉萨地磁台有一个水位和水温观测点), 很难从井水位和井水温同震响应方面探讨尼泊尔这次地震对西藏地区的影响。

本文虽然对一些井水位和井水温的同震效应能够给出相对合理的解释，但地下流体的复杂性表明，很多现象并不是在单纯某一种机制下形成，而是多种机制共同作用的结果。对一些特殊的井孔，需要在获取其水文地质条件的基础上，开展必要的实验和数值模拟研究，以定量分析其水温变化机理。

井水温度观测已发展成为我国地震地下流体前兆观测的第二大主测项，不仅在多次强震前记录到成组的水温前兆异常，而且还记录到潮汐效应、同震响应及震后效应等重要的地球动力学作用信息（车用太等，2014）。但仍有很多观测井既没有水温前兆异常、潮汐效应，也没有同震响应或震后效应，这可能与井-含水层条件和水温仪器探头安装位置有很大关系，尚需通过大量相关事件总结和科学实验来考察其原因。

参 考 文 献

- 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[J]. 地震学报, **36**(1): 106–117.
- Che Y T, He A H, Yu J Z. 2014. Mechanisms of water-heat dynamics and earth-heat dynamics of well water temperature micro-behavior[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(1): 106–117 (in Chinese).
- 刘耀炜。2009. 动力加载作用与地下水物理动态过程研究[D]. 北京：中国地质大学(北京)：68–73.
- Liu Y W. 2009. *Dynamic Loading and Physical Dynamics Process of Groundwater*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 68–73 (in Chinese).
- 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[D]. 北京：中国地震局地质研究所：70–73.
- Yang Z Z. 2011. *Variations of Well Water Level and Temperature Caused by Earthquakes and Their Generation Mechanism*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 70–73 (in Chinese).
- 尹宝军。2010. 唐山井地下水动态特征的研究[D]. 北京：中国地震局地球物理研究所：145–150.
- Yin B J. 2010. *Study on the Fluctuant Characteristic of Underground Water at Tangshan Well*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 145–150 (in Chinese).
- 鱼金子，车用太，刘成龙，李万明。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[J]. 地震, **32**(1): 59–69.
- Yu J Z, Che Y T, Liu C L, Li W M. 2012. Coseismic responses of water level and temperature in wells of the Jinshajiang groundwater observation network to the Japan $M_{\text{S}}9.0$ earthquake: Characteristics and mechanism[J]. *Earthquake*, **32**(1): 59–69 (in Chinese).
- 张彬，刘耀炜，杨选辉。2013. 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[J]. 地震工程学报, **35**(3): 535–541.
- Zhang B, Liu Y W, Yang X H. 2013. Contrastive study on co-seismic response characteristics of well water temperature in Wenchuan ($M_{\text{8},0}$), Yushu ($M_{\text{7},1$), Lushan ($M_{\text{7},0$) and Minxian ($M_{\text{6},6$) earthquakes[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(3): 535–541 (in Chinese).
- Brodsky E E, Roeloffs E, Woodcock D, Gall I, Manga M. 2003. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **108**(B8): 2390.
- Cooper H H, Bredehoeft J D, Papadopoulos I S, Bennett R R. 1965. The response of well-aquifer systems to seismic waves[J]. *J Geophys Res*, **70**(16): 3915–3926.
- Mogi K, Mochizuki H, Kurokawa Y. 1989. Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes[J]. *Tectonophysics*, **159**(1): 95–108.
- Montgomery D R, Manga M. 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes[J]. *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]. *J Geophys Res*, **103**(B1): 869–889.
- Wang C Y, Manga M. 2014. Earthquake and water[G]// *Encyclopedia of Complexity and System Science*. New York: Springer: 1–18.