

杨竹转, 邓志辉, 邓盛昌, 杨跃文, 陶京岑. 2018. 井水温度动态变化分析——以云南丽江党校井为例. 地震学报, 40(2): 172-184. doi: 10.11939/jass.20170145.

Yang Z Z, Deng Z H, Deng S C, Yang Y W, Tao J L. 2018. Analysis on the dynamic variations of well water temperature: With example of the Dangxiao well in Lijiang area, Yunnan Province. *Acta Seismologica Sinica*, 40(2): 172-184. doi: 10.11939/jass.20170145.

井水温度动态变化分析 ——以云南丽江党校井为例^{*}

杨竹转^{1),†} 邓志辉²⁾ 邓盛昌³⁾ 杨跃文⁴⁾ 陶京岑¹⁾

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

2) 中国广州 510070 广东省地震局

3) 中国云南丽江 674100 丽江市地震局

4) 中国云南丽江 674100 云南省地震局丽江地震台

摘要 以云南丽江党校井为例, 分析了水温基本动态和同震变化特征, 并对水温前兆异常变化进行了讨论。基本动态方面, 水温水位的对比分析和井温梯度结构显示, 党校井的温度探头位于井孔水体与含水层连通的主要部位, 含水层中补给水的温度较低, 水温动态主要受水位泄流状态和水位变化的影响; 同震方面, 在水位均为振荡的情况下, 水温同震变化形态在不同的泄流状态下存在明显的差异, 自流期间为上升一下降一恢复型, 非自流期间为下降一上升一恢复型, 同震变化反映出的温度探头放置位置和低温水源补给的认识与基本动态分析获得的认识相一致; 前兆方面, 党校井的水位动态受降雨的趋势性影响, 温度探头所在处的地下水体活动剧烈, 水温动态前兆变化特征不明显。

关键词 水温变化 水位 井温梯度 同震变化 前兆

doi: 10.11939/jass.20170145 中图分类号: P315.72[†] 文献标识码: A

Analysis on the dynamic variations of well water temperature: With example of the Dangxiao well in Lijiang area, Yunnan Province

Yang Zhuzhuan^{1),†} Deng Zhihui²⁾ Deng Shengchang³⁾ Yang Yuewen⁴⁾ Tao Jingling¹⁾

1) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2) Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China

3) Lijiang City Earthquake Agency, Yunnan Lijiang 674100, China

4) Lijiang Seismic Station, Yunnan Earthquake Agency, Yunnan Lijiang 674100, China

Abstract: With example of the Dangxiao well in Lijiang city of Yunnan Province, we analyzed the basic and coseismic variations of the water temperature, and discussed the possible precursory anomalies. As for the basic variation of water temperature and water level in the

* 基金项目 中央公益性科研院所基本科研业务专项(IGCEA1418)资助.

收稿日期 2017-07-12 收到初稿, 2017-12-19 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: xiaoyangzhzh@163.com



Dangxiao well, the comparison results combined with the well water temperature gradient show that, the temperature sensor in the Dangxiao well is located at the main section where the well water intersects with the aquifer, and the recharging source is relatively cold. The water temperature variation is mainly affected by the discharge status and the variation of water level. As for the coseismic variations of the water temperature in the Dangxiao well, when the coseismic variation of water level displays as oscillating, it shows obvious differences, displaying as ascending-descending-recovering during artesian status and descending-ascending-recovering during non-artesian status. The coseismic variations of water temperature also verify the location of water temperature sensor and cold source recharging, which is consistent with the conclusion obtained from analysis of the basic variation aspect. As for the precursory variations, the water level variations in the Dangxiao well are influenced by the tendency of rainfall, and the strong water activity could be found at the location of the temperature sensor in the Dangxiao well, which may suppress the precursor information to some extent, so it is hard to find evident precursor in the water temperature variation.

Key words: water temperature variation; water level; well water temperature gradient; coseismic variations; precursor

引言

与地震研究相关的井孔深部微小温度变化的高精度观测(分辨率优于 $10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}$)始于20世纪70年代(Nakamura, Wakita, 1984; Shimamura *et al.*, 1984). 我国自1984年开始在云南省和首都圈地区布设区域性台网, 获得了1988年澜沧—耿马 $M_{\text{S}}7.6$ 等典型的中强震震例(付子忠, 1988), 自此之后, 井水温度动态观测得到了大力发展. 目前, 地震系统内已拥有300多口井泉的水温观测点, 而水温则已成为地下流体监测台网中继水位之后的第二大测项(冯恩国等, 2012).

国内外关于井水温度的地震前兆、同震及震后的动态变化等研究已有不少报道: 例如Mogi等(1989)报道了日本伊豆半岛东北温泉区一口自流泉的温度变化, 发现温度变化与地震的发生存在密切关系, 水温观测记录到了一些中强震的前兆和同震变化; Cicerone等(2009)对包括水温在内的各类前兆进行了统计整理, 认为地下水的流动能快速有效地传递热异常信息, 是水温前兆异常变化的主要原因; Orihara等(2014)报道了2011年日本 $M_{\text{W}}9.0$ 地震3个月前, 位于震中NW 155 km的岩手县一口2 000 m深的井, 其井孔水位和水温同时出现大幅度下降的现象.

王瑜青等(1994)分析了云南地区9口井自1986年至1993年的水温观测资料, 总结出水温正常动态可分为6种类型, 前兆变化动态可分为5种类型, 认为水温变化具有显著的中强震前兆映震能力; 刘耀炜等(2008)报道了2007年宁洱 $M_{\text{S}}6.4$ 地震前云南地区的群体性水温异常变化; 赵刚等(2009)分析整理了2008年四川汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震前后全国277个观测台站的水温观测资料, 发现有134个观测台站的水温观测数据存在同震变化和震后调整, 有37个观测台站的水温观测数据存在“疑似”前兆变化; 张彬等(2014)分析研究了2007年以前云南地区水温异常持续时间、异常空间位置、异常幅度与后续地震的关系, 结果表明, 水温异常主要为短临异常, 但强震前也存在水温中期异常. 一般情况下, 地震震级越大, 异常范围越大, 发震地点通常出现在水温异常集中的区域.

在大量的水温前兆异常报道和研究中,大部分是在地震发生后对资料进行回溯研究的过程中发现水温异常变化,仅有少量是在地震发生前即根据包括井水温在内的异常变化提出了短临预测意见(车用太等,1998;付虹,赵小艳,2013;付虹等,2015),说明对中强震发生前水温微异常变化的分析仍然面临较大的困难。水温变化形态复杂多样,如何识别具有多样性和个性特征的异常变化是前兆分析中面临的关键问题之一。

丽江地区位于川滇块体中部,云南省的西北部,是红河、丽江—剑川、龙蟠—乔后、鹤庆—洱源、程海等多条断裂的复合交汇区(国家地震局地质研究所,云南省地震局,1990)(图1),中强震发生频繁。本文拟以丽江党校井为例,分析水温基本动态和同震变化特征,并对前兆异常变化进行讨论,得到的结果和认识可以对未来水温动态分析、异常核实跟踪以及井孔中温度探头的放置提供一定的依据和参考。

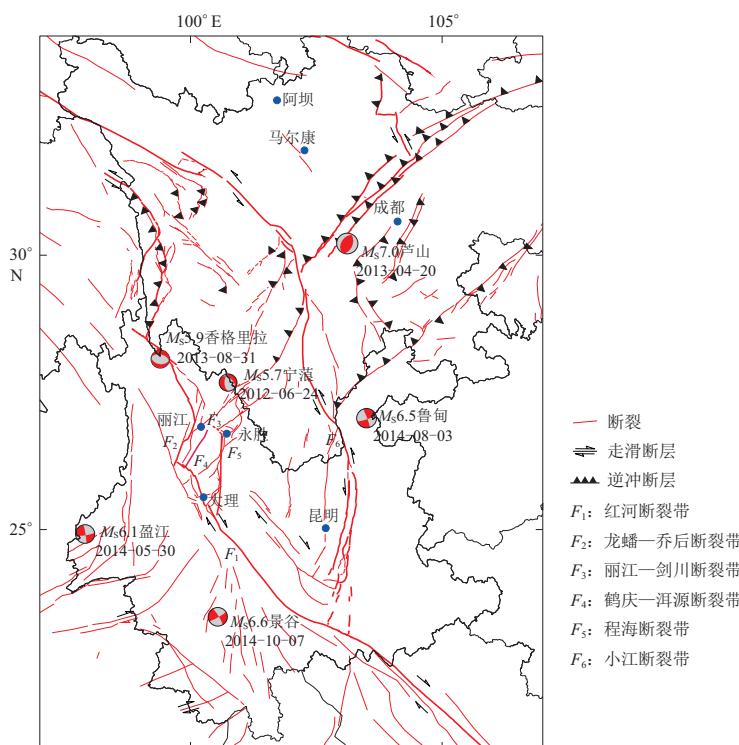


图 1 云南丽江周边活动断裂构造和部分地震震源机制解

活动断裂引自邓起东等(2003);震源机制解引自 Ekström *et al* (2012)

Fig. 1 Active faults and focal mechanism solutions of some major earthquakes in Lijiang area and its vicinity, Yunnan Province

The active faults are referred to Deng *et al* (2003); the mechanism solutions are referred to Ekström *et al* (2012)

1 观测背景

党校井位于丽江盆地东边缘,与黑龙潭泉群接近(图2),地下水类型为碳酸盐类裂隙溶洞水。补给区位于盆地北端的九子海洼地及其周边山系,该区域海拔2 800—3 588 m,高出丽江盆地400—1 188 m(图3),翟军伟等通过投放钼酸铵示踪剂证实了九子海与黑龙潭

和下游泉点存在直接的水力联系, 是这些泉水的补给区(康晓波等, 2013; 曾成等, 2013)。九子海溶蚀区侵蚀作用强烈, 溶蚀洼地和落水洞沿九子海环状断裂带分布。降雨产生的地表水通过洼地和落水洞灌入式补给后, 沿岩溶管道、节理裂隙由北向南径流, 在黑龙潭泉群出口处(海拔2 420 m)受地形切割和第四系相对隔水层阻隔, 形成地下水富集带, 浅层径流呈股状涌出地表, 深层径流侧向补给丽江盆地底部第四系含水层后再向盆地南部作深远程径流, 从九子海到黑龙潭泉群运移距离约为20 km。

党校井井孔结构及观测示意图如图4a所示, 井深为347.3 m, 其中167.5—310 m安装滤水管, 含水层为三叠系中统灰岩岩溶裂隙承压水。党校井管高出观测室地面

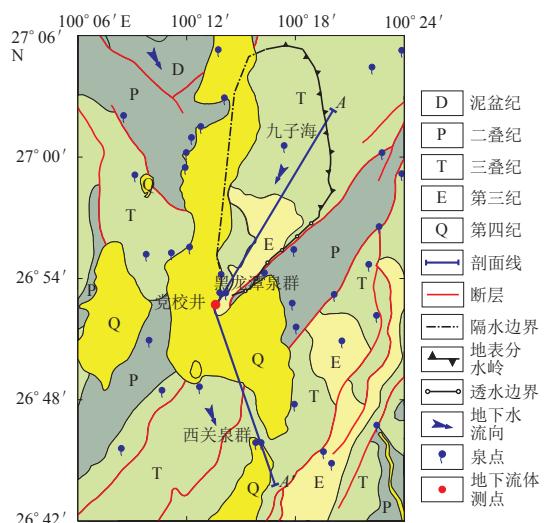


图2 党校井区域水文地质和井点位置图
(修改自康晓波等, 2013)

Fig. 2 The hydrogeological map of the Dangxiao well region (modified from Kang *et al.*, 2013)

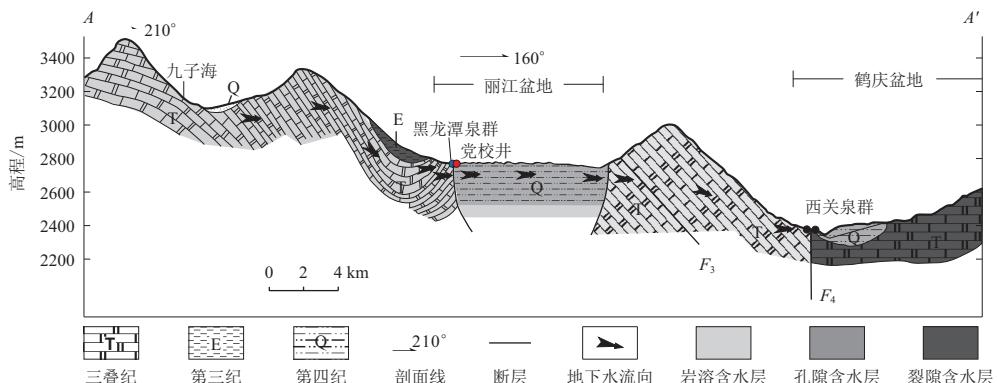


图3 党校井地下水系统补径排过程示意图(改自康晓波等, 2013)
Fig. 3 The sketch map of recharge-flow-discharge process of the Dangxiao well
(modified from Kang *et al.*, 2013)

6 m, 在距地面0.4 m处安装一直径7 cm的泄流口, 当水位高出泄流口时则自动泄流, 称之为自流状态或动水位状态; 低于泄流口停止自流, 称之为非自流或静水位状态。井水位观测值为水面至泄流口的距离。

党校井自1992年3月1日起使用浮子式模拟水位仪进行观测。2007年6月改造为数字水位仪观测, 分辨率为1 mm, 同时增加了一套高精度石英温度仪, 温度探头放置在距井口300 m深度处, 采样率为分钟值。党校井分别于2006年11月24日和2015年7月17日进行了水温梯度测试(图4b)。

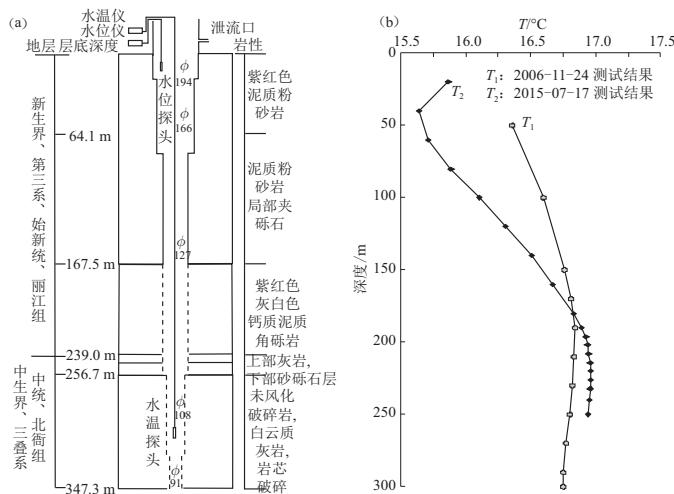


图 4 党校井井孔柱状图与观测示意图 (a) 和井温梯度图 (b)

Fig. 4 Histogram of strata and schematic diagram of observation (a) as well as the geothermal gradients map (b) of the Dangxiao well

2 基本动态特征分析

图 5 显示, 2007—2015 年党校井水温时值动态曲线以 2011 年末为界, 可划分为两个阶段 (图 5a): ① 2007—2011 年出现多次上升或下降的台阶式变化; ② 2012—2015 年期间表现为缓慢的上升一下降变化. 与此相对, 水位变化也可划分为两个阶段 (图 5b): ① 2007—2011 年变化规律清晰, 一般情况下每年 4—6 月水位下降直至低于泄流口不自流, 8 月之后水位逐渐升高, 直至高于泄流口则开始自流至下一年度断流, 年变化幅度不大, 一般约为 4 m; ② 2012 年开始水位低于分界线不再自流, 保持静水位状态, 水位动态表现为大幅度升降变化.

对水温水位动态曲线进行局部放大, 可以看出, 在 2007—2011 年期间, 水温阶梯状的上升和下降变化与水位自流、非自流状态的转换具有明显的相关性 (图 6).

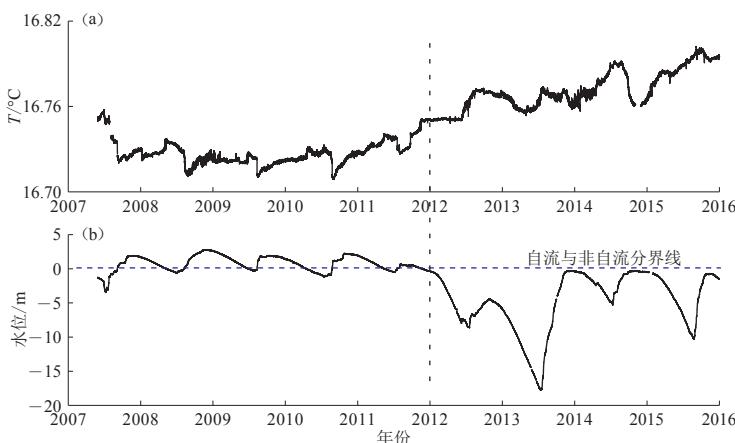


图 5 党校井水温(a)和水位(b)时值图

Fig. 5 Hourly values of water level (a) and temperature (b) for the Dangxiao well

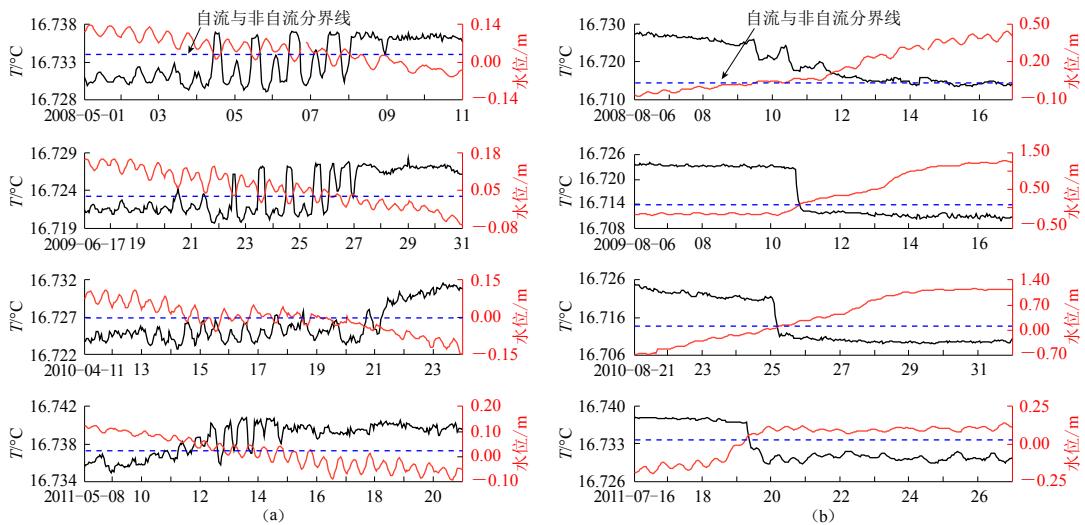


图 6 党校井由自流转换为断流 (a) 和断流转换为自流 (b) 状态时的水位水温时值图

Fig. 6 The hourly values of water level and temperature for the Dangxiao well at the state from artesian to non-artesian (a) and from non-artesian to artesian (b)

当井水位由自流状态转换至非自流状态时,水温动态变化表现出以下特征(图 6a):①即刻出现明显上升,例如 2008 年 5 月 4—7 日,一旦水位的潮汐波动低于泄流口,水温立即出现上升,使得水位由自流向非自流时断时续地过渡的情况下,水温出现大幅震荡;②从自流到稳定的非自流状态一般要经历 3—7 日,在此前后温度上升幅度约为 0.004—0.007°C;③自流状态下水温波动幅度大,转变为非自流状态后,水温动态更为平稳.

当井水位由静水位转换至自流状态时,水温动态变化表现出以下特征(图 6b):①出现阶梯式下降;②除 2008 年 8 月水位上升和下降均缓慢以外,其余 3 次当水位状态呈自流后,温度自下降至稳定状态只需 7—16 个小时,水位自流前后温度下降幅度约为 0.008—0.011°C.

水温与水位动态之间良好的实时相关性显示,温度探头位于井孔中水体与含水层连通的主要部位.同时,根据水温与水位的反向动态变化对比分析也可推断出,来自补给区的水源温度较低,这可以通过不同时期的两次井水温梯度测试结果(图 4b)进行验证.

第一次井水温梯度测试期间,井水位处于自流状态,井水温度自上而下变化幅度小(图 4b),50 m 处温度值最低,190 m 处温度值最高,50—190 m 区段内水温缓慢增加,190—300 m 区段内温度随深度增加略微降低,越接近温度探头放置处水温越低.

第二次测试期间,井水位处于非自流状态,井水温度自上而下变化幅度远大于自流状态下的观测值(图 4b),40 m 处温度值最低,226 m 处温度值最高,40—196 m 区段内温度随深度增加较快,196—226 m 区段内增温缓慢,226—250 m 区段内表现出微小的温度降低.

水温基本动态特征主要受水位泄流状态变化的影响.自流期间,含水层中较低温度的水在水头压力作用下不断向井孔内部流动上升,并通过泄流口溢出排泄,水温梯度曲线相对平缓,当含水层水头压力逐渐降低,较低温度的水向井孔中流动,通过泄流口排泄的水量也逐渐减少,直至转变为接近断流时,探头放置处的水温缓慢上升(图 5a),断流后水温迅速上升(图 5a, 6a).断流状态下,当含水层水头压力逐渐增加,水位不断上升至超过泄流口时,较低温度的水加速向井孔中流动溢出,探头所在区域的水温很快出现下降(图 6b).

3 同震变化特征分析

水温水位同震变化能够直接地、有效地揭示地下流体对应力-应变的响应,国内外近年来针对此问题已有较多的研究(石耀霖等, 2007; 杨竹转等, 2008; Wang, Manga, 2010; Cox *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 2015). 本文使用分钟值观测资料来分析水温同震变化特征.

表1列出了2007—2015年引起党校井显著水温同震变化的8次强震及其相关参数,相应的震中分布图如图7所示. 表中地震能量密度 $e(r)$ 与震中距 r 和震级 M 之间的关系式为(Wang, Manga, 2010)

$$e(r) = 10^{1.45M-3.03\lg r-4.24}. \quad (1)$$

表1 引起党校井显著水温同震变化的地震及其相关参数

Table 1 The earthquakes caused obvious water temperature coseismic variations in the Dangxiao well and the corresponding parameters

序号	发震时刻		东经/°	纬度/°	M_W	发震地点	震中距/km	地震能量密度/(J·m ⁻³)	泄流状态	水位振荡幅值/m	水温同震变化类型	水温变化幅值/ 10^{-4} ℃
	年	月-日										
1	2007-09-12	19:11	101.40	4.46 (S)	8.5	印尼苏门答腊	3 487	0.002 2	自流	0.208	上升—下降	47
2	2007-09-13	07:49	100.73	2.62 (S)	7.9	印尼苏门答腊	3 281	0.000 4	自流	0.166	上升—下降	35
3	2008-05-12	14:28	103.37	31.06 (N)	7.9	四川汶川	556	0.079 0	静水位	0.119	下降—上升	-30
4	2011-03-11	13:46	142.50	38.30 (N)	9.1	日本	4 119	0.010 1	自流	0.711	上升—下降	48
5	2012-04-11	16:38	93.01	2.24 (S)	8.6	印尼苏门答腊	2 846	0.005 8	静水位	0.228	下降—上升	-41
6	2012-04-11	18:43	92.43	0.77 (S)	8.2	印尼苏门答腊	3 021	0.001 3	静水位	0.156	下降—上升	-30
7	2015-04-25	14:11	84.79	28.28 (N)	7.9	尼泊尔	1 529	0.003 7	静水位	0.163	下降—上升	-74
8	2015-12-07	15:50	72.78	38.21 (N)	7.2	塔吉克斯坦	2 850	0.000 1	静水位	0.016	下降—上升	-22

注: 水位震荡幅值指最高值与最低值的差值; 水温同震变化幅值指地震前的温度观测值与震后的水温上升或者下降最大值的差值; 地震相关参数来自于 ISC (International Seismological Centre, 2017).

党校井水位水温同震变化分钟值曲线图(图8)显示, 8次强震引起的水温同震变化形态

可以分为两种类型: 1, 2, 4号这3次地震(表1)为上升—下降—恢复型, 其余5次地震为下降—上升—恢复型. 两种类型的变化经过几十分钟至几小时后均能恢复到变化前的观测值附近. 8次强震引起的水位同震变化类型均为振荡型, 振荡很快达到峰值, 峰值过后又快速衰减, 振荡持续时间通常为几分钟至几十分钟, 之后水位振荡逐渐减小直至恢复到变化前的观测值附近. 中强震引起的水位振荡一般认为是在长周期瑞雷波的作用下, 含水层膨胀和压缩引起孔隙压力的变化, 导致含水层中的水进出井孔而造成井水面波动(Wang, Manga, 2010).

在井水位同震变化均为振荡的情况下, 水温的同震变化表现出两种不同类型

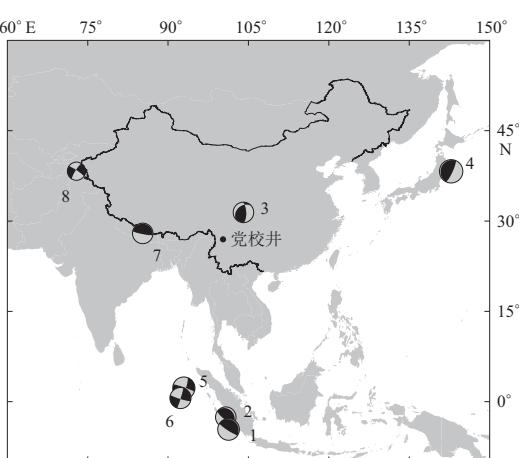


图7 表1中8次地震的震中分布图(数字与表1中震例序号相对应)

Fig. 7 The epicenters of the earthquakes listed in Table 1 (The marked numbers are consistent with the serial numbers in Table 1)

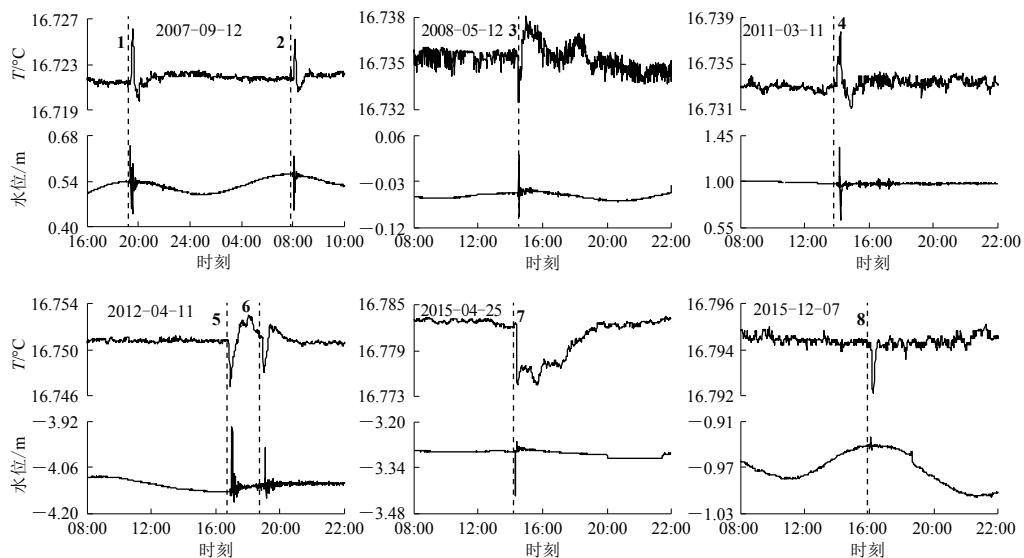


图 8 党校井水温水位同震变化分钟值曲线图

数字与表 1 中的 8 次地震相对应,虚线表示发震时间

Fig. 8 Coseismic variations of minute values of water temperature and water level for the Dangxiao well

Dashed lines denote the earthquakes occurrence time; the numbers are consistent with the serial numbers in Table 1

的变化形态。从水位观测值上看,1, 2, 4号这3次地震发生时井水位的观测值均大于0,显示水位为自流状态;其余5次地震发生时井水位的观测值均小于0,显示水位为静水位状态,表明水温同震变化明显受到泄流状态的影响,与震中的方位和震源机制解没有明确的相关性(图7)。

比较表1中水位振荡幅值与地震能量密度,可以观察到:自流状态下,两者之间基本呈正相关关系;而在静水位状态下,除汶川地震外,对于其余的4次地震而言,两者之间也保持了正相关关系。实际上,汶川地震是8次地震中地震能量密度最大的地震,但由于在地震前4—5天刚刚断流,水位处于泄流口以下0.05 m(图8),地震时振荡产生的水震波在向上运动时超过泄流口的部分通过泄流口流失,受此影响,振荡幅度偏小。即无论是在自流或非自流状态下,水位振荡幅值与地震能量密度均大致呈正相关关系。

比较表1中水温变化幅值与地震能量密度,可以看出,两者之间无明显的相关性,水温变化幅值的影响因素更为复杂。

自流期间,当地震波引起含水层水头压力波动时,加速了探头所在下部区域较低温度的水体与井孔上部较高温水体的对流混合,较高温的水混入到低温的水体中,使得探头所在处的温度值短暂相对升高,水位震荡平息后水温迅速恢复。非自流期间,井孔内部水体与含水层中水体交换微弱,当地震波引起含水层水位震荡时,含水层中较低温度的水体进出井孔中,混水作用引起了探头附近温度值的迅速下降,震荡平息后很快恢复。因此放置在含水层与井孔水体连通主要部位的温度探头能够迅速地反映以上温度的同震变化特征。

水温同震变化特征反映出的温度探头放置位置和低温水源补给与基本动态分析中获得的认识相一致。

4 前兆变化分析

4.1 水温前兆异常机理

关于水温前兆异常机理,一般认为,由于岩石热传导率低,震源体附近的热量或者断层表面的摩擦热传导到地面需要很长时间,引起温度变化的异常量也非常小,所以要在岩石中观测到温度前兆异常是极为困难的;但是深部产生的热通过地下水的流动可以在较短时间内传输到地表,特别是在导水导气的断裂带中,由于存在热对流,很有可能在有限的时间内影响到地壳表层而且变化量相对较大(Cicerone *et al*, 2009).

与中强震孕育有关的应力变化,一方面可引起地下水流动状态或者流向的变化,进而导致水温的变化(车用太等, 2008);另一方面,又可导致岩体孔隙结构的变化,产生新裂隙,例如震前岩体膨胀产生的新裂隙和原有裂隙的加宽使得流体活动增强(刘耀炜等, 2015),使受到限制的地下水循环到更深的、更热的地方.深部岩体的热量通过地下水和气体的流动传导上来引起近地表水体的升温变化,若裂隙的改变堵塞了高温水与地表水的连通,则会引起降温的异常变化(Cicerone *et al*, 2009).

4.2 降雨对党校井水位的影响

考虑到党校井与黑龙潭泉群具有相同的区域水文地质背景,我们将1992年以来党校井的水位日均值(图9a)与黑龙潭泉群的泄流情况(图9b)进行对比,可以看出党校井与黑龙潭泉群的断流时段有很好的对应性.多年的观测值显示,党校井水位下降至泄流口以下0.6—0.7 m时黑龙潭泉群口会出现断流,两者良好的相关性也进一步证实它们具有相同的补给来源.

图9c为1992年以来丽江的年降雨量,在1992, 1994, 1997, 2003, 2005, 2006和2009年降雨量均小于920 mm的情况下,黑龙潭泉群在次年均发生了断流(康晓波等, 2013),党校井

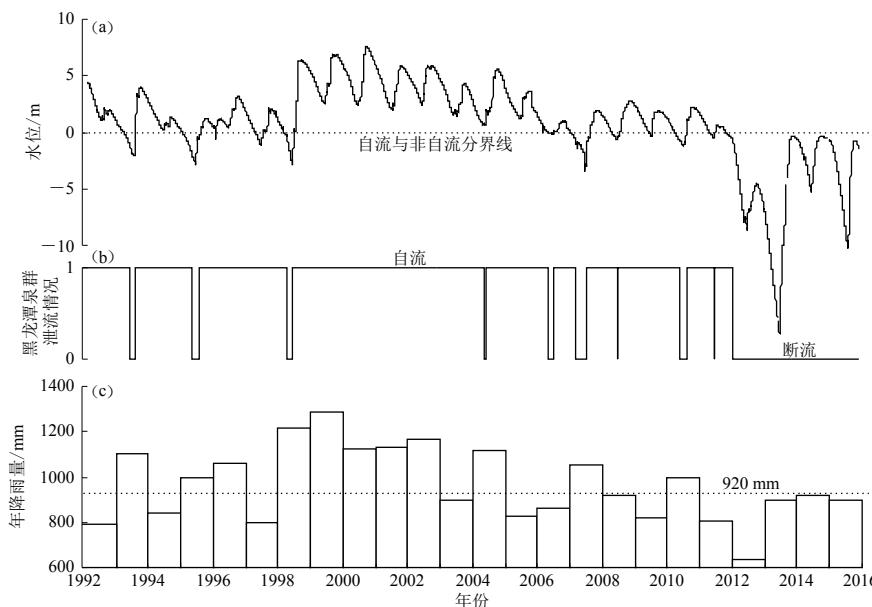


图9 党校井水位(a)、黑龙潭泉群泄流状态(b)及年降雨量统计直方图(c)

Fig. 9 Water level of the Dangxiao well (a), the discharging state of Heilongtan spring groups (b) and the annual rainfall histogram (c)

水位除2004年外也均出现了断流的情况。2011—2015年在年降雨量连续小于920 mm的情况下,党校井水位自2011年11月20日起断流,至今仍为静水位,黑龙潭泉群从2012年1月21日起断流。降雨量最少的年份为2012年,只有634 mm,党校井水位次年,即2013年7月12日下降至17.738 m的历史最低值。上述分析显示,党校井水位泄流状态的变化主要受大气降雨的补给影响,降雨对党校井水位的影响在时间上有滞后性,表现为趋势性的影响。

4.3 党校井水温前兆变化分析

据文献资料显示,黑龙潭泉群多年平均泄流量为 $1.23 \text{ m}^3/\text{s}$ (康晓波等,2013),党校井的泄流量为 $1.181 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,前者约为后者的1 000倍。泄流期间,水头压力变化的大部分信息通过流量的变化流失掉了。

2007—2011年期间,党校井水位每年出现两次自流与非自流的转换,相应的水温每年出现两次上升或下降的台阶式变化(图5)。在此期间,受地下水体剧烈活动的影响,水温动态难以反映与地震孕育相关的变化信息。

2012—2015年期间,党校井一直处于断流状态,黑龙潭泉群除了在2014年9月下旬至2015年1月当井水位的观测值大于-0.6 m时出现泄流外,其余时间也处于断流状态。这一时期内,受年度降雨的趋势性影响,党校井水位表现出夏低冬高的年变形态(图10),水位自年初缓慢下降,至7—8月达到最低值,之后逐渐上升,至11—12月达到年度最高值。水温则在趋势上升的背景上叠加夏高冬低的大致年变形态(图10),一般在8—9月达到最高值。与水位年度最低值时间相比,水温年度最高值一般情况下要滞后10—20天,显示含水层中水头压力上升,低温水源增多时探头附近水温缓慢降低。党校井水温2014年9月加速下降,而2015年1月快速上升,分析认为可能与黑龙潭泉群在这段时间的泄流和断流有关。总体来说,水温年动态变化受到水位动态规律的明显影响。对照周边区域发生的中强震(图1),从目前的分析结果来看,水温前兆变化特征不明显,其中是否含有前兆变化信息有待于资料的进一步积累和更多的分析研究。

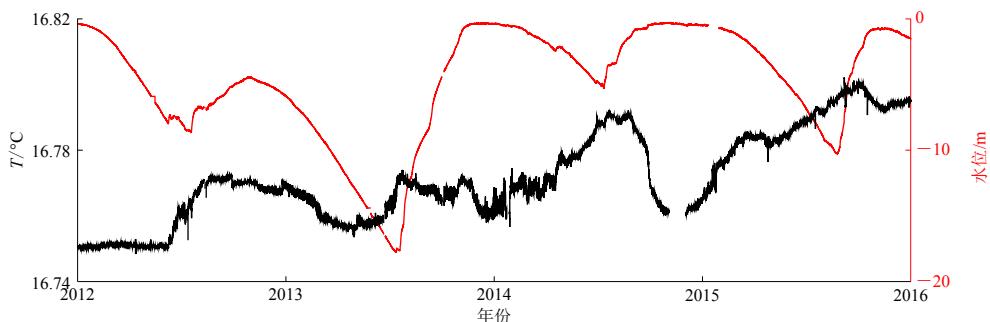


图10 党校井2012—2015年水温水位时值曲线图

Fig. 10 Hourly values of water level and temperature for the Dangxiao well from 2012 to 2015

5 讨论与结论

本研究以丽江党校井为例,结合同井水位动态、区域水文地质、井孔结构和井温梯度,分析水温动态的基本特征,并根据分钟值观测资料记录到的8次中强震的水温水位同震变化分析了水温的动态特征,最后对水温的前兆变化进行了讨论,得到如下结论和认识:

1) 水温水位对比和井温梯度结构分析显示,党校井温度探头放置在井孔水体与含水层

连通的主要部位, 补给水源的水温较低, 水温基本动态特征主要受水位泄流状态和水位变化的影响;

2) 水位同震变化为振荡, 水温同震变化形态在不同的泄流状态下存在明显差异, 自流期间为上升一下降一恢复型, 非自流期间为下降一上升一恢复型, 同震变化分析反映出的温度探头放置位置和低温水源补给的认识与基本动态分析获得的认识相一致;

3) 前兆变化方面, 党校井水位动态受降雨的趋势性影响, 2007—2011年水位每年有两次泄流和非泄流的状态转换, 地下水体活动剧烈, 水温动态难以反映与地震孕育相关的变化信息, 2012—2015年非自流状态期间, 水温动态前兆变化特征不明显.

研究分析得到的结果和认识可以为未来水温动态分析和异常落实提供一定的依据和参考.

井水温度对地下水的运动非常敏感, 因此水温动态分析首先需要结合同井水位的动态变化来研究, 对比长时间水位水温的观测值, 分析不同时期两者之间的变化特征差异, 必要时, 需要对水位变化进行深入研究, 通过区域地质构造、水文地质资料、井孔结构、区域降雨资料等分析井孔所在含水层的补给和降雨情况; 其次, 结合井温梯度结构分析了补给水源的温度特性和井孔与含水层连通的主要补给部位; 最后, 水温水位的同震变化是地下流体对应力应变的直接反映, 使得我们可以从另一个角度分析水温水位动态变化的相互关系.

党校井水温动态分析对温度探头的放置也具有一定的启示意义. 关于温度探头放置位置的选择在《地震地下流体观测方法: 井水和泉水温度观测》(DB/T 49—2012)中已有说明(中国地震局, 2012), 但每口井的情况仍需要具体对待. 当水位补给来源主要为浅部降雨时, 水温探头的放置应避开井孔与含水层连通的主要部位.

实际观测中, 井孔通常在某一深度以下均与含水层相通, 要寻找避开井孔水体与含水层连通的主要段落, 本文研究显示, 可以通过短期水位水温对比、温度梯度结构特性、水温水位同震变化记录等方面帮助寻找.

由于井孔位置、结构、水文地质情况的差异, 每一口地震观测井的水温均有其独特的变化特征, 本文的分析可能仍然有很大的局限性, 未来需要通过对更多的井孔加以研究来弥补.

云南省地震局付虹研究员、中国地震局地壳应力研究所刘耀炜研究员在稿件撰写过程中给予了建议、帮助和支持, 审稿专家提出了有益的修改建议, 作者在此一并表示衷心的感谢.

参 考 文 献

车用太, 王基华, 林元武. 1998. 张北—尚义地震的短临预测回顾与反思[J]. 国际地震动态, (7): 9—15.

Che Y T, Wang J H, Lin Y W. 1998. Reviewing and repondering on the short-term and imminent prediction of the Zhangbei-Shangyi earthquake[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (7): 9—15 (in Chinese).

车用太, 刘成龙, 鱼金子. 2008. 井水温度微动态及其形成机制[J]. 地震, 28(4): 20—28.

Che Y T, Liu C L, Yu J Z. 2008. Micro-behavior of well-water temperature and its mechanism[J]. *Earthquake*, 28(4): 20—28 (in Chinese).

邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 陈立春. 2003. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘, 10(增刊1): 66—73.

Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, Yang X P, Min W, Chen L C. 2003. Active tectonics and earthquake activities in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(S1): 66—73 (in Chinese).

冯恩国, 王华, 车用太, 刘成龙, 王伟, 陈其锋, 连凯旋, 刘保华, 李月强. 2012. 地震地下流体观测现状[J]. 地震地磁观测与研究, 33(5/6): 202—207.

Feng E G, Wang H, Che Y T, Liu C L, Wang W, Chen Q F, Lian K X, Liu B H, Li Y Q. 2012. Investigation and analysis on

the current observation status of the seismic underground fluid in China[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 33(5/6): 202–207 (in Chinese).

付虹, 赵小艳. 2013. 汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震前云南地区显著前兆观测异常分析[J]. 地震学报, 35(4): 477–484.

Fu H, Zhao X Y. 2013. Analysis on remarkable precursory anomalies observed in Yunnan area before Wenchuan $M_{\text{S}}8.0$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 35(4): 477–484 (in Chinese).

付虹, 钱晓东, 毛玉平, 苏有锦, 刘翔, 李琼, 张立, 赵小艳, 邬成栋. 2015. 2014 年云南鲁甸 $M_{\text{S}}6.5$ 地震异常及预测[J]. 地震研究, 38(2): 181–188.

Fu H, Qian X D, Mao Y P, Su Y J, Liu X, Li Q, Zhang L, Zhao X Y, Wu C D. 2015. Anomaly and forecast of Yunnan Ludian $M_{\text{S}}6.5$ earthquake in 2014[J]. *Journal of Seismological Research*, 38(2): 181–188 (in Chinese).

付子忠. 1988. 地热动态观测与地热前兆[G]//地壳构造与地壳应力文集(1). 北京: 地震出版社: 1–8.

Fu Z Z. 1988. The observation and earth-thermal precursor[G]//*Thesis on Geological Tectonic and Stress in Earth Crust* (1). Beijing: Seismological Press: 1–8 (in Chinese).

国家地震局地质研究所, 云南省地震局. 1990. 滇西北地区活动断裂[M]. 北京: 地震出版社: 106–113.

Institute of Geology, State Seismological Bureau, Seismological Bureau of Yunnan Province. 1990. *Active Faults in the Northwest Yunnan Region*[M]. Beijing: Seismological Press: 106–113 (in Chinese).

康晓波, 王宇, 张华, 曹瑾. 2013. 丽江黑龙潭泉群水文地质特征及断流的影响因素分析[J]. 中国岩溶, 32(4): 398–403.

Kang X B, Wang Y, Zhang H, Cao J. 2013. Hydrogeologic features and influence factors of zero flow of the Heilongtan spring group in Lijiang[J]. *Carsologica Sinica*, 32(4): 398–403 (in Chinese).

刘耀炜, 孙小龙, 王世芹, 任宏微. 2008. 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, 31(4): 347–353.

Liu Y W, Sun X L, Wang S Q, Ren H W. 2008. Relationship of bore-hole water temperature anomaly and the 2007 Ning'er $M_{\text{6.4}}$ earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 31(4): 347–353 (in Chinese).

刘耀炜, 任宏微, 张磊, 付虹, 孙小龙, 何德强, 余怀忠, 周志华, 张国盟. 2015. 鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析[J]. 地震地质, 37(1): 307–318.

Liu Y W, Ren H W, Zhang L, Fu H, Sun X L, He D Q, Yu H Z, Zhou Z H, Zhang G M. 2015. Underground fluid anomalies and the precursor mechanisms of the Ludian $M_{\text{S}}6.5$ earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 37(1): 307–318 (in Chinese).

石耀霖, 曹建玲, 马丽, 尹宝军. 2007. 唐山井水温的同震变化及其物理解释[J]. 地震学报, 29(3): 265–273.

Shi Y L, Cao J L, Ma L, Yin B J. 2007. Tele-seismic coseismic well temperature changes and their interpretation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 29(3): 265–273 (in Chinese).

王瑜青, 陈桂兰, 付子忠. 1994. 地热观测资料清理及映震能力分析[J]. 地震学报, 16(增刊1): 148–152.

Wang Y Q, Chen G L, Fu Z Z. 1994. Sorting out of geothermal data in Yunnan and analysis of the correspondence with earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 16(S1): 148–152 (in Chinese).

杨竹转, 邓志辉, 刘春国, 王桂清, 祖金华, 陶京玲, 宋键. 2008. 中国大陆井水位与水温动态对汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震的同震响应特征分析[J]. 地震地质, 30(4): 895–905.

Yang Z Z, Deng Z H, Liu C G, Wang G Q, Zu J H, Tao J L, Song J. 2008. Coseismic changes of water level and water temperature caused by $M_{\text{S}}8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 30(4): 895–905 (in Chinese).

曾成, 杨睿, 杨明明, 胡君春, 武贵华, 樊宇红. 2013. 丽江市黑龙潭泉群断流的人工神经网络模拟[J]. 中国岩溶, 32(4): 391–397.

Zeng C, Yang R, Yang M M, Hu J C, Wu G H, Fan Y H. 2013. Artificial neural network simulation to zero flow of the Heilongtan spring groups in Lijiang[J]. *Carsologica Sinica*, 32(4): 391–397 (in Chinese).

张彬, 方震, 刘耀炜, 杨选辉, 赵刚, 荆燕. 2014. 云南地区水温异常与地震关系[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 39(12): 1880–1886.

Zhang B, Fang Z, Liu Y W, Yang X H, Zhao G, Jing Y. 2014. Relationship between water temperature anomaly and earthquake in Yunnan[J]. *Earth Science: Journal of China University Geosciences*, 39(12): 1880–1886 (in Chinese).

赵刚, 马文娟, 王军, 何案华. 2009. 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, 32(3): 248–252.

Zhao G, Ma W J, Wang J, He A H. 2009. Geothermal earthquake precursor network and its response to $M_{\text{S}}8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 32(3): 248–252 (in Chinese).

中国地震局. 2012. 地震地下流体观测方法: 井水和泉水温度观测(DB/T 49—2012)[S]. 北京: 地震出版社: 4.

China Earthquake Administration. 2012. *The Observation Method of Earthquake-Related Underground Fluid: Observation of Well-Water and Spring-Water Temperature (DB/T 49—2012)*[S]. Beijing: Seismological Press: 4 (in Chinese).

Cicerone R D, Ebel J E, Britton J. 2009. A systematic compilation of earthquake precursors[J]. *Tectonophysics*, **476**(3/4): 371–396.

Cox S C, Menzies C D, Sutherland R, Denys P H, Chamberlain C D, Teagle A H. 2015. Changes in hot spring temperature and hydrogeology of the Alpine fault hanging wall, New Zealand, induced by distal South Island earthquakes[J]. *Geofluids*, **15**(1/2): 216–239.

Ekström G, Nettles M, Dziewonski A M. 2012. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **200/201**: 1–9.

International Seismological Centre. 2017. ISC-EHB bulletin: Catalogue search[EB/OL]. [2017-06-01]. <http://www.isc.ac.uk/isc-ehb/search/catalogue/>.

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**(1/2): 95–108.

Nakamura Y, Wakita H. 1984. Precise temperature measurement of groundwater for earthquake-prediction study[J]. *Pure Appl Geophys*, **122**(2): 164–174.

Orihara Y, Kamogawa M, Nagao T. 2014. Preseismic changes of the level and temperature of confined groundwater related to the 2011 Tohoku earthquake[J]. *Sci Rep*, **4**: 6907.

Shi Z M, Wang G C, Manga M, Wang C Y. 2015. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes: Insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **430**: 66–74.

Shimamura H, Ino M, Hikawa H, Iwasaki T. 1984. Groundwater microtemperature in earthquake regions[J]. *Pure Appl Geophys*, **122**(6): 933–946.

Wang C Y, Manga M. 2010. *Earthquakes and Water*[M]. Berlin: Springer-Verlag: 16–17.