

孙小龙, 向阳, 杨朋涛. 2018. 云南会泽井水位地震预测效能检验及其机理分析. 地震学报, 40(2): 185–194. doi: 10.11939/jass.20170125.

Sun X L, Xiang Y, Yang P T. 2018. Earthquake prediction efficiency inspection of water level in Huize well and its anomaly mechanism. *Acta Seismologica Sinica*, 40(2): 185–194. doi: 10.11939/jass.20170125.

## 云南会泽井水位地震预测效能检验 及其机理分析\*

孙小龙<sup>1),†</sup> 向 阳<sup>1,2)</sup> 杨朋涛<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

**摘要** 云南会泽井水位在几次中强地震前均出现了显著的异常变化, 表明该井水位对其周边的中强地震具有较好的映震效果. 本文利用 Molchan 图表法对会泽井水位的预测效能进行了定量检验, 并对其水位上升异常机理进行了分析探讨. Molchan 图表法检验结果显示: 会泽井水位异常的整体预测效能较好, 对地震发生的时间和地点具有一定的指示意义; 地震对应优势预测时间段为 3 个月以内, 优势预测地区为川滇菱形地块以东区域. 此外, 会泽井处于地块边界带上的断裂交会部位, 对与震源过程相关的区域构造活动响应较为灵敏, 具有较好的预测效能.

**关键词** 云南会泽井 井水位 预测效能 异常机理

doi: 10.11939/jass.20170125 中图分类号: P315.72 文献标识码: A

## Earthquake prediction efficiency inspection of water level in Huize well and its anomaly mechanism

Sun Xiaolong<sup>1),†</sup> Xiang Yang<sup>1,2)</sup> Yang Pengtao<sup>1)</sup>

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

2) *Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830011, China*

**Abstract:** Significant abnormal changes of water level in Huize well of Yunnan Province were observed before several earthquakes, which indicates that the anomalies of water level in Huize well has good prediction efficiency to the earthquakes occurred surrounding the well. In this paper, the prediction efficiency of the water level in Huize well was tested by the Molchan diagram method, and the anomaly mechanism of water level was analyzed. The results show that the water level in Huize well has good prediction efficiency to earthquakes, and the anomalies can be used to predict the time and the site of the next earthquake. The prediction interval from anomaly appearance to next earthquake occurrence corresponds to three months, and the prediction area is the eastern part of Sichuan-Yunnan block. Because the Huize well was drilled in the junction of fault zones, water level in the well was sensitivity to the regional tectonic activity

\* 基金项目 国家自然科学基金(41502239)、国家重点研发计划(2017YFC1500502)和中国地震局川滇国家地震预报实验场项目(20150111)共同资助.

收稿日期 2017-06-01 收到初稿, 2017-09-21 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: xlsun04@163.com



associated with the seismogenic process, which leads to the good prediction efficiency.

**Key words:** Yunnan Huize; well water level; prediction efficiency; anomaly mechanism

引言

井水位观测是地震地下流体前兆监测的重要手段之一(刘耀炜, 2006), 井水位的异常变化能够客观地、灵敏地反映地壳介质应力-应变变化. 在地震孕育、发生的过程中, 局部应力的加卸载作用或断层的大尺度活动均会导致岩体发生变形, 使含水层孔隙压力产生变化, 从而导致地壳介质渗流场的变化, 井孔水位也随之动态变化(田竹君, 谷圆珠, 1985; Montgomery, Manga, 2003). 付虹等(1997), Sato 等(2004)和车用太等(2008)的观测实践已表明, 地震前井水位是存在异常变化的. 研究地震孕育、发生过程中井水位的各种异常变化, 对揭示地震孕育、发生和发展过程具有重要的物理意义, 在地震前兆监测与地震预测实践中发挥着重要作用(车用太等, 2003).

云南省会泽井的井水位自 2012 年数字化观测以来, 该井周边及附近地区发生的中强地震震前井水位均出现了显著的上升, 显示出较强的映震能力. 本文拟以会泽井水位为研究对象, 系统地分析会泽井水位在几次中强地震前出现的显著异常特征, 并依据会泽井水位及其周边的地震活动情况, 利用 Molchan 图表法对该井水位观测资料进行预测效能量化评估与检验, 提取其具有前兆指示意义的地震预测预报指标, 进而对会泽井水位上升异常的机理进行解释, 以期为本地区的震情跟踪及地震形势判定提供可能的判定依据.

1 观测井概况

会泽井位于云南省曲靖市会泽县城以西 18 km 处的娜姑湖盆地边缘, 地理坐标为 (26.52°N, 103.15°E), 海拔为 2 005 m, 所属区域属于云贵高原中部盆岭地貌, 地势北高南低; 位于川滇菱形地块构造的东南部, 小江断裂东侧 8 km 处, 白雾街不对称双弧形构造的交会部位. 会泽井深 103.15 m, 套管深度为 87.80 m, 水位埋深约 30.00 m, 其中 34.06—87.80 m 为滤水管, 观测段为 34.06—103.15 m. 会泽井的水文地质条件如图 1a 所示, 地下水为裂隙承压水, 水温为 16.0℃ 左右, 受区域活动断裂控制和影响, 该井的松散堆积层孔隙水的富水性

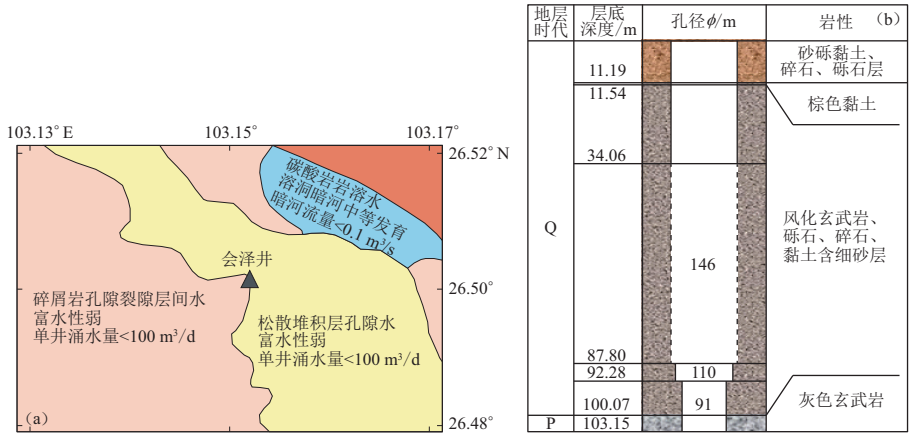


图 1 会泽井的水文地质条件(a)和井孔柱状图(b)  
Fig. 1 Hydrogeological conditions (a) and the bore hole histogram (b) of Huize well

弱, 单井涌水量小于 100 m<sup>3</sup>/d, 地表以下 11.19 m 深处为 0.15 m 厚的棕色黏土隔水层, 其隔水效果较好. 井孔周边岩性如图 1b 所示: 地表为第四系湖相沉积, 观测含水层岩性为第四系风化玄武岩、砾石、碎石、黏土含细砂层; 下伏地层为二叠系灰色玄武岩.

2 会泽井水位异常特征

会泽井水位采用 LN-3 型数字化水位仪, 探头放置于水下 4.925 m, 自 2012 年采用数字化观测以来, 该井水位的动态特征表现为持续下降趋势, 无年变, 不受降雨影响, 下降速率为 0.3 m/a. 如图 2a 所示, 在表 1 所示的 4 次地震前, 该井水位在多年缓降趋势的正常动态背景上, 均表现出显著的突升异常现象, 异常幅度较大, 表明其具有一定的映震能力.

为进一步分析中强地震前会泽井水位的异常变化特征, 分别将图 2a 中的 4 次地震前井水位出现的显著异常时段经时间平移后, 叠加异常形态曲线, 得到各异常动态曲线, 如图 2b 所示, 可见 4 次地震前会泽井水位的异常形态特征较为相似, 均为短时间内的上升异常变化, 变化幅值存在差异, 介于 0.21—0.38 m 之间, 详见表 1. 其中井震距最短的地震为 2014 年 8 月 3 日鲁甸 M<sub>S</sub> 6.5 地震, 震前 14 天井水位呈明显上升变化, 幅值为 0.33 m, 并在地震发生后又出现了一次幅值为 0.32 m 的明显上升变化(此为震后效应). 几次地震前会泽井水位异常变化距离发震的时间均在 1 个月以内, 说明该井水位具有显著的地震短临异常特征.

从会泽井水位异常的变化特征来看, 当井水位出现上升异常变化之后, 在一定时间内均会发生中强地震, 说明该井水位异常与地震活动存在一定的关系, 据此可为该区域的地震形势判定提供可能的参考依据.

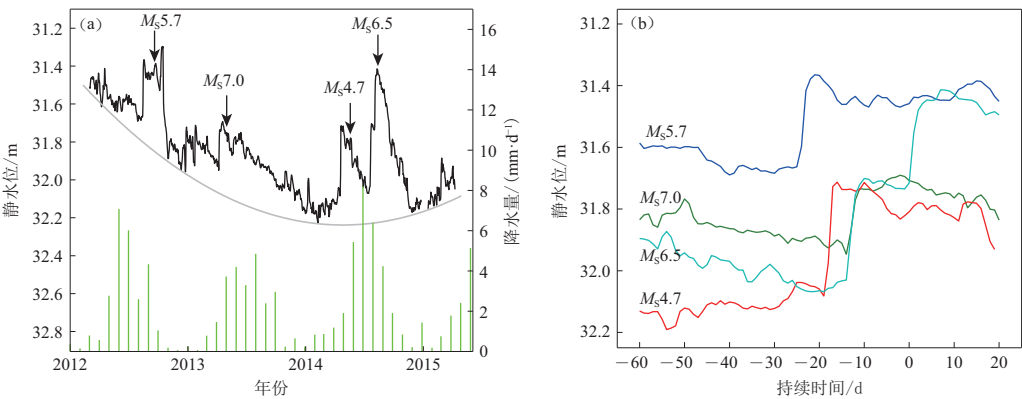


图 2 会泽井静水位与该地区的降雨观测曲线(a)及 4 次地震前会泽井静水位的显著异常变化(b)

Fig. 2 Curves of water level in Huize well and the rainfall in the area (a) as well as abnormal changes of water level of Huize well before four earthquakes (b)

表 1 会泽井水位出现异常变化及对应的地震

Table 1 Abnormal changes of water level and corresponding earthquakes

发震日期 年-月-日	震中位置		地点	M <sub>S</sub>	井震距 /km	水位变化 幅值/m	水位变化开始时间 年-月-日	水位变化距 发震时间/d
	北纬/°	东经/°						
2012-09-07	27.50	103.95	云南彝良	5.7	136	0.27	2012-08-13	25
2013-04-20	30.30	103.00	四川芦山	7.0	421	0.21	2013-04-06	14
2014-05-07	25.48	101.92	云南元谋	4.7	161	0.38	2014-04-18	19
2014-08-03	27.10	103.40	云南鲁甸	6.5	71	0.33	2014-07-20	14

### 3 地震预测效能检验

会泽井水位出现上升异常与本区或周边地区中强以上地震发生的对应关系,显示出会泽井水位在多次中强震前都有较好的映震能力,但并非该区域内所有地震震前均存在井水位的异常变化.因此,本文将采用 Molchan 图表法对其预测效能进行定量化检验. Molchan 图表法是目前国际上“地震可预测性合作研究”计划中采用的 6 种统计检验方法之一,该方法不仅能客观地和科学地进行地震预测评估,还能解决固定研究区域内地震时间的预测问题,并能给出相应的概率解释(Jordan, 2006),已被广泛应用于常规的确定性和概率性预测的统计检验和效能评估中(Zechar, Jordan, 2008).

研究区范围为(21°—32°N, 97°—110°E),地震目录引自中国地震台网中心(2017),震源机制解引自 USGS (2017). 依据震级与震中距一般对应关系:  $M_s 4.0—4.9$  地震的震中距小于 200 km;  $M_s 5.0—5.9$  地震的震中距小于 250 km;  $M_s 6.0—6.9$  地震的震中距小于 300 km;  $M_s 7.0$  以上地震的震中距小于 500 km, 筛选出 2012—2015 年会泽井周围发生的地震,共 31 次,其中  $M_s 4.0—4.9$  地震 19 次,  $M_s 5.0—5.9$  地震 8 次,  $M_s 6.0—6.9$  地震 3 次,  $M_s 7.0—7.9$  地震 1 次. 利用实际观测数据进行地震预测分析时,常需要对数据进行预处理. 由于会泽井水位无年变特征,水位的异常特征表现为高值异常,对所积累的震例进行日常跟踪分析可知,地震一般发生在井水位异常升高之后,因此,本文选取去趋势处理和差分分析两种方法分别对会泽井水位的原始数据进行预处理,再利用 Molchan 图表法对水位异常期相应的地震依次进行检验,并对不同预处理方法的检验结果加以分析,最终得到会泽井的预测效能和优势对应异常时间的定量结果.

#### 3.1 Molchan 图表法

Molchan 图表法主要是针对预测值与目标地震差异度的检验(Molchan, 1990),该方法既能直观地反映观测资料的整体预测效能,又能定量地分析异常,提取最佳阈值所对应的异常判定指标. 图表法所计算的变量为:漏报率  $\nu$ , 即预测无震而实际发震的数量与总的实际发震数之比;异常时空占有率  $\tau$ , 即以不同的阈值提取异常的时空范围与总的时空范围之比.

本文利用此方法对会泽井水位观测数据的预测效果进行检验时,需考虑时间占有率,即所有异常时间及其有效预测期所累积的去除二者重复时段后的总时间长度除以被检验数据的总时间长度. 例如:被检验数据的起始时间为 2010 年 1 月 1 日,结束时间为 2010 年 12 月 31 日,总时间长度为 365 天. 在这一年中出现了测值高于某一阈值的异常 3 次,每次异常的持续时间为 15 天,预测期为 30 天,并且 3 次异常的持续时间和预测期中共计有 20 天是重复的. 那么,其时间占有率为  $[3 \times (15 + 30) - 20] / 365 \approx 0.315$ . 通过不断降低预测的“警报”阈值,分别计算异常在时间上的占有率  $\tau$  和相应的漏报率  $\nu$ , 得到 Molchan 图表中的  $\tau-\nu$  曲线. 曲线与图表的边界线所包围的面积代表检验的预测效果,面积越小,预测效果越好;此外,还需参考概率增益  $G$ . 在 Molchan 图表法中  $G$  被定义为(Molchan, 1991; Zechar, Jordan, 2008)

$$G = \frac{1 - \nu}{\tau}, \quad (1)$$

$G$  越大,预测效果越好,若  $\tau-\nu$  曲线接近于直线  $G=1$ , 表示无统计意义. 实际检验的具体过程为给定阈值后,超出阈值的数据为异常值,地震发生在异常值所在时段及其有效预测期之外时,称为漏报.

3.2 会泽井水位检验结果

2012—2015 年会泽井周围发生的 31 次地震的空间分布如图 3a 所示, 利用 Molchan 检验法对会泽井水位去趋势后数据进行预测效能检验, 阈值由大到小滑动, 根据阈值确定时间占有率  $\tau$  和漏报率  $\nu$ , 得到  $\tau$ - $\nu$  曲线结果如图 3b 所示. 图中点 (1.0, 0) 表示地震全都报准, 但其时间占有率也最大, 占据整个数据的时间段; 点 (0, 1.0) 表示地震全部漏报, 其时间占有率最小, 相当于未作出预测. 因此, 评估观测资料的预测效能需要从漏报率和时间占有率这两方面综合判定.

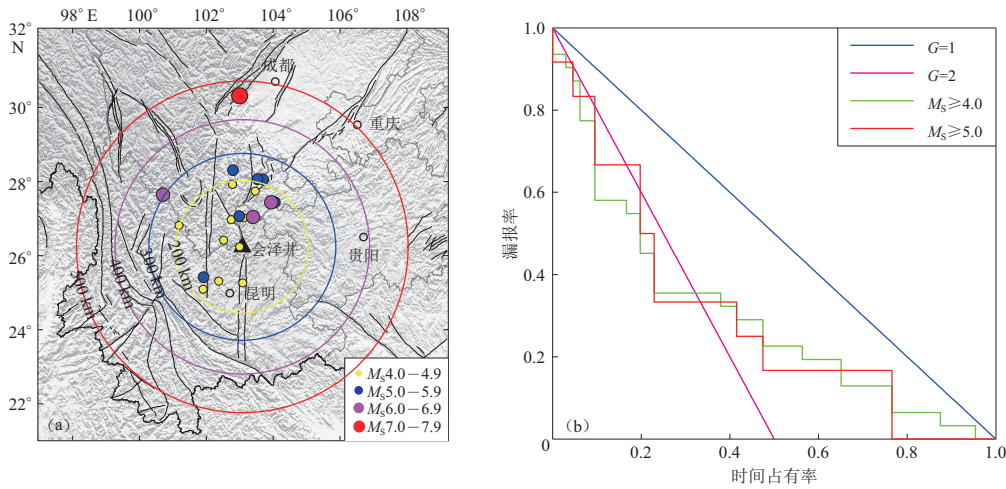


图 3 会泽井周边地震的空间分布(a)及水位的 Molchan 检验结果(b)

Fig. 3 The spatial distribution of earthquakes around the Huize well (a) and the test results of water level by Molchan chart method (b)

对会泽井水位观测数据经去趋势处理后的 Molchan 检验结果显示, 该井水位对  $M_s \geq 4.0$  地震与  $M_s \geq 5.0$  地震的预测效果基本相当, 且  $G$  约为 2, 只是  $M_s \geq 5.0$  地震的时间占有率略小, 说明从去趋势曲线来看, 会泽井水位对于其周围或附近地区、整个大区域不同的震级档未显示出明显的优势预测效果.

会泽井位于川滇菱形地块的东南部, 处于多条断裂的交会部位, 其所在地区的地震活动受区域活动断裂控制和影响, 因此, 针对  $M_s \geq 5.0$  地震按会泽井所在川滇菱形地块以东和以西进行分选, 地震震中分布如图 4a 所示; 分别对川滇菱形地块以东和以西的地震预测效能进行 Molchan 检验, 结果如图 4b 所示, 可以明显地看出: 会泽井水位去趋势曲线对地块以东的地震预测效能较好, 检验线与横纵坐标包围的面积较小, 大部分数据点  $G > 2$ ; 而对地块以西的地震预测效能并不理想, 基本都在随机线  $G=1$  附近, 且  $G < 2$ , 说明当会泽井水位出现异常变化时, 中强地震发生的优势预测区域为川滇菱形地块以东, 这可以为将来地震发生的地点和强度提供一定的参考依据.

以上分析和检验是基于对原始水位数据进行去趋势预处理后的数据, 考虑到会泽井水位震前多表现为上升型高值异常, 且不同的预处理方法可能会得到不同的结果, 因此为了更加突出会泽井水位的高值异常, 分析不同的预处理方法对检验结果的影响, 本文还尝试用差分法对其数据进行预处理, 结果如图 5a 和图 5c 所示, 可见绝大部分地震前都出现了井水位高值现象, 但并不是所有高值之后均有地震发生.



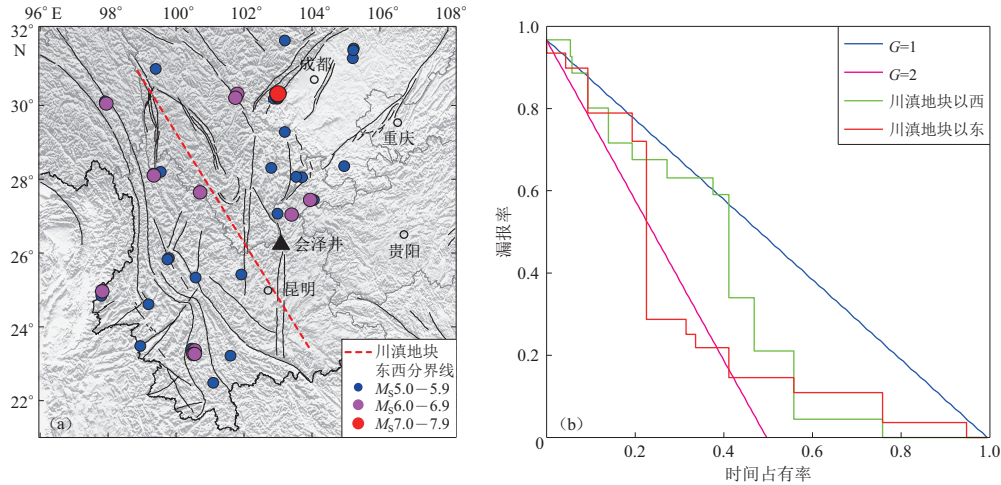


图 4 川滇菱形地块及附近地震的空间分布(a)及水位 Molchan 检验结果(b)  
Fig. 4 The spatial distribution of earthquakes in and around Sichuan-Yunnan block (a) and the test results of water level by Molchan chart method (b)

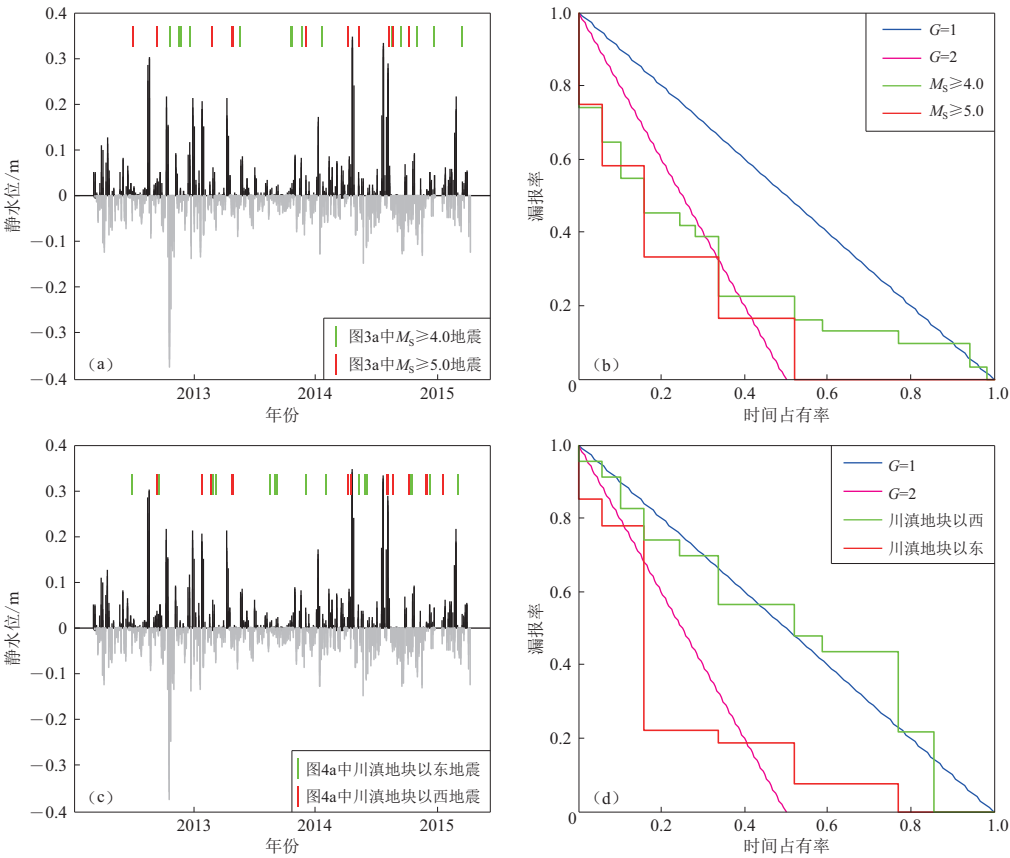


图 5 会泽井水位 5 日差分曲线(a, c)及 Molchan 检验结果(b, d)  
Fig. 5 Five-day difference water level curves (a, c) and the test results of water level by Molchan chart method (b, d)

利用 Molchan 图表法对差分处理后的会泽井水位进行检验, 结果如图 5b 和图 5d 所示. 由图 5b 可直观地看出,  $M_S \geq 5.0$  地震的红色检验线包围的面积较  $M_S \geq 4.0$  地震的绿色检验线包围面积更小, 且  $M_S \geq 5.0$  地震的概率增益更大, 说明会泽井水位 5 日差分曲线对其附近或周围地区  $M_S \geq 5.0$  地震的预测效能更好; 同样, 如图 5d 所示, 川滇菱形地块以东地震的红色检验线所包围的面积较地块以西地震的绿色检验线所包围面积更小, 其概率增益更大, 说明会泽井水位 5 日差分曲线对川滇菱形地块以东地震的预测效能更好. 由此可见, 利用去趋势法和差分法对会泽井水位进行预处理后, 二者的检验效果与已有认识基本一致, 即会泽井水位的上升高值异常对周边及川滇菱形地块以东的中强地震具有一定的预测效能.

基于上述分析, 分别对会泽井去趋势曲线和 5 日差分曲线进行预测效能的检验, 结果如图 6a 和图 6c 所示. 可以看出, 会泽井水位在去趋势和 5 日差分处理后的整体预测效能都很好, 即概率增益均大于 1, 而且有效预测时间的预测效能均在 0.5 以上, 尤其是 5 日差分处理后的会泽井水位绝大多数预测时间的预测效能均在 0.6 以上, 部分在 0.8 以上, 说明会泽井水位用 5 日差分方法进行预处理后, 预测效能更好.

图 6b 和图 6d 分别为两种方法预测效能的优势地震对应时段, 可见, 会泽井水位去趋势处理后, 优势地震对应时间段为 3 个月以内, 预测效能介于 0.6—0.8 之间, 3 个月之后预测效能降低至同一水平(图 6b); 会泽井水位 5 日差分处理后, 优势地震对应时间段也为 3 个月以内, 预测效能介于 0.7—0.8 之间, 3 个月之后预测效能逐渐降低, 直至同一水平(图 6d),

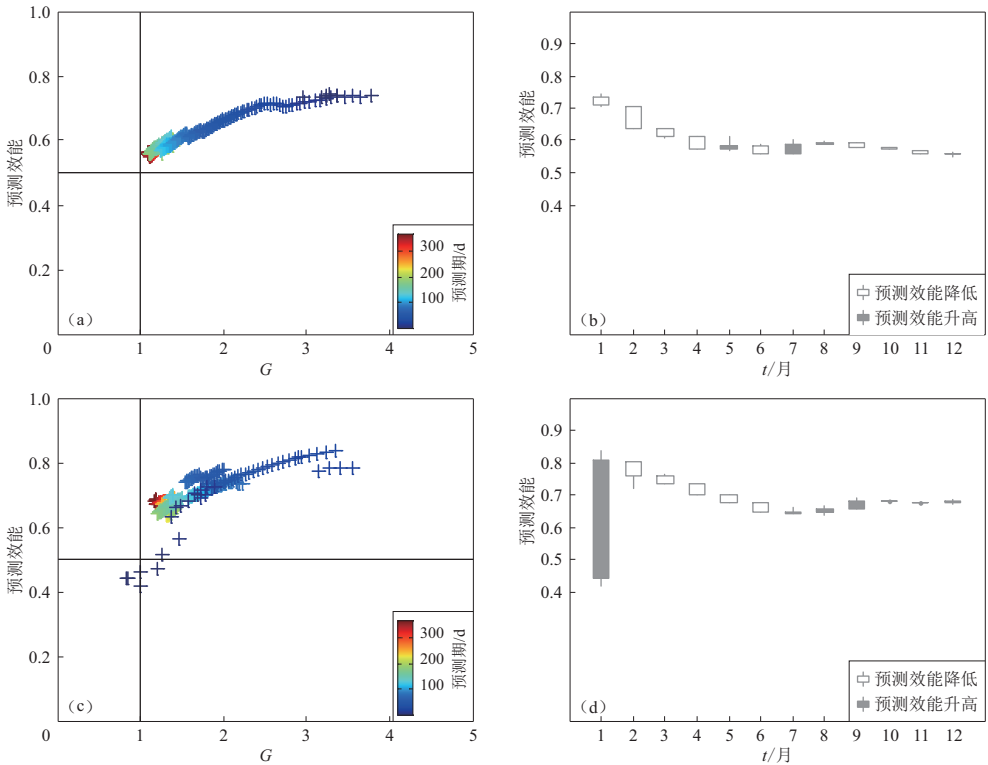


图 6 会泽井水位去趋势(a, b)和 5 日差分值(c, d)处理的预测效能  
Fig. 6 Prediction efficiency of water level in Huize well based on the de-trended data (a, b) and five-day difference data (c, d)

说明会泽井水位在 1—3 个月以内的短期预测效果较好。

综上所述,从空间预测角度来看,会泽井水位的上升高值异常对周边及川滇菱形地块以东的中强地震具有一定的预测效能,从时间预测角度来看,其预测期多在 1—3 个月,且 1 个月左右的预测效能最佳。定量检验的结果与水位原始曲线(经去趋势处理)的映震效果基本一致,如表 1 中统计的 4 次显著震例,其异常出现时间距发震时间均在 30 天以内。

## 4 水位异常机理分析

国内外研究人员已经开展了大量的地下水位异常变化与地震关系的机理研究,提出了多种模式。20 世纪 70 年代初的扩容-扩散模式、裂隙串通或雪崩模式和微裂-顶位移模式,均认为地震孕育到发生的过程中,震源附近应力积累使得地下介质变化,引起地震震中位置或周围地下水位的异常(国家地震局预测预防司,1997)。车用太和杨会年(1985)总结了国外研究关于震前地下水动态异常的 3 种机理:滑动机理、破裂机理和变形锋传播机理,归纳出震前断裂的预滑或微破裂的产生与发展可形成震中压缩区和拉张区,从而导致井水位上升或下降异常。车用太(1990)进一步研究认为震前地下水位异常与震源区域应力场活动相关。至 20 世纪 80 年代,地下水前兆机理研究从“震源效应”转向“大范围应力场效应”,认为井水位上升、下降异常与地壳应力变化—含水层变形—水动力条件改变等作用过程有关,是区域应力场和震源应力场共同作用的结果(车用太,杨会年,1985;王吉易等,2002)。

2012 年以来会泽井水位在多次中强地震前均出现了上升高值异常变化,本文利用 Molchan 图表法的检验结果显示,会泽井水位的高值异常对川滇菱形地块以东地震的预测效能较高,这可能与会泽井所处的构造位置及井孔的水文条件密切相关。从构造区域环境来看,会泽井位于则木河—小江断裂和西鱼河—昭通断裂的交会区附近(图 7a),两断裂位于川滇菱形地块与华南地块之间的边界带上,属于活动地块边界带的一部分(张培震等,2003),由一系列大规模逆冲断裂系组成,具有显著逆冲分量的右旋走滑性质,朝东南向推覆(闻学泽等,2013),在青藏高原隆升、川滇地块朝南东运动的区域构造作用下,会泽井所处的区域

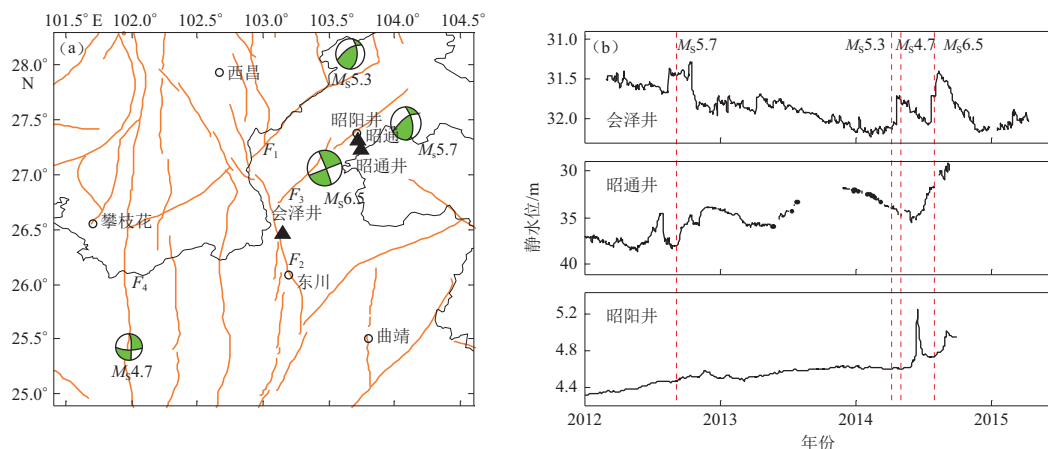


图 7 会泽及周边观测井的位置及其水位与地震的关系

$F_1$ : 莲峰断裂;  $F_2$ : 小江断裂;  $F_3$ : 西鱼河—昭通断裂;  $F_4$ : 磨盘山—绿汁江断裂

Fig. 7 Location of wells and comparison of earthquakes and water levels nearby by Huize well

$F_1$ : Lianfeng fault;  $F_2$ : Xiaojiang fault;  $F_3$ : Xiyuhe-Zhaotong fault;  $F_4$ : Mopanshan-Lüzhijiang fault



应力场呈挤压状态, 其井水位在本文分析的多次中强地震前表现为上升高值异常变化(图 7b)。

从区域水文环境来看, 由于处于构造灵敏点, 会泽井的观测含水层对区域构造作用具有很好的反映能力。2012 年云南彝良  $M_s5.7$  地震和 2014 年云南鲁甸  $M_s6.5$  地震发生在离会泽井较近的西鱼河—昭通断裂附近, 从水位观测曲线上也能看出, 这两次地震前出现的水位异常变化也是最显著的。但是, 并不是所有地震前均会出现类似异常变化, 例如 2014 年云南永善  $M_s5.3$  地震, 一方面此次地震发生在离会泽井较远的 ENE 向蓬峰断裂附近(近 200 km), 另一方面可能由于此次地震的孕育过程中会泽井所处位置未受到区域构造作用的影响, 即永善  $M_s5.3$  地震的震源过程与会泽井附近区域的断裂带并无直接相关性。结合先前会泽井异常变化与川滇菱形地块构造活动密切相关的认识, 会泽井位于构造灵敏部位, 对川滇菱形地块以东区域的整体构造作用较为敏感, 但对距其较远的局部应力调整无显著反映。

此外, 观测井自身的水文条件也直接影响到水位对构造活动作用的灵敏程度。距会泽井约 120 km 处的昭通井、昭阳井, 虽同处西鱼河—昭通断裂附近(图 7a), 但会泽井水位在 3 次地震前均有显著异常出现(图 7b); 昭通井在 2012 年云南彝良  $M_s5.7$  地震和 2014 年云南鲁甸  $M_s6.5$  地震前出现了上升高值异常, 在 2014 年云南元谋  $M_s4.7$  地震前却未出现; 而昭阳井仅在 2014 年云南鲁甸  $M_s6.5$  地震前出现了上升高值异常变化。可见, 同样是水位观测井, 会泽井由于处于构造灵敏点, 其对地震孕育过程或构造活动的响应能力较好, 即使同处一个构造区(如昭通井和昭阳井), 不同的井-含水层系统条件也直接影响其对地震的响应能力。从图 7b 可知, 昭通井水位深 35 m 左右, 昭阳井水位埋深 4.5 m 左右, 其观测含水层明显不同, 进而对附近区域的地震响应能力也不完全相同。

综上分析, 井水位异常的变化机理较为复杂, 既与区域构造活动有关, 也与井孔自身的水文条件密切相关。会泽井位于则木河—小江断裂和西鱼河—昭通断裂的交会区附近, 处于构造敏感部位, 其水位对区域构造作用及地震孕育过程较为灵敏, 因而具有较好的预测效能, 本文定量检验的结果与其一致。

## 5 讨论与结论

本文通过对会泽井水位在几次中强地震前出现的显著异常特征的分析, 认为会泽井水位对其周围一定范围内的中强地震具有较高的映震能力。利用 Molchan 图表法对会泽井水位的预测效能进行了定量检验, 得到了会泽井的水位优势预测时间, 最后从不同的角度对会泽井水位上升异常机理进行了初步分析与解释, 结论如下:

1) 会泽井水位在几次显著的上升异常变化后, 一个月以内周围一定范围内均有中强地震发生, 说明会泽井水位异常与地震活动存在一定的关系, 且均为短临异常, 这对周边区域的地震预测探索有重要意义。

2) 会泽井水位异常的整体预测效能较好, 对地震发生的时间和地点具有一定的指示意义。优势地震对应时间段为 3 个月以内, 优势预测地区为川滇菱形地块以东区域。

3) 处于断裂带交会部位的会泽井, 对与震源过程相关的区域构造活动响应较为灵敏, 其水位在川滇地区几次中强地震前均出现显著上升异常, 与区域构造作用密切相关。

## 参 考 文 献

车用太, 杨会年. 1985. 井孔水位微动态形成机理的探讨[J]. 地震地质, 7(3): 43–50.

Che Y T, Yang H N. 1985. Discussion on mechanism of microbehaviour of groundwater level in a borehole[J]. *Seismology and*

- Geology*, 7(3): 43–50 (in Chinese).
- 车用太. 1990. 地下水动态映震理论与预报地震方法[J]. 地震, (6): 19–25.
- Che Y T. 1990. On precursor theory and prediction method of groundwater behavior[J]. *Earthquake*, (6): 19–25 (in Chinese).
- 车用太, 刘五洲, 鱼金子, 高立新, 纪建国, 张淑亮, 王爱英. 2003. 井水位对地壳应力-应变响应灵敏度的研究[J]. 地震, 23(3): 113–120.
- Che Y T, Liu W Z, Yu J Z, Gao L X, Ji J G, Zhang S L, Wang A Y. 2003. The study of responding sensitivity of well water level to crustal stress-strain[J]. *Earthquake*, 23(3): 113–120 (in Chinese).
- 车用太, 刘成龙, 鱼金子, 官致君, 李军. 2008. 汶川  $M_s8.0$  地震的地下流体与宏观异常及地震预测问题的思考[J]. 地震地质, 30(4): 828–838.
- Che Y T, Liu C L, Yu J Z, Guan Z J, Li J. 2008. Underground fluid anomaly and macro anomaly of  $M_s8.0$  wenchuan earthquake and opinions about earthquake prediction[J]. *Seismology and Geology*, 30(4): 828–838 (in Chinese).
- 付虹, 陈立德, 罗平, 杨杰英, 张立, 刘翔, 李永强, 刘仲全, 沈斌, 王世芹. 1997. 1995年7月12日云南孟连中缅边界7.3级地震中短临预报及前兆异常特征(3)[J]. 地震研究, 20(4): 345–356.
- Fu H, Chen L D, Luo P, Yang J Y, Zhang L, Liu X, Li Y Q, Liu Z Q, Shen B, Wang S Q. 1997. Medium-short-impending prediction and precursory anomalous characteristics on earthquake of  $M7.3$  on July 12, 1995 in border area between China Yunnan's Menglian and Myanmar[J]. *Journal of Seismological Research*, 20(4): 345–356 (in Chinese).
- 国家地震局预测预防司. 1997. 地下流体地震预报方法[M]. 北京: 地震出版社: 30–32.
- Department of Prediction and Prevention, State Seismological Bureau. 1997. *Earthquake Prediction Method of Underground Fluid* [M]. Beijing: Seismological Press: 30–32 (in Chinese).
- 刘耀伟. 2006. 我国地震地下流体科学40年探索历程回顾[J]. 中国地震, 22(3): 222–235.
- Liu Y W. 2006. Review of the research progress on the seismological science of underground fluid in China during last 40 years[J]. *Earthquake Research in China*, 22(3): 222–235 (in Chinese).
- 田竹君, 谷圆珠. 1985. 地下水位微动态的分析与处理[J]. 地震地质, 7(3): 51–59.
- Tian Z J, Gu Y Z. 1985. Analysis and processing of data on fluctuations of groundwater level[J]. *Seismology and Geology*, 7(3): 51–59 (in Chinese).
- 王吉易, 宋贯一, 曹志成, 郑云贞, 张子广, 范雪芳, 黄辅琼, 杨明波. 2002. 地下水诱发的浅层前兆异常及其机理与有关的地震预报问题(1)[J]. 华北地震科学, 20(2): 28–41.
- Wang J Y, Song G Y, Cao Z C, Zheng Y Z, Zhang Z G, Fan X F, Huang F Q, Yang M B. 2002. The mechanism of shallow layers anomaly caused by groundwater and its related question in earthquake prediction (1)[J]. *North China Earthquake Sciences*, 20(2): 28–41 (in Chinese).
- 闻学泽, 杜方, 易桂喜, 龙锋, 范军, 杨攀新, 熊仁伟, 刘晓霞, 刘琦. 2013. 川滇交界东段昭通-莲峰断裂带的地震危险背景[J]. 地球物理学报, 56(10): 3361–3372.
- Wen X Z, Du F, Yi G X, Long F, Fan J, Yang P X, Xiong R W, Liu X X, Liu Q. 2013. Earthquake potential of the Zhao-tong and Lianfeng fault zones of the eastern Sichuan-Yunnan border region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(10): 3361–3372 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D辑, 33(增刊1): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China: Series D*, 46(S2): 13–24.
- 中国地震台网中心. 2017. 地震数据与管理服务系统[DB/OL]. [2017-06-01]. <http://www.csndmc.ac.cn/index/main>.
- China Earthquake Networks Center. 2017. Seismic data and management services[DB/OL]. [2017-06-01]. <http://www.csndmc.ac.cn/index/main> (in Chinese).
- Jordan T H. 2006. Earthquake predictability brick by brick[J]. *Seism Res Lett*, 77(1): 3–610.
- Molchan G M. 1990. Strategies in strong earthquake prediction[J]. *Phys Earth Planet Inter*, 61(1/2): 84–98.
- Molchan G M. 1991. Structure of optimal strategies of earthquake prediction[J]. *Tectonophysics*, 193: 267–276.
- Montgomery D R, Manga M. 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes[J]. *Science*, 300(56): 2047–2049.
- Sato T, Matsumoto N, Kitagawa Y, Koizumi N, Takahashi M, Kuwahara Y, Ito H, Cho A, Statoh T, Ozawa K, Tasaka S. 2004. Changes in groundwater level associated with the 2003 Tokachi-Oki earthquake[J]. *Earth Planets Space*, 56(3): 395–400.
- Zechar J D, Jordan T H. 2008. Testing alarm-based earthquake predictions[J]. *Geophys J Inter*, 172(2): 715–724.
- USGS. 2017. Earthquake hazards program[DB/OL]. [2017-04-20]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.