

鲁明贵,谷洪彪,巩浩波,等. 2024. 基于 Molchan 图表法的流体监测井水位地震预测效能检验[J]. 地震研究, 47(2): 200–211, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0011.

Lu M G, Gu H B, Gong H B, et al. 2024. Effectiveness test of seismic prediction of water level in fluid monitoring well based on the Molchan diagram method [J]. *Journal of Seismological Research*, 47(2): 200–211, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0011.

# 基于 Molchan 图表法的流体监测井水位 地震预测效能检验\*

鲁明贵<sup>1</sup>, 谷洪彪<sup>1,2♣</sup>, 巩浩波<sup>3</sup>, 张文旭<sup>1</sup>, 迟宝明<sup>1</sup>

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省地震动力重点实验室, 河北 三河 065201;  
3. 重庆市地震局, 重庆 401147)

**摘要:** 为了探究水位异常和地震之间潜在的对应关系以及监测井水位的地震预测效能, 通过差分法和水位固体潮加卸载比法对德阳井、剑川井、佐署井和门源井水位数据进行处理, 并采用 Molchan 图表法对 4 口监测井水位的不同预测期 and 不同块体发生的地震进行预测效能检验。结果表明: 两种方法处理后的 Molchan 图表法检测效能结果相似; 4 口监测井水位在 180 d 内均有较好的预测效能, 均对不同范围中强地震有一定预测效能, 并且预测效能受板块内构造分布情况影响, 对构造发育的区域预测效能更好。

**关键词:** 井水位; 水位异常识别; Molchan 图表法; 预测效能

中图分类号: P135.72 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2024)02-0200-12  
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0011

## 0 引言

诸多地震发生之前, 都会引发周边地下流体监测井中的水位、水温或水化学等出现前兆异常变化, 如 2018 年四川汶川 8.0 级地震、2013 年四川芦山 7.0 级地震、2017 年四川九寨沟 7.0 级地震、2021 年云南漾濞 6.4 级地震和青海玛多 7.4 级地震(晏锐等, 2009; 钟俊等, 2021; 王永刚等, 2021; 马玉川等, 2021)等, 表明地震前地下流体的异常可能对地震的发生有指示意义。地震地下流体监测指标中水位在震前地下流体响应中最为显著。震前水位变化是地震孕育过程中构造应力调整引起的岩石介质变形导致孔隙水压力变化, 进而引起的井孔内水位波动现象(车用太, 鱼金子, 2006)。水位的震前异常响应总共包含 3

个过程: 震前构造应力的调整、构造应力调整导致的含水层孔压改变、含水层孔压变化导致井水位变幅, 这 3 个过程的机制均涉及多学科交叉理论, 定量解释这一综合物理过程难度极大。因此, 现有地震预测研究大多是基于水位与地震之间的统计规律而开展的, 如晏锐等(2018)在 2008 年汶川 8.0 级地震后共收集震中距 71~1 625 km 的地下流体异常共 68 项, 汶川地震的观测范围至少包含该地震 3 倍破裂尺度甚至更广, 异常出现时间在震前几小时至 7 年内, 异常形态特征较为复杂; 钟俊等(2021)收集并统计 2013 年四川芦山 7.0 级地震、2017 年四川九寨沟 7.0 级地震和 2021 年青海玛多 7.4 级地震在震中距 500 km 范围内分别出现地下流体异常 10、14 和 5 次, 并发现震前流体异常形态存在一定相似性。以上研究表明, 现有研究主要是根据水位与地震的关联运用统计学

\* 收稿日期: 2022-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877205); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH19070).

第一作者简介: 鲁明贵(2001-), 本科生在读, 主要从事地震地下流体研究. E-mail: 1907993011@qq.com.

♣通信作者简介: 谷洪彪(1984-), 教授, 博士, 主要从事地震地下流体研究. E-mail: hongbiaosw@126.com.

方法进行“地震试预报”，并与实际发生的地震进行对比。

在地震预测过程中，流体监测井水位信息发挥了重要作用，如何检验水位信息结果的可靠性，以及各流体监测井水位对地震的预测效能，对于这两个问题的探究已在“地震可预测性合作研究”（CSEP）计划中取得了阶段性结果，如王博等（2018）、孙小龙等（2018）分别利用概率预测统计检验方法 Molchan 图表法对南北地震带北段流体资料和云南会泽井水位进行地震预测效能的定量检验。其中 Molchan 图表法由于能够客观和科学地进行地震预测评估，已经被较广泛地应用于地震确定性和概率性预测的统计检验和效能评估中（孙丽娜等，2012）。虽然近年来的研究在该方面取得了有益的成果，但地震预测效能结果的可靠性方面的研究仍然较少。

本文选取我国川滇、青海地区的4口地震流体监测井作为研究对象，通过对水位数据进行滤波等处理，提取地震构造应力与水位变化的一一对应信息，统计震前水位明显异常数量，汇总分析水位响应异常与地震之间存在的潜在联系。运用 Molchan 图表法对监测井水位进行地震预测效能量化评估，得到具有前兆指示意义的地震预测指标，以期为后续研究区内地震危险判定和震情跟踪提供一定理论依据。

## 1 基础资料获取

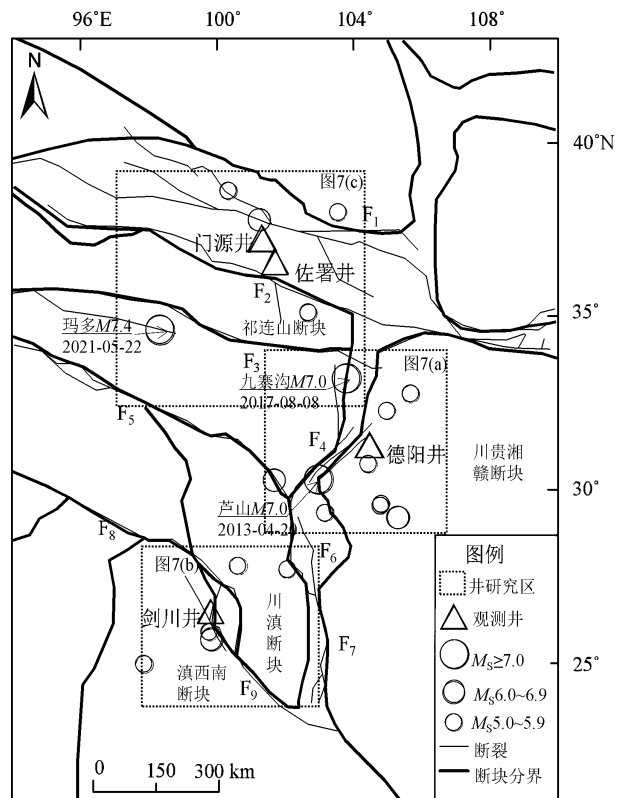
### 1.1 监测井与地震选取

本文研究区为川滇地区和青海地区，受印度洋板块和欧亚板块挤压作用，研究区内构造发育、地震频发，2012—2021年该研究区共发生了 $M_s \geq 4.0$ 地震795次。为探究研究区内监测井水位对地震的预测效能，本文参照晏锐等（2018）、钟俊（2021）等研究以及《云南省地震监测志》（云南省地震局，2005），共选取了14口流体监测井，其中10口监测井存在数据缺失严重或距离研究区过远问题，最终选取四川德阳井、云南剑川井、青海佐署井、青海门源井为研究对象，这4口井观测数据连续性好、前兆异常明显。如德阳井水位在2008年汶川8.0级地震前一年就出现趋势下降后无变化（晏锐等，2009）；佐署井和

门源井在2021年玛多7.4级地震前均有水位异常现象（王永刚等，2021）；据《云南省地震监测志》（云南省地震局，2005）记载，剑川井水位上升、下降速率加快周围可能出现 $M_s \geq 5.0$ 地震，在2021年漾濞6.4级地震前剑川井出现水温异常变化（付虹等，2021）。

自2008年汶川8.0级地震后，中国大陆第一次7.0级以上地震为2013年芦山地震7.0级地震，因此，选取2012年以后上述4口监测井的水位数据进行研究，其中剑川井和佐署井只获取2017年以后的数据，门源井建井时间较晚，只选取该井2018年以后的水位数据。

中强地震引起的流体异常主要集中在震中距300 km内。为获取更多地震样本，探究4口监测井的优势预测地震范围，按照震级与震中距一般



F<sub>1</sub>: 祁连—海原断裂; F<sub>2</sub>: 西秦岭断裂; F<sub>3</sub>: 昆仑断裂; F<sub>4</sub>: 龙门山断裂; F<sub>5</sub>: 玉树—鲜水河断裂; F<sub>6</sub>: 安宁河断裂; F<sub>7</sub>: 小江断裂; F<sub>8</sub>: 嘉黎断裂; F<sub>9</sub>: 红河断裂

图1 研究区构造背景及监测井与地震分布图  
(构造分布参照邓起东等，2002，张培震等，2003)

Fig. 1 Tectonic settings, monitoring wells, and historical earthquakes in the study area  
(according to Deng *et al.*, 2002, Zhang *et al.*, 2003)

对应关系,选取震中距小于 250 km 的  $M_s5.0 \sim 5.9$  地震、震中距小于 300 km 的  $M_s6.0 \sim 6.9$  地震,震中距小于 500 km 的  $M_s \geq 7.0$  地震来作为地震样本。地震目录下载自中国地震台网中心<sup>①</sup>,震源机制解的断层参数数据来源于 CMT<sup>②</sup>。

最终本文选取 2012—2022 年德阳井区域范围

内地震 10 次、2017—2022 年剑川井区域范围内地震 5 次、2017—2022 年佐署井区域范围内地震 5 次、2018—2022 年门源井区域范围内地震 3 次,其中  $M_s5.0 \sim 5.9$  地震 13 次,  $M_s6.0 \sim 6.9$  地震 4 次,  $M_s \geq 7.0$  地震 3 次,共计 20 次地震(表 1),地震分布如图 1 所示。

表 1 本文研究选取地震信息

Tab. 1 Parameters of the selected historical earthquakes

编号	参考位置	发震日期	$M_s$	震中位置		震中距/km
				$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	
1	四川省雅安市芦山县	2013-04-20	7.0	103	30.3	I 177
2	四川省甘孜州康定县	2014-11-22	6.3	101.69	30.26	I 288
3	四川省乐山市金口河	2015-01-14	5.0	103.19	29.33	I 248
4	云南大理州漾濞县	2017-03-27	5.1	99.8	25.89	II 67
5	内蒙古自治区阿拉善	2017-06-03	5.0	103.56	37.99	IV 228
6	四川阿坝州九寨沟县	2017-08-08	7.0	103.82	33.2	I 223/III 419
7	四川广元市青川县	2017-09-30	5.4	105	32.27	I 121
8	陕西汉中市宁强县	2018-09-12	5.3	105.69	32.75	I 200
9	四川凉山州西昌市	2018-10-31	5.1	102.08	27.7	I 459/II 260
10	四川内江市威远县	2019-09-08	5.4	104.79	29.55	I 193
11	甘肃张掖市甘州区	2019-09-16	5.0	100.35	38.6	III 258/IV 177
12	甘肃甘南州夏河县	2019-10-28	5.7	102.69	35.1	I 475/III 183/IV 265
13	四川内江市资中县	2019-12-18	5.2	104.82	29.59	I 189
14	四川成都市青白江区	2020-02-03	5.1	104.46	30.74	I 58
15	云南大理州漾濞县	2021-05-21	6.4	99.87	25.67	II 92
16	云南德宏州盈江县	2021-06-12	5.0	97.89	24.96	II 258
17	青海果洛州玛多县	2021-05-22	7.4	98.34	34.59	III 437/IV 453
18	四川泸州市泸县	2021-09-16	6.0	105.34	29.2	I 244
19	云南丽江市宁蒗县	2022-01-02	5.5	100.65	27.79	II 165
20	青海海北州门源县	2022-01-08	6.9	101.26	37.77	III 141/IV 61

注: I、II、III、IV 分别代表德阳井、剑川井、佐署井、门源井。

1.2 监测井概况

4 口监测井都分布于断裂带附近(图 1),其水位在地震前响应较为灵敏。其中德阳井位于川桂湘赣块体,地处龙泉山构造带东北端的白马关背斜西北侧,观测含水层为砂岩,为静水位观测,该井井深 3 072 m,基本不受降水、气压、抽水等因素干扰(四川省地震局,2004)。剑川井(滇 6 井)位于剑川盆地西缘、中甸—剑川断裂带南段,为静水位观测,井深 100 m,无固体潮响应现象(云南省地震局,2005)。佐署井位于日月山断裂和拉脊山断裂交会区域,其北侧为达坂山构造带,

西侧为日月山构造带,南侧为拉脊山构造带,该点处在拉脊山构造带的北缘,区内断裂较为发育,水井岩性为砂岩,为动水位观测,井深 107 m(青海省地震局,2005)。门源井地处祁连山褶皱构造带内,该构造带是青藏高原的重要活动构造带,该井为静水位观测,井深 105 m(汪发耀等,2020)。4 口监测井孔周边岩性如图 2 所示。

对 4 口井水位数据去趋势预处理后,其水位动态曲线变化和典型异常水位局部放大曲线如图 3 所示。从图可知,除剑川井外,其它 3 口井的水位动态曲线背景值均无年变;德阳井水位整体呈下降

① <http://www.ceic.ac.cn/history>.  
② <https://www.globalcmt.org>.

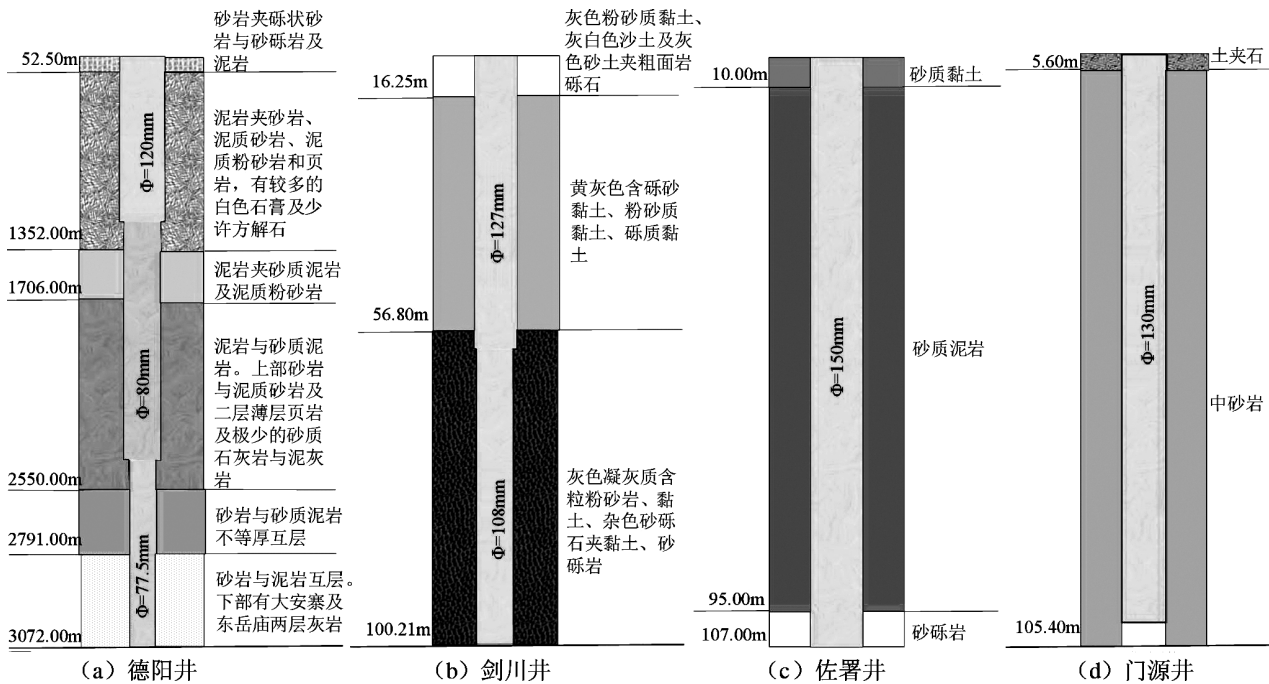


图 2 4 口监测井井孔柱状图

Fig. 2 Histogram of the 4 monitoring wells

趋势，剑川井有年变趋势，佐署井和门源井水位整体趋势变化不大。从图 3 中可见，地震前 4 口监测井水位在正常背景下都存在一定的异常变化，并且异常变化形态并不相同，异常时间多在 180 d 内。其中德阳井在 2021 年泸县 6.0 级地震（编号 18）前 180 d 左右出现明显的水位下降；剑川井在 2021 年漾濞 6.4 级地震（编号 15）前 150 d 左右水位出现了大幅度的上升；佐署井在 2021 年玛多 7.4 级地震（编号 17）和 2022 年门源 6.9 级地震（编号 20）前都发生水位异常下降；门源井在 2021 年玛多 7.4 级地震（编号 17）前 140 d 左右发生水位上升。对图 3 中水位存在的异常形态和异常发生时刻进行统计发现，德阳井在 10 年内有 5 次异常，异常形态为水位下降、变化后恢复、上

升、趋势下降；剑川井 5 年间有 2 次异常，异常形态为水位上升、下降速率变化，佐署井 5 年间 3 次异常，异常形态为水位变化后恢复和下降，门源井 4 年间出现 3 次异常，异常形态为下降后恢复、上升（表 2）。当水位存在表 2 所述异常形态时，在 180 d 内有较大可能会发生中强地震。2019 年 9—11 月门源井水位发生巨幅异常变化，钟骏等（2021）认为该异常为 2021 年 5 月玛多 7.4 级地震的前兆异常，但是由于该异常和玛多地震相隔时间过长，所以本文认定为虚报。从图 3 还可以看出，大部分水位异常较为明显，但有些趋势性异常被背景动态掩盖并不突出，难以直观看出，因此，需要对水位数据进行处理，以突出不易发现的异常和排除其他因素影响，从而方便准确判别地震引起的异常。

表 2 4 口监测井水位异常信息

Tab. 2 Abnormities of the water level of the 4 monitoring wells

监测井	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	日期	异常次数	异常形态	异常持续时间
德阳井	104.47	31.27	2012-01-01—2021-09-17	5 次	下降、变化后恢复、上升、趋势下降	3 次 90 d 内，2 次大于 90 d
剑川井	99.82	26.51	2017-01-01—2022-01-17	2 次	上升、下降速率变化	2 次大于 90 d
佐署井	101.71	36.54	2017-01-01—2022-01-17	3 次	变化后恢复、下降	1 次 90 d 内，2 次大于 90 d
门源井	101.36	37.22	2018-01-01—2022-01-17	3 次	下降后恢复、上升	1 次 90 d 内，2 次大于 90 d

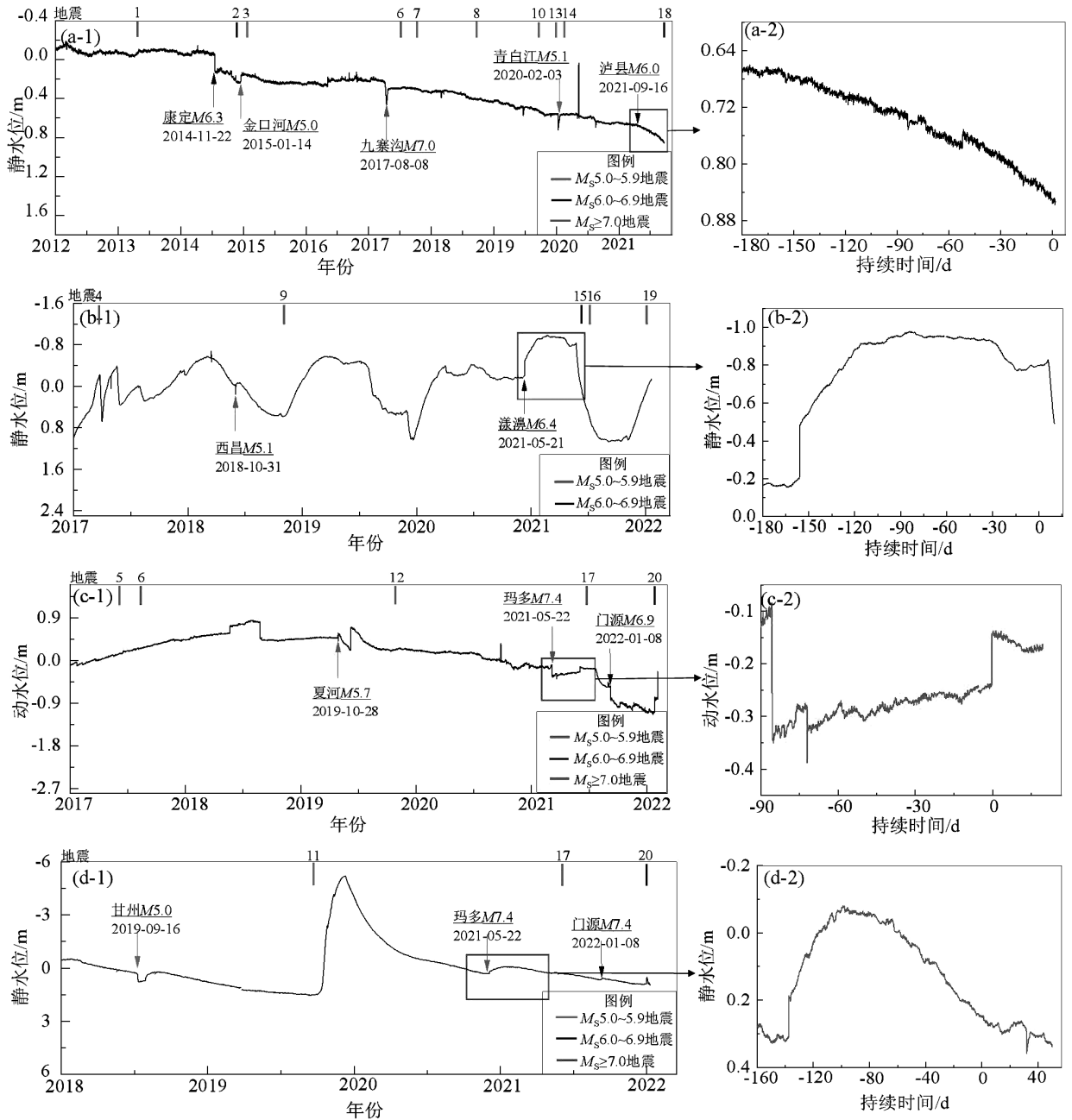


图3 德阳井 (a)、剑川井 (b)、佐署井 (c)、门源井 (d) 水位时间序列观测曲线  
(图中箭头所指为震前水位异常处) 及典型异常水位局部放大曲线

Fig. 3 Time-series curves of the water level in Deyang Well (a), Jianchuan Well (b),  
Zaoshu Well (c) and Menyuan Well (d) and the enlarged parts of the local cures

## 2 水位数据处理方法

由于水位数据存在降水、固体潮、气压等因素的干扰,为尽可能排除这些干扰而突出地震前兆异常,本文采用差分法和固体潮加卸载响应比法对水位数据进行处理,并与原始水位曲线进行

对比分析,水位数据处理使用 EIS2000 软件对应插件(蒋骏等,2000)。由于处理的数据结果显示并不是每次地震前都会出现前兆异常,因此运用 Molchan 图表法对监测井的预测效能进行整体定量化检验。

### 2.1 差分法

差分法是一种适用于排除观测数据中的趋势

性上升、下降和在短时期内水位有反复升降变化和长周期干扰的线性滤波,主要适用于中期和短临异常判别,中期和短期异常判别适合采用数据类型为日均值(孙其政等,1997)。一阶差分表达式为:

$$\Delta y_i = y_i - y_{i-1} \quad (1)$$

使用差分法对4口井的原始水位观测数据进行处理的结果取绝对值后如图4所示,图中红虚线为异常阈值,箭头所指为震前水位差分处理后预测期在180 d内异常。从图中可以看出,差分法处理后,德阳井共出现6次震前高值异常,其中有3次高值异常与原始水位异常对应地震是相同的;剑川井出现2次震前高值异常,佐署井、门源井出现3次震前异常高值,且与原始水位异常对应地震相同。通过分析发现,只有德阳井部分原始水位异常会被水位动态背景所掩盖,其它3口监测井原始水位异常都比较清晰,可直接观测。差分法处理结果中,有些原始水位数据存在的水位异常并没有出现,原始水位的异常是否为干扰,能否作为判别地震异常的依据还存在一定疑问。

## 2.2 水位固体潮加卸载响应比法

地震的加卸载响应比原理是将孕震区作为非线性系统,设法对其输入的某些信号进行连续观

测,该系统在临近失稳时会对输入信号作出各种响应(兰双双,迟宝明,2012)。故该方法可用来研究地球表面观测点周围系统由荷载稳态向失稳演化的过程,固体潮的变化可视为对孕震系统输入的一种周期不断变化的引潮力,不断对地球进行加载与卸载(万永芳,刘特培,2004)。可见,固体潮应力引起了岩石的固体潮应变,导致含水层孔隙压力发生变化,从而导致深层地下水位发生相应的变化,所以距震源区较近的承压井水位有可能反映震前岩体系统失稳的变化(黄春玲等,2013;马震,2020),进而捕捉到地震前兆异常信息。

地下水位固体潮观测对理论固体潮加卸载的响应可由类似于 Nakai 拟合模型获得(徐桂明等,2002):

$$Y(t_i) = AR(t_i) - \frac{dR}{dt}t_i + K_0 + K_1t_i + K_2t_i^2 \quad (i=1,2,\dots) \quad (2)$$

式中:  $Y(t)$  为地下水固体潮的实际观测值,即为系统输出;  $R(t_i)$  和  $(\frac{dR}{dt})t_i$  分别是  $t_i$  时刻的体应变固体潮理论值及时间的一阶微商,可通过固体潮理论值准确计算得到;  $A$  为拟合潮汐因子(即振幅因子);  $\Delta t$  为时间滞后,是潮汐响应项;  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  分别为拟合多项式的各阶系数,是非潮汐的响

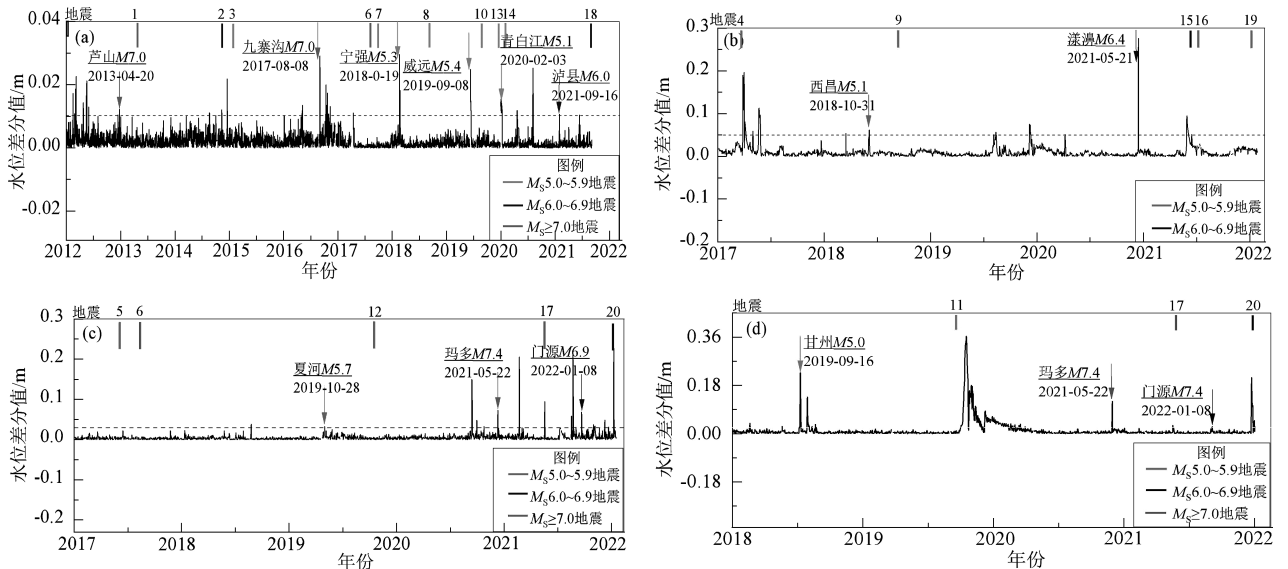


图4 德阳井(a)、剑川井(b)、佐署井(c)、门源井(d)水位数据的差分法处理结果

Fig. 4 Results from the difference method applied to the water level data of Deyang Well (a), Jianchuan Well (b), Zuoshu Well (c), and Menyuan Well (d)

应项。实际的计算分析中,可选取  $N = 24, 48, 60, \dots, 120, \dots$  (一天为一组),用最小二乘法求解式 (2),计算地下水位的加卸载比。

本文使用固体潮加卸载比处理 4 口井水位原始数据并取绝对值,如图 5 所示,图中红色虚线为异常阈值,箭头所指为震前水位加卸载比法处理后预测期在 180 d 内的异常。从图可见,固体潮加卸载比法处理后,德阳井共出现震前高值异常 6 次,可识别的异常有 3 次,与原始水位异常对应地震相同,其中 3 次异常与差分法处理结果对应地震相同;佐署井共出现 4 次震前高值异常,其中 3 次与原始水位异常对应地震相同;门源井共出现 3 次震前高值异常,与原始水位异常的对应地震相同,但预测期变短。由于剑川井无固体潮响应,本文

不对其进行处理。本文将 4 口监测井的原始水位异常与使用固体潮加卸载比法和差分法处理结果进行对比,发现震前水位高值异常所对应的地震相同情况较多。

根据 4 口监测井所属地震台的水位异常核实报告,德阳井水位观测系统分别于 2014 年 7 月和 2017 年 3 月发生过故障,导致数据缺失,所以德阳井原始水位在编号 2、3、6 地震(表 1)前出现的异常并不可取,而使用差分法和固体潮加卸载比法处理后的数据对于缺数异常都各自仅表现出一、两次异常,次数少,并且各不重合;剑川井水位在编号 15 地震前 1 个月内发生大幅度突降,经排查为周围井的抽水异常干扰,差分法处理后水位异常也并不明显;佐署井和门源井水位异常并未受到其周围环境的干扰。综上可得,两种方法对水位干扰异常有一定抑制作用,并且可以突出震前部分不明显异常,但从处理后的水位数据依旧能够观测到较为清晰的同震异常,说明这两种方法对于同震异常的排除并不理想。

### 3 预测效能检验与分析

#### 3.1 检验方法

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),该方法能够直观反映观测资料的整体预测效能和定量分析异常。该方法主要使用的变量有:漏报率  $v$ ,该变量可预测无震而实际发震的数量与研究时间段内所收集地震数量的比值;异常的时空占有率  $\tau$ ,该变量为不同阈值提取的地震异常的时空范围与研究总的时空范围的比值 (孙小龙等, 2018),水位资料仅需要考虑  $\tau$ 。

该方法主要通过不断降低数据的预测阈值,计算不同阈值下的  $v$  与  $\tau$ 。以  $\tau$  为横坐标,  $v$  为纵坐标得到的  $\tau-v$  曲线,预测效能为  $1-S$ ,  $S$  表示曲线与横纵坐标所围成的面积,即面积  $S$  越小预测效能越好;并且还需要参考概率增益  $G$  (Molchan, 1990; Zechar, Jordan, 2008):

$$G = \frac{1-v}{\tau} \quad (3)$$

$G$  值越大,预测效能越好;当  $G$  趋近于 1 时,表示

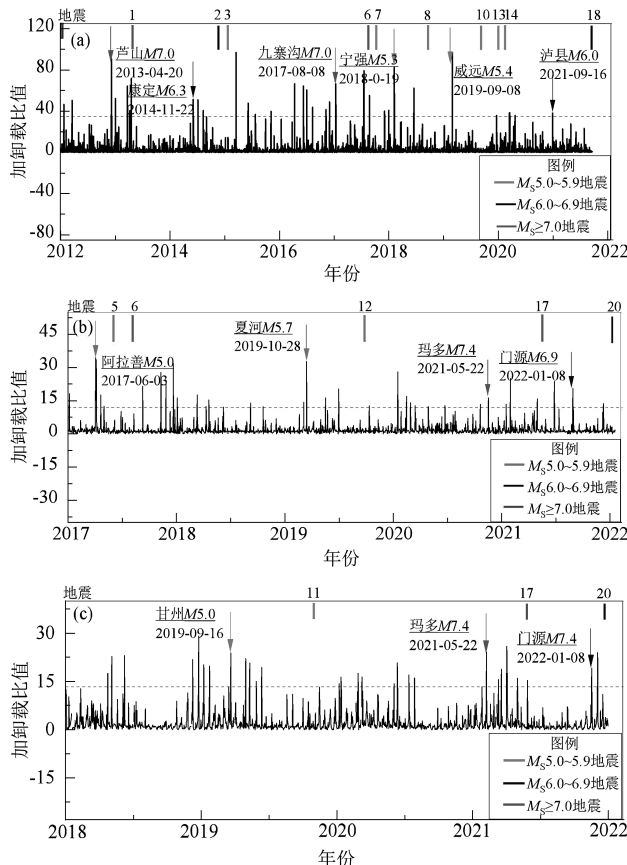


图 5 德阳井 (a)、佐署井 (b)、门源井 (c) 水位数据的固体潮加卸载比处理结果

Fig. 5 Results from the earth tide, load-unload response ratio method applied to the water level data of Deyang Well (a), Zuoshu Well (b), and Menyuan well (c)

预测方法无统计意义。检验过程中给定阈值后,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(30、60、90、180 d)之外时,称为漏报。

### 3.2 检验结果

由于影响水位形态变化的因素较多,不同的水位处理方法得到的异常结果也有所差异。所以本文使用差分法和固体潮加卸载比法对水位处理后,再利用 Molchan 图表法对水位预测期内相应的地震依次进行检验,并对不同处理方法的检验结果加以分析。最终得到4口监测井的预测效能(图6)以及对不同预测期和板块的优势预测定量结果。

从图6可以看出,从180 d到30 d监测井 $v-\tau$ 所围成的面积越来越小, $G$ 值也在增大,说明30 d

内预测效能最高,表明水位异常出现时异常点周围地区在30 d内发生地震概率较大;在30、60和90 d监测井 $v-\tau$ 所围成面积大小相差很小,且 $G$ 值都在3左右,说明在90 d内的短期预测效果较好;4口监测井在180 d内的预测效能都在0.75以上,概率增益 $G$ 值也接近2,说明井水位数据在差分法和固体潮加卸载比法处理后180 d内预报效能可信度也较高。通过 Molchan 法的计算结果可知,这两种处理数据的方法都比较适用于短临预测。德阳井、佐署井、门源井水位数据在两种方法处理后得到的检测效果基本一致,佐署井水位经固体潮加卸载比法处理后在180 d内预测效能更好(图6c),说明未对应地震的异常可靠性较高。

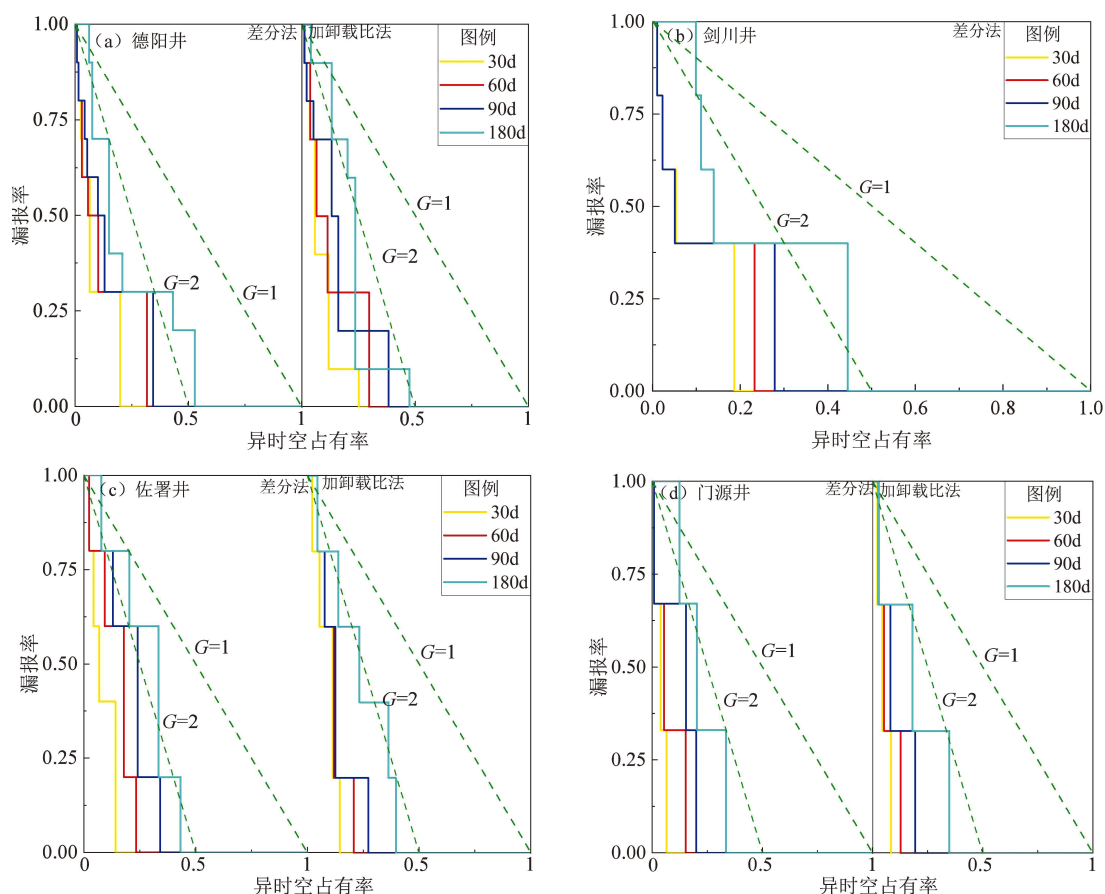


图6 4口监测井水位的 Molchan 图表法检验结果

Fig. 6 Results from the Molchan chart method applied to the water level in the 4 monitoring wells

由于4口监测井所处构造位置不同(图1),对地震发震地点可提供一定的指示意义,故对研究区不同块体发生的地震进行分选后,使用 Mol-

chan 图表法进行预测效能检验,选出优势预测块体。本文参考 Lai 等(2021)、孙小龙等(2018)研究,选取4口监测井周围500 km范围内 $M_s \geq$



5.0 地震作为地震样本。德阳井位于川桂湘赣断块西部,定义川桂湘赣断块为块体 A,其它为块体 B (图 7a);剑川井位于川滇断块和滇西南断块交界处,定义这两个断裂为块体 C,其它为块体 D (图 7b);佐署和门源井位于祁连山断块,井区周围构造发育,定义祁连山断块及其以北断块为块体 E,其它为块体 F (图 7c)。发生在块体 A 地震有 13

次,块体 B 有 13 次,2 个块体内的地震都分布在德阳井周围 500 km 范围内;发生在块体 C 的地震 6 次,且都发生于剑川井周围 300 km 范围内,发生在块体 D 的 6 次地震的震中距都大于 300 km;与佐署井与门源井同处块体 E 的地震分别为 4 次和 3 次,且祁连山断块上地震都分布在 250 km 范围内,块体 F 分别为 5 次和 3 次,震中距大于 250 km。

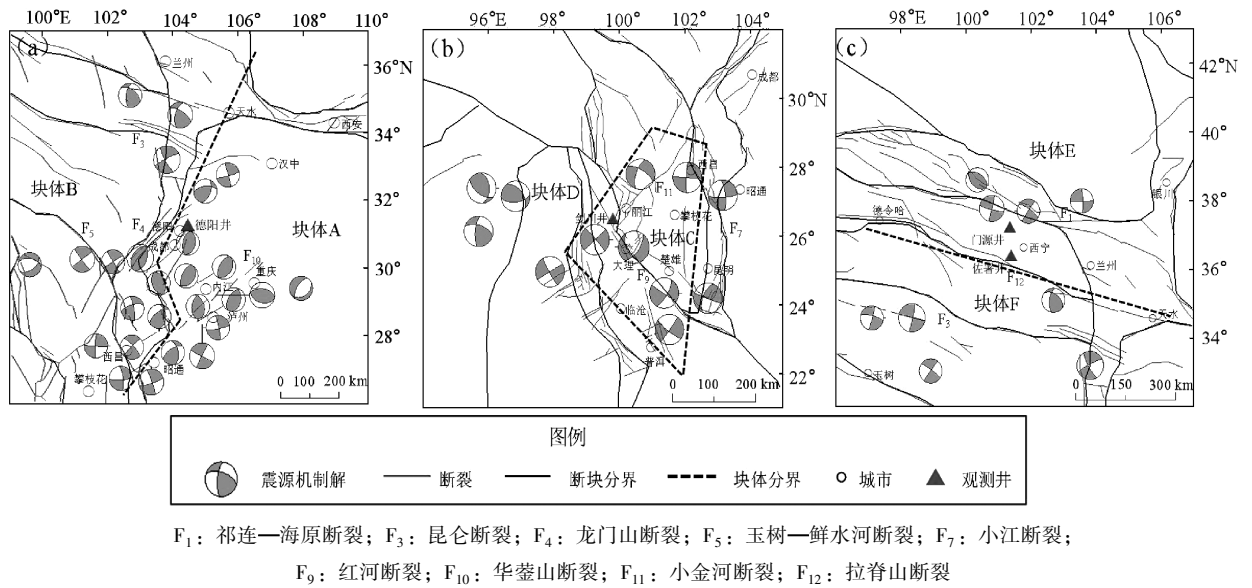


图 7 研究区不同块体地震的震源机制解分布

Fig. 7 Distribution of the earthquake focal mechanisms of the earthquakes in different blocks

本文按照不同断块上的地震进行分选,使用 Molchan 图表法检验 4 口监测井对不同断块的地震预报效能,如图 8 所示。从图中可以看出,德阳井与块体 A 的  $v-\tau$  面积大于块体 B 的  $v-\tau$  面积,即块体 B 预测效能高于块体 A;剑川井对于块体 C 的  $v-\tau$  面积大于块体 D,说明剑川井对于块体 C 上的地震具有一定的预测优势;门源井和佐署井块体 F 的  $v-\tau$  面积大于块体 E,说明两口监测井对块体 E 上的地震比对块体 F 上的地震更具预测优势。

从图 8 可以看出,4 口监测井在 90 d 内整体预测效能较好,概率增益值  $G$  都在 3 左右,在 180 d 内预测效能 0.75 左右,说明使用这两种方法处理水位数据都比较适合短临预报。

德阳井对块体 A 发生的地震没有明显预测优势,反而对块体 B 发生的地震有优势预测,其原因可能为德阳井位于川桂湘赣块体以西,更加靠近块

体分界处,且该井对其 500 km 范围内的  $M_s \geq 5.0$  地震在 90 d 内都具有较好预测效能,如鲁甸  $M_s 6.5$  地震的原始和固体潮加卸载比处理后的水位数据都出现异常,震中距达 476 km;2016 年的甘孜理塘  $M_s 5.1$  地震与 2021 年巧家  $M_s 5.0$  地震原始和两种方法处理后的水位数据中都存在异常,震中距分别为 482 和 472 km。对于剑川井,由于块体 C 构造较为发育,并且发生于块体 C 内的地震震中距更小,所以剑川井对块体 C 内地震预测效能优于块体外地震,当水位出现异常时,井区周围 300 km 内出现  $M_s 5.0$  地震概率较大。佐署井与门源井都位于祁连山块体。综上,门源井对于其周围 250 km 内  $M_s \geq 5.0$  地震有较好的预测效能,其周围 500 km 内的  $M_s \geq 7.0$  地震也具有一定预测效能;佐署井对其 500 km 内的  $M_s \geq 5.0$  地震也具有一定预测效能,但是主要集中在佐署井西南部,对于发生在该井东南部的九寨沟等地震未出现异常。

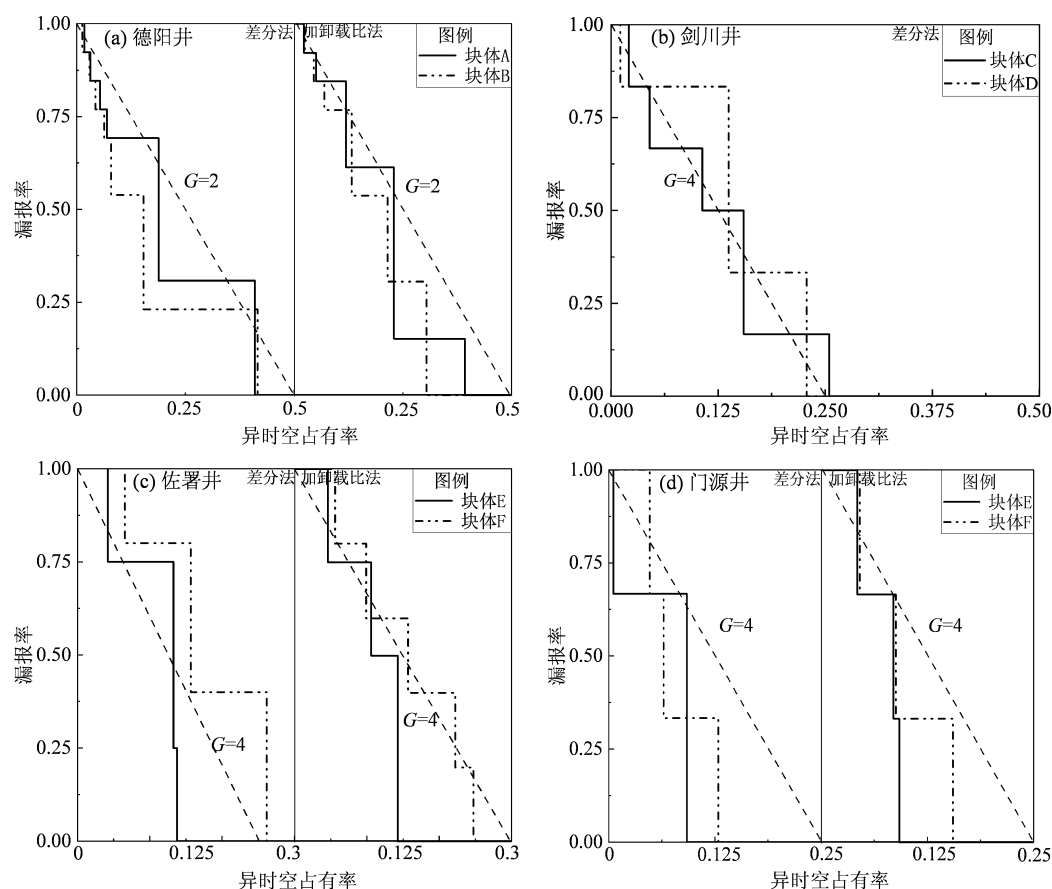


图8 监测井不同块体 Molchan 图表法检验结果

Fig. 8 Results from the Molchan chart method applied to the monitoring wells in different blocks

## 4 结论

本文通过对四川德阳井、云南剑川井、青海佐署井、青海门源井井水位在地震前出现的异常形态进行差分法和加卸载比法处理分析,发现4口监测井对周围地震都有较强的映震能力,最后利用 Molchan 图表法对4口监测井进行定量检验,得出以下结论:

德阳井和门源井水位数据经固体潮加卸载比法和差分法处理后预测效能结果相差很小;佐署井水位数据经固体潮加卸载比法处理后预测效能更具优势。使用 Molchan 图表法对两种方法处理后的水位数据的检测效能结果相似,其中固体潮加卸载比对地震异常指示性更强,其物理意义也更为明显。但是剑川井没有固体潮现象,则不能做此分析,因此固体潮加卸载比法对于处理无固体潮现象的监测井时存在一定的局限性。

4口监测井的预测效能均较好,预测时间在90 d内概率增益值 $G$ 都在3左右,在180 d的概率增益 $G$ 在2左右,预测效能较好。以上说明4口监测井水位异常180 d内与周边地震活动存在较强的关联性,其水位数据在经过差分法处理和固体潮加卸载比法处理后的优势预测时间为180 d内。

德阳井对其周围500 km范围内 $M_s \geq 5.0$ 地震预测效能较好,但对其西部断块的地震预测效能更好;剑川井对其周围300 km范围的 $M_s \geq 5.0$ 地震的预测效能较好,对滇西断块和川滇断块地震预测效能更优;门源井和佐署井对于井区300 km范围内 $M_s \geq 5.0$ 地震预测效能较好,对祁连山及以北断块地震预测效能更优。这4口监测井优势预测范围与前人研究结果也较符合,说明监测井水位的地震预测效能与监测井周围块体构造与震中距具有一定联系,并且块体内构造发育,预测效能更好。

## 参考文献:

- 车用太,鱼金子. 2006. 地震地下流体学[M]. 北京:气象出版社, 365-367, 300-302.
- Che Y T, Yu J Z. 2006. Underground fluids and earthquake[M]. Beijing: China Meteorological Press, 365-367, 300-302. (in Chinese)
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学, 32(12):1020-1030.
- Deng Q D, Zhang P Z, Rang Y K, *et al.* 2002. Basic characteristics of active tectonics in China[J]. Science China: Earth Sciences, 32(12): 1020-1030. (in Chinese)
- 付虹,刘自凤,胡小静,等. 2021. 2021 年云南漾濞  $M_s 6.4$  地震异常跟踪分析[J]. 地震研究, 44(3):301-308.
- Fu H, Liu Z F, Hu X J, *et al.* 2021. Tracking analysis of seismic anomalies of the 2021 Yangbi, Yunnan  $M_s 6.4$  Earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 44(3):301-308. (in Chinese)
- 黄春玲,程冬焱,杨静,等. 2013. 山西数字地下水位固体潮加卸载响应比与中强地震关系分析[J]. 山西地震, (3):11-17.
- Huang C L, Cheng D Y, Yang J, *et al.* 2013. Relationship between earth tidal LURR of digital groundwater observation in Shanxi and medium-strong earthquakes[J]. Earthquake Research in ShanXi, (3):11-17. (in Chinese)
- 蒋骏,李胜乐,张雁滨,等. 2000. EIS2000 地震前兆信息处理与软件系统[M]. 北京:地震出版社, 169-173.
- Jiang J, Li S L, Zhang Y B, *et al.* 200. EIS2000 earthquake precursor information processing and software system[M]. Beijing: Seismological Press, 169-173. (in Chinese)
- 兰双双,迟宝明. 2011. 汶川地震前地下水位固体潮加卸载响应比异常分析[J]. 地震研究, 34(3):317-321.
- Lan S S, Chi B M. 2011. Analysis on earth tidal loading/unloading response ratio of groundwater-level before Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 34(3):317-321. (in Chinese)
- 马玉川,晏锐,胡小静. 2021. 云南洱源井水温在 2021 年漾濞  $M_s 6.4$  地震前的异常特征[J]. 地震学报, 43(5):674-677.
- Ma Y C, Yan R, Hu X J. 2021. The anomaly characteristics of water temperature in the Eryuan well before the 2021 Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake in Yunnan, China[J]. Acta Seismologica Sinica, 43(5): 674-677. (in Chinese)
- 马震. 2020. 地震前地下水位 LURR 识别方法与应用[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所, 23-26.
- Ma Z. 2020. Identification method and application of LURR before earthquakes via groundwater level[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 23-26. (in Chinese)
- 青海省地震局. 2005. 青海省地震监测志[M]. 北京:地震出版社, 146-147.
- Qinghai Provincial Seismological Bureau. 2005. Qinghai Province earthquake monitoring records[M]. Beijing: Seismological press, 146-147. (in Chinese)
- 四川省地震局. 2004. 四川省地震监测志[M]. 成都:成都地图出版社, 111-112.
- Sichuan Provincial Seismological Bureau. 2004. Sichuan Province earthquake monitoring records[M]. Chengdu: Chengdu Map Publishing House, 111-112. (in Chinese)
- 孙丽娜,齐玉妍,温超,等. 2012. 中长期地震预测中的 PI 算法改进研究及应用[J]. 地震学报, 30(1):1-9.
- Sun L N, Qi Y Y, Wen C, *et al.* 2012. Application of improved PI Algorithm in Medium to Long-term Earthquake Prediction[J]. Acta Seismologica Sinica, 30(1):1-9. (in Chinese)
- 孙其政,张国民,李宣璐,等. 1997. 地下流体地震预报方法[M]. 北京:地震出版社. 355-356.
- Sun Q Zh, Zh G M, Li X H, *et al.* 1997. Earthquake prediction methods for underground fluids[M]. Beijing: Seismological Press. 355-356. (in Chinese)
- 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[J]. 地震学报, 40(2):185-194.
- Sun X L, Xiang Y, Yang P T. 2018. Earthquake prediction efficiency inspection of water level in Huize well and its anomaly mechanism[J]. Acta Seismologica Sinica, 40(2):185-194. (in Chinese)
- 王永芳,刘特培. 2004. 地下水位固体潮加卸载响应比分析及预测意义[J]. 华南地震, 24(1):28-34.
- Wan Y F, Liu T P. 2004. Analysis on the results of loading/unloading response ratio of groundwater level earth tide and its significance in earthquake prediction[J]. South China Journal of Seismology, 24(1):28-34. (in Chinese)
- 汪发耀,杨积礼,杨开来,等. 2020. 门源地震台静水位和形变异常核实实例与思考[J]. 高原地震, 32(3):50-55.
- Wang F Y, Yang J L, Yang K L, *et al.* 2020. Examples of water level and deformation abnormal verification in Menyuan seismic station and its reflections[J]. Plateau Earthquake Research, 32(3):50-55. (in Chinese)
- 王博,钟骏,王熠熙,等. 2018. 南北地震带北段流体资料地震预测效能检验[J]. 地震, 38(1):147-156.
- Wang B, Zhong J, Wang Y X, *et al.* 2018. Testing the forecast efficiency of underground fluid observation in the North Segment of North-South Seismic Belt[J]. Earthquake, 38(1):147-156. (in Chinese)
- 王永刚,李滔. 2021. 玛多 7.4 级地震前后青海地下流体数据响应研究[J]. 高原地震, 33(2):1-11.
- Wang Y G, Li T. 2021. Study on the response of underground fluid in Qinghai province to Maduo  $M_s 7.4$  Earthquake[J]. Plateau Earthquake Research, 33(2):1-11. (in Chinese)
- 徐桂明,冯志生,唐振芳. 2002. 江苏地区地下水固体潮加卸载响应比的时空演变特征及预测意义[J]. 地震学刊, 22(4):26-35.
- Xu G M, Feng Z S, Tang Z F. 2002. Characteristics of the temporal-spatial evolution of the loading/unloading response ratio of the ground water level to earth tides in Jiangsu region and its implications to earth-

- quake prediction[J]. Journal of Seismology, 22(4): 26–35. (in Chinese)
- 晏锐. 2009. 地震前兆观测资料分析[R]//中国地震局监测预报司. 汶川 8.0 级地震科学研究报告. 北京:地震出版社, 170–193.
- Yan R. 2009. Analysis of earthquake precursor monitoring data[R]//Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration. Research Report on the Wenchuan M8.0 Earthquake. Beijing: Seismological Press, 170–193. (in Chinese)
- 晏锐, 田雷, 王广才, 等. 2018. 2008 年汶川 8.0 级地震前地下流体异常回顾与统计特征分析[J]. 地球物理学报, 61(5): 1907–1921.
- Yan R, Tian L, Wang G C, *et al.* 2018. Review and statistically characteristic analysis of underground fluid anomalies prior to the 2008 Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(5): 1907–1921. (in Chinese)
- 云南省地震局. 2005. 云南省地震监测志[M]. 北京:地震出版社, 625–627.
- Yunnan Provincial Seismological Bureau. 2005. Yunnan Province earthquake monitoring records[M]. Beijing: Seismological Press; 625–627. (in Chinese)
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学, 33(S1): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, *et al.* 2003. Strong earthquake activity and active blocks in Chinese Mainland[J]. Science China: Earth Sciences, 33(S1): 12–20. (in Chinese)
- 钟骏, 王博, 周志华, 等. 2021. 2021 年青海玛多  $M_s 7.4$  地震前地下流体异常特征分析[J]. 中国地震, 37(3): 574–585.
- Zhong J, Wang B, Zhou Z H, *et al.* 2021 Analysis on anomaly characteristics of underground fluid before 2021 Maduo  $M_s 7.4$  Earthquake in Qinghai Province[J]. Earthquake Research in China, 37(3): 574–585. (in Chinese)
- Lai G J, Jiang C S, Wang W L, *et al.* 2021. Correlation between the water temperature and water level data at the Lijiang well in Yunnan, China, and its implication for local earthquake prediction[J]. Eur Phys J Special Topics, 230: 275–285.
- Molchan G M. 1990. Strategies in strong earthquake prediction[J]. Phys Earth Planet Inter, 61(1/2): 84–98.
- Zechar J D, Jordan T H. 2008. Testing alarm-based earthquake predictions[J]. Geophys J Inter, 172(2): 715–724.

## Effectiveness Test of Seismic Prediction of Water Level in Fluid Monitoring Well Based on the Molchan Diagram Method

LU Minggui<sup>1</sup>, GU Hongbiao<sup>1,2</sup>, GONG Haobo<sup>3</sup>, ZHANG Wenxu<sup>1</sup>, CHI Baoming<sup>1</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

(2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China)

(3. Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China)

### Abstract

In order to study the prediction efficiency of the water level in the observational wells, and to explore the relationship between the water-level anomaly and the earthquake, we process the observed water-level data of Deyang Well, Jianchuan Well, Zuoshu Well and Menyuan Well by the difference method and the tidal load-unloading ratio method. Then, using the Molchan chart, we test the prediction efficiency of the 4 monitoring wells for the prediction of the occurrence-time, and the magnitude of the earthquakes in different blocks. The results show that the water level in the 4 monitoring Wells are efficient for the prediction of earthquakes which may occur within 180 days, and effect for the prediction of the moderate- and strong-earthquakes within a certain range. The prediction efficiency is affected by the distribution of tectonic structures; in the structure-developed areas, the water-level anomaly is efficient for the earthquake prediction.

**Keywords:** well-water level; water-level anomaly discrimination; the Molchan chart; prediction efficiency