

吴明,杨晓东,刘洁.石泉井水位异常与九寨沟 7.0 级地震关联性探讨[J].地震工程学报,2023,45(2):441-446.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210809002
WU Ming, YANG Xiaodong, LIU Jie. Discussion on the correlation between the water-level anomaly of the Shiquan well and the Jiuzhaigou M7.0 earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45 (2): 441-446. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210809002

石泉井水位异常与九寨沟 7.0 级地震关联性探讨

吴 明, 杨晓东, 刘 洁

(陕西省地震局, 陕西 西安 710000)

摘要: 选取 2014—2020 年共计 7 年的石泉流体井水位整点值数据, 结合小波分析方法及区域构造分析, 研究石泉井水位长期异常变化的可能原因。结果表明, 石泉水位异常活跃主要发生在 2017 年 8 月 8 日九寨沟地震之后, 利用小波分析提取高频异常信息效果较好, 九寨沟 7.0 级地震后的区域断裂活动加强或九寨沟地震造成的断裂周边含水层渗透性发生变化可能为导致石泉井水位长期异常的直接原因, 未来月河断裂石泉段附近断层活动性值得进一步关注。

关键词: 水位; 九寨沟地震; 南北地震带; 石泉; 月河断裂

中图分类号: P319

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)02-0441-06

DOI:10.20000/j.1000-0844.20210809002

Discussion on the correlation between the water-level anomaly of the Shiquan well and the Jiuzhaigou M7.0 earthquake

WU Ming, YANG Xiaodong, LIU Jie

(Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, we selected the integral point value data of the Shiquan fluid well water level in 7 years from 2014 to 2020 and combined them with the wavelet analysis method and regional structure analysis to study the possible reasons for the long-term abnormal change in the Shiquan well water level. The results show that the water-level anomalies of the Shiquan well mainly occurred after the Jiuzhaigou M7.0 earthquake on August 8, 2017. The wavelet analysis method is effective in extracting high-frequency abnormal information. The strengthening of regional fault activity after the Jiuzhaigou M7.0 earthquake or the change in aquifer permeability around the fault caused by the earthquake may be the direct cause of the long-term abnormal water level in the Shiquan well. The fault activity near the Shiquan section of the Yuehe fault deserves further attention.

Keywords: water level; Jiuzhaigou earthquake; the north-south seismic belt; Shiquan; Yuehe fault

0 引言

地震是地壳构造运动能量释放的一种外在表现

形势,地下水作为存在于地壳的常见介质,是间接观测地震活动的重要前兆手段。但地下水位异常往往

收稿日期:2021-08-09

基金项目:中国地震局地震工程与工程震动重点实验室专项;宝鸡地震灾害风险调查和隐患排查数据库建设(2019EEEBVL0101)

第一作者简介:吴 明(1991—),男,硕士,助理工程师,主要从事活动构造等方面的工作。E-mail:3626682931@qq.com。

因素各异,甚至是由多因素综合所造成。降雨、周边水库蓄放水、地下水开采、观测仪器异常、构造运动等属常见的水位异常的干扰因素,如何排除次要干扰因素找寻主要因素将影响对异常活动的正确认识。

石泉流体台静水位从观测以来长期存在水位异常(图 1),主要表现为短时间快速阶升、阶降或趋势转折,持续时间通常为数小时至数十小时,变幅从厘米级到米级,异常无固定发生时间。针对石泉地下井水位的异常,陕西省地震局曾多次组织专门人员前往现场进行异常调查^[1],从仪器状态、地下水开采、井孔漏水、同震效应、河流水位变化等方面作异常分析。分析的结论为:在观测系统方面,通过比测、井下电视等多种手段,对观测系统进行了详细调查,结果显示石泉水位观测仪器工作正常,井管无破裂、错位等情况;对周围开采、河流水位、水库库容及储放水、井水物质来源分析等与石泉水位阶变进行对比分析认为,降雨、池河水位流量、石泉水库储放水等对水位变化有一定的影响;2020 年 6 月 21 日后石泉水位升至泄流口异常与池河水位及降雨增大有较大关系。

前人研究已基本排除仪器工作异常、井管破裂、位错等干扰可能,现有研究显示降雨、水库蓄放水等因素对石泉井水位异常可能存在一定影响,但较为有限。本文从数据分析的角度,结合小波分析方法,探讨石泉井水位长期异常与构造活动的关联性,以期今后类似井水位异常分析提供参考。

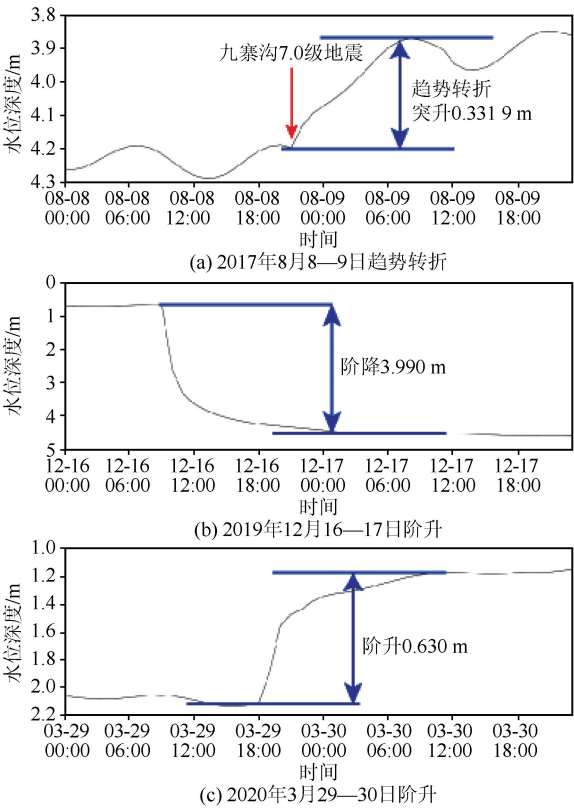


图 1 石泉流体井水位典型异常

Fig.1 Typical water level anomaly of Shiquan well

1 观测井概况及周边断裂

石泉流体台(图 2)位于陕西省石泉县池河镇明星村(32.98°N,108.32°E),处于南秦岭构造带内,构

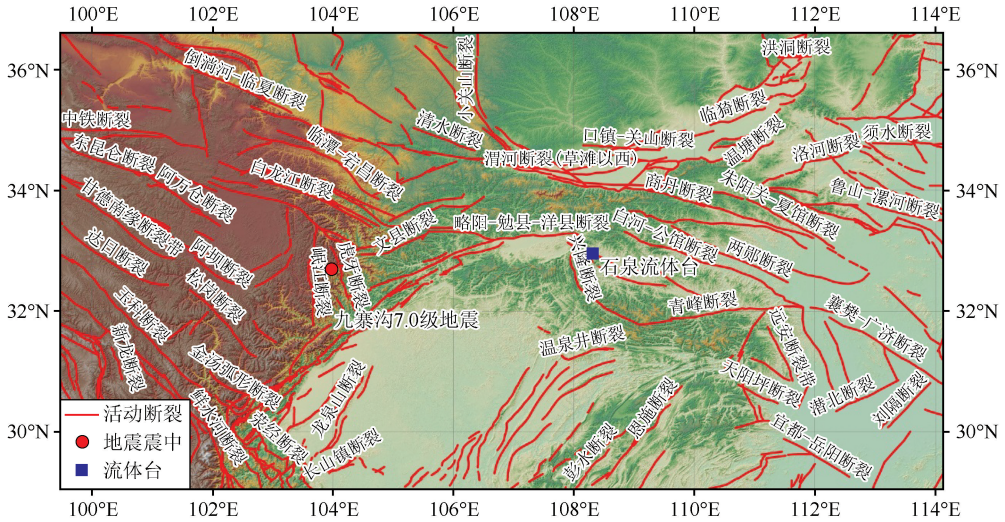


图 2 石泉流体井与九寨沟 7.0 级地震位置图

Fig 2 Location of Shiquan well and Jiuzhaigou M_s 7.0 earthquake

造单元属于南秦岭南部—北大巴山北部逆冲推覆系,初露地层除古穹隆基地层外,主要是古生代变质

岩,绢云千枚岩发育,志留系出露比较广泛^[2]。石泉井于 2010 年 11 月开凿完成,成井深度 300 m,钻孔

直径 350 mm,含水层为志留系千枚岩裂隙承压水,大气降水补给是含水层的主要补给源。井孔内地表至地下 191.11 m 的井管为直径 311 mm 的钢管,地下 191.11~300 m 为直径 219 mm 的滤水管。该井从 2013 年 4 月开始正式观测,观测设备包括 ZKGD3000-N 型水位仪、SZW-1A 型水温仪和 WYY-1 型气象三要素仪。

石泉周边主要活动断裂包括月河断裂、三花石—汉王城—双河口断裂、兴隆断裂等,石泉井所在池河流域主要受月河断裂控制。月河断裂西北起石泉北(图 2),向东南经汉阴,直到安康南,长约 140 km,走向 NW,倾向 NE,倾角 70°~80°,为正断层。月河断裂控制着月河水系的发育与安康、汉阴盆地的新生代沉积,在长枪岭一带断错了中更新统及其以前地层,最新活动时代为晚更新世。其北侧发育了多条次级叠瓦状正断层,并控制池河,为一区域性右旋正断层^[3]。月河断裂被认为是晚更新世的断裂带,在全新世活动性较弱,月河断裂作为南秦岭加里东褶皱带和中秦岭印支褶皱带的分界,断裂南北两侧寒武纪—志留系在岩相和厚度上都有较大的差异,由此推断月河断裂古生代初就已存在,沿断裂发育的大量糜棱岩、断层角砾岩及指示北盘向南西逆冲的小褶皱,都证明断层形成时具有压扭的性质。2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震发生在青藏高原巴颜喀拉地块北界东端的塔藏断裂与岷江断裂、虎牙断裂交汇处,发震断层为虎牙断裂北段,具有左旋走滑性质^[4-5]。李杰等^[6]曾统计我国大陆近 40 年中强以上地震震前跨断层形变异常范围,结果显示,7 级地震震前异常场地距震中距基本在 450 km 以内,九寨沟 7.0 级地震震中距离石泉流体台直线距离约 400 km,在九寨沟地震异常场地覆盖范围内。

针对石泉流体台静水位数据长期存在的异常情况,使用小波分析研究石泉水位 2014—2020 年的数据,并试图从断裂活动的角度对水位的异常现象进行分析和解释,探讨地震等构造运动与水位异常的关联性。

2 数据分析

石泉流体井水位仪从 2013 年 4 月 1 日起正式记录数据,本研究选取了从 2014 年 1 月 1 日到 2020 年 12 月 31 日间的全部水位观测数据。对全部观测到的异常进行统计,从统计结果上来看,从 2014 年—2020 年间石泉水位仪记录到水位阶升阶降现象多达 174 次,其中阶变幅度超过 0.49 m 的异常

达 29 次(表 1)。最大的两次阶变分别是 2018 年 12 月 23 日 2.87 m 阶降与 2019 年 12 月 16 日—17 日 3.99 m 阶降,持续时间分别为 16 h 和 38.5 h。

表 1 石泉井水位阶变统计表

Table 1 Statistics of water-level step change of Shiquan well					
序号	年份	开始时间	结束时间	变幅/m	异常特征
1	2014	3 月 17 日	3 月 18 日	0.517	阶降
2	2014	5 月 29 日	5 月 30 日	0.580	阶降
3	2017	8 月 16 日	8 月 16 日	0.876	阶降
4	2017	9 月 5 日	9 月 6 日	0.490	阶降
5	2017	11 月 10 日	11 月 11 日	0.699	阶降
6	2017	12 月 20 日	12 月 21 日	0.567	阶降
7	2018	4 月 12 日	4 月 13 日	1.433	阶降
8	2018	7 月 22 日	7 月 23 日	2.064	阶降
9	2018	9 月 17 日	9 月 18 日	1.149	阶降
10	2018	10 月 23 日	10 月 23 日	1.600	阶降
11	2018	12 月 23 日	12 月 23 日	2.870	阶降
12	2019	2 月 16 日	2 月 16 日	0.500	阶降
13	2019	3 月 16 日	3 月 16 日	0.500	阶降
14	2019	5 月 29 日	5 月 29 日	0.570	阶降
15	2019	6 月 18 日	6 月 18 日	0.520	阶降
16	2019	6 月 30 日	6 月 30 日	1.800	阶降
17	2019	10 月 2 日	10 月 2 日	2.100	阶降
18	2019	10 月 22 日	10 月 22 日	0.560	阶降
19	2019	11 月 11 日	11 月 11 日	0.800	阶降
20	2019	12 月 16 日	12 月 17 日	3.990	阶降
21	2020	2 月 16 日	2 月 16 日	0.600	阶降
22	2020	2 月 29 日	3 月 1 日	0.780	阶降
23	2020	3 月 19 日	3 月 19 日	1.200	阶降
24	2020	3 月 29 日	3 月 29 日	0.630	阶升
25	2020	4 月 2 日	4 月 2 日	0.570	阶降
26	2020	7 月 20 日	7 月 20 日	1.080	阶降
27	2020	7 月 31 日	7 月 31 日	0.620	阶降
28	2020	8 月 1 日	8 月 1 日	0.590	阶降
29	2020	8 月 29 日	8 月 29 日	0.580	阶升

从阶升与阶降的异常次数对比,可以发现阶降(27 次)的次数远高于阶升(2 次)。自 2017 年起,石泉水位大幅异常变换呈现逐年增多趋势。从长趋势分析来看,可以将 2013 年至 2020 年的数据以 2017 年 8 月 8 日为界限划分为两个阶段,2017 年 8 月 8 日之前的称为平稳阶段,之后称为波动阶段。两个阶段特征差异非常明显,平稳阶段每年阶变次数极少,阶变幅度小,且阶变多发生在雨季,与降雨规律较吻合。而在波动阶段,阶变的频次急剧增加,密集的小幅度波动伴随着间断的大幅波动,阶变与降雨相关性减弱,在冬季阶变频次也未减小,且 2018、2019 两年最大阶降均发生于 12 月。纵观整体数据,从 2017 年波动阶段开始,虽然有阶降也有阶升,且阶降频率更高,但是水位总体趋势始终维持上升趋势,2017 年上半年水位总体在井下 5 m 处,最近三年水位则持续上升,在 2020 年 6 月 21 日—7 月

20 日以及 9 月 9 日—10 月 9 日两次升至井口处, 9—11 月水位甚至涨至井口。

3 小波分析

小波分析在时域和频域具有表征局部信号特征的能力, 能够将多频合成的信号不同频率成分分开。石泉水位异常信号持续时间较短, 多为数小时, 属高频信号, 尝试小波变换分析。

有限时间序列的小波变换公式为:

$$W_{\varphi}f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为原始信号; $W_{\varphi}f(a, b)$ 为小波变换后的各频段分量; a 为尺度因子, 控制小波函数的伸缩, 对应频率; b 为时间平移因子, 控制小波函数的平移; $\frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$ 为小波母函数。小波分解的小

波基种类很多, 小波基的选取是否合适将影响结果的准确性。刘建明等^[7]基于定点小波基函数优劣的标准, 并考虑了消失矩阶数, 最终选定 db4 小波基函数进行分析, 由于 db4 小波能在保留固体潮信息的基础上较好的反映异常信号, 因此本文也采用 Daubecheies(dbN) 小波系中的 db4 小波基函数对原始石泉流体井 2014—2020 年的静水位整点值数据进行小波变换处理, 采用 db4 小波 9 阶对数据进行计算, 1~2 阶主要为高频成分, 3~4 阶主要为固体潮汐信息, 5 阶及以上为去除潮汐成分的非潮汐信息。石泉流体井水位异常通常持续时间多为数小时, 属高频信号, 从 1 阶及 2 阶小波分解所计算结果来看(图 4), 高频成分明显从 2017 年 8 月 8 日九寨沟地震后开始持续出现, 高频信号无明显周期性。与前面趋势分析的结果相吻合, 小波分析提取的高频干扰信号也可以根据九寨沟地震的时间节点划分为平稳阶段和波动阶段两阶段(图 4), 3 阶及以上分解虽也有一定阶段分选性, 但由于固体潮汐信号及低频干扰较多, 呼应性不及一阶、二阶。

4 异常原因分析

根据前面的分析可以得知石泉水位异常的整体爆发起始点是 2017 年 8 月 8 日 21 点 22 分, 恰好是 2017 年 8 月 8 日 21 点 19 分九寨沟 7.0 级地震之后。以 2017 年 8 月 8 日为特征分水岭, 九寨沟地震之前的石泉井水位虽偶有突变, 但频次较低, 总体稳定, 且主要集中在雨水较多的 6—9 月之间。九寨沟

地震之后, 石泉水位表现出新特点, 包括突变频次极高, 存在大幅度变化(超过一米甚至数米的突变), 突变全年发生, 与降雨无明显关联。前人研究已排除井管断裂、仪器故障干扰的可能, 降雨、周边河流、水库水位等因素同水位异常的关联性亦较弱^[1], 因而该异常与构造活动是否相关是值得探讨的问题。尤其是九寨沟 7.0 级地震, 可能是触发水位异常进入活跃的主要因素。石泉流体井在 100~200 m 深度处穿过月河断裂, 作为一口跨断裂的流体井, 石泉流体井较大的井深(300 m)、较窄的井口直径(350 mm)以及较厚的含水层厚度, 使其具有较好的承压性, 井水位对地震波、固体潮汐等有较好的响应能力^[8]。2017 年 8 月 8 日 21:19:46 为九寨沟地震发震时刻, 石泉井水位的水位值从 2017 年 8 月 8 日 21:20 发生升降转折由降转升, 水位由 21:20 的 4.200 4 m 升至 8 月 9 日 07:50 的 3.868 5 m, 变化幅度为 0.331 9 m, 石泉井距离九寨沟地震震中约 420 km; 2021 年 5 月 22 日 02:04 青海果洛发生 M7.4 地震, 石泉水位 5 月 22 日 02:06—04:00 快速抬升 0.667 9 m。孙小龙等认为井水位对地震波和其他地壳与地下水之间的机械耦合非常敏感, 可以被用作地震计或者应变计^[9], 石泉井静水位记录到的长期异常或可以部分反映附近断层的活动情况。

袁道阳等^[10]在总结了中国大陆 7 级以上地震迁移循环特征和机理的基础上, 重点对青藏块区 7 级以上地震的时空迁移特征、机理及未来发展趋势进行了综合分析后认为: 中国大陆区域强震、大地震活动存在时间上的丛集性和空间上的分区性, 过去的 100 年存在由西向东、由南向北迁移循环的 4 个大地震丛集区域, 每个区域的丛集时间约 20 年, 已经持续 20 年的昆仑—汶川地震系列可能已经趋于结束, 未来 20 年中国大陆 7 级大地震的主体活动区可能迁移到青藏地块区周缘的边界构造带上, 重点是东部边界构造带。自九寨沟地震之后, 位于巴彦喀拉块体东侧的断裂带如月河断裂可能进入相对活跃期, 其活跃或与近年来印度板块与欧亚板块碰撞的强构造运动持续的大背景相关。另外, 由于石泉流体井附近极易破碎的变质岩, 娟云千枚岩发育, 同时河流水资源富集, 2017 年九寨沟地震可能同时诱导月河断裂周边形成水力裂缝, 而水力裂缝通过扩展发育, 其裂缝尖端的张应力会导致断层与裂缝交叉附近出现应力和剪切应力集中, 导致断层失稳^[11], 从而进一步促进断层的活跃。为此, 九寨沟

地震之后石泉水位异常变化原因可从两个角度分析讨论:一是九寨沟地震有可能触发了月河断裂的活跃,进而造成石泉井水位长期异常。从 2013 年以来的多次 6~7 级地震来看,地震未继续集中在沿巴彦喀拉块体分布,而是多发生在青藏地区周缘的边界活动构造带上。2021 年上半年的地震活动也表明,中国大陆近期的地震活动受印度板块活跃影响,在

板块边界接连发生了云南漾濞县 $M6.4$ 、青海果洛 $M7.4$ 地震,进一步印证了未来 7 级以上大地震主体活动区可能开始迁移,需重点关注青藏地块区东边界的南北地震构造带。二是九寨沟地震诱导月河断裂周边形成水力裂缝,造成断裂周边含水层渗透性发生变化乃至断层失稳,综合降雨、水库蓄放水等因素引发后续水位异常。

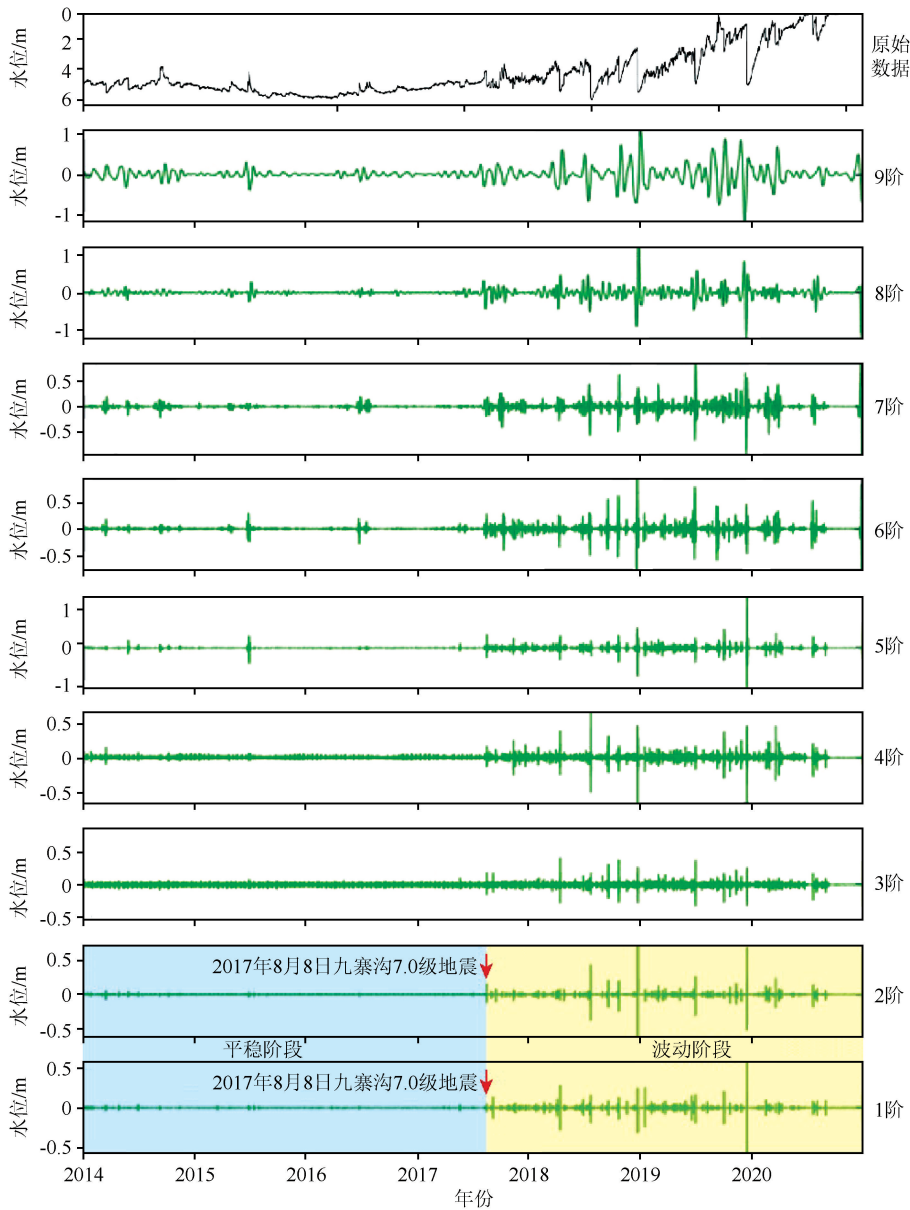


图 3 2014—2020 年石泉流体井静水位整点值观测曲线 1~9 阶小波分析图

Fig 3 1-9 order wavelet analysis chart of the point value observation curve of Shiquan well water level from 2014 to 2020

5 结论

石泉流体台频繁水位异常变化,或是受多种因素综合影响,包括水库水位涨落、降雨、构造运动等,其中构造运动可能是井水位发生阶变的主要因素。

小波分析方法提取的水位高频信息反映了石泉水位异常活跃期的开始时间,2017 年 8 月 8 日九寨沟地震是异常活跃的重要转折点。

经综合分析后结论如下:九寨沟 7.0 地震有较大可能是石泉后续长期水位异常的直接触发因素,

石泉井的水位变化一定程度上反映了近年来该区域构造活动日趋活跃。但受认知的局限,目前的分析可能不全面,需要今后进一步的研究与分析。

参考文献(References)

[1] 王秋宁,李守广,赵小茂.陕西石泉井水位阶降异常[J].华北地震科学,2019,37(3):75-80.
WANG Qiuning, LI Shouguang, ZHAO Xiaomao. Analysis of water level step-down anomaly of Shiquan well in Shaanxi Province[J]. North China Earthquake Sciences, 2019, 37(3): 75-80.

[2] 杨兴科,韩珂,吴旭,等.南秦岭陆内造山构造变形特征与演化:石泉—汉阴北部一带晚印支—燕山期构造变形分析[J].地学前缘,2016,23(4):72-80.
YANG Xingke, HAN Ke, WU Xu, et al. The structural deformation and tectonic evolution of intra-continental orogeny in South Qinling orogen: structural deformation analysis of the northern part of Shiquan—Hanyin belt in the Late Indosinian-Yanshanian period[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(4): 72-80.

[3] 胡健民,孟庆任,陈虹,等.秦岭造山带内宁陕断裂带构造演化及其意义[J].岩石学报,2011,27(3):657-671.
HU Jianmin, MENG Qingren, CHEN Hong, et al. Tectonic evolution and implication of Ningshan fault in the central part of Qinling orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 657-671.

[4] 徐锡伟,陈桂华,王启欣,等.九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论[J].地球物理学报,2017,60(10):4018-4026.
XU Xiwei, CHEN Guihua, WANG Qixin, et al. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai—Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4018-4026.

[5] 李勇,邵崇建,李芄宇,等.九寨沟 $M_s7.0$ 级地震的左旋走滑作用与动力机制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2017,44(6):641-648.

LI Yong, SHAO Chongjian, LI Pengyu, et al. Left-lateral strike-slip effect and dynamic mechanism of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake in the eastern margin of Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(6): 641-648.

[6] 李杰,唐廷梅,荆强,等.跨断层形变测量异常特征分析[J].地震,2010,30(2):100-111.
LI Jie, TANG Tingmei, JING Qiang, et al. Analysis of the anomaly characteristics from cross-fault deformation measurements[J]. Earthquake, 2010, 30(2): 100-111.

[7] 刘建明,李志海,孙甲宁,等.基于小波分析提取地倾斜异常特征[J].地震,2016,36(1):38-48.
LIU Jianming, LI Zhihai, SUN Jianing, et al. Extraction of ground tilt anomalies based on wavelet analysis[J]. Earthquake, 2016, 36(1): 38-48.

[8] 孙小龙,向阳,李源.深井水位对地震波、固体潮和气压的水力响应:以范县井为例[J].地震学报,2020,42(6):719-731.
SUN Xiaolong, XIANG Yang, LI Yuan. Hydraulic response of water level to seismic wave, earth tide and barometric pressure in deep well: a case study of the Fanxian well in Henan Province[J]. Acta Seismologica Sinica, 2020, 42(6): 719-731.

[9] SUN X L, XIANG Y, SHI Z M, et al. Sensitivity of the response of well-aquifer systems to different periodic loadings: a comparison of two wells in Huize, China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 121-130.

[10] 袁道阳,冯建刚,郑文俊,等.青藏地块区大地震迁移规律与未来主体活动区探讨[J].地震地质,2020,42(2):297-315.
YUAN Daoyang, FENG Jiangang, ZHENG Wenjun, et al. Migration of large earthquakes in Tibetan Block area and discussion on major active region in the future[J]. Seismology and Geology, 2020, 42(2): 297-315.

[11] 李佳琦,王斌,李轶,等.水力裂缝扩展对天然断层活动性的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(2):126-133.
LI Jiaqi, WANG Bin, LI Yi, et al. Influence of hydraulic fracture propagation on activity of natural faults[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(2): 126-133.