

莫佩婵,袁媛,文翔,等. 广西九塘井水位突变异常映震效能分析[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 94–101. [MO Peichan, YUAN Yuan, WEN Xiang, et al. Seismic Reflection Efficiency Analysis of Sudden Change of Water Level in Jiutang Well, Guangxi[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 94–101]

广西九塘井水位突变异常映震效能分析

莫佩婵, 袁媛, 文翔, 梁飞, 黄美丽, 苏珊

(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

摘要: 通过收集、整理九塘井多年来观测资料,发现该井水位形态多次出现加速上升并溢出井口的突变异常,异常的出现与观测井周围 200 km 范围 4.5 级左右地震的发生有较好对应关系。结合地质构造、水文地质、观测环境、气象因素等影响因素分析结果,认为九塘水位的动态变化反映了区域应力应变过程,其突变异常的出现对桂西地区地震活动性研判具有一定指示意义。

关键词: 九塘井; 井水位突变; 映震效能

中图分类号: P315.723

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0094-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.13

Seismic Reflection Efficiency Analysis of Sudden Change of Water Level in Jiutang Well, Guangxi

MO Peichan, YUAN Yuan, WEN Xiang, LIANG Fei, HUANG Meili, SU Shan

(Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China)

Abstract: By collecting and sorting out the observation data of Jiutang well over the years, obvious anomalies of sudden rise of water level and overflow from the wellhead had been found for several times, which were well corresponding to the occurrence of earthquakes of about $M_L 4.5$ within 200 km around the observation well. Combining with the analysis results of influencing factors such as geological structure, hydrogeology, observation environment and meteorological factors, it is considered that the dynamic change of Jiutang water level reflects the regional stress-strain process, and the occurrence of abrupt anomalies has certain guiding significance for the study and judgment of seismicity in western Guangxi.

Keywords: Jiutang well; Sudden change of water level; Seismic reflection efficiency

0 引言

地下流体是一种活跃的载体,以多种形态存在

各种地壳介质中,在一定条件下会发生位置和形态变化。地震在孕育与发生过程中,更是会导致地下流体在物理和化学性质方面发生异常变化,故地下流体观测能间接获取来自地球深部的信息,是目前

收稿日期: 202202-10

基金项目: 地震科技星火项目计划(XH22004YA)和广西局科研合同制项目(202102)联合资助。

作者简介: 莫佩婵(1967-),女,高级工程师,主要从事地震监测预报。

E-mail: rose.mpc@163.com

通信作者: 袁媛(1978-),女,高级工程师,主要从事地震监测预报。

E-mail: gxdzjyuyuan@163.com

地震监测与预报的重要手段之一^[1-3]。有研究认为,地震的前夕孕震体必定会有某些不稳局部逆转应变的发生,因而在临震前地下水位、流量以及其他物理量会出现“突跳”、“突变”、“反向”等多种临震现象^[4-6]。在孕震理论模型和现有震例中,当应力应变积累到一定程度,就会产生地壳形变而引起地下流体异常产生地下流体力,只有那些能与地震孕育构造应力增强过程产生力学耦合的地下流体力才能调制与诱发出地震前兆异常并促使地震发生,换言之,只有能反映区域构造应力变化过程的地下流体异常才具有地震前兆意义^[7-8]。李惠玲、张素欣、廖丽霞等分别通过归纳、总结晋冀蒙和华南地区流体观测资料,均提取到了与水位突变有关的预测指标^[9-11]。

九塘井位于广西中部南宁地区,距南宁市区约60 km,是广西地下流体观测预报效能较好的观测井。本文收集、整理了九塘井2002年以来的水位观测数据,结合地质构造、观测环境、气象条件、水质成份等因素,分析其水位突变现象与桂西地区中强地震关系,试图评估九塘井水位预报效能,补充、完善广西地区地下流体地震预测指标体系。

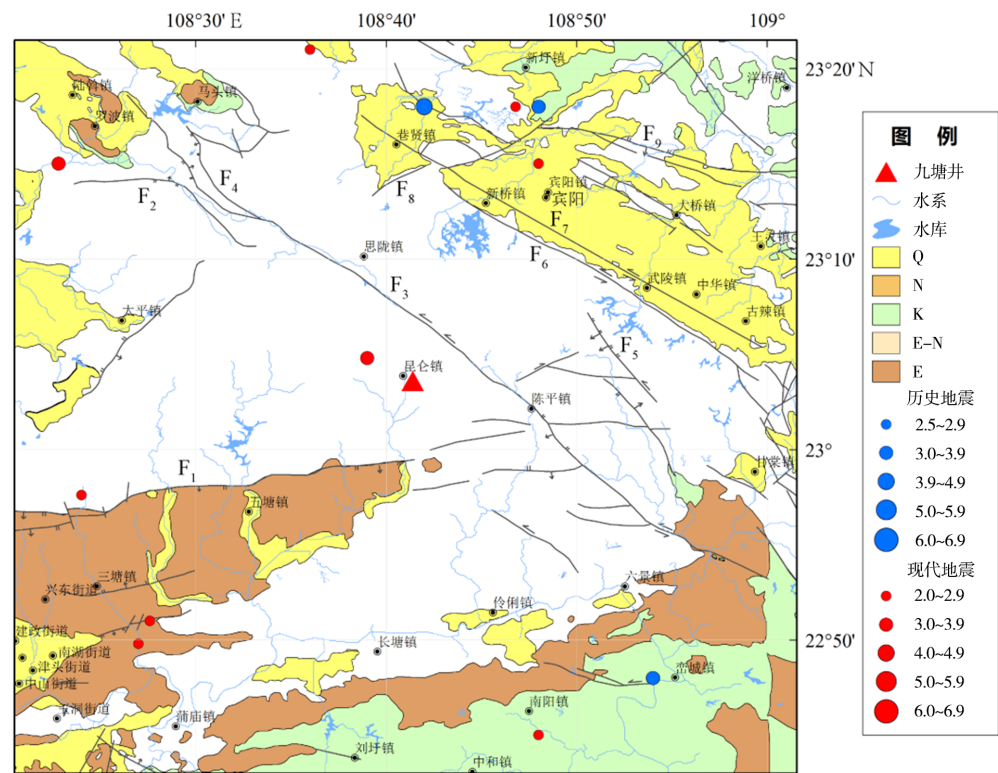
1 井孔基本情况

1.1 井孔概况

南宁九塘流体观测站,位于南宁市兴宁区九塘区坛敏村(108.69°E, 22.06°N), 高程176.0 m。台站位于一冲沟南侧边上, 冲沟东西走向, 南、北两侧地势均较陡, 周围均为菜地, 附近居民稀少, 无大工矿企业和单位, 少有人工排、灌、蓄等干扰源。观测井为自流井, 井深521.07 m, 孔径14.6 cm, 井孔岩性单一, 均为黑云母花岗岩, 井下80 m处的破碎带为主要的供水通道, 水从破碎带及裂隙中涌出, 沿钻孔向上溢出地表, 水头最高可达3 m, 为裂隙承压水。

1.2 地震地质构造

南宁九塘井区域上属华南准地台, 右江再生地槽大明山西隆起区, 大明山背斜与昆仑关复式背斜的复合地带, 地处北西向的巴马—博白断裂带和北东向的桂林—南宁断裂带交汇部位, 即天马—芦村断裂该断裂上(图1)。天马—芦村断裂总



F₁:心圩—韦村断裂;F₂:板音断裂;F₃:天马—芦圩断裂;F₄:那堤断裂;F₅:三叉断裂;
F₆:武陵断裂;F₇:巷贤—刘村断裂;F₈:大仙圩断裂;F₉:基塘断裂

图1 南宁九塘井附近地质构造图
Fig.1 Geological structure map near Jiutang well in Nanning

体走向北西 $310^{\circ} \sim 330^{\circ}$ ，倾向南西，倾角 $40^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。切割寒武系至第三系，断裂破碎带宽数米至百米，带内角砾岩、糜棱岩、硅化、构造透镜体、挤压揉皱带等构造现象发育。在芦村附近，可见三期不同的构造角砾岩：早期铁质、灰质紧密胶结，角砾棱角明显；中期红色砂泥质胶结，较松散，角砾棱角明显；晚期泥质胶结，松散，角砾棱角明显。在樟木坪附近，靠近该断裂带中心的北东侧，也见有两期不同的构造角砾岩。

巴马—博白断裂带是井区内唯一的左旋走滑兼具正断性质的区域性活动断裂。该断裂在新生代和第四纪以来活动强烈，主要表现为左旋剪切—挤压的力学性质，断层活动方式以蠕滑运动为主，TL测年值为 $60 \sim 280$ Ka，表明断裂在中更新世中晚期至晚更新世早期有过活动。巴马—博白断裂带在与防城—灵山断裂带交汇处曾发生1936年4月1日灵山 $6\frac{3}{4}$ 级地震，沿断裂带曾多次发生过4级以上地震^[12]。

1.3 水文地质

九塘井地处昆仑关花岗岩体重复侵入地带，该岩体内发育有多期构造节理，显示了深部岩浆的活动性。岩体与巴马—博白断裂带组成一套切割深、大，连通性好的节理裂隙网络，对地下水的形成与分布起控制作用，给深部岩浆热流上溢创造了良好的通道，并使受其切割的花岗岩体产生大量的节理裂隙。这些节理裂隙与断裂组合，构成了一套断裂—裂隙系统，特别是井孔所处的断裂上盘，应力较为集中，岩体破碎强烈，给大气降水的入渗，地下水的运移、储存带来了良好的空间条件，同时也是深部热源、热水向上部传导的主要通道^[13]。

2 影响因素分析

一般来说，引起观测井水位变化的因素较多，如区域应力应变、水文地质、气象条件、泄流量、观测系统等。这些因素会使得水位呈现出规律的动态，如日变、月变和年变。正常情况下，九塘水位具有以下规律的变化：固体潮日变形态清晰，每日双峰双谷的变化，日最大潮差约43 mm；受潮汐调制影响，每月望、朔时期水位潮差最大；具有一定的夏高冬低年变，每年4、5月为最高值，11、12月为最低值。但是，从历史资料分析，南宁九塘井水位也曾多次出现不规律的突

变，如单点突跳、加速变化、溢出井口等现象，有的现象还具有重复性和多样性。不规律现象的出现与上述影响因素或多或少存在一定的关系，为了明确影响最为主要、最为明显的因素，找出这些不规律变化与地震间的内在联系，挖掘可能存在的预报预测指标，除考虑上节所描述的地震地质构造和水文地质外，下面再从观测环境、气象条件和井孔流量等方面进行分析。

2.1 观测环境

九塘水位观测井位于郊区农村，观测井附近居民稀少，无大工矿企业和单位，周围没有大型建筑或抽水作业，未发现有人工排、灌、蓄等干扰源。在距井孔约150 m远的有一口生活用水井，井深50 m左右，据附近村民反映，其用量一直以来都相对稳定，周围2 km内观测环境一直以来无明显改变。

2.2 大气降雨

观测台站址地势较陡，坡积较浅，加之井孔较深、封闭性好，降雨补给的间隙和滞水条件有限，一般情况下，水位与降雨不会出现同步变化，但在出现强降雨或持续较长时间降雨时，二者间也会有明显的关联。如2015年降雨明显比2014年多，且2015年5月11日至6月11日间降雨集中且雨量偏大，但井水在2014年7月15日至8月22日间出现快速上升并溢出井口，其余时段均无明显变化(图2)。

2.3 泄流口流量

2007年1月至2020年11月，九塘井流量每月末或月初用量筒进行测算，偶尔因为震情或观测的需要进行加密测量，流量的调节较为随意，当出现井水溢出井口后就通过调大泄流口的阀门来加大流量，人为使水位下降。2020年11月，九塘井安装数字化流量仪，正式开始流量观测。通过一年多的连续、稳定观测，发现正常情况下九塘流量动态有以下特点：变化形态和趋势与水位基本呈正相关关系，有明显的固体潮形态，每日双峰双谷变化，并具有一定的夏高冬低年变；流量正常背景值约为0.093 L/s左右，最大日变幅约0.0053 L/s。

综合数字化改造前后水位与流量的变化，认为九塘流量与水位在出现宏观异常，如水位大幅

突变时呈负相关,即流量变大,水位下降,流量变小,水位上升,但在正常观测时则为正相关,两者出现一致的变化形态和趋势。经过核实,水位数次出现大幅突变时,泄流口并无异物堵塞。

通过上述分析认为,九塘井处于构造灵敏

地带,补给区较远,渗流途径较长,不易受到气象和人为因素的干扰,水位的动态变化能真实反映来自深部构造的信息,即区域构造应变是水位不规律变化的主要影响因素。

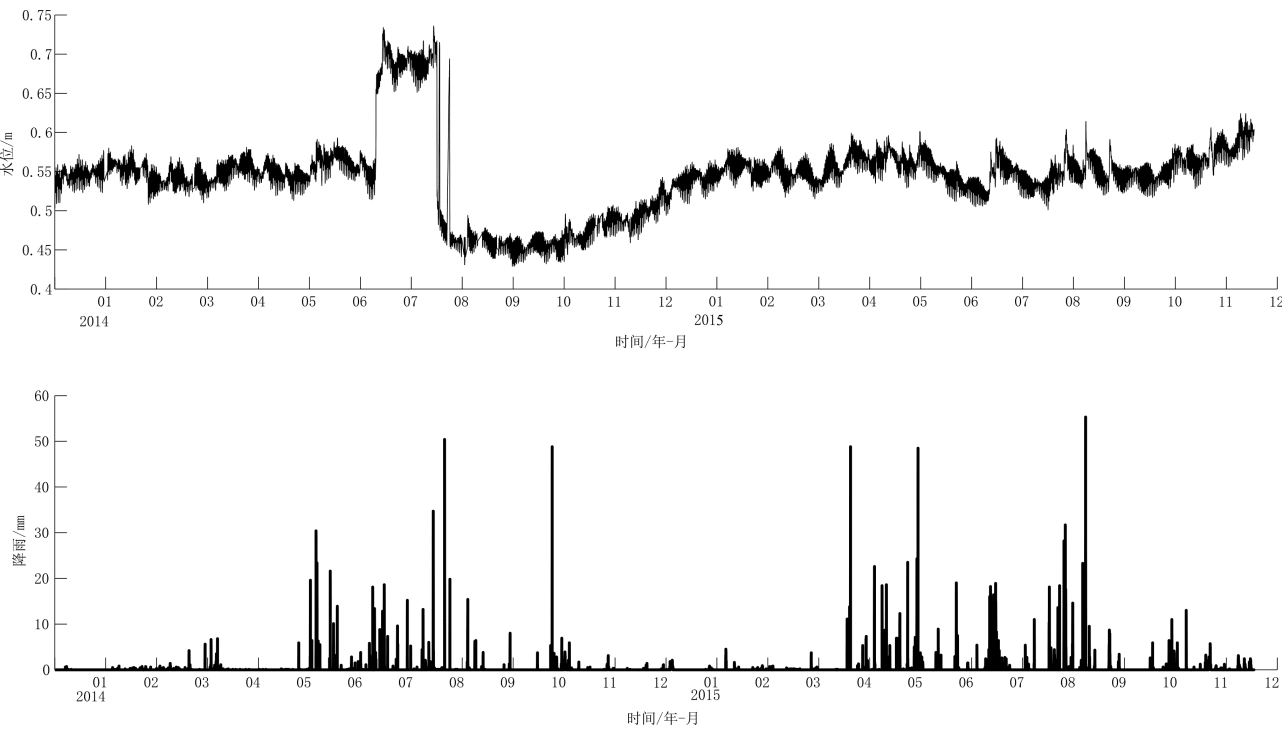


图2 九塘水位与降雨的关系
Fig.2 Relationship between water level and rainfall in Jiutang

3 九塘水位突变与地震关系分析

3.1 水位突变异常及其映震效能

九塘井水位突变异常,具体主要表现为井水快速上升后溢出井口。一般情况下,异常出现后1年左右,井孔周围200 km范围有发生4.5级左右地震的可能。经梳理,有如下几个明显的震例。

3.1.1 2005年10月27日平果4.3级地震

2004年12月26日印尼8.7级地震后,九塘井水位记录到0.084 m的同震阶升,此后一直处于高值。2005年3月1日调大流量后水位下降,降幅0.22 m;6月5日和9月2日又先后出现两次快速上升;9月14日—10月8日因主机出现故障,作缺数处理;10月27日平果4.3级地震发生后仍持续上升,12月31日再三将其流量上调后才下降恢复,此次降幅为0.203 m。水位初次上升与地震发生时间相距305 d,最后一次上升与地震发生时间相距

54 d,井震距135 km(图3)。

3.1.2 2013年2月20日平果、田东交界4.5级地震

2012年2月1日,九塘水位有序向上快速上升。2012年4月11日16时38分和18时43分,印尼先后发生8.6级和8.2级强震,地震发生后,井水在持续上升的背景下连续两次产生明显的同震阶升后溢出井口,12日9时调大流量,水位快速下降,降幅0.165 m;5月12日井水又持续加速上升,至11月30日8时,井水再次溢出,当日11时第二次调大流量,水位迅速下降,降幅0.18 m;经过二次调大流量下降后,水位于12月23日又出现明显的快速上升,2013年1月30日第三次调大流量,因此次流量调整较前两次大,水位下降更为明显,降幅0.344 m。水位在第三次调大流量下降恢复后,2月20日发生平果、田东交界发生4.5级地震,水位初次上升与地震发生时间相距383 d,最后一次上升与地震发生时间相距58 d,井震距154 km(图4)。

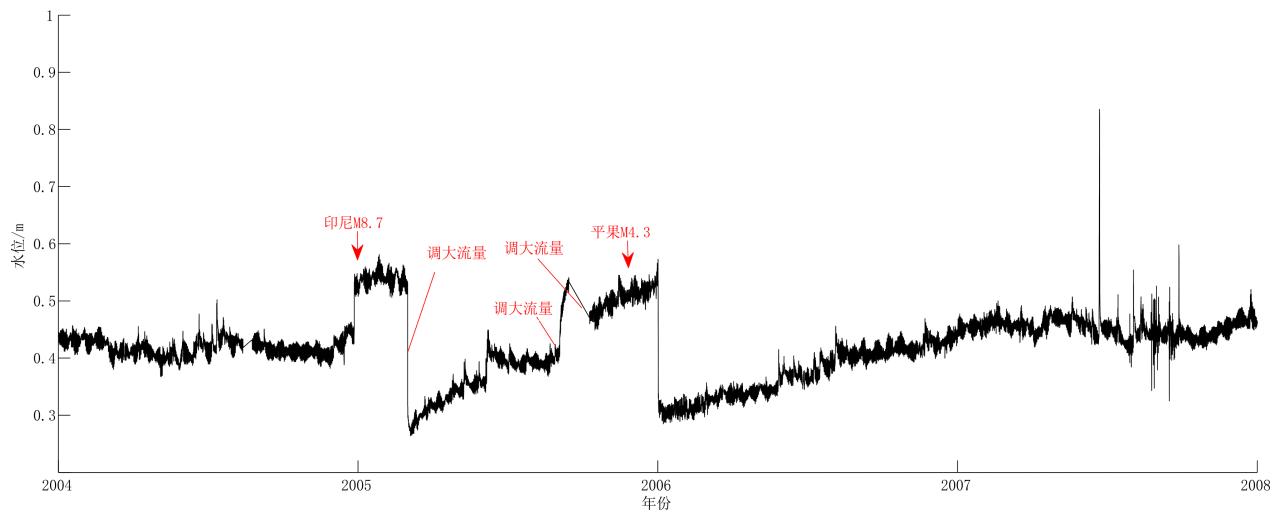


图3 九塘水位突变异常与平果4.3级地震
Fig.3 Sudden changes of Jiutang water level and Pingguo $M_s4.3$ earthquake

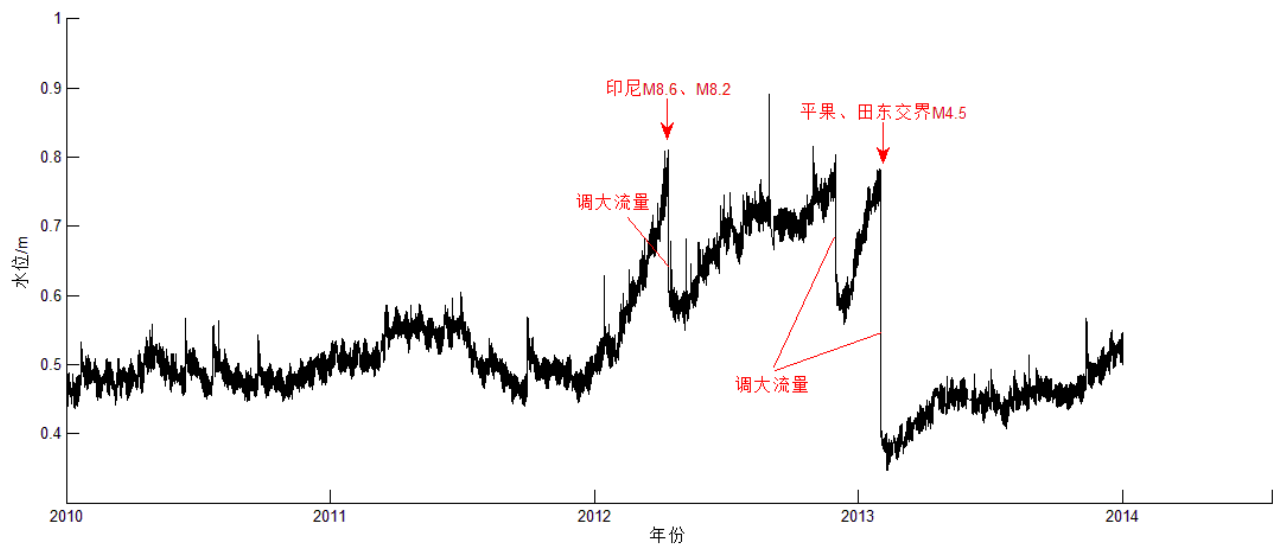


图4 九塘水位突变异常与平果、田东交界4.5级地震
Fig.4 Sudden change of Jiutang water level and $M_s4.5$ earthquake at the junction of Pingguo and Tiandong

3.1.3 2019年11月25日靖西5.2级地震

2019年10月15日，由于九塘水温探头放置太浅，对井孔露出地面部分的斜管进行改造，改造后该部位的孔径变小，由原来的14.6 cm变为12 cm。10月21日重新观测后，水位有规律地快速上升，2020年1月2日，井水溢出井口，14日上调流量后才下降恢复，降幅为0.383 m。

九塘井此次井孔改造时间比较特殊。在改造施工前2 d，即10月12日在桂东南地区发生了北流5.2级地震，而在恢复观测（水位快速上升）后34 d，即11月25日则在桂西地区发生了靖西5.2级地震，两次地震的井震距都约为210 km（图5）。显

然，此次水位突变在很大程度上因井孔改造、孔径变小引起的。北流地震是在异常出现前发生的，结合历史震例分析，认为异常的出现与北流5.2级地震无明显关联，而靖西5.2级地震虽然是在异常出现后发生的，但由于存在人为干扰，两者间的关系也存在不确定因素。

3.1.4 2021年8月4日德保4.8级地震

2020年9月25日井水位突然发生阶跃，上升幅度达0.17 m，此后水位持续上升，至10月10日完全溢出井口。经调查，异常的出现与人为干扰和气象影响无关。同年11月25日因改造安装数字化流量仪，一并调大其流量，水位下降恢复，降

幅为0.664 m。2021年8月4日德保发生4.8级地震,地震发生距水位开始上升时间312 d,井震距205 km(图6)。

综合上述震例资料,分析认为,九塘井自2002年数据化观测以来,共出现5次水位快速上升并溢出井口的现象,异常出现1年左右,在其约200 km范围,对应的中强地震有3次,分别为2005年10月27日平果4.3级、2013年2月20日平

果—田东交界4.5、2021年8月4日德保4.8级地震;异常出现后没有发生地震的情况有1次,即2017年7月15日水位上升后没有相应的地震发生;漏报的地震有2次,即2019年10月12日北流5.2级和2019年11月25日靖西5.2级地震,其中北流5.2级地震发生在桂东南地区,而靖西5.2级地震前异常的出现存在人为干扰因素,是否为漏报尚有一定的不确定性。

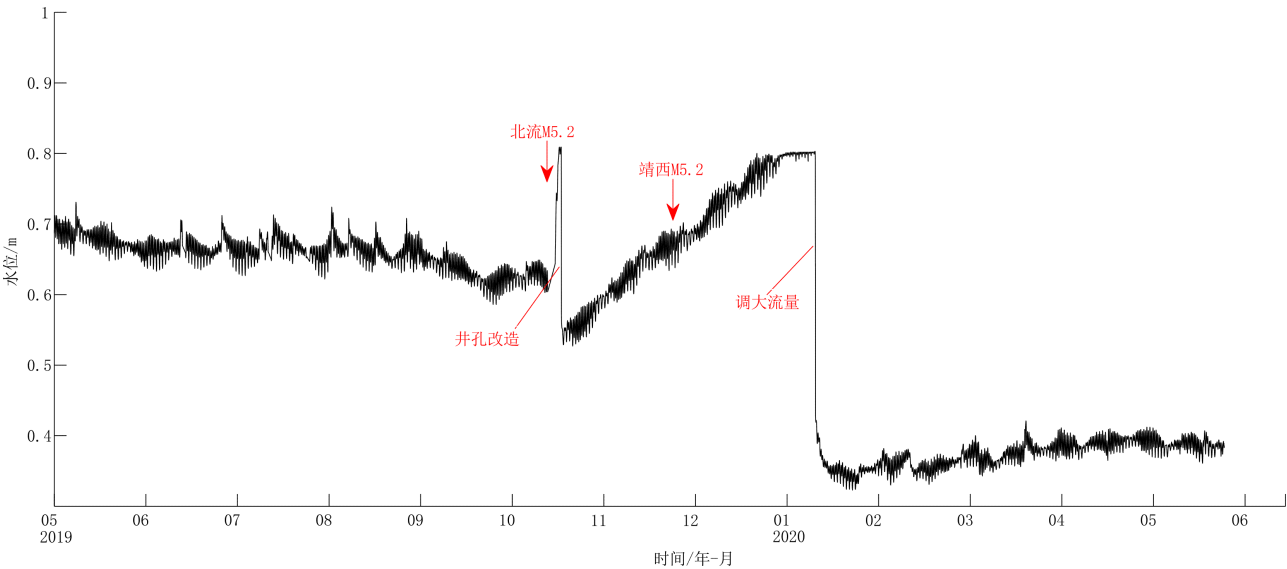


图5 九塘水位突变异常与靖西5.2级地震
Fig.5 Sudden change of Jiutang water level and Jingxi $M_s5.2$ earthquake

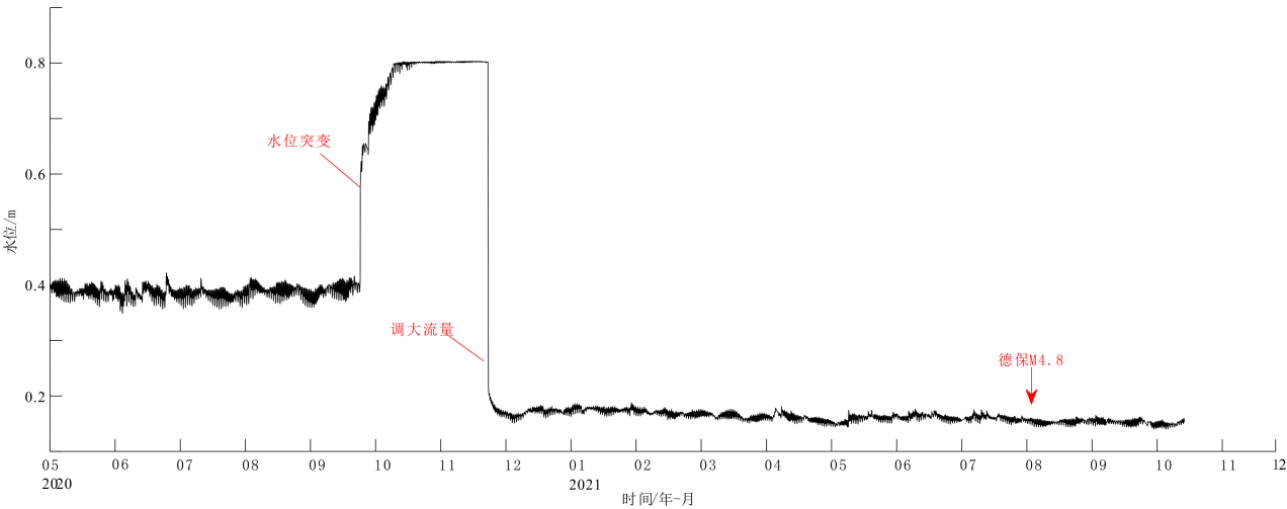


图6 九塘水位突变异常与德保4.8级地震
Fig.6 Sudden change of Jiutang water level and Debao $M_s4.8$ earthquakes

3.2 孕震机理

陆明勇等认为,地震前兆的产生是“双力源”

即构造应力和流体力联合作用的结果,震源体及其附近构造应力增强到一定程度时将产生膨胀(扩容)。当震源体膨胀(扩容)波及到上方的浅层地壳

时会使其产生变形异常同时为地壳中包含的各种流体开通其活动和流通的渠道,使流体涌入浅层,并引起地壳形变、地下流体等地球物理异常。另外,随着扩容区不断增大,当所产生的裂缝触及下方的深部流体处时由于其压力相对高于上方扩容区的压力深部流体物质就在吸与压的联合作用下侵入扩容区。而后由于深部流体温度较高其所带来的热力学效应一方面使介质强度降低扩容区孔隙压回升而加剧孕震过程的发展;另一方面产生的热应力使地壳浅层出现张性应力,同时产生一些张性裂隙,尔后张性裂纹与扩容区内的高压流体则沿裂隙上涌至地表浅层并引起地下水位快速上升,甚至溢出井口^[14-16]。

而在地震孕育的后期,区域构造应力非稳定性增强,致使断层上盘产生非稳定的、加速的向上错动。由于地下水附加力作用往往叠加在构造

应力增强作用之上,使构造应力引起的断层错动更为显著,从而造成明显的地震前兆异常。在通过采用CAP方法反演上述桂西地区地震的震源机制后,发现其孕震体大部分都与NW或NE向构造有关,而九塘井处在NW和NE向构造带的交汇部位,且基本上位于地震的震中区域(表1)。在上述相关地震孕育过程中,区域构造挤压应力增强促使孕震岩体应力应变的微小变化通过两个不同走向的构造带传播到观测井所在区域的含水层,引起含水层岩体孔隙度改变,进而改变井孔与含水层间水量的交换。具有良好的井—含水层系统,含水层岩体孔隙度减小导致水体从含水层流向井孔,水位上升。另外,由于九塘井其观测层位承压性好,水位观测灵敏度高,对地壳岩体的微小应变产生放大作用,故在地震前经常出现井水大幅度上升并溢出井口等异常现象。

表1 桂西地区部分地震震源机制解
Table 1 Focal mechanism solutions of some earthquakes in western Guangxi

编号	震例	震中位置		节面 I			节面 II			P轴		T轴		B轴	
		经度/(°)	纬度/(°)	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角
1	2005-10-27平 果4.3地震	107.50	23.58	36	71	167	130	78	19	347	10	79	39	38	40
2	2013-02-20平 果、田东交界4.5 级地震	107.45	23.85	29	27	71	230	65	99	313	19	159	69	46	8
3	2019-11-25靖 西5.2级地震	106.65	22.89	24	61	71	239	34	120	128	14	256	68	33	17
4	2021-08-04德 保4.8级地震	106.68	23.38	230	79	-10	322	80	-169	186	15	96	1	3	75

4 结论与讨论

4.1 结论

九塘井水在观测过程中多次出现快速上升并溢出井口等突变异常,异常的出现反映了区域构造应力变化,对桂西地区4.5级左右地震的发生具有较好的预测预报意义。具体表示为:九塘井水位突变异常出现后,1年时间左右,其周围约200 km范围,有发生4.5级左右地震的可能。

4.2 讨论

(1)前人研究认为,若地下流体出现突变峰值异常则地震的发震时间一般在未来10 d内,若出现连续突变峰值异常,则发震时间一般在“主峰”后一个月内,即水位突变一般为短临异常^[17]。一直以来,九塘水位突变异常出现后,由于认识不到位,一次或多次被人为地调大流量致水位下降,且流量调节没有按规范和要求进行,太过于随意,形成了调得越大,水位下降就越低,水位重新上升的时间持续就越长,反之则越短,这些操作从

根本上打断了异常的持续。由于地震一般是在水位下降后发生的,流量调大引起的水位下降,掩盖了地震前可能出现的更为明显的短临异常现象,同时异常结束时间还因流量调大、水位下降的影响而失真,异常是属于中期还是短临就难以下定论。为了明确九塘水位突变异常在地震中的映震效能,建议在日后的观测中再出现井水溢出时只需高度关注,不应人为调大流量,即使需要调大流量,也要按一定的规范和要求进行,最大限度确保异常的真实和可靠。

(2)广西地区主要受川滇菱形块体SSE向推挤及南海扩张N向挤压力影响,有利于区域内NW向和NE向断裂的走滑运动或拉分盆地中NE向断裂的逆冲运动^[18]。从长时间尺度来看,桂西地区视应力呈上升趋势,反映了区域应力水平在较长一段时间内均处于较高水平,上述这些地震就是在构造应力逐渐增强背景下发生的。2005年10月25日平果4.3级、2013年2月20日平果与田东交界4.5级,以及2019年11月25日靖西5.2级地震时,九塘水位均呈快速上升并溢出井口等现象,与区域应力状态相吻合。

2021年8月4日德保4.8级地震发生后,9月11日原震区又发生4.3级地震,属双震型系列,与区域内地震多为主—余型系列不甚相符。另外,广西境内历史上中强地震大多发生在NW或NE向断裂上,而此次地震主压应力方向为NEE向或近EW向,发震构造可能为NWW向或NEE断裂,抑或为NW向和NEE向共轭断裂的共同活动^[19]。综合上述两个方面,分析认为,德保4.8级地震前8多个月的时间段内,水位没有出现快速上升,反而呈缓慢下降,这一反常现象,除了与调大泄流口流量有关外,还可能与此次地震的地震系列特殊,以及发震构造的复杂性、多向性有关。

参考文献

- [1] 杜建国,康春丽.地震地下流体发展概述[J].地震,2000,20(S1):107-114.
- [2] 孙小龙,刘耀炜,付虹,等.我国地震地下流体学科分析预报研究进展回顾[J].地震研究,2020,43(02):216-231+417.
- [3] 吴景云,夏修军,李平林.地下流体动态稳定度及其应用[J].华南地震,1999,19(03):43-47.
- [4] 刘耀炜,陆明勇,付虹,等.地下流体动态信息提取与强震预测技术研究[M].北京:地震出版社,2010.
- [5] 訾少刚,钟美娇,杨晓鹏.甘肃省清水井流量长期动态变化及映震效能研究[J].西北地震学报,2013,35(S1):98-101.
- [6] 王俊,黄显良,陶月潮.华北地区强震前流体异常特征统计分析[J].国际地震动态,2018(08):1.
- [7] 陆明勇,黄辅琼,刘善华,等.地壳形变与地下水相互作用及其异常关系初探[J].地震,2005,25(1):67-73.
- [8] 陆明勇.地壳形变与地下水相互作用及“双力源”前兆观测[J].大地测量与地球动力学,2006,26(1):76-83.
- [9] 李惠玲,高云峰,贾炯,等.晋1-1井水位异常与晋冀蒙交界区中强地震关系简析[J].华北地震科学,2012,30(1):33-39.
- [10] 张素欣,盛艳蕊,张子广,等.黄骅井水位多次突变异常地震远场效应初探[J].国际地震动态,2015(9):148.
- [11] 廖丽霞,秦双龙,洪旭瑜.华南地区流体地震预测指标建立、应用和反思[J].地震研究,2020,43(2):311-318.
- [12] 广西壮族自治区地震局.广西简明地震信息手册[M].北京:接力出版社,2015.
- [13] 广西壮族自治区地质矿产局.中国人民共和国区域水文地质普查报告[R].南宁:广西壮族自治区地质矿产局,1979.
- [14] 陆明勇.“双力源”地震前兆观点的进一步探讨[J].大地测量与地球动力学,2007,27(4):105-111.
- [15] 李民.地下流体对地震前兆作用的综述[J].华北地震科学,2007,(02):24-38.
- [16] 缪森,朱守彪.地下流体对地震孕育过程的影响研究综述[J].地球物理学进展,2012,27(03):950-959.
- [17] 冯绚敏,叶秀薇,任明甫.地下流体短临地震信息的特殊意义[J].华南地震,1998,18(1):111-115.
- [18] 李细光,梁结,史水平,等.广西及其邻区现今构造应力场研究[J].地震研究,2007,30(3):235-240.
- [19] 苏珊,李莎,阎春恒,等.2021年8月4日广西德保M4.8地震序列及后续地震趋势分析报告[R].南宁:广西壮族自治区地震局,2021:1-30.