

廖丽霞,林稚颖,莫佩婵,等.2022.粤桂琼流体台网对区域中强地震的映震能力分析[J].地震研究,45(2):290-299,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0030.

Liao L X, Lin Z Y, Mo P C, et al. 2022. Analysis of seismic reflection ability of the Guangdong, Guangxi, Hainan fluid network to regional moderate-strong earthquakes[J]. Journal of Seismological Research, 45(2):290-299, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0030.

粤桂琼流体台网对区域中强地震的映震能力分析*

廖丽霞¹, 林稚颖¹, 莫佩婵², 田雷³

(1. 福建省地震局, 福建 福州 350001; 2. 广西壮族自治区地震局, 广西 南宁 530022;
3. 中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要:对广西2016年苍梧5.4级地震、2019年靖西5.2级地震、2019年北流5.2级地震震中300 km范围内粤桂琼流体台网观测资料进行梳理,认为该台网最显著的映震特征是趋势性和群体性,具体表现为同一条断裂带或同一组平行的断裂带上多井水位出现同步(或准同步)长期的背景性趋势异常、中期的年动态畸变异常和震前半年的高水位异常,且水位年动态畸变与累积重力异常呈现出时间上的同步性、空间上的叠加性。含水层水文地质参数计算及水位应力反演显示,3次地震前压力增强、孔隙度减小、渗透系数增大、水位上升,均符合水文动力学机制,表明粤桂琼流体台网能够真实反映区域应力场的变化,震前水位年动态畸变及加速上升是区域应力增强的表征。综合分析认为粤桂琼流体台网对区域中强地震反映灵敏,具备较好的映震能力。

关键词:粤桂琼流体台网;水位年动态畸变;趋势异常;映震能力;苍梧5.4级地震;靖西5.2级地震;北流5.2级地震

中图分类号: P315.723 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2022)02-0290-10
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0030

0 引言

2016年以来,广西地区陆续发生了一系列中等强度的地震,其中5级以上地震3次:2016年7月31日苍梧5.4级、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。苍梧5.4级地震打破了华南地区持续17年的5级地震平静期,预示该地区可能进入新一轮地震活跃期。苍梧地震发生后,广西地区还多次发生4级左右的地震,如2016年9月17日来宾4.1级、2017年7月15日南丹4.0级、2017年8月15日靖西4.0级、10月3日靖西4.1级、2019年11月28日靖西4.3级、2021年8月4日德保4.8级、9月11日德保4.3级等地震。在粤桂琼地区发生如此频度和强度的地震在数字化地震地

下流体观测推广以来是第一次。

地下流体映震灵敏,地震前流体能在一定的空间区域内通过不同时间长度、不同形态特征的异常捕捉前兆信号。通过对《中国震例》进行统计,结果显示含地下流体前兆异常的震例占中国所有震例的近七成(蒋海昆等,2009);这些流体前兆异常在时间上多呈长期趋势异常(陆明勇等,2009),或短期(刘耀炜等,2004)及短临异常(万迪堃等,1996);在形态上则多呈趋势性上升异常(黄辅琼等,1998)、高水位异常(付虹等,2015)、年动态异常(车用太,鱼金子,2004,2005;王熠熙等,2019)。笔者发现2013年以来粤桂琼的水位多次出现群体性年动态趋势异常,有多年持续趋势上升或下降异常,也有年动态畸变异常及高水位异常。这些异常是不是前兆异常需要进一步确认。在2016年华南预测指标梳理时,

* 收稿日期: 2022-02-18.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH21013)、中国地震局震情跟踪定向工作任务(面上2021020301)和国家重点研发计划专题(2019YFC1509404-4)联合资助.

第一作者简介: 廖丽霞(1965-),高级工程师,主要从事地震地下流体监测预报工作. E-mail: 909051757@qq.com.

由于《中国震例》(蒋海昆, 2014)之华南震例中水位震例较少,尤其是水位“点”的指标提取不足,当时水位台网历史资料不够丰富,也未能对水位进行进一步的归纳分析。目前水位台网资料有了更多积累,中强历史地震新增了3次,因此本文将粤桂琼流体台网对广西2016年苍梧5.4级、2019年北流5.2级和靖西5.2级地震的映震能力及这3次中强地震前的流体异常时空演化特征进行梳理,并对这种群体性异常进行综合、深入分析,对其发生机理进行初步探讨,开展震例总结、预测效能检验,完善现有预测指标,以期今后判定华南地区中强地震活动趋势积累重要震例、提供科学依据,也为其它地区出现类似水位异常变化的核实分析工作提供借鉴或参考。

1 粤桂琼流体台网概况

截至2022年1月,粤桂琼流体台网正常运行且纳入中国地震台网的流体观测站有37个,观测台项共有67项,其中广西、海南均有8个台站(16项),广东有21台站(35项),观测台网密度最大的是水位测项,共有30口观测井,其次是水温测项,共有28口观测井;水质、水氢测项分别只有4口和3口观测井,均分布在广东;另外仅有1口气氢观测井分布在海南。对历史资料进行预测指标梳理发现:水氢映震效能较好,对应过多次震例;水质观测井中仅潮州水质日测值趋势动态发生转折,与中国台湾7级以上地震有较好的对应,其余井因井口阻塞频繁换井、海水侵入、仪器故障、周边抽水及降雨等干扰,运行多为“基本稳定”或“不稳定”,映震效能不佳;广东的气体及海南的气氢观测资料质量差,无法用于预测;广东地区因经济发达,受大型基建、工农业抽水及电源不稳干扰较大,水位资料质量评估为“基本可靠”或“不可靠”;广西、海南除贵港井水位由于受周边抽水和观测技术系统干扰、三亚南滨台受周边农田灌溉及基建干扰数据不可靠外,其它井均运行稳定、资料可靠;水温测项台站多数运行稳定,资料质量可靠,少部分台站因受观测技术系统及施工抽水、降雨、电源电压、基建、探头位置、气温等干扰,资料稳定性和可靠性较差,预测效能也较差;广西部分观测井还受海潮、海风等自然因素干扰(周峥嵘等, 2021)。粤桂琼

流体台网空间分布情况如图1所示,图中3组同心圆所示范围分别为广西2016年苍梧5.4级、2019年北流5.2级地震和2019年靖西5.2级地震震中100 km、200 km、300 km范围。

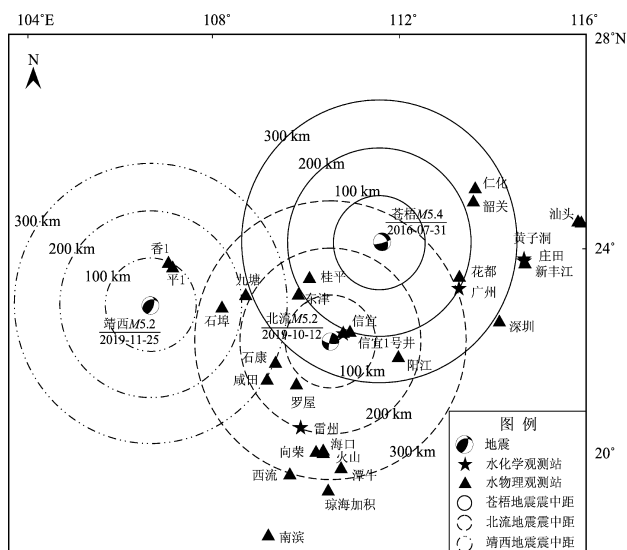


图1 粤桂琼流体台网空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of the Guangdong, Guangxi, Hainan fluid networks

2 资料选取及异常提取方法

2.1 资料选取

映震台站区域范围与发生地震的大小有关,《震例总结规范》(DB/T 24—2007)规定5.0~5.9级、6.0~6.9级和7.0~7.9级地震的前兆异常选取范围分别是震中附近200 km、300 km和500 km,通过统计《中国震例》(1966—2012)中华南片区的14个震例的规律发现(张肇诚, 1988, 1990a, b, 1999; 陈棋福, 2002a, b, c; 蒋海昆, 2018),优势震中距为60~250 km,一般不超过300 km。因此本文主要对2016年以来广西地区3次5级以上地震震中300 km范围内的流体观测资料进行分析,如图1所示,共涉及粤桂琼流体台网23个台站:广西8个和海南4个台站,全都为水位和水温观测站;广东11个台站,其中8个为水位和水温观测站,3个为地球化学观测站。由于华南片区水温资料内在质量较差,在流体预测指标梳理过程中未能提取到预测指标,日常震情跟踪工作中也没有取得过可靠的震例。信宜1号井水氢资料中没有提取到震前异常信息;信宜1号井气体

因仪器不稳定导致资料不可靠、雷州海康水质因海水侵入严重干扰、广州三元里水质因周边游泳场不定时抽水严重干扰,以上资料均无法用于地震预测,因此主要针对粤桂琼流体台网中3次5级以上地震震中300 km范围的水位资料进行分析。由于信宜1号井水氡的辅助测项流量是模拟观测,不受数字化观测技术系统干扰,水氡比水位更加可靠,其日测值也纳入分析。

2.2 异常提取方法

通过对华南流体预测指标梳理发现水氡测项是较好的时间预测指标,一般可作为短临(期)或中期指标,水质测项则多为中期指标。华南地区地震强度较中国西部地区弱,一般多为中等强度的地震。水位短时间的干扰因素较多,如供电系统、观测环境改变、仪器设备故障、观测条件改变、观测井孔自身问题产生的干扰等(樊春燕等, 2010; 刘春国等, 2015; 廖丽霞, 2019),这些干扰常常会掩盖前兆信息,因此主要从趋势动态来提取预测指标,在时间上一般提取水位年动态畸变作为中强地震的中期指标;地点上,同一构造带上多井水位(准)同步出现多年趋势上升可以作为中强地震预测指标。同样地,与映震能力相关的前兆异常分析主要从多井趋势背景异常和中期年动态畸变展开。

3 粤桂琼流体台网映震特征分析

通过对粤桂琼流体台网观测资料进行梳理,发现水位对广西2016年苍梧5.4级、2019年北流5.2级和靖西5.2级地震最显著的映震特征是趋势性和群体性。在时间上有长期的背景趋势异常,地震一般在趋势转折后一年内发生;中期的年动态畸变异常及震前半年高水位异常;在空间上则呈现同一条断裂带或同一组平行的断裂带上多井水位同步(或准同步)趋势异常和年动态畸变异常。

3.1 背景趋势异常

在这3次地震发生过程中,震中300 km范围内出现多井同步及准同步水位趋势上升,如图2所示。有的异常观测井甚至超出震中300 km范围。

2013年以来,位于百色—合浦断裂带上的香1、平1、石埠井以及位于与该断裂带平行的巴马—博白断裂带上的九塘井水位一直呈持续多年的

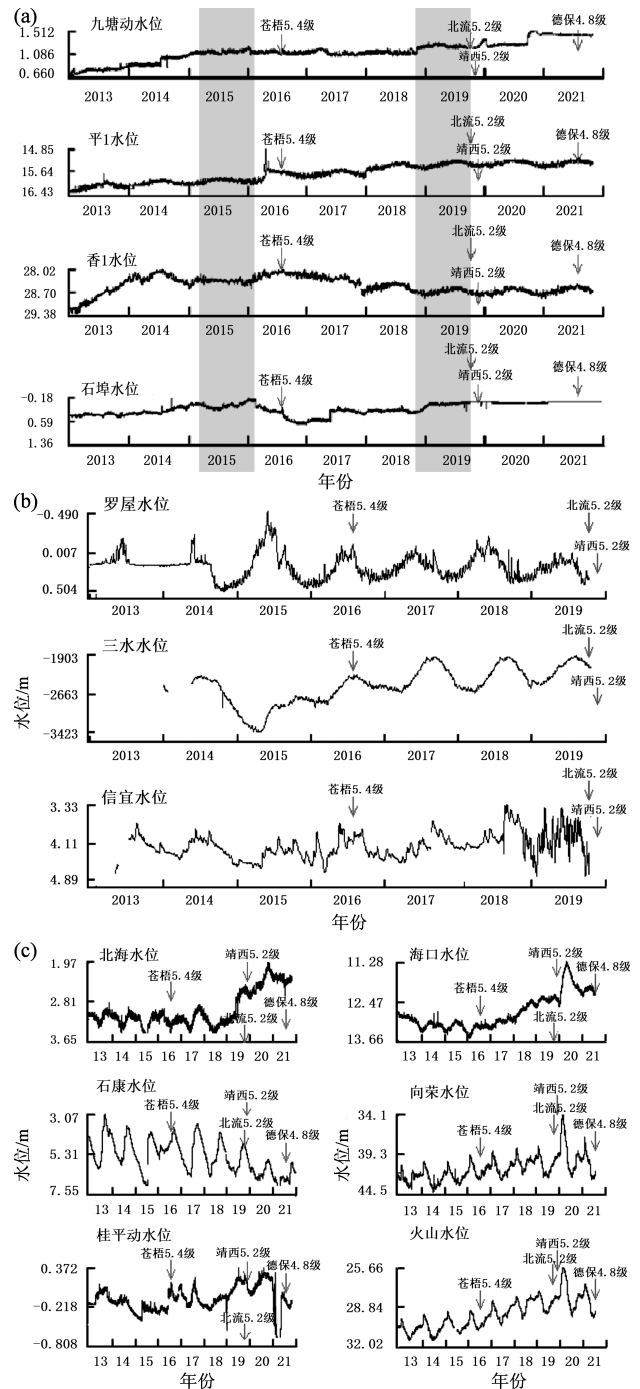


图2 3次地震震中300 km范围内观测井水位趋势上升动态图

Fig. 2 Rising trend of the water level of observation wells within 300 km from the epicenter of the three $M \geq 5.0$ earthquakes

趋势上升动态。2016年以来在全国地下流体年度会商工作中,华南片区会商小组一直把这组趋势上升动态作为水井所在断裂带区域未来发生中强地震的背景性异常加以跟踪。实际上该断裂带所

在区域确实也是华南地区地震多发区域。2016年1月香1、平1、石埠井水位同步发生转折,随后在7月31日发生苍梧5.4级地震;北流、靖西地震同样是在香1、平1、石埠井发生准同步趋势转折后一年左右发生的(图2a)。

北流5.2级地震前,震中300 km范围内的15口水位井和1口流量观测井中有9口井从2016年就开始出现趋势上升、1口井出现趋势下降,北海、桂平井水位从2018年开始也出现趋势上升。其中海南3口观测井周边同期虽有抽水量及抽水井减少的干扰,但海口井井深706 m,套管套到井底,水位在北流地震前一年出现加速上升,而周边生活用水开采井井深不超过350 m,无法对其造成如此程度的干扰,因此笔者认为海口井水位趋势上升是周边开采干扰与区域应力增强共同作用的结果。

靖西地震震中300 km范围内的平1、香1、九塘、石埠、石康、北海等6口井,除北海井趋势上升起始时间较晚为2018年1月,其它均从2016年1月就开始,从图2c中可以看到,北海井的上升速度明显快于其它井。石埠井在2019年8月4日发生井壁破裂,导致地表浅层水涌入水井,井水持续溢出井口,产生无效数据,无法进一步跟踪分析其水位动态趋势。笔者认为井壁破裂也可能是区域应力增强所致,因石埠井处在北流、靖西地震300 km空间范围的交集区域,同时承受2次地震孕育的应力增强影响,因此虽然8月4日后无法跟踪水位动态,仍将其纳入前兆异常范围进行统计分析。

3.2 多井水位年动态畸变异常

3次地震前均出现群体性水位年动态畸变异常(图3),这一现象在1999年11月29日辽宁岫岩5.4级地震前同样出现过(车用太,鱼金子,2004)。

北海、石康井水位呈夏低冬高的正常年动态变化。苍梧5.4级地震前,北海、石康井水位、信宜1号井流量在2016年1月均呈上升趋势,出现年动态畸变。北海水位在4月18日恢复下降走势;石康井水位在震后仍持续上升直到9月16日才恢复下降趋势;桂平水位、信宜1号井流量直到8月底至9月初才恢复下降走势(图3)。北流5.2级、靖西5.2级地震前,信宜1号井流量在2018年1月16日开始一直呈上升趋势,于2019年9月1日达阶段高值8.417 L/s后仍维持在高值,并呈小幅震荡直到地震发生;北海井水位本该在2018年11月开始下降,但却转折向上持续上升,升幅达0.758 m,直到2019年9月26日才停止上升,并在高位小幅震荡,10月12日北流5.2级地震发生后再次上升0.128 m,随后在11月25日发生靖西5.2级地震,震后稍稍回落后继续上升,2020年全年都呈上升态势没有回落,出现年动态畸变,结果2021年8月4日发生德保4.8地震;2019年1月10日到8月6日石康水位持续出现扰动,2个月后又发生北流地震。实际上这种扰动在苍梧地震前也出现过。2020年1月22日—8月2日、2021年1月1日—10月10日又出现2次较长时间的扰动,结果在2021年8月4日发生德保4.8级地震,如图3所示。

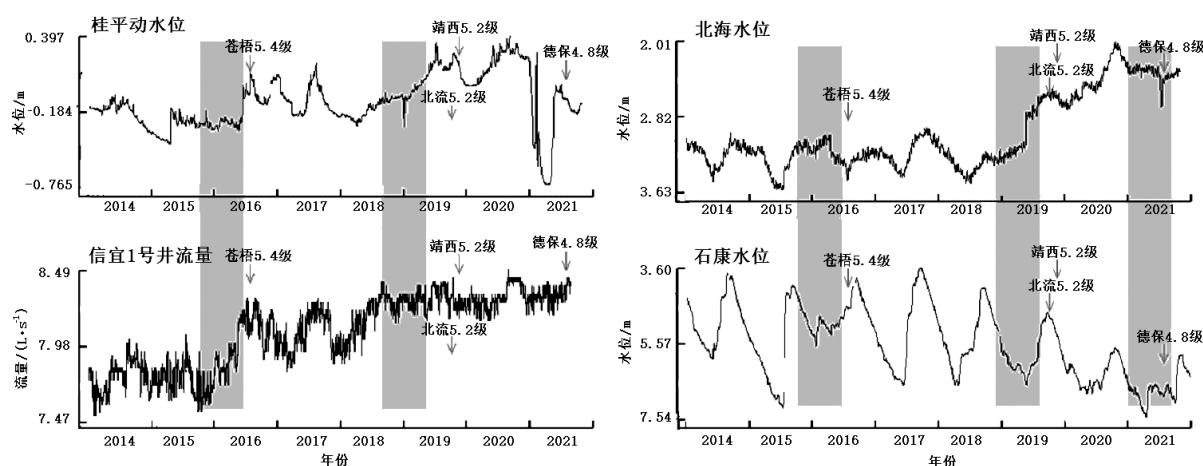


图3 3次地震震中300 km范围内观测井水位年动态畸变图

Fig. 3 Annual dynamic distortion of the water level of observation wells within 300 km from the epicenter of the three $M \geq 5.0$ earthquakes

3.3 震前高水位异常

3 次地震前出现多口井水位的高值异常, 这是区域应力增强的表现, 这种震前高值异常在华北及东北也有过震例 (车用太, 鱼金子, 2004)。以 2016 年苍梧 5.4 地震为例, 震中 300 km 范围内共有 9 口水位、流量观测井, 东津、花都水位因仪器不稳定、资料不可靠无法用于预测, 其它井的水位、流量动态如图 4 所示。

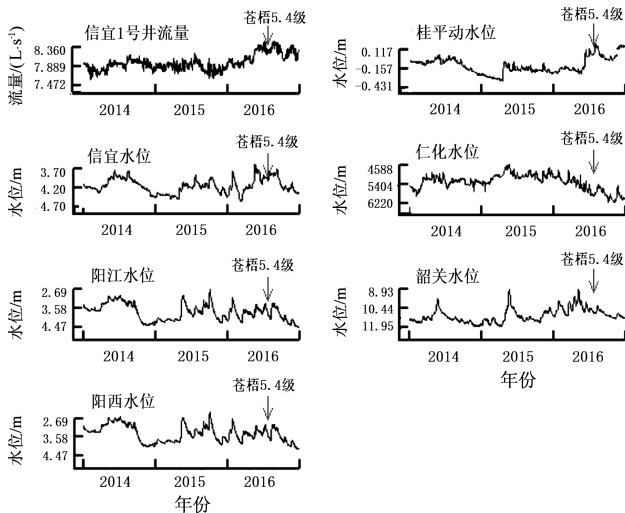


图 4 2014 年苍梧 5.4 级地震震中 300 km 范围观测井水位动态图

Fig. 4 Water level dynamic diagram of observation wells within 300 km from the epicenter of the Cangwu M5.4 earthquake in 2014

从图 4 可见, 苍梧 5.4 级地震发生前, 观测井总体呈现高水位动态, 其中距震中 200 km 范围内的信宜井水位及信宜 1 号井流量在 2016 年上半年出现持续上升, 5 月下旬开始加速上升, 尤其是信宜 1 号井流量从 2016 年 1 月 1 日至 7 月 10 日升幅达 0.612 L/s, 这种大幅上升且在没有持续降雨量支持下仍维持高位没有回落应是区域应力增强的真实表现; 同时同处距震中 200 km 范围内的桂平井水位, 也是离震中最近的水位观测点, 在 2016 年 6 月中旬出现加速上升, 6 月 12—14 日上升了 0.177 m, 之后同样维持在这一阶升平台上。其它震中距在 200 ~ 300 km 范围内的观测井水位也是呈现高水位或趋势上升的特征: 仁化水位从 2014 年开始发生趋势上升并维持在高位, 2016 年起因周边矿业严重干扰开始下降; 阳西、阳江、韶关水位也从 2015 年 1 月开始趋势上升, 并于 2016 年维持在高位, 震后才恢复趋势下降动态。同样, 北

流、靖西地震前桂平、北海、海口水位及信宜 1 号井流量也是在震前出现加速上升达近年最高值, 然后发震。

4 异常成因分析

地震的孕育过程总是伴随着区域应力的增强过程。水位的趋势上升及年动态畸变是否与区域应力的增强相关? 是否为地震的前兆反应? 根据水均衡理论, 当含水层水均衡发生变化, 补给量大于排泄量时, 则孔隙度增加, 渗透系数也增大。当含水层受力状态发生变化, 含水层受压应力影响产生变形时, 会导致孔隙度变小, 渗透系数增大。前人研究表明井水位的固体潮系数及气压效率与含水层参数间存在定量关系, 利用观测井中水位、配套气压等资料可以求解井水位动态变化中的潮汐因子与气压系数, 再进一步推算出孔隙度、渗透系数等含水层参数。因此本文以资料内在质量评估最好的平 1 井为例, 选择卷积回归法计算了其孔隙度和渗透系数 (张昭栋等, 1989; 晏锐等, 2012; 王礼恒等, 2012; 姚林鹏等, 2020), 结果如图 5 所示, 并对这些含水层水文地质参数进行深入分析。

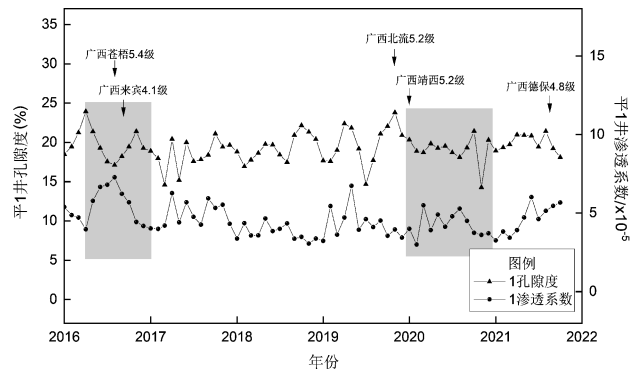


图 5 平 1 井孔隙度、渗透系数时序动态图

Fig. 5 Dynamic diagram of time series porosity and permeability coefficient of Pingma 1st well

从图 5 可见, 靖西、北流地震发生前, 孔隙度趋势下降、渗透系数趋势上升, 这充分反应了区域压应力的增强过程 (平 1 井与靖西 5.2 级地震震中距仅 92 km)。苍梧地震发生前, 孔隙度和渗透系数均增大。经调查平 1 井在 2016 年 4 月因暴雨导致洪水倒灌流入水井, 水位阶升, 处在含水层水的补给量大于排泄量的阶段, 这与水均衡理论是相符的。因此图 5 中苍梧地震前的趋势变化反应

的主要是干扰异常,地震前兆异常可能是被幅值更大的干扰异常所掩盖,但这种干扰时间是短暂的,4月以后的渗透系数增大可能含有区域应力增强的成分,因为毕竟上升过程持续了4个多月。

结合该区域的重力分析,2017年8月至2019年9月异常井所处区域为NW向平行的百色—合浦断裂带和巴马—博白断裂带,出现异常增加,累积重力变化差异超过80 μGal ,而2017年8月至2018年9月并未出现异常,说明异常出现的时间段为2018年10月至2019年9月(这一分析的基础资料引自全国形变学科2022年度会商报告,图略)。进一步分析发现靖西地区重力场异常变化时段(2018-09—2019-09)也是北海井水位、信宜1号井流量转折出现年动态畸变的时段(图6),且累积重力异常的空间位置正好是异常井所处区域,即水位年动态畸变与累积重力异常呈现出时间上的同步性、空间上的叠加性,说明水位年动态畸变是区域应力加速增强的表征。对于封闭性较好的深层承压井来说,通过计算井孔水位的潮汐因子和水位变化量,就可以求得该井的含水层体应变的变化量。应用前人反演应力的分析方法(张昭栋,张广城,1987;孙小龙等,2011;史浙明等,2012;杨柳等,2014;张淑亮等,2019)进一步用平1井水位反演垂向应力,反演结果显示3次地震前该井均出现压应力增强现象,且这一现象一般在震前半年出现,其异常出现时间也与累积重力异常时段及水位群体出现年动态畸变的时间段相重合,如图7所示。

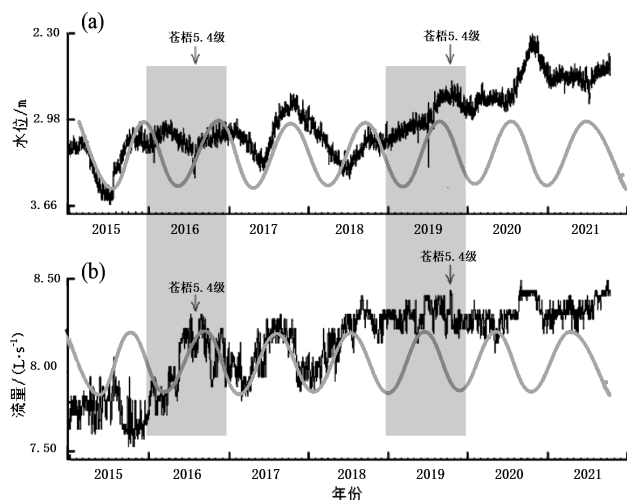


图6 北海井水位(a)和信宜1号井流量(b)时序曲线

Fig. 6 Time series curve of water level of Beihai well (a) and flow of Xinyi 1st well (b)

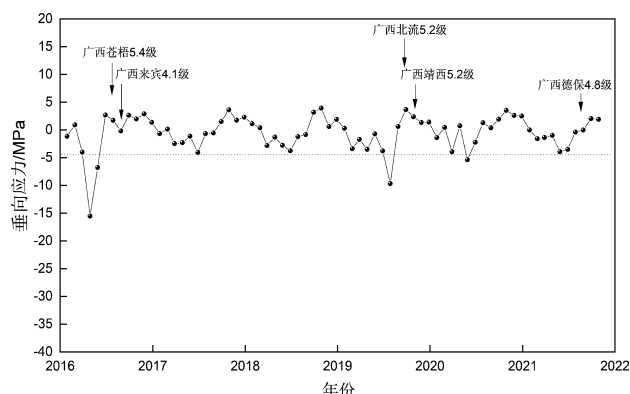


图7 平1井垂向应力变化时序曲线

Fig. 7 Time series curve of the vertical stress change of water level of Pingma 1st well

量化的断裂信息可为地震危险性分析、地震预测等方面的深入研究提供支持(阎春恒等,2020)。震源机制解就能提供量化的断裂信息。通过3次地震的震源机制解,可以发现异常在构造层面上的依据。从发震构造来看,3次地震均与NW向平行的构造密切相关,其发震构造或控震构造均是NW向的断裂带,这也是位于这组NW向断裂带上的水位观测井能够捕捉到前兆信息的构造依据。根据震源机制解、地震烈度等震线长轴方向、余震分布,结合野外地震地质调查结果分析认为,苍梧5.4级地震的控震构造应为贺街—夏郢断裂,发震构造可能是其NNW向的分支断层。此次地震震中所在的桂东北地区地壳内6 km深度存在一个2 km厚的低速层,推测为结晶基底与上硅铝层之间拆离滑脱形成的韧性剪切带(周依等,2019),这为应力的传导提供了有利条件,这也可能是本次地震300 km之外的观测井也产生映震的原因。

北流5.2级地震的发震构造是NW向的米场—石窝断裂(广西壮族自治区地震局,2019;阎春恒等,2019),该断裂带为九塘井、信宜井、信宜1号井所在区域的NW向巴马—博白断裂带的组成断裂(广西工程防震研究院,2015);靖西5.2级地震的发震构造尚无定论,初步判定可能是NE向的下雷—灵马断裂或NW向黑水河断裂。综合地质调查、现场灾害调查、烈度分布和余震展布结果推测,NE向的下雷—灵马断裂可能性更大。需要指出的是,地质调查得到的下雷—灵马断裂的倾向与反演获得的发震断层面倾向不一致,而走向NW、左旋走滑性质的区域断裂在地震孕育过程中

可能起到控震作用（苏珊等，2020）。从图 8 可见，九塘、石埠、平 1、香 1、石康、北海、信宜 1 号井就布设在这组 NW 向断裂带及其邻区内，因此有可能捕捉到断裂带应力积累及变化的过程，

实际上这些井的水位、流量的异常是最显著的，均是在北流和靖西地震震前就提取到异常，且在孕震过程中的不同阶段发生趋势性上升、下降、转折或畸变、高值异常。

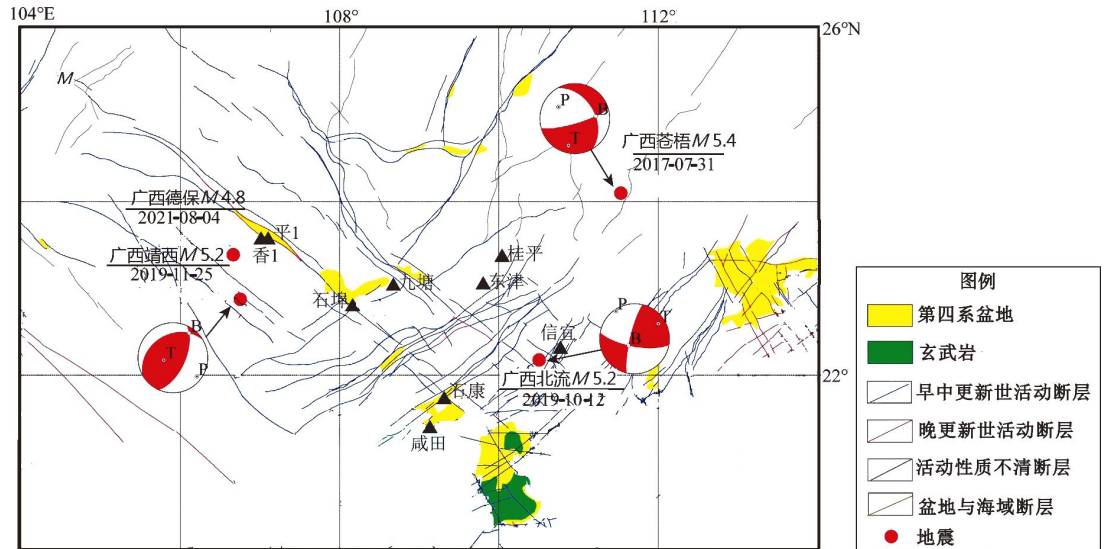


图 8 苍梧、靖西、北流地震震源机制解及区域构造

Fig. 8 Focal mechanism solutions of the Cangwu, Jingxi and Beiliu earthquakes and structures in the vicinity

5 粤桂琼流体台网映震能力分析

综上所述，研究区水位观测点所处的构造位置及 3 次地震的发震构造均与 NW 向平行的百色—合浦断裂带和巴马—博白断裂带密切相关，这为观测井映震能力分析提供了构造基础。含水层水文地质参数计算及水位压力、应力反演的结果显示，3 次地震前压力增强，孔隙度减小，渗透系数增大，水位上升，符合水文动力学机理；而这些参数的异常与水位年动态畸变及累积重力异常呈现出时间上的同步性、空间上的叠加性，说明这些水位动态异常同样有其动力学意义。结合以上分析认为震前水位的趋势上升、年动态畸变、

加速上升及高值异常等不同动态正是区域应力积累过程中不同阶段的表征，据此认为粤桂琼流体台网能够真实反映区域应力场的变化，能够对该地区的中强地震做出反映，具备较好的映震能力。苍梧 5.4 级地震 300 km 范围内共有 8 口水位观测井、1 口流量观测井；北流 5.2 级地震震中 300 km 范围内观测井达 16 口；靖西 5.2 级地震周围台站较少，只有 6 口观测井。震后对这些观测井水位的映震情况进行统计分析，发现除评估效能低的观测井外，其它观测井基本都有不同程度的前兆反映，见表 1。苍梧地震前震中 300 km 范围内 77.8% 的观测井有前兆反映，北流地震前 75.0% 的观测井有前兆反映，靖西地震前所有观测井都有不同程度的前兆反应。可见粤桂琼流体台网对

表 1 苍梧、北流、靖西地震前兆反应观测井统计

Tab. 1 Statistics of observation wells with precursors of the Cangwu, Beiliu and Jingxi earthquakes

地震	有反应观测井	无反应观测井	合计井数/映震井占比
苍梧 5.4 级	桂平、仁化、韶关、信宜、阳江、阳西、信宜 1 号井，共计 7 口观测井	东津、花都	9/77.8%
北流 5.2 级	桂平、九塘、石埠、石康、北海、信宜、信宜 1 号井、罗屋、海口、向荣、火山、三水，共计 12 口观测井	东津、阳江、阳西、潭牛	16/75.0%
靖西 5.2 级	平 1、香 1、九塘、石埠、石康、北海，共计 6 口观测井	—	6/100.0%

这类中强地震能较好地做出一定程度的反映，但程度不同，有些异常在震前就能明显判定，有些异常在震前难以发现或难以判定。特别是靖西地震与北流地震发震时间只差44 d，震中300 km范围内九塘、石埠、石康、北海4口水位观测井又处在交集部位，很难分清具体是哪次地震的前兆反应，其异常有可能是2次地震孕育过程的综合反应。汶川地震前也出现这类群体趋势异常，陆明勇等（2013）认为这种异常不是一次地震，而可能是多次地震的“共同前兆”。有的观测井虽超出地震震中300 km范围，但还是捕捉到了一些前兆反应。

6 结论与讨论

本文系统梳理了粤桂琼流体台网在广西2016年苍梧5.4级、2019年靖西5.2级、北流5.2级地震的映震能力、映震特征及异常成因机制，分析认为：

（1）粤桂琼流体台网能够对所控地区的中强地震做出反映，具备较好的映震能力。

（2）粤桂琼流体台网对中强地震的映震特征主要表现为趋势性和群体性，具体表现在孕震初期同一组同向的断裂带上的多个观测井井水位趋势上升，中期的年动态畸变及震前的高水位异常。

（3）形变资料（如重力资料）和水位应力反演及含水层水文地质参数能为水位异常提供动力学及水文动态学的依据。震情跟踪工作中结合重力及水位应力反演、含水层水文地质参数综合分析可以对地震的时空要素做出更为准确地判定。因此多个观测井井水位趋势上升可以作为该区域的背景预测指标，水位年动态畸变可以作为中期预测指标；水位应力反演及含水层水文地质参数可以作为中期指标应用到日常震情跟踪工作中。

（4）尽管粤桂琼流体台网大多数井水位对3次中强地震都有前兆反应，但有的异常在震前无法辨识，比如高水位异常常常被掩盖在降雨干扰中而被忽略，毕竟水位高值未发生地震的例子也不少。这就需要从更大的空间范围查明水位高值是否存在群体性，如果存在则可判定为异常，这样更具可靠性，然后在时间维度上从更长的时间范围对比分析当时的降雨量是否能支持这一幅度

的高值并给予确认。震前发现的异常多是香1、平1、石埠、九塘井所反映的这类背景性的趋势异常，其空间指示意义更强，且范围较广，多为观测井所在的断裂带与之平行的一组断裂带上；时间指示意义的指标较少，水位年动态畸变虽可以作为时间指标，但多为中期指标，时间在半年至一年，只能作为年度预测指标。在2016年以来的震情跟踪工作中，华南片区流体学科会商工作组在震情跟踪工作中，应用百色—合浦、巴马—博白断裂带上的多井水位趋势上升及年动态畸变异常，在2017年度会商报告中对2017年靖西 $M_L4.6$ 地震做出过一定程度的年度趋势预测；2019和2020年度在华南地区流体学科会商报告中均指出，百色—合浦断裂带及邻区存在发生 $M_L4.5$ 地震的可能，结果2019年10月12日发生北流5.2级地震，2019年11月25日发生靖西5.2级地震。再者无法提取到可以预测地震强度的指标，4级、5级地震的前兆异常特征并无差别，比如在2019、2020年度预测存在发生 $M_L4.5$ 地震的可能，实际上北流和靖西均发生5级以上地震。实际上，2005年平果4.8级地震、2013年平果 $M_L4.9$ 地震、2017年靖西 $M_L4.6$ 地震也是在这种多井长趋势背景异常下发生的。需要指出的是该区域缺乏短临预测指标。

（5）在今后的震情跟踪工作中，建议以断裂带为片区划分单位进行跟踪，这样才能有助于在震前发现群体性异常，并根据异常的空间范围结合构造对未来的发震空间做出较为准确地判定；今后建设流体台网时最好在同一断裂带上布设3个观测站，以便在震前对断裂带的应力情况互相验证以便做出正确的判定；建议建立地球化学观测台网，弥补短临预测指标的缺乏。也可以考虑建立流动地球化学观测台网，充分利用华南地区温泉广布的地域优势，开展温泉地球化学观测，以期达到投入少见效快的效果。

安徽省地震局王俊高级工程师在含水层水文地质参数计算及水位应力反演过程中给予指导，广西壮族自治区地震局阎春恒高级工程师在图件绘制上给予帮助，海南省地震局解晓静、广东省地震局刘锦高级工程师提供了相关省份的观测资料，审稿专家为本文提出了科学、严谨的修改建议，在此一并表示感谢。

参考文献:

- 车用太, 鱼金子. 2004. 地下流体典型异常的调查与研究[M]. 北京: 气象出版社, 273-284.
- 车用太, 鱼金子. 2005. 地震地下流体学[M]. 北京: 气象出版社.
- 陈棋福. 2002a. 中国震例(1992-1994)[M]. 北京: 地震出版社, 37-53, 358-389.
- 陈棋福. 2002b. 中国震例(1995-1996)[M]. 北京: 地震出版社, 15-28.
- 陈棋福. 2002c. 中国震例(1997-1999)[M]. 北京: 地震出版社, 74-90.
- 樊春燕, 陈华静, 刘春国, 等. 2010. 水位电信号干扰识别的新方法[J]. 地震地磁观测与研究, 31(3): 88-94.
- 付虹, 钱晓东, 毛玉平, 等. 2015. 2014年云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震异常及预测[J]. 地震研究, 38(2): 181-188.
- 广西工程防震研究院. 2015. 玉林市博白县金茂购物广场项目工程场地地震安全性评价报告[R]. 南宁: 广西工程防震研究院.
- 广西壮族自治区地震局. 2019. 广西北流 5.2 级地震现场灾害调查报告[R]. 南宁: 广西壮族自治区地震局.
- 黄辅琼, 王吉易, 杨文政. 1998. 张北—尚义地震前地下流体异常特征分析[J]. 地震, 18(4): 358-366.
- 蒋海昆, 苗青壮, 吴琼, 等. 2009. 基于震例的前兆统计特征分析[J]. 地震学报, 31(3): 245-259.
- 蒋海昆. 2014. 中国震例(2003-2006)[M]. 北京: 地震出版社, 428-446, 630-651.
- 廖丽霞. 2019. 福建地下流体典型异常核实及分析应用[M]. 北京: 地震出版社, 46-66.
- 刘春国, 孔令昌, 杨竹转, 等. 2015. 我国地震井水位观测网监测效能评估[J]. 中国地震, 31(2): 329-337.
- 刘耀炜, 曹玲玲, 平建军. 2004. 地下流体短期前兆典型特征分析[J]. 中国地震, 20(4): 372-379.
- 陆明勇, 李志雄, 刘天海, 等. 2013. 强地震前地下流体趋势异常的再探讨[J]. 国际地震动态, 418(10): 21-23.
- 陆明勇, 刘耀炜, 范雪芳, 等. 2009. 地下流体长趋势异常变化与强震预测的初步研究[J]. 地震研究, 32(4): 323-332.
- 史浙明, 王广才, 刘春国. 2012. 基于汶川地震同震地下水位变化反演含水层体应变[J]. 地震学报, 34(2): 215-223.
- 苏珊, 阎春恒, 向巍, 等. 2020. 广西靖西 $M_s 5.2$ 地震震源机制解及发震构造[J]. 华北地震科学, 38(S2): 13-18.
- 孙小龙, 刘耀炜, 晏锐. 2011. 利用水位资料反演华北地区构造应力场变化[J]. 地震, 31(2): 42-49.
- 万迪堃, 董守玉, 蓝秀英. 1996. 地下水位地震短临预报前兆标志体系研究[J]. 华北地震科学, 14(1): 1-10.
- 王礼恒, 李国敏, 董艳辉, 等. 2012. 利用观测孔中地下水位潮汐效应计算天津滨海新区含水层参数[J]. 水文地质工程地质, 39(4): 7-11.
- 王熠熙, 孙小龙, 邵永新, 等. 2019. 天津王 3 井水位异常机理[J]. 地震学报, 41(6): 757-768.
- 阎春恒, 向巍, 苏珊, 等. 2019. 广西北流 $M_s 5.2$ 地震序列重新定位及其发震构造分析[J]. 华北地震科学, 37(S1): 11-16, 42.
- 阎春恒, 周斌, 李莎, 等. 2020. 利用小震分布和区域应力场确定龙滩库区地震断面参数[J]. 地震地质, 42(3): 562-580.
- 晏锐, 张立, 简春林. 2012. 云南曲靖井水位潮汐动态特征分析[J]. 地震学报, 34(3): 363-373.
- 杨柳, 马建英, 曹井泉, 等. 2014. 利用华北地区承压井水位资料反演含水层体应变[J]. 中国地震, 30(2): 249-259.
- 姚林鹏, 刘国俊, 李民, 等. 2020. 运城东郭井水位异常与孔隙度变化的分析[J]. 山西地震, (1): 33-36.
- 张淑亮, 李宏伟, 吕芳, 等. 2019. 基于数值模拟与含水层垂向应力反演的静乐井水位异常分析[J]. 震灾防御技术, 14(4): 854-868.
- 张昭栋, 张广城. 1987. 利用水位阶变资料反演震时应力场的调整变化[J]. 地震研究, 10(6): 693-702.
- 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 1989. 井水位的固体潮效应和气压效应与含水层参数间的定量关系[J]. 西北地震学报, 11(3): 47-52.
- 张肇诚. 1988. 中国震例(1966-1975)[M]. 北京: 地震出版社, 1-16.
- 张肇诚. 1990a. 中国震例(1976-1980)[M]. 北京: 地震出版社, 1-421.
- 张肇诚. 1990b. 中国震例(1981-1985)[M]. 北京: 地震出版社, 1-294.
- 张肇诚. 1999. 中国震例(1986-1988)[M]. 北京: 地震出版社, 184-212.
- 周依, 阎春恒, 向巍, 等. 2019. 2016年7月31日广西苍梧 $M_s 5.4$ 地震震源参数[J]. 地震地质, 41(1): 150-161.
- 周峥嵘, 吕坚, 周斌, 等. 2021. 华南地区地震预测指标体系[M]. 北京: 地震出版社, 15-28.
- DB/T 24—2007, 震例总结规范[S].

Analysis of Seismic Reflection Ability of the Guangdong, Guangxi, Hainan Fluid Network to Regional Moderate-strong Earthquakes

LIAO Lixia¹, LIN Zhiying¹, MO Peichan², TIAN Lei³

(1. *Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350001, Fujian, China*)

(2. *Guangxi Zhuang Autonomous Region Earthquake Agency, Nanning 530022, Guangxi, China*)

(3. *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*)

Abstract

By analyzing the fluid observation data of the Guangdong, Guangxi, Hainan fluid network within 300 km of the epicenter of the Cangwu $M_s5.4$ earthquake, the Jingxi $M_s5.2$ earthquake and the Beiliu $M_s5.2$ earthquake, it is considered that the most significant seismic reflection characteristics of the network are trend and group, which are specifically manifested in the long-term background trend anomaly of synchronous (or quasi synchronous) water level of multiple wells on the same fault zone or the same group of parallel fault zones. The annual dynamic variation anomaly in the middle period and the high water level anomaly in the first half year before the earthquake, and the annual dynamic variation of water level and cumulative gravity anomaly show synchronization in time and superposition in space. The calculation of hydrogeological parameters of aquifer and the inversion of water level stress show that the pressure increases, the porosity decreases, the permeability coefficient increases and the water level rises before the three earthquakes, which are in line with the hydrodynamics mechanism. It shows that the water level observation network of Guangdong, Guangxi and Hainan can truly reflect the change of regional stress field. The annual dynamic distortion and accelerated rise of water level before the earthquake are the characteristics of regional stress enhancement. The comprehensive analysis shows that the water level observation network of Guangdong, Guangxi and Hainan is sensitive to medium-strong earthquakes in this area and has good seismic reflection ability.

Keywords: the Guangdong, Guangxi, Hainan fluid network; annual dynamic variation of water level; abnormal trend; seismic reflection capacity; the Cangwu $M_s5.4$ earthquake; the Jingxi $M_s5.2$ earthquake; the Beiliu $M_s5.2$ earthquake