

马震,于晨,张小涛,等,2020. 2019年6月17日长宁 M_s 6.0地震前地震活动和水位的加卸载响应比异常研究. 中国地震, 36(3):550~560.

2019年6月17日长宁 M_s 6.0地震前 地震活动和水位的加卸载响应比异常研究

马震^{1,2)} 于晨²⁾ 张小涛²⁾ 余怀忠²⁾

1) 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

2) 中国地震台网中心,北京 100045

摘要 加卸载响应比(LURR)方法是通过固体潮加卸载过程中的某一物理参数的响应差异探查区域应力场演化。本文将这一方法应用于2019年6月17日四川长宁 M_s 6.0地震,根据LURR时序演化探查震源区介质的应力状态变化,提取可能的震前异常信息。首先采用贝尼奥夫应变作为响应量计算LURR,通过固体潮在震源断层面的最优滑动方向上引起的库仑破坏应力变化来判断加载还是卸载,结果显示LURR值自2018年年初开始快速增加并在2018年年中达到峰值,此后异常持续至地震。在此基础上对该地区的大地形变和地下井水位资料进行了LURR分析,发现水富水平摆倾斜仪的东西和南北分量在LURR出现异常的同期发生明显偏转,而地震周边的地下井水位高值变化过程与长宁地震也有较好的对应关系。研究表明在长宁地震发生前,存在地震活动和地下水位的LURR异常,且异常时间与水富倾斜同步,暗示震源区介质存在明显的应力积累过程。

关键词: 长宁地震 加卸载响应比 贝尼奥夫应变 地下水位 大地形变观测

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0550-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2019年6月17日22时55分四川省宜宾市长宁县(28.34°N,104.90°E)发生 M_s 6.0地震,震源深度16km。统计结果显示,1900年以来,震中50km范围内未发生6级以上地震;震中100km范围内发生过2次6级以上地震,分别为1917年7月31日云南大关6.8级和1974年5月11日云南大关北7.1级地震,其中云南大关北7.1级地震距本次地震震中约80km。震中100~200km范围内发生6.0级以上地震5次,均属1935~1936年四川马边6级强震群序列。需要指出的是本次地震发生区自2018年12月以来5级及以上地震活动较为

[收稿日期] 2019-12-19; [修定日期] 2020-06-15

[项目类别] 科技部国际科技合作项目(2018YFE0109700)、国家自然科学基金(41942014)和亚太经合组织合作基金共同资助

[作者简介] 马震,1995年生,男,硕士研究生,主要从事地震活动性方面的研究。E-mail:1051523455@qq.com

余怀忠,通讯作者,男,1975年生,研究员,主要从事地震预测理论和孕震机理研究。

E-mail:yuhz750216@sina.com

活跃,其南侧分别于2018年12月16日和2019年1月3日发生兴文5.7级和珙县5.3级地震。

此次地震位于川东南地区,距离最近的断裂带华蓥山断裂带,实测为逆断层(何登发等,2019)。从构造上看,本次地震发生于四川盆地边缘的长宁背斜构造附近规模不大的次级断层面上,由于该地区活动断层较多,地质构造复杂,所以余震相对较为丰富(尹欣欣等,2019)。

本次长宁6.0级地震前是否存在可探测的异常活动?不少学者围绕这一问题开展过研究。黄辅琼等(2019)观测到在本次长宁地震发生前的2天时间范围内,川滇地区一些观测台站的水位水温数据存在可识别的显著异常现象;马亮等(2019)在对地震频谱进行系统跟踪的过程中也发现在本次长宁地震前存在明显的频谱偏移现象;而李艳娥等(2019)发现长宁地震前5年华蓥山断裂带存在视应力增强的过程;阮祥等(2008)认为可能是附近的盐矿井注水诱发地震,张致伟等(2018)对地震发生时展现出的特征进行了分析。此外,还有专家认为地震发生和区域的构造活动等因素有关(易桂喜等,2019),何登发等(2019)认为长宁背斜区的地震主要发生在背斜南翼,属于沿基底断层下盘断坡部位活动形成的天然地震。而余怀忠等(2019)在2018年底,利用基于加卸载响应比(LURR)(Yin et al,1995)的多方法综合预测模型提出该地区存在明显异常(图1),相关结果提交至中国地震台网中心2019年度地震趋势研究报告,说明该地区存在显著应力积累导致的地震危险性。

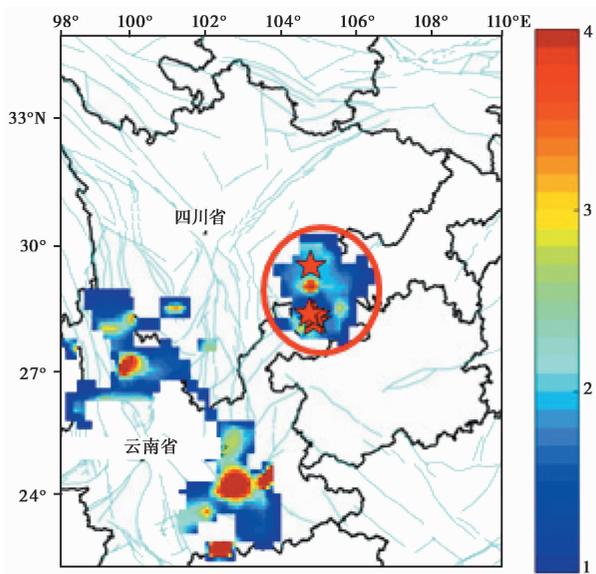


图1 西南地区LURR异常的空间分布

计算时间窗:2018年1月1日~12月31日,详细的LURR计算参数取自Yin等(2008)

本文将分别采用地震释放的贝尼奥夫应变(BS)和地下水位(WL)作为响应量进行LURR的计算,通过多重物理参量检验,根据LURR演化过程对震前较长时段长宁地区的应力应变场进行分析,在此基础上,收集了震源区附近的地壳形变观测资料,研究对应时段内可能存在的地壳变形过程,并进一步将该算法应用到其他更多震例的检验中,提高算法的可信度。在此研究之前,Zhu等(2019)开展地下流固耦合及渗流问题的研究工作,探讨了地下

流场特性及物理传递过程,为建立震前异常的地下水位加卸载响应比识别方法提供了理论支撑。目前,本论文所使用的水位 LURR 异常识别方法尚未见相关研究。

1 LURR 基本原理

LURR 是通过系统对外界响应的变化判断其应力状态,从而实现地震预测的目的(尹祥础,1987、2004)。在岩石实验中,随着应力的不断增加,岩石会经历弹性、损伤和失稳过程。当应力较低时,加载和卸载的响应相当(图 2);而当应力达到较高水平时,岩石内部出现的损伤会致使加载和卸载的响应出现差异,因此通过对比加卸载过程中的响应变化可以判断岩石的应力状态。

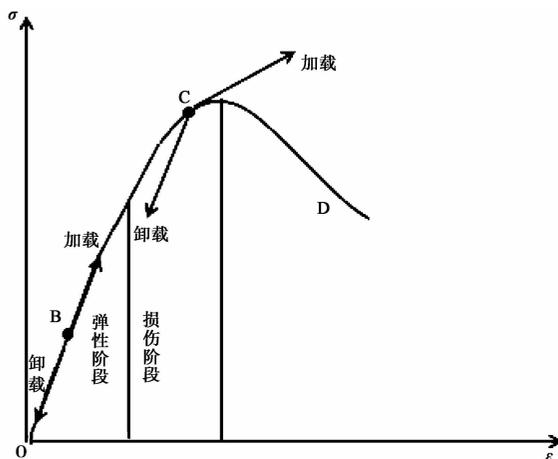


图 2 典型的岩石本构关系曲线

B 和 C 两点处给出不同阶段加载和卸载响应率的对比

可以定义响应率(X)量化描述加卸载过程的响应变化。根据固体介质的本构关系(Wawersik et al,1971),假设载荷的增量为 ΔP ,相应的响应增量为 ΔR ,响应率可以定义为

$$X = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta R}{\Delta P} \right) \tag{1}$$

当应力较低时,加载和卸载的响应率为线性;随着应力的增加,由于介质内部损伤的出现,导致加载和卸载时的响应率发生变化,随着应力的增加,这种差异会愈发明显,直到最终破坏(Yu et al,2006)。这样,加卸载响应比被定义为

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \tag{2}$$

其中, X 代表响应率,“+”和“-”分别表示加载和卸载。当处于弹性范围时, $X_+ = X_-$,因此 $Y = 1$;当介质出现损伤时, $X_+ > X_-$,则 $Y > 1$ 。根据 Y 值的变化可以判断固体介质的应力状态。

2 长宁地震前的 LURR

2.1 以贝尼奥夫应变(BS)作响应量

在地震研究实践时,通常取一定时间窗和空间窗内地震所释放出的能量作为响应量,

LURR 被定义为

$$Y_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N^+} E_i^m\right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N^-} E_i^m\right)_-} \quad (3)$$

其中, E_i 为第 i 个地震事件所释放出的能量, N^+ 和 N^- 分别代表加载和卸载的事件总数。 m 可以取 $0 \sim 1$ 之间的任意数字, 特别当 $m=1$ 时, E^m 代表释放的地震能量; 当 $m=1/2$ 时, E^m 代表 BS。 为了避免由于地震记录完备性导致的比值强烈波动, 计算时间窗中通常包含了多个加卸载过程。

首先, 利用传统的地震释放的 BS 作为响应量计算了震前的 LURR 时间序列, 计算的起止时间为 2010 年 1 月 1 日~2020 年 1 月 1 日, 选择区域为半径 150km 内, 计算时间窗为 1 年, 滑动步长 1 个月。 数据来源于中国地震台网中心 (CENC) 的地震目录, 将中小震 ($1.0 \leq M \leq 4.0$) 释放的 BS 作为加卸载响应, 预测震级 $M \geq 5.0$ (刘月等, 2012)。 并通过 G-R 关系拟合发现 2010 年以来该区的地震完备震级在 1.0 左右, 如图 3 所示, 表明长宁地区监测能力较好。 震源机制取自全球震源机制解^①, 选取公认测定的 1 组数据作为详细的主断面

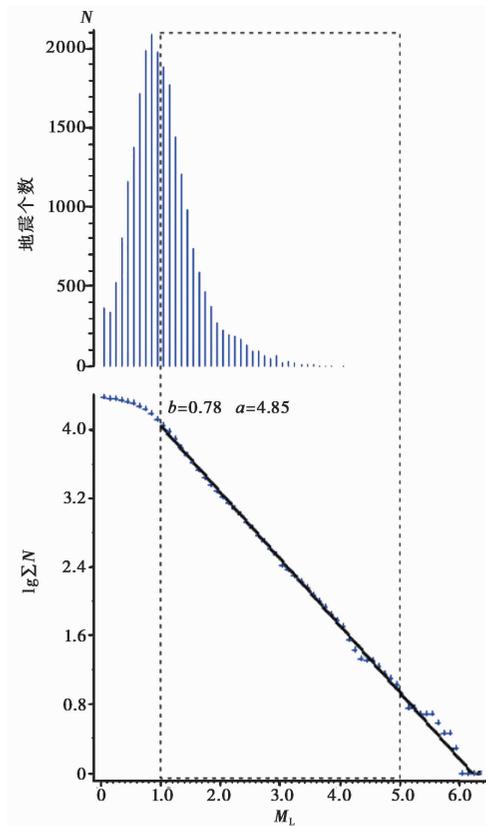


图 3 长宁地区地震目录的完备性分析

① <http://www.globalemt.org/>.

参数,计算库仑破裂应力的内摩擦系数为 0.4。详细的 LURR 演化曲线见图 4。结果显示,2010~2019 年间,每当 LURR 高值出现,均会伴随一定的显著地震事件,其中在 2018 年前的几次 LURR 高值对应的实际震级分别 5.2、5.2、5.6、5.1。而在本次长宁 M_s 6.0 地震前,LURR 异常尤为显著,异常值更高,持续时间更长。自 2018 年初开始,LURR 值由 1.2 逐渐升高,并在 2019 年初达到 1.7 左右的峰值,此后异常一直持续至本次地震发生,之后 LURR 逐渐发生回落。其中达到峰值时的 LURR 水平对应于在此期间相继发生的珙县 M_s 5.6、兴文 M_s 5.7、长宁 M_s 6.0 以及其他多次 $M_s \geq 5.0$ 地震,而对于本次长宁地震震级水平与对应的 LURR 高值水平有所偏差的原因将在下文详细讨论。

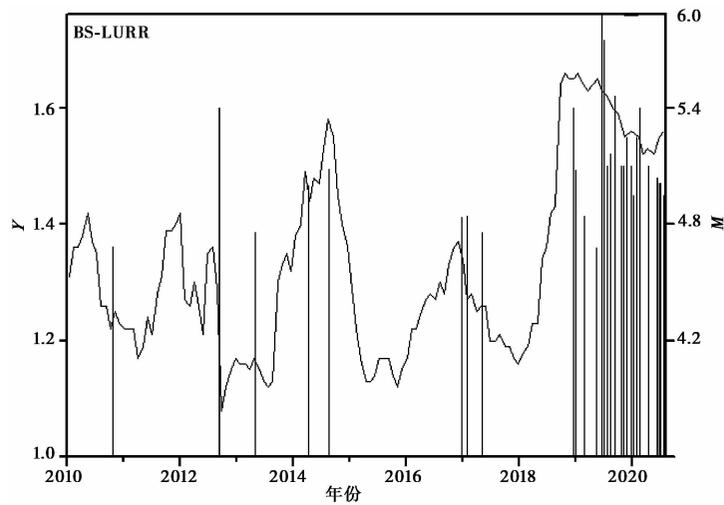


图 4 利用 BS 计算的长宁地震前 LURR 时间序列演化

选用的震源机制解:走向 = 184°, 倾角 = 40°, 滑动角 = 123°, 震源深度 = 12km; 图中竖线表示 5 级及以上地震

2.2 以地下水位 (WL) 为响应量

为了检验上述震前变化的可信度,进一步利用 WL 作为响应量计算 LURR,并定义为 WL-LURR。通过对比两组 LURR 曲线,实现多重物理参量检验,提升信度。

固体潮加载会使得地下岩石产生变形、破裂,由于深井水位具有的流动性,这一过程会被地下井水位记录。当构造应力较小时,地下岩石发生的是弹性变形,加载和卸载的水位变化没有差异。随着应力的不断积累,当超过弹性极限,岩石出现裂隙并导致容水体积发生变化,WL 可能会因此发生变化。随着裂隙不断增加,差异会愈加明显,直至灾变发生。另一方面,根据 Kaiser 效应 (Li et al, 1993),岩石在加卸载阶段产生的破裂程度不同,通常加载阶段产生的裂隙要多于卸载阶段 (Kurita et al, 1979),这就会导致在加卸载过程中的水位变化出现差异。所以将平均水位作为响应量引入到 LURR 的计算,并定义加载和卸载阶段的平均水位之比为 WL-LURR

$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N^+} H_i \right) / (N^+)}{\left(\sum_{i=1}^{N^-} H_i \right) / (N^-)} \quad (4)$$

其中, H_i 表示第 i 个水位值, N^+ 和 N^- 分别代表处于加载和卸载阶段的水位测值总数。

本研究依据的原理为: 当应力加载到较高的水平, 系统进入扩容膨胀阶段, 此时, 任何微小的应力变化都可能会造成裂隙的产生; 另一方面, 结合 Kaiser 效应可知, 微破裂更趋向由增加的库仑破坏应力造成, 即在循环的潮汐应力作用下, 加载阶段比卸载阶段引起更多的水位变化。整个演化过程可以简化为图 5, 当构造应力较低时, 岩石处于弹性阶段, 无裂隙产生, 此时未发生扩容现象, 加卸载过程体积无明显差异, 因此无水位差异出现, WL-LURR 值接近于 1, 表示为图 5(a); 随着构造应力积累到较高水平, 岩石开始有裂隙产生, 此时发生扩容现象, 导致加卸载过程的水位响应出现差异, $WL-LURR > 1$, 表示为图 5(b)。

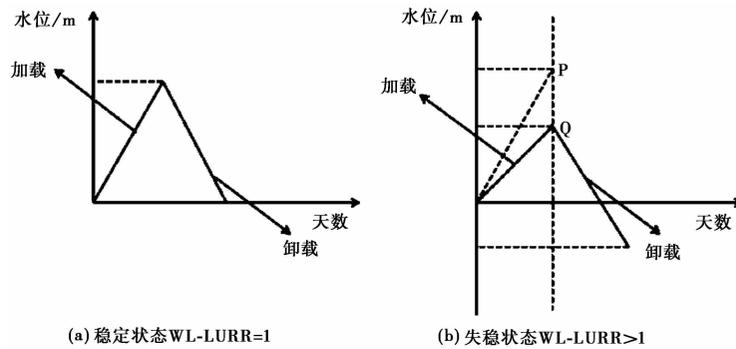


图 5 不同构造应力状态下 WL、岩石扩容以及 WL-LURR 之间的动态联系示意图

P 点代表岩石未发生扩容时在一个水位变化周期中所能达到的水位高度最大值; Q 点代表扩容产生后该周期实际达到的水位高度峰值; PQ 的高度代表由于扩容在一个水位变化周期产生的高度差

本文选择震中距最小的 3 口井的水位资料进行 WL-LURR 分析, 分别是距震中 76km、85km 和 105km 的南溪井、泸州井和荣昌华江井, 其深度从 100m 到 300m 不等, 在距本次地震震中 100km 范围内, 除上述南溪井和泸州井外无其他水位观测井分布, 100~150km 范围内除荣昌华江井无其他观测井分布, 这 3 口井的分布情况见图 6, 资料取自于中国地震数据

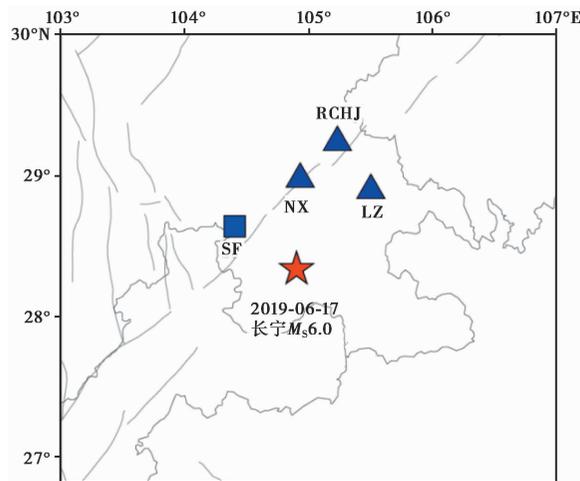


图 6 2019 年 6 月 17 日长宁 6.0 地震及周边观测台站的分布

三角形代表水位观测井; 矩形为水平摆倾斜仪观测台; NX: 南溪; LZ: 泸州; RCHJ: 荣昌华江; SF: 水富

中心^②。

需要说明的是在自然条件下井水位观测会受到气压、仪器和人为活动等影响,这些均可能造成一定的误差,所以通过以下步骤对原始水位数据进行预处理以保证能够清晰观测到固体潮的水位响应,具体如下。

(1) 去除数据极值:通过依次计算连续的 2 个水位测点的水位差值,如果差值大于平均差值的 2 倍,则将其判定为异常极值并去除。其原因在于在岩石发生破裂时,其体积为弹性体积的 0.2~2 倍 (Brace et al, 1966), 对应的水位变化幅度也不会超过这一范围,如果超出则认为干扰并予以去除。

(2) 补全数据:将缺失的水位测点数值用线性插值技术进行补全。

(3) 滤波:将补全后的数据用 Butterworth 滤波器进行带通滤波,保留频段为 12~24h 潮汐相关过程的数据。

图 7 为预处理前后的水位资料,并在表 1 中给出了 3 处水位观测井的详细信息。

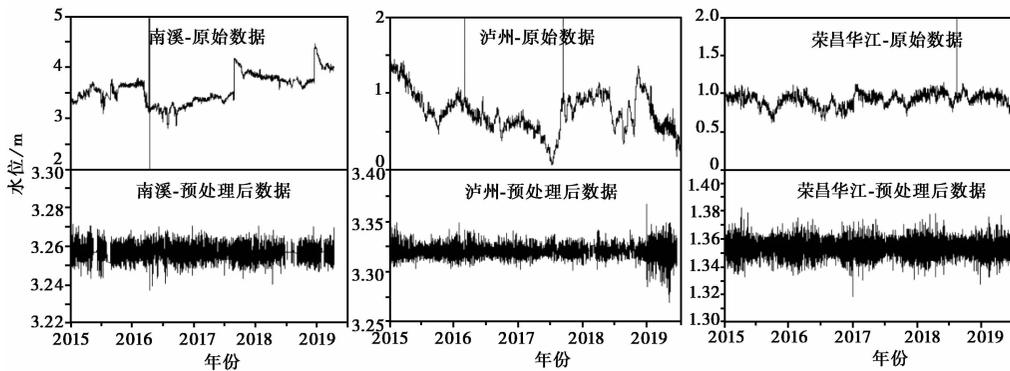


图 7 南溪、泸州和荣昌华江井原始和滤波后的水位数据

南溪井数据截至 2019 年 4 月 10 日

表 1 用于进行 LURR 计算的 WL 井的详细信息

事件	台站名称	震中距 /km	位置/(°) (北纬/东经)	起止时间 (年-月-日)	深度 /m	采样率 /h
长宁地震	南溪	71	28.98/104.93	2015-01-01~2019-04-10	105	1
	泸州	85	27.38/103.58	2015-01-01~	300	1
	荣昌华江	105	27.45/103.58	2015-01-01~	251	1

注:南溪井水位于 2019 年 4 月 10 日停止观测。

图 8 为使用 WL 计算的 WL-LURR 时间序列,计算时间窗为 60d,滑动步长为 30d,采用的震源参数与使用 BS 计算 LURR 时相同。

对比 3 口井 WL-LURR 的时间序列,可以看出在长宁地震发生前的较长一段时间(即 2018 年前)比值时间序列演化平稳,均在 1.02 范围以下波动;而从 2018 年年初开始比值序列的演化打破之前的平稳状态并开始出现较大幅度的攀升,超过 1.02,并在震前 2 个月达到

② <http://data.earthquake.cn/>.

峰值。虽然南溪水位观测井由于仪器改造的缘故,水位数据只到2019年4月10日,从图中我们可以看出南溪井水位 LURR 正处于明显的上升趋势。

必须指出的是,3口井的 WL-LURR 异常存在准同步性,但年变信息明显仍存在一定影响,特别是荣昌华江的水位 LURR 异常的年变信息最明显。就本研究而言,虽然 WL-LURR 存在年变信息且不可避免,但是对比其幅度对 LURR 的趋势判定影响不大。也就是说,从历年来的 WL-LURR 变化幅度对比可观测到长宁地震发生前的明显异常。

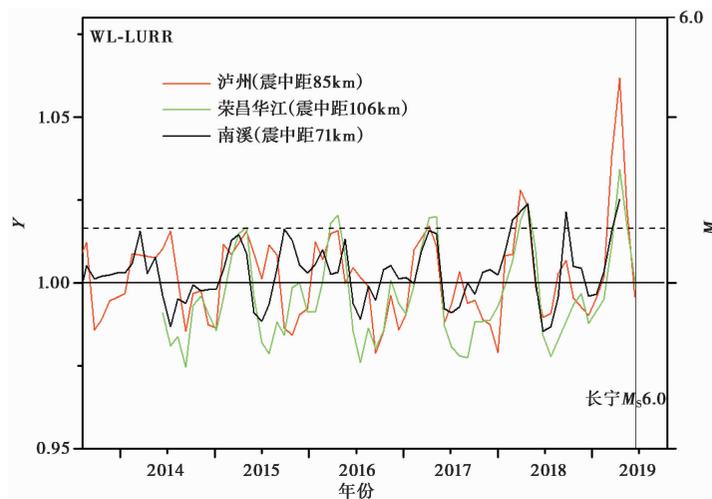


图8 南溪台、泸州台和荣昌华江台的井水位 LURR 时间序列

3 讨论

LURR 是一个反映介质本构关系动态变化的灵敏参数,计算的理论依据通过潮汐应力触发地震来完成,当构造应力处于较低水平时(例如在弹性阶段内),微小的应力变化(例如潮汐应力)不足以触发产生地震,加载和卸载释放的地震 BS 没有显著差异,这时的 LURR 值维持在 1 左右;当构造应力积累到相对较高水平时,较小的应力变化就可以触发产生地震。从图 4 的 LURR 演化曲线可以看出,在大部分时间里 LURR 处于相对较低状态,而在地震发生前的 1~2 年开始攀升并在震前数月达到峰值,这与 Yin 等(2000)的观点相一致。事实上,在以往多次显著地震前由 BS 得到的 LURR 时间序列均能观测到一定的异常变化过程(图 4)。LURR 反映了区域的应力积累过程,其异常的幅度、持续的时间尺度应该与地震震级存在一定的关联性。然而,仔细对比不同地震前的 LURR 值,发现本次长宁 $M_s6.0$ 地震前的异常幅度虽比以往地震要高、持续的时间也更长,但对比震级却高了很多,即异常与对应的地震似乎不匹配。这暗示着本次长宁 $M_s6.0$ 地震可能并非完全由构造应力积累所致,其他外界因素应该对该地震能够达到如此规模有相当贡献,具体原因还有待深入研究。

对于将 LURR 应用于 WL 中,张昭栋等(1997)也曾做过类似研究,然而其仅考虑到体应变加卸载在孕震过程中产生的变化,对此进行了探讨(即利用井水位潮汐幅度的变化与固体潮体应变的比值作为响应量进行 LURR 的计算),未考虑到扩容部分加卸载在孕震过程中所产生的差异。而实际地下岩石在周期应力作用下不仅发生弹性应变,还会产生由偏应力导

致的扩容变形(裂隙的变化与地震的孕育发生直接相关),而张昭栋等(1997)也未针对扩容变化伴随的水位变化进行系统分析,因而难以达到规律性的认识。本研究的创新之处在于岩石扩容膨胀(Brace et al,1966;Scholz et al,1973)引起的水位变化通过 LURR 加以解释,且量化了预测目标。

从图 8 中利用 WL 得出的 WL-LURR 演化曲线也可以观测到上述变化特征。相比于传统的 BS 计算 LURR, WL 具有更好的连续性,所得 WL-LURR 波动幅度更小,演化规律更为稳定,因此能够更加准确地给出异常的临界水平。从进一步收集到的该地区地壳形变观测资料中发现,在长宁地震震中距 57km 的水富水平摆倾斜仪观测中,EW 和 SN 向在 LURR 出现异常的同期都发生明显转折变化(图 9)。从图 9 可以看出倾斜仪南北和东西分量从 2018 年开始发生了明显转折变化,这与上述 LURR 出现异常较为同步,说明此时该地区地壳应力可能发生了较大程度的积累。结合 BS-LURR 以及 SF 倾斜异常的同期出现均在 2018 年后,对比 WL 的 WL-LURR 时间序列,其值在上述异常出现前一直维持在 1.02 以下运行,而在异常出现后明显高于 1.02,所以可以将 1.02 作为水位 LURR 出现异常的阈值,并认为当 $LURR > 1.02$ 时存在异常,反之系统则处于稳定状态。

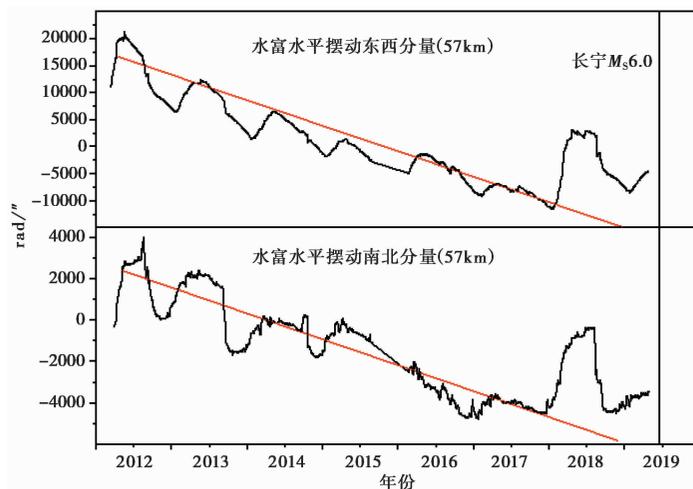


图 9 水富台水平摆斜仪倾斜 EW 和 NS 分量时间序列

虽然不同井的 WL-LURR 在震前异常峰值仅为 1.07 左右,仅超过稳定值 0.07,变化幅度只有 7%,但临界状态的阈值为 1.02,即变化幅度为 0.02,从变化幅度的角度分析,其波动程度已经超出数倍($0.07/0.02=3.5$),在计算 WL-LURR 的过程中主要比较其相对变化情况与变化的同期性。换言之,重点关注的不应该是 WL-LURR 变化的绝对值,而应该是相对变化幅度,这样,可以将 BS-LURR 与 WL-LURR 以及 SF 倾斜变化结合起来,通过多重物理参量检验提高异常的预测效率。

综上所述,推测长宁地震产生的原因可能包含两个方面,其一是构造应力积累,当载荷超过介质的承载水平时,触发微破裂或小地震的产生,从而导致 LURR 的高值异常变化;另一方面,由于工业活动也可能导致震源区介质本身承载能力降低,使得同等应力下岩石更容易发生破坏。然而无论何种原因,使用加卸载响应比方法均可能捕捉到有效的异常特征,进

一步通过多重物理参量检验能够提高预测效率。了解 LURR 方法的这一特点,可为我们今后探测大地震发生的时间和位置提供更多的帮助。

4 结论

本文研究结果显示,长宁地震前存在明显的加卸载响应比异常,结合大地形变资料,表明震源区介质存在明显的应力积累过程,显示长宁地震的发生与构造活动有关。同时,提出了新的地震前水位异常的加卸载响应比提取方法,建立了库仑破裂应力、扩容、水位变化与加卸载响应比之间的动态联系,通过不同种类参数的异常同期发生加深了对本次地震震前应力积累程度的认识。由图3发现,2018年前4次明显的 LURR 异常对应的震级分别为 5.2、5.2、5.6、5.1,根据异常幅度和震级的正比关系推算,2018年的 LURR 异常对应的最大震级水平在 5.7 左右,而实际震级为 6.0,考虑到震前 LURR 异常幅度与震级可能存在的匹配性,推测其一可能是估算模型本身的误差,这需要进一步改进;其二是其他因素对该地震的发生也有重要贡献,需要更多的依据加以支持。然而,无论如何,从加卸载响应比和大地形变观测时间序列中的异常可以获知显著的应力积累是从 2018 年年初开始,其峰值的出现与长宁 M_s 6.0 地震的发生对应,而异常的持续发展与期间不断发生的 $M_s \geq 5.0$ 地震相一致。而当前 LURR 的逐渐减小,表明区域介质正在逐渐趋于稳定。

参考文献

- 何登发,鲁人齐,黄涵宇,等,2019. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景. 石油勘探与开发, **46**(5):993~1006.
- 黄辅琼,田雷,2019. 宜宾长宁 6.0 级地震的同震及临震流体异常变化及其动力学意义初析. 国际地震动态, (8):176~177.
- 李艳娥,陈学忠,2019. 长宁地震前应力变化及震前触发过程探索研究. 国际地震动态, (8):255.
- 刘月,尹祥础,袁帅,等,2012. 量纲分析应用于地震预测的探索. 地球物理学报, **55**(9):3043~3050.
- 马亮,杨立明,程建武,等,2019. 前震与广义前震识别的频谱偏移法及其在长宁 6.0 级地震前的跟踪实践. 高原地震, **31**(增刊 I):17~25.
- 阮祥,程万正,张永久,等,2008. 四川长宁盐矿井注水诱发地震研究. 中国地震, **24**(3):226~234.
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等,2019. 2019年6月17日四川长宁 M_s 6.0 地震序列震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, **62**(9):3432~3447.
- 尹祥础,1987. 地震预测新途径的探索. 中国地震, **3**(1):1~8.
- 尹祥础,2004. 地震预报的新途径——加卸载响应比理论. 力学与实践, **26**(6):1~7.
- 尹欣欣,郭安宁,赵韬,等,2019. 四川长宁 M_s 6.0 地震区域构造应力场特征分析. 地震工程学报, **41**(5):1215~1220.
- 余怀忠,于晨,张小涛,等,2019. PI-LURR-SV-AMR 组合预测 2019 年度中国大陆地震危险区,中国地震台网中心 2019 年地震趋势研究报告. 142~145(保密一年).
- 张昭栋,陈学忠,陈建民,等,1997. 井水位固体潮加卸载响应比的地震短临前兆. 地震学报, **19**(2):174~180.
- 张致伟,孙小龙,2018. 四川长宁地区注水诱发地震的孔隙压力扩散特征. 国际地震动态, (8):132~133.
- Brace W B, Paulding Jr B W, Scholz C, 1966. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. J Geophys Res, **71**(16):3939~3953.
- Kurita K, Fujii N, 1979. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission. Geophys Res Lett, **6**(1):9~12.
- Li C, Nordlund E, 1993. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks. Rock Mech Rock Engng, **26**(4):333~351.
- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P, 1973. Earthquake prediction: A physical basis. Science, **181**(4102):803~809.
- Wawersik W R, Brace W F, 1971. Post-failure behavior of a granite and diabase. Rock Mech, **3**(2):61~85.
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al, 1995. A new approach to earthquake prediction—the Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. Pure Appl Geophys, **145**(3~4):701~715.
- Yin X C, Wang Y C, Peng K Y, et al, 2000. Development of a new approach to earthquake prediction: Load/unload response ratio

- (LURR) theory. *Pure Appl Geophys*, **157**(11):2365~2383.
- Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X, et al, 2008. The newest developments of load-unload response ratio(LURR). *Pure Appl Geophys*, **165**(3~4):711~722.
- Yu H Z, Shen Z K, Wan Y G, et al, 2006. Increasing critical sensitivity of the Load/Unload Response Ratio before large earthquakes with identified stress accumulation pattern. *Tectonophysics*, **428**(1~4):87~94.
- Zhu Q Y, Yang W B, Yu H Z, et al, 2019. A study on capillary actions of power-law fluids in porous fibrous materials via W-M function. *Int J Heat Mass Transf*, **129**:255~264.

Evolutions of LURR Anomaly Based on Seismicity and Groundwater Level Data before the June 17, 2019 M_s 6.0 Changning Earthquake

Ma Zhen^{1,2)} Yu Chen²⁾ Zhang Xiaotao²⁾ Yu Huaizhong²⁾

1) Institute of Earthquake Sciences, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract The load/unload response ratio(LURR) is a method to explore the evolution of regional stress field by detecting the difference of responses during the loading and unloading induced by tidal stress. Taking M_s 6.0 Changning earthquake as a case study, we analyzed the evolution of LURR time series, the change of stress state of source media, and the possible pre-earthquake anomaly. Firstly, the Benioff strain of small earthquakes are adopted as the loading/unloading response, and the change of Coulomb failure stress induced by earth tide, in the tectonically preferred slip direction on the fault surface of main shock, is used for differentiating the loading and unloading periods. The results show that the LURR values have anomalous increased since the beginning of 2018 and reached the peak in mid-2018. Meanwhile, the LURR method is also applied to the groundwater level data in the near field wells, and the pre-earthquake anomalies are observed too. In addition, we find that the changes can also be supported by the variations of the geodetic time series observed in the same neighborhoods during the same periods. Obvious changes in the EW and NS components of SF horizontal pendulum tiltmeter are observed during the period of LURR anomalies, which indicate that significant anomalies could be observed in LURR time series produced using both seismicity and groundwater level change as data input, suggesting the high stress accumulation in source media.

Keywords: Changning earthquake; Load/unload Response Ratio; Benioff strain; Groundwater level; Crustal deformation observation