

于晨,王淑艳,苑争一,等,2020. 2020年6月26日于田 M_s 6.4地震前 Benioff 应变和地电场加卸载响应比异常研究. 中国地震,36(3):417~426.

2020年6月26日于田 M_s 6.4地震前 Benioff 应变和地电场加卸载响应比异常研究

于晨¹⁾ 王淑艳²⁾ 苑争一¹⁾ 王亚丽¹⁾ 岳冲¹⁾ 余怀忠^{1,3)}

1) 中国地震台网中心,北京 100045

2) 中国电子科技集团公司电子科学研究院,北京 100041

3) 新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐 830011

摘要 加卸载响应比(Load/Unload Response Ratio, LURR)是根据岩石介质本构关系的动态演化特征提出的地震预测方法。2020年6月26日新疆于田县发生6.4级地震,震前以 Benioff 应变为响应量观测到明显的 LURR 高值异常,异常出现于2019年初,持续1年后发生地震,意味着震源区介质的应力状态在2019年发生了明显改变。进一步,以地电场为响应量,计算了距震中280km的和田地电场长、短极距共6个测向的 LURR 异常时序曲线,结果表明:和田地电场长、短极距的NS向和NW向共4个测向在震前1~3个月出现了 LURR 异常逐渐增大的同步变化,这种现象可能反映了孕震区介质因微裂隙的产生和扩展导致流体在裂隙中的运移引起的动电效应。综合分析2种不同响应量的 LURR 异常演化特征,有助于更深入地认知地震孕育过程,更准确地评估地震活动趋势。

关键词: 加卸载响应比 2020年于田 M_s 6.4地震 Benioff 应变 地电场

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0417-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2020年6月26日5时05分新疆和田地区于田县发生6.4级地震(82.33°N, 35.73°E),震源深度10km,地震震中位于西昆仑地区。根据历史地震活动统计显示,该地区强震活动较为活跃(图1),1900年以来,震中200km范围内发生6.0级及以上地震9次。其中,6.0~6.9级地震5次,7.0~7.9级地震4次。自2008年以来,该地区连续发生了2008年3月21日于田 M_s 7.3、2012年8月12日于田 M_s 6.2、2014年2月12日于田 M_s 7.3以及多次5级以上地震,这种短时间内强震连续发生的现象是值得关注的(程佳等,2014)。

本次地震发生在我国巴颜喀拉块体与塔里木块体之间的大型走滑断裂——阿尔金断裂

[收稿日期] 2020-08-03; [修定日期] 2020-09-07

[项目类别] 国家重点研发计划(2018YFE0109700、2018YFC1503506)、国家自然科学基金(41942014)共同资助

[作者简介] 于晨,男,1988年生,工程师,主要从事数字地震学和地震电磁学等研究。E-mail: yuchen_syw@163.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

西南段上,地震周边发育一系列全新世活动断层,距离最近的断层为 NE 向的黑石北湖断裂(图 1),该断层距震中约 2km,中国地震台网中心的震源机制解参数结果^①显示本次地震为一次正断型地震。巴颜喀拉块体是强震活动性最为活跃的地区,近十年全国大陆发生的一系列 7 级以上强震都集中在该区域(高翔等,2013),而本次于田地震的发生与巴颜喀拉地块东向扩展产生的拉张作用有密切关系(吴传勇等,2014)。但该地区地震监测能力较弱,震中 300km 范围内仅和田与于田 2 个地球物理观测台站具有有效观测资料,这也给评估该地区的地震危险性带来了难度。

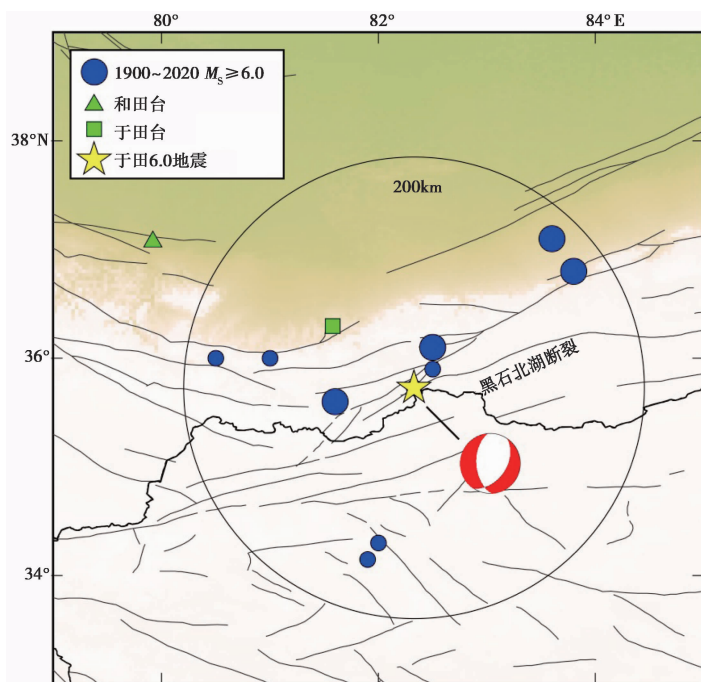


图 1 于田 6.4 级地震周边的活动构造、地球物理观测台站及历史强震分布
黑色轮廓线为震中 200km 区域

为了评估该地区的地震危险性,于 2019 年底利用基于 Benioff 应变为响应量的加卸载响应比(Yu et al,2013)探测到这一区域存在显著的异常,相关结果提交至中国地震台网中心年度地震趋势预测报告^②。为了更深入地认知震前 LURR 异常的演化特征,本文计算了地震前 5 年和田电场长、短极距共 6 个测向的 LURR 异常时间序列,综合分析 LURR 异常演化特征与地震的对应关系,结合异常演化特征探讨地震的孕育发生过程和预报的可行性。

1 LURR 方法介绍

地震孕育过程可看作是一种“间歇性临界现象”(Sammis et al,1999),大地震的临界性是由孕震区介质本构关系的动态变化决定的,与地下介质的裂缝发育有关。由岩石的应力-

① 中国地震台网中心,2020 年,2020 年 6 月 26 日新疆于田 6.4 级地震图集. 内部资料.

② 中国地震台网中心,2019 年,中国地震台网中心年度地震趋势预测报告. 内部资料.

应变曲线可知,岩石处于弹性阶段时,加载阶段和卸载阶段的响应率(形变模量)相等;但随着应力的不断累积,当岩石进入屈服阶段,应力与应变之间的线性关系被破坏,卸载阶段产生的变形只能部分恢复,有效弹性模量降低,进而导致岩石的强度降低或损伤,最终发生破裂。LURR 可以有效识别介质的损伤破坏过程,进而表征某一地区的地震孕育过程(Yin et al, 1995)。

1.1 加卸载过程的判断

加卸载响应比 Y 可以表示为: $Y = X_+ / X_-$, 式中的“+”和“-”表示加载过程和卸载过程, X 为响应率。

在地震预测实践中,根据日月潮汐力在地震破裂面上引起的库仑破裂应力变化(ΔCFS)判断加载和卸载过程

$$CFS = \tau_n - f\sigma_n \quad (1)$$

式中, f, τ_n, σ_n 分别代表内摩擦系数、剪应力和方向应力。式(1)中的 $\tau_n - f\sigma_n$ 被称为有效剪应力 τ_e 。如果 $\vec{\mu}$ 表示滑动矢量,构造有效剪应力 $\vec{\tau}_e^T$ 和潮汐有效剪应力 $\vec{\tau}_e^I$ 可以表示为

$$\vec{\tau}_e^T = \vec{\tau}^T - f\sigma^T \frac{\vec{\mu}}{|\vec{\mu}|} \quad (2)$$

$$\vec{\tau}_e^I = \vec{\tau}^I - f\sigma^I \frac{\vec{\mu}}{|\vec{\mu}|} \quad (3)$$

通常,构造剪应力和潮汐剪应力之和表示断层面上的剪应力(图2),即

$$\tau_e = \vec{\tau}_e^T + \vec{\tau}_e^I \quad (4)$$

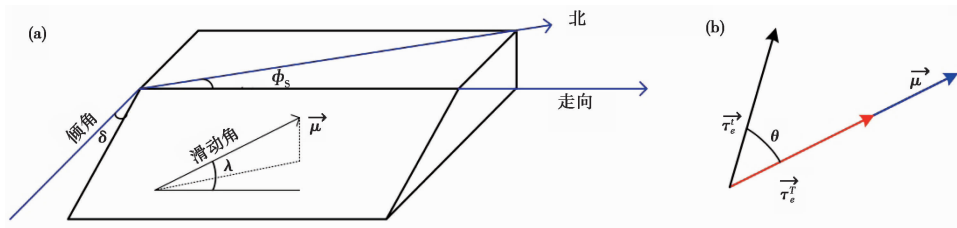


图2 潮汐应力引起的加卸载过程判定示意图

(a) 表示在断层面上由构造剪切应力驱动的滑动方向;(b) 表示断层面上构造剪应力和潮汐剪应力的叠加

虽然构造应力大于潮汐应力(相差几个数量级),但其变化非常缓慢,在实际计算过程中可以认为是不变的。因此,引潮力在断层面上引起有效剪应力的增量可以表示为

$$\Delta\tau_e = \vec{\tau}_e^I \cdot \frac{\vec{\mu}}{|\vec{\mu}|} \quad (5)$$

如图3所示,当 $\theta < 90^\circ$ 时, $\vec{\tau}_e^T$ 和 $\vec{\tau}_e^I$ 二者相互加强,表明应力增加,当 $\theta > 90^\circ$ 时, $\vec{\tau}_e^T$ 和 $\vec{\tau}_e^I$ 二者相互减弱,表明应力减小,将式(5)在时间域进行微分

$$g = \frac{d}{dt} \left(\vec{\tau}_e^I \cdot \frac{\vec{\mu}}{|\vec{\mu}|} \right) \quad (6)$$

由式(6)得出判断加卸载的准则,即 $g > 0$ 时为加载, $g < 0$ 时为卸载。

1.2 响应量的选择

在进行地震预测实践时,理论上任何能够反映孕震区介质损伤、失稳过程的地球物理量

均可以作为响应量,假设 P 和 R 分别表示载荷和响应,响应率 X 可以改写为

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (7)$$

其中, ΔR 表示由载荷变量 ΔP 引起的响应 R 的变化。定义基于地震能量 E 及其相关参量为响应量的加卸载响应比为

$$Y_m = \left(\sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+ / \left(\sum_{i=1}^{N_-} E_i^m \right)_- \quad (8)$$

式中, E_i 表示地震波能量,“+”、“-”分别表示加载和卸载; m 可以取 0、1/3、1/2、2/3 或 1。当 $m=1$ 时, E^m 表示地震能量;当 $m=1/3$ 或 $2/3$ 时, E^m 分别表示孕震区域的线性尺度和面尺度;当 $m=1/2$ 时, E^m 表示 Benioff 应变;当 $m=0$ 时, Y 值相当于加载和卸载过程中出现的地震数目。

计算地电场 LURR 时,应用地电场的总场资料为响应量,保留周期为 8~24h 的固体潮频段,由于地电场观测资料为矢量观测,取一段时间内的电磁观测资料绝对值的平均值作为响应量,定义加卸载响应比为

$$Y_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} |E'_i| \right) / (N_+)}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} |E'_i| \right) / (N_-)} \quad (9)$$

式中, E'_i 表示 t_i 时段内的地电场资料,为了避免地震数目太少导致加卸载响应比时间序列的强烈波动,计算时间窗内通常包含多个加、卸载循环过程。当介质所能承受的强度远大于载荷时, $Y_m \approx 1$;而介质接近破坏时, $Y_m > 1$,通过上述方法可以判断介质是否处在稳定阶段。

2 地震前 LURR 异常演化特征

2.1 基于 Benioff 应变的 LURR 演化特征

图 3 给出了于田 6.4 级地震前 LURR 异常的空间演化,数据来源于中国地震台网中心地震目录^③。具体计算参数为:目录起止时间 2018 年 1 月 1 日~2020 年 6 月 30 日,扫描半径 80km,并以 0.25°步长为单位分别在经度和纬度方向滑动。将扫描区域内 0~4.0 级小震的 Benioff 应变($m=1/2$)作为响应量,断层内摩擦系数取 0.4,计算时间窗为 1 年,以时间窗长的截止日期标记为扫描结果。

结果显示,于田地区在 2018 年没有明显的异常(图 3(a)),2019 年开始出现显著的 LURR 异常,异常的空间分布呈现明显的扩展现象,距于田 $M_s 6.4$ 地震震中西部 50km 的地区异常比值超过 4 以上(图 3(b))。2019 年 7 月 1 日~2020 年 6 月 30 日,该区域 LURR 异常开始出现减弱,并于 2020 年 6 月 26 日发生于田 6.4 级地震(图 3(c))。

2.2 基于地电场总场的 LURR 演化特征

距于田地震震中 300km 范围内的电磁定点观测有和田地电场,距震中 280km。和田地电场于 2007 年正式开始观测,电极测点布局为正交的“L”型,共 6 个测向,其中 EW、SN 向长极距 225m,短极距 150m,NW 向长极距 318m,短极距 212m,NS 向测道埋设于农田内,EW 向

^③ <http://www.csi.ac.cn/>

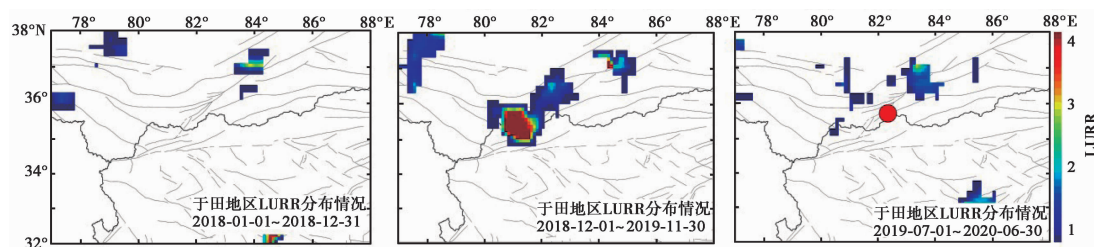


图3 于田6.4级地震前新疆地区的LURR异常空间分布及演化
计算时间窗显示在图中,LURR异常值用色标给出,红色圆点为于田6.4级地震

测道介于乡村公路与树林之间,使用ZD9A-II地电场仪,数据产出为分钟值资料。电极使用固体不极化电极,埋深4m(艾萨·伊斯马伊力等,2016),观测多年后数据相关系数月均值基本低于0.6,差值基本在10mV/km以上,因此,于2015年10月对和田地电场的电极进行了更换(邱大琼等,2018),月相关系数上升至0.9,差值月均值降至1mV/km,说明电极更换之后的地电场观测资料更稳定,更能反映真实的地电场变化。综上所述,为了保证数据的连贯性,计算了2015年11月之后的和田地电场长、短极距共6个测向的LURR时序曲线。

由于和田地电场的观测场地和环境存在一定干扰,原始曲线无年变化等周期性特征,存在大量的异常突跳点,观测资料的绝对值的跨度较大,短极距EW向和WN向尤其突出,近5年观测资料的变化幅度超过1000mV/km,很难从原始曲线中直接提取出显著的地震前兆异常(图4),因此,需要利用合理的异常提取技术捕捉地震前的异常。首先,对原始资料进行了去突跳、插值补齐数据等预处理,之后利用Butterworth滤波器保留8~24h的潮汐频段信息,最后计算了和田地电场6个测向的LURR时间序列,发现长、短极距的南北测道和北西测道共4个测向在震前出现了同步增大的共性特征(图5)。

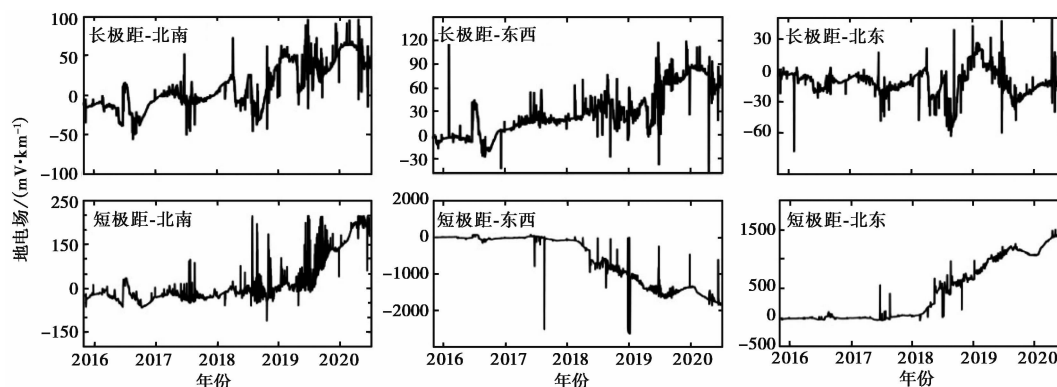


图4 和田地电场原始资料

资料起始时间为2015年11月,4个测向的LURR值一直在稳定值1.0附近波动,2019年初出现同步的增大变化,但不显著,长极距NW向最大值为1.025,短极距西北向最大值为1.026,另外2个测向的数值均未超过1.02,2019年10月后4个测道的LURR时序曲线又出现同步变化,比值逐渐增大,其中短极距NW向测道的计算结果于2020年3月达到最大值

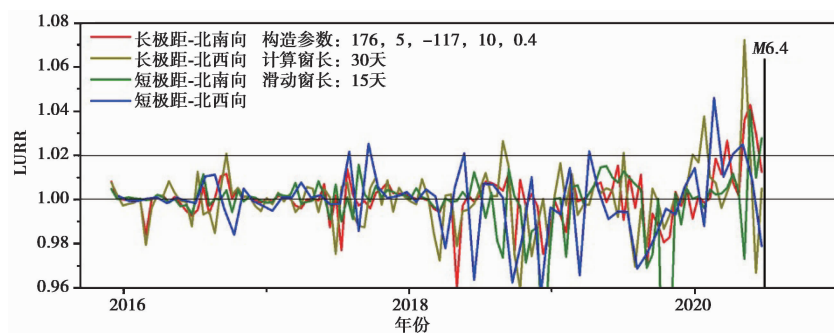


图5 于田地震前地电场4个测道 LURR 时序曲线

黑色竖线表示于田地震的震级和时间

1.049,其余3个测向的比值于5月达到最大值,此后异常幅度逐渐减小,在异常回落阶段发生了于田地震。

3 讨论

加卸载响应比是一种度量地壳介质损伤程度的预报方法,反映了灾变发生前临界敏感性的增大(Yu et al,2006)。本文的研究表明,于田地震发生前能观测到比较明显的 LURR 异常,通过综合分析不同响应量的 LURR 异常时空演化规律,将可能在预测预报实践中更准确的评估未来地震危险性。

加卸载响应比作为一种中短期地震预测方法,揭示了于田地震前震源区介质应力状态变化规律。LURR 理论依据潮汐应力触发机制,由于潮汐应力远远低于构造应力,潮汐应力只能触发地震。当构造应力较低时,潮汐应力的微小变化很难触发地震,地壳介质处于稳定状态,因此加卸载响应比值 $Y \approx 1$;而当构造应力累积到较高水平时,即使应力的增加非常微弱,潮汐应力都可能导致小地震的发生,造成加载阶段和卸载阶段的 Benioff 应变产生差异,因而 $LURR > 1$ 。图3所示的该区域的 LURR 高值异常出现在2019年,而在此前的2018年 LURR 异常并不突出,同时和田地电场 LURR 在2019年初也出现了一定的异常变化(图5),这些异常变化暗示了2019年开始于田地区构造应力已经达到了较高的状态。利用于田地震200km内的地震事件计算的 LURR 时间序列也可以解释这一演化过程(图6):自2004年以来,该地区出现的 LURR 异常在高值回落后的半年至1年内均有6级以上地震对应,具体而言,LURR 比值在2014年于田7.4级地震后一直在1.0附近波动,直至2019年初,比值快速增加,异常持续1年之后,在2020年初开始回落,之后发生此次于田6.4地震。这与 Yin 等(2000)描述的规律相一致,当远离地震发生的临界状态时,LURR 比值为1,在接近地震发生前 LURR 会出现明显高值并持续数月甚至数年。从空间分布上看,2019年的 LURR 异常主要分布在阿尔金断裂西端,呈 NE 方向分布,异常的走向与阿尔金、黑石北湖断裂等相一致(图3),表明于田地震的发生与上述断裂的应力积累相关。

与基于 Benioff 应变作为响应量的 LURR 计算方法相比,地球物理观测资料的连续性更好,计算得到的 LURR 时序曲线波动幅度更小,能够更加准确地判断地震发生的临界状态。分析和田地电场4个测道的 LURR 异常演化规律,认为可以将1.02作为该地区地电场

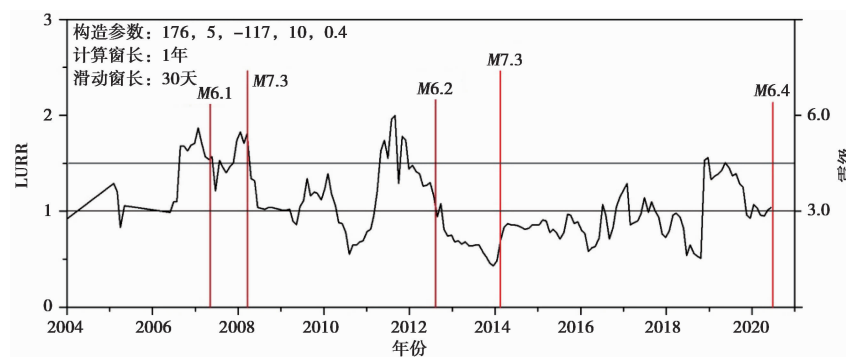


图6 于田地区的 LURR 时间序列演化

LURR 异常的判定阈值,当 LURR 值 >1.02 时,判定为异常,反之该地区介质则处于稳定状态。虽然计算结果的波动幅度最大值也仅仅为 1.072,仅仅超过稳定值 7.2%,但由于地电场 LURR 异常曲线的波动范围本身就较小,与临界阈值 1.02 相比,从变化幅度的角度分析 ($0.072/0.02=3.6$),LURR 最大值已超过判定阈值数倍以上,异常演化过程清晰且多个测向同步出现变化,从这个角度来说,地电场 LURR 异常更应该关注异常演化的相对变化和同步性,而非 LURR 时序曲线的绝对值。

电磁异常是一种对地震反映非常敏感的地球物理前兆异常(黄清华,2005;Thanassoulas,2007),地震孕育晚期产生的地表颤动和电磁辐射等能够引起电磁场的变化。地电场是地球内部的电场,按不同的场源可分为大地电场和自然电场 2 部分。大地电场分布于地球表面的大部分地区内;自然电场是地壳介质中的因物理、化学变化引起的局部稳定的电场,一般具有较大的变化梯度,局部性特征较强。范莹莹等(2010)应用频谱分析方法,发现在地震前震中附近存在地电场小波能谱相对变化的增大现象。刘君等(2011)应用非线性谱估计方法(MEM),发现震前地电场极低频成分功率谱密度的增大现象。一般认为,在发震构造中,富集地下水的断层才有可能快速滑动,最终产生地震,而地震发生前,发震断层某一部分或全部有可能在震前蠕动或预滑(Kao et al,2005),微裂隙的产生导致断层中的流体运移发生变化,产生过滤电势;此外,在应力积累过程中,岩层中孔压梯度的变化也会引起地下流体运移的变化,从而产生过滤电势,引起地电场观测资料的变化(钱复业等,2005)。

近年来,根据谭大诚等(2010、2014、2019)的研究表明,地电场波形的异常变化一方面与岩石所受应力的突变有关,另一方面可能反映岩石微破裂加剧导致地下水向破裂区渗流的现象。如图 7 所示,当岩石介质处于弹性阶段(稳定状态),此时孕震区并未发生扩容现象,因此,在加卸载过程中固体介质均未产生新的裂隙,破裂数目基本没有变化(图 7(a)),岩体内流体的运移没有明显的变化,因而流动电位差的变化非常微小(图 7(b)),也不会引起地电场 LURR 时序曲线的显著变化,因此,LURR 比值在 1 附近波动;随着应力积累达到较高水平,岩石进入屈服阶段,而根据 Kaiser 效应(Li et al,1993),在岩石实验中,此时加载阶段产生的裂隙数要明显多于卸载阶段(图 7(c)),加载阶段岩石扩容和微裂隙的产生导致流体的运移产生变化,产生过滤电势(图 7(d))。这样,产生的局部电场会导致 LURR 值逐渐增大,偏离稳定值 1(钱复业等,1998)。因此,尝试利用 LURR 方法分析地电场的异常变化,可能是捕捉震前异常信号的一种可行的方向。

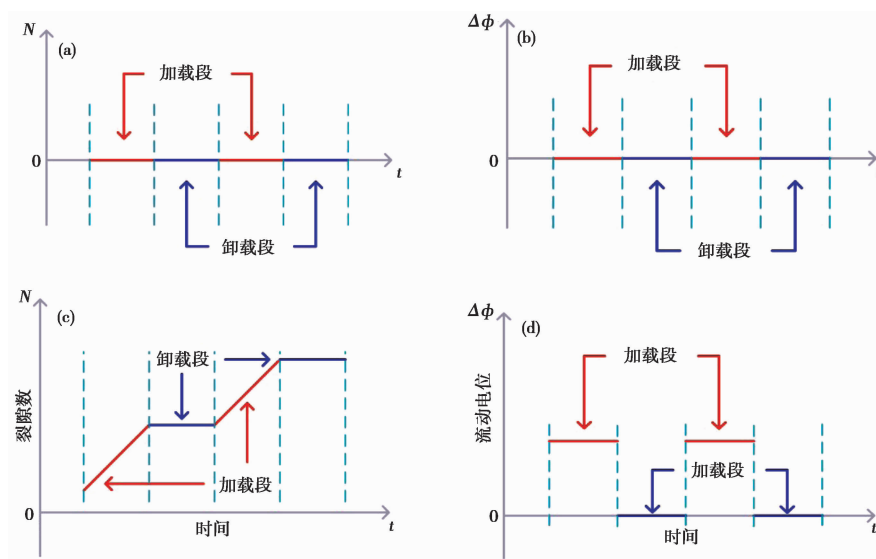


图 7 加、卸载过程中的裂隙数和流动电位的变化情况

(a)、(b) 分别为弹性阶段时裂隙数和流动电位的变化；(c)、(d) 分别为损伤阶段时裂隙数和流动电位的变化

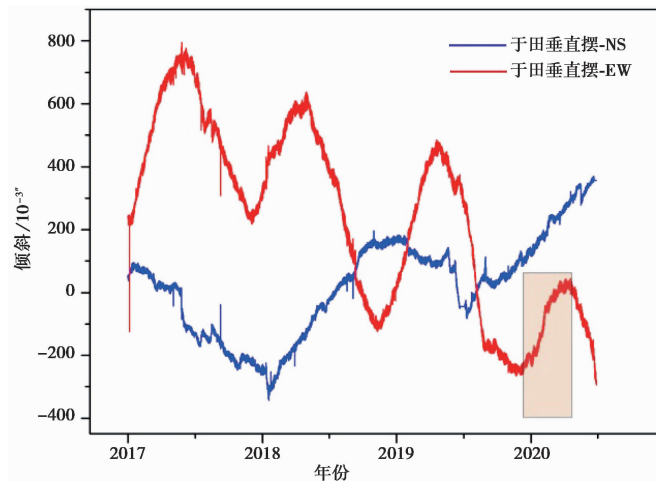


图 8 于田垂直摆倾斜仪观测曲线

而此次地震前定点形变观测资料也反映出该区域的应力积累现象(图 8),2019 年 11 月~2020 年 4 月于田垂直摆倾斜仪东西分量年变幅仅为 $0.264''$,明显小于往年同期的年变幅($0.499 \pm 0.199''$),该异常可以解释巴喀喀拉地块的东向运动造成块体西边界应力增加,逐渐增加的应力使得于田地区介质应力状态在 2019 年发生了改变,造成垂直摆倾斜仪东西分量年变幅显著变小。目前,以地应变为响应量的加卸载响应比的研究已逐步开展,岳冲等(2020)对九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前的地应变 LURR 异常进行了分析,发现地震前震中 500km 范围内出现显著的 LURR 异常。未来可通过分析基于多物理量为响应的加卸载响应比计算结果,可以优势互补,更好地认知地震孕育的物理过程;地震目录资料获得途径相对容易,且覆

盖的时空范围较广,结合定点观测资料,可以更好地把握少震地区的地震活动。

通过不同响应量的LURR异常进行综合分析,有助于更好地判断地震活动趋势,拓展LURR方法的应用领域,积累在地震预报实践应用的经验。由图5所示,从异常出现的时间看,震中附近的Benioff应变LURR异常在2019年开始显著增强,此时距离震中280km的和田地电场LURR异常也出现同步变化,但不显著,之后在2019年底和2020年初开始显著上升,这种现象表明:在地震孕育过程中,电场的变化与裂隙扩展、流体渗入有关,电场异常变化往往发生在孕震阶段晚期(Scholz et al, 1973),因此电场异常峰值可能晚于Benioff应变作为响应量的LURR。

4 结论

通过使用基于Benioff应变为响应的LURR方法对新疆地区进行前瞻性预测研究,在2020年6月26日于田6.4级地震前探测到显著异常,LURR异常在时间尺度上从中期到短期的变化,反映了该地区地震前的背景应力异常,结合地电场为响应量的LURR异常演化特征,发现2种不同响应量的LURR计算结果在震前均出现了显著异常,异常分布的时间、空间范围与于田地震有较好的对应关系,并且地形变观测资料也记录到相似的异常变化,显示出不同参数间具有物理关联性,可以反映地震发生前的共性特征(王海涛等, 2002; 尼鲁帕尔·买买吐孙等, 2017)。综上所述,综合分析震前多重物理参数的异常演化,有助于深入认知地震孕育的物理过程,为地震预测研究提供了一个可行的方向。

参考文献

- 艾萨·伊斯马伊力,邱大琼,2016. 新疆于田县2014年 M_s 7.3地震前和田地震台前兆资料异常分析. 高原地震, **28**(3):9~13,42.
- 程佳,杨文,刘杰,等,2014. 2014年2月12日新疆于田 M_s 7.3地震序列及其构造背景研究. 地震学报, **36**(3):350~361.
- 范莹莹,杜学彬, Zlotnicki J,等,2010. 汶川 M_s 8.0大震前的电磁现象. 地球物理学报, **53**(12):2887~2898.
- 高翔,邓起东,2013. 巴颜喀喇断块边界断裂强震活动分析. 地质学报, **87**(1):9~19.
- 黄清华,2005. 地震电磁观测研究简述. 国际地震动态, (11):2~5.
- 刘君,杜学彬, Zlotnicki J,等,2011. 几次大震前的地面和空间电磁场变化. 地球物理学报, **54**(11):2885~2897.
- 尼鲁帕尔·买买吐孙,王海涛,刘月,等,2017. 阿克陶 M_s 6.7地震前LURR异常演化特征分析. 内陆地震, **31**(2):138~144.
- 钱复业,卢振业,丁鉴海,等,1998. 电磁学分析预报方法. 北京:地震出版社.
- 钱复业,赵玉林,2005. 地电场短临预报方法研究. 地震, **25**(2):33~40.
- 邱大琼,马睿,艾萨·伊斯马伊力,等,2018. 新疆和田地震台地电场电极更换前后观测资料对比分析. 山西地震, (1):23~27.
- 谭大诚,辛建村,王建军,等,2019. 大地电场岩体裂隙模型的应用基础与震例解析. 地球物理学报, **62**(2):558~571.
- 谭大诚,赵家骝,刘小凤,等,2014. 自然电场的区域性变化特征. 地球物理学报, **57**(5):1588~1598.
- 谭大诚,赵家骝,席继楼,等,2010. 潮汐地电场特征及机理研究. 地球物理学报, **53**(3):544~555.
- 王海涛,曲延军,和锐,2002. 基于多种地震前兆异常的综合异常指数研究. 内陆地震, **16**(4):302~305.
- 吴传勇,张竹琪,赵翠萍,等,2014. 2014年新疆于田 M_s 7.3地震:巴颜喀喇地块侧向挤出的构造响应. 地球物理学报, **57**(10):3226~3237.
- 岳冲,牛安福,余怀忠,等,2020. 九寨沟 M_s 7.0地震前地应变LURR异常演化特征. 中国地震, **36**(2):267~275.
- Kao H, Shan S J, Dragert H, et al, 2005. A wide depth distribution of seismic tremors along the northern Cascadia margin. Nature, **436**(7052):841~844.

- Li C, Nordlund E, 1993. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks. *Rock Mech Rock Engng*, **26**(4):333~351.
- Sammis C G, Smith S W, 1999. Seismic cycles and the evolution of stress correlation in cellular automaton models of finite fault networks. *Pure Appl Geophys*, **155**(2):307~334.
- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P, 1973. Earthquake prediction: a physical basis. *Science*, **181**(4102):803~810.
- Thanassoulas C, 2007. Short-term Earthquake Prediction. Greece; H. Dounias & Co.
- 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):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.
- Yu H Z, Cheng J, Zhang X T, et al, 2013. Multi-methods combined analysis of future earthquake potential. *Pure Appl Geophys*, **170**(1~2):173~183.
- 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.

LURR to Benioff Strain and Geoelectric Field before Yutian $M_s6.4$ Earthquake of June 26, 2020

Yu Chen¹⁾ Wang Shuyan²⁾ Yuan Zhengyi¹⁾ Wang Yali¹⁾ Yue Chong¹⁾
Yu Huaizhong^{1,3)}

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Academy of Electronics and Information Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China

3) Earthquake Agency of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

Abstract Load/unload response ratio (LURR) is a method based on the dynamic evolution characteristics of constitutive relationship of rock media for earthquake prediction. On June 26, 2020, the earthquake with magnitude 6.4 occurred in Yutian, Xinjiang. We have observed the LURR anomaly based on Benioff strain as the response before the earthquake. The characteristics of the anomaly in temporal and spatial evolution show that the stress state of the source area has changed significantly in 2019. LURR anomalies show the intermediate-to-short-term earthquake potential, which markedly enhanced in 2019 and decreased in 2020. After the earthquake, we calculated the LURR anomaly time series curves of six items of long and short polar distances of Hetian electric field 280km away from the epicenter. The results show that the synchronous variation of LURR anomaly gradually increases in both north-south direction and north-west direction of the long and short polar distance of Hetian electric field about 1~3 months before the earthquake, which may reflect the electrokinetic effect of fluid migration in the fracture due to the generation and expansion of micro fractures in the seismogenic area. Comprehensive analysis of the characteristics of LURR anomaly evolution with two different responses is helpful to understand the process of earthquake generation and evaluate the trend of seismic activity more accurately.

Keywords: LURR; 2020 Yutian $M_s6.4$ earthquake; Benioff strain; Geoelectric field