

叶媛媛, 王志栋, 姜振海. 张掖 M_s 5.0 级地震前高台钻孔应变异常变化研究[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 56–62. [YE Yuanyuan, WANG Zhidong, JIANG Zhenhai. The Abnormal Change of Borehole Strain at Gaotai Seismic Station Before Zhangye M_s 5.0 Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 56–62]

张掖 M_s 5.0 级地震前高台钻孔应变异常变化研究

叶媛媛, 王志栋, 姜振海

(甘肃省地震局, 兰州 730000)

摘要: 张掖 M_s 5.0 级地震前, 高台分量式钻孔应变出现了显著的异常变化, 排除供电、调零、气压等影响观测数据的干扰因素, 研究发现该异常可能是地震前兆异常。利用离散小波分解、超限率、应变变化过程和方位角变化等分析方法提取异常, 综合分析发现: NE 分量和 NW 分量出现了破年变低值异常, NE 分量较往年最低点达到 $-64\,745.46 \times 10^{-8}$, 超出同期 2013—2018 年年变均值 54.38%, NW 分量数据最低点达到最低值 -65663.8×10^{-8} , 最大超出同期 2013—2018 年年变均值 17.68%; 求解 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi)$ 后, 半长轴 ε_2 持续缓慢增大, 半短轴 ε_1 加速增大张力增强, 达到最大值 $26\,814.1 \times 10^{-8}$, 后张力加速减小至 6441.6×10^{-8} , 震后应力逐步恢复至同期均值大小。方位角 φ 出现大幅偏转; 替换量的差分曲线、小波分解曲线、超限率曲线在 4 月至 8 月出现明显毛刺增加现象。地震前兆异常明显, 异常信息可靠。

关键字: 钻孔应变; 小波分析; 超限分析; 前兆异常

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0056-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.07

The Abnormal Change of Borehole Strain at Gaotai Seismic Station Before Zhangye M_s 5.0 Earthquake

YE Yuanyuan, WANG Zhidong, JIANG Zhenhai

(Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Before Zhangye M_s 5.0 earthquake, the component borehole strain of the Gaotai station had a significant abnormal change. Excluding the interference factors such as power supply, zero adjustment and air pressure, the study found that the anomaly may be an earthquake precursor anomaly. This paper use discrete wavelet decomposition, transfinite rate, strain process and azimuth change analysis methods to extract anomalies. The comprehensive analysis shows that: the NE component and NW component have the low value anomaly of breaking annual variation. Compared with the lowest point in previous years, the NE component has reached $-64\,745.46 \times$

收稿日期: 2021-03-29

基金项目: 中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-2021049)

作者简介: 叶媛媛(1982-), 女, 工程师, 主要从事地球物理台网观测与科研工作。

E-mail: 49371733@qq.com

通信作者: 姜振海(1971-), 男, 高级工程师, 主要从事定点形变资料观测和分析工作。

E-mail: jiangzh1971@163.com

10^{-8} , which is 54.38% higher than the average annual variation of the same period from 2013 to 2018. The lowest point of NW component data has reached the lowest value of $-65\ 663.8\times10^{-8}$, which is 17.68% higher than the average annual variation of the same period from 2013 to 2018. After solving $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi)$, the semi-major axis ε_2 continues to increase slowly, the semi-minor axis ε_1 increases at an accelerated rate and the tension increases. After reaching the maximum value of $26\ 814.1\times10^{-8}$, the tension decreased to 6441.6×10^{-8} at an accelerated rate, and the post earthquake stress gradually recovered to the mean value of the same period. There is a large deflection of azimuth angle. The difference curve, wavelet decomposition curve and overrun rate curve of replacement quantity increased obviously from April to August. The earthquake precursory anomalies are obvious and the anomaly information is reliable.

Keywords: Borehole strain; Wavelet analysis; Transfinite analysis; Precursory anomaly

0 引言

钻孔应变观测技术的发展历史已经有40多年,自从1966年邢台发生两次大地震以后,国家充分意识到了大震的严重危害。由著名的地质学家李四光先生牵头成立的地震大队,倡导群防群测预防大震,之后各种预报方法不断推出,期间观测地形变应力的预报方法也进入了大家视野,并发挥着重要作用^[1-3]。经过众多学者专家的努力探索研究,陆续成功研制出了RZB-1型电容式钻孔应变仪、RZB-2型钻孔分量式应变仪、TJ-1型体积式应变仪、YRY-4型分量钻孔应变仪。目前,我国已建成143个形变观测台站,安装了150余套体积式和分量式钻孔应力应变仪,构成了应用于地震观测的地应变台网^[4]。

地震是地壳应力积累到一定程度的爆发,钻孔应变观测方法在间接反应地壳应力变化方面有一定的优势。由于观测仪器安装在深入地下100~200 m的深井中,这很好的消除了近地表各种非构造因素的影响,得到地壳应力变动的清晰信息^[5-6]。持续观测更是得到了台站附近区域形变应力场的实时变化情况。而如何将钻孔应变的资料和优势应用于地震预报,也是地震人的长期课题,任重而道远。本文利用高台地震台的观测资料,研究了张掖 $M_s5.0$ 地震前的异常变化情况。

1 台站及数据介绍

高台地震台,位于青藏块体东北缘,祁连山北缘段裂带中段,线壮褶皱的地质构造非常发育,垂直差异运动强烈,有一条NNW走向的逆冲大断层。地质构造上位于合黎山—龙首山褶皱带南缘与走廊断陷的分界处,河西系高台—榆木山隆起

与祁吕西褶皱外缘与古北西向构造斜撞复合部位。台基为深层大面积裸露的完整花岗岩,台站南的地表表层为第四纪亚砂土、粉砂、沙砾石,厚度约5 m,下部全为花岗岩。

高台钻孔应变井于2007年3月建成,井深50 m,岩石均为海西期花岗闪长岩。仪器使用YRY-4分量式钻孔应变仪,安装在裸岩上,基岩无裂隙,无破碎,无涌水和漏水现象,钻孔用标准钢套管保护,然后用水泥浆压力封井,使得井套管与岩壁紧密凝固,底部垫入30 mm小石子,探头周边均匀灌入水泥石英沙进行固定偶合。四个方向元件方位角1路-65°,2路-20°,3路25°,4路70°(如图1),2007年6月20日安装调试工作完成,仪器开始观测运行,21日产出数据。自架设观测至今,运行稳定,完整率均保持在99.5%以上,能够记录到清晰的应变固体潮和同震变化。

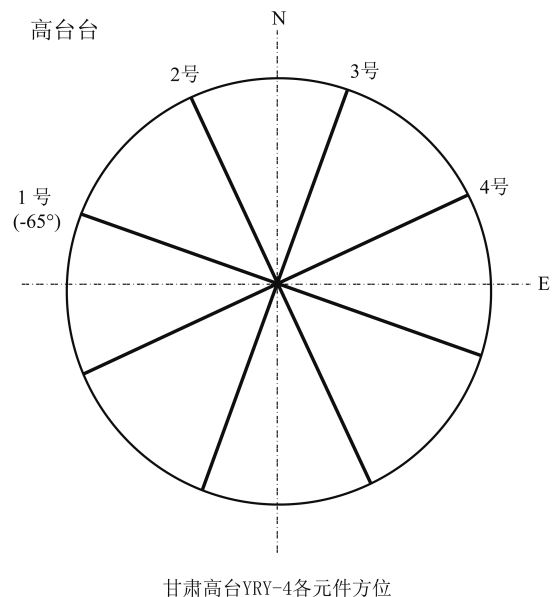


图1 高台台分量式钻孔应变元器件分布图
Fig.1 Distribution of component drilling strain components of Gaotai Station

2 张掖 $M_s5.0$ 级地震异常研究

北京时间 2019 年 9 月 16 日 20 时 48 分，在 (38.60 N, 100.35 E) 发生了张掖 $M_s5.0$ 级地震，震

源深度 11 km，震中距离高台地震台及钻孔应变 115 km，中国地震台网给出的震源机制中心解 (如图 2)。震后经过资料分析和研究，发现高台钻孔应变观测存在明显的前兆异常，现进行回溯性分析，对资料进行积累和总结。

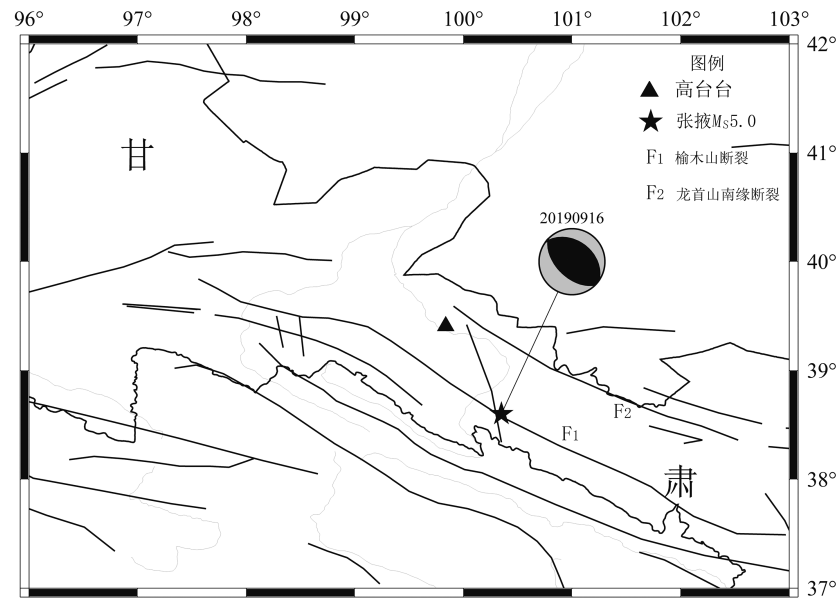


图2 张掖 $M_s5.0$ 级地震震中分布及震源中心解图
Fig.2 Epicenter distribution and focal center solution of Zhangye $M_s5.0$ Earthquake

2.1 资料可靠性分析

高台台 YRY-4 钻孔应变仪，2019 年全年数据连续可靠无断记，使用四元件钻孔应变观测的自治方程^[7],

$$S_1 + S_3 = S_2 + S_4 = 2A(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (1)$$

对 2019 年的资料进行自治方程检验， S_1+S_3 与

S_2+S_4 基本一致重合较好 (如图 3)，很好地验证了高台地震台的 YRY-4 仪器稳定数据可靠。

对高台钻孔应变观测数据进行调和分析，主要提取固体潮的 $M2$ 波进行分析，将 2015—2019 年的资料数据进行计算，潮汐因子 2015 年开始至 2019 年相对稳定 (表 1)，从另一方面证明了高台钻孔应变仪仪器稳定，数据可靠。

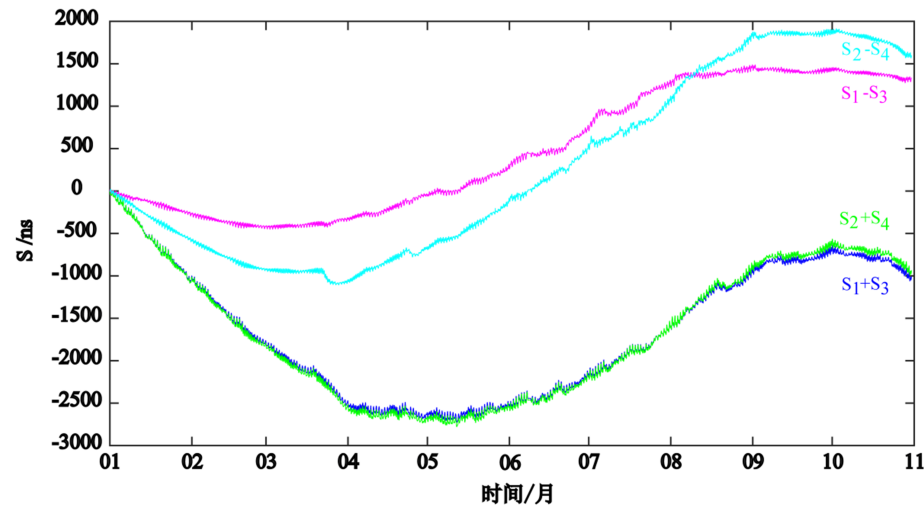


图3 高台台 YRY-4 自治曲线图
Fig.3 Self consistent curve of YRY-4 at Gaotai Station

表1 2015—2019年高台钻孔应变M2波潮汐因子表

Table1 The tidal factor of M2 wave of borehole strain at Gaotai Station from 2015 to 2019

年份	地理坐标		波形	波群	潮汐因子	相对中误差
	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$				
2015	99.814	39.411	M2波	261—286	7.5445	0.018 314
2016	99.814	39.411	M2波	261—286	6.7504	0.017 427
2017	99.814	39.411	M2波	261—286	6.8398	0.017 661
2018	99.814	39.411	M2波	261—286	7.0411	0.019 534
2019	99.814	39.411	M2波	261—286	7.0439	0.018 234

2.2 异常分析

2.2.1 年变趋势异常分析

将2013—2019年的整点值进行下载，排除标定台阶和人为干扰等记录到的影响事件，得到的数据曲线为钻孔应变的年变趋势图，对比2013—2018年的年变趋势发现，2013—2018年数据都在4月下旬上升，9月上旬下降。2019年2月20日发现

NE分量数据加速下降，一直持续至7月22日达到最低点 $-64\,745.46\times10^{-8}$ ，超出同期2013—2018年年变均值54.38%，NW分量数据持续下降至2019年7月8日，达到 $-65\,512.91\times10^{-8}$ ，转平后至2019年8月3日，达到最低值 $-65\,663.8\times10^{-8}$ ，最大超出同期2013—2018年年变均值17.68%，后转折回升至2019年9月16日发震时，NE分量和NW分量形成破年变低值异常现象(如图4)。

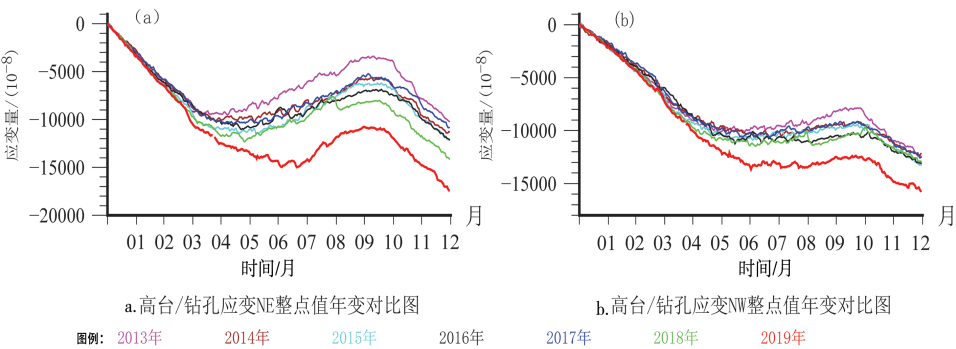


图4 2013—2019年高台钻孔应变年变对比图

Fig.4 Comparison chart of borehole strain of Gaotai Station from 2012 to 2019

2.2.2 主应变与主方位角异常变化分析

钻孔应变的数据处理通常是把四个直接观测值换算成三个间接观测值如(式3)，

$$\begin{cases} s_{13} = S_1 - S_3 \\ s_{24} = S_2 - S_4 \\ s_a = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4)/2 \end{cases} \quad (3)$$

将换算后的间接观测值按主应变—主方向($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi$)进行分解，(式3)可转化为(式4)

$$\begin{cases} s_{13} = 2B(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\cos2(\theta_1 - \phi) \\ s_{24} = -2B(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\sin2(\theta_1 - \phi) \\ s_a = 2A(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \end{cases} \quad (4)$$

再利用三角公式分别求得主应变和主方向如(式5)，

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{4A}s_a + \frac{1}{4B}\sqrt{s_{13}^2 + s_{24}^2} \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{4A}s_a - \frac{1}{4B}\sqrt{s_{13}^2 + s_{24}^2} \\ \phi = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{s_{24}}{s_{13}}\right) + \theta_1 \end{cases} \quad (5)$$

将2019年高台钻孔应变数据进行换算后，将($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi$)进行求解，每月抽取一组数据进行作图发现，2019年1月1日之后，半长轴 ε_2 持续缓慢增大，半短轴 ε_1 加速增大张力增强，4月2日 ε_1 达到最大值 $26\,814.1\times10^{-8}$ ，后张力逐步减弱，9月16日达到最小值 6441.6×10^{-8} ，张掖M_s5.0级地震后，应力释放 ε_1 逐步恢复，12月02日逐步恢复至1月

的主应变大小。方位角 φ 年变化相对平稳,但2019年3月23日快速下降,3月28日达到最小值 -64.6327° 后发生转折,逐步恢复至平稳状态。 ε_2 方向正好与榆木山断裂NW向一致,自仪器安装以来

稳步增大, ε_1 方向正好与断裂垂直,主方向的大小变化也很好地反映了张掖 $M_S5.0$ 级地震的应力积累和释放过程,很好地表现了地震孕育的前兆异常^[8](如图8)。

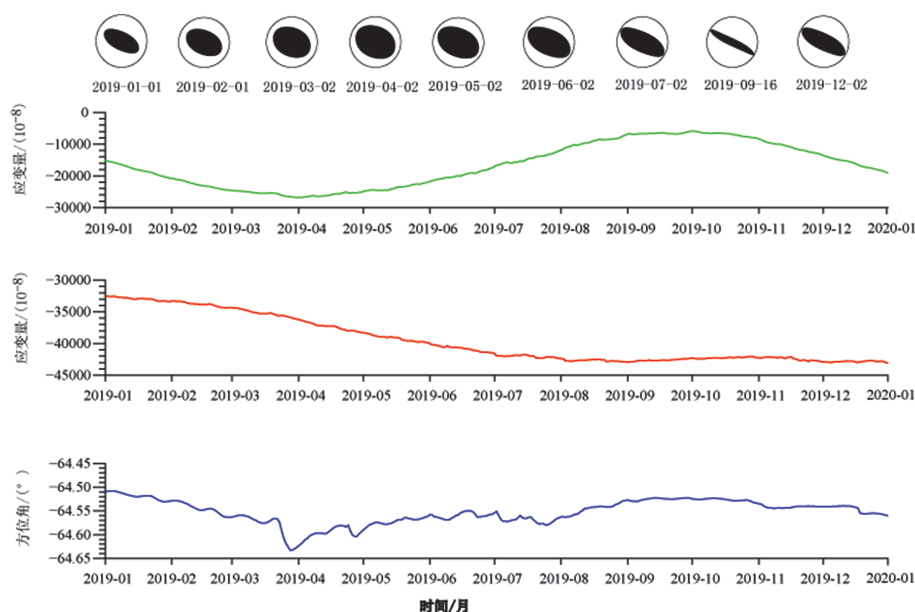


图5 高台钻孔应变替换量应力变化图与替换量数值图

Fig.5 Stress variation diagram and numerical replace diagram in borehole strain at Gaotai Station

2.2.3 差分变换异常分析

在钻孔应变观测中需要排除气压干扰造成的影响,对高台钻孔应变换算后的 S_a 数值进行差分处理,得到分钟值变化速率曲线,能清楚地发现钻孔应变观测中的高频信号变化情况(如图6),发现2019年4月—2019年7月,高频毛刺明显增多。

2.2.4 小波变换异常分析

小波方法最早起源于1980年,就是将信号分解成不同频率的分量,按相应的频率进行数据分

析的方法^[9-10]。在研究时间和频率的局域变化,一般情况下使用Daubechies^[11]和Mallat^[12]的离散小波变换。在脉冲形态信号的提取中,我们对 S_a 数据进行DB小波分解,从第一层2~4 min,到第九层512~1024 min,发现d4~d7在4月以后毛刺逐渐增多,9月以后逐渐减少,这些大小毛刺随时间不断变化,反映了在4月至9月之间,地震前岩石的断裂和裂隙逐渐增大(如图7)。

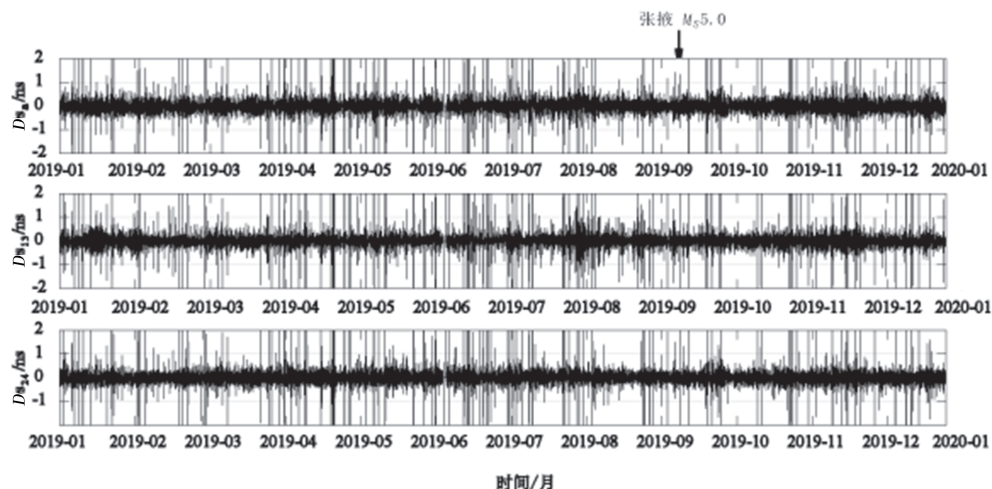


图6 高台钻孔应变 S_a, S_{13}, S_{24} 分钟值差分曲线图

Fig.6 Difference curve of S_a, S_{13}, S_{24} minute value of borehole strain at Gaotai Station

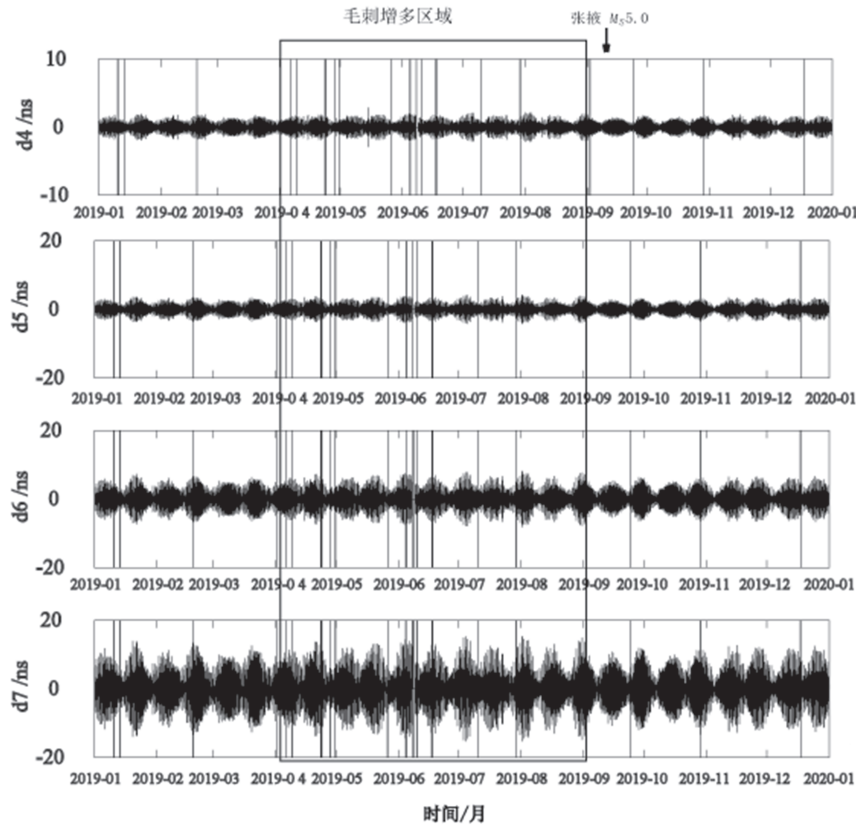


图7 高台钻孔应变Sa DB小波分解4-7阶分解图

Fig.7 The 4-7 order decomposition diagram of Gaotai Station borehole strain based on Sa DB wavelet decomposition

2.2.5 超限率异常分析

经过高通滤波和小波分解得到的观测值都是在0线的附近上下波动,当毛刺很小的时候就很难观察出来。将滤波后的信号时间序列记为 $X_i(i=1, 2, \dots, N)$ N 为数据的总个数,求时间序列的均值 \bar{X} , 得到标准差 S_D 。把 S_D 作为一个信号检测阈值,

超出这个范围记做超限,单位时间内超限点的个数叫做数量超限率,记为 R_{on} 。将高台钻孔应变2019年的替换数据 S_a 、 S_{13} 、 S_{24} 进行超限分析后,发现4月至8月数目超限率 R_{on} 明显增多,8月开始明显减少,直至发震(如图8)。

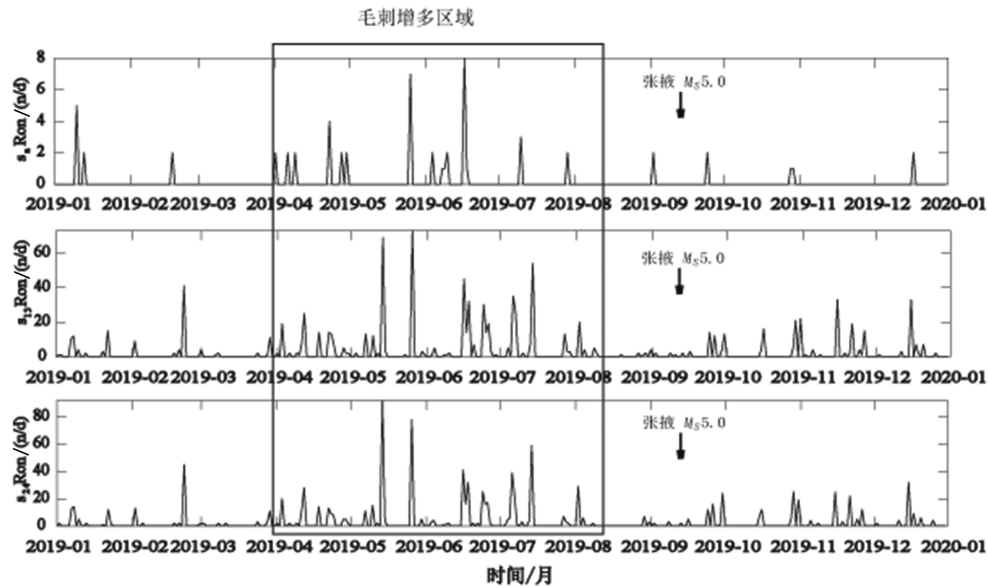


图8 高台钻孔应变Sa 超限分析图

Fig.8 Sa transfinite analysis chart of drilling strain in Gaotai

3 结果与讨论

2019年9月16日张掖 $M_s5.0$ 级地震发生在全国重点危险区内,通过对高台钻孔应变的资料进行分析,在正常的年变状态下,NE分量和NW分量出现了明显的异常现象。

(1)NE分量和NW分量出现了破年变低值异常,NE分量较往年最低点达到 $-64\ 745.46\times 10^{-8}$,超出同日2013年—2018年年变均值54.38%,NW分量数据最低点达到最低值 $-65\ 663.8\times 10^{-8}$,最大超出同日2013—2018年年变均值17.68%,年变转折点滞后出现破年变。

(2)求解 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi)$ 后发现,2019年1月1日之后,半长轴 ε_2 持续缓慢增大,半短轴 ε_1 加速增大张力增强,4月2日 ε_1 达到最大值 $26\ 814.1\times 10^{-8}$,后张力逐步减弱,9月16日达到最小值 6441.6×10^{-8} ,张掖 $M_s5.0$ 级地震后,应力释放 ε_1 逐步恢复,12月02日逐步恢复至1月的应力大小。方位角 φ 年变化相对平稳,但2019年3月23日快速下降,3月28日达到最小值 -64.6327° 后发生转折,逐步恢复至平稳状态, ε_2 方向正好与榆木山断裂NNW一致,自仪器安装以来稳步增大, ε_1 方向正好与断裂垂直,主方向的大小变化也很好的反映了张掖 $M_s5.0$ 级地震的应力积累和释放过程。

(3)替换量 S_a 、 S_{13} 、 S_{24} 的分钟值差分曲线在3~8月出现了毛刺增多现象,大小毛刺表现了岩石的破裂情况,DB离散小波分解后发现在4~7阶,在4~9月毛刺振幅变大,数量增多,地震发生后毛刺消失。求得超限点 S_0 后,进行数量超限发现,4~7月数目超限率 R_{on} 明显增多,8月开始明显减少至发震。

另外,此次地震前山丹地震台电阻率在2016—2018年出现了EW分量的破年变异常^[13]。根据此次地震前这些异常信息的相互印证,综合分析,在张掖 $M_s5.0$ 级地震前高台钻孔应变的异常信息可靠,可能是此次地震的前兆异常。

致谢:感谢应急管理部国家自然灾害研究院邱泽华研究员提供的钻孔应变分析软件对本文的技术支撑,唐磊副研究员的无私指导。

参考文献

- [1] 蒋靖祥,尹光华,哈斯高娃,等. 钻孔应变仪在地震前的记录及地震预测[J]. 地震研究,2000,23(4):410-417.
- [2] 蒋靖祥,尹光华,王在华,等. 发展钻孔应变观测的战略构想[J]. 国际地震动态,2004(11):7-14.
- [4] 邱泽华,唐磊,周龙寿,等. 四分量钻孔应变台网汶川地震前的观测应变变化[J]. 大地测量与地球动力学,2009,29(1):1-5.
- [5] 牛安福,张凌空,闫伟,等. 中国钻孔应变观测能力及在地震预报中的应用. 大地测量与地球动力学,2011,31(2):48-52.
- [6] 李淑恭. 钻孔应变、应力地震中短临前兆异常特征及预报方法研究[J]. 地壳构造与应力文集,2001(14):115-125.
- [7] 邱泽华. 钻孔应变观测理论和应用[M]. 北京:地震出版社,2017.
- [8] 钟继茂,李祖宁,谢志招,等. 用多分量钻孔应变仪资料推算测区附加应变场方向[J]. 大地测量与地球动力学,2011,31(1):29-33.
- [9] 戴勇,高立新,杨彦明,等. 基于小波变换方法的包头台形变分析[J]. 华南地震,2013,33(4):39-46.
- [10] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. Pure and Appl Math, 1988(41):909-996.
- [11] Grossmann, A., Morlet, J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1984(15):723-736.
- [12] Mallat, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989(11):674-693.
- [13] 王志栋,雷正超,寇俊阳,等. $M_s5.0$ 地震前山丹地震台电阻率异常分析[J]. 地震地磁观测与研究,2020,41(4):83-89.