

高丽娟、李尚伟、滕海涛,2019,用超限率分析法提取精河 6.6 级地震前的高频信号异常,中国地震,35(1),117~125.

# 用超限率分析法提取 精河 6.6 级地震前的高频信号异常

高丽娟 李尚伟 滕海涛

新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐 830011

**摘要** 2017 年精河  $M_s$ 6.6 地震震前,尼勒克台、巩留台和小泉沟台钻孔应变仪记录到了显著的高频信号异常变化,经现场异常落实确认异常是可靠的。本文通过超限率分析方法提取类似信号,定量描述了震前异常信号强度,结果表明地震前 3 个台不同程度出现超阈值现象,异常显著,其中 2 个台为临震变化。

**关键词:** 精河  $M_s$ 6.6 地震 定点形变 超限率分析 高频信号 地震前兆

[文章编号] 1001-4683(2019)01-0117-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

随着数字化观测网的逐渐普及,数字化前兆资料较模拟记录资料具有信息量大、干扰多的特点。如何从数字化的形变资料中识别与消除观测环境、仪器故障及气象因素等造成的毛刺、阶跃、畸变等干扰,是应用前兆资料进行地震预测面临的基础问题。此类信号的研究可以为今后新疆及附近地区地震前兆的判定提供支持。那么,如何将这些高频信号提取出来?这些变化是否为地震前兆异常?如何进行定量的描述?研究这些问题具有重要的现实意义。邱泽华等(2009、2012)用超限率分析法研究了汶川地震前姑咱台的应变异常变化。周龙寿等(2009a、2009b)使用超限率分析法来定量检验前驱波。刘琦等(2011、2014)利用 S 变换时频方法提取到了姑咱台四分量钻孔应变在汶川 8.0 级、芦山 7.0 级地震前“压性脉冲”和“潮汐畸变”信号。超限率和 S 变换时频分析方法是目前提取高频信号较实用的方法,它们都可以定量描述高频信号。许多学者(赵彬彬等,2017;张治广等,2017;艾萨·伊斯马伊力等,2017)已对 2018 年 8 月 9 日精河  $M_s$ 6.6 地震的前兆异常进行了初步分析和总结,本文拟采用超限率分析方法提取震前部分钻孔应变台出现的高频信号异常。

## 1 基础资料评价

本文用  $C_{95}$  来描述分量钻孔应变观测资料质量信度,它可以刻画 1+3 路和 2+4 路元件的自洽程度,越接近 1 表示信度越高。表 1 为新疆四分量钻孔应变台观测资料质量评价结果。

[收稿日期] 2018-08-27; [修定日期] 2019-02-14

[项目类别] 2018 年震情跟踪定向工作任务(2018010210)、中国地震局地震科技星火计划项目(XH19049)共同资助

[作者简介] 高丽娟,女,1984 年生,硕士,高级工程师,主要从事地震前兆分析预报工作。E-mail:124456882@qq.com

如表 1 所示,结合偏差和自洽信度结果来看,巩留台最好,但实际上,考虑偏差时,也应考虑 4 个元件的标定系数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  和  $k_4$  的值,巩留台的 4 个元件的标定系数最偏离 1,  $k_1$  甚至为负数,因此,综合评价,巩留台的自洽信度最差,信度较好的是小泉沟台和尼勒克台。

表 1 新疆四分量钻孔应变台观测资料质量评价结果

台项	元件相对标定系数(差分值)						观测信度 $C_{95}$	
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	平均值	偏差(相对于 1)	校正前	校正后
小泉沟台	1.0105	0.9717	0.8043	0.7483	0.8837	0.1839	0.7048	0.7710
尼勒克台	0.7140	1.0707	0.9348	0.9306	0.9125	0.1887	0.5038	0.7469
巩留台	-0.3333	0.3333	0.9999	0.3333	0.3333	0.0976	0.0562	0.9982

图 1 为小泉沟台、尼勒克台和巩留台钻孔应变四分量的潮汐因子中误差曲线。国家台评比标准中,潮汐因子中误差  $\leq 0.05$ ,表明观测数据质量精度高,稳定性好。小泉沟台除了 NW 分量精度不高,其它 3 个分量潮汐因子中误差基本都符合国家台评比标准。巩留台 NE 分量数据质量较差,其它 3 个分量潮汐因子中误差也都基本符合国家台评比标准。尼勒克台除了个别超限点,潮汐因子中误差基本都小于 0.05。文中研究的信号异常多表现为阶变、毛刺加粗等固体潮畸变,而潮汐因子变化一定程度上可以反映固体潮畸变,因此潮汐因子变化误差可以反映观测资料的稳定性。

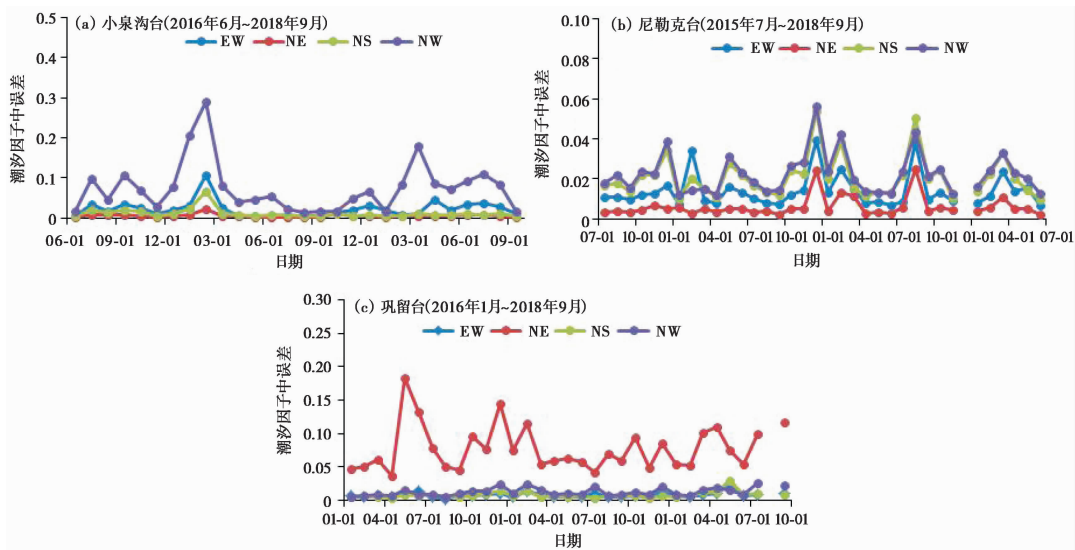


图 1 潮汐因子中误差时序曲线

## 2 基本原理

观测数据选取经过高通滤波处理后的值,该值总是在 0 值的附近变化。将某观测资料时间序列记为  $X_i(i=1, \dots, N)$ ,  $N$  为数据点总数。该时间序列的均值为

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \approx 0 \tag{1}$$

而其标准差为

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

可用  $S_D$  来描述数据变化的一般范围,把超出这个范围的点称为超限点,把这个点的观测值  $X_i$  的绝对值  $|X_i|$  超出  $S_D$  的部分  $|X_i| - S_D$  称为超限强度。称单位时间内的超限点数  $N$  为数量超限率,称单位时间内所有超限点的超限强度之和为强度超限率,即

$$X_s = \sum_{j=1}^N (|X_j| - S_D) \quad (3)$$

这两个超限率都是时间的函数(邱泽华等,2012)。

### 3 计算结果分析

本研究具体方案为:首先,结合台站仪器工作日志,排除人为(标定、调仪器)、雨雪、雷电等干扰因素,剔除受影响的数据,对缺数利用插值方法进行拟合,对地震波采用平滑滤波的方式进行处理;其次,将处理好的分钟值数据进行高通滤波处理;然后,确定高通滤波残差值的阈值;最后,运用超限率统计方法分别提取钻孔应变的高频信号,分析它们与地震的关联性。阈值的确定折中考虑漏报率和时空占有率,即  $R$  值最大的点对应的阈值作为最优阈值。

图 2~4 为 3 个台分量式钻孔应变强度超限率时序曲线,此类高频信号异常每个台的 4 个分量均同步出现,本文仅给出其中 2 个分量的变化。尼勒克台和巩留台分量式钻孔应变的强度超限率于 2017 年 7 月 13 日同步开始出现超阈值现象,异常持续 5 天左右,之后 22 天发

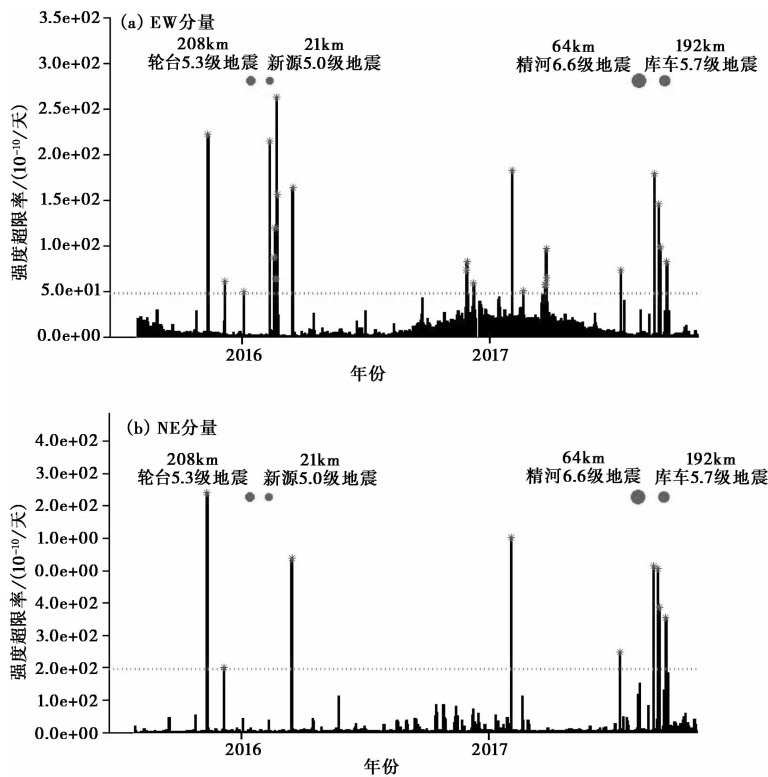


图 2 尼勒克台分量式钻孔应变高频信号时序曲线

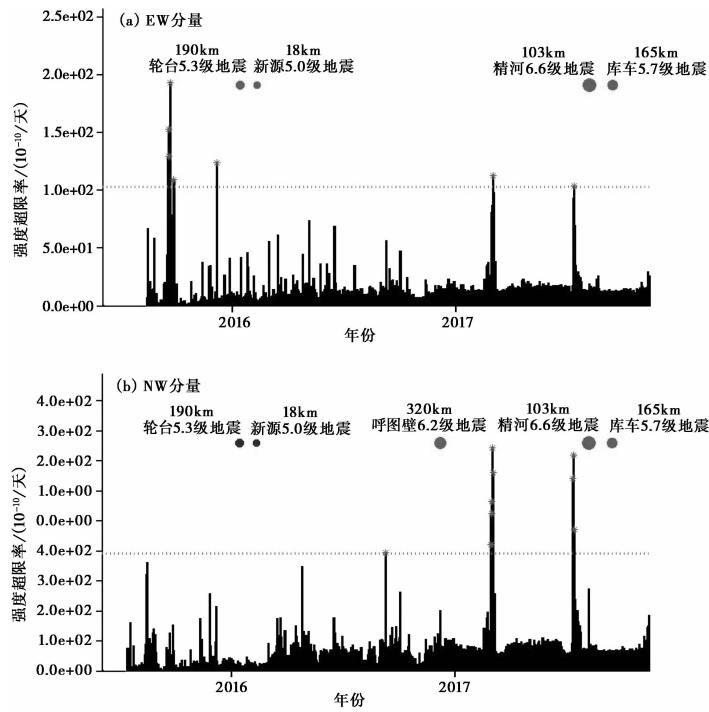


图 3 巩留台分量式钻孔应变高频信号时序曲线

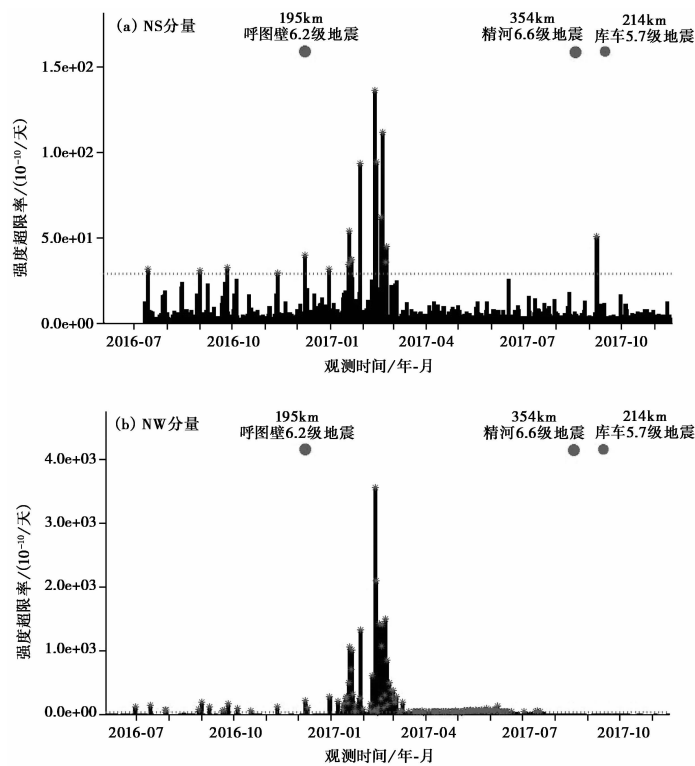


图 4 2016 年 6 月 1 日~2017 年 8 月 10 日小泉沟台分量式钻孔应变高频信号时序曲线

生精河 6.6 级地震。2016 年 2 月 11 日新源 5.0 级地震前 2 个台也同步出现过类似异常变化。小泉沟台分量式钻孔应变的强度超限率于 2017 年 1 月开始超限, 3 月之后 3 个分量高频信号基本结束, 仅 NW 分量异常持续, 7 月 22 日恢复正常, 17 天之后发生精河 6.6 级地震。

图 5 为尼勒克台、巩留台和小泉沟台钻孔应变的异常值与正常值的时序曲线。由图 5 可知, 3 个台的正常值曲线固体潮光滑, 形态呈“M”。尼勒克台(图 5a)、巩留台(图 5b)和小泉沟台(图 5(c))分量式钻孔应变在精河 6.6 级地震前出现了阶变、突跳和毛刺加粗的高频信号。尼勒克台主要以台阶畸变为主, 持续时间较短, 间隔出现; 巩留台以突跳和毛刺加粗型畸变为主, 连续几天持续出现; 小泉沟台以频繁出现阶变类信号为特征, 类似信号连续出现, 持续了 4 个月, 震前恢复。这些阶变式的信号有如下共同特征: ①阶跃出现时间短, 多在几十分钟; ②阶变信号多向下突变, 即受压为主; ③阶变幅度小, 以几个应变单位变化为主, 尼勒克台较小泉沟台幅度大; ④小泉沟台阶变信号数量多, 数天丛集出现, 尼勒克台数量少, 偶发性为主。

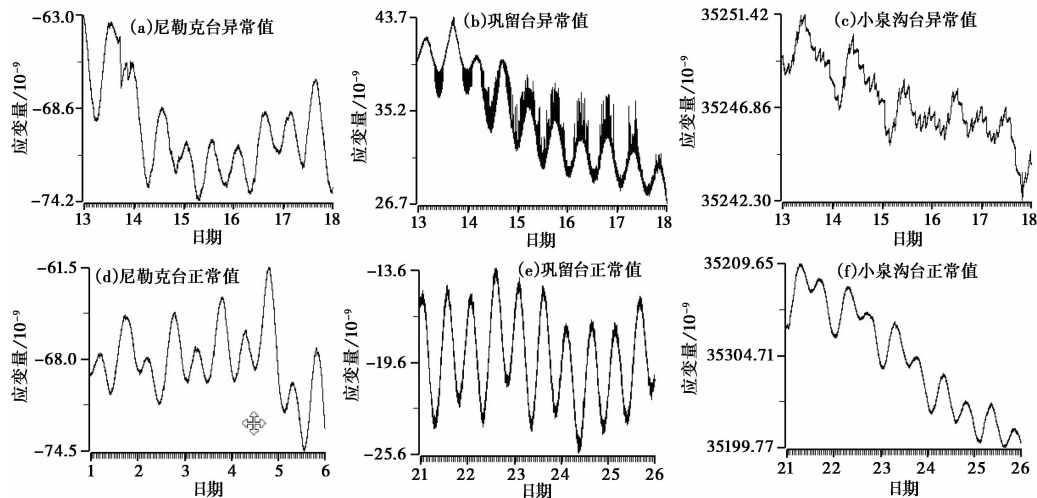


图 5 分量式钻孔应变时序曲线

小泉沟台出现的类似高频信号经异常核实已排除气压和水位的干扰, 详情见核实报告<sup>①</sup>。巩留台出现的毛刺加粗信号, 与应变观测数据中风扰的现象类似, 但巩留台异常变化时段未见风扰记录, 查阅气压相关数据曲线, 未见明显气压异常, 因此排除风扰影响。而尼勒克台的固体潮畸变现象以往也出现过类似变化, 未发现与气压等气象因素明显相关, 也可能是受区域应力应变偶发性调整的影响, 本文暂列为地震前兆异常, 主要考虑与巩留台异常出现时间上较为同步。

尼勒克台和小泉沟台类似阶变信号在 2008 年汶川  $M_s 8.0$ 、2010 年芦山  $M_s 7.0$ 、2012 年新源和静交界  $M_s 6.6$  地震前出现过。巩留台这种毛刺加粗的信号, 杨又陵等(2003)<sup>[</sup>等在昆山山口西  $M_s 8.0$  地震前捕捉到类似信号。精河地震前尼勒克台和巩留台高频信号震前 1 个月出现, 持续时间仅 5 天左右, 无规律, 偶发性; 而小泉沟台高频信号震前半年出现, 震前半

① 赵彬彬、杨绍富、张嘉敏, 2018, 异常核实——2018 年 3 月 3 日新疆小泉沟台钻孔分量应变。

月恢复正常,持续时间长,有一定规律可循。下文将对小泉沟台阶变异常信号细节进行分析,其特征表现为:第 1 阶段为 2018 年 1~2 月,4 个分量高频信号以大尺度阶变突跳为主;第 2 阶段为 2018 年 3 月之后,仅 NW 分量出现小尺度阶变,呈现一定规律,其它分量恢复正常。下文以 NW 分量为例,来研究其信号特征,提取的基本思路是:首先,提取出阶变或者脉冲等高频信号的发生时间和幅度大小;其次,将幅度大小视为震级整理成地震目录格式,绘制时间扫描曲线;最后,分析其信号特征。

图 6 为阶变信号经整理后绘制的时间扫描曲线,窗长取 1 天,步长也取 1 天。细节特征

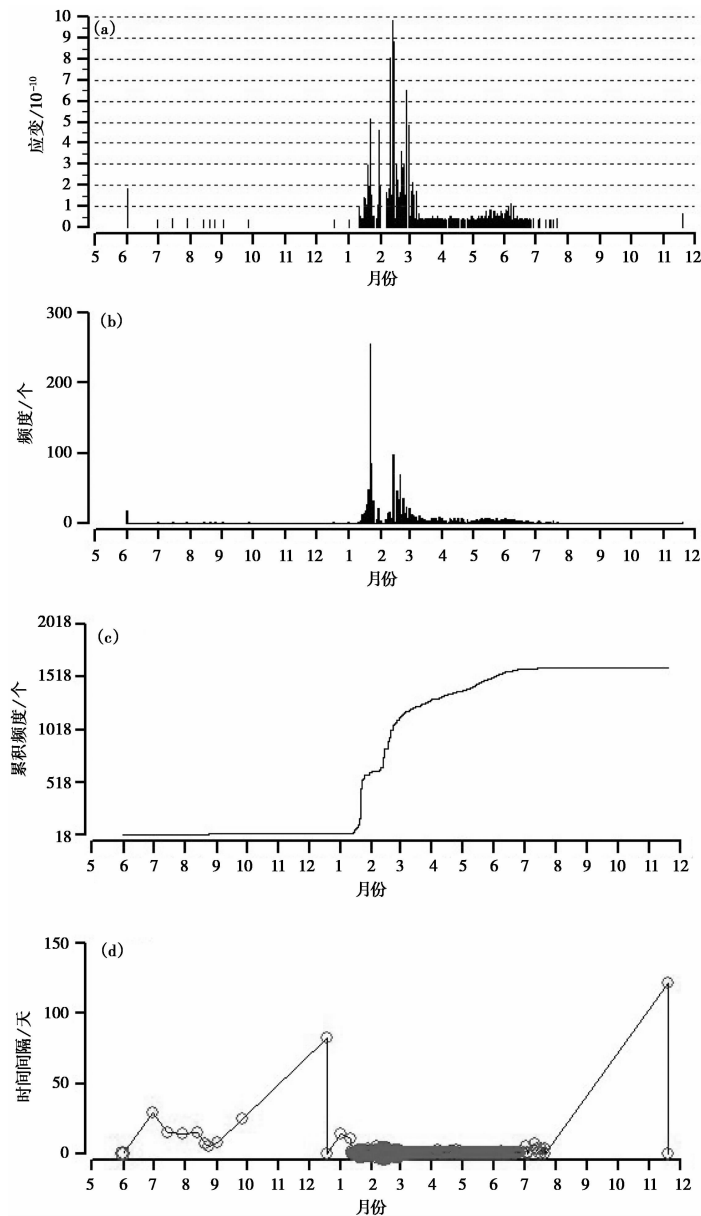


图 6 2016 年 5 月 30 日~2017 年 11 月 27 日阶变信号预处理后各类时间扫描曲线图  
(a)  $M-t$  图;(b) 频度图;(c) 累积频度图;(d) 阶变信号发生时间间隔  $\Delta T-T$  图

表现为：①阶变信号幅度，最大达到  $10 \times 10^{-10}$  个，2017 年 1~2 月阶变信号幅度大，多集中在几个应变变化，3~7 月的阶变幅度多在 0.5 个应变单位(图 6(a))；②阶变信号频度分 3 阶段，第 1 阶段为 1 月 15~21 日，日变化频度由 14 个/日迅速增加到 255 个/日，1 月 24 日之后迅速降到 18 个/日以下，第 2 阶段为 2 月 12~28 日，12 日这天阶变频度达到 97 个/日，之后逐渐减小，截至 28 日，基本达到 21 个/日，之后更加趋于减少，第 3 阶段为 3 月 11 日~7 月 22 日，日变化基本在 10 个/日以下(图 6(b))；③阶变信号累积频度显示，1、2 月分别出现 2 次突增变化，3 月之后增加变缓(图 6(c))；④阶变信号发生时间间隔显示，2017 年 1 月之前偶尔出现，1~7 月频繁间隔出现，7 月中旬之后阶变信号基本消失(图 6(d))，其细节特征表现为，1 月阶变信号发生的平均时间间隔为 0.03 天，2 月为 0.04 天，3 月为 0.24 天，4 月为 0.34 天，5 月为 0.22 天，6 月为 0.53 天，基本呈现间隔时间越来越大的态势。阶变信号出现的平均间隔时间由 43min 逐渐发展成 1hr 左右，然后又增大发展成 5hr、8hr，甚至 12hr 左右(图 7)。

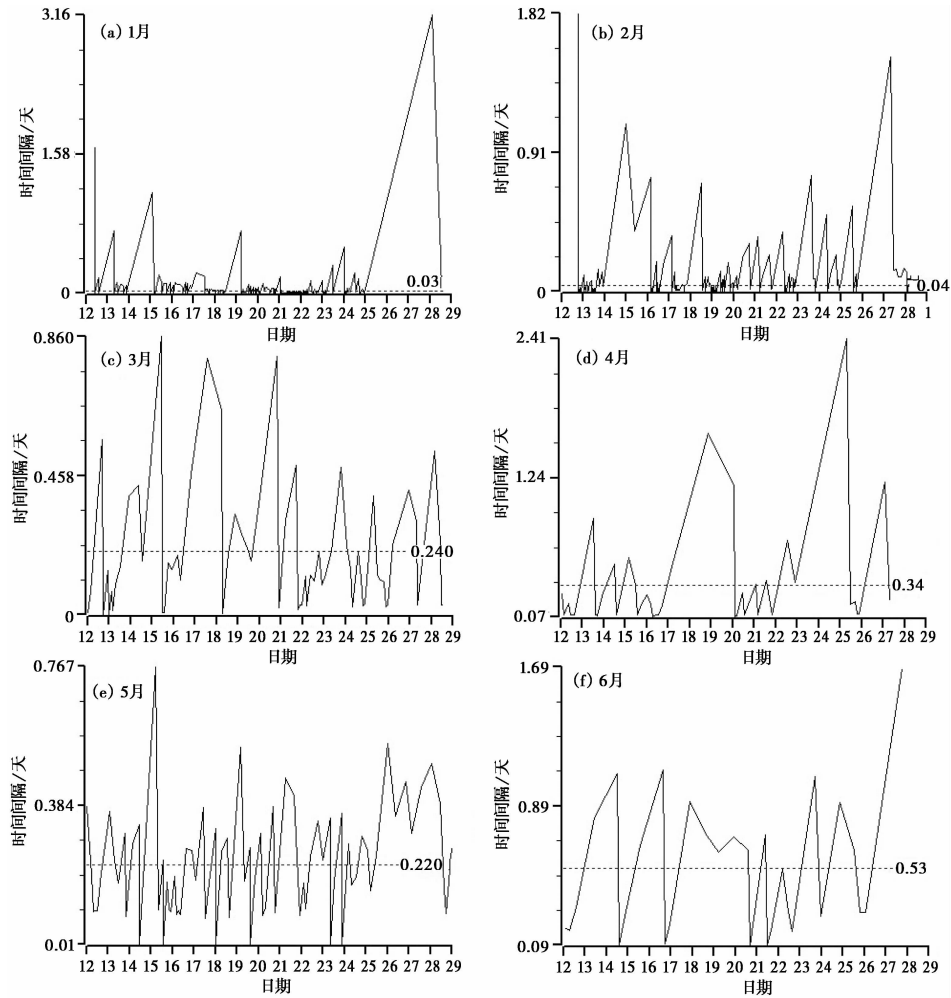


图 7 阶变信号预处理后阶变信号发生时间间隔图

取每月 12~28 日数据

总结来看,小泉沟台分量钻孔应变 NW 分量出现的阶变信号,以压性变化为主,幅度为 0.5~10.0 个应变单位,信号发生的间隔时间呈现出随着距主震震中越近,间隔越大的特征,1~2 月信号丛集出现 2 次突增变化,一定程度表明该区域构造应力在 1~2 月可能存在增强的变化。

### 4 讨论与结论

通过超限率分析方法,提取出了小泉沟台分量钻孔应变在精河 6.6 级地震前的高频信号异常,同时,尼勒克台和巩留台在震前也配套出现了类似异常变化。然后对小泉沟台类似阶变的高频信号进行了细节分析,并总结其特征,得出以下几点认识:

(1)在精河 6.6 级地震前 3 个台出现了阶变、突跳和毛刺加粗的高频信号,类似的发现在以往新疆多次中强震前都出现过,一定程度上表明,该类信号是客观存在的自然现象,与地震的孕育可能存在某种关联,只是目前的认识还不够充分和深入,仍需更多的关注和研究。

(2)小泉沟台分量钻孔应变 4 个分量出现的高频信号同步出现,相互映证,仅 NW 分量在异常后期表现出独有的异常变化信号。但我们发现,NW 分量元件的方向恰恰是与震中位置交角最小的方向,指向震中,在该方向上应力触发是否更敏感,表现出的异常是否更显著,有待我们进一步的积累和验证。

(3)小泉沟台高频信号异常是 4 个分量同时出现,异常后期仅 NW 分量出现;尼勒克台也是 4 个分量同时有畸变现象,巩留台是 EW、NW 分量同步出现毛刺加粗变化。超限率结果表明,巩留台和小泉沟台异常变化幅度最大的分量为 NW 向,尼勒克台变化最大的为 NE 向,如图 8 所示,3 个台异常变化最大的方位正好都与震中交角最小,即指向震中。

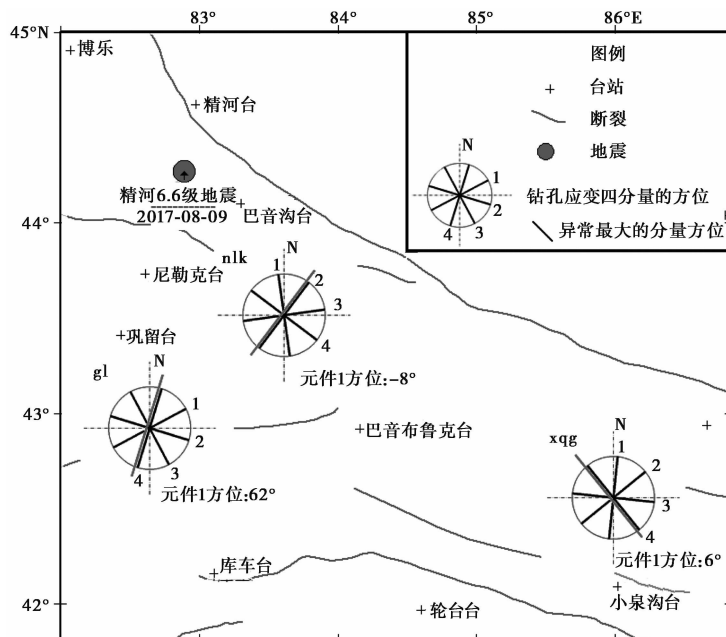


图 8 震中周围台站分布示意图



(4) 根据前人总结的应变积累的 4 个特征, 即稳定变化段、加速变化段、失稳段和震前突变段。其中在失稳段, 应变变化极不稳定, 是可能出现类似阶变、毛刺加粗等高频信号的阶段。其它岩石力学实验也观察到类似结果: 岩石破坏之前, 声发射活动存在稳定期、声发射活动初期、声发射活动加剧期和反转期等 4 个阶段。因此, 从机制分析或者实验观察, 在岩石破坏之前, 类似高频信号的出现可能是客观存在的现象。

**致谢:** 由中国地震局地壳应力研究所邱泽华研究员提供了本文所用程序, 并在理论与方法上给予了诸多指导和帮助, 审稿专家对本文细致审阅并提出了富有建设性的修改意见, 在此深表谢意。

### 参考文献

- 艾萨·伊斯马伊力、黄恩贤、高丽娟, 2017, 2017 年精河  $M_s$ 6.6 地震前地磁异常特征分析, 中国地震, **33**(4), 764~770.
- 刘琦、张晶, 2011, S 变换在汶川地震前后应变变化分析中的应用, 大地测量与地球动力学, **31**(4), 6~9.
- 刘琦、张晶、池顺良等, 2014, 2013 年芦山  $M_s$ 7.0 地震前后站台四分量钻孔应变时频特征分析, 地震学报, **36**(5), 770~779.
- 邱泽华、唐磊、张宝红等, 2012, 用小波-超限率分析提取宁陕台汶川地震体应变异常, 地球物理学报, **55**(2), 538~546.
- 邱泽华、周龙寿、池顺良, 2009, 用超限率分析法研究汶川地震的前兆应变变化, 大地测量与地球动力学, **29**(4), 1~4, 9.
- 杨又陵、赵根模、高国英等, 2003, 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西  $M$ 8.1 地震前的缓慢地震事件, 国际地震动态, (9), 1~4.
- 张治广、张璇、张元生等, 2017, 2017 年 8 月 9 日精河  $M_s$ 6.6 地震热红外亮温异常分析, 中国地震, **33**(4), 757~763.
- 赵彬彬、高丽娟, 2017, 2017 年 8 月 9 日精河  $M_s$ 6.6 地震前钻孔应变异常特征分析, 中国地震, **33**(4), 728~740.
- 周龙寿、邱泽华、唐磊, 2009a, 汶川 8.0 级地震前驱波的统计检验, 大地测量与地球动力学, **29**(2), 24~28, 38.
- 周龙寿、邱泽华、唐磊等, 2009b, 用小波方法系统检验强震“前驱波”, 地震学报, **31**(1), 1~12.

## Extracting High Frequency Signal Anomalies before the Jinghe $M_s$ 6.6 Earthquake with Overrun Rate Analysis

Gao Lijuan Li Shangwei Teng Haitao

Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

**Abstract** Before the  $M_s$ 6.6 earthquake happened in Jinghe, the borehole strain gauges of Nilka, Gongliu and Xiaoquanguo seismic stations recorded significant abnormal changes in high-frequency signals, and it was reliable to confirm the abnormalities through on-site abnormalities. In this paper, the similar signals are extracted by the over-limit rate analysis method, and the abnormal signal intensity before the earthquake is quantitatively described. the results show that the super-threshold phenomenon occurs in different degrees before the earthquake, and the anomaly is remarkable. Two of them are changes in the impending earthquake.

**Key words:** Jinghe  $M_s$ 6.6 Earthquake; Fixed point deformation; Overrun rate analysis; High frequency signal; Earthquake precursor