

跨断层辅助测线对非构造因素去除的应用探讨*

路 珍¹, 郭 泉², 李瑞莎¹, 张 希¹, 唐红涛¹, 贾 鹏¹, 汪翠枝¹

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 将跨断层场地的辅助测线应用于跨断层形变资料的数据处理中, 引入谱减法对沿鲜水河断裂带的5个跨断层场地进行分析处理, 试图将辅助测线与跨断层测线都包含的非构造因素的影响从跨断层数据中去除, 从而突出与地震发生相关的断层活动信息。结果表明: 利用谱减法处理过的跨断层测线在多数场地都表现出了时频成分上较明显的异常, 异常出现时间与周期特点都有较好的一致性。由鲜水河断裂带附近地震活动性可得异常在时间上存在与后续地震活动性增加相关的可能性。

关键词: 辅助测线; 跨断层测线; 谱减法; 非构造因素; 震前异常

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)02-0193-10

0 引言

已有的研究认为地震发生的机理是沿断层带的不稳定粘滑过程 (Brace, Byerlee, 1966; Ruina, 1983), 以往震例总结和构造物理实验揭示地震发生之前往往在应力应变、位移等方面都有迹象可寻 (牛安福等, 2012; 李瑞莎等, 2012; 薄万举, 华彩虹, 2001; 李杰等, 2011; 马瑾等, 2012; 卓燕群等, 2013; 季灵运等, 2015)。跨断层测量是指利用布设在断层带两盘的短水准和短基线测量来获得横跨断层带两测点的高差和位移随时间的变化, 可以较直接、较可靠地监测断层带的活动, 是捕捉地震前断层异常活动直接有力的方法之一。

近50年的跨断层形变监测不但积累了丰富的观测资料和地震前兆异常, 也在我国地震预报实践中发挥了重要的作用, 曾多次较为准确地预测地震, 如1975年2月4日海城 $M_s7.3$ 地震 (朱凤鸣, 吴戈, 1982)、1995年7月22日永登 $M_s5.8$ 地震 (江在森等, 1998)、2000年6月6日景泰 $M_s5.9$ 地震 (王双绪等, 2001), 还有近期的2013年4月20日芦山 $M_s7.0$ 地震 (苏琴等, 2014)。由此可见, 对跨断层形变数据中包含的与地震前兆信号有关的异常特征进行识别、捕捉和跟踪具

有重要且实用的地震预报意义。

跨断层形变观测中不但包含断层构造运动的信息, 同时也包含非构造的环境影响等干扰信息, 如气象、地下水位、振动、荷载变化、人为干扰等 (楼关寿等, 2010)。非构造干扰信息与有用的断层活动信息一起被记录下来, 影响着对跨断层数据的解释, 为构造活动的研究和前兆信息的确认带来了许多不确定因素。地震预报研究人员一直致力于对干扰因素的判定和提出, 试图提取出和孕震直接相关的构造活动信息 (薄万举, 1997; 施顺英等, 2007; 李腊月等, 2013a, b; 张希等, 2012; 刘权威, 1996; Moro, Zadro, 1998; Matsumoto *et al.*, 2003)。然而, 已有的对跨断层数据的处理方法大多是基于跨断层带测线进行分析的, 而场地的辅助测线则一直被忽略。本文中的辅助测线是指为了测量精度 (闭合差在规定范围内) 或者为了对场地更好地控制而在断层带周边设立的未跨过断层带的测线, 其往往设在断层带的一盘, 且在断层带附近。

由于辅助测线通常都在断层带附近, 因此辅助测线和跨断层测线都包含场地非构造影响因素, 其主要区别是跨断层数据包含了断层带的活动信息, 而辅助测线理论上并没有。因此, 本文对跨断层测线与辅助测线数据进行分析处理, 试图用

* 收稿日期: 2016-09-07.

基金项目: 2016年度震情跟踪定向工作任务——跨断层辅助测线对非构造因素判断的应用探讨 (2016010208) 资助。

谱减法将二者共同部分非构造因素的影响从中去除,并将所得结果与以往震例进行分析对比,对所用分析方法进行客观评估。

1 研究思路及方法

1.1 数据分析方法

本研究将语音通信中信号增强技术中所常用的谱减法引入跨断层数据的分析处理中,其基本算法是将非目标信号作为加性噪声叠加在目标信号上形成混合信号,在频率域中从混合信号的功率谱中减去非目标信号功率谱,从而得到较为纯净的目标信号。该方法原理比较简单,实验结果也表明此法在语音信号中的增强效果很好,可以有效去除背景噪声(黄斌,曾庆宁,2008;林琴等,2007)。本文所使用的跨断层数据包含断层活动信息和非构造影响因素,可看作是带噪声的混合信号。未跨断层测线数据原理上不包含断层运动信息,虽然可能会有一定的构造意义,如可反映断层一盘的掀斜运动,而掀斜运动可认为是旋转运动,其一般较微弱,效应并不显著(Stupazzini *et al.*, 2009; Trifunac, 2009)。另外,跨断层场地测线长度通常较短,一般只有几百米,能反映的范围相当有限。因此,基于上述考虑,我们认为未跨断层数据主要为非构造因素,即可对应为噪声非目标信号,可用于谱减法的操作。谱减法的原理如下所示(黄斌,曾庆宁,2008;林琴等,2007)。

设 $s(n)$ 为纯净信号, $n(n)$ 为噪音信号, $y(n)$ 为带噪语音信号,则有:

$$y(n) = s(n) + n(n) \quad (1)$$

用 Y_k , S_k , N_k 分别表示 $y(n)$, $s(n)$, $n(n)$ 的傅里叶变换,可得:

$$Y_k = S_k + N_k \quad (2)$$

对式(2)两边取平方,可得:

$$|Y_k|^2 = |S_k|^2 + |N_k|^2 + S_k N_k^* + S_k^* N_k \quad (3)$$

对式(3)两边取期望可得:

$$E(|Y_k|^2) = E(|S_k|^2) + E(|N_k|^2) + E(S_k N_k^*) + E(N_k S_k^*) \quad (4)$$

由于 $s(n)$ 和 $n(n)$ 独立,所以 S_k , N_k 也独立。而 N_k 为零均值的高斯分布,故 $E(S_k N_k^*) + E(N_k S_k^*) = 0$, 所以

$$E(|Y_k|^2) = E(|S_k|^2) + E(|N_k|^2) \quad (5)$$

即

$$|Y_k|^2 = |S_k|^2 + |N_k|^2 \quad (6)$$

由此得到原始信号的估计值为:

$$|S_k| = \left[|Y_k|^2 - |N_k|^2 \right]^{(1/2)} \quad (7)$$

具体数据处理步骤简述如下:

(1) 对观测资料进行连续性检验,剔除重复数据,用线性插值法填补缺失的数据,并使数据周期更加均匀,得到每年12个周期的连续性较好的数据。

(2) 采用小波变换方法对数据进行时频分析,得到数据的时频结果。数据处理是在 Matlab 的环境里编译 cmor3 小波算法进行的,具体算法如下(胡昌华等,1999):

morl 小波函数的定义为:

$$\psi(t) = Ce^{-t^2/2} \cos 5t \quad (8)$$

经伸缩和平移后得:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R; a \neq 0) \quad (9)$$

其中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(R)$ [$L^2(R)$ 表示平方可积的实数空间] 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \overline{|a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt} \quad (10)$$

(3) 基于前述谱减法的原理,在 Matlab 环境中编译算法,进行相应分析,得到数据的谱减法分析结果。

1.2 场地介绍

本文选取沿鲜水河断裂带且具有跨断层测线和辅助测线的5个水准场地作为研究对象, 这些场地测量精度优于 10^{-6} , 具有数据质量高、复测周期短、资料连续性好等特点。沿断裂带选取有利于基于断裂构造背景进行数据分析。所选场地为侏倭、格婆坝子、虚墟、龙灯坝和老乾宁场地, 如图1所示, 各场地测线布设如图2所示。

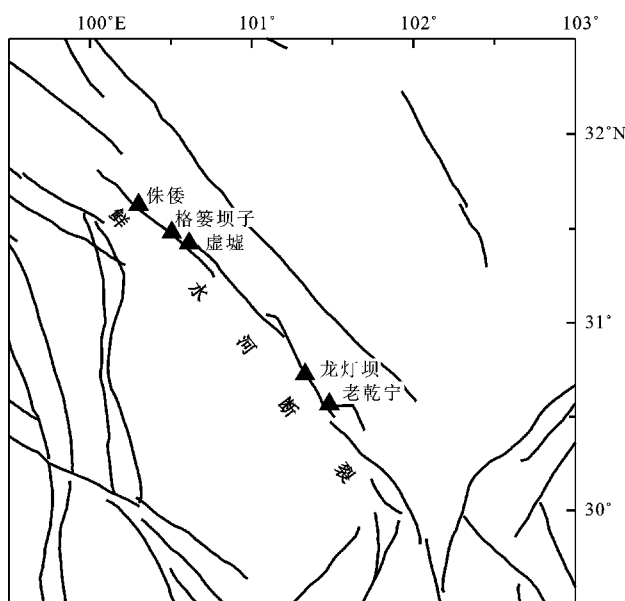


图1 沿鲜水河断裂所选跨断层场地示意图

Fig. 1 The distribution of the selected cross-fault sites along Xianshuihe fault zone

2 研究结果及分析

2.1 原始数据分析

为了更好地将各个场地间的数据进行对比分析, 统一选取1984—2016年的数据进行分析。图3列出了各个场地跨断层测线与辅助测线的原始数据曲线及其时频分析的结果。图中蓝色虚线为沿鲜水河断裂带200 km范围内 $M_s \geq 5.0$ 地震的发生时刻, 黑色虚线为沿鲜水河断裂带300 km范围内的 $M_s \geq 6.0$ 地震的发生时刻。

(1) 图3a所示为侏倭水准测量的结果, A←B和A←C测线都为跨断层测线, C-B测线为辅助测线。对于侏倭场地, 跨断层测线对断层的长期变化趋势有一个较好的反映, 都表现出下盘相对上盘呈上升的趋势。而辅助测线C-B则表现出了较大的不同, 只有微弱的递减趋势, 且呈锯齿状(图3a-5)。跨断层测线与辅助测线的时频特征都表现为周期为100 d以上的能量占主要成分, 1995年以后周期为30~50 d以上的能量成分有所增加。由于原始跨断层曲线呈平滑上升趋势, 与地震事件的对应并不好(图3a-1, a-3)。但其时频分析结果对地震的对应程度有所上升, 如白玉 $M_s 5.5$ 、雅江 $M_s 6.0$ 、汶川 $M_s 8.0$ 和鲁甸 $M_s 6.5$ 地震都不同程度的对应时频图上能量的增加(图3a-2, a-4)。

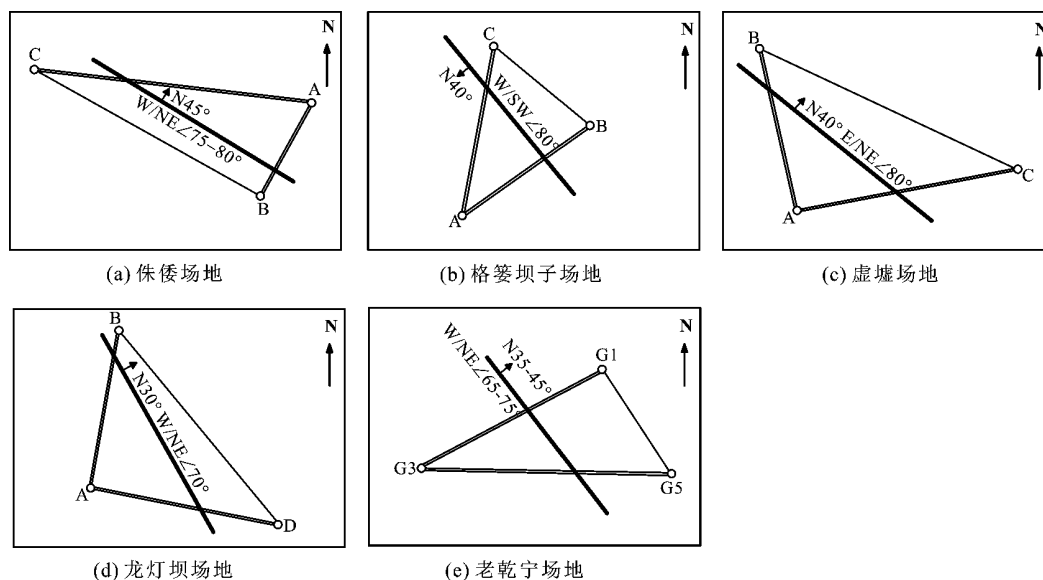
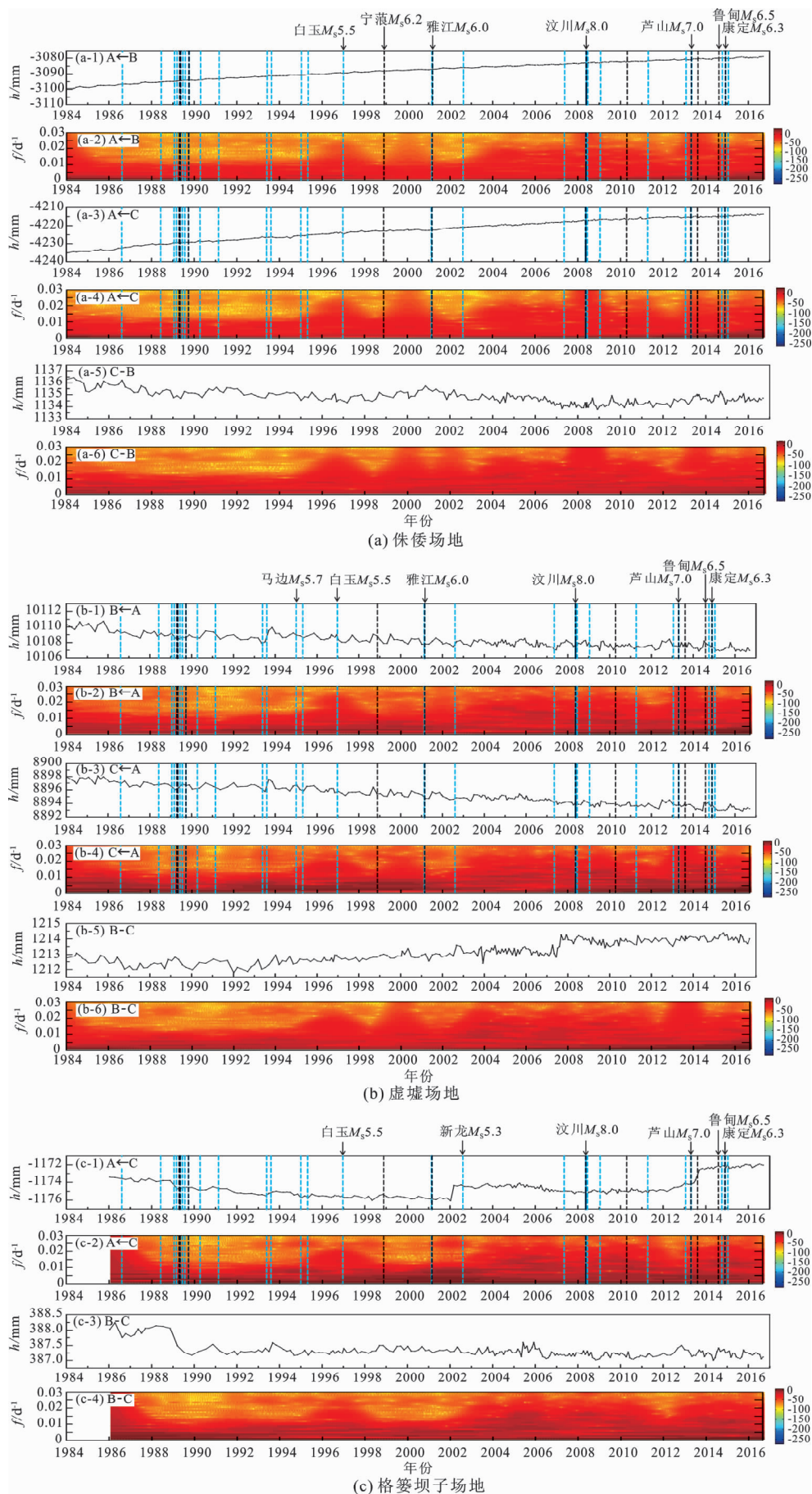


图2 跨断层水准场地测线布设图

Fig. 2 The layout of measuring lines of cross-fault leveling sites



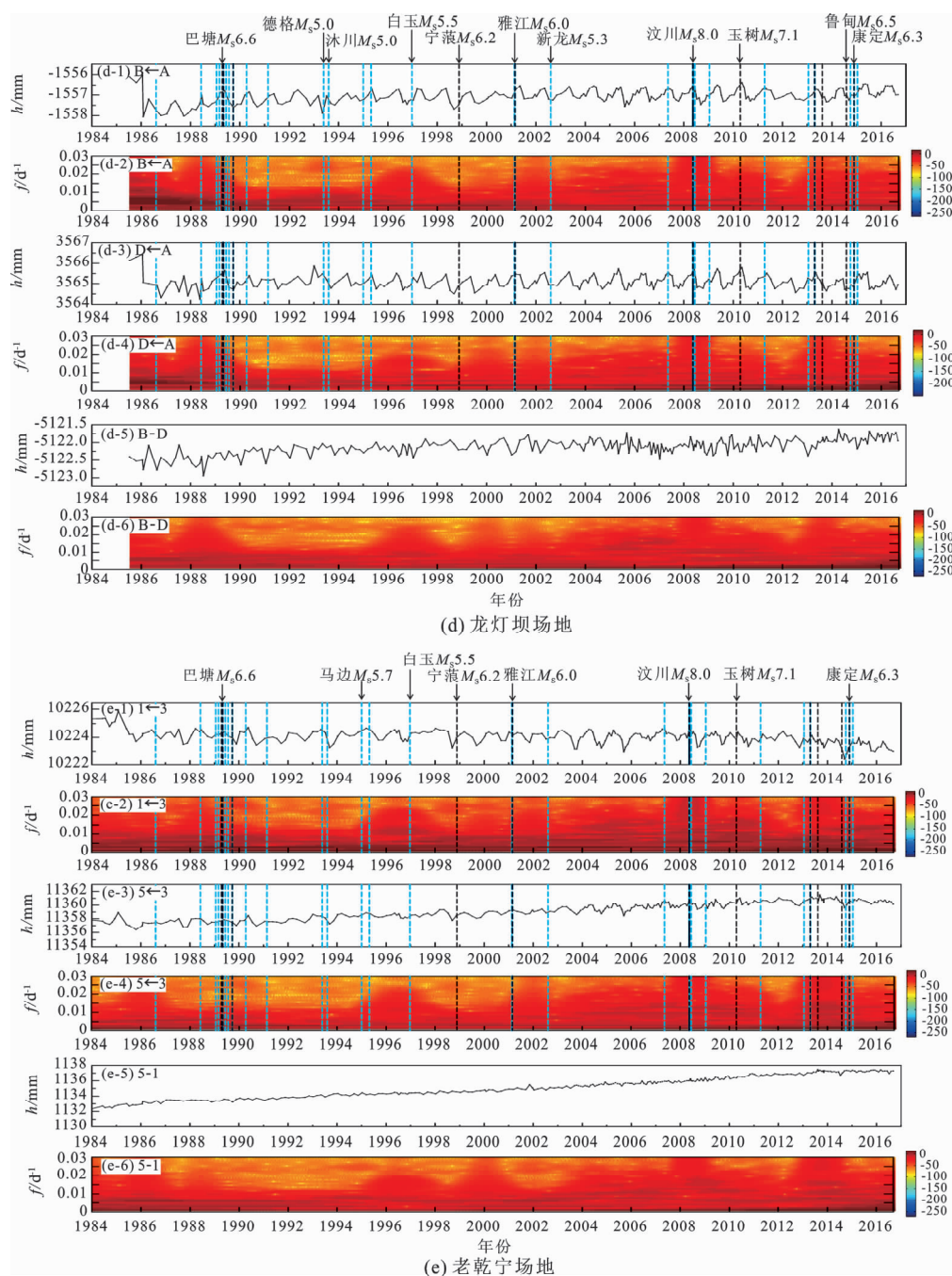


图3 沿鲜水河断裂跨断层场地原始数据高差-时间曲线及其时频分析结果

Fig. 3 Level difference - time plots for cross - fault sites and its time-frequency analysis results along Xianshuihe Fault Zone

(2) 虚墟场地的跨断层测线 B←A 与 C←A (图 3b) 表现为断层下盘相对上盘呈下降的趋势。辅助测线 B-C 随时间则为缓慢增加的趋势, 同时伴随锯齿状的跳跃 (图 3b-5)。其跨断层测线与辅助测线时频特征主要表现为周期 50~100 d 以上的能量, 后期为周期 30~50 d 以上的能量。虚墟场地原始跨断层曲线整体表现为上下跳动的特点, 对部分地震

有一定的反映, 如马边 $M_s5.7$ 、芦山 $M_s7.0$ 和鲁甸 $M_s6.5$ 地震前测线都有一定程度的向上跳跃, 对应拉张作用的增加 (图 3b-1, b-3)。其时频结果对白玉 $M_s5.5$ 和雅江 $M_s6.0$ 的对应较原始曲线有所提升, 表现为能量的增加 (图 3b-2, b-4)。

(3) 格菱坝子场地的跨断层测线 A←C (图 3c) 表现为断层下盘相对上盘先下降后上升的变

化,其在 2002 年左右出现约 1.7 mm 的台阶突跳,2012—2013 年底一直呈现上升趋势,且增加速率逐渐增大,上升幅度约为 2.5 mm。前者对应新龙 $M_s5.3$ 地震,后者在上升过程中发生了芦山 $M_s7.0$ 地震,在上升相对转平一年多的时间内发生了鲁甸 $M_s6.5$ 和康定 $M_s6.3$ 地震(图 3c-1)。其辅助测线先呈减小趋势后趋势变化不明显,同样一直伴随锯齿状的跳跃(图 3c-3)。该跨断层测线与辅助测线时频特征大多为周期 50~100 d 以上的能量,后期为 30~50 d 的能量。相比而言,其时频图结果未及原始曲线的映震效果(图 3c-2)。

(4) 龙灯坝与老乾宁场地的跨断层测线与辅助测线如图 3d 和 e 所示,其跨断层测线大多表现为类周期性的突跳波动特点,有微弱的上升趋势(图 3d-1,图 3e-3)或者趋势变化不明显(图 3d-3,图 3e-1),在部分地震发生前有较大幅度向下突跳与之对应,如白玉 $M_s5.5$ 、宁蒗 $M_s6.2$ 、雅江 $M_s6.0$ 等(图 3d-1, d-3, 3e-1, e-3)。龙灯坝场地辅助测线 B-D 表现出微弱的上升趋势,并一直伴随有尖点突跳的异常(图 3d-5)。老乾宁场地的辅助测线 5-1 则表现出明显的上升趋势(图 3e-5)。龙灯坝与老乾宁 2 个场地的时频分析也主要表现为前期周期 50~100 d 以上的信号为主要成分,后期主要为周期 30~50 d 以上的成分,其时频分析结果也在一定程度对应部分地震(图 3d-2, d-4, 3e-2, e-4)。

根据上述分析,发现鲜水河断裂带上的跨断层数据对于周围一定范围内的 5~6 级地震具有一定程度的映震能力。但由于跨断层原始测线大多表现为随整个时间序列的上下波动,所包含的异常较多,其中与地震有关的异常易被淹没其中而难以区分,导致异常和地震的发生并不是一一对应的,因此从众多异常中确认出明显的、不同于其他的地震异常具有一定困难。因此,从跨断层原始数据中突出地震异常的工作则显得比较必要。

2.2 谱减法分析结果

本文试图利用谱减法从跨断层测线中扣除非构造影响因素,由于谱减法的原理是从带噪信号的功率谱中减去整体噪声功率谱,因此结果中所去除的非构造因素不是如气象、地下水位、振动、荷载变化、人为干扰等某一项干扰因素的影响,

而是一个场地综合环境的影响,是上述可能影响因素的综合结果。分析结果见图 4,从图中可以看出,谱减法的结果与原始数据特征有所不同,显示对于侏倭、格蒗坝子和老乾宁 3 个场地都出现了明显的异常。具体表现为:

(1) 侏倭场地 A←B 测线和 A←C 测线的谱减法结果都出现了明显的能量的增强(图 4a-1, a-2),能量周期约为 30~100 d,在 50~100 d 之间占主要成分,持续时间约为 2001—2003 年。

(2) 格蒗坝子场地谱减法结果也表现出了明显的能量增强(图 4c),分别在 40 d 和 100 d 的 2 个周期成分处增强较明显,持续时间大致为 2000 年下半年至 2003 年中,这个时间段与 A←C 测线在 2002 年左右出现的阶跃异常在时间上有较好的一致(图 3c-1)。另外,对于格蒗坝子场地,能量的增强还出现在 2012 年左右,主要为 30~60 d 周期的能量成分,持续时间大致为从 2010 年下半年至 2012 年下半年,这与其原始测线在 2012—2014 年的持续上升有一定的对应。

(3) 谱减法得到的老乾宁场地 2 条跨断层测线 1←3 和 5←3 的异常周期都在 50~100 d 左右,持续时间大致为 2001—2003 年(图 4e-1, e-2)。而虚墟和龙灯坝 2 个场地的谱减法处理结果则较难从中指出明显的、区别于其他的异常现象。

总的来说,通过谱减法得到的沿鲜水河断裂带的侏倭、格蒗坝子和老乾宁 3 个跨断层场地所出现异常的周期大致都在 50~100 d,且异常出现的时间也都在 2002 年左右,表现出 3 个场地的异常在周期成分和出现时间上都有很好的一致性。虽然虚墟场地和龙灯坝场地并没有出现如上述 3 个场地明显的能量增强的异常,但是在 2002 年附近仍存在微弱的能量亮斑(图 4b、d)。

上述结果说明,与原始数据易将震前异常信号淹没在背景噪声中不同,利用谱减法处理过的跨断层测线在时频成分上表现出了较明显的异常,且这种异常出现在所研究的多数场地中,同时周期和时间特点都较一致。可见,利用谱减法去除非构造因素后的结果在异常反映上较原始数据有一定程度的提高。

2.3 谱减法异常分析

由于所分析的跨断层场地都是沿鲜水河断裂带选取的,因此在分析异常与地震发生关系的过

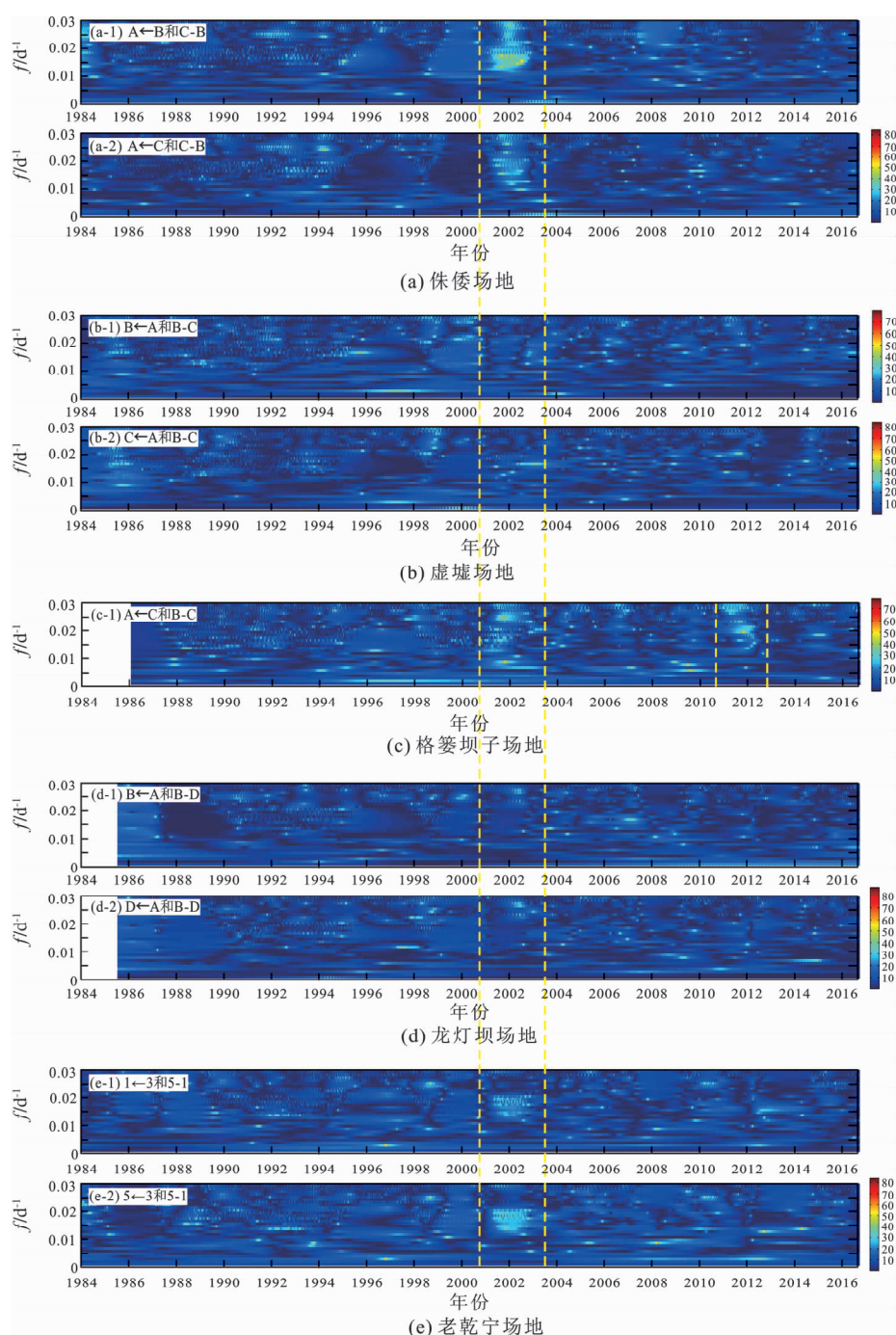


图4 谱减法分析结果

Fig. 4 The analysis results of spectral subtraction

程中,首先考虑鲜水河断裂带的地震活动情况。图5汇总了1983年以来沿鲜水河断裂带200 km范围内的 $M_s 5.0 \sim 6.0$ 地震(灰实线)和300 km范围内的 $M_s \geq 6.0$ 地震(红实线)。从图中可以看出,200 km范围内的 $M_s 5.0 \sim 6.0$ 地震有2个密集发生的时段,分别为1986—1996年和2007—2015年。1997—2007年有一个10年左右的相对小的平

静,期间只发生了2次5~6级地震。300 km范围内的 $M_s \geq 6.0$ 地震,集中出现于1989年,发生了巴塘 $M_s 6.6$ 和小金北 $M_s 6.5$ 等地震,随后有一个近20年的 $M_s \geq 6.0$ 地震平静期,期间只发生了1998年宁蒗 $M_s 6.2$ 和2001年雅江 $M_s 6.0$ 地震,在直到2008年这一平静被打破,相继发生了汶川 $M_s 8.0$ 、玉树 $M_s 7.1$ 、芦山 $M_s 7.0$ 、鲁甸 $M_s 6.5$ 、

康定 $M_s 6.3$ 等地震。可见,无论是地震频次还是地震量级,2008 年以后都有一个大幅的增加。本文利用谱减法对跨断层数据分析所得的异常现象出现在 200 km 范围内的 5~6 级地震的小平静期内,同时也处于 2008 年打破鲜水河断裂带 300 km 范围内近 20 年 $M_s \geq 6.0$ 地震平静之前(图 5 中深灰色阴影所示)。所得异常在时间上存在其与后续地震活动增加、能量增强有关的可能性。因此,

利用谱减法扣除非构造因素后,鲜水河断裂带跨断层测线时频信息中表现出明显且一致的异常频率信息可能与断层自身构造作用的孕震信息有关,从而引起后续地震活动性的增强。

另外,值得注意的是在异常发生的过程中发生了 2001 年 11 月 14 日的昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震(图 5 红色虚线所示)。因此,也不排除异常与该远场大震的震前效应或同震效应有关的可能性。

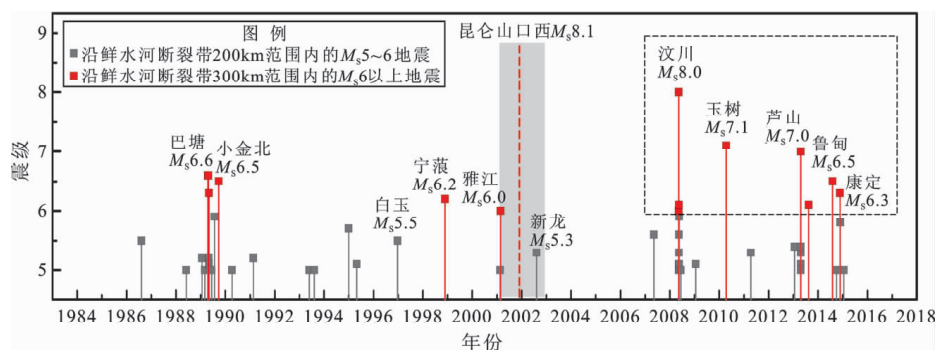


图 5 鲜水河断裂带跨断层异常与地震的关系

Fig. 5 The relationship of anomaly and earthquakes along Xianshuihe Fault Zone

3 讨论与结论

目前对跨断层数据提取和提炼突出其构造活动特点较常见的方法有灰色关联度(张希等, 2012)和主成分分析法(李腊月等, 2013a, b; 方颖等, 2015)。如张希等(2012)基于灰色关联度分析方法提炼了反映鲜水河断裂构造变形特征方式的新综合指标,研究了其与断裂附近强震孕育发生的可能关系,得出经过分析处理可能观测到昆仑山口西 8.1 级地震的影响、汶川 8.0 级地震前应力场强化或扰动影响、玉树 7.1 级地震后短期影响。方颖等(2015)利用主成分分析方法对鲜水河断裂西北段的跨断层形变资料进行了分析,得到第二主成分的时间系数在 2001 年底出现了大尺度的转折,认为可能是昆仑山 8.1 级大地震的影响。另外,其同样提出在 2008 年之前,鲜水河断裂带滑动出现了低频信号的增强,可能与后续地震的发生有很强的相关性(方颖等, 2015)。本文利用谱减法对鲜水河断裂带进行研究,得出其在 2002 年左右表现出明显的异常现象,这可能与 2008 年后续大地震的孕育有

关,同时也不排除与昆仑山口西 8.1 级远震间的关系。可见,本文结果与前人相关工作具有相当程度的一致性。

前人已有方法与本文方法都是试图用某种方法在原始数据的基础上去除相关干扰信息,最大限度提炼出与断层构造活动特征直接相关的信息。但前人工作主要都是利用跨断层测线数据进行分析的,而本研究引入了未跨断层的数据,对观测数据进行了充分应用。

虽然我们利用谱减法对跨断层数据进行处理得到了较明显一致且与地震相关性较高的异常现象,但目前对谱减法在跨断层数据处理中还存在一些弊端。由于谱减法得到的时频信息在进行逆变换时会造成相位信息的缺失(黄斌,曾庆宁, 2008; 林琴等, 2007),同时又受到跨断层资料采样率的限制,因此目前还较难将谱减法所得到的结果还原为时域上的信息。与已有方法相比,时域信息的缺失会限制对断层活动信息的获取和对异常信息的解释,使谱减法的应用目前只停留在更好地突出异常,而限制了对异常的动力学来源进行判断。因此,将谱减法的结果转化至时域,获得断层带随时间变化的运动信息是以后研究的

努力方向。

本文将以往都忽略的辅助测线引入到了跨断层数据处理中,结合辅助测线并利用谱减法将跨断层测线数据中的非构造因素去除,从而突出与未来地震发生相关的构造异常信息。研究结果显示多数台站、相同时间段都出现了类似的异常现象,其表明谱减法对于去除跨断层非构造因素在频域上是可行的,为进一步工作打下了一个基础。尽管目前对异常的解释受到了限制,谱减法所得到的异常结果对于强震跟踪与地震预测预报还是有积极意义的。

参考文献:

- 薄万举,华彩虹. 2001. 地形变强震前兆指标探讨[J]. 地震, 21(1): 25-32.
- 薄万举. 1997. 信息流合成方法在震情分析研究中的应用[J]. 西北地震学报, 19(2): 42-48.
- 方颖,张晶,江在森,等. 2015. 用跨断层形变资料分析鲜水河断裂西北段的运动特征[J]. 地球物理学报, 58(5): 1645-1653.
- 胡昌华,张军波,夏军,等. 1999. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- 黄斌,曾庆宁. 2008. 基于谱减法语音增强研究[J]. 大众科技, (10): 22-24, 26.
- 季灵运,刘立伟,郝明. 2015. 利用 InSAR 技术研究滇西南镇康—永德地区现今地壳形变特征[J]. 地震研究, 38(1): 84-89.
- 江在森,祝意青,王庆良,等. 1998. 永登 5.8 级地震孕育发生过程中的断层形变与重力场动态图象特征[J]. 地震学报, 20(3): 41-48.
- 李杰,殷海涛,吴晨,等. 2011. 沂沭断裂带跨断层形变异常及其解释[J]. 大地测量与地球动力学, 31(4): 18-21.
- 李腊月,邢成起,武安绪,等. 2013a. 用主成分分析方法综合分析首都圈跨断层形变资料[J]. 中国地震, 29(2): 246-255.
- 李腊月,邢成起,武安绪,等. 2013b. 张北 6.2 级地震前后断层活动时空演化特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 33(1): 29-34.
- 李瑞莎,张希,唐红涛,等. 2012. 玉门、民乐等地震前跨断层形变异常及与定点前兆观测的相互印证[J]. 西北地震学报, 34(4): 388-392.
- 林琴,张道信,吴小培. 2007. 一种基于改进谱减法的语音去噪新方法[J]. 计算机技术与发展, 17(7): 63-66.
- 刘权威. 1996. 地壳形变干扰因素有效性的判别[J]. 测绘学报, 25(2): 16-21, 23-24.
- 楼关寿,周伟,金鹏,等. 2010. 跨断层形变观测干扰因素的调查[J]. 大地测量与地球动力学, 30(增刊 2): 68-74.
- 马瑾, SHERMAN S I, 郭彦双. 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别——以 5° 拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. 中国科学: 地球科学, 42(5): 633-645.
- 牛安福,张凌空,闫伟,等. 2012. 汶川地震近震源区地形变短期前兆现象的解析[J]. 地震, 32(2): 52-63.
- 施顺英,张燕,吴云,等. 2007. 基于跨断层形变异常预测云南地震的试验[J]. 大地测量与地球动力学, 27(5): 82-87.
- 苏琴,杨永林,郑兵,等. 2014. 4·20 芦山 7.0 级地震预测思路及过程回顾[J]. 地震地质, 36(4): 1077-1093.
- 王双绪,江在森,陈文胜,等. 2001. 景泰 5.9 级地震的断层形变异常及中短期预报[J]. 地震学报, 23(2): 151-158.
- 张希,唐红涛,李瑞莎,等. 2012. 基于灰色关联度的鲜水河断裂活动特性与大震关系研究[J]. 地震研究, 35(4): 500-505.
- 朱凤鸣,吴戈. 1982. 一九七五年海城地震[M]. 北京: 地震出版社.
- 卓燕群,郭彦双,汲云涛,等. 2013. 平直走滑断层亚失稳状态的位移协同化特征——基于数字图像相关方法的实验研究[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1643-1650.
- BRACE W, BYERLEE J. 1966. Stick-slip as a mechanism for earthquakes[J]. Science, 153(3739): 990-992.
- MORO G D, ZADRO M. 1998. Subsurface deformations induced by rainfall and atmospheric pressure: tilt/strain measurements in the NE-Italy seismic area[J]. Earth and Planetary Science Letters, 164(1-2): 193-203.
- MATSUMOTO N, KITAGAWA G, ROELOFFS E A. 2003. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan - I. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses[J]. Geophysical Journal International, 155(3): 885-898.
- RUINA A. 1983. Slip instability and state variable friction laws[J]. J geophys Res, 88(B12): 359-310.
- STUPAZZINI M, DE LA PUENTE J, SMERZINI C, et al. 2009. Study of Rotational Ground Motion in the Near-Field Region[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(2B): 1271-1286.
- TRIFUNAC M D. 2009. Review: Rotations in Structural Response[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(2B): 968-979.

A Tentative Discussion on the Application of Aided Measuring Line to Remove the Non – tectonic Factors from Cross – fault Deformation Data

LU Zhen¹, GUO Quan², LI Ruisha¹, ZHANG Xi¹, TANG Hongtao¹, JIA Peng¹, WANG Cuizhi¹

(1. *The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shaanxi, China*)

(2. *The Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China*)

Abstract

This paper applied the aided measuring line of cross – fault site to the cross – fault deformation data processing. In order to remove the non – tectonic influence from cross – fault deformation data and highlight the information of fault activities which is related to the earthquake, we used spectral subtraction to analyze the cross – fault deformation data which are obtained along Xianshuihe fault zone and contain aided measuring line. By the processing of spectral subtraction, the results show that the cross – fault deformation data from most sites are all have obvious anomalies on time – frequency analysis. And the occurrence and the period of those anomalies are all consistent. Through analyzing the seismic activity along the Xianshuihe fault zone, the occurrence time of anomalies support the possibility that the anomalies are related to the increased seismic activities.

Keywords: aided measuring line; cross – fault measuring line; spectral subtraction method; non – tectonic factor; anomaly before earthquake