

李玲利、陈浩朋、刘泽民等, 2013, 2009 年“霍山窗”小震群 S 波分裂研究, 中国地震, 29 (3), 358 ~ 366。

2009 年“霍山窗”小震群 S 波分裂研究

李玲利^{1,3)} 陈浩朋²⁾ 刘泽民¹⁾ 倪红玉^{1,3)} 周志¹⁾ 洪德全^{1,3)}

1) 安徽省地震局, 合肥市长江西路 558 号 230031

2) 武汉大学测绘学院, 武汉 430079

3) 蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽蒙城县小涧镇 233500

摘要 采用互相关系数法, 计算了 2009 年“霍山窗”地区小震群 S 波分裂参数, 结果表明, S 波分裂现象明显, 快 S 波平均偏振方向为 NEE, 与区域最大水平主压应力方向基本一致。通过分析延迟时间随时间的变化趋势, 发现延迟时间在几次较大地震前呈现增加的趋势, 并且在临震前短时间内出现减小的现象。这一现象符合震前应力长时间积累和短时间应力释放的地震孕育发生机制, 而时间延迟在强震前出现下降则可能具有重要的地震短临预测意义。

关键词: S 波分裂 延迟时间 霍山窗

[文章编号] 1001-4683 (2013) 03-0358-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地球介质的各向异性提供了地球内部结构的丰富信息, 大量的观测和研究表明, S 波在各向异性介质中传播过程中发生了分裂现象, 形成了波速相同、偏振方向互相垂直的快慢 S 波列。1984 年, Crampin 提出了 EDA (Extensive Dilatancy Anisotropy) 假说, 他认为地壳岩石中遍布有近于直立的定向排列的平行微裂隙, 即 EDA 裂隙 (Crampin et al, 1984)。1997 年, Crampin 等 (1997) 将 EDA 假说进一步发展为 APE 模型, 即各向异性孔隙弹性模型 (Crampin et al, 1997), 认为地壳上部广泛存在含流体的微裂隙或孔隙, 在应力作用下这些裂隙或孔隙沿一定方向呈优势排列。由于这些裂隙定向排列, 才导致了 S 波在传播的过程中发生了分裂现象。由于近地表的最小主压应力通常是水平向的, 而裂隙面与最小主压应力垂直。当 S 波通过这种裂隙系传播时, 偏振方向将平行于裂隙平面, 因此其与最大主压应力方向一致, 这就给出了地壳中有关主压应力方向的信息。并且在 EDA 和 APE 模型中, 随着应力场作用逐渐加强, 介质中原先均匀分布的裂隙将闭合或张开。当裂隙面与最大水平主压应力垂直时, 裂隙将趋于闭合; 当裂隙面与最大水平主压应力平行时, 裂隙将膨胀, 同时 S 波的时间延迟随应力的增强而增大, 它随时间的变化曲线则体现了地壳应力变化的动态特征。因此, 通过监测 S 波分裂参数——偏振方向和延迟时间, 能够得到应力的变化信息, 为地震预

[收稿日期] 2012-04-19

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划 (XY131202Y) 和安徽省地震局科研重点基金项目 (20100506) 共同资助

[作者简介] 李玲利, 女, 中国科学技术大学固体地球物理学博士, 主要从事数字地震学、地震背景噪声等研究工作。

Email: heartkey@mail.ustc.edu.cn

测及应力场监测提供有用的信息。

安徽霍山地区处于现代构造活动比较强的大别山北麓($31^{\circ} \sim 31.9^{\circ}\text{N}$, $115.7^{\circ} \sim 116.5^{\circ}\text{E}$)。区内展布有 NE、NW 向断裂,与地震活动关系密切的断裂主要有 3 条,分布为 NE 走向的落儿岭-土地岭断裂、NW 走向的青山-晓天断裂和 NW 走向的梅山-龙河口断裂等。其中青山-晓天断裂又称为桐柏-磨子潭断裂,是研究区规模最大的断裂之一。在断裂的交汇部位历史上发生多次 5~6 级地震,如 1917 年 1 月 24 日霍山 6.25 级地震和 1917 年 2 月 22 日 5.5 级地震都发生在青山-晓天断裂与落儿岭-土地岭断裂的交汇部位。近现代该区又有小震丛集现象,中小地震资料十分丰富。

霍山地区历史上曾发生过 7 次 5 级以上地震,1970 年以来微震、小震活动频繁,并且这些地震活动与华东地区的中强地震活动似存在某种联系,因而对霍山“震情窗口”的研究从未间断过。姜秀娥等(1989)给出了“霍山窗”1972~1986 年的地震活动频度、 b 值、 k 值、 s 值、 u 值时序曲线;郑兆苾(1999)将小震频次出现峰值以及霍山窗震群参数异常及霍山地区 P 轴变化做为预测华东地区中强地震的指标。上述研究均肯定了“霍山窗”的某些参数具有一定的前兆意义。由于地震窗可以反映区域应力场的变换和震源应力场的变动效应,因此,有关“霍山窗”地区的相关地震学研究对于安徽乃至华东地区十分重要。自 1970 年以来,华东地区 14 次 5 级以上中强地震震前 1.5 年,“霍山窗”地区大多都出现小震活动增强,即“开窗现象”。2009 年 3 月份开始,“霍山窗”出现小震群活动,之后 4 月 6 日,在安徽肥东发生 $M_L 4.0$ 地震。因此,“霍山窗”地区已成为安徽乃至华东地区重要的“震情窗口”,对该地区的介质各向异性特征及区域应力场的研究有重要的意义。王椿镛等(1997)曾经开展过大别造山带的各向异性特征研究工作,利用地震测深剖面资料进行 S 波分裂的观测,认为大别山区的 S_g 波偏振方向为 SEE 或 NEE 向,但具体到针对霍山地区的各向异性研究还较少。

S 波分裂对地壳应力的变化比较敏感,反映了地球介质的各向异性特征。研究表明,快剪切波的偏振优势方向与断层走向较为一致,在地质结构比较复杂的区域,如不同走向的断层交汇处、地块交汇区域等,台站的快剪切波偏振方向具有一定的离散性。而慢 S 波随时间延迟的变化不仅能够反映介质的各向异性强弱,更能够描述区域应力环境的动态变化特征。邬成栋等(2003)计算云南大姚 6.2、6.1 级地震的 S 波分裂参数,发现在较大余震之前,延迟时间有较为一致的变化,反映了震前应力场增强的过程。Gao 等(2004)认为强余震发生之前短时间内慢 S 波延迟时间有减少的现象,该现象符合震前应力释放的结论。时间延迟在震前会出现下降,揭示了震前应力释放的特征可能具有重要的地震短临预测意义。因此,利用 S 波分裂现象探讨 S 波偏振方向与区域应力场的关系,以及监测东大别山地区地震活动期间区域应力场的变化,将对安徽乃至华东地区的地震预测研究提供有用的信息。

1 S 波分裂数据预处理

本文选择佛子岭(FZL)地震台(31.349°N , 116.27°E)记录的 3 分向地震数据进行此次震群活动的 S 波分裂观测研究(图 1)。自 2009 年 2 月 31 日~8 月 31 日,佛子岭地震台共记录到 $M_L 1.0$ 以上地震 174 次,其中 $M_L 2.0$ 以上 16 次, $M_L 3.0$ 以上地震 2 次,最大为 $M_L 3.9$ 地震,震中位置沿落儿岭-土地岭断裂方向分布。佛子岭地震台位于“霍山窗”内,距此震群的最大地震(31.40°N , 116.17°E) 11km。对于这些地震事件,挑选出符合条件的地震波形进

行 S 波分裂研究。

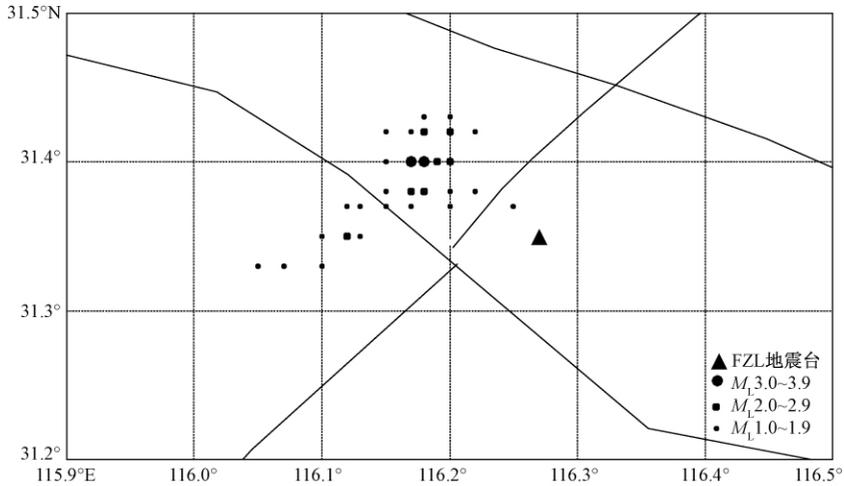


图1 “霍山窗”小震群及 FZL 台站分布图(图中实折线为断裂)

为提高分析计算的可靠性,在数据预处理的过程中采取以下限制条件:①S 波窗理论入射角的临界值为 35° ,在这个窗内可以避免地表 S-P 转换波对 S 波分裂的影响。由于射线在接近地表时,传播的速度逐渐降低,射线的入射角变小则射线传播时的轨迹趋向垂直方向,因此实际计算时本文采用临界角为 45° 的 S 波窗。②由于该地区附近 2000 年以来地震平均震源深度为 6km,深度范围在 5 ~ 8km,标准偏差为 1.57。因此,本文选择震中距大致在 10km 以内的地震波数据,这样,满足条件的波形可以落在 S 波窗内。③由于使用的地震波形数据是由近震产生的,采用带通 6 阶 3 ~ 20Hz 的巴特沃兹带通滤波器对原始波形进行了滤波,以抑制噪音。本文在实际处理数据过程中经过对比后认为,此种滤波范围为最佳,波形质量较高。④由于安徽地震台网仪器的采样率为 100Hz,计算出的延时不能小于 0.01s。⑤本次计算所用遗传算法设定最大延时为 0.2s,如果得到的延迟时间 ≥ 0.19 s,则认定为不符合条件。根据上述挑选规则,在 174 次地震事件中,有 117 条地震记录被挑选出来进行 S 波分裂现象分析。

2 S 波分裂计算方法

本文采用互相关系数法计算 S 波分裂参数(高原等,1995;华卫等,2006;Crampin et al, 2006)。以 EW 向为起始方向,顺时针在 180° 内旋转,延迟时间从 0 ~ 0.2s 进行选择。利用遗传算法对两水平向的波形进行计算,自动选择互相关系数最大时的时间延迟与快 S 波偏振方向(图 2)。旋转投影的公式为

$$A_1(t, \theta) = E(t) \sin\theta + N(t) \cos\theta \quad (1)$$

$$A_2(t, \theta) = E(t) \cos\theta - N(t) \sin\theta \quad (2)$$

其中, $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 分别为旋转后的快慢 S 波水平分量的振幅, $E(t)$ 、 $N(t)$ 分别为 EW 向和 SN 向的 S 波分量的振幅, θ 为旋转角度。

设定 A_1 方向有一个延迟时间 τ ,调整时间延迟,计算相关系数

$$C(\theta, \tau) = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+t_w} A_1(t, \theta) A_2(t + \tau, \theta)}{\sqrt{\sum_{t=t_0}^{t_0+t_w} A_1^2(t, \theta) A_2^2(t + \tau, \theta)}} \quad (3)$$

式中 t 、 t_0 、 τ 、 t_w 分别是波的记录时间、S 波的到时、快慢波到时差和时间窗长度。实际计算时为了保证波形的完整性与计算的准确性, t_0 是 EW 向与 SN 向完整波形的开始时间; t 是 S 波形窗长度, 是完整波形的结束时间减去开始时间。由于地震波的采样率是 100Hz, 因此时间延迟的最小分辨率是 0.01s, 遗传算法中设定的最大延迟时间为 0.2s, 故此计算结果取 $0.02 \leq \Delta t \leq 0.19$ s。

3 分裂结果可靠性检查

数值计算方法得到的 S 波分裂参数具有高效的优点, 为了确保解的可靠性和稳定性, 我们利用作图法对结果进行验证, 观察 S 波是否发生了分裂。由图 2 可以看到佛子岭 (FZL) 地震台记录的 3 月 18 日的一个地震事件的 S 波分裂情况。图 2 (a) 和 (b) 为选取的 S 波段, 图 2 (c) 为采用带通 6 阶 3 ~ 20 Hz 的巴特沃兹带通滤波器对原始波形进行滤波处理; 图 2

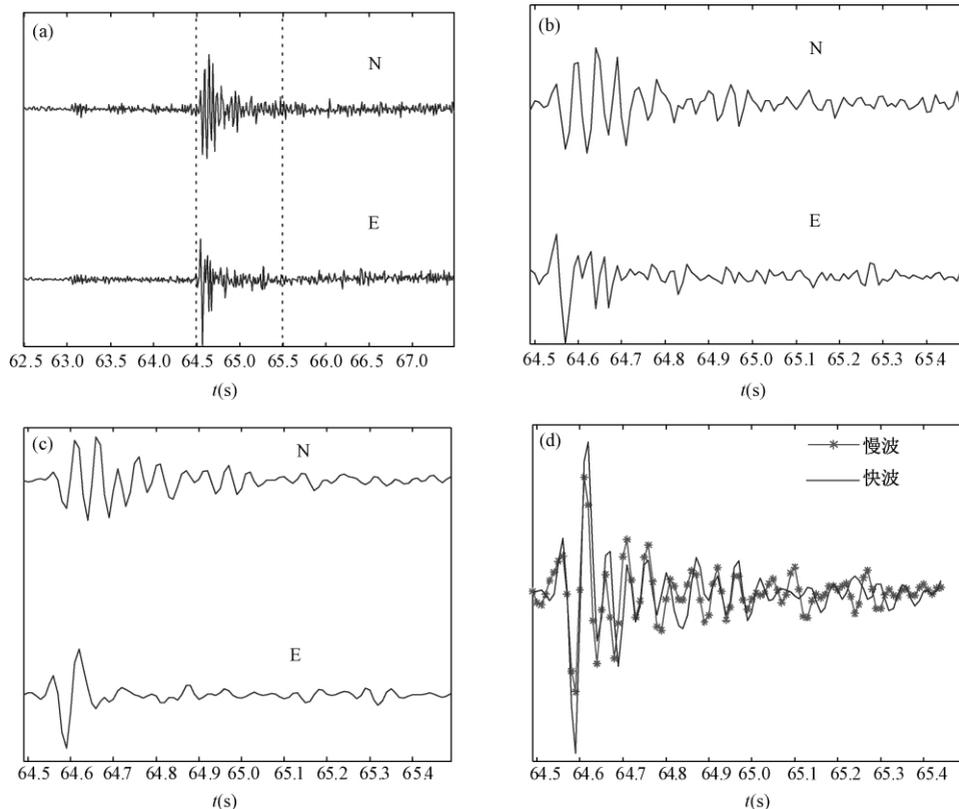


图 2 佛子岭台观测的 2009 年 3 月 18 日地震事件的 S 波分裂结果
 (a) 从原始数据选择的 S 波波形; (b) 单独的 S 波波形; (c) 去平均和滤波后的 S 波波形;
 (d) 加上延迟后的快慢波。(快 S 波偏振方向 54.56° , 延迟时间 0.05s)

(d) 则显示了分裂后的快慢 S 波形。对于这一事件的 S 波分裂结果,我们绘制了 S 波 NS 向和 EW 向分量质点运动图。根据质点运动方向的突然变化,来确定快 S 波和慢 S 波初动,将 NS 向和 EW 向分量投影到前一步测出的偏振角方向和与其垂直的方向,绘出快 S 波和慢 S 波偏振图,再将偏振角方向置为上下方向绘出 S 波水平质点运动轨迹,前者用于判断 S 波分裂时间是否准确,后者用于判别所测偏振角是否合适,合适的角度应使线段在上下振动。若以上结果不满意则重新计算。由图 3 (a) 和 (c) 的对比可知,“霍山窗”震群 S 波分裂现象明显,S 波波形经过旋转后确实有一个分量转到了快轴上。作图法虽然是人工判读,但是它确保了解的可靠性、稳定性和科学性,因此是很必要的。

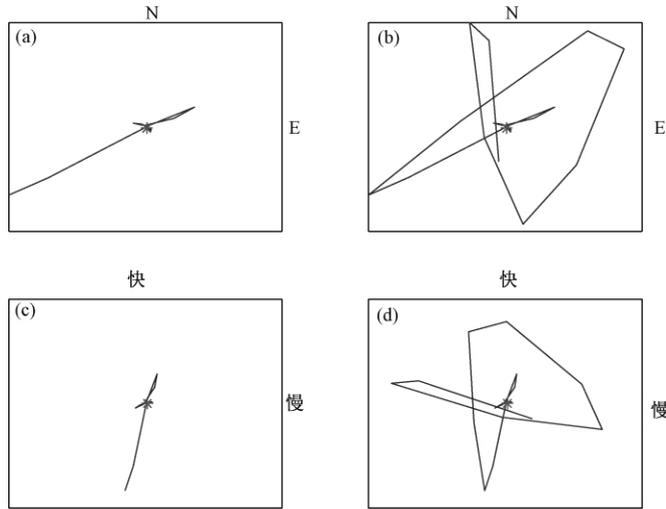


图 3 佛子岭地震台观测到 2009 年 3 月 18 日地震事件的质点运动图

(a)、(b) 两图是 S 波偏振图, (c)、(d) 两图是快慢波偏振图, 星号点表示质点开始震动的位罝。

(a)、(c) 两图的质点运动时间为 0.12s, (b)、(d) 两图的质点运动时间为 0.2s

4 S 波分裂计算结果

本文对霍山小震群 2009 年 3 ~ 8 月 $M_L 1.0$ 以上地震资料进行了 S 波分裂现象的观测研究。通过前述标准挑选出符合 S 波分裂观测条件的地震 117 个, 数据均经过了去平均、滤波处理。滤波选择 6 阶 Butterworth 带通滤波器, 带通范围为 3 ~ 20Hz。其中分裂参数满足 $0.02 \leq \Delta t \leq 0.19s$ 的有 88 个地震, 占地震总数的 77.8%, 质量较高, 结果较为可靠, 能反映地震区上地壳的各向异性介质的真实特性。由于同一台站接收到的不同事件的快 S 波偏振方向不完全一致, 为进一步统计分析, 分别计算了平均快 S 波偏振方向和 R 值 (式 (4))。 R 值在 0 ~ 1 之间, 其大小反映了快 S 波偏振方向集中的程度, 越接近 1 说明平均快 S 波偏振方向越集中。由此, 计算得到“霍山窗”小震群快 S 波平均偏振方向为 69.3498° (图 4), 集中度为 $\bar{\theta} = 0.8560$ (式 (5))。图 5 给出了慢波延迟时间随时间的分布。这里将延迟时间进行了标准化处理, 换算为单位长度路径上的时间, 传播距离以 S-P 到时差为 8.4km/s 来计算, 得到每千米传播路径上的延迟时间随时间的变化值。从图 5 中可以看出, 整个时段的延迟时间大部分在 4.0 ~ 8.0ms/km 范围, 平均值为 6.5ms/km, 这样的结果对于进行“霍山窗”小

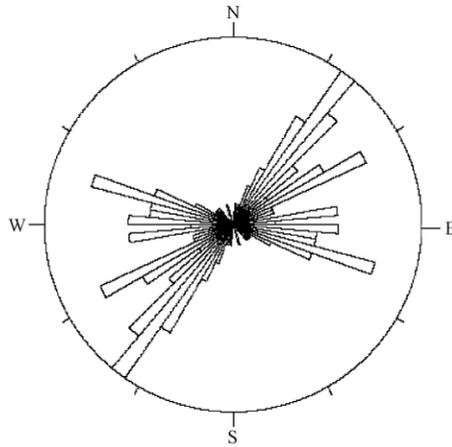


图4 “霍山窗”小震群 S 波偏振方向玫瑰图

震群的 S 波分裂研究来说还是有研究意义的。

$$R = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n \sin\theta_i)^2 + (\sum_{i=1}^n \cos\theta_i)^2}{n}} \eta \tag{4}$$

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} [(\sum_{i=1}^n \sin\theta_i) / (\sum_{i=1}^n \cos\theta_i)] \tag{5}$$

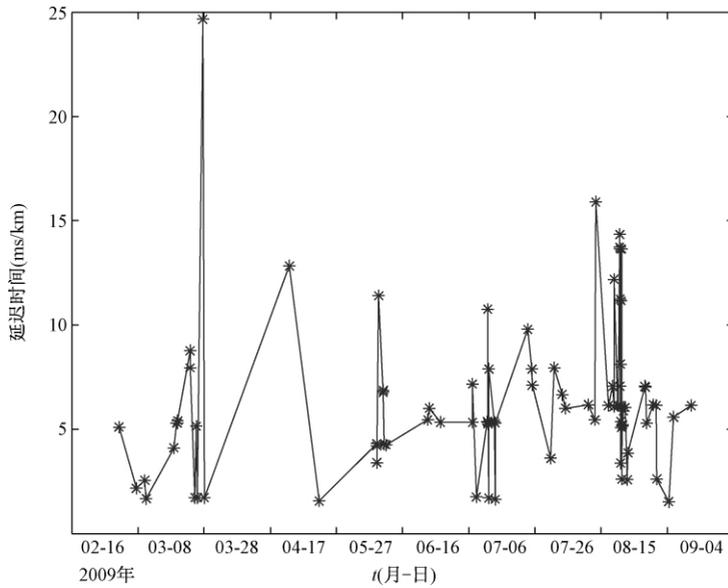


图5 S 波分裂延迟时间随时间变化图

5 分析与讨论

5.1 区域应力场讨论

由于地壳内主应力通常是水平方向的,最大可能的裂隙体系是一个平行于或垂直于最大张应力方向排列,且具彼此呈平行特征的铅直裂隙系。S波通过这种裂隙系统传播时,其偏振的水平投影在地表的S波窗内显示近似平行的排列。偏振方向将平行于裂隙平面,而裂隙平面又平行于最大主压应力的方向。有关研究表明,快S波的偏振方向与区域的主压应力的方向一致。本文由S波分裂的计算结果得到“霍山窗”地区平均S波偏振方向为 $N70^{\circ}E$,故可以推测“霍山窗”地区的最大主压应力方向约 $N70^{\circ}E$ 。

从图4中还可发现,S波偏振方向存在两个优势分布:即 NWW 向和 NE 向,这两个方向恰恰和 NW 向的青山-晓天断裂、 NE 向的落儿岭-土地岭断裂走向一致,与 NW 向和 NE 向的大别山群的构造线方向也极为一致。为了探讨其与东大别地区应力场的关系,作为比较,我们收集了2009年“霍山窗”地区的中小地震震源机制解的情况(图6)。

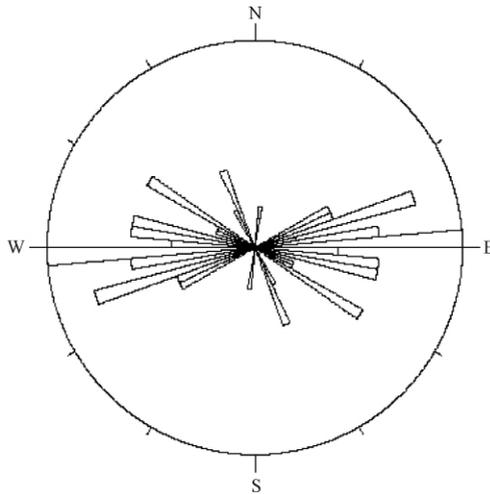


图6 “霍山窗”中小地震震源机制解玫瑰图

通过对比图4和图6,我们发现震源机制解所显示的 P 轴方位的优势方向为北偏东 70° 至近水平向,与我们得到的S波偏振平均为 $N70^{\circ}E$,在方向上虽大体一致,但亦有差别。分析导致差别的原因,可能是在以往的多数研究中,区域应力场的方向往往用该地区震源机制解的 P 轴的平均方向来近似,然而 P 轴和 T 轴反映的是地震前后震源区应力状态的变化,而不是震源区构造应力本身,也就是说, P 轴的方向并不代表区域主压应力场方向,这便造成 P 轴优势方位和S波偏振方向产生了差异。刘泽民等(2011)计算东大别地区最大主压应力轴方位角为 267° ,最小主压应力轴方位角为 358° ,周翠英等(2005)推断华东地区现今处在 ENE 向(80° 左右)主压、 NNW 向(350° 左右)主张应力场的控制下。本文的计算结果也显示该地区小震群活动很大程度上还是受区域应力场的控制,应力方向有 SN 向水平拉张和 FW 向水平挤压的特征。该地区小震从2009年3月开始活跃,从历史震例上看,该地区的微小地震活动和华东地区的中强震似有一定的关联性(夏瑞良,1983)。因此,S波分裂偏

振方向的特征研究对该区域的地震危险性预测也可以提供一定的参考意义。

5.2 延迟时间讨论

在 EDA 和 APE 模型中,随着应力场作用逐渐加强,介质中原先均匀分布的裂隙将闭合或张开。当裂隙面与最大水平压应力垂直时,裂隙将趋于闭合;当裂隙面与最大水平压应力平行时,裂隙将膨胀,同时 S 波的时间延迟随应力的增强而增大,它随时间的变化曲线体现了地壳应力变化的动态特征。为了进一步分析延迟时间的影响因素,本文对不同时间段的延迟时间变化和对应较大余震的变化情况也做了进一步观察与分析。从图 7 中可以看出,从 2009 年 8 月 1~8 日,延迟时间整体有增加的趋势,而 8 月 8 日到 $M_L 3.9$ 地震发生前,S 波延迟时间有了一定下降。这与邬成栋等(2003)发现在云南大姚地震后几次中强余震之前 S 波延迟时间呈现增加的特征相一致,并且在临震短时间内还观测到延迟时间有减小的现象,这一现象符合震前应力长时间积累和短时间应力释放的结论,这说明时间延迟在强震前会出现下降可能具有重要的地震短临预测意义。

图 8 是“霍山窗”从 2009 年 2 月中旬到 7 月初的 S 波延迟时间变化,可以看到在 $M_L 2.8$ 地震发生前,S 波延迟时间逐渐增加,而地震发生前一小段时间 S 波延迟时间又有减小的趋势。这和图 7 有相似的结果。

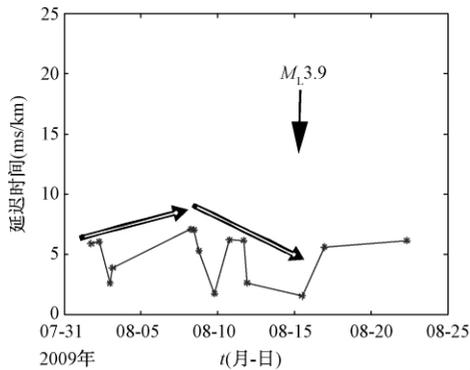


图 7 2009 年 8 月 S 波延迟时间变化

空心箭头线为最小二乘拟合结果示意;

向下箭头为发震时刻

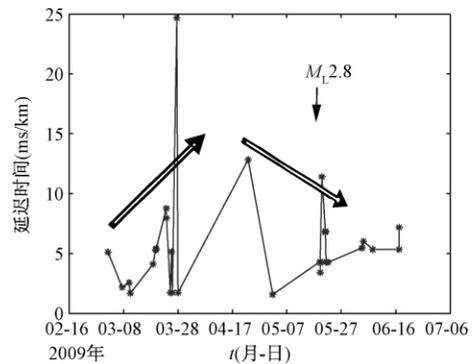


图 8 2009 年 2 月~7 月 S 波延迟时间变化

空心箭头线为最小二乘拟合结果示意;

向下箭头为发震时刻

本文的研究结果显示,“霍山窗”地区的快 S 波偏振的平均偏振方向约为 $N70^\circ E$,S 波分裂的时间延迟可以反映区域应力场的动态变化信息,为该地区的应力场研究与地震预测提供了有用的信息。

致谢:安徽省地震局佛子岭地震台为本文研究提供了事件波形数据,中国地震局地震预测研究所高原研究员提供了相关计算程序,云南省地震局邬成栋先生给予一定的指导,同时该文在审稿期间得到了匿名专家的指导,在此一并表示感谢。

参考文献

高原、郑斯华、孙勇,1995,唐山地区地壳裂隙各向异性,地震学报,17(3),283~293。

华卫、刘杰、陈章立等,2006,2003 年云南大姚 6.2 级、6.1 级地震序列 S 波分裂研究,地震学报,28(4),357~371。

- 姜秀娥、张国民、单锦芬等,1989,“地震窗”在地震预报中的应用,见:国家地震局科技监测司,地震预报方法实用化文集——地震学专辑,296~311,北京:学术书刊出版社。
- 刘泽民、刘东旺、李玲利等,2011,利用多个震源机制解求东大别地区平均应力场,地震学报,33(5),605~613。
- 王椿镛、丁志峰、陈学波等,1997,大别造山带地壳S波分裂和介质各项异性,科学通报,42(23)。
- 邬成栋、付虹、刘杰,2003,2003年云南大姚6.2级和6.1级地震余震S波分裂研究,地震,26(1),1~9。
- 夏瑞良,1983,安徽霍山地区的应力场及霍山地震的“窗口”效应,防灾减灾工程学报,3(2),13~17。
- 周翠英、王铮铮、蒋海昆等,2005,华东地区现代地壳应力场及地震断层错动性质,地震地质,27(2),273~288。
- 郑兆苾,1999,霍山窗与华东中强地震关系研究,地震学刊,2,1~9。
- Crampin S,1984,An introduction to wave propagation in anisotropic media,Geophys J R astr Soc,76,17~28.
- Crampin S,Zatsepin S V,1997,Modelling the compliance of crustal rock—II. Response to temporal changes before earthquakes,Geophys J Int,129,495~506.
- Crampin S,Gao Y,2006,A review of techniques for measuring seismic shear-wave splitting above small earthquakes,Phys Earth Planet Interi,159(1/2),114.
- Gao Y,Crampin S,2004,Observation of stress relaxation before earthquakes,Geophys J Int,157(2),578~582.

Shear wave splitting of a small earthquake swarm in the “Huoshan seismic window”

Li Lingli^{1,3)} *Chen Haopeng*²⁾ *Liu Zemin*¹⁾ *Ni Hongyu*^{1,3)} *Zhou Zhi*¹⁾ *Hong Dequan*^{1,3)}

1) Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230032, China

2) Dept. of Geophysics, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3) Mengcheng National Geophysical Observatory, Mengcheng 233500, Anhui, China

Abstract Using the correlation coefficient method, it studies shear wave splitting on the basis of the records of a small earthquake swarm in the “Huoshan seismic window”. The results show that the preponderant polarization of fast shear wave is NEE. It accords with the regional predominant direction of principal compressional stress. The time delay would basically increase before strong shocks. However, it was observed that the time delay abruptly decreased immediately before one strong shock. It is consistent with the conclusion that long-term stress accumulation and short-term stress relaxation exist before earthquakes. It is significant for the short-term earthquake prediction that the time delay will decrease before strong earthquakes. The result suggests the parameters of shear wave splitting may reflect the dynamic change of region stress field and provide useful information for the study of stress field and earthquake prediction.

Key words: S wave splitting Time delay The “Huoshan seismic window”