

2007年宁洱6.4级地震横波分裂研究*

毛慧玲, 秦嘉政

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 通过研究2007年6月3日宁洱 $M_s6.4$ 地震余震序列的三分向记录, 为探索横波分裂现象以及上地壳存在裂隙各向异性提供依据, 并发现快速S波偏振有两个优势方向, 分别为 $NW140^\circ$ 和 $NW150^\circ$, 这与宁洱地区的主应力场方向基本一致。横波分裂延迟时间能够动态反映地下应力场的变化趋势, 且较大余震发生之前延迟时间出现大幅度上升。

关键词: 横波分裂; 裂隙各向异性; 延迟时间; 宁洱地震

中图分类号: P315.3⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)01-0042-05

震预测预报具有重要意义。

0 引言

随着三分向数字化记录地震台网的投入使用以及地震预报工作的开展, 在地壳以及上地幔中由岩石各向异性引起的S波分裂已被广泛地观测到。在构造应力等因素的作用下, 地下介质实际上是表现为各向异性的, 这种介质的主要地球物理特征之一就是横波在其中传播时会发生分裂现象。分裂后的两列偏振波以不同的速度沿平行或垂直于裂隙面的方向传播, 先到达的称为快波, 后到达的称为慢波, 快、慢波的到达时间之差为横波分裂延迟时间。快波的偏振方向与主压应力场的方向有关, 而慢波的延迟时间与裂隙密度、纵横比以及水的含量有关, 因此对横波分裂参数的提取和分析研究对于探索地下应力场的分布、地质构造、地下裂隙的排列、介质方位各向异性以及地震预报等具有重要的意义。

2007年6月3日宁洱6.4级地震序列主要沿无量山断裂带呈NW向分布, 在宏观震中区还有多条NNE和NNW向近似共轭的次级断裂带。考虑到宁洱地区历史上中强地震的重复性以及地质构造的复杂性, 笔者认为深入了解该地区地下介质的分布特点以及追踪地下应力场的变化情况对地

1 资料选取

2007年6月3日云南省宁洱县发生 $M_s6.4$ 地震, 截止到12月3日共记录到2级以上地震573次, 其中2.0~2.9级地震515次, 3.0~3.9级地震52次, 4.0~4.9级地震4次, 最大余震为5.1级。该地震序列主要沿NW向展布, 长轴长50 km, 短轴长43 km, 震源深度主要集中在15 km范围内。由于横波分裂的波形资料必须满足S波窗的要求, 即S波的入射角必须小于 35° , 以避免S—P转换波的干扰, 故笔者只采用了在震中周围的小黑江、同心、宁洱、德化、勐先和白龙6个流动数字地震台的波形资料, 以EDA模型为基础, 研究宁洱 $M_s6.4$ 主震后, 该区域地下介质的变化以及应力的释放和积累随时间的动态变化情况。图1给出了本次地震的震中分布以及6个流动观测台的分布情况。这6个流动观测台的台基都为土层, 且3个分向的仪器响应灵敏度都为 $291 \text{ count}/\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图2给出了该区域1970年以来的 $M \geq 5.0$ 地震的震源机制解, 其震源机制解给出的主压应力方向为NNW向, 这与李克昌等(1980)所给出的该区域的主压应力方向是一致的。

* 收稿日期: 2010-01-04.

基金项目: 云南省十项措施“云南强震活动与板缘动力学机制研究(JCYB-20080601-4)”与“地球物理场和化学场动态变化与强震活动关系研究(JCYB-20080601-5)”联合资助。

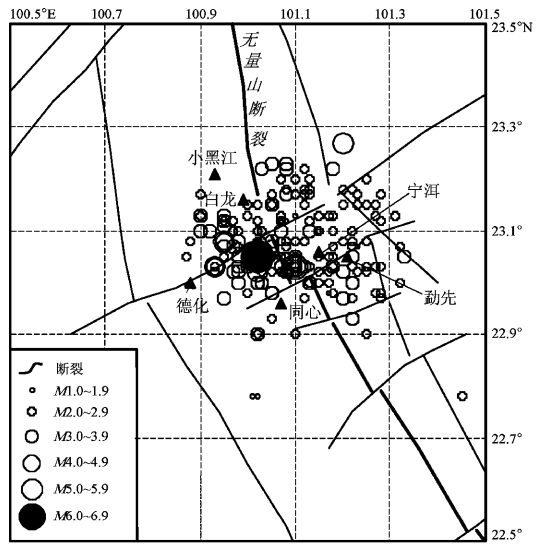


图 1 宁洱 6.4 级地震序列及流动观测台分布

Fig. 1 Distribution of the M_s 6.4 Ning'er earthquake and the aftershocks and six temporary stations

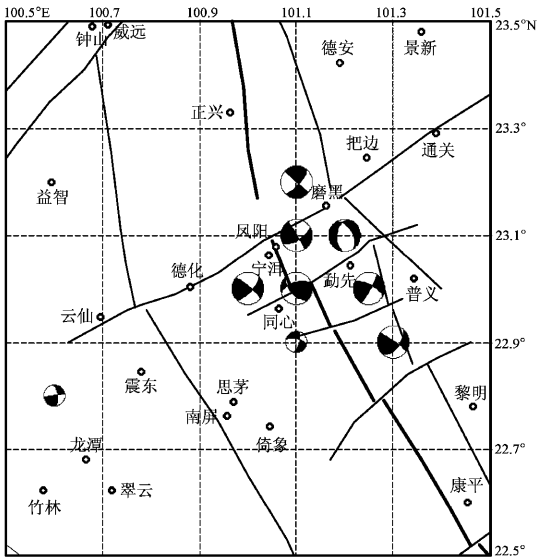


图 2 1970 年以来宁洱 $M \geq 5.0$ 地震震源机制解

Fig. 2 Focal mechanism solution of the $M \geq 5.0$ earthquakes in Ning'er since 1970

2 横波分裂方法

横波分裂的两个参数能反映主应力的变化以及裂隙构造和演化情况。笔者通过比较分析后，选用质点运动图方法，该方法的优点是 通过人机结合，能够直观地通过多次旋转分析后分裂出快波和慢波。

其原理是根据质点运动方向的突然变化来确定快波和慢波的初动（图 3）。快波到达后的线性轨迹表示偏振方向，慢波到达后叠加于快波之上，使线性轨迹发生变化。慢波到达之前即线性轨迹发生变化之前的这段时间即为横波分裂时间。图 4 为经过多次坐标旋转后的 S 波分裂图形，从图中可以看出 S 波分裂是十分明显的。

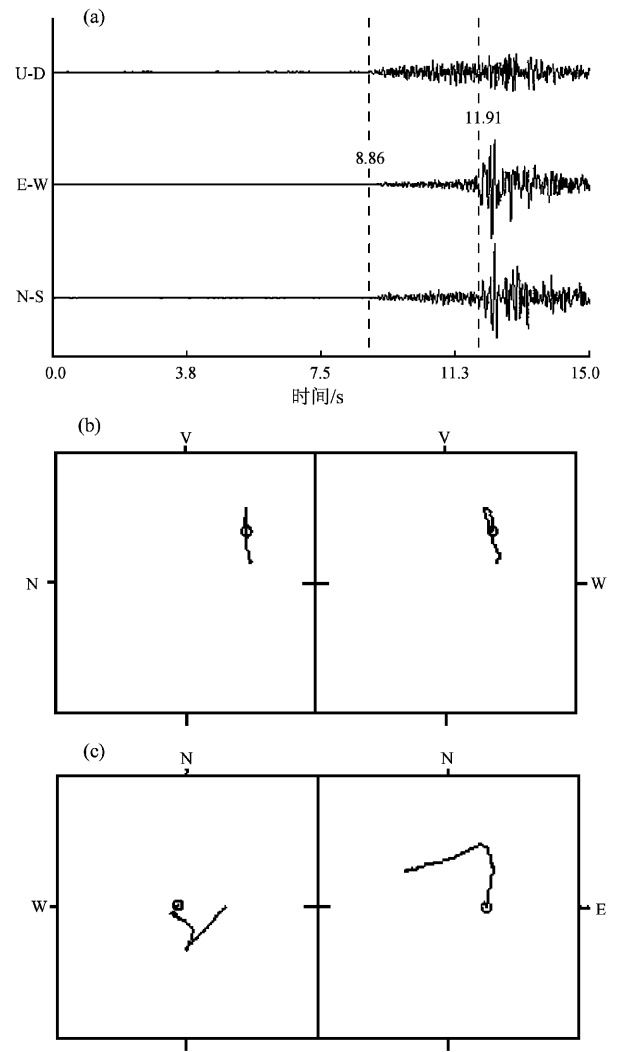


图 3 2007 年 6 月 25 日 2 时 56 分宁洱 M_L 1.6 地震德化台原始记录和质点运动图

(a) 原始记录图；(b) P 波质点运动图，左、右框分别代表南北向和东西向的 P 波质点运动；(c) 水平面的 S 波质点运动图，每方框为 0.1 s

Fig. 3 Original seismogram and particle movement maps at Dehua station on June 25, 2007

(a) Original records; (b) P-wave particle motion: the left pane corresponds to the particle motion of SN component, the right pane corresponds to the one of EW component; (c) S-wave particle motion, each plot stands for 0.1 s

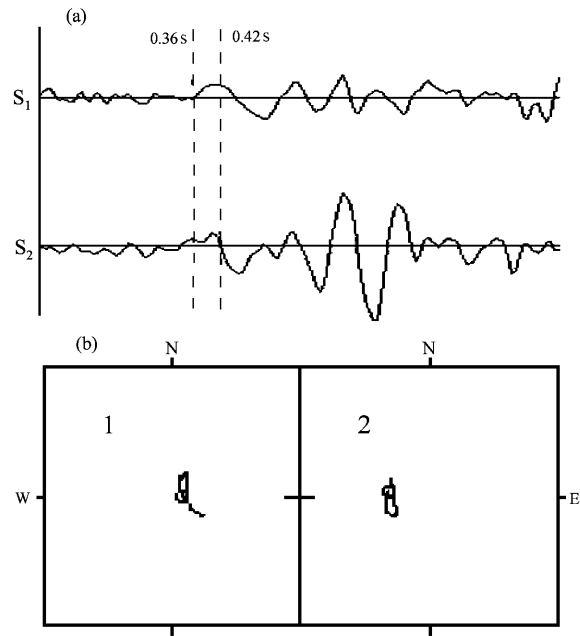


图4 2007年6月25日2时56分宁洱 M_L 1.6地震S波分裂图形
(a) 快波(S_1)、慢波(S_2);(b)质点运动图(1、2框时间相连);
 $T_{S-P}=3.09$ s; 快波方位角 $\varphi=135^\circ$; 延迟时间 $\Delta t=0.06$ s
Fig. 4 Shear wave splitting, of the Ning'er M_L 1.6 earthquake on June 25, 2007
(a) S_1 stands for fast-wave, S_2 stands for slow-wave; (b) Particle movement map. plot 1 and plot 2 are continuous in time;
 $T_{S-P}=3.09$ s; $\varphi=135^\circ$; $\Delta t=0.06$ s

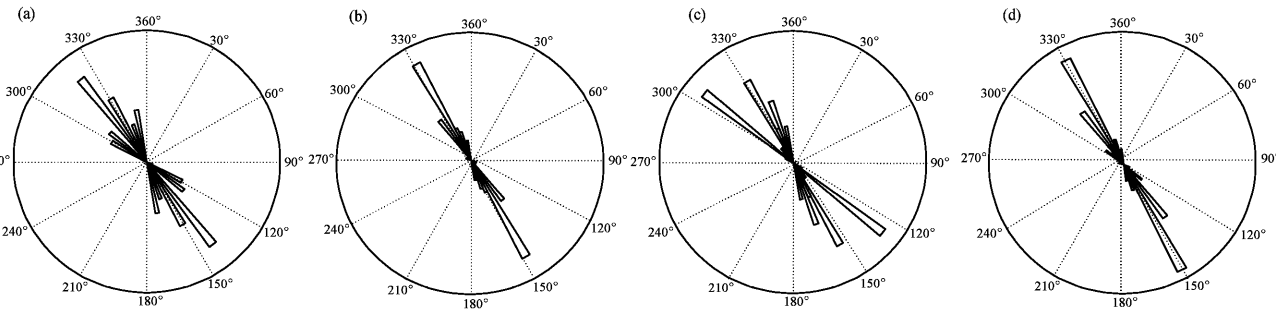


图5 快波偏振方向玫瑰图
(a) 同心台; (b) 宁洱台; (c) 德化台; (d) 小黑江台
Fig. 5 Rose diagrams of the polarization direction of fast shear wave
(a) Tongxin station; (b) Ning'er station; (c) Dehua station; (d) Xiaohaijiang station

3.2 延迟时间分析

慢波延迟时间是地震前后应力积累和释放的动态反应。图6展示了同心台和宁洱台归一化慢波延迟时间和震级随时间的变化情况。所谓归一化延迟时间是指将慢波延迟时间换算成单位长度路径上的延迟时间,传播距离以S-P为8.2 km/s来计算。横坐标以6月3日 M_S 6.4主震为时间原点,

3 结果分析

在6个观测台中,由于白龙台和勐先台的大部分波形数据不满足S波窗的要求,故舍弃。下文给出了其余4个台站记录到的快波偏振方向和慢波的延迟时间演化情况。

3.1 快波偏振方向分析

图5给出了同心台、宁洱台、德化台和小黑江台的快波偏振方向玫瑰图。从图中可以看出,同心台和德化台的快波偏振方向集中在 140° 范围内,而宁洱台和小黑江台的快波偏振方向主要集中在 150° 范围内。偏振方向的大小存在一定的差异,这可能与台站所在位置的地质构造有关。从图1余震序列的震中分布和6个观测台站的空间分布来看,同心台和德化台有一个共同的特点:在台站的下方存在一条与无量山断裂带近似垂直的次级断裂带。特别是德化台,由于它刚好位于该次级断裂带上,所记录到的快波偏振方向与另外3个台有偏差,但4个台站的快波偏振优势方向与图2给出的震源机制解主压应力方向还是相符的。可见,偏振方向除了受到区域主应力的影响外,还与局部地质构造有关。

给出了主震后1~2个月内延迟时间的变化情况。同心台和宁洱台归一化延迟时间的算术平均值分别是24.4 ms/km和14.5 ms/km,在这里假设整条路径是各向异性的。从图6可见,震级随时间的变化曲线和归一化延迟时间随时间的变化曲线具有相似的特征,且发生较大余震之前,延迟时间出现大幅度的增长,在延迟时间达到异常高值或由

高值下降恢复过程中, 发生较大余震。例如同心台(图6a)的记录显示, 6月19日1时5分和15时27分分别发生3.1、3.0级地震, 之后延迟时间出现明显的下降, 并在低值上持续活动一段时间后, 又于6月24日16时31分、17点47分的3.7级和3.8级地震之前出现大幅度的上升, 7月1日13时9分3.0级、7月10日23分3.2级地震前也出现大幅度的上升。宁洱台(图6b)的记录也显示了7月7日21时42分2.9级地震前, 延迟时间

由低值向高值迅速上升的情况。究其原因, 二者存在一定的物理相关性, 因为慢波延迟时间受地下应力场的控制, 应力场增大, 介质的纵横比和密度增大, 与密度成正比的延迟时间也随之增大。而应力场增大的同时, 也是地震孕育能量增大的过程, 因此慢波延迟时间的分析研究对地震预测预报有一定的指示意义。当然地震的孕育与发生是一个复杂的过程, 我们还需要借助更多的手段和方法来更好地完成地震预测预报工作。

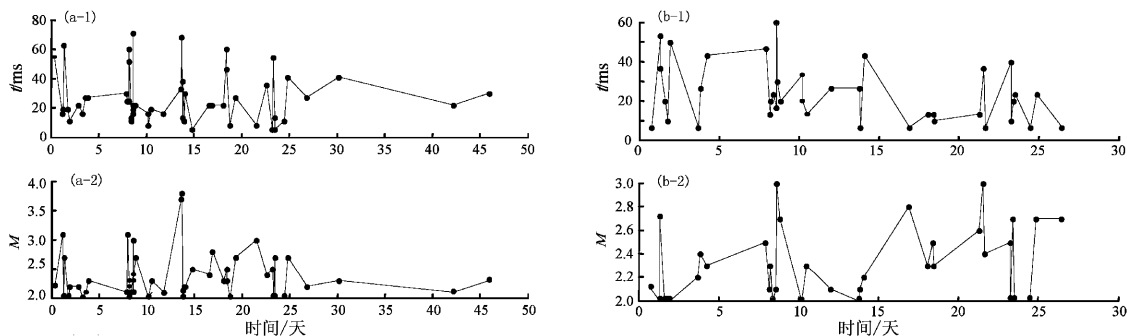


图6 同心台(a)和宁洱台(b)慢波延迟时间、震级随时间变化曲线

Fig. 6 Change of time delay and earthquake sequence with time

(a) Tongxin station; (b) Ning'er station

4 讨论和结论

根据4个台站记录到的波形资料分析结果, 快波偏振方向主要集中在 $140^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内, 这与该区域的构造应力场的主压应力方向是一致的, 并且和穿过宁洱境内走向为NW向的无量山断裂带的方向也是一致的, 这说明了宁洱地震的S波分裂是由应力作用下的裂隙引起的。归一化延迟时间主要集中在 $13 \sim 25$ ms/km之间, 从4个台站的横波分裂延迟时间与震级的变化关系来看, 震级随时间的变化曲线和慢波延迟时间的变化曲线具有相似的起伏变化特征, 较大余震发生之前, 延迟时间出现明显的大幅度上升, 达到高值后在下降、恢复过程中发震。因此对慢波延迟时间进行分析对地震预测预报具有一定的意义。

参考文献:

- 陈慧, 叶建庆, 刘学军, 等. 2007. 2007年宁洱6.4级地震监测与研究[J]. 地震研究, 30(4): 344-349.
- 高原. 2000. 破裂临界状态下大理岩的剪切波分裂特征[J]. 中国地震, 16(3): 197-202.
- 李克昌, 赵维城, 侯学英, 等. 1980. 从思茅、普洱地震探讨断块内部

- 地震地质特征[J]. 地震研究, 3(1): 01-05.
- 李白基. 1996. 云南禄劝地震余震分裂S波的变化[J]. 地震学报, 18(2): 224-230.
- 李白基, 秦嘉政, 钱晓东, 等. 2002. 1995年武定6.5级地震余震的S波分裂[J]. 地震研究, 25(2): 108-114.
- 罗省贤, 李录明. 2003. 基于横波分裂的地层裂缝预测方法与应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(1): 52-59.
- Crampin S, Atkinson B k. 1985. Microcracks in the Earth's crust. First Break, 3(3): 16-20.
- Crampin S, Zatsepin S V. 1997. Modelling the compliance of crustal rock - II. Response to temporal changes before earthquakes[J]. Geophys. J. Int, 129: 495-506.
- Crampin S, Volti T, Stefansson R. 1999. A successfully stress-forecast earthquake[J]. Geophys. J. Int, 138: F1-F5.
- Garbin H D, Knopoff L. 1973. The compressional modulus of a material by a random distribution of circular cracks[J]. Q. Appl. Math, 30: 453-463.
- Garbin H D, Knopoff L. 1975a. The shear modulus of a material permeated by a random distribution of circular cracks[J]. Q. Appl. Math, 33: 296-300.
- Garbin H D, Knopoff L. 1975b. Elastic modulus of a medium with liquid-filled cracks[J]. Q. Appl. Math, 33: 301-303.
- Hudson J A. 1981. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks[J]. Geophys. J. R. astr. Soc, 64: 133-150.
- Zatsepin S V, Crampin S. 1997. Modeling the compliance of crustal rock: I - Response of shear-wave splitting to differential stress[J]. Geophys. J. Int, 129: 477-494.

Study on the Shear-wave Splitting of the 2007 Ning'er, Yunnan, $M_s6.4$ Earthquake Sequence

MAO Hui-ling, QIN Jia-zheng

(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

In this paper, the result of the study about the aftershock-swarm of the $M_s6.4$ earthquake occurred on June 3, 2007 in Ning'er, Yunnan Province was given and the existence of both shear-wave splitting and the extensive dilatancy anisotropy in the upper crust of Ning'er region were recognized. The fast shear wave has two preponderant polarization-directions—NW140° and NW150°, which agree with the regional principal compressive stress. The delay time of the shear wave dynamically responds to the variation of stress field and increases before strong aftershocks.

Key words: shear-wave splitting; extensive dilatancy anisotropy; delay time; Ning'er earthquake