

2006 年 3 月 31 日吉林乾安 M5.0 余震序列 S 波分裂研究

迟天峰¹, 张新东³, 郑国栋¹, 朴杰², 张宇¹

(1. 吉林省地震局, 吉林 长春 130022; 2. 延边地震台, 吉林 延吉 133003;
3. 河北省地震局邯郸中心台, 河北 邯郸 056006)

摘要:2006 年 03 月 31 日 20 时 23 分, 松原市乾安县与前郭县交界处的查干花乡附近(44°36' N, 124°03' E)发生 5.0 级地震, 是吉林省近 40 年来最大一次地震。利用流动台记录到的地震波形资料对乾安地震余震序列进行 S 波分裂研究。结果表明, S 波快波偏振方向的优势取向为 NNE, 与乾安地震主震的最大主压应力方向偏差较大, 与该区域应力场方向不一致, 表明这次地震与区域的构造变化和应力场调整有关。S 波分裂时间延时大小受多种因素影响, 与 S 波传播时经过的介质性质关系密切, 慢波延迟时间在 0.02~0.38 s 之间变化。

关键词:乾安地震; S 波分裂; 延迟时间

中图分类号: P315.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-1375(2014)01-0022-05

0 引言

自地震学家 Crampin 提出 S 波分裂理论以来^[1], S 波分裂方法开始被广泛应用于世界许多地区地壳各向异性研究, S 波分裂对区域应力状态和构造特征有一定的反映。国内外不少学者对 S 波分裂也做过很多研究, 对我们研究区域地壳介质性质和地壳应力状态, 尤其是探讨 S 波分裂参数在地震前后的时间变化和分析区域应力场变化提供有益参考^[2-8]。目前随着我国数字地震台网的建成, 对数字地震波的研究也取得一些新成果, 对 S 波分裂的计算推广到单个地震台站资料。有关研究表明, S 波偏振方向与震源机制解的主压应力方向一致^[2-4]; 也有研究结果表明, S 波快波偏振优势方向与地震震源的主压应力方向相差甚大^[5]; 多数研究结果认为, 快波偏振优势方向与断裂走向一致或相近^[5-6]。

2006 年 3 月 31 日 20 点 23 分, 在吉林省松原市前郭和乾安县之间发生 5.0 级地震, 地震宏观震中在松原市前郭县查干花乡腰英台、老英台一带。地震发生后在主震区周边布设流动地震观测点

(图 1), 记录到大量余震波形资料^[9]。本文利用布设的老英流动台波形资料, 计算 S 波快波偏振方向和慢波延迟时间, 并结合松辽盆地的应力场、地质构造等性质, 对 5.0 级地震后余震的 S 波分裂时间延迟和偏振方向变化特征进行初步研究。

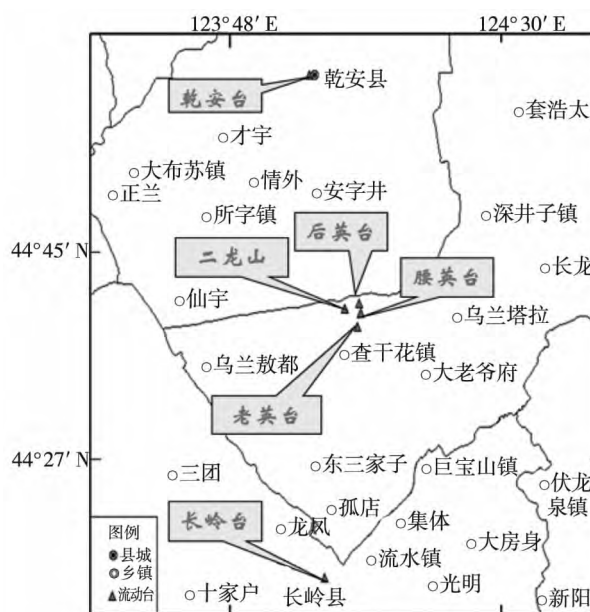


图 1 地震现场应急流动观测台分布图

收稿日期: 2014-03-29

基金项目: 河北省地震科技星火计划项目“利用爆破和近震来校正井下短周期地震计方位角”(项目编号: 2013310)

作者简介: 迟天峰 (1962-), 男(汉族), 吉林长春人, 工程师, 主要从事地震执法工作。E-mail: 13944824193@139.com.

1 资料选取

4 月 1 日开始在主震区周边陆续布设 6 个流动地震观测点(乾安台、二龙山台、腰英台、后英台、老英台、长岭台)。但由于各种因素影响,以老英台记录到波形资料效果最好、最完整,且震中距最近。故选取 2006 年 4 月 1—15 日老英台记录到的 110 多个波形事件,选择高信噪比的资料 40 个,采样率 50 Hz(图 2),震级范围 M_L0.3~3.7。用于 S 波分裂研究的波形数据需满足以下条件:① 震中距小于震源深度,即 S 波理论入射角小于 35°,一般选择波形时入射角小于 45°即可;② 选择 S 波与 P 波到时差小于 1.2 s 的波形记录是为了满足波形可以落在 S 波窗内;③ 对近震波形采用 6 阶 2~20 Hz 的 Butterworth 带通滤波器对原始波形进行滤波,以抑制噪声,获得较高质量的波形。

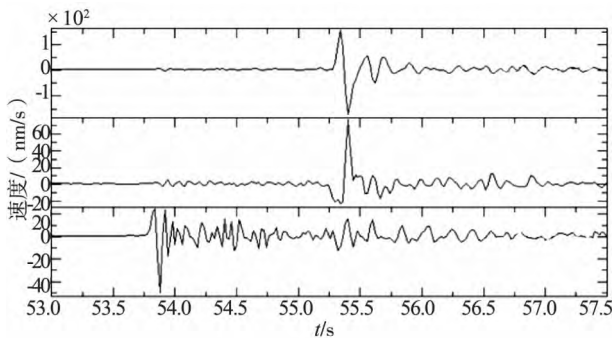


图 2 2006 年 4 月 5 日 M_L2.0 余震波形

2 S 波分裂的原理方法

选取震中距较近的波形,即出射角小于 S 波的全反射角 $\sin^{-1}(V_s/V_p)$,截取 S 波开始一段波形进行计算。以 EW 向为起始方向,顺时针在 180° 内旋转,延迟时间从 0 到某个时间进行选择(由于 EW 和 NS 方向数据在旋转 90° 时,数据发生交换,并且不区分正相关和负相关,所以,不需要 360° 和正负延迟时间内进行选择。如果角度小于 90°,表示 EW 向比 NS 向慢,否则相反)。

旋转投影的公式为^[8]

$$\begin{aligned} X(t, \theta) &= E(t) \cos\theta - N(t) \sin\theta \\ Y(t, \theta) &= E(t) \sin\theta + N(t) \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $X(t, \theta)$ 和 $Y(t, \theta)$ 分别为旋转后 S 波水平分量的振幅; $E(t)$ 、 $N(t)$ 分别为东西向和南北向 S 波分量的振幅; θ 为旋转角度。

设定 X 方向有一个延迟时间 Δt , 计算 $X(t +$

$\Delta t)$ 与 $Y(t)$ 的相关系数

$$C(\theta, \Delta t) = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+t_w} X(t, \theta)Y(t + \Delta t, \theta)}{\sqrt{\sum_{t=t_0}^{t_0+t_w} X^2(t, \theta)Y^2(t + \Delta t, \theta)}} \quad (2)$$

式中, $t, t_0, \Delta t, t_w$ 分别是波形到时、S 波的到时及快慢波到时差和时间窗长度。

3 震源区应力场特征及 S 波分裂结果分析

3.1 震源区应力场特征

用 CAP(Cut and Paste)方法^[10]反演得到的震源机制解(图 3)与 Global CMT^[11]结果对比发现,结果比较接近(表 1),此次地震为逆冲地震兼有走滑成分。通过对 3 个台以上记录到的余震事件进行双差定位^[12],结果显示余震分布(图 5)更加集中于极震区,优势走向北偏东,与 NE 向双山—前郭断裂、大安—德都断裂走向基本一致。

表 1 2006 年乾安地震震源机制解

方法	走向	倾角	滑动角	来源
CAP 方法	151	70	62	本文
GlobalCMT	168	39	70	Harvard

东北地区最大主压应力方向为 NEE-SWW,在主震近水平方向的最大主压应力和近南北向最小主压应力作用下,NNE 和 NWW 两个方向上断层最容易发生错动,引起岩石破裂而引发地震。地震宏观烈度考察结果也表明(图 4):发震构造与 NE 向及 NW 向断裂构造有关^[13]。

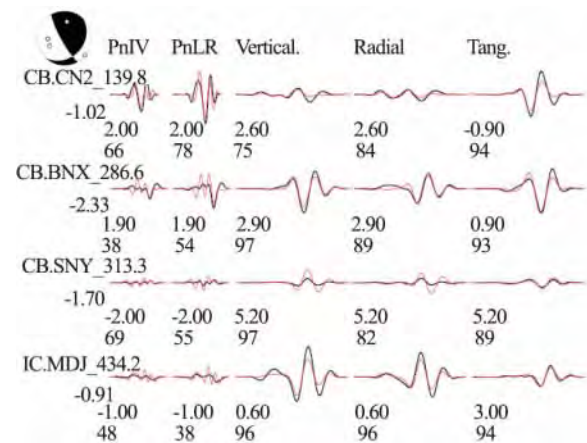


图 3 用 CAP 方法反演波形拟合图

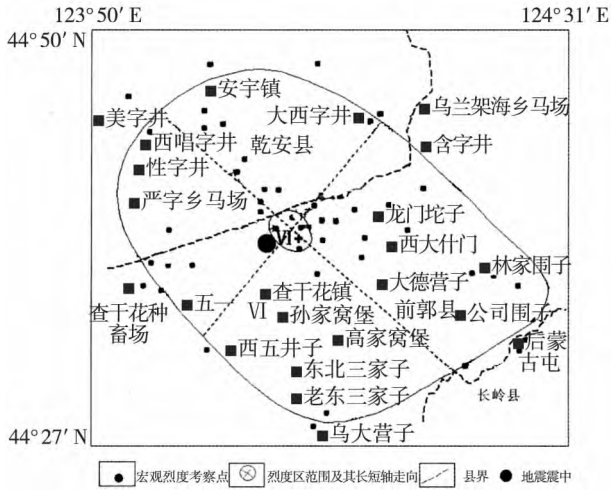


图4 吉林乾安地震烈度分布图^[16]

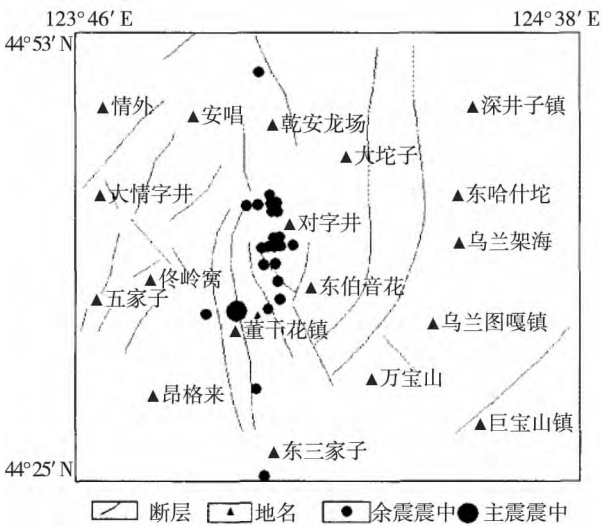


图5 震中区基底次级断层及余震震中分布图^[16]

3.2 S波分裂结果分析

乾安地震序列记录到的余震数目不多,且能够用于S波分裂计算的事件数目更少,但该地震序列的S波分裂现象却很明显。表2为老英台记录的乾安地震序列的S波分裂结果。由于地震计采样率是50 Hz,因此剔除慢波延迟时间小于0.02 s的结果,得到余震序列的快波偏振方向比较集中,平均最大偏振方向即最大平均主压应力方向为NNE,和双差定位后的余震分布方向基本一致^[12]。图6为S波分裂平均快波偏振方向优势分布的等面积玫瑰花图(5°为间隔)。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,分别计算了平均快波偏振方向和R值(相关系数)。R值在0~1.0之间,反映了快波偏振方向集中的程

度,越接近1.0说明平均快S波偏振方向越集中。选取相关系数大于0.84的S波分裂结果分析发现,快波偏振方向比较集中为NNE,与区域应力场近东西方向不一致,与余震分布方向较为一致^[15]。余震分布方向及余震的S波偏振方向与极震区烈度长轴走向不一致,烈度长轴走向为NW方向(图4),余震震中分布呈近NS向(或NNE向)及NW向排列,S波偏振方向呈NNE方向,可由此判断发震断层为隐伏的NW向断裂,而余震分布与组成区域主干断裂(NW向和NE向断裂)的次级NNW向或NW向断层有关^[13](图5)。乾安5.0级地震余震序列的平均快波偏振方向与NNE向断层方向一致性较好,而与主震的主压应力方向接近垂直,与区域应力场方向相差较大。图7为慢波延时随地震事件变化图。慢波延迟时间在0.02~0.38 s之间,主震过后时间延时下落很快,可能和主震过后震源区岩石裂隙密度、裂隙纵横比及空隙内所含液体等发生变化有关,是震后应力快速释放的一个过程。主震前震源区附近没有台站,没有可利用的用于S波分裂研究的地震数据,因此震前S波分裂延迟时间大

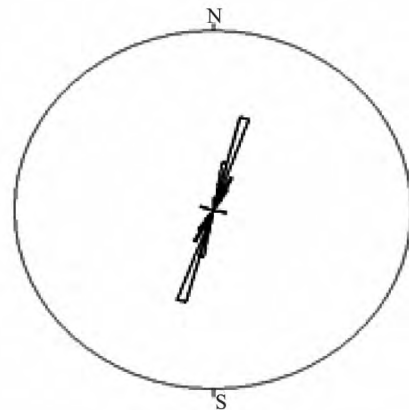


图6 S波分裂快波偏振方向玫瑰花图

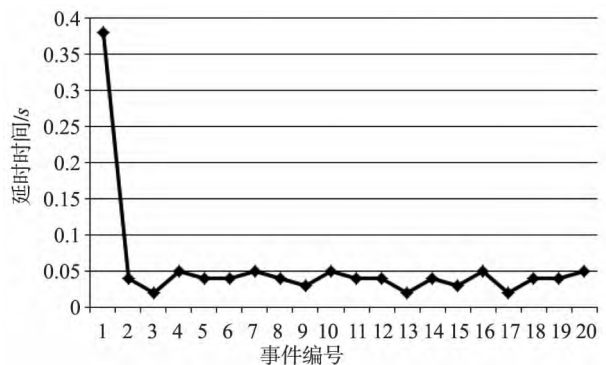


图7 S波慢波延时与地震事件曲线图

表 2 乾安地震余震序列 S 波分裂计算结果

序号	发震时间		震级 (M_L)	延迟时间/s	偏振方向/(°)	相关系数
	年月日	时分秒				
1	2006-04-01	20-24-20.00	2.3	0.38	89.78	0.91
2	2006-04-02	09-28-18.64	1.6	0.04	30.63	0.94
3	2006-04-02	20-24-42.48	1.6	0.02	170.08	0.94
4	2006-04-03	02-00-55.50	1.4	0.05	35.28	0.89
5	2006-04-03	04-42-17.03	1.2	0.04	26.77	0.88
6	2006-04-03	09-14-52.30	2.3	0.04	33.47	0.95
7	2006-04-03	14-13-05.19	1.3	0.05	18.39	0.89
8	2006-04-04	00-26-43.39	0.5	0.04	16.87	0.96
9	2006-04-04	03-41-55.69	0.5	0.03	13.16	0.93
10	2006-04-04	03-43-48.52	0.3	0.05	10.47	0.94
11	2006-04-04	14-26-01.80	0.9	0.04	8.73	0.96
12	2006-04-05	03-48-11.30	1.0	0.04	18.79	0.84
13	2006-04-05	15-29-10.70	1.4	0.02	157.38	0.90
14	2006-04-05	15-53-39.40	0.4	0.04	16.47	0.89
15	2006-04-06	23-31-47.50	0.5	0.03	13.97	0.95
16	2006-04-08	01-26-38.10	3.7	0.05	15.49	0.90
17	2006-04-08	08-12-12.10	2.1	0.02	176.32	0.94
18	2006-04-08	12-49-52.90	1.2	0.04	15.53	0.94
19	2006-04-13	18-41-52.00	1.9	0.04	15.61	0.93
20	2006-04-14	02-23-30.10	1.0	0.05	19.62	0.89

小不清楚。但是主震过后记录到余震的延迟时间快速衰减,可能与震源区震前分裂现象变大、应力增强有关,主震过后由于应力的释放,延迟时间减小,分裂现象也随之减小。由于所记录到的地震事件时间间隔短,时间上分布不均匀,图 7 中的横坐标为地震事件序号。

4 结论与讨论

通过对 2006 年 3 月 31 日乾安 5.0 级地震主震震源机制解和余震序列 S 波分裂结果分析表明:

(1) 乾安 5.0 级地震序列的平均快波偏振方向同震源区 NE 向断层走向基本一致,平均最大主压应力方向近 NS 向,S 波偏振优势方向与主震的最大主压应力方向相差甚大。

(2) S 波分裂时间延迟对孕震应力场反映敏感,慢波延时时间在 0.02~0.38 s 之间,主震过后

时间延时下降很快,可能与震后应力快速释放及分裂现象减小有关。余震序列的 S 波分裂延迟时间与震级大小无明显相关,尤其是延迟时间快速下降并处于较低状态,可能与在很短时间内应力调整快、介质中的微裂隙遭受不断改变有关;由于震前在震源区附近没有台站,没有记录到震前 S 波分裂的延迟时间变化。

(3) 由于台站方位角覆盖不均匀、数量少、距离远,初动清晰的震相少,用 P 波初动符号方法获得的震源机制解结果无法确定可靠性,故用 CAP 方法反演乾安地震主震的震源机制,并与 Global CMT 结果对比,结果比较接近。

(4) 此次地震为逆冲兼走滑型,在东北地区最大主压应力近 EW 向作用下,NNE 和 NWW 两个方向上断层最容易发生错动引发地震,此次地震的发震构造与 NE 向及 NW 向断裂构造有关。

(5)此次地震极震区烈度长轴走向和余震震中分布方向判断发震断层可能为隐伏的 NW 向断裂,而余震分布与组成区域主干断裂(NW 向和 NE 向断裂)的次级 NNW 向或 NWW 向断层有关。

致谢:感谢中国台网中心刘杰研究员提供的 S 波分裂程序,并对匿名审稿人提出的宝贵建议表示感谢。

参考文献:

- [1] Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as possible dilatancy diagnostic [J]. *Geophys J R Astr Soc*, 1978, 53: 467-496.
- [2] Crampin S, Booth D C. Shear-wave polarization near the North Anatolian fault - II. Interpretation in term of earth-induced anisotropy [J]. *Geophys J R Astr Soc*, 1985, 83: 75-92.
- [3] 王椿镛,丁志峰,陈学波,等. 大别造山带地壳 S 波分裂和介质各向异性[J]. *科学通报*, 1997, 42(23): 2539-2542.
- [4] 曲延军,赵翠萍,赵建政,等. 2003 年巴楚—伽师 6.8 级地震序列及强余震的 S 波分裂特征研究[J]. *西北地震学报*, 2004, 26(4): 328-333.
- [5] 李白基,秦嘉政,钱晓东. 1995 年武定 6.5 级地震余震的 S 波分裂[J]. *地震研究*, 2002, 25(2): 108-114.
- [6] 太龄雪,高原,曹凤娟,等. 辽宁 1999 年 Ms5.9 岫岩地震的剪切波分裂特征[J]. *地震学报*, 2008, 30(4): 340-354.
- [7] 董非非,邓辉,郑斌. 应力诱导各向异性介质中地震波的传播[J]. *华北地震科学*, 2012, 30(3): 1-7.
- [8] 廖武林,丁志峰,曾融生,等. 喜马拉雅地区 S 波分裂研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(5): 1437-1447.
- [9] 吕政,张京辉,邵喜斌,等. 2006 年 3 月 31 日吉林省前郭—乾安 Ms4.8 地震序列[J]. *国际地震动态*, 2006(10): 27-32.
- [10] Zhu L P, and D V Helmberger. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1996, 86: 1634-1641.
- [11] www.globalcmt.org/CMTsearch.html
- [12] 温岩,温洪涛,张晨侠. 应用双差定位法对吉林区域中小地震及乾安—前郭 5.0 级地震余震的重新定位[J]. *东北地震研究*, 2007, 23(1): 2-7.
- [13] 盘晓东,王军亮,孙旭丽,等. 乾安—前郭 5.0 级地震的构造背景分析[J]. *东北地震研究*, 2007, 23(1): 8-15.

Shear Wave Splitting Analysis of the 31 March 2006 Qian'an M5.0 Earthquake Sequence

CHI Tian-feng¹, ZHANG Xin-dong³, ZHENG Guo-dong¹, PIAO Jie², Zhang Yu¹

(1. Earthquake Administration of Jilin Province, Changchun 130022, China;

2. Yan Bian Seismic Station, Yanji 133003, China;

3. Handan Central Seismic Station, Handan 056006, China)

Abstract: The Qian'an M5.0 earthquake occurred on March 31, 2006 in the center of Songliao basin is the largest earthquake in the last 40 years in Jilin province. This paper analyzes shear-wave splitting using waveform data of Qian'an M5.0 earthquake sequence recorded by Lao-Yingtai station of Jilin Digital Seismic Network. The results show that the dominant polarization of fast shear wave is in NNE direction and does not consist with the maximum principal compression stress direction, which indicate that the earthquake is related with the region stress field adjustment. The time delay of shear wave splitting is 0.02 s-0.38 s. After main shock, the time delay of shear wave splitting dropped apparently which may reflects the release of the principal compression stress.

Key words: Qian'an earthquake; S-wave splitting; delay time