

# 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

曲延军, 赵翠萍, 赵建政, 聂晓红, 孙甲宁  
(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011),

摘要: 利用2003年2月24日新疆巴楚—伽师6.8级地震后架设在震中区的三个数字地震台记录资料, 分析了余震的S波分裂特征, 发现震中区余震的快波偏振方向总体表现为近南北向, 与主震的主压应力方向较为一致。3月16日5.1和3月31日5.3级强余震前慢波延迟时间总体表现出逐步减小的特征。

关键词: 巴楚—伽师地震; S波分裂; 慢波延迟时间; 快波偏振方向

中图分类号: P315.3<sup>+1</sup> 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)04-0328-06

## 0 引言

自1984年Crampin提出张性扩容各向异性假说(EDA)以来, 地震各向异性的研究有了长足的进展, 近年来国际性的IASPEI、IGC和IUGC大会对各向异性研究都进行了相应的研讨和专题讨论<sup>[1-2]</sup>。观测资料证实, 地壳岩石中遍布近于直立的定向排列的平行微裂隙。1985—1987年对土耳其北安纳托利亚断层上的一系列微震事件进行了剪切波分裂的专门观测研究, 结果与直立平行裂隙中波的传播的合成理论地震图的特征一致<sup>[3-4]</sup>。1986年美国南加州北棕榈泉6级地震前后的观测说明了分裂剪切波时间延迟参量随时间的变化实质上反应了地壳应力场的调整<sup>[5]</sup>。在我国, 人们对1983—1984年唐山地区的5级余震<sup>[6]</sup>、大同—阳高6.1级地震<sup>[7-8]</sup>、1982年河北卢龙6.1级地震的余震<sup>[9]</sup>、甘肃1990年天祝—景泰6.2和1995年永登5.8级地震<sup>[10-11]</sup>、1995、2000年云南武定和姚安的6.5级地震的余震<sup>[12-13]</sup>及1998年伽师地震<sup>[14]</sup>进行了S波分裂的研究, 均发现有不同程度的S波分裂现象。

由于S波“窗口”的限制, 目前世界各国可用于S波分裂研究的资料显得很少。2003年2月24日新疆巴楚—伽师发生了6.8级地震, 震后中国地震局地球物理研究所在震区架设的小区域流动数字地震仪的地震波记录, 为研究余震序列的S波分裂提供了基础资料。观测期间发生的两次5级和一次4.7级以上地震, 也为我们研究中强震前S波分裂的变化特征提供了很好的样本。

## 1 剪切波分裂的原理及计算方法<sup>[5-6]</sup>

1984年Crampin在扩容理论的基础上提出了张性扩容各向异性假说(EDA)。认为在孕震区里由于区域应力场的增强, 地壳中产生大量裂纹, 形成了介质的各向异性。当地震波通过这个区域时, S波就会分裂成两个或更多个初至, 具有不同的传播速度和偏振性质。平行于裂纹面振动的S波 $q_{S_1}$ 先到达台站, 垂直于裂纹面振动的S波 $q_{S_2}$ 后到达台站, 这种现象称为S波分裂。

根据波的传播理论, 在均匀介质中传播的剪切波入射到自由表面时, 如果入射角大于临界角会发生全反射现象。称SV波发生全反射时的临界角为S波窗。对泊松比为0.25的介质, 或 $V_s/V_p = \sqrt{3}$ 的情况, 其 $i_c$ 为 $35^\circ$ 。由于弯曲的波前和低速的表面沉积使得剪切波窗口有效地增大至大于 $40^\circ$ , 甚至可以达到 $45^\circ \sim$

$50^{\circ[14]}$ 。在伽师地区这一特征表现的更加明显(见表1—表3),因此研究中所选S波窗口基本满足要求。

研究中我们采用经典的相关系数法<sup>[6]</sup>。其主要思路是把两水平方向的S波记录旋转到快、慢波方向上,在此方向上经过时间补偿反推回进入各向异性介质之前的两列横波的性质应该相似,因而其相关系数最大。计算公式如下:

$$X(t) = E(t) \cos \theta - N(t) \sin \theta \quad (1)$$

$$Y(t) = E(t) \sin \theta + N(t) \cos \theta \quad (2)$$

相关系数为

$$\text{coef} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}} \quad (3)$$

式中  $x$  代表慢波方向,  $y$  代表快波方向,  $\theta$  是计算时从 EW 方向开始旋转的角度。

由于快、慢剪切波来自同一个波源,因而如果对快、慢剪切波进行时间延迟的校正,这两个波列则应是相关的。计算中对两个水平分量沿着顺时针方向以  $5^{\circ}$  为步长进行旋转,每旋转  $5^{\circ}$  以  $0.01 \text{ s}$  为步长在延迟时间  $0 \sim 0.4 \text{ s}$  范围内计算两个水平分量的互相关系数,利用遗传算法进行搜索。当互相关系数达到最大值时,即得到相应的快波偏振方向及慢波相对快波的时间延迟。

根据以上计算结果进行时间延迟校正和偏振分析,以检验方法的准确性。所谓时间延迟校正就是把得到的慢波波列提前一个时间量,使其初动时刻与快波一致,以达到消除时间延迟的影响。而偏振分析检验则是把做了时间延迟校正前后的偏振图(即质点运动轨迹图)进行对比分析。存在时间延迟的两列波,其质点运动轨迹呈椭圆偏振特征,明显偏离线性。而经过时间延迟校正后S波的质点运动轨迹由圆偏振变为明显的线偏振,从而验证计算的正确性。

图1为伽师1台的单个地震波形及S波偏振质点运动图示例。

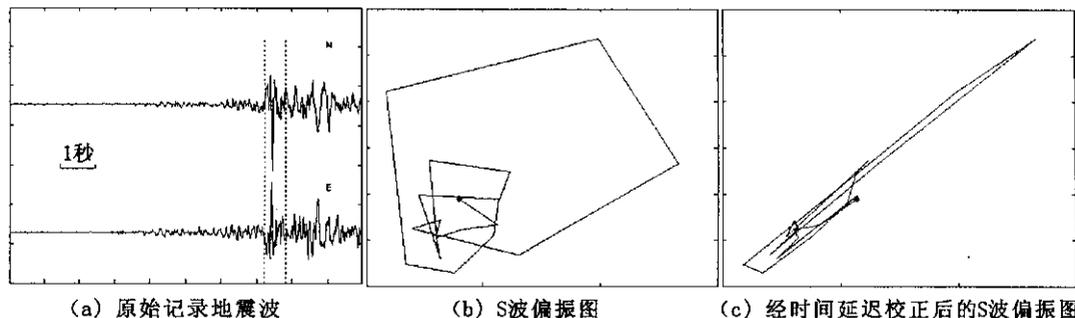


图1 伽师数字台记录S波形及质点运动图

Fig.1 S waveforms recorded by Jiashi digital seismic station and particle motion paths.

## 2 资料的选取

2003年2月24日新疆巴楚—伽师6.8级地震震中位于巴楚、伽师两县交界处( $39.5^{\circ}\text{N}$ ,  $77.2^{\circ}\text{E}$ ),地处塔里木盆地西北,南天山地震带和西昆仑地震带交汇部位,是印度板块与欧亚板块碰撞的结合部位,构造运动相当强烈。距震中20多公里处1997—1998年发生过伽师强震群。2003年3月12日至3月31日中国地震局地球物理研究所在震区先后架设了5套宽频带数字地震仪,平均台距为30 km左右。仪器为EDAS-C24型流动宽频带数字地震仪,采样率为50 Hz,具有地震自动触发系统,并采用GPS授时。观测时段自3月13日至4月28日。

图2为观测台站及已定位震中分布图。可见伽师2号台距6.8级主震和3月16日5.1级强余震震中较近,3月31日5.3级强余震距伽师1、2、3号台距离相当,且基本处于余震区中部,而伽师4和5号台相对偏离余震区,而且记录开始时间较晚。因此主要选取了伽师1、2、3号台的地震波数据。

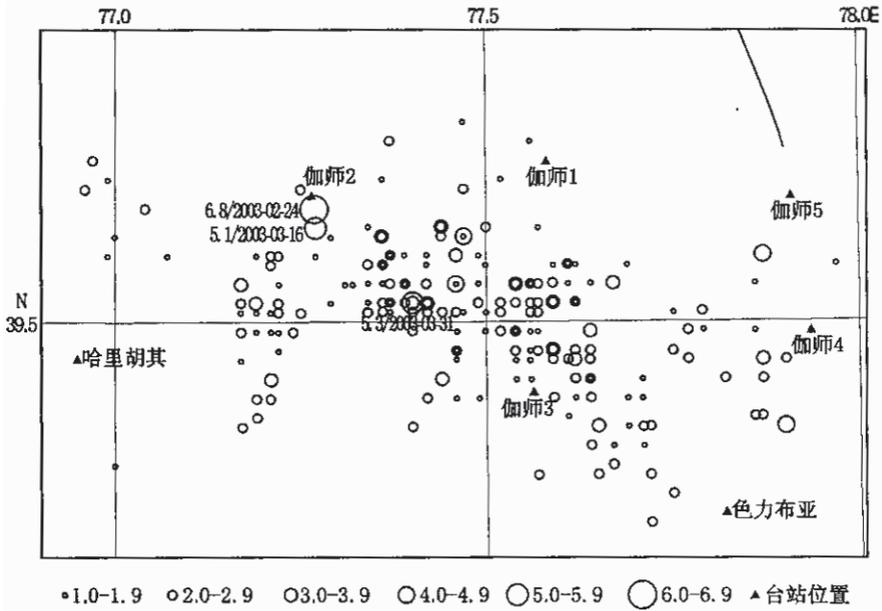


图2 巴楚—伽师6.8级地震余震及地震台位分布图

Fig. 2 Distribution of aftershocks of Bachu - Jiashi  $M_s$  6.8 earthquake and seismic stations.

由于巴楚—伽师地震区的特殊构造环境,许多地震波形所含成份复杂,震相不十分清楚,不能参加计算。其中伽师3台的地震记录满足S波窗条件的较多,伽师2和伽师1台相对较少。另外各台记录中干扰大小不尽相同,且白天的干扰大于夜晚,因此选择地震的发震时间大部分为21时至次日08时。具体工作中尽量选取台站附近具有清楚的P、S波震相,且记录的垂直分向P波相对较强,S波相对较弱,而两水平分向的P波相对较弱,S波相对较强的地震,并对其作进一步的偏振分析。最后选出偏振性较明显的地震作为研究样本,进行S波分裂研究。

### 3 巴楚—伽师部分余震序列的S波分裂特征

在流动数字地震仪工作期间共记录可定位地震301次,其中只筛选出50多条可供分析的地震,另外还选择了部分未定出震中的单台记录清晰的地震,并进行了S波偏振方向和慢S波延迟时间的分析。计算结果见表1,图3为快S波偏振方向的分布图。总体来看,快波偏振方向以近南北向、北北东向为主,并与地震及台站所处的位置有关。伽师2台位于6.8级地震的震中区,在震

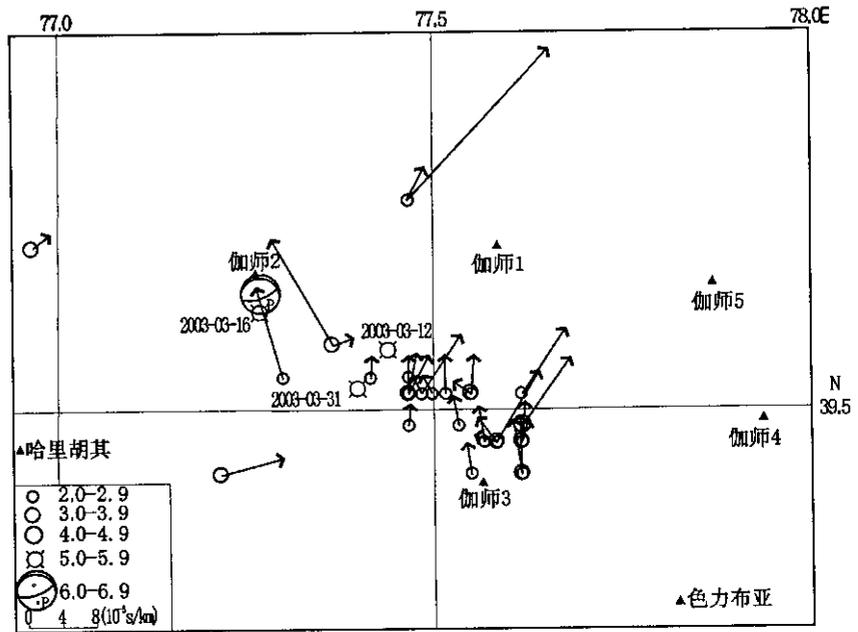


图3 伽师6.8级地震震源机制与余震S波偏振

Fig. 3 Focal mechanism solution of Bachu - Jiashi  $M_s$  6.8 earthquake and S-wave polarization of aftershocks.

中区的几次地震的快波偏振方向为北西向,且延迟时间相对较大。而 6.8 级地震东南方向的地震所反映的主压应力方向则相当一致,以近南北向、北北东向为主。根据 Harvard 大学的双力偶震源机制结果,6.8 级地震主压应力方向为北 12°西。该区的区域主压应力方向总体为北北东向。分析认为,震源附近地震的快波偏振方向与 6.8 级地震孕震应力场的方向一致,而震中外围区域的介质所受的主压应力方向仍与区域背景应力场一致。地震入射到伽师 2 台的方向与主震的主压应力方向的一致,是导致延迟时间较大的主要原因。Kriichi Tadokoro<sup>[15]</sup>等对 1995 年神户地震余震区的 S 波分裂分析中也曾观测到在震中区 500 m 以内快波方向平行与发震断层走向,而 1 km 以外的快波方向平行与区域主压应力方向。他解释为地震在震中区产生了新的裂隙排列。

表 1 巴楚—伽师地震部分余震及 S 波分裂计算结果

地震台	日期	时间	$L_a$	$L_o$	$M_L$	$\alpha_s$	$\Delta t / [s \cdot km^{-1}]$	LSPD	
伽师 1 台	2003-03-14 05 50		39.49°	77.54°	2.2	57°	0.0035	7.6NW	
	2003-03-15 20 55		39.47°	77.57°	2.7	57°	0.0040	5.5NW	
	2003-03-16 06 39		39.49°	77.46°	2.1	59°	0.0002	7.2NE	
	2003-03-16 08 15		39.51°	77.46°	3.4	58°	0.0005	6.6NE	
	2003-03-16 21 12		39.54°	77.42°	2.8	66°	0.0004	6.3NE	
	2003-03-18 06 53		39.46°	77.59°	3.1	56°	0.0093	33.8NE	
	2003-03-18 22 52		39.51°	77.56°	2.7	56°	0.0043	9.1NE	
	2003-03-21 22 49		39.54°	77.49°	2.6	49°	0.0005	3.8NE	
	2003-03-23 13 38		39.57°	77.37°	3.5	63°	0.0018	74.3NE	
	2003-03-24 03 45		39.46°	77.59°	2.7	52°	0.0005	68.7NW	
伽师 2 台	2003-03-16 03 51		39.71°	77.47°	2.4	24°	0.0233	45.65NE	
	2003-03-16 06 44		39.54°	77.31°	2.4	48°	0.0109	12.0NW	
	2003-03-16 08 15		39.51°	77.46°	3.4	52°	0.0050	31.5NE	
	2003-03-23 09 29		39.67°	76.97°	3.4	64°	0.0013	52.5NE	
	2003-03-23 13 38		39.57°	77.37°	3.5	48°	0.0140	25.8NW	
	2003-03-25 06 40		39.52°	77.49°	2.9	62°	0.0081	37.5NE	
	2003-03-29 05 00		39.52°	77.62°	2.6	61°	0.0088	37.2NE	
	2003-03-29 14 43		39.44°	77.21°	3.8	63°	0.0074	78.0NE	
	伽师 3 台	2003-03-14 02 09		39.26°	77.34°	4.1	39°	0.0044	7.7NE
		2003-03-14 02 30		39.26°	77.34°	3.4	36°	0.0044	7.5NE
2003-03-14 02 31			39.26°	77.34°	2.3	36°	0.0044	0.9NW	
2003-03-14 02 32			39.26°	77.34°	4	34°	0.0053	12.7NE	
2003-03-15 03 17			39.30°	77.28°	2.3	33°	0.0047	15.5NE	
2003-03-15 07 09			39.28°	77.35°	3.8	24°	0.0035	32.7NW	
2003-03-16 03 51			39.42°	77.28°	2.4	24°	0.0041	29.5NE	
2003-03-16 05 09			39.26°	77.34°	3.8	34°	0.0020	14.6NE	
2003-03-16 06 55			39.26°	77.33°	2.5	31°	0.0094	48.3NE	
2003-03-16 18 48			39.27°	77.38°		42°	0.0035	6.9NW	
伽师 1、2、3 台	2003-03-17 07 28		39.27°	77.38°	2.2	31°	0.0012	25.4NW	
	2003-03-17 21 24		39.27°	77.38°		38°	0.0138	17.4NE	
	2003-03-18 02 10		39.27°	77.38°	2.8	28°	0.025	18.6NE	
	2003-03-18 02 12		39.26°	77.34°	3.1	36°	0.025	11.0NE	
	2003-03-18 02 29		39.26°	77.34°	3.5	34°	0.0233	72.2NE	
	2003-03-18 22 54		39.26°	77.34°	1.5	36°	0.025	55.7NW	
	2003-03-21 01 45		39.26°	77.34°	2	34°	0.008	1.8NE	
	2003-03-21 23 27		39.26°	77.37°	2.9	38°	0.0063	6.2NW	
	2003-03-27 18 31		39.26°	77.37°	3.1	46°	0.0067	1.4NE	
	2003-03-28 18 44		39.26°	77.37°	2.8	32°	0.0044	2.3NE	
2003-04-02 15 15		39.26°	77.34°	2.6	32°	0.0014	31.4NE		

注:表中  $\alpha_s$  为均匀介质的 s 波入射角。实际上,由于伽师地区介质非均匀性质形成的曲面波前效应,实际 s 波入射角小于表中  $\alpha_s$ 。

图 4 给出了 2003 年 3 月 16 日 5.1 级、3 月 24 日 4.7 级和 3 月 31 日 5.3 级余震前后伽师 1、2、3 号台记录的慢 S 波延迟时间时序曲线。可见,两次 5 级强余震前慢 S 波延迟时间均有由大变小后发震的特点,但 4.7 级地震前表现不十分明显。其中伽师 1、2 台可供分析的地震较少,特别是 3 月 24 日后地震明显减

少,基本无可供分析的地震。因此3月31日5.3级地震前后伽师1、2台无资料,伽师3台则表现为慢波延迟时间快速减小后发生5.3级地震。这种在强余震发生前慢波延迟时间的减小,可能说明局部地区应力出现了新的增强。

## 4 结论与讨论

由以上分析可初步得出以下几点认识:

(1)处于不同位置的三个台记录的地震波其快波偏振方向总体以近南北为主,这与主震的震源机制基本一致。但各自又有差异:处于6.8级地震源区附近的伽师2台的S波偏振方向基本与主震的震源机制解一致;其它台以近南北为主,其次为北北东向;与区域背景应力场方向较为一致。这与文献[14]的结果有所不同,其原因可能与主震的震源机制有极大的关系。1997—1998年伽师强震群的震源机制解<sup>[16]</sup>表明,其主压应力为北北东向或北南向,断层性质以正断层为主,主破裂面为北东向。而2003年2月24日6.8级地震震源机制解显示,主压应力P轴近北偏西,但地震断错性质为倾滑逆断层,主破裂面为近东西走向。

(2)巴楚—伽师6.8级地震后震中区发生的5.1和5.3级强余震前,伽师3个台记录的慢S波延迟时间均表现出由大变小的特征,震后一般有一定时间的调整。

(3)在研究时段内各台的S快波偏振方向总体显示较为一致。在两次强余震前偏振方向有不稳定变化,但规律性不强。对比余震较活跃时期发生的几次强余震的震源机制解,发现几次强余震的震源机制解不但与主震不同,而且各次强余震的震源断错性质也不相同,有走滑逆断层、走滑正断层和倾滑正断层。这可能说明余震区此时的受力状态处于极不稳定时期。

随着数字地震观测台网的发展,及资料的不断积累,利用S波分裂研究余震序列的各向异性特征,可能会在强余震的监测预报中发挥更大的作用。

本文得到王海涛研究员的热心指导和帮助,在此表示感谢!

## [参考文献]

- [1] 高原.地震各向异性研究进展—参加2001年IASPEI会议总结[J].地球物理学进展,2002,17(2):360-364.
- [2] 姚陈.地震各向异性研究新进展—参加1990年第四届国际地震各向异性专题讨论会报告[J].地球物理学进展,1990,5(4):103-108.
- [3] Crampin S, Evan R. Analysis of records of local earthquakes the Turkish Dilatancy Projects(TDPI and TDP2)[J]. Geophys. J. R. astr. soc., 1985, 83:1-16.
- [4] Evans R, Beamish D, Crampin S et al.. The Turkish Dilatancy Project(TDP3): Multi-disciplinary studies of a potential earthquake source region[J]. Geophys. J. R. astr. Soc., 1987, 91:265-281.
- [5] 中国地震局监测预报司.地震参数—数字地震学在地震预测中的应用[M].北京:地震出版社,2003.
- [6] 高原,郑斯华.唐山地区剪切波分裂研究(II)—相关函数分析法[J].中国地震,1994,10(增刊):22-32.
- [7] 郑治真,刘元壮.提取慢S波初至的自适应方法及S波分裂在地震趋势估计中的应用[J].中国地震,1994,10(增刊):1-8.
- [8] 冯德益,郭瑞芝.波速异常的进一步研究和问题讨论(二)—S波分裂的某些研究[J].西北地震学报,1992,14(1):10-17.

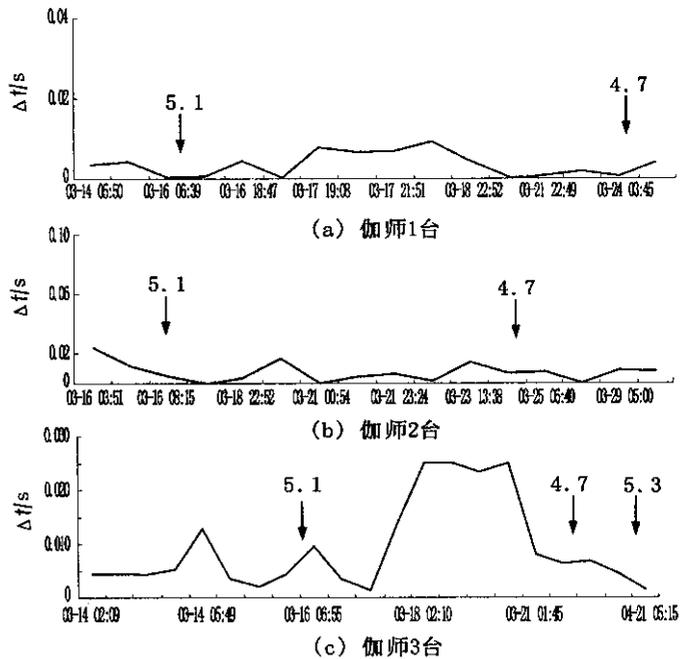


图4 伽师6.8级地震部分强余震的S波慢波延迟时间进程曲线

Fig. 4 Curve of slow S-wave delay time for some aftershocks of  $M_s$  6.8 earthquake recorded by three stations.

- [9] 姚陈,王培德,陈运泰. 卢龙地区S波偏振与上地壳裂隙各向异性[J]. 地球物理学报, 1992, 35(3): 305-315.
- [10] 李清河,刘希强,张范民,等. 剪切波分裂的某些理论问题及天祝—景泰6.2级地震剪切波分裂特征研究[J]. 中国地震, 1994, 10(增刊): 9-21.
- [11] 阮爱国,李清河,荣代路,等. 永登地震剪切波分裂及电性各向异性的变化特征[J]. 中国地震, 2000, 16(4): 316-326.
- [12] 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.
- [13] 钱晓东,李白基,秦嘉政. 2000年云南姚安MS6.5地震余震序列S波分裂研究[J]. 中国地震, 2002, 18(2): 157-165.
- [14] 赖院根,刘启元,陈九辉,等. 新疆伽师强震群区的横波分裂与应力场特征[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 83-92.
- [15] Kriichi Tadokoro, Masataka Ando, Yasuhiro Umeda. S wave splitting in the aftershock region of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake[J]. Journal of geophysical research, 1999, 104(B1): 981-991.
- [16] 陈棋福主编. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京:地震出版社, 2003: 1-41.

## RESEARCH ON S-WAVE SPLITTING CHARACTER FOR BACHU – JIASHI $M_s$ 6.8 EARTHQUAKE SEQUENCE AND ITS STRONG AFTERSHOCKS

QU Yan-jun, ZHAO Cui-ping, ZHAO Jian-zheng, NIE Xiao-hong, SUN Jia-ning  
(Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

**Abstract** :Using the data of three digital stations which were erected in aftershock region after Bachu – Jiashi  $M_s$  6.8 earthquake, Xinjiang Urumqi Autonomous Region, on Feb. 24, 2003, the S – wave splitting character of the aftershocks is analyzed. The result shows that the polarization direction of fast wave of aftershocks in epicenter region is approximately in NS, which is consistent with the principal compressive stress of the main shock. The delaying times of slow wave before strong aftershocks with  $M_s$  5.1 on Mar. 16 and  $M_s$  5.3 on Mar. 31 show the characteristic of gradually decreasing in general case.

**Key words** : Bachu – Jiashi earthquake ; S-wave splitting ; Delaying time of slow wave ; Polarization direction of fast wave