

张永久, 高原, 石玉涛, 程万正. 2008. 四川区域地震台网的剪切波分裂研究. 地震学报, 30(2): 123-134.  
Zhang Yongjiu, Gao Yuan, Shi Yutao, Cheng Wanzheng. 2008. A study on S wave splitting using waveform data from Sichuan Regional Seismic Network. *Acta Seismologica Sinica*, 30(2): 123-134.

# 四川区域地震台网的剪切波分裂研究<sup>\*</sup>

张永久<sup>1),\*</sup> 高原<sup>2)</sup> 石玉涛<sup>2)</sup> 程万正<sup>1)</sup>

1) 中国成都 610041 四川省地震局

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

**摘要** 通过对成都数字地震台网 2000 年 5 月 1 日—2006 年 12 月 31 日 6 年多资料的分析, 使用剪切波分裂 SAM 系统分析方法, 获得了四川地区 8 个地震台站的快剪切波偏振结果. 结果表明, 四川地区大部分台站的快剪切波偏振优势方向主要为 NE 或 NW 方向; 位于活动断裂上或几条活动断裂交汇部位的台站的快剪切波偏振优势方向, 大多数与对选用的小地震起控制作用的活动断裂走向一致, 或与区域主压应力方向一致, 但复杂的局部构造会影响剪切波分裂结果, 造成台站的快剪切波偏振优势方向与主要活动断裂走向不一致, 或与区域主压应力相差较大的现象.

**关键词** 剪切波分裂 快剪切波偏振 主压应力 活动断裂 四川地区

**文章编号:** 0253-3782(2008)02-0123-12

**中图分类号:** P315.3<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

## A study on S wave splitting using waveform data from Sichuan Regional Seismic Network

Zhang Yongjiu<sup>1),\*</sup> Gao Yuan<sup>2)</sup> Shi Yutao<sup>2)</sup> Cheng Wanzheng<sup>1)</sup>

1) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

**Abstract:** Using seismic data recorded by the Chengdu Digital Seismic Network from May 1, 2000, to December 31, 2006, and the SAM technique for S wave splitting analysis, this study has found the dominant polarization directions of fast S wave at 8 stations. The result shows that the dominant polarization directions at most stations are mainly in nearly NE-SW or NW-SE in Sichuan region. The dominant polarization direction at the stations located on active faults or at the intersection of several active faults is consistent with the strike of the faults, which control the earthquakes used in this analysis, and is basically consistent with the direction of regional compression axis. However, for some stations the fast S wave polarization directions are not consistent with the fault strikes and the directions of regional compression axis, probably owing to the

\* 基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研专项(2007-24)资助.

收稿日期 2007-12-14 收到初稿, 2008-02-25 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: ahangyongjiu@163.com

influence of local complicated crustal structure.

**Key words:** S wave splitting; fast S wave polarization; principal compressive stress; active fault; Sichuan region

## 引言

地壳介质的地震各向异性是一种比较常见的现象(Crampin, 1984), 利用地壳中的剪切波分裂观测可以研究地壳介质的地震各向异性特性, 分析地壳应力场的状态, 对有关各向异性参数进行静态和动态的描述(高原等, 1999). 研究表明, 复杂地质构造会造成剪切波偏振方向的不同(Shih, Meyer, 1990; 高原等, 1995, 1999). 由于剪切波偏振方向反映了地震台站下方地壳的主压应力方向, 因而可以用来研究地壳应力场特征(Crampin, 1978; 高原等, 1995; Cochran *et al.*, 2003). 国内利用剪切波分裂研究地壳介质的各向异性也取得不少研究结果(姚陈等, 1992; 高原等, 1995, 1999; 王椿镛等, 1997; 王培德等, 2000; 赖院根等, 2002; 石玉涛等, 2006; 吴晶等, 2007). 剪切波分裂对各向异性比较敏感, Gao 和 Crampin(2004)的研究表明, 剪切波分裂参数可以反映震前的应力积累和临震前的应力释放过程, 并可望用于研究地震预测问题.

四川地区位于青藏高原东部、南北地震带中段. 四川地区地震构造复杂, 是中国大陆地震活动最强的地区之一, 地震活动十分频繁, 强震活动水平处于西藏、云南和新疆之后列第四位. 从上世纪 70 年代以来四川省境内发生过 7 级地震 3 次, 6 级地震 15 次, 5 级地震 62 次. 在四川地区, 陈天长等(1995, 1996)曾利用 1989 年石棉 5.2 级地震的余震资料和 1994 年 7 月—1995 年 3 月部分遥测台站的 Sn 波资料, 进行剪切波各向异性的研究. 本文将利用 2000 年以来的数字地震波形资料, 对四川地区的各向异性进行初步研究, 分析该区域内的应力分布特征及其与断层性质等的关系.

## 1 地质构造背景台站情况

四川地区有龙门山、鲜水河和安宁河—则木河三大主要断裂带(邓起东, 张培震, 2002). 其中龙门山断裂带深部有北北东向地壳厚度陡变带或重力梯度带, 浅部由多条断层及强烈的构造变形带组成, 属控制青藏高原东缘的 I 级活动地块边界构造带, 部分断裂全新世活动性强烈. 鲜水河及其西北的甘孜—玉树断裂带属藏东地块北东缘与川滇地块北缘的共同边界断裂带, 具有强烈的晚第四纪活动性. 鲜水河南段的西南侧发育有北北东向的次级活动走滑逆断层, 如玉龙西断裂等. 而近南北向安宁河断裂带、北北西向则木河断裂带以及近南北向大凉山断裂带, 共同组成了川滇地块东边界.

四川地区主压应力场比较复杂, 不同区域存在明显差异(阚荣举等, 1977, 1983; 阚荣举, 1980; 许忠淮等, 1987; 崔效锋等, 2006; 崔效锋, 谢富仁, 1999). 结合 GPS 观测结果(张希等, 2003; 乔学军等, 2004), 并以三大主要断裂带为界, 四川地区可以依据应变与应力特征划分为雅江地块、川青地块和川中地块三大次级块体(程万正等, 2003, 2006). 印度板块与亚欧板块碰撞下的阿萨姆楔体作用造成了各个(地壳)块体非均匀的运动, 而且由于在地壳多(应力集中)点应力场(马宗晋, 1980; 丁国瑜, 1991)中, 所处位置不一样, 受力状态不同, 各块体及边界带运动形式会有显著差异.

震源机制解结果表明(蒲晓虹, 郭惠兰, 1993; 程万正等, 2003, 2006; 钟继茂, 程万正, 2006), 雅江地块压应力轴的优势方向为 ESE 或 WNW, 其  $P$  轴作用力接近水平, 相对集中在  $0^{\circ}$ — $20^{\circ}$ . 川青地块压应力主轴的优势方向为  $70^{\circ}$ — $130^{\circ}$ , 其  $P$  轴作用力呈低角度, 相对集中在  $0^{\circ}$ — $30^{\circ}$ . 川青地块的运动速率比雅江地块小, 表现出相对于雅江地块的滞后运动, 这使两地块间的鲜水河断裂呈现强烈的左旋运动. 川青地块除走滑型地震外, 倾滑型地震也占一定的比例. 川中地块的小震主压应力轴优势分布在 SE 或 NW 方位.

成都数字地震台网从 2000 年 5 月开始运行, 最初由郭达山(GDS)、蒙顶山(MDS)、鲜家坪(XJP)等 14 个子台组成. 随着“十五”台站改扩建项目的进行, 子台数目有所调整, 到 2006 年 11 月增加到 19 个台站. 调整过程大致为: 2003 年 10 月增加了理塘台, 2004 年 3 月增加了成都台, 2006 年 1 月华莹山台代替了老寨子台, 2006 年 2 月 14 日开始子台数从 16 个增加到 19 个, 取消了理塘台和成都台, 同时增加了乡城台、白玉台、巴塘台、壤塘台和松潘台(图 1). 6 个子台配备了宽频带数字地震仪, 其余子台配备了短周期数字地震仪; 宽频带数字地震仪在 0.05—40 Hz 范围内的归一化振幅频率响应值约等于 1, 短周期数字地震仪在 1—20 Hz 范围内的归一化振幅频率响应值约等于 1; 16 bit 子台系统动态范围大

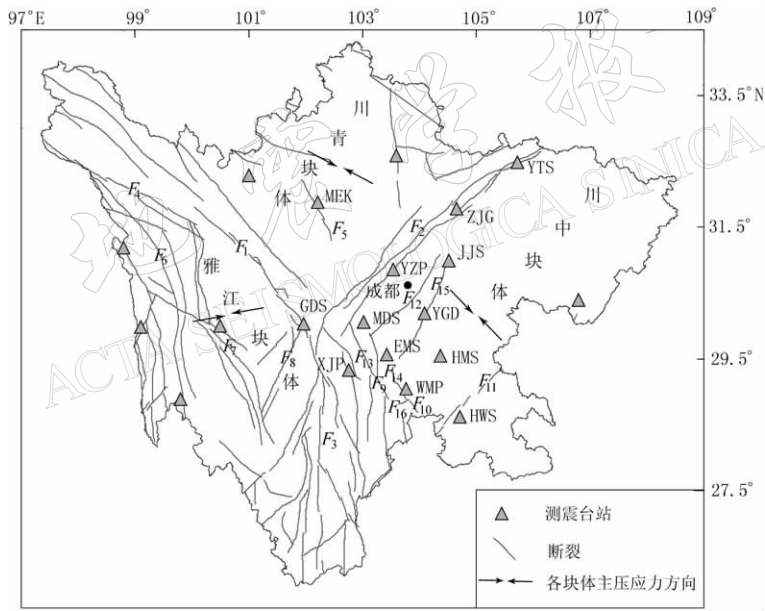


图 1 四川地区断裂与使用台站分布(图中未标注名称的 6 个台站, 无可供本研究使用的地震记录)  
 $F_1$ . 鲜水河断裂;  $F_2$ . 龙门山断裂;  $F_3$ . 安宁河—则木河断裂;  $F_4$ . 甘孜—玉树断裂;  $F_5$ . 马尔康断裂;  $F_6$ . 金沙江断裂;  $F_7$ . 理塘—雅江断裂;  $F_8$ . 玉龙西断裂;  $F_9$ . 峨边断裂;  $F_{10}$ . 中都断裂;  $F_{11}$ . 华莹山断裂;  $F_{12}$ . 新津—成都—德阳断裂;  $F_{13}$ . 天全—荣经断裂;  $F_{14}$ . 利店断裂;  $F_{15}$ . 龙泉山西缘断裂;  $F_{16}$ . 漩兰坝断裂

Fig. 1 Faults and seismic stations in Sichuan(wave data are unavailable for the six stations without code label)

$F_1$ . Xianshuihe fault;  $F_2$ . Longmenshan fault;  $F_3$ . Anninghe—Zemuhe fault;  $F_4$ . Ganzi—Yushu fault;  $F_5$ . Maerkang fault;  $F_6$ . Jinshajiang fault;  $F_7$ . Litang—Yajiang fault;  $F_8$ . Yulongxi fault;  $F_9$ . Ebian fault;  $F_{10}$ . Zhongdu fault;  $F_{11}$ . Huayingshan fault;  $F_{12}$ . Xinjin—Chengdu—Deyang fault;  $F_{13}$ . Tianquan—Rongjing fault;  $F_{14}$ . Lidian fault;  $F_{15}$ . Longquanshan fault;  $F_{16}$ . Dianlanba fault

于 90 dB, 24 bit 子台系统动态范围大于 140 dB, 实际动态范围 16 bit 绝大部分大于 80 dB, 24 bit 大于 110 dB; 可测量的最小地动信号为  $2.0 \times 10^{-8}$  m/s, 时间误差小于 1 ms.

2 研究方法和数据处理

地震波在各向异性介质中传播时, 由于传播速度的不同, 剪切波会分裂成快、慢两个剪切波列, 这两个剪切波具有近似垂直的偏振特性. 地壳岩石中普遍分布有近似直立、定向排列的平行裂隙, 即 EDA(extensive-dilatancy anisotropy, 缩写为 EDA)裂隙(Crampin, Atkinson, 1985). EDA 裂隙结构是各向异性的, 剪切波在这种结构中传播时, 会分裂成快剪切波和慢剪切波. 快剪切波的偏振方向与应力诱发的定向排列裂隙面的走向一致, 即快剪切波偏振方向与原地最大主压应力方向一致; 慢剪切波的时间延迟反映了地壳介质的各向异性程度, 它受到介质中裂隙的物理特性和所含的流体特性的影响. 剪切波入射到自由表面时, 若入射角大于临界角, 则会发生全反射现象, 这是剪切波窗口的限制条件. 对于泊松介质, 其临界角约为  $35^\circ$ . 但由于地壳表面沉积层的影响, 简单地按照单层介质计算, 选择入射角小于  $45^\circ$  范围内的地震射线, 即可满足剪切波窗口的要求(Crampin, 2005).

本研究使用剪切波分裂系统分析法——SAM 方法(高原等, 2004b). SAM 方法是在相关函数的基础上提出的一种分析方法, 包括相关函数计算、时间延迟校正和偏振分析检验 3 个部分, 具有自我检验的特点(高原, 郑斯华, 1994; 高原等, 2004b). 新的 SAM 方法软件系统升级为 SAM(2007)<sup>①</sup>, 具体的计算原理和分析方法可参阅有关文章<sup>②</sup>(高原, 郑斯华, 1994; 高原等, 1995, 1996, 1999; 石玉涛等, 2006; 吴晶等, 2007).

进行相关函数计算、时间延迟校正和偏振分析检验之前, 需要对地震波数据进行滤波等预处理. 根据四川区域地震台网仪器幅频特性和 S 波分裂分析的实际情况, 统一对全部地震波数据进行 1—20 Hz 带通滤波. 图 2 给出了马尔康(MEK)台 2005 年 1 月 10 日记录

的一次  $M_L 2.2$  地震经过滤波后的波形. 该地震震中为  $31.95^\circ\text{N}$ 、 $102.22^\circ\text{E}$ , 震源深度为 11 km, 震中距为 6.4 km, 依据单层介质速度结构模型计算的入射角为  $30.5^\circ$ .

剪切波分裂分析技术和过程如图 3 所示. 图 3a 给出了水平方向上两列剪切波的质点运动轨迹, 即剪切波偏振图. 由于剪切波已经发生了分裂, 在水平方向上两个分量的剪切波的质点运动轨迹并不是线性的. 如果快剪切波偏振方向为  $\alpha$  角, 把剪切波按  $\alpha$  角进行顺时针旋转, 得到快、慢剪切波, 再进行时间延迟校正, 把慢剪切波提前, 扣除时间延迟的影响,

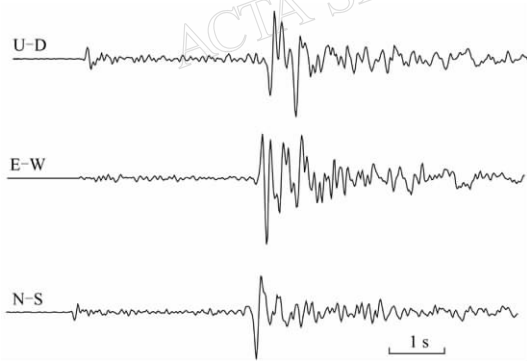


图 2 马尔康(MEK)地震台记录到的 2005 年 1 月 10 日  $M_L 2.2$  地震

Fig. 2 Waveform of the  $M_L 2.2$  earthquake on Jan. 10, 2005, recorded by station MEK

① 高原, 石玉涛, 梁维, 刘希强, 郝平. 2008. 剪切波分裂系统分析系统 SAM(2007): 软件系统.  
② 石玉涛, 高原, 吴晶, 太龄雪. 2008. 剪切波分裂系统分析系统 SAM(2007): 区域地震台网资料应用实例.

得到偏振图(图 3b). 此时的两列剪切波的偏振图应该表现为更接近线性的偏振. 若快剪切波偏振方向的计算结果不正确, 由于快、慢剪切波相互混在一起, 则得不到分离的快、慢剪切波. 若时间延迟的计算结果不正确, 则扣除时间延迟影响的剪切波偏振图不会是线性的. 如果发现结果有偏差, 则需要根据波形和偏振特征进行修正, 这也正是 SAM 方法的优势所在(高原等, 1995, 1996, 2004a, b).

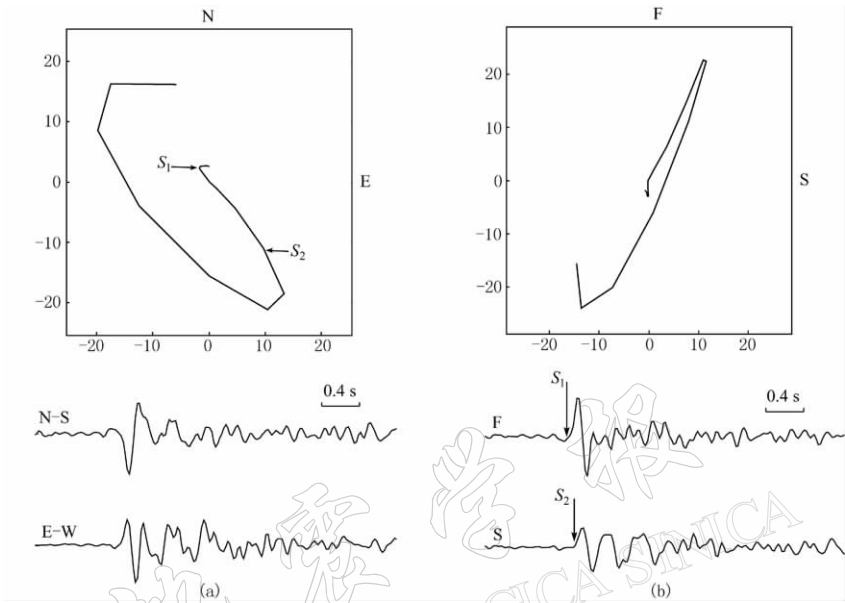


图 3 剪切波分裂分析  
(a) 上图剪切波偏振图, 下图分别为北南向和东西向剪切波波形; (b) 上图经过时间延迟校正后的剪切波偏振图, 下图分别为快剪切波和慢剪切波波形. 其中  $S_1$  和  $S_2$  分别表示快、慢剪切波位置, 以箭头示出

Fig. 3 Shear-wave splitting analysis  
(a) Upper: Particle motion; Lower: Shear wave record, N-S represents North-South component, E-W represents East-West component. (b) Upper: Particle motion after the correction of wave record with the time delay between fast and slow S wave; Lower: F represents fast S wave and S represents slow S wave,  $S_1$  and  $S_2$  mark the onset of fast and slow shear-wave

### 3 计算结果

根据成都数字地震台网提供的地震目录, 本文收集整理成都数字地震台网监测范围内自 2000 年 5 月—2006 年 12 月的 2.0 级以上, 并有深度记录的 887 次地震. 如前所述, 剪切波窗理论入射角的临界值为  $35^\circ$ , 但射线在接近地表时, 由于低速层或沉积层的影响, 射线传播的轨迹会逐渐趋向垂直方向. 根据四川地区的速度结构(赵珠, 张润生, 1987), 并结合石油部门的浅层勘探速度结果<sup>①</sup>, 四川地区厚度分别为 1, 5 km 和 20 km, 速度分别为 3.7, 4.3 km/s 和 5.9 km/s 的速度结构. 对于一个深度为 12 km, 震中距为 19.5 km 的地震, 按单层均匀模型简单计算入射角为  $58.5^\circ$ , 但按分层模型计算地表的实际入射角为

① 中石化集团新星石油公司西南石油局第二物探大队研究院. 2005. 龙门山街子地区主要勘探层勘探结果.

35.3°. 本研究中使用单层模型概念下的 58°入射角作为剪切波窗口. 根据这里给出的速度模型, 本研究使用的数据都在剪切波窗口内. 根据剪切波窗口的约束条件, 得到剪切波窗口内的有效地震记录 152 条. 在此基础上挑选观测质量较好的波形记录, 最后得到用于计算剪切波分裂的地震记录 89 条, 最终得到 13 个台的剪切波分裂结果. 其中 8 个台有 3 条以上地震记录(图 4).

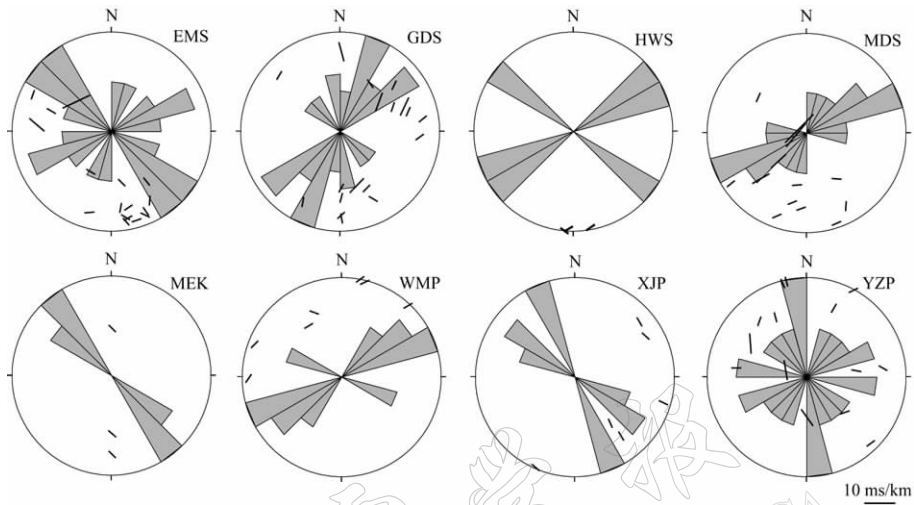


图 4 快剪切波偏振方向下半球等面积极射投影与等面积玫瑰图

短线方向是相应台站记录的每次地震的快剪切波偏振方向, 线段的长短表示慢剪切波延迟时间大小

Fig. 4 Lower hemisphere equal-area project of fast shear-wave polarization

Short bars denote the polarization of the fast S wave at every station, the bar length is proportional to the time delay of the slow S wave

由于同一台站接收到不同地震的快剪切波偏振方向不完全一致, 因此, 采用下面求角度平均的公式, 分别计算各个台站的平均快剪切波偏振方向  $\bar{\theta}$  和  $R$  值.  $R$  值在 0—1.0 之间, 其大小反映了快剪切波偏振方向的集中程度, 越接近 1.0 说明快剪切波偏振方向越集中(Davis, 1986; Mardia, Jupp, 2000; 马宏生等, 2007).

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

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

式中,  $n$  为台站计算出的地震次数,  $\theta_i$  为每次地震的快剪切波偏振方向. 计算得到的成都台网 89 次地震的剪切波分裂平均快波偏振方向为  $83.1^\circ \pm 49.1^\circ$ ,  $R$  值为 0.68; 慢波的平均延迟时间为  $(3.92 \pm 2.72)$  ms/km. 部分台站的计算结果列于表 1(仅列出有 3 次以上地震剪切波分裂的台站结果).

快剪切波偏振方向与台站的原地主压应力方向一致, 受区域应力场的控制, 与断裂分布和地质构造等有关. 图 5 给出了本研究得到的四川地区 8 个台站的快剪切波偏振方向及其与应力场、断裂分布的关联性. 从图 5 中可看出, 有 3 个台站(EMS, MEK, XJP)显示出快剪切波偏振优势方向为近 NW 或 NNW 方向, 1 个台站(YZP)为近 N-S 方向, 4 个台站

(GDS, MDS, WMP, HWS)为 NE 或 ENE 方向. 即除 YZP 台外, 其它台站的快剪切波偏振优势方向与区域应力场或断裂走向一致. 下面将进行更详细的讨论.

表 1 成都台网部分台站参数与剪切波分裂参数

Table 1 Station and shear-wave splitting parameters of the Chengdu network

台站名称	台站代码	记录条数	$\bar{\theta}/^{\circ}$	R	$\overline{\Delta t}/\text{ms} \cdot \text{km}^{-1}$
郭达山	GDS	18	$47.4 \pm 53.0$	0.68	$4.11 \pm 2.87$
峨眉山	EMS	17	$93.7 \pm 47.8$	0.71	$3.85 \pm 2.56$
蒙顶山	MDS	14	$56.5 \pm 23.3$	0.93	$5.72 \pm 4.24$
油榨坪	YZP	14	$111.3 \pm 54.6$	0.62	$3.73 \pm 1.95$
五马坪	WMP	7	$60.7 \pm 23.6$	0.93	$2.53 \pm 0.93$
鲜家坪	XJP	6	$138.4 \pm 15.7$	0.97	$2.59 \pm 1.34$
汗旺山	HWS	3	$78.7 \pm 39.1$	0.85	$2.48 \pm 0.47$
马尔康	MEK	3	$133.3 \pm 02.9$	0.99	$1.96 \pm 1.03$

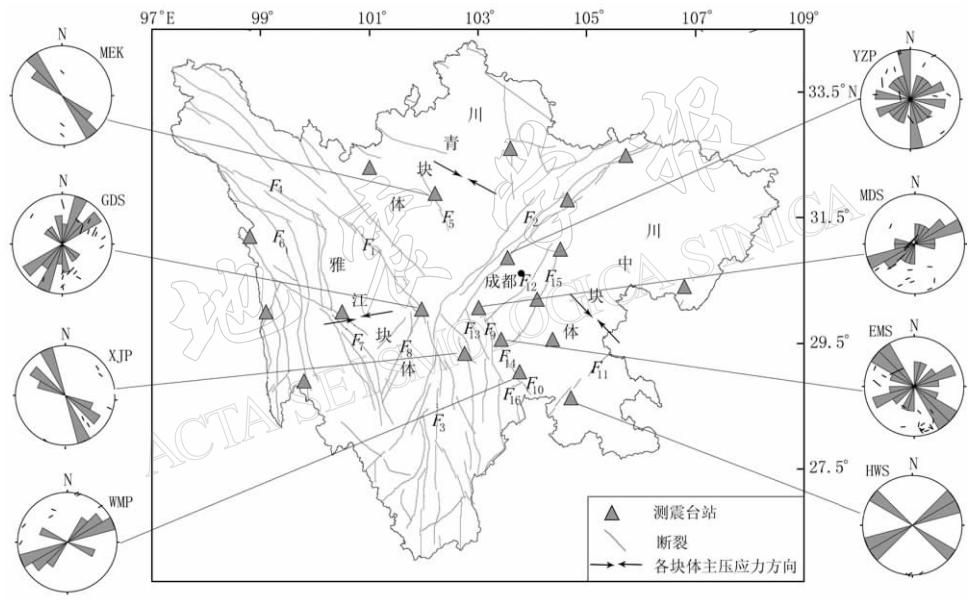


图 5 四川地区快剪切波偏振方向(成都遥测地震台网部分台站结果)

Fig. 5 Polarization of fast shear-wave in Sichuan region

This result is obtained from the records of some stations of the Chengdu telemetry seismic network

4 分析和讨论

四川地区剪切波速度结构具有很强的横向不均匀性(赵珠, 张润生, 1987). 四川地区复杂的断裂分布(图 1)从一个侧面反映出该地区构造上的复杂性, 复杂的地质构造背景造成了四川地区地壳应力场的局部区域性特征. 本文结果显示这种应力场的复杂性.

为研究结果的可靠性, 本文仅分析剪切波窗口内有效数据有 3 条以上的台站的计算结果, 共计 8 个台站. 综合研究结果表明, 鲜水河断裂带大致以乾宁惠远寺拉分盆地为界, 可分为北西和南东两段. 北西段结构较单一, 为一条主干断裂; 南东段结构比较复杂, 主

要由 4 条分支断裂组成(闻学泽, 2000). 郭达山(GDS)台即位于鲜水河中南段 NW 向的雅拉河、折多塘断裂的南端与 NNE 向的玉龙西断裂北端的交汇部位, 该台的快剪切波偏振优势方向为 NNE 或 NE 方向. 20 世纪 70 年代以来鲜水河断裂上中强地震震源机制结果表明, 该断裂带受到的主压应力方向为 ENE 或 NE 向(林邦慧等, 1986). 例如, 1973 年炉霍 7.6 级地震的  $P$  轴方位为  $250^{\circ}$ ; 1981 年道孚 6.9 级地震的  $P$  轴方向为  $84^{\circ}$ ; 1982 年甘孜 6.0 级地震的  $P$  轴方位为  $50^{\circ}$ . 说明该台的快剪切波优势方向与 NW 向的鲜水河主断裂方向不一致, 与鲜水河主断裂的主压应力方向也存在差异, 而与 NNE 向的玉龙西断裂走向一致. 另外, 朱艾澜等(2005)根据川西地区小震精确定位结果分析认为, 磨西一带存在 NE 向的隐伏断裂. 郭达山(GDS)台的快剪切波偏振分析结果在一定程度上支持了这一结论.

水压致裂地应力的测量结果表明, 龙门山断裂最大水平主应力在各段略有差异, 总体上呈 NW-SE 方向(安其美等, 2004). 蒙顶山(MDS)、油炸坪(YZP)、仲家沟(ZJG)和营台山(YTS)4 个台站分别位于龙门山断裂及附近的不同段落上, 由于 ZJG 和 YTS 两个台站的地震记录数少于 3 个, 这里不予讨论. MDS 台位于龙门山断裂的最南端与 NE 向的新津—成都—德阳断裂及 NNW 向的天全—荣经断裂和峨边断裂的交错部位, 该台的快剪切波偏振优势方向为 NE 向, 与主压应力方向近似垂直, 与新津—成都—德阳断裂的走向一致, 与龙门山断裂走向比较一致, 而与天全—荣经断裂和峨边断裂走向无关. 这可能与我们用于快剪切波偏振分析的地震更接近新津—成都—德阳断裂, 而龙门山断裂与新津—成都—德阳断裂走向又相对接近有关.

油炸坪(YZP)台处于龙门山中段的盆地向高原过渡的交汇部位. 该台的快剪切波偏振优势方向为近 N-S 向, 与原地主压应力方向、GPS 主压应变方向(张希等, 2003; 张晓亮等, 2005)及龙门山断裂走向都存在较大的差异, 这种结果造成解释上的困难. 但进一步分析发现: ① 该台海拔高度为 608 m, 接近盆地边缘, 台基可能受盆地边缘沉积盖层的影响较大, 使得该台的地震记录波形相对复杂(图 6), 14 条地震记录中有 12 条出现了“转换波

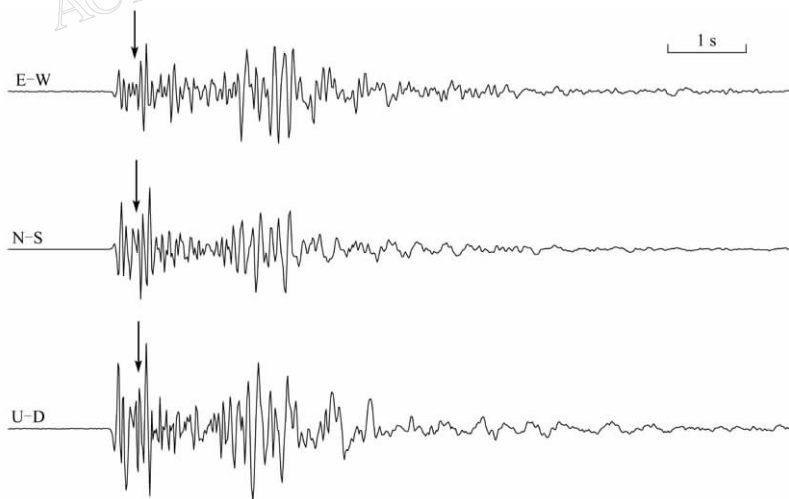


图 6 油炸坪(YZP)台记录的 2004 年 2 月 24 日  $M_L$  2.1 地震波形(箭头指示“转换”震相位置)

Fig. 6 Waveform of the  $M_L$  2.1 earthquake on Jan. 24, 2004, at station YZP  
The arrow shows the converted wave



形”(姚陈等, 1992), 给我们的分析造成较大的干扰; ② 发现凡是快剪切波偏振方向接近 N-S 向的地震的方位角几乎都大于  $280^{\circ}$  或小于  $30^{\circ}$ , 即这些地震都分布在台站的北西方向, 且震源深度都在 10 km 以下(表 2). 因此推测在某深度以下该区域可能存在近 N-S 向的小型隐伏断裂等复杂情况(朱艾澜等, 2005). 要证实后一种推测的准确性, 还需要补充大量的数据资料, 提供更多的可靠观测证据.

表 2 油榨坪(YZP)台使用的地震参数及快剪切波偏振方位  
Table 2 Earthquake parameters and direction of fast shear-wave polarization at the station YZP

地震 编号	日期	发震时刻(BT)	深度/km	$M_L$	方位角/ $^{\circ}$	震中距 /km	快波偏振 方向/ $^{\circ}$
	年-月-日	时:分					
01	2001-11-15	10:42	15.0	2.0	179.20	7.57	145.0
02	2002-11-16	20:51	13.0	2.0	28.38	20.33	165.0
03	2003-02-11	07:04	15.0	2.1	300.83	13.11	175.0
04	2003-02-24	17:59	15.0	2.5	348.18	22.76	165.0
05	2003-03-03	03:05	11.0	2.0	332.55	9.79	165.0
06	2003-03-22	12:57	15.0	2.4	288.34	4.00	170.0
07	2003-05-09	22:44	15.0	2.2	82.71	9.65	100.0
08	2003-09-19	16:10	10.0	2.8	83.36	10.58	120.0
09	2003-09-26	12:31	10.0	2.3	277.45	9.59	90.0
10	2004-01-10	09:22	10.0	2.5	345.67	14.91	155.0
11	2004-04-09	17:20	22.0	2.1	319.70	21.95	180.0
12	2004-08-24	13:02	11.0	2.1	135.85	15.07	55.0
13	2004-10-01	13:20	12.0	2.1	132.82	7.87	70.0
14	2005-09-10	14:19	13.0	3.0	21.62	13.21	30.0

峨眉山(EMS)台位于峨边断裂东侧、龙泉山断裂西南端与利店断裂西北端的交汇部位. 该台的快剪切波偏振的优势方向为 NW 向, 与原地主压应力方向一致, 与 GPS 主压应变方向(张希等, 2003; 张晓亮等, 2005)一致, 与峨边断裂、利店断裂走向一致, 同时其第二优势方向与龙泉山西缘断裂走向较接近.

马边—盐津断裂包含了多条次级断裂, 各次级断裂的走向及其它特征都存在差异, 大部分次级断裂的走向都是 NNW 向, 如利店断裂、中都断裂. 也有 ENE 走向的次级断裂, 如靛兰坝断裂. 五马坪(WMP)台位于利店断裂、中都断裂与靛兰坝断裂交汇处. 该台的剪切波分裂快波偏振的优势方向为 ENE, 与原地主压应力方向和 GPS 观测结果近似垂直, 与靛兰坝断裂走向一致. 一种可能的解释是, ENE 向的靛兰坝断裂穿过了 WNW 向的利店断裂和中都断裂的不连续区, 而该台的剪切波分裂结果主要受控于 ENE 向的靛兰坝断裂.

华蓥山断裂带分布于四川盆地东南部, 为压扭性断褶带, 该断褶带及附近区域的地震活动以双震或震群型为主(刘成明, 2000). 汉旺山(HWS)台位于华蓥山断裂带西南段. 该台的剪切波分裂结果表明应力场与断裂走向的双重影响. 一条记录的快剪切波偏振的优势方向为 NE 向, 与华蓥山断裂走向一致; 另一条记录的快剪切波偏振方向为 NW 向, 与原地主压应力方向一致. HWS 台的数据还需要增加以作进一步的分析.

马尔康断裂分布于川青块体内部, 控制抚边河等 NW 向断层谷地. 1989 年小金 6.6 级地震序列震源机制综合结果显示, 该断裂主压应力与区域应力场一致(刁桂苓等, 1995).

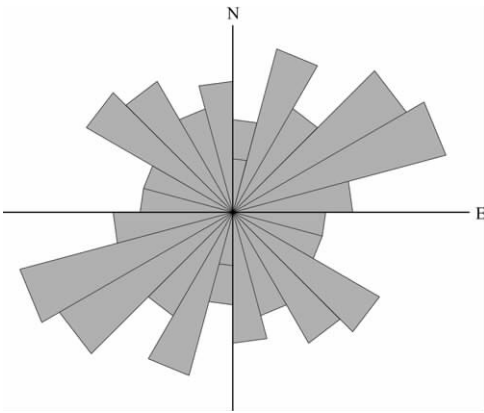


图 7 快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图  
使用了有分析结果的全部 13 个台的数据, 包括  
5 个只有 1—2 条有效波形记录的台站

Fig. 7 Rose-lobe diagram of the fast shear-wave polarization directions  
Result of 13 stations, including the 5 stations  
with only 1—2 waveform records

马尔康(MEK)台位于马尔康断裂松岗段, 该台的快剪切波偏振的优势方向为 NW 向, 与马尔康断裂松岗段的主压应力方向一致, 与 GPS 主压应变方向(张希等, 2003; 张晓亮等, 2005)一致, 与马尔康断裂松岗段走向一致.

鲜家坪(XJP)台位于甘洛—竹核断裂北段与保新长—凤仪断裂的交错区, 在交错区两条断裂的走向基本一致, 都是 NNW 走向. 该台的剪切波分裂快波偏振的优势方向为 NW 向, 与原地主压应力方向一致, 与 GPS 主压应变方向(张希等, 2003; 张晓亮等, 2005)一致, 与甘洛—竹核断裂走向一致.

把有分析结果的全部 13 个台的数据综合起来, 得到全部记录的快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图(图 7). 图 7 显示出两个主要优势方向: 一个优势方向是近北东方

向, 与研究区的主要断裂带(龙门山断裂带等)的走向一致; 另一个优势方向大约是北西方向, 与研究区的主压应力方向一致.

## 5 结论

四川地区受到欧亚板块和印度板块的强烈作用, 无论深部、浅部还是地表, 表现出来的地球物理特性和地质特性都非常复杂. 本文使用四川成都数字地震台网 2000 年 5 月 1 日—2006 年 12 月 31 日 6 年多的波形资料, 通过剪切波分裂的研究, 得到了对四川地区地壳介质各向异性的初步认识.

快剪切波偏振优势方向代表了观测区域的原地(台站及其附近)主压应力方向或观测区域活动断裂走向. 本研究结果显示了快剪切波偏振优势方向与区域主压应力方向和活动断裂的走向都有很强的关联性, 与 GPS 主压应变方向(张希等, 2003; 张晓亮等, 2005)一致. 四川地区大部分台站的快剪切波偏振优势方向主要为 NE 或 NW 方向.

位于活动断裂上或几条活动断裂交汇部位的台站的快剪切波偏振优势方向, 大多数与区域主压应力方向或控制地震活动的断裂走向一致. 例如 GDS, EMS, XJP, WMP, MEK, HWS 和 MDS 台.

复杂的局部构造会控制或影响台站的快剪切波偏振优势方向, 造成与主要活动断裂走向的不一致, 或与区域主压应力结果相差较大的现象, 例如 YZP 台. 但这个现象需要仔细地解析. 快剪切波偏振优势方向的分布不仅可以判断主压应力场方向, 还可以分析断层的活动性, 并可揭示新的构造关系, 如是否存在隐伏断层等(石玉涛等, 2006; 吴晶等, 2007).

四川地区构造复杂、断裂带多、有感地震多, 但目前对地震波形记录相对较好且资料相对丰富的台站仍主要集中在四川盆地西、北边缘及附近地区, 川西北、川西南高原以及

川东的广大区域目前可用的数字地震资料稀少, 仍然需要积累更多的资料以展开进一步地更加全面的研究工作. 关于鲜水河断裂带的影响, 也需要更多的数据积累才能进行深入的分析.

感谢吴晶和太龄雪对本研究的帮助, 以及 2007 年中国地震局访问学者计划的支持.

## 参 考 文 献

- 安其美, 丁立丰, 王海忠, 赵仕广. 2004. 龙门山断裂带的性质与活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(2): 115-119.
- 陈天长, 范军, 曾健. 1996. 四川地区  $S_n$  波偏振[J]. 四川地震, (4): 85-90.
- 陈天长, 李志君, 张润生, 杜国光, 彭万星. 1995. 1989 年 6 月 9 日石棉 5.2 级地震后横波分裂的时间变化[J]. 地震学报, **17**(1): 52-61.
- 程万正, 刁桂苓, 吕戈培, 张永久, 李桂芳, 陈天长. 2003. 川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式[J]. 地震地质, **25**(1): 71-87.
- 程万正, 阮祥, 张永久. 2006. 川滇次级地块震源机制解类型与一致性参数[J]. 地震学报, **28**(6): 561-573.
- 崔效锋, 谢富仁, 张红艳. 2006. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义[J]. 地震学报, **28**(5): 451-461.
- 崔效锋, 谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报, **21**(5): 513-522.
- 邓起东, 张培震. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑), **32**(12): 1 020-1 030.
- 刁桂苓, 程万正, 李桂芳, 陈新华, 于利民, 李钦祖. 1995. 小金地震序列的震源区应力场[J]. 中国地震, **11**(2): 168-173.
- 丁国瑜. 1991. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京: 地震出版社: 154-178.
- 高原, 郑斯华. 1994. 唐山地区剪切波分裂研究(Ⅱ): 相关函数分析法[J]. 中国地震, **10**(增刊): 11-21.
- 高原, 郑斯华, 孙勇. 1995. 唐山地区地壳裂隙各向异性[J]. 地震学报, **17**(3): 283-293.
- 高原, 郑斯华, 王培德. 1996. 海南省东方地区 1992 年小震群剪切波分裂研究[J]. 地球物理学报, **39**(2): 221-232.
- 高原, 郑斯华, 周惠兰. 1999. 唐山地区快剪切波偏振图象及其变化[J]. 地球物理学报, **42**(2): 228-232.
- 高原, 梁维, 丁香, 薛艳, 蔡明军, 刘希强, 苏有锦, 彭立国. 2004a. 云南 2001 年施甸地震的剪切波分裂参数变化特征[J]. 地震学报, **26**(6): 576-582.
- 高原, 刘希强, 梁维, 郝平. 2004b. 剪切波系统分裂方法(SAM)软件系统[J]. 中国地震, **20**(1): 101-107.
- 阚荣举. 1980. 西南地区现代构造应力场与板内强震活动[J]. 地震研究, **3**(3): 45-59.
- 阚荣举, 张四吕, 晏风桐, 俞林胜. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, **20**(2): 96-109.
- 阚荣举, 王邵晋, 黄琨, 宋文. 1983. 中国西南现代构造应力场与板块相对运动[J]. 地震地质, **5**(2): 79-90.
- 赖院根, 刘启元, 陈九辉. 2002. 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, **45**(1): 83-93.
- 林邦慧, 陈天长, 蒲晓虹, 刘万琴, 彭美宣, 张卫平. 1986. 鲜水河断裂强震的破裂过程与地震活动[J]. 地震学报, **8**(1): 1-10.
- 刘成明. 2000. 华莹山断褶带地震活动的新特点及内因初探[J]. 四川地震, (4): 29-33.
- 马宏生, 张国民, 刘杰, 江在森, 华卫, 王辉, 王新岭. 2007. 云南及邻区应力应变场分区耦合特性初步研究[J]. 地震学报, **29**(2): 130-411.
- 马宗晋. 1980. 华北地壳的多(应力集中)点应力场与地震[J]. 地震地质, **2**(1): 39-48.
- 蒲晓虹, 郭惠兰. 1993. 四川地区现代构造应力场的空间分布特征及潜在震源区判定[J]. 西北地震学报, **15**(2): 97-99.
- 乔学军, 王琪, 杜瑞林. 2004. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J]. 地球物理学报, **47**(5): 805-811.
- 石玉涛, 高原, 吴晶, 罗艳, 苏有锦. 2006. 云南地区地壳介质各向异性: 快剪切波偏振特性[J]. 地震学报, **28**(6): 574-585.
- 王培德, Klinge K, Kruger F, Plenefisch T. 2000. 波形极相似的地震丛集中剪切波分裂的变化[J]. 地震学报, **22**(5):

501-508.

- 王椿镛, 丁志峰, 陈学波, 陈光英, 李桂银. 1997. 大别造山带地壳 S 波分裂和介质各向异性[J]. 科学通报, **42**(23): 2 539-2 542.
- 闻学泽. 2000. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征[J]. 地震地质, **22**(3): 239-249.
- 吴晶, 高原, 陈运泰, 黄金莉. 2007. 首都圈西北部地区地壳介质地震各向异性特征初步研究[J]. 地球物理学报, **50**(1): 209-220.
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 高阿甲, 金小峰, 常向东. 1987. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征[J]. 地球物理学报, **30**(5): 476-486.
- 姚陈, 王培德, 陈运泰. 1992. 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, **35**(3): 305-315.
- 张希, 江在森, 王琪, 王双绪, 张晓亮. 2003. 川滇地区地壳水平运动特征与强震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, **23**(3): 35-41.
- 张晓亮, 江在森, 王双绪, 陈兵, 黄国柱. 2005. 川滇地区现今块体水平运动变形特征分析[J]. 地震研究, **28**(3): 262-267.
- 赵珠, 张润生. 1987. 四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究[J]. 地震学报, **9**(2): 154-166.
- 钟继茂, 程万正. 2006. 由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场方向[J]. 地震学报, **28**(4): 337-346.
- 朱艾斓, 徐锡伟, 周永胜, 尹京苑, 甘卫军, 陈桂华. 2005. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J]. 地球物理学报, **48**(3): 629-636.
- Cochran E S, Vidale J E, Li Y G. 2003. Near-fault anisotropy following the Hector Mine earthquake[J]. *J Geophys Res*, **108**(B9): 2 436-2 447.
- Crampin S. 1978. Seismic-wave propagation through a cracked solid: Polarization as a possible dilatancy diagnostic[J]. *Geophys J R astr Soc*, **53**: 467-496.
- Crampin S. 1984. An introduction to wave propagation in anisotropic media[J]. *Geophys J R astr Soc*, **76**: 17-28.
- Crampin S. 2005. A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic earth[J]. *Wave Motion*, **41**: 59-77.
- Crampin S, Atkinson B K. 1985. Microcracks in the earth's crust[J]. *First Break*, **3**(3): 16-20.
- Davis J C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*[M]. Hoboken N J: John Wiley: 649.
- Gao Y, Crampin S. 2004. Observations of stress relaxation before earthquakes[J]. *Geophys J Int*, **157**(2): 578-582.
- Mardia K V, Jupp P E. 2000. *Directional Statistics*[M]. Hoboken N J: John Wiley: 429.
- Shih X R, Meyer R P. 1990. Observation of shear wave splitting from nature events: South Moat of Long Valley Caldera, California, June 29 to August 12, 1982[J]. *J Geophys Res*, **95**: 11 179-11 196.