# 甘东南地区地壳介质各向异性特征

张 辉,王熠熙,冯建刚

(中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

摘 要:利用甘肃数字地震台网(2001-2008年)的观测资料,采用 SAM 分析方法进行剪切波分裂, 获得了甘东南地区 7 个台站 319 条剪切波分裂参数。结果表明甘东南地区快剪切波平均偏振方向 与该区域最大主压应力方向一致,是区域应力环境的较好描述;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控震的活动断裂走向一致;复杂的局部构造会 影响剪切波分裂结果,造成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: SAM 分析方法; 剪切波分裂; 快剪切波偏振; 时间延迟 中图分类号: P315.31 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2011)02-0111-06

### Seismic Anisotropy in the Crust in Southeastern Area of Gansu Province

ZHANG Hui, WANG Yi-xi, FENG Jian-gang

(Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the observation data recorded by Gansu Seismological Network (2001-2008), using the SAM technique for S wave splitting analysis, the 319 shear-wave splitting parameters at 7 stations are obtained in southeastern area of Gansu province. It is shown that the average polarization of fast shear-wave is consistent with the regional maximum horizontal compressional stress, it is an efficient tool to depict regional stress field. The dominant polarization direction at stations which located on active fault or cross point of some active faults is consistent with the strike of main earthquake-controlling fault. However, for some stations the fast S wave polarization directions are not consistent with the fault strikes and the direction of regional maximum horizontal compressional stress, probably owing to the influence of local complicated crustal structure.

#### Key words: SAM analysis method; Shear-wave splitting; Polarization of fast shear-wave; Time delay

0 引言

地壳介质的地震各向异性是一种比较常见的现 象<sup>[1]</sup>,地壳中大量充满液体的定向排列的微裂隙是 产生各向异性的主要因素,当剪切波穿过这种各向 异性介质传播时会分裂为快剪切波和慢剪切波<sup>[2]</sup>。 快剪切波的优势偏振方向与裂隙走向一致,与区域 主压应力方向一致,复杂的地质构造会造成剪切波 偏振方向的不同<sup>[3-6]</sup>。由于快剪切波偏振方向反映 了地震台站下方地壳的主压应力的方向,因而可以 用来研究地壳应力场特征<sup>[7]</sup>。国内许多学者利用固 定台站、流动台网(台阵)的资料对中国的一些地区 进行了各向异性的研究<sup>[3-6,8-13]</sup>,取得了大量的研究 结果,表明利用剪切波分裂可以分析地壳介质的各 向异性、应力场及断层的性质等。Gao 和 Crampin 的研究表明<sup>[14]</sup>,剪切波分裂参数可以反映震前的应

- 基金项目:2011 年度地震科技星火计划(XH1026Y);南北地震带北段大震危险性强化跟踪;中国地震局兰州地震研究所论著编号; LC2011003
- 作者简介:张 辉(1978-),男(汉族),山东邹平人,助理研究员,主要从事数字地震学的研究工作.

收稿日期:2010-12-18

第 33 卷

力积累和临震前的应力释放过程,这个特征对于地 震预测具有重要的意义。最新的研究发现,慢剪切 波的时间延迟对裂隙的水压变化具有很好的反 映<sup>[15]</sup>。

本文主要利用甘肃省区域数字地震台网 2001 -2008 年的地震波形资料,采用 SAM(Systematic Analysis Method of Shear-wave Splitting,剪切波分 裂系统分析方法)<sup>[16-18]</sup>方法,对甘东南地区地壳介质 各向异性特征进行分析,结合断层分布讨论剪切波 分裂特性及其与地震断层的关系,为以后更详细的 地震学研究提供参考资料。 1 区域背景

甘东南活动构造区地处青藏高原块体与鄂尔多 斯块体、阿拉善块体的交汇区<sup>[19]</sup>,为西秦岭北缘断 裂以南和东昆仑断裂东段以北的区域。本区是强烈 地震活动区,也是现今构造活动强烈地区,分布着多 条大型深断裂带,如 NWW 向的临潭一宕昌断裂、 迭部一白龙江断裂等;NEE 向的礼县一罗家堡断 裂、哈南一稻畦子断裂等<sup>[20]</sup>。据记载,该区内发生 了 1654 年天水 8.0 级、1879 年武都 8.0 级等 2 次 8 级大地震(图 1),还有多次中强地震发生。



图1 研究区断层和台站分布图

Fig. 1 Distribution of faults and stations in the research area.

许多学者从 GPS 观测、震源机制解、第四纪地 质调查、数值模拟角度研究青藏高原东北缘地壳变 形特征、动力驱动机制,取得了一系列重要成果。江 在森等<sup>[21]</sup>利用 GPS 观测资料研究中国大陆水平应 变场与构造变形,显示本区主压应变方向呈顺时针 旋转特征;谢富仁等<sup>[22]</sup>编制的中国大陆地壳应力环 境基础数据库表明,青藏高原东北缘地区现今构造 应力场主压应力方向分布比较复杂,自北向南,呈现 由 NE、NEE、近 EW、SE 到 SSE 方向的变化。吴满 路等<sup>[23]</sup>利用压磁应力解除法测量了兰州一玛曲地 区的地应力,认为西秦岭构造带是现今地应力的一 个过渡带,最大水平主应力方向由北侧的 NE 向逐 渐转变为中部的 EW 向和南侧的 SEE 向。

#### 2 资料及研究方法

甘肃数字地震台网自 2001 年投入使用,到 2008 年 6 月升级改造,积累了大量的中小地震波形 资料。本研究选取分布在甘东南地区的 7 个地震台 站,具体位置见图 1。使用地表台站记录波形分析 剪切波分裂时,要求地震射线满足剪切波窗口的约 束条件。根据对大量实际资料的分析可知,如果使 用近似单层介质计算入射角,则选择入射角≪45°的 波形 资料 即 可 满 足 剪 切 波 窗 口 的 约 束 条 件 (Crampin et al.,2005)。 本文采用高原等<sup>[16-18]</sup>提出的剪切波分裂 SAM 系统分析法。该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,具体 的计算原理和分析方法<sup>[18,24]</sup>,在此不再赘述。

应用 SAM 方法的具体步骤如下:首先对数据 进行预处理,选取直达剪切波段,依据网格搜索的原 理给定不同的快剪切波偏振方向与慢剪切波延迟时 间参数,计算两水平分量的相关系数;把最大相关系 数所对应的一组各向异性参数作为初始解,通过质 点运动对初始解进行检验,得到最终的分裂参数值。 图 2 为经 1~15 Hz 带通滤波后的地震波三分向记 录,图 3 为剪切波分裂结果矫正。

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,采用公式(1)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 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 说明快剪切波偏振方向越集中<sup>[25-27]</sup>:



(左:剪切波质点运动轨迹、NS向记录、EW 向记录;右:慢剪切波延时矫正与快剪切波 偏振方向矫正后的质点运动轨迹、快剪切波 F、慢剪切波 S;S<sub>1</sub> 与 S<sub>2</sub> 分别代表快剪切 波与慢剪切波,圆圈与箭头分别表示快、慢剪切波的位置。)

图3 剪切波分裂分析检验

Fig. 3 The check of shear-wave splitting analysis.

式中 *n* 为台站计算出的地震次数;θ<sub>i</sub> 为每次地震的 快剪切波偏振方向。

根据剪切波窗口、波形质量和扩大数据选择的 条件,最后得到东南地区7个地震台站319个有效



剪切波分裂参数结果(表 1)。图 4 给出了甘东南地 区各台站快剪切波偏振方向等面积投影结果,线段 方向代表各个台站每条有效记录的快剪切波偏振方 向。



Fig. 4 The spatial distribution of fast shear-wave polarizations at 7 stations in research area.

台站名称	台站代码	经度/℃	纬度/°N	记录条数	快剪切波 偏振方向	偏振方向/° 标准差/±°	R值
成县台	CXT	105.76	33.73	14	129.18	25.88	0.91
迭部台	DBT	103.23	34.06	96	111.82	19.09	0.95
合作台	HZT	102.91	35.01	19	141.96	43.06	0.79
岷县台	MXT	104.02	34.43	22	105.01	30.10	0.88
文县台	WXT	104.68	32.95	89	116.20	44.83	0.74
天水台	TSS	105.90	34.48	19	75.33	43.46	0.76
武都台	WDT	104.99	33.36	60	27.38	24.06	0.73

表1 甘东南地区7个台站参数及剪切波分裂参数

# 3 讨论

利用接收函数<sup>[28-29]</sup>得到的研究结果显示,甘东 南地区地壳剪切波速度结构存在明显的横向不均匀 性。甘东南地区错综复杂的断裂分布造成了该地区 地壳应力场的局部区域性特征。

临潭一宕昌断裂是一条 NWW 走向的晚更新 世一全新世活动断裂,HZT 台位于该断裂的北端, 其快剪切波偏振优势方向为 NW 向,据接收函数<sup>[28]</sup> 得到的结果该台站下方地壳厚度达到了 55 km,在 区域应力场的作用下,快剪切波偏振优势方向与区 域主压应力方向一致。而 MXT 则几乎在该断裂带 上,快剪切波偏振具有明显的 NWW 优势方向,与 断裂走向一致。认为,在近 EW 向主压应力作用 下,临潭一宕昌断裂的左旋活动控制着 MXT 台及 附近的地壳各向异性。

迭部一带分布着包含了多条 NWW 向的弧形

断裂,如迭部一白龙江北缘、南缘断裂。研究得到的 DBT 台的优势方向为 NWW 向,快剪切波偏振具有 很高的一致性,与利用地应力<sup>[23]</sup>在大水测点(N118° E),尕海测点(N93°E)的测量结果非常接近,表明了 DBT 台及其附近主压应力方向为 NWW 向。

WDT 和 WXT 二台所处地理位置特殊,几条 NWW 走向的断层与 NEE 走向的断层交汇于此,地 质构造复杂,地震活动强烈,曾经发生 1879 年武都 8.0 级大震和 2006 年文县 5.0 级地震。两个台站 快剪切波偏振图象显示,快剪切波偏振方向有一定 的离散性。根据断裂交界以及断裂的拐点处是应力 比较多变的地方<sup>[30]</sup>,表明这两个台站周围局部区域 的主压应力方向比较复杂,也进一步证明了快剪切 波偏振方向有很强的局部区域性。

礼县一罗家堡断裂带晚更新世以来有过明显活动,为1654年天水8.0级地震的发震构造。TSS的

优势偏振方向为 NEE,与礼县一罗家堡断裂走向一致。CXT 位于徽成盆地南缘,其优势偏振方向虽有 点离散但主要为 NW 方向,似乎没有受到徽成盆地 南缘断裂的影响,与该区域的主压应力近似一致。

从图 4 对各个台站快剪切波偏振方向的分布发现,位于活动断裂上(或附近)的台站其快剪切波偏 振优势方向与断层走向较为一致,在地质结构比较 复杂的区域台站的快剪切波方向具有一定的离散 性<sup>[4,6]</sup>。统计分析甘东南地区 7 个台站快剪切波偏 振方向(图 5),平均偏振方向为 103.53°±32.91°, 与区内主压应力方向近似一致。据此推断该区域地 壳介质各向异性的方向与台站周边主要走滑断裂的 走向基本一致,表明在北东向构造应力和东部稳定 块体阻挡的共同作用下,该地区的区域应力场发生 了较大的方向改变。



## 图5 甘东南地区7个台站快剪切波偏振方向 等面积投影玫瑰图

- Fig. 5 Equal-area project rose diagram of fast shear-wave polarizations of 7 stations in southeastern Gansu province.
- 4 结论

甘东南地区是印度板块北东向推挤引起青藏块 体强烈变形的前缘区,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 文采用 SAM 方法,根据甘肃数字地震台网在 2001 -2008 年期间记录的地震波形资料,通过剪切波分 裂的研究,得到了对甘东南地区地壳介质各向异性 的初步认识。

(1)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。甘东南地区 7 个台站快剪切波平均偏振方向为 103.53°±32.91°, 对比 GPS 资料<sup>[21]</sup>、地应力观测<sup>[23]</sup>和震源机制<sup>[31]</sup>得 到的最大主压应力方向具有很好的一致性。因此快 剪切波平均偏振方向是区域应力环境一个很好的反 映。

(2)位于活动断裂上的台站的快剪切波偏振优 势方向与活动断裂走向和区域主压应力方向一致, 如 TSS、MXT、DBT 和 CXT 台。离开活动断裂的 台站,由于区域应力场的作用,快剪切波偏振优势方 向与区域主压应力方向一致,如 HZT。复杂的地质 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,或造成快剪切 波偏振较为离散或出现多个优势方向的现象,如 WDT 和 WXT 台。研究表明,甘东南地区的台站快 剪切偏振方向既受到区域构造背景应力环境的作 用,又受到局部构造带的制约,是两者共同作用的结 果。

致谢:本研究的数据分析是在 SAM 软件上计 算完成。感谢 2010 年中国地震局访问学者计划的 支持!感谢专家审稿过程提出的意见和建议!

#### [参考文献]

- [1] Crampin S, Evans R, Atkinson B K. Earthquake prediction: A new physical basis [J]. Geophys. J. R. Astron. Soc., 1984, 91:331-347.
- [2] 刘希强. 剪切波分裂中的快慢波识别方法[J]. 西北地震学报, 1992,14(4):17-24.
- [3] 高原,郑斯华,孙勇. 唐山地区地壳裂隙各向异性[J]. 地震学 报,1995,17(3):283-293.
- [4] 高原,郑斯华,周蕙兰. 唐山地区快剪切波偏振图像及其变化[J]. 地球物理学报,1999,42(2):228-232.
- [5] 石玉涛,高原,吴晶,等.云南地区地壳介质各向异性:快剪切波 偏振特性的初步研究[J].地震学报,2006,28(6):574-585.
- [6] 吴晶,高原,蔡晋安,等.华夏地块东南部地壳地震各向异性特 征初步研究[J].地球物理学报,2007,60(6):1748-1756.
- [7] Crampin S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic[J]. Geophys. J. R. Astr. Soc. ,1978,53:467-496.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王培德, Klinge K, Kruger F, 等. 波形极相似的地震丛集中剪 切波分裂的变化[J]. 地震学报, 2000, 22(5): 501-508.
- [11] 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.
- [12] 赖院根,刘启元,陈九辉,等.首都圈地区横波分裂与地壳应力 场特征[J].地球物理学报,2006,49(1):189-196.

- [13] 石玉涛,高原,赵翠萍,等.汶川地震余震序列的地震各向异性 [J]. 地球物理学报,2009,52(2):398-407.
- [14] Gao Y, Crampin S. Observations of stress relaxation before earthquake[J]. Geophys. J. Int., 2004. 157(2):578-582.
- [15] Tang C, Rial J A, Less J M. Shear-wave splitting; a diagnostic tool to monitor fluid pressure in geothermal fields [J]. Geophys. Res. Lett., 2005, 32; L21317, doi: 10. 1029/ 2005GL023551.
- [16] 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):11-21.
- [17] 高原,刘希强,梁维,等.剪切波分裂系统分析方法(SAM)软 件系统[J].中国地震,2004,20(1);101-107.
- [18] 高原,石玉涛,梁维,等. 剪切波分裂系统分析方法 SAM (2007)——软件系统[J].中国地震,2008,24(4);345-353.
- [19] 张培震,邓启东,张国民,等.中国大陆的强震活动与活动地块 [J].中国科学(D辑),2003,33(增刊):12-20.
- [20] 袁道阳,张培震,刘百篪,等.青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J].地质学报,2004,78(2):270-278.
- [21] 江在森,马宗晋,张希,等. GPS 初步结果揭示的中国大陆水 平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报,2003,46(3):352-358.
- [22] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等.中国大陆及邻区现代构造应力场

分区[J]. 地球物理学报,2004,47(4):654-662.

- [23] 吴满路,马寅生,张春山,等.兰州至玛曲地区地应力测量与现 今构造应力场特征研究[J].地球物理学报,2008,51(5): 1468-1474.
- [24] 石玉涛,高原,吴晶,等.剪切波分裂系统 SAM(2007)——区 域地震台网资料应用实例[J].中国地震,2008,24(4):354-361.
- [25] Davis J C. Statistics and Data Analysis in Geology[M]. Hoboken N. J. : John Wiley, 1986:649.
- [26] Mardia K V, Jupp P E. Directional Statistics [M]. Hoboken N. J. ; John Wiley, 2000; 429.
- [27] 马宏生,张国民,刘杰,等.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,2007,29(2):130-141.
- [28] 李永华,吴庆举,安张辉,等.青藏高原东北缘地壳S波速度结构与泊松比及其意义[J].地球物理学报,2006,49(5):1359-1368.
- [29] 安张辉,吴庆举,周民都,等.用接收函数反演甘肃测震台网下 方的S波速度结构[J].西北地震学报,2006,28(3):263-267.
- [30] 李群芳.不同力源作用下云南中西部构造和应力场特征[J]. 西北地震学报,1992,14(2):72-78.
- [31] 徐纪人,赵志新,石川有三.中国大陆地壳应力场与构造运动 区域特征研究[J].地球物理学报,2008,51(3):770-781.