

祁连山—六盘山地震带地壳各向异性特征初步研究*

潘宇航¹, 程建武^{1✉}, 鲍子文², 蒲 举¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 安徽省地震局, 安徽 合肥 230000)

摘要: 利用2010年1月至2015年12月甘肃省测震台网的地震波形资料, 使用SAM方法, 获得了祁连山—六盘山地震带地区21个台站的快剪切波偏振方向和慢剪切波的时间延迟, 分析讨论了该地震带地壳介质各向异性空间分布特征。结果表明: 大部分台站的快波偏振优势方向明显与区域内的主压应力方向一致, 呈近NE—NEE方向, 表明来自印度板块和欧亚板块的NNE或NE向的水平挤压应力控制了祁连山—六盘山地震带的中上地壳应力场。但局部区域的快剪切波偏振方向与断裂走向一致, 表明该区各向异性具有差异性, 主要是由复杂的活动构造所造成。

关键词: 地壳各向异性; 剪切波分裂; 偏振; 主压应力

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)01-0122-07

0 引言

祁连山—六盘山地震带处于印度和欧亚板块碰撞挤压的转折过渡区域, 位于阿拉善地块、鄂尔多斯地块与青藏块体的交汇地带。该地区属于构造运动比较活跃的区域, 主要受到NE向的现代构造应力场的作用, 使之产生强烈的地壳变形和断裂活动, 地震活动强烈, 地震灾害较为严重(邓起东等, 2002)。因此对祁连山—六盘山地震带地区开展剪切波分裂的研究有助于进一步认识区域地壳应力场、地质构造特征和地震活动性。

一般来说, 地壳和上地幔介质普遍存在地震各向异性。在应力作用下, 引起地壳各向异性的主要原因是由于地壳中充满了大量定向排列的微裂隙, 简称EDA (Extensive—dilatancy Anisotropy) (Crampin 1981; Crampin, Booth, 1985)。剪切波分裂是研究地壳介质各向异性和区域构造应力状态的有效手段之一 (Crampin *et al.*, 2002; 高原等, 2008a, b; 吴晶等, 2010)。通常来说, 当地震波在各向异性介质传播时, 剪切波会分裂成2个近似相互垂直的子波, 即快剪切波和慢剪切波。快剪切波的优势方向与裂隙走向一致, 即与原地主压应力方向一致 (Crampin, 1984), 因此快剪切波的

偏振方向可以较好地反映出研究区域内构造应力的方位 (李金等, 2015); 慢剪切波的时间延迟不仅能反映介质各向异性的强度, 更能够描述区域应力环境的动态特征 (Gao *et al.*, 1998, 2004; Crampin *et al.*, 1999; 丁志峰等, 2008)。

目前, 很多学者使用各种地震学方法对该地区壳幔结构、变形模式以及各向异性进行了大量研究 (常利军等, 2008; 张辉等, 2012; 王琼等, 2013; Xu *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2015; 姜永涛等, 2015)。但利用“十五”项目的密集台网数据, 针对祁连山—六盘山地震带及邻区更大范围内开展区域地壳各向异性的研究还有待进一步深入探讨。本文利用2010年1月至2015年12月甘肃省测震台网“十五”宽频带数字地震波形资料, 基于剪切波分裂原理, 计算了祁连山—六盘山地震带地区21个台站下方的地壳各向异性参数, 分析了该区地壳各向异性的分布特征, 讨论了地壳各向异性与地壳内部构造特征和区域应力分布关系和内在联系。

1 构造背景概况

祁连山—六盘山地震带西起甘肃昌马, 东至陕西宝鸡, 长约1 200 km, 在青藏块体东北部的边

* 收稿日期: 2016-08-04.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划攻关项目 (XH15042) 和国家自然科学基金 (41440030、41304048) 联合资助.

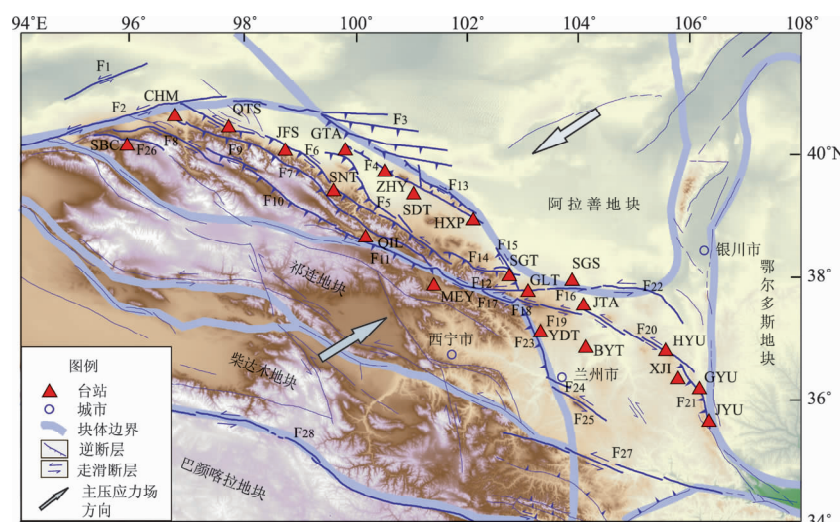
✉ 通讯作者: 程建武 (1971-), 博士, 高级工程师, 主要从事活动构造、地震预报的理论与应用研究.

E-mail: Chengjw71@163.com.

缘呈北西向展布,是青藏高原最年轻的构造带之一。由于长期受到印度板块与欧亚板块的碰撞挤压作用,该地震带不断遭受构造隆升并逐渐成为高原的一部分 (Tapponnier *et al*, 2001; 邓起东等, 2002; 柴炽章等, 2003; 袁道阳等, 2004)。第四纪以来,祁连山—六盘山地震带的构造活动比较强烈,是中上地壳介质最易形变和流动的地区,其内部发育着多条 NWW、NW、NNW 向的断层 (图 1)。区域内不同走向的断裂衔接相交,构成了该区域复杂的孕震环境和构造背景。本区域内的地震活动频度高、震级大、地震灾害严重。自

1900 年以来,区内发生了 1920 年海原 8.5 级、1927 年古浪 8.0 级、1932 年昌马 7.6 级、1954 年山丹 7.3 级等地震。最近的一次是 2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震。

根据震源机制解资料 (许忠淮, 2001; 张辉, 2007), 得到祁连山—六盘山地震带现代构造应力场的主压应力轴方向为 NE 至 NEE 向,区域内地震震源机制类型主要是走滑型和逆断型 (崔效锋等, 2005)。水压致裂地应力的测量结果也显示祁连山—六盘山地震带现今地壳应力场的主压应力方向为 NE 至 NEE 向 (王学潮等, 2000)。



F₁: 三危山断裂; F₂: 阿尔金断裂; F₃: 北大山断裂; F₄: 龙首山南缘断裂; F₅: 榆木山断裂; F₆: 祁连山北缘断裂; F₇: 昌马断裂; F₈: 大雪山北缘; F₉: 热水大坂—黑大坂断裂; F₁₀: 阴凹曹断裂; F₁₁: 托莱山断裂; F₁₂: 冷龙岭断裂; F₁₃: 龙首山北缘断裂; F₁₄: 皇城—双塔断裂; F₁₅: 武威—天祝断裂; F₁₆: 天桥沟—黄羊川断裂; F₁₇: 金强河断裂; F₁₈: 毛毛山断裂; F₁₉: 老虎山断裂; F₂₀: 海原断裂; F₂₁: 六盘山断裂; F₂₂: 香山—天景山断裂; F₂₃: 庄浪河断裂; F₂₄: 金城关断裂; F₂₅: 马街山断裂; F₂₆: 野马河断裂; F₂₇: 西秦岭北缘断裂; F₂₈: 东昆仑断裂

图 1 祁连山—六盘山地震带台站分布和构造背景图

Fig. 1 Distribution map of seismic stations and tectonic setting in Qilian Mountains – Liupan Mountains seismic belt

2 数据处理和实例分析

本文采用剪切波分裂系统分析 (SAM) 方法 (高原等, 2004), 研究祁连山—六盘山地震带地壳介质的各向异性特征。该方法是在相关函数的基础上提出的一种用于剪切波分裂分析的系统分析方法, 具有自我检验的特点, 可提高分析结果的可靠性和稳定性, 其具体原理和方法可参考高原和郑斯华 (1994), 高原等 (2008a, b), 石玉涛等 (2008) 等。

本文使用了甘肃省测震台网 21 个台站所记录的 2010—2015 年祁连山—六盘山地震带区域内的 27 855 次近场小震的波形数据。在泊松比为 0.25 的情况下, 剪切波窗口一般为约 35° 的入射角 (Crampin, Pacock, 2005), 但是由于地壳顶部低速沉积层的存在, 有效的剪切波窗口一般能拓宽到 45° ~ 50° (Gao *et al*, 1998; Crampin, Pacock, 2005), 在此基础上挑选出波形质量好、可用于近震剪切波分裂分析的波形数据。另外, 剪切波分裂计算还要求选取的数据具有较高的信噪比, 因此先对数据进行了带通滤波处理, 滤波

范围为 1 ~ 15 Hz。图 2 为采用 Butterworth 滤波器滤波后的地震三分向记录, 2012 年 9 月 2 日 9 时 46 分 M_L 1.9 地震的震源深度为 6 km, 震中距为 6.25 km。从图中可以看到, 该地震剪切波清晰

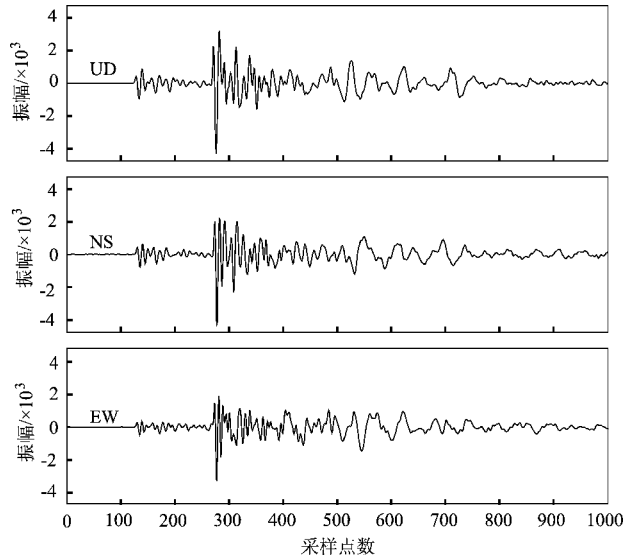


图 2 四个山 (SGS) 台记录到的 2012 年 9 月 2 日 M_L 1.9 地震的波形

Fig. 2 Waveform of the M_L 1.9 earthquake on Sep. 2, 2012 recorded by SGS Station

可见, 波形信噪比较高。同时, 为了保证截取 S_g 波段数据的准确性和计算结果的可靠性, 避免自动拾取震相对结果的影响, 文中所有的 S_g 波震相都是人工拾取, 同时删除震相不清晰的事件。经统计, 大多数地震事件的震源深度在 5 ~ 20 km 之间 (图 3)。

图 4 分别给出剪切波偏振图和偏振分析检验图的实例。从图 4a 中可以看出 2 列剪切波的质点运动轨迹并不是线性的, 在经过波形旋转和时间延迟校正之后, 2 列剪切波的偏振图表现为接近线性的特征 (图 4b), 这表明计算结果是比较可靠的。

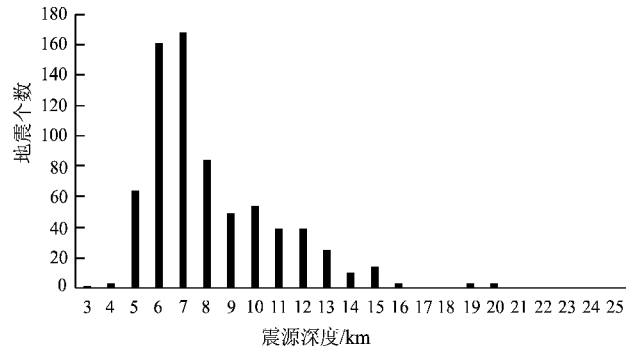
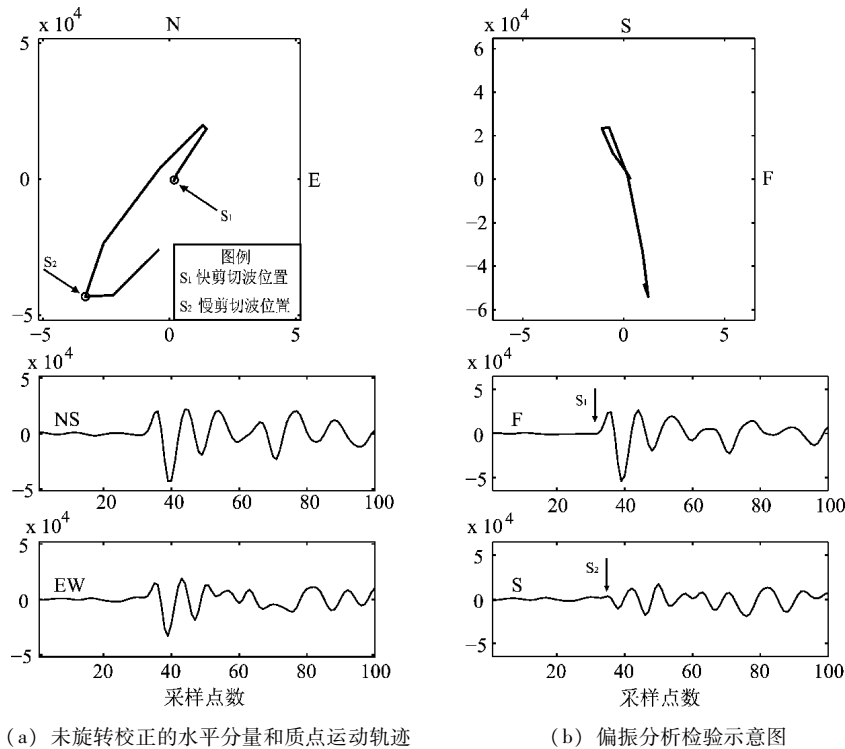


图 3 地震个数—震源深度统计图

Fig. 3 Histogram of earthquake number focal depth



(a) 未旋转校正的水平分量和质点运动轨迹

(b) 偏振分析检验示意图

图 4 剪切波分裂分析示意图

Fig. 4 Sketch map of shear wave splitting analysis

表 1 研究区内台站下方地壳剪切波分裂结果
Tab. 1 The results of shear – wave splitting beneath
the stations in the study area

台站 名称	台站 代码	有效记录 条数	偏振方向/ (°)	时间延迟/ (ms · km ⁻¹)
泾源	JYU	2	170	0.96 ± 0.68
固原	GYU	8	125 ± 12.25	1.23 ± 0.94
西吉	XJI	2	40 ± 5	0.90 ± 0.26
海原	HYU	10	111 ± 14.63	1.10 ± 0.82
景泰	JTA	46	107 ± 13.84	1.94 ± 0.88
		22	38 ± 9.42	1.75 ± 0.97
门源	MEY	2	145	1.29 ± 0.30
古浪	GLT	8	156 ± 17.28	1.43 ± 1.01
		10	36.5 ± 7.43	1.06 ± 0.59
祁连	QIL	9	39 ± 5.98	1.08 ± 0.55
石包城	SBC	6	26.5 ± 7.04	0.96 ± 0.43
石岗	SGT	124	46.5 ± 13.24	1.46 ± 0.80
		51	132 ± 17.72	1.44 ± 0.89
昌马	CHM	9	42 ± 8.5	0.67 ± 0.54
肃南	SNT	11	138.5 ± 13.68	1.23 ± 0.51
		10	38 ± 12.04	0.817 ± 0.52
金佛寺	JFS	7	33 ± 2.78	1.66 ± 0.75
		6	122 ± 3.82	1.70 ± 0.60
青头山	QTS	7	126 ± 3.5	1.61 ± 0.82
四个山	SGS	33	37 ± 11.05	1.81 ± 0.88
		18	91 ± 9.46	1.99 ± 1.26
河西堡	HXP	30	59 ± 13.5	1.32 ± 0.48
山丹	SDT	37	42 ± 17.8	1.80 ± 1.08
张掖	ZHY	9	59 ± 7.24	1.30 ± 0.83
高台	GTA	25	49 ± 19.05	1.652 ± 0.61
永登	YDT	29	147 ± 10.53	1.42 ± 0.93
		22	49 ± 11.42	1.66 ± 0.80
白银	BYT	172	84 ± 28.55	1.78 ± 0.89

3 结果与分析

由研究区域内各台站快剪切波偏振方向的等面积投影玫瑰图（图 5）可以看出，祁连山—六盘山地震带的中部以及东西两侧的各向异性存在明显的分区特征。因此，可将研究区域粗略地划分为 4 个区域：西缘、中西段、中东段和东缘。从整体上来说，大部分台站的快剪切波偏振方向主要

显示为近 NE 方向，与前人研究结果（张辉等，2012；郭桂红等，2015）大体一致。

祁连山—六盘山地震带的西缘是阿尔金活动断裂切截祁连山诸构造的交汇区，中强震比较频繁，尤以 1932 年昌马地震著名。该区域平均快波偏振方向为 NE ($35.5^{\circ} \pm 10.88^{\circ}$)，平均快慢波时间延迟为 (0.79 ± 0.52) ms/km。SBC、CHM 台快剪切波偏振方向表现出较好的近 NE 向，研究结果显示该区域地壳介质主要受到区域主压应力场和阿尔金断裂走滑剪切的双重作用。

中西段地处河西走廊，是青藏块体向阿拉善地块应力传递的过渡区域，包括 QTS、JFS、SNT、QIL、MEY、GTA、ZHY、SDT、HXP 台。该区域发育多组近平行的断裂：龙首山南缘断裂、榆木山断裂、昌马断裂、祁连山北缘断裂等。根据剪切波分裂分析结果，该区域的快剪切波偏振方向为近 NE 向，平均偏振方向为 $46^{\circ} \pm 11.20^{\circ}$ 。但本区域内，位于冷龙岭断裂带北西方向的 MEY 台快波偏振方向为 NW 向，与断裂的走向斜交，因此可以推测 MEY 台下方快波偏振方向可能是受到局部构造和主压应力场的双重制约。整体上，该区域台站下方的快剪切波偏振方向一致性较高，表现与河西走廊的主压应力状态一致，受断层的影响较小。本研究认为，可能由于台站附近的断层对该地区地壳各向异性的影响较弱，区域主压应力场起主导作用，也从另一个侧面暗示了该区域在深部构造变形达到一定均衡性，说明该研究区域的应力场分布具有一定的均匀性和一致性。

中东段处于青藏块体、阿拉善地块和鄂尔多斯地块的交汇区域，位于陇中盆地西北缘，该区域地质条件复杂，多条断层发育，包括 NW 走向的海原断裂、NNW 走向的庄浪河断裂和皇城—双塔断裂、EW 走向的武威—天祝断裂等。其中，SGT、GLT、JTA、YDT 台的快剪切波平均偏振方向显示出 2 个优势方向：NE 向和 NW 向。快剪切波偏振方向的第一优势取向反映了该区域的水平主压应力方向，快剪切波偏振方向的第二优势取向揭示了 NWW 的局部构造意义，表明快波偏振方向受本区 NW 向断裂带的影响。例如，武威—天祝断裂和皇城—双塔断裂交汇部分的 SGT 台，其快剪切波偏振方向出现 NE 和 NW 两个优势方向，SGT 台

的第一优势方向 NE 向与区域构造应力背景一致 (谢富仁等, 2004), 而 NW 向的优势方向则受到了皇城—双塔断裂和武威—天祝断裂构造运动的影响。

东缘位于鄂尔多斯西南缘, 是海原断裂和六盘山断裂的衔接区域, 包括 JTA、HYU、XJI、GYU 台。根据区内各台站获得的剪切波分裂结果,

得到研究区内台站的优势偏振方向为近 NW 向。区域内 XJI 台的快剪切波的偏振方向与紧邻台站的快剪切波偏振方向差异较大, 显示出明显 NE 向, 导致这一现象的原因可能与 XJI 台所处的区域应力场环境有关。统计得到, 除 XJI 台之外, 研究区 IV 区的快剪切波的平均偏振方向为 $135^{\circ} \pm 8.96^{\circ}$, 平均慢剪切波时间延迟为 $(1.10 \pm 0.81) \text{ ms/km}$ 。

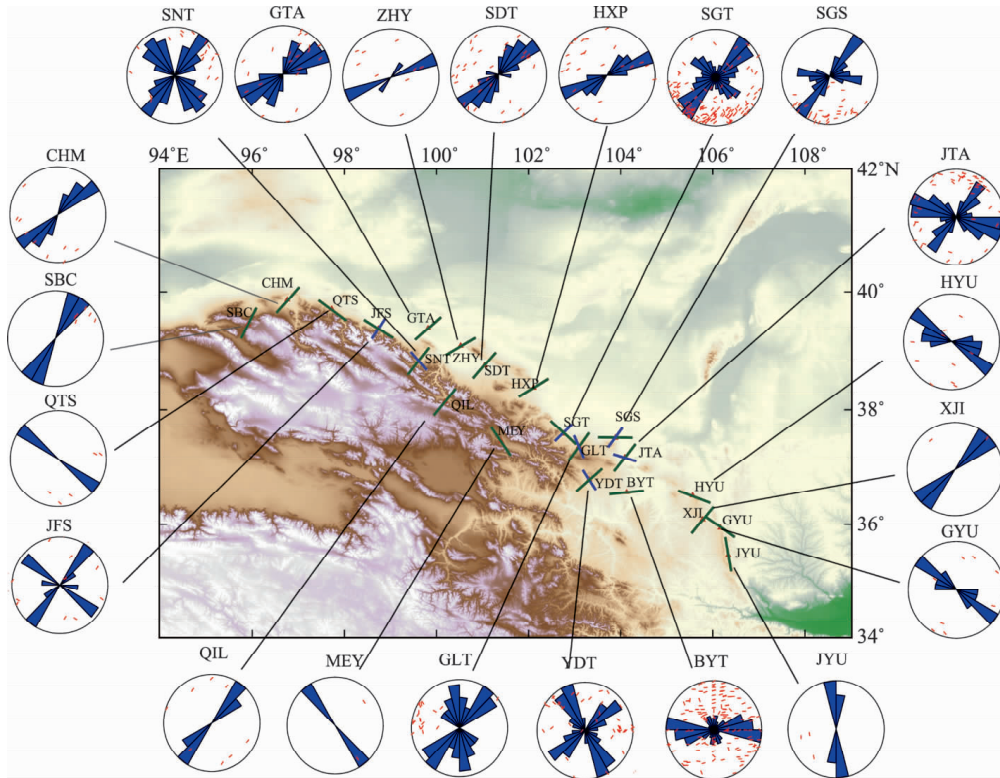


图 5 祁连山—六盘山地震带各台站快剪切波平均偏振方向的空间分布及其等面积投影玫瑰图
Fig. 5 Spatial distribution of average fast shear wave polarizations of stations in Qilian Mountains – Liupan Mountains seismic belt and their equal area project rose diagrams

4 结论

通过对祁连山—六盘山地震带地区 21 个台站的剪切波分裂的研究, 得到如下结论:

大部分台站的优势方向明显与区域内的主压应力的方向一致, 呈近 NE – NEE 向, 表明来自印度板块和欧亚板块的 NNE 或 NE 向的水平挤压应力控制了祁连山—六盘山地震带的中上地壳应力场。但局部区域的快剪切波偏振方向与断裂走向一致, 表明该区各向异性具有差异性, 主要是由活动构造影响造成的。研究区域快剪切波偏振方

向由西至东表现为: 西缘地区快剪切波偏振方向为近 NE 向, 产生各向异性的原因可能是区域主压应力场和阿尔金断裂走滑剪切的共同作用; 中西段快剪切波偏振方向与区域主压应力方向一致性较好, 受断层的影响较小, 推测该区域深部构造变形达到一定的均衡性, 进而使该区域应力场具有均匀性和一致性特征; 中东段快剪切波偏振方向则显示出复杂的分布, 对应了该地区受到多个地块互相作用、山区盆地交错出现、多条断裂相交的多重因素的制约, 使快剪切波偏振方向具有一定的离散性; 东缘区域快波偏振方向为近 NW 向, 在空间上具有明显的沿顺时针方向旋转的特征。

本研究使用的波形资料和地震目录由甘肃省地震局提供,中国地震局地震预测研究所高原研究员课题组提供SAM软件,北京大学冀战波博士、新疆维吾尔自治区地震局苏金波和中国科学院大学崔辉辉博士对本文给予了悉心指导与帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 柴炽章,马禾青,金春华. 2003. 祁连山—六盘山地震带中强地震活动特点及震前异常特征[J]. 西北地震学报,25(4):354-358.
- 常利军,王椿镛,丁志峰,等. 2008. 青藏高原东北缘上地幔各向异性研究[J]. 地球物理学报,51(2):431-438.
- 崔效锋,谢富仁,赵建涛. 2005. 中国及邻区震源机制解的分区特征[J]. 地震地质,27(2):298-307.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学,32(12):1020-1030.
- 丁志峰,武岩,王辉,等. 2008. 2008年汶川地震震源区横波分裂的变化特征[J]. 中国科学:地球科学,53(12):1600-1604.
- 高原,刘希强,梁维,等. 2004. 剪切波分裂系统分析方法(SAM)软件系统[J]. 中国地震,20(1):101-107.
- 高原,石玉涛,梁维,等. 2008a. 剪切波分裂分析系统 SAM(2007)——软件系统[J]. 中国地震,24(4):345-353.
- 高原,吴晶. 2008b. 利用剪切波各向异性推断地壳主压应力场:以首都圈地区为例[J]. 科学通报,53(23):2933-2939.
- 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,(增刊1):11-21.
- 郭桂红,张智,程建武,等. 2015. 青藏高原东北缘地壳各向异性的构造含义[J]. 地球物理学报,58(11):4092-4105.
- 姜永涛,张永志,吴然,等. 2015. 青藏高原东缘地应变演化特征[J]. 地震工程学报,37(1):152-158.
- 李金,高原,徐甫坤,等. 2015. 2014年5月30日盈江6.1级地震序列剪切波分裂研究[J]. 中国地震,31(2):245-252.
- 石玉涛,高原,吴晶,等. 2008. 剪切波分裂分析系统 SAM(2007)——区域地震台网资料应用实例[J]. 中国地震,24(4):354-361.
- 王琮,高原,石玉涛,等. 2013. 青藏高原东北缘上地幔地震各向异性:来自SKS、PKS和SKKS震相分裂的证据[J]. 地球物理学报,56(3):892-905.
- 王学潮,郭启良,张辉,等. 2000. 青藏高原东北缘水压致裂地应力测量[J]. 地质力学学报,6(2):64-70.
- 吴晶,高原,石玉涛,等. 2010. 基于地壳介质各向异性分析江苏及邻区构造应力特征[J]. 地球物理学报,53(7):1622-1630.
- 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报,47(4):654-662.
- 许忠淮. 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. 地震学报,23(5):492-501.
- 袁道阳,张培震,刘百麓,等. 2004. 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,78(2):270-278.
- 张辉,高原,石玉涛,等. 2012. 基于地壳介质各向异性分析青藏高原东北缘构造应力特征[J]. 地球物理学报,55(1):95-104.
- 张辉. 2007. 青藏高原东北缘基于小震震源机制解的区域应力场特征研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- CRAMPIN S, BOOTH D C. 1985. Shear - wave polarizations near the North Anatolian Fault - II. Interpretation in terms of crack - induced anisotropy[J]. Geophysical Journal International,83(1):75-92.
- CRAMPIN S, PACOCK S. 2005. A review of shear - wave splitting in the compliant crack - critical anisotropic Earth[J]. Wave Motion,41(1):59-77.
- CRAMPIN S, VOLT T, STEFANSSON R. 1999. A successfully stress - forecast earthquake[J]. Geophysical Journal International,138(1):1-5.
- CRAMPIN S, VOLYI T, CHASTIN S, et al. 2002. Indication of high pore - fluid pressures in a seismically - active fault zone[J]. Geophysical Journal International,151(2):1-5.
- CRAMPIN S. 1981. Review of wave motion in anisotropic and cracked media[J]. Wave Motion,3(4):343-391.
- CRAMPIN S. 1984. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,76(1):135-145.
- GAO Y, CRAMPIN S. 2004. Observations of stress relaxation before earthquakes[J]. Geophysical Journal International,157(2):578-582.
- GAO Y, WANG P, ZHENG S, et al. 1998. Temporal changes in shear - wave splitting at an isolated swarm of small earthquakes in 1992 near Dongfang, Hainan Island, southern China[J]. Geophysical Journal International,135(1):102-112.
- TAPPONNIER P, ZHIQIN X, ROGER F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau[J]. Science,294(5547):1671-1677.
- WU J, ZHANG Z, KONG F, et al. 2015. Complex seismic anisotropy beneath western Tibet and its geodynamic implications[J]. Earth and Planetary Science Letters,413:167-175.
- XU T, WU Z, ZHANG Z, et al. 2014. Crustal structure across the Kunlun fault from passive source seismic profiling in East Tibet[J]. Tectonophysics,627:98-107.

Seismic Anisotropy in the Crust in Qilian Mountains – Liupan Mountains Seismic Belt

PAN Yuhang¹, CHENG Jianwu¹, BAO Ziwen², PU Ju¹

(1. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

(2. *Earthquake Administration of Anhui province, Hefei 230000, Anhui, China*)

Abstract

In this study, the polarization of fast shear waves and time delay of low shear – wave beneath the 21 stations in this area were computed using shear – wave Splitting Analysis Method (SAM) based on the seismic data during January 2010 to December 2015, recorded by the Gansu Regional Digital Seismic Network. Meanwhile, we also analysed and discussed the spatial distribution of the crust anisotropy characteristics in Qilian Mountains – Liupan Mountains seismic belt. Due to the impact of the regional principal compressive stress and local geological structure, the spatial distribution of polarization of the fast shear – wave shows partly complicated and localized characteristics. The second predominant polarization direction of fast shear – wave is consistent with strike direction of fault in local area, which indicates discreteness and differences about anisotropy. However, the principle polarization direction, which is near NE direction, is obvious in Qilian Mountains – Liupan Mountains seismic belt.

Keywords: crustal anisotropy; shear – wave splitting; polarization; principal compressive stress