

孙楠, 高原, 赵小艳, 苏有锦, 刘庚, 邬成栋. 2017. 盈江  $M_S 6.1$  地震序列近场横波分裂研究. 地震学报, 39(1): 34-46. doi:10.11939/jass.2017.01.004.

Sun N, Gao Y, Zhao X Y, Su Y J, Liu G, Wu C D. 2017. Near-field shear-wave splitting of 2014 Yingjiang  $M_S 6.1$  earthquake sequence. *Acta Seismologica Sinica*, 39(1): 34-46. doi:10.11939/jass.2017.01.004.

# 盈江 $M_S 6.1$ 地震序列近场横波分裂研究<sup>\*</sup>

孙 楠<sup>1,2),\*</sup> 高 原<sup>3)</sup> 赵小艳<sup>2)</sup> 苏有锦<sup>2)</sup> 刘 庚<sup>3)</sup> 邬成栋<sup>2)</sup>

1) 中国合肥 230026 中国科学技术大学地球和空间科学学院

2) 中国昆明 650224 云南省地震局

3) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

**摘要** 使用横波分裂系统分析方法(SAM), 对2014年5月30日盈江  $M_S 6.1$  地震震区内多个近场流动台站记录到的大量波形数据进行横波分裂研究。研究结果表明, 盈江  $M_S 6.1$  地震序列的快S波偏振方向为近NS向, 与区域主压应力方向一致。主震发生后, 由于震源区应力状态的调整, 卡场台(KAC)快S波偏振方向发生逆时针偏转, 勐弄台(MNO)快S波偏振方向离散度减小, 并且由于受到研究区内断裂的影响, MNO台偏振方向较KAC台偏振方向更加离散。KAC台和MNO台的慢S波时间延迟均表现出主震发生前短时间内突然减小, 震后逐渐增大的变化特征, 这意味着临震前震源区地壳应力的释放和震后地壳应力的增强, 预示了后续余震的持续发生。地震序列时间延迟平均滑动曲线起伏振荡, 表明了余震的发生伴随着震源区地壳应力的不断调整。

**关键词** 盈江地震序列 横波分裂 偏振方向 时间延迟 断裂

doi:10.11939/jass.2017.01.004 中图分类号: P315.3<sup>+</sup>1 文献标志码: A

## Near-field shear-wave splitting of 2014 Yingjiang $M_S 6.1$ earthquake sequence

Sun Nan<sup>1,2),\*</sup> Gao Yuan<sup>3)</sup> Zhao Xiaoyan<sup>2)</sup> Su Youjin<sup>2)</sup>  
Liu Geng<sup>3)</sup> Wu Chengdong<sup>2)</sup>

1) School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China,  
Hefei 230026, China

2) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

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

**Abstract:** SAM (systematic analysis method of shear-wave splitting) has been applied to numerous waveform data recorded by near-field mobile seismic stations of Yingjiang  $M_S 6.1$  earthquake sequence occurred on May 30, 2014. The results showed that the polarization of fast shear-wave of the earthquake sequence was consistent with regional principal compressive stress of NS tren-

\* 基金项目 云南省地震局地震科技专项基金(ZX2015-03)、云南省地震局青年基金(13000)和云南省地震局10项重点工程(2014020101)共同资助。

收稿日期 2016-05-10 收到初稿, 2016-09-12 决定采用修改稿。

\* 通讯作者 e-mail: China\_yn\_sn@163.com



ding. The polarization of fast shear-wave has a counterclockwise deflection at the station KAC, and dispersion decrease at the station MNO due to the adjustment of stress state in seismic region after the main shock. Influenced by faults of the studied area, the polarization of fast shear-wave at the station MNO presents a more discrete state compared to that of KAC. The time-delays of slow shear-wave at the stations KAC and MNO both present the feature of sudden contraction before the main shock and increase after the event, which means release and enhancement of crustal stress before and after the earthquake, and also indicates constant occurrence of aftershocks. The oscillation of time-delay curves suggests that the occurrence of aftershocks is accompanied by continuous adjustment of crustal stress in seismic region.

**Key words:** Yingjiang  $M_s 6.1$  earthquake sequence; shear-wave splitting; polarization; time-delay; fault

## 引言

地壳介质中竖直平行排列的裂隙具有各向异性的特点,能使地震波在传播时发生横波(S波)分裂。Crampin(1984)曾提出“张性扩容”(也称“大范围扩容”)各向异性(extensive-dilatancy anisotropy, 简写为 EDA)理论来解释横波分裂现象,后发展为各向异性孔隙弹性(anisotropy poro-elasticity, 简写为 APE)模型,该模型认为:地壳上部广泛存在低纵横比的孔隙结构和充满流体的微裂隙,这些孔隙或裂隙在应力作用下沿一定优势方向排列,且优势排列方向与最小主压应力方向垂直。由于近地表的最小主压应力方向通常是水平向的,所以裂隙在地壳中呈竖直排列。同时裂隙的走向与最大水平主压应力方向一致,因此从本构关系上讲,定向裂隙的存在使地壳介质产生方位各向异性,导致S波在地壳中传播时分裂成快S波和慢S波,其中快S波的偏振方向与最大水平主压应力方向基本一致(石玉涛等,2006)。横波分裂方法亦成为研究地壳介质各向异性的有效手段。

大量研究结果表明:快S波的偏振方向能够反映地震台站下方地壳的主压应力方向(Crampin, 1978; 高原等, 1996; 吴晶等, 2007; 郑秀芬等, 2008; 刘庚等, 2015),可以用于研究区域地壳应力场特征;慢S波时间延迟对介质中裂隙的物理特性和流体特性的变化非常敏感,而震前应力释放会使地壳中微裂隙的几何形态发生变化,因此慢S波时间延迟可在一定程度上反映震前应力积累和临震前应力释放的动态过程(高原等, 2004a; Gao, Crampin, 2004)。若台站位于断裂上,其快S波偏振方向往往与断裂走向一致(Crampin *et al*, 2003; 吴晶等, 2007);而断裂交界及断裂拐点处应力多变,位于此处的台站其快S波偏振方向比较复杂离散(石玉涛等, 2006; Gao *et al*, 2011, 2012)。当台站距离断裂较远时,其下方原地主压应力方向更趋向于区域应力场方向,受断裂影响较小(Mizuono *et al*, 2005)。2008年汶川地震以来,对强震余震序列的多次横波分裂特征的研究显示,震源区地壳应力强度在主震后增大,但随着余震活动导致的应力释放,地壳应力在地震后期逐渐减小,这也揭示了主震和余震发生过程中区域应力场的变化特征(丁志锋等, 2008; 常利军等, 2010, 2015)。因此,利用横波分裂参数(快S波偏振方向和慢S波时间延迟)的变化特征探究介质各向异性的强弱和区域应力状态的变化,监测与地震活动相关的应力变化,对研究地震发生的机理和地震活动的应力背景有重要意义(Crampin *et al*, 2003; Gao,

Crampin, 2008; 刘莎等, 2014).

云南地区位于青藏高原东南部, 受欧亚板块和印度板块的强烈挤压, 地质构造复杂。石玉涛等(2006)对云南地区快 S 波偏振特性的研究结果表明, 大部分台站的快波偏振优势方向为近 NS 或 NNW 向。吴建平等(2001)研究认为云南地区 S 波速度结构具有很强的横向不均匀性, 复杂的地质构造背景造成该地区地壳应力场的区域性, 尤其是滇西地区(杨国华等, 2003), 地壳运动强烈, 是强震活动的主要场所。2014 年盈江  $M_s 6.1$  地震即发生在滇西盈江地区, 该区域地质构造复杂, 地震活动频繁, 且人口相对密集, 因此对盈江地震的深入研究具有明显意义。李金等(2015)通过单个台站记录的数据对盈江地震序列横波分裂特征的研究结果表明, 主震发生前快 S 波的偏振方向与区域主压应力方向一致。本文使用多个流动台站的波形数据, 详细分析了盈江  $M_s 6.1$  地震在主震发生前、后及强余震发生前快 S 波偏振方向和慢 S 波时间延迟的变化信息, 以期研究震区内的应力分布特征, 探讨横波分裂方法在该区域地震活动研究中的可行性。

## 1 盈江 $M_s 6.1$ 地震序列

据中国地震台网中心测定, 2014 年 5 月 24 日 4 时 49 分云南省德宏傣族景颇族自治州盈江县(25.0°N, 97.8°E)发生  $M_s 5.6$  地震, 5 月 30 日 9 时 20 分再次发生  $M_s 6.1$  地震。截止到 2014 年 6 月 30 日, 盈江  $M_s 6.1$  地震序列共发生  $M_L \geq 2.0$  地震 2124 次, 其中  $M_L 2.0$ — $2.9$  地震 1884 次,  $M_L 3.0$ — $3.9$  地震 223 次,  $M_L 4.0$ — $4.9$  地震 14 次,  $M_L 5.0$ — $5.9$  地震 2 次,  $M_L 6.0$ — $6.9$  地震 1 次。该序列震中和台站分布如图 1 所示。

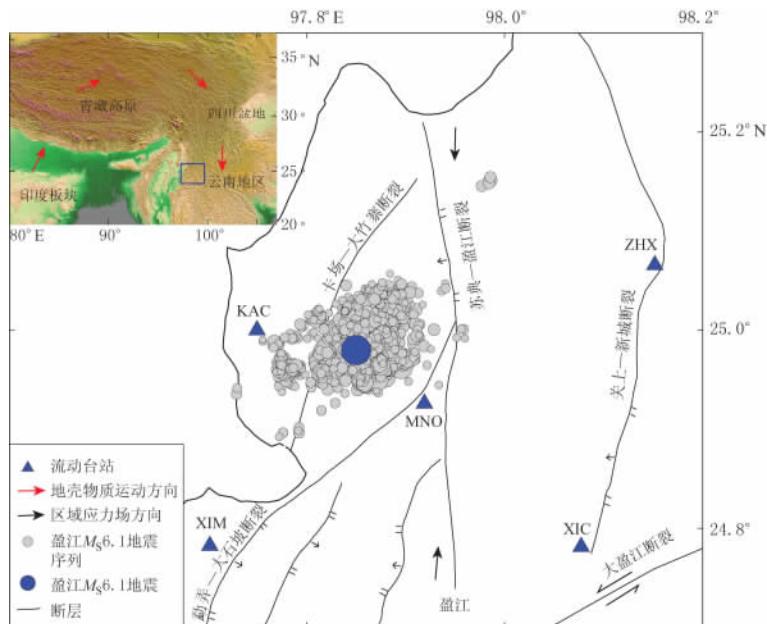


图 1 2014 年 5 月 24 日—6 月 30 日盈江  $M_s 6.1$  地震序列重定位分布图

黑色箭头表示区域应力场方向(引自吴建平等, 2004); 左上角小图为青藏高原东南缘, 蓝色矩形框标注范围为本文研究区域。

Fig. 1 Relocation distribution map of Yingjiang  $M_s 6.1$  earthquake sequence from May 24 to June 30, 2014

Black arrows denote the regional stress field direction (after Wu *et al.*, 2004); insert on top-left corner shows the south-eastern Tibetan Plateau, in which blue box shows the studied area

2014年5月24日盈江  $M_s 5.6$  地震发生后,云南省地震局在震区内先后架设了5个流动台,分别为卡场台(KAC)、勐弄台(MNO)、昔马台(XIM)、盏西台(ZHX)和新城台(XIC),其中:KAC台架设于距离该地震序列较近的卡场—大竹寨断裂西侧,MNO台架设于苏典—盈江断裂与勐弄—大石坡断裂交界处,两台均距离主震大约10 km;XIM台、ZHX台和XIC台分别架设于距离主震约30 km处。5个流动台记录到了大量的波形信息。

根据云南省防震减灾研究所地震地质研究室和云南省地震工程研究院提供的云南地震构造图显示(图1),2014年5月30日盈江  $M_s 6.1$  地震发生在NNE向的卡场—大竹寨断裂东侧,该断裂位于近年来盈江地区相对活跃的苏典—盈江断裂西侧,为第四纪断裂。2008年以来盈江地区已发生了多次中强地震,例如2008年3月21日  $M_s 5.0$  地震,8月20日  $M_s 5.0$  地震,8月21日  $M_s 5.9$  地震和2011年3月10日  $M_s 5.8$  地震,这些地震表明该区域新构造活动十分强烈。

## 2 研究方法和数据处理

本文采用基于横波分裂系统分析方法(systematic analysis method of shear-wave splitting,简写为SAM)(2003R)(高原等,2004b)而发展出的SAM(2007)(高原等,2008),研究横波分裂参数的变化特征。该方法是在相关函数法(高原,郑斯华,1994)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等3部分,具有自我检验的优点,所得结果稳定可靠(高原等,2008)。

采用云南省地震局预报研究中心提供的盈江  $M_s 6.1$  地震序列重定位数据(徐甫坤等,2015),通过计算每个流动台记录的地震事件的震源参数,并对符合S波窗约束条件的地震事件进行滤波处理,选取出信噪比高、S波信号清晰的波形,使用SAM方法进行横波分裂计算。为避免入射到地表时发生全反射,文中所选地震事件的波形须满足入射角 $\leq 45^\circ$  S波窗的约束条件。由于快、慢S波来自同一波源,因此经过时间延迟校正后,这两列波的初动时刻应该是一致的。以正北方向起始沿顺时针方向旋转为正,将台站记录到的两个水平分量作 $\alpha$ 度旋转,对新得到的两个分量再进行时间移动 $\Delta t$ ,计算旋转角度 $\alpha$ 方向上不同 $\Delta t$ 所对应的快、慢S波的互相关系数,求得最大相关系数所对应的各分量即为快S波偏振方向 $\alpha$ 和慢S波时间延迟 $\Delta t$ (石玉涛等,2008)。图2给出了利用SAM方法对KAC台记录的2014年5月31日  $M_{L3.2}$  地震进行分析的实例。

本文从盈江  $M_s 5.6$  地震后架设在震区内的5个流动台站所收集的2014年5月24日—6月30日的波形数据中,按照波形满足入射角 $\leq 45^\circ$  S波窗的条件,筛选出符合条件的可用于横波分裂分析的有效数据(表1)进行SAM计算。由于XIM台、ZHX台和XIC台距离震源区相对较远,S波窗口内的有效记录仅有两条或更少,不足以研究其慢S波时间延迟的变化情况。所以,本文主要对有效记录较多的KAC台和MNO台的数据进行详细分析。由此可以看出,距离震源区越近的台站,其记录到的S波窗口内的有效数据越多,表明震中距是影响横波分裂结果的一个重要因素,对后期台站布设具有重要的指导意义。

表1 本文所用的5个流动台站的有效数据

Table 1 Valid data from five stations used in this study

台站	代码	震中距/km	有效数据个数
卡场台	KAC	9.0	664
勐弄台	MNO	10.5	304
昔马台	XIM	28.0	2
新城台	XIC	31.5	0
盏西台	ZHX	32.5	1

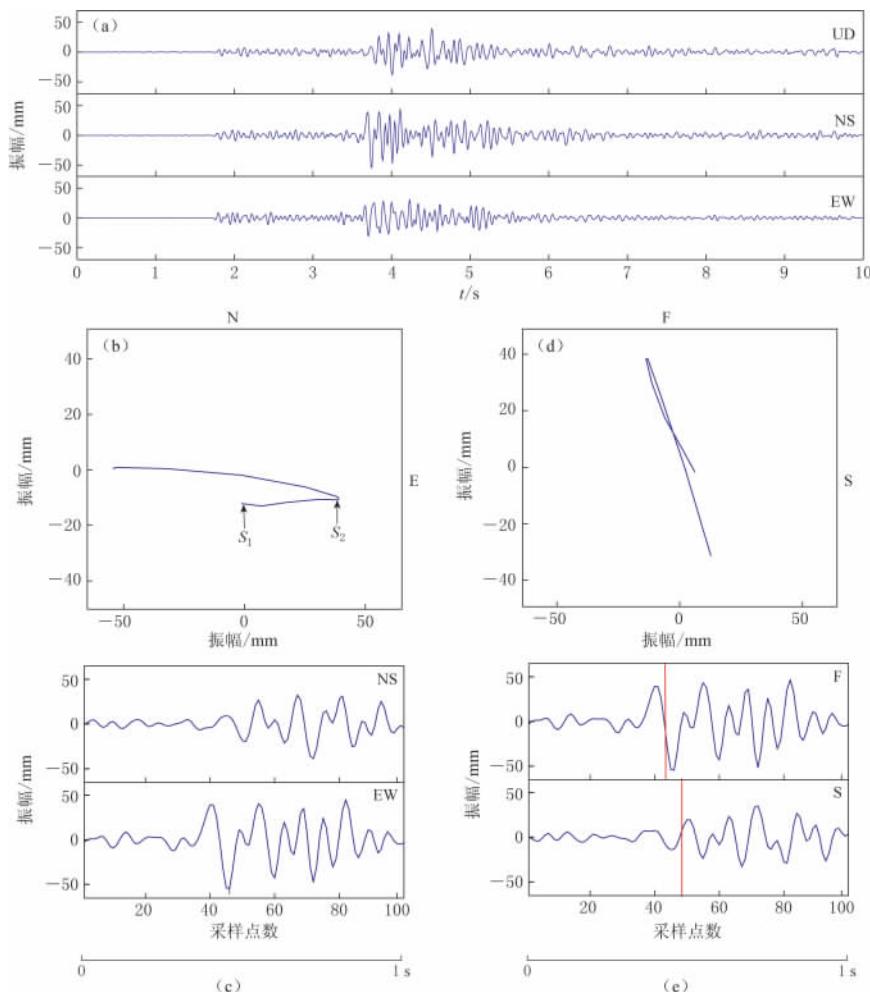


图2 KAC台站记录的2014年5月31日 $M_L$ 3.2地震的横波分裂分析过程

(a) 横波三分量波形; (b) 横波质点运动轨迹,  $S_1$ ,  $S_2$  分别表示快、慢 S 波到时; (c) NS 向和 EW 向波形记录; (d) 快(F)、慢(S)S 波质点运动轨迹图, 已消除时间延迟的影响; (e) 快、慢 S 波波形, 两条竖线之间的时间差为慢 S 波的时间延迟. 波形采样率为 100 sps(记为 100 Hz)

Fig. 2 Analysis process of SAM method of  $M_L$ 3.2 earthquake on May 31, 2014 recorded by station KAC  
 (a) Three-component waveforms of shear-wave; (b) Shear-wave particle moving track, where  $S_1$  and  $S_2$  represent the arrival of fast and slow shear-wave respectively; (c) NS and EW component waves; (d) Particle moving track of shear-wave with time delay removed; (e) Fast and slow shear-waves, where two vertical lines delineates the time-delay of slow shear-wave, sampling rate is 100 sps (recorded as 100 Hz)

### 3 计算结果

#### 3.1 快 S 波偏振方向及其变化特征

快 S 波偏振方向反映了台站及附近地区主压应力场的方向, 而断裂等复杂构造及强震的发生会对区域应力场的状态产生影响, 从而影响 S 波偏振方向. 本文拟从几方面分析讨论盈江  $M_S$ 6.1 地震序列的快 S 波偏振方向, 包括不同流动台站记录的地震事件的快 S 波偏振方向、主震发生前后偏振方向的变化及断裂等复杂构造.

通过对震区内 5 个流动台站记录的地震波形资料进行分析,得到了 KAC 台(664 次)、MNO 台(304 次)、XIM 台(2 次)及 ZHX 台(1 次)的快 S 波偏振方向。由偏振方向等面积极射投影图和等面积投影玫瑰图(图 3)可以看出,数据较多的 KAC 台和 MNO 台存在明显的偏振优势方向。

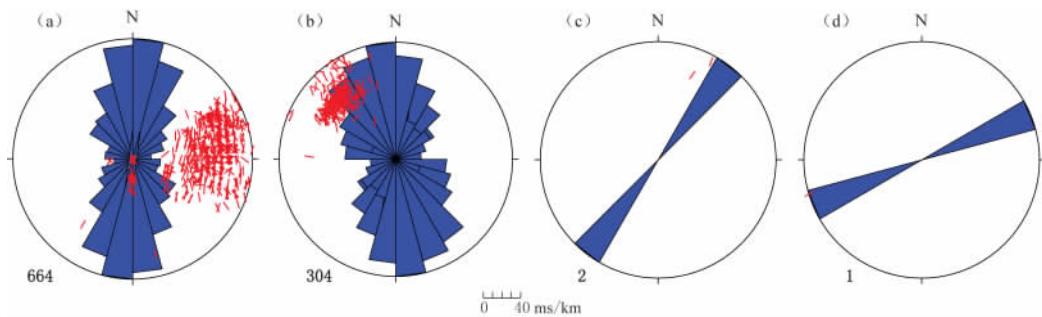


图 3 盈江  $M_S 6.1$  地震序列快 S 波偏振方向的等面积极射投影图和等面积投影玫瑰图

(a) KAC 台; (b) MNO 台; (c) XIM 台; (d) ZHX 台

左下角数字为各台站用于分析的有效地震事件次数, 短线方向为各台站记录

的每个地震事件的快 S 波偏振方向, 下同

Fig. 3 Equal-area polar projection diagram and projection rose diagram of fast shear-wave polarization of Yingjiang  $M_S 6.1$  earthquake sequence

(a) Station KAC; (b) Station MNO; (c) Station XIM; (d) Station ZHX

The bold figures on lower-left indicate the earthquake number used in study, and directions of short bars indicate the fast shear-wave polarization of earthquakes recorded by each station, the same below

KAC 台站记录的地震事件的快 S 波偏振优势方向近 NS 向(图 3a), MNO 台站记录的地震事件的快 S 波偏振优势方向为 NNW 向(图 3b), 该结果与云南地区大部分台站的快 S 波偏振优势方向主要为近 NS 或 NNW 向(石玉涛等, 2006; Shi *et al.*, 2012)的结论一致。盈江地区已有地震的震源机制解显示, 该区域整体以走滑地震为主, 区域主压应力场方向为近 NS 向(阚荣举等, 1983; 吴建平等, 2001, 2004; 钟继茂, 程万正, 2006; 赵小艳等, 2012; 张丽娜等, 2016), 与杨国华等(2003)利用 GPS 观测得到的滇西地区主压应变方向近 NS 向的结果一致。马文涛等(2008)认为川滇地区由于受青藏高原 SE 向的挤压作用, 使得该区域次级地块发生顺时针旋转, 同时保山—腾冲地块受缅甸弧 NE 向的下插挤压作用, 最终导致滇西地区形成近 NS 向的主压应力方向。由横波分裂计算得到的盈江地震序列的快 S 波偏振方向与 GPS 观测到的主压应变方向一致, 亦与所在区域主压应力场方向相吻合。

XIM 台记录到两次有效地震事件, 其快 S 波偏振方向为 NE 向(图 3c), 与台站附近 NE 向的勐弄—大石坡断裂走向一致。ZHX 台位于关上—新城断裂的拐点处, 记录到一次有效地震事件, 其快 S 波偏振方向为 ENE 向(图 3d)。

为了解盈江  $M_S 6.1$  地震序列的快 S 波偏振特征, 本文以  $M_S 6.1$  地震的发震时刻为节点, 分别讨论主震发生前地震序列(主震前序列)和余震序列的快 S 波偏振方向变化信息, 并进行对比分析。

KAC 台站位于盈江地震序列和苏典—盈江断裂西侧, 从等面积极射投影图和等面积

投影玫瑰图来看(图 4a, b), 主震前序列的快 S 波偏振优势方向为 N10.6°E(图 4a), 主震发生后, 余震序列(图 4b)向东扩散, 与主震发生前相比, 余震序列更靠近东侧的走向近 NS 向的苏典—盈江断裂, 其快 S 波偏振方向也更接近苏典—盈江断裂的走向, 转为 N3.5°W, 具体见表 2 中 KAC 台主震前序列和余震序列的平均偏振方向值. 受震源区应力调整的影响, 主震发生前、后 KAC 台快 S 波偏振方向发生了 14°逆时针旋转, 且越靠近苏典—盈江断裂, 得到的偏振方向与该断裂走向越一致.

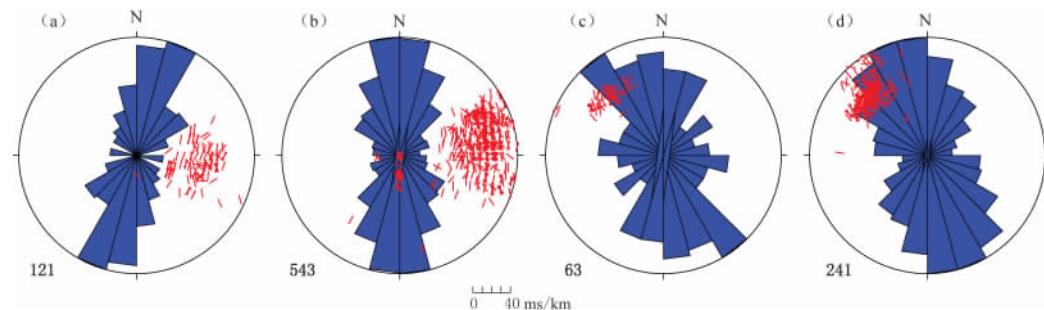


图 4 盈江  $M_s 6.1$  地震主震发生前、后地震序列快 S 波偏振方向的等面积极射投影图和等面积投影玫瑰图  
(a) KAC 台主震前序列; (b) KAC 台余震序列; (c) MNO 台主震前序列; (d) MNO 台余震序列

Fig. 4 Equal-area polar projection diagram and projection rose diagram of fast shear-wave polarization of Yingjiang  $M_s 6.1$  earthquake sequence before and after the main shock  
(a) Earthquake sequence before the main shock recorded by the station KAC; (b) Aftershock sequence recorded by the station KAC; (c) Earthquake sequence before the main shock recorded by the station MNO; (d) Aftershock sequence recorded by the station MNO

MNO 台站位于近 NS 向的苏典—盈江断裂与 NNE 向的勐弄—大石坡断裂交界处, 构造背景复杂. 从等面积极射投影图与等面积投影玫瑰图来看(图 4c, d), 主震前序列的快 S 波偏振方向较离散(图 4c), 平均偏振方向为 N13.5°W, 标准偏差为 38.6°; 主震发生后, 余震序列的快 S 波偏振方向(图 4d)相比主震发生前更集中, 平均偏振方向为 N15.0°W, 标准偏差减小为 33.8°. 主震发生前、后 MNO 台的快 S 波平均偏振方向变化很小, 但主震发生后快 S 波偏振方向的离散性略小于主震发生前, 可能是受到主震引起的震源区应力状态调整的影响.

为了深入研究主震发生后快 S 波偏振方向的变化特征, 本文对统计时段进行了细分, 将余震序列分成 3 个时间段, 即 5 月 30—31 日(a1 时段), 6 月 1—9 日(a2 时段)和 6 月 10—30 日(a3 时段), 初步探讨断裂对快 S 波偏振方向变化的影响. 表 2 列出了盈江  $M_s 6.1$  地震序列中 KAC 台和 MNO 台记录的主震前序列、整个地震序列、余震序列及余震序列 3 个阶段(a1, a2, a3)的快 S 波平均偏振方向与标准偏差情况.

MNO 台地处断裂交界处, 构造背景比 KAC 台复杂. 对比两个台站余震序列 3 个时段的快 S 波偏振方向等面积极射投影图和等面积投影玫瑰图(图 5)可知, KAC 台快 S 波偏振优势方向(图 5a)的一致性均比 MNO 台(图 5b)好. 再结合表 2 可知, 平均偏振方向除了在 a2 时段出现轻微的东向转动外, 均基本保持不变, 但 MNO 台在各时段的平均偏振方向的标准偏差均大于 KAC 台, 说明 MNO 台的快 S 波偏振方向更离散.

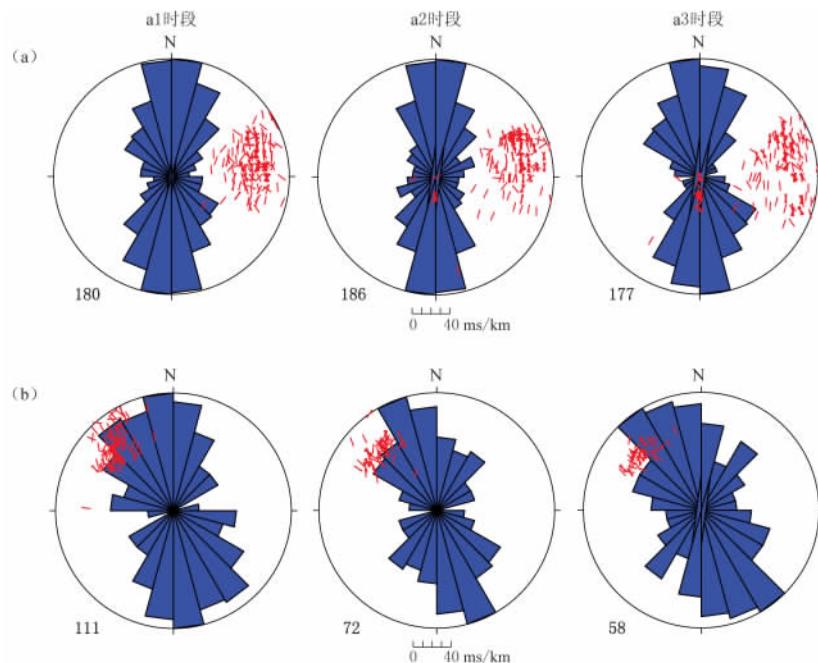


图 5 KAC 台(a)和 MNO 台(b)记录的盈江  $M_s 6.1$  地震余震序列 3 个时段快 S 波偏振方向等面积极射投影图和等面积投影玫瑰图

Fig. 5 Equal-area polar projection diagram and projection rose diagram of fast shear wave polarization of Yingjiang  $M_s 6.1$  aftershock sequence recorded at the stations KAC (a) and MNO (b) in time periods a1, a2 and a3

表 2 KAC 台和 MNO 台记录到的盈江  $M_s 6.1$  地震序列在不同时段的快 S 波偏振方向

Table 2 The fast shear-wave polarization of Yingjiang  $M_s 6.1$  earthquake sequence recorded by stations KAC and MNO in different time periods

地震序列	KAC 台		MNO 台	
	平均偏振方向/°	数据条数	平均偏振方向/°	数据条数
主震前序列	$10.6 \pm 26.6$	121	$-13.5 \pm 38.6$	63
整个盈江地震序列	$-0.9 \pm 28.0$	664	$-15.0 \pm 34.8$	304
余震序列	$-3.5 \pm 27.7$	543	$-15.0 \pm 33.8$	241
5月 30—31 日余震序列(a1)	$-2.6 \pm 28.8$	180	$-16.9 \pm 33.3$	111
6月 1—9 日余震序列(a2)	$0.8 \pm 27.1$	186	$-13.4 \pm 31.9$	72
6月 10—30 日余震序列(a3)	$-8.8 \pm 26.4$	177	$-16.5 \pm 37.7$	58

### 3.2 慢 S 波时间延迟

慢 S 波时间延迟随时间的变化反映了临震前地壳应力变化的动态特征 (Gao, Crampin, 2004), 由于时间延迟往往存在较高的离散度, 因此在研究慢 S 波时间延迟变化时通常采用滑动平均曲线来表征其变化特征。由于 XIM, ZHX 和 XIC 台记录的有效数据过少, 不足以说明其慢 S 波时间延迟的变化情况, 因此本文仅绘制了不同时段内 KAC 台和 MNO 台慢 S 波时间延迟滑动平均曲线并对时间延迟作归一化处理; 同时将盈江  $M_s 6.1$  地震序列分布图( $M-t$  图)列于下方作为比照参考, 以便更直观地反映地震发生前后时间延

迟滑动平均曲线的变化.

图6给出了KAC台和MNO台记录的地震事件的慢S波时间延迟滑动平均曲线和盈江 $M_s 6.1$ 地震序列 $M-t$ 图. 从图6a可以看出: 2014年5月30日盈江 $M_s 6.1$ 地震发生前, 滑动平均曲线上下波动, 临震前短时间内出现明显下降, 而余震序列的滑动平均曲线呈现多次起伏振荡. 通过计算得到整个地震序列的慢S波时间延迟平均值为3.8 ms/km, 主震发生前时间延迟平均值为3.4 ms/km, 主震发生后时间延迟平均值为3.8 ms/km, 震后平均值高于震前, 意味着震源区地壳应力在主震后增强, 且余震的发生伴随着区域地壳应力的不断调整.

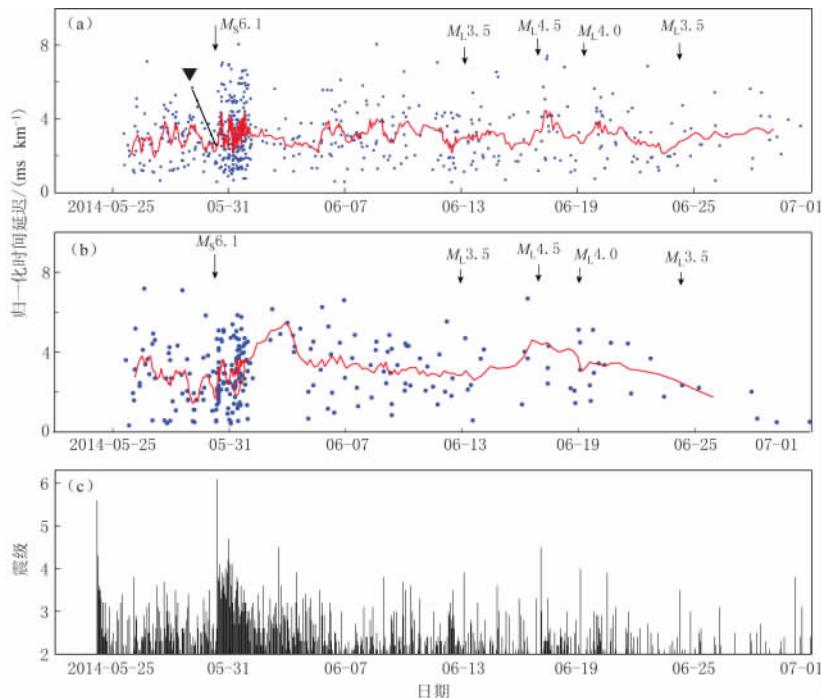


图6 KAC台(a)和MNO台(b)记录的地震事件的慢S波时间延迟变化及盈江 $M_s 6.1$ 地震序列 $M-t$ 图(c). 倒三角表示余震前曲线下降段, 下同

Fig. 6 Slow shear-wave time-delay changes of Yingjiang  $M_s 6.1$  earthquake

sequence at the stations KAC (a) and MNO (b) and  $M-t$  map (c)

Inverse triangle denotes the decreasing stage before aftershocks, the same below

MNO台滑动平均曲线(图6b)显示: 盈江 $M_s 6.1$ 地震发生前滑动平均曲线总体呈下降趋势, 但仍有极少数小地震的时间延迟为高值; 主震发生后, 滑动平均曲线反复出现上升—下降的变化, 但总体时间延迟取值较主震发生前高. 通过计算得到整个序列的慢S波时间延迟平均值为3.6 ms/km, 主震发生前时间延迟平均值为3.1 ms/km, 主震发生后时间延迟平均值为3.7 ms/km, 震后平均值高于震前, 说明主震发生后震源区地壳应力增强.

盈江 $M_s 6.1$ 地震主震发生前慢S波时间延迟的变化特点是本研究关注的重点. 为进一步分析主震发生前时间延迟的变化特征, 将图6中KAC台和MNO台主震发生时(5月24日—6月1日)地震序列的慢S波时间延迟滑动平均曲线放大绘制成图7. 可以清楚地看出, 主震发生前KAC台和MNO台的时间延迟滑动平均曲线在5月29日均出现下降, 且

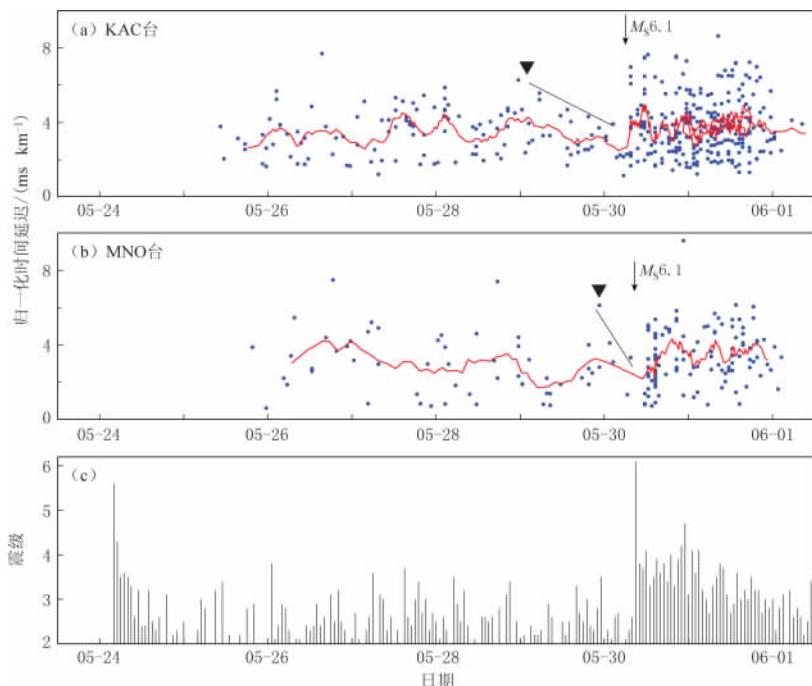


图 7 2014 年 5 月 24 日至 6 月 1 日 KAC 台(a)和 MNO 台(b)记录的地震事件的慢 S 波时间延迟变化与盈江  $M_s 6.1$  地震序列  $M-t$  图(c). 倒三角表示时间延迟开始下降的时刻

Fig. 7 Slow shear-wave time-delay changes at the stations KAC (a) and MNO (b) from May 24 to June 1, 2014 and  $M-t$  map (c) of Yingjiang  $M_s 6.1$  earthquake sequence  
Inverse triangle denotes the decreasing moment of the curve

二者在主震发生后均表现出时间延迟增大的特征, 预示了后续余震活动的持续发生.

#### 4 讨论与结论

利用横波分裂系统分析方法, 计算了 2014 年 5 月 30 日盈江  $M_s 6.1$  地震序列的横波分裂参数, 并针对该参数随时间的变化探讨了盈江地区的区域应力场特征, 以及主震发生前后该区域的地壳应力变化特征.

盈江  $M_s 6.1$  地震序列近 NS 向的快 S 波偏振优势方向反映了区域主压应力方向, 与 GPS 观测到的主压应变方向基本一致. 快 S 波偏振方向与主震发震断裂, 即卡场一大竹寨断裂走向基本一致, 体现了盈江  $M_s 6.1$  地震的走滑特点.

盈江  $M_s 6.1$  地震发生前, KAC 台的快 S 波偏振方向为  $N10.6^\circ E$ , 主震发生后, 其快 S 波偏振方向逆时针旋转了约  $14^\circ$ , 与李金等(2015)得到的盈江  $M_s 6.1$  余震序列的偏振方向较前震序列可能有一个偏转的结果相吻合. MNO 主震发生前的快 S 波偏振方向为  $N13.5^\circ W$ , 主震后偏振方向基本没变, 但其一致性均略好于主震发生前, 表明主震的发生引起了震源区应力状态的调整.

XIM 台和 KAC 台的快 S 波偏振方向与其附近断裂的走向基本一致, 断裂拐点处的 ZHX 台快 S 波偏振方向与断裂走向不同(由于参与分析的数据过少, 仅作参考), 断裂交界处的 MNO 台快 S 波偏振方向呈离散状态. 这些结果表明, 复杂的地质构造会控制或影响

台站的快剪切波偏振方向,造成较为离散或出现多个优势方向的现象,与石玉涛等(2006)的研究结果一致,这也揭示了台站下方原地主压应力方向复杂多变的特点。

在地质构造复杂和断裂活跃的地区,应力情况往往不能根据周边区域应力场的分布作简单推测,并且这些地区往往是实地应力测量的空白区,而S波偏振方向的观测可解决这些问题,能够快速有效地提供及时的重要的应力特征信息。

慢S波时间延迟对地壳中微裂隙的几何形态较为敏感,而震前应力释放会使地壳中微裂隙的几何形态产生变化,因此可以通过研究慢S波时间延迟的变化来监测地壳应力状态的分布(高原等,2004a; Gao, Crampin, 2004; 刘莎等,2014)。KAC台和MNO台记录的地震事件的慢S波时间延迟结果显示,二者的慢S波时间延迟平均值约为3.8 ms/km,且均呈现出在主震发生前短时间内突然减小、主震后增大的变化特征,这意味着临震前震源区地壳应力的释放和震后地壳应力的增强,预示了后续余震活动的持续发生。余震序列中,时间延迟曲线呈起伏振荡现象,表明余震的发生伴随着震源区区域应力的不断调整。

慢S波时间延迟的变化反映了主震和余震发生过程中区域应力场的动态变化特征,对时间延迟的持续性观测分析可用于地壳应力特征变化的研究。在地震活动频繁、断裂分布复杂及构造运动强烈的云南地区,剪切波分裂分析方法可以为应力特征信息的提取和地震应力动态变化的研究提供一种有用的分析手段,但也需要更多的资料对该地区进行更加精细的地震学研究。

审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,云南省数字台网中心为本研究提供了波形资料,叶建庆高级工程师在研究区域选取上给予了指导,马红虎工程师、聂涛提供了盈江地震流动台站信息,作者在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 常利军,丁志峰,王椿镛. 2010. 2010年玉树7.1级地震震源区横波分裂的变化特征[J]. 地球物理学报, 53(11): 2613–2619.
- Chang L J, Ding Z F, Wang C Y. 2010. Variations of shear wave splitting in the 2010 Yushu  $M_{\text{S}}7.1$  earthquake region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(11): 2613–2619 (in Chinese).
- 常利军,丁志峰,王椿镛. 2015. 2013年芦山  $M_{\text{S}}7.0$  地震震源区横波分裂的变化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 45(2): 161–168.
- Chang L J, Ding Z F, Wang C Y. 2015. Variations of shear wave splitting in the 2013 Lushan  $M_{\text{S}}7.0$  earthquake region [J]. *Science China Earth Sciences*, 57(9): 2045–2052.
- 丁志峰,武岩,王辉,周晓峰,李桂银. 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, 38(12): 1600–1604.
- Ding Z F, Wu Y, Wang H, Zhou X F, Li G Y. 2008. Variations of shear wave splitting in the 2008 Wenchuan earthquake region[J]. *Science in China: Series D*, 51(12): 1712–1716.
- 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(S): 22–32.
- Gao Y, Zheng S H. 1994. On shear wave splitting in Tangshan region (Ⅱ): Correlation function analysis method[J]. *Earthquake Research in China*, 10(S): 22–32 (in Chinese).
- 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.
- Gao Y, Zheng S H, Wang P D. 1996. Shear wave splitting study on small earthquake swarm of 1992 in Dongfang of Hainan, South China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 39(2): 221–232 (in Chinese).
- 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.
- Gao Y, Liang W, Ding X, Xue Y, Cai M J, Liu X Q, Su Y J, Peng L G. 2004a. Variational characteristics of shear-wave splitting on the 2001 Shidian earthquakes in Yunnan, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 26(6): 576—582 (in Chinese).
- 高原, 刘希强, 梁维, 郝平. 2004b. 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.
- Gao Y, Liu X Q, Liang W, Hao P. 2004b. Systematic analysis method of shear-wave splitting: SAM software system [J]. *Earthquake Research in China*, 20(1): 101—107 (in Chinese).
- 高原, 石玉涛, 梁维, 刘希强, 郝平. 2008. 剪切波分裂分析系统 SAM (2007): 软件系统[J]. 中国地震, 24(4): 345—353.
- Gao Y, Shi Y T, Liang W, Liu X Q, Hao P. 2008. Systematic analysis method of shear wave splitting SAM (2007): Software system[J]. *Earthquake Research in China*, 24(4): 345—353 (in Chinese).
- 阚荣举, 王绍晋, 黄岷, 宋文. 1983. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动[J]. 地震地质, 5(2): 79—90.
- Kan R J, Wang S J, Huang K, Song W. 1983. Modern tectonic stress field and relative motion of intraplate block in southwestern China[J]. *Seismology and Geology*, 5(2): 79—90 (in Chinese).
- 李金, 高原, 徐甫坤, 向阳, 向元, 刘庚. 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.
- Li J, Gao Y, Xu F K, Xiang Y, Xiang Y, Liu G. 2015. The shear-wave splitting study on the Yingjiang  $M_S$  6.1 earthquake sequence on May 30, 2014[J]. *Earthquake Research in China*, 31(2): 245—252 (in Chinese).
- 刘庚, 高原, 石玉涛. 2015. 云贵高原东南部地壳各向异性初步研究[J]. 地震, 35(3): 76—85.
- Liu G, Gao Y, Shi Y T. 2015. Crustal anisotropy in the southeast of the Yunnan-Guizhou plateau, China[J]. *Earthquake*, 35(3): 76—85 (in Chinese).
- 刘莎, 吴朋, 杨建思, 苏金蓉. 2014. 吉林省前郭地区地震各向异性的初步探讨[J]. 地球物理学报, 57(7): 2088—2098.
- Liu S, Wu P, Yang J S, Su J R. 2014. Preliminary study of seismic anisotropy in Qianguo area, Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(7): 2088—2098 (in Chinese).
- 马文涛, 徐锡伟, 曹忠权, 于贵华, 李海鸥, 徐长朋. 2008. 震源机制解分类与川滇及邻近地区最新变形特征[J]. 地震地质, 30(4): 926—934.
- Ma W T, Xu X W, Cao Z Q, Yu G H, Li H O, Xu C P. 2008. Classification of focal mechanism solutions and characteristics of latest crustal deformation of Sichuan-Yunnan region and its adjacency[J]. *Seismology and Geology*, 30(4): 926—934 (in Chinese).
- 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: 快剪切波偏振特征[J]. 地震学报, 28(6): 574—585.
- Shi Y T, Gao Y, Wu J, Luo Y, Su Y J. 2006. Seismic anisotropy of the crust in Yunnan, China: Polarizations of fast shear-waves[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28(6): 574—585 (in Chinese).
- 石玉涛, 高原, 吴晶, 太龄雪. 2008. 剪切波分裂系统分析 SAM (2007): 区域地震台网资料应用实例[J]. 中国地震, 24(4): 354—361.
- Shi Y T, Gao Y, Wu J, Tai L X. 2008. Systematic analysis method of shear wave splitting SAM (2007): Examples of application in the regional seismograph networks[J]. *Earthquake Research in China*, 24(4): 354—361 (in Chinese).
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2001. 云南数字地震台站下方的 S 波速度结构研究[J]. 地球物理学报, 44(2): 228—237.
- Wu J P, Ming Y H, Wang C Y. 2001. The shear-wave velocity structure beneath digital seismic stations of Yunnan Province inferred from teleseismic receiver function modelling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(2): 228—237 (in Chinese).
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2004. 云南地区中小地震震源机制及构造应力场研究[J]. 地震学报, 26(5): 457—465.
- Wu J P, Ming Y H, Wang C Y. 2004. Source mechanism of small-to-moderate earthquakes and tectonic stress field in Yunnan Province[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 26(5): 457—465 (in Chinese).
- 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.
- Wu J, Gao Y, Chen Y T, Huang J L. 2007. Seismic anisotropy in the crust in northwestern capital area of China[J].

- Chinese Journal of Geophysics*, **50**(1): 209–220 (in Chinese).
- 徐甫坤, 张彦琪, 苏有锦. 2015. 2014 年云南盈江  $M_{\text{S}}6.1$  地震前后序列分布差异研究[J]. 地震研究, **38**(4): 525–534.
- Xu F K, Zhang Y Q, Su Y J. 2015. Research on difference of sequence distribution before and after Yingjiang  $M_{\text{S}}6.1$  earthquake in Yunnan Province in 2014[J]. *Journal of Seismological Research*, **38**(4): 525–534 (in Chinese).
- 杨国华, 王琪, 王敏, 周晓燕, 韩月萍. 2003. 云南地区现今地壳水平运动与变形特征[J]. 大地测量与地球动力学, **23**(2): 7–14.
- Yang G H, Wang Q, Wang M, Zhou X Y, Han Y P. 2003. Current horizontal crustal movement and deformation characteristics in Yunnan area[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **23**(2): 7–14 (in Chinese).
- 张丽娜, 韩立波, 罗艳. 2016. 2014 年 5 月云南盈江两次中强地震震源参数研究[J]. 地震, **36**(1): 59–68.
- Zhang L N, Han L B, Luo Y. 2016. Source parameters of May 24, 2014  $M_{\text{S}}5.6$  and May 30, 2014  $M_{\text{S}}6.1$  earthquakes in Yingjiang, Yunnan Province[J]. *Earthquake*, **36**(1): 59–68 (in Chinese).
- 张彦琪, 范柱国, 陈坤华, 冉华, 华钧, 张昌. 2014. 2011 年盈江 5.8 级地震构造及地震活动特点分析[J]. 地震研究, **37**(3): 390–398.
- Zhang Y Q, Fan Z G, Chen K H, Ran H, Hua J, Zhang L. 2014. Analysis on seismogenic structure and seismic activity characteristics of Yingjiang  $M_{\text{S}}5.8$  earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, **37**(3): 390–398 (in Chinese).
- 赵小艳, 韩立波, 龙锋. 2012. 2011 年盈江  $M_{\text{S}} \geq 4.0$  地震序列震源机制解与发震构造研究[J]. 地震研究, **35**(4): 477–484.
- Zhao X Y, Han L B, Long F. 2012. Focal mechanism solutions and seismogenic structures of Yingjiang  $M_{\text{S}}4.0$  earthquake sequences in 2011[J]. *Journal of Seismological Research*, **35**(4): 477–484 (in Chinese).
- 郑秀芬, 陈朝辉, 张春贺. 2008. 1999 年台湾集集地震余震区: 嘉义地区地震的剪切波分裂参数随时间变化的研究[J]. 地球物理学报, **51**(1): 149–157.
- Zheng X F, Chen C H, Zhang C H. 2008. Study on temporal variations of shear wave splitting in the Chiayi area, after-shock zone of 1999 Chi-chi earthquake, Taiwan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(1): 149–157 (in Chinese).
- 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.
- Zhong J M, Cheng W Z. 2006. Determination of directions of the mean stress field in Sichuan-Yunnan region from a number of focal mechanism solutions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(4): 337–346 (in Chinese).
- Crampin S. 1978. Seismic-wave propagation through a cracked solid: Polarization as a possible dilatancy diagnostic[J]. *Geophys J Int*, **53**(3): 467–496.
- Crampin S. 1984. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids[J]. *Geophys J Int*, **76**(1): 135–145.
- Crampin S, Chastin S, Gao Y. 2003. Shear wave splitting in a critical crust: III. Preliminary report of multi-variable measurements in active tectonic[J]. *J Appl Geophys*, **54**(3/4): 265–277.
- Gao Y, Crampin S. 2004. Observations of stress relaxation before earthquakes[J]. *Geophys J Int*, **157**(2): 578–582.
- Gao Y, Crampin S. 2008. Shear wave splitting and earthquake forecasting[J]. *Terra Nova*, **20**(6): 440–448.
- Gao Y, Wu J, Fukao Y, Shi Y T, Zhu A L. 2011. Shear wave splitting in the crust in North China: Stress, faults and tectonic implications[J]. *Geophys J Int*, **187**(2): 642–654.
- Gao Y, Shi Y T, Wu J, Tai L X. 2012. Shear wave splitting in the crust: Regional compressive stress from polarizations of fast shear waves[J]. *Earthquake Science*, **25**(1): 35–45.
- Mizuono T, Ito H, Kuwahara Y. 2005. Spatial variation of shear wave splitting across an active fault and its implication for stress accumulation mechanism of inland earthquakes: The Atotsugawa fault case[J]. *Geophys Res Lett*, **32**(20): L20305. doi:10.1029/2005GL023875.
- Shi Y T, Gao Y, Su Y J, Wang Q. 2012. Shear wave splitting beneath Yunnan area of southwest China[J]. *Earthquake Science*, **25**(1): 25–34.

## 作者简介



臧 阳 中国地震台网中  
心研究实习员. 2014 年云  
南大学固体地球物理学专  
业毕业, 获理学硕士学位.  
曾从事第四纪活动构造方  
面的研究, 现主要从事地  
震活动性和强地面运动方  
面的研究. 中国地球物理  
学会和中国地震学会会员.



丁风和 内蒙古自治区地  
震局高级工程师. 2005 年  
中国地震局兰州地震研究  
所固体地球物理学毕业,  
获理学硕士学位. 主要从  
事地震地下流体方面的研  
究. 中国地震学会会员, 中  
国地震学会地震流体专业  
委员会委员.



刘特培 广东省地震局高  
级工程师. 1985 年云南大  
学地球物理学专业毕业,  
获理学学士学位. 曾从事  
地震台网建设、地震监测  
工作. 现主要从事数字地  
震学及地震预测研究工作.  
中国地震学会和中国地球  
物理学会会员.



王喜龙 辽宁省地震局工  
程师. 2011 年中国地质大  
学(北京)资源勘查工程专  
业毕业, 获工学学士学位;  
2014 年中国地质大学(北  
京)岩石学、矿物学、矿床  
学专业毕业, 获理学硕士  
学位. 曾从事矿床地球化  
学方面的研究, 现主要从  
事流体地球化学方面的  
研究.



孙 楠 云南省地震局研  
究实习员, 中国科学技术  
大学地球物理学专业在职  
博士研究生. 2013 年云南  
大学固体地球物理学专业  
毕业, 获理学硕士学位. 从  
事地震预报和相关数字地  
震学方面的研究.



刘中宪 天津城建大学土  
木工程学院教授. 2009 年  
天津大学土木系土木工程  
专业毕业, 获工学博士学位.  
长期从事地震波动及  
动力边界元方法研究, 现  
主要从事快速多极子动力  
边界元法及三维复杂场地  
地震动模拟研究. 国际岩石力学与工程学会会员.



王立凤 中国地震局地质  
研究所助理研究员. 1995  
年长春地质学院勘探地球  
物理专业毕业, 获理学学  
士学位; 2001 年中国地震  
局地质研究所固体地球物  
理学专业毕业, 获理学硕  
士学位. 曾从事可控源电  
磁法活断层探测方面的研  
究, 现主要从事地震电  
磁方面的研究.



姜永正 中国地震局工程  
力学研究所防灾减灾与防  
护工程专业硕士研究生.  
2013 年中国地质大学(武  
汉)工程地质专业毕业, 获  
工学学士学位. 现主要从  
事强震动记录数据处理、  
地震动衰减关系、方向性  
效应等方面的研究.

注: 曾宪伟、龚绍京、张红才、朱永莉的简介分别见本刊 Vol. 30, No. 1; Vol. 23, No. 3; Vol. 36, No. 4; Vol. 37, No. 2.