

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, 中国地震, 31 (2), 245 ~ 252。

# 2014 年 5 月 30 日盈江 6.1 级地震序列 剪切波分裂研究

李金<sup>1)</sup> 高原<sup>2)</sup> 徐甫坤<sup>3)</sup> 向阳<sup>1)</sup> 向元<sup>1)</sup> 刘庚<sup>2)</sup>

1) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐市新市区科学二街 338 号 830011

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3) 云南省地震局, 昆明 650224

**摘要** 2014 年 5 月 24、30 日, 云南盈江分别发生了  $M_s 5.6$  和  $M_s 6.1$  地震。本文利用 2014 年 5 月 24 日盈江  $M_s 5.6$  地震后在震源区附近架设的流动地震台卡场台 (KAC) 记录到的波形资料, 使用 SAM 分析方法对盈江  $M_s 6.1$  地震序列进行剪切波分裂参数变化特征的研究。初步结果表明,  $M_s 6.1$  地震震前序列快剪切波优势偏振方向与区域主压应力方向一致, 震前的快剪切波偏振方向与震后相比具有更好的一致性 & 更小的离散度, 且盈江  $M_s 6.1$  地震余震序列的快剪切波偏振方向较前震序列可能有一个偏转。对比  $M_s 6.1$  地震的震前、震后发现, 震前 6 天的数据显示出剪切波分裂时间延迟总体上呈现较低的水平, 而震后的时间延迟值相对较高。

**关键词:** 盈江地震序列 前震 剪切波分裂 快波偏振方向 时间延迟

[文章编号] 1001-4683(2015)02-0245-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

在地壳中产生各向异性的主要因素是大量充满液体的定向排列的微裂隙, 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 (Crampin, 1978)。快剪切波的优势偏振方向与裂隙走向一致, 即与原地主压应力方向一致; 慢剪切波的时间延迟与介质的各向异性程度有关。地壳的各向异性特征受构造、岩相、断裂分布和应力环境等因素的影响, 并与地壳运动特征密切相关, 区域性很强 (高原等, 1995)。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状态及应力场的变化。Gao 等 (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, 并可应用于地震预测研究。Crampin 等 (1999) 基于冰岛地区的波形资料利用剪切波分裂方法对冰岛西南部发生的  $M 5.0$  地震作出了成功预测。最新的研究结果表明, 慢剪切

[收稿日期] 2015-02-27; [修定日期] 2015-04-11

[项目类别] 2015 年度震情跟踪合同制定向工作任务 (2015010113、2015010301) 和新疆地震局基金 (201401) 联合资助

[作者简介] 李金, 男, 1986 年生, 工程师, 主要从事数字地震及地震预测研究。E-mail: lijn6205@163.com。

高原: 通讯作者, 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事地震波理论与应用研究。E-mail: gaoyuan@seis.ac.cn

波的时间延迟对裂隙的孔隙压变化具有很好的反映 (Tang et al, 2005)。Mizuno 等 (2005) 在日本 Atotsugawa 断层附近进行的剪切波分裂研究表明, 原地最大水平主压应力方向与断层走向之间的夹角随着断层与台站之间距离的增加而增加, 即随着与断层距离的增加, 台站下面的原地主压应力受到的断层影响逐渐减小, 而更加趋向于区域应力场方向。

据中国地震台网中心测定, 2014 年 5 月 24 日 04 时 49 分云南省德宏傣族景颇族自治州盈江县发生 5.6 级地震, 随后 30 日 09 时 20 分再次发生 6.1 级地震。截至 2014 年 6 月 30 日, 盈江地震序列共发生  $M_L \geq 1.0$  地震 5786 次 (图 1), 其中  $M_L 1.0 \sim 1.9$  的 4388 次,  $M_L 2.0 \sim 2.9$  的 1160 次,  $M_L \geq 3.0$  地震 240 次。而自 5.6 级前震至 6.1 级主震发生约 6 天的时间内共发生  $M_L \geq 1.0$  余震 1165 次, 其中  $M_L 1.0 \sim 2.0$  的 931 次,  $M_L 2.0 \sim 2.9$  的 181 次。丰富的波形资料为后续开展数字地震研究提供了数据基础。此外, 云南省地震局在盈江 5.6 级地震后迅速在震中附近架设流动台以获取更多资料, 其中距 5.6 级地震震中最近的流动台为卡场台 (KAC), 震中距约 10km, 卡场台的波形数据在 2014 年 5 月 26 日 11 时并入区域地震台网数据库。

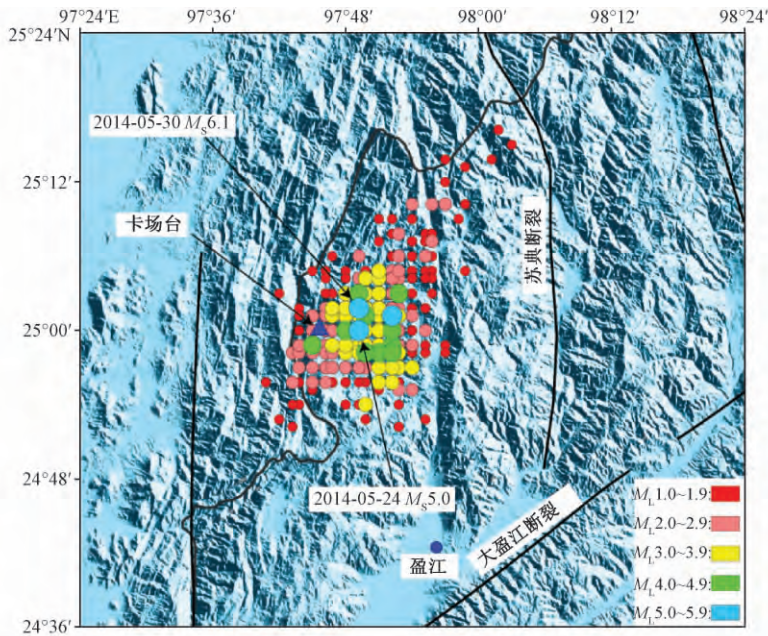


图 1 2014 年 5 月 24 日 ~ 6 月 30 日盈江 6.1 级地震序列震中分布图  
地震目录由云南省地震局提供

盈江地震未发生在主要断裂上, 距震中最近的大盈江断裂在其东南方向约 40km。大盈江断裂北起腾冲以西, 南止西帕河, 全长 140km, 走向  $N40^\circ \sim 75^\circ E$ , 主体倾向 NW, 局部倾向 SE, 倾角较陡, 彼此呈左阶羽列分布。总体而言, 断裂以水平左旋运动为主, NE 段滑动速率为  $1.5 \sim 2.5 \text{ mm/a}$ , SW 段为  $1.2 \sim 1.6 \text{ mm/a}$  (安晓文等, 2009; 常祖峰等, 2011)。近些年, 该地区曾发生过多级与此相当的地震, 如 2008 年 3 月 21 日 5.0 级及 8 月 20、21 日 5.0 级、5.8 级, 2009 年 9 月 6 日 5.8 级, 2011 年 3 月 10 日 5.9 级及 6 月 20 日、8 月 9 日 5.3 级、5.2 级地震。

## 1 方法

本研究采用“剪切波分裂系统分析法”——即 SAM 方法(高原等,2004b),它是在相关函数的基础上提出的一种分析方法。SAM 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 个部分,具有自我检验的特点。新的 SAM 方法软件系统已升级为 SAM(2007 版)(高原等,2008),具体的计算原理和分析方法见相关文献(高原等,1994、1995、1996;石玉涛等,2008)。

使用地表台站记录波形分析剪切波时要求地震射线满足剪切波窗口的约束条件。剪切波入射到地表时,若入射角大于临界角会发生全反射现象。为了避免发生全反射现象,在挑选数据时应选择剪切波窗口内的数据。在理论上,对于泊松介质(泊松比为 0.25)临界角约为  $35^\circ$ 。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  $\leq 45^\circ$  的波形资料即可满足剪切波窗口的约束条件(Crampin,2005)。图 2 显示了对卡场台(KAC)记录到的 1 次地震事件使用 SAM 方法进行剪切波分裂的实例。该地震为 2014 年 5 月 31 日发生的 2.7 级地震,震中距为 7.98km,震源深度为 8.6km。由于剪切波已经发生了分裂,在水平方向上 2 个分量的剪切波的质点运动轨迹并不是线性的。如果快剪切波的偏振方向为  $\alpha$ ,将剪切波按  $\alpha$  角进行顺时针旋转得到快、慢剪切波;再进行时间延迟校正,将慢剪切波提前以扣除时间延迟的影响,最终得到偏振图,此时的 2 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是非线性的。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)。

## 2 研究结果

通过对距盈江 6.1 级地震震中最近的卡场台(KAC)波形资料的分析,得到了盈江地震序列中 86 个地震的快波偏振方向。卡场台(KAC)的等面积投影玫瑰图(图 3(a))显示,盈江地震序列快波偏振的优势方向为近 SN 向,而崔效锋等(1999)运用逐次收敛法对中国西南及邻区进行的应力场反演结果表明,该地区最大主应力方位为  $200^\circ$ ,另崔效锋等(2006)给出的滇西南地区最大主应力方位为  $201^\circ$ ,均与本研究中盈江地震序列快波偏振方向较为接近。

为了进一步分析盈江 6.1 级地震序列的剪切波分裂特征,本文以 6.1 级地震为时间节点分别研究 6.1 级地震的前震序列、余震序列的剪切波分裂特征。前震序列在剪切波窗口内共有 18 个地震的波形较为清晰,适合进行剪切波分裂研究。由 6.1 级地震前卡场台快波偏振方向的等面积投影玫瑰图(3(b))可以看出,优势方向为  $200^\circ$  且更加集中,18 个地震中有 14 个地震的快波偏振方向为  $200^\circ \pm 5^\circ$ 。此结果与崔效锋等(1999)给出的该区最大主应力方位完全一致。对 6.1 级地震后的 68 个地震进行分析处理后,得到卡场台 6.1 级地震后快波偏振方向的等面积投影玫瑰图(3(c)),其优势方向为  $175^\circ$ 。所有的 68 个地震中,50 个地震的快波偏振方向为  $175^\circ \pm 10^\circ$ 。由图 3(b)、3(c)可明显看出,盈江 6.1 级地震前后卡场台的快剪切波偏振方向发生了较为明显的变化,由主震前的  $200^\circ$  偏转为主震后的  $175^\circ$ 。

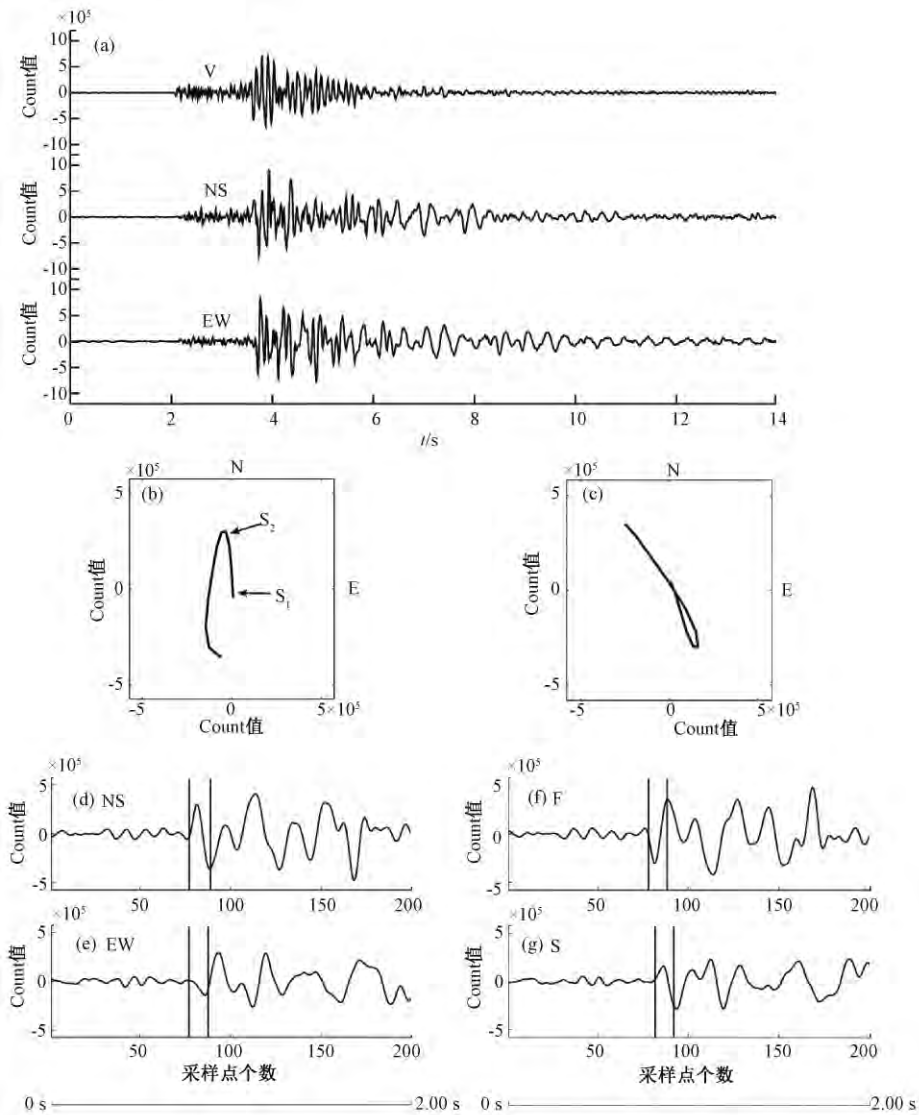


图2 由卡场台记录的数据(2014-05-31T00:33:51)进行的剪切波分裂分析过程

(a) 垂直(V)、南北(NS)和东西(EW)向的地震波形;(b) 剪切波的质点运动轨迹图, $S_1$ 和 $S_2$ 分别表示快剪切波和慢剪切波的到时;(c) 慢剪切波延时校正与快剪切波偏振方向校正后的质点运动轨迹;(d)、(e)分别为NS向和EW向记录;(f)、(g)分别为快剪切波F和慢剪切波S;(d)、(e)、(f)、(g)中两条竖线之间为质点运动轨迹的剪切波部分

此外,对盈江地震序列快剪切波偏振方向随时间的变化进行了研究,将前震序列18个地震分为2组做快波偏振方向的等面积投影玫瑰图(图4(a)、4(b)),2组中快剪切波优势偏振方向均为 $200^\circ$ ,与图3(b)中整个前震序列的结果一致。将余震序列68个地震按发震时间先后顺序分为7组,前6组每组10个地震,最后1组8个地震。由其快波偏振方向的等面积投影玫瑰图(图4(c)~4(i))可以看出,其优势方向仍较为明显,均以近NS向为主,但部分时段快波偏振的优势方向出现NNE向(图4(e)、4(g)),也有部分时段出现NNW向(图4

(h)、4(i))。总体来看 6.1 级地震后卡场台快波偏振方向较震前紊乱,这表明 6.1 级地震对震源区附近应力场产生了一定程度的扰动。

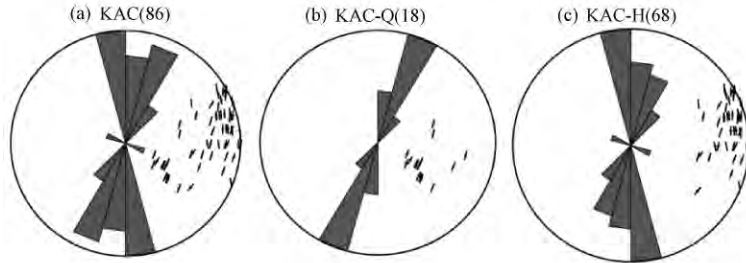


图 3 盈江地震序列卡场台(KAC)的快剪切波偏振方向等面积极射投影图与等面积投影玫瑰图 (a) KAC(86)指盈江地震序列全部 86 个有效数据结果;(b) KAC-Q(18)指 6.1 级地震前地震序列的 18 个有效数据结果;(c) KAC-H(68)指 6.1 级地震后余震序列的 68 个有效数据结果。短线段的方向是卡场台(KAC)记录的每个地震事件的快剪切波偏振方向;外圆的半径是剪切波窗口(本文取  $45^\circ$  入射角)

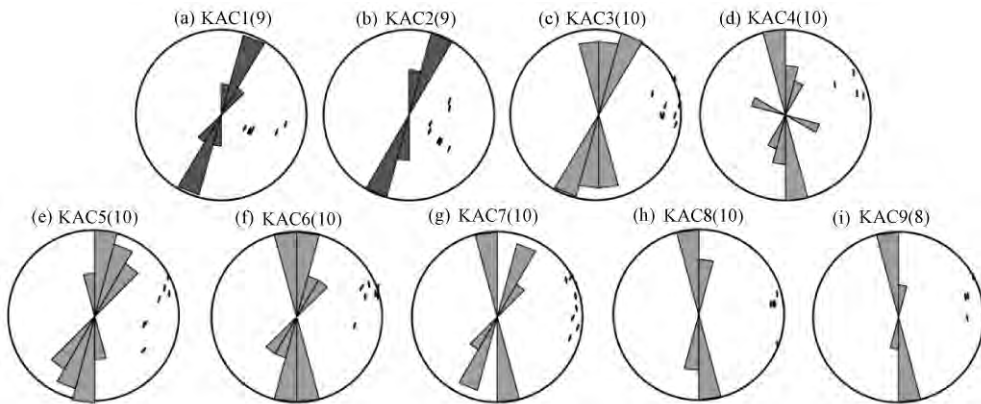


图 4 盈江地震序列快剪切波偏振方向随时间的变化 (a) ~ (b) 前震序列;(c) ~ (i) 余震序列

已有研究表明,在研究剪切波分裂特性时,需要把地震事件按照特别分区进行分组。射线方向与裂隙面相交在  $15^\circ \sim 45^\circ$  之间的区间定义为 1 角区,而射线与裂隙面相交的角度  $< 15^\circ$  的两侧方向上的区间定义为 2 角区(Crampin et al, 1999)。图 5 显示了 1 角区和 2 角区的射线路径。通过图 5 可以清楚地看到,1 角区实质上有 2 个区,在地震台站两侧各有 1 个,在 1 角区中的分裂剪切波时间延迟对裂隙纵横比的变化较敏感,在 2 角区中的分裂剪切波时间延迟主要对裂隙密度的变化较敏感(高原等, 2004a),但在低于破裂临界状态或破裂水平之下时,裂隙密度将不受应力微小变化的影响(Crampin et al, 1999)。在小地震不断发生的情况下,微小应力变化更多地受到裂隙纵横比的控制,因此可以由 1 角区射线路径的平均时间延迟变化来监测微小应力的变化。

根据上述分区结果,利用通过 SAM 分析得到的快剪切波偏振优势方向,将位于卡场台剪切波窗口内的地震事件按照特别分区进行分组,得到 64 个位于 1 角区内的地震事件的剪

切波分裂时间延迟。由盈江地震序列剪切波分裂时间延迟 ( $\Delta t$ ) 及其  $M-t$  图可以清楚地看出  $\Delta t$  的时间变化特征 (图 6), 即  $\Delta t$  分布在 0.69 ~ 4.84ms/km 范围内, 均值为 1.788ms/km。以 6.1 级地震前、后为界, 2014 年 5 月 24 日 5.6 级地震之后, 从有数据记录开始到 5 月 30 日 6.1 级地震之前,  $\Delta t$  总体上呈现较低的水平, 均值为 1.73 ms/km。随后 5 月 30 日盈江 6.1 级地震发生, 而震后  $\Delta t$  值相对较高, 均值为 2.83 ms/km。Gao 等 (2004) 通过总结已有的有关剪切波分裂时间变化特征的观测研究和相关实验结果, 以及对冰岛 2002 年 3 月底小震群的新资料的分析, 获得  $M_L 1.7 \sim M_S 6.0$  共 5 个震例和 2 个岩石实验例子, 得到震前应力释放的结论, 这意味着, 在震前  $\Delta t$  值会出现下降的过程。以往相关研究结果也表明, 强震前几十分钟至几个月应力开始释放, 微裂纹的合并与聚合形成触发岩石破坏水平的破裂。这种破裂的合并减小了裂纹密度 (因为合并使裂纹的数目减少) 和平均纵横比, 从而导致了 1 角区中时间延迟的减小 (Gao et al, 2008)。2000 年 6 月 17 日冰岛 6.6 级地震前, 该地区 SAU 台站的剪切波分裂时间延迟变化也呈现出临震的下降过程; 在 2001 年 6 月 8 日云南施甸 5.3 级强余震前  $\Delta t$  同样呈现下降过程 (高原等, 2004a)。此外, 冰岛 Bianco 等 (2006) 对 2001 年 Etna 火山爆发前后发生

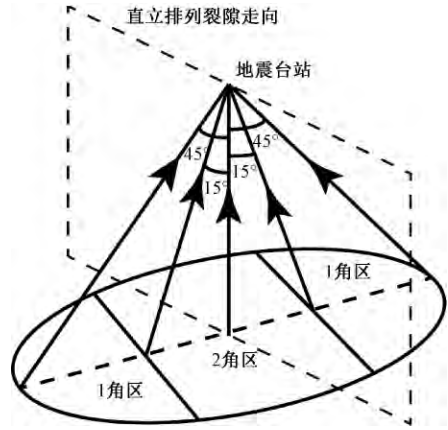


图 5 剪切波窗口内地震波射线分区的几何示意图 (据 Gao 等 (2008))

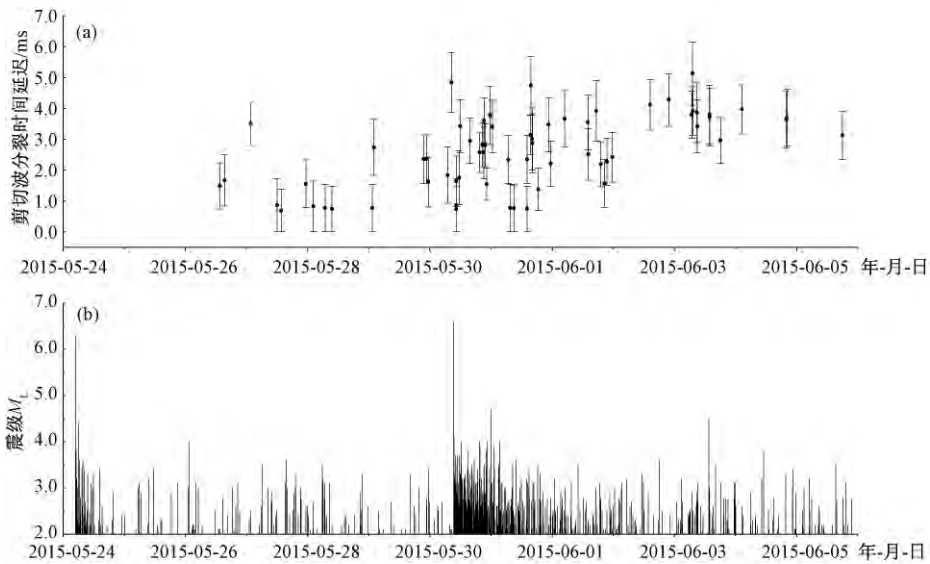


图 6 卡场台记录的剪切波分裂时间延迟的变化特征

(a) 剪切波分裂时间延迟随时间的变化;

(b) 盈江地震序列早期 (2014-05-24 ~ 2014-06-06)  $M_L \geq 2.0$  地震  $M-t$  图

的 134 个小震事件所进行的剪切波分裂研究显示,火山爆发前 70 天观测到了持续的慢剪切波时间延迟增加的过程,而火山爆发前 2~3 天慢剪切波时间延迟开始下降。

### 3 结论与讨论

本文采用 SAM 分析方法,利用 2014 年 5 月 24 日盈江 5.6 级地震后架设的卡场台(KAC)记录到的数字地震波形资料,对盈江 6.1 级地震序列进行剪切波分裂特征的研究,得到了卡场台附近地壳各向异性的初步结果。

盈江 6.1 级地震序列的快剪切波偏振的优势方向为近 NS 向,与该地区最大主应力的方位基本一致。即快剪切波的偏振方向可以反映该区的构造应力的方位。前震序列快剪切波的优势偏振方向为  $200^\circ$ ,与震源区附近最大主应力方位吻合,6.1 级主震后的余震序列快剪切波的优势偏振方向为  $175^\circ$ ,较前震序列及该区的最大主应力方位产生了  $25^\circ$  的偏转。但一个明显的现象是,6.1 级地震之前的快剪切波偏振方向一致性更好,偏振方向的离散度(标准误差)更小,6.1 级地震之后的快剪切波偏振方向一致性略低,偏振方向的离散度(标准误差)更大一些。此外,对盈江地震序列快剪切波偏振方向随时间变化的研究结果也表明,前震序列的快波优势偏振方向与震源区附近最大主应力方位完全一致,而余震序列的快波优势偏振方向虽与震源区附近最大主应力方位仍较为接近,均以近 NS 向为主,但部分时段快波偏振的优势方向为 NNE 或 NNW 向。总体来看,6.1 级地震后卡场台快波偏振方向较震前紊乱,这表明 6.1 级地震对震源区附近应力场产生了一定程度的扰动。

对卡场台记录的波形资料的分析结果显示,前震序列  $\Delta t$  呈现逐渐降低的趋势,随后发生了 2014 年 5 月 30 日盈江 6.1 级地震,而震后  $\Delta t$  值恢复至相对较高的水平。

本研究利用卡场台记录到的 2014 年 5 月 30 日盈江 6.1 级地震序列波形资料进行剪切波分裂研究,得到了主震前序列剪切波分裂参数的一些变化信息。但由于卡场台为 2014 年 5 月 24 日盈江 5.6 级地震后架设的应急流动台站,故未能记录到震前更长时间的波形资料。若能获得更长时段的波形资料,将对此类前震的识别研究有更大的帮助。

**致谢:**云南省地震局和中国地震局监测预报司为本研究提供了波形资料,感谢测震分析预报技术管理组对本研究的支持。

### 参考文献

- 安晓文、常祖峰、石静芳等,2009,大盈江断裂西南端晚第四纪活动研究,地震研究,32(2),193~197。  
常祖峰、陈刚、余建强,2011,大盈江断裂晚更新世以来活动的地质证据,地震地质,33(4),877~888。  
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,地震学报,21(5),513~522。  
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,地震学报,28(5),451~461。  
高原、梁维、丁香等,2004a,云南 2001 年施甸地震的剪切波分裂参数变化特征,地震学报,26(6),576~582。  
高原、刘希强、梁维,2004b,剪切波分裂系统分析方法(SAM)软件系统,中国地震,20(1),101~107。  
高原、石玉涛、梁维等,2008,剪切波分裂分析系统 SAM(2007)——软件系统,中国地震,24(4),345~353。  
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,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,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,地球物理学报,39(2),221~232。  
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,中国地震,24(4),354

~ 361。

- Bianco F, Scarfi L, Del Pezzo E, et al, 2006, Shear wave splitting changes associated with the 2001 volcanic eruption on Mt Etna, *Geophys J Int*, **167**, 959 ~ 967.
- Crampin S, 1978, Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic, *Geophys J R astr Soc*, **53**, 467 ~ 496.
- Crampin S, 2005, A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic earth, *Wave Motion*, **41**, 59 ~ 77.
- Crampin S, Volti T, Stefansson R, 1999, A successfully stress-forecast earthquake, *Geophys J Int*, **138**, F1 ~ F5.
- Gao Y, Crampin S, 2004, Observation of stress relaxation before earthquake, *Geophys J Int*, **157** (2), 578 ~ 582.
- Gao Y, Crampin S, 2008, Shear-wave splitting and earthquake forecasting, *Terra Nova*, **20** (6), 440 ~ 448, doi: 10.1111/j.1365-3121.2008.00836.x
- Mizuno T, Ito H, Kuwahara Y, et al, 2005, Spatial variation of shear-wave splitting across an active fault and its implication for stress accumulation mechanism of inland earthquake: The Atosugawa fault case, *Geophys Res Lett*, **32**, L20305, doi: 10.1029/2005GL023875.
- Tang C, Rial J A, Lees J M, 2005, Shear-wave splitting: a diagnostic tool to monitor fluid pressure in geothermal fields, *Geophys Res Lett*, **32**, L21317, doi:10.1029/2005GL023551.

## The shear-wave splitting study on the Yingjiang $M_s6.1$ earthquake sequence on May 30, 2014

Li Jin<sup>1)</sup> Gao Yuan<sup>2)</sup> Xu Fukun<sup>3)</sup> Xiang Yang<sup>1)</sup> Xiang Yuan<sup>1)</sup> Liu Geng<sup>2)</sup>

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

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

3) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041, China

**Abstract** The  $M_s5.6$  and  $M_s6.1$  earthquakes occurred respectively in Yingjiang, Yunnan on May 24 and 30, 2014. In this paper, we use the waveform data recorded by mobile seismic stations (KAC) which set up in the source area after the Yingjiang  $M_s5.6$  happened on May 24, 2014, study the shear-wave splitting characteristics of Yingjiang  $M_s6.1$  earthquake sequence with the SAM method. The result showed that predominant polarization of fast shear-waves before the  $M_s6.1$  earthquake consistent with the direction of regional principal compressive stress, predominant polarization of fast shear-waves before the  $M_s6.1$  earthquake showed better consistency and smaller dispersion compared with that after the  $M_s6.1$  earthquake. There may be a deflection for the fast shear-waves predominant polarization between the  $M_s6.1$  earthquake sequence and foreshock sequence. We found that the time-delays generally exhibit a lower level before the  $M_s6.1$  earthquake, and that value is relatively high after the  $M_s6.1$  earthquake.

**Key words:** Yingjiang earthquake sequence    Foreshock    Shear-wave splitting  
Polarization of fast shear-waves    Time-delays