

2011年盈江 $M_s \geq 4.0$ 地震序列震源机制解 与发震构造研究*

赵小艳¹, 韩立波², 龙 锋³

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 四川省地震局, 四川 成都 640041)

摘要: 基于云南数字地震台网和腾冲火山台网宽频带波形记录, 采用CAP方法反演了2011年盈江 $M_s 5.8$ 地震序列主震及 $M_s \geq 4.0$ 前震、余震的震源机制解。结果显示: 主震震源深度为9 km, 与该事件的定位结果相一致; 震源机制解的节面之一走向 248° , 倾角 77° , 滑动角 19° 。结合余震、烈度分布以及震区的活动构造, 判定该节面代表了主震的发震断层, 相应的发震断层应是震区附近的北东向大盈江断裂。主震主压力轴方位为 20° , 除 $M_s 4.7$ 余震为正断型地震外, 其他7次地震都为纯走滑型地震, 都具有NNE-SSW向近水平的P轴, 与该区历史地震震源机制主压应力优势方向一致。综合应力场及构造分析表明, 盈江 $M_s 5.8$ 地震的发震动力学环境是: 受印度板块向欧亚板块北东向挤压和缅甸弧对保山—腾冲地块北东向俯冲的双重作用, 保山—腾冲地块呈现北东向水平运动, 导致的大盈江断裂带左旋走滑错动的结果。

关键词: CAP方法; 震源机制解; 盈江地震; 发震断层

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)04-0477-08

0 引言

2011年1月以来, 云南德宏自治州盈江县共发生10次 $M_s 4.0$ 以上地震。其中2011年3月10日发生的 $M_s 5.8$ 地震附近地造成了重大的经济损失和人员伤亡, 共造成25人死亡, 314人受伤, 极震区烈度达VIII度(房立华等, 2011)。 $M_s 5.8$ 地震所处的盈江地区地质构造复杂, 地处喜马拉雅山南延横断山脉的西南端, 为高黎贡山支系西南余脉构成的山地, 地势东北高、西南低, 起伏较大, 境内中、低山与宽谷盆地交错相间, 地貌组合复杂多样(罗艳等, 2010)。区内大震密集, 近代火山、高温温泉或沸泉与活动断裂共生, 为剧烈新活动区。房立华等(2011)用双差定位法对盈江地震序列进行精定位发现余震分布呈现两个优势方向, 一支沿大盈江断裂呈北东向分布, 另一支沿大盈江断裂中段和北东段的错断分布。

因此, 研究该地震序列震源性质, 分析其与发震构造的关系, 对理解地震的孕震机理、分析未来可能的发震趋势及危险性均有极其重要的现实意义。

震源机制解和震源深度直观地反映了地震破裂几何特征和运动学特征, 不仅是研究区域构造应力和地震灾害的基础, 对认识地震活动与地质构造之间的关系, 勾画活动断层形态等也起着非常重要的作用, 因此成为地震学家研究的重点之一。地震震源机制的求解中, P波初动法是最常用的方法。但P波初动法存在的3个缺点可能影响到震源机制解的可靠性: (1) 要大量在球面投影离散、均匀的台站; (2) 对于节面方位角附近的地震记录, 很难判断P波初动的极性; (3) 离源角的计算受地下速度结构影响较大, 需要相对精确的速度模型。盈江地震发生在云南西部, 西邻缅甸, 云南现有数字台网都位于震中东侧, 对该次地震包围效果较差, 且台站间距较大。因此, P波

* 收稿日期: 2011-08-08.

基金项目: 大地震中长期危险性判定及地震大形势预测关键技术研究(2012BAK19B01)子专题南北地震带强震综合预测与跟踪方法研究(2012BAK19B01-07)和云南省地震局2010年青年基金“2008年盈江地震震源机制研究(201002)”联合资助。

初动法在盈江地区震源机制的求解上有一定的限制,难以取得较为精确的震源机制和震源深度结果。相比 P 波初动方法,全波形的矩张量反演方法可靠性、准确性较高,需要的数据资料也相对较少,但对地下速度结构的依赖性高。地壳介质模型的选取会影响合成地震图的计算,决定格林函数能否代表地震波传播介质的效应 (Yao, Harkrider, 1983; Chen *et al*, 1991; 陈培善, 陈海通, 1992)。由于全波形反演中,实际地震记录面波振幅比体波振幅大很多,在反演过程中不可避免地使面波权重过大,掩盖了体波的部分优势。因为相比面波,体波受介质局部非均匀性影响小,且更稳定 (Zhu, Helmberger, 1996)。

笔者利用云南数字台网及腾冲火山台网的宽频带波形资料,采用 CAP 方法 (Zhao, Helmerger, 1994) 反演计算了 2011 年以来盈江地区 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解,并结合烈度与地震精定位震中分布,确定该序列的发震断层。在此基础上,通过对比分析研究区已有的震源机制解,讨论了盈江地震成因与区域构造的关系。

2 资料与反演计算

2.1 台站分布及资料情况

笔者选用了云南省数字地震台网和腾冲火山台网中震中距在 250 km 以内台站的宽频带波形记录,台站及地震的分布见图 1。在 0.05 ~ 20 Hz 的频率范围内,这些台站的仪器幅频特性速度曲线都是平直的,可以获得盈江 $M_s \geq 4.0$ 地震信噪比较高的数字化宽频带记录。我们拟用 CAP 方法反演出 2011 年 1 月以来盈江地区发生的 10 次 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解,其参数列于表 1。其中编号 9、10 的两次地震由于间隔时间仅 26 s,绝大部分台站记录到的这两次地震的波形有重叠现象,无法对这两次事件进行反演,因此笔者的分析编号 1~8 地震的计算结果。

2.2 模型选取和理论地震图计算

现有的关于盈江地区的分层速度模型研究结果并不多。大多数区域人工地震测深及速度结构反演研究主要集中于与盈江相邻的腾冲地区 (楼海等, 2002)。由于腾冲地区为著名的火山区,区内具有显著的上地幔顶部负异常的特征,上地

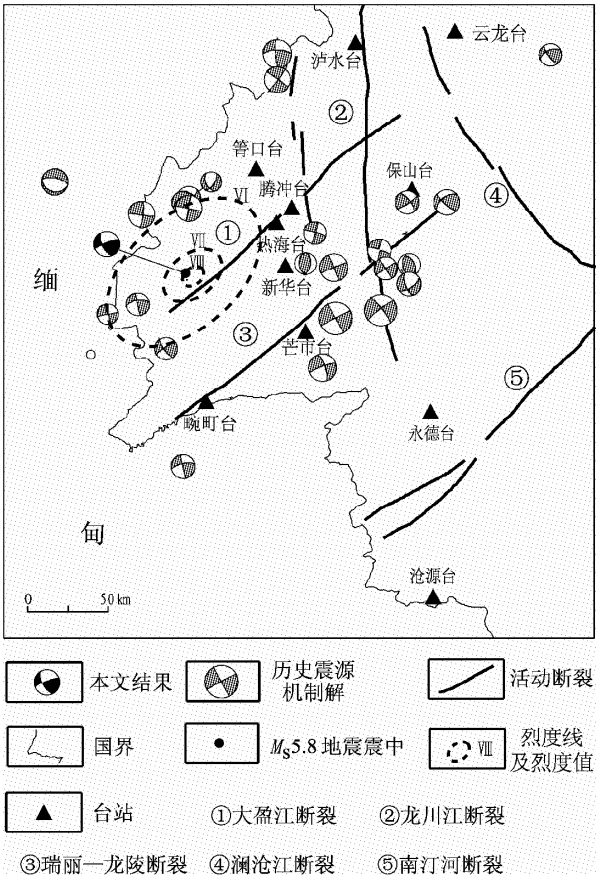


图 1 2011 年盈江地震震中位置、震源机制、烈度及台站分布图

Fig. 1 Distribution of epicenter location, focal mechanism solutions, seismic intensity of Yingjiang $M_s \geq 4.0$ earthquake and seismic stations

表 1 2011 年 1 月以来盈江地区 $M_s \geq 4.0$ 地震
Tab. 1 List of $M_s \geq 4.0$ earthquakes in Yingjiang region since Jan, 2011

序号	发震时间	震中位置		震级	深度
	年-月-日 时:分:秒	$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$	M_s	/km
1	2011-01-01 15:31:58	97.92	24.72	4.6	10
2	2011-01-02 07:33:34	97.92	24.72	4.8	10
3	2011-01-02 07:44:30	97.92	24.72	4.0	10
4	2011-01-14 22:50:34	97.93	24.73	4.3	10
5	2011-02-01 15:11:20	97.95	24.73	4.8	10
6	2011-03-10 12:58:10	97.92	24.72	5.8	10
7	2011-03-10 13:03:56	97.93	24.70	4.7	10
8	2011-03-10 13:04:50	97.92	24.68	4.5	10
9	2011-03-10 20:41:36	97.98	24.75	4.5	7
10	2011-03-10 20:42:02	97.97	24.75	4.3	6

壳内存在与岩浆有关的热物质，故上地壳和上地幔均有大面积的低速层。低速层的存在对格林函数理论地震图的计算结果产生显著影响，导致理论地震图与实际地震图拟合偏差。而盈江与腾冲相距 70 km，并无直接的研究结果表明盈江地区也存在低速层。2011 年盈江 5.8 级地震发生后，房立华等（2011）参考了胡鸿翔等（1986）、张中杰等（2005）的人工地震测深结果、以及据附近台站的接收函数 F-K 扫描结果得到的波速比 1.76，对地震序列进行了快速精定位。主震震源位置和震源深度较为可信的定位结果表明，该模型可以较准确地反映盈江地区的速度结构。本文使用该模型，用于 CAP 方法的反演，模型详细参数如表 2 所示。

表 2 云南盈江地区分层地壳速度模型			
Tab. 2 Layered crustal velocity model for Yingjiang region in Yunnan			
每层深度范围 /km	S 波速度 $V_s/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	P 波速度 $V_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	密度 $/10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
0.00 ~ 1.00	2.84	5.00	2.10
1.00 ~ 14.00	3.47	6.10	2.40
14.00 ~ 18.00	3.64	6.40	2.75
18.00 ~ 30.00	3.75	6.60	2.80
30.00 ~ 38.00	4.09	7.20	3.10
38.00 ~ 60.00	4.55	8.00	3.20

在计算理论地震图时，我们采用目前广泛使用的频率—波数法（F-K 方法）（Zhu, Rivera, 2002），该方法通过对频率和波数分别进行积分，采用传播矩阵计算地震的位移场分布，适用于水平分层地壳模型，能够计算各种频率下的体波和面波波形，非常有效的应用于研究震源参数。

3 反演结果与分析

图 2 和图 3 分别是 2011 年 3 月 10 日盈江 $M_s 5.8$ 地震的震源机制解反演中拟合误差随深度变化以及波形拟合结果。图 2 表明，震源深度 9 km 时具有最小的反演误差，说明 9 km 左右应是盈江 5.8 级地震的最佳矩深度，与该事件的速报定位结果（10 km）相差不大。此震深度对应的双力偶解即为最佳震源机制解。其中，5.8 级主震最佳双力偶解节面 I 的解为：走向 248° ，倾角 77° ，滑动角

19° ；节面 II 的解为：走向 154° ，倾角 72° ，滑动角 166° ，矩震级 $M_w = 5.28$ 。从图 2 还可以看出，震源机制解在不同震源深度变化不大，表明使用 CAP 方法得到的震源机制解对震源深度的依赖不大，同时也证明了所得到震源机制解的可靠性。

在震源深度为 9 km 时，8 个台站记录的 40 个震相中，理论地震图与观测地震图的相关系数大于 0.8 的台站有 31 个，占 78%；相关系数大于 0.9 的有 21 个，占 53%，反演方差为 0.62，理论地震图与观测地震图拟合较好，表明模型选择及理论地震图的合理性，反演结果是可信的。从图 3 可以看到，大多数 Pnl 波形的相关性较好，其中有一些台站的相关系数在 90% 以上；但 QKT、RHT 这 2 个火山台站面波部分理论地震图与实际地震图拟合不好。在计算过程中，我们对面波部分滤波器的频率不断进行调整，但拟合效果仍然较差。其原因可能是盈江地区区域地壳速度结构复杂等，笔者在文中所给的这些台站的简单一维速度结构模型不能很好的近似于真实地壳速度结构。为避免此类数据参与计算影响结果的可靠性，反演中未采用这三个分量。

我们将本文得到的 2011 年 3 月 10 日盈江 $M_s 5.8$ 地震震源机制解与哈佛大学及中国地震局地球物理研究所利用 P 波初动得到的结果进行对比，可以看出，

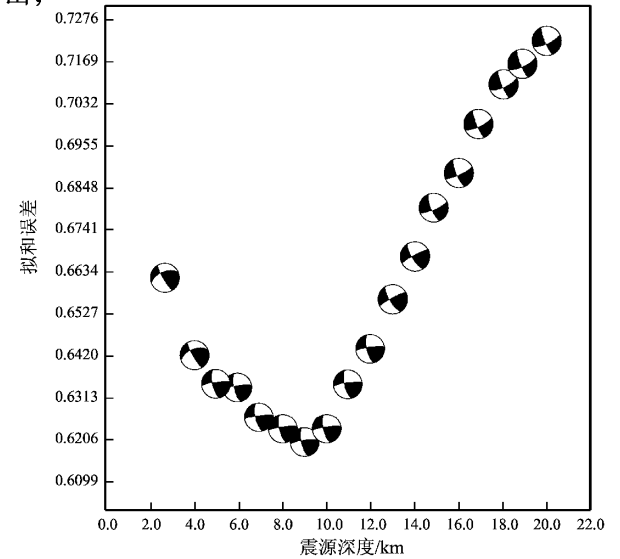


图 2 盈江 $M_s 5.8$ 震源机制解反演中的误差—深度分布图

Fig. 2 Misfit error – focal depth distribution in inversion of the focal mechanism solution of the Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake

多种结果比较接近,表明本文结果是可靠的。

本文的震源机制求解过程确实体现了 Zhu 和 Helmberger (1996), Zhao 和 Helmerger (1994), 郑勇等 (2009), 韦生吉等 (2009), 龙锋等 (2010) 研究提到的 CAP 方法在反演震源机制解和确定

震源深度上的 3 个优点:

(1) CAP 方法将 Pnl 和面波分开进行拟合,综合利用了近震波形中的体波和面波信息,并在反演的过程中允许它们在适当的时间变化范围内相对移动,一定程度上消除了地下速度结构不准

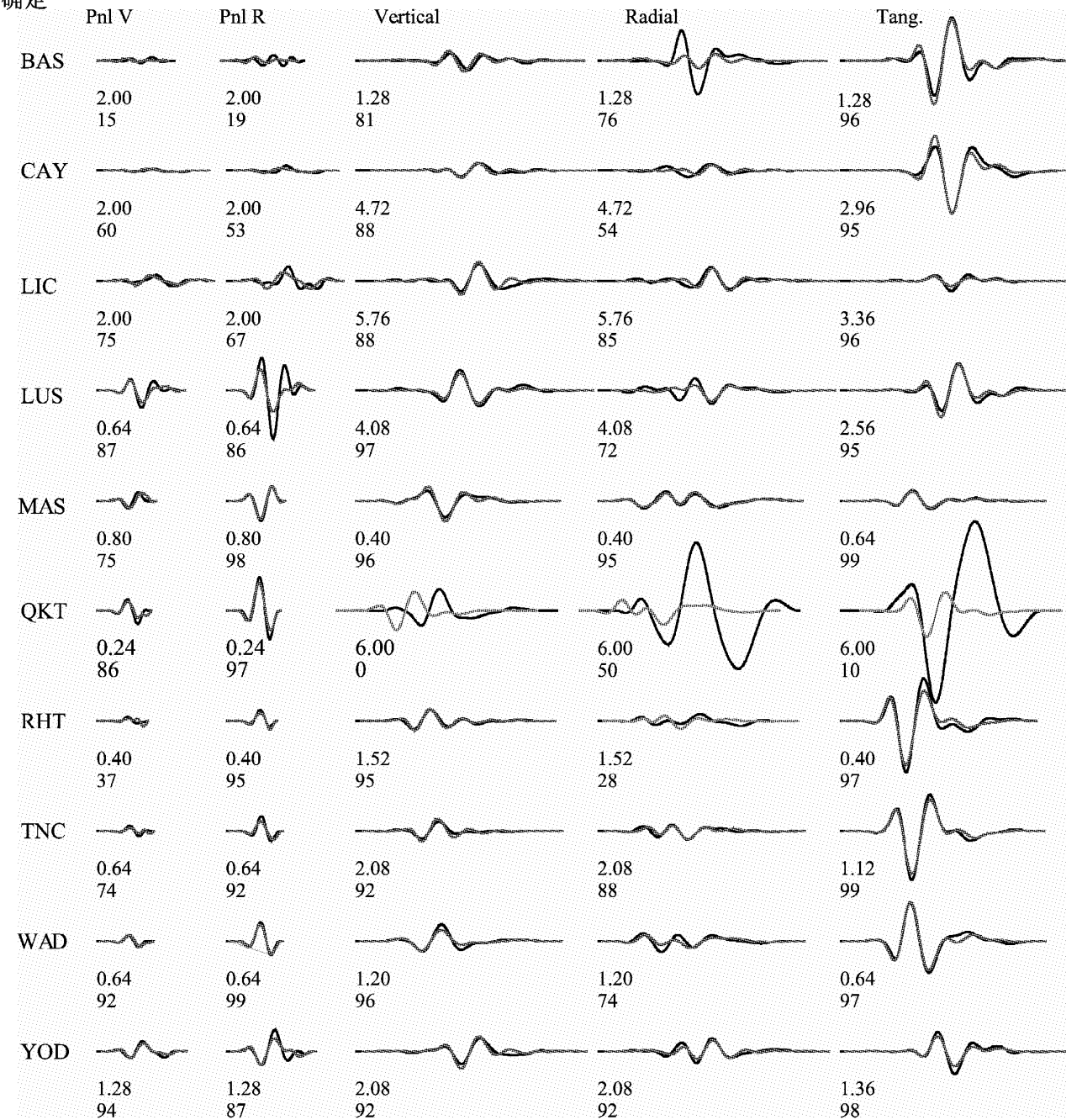


图3 盈江 $M_s5.8$ 部分台站的波形拟合图
(红线是理论地震图, 黑线是观测地震图; 波形下面第一行数字为理论地震图相对观测地震图的移动时间 (s), 第二行数字为二者的相关系数 (%))

Fig. 3 The fitting waveform for the $M_s5.8$ earthquake recorded by some seismic stations
(red curves are theoretical seismograms, and black curves are observation seismograms; the first line below the waveform curves are the time shifts between theoretical and observation seismograms (unit: s), and the second lines are their correlation coefficients (unit:%))

确所造成的影响，即使在格林函数和地震位置不是很准确的情况下也可以得到较好的结果。

(2) 通过给 Pnl 波形赋更大的权重来避免面波在反演过程中权重过大的影响，能更好的约束地震深度及震源机制解。本文反演中，根据 Pnl 波和面波的特点，相对权重为 2:1，这样的权重可以兼顾 Pnl 波和面波的优点。

(3) 在误差函数中引入距离影响因子，充分考虑到了因距离产生的衰减对波形的改造，从而避免反演中受到最近台站记录影响。在盈江 $M_s 5.8$ 地震反演过程中，最佳的台站距离为 RHT 台，约 58 km，最远的为 LiC 台，为 216 km。

表 3 笔者、Harvard 与中国地震局地球物理所得到震源机制解的比较（单位： $^{\circ}$ ）

Tab. 3 Focal solutions comparison among by author, Harvard and Institute of Geophysics, CEA (unit： $^{\circ}$)

事件	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		资料来源
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位角	俯角	方位角	俯角	
盈江 5.8 级地震	248	77	19	154	72	166	20	4	112	23	本文
	254	80	1	155	89	172	20	2	110	3	Harvard
	250	82	11	158	89	172	24	2	114	13	CEA-IGP

据云南省地震现场灾评组^①给出的盈江 $M_s 5.8$ 级地震烈度分布图可以看出，烈度长轴大致沿着大盈江断裂带呈北东向（图 1）。利用云南地震台网中心给出的 2011 年 1 ~ 12 月 2 级以上地震的震相数据（ $97.8^{\circ} \sim 98.1^{\circ}E$ ， $24.6^{\circ} \sim 24.8^{\circ}N$ ），采用上述模型，用 HYP 2000 方法对 2011 年盈江 5.8 级地震序列进行了绝对定位后，再用双差方法进行了相对定位。得到了包含 313 个前震和 414 个余震共计 727 个地震的精定位结果（图 5）。地震主要分布在大盈江断裂的两侧及中段和北东段的转折处。这些结果表明，大盈江断裂带为本次 5.8 级地震的发震断层，即 NNE - SSW 向的主压应力作用于大盈江断裂产生左旋走滑错动的结果。

笔者用同样的方法得到了 2011 年 1 月以来盈江县其余 7 次 $M_s \geq 4.0$ 地震震源机制解。表 4 为这些地震的断层面参数，图 4 给出了这些地震的震源机制球面解。从表 4 和图 6 可以看出，8 次地震除 2011 年 3 月 10 日 13 时 3 分 $M_s 4.7$ 地震为有正断性质的走滑型地震外，其他 7 次地震都为纯走滑型地震，都具有 NNE - SSW 向近水平的 P 轴。

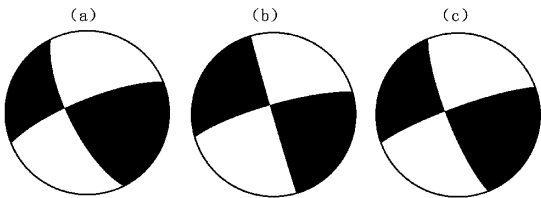


图 4 盈江 $M_s 5.8$ 的震源机制解

(a) 本文反演结果；(b) 哈佛大学结果；
(c) 中国地震局地球物理研究所结果

Fig. 4 Focal solutions of Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake

(a) inversion result in this paper; (b) inversion result from Harvard; (c) inversion result from Institute of Geophysics, CEA

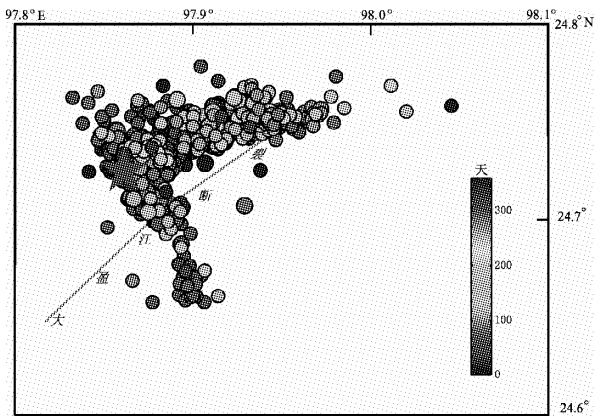


图 5 2011 年盈江 5.8 级地震序列震中分布图

（圆圈表示震中，圆圈大小与震级成正比；黑色曲线表示大盈江断裂；红黑色五角星表示主震震中位置。图上的色标表示距离起始地震（2011.01.01 $M_s 4.4$ ）的时间差）

Fig. 5 Distribution of the relocated epicenter of Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake sequence in 2011

(circles denote earthquake epicenter, size of circle is proportional to magnitude; black curve represent the Dayingjiang Fault; red aniseed star denotes the epicenter location of the mainshock; the color code represents the difference between occurrence time of earthquakes to the first earthquake (2011.01.01 $M_s 4.4$))

① 云南省地震局. 2011. 2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 地震灾害直接损失评估报告.

表 4 2011 年盈江序列 $M_s \geq 4.0$ 震源机制解 (单位: $^{\circ}$)
Tab. 4 Focal mechanism solution of Yingjiang $M_s \geq 4.0$ earthquakes sequence in 2011 (unit: $^{\circ}$)

序号	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴	
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位角	俯角	方位角	俯角
1	139	83	161	231	71	7	186	8	93	18
2	140	81	163	232	73	9	187	5	95	18
3	135	78	156	230	67	12	184	8	90	24
4	150	78	162	243	72	12	197	3	106	21
5	156	80	167	249	78	10	203	1	112	15
6	154	72	169	248	77	19	20	4	112	23
7	325	43	-147	211	68	-51	165	50	273	14
8	167	73	174	259	85	17	32	8	124	15

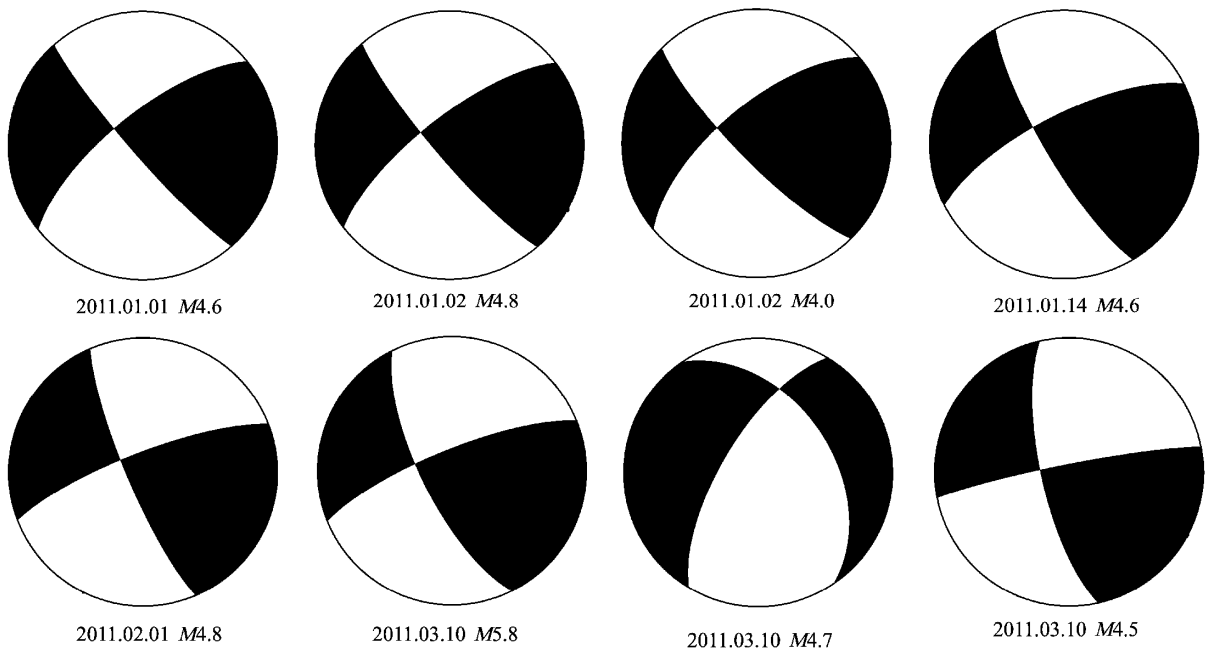


图 6 2011 年盈江 8 次 4 级地震的震源机制图像
Fig. 6 Focal mechanism solutions of 8 Yingjiang $M_s \geq 4.0$ earthquakes in 2011

4 区域应力场与构造分析

为了进一步分析盈江 5.8 级地震序列发生的动力学背景,我们收集了研究区已有地震的震源机制解资料(陈天长等,2001;吴建平等,2001),图 1 给出了这些地震的震源机制球面解及其分布情况。从图 1 看出,研究区在靠近缅甸弧地区偶有逆冲型地震,在腾冲火山区附近有部分正断型地震,但总体以走滑型地震为主。主压应力玫瑰图(图 7)分布显示优势分布方向为 NNE-SSW 向,本次地震主压应力轴走向也为 NNE-SSW 向,表明盈江 5.8 级地震序列的震源机制解与研究区内更早地

震的震源机制解具有良好的协调一致性。
季建清等(2000)依据走滑断裂的运动学和年代学,确认滇西腾冲地区新生代大型走滑断裂带变形作用的特征,即随着印度大陆向欧亚大陆的进一步挤入,在腾冲地区出现了地块向南的运动和顺时针旋转,地块内部和边界的走滑断裂活动性质为左旋。而在这一运动过程中,其间交织着阶段性(23Ma 和 13Ma)的向南逸出作用。已有的一些研究成果也表明该区区域应力场方向为 NNE-SSW 向,如钟继茂和程万正(2006)由多个地震震源机制解求得到的保山-腾冲-盈江地区平均应力场方向为 NE25 $^{\circ}$;马文涛等(2008)研究表明,川滇地区由于受青藏高原向 SE 方向挤

压,形成该区次级块体顺时针旋转,在保山——腾冲地块,又受到缅甸弧北东向的下插挤压作用,在保山—腾冲地块与密支那地块之间,形成前端逆冲、后侧走滑的变形形式,即围绕阿萨姆顶点顺时针旋转的应力场。因此,在保山—腾冲一带,以 NNE—SSW 向应力场为主,这些结果与本文的研究结果是一致的。综合上述应力场及构造分析表明,盈江 $M_s 5.8$ 地震的发震动力学环境为:受印度板块向欧亚板块北东向挤压和缅甸弧北东向俯冲作用,保山—腾冲地块呈现北东向水平运动,导致大盈江断裂带左旋走滑错动。

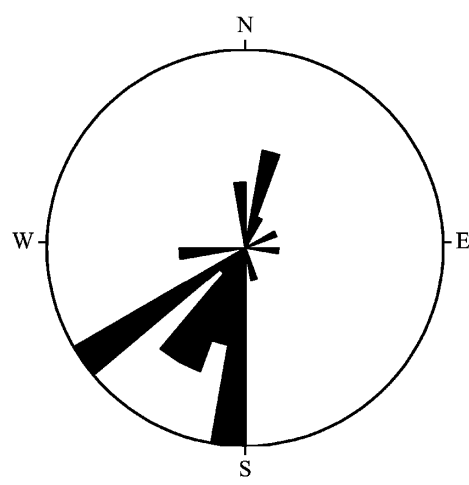


图7 研究区历史震源机制解主压应力玫瑰图
Fig. 7 Rose diagram of principle compressive stress axis of historical focal mechanism solutions in study area

5 结论和讨论

基于云南和腾冲火山宽频带数字地震波形资料,笔者利用 CAP 方法反演了 2011 年盈江地震序列中 8 次 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解。反演结果显示 $M_s 5.8$ 级主震震源机制参数与哈佛大学、中国地震局地球物理所获得的结果较为一致。结合精定位地震分布、烈度分布以及震区的地质构造,认为震源机制解中走向 248° , 倾角 77° , 滑动角 19° 的节面为 $M_s 5.8$ 主震的发震断层,走向 NE 向的大盈江断裂带是这次地震的发震构造。并结合历史地震震源机制与主压应力分布优势方向分析 $M_s 5.8$ 地震孕震构造动力源是保山—腾冲地块受印度板块向欧亚板块北东向挤压和缅甸弧北东向俯冲的双重力源作用下,呈现北东向水平运动,导

致块体内的北东向大盈江断裂带左旋走滑错动的结果。

在本研究中我们还发现盈江 $M_s 5.8$ 地震前发生过 5 次 4 级地震,其震源机制均为走滑型地震,震源机制参数也比较相近,具有较高的一致性,而震后发生 1 次具有正断性质的走滑地震,震源机制一致性低于前震。据陈颙 (1978) 通过对典型震例的研究发现,在前震、余震和地震群震源机制的一致性程度方面,有明显的差别。已有的一些研究结果也表明,大震前孕震区一致性参数比较低,震源机制与构造应力场的差异较小,而主震发生之后震源机制解的一致性参数比较高 (倪四道等, 2010; 泽仁志玛等, 2010; 刁桂苓, 赵英萍, 2004)。而本次地震序列是否具有震前一致、主震后余震不一致的性质,还需要通过计算更多小地震的震源机制资料通过进一步的分析予以佐证。

中国科学院测量与地球物理研究所郑勇、谢祖军、葛黎博士为本研究提供了美国圣路易斯大学朱露培先生的 CAP 方法反演程序,并指导相关的反演计算。研究中马宏生、蒋长胜、邵志刚、李志海等老师提出诸多有益建议,在此一并表示感谢。

参考文献:

陈培善,陈海通. 1992. 由环境应力值寻找地震危险区的尝试[J]. 地震地磁测与研究, 13(6): 1-11.
 陈天长, 堀内茂木, 郑斯华. 2001. 利用 P 波初动和短周期 P、S 波振幅测定川滇地区地震震源机制解和应力场[J]. 地震学报, 3(4): 436-440.
 陈颙. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, 21(2): 140-159.
 刁桂苓, 赵英萍. 2004. 大同晚期强余震前震源机制解的一致性特征[J]. 内陆地震, 18(3): 202-206.
 房立华, 吴建平, 张天中, 等. 2011. 2011 年云南盈江 $M_s 5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. 地震学报, 33(2): 262-267.
 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J]. 地球物理学报, 29(2): 133-144.
 李建清, 钟大赉, 张连生. 2000. 滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学, 及对青藏高原东南部块体运动的意义[J]. 地质科学, 35(3): 336-349.
 龙锋, 张永久, 闻学泽, 等. 2010. 2008 年 8 月 30 日攀枝花—会理 6.1 级地震序列 $M_L \geq 4.0$ 事件的震源机制解[J]. 地球物理学报, 53(12): 1-9.
 楼海, 王椿镛, 皇甫岗, 等. 2002. 云南腾冲火山区上部地壳三维地震速度层析成像[J]. 地震学报, 24(3): 243-251.

罗艳,倪四道,曾祥方,等. 2010. 汶川地震余震区东北端一个余震序列的地震学研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学),40(6):677-687.

马文涛,徐锡伟,曹忠权,等. 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.

倪四道,王伟涛,李丽. 2010. 2010年4月14日玉树地震:一个有前震的破坏性地震[J]. 中国科学(D辑:地球科学),40(5):535-537.

韦生吉,倪四道,崇加军,等. 2009. 2003年8月16日赤峰地震:一个可能发生在下地壳的地震[J]. 地球物理学报,52(1):111-119.

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.

泽仁志玛,刁桂苓,李志雄,等. 2010. 大震前显示的地震震源机制趋于一致的变化[J]. 地震,30(1):108-114.

张中杰,白志明,王椿镛,等. 2005. 冈瓦纳型和扬子型地块地壳结构:以滇西孟连—马龙宽角反射剖面为例[J]. 中国科学(D辑:地球科学),35(5):387-392.

郑勇,马宏生,吕坚,等. 2009. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机

制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学(D辑:地球科学),39(4):413-426.

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.

Chen Y T, Zbou J Y, Ni J C. 1991. Inversion of near-source broadband accelerograms for the earthquake sourcetime function [J]. Tectonophysics, 197:89-98.

Yao Z X, Harkrider D G. 1983. A generalised reflection transmission coefficient matrix and discrete wavenumber method for seismograms [J]. BSSA, 73(6A):1685-1699.

Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. BSSA, 84(1):91-104.

Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. BSSA, 86(5):1634-1641.

Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multi-layered media [J]. Geophys J Int, 148(3):619-627.

Focal Mechanism Solutions and Seismogenic Structures of Yingjiang $M_s \geq 4.0$ Earthquake Sequences in 2011

ZHAO Xiao-yan¹, HAN Li-bo², LONG Feng³

(1. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650024, Yunnan, China)

(2. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

(3. Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract

Basing on the broadband waveforms recorded by Yunnan and Tengchong Volcanic Digital Seismic Networks, we inversed the focal mechanism solutions of the main shock of Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake sequences and $M_s \geq 4.0$ foreshocks and aftershocks in 2011 by using CAP method. The results showed that the focal depth of the main shock is 9 km, which was consistent with the location depth of Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake. Combining with the distributions of aftershocks and intensity and the active geologic structures in seismic area, the nodal plane which had the strike of 248° , rake of 77° and dip of 19° was identified to be the seismogenic fault plane of the main shock, and its corresponding seismogenic fault was Dayingjiang Fault with northeast trending in seismic area. The direction of principal compressive stress axis of the main shock is 20° . The $M_s 4.7$ aftershock was normal-fault earthquake, the other 7 earthquakes was strike-slip earthquakes with nearly horizontal P-axis in NNE-SSW direction, which was consistent with principal compressive stress axis of the focal mechanism solutions in historical earthquakes. Combination with stress field and tectonic settings comprehensively, the seismogenic dynamic background of Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake was under the double effects which were northeastward compression of India plate to Eurasia plate and northeastward subduction of Burma arc to Baoshan-Tengchong block. The Baoshan-Tengchong block moved horizontally along NE direction, which leaded to the left-lateral strike-slip motion of Dayingjiang Fault

Key words: CAP method; focal mechanism; Yingjiang $M_s 5.8$ earthquake; seismogenic fault