

王力伟, 吴国瑞, 黄柳芳. CAP方法反演新丰江锡场地区  $M_L$  4.0级以上地震震源机制解[J]. 华南地震, 2018, 38(3): 1-8. [WANG Liwei, WU Guorui, HUANG Liufang. Focal Mechanism Inversion of  $M_L \geq 4.0$  Earthquakes in Xichang, Xinfengjiang Reservoir by CAP Method[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(3): 1-8]

## CAP方法反演新丰江锡场地区 $M_L$ 4.0级以上地震震源机制解

王力伟<sup>1,2</sup>, 吴国瑞<sup>2</sup>, 黄柳芳<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地球物理研究所 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081;

2. 广东省地震局, 广州 5100701)

**摘要:** 利用区域台网宽频带波形数据, 采用CAP方法反演了锡场地区5次  $M_L$  4.0级以上地震的震源机制解, 并结合地震精定位和区域活动构造讨论了其发震构造。结果显示: 2012年2月16日  $M_L$  5.2级地震的震源机制解为, 节面I: 走向351°、倾角84°、滑动角-23°, 节面II: 走向83°、倾角67°、滑动角-173°, 最佳震源深度10.39 km; 2013年2月22日  $M_L$  5.1级地震的震源机制解为, 节面I: 走向274°、倾角55°、滑动角-118°, 节面II: 走向136°、倾角43°、滑动角-56°, 最佳震源深度10.88 km。其它3个事件均以走滑为主, 破裂类型与  $M_L$  5.2级地震相似。最佳拟合震源深度集中在上地壳底部的8 km和10 km。结合区域构造和地震序列精定位结果, 认为2014年7月11日  $M_L$  4.5级地震NW向的节面I为真实破裂面, 2012年的2次地震和2014年4月25日  $M_L$  4.4级地震NEE向的节面II为真实破裂面, 2013年2月22日  $M_L$  5.1级地震真实破裂面是近EW向的节面I, 2012年2次地震和2014年4月的1次地震活动可能与近EW走向的大坑南断裂有关, 锡场地区可能存在多条相互交割的隐伏断裂。

**关键词:** 锡场地震; CAP方法; 震源机制解; 双差定位

**中图分类号:** P315.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)03-001-09

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2018.03.001

## Focal Mechanism Inversion of $M_L \geq 4.0$ Earthquakes in Xichang, Xinfengjiang Reservoir by CAP Method

WANG Liwei<sup>1,2</sup>, WU Guorui<sup>2</sup>, HUANG Liufang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 2. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** Using regional broadband waveform data, the paper inverted the focal mechanisms of five  $M_L \geq 4.0$  earthquakes swarmed in Xichang, Xinfengjiang reservoir by CAP method, and discussed the seismogenic fault based on the relocated events and regional active fault data. The results show that the best CMT solution of the Feb 16<sup>th</sup> 2012  $M_L$  5.2 earthquake is, Plane I: strike=351°, dip=84° and rake=-23°, plane II: strike=83°, dip=

**收稿日期:** 2018-03-28

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41474114); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH18033Y)

**作者简介:** 王力伟(1985-), 男, 工程师, 主要从事介质结构和波速变化研究。

**E-mail:** wlw032@163.com.

67° and rake=-173°, and the best fitting depth is 10.39 km. The best CMT solution of the Feb 22<sup>nd</sup> 2013  $M_L$  5.1 earthquake is, Plane I: strike=274°, dip=55° and rake=-118°, plane II: strike=136°, dip=43° and rake=-56°, and the best fitting depth is 10.88 km. The focal mechanisms of other three earthquakes are consistent with the  $M_L$  5.2 earthquake, typically strike slip fault. And the best fitting depth are concentrated on 8km and 10 km, which located in the lower part of the upper crust. By analyzing the relocated earthquake distributions and regional active fault, the paper consider the true slip fault of the two earthquakes in 2012 and the one earthquake in Apr 25<sup>th</sup> 2014 is NEE trending nodal plane I. And EW trending nodal plane II is the Feb 22<sup>nd</sup> 2013  $M_L$  5.1 earthquake's truth slip fault. The EW trending Dakeng south active fault may be the active fault of the two earthquakes in 2012 and the one earthquake in Feb 2014. Some crossing buried faults may exist in the Xichang area.

**Keywords:** Xichang area; CAP method; Focal mechanism; Double difference relocation

## 0 引言

锡场地区位于新丰江水库西北库尾处, 水库内构造活动强烈, 加上水库水的作用, 具备发生中强地震的构造背景和介质条件<sup>[1]</sup>, 曾在 1962 年 3 月 19 日发生 6.1 级地震。此后一直小震不断。1959 年水库开始蓄水至 2011 年, 地震活动主要集中在库区东南的峡谷区和大坝附近。2012 年后, 地震活动开始往库区西北方向扩展, 锡场地震活动开始活跃<sup>[2-3]</sup>。2012 年 2 月、2013 年 2 月, 锡场地区接连发生 2 次  $M_L$  5.0 级以上地震, 期间还发生了 3 次  $M_L$  4 级以上地震和多次小震群活动(图 1)。库区地震活动出现明显变化。

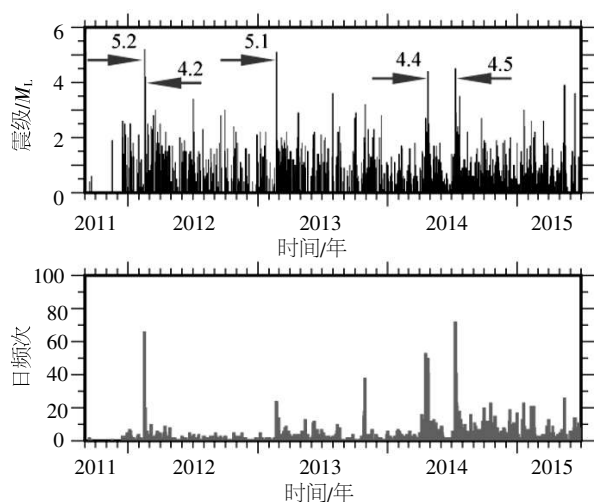


图 1 锡场地区地震震级-时间图

Fig.1 Magnitude versus time sequence of earthquakes with  $M_L \geq 0.0$  in Xichang area

受库区以往地震活动空间分布的影响, 大量研究和监测台站均集中在东南的峡谷区和大坝附近(图 2)<sup>[1,3-5]</sup>, 因此, 对锡场地区的认识不及东南侧深入。2012 年  $M_L$  5.2 地震后, 刘特培等<sup>[6]</sup>认为该

地震为走滑兼正断错动, 并提出水库西北角附近可能存在尚未明确的北西向小破裂带。叶秀薇等<sup>[7]</sup>通过震源位置和速度结构联合反演, 认为该序列展布呈近东西向, 是自西向东的单侧破裂。2013 年  $M_L$  5.1 地震后, 邵叶等<sup>[8]</sup>利用  $M_L$  1.0 以上小震资料, 对锡场地区北东东向和北西向两条小震密集带进行了断层参数拟合, 认为北东东向右旋走滑断裂是 2012 年 2 月  $M_L$  5.2 级地震发震构造, 北西向左旋走滑断裂是 2013 年 2 月  $M_L$  5.0 级地震发震构造。

然而, 目前对锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震的震源机制、发震深度和发震构造尚无更全面的认识。本文首先利用双差定位方法对 2012 年 2 月至 2015 年 7 月锡场地区  $M_L$  0.0 级以上地震进行了重新定位, 然后利用 CAP 方法反演了这 5 次  $M_L$  4 级以上地震的震源机制解和发震深度, 最后, 通过综合分析地震震源机制解、地震空间分布和区域活动断裂展布, 对这 5 次地震的发震构造和机理进行了进一步研究。

## 1 地质构造特征和数据

新丰江水库位于燕山期花岗岩体之上, 东侧与晚白垩纪—第三纪断陷盆地呈断层接触<sup>[1]</sup>。区内构造活动强烈, 新生代早期曾有强烈的火山喷发, 且拉张形成一定规模的河源—杨村盆地<sup>[1,9]</sup>。该区是北东、北西、近东西和南北向断裂的交汇处<sup>[9]</sup>, 北东—北北东向断裂最为发育, 以逆断层或逆掩断层为主, 主要有河源—邵武断裂、人字石断裂和大坪—岩前断裂。北北西向的石角—新港—白田断裂在库区东侧发育, 由许多小断裂组成, 与其他走向断裂相切割。近东西向断裂以陡倾角为主, 有南山—坳头断裂和大坑南断裂<sup>[1,9]</sup>。这些断裂无

明显地表出露,是地壳深部的主要构造<sup>[1,9-10]</sup>。锡场地区最主要的构造为南北向的兰屋—太和洞断裂,其位于锡场东侧,南北长约 17 km,东西宽约 6~10 km。另一条南北向构造为在锡场西侧经过的锡场向斜,南北可见长度 3 km,东西宽 4 km,在两条南北向构造之间,存在一条近东西向地表没有出露的,由重磁资料推断的大坑南断裂<sup>[2]</sup>。

新丰江水库地震监测能力较高,截止到2012

年,已形成具有 22 个地震台站组成的水库台网(图 2)。最小完备震级达  $M_L$  0.0 级。300 km 范围内,现有方位角覆盖良好的宽频带地震台站 43 个。本文收集了广东省数字地震台网观测的 2012 年 2 月 1 日至 2015 年 7 月 1 日锡场地区  $M_L$  0.0 级以上地震观测报告,以及锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震的观测波形数据。这些丰富的资料,为震源机制解反演和地震精定位提供了较好的基础。

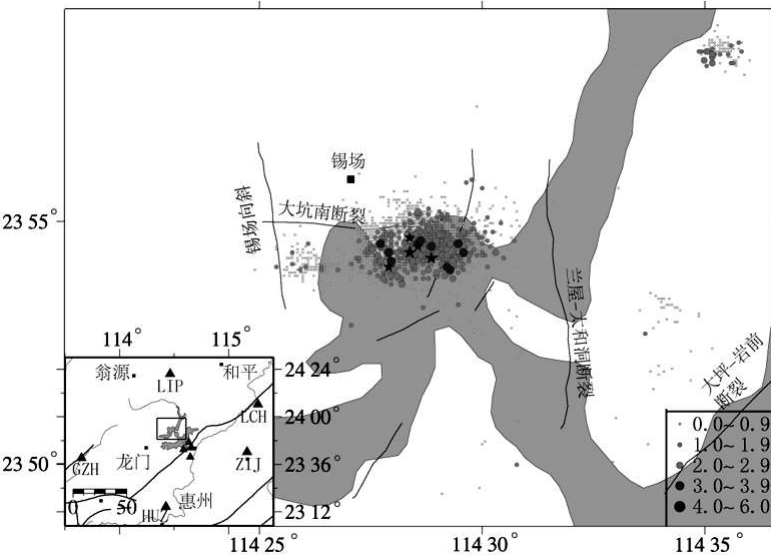


图 2 锡场地区地震及断裂分布图

Fig.2 Earthquakes and active faults distribution in Xichang area

图 2 中灰色区域为新丰水库水系,灰色和黑色实心圆为 2012 年 2 月 1 日至 2015 年 7 月 1 日锡场地区  $M_L$  0.0 级以上地震。黑色五角星为该区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震。黑色线条为活动断裂<sup>[2]</sup>,黑色正方形为地名。左下角插图,黑色矩形为锡场地区范围,黑色三角为锡场周边的测震台站,黑色线条为活动断裂(来至软件 MAPSIS 邓起东活动断裂),黑色圆点为地名。

2 精定位

为了减少定位误差对理论地震图计算的影响,以及更好的根据地震空间展布判断分析地震的真

实发震断层。本文利用地震观测报告,仅使用震相到时数据,利用双差定位算法<sup>[11]</sup>对 2012 年 2 月 1 日至 2015 年 7 月 1 日锡场地区  $M_L$  0.0 级以上地震进行了精定位。精定位所用的速度模型,是根据新丰江库区开展的人工地震探测剖面<sup>[9]</sup>及层析成像结果<sup>[12]</sup>,并参考华南一维速度模型<sup>[13]</sup>及 crust2.0<sup>[14]</sup>建立(表 1)。模型采用上、中、下 3 层地壳模型,其中上地壳分上下两层,上地壳上部层厚 2 km, P 波速度 5.5 km/s, S 波速度 3.48 km/s,主要包括基底之上的沉积层和破碎风化壳,上地壳下部层厚 9 km, P 波速度 6.0 km/s, S 波速度 3.4 km/s,中地壳厚度 10.5 km, P 波速度 6.15 km/s, S 波速度 3.58 km/s,下地壳厚度 10.5 km, P 波速度 6.8 km/s, S 波速度 3.9 km/s。

表 1 地壳速度模型

Table 1 Structure velocity model

序号	厚度/km	P 波波速/(km·s <sup>-1</sup> )	S 波波速/(km·s <sup>-1</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
1	2.0	5.50	3.48	2 400
2	9.0	6.00	3.40	2 700
3	10.5	6.15	3.58	2 900
4	10.5	6.80	3.90	3 100
5	—	8.10	4.65	3 400

精定位前, 观测报告中地震数目 3 072 个, 精定位后地震数目 2 912 个。双差定位算法震相相对挑选条件为: 事件对之间最大距离设置为 2 km, 事件对至台站最远距离为 300 km, 邻居间最小震相相对数目为 8 个。共挑选出 53 个地震台站记录到的 120 920 个 P 波走时差和 163 356 个 S 波走时双差数据, 并设 P 波震相权重系数为 1.0, S 波震相权重系数为 0.75, 选取阻尼最小二乘进行反演。精定位结果见图 3 和图 4。

图 3 中, 蓝色区域代表新丰江水库水域, 黑色沙滩球表示 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震的震源机制解, 灰色实心圆点表示精定位后的地震事件 (2012 年 2 月 1 日至 2015 年 7 月 1 日,  $M_L \geq 0.0$ ), 黑色线条代表区域活动断裂<sup>[2]</sup>, AA'、BB' 等 5 条直线代表图 4 的深度剖面的起点和终点, 图中左上角的黑色箭头代表区域主压应力场的方向<sup>[8-9]</sup>, 右上角的插图表示 2013 年 02 月 22 日  $M_L$  5.1 级地震震后 2 个月内精定位后的地震分布。

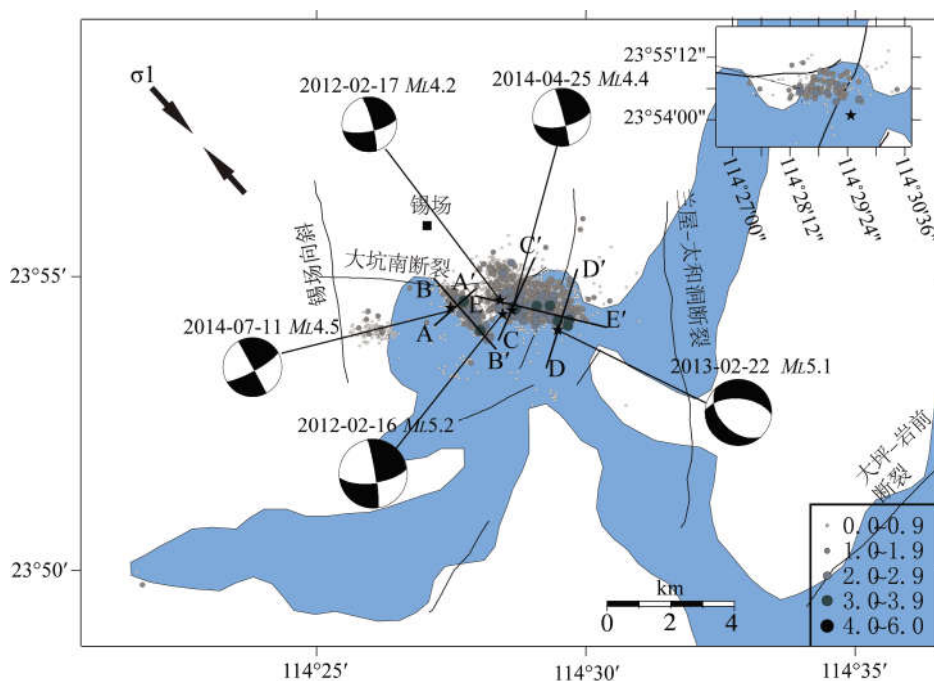
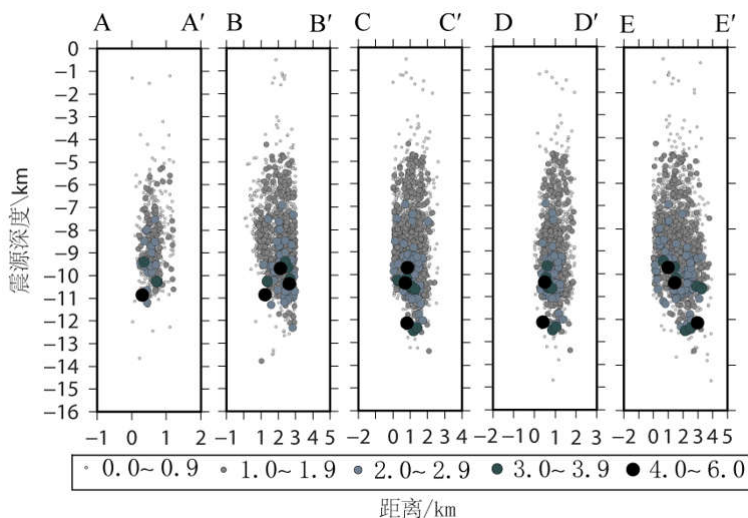


图 3 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震的震源机制解以及精定位后的地震分布

Fig.3 Focal mechanisms of five earthquakes with magnitude larger than  $M_L \geq 4.0$  and relocated events in Xichang area



(图中, 不同颜色和形状代表地震的震级, AA' 等剖面起点和终点位置见图 6。)

图 4 精定位后的地震事件深度剖面

Fig.4 Depth profile of relocated earthquakes in Xichang area

### 3 近震波形反演震源机制解和震源深度

#### 3.1 理论和方法

中小地震的震源位错辐射的位移场可用双力偶点源表示为<sup>[15-16]</sup>:

$$s(t) = M_0 \sum_{i=1}^3 A_i(\theta - \varphi_i, \delta, \lambda) G_i(t) \quad (1)$$

式(1)中,  $s(t)$ 为地震位错辐射的位移场,  $\varphi$ 表示断层的走向,  $\delta$ 表示断层倾角,  $\lambda$ 表示断层滑动角,  $G_i(t)$ 为格林函数,  $M_0$ 为标量地震矩,  $A_i$ 表示震源的辐射花样,  $\theta$ 为台站方位角。因此,理论上将观测波形  $u(t)$ 和理论计算波形  $s(t)$ 进行比较,便可求得震源的震源机制解。

CAP方法(Cut And Paste)是利用近震宽频带波形数据,采用体波和面波联合反演地震震源机制的一种方法<sup>[15-16]</sup>,它将整个记录波形分为P波部分(Pnl)和面波部分(Sur),将三分量波形数据的5个不同的时间窗内的观测波形和理论波形进行比较,并建立误差函数,通过格点搜索方法,在适当的范围内循环搜索地震深度、方位角、倾角和滑动角,最终得到相对误差最小时的震源机制解和地震深度。该方法允许波形拟合时有不同的时移,可减少地下速度结构对结果的影响。同时,可对Pnl和面波赋予不同权重,通过给Pnl部分赋更大的权重来避免面波在反演过程中权重过大的影响。并在误差函数中引入距离影响因子,以校正衰减对波形的影响。由于Pnl中的sPmP、sPg和sPn等震相含有震源深度信息,因此,该方法也能较好的确定震源的矩心深度<sup>[17]</sup>。该方法在中小地震( $\geq M 3.5$ )震源反演中得到广泛应用<sup>[17-21]</sup>。

#### 3.2 数据处理

使用CAP方法反演前的数据预处理主要包括以下几步:

(1)波形数据准备,包括数据格式转换,如seed到sac,剔除震中距在300 km以外的台站,和震中距较近的记录限幅的台站,并剔除信噪比较低的台站,仅利用质量较好的宽频带台站参与反演。

(2)观测波形预处理,主要包括去均值、去倾斜、水平分量旋转至径向和切向,手动标注P波和面波震相,以及按一定时间窗截取震相,我们没有去除仪器响应,直接采用观测的速度记录和FK计算的理论速度记录进行比较。本文截取P波长度35 s、面波长度70 s,并对截取后的震相进行带通滤

波,P波滤波范围0.02~0.15 Hz,面波滤波范围0.02~0.1 Hz,并对截取后的波形进行两端尖灭处理。

(3)理论地震图计算,利用研究区建立的一维速度结构(表1),采用频率—波数法计算理论地震图<sup>[22]</sup>,并采用与观测波形相同的截取窗长和滤波参数进行预处理。

(4)震源机制解反演,利用准备好的理论和观测波形数据,通过波形拟合在一定参数空间内搜索,得到相对误差最小的解便是最优解。波形拟合时允许P波有5 s,S波有10 s的时间移动,P波权重为1.0,面波权重为0.5。

#### 3.3 反演结果分析

受篇幅限制,我们仅展示了两地震的波形拟合图,图5和图6分别给出了5次地震中最大地震(2012年2月16日  $M_L 5.2$ )和最小地震(2012年2月17日  $M_L 4.2$ )的波形拟合结果。从图5可见,2012年2月16日  $M_L 5.2$ 级地震反演时,共有17个台站,81个震相参与反演。P波互相关系数大于0.9的有12个,占35.3%;P波互相关系数大于0.8的有26个,占76.5%。面波互相关系数大于0.9的有45个,占91.8%,面波互相关系数大于0.8的有4个,占8.1%。台站方位角分布良好,波形拟合较好,结果可信。最佳拟合震源深度10.29 km,节面I走向351°、倾角54°、滑动角-23°,节面II走向83°、倾角67°、滑动角-173°,地震破裂类型为走滑为主兼少量正断型地震,与已有结果符合<sup>[7-8]</sup>。

图6展示了5次事件中,震级最小的2012年2月17日  $M_L 4.2$ 级地震的波形拟合结果,因相对  $M_L 5.2$ 级地震,震级较小,因此,经过挑选后,参与反演的台站数目仅10个,震相41个。但并不影响结果质量。由图6可见,P波互相关系数大于0.9的有2个,占18.2%;P波相关系数大于0.7的有7个,占63.6%。面波互相关系数大于0.9的有13个,占43.3%,面波互相关系数大于0.8的20个,占66.7%。台站方位角分布良好,波形拟合较好,结果可信。最佳拟合震源深度10.24 km,节面I走向345°、倾角81°、滑动角-20°,节面II走向78°、倾角70°、滑动角-170°,与  $M_L 5.2$ 级地震类似,地震破裂类型为走滑为主兼少量正断型地震,与已有结果符合<sup>[7-8]</sup>。

表2给出了全部5次  $M_L 4.0$ 级以上地震的震源机制解和最佳震源深度拟合结果(图3),从结果可见,除了2013年2月22日  $M_L 5.1$ 级地震破裂类型为走滑为主兼少量走滑外,其它4次地震事件破

裂类型均为走滑型为主的地震。震源最佳拟合深度 2014 年的两个地震集中在 8 km, 2012 年的两次事件和 2013 年的一次事件震源深度集中在 10 km, 均位于我们采用的一维速度模型的上地壳底部, 锡场地区 3~12 km 深度是一相对高速区域, 13~17km 为相对低速区<sup>[2,6,12]</sup>, 因此锡场 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震均集中在上地壳高速区内, 与新丰江大坝区域 1962 年  $M_S$  6.1 级地震震源处同样是高速体类似<sup>[2,12]</sup>。新丰江区域应力场主压应力为 NW、SE 向<sup>[9,23-24]</sup> (图 3), 受区域应力场作用, 锡场地区北西向的锡场向斜、兰屋—太和涧断裂活动类型均将为左旋走滑, 近东西向的大坑南断裂为右旋走滑, 北北东向的断裂为左旋走滑。从 5 次地震的震源机制解来看, 5 次地震均有走向近北东东向

的节面。除 2013 年 2 月 22 日  $M_L$  5.1 级地震另外一个节面为 NW 向外, 其它 4 个地震另外一个的节面均为 NNW 向。从锡场地区地震精定位结果可见 (图 3, 图 4), 2012 年 2 月 16 日  $M_L$  5.2、2012 年 2 月 17 日  $M_L$  4.2、2014 年 4 月 25 日  $M_L$  4.4 真实发震断层可能是 NEE 向的节面 II, 2014 年 7 月 11 日  $M_L$  4.5 级地震的真实破裂面可能是 NW 向的节面 I。2013 年 2 月 22 日  $M_L$  5.1 级地震位于整个序列的东南角, 且震源机制解的两个节面走向差别不大, 从全部时间的地震精定位空间展布中, 无法判断哪个是真实破裂面, 但从图 3 左上角的插图可见, 震后 2 个月的余震精定位呈现近 EW 向展布, 因此判断, 近 EW 向的节面 I 可能是真实破裂面。

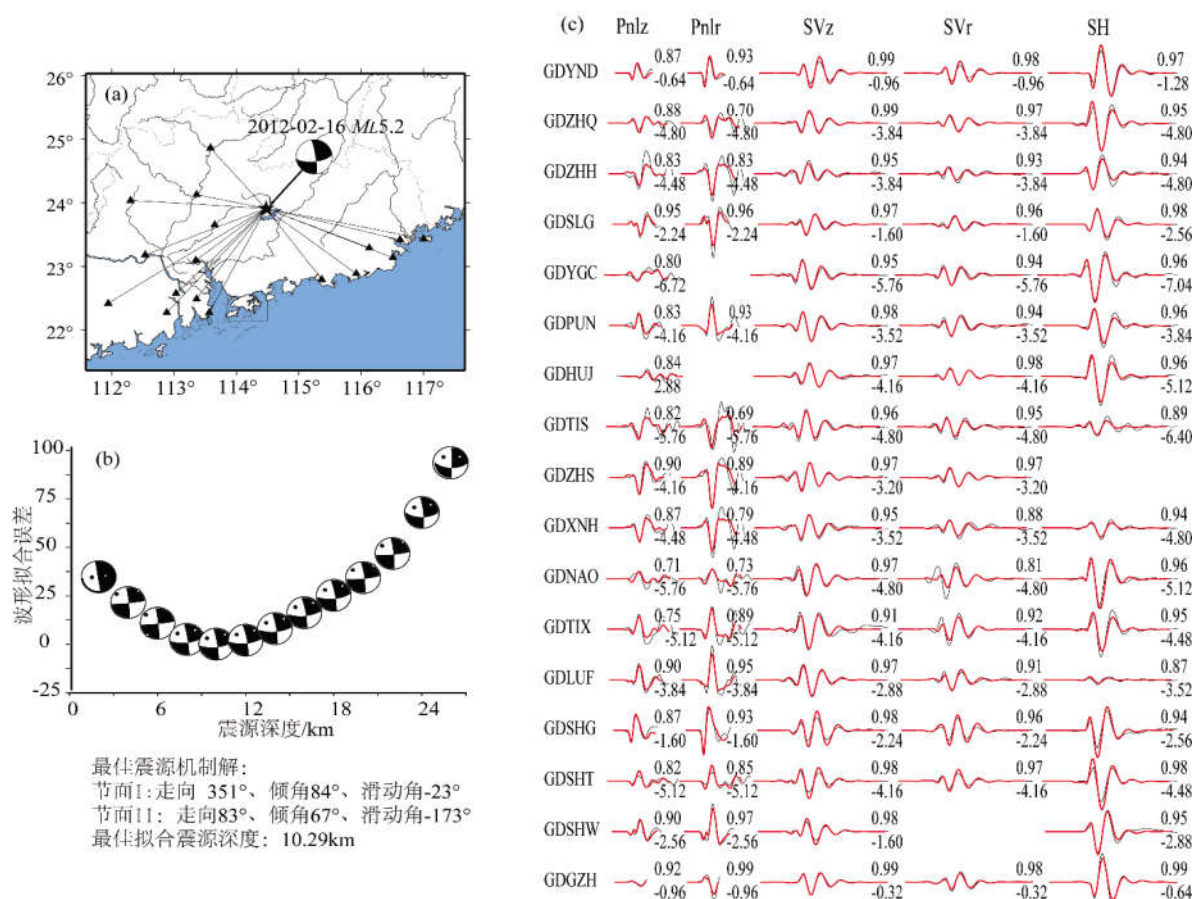
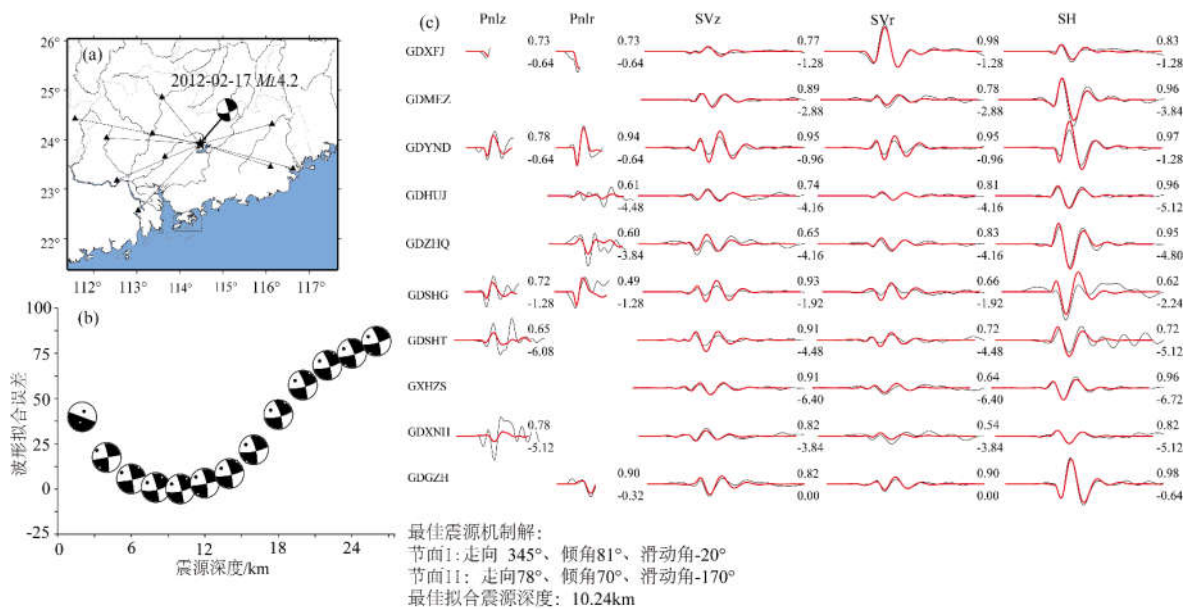


图 5 2012 年 2 月 16 日  $M_L$  5.2 级地震波形拟合图示

Fig.5 Focal mechanism inversion of the  $M_L$  5.2 earthquake on Feb 16<sup>th</sup>, 2012





(a) CAP 波形拟合选择的台站分布图;  
(b) 波形拟合误差随深度分布图, 当搜索深度为 10.24 km 时, 误差最小;  
(c) 最优 10.24 km 深度时, FK 理论波形和实际观测波形拟合结果。其中, 红线代表理论波形, 黑线代表实际观测波形, 每列波形上方标注了震相类型, 波形右上角标注了理论波形和观测波形的相关系数, 右下角标注了相应震相的时移(s), 每行最左边标注了台站的台网标识和台站名。波形最下方给出了最佳震源机制解结果。

图 6 2012 年 2 月 17 日  $M_L$  4.2 级地震波形拟合图示  
Fig.6 Focal mechanism inversion of the  $M_L$  4.2 earthquake on Feb 17<sup>th</sup>, 2012

表 2 锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震震源机制解

Table 2 Focal mechanisms of five earthquakes with magnitude larger than $M_L \geq 4.0$ in Xichang area											
发震时间	经度/(°)	纬度/(°)	震级/ $M_L$	节面 I/(°)			节面 II/(°)			拟合深度/km	
				走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角		
2012-02-16	114.47	23.91	5.2	351	84	-23	83	67	-173	10.29	
2012-02-17	114.47	23.91	4.2	345	81	-20	78	70	-170	10.24	
2013-02-22	114.48	23.90	5.1	274	55	-118	136	43	-56	10.88	
2014-04-25	114.48	23.91	4.4	346	86	-25	77	65	-175	8.28	
2014-07-11	114.47	23.90	4.5	151	90	11	61	79	180	8.38	

4 结语

本文采用 CAP 方法反演了锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震的震源机制解和震源深度。震源机制解显示 2013 年 2 月 22 日  $M_L$  5.1 级地震破裂类型为正断为主兼少量走滑, 其它 4 次地震均以走滑型为主。最佳拟合震源深度集中在 8 km 和 10 km, 正好位于该区介质波速相对较高的区域。文中采用 CAP 方法得到的最佳拟合震级  $M_w$  与  $M_L$  差异较大, 如 2012 年 2 月 16 日  $M_L$  5.2 级地震, 相差 0.78 级, 2012 年 2 月 17 日  $M_L$  4.2 级地震相差 0.46 级, 而一般认为此震级范围不同类型震级差异约 0.2 [25]。可能是文中利用 CAP 方法时, 直接采用理

论和观测速度记录进行体波和面波振幅匹配得出的震级, 因此, 得出的震级失真, 但不影响震源机制解的正确性。为进一步揭示各次地震的真实发震断层, 我们利用双差定位方法, 对锡场地区 2012 年 2 月~2015 年 7 月的  $M_L$  0.0 级以上地震进行了精定位, 定位结果显示 2014 年 7 月 11 日  $M_L$  4.5 级地震所在处的地震群呈 NW 向条带展布, 从地震深度分布剖面 AA' 和 BB' 可见, 该处地震沿深度倾角较大, 近乎直立, 倾向 SW, 这与震源机制解显示的走向 NW 的高倾角, 倾向 SW 的左旋走滑断裂相一致, 也与区域构造应力场方向符合。2012 年 2 次地震和 2014 年 4 月 25 日  $M_L$  4.4 级地震均集中在另一地震序列比较集中的区域, 从精

定位后的余震空间展布看,这一从地震整体呈现 NWW 向和 NW 向展布,与这些地震的震源机制解两个节面均吻合,2012 年 2 月 16 日  $M_L$  5.2 级地震发生后,根据现场宏观调查判断 NW 向的断裂面为真实破裂面<sup>[7,25-26]</sup>,但从图 3 该区地形来看,极震区南边全是水域,东西两侧也有部分水域,现场调查得出的 NNW 走向的等震线可能是采样点的不均匀造成的。从主震后几个月内的余震空间展布来看,这 3 次地震,NEE 向的断层面更可能是真实发震断层面,这也与其它研究的结论相一致<sup>[2,8]</sup>,高角度且倾向 SE 的 NEE 向断层面也与地震深度剖面 CC' 的 SE 倾向和倾角吻合。从震后 2 个月的仅 EW 向的余震空间展布,以及 DD' 倾向 SW 的深度剖面,我们认为 2013 年 02 月 22 日  $M_L$  5.1 级地震真实破裂面为近 EW 向、倾向 SW 的节面 I,这与其它研究不一致<sup>[9]</sup>。从图 6 锡场地区地震的深度剖面看,该区地震集中在 6~12 km 的上地壳,且从西往东有深度变深的趋势。锡场地区已知活动断裂,除近东西走向的大坑南断裂与 2012 年 2 次地震和 2014 年 4 月的 1 次地震走向和断裂切割深度相近外<sup>[2]</sup>,尚没有与 2014 年 7 月和 2013 年 2 月震源机制相符合的活动断裂。因此,该区可能有其它多条相互交割的隐伏断裂存在。

致谢:广东省数字地震台网提供了本文研究的观测报告和事件波形数据,CAP 方法采用 GeotaoS 软件包实现,精定位采用 HypoDD 软件实现。审稿人提出了建设性评审意见,期刊编辑对文稿和图件进行了修改。在此深表感谢。

## 参考文献:

- [1] 丁原章,潘建雄,肖安予,等.新丰江水库诱发地震的构造条件[J].地震地质,1983,5(3):63-74.
- [2] 叶秀薇,黄元敏,胡秀敏,等.广东东源  $M_s$  4.8 地震序列震源位置及周边地区 P 波三维速度结构[J].地震学报,2013;35(6):809-819.
- [3] 刘特培,邵叶,杨选,等.利用高精度小震资料确定新丰江水库大坝区北西向发震断层[J].地震学报,2017,39(1):23-33.
- [4] 王妙月,杨懋源,胡毓良,等.新丰江水库地震的震源机制及其成因的初步探讨[J].中国科学,1976,19(1):85-97.
- [5] 郭贵安,冯锐.新丰江水库三维速度结构和震源参数的联合反演[J].地球物理学报,1992,35(3):331-342.
- [6] 杨卓欣,刘宝峰,王勤彩,等.新丰江库区二维 P 波速度结构-英德-河源-陆河深地震测深剖面探测结果[J].地球物理学进展,2011,26(6):1968-1975.
- [7] 刘特培,刘吉平,李健梅,等.2012 年河源  $M$  4.8 级地震活动特征及预测研究[J].华南地震,2012,32(2):20-36.
- [8] 邵叶,刘特培,刘吉平.2012 和 2013 年广东新丰江锡场 2 次  $M_s$  4.8 地震发震构造的确定[J].地震,2016,36(2):132-140.
- [9] 魏柏林.新丰江水库地震震源应力场与构造应力场[J].地震地质,1981,3(1):77-81.
- [10] 潘建雄,肖安予.新丰江水库区地震构造及其活动特征的初步研究[J].地震地质,1982,4(2):53-58.
- [11] Waldhauser F, Ellsworth W L. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bull. seismol.soc.am, 2000, 90(90):1353-1368.
- [12] 叶秀薇,邓志辉,黄元敏,等.新丰江水库中上地壳 P 波三维速度结构特征及库水的渗透影响[J].地球物理学报,2017,60(9):3432-3444.
- [13] 范玉兰,林纪曾,胡瑞贺,等.华南地区近震走时表的研制[J].华南地震,1990,10(2):1-16.
- [14] Kaban M K, Schwintzer P, Reigber C. A new isostatic model of the lithosphere and gravity field[J]. Journal of Geodesy, 2004, 78(6):368-385.
- [15] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. Bull. seismol.soc.am, 1994, 84(1):91-104.
- [16] Zhu L, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(5):1634-1641.
- [17] 罗艳,倪四道,曾祥方,等.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:地球科学,2010,40(6):677-687.
- [18] 罗艳,赵里,曾祥方,等.芦山地震序列震源机制及其构造应力场空间变化[J].中国科学:地球科学,2015(4):538-550.
- [19] 张丽娜,韩立波,罗艳,等.2014 年 5 月云南盈江两次中强地震震源参数研究[J].地震,2016,36(1):59-68.
- [20] 黄建平,倪四道,傅容珊,等.综合近震及远震波形反演 2006 文安地震( $M_w$  5.1)的震源机制解[J].地球物理学报,2009,52(1):120-130.
- [21] 吕坚,郑勇,倪四道,等.2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌  $M_s$  5.7、 $M_s$  4.8 地震的震源机制解与发震构造研究[J].地球物理学报,2008,51(1):158-164.
- [22] Zhu L, Rivera L A. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2002, 148(3):619-627.
- [23] 魏柏林,徐辉龙.东南沿海地震区的现代构造应力场[J].华南地震,1996,16(4):11-19.
- [24] 赵翠萍,罗钧,周连庆.新丰江水库应力场及 2012 年 2 月 16 日 4.8 级地震震源特征研究[J].国际地震动态,2012(6):250-250.
- [25] 刘瑞丰,陈运泰,任泉,等.震级的测定[M].北京:地震出版社,2015.
- [26] 钟贻军,陈庞龙,王维亮,等.2012 年 2 月 16 日河源  $M4.8$  级地震[J].华南地震,2012,32(2):9-19.