

王力伟, 黄柳芳, 吴国瑞. 锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震的静态库仑应力触发研究 [J]. 华南地震, 2018, 38 (S1): 18-24. [WANG Liwei, HUANG Liufang, WU Guorui. Static Coulomb Stress Triggering Effect Among Five Earthquakes with  $M_L \geq 4.0$  in Xichang Area [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(S1): 18-24]

## 锡场地区 5 次 $M_L$ 4.0 级以上地震的 静态库仑应力触发研究

王力伟<sup>1,2</sup>, 黄柳芳<sup>2</sup>, 吴国瑞<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 510070)

**摘要:** 2012 年 2 月至 2014 年 7 月, 以往地震活动很弱的锡场地区接连发生 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震。为研究这 5 次事件之间是否存在应力触发关系, 首先使用双差定位方法、CAP 方法反演得到了这 5 次事件精确的震源位置、震源机制解和震源深度, 并根据精定位后的地震展布和区域活动断裂选择了真实发震断层面。以此计算了锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震之间的静态库仑应力触发影响。计算结果表明: 锡场地区 5 次地震之间累计静态库仑应力变化大小均超过阈值 0.1 Bar, 存在应力触发现象。其中, 2014 年 7 月 11 日的  $M_L$  4.5 级地震被已发生的前 4 次地震触发, 应力增加达 0.331 Bar; 2014 年 4 月 25 日的  $M_L$  4.4 级地震被已发生的前 3 次地震触发, 应力增加达 0.368 Bar; 而 2013 年 2 月 22 日的  $M_L$  5.1 级可能被前面两次地震触发, 累计静态应力增加为 0.119 Bar, 大于阈值 0.1 Bar; 2012 年 2 月 17 日的  $M_L$  4.2 被 2012 年 2 月 16 日的  $M_L$  5.2 级地震抑制, 应力降低为 3.37 Bar。

**关键词:** 锡场地震; CAP 方法; 震源机制解; 双差定位; 静态库仑应力触发

**中图分类号:** P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)S1-0018-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2018.S1.003

## Static Coulomb Stress Triggering Effect Among Five Earthquakes with $M_L \geq 4.0$ in Xichang Area

WANG Liwei<sup>1,2</sup>, HUANG Liufang<sup>2</sup>, WU Guorui<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:** From February 2012 to July 2014, five earthquakes with  $M_L \geq 4.0$  occurred in Xichang, Xinfengjiang reservoir, where seismicity was weak before. To study whether these five earthquakes were triggered by each other, this paper firstly relocated these earthquakes by using HypoDD method, then inversed the focal

**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.

mechanisms and best fitting depths of these five earthquakes. Secondly, the paper selected the true seismogenic fault plane based on the seismic distribution and regional active fault data. Finally, this paper calculated the static coulomb stress changes of these earthquakes. The results show that the static coulomb stress triggering effect does exist in Xichang area. The cumulative static coulomb stress changes of these five earthquakes exceed the threshold of 0.1Bar. The  $M_L$  4.5 earthquake on July 11<sup>th</sup> was triggered by the other four earthquakes with stress increase of 0.331Bar, and the earthquake on April 25<sup>th</sup> was also triggered by the former three earthquakes with stress increase of 0.368Bar. Considering the uncertainty of calculation parameters, the  $M_L$  5.1 earthquake on February 22<sup>nd</sup> may be triggered by the two previous earthquakes with stress increase of 0.119Bar, which is slightly greater than the threshold of 0.1Bar. But for the  $M_L$  4.2 earthquake on February 17<sup>th</sup>, it was significantly suppressed by the  $M_L$  5.2 earthquake on February 16<sup>th</sup> with the stress decrease of 3.37Bar.

**Keywords:** Xichang area; CAP method; Focal mechanism; Double difference relocation; Static coulomb stress trigger

## 0 引言

锡场地区位于新丰江水库西北库尾处,新丰江水库是地震多发区,1962年3月19日曾在库区大坝附近发生6.1级地震<sup>[1]</sup>,之后小震不断,但地震活动呈分区特征,地震集中在库区东南的峡谷区和大坝附近,锡场地区地震较少。2012年2月16日,锡场发生 $M_L$  5.2级地震<sup>[2-5]</sup>,打破了该区地震平静特征,此后新丰江水库的地震活动开始往锡场迁移,震后3年内,锡场地区接连发生4次 $M_L$  4.0级以上地震(图1),其中最大为2013年2月22日 $M_L$  5.1级<sup>[6]</sup>。在背景地震活动如此弱的小区域,接连发生的这5次事件之间是否存在应力触发关系值得讨论。

地震的发生可认为是地震断层面上加载的应力超过了其破裂极限,断层突然错动释放能量的过程。库仑应力即是利用投影到地震断层面的正应力和剪切应力来描述地震断层的破裂状态<sup>[6-7]</sup>,库仑应力增加,则会促进断层发生破裂,反之,库仑应力减少,便会延缓断层发生破裂,从而从力学机制上为地震危险性判断提供了有力工具。库仑应力分静态库仑应力变化和动态库仑应力变化<sup>[6-9]</sup>,静态库仑应力变化因随距离衰减较快<sup>[8-9]</sup>,因此多用于讨论区域构造关联地区地震之间的应力触发作用<sup>[10-11]</sup>,主震对余震空间分布的控制作用<sup>[12]</sup>,大地震对周边已知活动断裂的加卸载作用<sup>[13]</sup>,以及基于速率-状态关系研究应力扰动对区域地震活动速率的影响<sup>[14]</sup>。动态库仑应力因随距离衰减较慢<sup>[9-10]</sup>,多用于研究距离较远的跨构造块体的大地震间的应力触发作用<sup>[9-10]</sup>,以及大震面波产生的应力扰动对特殊构造的小区域的微震触发作用<sup>[15]</sup>,随着模板匹

配滤波等新的微震识别方法的出现<sup>[16]</sup>,远震应力触发在更多的区域被发现<sup>[15]</sup>。库仑应力物理概念明确,计算高效,因此在国内外得到了广泛应用。万永革<sup>[17]</sup>通过检验发现,从全球角度看,地震静态库仑应力触发现象的确存在。库仑应力计算的基础是地震位错产生的位移场<sup>[18]</sup>,目前,其计算方法也从较理想的均匀弹性半空间模型<sup>[18]</sup>,发展到分层弹性介质模型<sup>[19]</sup>,甚至分层黏弹性介质模型<sup>[19]</sup>,并可模拟长时间尺度下,重力和黏弹性对同震位移场的影响<sup>[19-20]</sup>。

因锡场地区研究范围较小,仅6 km,且5次 $M_L$  4.0级以上地震事件时间跨度较短,仅3年。因此,我们利用均匀弹性半空间中的位错理论,通过计算地震之间的静态库仑应力触发作用,讨论了5次地震之间的应力触发现象。因静态库仑应力计算对地震之间相对位置、震源机制和震源深度较敏感<sup>[21]</sup>,为减少参数不确定性对计算结果的影响。本文首先采用HypoDD双差定位方法对5次地震进行了相对定位<sup>[22]</sup>;其次,使用CAP方法利用近震波形数据反演了各次地震的震源机制解和最佳震源深度<sup>[23]</sup>;然后,根据区域活动构造和精定位后的余震空间展布选择真实发震断层面,并利用coulomb3.3软件包计算了5次地震之间的静态库仑应力触发作用。最后,对不同参数的选取对计算结果的影响进行了讨论。

图1中蓝色区域为新丰江水库水系,黑色沙滩球为采用CAP方法反演的5次 $M_L$  4.0级以上地震的震源机制解,灰色和黑色实心圆为2012年2月1日至2015年7月1日锡场地区精定位后的 $M_L$  0.0级以上地震,黑色实心五角星为该区精定位后的5次 $M_L$  4.0级以上地震,黑色空心五角星为未精定位前的位置。黑色线条为活动断裂<sup>[2]</sup>。

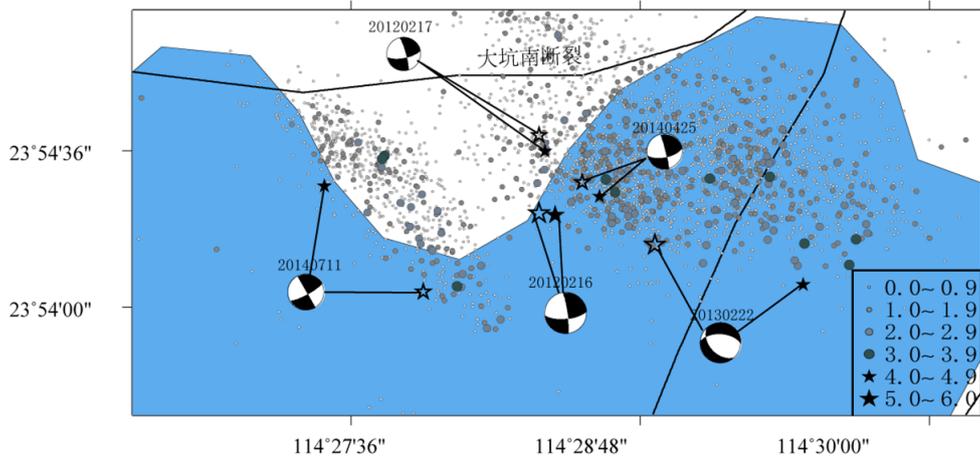


图 1 锡场地区地震及断裂分布图

Fig.1 Earthquakes and active faults distribution in Xichang area

### 1 原理和方法

投影到接收断层面的静态库仑应力变化的计算基础是弹性位错理论, Okada 给出均匀弹性半空间中各种类型断层位错产生的位移场和应变场的解析表达式<sup>[18]</sup>, Wang 发展了自重多层粘弹性介质中任意位错产生应力场的格林函数求解方法<sup>[19]</sup>. 利用计算得到的地震位错产生的静态应变场, 便可以根据介质本构关系得到静态应力场的变化。

运用库仑应力破裂准则, 将静态应力场变化投影到已知的接收断层面上, 便得到静态库仑应力变化为:

$$\delta\sigma_{CS} = \delta\tau + \mu \delta\sigma_n \quad (1)$$

式(1)中  $\delta\tau$  为剪切应力变化(与滑动方向同向为正),  $\delta\sigma_n$  为正应力变化(张开为正), 其中  $\mu = (1-B)$ ,  $B$  为 Skempton 系数。静态库仑应力变化利用地震位错产生的应力场投影到接收断层的剪应力和正应力来综合描述断层的破裂状态, 库仑应力增加, 则促进断层破裂, 使下次地震发生时间提前, 反之, 则抑制断层破裂, 使下次地震发生时间延后。

### 2 模型及参数选取

#### 2.1 地震位置

静态库仑应力计算对地震之间的相对位置比较敏感<sup>[21]</sup>, 为减少震源定位误差对计算结果的影响, 我们首先利用地震观测报告中的震相到时数据, 利用双差定位方法对锡场地区的 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震进行了相对定位。精定位采用的速度模型是根据

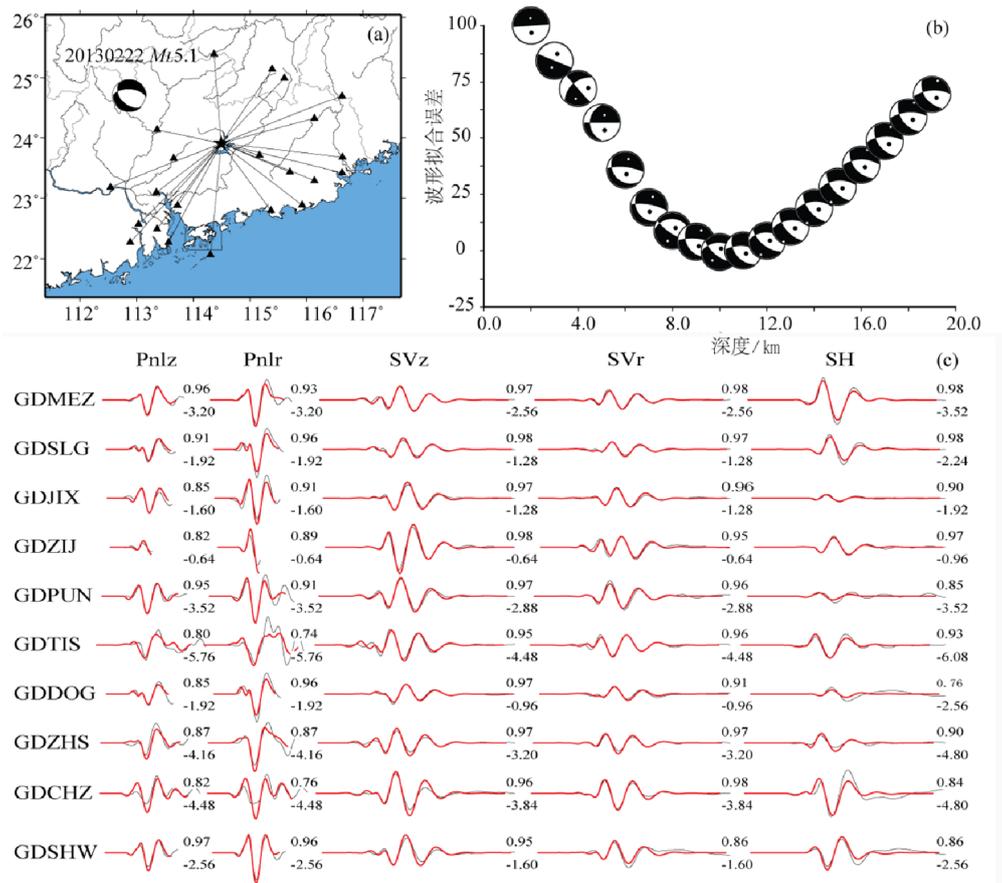
新丰江库区开展的人工地震探测剖面<sup>[24]</sup> 及层析成像结果<sup>[2]</sup>, 并参考华南一维速度模型<sup>[25]</sup>及 crust2.0 建立(表 1)。精定位后的震源位置如图 1 所示, 其中, 2012 年 2 月 16 日  $M_L$  5.2 级地震、2012 年 2 月 17 日  $M_L$  4.2 级地震和 2014 年 4 月 25 日  $M_L$  4.4 级地震, 这三次地震精定位前后位置偏移较小, 水平距离偏移约 0.12 km, 但是, 2013 年 2 月 22 日  $M_L$  5.1 和 2014 年 7 月 11 日  $M_L$  4.5 这两次地震精定位前后地震位置差异较大, 水平距离偏移达 1.1 km。

因精定位对震源深度的约束没水平位置精确, 为进一步减少震源深度定位误差对静态库仑应力计算结果的影响, 本文使用区域近震宽频带波形数据, 采用 CAP 方法<sup>[23]</sup>使用体波和面波联合反演了这 5 次地震的震源机制解和最佳拟合震源深度。CAP 方法反演震源机制解时, PnI 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>[26]</sup>。表 2 给出了各次地震的最佳拟合震源深度。图 2 以 2013 年 2 月 22 日  $M_L$  5.1 级为例, 展示了使用 CAP 方法反演地震震源机制解和最佳震源深度的实例。

表 1 地壳速度模型

Table 1 Structure velocity model

序号	厚度/km	P 波波速/ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	S 波波速/ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-3}$ )
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



(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 10.88 km 时,误差最小;  
 (c)最优 10.88 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,共 22 个台站参与反演,图中仅画出部分结果。

图 2 2013 年 2 月 22 日  $M_L$  5.1 级地震波形拟合和最佳震源深度图示

Fig.2 Focal mechanism inversion and best fitting depth of the  $M_L$  5.2 earthquake on February 22<sup>nd</sup>, 2013

### 2.2 震源机制

中小地震的震源破裂过程可以用双力偶点源模型来描述,其求解过程即是反演地震的震源机制解。本文采用 CAP 方法<sup>[23]</sup>(Cut And Paste)反演了 5 次地震的震源机制解(表 2)。该方法使用近震宽频带的体波和面波数据,通过将整个记录波形,按 P 波部分和面波部分分别裁剪,将 3 分量地震记录波形中的 5 个不同时间窗内的观测波形,分别与理论计算波形进行比较,通过在走向、倾角、滑动角、震源深度、震级参数空间进行搜索,寻找误差函数的极小值处所对应的解便是该地震的最佳震源机制解,所对应的深度便是最佳震源深度。图 2 以 2013 年 2 月 22 日  $M_L$  5.1 级地震为例,展示了其反演过程。图中 P 波截取长度 35 s、面波截取长度 70 s, P 波滤波范围 0.02~0.15 Hz,面波滤波范围 0.02~0.1 Hz,理论地震图采用频率-波数法<sup>[27]</sup>,利用表 1 的一维速度结构计算得到。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。从图 2 可见,波形拟合较好,结果可信。

### 2.3 发震断层面

地震震源的双力偶点源模型中,断层面和辅助断层面所辐射的地震波同样,因此,从震源机制解无法判断哪一个节面是真实断层破裂面。但是,静态库仑应力计算时,需要确定发震断层的几何参数和接收断层的几何参数,因此必须对各次地震的发震断层面进行判断。大地震破裂尺度较大,一般几百公里,并且有明显的地表破裂带,因此,大地震的真实破裂面很容易获得。中小地震多发生在地壳深部,破裂尺度较小,且没有地表破裂,因此其发震断层的判断较难。目前,多根据余震空间展布、区域活动断裂展布等综合判断。为判断这 5 次地震的发震断层面,我们对

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, 精定位采用双差定位方法, 采用表1的速度模型。

从图1精定位后的地震分布, 我们判断, 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地震的真实发震断层面可能是 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。

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 mechanism of five earthquakes with magnitude over  $M_L > 4.0$  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	<b>83</b>	<b>67</b>	<b>-173</b>	10.29
2012-02-17	114.47	23.91	4.2	345	81	-20	<b>78</b>	<b>70</b>	<b>-170</b>	10.24
2013-02-22	114.48	23.90	5.1	<b>274</b>	<b>55</b>	<b>-118</b>	136	43	-56	10.88
2014-04-25	114.48	23.91	4.4	346	86	-25	77	<b>65</b>	<b>-175</b>	8.28
2014-07-11	114.47	23.90	4.5	<b>151</b>	<b>90</b>	<b>11</b>	61	79	180	8.38

注: 表中黑体数字为真实发震断层

### 3 计算结果与讨论

利用计算得到的5次地震的震源位置、震源深度、震源机制解和真实断层破裂面, 我们使用 Coulomb3.3 计算程序, 计算了各次地震对后续地震的静态库仑应力触发影响。图3以2012年2月16日  $M_L$  5.2级地震对2013年2月22日  $M_L$  5.1级地震的静态库仑应力触发计算为例, 详细计算过程如下: 首先, 根据 CAP 方法拟合的最佳矩震级, 根据 Wells 和 Coppersmith 的经验关系<sup>[28]</sup>计算发震断层的破裂面尺度和位错量大小, 并以此建立矩形均匀位错断层模型, 为减少近断层附近计算奇异点对结果的影响<sup>[28]</sup>, 我们采用 0.14 km 的间隔对发震断层面进行了均匀分割(图3所示)。并设置

均匀弹性半空间模型的参数为: 泊松比 0.25, 杨氏模型  $8.0 \times 10^5$  Bar, 库仑应力的投影断层面为接收断层的发生断层面, 计算深度为接收断层的震源深度, 断层面摩擦系数取 0.4。计算结果如图3所示, 2013年2月22日  $M_L$  5.1级地震位于2012年2月16日  $M_L$  5.2级地震静态库仑应力降低区域, 2012年2月16日  $M_L$  5.2级地震的发生, 抑制了2013年2月22日  $M_L$  5.1级地震的发生, 使其发生时间延后。表3给出了摩擦系数为 0.4 的情况下, 这5次地震之间的静态库仑应力触发结果。从表中可见, 2012年2月16日  $M_L$  5.2级地震对2013年2月22日  $M_L$  5.1级地震的静态库仑应力降低了为 -0.175 Bar, 大于触发阈值 0.1 Bar, 因此, 认为2012年2月  $M_L$  5.2级地震被2013年2月的  $M_L$  5.1级地震抑制。

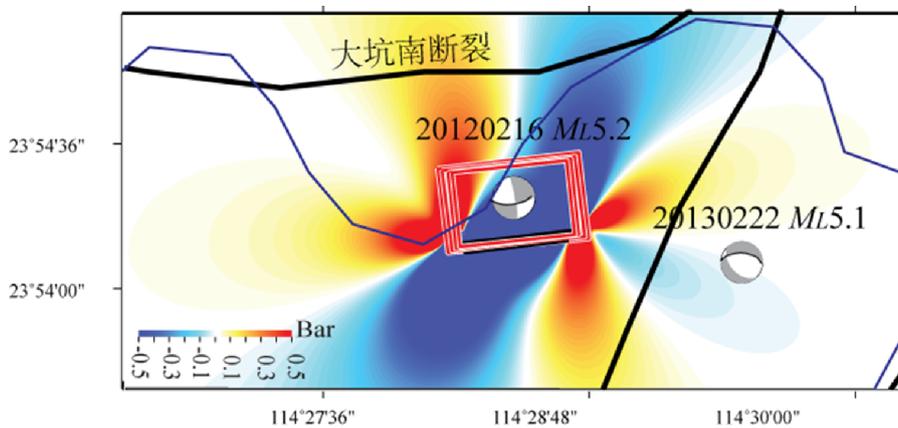


图3 2012年2月16日  $M_L$  5.2级地震对2013年2月22日  $M_L$  5.1级地震的静态库仑应力触发计算示例

Fig.3 Static coulomb stress change of the  $M_L$  5.2 earthquake on February 16<sup>th</sup> applied on the  $M_L$  5.1 earthquake on February 16<sup>th</sup>

图 3 中,灰色沙滩球表示地震的震源机制解,两个节平面中以黑色线条表示的节平面为库仑应力计算选择的断层面,红色矩形框为 2012 年 2 月 16 日地震断层破裂面在地表的投影,以间距 0.14 km 对

源断层面进行分割,以减少近断层附近计算奇点的干扰。黑色粗线条表示区域活动断裂<sup>24</sup>,蓝色曲线表示新丰江水库水域边界(南侧为水域),静态库仑应力增加以红色表示,静态库仑应力降低以蓝色表示。

表 3 锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震的静态库仑应力触发结果

Table 2 3 Static coulomb stress trigger effect of five earthquakes with  $M_L > 4.0$  in Xichang area

源断层	震级( $M_L$ )/接收断层				
	5.2/2012-02-16	4.2/2012-02-17	5.1/2013-02-22	4.4/2014-04-25	4.5/2014-07-11
2012-02-16		-3.370	-0.175	0.295	0.272
2012-02-17			-0.017	0.036	0.023
2013-02-22				0.037	-0.011
2014-04-25					0.047
总和/Bar		-3.370	-0.192	0.368	0.331

表 3 中给出了已发生的地震对尚未发生的地震的静态库仑应力计算结果,从表中可见,2012-02-16  $M_L$  5.2 级地震抑制了 2012-02-17  $M_L$  4.2 级地震的发生,库仑应力变化为-3.37 Bar,应力降低 3.37 Bar,大于静态应力影响阈值 0.1 Bar;该地震也抑制了 2013-02-22  $M_L$  5.1 级地震的发生,库仑应力降低 0.175 Bar,也大于阈值 0.1 Bar,使这两次地震的发生时间延后;但该地震触发了 2014-02-25  $M_L$  4.4 级地震和 2014-07-11  $M_L$  4.5 级地震,使这两次地震的发生时间提前。2012-02-17  $M_L$  4.2 级地震也抑制了 2013-02-22  $M_L$  5.1 级地震的发生,应力降低 0.017 Bar,小于阈值 0.1 Bar,抑制效应不显著;但该地震触发了 2014-02-25  $M_L$  4.4 级地震和 2014-07-11  $M_L$  4.5 级地震,使这两次地震的发生时间提前。2013-02-22  $M_L$  5.1 级地震触发了 2014-04-25  $M_L$  4.4 级地震,应力增加 0.037 Bar;但抑制了 2014-07-11  $M_L$  4.5 级地震,应力降低 0.011 Bar。2014-04-25  $M_L$  4.4 级地震触发了 2014-07-11  $M_L$  4.5 级地震,应力增加 0.047 Bar。从这些结果看,2012-02-16  $M_L$  5.2 级地震产生的静态库仑应力变化较大,大于阈值 0.1 Bar,其它地震因震级较小,静态应力扰动小于阈值 0.1 Bar。但也有研究表明,小应力扰动的事件也可以触发地震<sup>29</sup>。

从表 3 中累计库仑应力变化看,2014-07-11  $M_L$  4.5 级地震被之前发生的 4 次地震触发,应力增加达 0.331 Bar,2014-04-25  $M_L$  4.4 级地震被之前发生的 3 次地震触发,应力增加达 0.368 Bar,2014 年两次地震的发生时间被提前。而 2013-02-22  $M_L$  5.1 和 2012-02-17  $M_L$  4.2 均被前面发生的地震抑制,应力降低分别为 0.192 Bar 和 3.37 Bar。锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级地震之间的累计静态库仑应力触发效应明显,均大于阈值 0.1 Bar,静态应力触发影响在这 5 次地震事件之间存在。

为讨论不同接收断面对计算结果的影响,因 2013-02-22  $M_L$  5.1 级地震两个节面走向较相似,余震分布也没其它 4 个地震条带清晰。因此,我们也选择节面 II 进行计算。结果显示,采用另一破裂节面 II,2012-02-16  $M_L$  5.2 对它的影响为 0.138 Bar,触发了该次地震,2012-02-17 对它的影响为-0.019 Bar,抑制了该次地震。但总和为 0.119 Bar,说明 2013-02-22  $M_L$  5.1 级地震被前面两次地震触发,应力增加大于 0.1 Bar。2013-02-22  $M_L$  5.1 对 2014-04-25  $M_L$  4.4 的影响为 0.07 bar,对 2014-07-11  $M_L$  4.5 的影响为-0.008 bar,应力变化符号没有变化,仅大小有变化,不影响其他两次地震被前面地震触发的判断。

为讨论不同等效摩擦系数对计算结果的影响,我们对序列后发生的最大地震,即 2013-02-22  $M_L$  5.1 级地震,分别计算了等效摩擦系数取 0.2 和 0.6 时的情况,结果显示,2012-02-16  $M_L$  5.2 对它的影响均为-0.175 Bar,抑制了该次地震,2012-02-17 对它的影响为-0.024 Bar、-0.004 Bar,均抑制了该次地震,说明 2013-02-22  $M_L$  5.1 级地震被前面两次地震抑制,应力降低最大 0.199 Bar,大于 0.1 Bar。2013-02-22  $M_L$  5.1 对 2014-04-25  $M_L$  4.4 的影响分别为 0.049 bar、0.014 Bar,均触发了该次地震。对 2014-07-11  $M_L$  4.5 的影响分别为-0.032 Bar、0.03 bar,应力变化符号发生变化,使触发变成抑制,但 2014-07-11  $M_L$  4.5 被前面 4 次地震应力影响的总和为 0.252~0.331 Bar,不影响其被前面 4 次地震触发的判断。

## 4 结语

本文使用双差定位方法精定位后的震源位置,CAP 反演的震源机制解和最佳震源深度,计算了锡场地区 5 次  $M_L$  4.0 级以上地震之间的静态库仑

应力触发影响。计算结果表明,锡场地区5次地震之间的累计静态库仑应力触发现象明显,累计静态库仑应力变化大小均超过阈值0.1 Bar。其中,2014年7月11日07:11  $M_L$  4.5级地震被之前发生的4次地震触发,应力增加达0.331 Bar,2014年4月25日04:25  $M_L$  4.4级地震被之前发生的3次地震触发,应力增加达0.368 Bar,2014年两次地震的发生时间均被提前。不同计算参数的计算结果表明,2013年2月22日02:22  $M_L$  5.1级地震可能被前面两次地震触发,累计静态应力增加为0.119 Bar,略大于阈值。而2012年2月17日02:17  $M_L$  4.2级地震被2012年2月16日02:16  $M_L$  5.2级地震抑制,应力降低为3.37 Bar。

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Geotao软件包实现,精定位采用HypoDD软件实现,静态库仑应力计算采用Coulomb3.3。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] 杨马陵,万永芳.新丰江水库6.1级地震的监测、预防、救灾与重建(1960-1962)[J].华南地震,2012,32(s1):1-9.
- [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,刘吉平,李键梅,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.
- [4] 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地震震源构造的确定[J].地震,2016,36(2):132-140.
- [5] 钟貽军,陈庞龙,王维亮,等.2012年2月16日河源  $M$  4.8级地震[J].华南地震,2012,32(2):9-19.
- [6] Toda S, Stein R S, Richards - Dinger K, et al. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2005, 110(B5): 16-32
- [7] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. Bull.seism.soc.am, 1994, 78(3): 935-953.
- [8] Gombert J, Beeler N M, Blanpied M L, et al. Earthquake triggering by transient and static deformations[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1998, 103 (B10): 24411-24426.
- [9] 解朝娣. 巨震的动态库仑破裂应力及其对远场地震活动的触发作用[D]. 云南: 云南大学, 2007.
- [10] Steacy S, Gombert J, Cocco M. Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering, and time - dependent seismic hazard [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2005, 110(B5): 89-94.
- [11] 单斌, 郑勇, 刘成利, 等. 2017年  $M$  7.0级九寨沟地震同震库仑应力变化及其与2008年汶川地震的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 2017(11): 1329-1338.
- [12] 程佳, 徐锡伟, 刘杰. 2014年鲁甸6.5级地震成因、破裂特征和余震分布特征的库仑应力作用[J]. 地球物理学报, 2016, 59(2): 556-567.
- [13] 万永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2008年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 128-139.
- [14] Toda S, Lin J, Stein R S. Using the 2011  $M=9.0$  Tohoku earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure [J]. Earth Planets & Space, 2011, 63(7): 725-730.
- [15] 龚萱, 陈棋福, 彭志刚, 等. 2010年智利8.8级地震在北京房山岩体附近的动态触发活动[J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 115-128.
- [16] 李璐, 王宝善, 侯金欣. 模板匹配滤波技术在地震数据处理中的应用[J]. 中国地震, 2017, 33(1): 14-22.
- [17] 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 地震静态应力触发模型的全球检验[J]. 地震学报, 2002, 24(3): 302-316.
- [18] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1992, 82: 1018-1040.
- [19] Wang R J. A Simple Orthonormalization method for stable and efficient computation of green's functions [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1999, 89(3): 733-741.
- [20] 沈正康, 万永革, 甘卫军, 等. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 786-795.
- [21] 王力伟, 陈棋福. 以2008年汶川8.0级地震为例分析地震触发的静态库仑应力计算的不确定性 [J]. 中国地震, 2010, 26(3): 3-16.
- [22] 敬少群, 王佳卫. 常德及邻区小震重新定位与速度结构的联合反演[J]. 华南地震, 2016, 36(2): 13-19.
- [23] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bull.seismol.soc.am, 1994, 84(1): 91-104.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. Bull.seism.soc.am, 1994, 84(4): 974-1002.
- [29] 万永革, 吴忠良, 周公威. 小应力变化触发大地震的研究[J]. 国际地震动态, 2004(s1).