

邱毅、李军、康兰池等,2014,福建仙游地震序列的震源机制解,中国地震,30(2),280~288。

# 福建仙游地震序列的震源机制解

邱毅 李军 康兰池 袁丽文

福建省地震局,福州市华鸿路7号 350003

**摘要** 2010年8月4日至2013年10月4日福建仙游共记录到地震1209次,其中最大地震为2013年9月4日发生的 $M_L$ 5.0地震。为了加强对仙游地震序列的研究,更好地了解仙游地震的发震构造及震区的区域应力场,本文利用福建数字地震台网宽频带地震记录,采用矩张量反演方法,得到仙游地震序列中 $M_L > 3.5$ 的6次地震的震源机制解。这6次地震的震源机制解结果较为一致,都为走滑型地震,断层走向为NW向,倾角陡立,主压应力轴方向为近SN向。反演得到的主压应力轴方向与福建地区的区域应力场并不一致,本文认为仙游地震是由位于震区的金钟水库蓄水造成震区应力调整而引起的。

**关键词:** 福建仙游地震 震源机制解 矩张量 反演

[文章编号] 1001-4683(2014)02-0280-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

福建仙游自2010年8月以来陆续出现小震活动,截至2013年10月4日共记录到地震1209次,其中5级地震1次,4级地震3次,3级地震11次,最大震级为 $M_L$ 5.0。该区域是2012、2013年福建地区地震最活跃的区域,多次发生有感地震。2013年9月4日福建仙游 $M_L$ 5.0地震也是福建地区近16年来发生的最大地震,地震发生时福建全省多处有明显震感,震中区域震感强烈,震中区烈度达到VI度,出现房屋倒塌、墙壁开裂等灾情。因而开展对仙游地震序列的震源特征研究,进一步了解发震构造及震区区域应力场具有一定的科学意义。

震源机制解对于震源过程研究和地震预测研究具有重要意义,是研究现代构造应力场的基础资料之一。通过震源机制研究,可以分析地震发生的力学过程,推断地震的主要成因(赵翠萍等,2008;王勤彩等,2009)。P波初动法和地震矩张量反演方法是目前常用的震源机制反演手段。美国加州大学Dreger等(Dreger et al,1993,1999;Dreger,2002)从1993年开始开发利用区域台网宽频带地震资料实现矩张量反演的程序,提出了利用区域Pnl波进行地震矩张量反演的方法。本文基于此方法,利用福建数字地震台网宽频带地震波形记录反演得到福建仙游地震序列 $M_L > 3.5$ 的6次地震的震源机制解。

[收稿日期] 2013-10-16; [修定日期] 2013-11-04

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划(XH12026Y)资助

[作者简介] 邱毅,男,1984年生,硕士,工程师,主要从事地震学和地震工程等研究。E-mail:120835384@163.com

## 1 计算原理

Derger 等(1993、1999)提出了利用区域台网宽频带台站长周期地震记录来反演中等强度地震矩张量的方法。此后,Derger(2002)对该方法作了改进,使用 Saikai(1994)改进的离散波数积分方法计算理论地震波形,并用该方法反演了加州北部  $M3.5$  以上地震的矩张量。

Saikai(1994)改进的离散波数积分方法基于 Wang 等(1980)和 Herrmann 等(1985)给出的层状介质中任意一个位错点源和爆炸源所产生的地震波场表达式及所需要的 10 个格林函数。该表达式在圆柱坐标系下,傅立叶变换后在自由表面距震源  $r$  处的垂直、径向和切向位移可分别表示为

$$\begin{aligned}
 u_z(r, z=0, \omega) &= M_{xx} [Z_{SS}(\cos 2\alpha)/2 - Z_{DD}/2 + Z_{EP}/3] \\
 &\quad + M_{yy} [-Z_{SS}(\cos 2\alpha)/2 - Z_{SS}/2 + Z_{EP}/3] \\
 &\quad + M_{zz} Z_{EP}/3 + M_{xy} Z_{SS} \sin 2\alpha \\
 &\quad + M_{xz} Z_{DS} \cos \alpha + M_{yz} Z_{DS} \sin \alpha \\
 u_r(r, z=0, \omega) &= M_{xx} [R_{SS}(\cos 2\alpha)/2 - Z_{DD}/2 + R_{EP}/3] \\
 &\quad + M_{yy} [-R_{SS}(\cos 2\alpha)/2 - Z_{DD}/2 + R_{EP}/3] \\
 &\quad + M_{zz} R_{EP}/3 + M_{xy} R_{SS} \sin 2\alpha \\
 &\quad + M_{xz} R_{DS} \cos \alpha + M_{yz} R_{DS} \sin \alpha \\
 u_t(r, z=0, \omega) &= M_{xx} T_{SS}(\sin 2\alpha)/2 - M_{yy} T_{SS}(\sin 2\alpha)/2 \\
 &\quad - M_{xy} T_{SS} \cos 2\alpha + M_{xz} T_{DS} \sin \alpha - M_{yz} T_{DS} \cos \alpha
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中,  $r$  是台站到震源的距离;  $\alpha$  为台站相对震中位置的方位角;  $\theta$ 、 $\lambda$ 、 $\delta$  分别是断层的走向、滑动角和倾角;  $Z_{SS}$ 、 $Z_{DS}$ 、 $Z_{DD}$  分别相当于 1 个直立的纯走滑断层 ( $\theta=0^\circ$ ,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\delta=90^\circ$ )、1 个直立的纯逆断层 ( $\theta=0^\circ$ ,  $\lambda=90^\circ$ ,  $\delta=90^\circ$ ) 以及一个  $45^\circ$  的斜滑断层 ( $\theta=0^\circ$ ,  $\lambda=90^\circ$ ,  $\delta=45^\circ$ ) 在坐标为  $(r, \alpha, 0)$  点产生的垂直分量位移;  $R_{SS}$ 、 $R_{DS}$ 、 $R_{DD}$  相当于上述 3 种断层产生的径向位移;  $T_{SS}$ 、 $T_{DS}$  为直立的走滑断层和逆断层产生的切向分量位移;  $Z_{EP}$  和  $R_{EP}$  为一个爆炸源产生的垂直、径向位移。

若仅考虑一个纯偏矩张量震源, 有  $Z_{EP}=0$ ,  $R_{EP}=0$ ,  $M_{zz} = -(M_{xx} + M_{yy})$ , 上式中只包含 5 个矩张量元素。矩张量的反演问题可以用矩阵表示为

$$Gm = d \tag{2}$$

式中,  $d$  为  $n$  行观测位移矢量,  $G$  为  $n \times 5$  阶的格林函数矩阵,  $m$  为包含  $M_{xx}$ 、 $M_{yy}$ 、 $M_{zz}$ 、 $M_{xy}$ 、 $M_{yz}$  这 5 个矩张量元素的矢量。可见当参加反演的观测数据大于 5 个时, 反演问题的解是超定问题。采用最小二乘法进行反演, 通过考察目标函数  $RES/Pdc$  (偏量与最佳双力偶的比值) 和  $VR$  来确定最佳解。  $VR$  为观测波形和理论波形的拟合程度的参数,  $VR$  值越大, 表示残差越小, 波形拟合效果越好, 求解出来的地震矩张量越可靠。  $RES/Pdc$  及  $VR$  的计算公式如下

$$RES/Pdc = \sum_i \sqrt{(\text{data}_i - \text{synth}_i)^2} / Pdc \tag{3}$$

$$VR = [1 - \sum_i \sqrt{(\text{data}_i - \text{synth}_i)^2} / \sqrt{\text{data}_i^2}] \times 100 \tag{4}$$

式中,  $\text{data}$  表示观测波形数据,  $\text{synth}$  表示理论波形数据。

反演得到矩张量后,经过坐标变换,把计算得出的地震矩张量旋转到主轴坐标系下

$$\begin{pmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  是矩张量的本征值, $M_1$  对应于张应力轴(T), $M_2$  对应于零轴(N), $M_3$  对应于压应力轴(P)。它们的倾角和方位角以及断层的 2 个节面的走向、倾角和滑动角都可由 P 轴、T 轴和 N 轴计算得到。

## 2 数据处理和模型选取

### 2.1 地震事件

福建仙游地震序列共发生  $M_L > 3.5$  的地震 6 次,具体地震事件见表 1。

表 1 福建仙游地震序列  $M_L > 3.5$  地震

编号	发震时间 (年-月-日)	纬度 (°N)	经度 (°E)	震级 $M_L$	震源深度 (km)
1	2012-04-15	25.660	118.708	4.1	14
2	2012-11-25	25.631	118.748	3.8	17
3	2013-08-03	25.635	118.746	4.2	10
4	2013-08-19	25.630	118.748	3.8	10
5	2013-08-23	25.631	118.750	4.5	10
6	2013-09-04	25.629	118.752	5.0	11

注:表中的地震事件资料来源于福建数字地震台网月报目录

### 2.2 速度结构模型

速度模型的选取影响理论波形的生成,进而影响震源机制解的反演结果和震源深度的确定,因此选取一个较为符合福建地区实际速度结构的模型显得较为重要。张路(2008)根据近 20 年来福建地区进行的人工地震测深、大地电磁测深、重磁测量、地热测量、地学大断面的编制、天然地震的层析成像以及地球物理资料综合分析等大量深部构造研究工作,提出福建东南沿海地壳结构。本文使用的福建地区速度结构模型即在此基础上给出的(表 2)。

表 2 福建地区速度结构模型

层序	层厚度 (km)	$v_p$ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v_s$ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	据 P 波测得的 Q 值	据 S 波测得的 Q 值
1	4.0	5.6	3.23	2.5	600	300
2	8.0	6.1	3.52	2.7	600	300
3	6.0	6.0	3.46	2.6	600	300
4	7.0	6.4	3.70	2.8	600	300
5	5.0	6.9	3.98	2.9	600	300
6	400.0	8.0	4.57	3.3	600	300

### 2.3 数据选取与处理

Derger (2002) 方法基于区域台网宽频带台站长周期地震记录来反演中等强度地震矩张量。对于不同的震级,要选取不同震中距、不同频带范围、不同长度的波形记录 (Kubo et al, 2002), 如表 3 所示。

福建数字地震台网现有宽频带台站 70 个 (图 1)。其中 23 个台的带宽为 50Hz/60s, 如图 1 中空心三角形所示, 47 个台带宽为 50Hz/120s, 如图 1 实心三角形所示, 震中四周台站分布较好, 这些台为仙游地震震源机制解

表 3 震中距、频带范围、数据长度与震级关系  
(据 Kubo 等 (2002) 文献)

震级范围	震中距 (km)	频带范围 (Hz)	数据长度 (s)
$M \leq 5.0$	>50	0.02 ~ 0.05	120
$5.0 < M \leq 6.5$	>100	0.01 ~ 0.05	120
$6.5 < M \leq 7.5$	>300	0.01 ~ 0.05	150

反演提供了丰富可靠的波形资料。福建仙游地震序列的 6 次  $M_L > 3.5$  地震的震级都小于等于 5.0 级, 考虑到若震中距太远, 波形数据信噪比会降低。因此, 本文选取福建台网震中距在 50 ~ 400km 内的宽频带台站; 对这些台三分量波形记录进行数据质量检测, 剔除信噪比差的台站数据; 对剩下的台站记录进行仪器响应校正, 将记录变为实际的速度值, 再将仪器响应校正后的实际速度记录积分为位移, 并旋转到 Z、R、T 分量, 使用 Butterworth 4 阶滤波器滤波, 滤波频带为 0.02 ~ 0.05 Hz; 采用前述 2.2 的速度结构模型, 利用 Saikai (1994) 改进的离散波数积分方法计算不同深度、不同震中距的理论地震波形, 采用与观测地震波形记录同样的滤波范围 0.02 ~ 0.05 Hz 对理论地震波形进行滤波; 由于 Derger 方法使用 3 台三分量的波形记录进行反演, 可以得到较为稳定的结果 (Derger, 2002; Kubo et al, 2002), 对剩下的台站进行不同深度、不同台站组合的 3 台组合反演, 利用 VR 值作为第 1 目标函数, 选取 VR 值最大的几个反演结果, 然后用 RES/Pdc 的值作为第 2 目标函数, 对已选取 VR 值最大的几个反演结果, 选取其中 RES/Pdc 值最小的最佳解为地震的震源机制解。

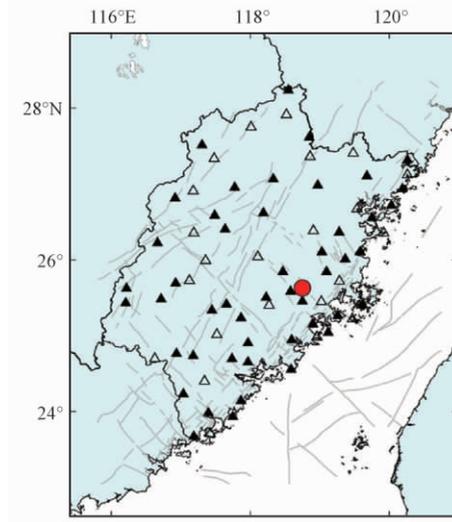


图 1 福建宽频带台站分布  
灰色圆圈为仙游地震震中

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 反演结果

福建仙游 2012 年 4 月 15 日  $M_L$ 4.1、11 月 25 日  $M_L$ 3.8、2013 年 8 月 3 日  $M_L$ 4.2、8 月 19 日  $M_L$ 3.8、8 月 23 日  $M_L$ 4.5、9 月 4 日  $M_L$ 5.0 地震的反演结果如图 2、3 和表 4 所示。

#### 3.2 结果分析

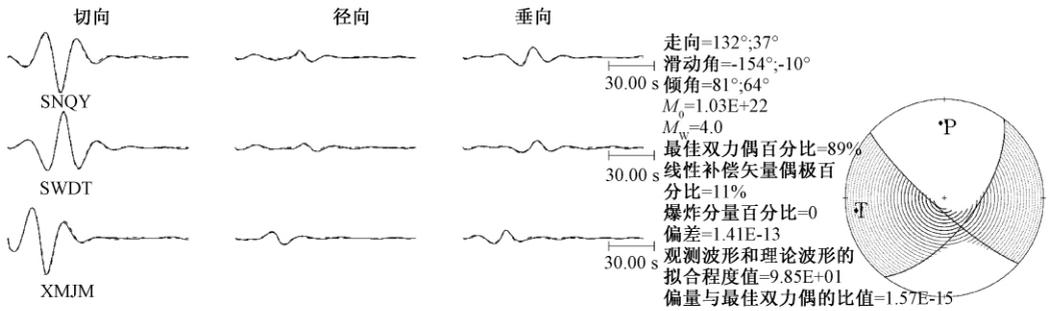
福建仙游地震序列发生于福建省莆田市仙游县,历史上该区域属于少震、弱震区。仙游震群自 2010 年 8 月开始活动,在 2012、2013 年发生多次有感地震,其中 2013 年 9 月 4 日的  $M_L$ 5.0 地震为福建地区近 16 年来发生的最大地震。整个序列地震活动呈现逐渐增强的趋势,地震的频次和强度逐渐提高。

表 4 最佳双力偶解(单位:°)

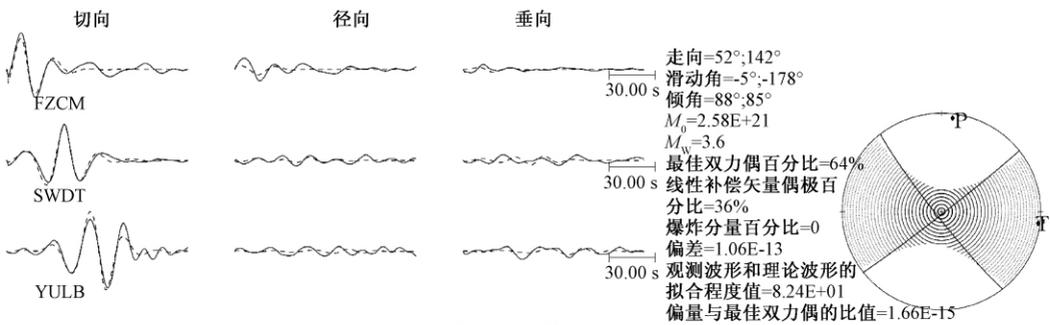
编号	节面 A			节面 B			P 轴		T 轴	
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	仰角	方位	仰角
1	37	64	-10	132	81	-154	358	25	262	11
2	52	88	-5	142	85	-178	7	5	97	2
3	42	76	-6	133	84	-166	358	14	267	6
4	46	85	-8	136	82	-175	0	9	91	2
5	50	78	-6	141	84	-168	6	13	275	4
6	46	74	-12	140	78	-163	4	20	273	3

本文利用区域台网宽频带地震记录,采用地震矩张量反演方法得到福建仙游 2012 年 4 月 15 日  $M_L$ 4.1、11 月 25 日  $M_L$ 3.8、2013 年 8 月 3 日  $M_L$ 4.2、8 月 19 日  $M_L$ 3.8、8 月 23 日  $M_L$ 4.5、9 月 4 日  $M_L$ 5.0 地震的震源机制解(图 3)。仙游震群发生在 NW 向的沙县-南日岛断裂带上,结合地震序列的震中分布图(图 3),判断断层走向为 NW 向,断层节面为节面 B。通过反演结果可知,这 6 次地震的震源机制解具有较高的相似性,都为走滑型,断层走向都为 NW 向,具有高倾角的性质,主压应力轴都为近 SN 向。

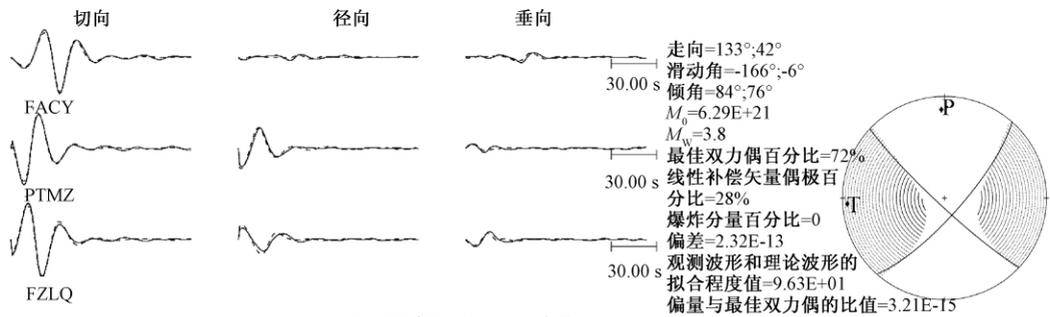
通过震源机制解可以得知震区应力状态。福建地区地处欧亚板块的东南边缘地带,区域应力场主要受菲律宾板块对欧亚板块的挤压碰撞,福建地区的现代区域应力场为 NW 向(汪素云等,1985;谢富仁等,2004;丁学仁等,1999;林松建等,2009;袁丽文等,2009),近些年福建地区的中等强度地震震源机制解的主压应力轴也主要为 NW 向(袁丽文等,2009;邱毅等,2013)。本文反演得到的福建仙游地震序列的 6 次  $M_L > 3.5$  地震的主压应力轴都为近 SN 向,与福建地区现代区域应力场并不一致。金钟水库位于仙游震区,于 2012 年 5 月开始下闸蓄水,库容 1.06 亿  $m^3$ ,坝高 97.5m,水坝离这 6 次地震最大的震中距为 4km,最小的震中距不到 1km。仙游地区历史上属于少震、弱震区,但在金钟水库开始蓄水 3 个月后(2012 年 8 月),该区出现震群活动,地震的频次和强度逐渐提高,从 2010 年 8 月 4 日至 2013 年 10 月 4 日共记录到地震 1209 次,其中  $M_L$ 5.0 以上地震 1 次, $M_L$ 4.0~4.9 地震 3 次。本文认为仙游地震是金钟水库蓄水引起仙游震区应力调整而诱发的地震,所以仙游地震震源机制解主压应力轴方向与福建的现代构造应力场的方向不同。



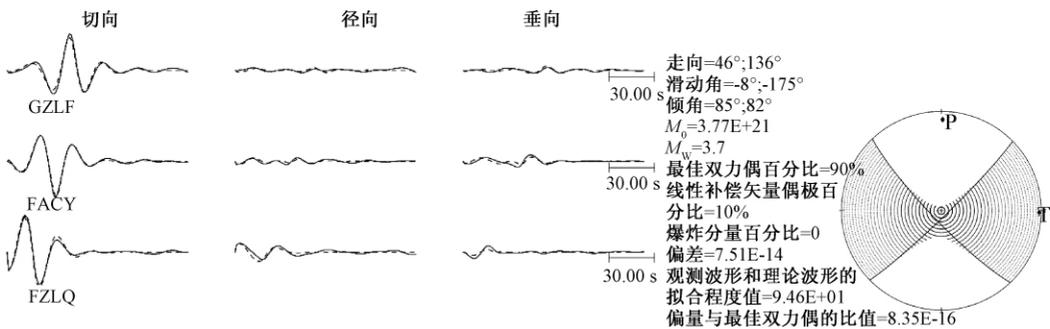
(a) 2012年4月15日 $M_L$ 4.1地震



(b) 2012年11月25日 $M_L$ 3.8地震



(c) 2013年8月3日 $M_L$ 4.2地震



(d) 2013年8月19日 $M_L$ 3.8地震

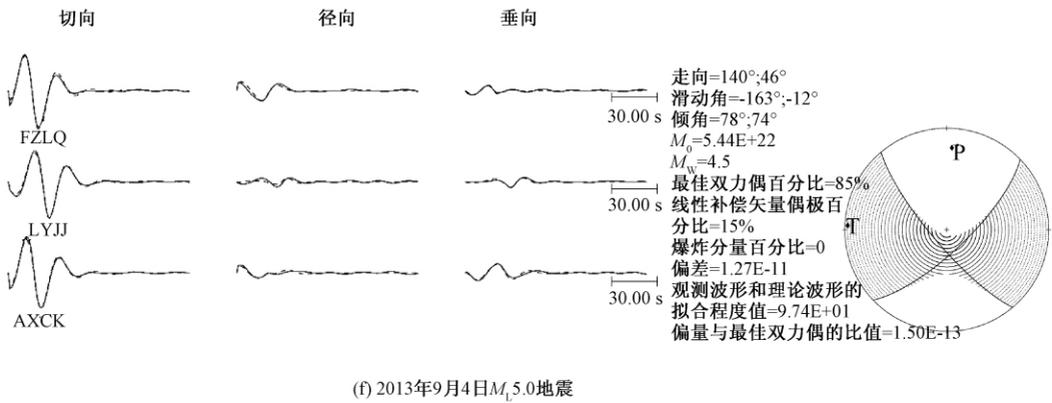
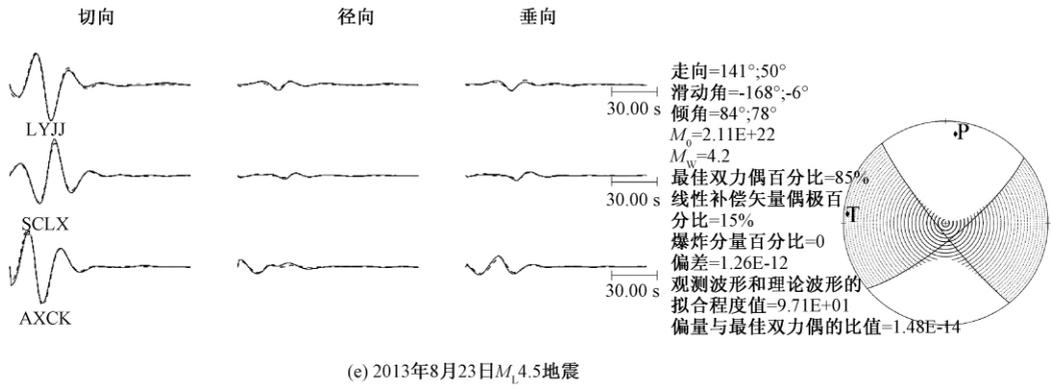


图2 地震波形拟合及矩张量反演结果  
 实线为观测记录波形;虚线为理论波形

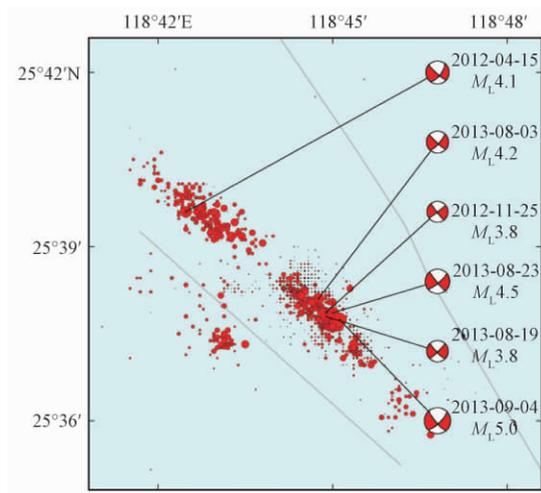


图3 仙游地震序列的震中分布与 $M_L > 3.5$ 地震的震源机制解

## 4 结论

(1) 本文利用矩张量反演方法求解了福建仙游地震序列  $M_L > 3.5$  的 6 次地震的震源机制解。这 6 次地震发生在 NW 向的沙县-南日岛断裂带上, 结合地震序列的震中分布图, 确定这 6 次地震的断层走向为 NW 向, 发震断层为节面 B。这 6 次地震的震源机制解具有较高的相似性, 都为走滑断层, 高倾角, 断层走向都为 NW 向, 主压应力轴方向都为近 SN 向, 震区应力场并未出现明显调整变化的情况。

(2) 福建区域应力场的方向为 NW 向, 而本文得到的仙游地震震源机制解主压应力轴方向为近 SN 向, 两者存在差异。本文认为仙游震区的金钟水库蓄水引起震区应力调整, 进而诱发了仙游地震。仙游地震是由震区的局部应力场控制, 故仙游震区的应力场与福建地区的区域应力场存在差异。

**致谢:** 本文使用的地震观测波形记录由福建省地震局监测中心提供; 使用的矩张量反演程序 TDMT\_INVC 由美国 BSL 的 Douglas S Dreger 等开发, 其中格林函数计算使用的是 URS 的 Chandan Saikia 开发的 FKRPROG 程序; 两位审稿专家对本文提出宝贵建议, 在此表示谢意。

## 参考文献

- 丁学仁、吴长江, 1999, 福建及其沿海地区中强以上地震的震源机制研究, 地壳形变与地震, **19** (1), 95 ~ 97。
- 林松建、丁学仁、陈为伟等, 2009, 福建地区震源机制解与现代构造应力场研究, 大地测量与地球动力学, **29** (5), 27 ~ 32。
- 邱毅、郑斯华、鲍挺等, 2013, 利用地震台网宽频带地震记录计算福建中等强度地震的震源机制解, 地震, **33** (1), 65 ~ 73。
- 汪素云、许忠淮, 1985, 中国东部大陆的地震构造应力场, 地震学报, **7** (1), 17 ~ 31。
- 王勤彩、陈章立、郑斯华, 2009, 汶川大地震余震序列震源机制的空间分段特征, 科学通报, **54** (16), 2348 ~ 2354。
- 谢富仁、崔效锋、赵建涛等, 2004, 中国大陆及邻区现代构造应力场分区, 地球物理学报, **47** (4), 654 ~ 662。
- 袁丽文、郑斯华、周峥嵘, 2009, 福建地区地震活动特征及区域应力场研究, 东北地震研究, **25** (3), 37 ~ 44。
- 张路, 2008, 福建东南沿海盆地第四纪构造运动模式与动力学成因, 博士学位论文, 北京: 中国地震局地质研究所。
- 赵翠萍、陈章立、郑斯华等, 2008, 伽师震源区中等强度地震矩张量反演及其应力场特征, 地球物理学报, **51** (3), 782 ~ 792。
- Dreger D S, 2002, Time-Domain Moment Tensor INverse Code (TDMT\_INVC), Release 1.1.
- Dreger D S, Brain Savage, 1999, Aftershocks of the 1952 Kern County, California, earthquake sequence, Bull Seism Soc Am, **89** (4), 1094 ~ 1108.
- Dreger D S, Helmberger D V, 1993, Determination of source parameters at regional distances with single station or sparse network data, J Geophys Res, **98**, 8107 ~ 8125.
- Herrmann R B, Wang C Y, 1985, A comparison of synthetic seismograms, Bull Seism Soc Am, **75**, 41 ~ 56.
- Kubo A, Fukuyama E, Kawai H, et al, 2002, NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application, Tectonophysics, **356**, 23 ~ 48.
- Saikia C K, 1994, Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature: modeling of Lg waves in eastern North America, Geophys J Int, **118**, 142 ~ 158.
- Wang C Y, Herrmann R B, 1980, A numerical study of P, SV, SH-wave generation in a plane layered medium, Bull Seism Soc Am, **70**, 1015 ~ 1036.

## Focal mechanism of the Xianyou earthquake sequence, Fujian

Qiu Yi Li Jun Kang Lanchi Yuan Liwen

Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

**Abstract** The 1209 earthquakes occurred in Xianyou, Fujian from August 4, 2010 to October 4, 2013. The largest earthquakes is  $M_L 5.0$  on September 4, 2013. To strengthen the research of Xianyou earthquake sequence and understand the causative structure and stress field of Xianyou, the focal mechanism solutions of six earthquakes ( $M_L > 3.5$ ) in Xianyou are calculated using the broadband digital data of Fujian Earthquake Network and the seismic moment tensor inverse method. The results show that the focal faults of the 6 earthquakes are similar. They are all strike slip faults with the fault strike to the northwest and high dip angle. The principal compressive stress axes are near to SN, which are different of the stress field of Fujian region. The Xianyou earthquake sequence may be induced by the stress adjustment after the impoundment of Jinzhong reservoir.

**Key words:** Xianyou earthquake, Fujian Focal mechanism solution Moment tensor Inverse