



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

福建仙游震群的应力场及其成因分析

余海琳 万永革 崔华伟 王晓山 黄少华

Analysis of stress field and its causes of the Xianyou earthquake swarm in Fujian

Yu Hailin, Wan Yongge, Cui Huawei, Wang Xiaoshan, Huang Shaohua

引用本文:

余海琳, 万永革, 崔华伟, 王晓山, 黄少华. 2024. 福建仙游震群的应力场及其成因分析. *地震学报*[J], 46(4): 600–613. DOI: 10.11939/jass.20220204

Yu H L, Wan Y G, Cui H W, Wang X S, Huang S H. 2024. Analysis of stress field and its causes of the Xianyou earthquake swarm in Fujian. *Acta Seismologica Sinica*[J], 46(4): 600–613. DOI: 10.11939/jass.20220204

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220204>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

首都圈地区震源机制解及现今构造应力场时空变化特征研究

Focal mechanism solutions and spatio-temporal variations of the present tectonic stress field in Capital Circle region
地震学报. 2019, 41(1): 33–45 <https://doi.org/10.11939/jass.20180064>

川南威远地区中小地震震源机制解及应力场特征

Focal mechanism solutions and stress field characteristics of small and moderate earthquakes in Weiyuan area, southern Sichuan basin
地震学报. 2023, 45(6): 1025–1039 <https://doi.org/10.11939/jass.20220057>

2018年5月松原 $M_S5.7$ 地震序列发震断层及应力场特征

Characteristics of seismogenic faults and stress fields of the Songyuan $M_S5.7$ earthquake sequence in May 2018
地震学报. 2019, 41(2): 207–218 <https://doi.org/10.11939/jass.20180101>

盈江地区构造应力场和断层识别的联合迭代式反演研究

Joint iterative inversion of tectonic stress field and fault identification in Yingjiang area
地震学报. 2022, 44(4): 619–631 <https://doi.org/10.11939/jass.20210027>

2022年1月8日青海门源 $M_S6.9$ 地震序列重定位和震源机制解研究

Relocation and focal mechanism solutions of the $M_S6.9$ Menyuan earthquake sequence on January 8, 2022 in Qinghai Province
地震学报. 2022, 44(2): 195–210 <https://doi.org/10.11939/jass.20220008>

南北地震带区域构造应力场反演

Inversion for regional tectonic stress field in the North–South Seismic Belt of China
地震学报. 2019, 41(2): 219–229 <https://doi.org/10.11939/jass.20180073>

余海琳, 万永革, 崔华伟, 王晓山, 黄少华. 2024. 福建仙游震群的应力场及其成因分析. 地震学报, 46(4): 600–613. doi: 10.11939/jass.20220204.
Yu H L, Wan Y G, Cui H W, Wang X S, Huang S H. 2024. Analysis of stress field and its causes of the Xianyou earthquake swarm in Fujian. *Acta Seismologica Sinica*, 46(4): 600–613. doi: 10.11939/jass.20220204.

福建仙游震群的应力场及其成因分析^{*}

余海琳^{1,6)} 万永革^{1,2,3), †} 崔华伟⁴⁾ 王晓山^{3,5)} 黄少华¹⁾

- 1) 中国河北三河 065201 防灾科技学院地球科学学院
- 2) 中国河北三河 065201 防灾科技学院河北省地震动力学重点实验室
- 3) 中国河北隆尧 055350 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站
- 4) 中国济南 250014 山东省地震局
- 5) 中国石家庄 050021 河北省地震局
- 6) 中国杭州 310000 杭州晟初防震科技有限公司

摘要 利用双差定位法对 2010 年 8 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日福建仙游地区中国地震台网中心记录到的地震群进行重定位, 并采用 P 波初动的方法求解出该震群的 159 个震源机制解, 显示该震群的震源机制解结果与背景构造应力场表现明显不一致. 为了进一步探究差异性存在的原因, 将得到的震群震源机制解结果分区域和分深度求解应力场, 结果显示: 金钟水库的东南部附近应力方向更远离背景构造应力方向, 并且应力形因子小于 0.5, 中间轴呈现为拉张应力; 随着深度的增加, 应力场的方向也更接近背景构造应力场的方向. 此外, 根据前人研究推断该区域应力方向发生偏转是由于太平洋板块在深部的低角度俯冲挤压导致浅部张开, 应力呈现为东西向拉张所致. 在上述两原因的共同作用下, 使得经震源机制解反演出的应力场结果与背景应力场差别较大.

关键词 双差定位 断层面拟合 震源机制解 应力场

doi: 10.11939/jass.20220204 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Analysis of stress field and its causes of the Xianyou earthquake swarm in Fujian

Yu Hailin^{1,6)} Wan Yongge^{1,2,3), †} Cui Huawei⁴⁾ Wang Xiaoshan^{3,5)} Huang Shaohua¹⁾

- 1) Institute of Disaster Prevention Institute of Earth Science, Hebei Sanhe 065201, China
- 2) Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Hebei Sanhe 065201, China
- 3) Hebei Hongshan Thick Sediment and Earthquake Disaster National Field Scientific Observation and Research Station, Hebei Longyao 055350, China
- 4) Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China
- 5) Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China
- 6) Hangzhou Shengchu Seismic Technology Co., Ltd, Hangzhou 310000, China

*** 基金项目** 国家自然科学基金(42174074, 41674055)、中央高校科研业务费专项(ZY20215117)、河北省地震科技星火计划(DZ20200827053)和河北省地震动力学重点实验室开放基金(FZ212105)共同资助。

收稿日期 2022–11–03 收到初稿, 2023–03–16 决定采用修改稿。
作者简介 余海琳, 助理工程师, 主要从事构造应力场方面的研究, e-mail: 1534541141@qq.com; †通信作者: 万永革, 博士, 研究员, 主要从事构造应力场、地震应力触发等方面的研究, e-mail: wanyg217217@vip.sina.com



Abstract: This study employed the double-difference location method to relocate earthquakes recorded by the seismic network center in the Xianyou region of Fujian from August 1, 2010, to December 31, 2014. It also used the initial motion of P waves to determine the focal mechanism solutions for 159 events within this seismic cluster. The results reveal a significant inconsistency between the focal mechanism solutions of the cluster and the background tectonic stress field. To further investigate the reasons behind this discrepancy, the obtained focal mechanism solutions were analyzed to calculate the stress field by region and depth. The findings indicate that in the southeastern part, near the Jinzhong Reservoir, the direction of stress deviates more from the background tectonic stress direction, with a stress shape factor less than 0.5, and the intermediate axis showing extensional stress. As depth increases, the direction of the stress field also becomes closer to that of the background tectonic stress field. Additionally, based on previous research, it is inferred that the deviation in stress direction in this area is due to the low-angle subduction and compression of the Pacific Plate at depth, leading to extension at shallow levels, with the stress manifesting as east-west extension. Under the combined influence of these two factors, the stress field results deduced from the focal mechanism solutions differ significantly from the background stress field.

Key words: double difference location; fault plane fitting; focal mechanism solution; stress field

引言

福建仙游地区的地震记录显示, 该区地震活动自 2010 年 8 月 1 日明显频繁, 截至 2014 年 12 月 31 日, 共记录地震 3471 次, 其中 $M_L \geq 4.0$ 地震 5 次, $M_L \geq 3.0$ 地震 20 次, $M_L \geq 2.0$ 地震 101 次, 最大地震为 2013 年 9 月 4 日的 $M_L 4.8$ 地震, 震中位于石苍镇 (25.64°N , 118.75°E)。此次震群事件对当地群众的生产生活造成较大影响, 主要受灾地区在仙游县、莆田市区和永泰县, 其中影响最严重的是石苍镇的五湖村和游洋镇两地, 研究仙游地区的地震活动机制和地震发生背景有助于区域地震活动研判。

关于福建仙游震群序列的发震机制和发震构造已经有较多研究。例如: 邱毅等(2014)选取 6 次 $M_L > 3.5$ 的地震, 利用矩张量反演求解震源机制解, 并进行应力场分析, 判断该地区主要压应力轴近 NS 向, 与福建区域应力场不一致, 认为该地震是由金钟水库蓄水导致应力调整而引发的; 李强等(2015)分析了该区域地震的发震构造, 反演了 $M_L \geq 4.0$ 地震事件的震源机制解, 发现地震的破裂面沿 NW 方向, 震源破裂类型为走滑型, 发震断层为沙县—南日岛断裂, 并认为该地震序列是由金钟水库诱发的; 秦双龙等(2015)利用双差定位法将 2010 年 8 月至 2013 年 12 月期间记录到的地震序列重新定位, 并结合金钟水库库区周围的地震活动, 分析了震群序列的空间分布特征, 认为震群活动性质可能为水库诱发地震; 袁丽文等(2016)选取 6 次 $M_L > 3.5$ 的地震进行应力场分析, 利用 P 波初动和 Hardebeck and Sheark (HASH) 方法研究了 2010 年 8 月至 2014 年 12 月 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制反演方案, 发现地震破裂方向为 NW 方向, 震源破裂类型为右旋走滑, 认为该处地震序列受仙游区域应力场影响, 金钟水库的蓄水活动对仙游地区的构造应力场影响不大; 秦双龙和邱毅(2018)基于 2010 年 8 月至 2013 年 12 月 $M_L \geq 1.0$ 地震序列, 利用 Cut and Paste (CAP) 方法对 $M_L \geq 3.5$ 地震进行了重定位和震源机制反演, 判断此次仙游地震主震的震源构造断裂为石苍断裂, 属于水

计算走时差和走时残差, 并将每对地震事件的残差方程结合起来, 求解线性方程组, 以确定地震的相对位置。

在地震重定位的过程中, 需要每个台站的经纬度、深度等信息, 本文选用围绕 2013 年 9 月 4 日 $M_L4.8$ 地震震中分布的福建数字地震地震台网的宽频带台站, 震中与台站分布如图 1。除了地震事件与台站信息之外, 速度结构采用张路(2008)通过多种手段研究确定的福建东南沿海地壳结构模型, 其中 $v_P/v_S=1.73$ 。

本文数据源于中国地震台网中心, 选取福建仙游 2010 年 8 月 1 日—2014 年 12 月 31 日的 3471 个地震事件, 其观测报告包含地震事件发震时刻、震级、经纬度、深度、观测到此次地震事件的台站名称、台站记录的地震事件到时等信息。

1.2 定位结果及断层面拟合

采用双差定位的方法对 3471 次地震初步识别关联得到的 1977 个地震事件进行重新定位, 得到了 1864 个地震事件的相关参数信息。双差定位得到重定位结果的剩余走时残差大多分布于 0—0.08 s 的范围之内, 地震位置误差在东西方向为 0.091 km, 在南北方向为 0.12 km, 垂直方向为 0.12 km。将定位前后的地震事件进行对比分析, 可以看出重定位后地震分布更加密集, 震群更加集中, 从时间上来看, 地震从石苍断裂附近开始发生, 并随着时间的推移, 从石苍断裂与潼关断裂之间的西北部逐渐向潼关断裂延伸。

根据精定位目录, 我们发现除了早期的石苍断裂附近的地震外, 其余地震均发生在走向为 NW—SE 的一个条带上(图 2), 这预示着这些地震发生在一个未知的隐伏断层上。为确定该隐伏断层的产状参数, 我们采用小震拟合断层面的方法(万永革等, 2008)对地震序列 1 段(区域 2, 图 3)和地震序列 2 段(区域 1, 图 4)的地震分别拟合了断层面的形状, 经反演后可以得到仙游地震序列 1 段(区域 2)断层接近直立(图 3c), 走向为 135.6° , 倾角为 88.8° ; 序列 2 段(区域 1)断层也接近直立(图 4c), 走向为 140.2° , 倾角为 88.7° 。由于序列 1 地震事件数据较少, 因此和序列 2 相比, 走向、倾角以及距横坐标 0 点处的距离的标准差更大。根据图 3d 和图 4d 的地震事件与断层面之间的距离统计直方图可以看出, 序列 2 基本沿着断层呈对称的正态分布, 整体上分布较好, 而序列 1 可以明显看出地震集中分布, 表明本次福建仙游震群发生在西北—东南走向的近乎垂直的断层上, 西北和东南部的断层几乎参数相差不大, 可能由一条隐伏断裂的破裂所致。

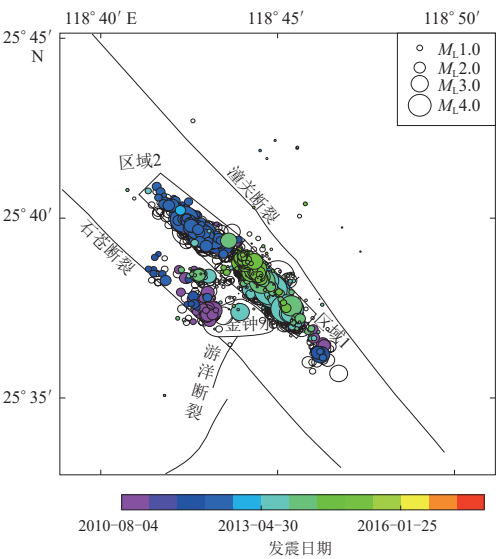


图 2 精定位前(未填充颜色)、后(填充颜色)的地震分布
Fig. 2 Earthquake distribution before (uncolored) and after precisely locating (colored)

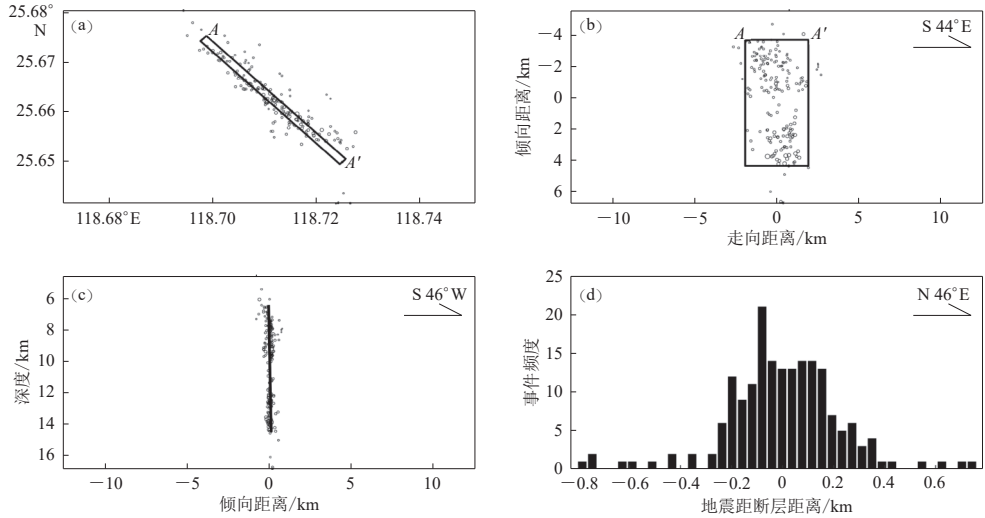


图 3 地震序列 1 段(区域 2)的断层面拟合

(a) 地震在水平面投影; (b) 地震在断层面的投影; (c) 地震在垂直于断层的横断面上的投影;
(d) 地震与断层面的距离

Fig. 3 Fitting of fault surface in the first section (region 2) of earthquake sequence
(a) The earthquake in the horizontal projection; (b) The earthquake in the faultplane projection; (c) The projection on a cross section perpendicular to the fault; (d) The distance between the earthquake and the fault plane

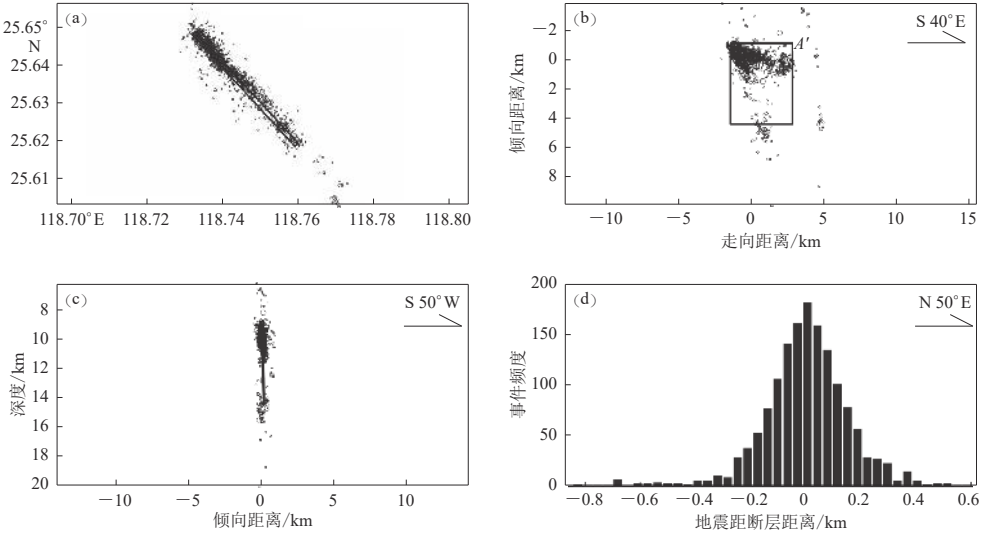


图 4 地震序列 2 段(区域 1)的断层面拟合

(a) 地震在水平面投影; (b) 地震在断层面的投影; (c) 地震在垂直于断层的横断面上的投影;
(d) 地震与断层面的距离

Fig. 4 Fitting of fault surface in the second section (region 1) of earthquake sequence
(a) The earthquake in the horizontal projection of the middle panel; (b) The earthquake in the fault plane projection;
(c) The projection on a cross section perpendicular to the fault; (d) The distance between the earthquake and the fault plane

2 区域应力场反演

2.1 震源机制解反演

本研究采用P波初动极性数据(万永革等, 2011)求解震源机制解. 该思路最先由Byerly (1938)提出, Hodgson 和 Storey (1953)在此基础上进一步研究推广, 扩大了该方法的应用深度; 郭增建(1958)在前人研究的基础上进一步修改, 使得该方法能够适用于普遍情况. 本文首先读取出现测报告中有P波初动地震事件的记录; 然后采用表1的地壳速度模型和重定位的精确地震位置计算每个台站相对于每个事件的方位角和离源角; 最后求解每个事件的震源机制解(余海琳等, 2021). 在求解过程中, 为保证精度, 将P波初动数目限制为10个, 最终得到159个震源机制解(见附表1).

表1 福建地区地壳速度模型(张路, 2008)

Table 1 Crustal velocity model in Fujian area

地壳厚度/km	$v_p/(km \cdot s^{-1})$	$v_s/(km \cdot s^{-1})$	密度/($kg \cdot m^{-3}$)
0—4.0	5.6	3.23	2.5
4.0—12.0	6.1	3.52	2.7
12.0—18.0	6.0	3.46	2.6
18.0—25.0	6.4	3.70	2.8
25.0—30.0	6.9	3.98	2.9
≥ 30.0	8.0	4.57	3.3

P波初动结果中的矛盾比参数是判断震源机制解准确性的重要参考标准, 矛盾比是指数据矛盾个数(即压缩象限出现负的符号或拉张象限出现正的符号的数量)与总符号个数之比. 在得到的震源机制解的结果中, 矛盾比为0的震源机制解有79个, 占总数的49.7%; 矛盾比在0—0.10范围内的震源机制解有63个, 占总数的39.6%; 矛盾比分布在0.1—0.18范围内的震源机制解有12个, 占总数的7.5%; 矛盾比大于0.18的震源机制解有5个, 仅占总数的3%. 根据震源机制分类方法(万永革, 2024), 可以判断出仙游地震序列中走滑型地震112次, 占总体数量的70.44%; 正断型地震23次, 占总体数量的14.47%; 正走滑型地震12次, 占总体数量的7.55%; 逆走滑型地震和逆断型地震各6个, 各占总体数量的3.77%. 可见该震群中走滑型具有优势占比, 并且有一定的正断型成分, 表现出了水库的影响.

将本文得到的159个震源机制解的P轴和T轴进行方位统计(图5a, b). 可以看出, 该区域P轴方向为近南北向, T轴方向为近东西向. 而许忠淮等(1989)和Wan (2010)给出的该区域背景构造应力场主压应力轴方向均为近东西向, 主张应力轴方向均为近南北向. 这就是说背景构造应力场的主压应力轴和主张应力轴与该震群震源机制总体P轴和T轴相差很大. 根据万永革(2024)的方法估计所得到的该震群震源机制解计算出节面I的走向、倾角和滑动角分别为140.33°, 85.20°和-162.64°; 节面II的走向、倾角和滑动角分别为48.83°, 72.70°和-5.02°; P轴的走向和倾伏角为5.84°和15.63°; B轴走向和倾伏角为155.3°和72.01°; T轴的走向和倾伏角为273.39°和8.69°; 震群总体震源机制表现为走滑型(图5c). 本文依据该震群的大量震源机制解数据从统计的P, T轴和总体震源机制解两方面确认了该震群的破裂性质与背景构造应力场有明显差别. 为了进一步研究这种差异性的形成原因, 下面将对震源机制解从水平面和纵向深度两个维度分别求解应力场, 分析该震群应力场在水平面内和深度方向上的变化. 需要说明的是, 上述反演的地震事件中有一个事件远离震群丛集区(图4中两个丛集区之外的海滩球), 进行应力场反演时进行了去除, 即采用了158个震源机制解进行水平和深度应力场反演.

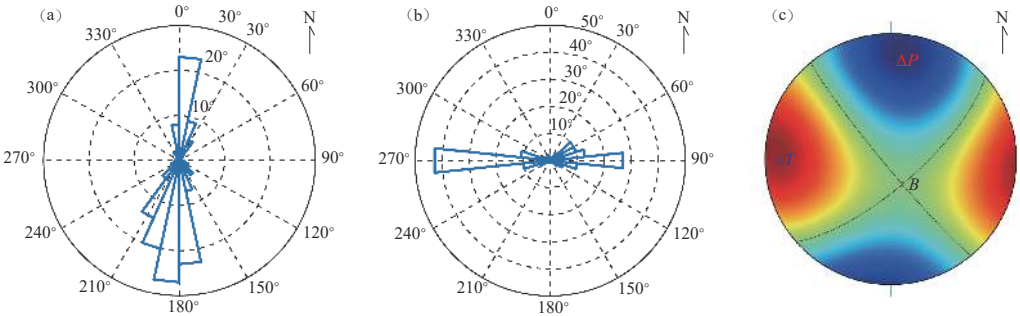


图 5 震源机制解的 P 轴(a)和 T 轴(b)统计分布及总体震源机制的等面积投影(c)
蓝色表示压缩, 红色表示拉张

Fig. 5 P -axis (a) and T -axis (b) statistical distribution of the focal mechanism solution and the equal area projection of the overall focal mechanism (c)
Blue means compression, red means expansion

2.2 地震水平成丛表现出的应力场差异

应力场求解采用 Wan 等(2016)提出的网格搜索法, 该方法利用断层面上剪应力方向与断层滑动方向一致原则, 将应力轴方向和应力形因子($R=(S_2-S_3)/(S_1-S_3)$, 其中 S_1 , S_2 和 S_3 分别表示三个主应力的大小)按照网格进行划分, 分别反演每个网格内的应力张量, 并结合应力形因子判断这三个主应力的分布. 该算法不仅给出应力场的参数估计, 还给出了反演应力场时所选用的震源机制解两个节面的“可能”断面. 在进行网格搜索时, 将应力方向参数 ϕ , δ 和 ψ (为北东下坐标系经过三次旋转后与主轴坐标系重合, 旋转的三个角度, 属于基变换的问题, 使用三个旋转角度就可以在北东下坐标系中表示三个应力主轴方向)以及应力形因子 R 值的搜索步长分别设置为 1° , 1° , 1° 和 0.01, 置信区间设为 95%.

根据上节的双差定位结果(图 2), 地震大致分为三个丛集区. 靠近石苍断裂的丛集区, 靠近金钟水库东部的一个丛集区(区域 1)及其北部的一个丛集区(区域 2). 这些地震丛集区基本沿着石苍断裂和潼关断裂的走向展布. 这三个地震丛集区发生时间也基本分离; 靠近石苍断裂的丛集区发生最早, 但地震记录较少, 没有得到震源机制解结果; 随后东侧北部丛集区(区域 2)地震发生; 最后发生的是金钟水库东部的丛集区(区域 1). 后两个地震丛集区具有大量可以确定震源机制解的地震, 本研究分别对其采用上述介绍的方法进行应力张量反演, 得到如图 6 所示的应力场结果.

从这两个应力场结果(表 2, 图 6)来看, 两个应力场所选择的“可能断面”的优势分布均在 NW—ES 向, 验证了前面小震拟合断层面的走向结果. 区域 1 内主压应力轴方向为 NNE 向, 主张应力轴方向为 WNW 向, 而区域 2 内主压应力轴方向为 NNW 向, 主张应力轴方向为 ENE 向. 为定量比较两个区域求解的构造应力场与背景构造应力场的差别, 我们采用 Wan (2010)反演的该区域背景应力场定量数据计算背景构造应力场方向和震群数据, 得到区域 1 和背景应力场之间的三维空间旋转角为 74° , 区域 2 和背景应力场之间的三维空间旋转角为 48° . 可见区域 2 内震群破裂的应力场方向更接近于近 EW 挤压方向的背景构造应力场, 而靠近金钟水库的区域 1 的震群破裂的应力场与背景构造应力场方向差别更大. 从两个区域应力场的方向来看区域 2 的应力形因子小于 0.5, 说明中间应力值更加靠近主张应力值(万永革等, 2011), 即中间应力轴呈现拉张, 而区域 1 的应力形因子大于 0.5, 中间应力

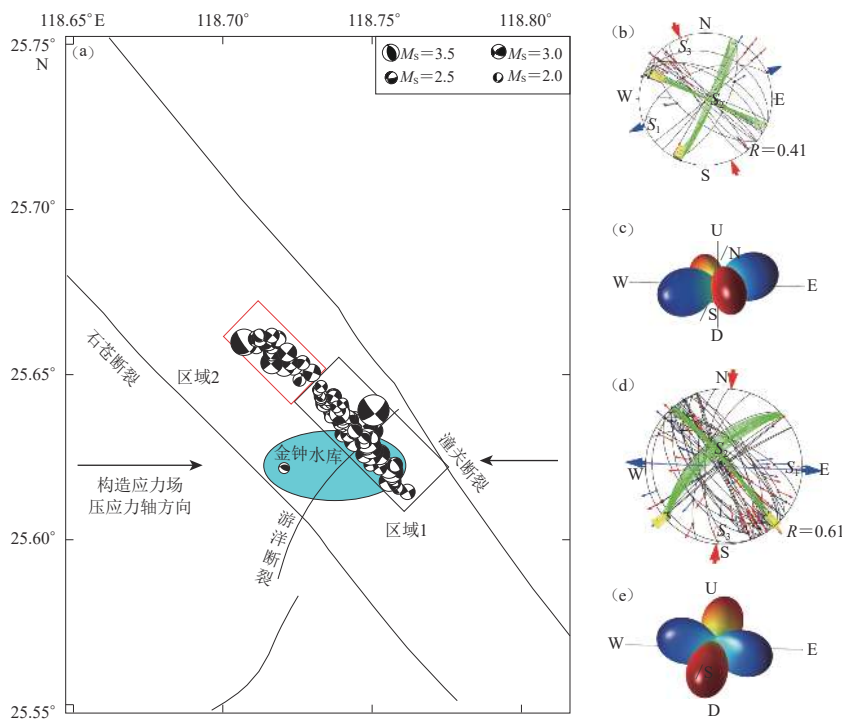


图 6 本研究中区域 1 和区域 2 的应力场反演结果

图(a)为区域整体应力示意图;图(b)、(d)为应力张量反演的等面积投影图。蓝色箭头和红色箭头分别表示“可能断层面”的实际测量的滑动方向和理论滑动方向;绿色表示在 95% 的置信水平下应力场的最大剪应力节面;黄色箭头表示最大剪应力的滑动方向。 S_3 、 S_2 和 S_1 及标注周边的闭合曲线分别表示主压应力轴、中间应力轴和主张应力轴的置信范围。U 和 D 分别为上和下两个方向。图(c)、(e)为两个子区应力张量反演结果的三维表示,红色表示主压应力的大小和方向;蓝色表示主张应力的大小和方向。下同

Fig. 6 Stress field inversion result in region 1 and region 2

Figs. (b) and (d) are equal-area projections of the stress tensor inversion. The blue and red arrows indicate the actual measured sliding direction and the theoretical sliding direction of the “possible fault plane”, respectively; the green indicates the maximum shear stress nodal plane of the stress field at 95% confidence level; the yellow arrow indicates the sliding direction of the maximum shear stress. The S_3 , S_2 , S_1 and the closed curves marked around them respectively represent the confidence ranges of the principal compressive stress axis, the intermediate stress axis and the principal tensile stress axis. U and D are the top and bottom directions respectively. Figs. (c) and (e) are three-dimensional representations of the results of the inversion of the stress tensor in the two sub-areas, with the magnitude and direction of the principal compressive stress in red; the magnitude and direction of the asserted stress in blue. The same below

轴呈现压缩状态。这从应力方向和应力相对大小两种方式反映了区域 1 受到了金钟水库的影响。

2.3 不同深度的应力场

上节采用水平区域应力场的方式表明远离水库区的应力场更接近背景构造应力场,说明了水库区对应力场的影响。本节按照 8—9 km, 10—11 km, 12—15 km, 16—21 km 不同深度区间的震群震源机制数据分别求解研究区的应力场,结果如表 2 和图 5 所示。采用与上小节相同的定量方法求解震群震源机制反演的应力场,并与 Wan (2010)得到的背景构造应力场

表 2 应力张量反演数值结果

Table 2 Results of the inverted stress tensor

分区	震源 机制解 个数	主压应力轴 S_1		中间应力轴 S_2		主张应力轴 S_3		R
		走向/ $^{\circ}$	倾伏角/ $^{\circ}$	走向/ $^{\circ}$	倾伏角/ $^{\circ}$	走向/ $^{\circ}$	倾伏角/ $^{\circ}$	
区域1	138	182.38°—188.46	10.16°—24.28°	329.00°—335.00°	61.00°—78.00°	89.58°—95.58°	-0.07°—16.93°	0.61
区域2	20	337.02°—344.43°	1.31°—7.04°	107.50°—115.00°	79.50°—88.00°	246.07°—253.57°	7.03°—15.53°	0.41
深度8—9 km	31	178.62°—197.62°	13.57°—39.02°	328.00°—347.00°	46.00°—75.00°	78.18°—97.18°	9.08°—38.08°	0.49
深度10—11 km	80	174.89°—181.25°	19.29°—26.97°	339.00°—343.00°	62.00°—70.00°	83.04°—87.04°	-1.68°—6.32°	0.45
深度12—15 km	30	334.41°—346.41°	8.75°—15.41°	228.00°—240.00°	39.00°—60.00°	72.22°—84.22°	18.53°—39.53°	0.81
深度16—21 km	17	344.03°—347.28°	1.31°—4.80°	99.50°—103.00°	79.00°—87.00°	253.22°—256.72°	6.08°—14.08°	0.53
前人研究	50	-0.44°—3.56°	12.42°—16.24°	162.00°—166.00°	73.00°—77.00°	268.45°—272.45°	2.34°—6.34°	0.32

的定量三维空间旋转角对比，得到8—9 km，10—11 km，12—15 km，16—21 km 深度范围内的震群震源机制数据反演的应力场与背景构造应力场的三维空间旋转角分别为 91°，74°，64°和 60°，由此可见随着深度的增加，震群构造应力场与背景应力场之间的角度差逐渐减小. 从图 5 可以直观地看到：随着深度的增加，主压应力轴的方向开始由 NNE 向变为 NNW 向，即随着深度的增加，与背景构造应力场的近 EW 向主压应力方向逐渐接近. 因此有理由相信反演区域的应力场值局限在有限空间内，随着远离金钟水库区和随着深度的加深，应力场逐渐靠近背景构造应力场方向，最后直至与背景构造应力场趋于一致.

结合上述结果可推测：福建仙游地区位于福建沿海，处于欧亚板块与太平洋板块的交接处，在太平洋板块的西向低角度俯冲下(Huang, Zhao, 2006)，应力场在俯冲带的板片俯冲处会呈现较大的东西向挤压应力，随着远离板片俯冲界面(随着深度的减小)，挤压应力会逐渐减小，类似于一立方体的下部受到挤压，而上部相对拉张一样，板片深部的挤压会导致浅部存在一定的东西向拉张作用. 根据震群反演的应力变化方向随深度发生变化的规律，地表的東西向拉张应力大小随着深度增加是逐渐减小的，到了某一深度就可能按着这种趋势变化为与板片俯冲相一致的东西向挤压应力状态. 该模型示意图如图 7 所示.

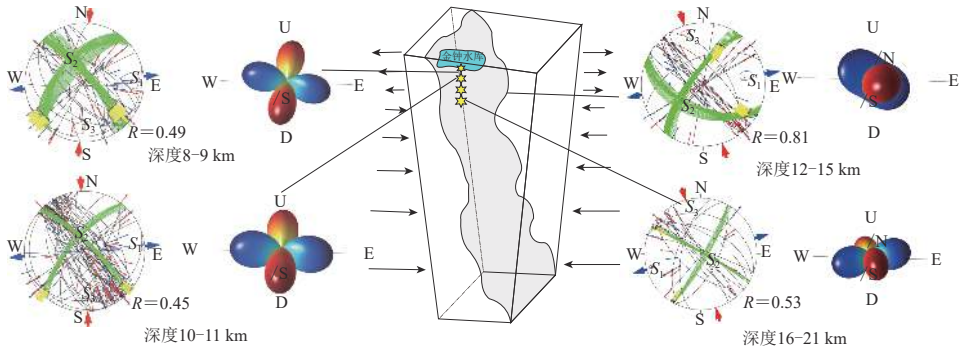


图 7 应力场方向随深度变化示意图

图中阴影表示板块交界面，黑色箭头表示构造应力场方向

Fig. 7 Schematic diagram of stress field changing with depth

The shadow zone in the figure indicates the plate interface, and the black arrows indicate the compressional axis direction of tectonic stress

3 讨论

3.1 定位结果揭示出断层面的准确性

本文为了获得更准确的地震事件位置分布, 利用双差定位的方式对有记录并满足条件的地震丛集重新定位, 将定位后的结果与原始结果重叠比较可以发现地震序列更加集中, 地震活动时间先后也一目了然, 这一结果与秦双龙和邱毅(2018)、毛松林和蔡欣欣(2014)进行定位后得到的地震序列有很强的一致性, 这也验证了本文定位结果的准确性.

3.2 震源机制结果的准确性

采用P波初动求解震源机制解是最传统的求解震源机制解的方法, 相较于目前流行的CAP求解震源机制的方法各有优缺点. 从数据量来看, P波初动方法利用了P波初动信息, 数据量少, 但不会受到地球内部界面导致观测波形变化的影响, 而CAP方法采用波形数据, 利用了较大的数据量, 但地球模型界面的不准确导致波形拟合存在差异. 从求解的地震震级来看, CAP方法很难求解M2.5以下的地震, 而P波初动方法没有求解的震级限制, 只要观测的P波初动符号足够多, 射线分布的间隔角度不太大, 就可以求解. 因此本研究采用更具优势的P波初动方法来求解大量小震震源机制用于分析应力场. 此外, 本研究一方面采用双差精定位的地震位置, 另一方面采用了较为精确的地球模型, 以确保台站相对于震源的离源角和方位角求解的准确性. 为展示震源机制解结果的准确性, 我们给出了两个典型地震(2013年2月10日M1.4和2014年3月14日M3.8地震)的震源机制求解台站P波初动符号的沙滩球分布和震源机制结果, 从分布来看, P波初动符号对震源机制解有较好的约束(图8).

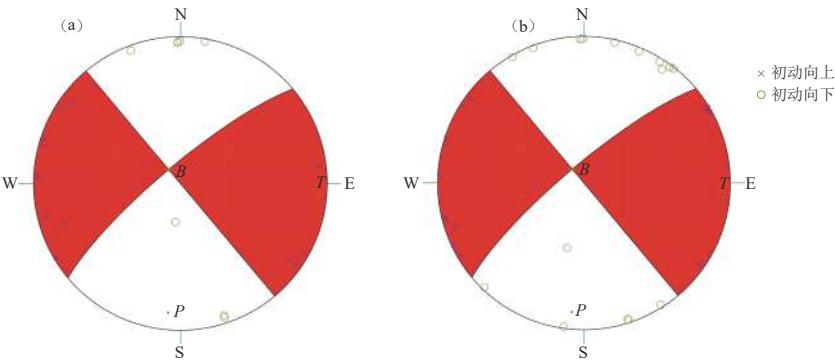


图8 2013年2月10日M1.4地震(a)和2014年3月14日M3.8地震(b)的P波初动分布和震源机制的等面积投影

Fig. 8 Equal area projection of the P-wave initial motion sign and estimated source mechanism for the February 10, 2013, M1.4 earthquake (a) and March 14, 2014, M3.8 earthquake (b)

为确认本研究反演震源机制解的准确性, 我们搜集了前人采用不同方式得出的震源机制解反演应力场对结果进行验证. 共收集了67个不同作者的震源机制解, 其中从袁丽文等(2016)文献中收集到48个, 从秦双龙和邱毅(2018)文献中收集到8个, 从李强等(2015)文献中收集到5个, 从邱毅等(2014)文献中收集到6个, 综合计算走滑型机制解所占比例最大, 有60个, 占有震源机制的92.3%. 对于相同的地震, 不同文献给出的震源机制解有一定的差异, 为了使反演出的应力场结果更加准确, 在对同一事件不同震源机制解进行处理时, 采

用万永革(2019)提出的同一地震震源机制中心解的方式进行计算震源机制中心解,然后利用中心解代替不同的震源机制解进行应力场反演,应力场反演结果的具体参数见表2最后一行,定量求解震群震源机制反演的应力场与用前人结果求解地应力场之间的三维空间旋转角为 20° ,得到的应力场与本文震源机制求解的结果基本一致,从而验证了本研究所得震源机制和应力场结果的正确性。

3.3 福建仙游震群发生的可能原因

本文采用P波初动的方法求解出159个震源机制解,根据震源机制解的P轴和T轴分布能明显看出该震群破裂的应力场与背景构造应力场之间的显著差异.考虑到金钟水库的存在,从水平分区和深度分层两个维度分别反演应力场,结果显示震群不同部位的应力场方向在水平方向反演的两个区域中距水库较远的震群应力场更靠近背景构造应力场;在深度方向上,随着深度的增加,应力场的方向逐渐靠近背景构造应力场的近东西方向.表明在研究区域的浅部(靠近水库)应力场方向较大地偏离了背景应力场方向.根据平面分区和深度分层上的应力场差别,可以推测出金钟水库对应力场的存在影响,但本研究求解的应力场方向与背景应力场相差太大,根据我们对地震错动导致周围应力场方向改变的研究(万永革等,2006),导致 10° 左右的应力方向偏转需要附加约相当于与构造应力量值相当的应力,而水体不会产生如此大的附加应力,因此仅凭水库的影响无法导致如此大的应力偏转.考虑到该地受到太平洋板片的深部俯冲挤压会使得浅部呈现拉张的趋势(图7),我们认为研究区域局部应力场的方向改变可能是这两种因素共同作用的。

此外研究区域的应力场分布与相距约254 km的珊溪水库有相似的表现.该震群活动与浙江珊溪水库震群震源机制均为NS向挤压,EW向拉张(张帆等,2013),且这两个震群均发生在我国东南沿海水库区,且水库区均位于太平洋板块的深部板片低角度俯冲区域的水区,可能是两者具有共同表现的原因。

4 结论

经过上述对福建仙游地区的研究与分析,本文得到以下结论:

1) 双差定位后得到了福建仙游震群的1864个地震事件的精确位置,该震群分布在NW—SE走向的一个条带上.对定位后的两个明显丛集区进行断层面拟合后得到西北丛集区(区域2)的断层走向为 135.6° ,倾角为 88.8° ,东南丛集区(区域1)的走向为 140.2° ,倾角为 88.7° ,由此推测该区域存在NW—SE走向的隐伏断层,本次震群由该隐伏断裂的破裂所致。

2) 采用P波初动极性数据求解得到159个震源机制解,震源机制类型以走滑型为主.利用震源机制解分区反演应力场,显示南北向两个分区的应力场主轴方向不同,北部远离金钟水库区域主压应力轴方向为NNE向,主张应力轴方向为WNW向,而南部靠近水库主压应力轴方向为NNW向,主张应力轴方向为ENE向.深部方向上,主压应力轴的方向由NNE向随深度增加逐渐变为NNW向,这表明随着深度增加,该区域应力场方向与背景应力场逐渐一致。

3) 从平面和深度两个维度分析应力场的变化表明:远离金钟水库区的应力场逐渐趋近于背景构造应力场,但还存在一定差距.根据应力场反演结果的空间分布和研究区域受到太平洋板片在深部的低角度俯冲,推测该震群的破裂是水库导致的拉张应力和低角度太平洋板片深部俯冲导致的浅部东西向拉张两者共同产生了一个跟构造应力场不一样的震群活动.要切实验证这种推测需要更多的资料,根据有地震布设台网以来的地震活动,该地区还

没有积累到足够的资料来进行精细应力场反演. 期待以后采用更多的其它与地壳应力场反演相关资料的加入, 以验证我们的推测.

此外, 目前发现的龙滩水库以及溪洛渡水库的震源机制破裂产生的应力场也与背景构造应力场不符合. 龙滩水库在蓄水后地震丛集的应力场最大主应力轴主要以 NW—SE 向为主, 最小主应力轴则呈 NE 向(阎春恒等, 2015); 溪洛渡水库在蓄水前后区域应力场也发生了改变, 最小压应力轴的仰角增大(苏珊等, 2020). 这两个库区在水库蓄水前后的应力场均有一定变化, 大多数学者认为区域应力场不一致是由于水库中水流向下渗透改变了岩石强度和孔隙压, 从而打破了应力平衡, 诱发了地震活动(陈翰林等, 2009; 阎春恒等, 2015; 马志江等, 2016; 王鹏等, 2017; 杨福平等, 2019; 苏珊等, 2020). 本研究为这些问题的研究提供了一个思路.

福建地震局蔡腾辉提供了部分地震数据, 审稿专家提出的宝贵修改意见, 作者在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 陈翰林, 赵翠萍, 修济刚, 陈章立. 2009. 龙滩库区水库地震震源机制及应力场特征[J]. *地震地质*, **31**(4): 686–698.
- Chen H L, Zhao C P, Xiu J G, Chen Z L. 2009. Study on the characteristics of focal mechanisms of reservoir induced earthquakes and stress field in the Longtan reservoir area[J]. *Seismology and Geology*, **31**(4): 686–698 (in Chinese).
- 郭增建. 1958. 由地震波初动求断层方法的一些推广和改进[J]. *地球物理学报*, **7**(1): 20–30.
- Kuo T C. 1958. Notes on the fault-plane determinations by means of initial motions of earthquakes[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **7**(1): 20–30 (in Chinese).
- 李强, 李军, 袁丽文, 邱毅, 李锋, 秦双龙, 曹轶. 2015. 福建仙游震群序列 $M_L \geq 4.0$ 事件震源机制与序列活动特征[J]. *地震*, **35**(4): 147–156.
- Li Q, Li J, Yuan L W, Qiu Y, Li F, Qin S L, Cao Y. 2015. Focal mechanisms and activity of $M_L \geq 4.0$ events in the 2013 Xianyou earthquake swarm sequence in Fujian Province[J]. *Earthquake*, **35**(4): 147–156 (in Chinese).
- 毛松林, 蔡欣欣. 2014. 仙游震群型地震的特点及地震机理分析[J]. *华南地震*, **34**(1): 86–93.
- Mao S L, Cai X X. 2014. Analysis of the characteristics and mechanism of xianyou earthquake swarm[J]. *South China Journal of Seismology*, **34**(1): 86–93 (in Chinese).
- 马志江, 钟羽云, 韩用兵, 叶建青, 张震峰, 林胜法, 徐梦林, 刘倩倩. 2016. 温州珊溪水库诱发地震构造条件[J]. *地球科学*, **41**(8): 1413–1423.
- Ma Z J, Zhong Y Y, Han Y B, Ye J Q, Zhang Z F, Lin S F, Xu M L, Liu Q Q. 2016. The tectonic conditions of Shanxi reservoir induced earthquake in Wenzhou[J]. *Earth Science*, **41**(8): 1413–1423 (in Chinese).
- 秦双龙, 李强, 邱毅, 廖丽霞, 陈莹. 2015. 福建仙游震群重定位及序列特征分析[J]. *地震地磁观测与研究*, **36**(3): 67–71.
- Qin S L, Li Q, Qiu Y, Liao L X, Chen Y. 2015. Relocation and sequence analysis for Xianyou earthquake swarm in Fujian Province[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **36**(3): 67–71 (in Chinese).
- 秦双龙, 邱毅. 2018. 福建仙游震群序列发震构造分析研究[J]. *地震工程学报*, **40**(6): 1306–1311.
- Qin S L, Qiu Y. 2018. Analysis of the seismogenic structure of the Xianyou earthquake swarm sequence in Fujian Province[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **40**(6): 1306–1311 (in Chinese).
- 邱毅, 李军, 康兰池, 袁丽文. 2014. 福建仙游地震序列的震源机制解[J]. *中国地震*, **30**(2): 280–288.
- Qiu Y, Li J, Kang L C, Yuan L W. 2014. Focal mechanism of the Xianyou earthquake sequence, Fujian[J]. *Earthquake Research In China*, **30**(2): 280–288 (in Chinese).
- 苏珊, 韩立波, 郭祥云. 2020. 溪洛渡水库近场区蓄水前后震源机制及应力场研究[J]. *地震研究*, **43**(2): 402–411.

- Su S, Han L B, Guo X Y. 2020. Study on focal mechanism and stress field before and after the impoundment in the vicinity of the Xiluodu reservoir[J]. *Journal of Seismological Research*, **43**(2): 402–411 (in Chinese).
- 万永革, 沈正康, 兰从欣. 2006. 根据走滑大地震前后应力轴偏转和应力降求取偏应力量值的研究[J]. *地球物理学报*, **49**(3): 838–844.
- Wan Y G, Shen Z K, Lan C X. 2006. Deviatoric stress level estimation according to principle axes rotation of stress field before and after large strike-slip type earthquake and stress drop[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(3): 838–844 (in Chinese).
- 万永革, 沈正康, 刁桂苓, 王福昌, 胡新亮, 盛书中. 2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. *地球物理学报*, **51**(3): 793–804.
- Wan Y G, Shen Z K, Diao G L, Wang F C, Hu X L, Sheng S Z. 2008. An algorithm of fault parameter determination using distribution of small earthquakes and parameters of regional stress field and its application to Tangshan earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(3): 793–804 (in Chinese).
- 万永革, 吴逸民, 盛书中, 沈正康, 万迪. 2011. P波极性数据所揭示的台湾地区三维应力结构的初步结果[J]. *地球物理学报*, **54**(11): 2809–2818.
- Wan Y G, Wu Y M, Sheng S Z, Shen Z K, Wan D. 2011. Preliminary result of Taiwan 3-D stress field from P wave polarity data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(11): 2809–2818 (in Chinese).
- 万永革. 2019. 同一地震多个震源机制中心解的确定[J]. *地球物理学报*, **62**(12): 4718–4728.
- Wan Y G. 2019. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(12): 4718–4728 (in Chinese).
- 万永革. 2024. 震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法及序列震源机制总体特征分析[J]. *地球科学*, **49**(7): 2675–2684.
- Wan Y G. 2024. Focal mechanism classification based on areal strain of the horizontal strain rosette of focal mechanism and characteristic analysis of overall focal mechanism of the earthquake sequence[J]. *Journal of Earth Science*, **49**(7): 2675–2684 (in Chinese).
- 王鹏, 孙冬军, 任烨, 于俊谊, 温燕林, 朱艾斓. 2017. 浙江珊溪水库 2014 年震群活动发震机理研究[J]. *地震学报*, **39**(5): 648–658.
- Wang P, Sun D J, Ren Y, Yu J Y, Wen Y L, Zhu A L. 2017. Investigation on the seismogenic mechanism of the 2014 earthquake swarm in Shanxi reservoir, Zhejiang Province[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **39**(5): 648–658 (in Chinese).
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 高阿甲. 1989. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J]. *地球物理学报*, **32**(6): 636–647.
- Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, Gao A J. 1989. The tectonic stress field of Chinese continent deduced from a great number of earthquakes[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **32**(6): 636–647 (in Chinese).
- 阎春恒, 周斌, 陆丽娟, 孙学军, 文翔. 2015. 龙滩水库蓄水后库区中小地震震源机制[J]. *地球物理学报*, **58**(11): 4207–4222.
- Yan C H, Zhou B, Lu L J, Sun X J, Wen X. 2015. Focal mechanisms of moderate and small earthquakes occurred after reservoir recharge in the Longtan reservoir region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(11): 4207–4222 (in Chinese).
- 杨福平, 余刚群, 侯林峰, 周昕. 2019. 大地电磁测深在珊溪水库诱发地震研究中的应用[J]. *工程地球物理学报*, **16**(2): 203–210.
- Yang F P, Yu G Q, Hou L F, Zhou X. 2019. The application of magnetotelluric sounding (MT) to research of reservoir-induced earthquake in Shanxi region[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, **16**(2): 203–210 (in Chinese).
- 余海琳, 万永革, 黄少华, 崔华伟. 2021. 利用 P 波初动数据研究 2021 年云南漾濞 $M_{\text{S}}6.4$ 地震序列震源机制解及应力场[J]. *地震研究*, **44**(3): 338–347.
- Yu H L, Wan Y G, Huang S H, Cui H W. 2021. Study on focal mechanism solution and stress field of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_{\text{S}}6.4$ earthquake sequence using P-wave first motion data[J]. *Journal of Seismological Research*, **44**(3): 338–347 (in Chinese).
- 袁丽文, 李强, 陈彩虹. 2016. 仙游地震序列中小地震震源机制解特征[J]. *防灾减灾学报*, **32**(3): 99–104.
- Yuan L W, Li Q, Chen C H. 2016. Focal mechanism solution characteristics of moderate and small earthquakes in Xianyou area[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, **32**(3): 99–104 (in Chinese).

- 张帆, 朱新运, 钟羽云. 2013. 珊溪水库地震小震震源机制解特征研究 [J]. *地震工程学报*, **35**(3): 684–691.
- Zhang F, Zhu X Y, Zhong Y Y. 2013. Study on the characteristic of focal mechanism solutions of the Shanxi reservoir earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(3): 684–691 (in Chinese).
- 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 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所; 141–151.
- Zhang L. 2008. *A Kinematic Model and Dynamic Cause of Quaternary Tectonic Movement of Southeastern Coastal Basins in Fujian Province*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration; 141–151 (in Chinese).
- Byerly P. 1938. The earthquake of July 6, 1934: Amplitudes and first motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **28**(1): 1–13.
- Hodgson J H, Storey R S. 1953. Tables extending byerly's fault-plane techniques to earthquakes of any focal depth[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **43**(1): 49–61.
- Huang J L, Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **111**(B9): B09305.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6): 1353–1368.
- Wan Y G. 2010. Contemporary tectonic stress field in China[J]. *Earthq Sci*, **23**(4): 377–386.
- Wan Y G, Sheng S Z, Huang J C, Li X, Chen X. 2016. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the boundary zone of China, Vietnam and Laos[J]. *Journal of Earth Science*, **27**(5): 777–785.

附表 1 P 波初动求得的震源机制解

序号	发震时间 年-月-日 时:分:秒	东经 °	北纬 °	深度 /km	震级 M	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾比	P波初动个数
						走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°	方位角/°	倾伏角/°	方位角/°	倾伏角/°				
1	2014-07-19 00:47:06	118.742	25.633	10	1.4	330	81	-177	240	87	-9	195	9	285	4	40	80	0	10
2	2014-04-06 10:12:33	118.743	25.633	10	1.5	174	53	-115	32	44	-60	24	69	282	5	190	20	0.09	11
3	2014-01-12 03:55:36	118.747	25.633	9	1.7	136	64	164	233	76	27	3	7	97	29	260	60	0.07	14
4	2014-03-14 20:25:11	118.743	25.635	10	1.7	134	67	-160	36	71	-24	354	30	86	3	180	60	0	14
5	2014-03-14 19:53:36	118.744	25.635	11	3.8	140	90	170	230	80	0	185	7	95	7	320	80	0	36
6	2014-07-19 01:00:22	118.739	25.636	9	1.7	315	81	-120	211	31	-17	194	45	69	30	320	30	0.06	18
7	2014-07-19 00:45:27	118.742	25.636	10	1.6	322	44	120	104	53	65	212	5	314	69	120	20	0.07	14
8	2014-03-14 19:52:20	118.742	25.636	9	1.3	340	82	174	70	84	8	205	1	295	10	110	80	0	10
9	2014-01-17 23:35:43	118.741	25.636	9	1.5	23	31	-109	226	61	-78	163	72	307	15	40	10	0.09	11
10	2014-01-07 06:49:43	118.742	25.636	10	1.7	146	64	164	243	76	27	13	7	107	29	270	60	0.20	10
11	2014-01-07 06:47:17	118.744	25.636	10	1.4	174	64	-124	51	41	-41	38	57	288	13	190	30	0.09	11
12	2014-07-23 23:52:37	118.741	25.637	9	1.8	334	22	-117	184	70	-79	110	63	265	25	0	10	0	12
13	2014-05-12 18:28:38	118.740	25.637	10	1.2	320	80	178	50	88	10	185	6	275	8	60	80	0.09	11
14	2014-03-14 20:05:29	118.743	25.637	10	1.7	310	80	180	220	90	170	175	7	265	7	40	80	0	11
15	2014-03-12 14:50:09	118.741	25.637	9	1.8	330	81	-177	240	87	-9	195	9	285	4	40	80	0	11
16	2014-02-27 14:32:29	118.740	25.637	10	2.5	310	80	180	220	90	170	175	7	265	7	40	80	0	20
17	2014-08-01 22:43:04	118.740	25.638	9	2.3	308	75	167	42	77	16	175	2	265	20	80	70	0	12
18	2014-07-25 06:44:18	118.741	25.638	10	1.8	334	61	-102	177	31	-71	217	72	73	15	340	10	0.06	16
19	2014-05-24 00:18:51	118.738	25.638	10	1.2	160	10	-90	340	80	-90	250	55	70	35	340	0	0	10
20	2014-05-12 18:24:19	118.739	25.638	10	3.0	325	81	-120	221	31	-17	204	45	79	30	330	30	0.07	30
21	2014-03-12 05:37:06	118.744	25.638	9	1.7	132	44	120	274	53	65	22	5	124	69	290	20	0.09	11
22	2014-03-12 04:24:19	118.743	25.638	9	1.6	160	88	170	250	80	2	205	6	115	8	330	80	0	12
23	2014-01-07 06:43:42	118.740	25.638	10	2.9	156	64	164	253	76	27	23	7	117	29	280	60	0.07	27
24	2014-01-02 13:56:38	118.740	25.638	10	2.5	150	44	158	257	75	48	17	19	126	44	270	40	0	18
25	2014-07-19 01:50:15	118.739	25.639	9	3.3	150	20	180	60	90	110	349	42	131	42	240	20	0.03	31
26	2014-07-03 17:14:26	118.738	25.639	11	2.9	320	87	171	50	81	3	5	4	275	9	120	80	0	26
27	2014-07-03 04:56:06	118.738	25.639	13	2.1	316	67	160	54	71	24	184	3	276	30	90	60	0.11	19
28	2014-06-29 03:41:30	118.739	25.639	10	1.9	130	90	170	220	80	0	175	7	85	7	310	80	0	13
29	2014-06-29 02:17:36	118.739	25.639	10	2.0	152	61	-138	37	54	-37	8	50	273	4	180	40	0.04	23
30	2014-05-24 00:14:12	118.737	25.639	11	2.8	140	90	110	230	20	0	211	42	69	42	320	20	0.03	29

续表 1

序号	发震时间 年-月-日 时:分:秒	东经 °	北纬 °	深度 /km	震级 M	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾比	P波初动个数
						走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°	方位角/°	倾伏角/°	方位角/°	倾伏角/°				
31	2014-07-19 00:32:21	118.738	25.640	10	2.3	312	48	-149	200	67	-46	157	48	260	11	0	40	0.07	27
32	2014-05-24 00:34:06	118.738	25.640	10	1.3	309	62	-113	171	36	-54	178	65	55	14	320	20	0.09	11
33	2014-02-10 23:29:21	118.739	25.640	10	1.8	138	61	174	231	85	30	1	17	99	24	240	60	0.10	20
34	2014-02-02 00:03:47	118.737	25.640	10	2.0	316	64	164	53	76	27	183	7	277	29	80	60	0.04	28
35	2014-01-27 13:50:18	118.737	25.640	12	3.1	130	90	170	220	80	0	175	7	85	7	310	80	0	30
36	2014-01-27 01:02:39	118.737	25.640	10	1.9	320	82	-174	230	84	-8	185	10	275	1	10	80	0	16
37	2014-01-02 23:34:08	118.738	25.640	10	2.3	321	83	-161	229	71	-7	186	18	94	8	340	70	0.04	27
38	2014-10-10 04:39:32	118.738	25.641	8	1.7	292	61	-138	177	54	-37	148	50	53	4	320	40	0	15
39	2014-08-13 13:29:12	118.735	25.641	10	1.9	130	90	100	220	10	0	210	44	50	44	310	10	0.07	15
40	2014-07-27 20:52:40	118.736	25.641	9	2.3	130	87	-171	40	81	-3	355	9	265	4	150	80	0.04	23
41	2014-07-05 22:15:24	118.738	25.641	12	1.9	140	73	-122	24	36	-31	13	52	253	21	150	30	0.10	20
42	2014-05-25 05:04:11	118.736	25.641	10	1.8	150	90	100	240	10	0	230	44	70	44	330	10	0.11	18
43	2014-05-24 00:36:56	118.736	25.641	10	1.9	130	90	100	220	10	0	210	44	50	44	310	10	0	15
44	2014-05-02 20:13:57	118.735	25.641	10	1.9	130	90	100	220	10	0	210	44	50	44	310	10	0	17
45	2014-01-27 13:53:04	118.738	25.641	10	2.5	140	90	100	230	10	0	220	44	60	44	320	10	0	18
46	2014-01-21 00:53:13	118.740	25.641	10	1.9	160	90	170	250	80	0	205	7	115	7	340	80	0.08	13
47	2014-01-17 23:07:55	118.738	25.641	9	1.6	137	62	169	233	80	28	2	12	98	27	250	60	0.14	14
48	2014-12-02 02:13:14	118.735	25.642	8	2.0	140	90	0	230	90	180	5	0	95	0	0	90	0.25	16
49	2014-07-27 21:02:03	118.735	25.642	9	1.5	150	87	171	240	81	3	195	4	105	9	310	80	0.09	11
50	2014-07-27 20:28:59	118.734	25.642	9	2.6	324	82	-130	225	41	-12	197	39	84	26	330	40	0.07	29
51	2014-07-07 23:44:34	118.734	25.642	11	1.5	339	70	176	71	87	20	203	11	297	16	80	70	0.20	10
52	2014-05-29 05:35:08	118.737	25.642	10	1.9	151	83	-161	59	71	-7	16	18	284	8	170	70	0.14	14
53	2014-02-01 15:43:52	118.735	25.642	10	1.9	130	90	100	220	10	0	210	44	50	44	310	10	0	11
54	2014-01-31 13:31:55	118.736	25.642	10	1.5	150	90	110	240	20	0	221	42	79	42	330	20	0	11
55	2014-01-17 22:32:14	118.738	25.642	9	1.3	314	64	-124	191	41	-41	178	57	68	13	330	30	0	11
56	2014-10-12 06:20:45	118.737	25.643	9	2.1	120	90	170	210	80	0	165	7	75	7	300	80	0	21
57	2014-10-10 04:37:57	118.738	25.643	8	1.0	111	31	163	215	81	60	329	30	94	45	220	30	0.10	10
58	2014-10-08 12:52:44	118.736	25.643	10	1.8	328	41	-105	168	51	-77	133	79	249	5	340	10	0	17
59	2014-10-08 04:32:36	118.736	25.643	9	1.6	70	10	-90	250	80	-90	160	55	340	35	250	0	0	10
60	2014-07-27 21:44:02	118.736	25.643	8	1.6	130	90	0	220	90	180	355	0	85	0	0	90	0	12

续表 1

序号	发震时间 年-月-日 时:分:秒	东经 °	北纬 °	深度 /km	震级 M	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾比	P波初动个数
						走向°	倾角°	滑动角°	走向°	倾角°	滑动角°	方位角°	倾伏角°	方位角°	倾伏角°				
61	2014-05-27 10:13:04	118.735	25.643	10	1.7	130	90	100	220	10	0	210	44	50	44	310	10	0	13
62	2014-02-05 04:06:32	118.733	25.643	10	1.7	70	20	-90	250	70	-90	160	65	340	25	250	0	0	12
63	2014-12-13 19:58:19	118.736	25.644	9	1.4	89	85	150	182	61	6	139	17	41	24	260	60	0.09	11
64	2014-12-05 12:35:40	118.737	25.644	8	2.5	344	61	-102	187	31	-71	227	72	83	15	350	10	0.29	14
65	2014-11-10 06:54:39	118.735	25.644	9	1.5	134	22	-117	344	70	-79	270	63	65	25	160	10	0	10
66	2014-11-10 06:05:07	118.734	25.644	9	1.3	299	62	-113	161	36	-54	168	65	45	14	310	20	0	11
67	2014-10-15 01:22:03	118.737	25.644	9	2.0	300	80	-178	210	88	-10	165	8	255	6	20	80	0	19
68	2014-07-12 06:45:45	118.733	25.644	12	2.1	330	30	180	240	90	120	177	38	303	38	60	30	0	20
69	2014-07-08 22:08:55	118.733	25.644	11	1.5	137	81	-110	23	22	-26	24	50	243	33	140	20	0.10	10
70	2014-11-26 07:00:14	118.732	25.645	10	1.3	287	22	-154	173	81	-70	106	50	247	33	350	20	0	11
71	2014-11-18 22:30:16	118.732	25.646	10	1.7	130	90	130	220	40	0	187	33	73	33	310	40	0	17
72	2014-09-22 14:44:57	118.733	25.647	10	1.9	320	81	175	50	85	9	185	3	275	10	80	80	0	13
73	2013-09-04 06:53:04	118.761	25.616	11	2.4	330	80	180	240	90	170	195	7	285	7	60	80	0	19
74	2013-09-05 04:21:47	118.758	25.617	11	1.8	153	71	-111	23	28	-43	34	58	259	23	160	20	0.11	18
75	2013-11-06 21:31:24	118.756	25.619	11	2.8	137	76	153	234	64	16	187	7	93	29	290	60	0	26
76	2013-11-04 20:34:40	118.755	25.619	11	3.0	158	73	170	252	80	18	24	5	116	19	280	70	0.12	26
77	2013-09-06 01:13:03	118.757	25.619	10	1.6	316	71	-144	213	56	-23	179	38	82	10	340	50	0.08	12
78	2013-09-14 03:13:50	118.756	25.620	10	1.4	318	80	163	52	73	10	6	5	274	19	110	70	0	10
79	2013-08-30 05:22:13	118.756	25.620	11	1.9	308	80	-100	175	14	-45	206	54	47	34	310	10	0.10	20
80	2013-11-04 20:34:28	118.755	25.621	11	1.4	340	60	-90	160	30	-90	250	75	70	15	160	0	0.19	16
81	2013-10-31 20:50:19	118.756	25.621	11	2.2	159	48	-132	33	56	-53	0	60	98	4	190	30	0	20
82	2013-09-27 11:45:15	118.756	25.621	11	2.1	318	80	163	52	73	10	6	5	274	19	110	70	0	12
83	2013-09-14 02:59:50	118.756	25.622	10	3.4	133	75	132	240	44	22	193	19	84	44	300	40	0.03	38
84	2013-08-25 22:10:29	118.756	25.622	11	1.8	149	83	161	241	71	7	196	8	104	18	310	70	0	13
85	2013-11-19 03:03:58	118.755	25.623	10	3.2	133	75	132	240	44	22	193	19	84	44	300	40	0	26
86	2013-09-13 14:22:14	118.752	25.623	11	2.1	150	88	170	240	80	2	195	6	105	8	320	80	0.12	17
87	2013-10-03 16:49:27	118.757	25.624	10	2.3	320	73	-122	204	36	-31	193	52	73	21	330	30	0.05	19
88	2013-09-13 15:12:20	118.749	25.624	11	2.0	329	70	176	61	87	20	193	11	287	16	70	70	0.09	11
89	2013-09-08 22:56:38	118.750	25.627	9	2.5	311	87	-160	219	70	-4	177	16	83	11	320	70	0.15	26
90	2013-08-24 00:49:57	118.752	25.627	11	3.1	130	90	110	220	20	0	201	42	59	42	310	20	0.06	31

续表 1

序号	发震时间 年-月-日 时:分:秒	东经 °	北纬 °	深度 /km	震级 M	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾比	P波初动个数
						走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°	方位角/°	倾伏角/°	方位角/°	倾伏角/°				
91	2013-08-09 13:37:12	118.750	25.628	11	3.1	310	80	178	40	88	10	175	6	265	8	50	80	0.10	10
92	2013-08-09 13:53:24	118.749	25.629	12	2.9	132	84	-140	37	51	-8	2	32	258	22	140	50	0.04	25
93	2013-08-07 05:30:32	118.746	25.629	11	1.8	331	85	-150	238	61	-6	199	24	101	17	340	60	0.09	11
94	2013-08-03 03:38:44	118.748	25.629	12	2.0	327	56	-127	201	48	-48	180	60	83	4	350	30	0.06	16
95	2013-08-19 17:36:20	118.748	25.630	10	3.8	140	90	170	230	80	0	185	7	95	7	320	80	0	34
96	2013-08-09 13:37:07	118.749	25.630	12	2.5	320	90	170	50	80	0	5	7	275	7	140	80	0.05	21
97	2013-08-02 21:10:17	118.747	25.630	10	1.8	139	83	161	231	71	7	186	8	94	18	300	70	0.09	11
98	2013-01-20 23:33:58	118.744	25.630	10	1.7	330	81	-177	240	87	-9	195	9	285	4	40	80	0	11
99	2013-10-18 14:05:23	118.744	25.631	10	3.3	140	90	170	230	80	0	185	7	95	7	320	80	0.03	35
100	2013-08-09 13:38:40	118.748	25.631	12	3.5	137	75	-132	30	44	-22	6	44	257	19	150	40	0.04	23
101	2013-08-03 05:23:36	118.749	25.631	9	2.8	324	77	-142	225	53	-16	191	36	90	16	340	50	0.04	24
102	2013-02-11 01:05:50	118.740	25.633	12	2.4	139	87	160	231	70	4	187	11	93	16	310	70	0.03	29
103	2013-02-10 03:25:46	118.742	25.633	14	2.5	320	84	-172	230	82	-6	185	10	95	1	0	80	0.03	32
104	2013-12-09 07:21:06	118.746	25.634	10	2.0	320	80	180	230	90	170	185	7	275	7	50	80	0	17
105	2013-08-19 18:05:28	118.744	25.634	10	2.7	140	90	0	230	90	180	5	0	95	0	0	90	0.12	32
106	2013-08-03 02:43:55	118.750	25.634	9	2.9	320	85	171	50	81	5	5	3	275	10	110	80	0.06	17
107	2013-12-09 23:25:13	118.746	25.635	10	1.8	316	82	130	55	41	12	16	26	263	39	130	40	0	17
108	2013-11-03 00:13:46	118.749	25.635	9	2.3	127	76	153	224	64	16	177	7	83	29	280	60	0	24
109	2013-10-17 03:29:21	118.745	25.635	9	1.7	320	80	-178	230	88	-10	185	8	275	6	40	80	0	10
110	2013-08-03 02:43:56	118.746	25.635	10	4.2	320	80	180	230	90	170	185	7	275	7	50	80	0	29
111	2013-03-23 02:39:47	118.742	25.635	10	1.6	320	80	178	50	88	10	185	6	275	8	60	80	0.08	13
112	2013-02-10 05:59:11	118.741	25.635	14	1.9	320	80	-178	230	88	-10	185	8	275	6	40	80	0	21
113	2013-02-10 04:56:09	118.740	25.635	12	1.4	140	90	170	230	80	0	185	7	95	7	320	80	0.05	21
114	2013-02-10 03:29:35	118.744	25.635	10	1.0	306	64	164	43	76	27	173	7	267	29	70	60	0.18	11
115	2013-01-20 18:59:31	118.739	25.636	13	1.9	330	80	-178	240	88	-10	195	8	285	6	50	80	0	11
116	2013-12-17 04:56:45	118.740	25.637	10	2.1	320	84	-172	230	82	-6	185	10	95	1	0	80	0	16
117	2013-02-23 23:23:14	118.742	25.637	13	3.0	320	80	-178	230	88	-10	185	8	275	6	40	80	0	30
118	2013-01-19 22:13:09	118.739	25.637	10	1.7	310	80	180	220	90	170	175	7	265	7	40	80	0	12
119	2013-01-12 22:57:21	118.740	25.637	10	2.4	310	80	180	220	90	170	175	7	265	7	40	80	0	22
120	2013-12-30 08:13:46	118.740	25.638	10	2.5	320	80	-178	230	88	-10	185	8	275	6	40	80	0	19

续表 1

序号	发震时间 年-月-日 时:分:秒		东经 °	北纬 °	深度 /km	震级 M	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾比	P波初动个数
							走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°	方位角/°	倾伏角/°	方位角/°	倾伏角/°				
121	2013-02-24 20:39:22	118.738	25.638	11	1.9	334	71	-156	236	67	-20	196	30	104	3	10	60	0	16	
122	2013-02-24 07:25:52	118.736	25.638	11	1.6	320	80	-178	230	88	-10	185	8	275	6	40	80	0	12	
123	2013-01-27 10:00:27	118.736	25.638	12	1.8	130	90	110	220	20	0	201	42	59	42	310	20	0.09	11	
124	2013-01-11 18:16:55	118.742	25.638	11	2.0	159	87	160	251	70	4	207	11	113	16	330	70	0.12	16	
125	2013-12-16 19:01:36	118.739	25.639	10	3.1	140	90	0	230	90	180	5	0	95	0	0	90	0.09	32	
126	2013-12-20 23:40:48	118.739	25.640	10	1.8	320	80	180	230	90	170	185	7	275	7	50	80	0	11	
127	2013-09-04 06:23:26	118.750	25.640	10	4.8	141	83	-161	49	71	-7	6	18	274	8	160	70	0.02	80	
128	2013-05-28 12:30:01	118.738	25.641	12	1.8	310	80	180	220	90	170	175	7	265	7	40	80	0	12	
129	2013-05-28 13:06:38	118.740	25.642	13	1.7	320	80	-178	230	88	-10	185	8	275	6	40	80	0	10	
130	2012-11-30 14:59:13	118.749	25.627	18	3.3	330	88	170	60	80	2	15	6	285	8	140	80	0.10	21	
131	2012-11-25 08:44:31	118.747	25.627	17	2.6	320	85	171	50	81	5	5	3	275	10	110	80	0	13	
132	2012-11-25 17:42:39	118.749	25.629	17	3.4	144	77	-142	45	53	-16	11	36	270	16	160	50	0.09	22	
133	2012-11-25 08:04:03	118.748	25.629	15	2.2	320	90	170	50	80	0	5	7	275	7	140	80	0	12	
134	2012-11-25 07:48:49	118.748	25.631	17	3.8	310	80	180	220	90	170	175	7	265	7	40	80	0	22	
135	2012-11-15 23:44:32	118.747	25.631	19	2.4	329	48	-132	203	56	-53	170	60	268	4	0	30	0	16	
136	2012-11-25 00:10:52	118.750	25.632	16	1.9	329	36	-126	191	62	-67	142	65	265	14	0	20	0	11	
137	2012-11-12 12:26:56	118.747	25.632	15	2.0	137	71	111	267	28	43	211	23	76	58	310	20	0	11	
138	2012-11-25 07:55:45	118.744	25.634	13	2.3	142	80	100	275	14	45	223	34	64	54	320	10	0.08	13	
139	2012-01-21 08:11:14	118.726	25.649	12	2.0	247	54	143	2	61	42	123	4	218	50	30	40	0.10	10	
140	2012-01-19 18:45:47	118.730	25.651	17	2.7	290	85	171	20	81	5	335	3	245	10	80	80	0	16	
141	2012-05-24 18:02:17	118.724	25.653	16	2.8	302	61	152	47	66	33	174	3	267	40	80	50	0.08	13	
142	2012-05-11 22:39:22	118.721	25.653	18	3.2	140	82	174	230	84	8	5	1	95	10	270	80	0.04	23	
143	2012-04-15 12:02:02	118.717	25.654	14	3.4	140	80	-178	50	88	-10	5	8	95	6	220	80	0	21	
144	2012-01-19 05:51:18	118.727	25.654	16	2.2	295	53	164	34	77	38	160	16	261	36	50	50	0.07	14	
145	2012-01-17 22:51:27	118.723	25.654	14	2.4	310	88	170	40	80	2	355	6	265	8	120	80	0.08	13	
146	2012-06-10 16:17:54	118.717	25.657	17	2.6	149	41	-139	26	64	-56	342	57	92	13	190	30	0	13	
147	2012-04-02 05:56:39	118.712	25.659	13	2.5	320	85	171	50	81	5	5	3	275	10	110	80	0	13	
148	2012-03-22 05:10:09	118.717	25.659	12	2.5	120	80	-180	30	90	-10	345	7	75	7	210	80	0	14	
149	2012-07-22 02:27:33	118.709	25.660	14	2.0	280	10	180	190	90	100	110	44	270	44	10	10	0.09	11	
150	2012-04-15 11:57:01	118.708	25.660	14	4.1	147	81	-110	33	22	-26	34	50	253	33	150	20	0.06	32	

续表 1

序号	发震时间 年-月-日 时:分:秒	东经 °	北纬 °	深度 /km	震级 M	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾比	P波初动个数
						走向°	倾角°	滑动角°	走向°	倾角°	滑动角°	方位角°	倾伏角°	方位角°	倾伏角°	方位角°	倾伏角°		
151	2012-04-04 02:15:41	118.716	25.660	13	2.6	140	80	-178	50	88	-10	5	8	95	6	220	80	0	11
152	2012-02-02 23:06:17	118.715	25.660	15	2.1	300	90	90	165	0	135	30	45	210	45	300	0	0.15	13
153	2012-04-22 10:22:46	118.719	25.661	18	2.5	290	30	180	200	90	120	137	38	263	38	20	30	0	14
154	2012-04-01 18:39:46	118.712	25.661	16	2.5	130	87	-171	40	81	-3	355	9	265	4	150	80	0.09	11
155	2012-03-30 03:34:43	118.713	25.661	18	2.4	302	84	-140	207	51	-8	172	32	68	22	310	50	0.07	14
156	2012-04-18 13:11:33	118.717	25.662	19	2.3	310	81	175	40	85	9	175	3	265	10	70	80	0	13
157	2012-04-02 04:44:40	118.713	25.662	18	2.0	129	62	-113	351	36	-54	358	65	235	14	140	20	0	11
158	2011-12-30 02:38:38	118.722	25.657	21	2.9	130	80	-178	40	88	-10	355	8	85	6	210	80	0	15
159	2010-08-06 11:46:26	118.721	25.623	13	1.7	121	62	113	259	36	54	195	14	72	65	290	20	0	10