

寻乌及邻区震源机制和视应力特征

汤兰荣¹ 曾新福¹ 罗丽¹ 黎斌¹ 吕坚¹

¹ 江西省地震局,南昌市昌东大道6929号,330096

摘要: 利用寻乌及邻区2009年以来的地震波形资料,采用Snoke方法反演19次 $M_L 2.5$ 以上地震的震源机制,计算89次 $M_L 1.5$ 以上地震的视应力。结果显示,寻乌及邻区的走滑型地震占绝对优势,震源机制解 P 轴优势方向分布在 $310^\circ \sim 320^\circ$ 和 $110^\circ \sim 130^\circ$ 之间,倾角绝大多数在 40° 以内,与该区以 $NWW-SEE$ 向水平挤压为特征的构造应力场吻合;寻乌震群集中区内8次 $M_L 2.5$ 以上地震的震源机制结果一致性较好。寻乌及邻区视应力与震级呈正相关,2017-11-06寻乌 $M_L 3.8$ 震群前的差视应力值出现高值波动。

关键词: 寻乌及邻区;Snoke方法;震源机制解;视应力

中图分类号: P313; P315

文献标识码: A

赣南是中强地震多发区,历史上破坏性地震频发,最大地震为1806年会昌南6.0级地震,该地震也是江西境内有记载以来的最大地震。寻乌是赣南地区地震活动最为强烈的地区,1970年以来共发生 $M_L 4.0$ 以上地震7次,最大地震为1987年寻乌5.5级震群。2017-11-06寻乌地区发生 $M_L 3.8$ 震群,其中包括多次 $M_L 3.0$ 以上地震(图1、2)。

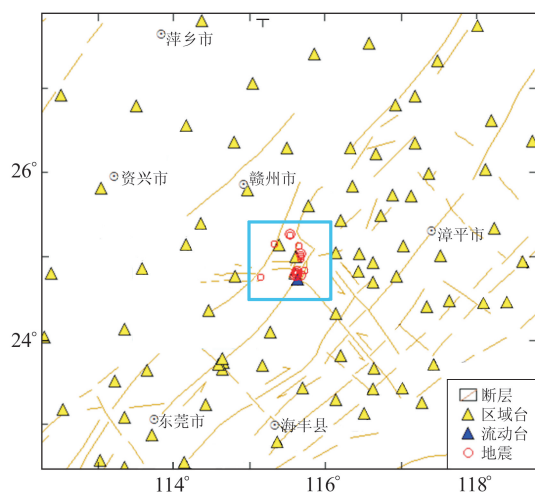


图1 地震震中和台站分布

Fig.1 Distribution of the epicenters and stations

利用数字地震波形资料开展的赣南地区研究较少。在震源机制和视应力研究方面,曾文敬等^[1]利用从震源向上射出的直达 P 、 S 波引起的地动位移振幅比,得到2001~2008年赣南及邻区

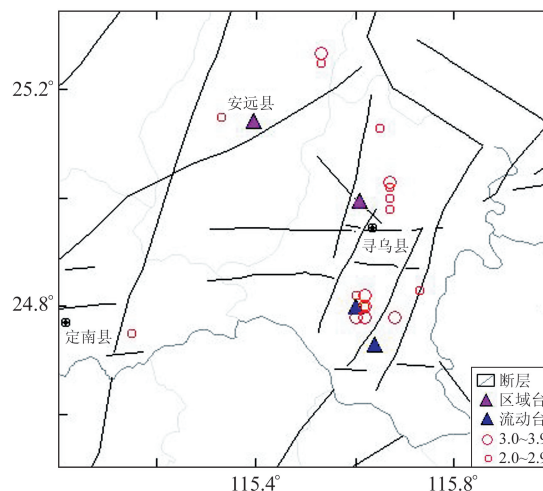


图2 图1方框中的地震、台站和构造分布
Fig.2 Earthquakes, stations and structural distribution in the box of figure 1

58个 $M_L 2.0 \sim 4.2$ 地震的震源机制;王甘娇等^[2]在此基础上对赣南地区综合断层面解及其置信区间进行了计算分析,得到最大主应力轴方位为 SEE 向(95%的置信范围为 $110^\circ \sim 140^\circ$),最小主应力轴方位为 NNE 向(95%的置信范围为 $15^\circ \sim 45^\circ$),为走滑类型。2009年以来,江西区域数字地震台网的台站数量大幅增加,对震源机制和视应力的计算精度提升有很大帮助。本文利用寻乌及邻区2009年以来的地震波形资料,计算震源机制和视应力,为赣南及邻区的地震趋势预测提供参考依据。

1 震源机制分析

1.1 数据资料 and 速度模型

选取 2009-01~2018-11 波形质量较好的 19 次 $M_L2.5$ 以上地震进行震源机制计算,其中 $M_L3.0\sim3.9$ 地震 8 次。计算使用的地震波形资料由国家数字测震台网数据备份中心提供^[3]。

本文所用方法对介质模型没有太多要求,速度结构的误差对计算结果的影响较小^[4-5]。使用华南地区速度结构模型作为层状介质速度结构^[6],具体见表 1。

表 1 华南地壳速度模型

Tab. 1 Crustal velocity model for southern China

| 地壳厚度/km | $V_P/(km\cdot s^{-1})$ | $V_S/(km\cdot s^{-1})$ |
|---------|------------------------|------------------------|
| 21.4 | 6.01 | 3.55 |
| 11.0 | 6.88 | 3.93 |

1.2 计算震源机制方法及原理

采用 Snoko 最新发展的利用 P 波、SV 波和

SH 波的初动和振幅比联合计算震源机制的方法和交互式 FOCMEC 反演程序^[7-9]进行计算。Snoko 方法利用双力偶点源模型,采用 3 个独立震源机制参数的网格尝试法,计算一系列直达 P 波、SV 波和 SH 波的初动方向及 SV/P、SH/P 或 SV/SH 振幅比的理论值,并将其与实际观测值进行对比,求取满足小于设定的矛盾数据上限的震源机制解,选择其中矛盾符号数最少及振幅比残差最小的震源机制解作为最佳解^[10]。该方法与 P 波初动法及垂直向 SV 波与 P 波的振幅比方法相比,优势在于增加了 SH 波与 P 波的振幅比和 S 波的初动数据,对震源机制解的约束更多,结果更准确^[11]。

1.3 计算结果及分析

本文采用的计算方法在初动和台站数量较少时也能准确确定震源机制^[4],19 次地震中有 18 次使用了 10 个以上的初动资料,计算结果稳定可靠(表 2)。根据 Zobark^[12]对震源机制的分类标

表 2 震源机制解计算结果

Tab. 2 Calculation results of focal mechanism solution

| 序号 | 发震时刻 | 震级 M_L | 节面 I/(°) | | | 节面 II/(°) | | | P 轴/(°) | | T 轴/(°) | | B 轴/(°) | | 断层类型 |
|----|---------------------|----------|----------|----|-----|-----------|----|------|---------|----|---------|----|---------|----|------|
| | | | 走向 | 倾角 | 滑动角 | 走向 | 倾角 | 滑动角 | 方位 | 倾角 | 方位 | 倾角 | 方位 | 倾角 | |
| 1 | 2009-04-03 00:56:02 | 2.6 | 121 | 74 | -37 | 223 | 54 | -160 | 76 | 37 | 176 | 13 | 282 | 50 | SS |
| 2 | 2009-12-14 02:07:21 | 2.5 | 140 | 90 | 35 | 50 | 55 | 180 | 270 | 24 | 11 | 24 | 140 | 55 | U |
| 3 | 2011-08-01 17:49:51 | 2.7 | 149 | 58 | -26 | 254 | 68 | -146 | 115 | 39 | 19 | 6 | 282 | 50 | SS |
| 4 | 2012-04-28 00:41:15 | 3.7 | 148 | 52 | -51 | 275 | 52 | -129 | 122 | 60 | 212 | 0 | 302 | 30 | NF |
| 5 | 2012-06-08 06:01:30 | 2.6 | 1 | 66 | -33 | 106 | 61 | -152 | 322 | 39 | 55 | 3 | 149 | 50 | SS |
| 6 | 2012-10-26 07:20:20 | 2.5 | 348 | 45 | 45 | 223 | 60 | 125 | 288 | 9 | 184 | 59 | 23 | 30 | TF |
| 7 | 2015-12-01 02:48:00 | 2.6 | 2 | 82 | -18 | 95 | 72 | -171 | 317 | 19 | 50 | 7 | 158 | 70 | SS |
| 8 | 2017-01-03 12:29:29 | 2.6 | 338 | 60 | 42 | 224 | 55 | 143 | 100 | 4 | 194 | 50 | 7 | 40 | TS |
| 9 | 2017-11-06 14:22:11 | 3.8 | 0 | 65 | -2 | 91 | 88 | -155 | 319 | 19 | 223 | 16 | 96 | 65 | SS |
| 10 | 2017-11-11 19:35:03 | 2.5 | 174 | 82 | -6 | 265 | 84 | -172 | 130 | 10 | 40 | 1 | 305 | 80 | SS |
| 11 | 2017-12-06 09:44:20 | 3.0 | 1 | 80 | 23 | 267 | 68 | 189 | 132 | 8 | 226 | 23 | 24 | 65 | SS |
| 12 | 2017-12-15 19:28:32 | 3.1 | 359 | 74 | 20 | 263 | 71 | 163 | 131 | 2 | 222 | 25 | 36 | 65 | SS |
| 13 | 2018-01-01 22:37:15 | 3.6 | 359 | 74 | 20 | 263 | 71 | 163 | 131 | 2 | 222 | 25 | 36 | 65 | SS |
| 14 | 2018-01-01 22:47:32 | 2.6 | 6 | 69 | 41 | 259 | 52 | 153 | 129 | 11 | 229 | 43 | 28 | 45 | TS |
| 15 | 2018-01-04 19:48:50 | 3.1 | 4 | 67 | 20 | 266 | 71 | 156 | 316 | 3 | 224 | 30 | 50 | 60 | SS |
| 16 | 2018-02-24 00:39:28 | 2.9 | 358 | 80 | 1 | 268 | 89 | 170 | 313 | 6 | 223 | 8 | 83 | 80 | SS |
| 17 | 2018-04-18 23:55:13 | 2.7 | 290 | 45 | -90 | 110 | 45 | -90 | 0 | 90 | 20 | 0 | 110 | 0 | NF |
| 18 | 2018-06-15 14:58:22 | 3.3 | 89 | 52 | -71 | 240 | 42 | -113 | 58 | 74 | 166 | 5 | 257 | 15 | NF |
| 19 | 2018-11-04 21:22:11 | 3.1 | 352 | 78 | -28 | 88 | 63 | -166 | 307 | 28 | 43 | 10 | 150 | 60 | SS |

准,对寻乌及邻区 19 次 $M_L2.5$ 以上地震的震源机制解进行分类统计(表 3),发现寻乌及邻区发生的走滑型地震占绝对优势,与曾文敬等^[1]的研究结果一致。

表 3 震源机制解类型统计

| Tab.3 Statistical table of focal mechanism type | | |
|---|----|------|
| 类型 | 次数 | 比例/% |
| NF(正断层) | 3 | 15.8 |
| NS(正段兼走滑型) | 0 | 0 |
| TF(逆断层) | 1 | 5.3 |
| TS(逆断兼走滑) | 2 | 10.5 |
| SS 走滑型 | 12 | 63.2 |
| U 无法确定性 | 1 | 5.3 |

对于 2017-11~2018-04 寻乌震群,地震集中区内共发生 $M_L2.5$ 以上地震 8 次(图 3 中蓝色地震),最大为 $M_L3.8$,计算得到走滑断层(SS)7 个,带走滑分量的逆断层(TS)1 个,震源机制解结果的一致性较好。

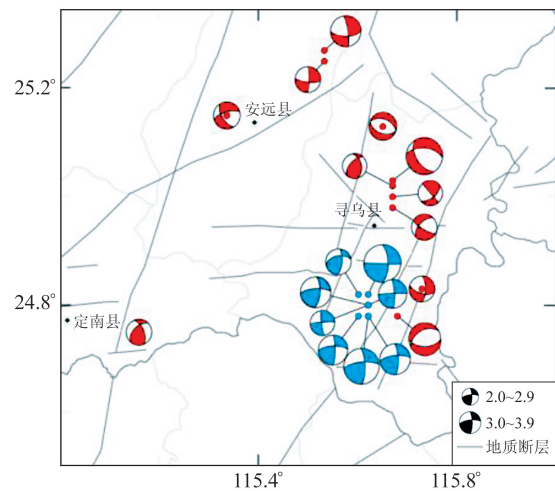


图 3 $M_L2.5$ 以上地震震源机制解
Fig.3 Mechanism solutions of $M_L \geq 2.5$ earthquakes

将震源机制解中各个参数每隔 10° 进行频数统计,结果见图 4。由图可知,走向主要集中在近 NS 向和 EW 向,倾角以 $50^\circ \sim 90^\circ$ 为主,滑动角主要分布在 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 和 $-150^\circ \sim 150^\circ$ 之间,滑动角与倾角说明地震以高倾角的走滑型运动为主。 P 轴和 T 轴的方位角具有明显的优势分布, P 轴在 $310^\circ \sim 320^\circ$ 和 $110^\circ \sim 130^\circ$ 之间, T 轴在 $220^\circ \sim 230^\circ$ 之间, P 轴的倾角大多在 40° 以内,表明断裂所承受的作用力以近水平向为主。计算结果与前人的研究结果^[1-2,13]较为一致, P 轴的优势分布方向与该区 NWW-SEE 向的水平挤压构造特征相吻合^[14-15],说明寻乌地区地震活动受区域构造应力场的控制。

2 视应力分析

视应力计算使用的地震波形资料由国家数字

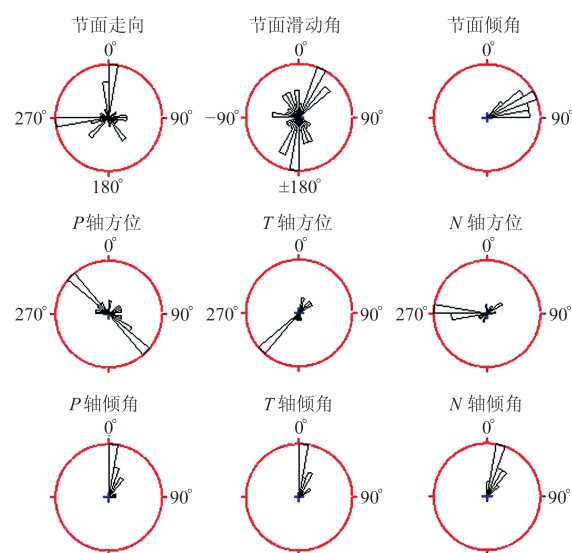


图 4 震源机制各个参数归一频数分布
Fig.4 Normalized frequency of the focal mechanism parameters

测震台网数据备份中心^[3]提供,视应力计算原理和方法见文献^[16-18]。选取 89 次信噪比较高、 $M_L1.5$ 以上及震中距在 200 km 以内的地震波形资料进行计算,每个地震至少有 3 个以上台站的波形记录,保证计算结果的可靠性。

2.1 视应力与震级的关系

89 次地震发生在 2009-04-03~2019-02-14,震级范围为 $M_L1.5 \sim 3.8$,其中 $M_L3.0$ 以上地震 8 次。对视应力值与震级的关系进行拟合发现,视应力与震级呈正相关(图 5)。

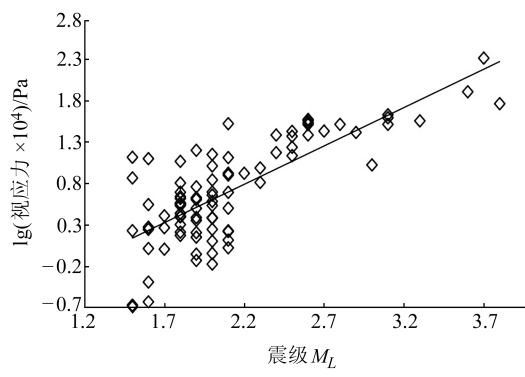


图 5 视应力与震级的关系
Fig.5 The relation between apparent stress and magnitude

2.2 视应力的时间变化特征

89 次 $M_L1.5$ 以上地震的视应力随时间的变化见图 6(a)。可以看出,视应力值在 0.002~2.07 MPa 之间变化,平均值为 0.13 MPa,低于中国东部的平均视应力值^[19]。由于视应力与震级呈正相关,将视应力扣除震级得到差视应力随时间变化的曲线,具体见图 6(b)。由图可知,2012-04-28 寻乌 $M_L3.7$ 地震的视应力较高,但扣除震级

影响之后的差视应力值并不突出;2010-07~2015-12 寻乌及邻区的差视应力较为平稳,2016 年开始差视应力波动加大,经过 2 次高值波动后发生 2017-11-06 寻乌 M_L 3.8 震群,表明震群发生前震源区应力水平有增强的现象,与王生文等^[20]的研究结果相似。寻乌震群的差视应力值不高,震群结束后寻乌及邻区的视应力又出现高值波动。

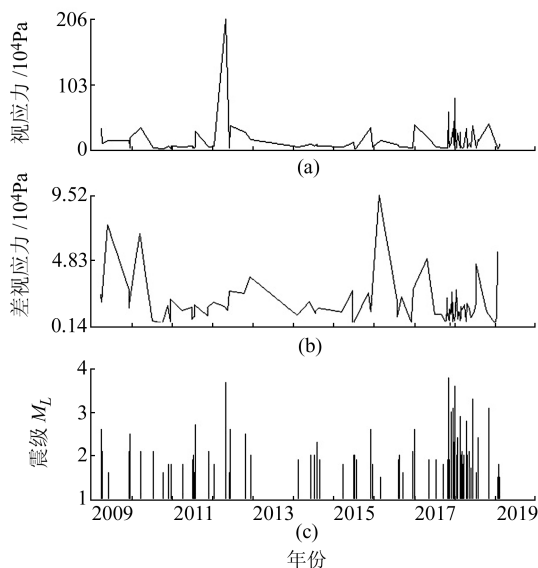


图 6 视应力、差视应力和震级随时间变化
Fig. 6 Time variation of apparent stress, differential apparent stress and magnitude

2.3 视应力空间分布特征

89 次 M_L 1.5 以上地震的视应力空间分布见图 7,图中无明显的高值或低值区。差视应力空间分布见图 8,可以看出,寻乌北部地区的差视应力值相对较高,而寻乌震群的差视应力值并不高。寻乌震群结束后地震也主要发生在寻乌北部高视应力区域,该区域的地质构造较复杂,容易积累应力,地震活动水平相对较高,是江西省中强地震最为活跃的区域,共发生 4.7 级以上地震 4 次,最大为 1941-09-21 寻乌 5 $\frac{3}{4}$ 级地震。由此可见,区域视应力的不同反映了地震活动水平和地壳应力状态的不同。

3 结 语

本文计算得到寻乌及邻区 19 次 M_L 2.5 以上地震的震源机制和 89 次 M_L 1.5 以上地震的视应力,得出以下结论:

1) 寻乌及邻区 19 次 M_L 2.5 以上地震的震源机制解分类统计结果显示,走滑断层(SS)占 63.2%,正断层(NF)占 15.8%,带走滑分量逆断层(TS)占 10.5%,逆断层(TF)和无法确定型(U)占 5.3%,可见该地区发生的走滑型地震占绝

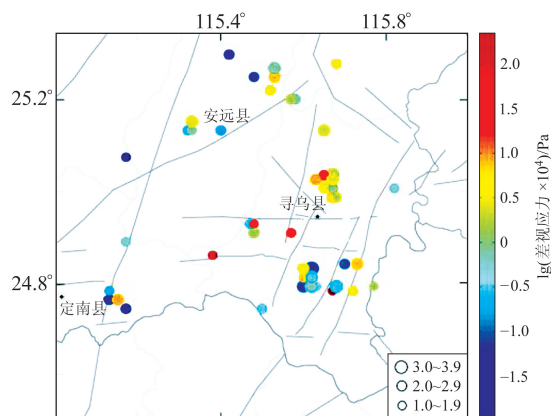


图 7 寻乌及邻区视应力空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of apparent stress in Xunwu and its adjacent areas

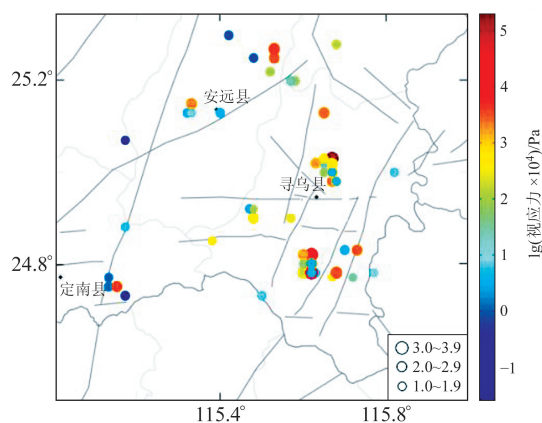


图 8 寻乌及邻区差视应力空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of differential apparent stress in Xunwu and its adjacent areas

对优势,与曾文敬等^[1]的研究结果一致。寻乌震群集中区内的 8 次 M_L 2.5 以上地震的震源机制结果一致性较好,其中,走滑断层(SS)7 个,带走滑分量的逆断层(TS)1 个。

2) 寻乌及邻区震源机制节面走向主要集中在近 NS 向和 EW 向,倾角以 $50^\circ \sim 90^\circ$ 为主,滑动角主要分布在 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 和 $-150^\circ \sim 150^\circ$ 之间,滑动角与倾角说明地震以高倾角的走滑型运动为主。 P 轴和 T 轴的方位角具有明显的优势分布, P 轴在 $310^\circ \sim 320^\circ$ 和 $110^\circ \sim 130^\circ$ 之间, T 轴在 $220^\circ \sim 230^\circ$ 之间, P 轴倾角大多在 40° 以内,表明断裂承受的作用力以近水平向为主。该结果与前人的研究结果^[1,13-14] 较为一致, P 轴的优势分布方向与该区 NWW-SEE 向水平挤压的应力特征吻合^[14-15],说明寻乌及邻区地震活动受区域构造应力场的控制。

3) 寻乌及邻区的视应力与震级呈正相关性,视应力随震级的增大而增大,89 次 M_L 1.5 以上地震视应力值的变化范围为 $0.002 \sim 2.07$ MPa,平均值为 0.13 MPa,低于中国东部的平均视应力

值。2010-07~2015-12 寻乌及邻区的差视应力较为平稳,2016 年开始差视应力波动加大,经过 2 次高值波动后发生 2017-11-06 寻乌 $M_L 3.8$ 震群,表明震群发生前震源区应力水平有增强现象。

4)89 次 $M_L 1.5$ 以上地震的视应力空间分布无明显的高值或低值区,而差视应力值显示寻乌北部地区相对较高。该地区地质构造较复杂,更容易积累应力,地震活动水平相对较高,可见区域视应力的不同反映了地震活动水平和地壳应力状态的不同。

致谢:本文所用程序由安徽省地震局刘泽民高级工程师和浙江省地震局朱新运研究员提供,中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心为本文提供地震波形数据,在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] 曾文敬, 罗丽, 项月文, 等. 赣南地区小震震源机制分析[J]. 华南地震, 2010, 30(1): 92-98 (Zeng Wenjing, Luo Li, Xiang Yuewen, et al. Analysis on the Focal Mechanism of Small Earthquakes in the Southern Area of Jiangxi[J]. South China Journal of Seismology, 2010, 30(1): 92-98)
- [2] 王甘娇, 胡幸平, 高威, 等. 格点尝试法计算综合断层面解的置信区间分析——以赣南地区为例[J]. 地震地质, 2018, 40(6): 1 305-1 317 (Wang Ganjiao, Hu Xingping, Gao Wei, et al. Analysis of the Confidence Interval of the Composite Fault Plane Solution Obtained from the Grid Search Method: An Example of Southern Jiangxi Province[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(6): 1 305-1 317)
- [3] 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 等. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1 412-1 417 (Zheng Xiufen, Ouyang Biao, Zhang Dongning, et al. Technical System Construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the Data Support to Researches on the Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1 412-1 417)
- [4] 倪红玉, 刘泽民, 沈小七, 等. 利用 FOCMEC 方法计算震源机制解的影响因素分析——以九江-瑞昌 $M_S 5.7$ 地震为例[J]. 华北地震科学, 2011, 29(3): 1-7 (Ni Hongyu, Liu Zemin, Shen Xiaoqi, et al. Analysis of Influencing Factors on FOCMEC Method—Taking Jiujiang-Ruichang $M_S 5.7$ Earthquake as an Example[J]. North China Earthquake Sciences, 2011, 29(3): 1-7)
- [5] 朱音杰, 刘檀, 赵英萍, 等. CAP 方法反演 2016 年唐山 $M_L 4.3$ 地震震源机制解[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 50-55 (Zhu Yinjie, Liu Tan, Zhao Yingping, et al. Focal Mechanism Inversion of the 2016 Tangshan $M_L 4.3$ Earthquake Using the CAP Method[J]. North China Earthquake Sciences, 2017, 35(2): 50-55)
- [6] 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 (Fan Yulan, Lin Jizeng, Hu Ruihe, et al. The Development of Travel Timetable for Near Earthquake in South China[J]. South China Journal of Seismology, 1990, 10(2): 1-16)
- [7] Snoke J A, Munsey J W, Teague A G, et al. A Program for Focal Mechanism Determination by Combined Use of Polarity and SV-P Amplitude Ratio Data[J]. Earthquake Notes, 1984, 55(3): 15-20
- [8] Snoke J A. Earthquake Mechanism[A]//James D E. Encyclopedia of Geophysics[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1989
- [9] 刘泽民, 倪红玉, 张炳, 等. 基于 FOCMC 方法反演震源机制解的交互式程序研制与使用[J]. 华北地震科学, 2015, 33(1): 19-24 (Liu Zemin, Ni Hongyu, Zhang Bing, et al. The Development and Manual of Interactive Program Inversing Focal Mechanism with Interactive FOCMEC Method[J]. North China Earthquake Sciences, 2015, 33(1): 19-24)
- [10] 汤兰荣, 吕坚, 曾新福, 等. 九江-瑞昌地震震源机制和应力场特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(8): 791-795 (Tang Lanrong, Lü Jian, Zeng Xinfu, et al. Characteristics of Focal Mechanisms and Stress Field in the Border Region of Jiujiang and Ruichang[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(8): 791-795)
- [11] 刘杰, 郑斯华, 康英, 等. 利用 P 波和 S 波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解[J]. 地震, 2004, 24(1): 19-26 (Liu Jie, Zheng Sihua, Kang Ying, et al. The Focal Mechanism Determinations of Moderate-Small Earthquakes Using the First Motion and Amplitude Ratio of P and S Wave[J]. Earthquake, 2004, 24(1): 19-26)
- [12] Zoback M L. First- and Second-Order Patterns of Stress in the Lithosphere: The World Stress Map Project[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1992, 97(B8): 11 703-11 728
- [13] 蒋维强, 林纪曾, 赵毅, 等. 华南地区的小震震源机制与构造应力场[J]. 中国地震, 1992, 8(1): 36-42 (Jiang Weiqiang, Lin Jizeng, Zhao Yi, et al. Focal Mechanism of Small Earthquakes and Characteristics of Tectonic Stress Field in South China[J]. Earthquake Research in China, 1992, 8(1): 36-42)
- [14] 汪素云, 许忠淮. 中国东部大陆的地震构造应力场[J]. 地震学报, 1985, 7(1): 17-32 (Wang Suyun, Xu Zhonghuai. Seismo-Tectonic Stress Field in East China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1985, 7(1): 17-32)
- [15] 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 654-662 (Xie Furen, Cui Xiaofeng, Zhao Jiantao, et al. Regional Division of the Recent Tectonic Stress Field in China and Adjacent Areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 654-662)
- [16] Wyss M. Apparent Stresses of Earthquakes on Ridges Compared to Apparent Stresses of Earthquakes in Rencches[J]. Geophysical Journal International, 1970, 19(5): 479-484
- [17] 于俊谊, 朱新运. 浙江珊溪水库地震震源参数研究[J]. 中国地震, 2008, 24(4): 379-387 (Yu Junyi, Zhu Xinyun. Hypocentral Parameters Research of the Shanxi Reservoir Area in Zhejiang[J]. Earthquake Research in China, 2008, 24(4): 379-387)

(下转第 789 页)