

王小娜, 邓志辉, 王力伟, 等. 广西北流—广东化州  $M_S$ 5.2 级地震发震构造探讨 [J]. 华南地震, 2020, 40 (2):19-25. WANG Xiaona, DENG Zhihui, WANG Liwei, et al. Discussion on the Seismogenic Structure of the Beiliu-Huazhou  $M_S$ 5.2 Earthquake in the Junction of Guangxi and Guangdong [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (2):19-25 ]

## 广西北流—广东化州 $M_S$ 5.2 级地震 发震构造探讨

王小娜<sup>1,2</sup>, 邓志辉<sup>1,2</sup>, 王力伟<sup>1</sup>, 杨选<sup>1</sup>

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 2019年10月12日广西北流与广东化州交界发生5.2级地震, 地震发生前2s, 其北西侧发生4.2级前震。根据地震周边47个台站记录到的P波及S波震相走时数据, 利用双差地震定位方法获取了104个地震的精定位结果, 结合4.2级前震的震源机制解及5.2级主震的“中心震源机制解”进行研究探讨, 综合分析认为NW-SE向米场—石窝断裂可能是北流4.2级前震和5.2级主震的主要发震构造, 前震孕震过程有NEE-SWW向茶山断裂的参与。而5.2级主震位于米场—石窝断裂与NE-SW向信宜—廉江断裂交汇处, 该交汇处应力薄弱且距离前震仅1km左右, 推测4.2级前震的发生可能对5.2级地震具有触发作用, 5.2级地震发生后余震主要沿米场—石窝断裂的延伸线分布。

**关键词:** 广西北流—广东化州5.2级地震; 前震; 双差地震定位方法; 震源机制解; 米场—石窝断裂

中图分类号: P315.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2020) 02-0019-07

DOI:10.13512/j.hnd.2020.02.03

## Discussion on the Seismogenic Structure of the Beiliu-Huazhou $M_S$ 5.2 Earthquake in the Junction of Guangxi and Guangdong

WANG Xiaona<sup>1,2</sup>, DENG Zhihui<sup>1,2</sup>, WANG Liwei<sup>1</sup>, YANG Xuan<sup>1</sup>

(1. *Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China;*

2. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519000, China*)

**Abstract:** The  $M_S$ 5.2 earthquake occurred at the junction of Huazhou city of Guangdong province and Beiliu city of Guangxi province. There is a  $M_L$ 4.2 earthquake occurred 2 sec before the  $M_S$ 5.2 earthquake. This paper obtains 135 relocated earthquakes by applying Double-Difference seismic location method and the focal mechanism of the foreshock and mainshock. The research suggests that Michang-Shiwo fault with NW-SE trending might be the main seismogenic structure of the foreshock and mainshock. Additional, the Chashan fault with NEE-SWW trending involves the pregnant process of the  $M_L$ 4.2 foreshock. The  $M_S$ 5.2 mainshock locates at the intersection of Michang-Shiwo fault and Xinyi-Lianjiang fault, while the intersection is only about 1km from the foreshock,

收稿日期: 2010-01-10

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室环南海地质过程与灾害项目(99147-42080024); 国家自然科学基金项目(41604055, 41676057); 广东省科技计划项目(2019B020208014, 2018B020207011) 联合资助

作者简介: 王小娜(1987-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事地震层析成像、震源机制解等数字地震学方面的研究工作。

E-mail: wangxiaona09@mails.ucas.ac.cn.

which suggests that the  $M_L 4.2$  foreshock might trigger the  $M_S 5.2$  mainshock. Finally, the aftershock sequence distributes along the extension line of the Michang-Shiwo fault.

**Keywords:** Beiliu-Huazhou  $M_S 5.2$  earthquake; Foreshock; Double-Difference seismic location method; Focal mechanism; Michang-Shiwo fault

## 0 引言

经中国地震台网中心测定,北京时间2019年10月12日22时55分广西北流与广东化州交界(22.16°N, 110.52°E)发生 $M_S 5.2$ 级地震,震源深度10 km(图1),地震发生前2 s,其西北侧发生1次4.2级前震。根据广西及广东省地震局地震烈度调查与评定结果([http://www.gxdzj.gov.cn/dzyjcl/17431.jhtM\\_L](http://www.gxdzj.gov.cn/dzyjcl/17431.jhtM_L)),此次地震极震区烈度为VI度,等震线形状呈椭圆形,长轴总体呈NW向,长约19 km,短轴约10 km,面积约为141 km<sup>2</sup>,共造成广东化州市平定镇、播扬镇和广西北流市六靖镇、石窝镇和清湾镇5个乡镇受灾,目前无人员伤亡,直接经济损失约505万元。

地震发生后广东省地震局及广西省地震局组成应急工作小组前往震源区进行应急处置工作,在5.2级地震周边30 km范围内布设了6个地震台站(图1),显著提高了5.2级地震序列的监测能力。截止到2019年12月25日,共记录到余震205次,其中 $M_L 0.0\sim 0.9$ 地震123次、 $M_L 1.0\sim 1.9$ 地震70次、 $M_L 2.0\sim 2.9$ 地震10次、 $M_L 3.0\sim 3.9$ 地震2次,最大余震为2019年10月12日23时31分的 $M_L 3.2$ 地震(图1)。

2016年7月31日距北流5.2级地震北东约230 km处发生广西苍梧5.4级地震,广西苍梧5.4级地震打破了东南沿海地震带近18年的5级地震平静,标志着东南沿海地震带进入1900年以来第V活跃幕<sup>[1]</sup>。2018年11月26日台湾海峡6.2级地震打破了东南沿海地震带近24年的5.5级地震平静<sup>[2]</sup>,而广西北流—广东化州5.2级地震再次确认了东南沿海地震带正处于第V活跃幕。因此研究这些地震的震源机制及动力学特征,对于东南沿海地震带震情研判具有重要意义。

广西北流—广东化州5.2级地震位于少震弱震区,1800年后,5.2级地震周边100 km范围内仅在1890年8月30日广东廉江及广西陆川交界处发生5¼级地震,两次地震相距61 km。鉴于震源区周边较低的地震活动性,相关的地

球物理学研究资料较少,这为研究本次地震的发震构造增加了难度,因此,本文尝试利用固定台站和流动台站记录的地震资料对广西北流—广东化州5.2级地震序列进行精定位,对震源机制解进行反演,结合地质构造资料和烈度调查结果进行分析研究,探讨其发震构造,为粤闽交界地震危险性评价提供信息。

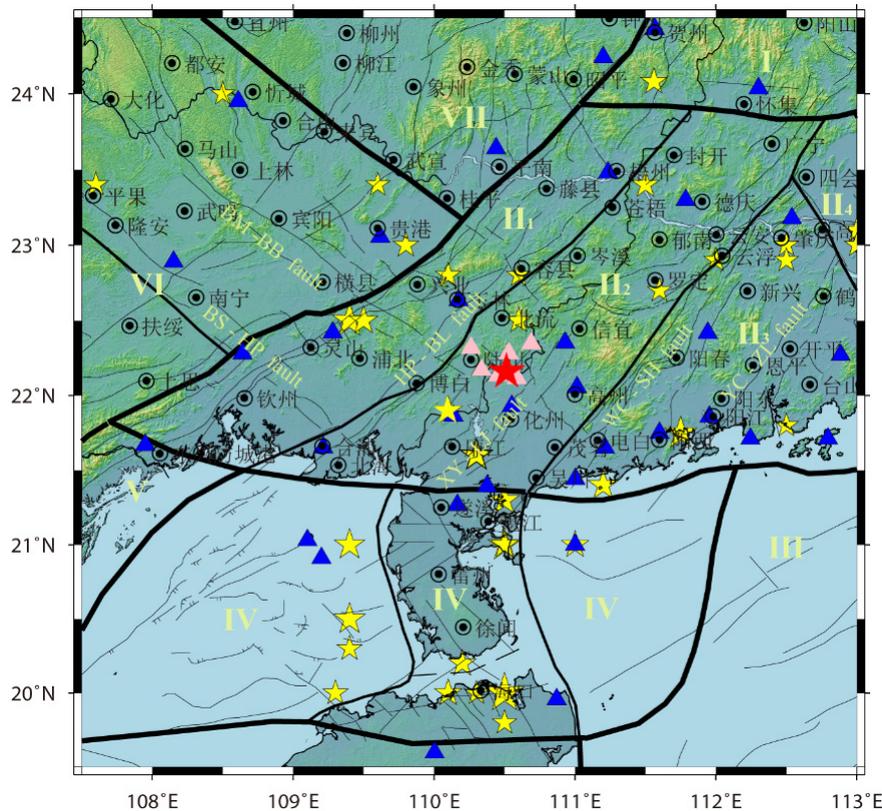
## 1 地震地质构造背景

广西北流—广东化州5.2级地震位于南华沿海断块差异隆起区,根据地质调查结果,该隆起区处于华南沿海地区,北至粤北间歇性上升区,南至滨海断裂带,构造线主要为NE向,其次为NW向。区内自晚古生代以来形成多个相对隆起区,中生代构造活动强烈,主要以断裂活动和断块运动为特征,新构造运动在总体上继承了断裂和断块运动特征。南华沿海断块差异隆起区地震活动较为频繁,是东南沿海地震带的主要组成部分。根据构造特征的差异,该区又可分为多个次级构造单元<sup>[3-5]</sup>,自西向东分别为桂东南—粤西断块差异隆起区、云开大山断块隆起区、天露山间歇性断块隆起区、珠江三角洲断陷区、闽西—粤中断块差异隆起区、莲花山—戴云山断块隆起区以及惠来—汕尾掀斜差异隆起区等,而本次广西北流—广东化州5.2级地震位于云开大山断块隆起区。

云开大山断块隆起区内主要有NE向和NW向两组断裂(图1),其中NE向断裂有合浦—北流断裂、信宜—廉江断裂及吴川—四会断裂,合浦—北流断裂西南起于北部湾海域,向北东经合浦、博白、陆川、北流、容县、岑溪一直延伸到苍梧一带,总长约370 km<sup>[6-7]</sup>,断裂附近发生了1507年容县5.0级地震、1778年北流5¼地震和2016年苍梧5.4级地震。合浦—北流断裂带分东、西两支,西支又称博白—梧州断裂,全长约370 km;东支又称陆川—岑溪断裂,长约300 km<sup>[8]</sup>。信宜—廉江断裂东北起自广东信宜附近,向西南经化州、廉江延伸入

海湾, 长约 150 km, 总体倾向 NW, 表现为正断性质, 1605 年廉江发生 6.0 级地震。吴川—四会断裂带经过吴川, 向西南延伸入海, 并继续延伸到湛江东海岛东缘, 向北东经阳春、云浮、四会至英德以北, 该断裂为广东省内主要的控震断裂, 曾发生过多次 5 级以上地震, 如 1605 年湛江海域 6.5 级地震、1606 年湛江海域 5.5 级地震、1611 年电白 6.0 级地震、1665 年罗定 5.0 级地震、1749 年云浮 5.0 级地震等<sup>[9]</sup>。NW 向断裂主要有百色—合浦断裂、巴马—博白断裂,

百色—合浦断裂始于广西与贵州交界的隆林, 向东南经百色、平果、南宁、合浦一直延伸到雷州半岛, 全长约 700 km, 1977 年广西平果附近发生 5.0 级地震。巴马—博白断裂西北起自贵州境内, 向东南经广西的巴马、大化、横县、博白以及广东高州一直延伸到广东茂名附近, 全长约 800 km, 倾向以 NE 为主, 倾角  $40\sim 85^{\circ}$ <sup>[10]</sup>, 该断裂与防城—灵山断裂交汇处在 1936 年和 1958 年分别发生  $6\frac{3}{4}$  级地震和  $5\frac{3}{4}$  级地震。



红色五角星: 北流—化州 5.2 级地震序列位置; 黄色五角星: 5 级以上历史地震; 蓝色三角: 研究所用固定台站; 粉色三角: 流动台站; 黑色粗线: 构造分区; 黑色细线: 断裂。

- I: 桂北—湘南—赣中南间歇隆起区; II: 南华沿海断块差异隆起区; II<sub>1</sub>: 粤西断块差异隆起区; II<sub>2</sub>: 云开大山断块隆起区; II<sub>3</sub>: 天露山间歇性断块隆起区; II<sub>4</sub>: 珠江三角洲断陷区; III: 南海北部海域断块差异沉降区; IV: 北部湾—雷东断拗区; V: 北部湾西部缓慢倾斜沉降区; VI: 桂中—桂西南断块隆起区; VII: 桂东北断块隆起区; HP-BL fault: 合浦—北流断裂; XY-LJ fault: 信宜—廉江断裂; WC-SH fault: 吴川—四会断裂; YC-ZL fault: 阳春—织篢断裂; BS-HP fault: 百色—合浦断裂; BM-BB fault: 巴马—博白断裂。

图 1 粤桂交界地震构造图

Fig. 1 Seismotectonic map at the junction of Guangdong and Guangxi

## 2 地震精定位结果

本文利用广东省地震台网 (24 个台站)、广西省地震台网 (15 个台站) 以及海南省地震台网 (2 个台站) 的 41 个固定地震台及 6 个流动地震台站 (图 1) 记录到的 P 波及 S 波震相走时数据<sup>[11-13]</sup>, 利用双差地震定位方法<sup>[14]</sup>进行重

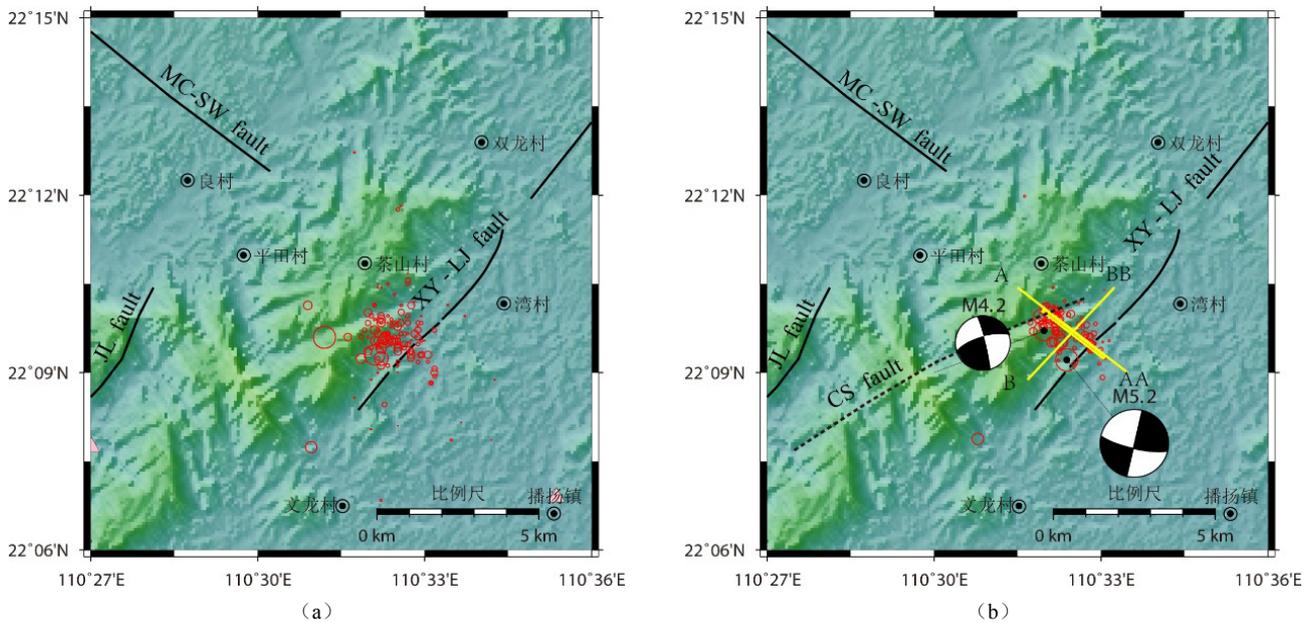
新定位, 在前期的资料处理过程中, 剔除掉走时偏差大于 5s 的震相数据, 且保证每个地震至少有 6 个台站记录, 最终获得 135 个地震 (包含主震及前震) 进行精定位反演, 震级范围  $M_L \geq 0.5$ , 震源深度范围 5~14 km。在反演过程中, 使用的一维速度模型为根据前人资料<sup>[15-20]</sup>获取的粤西地区平均一维速度模型。

表 1 粤西地区平均一维 P 波速度模型

Table 1 The 1D P wave velocity model of the western Guangdong region

| 深度 / km | $V_p / (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|---------|---------------------------------------|
| 0       | 4.97                                  |
| 5       | 5.70                                  |
| 9       | 6.00                                  |
| 14      | 6.04                                  |
| 20      | 6.15                                  |
| 25      | 6.31                                  |
| 31      | 6.72                                  |
| 40      | 6.96                                  |

经过双差地震定位, 本研究共获得 104 个地震的精定位结果, 地震走时残差由定位前的 0.27 s 降为 0.06 s, 定位精度有了明显提高。图 2 为定位前后地震分布图, 可以看出, 定位后广西北流—广东化州地震序列 NW 向条带特征更为明显, 精定位后广西北流—广东化州 5.2 级地震位于北纬 22.15°, 东经 110.54°, 震源深度 9.8 km, 而 4.2 级前震 (北纬 22.16°, 110.53°, 震源深度 9.5 km) 位于主震北西约 1.15 km 处。



红色空心圆表示地震; 黑线表示断裂; XY-LJ fault: 信宜—廉江断裂; MC-SW fault: 米场—石窝断裂; JL fault: 焦林断裂; CS fault: 茶山断裂; 黄色直线表示剖面位置; 黄色框线表示发震断层在地表的投影。

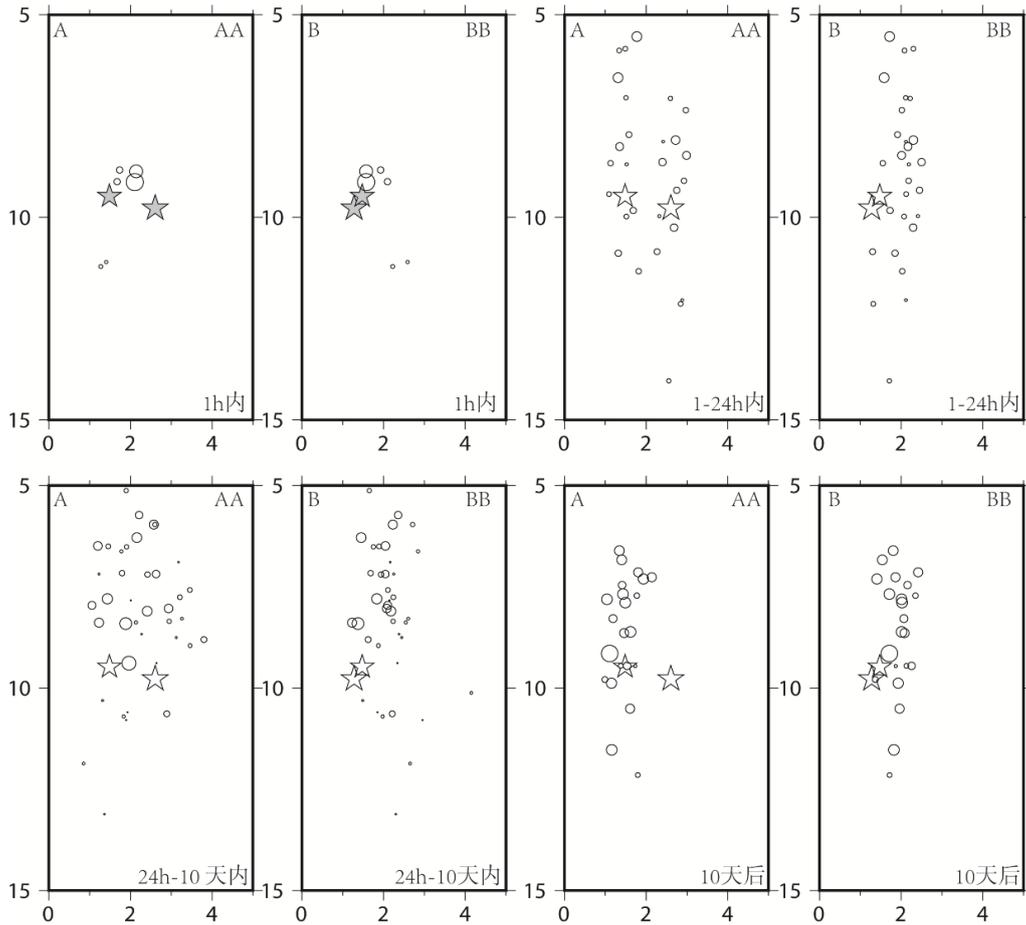
图 2 精定位前 (a) 后 (b) 北流—化州地震序列分布图

Fig. 2 Distribution of Beiliu-Huazhou seismic sequence before (left) and after (right) relocation

为更好地分析地震在深度方向的展布情况, 本文分别沿小震分布走向和垂向建立两条剖面, 精定位后, 北流地震序列与地面近垂直分布, 震源深度主要位于 5~13 km 之间, 其中 6~10 km 之间的地震占比 80%, 浅层 (0~4 km) 未定位到地震, 而震后地质考察亦未发现地表破裂。地震序列在不同时段的分布如图 3 所示, 可以看出, 4.2 级前震发生 2s 后在其南东发生广西北流—广东化州 5.2 级地震, 主震与前震深度相差不大, 主震后 1h 内, 余震主要位于 4.2 级前震附近。主震后 1~24 h 内, 沿走向看, 余震发生在前震和主震之间, 且多位于主震上方, 而垂直方向看, 余震主要位于主震和前震的东北侧, 震源深度范围 5~13 km。24 h~10 d 内, 余震横向

分布特征与 1~24 h 时段特征类似, 但余震在深度方向上主要位于主震上方。主震发生 10 d 后, 余震主要位于前震的东北侧, 且震源深度主要集中在前震附近及其上方。

此外, 根据小震集中在断层面附近的原则, 本文利用小震分布确定发震断层面参数<sup>[21]</sup>, 得到广西北流—广东化州地震序列发震断层面长约 2.7 km, 宽约 1 km, 走向 N51.8° W, 倾角约 89.3° (图 2b)。结合周边活动断裂情况, 地震序列位于 NE 向信宜—廉江断裂与 NW 向米场—石窝断裂延伸线的交汇处, 其中米场—石窝断裂为巴马—博白断裂的分支断裂, 该断裂与发震断层面走向相近。



五角星表示 4.2 级前震和 5.2 级主震，空心圆表示精定位后余震序列。

图 3 不同时段北流—化州地震序列地震分布图

Fig.3 Distribution of Beiliu-Huazhou seismic sequence along profiles at different time period

### 3 震源机制解

广西北流—广东化州 5.2 级地震前 2s 发生一次 4.2 级前震，两次地震波形数据耦合在一起，这为 P 波初动的拾取以及震源机制解反演过程中波形的拟合增加了不确定性。因此在求解 4.2 级前震的震源机制解时，我们仅根据 P 波初动资料，使用 focmec 方法<sup>[22-23]</sup> 求取震源机制解（表 2，图 2）。而对于 5.2 级主震，中国地震台网中心、台网应急部、中国地震局地球物

理研究所、中国地震局地震预测研究所等多家单位使用 CAP（Cut And Paste）方法<sup>[24-25]</sup> 进行了震源机制解反演运算（表 3）。防灾科技学院 Seismology 课题组 (<https://mp.weixin.qq.com/s/ODueSMjIEQvbytCiYc14bw>) 根据上述震源机制解，求出了一个与所有测定的震源机制的差别平方最小的“中心震源机制解”（表 3，图 2），因此，本文将利用中心震源机制解进行分析研究，以减小前震和主震波形耦合所引起的震源机制解误差。

表 2 广西北流 - 广东化州  $M_s4.2$  级前震震源机制解

Table 2 The focal mechanism of Beiliu-Huazhou  $M_L4.2$  foreshock

| 节面 I / (°) |    |     | 节面 II / (°) |    |     | P 轴 / (°) |    | T 轴 / (°) |    | B 轴 / (°) |    | 来源     |
|------------|----|-----|-------------|----|-----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|--------|
| 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 |        |
| 254        | 71 | 175 | 346         | 85 | 19  | 118       | 10 | 212       | 17 | 0         | 70 | 广东省地震局 |

表3 不同机构给出的5.2级地震震源机制解及中心震源机制解  
Table 3 The focal mechanisms of Beiliu-Huazhou  $M_s$  5.2 mainshock from different organization

| 节面 I (°) |    |      | 节面 II (°) |    |     | P 轴 (°) |    | T 轴 (°) |    | B 轴 (°) |    | 来源                      |
|----------|----|------|-----------|----|-----|---------|----|---------|----|---------|----|-------------------------|
| 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 |                         |
| 287      | 85 | -154 | 195       | 64 | -6  | 154     | 22 | 58      | 14 | 297     | 64 | 中国地震台网中心台网部应急组          |
| 105      | 69 | -168 | 306       | 88 | 91  | 35      | 43 | 217     | 47 | 126     | 1  | 中国地震局地震预测研究所            |
| 100      | 70 | -170 | 7         | 81 | -20 | 322     | 21 | 55      | 7  | 163     | 68 | 中国地震局地球物理研究所            |
| 106      | 75 | -175 | 15        | 85 | -15 | 329     | 14 | 61      | 7  | 15      | 85 | 中国地震台网中心                |
| 103      | 78 | -180 | 13        | 90 | -13 | 327     | 9  | 59      | 9  | 193     | 78 | Seismology 小组获得的中心震源机制解 |

根据震源机制解可知(图2,表2,表3),4.2级前震与5.2级主震震源机制解均为走滑型。4.2级前震节面1走向为NEE-SWW向,与附近的信宜—廉江断裂NE-SW走向存在一定差异,通过地质考察发现前震附近存在一条NEE-SWW向的沟谷(图2b虚线)将两侧山峰斜切,推测此处存在一条NEE-SWW向的未知断裂,在此命名为茶山断裂,该断裂走向与前震节面1走向一致,前震位于茶山断裂与米场—石窝断裂延伸线交汇处。5.2级主震节面1走向为NWW-SEE向,与精定位所揭示的断层面走向相近,亦与NW向米场—石窝断裂走向相近,而节面2走向为NE-SW向,与信宜—廉江断裂走向相近,主震位于米场—石窝断裂延伸线与信宜—廉江断裂交汇处。

#### 4 分析与讨论

根据广西北流—广东化州  $M_s$  5.2级地震序列精定位结果,其发震断层面参数与NW向巴马—博白断裂的分支米场—石窝断裂产状相近。而从前震和主震震源机制解结果来看,主震前震虽均为走滑型,但其震源机制解参数有一定差异:前震位于茶山断裂与米场—石窝断裂延伸线交汇处,其震源机制解两节面分别与交汇的两条断裂走向一致;主震位于米场—石窝断裂延伸线与信宜—廉江断裂交汇处,其震源机制解两节面亦与交汇的米场—石窝断裂及信宜—廉江断裂走向一致。结合断裂资料和地震烈度图,VI度极震区等震线长轴呈NW向,因此认为北流5.2级

地震序列与北西向米场—石窝断裂关系密切,前震和主震可能有不同的孕震机制,推测前震为NW-SE向米场—石窝断裂和NEE-SWW向茶山断裂共同作用的结果,这也可以解释主震发生10d后,余震集中在前震北东侧。而米场—石窝断裂延伸线与NE-SW向信宜—廉江断裂交汇处属于应力薄弱区域,该区域距离前震仅1km左右,因此,4.2级前震的发生可能对5.2级地震具有触发作用,5.2级地震发生后余震主要沿米场—石窝断裂的延伸线分布。

#### 5 结论

2019年10月12广西北流—广东化州交界发生5.2级地震,地震发生前2s,其北西侧发生4.2级前震。本文根据地震周边47个台站记录到的P波及S波震相走时资料,利用双差地震定位方法获取了104个地震的精定位结果。此外,本文使用focmec方法获得了4.2级前震的震源机制解,而对于5.2级主震,多家单位使用CAP方法反演得到了4个5.2级地震的震源机制解,本文采用上述4个震源机制解得到的“中心震源机制解”进行研究探讨<sup>[6]</sup>。根据精定位及前震和主震震源机制解结果,结合震区地质构造情况和烈度调查工作,对广西北流—广东化州  $M_s$  5.2级地震进行发震构造分析,得到如下结论:

(1) 精定位后广西北流—广东化州5.2级地震位于北纬22.15°,东经110.54°,震源深度9.8km,而4.2级前震位于北纬22.16°,110.53°,

震源深度 9.5 km, 前震位于主震北西约 1.15 km 处。地震序列的震源深度主要位于 5~13 km 之间, 浅层未定位到地震分布, 地表未发现破裂。震后不同时段, 余震在横向和垂向上表现出不同的特征。

(2) 4.2 级前震与 5.2 级主震震源机制解均为走滑型, 前震位于茶山断裂与米场—石窝断裂延伸线交汇处, 其震源机制解两节面分别与上述交汇的两条断裂走向一致; 主震位于米场—石窝断裂延伸线与信宜—廉江断裂交汇处, 其震源机制解两节面亦与交汇的米场—石窝断裂及信宜—廉江断裂走向一致。

(3) 广西北流—广东化州 5.2 级地震序列可能是米场—石窝断裂、茶山断裂和信宜—廉江断裂共同作用的结果, 前震和主震孕震过程可能并不相同, 前震可能为 NW-SE 向米场—石窝断裂和 NEE-SWW 向茶山断裂共同作用的结果。此外, 5.2 级地震位于米场—石窝断裂与 NE-SW 向信宜—廉江断裂交汇处, 该交汇处应力薄弱且距离前震仅 1 km 左右, 因此, 推测 4.2 级前震的发生可能对 5.2 级地震具有触发作用, 5.2 级地震发生后余震主要沿米场—石窝断裂的延伸线分布。

**致谢:** 感谢审稿专家给出的宝贵意见, 感谢国家测震台网数据备份中心及广东省地震局监测中心为本研究提供地震数据, 感谢防灾科技学院万永革教授提供的断层参数反演程序, 本文绘图均使用 GMT 程序绘制, 在此一并表示感谢。

## 参考文献

[1] 秦乃岗. 东南沿海地震带 20 世纪活跃幕划分及活动周期分析 [J]. 地震, 2007, 27(01): 107-115.

[2] 王小娜, 叶秀薇, 黄元敏, 等. 2018 年 11 月 26 日台湾海峡  $M_s6.2$  地震发震构造研究 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(12): 4673-4683.

[3] 郭福祥. 广西大地构造单元 [J]. 桂林理工大学学报, 1994, 14(3): 233-243.

[4] 许乃政, 姜月华, 贾军元, 等. 珠江三角洲地壳稳定性分区及其特征 [J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(04): 395-399+432.

[5] 丘元禧, 梁新权. 两广云开大山—十万大山地区盆山耦合构造演化—兼论华南若干区域构造问题 [J]. 地质通报, 2006, 25(3): 340-347.

[6] 王明明, 周本刚, 计凤桔, 等. 合浦—北流断裂带西支合浦盆地断裂活动性研究 [J]. 地震地质, 2009,

31(3): 470-487.

[7] 张继淹. 广西地质构造稳定性分析与评价 [J]. 南方国土资源, 2002, 15(3): 1-7.

[8] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1985.

[9] 魏柏林. 广东省地震构造概论 [M]. 北京: 地震出版社, 2000.

[10] 袁媛. 南宁地幔热柱对浅表新构造及地震活动的影响 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2011.

[11] 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 等. “国家数字测震台网数据备份中心”国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及对汶川大地震研究的数据支撑 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1412-1417.

[12] 刘军, 康英. 新版测震台网地震观测报告 [J]. 华南地震, 2015, 35(4): 25-30.

[13] 姜喜姣, 龚萱, 胡文灼, 等. 广东数字地震台网地震编目分析 [J]. 华南地震, 2018, 38(3): 45-51.

[14] Waldhauser F, Ellsworth W L. A Double-Difference earthquake location algorithm: method and application to the northern hayward fault, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of American, 2000, 90(90): 1353-1368.

[15] 郑圻森, 朱介寿, 宣瑞卿, 等. 华南地区地壳速度结构分析 [J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(4): 9-13.

[16] 闻则刚, 杨马陵, 叶秀薇. 广东省东部地区的 S 波速度结构 [J]. 西北地震学报, 2005, 27(2): 154-157.

[17] 叶秀薇, 刘锦, 胡秀敏. 广东阳江地震序列双差法重新定位结果分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(6): 60-63.

[18] 田轶, 张华美, 李冬雅, 等. 海南地区一维速度模型的研究 [J]. 华南地震, 2018, 38(3): 119-129.

[19] Xin H L, Zhang H J, Kang M et al. High-resolution lithospheric velocity structure of continental China by double-difference seismic travel time tomography [J]. Seismological Research Letters, 2018, 90(1): 229-241.

[20] 吴国瑞, 杨选, 姜喜娇, 等. 用 sPn 震相计算广东地区地震震源深度 [J]. 华南地震, 2018, 38(S1): 74-80.

[21] 万永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层参数方法及其在唐山地震序列中的应用 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 793-804.

[22] 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.

[23] Snoke J A. Earthquake mechanisms [M]. Geophysics. Springer US, 1989, 239-245.

[24] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of American, 1994, 84(1): 91-104.

[25] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of American, 1996, 86(5): 1634-1641.

[26] 王光明, 刘志凤, 赵小艳, 等. 2018 年云南通海  $M_s5.0$  地震序列重定位及发震构造 [J]. 地震研究, 2018, 41(4): 503-510.