

林群、刘特培、王小娜等, 2018, 1969 年阳江 M_s 6.4 地震发震断层参数的确定, 中国地震, 34(4), 745~753.

1969 年阳江 M_s 6.4 地震发震断层参数的确定

林群¹⁾ 刘特培¹⁾ 王小娜¹⁾ 徐晓枫²⁾ 官会玲¹⁾ 陈幸莲³⁾

1) 广东省地震局, 广州市先烈中路 81 号院 1 号 510070

2) 海南省地震局, 海口 570203

3) 阳江市地震局, 广东阳江 529500

摘要 利用 2010~2016 年阳江地区小震资料, 对围绕广东阳江 6.4 级地震发震构造的 NEE 走向平冈断层的西南段及 NW 走向的程村断层展布的密集地震, 经双差定位方法重新进行震源位置的修定, 获得了 1411 个精定位震源资料。依据成丛地震发生在断层附近的原则, 采用模拟退火算法及高斯-牛顿算法相结合的方式, 较精确地获得了 2 个断层面的详细参数: 即平冈断层西南段走向 258°、倾角 85°、倾向 NW, 与 6.4 级地震的震源机制解结果十分一致, 断层长度约 15km 并穿过了其西南端海域抵达了对岸; 程村断层走向 331°、倾角 88°、倾向 NE, 长度约 28km, 较已有结果更长、走向也朝 NE 向偏转了约 15°。2 条陡直断层近乎垂直相交于近海, 在构造应力作用下均以走滑错动为主。

关键词: 发震断层 阳江地震 小震丛集 断层反演

[文章编号] 1001-4683(2018)04-0745-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

1969 年 7 月 26 日广东阳江发生了 6.4 级地震, 震中烈度达 VIII, 造成了较大的人员和财产损失。震后至 2016 年底, 震中及附近中小震持续不断, 先后发生了 5 级左右地震 9 次, 最近一次是 2004 年 9 月的 4.9 级地震, 因此, 阳江地区地震活动一直以来倍受关注。

阳江区域主要受 2 条大断裂带控制, 西侧为 NE 走向的四会-吴川断裂 (F_1) 及织箕断裂 (F_2), 东侧为 NE 走向的苍城-海陵断裂 (F_3) (图 1)。其中苍城-海陵断裂的 NE 端可能与邵武-河源断裂带相接, 西南端通过海陵岛深入海中, 历史上该断裂带发生过 1806 年会昌 6 级、1962 年河源 6.2 级及多个 5 级左右地震, 所以它是广东陆地最为活动的断裂带 (魏柏林等, 2000)。根据阳江 6.4 级主震震中、等震线及余震分布等, 确认此次 6.4 级地震发生在苍城-海陵断裂西南端附近的一条走向 NEE、倾向 SSE、倾角 60°~70°、长度 35km 左右的平冈断层 (F_4) 的西南段附近, 余震分布显示该断层错动从断层西南端至平岗镇附近, 长度约 15km, 该西南段断层即为此次 6.4 级主震的发震断层 (魏柏林等人 2001)。但林纪曾等 (1980) 对阳

[收稿日期] 2017-05-29; [修定日期] 2018-09-17

[项目类别] 国家自然科学基金项目 (41604055) 资助

[作者简介] 林群, 男, 1972 年生, 助理工程师, 主要从事地震监测与测震分析。E-mail: linqun562294256@163.com

刘特培, 通讯作者, 男, 1962 年生, 高级工程师, 主要从事地震学与地震预测等方面的研究。

E-mail: liutepei@126.com

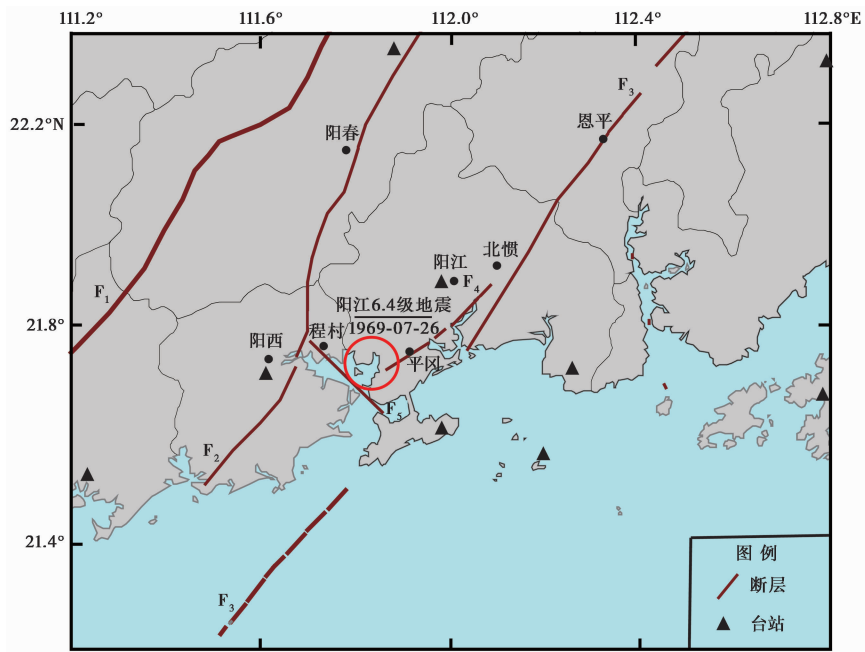


图 1 阳江地区主要断裂及地震台站分布

F₁: 吴川-四会断裂; F₂: 织箕断裂; F₃: 苍城-海陵; F₄: 平冈断层; F₅: 程村断层

江 6.4 级主震所做的震源机制解结果表明(图 6),走向为 NEE 的节面倾向为 NW 向,倾角 80°。通常地震的震源机制解可以直观反映地震的破裂特征和运动学特征,尤其是大震的节面解往往就较好地反映了实际发震断层面的特征(彭利娟等,2016)。由此可见,6.4 级地震震源机制解结果显示与上述研究者给出的主震发震断层面参数差异较大,实际发生的断层可能比已有资料的更陡直,倾角不小于 80°,倾向为 NW 而非 SSE。另外从图 1 可知,平冈断层的西南端往西延伸将入海域,通常的地质方法不易确定该断层是否存在继续向西延伸的可能性,因此以往研究者仅提供了平冈断层西南端止于陆地的资料。然而 6.4 级地震的实际震中并非在陆地,而是在平冈断层西南端的近海中(图 1)。近年来新建的数字地震台网测定的高精度小震分布显示,地震其实不仅发生在位于陆地的平冈断层附近,而是更密集地发生在平冈断层西南端向西延伸进入海中并直达对岸的区域(图 2)。主震震中及小震分布特征充分说明平冈断层的西南段不应该仅存在于陆地而是进入了海域。此外,阳江附近还存在一条 NW 走向的程村断层(F₅),近年来该断层上的地震活动呈现不断增强的趋势。但以往资料对 NW 断层的研究不充分。综上,有必要重新精确测定上述 2 条断层的相关参数,这对厘清阳江附近活动构造分布特点具有重要意义。

近年来,随着数字化地震观测台网的不断发展,利用其测定的高精度小震资料获得发震断层参数等的应用越来越普遍(王鸣等,1992;万永革等,2008;王福昌等,2013;刘特培等,2017;邵叶等,2016)。

2000 年后,广东省数字地震台网建成运行,至 2008 年后,对阳江及邻区小震的监测能力已经比较完善,地震定位精度也得到了大幅提高,丰富的小震资料,为测定相关断层参数提

供了数据基础。本文采用双差定位方法 (Waldhauser et al, 2000) 获得了 1713 个地震的精定位结果, 在此基础上, 将平冈、程村 2 条断层附近的 2 个小震密集区作为研究区, 依据成带分布的丛集地震发生在断层面及附近的原则, 利用模拟退火算法并结合高斯-牛顿算法 (万永革等, 2008) 反演了 2 个研究区相应的断层面参数, 较精确地确定了 6.4 级地震的发震断层及另一条 NW 走向断层的走向、倾角、断层长度、断层深度及地理位置分布等。该结果可为阳江地区的地震、地质研究提供基础性参考资料。

1 资料和方法

1.1 资料选取

2008 年后, 广东省地震局在阳江附近布设了比较密集的数字地震台站 (图 1), 对阳江附近 M_L 1.0 以上地震的有效监测不少于 10 个台站, 对 M_L 2.0 以上地震不少于 20 个台, 这些台站测定的地震直达波 (P 和 S 波) 走时差 (t_{s-p}) 绝大多数在 1.5~15.0s 范围内, 表明台站紧密布设在被测定的地震震中附近。2014 年后, 阳江小孔径井下型地震监测台阵的建成及运行更极大地提高了微弱信号的提取能力 (陈建涛等, 2017), 有助于提高地震定位精度。当前台网对震中距 120km 左右以内的地震均能捕获可靠数据, 因台站分布十分接近震中, 对难以测定的震源深度及误差的约束起到了关键作用, 故阳江地区地震的绝对定位精度是比较高的。

本文选取了阳江附近 2010~2016 年 M_L 1.0 以上地震数据 1920 个 (图 2 中红色圆点), 这些地震比较明显地围绕 NEE 走向的平冈断层 (F_4) 的西南段及 NW 走向的程村断层 (F_5) 附近密集分布。为进一步提高震源位置的精度, 研究者通常利用双差定位法 (Waldhauser

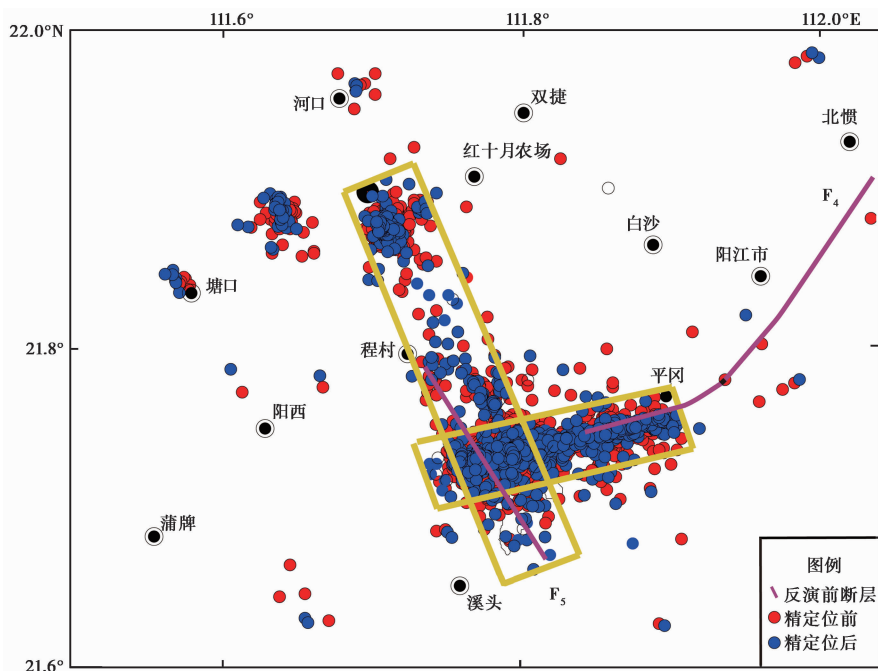


图 2 2010~2016 年阳江附近双差定位前后小震 ($M_L > 1.0$) 分布及断裂反演区域
黄色矩形框为反演区域

et al,2000),该方法在华南地区也得到广泛的应用(康英等,2007;徐晓枫等,2017)。本文通过双差精定位后获得了围绕2条断层1713个高精度震源资料(图2蓝色圆点)。结果显示,精定位后震中更集中,成丛性更显著。本研究初步划分出NEE向和NW向2条小震密集带作为反演断裂面的研究区域。很明显,平冈断层从平冈镇至北灌镇地震不活跃,小震记录不充分,不能参与反演,本文对NEE走向断层的反演仅为平冈断层的西南段,亦即6.4级地震的发震断层。

1.2 反演方法

大震发生后,大量小震通常围绕在断层面及附近发生,因此利用一定数量精定位小震震源位置的空间分布特点,可以获得断层面相关参数,这对于尺度不大的断层来说是合适的。王鸣等(1992)认为,利用小震分布特征反演断层的数学模型可通过寻求一个平面来实现,该平面应满足所有小震震源位置到其距离的平方和为最小。

在地理坐标系中,假设 (X_i, Y_i, Z_i) 为第*i*个地震震源位置,地震断层面的走向为 φ ,倾角为 δ ,到坐标原点距离为 ρ ,断层面法向量即为(万永革等,2008)

$$(\sin\varphi\sin\delta, -\cos\varphi\sin\delta, \cos\delta)$$

则断层面的方程为

$$x\sin\varphi\sin\delta + y(-\cos\varphi\sin\delta) + z\cos\delta - \rho = 0 \tag{1}$$

震源点到平面的垂直残差为

$$D_i = x_i\sin\delta + y_i(-\cos\varphi\sin\delta) + z_i\cos\delta - \rho \tag{2}$$

假定小震数据一共有*n*个,目标函数可表示为

$$E(\rho, \varphi, \delta) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{\delta_i} \right)^2 \tag{3}$$

其中, δ_i 表示第*i*个小震的定位残差。我们的目标就是求出 ρ, φ, δ ,使得 $E(\rho, \varphi, \delta)$ 最小。这是一个超定非线性最小二乘拟合问题,采用模拟退火算法和高斯-牛顿算法相结合的方法处理可得满意的结果(万永革等,2008)。本文采用该方法反演得到了6.4级地震发震构造平冈断层及程村断层面的参数。

2 断裂面反演结果

一般地,数学拟合结果的精度受数据样本偏离数据密集核心区的数量及偏离程度影响明显,因此有必要对数据样本进行筛选,剔除那些稀少且远离密集区的小震数据。

从图3可以看出,筛选前数据在纬度小于 21.6° 及大于 22° 、经度小于 111.5° 及大于 112.1° 、深度小于2km及大于15km范围内分布少而稀疏,故反演时可将其剔除。筛选后平冈断层和程村断层实际参与计算的地震数据分别为945、466个,反演结果见图4、5及表1。

反演结果表明:平冈西南段断层走向 258.4° (标准差 0.25°)、倾角 85.4° (标准差 0.46°)、倾向NW、断裂长度15.6km、断层深度4~13km;程村断层(F_3)走向 333.1° (标准差 0.45°)、倾向NE、倾角 88.6° (标准差 0.53°)、断层长度27.5km、断层深度2~15km。由于参与反演的地震数量充分,加之地震在水平和垂直方向带状分布显著、丛集度高(图4、5),因此反演断层所得走向、倾角的标准误差均很小(表1),2条反演断层的地理展布见图6。

根据阳江地区构造应力场主压应力 σ_1 和主张应力 σ_3 近乎水平且以NW-NWW向为挤

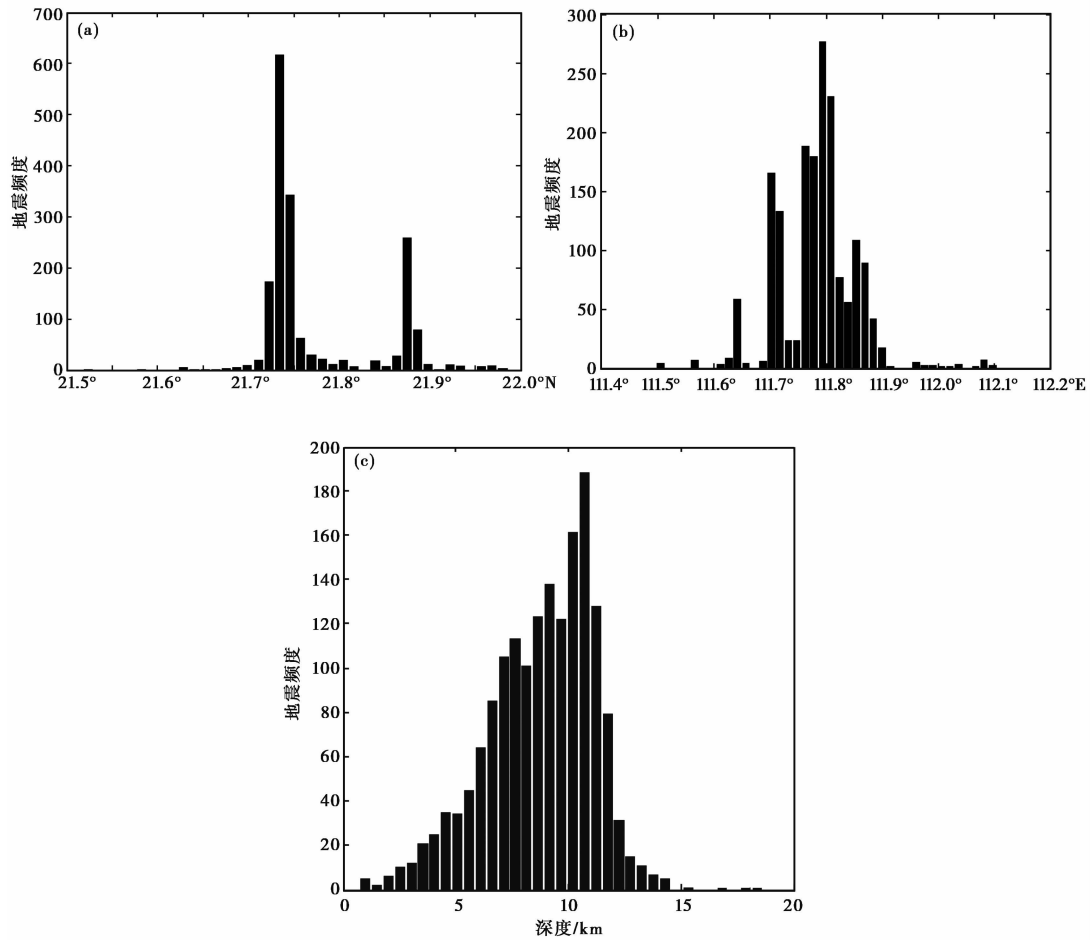


图 3 研究区内地震数据筛选前纬度(a)、经度(b)、深度(c)与频度间的关系

表 1 平冈断层西南段断层面和程村断层面参数反演结果

断层名称	地震个数	走向		倾角		距离		断层长度/km	顶点位置 北纬/(°), 东经/(°), 深度/km
		值/(°)	标准差/(°)	值/(°)	标准差/(°)	值/(°)	标准差/(°)		
平冈断层 (西南段)	945	258.4	0.25	85.4	0.46	0.00	0.02	15.6	21.7491, 111.8879, 4.5
									21.7548, 111.8867, 12.5
									21.7299, 111.7567, 12.5
									21.7242, 111.7580, 4.5
程村断层	466	333.1	0.45	88.6	0.53	0.00	0.03	27.5	21.6672, 111.8321, 2.3
									21.6071, 111.8346, 14.6
									21.8839, 111.7069, 14.6
									21.8820, 111.7041, 2.3

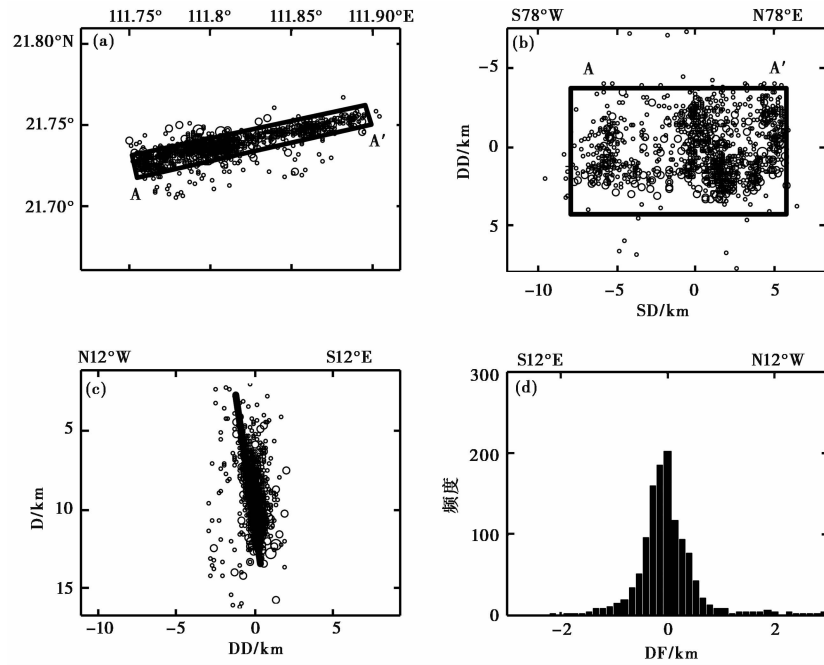


图 4 平岗断层西南段断层附近的小震在水平面 (a)、断层面 (b)、垂直于断层面 (c) 的投影分布和小震到断层面距离的分布 (d)

AA' 为断层上边界端点; DD 为倾向长度; DF 为距断层面的距离; SD 为走向长度

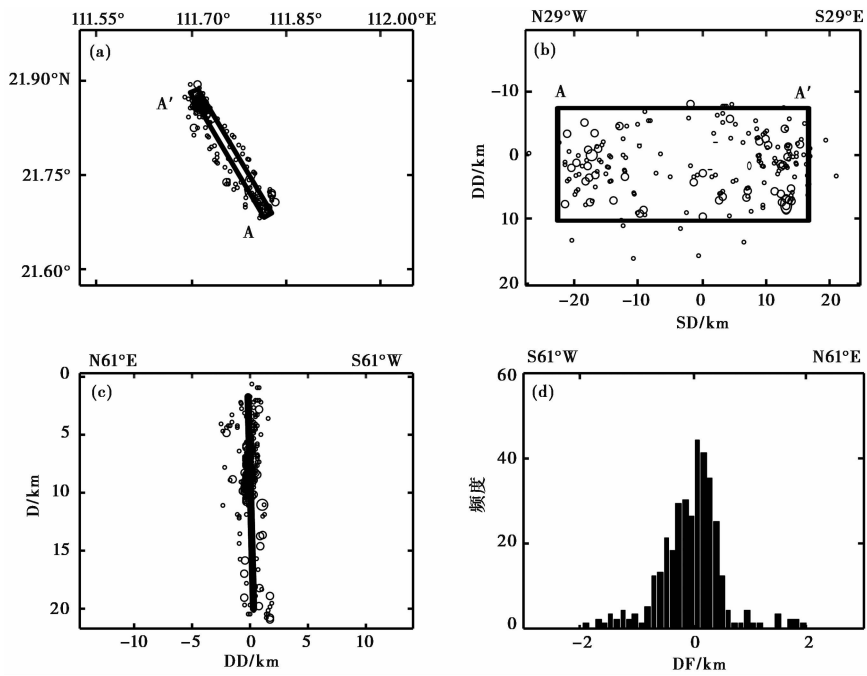


图 5 程村断层 (F_5) 附近的小震在水平面 (a)、断层面 (b)、垂直于断层面 (c) 的投影分布和小震到断层面距离的分布 (d)

AA' 为断层上边界端点; DD 为倾向长度; DF 为距断层面的距离; SD 为走向长度

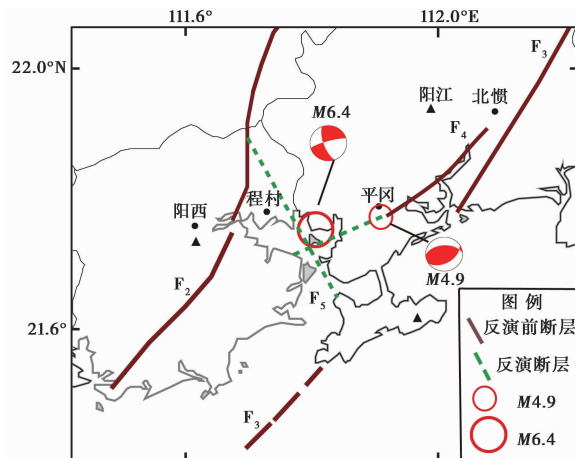


图 6 反演断层、地震分布及震源机制解
绿色虚线为反演断层

压的特点(林纪曾等,1980;蒋维强等,1992),推测平冈断层以右旋走滑错动为主,程村断层当 σ_1 方位呈 NW 时发生左旋的可能性较大,当偏转到 NWW 时则有可能发生右旋滑动。

3 讨论与结论

发震断层参数的精确测定对于地质构造、地震发震机理、地震预测等研究是一项重要的基础工作。本文利用阳江地区 2010~2016 年 $M_L1.0$ 以上绝对定位的小震资料,经双差方法精确修定震源位置,对紧紧围绕着平冈断层西南段(即 6.4 级地震发震断层)、程村断层的密集地震,用数学拟合方法反演得到了较精确的断层参数,结果表明:1969 年阳江 6.4 级地震的发震断层产状为走向约 258° ,倾角约 85° ,倾向 NW;程村断层的走向约 333° ,倾角约 86° ,倾向 NE。2 条断层均十分陡峭,近乎直立,断层深度基本相同,为 2~15km,它们相交切于近海域(图 6 绿色虚线)。

本文反演的平冈断层西南段的参数与阳江 6.4 级地震的震源机制解(林纪曾等,1980)十分接近(图 6)。例如断层反演走向 258° 和倾角 85° 与震源机制解的 NEE 的节面走向 254° 和倾角 80° 相差仅 4° 和 5° ,而倾向完全一致,同为 NW。反演的断层与以往资料相比,向西延长了约 10km 并穿过海域抵达对岸。这些结果与真实的地震分布特征及发震方式更为相符,应该是对平冈断层认识的一个完善与补充。需要强调的是,本文对平冈断层参数的反演,由于断层北东段地震资料不充分无法反演,结果仅限于平冈镇向西的部分,即 6.4 级地震的发震构造,并不反映整条平冈断层的特征。

程村断层的反演结果说明,该断层的实际长度比已有结果(魏柏林等,2001)更长,断层西北端点超过了程村镇继续向 NW 方向延长了约 8km,而走向则向 NE 偏转了约 15° (图 6)。

2004 年 9 月在平冈镇附近发生了一次逆冲分量很大的中等地震(4.9 级),当时由于余震数据不丰富,加之平冈断层北东段(平冈-北惯)平时地震活动较弱等原因,所以初步认定 4.9 级地震的发震断层可能与 6.4 级是重合的,即本文反演的平冈断层西南段的错动引发了 4.9 级地震(刘特培等,2005)。本研究经过反复论证 4.9 级的震源机制解后,确认它属高逆

冲量类型地震(图6)。然而近乎直立的平冈断层西南段在近水平的构造应力挤压下发生显著逆冲的可能性不大,因此关于4.9级地震的发震断层似有必要重新讨论。本文推测4.9级地震最为可能是由平冈断层的北东段发生逆冲所致。根据相关资料,从平冈镇至北惯镇的断层倾角较小,约为 60° (魏柏林等,2001),在该区域应力场作用下发生逆冲错动是可能的。综上,平冈断层(F_4)的总体特征是自西向东,断层构造由陡峭转为较平缓的形态,发生扭曲的地点就位于平冈镇附近。鉴于平冈-北惯段尚未记录到足够的地震资料,目前暂难测定其相关的断层参数。

通常断裂的相交点或端点是应力易集中进而可能发生较强地震的部位,当前由于阳江地区6.4级及一系列中强地震已经在上述两断层交点附近及平冈断层西南段相继发生,而2004年4.9级地震的震中却明显地脱离了原6.4级地震主震区域,并由以往不太活动的平冈断层的北东段错动所致,是否反映了阳江地区地震开始发生了迁移?这一点应在该区地质及地震活动性分析时加以关注。

致谢: 防灾科技学院万永革教授为本研究提供了断层反演程序,匿名审稿专家对文章的修改提出了中肯的建议,在此一并感谢。

参考文献

- 陈建涛、谢剑波、劳谦,2017,广东阳江小孔径井下型地震监测台阵介绍,华南地震,37(1),42~48.
- 蒋维强、林纪曾、赵毅等,1992,华南地区的小震震源机制与构造应力场,中国地震,8(1),36~42.
- 康英、杨选、黄文辉等,2007,阳江地区地震双差定位及其活动图像分析,中国地震,23(3),295~302.
- 林纪曾、梁国昭、赵毅等,1980,东南沿海地区的震源机制与构造应力场,地震学报,2(3),246~257.
- 刘特培、秦乃岗、陈玉桃,2005,阳江地震活动特征影响场及应急对策,地震地磁观测与研究,26(6),34~41.
- 刘特培、邵叶、杨选等,2017,利用高精度小震资料确定新丰江水库大坝区NW向发震断层,地震学报,39(1),23~33.
- 彭利媚、魏娅玲,2016,由 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解推断四川理县-黑水断裂构造特征,华南地震,36(3),9~16.
- 邵叶、刘特培、刘吉平,2016,2012和2013年广东新丰江锡场2次 $M_s 4.8$ 地震发震构造的确定,地震,36(2),132~139.
- 万永革、沈正康、刁桂苓等,2008,利用小震分布和区域应力场确定大震断层参数方法其在唐山地震序列中的应用,地球物理学报,51(3),793~804.
- 王福昌、万永革、钱小仕等,2013,由地震分布丛集性给出断层参数的一种方法,地球物理学报,56(2),522~530.
- 王鸣、王培德,1992,1989年10月18日大同-阳高地震的震源机制和发震构造,地震学报,14(4),407~415.
- 魏柏林、陈仁法、黄日恒,2000,广东省地质构造概论,北京:地震出版社.
- 魏柏林、冯驹敏、陈定国等,2001,东南沿海地震活动特征,162~169,北京:地震出版社.
- 徐晓枫、王惠琳、胡久常等,2017,铺前-清澜断裂带附近地震的重定位及其构造意义的初步分析,华南地震,37(2),10~16.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, Bull Seismol Soc Am, 90(6), 1353~1368.

Determination of the Seismogenic Structure Parameters of the Yangjiang $M_s6.4$ Earthquake in 1969

*Lin Qun*¹⁾ *Liu Tepei*¹⁾ *Wang Xiaona*¹⁾ *Xu Xiaofeng*²⁾ *Gong Huiling*¹⁾
*Chen Xinglian*³⁾

1) Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China

2) Hainan Earthquake Agency, Haikou 570203, China

3) Yangjiang Earthquake Agency, Yangjiang 529500, Guangdong, China

Abstract Based on the data of small earthquakes in the Yangjiang area from 2010 to 2016, the paper revised the dense earthquakes surrounding the Pinggang fault and the Chengcun fault during the Yangjiang $M_s6.4$ earthquake by double-difference method and obtained 1 411 relocated focus source parameters. According to the principle that the cluster earthquake occurs near the fault, the paper obtained the parameters of the two faults by using the simulated annealing algorithm and the Gauss-Newton algorithm. The Pinggang Fault with the strike of 258° , the dip angle of 85° , the fault length of 15km and dipping to northwest, which is very consistent with the focal mechanism of the $M_s6.4$ earthquake, crosses the southwest end of the sea and reaches the other side. The Chengcun Fault with the strike of 331° , the dip angle of 88° , the length of 28km, dipping to northeast, is longer than the previous data and deflects to the northeast with about 20° . The two steep faults are almost perpendicular at the offshore, and are of strike-slip motion.

Key words: Seismogenic Fault; Yangjiang earthquake; Small earthquake cluster; Fault inversion