

2005 年 11 月 26 日九江—瑞昌 $M_s5.7$ 、 $M_s4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究

吕 坚^{1,2}, 郑 勇^{3,1*}, 倪四道¹, 高建华²

1 中国科学技术大学, 合肥 230026

2 江西省地震局, 南昌 330039

3 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘 要 利用来源于江西区域台网和中国地震台网共 6 个台的宽频带数字地震记录, 采用 CAP 方法反演了 2005 年 11 月 26 日九江—瑞昌 5.7 级地震和 4.8 级强余震的震源机制解, 并结合地震序列的精确定位结果和区域地质背景讨论了发震构造。结果显示, 5.7 级主震的最佳双力偶解为节面 I 走向 223°, 倾角 75°, 滑动角 144°; 节面 II 走向 324°, 倾角 55°, 滑动角 18°。4.8 级强余震的最佳双力偶解为节面 I 走向 54°, 倾角 71°, 滑动角 -160°; 节面 II 走向 317°, 倾角 71°, 滑动角 -20°。这两次地震的震源机制解不完全一致, 地震序列在震中空间分布和震源深度分布上也具有复杂性。5.7 级主震发生后, 余震活动从 SE 向 NW、从浅部往深部发展, 在破裂过程中可能遇到障碍物, 触发了 4.8 级强余震。5.7 级主震的发震构造可能为隐伏在瑞昌盆地内的洋鸡山—武山—通江岭 NW 向断裂。4.8 级强余震的发震构造可能为瑞昌盆地西北缘的丁家山—桂林桥—武宁 NE 向断裂北段。

关键词 九江—瑞昌地震, 震源机制解, 地震构造, CAP 方法

文章编号 0001-5733(2008)01-0158-07 中图分类号 P315 收稿日期 2007-06-05, 2007-10-08 收修定稿

Focal mechanisms and seismogenic structures of the $M_s5.7$ and $M_s4.8$ Jiujiang-Ruichang earthquakes of Nov. 26, 2005

LÜ Jian^{1,2}, ZHENG Yong^{3,1*}, NI Si-Dao¹, GAO Jian-Hua²

1 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 Earthquake Administration of Jiangxi Province, Nanchang 330039, China

3 Institute of Geophysics, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract Based on the records of 6 stations in Jiangxi regional seismic network and CSN, we obtained the focal mechanisms of the $M_s5.7$ Jiujiang-Ruichang earthquake and its $M_s4.8$ aftershock of Nov. 26, 2005 with the “Cut and Paste” (CAP) method, and analyzed the seismogenic structure combining with relocation of the aftershock sequence and the geologic settings in the region. Our result shows that the best double couple solution of the $M_s5.7$ event is 324°, 55° and 18° for strike, dip and rake angles respectively, the other nodal plane is 223°, 75° and 144°; for the $M_s4.8$ aftershock the solution is 54°, 71°, -160° respectively with the other nodal plane of 317°, 71° and -20°. Complexities can be found from aftershock distribution and source depth of the sequence. After the occurrence of the $M_s5.7$ main shock, aftershocks occurred and propagated from SE to NW and from shallower to deeper crust, then they probably encountered an asperity and triggered the $M_s4.8$ strong aftershock. This complexity and the different focal mechanisms imply that the two earthquakes may not occur on

基金项目 地震科学联合基金(A07124), 国家自然科学基金(40604004, 40425005), 地震科学联合基金(606054), 中国地震局“数字地震资料在短临跟踪中的应用”项目(120602-06-114)联合资助。

作者简介 吕 坚, 男, 1975 年生, 2007 年毕业于中国科学技术大学地球物理专业, 现在江西省地震局工作, 主要从事地震活动性与地震危险性研究. E-mail: lvjian8438@163.com

* 通讯作者 郑 勇, 男, 1979 年生, 中国地震局地球物理研究所站博士后, 主要从事地震波理论与应用研究. E-mail: yzheng4@gmail.com

the same fault, we infer that the M_s 5.7 main shock is caused by the NW striking Yangjishan-Wushan-Tongjiangling fault buried in Ruichang basin and the M_s 4.8 aftershock occurred on the NE striking Dingjiashan-Guilinqiao-Wuning fault in the northwest margin of the basin.

Keywords Jiujiang-Ruichang earthquake, Focal mechanism, Seismogenic structure, CAP method

1 引言

北京时间 2005 年 11 月 26 日 08 时 49 分,在江西省九江县与瑞昌市交界发生 5.7 级地震,这次地震是近几年来我国损失最大、灾害最严重的地震,造成 13 人死亡,直接经济损失 20.4 亿元人民币。地震发生后,国内外一些机构确定了主震的震源机制解。中国地震台网中心给出的结果为:节面 I 走向 84° , 倾角 89° , 滑动角 -98° ; 节面 II 走向 346° , 倾角 8° , 滑动角 -8° 。美国地质调查局给出的结果为:节面 I 走向 5° , 倾角 23° , 滑动角 74° ; 节面 II 走向 202° , 倾角 68° , 滑动角 97° 。美国哈佛大学给出的结果为:节面 I 的走向 325° , 倾角 61° , 滑动角 20° ; 节面 II 的走向 224° , 倾角 72° , 滑动角 149° 。显而易见,上述三个震源机制解不太一致。此外,由于本次地震发生在秦岭—大别山造山带与郟城—庐江断裂带的延伸汇聚部位,震区附近的断裂构造发育,而微观震中位于长江南岸的瑞昌盆地内,地震造成的破坏明显受到局部地质和水文条件的影响,给发震构造的认定带来较大困难。目前发震构造也存在盆地北西缘北东向断裂^[1]、盆地内北西向隐伏断裂^[2]和盆地南东缘北东向断裂^[1]的三种不同观点。总而言之,对于本次地震的震源机制解和发震构造迄今为止仍然没有得到比较一致的结果。为了提高对上述重要问题的认识,本文利用江西区域台网和 CSN 的宽频带数字地震波形记录,反演了 2005 年 11 月 26 日 08 时 49 分 5.7 级主震、12 时 55 分 4.8 级强余震的震源机制解,并结合区域地质背景和地震序列的精确定位结果讨论了发震构造。

2 震源机制反演方法

在地震震源机制的研究中, P 波初动和波形反演方法是目前常用的手段。其中可用于波形反演的方法和资料有多种,最典型的是利用面波数据^[3,4]或者体波数据^[5-10]进行反演。最近几年,国际上的一些

地震学者^[11-13]建立和发展了“CAP (Cut and Paste) 方法”,将宽频带地震记录分成 Pnl 和面波两个部分进行反演并允许他们相对浮动,在适当的时间变化范围内,搜索出合成地震图和观测地震图全局差异最小的震源机制解。该方法的一大优势是反演结果对速度模型和地壳横向变化的依赖性相对较小,而且相对提高了 Pnl 的权重,对地震深度有比较好的约束。

一个双力偶震源的理论合成位移 $s(t)$ 可以表示为:

$$s(t) = M_0 \sum_{i=1}^3 A_i(\theta - \phi_s, \delta, \lambda) G_i(t), \quad (1)$$

上式中, $i=1, 2, 3$ 时分别对应垂直走滑、垂直倾滑和 45° 倾滑三种最基本的断层类型; G_i 为格林函数, A_i 为射线系数, θ 为台站方位角, M_0 为标量地震矩, ϕ_s 、 δ 、 λ 依次为所求震源机制解的走向(strike)、倾角(dip)和滑动角(rake)。

在反演过程中,以合成地震位移 $s(t)$ 与观测地震位移 $u(t)$ 一致作为判断标准:

$$u(t) = s(t). \quad (2)$$

由于要求的震源机制解的未知参数不多,且 $0^\circ \leq \phi_s \leq 360^\circ$, $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$, $-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$, 因此求解方程(2)可定义一个误差目标函数来衡量 s 与 u 的差异,直接采用网格搜索的方法得到最佳的震源机制解。在本研究中,使用经震中距矫正后的绝对误差值作为误差目标函数^[13], 定义为:

$$e = \left\| \left(\frac{r}{r_0} \right)^p \cdot \| u - s \| \right\|. \quad (3)$$

上式中, r 为震中距, r_0 为选定的参考震中距, p 为指数因子,一般而言,体波 $p=1$, 面波 $p=0.5$ 。

3 资料与反演过程

本研究选用的台站分布见表 1 和图 1。这些台站中有 4 个出自江西省区域台网, 2 个出自中国地震台网(CSN)。在 0.05~20 Hz 的频率范围内,这 6 个台站仪器的幅频特性曲线都是平直的,较好地获得了

表 1 台站表

Table 1 Coordinates of stations used in this study

台站名称	台站代码	纬度	经度	高程/km	资料来源
九江	JUJ	29.65°N	116.01°E	0.106	江西台网
南昌	YIC	28.78°N	115.80°E	0.078	CSN
修水	XIS	29.04°N	114.56°E	0.055	江西台网
武汉	WHN	30.54°N	114.35°E	0.026	CSN
宜春	YIC	27.81°N	114.37°E	0.143	江西台网
上饶	SHR	28.44°N	117.98°E	0.112	江西台网

表 2 九江—瑞昌地区地壳速度模型

Table 2 Crustal velocity model

地壳厚度(km)	V_P (km/s)	V_S (km/s)	密度(kg/m^3)
0.0~3.0	4.80	2.8	2.46
3.0~10.0	5.80	3.41	2.67
10.0~18.0	6.15	3.60	2.78
18.0~26.0	6.40	3.62	2.87
26.0~35.0	6.80	3.84	2.93
35.0	8.00	4.42	3.38

函数搜索出合成地震图和观测地震图全局差异最小的震源机制解。

4 结果与讨论

经过全局搜索,得到九江—瑞昌 5.7 级主震的最佳双力偶解为节面 I 走向 223°, 倾角 75°, 滑动角 144°; 节面 II 走向 324°, 倾角 55°, 滑动角 18°。这一结果与哈佛大学用全球远场波形记录反演得到的结果(节面 I 走向 224°, 倾角 72°, 滑动角 149°; 节面 II 走向 325°, 倾角 61°, 滑动角 20°)接近, 也与吕坚等^[21]利用 14 个省级区域台网、CSN 和 IRIS(Incorporated Research Institutions for Seismology)共 146 个台站反演得到的 P 波初动解(节面 I 走向 237°, 倾角 76°, 滑动角 153°; 节面 II 走向 334°, 倾角 64°, 滑动角 16°, 矛盾符号比 0.113)接近。图 2 展示了理论地震图与观测地震图的拟合情况。在 30 个震相中, 理论地震图与观测地震图的相关系数大于 0.5 的占 90%; 相关系数大于 0.8 的有 25 个, 占 83.3%; 相关系数大于 0.9 的有 19 个, 占 63.3%, 反演方差为 1.91×10^{-1} , 理论地震图较好地拟合了观测地震图, 反演结果是可信的。4.8 级强余震的最佳双力偶解为节面 I 走向 54°, 倾角 71°, 滑动角 -160°; 节面 II 走向 317°, 倾角 71°, 滑动角 -20°, 在 30 个震相中(图 3), 理论地震图与观测地震图的相关系数大于 0.5 的占 96.7%; 相关系数大于 0.8 的有 23 个, 占 76.7%; 相关系数大于 0.9 的有 16 个, 占 53.3%, 反演方差为 4.97×10^{-3} , 结果也是可信的。

根据吕坚等^[21]的精确定位结果, 九江—瑞昌 5.7 级主震(29.687°N, 115.744°E, 深度约 10.8 km)位于瑞昌盆地内, 被两条 NE 向断裂和两条 NW 向隐伏构造线所包围(图 4)。对于本次地震的发震构造, 卢福水等^[1]将其确定为 NE 向的丁家山—桂林桥—武宁断裂(图 4 中的断裂(2))北段, 主要依据为地震烈度等震线呈 NE 向长轴分布和该断裂为瑞昌盆地北西

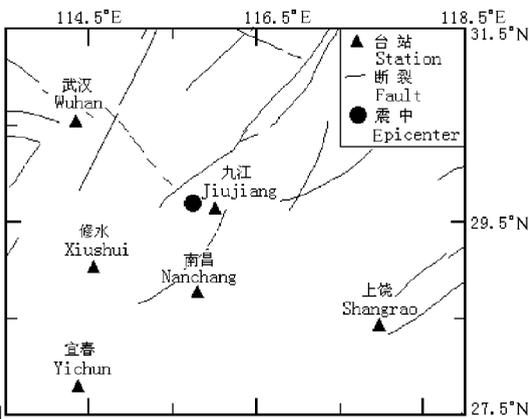


图 1 地震震中与台站分布图

Fig. 1 Seismic epicenter and stations

九江—瑞昌 5.7 级主震和 4.8 级强余震的数字化宽频带记录。在选用震相之前, 我们先将原始的速度记录扣除仪器响应后积分到位移记录, 再将位移记录从 UD-NS-EW 分量旋转为 Z-R-T 分量, 分成 Pn1 和面波两个部分, 并将 Pn1 部分经带宽为 0.05~0.2 Hz, 面波部分经带宽为 0.05~0.1 Hz 的 4 阶 Butterworth 带通滤波器滤波。选择这样的分析频率范围, 既可以滤掉长周期地脉动和由速度积分到位移造成的长周期漂移, 也可以有效避免介质细结构所带来的影响, 既可得到恰当的标量地震矩也能较充分地反映地震波携带的震源信息。经过上述处理后, 每一个台有 Z 分量、R 分量的 Pn1 震相和 3 个分量的面波震相供分析。

研究区的速度结构(表 2)采用区域人工地震测深与重力剖面的综合研究结果^[14~16]。在计算理论地震图时, 我们采用目前广泛使用的频率-波数法(F-K 方法)^[11~13]。该方法通过对频率和波数进行分别积分, 采用传播矩阵计算地震的位移场分布, 能够计算各种频率下的体波和面波波形, 应用于研究震源参数非常有效。最后, 根据公式(3)给出的误差目标

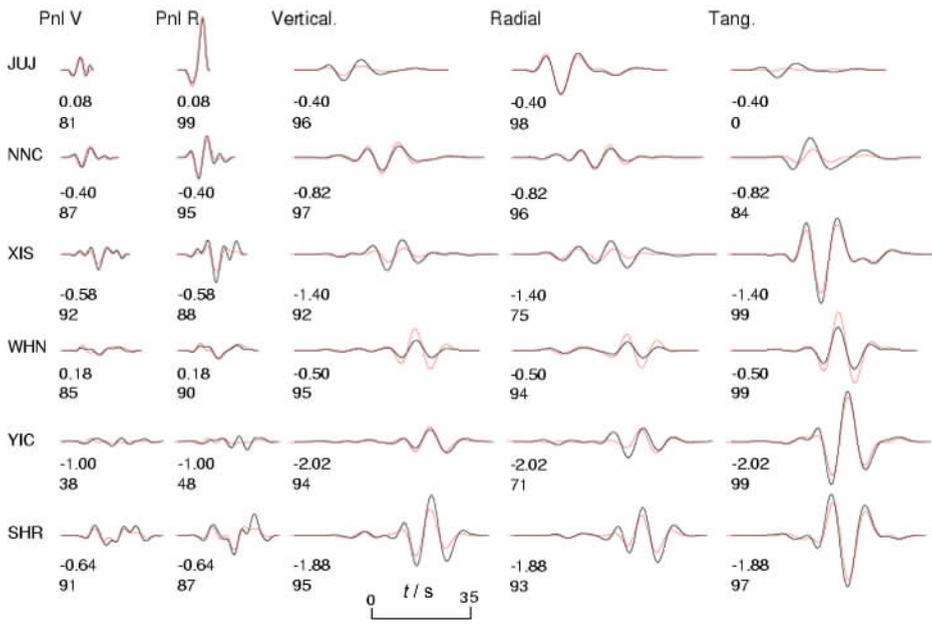


图 2 5.7 级地震的理论地震图与观测地震图

红线为理论地震图, 黑线为观测地震图, 左边上面的数字为理论地震图相对观测地震图的移动时间, 下面的数字为理论地震图与观测地震图的相关系数.

Fig.2 Comparison between the synthetic and the observed seismograms

The red traces are synthetic seismograms and the black traces are data. The numbers on the left side of the seismograms are the time shifts(upper) and cross-correlation coefficient in percent(lower).

Positive time shifts mean that the synthetics have been delayed or shifted to the right.

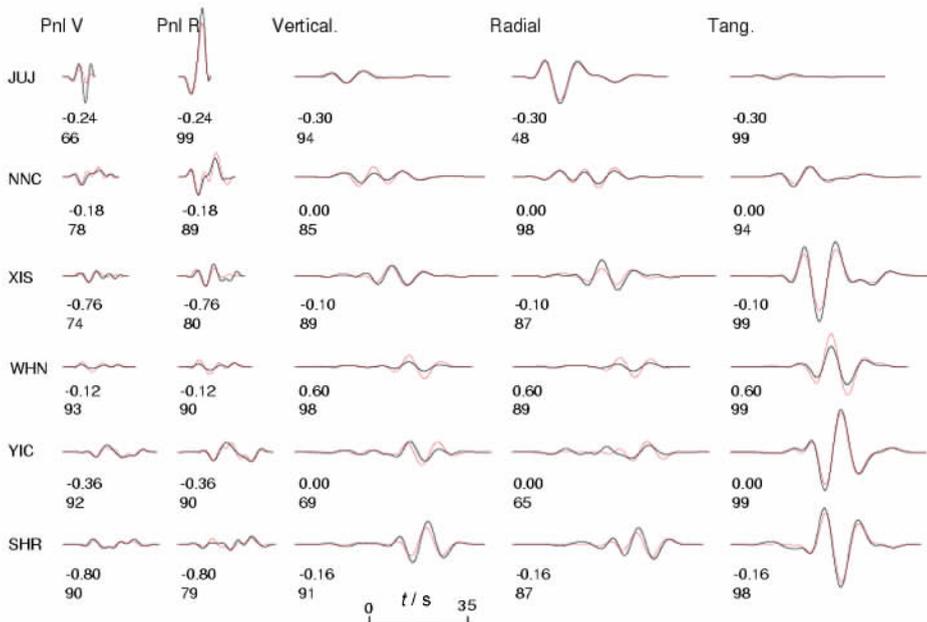


图 3 4.8 余震 CAP 反演结果

颜色和数字的含义参见图 2.

Fig.3 CAP inversion for the $M4.8$ aftershock

Refer to figure 2 for definition of colors and numbers.

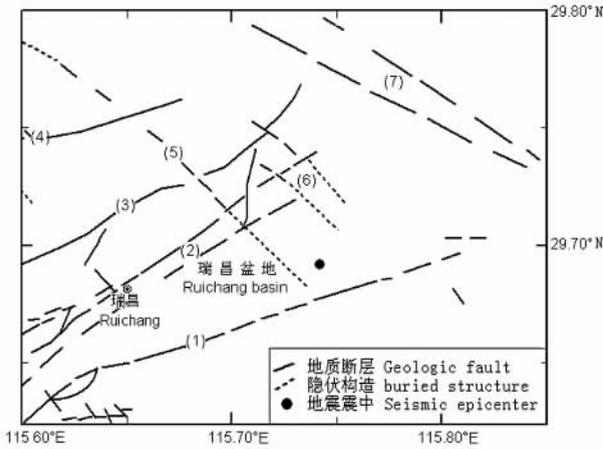


图 4 震区地质构造与精确定位后的主震震中分布图

- (1) 刘家—范家铺—城门山断裂 Liujiia-Fanjiaapu-Chengmenshan fault ;
- (2) 丁家山—桂林桥—武宁断裂 Dingjiashan-Guilinqiao-Wuning fault ;
- (3) 望夫山—大浪断裂 Wangfushan-Dalang fault ;(4) 武山—南阳断裂 Wushan-Nanyang fault ;(5) 洋鸡山—武山—通江岭断裂 Yangjiashan-Wushan-Tongjiangling fault ;(6) 丁家山—狮子岛断裂 Dingjiashan-Shizidao fault ;(7) 长江断裂 Changjiang fault.

Fig. 4 Map of geological settings and relocated epicenter of main shock

缘控制断裂 地表表现较清楚. 但本研究认为判定该断裂为 5.7 级主震的发震构造依据不足, 值得商榷, 主要理由如下:

(1) 现有的资料^[17,18,19,20]和地震现场考察结果均显示, 该断裂在赛湖—马家垅—丁家山(主震震中以北)一带, 表现为梯状正断层, 走向约 NE50°, 倾向 SE, 倾角 80°左右. 根据该断裂的走向和倾向, 如果其为发震构造, 主震震源机制解应有一组节面的走向在 0°~90°间, 这一推测结果与本研究结果不符.

(2) 如果该断裂为唯一的发震构造, 根据其走向和倾向, 地震序列总体上应该呈现 NE 向优势分布, 震源深度由 NW 至 SE 逐渐变深, 这一推测结果与地震序列的精确定位结果^[21]不太一致. 图 5 显示, 本次地震序列 $M_L \geq 1.0$ 级地震呈现 NNW 向优势分布, 余震区分布长轴大约 5 km, 短轴大约 3 km. 如果考虑 $M_L \geq 1.5$ 级地震, 则似乎存在 NW 向(剖面 B-A)和 NE 向(剖面 C-D)的两组共轭分布. 图 6 显示, 地震序列在震源深度上的变化也较为复杂, 大致以震源深度 11.5 km 处为分界: 沿剖面 A-B 与主震震源机制解的节面 I 走向大致垂直), 上部地震震源深度总体上由 NW 至 SE 逐渐变浅, 下部地震震源深度总体

上由 NW 至 SE 逐渐变深, 沿剖面 C-D 与主震震源机制解的节面 II 走向大致垂直), 上部地震震源深度总体上由 SW 至 NE 逐渐变深, 下部地震震源深度总体上由 SW 至 NE 逐渐变浅.

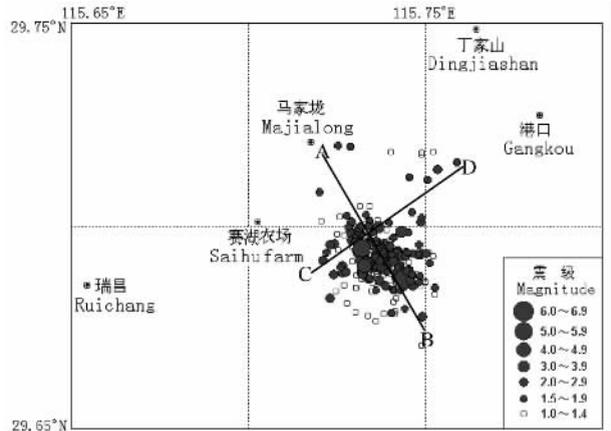


图 5 精确定位后的地震震中分布图

Fig. 5 Distribution of seismic epicenter after precise relocation

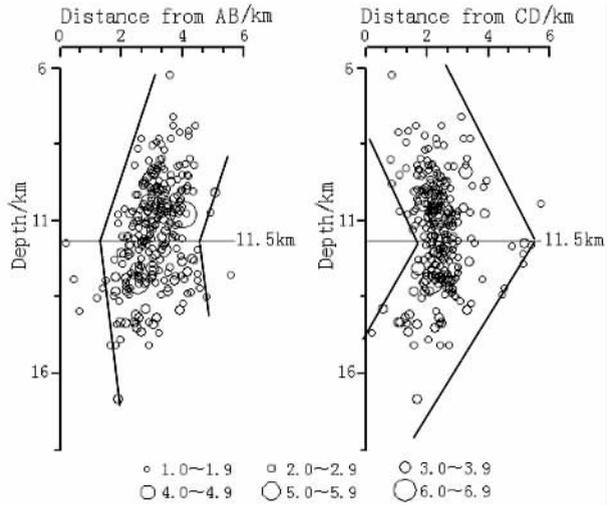


图 6 沿不同剖面的震源深度图

Fig. 6 Profile of focal depth along different cross-section

(3) 本研究得到的 5.7 级主震和 4.8 级强余震的震源机制解不完全一致, 而且这两次地震在震中空间分布和震源深度分布上也有所区别. 从图 5 和图 6 可以看出, 5.7 ($M_L 6.0$) 级主震发生在 $M_L \geq 1.5$ 地震序列的 SE 端, 震源深度小于 11.5 km 的上部; 而 4.8 ($M_L 5.3$) 级强余震 (29.695°N, 115.732°E, 深度约 13.0 km) 发生在 $M_L \geq 1.5$ 地震序列 NW 向分布(剖面 B-A)和 NE 向分布(剖面 C-D)的共轭部位, 震源深度

1) 地质部江西省地质局区域地质测量队. 中华人民共和国地质图(1:200000 瑞昌幅), 1966
 2) 地矿部江西地质矿产勘查开发局赣西北大队区调分队. 中华人民共和国地质图说明书(1:50000 瑞昌县幅), 1987
 3) 江西省地质矿产局. 中华人民共和国地质图(1:50000 瑞昌县幅), 1987

大于 11.5 km 的下部.上述现象表明在 5.7 级主震发生后,余震活动从 SE 往 NW、从浅部往深部发展,在破裂过程中可能遇到障碍物,触发了 4.8 级强余震,因此这两次地震的发震构造可能并不惟一,需进一步讨论.在与发震构造可能有关的 4 条断裂或隐伏构造线中(图 4),断裂(1)为刘家—范家铺—城门山断裂北段,该断裂为瑞昌盆地南东缘控制断裂,在震中一带走向 NE,倾向 SE,倾角 $70^\circ \sim 85^\circ$,根据其走向和倾向,发震破裂时地震位置应该处于该断裂以南而不在瑞昌盆地内,显然与实际不符,该断裂不太可能为本次地震的发震构造.断裂(6)为丁家山—狮子岛断裂,属性目前未见详细资料阐述,如果其倾向 NE,则走向 NW,发震破裂时地震位置应该处于该断裂以东而不在瑞昌盆地内;如果其倾向 SW,则走向 SE,发震破裂时 5.7 级主震和 4.8 级强余震的震源机制解中应有一组节面的走向在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 间,上述 2 种推测结果都与实际情况不一致,该断裂也不太可能为本次地震的发震构造.在排除了上述两条断裂后,我们认为,NE 向的丁家山—桂林桥—武宁断裂(图 4 中的断裂(2))北段应该是 4.8 级强余震的发震构造,因为该断裂的属性与 4.8 级强余震的震源机制解节面 I 的性质吻合,发震破裂时其余震可能出现沿剖面 C-D 与震源机制解节面 I 走向大体一致的一组优势分布,震源深度沿剖面 A-B 与震源机制解的节面 I 走向大致垂直.总体上可能由 NW 至 SE 逐渐变深,这一推测结果与本研究结果较为一致.对于 5.7 级主震的发震构造,我们认为图 4 中的断裂(5)即洋鸡山—武山—通江岭 NW 向断裂不可忽视,因为本次地震序列整体上表现为 NNW-NW 向优势分布,且震源分布图像和主震震源机制解的节面 II 性质均显示可能存在一条倾向 NE、走向 NW 的断层活动,引发了 5.7 级主震,而这条 NW 向断裂位于地震震中以西,可能向东南延伸并隐伏在瑞昌盆地中,很可能为本次地震序列主震的发震构造.

5 结 论

(1)九江—瑞昌 5.7 级主震的最佳双力偶解为节面 I 走向 223° ,倾角 75° ,滑动角 144° ;节面 II 走向 324° ,倾角 55° ,滑动角 18° .4.8 级强余震的最佳双力偶解为节面 I 走向 54° ,倾角 71° ,滑动角 -160° ;节面 II 走向 317° ,倾角 71° ,滑动角 -20° .这两次地震的震源机制解不完全一致.

(2)本次地震序列在震中空间分布和震源深度

分布上具有复杂性.5.7 级主震发生后,余震活动从 SE 向 NW、从浅部往深部发展,在破裂过程中可能遇到障碍物,触发了 4.8 级强余震.5.7 级主震的发震构造可能为隐伏在瑞昌盆地内的洋鸡山—武山—通江岭 NW 向断裂.4.8 级强余震的发震构造可能为瑞昌盆地西北缘的丁家山—桂林桥—武宁 NE 向断裂北段.

(3)建议在九江—瑞昌地区开展细致的人工地震勘探工作,深入研究震源区断裂和隐伏断层的动力学与运动学特征.

致 谢 本研究所用震源机制反演程序由美国圣路易斯大学朱露培先生提供,并得到车时、刘桂萍、李永林、黄蔚北等先生的帮助,审稿专家给出重要修改意见,在此一并致谢!

参考文献(References)

- [1] 卢福水,曾新福,郝 栋等.九江—瑞昌 5.7 级地震发震构造初探.防灾减灾工程学报,2006,26(增刊):75~82
Lu F S, Zeng X F, Zheng D, et al. Study on the seismogenic structure of Jiujiang-Ruichang $M_s 5.7$ earthquake. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering* (in Chinese), 2006, 26 (Suppl.): 75~82
- [2] 吕 坚,倪四道,沈小七等.九江—瑞昌地震的精确定位及其发震构造初探.中国地震,2007,23(2):166~174
Lü J, Ni S D, Shen X Q, et al. Discussion on precise relocation and seismo-tectonics of the Jiujiang-Ruichang earthquake. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2007, 23(2): 166~174
- [3] Patton H J. Reference point method for determining the source and path effects of surface waves. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 821~848
- [4] Thio H K, H Kanamori. Moment-tensor inversions for local earthquakes using surface waves recorded at TERRASCOPE. *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 1995, 85: 1021~1038
- [5] Fan G W, Wallace T C. The determination of source parameters for small earthquakes from a single very broadband seismic station. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, 18: 1385~1388
- [6] Dreger D S, Helmberger D V. Determination of source parameters at regional distances with three component sparse network data. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 8107~8125
- [7] Xu L S, Chen Y T. Tempo-spatial rupture process of the 1997 Mani, Xizang (Tibet), China earthquake of $M_s = 7.9$. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1999, 12(5): 495~506
- [8] 许力生,陈运泰.从全球长周期波形资料反演 2001 年 11 月 14 日昆仑山地震时空破裂过程.中国科学(D 辑),2004,34(3): 256~264
Xu L S, Chen Y T. Temporal and spatial rupture process of the November 14 2001 Kunlun Mountain great earthquake from the GDSN long period waveform data. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2004, 34(3): 256~264

- [9] 赵翠萍, 陈章立, 郑斯华等. 2003 年 9 月 27 日中、俄、蒙边界 7.9 地震震源机制及破裂过程研究. 地震学报, 2005, **27**(3): 237 ~ 249
Zhao C P, Chen Z L, Zheng S H, et al. Moment tensor inversion and source rupture process of the September 27, 2003 $M_S = 7.9$ earthquake occurred in the border area of China, Russia and Mongolia. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2005, **27**(3): 237 ~ 249
- [10] 周云好, 陈章立, 缪发军. 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_S 8.1$ 地震震源破裂过程研究. 地震学报, 2004, **26**(增刊): 9 ~ 20
Zhou Y H, Chen Z L, Miao F J. Source process of the 14 November 2001 western Kunlunshan $M_S 8.1$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2004, **26**(Suppl.): 9 ~ 20
- [11] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms. *Bull Seis Soc Amer*, 1994, **84**(1): 91 ~ 104
- [12] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull Seis Soc Amer*, 1996, **86**(5): 1634 ~ 1641
- [13] Tan Y, Zhu L P, Helmberger D V, et al. Locating and modeling regional earthquakes with two stations. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, B01306, doi: 10.2929/2005JB003775
- [14] 王椿镛, 张先康, 丁志峰等. 大别造山带上部地壳结构的有限差分析成像. 地球物理学报, 1997, **40**(4): 495 ~ 502
Wang C Y, Zhang X K, Ding Z F, et al. Finite-difference tomography of upper crustal structure in Dabieshan orogenic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(4): 495 ~ 502
- [15] 王椿镛, 张先康, 陈步云等. 大别造山带地壳结构研究. 中国科学(D 辑), 1997, **27**(3): 221 ~ 226
Wang C Y, Zhang X K, Chen B Y, et al. Crustal structure in Dabieshan orogenic belt. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 1997, **27**(3): 221 ~ 226
- [16] 王椿镛, 丁志峰, 宋建立等. 大别造山带地壳 S 波速度结构. 地球物理学报, 1997, **40**(3): 337 ~ 346
Wang C Y, Ding Z F, Song J L, et al. Shear wave velocity structure in Dabieshan orogenic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(3): 337 ~ 346
- [17] 吕新彪, 姚书振, 周宗桂. 大冶—九瑞地区局部地质异常特征与成矿. 地球科学—中国地质大学学报, 1998, **23**(2): 115 ~ 119
Lü X B, Yao S Z, Zhou Z G. Character of the local geological anomaly and mineralization in Daye-Jiurui region. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 1998, **23**(2): 115 ~ 119
- [18] 崔彬. 江西九瑞地区铜金成矿系列模式. 矿床地质, 1995, **14**(1): 44 ~ 50
Cui B. Model of copper and gold metallogenic series in Jiujiang-Ruichang area. *Mineral Deposits* (in Chinese), 1995, **14**(1): 44 ~ 50

(本文编辑 胡素芳)