

倪红玉, 沈小七, 洪德全, 李军辉, 郑海刚, 赵朋. 2015. 2014 年金寨 $M_L 3.9$ 震群序列特征研究. 地震学报, 37(6): 925–936. doi:10.11939/jass.2015.06.004.

Ni H Y, Shen X Q, Hong D Q, Li J H, Zheng H G, Zhao P. 2015. Characteristics of the $M_L 3.9$ Jinzhai, Anhui, earthquake swarm sequence in 2014. *Acta Seismologica Sinica*, 37(6): 925–936. doi:10.11939/jass.2015.06.004.

2014 年金寨 $M_L 3.9$ 震群序列特征研究^{*}

倪红玉^{1,2)} 沈小七^{3),*} 洪德全^{1,2)} 李军辉¹⁾
郑海刚¹⁾ 赵 朋¹⁾

1) 中国合肥 230031 安徽省地震局

2) 中国安徽蒙城 230026 蒙城国家野外观测研究站

3) 中国天津 300180 中国地震局第一监测中心

摘要 本文首先采用双差定位方法对 2014 年金寨 $M_L 3.9$ 震群序列进行了重新定位, 然后通过 Snok 方法和 CAP 方法计算了该震群序列中较大地震的震源机制解, 分析了震源参数的时空变化特征. 结果表明: 金寨震群序列密集分布在 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 范围内, 无明显的展布方向; 其震源深度较浅, 大部分集中在 3—7 km. 此外, 金寨震群序列中较大地震的震源机制解基本一致, 两组节面的走向分别为 NW 向和 NNE 向, 倾角均较高, 表明该震群序列为近 E–W 向的水平挤压和近 N–S 向的水平拉张应力场作用下的走滑型地震活动.

关键词 金寨震群 双差定位方法 震源机制解 CAP 方法 Snok 方法
doi:10.11939/jass.2015.06.004 中图分类号: P315.3⁺3 文献标志码: A

Characteristics of the $M_L 3.9$ Jinzhai, Anhui, earthquake swarm sequence in 2014

Ni Hongyu^{1,2)} Shen Xiaoqi^{3),*} Hong Dequan^{1,2)}
Li Junhui^{1,2)} Zheng Haigang¹⁾ Zhao Peng¹⁾

1) Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, China

2) National Geophysical Observatory at Mengcheng, Anhui Mengcheng 230026, China

3) First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

Abstract: This paper relocated the $M_L 3.9$ Jinzhai, Anhui, earthquake sequence in 2014 with double-difference earthquake location algorithm firstly, and then calculated the focal mechanisms of stronger earthquakes of the swarm by using Snok and CAP methods, respectively. Finally, the spatio-temporal evolutionary characteristics of source parameters were analyzed. The results show that the Jinzhai earthquake swarm sequence was distributed in the dense scope of $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ without predominant direction. The focal depth is very shallow, being 3—7 km. In addition, the focal mechanisms of larger earthquakes are

^{*} 基金项目 中国地震科技星火计划攻关项目 (XH14026) 和中国地震局 2015 年度震情跟踪定向工作任务 (2015010108) 共同资助.

收稿日期 2015-04-23 收到初稿, 2015-08-31 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: ahqxs@sina.com

basically consistent with each other. The strikes of two nodal planes are separately along the direction of NW and NNE, and the dips of two nodal planes are very high, suggesting the Jinzhai earthquake swarm sequence was caused by strike-slip faulting under the action of horizontally compressed nearly in E-W direction and horizontally extended nearly in N-S direction.

Key words: Jinzhai earthquake swarm; double-difference earthquake location algorithm; focal mechanism solution; CAP method; Snoke method

引言

地震序列相对于孤立地震事件包含更加丰富的震源体和构造信息。根据其震源参数的时空变化特征,结合地质资料研究地震的破裂过程和发震构造,是地震研究历来关注的重点之一(吕坚等,2008;郑勇等,2009;孙长虹等,2012;赵小艳,付虹,2014)。

2014年8月22日以来安徽省金寨县地震活动明显增强,出现震群活动,10月22日后,活动水平进一步增强,发生了多次 $M_L \geq 3.0$ 地震,最大为10月26日 $M_L 3.9$ 地震,截至2015年3月,该震群仍在持续活动。自有现代仪器记载以来,金寨震区周边从未记录到像本次震群这样频度高、持续时间长的地震序列活动,震区原地也未记录到小震活动。由于该震群震源深度浅,有感程度强,地声现象明显,因此造成了较大的社会影响。

本文将采用双差定位方法对金寨震群进行重定位,然后基于Snoke方法和CAP(cut and paste)方法计算震群中 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源机制解,以便深入分析金寨震群序列的特征,进一步探查地震孕育过程及发震构造。

1 金寨震群概况和数据

2014年8月22日以来,安徽金寨县关庙乡发生强有感震群。据中国地震台网^①测定,截至2015年3月31日,共发生 $M_L \geq 0.0$ 地震604次,其中 $M_L \geq 1.0$ 地震365次, $M_L \geq 2.0$ 地震71次, $M_L \geq 3.0$ 地震15次,最大地震为10月26日1时25分发生的 $M_L 3.9$ 地震。图1给出了该震群的 $M-t$ 图,可以看出该震群的地震活动具有明显的阶段性,可分为3个阶段:第一阶段为8月22日—10月21日,两个月内发生145次 $M_L \geq 0.0$ 地震,其中 $M_L \geq 1.0$ 地震75次, $M_L \geq 2.0$ 地震10次,最大震级为 $M_L 2.6$;第二阶段为10月22日—12月31日,

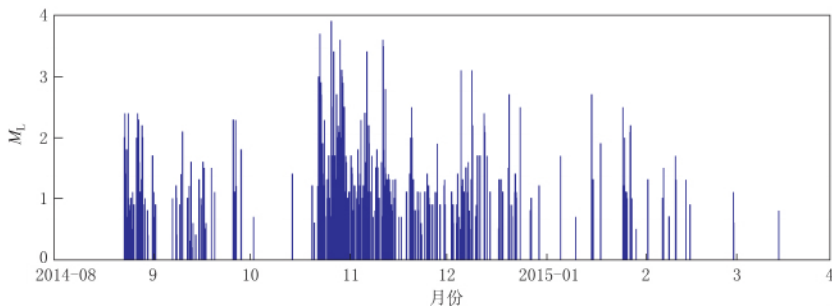


图1 2014年金寨震群的 $M-t$ 图

Fig. 1 $M-t$ plot of Jinzhai earthquake swarm in 2014

^① <http://10.5.202.22/bianmu/validate.jsp>

期间发生 418 次 $M_L \geq 0.0$ 地震, 其中 $M_L \geq 1.0$ 地震 265 次, $M_L \geq 2.0$ 地震 55 次, $M_L \geq 3.0$ 地震 15 次, 最大震级为 M_L 3.9, 该阶段震群活动频度大, 强度突破前期最大震级水平, 显示该震群有加强趋势; 第三阶段为 2015 年 1 月 1 日—3 月 31 日, 发生 41 次 $M_L \geq 0.0$ 地震, 其中 $M_L \geq 1.0$ 地震 25 次, $M_L \geq 2.0$ 地震 6 次, 最大为 M_L 2.7, 频度和强度均较低, 表明金寨震群逐渐衰减趋于平静。

2014 年金寨 M_L 3.9 震群发生在大别山北麓的安徽省六安市金寨县关庙乡, 该地区断裂构造复杂(姚大全等, 2006)。如图 2 所示, 该震群震区附近分布着 NW 向的青山—晓天

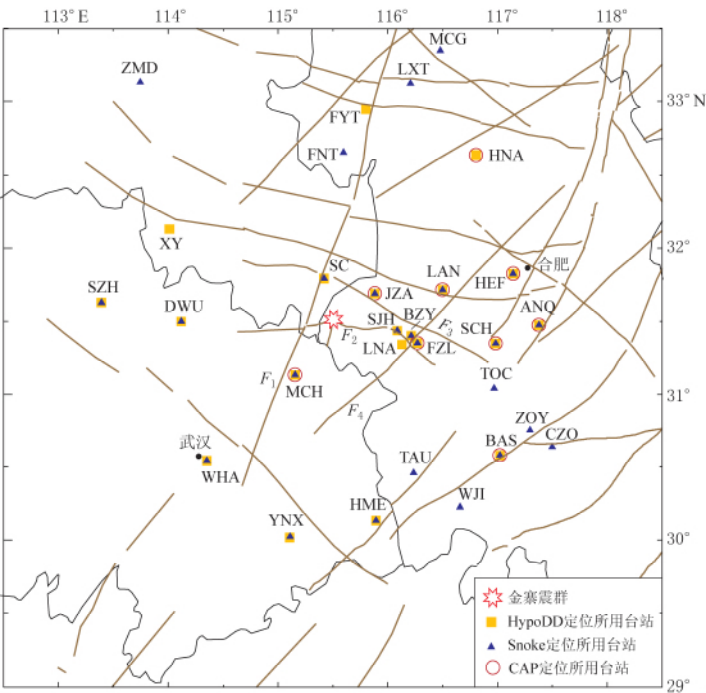


图 2 金寨震群位置及震区内断裂和台站的分布

F_1 : 商城—麻城断裂; F_2 : 青山—晓天断裂; F_3 : 梅山—龙河口断裂; F_4 : 落儿岭—土地岭断裂

Fig. 2 Location of Jinzhai earthquake swarm as well as distribution of seismic stations and faults

F_1 : Shangcheng-Macheng fault; F_2 : Qingshan-Xiaotian fault; F_3 : Meishan-Longhekou fault; F_4 : Luoerling-Tudiling fault

断裂、WNW 向的梅山—龙河口断裂、NNE 向的商城—麻城断裂和 NE 向的落儿岭—土地岭断裂, 其中青山—晓天断裂距离金寨震群最近, 仅约 2 km, 该断裂在震区附近被 NNE 向的断裂 F 切割(邓起东等, 2003), 但目前针对断裂 F 的研究较少。

本文收集了 2014 年 8 月 22 日—2015 年 3 月 31 日安徽、河南和湖北等省份地震台网记录的金寨震群中 15 次 $M_L \geq 3.0$ 地震的波形数据和中国地震台网中心提供的 604 次 $M_L \geq 0.0$ 地震的震相观测报告。采用 HypoDD 方法定位时, 选用震中附近 200 km 以

表 1 金寨地区分层地壳速度模型

Table 1 Layered crustal velocity model of Jinzhai region

序号	深度 /km	层厚 /km	v_p /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0—2	2	4.98
2	2—5	3	5.22
3	5—10	5	5.59
4	10—15	5	6.12
5	15—20	5	6.46
6	20—25	5	6.45
7	25—33	8	7.03
8	33—40	7	8.00

内、能够最大范围包围震中位置的 19 个台站,如图 2 中黄色方块所示;采用 Snoke 方法计算震源机制解时,选取震中附近 300 km 以内 25 个信噪比较高的台站,如图 2 中蓝色三角形所示;采用 CAP 方法计算震源机制解时,选用震中附近 200 km 以内 9 个信噪比较高的台站,如图 2 中红色圆圈所示.表 1 列出了本文重定位和震源机制解计算时所采用的速度结构模型,其中表层波速是采用金寨、六安和合肥地震台表层岩石的实验室测试结果的平均值(刘泽民等,2015),其它各层速度结构采用黄耘等(2011)给出的郯庐断裂带下扬子地块的 P 波速度, S 波速度则由 $v_s = v_p/1.732$ 计算所得.

2 研究方法

2.1 地震重定位方法

HypoDD 方法是近年来发展起来的一种相对定位方法(Waldhauser, Ellsworth, 2000),其原理是通过信号的走时差来反演震源位置,能够有效地消除介质横向不均匀所造成的路径效应,受地壳速度模型的影响较小,定位精度在小区域内可达到百米量级,目前在我国已得到广泛的应用(杨智娴等,2004;黄媛等,2008;房立华等,2013,2014;王未来等,2014;赵小艳,付虹,2014).

2.2 震源机制解反演方法

震源机制解的求解方法早期主要有 P 波初动方法,目前常用的则有 Snoke 方法(Snoke *et al*, 1984; Snoke, 1989)、CAP 方法(Zhao, Helmberger, 1994; Zhu, Helmberger, 1996)和矩张量反演方法(许力生等,2007)等.本文采用 Snoke 和 CAP 方法计算金寨震群中较大地震的震源机制解.

Snoke 方法采用直达 P 波、SV 波和 SH 波的初动和 SV/P、SH/P 或 SV/SH 的振幅比资料联合求解震源机制解(Snoke *et al*, 1984; Snoke, 1989),与 P 波初动方法相比,约束量由 1 个增至 5 个,降低了对台站分布的要求,反演结果更加可靠.刘杰等(2004)将其从 Unix 系统移植到 Windows 系统,并以两次中小地震为例,通过与 P 波初动方法得到的结果进行对比,表明该方法能够准确确定中小地震的震源机制解. CAP 方法则将体波与面波分开拟合,所需台站数量较少,对速度结构和地壳横向变化的依赖性较小.

3 结果

3.1 金寨震群重定位结果

为了保证定位结果的可靠性,本文仅对震相记录清晰且至少有 4 个台站记录的地震事件进行重定位.重定位时使用了震中距在 200 km 以内的 19 个台站的初至震相数据,其中震中距在 140 km 以内选用 Pg 和 Sg 震相,140 km 以上选用 Pn 和 Sn 震相.在地震事件组对时,设最小连接数为 8,最小观测数为 8,震源间距小于 10 km,事件对与台站的距离小于 200 km.经筛选最终得到符合条件的地震共 470 次,初至震相数据共 3 万 1467 条,其中 P 波震相 1 万 8041 条, S 波震相 1 万 3426 条,平均每次地震有 10 条震相数据.令 P 波到时权重为 1.0, S 波到时权重为 0.5,地震定位初始值为台网定位目录的位置,迭代计算时采用共轭梯度法求解方程.

图 3a 给出了中国地震台网观测报告的定位结果,图 3b 给出了本文采用 HypoDD 方法得到的金寨震群 470 个地震事件的震源位置.重定位后 E-W 向、N-S 向和垂直向的平均

定位误差分别为 0.44, 0.35 和 1.14 km. 图 3a 与图 3b 的对比显示, 重定位后走时差的残差大大降低, 平均定位残差由重定位前的 0.12 s 减小至重定位后的 0.03 s. 重定位后的震群序列水平位置更加集中, 主要位于青山—晓天断裂的北侧、断裂 F 的东侧, 无明显的优势分布, 主要集中在 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 范围内; 重定位后的震源深度为 1—8 km, 主要集中在 3—7 km, 相对于中国地震台网观测报告的定位结果, 震源深度更浅, 在 6 km 深度以下的地震所占比例大大增加, 表明该震群的主体破裂位置为上地壳浅表部位. 由图 3 还可以看出随着时间的推移, 该震群的位置并没有发生明显的迁移.

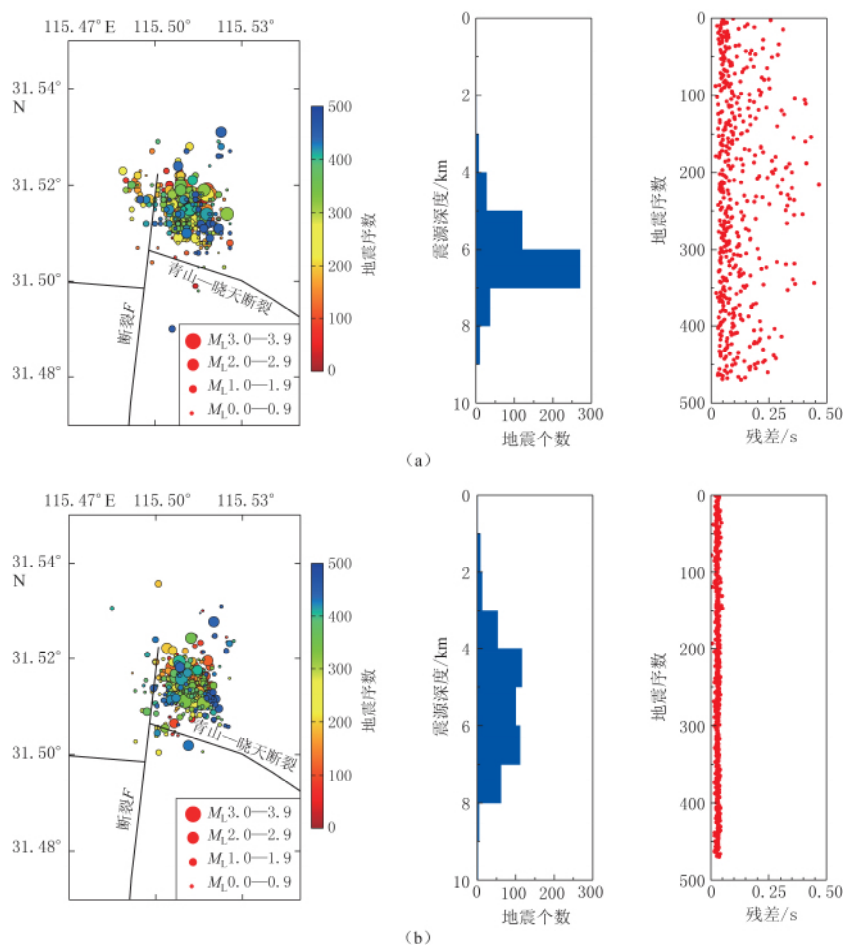


图 3 金寨震群重定位前(a)、后(b)震中、震源深度及定位残差分布

Fig. 3 Distribution of epicenter, focal depth and location residue before (a) and after (b) relocation of Jinzhai earthquake swarm

3.2 金寨震群震源机制解

采用 Snoko 方法计算得到金寨震群中 15 次 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源机制解, 具体计算过程详见倪红玉等(2011)和洪德全等(2013)文章. 以 10 月 26 日 $M_L 3.9$ 地震(目前最大地震)为例, 选用震中附近 300 km 以内 25 个信噪比较高的台站, 获得 28 个 P 波初动(包括直达波和首波)、2 个 SH 波初动和 28 个振幅比数据. 设初动总矛盾数为 0, 以 0.50 为振幅比对数(以 10 为底)的观测值与计算值之差的绝对值上限, 超过上限的振幅比为矛盾振幅比.

设振幅比的矛盾数为 5, 得到 9 组解, 如图 4a 所示. 表 2 列出了所有震源机制解, 可以看出, 9 组解中节面 I 的走向为 125° — 130° , 倾角为 75° — 88° , 滑动角为 2° — 20° , 参数差别较小, 表明震源机制解的约束较好. 选取振幅比矛盾数和总均方差均为最小的第 3 组解作为最佳解(图 4b), 即节面 I 的走向为 125° , 倾角为 79° , 滑动角为 17° ; 节面 II 的走向为 32° , 倾角为 74° , 滑动角为 168° ; P 轴的方位角、倾角分别为 258° 和 3° ; T 轴的方位角、倾角分别为 349° 和 20° ; N 轴的方位角、倾角分别为 158° 和 70° . 以相同的方法得到金寨震群中其余 14 次 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源机制解, 如图 5 所示, 表 3 列出了其具体参数. 在计算过程中, 对于一次地震, 初动数据至少 20 个, 振幅比数据至少 20 个, 初动矛盾比均小于 $1/20$, 振幅比矛盾比均小于 $1/4$, 几组震源机制解的离散程度较低, 表明所得的震源机制解较为可靠.

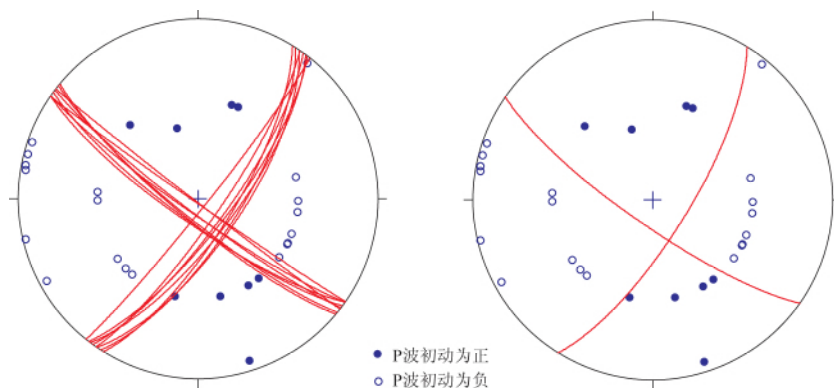


图 4 用 Snoko 方法计算得到的 2014 年 10 月 26 日 M_L 3.9 地震的震源机制解

(a) 所有解; (b) 最佳解

Fig. 4 Focal mechanism solutions of the 26 October 2014 M_L 3.9 earthquake calculated by Snoko method where dots represent positive polarity of P waves, open circles represent negative polarity of P waves

(a) All of solutions; (b) Optimized solution

表 2 用 Snoko 方法计算得到的 2014 年 10 月 26 日 M_L 3.9 地震的震源机制解误差

Table 2 Error of focal mechanism solutions of the 26 October 2014 M_L 3.9 earthquake calculated by Snoko method

序号	震源机制解			矛盾个数		振幅比均方差	总均方差
	走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$	P 波初动	振幅比		
1	125	89	20	0	5	0.28	0.38
2	125	83	19	0	5	0.27	0.37
3	125	79	17	0	4	0.29	0.37
4	130	80	18	0	4	0.27	0.40
5	128	89	15	0	5	0.27	0.40
6	127	84	14	0	4	0.28	0.39
7	126	79	10	0	4	0.30	0.38
8	127	75	3	0	5	0.24	0.42
9	129	81	4	0	5	0.25	0.43

本文同时采用 CAP 方法反演了其中 7 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解, 如表 3 所示, 具体计算过程详见洪德全等(2013)文章. 图 6 给出了 2014 年 10 月 26 日 M_L 3.9 地震(目前

表 3 金寨震群中 15 次 $M_L\geq 3.0$ 地震的震源机制解

Table 3 Focal mechanism solutions of 15 $M_L\geq 3.0$ earthquakes in Jinzhai earthquake swarm

序号	方法	发震时间 月-日	M_L	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
				走向 /°	倾角 /°	滑动角 /°	走向 /°	倾角 /°	滑动角 /°	方位角 /°	倾角 /°	方位角 /°	倾角 /°	方位角 /°	倾角 /°
1	Snoke	10-22	3.0	127	83	29	33	61	172	257	14	354	26	140	60
2	Snoke	10-22	3.7	125	83	19	33	71	173	258	8	350	18	144	70
	CAP		3.7	316	65	16	219	75	154	269	7	176	29	11	60
3	Snoke	10-26	3.9	125	79	17	32	74	168	258	3	349	20	158	70
	CAP		3.9	130	74	19	34	72	163	262	1	353	25	169	65
4	Snoke	10-26	3.7	127	83	29	33	61	172	257	14	354	26	140	60
	CAP		3.7	140	71	-9	232	83	-160	98	20	5	7	256	69
5	Snoke	10-26	3.4	121	85	30	28	61	174	251	17	349	24	130	60
6	Snoke	10-28	3.6	138	82	24	44	67	171	269	10	3	23	156	65
	CAP		3.6	140	66	10	46	81	156	95	10	0	24	207	64
7	Snoke	10-29	3.1	128	76	32	30	59	164	256	11	353	33	149	55
8	Snoke	10-29	3.0	140	71	36	37	56	157	266	10	4	38	164	50
9	Snoke	11-06	3.4	126	82	24	32	67	171	257	10	351	23	144	65
10	CAP	11-06	3.4	145	60	46	28	51	140	265	5	1	53	171	34
	Snoke		3.3	125	83	19	33	71	173	258	8	350	18	144	70
11	Snoke	11-11	3.6	141	85	30	48	61	174	271	17	9	24	150	60
	CAP		3.6	142	80	-8	233	82	-169	98	13	7	1	271	77
12	Snoke	11-11	3.5	140	78	22	46	69	167	272	6	4	24	168	65
	CAP		3.5	145	81	6	54	84	171	99	2	9	11	201	79
13	Snoke	11-11	3.1	136	70	15	41	76	159	89	4	357	24	188	65
14	Snoke	12-05	3.3	138	86	45	44	45	175	262	27	11	33	141	45
15	Snoke	12-08	3.3	137	87	40	44	50	176	264	24	8	30	141	50

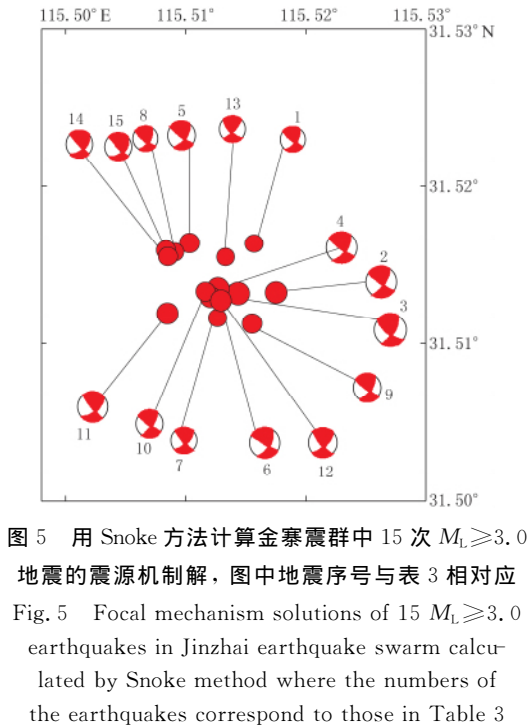


图 5 用 Snoke 方法计算金寨震群中 15 次 $M_L\geq 3.0$ 地震的震源机制解, 图中地震序号与表 3 相对应

Fig. 5 Focal mechanism solutions of 15 $M_L\geq 3.0$ earthquakes in Jinzhai earthquake swarm calculated by Snoke method where the numbers of the earthquakes correspond to those in Table 3

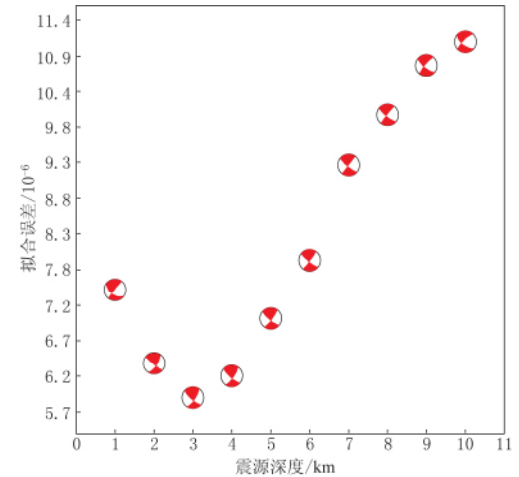


图 6 CAP 方法反演 2014 年 10 月 26 日 $M_L3.9$ 地震震源机制解的误差随震源深度的变化

Fig. 6 The misfit error distribution of focal mechanism solution of the 26 October 2014 $M_L3.9$ earthquake calculated by CAP method as a function of focal depth

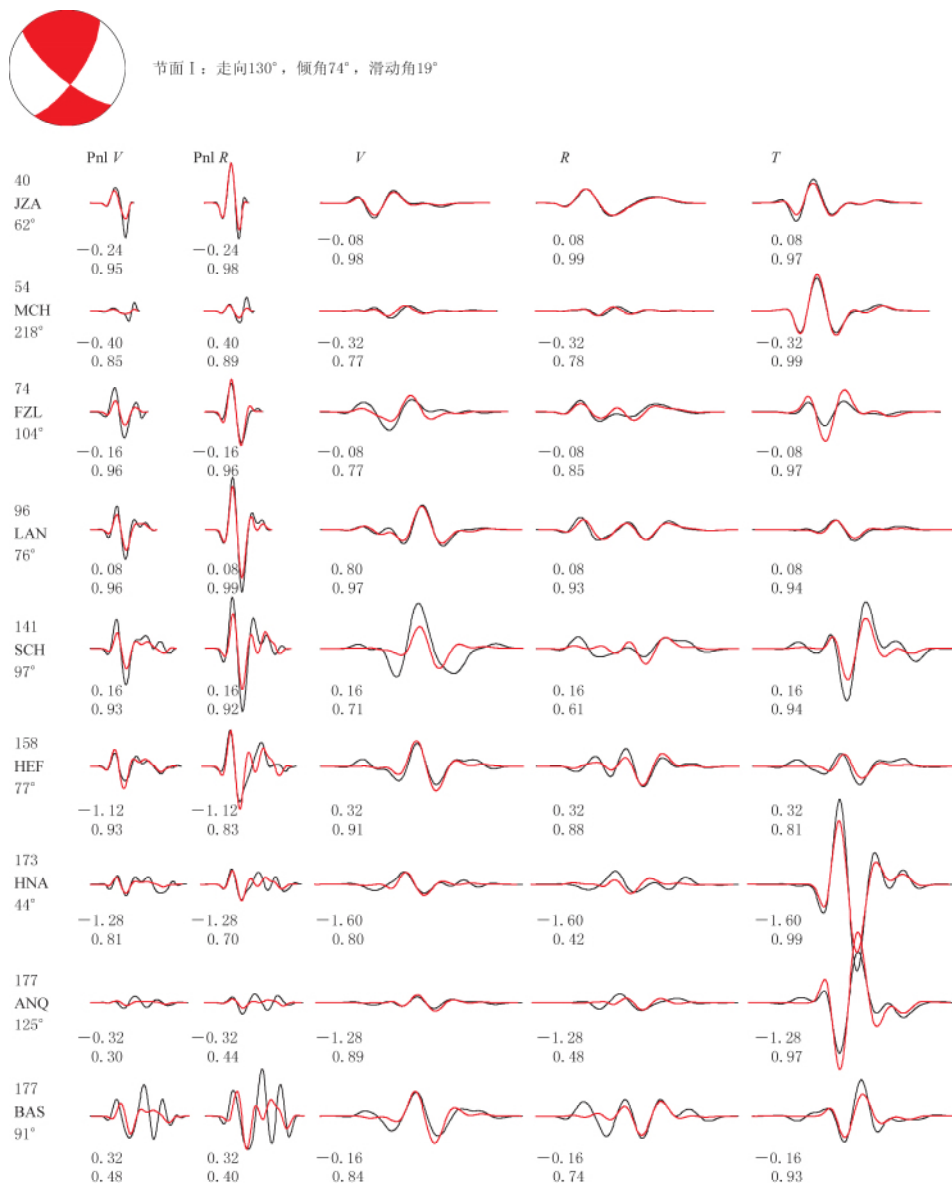


图7 2014年10月26日 M_L 3.9地震的理论地震波形(红色)与观测地震波形(黑色)的对比
 波形左端为台站代码,其上下数字分别表示震中距(单位: km)和方位角;波形下方第一行
 数字为理论地震图相对观测地震图的时移(单位: s),第二行数字为二者的相关系数

Fig. 7 Comparison between synthetic waveforms (red lines) and observed ones
 (black lines) of the M_L 3.9 earthquake on 26 October 2014

The station codes are given at the left of waveforms with epicentral distances (in unit of km) at the top
 and azimuths at the bottom, the numbers of the first line below the waveforms are the time shifts
 (in unit of s), the numbers of the second line are their correlative coefficient

最大地震)的震源机制拟合误差随不同震源深度的变化,可以看出,震源深度为3 km时
 震源机制解的拟合误差最小,表明该地震的震源深度为3 km. 图7给出了3 km深度处理
 论合成波形与实测波形的拟合,可以看出,9个台站的波形拟合整体较好,相关系数大于
 0.6的占84%,反演方差为 5.94×10^{-6} ,表明反演结果较稳定. 反演结果为: 矩震级 $M_w =$

3.6; 节面 I 的走向为 130° , 倾角为 74° , 滑动角为 19° ; 节面 II 的走向为 34° , 倾角为 72° , 滑动角为 163° ; P 轴的方位角、倾角分别为 $262^\circ, 1^\circ$; T 轴的方位角、倾角分别为 $353^\circ, 25^\circ$; N 轴的方位角、倾角分别为 $169^\circ, 65^\circ$. 该参数与 Snoke 方法所得参数非常接近, 其余 6 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解结果均与 Snoke 方法反演结果较为一致, 进一步表明所得结果的可靠性高. 另外在震源机制解反演的同时, 采用 CAP 方法所得到的这 7 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的最佳震源深度为 2—4 km, 与双差定位结果基本一致, 均表明本次金寨震群的震源非常浅.

从表 3 和图 5 可以看出, 金寨震群 15 次 $M_L \geq 3.0$ 地震震源机制解的一致性较好, 这与黄显良等(2015)采用震源一致性参数、体波谱振幅和台站极性的研究结果一致. 15 次地震的震源机制解中: 节面 I 的走向约为 $133^\circ(313^\circ)$, 呈 NW 向, 倾角约为 78° , 滑动角约为 22° , 节面 II 的走向约为 $38^\circ(218^\circ)$, 呈 NNE 向, 倾角约为 68° , 滑动角约为 167° ; P 轴方位角约为 $264^\circ(85^\circ)$, 倾角约为 6° , T 轴方位角约为 $357^\circ(177^\circ)$, 倾角约为 24° . 这表明本次震群可能为近 E-W 向的水平挤压和近 N-S 向的水平拉张应力场作用下的走滑型地震活动, 与前人对该区域构造应力场的研究结果基本一致(刘泽民等, 2011; 倪红玉等, 2012).

4 讨论与结论

本文采用双差定位方法对 2014 年金寨 $M_L 3.9$ 震群序列重定位, 通过 CAP 方法和 Snoke 方法计算了该震群序列中较大地震的震源机制解, 得到的主要结论如下:

1) 基于金寨震区周边的地壳速度结构, 采用 HypoDD 方法对金寨震群进行重定位, 得到 470 个地震事件的基本参数. 结果表明, 金寨震群整体的空间分布无明显的展布方向, 地震密集分布在 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的范围内, 震源深度较浅, 分布于 1—8 km 深度, 3—7 km 区间相对集中, 表明该震群的主体破裂发生在上地壳浅表部位.

2) 计算震源机制解时, 本文采用了原理完全不同的两种方法——Snoke 方法和 CAP 方法, 两者的计算结果较为一致, 保证了分析的可靠性. 结果表明 15 次 $M_L \geq 3.0$ 地震震源机制解的一致性较好, 节面位置基本一致, 两组节面的走向分别呈 NW 向和 NNE 向, 倾角均较高, 可能为近 E-W 向的水平挤压和近 N-S 向的水平拉张应力场作用下的走滑型地震活动, 与前人对该区域构造应力场研究的结果基本一致(刘泽民等, 2011; 倪红玉等, 2012). 在震源机制解反演的同时, 利用 CAP 方法得到 7 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的最佳震源深度, 为 2—4 km, 与双差定位结果基本一致. 这些均表明本次金寨震群的震源深度非常浅, 也与地震造成的有感程度强、地声现象明显等现象一致.

3) 双差定位结果显示金寨震群位于青山—晓天断裂的北侧、断裂 F 的东侧, 其空间分布无明显的展布方向. 震源机制解结果表明, 金寨震群两组节面的走向分别呈 NW 向和 NNE 向, 倾角均较高, 但是无法区分哪个节面为发震断层面. 加之金寨震群的震级较小, 因此很难准确判断其发震断层. 由于青山—晓天断裂是一条活动断裂(姚大全等, 2003), 其与落儿岭—土地岭断裂的交汇部位往往有中强地震发生(1917 年 1 月 24 日霍山 $M6\frac{1}{2}$ 地震和 1917 年 2 月 22 日霍山 $M5\frac{1}{2}$ 地震), 现代小震也非常频繁, 并且震源机制解结果显示青山—晓天断裂的走向与金寨震群震源机制解节面 II 的走向较为吻合, 因此初步推测金寨震群可能与青山—晓天断裂有关.

4) 本文研究表明金寨震群震源机制解的一致性程度较高, 与黄显良等(2015)采用震

源一致性参数、体波谱振幅和台站极性的研究结果一致。国家地震局监测预防司(1997)的研究结果表明,地震序列震源机制解的变化过程存在规律性,具有重要的前兆意义。前震时段小震震源机制解的相对一致性往往是地震活动增强的标志,而震源机制解的相对紊乱往往伴随着余震或地震群活动的减弱(朱航,龙锋,2005)。因此,从震源机制解的一致或紊乱可以判断震群中最大地震是否已经过去(陈颢,1978)。金寨震群的地震活动自2015年1月后呈明显减弱的趋势,截至2015年7月也未记录到 $M_L \geq 3.0$ 地震。因此震群序列震源机制解的一致性程度高是否仅表明应力水平较高,是否一定会发生更大地震,均有待于进一步的震例积累。

5) 自有现代仪器记载以来,金寨震区周边从未记录到像本次震群这样频度高、持续时间长的地震序列活动,震区原地也未记录到小震活动。CAP方法和双差定位方法的结果均表明本次金寨震群的震源深度非常浅,且震区附近存在有4级梯级水库(总库容840万 m^3),该震群是否与水库有关,有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- 陈颢. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, **21**(2): 142–159.
- Chen Y. 1978. Consistency of focal mechanism as a new parameter in describing seismic activity[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **21**(2): 142–159 (in Chinese).
- 邓起东, 徐锡伟, 张先康, 王广才. 2003. 城市隐伏断裂探测的方法和技术[J]. 地学前缘, **10**(1): 83–104.
- Deng Q D, Xu X W, Zhang X K, Wang G C. 2003. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(1): 83–104 (in Chinese).
- 房立华, 吴建平, 王未来, 吕作勇, 王长在, 杨婷, 蔡妍. 2013. 四川芦山 $M_s 7.0$ 级地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, **58**(20): 1901–1909.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, Lü Z Y, Wang C Z, Yang T, Cai Y. 2013. Relocation of mainshock and aftershock sequences of $M_s 7.0$ Sichuan Lushan earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(28/29): 3451–3459.
- 房立华, 吴建平, 王未来, 吕作勇, 王长在, 杨婷, 钟世军. 2014. 云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震余震重定位及其发震构造[J]. 地震地质, **36**(4): 1173–1185. doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.019.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, Lü Z Y, Wang C Z, Yang T, Zhong S J. 2014. Relocation of the aftershock sequence of the $M_s 6.5$ Ludian earthquake and its seismogenic structure[J]. *Seismology and Geology*, **36**(4): 1173–1185. doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2014.04.019 (in Chinese).
- 国家地震局监测预防司. 1997. 测震学分析预报方法[M]. 北京: 地震出版社: 121–151.
- Department of Monitoring and Prediction, State Seismological Bureau. 1997. *Method of Seismological Analysis and Prediction*[M]. Beijing: Seismological Press: 121–151 (in Chinese).
- 洪德全, 王行舟, 倪红玉, 李锋. 2013. 多种数字地震学方法研究2012年7月20日江苏高邮 $M_s 4.9$ 级地震震源机制解和震源深度[J]. 地球物理学进展, **28**(4): 1757–1765. doi:10.6038/pg20130416.
- Hong D Q, Wang X Z, Ni H Y, Li F. 2013. Focal mechanism and focal depth of July 20, 2012 Jiangsu Gaoyou $M_s 4.9$ earthquake[J]. *Progress in Geophysics*, **28**(4): 1757–1765. doi:10.6038/pg20130416 (in Chinese).
- 黄媛, 吴建平, 张天中, 张东宇. 2008. 汶川8.0级大地震及其余震序列重定位研究[J]. 中国科学: D辑, **38**(10): 1242–1249.
- Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, Zhang D Y. 2008. Relocation of the $M 8.0$ Wenchuan earthquake and its aftershock sequence[J]. *Science in China: Series D*, **51**(12): 1703–1711.
- 黄显良, 刘泽民, 郁建芳, 倪红玉, 张炳, 王瑛琛. 2015. 2014年安徽金寨 $M_L 3.9$ 震群序列震源一致性研究[J]. 地震学报, **37**(6): 916–924.
- Huang X L, Liu Z M, Yu J F, Ni H Y, Zhang B, Wang S C. 2015. Consistency parameters of focal mechanism for the $M_L 3.9$ Jinzhai, Anhui, earthquake swarm sequence in 2014[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(6): 916–924 (in Chi-

- nese).
- 黄耘, 李清河, 张元生, 孙业君, 毕雪梅, 金淑梅, 王俊. 2011. 郯庐断裂带鲁苏皖段及邻区地壳速度结构[J]. 地球物理学报, **54**(10): 2549–2559.
- Huang Y, Li Q H, Zhang Y S, Sun Y J, Bi X M, Jin S M, Wang J. 2011. Crustal velocity structure beneath the Shandong-Jiangsu-Anhui segment of the Tancheng-Lujiang fault zone and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(10): 2549–2559 (in Chinese).
- 刘杰, 郑斯华, 康英, 啜永清. 2004. 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, **24**(1): 19–26.
- Liu J, Zheng S H, Kang Y, Chuai Y Q. 2004. The focal mechanism determination of moderate-small earthquake using the first motion and amplitude ratio of P and S wave[J]. *Earthquake*, **24**(1): 19–26 (in Chinese).
- 刘泽民, 刘东旺, 李玲利, 倪红玉, 陈安国, 郑先进. 2011. 利用多个震源机制解求东大别地区平均应力场[J]. 地震学报, **33**(5): 605–613.
- Liu Z M, Liu D W, Li L L, Ni H Y, Chen A G, Zheng X J. 2011. Determination of mean stress field in eastern Dabie region from focal mechanism solution analysis[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(5): 605–613 (in Chinese).
- 刘泽民, 黄显良, 倪红玉, 张炳, 骆佳翼, 王琐琛. 2015. 2014 年 4 月 20 日霍山 $M_S 4.3$ 地震震源构造研究[J]. 地震学报, **37**(3): 402–410. doi:10.11939/jass.2015.03.003.
- Liu Z M, Hang X L, Ni H Y, Zhang B, Luo J J, Wang S C. 2015. Analysis on seismogenic structure of the 20 April 2014 Huoshan $M_S 4.3$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(3): 402–410. doi:10.11939/jass.2015.03.003 (in Chinese).
- 吕坚, 郑勇, 倪四道, 高建华. 2008. 2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 $M_S 5.7$ 、 $M_S 4.8$ 地震的地震震源机制解与震源构造研究[J]. 地球物理学报, **51**(1): 158–164.
- Lü J, Zheng Y, Ni S D, Gao J H. 2008. Focal mechanisms and seismogenic structures of the $M_S 5.7$ and $M_S 4.8$ Jiujiang-Ruichang earthquakes of Nov. 26, 2005[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(1): 158–164 (in Chinese).
- 倪红玉, 刘泽民, 沈小七, 郑先进, 李玲利. 2011. 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, **29**(3): 1–7.
- Ni H Y, Liu Z M, Shen X Q, Zheng X J, Li L L. 2011. Analysis of influencing factors on FOCMEC method: Taking Jiujiang-Ruichang $M_S 5.7$ earthquake as an example[J]. *North China Earthquake Sciences*, **29**(3): 1–7 (in Chinese).
- 倪红玉, 刘泽民, 洪德全, 李玲利, 郑先进, 徐鑫. 2012. “霍山窗”地区现代构造应力场研究[J]. 中国地震, **28**(3): 294–303.
- Ni H Y, Liu Z M, Hong D Q, Li L L, Zheng X J, Xu X. 2013. Study on the recent tectonic stress field in the “Huoshan Seismic Window” region[J]. *Earthquake Research in China*, **27**(4): 467–478.
- 孙长虹, 许丰, 杨玉波, 钱荣毅, 孟小红. 2012. 2003 年青海德令哈 6.7 级地震序列的震源机制解及其构造含义[J]. 地球物理学报, **55**(10): 3338–3346. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.16.
- Sun C H, Xu F, Yang Y B, Qian R Y, Meng X H. 2012. Focal mechanism solutions of 2003 Delingha, Qinghai, $M 6.7$ earthquake sequence and its tectonic implication[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(10): 3338–3346. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.016 (in Chinese).
- 王未来, 吴建平, 房立华, 来贵娟. 2014. 2014 年云南鲁甸 $M_S 6.5$ 地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报, **57**(9): 3042–3051. doi:10.6038/cjg20140929.
- Wang W L, Wu J P, Fang L H, Lai G J. 2014. Double difference location of the Ludian $M_S 6.5$ earthquake sequences in Yunnan Province in 2014[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(9): 3042–3051. doi:10.6038/cjg20140929 (in Chinese).
- 许力生, 蒋长胜, 陈运泰, 李春来, 张天中. 2007. 2004 年首都圈地区中小地震的矩张量反演[J]. 地震学报, **29**(3): 229–239.
- Xu L S, Jiang C S, Chen Y T, Li C L, Zhang T Z. 2007. Moment tensor inversion of small to moderate earthquakes in the capital region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **20**(3): 243–253.

- 杨智娴, 于湘伟, 郑月军, 陈运泰, 倪晓晞, Winston Chan. 2004. 中国中西部地区地震的重新定位和三维地壳结构[J]. 地震学报, **26**(1): 19–29.
- Yang Z X, Yu X W, Zheng Y J, Chen Y T, Ni X X, Chan W. 2004. Earthquake relocation and three-dimensional crustal structure of P-wave velocity in central-western China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **17**(1): 20–30.
- 姚大全, 刘家灿, 李杰, 翟洪涛. 2003. 六安—霍山地震危险区地震活动和地震构造[J]. 地震地质, **25**(2): 211–219.
- Yao D Q, Liu J C, Li J, Zhai H T. 2003. Seismic activities and structures of the Liu'an-Huoshan seismic risk area[J]. *Seismology and Geology*, **25**(2): 211–219 (in Chinese).
- 姚大全, 张杰, 沈小七. 2006. 安徽霍山地区断层活动习性研究的新进展[J]. 地球物理学进展, **21**(3): 776–782.
- Yao D Q, Zhang J, Shen X Q. 2006. New advance of fault active behavior research in Huoshan area, Anhui Province[J]. *Progress in Geophysics*, **21**(3): 776–782 (in Chinese).
- 赵小艳, 付虹. 2014. 2013 年洱源 $M_s5.5$ 和 $M_s5.0$ 地震发震构造识别[J]. 地震学报, **36**(4): 640–650. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.010.
- Zhao X Y, Fu H. 2014. Seismogenic structure identification of the 2013 Eryuan $M_s5.5$ and $M_s5.0$ earthquake sequence [J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(4): 640–650. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.010 (in Chinese).
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 倪四道, 李迎春, 韦生吉. 2009. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学: D 辑, **39**(4): 413–426.
- Zheng Y, Ma H S, Lü J, Ni S D, Li Y C, Wei S J. 2009. Source mechanism of strong aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonic[J]. *Science in China: Series D*, **52**(6): 739–753.
- 朱航, 龙锋. 2005. 单台振幅比方法在马尔康 $M_s4.7$ 级地震序列判断中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, **26**(4): 29–35.
- Zhu H, Long F. 2005. Application of single station amplitude-ratio method to the judgment of Maerkang $M_s4.7$ earthquake sequence[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **26**(4): 29–35 (in Chinese).
- Snoke J A, Munsey J W, Teague A G, Bollinger G A. 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data[J]. *Earthquake Notes*, **55**(3): 15–20.
- Snoke J A. 1989. Earthquake mechanisms[G]//James D E. *Encyclopedia of Geophysics*. New York: Van Nostrand Reinhold Company: 239–245.
- 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.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(1): 91–104.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1634–1641.



吕苗苗 中国地震局地球物理研究所读博士研究生。2012年长安大学固体地球物理学专业毕业，获理学学士学位。现主要从事地震定位、震源机制解和地球内部深部结构方面的研究工作。



倪红玉 安徽省地震局预报研究中心工程师。2005年安徽师范大学物理学专业毕业，获理学学士学位；2008年中国科学技术大学物理化学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事水等重要大气分子的近红外弱吸收带的研究工作，现主要从事震源机制、视应力、构造应力场和地震预测等方面的研究工作。



张佩 中国科学技术大学地球和空间科学学院在读硕士研究生。2012年吉林大学地球物理学专业毕业，获理学学士学位。现主要从事微地震震源机制反演方法的研究工作。SEG学生会会员。



李勇江 中国地震局地球物理勘探中心实习工程师。2011年长江大学固体地球物理学专业毕业，获理学学士学位；2015年中国地震局地球物理研究所地球探测与信息技术专业毕业，获工学硕士学位。现主要从事重力观测、资料处理及地震监测预报方面的研究工作。



黄显良 安徽省地震局地震工程研究院高级工程师。1996年安徽大学数理统计专业毕业，获理学学士学位；2005年中国科学技术大学固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事地震观测技术和地震预测预报方法的研究工作，现主要从事地震中长期预报方面的研究工作。安徽省地震学会理事。



韩晓明 内蒙古自治区地震局高级工程师。2004年河南理工大学大地测量专业毕业，获工学学士学位；2007年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。现主要从事地震学和地震预测方法的研究与应用工作。内蒙古自治区地震学会会员。