

黄显良, 刘泽民, 郁建芳, 倪红玉, 张炳, 王琐琛. 2015. 2014年安徽金寨 M_L 3.9 震群序列震源一致性研究. 地震学报, 37(6): 916-924. doi:10.11939/jass.2015.06.003.

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. *Acta Seismologica Sinica*, 37(6): 916-924. doi:10.11939/jass.2015.06.003.

2014年安徽金寨 M_L 3.9 震群序列 震源一致性研究^{*}

黄显良 刘泽民^{*} 郁建芳 倪红玉 张炳 王琐琛

(中国合肥 230031 安徽省地震局)

摘要 首先采用P波、SV波和SH波的极性和振幅比联合求解2014年安徽省金寨 M_L 3.9震群序列的震源机制解, 并在此基础上计算得到该震群序列的震源一致性参数和P轴方位角随时间的变化; 然后基于震区附近3个台站记录到的该震群序列的地震波形, 计算其体波谱振幅相关系数, 同时读取震区附近3个台站记录到的该震群序列中115次 $M_L \geq 1.5$ 地震的极性。研究结果表明: 金寨 M_L 3.9震群序列的地震震源机制解绝大多数为压性走滑型, P轴方位角较为一致; 其震源一致性参数处于较低水平, 体波谱振幅相关系数较高; 台站所记录到的地震极性也较为一致。该结果表明金寨 M_L 3.9震群序列的震源一致性程度非常高。

关键词 金寨 M_L 3.9震群序列 震源机制解 谱振幅相关系数 震源一致性参数

doi:10.11939/jass.2015.06.003 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Consistency parameters of focal mechanism for the M_L 3.9 Jinzhai, Anhui, earthquake swarm sequence in 2014

Huang Xianliang Liu Zemin^{*} Yu Jianfang Ni Hongyu
Zhang Bing Wang Suochen

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

Abstract: The Jinzhai M_L 3.9 earthquake swarm sequence occurred in Guanmiao town, Jinzhai county, Anhui Province in 2014, which continued in high activity frequency for a long duration. The focal depths of earthquakes in Jinzhai swarm were all shallow and the region was about 5 kilometers. Firstly, the consistency parameters of focal mechanism and the change in P-axis azimuth with time for the Jinzhai sequence have been obtained from the focal mechanism data which were solved by combining the polarity of P, SV and SH waves with their amplitude ratios. Then the correlation coefficients of spectral amplitude of the Jinzhai sequence were calculated based on the seismic waveforms recorded by three stations near the epicenter of Jinzhai M_L 3.9. And the polarity of first motions of

* 基金项目 中国地震局地震科技星火计划重点项目(XH15021)和青年项目(XH13008Y)共同资助。

收稿日期 2015-01-05 收到初稿, 2015-08-29 决定采用修改稿。

^{*} 通讯作者 e-mail: liuzemin@163.com

115 earthquakes with $M_{\text{L}} \geq 1.5$ recorded by three stations close to the earthquake region had been read at the same time. The results show that the main type of focal mechanism of Jinzhai earthquake swarm sequence is transpressional strike-slipping, and the P -axis azimuth is more consistent for the earthquakes. The consistency parameters of focal mechanism are at a low level, while the correlation coefficient of spectral amplitude are relatively high, and the polarities of first motion recorded by stations are also consistent. All mentioned above suggests that the consistency parameters of focal mechanism of Jinzhai earthquake sequence are in a very high degree.

Key words: Jinzhai earthquake swarm sequence; focal mechanism solution; correlation coefficient of spectral amplitudes; consistency parameter

引言

地震是地下介质受到应力作用产生破裂的自然现象, 研究中强地震震源区应力状态的时空分布, 对于了解地震的孕育过程具有重要意义。陈颙(1978)通过对一些强震震例的分析研究发现, 强震前震源机制趋于一致的现象时有发生, 提出可用前震震源机制的一致性来描述地震活动性, 同时给出了判定地震危险性的实例。后续的相关研究也较多。例如: 王俊国和刁桂苓(2005)的研究表明千岛岛弧 $M_{\text{w}} \geq 7.5$ 地震前曾出现震源机制解与构造应力场的一致性参数降低的现象; 泽仁志玛等(2010)对 2006 年千岛岛弧 $M_{\text{w}} 8.3$ 地震和 2001 年秘鲁 $M_{\text{w}} 8.4$ 地震的研究表明, 大震发生前孕震区震源一致性参数比较低, 震源机制解与构造应力场的差异较小, 说明前震受到了震源区应力场的统一作用, 而主震发生后震源一致性参数比较高, 说明后续地震的震源机制散乱, 表明背景应力场的控制作用开始减弱。

2014 年 8 月以来安徽省金寨县关庙乡发生 $M_{\text{L}} 3.9$ 震群序列, 该震群序列持续时间长, 震区原地 1970 年以来未记录到小震活动, 说明该震群活动的位置不是老震区。

本文将利用 P 波、 SV 波和 SH 波的极性和振幅比联合求解震源机制的方法(Snoke *et al.*, 1984; Snoke, 1989)反演金寨 $M_{\text{L}} 3.9$ 震群序列中较大地震的震源机制解, 并根据震源机制解的一致性参数(陈颙, 1978)及震源机制解 P 轴方位角的变化分析该震群序列的震源一致性, 同时利用震区附近 3 个地震台站的极性一致性和体波谱振幅相关系数(Lund, Bo-ovarsson, 2002)综合考察该震群序列的震源一致性相似程度。

1 地震地质背景及震群序列基本情况

1.1 地震地质背景

2014 年金寨 $M_{\text{L}} 3.9$ 震群序列发生在安徽省六安市金寨县关庙乡。该地区位于大别山北麓, 断裂构造复杂(姚大全等, 2006), 展布有 WNW 向的磨子潭—晓天断裂、梅山—龙河口断裂和 NE 向的落儿岭—土地岭断裂、团风—温泉断裂(亦称商城—麻城断裂)。金寨震群位于磨子潭—晓天断裂南侧, 距其约 2 km, 震区附近固定地震台站相对密集。鉴于该震群序列地震频发, 安徽省地震局先后在震区附近架设了 3 个流动地震台, 分别距震中 2, 5 和 13 km。图 1 给出了研究区内断裂和台站的分布。

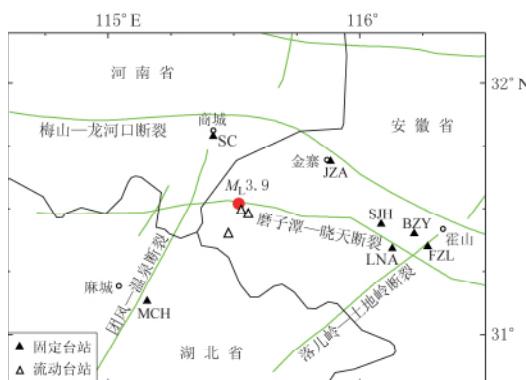


图 1 金寨 $M_L 3.9$ 地震震中位置及震区
断裂和台站分布

Fig. 1 Epicentral location of Jinzhai $M_L 3.9$ earthquake and distribution of faults and stations
Solid triangles represent fixed seismic stations,
and open triangles represent temporary ones

定位组对过程中某些地震不满足条件而
被剔除。

图 2 给出了采用双差定位法得到的
金寨震群序列地震精定位结果。双差精
定位结果显示, 该序列地震的震源深度
主要集中在 5—6 km, 占所定位地震总数的
88%, 表明该震群序列的震源深度较
浅, 分布也相对集中。从地震的空间分布
也可以看出, 该序列的地震主要分布在
5 km 范围内, 震中位置非常集中。由于
该序列的地震在空间上未出现明显的线
性分布, 因此很难确定其与周边断裂的
关系。从时间上可以看出, 该震群序列分
为两个活跃时间段: 第一个活跃时间段为 8 月底到 9 月底, 序列地震活动强度相对较低;
第二个活跃时段为 10 月下旬到 11 月底, 序列地震活动强度和频次均较高, 震群序列活动
有增强的趋势。

2 震源机制解反演及震源一致性参数

Snoke 等提出了利用 P 波、SV 波和 SH 波的极性和振幅比联合求解震源机制的方法,
简称为 Snoke 方法(Snoke *et al.*, 1984; Snoke, 1989)。该方法利用 P 波、SV 波和 SH 波的
极性, 以及 SV/P 和 SH/P 振幅比等 5 个约束信息进行震源机制反演。与 P 波极性法和垂
直向 SV/P 振幅比方法相比, 该方法约束量大为增加, 反演结果更为可靠。故本文采用
Snoke 方法来反演金寨震群序列中地震的震源机制解。

倪红玉等(2011)研究表明地壳速度结构模型对震源机制解的反演精度存在一定影响。

1.2 金寨震群序列基本情况

本文收集整理了 2014 年 8 月 1 日—
11 月 30 日安徽省地震台网记录到的金寨
地震资料, 包括安徽省的固定台站和所架
设的 3 个流动台站, 以及河南省、湖北省
紧邻震中区台站所记录到的地震波形数
据。在此基础上, 剔除震相不清晰的资料,
选取不少于 3 个台站记录到的 $M_L \geq 1.5$ 地
震, 共计 115 次地震, 3046 条震相数据。

在对所选的 115 次地震进行双差重定
位(Waldhauser, Ellsworth, 2000)的过
程中, 选取震相观测记录数不少于 6 且震源
间距小于 10 km 的地震事件进行组对, 利
用共轭梯度法反复迭代后得到了 113 次地
震的精确震源位置, 其余两次地震由于重

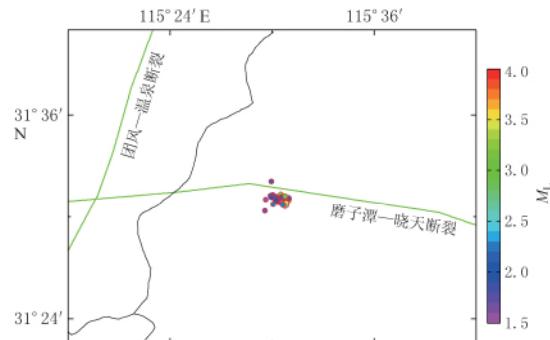


图 2 用双差定位法得到的金寨震群地震精定位结果

Fig. 2 Relocation result of the Jinzhai earthquake
swarm sequence by using double difference
location algorithm

经过对比, 本文反演采用了表1所示的速度结构模型, 其中表层波速均为金寨、六安和合肥地震台表层岩石实验室测试结果的平均值, 其它各层速度均引自黄耘等(2011)给出的郯庐断裂带下扬子地块的P波速度, S波速度由 $v_S = v_P / 1.732$ 计算得到。

鉴于篇幅所限, 表2仅列出了金寨震群序列中12次 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源机制解详细结果。可以看出, 除11月11日7时17分金寨 M_L 3.1地震的震源机制解为张性走滑型外, 其余 $M_L \geq 3.0$ 地震均为压性走滑型, 表明该震群序列的震源机制解具

有较好的一致性。从表2中还可以看到, 该震群序列的12次 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源机制解P轴方位角集中在 251° — 278° , 其中有7次地震的P轴方位角集中在 256° — 260° , 这说明从P轴方位角也可以看出该震群序列的震源机制一致程度很好。

表2 金寨震群 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源机制解Table 2 Focal mechanism solutions of $M_L \geq 3.0$ earthquakes of the Jinzhai earthquake swarm

年-月-日	时:分	北纬/°	东经/°	M_L	节面I			节面II			P轴		T轴	
					方位角/°	倾角/°	滑动角/°	方位角/°	倾角/°	滑动角/°	方位角/°	倾角/°	方位角/°	倾角/°
2014-10-22	04:29	31.52	115.52	3.0	127	83	29	33	61	172	257	14	354	26
2014-10-22	13:34	31.52	115.52	3.7	125	83	19	33	71	173	258	8	350	18
2014-10-26	01:25	31.52	115.52	3.9	129	69	22	31	69	158	260	0	350	30
2014-10-26	02:16	31.52	115.51	3.7	127	83	29	33	61	172	257	14	354	26
2014-10-26	23:05	31.52	115.51	3.3	121	85	30	28	61	174	251	17	349	24
2014-10-28	19:33	31.52	115.52	3.6	138	82	24	44	67	171	269	10	3	23
2014-10-29	09:38	31.51	115.51	3.0	128	76	32	30	59	164	256	11	353	33
2014-11-06	06:22	31.51	115.53	3.6	126	82	24	32	67	171	257	10	351	23
2014-11-06	06:31	31.52	115.52	3.3	125	83	19	33	71	173	258	8	350	18
2014-11-11	03:08	31.51	115.52	3.7	141	85	30	48	61	174	271	17	9	24
2014-11-11	07:08	31.51	115.51	3.4	140	78	22	46	69	167	272	6	4	24
2014-11-11	07:17	31.52	115.51	3.0	323	81	-5	53	85	-171	278	10	188	3

同理, 本文采用Snoke方法计算了金寨震群序列中26次 $M_L \geq 2.3$ 地震的震源机制解, 其中P轴方位角的时间变化进程如图3所示。可以看出, 该震群序列8月底的地震P轴方位角约为 278° , 10月26日 M_L 3.9地震前后P轴方位角约为 258° , 11月以后的地震P轴方位角又转至 278° 附近。刘泽民等(2011)利用震源机制解资料反演了东大别地区的构造应力场, 认为该地区的最大主应力轴方位角为 267° , 整个震群序列的震源机制解P轴方位角变化幅度约为 25° , 与震区构造应力场最大主应力轴方位角的夹角最大约为 10° 。本文结果与刘泽民等(2011)的结果吻合得很好。故从P轴方位角的变化幅度及其与构造应力场的夹角可以看出, 金寨序列地震震源机制解具有较好的一致性。

本文使用应力场的最大和最小主应力轴与震源机制解的P轴、T轴夹角之和的 $1/2$ 作为震源一致性参数, 因此震源一致性参数最小值为 0° , 最大值为 90° 。刘泽民等(2011)基于东大别地区的现代地震震源机制解资料, 利用应力张量平均法计算得到了该地区的构造

表1 速度结构模型

Table 1 Model of velocity structure

深度/km	层厚/km	v_P /(km·s ⁻¹)	v_S /(km·s ⁻¹)
0—2	2	4.98	2.94
2—5	3	5.22	3.01
5—10	5	5.59	3.23
10—15	5	6.12	3.53
15—20	5	6.46	3.73
20—25	5	6.45	3.72
25—33	8	7.03	4.06
33—40	7	8.00	4.62

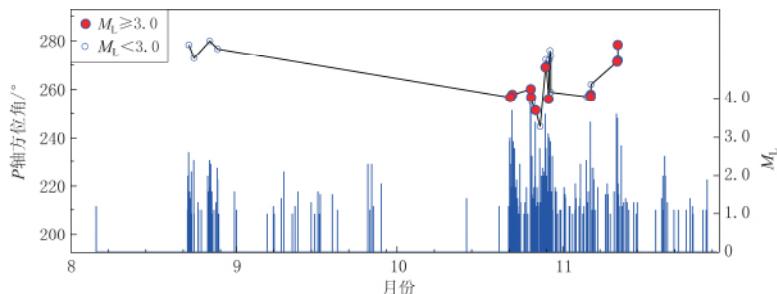


图3 金寨震群序列的 M_t 及震源机制解 P 轴方位角的时序分布

Fig. 3 M_t plots and temporal distribution of the P -axis azimuth of the focal mechanism for the Jinzhai earthquake swarm sequence

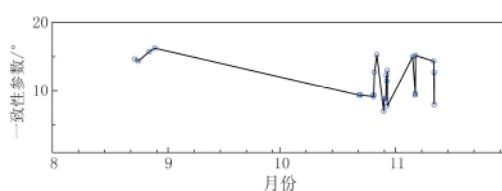


图4 金寨震群序列震源一致性参数的时序分布

Fig. 4 Temporal distribution of the consistency parameters of focal mechanism for the Jinzhai earthquake swarm sequence

应力场特征,认为最大主应力轴方位角为 267° ,倾角为 5° ,最小主应力轴方位角为 358° ,倾角为 4° .本文将刘泽民等(2011)的东大别地区的构造应力场方向作为金寨震群附近的构造应力场方向,利用金寨震群序列26次 $M_L \geq 2.3$ 地震的震源机制解,计算得到了该震群序列的震源一致性参数随时间的变化曲线,如图4所示.可以看出,该震群序列的震源一致性参数介于 7° — 17° ,而震源一

致性参数理论变化范围为 0° — 90° ,该值越小说明震源一致性程度越高.金寨震群序列的震源一致性参数一直处于较低值,说明其震源一致性非常好.

3 体波谱振幅相关系数

3.1 原理

对于同一震源区的两次地震(或者两次地震之间的距离远小于地震与台站之间的距离),Lund和Boovarsson(2002)提出可以由同一台站的地震记录反演两次地震直达P波、S波的零频谱振幅值,通过计算其相关系数来描述其震源机制是否相似.由于体波谱振幅相关系数给出了两次震中位置相近的地震事件在不同方位的零频谱值分量分布的相似性量度,因此可以用其相关系数来描述两次地震震源机制解的几何特性相似程度.若体波谱振幅相关系数接近1,则各台记录的两次地震的波形应相似,震源机制解的几何特性也应相近;若相关系数比较低,则两次地震的震源机制解的几何特性具有不同程度的差异.因此,体波谱振幅相关系数可以认为是其震源机制异同的归一化数值描述.

3.2 金寨震群序列谱振幅相关系数的时间变化

本文采用金寨震群震中附近波形记录较好的商城台(震中距31 km,方位角 344°)、金寨台(震中距40 km,方位角 61°)和麻城台(震中距52 km,方位角 218°)的波形资料,计算了该震群中8月1日—11月30日115次 $M_L \geq 1.5$ 地震的多台谱振幅相关系数,计算过程中删除了由于发震时刻较近波形存在相互叠加的地震,具体计算步骤与程序详见刘泽民等(2010)文章.图5a给出了金寨震群中 $M_L \geq 1.5$ 地震谱振幅相关系数的滑动平均时序曲线,

其累积窗长为 5 次地震, 滑动步长为 1 次地震。可以看出: 震群的第一组活跃时段为 8 月 22 日—9 月 28 日, 最大地震为 M_L 2.6, 其中 8 月 22 日—9 月 1 日较为密集, 该阶段谱振幅相关系数较高, 在 0.91—0.97 之间波动, 其平均值为 0.95, 9 月 2 日—9 月 28 日频度开始降低, 谱振幅相关系数也降低, 在 0.71—0.92 之间波动, 其平均值为 0.81; 第二组活跃时段从 10 月 20 日开始, 最大地震为 M_L 3.9, 震群活动水平明显上升, 谱振幅相关系数在 0.80—0.97 之间波动, 其平均值为 0.90, 整体较高。图 5b 给出了其中 57 次 $M_L \geq 2.0$ 地震的谱振幅相关系数的滑动平均时序曲线。可以看出, 谱振幅相关系数在 0.86—0.97 之间波动, 其平均值为 0.93, 持续处于较高水平。该震群序列中 $M_L \geq 1.5$ 和 $M_L \geq 2.0$ 地震的体波谱振幅相关系数的时序曲线, 随着地震序列的谱相关系数呈起伏变化, 但其整体仍处于较高水平 (≥ 0.9), 由此可以推断该震群的震源机制相似性较好。

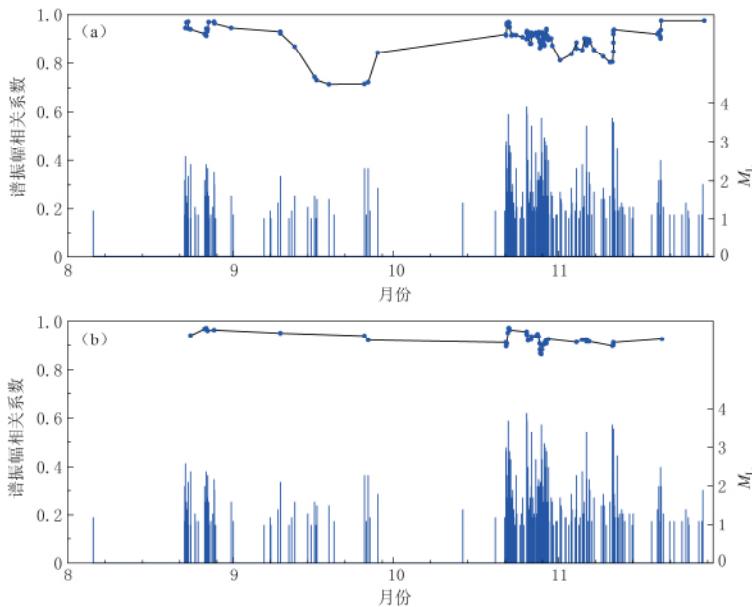


图 5 金寨震群的 $M-t$ 及体波谱振幅相关系数时序分布

(a) $M_L \geq 1.5$; (b) $M_L \geq 2.0$

Fig. 5 $M-t$ plots and temporal distribution of the correlation coefficient of spectral amplitude for the Jinzhai earthquake swarm sequence
(a) $M_L \geq 1.5$; (b) $M_L \geq 2.0$

4 台站极性分布

震群序列台站记录到的(地震动)极性也能反映震源一致性的相似程度, 若多个台站记录到的地震极性一致, 则可认为该序列地震的震源机制一致, 否则较离散。本文收集了商城、金寨、麻城台记录的金寨震群中的 115 次 $M_L \geq 1.5$ 地震的 P 波垂直向极性, 给出了上述 3 个台站所记录到的地震极性时间曲线, 如图 6 所示。可以看出: 商城台记录到的地震极性全部为正, 金寨台除 3 次地震为正外, 其余均为负, 商城台与金寨台所记录到的地震极性表现为高度一致; 而麻城台所记录的极性则较为混乱。麻城台的方位角为 218° , 由表 2 所列的金寨序列较大地震的震源机制解详细结果可以看出, 震源机制有一个节面的方位角集中分布在 30° — 50° , 而麻城台正好位于该节面附近, 因此导致了麻城台所记录到的地

震极性较为混乱。根据商城台与金寨台极性高度一致的现象,本文认为金寨震群整体极性分布优势明显,从时间上看,截至 11 月底,极性分布仍没有出现紊乱。由于极性的一致性可以间接地反映震源机制的一致性,故本文认为该震群序列的震源一致性较好。

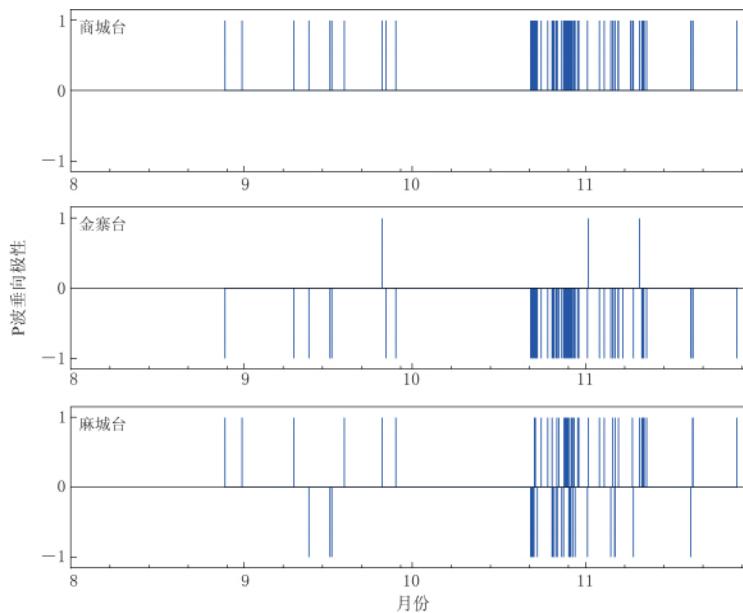


图 6 商城、金寨和麻城台所记录到的金寨震群地震极性时间变化图

+1 表示 Pg 波垂直向极性为正, 0 表示极性不清, -1 表示 Pg 波垂直向极性为负

Fig. 6 Variations of seismic initial polarity recorded by the stations Shangcheng,

Jinzhai and Macheng from the top down

+1 represents upcast polarity of vertical Pg wave, -1 represents downcast polarity, and 0 represents indistinct

5 讨论与结论

2014 年安徽省金寨县关庙乡发生显著震群序列,该震群自 8 月开始活动,截止到 11 月底,共记录到地震 502 次,其中 $M_L \geq 3.6$ 地震 6 次,最大为 $M_L 3.9$ 。双差定位研究显示,该震群序列的震源深度较浅,88% 的序列地震的震源深度集中在 5—6 km。从空间分布看,该震群序列位于磨子潭—晓天断裂南侧 2 km 附近,序列地震集中在约 5 km 的范围内,空间分布方向特征不明显。倪红玉等(2015)通过地震精定位也认为,金寨震群的空间分布无明显的展布方向,地震密集分布在 2 km \times 2 km 范围内,震源深度较浅,在 3—7 km 深度区间相对集中。从时间上看,该震群序列主要划分为两个活跃时间段:第一个活跃时间段为 8 月底至 9 月底,序列地震活动强度相对较低;第二个活跃时段为 10 月下旬至 11 月底,序列地震活动强度、频次均较高。鉴于该震群序列震级有走强的趋势,本文采用多种方法综合研判了该震群序列的震源一致性。

金寨序列地震的震源机制解精确反演显示,绝大多数地震统一表现为压性走滑型, P 轴方位角为 251° — 278° , 波动幅度较小, P 轴方位角与震区构造应力场最大主压应力轴方位角的最大夹角约为 10° ,这说明该序列地震震源机制解的一致性非常好。本文定量计算了该序列地震的震源一致性参数,结果显示其变化范围为 7° — 17° ,而理论变化范围为

0°—90°, 从震源一致性参数可以定量说明该震群序列的震源一致性非常好。倪红玉等(2015)采用 Snock 方法和 CAP (cut and paste) 方法计算了金寨震群较大地震的震源机制解, 结果表明 $M_L \geq 3.0$ 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, 高倾角。本文结果与倪红玉等(2015)的研究结果非常吻合。

金寨序列地震的体波谱振幅相关系数计算结果表明, 虽然随着该震群序列的发展, 谱振幅相关系数呈起伏波动, 但整体仍处于较高水平(≥ 0.9), 同时震区附近台站记录到的地震极性的优势分布明显。由此可推断该震群的震源一致性程度非常高。

金寨震区附近的东大别地区有 4 座大型水库, 分别为梅山水库、响洪甸水库、佛子岭水库和磨子潭水库, 均始建于 20 世纪五六十年代, 其蓄水时间与本次震群活动时间相差甚远, 加上 4 座水库与本次震群在空间上也存在一定距离, 且震群活动前后 4 座水库的水位变化幅度与往年基本相同, 因此本文认为本次震群活动与上述 4 座大型水库的蓄水无关。

此外, 金寨震群附近 3 km 内还有两座小型电站, 分别为 2007 年建成的黄谷滩电站(库容约 100 万 m^3)和 2012 年建成的关庙电站(库容约 400 万 m^3), 两座小型电站主要用于民用发电, 无水位观测。据震区政府介绍, 金寨震群活动前后两电站处于正常发电水平, 水位变化幅度相对较小。虽然这两座小型电站库容非常小, 蓄水时间也早于震群活动时间, 但由于其距震群位置非常近, 因此震群活动是否受该电站蓄水影响尚不确定。

崔子健等(2012)通过计算 5 个云南西北部发生的小震群序列, 认为强震前小震群序列的谱振幅相关系数明显增大, 接近于 1.0, 震源机制相似性显著; 而非前震序列谱振幅相关系数则明显较低, 震源机制相似程度较弱。黄浩和付虹(2014)使用相同的方法计算了滇西地区 2008—2011 年的 6 个 $M_s \geq 6.0$ 地震序列的谱振幅相关系数, 认为振幅谱相关系数较高的地震序列也有可能是主余型序列, 即谱振幅相关系数高的地震序列不一定都是前震序列。因此, 较低的谱振幅相关系数可以作为判别后续无更大地震的指标, 但较高的相关系数可能仅仅反映了较高的应力水平, 无法作为直接前震的判据。因此, 虽然金寨震群序列的体波谱振幅相关系数较高, 但也只能说明其震源一致性相似, 仅反映震区应力水平较高, 而不能作为直接前震的判据。同时本文认为金寨震群的震源一致性较好, 也可能只反映震源区处于较高的应力状态, 而在较高的应力水平下, 是以发生中强地震还是以发生多次中等地震的方式释放其应变能, 尚需进一步深入研究。

参 考 文 献

- 陈颙. 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).
- 崔子健, 李志雄, 陈章立, 赵翠萍, 郑斯华, 周连庆. 2012. 判别小震群序列类型的新方法研究: 谱振幅相关分析法[J]. 地球物理学报, 55(5): 1718—1724.
- Cui Z J, Li Z X, Chen Z L, Zhao C P, Zheng S H, Zhou L Q. 2012. A study on the new method for determining small earthquake sequence type: Correlation analysis of spectral amplitude[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(5): 1718—1724 (in Chinese).
- 黄浩, 付虹. 2014. 2008 年以来滇西地区地震序列的谱振幅相关系数变化特征[J]. 地震学报, 36(4): 631—639.
- Huang H, Fu H. 2014. Characteristics of the correlation coefficient of spectral amplitude of earthquake sequences in western Yunnan region since 2008[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 36(4): 631—639 (in Chinese).
- 黄耘, 李清河, 张元生, 孙业君, 毕雪梅, 金淑梅, 王俊. 2011. 鄱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).
- 刘泽民, 刘东旺, 夏仕安, 徐鑫, 龙爱军, 缪鹏. 2010. 体波谱振幅相关系数法在肥东地震序列震后判定中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 31(5): 13–16.
- Liu Z M, Liu D W, Xia S A, Xu X, Long A J, Miao P. 2010. The application of correlation coefficient of body-wave spectral amplitudes in the tendency determination after the Feidong earthquake sequence[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 31(5): 13–16 (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).
- 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 $M_{S5.7}$ 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 $M_{S5.7}$ earthquake as an example[J]. *North China Earthquake Sciences*, 29(3): 1–7 (in Chinese).
- 倪红玉, 沈小七, 洪德全, 李军辉, 郑海刚, 赵朋. 2015. 2014 年金寨 $M_{L3.9}$ 震群序列特征研究[J]. 地震学报, 37(6): 925–936.
- Ni H Y, Shen X Q, Hong D Q, Li J H, Zheng H G, Zhao P. 2015. Characteristics of the $M_{L3.9}$ Jinzhai, Anhui, earthquake swarm sequence in 2014[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 37(6): 925–936 (in Chinese).
- 王俊国, 刁桂苓. 2005. 千岛岛弧大震前哈佛大学矩心矩张量(CMT)解一致性的预测意义[J]. 地震学报, 27(2): 178–183.
- Wang J G, Diao G L. 2005. Consistent CMT solutions from Harvard University before the great earthquakes in Kurile Islands and its significance for earthquake prediction[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 27(2): 178–183 (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).
- 泽仁志玛, 刁桂苓, 李志雄, 王晓山, 冯向东. 2010. 大震前显示的地震震源机制解趋于一致的变化[J]. 地震, 30(1): 108–114.
- Zeren Z M, Diao G L, Li Z X, Wang X S, Feng X D. 2010. Consistent distribution of stress before strong earthquake from focal mechanisms[J]. *Earthquake*, 30(1): 108–114 (in Chinese).
- Lund B, Boosarsson R. 2002. Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 92(6): 2419–2433.
- Snoke J A, Munsey J W, Teague A G. 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 mechanism[G]//James D E eds. *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.

作者简介



吕苗苗 中国地震局地球物理研究所在读博士研究生, 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。