

黄耘、孙业君、杨云等 2011, 江苏及邻区震群活动特征分析, 中国地震, 27(1), 72~82。

江苏及邻区震群活动特征分析

黄耘 孙业君 杨云 叶碧文

江苏省地震局, 南京市卫岗 3 号 210014

摘要 系统地整理研究了江苏及其邻近地区 36 次小震群活动,总结了震群活动的参数特征,探讨了震群活动与大震的关系,分析检验了前兆震群类型的判定指标。江苏地区震群活动分布集中,强度以 M_L 2.0~3.9 地震为主,震群序列总频次在 30 次以下居多,持续时间在 15 天以内的震群占总数的 55%;震群序列中地震总频次和震群持续时间与震群的最大震级之间不成正比;研究区 78% 震群发生后对应 M 4.6 以上中强地震,其中 500km 范围内时间间隔在 1 年内的占对应地震总数的 57%,具有一定的中短期地震预测指示意义;震群与未来中强地震的距离较为离散,但尚无在原地发生大地震的震例。震群强度大小与未来中强地震的对应率高低和对应的地震强度大小没有明显的相关关系,震群频次的多少与其后发生地震的对应率高低也没有明显的相关关系。采用 U_p 组合或者全组合判定震群类型的效果相对较好,检验正确率约占总数的 50%,但总体而言效果并不十分有效,需要参考其它方法和手段综合判定。

关键词: 江苏及邻区 震群活动 参数特征 震群类型的判定指标

[文章编号] 1001-4683(2011)01-072-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

震群活动是地壳变动的结果,是地壳运动增强的客观反映,当大范围构造应力出现增强时,首先会在介质薄弱的部位发生显著地震或以震群活动的方式表现出来。那么这些震群活动与大地震的孕育和发生是否存在直接关系?它们是否为地震前兆?这些是很多地震工作者努力要研究的问题。不少研究表明,一些震群发生后,在短时间、近距离内往往有中强以上地震发生,如宋治平等(2001)研究了华北地区 1970 年以来震群活动认为,震群活动的迁移性与阶段性对强震的中期预测具有一定指导意义。姜秀娥等(1983)的研究表明,唐山大震前在震中区外围形成震群活动环。也有的震群并不与中强地震对应,李兴才等(1983)在研究中发现,某些震群活动的高潮滞后于大地震,认为附近的震群活动是由大地震的触发的。那么哪些震群活动具有前兆意义呢?在判定前兆性、非前兆震群指标方面也有不少研究(陆远忠,1984;朱传镇,1989;王炜,1984)。由于地壳结构和断裂分布的差异,不同地区的震群活动具有不同特征。孙文福等(2005)对辽宁及其邻近地区发生的 20 多个震群作了

[收稿日期] 2010-11-17; [修定日期] 2011-01-26

[项目类别] 江苏省社会发展项目(BS2007085)资助

[作者简介] 黄耘,女,1964 年 12 月生,副研究员,主要从事地震预测和地震波理论应用研究

E-mail:njhuangyun@yahoo.com.cn

详细的研究,将其分为 4 种类型: I 增强型, II 衰减型, III 增减型, IV 双丛(峰)型。在研究的 24 次震群中, 5 次具有明显的前兆意义,均属于 I 或 II 类震群。刘西林等(2007)对山东及其近海 30 多年来发生的 39 次小震群资料进行了系统的整理分析。结果表明,较显著小震群与外围的中、强地震对应率为 71%,震群与中强地震的时空间隔均较大。

由于震群活动在时空分布上高度集中,因此十分引人注目。江苏是华东地区中强地震较为活跃的地区,震群活动相对频繁。本文系统地研究了 1977 年以来江苏及其邻近地区发生的 36 次震群活动,总结了江苏地区震群活动的参数特征,探讨了该地区震群活动与大震的关系,分析检验了判定前兆震群性质的指标,以期对该地区的地震预测研究及地震应急工作有所贡献。

1 资料和方法

本文采用《地震学分析预报方法程式指南》(国家地震局科技监测司,1990)及《基于 GIS 的地震分析预报系统》(陆远忠等,2002)的方法与软件,对 1977 年有震群记录以来,江苏及邻近地区($29.0^{\circ} \sim 36^{\circ}N$, $117^{\circ} \sim 122^{\circ}E$)30 多年来发生的小震群资料进行系统的整理,对震群参数进行计算和分析。

震群的定义,迄今为止没有一个统一而严格的说法。不同作者根据所研究问题的性质,可以采用不完全一致的定义(许绍燮,1981;茂木清夫,1994)。陆远忠等(1984)结合我国东部震群活动特征,对震群做了比较具体的定义:

(1) 地震序列的震中分布在不大于 2500km^2 矩形区域内,而且与外围地震的分布有较为明显的界限。最大日频次不少于 3 次,总频次不少于 10 次。

(2) 序列中最大地震震级 $M_L \leq 5.2$,最大与次大地震震级差 $\Delta M_L \leq 1.1$ 。

(3) 序列开始前和结束后连续 15 天未记录到 0 级以上的地震,则以第一个地震所在日为震群序列的起始日,以最后一个地震所在日为序列的终止日。

在我们的工作中,为了得到完整的序列目录,对于 $M_L < 1$ 的地震和没有定位的地震,通过查找江苏省地震局编制的《江苏省地震目录》、山东省地震局编制的《山东省地震目录》和浙江省地震局编制的《浙江省地震目录》,进行复核和补充,力求资料的准确性和完整性。

2 结果与分析

本文共收集到 1977 年以来江苏及邻近地区($29^{\circ} \sim 36^{\circ}N$, $117^{\circ} \sim 122^{\circ}E$)36 次小震群活动,其中江苏境内有 28 次,浙江北部地区有 5 次,山东境内有 3 次。安徽境内的震群本文未加研究。图 1 为 1977 年以来江苏及邻近地区震群活动的空间分布图。表 1 为江苏及邻近地区震群活动和参数一览表。

2.1 资料完整性

由表 1 可见,1977 年前由于江苏地震观测台站很少,地震记录严重缺失,我们没有收集到震群活动,1977~1984 年收集整理到 3 次震群活动,而 1985 年之后研究区震群活动频次明显增多。分析认为这种现象并不表明 1985 年之前震群活动少,事实上 1985 年前江苏及邻区的中强地震十分活跃,其间发生了 1974 年溧阳 5.5 级地震、1975 年黄海 5.3 级地震、1979 年安徽固镇 5.0 级和 1979 年溧阳 6.0 级地震,此外 1984 年在黄海同一地点还连续发

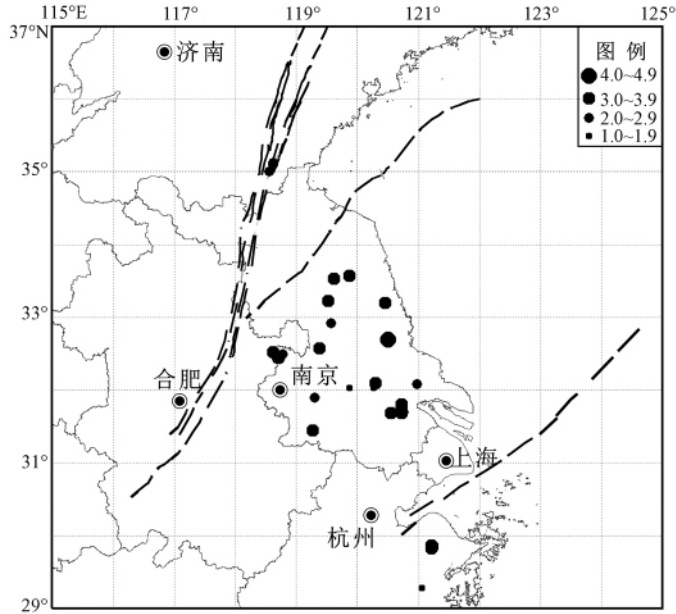


图 1 江苏及邻近地区震群活动的空间分布图

图中虚线表示断裂构造, 实心圆表示震群

生了 5.7 级和 6.2 级两次地震。中强震如此活跃的情况下, 小震群活动平静更可能是由于当时地震资料缺失或地震监测能力不够造成的。通过回顾江苏台网建设的过程得知, 1974~1984 年江苏台网处于起步阶段, 刚刚开始台站监测建设。1985 年起遥测台网技术在江苏得到了应用, 地震监测能力才得到大幅度提高 (江苏省地震局 2008)。

我们对所有记录到的震群活动进行了统计 (表 1), 对 M_L 1.0 以下的地震通过查找《江苏省地震目录》、《山东省地震目录》和《浙江省地震目录》原始记录的方法给出统计。虽然研究区的监测能力并未全部达到 M_L 1.0 以下, 但一些震群刚好发生在台站附近, S 波与 P 波的到时差仅 2~3s, 因此我们可以通过单台记录给出震群的统计频次。而且有部分地区的震群活动就是以微小地震的成串活动为特点的, 如靖江地区、常熟地区等, 这些微小的震群活动是我们了解和监测地壳活动不可忽视的重要途径, 因此不可舍去。对于这些刚好位于台站附近的震群活动个体来说, 震群序列中 0 级以上地震的记录应该是完整的。

2.2 小震群活动时空分布特点

江苏及邻区地处中国东部, 在大地构造上跨越中朝断块、扬子断块和秦岭-大别褶皱带三大一级单元构造, 区内有切割岩石圈级的深大断裂——郟庐断裂, 以淮阴响水口断裂为界的以北地区为出露超高压变质带的特殊块体——苏鲁块体, 东邻南黄海海域, 地质构造复杂。江苏及其邻区震群活动的空间分布, 主要有以下几个特点:

(1) 从震群总体的空间分布来分析 (图 1), 江苏地区震群相对集中分布在沿江至苏中地区, 即淮阴-响水口大断裂以南的下扬子块体内, 苏鲁块体内的徐州、淮阴、连云港地区没有震群记录。除山东和浙江北部的几次震群外, 江苏境内的最北震群为 1986 年 10 月 2 日盐城阜宁 M_L 3.9 震群, 最南震群为常熟地区的震群。

表 1 江苏及邻近地区震群活动及参数一览表

序号	地点	北纬	东经	起止时间 年-月-日	持续 天数	最大震 级 M_L	总次数/ $M_L \geq 1.0$ $/M_L \geq 2.0/M_L \geq 3.0$	震群参数				
								U	K	ρ	h	b
1	宝应	33°22'	119°41'	1977-03-11 ~ 31	21	3.4	55/55/18/1	0.55	0.18	0.49	1.80	1.16
2	六合	32°16'	118°55'	1980-03-31 ~ 04-01	2	2.1	26/25/1/0	0.22	0.71	0.91	3.50	1.19
3	南通	32°06'	121°11'	1981-10-07 ~ 10	4	2.4	25/23/5/0	1.00	0.74	0.44	3.50	0.87
4	沙洲	31°53'	120°36'	1985-04-30 ~ 05-02	3	3.3	14/9/3/1	1.00	0.05	0.48	3.50	0.53
5	常熟	31°41'	120°34'	1985-11-14 ~ 12-06	23	3.2	12/10/4/1	0.51	0.25	0.54	0.80	0.39
6	阜宁	33°32'	119°37'	1986-10-02 ~ 05	4	3.9	22/21/17/1	0.68	0.14	0.54	0.20	0.62
7	句容	31°54'	119°19'	1987-07-22 ~ 26	5	2.6	23/19/3/0	0.61	0.65	0.56	3.50	0.64
8	冶山	32°30'	118°56'	1989-04-29 ~ 05-05	7	2.0	24/15/1/0	0.68	0.67	0.64	0.10	0.70
9	建山	32°02'	119°52'	1990-02-14 ~ 24	11	1.8	26/4/0/0	0.95	0.45	0.45	0.10	1.07
10	高邮	32°55'	119°34'	1990-02-16 ~ 03-09	22	2.4	65/62/9/0	0.99	0.79	0.55	0.10	0.80
11	大丰	33°12'	120°27'	1990-03-06 ~ 04-02	26	3.2	23/7/2/1	0.36	0.04	0.56	0.50	0.65
12	邗江	32°35'	119°22'	1990-11-04 ~ 08	5	3.4	39/38/7/1	0.89	0.19	0.57	1.11	0.88
13	靖江	32°05'	120°18'	1991-07-06 ~ 17	12	3.5	11/6/1/1	0.00	0.02	0.80	1.60	1.18
14	靖江	32°04'	120°18'	1991-08-14 ~ 15	2	1.0	12/1/0/0	0.98	0.76	0.62	3.50	1.30
15	靖江	32°04'	120°18'	1992-10-07 ~ 14	8	1.6	10/8/0/0	0.03	0.59	0.00	0.70	1.19
16	鄞县	29°52'	121°13'	1993-02-18 ~ 04-03	44	3.9	33/33/17/4	0.65	0.59	0.48	0.50	0.50
17	常熟	31°37'	120°54'	1994-01-09 ~ 03-28	79	3.4	165/144/28/2	0.83	0.87	0.39	2.01	0.71
18	常熟	31°47'	120°43'	1994-05-12 ~ 07-02	52	3.4	127/105/23/5	0.48	0.67	0.74	0.70	0.63
19	鄞县	29°50'	121°13'	1995-02-05 ~ 15	45	3.1	18/18/8/1	0.96	0.59	0.83	0.10	0.63
20	鄞县	29°51'	121°14'	1995-03-02 ~ 05-31	90	2.7	30/30/3/0	0.78	0.45	0.78	0.40	1.21
21	鄞县	29°50'	121°13'	1996-11-05 ~ 12-15	41	2.5	18/18/2/0	0.99	0.48	0.54	3.50	0.77
22	常熟	31°41'	120°43'	1997-03-27 ~ 28	2	2.5	20/12/1/0	0.99	0.71	0.67	3.50	0.54
23	常熟	31°47'	120°44'	1999-09-19 ~ 19	1	2.6	14/13/4/0	0.81	0.45	0.76	3.50	0.71
24	靖江	32°04'	120°18'	2000-01-07 ~ 10	4	1.2	73/16/0/0	0.99	0.78	0.00	3.50	1.19
25	靖江	32°04'	120°18'	2000-01-23 ~ 28	6	0.9	61/0/0/0	0.77	0.78	0.00	0.39	2.18
26	靖江	32°04'	120°18'	2000-02-21 ~ 27	7	1.2	50/11/0/0	0.99	0.79	0.72	3.50	1.21
27	常熟	31°46'	120°45'	2001-11-03 ~ 15	13	3.7	240/58/12/1	0.66	0.17	0.52	1.90	0.81
28	临沭	35°00'	118°33'	2002-04-04 ~ 20	17	2.3	38/22/3/0	0.51	0.67	0.52	0.30	0.61
29	六合	32°26'	118°38'	2002-05-03 ~ 05	3	3.5	12/8/3/1	0.26	0.22	0.36	1.07	0.39
30	常熟	31°47'	120°42'	2002-06-13 ~ 07-03	21	3.5	152/30/5/2	0.24	0.39	0.62	1.20	0.69
31	临沭	35°07'	118°37'	2002-12-21 ~ 25	5	2.1	40/21/7/0	0.92	0.78	0.65	0.20	0.79
32	六合	32°26'	118°41'	2003-05-09 ~ 09	1	2.8	10/10/6/0	1.00	0.65	0.63	3.5	0.52
33	天台	29°17'	121°05'	2003-08-11 ~ 26	16	1.9	24/16/0/0	0.89	0.72	0.42	0.20	0.83
34	临沭	35°06'	118°37'	2003-11-06 ~ 26	21	2.2	309/43/1/0	0.74	0.59	0.64	1.10	1.26
35	东台	32°43'	120°30'	2006-11-16 ~ 12-03	18	4.1	16/16/6/3	0.54	0.14	0.74	0.30	0.55
36	鄞县	29°51'	121°14'	2009-09-10 ~ 10-18	49	3.3	30/30/10/4	0.75	0.75	0.35	1.20	0.42

注:表中 U 、 K 、 ρ 、 h 、 b 见“测震学预报方法”, 1997

(2) 从震群强度来分析(表 1), 1970 年以来江苏及其邻近地区发生的最大一次震群为 2006 年 11 月 16 日 ~ 12 月 3 日江苏东台 M_L 4.1 震群, 它也是研究区发生的唯一一次 M_L 4.1 的震群。最小一次震群为 2000 年 1 月 23 日 ~ 28 日江苏靖江震群, 其最大震级仅为 M_L 0.9, 该震群距靖江地震台仅 10km 左右, 多数地震都是通过单台记录得到的, 震群的震级虽小, 但震群序列频次在 6 天内达 61 次, 是一次典型的微震群活动。除此之外, 研究区震群活

动强度均在 M_L 1.0 ~ 3.9 之间,其中最大震级在 M_L 1.0 ~ 1.9 之间的有 6 次,占总数的 17%;在 M_L 2.0 ~ 2.9 之间的 14 次,占 39%;在 M_L 3.0 ~ 3.9 之间的 14 次,占 39%。因此研究区震群活动以 M_L 2.0 ~ 3.9 地震为主,占 78%。

(3)从震群序列的总频次来分析(表 1),总频次在 30 以下的震群居多。在我们研究的 36 次小震群中,总频次在 10 ~ 30 的震群有 22 次,占 61%;31 ~ 80 的有 9 次,占 25%;100 以上的有 5 次,占 14%。值得一提的是在总频次超过 100 的 5 次震群中,有 4 次位于常熟地区,1 次位于山东临沭。

(4)从震群活动的持续时间来分析(表 1),震群活动持续 1 ~ 7 天的有 16 次,占 44%;8 ~ 15 天的 4 次,占总数的 11%;16 ~ 30 天的 9 次,占 25%;超过 30 天的 7 次,占 19%。这 7 次持续较长的震群有 2 次发生在常熟,5 次发生在浙江鄞县。震群活动持续时间最长的是 1995 年 2 月 2 日 ~ 5 月 31 日浙江鄞县 M_L 2.7 震群,这次震群震级不大,总频次仅 30 次,但断断续续拖了 90 天。此外 1994 年 1 月 9 日 ~ 3 月 28 日常熟 M_L 3.4 震群,持续了 79 天。

总之,震群序列中地震总频次和震群持续时间与震群的最大震级之间不成正比;不同地区震群活动具有其自身特征,如常熟地区震群活动一般持续时间长,频次较多, M_L 1.0 以下的微震活动发育,震群的最大震级相对较大,震群在原地复发的现象比较多,并且 8 次常熟震群中有 6 次发生在 1990 年常熟 5.1 级地震之后。究其原因,可能是由于 1990 年常熟 5.1 级中强震之后震中区介质破碎,对区域应力场的增强较为敏感。

2.3 江苏小震群与中强震关系分析

《地震学分析预报方法程式指南》(国家地震局科技监测司,1990)将小震群发生后 1 ~ 2 年内,周围 500km 范围内发生的 5 级以上中强地震视为对应地震,那么研究区 36 次震群中有 15 次对应了地震,占总数的 42%。如果结合本研究区的实际情况,将判定标准进行调整,满足以下 3 个条件之一均视为对应地震:①震群发生后 1 年内,在 500km 左右范围内发生 4.6 ~ 4.9 级地震;②震群发生后 2.5 年内,在 500km 左右范围内发生 5 ~ 6 级地震;③震群发生后 3 年内,在 500km 左右范围内发生 6 级以上地震。符合以上规定的小震群有 28 次对应了中强地震,对应率为 78%,较调整前对应率有所提高。表 2 为按调整后的判别标准得到的小震群与中强地震映震统计表,具有以下几个特点:

(1)从小震群与未来中强地震的时间间隔看,小震群发生后 1 年内发震的有 16 次(16/28),占对应地震总数 57%;小震群发生后 1 ~ 2 年内发震 8(8/28)次,占 29%;小震群发生后 2 ~ 3 年内发震的有 4(4/28)次,占 14%。因此小震群与未来中强地震的时间间隔以 1 年内发震相对较多,占对应地震的一半以上,其中时间间隔最短的仅 4 天,即 1996 年 11 月 5 日浙江鄞县发生的 M_L 2.5 震群后 4 天,在南黄海发生 1996 年 11 月 9 日 6.1 级地震,并且这次浙江鄞县震群活动持续到 12 月 5 日,也就是震群活动与主震几乎是同时,但距离上它们相距 290km。此外也有多次在震群活动后 1 ~ 3 个月内发生了较大地震,但后续对应的地震都是 4.6 ~ 4.9 级地震,如 1992 年 10 月 7 ~ 14 日在靖江发生 M_L 1.6 小震群,震群发生后 14 天在射阳发生 4.7 级地震。除 1996 年 11 月浙江鄞县震群,其后发生 5 级以上中强地震外,时间次短的是 1986 年 10 月盐城阜宁 M_L 3.9 震群,其后 4 个月发生了 1987 年 2 月 17 日射阳 5.1 级地震。由此看来,可否将江苏及其邻区发生的震群作为判断中强地震发生的中短期指标之一,值得进一步研究。

表 2 江苏及邻区震群类型及其与中强地震的关系统计表

序号	震群名称	U-K 组合	检验	U-p 组合	检验	K-p 组合	检验	U-K-p 组合	检验	全组合	检验	相应的中强地震			ΔT (m)	ΔS (km)
												时间	地点	震级		
1	197703 宝应	非前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	1979-07-09	溧阳	6.0	28	200
2	198003 六合	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓					
3	198110 南通	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	1982-04-22	东台	4.6	6	70
4	198504 沙洲	非前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	1986-05-23	黄海	4.7	13	110
												1987-02-17	射阳	5.1	22	170
5	198511 常熟	非前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	1986-05-23	黄海	4.7	6	110
												1987-02-17	射阳	5.1	15	170
6	198610 阜宁	非前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	1987-02-17	射阳	5.1	4	85
7	198707 句容	前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	前兆	×	非前兆	×	1990-02-10	常熟	5.1	30	170
8	198904 冶山	前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	1990-02-10	常熟	5.1	10	220
9	199002 建山	非前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	1992-01-23	黄海	5.3	23	370
10	199002 高邮	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	1992-01-23	黄海	5.3	23	315
11	199003 大丰	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	1992-01-23	黄海	5.3	22	210
12	199011 邗江	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	1992-01-23	黄海	5.3	14	330
13	199107 靖江	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	1991-11-05	射阳	4.7	3	180
												1992-01-23	黄海	5.3	7	360
												1991-11-05	射阳	4.7	3	180
14	199108 靖江	前兆	✓	非前兆	×	非前兆	×	前兆	×	前兆	×	1992-01-23	黄海	5.3	6	360
												1992-10-22	射阳	4.7	12	180
												1992-10-22	射阳	4.7	0.5	180
15	199210 靖江	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	1994-07-26	黄海	5.3	21	500
16	199302 鄞县	非前兆	✓	前兆	×	非前兆	✓	前兆	✓	前兆	×					
17	199401 常熟	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	1994-07-26	黄海	5.3	6	500
												1995-09-20	苍山	5.2	20	430
												1996-11-09	黄海	6.1	34	230
18	199405 常熟	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	1994-07-26	黄海	5.3	3	500
												1995-09-20	苍山	5.2	20	430
												1996-11-09	黄海	6.1	30	230
19	199502 鄞县	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	1996-11-09	黄海	6.1	21	290
												1997-07-28	黄海	5.1	29	440
20	199503 鄞县	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	前兆	✓	1996-11-09	黄海	6.1	20	290
												1997-07-28	黄海	5.1	28	440
21	199611 鄞县	非前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	1996-11-09	黄海	6.1	0.5	290
												1997-07-28	黄海	5.1	8	440
22	199703 常熟	前兆	✓	非前兆	×	非前兆	×	前兆	×	非前兆	×	1997-07-28	黄海	5.1	4	260
23	199909 常熟	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓					
24	200001 靖江	前兆	×	前兆	×	前兆	×	前兆	×	前兆	×					
25	200001 靖江	前兆	×	前兆	×	前兆	×	前兆	×	前兆	×					
26	200002 靖江	前兆	×	非前兆	✓	非前兆	✓	前兆	✓	前兆	×					
27	200111 常熟	非前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	2002-07-23	黄海	4.7	8	460
28	200204 临沭	前兆	×	前兆	✓	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	2002-07-23	黄海	4.7	3	330
29	200205 六合	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	2002-07-23	黄海	4.7	2	480
30	200206 常熟	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	2002-07-23	黄海	4.7	1	470
31	200212 临沭	前兆	✓	非前兆	×	非前兆	×	前兆	×	前兆	✓	2003-03-23	黄海	4.7	3	520
32	200305 六合	前兆	×	非前兆	×	非前兆	×	前兆	×	非前兆	×	2005-11-26	九江	5.7	30	420
33	200308 天台	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	2005-11-26	九江	5.7	27	520
34	200311 临沭	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓					
35	200611 东台	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓	非前兆	✓					
36	200909 鄞县	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	前兆	✓	2011-01-12	黄海	4.8	15	460

注: ΔT : 震群与相应中强震的时间间隔; ΔS : 震群与相应中强震震中之间距

(2)从震群与对应的中强地震位置来分析,28次对应地震的震群中,中强地震发生在100km范围内的有2次,100~200km以内7次,200~300km以内有8次,300~500km以内有11次。小震群发生后对应的中强地震距离最近的为80km左右,分别是1981年10月7~10日南通 $M_L2.4$ 震群之后6个月,在相距约70km的东台发生的 $M4.6$ 地震;以及1986年10月2~5日阜宁发生 $M_L3.9$ 震群后4个月在相距约85km的射阳发生的5.1级中强震。因此震群活动与未来中强地震的距离较为离散,难以把握,一次震群活动后,有可能在整个江苏和邻近地区范围内发生中强地震,但尚无原地(20km以内)发生大地震的震例。

(3)从震群强度与未来中强地震关系来分析(表1 2),研究区共发生15次 $M_L3.0\sim3.9$ 级震群,有13次对应了地震,其中9次对应5级以上地震;共发生14次 $M_L2.0\sim2.9$ 震群,有11次对应了地震,其中8次对应5级以上中强地震;共发生6次 $M_L1.0\sim1.9$ 震群,4次对应了地震,且都对应了5级以上中强地震。最大一次震群2006年11月东台 $M_L4.1$ 震群,没有对应中强地震。可见,震群强度的大小与未来中强地震的对应率高低、对应的地震强度大小没有明显的相关关系。

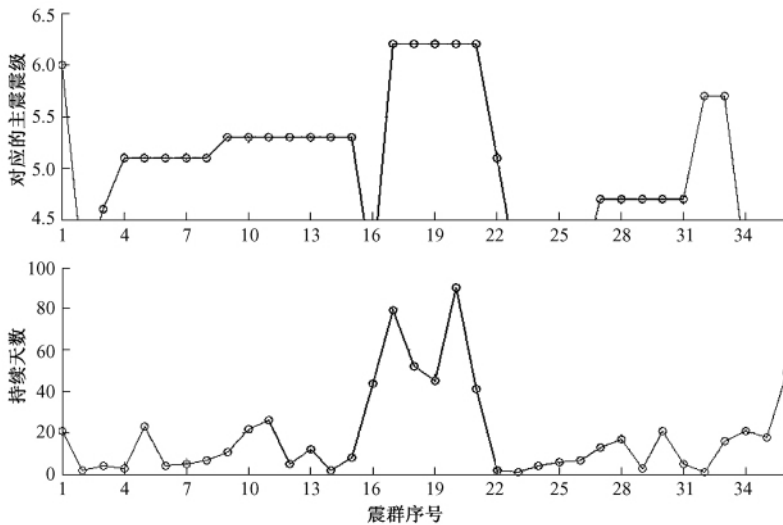


图2 震群持续时间与对应主震震级

(4)从震群频次多少与未来中强地震关系分析,研究区震群频次超过100的震群有5次,其中有4次对应地震;而频次在30以下的22次震群中有19次其后对应了地震,对应比例分别为80%和86%,可见震群频次的多少与其后发生地震的对应率不相关。

(5)从震群活动的持续时间与未来中强地震的对应关系分析,震群活动的持续时间长短与未来主震的强度大小可能存在一定的关联。图2为震群持续时间与对应地震震级关系图。由图可见,17号~21号5次震群都对应1996年11月9日6.1级黄海地震,而这5次震群平均持续时间约为61天,是全部36次震群的平均持续时间约19天的3.2倍。本研究区1977年以来共发生了3次6级以上地震,由于1979年溧阳6.0级地震和1984年黄海6.2级地震前,地震监测能力较弱,获得的小震活动资料严重缺失,因此无法进行对比研究。1996年11月9日黄海6.1级地震是统计中最大的地震,也是唯一一次6级以上地震,而在

此地震之前的震群活动时间也最长,由此认为震群持续时间的长短与未来对应地震的大小可能存在一定的关系。

(6) 研究区震群活动与后续中强地震并非一一对应。有些震群对应不止一次中强地震,如表 2 中的第 4、5、13、14、15、17、18、19、20、21 号等 10 次震群,其后均有 2 次以上中强地震符合我们给出的对应地震的判定标准,占对应地震总数的 37%;此外一次中强地震前有可能发生不止一次震群活动(表 3),1986 年以来研究区发生了 14 次 4.6 级以上地震前都发生了不止一次震群活动,而所有 5 级以上地震前 2 年半内都发生了 2 次以上震群活动,其中 1996 年黄海 6.1 级地震前 3 年内发生了 5 次震群活动。另外,1992 年 1 月 23 日黄海 5.3 级地震前和 2002 年 7 月 23 日黄海 4.7 级地震前震群活动次数也较多,出现了震群活动丛发的现象,在这些震群丛发后,其后虽然没有发生 6 级以上强震,但均出现了 5 级左右地震的连发。如 1990 年 2 月~1991 年 8 月的 18 个月时间内,共发生了 6 次震群活动,其后发生了 1991 年 11 月射阳 4.7 级、1992 年 1 月黄海 5.3 级和 1992 年 10 月射阳 4.7 级 3 次 5 级左右地震;又如 2001 年 11 月~2002 年 12 月的 13 个月时间内共发生了 5 次震群活动,其后发生了 2002 年 7 月黄海 4.7 级、2003 年 3 月 23 日黄海 4.7 级和 2003 年 3 月 30 日黄海 4.7 级等 3 次地震。

表 3 研究区中强地震前震群活动次数统计表

序号	年-月-日	地点	震级	震群次数	序号	年-月-日	地点	震级	震群次数
1	1986-05-23	黄海	4.7	2	8	1995-09-20	苍山	5.2	2
2	1987-02-17	射阳	5.1	3	9	1996-11-09	黄海	6.1	5
3	1990-02-10	常熟	5.1	2	10	1997-07-28	黄海	5.1	4
4	1991-11-05	射阳	4.7	2	11	2002-07-23	黄海	4.7	4
5	1992-01-23	黄海	5.3	6	12	2003-03-23	黄海	4.7	1
6	1992-10-22	射阳	4.6	2	13	2005-11-26	九江	5.7	2
7	1994-07-26	黄海	5.3	3	14	2011-01-12	黄海	4.8	1

总之,将小震群发生后 1~2 年内,周围 500km 范围内发生 5 级以上中强地震视为对应地震,那么研究区 36 次震群中有 15 次对应了地震,占总数的 42%。据研究区的实际情况将判定标准调整后,研究区 36 次震群发生后,有 28 次对应地震,对应率有所提高,为 78%。小震群与未来中强地震的时间间隔在 1 年内的有 16 次(16/28),占对应地震总数 57%;在 1~2 年内的有 8(8/28)次,占对应地震总数 29%,因此江苏及其邻区震群活动是中强震发生的一个中期—中短期指标。震群与未来的中强地震距离较为离散,难以把握,一次震群活动后,有可能在整个江苏和邻近地区范围内发生中强地震,但尚无在原地发生大震的震例。震群强度的大小与未来中强地震的对应率高低、对应的地震强度大小没有明显的相关关系。震群频次的多少与其后发生地震的对应率高低也没有明显的相关关系。震群的持续时间长短可能与未来中强地震强度大小有一定的关联。研究区震群活动与后续中强地震之间并不是简单的一一对应关系,有 10 次震群后对应了 2 次以上中强地震,占对应地震的 36%。相反一次中强地震前有可能发生不止一次震群活动,1986 年以来研究区发生的 14 次 4.6 级以上地震前都发生震群活动,其中 8 次 5 级以上中强地震前都发生了 2 次以上的震群活动。上述统计表明,当出现震群活动连发时,预示着其后有较大地震发生或者会出现 5 级左右地震连发的可能。

需要指出的是,通过对研究区震群活动的分析和统计,虽然有78%的震群之后发生了4.6级以上的中强地震,但其中中强地震的时空分布很不确定。

2.4 前兆震群识别及检验

一个地区震群发生后,我们最关心的是这些震群是否与中强地震的孕育和发生存在直接的关系?如何判断哪些震群之后会发生大地震,即哪些震群属于前兆震群?关于前兆性震群和非前兆震群的判断前人研究出不少指标,如 U 、 K 、 ρ 、 b 、 h 值等。根据《测震学分析预报方法》(国家地震局科技监测司,1997),利用多项指标判定前兆震群的效果要优于单项指标。综合判定前兆震群的指标有 U - K 组合、 U - ρ 组合、 K - ρ 组合、 U - K - ρ 组合,本文将其中 K 值指标调整为 $K > 0.65$,比文献中的 $K > 0.70$ 略小。判别标准如下:

U - K 组合:其中 $U > 0.5$, $K > 0.65$,则认为是 U - K 型前兆震群;

U - ρ 组合:其中 $U > 0.5$, $\rho < 0.55$,则认为是 U - ρ 型前兆震群;

K - ρ 组合:其中 $K > 0.65$, $\rho < 0.55$,则认为是 K - ρ 型前兆震群;

U - K - ρ 组合:其中 $U > 0.5$, $K > 0.65$, $\rho < 0.55$ 则认为是 U - K - ρ 型前兆震群。

除以上4种组合,本研究还采用全组合,即5项指标 $U > 0.5$, $K > 0.65$, $\rho < 0.55$, $h < 1.0$, $b > 0.65$ 中,满足其中的任意3项者,就认为是前兆震群。

采用以上5种组合,分别判定震群的类型,并对其后中强地震对应进行检验,探讨研究区震群类型与中强震关系,寻找适合研究区震群类型判别较好的指标。如果震群发生后判断为前兆震群,其后发生了地震并符合我们前述给出的对应地震的判定标准,那认为检验是正确的,否则是不正确的;相反如果震群发生后判定为非前兆震群,其后没有对应地震则认为检验是正确的,否则就是错误的。

表2可见,用 U - K 组合,其后检验正确的有13次(13/36),占总数的36%; U - ρ 组合检验正确的有18次(18/36),占总数的50%; K - ρ 组合检验正确的有11次(11/36),占总数的31%; U - K - ρ 组合检验正确的有12次(12/36),占总数的33%;如果采用5个指标的全组合判定,其后检验正确的有19次(19/36),占总数的53%。由此可见,研究区判定前兆震群和非前兆震群采用 U - ρ 组合或者全组合效果相对较好,检验正确的约占总数的一半左右,这可为以后发生震群后的趋势判定作为参考意见。但总体而言,通过前兆震群类型的判别,判断后续是否有大地震,在江苏地区效果并不十分有效,需要综合其它方法和手段综合判定。

3 结论

系统研究了收集到的36次震群活动资料,分析了江苏地区震群活动的参数特征,探讨了该地区震群活动与大震的关系,分析检验了前兆震群类型的判定指标。

(1)江苏地区震群活动相对集中分布在沿江至苏中地区;震群活动强度不大,最大的一次震群为2006年11月在江苏东台发生 $M_L 4.1$ 震群,它也是唯一的1次 $M_L 4.0$ 以上的震群,震群序列中的最大震级以 $M_L 2.0 \sim 3.9$ 级地震为主,震群序列总频次在30次以下居多,持续时间在15天以内的震群占总数的55%;震群序列中地震总频次和震群持续时间与震群序列的最大震级之间不成正比。

(2)将判定标准进行调整,满足以下3个条件之一均视为对应地震:①震群发生后1年内,在500km左右范围内发生4.6~4.9级地震。②震群发生后2.5年内,在500km左右范

围内发生 5~6 级地震;③震群发生后 3 年内,在 500km 左右范围内发生 6 级以上地震;那么研究区有 78% 的震群对应地震。

(3) 小震群与未来中强地震的时间间隔在 1 年内的占对应地震总数 57%,而两者的空间距离较为离散,因此江苏及其邻区震群活动可能是一个判断地震活动趋势的中期-中短期指标。

(4) 震群的强度和频次与未来中强地震的对应率和地震强度无明显的相关性。但震群的持续时间可能与未来中强地震强度有一定关系。

(5) 震群活动与后续中强地震之间不是简单的一一对应关系,37% 的震群对应了 2 次以上中强地震;相反,一次中强地震前有可能发生不止一次震群活动,其中 8 次 5 级以上中强地震前都发生了 2 次以上的震群活动。

(6) 用 $U-p$ 组合或者全组合判定研究区前兆震群和非前兆震群效果相对较好,检验正确的约占总数的一半左右,但总体而言,通过前兆震群类型的判别,判断后续是否有大地震,在江苏地区效果并不十分有效,需要参考其它方法和手段综合判定。

参考文献

- 国家地震局科技监测司,1990,地震学分析预报方法程序指南,25~28,北京:地震出版社。
- 国家地震局科技监测司,1997,地震学分析预报方法,105~108,北京:地震出版社。
- 江苏省地震局,2008,江苏地震监测志,南京:河海大学出版社。
- 姜秀娥、陈非比,1983,区域震群与唐山地震,地震学报,5(2),146~156。
- 李兴才、冯树文,1983,震群活动的一种可能触发机制,地震学报,5(3),297~303。
- 刘西林、刘涛涛、郑建常等,2007,山东及其近海小震群活动特征研究,防灾减灾工程学报,27(4),457~463。
- 陆远忠等,1984,一个判断震情的指标—震群的 U 值,地震学报,6(增刊),495~508。
- 陆远忠、李胜利、邓志辉等,2002,基于 GIS 的地震分析预报系统,成都:成都地图出版社。
- 茂木清夫,1994,地震前兆现象的产生机制,世界地震译丛,(4),8~14。
- 宋治平、徐平、薛艳,2001,华北地区震群活动的阶段性特征,地震,21(1),47~52。
- 孙文福、焦明若、李芳等,2005,辽宁地区震群序列特征及其分类的研究,东北地震研究,21(4),24~31。
- 王炜、杨德志,1987,利用 Weibull 分布研究华北地区前兆震群特征,中国地震,3(4),13~21。
- 许绍燮,1981,等海城地震前震系列与震群,地震学报,3(1),1~10。
- 朱传镇、王林瑛,1989,震群信息熵异常与地震预测,见:地震预报方法实用化研究文集(地震学专辑),北京:学术书刊出版社。

The characteristics of earthquake swarms in Jiangsu Province and its adjacent area

Huang Yun Sun Yejun Yang Yun Ye Biwen

Earthquake Administration of Jiangsu Province ,Nanjing 210014 ,China

Abstract We systematically analyzed 36 earthquake swarms in Jiangsu Province and its adjacent area , summarized the characteristics of earthquake swarms and discussed the relationship between earthquake swarms and strong earthquakes afterwards. We also analyzed the criteria of precursory earthquake swarm. Earthquake swarms in Jiangsu Province concentrated in several places. Most of them were of magnitude $M_L 2.0 \sim 3.9$. For most earthquake swarms , the number of earthquakes was less than 30. Time duration for about 55% of earthquake swarms was less than 15 days. The biggest magnitude of one earthquake swarm was not proportional to the number of earthquakes and time duration. 75% earthquake swarms were corresponded with one of the forthcoming earthquakes with $M > 4.6$, with time interval less than one year. This shows a medium- and short-term criteria. Distance between earthquake swarm and future earthquake distributed dispersedly. There were no earthquake occurrence in the place of earthquake swarms. There was no good relationship between the magnitude and corresponding rate of future earthquakes and magnitude of earthquake swarms. There was also no good relationship between the amount of earthquakes in earthquake swarm and the corresponding rate. It is better to use $U-p$ or all-combinations to determine the type of earthquake swarm.

Key words: In Jiangsu Province and adjacent area Earthquake swarms The characteristics of earthquake swarms The criteria of precursory earthquake swarms