

曹凤娟、翟丽娜、殷轶娜等, 2015, 辽宁地区震群序列统计特征及预测意义研究, 中国地震, 31(1), 45 ~ 55。

# 辽宁地区震群序列统计特征及预测意义研究

曹凤娟<sup>1)</sup> 翟丽娜<sup>1)</sup> 殷轶娜<sup>1)</sup> 杨牧萍<sup>1)</sup> 张慧<sup>2)</sup> 张博<sup>1)</sup>

1) 辽宁省地震局, 沈阳市皇姑区黄河北大街 44 号 110034

2) 大连市地震局, 辽宁大连 116021

**摘要** 系统研究了 1970 年以来辽宁及邻区发生的 25 次震群活动, 总结了辽宁地区震群活动的参数特征, 探讨了该地区震群活动与未来中强震的关系。结果表明: ①研究区的 25 次震群中, 最大地震优势发生时段在震群出现后 3 天内的占 68%, 84% 的震群中最大地震与次大地震的震级差  $\leq 0.5$  级, 平均为 0.35。80% 的震群持续活动时间约 2 个月; ②震群中最大地震的震级越大, 相应地 2、3 级地震频次也越多, 通常 1 个 4 级左右的震群, 2 级地震频次平均约为 28, 3 级地震平均约为 6; ③当震群中 3、4 级地震频次分别  $\geq 10$  和 4, 同时序列的  $b$  值为 0.6 ~ 0.9, 此时可判定震群为前兆震群。未来中强震 3 要素的判定依据为: 发震时间为震群开始后 1 年内, 平均 6 个月; 震中距离震群所在地约 0 ~ 400km, 平均为 180km; 最大强度为 G-R 预测的最大地震震级加 2.0 级。当  $b < 0.5$  时, 震群有可能为前震序列, 即震群开始后 1 ~ 20 天内原地有发生  $M \geq 5$  地震的危险; ④ 25 次震群中的 80% 在震群出现 1 年后对应了  $M \geq 4.6$  地震, 空间上辽宁内陆的震群对辽南和唐山地区的  $M \geq 4.6$  地震有较好的指示, 长岛和黑山岛附近海域的震群对渤海海峡及其附近地区的  $M \geq 4.6$  地震有较好的指示。

**关键词:** 震群 强度 持续时间  $b$  值

[文章编号] 1001-4683(2015)01-0045-11

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

## 0 前言

震群活动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。Evison (1977) 认为大震前几年, 在未来大震震中区周围几百千米范围里所发生的小震群活动可能与大震的孕育有关, 故称之为“前兆震群”。已有研究者 (Mogi, 1963 陆远忠等, 1984; 朱传镇等, 1989; Evison et al, 1999) 在研究前兆震群的判别指标及预测程式的基础上, 按与序列中主震的相对关系将地震序列分为 3 类: 发生在主震前的序列称前震序列; 发生在主震后的序列称余震序列; 在整个地震序列发生过程中无突出主震的序列称震群序列 (周仕勇等, 1999)。Mogi (1963) 的研究结果表明, 前震序列通常集中在震源区中的小范围内。如 1963 年千岛群岛地震前震的范

[收稿日期] 2014-01-27; [修定日期] 2014-05-28

[项目类别] 辽宁省科学技术计划项目“辽宁省重点地震构造地震危险性研究”(2014231003)、辽宁省地震局重点实验室项目“辽宁省地震活动性研究”(LZ-Z201501-2) 以及辽宁省地震局重点实验室项目“未来 1 ~ 3 年辽宁省 6 ~ 7 级地震高危区研究”(LNDZ2014003) 共同资助

[作者简介] 曹凤娟, 女, 1970 年生, 本科, 高级工程师, 主要从事地震综合分析 with 预测。Email: cao99@ sina. com

围是 35km, 而 1975 年伊豆大岛地震则约 10 km。中国大陆不同区域的震群与较大地震的关系也有其自身的特点, 江苏地区 78% 震群发生后对应  $M \geq 4.6$  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活动预测指示意义(黄耘等, 2011)。山东地区的震群、小序列群体活动与周围地区  $M_L \geq 5.0$  地震活动密切相关(李冬梅等, 2011), 小震群活动与外围的中强地震对应率为 56%, 其中显著小震群的对应率为 71% (刘西林等, 2007)。

辽宁及邻区的震群序列比较丰富, 包括前震序列、前兆震群和非前兆震群。辽宁地区个别大地震(如 1975 年海城 7.3 级地震和 1999 年岫岩 5.4 级地震)之前出现前震序列, 并依此作出了较成功的预测。有关辽宁地区震群性质判定和震群序列参数定量判别方法, 已有学者对此作了详细的研究(孙文福等, 2000、2005、2007; 张卫东等, 2002)。深入研究辽宁地区的震群与未来中强地震的距离、震群强度和频次与未来中强地震的关联性, 对于辽宁地区中强震的预测工作有一定的参考价值。

## 1 资料

采用 1970 年以来辽宁地震台网记录的资料, 在参考国家地震局预测预防司(1997)、陆远忠等(1984)、宋俊高等(1998)和林邦慧等(1994)对震群的定义的同时, 充分考虑辽宁地区中小地震活动特点和营口-海城老震区的影响, 将辽宁及邻区的震群定义为: ①地震序列的震中分布在  $30\text{km} \times 30\text{km}$  的矩形区域内, 与外围地震有较明显的分界线; ②地震序列的最大日频次不小于 5, 序列总次数不少于 50; ③序列中最大震级满足  $3.0 \leq M_L \leq 5.2$ , 且最大震级与次大震级之差  $\Delta M_L \leq 1.1$ ; ④序列开始前与结束后连续 15 天内未记录到  $M_L \geq 1.0$  地震, 则以第 1 个地震所在日为震群序列的起始日, 以最后 1 个地震所在日为该序列的终止日。

根据以上震群定义, 本文选取 1970 年以来发生在辽宁及其邻区 ( $37.5^\circ \sim 43^\circ\text{N}, 118^\circ \sim 126^\circ\text{E}$ ) 的记录相对较完整的 25 次震群序列, 各震群序列的具体情况详见表 1。表 1 中“\*”号所注的 4 次震群不完全满足上述震群的定义(1989 年盖州地震序列的最大地震与次大地震震级差大于 1.1、1991 年辽阳柳河地震序列的最大震级  $M_L < 3.0$ 、2012 年灯塔地震序列和 2013 年科尔沁 4 级地震序列的频次小于 50), 但由于上述 4 次震群与最近 2 年辽宁及邻区的震情形势有一定的可比性, 故在此收录一并加以研究。除表 1 中给出的震群之外, 还有部分震群(特别是 1974 年以前的)由于观测台站的控制能力弱或漏记等原因, 致使震群序列不完整或样本数太少, 无法对其进行统计分析, 所以未被选用。筛选的 25 次震群空间分布主要集中在辽蒙交界、辽阳与本溪交界、营口-海城、长岛附近海域等地区(图 1)。

## 2 结果与分析

对表 1 中每个震群各震级档地震频次、次大地震震级、 $b$  值和截距震级、震群前兆参数以及震后 1 年 5 级地震情况进行了统计, 详见表 2。由表 2 可以看出, 25 次震群中, 震群出现的当天发生最大地震的有 10 次, 占总数的 40%。对统计时段  $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_5$  作如下假定:  $t_0 \leq 1$  天、 $1 \text{ 天} < t_1 \leq 3$  天、 $3 \text{ 天} < t_2 \leq 7$  天、 $7 \text{ 天} < t_3 \leq 15$  天、 $15 \text{ 天} < t_4 \leq 30$  天、 $t_5 > 30$  天, 则震群中最大地震优势发生时段在  $t_0$  和  $t_1$  时段内的占 68%, 即震群出现后 3 天内(图 2)。

表 1 1970 年以来辽宁及邻区震群序列基本信息

序号	起止(年-月-日)日期	地点	持序时 间/天	最大地震		$M_L \geq 0.5$ 地震总频次
				$M_L$	发震(年-月-日)日期	
1	1974-03-08 ~ 1974-04-20	敖汉	42	3.3	1974-03-10	89
2	1974-12-19 ~ 1975-01-31	本溪水库	43	5.2	1974-12-22	216
3	1975-02-02 ~ 1975-02-04	海城	2	5.1	1975-02-04	633
4	1976-01-20 ~ 1976-05-30	盖县西海域	131	3.4	1976-03-01	72
5	1976-02-25 ~ 1976-04-05	黑山岛	40	4.1	1976-02-25	137
6	1976-03-29 ~ 1976-03-30	黑山岛	2	3.8	1976-03-30	317
7	1981-10-17 ~ 1981-12-13	长岛	57	3.5	1981-10-18	54
8	1983-03-20 ~ 1983-04-12	盖县西海域	22	4.8	1983-03-20	56
9	1984-04-20 ~ 1984-05-30	宁城	40	3.7	1984-04-23	147
10	1988-01-03 ~ 1988-02-22	岫岩	50	3.7	1988-01-29	404
11*	1989-01-12 ~ 1989-09-08	盖州	239	4.8	1989-01-12	58
12	1990-12-20 ~ 1991-03-21	辽阳柳河	90	3.4	1990-12-26	707
13*	1991-05-29 ~ 1991-06-21	辽阳柳河	23	2.4	1991-05-29	256
14	1997-07-05 ~ 1997-07-17	本溪	12	3.0	1997-07-10	158
15	1999-11-09 ~ 1999-11-29	岫岩	20	4.4	1999-11-25	205
16	2002-04-30 ~ 2002-05-03	海城	5	3.9	2002-04-30	112
17	2004-03-07 ~ 2004-04-30	营口	54	3.6	2004-03-07	245
18	2008-08-19 ~ 2008-09-01	喀喇沁旗	12	3.2	2008-08-21	712
19	2008-11-03 ~ 2009-02-19	海城	108	4.8	2008-11-14	248
20	2012-02-02 ~ 2012-12-23	盖州	324	4.8	2012-02-02	325
21	2013-01-16 ~ 2013-03-27	海城	71	3.3	2013-02-08	94
22	2013-03-12 ~ 2013-05-06	长岛	54	3.6	2013-05-02	164
23	2013-03-30 ~ 2013-05-07	盖州	41	4.0	2013-03-30	126
24*	2012-04-04 ~ 2012-10-04	灯塔	183	4.1	2012-04-04	18
25*	2013-01-21 ~ 2013-02-08	科尔沁	18	4.4	2013-01-21	9

注：“\*”所注震群不完全满足文中震群的定义

84% 的震群中最大地震与次大地震的震级差小于等于 0.5 级, 平均为 0.35 (图 3)。

## 2.1 统计特征分析

由表 2 也可以发现, 震群中最大地震的震级越大, 相应地 2、3 级地震频次也越多, 通常 1 个 4 级左右的震群, 2 级地震频次平均约为 28 (图 4(a)), 3 级地震约为 6 (图 4(b))。震群的持续活动时间与震群中最大地震的关系某种程度上成反比, 即最大地震的震级越大, 震群的持续活动时间越短。据初步统计, 辽宁地区 80% 的震群持续活动时间在 2 个月左右 (图 5), 其中盖州地区的 2 次震群 (表 2 中编号为 11 和 20 的震群) 例外, 持续时间均超过 6 个月。

## 2.2 震群与后续中强震的关系

1970 年以来辽宁及邻区发生的 25 次震群后续大都对应了  $M \geq 4.6$  地震, 对应 20 次, 对应率为 80%, 只有表 2 中编号为 11、17、18 和 19 的震群, 后面没有  $M \geq 4.6$  地震对应。后续对应的中强震距离震群所在地约 0 ~ 400km, 平均为 180km (图 6(a))。空间上辽宁内陆的震群对辽南和唐山地区的  $M \geq 4.6$  地震有较好的指示, 长岛和黑山岛附近海域的震群对渤海海峡及其附近地区的  $M \geq 4.6$  地震有较好的指示。这些  $M \geq 4.6$  地震距震群出现的时间

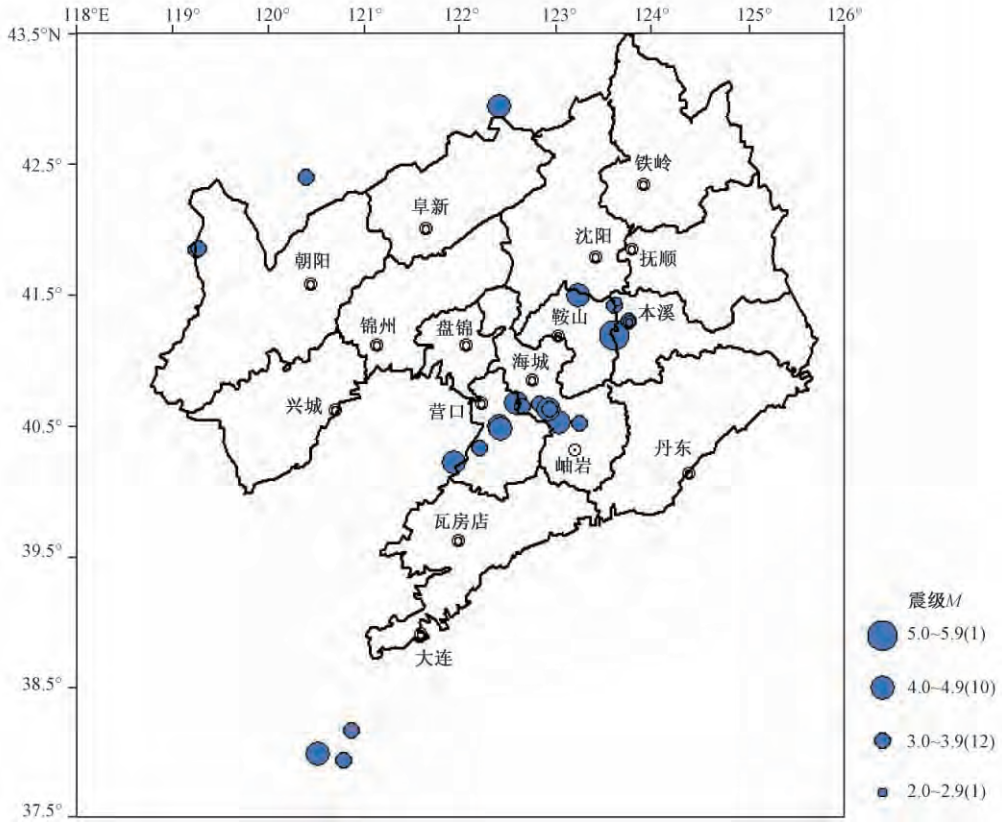


图1 1970年以来辽宁及邻区震群序列分布  
图例括号内为地震次数

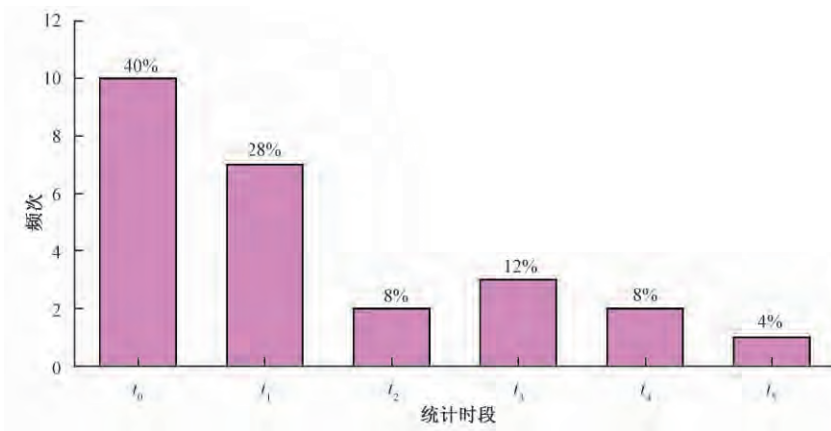


图2 震群中最大地震发生的优势时段

间隔约为1天~1年,平均为6个月左右,72%的震群距后续中强震的时间间隔小于6个月(图6(b))。

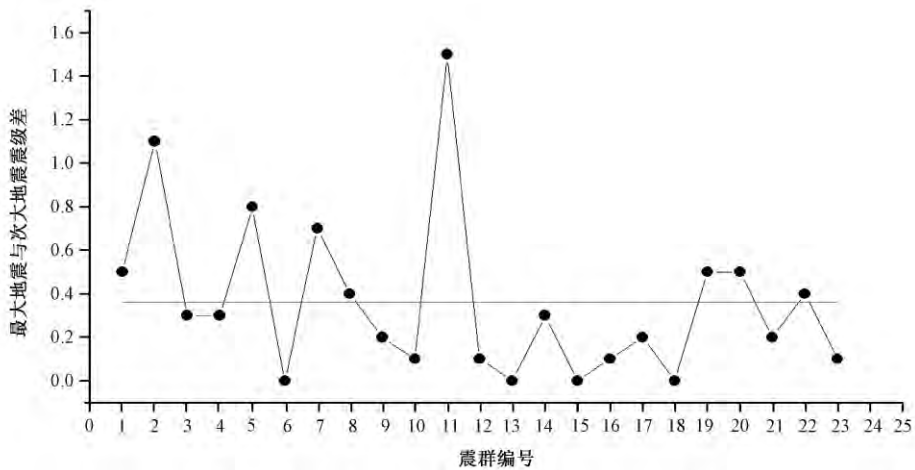


图3 震群中最大地震与次大地震震级差

..... 均值

由表2也可以发现,25次震群的 $b$ 值为0.46~1.0,平均0.73。值得注意的是辽宁及邻区几次典型的 $M \geq 5.0$ 地震前,震群的 $b$ 值都小于0.60。如1975年海城7.3级、1999年岫岩5.4级、2013年灯塔5.1级和科尔沁5.3级地震前的 $b$ 值分别为0.50、0.46、0.54和0.58。此外,由 $b$ 值截距预测的后续最大地震的震级通常比实际震级小1.5~2.0级。通常,震群中2级以上地震频次对后续中强震的震级有一定的指示意义,当震群中3级地震频次大于10或4级地震频次大于4时,90%以上后续有 $M \geq 5.0$ 地震发生。若此时 $b < 0.5$ ,则在震群原地发生5级地震的概率较大。

### 2.3 前兆震群识别

由表2可发现,通常所用的前兆震群定量判定指标 $U-F-K-p-h-b$ (陆远忠等,2002)在辽宁地区震群性质判定中无法准确判定震群的前兆性质,更无法将前震序列与前兆震群加以区分。例如编号11和17的震群,尽管震群定量判定指标 $U-F-K-p-h-b$ 中的6项都满足前兆震群的性质,但后续的1年内并未发生5级左右地震。相反,编号为3和15震群的定量判定指标中分别只有 $U-F$ 和 $U-F-p-K$ 指标满足前兆性质,但该震群实际上为前震序列。究其原因,可能是前人(陆远忠等,1984;王炜等,1984;朱传镇等,1989;林邦慧等,1994)对上述参数规定的指标范围过于宽松。如 $U$ 值,前震序列和前兆震群均规定 $U > 0.5$ ;参数 $h$ 、 $p$ 、 $k$ 等指标也存在类似的问题。因此,在实际应用中会出现判定结果不准确或对前震序列和前兆震群不易区分现象。孙文福等(2007)的研究也发现,震群定量判定指标中 $U$ 、 $p$ 和 $k$ 等3个参数规定的指标对辽宁地区不太适用,因为一些参数没有按照震群性质的不同分别给出各自的指标区间;另外,如参数 $U$ ,按定义为震群中释放90%的应变能所需要的最短时间 $T'$ 与全序列所持续的总时间 $T$ 之比(即 $U = T'/T$ )。但对于个别震群来说(如编号3和15的震群),由于震群中的大量事件和较大事件都集中在序列的后期,当应变能释放到90%时,持续的时间 $T'$ 较大( $T'$ 接近于 $T$ ),所以 $U$ 值较大(接近于1)。若以 $U > 0.5$ 来判定,此时的震群是前兆震群,但事实上该震群为前震序列。

表 2 1970 年以来辽宁及邻区震群序列统计信息

序号	起止日期 (年-月-日)	地点	待序		最大地震		地震频次					截距		前兆性质	后续地震	
			时间 /天	M <sub>L</sub>	M <sub>L</sub> 次	N <sub>总</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>2</sub>	b 值	BM	M <sub>max</sub>	地点		间隔时 间/月	距离 /km
1	1974-03-08 ~ 1974-04-20	敖汉	42	3.3	1974-03-10	2.8	89	1	6	1.00	3.0	7.3	海城	11.1	280	
2	1974-12-19 ~ 1975-01-31	本溪水库	43	5.2	1974-12-22	4.1	216	1	20	128	4.9	7.3	海城	1.6	90	
3	1975-02-02 ~ 1975-02-04	海城	2	5.1	1975-02-04	4.8	633	5	11	64	5.1	7.3	海城	2天	0	
4	1976-01-20 ~ 1976-05-30	盖县西海城	131	3.4	1976-03-01	3.1	72	9	54	0.63	4.5	7.8	唐山	6.3	380	
5	1976-02-25 ~ 1976-04-05	黑山岛	40	4.1	1976-02-25	3.3	137	1	4	39	0.87	7.8	唐山	5.1	270	
6	1976-03-29 ~ 1976-03-30	黑山岛	2	3.8	1976-03-30	3.8	317	23	122	0.83	4.3	7.8	唐山	4.0	280	
7	1981-10-17 ~ 1981-12-13	长岛	57	3.5	1981-10-18	2.8	54	1	11	0.81	3.4	5.8	殷历	4.0	390	
8	1983-03-20 ~ 1983-04-12	盖县西海城	22	4.8	1983-03-20	4.4	56	2	6	39	0.56	4.8	唐山	9.8	300	
9	1984-04-20 ~ 1984-05-30	宁城	40	3.7	1984-04-23	3.5	147	2	21	0.84	3.7	4.6	唐山	12.2	230	
10	1988-01-03 ~ 1988-02-22	岫岩	50	3.7	1988-01-29	3.6	404	12	74	0.95	4.1	4.8	唐山	1.8	200	
11	1989-01-12 ~ 1989-09-08	盖州	239	4.8	1989-01-12	3.6*	58	1	4	24	0.81	4.0	彰武			
12	1990-12-20 ~ 1991-03-21	辽阳柳河	90	3.4	1990-12-26	3.3	707	6	19	0.86	3.8	4.7	唐山	1天	280	
13	1991-05-29 ~ 1991-06-21	辽阳柳河	23	2.4	1991-05-29	2.4	256	1	4	0.84	3.0	5.0	唐山	7.3	270	
14	1997-07-05 ~ 1997-07-17	本溪	12	3.0	1997-07-10	2.7	158	10	28	0.46	5.5	5.4	岫岩	20	0	
15	1999-11-09 ~ 1999-11-29	岫岩	20	4.4	1999-11-25	4.4	205	5	14	0.66	4.1	4.7	北黄海	11.1	320	
16	2002-04-30 ~ 2002-05-03	海城	5	3.9	2002-04-30	3.8	112	2	18	0.81	3.6	5.1	灯塔	11.9	130	
17	2004-03-07 ~ 2004-04-30	营口	54	3.6	2004-03-07	3.4	245	3	16	0.88	3.5	5.3	科尔沁	3.2	260	
18	2008-08-19 ~ 2008-09-01	喀喇沁旗	12	3.2	2008-08-21	3.2	712	4	8	0.54	5.0	5.0	黄海	2.2	300	
19	2008-11-03 ~ 2009-02-19	海城	108	4.8	2008-11-14	4.3	248	4	5	0.58	4.1	5.3	科尔沁	23天	268	
20	2012-02-02 ~ 2012-12-23	盖州	324	4.8	2012-02-02	4.3	325	4	10	0.67	4.5	5.1	灯塔	9.8	0	
21	2013-01-16 ~ 2013-03-27	海城	71	3.3	2013-02-08	3.1	94	3	18	0.57	4.1	5.3	科尔沁	3.0	0	
22	2013-03-12 ~ 2013-05-06	长岛	54	3.6	2013-05-02	3.2	164	4	19	0.68	3.9	5.3	科尔沁			
23	2013-03-30 ~ 2013-05-07	盖州	41	4.0	2013-03-30	3.9	126	1	10	0.67	4.5	5.1	灯塔			
24	2012-04-04 ~ 2012-10-04	灯塔	183	4.1	2012-04-04	2.9	18	1	16	0.57	4.1	5.3	科尔沁			
25	2013-01-21 ~ 2013-02-08	科尔沁	18	4.4	2013-01-21	3.5	9	1	3	4	4	5.3	科尔沁			

注：后续地震为震后 1 年内、震群周围 400km 范围内发生的 M>4.6 地震；如下划线的震群为震群中最大地震发生在震群开始的当天；N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 分别代表 4.3、3.2 级地震频次；\* 表示资料来自《辽宁省地震目录（公元 2 ~ 1989 年）》①。

① 谷光裕, 1995, 辽宁省地震目录 (公元 2 ~ 1989 年)

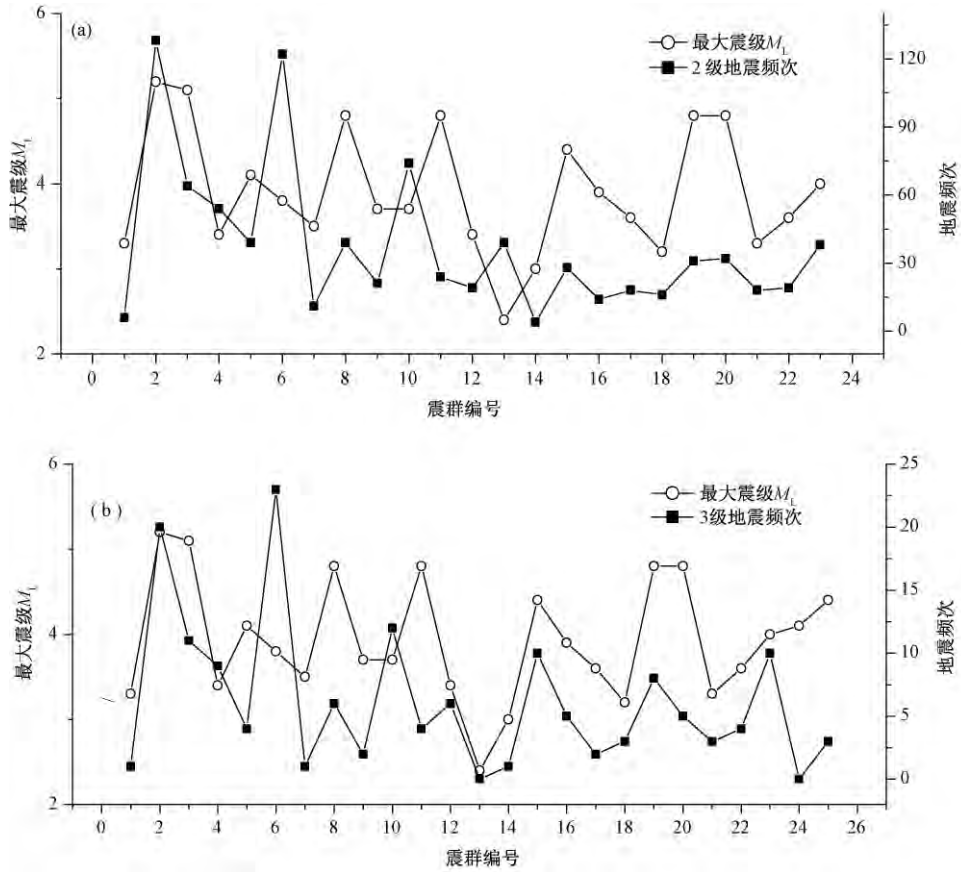


图4 震群中震级最大地震与中小地震频次  
(a) 2级地震; (b) 3级地震

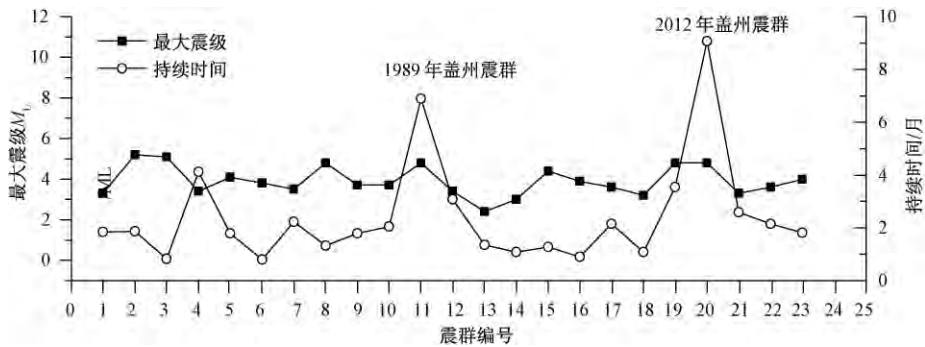


图5 震群中震级最大地震与震群持续活动时间

目前有关震群性质的识别方法除了常规的统计特征识别外,地震波形特征的研究也常用来帮助识别震群的前兆性质,如初动符号、震源机制、P波和S波振幅比、尾波衰减等。客观地说,尽管已有学者对震群进行了大量分析研究(韩志军等,2003),但肯定存在诸多不足之处,以至至今尚未发现或归纳出一种公认的、令人信服的、能解释大部分震群生成机理的

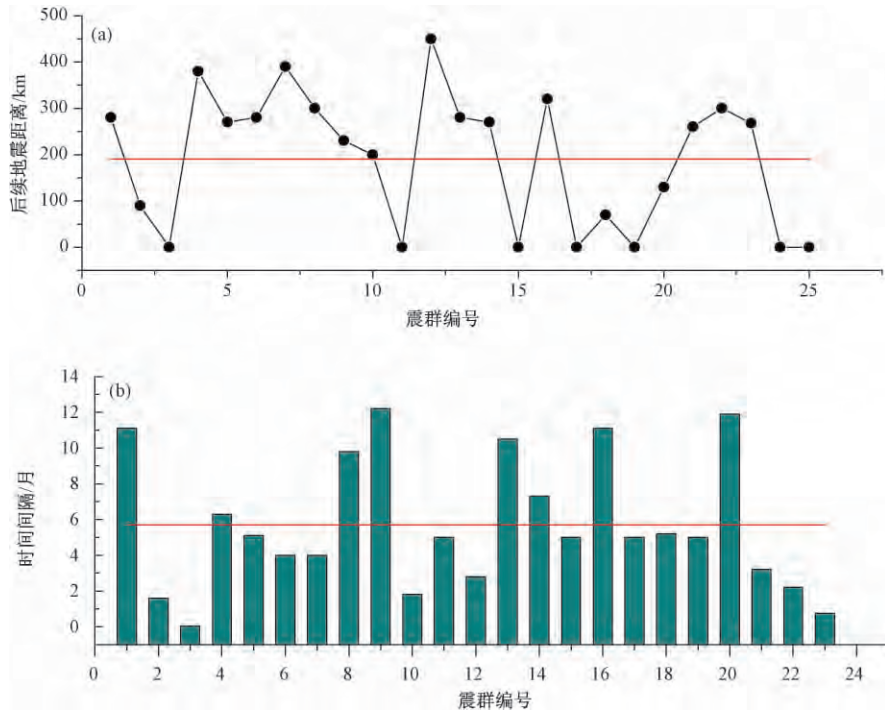


图6 辽宁地区小震群与后续中强震的距离和时间间隔

(a) 震群与中强震间的距离; (b) 震群与中强震的时间间隔

— 均值

模型;也没找到一种满意的方法,能快速、准确地判断震群性质,尤其是能有效、快速、准确地地区分前震序列和普通震群序列,从而快速预测地震活动区的未来地震形势的方法。但无论如何,已发现小震群活动直接或间接地与该区附近大地震有关,而其内在联系机制仍有待探究。对震群产生机理的分析认为,小震群活动展示了孕震区构造应力场地震应变能积累和释过程的信息,且小震群的成因十分复杂。各种类型地震活动包括小震群活动均可视为一种场效应(宋俊高等,1998)。在地壳应力场作用下,孕震区(其总面积有可能达数十万至上百万平)复杂的介质和各种格局的间断面结构,显示出多个应力集中点,在规模和过程各异的演变中,如果应力集中点是固结区,且介质均匀,则是未来大地震的孕震区;如果是易碎区且介质比较均匀,可先期破裂成为前震型序列活动;如果介质十分复杂而且构造格架满足立交模式(秦保燕,2000),这时因双层岩石圈的解耦作用将发生小震群活动。顾浩鼎等(1980)在研究海城地震前的小震群活动时指出,小震群活动表现出的阶段性同地壳垂直运动的阶段性完全吻合,用辽东半岛南端金县短水准测量资料同震前小震群活动比较来说明海城地震前地壳垂直形变异常变化的3个阶段:第1阶段是地壳运动相对缓慢的阶段;第2阶段是地壳的反向运动阶段;第3阶段为地壳快速运动阶段。从2种资料的定性对比不难看出,小震群活动的出现并非偶然,而是在地壳活动增强的背景上发生的。

本文研究发现,辽宁地区震群的前兆性质除了参考震群定量判定指标以外,还应重点关注震群中3、4级地震频次和序列**b**值。当震群中3、4级地震频次大于等于10和4时,若同



时序列的  $b$  值介于 0.6~0.9 之间,此时可判定震群为前兆震群,后续中强震的判定标准为:时间上震群开始后 1 年内,平均 6 个月;地点上距离震群所在地约 0~400km,平均为 180km;最大强度上由  $b$  值截距预测的最大地震的震级加 2.0 级。当  $b \leq 0.5$  时,可以考虑震群为前震序列的可能,即震群开始后 1~20 天内原地有发生 5 级以上地震的危险。当然,这些只是基于震群本身的统计特征得出的结论,未来可以结合数字地震学方法(S 波分裂、P 波初动等)、地壳形变(GPS 和区域短水准等)以及震群所在地的地质构造等,进行更深入细致的研究工作。

### 3 结论与讨论

(1) 1970 年以来辽宁及邻区的 25 次震群中,最大地震优势发生时段在震群出现后 3 天内的占 68%,84% 的震群最大地震与次大地震的震级差小于等于 0.5 级,平均为 0.35。80% 的震群持续活动时间 2 个月左右。震群中最大地震的震级越大,相应地 2、3 级地震频次也越多,通常 1 个 4 级左右的震群,2 级地震频次平均约为 28,3 级地震约为 6。

(2) 当震群中 3、4 级地震频次大于等于 10 和 4 时,同时序列的  $b$  值介于 0.6~0.9 之间,此时可判定震群为前兆震群,后续中强震的判定标准为:时间上震群开始后 1 年内,平均 6 个月;地点上距离震群所在地约 0~400km,平均为 180km;最大强度上由  $b$  值截距预测的最大地震的震级加 2.0 级。当  $b$  值  $\leq 0.5$  时,可以考虑震群为前震序列的可能,即震群开始后 1~20 天内原地有发生 5 级以上地震的危险。林邦慧等(1994)在研究中国  $M \geq 5.5$  地震的前震和前震序列时也发现,前震序列的  $b$  值比较小,为 0.3~0.45(占 64%),前兆震群  $b$  值为 0.6~1.4(占 80%)。本文所得前震序列、前兆震群的  $b$  值与林邦慧等(1994)的研究结果基本相符。

(3) 25 次震群中 80% 于 1 年内对应了  $M \geq 4.6$  地震,空间上辽宁内陆的震群对辽南和唐山地区的  $M \geq 4.6$  地震有较好的指示,长岛和黑山岛附近海域的震群对渤海海峡及其附近地区的  $M \geq 4.6$  地震有较好的指示。当震群为弱震区域背景下的显著 4 级震群时,不排除 1 年内原地发生 5 级左右地震的可能(如 2013 年灯塔 5.1 级和科尔沁 5.3 级地震前的 4 级震群)。刘西林等(2007)研究认为,山东地区的小震群多对应外围的中强地震,在原地发生中强地震的仅有 1 次,即 1990 年 8 月 1 日苍山  $M_L 4.4$  小震群后,间隔了 5 年多时间才在原地发生了 1995 年 9 月 20 日苍山  $M 5.2$  地震。由此看来,辽宁地区震群序列区别于其他地区的主要特点不仅是海城-岫岩地区的前震序列,而弱震区发生的 4 级左右显著震群对未来中强震的地点也有一定指示意义(曹凤娟等,2010)。

此外,需说明的是,如果严格按照陆远忠等(1984)、宋俊高等(1998)等对震群的定义,表 2 中序号 11 的 1989 盖州  $M_L 4.8$  地震序列不能称为“震群”,因为震群中的最大地震与次大地震震级差为 1.2,大于 1.1。但考虑到 2012 年以来盖州地区震群活动持续活跃,从震群类比和跟踪的角度,本文将其收录一并加以分析。从中也发现有些问题值得我们深思和进一步研究。首先从图 5 可以看出,辽宁地区 80% 的震群持续时间为 2~3 个月,而盖州地区的 2 次震群例外,1989 年和 2012 年盖州 2 次  $M_L 4.8$  “震群”持续时间分别为 239、324 天。其次,2012 年盖州 4.8 级震群中 4 级地震频次为 4,相比之下 3 级地震频次仅为 5,这似乎也与常规震群不符合。再有,盖州地区自 2013 年 12 月 23 日开始的新一丛震群序列依然在持续

活动中,截至2014年5月25日,序列共记录3级地震33次,没有4级地震,这也是打破以往统计规律的1次震群。按以往的统计,震群中至少应有1~2次4级以上地震发生,但事实上没有,这也是目前震情跟踪和趋势预测工作的不确定性和难点。因此,2012年以来盖州地区震群中这种3、4级地震频次比例“失调”的现象,连同1989年盖州震群中的最大地震与次大地震震级差为1.2的现象,也许是由于该区特有的地质构造或应力环境所致,我们暂且将其作为“特例”来一并分析,当然,也许是这一震群分析方法本身的局限性所致,这有待后续进一步深入研究。

震群的定义,最早源于新西兰学者 Evison (1977),他认为所谓震群是这样一组地震序列,其中没有一个地震在震级上明显超过其余的地震,此后陆远忠等(1984)结合我国东部震群活动特征,将其进一步做了说明,包括日频次、总频次、分布范围、最大震级和震级差等。但同时也提到,在实际使用时,可根据具体情况做相应的调整。就辽宁地区而言,对震群的分布范围和有关频次的界定更严格了,但震级差的界定上似乎要适当放宽,尽管辽宁地区84%的震群的最大地震和次大地震震级差 $\leq 0.5$ (图3)。也就是说,在震群资料筛选和界定上,空间范围的集中度和震群规模的大小似乎比震群中最大地震与次大地震的震级差所起的作用大。

致谢:审稿老师的耐心指教使本文增色很多,也让本人受益匪浅,在此深表感谢。

## 参考文献

- 曹凤娟、徐心同,2010,辽宁地区  $M \geq 5.0$  地震前4级地震集中活动的震兆研究,防灾减灾学报,26(3),18~24。
- 顾浩鼎、曹天青,1980,前兆震群和S波偏振,地震学报,2(4),342~355。
- 国家地震局预测预防司,1997,测震学分析预报方法,105~107,北京:地震出版社。
- 韩志军、王桂兰、周成虎等,2003,地震序列研究现状与研究方向探讨,地球物理学进展,18(1),74~78。
- 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。
- 李冬梅、周翠英、董翔等,2011,山东地区震群活动与周围地区中强地震的关系,华北地震科学,29(4),21~26。
- 林邦慧、李大鹏、刘杰等,1994,前震和前震序列的研究,地震学报,16(增刊),24~38。
- 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),457~464。
- 陆远忠、李胜乐、邓志辉等,2002,基于GIS的地震分析预报系统,117~119,成都:成都地图出版社。
- 陆远忠、宋俊高、戴维乐,1984,一个判断震情的指标——震群U值,地震学报,6(增刊),495~508。
- 秦保燕、姜秀娥,2000,震群时空演化成因与强震预报,高原地震,12(1),1~8。
- 宋俊高、王炜,1998,震群活动和地震预报综述,国际地震动态,(9),6~11。
- 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),23~31。
- 孙文福、焦明若、李芳等,2007,辽宁地区震群序列特征及其性质判定方法的研究,东北地震研究,23(2),1~15。
- 孙文福、王玉莹、李芳,2000,辽宁地区震群序列性质的研究,地震,20(4),63~68。
- 王炜、杨德志,1984,利用Weibull分布研究华北地区前兆震群的特征,中国地震,3(4),48~49。
- 张卫东、许世昌、刘旭东等,2002,两次岫岩震群的特征及其预报意义研究,东北地震研究,18(1),24~30。
- 周仕勇、许忠淮,1999,地震序列研究综述,中国地震,15(3),268~277。
- 朱传镇、王林瑛,1989,震群信息熵异常与地震预测,见:许绍燮、陆远忠、朱传镇等,地震预报方法实用化研究文集(地震学专辑),229~242,北京:学术书刊出版社。
- Evison F F, 1977, The precursory earthquake swarm, Phys Earth Planet Interiors, 15, 19~23.
- Evison F F, Rhoades D A, 1999, The precursory earthquake swarm in Japan: hypothesis test, Earth Planets Space, 51, 1267~1277.

Mogi K, 1963, Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms——The fracture of a semi-infinite body caused by inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena(3), Bull of the Earthquake Research Institute Univ Tokyo, 41, 615 ~ 658.

## The study on the statistical characteristics of the earthquake swarms in Liaoning and the prediction significance

Cao Fengjuan<sup>1)</sup> Zhai Lina<sup>1)</sup> Yin Yina<sup>1)</sup> Yang Muping<sup>1)</sup> Zhang Hui<sup>2)</sup> Zhang Bo<sup>1)</sup>

1) Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110034, China

2) Earthquake Administration of Dalian City, Dalian 116021, Liaoning, China

**Abstract** In this paper, 25 earthquake swarms occurring in Liaoning and its adjacent area since 1970 were systematically studied. The parameter characteristics of the earthquake swarms were summarized, and the relationship between earthquake swarms and the moderately strong earthquake in the future was discussed. The results showed that: (1) 68% of the largest earthquake occurred within 3 days, 84% of the magnitude difference between major earthquake and the maximum earthquake was less than or equal to 0.5, with the average of 0.35, and 80% of the earthquake swarms had a duration of 2 months; (2) the greater the magnitude of the maximum earthquake, the more frequent the corresponding earthquakes of  $M2.0$  and  $M3.0$ . In general, there were about 28 earthquakes with  $M2.0$  and 6 earthquakes with  $M3.0$  in an  $M4.0$  earthquake swarm; (3) when the frequency of earthquakes with  $M3.0$ ,  $M4.0$  in the earthquake swarms was greater than or equal to 10 and 4 times respectively with the  $b$ -value of the sequence being 0.6 ~ 0.9, it would be determined as a precursor earthquake swarms. The criterion of three factors of med-strong earthquake in the future was determined as follows: the seismogenic time should be within 1 year (6 months averaged) after the appearance of the earthquake swarms; the epicenter should be located ranging from 0km to 400km (180km averaged) of the earthquake swarms; the maximum intensity should be added 2 to the G-R predicted maximum magnitude; when the  $b$ -value was less than 0.5, the earthquake swarms would become foreshock sequence, which means  $M \geq 5.0$  earthquake would occur in situ area in 1 day to 20 days after the earthquake swarms; (4) 80% of 25 earthquake swarms were corresponding to  $M \geq 4.6$  earthquake after 1 year. The earthquake swarms in Liaoning Inland could provide a good prediction for  $M4.6$  earthquake in the Liaonan and Tangshan region, while the same method could be used analyzing the earthquake swarms in the waters near Heishan island and Long island for  $M4.6$  earthquake in the Bohai Strait and its nearby region.

**Key words:** Earthquake swarms Intensity The duration  $b$ -value