

陈颀、刘杰、杨文, 2015, 前震序列的图像特征研究, 中国地震, 31 (2), 177 ~ 187。

• 前震研究 •

前震序列的图像特征研究

陈颀¹⁾ 刘杰²⁾ 杨文²⁾

1) 中国地震局, 北京市复兴路 63 号 100036

2) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 地震丛集在时间和空间上分布具有不同的特征, 2 个特殊的例子就是前震序列和震群。基于对 1966 ~ 1996 年中国大陆 8 个前震序列的分析, 本研究提取了如下前震序列的图像特征: ①前震序列的震中在空间上密集集中; ②前震的震源机制与主震的震源机制相似, 而这种与主震震源机制的一致性在余震序列和震群中并不存在; ③这 30 年在中国大陆我们尚未发现主震之前的前震丛集的震源机制不一致。最后, 我们发现中国大陆 5% 的主震前发生前震序列。

关键词: 前震序列 地震图像 震源机制一致性

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0177-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

前震无疑是与主震发生物理相关的前兆。利用前震进行预测, 特别是临震预报是非常重要的。如果一个或多个地震在主震之前发生并位于主震附近, 很显然这个或这些地震被认为是主震的前震。尽管如此, 从背景地震活动中区分出前震是比较困难的, 这也是本文研究前震序列的原因。前震序列是包含了很多前震的地震丛集。根据前震的不同定义 (Wyss, 1991; Seggern, 1981), 我们总结了如下 4 点:

- (1) 前震序列是一种高频率的地震活动, 比如, 前震的活动频率比背景地震的活动频率高;
- (2) 前震序列在主震之前发生 (几个小时到几天);
- (3) 前震序列发生的位置与主震相同, 因此, 前震序列可以指示即将发生的主震的位置;
- (4) 主震的震级比前震序列中任何一个地震的震级都大。

[收稿日期] 2015-03-26

[项目类别] 国家自然科学基金 (59574203)、地震联合基金 (95070437) 共同资助; 本文是作者 1990 年代的研究成果, 原文发表在 *Pure Appl Geophys* (1999 年第 155 卷第 395 ~ 408 页)。现以中文发表, 供地震分析预测研究人员参考。

[作者简介] 陈颀, 男, 1942 年生, 中国科学院院士。E-mail: yongchen@seis.ac.cn

前震和主震的关系已研究了数十年 (Seggern, 1981; Wyss, 1991), 本文我们主要讨论前震序列与震群的区别, 即前震序列与其后无主震的其他序列在地震活动图像上的差别。我们从震例开始研究。

1 震例研究: 前震序列

1975 年 2 月 4 日辽宁海城 7.3 级地震 (Chen, 1979) 震中区的背景地震活动性很低, 但是, 自 1975 年 2 月 1 日开始, 距震中 20km 的石鹏峪地震台记录到 521 个前震。主震前几天, 震中附近的地震活动明显增强——前震的普通特征 (图 1)。地震目录的统计研究表明前震的发生率明显高于背景水平 (Bowman et al, 1984)。

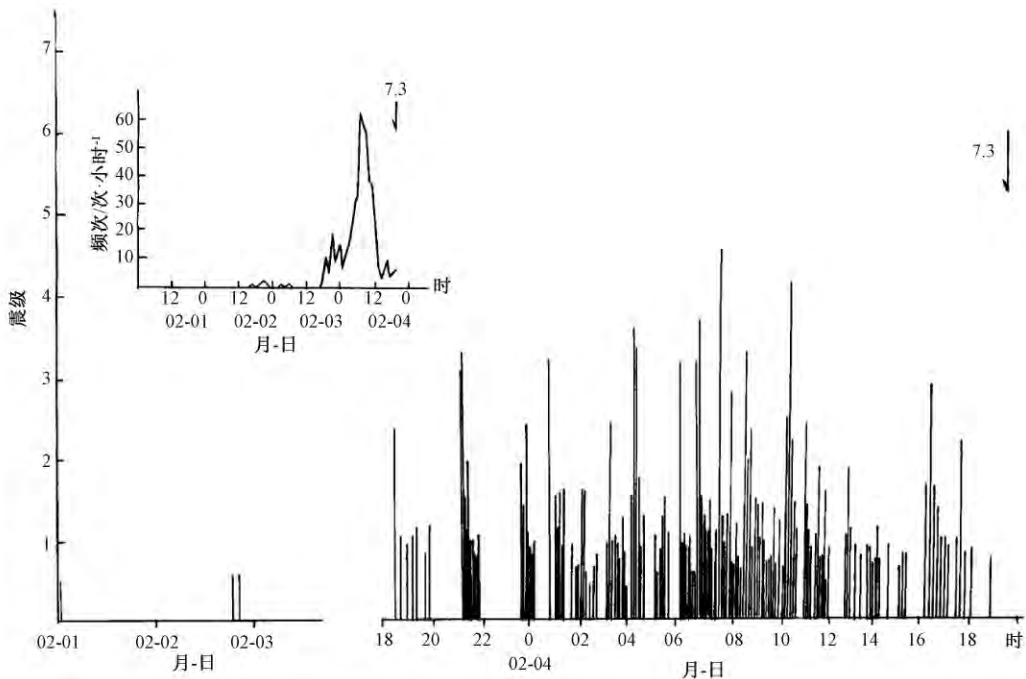


图 1 1975 年 2 月 1 ~ 4 日辽宁海城附近发生的前震 $M-t$ 图 (Chen et al., 1988)

7.3 级主震发生在 2 月 4 日 19:36; 左上角小图是 2 月 1 ~ 4 日每小时的前震频次图

海城地震的主震、前震和余震分布通过辽宁省区域地震台网获得 (图 2), 由图 2 可以看出前震的震中密集集中。利用 6 个区域台站的地震到时, Jones 等 (1983) 发现海城地震的前震活动分布在以震中为中心的数千米范围内。

由于区域台网地震定位精度不够高 (约 $\pm 5\text{km}$), 我们利用最近的台站 (石鹏峪台) 的 S 波到时 t_s 与 P 波到时 t_p 之差研究前震的空间丛集。图 3 显示由到时差 $t_s - t_p$ 得到的震中到台站的距离, 图 3 表明前震的 $t_s - t_p$ 是相似的 ($t_s - t_p = 2.5\text{s}$)。考虑到所有前震都位于该台站的相同方向 (图 2), 我们认为前震的震中在空间上是集中的。另一方面, 余震的震中则是分散的 (到时差 $t_s - t_p$ 为 $1.0 \sim 5.5\text{s}$ (图 3))。

海城地震的前震、主震和余震的断层面解如图 4 所示。图 4(a)、4(b) 显示前震的断层

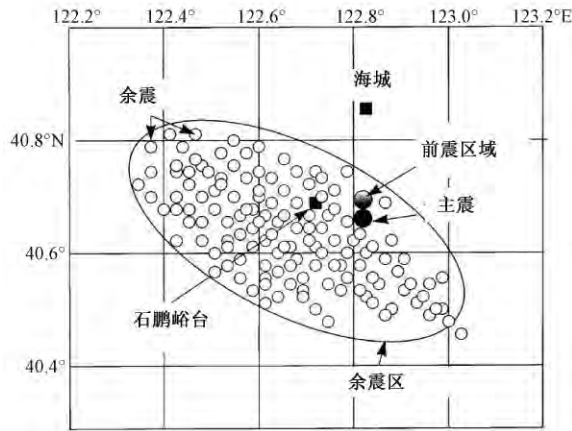


图2 1975年海城地震前震、主震和余震分布图

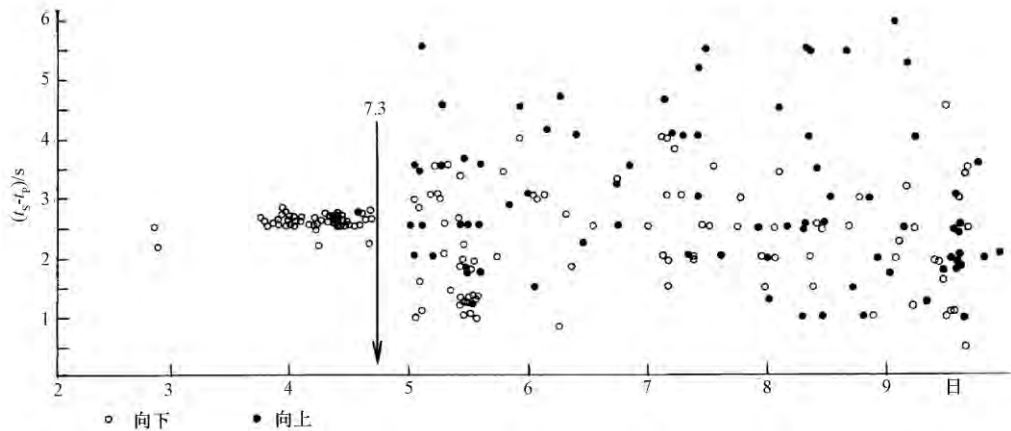


图3 1975年2月1~9日石鹏峪台记录的到时差 $t_s - t_p$ 和P波初动分布图

箭头指示海城7.3级主震的震发时间

面解与主震一致(图4(c))。8个主要余震的震源机制在图4(d)~4(k)中给出,余震的震源机制显然各不相同。1970年代地震监测能力有限,当时只能获得震级大于4级的地震断层面解,因此,图4中仅给出2个前震的断层面解。类似地,我们可以从1966年河北邢台地震的前震序列中发现相同的特征(图5)。

在本研究中,我们感兴趣的并非提取每个前震的震源机制解(事实上因为大部分前震的震级不够大,收集到足够的资料以计算每个事件的震源机制是很困难的),而是前震序列中前震的震源机制的一致性。因此,我们必须找到其它方法来监测震源机制一致性变化。

对于给定的台站和确定的震中区域,我们可以利用台站记录的初动监测震源机制的变化。由图3可以看到石鹏峪台(离前震最近的台站)记录的P波初动在主震之前都是一样的(初动向下),这表明前震的震源机制没有显著的变化。石鹏峪台记录的521个前震中,有79个P波初动可以清楚地识别,而这79个前震中有78个地震的初动都是“向下”。相比

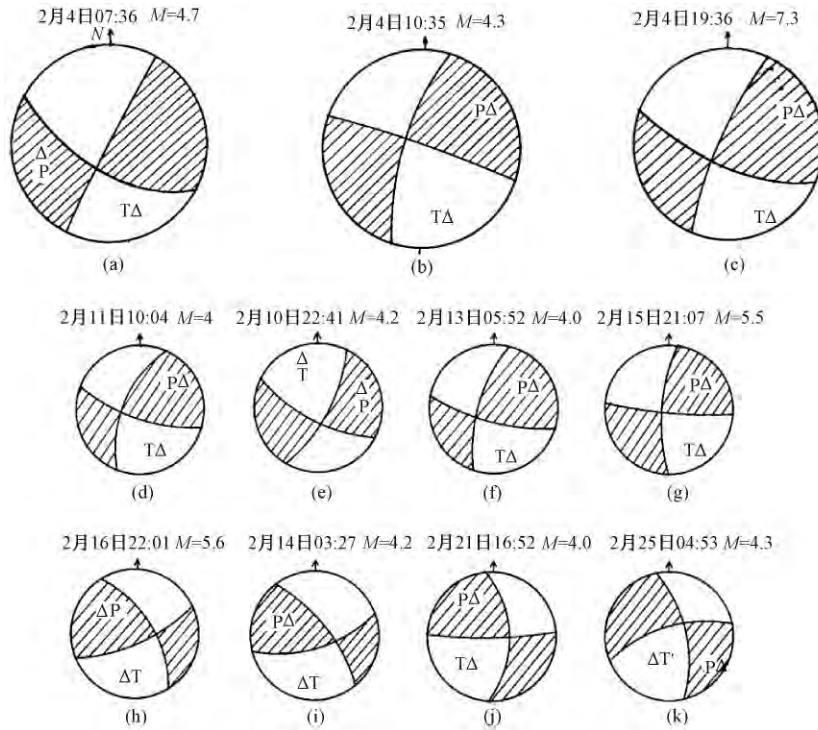


图4 1975年海城地震序列的震源机制解
(a)、(b)前震;(c)主震;(d)~(k)余震

较而言,余震的初动变化较大,一部分“向上”,一部分“向下”。震源机制一致性是1975年海城地震的重要特征。

图6给出了1995年云南孟连7.3级地震(表1)的到时差 $t_s - t_p$ 和P波初动,这些都被距离孟连地震震中120km的地震台站记录到。在最大的6.2级前震发生之前,前震序列的 $t_s - t_p$ 从15s到17s,并且所有的初动都是“向下”。在最大前震发生后,所有事件的P波初动保持“向下”直到7.3级主震发生。主震发生之后状态立刻发生变化:一部分余震的初动“向下”,一部分“向上”。在孟连地震中,震源机制的一致性被用来预测最大地震是否已经发生。

表1 1966~1996年中国大陆前震序列

地震名称	震级	北纬/ (°)	东经/ (°)	前震序列开始时间 (年-月-日)	主震时刻 (月-日-时刻)	总个数	主震与最大 前震震级差	主震与最大 前震距离/km
邢台地震	6.8	37.18	114.54	1966-03-06	03-08-05h	23	1.5	10
乌什地震	6.1	41.19	79.22	1971-03-21	03-24-04h	29	0.1	10
海城地震	7.3	40.63	122.81	1975-02-01	02-04-19h	521	2.6	15
勐腊地震	5.7	21.18	101.30	1975-10-23	10-28-07h	33	1.0	20
龙陵地震	7.3	24.22	98.38	1976-05-29	05-29-23h	16	2.0	20
宁蒗地震	6.7	27.30	101.05	1976-11-04	11-07-02h	16	3.2	15
大同地震	5.8	39.57	113.50	1991-03-21	03-26-02h	13	4.6	10
孟连地震	7.3	22.10	99.60	1995-07-10	07-12-08h	125	1.8	15

海城前震序列的另一个特征是前震序列的时间进程可以分为4步(图7(b)):

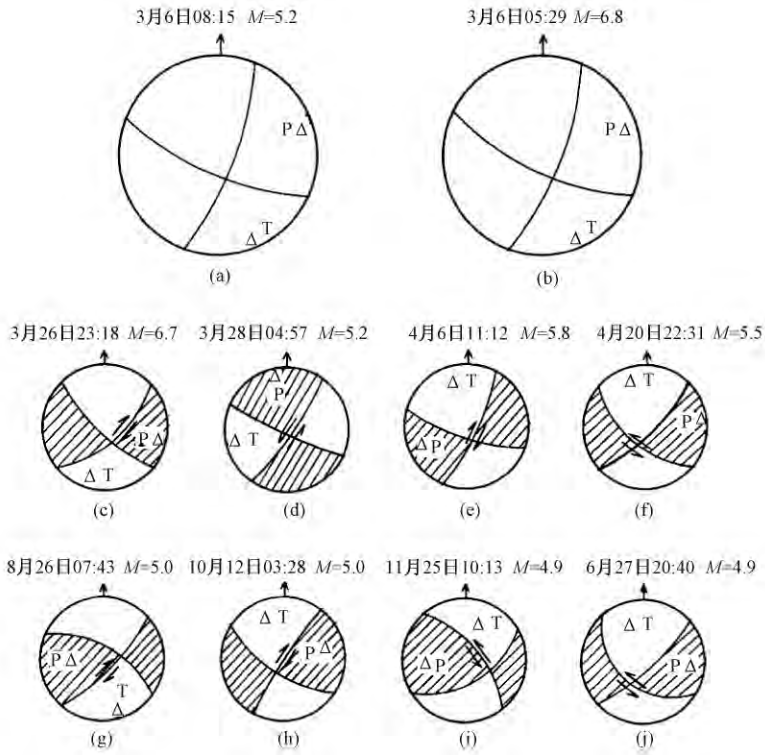


图5 1966年河北邢台地震序列的震源机制解 (Chen, 1979)
(a) 前震; (b) 主震; (c) ~ (j) 余震

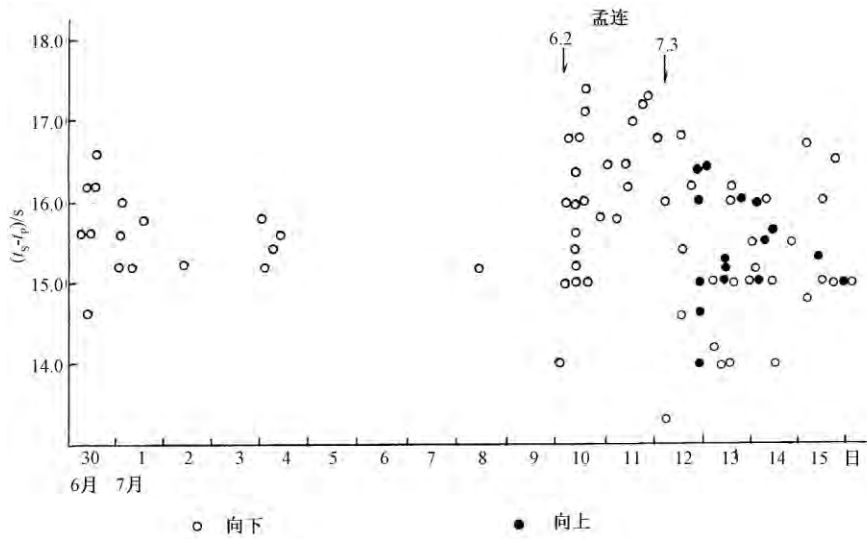


图6 1995年7月1~15日距云南孟连7.3级地震震中120km地震台记录的到时差 $t_s - t_p$ 和P波初动分布图
2个箭头分别指示最大前震和主震的震发时间

- I 非常低的地震活动(长期平均水平);
- II 非常高的地震活动(主震之前达到每天数十个地震);
- III 几小时到 1 天的地震活动“平静”;
- IV 主震发生。

邢台和山西大同的前震序列如图 7(a)、7(c) 所示。前震序列时间进程可分成 4 个步骤,即低活动-强活动(几天)-平静(几小时到 1 天)-主震发生,这在图 7 给出的 3 个前震序列中均存在,但不同序列中每一步的时间间隔有一定差异。一般来讲,主震与前震序列之间存在数小时的地震平静。从以上 3 个序列的研究中,可以看到前震活动从密集活动到平静的突然转变可能是大地震发生的一个重要指标。

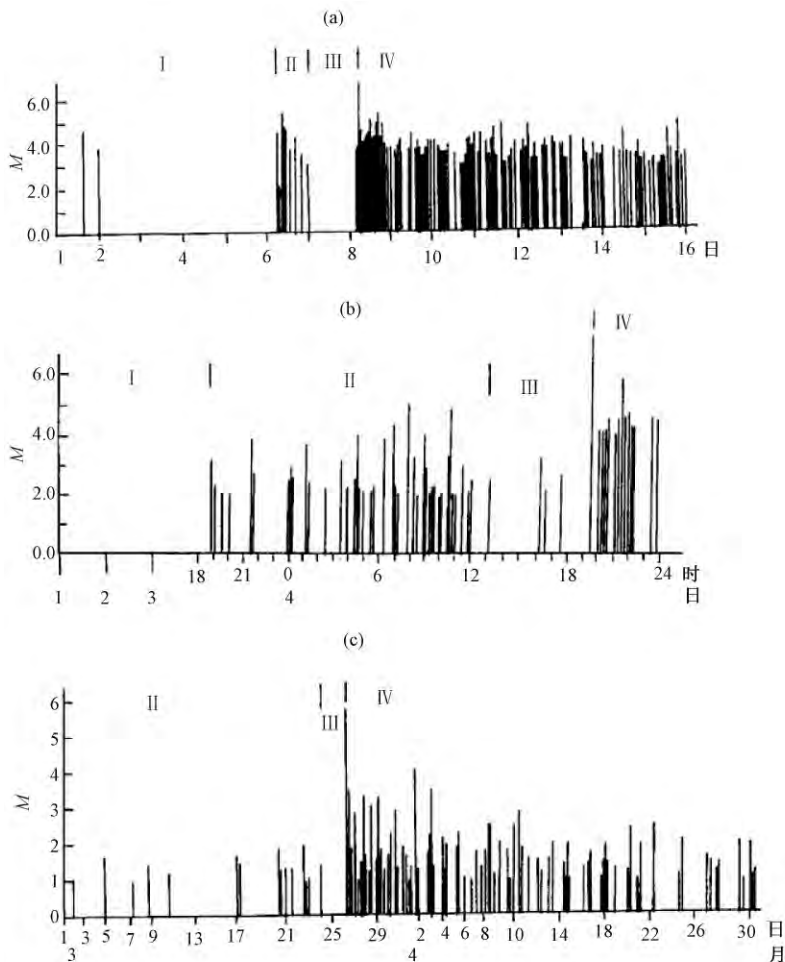


图 7 前震序列 $M-t$ 图

- (a) 1966 年 3 月 8 日邢台 6.8 级地震; (b) 1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震;
 (c) 1991 年 3 月 26 日大同 5.8 级地震。I、II、III、IV 代表前震序列不同阶段(见前文)

这里我们定义前震序列需满足以下条件:

- 发生在主震前 5 天以内;
- 距离主震震中小于 20km;
- 每天 1.5 级以上地震的发生次数大于 10。

基于中国地震目录,我们发现 1966 ~ 1996 年中国大陆大于 5.5 级的主震有 159 个,其中 8 个具有前震序列(表 1),具有前震序列的主震占总数的 5%。最大前震和主震的震级并不系统相关,基于表 1,中国大陆主震和最大前震的平均震级差约为 2.1。

2 震例研究:震群

另外一种地震丛集的形式是震群,即在相同的地方短时间发生许多地震,但后续没有发生大的地震。

1973 年 3 月 4 ~ 24 日,安徽霍山地区发生了震群(31.37° ~ 31.48°N, 116.15° ~ 116.21°E)(表 2)。562 个地震被霍山地震台记录到,其中包括 3 个震级大于 4 级的地震。霍山震群的震中集中在 48km² 的区域内。地震时当地居民能感觉到许多微小震动,问题是这些增强的地震活动是 1 个震群还是 1 个前震序列(即之后有大的地震)呢?

霍山台记录到的霍山震群 $M-t$ 图以及 P 波初动如图 8 所示。1972 年间,即在震群发生的前一年,霍山台记录到的霍山地区背景地震中有 53.4% 的初动“向上”,46.6% 初动“向下”。但是,从 1973 年 3 月 3 日开始,直到 1 个 3.1 级地震发生,所有的地震(47 个事件)的 P 波初动都变为“向下”。随后经过短暂的初动分散之后,直到 1 个较大的 4.5 级地震发生,期间 P 波初动又变成了“向下”。图 9 是霍山震群的地震台站和震中分布。显然,如果地震发生在台站的任意方向,初动“向上”和“向下”的比例不能提供震源机制的任何信息。但是,霍山地区(图 9)所有地震都位于台站的西北方向,这似乎表明震源机制一致性可作为最大地震是否已经到来的指标。

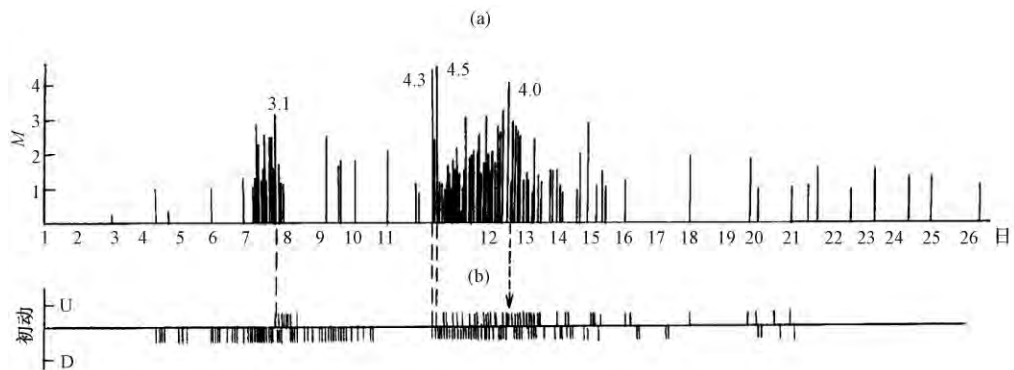


图 8 1973 年 3 月 4 ~ 24 日安徽霍山震群

(a) 地震序列 $M-t$ 图; (b) P 波初动时序图

表 2 给出了 1966 ~ 1996 年华北发生的最大震级大于 4.5 级的震群。比较表 2 与表 1 可以看到震群数量比前震序列多很多。

大部分震群的震级较小。低震级震群的 P 波初动很难被清楚识别。如果能提取并应用震群的新信息,就可能发现新的震群图像特征。在许多震例中,我们可以用 P 波和 S 波的

表 2 1966 ~ 1996 年华北震群

震群名称	最大震级	北纬 / (°)	东经 / (°)	发生时段 (年-月-日)	最大震级与 次大震级差	总个数
山东宁阳震群	5.0	35.70	116.88	1970-08-10 ~ 1970-09-04	1.7	68
山西和顺震群	5.2	37.38	113.50	1971-04-24 ~ 1971-12-01	0.4	315
宁夏吴忠震群	5.2	37.84	106.25	1971-06-10 ~ 1971-09-20	0.3	85
山西平遥震群	4.7	37.17	112.23	1971-11-26 ~ 1971-01-26	0.9	132
山西和顺震群	4.7	37.38	113.49	1972-01-14 ~ 1972-03-26	1.1	120
安徽霍山震群	4.5	31.37	116.17	1973-03-04 ~ 1973-05-11	0.1	562
宁夏泽川震群	5.0	38.02	106.30	1973-11-29 ~ 1973-01-08	0.2	44
河北星河震群	4.9	37.58	115.08	1974-05-21 ~ 1974-08-10	0.6	48
辽宁筏窝震群	5.2	41.21	123.62	1974-11-18 ~ 1974-01-31	1.1	227
天津宝坻震群	4.9	39.13	117.40	1976-08-02 ~ 1976-09-02	0.5	31
内蒙古凉城震群	5.2	40.64	112.53	1976-10-14 ~ 1976-11-14	0.5	39
内蒙古凉城震群	5.2	40.50	112.50	1977-03-02 ~ 1977-06-24	0.9	57
辽宁阜新震群	5.1	41.95	121.30	1977-06-05 ~ 1977-06-11	1.5	21
山东威海震群	4.6	37.52	122.05	1980-05-14 ~ 1980-05-22	0.5	38
山西临县震群	5.1	36.05	113.93	1980-06-04 ~ 1980-11-13	1.7	195
辽宁辽阳震群	5.1	40.68	122.67	1981-08-12 ~ 1981-08-14	0.8	13
内蒙古包头震群	5.1	40.62	109.39	1982-11-21 ~ 1982-04-10	0.0	142
北京怀柔震群	4.9	40.47	116.56	1982-12-10 ~ 1982-12-18	1.2	39
辽宁熊岳震群	4.8	40.45	122.10	1982-11-04 ~ 1982-05-12	0.4	114
北京房山震群	4.7	40.10	115.85	1985-11-21 ~ 1985-11-23	1.2	15
河北辛集震群	4.8	37.72	115.24	1986-02-15 ~ 1986-02-27	0.3	32
宁夏宁武震群	4.9	38.00	106.03	1987-08-10 ~ 1987-10-30	0.0	170
辽宁盖县震群	4.8	40.43	122.39	1989-01-12 ~ 1989-03-17	1.8	53
北京延庆震群	5.0	40.60	115.81	1990-07-15 ~ 1990-08-23	2.2	136
江苏射阳震群	5.0	33.84	120.43	1992-10-22 ~ 1992-11-09	1.0	18
河北滦县震群	5.4	39.81	118.48	1995-10-06 ~ 1995-10-23	2.4	154
北京顺义震群	4.5	40.16	116.50	1996-12-16 ~ 1996-02-28	0.5	264

最大振幅比来监测地震震源机制的改变。根据震源机制的双力偶模型, 比值 A_p/A_s 是方位角的函数。1976 年 7 ~ 9 月在天津宝坻 (39.7°N, 117.2°E) (表 2) 发生 1 个震群, 最近的南山地震台距震群 65km。从南山台记录到的 A_p/A_s 可以监测到震源机制的变化。图 10 显示了 1976 年 8 月宝坻震群 A_p/A_s 值在 8 月 21 日 4.9 级较大地震发生之前比值变化很小。随着比值变化增大 (8 月 21 日 ~ 9 月 1 日), 后面再没有较大地震发生。Jin 等 (1976) 研究了 1975 年海城地震 12 个台站记录的 P 波和 S 波最大垂向振幅的比值, 发现两者比值非常稳定。与中国其他区域的 5 个震群比较, Jin 等认为: “这可能有助于区分前震序列和震群”。Jones 等 (1979) 研究了 3 组主震的前震序列, 发现 P 波和 S 波的振幅比大致相当, 表明每个序列地震的震源机制是一致的。宝坻 4.9 级地震前的观测结果与 Jones 等 (1979) 的结果是一致的。

需要强调的是, 确定震源机制需要密集分布的地震台网 (Ogata et al, 1995、1996)。但是, 监测震源机制的变化却有很多方法, 比如 P 波初动的变化 (Chen, 1979)、P 波与 S 波的振幅比等。这些方法特别是振幅比方法的监测能力, 在监测地震的震源机制变化上是有局限性的。

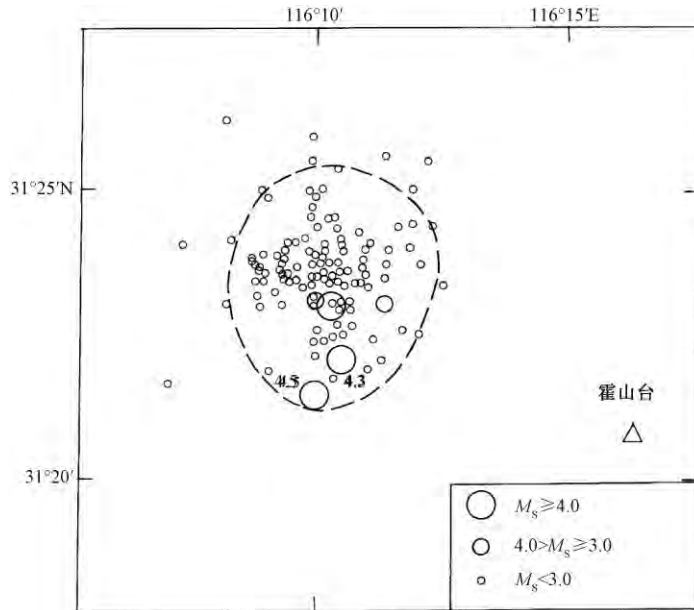
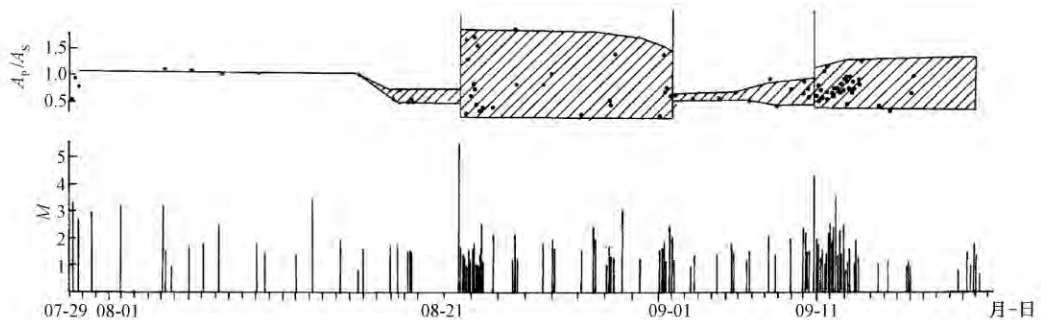


图9 霍山震群和台站分布图

图10 1976年7~9月天津宝坻震群(39.7°N, 117.2°E) P波和S波的振幅比时序图和 $M-t$ 图

3 讨论和结论

中国大陆前震和震群的震例研究表明震群比前震序列多的多,因此前震和其他地震丛的统计识别在地震预测中非常重要。通常认为地震的发生增加了相同位置另一次较大地震发生的可能性,因为第一次地震有可能是前震(Jones, 1985),但本文认为这不一定正确。

震源机制的一致性是区分一组地震是前震序列还是震群的非常重要的特征。对于前者,其震源机制与主震的震源机制是相似的,而对于后者往往不一致。

现有的一些研究显示震群也存在相似的震源机制解(Jones, 1985),但是前震和震群研究的最大问题是数据的缺乏。主震发生之后密集台网的布设可以获得大量的余震数据,然而前震和震群数据的提取则相对受限。在此条件下,我们需要更多的数据来证明震群的震源机制一致或者不一致。

很重要的一点认识是,在 1966~1996 年在中国大陆我们尚未发现主震之前发生的前震的震源机制不一致的震例,即地震丛(前震序列或震群)的震源机制一致性可以作为大震是否来临的一个指标。

在这 30 年中国大陆有前震序列(5 天内和 20km 内)的较大地震约占 5%。这些震例分析给我们提供了利用前震序列预报后续大震的可能性。

Jones (1985) 发现在加州南部 1 个地震发生后的 5 天内且距震中 10km 以内后续有更大地震的可能性为 $(6 \pm 0.5)\%$ 。基于 1970~1977 年 LASA 或者 NORSAR 数据,Seggern (1981) 分析了 510 个不低于 5.8 级的“主震”。基于明确的相对于主震的短暂延时,研究结果显示前震的发生率小于 20%,这一结果与我们的研究也比较吻合。

从地震丛中识别前震需要进行许多前震和背景活动的研究,以确定前震的独有和共性特征,还需要对前震序列和其他后续没有主震的序列做进一步对比研究,所以,更多的震例研究和数据积累是必须的。这些研究为我们估计一个序列是否后续会有大的地震提供了可能。

参考文献

- Bowman J, Kisslinger C, 1984, A test of foreshock occurrence in the central Aleutian Arc, *Bull Seism Soc Am*, **74**, 181~198.
- Chen Y, 1979, Consistency of focal mechanism as a new parameter in describing seismic activity, *Acta Geophysica Sinica*, **22** (2), 142~159.
- Chen Y, Tsoi K L, Chen B, et al, 1988, Great Tangshan earthquake of 1976—An anatomy of disaster, Oxford: Pergamon Press.
- Jin Y, Zhao Y, Chen Y, et al, 1976, A characteristic feature of the dislocation model of foreshocks of the Haicheng earthquake, Liaoning Province, *Acta Geophysica Sinica*, **19** (3), 156~164.
- Jones L M, 1985, Foreshocks and time-dependent earthquake hazard assessment in southern California, *Bull Seism Soc Am*, **75**, 1669~1680.
- Jones L M, Molnar P, 1979, Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults, *J Geophys Res*, **84** (B7), 3596~3608.
- Jones L M, Wang B Q, Xu S X, et al, 1983, The foreshock sequence of the February, 4, 1975, Haicheng earthquake (M7.3), *Acta Seismologica Sinica*, **5** (1), 1~14.
- Lin B H, Li D P, Liu J, et al, 1994, Study on foreshocks and foreshock sequences, *Acta Seismologica Sinica*, **16** (Supp), 24~38.
- Ogata Y, Utsu T, Katsura K, 1995, Statistical features of foreshocks in comparison with other earthquake cluster, *Geophys J Int*, **121**, 233~254.
- Ogata Y, Utsu T, Katsura K, 1996, Statistical discrimination of foreshocks from other earthquake cluster, *Geophys J Int*, **127**, 17~30.
- Seggern D, 1981, Seismicity pattern preceding moderate to major earthquakes, *J Geophys Res*, **86** (B10), 9325~9351.
- Wyss M, 1991, Evaluation of proposed earthquake precursors, American Geophysical Union.

Pattern characteristics of foreshock sequences

*Chen Yong*¹⁾ *Liu Jie*²⁾ *Yang Wen*²⁾

1) China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract Earthquake clusterings in both space and time have various forms. Two typical examples are the foreshock sequences and earthquake swarms. Based on the analysis of 8 foreshock sequences in Chinese mainland during 1966 ~ 1996, this study concentrates on the pattern characteristics of foreshock sequences. The following pattern characteristics of foreshock sequences have been found: (1) The epicenters of foreshock sequences were densely concentrated in space. (2) The focal mechanisms of foreshocks were similar to that of the main shock. Such consistency of focal mechanisms with main shocks did not exist in aftershock series as well as in several earthquake swarms. (3) We found no case in Chinese mainland during the past 30 years that a main shock was preceded by an earthquake clustering with inconsistent focal mechanisms. Finally, we found 5% of the main shocks in Chinese mainland were preceded by foreshock sequences.

Key words: Foreshock sequence Seismic pattern Consistency of focal mechanism