

# 地震活动性图象\*

许绍燮 沈佩文  
(国家地震局地球物理研究所)

## 摘要

本文叙述了在中国,特别是在华北地区观测到的一些地震活动性图象。高震级( $M \geq 7.5$ )地震具有特定的间隔距离。华北近年7级地震分布成条块。强震前的临震地震活动具有相似性。特定地区的地震具有明显的相关性,分析其特征,表明这种相关现象不是一种传播过程;不能用“相关地震间具有直接的断层联系”来解释;而可能是大范围地层同时受力的结果。观测到大震前总有中小地震为其作前奏,并且大小地震间遵循一定的比例关系。以上这些活动性图象,可用地层受力屈曲的机理给以解释。根据这种观点,可推算出一般地震的 $b$ 值将取0.75,火山地震、水库地震以及某些震群的 $b$ 值将取1.5,而沿断层分布的地震的 $b$ 值将为0.5。这些数值与实际情况比较符合,因而本文叙述的现象与分析结果,可能具有普遍意义。

## 一、几种空间分布图象

高震级( $M \geq 7.5$ )地震具有特定的间隔距离:图1给出了我国各个时期 $M \geq 7.5$ 地震的分布。1900年前只有历史资料,我国西部地震大多漏记,故图1中(a)–(f)只有东部地区的地震。从图中可见各个时期的高震级地震间距,大体上有短距与长距两种。1900年后有了仪器资料,测得了我国西部地区的强震(见图1(h))。显然西部地区的地震活动性高,其分布图象也比东部地区复杂些。但与东部地区观测到的高震级地震具有特定的间隔距离的特征并不矛盾。我们将这些地震的间隔距离与相隔时间作成图2<sup>[1]</sup>,从图显然可见,间隔距离有两个卓越分布,短距在480—550公里,长距在1100公里左右。我们解释其成因是受地层屈曲的控制。详细讨论见文献[1]。

华北7级地震的分布条块:1900年以来华北地区有五次7级以上地震,其分布具有相当的规则性(见图3)。这个条块还有许多其他特征,详细讨论可见文献[1]。

临震前的分布图象:上述华北五次7级地震中,后四次已有台网记录。我们观测到这些强震前的临震地震活动性是很相似的。图4中用不同符号画出了这四次强震前一年左右的 $M \geq 4$ (余震 $M \geq 5$ )地震。为了比较,在重叠图形时,分别作了一定程度的转动,其转角已在图中列出。ME为叠图时的主震重叠中心。从图可见,较强的震前活动都集中在一个很小的区域,离开主震约为360公里。图面上地震活动的差异性是很大的,说明现象有很好的重现性。这种重现性甚至对于该地区另二次6级水平地震(河间地震与和林格尔地震)仍是符合的,图4中也叠画了这二次地震。

\* 1980年8月20日收到。

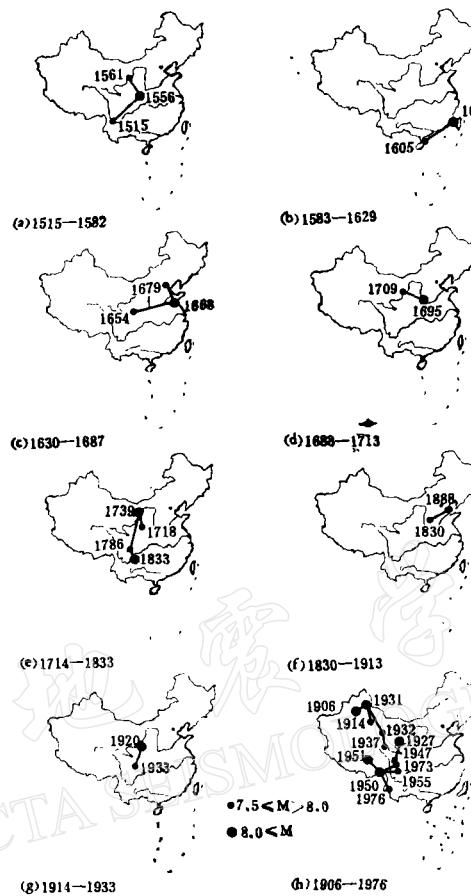
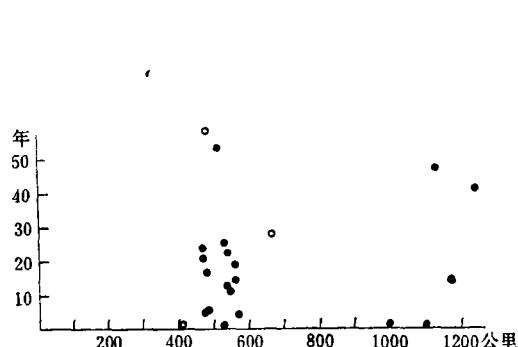
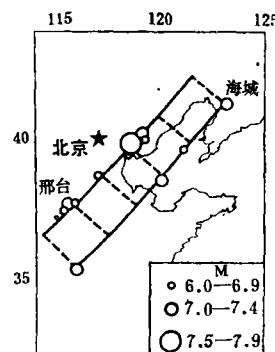
图 1 我国各时期强震 ( $M \geq 7.5$ ) 分布图图 2 我国高震级 ( $M = 7 \frac{1}{2} - 8 \frac{1}{2}$ ) 地震间隔距离

图 3 华北近年强震条块分布图

本节上述的这几种空间分布图象,包括了本地区的全部样本,并非仅从挑选出来的几个震例所得,故我们认为这些图象的重现性是较好的。

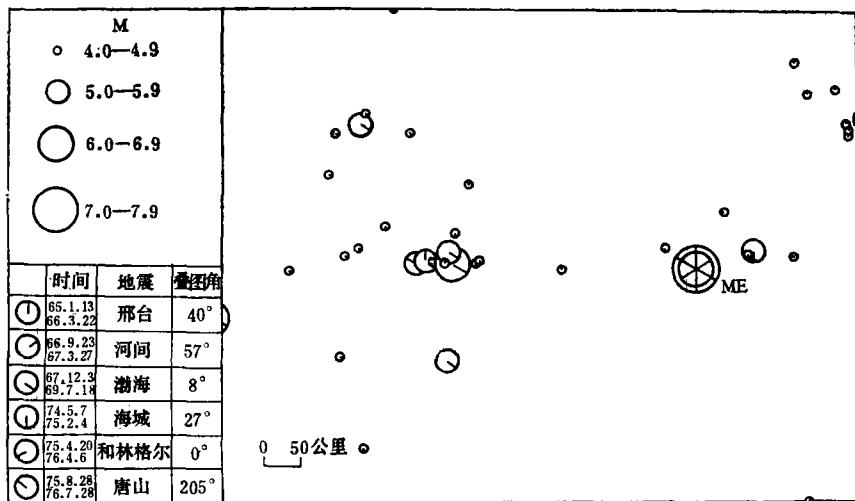


图 4 强震前地震活动分布对比图

## 二、特定地区地震的相关性

作者认为地震活动具有大尺度的现象，我们经常可以看到大范围的地震活动同时高涨，或大范围的地震活动同时趋于平静<sup>[1]</sup>。即一定区域上的地震活动有同步涨落的相关现象。

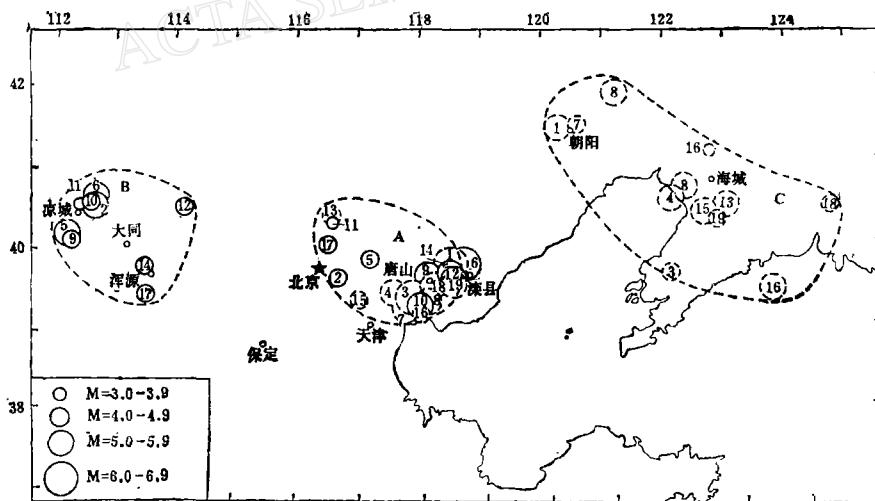


图 5 北京地区与其东西区地震相关区域图

下面我们首先讨论北京及其邻区的地震活动的相关现象。图 5 中我们圈出了中区（北京—唐山）、东区（朝阳—海城）、西区（凉城—浑源）的范围，在这些区域内，在一定限定震级<sup>1)</sup>以上地震全部依次作成  $M(t)$  图（见图 6）。

1) 如西区为 3—4 级，北京为 4 级，唐山为 5 级，朝阳为 4.5 级，海城为 4—5 级。

表 1 北京及其东西区地震相关性分析表

|   | 西 城 区                 | 浑 源 | 北 京 | 中 区                  |                     | 东 区                   |      | 无震间隔时间 | 有震间隔时间 | 无震间隔时间 |
|---|-----------------------|-----|-----|----------------------|---------------------|-----------------------|------|--------|--------|--------|
|   |                       |     |     | 朝 山                  | 阳                   | 海 城                   | 区    |        |        |        |
| 1 | 1976.4.6.00h<br>6.3   |     |     | 1976.7.28.03h<br>7.8 |                     |                       |      | 4.9    |        |        |
| 2 | 1976.9.28.18h<br>4.7  |     |     | 1976.8.31.11h<br>6.3 | 1976.9.5.08h<br>5.3 |                       |      | 23.4   | 4.8    |        |
| 3 | 1976.10.14.22h<br>5.0 |     |     |                      |                     |                       |      | 16.2   | 1.4    | 2.0    |
| 4 |                       |     |     |                      |                     | 1976.11.18.18h<br>4.9 |      | 32.0   | 11.4   |        |
| 5 | 1977.2.2.13h<br>5.0   |     |     |                      |                     | 1976.11.18.18h<br>4.9 | 2.8  |        | 4.9    |        |
| 6 | 1977.3.14.06h<br>5.1  |     |     |                      |                     | 1976.12.4.19h<br>5.2  |      | 13.6   | 5.6    |        |
| 7 |                       |     |     |                      |                     | 1976.12.4.19h<br>5.2  | 2.44 |        | 24.5   |        |
| 8 |                       |     |     |                      |                     |                       |      | 59.8   | 40.7   |        |
| 9 | 1977.8.25.13h<br>4.1  |     |     |                      |                     |                       |      | 31.31  | 4.5    |        |
|   |                       |     |     |                      |                     |                       |      | 45.0   | 3.1    |        |
|   |                       |     |     |                      |                     |                       |      |        | 6.5    |        |
|   |                       |     |     |                      |                     |                       |      |        | 14.52  | 1.6    |
|   |                       |     |     |                      |                     |                       |      |        | 23.72  | 4.9    |
|   |                       |     |     |                      |                     |                       |      |        | 4.83   | 6.2    |
|   |                       |     |     |                      |                     |                       |      |        | 29.83  | 0.6    |
|   |                       |     |     |                      |                     |                       |      |        | 46.38  |        |
|   |                       |     |     |                      |                     |                       |      |        |        | 1.6    |

|    |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     |       |       |      |
|----|---------------------------|-----|---------------------------|-----|----------------------------------|---------------------------|-----|---------------------------|-----|-------|-------|------|
| 10 | 1977.11.6.03 <sup>h</sup> | 4.5 |                           |     | 1977.11.27.06 <sup>h</sup>       | 5.8                       |     |                           |     | 21.13 | 72.6  | 3.4  |
| 11 | 1978.3.6.16 <sup>h</sup>  | 3.2 |                           |     | (1978.3.18.18 <sup>h</sup> ) 3.9 | 1978.3.16.20 <sup>h</sup> | 5.1 |                           |     | 10.19 | 99.4  | 4.7  |
| 12 |                           |     | 1978.4.21.02 <sup>h</sup> | 4.8 |                                  | 1978.4.25.20 <sup>h</sup> | 5.1 |                           |     | 4.75  | 35.24 | 3.5  |
| 13 |                           |     |                           |     |                                  |                           |     | 1978.5.18.20 <sup>h</sup> | 5.8 | 0.71  | 7.4   | 4.9  |
| 14 |                           |     |                           |     | 1978.5.19.13 <sup>h</sup>        | 4.4                       |     |                           |     | 12.73 | 32.4  | 32.4 |
| 15 |                           |     |                           |     |                                  | 1978.6.1.07 <sup>h</sup>  | 5.0 |                           |     | 0.26  | 49.0  | 49.0 |
| 16 |                           |     |                           |     |                                  | 1978.6.1.13 <sup>h</sup>  | 4.8 |                           |     |       | 14.08 | 54.2 |
| 17 |                           |     |                           |     |                                  | 1978.6.22.21 <sup>h</sup> | 4.7 |                           |     | 7.26  | 1.9   | 1.9  |
| 18 |                           |     |                           |     |                                  |                           |     | 1978.8.30.01 <sup>h</sup> | 5.0 |       | 45.93 | 6.3  |
| 19 |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     | 22.23 | 2.1   | 2.1  |
|    |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     | 34.73 | 1.6   | 1.6  |
|    |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     | 51.9  | 51.9  | 51.9 |
|    |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     | 0.67  | 77.2  | 77.2 |
|    |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     | 51.65 | 8.6   | 8.6  |
|    |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     | 6.01  | 4.0   | 4.0  |
|    |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     | 23.92 | 79.8  | 79.8 |
|    |                           |     |                           |     |                                  |                           |     |                           |     | 0.30  |       |      |

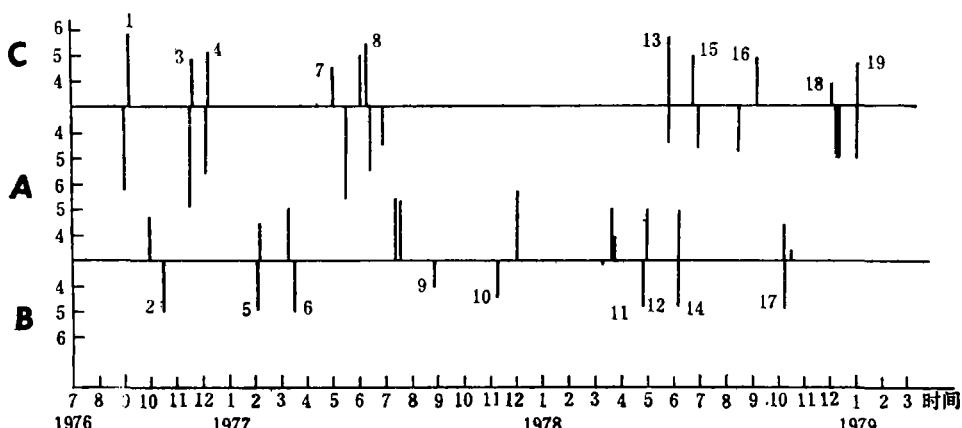


图 6 北京地区与其东西区地震相关系列图

我们发现每当北京—唐山地区有一定震级以上地震发生的前后，在它相邻的东西区总也有相当的地震发生。比较典型的如：1976年11月15日21时唐山、宁河6.9级地震后不到三天，18日10时海城发生4.9级地震。1976年12月2日08时唐山5.7级地震后不到两天半，4日19时海城发生5.2级地震。再如1977年2月2日13时在凉城发生5.0级地震后不到一天半，4日01时北京马驹桥发生4.5级地震。1978年6月1日07时唐山发生5.0级地震后仅6个小时，1日13时浑源发生了4.8级地震。1978年10月3日18时北京怀柔发生一次4.8级地震，仅16小时浑源即发生一次4.9级地震。由于这种某限定震级以上地震在这些地区都是稀有事件，上述地震能如此同步的发生，其偶然碰巧的机会是很小的。为求得一个量的比较，在表1中给出了全部这种同步地震的时间间隔（有震间时）及各对同步地震之间的平静无震时间间隔（无震间时），两者的比值列于表中的最后一栏。如果说两区发生的地震是随机的，那末这种比值既可大于1，也可小于1。但我们看到表中的比值（最后一栏）除仅有一个是0.6（小于1）以外，其他都是大于1。计大于2者占80%以上，大于6者约占一半，大于20者占1/4。这充分说明了同步现象是很明显的，不是偶然巧合。

怀柔—白家疃地区3~4级地震是不多的，自北京台网1966年建设以来，记到怀柔地区较大震级地震只在4级左右，共计有五次。白家疃地区较大震级地震则在3.5级左右，也有五次。很有意思的是这十次地震正好配成五对。最突出的一对是1972年3月25日22时22分在怀柔发生一次4.5级地震，紧跟着32小时后在白家疃发生了一次3.5级地震。这两次地震都是建立台网以来这两个小地区记到的最大地震。而且在这对地震发生以前，有4年多这两地区无3—4级地震，所以这两个地震如此紧接着发生是很引人注目的。表2中给出了这两个小地区全部五对地震的情况。同表1一样，最后一栏为无震间时与有震间时的比值。比值是如此之大，有的竟达到1000倍，故其相关现象应是很突出的。

一定地区的地震具有相关的现象，这种情况在我国已屡见不鲜。如华北与西南<sup>[1]</sup>，云南与四川，华北北部与长江下游，磴口地区与和林格尔地区都有如上所述的相关性。对比

分析这类地震的相关性，我们得到的初步认识是：

(1) 这种相关现象不是一种传播过程。我们将几种尺度的相关地震的时间间隔与其平均距离汇总列于图7下部。从小尺度怀柔—白家疃平均60公里，至较大尺度华北北部与长江下游地区平均900公里，其间隔时间的分布没有什么差别。因之，不能把这种相关地震的时间间隔视为某种效应（在途径上）“传播”所经历的时间（例如像一般称谓的蠕变或形变峰的传播）。

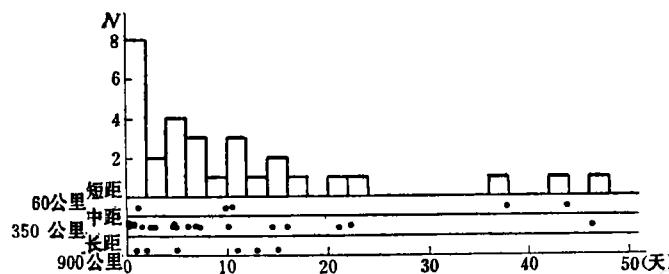


图7 不同尺度相关地震对比图

(2) 这种相关现象可能是某一区域同时受力作用的结果。图7上部是相关地震间隔时间的频次分布。从图中可见，间隔时间短的频次较多，大体是随时间间隔增长而次数减少的一种“衰减”型分布。这很可能是两相关地区同时受力，只是在反应上各有一定的流变性而已。

表2 怀柔—白家疃地震相关性分析表

|   | 怀柔                         |     | 白家疃                        |     | 间隔时间(天) |        | 无震间隔时间<br>有震间隔时间 |
|---|----------------------------|-----|----------------------------|-----|---------|--------|------------------|
|   |                            |     |                            |     | 有震      | 无震     |                  |
| 1 | 1967.11.18 <sup>h</sup>    | 4.2 | 1968.1.1.16 <sup>h</sup>   | 3.0 | 43.92   |        |                  |
|   |                            |     |                            |     |         |        | 35.2             |
| 2 | 1972.3.25.22 <sup>h</sup>  | 4.5 | 1972.3.27.06 <sup>h</sup>  | 3.5 | 1.35    | 1545.3 | 114.5            |
|   |                            |     |                            |     |         |        | 42.2             |
| 3 | 1973.10.18.14 <sup>h</sup> | 3.4 | 1973.11.25.11 <sup>h</sup> | 3.4 | 37.85   | 570.3  | 15.1             |
|   |                            |     |                            |     |         |        | 41.6             |
| 4 | 1978.3.18.18 <sup>h</sup>  | 3.9 | 1978.3.29.05 <sup>h</sup>  | 3.5 | 10.46   | 1574.3 | 151              |
|   |                            |     |                            |     |         |        | 4.9              |
| 5 | 1978.5.19.13 <sup>h</sup>  | 4.4 | 1978.5.29.11 <sup>h</sup>  | 3.1 | 9.9     | 51.3   | 5.2              |
|   |                            |     |                            |     |         |        |                  |

(3) 这种相关现象不宜以“相关地震间具有直接的断层联系”作解释。一般常认为断层两端的地震有相关性。但从我们观测到的现象分析，地震的相关性是在区域与跨距上比较稳定，但每对相关地震的联接线的具体位置则变化很大，展布有相当的宽度。且其展

布宽度甚至已与其跨度相当。图 8 中作出了北京与其东西区每对相关地震的连接线。从这些连线的空间形态——其连接线散布得如此宽广——判断，将相关成因的解释仅停留在断层的观点上是不妥的。

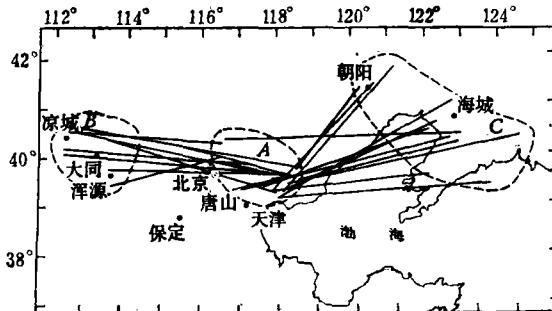


图 8 相关地震连接线散布图

考虑到地震活动具有块体性活动的特点<sup>[1]</sup>，图 5 中勾划出的相关区正好位于我们曾指出过的北京地区的两个块体的边角处（参见文献[1]，图 9）。故我们认为块体受力，对边对角具有相似的应力图象，可能是相关地震的一种初步解释。

### 三、震级分布图象

我们在研究前震系列与震群的区别中，注意到震级序列具有成团分布的特点<sup>[2]</sup>。这就意味着大震必须有中小地震作前奏。这种判断对于震群，水库地震是很明显的，它们总是在地震频繁活动，逐步升级的基础上发生大的地震。但对于一般强震，是否也有这种前奏呢？很有意思的是，我们发现几次大震前，其周围地区的中小地震都是很好地配套，并预示着那个大震的必将发生。

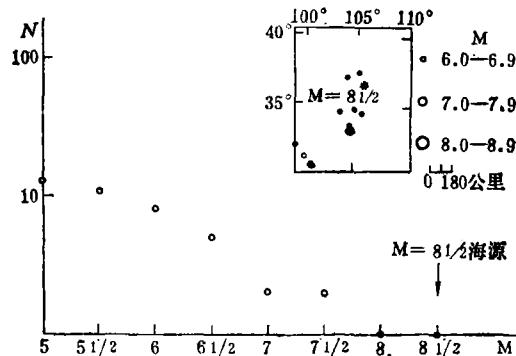


图 9 宁夏海原地区(1765.5—1920.12.16)  
震级频次图

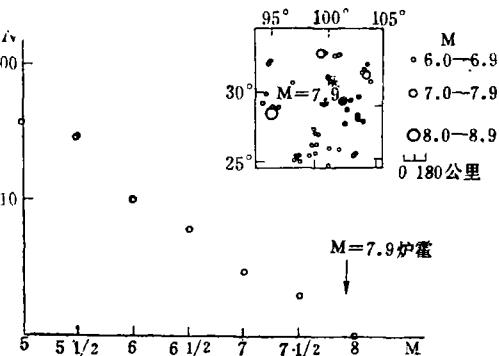


图 10 鲜水河地区(1926.8—1973.2.6)  
震级频次图

图 9 是 1920 年 12 月海原 8.5 级地震的震前活动情况。图中的震级——累积频次关系中的“*b* 直线”预示着这个 8.5 级地震的必将发生！构成这组震前“*b* 直线”的震中分布

已用黑圆点示明于图 9 右上角。追溯时间至 1739 年 1 月，正是该地区发生的上一次 8 级地震（银川—平罗地震）。显然选取构成“*b* 直线”的地震的界限是不含糊的。

图 10 是 1973 年 2 月炉霍 7.9 级地震的震前活动情况。图中的“*b* 直线”也预示着这个 8 级地震的必将发生！构成这组震前“*b* 直线”的震中分布也示于图 10 右上角。时间也自上一次本地区的一次较大地震后起算。

图 11 是又一个震例。有关数据在图中均已标明。所取时间则从本地区有历史资料的 1500 年开始。

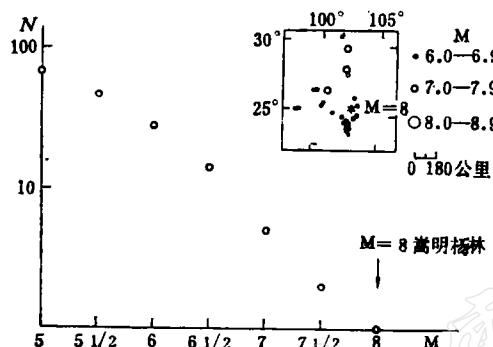


图 11 嵩明杨林地区 (1500—1833.9.6) 震级频次图

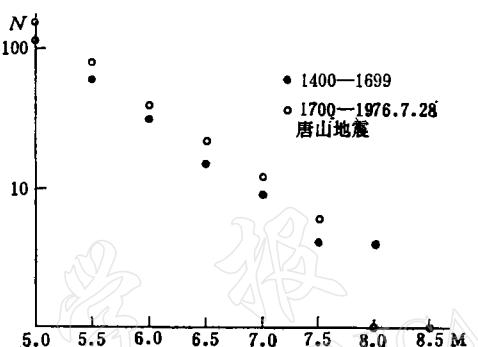


图 12 华北地区震级频次图

华北地区的情况也类似。十七世纪接连发生几次 8 级大震。检查其震前的中小地震也是很配套的。见图 12 中“●”符号的“*b* 直线”。其中 1700 年后华北的地震活动显示出短缺高震级的地震，这也是我们当前正在注意的问题。

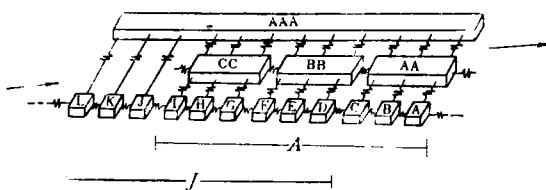


图 13 大小地震关系模式图

从上述强震前有较好的大小地震比例关系来看（如图 13 所示），我们在文献 [2] 中提出的一种模式是值得考虑的。即中小地震不仅有为自己释放能量的一面，而且有使应力在后继大震附近集中的另一面。从而大震必须要有中小地震作前奏。

#### 四、讨 论

根据以上所述，我们观测到地震活动具有块体性活动的特征，分布具有特定的间距，强震多发生在块体的边角处。地震间的相关性表征着地层在大范围能同时受力。这些现象我们认为都是受控于地层的屈曲<sup>[1]</sup>。而大震前必须要有一定比例的中小地震为其作前奏，似也可以用屈曲给出解释：

在文献 [1] 中我们曾指出过, 地震分布的间距, 相应于屈曲的半波长. 而地层受力屈曲时, 其波长主要只决定于地层的厚度:

$$\lambda = \pi \sqrt{\frac{R^2 h^2}{12(1 - \mu^2)}} = c \sqrt{h} \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为半波长,  $R$  为地球半径,  $\mu$  为介质泊松比,  $h$  为地层厚度.  $c$  为常数, 由一定的  $R$ 、 $\mu$  确定.

若估算在一定面积  $A$  范围内的地震数  $N$ , 则

$$N = \frac{A}{\lambda^2} = \frac{A}{c^2 h} \quad (2)$$

$$\therefore \log N = (\log A - \log c^2) - \log h \quad (3)$$

另一方面设地震能量  $E$  比例于参与活动的块体体积  $v$ , 即:

$$E = \varepsilon v \quad (4)$$

其中  $\varepsilon$  为常数. 则在 (2) 式中, 在  $A$  面积范围内, 有  $N$  次地震的那种地震的体积  $v$  应为

$$v = \lambda^2 h = c^2 h^2 \quad (5)$$

$$\therefore E = \varepsilon c^2 h^2 \quad (6)$$

根据能量  $E$  与震级  $M$  的关系<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned} \log E &= \alpha + \beta M \\ &= 11.8 + 1.5M \end{aligned} \quad (7)$$

这种地震的  $M$  有关系式:

$$\log \varepsilon c^2 h^2 = \alpha + \beta M \quad (8)$$

消去 (3), (8) 式中的  $h$ , 得

$$\log N = \left( \log \frac{A \sqrt{\varepsilon}}{c} - \frac{\alpha}{2} \right) - \frac{\beta}{2} M \quad (9)$$

通常大小地震的关系式为

$$\log N = a - bM \quad (10)$$

$$\therefore b = \frac{\beta}{2} = 0.75 \quad (11)$$

这是一般地震中极为常见的  $b$  值,

从这个分析中我们认识到小震对应着薄层的屈曲, 大震对应着厚层的屈曲. 在一定面积上的大小地震比例数是决定于这种特定的几何关系, 故世界各地大小地震的  $b$  值是相当接近的<sup>[4]</sup>.

如果地震的产生不是受控于散布在大范围的地层屈曲, 而是集中在某个特定的体积  $V$  内, 如火山地震, 水库地震, 以及某些震群等, 则 (2) 式中的次数将为  $N'$

$$N' = \frac{V}{\frac{3\pi}{4} r^3} \quad (12)$$

其中  $r$  为地震等效半径. 同样的 (5) 应为

$$v' = \frac{3\pi}{4} r^3 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \therefore E' &= \epsilon \cdot \frac{4\pi}{3} r^3 \\ &= \epsilon \frac{V}{N'} \end{aligned} \quad (14)$$

由(7)得

$$\log N' = (\log \epsilon V - \alpha) - \beta M \quad (15)$$

$$\therefore b' = \beta = 1.5 \quad (16)$$

这正是我们经常遇到的火山地震、水库地震、以及某些震群有比较大的  $b$  值<sup>[5]</sup>.

我们很易计算得,若地震只能在断层上发生,则这些地震的  $b$  值,将为

$$b'' = \frac{\beta}{3} = 0.5 \quad (17)$$

关于  $b$  值的讨论,在地震文献中是很多的了.有的把  $b$  值与应力状态相联系: 应力高,  $b$  值低; 应力低,  $b$  值高.有的将  $b$  与介质的均匀性相联系, 介质均匀,  $b$  值小; 介质复杂,  $b$  值高, 特别在地震预报中, 有的认为大震前  $b$  值变小, 有的认为大震前  $b$  值变大.看来这些解释都存在不少困难.本文则完全从另一种观点——从地震活动性图象, 认识到地震活动受控于地层屈曲——解释了  $b$  值, 我们希望这一对  $b$  值新的观点, 将有助于理解与  $b$  值有关的问题. 又由于  $b$  值在全球的地震活动中是具有普遍意义的现象, 我们对  $b$  值作出的解释, 可能在其他一些地区也会具有一定意义.

### 参 考 文 献

- [1] 许绍燮等, 北京周围地区地震的分布特点与地壳屈曲, 地震学报, 2, 2, 153—168, 1980.
- [2] 许绍燮等, 海城地震前震系列与震群, 地震学报, 3, 1, 1—10, 1981.
- [3] B. Gutenberg, C. Richter. Magnitude and energy of earthquakes, *Ann. Geofis.*, 9, 1, 1956.
- [4] Tokuji Utsu. Some Problems of the Frequency Distribution of Earthquakes in Respect to Magnitude (1), *Geophysical Bulletin of the Hokkaido University*, 17, 106, 1967.
- [5] Z. Suzuki, Statistics of Earthquake, *Journal of the Seismological Society of Japan*, 20, 4, 138, 1967.

## SEISMICITY PATTERN

XU SHAOXIE SHEN PEIWEN

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

### Abstract

The seismicity pattern of China, especially that seen in North China is described in this paper. Strong earthquakes with magnitudes of  $M \geq 7.5$  are found to occur at certain definite intervals of distance. In North China, recent earthquakes with magnitudes  $M \geq 7.0$  occurred within a belt in the form of a stripe. The seismicity immediately before the strong earthquakes show a similar distribution pattern. The strong earthquakes of given separate regions are thus obviously correlatable. Such a correlation can neither be shown to be due to a process of propagation nor be explained by the assumption that correlatable earthquakes are linked by faults. It is thought to be possibly the result of the action of an ambient stress field over a broad region. Medium and small shocks, whose numbers maintain certain constant ratios, are usually observed as preludes to the strong earthquakes.

All of these facts may be considered to be the results of buckling of crustal layers under an ambient stress field. According to this view-point, we are able to calculate the values of  $b$ : equalling 0.75 for average earthquakes; 1.5 for volcanic earthquakes, reservoir earthquakes and some earthquake swarms; and 0.5 for earthquakes on the same fault system. These figures agree rather well with actual observations, so the discussion presented here might have some general significance.