

# 强余震的空间分布特征及其理论解释\*

谷 继 成

(国家地震局地球物理研究所)

谢 小 碧 赵 莉

(中国科学技术大学)

## 摘 要

本文是《强余震的时间分布特征及其理论解释》(地球物理学报, 1979年1期)的继续。文中分析了我国11个强震的余震序列, 结果表明, 强余震的空间分布有以下特点:

1. 强余震的平面分布。强余震主要分布在断层的两端附近及主震震中附近。
2. 强余震的空间迁移具有以下特征: (1) 强余震的迁移范围与主震破裂长度相当, 且随着时间的推移, 迁移的范围越来越大; (2) 其总的迁移范围及迁移方向与主震破裂方式有关。对单侧破裂的较大主震, 强余震相对其震中呈单侧迁移; 对双侧破裂的主震, 其强余震相对其主震震中会呈现松弛振荡式迁移; 对于双震型地震, 强余震往往对第一个“主震”表现为单侧迁移, 对于第二个“主震”表现为两头跳现象。
3. 强余震的垂向分布: 位于主破裂的断层面内, 且在其前缘上。

本文从断裂力学和流变学角度, 对上述观测事实进行了初步理论解释。

## 一、引 言

强烈的浅源地震发生之后, 几乎都会伴随着大量的余震。研究这些余震, 特别是强余震的时空分布规律, 有助于对地震力学过程及地震成因的认识。

强余震的时空分布特征, 国内外已有不少人研究过<sup>[1~5]</sup>。在时间分布方面, 大森房吉是最早系统研究余震序列的。他从统计学出发得到了大森公式。在空间分布方面, 里克特<sup>[1]</sup>在研究南加利福尼亚地区的地震分布时曾指出了前震、主震和余震分布的一般规律。近年来, 日本的山川宜男<sup>[2]</sup>在研究余震分布时, 指出了主震发生后直接余震区、震中高烈度区和主震破裂带三者之间的联系。古普塔 (Gupta)<sup>[3]</sup>根据膨胀-流体饱和假设, 研究余震空间分布与膨胀的关系; 博兰非达 (Bonafeda)<sup>[4]</sup>根据断裂力学与膨胀-流体扩散理论又提出了预报晚期强余震的物理模式。黄福明等从构造应力场角度讨论了强余震的空间分布特征, 指出强余震发生在震后流体静压力引张区。最近, 石川有三等<sup>[6]</sup>又讨论了海城、唐山及盐源地震的余震分布。

我们在前文中<sup>[6]</sup>研究了强余震的时间分布特征, 并从理论上进行了初步探讨。本文

\* 1980年8月1日收到。

将从我国近年发生的一些大震的实际观测资料出发,分析总结强余震的空间分布规律,并对它作理论上的探讨。

## 二、资料处理

本文分析处理了我国大陆地区近年来发生的11个大地震的余震序列(表1)。对这些大震的强余震空间分布,作了时空迁移图,平面分布图,海城地震深度剖面分布图。

时空迁移图是以主震震中为原点,横坐标是时间轴(若以对数尺度表示时,主震时间取为1),纵坐标是余震带中(或在主震断层上)的相对位置,单位为公里。

## 三、强余震的空间分布特征

通过对我国大陆地区近年来发生的十一次大震的强余震序列的研究,发现其空间分布具有以下主要特点:

### 1. 强余震往往发生在主震附近或断层两端附近

强余震震中分布在主震断层的两端附近或主震震中附近是其平面分布特点。对单侧破裂,强余震往往发生在主震断层的两端附近(主震在断层的一端),对双侧破裂的大震,除两端附近外,主震震中附近也是强余震发生的地方之一。

里克特<sup>[1]</sup>在研究南加利福尼亚的地震分布时,曾发现大地震的震中常位于断层的一端,最大强余震的震中常位于断层的另一端,其它的余震沿整个断层分布且偏在主震震中的一侧。近年来,日本的山川宜男<sup>[2]</sup>在研究余震分布时指出,主震发生后直接余震区。震中高烈度区和由主震破裂引起的震中隆起带,三者基本上重合,而主震通常靠近这一区域的边缘部分。

分析了近年来国内一些强烈地震后,发现余震的空间分布同样具有上述的特点。作为一个突出的例子,图1给出了1975年2月4日辽宁海城地震的前震、主震断层、较强余

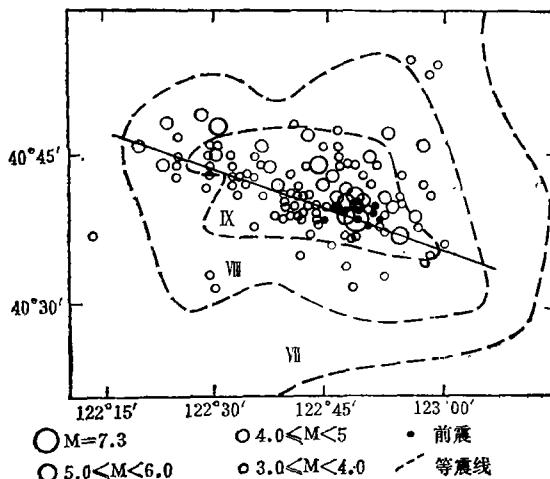


图1 海城地震前震、主震、较强余震和等震线图

震和烈度分布之间的相互关系。图中可以看出较大余震大都分布在主破裂两侧 IX 度圈以内的地区，而主震位于 IX 度区的东南侧。前震位于主震附近。不过值得指出的是，如果主震为双侧破裂，那么主震震中也有可能位于余震带和高烈度区的中部，如唐山地震、通海地震等。

此外，还观察到直接余震区中强余震并不是平均地分布，而是相对集中在主震震中和主破裂的两端附近。无论从余震的强度分布或单位面积所释放的能量密度来讲，都表现出明显的“三点分布”特点。图 2(a-d) 分别划出了 1970 年通海、1966 年邢台、1975 年海城和 1976 年唐山地震后强余震的“三点分布”特点。

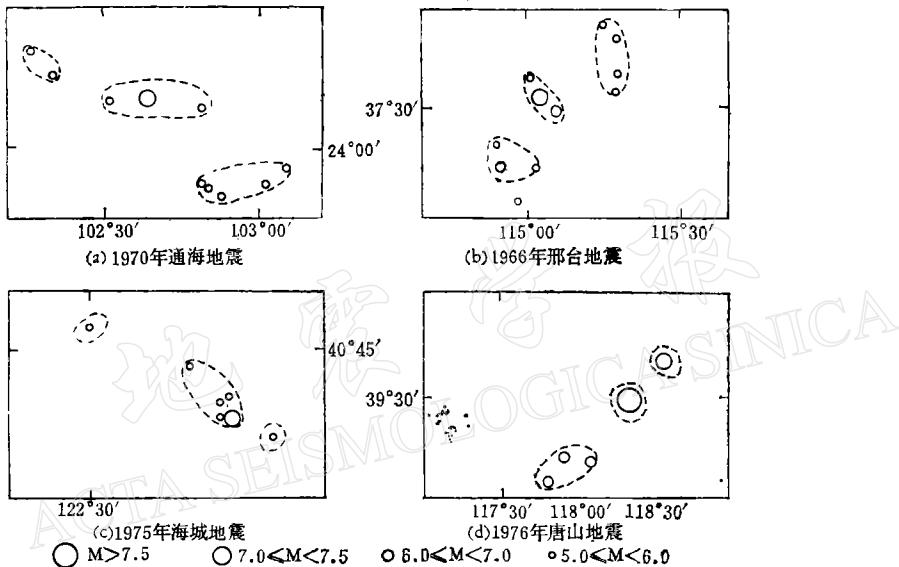


图 2 强余震的“三点分布”

(a)—通海 (b)—邢台 (c)—海城 (d)—唐山

## 2. 强余震的空间迁移现象

1966 年邢台地震后，我国地震工作者<sup>[8]</sup>曾发现余震带中较强余震的发生往往有明显的南北迁移特点，并形象地称此为“两头跳”现象。1964 年美国阿拉斯加地震后也有人发现<sup>[9]</sup>强余震的活动性往往表现为在余震带中从一端到另一端的迁移。

研究了国内一些余震序列后发现，对于一些震级高，震源尺度较大的地震，经常可以看到这种两头跳的现象，而对一些震级和震源尺度都较小的地震来说，这一现象不明显。图 3(a-c) 分别画出了邢台、海城、唐山三个地震后较强余震的时空迁移情况。图中纵坐标是在余震带中(或在主震断层上)的相对位置，单位为公里。横坐标是时间的对数。作为比较，图 3(d) 也给出了阿拉斯加地震后余震的时空迁移情况(纵坐标仍为在余震带中的相对位置，横坐标为时间)。从图 3 中可以清楚地看出这种时空迁移具有这样一些特点：(1)余震在空间上的位置相对其时间来说表现为一种周期性的变动。随着时间的推移，这种变动的周期越来越长，很象一种张弛振动的图形，如图 4 所示。(2)其中较强的余震往往发生在两端或主震的位置附近。(3)强余震的空间迁移范围与主破裂的长度相当。(4)迁移现象有时表现为两端的成丛迁移。例如邢台地震的后期这一现象就比较明显。

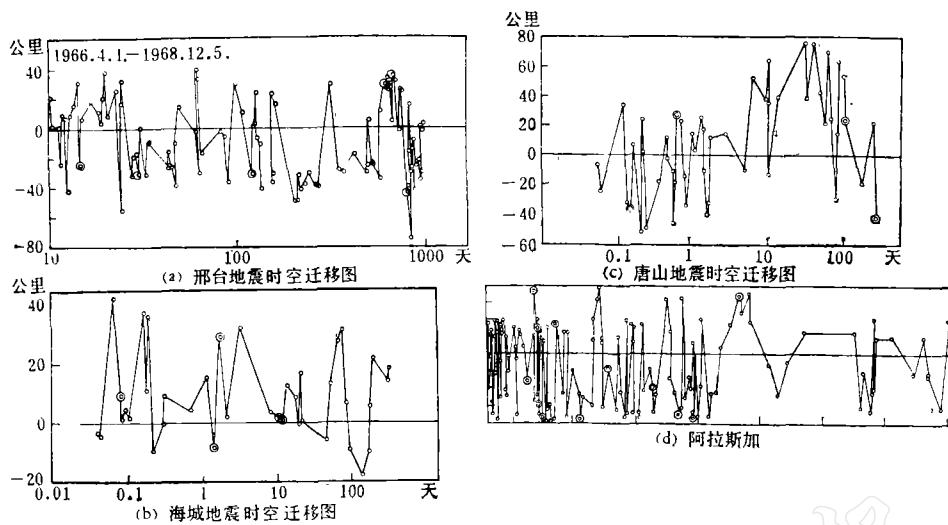


图3 较强余震的时空迁移图

(a)——邢台 (b)——海城 (c)——唐山 (d)——阿拉斯加

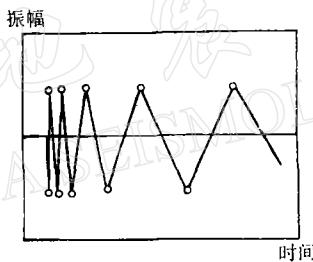


图4 张弛振动示意图

此外,我们又分析了一些序列中强余震(一般指比主震震级低二级以上者)的迁移规律。结果列于表1和图5中。从中还可以看出有下述一些特点:(5)随着时间的推移,强

表1 强余震的空间迁移

序 列 名 称	时 间	主 震 震 级	破 裂 方 式	迁 移 情 况
海 城	1975.2.4	7.3	单 侧	一 侧
炉 霍	1973.2.6	7.9	单 侧	一 侧
昭 通	1974.11.5	7.1	单 侧	一 侧
唐 山	1976.7.28	7.8	双 侧	两 侧
通 海	1970.1.5	7.7	双 侧	两 侧
邢 台	1966.3.8	6.8; 7.2	双 震 型	对第一个为一侧 对第二个为两侧
松 潘	1976.8.16	7.2; 7.2	双 震 型	对第一个为一侧 对第二个为两侧
龙 陵	1976.5.29	7.5; 7.6	双 震 型	对第一个为一侧 对第二个为两侧
松 潘	1973.8.11	6.5		不 明 显
盐 源	1976.11.7	6.9; 6.8		不 明 显
巴 楚	1961.4.14	6.5; 6.4; 6.8		不 明 显

余震迁移的范围越来越大。(6)其总的迁移范围和迁移方向与主震破裂的方式有关。对于单侧破裂、双侧破裂和双震型破裂之间的关系如图 6 所示。

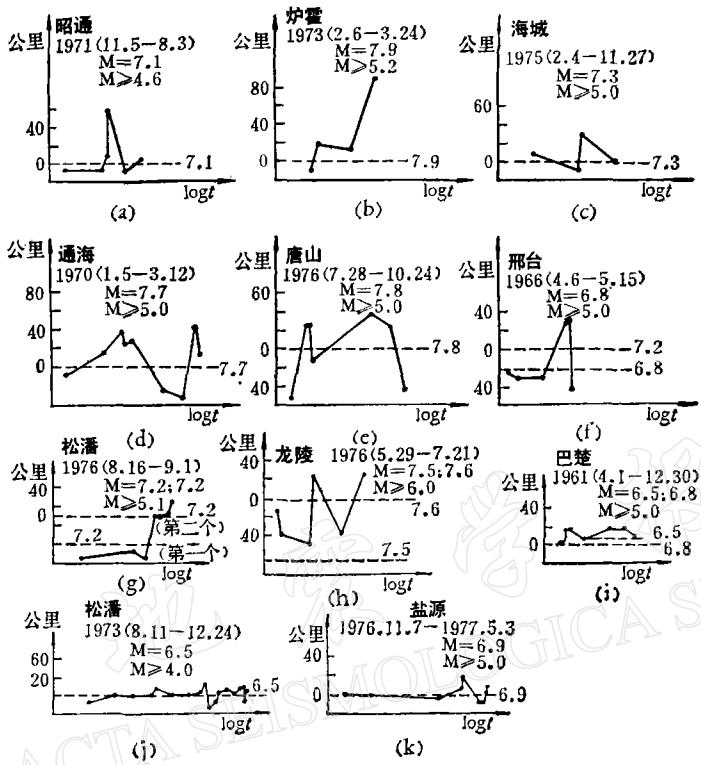


图 5 强余震的空间迁移

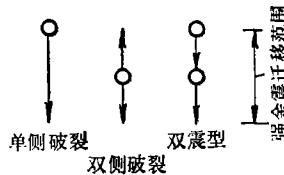


图 6 三种破裂方式和迁移的关系

(a)——单侧破裂 (b)——双侧破裂 (c)——双震型破裂

对于单侧破裂的较大地震来说，其强余震相对于主震震中会呈现单侧迁移的现象，如图 5<sub>(a-c)</sub>。对于双侧破裂的大地震，其强余震相对于主震震中会呈现两头跳的现象，如图 5<sub>(d,e)</sub>。对于双震型地震，往往对第一个地震来说表现为单侧迁移，对于第二个地震来说表现为双侧迁移。如图 5<sub>(f-h)</sub>，7 级以下的地震，由于其震源尺度较小，强余震迁移范围也很小，如图 5<sub>(i-k)</sub>。

### 3. 强余震的垂向分布特点

浅源地震中主震破裂有时并不穿透地壳，而是形成一个具有一定深度的裂缝。例如海城地区平均地壳厚度为 33 公里左右。而由观测资料和余震空间分布得到主破裂的长度约为 70 公里，深约 20 公里，并未穿透地壳。研究了余震的三维空间分布后发现，余震

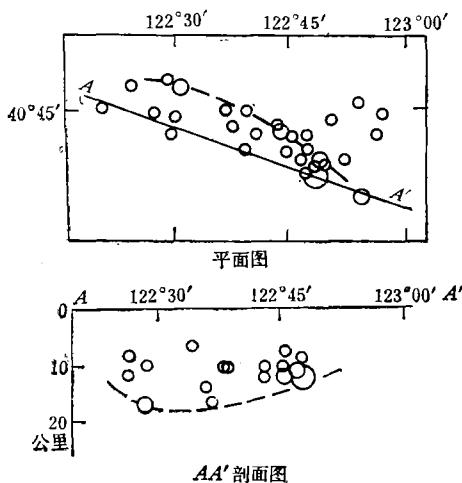


图 7 海城地震强余震的平面图和垂向剖面图

的深度在南东端较浅，向西北逐渐加深，其中强余震大都位于断层面附近，其深度一般在 10 至 20 公里之间。这些现象似乎说明，主震破裂在地壳中形成了一个埋藏的裂缝，越向破裂方向前方，深度越大，而强余震大都位于裂缝前缘附近。图 7 画出了强余震在水平和垂向剖面上的投影，其中也用虚线画出了假想的主破裂前缘的位置。从中可以看出主破裂面倾向东北，倾角约为  $70^\circ$ ，与由机制解得出的结果比较一致。但对于这种较典型的情况，目前尚缺少更多的例子。

#### 四、理 论 解 释

以上讨论了我国大陆内（板块内部）发生的大震的强余震的空间分布特点。在文献 [6] 中，作者从断裂力学观点讨论过余震发生的物理机制；在文献 [7] 中，又对强余震的时间分布特征用流变模型作了理论解释。现在，我们以上述观点和模型，对强余震的空间分布特点作定性说明：

1. 根据断裂力学、地壳裂纹<sup>[6]</sup>前缘上能量释放率  $G$  大的地方是最有可能发生强余震的地方。

主震所形成的地壳裂纹，对地球来说，是表面裂纹（图 7(a)），对于穿透地壳的大震，由于上地幔和软流层不易传递应力，则可用无穷大平板内的穿透裂纹（二维裂纹）来类比（图 7(b)）。

根据断裂力学，在周围应力场作用下，裂纹前缘的应力奇异性（以能量释放率  $G$  表示）会各处不同。对于穿透地壳的二维裂纹，两端的应力会集中，文献 [6] 认为，强余震主要是由于主震形成地壳主裂纹在应力场调整阶段，与其附近其他小裂纹（由于主震形成或原有缺陷）的互相勾通而造成的继续失稳破裂。所以，强余震会较多地分布在主震破裂两端附近。

此外，若是没有穿透地壳的表面裂纹（一般 6、7 级强震），则整个裂纹前缘都是应力

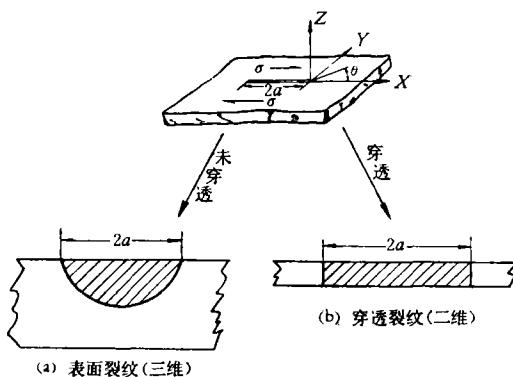


图 8 地壳裂纹示意图

奇异点, 裂纹前缘能量释放率  $G$  将是前缘位置的函数。如海城地震强余震就都沿着裂纹前缘分布。但裂纹深度较大时, 流体静压力在深部裂纹面上造成的摩擦力很大, 再加上深部地壳物质的温度高, 故深部的断裂韧性(用  $K_c$  或  $G_c$  表示) 比浅部大, 所以破裂有可能仅在裂纹前缘两端较浅的部位发生。因此, 形成强余震的平面“三点分布”。

2. 关于强余震相对于主震松驰振荡式迁移, 我们认为主要是由两方面的原因造成: 地壳介质的非完全弹性及主震断面的形状。这两个因素都直接影响裂纹前缘的能量释放率  $G$ 。一旦某处  $G$  值达到临界值  $G_c$ , 即失稳条件

$$G \geq G_c$$

成立, 则在该处裂纹失稳破裂。我们以二维穿透裂纹来说明这一过程。

我们仍用文献 [6] 中的流变-断裂模型(图 9)来说明, 这里不同的只是为了突出裂纹两端把原来的弹性元件和裂纹尖端都用两个元件并联。设想, 主震发生后, 原来储存在弹性元件  $E_A$ 、 $E_B$  中的能量被突然释放了, 而后的应力调整即储存在弹性元件  $E$  中的能量

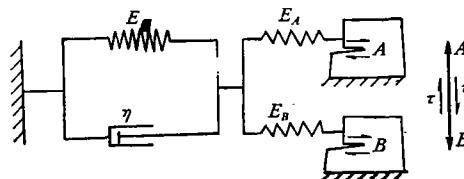


图 9 强余震的流变-断裂模型

( $AB$  为主震断层;  $\tau$  为剪切应力;  $E$  为弹性元件;  $E_A$ 、 $E_B$  分别是尖端  $A$ 、 $B$  处相应的弹性元件;  $\eta$  是介质的粘滞系数。)

慢慢(由于粘性元件  $\eta$  的存在)地馈给  $E_A$ 、 $E_B$ , 使裂纹尖端  $A$ 、 $B$  的能量释放率  $G_A$ 、 $G_B$  不断升高, 如图 10 中的第(1)阶段。由于实际中不可能完全对称(介质性质, 裂纹尖端形状, 力学性质等)  $G_A$ 、 $G_B$  增长时设  $G_A$  最早达到临界值  $G_c$  (图 10 第(2)阶段), 于是在裂纹  $A$  端首先失稳而发生一个强余震, 并从而  $A$  端的能量释放率  $G_A$  突然下降(图 10 第(3)阶段)。如果介质是完全弹性的, 当然应力的调整是瞬时(弹性波速度)完成的。 $A$  端失去的能量将会立即从  $B$  端和大范围得到补充。使之达到原有状态的平衡。但实际是非完全弹性, 正如我们所引用的模型(图 9)所示。所以当一端因释放能量而使  $G_A$  下降时, 已处

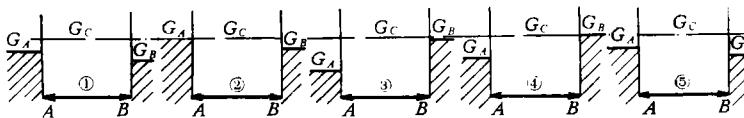


图 10 说明强余震两头跳的示意图

$AB$  为主震断层(地壳裂纹);  $G$  为能量释放率, 其变化过程是:

- (1)  $\begin{cases} G_A > G_B \\ G_A < G_C \end{cases}$  地壳裂纹稳定;
- (2)  $\begin{cases} G_A = G_C \\ G_B < G_C \end{cases}$  地壳裂纹  $A$  端满足失稳条件, 失稳而成一个强余震;
- (3)  $G_C > G_B > G_A$  地壳裂纹稳定;
- (4)  $\begin{cases} G_B = G_C \\ G_A < G_C \end{cases}$  地壳裂纹  $B$  端满足失稳条件, 失稳而成另一个强余震;
- (5)  $\begin{cases} G_A > G_B \\ G_A < G_C \end{cases}$  又回到(1)的状态, 并开始第二循环.

于较高状态的  $B$  端的能量虽会有一些馈给  $A$  端, 同时两者又从大范围得到补充, 但  $B$  端的应力奇异程度终会比  $A$  端高, 并在  $A$ 、 $B$  两端同时逐步增长到某一时刻(图 10 第(4)阶段)  $B$  端的  $G_B$  会达到  $G_C$  而在  $B$  端失稳. 即  $B$  端处发生了另一强余震, 此后, 两端的情况又进入到与第(1)阶段相似的状态, 并开始第二循环. 由于非完全弹性过程而使得强余震迁移呈现出一种松弛振荡现象.

## 五、结 论

本文研究了发生在中国大陆地区的十一个强震序列的强余震空间分布. 从实际的观测资料分析中, 总结和归纳出强余震的空间分布具有以下特征:

1. 平面分布, 大多呈三点分布方式, 即主要分布在主震断层的两端或震中附近. 并且, 分布图象与主震的破裂方式有关.
2. 在三维空间分布上, 强余震主要分布在主震断层面上, 并在其破裂前缘上. 但由于实际资料中, 震源深度测定不准, 因此, 震例尚少, 这一结论有待做更多的工作予以证实.
3. 强余震沿主震断层相对于主震震中作松弛振荡式的迁移. 这一现象不仅在我国板内强震出现, 在美国阿拉斯加(1964年)大震中也很明显. 这种振荡的幅度与主震断层长度相当, 并且随时间而扩展.

本文对强余震的上述空间分布特征, 应用流变学和断裂力学的理论, 作了理论上的解释.

## 参 考 文 献

- [1] F. Richter, Elementary Seismology, Chapter 6, 1958.
- [2] N. Yamakawa (山川宜男), Foreshoots, aftershocks and earthquake swarms (VI), Papers in Meteorology and Geophysics, 20, 3, 275—286, 1969.
- [3] I. N. Gupta, Dilatancy and spatial distribution of aftershocks, Bull. Seis. Soc. Am., 64, 4, 1707—1713, 1974.
- [4] M. Bonafeda, F. Mulargia and E. Boschi, A physical model for the prediction of large late aftershocks, Presented at the International Symposium on Earthquake Prediction, 2—6, April, 1979, Paris.

- [5] 石川有三, 朱传镇, 曹天青, 大地震强余震特征的研究, 地震学报, 待发表。  
 [6] 谷继成, 从断裂力学观点研究地震的力学过程, 地震科学, 第二辑, 1980.  
 [7] 谷继成, 谢小碧, 赵莉, 强余震的时间分布特点及其理论解释, 地球物理学报, 22, 1, 32—46, 1979.  
 [8] S. T. Algermissen, Preshocks and aftershocks, The Great Alaska Earthquake of 1964, p. 313.

## ON SPATIAL DISTRIBUTION OF LARGE AFTERSHOCKS OF THE SEQUENCE OF A MAJOR EARTHQUAKE AND PRELIMINARY THEORETICAL EXPLANATION

GU JICHENG

*(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)*

XIE XIAOBI ZHAO LI

*(University of Science and Technology of China)*

### Abstract

Sequences of 11 major earthquakes occurred in the continental area of China have been analysed for the characteristics of their spatial distribution of large aftershocks. It is found that:

1. The large aftershocks are located in three areas: in the vicinities of the ends of the earthquake fault and the epicenter of the main shock.
2. The characteristics of spatial migration of the large aftershocks are as follows: (1) The migration distance of the large aftershocks corresponds to the rupture length of the main shock, and increases with time; (2) The distance and direction of migration are related to the rupture pattern. For stronger main shocks with unilateral rupture, the migration of large aftershocks relative to the epicenter of the main shock will be unilateral; for an earthquake with bilateral rupture, the migration of the large aftershocks will be somewhat similar to relaxation oscillation from one end of the earthquake fault to the other relative to the epicenter of the main shock. For a twin earthquake (two main shocks), the large aftershocks migrate usually in a unilateral manner relative to the "first main shock" while in a bilateral manner relative to the "second main shock".
3. The vertical distribution of the large aftershocks in a section is within the fault plane and mostly are located on the front of the fault.

A preliminary theoretical explanation for the above observational results has been attempted based upon the principles of rheology and fracture mechanics.