

地震空区与“逼近地震”*

陆远忠 沈建文 宋俊高
(安徽省地震局)

摘 要

本文通过分析一些强震和中强震震例,指出通常所说的地震“空区”可分为两类。除了震前大范围、长时间、大震级的空区,这里称之为背景空区之外,还有可能出现震前较小范围、较短时间、较小震级的空区,这里称之为孕震空区。对这两类空区作了比较。我们发现在孕震空区的后期,孕震空区边缘往往会发生一个或一组较为引人注目的地震,本文称之为逼近地震。文中初步归纳了逼近地震的某些特征与主震的关系,讨论了用于地震预报的可能性。最后从断裂力学的观点初步探讨了孕震空区与逼近地震的成因机制。

一、引 言

研究主震发生前的前震、广义前震,一直是国内外地震预报研究中的一个重要课题。大量的文献研究了主震前震中区附近中、小地震的时间、空间、强度、震源机制解、波谱等的变化特征,发现一些有意义的现象,并得到许多统计结果。许多作者讨论了大震前的空区特征,得出一些规律及经验公式^[1-5]。另一些文章指出了主震前作为“信号”性的异常前震。魏光兴等给出了一些“中期信号震”的实例^[4];冯德益等指出在波速比异常初期及末期会发生两次(或两组)“信号地震”;新西兰学者埃维森指出“前兆震群”可能是强震和中强震的信号^[7]。上述研究虽然取得了一些成果,但迄今为止,不少从统计和经验上找到的指标往往因为资料少而缺乏普遍性,总结出的某些异常现象则因时间过长、空间范围过大,且判据不够明确而难于在地震预报中实施。尤其缺乏的是从理论上探讨前震活动的本质。因此,人们仍然难于从普遍的地震活动中较确切地判断出前兆性地震活动。对于广义前兆地震活动的研究仍需深入。

本文用近年来一些资料比较完整的强震和中强震震例,指出我国大陆上一些块体内部的强震和中强震之前,除了出现与某些作者^[4]所研究的地震空区相同的大范围、长时间、大震级的空区之外,还普遍地出现小震活动的孕震空区。此外,主震前不太长的时间里,孕震空区边缘可能出现一个或一批较为引人注目的地震。这些地震的发生预示着主震的孕育接近完成,这里称之为“逼近地震”。本文寻找了逼近地震的某些特征,并从断裂力学的观点解释了孕震空区与逼近地震。逼近地震是孕震的晚期发生在孕震空区边缘与主震密切相关的地震。它的发生,一方面暂时延缓了主震的发生时间,另一方面最后清除了孕震体边缘易于破裂的部位,使孕震体作为一个整体均一受力,从而集中更多的应变

* 1980年10月15日收到初稿,1981年4月6日收到修改稿。

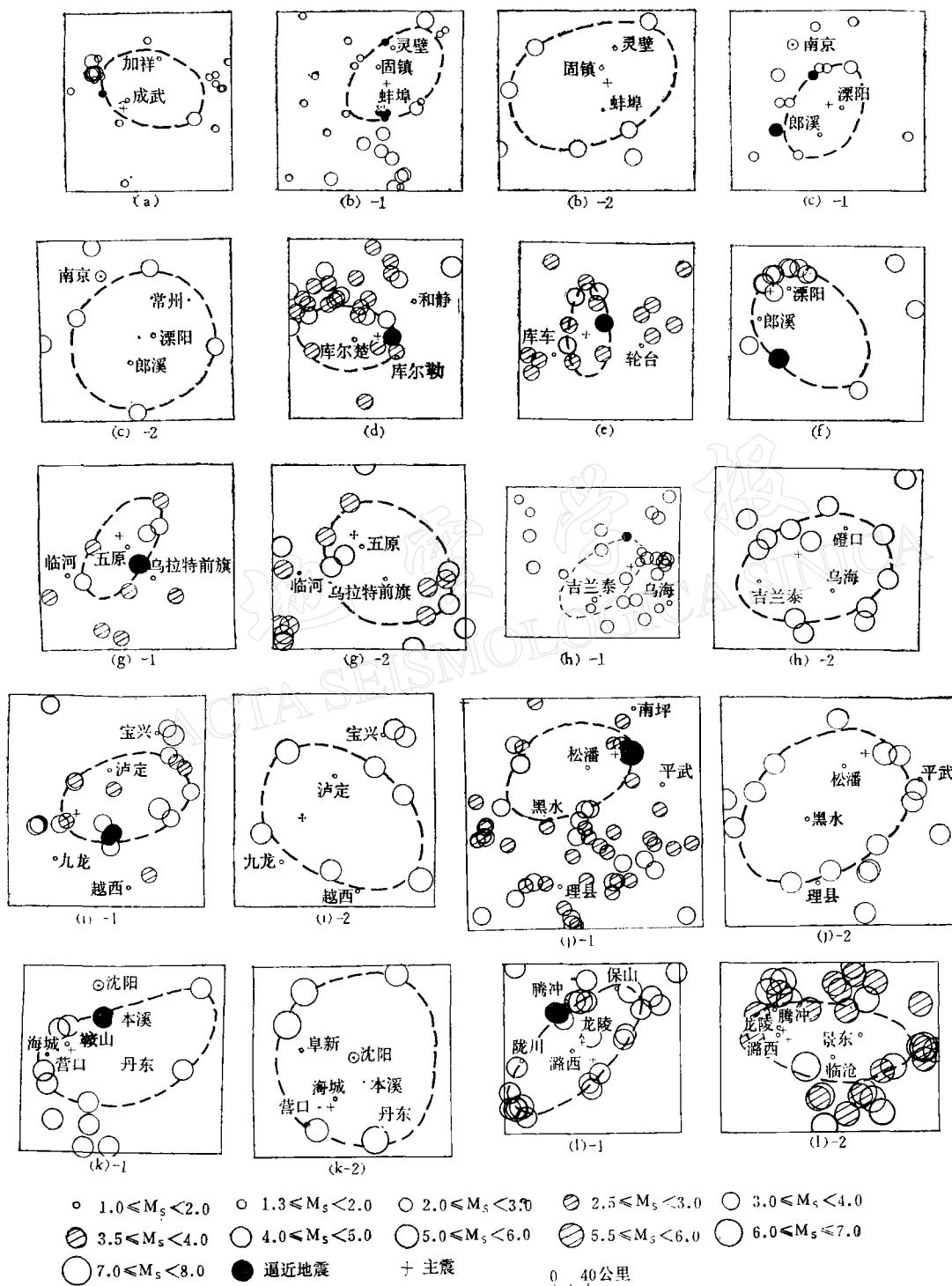


图 1

能,为最后更大的失稳破裂创造了条件。由于占有资料和各种条件的限制,我们未能收集国内外各种资料、作出结论性的判断。作者仅希望以此引起大家的重视,以期更广更深地探讨这种有意义的前兆。

二、两种地震空区

当前,对地震空区的研究日益增多,且不断深入,但“地震空区”这一术语有时显得有些混乱。茂木清夫指出^[5],有两种空区,一种是表示一个地震带上一些大地震在空间分布上的空区,他称之为第一种地震空区;另一种是较大地震前震级较小的地震活动空区,他称之为第二种地震空区。与茂木清夫不同,我们发现在大地震之前,可能先后出现大小两种空区,背景空区与孕震空区。背景空区出现在主震前较长的时间、较大的范围,它常由较大震级的地震构成围空。这种空区的边缘往往是地壳块体的界面或地质构造上的活动断裂带。其上的地震活动暗示着周围块体与该块体的相互作用比较激烈,同时,又部分释放了周围块体施加的力。因而这种空区的形成,虽然反映了空区内应力的背景性增加,但不一定就会发震。只有当孕震空区出现后,才显示出孕震的确切迹象。孕震空区出现在主震前较短的时间、较小的范围,它常由较小震级的地震构成围空。这种空区勾划出孕震体的地面投影,即表示出由于块体内应力的加强,微裂缝增加,特别是在相对强度较高的某一区域的四周,裂缝易于从集并发生失稳扩展,形成小震空区。而空区内部积累更大能量,孕育较强地震。下面我们给出12个孕震空区的震例,如图1(a)–(l)所示。作为比较,我们同时给出其中8个震例的相应的背景空区,表示于图1(b)–2,图1(c)–2,图1(g)–2,图1(h)–2,图1(i)–2,图1(j)–2,图1(k)–2,图1(l)–2。比较这些震例可以看出,孕震空区与背景空区的长轴 L_x 、 L_y 与未来主震震级 M_s 的关系有所区别,用最小二乘法分别得经验公式为

- (a)——1977年7月9日山东成武4.8级地震前(1975年6月1日至主震) $M_s \geq 1.0$ 地震分布及孕震空区;
- (b)-1——1979年3月2日安徽固镇5.0级地震前(1977年5月1日至主震) $M_s \geq 1.0$ 地震分布及孕震空区;
- (b)-2——1979年3月2日安徽固镇5.0级地震前(1966年1月1日至主震) $M_s \geq 3.0$ 地震分布及背景空区;
- (c)-1——1974年4月22日江苏溧阳5.5级地震前(1973年1月1日至主震) $M_s \geq 1.3$ 地震分布及孕震空区;
- (c)-2——1974年4月22日江苏溧阳5.5级地震前(1960年1月1日至主震) $M_s \geq 3.0$ 地震分布及孕震空区;
- (d)——1978年4月22日新疆库尔勒5.8级地震前(1975年6月1日至主震) $M_s \geq 2.5$ 地震分布及孕震空区;
- (e)——1979年3月29日新疆库车6.0级地震前(1978年1月1日至主震) $M_s \geq 2.5$ 地震分布及孕震空区;
- (f)——1979年7月9日江苏溧阳6.0级地震前(1977年4月15日至主震) $M_s \geq 2.0$ 地震分布及孕震空区;
- (g)-1——1979年8月25日内蒙古5原6.0级地震前(1975年7月1日至主震) $M_s \geq 2.5$ 地震分布及孕震空区;
- (g)-2——1979年8月25日内蒙古5原6.0级地震前(1968年1月1日至主震) $M_s \geq 3.5$ 地震分布及背景空区;
- (h)-1——1976年9月22日宁夏巴音木仁6.2级地震前(1973年1月1日至主震) $M_s \geq 2.5$ 地震分布及孕震空区;
- (h)-2——1976年9月23日宁夏巴音木仁6.2级地震前(1961年1月1日至主震) $M_s \geq 4.0$ 地震分布及背景空区;
- (i)-1——1975年1月15日四川九龙6.2级地震前(1974年4月1日至主震) $M_s \geq 2.5$ 地震分布及孕震空区;
- (i)-2——1975年1月15日四川九龙6.2级地震前(1972年4月1日至主震) $M_s \geq 4.0$ 地震分布及背景空区;
- (j)-1——1973年8月11日四川南坪6.5级地震前(1972年11月1日至主震) $M_s \geq 2.5$ 地震分布及孕震空区;
- (j)-2——1973年8月11日四川南坪6.5级地震前(1964年1月1日至主震) $M_s \geq 4.0$ 地震分布及背景空区;
- (k)-1——1975年2月4日辽宁海城7.3级地震前(1964年1月1日至主震) $M_s \geq 4.0$ 地震分布及孕震空区;
- (k)-2——1975年2月4日辽宁海城7.3级地震前(1940年1月1日至主震) $M_s \geq 5.0$ 地震分布及背景空区;
- (l)-1——1976年5月29日云南龙陵7.6级地震前(1966年1月1日至主震) $M_s \geq 4.0$ 地震分布及孕震空区;
- (l)-2——1976年5月29日云南龙陵7.6级地震前(1913年1月1日至主震) $M_s \geq 5.5$ 地震分布及背景空区。

$$M_s = 3.34 \lg L_{\text{孕}} - 1.20 \pm 0.63 \quad (1)$$

$$M_s = 3.45 \lg L_{\text{背}} - 1.97 \pm 0.50 \quad (2)$$

这里 L 以公里为单位, 如图 2 所示。

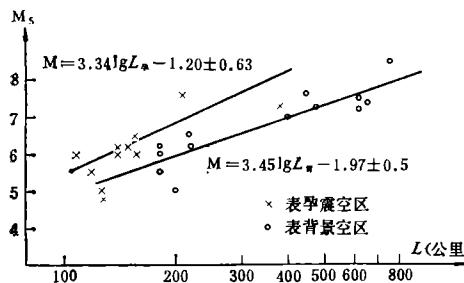


图 2 孕震空区及背景空区长轴 $L_{\text{孕}}$ 、 $L_{\text{背}}$ 与主震震级 M_s 的关系

两种空区的形成时间 $t_{\text{孕}}$ 、 $t_{\text{背}}$ 与未来主震震级的关系示于图 3, 两者的经验公式分别为

$$M_s = 1.48 \lg t_{\text{孕}} + 5.49 \pm 0.64 \quad (3)$$

$$M_s = 1.41 \lg t_{\text{背}} + 4.69 \pm 0.67 \quad (4)$$

这里 t 以年为单位。以上经验公式中对背景空区部分增加了 1668 年郯城 8.5 级地震, 1830 年磁县 7.5 级地震, 1937 年菏泽 7.0 级地震, 1966 年邢台 7.2 级地震, 1969 年渤海 7.4 级地震等震例的数据^[4]。

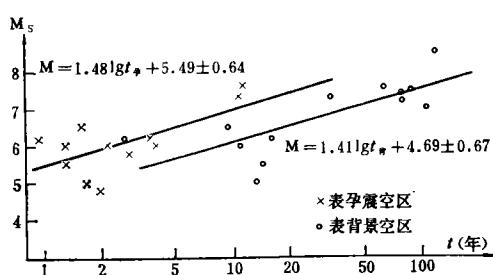


图 3 孕震空区及背景空区形成时间 $t_{\text{孕}}$ 、 $t_{\text{背}}$ 与主震震级 M_s 的关系

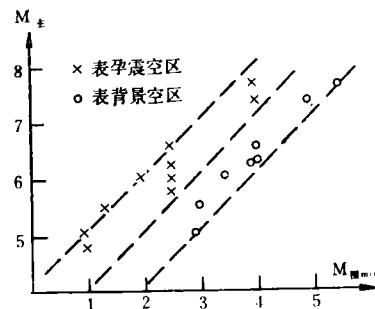


图 4 孕震空区与背景空区统计的超算震级与主震震级的关系

两种空区统计的最小震级 $M_{\text{min}}^{\text{孕}}$ 、 $M_{\text{min}}^{\text{背}}$ 与未来主震震级的关系表于图 4。图中可见, 对孕震空区, 未来主震一般比参加围空的最小地震高 3 至 4 级; 对背景空区, 未来主震比参加围空的最小地震高 2 至 3 级。

对孕震空区有两点值得注意:

1. 在以上所得的经验公式中, 孕震空区与未来主震震级关系式(1)与冯德益等根据波速异常得出的主震与孕震体(波速异常区)尺度关系式颇为一致^[8], 他们所得的公式是

$$M_s = 3.4 \lg L - 1.4 \pm 0.7 \quad (5)$$

式中 L 是孕震区最大线度, 以公里为单位。在有些震例总结中已经注意到波速异常区与

空区的一致性^[9], 实际上孕震空区出现的时间与波速异常时间也较接近, 但目前限于资料, 还难于系统和详细讨论。

2. 从以上震例可以看出, 参加围空的地震不一定均匀地分布于空区的周围, 有时某些区域地震较为集中, 有时甚至由于某些地段无震发生而围空地震并不闭合。这种情况使唯一准确地确定空区范围产生困难。但是, 比较上面那些兼有两种空区的震例, 可以发现, 孕震空区一般都在背景空区确定的范围之内。这种规律有益于确定空区。

还应指出, 虽然孕震体的地面投影一般是形成空区, 但当孕震体扁平直立时, 它在地面的投影就可能形成孕震空段或小震条带, 而主震发生在小震条带上。

三、逼近地震

近年来, 华东地区发生了三次中强震, 1974年4月22日的溧阳5.5级地震, 1979年3月2日的固镇5.0级地震和1979年7月9日的溧阳6.0级地震。这三次地震都无直接前震。但是, 在这三次地震之前, 主震周围的某些小震活动给人以很深的印象。例如固镇地震之前13天, 固镇周围一天之内发生了四次 $M_s \geq 1.0$ 的地震, 这在该地区有地震仪器记录资料以来是没有出现过的。1979年溧阳6.0级地震前124天, 距震中70多公里的广德发生了一次3.3级地震。而广德地区自1971年3月发生过一次3.2级地震后, 基本上没有记到什么地震。而且, 上述地震都发生在主震前孕震空区的边缘。为考察此种现象的普遍性, 我们又分析了部分资料完整的震例, 发现这种地震具有一定的普遍性。现把12个震例列于表1。本文把这种出现于孕震后期和孕震区边缘, 而又是参加围空的最后一个(批)较为显著的地震, 称为“逼近地震”, 因为它的发生标志着主震愈益逼近, 它与主震的位置关系表于图1(a)–(l)中。

无疑, 逼近地震对于地震预报是很有意义的前兆, 问题在于是否能找到逼近地震所具有的特征、识别的方法以及它们与主震的关系。通过对上述几个震例中逼近地震的分析, 我们初步归纳以下几点:

1. 逼近地震发生在孕震空区边缘, 它到主震震中的距离一般都小于孕震空区的半长轴。

2. 逼近地震发生在孕震空区形成过程的后期。从逼近地震到主震发生, 在孕震空区边缘和内部不再有显著的地震发生, 这段相对平静的时间一般在半年之内, 与主震震级无明显相关性。

3. 逼近地震震级与主震震级关系表于图5。其经验公式为

$$M = 0.58M_{\text{震}} + 4.04 \pm 0.51 \quad (6)$$

4. 逼近地震的显著性。与孕震空区周围的小地震活动相比较, 逼近地震具有一定的显著性。有时它以引人注目的小震群发生, 如1979年库车、1979年巴音木仁、1973年海城、1976年龙陵等地震的逼近地震; 有时它表现为在较短时间内连续发生几次小震, 从而与一般小震活动有所区别, 如1974年溧阳地震和1979年固镇地震的逼近地震; 有时它表

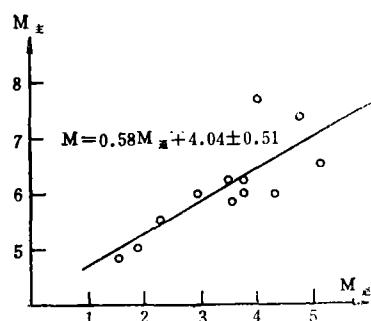


图5 逼近震级与主震震级的关系

表 1 逼近地震 12 例

序号	主震			逼近震			主震、逼近震中震的震距(公里)	逼近震前主震时间(天)	备注		
	发震时间(年.月.日)	震区	东经	北纬	震级(M _S)	发震时间(年.月.日)	东经	北纬	震级(M _S)		
1	1977.7.9	山东成武	115°48'	34°52'	4.8	1977.3.4	115°28'	35°02'	1.6	29	127
2	1979.3.2	安徽固镇	117°25'	33°11'	5.0	1979.2.17	117°25'	33°38'	1.0	40	13
3	1974.4.22	江苏溧阳	119°15'	31°25'	5.5	1974.2.25	119°06'	31°48'	1.7	60	55
4	1978.4.22	新疆库尔勒	85°46'	41°54'	5.8	1978.3.20	85°59'	41°53'	3.6	20	33
5	1979.3.29	新疆库车	83°15'	41°54'	6.0	1979.3.18	80°45'	42°00'	3.8	24	11
6	1979.7.9	江苏溧阳	119°15'	31°28'	6.0	1979.3.7	119°21'	30°40'	3.0	74	124
7	1979.8.25	内蒙古五原	108°07'	41°14'	6.0	1979.7.31	108°26'	40°54'	4.4	50	25
8	1976.9.23	宁夏巴音木仁	106°21'	40°05'	6.2	1976.9.3	106°15'	40°24'	2.7	40	20
9	1975.1.15	四川九龙	101°50'	29°27'	6.2	1974.12.20	102°18'	29°12'	3.8	50	26
10	1973.8.11	四川南坪	104°00'	32°53'	6.5	1973.5.8	104°06'	32°54'	5.2	20	95
11	1975.2.4	辽宁海城	122°48'	40°39'	7.3	1974.12.22	123°48'	41°12'	4.8	90	44
12	1976.5.29	云南龙陵	98°38'	24°22'	7.5	1975.12.16	98°24'	24°48'	4.1	50	164

现为孕震期内孕震空区周围震级最高或较高的地震,如1979年溧阳地震、1979年五原地震、1979年库车地震、1975年九龙地震、1973年南坪地震等的逼近地震。

此外,我们还发现逼近地震往往发生于波速异常恢复前后。如库尔勒地震波速异常于1978年2月回返,其逼近地震发生于1978年3月20日;库车地震波速异常于1979年3月回返,其逼近地震发生于1979年3月29日;海城地震波速异常于1974年4月回返,其逼近地震发生于1974年12月22日;龙陵地震波速异常于1975年12月回返,其逼近地震发生于1975年12月16日。

四、孕震空区与逼近地震的机理

1. 孕震体的弹性模量与周围介质不一致导致了围空的小震活动。

背景空区的形成可能说明本区区域应力场的加强。参与背景空区“围空”的地震活动是由于背景空区边缘发生了摩擦滑动或破裂所致,在区域应力场不断加强的条件下,地壳介质中某一特定的块体内部应变能不断积累就形成孕震体,未来主震就将发生在此孕震体中。我们总可以认为这一孕震体与其周围介质的物理力学性质不一致,例如我们认为其弹性模量与周围介质的弹性模量不同。这种弹性模量的差异就导致孕震体与周围介质交界处裂纹的应力强度因子显著增加。当孕震体弹性模量高于周围介质时,孕震体边缘的裂纹应力强度因子增高;当孕震体弹性模量低于周围介质时,周围介质中靠近交界处的裂纹的应力强度因子增高。下面用极简化的模式以孕震体模量高于周围介质为例作一简单说明。假定孕震体简化如图6,一无限板含一孕震体,孕震体半径为 R ,无限板受到均匀张应力 σ ,孕震区内外的剪切模量和泊松比分别为 μ_2, ν_2 和 μ_1, ν_1 。一裂纹长度为 b_1-a_1 ,位于水平轴如图。左右裂端的横坐标分别为 a_1, b_1 ,则在固定 $a_1/R = -0.9$ 和 $a_1/R = -0.75$ 两种情况下,右裂端应力强度因子为^[10]

$$K = F \left(\frac{a_1}{R}, \frac{b_1}{R}, \frac{\mu_2}{\mu_1}, \nu_1, \nu_2 \right) \sigma \sqrt{a}$$

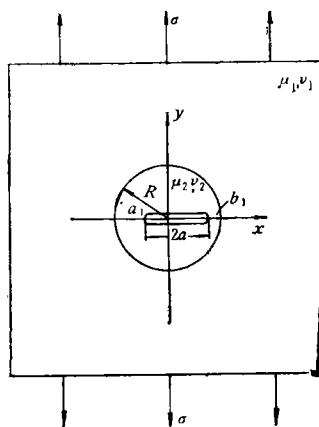


图6 孕震体示意简图

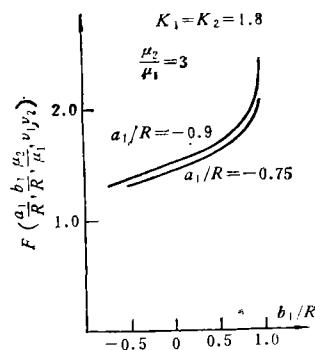


图7 函数 F 与 b_1/R 的关系

其中函数 F 值与 $\frac{b_1}{R}$ 的关系表于图 7.

图中 $K_j = 3 - 4\nu_j$, $j = 1, 2$, (平面应变)

$K_j = (3 - \nu_j)/(1 + \nu_j)$, $j = 1, 2$, (平面应力)

由图可见, 剪切模量较高的孕震体中, 裂纹的应力强度因子比均匀介质中的裂纹为高. 当一端接近孕震体边缘时, 应力强度因子增高很快, 因而较容易发生失稳扩展, 愈接近边缘愈容易扩展. 一横穿裂纹裂端的应力强度因子为^[10]

$$K = F\sigma a^\beta$$

式中 F 值与 β 值由表 2 给出.

表 2

$\frac{\mu_2}{\mu_1}$	β	F
1.0	0.5	1.0
2.0	0.57451	0.8843
5.0	0.67885	0.6585

由此可见, 裂纹一旦贯通, 应力强度因子迅速下降, 因而, 当裂纹扩展到边缘后即可停止.

因为裂纹失稳扩展的长度可代表所释放的弹性应变能, 从而代表震级的大小, 孕震体边缘处裂纹的扩展线度很短, 则参与孕震围空的是一些小震. 因为主震越大孕震区绝对尺度越大, 对同一应力强度因子 F , $R - b_1$ 就越大, 即参加围空的小地震线度就越长, 因而震级就越高.

另外, 界面裂纹的应力强度因子虽然不高^[11], 但因界面处介质结合不紧, 即表面能率低, 也容易发生失稳扩展, 这些扩展也参与孕震体周围的孕震围空.

由于地壳中介质状态的差别, 在孕震区边缘, 易于扩展的裂纹的分布是不均匀的, 某些部位可能没有可供扩展的裂纹, 故围空地震的分布可能并不均匀, 甚至因为某些较大地段没有地震而造成空区不“闭合”.

2. 最后一个(一组)边缘裂纹的失稳扩展形成逼近地震.

裂端在孕震区边缘附近的一些裂纹中, 最接近孕震体边缘者最易扩展, 即从裂纹失稳扩展长度短或震级小者开始, 愈往后扩展长度愈长, 震级愈大, 因而最后参加围空而失稳扩展的边缘裂纹往往具有较长的扩展长度, 因而它的震级较高. 如果在扩展路径上介质有微结构的不均一, 可能在短时间内发生几个小震甚至小震群, 从而造成逼近地震的显著性. 当最后一个(一组)参加小震围空的边缘裂纹失稳扩展即逼近地震发生后, 即解除了周围介质对孕震体的约束. 因而介质相对孕震体可产生位移. 同时, 由于逼近地震释放了孕震体的部分弹性应变能, 孕震体内应力暂时有一小的松弛, 然后进入最后积累能量阶段, 孕震体则出现一平静期. 由于围空阶段中一些应力集中程度高的裂纹都相继失稳扩展了, 故在平静期内, 整个孕震体(包括其外围)比较均一同步地产生形变, 积累应变能, 直至最后发生主震. 这种地震活动的平静期可能是孕震体内地壳急剧变形期, 从而导致一些无震异常现象.

因为一个强震的发生必然有一个孕震过程并有一个积累能量的孕震体. 而一般孕震

体的顶部和底部均不易积累应力, 所以孕震空区的出现应当带有普遍性, 只是当孕震体形状特殊时(如为直立扁平体时), 它在地面的投影才可能不表现为孕震空区。另一方面, 逼近地震是孕震区边缘的最后一个或一组显著地震, 它的发生即预示孕震进入末期, 未来强震孕育接近成熟, 故对多数地震来说, 逼近地震也应是普遍发生的, 当然, 孕震空区不能明显地显示于地面时, 逼近地震也难于识别。

五、结语

限于资料, 对于逼近地震地震波的特征没有探讨下去。关于孕震空区与波速异常区的时空关系问题也还有待深入。暂时还不能设想仅利用孕震空区及逼近地震就可以进行确切的地震预报。但是, 我们认为, 利用孕震空区及逼近地震, 结合其他前兆手段, 多少可为地震预报提供部分参考信息。预报步骤设想如下:

1. 从较大区域上3级以上地震的空间分布确定背景空区。结合其他方面作长趋势的估计。
2. 从背景空区内较小地震的分布结合波速异常等确定孕震空区。
3. 在孕震空区基本形成后, 注意孕震空区边缘较大地震或震群和连续小震的出现, 结合波速比、地形变等的短期异常判断是否为逼近地震。
4. 从空区的时间、空间范围及空区边缘围空地震的震级估算未来主震的震级。未来主震的地点则在孕震空区内。发震时间则在逼近地震发生后十多天到数月; 一般不超过半年。

参 考 文 献

- [1] S. A. Fedotov, Regularities of the distribution of strong earthquake in Kamchatka, the Kurile Islands, and northeastern Japan, *Trudy Inst. Phys. Earth. Acad. Sci. USSR*, 36, 66—93, 1965.
- [2] K. Mogi, Some features of recent seismic activity in and near Japan (2), *Activity before and after great earthquakes*, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo 47, 395—417, 1969.
- [3] 吴开统等, 海城地震序列的特征, *地球物理学报*, 19, 2, 1976。
- [4] 魏光兴等, 华北地区地震前围空区特征, *地球物理学报*, 21, 3, 1978。
- [5] K. Mogi, Two kinds of seismic gaps, *Pageoph*, 117, 6, 1172—1186, 1979.
- [6] 冯德益等, 我国西部地区一些强震及中强震前后波速异常的初步研究(一)——波速比异常, *地球物理学报*, 19, 3, 1976。
- [7] F. Evison, Precursory seismic sequence in New Zealand, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 20, 1, 129—141, 1977.
- [8] 冯德益等, 我国西部地区一些强震及中强震前后波速异常的初步研究(二)——波速异常区及其特征, *地球物理学报*, 20, 2, 1977。
- [9] 陈立德等, 一九七六年龙陵地震, 地震出版社, 1979。
- [10] G. C. Sib., *Handbook of Stress-Intensity Factors*, Institute of fracture and solid mechanics Lehigh University Bethlehem, Pennsylvania, 1973.
- [11] 北京钢铁研究院金属物理室, *工程断裂力学(上册)*, 68, 国防工业出版社, 1977。

SEISMIC GAPS AND “IMMINENT EARTHQUAKES”

LU YUANZHONG SHEN JIANWEN SONG JUNGAO

(Seismological Bureau of Anhui Province)

Abstract

By analysing a number of cases of moderate and strong earthquakes, it is pointed out in this paper that seismic gaps can be classified into two categories. Besides, background gaps formed by large earthquakes in a large area with a long time duration, there can also be preparatory gaps formed by smaller earthquakes in a smaller area and with a shorter time duration. A comparison has been made between these two kinds of seismic gaps. It has been also found that at the later period of preparatory gaps, one or a group of rather outstanding earthquakes occur on their edges, called “imminent earthquakes”. Some characteristic features of such earthquakes and their relation to the forthcoming main earthquakes for their possibility in predicting earthquakes are preliminarily studies. Finally, we also made a preliminary analysis of the physical process causing the preparatory gaps and “imminent earthquakes” with the point of view of fracture mechanics.

更正：本刊第4卷第3期首页，标题“测浅位置”应为“测线位置”。