

地震空区与逼近地震(续)*

陆远忠 王 炜 沈建文

(安徽省地震局)

摘 要

本文在《地震空区与逼近地震》一文(以下简称“上篇”)的基础上,分析了1970—1980年间我国大陆上所有资料较完整的6.0级以上的地震,以及60年代的两次7级以上地震的震例。结果表明,上篇所得的关于背景空区、孕震空区及逼近地震的结论具有普遍意义。本文在大量资料的基础上,充实了上篇论文的内容,并重新计算了上篇所得的经验公式。本篇指出,判别孕震空区有三个标志:(1)随着孕震空区的形成,空区及邻近区域的地震应变释放应出现加速;(2)孕震空区内外地震频度比 $\frac{N_{外}+1}{N_{内}+1}$ 在孕震空区的形成过程中应出现峰值;(3)在背景空区形成前,未来主震震源区内常常发生一些中等强度的早期前震。此外,本文发现在孕震空区形成的过程中,孕震空区及其邻近区域的地震所释放能量的 $1/3$ 次方的和 $\Sigma E^{1/3}$ 与孕震空区长轴的对数线性相关,所得经验公式可作为发生逼近地震的时间判据。最后本文讨论了孕震空区尺度的物理解释和逼近地震的成因。

一、引 言

《地震空区与逼近地震》^[1](以下简称“上篇”)一文分析了我国近年来12个强震及中强震震例,提出在这些地震前后先后出现两类地震空区,即背景空区和孕震空区,背景空区出现在主震前较长时间、较大的范围内,它常由较大震级的地震构成围空;孕震空区出现在主震前较短时间、较小的范围内,参加围空的地震震级也较小,另外还提出在孕震空区形成的后期,在距主震较近的孕震空区边缘,常常发生一个或一组较为显著的地震,它与主震的发生有较密切的关系,称之为逼近地震。

本文的目的有两个:其一就是在上篇的基础上探讨上述前兆的普遍性;第二是进一步寻求识别空区和逼近地震的标志。

二、两类地震空区及逼近地震的普遍性

1970年至1980年期间,除台湾、西藏地区以及东北地区的一些深震外,我国大陆上共发生 $M_s \geq 6.0$ 的地震(不包括余震)32次,加上1966年邢台7.2级和1969年渤海7.4级地震,共有34次地震,其中有些发生在地震台站较稀少的地区,资料极不完全;有些地

* 1981年12月30日收到。

表 1

序号	主震					通近地震					备注	
	发震时间 (年.月.日)	地点	M _s	北纬	东经	发震时间	北纬	东经	M _s	Δ(公里)		Δt(天)
1	1966.3.22	河北邢台	7.2	37°32'	115°03'	1965.9.4	36°3	113°4	4.0	190	200	其后无参加固空地震
2	1969.7.18	渤海	7.4	38°2	119°4							
3	1970.2.24	四川大邑	6.3	30°36'	103°12'	1970.1.20	30°6	103°2	4.3	0	36	发生在未来主震震中
4	1972.1.16	新疆柯坪	6.2	40°2	78°9	1971.12.24	39°18'	79°00'	3.3	90	23	
5	1973.2.6	四川炉霍	7.9	31°5	100°4	1972.9.27 9.30	30°11' 30°10'	101°39' 101°35'	5.8 5.8, 5.5	192	132 129	空区边缘一组较大地震,震后 空区周围无 M _s ≥4.0 级地震
6	1973.6.3	新疆精河	6.0	44°26'	83°32'	1973.3.31	43°9	83°5	3.5	54	64	
7	1974.5.11	云南永善	7.1	28°2	103°9	1974.4.7	27°6	104°1	4.3	72	35	
8	1975.4.28	新疆和田	6.1	36°2	79°6	1975.4.22	36°8 36°0	80°2 80°4	4.5 4.3	90 72	6	
9	1976.4.6	内蒙和林格尔	6.3	40°14'	112°12'	1975.6.24	40°30'	111°42'	4.4	50	286	空区边缘最大之地震
10	1976.7.28	河北唐山	7.8	39°6	118°2	1975.12.1	39°15'	118°00'	3.7	48	240	此震后空区周围无 M _s ≥3.0 级地震
11	1976.8.16 8.23	四川松潘	7.2 7.2	32°7 32°5	104°2 104°2	1976.4.11	31°37'	103°59'	3.1	100	128	此震后空区周围无 M _s ≥3.0 级地 震,表现为异常平静
12	1976.11.7	云南宁蒗	6.9	27°4	100°9	1976.10.29	27°36'	101°00'	4.4	30	8	距震中最近的最大的地震
13	1977.1.19	青海霍布逊湖	6.5	37°15'	95°40'	1976.10.30	37°15'	95°40'	4.4	0	81	在主震震中,为空区之最大地震
14	1977.12.19	新疆西克尔	6.1	39°59'	77°41'	1977.12.15	39°47'	77°35'	3.7	24	4	空区边缘之次大地震
15	1979.3.15	云南普洱	6.8	23°1	101°1	1979.1.14	22°9	100°6	4.0	48	61	空区边缘之次大地震

区由于接连不断地发生一系列强震和中强震,各次地震的孕震过程互相重迭,无明显阶段性。这两种情况对于本问题的研究是困难的。除上述两种情况外,该期间震前小震资料较完整的 $M_s \geq 6.0$ 地震共有 23 个。上篇中已讨论了其中 8 个震例,本文对其余的 15 个震例(表 1)进行了分析。

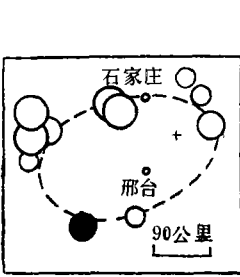


图1-1 1966.3.22 邢台7.2级地震
(1954年—震前)

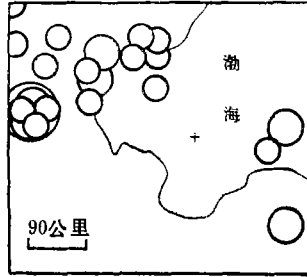


图1-2 1969.7.18 渤海7.4级地震
(1961年—震前)

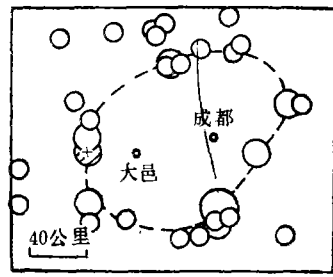


图1-3 1970.2.24 大邑6.3级地震
(1966年—震前)

M_s 3.2—3.9 4.0—4.9 5.0—5.9 M_s 3.1—3.9 4.0—4.9 6.0—6.9 M_s 3.0—3.9 4.0—4.9 5.0—5.9

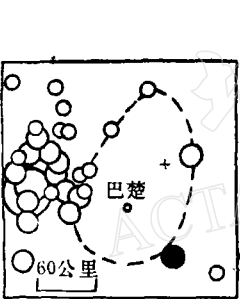


图1-4 1972.1.16 柯坪6.2级地震
(1971.4—震前)

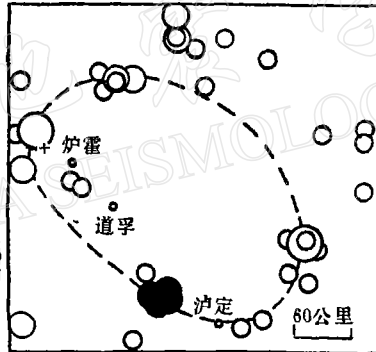


图1-5 1973.2.6 炉霍7.9级地震
(1965.11—震前)

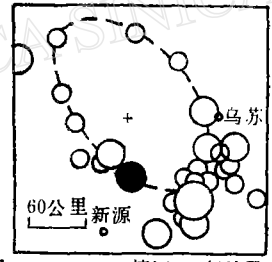


图1-6 1973.6.3 精河6.0级地震
(1972.2—震前)

M_s 2.5—2.9 3.0—3.9 M_s 4.0—4.9 5.0—5.9 M_s 4.0—4.9 5.0—5.9 6.0—6.9 M_s 2.3—2.9 3.0—3.9 4.0—4.9

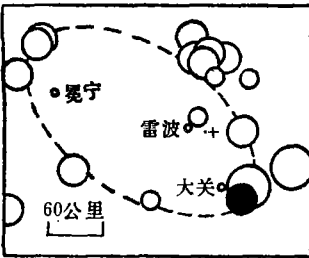


图1-7 1974.5.10 永善7.1级地震
(1972.1—震前)

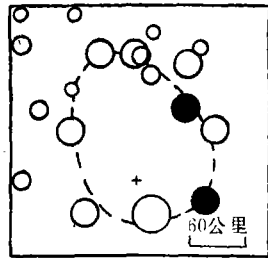


图1-8 1975.4.28 和田6.1级地震
(1974.5—震前)

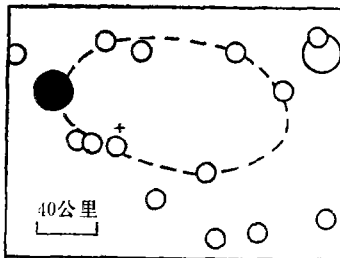


图1-9 1976.4.6 和林格尔6.3级地震
(1973.4—震前)

M_s 3.5—3.9 4.0—4.9 5.0—5.9 M_s 2.5—2.9 3.0—3.9 4.0—4.9 5.0—5.9 M_s 2.3—2.9 4.0—4.9

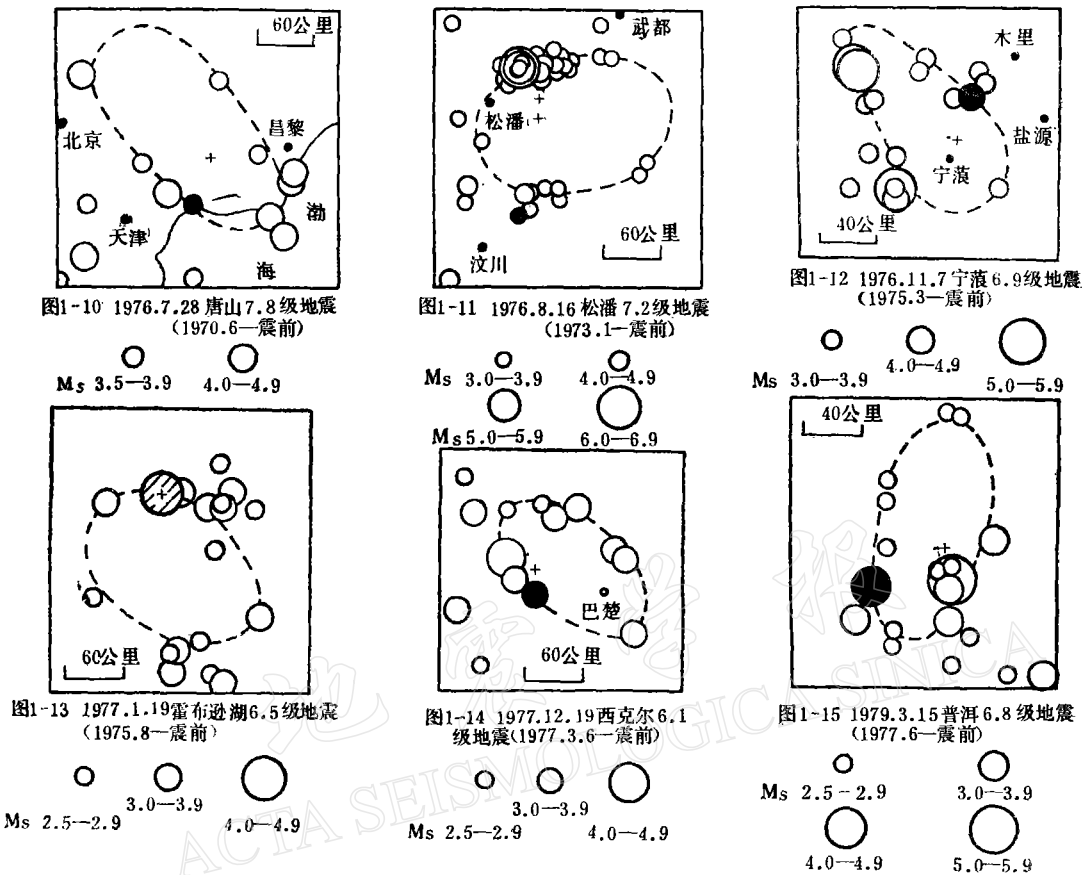


图 1 部分震例的孕震空区及逼近地震
(实心或阴影圆表示逼近地震)

15 个震例震前的地震活动性图象如图 1 所示, 除 1969 年渤海 7.4 级地震以外, 其余 14 个震例都给出了孕震空区及逼近地震。 渤海震前 (参见图 1-2) 虽然画不出界线明确的孕震空区, 但震中附近区域的地震活动在震前明显处于相对平静中。 图 2 给出了资料较完整的 10 个震例的背景空区, 为方便对比, 图 2 中的编号与图 1 中的编号相对应。 有

表 2

	背 景 空 区		孕 震 空 区		逼 近 地 震	
	震 例 数	所 占 比 例	震 例 数	所 占 比 例	震 例 数	所 占 比 例
有的震例	16	70%	22	96%	22	96%
无的震例	1	4%	1	4%	1	4%
资料不全或不能确定的震例	6	26%	0	0	0	0

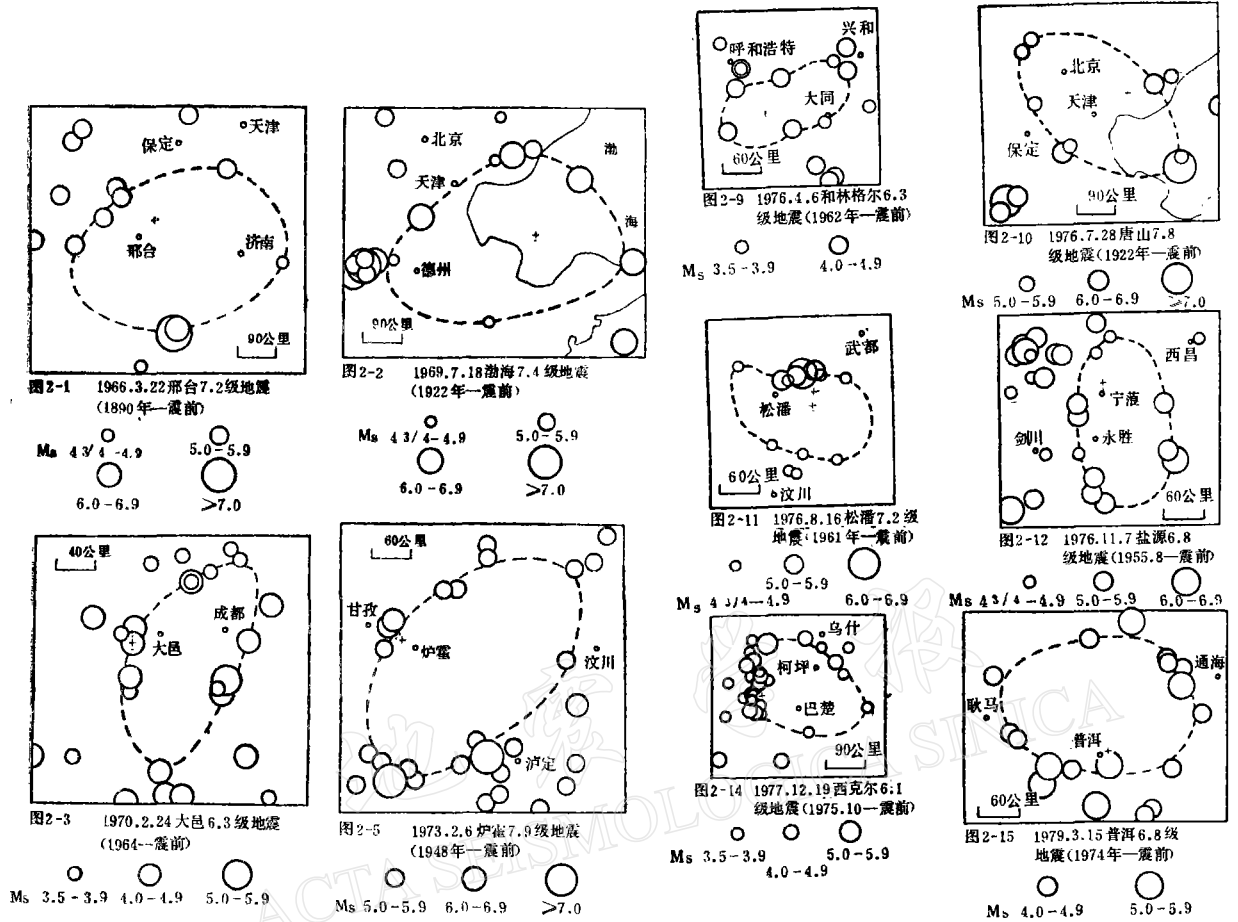


图2 部分震例的背景空区

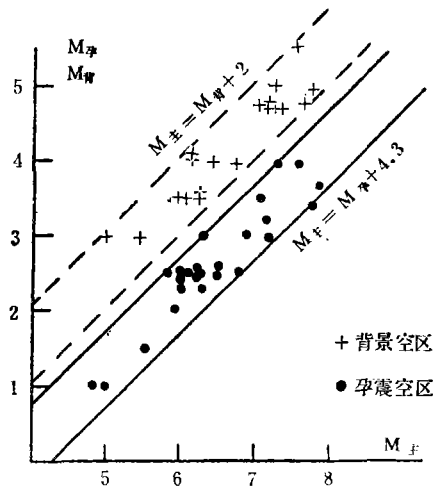


图3 两类空区的参加围空起始震级与主震震级关系

5 个震例由于资料不详或无背景空区而未给出图象。

两类地震空区参加统计的最小震级 M_{\min}^* 、 $M_{\min}^{\#}$ 与未来主震的关系表于图 3。由图可知,对于孕震空区,参加围空的最小震级一般比主震小 3.3—4.3 级;对于背景空区,参加围空的最小震级一般比主震小 2—3 级。

上篇已得孕震空区及背景空区的形成时间 $T_{\#}$ 、 $T_{\#}^*$ 及其空区长轴 $L_{\#}$ 、 $L_{\#}^*$ 与主震震级的经验关系。本篇用充实后的资料修正如下:

$$M_s = 6.02 + 1.34 \lg T_{\#} (\text{年}) \pm 0.48 \quad (1)$$

$$M_s = 5.35 + 1.23 \lg T_{\#}^* (\text{年}) \pm 0.51 \quad (2)$$

$$M_s = 3.69 \lg L_{\#} (\text{公里}) - 1.71 \pm 0.47 \quad (3)$$

$$M_s = 3.39 \lg L_{\#}^* (\text{公里}) - 1.48 \pm 0.41 \quad (4)$$

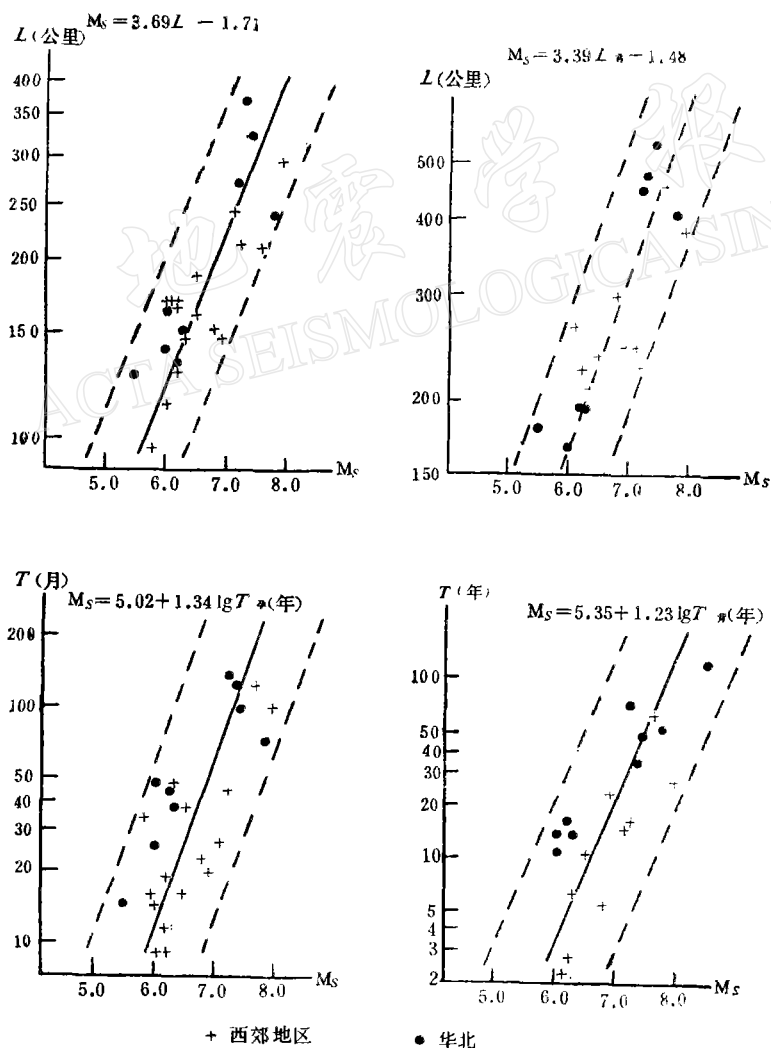


图 4 孕震空区和背景空区的长轴 $L_{\#}$ 、 $L_{\#}^*$ 及形成时间 $T_{\#}$ 、 $T_{\#}^*$ 与主震震级关系
(虚线为二倍剩余均方差界线)

由相关系数检验知^[2],上述关系在 5% 的水平上全部显著. 图 4 为散点图. 由图可见, 所有散点全部落入各经验曲线二倍剩余均方差界线的范围之内. 此种相关表明, 孕震空区现象具有某种共性, 它们可能受统一的因素所控制. 由于震例不多, 我们没有按地区分别进行研究. 但由图 4 可以大体看出, 对于同等级地震, 华北地区的空区形成时间及空区长轴长度要略大于西部地区. 这表明这两个不同区域的地壳介质或其应变积累速率可能有所差异.

三、孕震空区的形成标志及逼近地震的识别

1. 孕震空区的标志

在利用空区进行地震预报时, 孕震空区具有特殊的意义. 正确识别孕震空区就有可能为地震的中、短期预报提供依据. 为此, 需要找到孕震空区的识别标志. 实际上, 在上面讨论空区普遍性的时候, 我们已经同时给出了判别孕震空区的部分标志, 即在确定孕震空区的时候, 参加围空的起算震级, 空区的长轴, 空区的形成时间必须同时满足上面得出的经验统计关系的制约 (要求落入二倍剩余均方差范围). 要求同时满足上述关系式, 显然可以大大减少任意性. 为进一步探讨孕震空区的标志, 我们在上述震例中选择了震前资料很好的 11 个震例进行分析, 发现一个孕震空区的形成可以表现为以下几类情况(表 3).

表 3

		孕 震 空 区 内 的 地 震 活 动	
		基 本 不 变	下降(*为显著下降)
孕震空区外 的地震活动	显著上升	A (包括震例 3、10、11、17)	B (包括震例 5*、7*、14、15*、18、23)
	基本不变	D	C (震例 12)

1. **A 类** 孕震空区内的地震活动性在空区出现前后都较低且基本不变. 孕震空区的出现实际上表现为周围地震活动性的显著上升. A 类占总数的 36%.

2. **B 类** 这类孕震空区在形成过程中, 除空区外围的地震活动显著上升外, 孕震空区内的地震活动同时表现为下降或显著下降. B 类占 55%.

3. **C 类** 这类震例表现为孕震空区内地震活动性下降, 而空区外围地震活动性变化不明显. 此类震例占 9%.

表 3 中列出的 D 类情况, 即空区内外地震活动基本不变, 反映的是所谓永久性空区, 它没有前兆意义, 在所统计的震例中没有出现这种情况. 由上述分析可知, 孕震空区的主要特征是孕震空区外的地震活动性上升. 为了定量地表征空区内外活动性的变化, 我们总结了以下两个孕震空区的判据.

1. 随着孕震空区的形成, 空区及其邻近区域的地震应变释放速率出现明显的加速过

表 4

日 期 (年.月.日)	地 点	M _s	早 期 前 震				备 注
			日 期	北纬	东经	M _s	
1966.3.22	河北邢台	7.2	1882.12.12	38°1	115°1	5 3/4	余震区北部边缘
1969.7.18	渤 海	7.4	1922.9.29	39°2	120°5	6 1/2	余震区边缘
1970.1.5	云南通海	7.7	1913.12.21	24°09'	102°27'	6 1/2	余震区西北端
			1929.3.22	24°0	103°0	6 1/4	
1973.2.6	四川炉霍	7.9	1923.3.24	31°3	100°8	7 1/4	
			6.14	31°0	101°1	6 1/2	
1974.5.11	云南永善	7.1	1959.3.11	28°2	104°0	5.0	
1975.2.4	辽宁海城	7.3	1885.2.21	40°7	122°2	5.0	余震区西北端
1976.5.29	云南龙陵	7.5	1906.5	24°6	98°6	5 1/4	余震区西北端
		7.6	1910 春	24°6	98°6	5 1/2	
1976.7.28	河北唐山	7.8	1880.9.30	39°7	118°7	5	余震区东北端
1976 8.16 8.23	四川松潘	7.2	1961.1.6	32°8	104°0	4.7	
		7.2	1961.1.23	32°5	104°0	5.0	
1970.2.24	四川大邑	6.3	1961.10.9	30°8	103°0	3.5	
1973.8.11	四川南坪	6.5	1961.1.23	32°8	104°0	4.7	
1975.1.15	四川九龙	6.2	1972.4.8	29°4	101°8	5.2	
1976.11.7	云南宁蒗	6.9	1955.6.7	27°3	100°9	5 1/4	
1977.12.19	新疆西克尔	6.1	1974.7.25	39°55'	77°38'	4.0	
1979.3.15	云南普洱	6.8	1973.8.16	22°9	101°1	6.3	
				22°8	101°2	5.2	

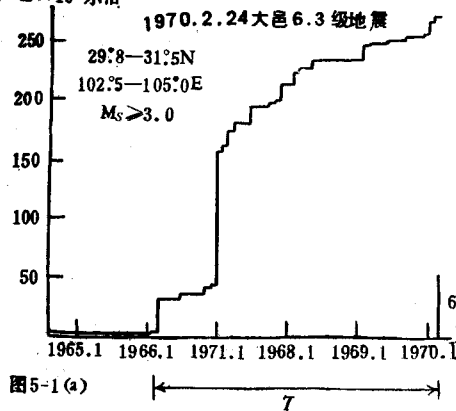
程,如图 5_{1-10(a)} 所示. 主震发生前,逼近地震发生后,往往还存在一个应变释放的平静阶段.

2. 孕震空区形成前,空区外部邻近区域与空区内部发生的起始震级以上的地震的频次之比 $K = \frac{N_{\text{外}} + 1}{N_{\text{内}} + 1}$ 较低,随着孕震空区的形成, K 开始出现高值,如图 5_{1-10(b)} 所示. 图 5 中频次统计一般采用一年累计,三个月滑动(图中另有说明的除外).

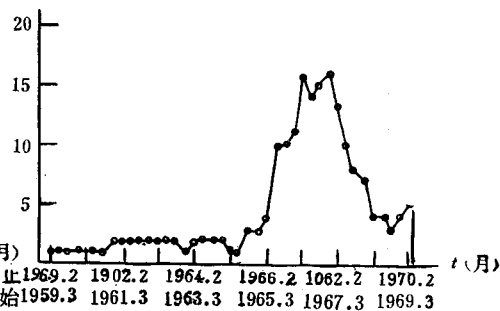
上述两项指标大体上是同步的. 根据上升或加速的起始,可以大致确定孕震空区的起始时间.

除上述指标外,还有一个补充指标,对多数地震,尤其是强震,其前十几年乃至几十年,未来主震震源区往往发生一个或一些中等强度的地震,借用刘正荣同志用过的术语^[3],将它称为早期前震,这种早期前震的发生使得地壳中局部区域破裂,因而应力容易在这些部位集中,为未来孕育强震创造了似乎必要但不充分的条件,这些地震一般出现在背景空区形成以前,表 4 列出了我国 1966 年以来九次七级以上强震和部分 6—7 级地震的早期前震.

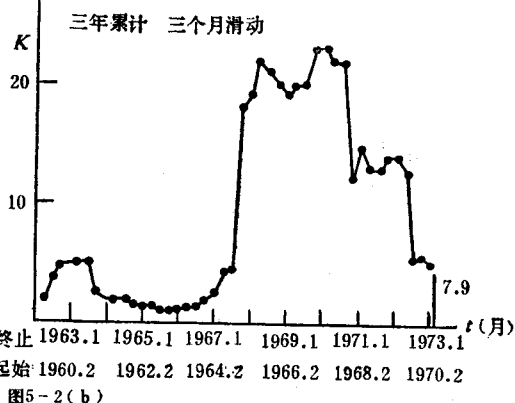
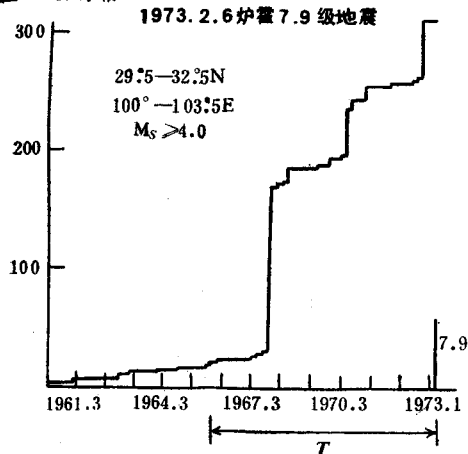
$\Sigma \sqrt{E} \times 10^8 \text{ 尔格}^{1/2}$



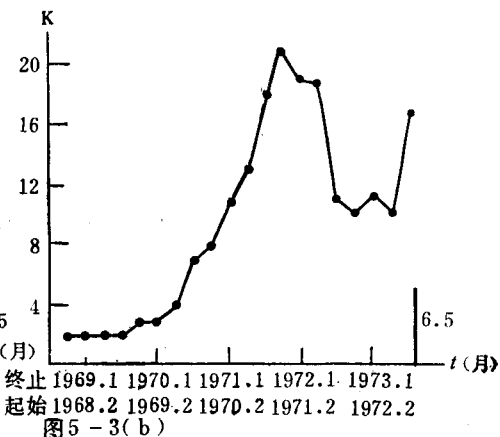
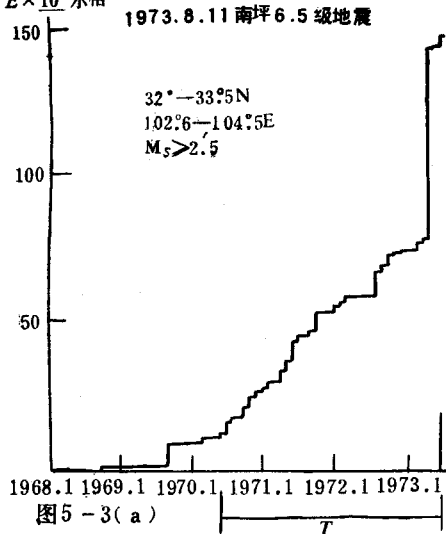
$$K = \frac{N_{n+1}}{N_n + 1}$$



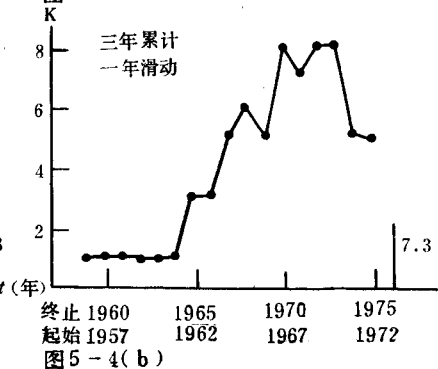
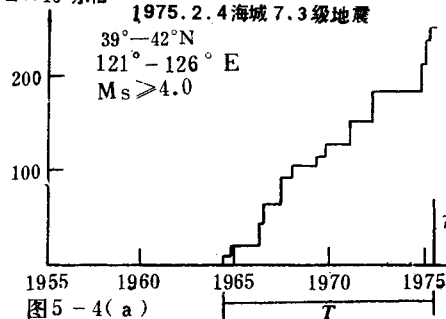
$\Sigma E \times 10^8 \text{ 尔格}^{1/2}$

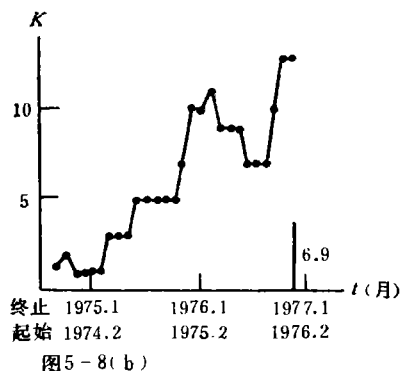
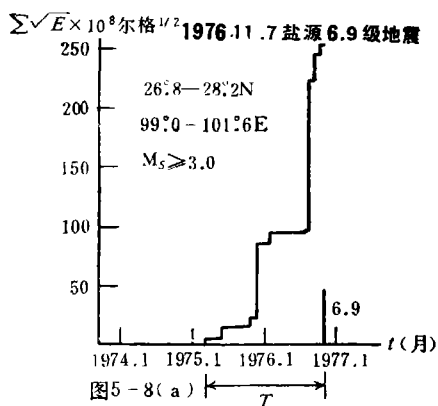
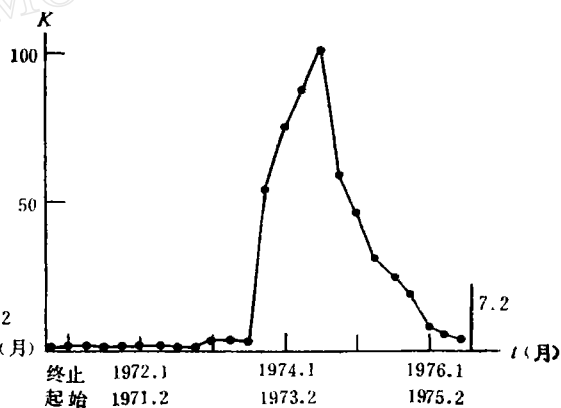
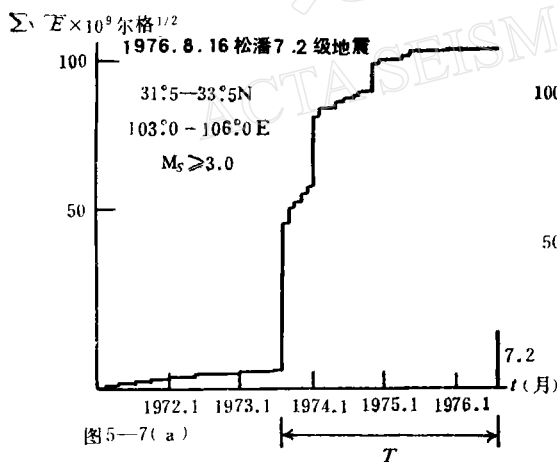
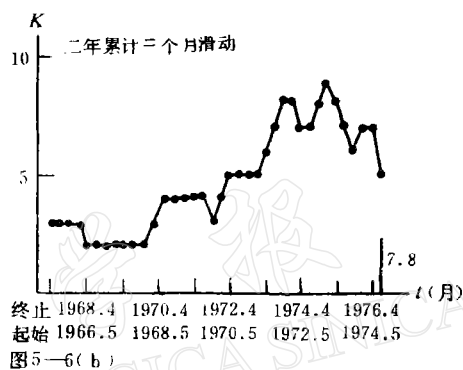
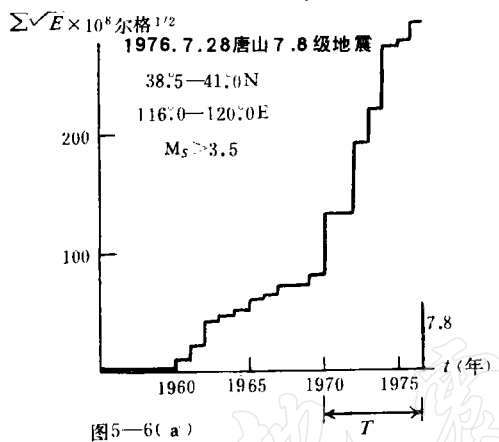
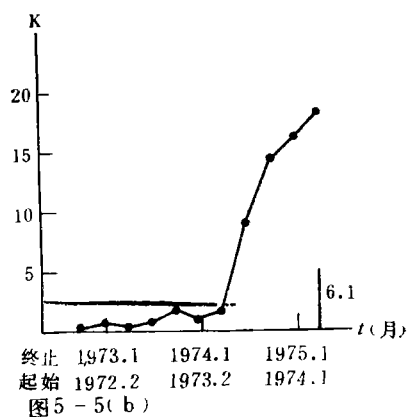
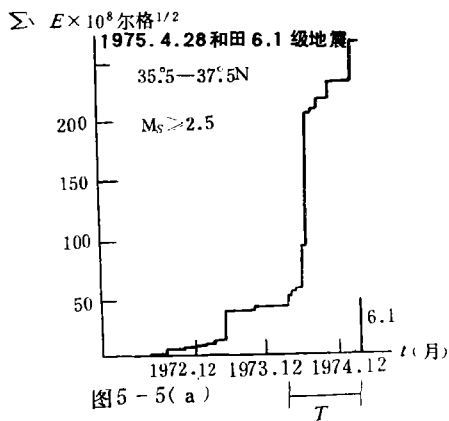


$\Sigma \sqrt{E} \times 10^8 \text{ 尔格}^{1/2}$



$\Sigma \sqrt{E} \times 10^8 \text{ 尔格}^{1/2}$





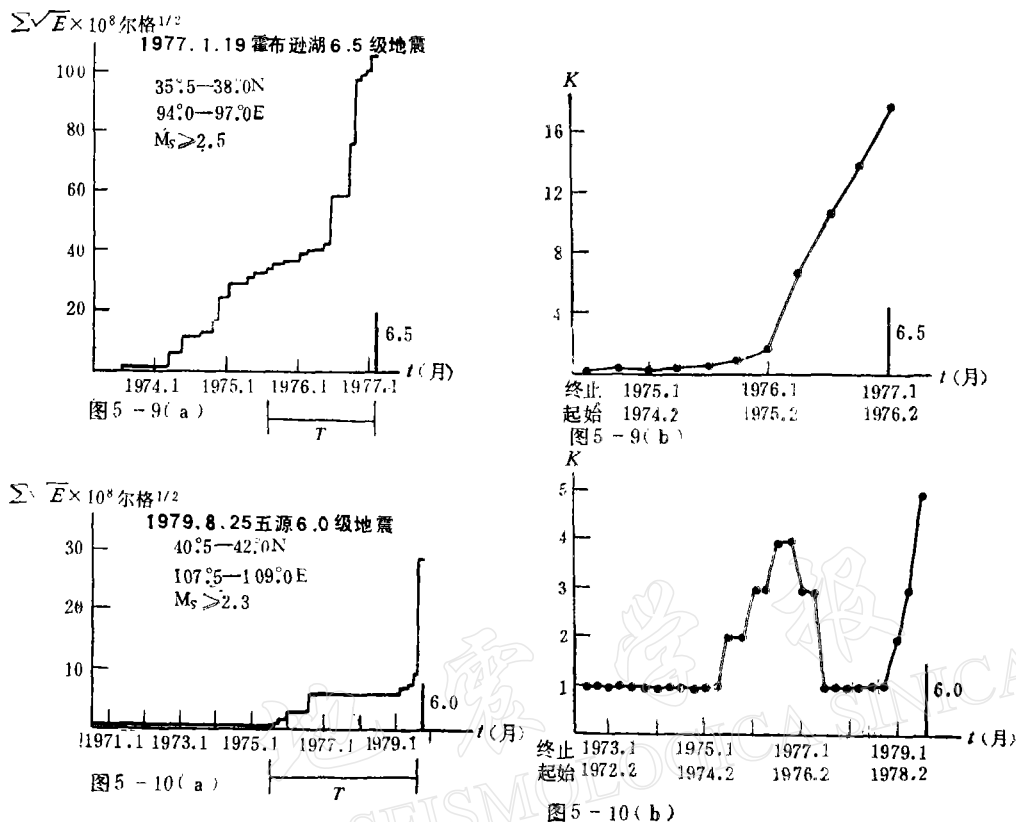


图 5 孕震空区及其邻近区域的地震应变释放曲线和空区内外频度比 $K = \frac{N_{外} + 1}{N_{内} + 1}$ 随着时间的变化

2. 逼近地震的特征与识别

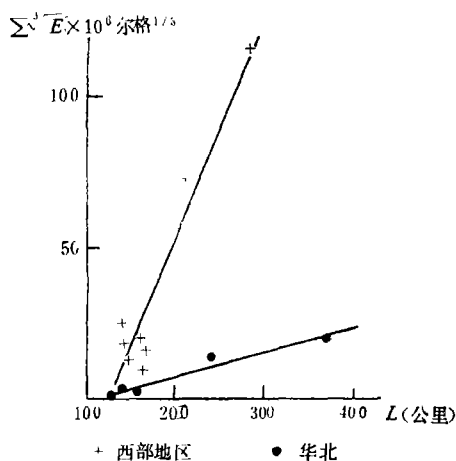


图 6 在孕震空区形成过程中,空区及邻近区域地震所释放能量的 $\frac{1}{3}$ 次方之和与主震震级关系

根据本文总结的空区特别是孕震空区的经验公式,可以大致给出未来强震的震级和地点,但对于预报强震的时间,任意性却较大,在围空区边缘较频繁的地震活动中识别出逼近地震,就能提供较为准确的信息。研究表明,上篇已经得出的逼近地震的一些特征,在本文的其余震例中同样适合,这里就不再重述。

此外,为了较为确定地识别逼近地震,我们又找出了如下定量的识别方法。

图 6 是孕震空区形成的过程中,空区及邻近区域地震所释放能量的三分之一次方的和 $\sum \sqrt[3]{E}$ 与空区长轴 L 之间的相关关系图。对于我国西部地区与华北地区,可以分别粗略地得到两个经验关系。

$$\text{华北 } \sum E^{1/3} (10^4 \text{ 尔格}^{1/3}) = 7.88 L (\text{公里})$$

$$-(8.50 \pm 1.73) \times 10^3 \quad (5)$$

$$\text{西部} \quad \Sigma E^{1/3} (10^5 \text{ 尔格}^{1/3}) = 7.19 L (\text{公里}) - (9.37 \pm 1.67) \times 10^2 \quad (6)$$

经相关系数检验,它们的相关性在 5% 的水平上全部显著. 因为逼近地震发生后,孕震空区边缘不再有较显著的地震发生,所以,根据孕震空区的长轴和由上式计算得到的 $\Sigma E^{1/3}$,可以判断逼近地震发生的大致时间,这就给出了判别逼近地震的定量标志. 例如,1973 年 2 月 6 日炉霍 7.9 级地震前,从孕震区及周围应变释放的加速可知,孕震空区于 1965 年 11 月前后开始出现,随着孕震空区周围地震不断发生,空区范围逐渐明显,长轴 L 为 290 公里,利用经验公式 (6) 算得空区及邻近区域在孕震过程中应释放的 $\Sigma E^{1/3}$ 为 1.15×10^8 尔格^{1/3},而自 1965 年 11 月至 1972 年 8 月间实际共释放 $\Sigma E^{1/3}$ 为 1.00×10^8 尔格^{1/3},这时便应注意空区边缘显著地震的发生. 1972 年 9 月 27 日康定发生 5.8 级震群,这时 $\Sigma E^{1/3}$ 达 1.16×10^8 尔格^{1/3}. 该震群发生后,空区周围便无地震发生,因此,我们可确定该震群即为逼近地震.

四、讨 论

在上篇中我们定性地解释了孕震空区和逼近地震的物理依据. 孕震空区是在强应力场作用下逐渐形成的与周围母体介质力学性质 (例如弹性常数和强度) 不同的一个区域,即孕震区的地面的表现. 这种介质性质的不同导致其边界附近裂纹的应力强度因子高,从而易于发生小震,形成孕震空区. 而逼近地震则是边界附近最后一个易扩展裂纹的失稳扩展.

为进一步说明孕震空区的意义,我们给出表 5,表 5 是一些作者由地形变、波速比等前兆资料得到的异常时间 T 与主震震级 M 的经验关系. 可以看出,它们与由孕震空区得到的经验关系 (1)、(3) 式大体一致. 这表明孕震空区大体于震前波速,地形变等中期异常出现前后产生. 由此可见,孕震空区表征的是在强震孕育的中期阶段、孕震区内的地震活动性相对于外围的平静,它是一项中期前兆指标. 这就是孕震空区的基本含义.

表 5

编 号	作 者	经 验 方 程	依据的前兆资料	文 献
1	坪川家恒	$M = 1.26 \lg t (\text{月}) + 4.25$	地形变	[4]
2	肖 尔 茨	$M = 1.46 \lg t (\text{月}) + 4.45$	波速比等	[5]
3	力武常次	$M = 1.32 \lg t (\text{月}) + 4.36$	地形变、波速比等	[6]
4	惠特科姆	$M = 1.25 \lg t (\text{月}) + 4.25$	地形变、波速比等	[7]
5	冯 德 益	$M = 1.45 \lg t (\text{月}) + 4.24$	波速比	[8]
6	陆远忠等	$M = 1.34 \lg T (\text{月}) + 4.57$		本文

1. 关于孕震区的尺度

由于孕震区大致勾划了一个与周围母体物理力学性质不同的介质体,如果这是一个比较均匀的球体或椭球体,从文献 [9] 可知,介质内部处于均一受力状态,产生均匀剪切应力和剪切应变,并在此范围内积累应变能,这就是所谓孕震体. 后来强震释放的能量主要就来自于孕震体贮备的应变能,显然孕震体比震源体大. 关于孕震区尺度,我国不同作

表 6

编 号	作 者	空区尺度与震级关系	文 献
1	西南地震烈度队	$M = 3.55 \lg L + 0.24$	[10]
2	吴 开 统 等	$M = 3.00 \lg L - 0.07(\pm 0.33)$	[11]
3	邓 起 东 等	$M = 3.16 \lg L - 0.31$	[12]
4	陆 远 忠 等	$M = 3.69 \lg L - 1.71(\pm 0.47)$	本文

者根据空区长轴与未来主震震级的经验关系作了估计,如表 6 所示。

从表中可知,不同作者一致得出地震震级与孕震区尺度的对数成线性关系,比例系数都集中在 3.00—3.69 之间,相差不大。上篇已经指出,冯德益等据波速比所得的孕震区尺度与震级的关系也与此相近。但把这一结果与震源区尺度和震级的关系^[13]

$$M = 2.1 \lg L (\text{公里}) + 3.3 \quad (7)$$

对比,发现比例系数显著不同。其原因何在? 我们是这样理解的,因为地震发生是断层失稳破裂的结果,主断层破裂尺度大体代表了震源区的线度。而地震波辐射能是与震源体积即断层的三次方成比例,再应用古登堡震级与能量的公式

$$\lg E_{\text{震}} = 1.5M + 11.8 \quad (8)$$

即可导出式(7)。然而孕震体积累的能量 E 只有很小一部分化为地震波动能,还有很大一部分消耗在各种非弹性损耗上,并且地震大小不同,地震释放的波动能占总能量的比例即地震效率不同,因而不能应用古登堡震级能量公式计算地震总能量。为了估计地震总能量,我们可以利用地震后测得的最大位错与震级的经验关系及位错与地震能的理论关系式^[13]:

$$D = 10^{0.52M-1.25} \quad (9)$$

$$E = A\mu \frac{\bar{D}^3}{l} \quad (10)$$

式中 D 为地震后测得的最大位错, \bar{D} 为断层面上各点的平均错动幅度, A 为断层面积, l 为断层长度, μ 为剪切模量。由于地震在深度的线度上发展受到的限制较大,故对较大地震断层宽度 $\frac{A}{l} = W$ 变化不大,若以地表最大位错 D 代表平均位错 \bar{D} , 则有

$$\lg E = 1.04M - 2.5 + \lg \frac{A\mu}{l} \quad (11)$$

我们同样可以认为地震释放的总能量与孕震区线度的三次方成比例。即

$$E = KL^3 \quad (12)$$

式中 K 为比例系数,联立(11)和(12)式即得

$$M = \frac{3}{1.04} \lg L + Q \quad (13)$$

Q 为一与震级无关的常数。由(13)式可见, $\lg L$ 前的系数大体在 3.0 左右。由于各地区条件不一,统计所得的经验公式可能有所差别,故不同作者所得的经验公式中, $\lg L$ 之前的系数有所差异。

2. 逼近地震发生的解释

我们已经设想孕震空区是未来地震孕震体在地表的投影,孕震体的物理力学性质(如弹性常数、强度等)与周围母体介质不一样,从而我们可以把孕震体与周围母体的关系表示如图 7(a). 根据文献[9],孕震体内应力 $\tau_{\#}$ 、应变 $\gamma_{\#}$ 分布是均匀的,它与无限远处母体的应力 τ_{∞} 、应变 γ_{∞} 的关系与孕震体性质无关,且可表示为

$$\gamma_{\#} - \frac{\tau_{\infty}}{G} = \xi / G (\tau_{\infty} - \tau_{\#}) \quad (14)$$

式中 G 是母体剪切模量, ξ 由以下三式决定

$$\xi = \frac{(1-\nu)L}{W} \quad (\text{平面应变情况,孕震体为窄椭圆球体}) \quad (15)$$

$$\xi = \frac{4(1-\nu)L}{\pi(2-\gamma)W} \quad (\text{孕震体为轴对称窄椭圆球体}) \quad (16)$$

$$\xi = \frac{2(4-5\nu)}{7-5\nu} \quad (\text{孕震体为球体}) \quad (17)$$

L 、 W 为孕震椭圆球体长短轴, ν 为母体介质的泊松比。在远处构造应力作用下,孕震体内的应力和应变如图 7(b)中曲线 OAB 所示。图中 OB 是周围母体应力应变曲线,可以认为它基本上是线性的。(14)式称为 Eshelby 线,如图中 NB 所示,图中 Eshelby 线与孕震体、母体的应力应变曲线的交点(如 A 点和 C 点)即代表当时孕震体与母体的应力应变状态。图中表出的孕震体的应力总是高于周围母体,图中虚线代表孕震体边缘裂纹失稳扩展产生的应力降和应力的继续积累。如上篇所述,周围母体逐渐增加的应力,将首先导致孕震体边缘处裂纹的失稳扩展。而由图可见,愈接近孕震体的极限强度,每两次失稳扩展之间的孕震体的应力变化愈小,从而这种大破裂前边缘裂纹的失稳扩展愈易于发生,即易于发生参加围空的小震。在孕震体应力应变曲线的最高应力处即 A 点附近,更容易连续发生小震或发生小震群,这就是所谓逼近地震。逼近地震发生后,孕震体并不立即发生大破裂。其应力应变状态如 AB 段所示,这时应变的增加不引起应力的增加,而反而使应力减小(弱化)。因而在 AB 段孕震体及其边缘一般不会发生小震,出现了临震前的平静期。在 B 点,孕震体应力应变曲线与 Eshelby 线平行,即孕震体发生大破裂,最终丧失了承载能力。

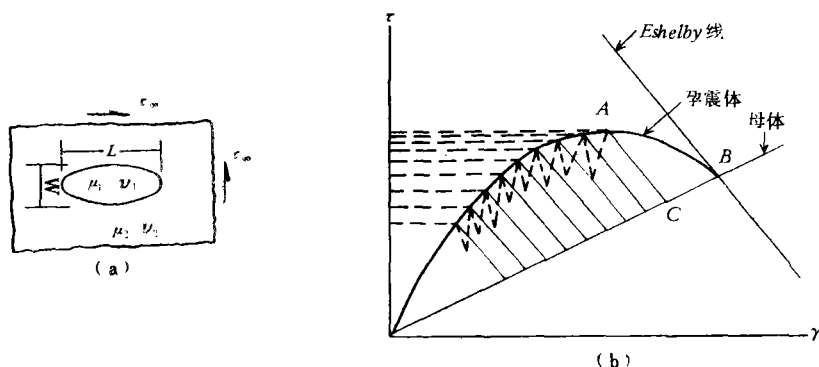


图 7

(a)——孕震体与母体 (b)——孕震体与母体应力应变示意图

可以设想,孕震体边缘发生的各次小震的破裂长度的和与孕震体的线度成比例。那么,孕震空区边缘小震地震波释放能量的三分之一次方之和也与孕震线度成正比,这就解释了本文所得的(5)、(6)两式。

五、结 语

综上所述,本文所论述的地震空区,尤其是孕震空区及逼近地震,对地震预报无疑有一定意义,它可以提供一定的中期和短临信息,在实际的地震预报工作中,如果某一区域在不长的时间段里出现较小地震围成的空区,则我们可以从如下几个方面确定它是否为我们所说的孕震空区。

1. 随着空区的形成,空区及邻近区域的地震应变释放应出现加速。

2. 上述区域的空区内外频度比 $\frac{N_{外} + 1}{N_{内} + 1}$ 在应变释放加速后也应上升。

3. 在孕震空区确定的区域之外,还应存在本文所论及的背景空区。通常在背景空区形成前,其内部还可能发生早期前震。

4. 孕震空区应出现在孕震的中期异常阶段,它大体于地形变、波速比等中期前兆异常开始前后出现,它与这些中期异常区域的尺度大体一致,甚至重合。

由上述四方面我们可以确定所发现的空区是否为本文所论述的孕震空区,并且进而对未来地震的三要素作出预报。对三要素的预报可由如下几个方面确定。

1. 根据孕震空区所在的区域及早期前震的位置并结合波速比等前兆异常区域,可初步判定未来震中位置。

2. 根据两类空区的形成时间、空区长轴以及参加围空的地震震级,利用经验关系(1)、(2)、(3)、(4)等,估算未来主震震级。孕震空区的起始时间可由空区及邻近区域应变释放加速及空区内外频度比上升的时间大体确定。

3. 孕震空区形成后,根据第三节所述,识别出逼近地震。此后,空区及邻近区域的地震活动应出现相对平静,这即是强震逼近的征兆。当然,逼近地震发生后的平静期在几天到半年左右,要准确作出临震预报还需前震或其他临震前兆资料,单靠逼近地震是无能为力了。

参 考 文 献

- [1] 陆远忠等,地震空区与逼近地震,地震学报, 4, 4, 1982.
- [2] 中国科学院数学研究所数理统计组,回归分析方法,科学出版社, 1975.
- [3] 刘正荣,早期前震与终止破裂点,地震战线, 6, 1977.
- [4] 坪川家恒,地壳变动的继续时间与地震の規模との関係について,测地学会誌, 15, 1969.
- [5] C. H. Scholz, L. R. Sykes and Y. P. Aggarwal, Earthquake prediction: a physical basis, *Science*, 181, 1973.
- [6] T. Rikitake, Earthquake Precursors, *B. S. S. A.*, 65, 1975.
- [7] J. H. Whitcomb, J. D. Garmany, D. L. Anderson, Earthquake prediction: Variation of seismic velocities before the San Fernando Earthquake, *Science*, 180, 4086, 1973.
- [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)——波速异常区及其特性,地球物理学报, 20, 2, 1977.
- [9] J. R. Rice, Theory of precursory processes in the inception of earthquake rupture, *Gerlands Beitr.*

Geophysik, Leipzig 88, 2, s. 91—127, 1979.

- [10] 西南地震烈度队, 强弱地震的时空强关系, 地震战线, 3, 1973.
- [11] 吴开统等, 海城地震序列的特征, 地球物理学报, 19, 2, 1976.
- [12] 邓起东等, 中国地震烈度区划图编制的原则和方法, 地震学报, 2, 1, 1980.
- [13] 郭增建等, 震源物理, 地震出版社, 1979.

SEISMIC GAPS AND IMMINENT EARTHQUAKES (CONTINUED)

LU YUANZHONG WANG WEI SHEN JIANWEN

(*Seismological Bureau of Anhui Province*)

Abstract

On the basis of a previous paper of the same title earthquakes of $M \geq 6$ occurred during the period 1970—1980 and two earthquakes of $M > 7$ of the 1960's on the main land of China, are analysed. It is shown that the conclusions reached about "background gaps", "preparatory gaps" and "imminent earthquakes" in the previous paper have general significance and thus it substantiates the results of the previous paper. The empirical formula has been recomputed.

Three criteria are proposed for the identification of "preparatory gaps": 1) Along with the formation of a "preparation gap", the seismic strain release should be accelerated in the gap area and its vicinity; 2) The ratio of earthquake frequency outside and inside the gap $\left(k = \frac{N_{(out)} + 1}{N_{(in)} + 1}\right)$ should reach a maximum value during the process of its formation; 3) Some moderate earthquakes in the form of early foreshocks would occur in the forthcoming epicentral area before the formation of the "background gap". Besides, it is found there is a linear relation between $\Sigma E^{\frac{1}{2}}$ and logarithm of the longer axis of a "preparatory gap", where E is the energy release in the "preparatory gap" and its neighbouring region. The empirical formula obtained can be used as a time criterion of the occurrence of the imminent earthquake. Finally, the physical mechanism of imminent earthquakes and the dimension of the area of preparatory gaps are discussed.