

进入短期阶段的空区识别及 判据指标研究^{*}

曹井泉 孙加林 杨毅

(中国呼和浩特 010051 内蒙古自治区地震局)

摘要 以中期空区(孕震空区)图象为背景, 在应变释放加速后转平的基础上, 逐步缩小时空强三维轴向扫描窗长和步长, 从多维空间探索强震进入短期阶段空区的特征及判据指标, 提出了通过时空强三维轴向稳定性检验确定空区的新方法。通过对华北和西南地区 26 个震例的研究分析, 发现在孕震空区形成后期、强震前 9~16 个月, 震源区附近出现一种有别于孕震空区的短期空区。这类空区一般持续 4~7 个月, 震前 3~8 个月结束, 结束的标志往往是空区内部或边缘出现显著地震, 空区内出现小震活动。

主题词 短期空区 三维轴向 识别 稳定性检验 判据指标

引言

经过多年来的研究探索和预报实践, 空区图象方法已基本形成模式化(国家地震局科技监测司, 1990), 特别是对孕震空区的判定及异常识别取得了较大进展(王炜等, 1989; 陆远忠, 宋俊高, 1989)。根据“八五”短临预报攻关的要求, 本项研究以孕震空区为背景, 在应变释放加速后转平的基础上, 从多维空间探索强震进入短期阶段的空区(短期空区)特征及识别方法, 提出半年左右时段的预报判据。

强震前 1~1.5 年, 震源区附近中等地震活动明显减弱, 而中小地震出现异常活动(孙加林, 1985)。因此, 对中短期震兆异常图象的提取和识别是比较困难的, 它依赖于时、空窗和震级下限的选取。实践证明, 即使采用同一种方法进行空区图象演化研究, 由于时、空窗和震级下限的取值不同, 而使研究结果出现很大差异和随机性。这种研究结果的不确定性, 往往使人们在实际应用中, 不自觉地按主观意识去寻找随机异常点, 从而导致大量的虚报。由此可见, 在时空强三维空间中提取稳定清晰的震兆信息是空区图象演化研究的关键。

我们改变过去将时、空窗和震级下限取某一定值来研究地震空区的办法, 在时间窗 T 、空间窗 S 和震级下限 M_0 三维空间中, 取某一适当值域: $T \in [T_1, T_2]$; $S \in [S_1, S_2]$; $M_0 \in [M_1, M_2]$, 提取具有震兆意义的地震活动图象。如果 $T < T_1$; $S < S_1$; $M_0 > M_2$, 图象中具有震兆意义的信息容易被漏掉, 反之, 具有震兆意义的信息会被干扰而模糊不清。因此,

* 1995-05-27 收到初稿, 1995-11-24 收到修改稿并决定采用。

在时空强三维空间中提取稳定清晰的空区图象, 特别是短期空区图象, 选取适当的时、空窗和震级下限的值域是至关重要的。本文采用三维轴向同步扫描的方法, 取得了较好的效果。

1 资料和方法

采用中国地震目录数据库 1970~1992 年的资料, 选取 1970 年以来发生在华北、川滇和祁连山地区 26 次中强以上地震震例为研究对象(表 1), 通过资料预处理, 剔除了余震序列。

1.1 资料的选取

根据震源区附近的地震构造特征, 考虑到台网的控震能力和资料精度, 按下述方法选取震例的基础资料: ① 空间域。对于 $M_s \geq 7.0$ 震例, 以主震为中心向外扩展 5×5 至 7×7 经纬度; 对 $M_s < 7.0$ 震例, 以主震为中心向外扩展 4×4 至 6×6 经纬度; ② 时间域。对于 $M_s \geq 7.0$ 震例, 取震前 4~6 年; 对于 $M_s < 7.0$ 震例, 取震前 3~5 年; ③ 震级下限。华北地区取 $M_L = 2.0$, 西南地区取 $M_L = 2.3$ 。

表 1 研究震例及其资料的选取

序号	震例			M_s	起始时间	参 数	
	发震时间	地点	纬度/N			起止纬度/N	起止经度/E
1	1976-07-28	唐山	39°24'	118°00'	7.8	1972-08	36°~43° 115°~122°
2	1970-01-05	通海	24°03'	102°37'	7.7	1966-02	21°~28° 99°~106°
3	1973-02-06	炉霍	31°30'	100°24'	7.6	1970-01	28°~35° 98°~105°
4	1976-05-29	龙陵	24°22'	98°38'	7.4	1972-06	21°~27° 96°~102°
5	1975-02-04	海城	40°39'	122°48'	7.3	1971-03	37°~43° 119°~126°
6	1976-08-16	松潘	32°42'	104°06'	7.2	1972-09	29°~35° 100°~107°
7	1974-05-11	大关	28°06'	104°00'	7.1	1970-06	25°~31° 100°~107°
8	1990-04-26	共和	36°07'	100°08'	7.0	1986-05	34°~41° 97°~103°
9	1981-01-24	道孚	31°00'	101°10'	6.9	1977-02	28°~34° 98°~104°
10	1979-03-15	普洱	23°12'	101°06'	6.8	1975-04	20°~26° 98°~104°
11	1976-11-07	盐源	27°32'	101°03'	6.7	1973-12	25°~30° 98°~104°
12	1973-08-11	松潘	32°53'	104°00'	6.5	1970-09	30°~35° 101°~107°
13	1986-08-26	门源	37°42'	101°30'	6.4	1983-09	35°~41° 98°~104°
14	1976-04-06	和林格尔	40°14'	112°12'	6.3	1973-05	37°~43° 109°~115°
15	1985-04-18	禄劝	25°52'	102°51'	6.3	1982-05	23°~29° 100°~106°
16	1975-01-05	康定	29°30'	101°48'	6.2	1972-02	27°~32° 98°~104°
17	1976-09-23	巴音木仁	39°59'	106°27'	6.2	1973-10	37°~42° 104°~109°
18	1984-05-21	南黄海	32°29'	121°35'	6.2	1981-06	30°~35° 118°~124°
19	1990-10-20	天祝	37°06'	103°30'	6.2	1987-11	35°~40° 100°~106°
20	1979-07-09	溧阳	31°28'	119°15'	6.0	1976-08	29°~34° 116°~122°
21	1979-08-25	五原	41°14'	108°07'	6.0	1976-09	38°~44° 105°~111°
22	1982-06-16	甘孜	31°50'	99°51'	6.0	1979-07	29°~34° 97°~103°
23	1983-11-07	菏泽	35°16'	115°17'	5.9	1980-12	32°~38° 112°~118°
24	1989-10-19	大同	39°57'	113°49'	5.9	1986-11	37°~43° 111°~117°
25	1981-08-13	丰镇	40°30'	113°26'	5.8	1978-09	38°~43° 111°~116°
26	1980-02-10	博克图	48°46'	121°46'	5.6	1977-03	46°~51° 119°~124°

1.2 基本方法

采用缩小时空强三维轴向扫描窗长和步长的方法, 对强震前进入短期阶段的空区图象进行动态追踪研究。首先, 确定出时空强三维轴向扫描的基本窗长和步长。本文以 $6^\circ \times 6^\circ$ 为空间轴向扫描的基本窗长, 扫描步长为 $12'$, $24'$; 时间轴向扫描基本窗长取 12 个月, 下限 9 个月, 上限 16 个月, 扫描步长 30 天; 强度轴向扫描步长取 0.1 级。在确定出三维轴向扫描基本参数后, 运行 DEMAP 软件。该软件用 C 语言编写在 GW486 机上实现。使用 DEMAP 软件可对短期空区进行三维轴向动态追踪研究, 程序框图见图 1。

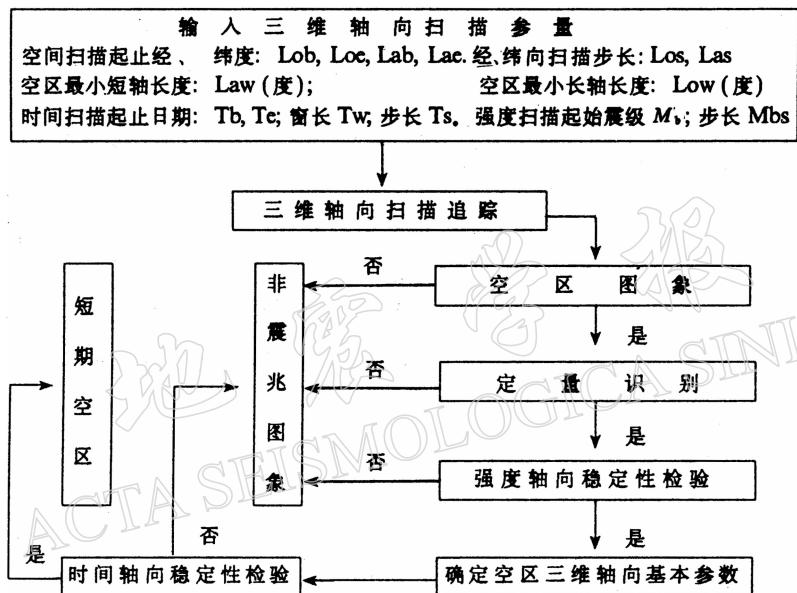


图 1 DEMAP 软件识别短期空区程序框图

2 短期空区的识别

在孕震空区形成后期, 强震前 9~16 个月左右, 震源区附近出现一种有别于孕震空区的空区。这类空区一般持续 4~7 个月, 震前 3~8 个月结束, 结束的标志往往是空区内或边缘出现显著地震(孙加林, 曹井泉, 1995), 空区内出现小震活动。我们称这类空区为短期空区。

2.1 空区图象的识别

在地震活动图象演化进入短期阶段后, 空区图象一旦出现, 在定量识别和勾画前, 空区图象应当是清晰的。这时, 空区内部基本无地震活动, 而外围区的地震则相对活跃。空区图象的定量识别与王炜等(1989)采用的方法基本一致。根据选取资料的精度(本文选取的资料, 精度达 I, II 类的约占 70%), 围空地震的震中拟合误差应小于 15 km。采用上述方法对空区图象进行识别, 结果发现: 26 个震例在强震孕育的短期阶段均存在空区图象, 其中有 5 个震例在震源区附近存在 2~3 个空区, 这样共获得 33 个空区。

2.2 强度轴向稳定性检验

经定量识别确定出的空区, 只在空间轴向上具有稳定性, 而无法排除时间轴向和强度

轴向上的随机因素。因此，进行强度轴向稳定性检验，以剔除强度轴向上因资料精度引起的误差和其它随机误差。所谓强度轴向稳定性，是指震级下限 M_0 在某一尺度内，即 $M_0 \in [M_1, M_2]$ 中的任意值时，空区图象不发生显著变化。本文使用 DEMAP 软件，将定量识别

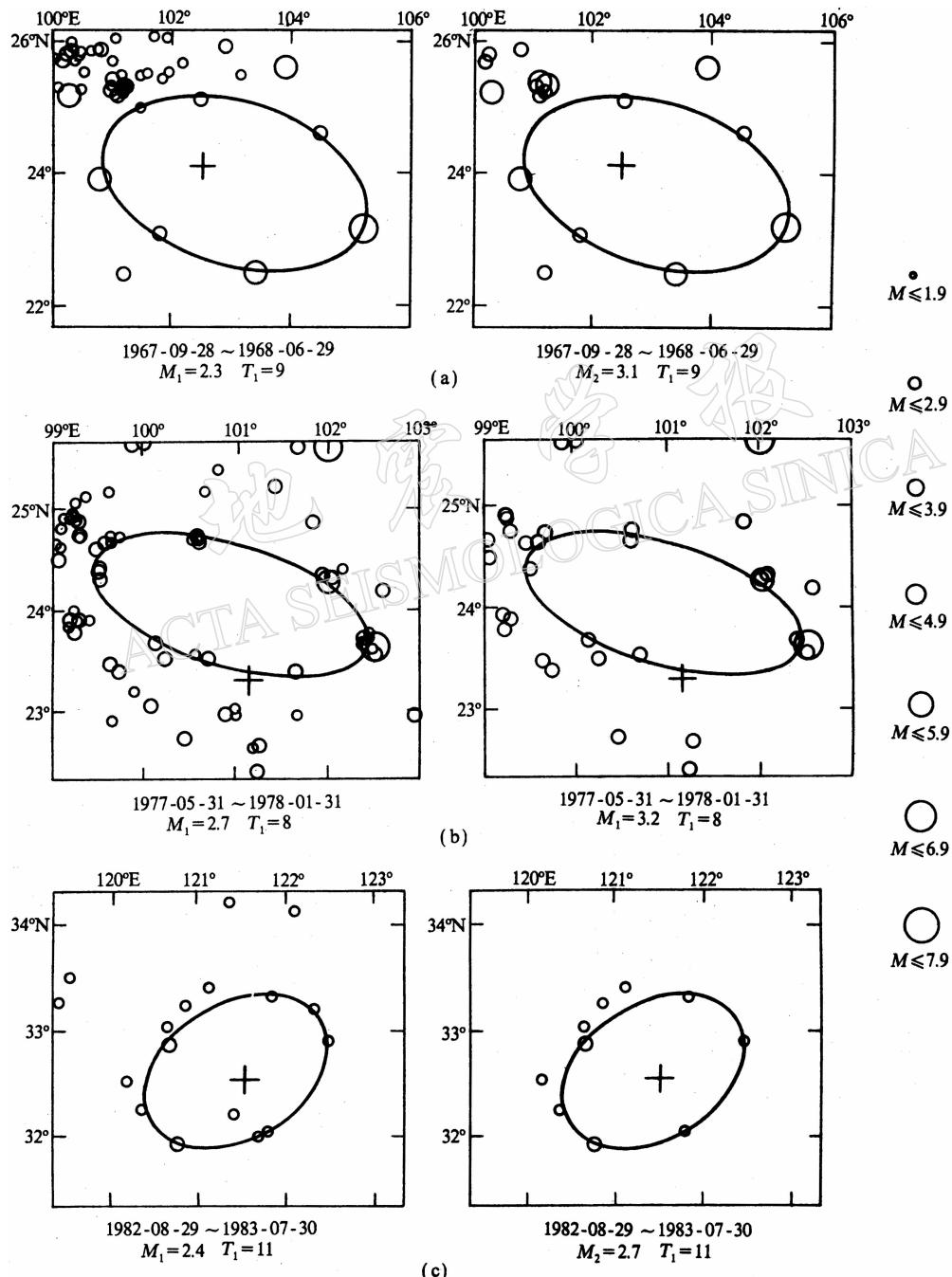


图 2 经强度轴向稳定性检验确定的短期空区图象。(a) 1970 年 1 月 5 日通海 7.7 级地震;
(b) 1979 年 3 月 15 日普洱 6.8 级地震;(c) 1984 年 5 月 21 日南黄海 6.2 级地震

确定出的空区图象，在时间窗 T 和空间窗 S 不变的情况下，按震级扫描步长 0.1 级进行强度轴向追踪扫描，即依次取震级下限 $M_0 = M_1, M_1 + 0.1, M_1 + 0.2, \dots, M_2$ 绘制一组震中分布图。根据台网的控震能力和资料精度，我们定义：如果华北地区 M_0 的域值 $M_2 - M_1 \geq 0.3$ ，西南地区 $M_2 - M_1 \geq 0.4$ ，空区图象是清晰稳定的，那么我们说，空区图象通过强度轴向稳定性检验。用空区定量识别方法确定出的 33 个空区，经强度轴向稳定性检验剔除了 8 个。图 2 给出了 1970 年 1 月 5 日通海 7.7 级地震、1979 年 3 月 15 日普洱 6.8 级地震和 1984 年 5 月 21 日南黄海 6.2 级地震等 3 次强震中强震前 $M_0 = M_1, T = T_1$ 和 $M_0 = M_2, T = T_2$ 两组空区图象。

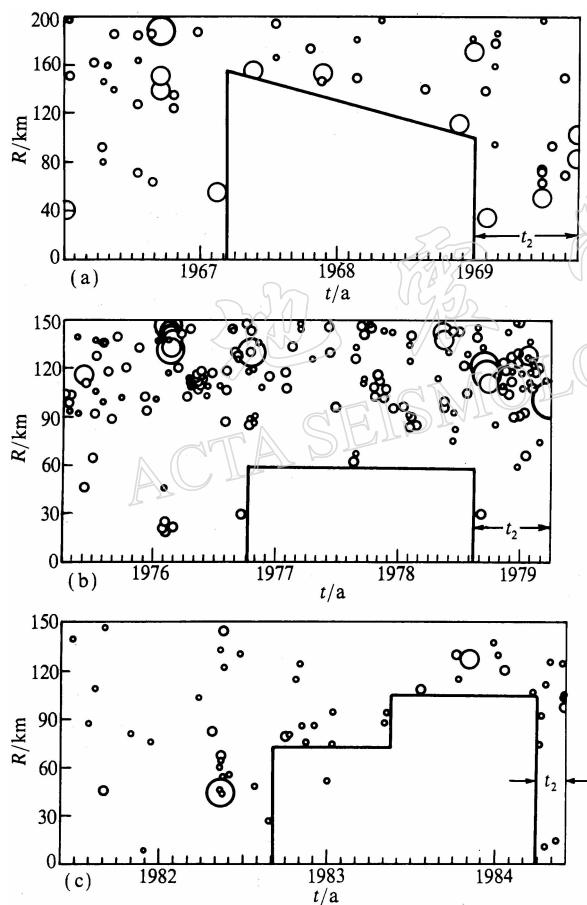


图 3 以空区几何中心为原点确定的 $R-t$ 图

(a) 1970 年 1 月 5 日通海 7.7 级地震(原点坐标: $23^{\circ}50'N, 103^{\circ}0' E, M_1 = 2.3$); (b) 1979 年 3 月 15 日普洱 6.8 级地震(原点坐标: $24^{\circ}00'N, 101^{\circ}00'E, M_1 = 2.7$); (c) 1984 年 5 月 21 日南黄海 6.2 级地震(原点坐标: $32^{\circ}39'N, 121^{\circ}30'E, M_1 = 2.4$)

的短期空区一般在主震前 3~9 个月结束，结束的标志是空区内出现小震活动，打破平静。

通过稳定性研究，确定出了识别短期空区的时空强三维轴向基本参数，即形成短期空区的最小时间窗 T_1 (月)、空间窗 S 和震级下限 $(M_2 - M_1)$ 的值域。其中：

华北地区 $T_1 \in [9, 12]$

$S \in [4 \times 5^{\circ}, 6 \times 7^{\circ}]$

$M_2 - M_1 \in [0.3, 1.0]$

西南地区 $T_1 \in [8, 11]$

$S \in [4 \times 4^{\circ}, 6 \times 6^{\circ}]$

$M_2 - M_1 \in [0.4, 1.1]$

2.3 用 $R-t$ 图确定短期空区

通过震中分布图确定出短期空区后，采用 $R-t$ 图对震源区进行空间扫描，以检验用震中分布图确定的空区边界及其形成时间。对于 $M_s \geq 7.0$ 震例，扫描半径取 200 km， $M_s < 7.0$ 震例，扫描半径取 150 km，原点扫描步长取 24' 和 30' 两组。研究表明，地震空间分布图象扫描与 $R-t$ 图扫描确定的短期空区时空特征基本一致。为简化操作，可仅以未来强震震中和空区几何中心两个点为原点作 $R-t$ 图。如果以前一种方法作 $R-t$ 图，26 个震例中有 23 次地震的 $R-t$ 图出现空区；当改用后一种方法作 $R-t$ 图，则均出现空区(图 3)。 $R-t$ 图确定

3 判据指标

从时间进程看, 短期空区形成于孕震空区后期, 震源区附近中等地震活动减弱, 应变释放加速后转平的时段(表 2). 众所周知, 进行地震活动图象的演化研究, 其实质就是探索地震活动图象在时间轴向上的变化过程. 因此, 研究空区图象在时间轴向上的稳定性, 是判别短期空区的关键. 所谓时间轴向稳定性, 就是指时间窗 T 在某一尺度内, 即 $T \in [T_1, T_2]$ 中的任意值时, 空区图象不发生显著变化. 本文使用 DEMAP 软件, 将通过强度轴向稳定性检验的短期空区图象, 在空间窗 S 不变的情况下, 分别以 $M_0 = M_1$, $M_0 = M_2$ 为震级下限, 按时间累加步长 30 天进行时间轴向扫描研究, 即依次取 $T = T_1$, $T_1 + 30$, $T_1 + 60$, \dots , T_2 绘制两组震中分布图. 当 M_0 分别等于 M_1 和 M_2 时, 如果时间窗 T 的值域同时满足 $T_2 - T_1 \geq 4$ (月), 且空区图象是清晰稳定的, 那么我们说, 空区图象通过时间轴向稳定性检验. 图 4 给出了 3 次强震、中强震前 $M_0 = M_1$, $T = T_1$ 和 $M_0 = M_1$, $T = T_2$ 两组空区图象.

为了能够定量地描述空区图象在时间轴向上的变化特征, 我们分别取短期空区长轴 1.5 倍, 短轴的 1.5~2.0 倍为边长, 由空区几何中心向外扩展的矩形区域为短期空区图象的研究域, 按给定的时间轴向扫描参数, 确定出短期空区的外内地震频度比时间变化曲线(图 5).

通过稳定性研究, 确定出短期空区的判据指标, 即

$$R \geq \bar{R} + \sigma \quad t \geq 4 \quad (1)$$

式中, R 为空区外内地震的频度比; \bar{R} 为空区外内地震频度比多年的均值; t 是在震级下限 M_0 值域中, 由 M_1 和 M_2 分别确定的空区外内地震频度比同步异常的持续时间(月); σ 是地震频度比 R 的均方差.

表 2 短期空区特征指标及判据检验统计表

序号	$t/\text{月}$	与 t 同步的变化特征				检 验	序号	$t/\text{月}$	与 t 同步的变化特征				检 验
		$\sum \sqrt{E}$	$t_1/\text{月}$	$t_2/\text{月}$	ΔM				$t_1/\text{月}$	$t_2/\text{月}$	ΔM		
1	7	转平	10	10	0.5	✓	14	4	转平	2	2	0.8	✓
2	11	加速转平	10	12	0.8	✓	15	5	转平	4	5	0.4	✓
3	2	转平	7	7	0.4	✗	16	4	转平	7	8	0.6	✓
4	6	转平	3	3	0.5	✓	17	4	转平	7	8	0.5	✓
5	6	加速转平	2	2	0.3	✓	18	4	转平	1	2	0.3	✓
6	4	转平	7	6	0.5	✓	19	5	加速转平	7	7	0.3	✓
7	7	转平	12	13	1.0	✓	20	4	转平	5	7	0.5	✓
8	6	转平	5	7	0.3	✓	21	8	转平	5	8	0.7	✓
9	7	转平	3	3	0.4	✓	22	3	转平	4	0	0.7	✗
10	7	转平	6	7	0.5	✓	23	4	转平	3	3	0.3	✓
11	2	转平	10	5	0.6	✗	24	8	转平	5	6	0.4	✓
12	2	加速转平	3	4	0.3	✗	25	3	转平	6	6	0.5	✗
13	4	转平	5	5	0.3	✓	26	6	加速转平	4	4	0.5	✓

注: t_1 为强震前空区外内地震频度比同步异常结束时间, $\Delta M = M_2 - M_1$, t_2 为用 $R-t$ 图确定的短期空区结束时间

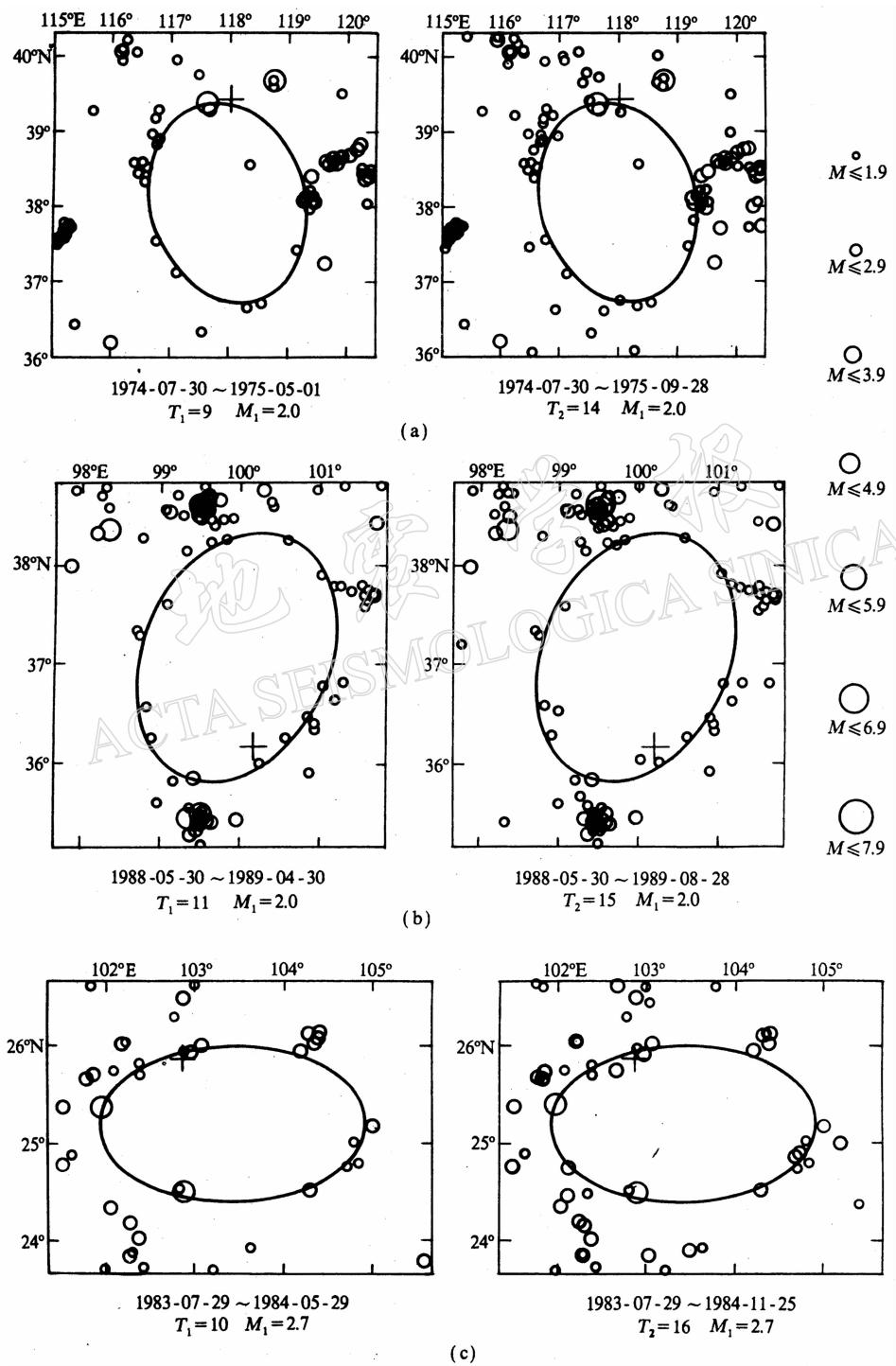


图 4 经时间轴向稳定性检验确定的短期空区图象

(a) 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级; (b) 1990 年 4 月 26 日共和 7.0 级; (c) 1985 年 4 月 18 日禄劝 6.3 级

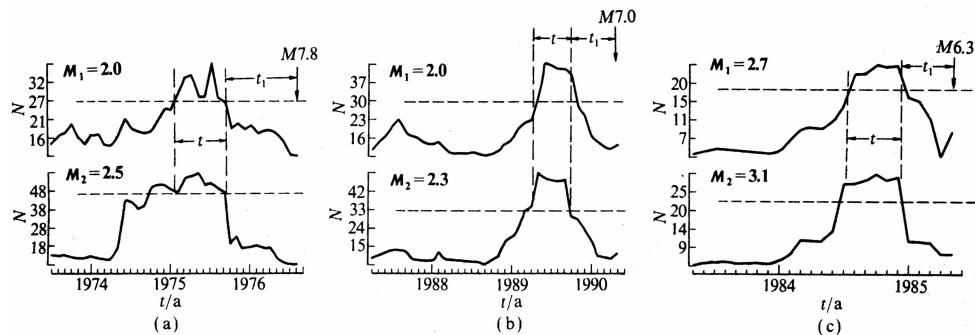


图 5 在震级下限 M_0 值域中, 由 M_1 和 M_2 分别确定的空区外内频度比时间变化曲线

(a) 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震; (b) 1990 年 4 月 26 日共和 7.0 级地震; (c) 1985 年 4 月 18 日禄劝 6.3 级地震

以式(1)为判据, 通过时间轴向的稳定性检验, 26 个震例中有 21 个存在短期空区。表 2 给出了 26 次强震、中强震前短期空区在时间和强度轴向的特征指标及判据检验结果。

4 结论

用缩小时空强三维轴向扫描窗长和步长的办法, 研究强震孕育到短期阶段的空区图象。尽管信息量大, 随机干扰因素较多, 但由于在时空强三维空间进行同步扫描提取震兆信息, 并把震兆特征的稳定性检验作为识别异常的新指标, 因此研究效果比较理想。

(1) 通过对 26 个震例的短期阶段空区研究, 发现短期空区长轴 L (km)与强震、中强震的震级 M 存在一定的相关关系。经统计分析, 得出如下经验公式:

$$M = 0.0054 \times L + 4.91 \pm 0.46 \quad (\text{相关系数 } r = 0.80) \quad (2)$$

如果以短期空区外内地震频率比同步异常恢复, 且 $R-t$ 图确定的时间空区结束为标志, 预报半年左右短期空区内部或边缘, 发生由式(2)确定的 M 级地震。通过对 26 个震例

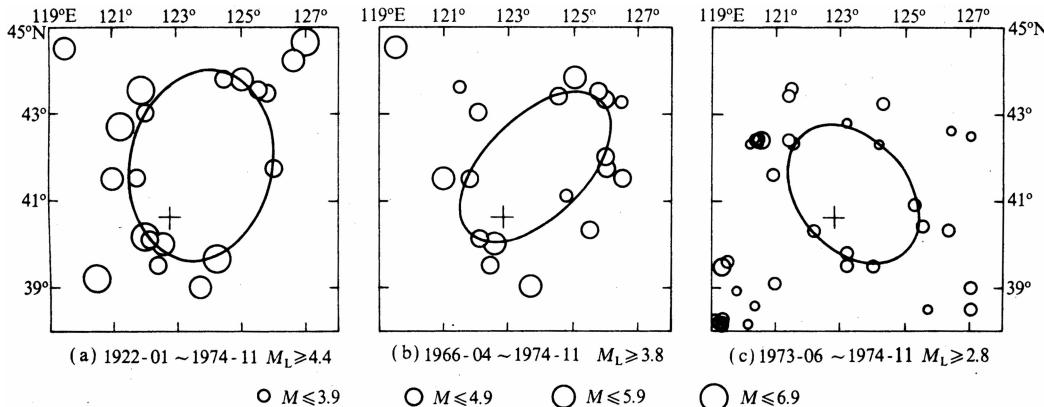


图 6 1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震前的 3 种空区图象

(a) 背景空区图象; (b) 中期空区图象; (c) 短期空区图象

进行回顾性研究, 有 18 个震例通过预报检验。

(2) 强震前震源区附近往往出现空区图象(魏光兴等, 1989; 陆远忠等, 1989), 这种大

震空区图象在向主震时间逼近的进程中,一般都经历背景空区→中期空区(孕震空区)→短期空区的演化过程(如图 6).通过对华北和西南地区 26 个震例的研究分析,发现在空区图象演化过程中,背景空区→中期空区→短期空区,其特征指标沿时空强三维轴向呈向原点收缩的趋势,具体表现为:

$$\begin{array}{ll} \text{空区长轴} & L_{\text{背}} \geq L_{\text{中}} \geq L_{\text{短}} \\ \text{空区形成时间} & T_{\text{背}} \geq T_{\text{中}} \geq T_{\text{短}} \\ \text{围空震级下限} & M_{\text{背}} \geq M_{\text{中}} \geq M_{\text{短}} \end{array}$$

图 6 给出了 1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震前的空区演化图象.从空间轴向看,背景空区→中期空区→短期空区总体向震源附近收缩,且后一类空区往往出现在前一类空区内部或由前一类空区演变而成;在时间轴向上空区图象形成时间缩短;在强度轴向上,围空地震强度减弱.

参 考 文 献

- 国家地震局科技监测司, 1990. 地震学分析预报方法程式指南. 北京: 地震出版社. 7~15
 陆远忠, 沈建文, 王炜, 1989. 中国大陆的地震空区. 地震空区与地震预报. 北京: 地震出版社. 79~98
 陆远忠, 宋俊高, 1989. 孕震空区在中期地震预报中的实际应用. 地震空区与地震预报. 北京: 地震出版社. 191~199
 孙加林, 1985. 中强地震前兆的综合判定及预报. 地震, (5): 13~23
 孙加林, 曹井泉, 1995. 强震前显著地震. 逼近地震的震兆特征及判据指标. 地震, (4): 315~322
 王炜, 黄冰树, 陆远忠, 等, 1989. 孕震空区方法在地震预报中的应用及其效能的研究. 见: 国家地震局科技监测司编,
 地震预报方法实用化研究文集, 地震学专集. 北京: 学术书刊出版社. 1~24
 魏光兴, 林趾祥, 朱宣久, 等, 1989. 华北地区大地震前地震的围空区特征. 地震空区与地震预报. 北京: 地震出版社.
 116~120