

华北地区中等地震活动非稳态特征及预报效能研究

曹井泉^{1,2}, 朝伦巴根¹, 汪翠枝²

(1. 内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 天津市地震局, 天津 300201)

摘要:采用全时空扫描方法在时空强三维轴上识别华北地区的中等地震活动的非稳态震兆信息。结果表明,在地震孕育过程中中等地震活动有由稳态向非稳态演化的特点。非稳态图像不同于传统意义上的空区和条带,其空间分布范围较大,一般出现在震前1年左右。以发生在非稳态图像的非开放、非卸载端点(交汇点)的地震作为标志地震,预测其周围($r=100\text{ km}$)2年内发生 $M_s \geq 5.0$ 地震,预报能力评分 $R=0.573$ 。

关键词:华北; 地震活动; 非稳态; 标志地震; 全时空扫描; 预报效能

中图分类号: P315.72 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)02-0168-05

Study on Non-steady-state Characteristic of Moderate Earthquake Activity and Predict Efficiency in North China

CAO Jing-quan^{1,2}, CHAO-lun Ba-gen¹, WANG Cui-zhi²

(1. Inner Mongolia Agriculture University, Huhhot 010080, China; 2. Earthquake Administration of Tianjin, Tianjin 300201, China)

Abstract: Adopting the method of whole time-space scan on the 3D axial of time, space and strength, the non-steady-state precursory information of moderate seismic activity is identified. The result shows that the characteristic of moderate seismic activity changing from steady-state to non-steady-state is exist in the course of an earthquake pregnant. The non-steady-state seismicity pattern is different from traditional seismic gap and band, its spatial scope is bigger and it often appears about one year before the earthquake. It is called sign earthquake when the earthquake occurs not at open or unload end point (intersection point) of non-steady-state pattern. Using the sign earthquake to predict the $M_s \geq 5.0$ shock inner 100 km range in future 2 years, its prediction efficiency is $R=0.573$.

Key words: North China; Seismic activity; Non-steady-state; Sign earthquake; Whole time-space scan; Predict efficiency

0 引言

过去人们研究地震活动图像是以强震、中强震震例为基础,采取以主震为中心,空间尺度向外扩展到某个范围,时间尺度反推到主震前某个时段的方法进行预报研究。由于这种研究模式的预报对象——未来的强震、中强震是已知的,在研究过程中很难避免人为的有意识地寻找震源区的异常信息。另外由于研究时空的局限性,人们往往注意不到震源区以外的地震活动与震源区之间的联系。因此在实际工作中应用上述研究成果进行全空间预报分

析,难以有效地判断未来的地震危险区。

本文采用一种在大范围内研究地震活动的非稳态图像的方法来尝试进行地震预测,即采用全时空扫描方法,提取地震活动图像演化的非稳态震兆信息,在时空强三维轴上进行外推预报研究。

1 思路和方法

对于一个地震区来说,非稳态图像既不是空区^[1],也不是条带^[2]或条块^[3],而是一种地震活动

收稿日期:2008-03-28

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC01B03-04-05);天津市科技计划项目(07ZCGYSF03100)

作者简介:曹井泉(1964-),男(汉族),内蒙古林西人,高级工程师,主要从事地震活动性和地震地下流体研究。

差异显著的有序图像^[46]。从时间进程看,非稳态图像的出现表明孕震过程已基本完成,未来中强以上地震往往发生在非稳态图像变化显著的部位(如端点、拐点或交汇部位)。我们把发生在这些特殊部位的中等地震作为标志地震^[7]。

本文以华北(N30°—43°,E108°—126°)地区作为研究区,选取1970—2006年 $M_s \geq 3.5$ 地震资料,进行预处理并剔除余震序列。然后对选取的地震数据进行扫描。

在研究时间、空间范围一定的条件下,初始扫描阶段的时间窗长取4年,扫描步长30天;震级下限 $M_s = 4.0$,扫描步长0.1。

(1) 按给定的窗长和步长,对研究区进行全时空扫描,通过不断调整扫描窗长和震级下限,检验地震活动图像在时空强三维轴上的稳定性^[8],提取有序、清晰的非稳态图像;

(2) 非稳态活动图像形成后,以标志地震为中心,预报某个空间范围发生中强以上地震;

(3) 重复(1)、(2)的工作,直至全时空扫描结束;

(4) 对历次预报进行统计,计算 R 值,评价预报效果,如果预报效果不理想则修改预报模型,调整扫描参数,然后重复上述工作。

2 建立预报模型

在某一时空强预报尺度内,预报时间 t 、预报空间 s 和预报震级范围 Δm 与该预报尺度内的地震(本文取 $M_s \geq 5.0$)次数 N 存在如下关系:

$$F(t, s, \Delta m) = N \quad (1)$$

限定条件: $N \geq 1$,求 t, s 和 Δm 的最优解。如果取足够大的 t, s 和 Δm ,那么很容易达到 $N \geq 1$ 的条件,显然这个解不是最优的;如果 t, s 和 Δm 取得过小,则可能导致 $N = 0$ 。最优解的条件是在 t, s 和 Δm 足够小的情况下,满足 $N \geq 1$ 。

预报震级下限取 $M_s \geq 5.0$, $\Delta m = 1.0$,预报震级范围按 $5 \sim 6$ 、 6 ± 0.5 、 $6 \sim 7$ 和 7 ± 0.5 划分4个档次。在全时空扫描研究中,确定 t 和 s 的限定条件是 $R > R_{0.975}$ ($R_{0.975}$ 为置信水平97.5%的 R 值)。

在 s 和 m 一定的情况下,式(1)可简化为

$$F(t) = N \quad (2)$$

其中 $t \in [0, t_1]$, t_1 为有效预报期的时间上限。根据模型的限定条件,公式(2)应满足以下关系:

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 1 \quad (3)$$

如果 $t \leq t_1$ 则预报成功,否则预报失败。如果 F

(t)与 t 的关系满足式(3),且 $t < t_1$,规定 $t_1 - t$ 为不可预报时段。就是说,在预报时空范围一定的条件下只预报首发地震。

在研究时空范围一定的情况下,靠近研究时空边缘的信息是不完整的,因此,可预报区域半径 r_1 应小于研究区域半径 r ,可预报时间域 T_0 应滞后于研究总时间域 T ,即

$$r_1 = r - L \quad (4)$$

$$T_0 = T - t_0 + t_1 \quad (5)$$

其中 L, t_0 为经验常数。

另外,强震后的余震窗口在空间上表现为单点高密度活动图像,难以提取震兆信息,因此把强震后的余震窗口、靠近研究区边缘的区域和地震活动空白区作为不可预报的区域。

根据上述预报模型对华北地区进行全时空扫描,结果发现在研究时空范围内并非所有的地震都可以预报。取 $L = 100$ km, $t_0 = 5$ 年(注意: t_0 必须大于时间扫描窗长)。把1966年3月22日邢台7.2级地震、1975年2月4日海城7.3级地震、1976年7月28日唐山7.8级地震的余震区(以强震为中心 $r = 100$ km)和鄂尔多斯块体内部作为不可预报区域。1970—2006年华北地区共发生 $M_s \geq 5.0$ 地震(不含余震)38次,剔除发生在不可预报区域和不可预报时段的地震后,可预报时空范围内共有地震24次。

3 非稳态活动特征

3.1 时空强三维轴向稳定性

通过地震活动图像全时空扫描研究,发现华北地区地震活动图像在时间轴上交替出现稳态—非稳态活动图像。在由稳态向非稳态演化的进程中,地震活动从无序到有序,并逐步形成一种大体沿构造带方向呈非均匀分布的活动图像。

时间轴向稳定性是指地震活动出现有序分布以后,随着时间的推移,这种有序分布在一定的时间尺度内是相对稳定的。研究证明,在孕震过程中非稳态有序图像一般持续半年到1年(表1)。

强度轴向稳定性是指震级下限 M_0 在某一范围内,即 $M_0 \in [M_1, M_2]$ 中的任意值时,地震活动图像不发生显著变化^[8]。为了检验地震活动图像在强度轴上的稳定性,我们把震级下限降低到 $M_s 3.5$ 进行强度轴向扫描。震级下限 M_2 与 M_1 之差可以反映非稳态图像的稳定性,差值越大,稳定性越好,反之,则稳定性越差。

表1 华北地区 $M_s \geq 4.0$ 地震非稳态活动特征

序号	形成时间	持续时间/月	震级下限		标志地震			
			M_1	M_2	时间	纬度 N	经度 E	震级/ M_s
1	1970-02—1974-02	12	4.1	4.5	1971-08-04	40°54'	112°24'	4.7
					1971-12-30	31°12'	122°30'	4.9
					1972-04-14	40°01'	122°30'	4.8
					1974-05-07	39°30'	119°18'	4.5
2	1973-03—1977-03	6	3.7	4.0	1973-09-22	33°35'	116°31'	4.0
					1975-02-10	39°42'	123°30'	4.0
					1977-01-01	37°41'	112°34'	4.0
3	1976-07—1980-05	6	3.6	4.1	1977-11-06	40°40'	112°30'	4.0
					1978-04-21	40°35'	114°11'	4.5
4	1979-05—1983-04	6	3.9	4.1	1981-12-23	35°36'	115°26'	4.1
					1986-05-23	32°29'	121°33'	4.7
5	1985-05—1989-02	8	3.8	4.0	1986-07-02	38°23'	120°29'	4.1
					1988-07-23	40°05'	114°13'	4.6
					1990-08-01	34°54'	117°56'	4.0
6	1990-07—1993-12	8	3.9	4.0	1993-03-28	33°00'	123°42'	4.5
					1993-03-28	33°00'	123°42'	4.5
					1993-09-11	39°11'	111°30'	4.3
7	1991-11—1995-09	10	3.9	4.2	1994-10-22	41°42'	120°22'	4.5
					1995-07-24	38°00'	124°10'	4.2
					1996-07-17	42°04'	120°25'	4.6
8	1993-06—1997-05	7	3.6	4.0	1997-05-25	40°42'	114°52'	4.2

3.2 非稳态活动图像的识别

非稳态活动图像是指地震活动在时空强三维轴上出现较明显的非均匀分布图像,如地震活动密集、增强、平静、有序,或者在较大范围内出现密集—平静差异显著的活动图像。采用全时空扫描方法识别非稳态图像,关键是时空强三维轴向稳定性检验。当地震活动空间分布出现非稳态特征图像时,按一定的步长(取30天)缩小时间扫描窗口,确定出形成非稳态图像的最短时间,然后按相同的步长放大时间窗,确定结束时间,如果持续6个月以上图像形态没有显著变化,则通过时间稳定性检验;按上述方法调整时间窗,同时按一定的步长(取0.1)提高(或降低)震级下限,观察图像形态变化,确定出震级下限 M_1 和 M_2 ,如果 $M_2 - M_1 \geq 0.2$,且图像形态没有显著变化,则通过强度稳定性检验。为了便于识别标志地震,可对非稳态分布图像按地震优势分布方向勾画地震分布趋势线(图1(a)、(c))或包络线(图1(b)、(d)),对于非稳态特征显著的图像可以不作任何勾画,直接识别标志地震。

3.3 标志地震

众所周知,当应力场增强时地震活动往往沿构造带展布,空间分布呈有序性。活动构造的端点、交汇点是应力易于集中的部位,当应力积累到一定程度,能量往往从这些特殊部位卸载。在地震活动非

稳态阶段我们把地震空间分布在频度、强度和密度均呈减弱趋势的端点(或内角 $\beta \geq 120^\circ$ 的交汇点)作为开放端点(交汇点),把非稳态活动图像形成过程中发生的 $M_s \geq 5.0$ 地震作为卸载地震,发生卸载地震的端点(交汇点)作为卸载端点(交汇点)。

研究表明,在地震活动非稳态阶段发生在非开放、非卸载端点(交汇点)的 $M_s \geq 4.0$ 地震在空间上对未来震源区有一定的指示意义;在时间上标志着孕震过程由中期向短期过渡。为此我们把具有上述特征的地震作为标志地震。图1(a)—(d)给出了华北地区 $M_s \geq 4.0$ 地震非稳态活动图像及其标志地震。

4 预报效能分析

4.1 预报规则

预报时间 t :当地震非稳态活动图像形成且至少持续6个月时,从第7个月开始起算,最大预报时间 $t_1 = 2$ 年, $t \in [0, 2]$ 。

预报范围 s :以标志地震为中心预报半径 $r_0 = 100$ km 的圆形区域。

预报震级 m :根据非稳态图像在强度轴上的稳定性及震级下限 M_2 确定预报震级范围。

$M_2 - M_1 = 0.2$ 且 $M_2 \leq 4.0$ 时,取 $m = 5 \sim 6$ 。

$M_2 - M_1 \geq 0.3$ 时,如果 $M_2 = 4.1 \sim 4.2$,取 m

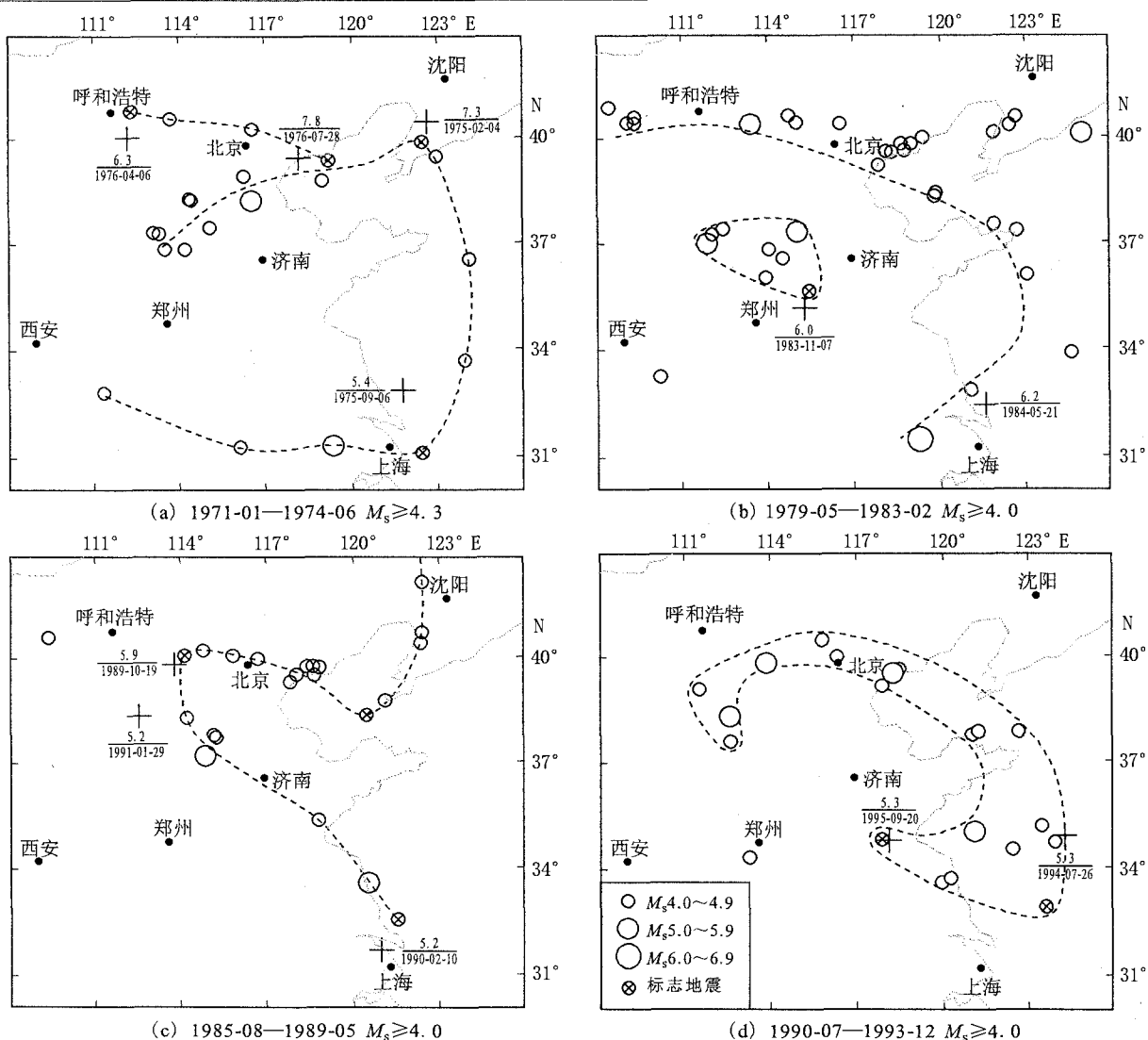


图1 华北地区 $M_s \geq 4.0$ 地震非稳态活动图像

Fig. 1 Non-steady-state patterns of $M_s \geq 4.0$ earthquakes in north China.

$= 6 \pm 0.5$;

$M_2 = 4.3 \sim 4.4$, 取 $m = 6 \sim 7$;

$M_2 \geq 4.5$, 取 $m = 7 \pm 0.5$ 。

如果在预报时空范围内发生预期地震,则预报成功(报对),同时根据公式(3)终止预报。如果在预报时空范围内未发生预期地震,则可能有两种情况,一种是地震发生在预报范围之外的邻近时空尺度内,属预报有偏差(报偏),但在一定程度上对应了预报,因此如果 $t < 2$ 年,则根据公式(3)终止预报。另一种情况是无地震发生,即预报失败(报错)。表2给出了华北地区 $M_s \geq 4.0$ 地震非稳态活动图像预报效能检验结果。

4.2 预报效能评估

根据全时空扫描预报模型,剔除不可预报区域和不可预报时段后,预报研究总面积为 129.1×10^4

km^2 , 预报研究总时间为31年,预报研究总时空为 $40.02 \times 10^6 \text{ km}^2 \cdot \text{a}$ 。通过图像识别共提取标志地震20个,根据预报规则,预报21次(其中1993年3月28日黄海 $M_s 4.5$ 作为标志地震连续预报2次),预报占用时空累计 $0.728 \times 10^6 \text{ km}^2 \cdot \text{a}$ 。

在可预报时空范围内共有 $M_s \geq 5.0$ 地震24次,其中经式(3)判别,发生在首发地震之后不可预报时段的地震有2次,即1997年7月28日黄海 $M_s 5.2$ 地震和1999年11月1日大同 $M_s 5.6$ 地震,分别是1996年11月9日南黄海 $M_s 6.1$ 地震和1998年1月10日张北 $M_s 6.2$ 地震在同一预报时空范围内的后续地震。因此在可预报时空范围内应预报的地震为22次。根据表3的检验结果,采用全时空扫描方法,报对13次,漏报地震9次(报偏按漏报

表2 华北地区 $M_s \geq 4.0$ 地震非稳态活动图像预报效能检验

序号	预报起止时间	预测震级 M_s	预报中心(标志地震)位置		地震实况				检验结果	
			纬度 N	经度 E	时间	地点	震级/M	震中距 Δ /km		
1	1974-09—1976-08	7 ± 0.5	40°01'	122°30'	1975-02-04	海城	7.3	78	√	
			31°12'	122°30'	1975-09-02	南黄海	5.4	200	○	
			40°54'	112°24'	1976-04-06	和林格尔	6.3	76	√	
			39°30'	119°18'	1976-07-28	唐山	7.8	97	√	
2	1977-10—1979-09	5 ~ 6	39°42'	123°30'	1978-08-30	朝鲜	5.0	70	√	
			33°35'	116°31'	1979-03-02	固镇	5.0	95	√	
			37°41'	112°34'	1979-06-19	介休	5.2	90	√	
3	1980-12—1982-11	6 ± 0.5	40°40'	112°30'	1981-08-13	丰镇	5.8	80	√	
			40°35'	114°11'			65	√		
4	1983-11—1985-10	6 ± 0.5	35°36'	115°26'	1983-11-07	菏泽	6.0	39	√	
			40°05'	114°13'	1989-10-19	大同	5.9	37	√	
5	1989-09—1991-08	5 ~ 6	32°29'	121°33'	1990-02-10	太仓	5.2	102	√	
			38°23'	120°29'					无	×
6	1994-07—1996-06	5 ~ 6	34°54'	117°56'	1995-09-20	苍山	5.3	17	√	
			33°00'	123°42'	1996-11-09	南黄海	6.1	133	○	
7	1996-04—1998-03	6 ± 0.5	39°11'	111°30'	1996-05-03	包头	6.4	235	○	
			33°00'	123°42'	1996-11-09	南黄海	6.1	133	○	
			41°42'	120°22'					无	×
8	1997-12—1999-11	5 ~ 6	38°00'	124°10'	1998-01-10	张北	6.2	65	×	
			42°04'	120°25'					无	×
			40°42'	114°52'					√	

注:√ 报对; × 报错; ○ 报偏

计算)。采用许绍燮(1989)提出的方法^[2]进行预报效能评分, $R = 0.573$, $R_{0.975} = 0.234$, 显然, $R > R_{0.975}$ 。

5 讨论与结论

在地震活动由稳态—非稳态演化进程中地震活动图像的变化实际上反映了孕震过程的时空变化。本文通过非稳态活动图像研究从“场”中寻找“源”, 判定中短期地震危险区。研究表明, 1970—2006 年华北地区以“多源”孕震过程为主, 个别时段出现“单源”孕震过程。就是说当中等地震非稳态活动出现后, 在未来 1~2 年内华北地区可能会发生多次 $M_s \geq 5.0$ 地震。

非稳态活动图像在时空强三维轴上的稳定性, 从一定程度上反映了孕震强度的大小。如 1975 年海城 7.3 级和 1976 年唐山 7.8 级地震前, 华北地区非稳态活动图像的变化不论是持续时间还是震级下限范围都明显偏大(表 1)。

1975 年海城 7.3 级和 1976 年唐山 7.8 级地震后, 根据地震活动的非稳态特征我们对渤海及其周边地区又进行了 5 次预报, 结果仅报对 1 次。报错 4 次的地点均在环渤海地区, 这可能与 1975 年海城 7.3 级和 1976 年唐山 7.8 级地震及其余震活动窗口有关。

1975—1985 年, 采用非稳态活动图像方法共预报 10 次, 其中报对 9 次, 报偏 1 次。1989—1999 年,

预报 11 次, 其中报对 4 次, 报偏 3 次, 报错 4 次。上述两个时间段与中国大陆 20 世纪第 4、第 5 地震活跃期的时间基本同步, 可见非稳态活动图像方法在第 4 活跃期的预报效果明显好于第 5 活跃期。从上述两个活跃期地震活动水平分析, 非稳态活动图像方法可能更适用于强震预报。

[参考文献]

- [1] 陆远忠, 沈建文, 王伟. 中国大陆的地震空区[A]//地震空区与地震预报[C]. 北京:地震出版社, 1989:191-199.
- [2] 刘蒲雄, 陈章立. 地震条带及其在地震预报中的作用[J]. 中国地震, 1989(1):25-34.
- [3] 孙加林, 陆远忠, 曹井泉, 等. 地震活动性图像演化及有序性在短临预报中应用研究的新进展[J]. 地震, 1995, (增刊):110-117.
- [4] 杨立明, 车时. 大震前后中强地震活动格局变化及其预测意义初步研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26(3):212-217.
- [5] 孙加林, 曹井泉. 2001 年昆仑山口西 8.1 级特大地震孕育过程及中强地震活动图像演化[J]. 西北地震学报, 2003, 25(1):28-34.
- [6] 任雪梅, 马禾青, 陈春梅. 2000 年以来中国大陆 5 级以上地震近源区的相继发震特征与预测[J]. 西北地震学报, 2005, 27(3):251-254.
- [7] 孙加林, 曹井泉. 强震前显著地震和逼近地震的震兆特征及判据指标[J]. 地震, 1995, (4):315-322.
- [8] 曹井泉, 孙加林, 杨毅. 进入短期阶段的空区识别及判据指标研究[J]. 地震学报, 1997, 19(1):36-44.