

我国西部地区某些强震及中强震前后的异常地震活动*

牛志仁

(陕西省地震局)

摘要

本文提出了一种检验异常地震活动的统计方法，并应用此方法研究了我国西部地区某些强震及中强震 ($M_s > 5.0$) 前后的异常地震活动，探讨了异常地震活动的某些基本特征。

一、引言

国内外不少工作已经指出，较大地震发生前后震源及其附近地区的地震活动性会出现异常变化，这种异常变化有可能做为地震预报的一个指标。但是，由于与较大地震相伴随的异常地震活动是发生在正常地震活动背景上的。所以，不仅这种异常地震活动有可能被背景地震所掩盖，而且从正常地震活动背景中客观地区分出异常地震活动也不是那样简单的。为了将“以震报震”方法的探索建立在更科学的分析方法的基础上，避免人为的混乱和臆测，认真研究异常地震活动的定义，建立客观评价和检验异常地震活动的定量方法无疑是十分重要的。本文将发展一种检验异常地震活动的统计方法，并应用这个方法研究我国西部地区十多次强震及中强震前后的异常地震活动。

二、检验异常地震活动的统计方法

众所周知，地震发生的场所——地壳和上地幔在漫长的地质时期中，由于构造力的反复作用，其内部已贯穿着无数的，大大小小的龟裂，成为一种破碎介质。所以，即使在我们监测的某区域内没有较大地震的孕育，但由于该区域介质始终处于构造力的作用下，所以同样会发生许多微小地震。这样的地震活动我们将称为正常地震活动，这是该区域地震活动的基本背景。由于在正常地震活动期间内，地震的发生未被较大地震的孕育过程所制约，或者说未被应变能的某个较大积累和突然释放过程所支配。况且，微小地震的孕育过程比较短促，积累和释放的能量都比较小，它的孕育和发生不足以影响下次地震是否发生以及发生的早晚。所以，当我们认为促使地震发生的构造能是平稳地供给时，正常的微小地震活动可以假定关于时间是随机的、平稳的和彼此独立的。或者说，正常的微小地震活动为均匀的泊松 (Poisson) 过程。正常的微小地震活动为均匀的泊松过程的假定，不仅从上述的物理分析中可以看出其合理性，而且也从去掉明显的余震和震群后，地震次数分

*1978年4月17日收到。

布服从泊松分布的研究中获得支持^[1]。

当某时间间隔中的地震活动与正常地震活动服从的泊松过程发生显著偏离时，我们将称这段时间间隔内的地震活动是异常的。为了从正常地震活动背景中检验出与较大地震孕育过程相伴随的异常地震活动，首先必须根据过去的观测资料确定正常地震活动基准，即确定出正常地震活动服从的泊松过程。其次是选择一个或几个适当的统计量，计算出在某给定的显著水平下，这些统计量的可用随机变化解释的摆动范围。以这个随机摆动范围为判据，当根据某段时间内的地震活动求出的相应统计量的值超过随机摆动范围时，这个地震活动便认为是异常的，否则是正常的。下面具体介绍本文建议的方法：

1. 正常地震活动基准的确定

为了从已有的观测数据中获得正常地震活动基准，我们在本文中将依下法进行：首先选取一个基本满足等精度观测的，尽量长的时间间隔，这个时间间隔截止在主震发生时。选定上述时间间隔就等于从地震活动母体中抽得了一个子样。由于在这个时间间隔内发生的地震活动中可能包含有与主震孕育相伴随的异常地震活动，所以它一般与正常活动母体有显著的偏离。我们将它做为正常地震活动基准的第一次近似值。以此近似值为基准，我们可以下段陈述的异常地震活动检验法检出在所选定的时间间隔内出现的异常地震活动。剔除这些异常活动，我们便得到正常地震活动基准的第二次近似值。以此近似值为新基准，仿上对剔除异常地震活动后的地震活动总体进行假设检验。若检验通过，即再未发现异常活动，则以此为正常地震活动基准。否则，再剔除新检出的异常地震活动，便得到正常地震活动基准的第三次近似值。反复施行这种手续，直至以某次近似值为基准，按照下段陈述的异常地震活动检验法，再未发现异常地震活动时为止。这次近似值即我们确定的正常地震活动基准。

2. 异常地震活动的检验

现在我们来介绍正常地震活动确定后，检验异常地震活动的方法。由于单位时间中地震次数的分布对于高异常地震活动反应比较灵敏，时间间隔分布对于低异常地震活动比较灵敏。所以，我们将从次数分布出发检验高异常地震活动，从时间间隔分布出发检验低异常地震活动。先说明高异常地震活动的检验方法。

划分时间轴 $[t_0, +\infty)$ 为长度等于 Δt 的等距间隔，这里 t_0 为研究地震活动的开始时刻。将第 i 个间隔 $[t_0 + (i-1)\Delta t, t_0 + i\Delta t]$ 中的发震次数记为 X_i 。当地震活动正常时，这些 X_i 便是相互独立且服从同一分布的随机变数，其概率函数为

$$P_{(1)}(X_i = k) = \frac{(\lambda\Delta t)^k}{k!} e^{-\lambda\Delta t}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.1)$$

这里 λ 为根据过去的观测数据确定的单位时间内正常地震活动的平均发震次数。

当连续观测 n 个这种时间间隔时，其中至少有 m 个时间间隔的发震次数 $\geq l$ 的概率为

$$P_n^{(m)}(F_1(l)) = \sum_{j=m}^n c_n^j [F_1(l)]^j [1 - F_1(l)]^{n-j}, \quad (2.2)$$

这里

$$F_1(l) = \sum_{k=l}^{+\infty} \frac{(\lambda\Delta t)^k}{k!} e^{-\lambda\Delta t}. \quad (2.3)$$

利用分部积分法容易将(2.2)变为

$$P_n^{(m)}(F_1(l)) = \frac{1}{B(m, n-m+1)} \int_0^{F_1(l)} \zeta^{m-1} (1-\zeta)^{n-m} d\zeta, \quad (2.4)$$

其中 $B(m, n-m+1)$ 为 B ——函数

$$B(p, q) = \int_0^1 \zeta^{p-1} (1-\zeta)^{q-1} d\zeta, \quad (2.5)$$

在 $p = m, q = n - m + 1$ 处的值。所以, $P_n^{(m)}(F_1(l))$ 的值可先由(2.3)计算 $F_1(l)$, 再利用 B ——分布表^[2]求得。

现在, 我们可以设计一个显著性检验来判别某段时间间隔中的地震活动是不是正常的。实际上, 假设我们考虑的时间段为 $[t_0 + i\Delta t, t_0 + (i+n)\Delta t]$ 。那么, 对于给定的显著水平 α , 根据式(2.4)可以算出对于每一个 $m = 1, 2, \dots, n$ 使

$$P_n^{(m)}(F_1(l)) < \alpha \quad (2.6)$$

满足的正整数 l 的最小值 $l_n^{(m)}(\alpha)$ 。当在我们考虑的时间段中有 m 个小时间隔内的发震次数 $\geq l_n^{(m)}(\alpha)$ 时, 便认为这个时间段中的地震活动是高异常的。因为, 出现这个事件的概率将小于 α , 它的出现已经超出了在显著水平 α 下可用随机摆动解释的范围。

检验低异常地震活动的思路与方法和前面完全类似。实际上, 由于在正常活动期地震的发生服从均匀的泊松过程。所以, 连续两次地震的时间间隔是按负指数规律分布的。即,

$$P_{(2)}(t) = \lambda e^{-\lambda t} dt, \quad (2.7)$$

其中 $P_{(2)}(t)$ 是给定的连续两次地震的时间间隔落入区间 $(t, t + \Delta t)$ 中的概率。其相应的累积分布函数为

$$F_2^*(t) = 1 - F_2(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (2.8)$$

λ 的意义同前。

类似于上面的推导可以得到, 当从服从上述分布的母体中抽取一系列容量为 n 的简单子样时, 每个子样中至少有 m 个元素的观察值 $\geq T$ 的概率为

$$P_n^{(m)}(F_2(T)) = \frac{1}{B(m, n-m+1)} \int_0^{F_2(T)} \zeta^{m-1} (1-\zeta)^{n-m} d\zeta, \quad (2.9)$$

上式说明, 假若在某次地震后又连续发生了 n 次地震。那么, 当地震活动正常时, 这 n 个小时间隔中至少有 m 个间隔的时间长度 $\geq T$ 的事件的概率将由(2.9)式计算。它的形式与(2.4)式完全一样。

显然, 可以设计一个与检验高异常地震活动完全类似的显著性检验如下: 假设给定了显著性水平 α 。那么, 由方程式

$$P_n^{(m)}(F_2(T)) = \alpha, \quad (2.10)$$

解出根 $T_n^{(m)}(\alpha)$ 。当在我们考虑的 n 个小时间隔中有 m 个时间间隔的长度 $> T_n^{(m)}(\alpha)$ 时, 则认为这 n 个地震活动是低异常的。因为, 它的出现已超过可用随机变化解释的范围。

上面我们介绍了本文中检验高、低异常地震活动的统计方法。下节将给出本方法应用的一个实例。

三、西海固地区五级以上地震发生前后的异常地震活动

我们研究的地区是界于东经 $105^{\circ}00'$ 与 $107^{\circ}00'$ 之间；北纬 $35^{\circ}20'$ 与 $37^{\circ}00'$ 之间的矩形区域。出于等精度考虑，我们仅研究 1966 年 1 月以后的 $M_L = 2.7$ 级以上的地震活动。

1. 正常地震活动基准的确定

以一天为单位将时间轴划分为等距间隔。将 1966 年 1 月 1 日至 1970 年 12 月 3 日西吉 $M_L = 5.5$ 级地震发生的时间段内的地震活动做为正常地震活动基准的第一次近似值。此时，每天的平均发震次数为

$$\lambda_1 = 52 \text{ 次}/1797 \text{ 天} \approx 0.0295 \text{ 次}/\text{天}.$$

以 λ_1 做为泊松分布 (2.1) 中的参数 λ ，按照上节第二段陈述的异常地震活动检验法，在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下，以 $T_1^{(1)}(\alpha) = 101.6$ 天和 $T_1^{(3)}(\alpha) = 1$ 次为判据，分别检出低异常和高异常地震活动，检验结果如图 1 所示。剔除这些异常地震活动，我们便得到正常地震活动

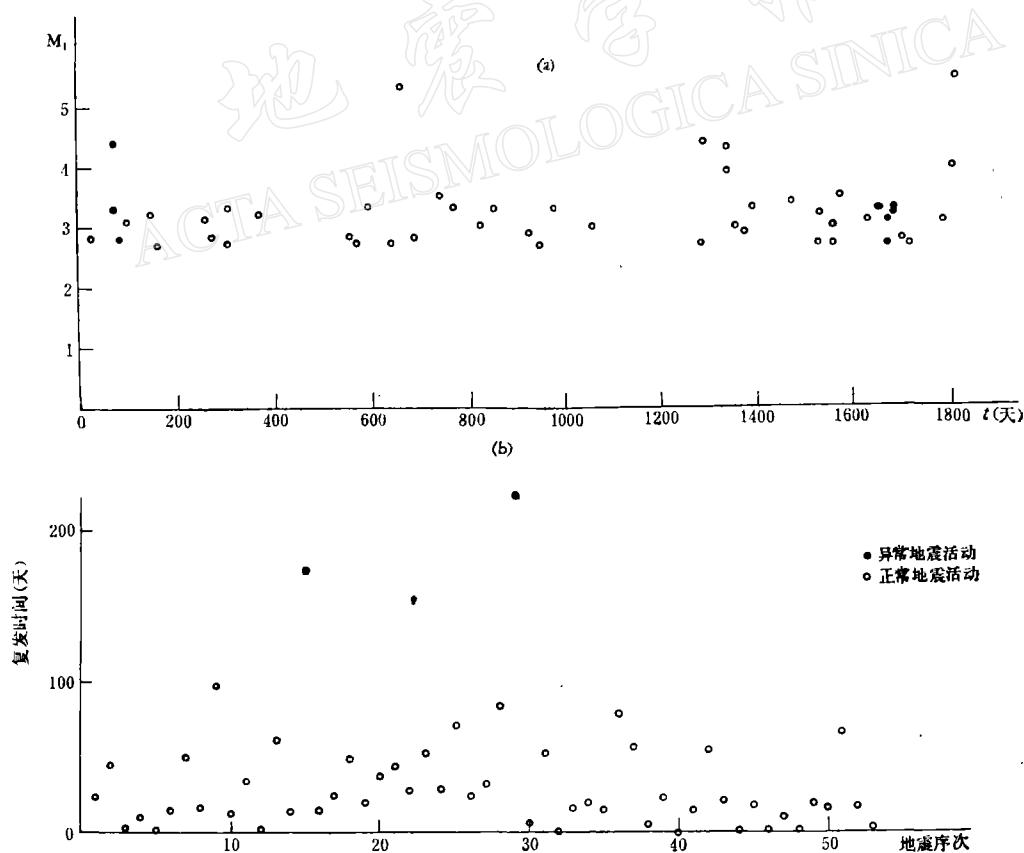


图 1

(a)——高异常活动检验图 (b)——低异常活动检验图(图 2、3 中的图例与此相同)

t 为自 1966 年 1 月 1 日起算的天数(图 2 中之 t 与此相同)

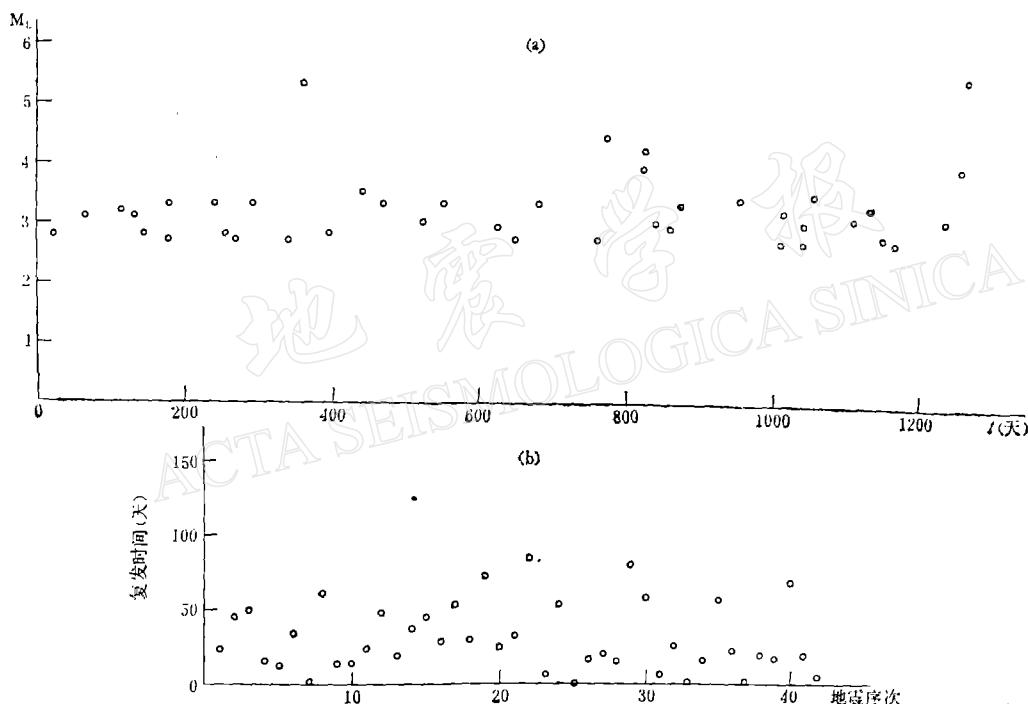
的第二次近似值。这时,每天平均发震次数为

$$\lambda_2 = 42 \text{ 次}/1342 \text{ 天} \approx 0.0313 \text{ 次}/\text{天}.$$

以 λ_2 作为 (2.1) 式中的参数 λ , 按照同样的方法检验异常地震活动。在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, 异常判据 $T_1^{(1)}(\alpha) = 95.7$, 天, $l_{13}^{(3)}(\alpha) = 1$ 次。剔除检出的异常地震活动, 便得正常地震活动的第三次近似值(图 2), 每天的平均发震次数为

$$\lambda_3 = 41 \text{ 次}/1245 \text{ 天} \approx 0.0329 \text{ 次}/\text{天}.$$

当以 λ_3 作为式 (2.1) 中的参数 λ , 在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, 进行异常地震活动检验时, 可以发现其中再未有异常地震活动(图 2)。所以, 我们将以第三次近似值作为正常地震活动基准。



(a)——高异常活动检验图 (b)——低异常活动检验图

2. 五级以上地震前后的异常地震活动

根据上述结果, 所研究地区的正常地震活动基准为参数 $\lambda = 0.0329$ 次/天的泊松过程。低异常判据为 $T_1^{(1)}(\alpha) = 91.1$ 天, 高异常判据为 $l_{13}^{(3)}(\alpha) = 1$ 次。在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, 对本区内的 1966 年 1 月 1 日至 1972 年 12 月 31 日的地震活动进行显著性检验的结果如图 3 所示。

由图可见:

(1) 本区内五级以上地震发生前会出现异常低的地震活动, 这种低异常地震活动可能是五级以上地震孕育的一个征兆。

(2) 本区内的高异常地震活动除有一次是在 1970 年 12 月 3 日 $M_L = 5.5$ 级地震前

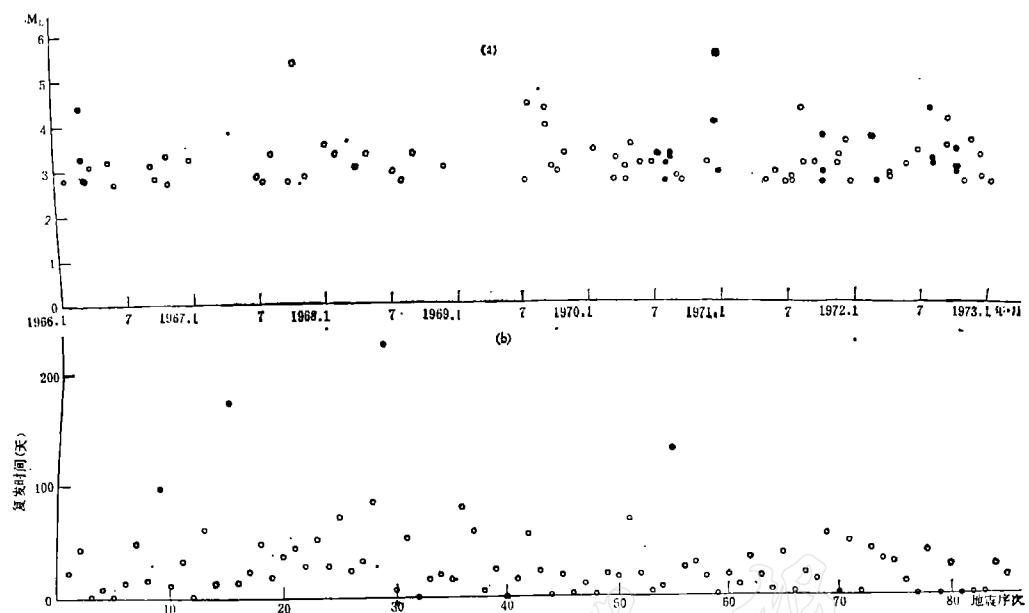


图 3
(a)——高异常活动检验图 (b)——低异常活动检验图

出现外，其余是在这次地震后才多次出现的。所以，这些高异常活动有可能是它引起的“余震型”地震活动。至于第一次五级以上地震（1967年10月16日靖远 $M_L = 5.3$ 级地震）发生后没有明显的高异常地震活动出现，可能是由于该地震后紧接着开始了西吉 $M_L = 5.5$ 级地震的孕育，也可能与本次地震位于研究区域的边界附近有关。

(3) 若将最明显的低异常地震活动出现到主震发生的时间称为孕震期，则在1970年12月3日西吉5.5级地震的孕震期内，本区仅出现过一次高异常地震活动，即1970年7月22日至8月2日的地震活动。

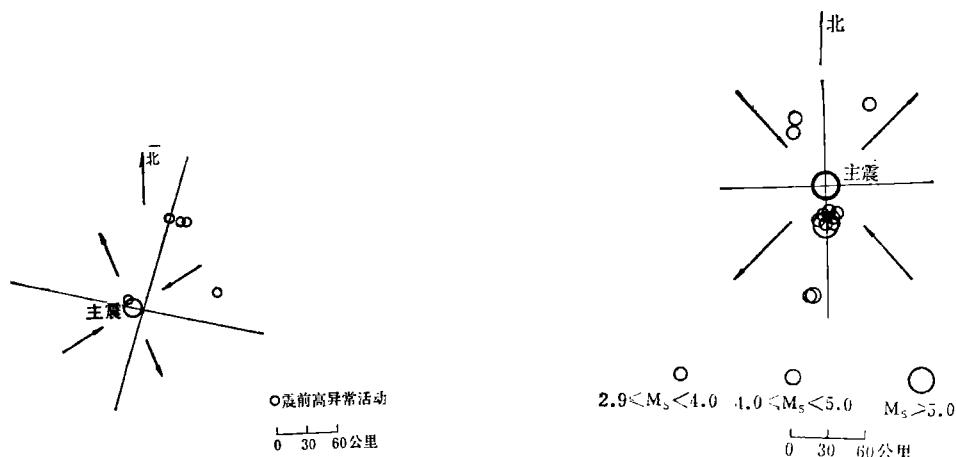


图 4 西吉地震前高异常地震活动空间分布与震源机制的关系

图 5 马边地震前高异常地震活动空间分布与震源机制的关系

(4) 孕震期内出现高异常地震活动至主震发生的时间间隔为 $\Delta T = 134$ 天。当注意到 12 月 3 日西吉地震的面波震级 $M_s = 5.1$ 时, 则 ΔT 和 M_s 的关系服从肖尔茨 (Scholz) 等^[3]的统计关系式。所以, 孕震期内的高异常地震活动, 有可能是介质膨胀的结果^[3, 4]。这些高异常地震活动的空间分布表明, 它们的活动并不是紊乱的, 而是与主震的震源机制有某些联系(图 4)。

上面我们以西海固地区为例, 说明了异常地震活动的具体研究方法和步骤。下面将以同样的程式, 研究我国西部地区十多次强震和中强震 ($M_s > 5.0$) 发生前后的异常地震活动, 初步探讨其基本规律。

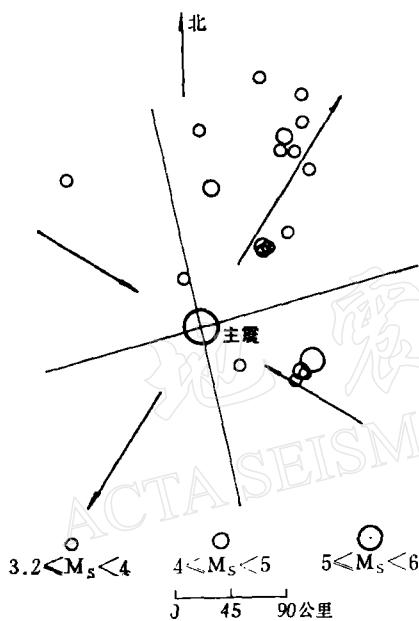


图 6 大邑地震前高异常地震活动
空间分布与震源机制的关系

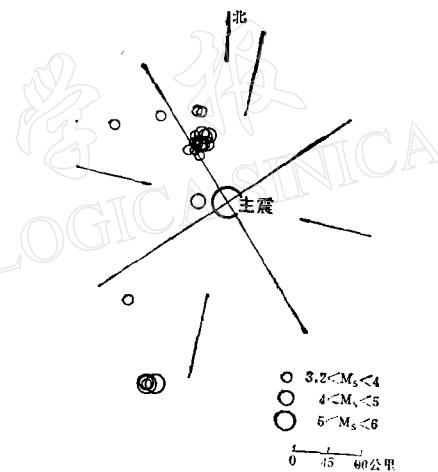


图 7 永善一大关地震前高异常地震活动
空间分布与震源机制的关系

四、强震及中强震前后的异常地震活动规律

根据我国西部地区现有台网的观测资料, 选择与主震震级差为三级以上的较小地震为基础地震¹⁾, 在同一个显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, 按照本文建议的方法检验异常地震活动, 探索强震及中强震前后异常地震活动的规律。我们的资料来源于《中国地震目录》、《四川地震目录》、《云南地震目录》以及西北地震台网的仪器记录资料。针对我国地震记录中可能存在遗漏及不准确的情况, 我们尽量选择台站较密地区, 发震时间离现在较近的地震进行研究, 以便增加资料的可靠程度。所研究的地震及其特征量汇总在下表中。下面所揭示的规律因具有统计的性质, 所以, 似乎不能将其归结为资料可靠性不高造成的假象。笔

1) 对于西吉 $M_L = 5.5$ 级地震和吴忠 $M_L = 5.3$ 级地震分别选 $M_L = 2.7$ 级和 $M_L = 2.5$ 级地震为基础地震。

地震日期	震中位置			震级 $M_s(M_L)$	统计范围		统计 起始日期	ΔT_1 (天)	ΔT_2 (天)
	北纬	东经	地区		北 纬	东 经			
1970.12.3	35°56'	105°35'	西 吉	5.1(5.5)	35°20'—37°00'	105°00'—107°00'	1966.1.1.	742	154
1971.6.28	37°8	106°3	吴 忠	5.1(5.3)	37°2—38°9	104°8—106°7	1966.1.1.	924	245
1972.9.27	30°4	101°7	乾 宁 西	5.7	29°0—31°0	100°8—102°8	1965.1.1.	1706	780
1971.2.5	25°0	99°3	保 山	5.8	24°0—26°0	98°0—99°8	1965.1.1.	1512	870
1971.8.16	28°9	103°8	马 边	5.9	27°45'—29°45'	102°50'—104°50'	1965.1.1.	1478	381
1970.2.24	30°39'	103°17'	大 邑	6.2	30°00'—32°20'	102°00'—104°30'	1963.1.1.	2192	1447
1975.1.15	29°4	101°8	九 龙	6.2	28°00'—30°30'	100°40'—103°00'	1965.1.1.	2508	840
1973.8.11	32°53'	104°00'	南 坪	6.5	31°50'—34°30'	103°00'—105°30'	1960.1.1.	4297	1254
1974.5.11	28°2	104°1	永 善—大 关	7.1	26°0—29°5	101°3—104°8	1900.1.1.	12230	2920
1976.8.16	32°7	104°1	松 潘—平 武	7.2	30°0—33°5	102°5—106°0	1933.8.25.	12045	5616
1973.2.6	31°5	100°4	炉 霍	7.9	29°5—33°5	100°0—104°0	1786.6.1.	58897	14400

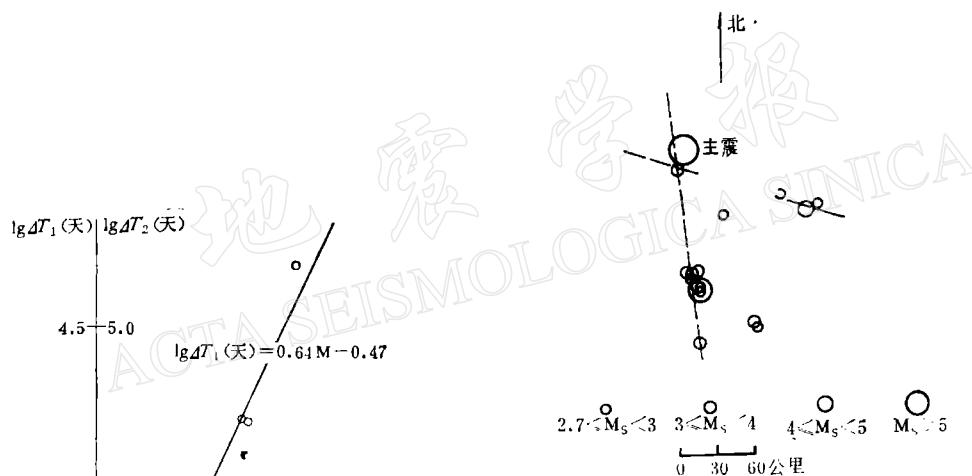


图 9 乾宁西地震前高异常地震活动的空间分布

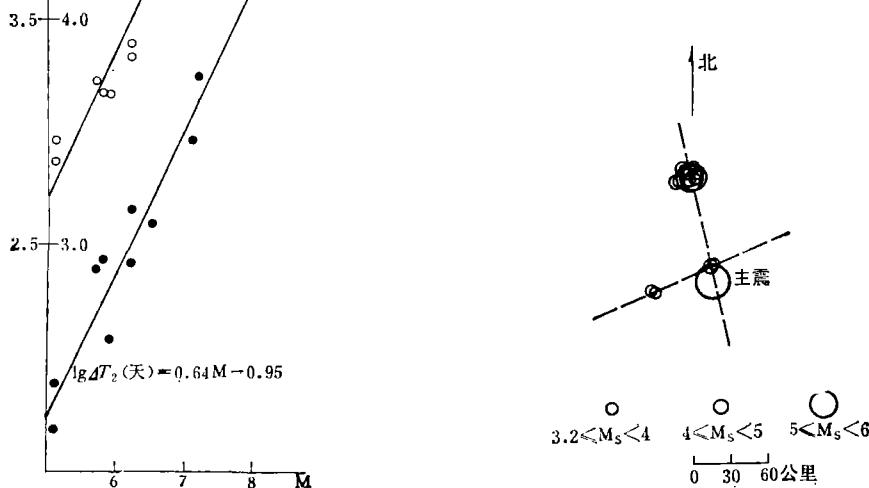
图 8 $\Delta T_1, \Delta T_2$ — M 经验关系

图 10 九龙地震前高异常地震活动的空间分布

者认为,这些规律对于强震及中强震预报及孕育特征的研究有一定的参考意义。当然,取得高精度的,长期的观测资料对这些规律进行进一步检验是完全必要的。

我们发现:

(1) 所研究的地震发生前都会出现异常低的地震活动。这种低异常地震活动可能是五级以上地震孕育的一个征兆。若称最明显的低异常地震活动出现至主震发生的时间间隔 ΔT_1 为孕震期, 则一般说来震级愈大, 孕震期愈长。孕震时间 ΔT_1 与震级 M 近似成对数直线关系(图 8):

$$\lg \Delta T_1 (\text{天}) = 0.64M - 0.47 \quad (4.1)$$

(2) 孕震期内往往会出现一次或几次高异常地震活动。若记孕震期内出现最早的高异常地震活动至主震发生的时间间隔为 ΔT_2 , 则 ΔT_2 与主震震级 M 之间也存在着类似的统计关系式(图 8)

$$\lg \Delta T_2 (\text{天}) = 0.64 M - 0.95, \quad (4.2)$$

从以上二式可得

$$\frac{\Delta T_1 (\text{天})}{\Delta T_2 (\text{天})} = 10^{0.48} \approx 3, \quad (4.3)$$

与震级 M 无关。

(3) 孕震期内的高异常地震活动在空间分布上不是没有一定规律的。有震源机制解可供对比的震例表明, 孕震期内高异常地震的空间分布可能与断层面解中的节面走向和主应力方向有关, 图 4—7 给出了几个例子; 无震源机制解资料的震例则显示出某种条带状分布的迹象。图 9、10 是二个例子。

(4) 主震发生后的异常地震活动, 主要是“余震型”的高异常地震活动。

五、结 语

在本文中, 我们介绍了一种检验异常地震活动的统计方法, 并应用这个方法研究了我国西部地区某些强震及中强震 ($M_s > 5.0$) 前后的异常地震活动, 初步探讨了这些地震发生前后异常地震活动的某些规律。应当指出, 采用定量方法研究异常地震活动还只是开始, 本文的结果也只是初步的。使用某种“扫描”办法, 区分出与某次地震孕育密切相关的弱震活动区域; 随着监测能力的提高以及地震活动资料的积累, 降低基础地震震级, 扩大所研究地震活动的时间尺度, 对本文指出的异常地震活动的某些特征进行鉴别、修改、补充, 是今后的任务。

参 考 文 献

- [1] 宇津德治, 地震の時間的分布に関連する諸問題(その1), 北海道大学地球物理学研究報告, 22, 73—93, 1969.
- [2] K. Pearson, Tables of the incomplete B—functions, London, 1934.
- [3] C. H. Scholz et al., Earthquake predictions, A physical basis, *Science*, 181, 4102, 1973.
- [4] 牛志仁, 构造地震的前兆理论, 地球物理学报, 21, 3, 1978.

UNUSUAL SEISMIC ACTIVITIES BEFORE AND AFTER SOME STRONG AND MODERATE EARTHQUAKES IN WESTERN CHINA

NIU ZHI-REN

(Seismological Bureau of Shanxi Province)

Abstract

In this paper a statistical method of detecting unusual seismic activities has been developed. The method proposed is then applied to weak earthquake activities before and after some strong and moderate earthquakes ($M_s > 5.0$) in Western China. Certain fundamental characteristics of the unusual seismic activities have been investigated and discussed.

地
震
學
報
稿
件
ACTA SEISMOLOGICA SINICA