

中国大陆及附近地区大地震重现的周期和量级的分布律*

朱成熹
(南开大学)

摘要

本文给出了中国大陆及附近地区大地震重现于活跃期的周期是近似地服从数学期望 $m = 39.5$ 月, $\sigma = 3.3$ 月 (σ^2 ——方差) 的正态分布律, 而重现的量级序列可近似地被一个非齐次(或非均匀)的马尔科夫链所描述。

一、引言

1976年5—8月, 我国大陆上出现了一个大地震发生的高潮, 连续发生了三个大地震, 即1976年5月29日云南龙陵7.5、7.6级、7月28日河北唐山7.8级和8月16日和23日四川松潘的两个7.2级大地震。在此三年多以前又出现了一个以1973年2月6日四川炉霍7.9级大地震和1973年7月14日西藏7.3级大地震所构成的高潮, 再往前又隔三年多时间, 出现了以1970年1月5日云南通海7.7级大地震和1969年7月18日渤海7.4级大地震为主的活动高潮等等。这就启发我们研究这些客观现象, 究竟是有规律的重现呢? 还是一些偶然的巧合。本文将给以肯定的回答。我们最感兴趣的是如下二个问题:

1. 大地震重现周期长短的分布规律;
2. 每次重现总释放能量大小(即量级)的规律。

这两个问题的解决, 使我们能够比较准确地预测下次大地震重现的时间和震级, 它对国民经济和人民生命财产的实际意义是不言而喻的。

本文讨论的地区是大约北纬 23.6° — 45° , 东经 77° — 120° 之间的东亚大陆, 主要包括中国大陆的绝大部分和与之接壤的邻国附近地区, 如缅甸和印度的北部, 蒙古的南部和苏联的阿拉木图地区等。所取的地震资料是文献[3], [4]中的浅源地震。

二、重现周期和量级序列

将文献[3], [4]中在前述研究地区内的浅源主震共54次, 除去一些大地震的“远联

* 1979年5月29日收到。

表1 大震重现周期发震情况表

周期编号	发震时间 年.月.日	地 点			震 级	应变能 10^{11} (尔格) $^{\frac{1}{2}}$
		地 名	北 纬	东 经		
0	1911. 1. 3	苏联阿拉木图	43.5	77.5	8.4	16
1	1914. 8. 4	哈 密	43.5	91.5	7.5	3.4
2	1917. 7.31	云南大关	28	104	6.5	0.6*
3	1920.12.16	海 原	36.4	105.8	8.5	19
4	1924. 7. 3 1924. 7.12	民 丰	36.8	83.8	7 1/4	2
		丰 丰	37.1	83.6	7 1/4	2
5	1927. 5.23 1927. 9.23	古 和 浪 静	37.6 42.3	102.6 85.6	8.0 6.8	8 1
6	1930. 7. 2 1931. 1.27	印 度 缅 甸	25.5 25.6	90 96.8	7.2 7.6	2 4
7	1933. 8.25 1934. 1.15	四 川 印度—尼泊尔边界	32 26.5	103.7 86.5	7.5 8.3	3.4 13.4
8	1937. 1. 7 1937. 8. 1	都 兰 山	35.5 35.2	97.6 115.3	7.5 7.0	3.4 1.4
9	1941. 1.21 1941. 5.16	西 藏 云 南	27.5 23.6	91.9 99.4	6.8 7.0	1 1.4
10	1943.10.23 1944. 3.10	印 度 库 车	2.6 42.5	93 82.5	7.2 7 1/4	2 2
11	1947. 3.17 1947. 7.29	达 日 西 藏	33.3 28.6	99.5 93.6	7 3/4 7 3/4	5 5
12	1950. 8.15	西 藏	28.7	96.7	8.5	19
13	1954. 2.11 1954. 3.21 1954. 7.31	山 丹 缅 甸 民 丹 勤	39 24.6 38.8	101.3 95 104.2	7 1/4 7.3 7.0	2.0 2.2 1.4
14	1957.12. 4	蒙古 南	45.5	99.3	8.1	9.5
15	1960.11. 9 1960.12.13 1961. 4.14	松 蒙 古 潘 南 巴 楚	32.8 43 39.9	103.7 104.4 77.8	6.8 7.1 6.8	1 1.7 1
16	1963. 4.19	阿 兰 湖	35.7	97	7.0	1.4
17	1966. 3. 6 1966. 3.22 1966. 9.28	噶 邢 尔 台 伸 中	31.4 37.5 27.5	80.5 115 100.2	6.6 7.2 6.5	0.7 2 0.6
18	1969. 7.18 1970. 1. 5	渤 海 通 海	38.2 24.2	119.4 102.7	7.4 7.7	2.8 4.8
19	1973. 2. 6 1973. 7.14	炉 西 霍 藏	31.5 35.1	100.4 86.5	7.9 7.3	6.7 2.4
20	1976. 5.29 1976. 7.28 1976. 8.16	龙 唐 陵 山 潘	24.5 39.7 32.7	98.9 117.8 104.1	7.5+7.6 7.8 7.2+7.2	7.3 5.6 4

* 此地震可能震级偏低,也可能在此期间还有其他 $M_S = 7.0$ 左右的地震被遗漏。

震”^[2]（如 1974 年 5 月 11 日云南大关 7.1 级地震是 1973 年 2 月 6 日四川炉霍 7.9 级大震的“远联震”，1951 年 11 月 18 日西藏当雄 8.0 级地震是 1950 年 8 月 15 日西藏察隅 8.5 级大地震的“远联震”等共 10 次）和个别（如 1955 年 4 月 14 日四川康定 7.5 级地震等 8 次）地震外，大都收入表 1 中。从表 1 中很清楚地可以看到，自 1911 年苏联阿拉木图 8.4 级大地震开始至 1976 年的龙陵、唐山、松潘大地震为止共经历了 20 个重现周期。在一个重现高潮里我们限定以大约半年为期，它可能出现一个大地震，也可能出现多个大地震。不妨设为 r 个，再设每个地震的发震时间和释放的应变能分别为 t_k 和 e_k ($k = 1, 2, 3, \dots, r$ ， $t_1 < t_2 < \dots < t_r$)。令：

$$E = \sum_{k=1}^r e_k$$

$$T = \frac{e_1}{E} \times t_1 + \frac{e_2}{E} \times t_2 + \dots + \frac{e_r}{E} \times t_r = t_1 + (t_2 - t_1) \times \left(\frac{e_2}{E} \right) + (t_3 - t_1) \times \left(\frac{e_3}{E} \right) + \dots + (t_r - t_1) \times \left(\frac{e_r}{E} \right) \quad (1)$$

T 表示该次高潮里以各个大地震能量为权量的平均发震时间， E 表示其总的量级。因此我们把 E 和 T 分别称为该次重现的量级和时间，这样，我们可得到二个序列：

$$T_0, T_1, T_2, \dots, T_{20}, \dots$$

$$E_0, E_1, E_2, \dots, E_{20}, \dots$$

表 2

周期编号 n	T_n (年.月)	T_{nk} (月)	E_n 10^{11} (尔格) $^{1/2}$	应变能所 属状态 i	所属活动 期类别	备注
0	1911. 1		16	4	活跃期	全平点
1	1914. 8	43	3.4	2	平静期	
2	1917. 8	36	0.6	1	平静期	
3	1920.12	40	19	4	活跃期	
4	1924. 7	43	4	2	活跃期	
5	1927. 6	35, 38	9	3	活跃期	
6	1930.11	35, 42	6	3	活跃期	
7	1933.12	34, 38	16.8	4	活跃期	
8	1937. 3	37, 43	4.8	2	平静期	
9	1941. 2	46, 50	2.4	1	平静期	
10	1944. 1	33, 37	4	2	平静期	全平点
11	1947. 5	38, 42	10	3	活跃期	
12	1950. 8	39	19	4	活跃期	
13	1954. 4	42, 47, 43	5.6	2	活跃期	
14	1957.12	44	9.5	3	活跃期	
15	1960.12	35, 36, 40	3.7	2	平静期	全平点
16	1963. 4	28	1.4	1	平静期	
17	1966. 5	35, 35, 41	3.3	2	平静期	
18	1969.11	38, 43	7.6	3	活跃期	
19	1973. 3	39, 44	9.1	3	活跃期	
20	1976. 7	38, 39, 40	16.9	4	活跃期	

其中 $t_k^{(n)}$ 表示第 n 次重现高潮里第 k 个大地震的发震时刻, r_n 是第 n 次重现高潮里所发大地震的个数. 序列 $\{T_n\}$, $\{E_n\}$ 和 $\{T_{nk}\}$ 在 $n \leq 20$ 时的值详见表 2.

三、重现周期序列 $\{T_{nk}, k=1, 2, \dots, r_n, n=1, 2, 3, \dots\}$ 的统计分析

将 $\{T_{nk}\}$ 视为随机序列, 并假定它对一切 k 和 n 是独立同分布, 但其分布是未知的. 我们的目的就是要根据已知的 $T_{nk}, k = 1, 2, \dots, r_n, n = 1, 2, \dots, 20$ 的值来估计和推断这个未知的分布^④. 为此, 我们首先把 $\{T_{nk}\}$ 的值域分为 7 组, 它们的组限和组中值 x 以及落在各组内 T_{nk} 的个数 (即实发频数) V , 列入表 3. 它的频率直方图如图 1 所示, 从这个图形直观的可看出它近似一个 χ^2 分布密度曲线. 由于前述假定 (对一切 $n, k, \{T_{nk}\}$ 独立同分布) 有不尽合理之处. 因此, 我们对上述实测分布不再进一步讨论. 为了进一步对 $\{T_{nk}\}$ 作出比较合理的假定, 我们必须考虑更大范围内地震活动的具体情况, 特别是地

表 3

组数 i	1	2	3	4	5	6	7
组限	28—32	32—35	35—38	38—41	41—44	44—47	47—51
组中值 x_i	30	33.5	36.5	39.5	42.5	45.5	49
实发频数 V_i	1	3	12	11	9	3	2

震的活跃期和平静期是有显著差别的 (图 2), 即它们的分布是不相同的. 在文献 [1] 中

详细地论述了包括我们研究的地区在内的亚洲地震活动的周期性规律 (图 2). 平静期的时间区间大致为 [1912.5, 1920.11], [1935.6, 1944.11], [1958.1, 1966], [1981, 1989], ……; 活跃期时间区间大致为 [1897, 1912], [1920, 1935], [1945, 1957], [1966, 1980], …….

我们将完全处于平静期的重现周期 (称全平点), 即 $n = 2, 9, 10, 16, 17$ 等除外, 假定对其余的 $k, n, \{T_{nk}\}$ 是独立同分布的. 这时, 这个分布的经验分布和理论分布在各组的分配情况如表 4 所示.

表 4

组数 i	1	2	3	4	5	6
组限	32—35	35—38	38—41	41—44	44—47	47—49
组中值 x_i	32.5	36.5	39.5	42.5	45.5	48
实发频数 V_i	2	8	11	8	2	1
理论频率 π_i	0.07	0.24	0.34	0.24	0.07	0.01
理论频数 $31 \times \pi_i$	2.2	7.2	10.5	7.2	2.2	0.3

它的均值 $\bar{x} = \sum_i x_i P_i$ 有

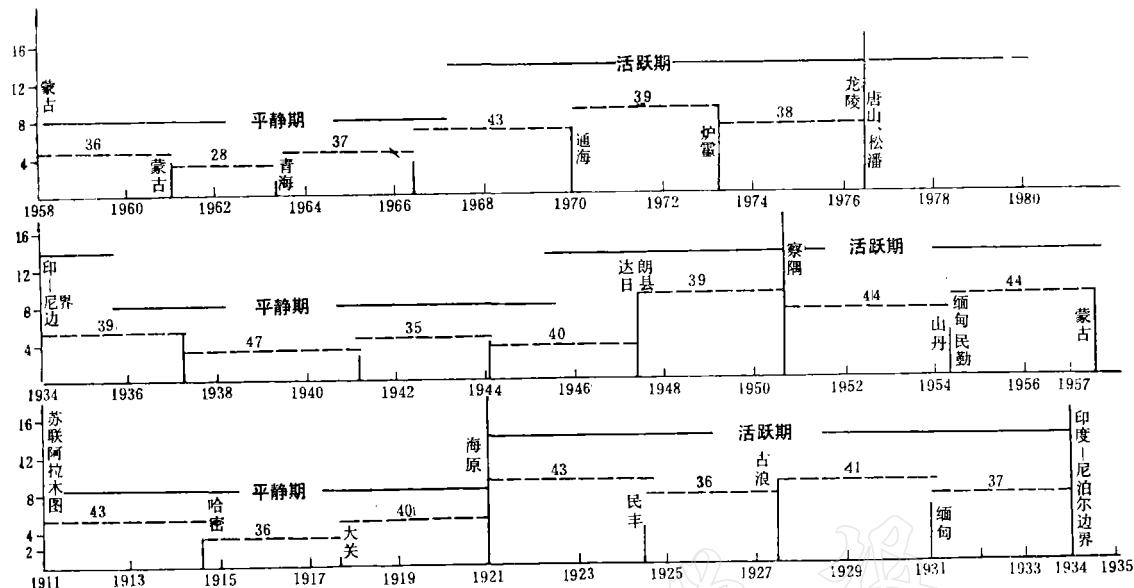


图 2

$$\bar{x} = 33.5 \times 2/32 + 36.5 \times 8/32 + 39.5 \times 11/32 + 42.5 \times 8/32 + 45.5 \times 2/32 + 48 \times 1/32 = 39.5$$

均方根差 $\sigma_x^2 = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 P_i$ 近似的有

$$\sigma_x^2 = 6^2 \times 2/32 + 3^2 \times 8/32 + 0 + 3^2 \times 8/32 + 6^2 \times 2/32 + 8.5^2 \times 1/32$$

$$\sigma_x = 3.3$$

其中 $P_i = \frac{V_i}{31}$ 是经验频率, 由表 4 中数据作出实发频率(经验频率)直方图(图 3 中实线

所示, 虚线表示理论的). 从这个图中直观地看出它很近似一个正态分布密度曲线(图 3 中实曲线). 下面我们就来定量地用统计推断的理论, 通过这个实发的经验分布直方图, 检定客观的理论分布是否是一个具有数学期望值 $m = 39.5$, 方差 $\sigma = 3.3$ 的正态分布.

为此, 作统计量

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^6 (V_i - 31 \times \pi_i)^2 / 31 \pi_i \quad (2)$$

其中:

$$\begin{aligned} \pi_3 &= \phi\left(\frac{41-m}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{38-m}{\sigma}\right) \\ &= 2 \times \left[\phi(0.45) - \frac{1}{2} \right] \\ &= 2 \times 0.17 = 0.34 \end{aligned}$$

$$\pi_2 = \pi_4 = \phi\left(\frac{44-m}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{41-m}{\sigma}\right) = \phi(1.36) - \phi(0.45) = 0.24$$

$$\pi_1 = \pi_5 = \phi\left(\frac{47-m}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{44-m}{\sigma}\right) = \phi(2.27) - \phi(1.36) = 0.07$$

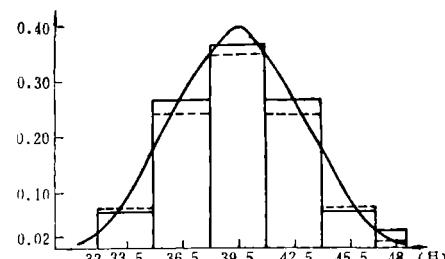


图 3

$$\pi_6 = \phi\left(\frac{49-m}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{47-m}{\sigma}\right) = \phi(3) - \phi(2.27) = 0.01$$

$\phi(x)$ 是 $m = 0, \sigma = 1$ 的标准正态分布函数。将表 4 中数据代入式 (2) 得：

$$\chi^2 = \frac{(0.2)^2}{2.2} + \frac{(0.8)^2}{7.2} + \frac{(0.5)^2}{10.5} + \frac{(0.8)^2}{7.2} + \frac{(0.2)^2}{2.2} + \frac{(0.7)^2}{0.3} = 1.87$$

取信度 (显著水平) $\alpha = 5\%$ ，由于式 (2) 确定的统计量服从自由度为 $6 - 1 = 5$ 的 χ^2 分布^[5]，查表可得临界值 $\chi^2_{\alpha} = 11$ ，而我们算得的 $\chi^2 = 1.77$ 远远小于 11，故我们接受理论分布是 $m = 39.5, \sigma = 3.3$ 的正态分布的假设。亦即我们可以认为重现周期 T_{nk} 是服从 $m = 39.5, \sigma = 3.3$ 的正态分布的。

四、重现量级序列 $\{E_n, n = 0, 1, 2, \dots\}$ 的统计分析

我们将 $\{E_n\}$ 的值域空间，分为若干不相交的区间，每个区间称为一个状态，具体分法如表 5 所列。

表 5

状态 i	1	2	3	4
应变能范围	0.6—2.8	2.8—5.6	5.6—11	11—19
相当震级范围	6.5—7.4	7.4—7.8	7.8—8.2	8.2—8.5

将序列 $\{E_n, n = 0, 1, 2, \dots, 20\}$ 按状态描在图上，得到图 4。图中标有“平”字者表示该点处于平静期，从这个图中清楚地看到：

- 1) 下次转移的状态至少与这次所处的状态有关。在此，我们假定它只与这次有关，而与前面各次无关(即马尔科夫性)。
- 2) 下次转移的状态与其活跃期和平静期有关。在此，我们假定在所有活跃期(平静期)里分别具有齐次性(或均匀性)^[6]。

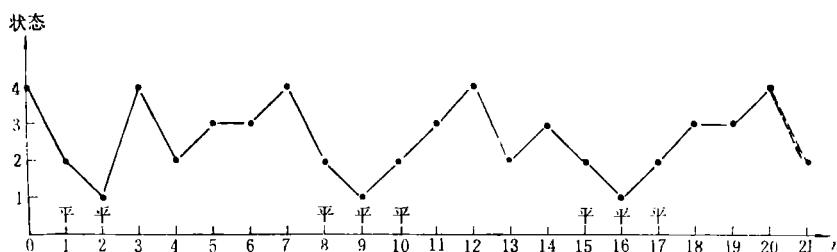


图 4

在上述假定下，我们可以得二个转移矩阵 P_1 和 P_2 ，其中 P_2 是活跃期(包括活跃期转活跃期，活跃期转平静期和平静期转活跃期)的转移矩阵， P_1 是平静期(包括平静期转平静期和活跃期转平静期)的转移矩阵。由于比较完整的地震资料的记录时间较短，因此，统计得到的 P_1, P_2 的数据，所用的资料显得太少。但随着时间的推移，资料的增多，相应得到的 P_1 和 P_2 ，其可靠程度将会愈来愈大。仅就目前较少资料得到的 P_1 和 P_2 ，可以看出它

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0, & 0, & 0, & 1 \\ 0, & 0, & 4/4, & 0 \\ 0, & 0, & 2/5, & 3/5 \\ 0, & 4/4, & 0, & 0 \end{pmatrix}, \quad P_2 = \begin{pmatrix} 0, & 2/2, & 0, & 0 \\ 3/3, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 0, & 0 \\ 0, & 2/2, & 0, & 0 \end{pmatrix}$$

的转移规律是非常集中的。

五、预测方法

我们以预测尚未发生的下次大地震的重现时间和量级作为例子，根据前二段阐述的理论，讲明预测的方法和步骤：

1. 算出至今为止的最后一次大地震重现的平均时间 T_n 和总释放应变能 E_n （单位： $10^{11} \times (\text{尔格})^{1/2}$ ）并确定其所处的状态。

在我们的情形，最后一次重现为 1976 年 5—8 月 ($n = 20$)，包含有三个大地震：

1) 1976 年 5 月 29 日 (t_1) 龙陵 7.5 + 7.6 级 ($e_1 = 3.3 + 4.0 = 7.3$)；

2) 1976 年 7 月 28 日 (t_2) 唐山 7.8 级 ($e_2 = 5.6$)；

3) 1976 年 8 月 16 日和 23 日 (t_3 取二者之中值) 松潘 7.2 + 7.2 级 ($e_3 = 2.0 + 2.0 = 4.0$)

由公式(1)得到：

$$E_{20} = 7.3 + 5.6 + 4.0 = 16.9$$

$$\begin{aligned} T_{20} &= t_1 \times e_1/E_{20} + t_2 \times e_2/E_{20} + t_3 \times e_3/E_{20} \\ &= t_1 + (t_2 - t_1) \times e_2/E_{20} + (t_3 - t_1) \times e_3/E_{20} \\ &= t_1 + 60 \times 5.6/16.9 + 83 \times 4/16.9 \\ &= t_1 + 668/16.9 \text{ (天)} \\ &= t_1 + 39 \text{ (天)} \end{aligned}$$

亦即 T_{20} 为 1976 年 5 月 29 日 + 39 天，即 1976 年 7 月 7 日。而 $E_{20} = 16.9$ ，由表 5 知属于状态 4。

2. 算出下次重现时间的期望值和估值区间。由第三段我们得知 T_{21k} 服从期望值 $m = 39.5$ (月)，方差 $\sigma = 3.3$ (月) 的正态分布。故知下次 ($n + 1 = 21$ 次) 重现时间的期望值为：

$$T_{20} + 39.5 \text{ (月)}$$

亦即 1979 年 10 月 22 日。并由正态分布表可查得 $T_{21,k}$ 的估计区间为

$$[m - 2.2\sigma, m + 2.2\sigma] = [32.5, 46.5]$$

的概率是 97%。从而得知，下次重现时间在 1979 年 3 月 14 日至 1980 年 5 月范围内的概率为 7%。

3. 下次重现量级的估计。由于 1980 年以前仍处于活动期，而 $E_{20} = 4$ (状态)。用转移矩阵 P_1 得到转移概率 $P_{4,2} = 4/4$ (因资料少，最好用其修正值 $4/4 + 1 = 80\%$)^[6]。亦即下次重现的量级是总释放应变能相当于 $M_s 7.4$ 至 $M_s 7.8$ 之间，其可能性在 80% 以上。

六、讨 论

上述历次重现高潮，概括了这个地区从 1911 年至今的所有 M_s 7.5 级以上的特大地震和大部分 $M_s \geq 7.0$ 级的大地震（除大震牵联的远震外），在此期间共发生 54 个 M_s 7 级以上大震，而历次重现高潮期共发生 36 个，其应变能占 80%；牵联震共发生 9 个，应变能占 12%，其余未概于其中的只有 9 个，其应变能只占 8%。这九个地震是：1915 年 12 月拉萨 7.0 和 1918 年 7 月巴基斯坦 7.0 地震；1923 年 9 月缅甸 7.1；1949 年 2 月新疆 7.3 地震；1932 年 8 月缅甸 7.0 和 12 月甘肃 7.5 地震；1955 年 4 月四川康定 7.5 和 1925 年 3 月云南 7.1 级地震；1974 年 7 月中蒙边界 7.1 级大地震等。为什么这些地震大都集中在 1917 年、1924 年、1930 年和 1954 年这几个重现高潮附近呢？是偶然的吗？从表 1 中不难看出这几个重现期相对于同等水平（活跃期或平静期的平均释放能量^[1]）来说它释放的能量是太低了。因此这些高潮前后，还有一些能量必须释放，这就告诉我们一个事实，当重现高潮释放总量级过低时，紧接着一、二年内还有大地震发生，但即使在活跃期也不会超过 M_s 7.5。从上述统计数字还可看到，文中所述周期是一个非常主要的周期（当然还可能有别的周期）。

参 考 文 献

- [1] 朱成熹，欧亚板块亚洲大陆部分地震活动的周期性和能量释放规律，地震研究，2，2，1979。
- [2] 朱成熹，大地震牵联的晚期最大近震和远震震级的计算公式，地震学报，2，1，1980。
- [3] 国家地震局，中国强震简目，地震出版社，1977。
- [4] 国家地震局，世界大地震简目，国家地震局印，1973。
- [5] M. 费史（王福宝译），概率论及数理统计，上海科学技术出版社，1963。
- [6] 金光炎，实用水文统计法，水电出版社，1959。

DISTRIBUTION LAWS OF RECURRANCE PERIODS AND MAGNITUDE SEQUENCE OF GREAT EARTHQUAKES IN MAINLAND CHINA AND ITS SURROUNDING REGIONS

ZHU CHENG-XI

(Mathematical Department, Nankai University)

Abstract

In Mainland China and surrounding regions, the recurrence periods of great earthquakes obey nearly the normal distribution law with mathematical expectation $m = 39.5$ months and $\sigma = 3.3$ months (variance σ^2) within a seismic active time interval while the recurrence magnitude sequence may be described by a nonhomogeneous Markov chain.