

# 地震发生的随机模式\*

宋良玉<sup>1)</sup> 张建中<sup>2)</sup> 郁曙君<sup>1)</sup> 何淑韵<sup>1)</sup> 王正华<sup>3)</sup>

## 摘要

本文资料取自华北地震区 1446—1969 年的地震记录，选出活动期主峰与拐点地震 36 次，每两次之间做埃尔米特插值，这样就构造出一条等间隔采样的曲线，它反映了五百年来华北地震活动强弱的变化。

设此曲线由两部分组成，确定性部分和随机部分。给出轮迴模式与平稳随机过程的自回归模式，分别进行外推预测。

文中还做了后验综合分析，将近期资料删截 15 次分别进行计算、外推、预测。把每个时间段被预测危险的次数相加得到预报曲线。根据这些后验的结果，于 1974 年 4 月估计，1975 至 1977 年华北将出现地震活动高潮。在此间发生了 1975 年 2 月 5 日的海城地震与 1976 年 7 月 28 日的唐山地震。该曲线对今后华北地震仍具有预报意义。以海城地震开始的华北地震高潮还要延续一段时间，至 1980 年后才转入低潮，且到 2001 年前后将开始重新活动。

地震是复杂的地球物理现象，为了突出它的力学特征，从力学角度把地震看做是一次应力的瞬变。为了研究地震能量的转换，从热力学角度将地震看做是一次能量的释放。鉴于地震发生表现出一定的随机特性，从统计学角度将地震看做是一次随机事件。这三个方面的研究对认识以至最终揭示地震奥密应该是并行不悖的。本文对五百年华北大地震序列进行了统计分析，给出地震发生的轮迴模式与平稳随机模式。统计结果：华北大地震之间存在着显著的依赖关系，可用于地震的中长期预报。

## 一、华北地震数字时间序列的构造

华北地震区，1446—1969 年共记录破坏性地震 ( $M_s \geq 5.0$ ) 大约有 260 次，强破坏震 ( $M_s \geq 6.0$ ) 约有 75 次，震中分布见图 1。这就是所谓“华北板块地震区”的大致范围。地震序列见图 2<sup>4)</sup> 和表 1。图 2 横坐标为时间，纵坐标为地震能量取对数。由图可见，地震在时间轴上断续成丛出现，地震释放的能量随时间进程有强弱变化，在这五百年地震活动的峰谷变换中，地震之间是否存在有某种可能被描述的关系，是否隐含着预测未来的信  
息，我们利用数字时间序列分析方法，对华北历史地震资料进行了分析处理，通过地震数字时间序列的构造，数学模式的选取，后验效果分析等步骤，对未来地震活动高潮时段作出概率估计。

\* 1978 年 7 月 6 日收到。

1) 国家地震局地球物理研究所；2) 中国科学院计算中心；3) 贵州省毕节地震台。

4) 此项工作 1974 年完成，当时因 1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震及 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震尚未发生，故该两次地震在图中以虚线标出。

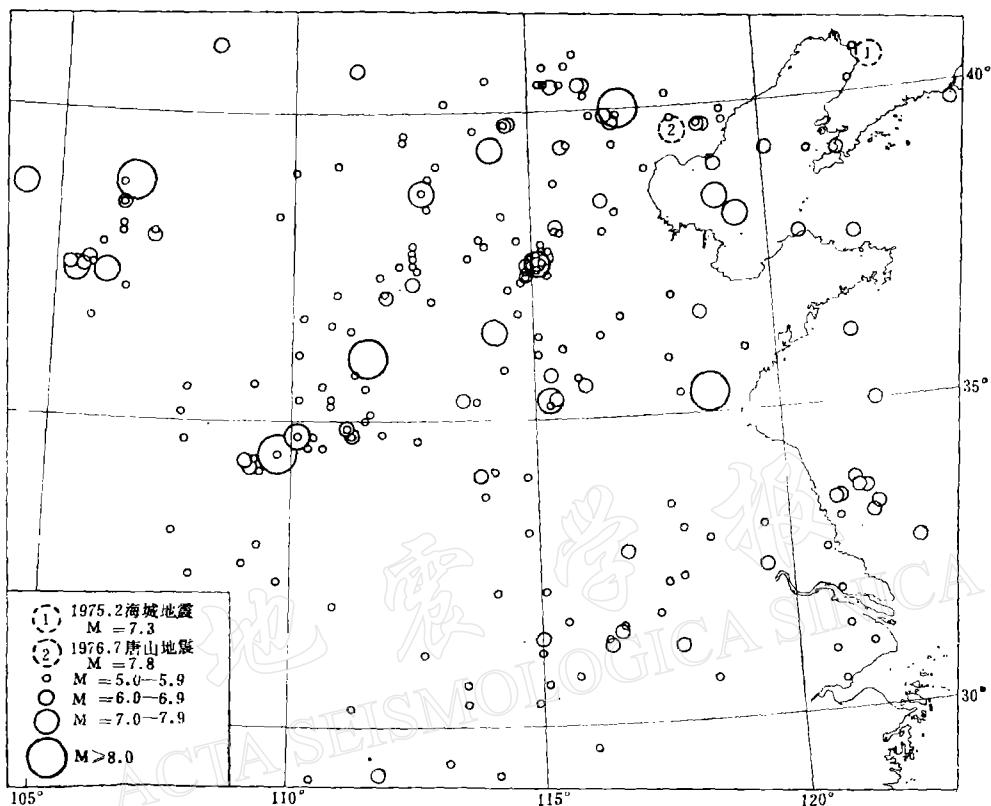
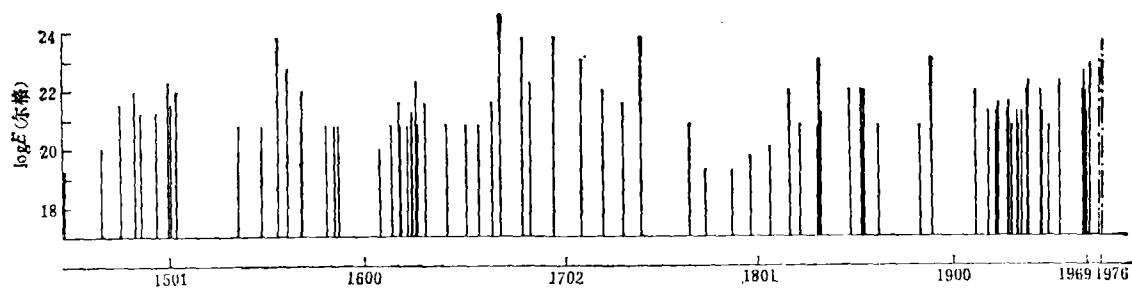
图1 华北地震震中分布 (1446—1971,  $M \geq 5.0$ )图2 华北地震序列 (1446—1977,  $M \geq 5.0$ )

表1 华北地震区强震目录

序号	年、月、日	纬度	经度	震级	烈度	地 点	序号	年、月、日	纬度	经度	震级	烈度	地 点
1	*1448.9.30	38.3	109.7	5	6—7	陕西榆林	32	1665.4.16	39.9	116.7	6 1/2	8	北京通县
2	*1467.6.4	39.6	112.3	5 1/2	7	山西朔县威远堡一带	33	*1668.7.25	35.3	118.6	8 1/2	12	山东郯城
3	*1477.5.13	38.5	106.3	6 1/2	8	宁夏银川	34	*1679.9.2	40.0	117.0	8	11	河北三河
4	*1484.1.29	40.4	116.1	6 3/4	8—9	北京居庸关	35	1683.11.22	38.7	112.7	7	9	山西原平
5	1487.8.10	34.3	109.1	6 1/4	8	陕西临潼	36	*1695.5.18	36.0	111.5	8	10	山西临汾
6	1495.4.10	37.6	105.6	6 1/4	8	宁夏中卫	37	*1709.10.14	37.4	105.3	7 1/2	9—10	宁夏中卫
7	*1501.1.19	34.8	110.1	7	9	陕西朝邑	38	1720.7.12	40.4	115.5	6 3/4	9	河北沙城
8	1502.10.17	35.7	115.3	6 1/2	8	山东濮城	39	1730.9.30	40.0	116.2	6 1/2	8	北京西郊
9	1505.10.9	32.8	122.7	6 3/4		黄 海	40	*1739.1.3	38.9	106.5	8	10	宁夏平罗
10	1536.10.22	39.8	116.8	6	7—8	北京通县	41	1764.6.27	33.7	121.6	6		黄 海
11	1548.9.13	37.8	120.7	6	8	山东蓬莱	42	*1772.3.1	38.3	114.4	5	6	河北灵寿
12	*1556.1.23	34.5	109.7	8	11	陕西华县	43	*1786.1—	29.1	110.4	5	6	湖南大庸
13	*1561.7.25	37.4	106.0	7 1/4	9—10	宁夏中宁	44	*1795.8.5	39.7	118.7	5 1/4	6—7	河北深县
14	*1568.4.25	39.0	119.0	6		渤海湾	45	*1805.8.5	39.7	119.2	5 1/2	7	河北昌黎
15	1568.5.15	34.4	109.0	6 3/4	9	陕西西安	46	*1815.10.23	34.8	111.2	6 3/4	9	山西平陆
16	*1581.5.18	39.8	114.5	6	7—8	河北蔚县	47	1820.8.3	34.1	113.8	6	8	河南许昌
17	*1585.3.6	31.2	117.7	6	7	安徽巢县	48	1829.11.19	36.6	118.5	6	8	山东临朐
18	*1587.4.10	35.3	113.5	6	7	河南修武	49	*1830.6.12	36.4	114.2	7 1/2	10	河北磁县
19	*1608.9.23	37.5	105.7	5 1/2	7	宁夏青铜峡南	50	1831.9.28	32.8	116.7	6 1/4	8	安徽凤台
20	*1614.10.23	37.2	112.5	6	7—8	山西平遥	51	1846.8.4	33.4	121.9	6 3/4		黄 海
21	*1618.5.20	37.0	111.9	6 1/2	8	山西介休	52	*1852.5.26	37.5	105.2	6	8	宁夏中卫
22	1618.11.16	39.8	114.5	6	7—8	河北蔚县	53	1852.12.16	33.3	121.8	6 3/4		黄 海
23	1622.3.18	35.5	116.0	6	7—8	山东郓城	54	1853.4.14	33.8	121.5	6 3/4		黄 海
24	1624.2.10	32.5	119.5	6	7	江苏扬州	55	*1861.7.19	39.1	121.7	6	8	辽宁金县
25	1624.4.17	39.7	118.7	6 1/4	8	河北深县	56	1882.12.2	38.1	115.5	6	8	河北深县
26	*1626.6.28	39.4	114.2	7	9	山西灵丘	57	*1888.6.13	38.5	119.0	7 1/2		渤海湾
27	1627.2.16	37.5	105.5	6	8	宁夏中宁	58	*1910.1.8	35.0	122.0	6 3/4		江苏黄海
28	1631.8.14	29.2	111.7	6 1/2	8	湖南常德	59	1917.1.24	31.3	116.3	6 1/4	8	安徽霍山
29	1642.6.30	34.9	111.1	6	8	山西平陆	60	1921.1.7	38.0	107.0	6		宁夏吴忠
30	1652.3.23	31.5	116.5	6	7—8	安徽霍山	61	1921.12.1	33.7	121.6	6 1/4		黄 海
31	1658.2.3	39.4	115.7	6	7—8	河北涞水	62	*1922.9.29	39.2	120.5	6 1/2		渤海

续 表

序号	年、月、日	纬度	经度	震级	烈度	地 点	序号	年、月、日	纬度	经度	震级	烈度	地 点
63	*1927.2.3	33.5	121.0	6 1/2		黄 海	74	1954.7.31	38.8	104.2	7		甘肃民勤东
64	1927.2.3	33.5	121.0	6 1/4		黄 海	75	1966.3.8	37.4	114.9	6.8	9	河北邢台隆尧
65	1929.1.14	40.7	111.3	6	8	内蒙呼和浩特西	76	*1966.3.22	37.5	115.1	6.7		河北宁晋
66	1932.4.6	31.4	115.0	6	8	湖北麻城	77	1966.3.22	37.5	115.1	7.2	10	河北宁晋
67	1932.8.22	36.1	121.6	6 1/4		山东青岛东黄海中	78	1966.3.26	37.6	115.3	6.2	7	河北束鹿
68	1934.1.21	41.1	108.3	6 1/4	8	内蒙五原	79	1966.3.29	37.5	114.9	6		河北巨鹿
69	*1937.8.1	35.2	115.3	7	9	山东荷泽	80	1967.3.27	38.5	116.5	6.3	7	河北河间
70	1937.8.1	35.3	115.4	6 3/4	8	山东荷泽	81	*1969.7.18	38.2	119.4	7.4		渤海
71	*1944.12.19	39.7	124.3	6 3/4		辽宁丹东南海中	82	1975.2.4	40.6	122.8	7.3	9	辽宁海城
72	1945.9.23	39.7	118.7	6 1/4	8	河北滦县	83	1976.4.6	40.2	112.2	6.3	8	内蒙和林格尔
73	1948.5.23	37.7	121.9	6		山东威海海中	84	1976.7.28	39.6	118.2	7.8	11	河北唐山

注: \* 者为处于地震活动主峰或拐点处地震 36 次, 选做插值的基本资料, 其中有 6 次地震小于 6 级

## 二、地震数字时间序列的构造

地震原始序列是梳齿状的脉冲函数, 见图 2, 使用埃尔米特插值法可将断续的地震序列构造成等时间间隔采样的地震数字时间序列。经插值所得曲线画于图 3 并列入表 2。这条曲线既保留了原始地震序列随时间进程的强弱变化趋势, 又给出了时间轴上的等间隔采样值, 便于信息提取。

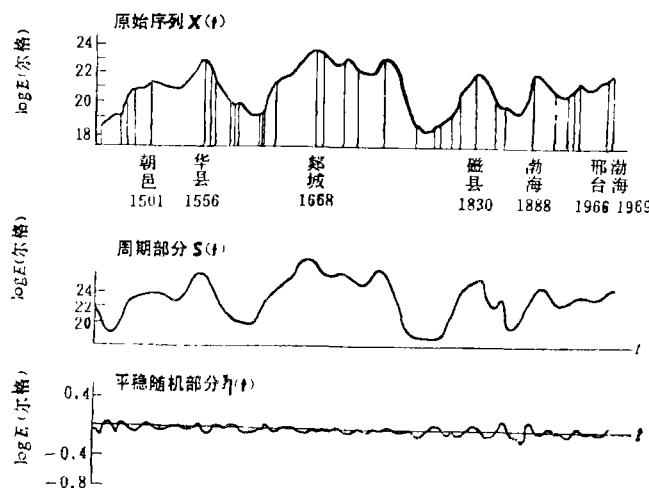


图 3 华北地震数字时间序列

埃尔米特插值又称带导数的插值, 在给定  $n$  个插值结点  $t_1, t_2, \dots, t_n$  及其对应的函数值  $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)$  和一阶导数  $X'(t_1), X'(t_2), \dots, X'(t_n)$  的情

表2 华北地震数字时间序列

序号	序列值	序号	序列值	序号	序列值	序号	序列值
1	(19.30)	45	20.90	84	23.01	133	21.69
2	19.33	46	(20.80)	90	22.91	134	21.25
3	19.42	47	(20.80)	91	22.79	135	20.92
4	19.54	48	(20.80)	92	22.69	136	(20.80)
5	19.68	49	20.64	93	22.65	137	20.60
6	19.81	50	20.30	94	22.70	138	20.70
7	19.93	51	19.96	95	23.00	139	(20.80)
8	(20.05)	52	19.80	96	23.60	140	20.59
9	20.05	53	19.86	97	23.75	141	20.21
10	20.80	54	19.99	98	(23.80)	142	20.00
11	(21.55)	55	(20.05)	99	23.75	143	20.13
12	21.70	56	20.43	100	23.65	144	20.40
13	(21.85)	57	(20.80)	101	23.30	145	20.68
14	21.81	58	(21.55)	102	22.60	146	20.80
15	21.72	59	21.74	103	21.90	147	21.93
16	21.68	60	22.11	104	21.00	148	(23.05)
17	21.84	61	(22.30)	105	20.35	149	22.98
18	22.14	62	22.33	106	19.85	150	22.81
19	(22.30)	63	22.42	107	19.55	151	22.58
20	22.28	64	22.57	108	19.35	152	22.32
21	22.22	65	22.75	109	(19.30)	153	22.09
22	22.14	66	22.96	110	19.08	154	21.92
23	22.04	67	23.19	111	18.85	155	(21.85)
24	21.94	68	23.43	112	18.97	156	21.65
25	21.84	69	23.66	113	19.18	157	21.45
26	21.76	70	23.89	114	(19.30)	158	21.50
27	21.70	71	24.10	115	19.38	159	(21.55)
28	21.68	72	24.28	116	19.52	160	21.55
29	21.75	73	24.43	117	(19.60)	161	(21.55)
30	21.95	74	24.52	118	19.72	162	21.76
31	22.23	75	(24.55)	119	19.93	163	22.14
32	22.56	76	24.36	120	(20.05)	164	(22.35)
33	22.92	77	23.99	121	20.34	165	22.22
34	23.25	78	(23.80)	122	20.98	166	21.98
35	23.53	79	23.64	123	21.61	167	(21.85)
36	23.73	80	23.34	124	(21.85)	168	21.89
37	(23.80)	81	23.18	125	22.02	169	22.00
38	23.20	82	23.34	126	22.30	170	22.15
39	(22.60)	83	23.64	127	22.65	171	22.30
40	22.20	84	(23.80)	128	22.93	172	22.45
41	(21.80)	85	23.68	129	(23.05)	173	22.56
42	21.70	86	23.43	130	22.93	174	(22.60)
43	21.45	87	23.17	131	22.60	175	(22.90)
44	21.15	88	(23.05)	132	22.16		

括弧内数据为该时间段发生的地震能量取对数,其他数据经插值得到。

况下,计算  $t$  点的函数值  $X(t)$ . 考虑区间  $(t_i, t_{i+1})$  上插值多项式  $X(t)$ , 使其满足

$$\begin{cases} X(t_i) = X_i \\ X(t_{i+1}) = X_{i+1} \\ X'(t_i) = 0 \\ X'(t_{i+1}) = 0 \end{cases}$$

令  $h_i = t_{i+1} - t_i$  则

$$X(t) = \left[ \frac{3}{h_i^2} (t_{i+1} - t)^2 - \frac{2}{h_i^3} (t_{i+1} - t)^3 \right] X_i + \left[ \frac{3}{h_i^2} (t - t_i)^2 - \frac{2}{h_i^3} (t - t_i)^3 \right] X_{i+1}$$

由图 2 选出位于活动期主峰或拐点处的地震 36 次, 其他地震视为此 36 次地震的广义前余震而不予考虑, 该 36 次地震见表 1 中带有 \* 号的地震. 埃尔米特插值的结点除上述

36 次地震外还有 35 个点, 如下式做单点插值得出(见图 4)

$$X\left(\frac{\Delta t_i}{2}\right) = \max(\log E_i, \log E_{i+1}) - a\Delta t_i$$

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$$

$\Delta t_i$  是 36 次地震中每两次相邻地震的时间间隔,  $t_i$  是  $i$  次地震的发震时间,  $E_i$  是  $i$  次地震的能量,  $a$  是经验常数. 由上式看出,  $X\left(\frac{\Delta t_i}{2}\right)$  值与两地震相隔的时间有关, 同时与两次地震的大小也有关, 这样确定了埃尔米特插值的 71 个结点. 令插值结点处函数一阶导数为零, 于是历史地震活动的强弱变化就通过插值后一条光滑的曲线描述出来, 这是下面进行分析的基本序列, 称其为地震数字时间序列. 曲线外推做预测时, 注意寻找外推曲线一阶导数为零的峰值或拐点部位, 将该时刻估计为强震发生的危险时段.

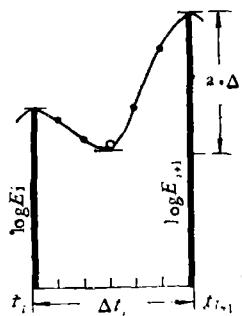


图 4 插值示意图

图 4 插值示意图

### 三、地震发生的轮迴模式

过去研究地震发生的周期性, 对地震序列做富立叶分析, 大多是选取地震频数序列作为分析对象而不考虑地震的大小, 这也许是由于历史强震资料记录不够长的缘故. 这里华北地震数字时间序列不是频数序列, 而是在一定概率下的能量序列. 我们去考察地震能量释放随时间进程而表现出的统计规律. 假设地震能量的释放由确定性因素与随机因素两部份组成, 首先使用谱分析方法将隐含在随机干扰中的周期部份识别提取出来, 然后再对剩余的部份做随机线性序列分析. 我们知道任何一条曲线都可以由许多个周期函数拟合得出, 这是一个奇妙的数学现象, 没有任何物理内容. 但是当一条具有物理背景的曲线, 仅由少数几个(而不是许多个)周期函数以不同振幅与初始位相拟合得出时, 我们需认真考虑该物理问题隐含在随机干扰中的某些确定性规律, 即所谓周期性. 这里的周期性决不是简单的重复, 而是数个周期因素对孕震区作用后表现出来的地震能量释放的轮迴效果.

取 1446 年至 1910 年华北地震资料经埃尔米特插值构成华北地震数字时间序列

$$x_1, x_2, \dots, \dots, x_t, \dots, x_N \quad (1)$$

1446—1910 年中每 3 年一个间隔，共 155 个间隔， $N = 155$ ，参见图 5 及表 2 前 155 个值。1910 年以后的资料暂不列入计算，留作检验模式预测效果。

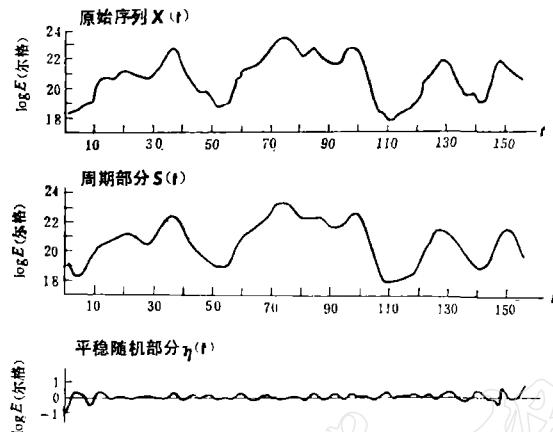


图 5 华北地震序列曲线(1446—1910 年)

设(1)式由两部份组成：

$$x(t) = s(t) + z(t) \quad (2)$$

$s(t)$  为确定性部份， $z(t)$  为随机部份。取隐含周期模式：

$$s(t) = a_0 + \sum_{j=1}^k \left( a_j \cos \frac{2\pi}{T_j} t + b_j \sin \frac{2\pi}{T_j} t \right) \quad (3)$$

式中  $a_0, a_j, b_j, T_j (j = 1, 2, \dots, k)$  为待定参数。为了从随机干扰中识别出周期，我们使用了周期图分析方法。取

$$X(t) = a_0 + \sum_{j=1}^k \left( a_j \cos \frac{2\pi}{T_j} t + b_j \sin \frac{2\pi}{T_j} t \right)$$

$$k = \left[ \frac{N}{2} \right] = \begin{cases} \frac{N}{2} & N \text{ 为偶数} \\ \frac{N-1}{2} & N \text{ 为奇数} \end{cases}$$

$N$  为资料的长度， $f_j = \frac{j}{N}$ ， $\left( j = 1, 2, \dots, \left[ \frac{N}{2} \right] \right)$  是基频  $\frac{1}{N}$  的倍频，周期  $T_j = \frac{1}{f_j}$ 。这里富立叶系数

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t = \bar{X} \quad (\bar{X} \text{ 为 } X_t \text{ 序列均值}) \\ a_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_t \cos \frac{2\pi jt}{N} \\ b_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_t \sin \frac{2\pi jt}{N} \quad j = 1, 2, \dots, \left[ \frac{N-1}{2} \right] \end{cases} \quad (4)$$

当  $N$  为偶数时

$$\begin{cases} a_{N/2} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t \cos t\pi \\ b_{N/2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

称

$$\begin{cases} I(f_j) = \frac{N}{2} (a_j^2 + b_j^2) \\ I(f_{N/2}) = N a_{N/2}^2 \end{cases} \quad (\text{当 } N \text{ 为偶数时})$$

为地震数字时间序列(1)式的“周期图”。将(1)式代入(4)式与(5)式计算,结果列入表3及图6

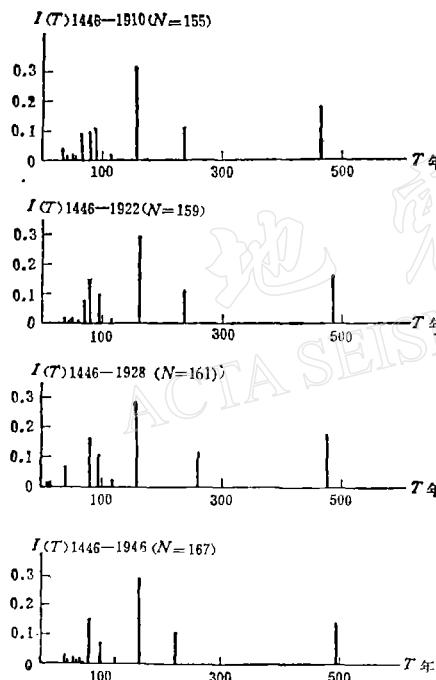


表 3  $N = 155$  序列“周期图”

序号	“周期图”
1	0.1924
2	0.1249
3	0.2858
4	0.0071
5	0.1088
6	0.0929
7	0.0843
8	0.0243
9	0.0154
10	0.0063

图 6 华北地震不同时段周期图

易证

$$\sum_{j=1}^k I(f_j) = \sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2 = N s^2 \quad (s^2 \text{ 为 } X_t \text{ 序列的方差})$$

当  $f$  在  $[0, 0.5]$  中变化时,“周期图”的定义可记为:

$$I(f) = \frac{N}{2} (a_f^2 + b_f^2) \quad (0 \leq f \leq 0.5)$$

其中  $a_f, b_f$ , 由(4)式用  $f$  代替  $j/N$  给出。

$$\text{称 } p(f) = \frac{I(f)}{s^2} \quad (0 \leq f \leq 0.5)$$

为地震数字时间序列的谱密度。由图 6 可看出, 谱线存在几个峰值。

下面用“周期图”构造一个新的服从费希尔 (Fisher) 分布的统计量  $Q_i$ , 目的是在给定显著水平下, 经统计检验选出  $k$  个周期, 设  $g_i = I(f_i)$ , 若  $z(t)$  为正态白噪声取

$$G = \sum_{i=1}^{[\frac{N}{2}]} g_i$$

统计量

$$Q_i = g_i/G$$

服从费希尔分布,  $g_i$  为  $g_1, g_2, \dots, g_{[\frac{N}{2}]}$  中第  $i$  个最大值, 对给定显著水平  $\alpha$ , 经统计检验得到  $X(t)$  的  $k$  个周期  $T_{i_1}, T_{i_2}, \dots, T_{i_k}$ 。对  $N = 155$ , 序列取  $\alpha = 0.025$ , 选出三个周期分别为 156 年, 252 年, 81 年参见图 7(a), (b), (c), 至此(3)式中的待定系数  $k$ ,  $a_i, b_i$ , 均求出。代入(3)式后得到  $X(t)$  的周期部分  $s(t)$ , 见图 5 周期部分及图 7。图 6 展示了对资料做不同长度删截后的“周期图”, 通过比较可以看出,  $I(T)$  峰值在横轴  $T$  上出现的部位大体一致。资料长短对周期提取影响不大, 随时间进程周期是稳定的。几百年来华北强震活动主要受 81 年  $\pm 3$  年, 162 年  $\pm 10$  年, 252 年  $\pm 10$  年三个周期性因素的作用。虽然它们的物理机制还不十分清楚, 可能是地壳本身固有的周期变化, 或来自地幔的周期作用, 也可能是来自宇宙的周期影响, 这些周期因素作用的最终结果, 使华北地区强地震的发生表现出明显的轮迴。统计分析在对地震周期性认识上有两点深入了。第一点, 华北强震数字时间序列的富立叶波谱图上, 大振幅的出现不是偶然的。假设强震没有

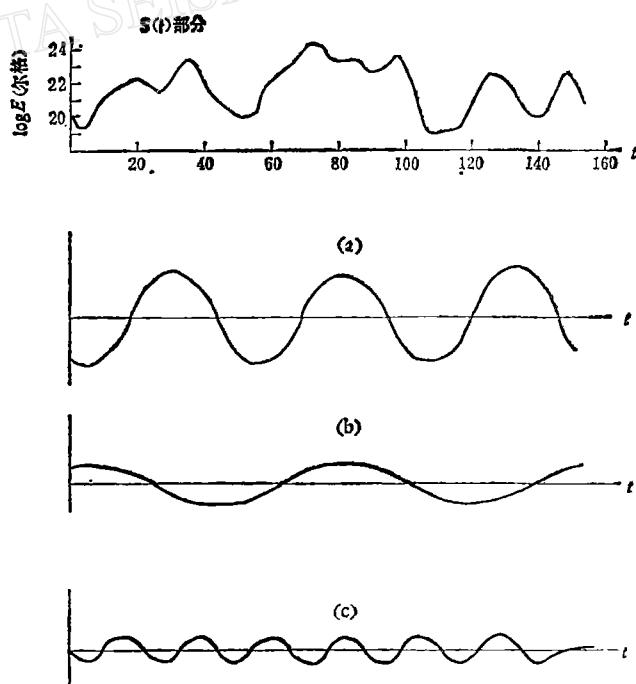


图 7 华北地震序列周期迭加示意图  
(1446—1910 年)

周期,出现这样高振幅的概率只有 2.5%,然而小概率事件发生了,无周期的假设被否定。所以我们得出结论,在概率意义下,近十年华北地震与华北五百年来的地震活动存在某种内在的联系。但这种联系不是简单的周期重复,而是由几个周期叠加后表现出的轮迴效果;第二点,统计方法将地震释放的能量定量地分解成两部份,一部份能量释放受周期因素控制,另一部份具有随机性,这样使我们对隐含在随机干扰中的周期性认识得更加清晰。

#### 四、地震随机序列的自回归模式

地震数字时间序列周期部份除去后,余下随机部份.为了研究地震发生之间的随机统计关系,需要首先引入自相关函数的概念,自相关函数象序列的均值,方差一样是描述一组随机数据总体平均性质的统计量.不同的是均值、方差是常数,而自相关函数是系列间隔 $\tau$ 的函数,它描述了序列的统计结构.

设

$$z(t) = x(t) - s(t) = \eta(t) + \xi(t) \quad (6)$$

$x(t)$  是原始序列,  $s(t)$  是周期部份,  $z(t)$  是除去周期部份余下的随机部份,  $\eta(t)$  是随机部份中存在统计规律部份,  $\xi(t)$  随机噪声或称随机误差.

地震数字时间序列(1)式除去周期部份后余下序列

$$z_1, z_{2^1}, \dots, z_{i_2}, \dots, z_N \quad (7)$$

现在我们来考察序列的自相关性。如果序列各元素  $z_i$  之间的相关性很弱，统计规律也就无从可寻。当估计序列  $z_i$  在  $j$  时刻和  $j + \tau$  时刻的相关性时，只要在序列的全程  $N$  上对两个时刻  $j$  和  $j + \tau$  的  $z$  值标准化后的乘积求平均就可得到。自相关函数的估值为：

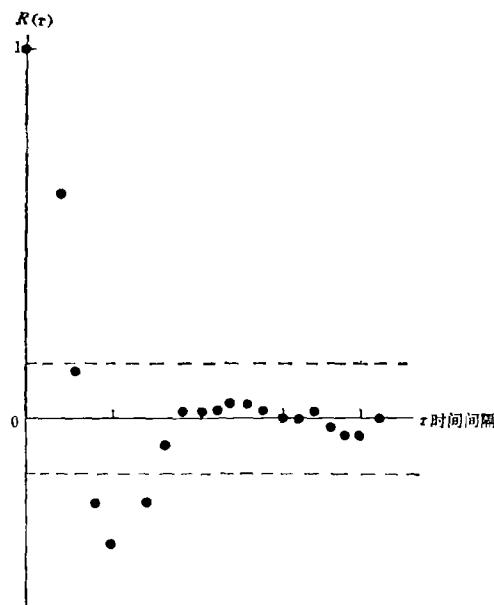


图 8 华北地震序列自相关函数

$$R(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} \left( \frac{z_i - \bar{z}}{s} \right) \left( \frac{z_{i+\tau} - \bar{z}}{s} \right) \quad (8)$$

此处  $\bar{z}$  为序列(7)式的均值,  $s$  为(7)式的标准差. 图 8 给出地震数字时间序列  $z(t)$  的自相关函数. 由于  $p\left(|R(\tau)| \leq \frac{2}{\sqrt{N}}\right) = 95.5\% \quad (N = 155, \frac{2}{\sqrt{N}} = 0.16)$  自相关函数为拖尾型, 序列之间存在线性统计关系. 下面给出  $n$  阶自回归模式:

$$z_{N+1}^* = \sum_{i=1}^N C_i z_{N+1-i} \quad (9)$$

确定  $C_i$  使预报误差平方期望

$$E = (z_{N+1} - z_{N+1}^*)^2$$

最小，易证自迴归系数  $c_i$  满足  $n$  阶代数方程组。

$$\begin{pmatrix} R(0), & R(1) \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) \dots & R(n-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R(n-1) & R(n-2) \dots & R(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(1) \\ R(2) \\ \vdots \\ R(n) \end{pmatrix} \quad (10)$$

解得  $C_i$  见表 4

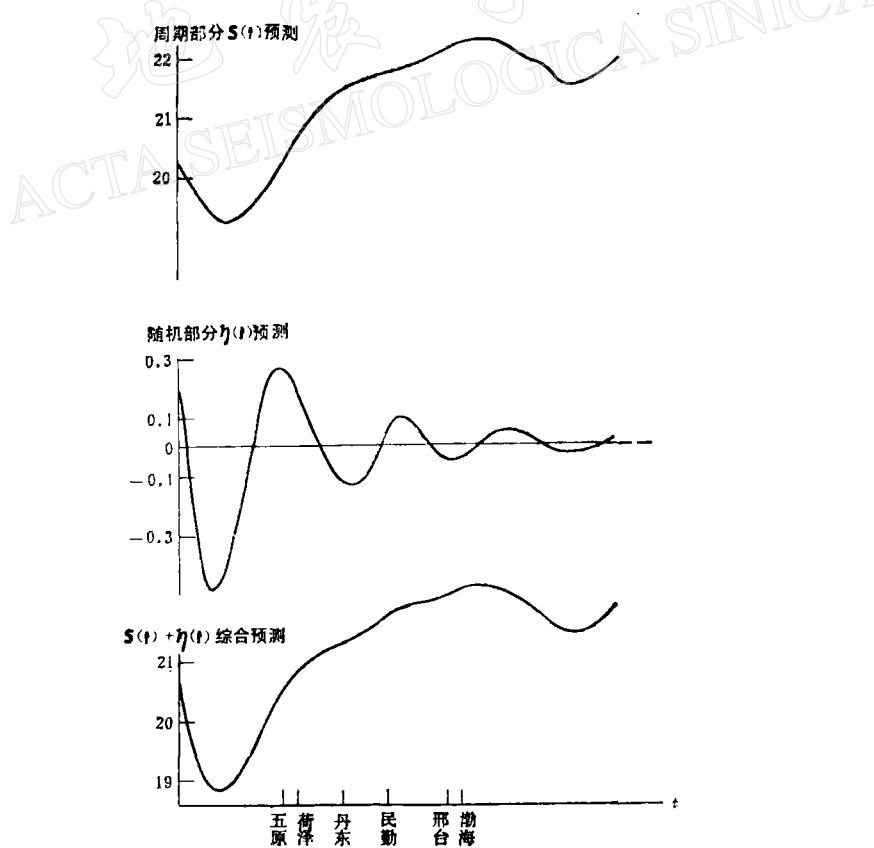


图9 华北地震预测曲线

表 4 自回归模式系数  $C_i$ 

$i$	$C_i$	$i$	$C_i$	$i$	$C_i$	$i$	$C_i$
1	0.5336	4	-0.2017	7	0	10	0
2	-0.4446	5	-0.1707	8	-0.1544	$\vdots$	$\vdots$
3	-0.1909	6	-0.1258	9	0	15	0.0656

根据(9)式及(3)式可对  $s(t)$  及  $z(t)$  作外推预测。将  $t = 156, \dots, 186$  代入方程(3)及(9)得预报曲线, 见图 9。值得注意的是预报曲线一阶导数为零的那些点, 也就是预报曲线是峰值或拐点部位估计为地震发生的危险时段。

## 五、后验综合分析

前面给出的周期模式与自回归模式是否反映了地震能量释放的某些规律, 最好的检验是预报实践。如果将近期资料删截一段不加入计算, 用它来检验前面资料计算外推的效果, 虽然删去的那段资料是已经发生过的事实, 但仍不失对模式的检验的意义, 这就是后验。另一方面, 对强震发生时间的估计, 不仅是通过资料的一次计算外推得出, 而是对资料长度做多次删截, 每删截一次就外推预测一次, 将多次预测的结果绘于图 10, 称后验预测判别图。纵坐标为资料删截长度, 横坐标为时间, 以年为单位, 一个格值代表 3 年, 预测有震时段在图中以黑方格表示, 从图 10(a) 中可一览各次后验预测的有震时段。再将图 10(a) 中有震间隔次数纵向求和标于图 10(b) 中得到预测曲线, 频数超过 2 的都对应有 6 级以上强地震发生, 后验的效果比较好。由图 10(b) 可见, 1969 年 7 月 18 日渤海 7.4 级级以上强地震发生, 后验的效果比较好。

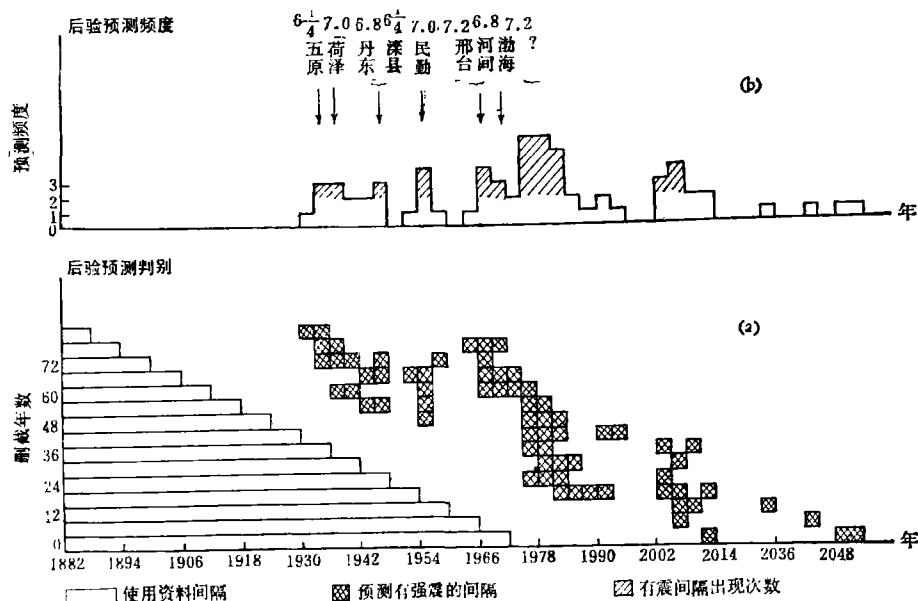


图 10 华北后验预测综合分析图

地震后，在1972—1974年有一个短暂的低值，1975年开始延续至1980年为华北强震活动的峰值段，1980年后至2000年华北有相对平静期出现，2001年始复出现强震活动。此项工作是1974年4月作出初步结果。预测1975年至1980年为华北地震活动的峰值段，1975至1977年需特别加强监视。1975年2月5日海城7.3级与1975年7月28日唐山7.8级地震正值此期间相继发生。

## 参 考 文 献

- [1] 中国科学院计算中心概率统计组,概率统计计算,科学出版社,1979.
- [2] U. 格列南特, M. 罗逊勃勒特,平稳时间序列的统计分析(中译本),上海科学出版社,1962.
- [3] A. 拉尔斯登, H. S. 维尔夫,数字计算机上用的数学方法(中译本),上海科学出版社,1963.
- [4] E. P. George Box et al; Time series analysis forecasting and control, Holden-Day, 1970.
- [5] J. S. 贝达特, A. G. 皮尔索,随机数据分析方法(中译本),国防工业出版社,1976.
- [6] Robert K. Otnes, Loren enochson, Digital time series analysis, John Wiley and Sons, 1972.
- [7] 清华大学,北京大学《计算方法》编写组,计算方法,科学出版社,1974.

## STOCHASTIC MODELS FOR EARTHQUAKE OCCURRENCE

SONG LIANG-YU<sup>1)</sup> ZHANG JIAN-ZHONG<sup>2)</sup> YU SHU-JUN<sup>1)</sup>  
HE SHU-YUN<sup>1)</sup> WANG ZHENG-HUA<sup>3)</sup>

### Abstract

Seismic data for the period 1446—1969 in the North China seismic active region have been used in this study. We selected 36 earthquakes which occurred at the points of inflection and at the main peaks of the active periods. Hermitian interpolation was made between the energies of two consecutive earthquakes. In this way, a curve of equal sampling intervals showing the variation of the activity of the North China seismic region during the past 500 years was obtained.

This curve may be assumed to consist of two parts, namely, the deterministic part and the stochastic part. A periodic model and an auto-regressional model of stationary stochastic process were respectively proposed for carrying out extrapolation and prediction.

By posteriori-test analysis, we mean the interceptions of the recent data 15 times, each followed by computing, extrapolating and predicting separately. Again, by summing up the number of time intervals predicted to be earthquake dangerous, a curve of prediction could be obtained.

Based on these results of posteriori-test we predicted in April 1974 the appearance during the time interval from 1975 to 1977 a seismic active period in North China, within which the Haicheng earthquake of 1975 and the Tangshan earthquake of 1976 actually occurred. Moreover, the said curve is still significant for predicting future earthquakes in North China. It seems that the seismic active period of North China starting from the Haicheng earthquake would last for a certain length of time, till about 1980, but it would be again active at around the year 2001.

1) Institute of Geophysics, State Seismological Bureau;

2) Computing Centre, Academia Sinica;

3) Bijie Earthquake Station of Guizhou Province.