

全球地震活动性的统计分析

徐 道 一

(国家地震局地质研究所)

随着宇航事业的迅速发展,在地学中出现了对地球从整体上来进行研究的趋势,并把各种地球物理现象与宇宙中发生变动相联系。在地震学研究中,对全球地震活动性的研究亦是一个重要方面,它不仅有理论上意义,而且对一些地震带的地震趋势估计亦有重要作用,因为有些地震带在一定程度上与全球地震活动性密切相关。

对全球地震活动性有很多人进行过研究(gutenberg等1954, Benioff 1951, Heder-vari 1967),所用资料大多限于本世纪前50年期间地震目录。最近,巴特(Bath 1979)系统整理了1897—1977年期间的全球 $M \geq 7$ 级地震目录,这个地震目录的特点是震级的确定方面所用的资料比较统一连续,主要根据作者掌握的两个台(upsala和Kiruna)有关全球 $M \geq 7$ 级地震震级的平均值,并参考了其它地震目录的资料。虽然这个地震目录在某些地震的震级上与常用地震目录有些出入,但从整体上看,数据的前后一贯性较好,是一个优点。

巴特统计了上述81年期间反映全球 $M \geq 7$ 级地震活动的三个重要指标:年地震能量和(ΣE),年地震频数(ΣN)和年震级平均值(\bar{M})。具体数据见表I。本文着重对这些指标在时间上的变化进行统计分析。

(一) 计算方法简介

从三个指标的1897—1977年81个数据的变化看来,这些曲线是不同长度的周期迭加形成。为了确切地了解这些曲线的周期成分,对时间序列数据进行频谱分析,然后根据求出的频率设计相应的数字滤波器,通过褶积运算,进行滤波。最后,把分离后各种周期成分分别进行分析。

1) 频谱分析

设观测数据是一个等间隔(年)的离散时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , n 是数据点数。首先求自协方差函数:

$$R_x^{(p)} = \frac{1}{n-p} \sum_{q=1}^{n-p} X_q \cdot X_{q+p} \quad P = 0, 1, 2, \dots, m$$

上式中 m 是最大滞后点数。功率谱的估计值为

表1 1897—1977年地球活动性三个指标数据

Table The data of three indexes of global seismicity during 1897—1977 period.

年	$\Sigma E \times 10^{25}$ 尔格	ΣN	\bar{M}	年	$\Sigma E \times 10^{25}$ 尔格	ΣN	\bar{M}	年	$\Sigma E \times 10^{25}$ 尔格	ΣN	\bar{M}
1897	2.783	12	8.4	1924	0.373	17	7.7	1951	0.127	14	7.4
1898	0.466	6	8.1	1925	0.078	17	7.2	1952	0.730	13	8
1899	1.000	1	8.1	1926	0.302	19	7.6	1953	0.141	15	7.5
1900	0.684	9	8.1	1927	0.246	16	7.6	1954	0.045	15	7.1
1901	0.547	8	8.1	1928	0.356	19	7.7	1955	0.110	19	7.3
1902	0.947	8	8.2	1929	0.674	18	7.9	1956	0.118	14	7.4
1903	0.661	8	8.1	1930	0.038	10	7.2	1957	0.540	33	7.6
1904	0.712	8	8.1	1931	0.345	26	7.6	1958	0.707	10	8.1
1905	1.769	26	8.1	1932	0.352	11	7.8	1959	0.207	12	7.6
1906	2.703	29	8.1	1933	1.214	12	8.2	1960	0.253	16	7.6
1907	0.487	24	7.7	1934	0.423	19	7.7	1961	0.074	11	7.4
1908	0.288	15	7.7	1935	0.216	22	7.5	1962	0.045	14	7.1
1909	0.591	30	7.7	1936	0.099	18	7.3	1963	0.200	17	7.5
1910	0.807	30	7.8	1937	0.189	21	7.4	1964	0.383	13	7.8
1911	1.417	18	8.1	1938	1.199	25	7.9	1965	0.216	18	7.5
1912	0.514	17	7.4	1939	0.797	20	7.9	1966	0.369	16	7.7
1913	0.504	21	7.7	1940	0.329	20	7.6	1967	0.068	13	7.3
1914	0.938	18	8	1941	0.939	23	7.9	1968	0.801	31	7.8
1915	0.282	17	7.6	1942	0.998	26	7.9	1969	0.291	21	7.6
1916	0.484	22	7.7	1943	0.599	40	7.6	1970	0.219	27	7.4
1917	1.255	17	8.1	1944	0.301	31	7.5	1971	0.468	18	7.8
1918	0.608	21	7.8	1945	0.254	26	7.5	1972	0.734	23	7.8
1919	0.507	15	7.8	1946	0.562	34	7.6	1973	0.290	15	7.7
1920	0.764	8	8.2	1947	0.158	25	7.3	1974	0.153	21	7.4
1921	0.176	11	7.6	1948	0.332	27	7.5	1975	0.336	23	7.5
1922	0.303	14	7.7	1949	0.252	30	7.4	1976	0.394	24	7.6
1923	0.478	23	7.7	1950	1.095	30	7.9	1977	0.297	16	7.7

$$P_x^{(n)} = \frac{2 \Delta t}{\pi} \sum_{p=0}^m 6 P R_x^{(p)} \cos \frac{np\pi}{m} \quad n = 0, 1, \dots, m$$

$$6 P \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{若 } p=0, p=m \\ 1 & \text{若 } 0 < p < m \end{cases}$$

Δt 是单位时间间隔。经海明窗光滑后的功率谱的估计值为：

$$SP_x^{(0)} = 0.54P_x^{(0)} + 0.46P_x^{(1)}$$

$$SP_x^{(n)} = 0.23P_x^{(n-1)} + 0.54P_x^{(n)} + 0.23P_x^{(n+1)}$$

$$SP_x^{(m)} = 0.54P_x^{(m)} + 0.46P_x^{(m-1)}$$

除时间序列 $X(t)$ 以外，有另一时间序列为 y_1, y_2, \dots, y_n ，两个时间序列的交互协方差函数为：

$$R_{xy}^{(p)} = \frac{1}{n-p} \sum_{q=1}^{n-p} x_q \cdot y_{q+p} \quad p = 0, 1, 2, \dots, m$$

$$R_{xy}^{(-p)} = \frac{1}{n-p} \sum_{q=1}^{n-p} x_{q+p} \cdot y_q \quad p = 0, 1, 2, \dots, m$$

进而计算交互谱的

$$\begin{aligned} \text{协谱 } C_{xy}^{(n)} &= \frac{\Delta t}{\pi} \sum_{p=0}^m \varepsilon_p (R_{xy}^{(p)} + R_{xy}^{(-p)}) \cos \frac{np\pi}{m} \\ \text{余谱 } Q_{xy}^{(n)} &= \frac{\Delta t}{\pi} \sum_{p=0}^m \varepsilon_p (R_{xy}^{(p)} - R_{xy}^{(-p)}) \sin \frac{np\pi}{m} \\ n &= 0, 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

通过这可计算交互的幅度

$$AM_{xy}^{(n)} = \sqrt{(SC_{xy}^{(n)})^2 + (SQ_{xy}^{(n)})^2}$$

它的相位是 $PHAS_{xy}^{(n)} = \arctg (SC_{xy}^{(n)} + iSQ_{xy}^{(n)})$

上式中 $SC_{xy}^{(n)}$, $SQ_{xy}^{(n)}$ 是 $C_{xy}^{(n)}$, $Q_{xy}^{(n)}$ 的海明窗光滑后的结果。

进而可求出两时间序列的凝聚系数

$$COH_{xy}^{(n)} = \frac{(AM_{xy}^{(n)})^2}{SP_x^{(n)} \cdot SP_y^{(n)}}$$

反映两个时间序列的各个频率成分的相关程度。

2) FIR 数字滤波器的最优化设计

在求得时间序列的频率组成后，下一步应把不同的周期分开，这就须要设计专用的数字滤波器。有许多方法可以设计数字滤波器，我们采用的是有限长单位脉冲响应 (FIR) 方法，这是由于 FIR 有下列一些优点：I) 它可以允许在规定频率幅度的条件下，保证严格的线性相位的特性；II) 它主要是非递归型结构，这样在有限精度运行时，不会出现递归型结构时常发生的极限振荡的不稳定现象；III) 滤波器的设计误差相对较小。

设计 FIR 数字滤波器时采用最大误差最小准则 (亦称为契比雪夫准则)。若奇数滤波器的系数值为 $H(n)$, $n = 0, \pm 1, \dots, \pm 1, 2l+1$ 为滤波器长度。在设计时，改变 $H(n)$ 值，使频率 f 在 A 域内最大的绝对误差最小。 A 域包括通带和阻带范围。

麦克莱伦 (McClellon) 应用了苏联学者雷密斯方法求解 FIR 数字滤波器取得较好的效果。在满足最大误差最小准则的条件下，可以自由选择数字滤波器的长度，确定通带和阻带的上下限，以及误差加权等。当前公认这是使用计算机设计数字滤波器较好的一种方法。本文采用的就是麦克莱伦方法。

上述计算都是在国产 DJS-131 机上用 BASIC 语言编写的程序计算完成的。

(二) 全球地震活动性三个指标的周期成分

对三个指标的时间序列进行谱分析，计算结果见图 1。由图 1 可见，40 年的长周期的幅度值很大，但是由于资料长度只有 81 年，又受谱分析本身方法的限制，对长周期的确定不那么准确，故不作进一步的讨论。

ΣE 的频谱曲线有三个周期的小峰值：8 年 (0.098)，4.4 年 (0.115) 和 2.9 年 (0.098)，括号中为相应周期的幅度。 ΣN 的频谱曲线有两个周期的小峰值：6.7 年 (14.5) 和 3.6 年 (12.6)。6.7 年周期与上述 ΣE 的 8 年周期接近，但 3.6 年却在 ΣE 的频谱曲线的谷值附近，这表明 ΣE 与 ΣN 的频率成分在频段 0.15 以下时有相似之处，然而在 0.25—0.40 频率区

间,两者有显著差别。

\bar{M} 的频谱曲线主要有两个周期的峰值:

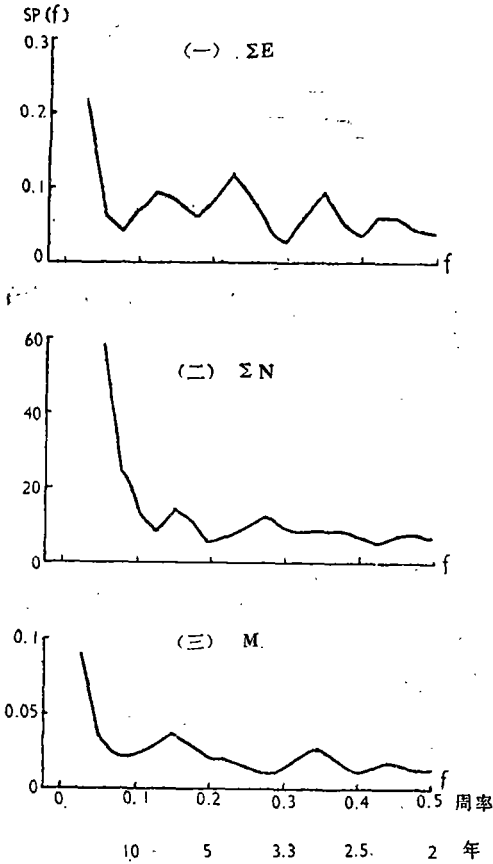


图1 ΣE , ΣN , \bar{M} 的频谱曲线

Fig. 1 The power spectral curves of ΣE , ΣN and \bar{M}

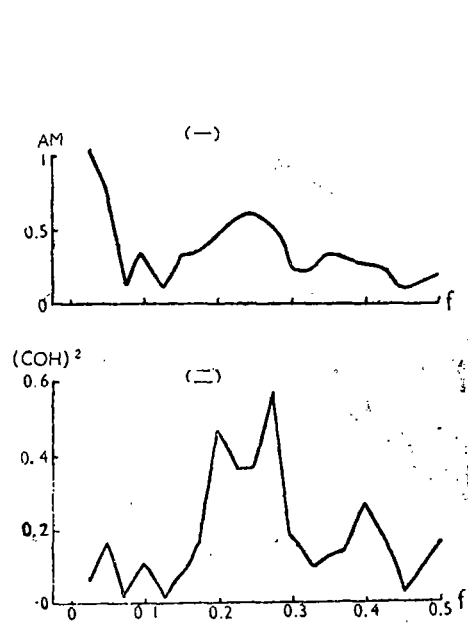


图2 ΣE 与 ΣN 的交互谱幅度(AM)和凝聚系数(COH)

Fig. 2 The cross-spectral amplitude (AM) and coherence coefficient (COH) of ΣE and ΣN .

6.7年(0.036)和2.9年(0.022)。这与 ΣE 的两个周期峰值相接近,6.67年周期与 ΣE 的一个周期峰值相同。因此可以认为 \bar{M} 曲线是处于 ΣE 与 ΣN 的一种中间类型。在下面我们主要讨论 ΣE 与 ΣN 曲线的变化。

ΣN 与 ΣE 的交互谱与凝聚系数绘成图2。它们的峰值在0.2与0.275处,0.2在 ΣN 频谱曲线上是一低值,0.275在 ΣE 频谱曲线上是一低值,而 ΣE 频谱曲线上高值如0.225和0.35在图2(二)上却为低值。这表明 ΣE 与 ΣN 的频率组分确系有明显差别。

(三) 数字滤波

1) FIR数字滤波器

由于数据长度不大,这就限制了滤波器通带和阻带数目不能多,否则数字滤波器设计误差会增加很多。我们选用了最低限度的一个通带和一个阻带的低通滤波器。通带的下限与阻带的上限称为过渡带,过渡带的宽度对数字滤波器的影响较大,它的值小时,意味着对滤波

器要高，当滤波器其它参数固定时，滤波器的设计误差就会明显变大；反之，则降低。由表 2 可见，在 11 点低通滤波器时，过渡带宽度由 0.04 增加到 0.06 时，设计误差由 0.2093 降低到 0.1404。

其次要选择滤波器的长度，长度大时，设计误差显然会降低，但时间序列两端损失也随之增加。表 2 列出了不同滤波器长度时，设计误差的变化情况。当滤波器长度为 11 点时误差改善幅度最大，其次为 21 点。21 点滤波器的误差比 11 点的降低很多，但是两端数据项的损失亦增多了 10 个。

表 2 低通数字滤波器设计误差与长度的关系

Table 2 Relation between the error of designing the and length low-pass digital filter.

滤波器长度	设计误差		
	通带 0—0.25 阻带 0.29—0.50	通带 0—0.24 阻带 0.30—0.50	通带 0—0.12 阻带 0.16—0.50
7	0.2881	—	—
9	0.2626	—	—
11	0.2093	0.1404	—
13	0.1790	—	—
15	0.1525	—	—
17	0.1232	—	—
19	0.1114	—	—
21	0.0856	0.0393	0.0944
23	0.0815	—	—
25	0.0600	—	0.0658
31	0.0434	—	—

表 3 6 种数字滤波器主要参数

Table 3 The major parameters of six digital filters.

主要参数	编号	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
通带		0—0.24	0—0.24	0—0.25	0—0.18	0—0.18	0—0.12
阻带		0.30—0.50	0.30—0.50	0.29—0.50	0.25—0.50	0.25—0.50	0.16—0.50
滤波器长度		11	21	21	11	21	25
设计误差		0.1403	0.0393	0.0856	0.1264	0.0296	0.0658
	0	0.5457	0.5410	0.5418	0.4302	0.4303	0.2813
	1(-1)	0.3068	0.3150	0.3168	0.3072	0.3084	0.2459
	2(-2)	-0.0266	-0.0377	-0.0369	0.0618	0.0654	0.1560
	3(-3)	-0.1155	-0.0925	-0.0934	-0.0898	-0.0790	0.0513
	4(-4)	0.0739	0.0369	0.0405	-0.0901	-0.0548	-0.0263
	5(-5)	0.0587	0.0470	0.0532	0.0326	0.0238	-0.0543
	6(-6)	—	-0.0265	-0.0259	—	0.0381	-0.0376
	7(-7)	—	-0.0174	-0.0154	—	-0.0035	-0.0009
	8(-8)	—	0.0292	0.0422	—	-0.0280	0.0281
	9(-9)	—	0.0176	0.0316	—	-0.0144	0.0349
	10(-10)	—	-0.0223	-0.0408	—	0.0141	0.0226
	11(-11)	—	—	—	—	—	0.0061
	12(-12)	—	—	—	—	—	-0.0336

在表3中列出了6个数字滤波器 (F_1, F_2, \dots, F_6) 的主要参数和系数值。 F_1, F_2, F_3 主要是用于 ΣE 时间序列的, F_4, F_5 主要是用于 ΣN 的, F_6 是主要分离8年以上周期的。表3给出了每个滤波器的系数值, 滤波器长度都是奇数, 便于褶积运算。由于系数对称于中心, 故只给出其中心点一侧的系数。

为了检验低通滤波器的效果, 对低通滤波后的剩余序列再进行频谱分析。

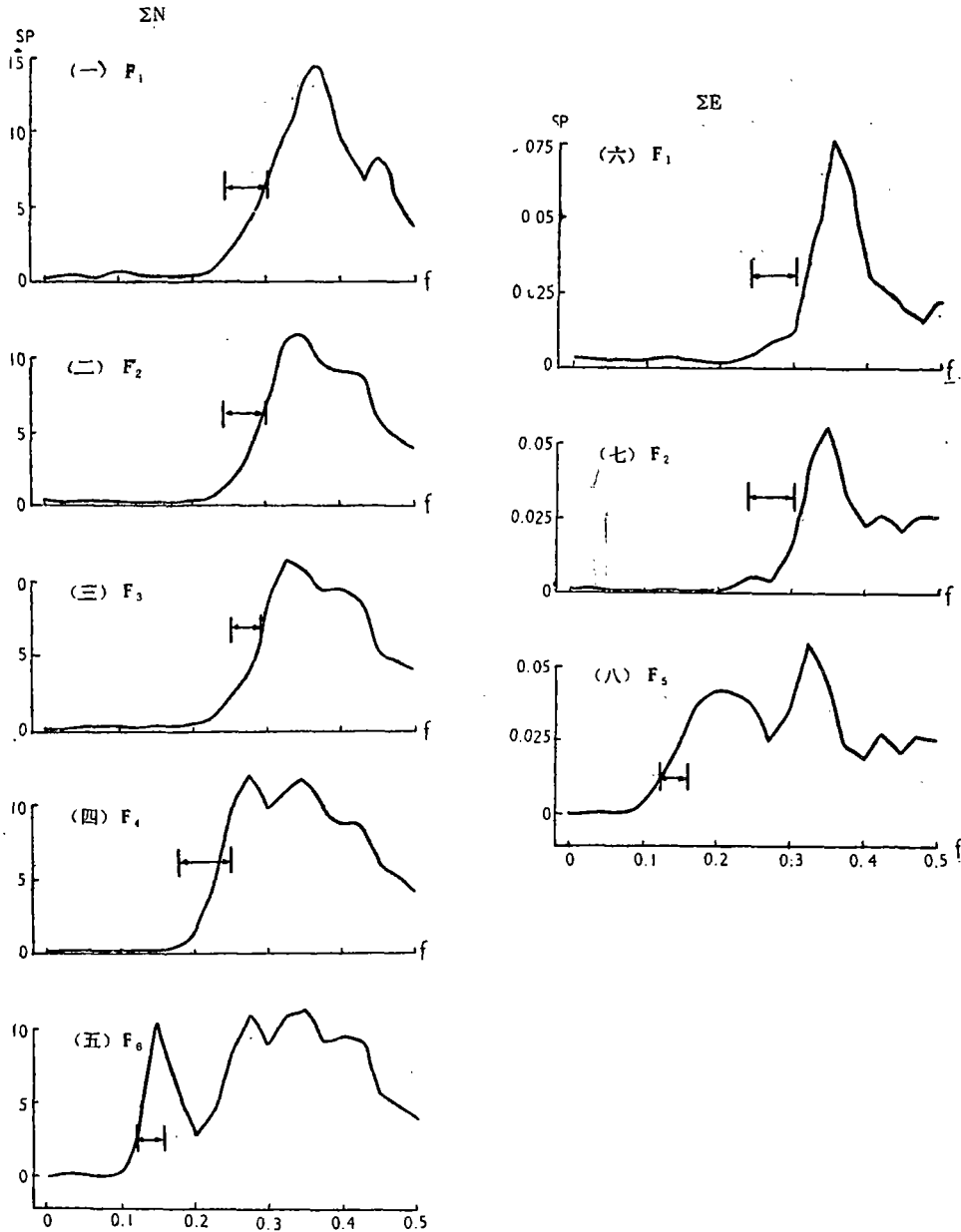


图3 $\Sigma N, \Sigma E$ 低通滤波后剩余曲线的频谱曲线。

F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 是滤波器编号, 见表8。

Fig. 3 The spectral curve of residual values of ΣE and ΣN after low-pass filtering.

图3上用箭头表明了过渡带的范围。由图可见，FIR滤波器的效果是相当好的，在通带范围内的频率成份基本上被滤掉，阻带部分被保留，当阻带的上限选择与原数据的频谱成分不合拍时，则经滤波后阻带的周期峰值与原始曲线的峰值会有倚变。当FIR滤波器的设计误差较大时（如 F_1 ），则会出现原来没有的高频波动（如图3（一）），或是原来应有的高频消失（如图3（六））。在用 F_2 ， F_4 时则上述倚变就不存在了。在过渡带中频谱曲线呈现为一斜坡。

2) 滤波结果

把原始数据序列 $X(t)$ 与滤波器系数进行褶积，可以求得低通滤波后曲线 $a(L)$ ，把 $X(t)$ 与 $a(t)$ 相减可得到剩余曲线 $b(t)$ 。在图4，图5中分别绘出了 ΣE ， ΣN 的 $X(t)$ ， $a(t)$ 和 $b(t)$ 。

从 ΣE 原始数据看（图4（一）），可看到一些短周期起伏，但是长趋势的变化规律不明显。通过低通滤波后则趋势性变化比较明显。在图4的（二）a和（三）a中有4—5年周期。

通过 F_0 低通滤波器后，4—5年周期亦被滤掉，在（四）a中已消失，而表现在（四）b中。从（四）a中可看出曲线大致可分为两大段：1930年以前为一段，从二十世纪初期 ΣE 高值逐渐缓下降，1930年以后为一段，呈现为8—9年规律波状起伏，在1941年为趋势高值，到1962年为趋势最低值。62年以后则又趋势性上升。

ΣE 的 $b(t)$ 曲线的变化亦是有规律的。从图3的（二）b看，呈规则的2—3年周期性起伏，2—3年周期的幅度在时间上亦有变化，似呈串珠状振荡，如在1900—1920年和1930—1940年期间该周期振幅都较大，在1920—1930和1940—1949年期间，则振幅又都小。在 $b(t)$ 上迭加4—5年周期后，则使 $b(t)$ 的幅度增大（四）b，尤其是1911年，1917年，1933年，1937年，1950年这五年的 $b(t)$ 值明显增强。

ΣN 的原始曲线上看，明显看出趋势性高峰在1910—1920年和1942—1950年期间。通过 F_0 滤波后（图5（四）a）趋势性高值亦在1945—1955年期间，趋势性低值在1962年，1962年后回升，这与 ΣE 曲线有相似之处。

ΣN 的 $b(t)$ 曲线为3—4年起伏，在迭加了6—7年周期后曲线形态改变不大。

（四）讨论

1) 从地震震级与频数的关系可知，震级越大，则频数越小。由于7级地震在数量上比8级地震多，因此 ΣN 指标主要反映7级地震频数的变化。

从地震震级与能量的关系可知，震级越大，地震能量越大。虽然8级地震数量少，但是 ΣE 指标主要反映的是8级地震的变化。

通过上面的统计分析，可看出 ΣE 与 ΣN 变化有很大区别，因此可认为7级地震与8级地震的变化规律是有不同地方的。

从 ΣE 的趋势变化看，十九世纪末二十世纪初是80多年来地震能量释放高潮，能量释放低潮是在1960年左右，这与太阳活动的长趋势变化相似，近80多年来太阳活动趋势性低值（据11年太阳周峰年黑子数变化，见图4（四）的图线）在二十世纪初，太阳活动趋势性高值是在1958年，大体上大地震能量释放与太阳活动趋势变化上是负相关关系，既太阳活动低潮时，大地震能量释放是高潮。这种关系在1900年以前我国8级地震与太阳活动关系中亦表

现得很明显。

2) 在太阳活动趋势性低潮阶段, ΣE 曲线上10年左右的起伏不明显(相当于前面提到的 ΣE 趋势变化的第一阶段) 在太阳活动趋势性高潮阶段, ΣE 曲线上呈现比较明显的十年左右的波状起伏(相当于第二阶段)。这从物理意义上是容易理解的。太阳活动强烈, 太阳对地球的影响也就大, 它的11年左右周期的起伏在 ΣE 的曲线上反映也就比较明显, 这些又是在地震能量释放的趋势性低值背景的情况下发生的。

3) 从图5(四)a看出 ΣN 的趋势性变化与太阳活动的长趋势性变化关系不密切。但在曲线上似乎可以看出有9—10年左右的周期, 这与太阳活动11年周期或地球自转的10年周期可能有关。曲线上有6.7年, 4.4年, 3.6年, 2.6年的周期存在。有人用1956~1974年地球自转速率变化数据(单位时间间距是半个月)进行分析, 求出有6.9年, 3.7年、2.9年的周期(雅杜金, 1979)。上述地震的4个短周期有3个与地球自转的短周期接近, 因此可以推想, 它们可能与地球自转有关。

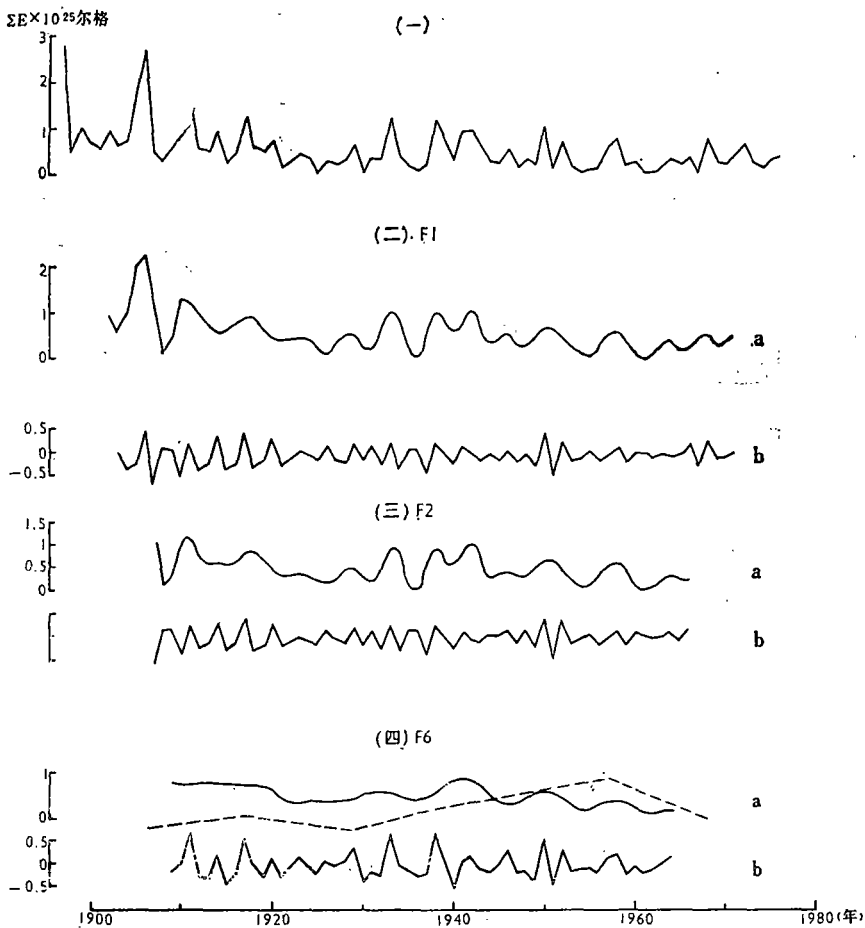


图4

Fig. 4 The ΣE curve and its $a(t)$ and $b(t)$ curves after $F1$, $F2$, $F6$ filtering.

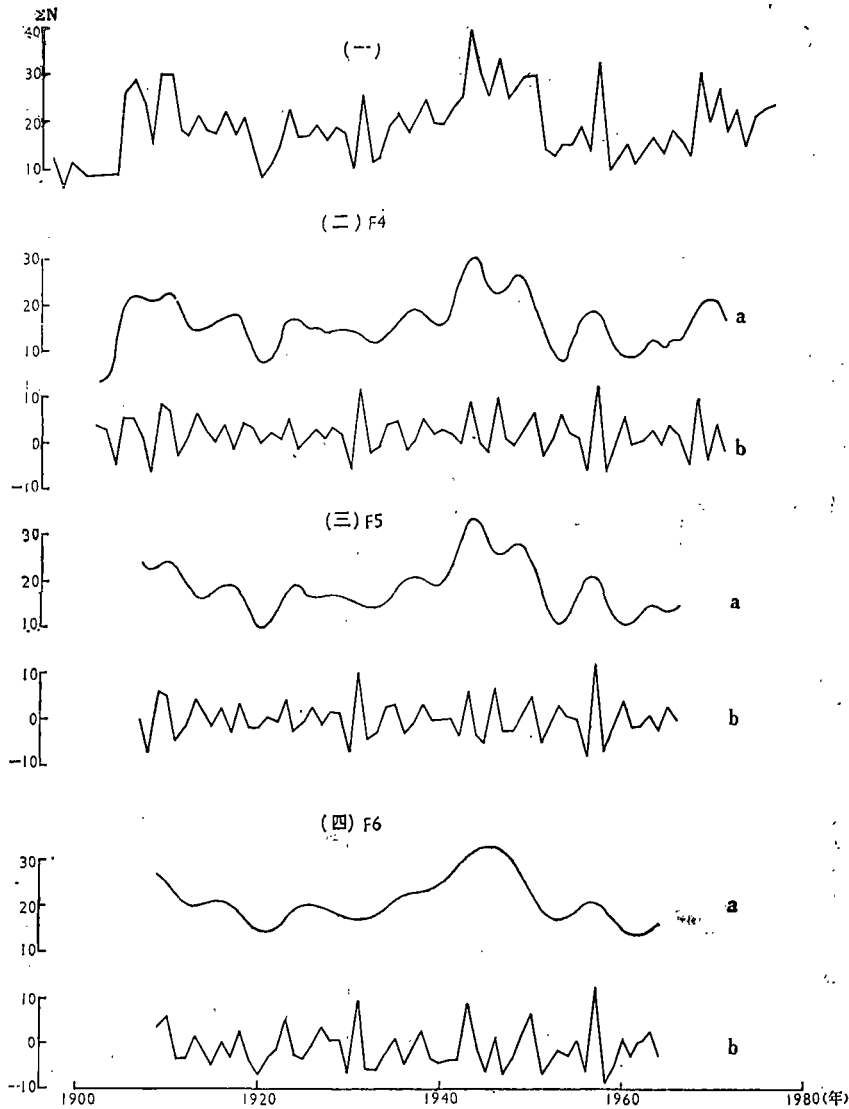


图 5

Fig. 5 The ΣN curve and its $a(t)$ and $b(t)$ curves after F4, F5, F6 filtering.

4) 1962年以来至今 ΣE 曲线是逐步上升, 推测80年代前五年仍会继续上升, 全球地震活动水平较1970年—1979年会有所升高。短周期起伏仍会存在。

参 考 文 献

- [1] 邹理和, 数字滤波器, 国防工业出版社, 1979.
- [2] 巴 特, 地球物理学中的谱分析, 1978.
- [3] 雅杜金, 地球自转速率变化的分析, 天文参考资料(上海天文台)第2期, 1979.
- [4] Bath, Metal, Some aspects of global seismicity, 1979.
- [5] Benioff, H, Global strain accumulation and release as revealed by

- great earthquakes, Bull. Geol. Soc. Amer. Vol. 64, 1951.
- [6] Gutenberg B. et al, 1954 Seismicity of the earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press 273pp.
- [7] Hedevarip. Investigations regarding the earth's seismicity Gerl Beitr Zur Geophysik, Bd. 72, Hf. 6 .P. 352, 1963.
- [8] Eedervarip. On the periodicity of earthquake activity of the earth as a whole Indian Geophys Union Jour. Vol. 4 n. 2 .P81—92, 1967.
- [9] Mecklellon J.H. et al. 1973 A unified approach to the design of optimum FIR linear phase digital filters IEEE Trans. on CT, Vol, CT—20, pp. 697—701
- [10] Robinson E.A. 1978 Multichannel time series analysis with digital Computer Programs. (rev. ed) Holden-Day 298pp
- [11] Wesson F.S. 1979 Cosmology and Geophysics.

STATISTICAL ANALYSIS OF GLOBAL SEISMICITY

Xu Daoyi

(Institute of Geography, the State Seismological Bureau)

Abstract

The statistical method of power spectral analysis has been used to analyze three indexes of (1897—1977) global seismicity: annual seismic energy release (ΣE), annual number of large earthquakes (ΣN) and annual mean of large earthquake magnitude (\bar{M}). Then, the finite impulse response (FIR) method is applied to construct the desired filter (F1, F2, F3, F4, F5, F6).

The power spectrum of ΣE and ΣN represents five peaks: 8, 6.7, 4.4, 3.6, and 2.9 years (Fig. 1), their cross-spectra and coherence coefficients are shown in Fig. 2. The variation of ΣE after filtering may approximately be the inverse proportion to the long-term changes of sun-spot activities. The power spectrum of 6.7, 3.6, and 2.9 years of ΣN and ΣE is very similar to those of earth rotation (6.9, 3.7, and 2.9 years). In brief, it is suggested that the general tendency of global seismicity during the 1897—1977 period may be closely related to sun-spot activities and the earth rotation.