

1904—1980年全球浅源地震能量 释放的隐含周期性探讨

林 长 佑

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文求取了1904—1980年全球浅源地震释放能量时间序列的付氏谱、布莱克曼—图基谱和最大熵谱。由不同的取样方式和功率谱的计算方法,确定其地震能量释放较为可信的隐含周期约为9.1年、14.4年、45.4年和128年,且这些主要周期成份之间存在整数因子3和5。用互功率谱法求取了这些主周期成份的初相,从而确定了这些周期成份取最大值的时间,并与地震能量释放时间序列进行了对比,推测下一个全球浅源地震能量释放高潮期约在1990—1994年左右。

一、资料和采样

为了分析全球浅源地震能量释放的隐含周期性,本文利用了K. Abe所校订的1904—1980年浅源大震震级表^[1],在这七十七年中共列有922次浅源大震。由于采用了较近代的时间段,对于对能量累计有较大贡献的大地震来说,遗漏或震级混淆的可能性较小,且具有比较统一的震级标度。

这里利用面波震级 M_s ,按下式估算单个地震的能量:

$$E = 10^{1.5M_s + 11.8} \text{ (尔格)} \quad (1)$$

为了加密采样间隔,以半年为采样点,求取每半年之内地震释放总能量,则全部资料构成一个共有154个采样点的能量—时间序列 X_i ($i = 1, 2, \dots, 154$)。然后采用巴特给出的三点平滑公式^[2]对该序列进行去假频滤波:

$$X_i = 0.23X_{i-1} + 0.54X_i + 0.23X_{i+1} \quad (2)$$

为寻求较为可靠的隐含周期成份,本文采用了建立在不同假定基础上的三种谱分析方法:付氏谱、布莱克曼—图基谱和最大熵谱,所分析的资料段也进行了不同方式的截取。在

$\frac{1}{3} - \frac{1}{3000}$ (年⁻¹) 的频带范围内计算了300个谱线,求出60个功率谱的频带平均值。

二、地震释放能量功率谱的估算方法

这里所使用的第一种谱分析方法是常规的付氏谱法,其结果用NFS表示。该方法是建立在这样假定的基础上的,即采样段以外的资料做周期性重复。

布莱克曼—图基谱法则是建立在假定采样段以外的信号为零的基础上的。其自功率谱计算步骤如下^[8]: (1) 将该时间系列化为零平均序列; (2) 选择适当的滞后阶 m ; (3) 对序列 X_t 计算 $m+1$ 个自相关函数值 $R_{xx}(r=0, 1, \dots, m)$; (4) 选择适当的落后窗,对自相关函数加窗,本文选用了汉宁窗口

$$U_{m,r} = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi r}{m} \right) \quad (3)$$

(5) 使用梯形积分公式计算频率 f 附近的功率谱密度 $S_{BT}(f)$

$$S_{BT}(f) = 2 \Delta t (R_{xx} + 2 \sum_{r=1}^{m-1} R_{xx,r} \cos 2\pi f r \Delta t + R_{xx,m} \cos 2\pi f m \Delta t) \quad (4)$$

其中 Δt 为采样间隔。这一谱分析方法的结果用BTS表示。

近年来,最大熵谱分析法在地球物理学研究中得到了日益广泛的应用。与前两种谱分析法的重要差别是它并不要求资料扩展的假定。方法明确地对资料的扩展不加承诺,而能够在两个时间方向上去预期它们。它只承认采样段内的已知资料所导出的自相关函数,而使由此外推的自相关信号序列具有最大的熵。这样,在外推自相关函数时就可以最大限度地不涉及采样段以外的未加测量的信号。本文采用了由安德森(N. Anderson)所给出的求取最大熵自功率谱滤波系数的方法^[4]。在选择适当的滞后阶 m 后,用递推的方法计算出 $0-m$ 个自相关函数,从而计算出预期误差滤波系数 a_{mn} ($n=1, 2, \dots, m$)及输出功率 P_n ($n=0, 1, 2, \dots, m$)。则频率 f 附近的最大熵谱 $S_{ME}(f)$ 可按下式计算:

$$S_{ME}(f) = \frac{P_m \Delta t}{\left| 1 - \sum_{n=1}^m a_{mn} e^{-2\pi j f n \Delta t} \right|^2} \quad (5)$$

其中 Δt 为采样间隔, j 为单位虚数。最大熵谱的结果用MES表示。

三、1904—1980年全球浅源地震能量释放 隐含周期成份的分析

图1给出了由全部七十七年资料段得到的地震释放能量的付氏谱(NFS)、布莱克曼—图基谱(BTS)和最大熵谱(MES)。图中谱名后的三个数字分别表示:采样总数、滞后阶和采样段起始点位置。谱密度的模值 $|S(f)|$ 作为估算频带的中心周期 $T\left(\frac{1}{f}\right)$ 的函数被表示在双对数坐标之中。由于未进行归一化,谱值 $S(T)$ 仅具有相对意义(下同)。由图可见,这三条谱线有六个共同的极大值点出现,在MES曲线上表现出为六个明显的峰值。它们相应的周期是4.5年、6.4年、9.1年、14.4年、45.4年和128年。

为了进一步检验上述隐含周期成份存在的可靠性,从中筛选出起主要作用的成份,对各种

谱分析方法、不同滞后阶及不同采样段进行了比较广泛的试验。图2给出的是不同阶MES的例子。为缩小图幅纵坐标, 使用 $S(T)$ 的平方根。可以看出, 它们的峰值是重叠的。某些较低滞后阶的曲线没有显示出较长周期成份, 这是由方法本身的分辨率所决定的。MES比BTS有明显高的分辨率, 当滞后阶降低至120阶以下时, BTS对尾部长周期的两个峰值就无法分辨了。而NFS在中周期段则出现了过多的峰值, 却未特别突出主要峰值(图1)。

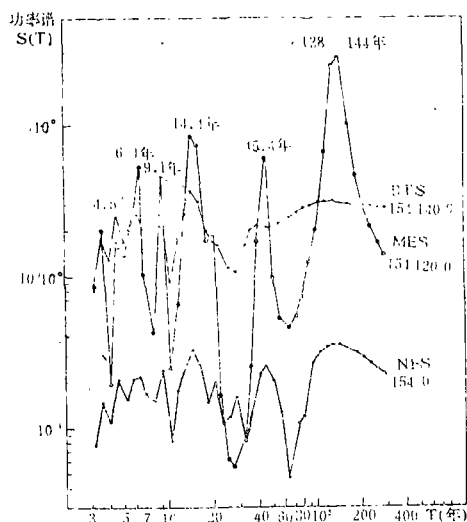


图1 1904—1980年全球浅源地震释放能量的付氏谱(NFS)、布莱克曼—图基谱(BTS)和最大熵谱(MES)曲线
Fig.1 The normal Fourier power spectrum (NFS), Blackman-Tukey power spectrum (BTS) and maximum entropy power spectrum (MES) of the energy of global shallow earthquakes from 1904 to 1980

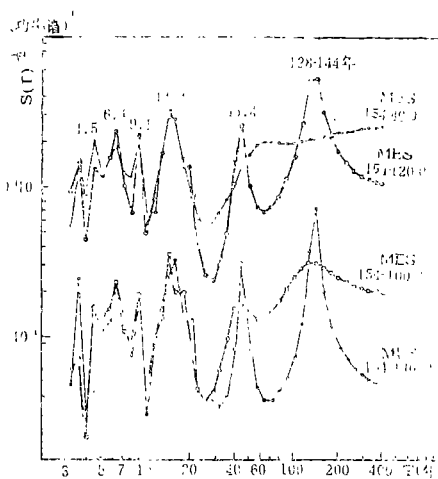


图2 不同滞后阶的最大熵谱曲线

Fig. 2 The ME-spectrum curves for various lag order

表1给出的是, 对于采样段的不同截取方式, 由三种谱分析方法得到的谱峰值的中心周期的几个例子(峰值的条件是其两侧有两个以上明显低点存在)。其中“采样—计算方式”一栏中的三个数字的含义同上, 例如, 54—50—50表示计算利用了1929—1956年这二十七年的资料, BTS和MES的滞后阶是50。峰值为中心周期邻点时也标出了其数字。从表中可以看出, 各种方式计算的谱的最明显的峰值是14.4年和9.1年。由于方法本身的限制, 短采样段的结果对较长周期成份45.4年和128年是不可能清楚显示的, 于是暂时亦对它们持某种保留态度。

表 1

采样—计算方式	谱分析法	峰 值 周 期 (年)					
154—140—0	NFS	4.5	6.4	9.1	14.4	45.4	128
	BTS	4.5	6.4	9.1	14.4	40.5	128
	MES	4.5	6.4	9.1	16.1	45.4	144
140—130—14	NFS	4.5	6.4	10.2	14.4	40.5	—
	BTS	4.5	6.4	10.2	14.4	—	—
	MES	4.5	6.4	—	12.8	45.4	114
104—100—0	NFS	4.5	6.4	9.1	14.4	—	—
	BTS	4.5	6.4	9.1	14.4	—	—
	MES	—	6.4	9.1	14.4	—	—
104—100—25	NFS	4.5	6.4	10.2	14.4	—	—
	BTS	4.5	6.4	9.1	14.4	—	—
	MES	5.1	—	9.1	14.4	—	—
104—100—50	NFS	4.5	6.4	9.1	16.1	—	—
	BTS	4.5	6.4	9.1	16.1	—	—
	MES	—	6.4	—	16.1	—	—
77—74—0	NFS	—	6.4	9.1	14.4	—	—
	BTS	—	5.7	9.1	14.4	—	—
	MES	—	5.7	9.1	14.4	—	—
77—74—77	NFS	4.5	—	8.1	—	—	—
	BTS	4.5	—	8.1	—	—	—
	MES	—	—	8.1	14.4	—	—
54—50—50	NFS	4.5	6.4	9.1	14.4	40.5	—
	BTS	4.5	6.4	9.1	16.1	—	—
	MES	—	6.4	9.1	14.4	—	—

四、各主要周期成份初相的确定

为了确定各主周期成份的初相, 首先构制了一个包含有这几个主要周期成份、且都具有零初相的序列 y_i :

$$\begin{aligned}
 y_i = A \Big(& \cos \frac{\pi i}{4.5} + \cos \frac{\pi i}{6.4} + \cos \frac{\pi i}{9.1} + \cos \frac{\pi i}{14.4} \\
 & + \cos \frac{\pi i}{45.4} + \cos \frac{\pi i}{128} \Big) \quad (6) \\
 i = & 1, 2, 3, \dots, 154
 \end{aligned}$$

其中A为一个振幅常数,使 y_i 序列与 x_i 有大体相当的幅度。若能以求取序列 x_i 与 y_i 的互功率谱,则由互功率谱的相位谱可以推算出 x_i 内各主要周期成份的初相。

求取序列 x_i 和 y_i 的布莱克曼—图基互功率谱的计算步骤类似于自功率谱的计算^[8]。只是需要计算 $2 \times (m+1)$ 个互相关函数 R_{xyi} 、 $R_{yx i}$, $i=0, 1, 2, \dots, m$ 。其频率 f 附近互功率谱的实部和虚部,即协谱 $C_{xy}(f)$ 和垂谱 $Q_{xy}(f)$ 可以由下式计算:

$$C_{xy}(f) = \Delta t (a_0 + 2 \sum_{i=1}^{m+1} a_i \cos 2\pi f i \Delta t + a_m \cos 2\pi f m \Delta t)$$

$$Q_{xy}(f) = \Delta t (b_0 + \sum_{i=1}^{m+1} b_i \sin 2\pi f i \Delta t + b_m \sin 2\pi f m \Delta t) \quad (7)$$

其中 $a_i = R_{xyi} + R_{yx i}$ $i=0, 1, 2, \dots, m$
 $b_i = R_{xyi} - R_{yx i}$

Δt 为采样间隔。则可计算出其振幅谱 $S_{xy}(f)$ 和相位谱 $PH(f)$

$$S_{xy}(f) = \sqrt{C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)}$$

$$PH(f) = -\text{ARCTAN}(Q_{xy}(f)/C_{xy}(f)) \quad (8)$$

所求出的互功率振幅谱的峰值位置与(6)式中给出的几个振子的周期完全相同(图3)。

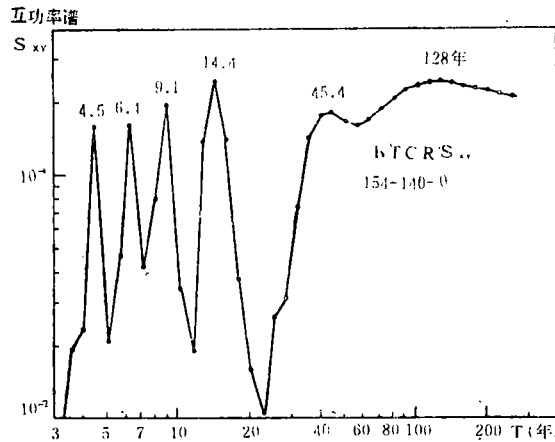


图3 序列 x_i 和 y_i 的布莱克曼—图基互功率谱曲线

Fig. 3 The BT-cross power spectrum curve of x_i and y_i

表2给出对不同滞后阶对应于各峰值互功率谱的相位。表中“采样—计算方式”一栏中的数字的意义同前,只是最后一个数字表示 x_i 序列被选择的起始位置。本文内所有的计算中, y_i 选择的起点都是从头开始,因此,表2中两序列采样段起始点相同。由于 y_i 序列中的所有谐振子都是零相移的,且极大值都在零点(见(6)式),则其中所列的相位谱值也就是 x_i 内各主要周期成份的初相,代表了该周期成份贡献取极大值位置相应于零点的超前或滞后。在这里,初相取正号表示超前,取负号表示滞后。从该表中可以清楚地看出,9.1年和14.4年两主要周期成份具有比较稳定的初相,而4.5年和6.4年的初相则不够稳定。较长周期的45.4年和128年其初相在长采样段似乎是稳定的,在采样段长度减少时其初相就成为不稳定了,这可以部分地归因于方法的分辨,表中的平均值由长采样段结果获取。

为了进一步验证这里所获得各主要周期成份初相的可靠性,对 x_i 序列的起始点做各种不同选择,求取其与系列 y_i 的互功率谱。其振幅谱峰值的位置未变。所得到的谱的相位很容

表 2

采样—计算方式 各峰值周期(年)	各峰值互功率谱的相位(弧度)					
	4.5	6.4	9.1	14.4	45.4	128
154—150—0	-0.1228	0.1286	-1.1104	-0.8022	0.1742	0.0415
154—140—0	-0.0662	0.1073	-1.0681	-0.9818	0.1828	0.0418
154—130—0	-0.1025	0.7157	-1.0624	-0.7770	0.1871	0.0373
154—120—0	-0.5437	0.7010	-1.0625	-0.7273	0.1898	0.0313
154—115—0	-0.4860	0.6957	-0.9304	-0.7043	0.1897	0.0282
154—50—0	-0.2363	0.7696	-0.8489	-1.0306	0.1607	0.0378
150—146—0	-0.0888	0.0875	-1.0350	-0.8682	0.2722	0.1123
146—142—0	-0.0748	0.0761	-1.0523	-0.7686	0.3013	0.1024
142—138—0	-0.0333	0.0825	-1.0295	-0.6937	0.3850	0.1896
140—136—0	-0.0127	0.0908	-1.0711	-0.7429	0.4658	0.2605
138—134—0	0.0063	0.0948	-1.1272	-0.7761	0.5174	0.2875
120—118—0	-0.5494	0.1733	-0.8977	-0.8311	0.6886	-0.2163
平均值	-0.1925	0.3102	-1.0246	-0.8087	0.1807	0.0363

易折算到 x_1 序列从头取起的初相值。在这种情况下, 9.1年和14.4年两主要周期成份的初相仍然可以认为是稳定的(表3)。

由表2所列9.1年和14.4年的初相的平均值, -1.0246 和 -0.8087 , 不难算出这两个主要周期成份对能量释放的极大贡献点比零点滞后1.5年和1.9年。故该两个主要周期成份能量释放峰值期在1905—1906年期间, 而偏于1906年。按K. Abe所给出的震级表, 这两年内所释放的地震能量约为这七十七年内释放总能量的七分之一。

五、讨 论

1. 由1904—1980年全球浅源地震能量释放时间序列的分析可见, 较为可信的能量释放隐含周期约为9.1年、14.4年, 其次可能有45.4年和128年。上述数字都是频带平均值, 相应谱极大值更为精细的谱线位置是8.9年、14.7年、44.2年和134年, 它们之间存在下述近似算术关系式:

$$134 \approx 44.2 \times 3 \approx (14.7 \times 3) \times 3 \approx (8.9 \times 5) \times 3,$$

即似有整数因子3和5存在。如果还考虑到周期成份4.5年和6.4年, 不难看出, 这六个周期值间似还有整数因子2和7存在。排列起来它们恰好是质数序列的前几个数。这是偶然的巧合, 还是具有某种内在的实质性的意义, 尚待进一步研究。

2. 在图4的单对数坐标中, 给出了地震能量立方根时间序列和三点平滑能量时间序列, 同时在图上标出了极值点出现的年份。可以看到, 1906—1920—(1933—1938)—1950—(1960—1964)—1976似乎都有一个近似14年的周期。而1906—1923—1933—1942—1950—

表 3

采样—算计方式 各峰值周期(年)	互 谱 相 位 (弧度)	
	9.1	14.4
146—142—4	0.3180	0.0125
146—140—4	0.3210	0.0093
146—138—4	0.3236	0.0080
140—136—4	0.3490	0.0225
150—146—4	0.3328	0.0406
150—142—4	0.3429	0.0387
150—138—4	0.3512	0.0368
平 均 值	0.3341	0.0241
折 合 值	-1.0468	-0.8486
140—136—6	1.3639	0.5286
折 合 值	-0.7075	-0.7804
140—136—7	-1.3728	0.7423
折 合 值	-0.6478	-0.7849
146—142—8	-0.8664	1.0542
146—140—8	-0.8342	1.0490
146—138—8	-0.9403	1.0438
平 均 值	-0.8803	1.0490
折 合 值	-0.7399	-0.6963
100—136—14	1.1653	-1.0490
折 合 值	-0.5263	-0.9617
120—118—17	-1.1414	-0.2491
折 合 值	-0.7271	-0.8163
120—118—34	0.2441	0.2194
折 合 值	-1.0727	-0.9151

1960—1976也都包含了约一个或两个9年的周期。这样,如果今后一个短时期内全球地震能量释放的图象没有带根本性的改变,则可推测下一个全球浅源地震能量释放的高潮期大约在1990—1994年。值得注意的是,在1906、1920、1950这些全球地震活动高峰年份附近,中国大陆内也都有8级以上大震发生,在其它几个高峰年份附近也都有一定的大震活动。

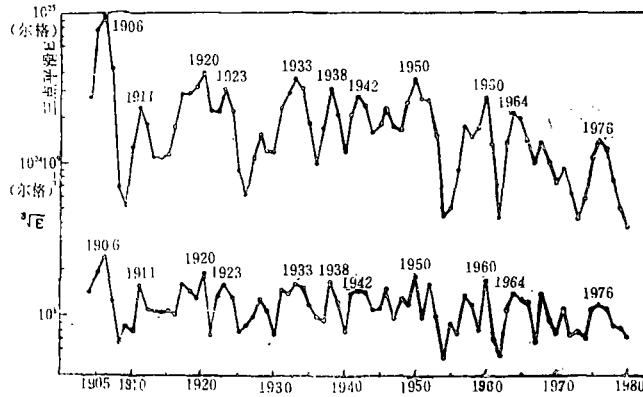


图4 1904—1980年地震能量的立方根和三点平滑值的时间序列

Fig. 4 The time-series for cube root and 3—points smoothed values of the earthquake's energy from 1904 to 1980

参 考 文 献

- [1] K. Abe, Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980, Phys. Earth Planet. Inter., Vol.27, No.1, 1981.
- [2] M. 巴特, 地球物理学中的谱分析, 郑治真、叶正仁、安镇文、谷继成译, 地震出版社, 1978.
- [3] R. K. 奥特内斯、L. 伊诺克森, 数字时间序列分析, 王子仁、马忠安译, 国防工业出版社, 1982.
- [4] Nils O. Anderson, On the calculation of filter coefficients for maximum entropy spectral analysis, Geophys., Vol.39, No.1, 1974.

THE PRELIMINARY DISCUSSION ON THE LATENT PERIODICITY
OF THE ENERGY'S RELEASE FOR THE GLOBAL
SHALLOW EARTHQUAKES FROM 1904 TO 1980

Lin Changyou

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau*)

Abstract

This paper calculates the normal Fourier power spectrum (NFS), Blackman-Turkey power spectrum (BTS) and maximum entropy power spectrum (MES) of the time series of the energy's release for the global shallow earthquakes from 1904 to 1980. By use of the various modes of sampling and methods of the estimation of the power spectrum, it is obtained that the more confident latent periods of the energy's release of earthquakes were 9.1, 14.4, 45.4 and 128 years, and there are the integer ratio's factors, 3 and 5, between these primary periodic components. By means of the cross-power spectrum's method. We obtain, as well, the initial phases of these primary periodic components, hence, estimate the time of their maximum values, compare them with the time series of the energy's release for earthquakes, and guess that the next high level's period of the energy's release for the global shallow earthquakes will be about 1990—1994 years.