

# 地震波谱与大地震前后中强地震波谱变化\*

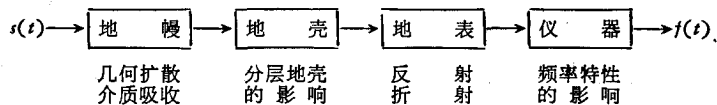
齐 国 英<sup>1)</sup> 郭 亚 平<sup>2)</sup>

本文介绍地震波谱,震源参数的概念及地震波谱与震源参数的关系,讨论了如果在某地区发生了  $M_s \geq 4.5$  级地震的条件下,是否能够通过频谱分析,根据震源参数的变化来预报其后有无  $M_s > 6.0$  级的大地震;如果在某地区发生了 6.0 级的大地震,是否能够根据震源参数的变化来预报还有无  $M_s > 6.0$  级的大地震。

## 一、地震波谱与震源参数

### 1. 地震波谱

设震源处的地震波为  $s(t)$ , 经过地幔, 地壳后, 在地表的仪器上记录到的地震波为  $f(t)$ , 即地震波在传播过程中受到如下影响:



因此,要得到震源处的地震波  $s(t)$ , 必须从  $f(t)$  中扣除仪器、地表、地壳、地幔中的影响。  $s(t)$  和  $f(t)$  都是时间的函数,通过傅里叶变换,将  $s(t)$  和  $f(t)$  换成频率的函数,即

$$s(t) \xrightarrow{\text{傅氏变换}} Q(\omega), \quad f(t) \xrightarrow{\text{傅氏变换}} F(\omega).$$

我们称  $Q(\omega)$  为震源处的地震波谱,称  $F(\omega)$  为记录的地震波谱。

一般求震源处的地震波谱的步骤是,先把地震记录  $f(t)$  进行傅里叶变换,即

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt,$$

其中  $\omega$  为圆频率,  $t$  为时间。于是得到记录的地震波谱,再从  $F(\omega)$  中扣除仪器、地表、地壳和地幔的影响,即得到震源处的地震波谱  $Q(\omega)$ 。

### 2. 震源参数

一般所说的震源机制解是指如下的结果,根据初动符号的分布划出两个节面,进而决定断层面及其走向、倾角和倾向,错动力的方向和倾角以及断层性质等。

近十多年来,根据地震波谱的研究,人们又提出一些新的震源参数量,主要有如下一些:

$$M_0 = \mu \bar{u} S \text{——地震矩,}$$

其中  $\mu$  是剪切模量,  $\bar{u}$  是断面上的平均错距,  $S$  是断层面积;

\* 1975 年 10 月 14 日收到。

1), 2) 作者系中国科学技术大学 1972 级工农兵学员。

- $\Delta\sigma = \sigma_{前} - \sigma_{后}$ ——应力降 ( $\sigma_{前}$  和  $\sigma_{后}$  分别为地震前、后的应力);
- $r$ ——等效圆位错半径, 即把断层面等效为一个圆, 其半径为  $r$ ;
- $\bar{\sigma}$ ——视应力(初始应力与最后应力的平均);
- $v_r$ ——破裂速度(断层面上破裂传播的速度).

3. 地震波谱与震源参数的关系

我们主要介绍两种震源模式的结果.

**位错模式** Brune 把断层面等效为一个半径为  $r$  的圆, 借助帕塞沃尔定理计算了纯剪切错动的波谱, 根据能量守恒定律得到理论地震波谱  $Q(\omega)$  的形状如图 1.

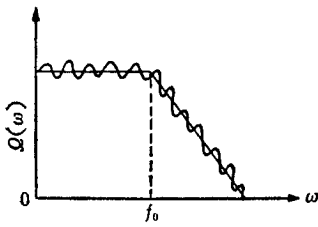


图 1

$Q(\omega)$  在低频处近似为常数, 记为  $Q(0)$ , 在高频处以  $\omega^{-2}$  衰减, 因此可表示为

$$Q(\omega) = Q(0)F(x), \quad x = \frac{\omega}{2\pi f_0},$$

$x$  为无量纲量,  $F(x)$  是一个在低频处  $F(0) = 1$ , 高频处近似为  $F \sim x^{-2}$  的函数. 低频和高频渐近线的交点处频率  $f_0$  称为拐角频率.

$f_0, Q(0)$  与震源参数有如下关系:

$$M_0 = \frac{Q_p(0)}{\mathcal{R}_p(\theta, \varphi)} \cdot 4\pi\rho R v_p^3 = \frac{Q_s(0)}{\mathcal{R}_s(\theta, \varphi)} \cdot 4\pi\rho R v_s^3,$$

其中  $R$  是震源距,  $\rho$  是密度,  $v_p$  和  $v_s$  是震源处  $p$  波和  $s$  波速度,  $Q(0)$  是  $p$  波或  $s$  波确定的零频处  $Q(\omega)$  值,  $\mathcal{R}(\theta, \varphi)$  是辐射花样 ( $\theta, \varphi$  是震源坐标系中的极坐标):

$$\mathcal{R}_p(\theta, \varphi) = \sin 2\theta \sin \varphi,$$

$$\mathcal{R}_s(\theta, \varphi) = (0, \cos 2\theta \sin \varphi, \cos \theta \cos \varphi).$$

还有

$$r = \frac{2.34 v_p}{2\pi f_0(p)} = \frac{2.34 v_s}{2\pi f_0(s)},$$

$f_0$  是由  $p$  波或  $s$  波波谱确定的拐角频率.

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^3}, \quad S = \pi r^2.$$

**有限移动源模式** Ben-Menahem 采用有限移动源模式<sup>[7]</sup>, 给出用体波或面波波谱确定断层面, 断层长度和破裂速度的结果.

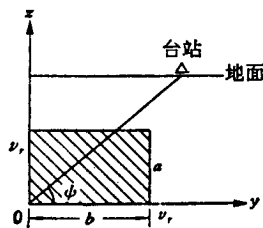


图 2

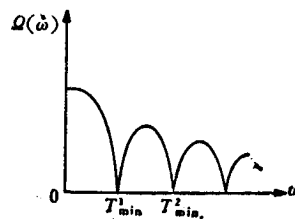


图 3

图 2 表示有限移动源情况,由 0 点开始破裂,沿  $y$  轴破裂速度为  $v_r$ ,沿  $z$  轴破裂速度为  $v'_r$ ,最后形成长度为  $b$ ,宽为  $a$  的断层面,理论结果指出体波波谱形状如图 3 所示, $T_{\min}$  是波谱中的一系列极小值.对体波来说有下述关系式:

$$T_{\min} = \frac{b}{v_r} \pm \frac{b}{c} \cos \phi,$$

$\phi$  为射线与  $y$  轴的夹角,它可以根据  $\theta$ ,  $\varphi$  和观测台的位置求出来. $c$  为  $p$  或  $s$  波波速.

这个方程是一个  $T_{\min}$  与  $\cos \phi$  的直线方程,根据多台的  $T_{\min}$  和  $\cos \phi$  值点图,求出直线的截距和斜率,进而求出断层长度  $b$  和破裂速度  $v_r$ .

另外 Ben-Menahem 等给出面波和体波的方向性函数,借以确定震源参数,这里不赘述.

下面我们根据地震波谱和震源参数的变化,提出估计发生大地震趋势的一种方法.

## 二、平均断错 $F$ 的引入

### 1. 基本想法

一个地震的震源体积为  $V$ ,应力降为  $\Delta\sigma$ ,那么这个地震的大小基本上就决定于  $V$  和  $\Delta\sigma$ . 现假设有  $M_i$  相等的两个地震,一个地震的应力降大于另一个地震的应力降,  $\Delta\sigma_1 > \Delta\sigma_2$ ,则要保持  $M_i$  相等,就必须  $V_1 < V_2$ .

又知源线度的大小对辐射的地震波波谱有很大影响.线度小,地震波谱频率较高;线度大,地震波谱频率较低.

在  $M_i \geq 6.0$  级大地震之前,介质中的应力背景很高,因而前震的应力降较大,产生同样强度地震的震源体积  $V$  较小,其波谱的频率较高,从而为利用前震波谱变化探讨大地震趋势提供了可能性.

另外,大地震的应力降大,小地震的应力降小,因此利用波谱探讨地震趋势时,必须同时考虑波谱和震级.

### 2. $F$ 值的引入

根据新疆选频地震仪结果及前人的工作<sup>[1,2]</sup>,我们提出下述公式:

$$F = M_i - \log S, \quad (1)$$

$F$  称为平均断错,  $M_i$  为面波震级,  $S$  为根据地震波波谱确定的断层面面积. 根据 Aki 的结果有<sup>[3]</sup>

$$M_0 = \mu \bar{u} S, \quad (2)$$

$M_0$  是地震矩,  $\mu$  是剪切模量,  $\bar{u}$  是断层面上的平均位错. (2) 式取对数后代入 (1) 式,得

$$F = M_i - \log M_0 + \log \mu + \log \bar{u}. \quad (3)$$

又根据 Aki 结果<sup>[4]</sup>, 在  $M_i = 4.0-5.0$  范围内近似有

$$\log M_0 = a + dM_i,$$

$a, d$  为常数,  $d \approx 0.944$ , 所以

$$F = 0.056M_i - a + \log \mu + \log \bar{u}. \quad (4)$$

由 (4) 式看出, 在  $M_i$  变化不大的情况下 ( $M_i = 4-5$ ), 第一项变化很小, 第二项  $a$  对一

个地区说是一个常数,第三项变化也很小,因而  $F$  的变化主要决定于第四项。

下面讨论在邢台大地震发生前后  $F$  值变化情况。

### 三、邢台大地震前后 $F$ 值变化情况

#### 1. $F$ 值的计算

我们采用基式仪记录,取  $4.5 \leq M_s < 6.0$  地震。为了求出(1)式的  $F$  值,  $M_s$  采用全国面波震级,  $S$  采用 Brune 公式<sup>[5]</sup>:

$$S = \pi r^2, \quad (5)$$

$$r_p = \frac{2.34v_p}{2\pi f_0(p)}, \quad r_s = \frac{2.34v_s}{2\pi f_0(s)}, \quad (6)$$

其中  $f_0$  是根据  $p$  波或  $s$  波波谱确定的拐角频率,  $r$  是根据波谱确定的圆位错半径。由公式  $F = M_s - \log S$ , 求出  $F$  值。

#### 2. 邢台大地震前后 $F$ 值变化

1966年3月8日和22日,邢台地区发生了  $M_s = 6.8$  和  $M_s = 7.0$  级大地震,在此之前,3月1日和6日发生过  $M_s = 4.6$  级和 5.5 级中强地震,大地震之后,发生了一系列 4—5 级余震,构成一个完整系列。

由于仪器放大倍数的限制,我们选用  $M_s \geq 5.0$  级地震,个别有  $M_s \geq 4.6$  级地震,4 月份四个地震任选两个,1966年5月—1974年6月全部选取。具体结果见下表:

时 间		$\lambda$ 邢 台	$\varphi$ 台	$M_s$	$r$				$F$
年-月-日	时-分-秒				$r_p$	$r_s$	$\bar{r}$	$r_R$	
1966-3	-1	15-24-54		4.6			1.4		3.81
3	-6	08-13-00	115°02'	37°28'	5.5	2.86	1.92	2.39	4.25
3	-8	05-29	114°55'	37°21'	6.8	13.8			4.02
3	-20	00-59	114°58'	37°16'	5.6			3.0	4.19
3	-22	16-11	115°05'	37°30'	6.7	10.2			4.19
3	-26	23-14	115°16'	37°41'	5.2			2.5	3.19
3	-2	02-14	115°16'	37°33'	5.8			4.1	4.08
3	-29	14-11	114°53'	37°28'	6.0			2.6	4.67
3	-31	13-55	115°17'	37°43'	5.0	2.7	2.6	2.7	3.65
4	-6	11-12	114°56'	37°18'	5.5	5.45	4.55	5.0	3.61
4	-20	22-31	114°47'	37°15'	5.25	5.6	4.2	4.9	3.37
7	-19	08-56	114°49'	37°17'	5.0	4.5	4.25	4.38	3.22
11	-4	10-31	114°52'	37°13'	4.9	4.5			3.09
1967-12	-3	04-05	115°13'	37°41'	5.7			6.7	3.55
1968-1	-16	03-33	115°13'	37°46'	5.3	3.35	3.91	3.63	3.68
5	-15	03-46	114°47'	37°11'	4.7			2.5	3.41
5	-15	08-27	114°49'	37°15'	4.7			3.4	3.14
1974-6	-6	20-31	115°09'	37°34'	5.0	3.51	2.87	3.19	3.50

图 4 给出了  $F$  值随时间变化情况,横轴为时间的对数  $\log t$  (日)。

邢台共发生五次  $M_s \geq 6.0$  级大地震:

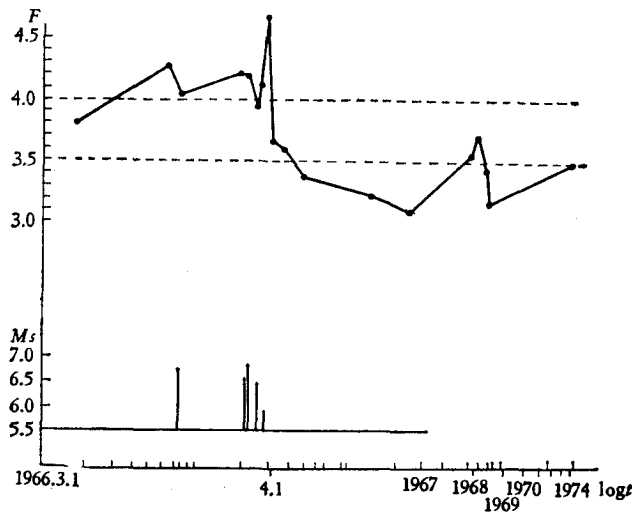


图 4

- 1966年3月8日  $M_s = 6.8$ ;  
 3月22日  $M_s = 6.8; 7.0$ ;  
 3月26日  $M_s = 6.5$ ;  
 3月29日  $M_s = 6.0$ .

由图4可看出,1966年3月8日大地震前, $F$ 值较高,在3.8—4.2之间;3月8日—29日六级大地震期间, $F$ 保持在4.0左右;四月份开始急剧下降,以后围绕3.5波动。

## 四、讨 论

### 1. $F$ 值变化特征

根据邢台大地震前后中强地震的 $F$ 值变化情况,提出如下看法:六级大地震前, $F$ 值较高;大地震期间保持较高数值,余震时 $F$ 值急剧下降;一般情况下围绕某一数值波动,这个数值因地区而有差异。

### 2. $F$ 值的物理意义

大地震前的应力背景很高,地震时应力降 $\Delta\sigma$ 很大。由 $M_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\bar{u}$ 之间的下述关系:

$$M_0 = \mu \bar{u} S, \quad \Delta\sigma = \frac{CM_0}{S^{3/2}},$$

可见对一定的 $M_s$ 地震, $M_0$ 不变,所以 $\Delta\sigma$ 增大, $S$ 必定减小,从而 $\bar{u}$ 增大。故 $F$ 基本上反映了震源区应力降 $\Delta\sigma$ 的变化,即一定程度上反映了介质的应力状态。

### 3. $F$ 与 $b$ 值的关系

大地震前 $F$ 值较高,基本上反映了应力降 $\Delta\sigma$ 较大。Wyss的结果指出<sup>[6]</sup>, $b$ 值(即 $\log N = a - bM$ 中的 $b$ )较低反映了应力降较大,因而在某种意义上讲, $F$ 与 $b$ 有一定关系。不同的是 $b$ 值受地震系列的划分和地震次数的影响,而 $F$ 是由单个大地震求得的。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] J. N. Brune, C. R. Allen, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 57(3) (1967).
- [ 2 ] N. V. Shebalin, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 6 (1972), 324.
- [ 3 ] K. Aki, *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, 44 (1966), 73.
- [ 4 ] K. Aki, *Tectonophysics*, 13 (1972), 423.
- [ 5 ] J. N. Brune, *J. G. R.*, 75 (1970), 4997.
- [ 6 ] M. Wyss, *The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31 (1973), 4.
- [ 7 ] A. Ben-Menahem *et al.*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 55(2) (1965), 203.

**SEISMIC SPECTRA, AND VARIATIONS IN THE SEISMIC SPECTRA  
OF MEDIUM-SCALE EARTHQUAKES BEFORE AND  
AFTER STRONG EARTHQUAKES**

QI GUO-YING      GUO YA-PING