

民乐盆地及其周围地区小震震源参数的研究

姚立珣 温增平 虞雪君 汪 进*

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文利用中国和法国合作建立的张掖数字化地震台网记录的小震资料,测定了民乐、肃南、张掖和临泽4个地区的小震震源参数。用P波测定的上述4个地区的应力降为6.1—9.5bar,用S波测定的应力降为26—60bar。在肃南5.7级地震发生前一个月左右,出现应力降减小的现象,这可能是一种前兆信息。本文还对用两种波测定的应力降的差异进行了初步讨论。

关键词: 民乐盆地 震源参数 地震前兆

一、引 言

民乐盆地位于河西走廊中部,其北缘分布有龙首山断裂带,南缘分布有祁连山断裂带。历史上该盆地周围发生过多次强烈地震,1980年以来该区周围先后发生了几次中强地震,最大的为1986年8月26日门源6.4级地震。近几年民乐盆地及其周围地区被划为地震重点监视区。研究该区的小震震源参数与地震活动的关系对该区地震的监测预报有一定的意义。

小震震源参数的变化定量地反映了震源区介质状态和应力水平的变化,它与地震活动有密切关系。但是,由于震源区介质和区域应力水平的非均匀分布,使问题变得很复杂。此外,在以往的研究中,大多使用模拟记录,存在着资料处理的精度问题,影响测量结果。若使用数字化台网资料,则会使精度提高,结果更为可靠。1988年中法合作建立了张掖数字化地震台网。该台网记录到多次小震。我们挑选了该台网记录良好的资料,测定了民乐、肃南、张掖和临泽4个地区的小震震源参数,研究了它们的变化特征,为民乐盆地地震的监测预报工作提供有用的资料。

二、资 料

张掖数字化台网包括11个台,其中有6个台使用法国L·4C型短周期地震仪,5个台使用中国BTY—8型短周期地震仪。张掖台使用的是三分向地震仪,其余台站使用的均

* 现在美国南加利福尼亚大学地质科学系学习

是单方向地震仪。法国地震仪为速度记录,中国地震仪为位移记录。仪器的频率特性曲线如图1所示。由图1可以看出,在1—40Hz范围内曲线是平坦的。张掖数字台网孔径约160km,可以较好地记录地方小地震。图2给出了该台网布局情况。

一般说来,对于每一个地震记录都可以求得一组震源参数,但由于在使用谱分析方法测量拐角频率和低频水平时误差较大,因此需要使用多个台站记录的多个地震资料才能取得较为可靠的结果。我们选用了1988年10月—1990年4月集中发生在民乐、肃南、张掖和临泽4个地区的30多次小地震($M_L=1.9-3.5$)的记录资料,测定了它们的震源参数。被选用的地震资料一般记录良好、干扰小、震相清晰可辨。图3给出了1988年10月1日肃南3.3级地震的记录图。

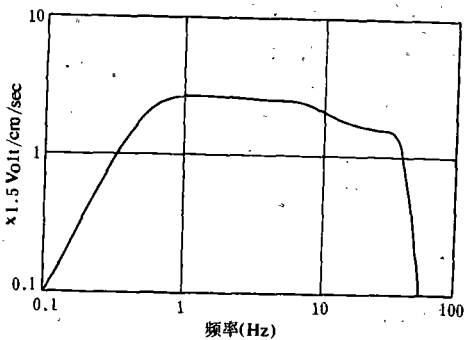


图1 地震仪频率响应曲线

Fig. 1 Frequency response of the digital seismograph.

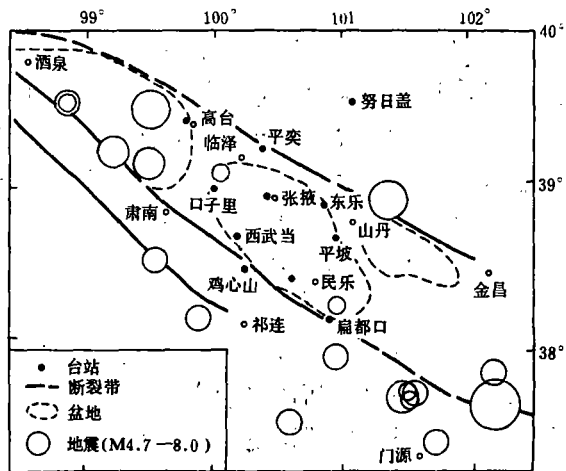


图2 张掖数字台网布局

Fig. 2 Overall arrangement of stations of the Zhangye digital network

进行谱分析时,采样长度为3.0—6.0秒,尽量使震相单纯,避免其它震相混入。每秒钟采样92个,奈奎斯特频率 $f_N=1/2\Delta t=46\text{Hz}$ 。按照采样定理,这样可以使频谱有较高的分辨率,又不丢失信息。所选用的地震记录一般噪声很小,可用矩形窗分析。对于个别噪声大的记录,使用带通滤波器进行了滤波。

三、方法简述

对于无限均匀弹性介质中的剪切位错源产生的远场位移,其震源谱可以表示为⁽¹⁾

$$|\Omega(\omega)| = \frac{\mu D_0 W L}{\sqrt{1 + \left(\frac{\cos\theta}{C} - \frac{1}{v}\right)^2 \left(\frac{\omega}{K_L}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{K_r}\right)^2}} \quad (1)$$

其中 μ 为剪切模量; D_0 为位错幅度; W 和 L 分别为断层宽度和长度; θ 为观测点与错动方

向（取极轴方向）之间的夹角； C 为地震波速度； v 为破裂速度； K_L 和 K_T 分别称为相关长度和相关时间，它们是统计学参数。当 $\omega \rightarrow 0$ 和 ω 足够大时，得到

$$|\Omega(\omega)| = \begin{cases} \mu D_0 W L & , \omega \rightarrow 0 ; \\ \frac{\mu D_0 W L K_L K_T}{(\frac{\cos \theta}{C} - \frac{1}{v}) \omega^2} & , \omega \text{ 足够大。} \end{cases} \quad (2)$$

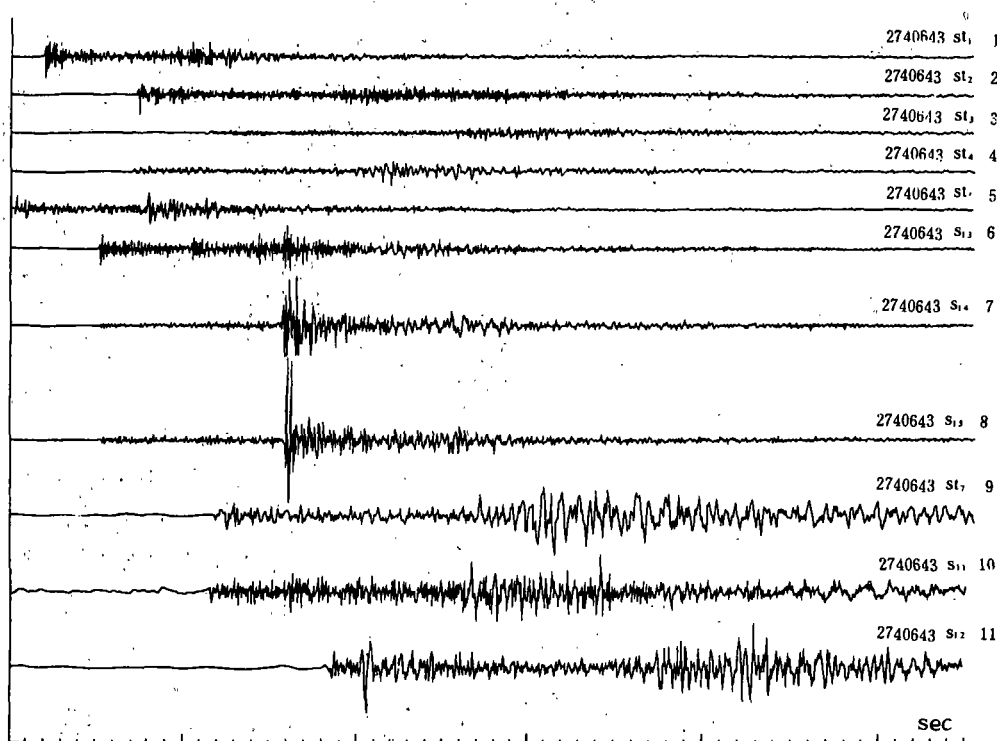


图3 1988年10月1日肃南3.1级地震记录图

1. 口子里 2. 平奕堡 3. 东乐 4. 民乐 5. 鸡心山 6. 张掖
7. 张掖 8. 张掖 9. 扁都口 10. 平坡 11. 努日盖

Fig. 3 Seismograms of the Su'nan earthquake ($M=3.1$) on October 1, 1988

由(2)式可以看到，震源谱的低频段近似为常数，高频段与 ω^{-2} 成比例，随 ω 增大而迅速衰减。这样在双对数坐标中，由震源谱的低频部分可以求得地震矩 M_0 ，由低频部分与高频部分的交点可以求得拐角频率 f_c 。

地震波在介质内传播过程中，由于传播介质的非弹性吸收，越接近高频部分吸收越强烈，使得波谱的高频部分迅速衰减。直接使用这种波谱求得的拐角频率比实际拐角频率要小一些。对于浅源小地震，这种影响十分显著^[2]。可以使用频谱比方法消除介质和场地影响，以得到真实的拐角频率和衰减趋势。

在观测点得到的地震波谱可以表示为

$$F(\omega) = \Omega(\omega)B(\omega)P(\omega)S(\omega)I(\omega) \quad (3)$$

其中 $B(\omega)$ 为介质衰减因子, $P(\omega)$ 为路径响应, $S(\omega)$ 为场地响应, $I(\omega)$ 为仪器响应。对于同一台地震仪记录到的同一地点的不同震级的两次地震, 其波谱比等于震源谱之比:

$$\frac{F_1(\omega)}{F_2(\omega)} = \frac{\Omega_1(\omega)}{\Omega_2(\omega)} \quad (4)$$

这里已消除了路径、场地、仪器响应以及介质吸收的影响, 因此在频谱比图上求得的拐角频率 f_{c1} 和 f_{c2} 就分别是两次地震的震源谱的真实拐角频率。图 4a 是由观测的波谱直接得到的拐角频率, 图 4b 给出了由两次地震的频谱比求得的拐角频率。对比两种结果可以看到, 对于同一次小震, 实际震源谱的拐角频率要比观测波谱的拐角频率大一些。

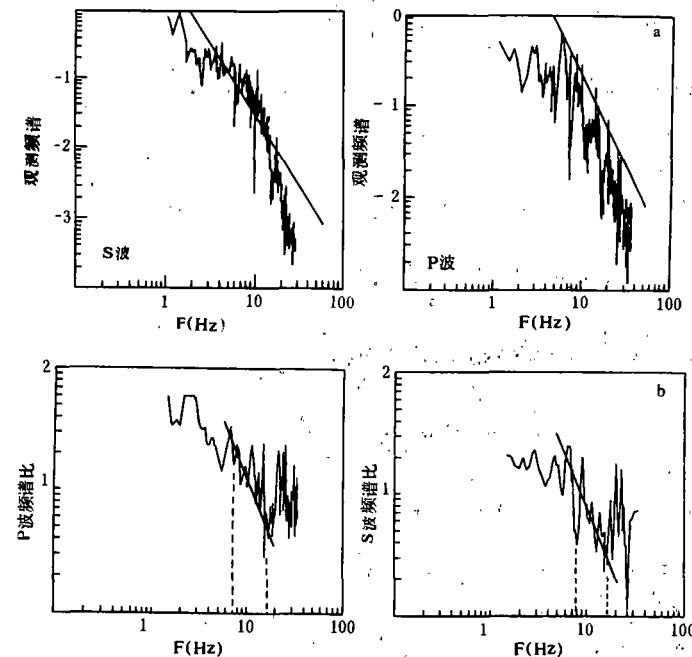


图 4 (a) 1989 年 4 月 7 日 2.2 级地震的 S 波观测频谱
(b) 1988 年 10 月 24 日 3.3 级地震与 1989 年 4 月 7 日 2.2 级地震的频谱比

Fig. 4 (a) Observed spectrum of small earthquake ($M=2.2$, Apr. 2, 1989)
(b) Ratio of frequency spectrum of a large earthquake ($M=3.3$) and a small earthquake ($M=2.2$)

对于每一次地震, 使用其波谱求低频水平时也要扣除仪器、路径以及介质衰减的影响。用衰减因子 $B(\omega) = \exp[-\omega x / 2QC]$, 给出一定的 Q 值, 对频谱进行修正, 使其高频衰减趋势符合 ω^{-2} 模型, 这样便得到震源谱。在确定了低频水平后便可以求有关的震源参数。

$$M_0 = \frac{4\pi\rho c x \Omega_0}{|R|} \quad (5)$$

$$\tau_0 = \frac{2.29C_s}{2\pi f_c} = \frac{2.34c_s}{2\pi f_c} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r_0^3} \quad (7)$$

$$\bar{u} = \frac{M_0}{\pi\mu r_0^2} \quad (8)$$

式中 ρ 为介质密度; C 为波速; x 为震源距; Ω_0 为震源谱零频值, 这里取低频均值; R 为地震波辐射图案因子, 取为震源球面上的平均值 ($R_s =$

$$\frac{2}{\sqrt{15}}, R_s = \sqrt{\frac{2}{15}}); \mu \text{ 为剪切模}$$

量, 取为 3.0×10^{11} 达因/厘米²; f_c 为拐角频率。图 5 给出了肃南 3.1 级地震的修正后的

频谱。

四、结果与讨论

本文测定了肃南地区 1988 年 10 月—1990 年 4 月发生的 12 次地震的震源参数。表 1 列出了用 P 波测定的结果，表 2 列出了用 S 波测定的结果。此外，用 18 个地震的资料测定了民乐、张掖和临泽 3 个地区的小震应力降。

1. 地震矩

表 1—2 中给出了肃南 12 次小地震的地震矩，它们与震级的关系符合公式⁽³⁾

$$\lg M_0 = 1.5M + 16 \quad (9)$$

(9) 式是综合国内外一些结果得到的。由 (9) 式计算的矩震级也列入了表 1—2 中。

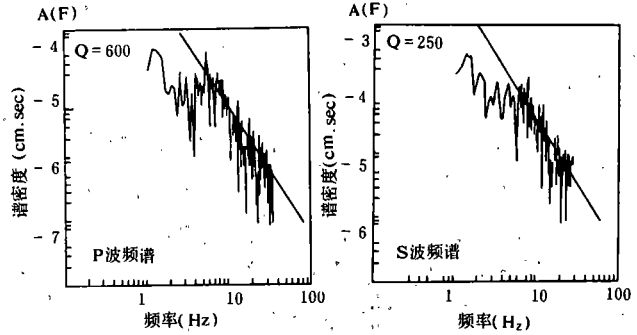


图 5 1988 年 10 月 1 日肃南 3.1 级地震的震源谱

Fig. 5 The corrected spectrum of the Sunan earthquake (M=3.1, October 1, 1988)

表 1 肃南小地震震源参数 (P 波测定)

时间	1988 年 10 月 1 日	1988 年 10 月 23 日	1988 年 11 月 17 日	1988 年 11 月 26 日	1988 年 12 月 4 日	1988 年 12 月 5 日	1989 年 3 月 25 日	1989 年 4 月 7 日	1989 年 5 月 28 日	1989 年 6 月 18 日	1989 年 10 月 9 日	1990 年 4 月 4 日	平均值
震级	3.1	2.9	3.0	3.3	3.1	3.3	3.2	2.2	3.0	2.7	2.4	3.1	
Mw	3.1	2.7	2.9	3.2	3.1	3.3	3.2	2.4	3.0	2.5	2.4	3.1	
M ₀ (×10 ²² dyn·cm)	4.95	0.94	2.07	7.44	4.54	7.52	5.68	0.63	3.80	0.54	0.46	4.92	
f _{cp} (Hz)	(7.7)	9.4	(8.0)	7.4	(7.7)	7.4	(7.6)	19	(8.0)	14	15	(7.7)	*
r ₀ (km)	0.31	0.26	0.30	0.33	0.31	0.33	0.32	0.13	0.30	0.19	0.16	0.31	
Δσ(bar)	6.37	3.0	4.4	8.3	9.6	8.1	13.1	7.8	5.8	3.4	4.9	8.7	6.9
u(cm)	0.52	0.14	0.14	0.67	0.73	0.70	0.85	0.31	0.44	0.15	0.19	0.69	

* 括号内的 f_{cp}是用震源谱测定的，其余是用频谱比测定的。

表 2 肃南小地震震源参数 (用 S 波测定)

时间	1988 年 10 月 1 日	1988 年 10 月 23 日	1988 年 11 月 17 日	1988 年 11 月 26 日	1988 年 12 月 4 日	1988 年 12 月 5 日	1989 年 3 月 25 日	1989 年 4 月 7 日	1989 年 5 月 28 日	1989 年 6 月 18 日	1989 年 10 月 9 日	1990 年 4 月 4 日	平均值
震级	3.1	2.9	3.0	3.3	3.1	3.3	3.2	2.2	3.0	2.7	2.4	3.1	
Mw	3.0	2.8	2.8	3.3	3.3	3.2	3.2	2.4	3.1	2.6	2.4	3.1	
M ₀ (×10 ²² dyn·cm)	3.80	1.43	1.38	7.54	8.26	7.47	6.92	0.42	4.87	0.74	0.40	9.22	
f _{cp} (Hz)	(7.6)	8.0	(7.8)	7.4	(7.6)	7.4	(7.5)	17	(7.8)	13	15	(7.6)	*
r ₀ (km)	0.18	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.08	0.17	0.10	0.09	0.18	
Δσ(bar)	30.6	13.2	11.9	55.6	66.3	55.1	52.7	37	41.9	29.6	26.0	72.8	41.0
u(cm)	1.3	0.54	0.49	2.4	2.8	2.4	2.3	0.70	1.7	0.74	0.64	3.2	

* 括号内的 f_{cp}是用震源谱测定的，其余是用频谱比测定的。

2. 应力降

研究表明，地震应力降是一个常数，其大小与震级无关，故可以通过监测小震应力降

随时间的变化来进行地震预报。

由P波测得张掖地区的小震应力降为6.1bar,肃南为6.9bar,临泽为9.5bar,民乐为6.9bar。由S波测得张掖地区的小震应力降为35.0bar,肃南为42.2bar,临泽为60.6bar,民乐为25.5bar。由上述结果看,P波测定的应力降都不高,属于低应力降。图6给出了肃南地区小震应力降随时间变化曲线。由该图可以看到,在1988年11月22日肃南5.7级地震之前,应力降明显变低,这也许是一种前兆信息。一些研究表明^[4,5],前震具有较大的应力降,余震具有较小的应力降,其变化量可达一个数量级。肃南5.7级地震之前是否也经历过应力降高值阶段还不清楚。但震前一个月应力降变低是肯定的。也有的研究指出^[6],仅在主震之前很短时间,小震应力降才会升高,而早期的应力降与正常情况没有区别。可见应力降的变化是十分复杂的问题,目前还无法给出明确的结论,需要进一步研究。

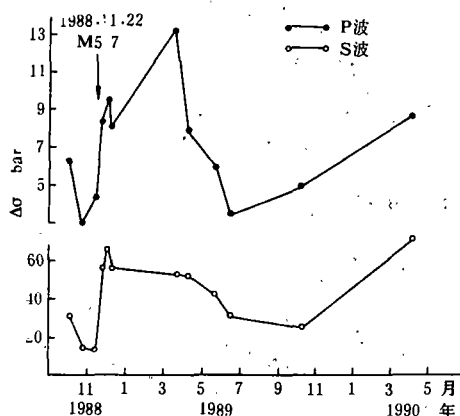


图6 肃南地区小震应力降随时间的变化

Fig. 6 The change of stress drop versus time

用P波和S波测定的地震矩、震级基本一致,但测定的震源等效半径、应力降则相差甚远。这主要是由于拐角频率的测定引起的。拐角频率的测定是一个复杂问题,用频谱估计其误差较大。此外,在理论上对拐角频率的确定也不一致。Savage用双侧破裂模型,得到S波拐角频率大于P波^[7]。佐藤和平泽用圆形裂纹模型给出P波拐角频率大于S波^[7]。Frankel得到小地震的P波和S波的拐角频率大体相同^[2]。我们用P波和S波分别测定的拐角频率大致相同(对小地震而言),但用(6)式、(7)式和(8)式计算的震源等效半径、应力降和平均位错则相差较大。

对于大地震,场地和浅层介质的吸收对拐角频率测定影响不大。对于小地震,由于地震波中含有丰富的高频成份,浅层介质和场地造成的地震波的衰减则不可忽略,因为这会使测定的观测波谱的拐角频率小于实际震源谱的拐角频率。使用频谱比方法测定拐角频率就可以避免这一问题。但是,计算频谱比要有较好的资料,计算时使用的两次地震震中要十分接近,震级差要大,两次地震的波形要相似,满足这些条件也是比较困难的。

上述这些问题不仅是实际问题,也是理论问题,还需要进一步研究。

(本文1992年1月24日收到)

参考文献

- [1] 徐果明、周蒞兰,地震学原理,科学出版社,345—349,1982.
- [2] Frankel, A. and L. Weunenberg, Microearthquake spectra from the Anza, California, Seismic Network: Site response and source scaling, BSSA, Vol. 79, No. 3, 581—609, 1989.

- [3] 陈培善、谷继成、李文香, 从断裂力学观点研究地震的破裂过程和地震预报, 地球物理学报, Vol. 20, No. 3, 185—201, 1977.
- [4] 付昌洪, 介质特征(Q值)的变化与地震预报, 地震预报方法实用化研究文集, 地震学专辑, 学术书刊出版社, 426—437, 1989.
- [5] 林邦慧、李志勇、魏富胜, 京津地区Q值及平均应力降的分布特征, 地球物理学报, Vol. 25, No. 4, 344—351, 1982.
- [6] Bakun, W. H., et al., P wave spectra for M_L of foreshocks, aftershocks and isolated earthquakes near Parkfield California, BSSA, Vol. 71, No. 2, 1981.
- [7] 安艺敬一、P. G. 理查兹, 定量地震学, 地震出版社, 第二卷, 284—286, 1986.

PARAMETERS OF SMALL EARTHQUAKES IN AND AROUND MINLE BASIN

Yao Lixun, Wen Zengping, Yu Xuejun, Wang Jin

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, 730000, China)

Abstract

The digital seismograph network set up by China and France in Zhangye had operated in 1988. There are eleven substations, which were situated in middle segment of Hexi corridor and Qilian Mountain. Using the small earthquakes recorded by Zhangye digital network the parameters of earthquake of Minle, Su'nan, Zhangye and Linze area were measured. The stress drops of these four areas are a range from 6.1 to 9.5 bar using P wave, and from 26 to 60 bar using S wave, which belong to lower drops. The change curve of stress drop versus time had showed lower value about in a month before Su'nan earthquake ($M_s=5.7$). This phenomenon may be a precursor information. In this paper the different results of stress drops measured using P wave and S wave were preliminarily discussed.

Key Words: Minle Basin, parameter of earthquake, precursor