

中强地震前中小地震速度谱的变化特征

刘红桂¹, 顾瑾平², 王琤琤¹, 南金生¹, 马建军¹

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 2. 中国地震局分析预报中心, 北京 100036)

摘要:从 Duda 和 Nortmann 提出的谱震级定义出发, 利用江苏地区遥测台网的 5 个台站记录到的 54 次地震的数字化垂直向位移波形记录, 采用 13 组 0.5 倍频程的滤波器, 计算了各次地震的 P 波及 S 波在不同中心周期处的平均速度谱值, 研究了地震的 P 波或 S 波速度谱的拐角周期及综合因子 f 值的时间变化特征. 结果显示: 中强地震发生之前 1 年或更短的时间内所发生的中小地震, 其速度谱综合因子 f 值随时间的变化具有由高值向低值的变化趋势, 地震发生在低 f 值阶段.

关键词:地震前兆; 异常特征; 拐角周期; 速度谱; 综合因子

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)03-0251-07

0 前言

Haskell(1964, 1966)和 Aki 等(1967, 1972)从理论上研究了震源辐射强度与地震波周期函数的关系, 目的在于研究震源过程的物理参数, 如断层长度和宽度、位错、破裂速度、上升时间、应力降、地震矩等与时间域或频率域中辐射信号之间的关系. 虽然震源辐射谱与模型有关, 但对于一个给定的模型, 辐射谱的形状是固定的. 为此, Duda 和 Nuttli(1974)提出单色震级概念, 对地震的谱特征进行了分类. Duda 和 Nortmann^[1]提出, 可以在一些特定的频带内对辐射地震波的能量进行采样, 用“红色地震”和“兰色地震”分别表示地震波长周期和短周期辐射的相对优势. 在此之前, 渡边晃^[2]提出“柔软地震”和“刚硬地震”的概念, 指出日本关东地区北部地震短周期波成份占优势(硬震), 东南部地震长周期波成份占优势(软震). 饭冢进(1970)指出, 日本松代震群序列的强震前小震卓越频率增大. Kanamori^[3]发现, 1952 年克恩郡 $M_s 7.1$ 地震前小震 P 波卓越频率增高. 此外, 也有人发现强震前地震波卓越频率降低的例子. 赵根模等^[4]通过对余震的频率特征的分析指出, 根据余震的高低频特征有可能对强余震做出预报. 本文利用江苏地区遥测台网记录的数字化垂直向位移资料, 对 54 次地震的速度谱拐角周期进行了研究, 旨在尝试用谱的拐角周期特征来预测中强地震的发生.

1 计算方法

1.1 谱震级

Duda 等人^[5~7]提出的谱震级的概念实际上就是用震级单位来量度的震源速度谱值, 是对

收稿日期: 1999-11-01

基金项目: 中国地震局“九五”攻关合同制项目资助课题(9504050205)

作者简介: 刘红桂(1966-), 男(汉族), 湖南双峰人, 助理研究员, 现主要从事地震预报方法及非金属超声波无损检测技术等方面的研究工作

震源辐射的给定波型能量谱密度的一种估计. 谱震级 $m(T)$ 的计算公式为:

$$m(T) = \lg A_v(T) + f(\Delta, h, T) \quad (1)$$

式中: $A_v(T)$ 是速度谱值; $f(\Delta, h, T)$ 是 Nortmann 和 Duda 给出的量规函数, 是基于一般可接受的地球 Q 值模式导出来的^[5,6]; Δ 为震中距; h 为震源深度; T 表示地震波的周期.

由公式(1)可知, 谱震级 $m(T)$ 是一组关于周期 T 的函数值, 其周期特征主要通过速度谱值表现出来. 通过计算谱震级 $m(T)$ 和速度谱 $A_v(T)$ 来研究谱的周期特征, 其效果应是一样的.

1.2 记录台站及地震资料

江苏地方台网使用 768 地震仪观测, 本文选用该台网中 5 个台站记录的 54 次地震的波形数据. 这 5 个台站均在同一时间建立, 相距不远, 且运行时间较长, 记录数据可靠. 表 1 给出了记录台站的参数. 台站位置见图 1. 表 2 给出了 1992 年以来江苏地区发生的中强地震的有关参数. 各台站记录的地震波为垂直向地动位移, 数据的采样时间间隔为 0.01 s. 54 次地震中有 11 次地震的 S 波记录限幅, 其余地震的波形都很完整, 且 P 波和 S 波震相清晰. 对于 P 波, 选取其起点至 S 波起点之间的所有数据; 对于 S 波, 选取其起点以后的 10.24 s 数据. 对于已限幅的记录, 其 P 波资料视实际情况选取, S 波则不予考虑.

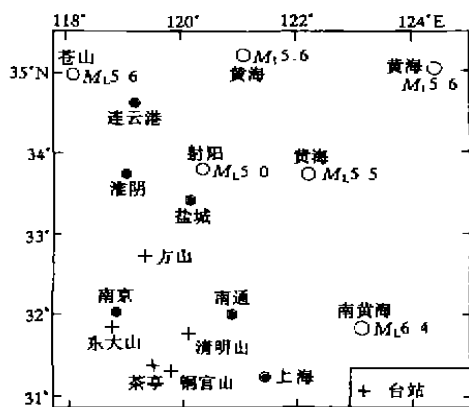


图 1 台站与中强地震震中分布示意图

Fig. 1 Sketch map of distribution of medium-strong earthquakes and stations.

表 1 记录台站参数

编号	台站	台站位置		海拔/m	台基岩性
		北纬	东经		
1	茶亭	31.38°	119.46°	13	砂岩
2	铜官山	31.31°	119.74°	528	砂岩
3	东大山	31.86°	118.77°	175	砂岩
4	清明山	31.77°	120.10°	35	紫砂岩
5	方山	32.72°	119.32°	307	玄武岩

表 2 1992 年以来江苏地区发生的中强地震参数

序号	地点	发震时间	震中位置		震级 (M_L)
			北纬	东经	
1	黄海	1992-01-23	35°12'	121°04'	5.6
2	射阳县	1992-10-22	33°47'	120°19'	5.0
3	黄海	1994-07-26	35°02'	124°23'	5.6
4	山东苍山	1995-09-20	34°58'	118°06'	5.6
5	南黄海	1996-11-09	31°50'	123°06'	6.4
6	黄海	1997-07-28	33°43'	122°10'	5.5

1.3 速度谱的计算

对于位移信号 $y(t)$, 其傅里叶变换 $F(\omega)$ 为

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

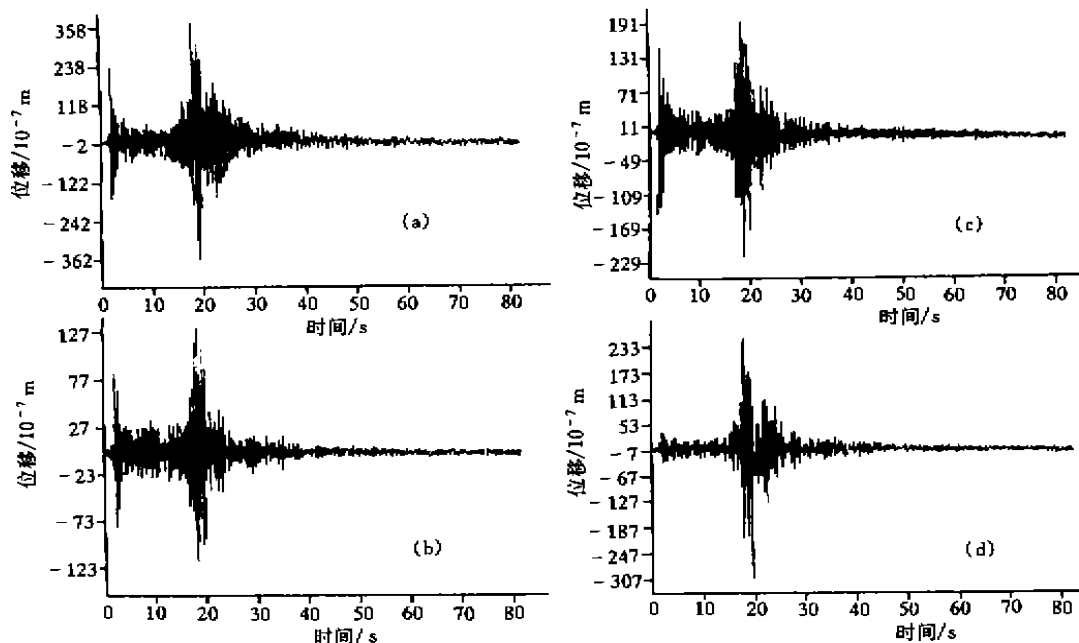
傅里叶反变换为

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

对于位移信号 $y(t)$, 其速度为 $v(t) = dy(t)/dt$, 根据傅里叶微分定理, 由位移信号 $y(t)$ 的傅里叶变换 $F(\omega)$ 可得到速度的傅里叶变换 $V(\omega)$, 即

$$V(\omega) = i\omega F(\omega) \quad (2)$$

对于选取的波型资料, 首先用 FFT 得到频域中的 $F(\omega)$, 在频域中对仪器的频率特性进行校正, 然后由式(2) 得到速度傅里叶变换 $V(\omega)$. 为了得到每个平均周期上的速度谱值, 采用了 13 组 0.5 倍频程的滤波器, 以每组内谱的平均值作为该组中心周期的谱值, 滤波器的中心周期分别为 1.2 s、1.0 s、0.67 s、0.4 s、0.25 s、0.147 s、0.119 s、0.1 s、0.078 s、0.065 s、0.054 s、0.047 s 和 0.041 s. 图 2 为 1997 年 3 月 29 日 $M_L 2.9$ 地震铜官山台站的原始记录图及滤波后的几组分频波形图(由于篇幅所限, 未能全部列出). 为了表达方便, 对 13 组谱值做了归一化处理, 并在此基础上乘以一个系数(M_L 震级值). 因不对每个地震的谱值大小做对比研究, 故这样的数学处理对后面的结果并没有影响. 作为一个例子, 图 3 给出了经过上述数学处理后几次地震的 P 波及 S 波速度谱曲线.



(a) 原始波形; (b) 中心周期为 0.054 s 的分频波形;

(c) 中心周期为 0.1 s 的分频波形; (d) 中心周期为 0.4 s 的分频波形

图 2 铜官山台站记录的 1997 年 3 月 29 日 21 时 $M_L 2.9$

地震的原始波形及几组分频波形

Fig. 2 Original wave and a few single-frequency waves of the $M_L 2.9$ earthquake on March 29, 1997 recorded by Tongguanshan station.

2 计算结果与讨论

2.1 计算结果

对于每一次地震的某一种波型来说, 其速度谱都存在一个最大值, 此值所对应的周期被称

作拐角周期,用 T_c 表示.在对 54 次地震的 T_c 进行统计的基础上得到一个临界值 T_0 .一般情况下 T_0 取 0.2 s 比较适宜,对于 P 波或 S 波,此值基本上差不多.本文定义高频地震(即“兰地震”)具有以下 3 个特征,即 (1)P 波速度谱的拐角周期比 S 波速度谱的拐角周期大,即 $T_{pc} \geq T_{sc}$; (2)P 波速度谱拐角周期 $T_{pc} \leq T_0$; (3)S 波速度谱拐角周期 $T_{sc} \leq T_0$.由此来定义综合因子 f 值:当以上 3 个特征都不存在时, $f = 0$; 当 3 者中有 1 个存在时, $f = 1$; 当 3 者中有 2 个存在时, $f = 2$; 当 3 者都存在时, $f = 3$.如果 S 波限幅,则 f 值根据 P 波速度谱拐角周期确定,若 $T_{pc} \leq T_0$,则 $f = 1$,反之,则 $f = 0$.由 54 次地震的 f 值可得到临界值 f_0 ,取 $f_0 = 2$.对 54 次地震的 P 波和 S 波的拐角频率(T_{pc} 和 T_{sc})和综合因子 f 值的计算结果见表 3.

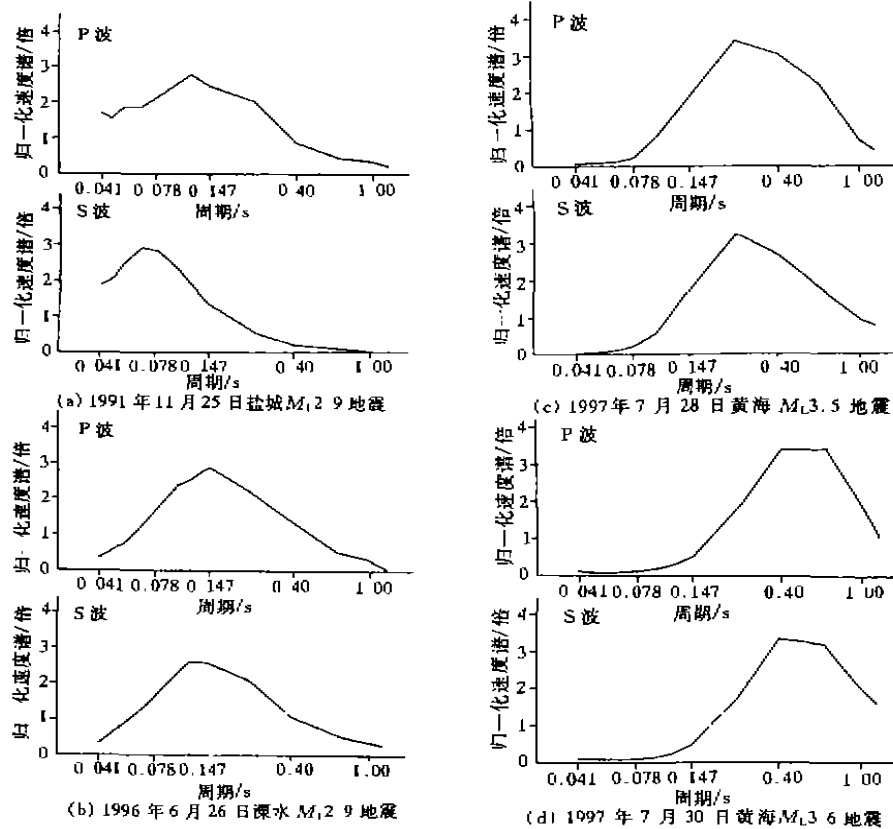


图3 几次地震的速度谱曲线

Fig. 3 Curves of velocity spectrum of a few earthquakes.

2.2 讨论

图4给出了P波和S波的拐角频率及综合因子 f 值随时间的变化曲线.由图4可以看出,中强地震(表2)发生前,中小地震P波和S波的拐角频率和综合因子 f 值呈现先增高后降低的过程,而综合因子 f 值比单个波型的速度谱拐角周期更能反映中强地震的孕震过程.为描述方便,本文将综合因子 f 大于临界值,即 $f \geq 2$ 的地震称为高 f 值地震;将综合因子 f 在平均值与临界值之间,即 $1 \leq f < 2$ 的地震称为中 f 值地震;将综合因子 f 小于平均值的地震称为低 f 值地震.众所周知,地震波传播特性可以客观地反映地壳介质的结构、物性及应力状态.目前多数研究结果表明,强震发生于介质坚硬、强度高、易于积累能量、地震波衰减减小和 Q 值高的地区.因震前介质完整性好、应力较高、 Q 值高,地震波特别是S波的高频成分衰减减小,因而出现高 f 值地震;当区域应力积累到一定阶段,局部地区微裂缝、裂隙发育,地壳介质不均匀性增

加,散射体增多,造成地震波(特别是S波)高频成分的衰减,因而有可能出现中 f 值地震及低 f 值地震;强震发生后,应力已释放,介质破碎, Q 值降低,高频地震波显著衰减,则出现低 f 值地震。由此可见,综合因子 f 值实际上反映了强震前后地壳介质 Q 值的变化。在江淮地区,一般情况下,中强地震发生之前1年或更短的时间内,首先发生的中小地震的 f 值较高,在最后一个高 f 值地震发生后,可能会有中 f 值地震发生,最后才是低 f 值地震出现。当低 f 值地震出现后,中强地震就可能即将发生了。

3 结语

由于江苏地区数字遥测台网记录到的地震可能有遗漏,因此计算出的综合因子 f 值时间序列可能有些不完整。但是,从目前的研究结果来看,综合因子 f 确实能揭示出中强地震的孕育过程。关于中强地震前中小地震P波和S波的拐角频率和综合因子 f 值变化的物理机制还有待于今后进一步深入研究。

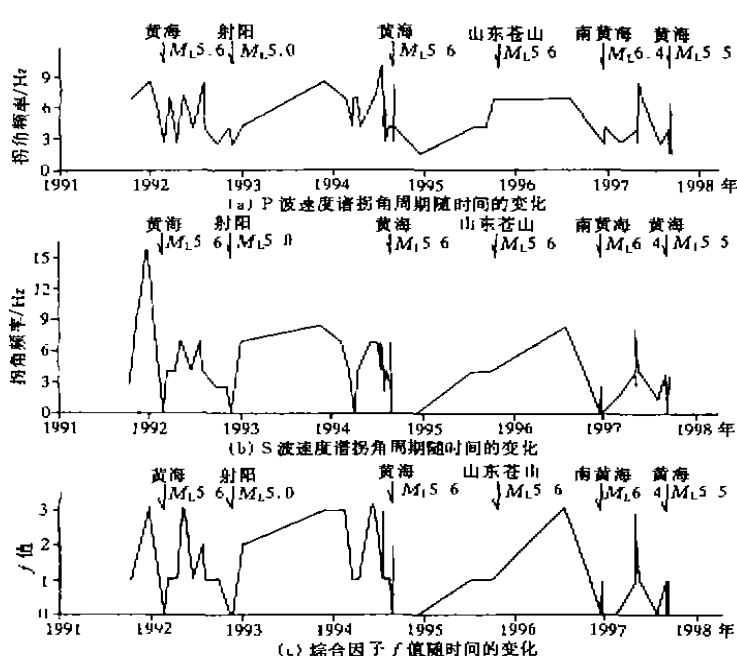


图4 中强地震前拐角频率及综合因子随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of change of corner-frequency and synthetical fact with time before medium-strong earthquakes.

表3 地震参数、P波和S波拐角周期及综合因子

序号	发震时间	震中位置		震级 (M_L)	T_{pc}	T_s	f
		北纬	东经				
1	1991-09-12	31°37'	118°41'	3.7	0.147	0.400	1
2	1991-11-25	33°26'	120°08'	2.9	0.119	0.065	3
3	1992-01-23	35°12'	121°04'	5.6	0.400	—	0
4	1992-02-12	32°09'	117°24'	3.0	0.147	0.250	1
5	1992-03-12	33°00'	120°27'	2.8	0.400	0.250	1
6	1992-04-09	31°55'	120°54'	3.2	0.147	0.147	3
7	1992-05-17	32°35'	121°37'	3.2	0.250	0.250	1
8	1992-06-27	32°31'	117°48'	3.1	0.119	0.147	2
9	1992-07-01	35°08'	120°46'	3.2	0.250	0.250	1
10	1992-08-25	34°17'	121°40'	4.0	0.400	0.400	1
11	1992-10-08	31°05'	121°20'	3.1	0.250	0.400	0
12	1992-10-22	33°47'	120°19'	5.0	0.400	—	0
13	1992-12-01	33°17'	119°22'	2.3	0.250	0.147	2
14	1993-10-21	31°06'	118°08'	3.0	0.119	0.119	3
15	1994-01-15	31°49'	120°40'	3.1	0.147	0.147	3
16	1994-02-16	33°11'	120°43'	2.9	0.250	0.250	1
17	1994-02-19	32°09'	121°38'	2.8	0.147	0.250	1
18	1994-03-01	31°37'	120°57'	3.4	0.147	—	1
19	1994-03-15	31°48'	120°41'	2.7	0.250	0.250	1

续表3

序号	发震时间	震中位置		震级 (M_j)	T_{pe}	T_m	f
		北纬	东经				
20	1994-05-14	33°05′	119°43′	2.8	0.147	0.147	3
21	1994-06-07	31°52′	119°44′	2.1	0.100	0.147	2
22	1994-06-17	31°47′	120°43′	3.4	0.250	0.250	1
23	1994-06-18	31°53′	120°39′	2.9	0.147	0.147	3
24	1994-06-19	31°53′	120°39′	2.9	0.147	0.147	3
25	1994-06-20	31°50′	120°41′	3.1	0.250	0.147	2
26	1994-06-23	31°52′	120°41′	2.7	0.147	0.147	3
27	1994-06-24	33°31′	120°16′	3.4	0.400	0.400	1
28	1994-07-12	32°34′	121°38′	2.8	0.250	0.250	1
29	1994-07-27	33°39′	121°02′	3.1	0.250	0.400	0
30	1994-07-24	33°38′	121°07′	3.7	0.250	0.250	1
31	1994-07-26	35°02′	124°23′	5.6	0.400	—	0
32	1994-07-26	31°47′	120°42′	2.5	0.119	0.147	2
33	1994-07-28	33°58′	121°05′	2.2	0.250	—	0
34	1994-11-08	35°14′	121°30′	4.6	0.670	—	0
35	1995-06-08	33°13′	120°55′	3.3	0.250	0.250	1
36	1995-07-29	33°08′	120°50′	2.8	0.250	0.250	1
37	1995-08-29	30°45′	118°09′	2.8	0.147	0.250	1
38	1996-06-26	31°42′	119°01′	2.9	0.147	0.119	3
39	1996-11-10	31°50′	123°11′	3.2	0.400	—	0
40	1996-11-17	33°25′	121°10′	3.7	0.400	0.400	1
41	1996-11-18	33°52′	123°14′	3.2	0.250	—	0
42	1997-01-15	35°16′	120°37′	4.4	0.400	0.670	0
43	1997-03-28	31°51′	120°42′	2.5	0.250	0.250	1
44	1997-03-29	32°02′	123°10′	3.3	0.400	0.400	1
45	1997-03-29	32°14′	119°05′	2.9	0.119	0.119	3
46	1997-04-10	32°02′	118°42′	2.6	0.147	0.250	1
47	1997-06-25	33°42′	122°03′	4.3	0.400	0.670	0
48	1997-07-28	33°42′	122°07′	3.5	0.250	0.250	1
49	1997-07-28	33°43′	122°10′	5.5	0.250	—	0
50	1997-07-29	33°40′	122°11′	3.4	0.250	0.250	1
51	1997-07-30	33°43′	122°11′	3.6	0.670	0.400	1
52	1997-08-03	31°23′	121°53′	4.2	0.147	—	1
53	1997-08-06	31°28′	121°54′	3.0	0.250	0.250	1
54	1997-08-09	34°04′	124°53′	4.1	0.670	—	0

江苏省地震局分析预报中心朱晤高级工程师为本文提供了所有波形数据,在此谨表谢意。

[参考文献]

- [1] Duda S J and Nortmann R. Normal, blue and red earthquakes—a new way of earthquake classification on the basis of body-wave magnitudes[J]. Tectonophysics, 1983, 93: 295—306.
- [2] 渡边晃. 近地震のマケニチュド(第三报)——マケニチュドと最大振幅の周期上の关系[J]. 地震Ⅱ, 1974, 27: 129—140.
- [3] 金森博雄. 地震活动と地震予知[J]. 地震予知研究ツンボウム, 1980. 163—174.
- [4] 赵根模, 杨港生. 地震序列中的高频与低频地震及其在序列类型判断中的应用[J]. 地震学报, 1994, 16(1): 47—55.
- [5] Nortmann R and Duda S J. The amplitude spectra of P and S wave and body wave magnitude of earthquakes[J]. Tectonophysics, 1982, 84: 17—32.

- [6] Nortmann R and Duda S J. Determination of spectral properties of earthquakes from their magnitudes[J]. *Tectonophysics*, 1983, **93**: 251—275.
- [7] Kaiser D and Duda S J. Magnitude spectra and other source parameters for some major 1985 and 1986 earthquakes[J]. *Tectonophysics*, 1988, **152**: 303—318.

A STUDY ON CHANGE OF VELOCITY SPECTRUM OF MEDIUM-MINOR EARTHQUAKES BEFORE MEDIUM-STRONG EARTHQUAKES

LIU Hong-gui¹, GU Jin-ping², WANG Zheng-zheng¹, NAN Jin-sheng¹, MA Jian-jun¹

(1. *Seismological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China* ;

2. *Center for Analysis and Prediction, CSB, Beijing 100036, China*)

Abstract: According to the definition for the spectral magnitude advanced by Duda and Nortmann, using the digital vertical displacement data recorded by 5 telecontrol stations in Jiangsu area and 13 groups of 0.5-octave band-pass filters of which central period are 1.2 s, 1.0 s, 0.67 s, 0.4 s, 0.25 s, 0.147 s, 0.119 s, 0.1 s, 0.078 s, 0.065 s, 0.054 s, 0.047 s, 0.041 s respectively, the average velocity spectra of P and S wave of 54 earthquakes has been determined. And the synthetical fact f of each earthquake can be gotten. Change feature of corner periods of the velocity spectra of P and S wave and the f values with time are studied. The results show that the synthetical fact f of velocity spectrum of medium-minor earthquakes changed from high to low with time during one year or shorter period before medium-strong earthquakes which occurred in the duration of low f -value.

Key words: Earthquake precursor; Anomalous character; Corner period; Velocity spectrum; Synthetical fact

~~~~~  
(上接 246 页)

### ANOMALOUS CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND FLUID IN LIAOHE BASIN BEFORE THE 1999 XIUYAN $M_s5.6$ EARTHQUAKE, LIAONING

LIU Yuan-sheng<sup>1</sup>, LIU Gui-he<sup>2</sup>, TONG Feng-lan<sup>2</sup>

(1. *Seismological Bureau of Shanlong Province, Jinan 250014, China* ;

2. *Seismic Station of Liaohe Oil Field, Panjin 024010, China*)

**Abstract:** Anomalous characteristics of observation data of 6 wells in Liaohe oil field before the Xiuyan  $M_s5.6$  earthquake, Liaoning on Nov. 29, 1999 are analysed. Observed items are ground-water level, oil recovery volume, casing pressure and gas recovery volume. Trend, short term and impending anomalies appeared in observation data of the 6 wells before the event with fairly good synchronism and a shape of rise-fall-rise. The test shows disturbance factors, such as water flooding, pumping water, atmospheric pressure and temperature etc. have not influence on the observation data, therefore, the anomalies can be believed.

**Key words:** Trend anomaly; Impending earthquake anomaly; Anomalous character; Underground fluid; Xiuyan earthquake