

30-36

永登 5.8 级地震前后波谱参数
和 Q 值变化特征*

许健生, 尹志文

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用中国数字地震台网(CDSN)兰州台短周期数字地震仪的记录资料, 研究了1995年甘肃永登 $M_s 5.8$ 地震前后, 发生在永登地区小地震的S波波谱参数, 获得以下结果:

(1) 在永登地震前2年左右, 该地区小地震的 S_c 波波谱拐角频率 f_c 逐渐下降, 由原来的2.4 Hz下降到1.8 Hz.

(2) 直达波 S_g 和地壳内中间层反射波 S_c 的波谱高频衰减斜率比值 γ 则先逐渐上升, 在临震前16个月逐渐下降, 在下降过程中发生了永登地震, 以后又逐渐恢复.

(3) 用直达横波 S_g 的谱参数求出的介质品质因数 Q_s 在永登地震前后有较明显的异常变化.

关键词: 波谱分析; Q 值; 异常特征; 甘肃; 永登地震

中图分类号: P315.3; P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(1999)01-0030-07

0 引言

在70年代, Sadowsky 等人^[1]观测到强震前微震波谱向高频移动, 地震发生后通过震区的微震波谱高频成份急剧衰减. 近年来, 国内在这方面也取得了一些观测结果^[2-4]. 总之, 研究前震、余震的波谱参数变化, 对于了解震源过程、孕震区的介质状态和估计地震危险性都有重要意义.

本文以1995年甘肃永登 $M_s 5.8$ 地震为例, 利用中国数字台网(CDSN)兰州台短周期数字地震仪的记录资料, 研究了该次地震前后发生在永登地区的小震的S波波谱参数变化特征.

1 方法

对于距离在100 km左右的浅源近震, 兰州台短周期数字地震仪记录到的震相主要有直达波 P_g , S_g 和来自地壳中间层C界面(康拉德界面)上的反射波 P_c , S_c . 它们的射线路径和时距曲线如图1所示, 所记录的波型如图3所示.

对于近震, 台站上记录到的地震波振幅主要取决于3个因素, 即源的性质(源的时间函

收稿日期: 1998-04-14

* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC1999005.

第一作者简介: 许健生, 男, 1954年10月生, 高级工程师, 从事地震观测与分析工作.

数、空间函数及震级等)、路径的性质(吸收、散射、几何扩散、反射和折射等)和接收点的性质(脉动背景和仪器频率特性等)。

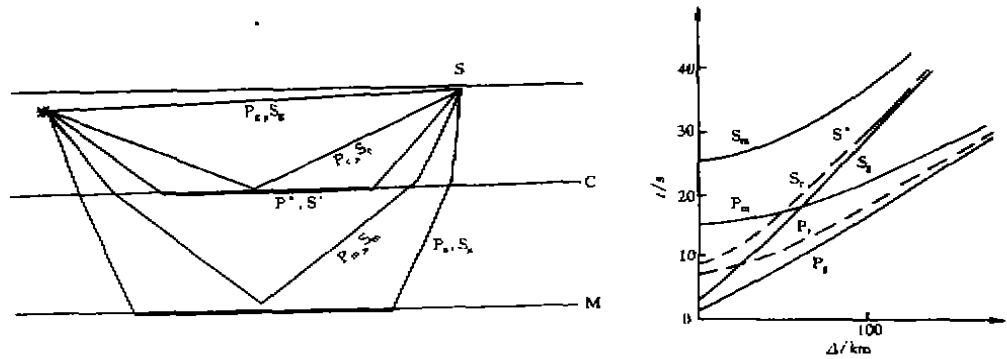


图1 S_g, S_c 波射线路径和走时曲线

Fig. 1 Travel-time curve and travel path of S_g and S_c wave.

对于近距离的体波,在震中距为 Δ 处记录到的直达横波 S_g 和中间界面上的反射横波 S_c 的振幅可分别写为:

$$A_g(\omega) = A_0(\omega) G_g(r_1) I(\omega) \exp\left\{\frac{-\pi r_1 f}{Q_{S_g} v_{S_g}}\right\} \quad (1)$$

$$A_c(\omega) = A_0(\omega) G_c(r_2) I(\omega) \exp\left\{\frac{-\pi r_2 f}{Q_{S_c} v_{S_c}}\right\} \quad (2)$$

式中: $A_0(\omega)$ 为震源的位移谱; $G_g(r_1), G_c(r_2)$ 分别为直达、反射横波的几何扩散因子; $I(\omega)$ 为地震仪的频率特性; r_1, r_2 分别为直达、反射横波的射线路径; Q_{S_g}, Q_{S_c} 分别为直达、反射横波的介质品质因数; v_{S_g}, v_{S_c} 分别为直达、反射横波在地壳上层中的传播速度。

对于出自同一震源、同一类型的波动又被同一仪器接收后的震源位移谱 $A_0(\omega)$ 应该是相同的。

式(1)和式(2)在消去仪器频率特性 $I(\omega)$, 等式两边又分别取对数后可写为:

$$\ln\left\{\frac{A_g(\omega)}{I(\omega)}\right\} = \ln[A_0(\omega) G_g(\omega)] - \frac{\pi r_1}{Q_{S_g} v_{S_g}} f \quad (3)$$

$$\ln\left\{\frac{A_c(\omega)}{I(\omega)}\right\} = \ln[A_0(\omega) G_c(\omega)] - \frac{\pi r_2}{Q_{S_c} v_{S_c}} f \quad (4)$$

就频率而言, 式(3)和式(4)是直线方程. 用 $r_1 = v_{S_g}(t_{S_g} - t_{P_g})$ 和 $r_2 = v_{S_c}(t_{S_c} - t_{P_c})$ 表示, 其斜率为:

$$K_g = -\frac{\pi r_1}{Q_{S_g} v_{S_g}} = -\frac{\pi v_{S_g}(t_{S_g} - t_{P_g})}{Q_{S_g} v_{S_g}} \quad (5)$$

$$K_c = -\frac{\pi r_2}{Q_{S_c} v_{S_c}} = -\frac{\pi v_{S_c}(t_{S_c} - t_{P_c})}{Q_{S_c} v_{S_c}} \quad (6)$$

式中: v_{S_g} 和 v_{S_c} 分别为直达和反射横波的虚波速度. 由式(5)和式(6)得直达、反射横波的振幅谱高频衰减斜率比为:

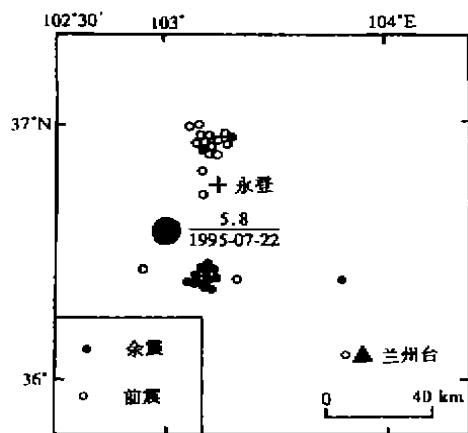


图2 台站和震中位置分布
Fig.2 Distribution of Lanzhou seismic station and earthquakes.

这样经过对地震波形资料的波谱分析,就可求得表征孕震区内介质物理性质变化的 γ 值和 Q 值.

2 资料处理与选取

在研究中所采用的资料是从兰州台的短周期数字地震仪南北向记录中选取的直达横波 S_g 和在中间界面上反射横波 S_c 的数字波形资料. 选用了1990年4月26日到永登地震前,发生在永登地区的前震20个,主震发生以后到1995年9月26日的余震12个. 这些地震与兰州台的距离为70~120 km左右. 其震级范围为 $M_L = 2.5 \sim 3.5$. 台站和震中分布见图2. 数字记录资料采样率为40个/s,在谱分析中采用了频率低于20 Hz的波谱资料. 事实上在研究中所用的位移谱拐角频率均在10 Hz以下,因此,高频端对计算结果的影响较小. 图3是震前1992年3月28日和1995年7月21日震后2次地震的记录波形.

由于选用的地震大多数较小,兰州台的噪声背景又相对较高, P_g 和 P_c 波的振幅较小,特别是不能很好地从干扰背景中将 P_g 波分辨出来,故选用振幅相对较大的 S_g 和 S_c 波作为研究的对象. 对于震中距在100 km左右的地震, S_g 和 S_c 波时间窗长度均取为 $3.0 \text{ s} \pm 0.1 \text{ s}$. 对于震中距在70 km左右的地震, S_g 和 S_c 波时间窗长度均取为 $2.0 \text{ s} \pm 0.1 \text{ s}$. 波谱分析所用软件是IASPEI推荐的Seisgram软件.

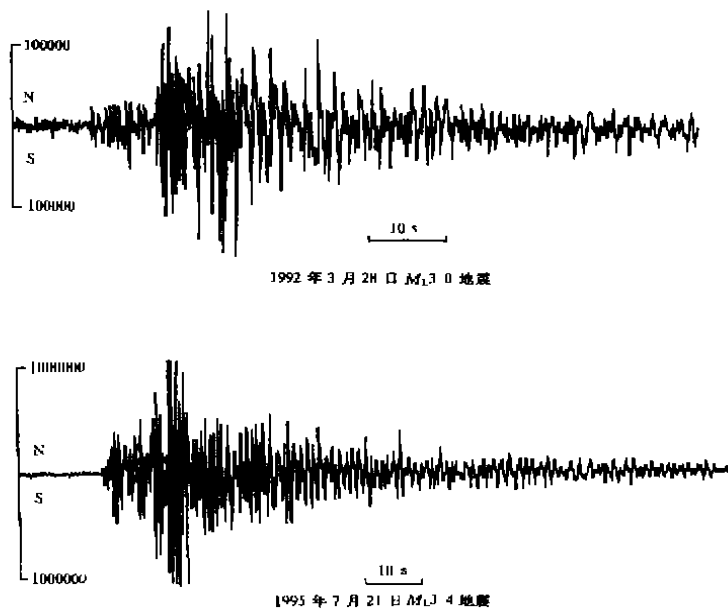


图3 兰州台记录的2次地震的数字波形

Fig.3 Digital seismograms of two earthquakes in Yongdeng area recorded by Lanzhou seismic station.

$$\gamma = \frac{K_c}{K_g} = \frac{v_{\phi_c}(t_{S_c} - t_{P_c})Q_{S_g}v_{S_g}}{v_{\phi_g}(t_{S_g} - t_{P_g})Q_{S_c}v_{S_c}} \quad (7)$$

由式(7)可见,在各自不同传播路径上速度的变化、介质品质因数的变化和虚波速度的变化都将使 γ 值发生变化. 在大地震前地震波速度和虚波速度发生变化的现象在1962年新丰江6.1级地震之前就曾被观测到[5].

根据公式(5)和(6)

$$Q_{S_g} = \frac{\pi v_{\phi_g}(t_{S_g} - t_{P_g})}{K_g v_{S_g}} \quad (8)$$

$$Q_{S_c} = \frac{\pi v_{\phi_c}(t_{S_c} - t_{P_c})}{K_c v_{S_c}} \quad (9)$$

因为兰州台的数字记录仪是速度型记录,故在波谱分析之前用 Seisgram 软件对记录波形先作了积分处理,使其转化为位移记录波形.由图 4 可见,作出的前震波谱图和余震波谱图都十分典型.通过人工拟合,波谱的拐角频率 f_c 和高频衰减斜率 K 都可求出,见表 1.虽然人工拟合有一定误差,但总体结果还是可信的.

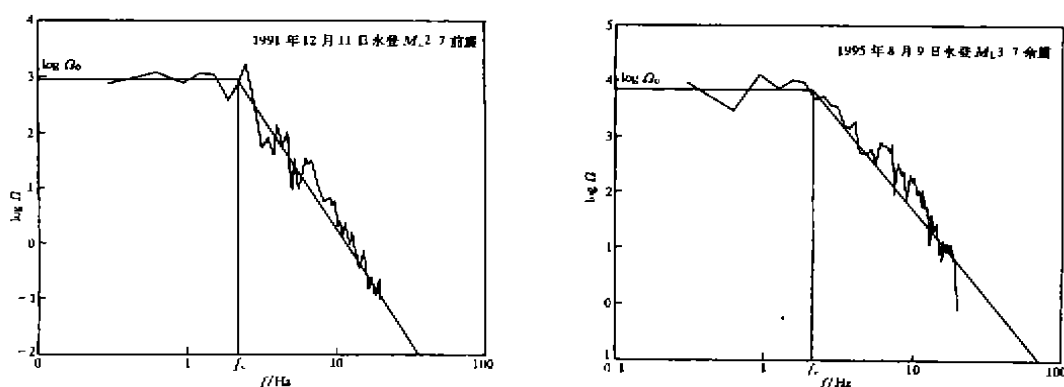


图 4 兰州台记录的 2 次地震的波谱

Fig. 4 Wave spectrums of a foreshock and an aftershock in Yongdeng area recorded by Lanzhou seismic station.

3 结果讨论

由图 5 可见,在永登地震前近 2 年左右, S_c 波的拐角频率 f_c 逐渐下降,由原来的 2.4 下降到 1.8. S_g 波与 S_c 波的波谱拐角频率比也出现了同步异常,而且与共和地震之前的变化情况相同^[6].

由表 1 和图 6 可见,在永登 5.8 级地震之前,从 1990 年到 1993 年 S_g 和 S_c 波的波谱高频衰减斜率比值 γ 逐渐上升到 1.3 左右,从 1993 年 3 月 13 日开始又逐渐下降,持续下降 16 个月后发生主震.主震后该值下降到 0.8 左右后又开始上升.1995 年 7 月 25 日恢复到 1.2 左右,后又下降,9 月 26 日又恢复到 1.0 左右.

永登地区的介质品质因数 Q_s 在 1993 年底以前逐渐增大,变化幅度较大,尔后逐年下降,在下降过程中发生了永登 $M_s 5.8$ 地震,见图 7.

与 Q_s 相比, Q_c 在该次地震

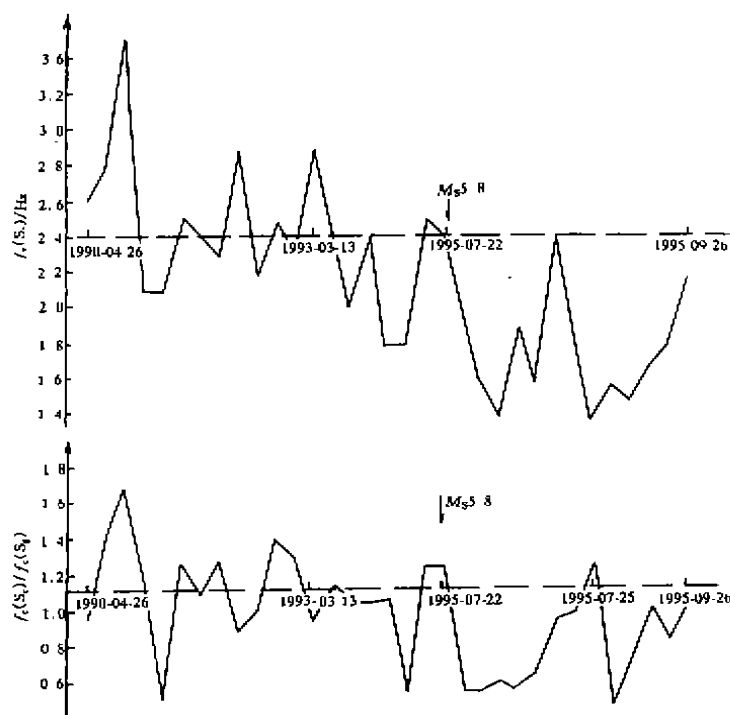


图 5 永登 5.8 级地震前后小震波谱拐角频率和拐角频率比值变化

Fig. 5 Corner frequency and corner frequency ratio of wave spectrum of small earthquakes before and after the Yongdeng $M_s 5.8$ earthquake.

前后变化幅度不太明显.这是因为 Q_{S_s} 和 Q_{S_c} 反应了同一种波在不同传播路径上介质衰减特性.由于地壳介质并不是均匀完全弹性和各向同性的,当震源深度较浅,记录台站离震源较近的时候,直达波主要在地壳上层传播,所测到的 Q_{S_s} 值主要反映了地壳上层的介质特性.而中间界面上的反射波主要在较深处传播,所测定的 Q_{S_c} 值主要反映了地壳内较深处的介质特性.

永登地震序列的震源深度为 1~10 km.应该说 Q_{S_s} 比 Q_{S_c} 更灵敏地反应了永登地区地壳上层孕震介质的物理特性变化.

表 1 32 次小震的波谱参数

编号	时 间	震中位置	震源深度 /km	震级 M_L	S_s 波拐角频率 f_c/Hz	S_c 波拐角频率 f_c/Hz	S_s 波高频衰减斜率 K_s	S_c 波高频衰减斜率 K_c	$\frac{f_c(S_s)}{f_c(S_c)}$	γ	Q_{S_s}	Q_{S_c}
1	1990-04-26-04:37:39.2	36°55'N, 103°10'E	2	2.6	2.7	2.6	1.74	1.71	0.796	0.98	59.0	57.5
2	1990-10-09-06:49:23.7	36°47'N, 103°13'E	6	2.7	2.0	2.8	1.56	1.53	1.40	0.98	53.1	52.6
3	1991-08-02-08:35:15.5	36°56'N, 103°12'E	2	2.8	2.2	3.7	1.70	1.70	1.68	1.00	57.9	55.2
4	1991-09-20-04:47:42.4	36°55'N, 103°16'E	1	2.6	1.8	2.1	1.53	1.62	1.16	1.06	61.5	55.2
5	1991-10-12-00:21:01.0	36°23'N, 103°18'E	9	3.3	4.2	2.1	2.24	1.35	0.50	0.60	23.4	21.8
6	1991-10-25-04:49:13.9	36°55'N, 103°10'E	-	2.6	2.0	2.5	1.46	1.72	1.25	1.17	67.2	54.4
7	1991-12-11-05:15:51.0	36°55'N, 103°12'E	16	2.7	2.2	2.4	1.62	1.66	1.09	1.02	56.0	56.3
8	1992-01-22-07:42:39.3	36°56'N, 103°14'E	1	2.8	1.8	2.3	1.50	1.68	1.28	1.12	64.5	54.7
9	1992-03-28-03:59:52.7	36°43'N, 104°15'E	-	3.0	3.3	2.9	2.64	2.03	0.88	0.77	31.5	32.4
10	1992-05-14-04:35:44.5	36°56'N, 103°82'E	0	2.9	2.2	2.2	1.29	1.61	1.00	1.24	94.0	59.9
11	1992-06-17-05:23:57.2	36°53'N, 103°10'E	22	2.8	1.8	2.5	1.58	1.68	1.39	1.06	56.7	55.1
12	1992-07-13-06:08:39.8	36°55'N, 103°15'E	2	2.9	1.8	2.3	1.39	1.78	1.28	1.28	67.5	50.3
13	1993-03-13-02:20:06.7	36°44'N, 103°10'E	8	3.1	3.1	2.9	1.53	2.06	0.93	1.34	53.1	38.5
14	1993-04-09-04:34:07.3	36°53'N, 103°12'E	12	2.8	2.1	2.4	1.65	1.66	1.14	1.00	54.2	54.0
15	1993-08-10-04:37:40.6	36°57'N, 103°09'E	-	2.6	1.9	2.0	1.58	1.57	1.05	0.99	68.0	65.4
16	1993-11-10-07:08:03.0	36°53'N, 103°14'E	-	2.8	2.3	2.4	1.49	1.69	1.04	1.13	61.9	52.1
17	1993-12-21-07:28:03.9	36°58'N, 103°08'E	2	2.7	1.7	1.8	1.33	1.60	1.05	1.19	78.0	62.2
18	1994-02-18-07:41:12.8	36°22'N, 103°09'E	2	2.8	3.3	1.8	1.71	1.29	0.54	0.75	35.8	45.4
19	1994-07-01-05:02:41.1	36°52'N, 103°12'E	4	2.8	2.0	2.5	1.68	1.78	1.25	1.06	54.2	49.7
20	1995-06-21-03:16:47.2	36°53'N, 103°13'E	7	2.7	1.9	2.4	1.57	1.79	1.26	1.14	60.8	51.7
21	1995-07-21-23:10:47.6	36°23'N, 103°08'E	2	3.4	1.8	2.0	1.62	1.55	1.11	0.96	39.0	38.8
22	1995-07-21-23:52:56.0	36°23'N, 103°11'E	1	3.0	2.8	1.6	1.58	1.13	0.57	0.71	40.9	55.3
23	1995-07-21-23:54:07.4	36°21'N, 103°10'E	9	3.3	2.3	1.4	1.35	0.77	0.60	0.55	42.6	72.5
24	1995-07-22-01:13:22.4	36°22'N, 103°13'E	1	2.6	3.3	1.9	2.09	1.47	0.57	0.70	27.6	37.3
25	1995-07-22-01:59:50.1	36°22'N, 103°06'E	23	2.7	2.4	1.6	1.41	1.30	0.66	0.91	44.7	50.0
26	1995-07-22-14:25:13.2	36°22'N, 103°09'E	1	3.2	2.5	2.4	1.54	1.25	0.96	0.80	39.7	47.2
27	1995-07-25-02:59:13.9	36°23'N, 103°46'E	10	2.6	1.1	1.4	1.10	1.30	1.27	1.18	25.4	20.9
28	1995-08-08-23:48:37.6	36°23'N, 103°11'E	3	3.3	3.3	1.6	1.51	1.30	0.48	0.85	39.5	43.8
29	1995-08-09-15:55:51.8	36°21'N, 103°10'E	2	3.2	2.1	1.5	1.22	1.18	0.71	0.96	48.3	47.7
30	1995-08-14-22:48:58.4	36°22'N, 103°11'E	3	2.7	1.7	1.7	1.45	1.23	1.00	0.84	40.7	45.8
31	1995-08-26-07:52:53.6	36°21'N, 103°11'E	1	3.1	2.1	1.8	1.57	1.47	0.85	0.93	37.0	37.7
32	1995-09-26-06:38:52.3	36°56'N, 103°17'E	1	2.6	2.1	2.2	1.74	1.76	1.04	1.01	54.2	51.8

永登地区小地震的 Q_s 和 Q_{sc} 值在永登地震前的平均值分别为 57.4 和 51.2, 在主震后分别为 40.3 和 45.1, 显示了较明显的下降。

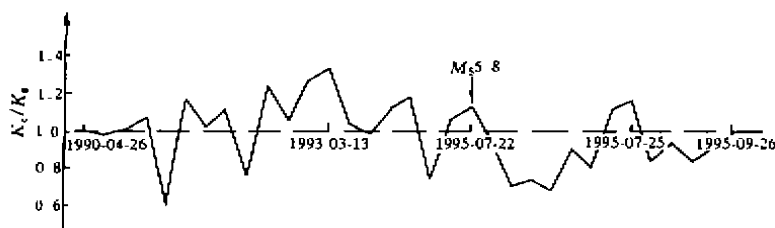


图 6 永登 5.8 级地震前后小震波谱高频衰减斜率比值变化

Fig. 6 Ratio of wave spectrum attenuation slope in high frequency of small earthquakes before and after the Yongdeng $M_s 5.8$ earthquake.

大震前后 Q 值先上升后下降的现象可能具有一定的普遍性. 这可能是由于在实际的地壳岩石中, 总是存在着许多微裂缝. 在构造剪切应力的作用下, 原有的微裂缝将逐渐闭合. 这时当地震波穿过这些微裂缝区时, 非均匀性所造成的能量损耗略有减少, 作为介质吸收能量大小标志的 Q 值应该略有增大, 如图 7(a) 中第 I 阶段所示.

随着构造应力的进一步加强, 岩石中的微裂缝数目继续减少, 裂缝尺度减小, 当达到一定程度时岩石力学性质就起了放大变化. 例如: 弹性模量的改变和介质各向异性的改变等, 导致 Q 值将进一步增大. 这就是图 7(a) 中的第 II 个阶段.

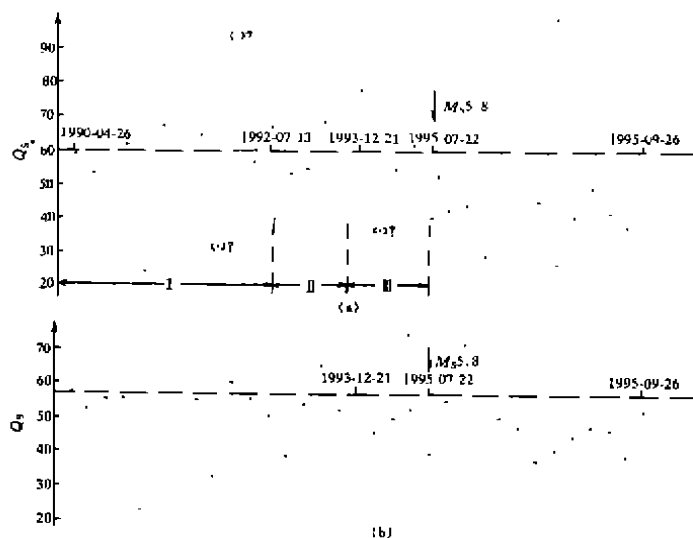


图 7 永登地震前后 Q_s 值(a)与 Q_{sc} 值(b)变化

Fig. 7 Variation of Q_s and Q_{sc} values before and after the Yongdeng $M_s 5.8$ earthquake.

当构造应力进一步加强时, 由于介质的非均匀性, 在应力相对集中的部位新裂缝产生, 而且数量急剧增加, 以至于在这些部位的小裂缝串通发展成若干相对比较大的裂缝, 弹性波经过

该区时能量的损耗必然增大, Q 值又逐渐下降. 这就是图 7(a) 中给出的震源孕育的第三个阶段.

大震后, 震源周围地区介质破碎程度与震前相比显著增长, 这就使得 Q 值变小.

4 结语

较大地震前波谱参数和 Q 值的变化前人进行了较多的研究. 本文应用兰州台的数字地震记录资料, 研究了永登 $M_s 5.8$ 地震前的波谱参数和 Q 值变化特征, 这仅仅是一种尝试, 所得结论还有待更多的震例证实. 强震前后波谱参数和 Q 值变化的物理机制还有待深入研究.

参考文献

- [1] Sadovsky M A, et al. The processes preceding strong earthquakes in some regions of middle Asia [J]. Tectonophysics, 1972, 14: (3/4).
- [2] 冯德益, 陈化然, 丁伟国. 大震前地震波频谱异常特征的研究 [J]. 地震研究, 1994, 17(4): 319~328.
- [3] 陈化然, 冯德益. Sompi 谱分析方法在处理数字地震记录中的初步应用 [J]. 地震, 1995, (4): 359~363.
- [4] 罗娉华, 叶建庆, 陈敬恭, 等. 丽江 7.0 级地震的余震震源参数研究 [J]. 地震研究, 1997, 20(1): 83~90.
- [5] 冯德益. 地震波速异常 [M]. 北京: 地震出版社, 1981. 117.
- [6] 许健生, 尹志文. 共和 7.0 级地震前后中小地震的波谱变化 [J]. 地震地磁观测与研究, 1998, 19(4): 30~36.

VARIATION CHARACTERISTICS OF WAVE SPECTRUM PARAMETERS AND Q VALUE BEFORE AND AFTER THE YONGDENG $M_s 5.8$ EARTHQUAKE

XU Jian-sheng, YIN Zhi-wen

(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou Gansu 730000)

Abstract

Short period digital seismic data of Lanzhou seismic station in Chinese digital seismic network are used to study variation of wave spectrum parameters of small earthquakes in Yongdeng area before and after the Yongdeng $M_s 5.8$ earthquake in 1995. The results are the followings:

(1) About two years before the Yongdeng earthquake, corner frequency f_c of S_c wave spectrum of small earthquakes in Yongdeng area fall from 2.4 Hz to 1.8 Hz.

(2) Ratio of spectrum attenuation slope in high frequency between S_g wave and S_c wave increased since 1990, then decreased about 16 months before the Yongdeng earthquake. During the ratio decreasing, the earthquake occurred. After the shock, the ratio value recovered gradually.

(3) Anomalies of Q value from spectrum parameters of S_g wave appeared before and after the Yongdeng earthquake.

Key words: Spectral analysis; Q value; Anomalous character; Gansu; Yongdeng earthquake