

蔡杏辉, 段 刚, 邵平荣. 福建仙游 5.0 级地震序列 P 波、S 波拐角频率比值变化研究[J]. 华南地震, 2015, 35 (2): 73-79. CAI Xinghui, DUAN Gang, SHAO Pingrong, et al. Changes of P-wave, S-wave Corner Frequency Ratio of Xianyou  $M_L$  5.0 Earthquake Sequence in Fujian Province[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(2): 73-79.]

## 福建仙游 5.0 级地震序列 P 波、S 波拐角频率 比值变化研究

蔡杏辉, 段 刚, 邵平荣, 张丽娜

(福建省地震局, 福州 350003)

**摘要:** 利用福建仙游震区附近的 3 个数字地震台记录的仙游地震序列波形资料, 采用 PITSa 软件, 对 2013 年 9 月 4 日仙游  $M_L$  5.0 地震发生前后 73 个前、余震的 P 波、S 波拐角频率比值进行分析。结果表明: 3 个地震台的拐角频率比值在主震前均出现较明显的下降趋势, 不同台站间主震前后的变化形态存在较明显差异。

**关键词:** 仙游  $M_L$  5.0 地震; 地震序列; 地震波谱; 拐角频率比

中图分类号: P315.31 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2015) 02-0073-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.02.012

## Changes of P-wave, S-wave Corner Frequency Ratio of Xianyou $M_L$ 5.0 Earthquake Sequence in Fujian Province

CAI Xinghui, DUAN Gang, SHAO Pingrong, ZHANG Lina

(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** By using wave data of Xianyou earthquake sequence recorded by three stations near the Xianyou epicenter region in Fujian, the paper analyzes the P, S wave corner frequency ratio of 73 earthquakes before and after the Xianyou  $M_L$  5.0 earthquake sequence on Sep. 4th, 2013 by using the PITSa software. The result shows that the corner frequency ratio of the 3 stations has obvious downward trend before the main earthquake, and it is changing shape different between different stations before and after the main earthquake.

**Key words:** Xianyou  $M_L$  5.0 earthquake; Earthquake sequence; Seismic wave spectrum; Corner frequency ratio

### 0 引言

大地震发生前, 孕震区地壳介质处于应力加速和积累状态。地震发生后, 震源周围的介质变化, 这种变化可以通过地震仪器记录的地震波谱

差异来反映。波谱是动力学特征, 它既与震源的辐射图像有关, 又依赖于传播介质的吸收性质<sup>[1]</sup>。利用地震波形资料, 提取有关的波谱信息, 是获得中强震前后震源区应力状态与孕震状态变化的一种重要方法。近年来, 随着数字地震波形资料

收稿日期: 2014-09-26

作者简介: 蔡杏辉 (1976-), 男, 工程师, 主要从事地震监测工作。

E-mail: 13870511@sina.com.

的积累,国内利用数字地震资料研究大地震前后地震波谱异常特征逐渐增多<sup>[2-8]</sup>,取得了初步进展。

随着福建“十五”台网建立,观测仪器得到改进和台站布局密度增大,观测精度得到提高,与模拟记录相比,数字化地震波资料的优点是:频带范围宽、动态范围大、分辨率高、观测精度高;产出丰富的数字地震波形数据为本地区地震序列波谱变化研究创造良好条件。2013年9月4日福建仙游发生  $M_L$  5.0 地震,地震的前震、余震丰富;计算仙游  $M_L$  5.0 地震前后中小地震纵横波的拐角频率比值,探索较大地震发生前小震波谱可能变化,为该地区强震预测和震后趋势判断提供有关地震波谱特征方面的参考依据。

### 1 资料选取与处理

#### 1.1 资料选取

2013年9月4日福建仙游发生  $M_L$  5.0 地震,震中位置为 25.629°N, 118.752°E。震区 2009 年以来共记录 0 级以上地震达到 1 000 余次以上,形成较为完整的地震序列。本文选取福建台网记录的福建仙游  $M_L$  2.0 以上地震进行研究,其中前震 60 个,余震 13 个,选取该序列  $M_L$  2.0 以上地震都有较好记录震源区附近的 3 个数字台,选取莆田荔城台、福清东张台、惠安净峰台,震中距分别为 35 km、55 km、76 km,3 个台均采用 CMG-3ESPC-60 型地震计,台基岩性分别为花岗岩、辉绿岩、花岗岩。图 1 给出了 3 个台站的位置及仙游地震序列的空间分布。



图 1 仙游震区附近台站分布及地震序列  
Fig.1 Xianyou earthquake sequence map and distribution of stations near Xianyou earthquake region

#### 1.2 资料处理

采用 PITSa 软件进行波谱分析,该软件是用于数字地震波形分析的实用软件,并且功能较强。PITSa 软件可以处理 ISAM、SUDS、ASCII 格式的数据文件,而目前台网波形事件都是以 SEED 格式存储,因此在波谱分析前要先将选取事件进行格式转换,转换成 ASCII 格式文件。P 波取垂直向,S 波取南北向和东西向,窗长取 S 波初始震相到最大振幅间一定长度的波形数据。波形资料处理步骤:对原始速度记录进行去倾斜及水平基线校正后,做积分处理;积分运算后,采用 4 阶巴特沃斯带通滤波器进行数字滤波处理,最后对数据取余弦窗。得出位移谱图后,采用人工拟合的方法得到 P 波和 S 波拐角频率值,进而求得两者拐角频率比值。拐角频率的确定原则:波谱高频段与低频段的趋势渐近线交点处的频率值,也就是说振幅有明显衰减变化时所对应的频率。图 2 为波谱主要参数示意图。

### 2 计算结果与分析

#### 2.1 计算结果

测定了 60 个前震和 13 个余震 3 个台的 P 波和 S 波拐角频率比值,结果见表 1。表中的参数 P 波取 UD 向计算结果,S 波取 NS 和 EW 向平均结果。

表 1 给出了莆田荔城、福清东张、惠安净峰 3 个台 74 个  $M_L$  2.0 以上地震的 P 波和 S 波的拐角频率及其比值。地震波拐角频率主要与震源断面

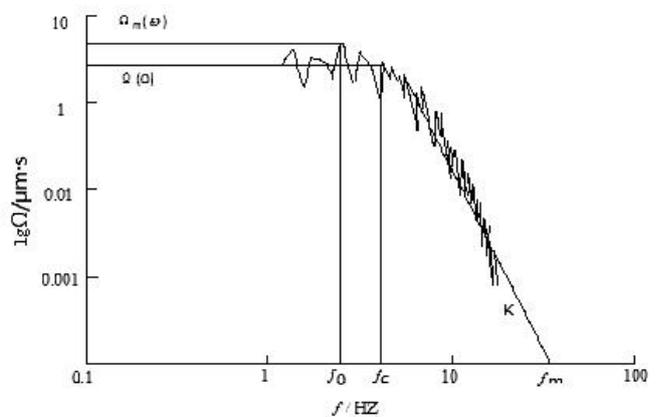


图 2 波谱主要参数示意图  
Fig.2 Schematic diagram of the main parameters of spectrum

的大小有关,反映了地震波高低频能量的分布特征;通常情况下,拐角频率大小与地震震级大小有关,地震越大,拐角频率越小<sup>[9]</sup>。图 3 为仙游地震序列拐角频率与震级的关系图,结果表明,地震越大,拐角频率越小,与前人研究结论是一致的;但 3 个台的拐角频率与震级的相关性较弱(莆田荔

城台 P 波、S 波拐角频率与震级相关系数分别为-0.47、-0.42,福清东张台两者相关系数分别为-0.53、-0.37,惠安净峰台两者相关系数分别为-0.45、-0.31),同时拐角频率比值也能减弱震级的影响,因此在分析拐角频率比变化特征时不考虑震级大小的影响。

表 1 仙游  $M_L$  5.0 地震前后 P、S 波拐角频率比变化

Table 1 The change of the corner frequency ratio of P and S wave before and after Xianyou  $M_L$  5.0 earthquake

序号	时间/ 年-月-日-时:分	震级/ $M_L$	莆田荔城台			福清东张台			惠安净峰台		
			$f_cP$	$f_cS$	$f_cP/f_cS$	$f_cP$	$f_cS$	$f_cP/f_cS$	$f_cP$	$f_cS$	$f_cP/f_cS$
1	2011-01-20-10:34	2.0	9.3	9.9	0.94	6.8	7.0	0.97	9.7	10.1	0.96
2	2011-01-27-17:48	2.3	9.0	9.3	0.97	6.1	6.1	1.0	9.0	11.2	0.80
3	2011-01-29-14:59	2.8	7.4	8.5	0.87	7.2	7.9	0.91	8.9	8.8	1.01
4	2011-01-29-18:24	2.2	9.7	10.1	0.96	9.1	9.6	0.95	10.2	10.0	1.02
5	2011-01-30-13:00	2.1	9.8	10.0	0.98	9.4	10.7	0.88	9.3	10.5	0.89
6	2011-01-30-13:41	2.1	10.2	10.5	0.97	11.3	12.4	0.91	9.2	10.0	0.92
7	2011-12-30-02:38	2.9	7.8	7.4	1.05	7.0	7.2	0.97	9.0	9.8	0.92
8	2012-01-13-22:02	2.6	9.0	8.5	1.06	6.0	4.0	1.5	9.1	9.0	1.01
9	2012-01-15-15:16	2.0	7.2	7.5	0.96	6.5	6.1	1.07	8.2	7.6	1.08
10	2012-01-17-22:51	2.4	6.3	5.2	1.21	6.8	5.2	1.31	7.9	8.7	0.91
11	2012-01-19-05:51	2.2	7.8	7.1	1.10	6.2	5.8	1.07	7.8	8.8	0.89
12	2012-01-19-18:45	2.7	7.2	5.1	1.41	5.5	5.3	1.04	8.7	9.1	0.96
13	2012-02-02-23:06	2.1	9.3	11.0	0.85	6.3	6.0	1.05	9.5	8.8	1.08
14	2012-03-20-03:34	2.4	6.0	5.5	1.09	6.5	6.0	1.08	9.0	8.8	1.02
15	2012-03-22-05:10	2.5	10.2	9.4	1.09	6.2	5.9	1.05	9.4	9.2	1.02
16	2012-04-01-18:39	2.5	9.5	9.9	0.96	5.5	6.2	0.89	9.4	9.0	1.04
17	2012-04-02-04:44	2.0	8.8	9.0	0.98	6.5	7.0	0.93	7.2	8.4	0.86
18	2012-04-02-05:56	2.5	6.7	6.8	0.99	6.3	5.8	1.09	7.8	7.5	1.01
19	2012-04-04-02:15	2.6	6.0	5.8	1.03	6.1	7.0	0.87	8.9	8.5	1.05
20	2012-04-15-11:57	4.1	6.4	6.2	1.03	2.4	2.8	0.86	8.1	8.8	0.92
21	2012-04-15-12:02	3.4	5.3	4.8	1.10	4.7	5.0	0.94	7.8	7.5	1.04
22	2012-04-16-23:25	2.2	5.7	5.8	0.98	7.1	7.9	0.90	8.8	8.7	1.01
23	2012-04-18-13:11	2.3	7.8	7.2	1.08	7.0	6.2	1.13	8.9	8.2	1.09
24	2012-04-22-10:22	2.5	5.8	5.1	1.14	7.7	7.1	1.08	9.2	9.5	0.97
25	2012-04-26-23:34	2.2	6.2	6.0	1.03	7.6	6.6	1.15	9.0	8.3	1.08
26	2012-05-11-22:39	3.2	5.9	6.0	0.98	5.1	4.7	1.09	7.2	8.3	0.87
27	2012-05-12-22:40	2.5	7.5	6.5	1.15	7.1	7.0	1.01	7.8	7.2	1.08
28	2012-05-14-07:43	2.3	8.5	7.0	1.21	6.3	5.1	1.24	9.0	7.4	1.22
29	2012-05-24-18:02	2.8	5.1	5.0	1.02	5.8	6.3	0.92	8.8	7.7	1.14
30	2012-06-10-16:17	2.6	5.0	6.0	0.83	6.9	6.5	1.06	7.8	8.2	0.95
31	2012-06-13-13:09	2.2	6.7	6.1	1.10	6.8	6.0	1.13	9.5	10.0	0.95
32	2012-06-14-14:03	2.5	8.5	7.0	1.21	6.6	5.0	1.32	8.9	8.4	1.06
33	2012-07-22-02:27	2.0	9.5	9.2	1.03	8.0	7.2	1.11	9.0	9.5	0.95
34	2012-11-15-23:44	2.4	11.1	12.0	0.93	5.8	5.6	1.04	8.7	8.1	1.07
35	2012-11-25-07:48	3.8	9.0	8.8	1.02	7.4	8.6	0.86	9.0	8.8	1.02
36	2012-11-25-07:49	2.4	8.5	9.1	0.93	8.8	9.0	0.98	8.1	9.5	0.85
37	2012-11-25-07:50	2.2	7.1	8.1	0.88	9.0	9.3	0.97	9.1	8.1	1.12

(转下表)

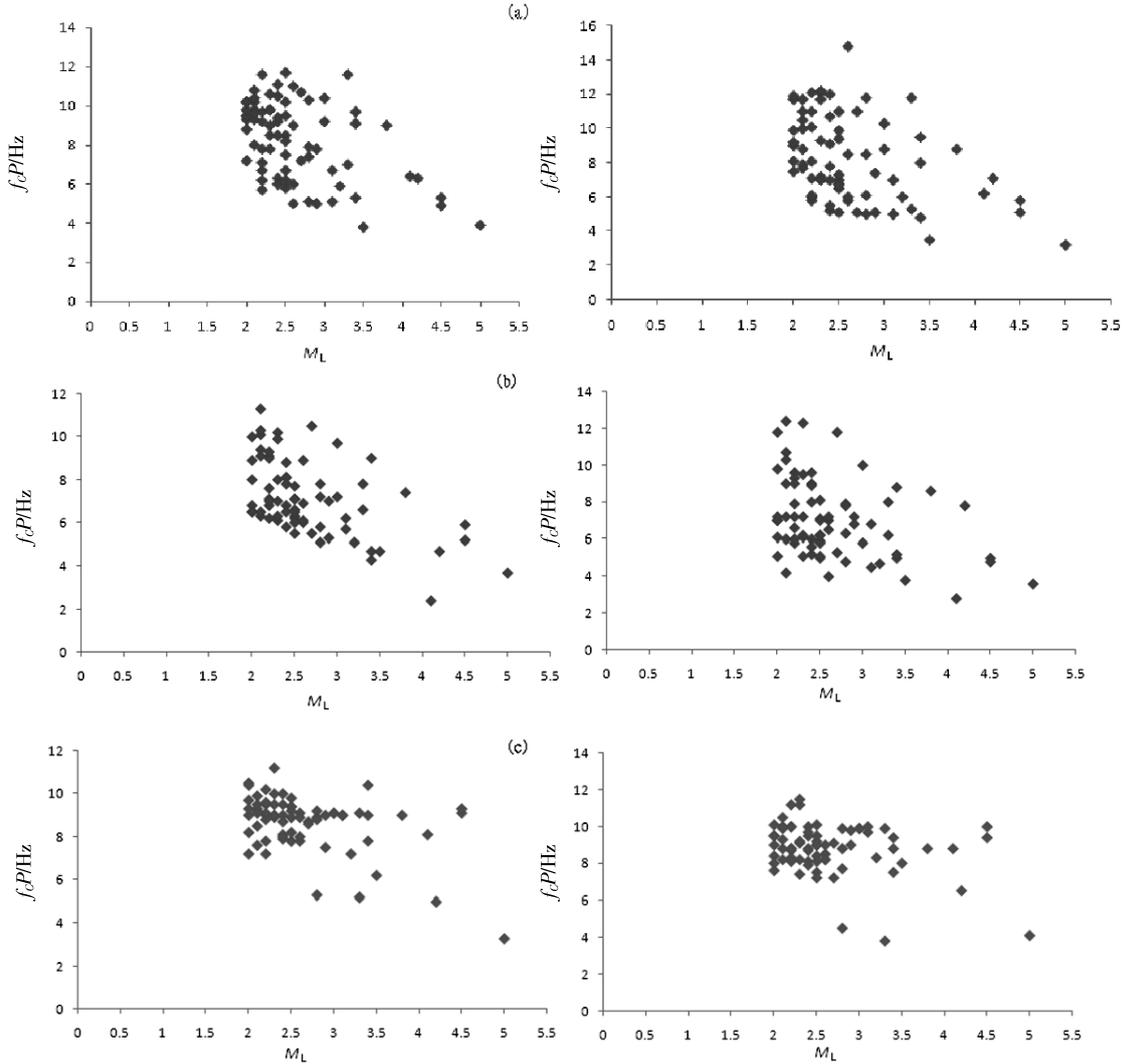
(接表1)

序号	时间/ 年-月-日-时:分	震级/ $M_L$	莆田荔城台			福清东张台			惠安净峰台			
			$f_cP$	$f_cS$	$f_cP/f_cS$	$f_cP$	$f_cS$	$f_cP/f_cS$	$f_cP$	$f_cS$	$f_cP/f_cS$	
38	2012-11-25-07:55	2.3	9.8	12.1	0.81	8.0	7.2	1.11	9.5	9.1	1.04	
39	2012-11-25-08:04	2.2	9.2	11	0.84	9.3	9.0	1.03	7.2	8.8	0.82	
40	2012-11-25-08:44	2.0	9.8	11.7	0.84	10.0	11.8	0.85	10.5	8.0	1.3	
41	2012-11-25-08:45	2.6	11.0	14.8	0.74	8.9	7.2	1.24	8.0	8.2	0.98	
42	2012-11-25-10:04	2.1	10.8	11.7	0.92	9.1	10.3	0.88	9.1	9.3	0.98	
43	2012-11-25-17:42	3.4	9.7	9.5	1.02	9.0	8.8	1.02	10.4	9.4	1.11	
44	2012-11-27-19:45	2.1	9.6	7.7	1.25	6.5	4.2	1.55	8.5	8.2	1.04	
45	2012-11-30-14:59	3.3	7.0	5.3	1.32	6.6	6.2	1.06	5.2	3.8	1.37	
46	2013-01-11-18:16	2.0	10.2	8.1	1.26	6.5	5.1	1.27	9.3	9.0	1.03	
47	2013-01-12-22:57	2.4	9.2	7.0	1.31	8.1	9.6	0.84	8.0	10.0	0.80	
48	2013-02-10-03:25	2.5	8.2	7.3	1.12	6.5	5.1	1.27	9.8	8.1	1.21	
49	2013-02-11-01:05	2.4	9.4	7.8	1.21	8.1	8.0	1.01	9.5	7.9	1.20	
50	2013-02-23-23:23	3.0	9.2	8.8	1.05	7.2	5.8	1.24	9.1	9.9	0.92	
51	2013-08-03-02:43	4.2	6.3	7.1	0.89	4.7	7.8	0.60	5.0	6.5	0.77	
52	2013-08-03-05:23	2.8	7.9	6.1	1.30	5.1	4.8	1.06	5.3	4.5	1.18	
53	2013-08-09-13:36	2.5	6.2	6.7	0.93	6.0	6.2	0.97	8.9	9.0	0.99	
54	2013-08-09-13:37	3.1	6.7	7.0	0.96	6.2	4.5	1.38	9.0	9.7	0.93	
55	2013-08-09-13:38	3.5	3.8	3.5	1.09	4.7	3.8	1.24	6.2	8.0	0.78	
56	2013-08-09-13:53	2.9	5.0	5.1	0.98	5.3	6.8	0.78	7.5	9.0	0.83	
57	2013-08-19-17:36	3.8	4.3	6.0	0.72	5.9	6.0	0.98	5.3	8.9	0.60	
58	2013-08-19-18:05	2.7	10.7	11.0	0.97	10.5	11.8	0.89	8.6	7.2	1.19	
59	2013-08-23-05:02	4.5	5.3	5.8	0.91	5.9	5.0	1.18	9.1	10.0	0.91	
60	2013-08-24-00:49	3.1	5.1	5.0	1.02	5.7	6.8	0.84	9.0	10.0	0.90	
61	2013-09-04-06:23	5.0	3.9	3.2	1.22	3.7	3.6	1.03	3.3	4.1	0.80	
62	2013-09-04-06:53	2.4	10.5	10.7	0.98	7.8	8.9	0.88	10.0	9.7	1.03	
63	2013-09-08-22:56	2.5	11.7	11.0	1.06	7.1	8.1	0.88	8.2	10.1	0.81	
64	2013-09-13-14:22	2.1	8.0	8.8	0.91	10.1	9.0	1.12	7.6	9.9	0.77	
65	2013-09-13-15:12	2.0	10.2	11.9	0.86	8.9	9.8	0.91	10.4	9.5	1.09	
66	2013-09-14-02:59	3.4	9.1	8.0	1.14	4.3	5.2	0.83	9.0	8.8	1.02	
67	2013-09-27-11:45	2.1	10.4	7.9	1.32	10.3	7.2	1.43	9.9	10.0	0.99	
68	2013-10-03-16:49	2.3	9.8	12.2	0.80	10.2	12.3	0.83	10.0	9.2	1.09	
69	2013-10-18-14:05	3.3	11.6	11.8	0.98	7.8	8.0	0.98	9.1	9.9	0.92	
70	2013-10-30-01:50	4.5	4.9	5.1	0.96	5.2	4.8	1.08	9.3	9.4	0.99	
71	2013-10-31-20:50	2.2	11.6	12.1	0.96	7.0	7.2	0.97	9.6	11.2	0.86	
72	2013-11-03-00:13	2.3	10.6	11.7	0.91	9.9	9.5	1.04	11.2	11.5	0.97	
73	2013-11-04-20:34	3.0	10.4	10.3	1.01	9.7	10.0	0.97	9.1	9.9	0.92	
74	2013-11-06-21:31	2.8	10.3	11.8	0.87	7.8	7.8	1.0	9.2	9.9	0.93	
拐角频率比平均值					1.02			1.03			0.99	

## 2.2 拐角频率比变化分析

从表1可见,莆田荔城台拐角频率比在0.72~1.41之间,平均值为1.02;福清东张台拐角频率比在0.60~1.55之间,平均值为1.03;惠安净峰台拐角频率比在0.60~1.37之间,平均值为0.99。张萍等<sup>[3]</sup>利用辽宁台网的资料研究所得平均拐角频率

比为1.004;夏爱国等<sup>[4]</sup>对伽师地震序列的地震波谱变化研究所得3个台拐角频率比在0.86~4.58,平均值为2.06;刘富安等<sup>[5]</sup>对克拉玛依南地震波谱变化研究所得拐角频率比在0.70~2.10之间,平均值为1.18;张永久等<sup>[6]</sup>对雅江6.0级地震前后波谱变化研究所得3个台的拐角频率比在1.053~2.063



(a)莆田荔城台; (b)福清东张台; (c)惠安净峰台

图 3 仙游地震序列拐角频率与震级的关系

Fig.3 Relation between magnitude and corner frequency of Xianyou  $M_L$  5.0 earthquake sequence

之间变化,平均值为 1.76。Molar 以及陈运泰等提出拐角频率比的理论计算结果为 1~3, Molnar 模型以及陈运泰等提出的理论均认为 P 波的拐角频率要高于 S 波的拐角频率<sup>[1,10]</sup>, 这与目前大多数观测事实相符。

本文所得拐角频率比值结果与张萍等人计算结果较为接近,从图 4、图 5、图 6 可见,3 个台 P 波、S 波拐角频率在  $M_L$  5.0 地震震前均出现低拐角频率阶段,每个台的 P 波和 S 波拐角频率变化曲线形态较为一致,S 波拐角频率变化曲线比 P 波拐角频率变化曲线波动要大一些。3 个台拐角频率比值的变化既有相似又有一定区别,相似之处在仙游  $M_L$  5.0 地震前都出现拐角频率比值出现明显下降,不同之处是 3 个台的拐角频率比值在仙游  $M_L$  5.0 地震前后的变化的具体形态存在差异。

莆田荔城台拐角频率比在 2012 年 06 月 14 日开始缓慢下降,2012 年 11 月 25 日达到次低值,之后逐步上升,于 2013 年 02 月 11 日又缓慢下降,2013 年 08 月 19 日达到最低值,不久在上升过程中发生  $M_L$  5.0 地震,震后快速下降;福清东张台拐角频率比从 2012 年 04 月 04 日开始出现缓慢上升的趋势,并于 2012 年 11 月 27 日达到最高值后缓慢下降,2013 年 08 月 03 日达到最低值后,在恢复接近正常比值情况下发生  $M_L$  5.0 地震,震后呈现回升趋势;惠安净峰台拐角频率比在 2012 年 11 月 25 日后缓慢上升,并于 2012 年 11 月 30 日达到最高值后缓慢下降,2013 年 08 月 19 日达到最低值,之后不久在回升过程中发生  $M_L$  5.0 地震,震后恢复到接近均值。

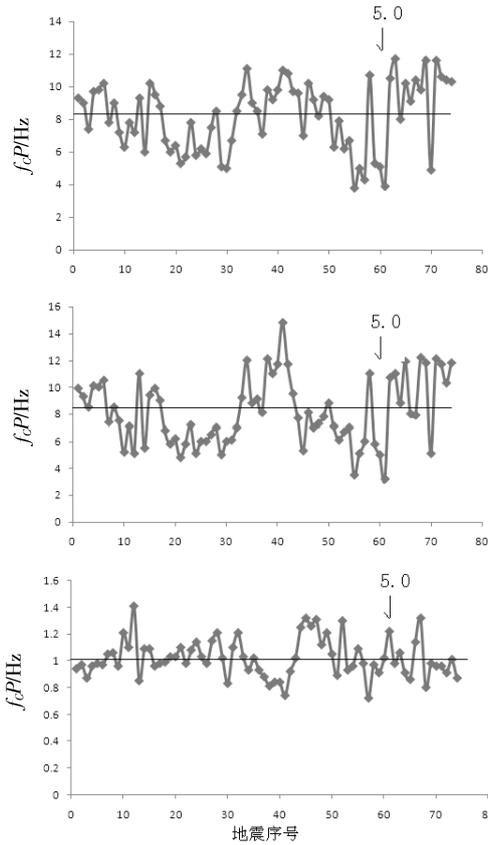


图4 莆田荔城台P波、S波拐角频率和拐角频率比值的变化曲线

Fig.4 Change curves of corner frequency of P and S wave and their ratio recorded by licheng station in Putian city

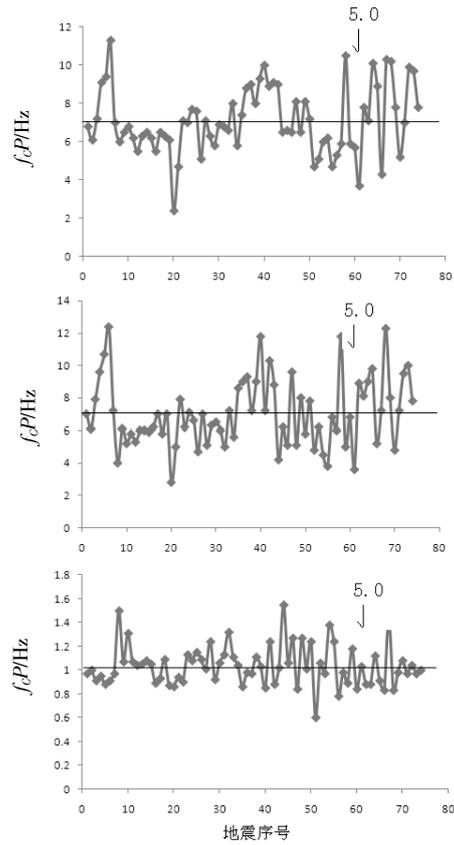


图5 福清东张台P波、S波拐角频率和拐角频率比值的变化曲线

Fig.5 Change curves of corner frequency of P and S wave and their ratio recorded by Dongzhang station in Fuqing county

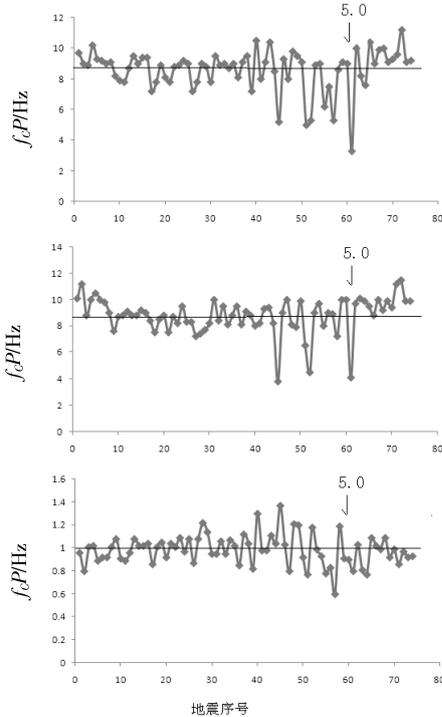


图6 惠安净峰台P波、S波拐角频率和拐角频率比值的变化曲线

Fig.6 Curves of corner frequency and their ratio of P and S wave recorded by Hui'an jinfeng station

### 3 讨论

拐角频率与震源区应力状态、发震过程有关，又受到接收台站场地、射线路径及仪器响应的影响。选用固定观测台站，记录同一地区发生的地震，断层走向、震中距、观测方位是相对稳定的，得到它们的拐角频率比值随时间变化特征，就可能反映地震震源处地下介质随时间的相对变化情况，对地震监测预报有一定参考意义<sup>[3]</sup>。

陈运泰等<sup>[1]</sup>研究认为，纵、横波拐角频率比和纵、横波速度比有关，还与破裂速度和观测点方位有关。本文研究表明，不同台拐角频率比值在强震前后变化具体形态存在差异，这反映了前述因素的影响。本文所得拐角频率比值结果与前人的理论结果和实际计算结果基本相符，3个台拐角频率比值在较大地震发生前短时间内均出现明显的下降异常，并在回返过程中发震，与张萍<sup>[3]</sup>等人岫岩5.4和5.1级地震序列研究结果较为一致；何璟林等人<sup>[7]</sup>对新丰江 $M_L$  4.9地震序列研究则认为拐角频率比呈现震前上升震后下降的过程。一个地

震序列的拐角频率比随地震序列的发展表现出一定的趋势变化特征, 可用来判断未来地震序列的发展示趋势<sup>[8]</sup>; 从国内外地震学者对大地震前后地震波谱异常特征进行研究取得结果来看, 每次地震前后的地震波谱变化特征差异较大, 地震波拐角频率比随地震序列变化特征可能与区域的应力场有关。本文研究所得仙游地震序列拐角频率比变化特征对今后该区域的地震序列的发展趋势的判识具有一定借鉴意义。

此外, 由于在地震波的处理中涉及到仪器校正等必要步骤, 拐角频率值采用人工拟合方法, 会导致人为误差, 需要积累更多基础资料, 做深入研究, 有待进一步震例检验。

#### 参考文献:

- [1] 陈运泰, 王妙月, 林邦慧, 等. 中、小地震体波的频率和纵、横波拐角频率比[J]. 科学通报, 1976 (9): 414-417.
- [2] 许健生, 尹志文. 共和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.
- [3] 张萍, 王安东. 岫岩 5.4 和 5.1 级地震前波谱异常特征研究[J]. 地震, 2006, 26 (1): 57-65.
- [4] 夏爱国, 赵翠萍. 伽师地震序列的地震波谱变化研究[J]. 内陆地震, 2007, 21 (4): 316-325.
- [5] 刘富安, 盛琰. 克拉玛依南地震波谱变化初探[J]. 高原地震, 2010, 22 (3): 33-37.
- [6] 张永久, 程万正. 雅江 6.0 级地震前后的序列的波谱变化[J]. 内陆地震, 2004, 18 (4): 340-347.
- [7] 何璟琳, 闻则刚, 吕金水. 新丰江  $M_L$  4.9 级地震序列的波谱分析 [J]. 华南地震, 2000, 20 (4): 65-70.
- [8] 朱新运, 钟羽云, 张震峰. 地震波拐角频率对地震序列的依赖性研究 [J]. 西北地震学报, 2004, 26 (2): 131-136.
- [9] 中国地震局监测预报司. 地震参数-数字地震学在地震预测中的应用 [M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [10] Molnar P, Toker B E, Brune J N. Corner frequencies of P and S waves and models of earthquake sources[J]. B.S. S.A., 1973, 63 (6): 2 091-2 104.