

袁丽文, 李 强, 陈智勇. 福建水口及仙游地震序列的谱振幅相关系数变化特征[J]. 华南地震, 2016, 36 (3): 35–42. YUAN Liwen, LI Qiang, CHEN Zhiyong. Variation Characteristics of the Correlation Coefficient of Spectral Amplitude of Shuikou and Xianyou Earthquake Sequences in Fujian[J]. South china journal of seismology, 2016, 36(3): 35–42.]

福建水口及仙游地震序列的谱振幅相关系数变化特征

袁丽文, 李 强, 陈智勇
(福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 利用福建省数字地震台网记录的波形数据, 计算了水口和仙游地震序列的谱振幅相关系数, 结果显示水口序列谱振幅相关系数在 0.90–0.98 之间变化, 相关系数高, 序列地震震源机制解相似程度高; 仙游序列谱振幅相关系数在 0.72–0.81 之间变化, 相关系数略低, 震源机制解整体相似程度不高。结合福建地区同期地震活动背景水平分析认为, 较高的谱振幅相关系数与福建地区较高的背景应力积累水平存在一定相关性。水口和仙游序列谱振幅相关系数时序变化显示, 序列最大地震发生前的谱振幅相关系数存在上升变化, 显示较大地震发生前震区应力水平有增强迹象。

关键词: 地震序列; 谱振幅相关系数; 震源机制一致性; 应力水平

中图分类号: P315.31 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2016) 03-0035-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.03.005

Variation Characteristics of the Correlation Coefficient of Spectral Amplitude of Shuikou and Xianyou Earthquake Sequences in Fujian

YUAN Liwen, LI Qiang, CHEN Zhiyong
(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

Abstract: By using digital seismic waves recorded by Fujian Digital Seismic Network, the paper calculated the correlation coefficient of spectral amplitude of Shuikou and Xianyou earthquake sequences. The results shows that the correlation coefficient of spectral amplitude of Shuikou varies between 0.90–0.98, the high value of correlation coefficient indicates that the focal mechanism of the Shuikou small earthquakes are more consistent; the correlation coefficient of spectral amplitude of Xianyou varies between 0.72–0.81, the lower value of correlation coefficient indicates that the focal mechanism of the Shuikou small earthquakes are less consistent. Considering the seismicity background in Fujian area, the high correlation coefficient of spectral amplitude is related to the high background stress level in Fujian. The rising changes of correlation coefficient of spectral

收稿日期: 2016-07-20

基金项目: 福建省地震局青年科技基金(Y201302)资助

作者简介: 袁丽文(1982–), 女, 工程师, 硕士, 主要从事地震活动性及数字地震学研究工作。

E-mail: lwysz@126.com.

amplitude before maximum earthquake may be caused by the enhance of regional stress level.

Keywords: Earthquake sequence ; Correlation coefficient of spectral amplitude; Consistency of focal mechanism; Stress level

0 引言

基于多种孕震物理模式的研究发现,在大地震孕育过程中,震前在震源区及邻近地区应力水平有增强过程。在区域应力水平增强的背景下,震源区介质的微裂隙呈现某一优势方向上的定向排列,介质各向异性增强,强震前的前震序列震源机制解应趋于一致。我国研究学者对国内外多次强震前小震的震源机制解进行了研究,显示出主震前中小地震震源机制解趋于一致的现象明显^[1-5]。因此,利用小震震源机制解一致性判定小震群后续地震活动趋势,进而判定小震群序列类型是可行的。然而,受观测台网布局和台站密度等的观测条件的限制,有时直接求解小震群中大量中小地震的震源机制解存在一定困难,其求解精度也难以保证。因此,Lund 等^[6]提出了微震体波谱振幅相关分析方法,将求解大量中小地震震源机制解是否相似的问题转化为求解其零频谱振幅是否相关的。

国内许多研究人员利用谱振幅相关系数方法开展了一系列地震序列的研究工作,获得了谱振幅相关系数与序列地震震源机制一致性、区域应力水平和地震活动趋势判定等的研究成果。崔子健^[7]等对云南西北部 5 组小震群序列开展了震例的回溯性检验工作,通过谱振幅相关系数的研究显示,前兆震群的谱振幅相关系数较高,一般性的非前兆震群活动其谱振幅相关系数较低,提出可利用谱振幅相关系数的大小判定小震群的前兆性质,从而进行区域地震危险性预测研究。黄浩等^[8]对滇西地区 6 组地震序列(含 4 种不同序列类型)进行谱振幅相关系数研究,分析认为其较高的谱振幅相关系数与区域较高的应力积累水平有关,利于后续中强地震的发生,但不能把谱振幅相关系数较高作为判定前震序列的充分条件。王莹等^[9]对陕西及周边地区 4 个中小地震丛集序列进行了研究,指出谱振幅相关系数较高的地震序列所在区域,其后续强震危险性较大。除了上述利用强震发生前的小震序列谱振幅相关系数进行中强地震活动趋势预测之外,也有研究通过对主震后余震序列谱振幅相关系数的时序分析,指出余震活动时段的谱振幅相关系数上升或持续高值可能与强余震

活动或震源区周边中强地震活动有关^[10-11],若余震序列的谱振幅相关系数下降,则后续余震活动发生更大地震可能性不大^[12]。张致伟等^[13]将谱振幅相关系数和地震视应力研究结合起来,对四川自贡和长宁两个注水诱发的地震序列进行了研究,指出谱振幅相关系数的高值不一定对应区域处于高应力水平,也可能是区域应力场受到流体作用影响。此外,亦有研究人员利用振幅相关系数的聚类分析法研究序列地震震源机制变化特征,由震源机制一致性增强或减弱的变化来判定区域未来发生中强地震的危险性^[14-16]。

本文利用谱振幅相关系数方法,对近年来福建省最显著的水口和仙游地震序列活动进行分析研究,类比已有震例的研究结果,分析两个序列谱振幅相关系数变化与震源机制一致性、序列显著地震活动和区域应力水平的相关性。

1 原理及方法

地震记录位移谱包含了震源效应、地震与台站之间的传播路径效应、台站场地效应、台站附近的地面运动噪声、地震仪的仪器响应和台站附近地表自由表面效应等信息,可将其表达为:

$$U_{ij}(f)=[S_i(f)P_{ij}(f)L_j(f)+N_j(f)]I_j(f)Sur_j \quad (1)$$

其中, $U_{ij}(f)$ 表示地震 i 在台站 j 记录到的位移谱, f 为频率; i 为地震; j 为台站; $S_i(f)$ 为地震 i 包含辐射图型因子的震源谱; $P_{ij}(f)$ 为地震 i 与台站 j 之间的传播路径效应; $N_j(f)$ 为台站 j 附近的地面运动噪声; $L_j(f)$ 为台站 j 处的局地场地效应; $I_j(f)$ 为台站 j 的仪器响应; Sur_j 为台站 j 附近地表的自由表面效应。

$S_i(f)$ 为地震 i 包含辐射图型因子的震源谱,可表达为:

$$S_i(f)=S'_i(f)\varphi_{ij} \quad (2)$$

式(2)中, $S'_i(f)$ 为地震 i 的震源谱; φ_{ij} 为地震 i 的震源辐射图型因子。震源辐射图型因子包含了震源处地震的震源机制信息(断层的走向、倾角、滑动角)和震源位置信息(震源到台站的方位角、离源角)。

根据 Brune 模型^[17],地震 i 的震源谱可表达为:

$$S_i(f) = \frac{\dot{\Omega}_{0i}}{1+(ff_c)^2} \quad (3)$$

式(3)中, $\dot{\Omega}_{0i}$ 为地震 i 的零频极限值; f_c 为拐角频率。

将(3)式带入(2)式中有:

$$S_i(f) = \frac{\dot{\Omega}_{0i} \varphi_{ij}}{1+(ff_c)^2} \quad (4)$$

式(4)中, $\dot{\Omega}_{0i} \varphi_{ij}$ 表示台站 j 记录到的地震 i 的包含辐射图型因子的震源谱零频极限值, 即谱振幅 $\dot{\Omega}_{0ij}$ 。

地震 i 与台站 j 之间的传播路径效应可表示为:

$$P_{ij}(f) = G_{ij} e^{-\pi R_{ij} f} / v Q(f) \quad (5)$$

式(5)可见, 地震与台站间的传播路径效应受到几何扩散因子 G_{ij} 、震源距 R_{ij} 、介质品质因子 $Q(f)$ 和地震波波速 v 的影响。当两次地震被同一个台站记录到, 且两次地震之间的距离足够接近时, 其传播路径效应几乎相等。

如果从地震记录中扣除地面运动噪声和仪器响应, 并令 $L_j(f) = L_j(f) \text{Sur}_j$ 后, 则地震 i 在台站 j 的地面位移谱 $U_{ij}(f)$ 可表示为:

$$U_{ij}(f) = S_i(f) P_{ij}(f) L_j(f) \quad (6)$$

对台站 j 记录的两次地震 x 、 y , 则有:

$$U_{xj}(f) = S_x(f) P_{xj}(f) L_j(f) \quad (7)$$

$$U_{yj}(f) = S_y(f) P_{yj}(f) L_j(f) \quad (8)$$

当地震 x 和地震 y 的距离足够接近时, 地震射线到同一台站的传播路径几乎一样, 即 $P_{xj}(f)$ 与 $P_{yj}(f)$ 几乎相等, 根据公式(4)可见, 台站 j 记录到的地震 x 和地震 y 的地面运动位移谱 $U_{xj}(f)$ 、 $U_{yj}(f)$ 与 $\dot{\Omega}'_{0x}$ 、 $\dot{\Omega}'_{0y}$ 和 φ_{xj} 、 φ_{yj} 有关。当震源机制相同的情况下, 即 $\varphi_{xj} = \varphi_{yj}$ 时, 地面运动位移谱只与 $\dot{\Omega}'_{0x}$ 、 $\dot{\Omega}'_{0y}$ 的相对大小有关; 在震源机制不同的时, 则还与表征震源机制信息的 φ_{xj} 、 φ_{yj} 有关。因此, 通过地震记录反演谱振幅时, 若震源机制相同, 反演得到的谱振幅 $\dot{\Omega}_{0xj}$ 和 $\dot{\Omega}_{0yj}$ 的相对大小只与 $\dot{\Omega}'_{0x}$ 和 $\dot{\Omega}'_{0y}$ 的相对大小有关; 否则, 还与震源机制有关。因此, 可由台站记录反演地震 x 与 y 的谱振幅, 通过计算相关系数 r_{xy} 来描述两次地震震源机制是否相似的问题。

地震 x 与 y 的谱振幅相关系数 r_{xy} 可表示为^[6]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{j,l} (x_{jl} - \bar{x})(y_{jl} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j,l} (x_{jl} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{j,l} (y_{jl} - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式(9)中: x_{jl} 和 y_{jl} 分别表示台站 j 记录的地震 x 和 y 的 l 分量波形资料反演所得到的谱振幅 $\dot{\Omega}_{0ij}$ 和 $\dot{\Omega}_{0ij}$ 的对数值; l 为地震波形的分量, 包含 P 波垂向、径向和 S 波垂向、径向和切向共 5 个分量, 对地震波形的 5 分量分别计算谱振幅, 而后进行互相关计算, 可以充分利用地震波形所包含的震源机制信息, 提高研究结果信度。

对一组地震序列按地震发生时间顺序进行排列, 序列第 $m(m \geq 2)$ 次地震与前面 $m-1$ 次地震编为一组, 计算组内两两地震之间的谱振幅相关系数 r_{xy} , 将所有两两地震间的相关系数求算数平均值, 则得到第 m 个地震时的谱振幅相关系数。以滑动步长为 1 进行滑动, 依次完成每个地震时刻谱振幅相关系数的计算, 则可得到随时间变化的谱振幅相关系数。

根据上述原理分析, 对水口和仙游地震序列采取如下计算步骤:

(1) 收集水口和仙游序列地震波形资料。

(2) 将南北、东西和垂直向的三分量地震记录旋转到径向、切向和垂直向上, 采用延迟时间窗方法^[18-19]计算地震位移谱。图 1 为本文使用的一个地震的旋转后的波形及其位移谱图像。

(3) 分别利用水口和仙游周边地区背景地震资料(图 2), 采用多台联合反演方法^[20]反演水口和仙游地区的 Q 值, 得到水口地区 $Q_p = 34.8f^{0.906}$, $Q_s = 83.5f^{0.829}$; 仙游地区 $Q_p = 47.7f^{0.843}$, $Q_s = 210.5f^{0.631}$ 。

(4) 采用 Moya 等^[21]引入的遗传算法反演各台站的场地效应。

(5) 获得经过传播路径、场地响应、噪声和仪器响应校正后的谱振幅, 并计算谱振幅相关系数。

2 计算结果

2.1 2007 至 2008 年水口地震序列

福建水口地区自 1993 年 7 月开始小震活动, 之后地震活动呈断续起伏状态, 但震级水平不高, 但自 2007 年 10 月开始, 水口地区地震活动频次和强度水平显著上升, 截止 2008 年 12 月共发生 $M_L 2.5$ 级以上地震 45 次, 其中 $M_L 4.0$ 级以上地震 3 次, 最大地震为 2008 年 3 月 6 日福建水口 $M_L 4.8$ 级地震(26.37°N, 118.67°E)。本研究利用南平台(NAP)、福州台(FUZ)、闽清台(MIQ)、古田台(GUT)、尤溪台(YOX)、宁德台(NID)、德化汤头台(DHTT)等 7 个地震台站记录到的 33 次 $M_L 2.5$

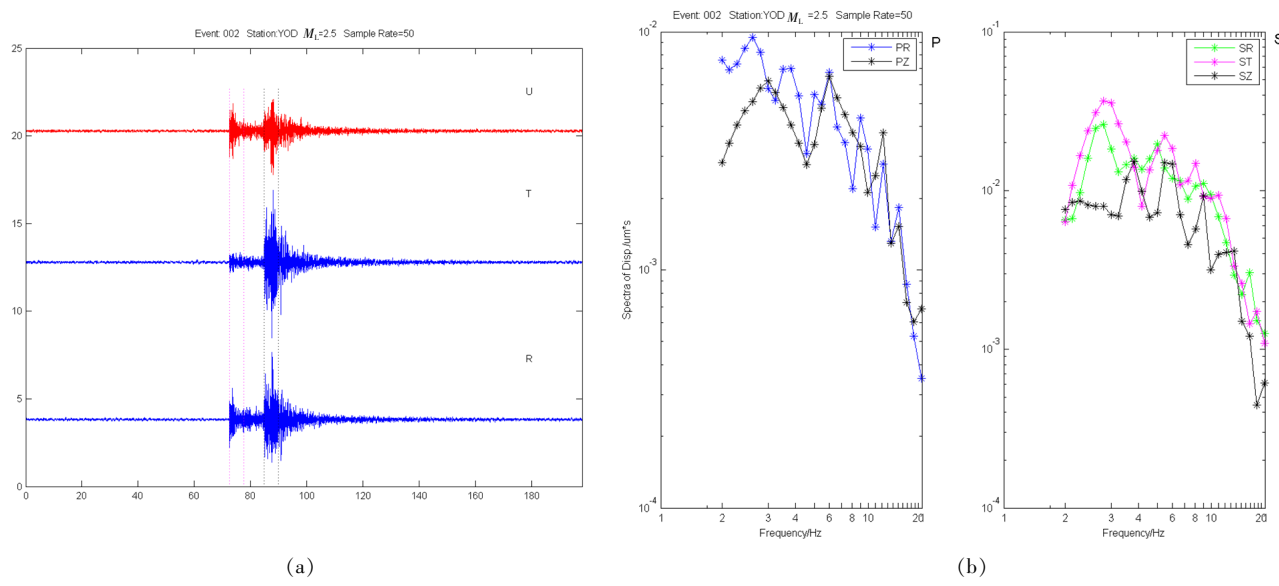


图 1 永定台(YOD)记录到的一次地震的波形(a)及计算所得的相应观测位移谱(b)

Fig.1 Waveform of one earthquake recorded by YOD station (a), and the calculated spectrum of the observed displacement (b)

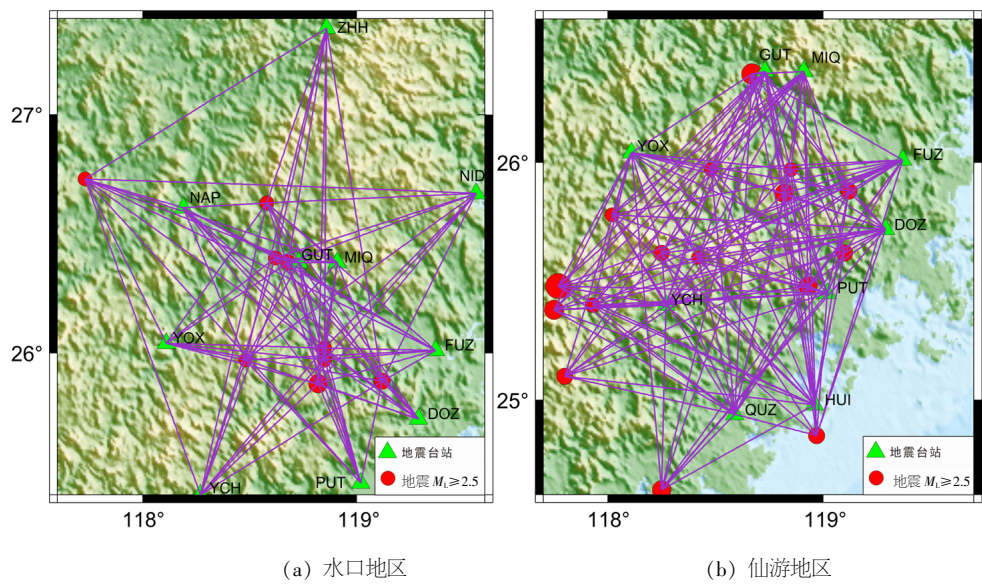


图 2 地震与台站射线分布图

Fig.2 Distribution of earthquakes and stations

级以上地震 (图 3) 的波形资料计算谱振幅相关系数。水口序列地震的谱振幅相关系数在 0.90~0.98 之间变化(图 4), 相关系数数值高, 表明序列小震震源机制解一致性好。

2.2 2012 至 2014 年仙游地震序列

福建仙游地区自 2010 年 10 月开始小震群活动, 随后地震活动断续起伏, 截止 2014 年 12 月序列仍有 M_L 2.0 级以上地震活动。序列共发生 M_L 4.0 级以上地震 5 次, 其中最大地震为 2013 年 9 月 3 日福建仙游 M_L 5.0 (M_s 4.8) 级地震(25.63°N,

118.75°E)。本研究利用安溪长坑台 (AXCK)、安溪参内台 (AXCN)、德化唐寨台 (DHTZ)、福清东张台 (FQDZ)、福州城门台 (FZCM)、福州琅岐台 (FZLQ)、福州日溪台 (FZRX)、惠安净峰台 (HAJF)、闽侯竹岐台 (MHZQ)、闽清东桥 (MQDQ)、莆田埭头 (PTDT)、莆田荔城台 (PTLC)、莆田湄洲台 (PTMZ)、莆田南日台 (PTNR)、泉港前黄台 (QGQH)、泉州台 (QZH)、仙游西苑台 (XYXY)、永春石鼓台 (YCSG)、永泰葛岭台 (YTGL)、永泰盖洋台 (YTGy)、尤溪坂面台 (YXBM) 等 21 个地震台记录到的 52 次

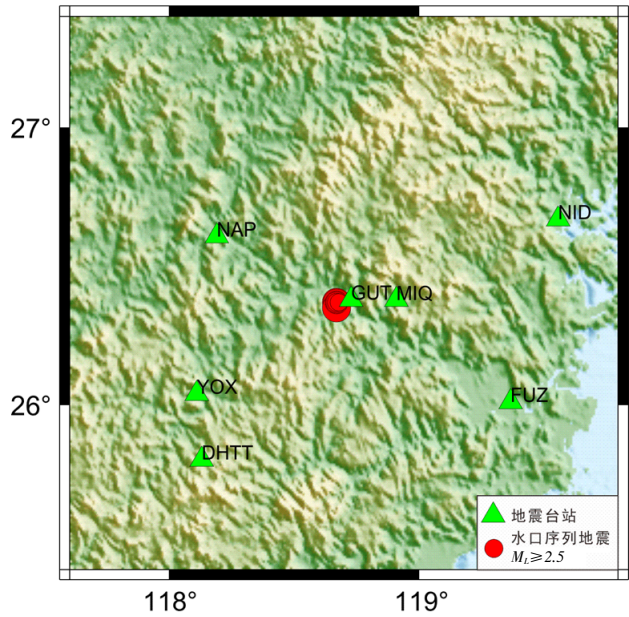


图 3 2007—2008 年水口地震序列及周边台站分布
Fig.3 Earthquakes and stations around Shuikou area between 2007 and 2008

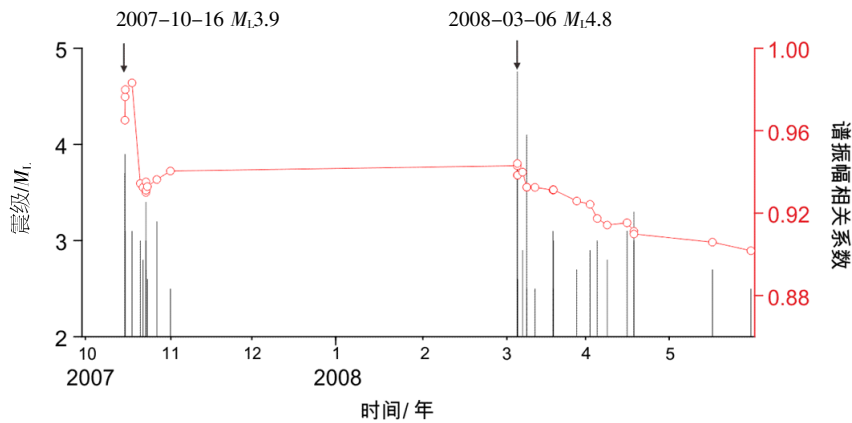


图 4 水口地震序列谱振幅相关系数和 $M-t$ 图
Fig.4 The correlation coefficient of spectral amplitude and $M-t$ plot of Shuikou earthquake sequence

M_L 2.5 级以上地震(图 5)的波形资料计算谱振幅相关系数。仙游序列地震谱振幅相关系数在 0.72~0.81 之间变化(图 6), 相关系数略低, 说明序列小震震源机制一致性不高。

3 讨论与结论

3.1 谱振幅相关系数与序列地震参数

谱振幅相关系数从震源物理角度提供了对震源机制解一致性、区域应力场状态的描述, 为判定地震序列活动趋势提供了重要信息。在我国的地震分析预报实践中, 许多学者利用地震目录, 通过多大量震例的分析研究, 总结出了利用表征

震群能量释放均匀度 U 值、震群归一化信息熵 K 值、序列地震时间丛集程度 ρ 值、序列频次衰减快慢程度 h 值和序列大小地震比例关系 b 值等对序列活动特征及趋势进行判定, 并提出了一套关于前兆震群判定的指标体系^[22-24]。当其中任一参数符合前兆震群阈值范围, 则判定震群为前兆震群, 通常多指标判定效果优于单一指标。鉴于水口和仙游地震序列持续活动时间较长, 序列地震活动活跃-平静交替现象明显, 根据序列参数定义, 对两个序列进行分时段序列参数的计算。 U 值、 K 值、 ρ 值、 b 值和 h 值计算结果见表 1。

从表 1 中看出, 编号 1 的水口序列 h 值, ρ 值符合前震序列判断阈值, 该序列具有前兆性质,

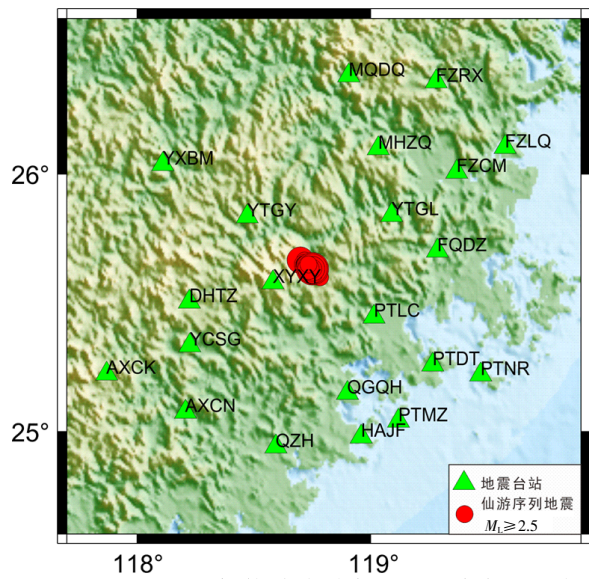


图 5 2012—2014 年仙游地震序列及周边台站分布
Fig.5 Earthquakes and stations around Xianyou area between 2012 and 2014

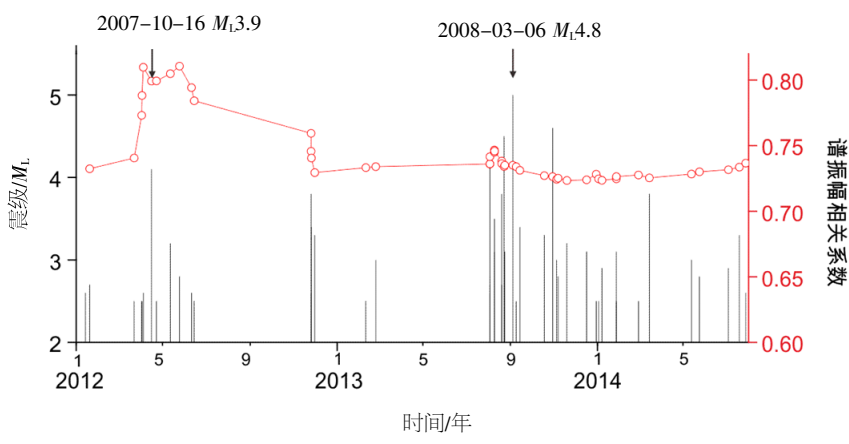


图 6 仙游地震序列谱振幅相关系数和 $M-t$ 图
Fig.6 The correlation coefficient of spectral amplitude and $M-t$ plot of Xianyou earthquake sequence

表 1 水口、仙游地震序列测震学参数统计表
Table 1 The seismometry parameters of Shuikou and Xianyou earthquake sequence

编号	地震序列		序列参数计算结果				
	名称	起止时间	b 值	h 值	U 值	K 值	ρ 值
1	水口	2007-10-16~2007-12-31	0.79	0.71	0.27	0.59	0.54
2	水口	2008-03-06~2008-09-22	0.82	1.23	0.40	0.29	0.49
3	仙游	2012-04-15~2012-08-07	0.69	0.69	0.52	0.32	0.49
4	仙游	2013-08-03~2013-08-23	0.47	1.72	0.83	0.51	0.41
5	仙游	2013-09-04~2014-12-31	0.79	1.11	0.66	0.33	0.46

且该时段内谱振幅相关系数高，尤其在 2007 年 10 月为研究时段的最高值，显示这一时期区域应力场增强，小震震源机制解一致性程度增强，随后发生 2008 年 3 月 6 日水口 M_L 4.8 级地震(序列最大地震)，该地震后水口序列持续活动；编号 2 地

震序列参数计算结果仅 ρ 值还存在一定的前兆性质，同期谱振幅相关系数虽然数值高，但整体呈下降趋势(图 4)，随后水口序列虽然仍持续了长时间的活动，但整体地震活动水平呈衰减状态。编号 3 的仙游序列除 K 值不符合前震序列判断阈值

外,其余参数均表现出明显的前兆性质,该时段发生的最大地震为2012年4月15日仙游 M_L 4.1级地震,谱振幅相关系数为研究时段内最高,且 M_L 4.1级地震前相关系数逐渐增大,显示小震震源机制解趋于一致;编号4与编号5的仙游序列 U 值和 ρ 值符合前震序列判断阈值,显示序列具有一定的前兆性质,但对比编号3的前兆性质不明显,同期谱振幅相关系数处于研究时段较低水平(图6)。综上所述,水口和仙游序列分时段的序列参数计算均显示出一定的前兆性质,两个序列最大地震发生前的序列参数其前兆性质更为明显,相应的谱振幅相关系数也相对较高。

3.2 谱振幅相关系数与震源机制解

利用P初动求解了研究时段内水口序列 M_L 3.0级以上地震震源机制,显示具有较好的一致性,与谱振幅相关系数在高值波动(0.90~0.98)所显示出的震源机制解一致性好是吻合的;利用Hash方法求解了研究时段内仙游地区150次 M_L 2.0级以上震源机制,其震源机制解一致性较好,但其谱振幅相关系数在0.72~0.81之间变化,数值略低,显示出震源机制解一致性程度不高,分析认为这种差异性的存在可能与应力水平的高低有关。

3.3 谱振幅相关系数与应力水平

从谱振幅相关系数的时序变化来看,在两个序列最大地震发生前,谱振幅相关系数均存在高值上升而后下降的变化,显示出序列显著地震前局地的区域应力场有增强的现象。从谱振幅相关系数数值来看,水口序列高于仙游序列。本文水口序列谱振幅相关系数研究时段(2007—2008年)前后,福建省正处于 M_L 4.0级地震集中活跃时期,2007—2009年福建省陆域及近海发生10次 M_L 4.0级以上地震(含水口地区3次),是我省1971年以来陆域 M_L 4级地震最活跃时期,其中9次发生在以水口为中心半径200 km范围内,水口序列的谱振幅相关系数的高值与福建地区整体处于高应力背景水平有关。仙游序列谱振幅相关系数数值略低,仙游序列 M_L 4.0级地震活动前福建省 M_L 4.0级以上地震持续平静超过3年,且 M_L 3级地震活动水平偏低,仙游序列地震活动平静后,福建地区地震活动也逐渐平静,截止2015年底超过2年福建地区未发生 M_L 4.0级以上地震。由此可见,仙游序列发生前后福建地区中等地震活动水平低,福建地区处于较低的应力背景水平,与其谱振幅

相关系数偏低一致。仙游序列中等地震活动主要受制于小区域的应力调整活动,不存在福建整体区域的高应力背景。

致谢:中国地震局预测研究所崔子健博士为本研究提供了计算程序,并在程序使用等方面提供了悉心的帮助与指导;福建数字地震台网为本研究提供了高质量的观测数据。作者在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 陈颙. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, 1978, 21 (2): 142-459.
- [2] 刁桂苓, 于新昌. 唐山地震前后京、津、唐、张地区的综合断层面解[J]. 西北地震学报, 1980, 2 (3): 39-47.
- [3] 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 强震前后震源区应力场变化一例[J]. 地震学报, 1994, 16 (1): 64-69.
- [4] 王俊国, 刁桂苓. 千岛岛弧大震前哈佛大学矩心矩张量(CMT)解一致性的预测意义[J]. 地震报, 2005, 27 (2): 178-183.
- [5] 刁桂苓, 徐锡伟, 陈于高, 等. 汶川 M_w 7.9和集集 M_w 7.6地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义[J]. 地球物理学报, 2011, 54 (1): 128-136.
- [6] Lund B, Boevarsson R. Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2002, 92 (6): 2 419-2 433.
- [7] 崔子健, 李志雄, 陈章立, 等. 判别小震群序列类型的新方法研究——谱振幅相关分析法[J]. 地球物理学报, 2012, 55 (5): 1 718-1 724.
- [8] 黄浩, 付虹. 2008年以来滇西地区地震序列的谱振幅相关系数变化特征[J]. 地震学报, 2014, 36 (4): 631-639.
- [9] 王莹, 赵韬, 刘春. 陕西及周邻地区几个地震丛序列的震源谱振幅相关研究[J]. 高原地震, 2015, 27 (1): 1-7.
- [10] 黄浩, 付虹, 王培玲, 等. 云南鲁甸6.5级地震序列的谱振幅相关系数变化特征[J]. 地震研究, 2014, 37 (4): 532-536.
- [11] 崔子健, 李志雄, 陈章立, 等. 云南景谷 M_s 6.6、云南沧源 M_s 5.5地震谱振幅相关系数特征分析[J]. 地震研究, 2015, 38 (4): 535-540.
- [12] 崔子健, 李志雄, 陈章立, 等. 中国东北2次中强地震谱振幅相关系数研究[J]. 中国地震, 2105, 31 (2): 218-226.
- [13] 张致伟, 乔慧珍, 吴朋, 等. 注水诱发地震的谱振幅相关系数及视应力研究[J]. 地震研究, 2015, 38 (1): 42-50.
- [14] 朱航, 刘杰, 陈天长. 采用体波谱振幅相关系数方法研究地震序列的震源机制变化过程[J]. 地震,

- 2006, 26 (2): 1-11.
- [15] 李霞, 董翔, 刘希强, 等. 采用体波谱振幅相关系数方法研究地震集中区震源机制变化过程[J]. 西北地震学报, 2010, 32 (3): 231-236.
- [16] 刘泽民, 刘东旺, 夏仕安, 等. 体波谱振幅相关系数法在肥东地震序列震后判定中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2010, 31 (5): 13-16.
- [17] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake [J]. J Geophy Res, 1970, 75 (26): 4 997-5 009.
- [18] Chael E P. Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick[J]. Bull.Seism.Soc.Am., 1987, 77 (2): 347-365.
- [19] 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理报, 2003, 46 (1): 54-61.
- [20] Atkinson G M, Mereu R F. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada [J]. Bull Seismol Soc Am, 1992, 82 (5): 2 014-2 031.
- [21] Moya A, Aguirre J, Irikura K. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using geneticalgorithms[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2000, 90 (4): 977-992.
- [22] 国家地震局预测预防司. 测震学分析预报方法[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [23] 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [24] 吴忠良. 关于 b 值应用于地震趋势预测的讨论[J]. 地震学报, 2001, 23 (5): 548-551.