

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^{*}

崔子健¹, 李志雄², 陈章立³

(1. 中国地震局地震预测研究所 地震预测重点实验室, 北京 100036; 2. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049;
3. 中国地震局, 北京 100036)

摘要: 作为谱振幅相关分析法的拓展应用, 计算了2014年10月7日云南景谷 $M_s 6.6$ 地震、2015年3月1日云南沧源 $M_s 5.5$ 地震余震序列的谱振幅相关系数。结果显示, 景谷地震后谱振幅相关系数维持在高值, 主震后2个月, 发生了 $M_s 5.8$ 、 5.9 强余震。该高值体现出震源机制具有较高的一致性和较强的区域应力水平, 有利于强余震的发生和区域中强地震丛集。沧源余震序列谱振幅相关系数的结果与景谷地震相似, 一直处于高值。景谷地震与沧源地震所在地区历史地震序列以主—余型为主, 不能简单地利用谱振幅相关系数的绝对值预测后续地震的大小, 但两个序列的高值也许显示滇南较大区域目前正处于强应力状态下, 存在发生中强地震的背景。

关键词: 景谷地震; 沧源地震; 谱振幅相关系数; 震源机制一致性; 余震序列

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)04-0535-06

0 引言

地震震源机制解的计算结果, 无论是对区域构造应力场的研究, 还是对于地震预测相关方面的研究, 都起着举足轻重的作用。已有研究表明, 强震受到构造应力场的制约, 一般情况下震源机制与应力场的方向相吻合(李钦祖等, 1982)。但地震震源机制解的统计平均与构造应力场方向并不完全一致(Yamakawa, 1971), 而大量研究表明, 大震之前小地震震源机制趋于主震震源机制的现象在一定程度上代表了应力方向集中产生于主震破裂的应力方向上。Wiemer和Wyss(2002)研究了美国1992年Landers7.3级地震前和1999年Hector Mine7.1级地震前, 震中及附近地区中等地震的滑动角与断层滑动角之差的变化, 发现滑动角偏差越小, 研究区域应力方向越一致, 发生较大地震的危险性相对较高。陈颢(1978)根据邢台、海城前震序列的研究, 提出利用震源机制一致性可作为判定前震序列的新参数。刁桂苓等

(1994, 2011)根据多个震例的研究指出, 主震前中小地震震源机制解趋于一致; 王俊国和刁桂苓(2005)根据千岛弧地区震源机制解一致性特征, 提出利用震源机制和构造应力场的一致性参数进行地震预测的思路。

受台网布局和观测点密度的制约, 直接求解诸多小地震的震源机制解往往存在较大的困难, 也难以精确给出其中多数小地震的震源机制解。为了克服这一困难, 朱航等(2006)、崔子健等(2012)根据Lund和Böðvarsson(2002)提出的微震体波谱振幅相关分析的方法, 对几个震例进行研究, 结果表明, 前震序列的谱振幅相关系数较高, 表现出震源机制相似性较强的特点。

在实际发生的强震中, 主—余型地震序列数目远多于前—主—余型序列。作为谱振幅相关分析法判别小震群序列类型应用研究的拓展, 本文通过研究发生在滇南地区的2例主—余型地震序列(2014年10月7日云南景谷 $M_s 6.6$ 地震序列、2015年3月1日云南沧源 $M_s 5.5$ 地震序列)的谱振幅相关系数的特征, 探讨该方法在中强地震后

^{*} 收稿日期: 2015-03-31.

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2012IES0201)和中国地震局监测预报司震情跟踪青年课题(2015010126)联合资助.

趋势分析中应用的可能。

1 谱振幅相关分析法

地震记录位移谱 $U_{ij}(f)$ 可表达为

$$U_{ij}(f) = [S_i(f)P_{ij}(f)L'_j(f) + N_j(f)]I_j(f)\text{Sur}_j. \quad (1)$$

式中, $U_{ij}(f)$ 为台站 j 记录的地震 i 的位移谱; f 为频率; $S_i(f)$ 为地震 i 包含辐射图型因子的震源谱; $P_{ij}(f)$ 为地震 i 至台站 j 之间的传播路径效应, 用于描述地震波在传播过程中的衰减; $L'_j(f)$ 为台站 j 的局部场地效应; $N_j(f)$ 为台站 j 附近的地面运动噪声; $I_j(f)$ 为台站 j 的仪器响应; Sur_j 为台站 j 附近地表自由表面效应。

$S_i(f)$ 表示为

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

其中, $S'_i(f)$ 为地震 i 的震源谱。根据 Brune 模型 (Brune, 1970), $S'_i(f)$ 可表示为

$$S'_i(f) = \frac{\Omega'_{0i}}{1 + (f/f_c)^2}. \quad (3)$$

式中, Ω'_{0i} 为地震 i 的震源谱低频渐近线值; f_c 为拐角频率。

式 (2) 中的 ϕ_{ij} 为震源辐射图型因子, 由震源机制解的断层面走向、倾角、滑动角以及台站 j 相对于震源 i 的位置所确定, 反映了震源机制信息。根据震源理论可知, 同一个震源的 P、S 波辐射图型因子不同, 而利用二者的综合信息可以得到更为可靠的震源机制解 (Kisslinger *et al.*, 1981)。所以, 本文综合利用 P 波和 S 波资料进行相关性研究。

定义谱振幅为

$$\Omega_{0ij} = \Omega'_{0i}\phi_{ij}. \quad (4)$$

式 (1) 中的 $P_{ij}(f)$ 可表示为

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

式中, G_{ij} 为几何扩散因子, R_{ij} 为震源距, $Q(f)$ 为介质的品质因子, v 为地震波传播速度。

从地震记录中扣除噪声和仪器响应, 令 $L_j(f) = L'_j(f)\text{Sur}_j$ 后, 则地震 i 在台站 j 记录到的地面运

动位移谱为

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

对台站 j 记录的 2 次地震 x 、 y , 有

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

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

由式 (7)、(8) 及式 (2)、(3) 可以看出, 若这两次地震震中位置足够接近, 即其间距远小于震源距 R_{ij} , 且震源机制 (辐射图型因子) 相同, 则台站 j 记录这两次地震的地面运动位移谱 $U_{xj}(f)$ 与 $U_{yj}(f)$ 的相对大小只与这两次地震 Ω'_0 的相对大小有关; 若震源机制不同, 则还应与这 2 次地震震源机制的差异有关。所以, 当地震记录反演谱振幅时, 若这两次地震震源机制相同, 则反演得到的 Ω_{0xj} 和 Ω_{0yj} 的相对大小只与 Ω'_{0x} 和 Ω'_{0y} 的相对大小有关; 如果震源机制不同, 则还与震源机制有关。因此可由台站的地震波形记录反演地震 x 与 y 的谱振幅 Ω_{0xj} 、 Ω_{0yj} , 通过计算其相关系数 r_{xy} 来确定震源机制是否相似。地震 x 、 y 的谱振幅相关系数 r_{xy} 可表示为 (Lund, Böðvarsson, 2002)

$$r_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^5 (x_{jl} - \bar{x})(y_{jl} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^5 (x_{jl} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^5 (y_{jl} - \bar{y})^2}}. \quad (9)$$

式中, x_{jl} 、 y_{jl} 分别表示台站 j 记录的地震 x 、 y 的 l 分量波形资料所反演得到的谱振幅 Ω_{0xj} 、 Ω_{0yj} 的对数值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x_{jl} 与 y_{jl} 的平均值; n 表示所使用的台站数目; l 取值为 1~5, 依次表示径向、垂向分量的 P 波记录, 径向、切向、垂向的 S 波记录。

对于谱振幅相关系数随时间变化特征分析, 有两种做法: ①将序列中的地震按发生时间顺序排列, 地震 m 与其前面 $(m-1)$ 个地震为一组, 计算组内每 2 个地震的 r_{xy} , 得出 $N = \frac{1}{2}m(m-1)$ 个相关系数 r_{xy} , 对 r_{xy} 求算术平均值, 其结果代表了地震 m 时刻的组内谱振幅的相关程度。以步长为 1 进行滑动, 计算每个组内的谱振幅相关系数的算术平均值, 最后可以得到随时间变化的谱振幅相关系数; ②以固定窗长 (如窗长为 5), 步长为 1 进行滑动。考虑到景谷地震序列余震数

目较多, 采用第2种滑动方式进行计算; 而沧源地震序列余震数目较少, 采用第1种滑动方式进行计算。

根据上述原理分析, 设计如下计算步骤: ①对地震序列资料精确定位; ②将三分量地震记录旋转为径向、切向、垂向, 并采用延迟时间窗方法计算其位移谱 (Chael, 1987; 黄玉龙等,

2003), 图1为孟连台记录到的一个 $M_L4.7$ 地震波形及其位移谱图像; ③采用多台联合反演方法反演 Q 值 (Atkinson, Meren., 1992); ④采用 Moya 等 (2000) 给出的方法反演台站场地响应; ⑤获得经过路径及场地校正后的谱振幅 (刘杰等, 2003); ⑥计算各分组的谱振幅相关系数, 得到谱振幅相关系数随时间变化特征。

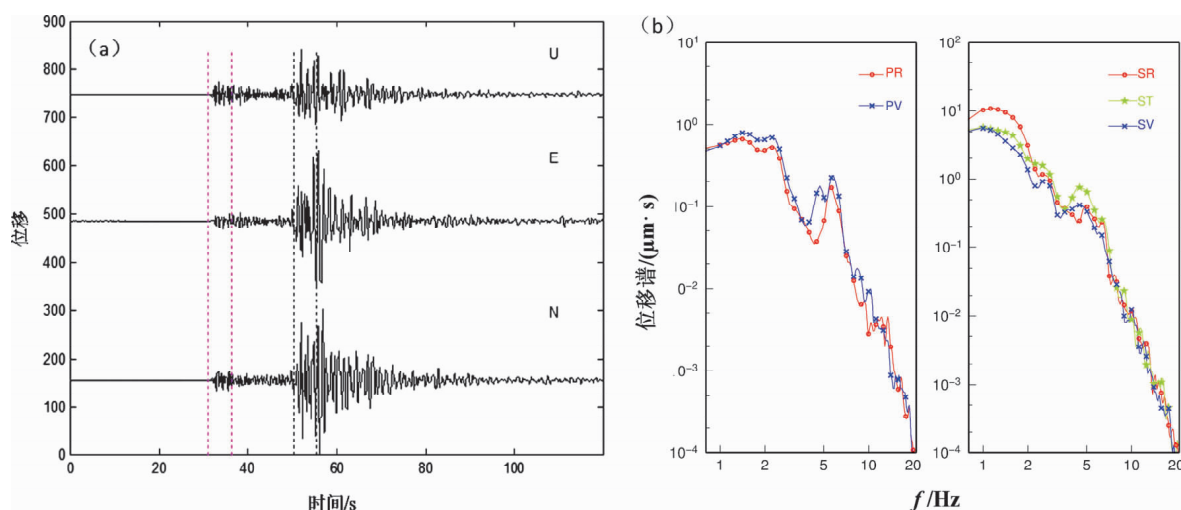


图1 孟连台记录到的 2014-10-07 $M_L4.7$ 地震的波形 (a) 及其计算得到的观测位移谱 (b)

Fig. 1 Waveform of $M_L4.7$ earthquake on Oct. 7, 2014 recorded by Menglian Station (a) and the calculated observed displacement spectral (b)

2 谱振幅相关系数计算结果

2.1 2014 年景谷 $M_s6.6$ 地震

2014 年 10 月 7 日云南省普洱市景谷傣族彝族自治县发生 $M_s6.6$ 地震, 震中位置 (23.4°N , 100.5°E)。该地震序列为主-余型, 最大余震为 12 月 6 日 $M_s5.8$ 、 5.9 地震。 $M_s6.6$ 、 5.8 、 5.9 地震的震源机制解基本相同, 均为走滑型 (图 2)。从历史地震类型分析, 震区 100 km 范围内, 90% 的 $M \geq 6.0$ 地震为主-余型。

笔者利用景谷 $M_s6.6$ 地震周边沧源台 (CAY)、澜沧台 (LAC)、临沧台 (LIC)、孟连台 (MEL)、云县台 (YUX)、思茅台 (SIM) 6 个地震台记录到的 60 个 $M \geq 3.0$ 余震观测资料计算谱振幅相关系数。图 3 中区域 a 为景谷地震序列分布图, 图 4a 为地震的震级-时间图。根据前述方法步骤, 计算景谷地震序列的谱振幅相关系数, 结

果如图 4b 所示。景谷 $M_s6.6$ 地震发生后, 其余震谱振幅相关系数在 0.88 ~ 0.96 间波动, 表现出很强的震源机制相似性, 这一特征与已有震源机制解结果 (图 2) 一致。在谱振幅相关系数高值背景下, 12 月 6 日发生了 $M_s5.8$ 、 $M_s5.9$ 强余震。

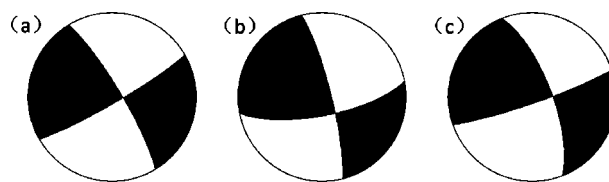


图2 景谷地震序列 $M_s \geq 5.0$ 地震震源机制解^①
(a) 2014-10-07 21:49:39 景谷 $M_s6.6$ 地震; (b) 2014-12-06 02:43:44 景谷 $M_s5.8$ 地震; (c) 2014-12-06 18:20:00 景谷 $M_s5.9$ 地震

Fig. 2 Maps of focal mechanism solutions of $M_s \geq 5.0$ earthquakes in Jinggu earthquake sequence

① <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

整个序列的谱振幅相关系数虽然波动范围不大,但也表现出一定的起伏性。根据相关系数的变化特点,可将其大致分为5个阶段:①2014年10月7日主震发生后至10月11日14时,谱振幅相关系数为0.91~0.96,此阶段余震活动最为密集,并发生了3次 $M \geq 4$ 地震;②10月11日14时至10月16日11时,谱振幅相关系数为0.88~0.90,处于相对低值阶段。与上一阶段相比,余震频度降低,且无 $M \geq 4$ 地震发生;③10月16日11

时至11月20日20时,谱振幅相关系数为0.92~0.96,处于相对高值阶段,期间发生了3次 $M \geq 4$ 地震;④11月20日20时至12月4日0时,谱振幅相关系数呈下降趋势,余震活动减弱;⑤12月4日0时至12月10日0时,谱振幅相关系数小幅升高,这一阶段地震较为活跃,并发生了2次 $M \geq 5$ 强余震。

2.2 2015年沧源 $M_s 5.5$ 地震

2015年3月1日云南省临沧市沧源佤族自治县发生 $M_s 5.5$ 地震,震中位置(23.5°N , 98.9°E),震源机制结果(图5)显示为走滑型破裂。该地震序列为主-余型,后续余震数目相对较少。根据历史地震统计,澜沧江以西滇西南地区 $M \geq 5$ 地震类型主要为主-余型、多震型,其中70%为主-余型,30%为多震型,主-余型地震居多。

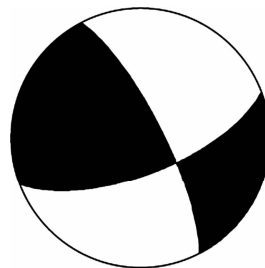


图5 沧源 $M_s 5.5$ 地震震源机制解^①

Fig. 5 Focal mechanism solution of Cangyuan $M_s 5.5$ earthquake

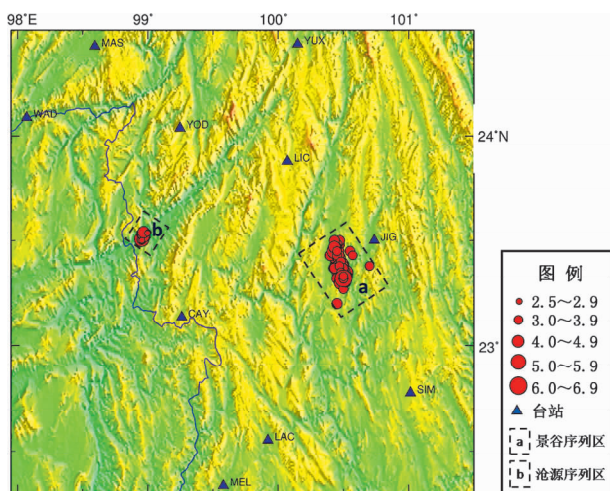


图3 2014年景谷6.6级(区域a)、2015年沧源5.5级(区域b)地震序列及周围台站分布图

Fig. 3 Distributions of the Jinggu $M_s 6.6$ earthquake sequence in 2014 (area a) and the Cangyuan $M_s 5.5$ earthquake sequence in 2015 (area b) in south of Yunnan Province and the surrounding stations

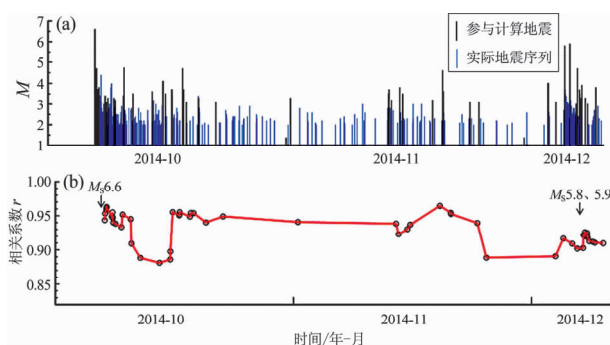


图4 2014年景谷 $M_s 6.6$ 地震序列震级—时间图(a)及谱振幅相关系数随时间变化曲线(b)

Fig. 4 $M-t$ plot of the Jinggu $M_s 6.6$ earthquake sequence (a) and curve of the correlation coefficient of spectral amplitude varied with time (b)

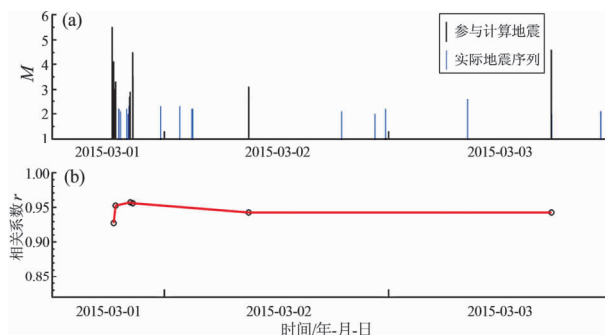


图6 2015年沧源 $M_s 5.5$ 地震序列震级时间图(a)及谱振幅相关系数随时间变化曲线(b)

Fig. 6 $M-t$ plot of the Cangyuan $M_s 5.5$ earthquake sequence (a) and curve of the correlation coefficient of spectral amplitude varied with time (b)

① <http://www.cea-igp.ac.cn>.

沧源 $M_s5.5$ 地震后, 利用3月1~3日沧源台(CAY)、澜沧台(LAC)、芒市台(MAS)、畹町台(WAD)、永德台(YOD)5个地震台站记录的9次 $M \geq 2.5$ 地震波形资料计算序列谱振幅相关系数。图3中区域b为沧源地震序列分布图, 图6a为沧源地震的震级—时间图, 图6b为计算结果。结果显示, 沧源地震谱振幅相关系数与景谷6.6级地震相似, 其值较高, 大于0.9, 表现出余震序列震源机制相似性较强的特征。

3 讨论与结论

(1) 2014年10月7日景谷发生 $M_s6.6$ 地震后, 其余震序列谱振幅相关系数在0.88~0.96间波动, 整体维持在高值, 显示震源机制一致性很强。本研究得到的谱振幅相关系数高值与景谷地震序列几次 $M \geq 5$ 地震震源机制具有较强的相似性(图2)相吻合, 表明谱振幅相关系数在一定程度上能够反映震源机制的相似程度。

已有研究发现, 强余震发生前, 震源机制具有一致性的特征(刁桂苓, 赵英萍, 2004; 赵英萍, 刁桂苓, 2004)。在景谷余震序列谱振幅相关系数高值背景下, 12月6日发生了 $M_s5.8$ 、 $M_s5.9$ 强余震。该高值体现出景谷 $M_s6.6$ 地震后余震序列的震源机制较为一致, 应力场控制作用仍较强。受强应力水平的作用, 发生强余震的可能性较大。且从时间进程来看, 这种高值贯穿于序列的全过程, 这有利于对强余震的早期判别。但6级强地震的谱振幅相关系数高值是否一定会对应较强余震的发生, 以及阈值与最大余震震级的关系, 需进一步研究。

从景谷 $M_s6.6$ 地震序列谱振幅相关系数随时间变化曲线看(图4b), 主震后的4天内, 谱振幅相关系数维持在相对较高值, 余震活动最为密集。之后, 相关系数虽然波动范围不大, 但也具有一定的起伏性。11月中下旬达到较低值0.88, 之后小幅上升, 于12月6日发生 $M_s5.8$ 、 $M_s5.9$ 强余震。整体而言, $M \geq 4$ 地震多发生在相关系数相对高值阶段。

(2) 2015年3月1日距离景谷主震160 km左右的沧源地区发生了 $M_s5.5$ 地震。黄浩和付虹(2014)通过对2008~2011年滇西地区6例地震序列的谱振幅相关系数的研究, 认为谱振幅相关系

数的高值有利于区域中强地震丛集发生。景谷地震序列较高的谱振幅相关系数可能对沧源地震的发生具有指示意义。沧源地震序列与景谷地震序列相似, 谱振幅相关系数处于高值(图6b)。二者的谱振幅相关系数特征也许显示滇南较大区域具有较强的应力水平, 存在发生中强地震的背景。景谷地震与沧源地震所在地区的历史地震序列均以主—余型为主, 对于发生在类似区域, 且无前震出现的中强地震来说, 不能简单地利用谱振幅相关系数的绝对值预测后续地震的大小, 但谱振幅相关系数的高值有利于较强余震或区域中强地震的发生。

(3) 在以往的谱振幅相关分析研究中, 主要侧重于小震群序列类型的判别(崔子健等, 2012)。对于有前震的中强地震来说, 可通过比较前震序列与余震序列谱振幅相关系数的大小来判定主震后震源机制一致性的增强与减弱, 从而探讨发生较大或更大地震的可能性(崔子健等, 2015)。在实际震例中, 强震前往往并无前震发生。利用谱振幅相关系数法对中强地震后续趋势进行判定, 相比于小震群序列类型的判定, 具有更大的难度。本文只是对相继发生在滇南地区的两例主—余型地震序列的谱振幅相关系数研究进行初步探索, 并得到了一些认识, 在今后的实际工作中可供参考。当把这种方法继续拓展应用到更多的地区, 在不同的构造区积累足够多的震例, 则有可能确定不同区域的判别标准与普适性。

本文在撰写过程中得到云南省地震局付虹研究员的帮助, 审稿专家提出了宝贵的意见与建议, 在此向他们表示衷心感谢。

参考文献:

- 陈颙. 1978. 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, 21(2): 142~159.
- 崔子健, 李志雄, 陈章立, 等. 2012. 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, 55(5): 1718~1724.
- 崔子健, 李志雄, 陈章立, 等. 2015. 中国东北2次中强地震谱振幅相关系数研究[J]. 中国地震, 31(2): 218~226.
- 刁桂苓, 徐锡伟, 陈于高, 等. 2011. 汶川 $M_w7.9$ 和集集 $M_w7.6$ 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, 54(1): 128~136.
- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1994. 强震前后震源区应力场变化一例[J]. 地震学报, 16(1): 64~69.

- 刁桂苓, 赵英萍. 2004. 大同晚期强余震前震源机制的一致性特征[J]. 内陆地震, 18(3): 202–206.
- 黄浩, 付虹. 2014. 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, 36(4): 631–639.
- 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 2003. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 46(1): 54–61.
- 李钦祖, 靳雅敏, 于新昌. 1982. 华北地区的震源机制与地壳应力场[J]. 地震学报, 4(1): 55–61.
- 刘杰, 郑斯华, 黄玉龙. 2003. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J]. 地震学报, 25(2): 211–218.
- 王俊国, 刁桂苓. 2005. 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]. 地震学报, 27(2): 178–183.
- 赵英萍, 刁桂苓. 2004. 张北强余震前震源机制的一致性特征[J]. 华北地震科学, 22(1): 1–4.
- 朱航, 刘杰, 陈天长. 2006. 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, 26(2): 1–11.
- Atkinson G. M., Mereu R. F. 1992. The shape of ground attenuation curves in Southeastern Canada[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 82(5): 2014–2031.
- Brune J. N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic waves from earthquakes[J]. J. Geophys. Res., 75: 4997–5009.
- Chael E. 1987. Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 77(2): 347–365.
- Kisslinger C., Bowman J. R., Koch K. 1981. Procedures for computing focal mechanism M_s from local (SV/P) z data[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 71(6): 1719–1729.
- Lund B., Böövarsson R. 2002. Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 92(6): 2419–2433.
- Moya C. A., Aguirre J., Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion record using genetic algorithm M_s [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 90(2): 977–992.
- Wiemer S., Wyss M. 2002. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes[J]. Advances in Geophysics, 45: 259–302.
- Yamakawa N. 1971. Stress field in focal regions[J]. J. Phys. Earth, 19: 347–353.

Aanalysis of Correlation Coefficient Characteristic of Spectral Amplitude of Jinggu $M_s6.6$ Earthquake and Cangyuan $M_s5.5$ Earthquake

CUI Zi-jian¹, LI Zhi-xiong², CHEN Zhang-li³

(1. Key Laboratory for Earthquake Science, Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

(2. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China)

(3. China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract

In order to expand the application of the method of correlation coefficient of spectral amplitude, we calculated the correlation coefficient of spectral amplitude of aftershock sequence of Jinggu $M_s6.6$ earthquake in 2014 and Cangyuan $M_s5.5$ earthquake in 2015. The results show that the correlation coefficient of spectral amplitude maintained the high value after Jinggu earthquake, and the $M_s5.8$ and $M_s5.9$ strong aftershocks occurred in two months after the main shock. This high value implied the consistency of focal mechanism and the stronger regional stress, which was beneficial to occur the strong aftershock and the regional middle-strong earthquake clustering. The correlation coefficient of spectral amplitude of the aftershock sequence of Cangyuan earthquake was high, which was similar to that of Jinggu earthquake. The historical earthquake sequence which occurred in the area of the epicenters of Jinggu and Cangyuan earthquakes were mainly shock-aftershock type. It was hard to predict the magnitude of the earthquake after main shock by the absolute value of correlation coefficient of spectral amplitude. But the high values of the two earthquake sequence may show that it was in the state of the higher value of stress and existed the background of occurring the middle-strong earthquake in the southern region of Yunnan.

Key words: Jinggu $M_s5.8$ earthquake; Cangyuan $M_s5.9$ earthquake; correlation coefficient of spectral amplitude; the consistency of focal mechanism; aftershock sequence