

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, 中国地震, 31 (2), 218 ~ 226。

中国东北 2 次中强地震谱振幅相关系数研究

崔子健¹⁾ 李志雄²⁾ 陈章立³⁾ 邵志刚¹⁾

1) 中国地震局地震预测研究所地震预测重点实验室, 北京市复兴路 63 号 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 利用谱振幅相关系数法对发生在我国东北地区的 2 次中强地震进行研究。结果显示, 1999 年辽宁岫岩 5.4 级地震前震序列谱振幅相关系数平均值为 0.90, 2013 年吉林前郭 5.8 级震群谱振幅相关系数平均值为 0.88, 表明二者均表现出较强的震源机制相似性, 具有发生强震的背景条件, 与已有研究结果一致。此外, 岫岩 5.4 级地震余震序列的谱振幅相关系数有所下降。值得注意的是, 前郭震群序列前期相关系数维持在高值, 5 次强震发生后其值有下降的趋势, 表现出震源机制相似性的减弱, 这对中强震群后续趋势的判定具有一定的启发意义。

关键词: 岫岩地震 前郭地震 前震序列 谱振幅相关系数

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0218-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

近些年我国数字化地震观测台网的建立和发展普遍提升了对区域地震的监测能力, 许多小地震能够被更好地记录下来, 从而有利于对小地震波形资料的处理与应用。由于监测能力的提高, 在某一地区经常能记录到集中发生的一组小地震, 且它们往往引起人们的高度关注。因此, 小震群序列可能类型的快速判别, 即正在活动过程中的小震群, 究竟是大震的前震序列, 还是并不伴有大地震发生的一般小震群活动, 这对于减轻地震灾害和维护社会稳定具有重要的现实意义。

震群序列类型的判定是目前地震预测研究中的难题, 迄今仍没有找到主震前判定震群序列类型的有效方法。1966 年以来, 不少学者从序列的时、空、强表现出来的某些特征寻找表征前震的某些特征指标 (如 b 值、 h 值、初动和频度变化等异常值), 并建立了一些判定指标体系 (刘正荣等, 1979; 陆远忠等, 1984; 朱传镇等, 1989; 王炜等, 1987)。还有一些学者从序列发展的物理特征如震源参数、波形变化等方面对地震序列进行研究, 并取得了一系列用于判定震群类型的认识。陈颀 (1978) 提出利用震源机制的一致性作为判定前震序列的新

[收稿日期] 2014-11-30; [修订日期] 2015-03-12

[项目类别] 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项 (2012IES0201)、中国地震局监测预报司震情跟踪青年课题 (2015010126) 共同资助

[作者简介] 崔子健, 男, 1983 年生, 在职博士生, 助理研究员, 主要从事数字地震学及地震预测研究。

E-mail: c_z_j@163.com

参数;刁桂苓等(1994)、王俊国等(2005)、倪四道等(2010)利用不同的方法,通过一定的震例研究认为前震序列表现出震源机制一致性的特征。

受地震台网布局与台站密度等因素的制约,直接求解地震序列中诸多小地震的震源机制解往往存在一定的困难。崔子健等(2012)对Lund等(2002)首先提出的微震体波谱振幅相关分析的方法进行了改进,并将该方法应用到小震群序列类型的判定中。通过对滇西地区5例地震序列的研究发现,前震序列的谱振幅相关系数平均值明显高于一般性小震群,表明与一般性小震群相比,前震序列的震源机制更趋于一致性。

本文利用谱振幅相关分析法,对有数字地震波形记录以来、发生在我国东北地区的2次中强地震(1999年辽宁岫岩5.4级地震、2013年吉林前郭5.8级震群)进行研究,并结合已有震例研究探讨该方法在更多区域应用的可能性。

1 谱振幅相关系数方法原理

地震记录位移谱 $U_{ij}(f)$ 可表达为

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

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。 $S_i(f)$ 可表示为

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

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

$$S_i'(f) = \frac{\Omega_{0i}}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (3)$$

式中, Ω_{0i} 为地震 i 的震源谱低频渐近线值,即零频极限值; f_c 为拐角频率。

式(2)中的 φ_{ij} 为震源辐射图型因子, φ_{ij} 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,同一个震源辐射的 P、S 波辐射花样不同,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,本方法综合利用 P 波和 S 波资料进行相关性研究。

定义谱振幅 Ω_{0ij} 为

$$\Omega_{0ij} = \Omega_{0i} \varphi_{ij} \quad (4)$$

式(1)中的 $P_{ij}(f)$ 可表示为

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

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。

从地震波形记录中扣除噪音和仪器响应,并令 $L_j(f) = L_j'(f) Sur_j$ 后,则地震 i 在台站 j 的地面运动位移谱 $U_{ij}(f)$ 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(2)、(3)、(7)、(8)可见,若这2次地震震中足够近,即其间距比震源距 R_{ij} 小得多,且震源机制(辐射图型因子)相同,则台站 j 记录的这2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2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,当地震波形记录来反演谱振幅时,若这2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} ,再通过计算其相关系数 r_{xy} 来研究震源机制是否相似的问题。地震 x 、 y 的谱振幅相关系数 r_{xy} 可表示为(Lund et al,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} 分别表示由台站 j 记录的地震 x 、 y 的 l 分量波形资料反演得到的谱振幅 Ω_{0xj} 、 Ω_{0yj} 的对数值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x_{jl} 、 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波记录以及径向、切向、垂向分量的S波记录。

考虑到序列震源机制是否相似是针对多数地震而言的,故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 发生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。

根据上述原理,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,并计算其位移谱,本文采用延迟时间窗方法(Chael,1987;黄玉龙等,2003),图1为本文使用的1个地震波形及其位移谱图像;③反演 Q 值,本文采用多台联合反演方法(Atkinson et al,1992),利用东北地区背景地震资料反演得到其 $Q_p = 100.5f^{0.570}$, $Q_s = 718.6f^{0.10}$;④反演台站场地响应,本文采用Moya等(2000)给出的方法;⑤获得经过路径及场地校正后的谱振幅(Holland,1975;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的特征。

2 地震资料及计算结果

2.1 1999年辽宁岫岩5.4级地震

1999年11月29日辽宁岫岩地区发生 $M_s5.4$ 地震(40.3°N,123.0°E),从11月9日至 $M_s5.4$ 地震发生前,记录到该地区1.5级以上小地震53次, $M_s5.4$ 地震后无更大地震发生,但2000年1月12日发生 $M_s5.1$ 地震。本文利用岫岩地震震中周边丹东(DDo)、宽甸(KDi)、本溪(BXi)、抚顺(FSu)等4个地震台记录到的2.0级以上35个前震的波形资料计算谱振幅相关系数。图2为岫岩地震序列震中及周围台站分布图,图3(a)为 $M-t$ 图。根据

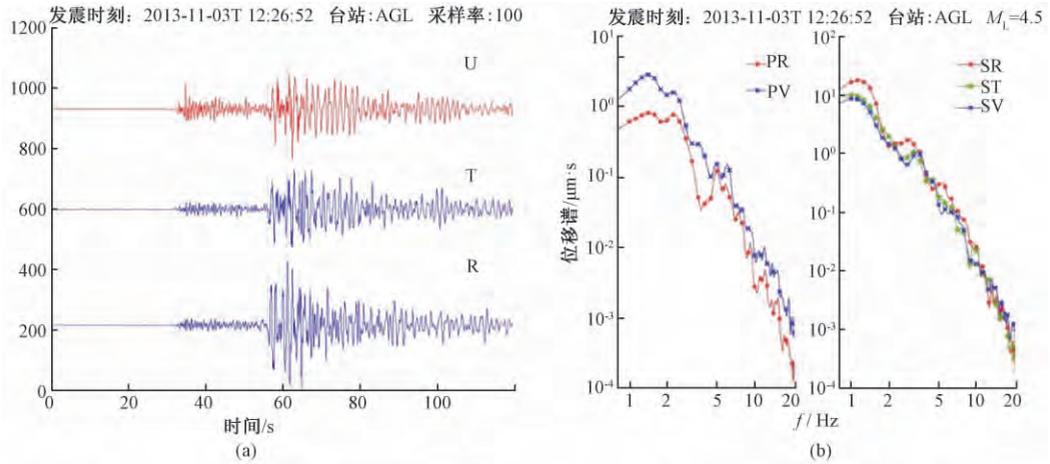


图 1 AGL 台记录到的 1 个波形 (a) 及由计算得到的观测位移谱 (b)

前述方法步骤计算岫岩地震前震序列的谱振幅相关系数,结果如图 3 (b) 所示。由图 3 (b) 可见, $M_s5.4$ 地震发生前的小震群相关系数较大,其值为 0.87 ~ 0.96,说明该震群诸多小地震的震源机制具有较高的相似性。为更全面地了解该地震序列,又选择了 $M_s5.4$ 地震余震序列进行研究,结果如图 4 所示。虽然余震序列谱振幅相关系数仍大于 0.8,但与前震序列相比,其值明显减小,并在波动中持续降低。

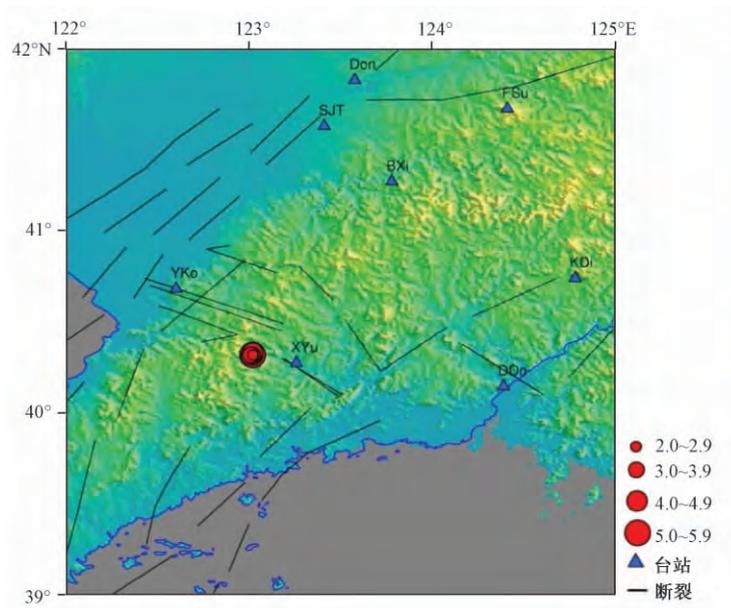


图 2 1999 年辽宁岫岩地震序列及周围台站分布

2.2 2013 年吉林前郭 5.8 级震群

2013 年 10 月 31 日吉林前郭地区发生 $M_s5.5$ 地震 (44.6°N, 124.2°E), 其后至 2013 年

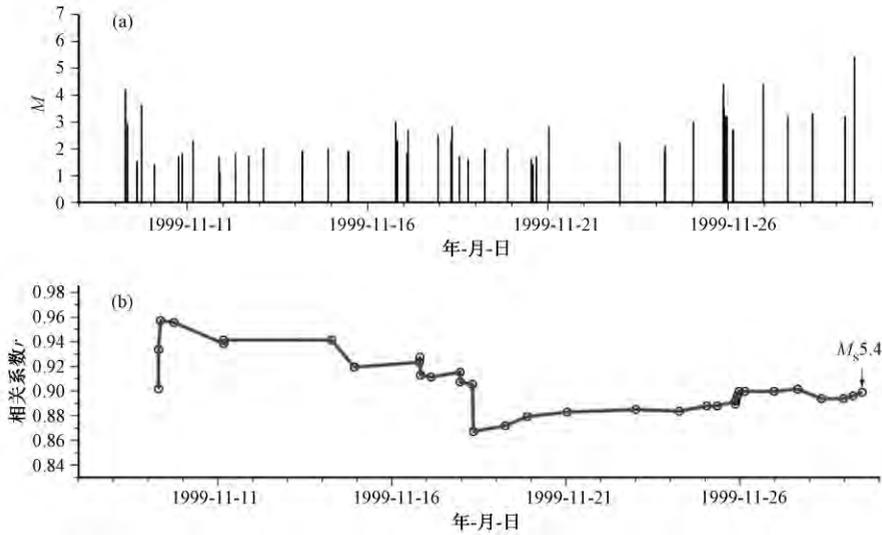


图3 1999年岫岩 $M_s5.4$ 地震前震序列 $M-t$ 图(a)及谱振幅相关系数随时间的变化(b)

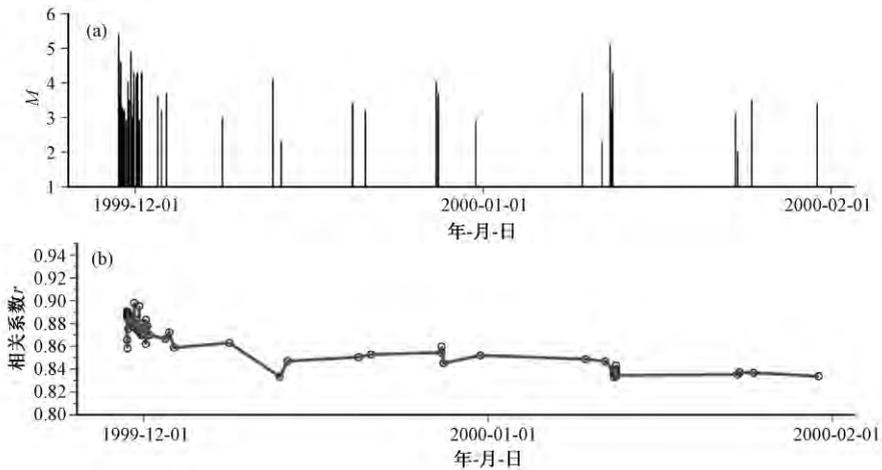


图4 1999年岫岩 $M_s5.4$ 地震余震序列 $M-t$ 图(a)及谱振幅相关系数随时间的变化(b)

11月23日又发生了4次5级以上地震(表1),最大震级 $M_s5.8$,其间小震不断。在近1个月的短时间内吉林前郭地区发生的这5次5级以上地震形成中强震群,这种情况在东北地区实属罕见。本文利用2013年10月31日~12月13日该震群周边阿古拉(AGL)、乾安(QAT)、松原子(SYT)、安广(AGT)、长岭(CLT)等5个地震台记录到的30个2.5级以上地震的波形资料计算谱振幅相关系数。图5为前郭震群与所用台站分布图,图6(a)为 $M-t$ 图,谱振幅相关系数结果如图6(b)所示。由计算结果可见,前郭震群谱振幅相关系数为0.79~0.95,整体而言表现出较高的震源机制相似性,但是随着几次中强地震的相继发生,相关系数有下降的趋势。

表 1 2013 年吉林前郭地区 $M_s \geq 5.0$ 地震基本参数

地震序号	发震日期、时刻		震中位置		震级 M_s
	年-月-日	时:分:秒	北纬 $/(^\circ)$	东经 $/(^\circ)$	
1	2013-10-31	11:03:35	44.68	124.10	5.5
2	2013-10-31	11:10:07	44.69	124.12	5.0
3	2013-11-22	16:18:51	44.70	124.10	5.3
4	2013-11-23	06:04:23	44.60	124.10	5.8
5	2013-11-23	06:32:29	44.60	124.10	5.0

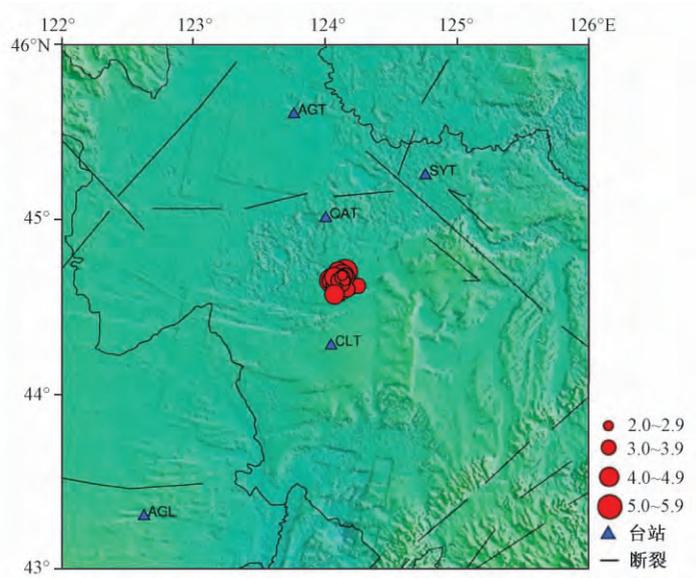


图 5 2013 年吉林前郭震群及所用台站分布

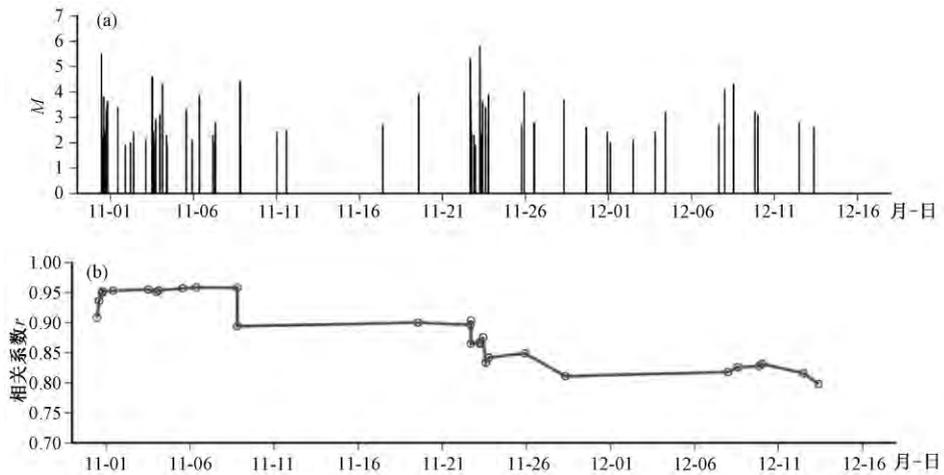


图 6 2013 年前郭 $M_s 5.8$ 震群序列 $M-t$ 图 (a) 及谱振幅相关系数随时间的变化 (b)

3 讨论与结论

(1) 1999 年辽宁岫岩 5.4 级地震前震序列谱振幅相关系数平均值为 0.90, 说明该地震前小地震的震源机制较一致, 区域构造应力场较强, 有发生更大地震的可能。崔子健等 (2012) 通过对滇西地区几例震群的研究发现, 前震序列谱振幅相关系数大于 0.80, 表现出震源机制相似性较强; 而一般性小震群谱振幅相关系数小于 0.80, 震源机制解的相似性较弱。岫岩 5.4 级地震前震序列谱振幅相关系数最低值为 0.87, 与已有研究结果一致。由图 3(b) 可以发现, 1999 年 11 月 18 日至岫岩 5.4 级地震前, 相关系数在下降的过程中出现了一定的回升, 并于同年 11 月 29 日发震。这一现象或许显示了岫岩 5.4 级地震前震源区应力的短时集中过程。另外, 在余震密集活动时段, 谱振幅相关系数仍维持在较高值, 随着余震频度的衰减, 相关系数不断减小。整体而言, 与岫岩地震前震序列谱振幅相关系数相比, 余震序列相关系数出现下降, 表明主震发震后, 震源机制相似性有所减弱, 反映出震源区应力水平有所降低。利用谱振幅相关系数法对具有前震的中强震进行后续趋势的预测, 是需要研究的另一个复杂问题。

(2) 2013 年吉林前郭 5.8 级中强震群谱振幅相关系数平均值为 0.88, 说明在此期间该区域存在发生强震的背景。值得注意的是, 10 月 31 日前郭 5.5 级、5.0 级地震发生后至 11 月 23 日 5.8 级、5.0 级地震发生前, 该序列谱振幅相关系数平均值达 0.93, 而随着 5.8 级、5.0 级地震的发生, 谱振幅相关系数出现明显下降的趋势, 最小值降为 0.79, 表现出震源机制一致性的减弱。其后, 没有 5 级以上地震发生。由此可见, 利用谱振幅相关分析法对中强震群后续趋势的判定不仅需要考虑相关系数的绝对值, 而且需要关注其相对变化趋势, 而后者可为今后的应用提供可借鉴之处。结合本研究与已有震例 (黄浩等, 2014) 可以发现, 虽然部分 4.5 级左右震群也存在谱振幅相关系数较高的现象, 但 5 级震群相关系数明显大于 4.5 级震群的, 尤其在最大地震发生前, 这或许因为前者的应力状态高于后者所致, 对此值得进一步深入研究。

(3) 地震预测研究是公认的世界性科学难题, 多途径探索新的研究方法是其发展的必由之路, 而利用地震观测资料对前震的判断更是地震分析预测研究的重点。基于前人从理论和震例研究方面对前震序列震源机制一致性的认识, 本文利用数字地震观测资料, 通过谱振幅相关系数方法对我国东北地区的 2 例中强地震序列进行了研究, 研究结果与已有研究相一致, 并在不断积累震例的研究中获得了一些新的认识。今后, 需要通过更多不同类型震例的研究与应用来获得对前震序列的更为深入的认识。

致谢: 感谢辽宁省地震局焦明若研究员、中国地震局地震预测研究所计算与网络中心提供的帮助; 前郭 5.8 级震群数据来源于“中国地震局地震预测研究所地震波形数据服务系统”, 感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵意见与建议。

参考文献

- 陈颢, 1978, 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数, 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, 地球物理学报, **55** (5), 1718 ~ 1724。

- 刁桂苓、于利民、李钦祖,1994,强震前后震源区应力场变化一例,地震学报,16(1),64~69。
- 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,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,地球物理学报,46(1),54~61。
- 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,地震学报,25(2),211~218。
- 刘正荣、钱兆霞、王维清,1979,前震的一个标志——地震频度的衰减,地震研究,2(4),1~9。
- 陆远忠、宋俊高、戴维乐,1984,一个判断震情的指标——震群的 U 值,地震学报,6(增刊),509~523。
- 倪四道、王伟涛、李丽,2010,2010 年 4 月 14 日玉树地震:一个有前震的破坏性地震,中国科学:D 辑,40(5),535~537。
- 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,地震学报,27(2),178~183。
- 王炜、杨德志,1987,利用 Weibull 分布研究华北地区前兆震群的特征,中国地震,3(4),13~21。
- 朱传镇、王林瑛,1989,震群信息熵异常与地震预报,见:许绍燮、陆远忠、朱传镇等,地震预报方法实用化研究文集:地震学专辑,229~242,北京:学术书刊出版社。
- Atkinson G M, Mereu R F, 1992, The shape of ground attenuation curves in southeastern Canada, Bull Seism Soc Am, 82(5), 2014~2031.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic waves from earthquakes, J Geophys Res, 75, 4997~5009.
- Chael E, 1987, Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick, Bull Seism Soc Am, 77(2), 347~365.
- Holland J H, 1975, Adaptation in nature and artificial systems, Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Kisslinger C, Bowman J R, Koch K, 1981, Procedures for computing focal mechanisms from local (SV/P)_z data, Bull Seism Soc Am, 71(6), 1719~1729.
- Lund B, Böövarsson R, 2002, Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes, 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 algorithms, Bull Seism Soc Am, 90(2), 977~992.

A study on the correlation coefficient of spectral amplitude of two med-strong earthquakes in northeast China

*Cui Zijian*¹⁾ *Li Zhixiong*²⁾ *Chen Zhangli*³⁾ *Shao Zhigang*¹⁾

1) Key Laboratory of Earthquake Prediction, 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 The paper applies the method of correlation coefficient of spectral amplitude to two mid-strong earthquakes in northeast China. The results show the mean correlation coefficient of spectral amplitude of the Xiuyan $M_s5.4$ foreshock sequence in 1999 is 0.90, and the Qianguo $M_s5.8$ earthquake swarm is 0.88. It suggests that both earthquake sequences have the feature in focal mechanism similarity, and have the background condition of strong earthquake. This result conforms to the former research. In addition, the correlation coefficient of spectral amplitude of Xiuyan $M_s5.4$ aftershock sequence has a trend of reduction. It is worth noting that the correlation coefficient of spectral amplitude is larger before the five strong earthquakes in the Qianguo earthquake swarm. But it becomes smaller afterward, which means focal mechanism similarity has been less. The findings give us a meaningful enlightenment in determining the trend of the med-strong earthquake swarm.

Key words: Xiuyan earthquake Qianguo earthquake Foreshock sequence Correlation coefficient of spectral amplitude