

云南鲁甸 6.5 级地震序列的谱振幅相关系数变化特征^{*}

黄浩¹, 付虹², 王培玲¹, 马玉虎¹

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810001; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 使用云南数字地震台网记录的波形资料, 计算了云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的谱振幅相关系数。8月3日19时至8月4日5时, 谱振幅相关系数由序列的最小值持续升高至最大值, 期间发生了4次4级余震, 表明震源机制逐渐趋于一致, 4级地震发生在谱振幅相关系数波动相对较大的阶段。其后谱振幅相关系数一直维持在0.82的高值状态, 8月17日距离鲁甸地震震中110 km的同一构造区永善发生 $M_s5.0$ 地震, 表明谱振幅相关系数高区域应力水平较高。

关键词: 鲁甸 6.5 级地震; 地震序列; 谱振幅; 相关系数

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0532-05

0 引言

据中国地震台网中心测定, 北京时间2014年8月3日16时3分, 在云南省昭通市鲁甸县龙头山镇发生 $M_s6.5$ 地震, 震中位置 (27.1°N , 103.3°E), 震源深度12 km。截至9月9日, 震区共记录到68次 $M_L \geq 3.0$ 余震, 其中 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震63次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震5次, 没有发生 $M_L \geq 5$ 余震。

鲁甸 6.5 级地震极震区烈度达到IX度, 地震序列为主震—余震型, 主震之后没有发生更大地震, 最大余震为 $M_s4.4$ 。余震震级偏低、中强余震次数少, 是否意味着震源区仍存在发生强余震的可能? 在余震活动相对减弱的情况下, 利用震源机制一致性来研究这一问题也许可以有些帮助。

已有震例研究表明 (陈颢, 1978; Wiemer, Wyss, 2002; 赵英萍等, 2004; 王俊国, 刁桂苓, 2005), 震源机制一致性可用来判断未来是否会发生更大地震。然而, 由于受到台站方位分布和密度的限制, 很难精确求解中小地震的震源机制解, 因此中小地震震源机制一致性方面的研究还比较少。

Lund 和 Böðvarsson (2002) 提出微震体波谱振幅相关分析法, 该方法可以不直接求解震源机制, 而利用谱振幅的相关程度来描述震源机制的一致性。崔子健等 (2012) 利用谱振幅相关分析法研究了发生在云南的几个小震群序列, 结果表明强震前的小震群序列的谱振幅相关系数较大, 而一般性小震群序列的谱振幅相关系数较小, 获得了与理论推测相符合的结果。黄浩和付虹 (2014) 应用谱振幅相关分析法研究了6个发生在滇西地区不同类型的地震序列, 结果表明前震序列的谱振幅相关系数较高, 但谱振幅相关系数较高的不一定是前震序列。虽然谱振幅相关分析法在云南地区初步应用的结果有所不同, 但还应积累更多的震例进行深入研究。本文采用谱振幅相关分析法, 计算了鲁甸地震序列的谱振幅相关系数, 并对其变化特征进行了分析。

1 谱振幅相关分析法

谱振幅相关分析法要求参与计算的地震拥有近似的射线路径以扣除传播路径效应, 因此适用于时间和空间上丛集发生的小震群。崔子健等 (2012) 已对谱振幅相关分析法进行过详细的描述, 本文只做简要介绍。台站记录的位移谱 $U_{ij}(f)$

^{*} 收稿日期: 2014-09-29.

基金项目: 云南省人民政府十项措施监测预报 (JC YB-20080601-5) 和中国地震局“三结合”课题 (142903) 联合资助。

可表示为

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

式中, $U_{ij}(f)$ 为台站 j 记录的地震的位移谱; f 为频率; $P_{ij}(f)$ 为台站 j 至地震 i 之间的传播路径效应; $S_i(f)$ 为地震 i 包含辐射图型因子的震源谱; $L'_j(f)$ 为台站 j 的局部场地效应; $N_j(f)$ 为台站 j 的噪声; $I_j(f)$ 为台站 j 的仪器响应; $W_j(f)$ 为台站 j 的自由表面效应。

在去除噪声、仪器响应、台站场地效应和传播路径效应后, 若震源机制相同, 则两次地震的位移谱的相对大小只与谱振幅的相对大小有关。因此, 可计算两次地震的谱振幅相关系数来描述震源机制的相似程度。

谱振幅相关系数 r_{xy} (Lund, Böðvarsson, 2002) 可表示为

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

式中, x_{jl} 、 y_{jl} 分别为地震 x 和 y 的分量的谱振幅的对数值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x_{jl} 与 y_{jl} 的平均值; l 取值 1 ~ 5, 分别表示 P 波的径向、垂向分量与 S 波的径向、切向、垂向分量; n 为参与计算的台站数量。

计算每次地震和地震序列中发生在它前面的所有地震的相关系数, 取平均后, 代表这次地震与前面所有地震谱振幅的相关程度, 这样就可得

到整个序列的谱振幅相关系数。

计算过程按以下步骤进行: ① 收集鲁甸地震序列的数字波形; ② 把波形的水平分量旋转为径向和切向分量, 并采用延迟时间窗方法 (Chael, 1987; 黄玉龙等, 2003) 计算其位移谱; ③ 利用 Atkinson 和 Mereu (1992) 方法反演鲁甸震区的 Q 值, $Q_p = 35.5f^{0.831}$ 、 $Q_s = 53.2f^{0.872}$; ④ 采用多台多事件联合反演台站的场地响应 (Moya, Jorge, 2000); ⑤ 利用经过噪声、仪器响应、传播路径及场地响应校正的谱振幅, 计算鲁甸地震序列的谱振幅相关系数。图 1 为本文使用的昭通台记录的一次地震波形及其位移谱, 图中, Z、R、T 分别表示垂向、径向、切向分量; PZ、PR 分别表示 P 波垂向和径向分量的位移谱; SZ、SR、ST 分别表示 S 波垂向、径向和切向分量的位移谱。

2 地震序列资料及计算结果

2.1 地震序列资料

鲁甸地震发生后, 截至 9 月 9 日, 震源区共发生 $M_L \geq 3.0$ 地震 64 次。剔除部分信噪比较差或受主震影响较大的余震, 本文选取了 48 次 $M_L \geq 3.0$ 地震计算了鲁甸序列的谱振幅相关系数 (图 2)。

2.2 结果分析

采用昭通台 (ZAT)、巧家台 (QJ)、普格台 (PGE)、雷波台 (LBO)、东川台 (DOC) 5 个地震台记录的 48 个 $M_L \geq 3.0$ 的波形资料计算了鲁甸地震序列的谱振幅相关系数, 其相关系数值在

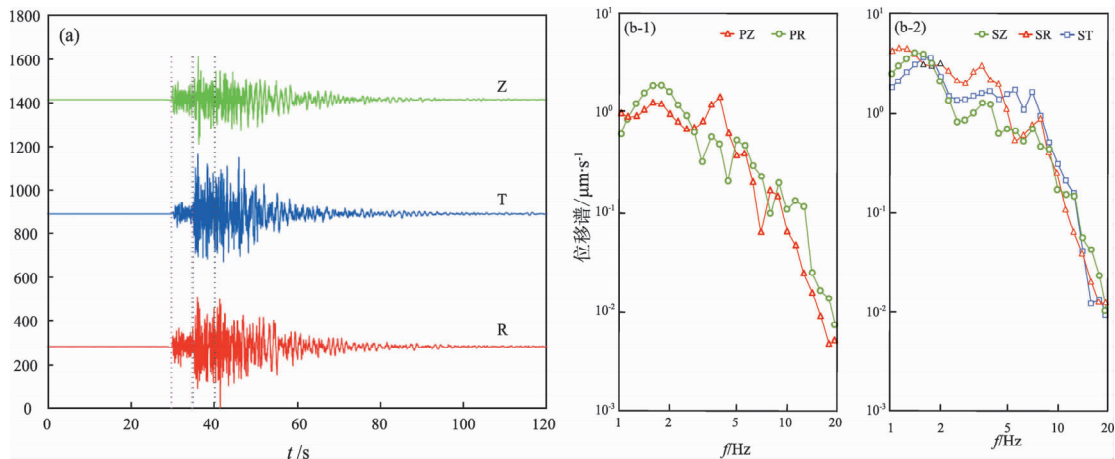


图 1 昭通台记录的一次地震的波形 (a) 及其位移谱 (b)

Fig. 1 Waveform of an earthquake recorded by Zhaotong Station (a), and its displacement spectra (b)

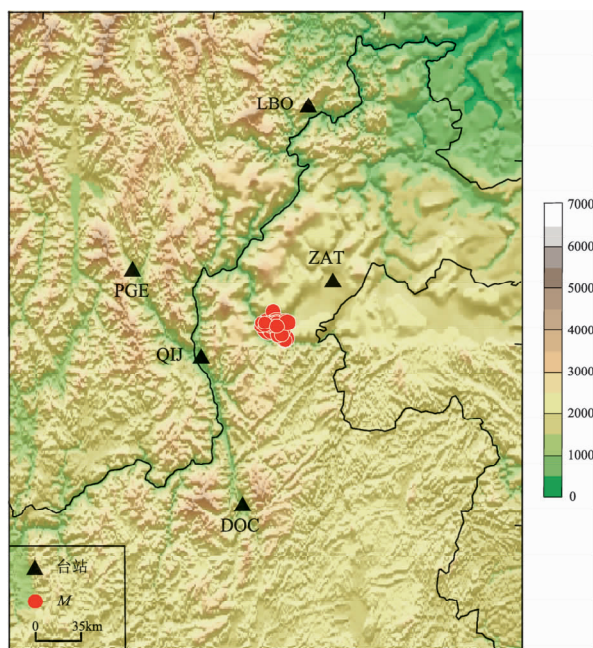


图2 鲁甸 $M_L \geq 3.0$ 地震序列和周围台站分布
Fig. 2 Distribution of Ludian $M_L \geq 3.0$ earthquake sequence and their surrounding stations

0.77 ~ 0.83 之间变化, 平均值 0.82。

虽然谱振幅相关系数的变化范围不大, 但具有明显的起伏过程 (图 3)。从相关系数随时间变化的特点来看, 大致可以以 8 月 11 日为界将谱振幅相关系数的变化过程划分为两个阶段, 第一阶段相关系数波动较大 (图 3a), 第二阶段相关系数保持平稳 (图 3b)。虽然两个阶段的相关系数均值同为 0.82, 但第一阶段相关系数变化更明显, 且多数 $M_s \geq 4.0$ 余震发生在第一阶段, 因此本文重点分析第一阶段的谱振幅相关系数变化特征。

第一阶段谱振幅相关系数随时间变化的形态比较丰富 (图 3a), 可以划分为 4 个变化过程, 即: ① 主震后 3 小时内, 相关系数自 0.81 下降至 0.77; ② 8 月 3 日 19 时至 8 月 4 日 5 时, 相关系数自整个序列的最小值 0.77 上升至最大值 0.83; ③ 8 月 4 日 5 时至 8 月 5 日 8 时, 相关系数总体呈下降过程; ④ 8 月 5 日 8 时至 8 月 11 日, 相关系数缓慢上升至平均值并保持稳定。

谱振幅相关系数在主震后 3 小时内快速下降至最小值 0.77, 表明主震后震源机制一致性在短时间有所降低。在第二个变化过程中, 谱振幅相关系数持续升高, 从序列最小值 0.77 上升为序列

最大值 0.83。在此期间, 震源区相继发生了 4 次 4 级余震, 表明这段时间震源机制表现出趋于一致的现象。在第三个变化过程中, 谱振幅相关系数既有下降也有上升, 但总体表现为下降, 说明这一时段的震源机制一致性有所降低。在第四个变化过程中, 谱振幅相关系数在缓慢上升后表现平稳, 表明震源机制一致性程度趋于稳定。

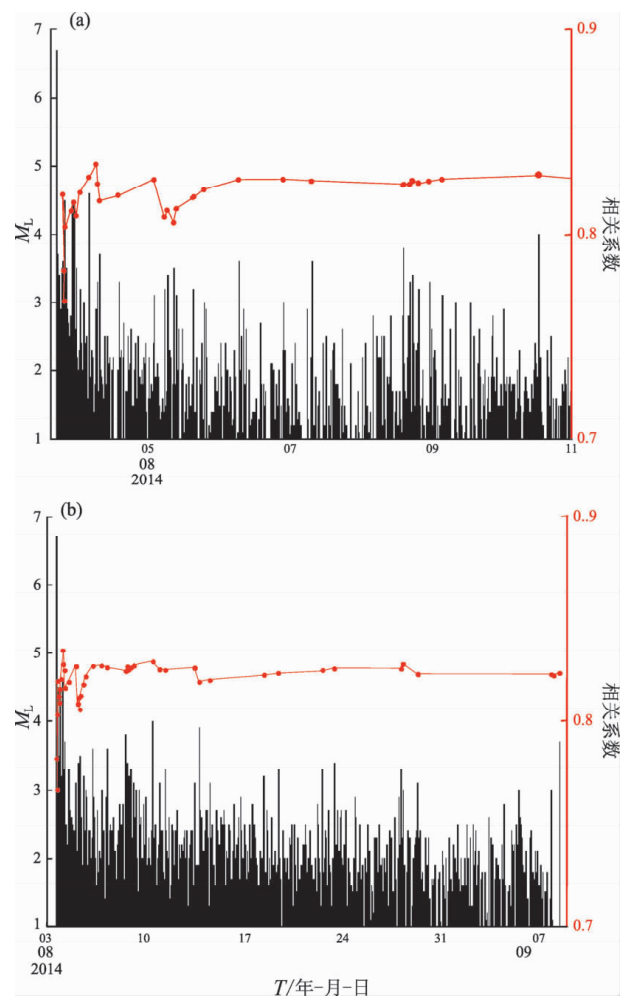


图3 鲁甸地震序列的相关系数及震级—时间图
(a) 数据选取自 8 月 3 ~ 11 日; (b) 数据选取自 8 月 3 日至 9 月 7 日

Fig. 3 The correlation coefficient of spectral amplitude and $M-t$ plot of Ludian earthquake sequence
(a) data selected from Aug. 3 to Aug. 11;
(b) data selected from Aug. 3 to Sep. 7

3 结论与讨论

鲁甸地震序列的谱振幅相关系数可以大致以 8

月 11 日为界划分为两个阶段, 第一阶段相关系数变化多样, 第二阶段相关系数保持稳定。第一阶段可根据变化特征不同, 划分为 4 个变化过程, 其中 4 次 4 级余震发生在第二个变化过程。在第二个变化过程中, 相关系数持续升高、上升幅度最大, 说明这段时间震源机制表现出趋于一致的现象。

鲁甸地震序列的谱振幅相关系数较高, 但至今没有发生更大地震。崔子健等 (2012) 的研究结果表明, 强震前的小震群序列和一般性小震群序列的谱振幅相关系数差异较大; 黄浩和付虹 (2014) 对滇西地区的 6 个地震序列进行谱振幅相关分析后认为, 前震序列的谱振幅相关系数较高, 但谱振幅相关系数较高的序列不一定是前震序列。因此据以往震例, 鲁甸地震序列的谱振幅相关系数较高, 只能说明区域应力水平较高, 不能判定该序列不会发生较大地震, 也不能说明其后还有较大地震发生。目前, 谱振幅相关分析法的应用还不多, 需要积累更多的震例进行验证。

当谱振幅相关系数较高时, 区域应力水平较高, 震源区及其附近地区继续发生 $M_s \geq 5.0$ 地震的可能性相对较大。8 月 11 日以后, 相关系数仍稳定在 0.82 左右, 虽然在震源区没有发生更大地震, 但 8 月 17 日在距主震震中 110 km 的永善县发生了 $M_s 5.0$ 地震。这与 2008 年 3 月 21 日盈江 $M_s 5.2$ 和 2011 年 3 月 10 日盈江 $M_s 5.8$ 地震序列谱振幅相关系数较高, 其后在附近地区发生 $M_s \geq 5.0$ 地震的现象类似。

云南省数字地震台网为本文提供了相关资料, 云南省地震预报中心刘自凤和孙楠在收集资料过程中提供了许多帮助, 审者提出了宝贵意见, 在此表示衷心的感谢!

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.
- 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.
- 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, 高景春, 等. 2004. 张北强余震前震源机制解的一致性特征[J]. 华北地震科学, 22(1): 1–4.
- Atkinson G. M., Mereu R. F. . 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 82(5): 2014–2031.
- Chael E. . 1987. Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 77(2): 347–365.
- Lund B., Böövarsson R. . 2002. Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 92(6): 2419–2433.
- Moya A., Jorge A. . 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 90(4): 977–992.
- Wiemer S., Wyss M. . 2002. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes[J]. Advances in Geophysics, 45: 259–302.

Variation Characteristics of the Correlation Coefficient of Spectral Amplitude of Yunnan Ludian $M_s6.5$ Earthquake Sequence in 2014

HUANG Hao¹, FU Hong², WANG Pei-ling¹, MA Yu-hu¹

(1. *Earthquake Administration of Qinghai province, Xining 810001, Qinghai, china*)

(2. *Earthquake Administration of Yunnan province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

Using seismic wave recorded by Yunnan Digital Seismic Network, we calculated the correlation coefficient of spectral amplitude of Ludian $M_s6.5$ earthquake sequences in Yunnan in 2014. From 19:00 on Aug. 3 to 05:00 on Aug. 4, four times of $M_L \geq 4.0$ aftershocks occurred in the period of the correlation coefficient of spectral amplitude raised from minimum to maximum of the earthquake sequence, and the focal mechanism became to be more consistent gradually in this period. Then, the correlation coefficient of spectral amplitude kept at a high state of 0.82. A $M_s5.0$ earthquake occurred at Yongshan area on Aug. 17, which belongs to the same geological structure with Ludian earthquake and the two epicenters are only 110 km apart. All these indicate that the higher correlation coefficient of spectral amplitude is corresponding to the high level of the stress field.

Key words: Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake; earthquake sequence; spectral amplitude; correlation coefficient