

何畅、朱航, 2015, 2013 年左贡 - 芒康 $M_s 6.1$ 地震序列震源机制变化过程研究, 中国地震, 31 (2), 227 ~ 234。

2013 年左贡 - 芒康 $M_s 6.1$ 地震序列 震源机制变化过程研究

何畅 朱航

四川省地震局, 成都市人民南路 3 段 29 号 610041

摘要 2013 年 8 月 12 日西藏昌都地区左贡县、芒康县交界发生 6.1 级地震, 地震序列为前-主-余型, 在主震发生前 9h 内发生了 7 次 $M_L \geq 2.0$ 中小地震, 最大震级为 $M_L 4.7$ 。本文采用体波谱振幅相关系数方法, 基于区域测震台网记录的数字地震波形资料研究左贡 - 芒康 6.1 级地震序列震源机制变化过程。结果显示, 主震前的中小地震相关系数较高, 均值为 0.86, 表明其震源机制相似程度较高, 是具有震兆意义的小震序列; 余震的相关系数较低, 表明震源机制相似程度较低。

关键词: 左贡 - 芒康 $M_s 6.1$ 地震 地震序列 震源机制 谱振幅相关系数

[文章编号] 1001-4683 (2015)02-0227-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

一次中强地震的发生经常会伴有一些前震和大量的余震, 而前震和余震的震源机制有何规律、与主震震源机制的异同性以及怎样利用这些信息进行地震预测研究, 一直是地震工作者非常关心的问题 (李钦祖, 1974; 陈运泰, 2007; 李丽等, 2009)。陈颢 (1978) 从震源机制的角度研究了前震与余震的特征, 指出前震与余震在震源机制的一致程度方面存在明显的差异; 刁桂苓等 (1994) 也提出了 1 个反映震源机制一致性的参数, 将其定义为震源机制解 P、T、N 轴分别与区域地壳应力场 3 个应力主轴的夹角之和, 以此来表征震源机制和区域构造应力场的一致性。

在较小范围内发生的地震事件, 其传播效应是非常相近的, 因此各自波形上的差异可以归因于震源机制的不同。Lund 等 (2002) 据此提出了利用直达 P 波、S 波的谱振幅相关来识别具有相似震源机制的小震的方法; 朱航等 (2006) 根据 Lund 等 (2002) 提出的方法采用体波谱振幅相关系数方法, 对几次地震序列的震源机制变化过程进行了研究, 并利用震源机制的一致性较好地区分了强震序列与小震序列 (朱航等, 2006; 李霞等, 2010; 刘泽民等, 2010)。崔子健等 (2011) 在对小震群序列类型判定方法及研究趋势进行综述的基础上, 使用谱振幅相关分析法研究了小震震源机制相似性, 其研究表明谱振幅相关分析法可能是具

[收稿日期] 2015-02-11; [修定日期] 2015-03-18

[项目类别] 四川省地震局地震科技专项项目 (LY1302)、国家科技支撑计划项目 (2012BAK19B02) 共同资助

[作者简介] 何畅, 女, 1988 年生, 助理工程师, 主要从事地震学与地震预测研究。

E-mail: hechang5131105@163.com

有较明确物理意义的判定小震序列类型的方法,且具有实用价值,值得进一步研究。

2013年8月12日05:23:40西藏自治区昌都地区左贡县、芒康县交界(30.03°N, 97.95°E)发生6.1级地震,在主震发生前9h,与主震震中非常接近处曾发生 M_L 4.7地震,并伴有一系列震级较低的地震。本文使用四川地震台网波形数据,采用体波谱振幅相关系数方法研究左贡-芒康6.1级地震序列的震源机制变化特征。

1 左贡-芒康6.1级地震序列

2013年8月12日西藏左贡-芒康交界发生 M_S 6.1(M_L 6.3)地震,震中位于澜沧江断裂附近,震源深度7.7km。本次地震序列属于前-主-余型,8月11日在主震震中附近发生了7次 $M_L \geq 2.0$ 的中、小地震,最大震级为 M_L 4.7,主震发生后当日共发生5次4级以上余震,其中5.0~5.9级2次,最大震级余震为8月12日07:58:45 M_L 5.6地震,图1给出了2013年8月11~12日震中附近 $M_L \geq 2.0$ 地震的 $M-t$ 和 $N-t$ 图,图2为此次地震序列的震中分布图。由图1、2可见,主震前的一串中、小地震震中与主震震中非常接近,而余震震中则偏离主震向其西北向展布。

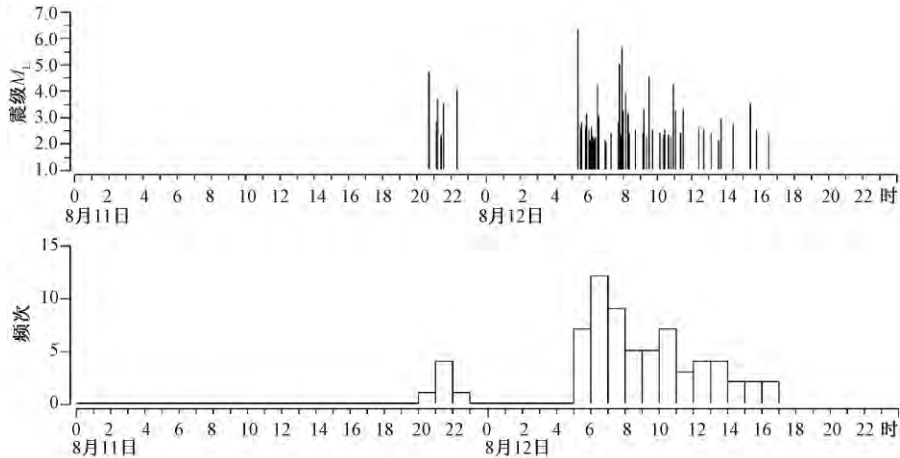


图1 2013年8月11~12日左贡-芒康6.1级地震序列 $M_L \geq 2.0$ 地震的震级(a)、频度(b)图

2 研究方法

地震学中,台站记录的地震波位移观测谱振幅表达为

$$O_{ij}(f) = S_i(f) R_{ij}(\theta, \varphi) G_{ij}(r) P_{ij}(f, r) L_j(f) I_j(f) \quad (1)$$

式中, i 代表第 i 个地震事件; j 代表第 j 个台站; f 为频率; r 为台站与地震事件之间的距离; $R(\theta, \varphi)$ 为地震波的震源辐射图型因子,其中 θ, φ 表示震源球坐标系中台站的方位角; $G_{ij}(r)$ 是几何扩散因子; $P_{ij}(f, r)$ 为非弹性衰减系数; $L_j(f)$ 为台站的场地响应, $I_j(f)$ 为仪器响应,两者仅仅与频率有关; $S_i(f)$ 为地震的震源谱,可以表示为

$$S_i(f) = \frac{M_0(i)}{1 + [f/f_c(i)]^2} \quad (2)$$

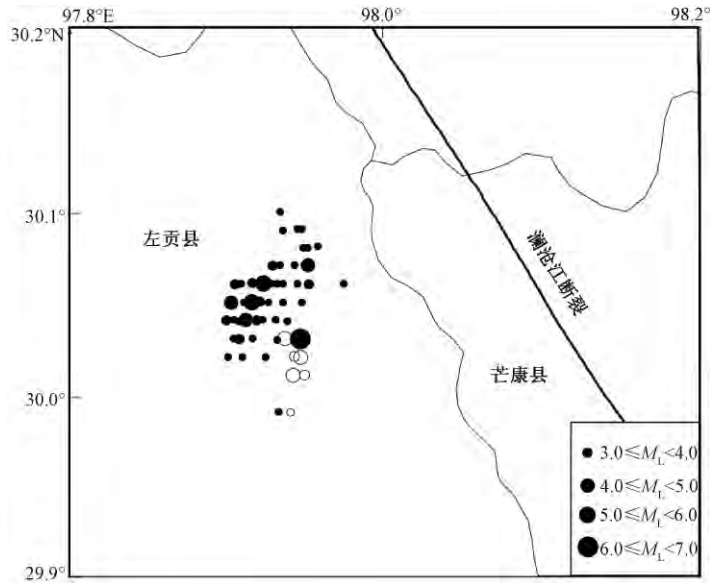


图2 左贡 - 芒康地震序列的空间分布
 实心圆表示主震及余震;空心圆表示前震

式中, M_0 为地震矩; f_c 为拐角频率, 是高频渐近线与低频渐近线相交处的频率。

如果 2 次地震震中足够接近, 即 2 次地震震中的间距比地震震中到台站之间的距离小得多, 那么同一台站记录的这 2 次地震的仪器响应、几何扩散、场地响应和非弹性衰减是相同的。对于同一台站、同一频率的观测谱值之比可以表示为

$$\frac{O_{1j}(f)}{O_{2j}(f)} = \frac{R_{1j}(\theta, \varphi)}{R_{2j}(\theta, \varphi)} \cdot \frac{M_0(1)}{M_0(2)} \cdot \frac{1 + [f/f_c(2)]^2}{1 + [f/f_c(1)]^2} \quad (3)$$

当 f 远小于 $f_c(1)$ 、 $f_c(2)$ 时, 式(3)可以表示为

$$\frac{O_{1j}(f_0)}{O_{2j}(f_0)} = \frac{R_{1j}(\theta, \varphi)}{R_{2j}(\theta, \varphi)} \cdot \frac{M_0(1)}{M_0(2)} \quad (4)$$

式中, $O_{1j}(f_0)$ 与 $O_{2j}(f_0)$ 为 2 次地震在第 j 个台站的观测谱零频谱值; $\frac{M_0(1)}{M_0(2)}$ 为常数。

由于不同震级地震的地震矩差别很大, 因此为了便于比较, 对式(4)取对数, 即

$$\log [O_{1j}(f_0)] = \log [O_{2j}(f_0)] + b(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2) \quad (5)$$

式中, $b(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2) = \log \left[\frac{M_0(1)}{M_0(2)} \cdot \frac{R(\theta_1, \varphi_1)}{R(\theta_2, \varphi_2)} \right]$ 。

Lund 等(2002)提出了一种体波谱振幅相关分析方法: 对于同一震源区 2 次地震事件在同一台站的波形记录, 利用直达 P 波、S 波零频谱振幅计算相关系数。对三分向波形记录, 可以得到 5 个不同分量的零频谱振幅值, 即径向、垂向分量的 P 波记录 (PZ 和 PR), 切向、径向和垂向分量的 S 波记录 (SZ、SR 和 ST)。2 次地震事件的线性相关系数 r_{xy} 可以表示为

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i,j} (y_{ij} - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, x_{ij} 表示事件 x 在第 i 个台站记录的第 j 个谱值分量的对数; \bar{x} 为 x_{ij} 的平均值; y_{ij} 为事件 y 的谱值分量的对数。

由式(4)、(5)可知, 体波谱振幅相关系数可以描述 2 次地震事件震源机制的相似程度。若相关系数接近于 1, 表示 2 次事件震源机制解的几何特性相似; 若相关系数比较低, 则 2 次事件的震源机制不相似。

将每一次事件与序列中其它的事件进行相关分析, 可以得到序列中事件相互之间震源机制的差异, 在此基础上就可以研究地震序列震源机制的时空变化特征。

3 计算结果分析

左贡-芒康 6.1 级地震震中位于藏东南高山峡谷地带, 测震台站稀疏, 监测能力较弱。本文利用四川数字地震台网资料, 挑选主震前后具有较完整清晰波形的 $M_L \geq 3.0$ 地震, 共计 9 次, 其中包含 6 次 $M_L \geq 4.0$ 地震(表 1)。

表 1 计算中使用的 $M_L 3.0$ 以上地震目录

事件序号	发震日期(年-月-日)	发震时刻(时:分:秒)	震级 M_L	东经/(°)	北纬/(°)
1	2013-08-11	20:40:03	4.7	97.95	30.02
2	2013-08-11	21:11:31	3.7	97.95	30.01
3	2013-08-11	21:31:07	3.5	97.94	30.02
4	2013-08-11	22:21:23	4.0	97.94	30.01
5	2013-08-12	05:23:40	6.3	97.95	30.03
6	2013-08-12	06:30:11	4.2	97.95	30.07
7	2013-08-12	06:37:49	3.0	97.92	30.06
8	2013-08-12	07:48:19	5.0	97.92	30.05
9	2013-08-12	07:58:45	5.6	97.92	30.06

根据前述原理与方法, 选取观测台站时应满足下列条件: ①台站距震源区距离应远大于震群内最大震间距; ②研究时段内台站记录正常。按照上述条件, 本文选用四川地震观测台网的巴塘(BTA)、理塘(LTA)、乡城(XCE)及甘孜(GZI)等 4 个台站的波形记录进行计算, 4 个台站均位于震源区北东侧, 距主震震中 120~260km(图 3)。

3.1 序列震源机制的时间演化

利用上述 4 个台站记录到的波形数据计算序列内 9 次 $M_L \geq 3.0$ 地震的谱振幅相关系数, 计算过程中滑动窗长为 3, 步长为 1, 求得 3 次事件中两两组合的相关系数并取算术平均, 将结果标注在窗内最后 1 次事件的序号上方, 得到谱振幅相关系数滑动平均的顺序曲线(图 4(a))。由图 4(a)可知, 滑动平均值在 0.59~0.89 间波动, 曲线表现为从逐渐升高至主震发生后迅速降低。主震发生前的相关系数较高, 从 0.84 逐渐增大至 0.89; 主震发生后, 余震的相关系数迅速下降, 从 0.75 下降至 0.59, 之后虽有转折上升但也仅停留在 0.68 的较低值处。崔子健等(2012)计算得到前震序列的相关系数平均值均大于 0.85, 此次左贡-芒康 6.1 级地震前的小震序列相关系数平均值为 0.86, 显示其震源机制较一致, 与前震序列的特征相吻合。图 4(b)是 9 次地震分别与主震的谱振幅相关系数的分布曲线, 曲线走势与图 4(a)相似, 即前震与主震的谱振幅相关系数较高, 且随序列的发展逐步升高, 而余震与主震的谱振幅相关系数明显降低。

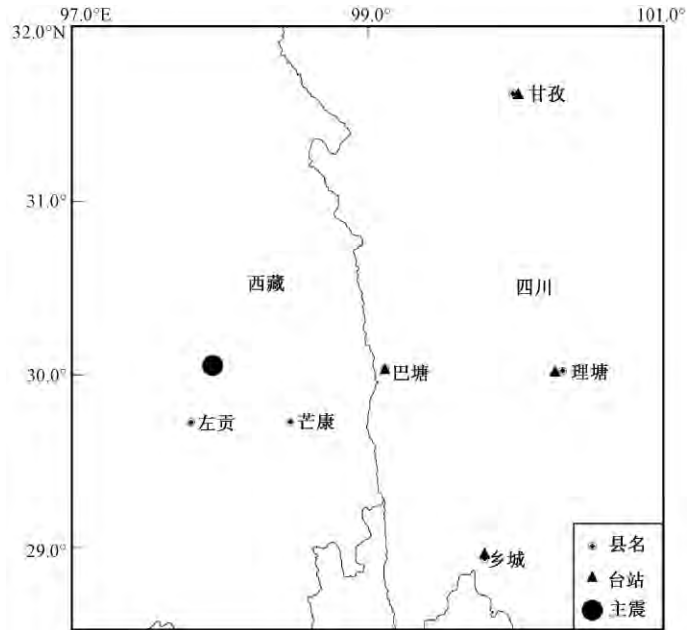


图 3 地震台站分布图

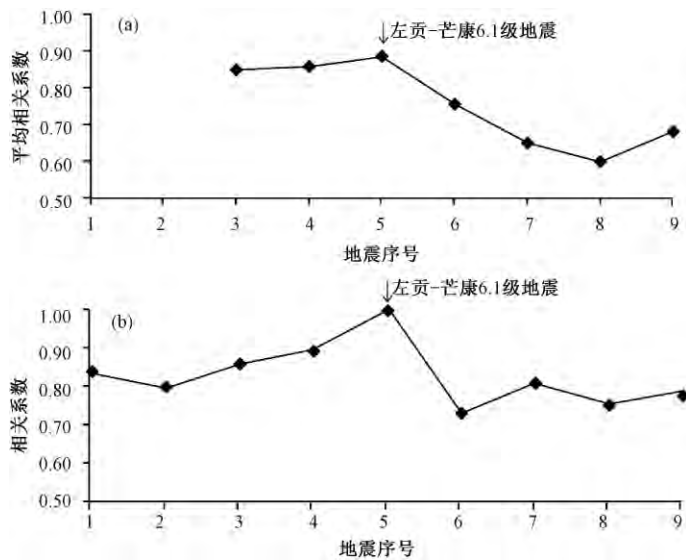


图 4 $M_L \geq 3.0$ 地震谱振幅相关系数滑动平均的顺序曲线 (a)、 $M_L \geq 3.0$ 地震分别与主震的谱振幅相关系数的分布曲线 (b)

3.2 序列震源机制聚类分析

在得到序列事件相互间的谱振幅相关系数的基础上,可以根据彼此相关系数的大小进行聚类分组。聚类分析是对未知类别的一批样本进行合理分类,使得同一个类中的事件比较接近,不同类的事件相差较多。进行聚类分析时,定义不同的相似性量度和距离量度便可

以产生不同的聚类结果。

本文选用最长距离法,该方法属于谱系聚类方法,是通过逐次合并类,最后得到一个二叉树聚类图。对于 n 个观测,首先计算两两间的距离,把距离最近的 2 个观测量合并为一类,这时剩余 $n-1$ 个类(单独未合并的观测量为 1 个类);其次计算这 $n-1$ 个类两两间的距离;最后找到距离最近的 2 个类将其合并,则只剩下 $n-2$ 个类,依次类推,直到剩下 2 个类并且将其合并为 1 个类为止。实际计算时会规定 1 个类水平数(即未合并的类数),最终的类取决于这些未合并的类。本文中定义的距离是 1 与谱振幅相关系数的差,含义是 2 次事件间的相关系数越大,则距离越小,它们的相似程度就越高。

图 5 是左贡-芒康 6.1 级地震序列 $M_L \geq 3.0$ 地震的聚类树,事件 1~4 为前震,事件 5 为主震,事件 6~9 为余震。根据图 5 可将序列事件分为 2 组,第 1 组最长距离小于 0.25,包含事件 1~5 及事件 9,认为组内事件震源机制比较相似;第 2 组的 3 个事件较分散,认为组内事件震源机制不相似;震源机制相似事件包含 6.1 级地震的前震序列、主震及最大余震(事件 9 为 $M_s 6.1$ 地震的最大余震),表明主震前的中小地震存在 1 个优势的震源机制分布,并且与主震的震源机制相似,在主震发生前的一段时间内,小震震源机制相似是前震的特征。从空间分布情况来看,第 1 组机制相似事件的震中主要分布在 6.1 级地震震中附近(图 2)。

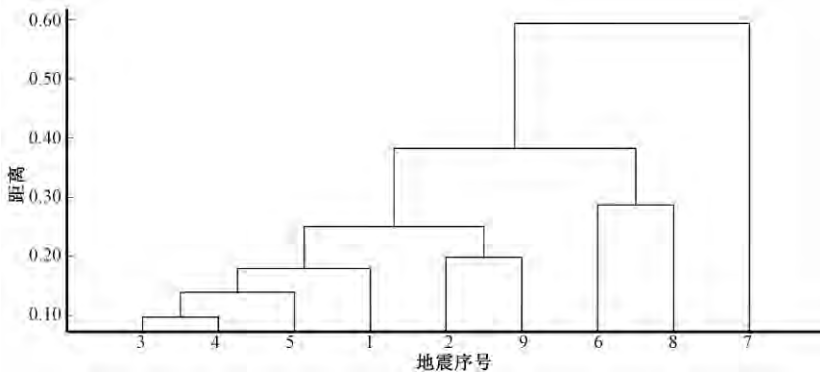


图 5 $M_L \geq 3.0$ 地震事件聚类树

4 讨论与结论

对于同一个震源区的不同地震,利用不同台站得到的直达波零频谱的观测谱值进行对比可以了解不同地震间的震源机制差异,进而得到地震序列的震源机制变化过程。本文使用谱振幅相关系数方法研究了左贡-芒康 6.1 级地震序列的震源机制变化特征,结果显示左贡-芒康 6.1 级地震的前震序列谱振幅相关系数较高,均值为 0.86,高于普通小震序列的相关系数值,表明其震源机制的一致程度高,而余震序列的相关系数较低,表明余震的震源机制较紊乱。当前震发生时,岩层虽受到应力作用但其基本结构还未发生改变,加之较高的构造应力场强度会促使裂隙排列呈现优势取向,因此序列的震源机制趋于一致,谱振幅相关系数呈现出高值的特征;而当主震发生过后,构造基本结构的变化以及局部应力场强度的降低都会导致余震的震源机制较紊乱,谱振幅相关系数出现低值波动特征,这种特征也表明

后续发生较大地震的可能性较低。虽然本文中参与计算的地震事件较少,但是非常完整地呈现了前-主-余型地震序列的谱振幅相关系数的变化过程,具有一定的典型性。

前人(朱航等,2006;崔子健等,2012)利用谱振幅相关系数方法对强震的前震和余震序列的研究结果显示,强震序列初期,震源机制表现为从散乱到一致的特征,主震与较大地震发生后小震的震源机制有一定的发散;在普通小震序列中,地震的震源机制发散。本文计算的左贡 - 芒康 6.1 级地震序列的变化特征与前人研究结果相一致,证实了体波谱振幅相关系数法对序列类型判定的实效性。

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),146~159。
- 陈运泰,2007,地震预测——进展、困难与前景,地震地磁观测与研究,**28**(2),1~24。
- 崔子健、李志雄、陈章立等,2011,小震群序列类型判定方法研究的现状及相关问题研究的趋势,国际地震动态,(6),32~35。
- 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。
- 李丽、陈颢,2009,2009年4月6日意大利拉奎拉地震的前震及其预测意义,中国地震,**25**(2),151~158。
- 李钦祖,1974,一个研究小地震机制的方法,地球物理学报,**17**(3),155~164。
- 李霞、董翔、刘希强等,2010,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,西北地震学报,**32**(3),231~236。
- 刘泽民、刘东旺、夏仕安,2010,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,地震地磁观测与研究,**31**(5),13~16。
- 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,地震,**26**(2),1~11。
- Lund B, Böðvarsson R, 2002, Correlation of micro-earthquake body-wave spectral amplitudes, Bull Seism Soc Am, **92**, 2419~2433, doi: 10.1785/0119990156.

Study on focal mechanism changing character of the 2013 Zogang–Markam $M_s6.1$ earthquake sequence

He Chang Zhu Hang

Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract The $M_s6.1$ earthquake is foreshock–mainshock–aftershock type which happened in boundary region between Zogang and Markam counties on August 12, 2013. Within 9 hours before the main shock seven times more than the $M_L2.0$ earthquake occurred, in which the maximum magnitude is $M_L4.7$. In this paper, the earthquake focal mechanism changing process of Zogang–Markam $M_s6.1$ earthquake sequence is studied by calculating correlation coefficient of body wave spectral amplitudes, and the result shows that the correlation coefficients of spectral amplitude of foreshocks present high value fluctuation, the average value is 0.86, what shows that the focal mechanism of foreshocks are similar; and the correlation coefficients of spectral amplitude of aftershocks present low value, what shows that the possibility of a large earthquake is not high after time.

Key words: Zogang–Markam $M_s6.1$ earthquake Earthquake sequence Focal mechanism Spectral amplitude correlation coefficient