

刘建明、王琼、刘杰等,2016,新源、和静交界 M_L 6.8 地震序列的应力降和震源机制研究,中国地震,32(1),28~39。

新源、和静交界 M_L 6.8 地震序列的 应力降和震源机制研究

刘建明¹⁾ 王琼¹⁾ 刘杰²⁾ 邓菲³⁾
向元¹⁾ 杨文¹⁾ 李金¹⁾

1)新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐市北京南路 42 号 830000

2)中国地震台网中心,北京 100045

3)云南省地震局,昆明 650224

摘要 采用新疆区域台网记录的 2012 年 6 月 30 日新源、和静交界 M_L 6.8 地震序列的数字波形资料,研究分析了余震序列应力降的变化特征及其地震序列震源机制的相关性。采用波谱分析方法和 Brune 震源模型,计算了新源、和静交界 M_L 6.8 地震序列震源参数、地震序列中不同事件在相同台站的体波零频震源谱值、地震谱振幅相关系数;并对地震序列震源机制解进行聚类分组。结果表明:①在余震序列平静阶段,应力降呈平稳态势,强余震前应力降出现升高-回落变化过程;②滑动平均谱振幅相关系数在主震后发散,表明余震的震源机制解与主震的相关性降低;③震源机制解聚类分组结果显示, M_L 6.8 地震序列主要以走滑型地震为主,主压应力轴呈近 NS 向,与近 NS 向的构造应力场结果基本一致,一定程度上显示了地震前天山中段受 NS 向水平挤压应力作用明显;④震级、震源机制演化表明,强余震前震源机制解表现较好的一致性,显示了区域应力场控制作用增强,对后续强余震发生具有预测意义。

关键词: 新源、和静交界 M_L 6.8 地震序列 应力降 震源机制相关系数 体波谱振幅
聚类分组

[文章编号] 1001-4683(2016)01-0028-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震是地下介质应力达到极限强度后,地壳岩层快速破裂错动而释放能量的一种自然现象,地震仪所记录到的地震波携带了很多震源信息,如地震矩、应力降以及破裂尺度等。震源参数可以反映某一地区构造运动和应力应变等状态,通过研究各种震源参数的时空变化特征可以了解地震孕育、发生的应力背景(赵翠萍等,2011),对该地区地震趋势的估计、未来大震的预测以及地震危险性评估都具有实际意义。

地震应力降作为地震震源参数之一,是地震前断层面上平均剪应力与震后断层面上平均剪应力之差(陈章立等,2008),在地壳应力场变化和地震预测研究中的应用等受到了很多

[收稿日期] 2015-05-17; [修定日期] 2015-11-27

[项目类别] 2014 年度震情跟踪合同制定向工作任务(2014020110)和新疆地震局科学基金(201402)联合资助

[作者简介] 刘建明,女,1984 年生,硕士,主要从事数字地震学和地震活动性研究。E-mail:287928467@qq.com

学者的广泛关注(陈章立等,2008;华卫等,2009;刘丽芳等,2006;Annemarie et al,2006)。陈章立等(2008)研究发现震群地震的应力降随时间增大是前震序列的重要标志。华卫等(2009)研究了汶川 8.0 级地震序列应力降的时空演变过程。刘丽芳等(2006)研究了姚安地震序列和大姚地震序列的应力降时序演变过程。Annemarie 等(2006)研究了日本 4 个地震序列的拐角频率、应力降和辐射能量。研究结果均表明:在大震以及强余震孕育过程中,孕震区的中小地震应力降有增大的过程,震后应力降趋于平稳。因此,本文通过计算新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列的应力降,研究本次地震序列应力降的时序特征。

诸多研究显示(刁桂苓等,2005、2011;解朝娣等,2010;徐锡伟等,2014),应力状态影响地震活动。震源机制解直接反应了地壳现今状况和断层构造运动特征,对于了解和预测地震的形成过程具有重要意义。陈颢(1978)提出用震源机制解一致性参数描述地震活动性。刁桂苓等(1992、1994)提出系统聚类分析的方法,通过对美国夏威夷 Kaoki 地区 1983 年 11 月 16 日 $M 6.6$ 地震前后分时段进行系统聚类分析发现,大震前存在震源机制与构造区域应力场一致性参数降低的现象。万永革(2008)利用双力偶源地震震源机制空间旋转的方法,通过对南加州地区 2 个 $M_w > 7.0$ 地震前小震震源机制应力方向的统计发现,震中区及邻近区域震前约半年内的地震震源机制更趋于主震震源机制。许多地震学家基于小地震震源机制解的一致性,捕捉到了强震前的震兆信息,进而判断大震发生的危险性或者大震后发生强余震的可能性(高国英等,2010;泽仁志玛等,2009;范俊喜等,2003;程万正等,2003)。

目前,有多种求解地震震源机制解的方法,如 P 波初动(刘杰等,2004)、矩张量反演(黄建平,2009)和 CAP 方法(吕坚等,2008;郑勇等,2009)等,但大多数方法需满足 $M_s \geq 4.0$ 、波形清晰、台站包围较好等计算条件,而无法计算大量的小震震源机制解。Lund 等(2002)提出采用体波谱振幅相关性方法,研究地震序列中小地震震源机制的变化过程,该方法优势在于不要求得到每个中小地震的震源机制解,但可以描述一组地震震源机制的一致性。朱航等(2006)和崔子健等(2012)利用此方法,得到体波谱振幅相关系数时序曲线,并以此作为判断强震和小震序列的标志,但该方法只能刻画某个时间段整体震源机制解的相关程度。为获取更多地震之间的关系,邓菲等(2014)通过对体波谱振幅相关系数进行聚类分组,更全面地反映了地震序列震源机制解的变化。

2012 年 6 月 30 日天山中段新源、和静交界发生了 $M_L 6.8$ 地震,该地震序列为典型的主余型序列,余震较丰富,可利用应力降和中小地震震源机制解一致性研究余震时空变化特征。因此,本文首先采用波谱分析方法和 Brune 震源模型,计算新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列震源参数;其次,计算地震序列中不同事件在相同台站的体波零频震源谱值;最后,计算地震谱振幅相关系数,并对地震序列震源机制解进行聚类分组。

1 研究方法

1.1 震源谱和地震应力降

地震仪所记录的地震波是一种综合信息,包含了地震震源效应、地震波的传播路径效应、台站场地响应和仪器响应等。要测定震源参数,必须首先对地震记录扣除传播路径效应、台站场地响应及仪器响应等,分离出震源部分,即求出地震的震源谱。

台站观测到的任一地震地面运动的傅立叶振幅谱表达式为

$$U_{ij}(f) = \Omega_i(f) \cdot P_{ij}(r) \cdot F_{ij}(f, r) \cdot S_j(f) \cdot I_j(f) \quad (1)$$

式中, f 为频率; $\Omega_i(f)$ 为第 i 个地震的震源谱; $P_{ij}(r)$ 为几何衰减函数; r 为地震与台站之间的距离; $S_j(f)$ 为第 j 个台站的场地响应; $I_j(f)$ 为第 j 个台站的仪器响应; $F_{ij}(f, r)$ 为非弹性衰减系数。

对某种类型的地震仪, 仪器响应是已知的。如果几何衰减函数、品质因子及场地响应均为已知, 则求解地震的震源谱为

$$\Omega_i(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (2)$$

其中, 地震波的几何衰减采用 Atkinson 等 (1992) 提出的三段几何衰减模型, 台站的场地响应利用 Moya 等 (2000) 和刘杰等 (2003) 提出的采用多台、多地震联合反演的方法得到。

根据 Brune 模型 (Brune et al, 1970), 应力降可表示为

$$\Delta\sigma = \frac{14\pi\rho\Omega_0}{2.34^3 R_i(\theta, \varphi)} \quad (3)$$

式中, Ω_0 为振幅谱零频极限值; ρ 是密度, 取为 2.9g/cm^3 ; $R_i(\theta, \varphi)$ 为地震波的辐射因子, θ 、 φ 表示地震到台站的方位角、离源角, 取值为 $\sqrt{2/5}$ 。

1.2 体波谱振幅相关系数

若 2 个地震震源位置足够接近, 即其间距远小于震中距, 则同一台站记录到的 2 个地震的几何扩散、非弹性衰减、场地响应和仪器响应是一样的。那么, 同一频率下同一台站的观测谱值之比可表示为

$$\frac{U_{1j}(f)}{U_{2j}(f)} = \frac{R_{1j}(\theta, \varphi)}{R_{2j}(\theta, \varphi)} \cdot \frac{M_{01}}{M_{02}} \cdot \frac{1 + (f/f_0(2))^2}{1 + (f/f_0(1))^2} \quad (4)$$

当 $f \ll f_0(1)$ 和 $f_0(2)$ 时, 式 (4) 可以表示为

$$\frac{U_{1j}(f_0)}{U_{2j}(f_0)} = \frac{R_{1j}(\theta, \varphi)}{R_{2j}(\theta, \varphi)} \cdot \frac{M_{01}}{M_{02}} \quad (5)$$

式中, $U_{1j}(f_0)$ 和 $U_{2j}(f_0)$ 为 2 个台站的零频观测谱值, $\frac{M_{01}}{M_{02}}$ 为常数。

由式 (5) 可知, 对于同一震源区的 2 个地震, 同一台站的零频观测谱值比与辐射图型因子线性相关, 而辐射图型因子取决于地震震源机制解的几何特性 (走向、倾角、滑动角)。由此可得, 当地震发生在一个小范围内, 其传播途径、场地响应完全相同。那么, 不同台站记录到的地震零频观测谱值差异主要来自地震震源机制的差异。崔子健等 (2012) 研究结果表明, 前震序列和非前震序列震源机制的变化过程存在明显差异, 前震序列震源机制解相似程度较显著, 谱振幅相关系数接近 1.0; 非前震序列震源机制相似程度较弱, 谱振幅相关系数偏离 1.0 较大, 这具有重要的地震前兆意义。因此, 可通过对比相同台站记录到的不同地震的零频观测谱值, 推测地震之间震源机制的差异性。

Lund 等 (2002) 提出计算体波谱振幅相关性的方法, 通过反演同一震源区地震间的直达体波零频谱振幅, 计算其相关系数来描述震源机制的差异。对于 S 波的三分向波形记录, 每个台站可得到 3 个零频谱值: 垂向、径向和切向 (SZ, SR, ST) 3 个谱值分量; 计算其线性相关

系数可得到地震事件间的相似性,体波谱振幅相关系数 r_{xy} 定义为

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

式中, x_{ij}, y_{ij} 分别为 2 次不同地震事件在第 i 个台站的第 j 个谱值分量的对数; \bar{x}, \bar{y} 为 x_{ij} 的平均值。

1.3 聚类分组

体波谱振幅相关系数只能刻画某个时间段整体震源机制解的相关程度,因而邓菲等(2014)提出将聚类分组应用于震源机制解相关性分析,进一步刻画震源机制解变化过程。聚类分组的基本思想是将数据分类到不同类或者簇的过程,同一簇中的数据具有很大的相似性,而不同簇间的数据具有很大的差异性。

本文在求得序列中地震事件间谱振幅相关系数的基础上,使用聚类方法中的类平均法,将地震事件间相关系数的大小进行分组,得到二叉树聚类图。类平均法将两类观测的平均距离作为类间距离(周海岩等,2010),即

$$D_c(p, q) = \frac{1}{LK} \sum_{i \in G_p} \sum_{j \in G_q} d_{ij} \quad (7)$$

式中, G_p 和 G_q 为不同的簇; L 和 K 分别为 G_p 和 G_q 中的样品数。本文定义距离为 1 与谱振幅相关系数的差值,含义为距离越近的点相似程度越高。

2 资料选取

本文收集了 2012 年 6 月 30 日~12 月 30 日新疆区域地震台网记录到的新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列 $M_L \geq 2.5$ 地震的波形数据,反演得到了 103 次地震的震源参数,计算了 85 次地震震源机制解的相关系数,并对其进行了聚类分组。考虑使用不同方位的台站以及台站到震源区的距离远大于地震间的距离为条件,本文选取新源台 $\Delta = 118\text{km}$ (XNY)、石梯子台 $\Delta = 157\text{km}$ (STZ)、精河台 $\Delta = 194\text{km}$ (JHE)、库尔勒台 $\Delta = 215\text{km}$ (KOL)、克拉玛依台 $\Delta = 245\text{km}$ (KMY) 共 5 个不同方位台站计算谱振幅相关系数(图 1)。天山中段非弹性衰减 Q 值采用多台联合反演方法(Atkinson et al, 1992)得到的 $Q(f) = 465.2f^{0.53}$ (刘建明等,2014),台站场地响应采用 Moya 等(2000)方法反演得到的结果(唐兰兰等,2011;刘建明等,2014)。

3 计算结果及分析

3.1 地震序列震源参数

采用 Brune 圆盘模型,计算了新源、和静交界 $M_L 6.8$ 余震序列中 $M_L \geq 2.5$ 地震的应力降(图 2)。结果显示,余震序列中 102 次余震应力降为 0~8MPa。 $M_L \leq 3.5$ 余震的应力降与震级大小并无明显的依存关系; $M_L > 3.5$ 部分余震的应力降(图 2 中红色点)与震级大小呈正相关。因此,本文在讨论平均应力降时,扣除了与震级明显相关的应力降。

图 3 为新源、和静交界 $M_L 6.8$ 余震序列应力降随时间的演化过程,扣除与震级明显相关的应力降后余震序列应力降均值为 2.47MPa(图 3 中虚线)。图 3 显示,主震发生后的几天内余震应力降主要在 4~8MPa 波动,期间发生了 6 次 4 级以上余震,之后应力降值逐渐恢复至

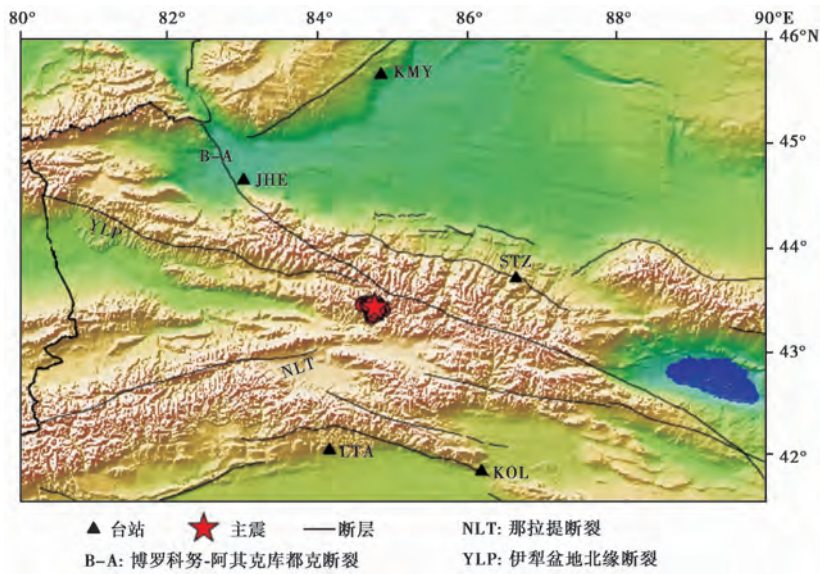


图1 新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列震中分布及参与计算台站示意图

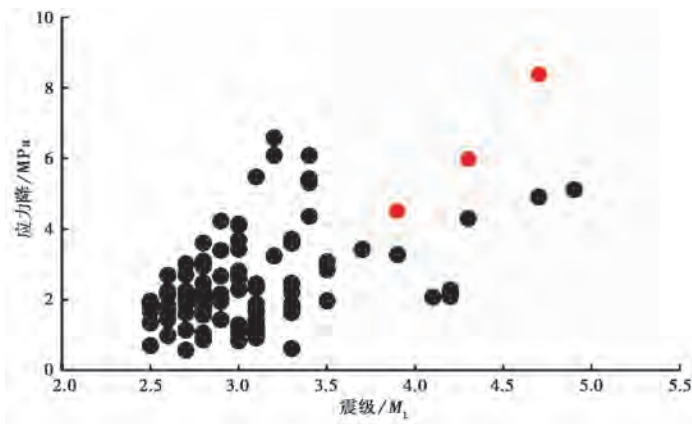


图2 新源、和静交界 $M_L 6.8$ 余震序列应力降与震级的关系图(红色点为扣除地震)

平均应力水平,表明震后震源区应力处于不断调整过程中。其中,7月6~8日应力降逐渐升高,9日开始余震应力降低于平均应力水平,5天后发生了7月13日 $M_L 4.1$ 余震;8月7~14日余震应力降再次明显升高,较 $M_L 4.1$ 余震前的升高幅度更大、持续时间更长,其后9天发生了序列中最大余震即9月1日 $M_L 4.9$ 余震。总体来说,在余震序列平静阶段,应力降值变化平稳;而强余震前应力降值呈升高-回落的变化过程。在震情趋势判定过程中,可参考地震序列应力降的时序变化特征判定强余震发生的危险性。

3.2 滑动平均谱振幅相关性

崔子健等(2012)为进一步了解主震前后谱振幅相关系数的变化特征,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。具体原理为,将地震按发生时间顺序排列,地震 m 与前面 $m - 1$ 个地震

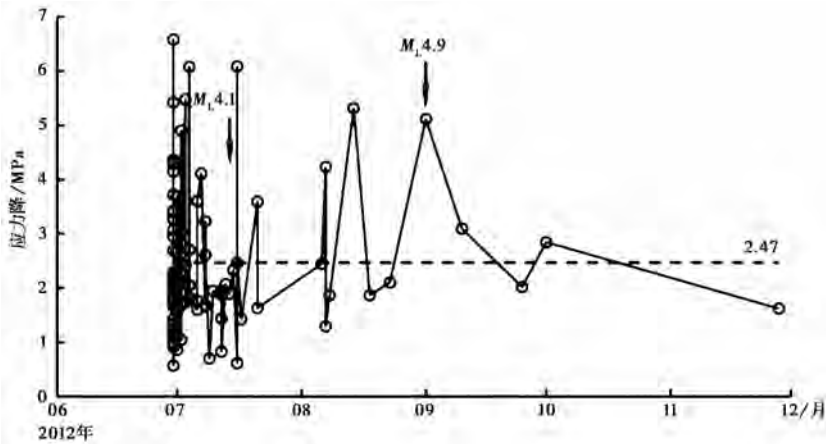


图3 新源、和静交界 $M_L 6.8$ 余震序列的应力降随时间变化的时序图(虚线为应力降均值线)

为一组,计算组内每 2 个地震的 r_{xy} , 得出 $N = m(m - 1)/2$ 个相关系数 r_{xy} , 对 r_{xy} 求算数平均值, 其结果代表了地震 m 时刻的组内谱振幅的相关程度。本文采用该方法, 以地震个数为 1 的步长进行滑动, 计算每个组内零频谱振幅相关系数的平均值, 得到了新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列随时间变化的谱振幅相关性系数(图 4)。结果显示, 余震的滑动平均谱振幅相关系数为 0.54~0.62, 说明主震后震源机制解发散, 且与主震震源机制解相关性降低, 表明后续发生更大地震的可能性不大。本文研究结果与崔子健等(2012)研究结果一致, 即在小震序列中, 地震的震源机制解发散, 滑动平均谱振幅相关性系数时序曲线在低值上波动。

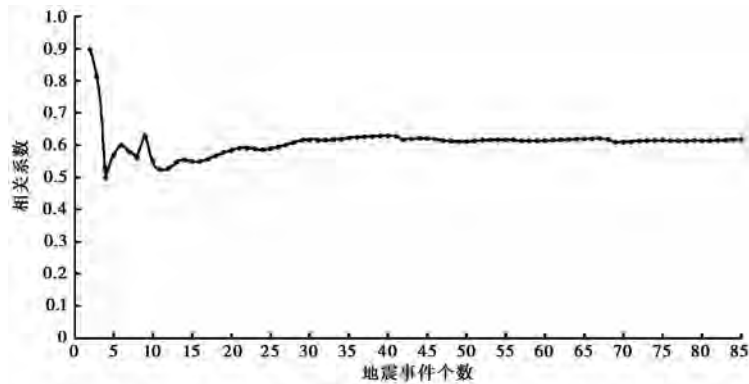


图4 新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列滑动平均谱振幅相关性系数曲线图

3.3 序列震源机制解相关性的聚类分析

滑动平均谱振幅相关性系数主要刻画某个时间段整体震源机制解的相关程度, 为获取更多体波谱振幅的相关系数, 对新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列的震源机制进行了聚类分组。图 5 显示了新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震群组之间的关系, 地震序列震源机制解分为 4 组, 除第 ④组地震间无相关性外, 第 ①~③组每组地震间的相关系数均为 0.52~0.53, 组内相关系数较高。

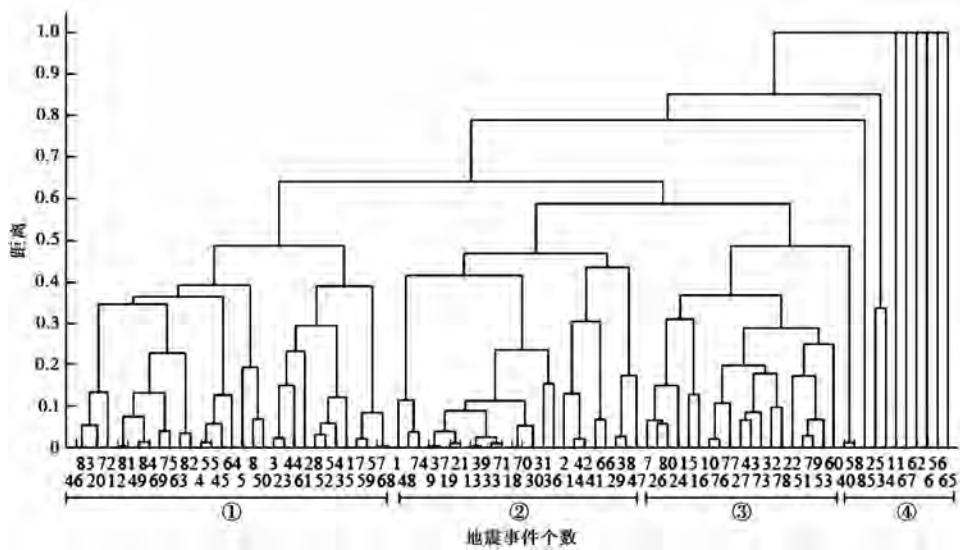


图 5 新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列聚类分组图

表 1 给出了李志海等(2014)得到的新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解,结果显示地震震源机制解均呈走滑型,区别在于逆冲分量的大小;P 轴方位具有明显的优势分布,主要呈近 NS 向(图 6),与北天山中东段近 NS 向的构造应力场一致(龙海英等,2008;张红艳等,2014),一定程度上显示了地震前天山中段受 NS 向水平挤压应力作用明显。

表 1 新源、和静交界 $M_L 6.8$ 序列中 $M_s \geq 4.0$ 震源机制解

序号	地震时刻 年-月-日 时:分:秒	震中位置		震级 M_L	节面 I			B 轴		P 轴		T 轴	
		东经 /(°)	北纬 /(°)		走向 /(°)	倾向 /(°)	滑动角 /(°)	方位角 /(°)	倾角 /(°)	方位角 /(°)	倾角 /(°)	方位角 /(°)	倾角 /(°)
1	2012-06-30 05:07:34	84.77	43.43	6.8	301	81	135	112	45	358	23	249	37
2	2012-06-30 08:46:48	84.83	43.40	4.7	309	61	156	82	53	179	5	272	36
3	2012-09-01 14:47:09	84.68	43.43	4.9	16	82	6	69	80	331	1	240	10

已知 $M_s \geq 4.0$ 地震震源机制解对比聚类分组结果可见,(1)序号为 1(主震)的震源机制解为第②组,其震源机制解特点为带较大逆冲分量的走滑型地震(李志海等,2014),P 轴方位近 NS 向。(2)序号为 2 的震源机制解为第③组,为走滑型地震,逆冲分量较第②组略小,P 轴方位近 NS 向。(3)序号为 3 的震源机制解为第①组,为走滑型地震,逆冲分量又较第③组较小,P 轴方位近 NNW 向。总体而言,新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列震源机制解一致,主要以走滑型地震为主;随着时间的推移,余震序列震源机制解逆冲分量越来越小(图 7);第②组和第③组地震方位角均近 NS 向,以第②组地震方位角 358° 表征两组方位角,可见 P 轴方位角由近 NS 向逐渐转为 NNW 向(图 8),表明地震序列震源机制趋于散乱,构造应力场

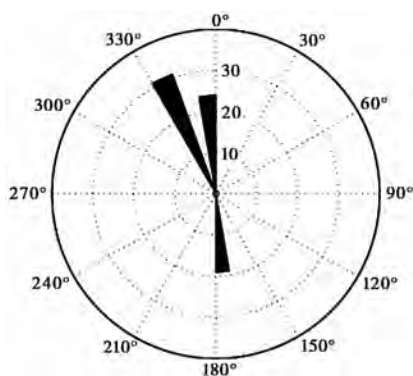
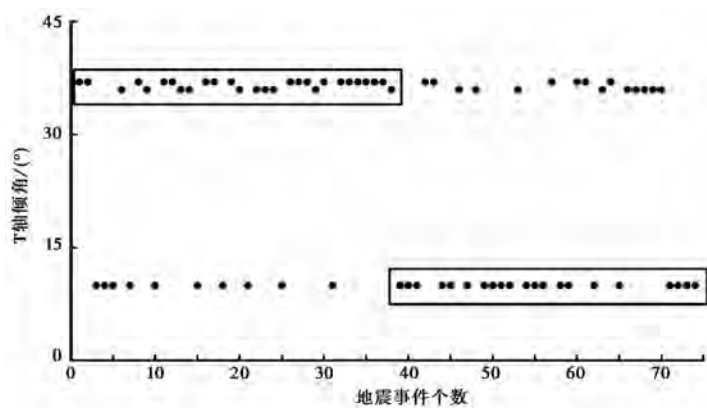
图 6 新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列 P 轴方位角分布

图 7 T 轴倾角随时间变化

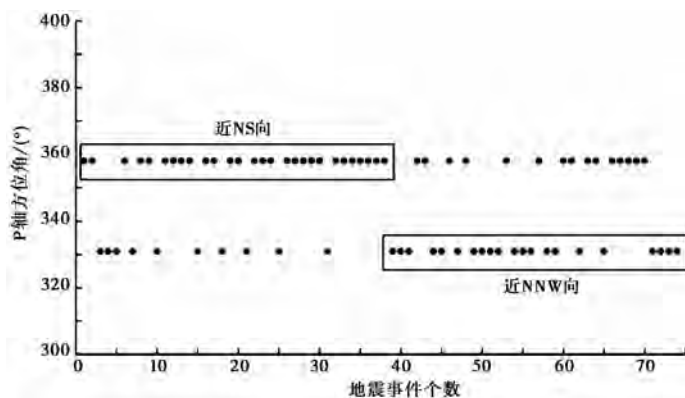


图 8 P 轴方位角随时间变化

的控制作用趋于减弱,地震将以离散发生的中小地震为主。

新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列震级、震源机制解分组结果显示(图 9),主震后至 7 月 2 日(地震事件 50)期间发生了 6 次 $M_L \geq 4.0$ 余震,由于震源机制解分组过多,并未发现震源机制解存在较好的一致性现象。8 月 7~23 日余震(地震事件 76~80)震源机制解一致性较好,

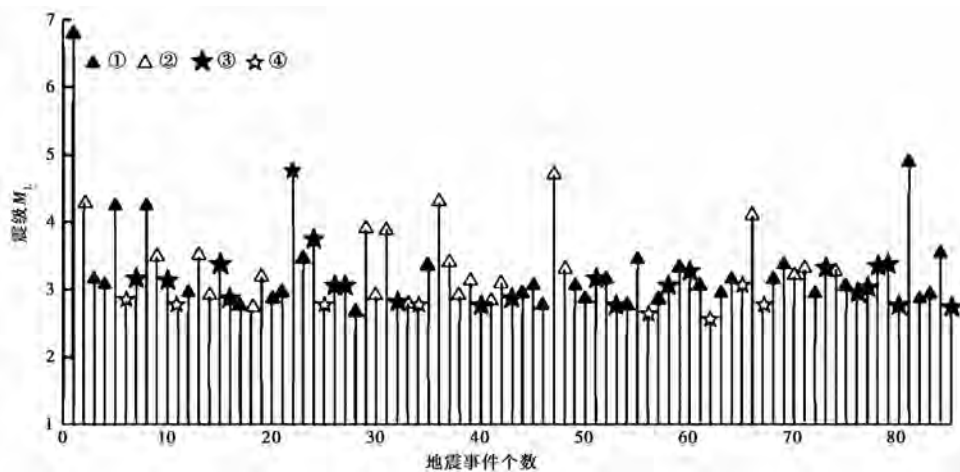


图9 新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列震级、震源机制解分组演化图

并且震源机制解表现出的应力方向与构造应力场一致,随后发生了9月1日最强余震 $M_L 4.9$ (地震事件81)。这种现象表明强余震前震源机制一致性较好,显示区域应力场控制作用增强,有利于后续强余震发生。

4 结论与讨论

通过计算2012年新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列应力降、谱振幅相关系数以及对地震序列震源机制解进行聚类分析,初步得出以下结论:

(1)新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列中 $M_L \leq 3.5$ 余震的应力降与震级大小并无明显的依存关系; $M_L > 3.5$ 余震的应力降与震级大小呈正相关;主震应力降值为53.375MPa,能量释放充分。余震序列应力降随时间的变化表明,在余震序列平静阶段,应力降变化平稳;强余震前应力降出现升高-回落变化过程。

对比前人对应力降随时间变化特征的研究结果,本文结果与其一致。华卫等(2009)针对2008年汶川8.0级地震序列震源参数分段特征研究,5月17日之前北川至青川之间地震应力降一直处于高值水平,之后 $M_L \geq 5.0$ 余震活动主体地区则转移到该段,并发生了青川6.4级最大余震。Hardebeck等(2009)研究表明断层上的高应力降分布与外加剪应力、闭锁区域相关等,即高应力降集中分布的区域是中强地震的潜在震源成核区。因此,余震序列应力降随时间变化特征对震后趋势判定具备一定的参考价值。

(2)滑动平均谱振幅相关系数显示,余震的滑动平均谱振幅相关系数在0.54~0.62之间波动,说明主震后震源机制解开始发散,并且与主震震源机制解相关性降低,表明在这种变化过程中再次发生较大地震的可能性相应较低,与实际震例情况一致。由此认为,可将谱振幅相关性系数作为判断小震序列和强震序列的标志。本文研究结果与崔子健等(2012)对云南西北部3个一般性小震群和2个强震小震序列研究结论一致。

(3)据新源、和静交界 $M_L 6.8$ 地震序列聚类分组,结合已知 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解结果可知,震源机制解分为④组,除第④组地震间无相关性外,其余地震震源机制解均为走

滑型,主压应力轴呈近 NS 向的优势分布特征,与北天山中东段近 NS 向的构造应力场结果基本一致,一定程度上显示了地震前天山中段受 NS 向水平挤压应力作用明显。该部分结果与王琼等(2015)利用 P 波初动方法研究地震序列震源机制特征基本一致。

另外,小震震源机制解虽然表现出一定的随机性,但大量样本反映的优势应力场分布仍与构造应力场基本一致,表明在一定的样本量下,小震的震源机制解的优势规律也可反映区域应力场方向。

(4)震级、震源机制解分组演化表明,强余震前余震震源机制解反映的应力场和区域构造应力场一致,并且震源机制解一致性较好,显示出区域应力场控制作用增强,对后续强余震发生具有预测意义;反之,震源机制解类型增多、主压应力方向较为分散,表明区域应力场控制作用减弱,后续余震以中小地震活动为主。

(5)采用谱振幅相关系数和聚类分析方法,可以尽可能多的了解小震的震源机制解,清楚地研究整个地震序列中小地震的震源机制解变化过程。基于此联合地震序列应力降的时序特征,研究区域应力场应力水平,对确定震源区未来地震的危险性有一定物理意义和定量意义。在实际工作中,将应力降和谱振幅相关系数应用于前震序列或小震序列,对在震后快速判定震情具有重要的意义。

致谢:对匿名审稿专家提出的建设性意见和建议,在此深表谢意!

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。
- 程万正、阮祥、涨永久,2003,川滇次级地块震源机制解类型与一致性参数,地震学报,28(6),561~573。
- 陈章立、李志雄,2008,对地震预报的科学思考(二)——前兆观测研究及加强地震综合预报研究的方向和重点,地震,28(2),1~16。
- 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。
- 邓菲、刘杰,2014,2008年盈江地震序列的震源参数和震源机制相关系数研究,地震,34(2),22~34。
- 刁桂苓、王海涛、高国英等,2005,伽师强震系列应力场的转向过程,地球物理学报,48(5),1062~1068。
- 刁桂苓、徐锡伟、陈于高等,2011,汶川 $M_w 7.9$ 和集集 7.6 地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义,地球物理学报,54(1),128~136。
- 刁桂苓、于利民、李钦祖,1992,震源机制解的系统聚类分析——以海城地震序列为例,中国地震,8(3),86~92。
- 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。
- 范俊喜、马瑾、刁桂苓,2003,由小震震源机制解得到的鄂尔多斯周边构造应力场,地震地质,25(1),88~99。
- 高国英、聂晓红、龙海英,2010,2003—2008年新疆区域构造应力场特征探讨,地震地质,32(1),70~79。
- 黄建平、倪四道、傅容珊等,2009,综合近震及远震波形反演 2006 年文安地震 ($M_w 5.1$) 的震源机制解,地球物理学报,52(1),120~130。
- 华卫、陈章立、郑斯华,2009,2008年汶川 8.0 级地震序列震源参数分段特征的研究,地球物理学报,52(2),365~371。
- 龙海英、高国英、聂晓红等,2008,北天山中东段中小地震震源机制解及应力场反演,地震,28(1),93~99。
- 刘杰、郑斯华、康英等,2004,利用 P 波和 S 波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解,地震,24(1),19~26。
- 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。
- 吕坚、郑勇、倪四道等,2008,2005年11月26日九江-瑞昌 $M_s 5.7$ 、 $M_s 4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究,地球物理学报,51(1),158~164。
- 刘建明、李志海,2014,新疆北天山非弹性衰减、场地响应及其震源参数研究,地震,34(1),77~86。

- 刘丽芳、刘杰、苏有锦,2006,姚安地震序列与大姚地震序列震源参数的对比研究,地震,26(1),10~18。
- 李志海、郑勇、谢祖军等,2014,2012年6月30日新疆新源-和静 M_s 6.6地震发震构造初步研究,地球物理学报,57(2),449~458。
- 唐兰兰、李志海,2011,新疆天山中东段地区地震波衰减、场地响应及震源参数研究,地震学报,33(2),134~142。
- 王琼、冀战波、赵翠萍等,2015,2012年6月30日新疆新源-和静交界 M_s 6.6地震的破裂过程,地震地质,37(1),33~43。
- 万永革,2008,美国 Landers 地震和 Hector Mine 地震前震源机制与主震机制一致现象的研究,中国地震,24(3),216~225。
- 徐锡伟、江国焰、于贵华等,2014,鲁甸 6.5 级地震发震断层判定及构造属性讨论,地球物理学报,57(9),3060~3068。
- 解朝娣、朱元清、Xinlin LEI,2010, M_s 8.0 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响,中国科学: D 辑,40(6),688~698。
- 赵翠萍、陈章立、华卫等,2011,中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究,地球物理学报,54(6),1478~1489。
- 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。
- 周海岩、白晓林,2010,基于图的 K-均值聚类法中初始聚类中心选择,计算机测量与控制,18(9),2167~2169。
- 张红艳、谢富仁、崔效锋等,2014,北天山中东段活动断层滑动与现代构造应力场,中国地震,30(1),13~22。
- 泽仁志玛、刁桂苓,2009,千岛岛弧 2006 年 M_w 8.3 地震前震源机制解的一致性变化,地震学报,31(4),467~470。
- 郑勇、马宏生、吕坚等,2009,汶川地震强余震 ($M_s \geq 5.6$) 的震源机制解及其发震构造的关系,中国科学: D 辑,39(4),413~426。
- Annemarie B, Satoshi I, German P, 2006, Variability in earthquake stress drop and apparent stress, Geophys Res Lett, 33, L06303, doi:10.1029/2011GL046698.
- Atkinson G M, Mereu R F, 1992, The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada, Bull Seism Soc Am, 82(5), 2014~2031.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and the spectral of seismic shear waves from earthquake, Geophys Res, 75, 4997~5009.
- Hardebeck J L, Allegra A, 2009, Earthquake stress drops and inferred fault strength on the Hayward fault, East San Francisco Bay, California, Bull Seism Soc Am, 99(3), 1801~1814.
- Lund B, Bodvarsson R, 2002, Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes, Bull Seism Soc Am, 92(6), 2419~2433.
- Moya A, Aguirre J, Irikura K, 2000, Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms, Bull Seism Soc Am, 90(4), 977~992.
- Wan Y, Sheng S, 2000, Seismological evidence for the convergence of crustal stress orientation before large earthquakes, Earthquake Science, 22, 623~629.

Research on stress drops and the focal mechanisms of the Xinyuan-Hejing $M_L 6.8$ earthquake sequences

*Liu Jianming*¹⁾ *Wang Qiong*¹⁾ *Liu Jie*²⁾ *Deng Fei*³⁾ *Xiang Yuan*¹⁾
*Yang Wen*¹⁾ *Li Jin*¹⁾

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Regions, Urumqi 830011, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

Abstract Based on the digital waveform data recorded by Xinjiang Digital Seismic Network for the Xinyuan-Hejing $M_L 6.8$ earthquake sequences of June 30, 2012, the paper analyzes stress drops of earthquake sequences and the correlation coefficients of focal mechanisms significant for strong aftershocks. Firstly, the source parameters of the Xinyuan-Hejing $M_L 6.8$ earthquake sequences are obtained by applying the spectrum analysis and the Brune's source model. Then, the correlation coefficients of spectral amplitude are calculated using the low-frequency spectral amplitude recorded by the same station for the different events. Finally, based on the results of the correlation coefficients of spectral amplitude, the events with similar focal mechanism are grouped using clustering method. The results show that: (1) The stress drop values show a steady trend in the aftershocks sequence calm period and the stress drop values show rise-fall in the strong aftershocks. (2) Moving average correlation coefficient of amplitude spectrum begins to spread after the main shock. It shows that the correlation decreases between the main shock and the aftershocks in mechanisms. (3) The results of focal mechanism groups show that the earthquake sequences are mainly strike slips. The stress distribution of the main pressure axis is nearly NS which is the same with the structural stress field. (4) The magnitude and mechanism show that there is an agreement before the strong aftershock, which shows that the regional stress field is enhanced.

Key words: Xinyuan-Hejing $M_L 6.8$ earthquake sequences Stress drop The correlation of the focal mechanism Body-wave spectral amplitude Clustering group