周少辉,蒋海昆,曲均浩,等.2014 年云南景谷 6.6 级地震序列震源参数研究[J].地震工程学报,2020,42(6):1565-1572.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2020.06.1565

ZHOU Shaohui,JIANG Haikun,QU Junhao,et al.Source Parameters of the 2014 *M*6.6 Earthquake Sequence in Jinggu, Yunnan[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(6):1565-1572.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2020.06.1565

2014 年云南景谷 6.6 级地震序列震源参数研究

周少辉[1], 蒋海昆[2], 曲均浩[1], 郑旭[1], 郭宗斌[1], 李亚军[1], 张志慧[1]

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 利用 290 个 $M_L \geqslant 2.5$ 的景谷 6.6 级地震序列事件的数字波形资料,计算得到其震源参数。结果显示,地震矩 M_0 数值范围为 10^{12}～10^{16} N·m;拐角频率 f_c 为 3～16 Hz;视应力数值范围为0～15 MPa,平均值是 2.14 MPa,中位数为 1.39 MPa。同时,各个震源参数之间均存在一定的相关关系;景谷地震序列余震空间分布可分为北段、中段与南段,其视应力高低分布依次为:南段＞中段＞北段;表明主震发生后,震源区南段区域的应力水平最高,这可能是后续 5.8 级、5.9 级强余震均发生在南段的根本原因。在视应力时间变化特征方面,5.8 级、5.9 级强余震的发生前,震中所在的南段视应力数值存在"逐渐变大-维持稳定"的特点。而后续未发生强余震的北段和中段,其视应力时间变化为早期快速调整,后续逐渐变化到各自区域的视应力均值水平;这类变化表明对于震源区南段,在强余震发生前的短时间内,南段区域首先出现局部应力不断挤压增强,并随后维持相对高值应力水平的"闭锁"状态,直到强余震的发生。因而,震后震源区余震视应力的空间分布对强余震可能产生地点判定有指示作用,其时间变化特征与地震序列中较强地震的发生存在一定的相关性。余震视应力的时空变化对序列后续地震活动的判定有重要指示作用,可为强余震的时空判定提供相应参考。

关键词: 视应力; 余震序列; 景谷地震; 强余震判定

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000－0844(2020)06－1565－08

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2020.06.1565

Source Parameters of the 2014 *M*6.6 Earthquake Sequence in Jinggu, Yunnan

ZHOU Shaohui[1], JIANG Haikun[2], QU Junhao[1], ZHENG Xu[1], GUO Zongbin[1], LI Yajun[1], ZHANG Zhihui[1]

(*1. Shandong Earthquake Agency, Ji'nan 250014, Shandong, China;*
2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China;)

Abstract: In this paper, the digital records of 290 $M_L \geqslant 2.5$ earthquakes recorded in the Jinggu *M*6.6 earthquake sequence are used to calculate source parameters. Results show that the seismic

收稿日期: 2019-09-26

基金项目: 中国地震局监测、预报、科研三结合项目(3JH-201901064); 山东省自然基金(ZR2017LD009); 山东省地震局一般科研项目(YB-1902); 中国地震局星火计划项目(XH19027,XH19026Y)

第一作者简介: 周少辉,男,硕士,助理工程师,主要从事地震序列及余震预测研究。E-mail:674891062@qq.com。

通信作者: 蒋海昆,男,博士,研究员。E-mail:jianghaikun@ sohu.com。

moment M_0 is $10^{12}-10^{16}$ N·m, the corner frequency f_c is 3—16 HZ, the apparent stress is 0—15 MPa, the mean value is 2.14 MPa, and the median value is 1.39 MPa. A certain correlation was also found between the source parameters, and the spatial distribution of aftershocks in the Jinggu earthquake sequence can be divided into northern, middle, and southern sections. The distribution of apparent stress is south > middle > north. This finding indicates that the stress level in the southern section of the source area is the highest after the main shock occurred, which may be the root cause of the subsequent M5.8 and M5.9 strong aftershocks that occurred in the southern section. Apparent stress in the southern section is "gradually rising-maintaining stability" before the strong aftershocks occurred. In the northern and middle sections where no strong aftershocks occurred, the temporal change in apparent stress is a rapid adjustment in the early stage, which then gradually changed to the average value in each region. Such changes indicate that in a short period before the occurrence of strong aftershocks, the local stress in the southern section first increased and then maintained a "locked" state of a relatively high value until the occurrence of strong aftershocks. Therefore, the spatial distribution of apparent stress in the source area has an indication of the possible location of strong aftershocks, and its temporal variation has a certain correlation with the occurrence of strong earthquakes in the seismic sequence. The temporal and spatial variations of apparent stress have important indications for subsequent seismic activities and can provide a corresponding reference for the space-time determination of strong aftershocks.

Keywords: apparent stress; aftershock sequence; Jinggu earthquake; determination of strong aftershock

0 引言

地震是地球内部原有断层或整体介质在应力作用下发生的扩展失稳与破裂错动。即震源所在区域的应力环境与地震事件的孕育密切相关。就单一地震序列地震活动而言，主震发生后判定震源区应力环境状态的强弱，对序列地震活动趋势判断与后续强余震预测均有重要的指示作用[1]。由于天然地震事件往往在地下深部产生。目前，主流的地球物理学方法是通过分析地震矩、震源破裂半径、视应力、拐角频率等震源参数来间接判定震源区的应力环境状态，进而进行震源区孕震状态变化及局部地区的地震危险性判定[2-4]。

目前关于震源参数研究，国内外学者已进行大量工作并取得良好成果。有研究者对胶东半岛地区中小地震的震源参数研究显示，地震矩、应力降和视应力都与震级呈正相关关系；同时，其根据胶东地区震源参数和震级的定量统计关系，去除震级影响后判定胶东半岛地区正处于应力的释放时期[5]。同时，对四川九寨沟 M_S7.0 地震序列视应力的研究结果显示，最大余震发生前的平均视应力显著高于最大余震发生后 2 周内的平均视应力，且从空间分布看，最大余震也发生在视应力较高区域[6]。对新疆 2011—2015 年期间所有 6 级以上地震序列的研究显示，视应力与震级存在正相关关系，且几次强余震前均出现视应力高值现象，表明视应力对强余震有很好的预测作用[7]。

以上研究结果都显示，震源参数对强余震有很好的前兆特征表现。因此，本文采用华卫研究员等研发的震源参数计算程序获得景谷地震序列震源参数，并研究其序列震源参数特征，分析震源参数在中强余震预测及序列后续地震活动趋势判定等方面的指示意义。

1 方法原理

本文主要研究震级在 M_L2.5～4.9 的中小地震，故可利用 Brune 圆盘模型下的震源参数计算公式来获取各类震源参数[8-9]：

$$\sigma_{\mathrm{app}}=\frac{2\mu\cdot R_{\theta\varphi}\cdot\Omega_0\cdot(\pi f_c)^2}{(v_S)^2} \tag{1}$$

$$M_0=\frac{4\pi\rho v_S^3\Omega_0}{R_{\theta\varphi}} \tag{2}$$

$$R=\frac{2.34v_S}{2\pi f_c} \tag{3}$$

式中：σ_{app} 表示视应力；M_0 表示地震矩；R 表示震源半径；μ 表示震源区介质的剪切模量；ρ 为研究区域

介质密度；v_S 为 S 波传播速度；$R_{\theta\varphi}$ 表示震源辐射因子；Ω_0 表示震源谱低频极限值；f_c 表示震源谱拐角频率。

由式(1)～(3)可知，需得到 ρ、v_S、$R_{\theta\varphi}$、Ω_0 与 f_c 才可获取相关地震事件的震源参数。本研究中，研究区域位于云南地区，介质密度 $\rho=2.7\ \mathrm{g\cdot cm^{-3}}$，剪切模量 $\mu=3.0\times10^4$ MPa，$v_S=3.5$ km/s，$R_{\theta\varphi}=0.41$[10-11]。Ω_0 与 f_c 选取遗传算法来确定；具体方法为理论震源谱与由多个台站记录到的该地震事件的实际震源谱求平均后获取的平均震源谱的残差最小时的 Ω_0 与 f_c 即为所求值。残差定义为：

$$\varepsilon=\sum_{k=1}^{p}\frac{(teo_k-obs_k)^2}{\sqrt{(teo_k)(obs_k)}} \tag{4}$$

式中：teo_k 表示理论震源谱；obs_k 表示平均震源谱。理论震源谱与台站记录的地震事件实际震源谱的求取方法如下：

由 Brune 模型可知，理论震源谱 $\Omega_0(f)$ 为：

$$\Omega_0(f)=\frac{\Omega_0}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \tag{5}$$

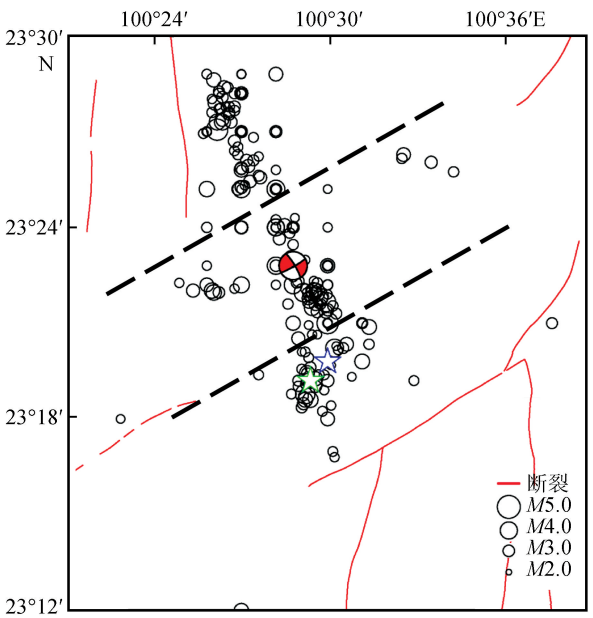
台站记录的地震事件实际震源谱由数字地震台网日常记录到的地震波形数据经过相关计算得到。数字地震台网日常记录到的地震数据为地震位移谱 $U_{ij}(f)$；其中除包含地震震源信息外，还包括地震波传播路径响应、台站场地响应等各类信息[12]。因此，$U_{ij}(f)$ 为：

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

式中：f 表示频率；$S_i(f)$ 表示地震事件 i 的震源谱；$P_{ij}(f)$ 为地震 i 传播到台站 j 的过程中的路径效应；$L'_j(f)$ 为台站 j 自身的场地响应；$N_j(f)$ 为台站附近的噪音项；$I_j(f)$ 为仪器响应；Sur_j 表示地震波在入射地表自由表面时的反射情况，因此对于地表台站而言，$Sur_j=2$。本研究利用延迟窗谱技术在将地震信号由时间域转为频率域的过程中消除噪音项[13]；通过仪器标定校正仪器响应[11,14]。消除传播路径的影响使用的 Q 值与各个台站的场地效应采用前人对该区域的研究结果[15]。消除以上各类因素后，即可从地震位移谱 $U_{ij}(f)$ 获得实际震源谱。

2　数据资料

2014 年 10 月 7 日 21 时 49 分，中国云南景谷(23.4°N，100.5°E)发生 $M6.6$ 地震，本次地震序列为典型的主-余型地震活动序列(在 12 月 6 日先后发生 $M5.8$ 与 $M5.9$ 地震)；景谷地震发震断层为无量山活动断裂带，其展布方向为 NNW 向[16]；余震分布具有明显的线性集中展布特征；进一步从更小的空间尺度上看，余震分布具有明显的分段差异，粗略可分为北段、中段和南段[17]；主震位于中段，后续的 5.8 与 5.9 级强余震均位于南段(图 1)。该地震序列地震活动在主震发生 80 天(2014 年 12 月 25 日)之后，$M_L\geqslant2.5$ 地震频次几乎为零(图 2)。因此本文重点针对主震后 80 天内的景谷地震序列情况进行研究，在这期间，景谷序列共发 290 次 $M_L\geqslant2.5$ 余震，其中 $M_L2.5\sim2.9$ 余震 155 次，$M_L3.0\sim3.9$ 余震 115 次，$M_L4.0\sim4.9$ 余震 18 次，5.0 级以上强余震2 次。



蓝色五角星为 5.8 级强余震，绿色五角星为 5.9 级强余震

图 1　景谷 6.6 级地震序列 $M_L\geqslant2.5$ 余震空间分布图

Fig.1　Spatial distribution of aftershocks with $M_L\geqslant2.5$ in Jinggu $M6.6$ earthquake sequence

本文选取震源区 8 个台站(图 3)记录到的景谷地震序列波形资料，挑选其中记录较好，经过 1.5 倍信噪比检验且至少同时有 3 个台站记录到的地震记录事件用于最终计算其地震矩、震源破裂半径、视应力、拐角频率等震源参数[12,14]，随后舍弃台站最大张角超过 180°或台站分布大于 0.35 的震源参数结果，进而研究该序列的震源参数特征。

3　计算结果及分析

在本次研究的景谷地震序列 $M_L2.5\sim5.0$ 震级范围内，本文最终获得满足各类条件的震源参数 172 个，占比约 59.7%。

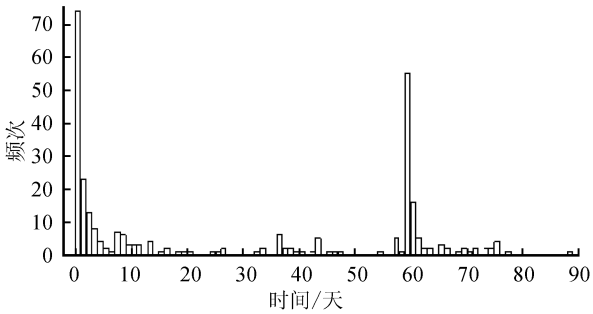


图 2 景谷 6.6 级地震序列 $M\geqslant 2.5$ 日频次统计图

Fig.2 Daily frequency chart of aftershocks with $M_L\geqslant 2.5$ in Jinggu $M6.6$ earthquake sequence

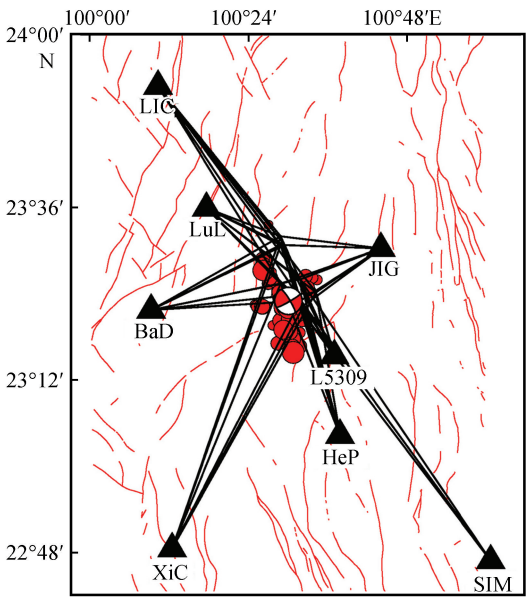


图 3 研究区断层、台站及震中位置分布

Fig.3 Distribution of faults, stations and epicenters in the study area

3.1 地震矩与震级、震源破裂半径、拐角频率之间的关系

地震矩 M_0 是最主要的震源参数之一，其为表示地震强度大小的物理量。景谷地震序列计算得到的地震矩 M_0 数值范围为 $10^{12}\sim10^{16}$ N·m(图 4)；且地震矩 M_0 与 M_L 震级的相关性极高，二者的相关系数高达 0.977。同时，有大量研究者指出地震矩 M_0 与 M_L 震级存在一定的线性拟合关系[18]；就景谷地震序列而言，其地震矩 M_0 与 M_L 震级之间的关系(图 5)：$\lg M_0=10.469+1.038M_L$。本次获得的二者线性关系式与其他研究者得到的结果基本相似[19-20]。

震源破裂半径 R 是反映震源尺度大小的物理量；与地震强度、震源区介质结构等有关[8,21]。图 6 为震源破裂半径R与地震矩关系图。地震矩和震源破裂半径 R 之间存在半对数关系：$\lg M_0=11.949+0.01R$，其相关系数为 0.740。拐角频率 f_c 表示

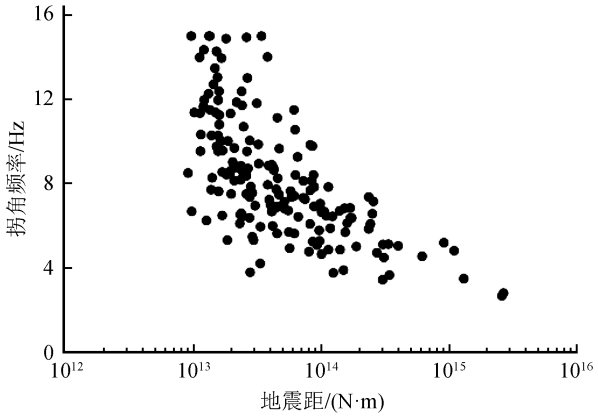


图 4 拐角频率与地震矩关系图

Fig.4 The relationship between corner frequency and seismic moment

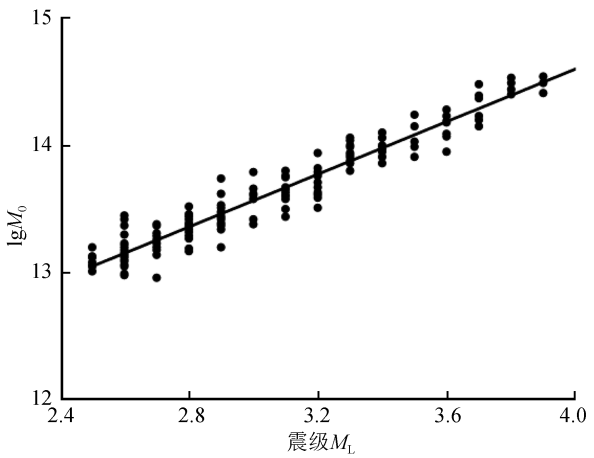


图 5 地震矩 M_0 与 M_L 震级关系图

Fig.5 The relationship between seismic moments M_0 and M_L

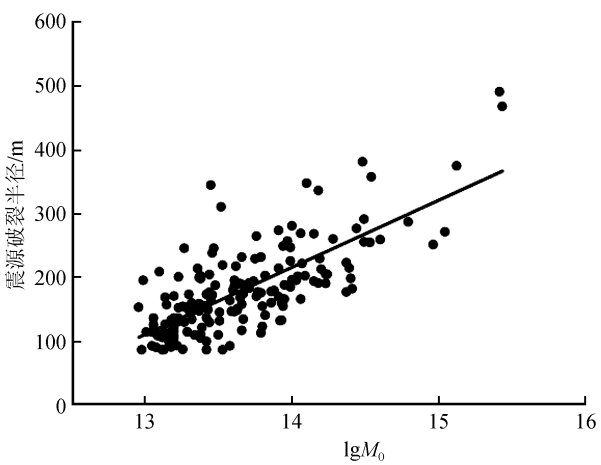


图 6 破裂半径 R 与地震矩 M_0 关系图图

Fig.6 The relationship between rupture radius R and seismic moment M_0

频谱图中低频与高频渐近线相交点所对应的频率，其能够反映地震波高、低频能量的分布及地震波的衰减变化特征[8,22]。本次获得的拐角频率 f_c 数值范围在 3～16 Hz 之间，整体而言，拐角频率与地震矩互为反相关，即随地震矩增大而减少（图 4），相关系数为－0.662；这一结果亦符合震源标定律[22]。

3.2　景谷地震序列余震视应力

图 7 为最终获得的景谷地震序列视应力的数值分布统计图。由图可见，景谷地震序列视应力数值分布范围为 0～15 MPa；平均值为 2.14 MPa，中位数为 1.39 MPa。计算结果与全球平均视应力基本相吻合[23]；除极个别余震视应力大于 8 MPa 之外，绝大部分数值都小于 8 MPa（约占 97%），其中，小于 2 MPa 的地震约占 68%。

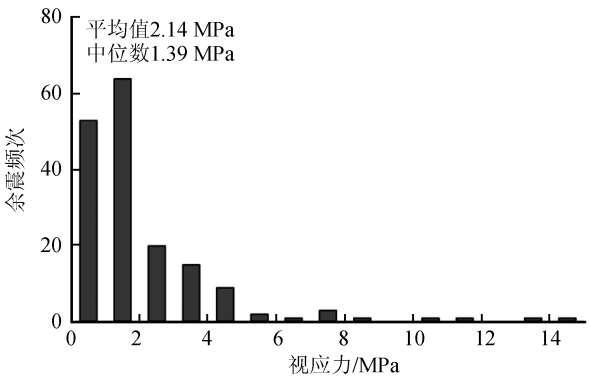


图 7　景谷地震序列视应力分布统计

Fig.7　Distribution of apparent stress in Jinggu earthquake sequence

关于视应力与震级二者之间的关系目前尚有一定争议。有部分研究者认为视应力随地震矩不变，近似于常数[24-25]；也有部分研究者认为视应力与震级存在正相关关系[26-27]；本文计算得到的视应力与震级存在一定的相关性，视应力随震级的增大而增大，然而，值得注意的是，若缩小震级范围，即在小范围的震级段（如 M_L2.5～2.9、M_L3.0～3.4）内，视应力随震级的变化并不是很显著（图 8）。

理论上，震源区的地震事件释放的视应力与本区域的环境应力均值成正比，即地震事件释放的视应力越高，表示事件所处的震源区应力水平越高，也可据此探索潜在的地震危险性区域[28-29]。由表 1 可知，在景谷地震序列震源区，视应力高低分布依次为：南段＞中段＞北段；即景谷 6.6 级主震发生后，震源区北段平均视应力最低，暗示震后震源区北段区域的应力水平最低，这也符合主震发生后北段余震较少，且衰减很快的特点；中段平均视应力居中，可能与主震发生在中段有关；南段平均视应力最高，暗示震后震源区南段的应力水平最高，这可能是后续 5.8、5.9 级强余震均发生在南段的根本原因。

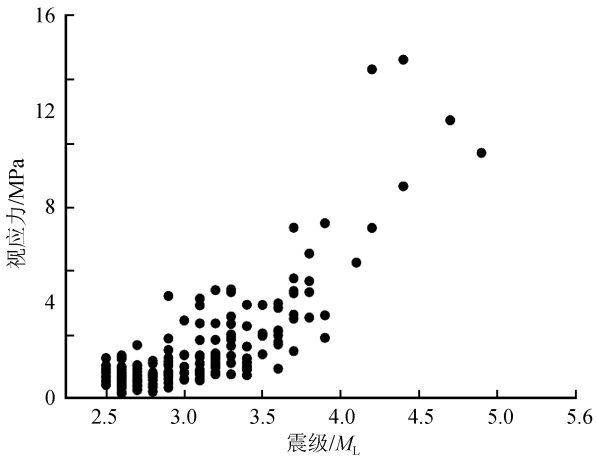


图 8　视应力与震级关系

Fig.8　The relationship between apparent stress and M_L

表 1　景谷 6.6 级地震震后 M_L2.5～3.4 余震分区域平均视应力对比

Table 1　Comparison of the mean apparent stress by region of the aftershocks with M_L2.5－3.4 after the Jinggu *M*6.6 earthquake

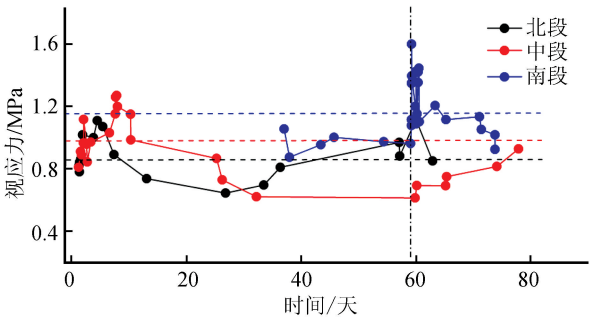
震源区位置	平均视应力/MPa	视应力平均绝对偏差（MAD）	样本数
北段	1.207	0.493	36
中段	1.390	0.62	53
南段	1.622	0.791	50

3.3　视应力的时间变化特征

由图 8 可知，在小范围的震级段（如 M_L2.5～2.9、M_L3.0～3.4），视应力随震级的变化并不是很显著，因此为保证能够用于结果分析的地震样本数量，本文选取小范围震级段（M_L2.5～2.9、M_L3.0～3.4）的视应力时间变化来研究景谷地震序列视应力的时间变化特征，同时，由于从空间分布的角度，景谷地震序列震源区可分为三段（图 2），故分别做出三段的视应力时间变化来进行具体分析研究。

图 9 为景谷地震序列 M_L2.5～2.9 震级段地震视应力时间变化图。由图可知，对于 M_L2.5～2.9 震级段视应力时间变化而言，在主震后约 35 天，南段开始产生明显余震活动，其余震序列所释放的视应力逐渐增大，随后一直维持稳定直到 5.8 级、5.9 级强余震的发生，强余震发生后地震事件所释放的视应力数值短时间内迅速降低区域视应力均值水平，且随后降低到强余震发生前的数值水平。而对

于北段和中段，则都经历了早期主震发生后围绕本区域视应力均值有起伏的逐渐降低，随后缓慢上升(北段从约震后约 27 天开始、中段从震后约 60 天左右开始)恢复到本区域视应力均值附近的特点。



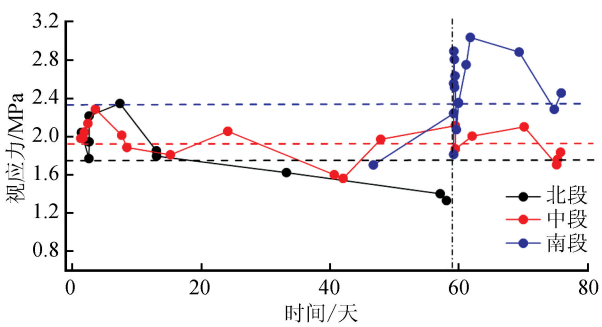
横线为相应区域视应力均值，竖线是 5.8 级级强余震的发生时间

图 9 景谷地震序列 M_L2.5～2.9 地震视应力时间变化图

Fig.9 Variation of apparent stress of M_L2.5－3.0 earthquakes in the Jinggu swarm over time

余震序列视应力的时间变化可能反映了震源区应力环境水平的变化调整过程[6,27]。因此，结合景谷地震序列视应力的时间变化特征，可认为主震发生之后，序列早期，震源区北段与中段，由于位于中段的主震能量释放较大，造成震源区应力水平较低，余震视应力较低(均为围绕本区域视应力均值有起伏的逐渐降低)；随后，区域应力水平逐渐恢复到正常水平。而对于震源区南段，主震发生后的早期，该区域并未有显著数量的地震事件发生，直到震后 40 天左右，该区域才有大量事件爆发，同时视应力不断升高，随后维持高值直到强余震发生，虽然此时该区域地震事件所释放的视应力数值低于该区域事件的平均数值，但该区域地震事件所释放的视应力值均高于同一时刻北段与中段区域所发生的同类事件的视应力值。表明在强余震发生前的短时间内，南段区域首先出现局部应力不断挤压增强，并随后维持相对高值应力水平的“闭锁”状态，直到 12 月 6 日 5.8级强余震的发生。而强余震发生后，南段区域的应力水平逐渐恢复到之前的水平，且整个序列地震活动也基本结束。

图 10 为景谷地震序列 M_L3.0～3.4 震级段地震视应力时间变化图。由于 5.8 级、5.9 级强余震的发生之前，震源区南段区域 M_L3.0～3.4 地震极少，所以并不能显示出明显时间变化特征；强余震的发生后，南段地震视应力数值逐渐降低到该区域视应力均值水平。而对于震源区北段，早期主震发生后围绕本区域视应力均值有起伏的逐渐降低，随后从震后 9 天左右就开始一直缓慢下降直到结束。至于震源区中段，地震所释放的视应力在这段时间内一直围绕该区域均值上下波动。因此，上述震源区三段部分的视应力时间变化显示：主震发生后，震源区北段与中段应力水平除早期由于主震刚发生造成区域应力快速调整后，后续区域应力水平均在各自区域正常值上下波动，因此后续这两个区域并未发生较大地震事件。而南段在强余震发生之前的应力水平由于事件较少，无法估计，同时，南段在强余震发生后的极短时间内出现视应力更高值现象，但随后其视应力也快速降低恢复到区域正常水平，序列地震活动结束。值得注意的是，南段在强余震发生后的极短时间内出现视应力更高值现象和主震发生后早期震源区余震出现视应力升高的情况类似，都是强震发生后，震源区应力反复复杂调整的结果，其视应力升高并未长时间持续就快速降低并恢复到区域正常水平，因此，后续南段应力环境整体恢复到区域正常水平，并无强余震发生。



横线为相应区域视应力均值，竖线是 5.8 级级强余震的发生时间

图 10 景谷地震序列 M_L3.0～3.4 地震视应力时间变化图

Fig.10 Variation of apparent stress of M_L3.0－3.4 earthquakes in the Jinggu swarm over time

4 讨论和结论

(1) 景谷地震序列计算得到的地震矩 M_0 数值范围为 10^{12}～10^{16} N·m，拐角频率 f_c 数值范围为 3～16 Hz，视应力数值分布范围为 0～15 MPa，平均值为 2.14 MPa，中位数为 1.39 MPa。同时，各个震源参数之间均存在一定的相关关系；地震矩与视应力均随 M_L 震级增大而增加，但值得注意的是，在小范围的震级段(如 M_L2.5～2.9、M_L3.0～3.4)内，视应力随震级的变化并不明显；而拐角频率 f_c 与地震矩互为反相关，即拐角频率随地震矩增大而减少；且

震源破裂半径 R 与地震矩之间存在半对数关系：$\lg M_0 = 11.949 + 0.01R$。

（2）景谷地震序列余震空间分布可分为北段、中段与南段。其视应力高低分布依次为：南段＞中段＞北段；表明主震发生后，震源区南段区域的应力水平最高，这可能是后续 5.8、5.9 级强余震均发生在南段的根本原因。

（3）在视应力随时间变化方面，对于后续未发生强余震的北段和中段，其视应力整体上均为早期快速调整，后续逐渐变化到各自区域的视应力均值水平；对于发生强余震的南段，其 M_L2.5～2.9 震级段视应力在主震发生约 35 天左右开始有明显地震活动发生，在 5.8 级、5.9 级强余震的发生前，其视应力数值存在“逐渐变大-维持稳定”的特点，强余震发生后地震事件所释放的视应力数值逐渐降低到强余震发生前该区域地震所释放的视应力数值水平。由于余震序列视应力的时空变化反映了震源区应力状态的变化调整过程，因此，结合景谷地震序列视应力的时间变化特征，可认为主震发生之后，震源区北段与中段，除早期区域应力水平快速调整外，后续逐渐恢复到正常水平；而对于震源区南段，在强余震发生前的短时间内，南段区域首先出现局部应力不断挤压增强，并随后维持相对高值应力水平的“闭锁”状态，直到强余震的发生；而强余震发生后，南段区域的应力水平逐渐恢复到之前的水平，且整个序列地震活动也基本结束。

综上，震后震源区余震视应力的时间变化特征与地震序列中较强地震的发生存在一定的相关性，且其空间分布对强余震可能产生地点的判定有指示作用。因而，余震视应力的时空变化对后续序列地震活动的判定有重要指示意义，可为强余震的时空判定提供相应参考。

参考文献（References）

[1] 钟羽云，张帆，张震峰，等.应用强震应力降和视应力进行震后趋势快速判定的可能性[J].防灾减灾工程学报，2004，24(1)：8-14.
ZHONG Yuyun，ZHANG Fan，ZHANG Zhenfeng，et al.Possibility of Earlier Judgement on Seismic Tendency after Strong Earthquake Based on Apparent Stress and Stress Drop[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2004，24(1)：8-14.

[2] 陈学忠.2001 年昆仑山口西 8.1 级大地震前后震源区应力水平估计[J].地震学报，2005，27(6)：605-609.
CHEN Xuezhong.Estimation of the Stress Levels in the Focal Region before and after the 2001 M8.1 Western Kunlun Mountain Pass Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica，2005，27(6)：605-609.

[3] 周少辉，蒋海昆，曲均浩，等.应力降研究进展综述[J].中国地震，2018，34(4)：591-605.
ZHOU Shaohui，JIANG Haikun，QU Junhao，et al. A Review on Research of Foreshocks[J].Earthquake Research in China，2018，34(4)：591-605.

[4] 周少辉，曲均浩，苗庆杰，等.山东长岛地区地震波非弹性衰减 Q 值、场地响应及震源参数研究[J].地震工程学报，2018，40(6)：1312-1321.
ZHOU Shaohui，QU Junhao，MIAO Qingjie，et al.Inelastic Attenuation Q Value，Site Response，and Seismic Source Parameters in Changdao Region，Shandong[J].China Earthquake Engineering Journal，2018，40(6)：1312-1321.

[5] 王鹏，郑建常，赵金花.胶东半岛地区震源波谱参数研究[J].地震工程学报，2013，35(2)：360-365.
WANG Peng，ZHENG Jianchang，ZHAO Jinhua. Status of Seismic Source Spectral Parameters in the Jiaodong Peninsula[J].China Earthquake Engineering Journal，2013，35(2)：360-365.

[6] 邱玉荣，刘春，杨宜海，等.四川九寨沟 M_S7.0 地震序列视应力时空特征[J].中国地震，2017，33(4)：511-520.
QIU Yurong，LIU Chun，YANGg Yihai，et al. Temporal and Spatial Characteristics of Apparent Stress of the 2017 Jiuzhaigou M_S7.0 Earthquake Sequence[J]. Earthquake Research in China，2017，33(4)：511-520.

[7] 郭寅，王琼.新疆几次 6 级地震序列视应力特征研究[J].地震，2017，37(3)：169-179.
GUO Yan，WANGQiong. Apparent Stress Characteristics of Several M_S6.0 Earthquake Sequences in Xinjiang，China[J]. Earthquake，2017，37(3)：169-179.

[8] BRUNE J N.Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres，1970，75(26)：4997-5009.

[9] BRUNE J N. Correction[J].J Geophys Res，1971，76(20)：5002.

[10] STORK A L.SourceParameter Scaling for Small Earthquakes Observed at the Western Nagano 800-m-Deep Borehole，Central Japan[J].Bulletin of the Seismological Society of America，2004，94(5)：1781-1794.

[11] 杨晶琼，杨周胜，刘丽芳，等.2008 年盈江 5.9 级地震序列震源参数研究[J].地震研究，2010，33(4)：308-312，376.
YANG Jingqiong，YANG Zhousheng，LIU Lifang，et al.Study on the Source Parameters of the Yingjiang M_S5.9 Earthquake Sequence in 2008[J].Journal of Seismological Research，2010，33(4)：308-312，376.

[12] 刘杰，郑斯华，黄玉龙.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，2003，25(2)：211-218.

LIU Jie, ZHENG Sihua, HUANG Yulong. The Inversion of Non-elasticity Coefficient, Source Parameters, Site Response Using Genetic Algorithms[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(2): 211-218.

[13] CHAEL E. Spectral Scaling of Earthquakes in the Miramichi Region of New Brunswick[J]. Bull Sesism Soc Am, 1987, 77(2): 347-365.

[14] 华卫,陈章立,郑斯华.2008 年汶川 8.0 级地震序列震源参数分段特征的研究[J].地球物理学报,2009,52(2):365-371.
HUA Wei, CHENZhangli, ZHENG Sihua. A Study on Segmentation Characteristics of Aftershock Source Parameters of Wenchuan M8.0 Earthquake in 2008[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 365-371.

[15] 周少辉,蒋海昆.景谷 6.6 级、鲁甸 6.5 级地震序列应力降变化对比研究[J].中国地震,2017,33(1):23-37.
ZHOU Shaohui, JIANG Haikun. Comparative Study of Changes in Stress Drop of the Jinggu M_S6.6 and Ludian M_S6.5 Earthquake Sequences[J]. Earthquake Research in China, 2017, 33(1): 23-37.

[16] 常祖峰,陈晓利,陈宇军,等.景谷 M_S6.6 地震同震地表破坏特征与孕震构造[J].地球物理学报,2016,59(7):2539-2552.
CHANG Zufeng, CHEN Xiaoli, CHEN Yujun, et al. The Coseismic Ground Failure Features and Seismogenic Structure of the Jinggu M_S6.6 Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2539-2552.

[17] 徐甫坤,刘自凤,张竹琪,等.2014 年云南景谷 M_S6.6 地震序列重定位与震源机制解特征[J].地球科学,2015,40(10):1741-1754.
XU Fukun, LIU Zifeng, ZHANG Zhuqi, et al. Double Difference Relocation and Focal Mechanisms of the Jinggu M_S6.6 Earthquake Sequences in Yunnan Province in 2014[J]. Earth Science, 2015, 40(10): 1741-1754.

[18] 师海阔,朱新运,贺永忠,等.宁夏及邻区地震震源参数研究[J].大地测量与地球动力学,2010,30(增刊 1):38-43..
SHI Haikuo, ZHU Xinyun, HE Yongzhong, et al. Research on Hypocentral Parameters of Ningxia and Adjacent Region[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(Suppl): 38-43.

[19] ALLMANN B P, SHEARER P M. Global Variations of Stress Drop for Moderate to Large Earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2009, 114(B1): 310-332.

[20] 申学林,魏贵春,丁文秀,等.湖北地区地震震源参数研究[J].中国地震,2018,34(4):781-787.
SHEN Xuelin, WEI Guichun, DING Wenxiu, et al. Study on the Source Parameters of the Hubei Region[J]. Earthquake Research in China, 2018, 34(4): 781-787.

[21] 曲均浩,刘瑞峰,李金,等.CAP 方法反演 2014 年山东乳山 M4.2、M4.0 地震震源机制解[J].地震工程学报,2014,36(4):1076-1080.
QU Junhao, LIU Ruifeng, LI Jin, et al. Inversion of the Focal Mechanisms of the 2014 M4.2 and M4.0 Earthquakes in Rushan, Shandong Using the CAP Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 1076-1080.

[22] SAVAGE J C. Relation of Corner Frequency to Fault Dimensions[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1972, 77(20): 3788-3795.

[23] CHOY G L, BOATWRIGHT J L. Global Patterns of Radiated Seismic Energy and Apparent Stress[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B9): 18205-18228.

[24] SHEARER P M, PRIETO G A, HAUKSSON E. Comprehensive Analysis of Earthquake Source Spectra in Southern California[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006, 111(B6): 3197-3215.

[25] BALTAY A, IDE S, PRIETO G, et al. Variability in Earthquake Stress Drop and Apparent Stress[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(6): 122-133.

[26] IZUTANI Y, KANAMORI H. Scale-dependence of Seismic Energy-to-moment Ratio for Strike-slip Earthquakes in Japan[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(20): 4007-4010.

[27] 李艳娥,陈丽娟,王生文,等.山东地区地震视应力时空变化特征研究[J].地震,2015,35(2):80-90.
LI Yane, CHEN Lijuan, WANG Shengwen, et al. Temporal and Spatial Variations of Apparent Stress in Shandong Province, China[J]. Earthquake, 2015, 35(2): 80-90.

[28] PULIDO N, IRIKURA K. Estimation of Dynamic Rupture Parameters from the Radiated Seismic Energy and Apparent Stress[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(23): 3945-3948.

[29] 蒋海昆,杨马陵,付虹,等.震后趋势判定参考指南[M].北京:地震出版社,2015.
JIANG Haikun, YANG Maling, FU Hong, et al. Guidelines for Post-earthquake Trend Determination[M]. Beijing: Seismological Press, 2015.