

2014年景谷 M_s 6.6 和 2018年墨江 M_s 5.9 地震前 视应力、视体积异常特征研究*

彭关灵, 孔德育*, 孙楠, 杨棋

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

摘要: 岩石力学性质实验显示, 岩石破坏前会出现扩容现象, 可用累积视体积的变化来度量岩体体积的变化。结合岩石破坏前应力-应变关系, 通过对滇西南块体震源参数的计算, 探讨 2014 年景谷 M_s 6.6 和 2018 年墨江 M_s 5.9 地震前后, 震源区及邻区视应力、视体积的变化特征。结果表明: 该区的地震视应力与震级、地震矩的皮尔逊相关系数 r 分别为 0.73, 0.58, 视应力与震级的相关性较大, 与地震矩存在正相关关系; 景谷 M_s 6.6 地震前 8.4 个月和墨江 M_s 5.9 地震前 4.2 个月, 视应力和归准化视应力均出现高值异常, 累积视体积增长, 且增长速率增大。景谷地震前其震源区、墨江地震前震源区同一断裂带南段为视应力高值区域。

关键词: 景谷 M_s 6.6 地震; 墨江 M_s 5.9 地震; 视应力; 视体积

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)02-0355-08

0 引言

研究震源区及其周边的岩体变形、应力调整过程, 并对其空间分布和时间演变特征进行分析, 以及将其作为前兆现象的特征进行提取是地震孕育过程研究中的一个基本问题。地震视应力为单位地震矩或单位面积断层上的单位错动释放的地震波能量 (Wyss, Brune, 1968), 是震源辐射地震波能力的一种量度。震级相当的地震事件, 视应力较高的地震在破裂过程中放射出更多的能量, 其能量水平可能与断层条件, 特别是断层面强度有关 (Choy, McGarr, 2002; Choy, Kirby, 2004; Choy *et al.*, 2013)。因此, 视应力可被用来评估地震发生时的地质力学条件, 高视应力地震事件的发生可作为区域岩体应力状态增加的一种指标 (Baltay *et al.*, 2011; Brown, Hudyma, 2017)。近年来, 在国内地震视应力逐渐应用于地震预测研究: 刘红桂等 (2007) 计算得到 1999 年 7 月—2005 年 4 月云南地区中小地震视应力值超过 0.9 MPa, 可以作为该地区未来可能发生中强地震的一个预测指标; 易桂喜等 (2011) 计算了汶川 M_s 8.0

地震前龙门山断裂带的地震视应力值, 结果显示龙门山断裂带中北段的绵竹茂县段与江油—平武段地震视应力值较高, 是汶川主震破裂的中心部分和严重地面破坏的 2 个地段; 李艳娥等 (2012) 研究了 2007 年云南宁洱 M_s 6.4 地震前视应力时空变化特征, 结果显示地震前滇西南地区视应力表现出明显的升高变化过程; 彭关灵等 (2018) 计算了 2018 年云南通海 M_s 5.0 地震震中 100 km 范围内中小地震视应力值, 发现震前出现高视应力状态。

室内岩石单向、三向压缩试验表明, 随着应力的增高, 岩石发生破坏前, 会产生扩容现象 (即扩大体积), 这是岩石内张开细微裂隙的形成和扩展所致, 随着裂纹数量的增加和裂纹的张开, 岩石体积会越来越大 (张永兴, 许明, 2015)。视体积为震源非弹性剪切变形的岩体体积 (Mendec-ki, 1993; 张敏等, 2018), 可用于描述地震发生前后岩体的变形。根据岩石力学性质实验, 岩石的全应力—应变曲线可分为 6 个阶段, 其中第 2 阶段, 曲线偏离线性, 出现塑性变形, 该阶段后开始出现微裂隙, 随应力增大, 数量增多, 体积增大 (扩容), 曲线表现为斜率增大, 表征岩石的破

* 收稿日期: 2019-10-31.

基金项目: 重点危险区及构造带数字地震学研究项目和地震科技星火计划 (XH18044Y) 资助.

♣ 通讯作者: 孔德育 (1992-), 助理工程师, 主要从事地震舆情监控工作。E-mail: 914288182@qq.com.

坏已经开始(蔡美峰等, 2002)。因此, 考虑到岩石应力-应变的关系, 可结合视应力、视体积的变化来获取岩体破坏发生前的信息和规律。

2014 年景谷 $M_s 6.6$ 地震和 2018 年墨江 $M_s 5.9$ 地震分别为 2000 年以来云南省内和 1900 年以来阿墨江断裂带上发生的最大地震, 也是 2010 年以来滇西南块体内 2 次 $M_s \geq 5.5$ 地震, 这 2 次地震的发生与滇西南块体内部强烈的构造活动密切相关。本文利用云南区域地震台网观测波形资料, 计算了 2009—2018 年滇西南地区 $3.0 \leq M_L \leq 5.5$ 地震的震源参数, 分析地震视应力及视体积的时间变化特征、视应力的空间分布特征, 探讨 2014 年景谷 $M_s 6.6$ 地震和 2018 年墨江 $M_s 5.9$ 地震前, 震源区及其邻区视应力、视体积的变化特征及二者的相关性。

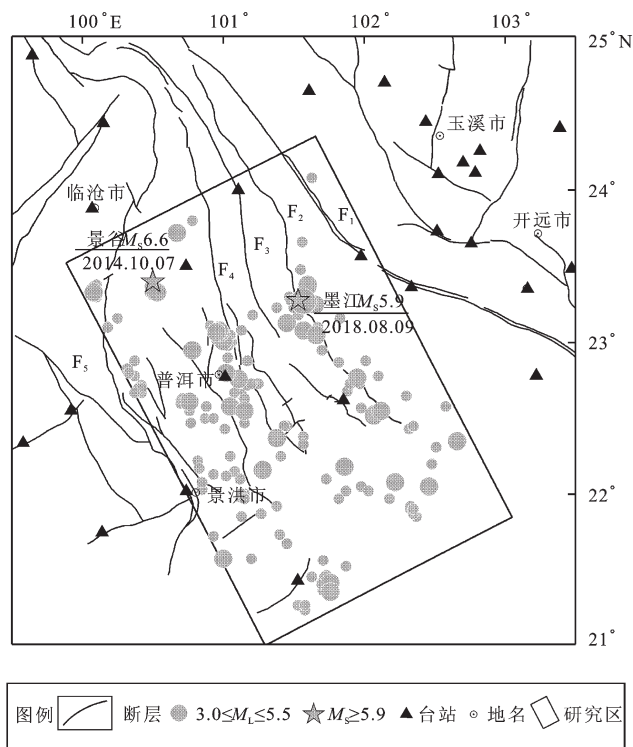
1 研究区概况

2014 年景谷 $M_s 6.6$ 地震和 2018 年墨江 $M_s 5.9$ 地震发生在滇西南块体内部, 该块体内构造复杂, 主要断裂以走滑型断裂为主, 如图 1 所示。其中, 无量山断裂是晚更新世活动断裂, 带上地震活动非常强烈, 曾发生 1971 年 4 月 28 日普洱 $M_s 6.7$ 地震、1979 年 3 月 15 日普洱 $M_s 6.7$ 地震和 2014 年 10 月 7 日景谷 $M_s 6.6$ 地震; 阿墨江断裂带为早-中更新世断裂, 是一条二级构造单元的分界断裂, 曾发生 2018 年 9 月 8 日墨江 $M_s 5.9$ 地震, 其震中 30 km 范围内仅发生过 1941 年 12 月 7 日墨江 $M_s 5.0$ 地震和 2006 年 1 月 12 日墨江 $M_s 5.0$ 地震。

2 资料选取与计算方法

2.1 资料选取

本文研究区为图 1 中黑色矩形框, 该区内分布的 27 个固定测震台站形成了相对密集且包围相对较好的观测台网, 2009—2018 年共发生了 206 次 3.0 级以上地震, 其中 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震 171 次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震 31 次, $M_L 5.0 \sim 5.9$ 地震 4 次, 最大为 2014 年 10 月 7 日景谷 $M_s 6.6$ 地震。基于云南区域地震台网数字波形资料和震相报告, 对研究区内的目标地震分别选取震中距在 200 km 以内的台站。根据各台站记录到的波形情况, 挑选其中信噪比较高、记录较清晰的波形数据, 并参考区域台网的震相报告重新进行了震相标定。



图例: 断层 ● $3.0 \leq M_L \leq 5.5$ ★ $M \geq 5.9$ ▲ 台站 ○ 地名 □ 研究区
F₁: 红河断裂; F₂: 阿墨江断裂; F₃: 把边江断裂;
F₄: 无量山断裂; F₅: 澜沧江断裂

图 1 研究区 3.0 级以上地震、台站分布及地质构造图 (据安晓文等, 2018 修改)

Fig. 1 Map showing the distributions of earthquakes, seismic stations and tectonics (modified from the An *et al.*, 2018)

首先在频率域中进行震源谱计算, 选取 S 波频谱 1.0 ~ 20.0 Hz 的波形, 以 P 波到时前 256 个数据点为背景噪声数据 (刘红桂等, 2004), 由信号谱减去噪声谱, 从而得到 S 波的谱信息。然后在此基础上计算了 2009—2018 年共 206 个 $3.0 \leq M_L \leq 5.5$ 地震的震源参数, 去除标准差较大的地震事件, 最终获得 200 个地震的震源参数。

2.2 计算方法

在频率域, 台站 j 记录到的地震 i 的观测位移谱 $U_{ij}(f)$ 可表示为:

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

式中: f 为频率; $S_i(f)$ 为震源谱; φ 为震源辐射图形因子; $P_{ij}(f)$ 为地震波从震源 i 到台站 j 的传播路径效应项, 描述地震波在传播过程中的衰减, 其中包括了地震波的几何扩散和非弹性衰减; $L_j(f)$ 表示场地效应; $N_j(f)$ 表示台站 j 记录的噪音项;

$I_j(f)$ 表示台站 j 的仪器响应函数; Sur_j 表示地表自由表面效应。

本文采用赵翠萍等 (2011) 的研究方法, 对 $U_{ij}(f)$ 反演得到震源谱 $S_i(f)$ 。由于在近震源条件下, 震中距较小, $P_{ij}(f)$ 的非弹性衰减影响可以忽略 (陈学忠, 李艳娥, 2007), 对于 $P_{ij}(f)$ 的几何扩散, 采用 Atkinson 和 Mereu (1992) 提出的三段几何扩散模型进行校正。 $L_j(f)$ 与各个台站具体的场地介质及频率有关, 在自观测数据恢复震源谱并开展震源参数的研究中, 由于路径、场地等因素之间的相互耦合及不确定性, 暂不考虑场地的影响。

对于中小地震, 震源谱符合 Brune (1970) 圆盘模型, 理论震源谱可表示为:

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

式中: Ω_0 为震源谱的零频极限值; f_c 为拐角频率。

将地震震源谱与理论震源谱进行拟合, 即可得到相应的震源谱参数 Ω_0 和 f_c 。

视应力 σ_a 定义为 (Wyss, Brune, 1968):

$$\sigma_a = \mu(E_s/M_0) \quad (3)$$

式中: E_s 为地震波辐射能量; M_0 为地震矩; μ 为震源区的介质剪切模量, 对于地壳介质, μ 取 3×10^4 MPa (Wyss, Brune, 1968; Choy, Boatwright, 1995; Wu, 2001)。

视体积为 (Mendecki, 1993):

$$V_a = \frac{M^2}{2\mu E} \quad (4)$$

式中: M 为地震矩; E 为地震波辐射能量。

结合式 (3) 和 (4), 把视体积假设为区域上大的非弹性应变 (应力降的数量级), 可得到视应力与视体积的关系为:

$$V_a = \frac{M_0}{2\sigma_a} \quad (5)$$

根据上述方法分别求得每个台站的地震矩 M_0 、地震波辐射能量 E_s 、地震视应力 σ_a 及地震视体积 V_a 等震源参数, 再由各台站的值求其平均值。为了消除个别台站的异常高值对平均值的影响, 求

平均值采用 Archuleta 等 (1982) 的方法:

$$x = \exp \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i \right] \quad (6)$$

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - x)^2} \quad (7)$$

式中: x_i 为各台站的地震矩或地震能量或地震视应力; N 为台站数; Δx 为标准差。

3 结果分析

3.1 震源参数定标关系

震源参数定标关系对于揭示地震的物理过程具有重要的意义 (华卫, 2007; Yoo *et al*, 2010)。通过分析 200 个 $3.0 \leq M_L \leq 5.5$ 地震的震源参数得到震源参数之间的定标关系, 如图 2 所示, 可见震源参数间的拟合关系线性趋势明显。

视应力与震级之间的拟合关系为:

$$\lg \sigma_a = 0.494 M_L - 3.633, r = 0.73 \quad (8)$$

视应力与地震辐射能量之间的拟合关系为:

$$\lg \sigma_a = 0.336 \lg E_s - 2.701, r = 0.70 \quad (9)$$

视应力与地震矩之间的拟合关系为:

$$\lg \sigma_a = 0.356 \lg M_0 - 2.882, r = 0.58 \quad (10)$$

折合能量 ($e = E_s/M_0$) 与地震矩之间的拟合关系为:

$$\lg e = 0.356 \lg M_0 - 1.360, r = 0.58 \quad (11)$$

式中: r 表示皮尔逊 (pearson) 相关系数, 可度量 2 个变量之间的相关程度, 反映变量之间的线性关系和相关性的方向。当 $r = 1$ 时, 为完全正相关; 当 $r = -1$ 时, 则为完全负相关, r 的绝对值越大相关性越强, r 越接近于 0 相关度越弱。

视应力与震级的相关系数 r 为 0.73 时, 说明视应力与震级的相关性较大, 即震级越大, 视应力越高。如果个体地震视应力偏离拟合趋势线较远, 可以考察该地震事件的视应力是否存在异常特征。视应力与地震矩的 r 为 0.58 时, 表明该地

区视应力与地震矩的相关性较显著，存在随地震矩增大视应力增大现象，可能反映 2009—2018 年研究区大地震辐射效率高于小震。吴忠良（2001）针对 1987—1998 年全球走滑型和非走滑型浅源地震，给出了折合能量与地震矩的关系，其结果显

示，走滑型地震的折合能量与地震矩的拟合趋势线略有上升，而非走滑型地震呈下降趋势。本文结果与第一种情况相符，即研究区以走滑构造为主的情况下，折合能量与地震矩拟合趋势线略有上升（图 2d）。

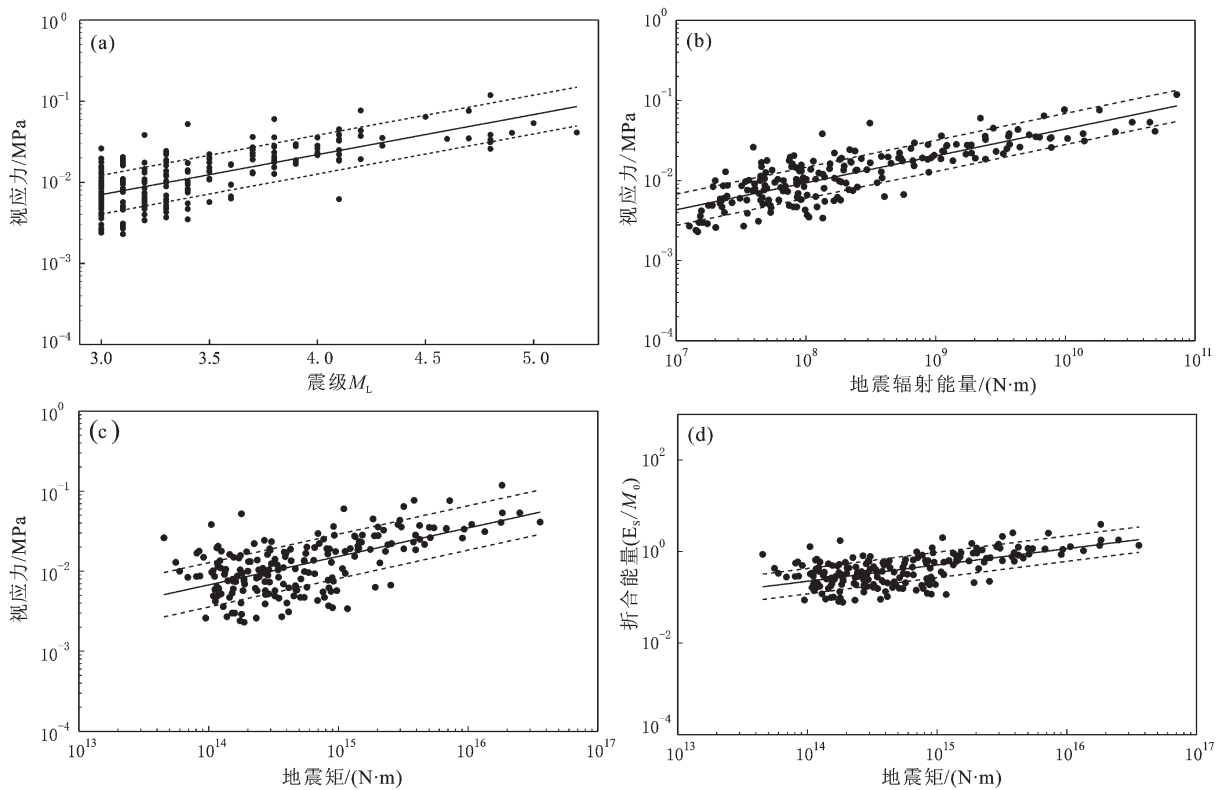


图 2 震级 (a)、地震辐射能量 (b) 与视应力之间的定标关系及视应力 (c) 和折合能量 (d) 与地震矩之间的定标关系

Fig. 2 The scaling law between magnitude (a), earthquake radiation energy (b) and apparent stress and the scaling law between apparent stress (c), reduced energy (d) and seismic moment

3.2 视应力、视体积随时间的变化特征

由于视应力与震级的相关系数 r 较高，受震级的影响较大，当样本数据的震级范围跨度较大时，不对震级进行校正，得到的是地震辐射能量的时空特征而不是视应力的真实变化。因此，为了扣除震级对视应力分析的影响，本文采用以下公式（彭关灵等，2018）：

$$\sigma_{\text{nor}} = \sigma_a - \sigma_{\text{fit}} \tag{12}$$

式中： σ_{nor} 为归准化视应力； σ_a 为上述理论和方法计算得到的视应力； σ_{fit} 为根据视应力与震级的拟合关系式计算得到的视应力。

以 10 个值为窗长，1 个值为步长，10 个值求

平均值进行滑动，得到视应力和归准化视应力滑动平均值时间进程曲线（图 3a, b）。结果显示，2009—2018 年研究区共发生 2 次 $M_s \geq 5.7$ 地震，即 2014 年景谷 $M_s 6.6$ 地震和 2018 年墨江 $M_s 5.9$ 地震。这 2 次地震前均出现过视应力高值异常（图 3 中红色底纹），且高值异常与发震的时间间隔分别为 8.4 和 4.2 个月。2014 年景谷 $M_s 6.6$ 地震前，视应力和归准化视应力均出现趋势上升，当上升到 1 倍、1.5 倍标准差上限后发生地震。景谷 $M_s 6.6$ 地震发生后，视应力和归准化视应力值下降，之后出现较高值，但没有出现二者同时高于标准差上限的现象，可能为背景正常动态变化，从 2017 年开始视应力和归准化视应力再次出现趋

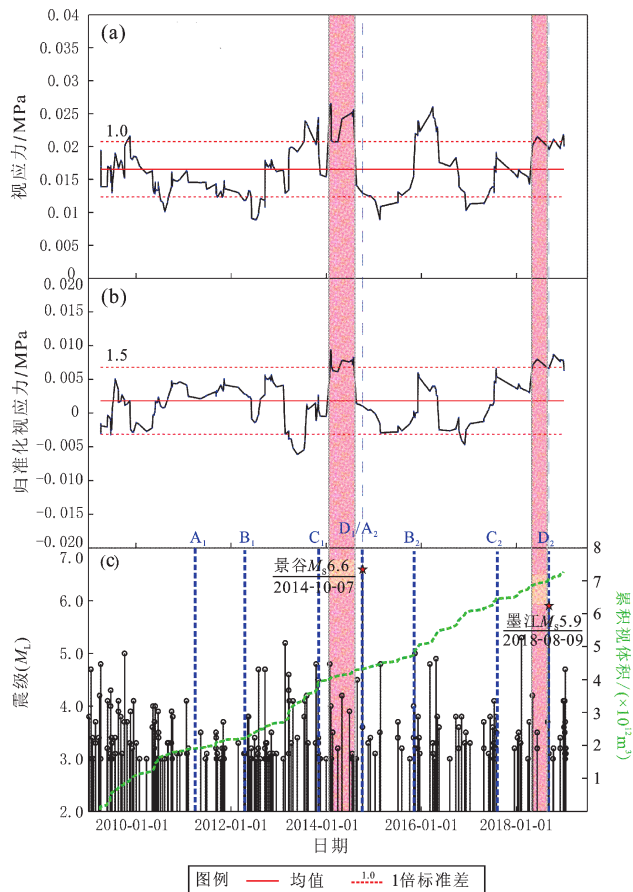


图3 地震视应力 (a) 和归一化视应力 (b) 滑动平均值以及震级、累积视体积 (c) 随时间的变化关系

Fig. 3 The temporal process based on 10 apparent stress (a), normalized apparent stress (b) values moving average and the relationship chart between magnitude, apparent volume and time (c)

势上升, 于 2018 年 1 月视应力值超过 1 倍标准差, 归一化视应力值超过 1.5 倍标准差, 高值状态持续一段时间后, 发生 2018 年墨江 $M_s5.9$ 地震。

以 10 个点为窗长, 1 个点为步长, 求取视体积滑动平均值, 并进行累加求得每一个时间点的累积视体积。为了与岩石应力应变过程曲线 (图 4) 进行对比研究, 探寻岩石破坏相似的物理过程, 本文把震前累积视体积曲线分为 3 个阶段, 分别为 AB, BC, CD, 对应于岩石应力应变曲线的第二、三、四阶段。由图 3c 可见, 在 2014 年景谷 $M_s6.6$ 和 2018 年墨江 $M_s5.9$ 地震前, 累积视应力均出现了相似变化形态: 首先是近似直线段 A_1B_1 (A_2B_2), 为线弹性阶段; 然后是曲线速率增大段 B_1C_1 (B_2C_2), 为裂纹开始出现或迅速扩展段;

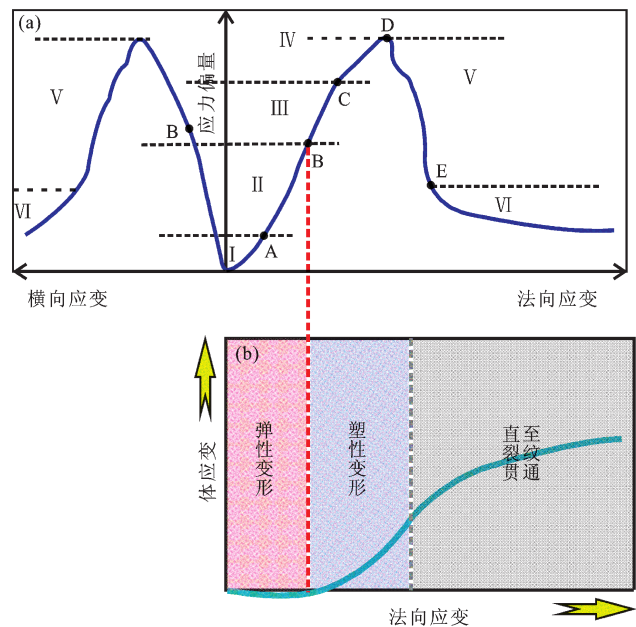


图4 岩石全应力应变曲线 (据蔡美峰等, 2002) (a) 及相应的体应变与法向应变的关系 (b)

Fig. 4 Total stress - strain curve of rock (based on Cai *et al*, 2002) (a) and the relationship between bulk strain and normal strain (b)

最后是震前的曲线速率变缓段 C_1D_1 (C_2D_2), 为裂纹逐渐贯通段。比较图 3c 与图 4b, 发现尽管实际中的曲线变化幅度没有实验室中的大, 但二者的变化趋势是一致的。累积视体积曲线速率增大段 B_1C_1 (B_2C_2) 可能反映了强震前岩体体积出现的增大现象。结合视应力、归一化视应力高值段, 笔者发现视体积累积曲线斜率增大后的降低段可能是预测地震进入临震阶段的标志。

3.3 视应力的空间分布特征

2014 年景谷 $M_s6.6$ 地震和 2018 年墨江 $M_s5.9$ 地震前的归一化视应力空间分布如图 5 所示。从图 5a 可以看出, 景谷 $M_s6.6$ 地震前, 景谷一思茅一带和勐腊地区及其东北一带为归一化视应力高值区, 而墨江—江城一带, 即把边江断裂和阿墨江断裂中南段, 为归一化视应力低值区。图 5b 则显示, 墨江 $M_s5.9$ 地震前, 延续了景谷 $M_s6.6$ 地震前的 2 个高值区和 1 个低值区, 但出现明显变化的是图中黑色虚线框内的 2 个区域, 这 2 个区域为景谷 $M_s6.6$ 地震后归一化视应力高值区域。其中 A 区域位于阿墨江断裂南段, 之后在阿墨江断裂中段发生 2018 年墨江 $M_s5.9$ 地震, 这可能是同一条断裂带应力调整的结果。

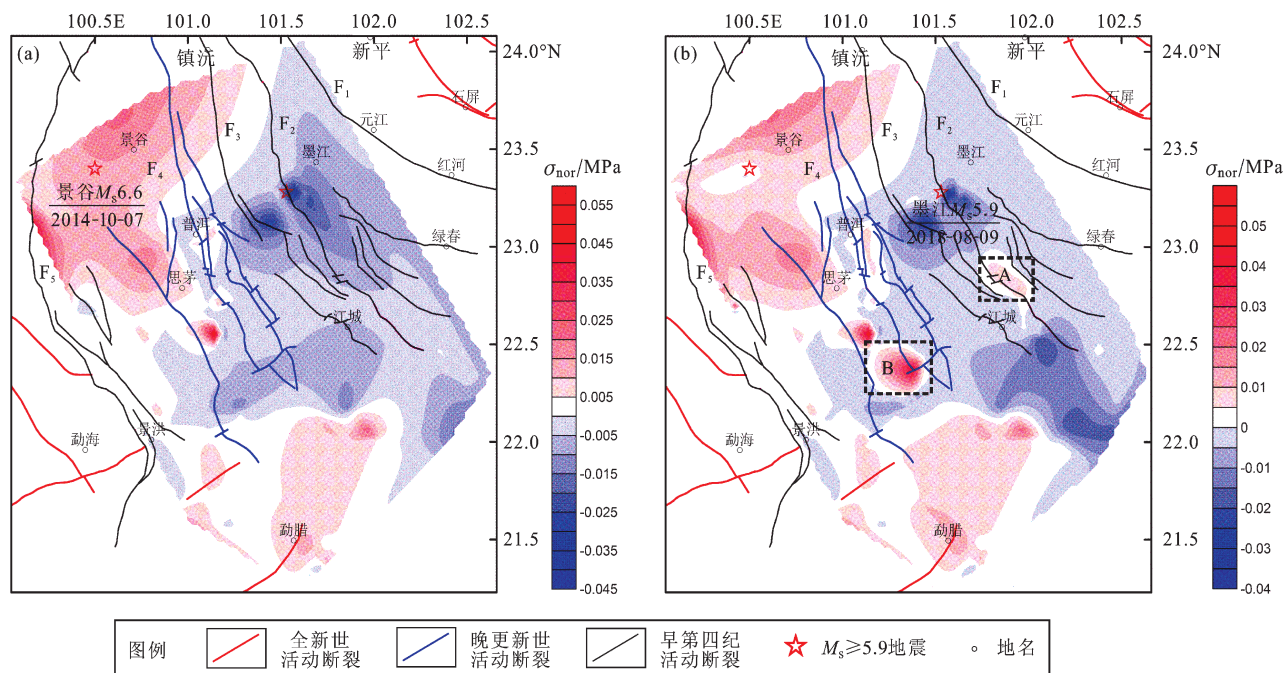


图5 景谷 (a)、墨江 (b) 地震前研究区归准化视应力空间分布 (断裂同图1)

Fig. 5 Map of the normalized apparent stress prior to the Jinggu mainshock (a), Mojiang mainshock (b) (the fault is same as shown in Fig. 1)

4 结论与讨论

通过计算 2009—2018 年滇西南地区 200 个 $3.0 \leq M_L \leq 5.5$ 地震的震源参数, 得出震源参数间的定标关系和 2 次强震前视应力、视体积的时空分布特征, 获得的结论如下:

(1) 滇西南地区地震视应力与震级的皮尔逊相关系数 r 为 0.73, 呈正相关关系, 地震视应力与地震矩的 r 为 0.58, 相关性显著, 视应力随地震矩的增加而增加。在自相似模型的假设前提下, 认为在大范围地震矩范围内的地震事件视应力是恒定的 (Ide, Beroza, 2001); 在非自相似中, 视应力随地震矩的增加而增加, 这意味着大震级事件比小震级事件辐射更多的地震能量 (Mayeda, Walter, 1996)。本文给出的地震标度关系符合非自相似模型。

(2) 2014 年景谷 $M_s 6.6$ 地震前 8.4 个月和 2018 年墨江 $M_s 5.9$ 地震前 4.2 个月, 视应力和归准化视应力均出现高值异常, 视体积累积曲线斜率先增大后降低。景谷 $M_s 6.6$ 地震前, 震源区为归准化视应力高值异常区域; 墨江 $M_s 5.9$ 地震前, 震源区同属阿墨江断裂带的南段曾出现归准化视

应力高值区域。陈浩朋等 (2018) 对云南地区地壳上地幔三维 S 波速度与径向各向异性结构研究显示, 2014 年景谷 $M_s 6.6$ 地震和 2018 年墨江 $M_s 5.9$ 地震发生在地壳高低速过渡带, 该区地壳低速层或高低速过渡地带及构造条件可能对区域应力的变化和地震的发生起到控制作用。在这种构造条件下, 地震的发生对应力的变化敏感, 视应力的变化可能对地质力学条件的变化也更敏感。

(3) 滇西南地区中小地震的视应力高值异常点累积视体积的加速增长, 可能对该区域 $M_s 5.9$ 以上地震的发生具有一定指示意义。视应力的异常变化, 可能反映了震源区及周边应力场的调整变化, 墨江 $M_s 5.9$ 地震恰好发生在应力场的调整过程之中。但值得注意的是该地震前的高视应力地震发生在同一断层的南段, 而地震的发震位置并未出现高值, 这一现象可能与断层的成熟度有关 (Choy *et al*, 2013)。通常情况下, 成熟的断层似乎强度较低, 倾向于产生低视应力地震; 未成熟断层的强度更大, 产生的视应力也更高, 因为它们要么是新鲜岩石破裂的结果, 要么至少是其累积的断层滑动相当小 (Choy *et al*, 2013)。相较于景谷 $M_s 6.6$ 地震的发震断层 (出露不明显, 震

后才被发现,可能为新生断层),墨江 $M_s5.9$ 地震的发震断层(已知的、出露明显的阿墨江断层,早第四纪断层)更成熟,发生较低的视应力事件,研究结果也显示出墨江—江城一带相较于景谷—勐腊一带,空间视应力整体偏低。

在本文完成过程中,付虹研究员给予了悉心指导,李艳娥副研究员提供了视应力计算源程序,两位审稿专家提出了认真细致的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- 安晓文,常祖峰,陈宇军,等. 2018. 云南第四纪活动断裂[M]. 北京:地震出版社,10.
- 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 2002. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社.
- 陈浩朋,李志伟,储日升,等. 2018. 云南地区地壳上地幔三维 S 波速度与径向各向异性结构研究[J]. 地球物理学报, 61(8): 3219 – 3236.
- 陈学忠,李艳娥. 2007. 2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_s5.1$ 地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化[J]. 中国地震, 23(4): 327 – 336.
- 华卫. 2007. 中小地震震源参数定标关系研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 李艳娥,陈学忠,付虹. 2012. 2007 年云南宁洱 $M_s6.4$ 地震前滇西南地区震源参数时空变化特征[J]. 地震, 32(1): 28 – 39.
- 刘红桂,缪发军,吴晶. 2004. 场地响应、震源参数与介质衰减的同时反演[J]. 地震, 24(4): 27 – 36.
- 刘红桂,王培玲,杨彩霞,等. 2007. 地震视应力在地震预测中的应用[J]. 地震学报, 29(4): 437 – 445.
- 彭关灵,赵小艳,刘自凤,等. 2018. 2018 年云南通海 $M_s5.0$ 地震前视应力时空特征[J]. 地震研究, 41(4): 487 – 493.
- 吴忠良. 2001. 由宽频带辐射能量目录和地震矩目录给出的视应力及其地震学意义[J]. 中国地震, 17(1): 8 – 15.
- 易桂喜,闻学泽,辛华,等. 2011. 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前龙门山—岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布[J]. 地球物理学报, 54(6): 1490 – 1500.
- 张敏,徐奴文,陈文夫,等. 2018. 白鹤滩水电站左岸边坡开挖卸荷过程微震视应力特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 37(增刊 2): 4133 – 4141.
- 张永兴,许明. 2015. 岩石力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社.
- 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[J]. 地球物理学报, 54(6): 1478 – 1489.
- Archuleta R, Cranswick E, Mueller C, *et al.* 1982. Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, earthquakes sequence [J]. J Geophys Res, 87(B6): 4595 – 4607.
- 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.
- Baltay A, Ide S, Prieto G, *et al.* 2011. Variability in earthquake stress drop and apparent stress [J]. Geophys Res Lett, 38: L06303.
- Brown L, Hudyma M. 2017. Identification of stress change within a rock mass through apparent stress of local seismic events [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1(50): 81 – 88.
- Choy G L, Boatwright J L. 1995. Global pattern of radiated seismic energy and apparent stress [J]. J Geophys Res, 100(B9): 18205 – 18228.
- Choy G L, Kirby S. 2004. Apparent stress, fault maturity and seismic hazard for normal – fault earthquakes at subduction zones [J]. Geophys J Int, 159(3): 991 – 1012.
- Choy G L, McGarr A, Kirby S H, *et al.* 2013. An overview of the global variability in radiated energy and apparent stress [M]. Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting.
- Choy G L, McGarr A. 2002. Strike – slip earthquakes in the oceanic lithosphere: observations of exceptionally high apparent stress [J]. Geophys J Int, 150(2): 506 – 523.
- Ide S, Beroza G C. 2001. Does apparent stress vary with earthquake size [J]. Geophys Res Lett, 28(17): 3349 – 3352.
- Mayeda K, Walter W R. 1996. Moment, energy, stress drop, and source spectra of western United State earthquakes from regional coda envelopes [J]. J Geophys Res, 101(B5): 11195 – 11208.
- Mendecki A J. 1993. Real time quantitative seismology in mines [C]// Kingston, Ontario, Canada: Proceedings of Third International Symposium on Rock – bursts and Seismicity in Mines 16 – 18, 287 – 295.
- Wyss M, Brune J N. 1968. Seismic moment stress, and source dimensions for earthquakes in the California – Nevada region [J]. J Geophys Res, 73(22): 4681 – 4694.
- Wu Z L. 2001. Scaling of apparent stress from broadband radiated energy catalogue and seismic moment catalogue and its focal mechanism dependence [J]. Earth Planet Sci, 53(10): 943 – 948.
- Yoo S H, Rhie J, Choi H, *et al.* 2010. Evidence for non – self – similarity and transitional increment of scaled energy in the 2005 west off Fukuoka seismic sequence [J]. J Geophys Res, 115: B08308.
- Wyss M, Brune J N. 1968. Seismic moment stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region [J]. J geophys Res, 73, 4681 – 4694.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes [J]. J Geophys Res, 15, 4897 – 5009.

Characterization of Apparent Stress and Apparent Volume before the 2014 Jinggu $M_s6.6$ and 2018 Mojiang $M_s5.9$ Earthquake, Yunnan

PENG Guanling, KONG Deyu, SUN Nan, YANG Qi
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

According to the experiment of rock mechanical properties, before rock failure, volume expansion phenomenon is expected to occur. We use the change of cumulative apparent volume to measure the change of rock volume. Combining stress – strain relationship before failure of rock, based on the calculation of the focal parameters of the southwest Yunnan block, we examined the temporal evolution of apparent stress, apparent volume, the characteristics of other source parameters, and spatial apparent stress before the 2014 Jinggu $M_s6.6$ earthquake and the 2018 Mojiang $M_s5.9$ earthquake. The results show that the Pearson correlation coefficients of apparent stress with magnitude, moment are 0.73, 0.58, respectively. The apparent stress is highly correlated with the magnitude and has a positive correlation with the moment. In the 8.4 months before the 2014 Jinggu $M_s6.6$ earthquake and 4.2 months before the 2018 Mojiang $M_s5.9$ earthquake, the apparent stress and normalized apparent stress were abnormal with a high value, and the cumulative apparent volume increased at a large rate. The focal area before Jinggu earthquake and the southern segment of the seismogenic fault zone before the Mojiang earthquake are the location of a higher apparent stress.

Keywords: Jinggu $M_s6.6$ earthquake; Mojiang $M_s5.9$ earthquake; apparent stress; apparent volume