

文章编号: 0253-3782(2006)03-0221-09

云南地区地震视应力的时间 和空间分布研究^{*}

秦嘉政 钱晓东^{*}

(中国昆明 650224 云南省地震局)

摘要 利用地面运动峰值速度($r \cdot v$)测定地震波辐射能 E_R 的方法, 详细研究了云南地区中小地震和两次余震序列的地震视应力 σ_a 的时空分布。结果表明, 视应力在空间分布上存在明显的非均匀性, 高视应力集中区与中小地震活动频繁地区相关。在大姚 6.2 级主震前, 视应力出现了高值变化时段, 是平均值 0.25 MPa 的 5 倍, 且主震及周围地区具有相对较高的视应力值。因此, 视应力的时空变化特征可作为地震危险性预测的一种新的判据, 余震序列视应力 σ_{aA} 与主震视应力 σ_{aM} 之比一般小于 1.0。

关键词 地震能量 视应力 地震矩 时空分布 云南地区

中图分类号: P315.72⁺⁷

文献标识码: A

引言

近年来, 由于宽带数字地震观测资料的广泛应用, 数字地震学研究取得了重大进展, 尤其是震源理论的研究取得了许多更为精细的研究成果。震源理论研究地震破裂的物理过程和地震波的产生以及传播过程, 其中之一的重大进展是模拟活动断层上的破裂过程, 特别是在震源理论的研究中针对破裂的引发、传播和愈合过程引进了断裂力学的新概念, 在破裂理论、前兆现象理论以及介质的脆性与延性滑动等方面取得了许多引人注目的成果。目前所提出的震源表示理论仍是震源的场论, 该理论没有涉及特定的断裂模式, 而试图以“客观”的方式表示震源的过程。因此, 研究的重点放在地震及地震辐射的动力学和运动学参数上。例如, 在动力学方面所取得的最重要的成果就是利用全球数字地震标准台网测定地震矩张量, 这是一种测量地震强度和震源破裂尺度最简单的方法。地震矩张量是量度震源的非弹性形变, 而在地震破裂过程终止时量度的则是由地震产生的永久性非弹性形变。

此外, 许多有关震源破裂过程的认识, 是通过研究地震波辐射得到的。因此, 研究地震波辐射能量的理论和计算方法, 这些年来已引起地震学界的高度重视。在传统的地震学研究中, 地震波能量只能由震级估算, 但其结果既不可靠, 也不相互独立; 随着宽频带数字地震学的发展, 近几年世界上一些地学研究机构已采用波谱反演技术定期公布全球大地震的地震波辐射能的测定结果, 提供了现代地震的新参数目录, 这使得地震能量的测定变成真正从地震图上独立测定的参数。但关于中小地震地震波辐射能量的测定方法的研究仍

* 云南省重点科技攻关项目(NG2001)资助。

2006-01-04 收到初稿, 2006-03-07 决定采用修改稿。

† 通讯作者。E-mail: qxd13@163.com

然很少, 我们提出用地面运动峰值参数($r \cdot v$)测定中小地震辐射能取得了一些新进展(秦嘉政等, 2002), 本文在此基础上, 研究地震学中另一个重要参数即地震视应力 σ_a 的空间分布和时间变化特征。开展这一领域的研究无疑对深入了解震源破裂过程的细节及提高地震预测能力有十分重要的作用。

1 地震视应力的估算方法

地震视应力对描述震源破裂过程具有重要的意义, 视应力的计算可给出关于地震断层面上非线性动摩擦函数、地震发生前后应力大小的估计以及地震波辐射效率等相关的信息。在地震预测预报分析中, 可依据地震视应力的空间分布和时间变化, 对强震活动趋势和潜在危险地点进行分析预测。

根据 Wyss 和 Brune(1968)以及 Wyss(1970), 地震视应力可由下式计算得到:

$$\sigma_a = \mu \frac{E_R}{M_0} \quad (1)$$

式中, E_R 为地震波辐射能, M_0 为地震矩, μ 是震源区介质的剪切模量, 通常取 $\mu = 3.0 \times 10^4$ MPa。上式表明, 视应力与地震能量和地震矩相关, 这个关系式实质上反映出视应力与引起地震滑动的平均应力水平之间可以通过地震波辐射效率联系, 这一概念近年来已被越来越多的野外实验和观测结果所证实(McGarr, 1999)。因此, 视应力值可作为一个地区的绝对应力水平的间接估计。

运用式(1)测定地震视应力值, 最关键的是地震矩 M_0 和地震波辐射能量 E_R 应是相互独立测定的结果, 而在传统地震学中, 这两个物理量大多是由震级换算给出的, 所以很难体现视应力的独立性和其应有的物理意义。在本研究中, 地震矩 M_0 是通过波谱反演方法测定的结果, 地震能量 E_R 是采用地面运动峰值速度($r \cdot v$)测定地震波能量的一个新的关系给出(秦嘉政等, 2002):

$$\lg E_R = 0.2 + \frac{1}{2} \lg M_0 + \frac{3}{2} \lg(r \cdot v) \quad (2)$$

式中, $(r \cdot v)$ 代表归算在震源处的峰值速度, 峰值速度 v 指数字地震仪记录的两水平分量给出的峰值矢量合成值。

由于能量和地震矩为相互独立的量, 因此用式(1)估算的地震视应力就成为具有明确独立意义的物理量。对于大地震, Choy 和 Boatwright(1995)根据美国国家信息中心(NEIC)宽带辐射能量的测定结果和美国哈佛大学矩心张量解(CMT)测定的地震矩结果, 分析讨论了全球地震视应力的分布; Newman 和 Okal(1998)建立了用视应力变化作为预测海啸地震的一个判据; Pulido 和 Irikura(2000)依据震源破裂过程的数字地震成像结果, 通过地震能量和视应力随时间变化来估计地震破裂性质的动力学参数; 吴忠良(2001)、吴忠良等(2002)利用全球宽频带地震辐射能和地震矩数据资料, 研究了全球走滑型浅源地震、非走滑型浅源地震和地震波辐射能 E_R 与地震矩 M_0 的关系、主震和余震的视应力差异以及中国西部地震视应力的空间分布特征。有关地震视应力的研究结果, 为地震破裂过程的精细结构和地球动力学模拟提供了更多的细约束。

2 云南地区地震视应力的时空分布特征

利用云南区域宽频带数字地震台网在 2002 年 6 月至 2003 年 7 月一年期间内记录到的云

南地区 $M_L 2.0 \sim 4.5$ 的 200 多次中小地震的地面运动峰值速度和波形数据资料, 采用波谱反演方法, 测定了这些地震的地震矩 M_0 , 由式(2)测定了地震辐射能, 从而根据测定地震视应力的关系式(1), 给出了这些中小地震的视应力 σ_a 的计算结果。结果表明多数中小地震的视应力为 0.01~1.0 MPa, 所有地震的视应力平均值为 0.25 MPa。图 1 给出了云南区域数字地震台站及所使用的中小地震的震中分布。

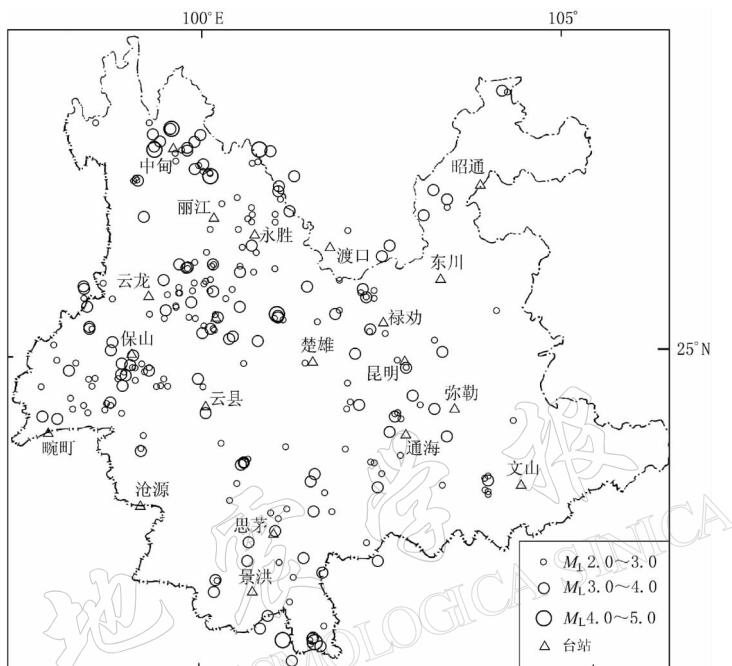


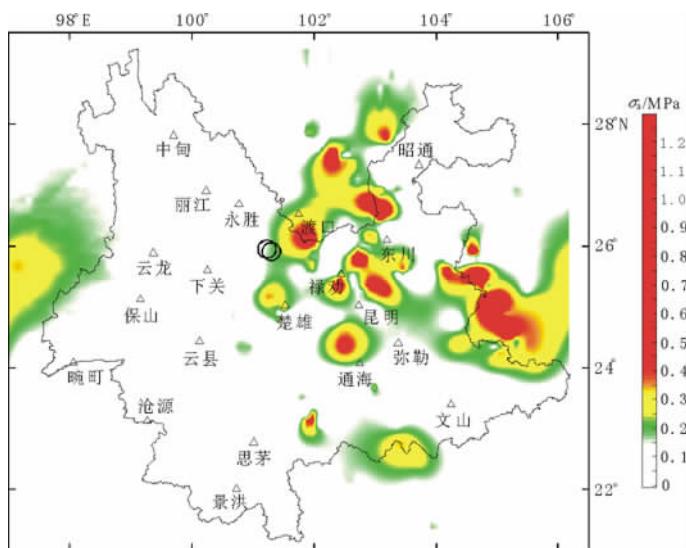
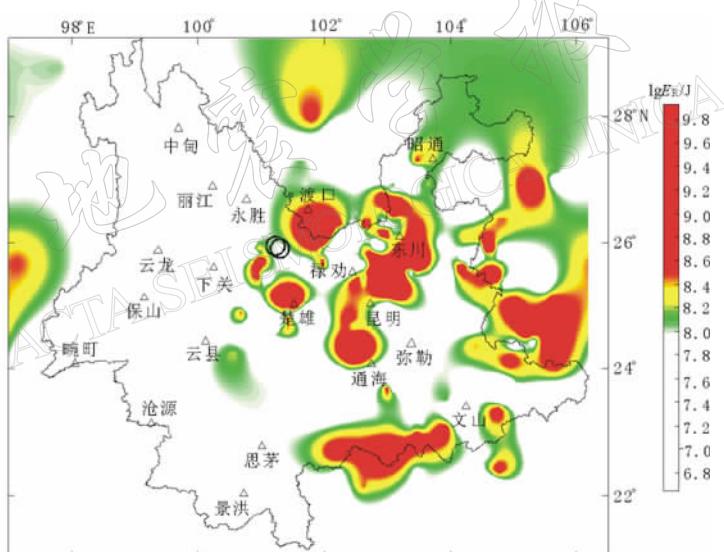
图 1 云南区域数字地震台站及本研究所使用的中小地震(2002-06—2003-07)震中分布图

2.1 视应力的空间分布

为讨论视应力的空间分布特征, 我们采用均匀网格点计算视应力空间分布的方法, 以 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 为网格单元, 将云南地区划分为 16×18 个网格点, 由此得到的视应力空间分布见图 2。由该图可以看出, 高视应力 ($\sigma_a > 0.5$ MPa)、中等视应力 ($\sigma_a = 0.25 \sim 0.5$ MPa) 及低视应力 ($\sigma_a < 0.25$ MPa) 地区的分布在空间上是不连续和不均匀的。2003 年 7 月 21 日和 10 月 16 日在云南中部的大姚地区分别发生了 $M_s 6.2$ 和 $M_s 6.1$ 级两次破坏性地震, 这两次主震的震中分布见图 2 中的圆圈所示。震前一年内的中小地震视应力空间分布显示, 云南地区高视应力主要分布在北纬 24.5° 以北的地区, 更为引人注目的是高视应力集中区主要分布在两次 6 级强震的周边地区, 其余地区则显示出较低的视应力水平。这一结果似乎暗示了视应力的空间分布特征可以作为地震危险地点预测分析的一种判据。之后, 以同样的方法, 给出了能量的空间分布图象(图 3)。由图 3 看出, 两次 6 级强震的震中及周围地区也是小震活动的高能量释放区。

2.2 视应力随时间的变化

采用滑动平均统计的方法, 本文给出了视应力 σ_a 和能量 E_R 随时间的变化图象, 整个时间序列的平均视应力为 0.25 MPa, 结果见图 4。由图 4a 可以看出, 从 2003 年 1 月至 7 月 21 日主震发生前约 5 个多月的时间内, 出现了视应力随时间变化的高值时段, 最大值高

图 2 云南地区视应力 σ_a 空间分布图(2002-06—2003-07)图 3 云南地区能量 lgE_R 空间分布图(2002-06—2003-07)

达平均值 0.25 MPa 的 5.0 倍。视应力表示区域绝对应力水平的某种量度,由此表明,在大姚地震发生前数月内,主震区周围已处于较高的应力水平,表现为较高的中小地震活动水平。7月 21 日大姚第一次 6.2 级地震发生之后的 2 个多月至 10 月 16 日再次发生 6.1 级地震,该次地震之前的 9 月份也出现了高视应力变化时段。用相同的平均滑动统计分析方法,给出了中小地震能量释放随时间的变化,结果见图 4b。由图 4b 看出,大姚两次 6 级地震前都出现了中小地震高能量释放过程,表明这两次主震是在云南地区中小地震活动水平相对较高的背景下发生的。本研究表明,中小地震能量释放及视应力随时间的变化均显示出中强震发生的前兆异常。

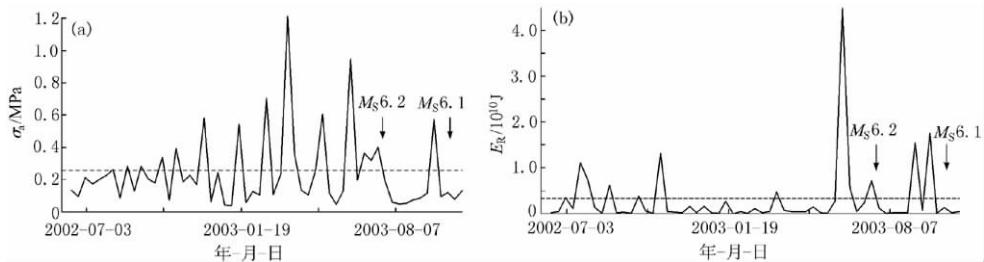


图 4 云南地区地震视应力 σ_a 和能量 E_R 随时间的变化(2002-06—2003-07)

(a) 地震视应力 σ_a 随时间的变化, 图中水平直线代表平均值 0.25 MPa;

(b) 地震释放能量 E_R 随时间的变化, 图中水平直线代表平均值

2.3 测量视应力误差分析

在计算相对地震波辐射能量时, 内在误差我们作如下分析: 根据测定能量的方程式(2), 假定震源峰值速度参数($r \cdot v$)和地震矩 M_0 是一阶不相关的, 我们就可以认为测定辐射能 E_R 的误差量分别由 M_0 和($r \cdot v$)的计算误差而引起, 于是定义引起测定能量 E_R 的误差由下式计算:

$$\Delta E_R = \left[\left(\frac{\partial E_R}{\partial (r \cdot v)} \Delta (r \cdot v) \right)^2 + \left(\frac{\partial E_R}{\partial M_0} \Delta M_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

利用方程式(2)和(3), 可估算测定地震辐射能 E_R 的百分比误差:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{3 \Delta (r \cdot v)}{(r \cdot v)} \right]^2 + \left(\frac{\Delta M_0}{M_0} \right)^2} \quad (4)$$

在采用波谱方法计算地震矩 M_0 时, 方差统计结果给出地震矩的相对标准偏差绝大多数在 15% 左右, 峰值速度参数($r \cdot v$)的标准方差在 20% 左右(主要是由测定震源距 r 的误差引起), 利用上式估算出地震波能量的标准偏差为 30% 左右. 由中小地震的地震矩和地震能量给出的标准偏差与吴忠良等(2002)利用全球 $M \geq 5.5$ 以上地震给出的地震矩和地震能量的标准偏差(分别为 5% 和 25% 左右)是基本一致的. 而且可以预期, 地震越大, 计算误差会相对变小. 作类似上述的方差分析, 取能量和地震矩的计算误差分别为 30% 和 15% 时, 可得视应力 σ_a 的误差为 33% 左右.

3 余震序列视应力的时空分布

以上主要研究了云南区域视应力的时空分布与大姚地震的相关性, 得出了一些有意义的结果. 利用 2000 年 1 月 15 日姚安 6.5 级地震和 2003 年 7 月 21 日大姚 6.2 级地震的余震序列资料, 研究余震视应力的时空分布特征.

3.1 2000 年姚安 6.5 级余震序列的视应力

对于 2000 年 1 月 15 日姚安 6.5 级地震余震序列的震源参数, 秦嘉政等(2003)进行了详细的研究. 利用该次序列的 400 多个余震资料测定了视应力, 图 5 给出了该次地震的余震序列视应力的时空分布情况. 图 5a 为视应力的空间分布, 高视应力区位于余震空间分布的中部地区; 图 5b 为视应力随时间的变化, 在两周左右的时间段内, 视应力从主震后相对较高水平逐渐下降至平均值附近波动. 图中标出了两次大于 5.0 级的地震, 其中 5.9 级地震是 6.5 级主震发生前 98 分钟发生的一次直接前震, 余震分布总体呈北西方向展布, 计算

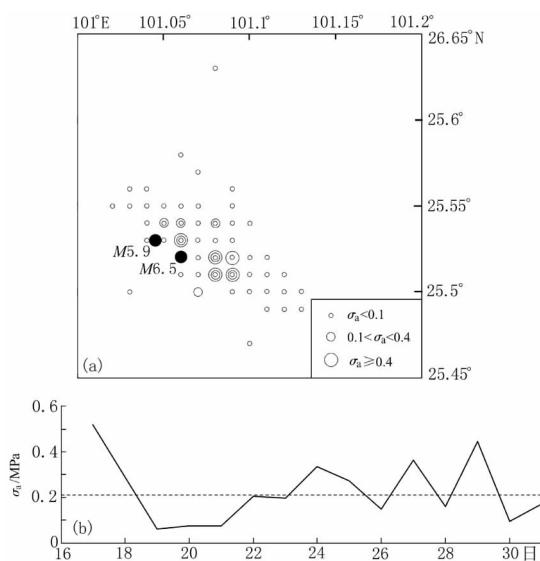


图 5 2000 年 1 月姚安 6.5 级余震序列视应力 σ_a 的空间分布(a)以及 σ_a 随时间的变化(b)

图 5a 中●代表主震; 图 5b 中水平虚线代表平均值 0.21 MPa

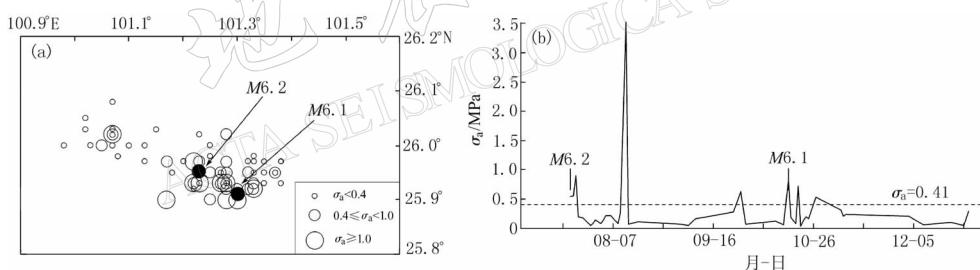


图 6 2003 年大姚 6.2 级余震序列视应力 σ_a 的时空变化

(a) 视应力 σ_a 的余震震中分布, ● 代表主震; (b) 视应力 σ_a 随时间变化, 图中水平直线代表平均值为 0.41 MPa

破裂模式。例如, 最近几年提出的凹凸体(asperity)和障碍体(barrier)模式(吴忠良, 2001; Lay, Kanamori, 1981)。断裂力学表明, 这两种模式虽然都强调天然断层上物理条件的不均匀性, 但凹凸体模式强调断层面上应力的不均匀, 障碍体模式则强调断层面上的应力强度变化。对于某一特定地震, 究竟哪一种模式对解释地震观测资料更为合适, 则取决于断层面上的具体情况。实际上这两种模式可能代表活动断层区轮回演化的两个相继不同的阶段。将凹凸体模式和障碍体模式看成有关地震过程的两种极端情况的模型, 二者有一个共同的前提, 即断层区是由弱区(低应力状态)和强区(高应力状态)组成。凹凸体模型的基本特点是, 当主要的大而强的凹凸体破碎时, 就发生最大的地震; 在障碍体模型中, 最大地震发生在弱区滑动时, 并且可能以发生余震或无震滑动的方式发生滑动, 另一种可能是障碍体最终以地震的形式破碎, 因而归属于凹凸体模型。因此, 对于一个地区的强震危险性

的视应力多数在 0.01~0.5 MPa 之间, 序列平均视应力为 0.21 MPa。

3.2 2003 年大姚 6.2 级余震序列的视应力

利用 2003 年 7 月 21 日大姚 6.2 级主震发生后的 80 次余震序列资料, 计算该次余震序列的视应力。估算结果显示视应力在 0.05~4.2 MPa, 多数视应力分布在 0.1~1.0 MPa 之间, 余震序列平均视应力为 0.41 MPa。图 6 给出了视应力的时空分布, 由该图可以看出, 在 8 月 10 日左右视应力出现了较高值, 之后于 10 月 16 日再次发生 6.1 级地震, 余震序列总体分布为北西西向, 较高视应力集中在主震附近。

3.3 主震和余震序列视应力的比较

震源破裂过程的复杂性已被众多的研究成果所证明, 为解释这一复杂性的起因, 地震学家提出和建立了各种震源

估计, 研究这一地区地震是在障碍体模型意义下破裂还是在凹凸体模型意义下破裂是十分重要的。通过这样的深入细节研究, 对地震发生的物理模型的发展会有很大意义。

本文估算出的姚安 6.5 级主震视应力 σ_a 为 8.4 MPa, 大姚 6.2 级主震的视应力 σ_a 为 4.4 MPa, 图 7 给出了这两次地震序列余震视应力与主震视应力的归一化关系, 图中实心圆代表大姚 6.2 级余震序列的结果, 空心圆代表姚安 6.5 级余震序列的结果。比值 C_σ 代表余震序列每次地震的视应力与主震视应力之比, $C_\sigma = \sigma_{aA}/\sigma_{aM}$ 。由图 7 看出, 主震视应力 σ_{aM} 比余震序列的视应力 σ_{aA} 大; 其次, 姚安地震序列的比值 C_σ 在 $M_w \geq 3.5$ 时, 随着震级增大其比值增加较为明显, 而大姚地震序列给出的比值 C_σ 与震级关系并不明显。详细研究主震与余震视应力关系的报道目前并不多见, 吴忠良(2001)利用全球 $M \geq 5.5$ 地震资料给出一个基本认识: 走滑型地震余震的视应力比主震的视应力低, 非走滑型地震余震的视应力比较复杂, 即有高于也有低于主震的视应力的情况。采用凹凸体或障碍体两种概念性模型来描述地震的破裂过程, 可以定性地解释许多地震活动性的特点, 作用于断层上的剪应力在空间和时间上是变化的, 用地震波来确定断面上的位移分布可以间接讨论断面上应力的时空变化特征, 根据余震分布的集中程度, 可能提供断层性质的空间变化。对于任何一次地震, 凹凸体或障碍体模型所描述的情形都可能存在。对地震破裂模型的讨论中, 这个问题涉及到分析什么条件使地震破裂终止, 而研究余震视应力与主震视应力关系可能会提供这方面的线索。

3.4 地震矩与能量的关系

根据地震波辐射能、地震矩与应力降的关系式(Kanamori, 2001)

$$E_R = \frac{\Delta\sigma M_0}{2\mu} \quad (5)$$

式中, $\Delta\sigma$ 为应力降。利用云南地区中小地震资料, 研究地震能量与地震矩的关系。图 8 给出了本文对云南地区中小地震估算的地震能量与地震矩的关系, 图中给出了应力降 $\Delta\sigma$ 分别为 0.01, 0.1, 1.0, 10.0 MPa 时拟合的 4 条直线方程, 这组直线方程等同于能 - 矩比值 $C_R = E_R/M_0$ 处于 $1.67 \times 10^{-6} \sim 1.67 \times 10^{-3}$ 的范围, 这与国外类似研究的结果基本一致。

4 讨论

利用云南区域数字观测台网的区域中小地震资料和余震序列资料, 详细研究了地震视应力的时间变化和空间分布, 得到了诸多有意义的认识。例如, 视应力 σ_a 水平与地震释放能水平具有某些相关性, 高视应力地区与中小地震活动频繁地区大致相同; 大姚 6.2 级主震前出现高视应力时段, 并且主震及其周围地区显示出较高视应力分布; 姚安和大姚两次 6 级主震的余震序列的视应力比主震视应力低, 这一结果与吴忠良(2001)用全球地震资料

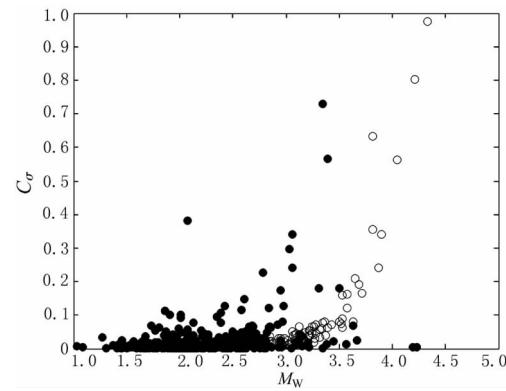


图 7 主震视应力 σ_{aM} 与余震视应力

σ_{aA} 之间的关系

空心圆代表姚安 6.5 级余震序列的结果,

实心圆代表大姚 6.2 级余震序列的结果

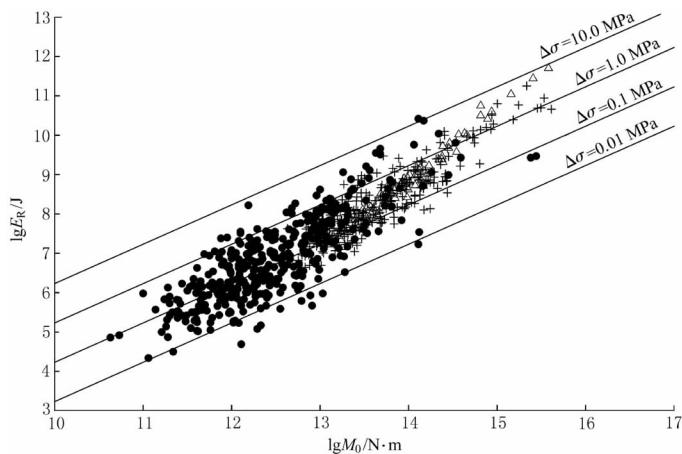


图 8 云南区域地震辐射能 E_R 和地震矩 M_0 的关系

黑点表示姚安 6.5 级余震序列，十字表示 2002 年 6 月至 2003 年 7 月云南区域地震，
三角形表示大姚 6.2 级余震序列；4 条直线分别代表应力降 $\Delta\sigma$ 为 0.01, 0.1,
1.0, 10.0 MPa 时地震矩和辐射能量的理论关系

给出的关于走滑型地震的主震视应力比余震视应力高的结论相一致。陈学忠等(2005)对 1995 年 7 月河北沙城 4.1 级余震序列的视应力研究同样也给出了主震视应力比余震视应力高的结论。中小地震资料给出的能量释放和视应力的空间分布特征，提供了强震前的某些异常信息，为分析强震活动提供了一种新的预测指标。

地震视应力和释放能量是研究地震破裂过程的重要物理参量，国内外地震学家对全球大地震的地震矩 M_0 、地震波辐射能 E_R 和视应力 σ_a 的测定已做了大量的研究工作，取得了许多有意义的成果，但关于中小地震视应力的研究在我国还不够广泛，然而这又是一个重要的研究方面，本文在这方面做了一定程度的分析研究，使用的方法便于实时处理大量中小地震资料，适应震情趋势预测动态分析。鉴于我国目前新建区域数字观测台网已获得了十分丰富的中小地震观测资料和地震序列资料，探索独立测定中小地震的地震波辐射能量、地震矩以及相关的介质和应力参数，这对研究地震物理过程和强震预测预报都是十分重要的。

参 考 文 献

- 陈学忠, 许向彤, 翟文杰. 2005. 1995 年 7 月 20 日河北沙城 $M_{4.1}$ 地震序列破裂过程中应力变化的研究[J]. 地震学报, 27(3): 276~281
- 秦嘉政, 钱晓东, 叶建庆, 等. 2002. 用峰值速度估算姚安地震序列的地震能量[J]. 地震学报, 24(1): 98~102
- 秦嘉政, 叶建庄, 钱晓东, 等. 2003. 2000 年姚安地震的震源参数[J]. 地球物理学报, 46(5): 633~641
- 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他地震学意义[J]. 中国地震, 17(1): 8~15
- 吴忠良, 黄静, 林碧苍. 2002. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报, 24(3): 293~301
- Choy G L, Boatwright J L. 1995. Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress[J]. *J Geophys Res*, 100: 18 205~18 228
- Kanamori H. 2001. Energy budget of earthquakes and seismic efficiency[J]. *Earthquake Thermo-dynamics and Phase Transformations in the Earth's Interior*, 76: 293~305
- Lay T, Kanamori H. 1981. An asperity model of great earthquake sequences[A]. In: Simpson D W and Richards P G

- eds. *Earthquake Prediction, An International Review*, M. Ewing Ser 4[C]. Washington D. C. : AGU, 579~592
- McGarr A. 1999. On relating apparent stress to the stress causing earthquake fault slip[J]. *J Geophys Res*, **104**: 3 003~3 011
- Newman A V, Okal E A. 1998. Teleseismic estimates of radiated seismic energy: The E/M_0 discriminant for tsunami earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **103**: 26 963~26 974
- Pulido N, Irikura K. 2000. Estimation of dynamic rupture parameters from the radiated seismic energy and apparent stress[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 3 945~3 948
- Wyss M. 1970. Stress estimates for south American shallow and deep earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **75**(8): 1 529~1 544
- Wyss M, Brune J N. 1968. Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in California-Nevada region [J]. *J Geophys Res*, **73**: 4 681~4 694

ON TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTION OF SEISMIC APPARENT STRESSES IN YUNNAN AREA

Qin Jiazheng Qian Xiaodong

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

Abstract: The method of radiation energy E_R of the earthquake wave measured by the peak velocity ($r \cdot v$) of the ground motion is applied to a detaile study on the temporal and spatial distributions of the seismic apparent stresses (σ_a) for the moderate and small earthquakes and two aftershock sequences in Yunnan area. The results show that there exists an obvious non-homogeneity for the seismic apparent stresses in the spatial distribution. The concentrated regions of the high apparent stresses are related to the active places of the moderate and small earthquakes. Before the Dayao $M=6.2$ earthquake, there was a period in which the apparent stresses were high and the value was 5 times of the average value, 0.25 MPa. The relatively high values of apparent stresses distribute around the epicentral areas of the major shock and nearby. It indicates that the variation characteristics of the apparent stresses can be taken as a new kind of criterion for the earthquake risk forecast. Usually the ratio of the apparent stresses of the aftershock sequence σ_{aA} to the ones σ_{aM} of major shock is less than 1.0.

Key words: earthquake energy; apparent stress; seismic moment; temporal and spatial distribution; Yunnan area