

刘丽芳、杨晶琼、华卫等,2011,云南地区中小地震静力学和动力学参数定标关系,中国地震,27(3),268~279。

云南地区中小地震静力学和动力学参数定标关系

刘丽芳¹⁾ 杨晶琼¹⁾ 华卫²⁾ 苏有锦¹⁾ 刘杰³⁾

1) 云南省地震局,昆明市北辰大道842号 650224

2) 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

3) 中国地震台网中心,北京 100045

摘要 通过消除S波观测谱中的传播路径、场地响应、仪器响应等影响因素,得到中小地震的震源谱。根据Brune震源模型,运用遗传算法计算了地震矩、应力降、震源半径等震源参数;通过考虑由于有限的仪器带宽带来的地震辐射能量低估及补偿问题,测定了中小地震辐射能量;分析了云南地区 M_L 2.0~5.3地震静力学和动力学参数定标关系。结果表明:地震矩为 $2.1 \times 10^{12} \sim 1.2 \times 10^{16} \text{ N}\cdot\text{m}$,地震矩 M_0 和震级 M_L 的线性关系式为 $\lg M_0 = 1.01M_L + 10.59$;震源破裂半径在86.9~1220.4m之间,地震矩 M_0 与震源半径 a 之间的关系式为 $\lg M_0 = 0.003a + 12.90$;应力降结果介于0.03~57.55MPa之间,当 $M_0 < 4 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,应力降随地震矩的增大而增大,当 $M_0 \geq 4 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,应力降与地震矩之间无明显的依赖关系;地震矩 M_0 与拐角频率 f_c 明显有依赖关系,二者之间的关系式为 $\lg f_c = -\lg M_0 + 5.32$;地震辐射能量 E_R 在 $3.01 \times 10^6 \sim 2.06 \times 10^{12} \text{ J}$ 之间,地震辐射能量 E_R 与震级 M_L 之间的关系为 $\lg E_R = 1.18M_L + 5.69$ 。当 $M_0 < 4 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,折合能量有随地震矩增大而增大的趋势,当 $M_0 \geq 4 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,折合能量不随地震矩的增大而变化;地震视应力范围为0.02~31.4MPa之间,视应力与震源深度之间没有明显的依赖性。

关键词: 震源参数 定标关系 中小地震 遗传算法

[文章编号] 1001-4683(2011)03-0268-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震震源参数之间的定标关系研究,对于揭示大地震和小地震的断层机制是否包含了相同的物理过程,探索震源参数应用于地震预测等具有重要的意义。研究确定应力降与地震矩、应力降与震源深度、能量与地震矩之间的定标关系,是将应力降、地震辐射能量等作为地震预测的重要参数来使用时所必须进行的基础性工作。

地震矩与拐角频率之间的关系 $M_0 \propto f_c^{-3}$,以及地震矩与震源持续时间、断层面积等静力学参数之间的关系在地震学中得到了广泛应用(Brune, 1970、1971; Hanks et al, 1972; Abercrombie et al, 1993)。应力降的标度性质,即应力降如何随地震的尺度而变化,对于较

[收稿日期] 2009-10-19

[项目类别] 云南省应用基础研究重点项目(2010CC006)、云南省重点项目(JCYB-20080601-4)和地震科学联合基金(C08065)联合资助

[作者简介] 刘丽芳,女,1975年生,理学硕士。主要从事地震活动性和数字地震学研究。E-mail: lifang_l@sina.com

大的地震的比较一致的看法是应力降基本保持不变(Scholz,1990)。Kanamori等(2004)认为, M_0 在 $10^{18} \sim 10^{19}$ 范围内的地震,应力降大致为常数。然而,小地震的应力降如何随地震的尺度而变化,迄今由观测资料得到的结果似乎是相互矛盾的(Mayeda et al,1996;Hardebeck et al,1997;Abercrombie,1995;Nuttli,1983;吴忠良等,1999;陈运泰等,2000)。折合能量,即地震辐射能量与地震矩之比如何随地震矩的大小而变化(即折合能量-地震矩定标关系)问题,目前结论也并不清楚。之所以存在这种情况,是因为迄今为止能量的测定仍有相当大的不确定性,现在的观测还不足以给出最后的结果。因此,应力降标度性质、能量-地震矩定标关系,仍是一个有待通过积累与具体区域有关的、不同大小地震的资料进行深入研究的重要问题。

要开展中小地震震源参数定标关系的研究,传播路径效应(包括几何扩散和非弹性衰减)和场地响应的精确测定是关键。一方面,通过频率域震源参数推测应力降常常有相当大的不确定性,并且应力降的数值与所使用的模型有关;另一方面,因为仪器有限的频带宽度和沿着地震波传播路径衰减的不可靠校正,使中小地震能量的估算被低估(Ide et al,2001)。本文对S波观测谱中的传播路径效应、场地响应、仪器响应等影响进行消除,其中地震波衰减利用Atkinson等(1992)方法反演,台站的场地响应利用Moya等(2000)和刘杰等(2003)提出的方法反演得到,仪器响应通过仪器标定进行校正,得到中小地震的震源谱。再根据Brune(1970)震源模型,运用遗传算法计算地震矩、应力降、震源半径等震源参数;通过考虑由于有限的仪器带宽带来的地震辐射能量低估及补偿问题,测定中小地震辐射能量。从静力学定标关系和动力学定标关系两个方面,开展了云南地区2120次 $M_1 2.0 \sim 5.3$ 地震震源参数之间(主要是地震矩与应力降以及地震矩和地震辐射能量)定标关系研究。

1 计算方法

任一台站观测的地震地面运动的傅里叶谱可以表示为

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) \cdot G(R_{ij}) \cdot S_j(f) \cdot I_j(f) \cdot e^{-\frac{\pi R_{ij} f}{Q(f)\beta}} \quad (1)$$

式中 A_{ij} 是在第 j 个台观测到的第 i 个地震的傅里叶谱振幅, $A_{i0}(f)$ 为第 i 个地震的震源谱振幅, R_{ij} 为震源距, $G(R_{ij})$ 为几何衰减函数, $S_j(f)$ 为第 j 个台站的场地响应项, $I_j(f)$ 为第 j 个台站的仪器响应项, $Q(f)$ 为频率依赖的品质因子, β 为地震波速度(在本研究中仅分析S波)。

由式(1)可见,对某种类型的地震仪,仪器响应 $I_j(f)$ 是已知的。如果几何衰减函数 $G(R_{ij})$ 、品质因子 $Q(f)$ 及场地响应 $S_j(f)$ 均为已知,则可从观测谱 $A_{ij}(f)$ 中求出第 j 个台站记录的第 i 个地震的震源谱 $[A_0(f)]_j$ 。

本文利用苏有锦等(2005)反演得到的云南地区 Q 与频率 f 关系 $Q(f) = 238.0f^{0.388}$,刘丽芳等(2007)反演得到的云南数字地震台网子台场地响应,对台站记录扣除传播路径、场地响应的影 响,仪器响应通过仪器标定进行校正,得到每个地震的震源谱。这样对某个地震,就可以得到第 j 个台站记录的该地震的震源位移谱 $[A_0(f)]_j$,再对台站得到的震源谱求出平均,即是该地震的震源谱 $\bar{A}_0(f)$ 。

采用由Brune(1970,1971)二次方衰减震源谱模型作为理论震源谱 $A_{\text{theo}}(f)$,利用遗传算法求解由 $\bar{A}_0(f)$ 和 $A_{\text{theo}}(f)$ 定义的残差为极小的震源谱参数 Ω_0 和 f_c ,这里 Ω_0 是零频振幅, f_c

是拐角频率。

利用上面得到的震源谱参数求解各种震源参数,地震矩为

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3\Omega_0}{2R_{\theta\varphi}} \quad (2)$$

式中 ρ 为密度,取为 2.9g/cm^3 ; β 是 S 波速度,取为 3.5km/s ; $R_{\theta\varphi}$ 是辐射花样系数,由于没有每次地震的断层面解,所以对水平向的 S 波取震源球上的平均值为 $\sqrt{2/5}$ 。

应力降为

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (3)$$

震源半径为

$$r = \frac{2.34\beta}{2\pi f_c} \quad (4)$$

在频率域中,远场辐射能量可以表示为 (Izutani et al, 2001)

$$E_R = \frac{4\pi}{5\rho\beta^5} \int |f\dot{M}(f)|^2 df \quad (5)$$

其中

$$\dot{M}(f) = \frac{M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (6)$$

式中 M_0 为地震矩,由式(2)所示。

利用经过传播路径、场地响应及仪器响应校正后计算得到的零频振幅 Ω_0 和拐角频率 f_c ,就得到了实际震源谱的理论模型曲线,然后根据这条理论模型曲线,由式(5)、(6)积分可得到地震辐射能量。但地震能量分布于一个很宽的频率范围内,为避免宽频带数字地震仪有限的频带宽度和采样率带来地震辐射能量的低估,将积分上限设定为所研究地震拐角频率的 10 倍 (Ide et al, 2001; 华卫, 2007), 这样可得到实际地震能量的 90%。

视应力为

$$\sigma_{\text{app}} = \mu \frac{E_R}{M_0} \quad (7)$$

式中 μ 是震源区介质的剪切模量,取为 $3.0 \times 10^4 \text{MPa}$ 。显然视应力是与地震辐射能量直接相关的物理量。

2 资料处理

云南区域数字地震台网于 1999 年 6 月正式投入使用,使用之初由 23 个子台组成,2001 年 7 月和 9 月新增了个旧、洱源、腾冲地震台后,便由 26 个子台组成。每个台站均安装了 FBS-3A 型中长周期三分向速度地震计,这些地震仪基本上在 $0.1 \sim 20\text{Hz}$ 区间具有速度平坦的响应,信号采样率为 50Hz 。

对于所有的记录,采用包含所有可识别 S 震相的“S 窗”内的信号进行分析,其中“S 窗”的定义为从 S 波开始到包括 S 波总能量的 90% 的时间段。采用平移窗谱方法 (Chael,

1987) 获得具有同样频率间隔的观测信号的傅里叶谱。取 P 波初动前 256 个采样点的记录作为噪声记录, 计算与观测信号相同持续时间的噪声位移振幅, 依此对观测信号进行去噪声处理。之后, 按照信噪比大于 2 倍为标准选择可以使用的波形记录。用以上处理方法, 按每个地震至少有 3 个以上台站记录, 每个台至少有 3 条记录的原则, 挑选波形较好, 能经过信噪比检验的地震记录用于本研究。

选取 1999 年 6 月 ~ 2007 年 12 月云南区域数字地震台网记录的云南地区 (21 ~ 29°N, 97 ~ 106°E) $M_L \geq 2.0$ 地震的波形记录, 通过分析 7072 次地震 1 ~ 15 Hz 的 S 波谱, 最终测定了 2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的地震矩、应力降、震源半径、地震幅射能、视应力等震源参数, 分析了中小地震静力学和动力学参数定标关系。

3 静力学参数定标关系

3.1 地震矩 M_0 与震级 M_L 的关系

2120 次地震的震级范围为 $M_L 2.0 \sim 5.3$, 标量地震矩 M_0 计算结果介于 $2.1 \times 10^{12} \sim 1.2 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。在单对数坐标下, 地震矩 M_0 与震级 M_L 之间呈很好的相关性, 相关系数为 0.8905, 随着震级的增大, 地震矩也相应地增大。最小二乘法拟合出地震矩 M_0 与 M_L 之间的关系 (图 1) 为

$$\lg M_0 = 1.01 M_L + 10.59 \quad (8)$$

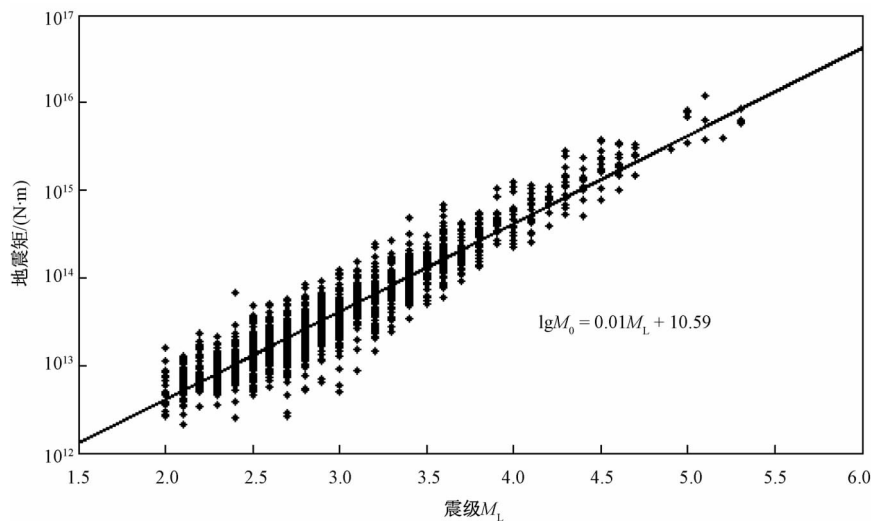


图 1 云南地区 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的地震矩 M_0 与震级 M_L 关系

地震矩与震级之间的线性关系式能反映不同地区的地下介质状态和地震活动特点。本文所得结果与其它研究者利用不同资料对不同地区所得的结果基本一致, 如美国中加州地区 (Bakun, 1984): $\lg M_0 = 1.20 M_L + 10.0$; 北京地区 (兰丛欣等, 2005): $\lg M_0 = 1.01 M_L + 10.17$; 滇西地区 (李一正, 1985): $\lg M_0 = 1.19 M_L + 9.91$; 昆明地区 (秦嘉政等, 1986): $\lg M_0 = 1.18 M_L + 11.10$ 。

3.2 地震矩 M_0 与震源半径 a 的关系

2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的震源破裂半径 a 在 86.90 ~ 1220.40m 之间。图 2 给出了用最小二乘法拟合得到的地震矩 M_0 与震源破裂半径 a 之间的关系式

$$\lg M_0 = 0.003a + 12.90 \quad (9)$$

可见地震矩与震源半径之间呈线性关系,两者的相关系数为 0.5274。

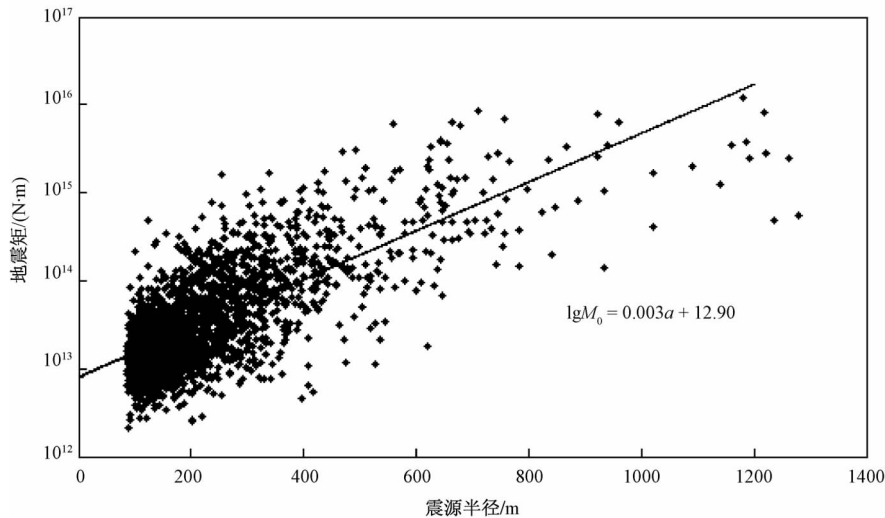


图 2 云南地区 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的地震矩 M_0 与震源半径 a 关系

3.3 应力降 $\Delta\sigma$ 与地震矩 M_0 的关系

2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的应力降 $\Delta\sigma$ 计算结果介于 0.03 ~ 57.55MPa 之间,图 3 给出了应力降 $\Delta\sigma$ 与地震矩 M_0 之间的关系图。由图可见,当 $M_0 < 4 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时(相当于 $M_L 4.0$ 地震),应力降随地震矩的增大有增大的趋势,显示出对地震矩有弱的依赖;当 $M_0 \geq 4 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,应力降不依赖于地震矩,分布较为离散。

已有的研究表明,应力降与地震矩之间呈现出不同的尺度关系,如 Mayeda 等 (1996) 研究发现小地震的应力降 $\Delta\sigma$ 随地震矩 M_0 按 $\Delta\sigma \propto M_0^{0.25}$ 的规律增加;Hardebeck 等 (1997) 认为是应力降随地震尺度增加而增加;Abercrombie (1995) 认为小地震的应力降基本上保持不变。Nuttli (1983) 认为板间地震应力降不随地震大小而变化(常数应力降模型),板内地震应力降随地震增大而增加(增加应力降模型)。而本文得到不同地震矩的“大”地震应力降接近于常数,不同地震矩“小”地震应力降的大小随地震矩(或震级)的增大而增大的结论,与陈运泰等(2000)、赵翠萍等(2007)所得的研究结果基本一致。由前述可见,应力降与地震矩之间定标的关系甚为复杂。云南地区地震活动兼具板缘和板内地震的双重特征,一方面,云南位于我国青藏高原东缘著名的南北地震带南段,所发地震多属板内地震;另一方面,云南地区属安达曼-缅甸孤中深源板缘地震带,受该板缘地震带强震活动的强烈影响,所发震又兼有一些板缘地震特点,因此云南地区应力降具备了双重标度性。

3.4 地震矩 M_0 与拐角频率 f_c 的关系

从 M_0 和 f_c 的关系(图 4)来看,二者明显有依赖关系,地震矩越大,拐角频率越小。图

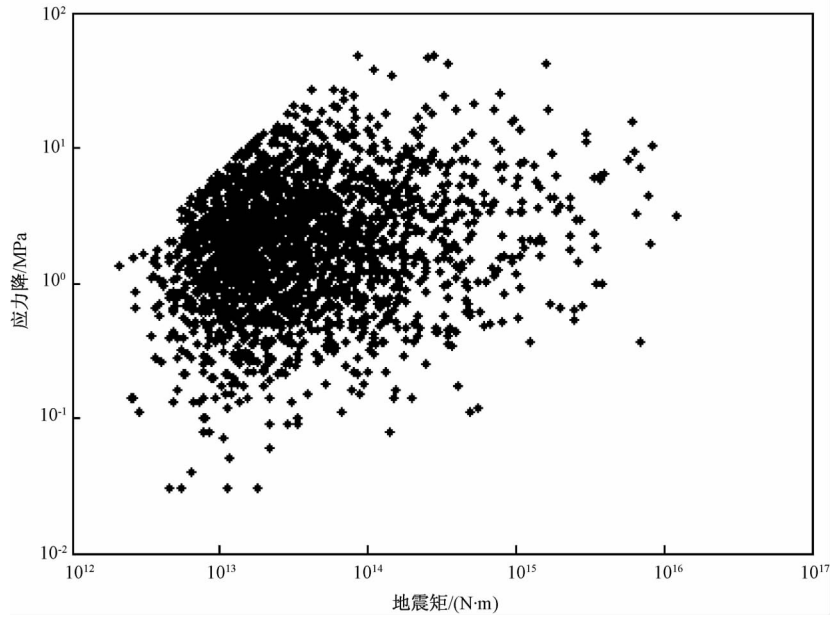


图3 云南地区 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的应力降 $\Delta\sigma$ 和地震矩 M_0 关系

中3条直线分别对应于应力降 $\Delta\sigma$ 为 0.05、1.0 和 40.0MPa 时地震矩与拐角频率的关系曲线 ($M_0 \propto f_c^{-3}$)。

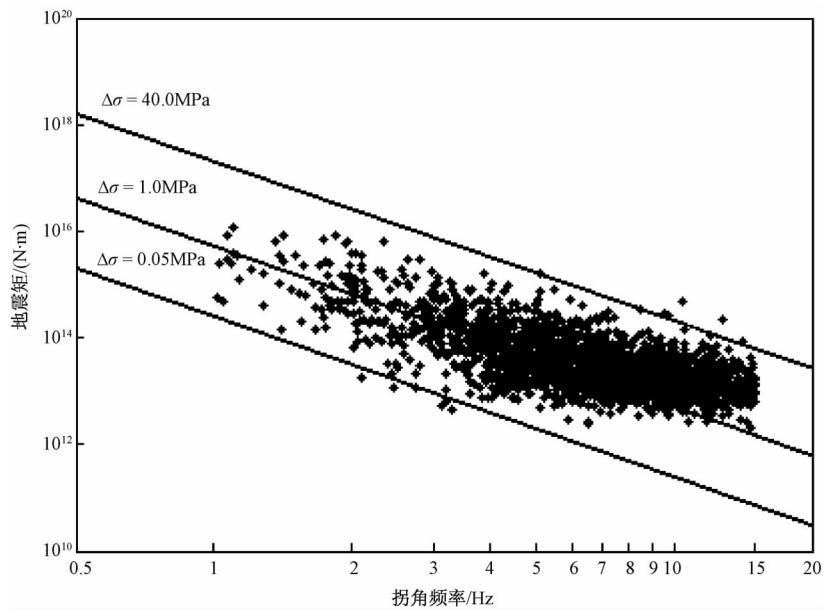


图4 云南地区 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震矩 M_0 和拐角频率 f_c 的关系

根据 Brune(1970)模型, $\lg f_c = -\frac{1}{3}\lg M_0 + \frac{1}{3}\lg(\Delta\sigma) + A$, 式中 A 为常数, 且假定应力降

为常数,用最小二乘法可拟合出 2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震拐角频率 f_c 和地震矩 M_0 之间的关系式为

$$\lg f_c = -\frac{1}{3} \lg M_0 + 5.32 \quad (10)$$

据式(10),对给定的地震矩 M_0 可得到拐角频率的估计值 f_a ,由此可分析实际计算的拐角频率与估计值之差 $f_c - f_a$ 的时间变化曲线。

4 动力学参数定标关系

4.1 地震辐射能 E_R 与震级 M_L 的关系

2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震辐射能 E_R 计算结果介于 $3.01 \times 10^6 \sim 2.06 \times 10^{12} \text{J}$,在单对数坐标下,理论估算出的地震辐射能 E_R 与震级 M_L 之间呈线性关系,相关系数为 0.6218,用最小二乘法拟合出地震辐射能 E_R 与 M_L 之间的关系(图 5)为

$$\lg E_R = 1.18M_L + 5.69 \quad (11)$$

传统上,由地震辐射能 E_R 、面波震级 M_S 和地方震级 M_L 之间的关系,可导出地震辐射能 E_R 和震级 M_L 之间的统计关系式为

$$\lg E_R = 1.692M_L + 3.18 \quad (12)$$

相比于(12)式,本文利用 2120 次地震拟合出的 E_R 和 M_L 之间的关系式(11),能由 M_L 相对准确估算出云南地区中小地震辐射能 E_R 。

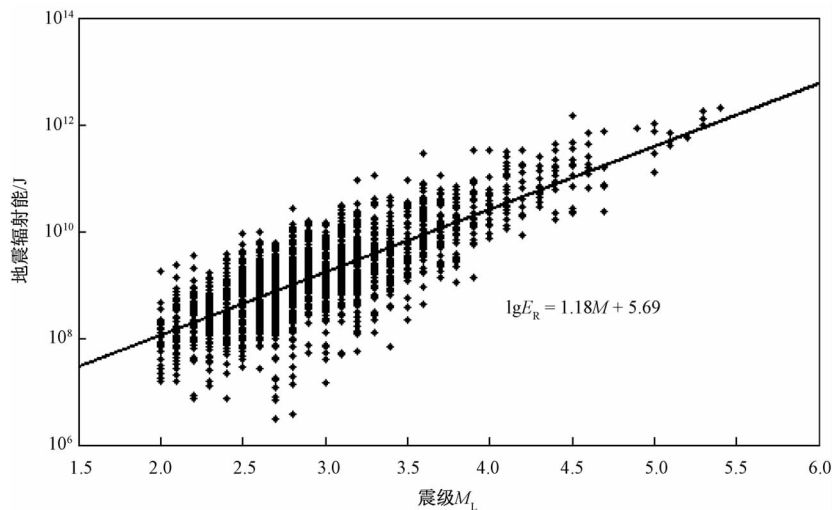


图 5 云南地区 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震辐射能 E_R 与震级 M_L 的关系

4.2 折合能量 E_R/M_0 与地震矩 M_0 的关系(图 6)

地震辐射能量的测定因必须考虑高频成分而显得很复杂,本文充分考虑了由于有限的仪器带宽带来的能量低估及补偿问题,即由震源位移谱的最佳拟合模型将一般积分上限设定为所研究地震的拐角频率的 10 倍,这在一定程度上增加了中小地震辐射能量计算的可信度。2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震折合能量的范围为 $6.89 \times 10^{-7} \sim 1.05 \times 10^{-3}$ 。在讨论的地震

矩范围之内,当 $M_0 < 4 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,折合能量有随地震矩增大而增大的趋势;当 $M_0 \geq 4 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,折合能量分布较为离散,不随地震矩的增加而变化。

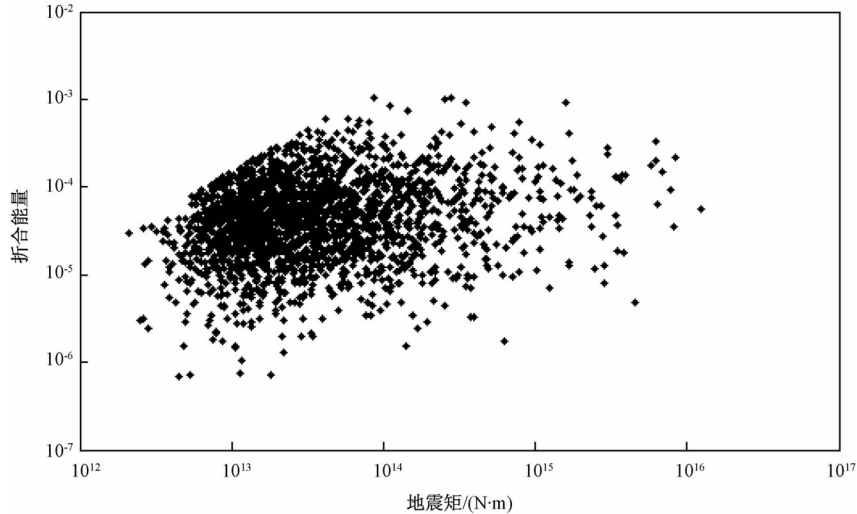


图6 云南地区 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 折合能量 E_R/M_0 与地震矩 M_0 的关系

关于折合能量与地震矩的定标关系,有研究认为折合能量不随地震矩变化(Kanamori et al,1975;Choy et al,1995;Ide et al,2001);也有研究认为折合能量随地震矩的增大而增大(Kanamori et al,1993;Abercrombie,1995;Mori et al,2003)。本文得出折合能量与地震矩的两种定标关系,一方面可能反映了地震辐射能估计的不确定性,另一方面可能反映了地震辐射能与地震类型、震源区发震构造特征有关。如 Wu(2001)研究认为,对于逆断层和正断层的地震,折合能量随地震矩减小;对于走滑型地震,折合能量随地震矩增大。

4.3 地震视应力 σ_{app} 与震源深度的关系

2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震视应力的范围为 $0.02 \sim 31.4 \text{ MPa}$ 之间,约 67% 地震的震源深度集中在 $1 \sim 16 \text{ km}$ 范围内。由图 7 可见,震源深度大于 16 km 地震的视应力似乎有随深度加深而增加的趋势,但在震源深度讨论范围内,视应力随震源深度加深而增加的趋势并不明显,这与视应力有随震源深度增大趋势的研究结果(Mori et al,2003;Kanamori et al,2004)不一致,可能与本文所研究地震震源深度较浅有一定的关系。

5 讨论和结论

本文计算了云南地区 2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的震源参数,讨论了地震矩、震源半径、应力降、拐角频率等静力学参数之间,以及地震矩、地震辐射能量等动力学参数之间的定标关系,得到以下认识:

(1) 地震矩与震级的关系。2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的地震矩和近震震级之间有很好的线性关系,最小二乘法拟合两者之间的关系式为 $\lg M_0 = 1.01 M_L + 10.59$,本文所得结果与其它研究者利用不同类型的资料对不同地区所得的结果基本一致。按照定义,震级 M_L 是根据 Wood-Anderson 地震计的记录测定的,当地震的拐角频率高于 Wood-Anderson 地震计

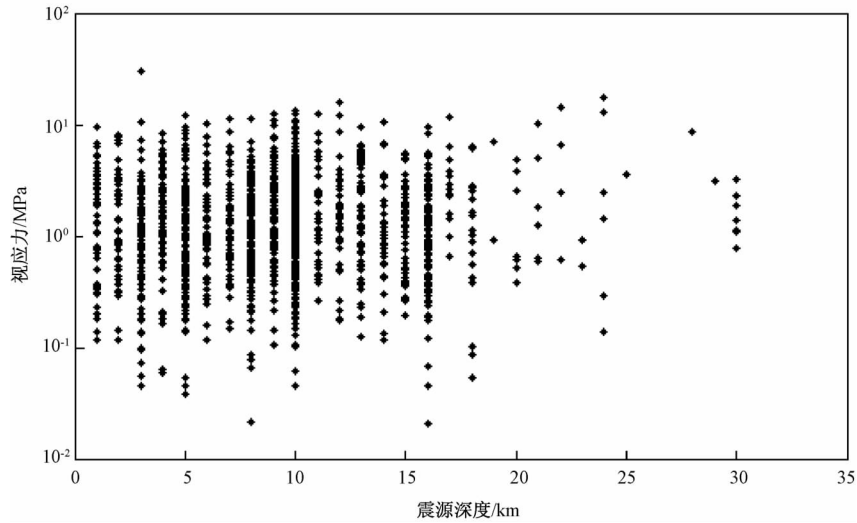


图7 云南地区 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震视应力 σ_{app} 与震源深度的关系

的截止频率 1.2 Hz 时,其振幅直接正比于地震矩,即 $\lg M_0$ 与 M_L 的比例系数为 1 (Randall, 1973)。本文所研究 99.5% 的中小地震的拐角频率大于 1.2 Hz,因此我们所得到的 $\lg M_0$ 与 M_L 的比例系数很接近其理论值 1。

(2) 地震矩与震源半径的关系。用最小二乘法拟合得到 2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的地震矩 M_0 与震源破裂半径 a 之间的关系式 $\lg M_0 = 0.003a + 12.90$,但两者的相关系数不高。实际上,地震矩主要由震源所释放的能量来确定,而震源尺度除震源所释放的能量对其影响外,还与震源地区的地壳结构、地质构造及应力状态等关系甚大,两者之间难以建立很好的线性相关关系。云南地区地壳结构相当复杂,活动断裂分布广泛,活动强度不同,各地岩层的构成相差也很大,因此同等强度地震的震源尺度差异大是可以理解的。

(3) 应力降与地震矩的关系。应力降如何随地震强度大小而变化,是震源参数研究中广泛讨论的问题,也是本文研究的重点。对应力降比较一致的看法是,在同样 M_0 释放的条件下,板内地震的应力降大于板缘地震的应力降。但对板内地震应力降的认识,不同的研究者在不同研究区域利用不同资料得到的结论不同 ((Nuttli, 1983; Scholz, 1990; Kanamori et al, 2004; Abercrombie, 1995; Mayeda et al, 1996; Hardebeck et al, 1997; Jin et al, 2000; 陈运泰等, 2000)。本文得到了 2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震应力降的双重标度性质,即当 $M_0 < 4 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时(相当于 $M_L 4.0$ 地震),应力降随地震矩的增大而增大,当 $M_0 \geq 4 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,应力降不依赖于地震矩。对于本文研究结果与已有的结果之间的不一致,我们倾向于认为,不同的构造环境的中小地震可能会有不同的应力降的标度性质,与大地震不同,对于小地震,局部介质结构的非均匀性将具有更为重要的意义。

(4) 地震矩与拐角频率的关系。地震矩与拐角频率明显有依赖关系,地震矩越大,拐角频率越小。假定应力降为常数,用最小二乘法可拟合出 2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震拐角频率 f_c 和地震矩 M_0 之间的关系式为 $\lg f_c = -\frac{1}{3} \lg M_0 + 5.32$ 。

(5) 折合能量与地震矩的关系。2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震折合能量的范围为 $6.89 \times 10^{-7} \sim 1.05 \times 10^{-3}$, 最小二乘法拟合出理论估算的地震辐射能量与震级之间的关系式为 $\lg E_R = 1.18 M_L + 5.69$ 。折合能量与地震矩定标关系表现为, 当 $M_0 < 4 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, 折合能量有随地震矩增大而增大的趋势; 当 $M_0 \geq 4 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, 折合能量不随地震矩的增加而变化。就目前相佐的能量-地震矩定标关系两种不同的观点(图 8), 本文从区域中小地震的资料给出了折合能量随地震矩的变化特点。

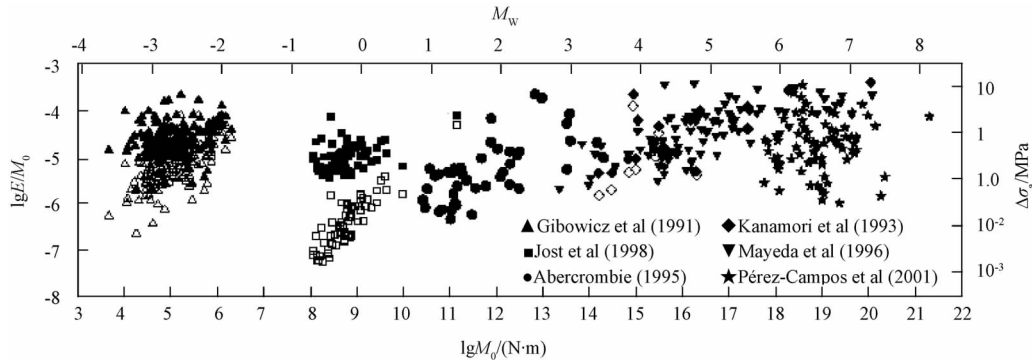


图 8 折合能量与地震矩关系图(Ide et al, 2001)

(6) 视应力与震源深度的关系。2120 次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震视应力与震源深度之间没有明显的依赖性, 该结果与 Mori 等(2003)利用 1994 年加利福尼亚 Northridge 余震研究认为视应力存在一个小的深度依赖性的结论不一致, 这可能与本文所研究地震震源深度较浅有一定的关系。

参考文献

- 陈运泰、吴忠良、王培德等, 2000, 数字地震学, 1 ~ 172, 北京: 地震出版社。
- 华卫, 2007, 中小地震震源参数定标关系研究, 博士学位论文, 北京: 中国地震局地球物理研究所。
- 兰丛欣、刘杰、郑斯华等, 2005, 北京地区中小地震震源参数反演, 地震学报, **27**(5), 498 ~ 507。
- 李一正, 1985, 滇西地区震级与地震矩标度, 地震研究, **8**(6), 617 ~ 632。
- 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。
- 刘丽芳、苏有锦、刘杰等, 2007, 用 Moya 方法反演云南数字地震台站场地响应, 地震研究, **30**(1), 39 ~ 42。
- 秦嘉政、阚荣举, 1986, 用近震尾波估算昆明及其周围地区的 Q 值和地震矩, 地球物理学报, **29**(2), 145 ~ 156。
- 苏有锦、刘杰、郑斯华等, 2005, 云南地区 S 波非弹性衰减 Q 研究, 地震学报, **28**(2), 1 ~ 7。
- 吴忠良、陈运泰、Mozaffari P, 1999, 应力降的标度性质与震源谱高频衰减常数, 地震学报, **21**(5), 460 ~ 468。
- 赵翠萍、夏爱国、郑斯华等, 2007, 新疆北天山中段地区震源参数研究, 见: 数字地震观测资料应用研究, 307 ~ 315, 北京: 地震出版社。
- Abercrombie R E, 1995, Earthquake source scaling relationships from M_L -1 to 5 using seismogram recorded at 2.5-km depth, *J Geophys Res*, **100**, 24015 ~ 24036。
- Abercrombie R E, Leary, P, 1993, Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5km depth, Cajon Pass Southern California: implications for earthquake scaling, *Geophys Res Letter*, **20**, 1511 ~ 1514。
- Atkinson G M, Mereu R F, 1992, The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada, *Bull Seism Soc Am.*, **82**, 2014 ~ 2031。
- Bakun W H, 1984, Seismic moments, local magnitudes, and coda-duration magnitudes for earthquakes in central California, *Bull*

- Seism Soc Am, **74**, 439 ~ 458.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J Geophys Res*, **75**, 4997 ~ 5009.
- Brune J N, 1971, Correction *J Geophys Res*, **76**, 5002.
- Chael E, 1987, Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick, *Bull Seism Soc Am*, **77**, 347 ~ 365.
- Choy, G L and Boatwright, J L, 1995, Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress, *J Geophys Res*, **100**, 18205 ~ 18228.
- Gibowicz S J, Young R P, Talebi S, et al, 1991, Source parameters of seismic events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada; Scaling relations for events with moment magnitude smaller than -2, *Bull Seism Soc Am*, **81**, 1157 ~ 1182.
- Hanks T C, Wyss M, 1972, The use of body wave spectra in the determination of seismic source parameters, *Bull Seism Soc Am*, **62**, 561 ~ 589.
- Hardebeck J L, Hauksson E, 1997, Static stress drop in the 1994 Northridge, California, aftershock sequence, *Bull Seism Soc Am*, **87**, 1495 ~ 1501.
- Ide S, Beroza G. C., 2001, Does apparent stress vary with earthquake size, *Geophys Res Lett*, **28**, 3349 ~ 3352.
- Izutani Y, Kanamori H, 2001, Scale-dependence of seismic energy to moment ratio for strike-slip earthquake in Japan, *Geophys/Res Lett*, **28**, 4007 ~ 4010.
- Jin A S, Moya C A, Ando M, 2000, Simultaneous determination on site response and source parameters of small earthquakes along the Atotsugawa fault zone, Central Japan, *Bull Seism Soc Am*, **90**, 1430 ~ 1445.
- Jost M L, Büßelberg T, Jost Ö, et al, 1998, Source parameters of injection-induced microearthquakes at 9km depth at the KTB deep drilling site, Germany, *Bull Seism Soc Am*, **88**, 815 ~ 832.
- Kanamori H, Anderson D L, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull Seism Soc Am*, **65**, 1073 ~ 1095.
- Kanamori H, Brodsky E E, 2004, The physics of earthquakes. *Res/Prog/Phys/*, **67**, 1429 ~ 1496.
- Kanamori H, Hauksson E, Hutton L K, et al, 1993, Determination of earthquake energy release and M_L using TERRAScope, *Bull/Seism/Soc/Amer/*, **83**, 330 ~ 346.
- Mayeda K, Walter W R, 1996, Moment, energy, stress drop and source spectra of western United States earthquakes from regional coda envelopes, *J Geophys Res*, **101**, 11195 ~ 11208.
- Mori J, Abernombie R E, Kanamori H, 2003, Stress drop and radiated energies of aftershocks of 1994 Northridge, California, earthquakes, *J Geophys Res*, **108**, doi:10.1029/2001JB000474.
- Moya C 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**, 977 ~ 992.
- Nuttli OW, 1983, Average seismic source-parameter relations for mid-plate earthquakes. *Bull Seism Soc Am*, **73**, 519 ~ 535.
- Randall M J, 1973, The spectral theory of seismic sources. *Bull Seism Soc Amer*, **63**, 1133 ~ 1144.
- Scholz C H, 1990, *The mechanics of earthquakes and Faulting*. 439, Cambridge Univ Press.
- Wu Z/L/, 2001, Scaling of apparent stress from broadband radiated energy catalogue and seismic moment catalogue and its focal mechanism dependence, *Earth Planets Space*, **53**, 943 ~ 948.

Static and dynamic scaling relations for moderate and small earthquakes in the Yunnan region

Liu Lifang¹⁾ Yang Jingqiong¹⁾ Hua Wei²⁾ Su Youjin¹⁾ Liu Jie³⁾

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

2) Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China.

Abstract The observational seismic S waveform data are corrected by removing the propagation, site effects, instrument etc, and source spectra for the moderate and small earthquakes are obtained. Based on Brune source model and by means of generalized inversion technique, we determined the source parameters including seismic moment, stress drop, source dimension etc. And we estimated the radiated seismic energy for moderate and small earthquakes with the possible underestimation by limited bandwidth recording taken into account. We analyzed the scaling relations of static and dynamic parameters for earthquakes with $M_L 2.0 \sim 5.3$ in the Yunnan region. The results show that the seismic moment is between $2.1 \times 10^{12} \text{ N}\cdot\text{m}$ and $1.2 \times 10^{16} \text{ N}\cdot\text{m}$, and there is a linear relation of $\lg M_0 = 1.01 M_L + 10.59$ between the seismic moment and local magnitude. The source dimension varies from 86.9m to 1220.4m. The seismic moment and rupture radius remain a linear correlation of $\lg M_0 = 0.003 a + 12.90$. The stress drop is in the range of 0.03 ~ 57.55MPa, and the stress drop increases with seismic moment for $M_0 < 4 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$, while it doesn't vary with seismic moment for $M_0 \geq 4 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$. The seismic moment shows dependence of the corner frequency. Assuming the constant stress drops, we can obtain the relation of $\lg f_c = -\frac{1}{3} \lg M_0 + 5.32$ between the seismic moment and corner frequency using least squares fitting. The theoretical radiated seismic energy is between $3.01 \times 10^6 \text{ J}$ and $2.06 \times 10^{12} \text{ J}$. The linear relation between the radiated seismic energy and local magnitude is $\lg E_R = 1.18 M_L + 5.69$. The scaled energy increases with seismic moment for $M_0 < 4 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$. However it seems that the scaled energy doesn't vary with seismic moment for $M_0 \geq 4 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}$. The apparent stress is in the range of 0.02 ~ 31.4MPa. The apparent stress also seems independent of the seismic depth.

Key words: Source parameter Scaling relation Moderate and small earthquakes
Generalized inversion technique