

云南中小地震矩震级的测定^{*}

杨晶琼, 刘丽芳, 杨周胜

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 利用云南省测震台网的数字地震波形资料, 反演了2008年1月至2012年9月675个中小地震的震源波谱参数, 并计算了这些地震的地震矩 M_0 和矩震级 M_w , 最后利用回归分析方法得到了近震震级 M_L 和 M_w 之间的关系式。

关键词: 中小地震; 震源波谱参数; 地震矩; 矩震级; 回归分析法

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)03-0306-07

0 引言

震级是表征地震大小的量, 是地震的基本参数之一, 是地震预报和其它有关地震的研究中的一个重要参数。Richter (1935) 在研究美国南加州的地震时引入了地方性震级 M_L , 现称作里克特震级 (简称里氏震级), 尽管里氏震级完全是经验性的, 物理意义不清楚, 但使用方便, 更重要的是它为震级的发展奠定了基础。

现在常用的震级主要有: 近震震级 M_L 、面波震级 M_S 、体波震级 m_b 和 m_B 、持续时间震级 M_D 、矩震级 M_w 。与传统的震级标度相比, 矩震级 M_w 不仅物理含义较明确, 而且不会出现震级饱和的现象, 是目前量度地震大小的最理想的物理量 (高景春等, 2011)。它是一个均匀的震级标度, 适用于震级范围很宽的统计, 无论对大震、小震、微震, 甚至极微震, 还是是对浅震、深震, 均可测量其地震矩, 在一定震级范围内能与常规的面波震级转换 (陈运泰, 刘瑞丰, 2004)。

本文利用云南省测震台网的近场数字地震波形资料, 采用多台联合反演方法计算了2008年1月至2012年9月的 M_L 3.0 以上 675 个中小地震的震源波谱参数, 得到了这些地震的地震矩 M_0 和矩震级 M_w , 并利用回归分析方法研究了近震震级 M_L 和 M_w 之间的关系。

1 计算方法

1.1 原理

从震源辐射出的地震波, 经过地球介质传播到地震观测台, 既携带着震源的信息, 又携带着从震源地到地震台站之间的传播介质的信息, 因此地震仪记录到的地震波是一种综合信息, 包含了地震震源效应、传播路径效应、台站场地响应及仪器响应。要测定地震矩参数, 就必须首先扣除地震记录中传播路径效应、台站场地响应及仪器响应等, 即先求出震源谱。

在任一台站观测的任一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, $A_{ij}(f)$ 是在第 j 个台观测到的第 i 个地震的傅里叶振幅谱 (观测谱); $A_{i0}(f)$ 为第 i 个地震的震源振幅谱 (震源谱); R_{ij} 为震源距 (第 i 个地震到第 j 个台站); $G(R_{ij})$ 为几何衰减函数; $Q(f)$ 为频率依赖的品质因子; β 为地震波速度 (本文仅分析 S 波); $S_j(f)$ 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。

由式 (1) 可见, 在频率域内对台站的观测位

* 收稿日期: 2013-03-04.

基金项目: 中国地震局“测震台网青年骨干培养专项”(20120104) 资助。

移谱 $A_y(f)$ 进行几何衰减、非弹性衰减、场地响应及仪器响应校正后,才能得到震源谱 $A_0(f)$ 。笔者采用三段几何衰减模型来计算传播路径的影响 (Atkinson, Mereu, 1992; 黄玉龙等, 2003), 采用 Moya 等 (2000) 关于多台、多地震联合反演的方法来计算台站的场地响应, 仪器响应可通过仪器标定进行校正。

通过以上计算, 对每个地震、每个台站记录的位移谱逐一校正后, 就得到了每个地震多个台站的震源谱, 求其平均值以消除方向性效应, 得到每个地震的平均震源谱。这样对于某个地震, 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平均, 可得到该地震的震源谱 $\bar{A}_0(f)$ 。采用 Brune (1970) 的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 , 其中, Ω_0 是零频振幅, f_c 是拐角频率。

由得到的震源谱参数 Ω_0 及拐角频率 f_c , 就可计算地震矩 (Brune, 1970):

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

式中, ρ 是密度, 取 2.9 g/cm^3 ; β 是 S 波速度, 取 3.5 km/s ; $R_{\theta\varphi}$ 是辐射花样系数, 由于没有每次地震的断层面解, 所以令 $R_{\theta\varphi}$ 为一常数, 并取 S 波在震源球上的平均值为 $\sqrt{2/5}$ 。

矩震级 M_w 由地震矩 M_0 通过下式计算得到 (Kanamori, 1977; Hanks, Kanamori, 1979):

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6.07. \quad (3)$$

式中, 地震矩 M_0 的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

1.2 参数选取

(1) Q 值

在计算台站观测震源谱时, 必须首先扣除地震记录中的传播路径效应、台站场地响应及仪器响应等, 其中最为关键的是介质品质因子 Q 。 Q 是地球介质的物理参数, 描述由于介质的非完全弹性, 地震波在介质里传播过程中的衰减, 或能量耗损的特征, 其定义为

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E}. \quad (4)$$

式中, E 为一定体积的地球介质在地震波一个周期 T (或一个波长 λ) 的运动中所积累的能量, ΔE 为同一体积的介质在地震波一个周期 T (或一个波长 λ) 的运动中所耗损的能量。由式 (4) 可以看出, 地震波在 Q 值较大的介质里传播时, 耗损的能量较小, 波衰减较慢。

笔者利用云南“十五”区域数字地震台网资料, 从中挑选了波形较好、能经过信噪比检验的 69 个 2.5 ~ 6.1 级地震用于计算区域模型, 采用多台、多地震联合反演得到云南地区的介质品质因子 $Q(f) = 231.0f^{0.480}$ (杨晶琼等, 2010)。图 1 给出了云南“十五”区域数字地震台网的台站分布和地震记录的传播路径分布。

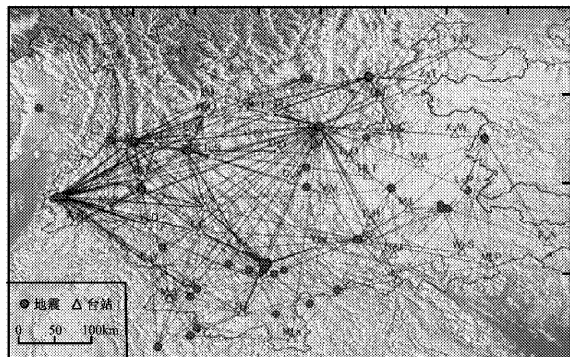


图 1 研究区台站、地震震中及射线路径分布图

Fig. 1 Distribution of seismic stations, earthquake epicenters and ray path in study area

(2) S 波窗长

要求解某次地震某个台站的观测振幅谱, 首先要截取“S 波窗”。“S 波窗”定义为从 S 波开始到包含 90% S 波总能量的时间段。但“90% S 波总能量”只是一个理论上的概念, 具体操作一般是采用目测人机结合读取的方法, 且需要操作人员有丰富的经验, 不同的操作人员读取的“S 波窗”结束时间也不一致, 可能会造成一定的结果误差。

我们读取了云南区域数字地震台网 600 个地震的震相到时和“S 波窗”的结束时间, 发现“S 波窗”长和 $S_g - P_g$ 存在一个线性关系 (如图 2 所示, 均方根为 0.11), 对其拟合给出了云南地区“S 波窗”长和 $S_g - P_g$ 的线性关系:

$$T_{Se} - T_{Sf} = 0.83(T_{Sg} - T_{Pg}) + 12.6 . \tag{5}$$

式中, T_{Se} 是“S 波窗”的截止时间, T_{Sf} 是 Sf 到时, T_{Pg} 是 Pg 到时; Sf 是首个 S 波震相的到时, 如果该台有 Sn 到时, Sf 等于 Sn; 如果没有 Sn, Sf 等于 Sg 。本文研究过程中用式 (5) 来截取“S 波窗”。

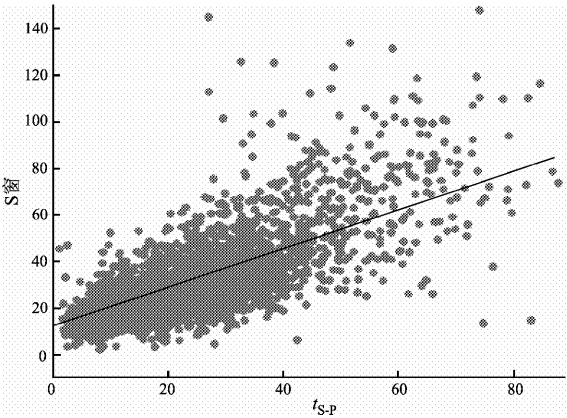


图2 “S 波窗”长和 $Sg - Pg$ 到时差之间的线性关系
Fig. 2 Linear relationship between window length of S wave and arrival time difference of Sg and Pg waves

2 资料选取

云南省测震台网负责监测云南省及周边地区的地震活动, 为地震预报和科学研究提供基础数据资料。经过“十五”建设后, 云南区域数字台网的子台均为基岩台, 使用 24 位的 EDAS-24IP 型数据采集器, 并分别安装了 KS-2000M 和 CTS-1E 两种中长周期三分向速度地震计, 采样率均为 100 Hz, 在 50 Hz ~ 120 s 频带范围具有速度平坦的响应。

本文选取云南区域数字地震台网记录的 2008 年 1 月至 2012 年 9 月的 $M_L \geq 3.0$ 以上地震波形数据。对于所有的地震记录, 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。同时, 采用平移窗谱方法, 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。再按照信噪比大于 2 的标准选择可以使用的波形记录, 以及 1 个地震至少有 3 个以上台站记录的原则 (刘丽芳等, 2010), 最终挑选了 675 次 $M_L \geq 3.0$ 地震的波形记录用于震源参数的联合反演研究。图 3 为参与计算的地震震中及周围台站分布。

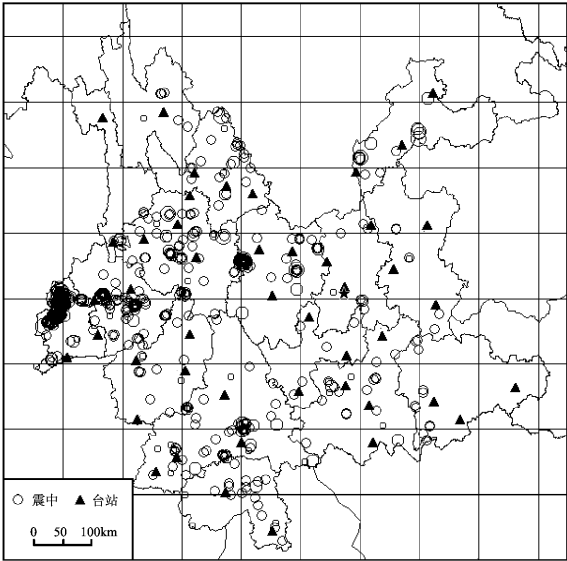


图3 参与计算地震震中及周围台站分布
Fig. 3 Distribution of earthquake epicenter used to calculation and the location of its surrounding stations

3 M_L 和 M_W 回归关系

从 2008 年 1 月到 2012 年 9 月, 共计算得到了 675 个 $M_L \geq 3.0$ 地震的地震矩和矩震级。表 1 给出 $M_L \geq 4.0$ 以上地震计算结果。

表 1 $M_L \geq 4.0$ 地震的矩震级目录
Tab. 1 Moment magnitude catalog of $M_L \geq 4.0$ earthquakes

发震时间/年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	M_L	$M_0/(N \cdot m)$	M_W	台站数
2008-01-23	00:23:26.8	25.89	98.96	4.0	$2.41E+14$	3.5	11
2008-02-18	10:44:44.5	25.73	99.78	4.8	$8.96E+14$	3.9	16
2008-03-03	02:26:43.5	22.52	102.20	4.2	$3.90E+14$	3.7	11
2008-03-21	20:36:55.2	24.58	97.67	5.3	$3.54E+15$	4.3	17

续表 1							
发震时间/年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	M_L	$M_0/(N \cdot m)$	M_W	台站数
2008-03-21	21:45:55.3	24.63	97.80	4.1	3.63E+14	3.6	8
2008-03-21	22:20:00.2	24.63	97.79	4.0	3.05E+14	3.6	11
2008-04-28	02:09:51.5	24.61	97.82	4.1	4.22E+14	3.7	10
2008-04-29	23:02:51.0	24.63	97.80	4.3	5.35E+14	3.7	10
2008-05-07	23:29:55.2	23.11	101.02	4.0	3.25E+14	3.6	7
2008-05-11	11:18:59.1	25.67	99.83	4.0	1.88E+14	3.4	9
2008-05-14	19:45:36.5	23.66	102.52	4.2	6.81E+14	3.8	6
2008-06-09	21:44:44.9	24.65	97.75	4.2	3.98E+14	3.7	11
2008-08-20	05:35:11.4	25.12	97.94	5.1	3.25E+15	4.3	11
2008-08-21	20:20:52.6	25.10	97.91	4.9	1.96E+15	4.1	16
2008-08-21	20:24:28.1	25.08	97.95	6.0	2.78E+16	4.9	19
2008-08-22	00:39:01.3	24.95	98.02	4.0	2.62E+14	3.5	7
2008-08-22	20:06:15.0	24.98	97.97	4.8	1.71E+15	4.1	13
2008-08-31	12:06:43.5	24.90	97.95	4.2	5.30E+14	3.7	10
2008-09-03	02:59:19.2	24.94	97.96	4.2	4.01E+14	3.7	11
2008-09-07	03:31:51.5	24.94	97.91	4.2	5.35E+14	3.7	10
2008-12-26	02:19:54.6	24.96	103.03	4.3	3.28E+14	3.6	11
2008-12-26	05:25:58.4	24.08	97.80	4.0	2.71E+14	3.6	8
2008-12-26	15:27:42.9	24.94	97.88	4.1	2.97E+14	3.6	5
2009-01-20	12:03:01.8	22.14	101.25	4.3	4.91E+14	3.7	5
2009-04-14	04:37:10.3	25.95	99.73	4.7	1.25E+15	4.0	27
2009-06-20	21:04:31.7	22.98	101.02	4.1	3.33E+14	3.6	7
2009-06-21	06:21:16.9	22.98	101.01	4.3	4.50E+14	3.7	11
2009-06-27	16:04:55.2	25.00	97.90	4.1	1.95E+14	3.5	7
2009-07-09	19:19:14.1	25.57	101.03	6.3	1.50E+16	4.7	20
2009-07-09	21:14:23.9	25.56	101.06	4.4	5.53E+14	3.8	19
2009-07-10	08:36:30.5	25.57	101.00	4.0	1.95E+14	3.5	5
2009-07-10	17:02:01.0	25.57	101.02	5.5	4.97E+15	4.4	23
2009-07-10	20:57:30.8	25.59	101.00	4.8	1.35E+15	4.0	19
2009-07-13	00:01:19.5	25.56	101.05	5.1	2.09E+15	4.1	28
2009-08-11	13:48:46.1	25.56	101.07	4.3	2.91E+14	3.6	11
2009-08-12	05:41:23.2	25.55	101.09	4.2	2.85E+14	3.6	16
2009-09-15	03:31:05.9	26.14	103.05	4.0	1.74E+14	3.4	9
2009-09-20	19:59:45.6	24.95	97.91	4.4	3.66E+14	3.6	8
2009-09-25	09:14:12.4	24.95	98.09	4.8	8.55E+14	3.9	7
2009-09-26	16:38:50.9	24.94	97.91	4.0	1.47E+14	3.4	6
2009-09-30	13:59:12.4	25.97	100.19	4.2	2.98E+14	3.6	16
2009-10-14	20:24:14.5	25.58	100.98	4.1	2.26E+14	3.5	15
2009-10-23	12:44:46.3	25.60	100.98	4.1	2.08E+14	3.5	16
2009-11-01	12:51:22.5	24.78	101.02	4.6	6.76E+14	3.8	23
2009-11-02	05:07:18.1	25.94	100.70	5.3	3.49E+15	4.3	24
2009-12-11	03:23:10.4	27.08	100.87	4.5	6.82E+14	3.8	15
2009-12-14	03:08:34.7	22.76	101.16	4.1	2.26E+14	3.5	10
2010-01-01	10:08:21.3	26.30	99.76	5.1	2.31E+15	4.2	16
2010-02-21	16:23:17.3	25.75	102.29	4.1	2.64E+14	3.5	10
2010-02-25	12:56:52.6	25.43	101.93	5.6	4.84E+15	4.4	26
2010-04-02	01:27:23.2	24.96	98.33	4.5	6.45E+14	3.8	15

续表 1

发震时间/年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	M_L	$M_0/(N \cdot m)$	M_W	台站数
2010-04-03	04:26:30.4	22.41	100.23	4.6	7.78E+14	3.9	13
2010-04-03	13:04:52.8	24.98	98.29	4.4	3.52E+14	3.6	8
2010-04-29	12:51:13.8	25.13	101.93	4.1	1.54E+14	3.4	11
2010-05-12	03:45:06.7	21.30	101.70	4.0	3.35E+14	3.6	5
2010-05-28	22:53:35.0	22.57	100.75	4.1	2.80E+14	3.6	10
2010-06-01	23:58:08.7	24.89	99.20	4.8	1.80E+15	4.1	22
2010-06-06	11:04:00.1	24.89	99.21	4.3	5.04E+14	3.7	18
2010-06-06	11:08:52.3	24.89	99.20	4.3	5.72E+14	3.8	17
2010-06-06	11:12:27.9	24.89	99.22	4.4	5.69E+14	3.8	16
2010-08-29	08:53:27.2	27.16	103.00	5.0	2.80E+15	4.2	13
2010-09-22	19:19:28.7	27.16	102.99	4.1	4.34E+14	3.7	7
2010-10-18	05:49:39.7	28.06	104.14	4.5	5.98E+14	3.8	8
2010-12-03	22:30:54.2	27.15	102.98	4.6	5.71E+14	3.8	8
2011-01-01	15:31:57.8	24.73	97.84	4.4	9.64E+14	3.9	9
2011-01-02	07:33:34.9	24.73	97.86	4.7	1.47E+15	4.0	16
2011-01-02	07:44:30.8	24.73	97.86	4.2	4.68E+14	3.7	12
2011-01-14	22:50:35.4	24.75	97.91	4.2	4.40E+14	3.7	10
2011-01-23	23:46:19.0	23.08	101.60	4.1	2.95E+14	3.6	12
2011-02-01	15:11:20.9	24.74	97.89	5.1	3.65E+15	4.3	12
2011-02-05	15:54:20.2	24.73	97.89	4.0	2.28E+14	3.5	8
2011-02-12	13:44:15.0	27.14	102.99	4.5	6.55E+14	3.8	7
2011-03-10	12:58:11.6	24.73	97.86	5.5	8.96E+15	4.6	23
2011-03-10	13:03:56.6	24.71	97.87	4.4	5.62E+14	3.8	6
2011-03-10	20:40:01.1	24.76	97.91	4.0	4.63E+14	3.7	5
2011-03-10	20:41:36.2	24.76	97.92	4.3	7.19E+14	3.8	11
2011-03-25	07:29:09.9	24.98	98.92	4.0	1.83E+14	3.4	12
2011-04-01	06:54:27.0	24.72	97.85	4.1	2.93E+14	3.6	9
2011-04-25	09:46:40.9	25.41	101.92	4.0	2.34E+14	3.5	9
2011-05-22	04:31:17.8	22.83	103.64	4.2	2.88E+14	3.6	11
2011-05-31	21:13:37.7	25.04	98.65	4.7	1.24E+15	4.0	15
2011-06-20	18:16:51.7	25.02	98.68	5.6	6.71E+15	4.5	22
2011-06-22	09:42:07.8	25.61	99.98	4.2	3.45E+14	3.6	18
2011-06-25	19:30:10.9	25.06	98.67	4.1	3.03E+14	3.6	10
2011-08-09	19:50:17.6	25.03	98.66	5.6	7.64E+15	4.5	25
2011-08-31	00:23:51.9	24.74	98.01	4.4	5.35E+14	3.7	13
2011-09-24	05:38:32.4	24.35	98.17	4.2	2.86E+14	3.6	12
2011-10-16	11:54:43.8	26.59	100.73	4.1	4.07E+14	3.7	9
2011-12-06	04:37:45.7	27.37	103.18	4.1	5.11E+14	3.7	7
2012-06-24	15:59:33.8	27.78	100.66	5.9	8.20E+15	4.5	20
2012-07-30	00:05:32.3	23.06	101.21	4.5	5.67E+14	3.8	19
2012-09-07	11:19:43.1	27.55	103.99	5.9	8.39E+15	4.5	6
2012-09-07	11:58:01.8	27.60	103.97	4.3	4.97E+14	3.7	4
2012-09-07	12:16:33.3	27.44	103.99	5.9	8.12E+15	4.5	16
2012-09-07	13:12:45.5	27.52	104.00	4.3	7.40E+14	3.8	4
2012-09-11	11:20:18.0	24.66	99.18	4.4	5.56E+14	3.8	20
2012-09-11	11:21:21.4	24.66	99.18	4.9	2.39E+15	4.2	18
2012-09-18	07:28:35.5	23.32	100.08	4.5	6.19E+14	3.8	14

为了对测定不同震级之间的关系进行分析，本文采用线性回归方法对 M_L 和 M_w 之间的关系进行了回归分析（相关系数 R 为 0.9661，拟合点数 N 为 675），结果如图 4a 所示。得到回归关系式为（表 2）

$$M_w = 0.670M_L + 0.799,$$

(6)

同时，对云南地区 M_w 和 M_0 之间关系也进行了回归分析（相关系数 R 为 0.9968，拟合点数 N 为 675），如图 4b 所示，得到关系式为

$$M_w = 0.671gM_0 - 6.07 .$$

(7)

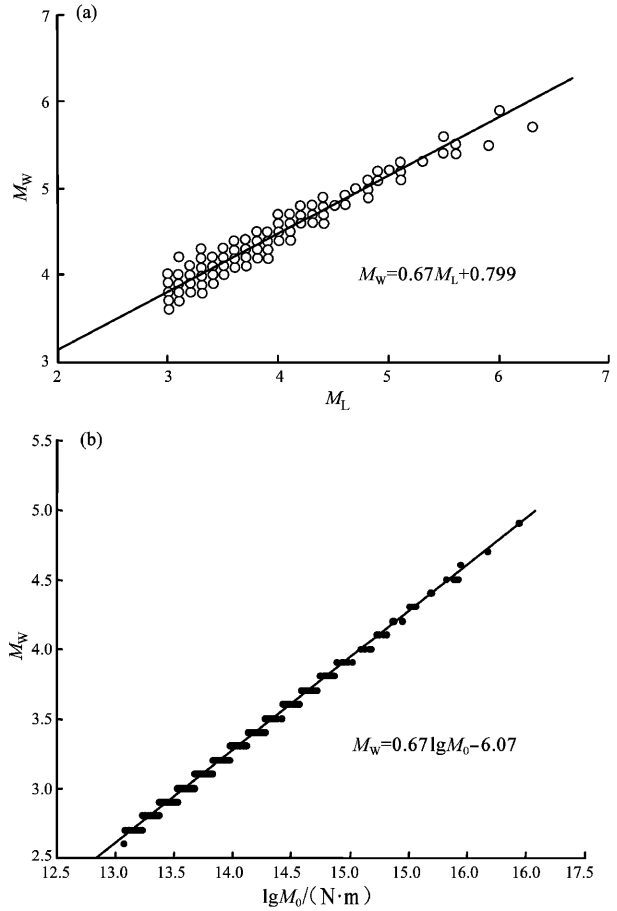


图 4 矩震级 M_w 和 M_L (a)、 M_0 (b) 的回归关系
Fig. 4 Regression relation between moment magnitude M_w and M_L (a)、 M_0 (b)

表 2 近震震级 M_L 和矩震级 M_w 线性回归关系表

Fig. 2 The linear regression between local earthquake

magnitude M_L and moment magnitude M_w

M_L	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
M_w	2.81	3.14	3.48	3.81	4.15	4.48	4.82	5.15

4 结论

本文研究表明，在区域测震台网常规测定中小地震的矩震级是可行的。矩震级也是一个均匀的震级标度，适于震级范围很宽的统计，不会出现震级饱和的现象，无论是对大震还是小震、微震，甚至极微震，无论是对浅震还是深震，均可测量地震矩，在一定震级范围内能与常规的面波震级转换。

参考文献：

陈运泰,刘瑞丰. 2004. 地震的震级[J]. 地震地磁观测与研究,25 (6):1-11.

高景春,赵英萍,徐志国,等. 2011. 河北省测震台网中小地震矩震级的测定[J]. 华北地震科学,29(2):1-4.

黄玉龙,郑斯华,刘杰,等. 2003. 华南地区地震波衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报,46(1):54-61.

刘丽芳,苏有锦,刘杰,等. 2010. 云南和四川中小地震应力降时空特征研究[J]. 地震研究,33(3):314-319.

杨晶琼,杨周胜,刘丽芳,等. 2010. 2008 年盈江 5.9 级地震序列震源参数研究[J]. 地震研究,33(4):309-310.

Atkinson G M,Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. BSSA,82(5):2 014-2 031.

Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake[J]. JGR,75(26):4 997-5 009.

Hanks T C, Kanamori H. 1979. Amomentmagnitudescale [J]. JGR, 84 (B5):2 348-2 350.

Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. JGR,82 (20):2 981-2 987.

Moya C A,Aguirre J,Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. BSSA,90(4):977-992.

Richter CF. 1935. An instrumental earthquake maginitnde scale [J]. BSSA,25(1):1-32.

Measurement on Moment Magnitude of Moderate and Small Earthquakes in Yunnan

YANG Jing-qiong, LIU Li-fang, YANG Zhou-sheng

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

Abstract

Based on digital seismic waveform data in Yunnan seismic network, we inversed the source spectrum parameters and calculated the seismic moment M_0 and moment magnitude M_w of 675 moderate and small earthquakes form Jan. , 2008 to Sep. , 2012. Finally, we obtained the relationship expression between body wave magnitude M_L and moment magnitude M_w of local earthquake by linear regression analysis method.

Key words: moderate and small earthquake; source spectrum parameter; seismic moment magnitude; regression analysis method