

杨晶琼、杨周胜、蔡明军等, 2013, 云南地区近震震级与面波震级转换关系研究, 中国地震, 29(4), 513 ~ 521。

云南地区近震震级与面波震级转换关系研究

杨晶琼 杨周胜 蔡明军 许亚吉 梁勇

云南省地震局, 昆明市北市区北辰大道 650224

摘要 利用云南地区数字地震台站记录的云南及周边地区 2000 ~ 2011 年 4.0 级以上可同时测定近震震级 M_L 和面波震级 M_S 的 433 个地震波形数据, 将速度数据进行仿真, 即近震震级 M_L 在仿真短周期地震仪 DD-1 记录上测定, 面波震级 M_S 在仿真中长周期地震仪 SK 记录上测定, 对全部人工重新测定的 M_L 和 M_S , 采用线性回归和正交回归方法, 得到了它们之间的转换关系式。结果表明, 自 20 世纪 70 年代使用至今的公式 $M_S = 1.13M_L - 1.08$ 与云南地区实际情况存在系统偏差, 已不适用于云南地区。考虑到区域差异, 认为采用关系式 $M_S = 1.13M_L - 0.86$ 作为新的转换关系更合理适用。同时, 对云南地震台网和国家地震台网都有记录的地震数据进行对比, 发现云南台网和国家台网测定的绝大多数地震 M_L 差值为 $-0.2 \sim 0.4$, 差值为 0.2 的地震数量最多; M_S 差值为 $-0.4 \sim 0.2$, 差值为 -0.2 的地震数量最多。

关键词: 震级测定 面波震级 M_S 近震震级 M_L 震级转换

[文章编号] 1001-4683(2013)04-0513-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

震级是地震的基本参数之一, 用来表示地震的强度。在地震预测及相关研究中是一个重要的参数(陈运泰等, 2000、2004)。

一次 6 级以上的地震, 几乎全球所有地震台都可以测定其震级, 所以震级标度统一的问题始终是地震学家研究的热点(刘瑞丰, 2003)。由于我国大陆地震多数为浅源地震(震源深度小于 70km), 因此, 在地震研究中常使用面波震级 M_S 与近震震级 M_L 两种标度。一次地震可以同时测定 M_S 和 M_L , 但二者往往并不一致。考虑到不同震级测量的方法不同, 因此在不同的震级之间一律不进行换算(刘瑞丰等, 2006)。但是在地震活动性分析, 特别是在地震预测研究中, 通常使用经验公式将不同的震级换算成同一种震级。

自 20 世纪 70 年代以来, 国内普遍采用的是 1971 年郭履灿^①根据邢台地震资料进行统计得到的关系式: $M_S = 1.13M_L - 1.08$ 。但此公式得出时注明, 在震中距 $\Delta \leq 1000\text{km}$ 时, 此公式适用于中国华北地区, 其他地区兼用。为了得出云南地震台网测定的 M_L 、 M_S 之间比较可靠的经验关系式, 本文利用线性回归方法和正交回归方法, 得到了云南地震台网 M_L 和 M_S

[收稿日期] 2013-06-15; [修定日期] 2013-06-28

[项目类别] 中国地震局“测震台网青年骨干培养专项”(20120104)资助

[作者简介] 杨晶琼, 女, 1968 年生, 高级工程师, 主要从事地震分析编目与数字地震资料应用研究。E-mail: yjq6@163.com

① 郭履灿, 1971, 华北地区的地方性震级 M_L 和面波震级 M_S 经验关系(全国地震工作会议资料)

震级之间的关系式。

1 M_L 和 M_S 震级的测定

云南省地震遥测台网数字化改造于 1999 年 8 月通过验收,当时有 26 个子台,全部采用宽频带数字地震计。而原有 20 世纪 60、70 年代建设的模拟地震台网仍在运行,但它使用的是短周期地震计,不利于 M_S 的测定。对于数字地震台网,震级较小的地震由于面波不发育,只能测定 M_L ;对于 $M_L \geq 4.0$ 级的地震除测定 M_L 外,还可测定面波震级 M_S 。多年来,在实际工作中发现云南省数字地震台网测定的 M_L 和 M_S ,并不满足前述的 M_L 与 M_S 的换算关系。最初以为是由于 16 位数采引起 S 波记录限幅所造成的,后经仔细校核,情况并非如此。

2008 年云南“十五”数字地震台网建成并正式运行,经过“十五”建设的云南区域数字台网,46 个子台均为基岩台,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 100Hz,KS-2000M 在 50Hz-60s 频带范围具有速度平坦的响应;CTS-1E 在 50Hz-120s 频带范围具有速度平坦的响应。但 M_L 与 M_S 的换算关系不满足上面提到的“郭履灿转换关系式”的现象始终存在。

为了严格考虑模拟与数字,仿真与不仿真之间的差异,在目前数字台网已取代模拟台网的情况下,研究中全部采用数字记录资料,且文中近震震级 M_L 与面波震级 M_S 均指经过仿真后的测定值。

本文收集整理了云南地区数字地震台站记录的云南及周边地区 2000~2011 年 4.0 级以上可同时测定近震震级 M_L 和面波震级 M_S 的地震波形数据 433 个,其中,4.0~4.9 级 377 个,5.0~5.9 级 48 个,6.0~6.9 级 7 个,7.0 级 1 个。对 M_L 和 M_S 全部重新人工测定,拟合它们之间的转换关系。图 1 为所用地震震中分布图。

1.1 近震震级 M_L 的测定

对于近震、小震,通常采用短周期地震仪(DD-1)记录的在区域范围内($\Delta < 1000\text{km}$)的近震震相 S 波(或 L_g 波)的最大振幅来测定震级,即 M_L 。计算公式如下

$$M_L = \log(A) + R(\Delta) \quad (1)$$

$A = (A_N / V(T)_N + A_E / V(T)_E) / 2$, 以 μm 为单位。其中 A_N 、 A_E 分别为南北向和东西向 S 波(或 L_g 波)最大振幅(峰-峰值振幅/2), $V(T)_N$ 和 $V(T)_E$ 分别为南北向和东西向相应周期的折合放大倍数。两水平向最大振幅不一定同时到达,振幅大于干扰水平 2 倍以上才予以测定。 Δ 是震中距,单位 km; $R(\Delta)$ 是量规函数。

1.2 面波震级 M_S 的测定

面波震级 M_S 是用面波测定的震级,简称之“面波震级”,也就是震级国标中规定的地震震级 M 。它是采用中长周期地震仪 SK 记录的地震面波质点运动最大值 $(A/T)_{\max}$ 测定。

我国在 1966 年以后,采用以北京白家疃地震台为基准的面波震级公式测定面波震级(郭履灿等,1981)

$$M_S = \log(A/T)_{\max} + \sigma(\Delta) \quad (2)$$

$$\sigma(\Delta) = 1.66 \log(\Delta) + 3.5 \quad (1^\circ < \Delta < 130^\circ)$$

式中, A 是两水平分向面波地动位移的矢量和, $A = (A_E^2 + A_N^2)^{1/2}$, 单位 μm ; T 是相应的周期,单位是 s; $\sigma(\Delta)$ 是量规函数。

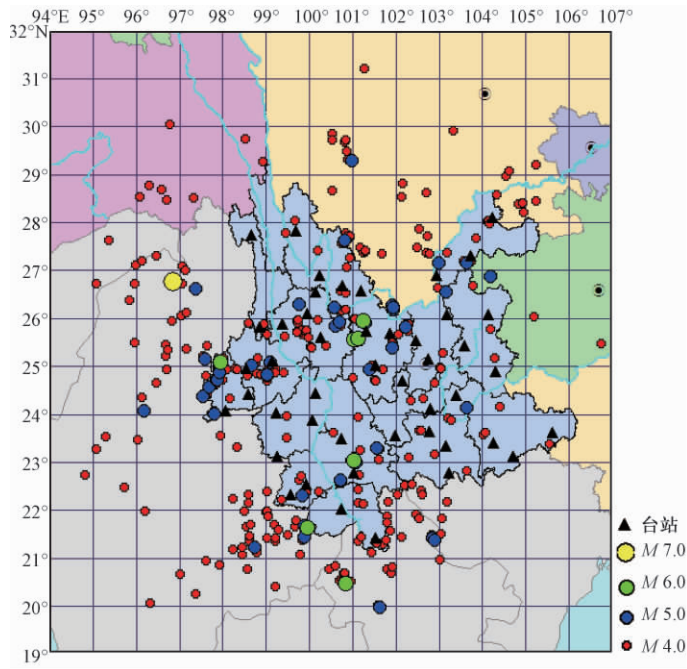


图1 所用地震的震中分布图

以上两种震级的适用范围各有侧重, M_s 多用于破坏性地震($M_s \geq 4.7$), 由中、长周期宽频带记录仪(SK和DK-1)测定, 震中距 $> 200\text{km}$; 而 M_L 多用于小地震($M_s < 4.7$), 由短周期地震仪(DD-1)记录测定, 震中距 $< 1000\text{km}$ (汪素云等, 2010)。

由数字记录波形来测定仿真震级时, 近震震级 M_L 使用仿真短周期位移记录(DD-1)的S波(或 L_g 波)的最大振幅来测定; 面波震级 M_s 由数字地震记录仿真成中周期宽频带地震仪(SK)来测定。

经重新测定后获得仿真 M_L 426 个、仿真 M_s 415 个, 共 941 个震级。表 1 为重新测量震级统计。

表 1 重新测量震级统计

年份	$M_L \geq 4.0$ 地震总数	重新测量震级的地震个数	
		仿真 M_L	仿真 M_s
2000	40	36	37
2001	70	68	62
2002	26	26	26
2003	44	44	43
2004	39	38	37
2005	25	25	25
2006	17	17	17
2007	38	38	36
2008	44	44	44
2009	37	37	37
2010	22	22	22
2011	31	31	29
合计	433	426	415

2 回归方法

本文采用线性回归和正交回归方法对云南地震台网测定的仿真 M_L 和 M_S 之间的关系进行了全面分析。

2.1 线性回归方法

对于两个或多个存在着统计相关的随机变量,可以根据大量的观测数据来确定它们之间的定量关系,进而用数学公式(即回归方程)来表达这种关系。考虑将 N 个数据点 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, 3, \dots, N$, 拟合成如下直线模型的问题

$$Y = AX + B \quad (3)$$

通常利用线性最小二乘回归(SR)方法就可以确定系数 A 和 B 。Gutenberg 等(1956a、1956b)采用 SR 方法给出了 M_S 和 M_L 之间的关系式。

SR 回归方法适用于一个变量产生的偏差比另一个变量产生的偏差大的情况。确定系数 A 和 B 拟合线性公式(3)有以下两种可能(Draper et al, 1998)

第一种可能的情况是

$$\text{SR}_1 \quad Y \leftarrow A_1 X + B_1 \quad (4)$$

适用的条件是 $\sigma_{xx}^2 \rightarrow 0$ 和 $\sigma_{yy}^2 > 0$, 其中 σ_{xx}^2 和 σ_{yy}^2 分别是 x 和 y 的方差。

第二种可能的情况是

$$\text{SR}_2 \quad Y \rightarrow A_2 X + B_2 \quad (5)$$

这种情况又称为反标准回归(Carroll et al, 1996), 它适用的条件是 $\sigma_{xx}^2 > 0$ 和 $\sigma_{yy}^2 \rightarrow 0$ 。

线性回归方法只考虑一个变量产生的偏差比另一个变量产生的偏差大, 因此对于线性回归关系不能使用等号, 这就是在公式(4)、(5)中不用等号而用箭头表述的原因。

2.2 正交回归方法

回归分析是研究事物间相关变量的数量关系的一种重要方法, 经典回归分析在不同领域已获得广泛应用。经典线性回归方法(最小二乘法)有一重要前提, 即假设自变量的值完全准确, 或其观测误差与因变量的观测误差相比可忽略不计。然而本文研究的是不同标准下震级之间的关系, 震级的测定存在一定误差, 故这一假定往往难以满足, 自变量和因变量同时存在观测误差。很明显, 此时经典的最小二乘法难以满足数据处理的需要, 而正交回归方法能够克服固定单方向最优带来的拟合稳定性差的弊端。因此, 利用正交回归方法分析震级之间的关系能获得较好结果。

采用正交回归方法拟合公式(3), 以 OR 表示正交回归方法, 则

$$\text{OR} \quad Y = A_3 X + B_3 \quad (6)$$

通常采用 Hesse 方法来表示正交回归(Carroll et al, 1996), 即把两个变量都放在等号的右边, 表示右边的两个变量都在变化, 即

$$P = n_x X + n_y Y \quad (7)$$

式中, $P = B_3/q$, $n_x = -A_3/q$, $n_y = 1/q$, $q = (1 + A_3^2)^{1/2}$, $-n_x/n_y = A_3$ 。

如果把上述关系应用于震级标度 M_x 和 M_y , 则 SR_1 适用于在 M_x 测量偏差较大的情况下对 M_y 产生的影响, 而 SR_2 适用于在 M_y 测量偏差较大的情况下对 M_x 产生的影响。然而,

我们知道所有的震级在测量时都有可能存在一定的误差,无论是 SR_1 还是 SR_2 都与实际的震级测定情况有一定的差别,因此从理论上讲用正交回归方法研究各种震级标度之间的关系应当更能接近实际的震级测定 (Madansky, 1959; Fuller, 1987; Carroll et al, 1996; 刘瑞丰等, 2007)。作为比较,本文分别给出了用 SR_1 、 SR_2 和 OR 方法得到的不同震级标度之间的关系式,但在对结果的分析 and 结论中则主要依据用 OR 方法得出的拟合关系式。

3 M_L 和 M_S 的转换关系

用一般线性回归方法 (SR_1 和 SR_2) 和正交回归方法 (OR) 分别对 M_L 和 M_S 之间的关系进行了回归分析与对比,所得到的回归关系如表 2 所示。表 2 中 RMS 表示均方根,相应的回归直线如图 2 所示。

表 1 M_L 和 M_S 的关系

震级	地震数量	震级范围	回归方法	关系式	RMS
$M_L - M_S$	402	$3.3 \leq M_S \leq 6.5$	SR_1	$M_S \leftarrow 1.04M_L - 0.43$	± 0.20
			SR_2	$M_S \rightarrow 1.21M_L - 1.22$	± 0.18
			OR	$M_S = 1.13M_L - 0.86$	± 0.14

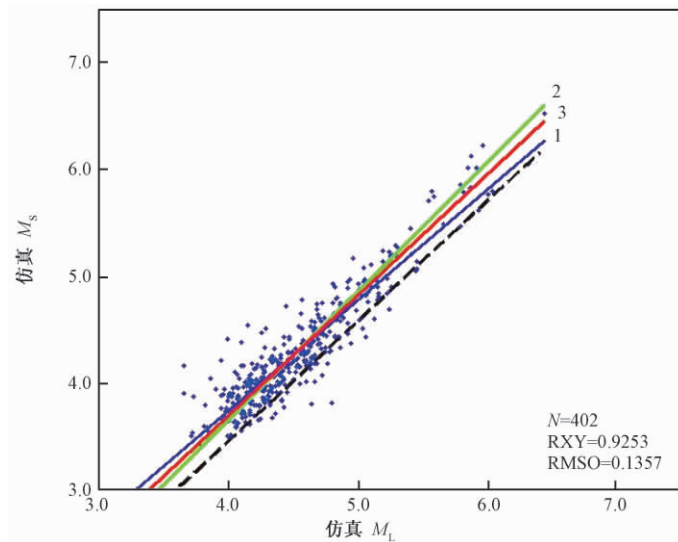


图 2 M_L 和 M_S 震级之间的关系

直线 1 为 SR_1 线性回归结果;直线 2 为 SR_2 线性回归结果;直线 3 为 OR 正交回归结果; N 为地震数, RXY 是正交回归的相关系数, $RMSO$ 是正交回归的均方根;虚线为“郭履灿转换关系”

用作回归分析的资料是云南地区数字地震台站记录的云南及周边地区 2000 ~ 2011 年的 402 次地震的资料,重新测定震级范围是 $3.3 \leq M_S \leq 6.5$ 。由图 2 可以看出,由正交回归 (OR) 得到的 M_L 与 M_S 关系直线 3 在线性回归 (SR_1 和 SR_2) 得到的直线 1 和 2 中间。

由正交回归方法 (OR) 得到的结果为

$$M_S = 1.13M_L - 0.86 \quad (8)$$

郭履灿^①通过研究华北地区的地方性震级 M_L 和面波震级 M_S , 得到的 M_L 和 M_S 间的经验公式为

$$M_S = 1.13M_L - 1.08 \quad (9)$$

我们把用式(9)转换所得 M_S 称为 $M_{S郭}$, 它与仿真后实测所得 $M_{S实测}$ 之间有一差值, 差值分布见图3。由图3可看出, 绝大多数地震的 $M_{S实测}$ 与 $M_{S郭}$ 差值为 $0.0 \sim 0.4$, 以差值为 0.2 的地震数量最多。

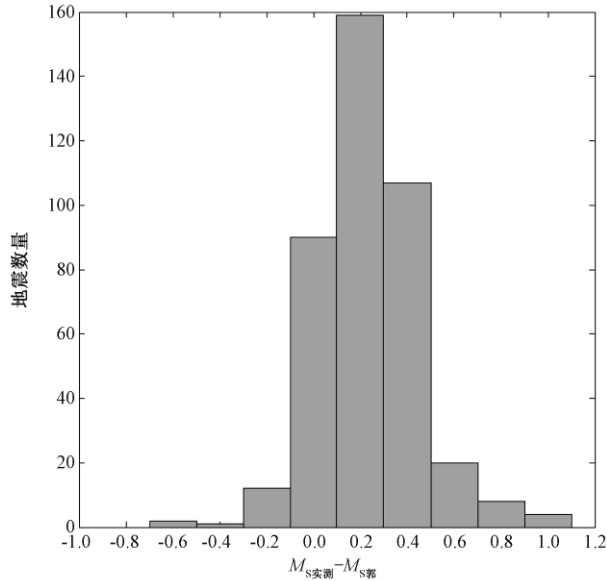


图3 $M_{S实测}$ 和 $M_{S郭}$ 差值分布图

同时, 我们把式(8)称为“云南区域转换公式”, 式(9)称为“郭履灿转换公式”, 从式(8)、(9)得到的结果见表3。对比两个关系式, 可看出, 两者有极大相似性, 但由于区域的差异性, 两者间又明显存在一个系统偏差, 云南地区由 M_L 转换而来的 M_S 值, 明显高于用“郭履灿转换公式”得到 $M_{S郭}$ 值, 平均差值为 0.2 。因此, 在研究工作中, 推荐使用(8)式, 而不再使用(9)式。

表3

M_L 和 M_S 对照表

M_L	云南区域转换公式	郭履灿转换公式	$M_S - M_{S郭}$
	M_S	$M_{S郭}$	
3.5	3.1	2.9	0.2
4.0	3.7	3.4	0.2
4.5	4.2	4.0	0.2
5.0	4.8	4.6	0.2
5.5	5.4	5.1	0.2
6.0	5.9	5.7	0.2
6.5	6.5	6.3	0.2
7.0	7.1	6.8	0.2

4 云南台网与国家台网测定震级比较

为了更好地对云南台网和国家台网测定的震级进行比较,分别选用经过仿真后且云南台网和国家台网同时有记录的 393 个 M_L 数据与 337 个 M_S 数据作对比,震级差值分布见图(4)。

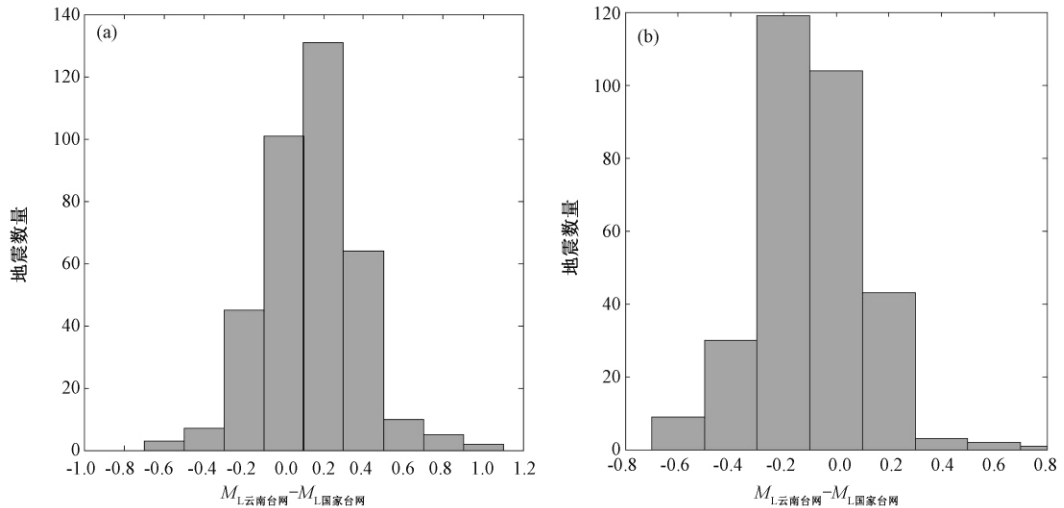


图4 云南台网和国家台网震级差值分布图

由图4(a)可见,对于绝大多数地震云南台网和国家台网 M_L 差值为 $-0.2 \sim 0.4$,以差值为 0.2 的地震数量最多;由图4(b)可见,对于绝大多数地震两者 M_S 差值为 $-0.4 \sim 0.2$,以差值为 -0.2 的地震数最多。即对于 M_L 震级,云南台网多数比国家台网测定值大;而对于 M_S ,云南台网在多数情况下比国家台网测定值小,差值均以 0.2 居多。对于发生在云南及周边地区的地震,相对于云南台网,国家台网震中距 $> 200\text{km}$ 的远台较多,面波发育,利于 M_S 的测量。也就是说,由于 M_S 的测定是用面波,面波在震中距 $> 200\text{km}$ 时才出现,对于较大地震面波也才发育,小地震是测不准面波震级的。因此,震级较大(如5级)时国家台网测定的面波震级应该比区域台网准确;而对于小地震,区域台网测得的 M_L 应该比国家台网更准确。为了更好地进行比较,再分别选用经过仿真后且云南台网 M_L 和国家台网 M_S 同时有记录的 283 个地震数据做对比,结果见图5。由正交回归方法(OR)得到的结果即式(10)用于云南台网与国家台网间震级换算应该较为合理

$$M_{S\text{国家}} = 1.18M_{L\text{云南}} - 0.86 \quad (10)$$

5 结论

本文利用云南地区数字地震台站记录的云南及周边地区 2000~2011 年 4.0 级以上、且同时具有测定近震震级 M_L 和面波震级 M_S 的地震波形数据,将速度数据进行仿真,对 M_L 和 M_S 全部重新人工测定,并分别用线性回归(SR_1 和 SR_2)和正交回归(OR)等 3 种方法,对 M_L 和 M_S 之间关系进行回归对比分析,得到了经验关系式。通过对正交回归结果的分析,得到

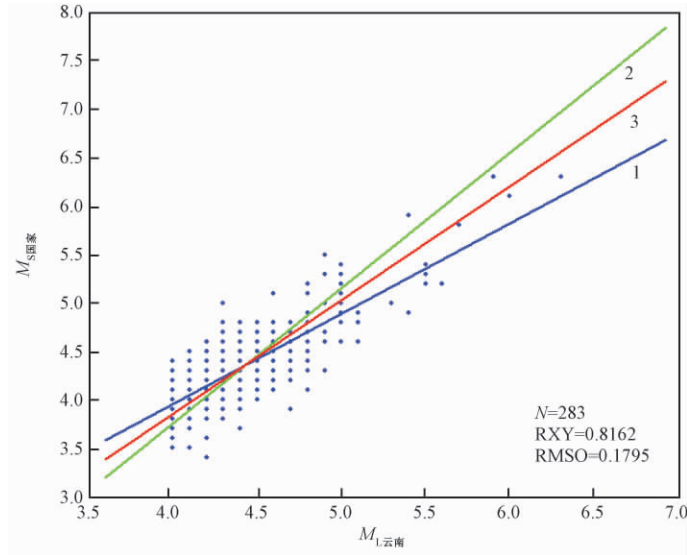


图5 国家台网测定的 M_S 和云南台网测定的 M_L 之间的关系

直线1为SR1线性回归结果;直线2为SR2线性回归结果;直线3为OR正交回归结果; N 为地震数, RXY 是正交回归的相关系数, $RMSO$ 是正交回归的均方根

以下结论:

(1) 云南地区绝大多数地震的仿真实测 M_S , 与用“郭履灿转换公式”得到的 M_S 差值为 $0.0 \sim 0.4$, 差值为 0.2 的地震数量最多。

(2) 云南地区 M_L 和 M_S 之间的转换关系为: $M_S = 1.13M_L - 0.86$, 与“郭履灿转换公式” $M_S = 1.13M_L - 1.08$ 进行对比可看出, 两者有极大相似性, 但由于区域的差异性, 两者间又明显存在系统偏差。云南地区由 M_L 转换出的 M_S 值, 明显高于用“郭履灿转换公式”得到的 M_S 值, 平均差值为 0.2 。在研究工作中, 推荐使用 $M_S = 1.13M_L - 0.86$, 因为它更合理适用, 而不再使用“郭履灿转换公式”。

(3) 对于绝大多数地震, 云南台网和国家台网测定的 M_L 差值为 $-0.2 \sim 0.4$, 差值为 0.2 的地震数量最多, 而 M_S 差值为 $-0.4 \sim 0.2$, 差值为 -0.2 的地震数量最多。即对于 M_L 而言, 大多情况下云南台网比国家台网测定值大; 而对于 M_S , 多数情况下云南台网比国家台网测定值小, 差值均以 0.2 居多。国家台网测定的 M_S 和云南台网测定的 M_L 间经验关系为: $M_{S\text{国家}} = 1.18M_{L\text{云南}} - 0.86$ 。

致谢:衷心感谢中国地震台网中心刘瑞丰研究员、河北省地震局高景春研究员和云南省地震局颜其中研究员对本研究给予的指导和帮助。

参考文献

- 陈运泰、刘瑞丰, 2004, 地震的震级, 地震地磁观测与研究, **25**(6), 1~12。
 陈运泰、吴忠良、王培德等, 2000, 数字地震学, 1~30, 北京: 地震出版社。
 郭履灿、庞明虎, 1981, 面波震级和它的台基校正值, 地震学报, **3**(3), 312~320。

刘瑞丰, 2003, 地震参数, 7 ~ 15, 北京: 地震出版社。

刘瑞丰、陈运泰、Peter Bormann 等, 2006, 中国地震台网与美国地震台网测定震级的对比: II. 面波震级, 地震学报, **28**(1), 1 ~ 7。

刘瑞丰、陈运泰、任泉等, 2007, 中国地震台网震级的对比, 地震学报, **29**(5), 467 ~ 476。

汪素云、王健、俞言祥等, 2010, 基于中国地震台网观测报告的 M_L 与 M_S 经验关系, 中国地震, **26**(1), 14 ~ 22。

Carroll R I, Ruppert D, 1996, The use and misuse of orthogonal regression in linear errors-in-variables models, The American Statistician, **50**(1), 1 ~ 6。

Draper N R, Smith H, 1998, Applied Regression Analysis, New York: John Wiley & Sons: 100 ~ 125。

Fulier W A, 1987, Measurement Error Models, New York: John Wiley & Sons: 20 ~ 30。

Gutenberg B, Richter C F, 1956a, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, Bull Seism Soc Am, **46**, 105 ~ 145。

Gutenberg B, Richter C F, 1956b, Magnitude and energy of earthquakes, Annali di Geofisica, **91**, 1 ~ 15。

Madansky A, 1959, The fitting of straight lines when both variables are subject to error, J Amer Statist Assoc, **54**, 173 ~ 205。

Study on the M_L and M_S of conversation in the Yunnan Regional Digital Networks

Yang Jingqiong Yang Zhousheng Cai Mingjun Xu Yaji Liang Yong

Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

Abstract Seismic station records of $M \geq 4.0$ earthquakes in the Yunnan Regional Digital Networks in 2000 ~ 2011 were used to determine near earthquake magnitude M_L and wave magnitude M_S of 433 earthquake waveform data. The speed data were simulated: near earthquake magnitude M_L was simulated in terms of short cycle seismographs by DD-1 records, and surface wave magnitude M_S in terms of the long cycle seismographs by SK records. All the M_L and M_S data were then man-checked with linear regression and orthogonal regression and obtain the conversion formula between them. Results showed that the formula $M_S = 1.13M_L - 1.08$ used since the 1970s may cause problems when applied to the Yunnan region. The adjusted formula of $M_S = 1.13M_L - 0.86$ is more applicable as the new conversion relationship. Meanwhile, the comparison between the recorded data from Yunnan seismic network and the national seismic network shows the M_L difference of $-0.2 \sim 0.4$ in most of these data with 0.2 as the majority and M_S difference between $-0.4 \sim 0.2$ with -0.2 as the majority.

Key words: Magnitude determination Surface-wave magnitude M_S Local earthquake magnitude M_L Conversion formula