

中南五省地区

Lg波衰减及震级公式

姚 宏

李永勤 徐元耀 鲁忠良 黄才中

(广西地震办公室)

(江苏省地震局)

提要 选取桂、粤、湘、赣、闽五省及其附近地区16个地震31个台站的DD—1短周期地震仪记录资料,用综合回归分析法测定了Lg波传播速度为3.54Kmls,约1秒Lg波埃里相滞弹性衰减系数为 $r=0.0022\pm0.0001\text{Km}^{-1}$,并导出五省地区的Lg震级公式:

$$m_{lg} = LgA_{mxh} + q_s(\Delta) + D_{mh}$$

$$q_s(\Delta) = 5/6 Lg\Delta + 0.00096\Delta + 1.88$$

计算了该区域内16个地震的各震级值,以及31个台站的台校值,单台震级标准差为0.1S~0.15震级单位,台网震级标准差为0.02~0.03震级单位。

一、引 言

众所周知,在大陆近震距离的短周期地震仪记录图上,清楚地记录到一组波群,其振幅最大、持续时间最长、负载能量最大,群速度约3.5Km/S,具有明显剪切型振动特征的震相,它即为Lg波。由于历史上的原因,在我国一般称之为S震相。

地面振动引起建筑物破坏频率通常在1到10赫兹范围,因此,研究波在这频率范围里的衰减是很重要的。区域性Lg波空间衰减的研究,对于传播介质、震级、工程地震等工作都具有重要的现实意义。

1967年Baker提出了Lg震级,随后,Nuttli⁽¹⁾用Lg波振幅同理论衰减曲线拟合的方法,估算了北美东部滞弹性衰减系数 r 值为 0.0006km^{-1} ,并给出了北美东部约1秒的Lg震级公式 m_b 。street(1976)对美国东北部做了类似研究,求出的 r 值是 0.001Km^{-1} 。Herrmann和Nuttij(1982)⁽²⁾导出了Lg震级的普遍公式,并对Lg震级基准作了定义,在震中距10Km处,对于 $m_{blg}=5.0$ 的地震, $T=1.0\pm0.2\text{S}$ 的地动振幅为115 μm 。指出美国西部地区在3—5级范围内,有 $M_L(S,C)=m_{blg}$ 。

葛焕称等(1983)⁽³⁾根据最小二乘原理导出的综合回归分析法,初步测定江苏及附近地区约1秒的Lg波衰减系数,后来(1986)^(4,5,6)他们进一步研究得出中国东部七省(苏、鲁、豫、皖、冀、浙、鄂)三市(京、津、沪)约1秒Lg波滞弹性衰减系数为 $r=0.0034\pm0.0001\text{km}^{-1}$,并建立了中国东部 m_{lg} 震级标度。该标度定义了使用最大振幅测定 m_{lg} 震级,既保持了与全球任何地区 m_{lg} 的震级基准点,又能在较长的距离区间,较宽的震级范围与我

国传统的 M_L (ECH)一致。本文根据上述类似研究方法,选用华南五省及邻近地区的DD—1短周期地震仪记录资料,确定该地区约1秒Lg波衰减系数,建立中国南部五省地区 m_{Lg} 震级标度。

二、Lg振幅衰减及震级公式

为了确定观测振幅随距离的减小, Nuttli (1973)^[1]指出,高阶型短周期面波埃里相,在时间域内,确定周期和地动振幅,满足下列关系:

$$A = A_0 \Delta^{-5/6} \exp(-r\Delta) \quad (1)$$

这里, A_0 是源振幅,依赖于频率; Δ 是震中距,以公里为单位; r 为介质的滞弹性衰减系数; $\exp(-r\Delta)$ 表示由于介质的滞弹性引起的依赖于频率 f 的吸收; $\Delta^{-5/6}$ 为频散及几何扩散项。 r 与介质的品质因子 Q 有如下关系:

$$r = \frac{\pi f}{Qu} \quad (2)$$

U 为Lg波群速度。一般由于 $r \ll 1$,故 A_0 等于在 $\Delta = 1$ km处Lg波的振幅,可作为源振幅。令 $A^* = A\Delta^{5/6}$,则(1)式可化为如下形式:

$$A^* = A_0 \exp(-r\Delta) \quad (3)$$

上式两端取自然对数,则有

$$\ln A^* = -r\Delta + C \quad (4)$$

这里, $C = \ln A_0$,对于某个地震为常数。(4)式即表示斜率为 $-r$ 的直线方程,若对于一个地震,有多个台Lg振幅数据,则可以用(4)式进行直线拟合,其斜率即为所求Lg波滞弹性衰减系数。Herrmann和Nuttli(1982)^[2]就是采用的这种方法,称“单震多台”法^[4]。

对于发生在某地区的 N 个地震, C 值将随地震而变化,假定该区域内的 r 值分布是均匀的,且不随时间变化,方程(4)则可写成:

$$\ln A^* = -r\Delta + C_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

上式表示 N 条截距不同的平行回归直线,共同的斜率为 $-r$, C_i 为各直线的纵截距,代表源谱激发水平。葛焕称等^[3]导出了综合回归的数学分析方法,可很容易地求得该方程组的解。该方法可称“多震多台”法^[4]。

Herrmann和kijko (1983)^[2]给出全球统一的Lg震级公式可写成下列形式:

$$m_{Lg}(f) = \lg A_{Lg} + \frac{5}{6} \lg \Delta + 0.4343r\Delta + 2.10 + D_{ms} \quad (6)$$

这里, A_{Lg} 为竖直向 Lg 波最大持续振幅(以微米为单位); Δ 为震中距(km); r (km^{-1})为频率 f 的函数; D_{ms} 为竖直向台校值。上式亦可通过葛焕称(1987)^[3]给出的Lg震级公式(1)和(2),令 $\eta = 1/3$ 取得。

三、资料选取和振幅测量

选取了1986至1987年间发生在桂、粤、湘、赣、闽及其邻近地区的16个地震和五省区内记录得较好的31个台站记录资料。

为了较准确地辨认Lg相及保证选用地震基本参数的可靠,在测量各震相振幅之前,对31个台记录到的16个地震共264组Lg波走时数据进行了综合回归计算,得到Lg波传播速度为3.54km/s,走时单台观测值标准差为2.0秒。该速度值与Bath(1954)测定欧亚大陆的Lg₁及葛焕称等(1986)^[6]测定中国东部六省区的Lg速度值完全一致。此外,测量了747组MAX到时数据,回归得到MAX的平均群速度为3.33km/s,速度标准差为0.15km/s。与Bath(1954)测定的Lg₂群速度3.37km/s相近,与中国东部地区 $V_{max}=3.27\text{km/s}$ 稍有差别。

地震选取的标准是在该区内有尽可能多的台站记录到,且地理分布均匀。图1为本文所选16个地震震中及31个台站位置分布情况。地震震级约在2.9~4.2级之间,一个地震的记录台数大多数在10个以上,平均为13,震中距在68~1069km之间,平均为545km。

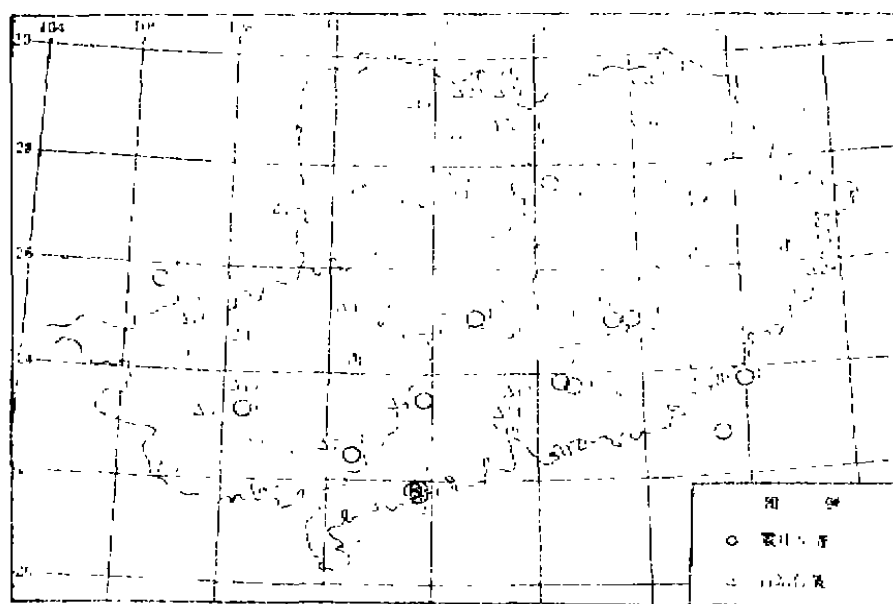


图1 中国南部五省地区31个台站和16个地震分布图

Fig. 1 Distribution of 16 earthquakes and 31 stations in the five southern provinces of China

除个别熏烟记录资料外,基本上全部采用三分向DD—1型短周期笔绘记录地震仪记录资料。使用统计归一化幅频特性值将记录振幅换算为地动位移。归一化幅频特性由统计五省区内187台DD—1仪(每一分向作为一台)实测放大倍率得到,结果列于表2。与葛焕称等^[4]统计的苏、鲁、豫、皖、冀、浙及姚宏^[8]统计的广西地区DD—1仪幅频特性值也是一致的。

在三分向DD—1记录地震图上,分别量取Lg波最大持续振幅(maximum sustained

表1 桂、粤、湘、闽、赣DD—1短周期地震仪统计频率特性

Table 1 The characteristics of statistical amplitude-frequency for DD—1 short period seismograph in the five southern provinces of China

T(S)	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
N	178	187	187	187	187	187	187	184	187
u	0.951	1.201	1.219	1.223	1.240	1.257	1.270	1.268	1.221
S、D	0.120	0.089	0.060	0.051	0.045	0.059	0.037	0.054	0.028

0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0
184		187	184	184	184	187	184	186
1.133	1	0.703	0.470	0.318	0.224	0.157	0.076	0.041
0.026		0.020	0.017	0.017	0.031	0.013	0.009	0.006

amplitude)^{〔6〕}(以“LG”表示)及最大振幅(以“MAX”表示)。Nuttli对Lg最大持续振幅的定义为,在地震图上相应于Lg波群速度3.55km/s和3.30km/s处作两个时间标志,在这两个时间标志之间的Lg波第三大振幅,即称之为最大持续振幅。

Nuttli的这种振幅测量方法规定了群速度区间,保证了测量的振幅是属于Lg波;量取第三大而不是最大振幅,这就自然地排除了错误量取孤立特大振幅的可能性,持续振幅较为合理地代表了Lg波列的平均能量大小。但较难在地震常规分析中推广使用。根据葛焕称等^{〔6〕}最新研究结果认为,MAX可视为埃里相,LG和MAX相可使用相同传播模式,衰减系数相同,对实际应用带来了方便。

量图中,测量振幅的范围限制在2~85mm(双振幅),振幅过小,测量误差大,振幅过大,记录限幅,测量的振幅不可靠。有时,一些振幅表面看起来并未限幅,实际这时仪器已呈限幅状态。另外,如下列情况:Lg波群中突然出现的孤立特大振幅(如反射波、相干叠加等);在极个别情况下,P波振幅超过Lg振幅,以及在较大震中距上出现的较大周期的面波振幅,均不予以测量。

水平向振幅取NS和EW向振幅的算术平均值。对于LG和MAX相Z向和H向,分别以“LGZ”、“LGH”、“MXZ”、“MXH”表示,所测振幅周期在0.4~1.2秒之间,随震中距增加,周期逐渐变化。统计使用的平均周期为,Lg相 0.72 ± 0.16 S;MAX相 0.76 ± 0.18 S,因此可以看作约1秒左右的Lg波。采用数据:LGZ相204组;LGH相205组;MXZ相204组,MXH相205组。

四、计算r值与台校值

基本按文献〔4〕给出的原理方框图的步骤进行计算,不同之处,对最大振幅按埃里相处理,即一律取 $\eta = 1/3$ 。说明如下:

(1) 计算台站校正值。第j台 $\ln A^*$ 的校正值为:

$$U_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} U_{ij}}{N_j} \quad (7)$$

式中, U_{ij} 为第 j 台记录到第 i 个地震 $\ln A^*$ 的残差, 将 $(\ln A^* + U_{ij})$ 赋值给 $\ln A^*$, 作迭代, 直至前后两次迭代的 r 值基本稳定 (变化小于 5×10^{-5}) 为止。由于台校值仅与分向有关⁽⁴⁾, 取最后一次迭代的 $\lg z$ 与 $\lg h$, L_{gh} 与 m_{xh} 的 U_i 平均值 $U_i^{(z)}$ 和 $U_i^{(h)}$ 分别作为 Z 向和 H 向的台校值, 结果见表 2。

表 2 震级台基校正值 D_m

Table 2 The corrected value D_m of magnitude in 31 stations

台号	台 名	Z向		H向		地震仪	台 基 岩 性
		N_i	D_m	N_i	D_m		
1	邕 宁	4	-0.12	4	-0.12	DD-1	灰 岩
2	合 浦	7	0.13	7	0.06	DD-1	砂 岩
3	凭 祥	7	0.00	7	-0.04	DD-1	灰 岩
4	桂 林	4	0.19	4	0.22	DD-1	灰 岩
5	灵 山	7	0.18	7	0.10	DD-1	灰 岩
6	河 池	11	0.07	11	0.08	DD-1	灰 岩
7	玉 林	9	0.14	9	0.12	DD-1	灰 岩
8	梧 州	12	-0.00	12	-0.00	DD-1	花 岗 岩
9	平 果	10	-0.08	10	-0.01	DD-1	灰 岩
10	大 化	6	-0.01	7	-0.03	DD-1	灰 岩
11	天 峨	11	0.04	11	0.07	DD-1	灰 岩
12	韶 关	1	(-0.27)	1	(-0.28)	64型	石英砂岩
13	从 化	1	(-0.45)	1	(-0.45)	DD-1	花 岗 岩
14	广 州	6	-0.20	6	-0.15	DD-1	砂 岩
15	琼 中	2	(0.25)	2	(0.32)	DD-1	花岗砂粒岩
16	番 禺	9	-0.18	8	-0.07	DD-1	(待 定)
17	益 阳	9	-0.14	9	-0.21	DD-1	板 岩
18	邵 阳	14	-0.10	14	0.06	DD-1	灰 岩
19	常 德	10	0.10	10	0.05	DD-1	灰 岩
20	华 容	4	0.07	4	0.14	DD-1	花 岗 岩
21	灰 汤	5	0.10	5	0.13	DD-1	花 岗 岩
22	汨 罗	3	(0.09)	3	(0.06)	DD-1	页 岩
23	茶 陵	14	-0.10	14	-0.12	DD-1	砂 岩
24	岳 阳	6	-0.01	6	0.04	DD-1	片 岩
25	莆 田	1	(-0.25)	1	(0.23)	D73	花 岗 岩
26	南 平	6	0.09	6	-0.03	DD-1	绢云母板岩
27	邵 武	4	-0.03	4	0.03	DD-1	花 岗 岩
28	平 潭	4	0.18	4	0.12	DD-1	花 岗 岩
29	南 昌	7	0.03	7	0.05	DD-1	闪长花岗岩
30	会 昌	3	(0.03)	3	(0.08)	DD-1	花 岗 岩
31	九 江	8	-0.03	8	-0.28	DD-1	硅 质 岩

注: 记录地震数 ≤ 3 的计算结果加括号引出, 仅作参考。

(2) 确定 r 值。去掉记录地震数 ≤ 3 或台校值误差极大的台, 然后对 lgz 、 lgh 、 mz 、 mz_h 分别按: ①加台校值 Dmz 和 Dm_h , 进行一次(不迭代)综合回归; ②根据加权原则^[4]以50km为一区间, $\Delta=50\sim 1100$ km加权综合回归。因此, 每个震相可得到2个 r 值(表3), 四个震相共8组 r 值均很接近, 偏差在误差范围内, 最后我们取平均值 $r=0.0022\pm 0.0001\text{km}^{-1}$ 作为综合结果。

表3 r 值——综合回归结果
Table 3 Synthetic regression results of r -value

r (10^{-3}km^{-1})		不加权	加 权	综 合
	LGZ	2.16 ± 0.16	2.16 ± 0.14	2.2 ± 0.1
	LGH	2.07 ± 0.14	2.12 ± 0.13	
	MXZ	2.25 ± 0.16	2.25 ± 0.16	
	MXH	2.21 ± 0.14	2.27 ± 0.13	

五、中国南部五省及邻近地区Lg振幅比与震级公式

将中国南部五省地区Lg波 r 值代入(6)式即可得到适合该地区的约1秒的Lg波 mlg 公式, 表示为:

$$mlg = \lg A_{Lg} + 6/5 \lg \Delta + 0.00096\Delta + 2.10 + Dmz \quad (8)$$

为了能用其它振幅测定 mlg , 我们对各种振幅进行了振幅比统计, 根据统计结果*取各类台平均有: $\lg \frac{A_h}{A_z} = 0.07$ (9)

对某个台, 考虑台基校正有:

$$(\lg A_z + Dm_h) - (\lg A_z + Dm_h) = 0.07 \quad (10)$$

由(8)、(9)和(10)式可以得到分别由 A_{Lgh} 、 A_{mz} 和 A_{mz_h} 计算 mlg 的公式, 和 A_{mxh} 计算 mlg 的公式:

$$mlg(A_{Lgh}) = \lg A_{Lgh} + q_1(\Delta) + 0.15 + Dm_h \quad (11)$$

$$mlg(A_{mz}) = \lg A_{mz} + q_2(\Delta) + 0.07 + Dmz \quad (12)$$

$$mlg(A_{mxh}) = \lg A_{mxh} + q_3(\Delta) + Dm_h \quad (13)$$

这里震级校准函数

$$q_i(\Delta) = 5/6 \lg \Delta + 0.00096\Delta + 1.88 \quad (14)$$

一般认为, 约在震中距100km以外, 才形成典型的lg波^[6], 因此规定(8)和(11)式仅应用于100至1100km范围。

用(11)、(12)和(13)式计算的 mlg , 与(8)式计算的 mlg 之间一致性很好, 不存在系统偏差*。

* 因篇幅所限, 在此未刊出。

鉴于中国传统使用 A_{msb} 测定近震震级, 并且又与葛焕称等^[6]得出的东部六省 m_{lg} 公式保持一致, 故把 (13) 式作为实际应用的基本公式, 定义相应的震级校准函数 $q_s(\Delta)$ 。

图2绘出了 $q_E(\Delta)$ 、 $q_s(\Delta)$ 曲线和 $R_1(\Delta)$ 点子, 由图看出, $q_s(\Delta)$ 与 $R_1(\Delta)$ 有两个交汇点, $\Delta < 220\text{km}$ 时, $q_s(\Delta)$ 在 $R_1(\Delta)$ 上方; $220\text{km} < \Delta < 900\text{km}$ 时, $R_1(\Delta)$ 上升至 $q_s(\Delta)$ 上方, 平均约高出 0.2 震级单位, 当 $\Delta > 900\text{km}$ 时, $q_s(\Delta)$ 与 $R_1(\Delta)$ 基本吻合。因中国东部六省比南部五省 lg 波衰减系数大, $q_s(\Delta)$ 与 $q_E(\Delta)$ 随震中距的增加而偏离越来越大, $R_1(\Delta)$ 的点子离散较大, 不满足任何一地区 lg 波最大振幅的衰减规律。

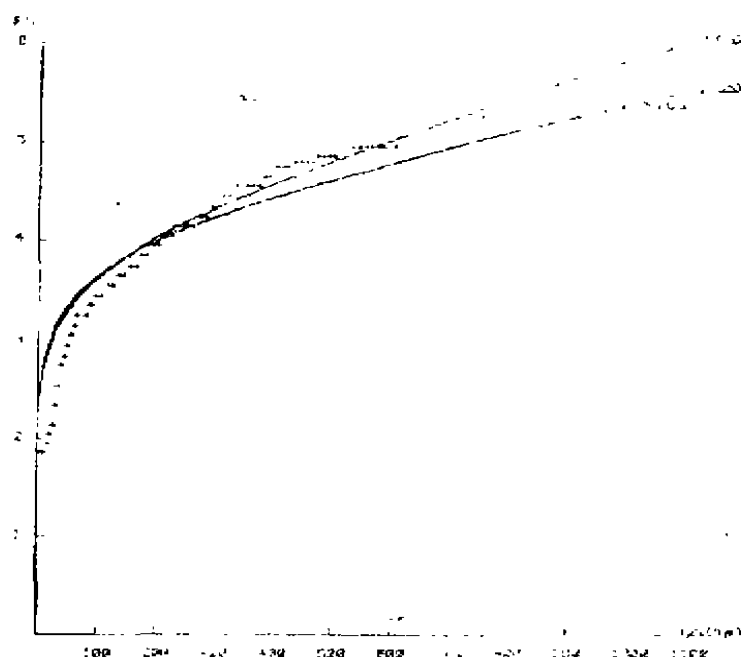


图2 $q_s(\Delta)$, $q_E(\Delta)$ 和 $R_1(\Delta)$ 曲线的比较
Fig. 2 Comparison of $q_s(\Delta)$, $q_E(\Delta)$ and $R_1(\Delta)$ curve

六、结果与讨论

1. Nuttli^[1]首先提出测定 r 值时, 采用了最大持续振幅, 建立的震级公式也就难以在实际中使用。葛焕称等 (1986)^[4,6]及本文研究结果表明: 可使用水平或竖直向 lg 波最大振幅、 lg 波群第三振幅等震相测定 r , 它们具有相同的传播模式及衰减系数, 对 LG 和 MAX 振幅分别采用 $u=3.5\text{km/s}$ 和 3.33km/s , $T=0.72$ 和 0.76s 利用 (2) 式计算得到 $Q=560$ 和 564 , 它们极为一致。中国东部类似结果分别为 $Q=408$ 和 398 ^[6], 从而进一步说明 LG 和 MAX 是在相同的地壳介质中传播的。使 lg 波震级的推广使用成为可能。中国南部五省及邻近地区约 1 秒 lg 波滞弹性衰减系数 (0.0022km^{-1}) 比中国东部六省地区 (0.0034km^{-1})^[6] 为低, 与法国地区 (0.002km^{-1}) 的相近。

2. 31 个台站震级校正值 D_m , 台校值与台基岩性有较大关系。本文未采用松散沉积台基的台站资料, 石灰岩台基的台站最多, 从统计平均值看, 灰岩 D_m 值在 0 左右, 若某灰岩台基 D_m 较大, 有可能该台基受侵蚀风化, 已变成较软的岩石, 或是使用了不准确的振幅数据测定 D_m 。

3. 16 个地震震级与标准差。本文给出 16 个地震的震级结果及相应震级标准差*, 全部均加台校值计算。另外还使用 16 个地震 31 个台的 A_{msb} 振幅, 分别计算了 m_{lg} 及 M_L 不加台校

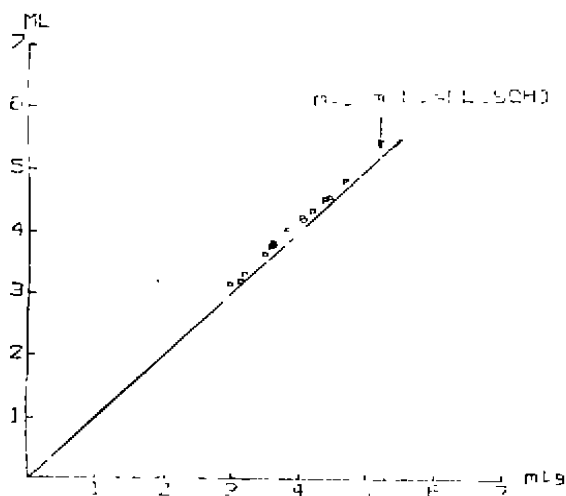


图3 16个地震的 mlg 与 M_L 关系曲线
Fig. 3 The relative curve between mLg and M_L for 16 seismic events

值与加台校值震级及相应震级标准差的变化,在计算16个地震的 M_L 震级时,一律取 $R_1(\Delta)$ 计算。我们发现,台校值对台网震级值影响不大,一般小于0.1级,平均0.0级。当加上台校值计算震级时, $mlg(mxh)$ 比 $M_L(SCH)$ 的平均标准差要小一些。

4. 中国南部五省 mlg 与 M_L 的关系。图3作出了16个地震 mlg 与 $M_L(SCH)$ 关系图,从图中看出, M_L 较 mlg 略大一些,但 mlg 基本上还是维持了原 $M_L(SCH)$ 的震级水平。

5. 台基岩性对振幅比的影响。根据不同岩性的台基分为三类统计*,发现全部花岗岩和片麻岩类的 H/Z 值均一致地偏小,10个台平均为 $lgH/Z=0.04$,与中国东部统计振幅比结果^[6]一致。

七、结 论

建立在原始 mlg 震级统一基准点上的中国南部五省 mlg 震级标度,(8)式是 mlg 的基本震级公式,(13)式可作为常规使用公式。便于与中国常规测量的 MXH 振幅资料相统一。若我们放弃 $M_L(SCH)$ 在100km处的基准点,采取10km处原始 mlg 的基准点,就能将中国近震震级 M_L 与全球 mlg 震级统一起来。事实上,葛焕称等^[6]及本文的研究结果均认为,这样做更加合理。因为它基本上可以消除在不同地区由于介质衰减的差异引起的自10至100km间波的传播产生的震级系统差。另外, mlg 与 M_s 或 m_b 标度更易于衔接。作台校值修正后, mlg 的单台测定精度达0.13~0.15震级单位。台网震级标准差为0.02~0.03。

本文在葛焕称同志指导下完成,倪岳伟同志完成了部分计算工作,蒋耀明同志作出了幅频性统计结果。广西、广东、湖南、江西及福建省地震局(办、台)为本工作提供了大量的地震资料,在此一并表示感谢。

本工作系地震学联合科学基金会部分资助的课题。

参 考 文 献

- (1) Nuttli, O. W. seismic wave attenuation and magnitude relation of Eastern North America, J. Geophys. Res. 78, 876—885, 1973.
- (2) Herrmann R. B. and O. W. Nuttli, Magnitude: The relation of M_L to M_{blg} . Bull. Seism. Soc. Am. vol. 72, No. 2, 389—397, 1982.
- (3) 葛焕称等,江苏及其邻近地区 Lg 波的衰减和 M_{lg} 的初步测定,地震地磁观测与研究, 4, 11—14,

1983.

- (4) 葛焕称等, 综合回归分析与中国东部六省地区Lg波衰减的测定, 地震学报, 8, 367—381, 1986.
- (5) 葛焕称等, 中国东部六省的Lg震级(上)——测定方法和结果, 地震学报, 9, 37—51, 1987.
- (6) 葛焕称等, Lg波振幅、振幅比、衰减系数和Mlg之间的关系, (待发表).
- (7) Herrmann R. B. and A. Kijko, shortperiod Lg magnitude: instrument, attenuation, and source effects, Bull. seism. soc. Am., 73, 1835—1850, 1983.
- (8) 姚宏, DD—1地震仪频率特性的利用, 地震地磁观测与研究, 6, 58—63, 1988.

LG WAVE ATTENUATION AND MAGNITUDE FORMULAS FOR THE FIVE SOUTHERN PROVINCES OF CHINA

Yao Hong

(Seismological Office of Guangxi Province)

Li Yongqin, Xu Yuanyao, Lu Zhongliang, Huang Caizhong

(Seismological Bureau of Jiangsu Province)

[Abstract] In this paper, the data of 16 earthquakes recorded by DD-1 short period seismograph at 31 seismologic stations in and near the five southern provinces of China are used. The Lg wave propagation velocity was determined to be 3.54 km/s by the synthetic regression method. The anelastic attenuation coefficient is found to be $0.0022 \pm 0.0001 \text{ km}^{-1}$ for 0.7s Lg Airy phase and the Lg magnitude formulas for this region are deduced as follows:

$$m_{Lg} = Lg A_{mxh} + qs(\Delta) + Dmh$$

$$\text{where, } qs(\Delta) = 5/6 Lg \Delta + 0.00096 \Delta + 1.88$$

The m_{Lg} -values of 16 events and 31 stations correction values are calculated accurately in the region. The standard deviation of single station magnitude is 0.13–0.15 magnitude unit, and that of seismograph network is 0.02–0.03 unit.