

用尾波的强度和衰减估算北京地区 *S* 波的平均自由程

高龙生 华正兴 李瑞瑄
(国家地震局地球物理研究所)

摘要

Aki 提出的单次散射模型由于它的简单而显得很实用。作为单次散射模型的改进，本文表明应用多次散射模型也可给出一个简单可行的办法来估算一定地区地下介质的不均匀性。本文分别用尾波的强度和衰减求出与散射有关的 Ω 因子。可以看到，尽管单次散射模型和多次散射模型两者给出了十分接近的结果，但后者显得更加合理并有其自相一致性。本文认为，无论运用哪个简化了的模型，方程 ($\ln A = \alpha_1 - \ln t - b_1 t$ 或 $\ln A = \alpha_2 - 0.5 \ln t - b_2 t$) 中的对数项是不可忽略的。本文应用北京地区地震台网资料，求出了频率在 1Hz 左右北京地区 *S* 波的平均自由程，结果见表 2。

关键词 地震波；尾波；衰减； Ω 值；散射

一、引言

自 Aki (1969)^[1] 提出地方震尾波是地下介质的不均匀体引起的散射波这样一种假设，对尾波的研究已在多方面取得进展，诸如对尾波产生机制的研究和应用尾波去发现震源及地下介质的某些参数等方面的研究。现已证实尾波主要是来自 *S* 波^[2]，并且，对较晚到达的尾波多次散射将比单次散射显得更重要^[3,4]。利用单次散射计算的简易性，许多学者，例如 Aki, Sato^[5], Herrmann^[6] 用此理论来处理尾波资料确实取得了不少成绩。本文则想在处理北京地区的资料的同时，比较一下两种不同模型给出的结果，并透析一下不同模型给出的不同解答的物理含义。

假定一定数量各向同性散射体随机均匀分布在地下三维弹性体内，高龙生等^[7] 导出尾波功率谱的表达式为

$$P(\omega/t) = \frac{2n_0\sigma S(\omega)e^{-\omega t/\Omega}}{Vt^2} (1 + 1.23n_0\sigma Vt e^{0.33n_0\sigma Vt}) \quad (1)$$

这里 n_0 为单位体积内散射体的平均密度； σ 表示散射体平均横截面； $S(\omega)$ 为震源函数，它可表示为 $S(\omega) = r_0^2 |\phi_0(\omega/t_0)|^2$ ，其中 r_0 表示参考距离； ϕ_0 为震源发射波包的振幅谱密度， $|\phi_0|^2$ 正比于通过单位面积的波动能量， V 表示波速， ω 为所考虑的角频率； t 为从震发时刻起算的尾波延续时间； Ω 为介质品质因素。

等式 (1) 由两部分组成，前一项为单次散射功率 $P_s(\omega/t)$ ，后一项为多次散射功率 $P_m(\omega/t)$ ，分别表示为

本文 1987 年 2 月 15 日收到。

$$P_s(\omega/t) = n_0 \sigma S(\omega) \frac{e^{-\omega t/Q}}{V t^2} \quad (2)$$

和

$$P_m(\omega/t) = 2.46(n_0 \sigma)^2 S(\omega) \frac{e^{(-\omega t/Q + 0.33 n_0 \sigma V t)}}{t} \quad (3)$$

考虑单次散射只包括了地表下半空间, 作为对单次散射模型的修正, 我们在这里已扣除了因子 2。在角频率 ω 附近的单位角频段上震源释放的能量 $W(\omega)$ 可写为

$$W(\omega) = 4\pi r_0^2 |\phi_0(\omega/r_0)|^2 \quad (4)$$

进一步, 运用下列等式 (Sato, 1977; Dainty, 1980)^[8,9]

$$n_0 \sigma = \frac{1}{L} \quad n_0 \sigma V = \frac{\omega}{Q_s} \quad (5)$$

及

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_s} \quad (6)$$

我们可把表达式 (2), (3) 写为

$$P_s(\omega/t) = \frac{W(\omega)}{4\pi L V} \cdot \frac{e^{-\omega t/Q}}{t^2} \quad (7)$$

$$P_m(\omega/t) = \frac{1.23 W(\omega)}{2\pi L^2} \cdot \frac{e^{-(\frac{\omega}{Q_i} + 0.67 \frac{\omega}{Q_s}) t}}{t} \quad (8)$$

或

$$P_m(\omega/t) = \frac{1.23 W(\omega)}{2\pi L^2} \cdot \frac{e^{-\omega t/Q^*}}{t}, \quad \frac{\omega}{Q^*} = \frac{\omega}{Q_i} + 0.67 \frac{\omega}{Q_s} \quad (9)$$

以上表达式中, L 表示平均自由程, Q_s 表示散射品质因素, Q_i 表示内耗吸收品质因素

Sato (1978)^[9] 提出, 台站接收到的地震能量密度可近似表达为 $\frac{3}{8} \rho A^2(t)$, 其中 ρ 为介质密度, 对地壳而言 ρ 取为 2.7 g/cm^3 ; $A(t)$ 为给定时刻波的平均双振幅, 因此, 尾波功率作为在单位时间和单位面积上的能流可近似为

$$P(t) = \frac{3}{8} \rho A^2(t) V \quad (10)$$

这里 V 是波速, S 波速取为 3.5 km/s .

从式 (7), (8) 和 (10), 可分别得到两种不同模型的表达式, 对单次散射模型有:

$$A^2(t) = \frac{2W}{3\pi\rho L V^2} \cdot \frac{e^{-\omega t/Q}}{t^2} \quad (11)$$

对多次散射模型有:

$$A^2(t) = \frac{4.92 W}{3\pi\rho L^2 V} \cdot \frac{e^{-(\frac{\omega}{Q_i} + 0.67 \frac{\omega}{Q_s}) t}}{t} \quad (12)$$

分别对式 (11), (12) 两边取对数, 可得

$$\ln A(t) = a_1 - \ln t - b_1 t \quad (13)$$

和

$$\ln A(t) = a_2 - 0.5 \ln t - b_2 t \quad (14)$$

其中

$$a_1 = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{2}{3\pi V^2 \rho} + \ln W - \ln L \right) \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{4.92}{3\pi V \rho} + \ln W \right) - \ln L \quad (16)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \frac{\omega}{Q} \quad (17)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{Q_i} + 0.67 \frac{\omega}{Q_s} \right) \quad (18)$$

这里值得注意的是, b_1, b_2 只有 10^{-2} — 10^{-3} 这个量级, 所以尽管式 (13), (14) 中的第二项对时间 t 取了对数, 但其系数达 0.5 和 1, 故此项在最小二乘拟合中对结果具有十分重要的影响, 不可忽略。

本文使用北京台网的记录资料, 并以此为例, 对使用两种不同模型求出的有关介质区域性衰减参数进行比较, 并对它们在特定条件下为何具有如此接近的结果作一些内在物理原因的分析。

因受资料来源的限制, 在现阶段我们只能使用宽带记录地震图, 尽管这种记录不够理想, 但对计算结果的可靠性仍是可以充分肯定的。

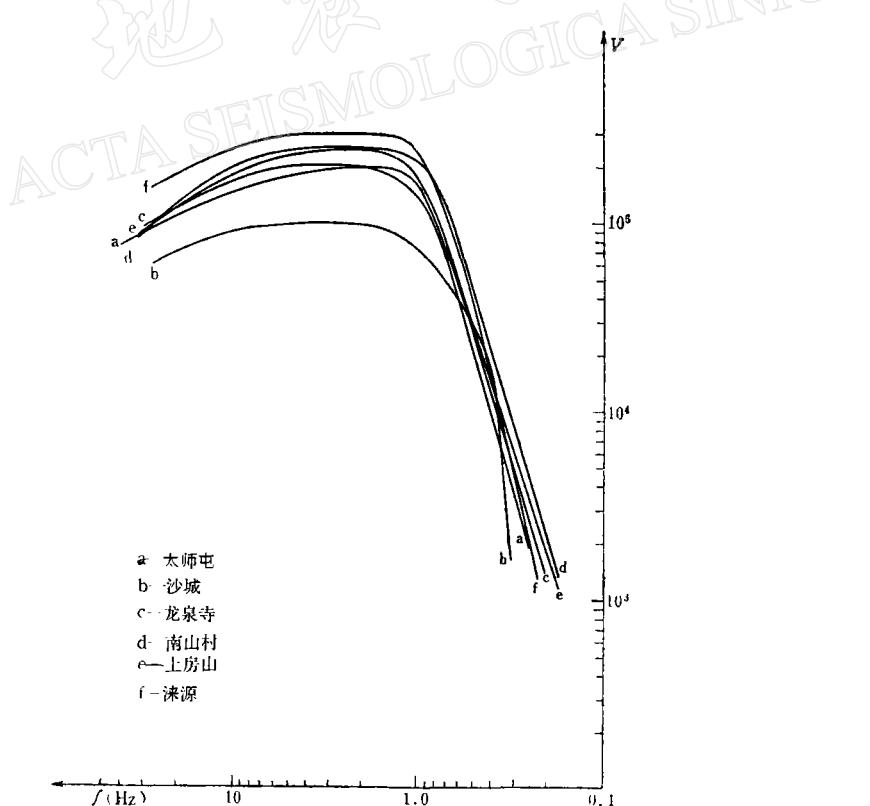


图 1 台站仪器的频响曲线

Response curves of Selected Stations within the Beijing Seismic Network.

二、资料处理

选用资料来自北京地震台网的部分台站，台网各站的地震信号用电话线传输至北京三里河记录中心。自 1979 年以来，除沙城台因台基较差外，整个台网进行了仪器归范化工作。各站使用的都是 DD-1 型墨水笔绘记录仪，仪器固有频率为 10 Hz，它配有自振周期 $T_0 = 1\text{ s}$ 的 DS-1 型摆。图 1 显示了选用台站的仪器频响曲线。

本工作使用的资料大部选自 1979 年以后的地震记录，少量的也选用了 1977 年以来的资料。表 1 列出了地震清单，参数引自北京地震台网观测报告。图 2 为台站地理位置和震中分布图。尾波，作为非均匀介质中随机分布的非均匀体的散射波，是一种统计现象的结果。同时地球中相对较深的界面也会反射一些波掺杂其中。因此，尾波包络线的起伏是不可避免的。作为统计现象来处理，这种起伏是应予忽略的。因此，在处理资料时，我们首先对尾波包络进行平滑处理，以消除尖脉冲的影响。考虑公式推导时的一些近似条件采用 $2(t_s - t_0)$ 为尾波起始，其中 t_s 为 S 波到时， t_0 为地震的发展时刻，取时间间隔 10s—20s（其间一般含 10 个周期的波列），量出尾波峰峰值的平均值。

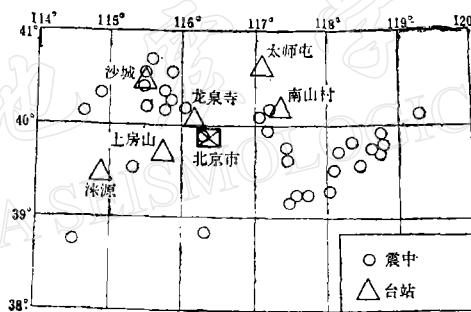


图 2 台站与震中地理分布图
Geographical distribution of selected stations and epicenters.

三、尾波包络衰减计算结果

为检验北京地区地震台网不同台站尾波衰减特征的一致性，对同一地震 ($M_L = 4.4$, 1981.9.6) 分别测量了各台的尾波振幅衰减，并将振幅放大倍数全部归一至 2×10^5 倍。由图 3 可见，记录到的尾波反映了整个台网的区域特征而不只是单个台站的。唯一例外的是沙城台，因它的台基地质条件稍差于其他台，地震仪的放大倍数只限于 10^5 以下，是其他台的一半。

由表 1 可见，震级愈大，台站间尾波衰减特征一致性愈好。例如，对较大的地震 ($M_L = 5.6$, 1980.2.7)，台站间 b 值变化只有 0.0034，而对小一些的地震 ($M_L = 3.9$, 1980.2.28)， b 值的变化范围为 0.011，为前者的三倍。

可以看到，小地震的尾波比大地震的更易受小区域局部特征的影响。分别应用 (14) 式对六个站的尾波包络进行拟合，结果如图 4 所示。由图可看出，尾波衰减斜率因震级不同而有差异。基于 (13), (14) 式，用最小二乘法求出了参数 a_1 , a_2 , b_1 和 b_2 。它们一并与

采用地震的参数列在表 1 中。

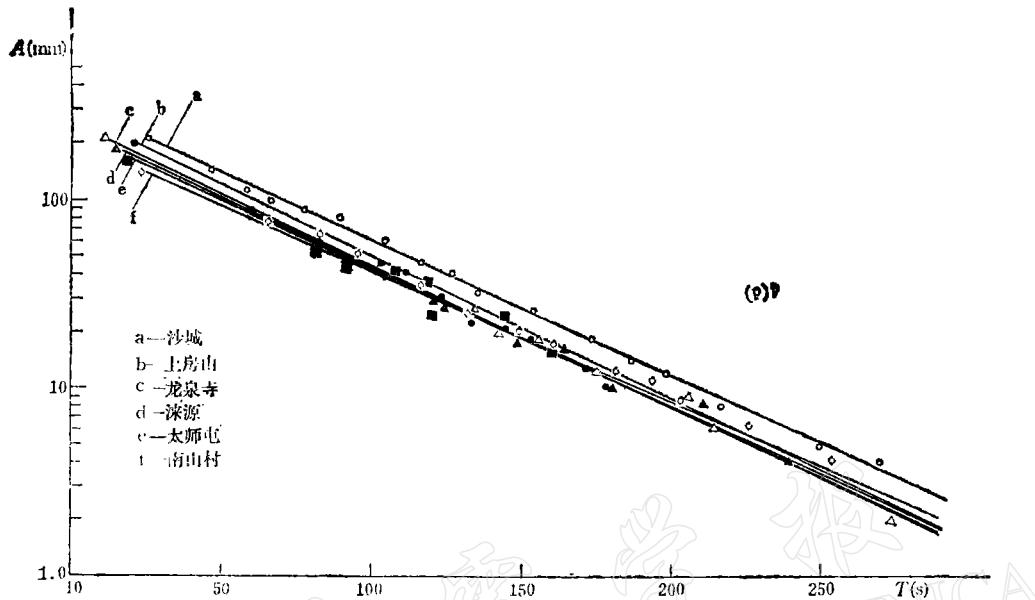


图 3 北京台网不同台站尾波衰减特征的比较

Comparison of decay features of coda among different stations within the Beijing Seismic Network.

图 5 显示了单次散射模型与多次散射模型 b 值与震级之间的关系, 用线性拟合的方法可分别得到以下表达式, 对单次散射有

$$\lg b_1 = -1.33 - 0.15M \quad 2.5 \leq M \leq 5.6 \quad (19)$$

对多次散射有

$$\lg b_2 = -1.04 - 0.189M \quad 2.5 \leq M \leq 5.6 \quad (20)$$

由于我们的资料来源于宽带记录系统, 因此不同震级的不同衰减特征可由它们优势频率的差异给以解释, 即地震震级愈大, 尾波延续时间愈长, 优势频率也就显得愈低。如图 6 所示。对北京地区, 优势频率与尾波延续时间有如下关系式:

$$\ln f_p = 2.93 - 0.54 \ln t \quad (21)$$

另外也得出了北京地区震级与尾波延续时间的关系式

$$M = 1.39 \ln t - 3.47 \quad (22)$$

由(19), (20), (21) 和 (22) 式可得如下 b 值与优势频率的表达式, 对单次散射模型

$$\lg b_1 = -1.94 + 0.89 \lg f \quad 0.6 < f < 1.6 \quad (23)$$

对多次散射模型

$$\lg b_2 = -1.81 + 1.12 \lg f \quad 0.6 < f < 1.6 \quad (24)$$

注意(23), (24) 式并不是一个普适的表达式, 而是用北京地区的资料拟合的式子。为使结果更明确, 按此二式在 0.6—1.6 Hz 间取若干频率值来求出相应的 b 值。再按(17), (18) 式可求出相应的 Q 值, 此结果列于表 2 的上半部分。其中 Q^+ 是一种等效 Q

表 1(a) 地震参数
Parameters of earthquakes and all the

| No. | 发震时刻 | | 震中 | | 震级 (M _L) | 沙城 | | |
|-----|------------|------------|--------------|--------------|-------------------------|-------|-------|--|
| | 年·月·日 | h·m·s | $\varphi(N)$ | $\lambda(E)$ | | a_2 | b_2 | |
| | | | | | | a_2 | b_2 | |
| 1 | 1980. 2. 7 | 13-31-30.7 | 39°26' | 118° 2' | 5.6 | -1.05 | 0.88 | |
| 2 | 1983. 4. 3 | 10-16-30.0 | 40°45' | 114°47' | 5.1 | -1.93 | 0.94 | |
| 3 | 1980. 8. 6 | 17-21- 7.4 | 39°13' | 117°43' | 4.7 | | | |
| 4 | 1977. 9.27 | 11-31- 9.2 | 39°44' | 118°49' | 4.6 | | | |
| 5 | 1977. 9.28 | 21-40-37.4 | 39°50' | 118°20' | 4.6 | | | |
| 6 | 1980. 3.28 | 2-38-32.7 | 40° 7' | 119°24' | 4.5 | -1.95 | 1.40 | |
| 7 | 1981. 7. 7 | 22- 4-19.1 | 38°25' | 115°39' | 4.4 | -2.55 | 1.50 | |
| 8 | 1981. 9. 6 | 20-26-53.8 | 40°19' | 115°51' | 4.4 | -1.95 | 1.20 | |
| 9 | 1977. 9. 7 | 9-57-33.4 | 39°22' | 118° 2' | 4.3 | | | |
| 10 | 1980.10.29 | 17-57- 8.5 | 39°20' | 117°36' | 4.3 | | | |
| 11 | 1980.11.10 | 13-56-53.2 | 40°39' | 115°38' | 4.3 | -2.55 | 2.10 | |
| 12 | 1980. 1.17 | 19-44-20.4 | 39°40' | 118°41' | 4.3 | | | |
| 13 | 1977. 9. 2 | 6-40-21.3 | 39°41' | 118°41' | 4.2 | | | |
| 14 | 1980.11. 5 | 13-36-49.0 | 39°19' | 116°47' | 4.1 | -3.15 | 2.20 | |
| 15 | 1980.11. 5 | 11- 6- 7.9 | 40°28' | 115°45' | 4.0 | -3.05 | 2.30 | |
| 16 | 1977. 9. 8 | 14-18- 5.4 | 39°54' | 119°39' | 4.0 | | | |
| 17 | 1977. 9. 3 | 5-21- 1.1 | 39°47' | 118°36' | 4.0 | | | |
| 18 | 1981. 9. 7 | 11-24-55.3 | 40°21' | 115°51' | 3.9 | -3.45 | 1.80 | |
| 19 | 1980. 2.28 | 7-57-40.1 | 39°34' | 117°27' | 3.9 | -3.25 | 2.30 | |
| 20 | 1981.12.20 | 0-48-37.0 | 39°50' | 117°11' | 3.8 | | | |
| 21 | 1980.10.28 | 20- 1-50.9 | 39°13' | 117°32' | 3.2 | -3.50 | 3.80 | |
| 22 | 1980. 8. 3 | 8- 8-46.9 | 39°34' | 118°28' | 3.1 | | | |
| 23 | 1981. 4.17 | 12- 4-12.3 | 40°13' | 115°59' | 3.0 | -3.50 | 3.80 | |
| 24 | 1981. 4.11 | 8- 1-37.5 | 40°14' | 116° 6' | 2.9 | | | |
| 25 | 1980. 1.16 | 8-22- 4.6 | 40° 8' | 114°37' | 2.8 | | | |
| 26 | 1983. 4.28 | 22-50-22.4 | 40°34' | 115°57' | 2.7 | -4.65 | 3.80 | |
| 27 | 1981. 7.18 | 3-15-48.5 | 38°57' | 116°26' | 2.7 | | | |
| 28 | 1982. 7.17 | 11- 7-23.7 | 38°40' | 114°30' | 2.7 | | | |
| 29 | 1981.11.17 | 6- 9- 3.0 | 39°40' | 117°27' | 2.5 | | | |
| 30 | 1983. 4. 7 | 19-12-10.2 | 40°21' | 114°57' | 2.4 | -4.75 | 4.20 | |
| 31 | 1982.12.11 | 11-27- 1.8 | 40°28' | 116°33' | 2.3 | | | |
| 32 | 1973.11. 1 | 16-28-26.9 | 40° 5' | 115°17' | 2.2 | | | |
| 33 | 1982.12.14 | 15-48-22.6 | 39°54' | 114°48' | 2.1 | | | |
| 34 | 1983. 6.22 | 5- 1-52.1 | 39°30' | 115°20' | 2.0 | | | |
| 35 | 1980. 3.26 | 10-11-50.0 | 40°14' | 117°12' | 1.8 | | | |
| 36 | 1980. 2. 7 | 4-34-36.0 | 40°32' | 115°31' | 1.8 | -5.07 | 6.00 | |
| 37 | 1980. 1.19 | 2- 3-19.2 | 40°16' | 115°53' | 1.8 | | | |
| 38 | 1982.11.16 | 12-10-59.5 | 40° 5* | 117°23' | 1.6 | | | |
| 39 | 1982.12. 5 | 13- 8-13.8 | 39°46' | 116°16' | 1.6 | | | |
| 40 | 1979.12. 3 | 10-19-27.4 | 39°56' | 117° 9' | 1.4 | | | |
| 41 | 1980. 2. 7 | 3-57- .0 | 40°32' | 115°31' | 1.3 | -5.48 | 6.00 | |
| 42 | 1981.11.13 | 22-40-39.0 | 39°45' | 115° 0' | 1.3 | | | |
| 43 | 1980. 1.28 | 7- 8-32.1 | 40°17' | 115°30' | 1.2 | -5.33 | 8.60 | |
| 44 | 1980. 2. 7 | 3-40-39.8 | 40°32' | 115°31' | 1.2 | -5.47 | 14.00 | |
| 45 | 1980. 2. 6 | 10-11-49.3 | 40°28' | 115°31' | 1.1 | -5.32 | 12.00 | |

注：表中所有 b_2 应乘以 0.01。

及各站拟合结果

fitted results from the codas of these earthquakes

$$\ln A = a_2 - 0.5 \ln t - b_2 t \text{ (多次散射模型)}$$

| 测源 | | 南山村 | | 上房山 | | 太师屯 | | 龙泉寺 | | 延续时间 (s) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| a_2 | b_2 | |
| -1.93 | 0.66 | -2.65 | 0.77 | | | -1.52 | 0.83 | -1.35 | 1.00 | 520 |
| -2.98 | 0.65 | -2.73 | 0.73 | -2.23 | 0.84 | -1.84 | 0.92 | -2.55 | 0.74 | 462 |
| -3.32 | 1.10 | | | -3.00 | 1.02 | | | | | 255 |
| | | | | -2.55 | 1.28 | | | | | 318 |
| -2.26 | 1.10 | -3.16 | 1.10 | -3.13 | 1.00 | -2.89 | 1.20 | -3.34 | 1.00 | 295 |
| -2.62 | 1.50 | -3.31 | 1.40 | | | -2.93 | 1.40 | | | 308 |
| -2.28 | 1.40 | -2.67 | 1.20 | -2.14 | 1.50 | -2.22 | 1.30 | -2.11 | 1.50 | 230 |
| -3.45 | 1.50 | -3.35 | 1.50 | | | -4.12 | 1.30 | | | 288 |
| -3.87 | 1.30 | | | -3.55 | 1.60 | -3.82 | 1.60 | -3.96 | 1.70 | 200 |
| -2.72 | 1.50 | | | -2.62 | 1.30 | -3.20 | 1.20 | -3.02 | 1.60 | 175 |
| | | | | | | 2.75 | 1.40 | | | 240 |
| | | -3.50 | 0.95 | -2.78 | 1.10 | -3.40 | 1.10 | | | 240 |
| -3.11 | 1.60 | | | -3.65 | 1.60 | -3.23 | 2.10 | -3.40 | 1.80 | 292 |
| -3.51 | 1.40 | | | | | -4.00 | 1.30 | -3.59 | 1.80 | 169 |
| -3.48 | 1.40 | -3.70 | 1.50 | | | -4.12 | 1.50 | | | 169 |
| -4.61 | 0.98 | | | | | | | | | 189 |
| -3.90 | 1.30 | -4.60 | 1.33 | -3.39 | 1.90 | -3.88 | 1.60 | -3.92 | 1.80 | 213 |
| -4.35 | 1.17 | -3.24 | 1.80 | | | -3.49 | 1.40 | -3.89 | 1.30 | 166 |
| -4.53 | 1.20 | -3.80 | 1.80 | -4.07 | 1.70 | -3.88 | 1.70 | | | 115 |
| | | -3.87 | 2.70 | -3.96 | 1.90 | | | | | 101 |
| | | -5.10 | 1.70 | | | -4.26 | 2.30 | -4.40 | 2.30 | 91 |
| -3.93 | 1.90 | -3.61 | 3.10 | -4.27 | 2.20 | | | | | 124 |
| -4.90 | 2.00 | | | | | | | | | 106 |
| | | | | | | | | | | 49 |
| -3.98 | 2.40 | | | | | | | | | 125 |
| -4.89 | 2.20 | | | | | | | | | 101 |
| | | -5.10 | 2.20 | | | -4.00 | 3.10 | | | 90 |
| | | -5.10 | 3.30 | | | -4.90 | 1.60 | | | 39 |
| -5.13 | 4.70 | | | -5.02 | 3.20 | | | | | 85 |
| | | | | -5.66 | 3.60 | -6.01 | 4.00 | | | 62 |
| | | | | | | | | -5.56 | 8.40 | 53 |
| | | -5.60 | 11.80 | -5.30 | 4.40 | | | | | 43 |
| | | -6.12 | 5.10 | | | | | | | 31 |
| -6.26 | 6.20 | | | | | | | | | 24 |
| | | | | | | | | | | 30 |
| | | | | | | | | | | 19 |
| | | | | | | | | | | 41 |
| | | | | | | | | | | 29 |
| | | | | | | | | | | 19 |
| | | | | | | | | | | 25 |
| | | | | | | | | | | 17 |
| | | | | | | | | | | 11 |
| | | | | | | | | | | 12 |

表 1(b) 地震参数
Parameters of earthquakes and all the

| No. | 发震时刻 | | 震 中 | | 震级 (M _L) | | | |
|-----|------------|------------|--------|---------|-------------------------|----------------|----------------|--|
| | 年·月·日 | h-m-s | φ(N) | λ(E) | | 沙城 | | |
| | | | | | | a ₁ | b ₁ | |
| 1 | 1980. 2. 7 | 13-31-30.7 | 39°26' | 118° 2' | 5.6 | 1.25 | 0.70 | |
| 2 | 1983. 4. 3 | 10-16-30.0 | 40°45' | 114°47' | 5.1 | 0.35 | 0.70 | |
| 3 | 1980. 8. 6 | 17-21- 7.4 | 39°13' | 117°43' | 4.7 | | | |
| 4 | 1977. 9.27 | 11-31- 9.2 | 39°44' | 118°49' | 4.6 | | | |
| 5 | 1977. 9.28 | 21-40-37.4 | 39°50' | 118°20' | 4.6 | | | |
| 6 | 1980. 3.28 | 2-38-32.7 | 40° 7' | 119°24' | 4.5 | 0.21 | 1.10 | |
| 7 | 1981. 7. 7 | 22- 4-19.1 | 38°25' | 115°39' | 4.4 | -0.55 | 1.20 | |
| 8 | 1981. 9. 6 | 20-26-53.8 | 40°19' | 115°51' | 4.4 | -0.38 | 0.75 | |
| 9 | 1977. 9. 7 | 9-57-33.4 | 39°22' | 118° 2' | 4.3 | | | |
| 10 | 1980.10.29 | 17-57- 8.5 | 39°20' | 117°36' | 4.3 | | | |
| 11 | 1980.11.10 | 13-56-53.2 | 40°39' | 115°38' | 4.3 | -1.04 | 1.40 | |
| 12 | 1980. 1.17 | 19-44-20.4 | 39°40' | 118°41' | 4.3 | | | |
| 13 | 1977. 9. 2 | 6-40-21.3 | 39°41' | 118°41' | 4.2 | | | |
| 14 | 1980.11. 5 | 13-36-49.0 | 39°19' | 116°47' | 4.1 | -1.27 | 1.70 | |
| 15 | 1980.11. 5 | 11- 6- 7.9 | 40°28' | 115°45' | 4.0 | -1.63 | 1.40 | |
| 16 | 1977. 9. 8 | 14-18- 5.4 | 39°54' | 118°39' | 4.0 | | | |
| 17 | 1977. 9. 3 | 5-21- 1.1 | 39°47' | 118°36' | 4.0 | | | |
| 18 | 1981. 9. 7 | 11-24-55.3 | 40°21' | 115°51' | 3.9 | -1.89 | 1.00 | |
| 19 | 1980. 2.28 | 7-57-40.1 | 39°34' | 117°27' | 3.9 | -1.59 | 1.60 | |
| 20 | 1981.12.20 | 0-48-37.0 | 39°50' | 117°11' | 3.8 | | | |
| 21 | 1980.10.28 | 20- 1-50.9 | 39°13' | 117°32' | 3.2 | -1.79 | 2.00 | |
| 22 | 1980. 8. 3 | 8- 8-46.9 | 39°34' | 118°28' | 3.1 | | | |
| 23 | 1981. 4.17 | 12- 4-12.3 | 40°13' | 115°59' | 3.0 | -2.12 | 2.60 | |
| 24 | 1981. 4.11 | 8- 1-37.5 | 40°14' | 116° 6' | 2.9 | | | |
| 25 | 1980. 1.16 | 8-22- 4.6 | 40° 8' | 114°37' | 2.8 | | | |
| 26 | 1983. 4.28 | 22-50-22.4 | 40°34' | 115°57' | 2.7 | -3.37 | 2.50 | |
| 27 | 1981. 7.18 | 3-15-48.5 | 38°57' | 116°26' | 2.7 | | | |
| 28 | 1982. 7.17 | 11- 7-23.7 | 38°40' | 114°30' | 2.7 | | | |
| 29 | 1981.11.17 | 6- 9- 3.0 | 39°40' | 117°27' | 2.5 | | | |
| 30 | 1983. 4. 7 | 19-12-10.2 | 40°21' | 114°57' | 2.4 | -3.45 | 2.80 | |
| 31 | 1982.12.11 | 11-27- 1.8 | 40°28' | 116°33' | 2.3 | | | |
| 32 | 1978.11. 1 | 16-28-26.9 | 40° 5' | 115°17' | 2.2 | | | |
| 33 | 1982.12.14 | 15-48-22.6 | 39°54' | 114°48' | 2.1 | | | |
| 34 | 1983. 6.22 | 5- 1-52.1 | 39°30' | 115°20' | 2.0 | | | |
| 35 | 1980. 3.26 | 10-11-50.0 | 40°14' | 117°12' | 1.8 | | | |
| 36 | 1980. 2. 7 | 4-34-36.0 | 40°32' | 115°31' | 1.8 | -4.25 | 2.70 | |
| 37 | 1980. 1.19 | 2- 3-19.2 | 40°16' | 115°53' | 1.8 | | | |
| 38 | 1982.11.16 | 12-10-59.5 | 40° 5' | 117°23' | 1.6 | | | |
| 39 | 1982.12. 5 | 13- 8-13.8 | 39°46' | 116°16' | 1.6 | | | |
| 40 | 1979.12. 3 | 10-19-27.4 | 39°56' | 117° 9' | 1.4 | | | |
| 41 | 1980. 2. 7 | 3-57- 0.0 | 40°32' | 115°31' | 1.3 | -4.85 | 1.30 | |
| 42 | 1981.11.13 | 22-40-39.0 | 39°45' | 115° 0' | 1.3 | | | |
| 43 | 1980. 1.28 | 7- 8-32.1 | 40°17' | 115°30' | 1.2 | -4.51 | 5.30 | |
| 44 | 1980. 2. 7 | 3-40-39.8 | 40°32' | 115°31' | 1.2 | -4.99 | 0.72 | |
| 45 | 1980. 2. 6 | 10-11-49.3 | 40°28' | 115°31' | 1.1 | -4.85 | 0.55 | |

注：表中所有 b₁ 应乘以 0.01。

数及各站拟合结果

fitted results from the codas of these earthquakes

$$\ln A = a_1 - \ln t - b_1 t \text{ (单次散射模型)}$$

| 源 | | 南山村 | | 上房山 | | 太师屯 | | 龙泉寺 | | 延续时间 (s) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| a_1 | b_1 | |
| 0.54 | 0.53 | -0.37 | 0.53 | | | 0.84 | 0.67 | 0.99 | 0.83 | 520 |
| -0.56 | 0.51 | -0.36 | 0.57 | 0.12 | 0.68 | 0.48 | 0.75 | -0.20 | 0.58 | 462 |
| -1.12 | 0.84 | | | -0.84 | 0.79 | -0.87 | 0.97 | | | 255 |
| | | | | -0.44 | 1.00 | | | | | 318 |
| -0.05 | 0.92 | -1.08 | 0.85 | -0.96 | 0.75 | -0.59 | 0.91 | -1.16 | 0.74 | 295 |
| -0.65 | 1.10 | -1.23 | 1.10 | | | -0.82 | 1.10 | | | 308 |
| -0.23 | 1.10 | -0.68 | 0.93 | -1.10 | 1.20 | -0.17 | 1.00 | -0.02 | 1.20 | 230 |
| -1.38 | 1.30 | -1.54 | 1.10 | | | -2.22 | 0.84 | | | 288 |
| -1.88 | 1.00 | | | -1.71 | 1.20 | -2.00 | 1.10 | -2.16 | 1.20 | 200 |
| -0.76 | 1.10 | | | -0.70 | 0.97 | -1.29 | 8.80 | -1.14 | 1.20 | 175 |
| | | | | | | -0.82 | 1.00 | | | 240 |
| | | -1.38 | 0.70 | -0.65 | 0.90 | -1.40 | 0.77 | | | 292 |
| -1.15 | 1.30 | | | -1.87 | 1.10 | 1.39 | 1.60 | -1.59 | 1.40 | 169 |
| -1.60 | 1.00 | | | | | -2.19 | 0.90 | -1.94 | 1.20 | 169 |
| -1.35 | 1.20 | -1.88 | 1.10 | | | -2.27 | 1.10 | | | 189 |
| -2.50 | 0.72 | | | | | | | | | 213 |
| -1.99 | 0.93 | -2.67 | 0.90 | -1.65 | 1.40 | -2.07 | 1.10 | -2.15 | 1.30 | 163 |
| -2.52 | 0.74 | -1.36 | 1.40 | | | -1.58 | 1.00 | -1.99 | 0.87 | 180 |
| -2.55 | 0.87 | -2.15 | 1.20 | -2.25 | 1.20 | -2.14 | 1.20 | | | 166 |
| | | -2.18 | 2.10 | -2.16 | 1.40 | | | | | 115 |
| | | -3.40 | 1.10 | | | -2.68 | 1.60 | -2.76 | 1.60 | 101 |
| -2.03 | 1.50 | -1.84 | 2.60 | -2.56 | 1.60 | | | | | 91 |
| -3.21 | 1.40 | | | | | | | | | 124 |
| | | | | | | | | | | 106 |
| -2.44 | 1.90 | | | | | | | | | 49 |
| -3.20 | 1.60 | | | | | | | | | 125 |
| | | -3.58 | 1.30 | | | -2.36 | 2.40 | | | 101 |
| | | -3.55 | 2.50 | | | -3.45 | 0.80 | | | 90 |
| -3.81 | 3.40 | | | -3.59 | 2.10 | | | | | 39 |
| | | | | -4.42 | 2.10 | -4.89 | 2.10 | | | 85 |
| | | -4.89 | 7.70 | | | | | -4.48 | 6.30 | 62 |
| | | -5.08 | 2.90 | -4.08 | 2.90 | | | | | 53 |
| -5.20 | 4.00 | | | | | | | | | 43 |
| | | | | | | | | | | 31 |
| | | | | | | | | | | 24 |
| | | | | | | | | | | 30 |
| | | | | | | | | | | 19 |
| | | | | | | | | | | 41 |
| | | | | | | | | | | 29 |
| | | | | | | | | | | 19 |
| | | | | | | | | | | 25 |
| | | | | | | | | | | 17 |
| | | | | | | | | | | 11 |
| | | | | | | | | | | 12 |

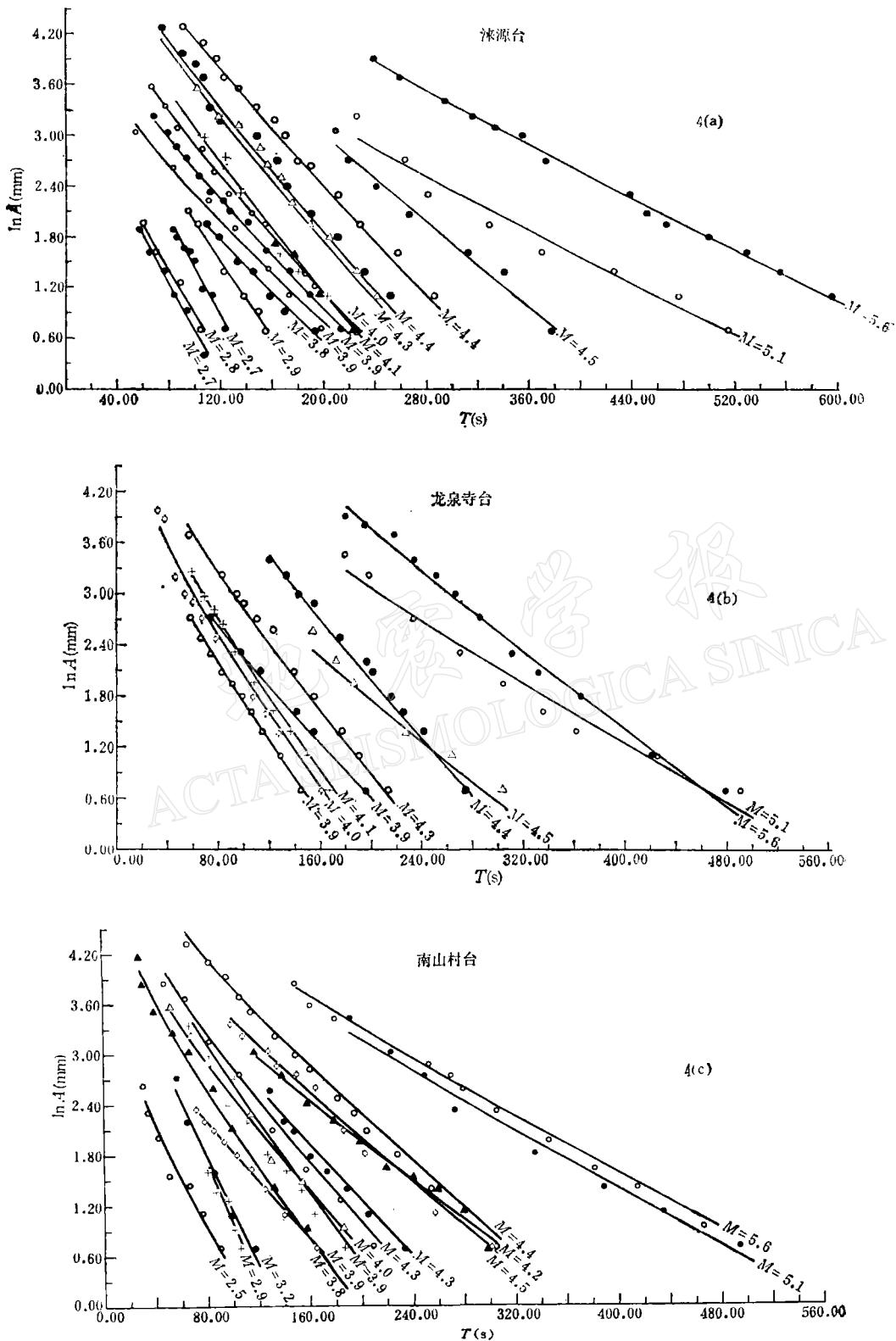
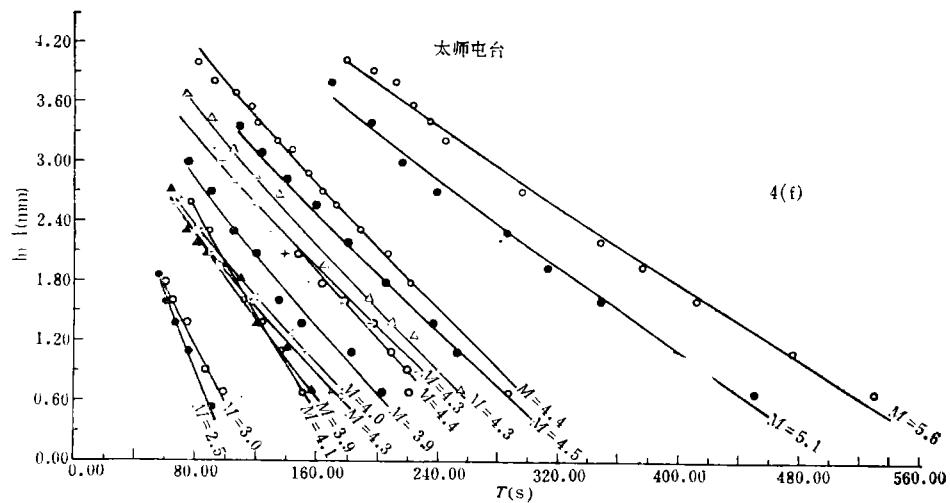
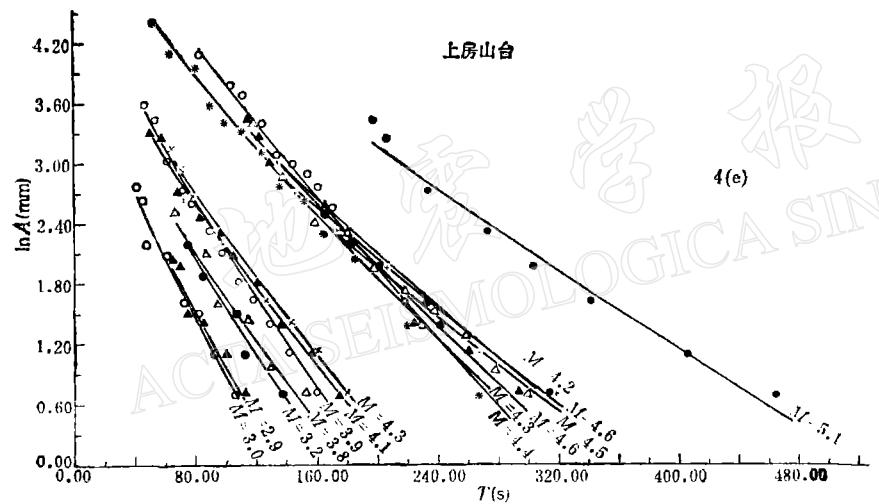
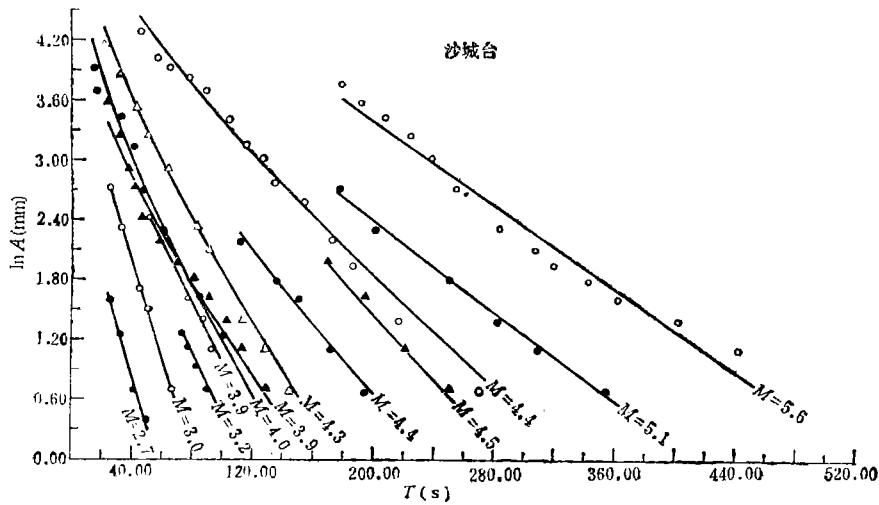


图 4 用多次散射模型拟合的北
Decay envelopes of codas for six Stations in Beijing



京地区六个台站的尾波衰减包络

area. All curves are fitted according to the multiple Scattering model.

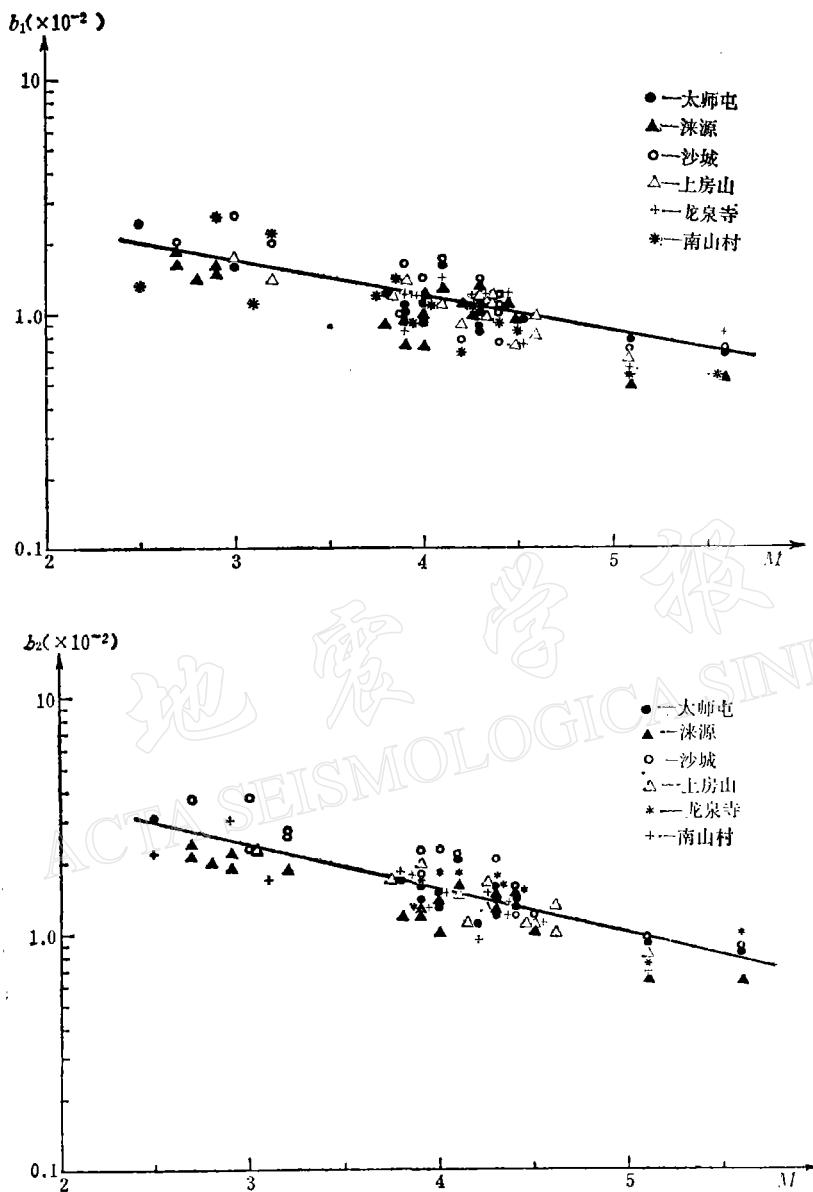


图 5 各台综合的 b_1 , b_2 值与震级的关系
Values of b_1 , b_2 versus magnitudes for selected stations.

值,由(9)式定义。

另一方面,可根据(13),(14)式中的 α 值来求平均自由程 L ,并用(5)式来推算 Q 值。其作法是这样的:首先综合用每张地震记录求出的 α 值与震级的关系,如图7所示,可拟合得如下的线性关系:

$$\alpha_1 = -6.58 + 1.27M \quad 2.5 \leq M \leq 5.6 \quad (25)$$

$$\alpha_2 = -7.34 + 0.98M \quad 2.5 \leq M \leq 5.6 \quad (26)$$

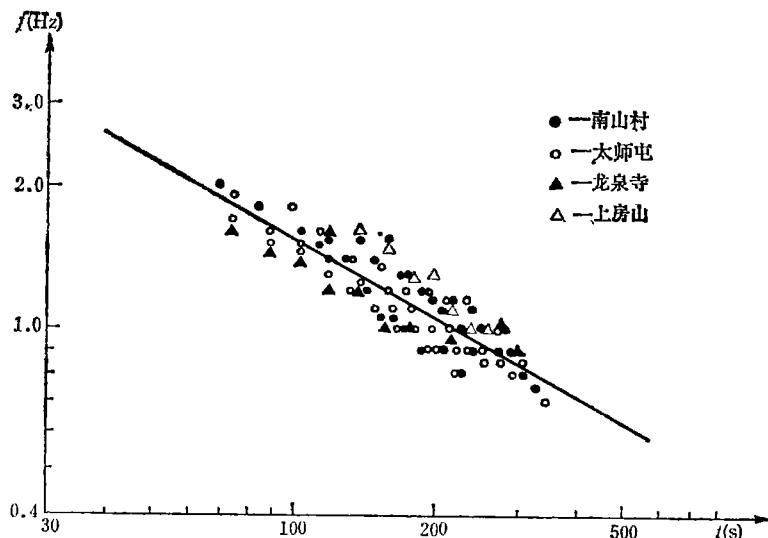


图 6 北京台网尾波优势频率与延续时间的关系
Predominant frequencies in Beijing Network versus elapsed time.

考虑 Gutenberg-Richter 震级能量公式

$$\lg W = 1.5M + 11.8 \quad (27)$$

式中 W 为地震波能量, M 为震级。

将式(25), (26) 及(27)代入(15), (16)式可得

$$\lg L_1 = 5.327 + 0.40M \quad 2.5 < M < 5.6 \quad (28)$$

和

$$\lg L_2 = 5.97 + 0.32M \quad 2.5 < M < 5.6 \quad (29)$$

使用类似于 b_1 和 b_2 的方法, 可得平均自由程与优势频率的表达式

$$\lg L_1 = 6.956 - 2.368 \lg f \quad 0.6 < f < 1.6 \quad (30)$$

$$\lg L_2 = 7.172 - 1.776 \lg f \quad 0.6 < f < 1.6 \quad (31)$$

应用对(23), (24)式类似的做法, 在 0.6—1.6 Hz 频段上取若干频率值即可求得相应的 L 值及 Q 值。它们列在表 2 的下半部分。表 2 的左半部为用单次散射所得计算结果, 右半部为多次散射所得计算结果。

四、讨论和结论

表 2 是本文所给出的主要结果, 它比较了由尾波包络线的衰减特征所给出的及由尾波强度给出的 Q 值; 也比较了由单次散射和多次散射两种计算式所给出的结果。使人感到意外的是, 尽管单次散射和多次散射两种模型具有不同的表达式, 但却给出了十分接近的结果。这种数值结果的稳定性可与如下事实进行对比: 即在现阶段, 用别的方法所给出的 Q 值, 其涨落却很大。

在某种意义上, 前述结果的一致性是偶然的而非必然的。可以看到的一种可能原因是理论上预计的两种不同模型的尾波包络线并无实质性差别^[3,7]。第二种可能的原因可以

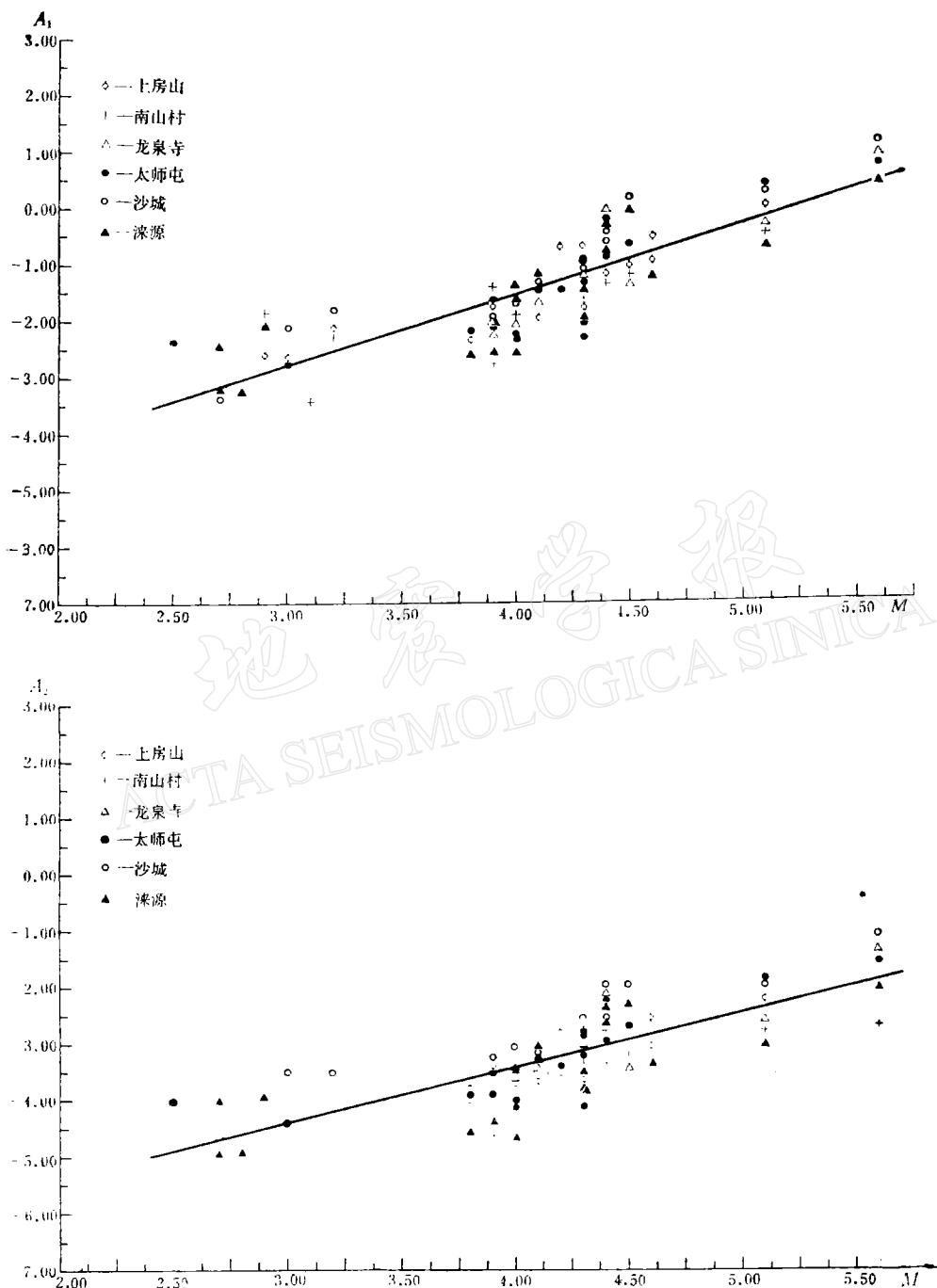


图 7 各台综合的 α_1 , α_2 值与震级的关系
Values of α_1 , α_2 Versus magnitudes for selected stations.

从分析(11)式和(12)式中看出: 两个式子中平均自由程 L 分别以 L 及 L^2 出现, 而速度 V 则分别以 V^2 及 V 出现; 正由于速度值在量级上与自由程相近, 因此两种差别正好相消.

表 2

| 单 次 散 射 模 式 | | | | | | |
|------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f_p | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 |
| b_1 | 0.0073 | 0.0094 | 0.0110 | 0.0140 | 0.0150 | 0.0170 |
| $Q = \pi f/b_1$ | 259 | 267 | 274 | 279 | 284 | 288 |
| \bar{Q} (平均) | $275 \pm (-10)$ | | | | | |
| $L_1(\text{km})$ | 303.0 | 153.0 | 90.0 | 58.7 | 40.7 | 29.7 |
| $Q_s = \omega L_1 / \bar{V}$ | 326 | 220 | 162 | 126 | 102 | 85 |
| L (平均) (km) | $113 \pm (-94)$ | | | | | |
| \bar{Q}_s (平均) | $170 \pm (-82)$ | | | | | |

| 多 次 散 射 模 式 | | | | | | |
|------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f_p | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 |
| b_2 | 0.0088 | 0.0120 | 0.0160 | 0.0190 | 0.0230 | 0.0260 |
| $Q^+ = \pi f/b_2$ | 214 | 207 | 201 | 197 | 194 | 191 |
| \bar{Q}^+ (平均) | 201 ± 8 | | | | | |
| $L_2(\text{km})$ | 368.0 | 221.0 | 149.0 | 107.0 | 81.7 | 64.0 |
| $Q_s = \omega L_2 / \bar{V}$ | 396 | 317 | 267 | 232 | 205 | 185 |
| L (平均) (km) | 165 ± 104 | | | | | |
| \bar{Q}_s (平均) | 267 ± 72 | | | | | |

注: $Q^+ = \frac{1}{Q_i} + \frac{0.67}{Q_s}$, 其中 Q_i 为内耗吸收品质因素, Q_s 为散射品质因素.

但假若是速度值趋近于光速那样, 或远小于现在这样的值, 那么多次散射和单次散射就会给出远为不同的结果了.

表 2 中, 用单次散射模型由尾波强度求出的 Q 因子为 170; 而用包络线衰减求出的总体衰减 Q 因子为 275. 此结果与(6)式所要求的 $Q_s > Q$ 相冲突. 另一方面, 按照多次散射模型, 表 2 给出的平均散射 Q_s 为 267, 而平均的总体衰减 Q 因子为 201, 则是符合(6)式的要求. 因此可以认为, 尽管单次散射模型和多次散射模型给出了十分接近的结果, 但后者有更好的内符. 此外, 假如能用此种方法作更精细测量的话, 则将有可能以此为基础来研究在这些 Q 值之间, 即由自由程所得的散射 Q 以及总体 Q 之间, 有多少差别. 这显然是很重要的课题. 然而, 本文的作者们在考虑到整个的工作中作了较多的假设和简化, 故现有计算的结果之精度恐不足以用来详细讨论散射 Q (Q -scattering) 和总体 Q (Q -general) 间的差别. 但前述的定性的内符检验也是重要的.

表 2 也表明, 用尾波的包络特征来求区域性的衰减参数比用尾波强度来求所得的结果要更稳定些. 用不同震级的资料拼合在一起所求得的 Q 值其标准差对前者为 8 (Q 值自身为 201), 对后者为 72 (求出的 Q 值自身为 267). 佐藤^[3]发表的结果说明其求得之自由

程的对数的标准差为 0.5, 这和自然数上的标准差难以作一一对比。但本项工作所得的误差不会高于这一量级。

最后值得一提的是, 在应用 (13) 及 (14) 式作计算时, 由于 b 值是一个很小的量, 故尽管第二项是对时间取了对数的项, 和自然数相比似应很小, 但仍不可忽略, 否则将会严重影响最后的结果。

本工作得到地震学联合科学基金会的部分资助。

参 考 文 献

- [1] Aki, K., Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, *J. Geophys. Res.*, **74**, 615—631, 1969.
- [2] Aki, K., Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere, *J. Geophys. Res.*, **85**, 6496—6504, 1980.
- [3] Gao, L. S., L. C. Lee, N. N. Biswas and K. Aki, Comparison of the effects between single and multiple-Scattering on coda waves for local earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **73**, 377—389, 1983.
- [4] Kopnichiev, Y. F., The role of multiple scattering in the formation of a seismogram's tail, *Izvestiya, Academy of Science, USSR, Physics of the Solid Earth*, **13**, 394—398, 1977.
- [5] Sato, H., Mean free path of S waves under the Kanto district of Japan, *J. Phys. Earth.*, **26**, 185—198, 1978.
- [6] Herrmann, R. B., Q estimates using the coda of local earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **70**, 447—468, 1980.
- [7] Gao, L. S., N. N. Biswas, L. C. Lee, K. Aki, Effects of multiple scattering on coda waves in three-dimensional medium, *Pure and Applied Geophys.*, **121** 3—15, 1983.
- [8] Sato, H., Energy propagation including scattering effects; single isotropic scattering approximation, *J. Phys. Earth.*, **25**, 27—41, 1977.
- [9] Dainty, A. M., A scattering model to explain seismic Q observations in the lithosphere between 1 and 30Hz, *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 1128—1178, 1981.

ESTIMATION OF MEAN FREE PATH OF S-WAVES UNDER BEIJING AREA BY MEANS OF BOTH INTENSITY AND DECAY OF CODAS

GAO LONGSHENG, HUA ZHENGXING AND LI RUIXUAN

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

The single back scattering model proposed by Aki is convenient due to its simplicity. This paper shows that the multiple scattering model which is an improvement upon Aki's model also gives a very simple and successful approach to estimate the heterogeneities under a certain area. Both the intensity and the decay of cadas were used to find the Q -factor related to scattering. It is noted that although both the single scattering model and the multiple scattering model give quite close results, the results from the latter are more reasonable and self-consistent. This paper also suggests that whichever simplified model is used, the logarithmic term in its equation is not negligible. As an example, seismograms of local earthquakes recorded at the Beijing Regional Seismological Network were used and the mean free path of S-wave under the Beijing area was obtained at frequencies around 1 Hz, shown in Table 2.