

王婷婷, 边银菊. 2015. 振幅衰减特性在地震与爆破识别中的应用. 地震学报, 37(1): 169–179. doi:10.11939/jass.2015.01.015.

Wang T T, Bian Y J. 2015. Amplitude attenuation and its application to earthquake and explosion discrimination. *Acta Seismologica Sinica*, 37(1): 169–179. doi:10.11939/jass.2015.01.015.

振幅衰减特性在地震与爆破识别中的应用^{*}

王婷婷 边银菊^{*}

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 基于小震级地震与爆破事件, 从快速识别要求出发, 分析了 P 波初动振幅 A_I 和 P 波最大振幅 A_P 分别与 S 波最大振幅 A_S 的幅值比判据及其对事件的识别能力. 考虑到传播路径对地震与爆破各振幅的影响, 选用合理的振幅随距离衰减公式, 分别研究了 P 波、S 波各振幅随震中距的衰减特征, 结果显示爆破振幅衰减比地震快; 在 100 km 处进行衰减校正后重新计算 P 波与 S 波幅值比, 得到经过衰减校正后的幅值比 A_I/A_S 正确识别率从 84% 提高到 98%, A_P/A_S 正确识别率从 92% 提高到 100%, 表明经衰减校正后的幅值比判据可以更好地应用于小震级地震与爆破的识别中.

关键词 地震 爆破 振幅衰减 幅值比 事件识别

doi:10.11939/jass.2015.01.015 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Amplitude attenuation and its application to earthquake and explosion discrimination

Wang Tingting Bian Yinju^{*}

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the small magnitude earthquakes and explosions and quick identification requirements, this paper analyzed the identification ability of first motion amplitude A_I and P maximum amplitude A_P to S maximum amplitude A_S ratios. Considering the impact of propagation paths on different seismic amplitude, this paper selected reasonable amplitude attenuation formula with distance, and investigated attenuation characteristics of P, S amplitudes which indicates that amplitude of explosion attenuated faster than that of earthquake. We chosen 100 km as attenuation correction distance and recalculated the ratios of P amplitude to S amplitude after attenuation correction, then it is shown that the correct recognition rate of A_I/A_S improved from 84% to 98%, A_P/A_S improved from 92% to 100%. These results show that amplitude ratio criteria after attenuation correction could be better applied to small magnitude earthquakes and explosions recognition.

^{*} 基金项目 中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB13B12)资助.

收稿日期 2014-08-23 收到初稿, 2014-11-09 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: bianyinju@Yahoo.com.cn

Key words: earthquake; explosion; amplitude attenuation; amplitude ratio; event recognition

引言

在地震与爆破的众多识别判据中, P/S 幅值比的研究最为深入和应用最为广泛. 该判别量可分为同一频段内 P 波与 S 波幅值比、同一震相低频与高频幅值比, 以及不同震相高频与低频幅值比等. 到目前为止, P/S 幅值比仍是识别天然地震与地下核爆破的有效判据. Zhao 等(2008)通过对朝鲜 2006 年 10 月 9 日核爆分析, 得到在频率大于 2 Hz 时, 台站记录的平均 P/S 谱比(Pg/Lg, Pn/Lg, Pn/Sn)可将核爆与附近的地震完全分开. Shin 等(2010)分析 2009 年朝鲜第二次核爆与附近的两次地震垂直向记录在 0.5—15 Hz 的 Pn/Lg 比值, 得到大于 4 Hz 时可将两类事件完全分开. Chun 等(2011)分析不同台站记录到的朝鲜 2006 和 2009 两次核爆与中朝边界地震的 Pg 与 Lg 的傅里叶谱比值, 发现 3—11 Hz 内地震与核爆破的识别效果好.

由于地震波的振幅随着传播距离的增大而不断衰减, 因此, P/S 幅值比对传播路径具有较强的依赖性, 通常需要进行路径校正才能更好地应用于事件性质识别中. 最常用的校正方法是基于一维几何扩散的振幅随震中距衰减校正. 也有研究考虑传播路径上的地形起伏、地壳厚度以及传播介质结构等特征, 建立了包含传播路径上的地形、地壳结构等影响因素在内的经验校正方法、小区域平均和克里金方法等(Rodgers *et al*, 1999; Fisk, Botton, 2002; 潘常周等, 2007a). MDAC(magnitude and distance amplitude correction)将震源、台站校正、传播路径考虑在内, 对每个地区都需要用大量的震相资料进行反演, 以消除震源大小和传播距离对 P/S 判别量的影响(Taylor *et al*, 2002; Walter *et al*, 2005; Che *et al*, 2007; Fisk *et al*, 2008, 2009; Pasyanos, Walter, 2009; Hong, Rhie, 2009; Pasyanos, 2010; Taylor, 2011), 从而取得了较好的事件识别效果. 以上关于 P/S 幅值比的研究及校正大部分基于大震级事件. 潘常周等(2007b)将 P/S 幅值比应用于小震级事件识别中, 用 $R=a+b\lg\Delta+c\Delta$ 描述 P/S 震相比对震中距的依赖性, 并在此基础上进行震中距校正, 减小了 P/S 幅值比对震级的依赖性.

本文在着重分析小震级事件的幅值比判据, 包含 P 波初动振幅与 S 波最大振幅比值(A_I/A_S)以及 P 波最大振幅与 S 波最大幅值比值(A_P/A_S)的基础上, 分别研究地震与爆破的 P 波、S 波振幅随震中距的衰减特性, 并对振幅进行衰减校正, 最后对比分析衰减校正前后的 P/S 幅值比的识别能力.

1 资料

本文共选取了首都圈 29 个爆破和 33 个地震事件, 爆破震级范围为 $M_L 1.0—2.1$, 地震震级范围为 $M_L 1.3—3.2$. 所选事件保证至少有 3 个以上台站的记录, 剔除诸如 P 波最大振幅与噪声水平相当的较差记录, 最终共有 59 个台站的 661 条波形记录. 其中爆破记录 185 个, 地震记录 476 个, 经统计发现所选记录的最大震中距为 180 km. 所选爆破、地震、台站及传播路径分布如图 1 所示. 为研究方便, 本文对文中所选的 33 次地震和 29 次爆破按发震时间先后顺序分别进行编号.

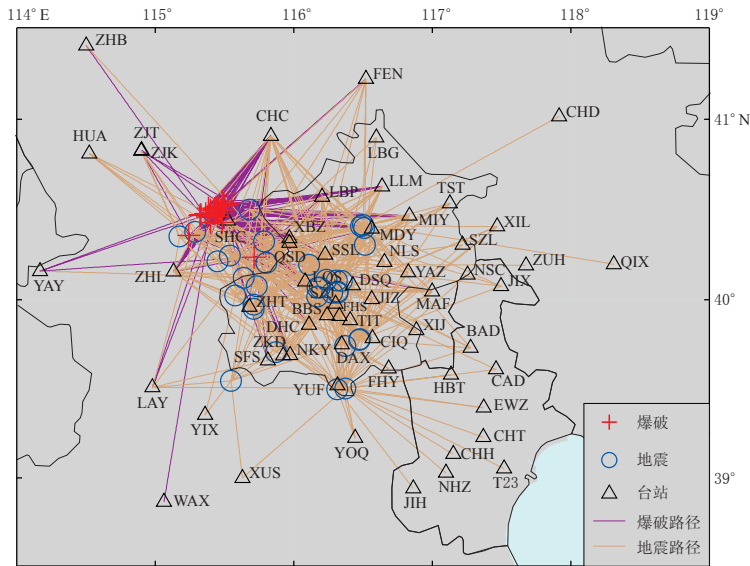


图 1 本文所选爆破、地震事件、台站及传播路径示意图

Fig. 1 Location of explosions (red crosses), earthquakes (blue circles) and stations (triangles) used in this paper. Purple lines represent explosion paths, and light brown lines represent earthquake paths

2 垂直向 P 波与 S 波幅值比

从快速识别要求出发，通过人机交互方式量取爆破和地震垂直向的 P 波初动振幅 A_1 、P 波最大振幅 A_P 和 S 波最大振幅 A_S (王婷婷，边银菊，2011)，此处 P 波最大振幅和 S 波最大振幅分别为震相 P_g 和 S_g 的最大幅值。由于本文地震与爆破事件震级较小，可用的台站资料较少，故选用多种仪器记录。其中，宽频带仪器记录有 468 个，甚宽频带仪器记录有 12 个，短周期仪器记录有 124 个，井下短周期仪器记录有 51 个。本文所测事件的 P 波初动振幅、P 波和 S 波最大振幅的优势频率为 3—5 Hz，不超过 2—10 Hz 的范围，而 2—10 Hz 处于短周期和井下短周期仪器频率特性的平坦区域，也处于宽频带和甚宽频带仪器频率特性的平坦区域，因此，不同频带仪器对本文幅值影响较小。

理论上认为爆破是简单的膨胀源，有较强的 P 波群，而剪切 S 波是传播路径复杂等影响下所产生的，故相对较弱；而在地震的发生过程中，岩石要发生剪切错动，大多数地震的 S 波较 P 波发育(赵永等，1995；Yildirim *et al.*, 2011)，因此一般来说爆破的 P 波与 S 波最大振幅比要大于地震。但在实际爆破波形记录中，并不是所有的记录都有较强的 P 波群和较弱的 S 波群，这可能由于放炮方式(比如并排放炮式等)以及传播介质复杂等因素，使得有些记录 S 波组也比较发育；而对于地震来说，由于震源错动方位的影响，也不一定是每个地震记录都有较强的 S 波群。如图 2a 所示，2003 年 5 月 10 日爆破，XBZ 台站的记录有着较强的 P 波及较弱的 S 波，而 CHC 台站的记录情况则相反，且单凭 CHC 台的 P、S 波记录情况，很难判定其事件类型；又如图 2b 所示，2003 年 6 月 19 日地震，LBP 台站记录的 S 波较强，P 波较弱，而 SHC 台站记录的 P 波较强，尤其是垂直向 P 波最大振幅大于 S 波。

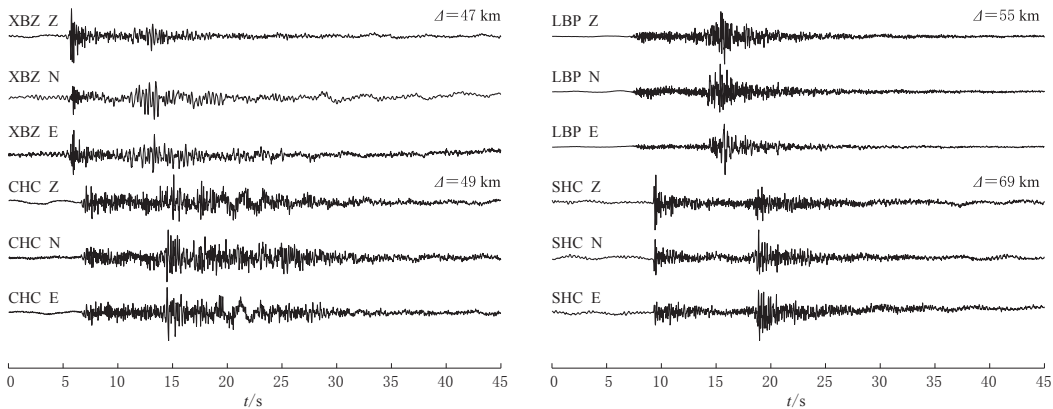


图 2 2003 年 5 月 10 日爆破波形(左)和 2003 年 6 月 19 日地震波形(右)

Fig. 2 Waveforms of the explosion on 10 May 2003 (left) and the earthquake on 19 June 2003 (right)

本文求取每一条波形记录的 P 波初动振幅与 S 波最大振幅比值(A_1/A_S)、P 波最大振幅与 S 波最大振幅比值(A_P/A_S)后,再对各台站记录的幅值比结果进行算术平均,以减弱台站方位以及震中距引起的差异(边银菊等,2012).最终得到的 62 个事件的 A_1/A_S 和 A_P/A_S 分布如图 3 所示.由于本研究需对所得到的幅值比值均取以 10 为底的对数,为方便表述,文中提到 A_1/A_S 和 A_P/A_S 时均省略了对数符号.从图 3 可看出,研究区大部分爆破的 A_1/A_S 值大于 -0.3 , A_P/A_S 的值大于 -0.02 ;而地震的 A_1/A_S 值小于 -0.3 , A_P/A_S 值小于 -0.02 .对于 A_1/A_S 共有 5 个爆破和 5 次地震误识,正确识别率为 84%; A_P/A_S 有 4 个爆破和 1 次地震误识,正确识别率为 92%.

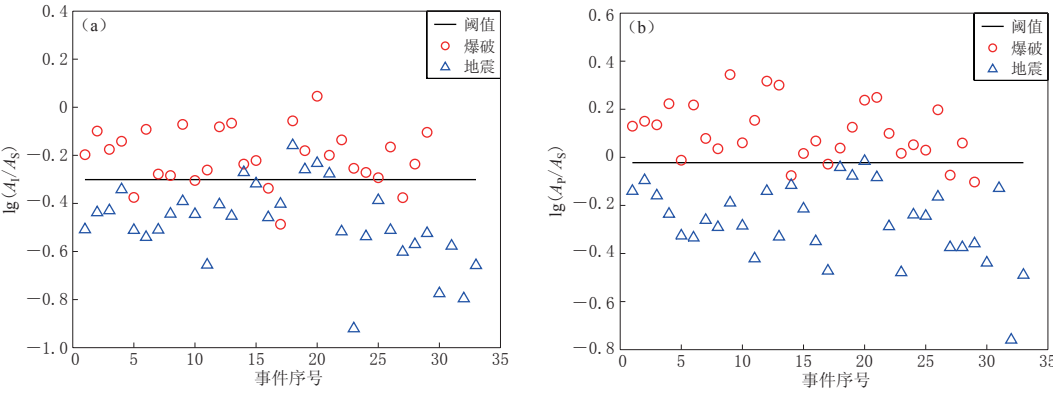


图 3 (a) P 波初动振幅与 S 波最大振幅比(A_1/A_S); (b) P 波最大振幅与 S 波最大振幅比(A_P/A_S)

Fig. 3 (a) Ratios of first P amplitude to S maximum amplitude (A_1/A_S);
(b) Ratios of P maximum amplitude to S maximum amplitude (A_P/A_S)

3 振幅衰减特性及衰减校正

3.1 振幅随震中距衰减特性

振幅是地震波的动力学特征之一,其大小代表地震波能量的大小,其变化反映的是波动能量的变化,也是震源、波的传播路径及介质物性等因素共同作用的结果.地震波的振

幅随传播距离(时间)的增大而不断衰减, 振幅的衰减既随传播时间的不同而变化, 又随频率的不同而变化, 高频成分比低频成分衰减得更快, 主频向低频方向移动. 从快速识别出发, 本文仅对地震波的速度记录在时间域量取各震相振幅, 并研究其衰减特性.

本文参考王碧泉等(1999)对中国华北地区峰值加速度衰减特性的分析, 采用 Peng 等(1985)所用的振幅随距离衰减拟合公式分别研究了 A_I , A_P , A_S 随震中距的衰减, 其公式为 $\lg A = a + bM_s + c\lg R + dR$. 其中, bM_s 项和 $c\lg R$ 项分别表示震级和震中距对地震动参数的影响, dR 项代表地震波在地壳介质传播中的内摩擦损耗(陈运泰等, 2000). 我们将式

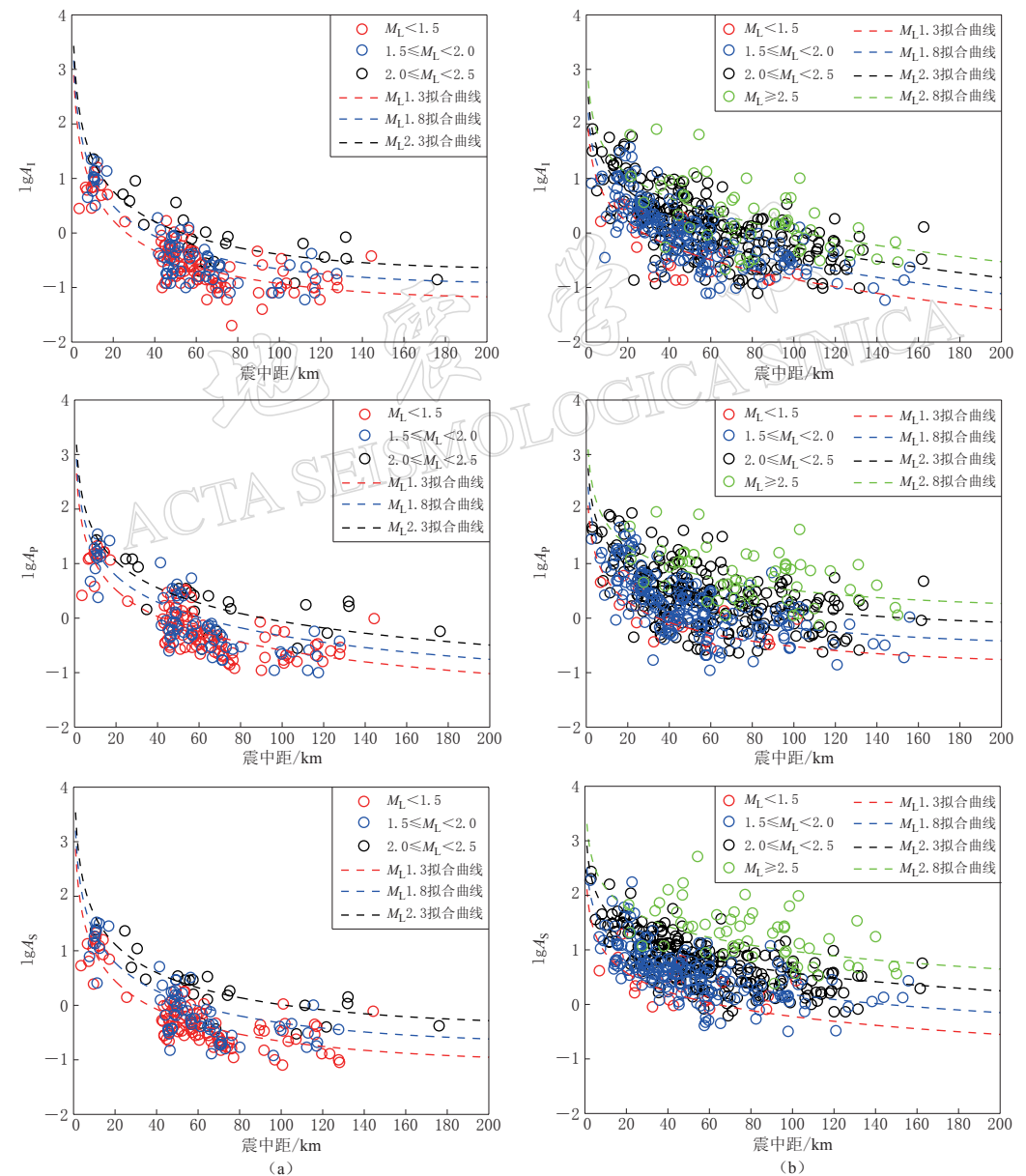


图4 爆破(a)与地震(b)振幅(A_I , A_P , A_S)随震中距的衰减特性

Fig.4 Attenuation characteristics of amplitude (A_I , A_P , A_S) with epicentral distance

中面波震级替换为近震震级, 有 $\lg A = a + bM_L + c\lg R + dR$. 其中: A 为垂直向速度记录振幅值, M_L 为近震震级, R 为震中距(km); a, b, c, d 为未知系数, 其可用振幅随震中距变化的数据通过最小二乘法拟合得到.

用上述资料及公式, 研究爆破与地震振幅(A_I, A_P, A_S)随震中距的衰减特性, 其衰减拟合曲线如图 4 所示. 可以直观看出: 爆破资料的震中距较为集中, 大多集中在 40—80 km 处; 而地震资料较多, 震中距分布也较为均匀一些. 计算 6 条衰减曲线的平均残差平

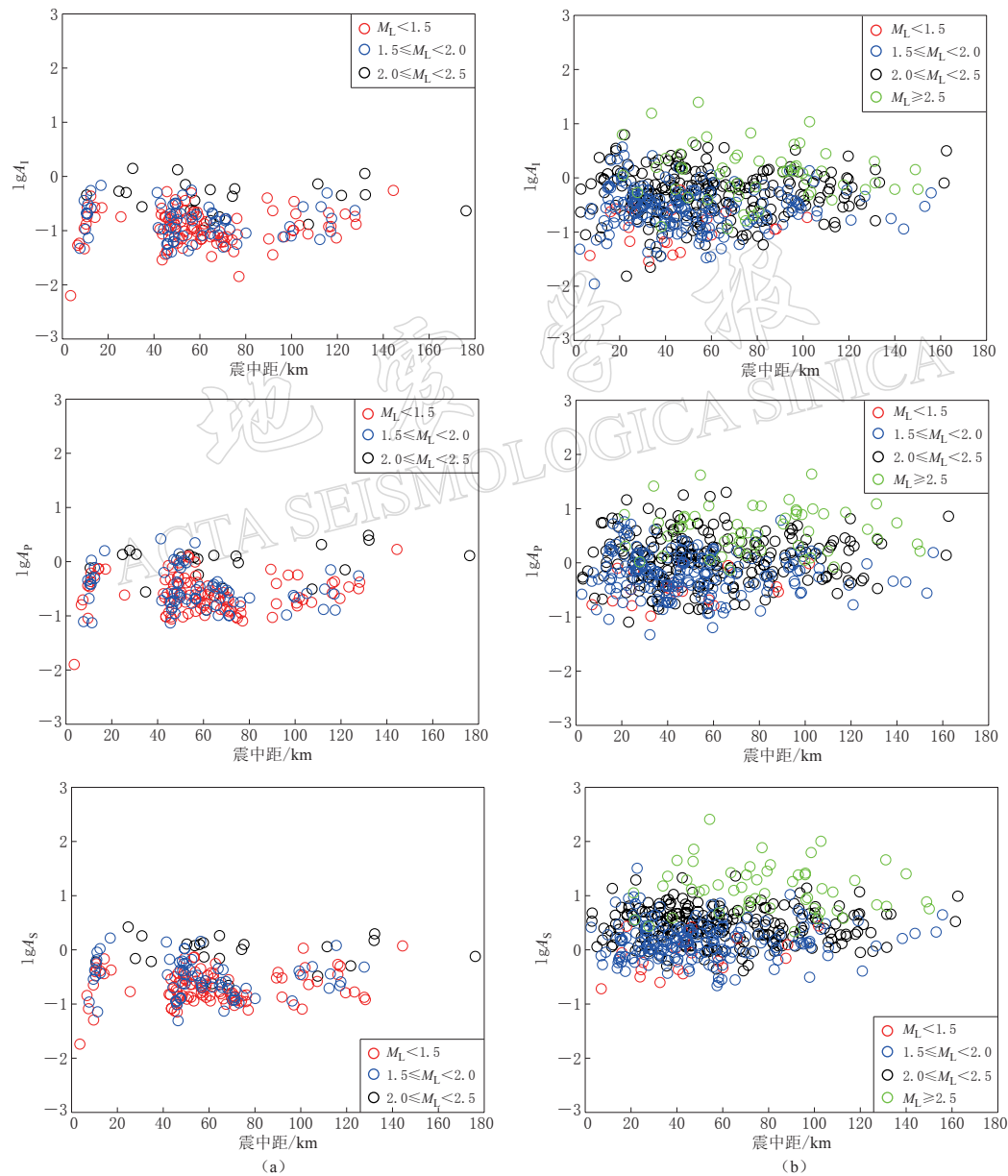


图 5 爆破(a)与地震(b)衰减校正后的振幅值
Fig. 5 Variation of amplitude values of explosion (a) and earthquake (b) after attenuation correction

方, 得到拟合残差如表 1 所示, 然后进行检验分析, 得出这 6 个拟合公式均可以通过显著水平为 0.05 的 F 检验.

表 1 不同振幅的拟合残差
Table 1 Fitting residual of different amplitudes

	S 波最大振幅值 A_S		P 波最大振幅值 A_P		P 波初动振幅值 A_I	
	爆破	地震	爆破	地震	爆破	地震
拟合残差	0.1029	0.1117	0.1247	0.1664	0.1086	0.1792

3.2 振幅衰减校正

对各振幅用得到的衰减拟合曲线进行衰减校正, 取距离 R_0 为 100 km, 将不同距离 R 上的振幅值都校正到距离 R_0 处, 即 $A_{R校正后} = A_{R校正前} + (A_{100理论} - A_{R理论})$. 通过 100 km 处衰减校正重新得到的地震与爆破的 P 波初动振幅、P 波最大振幅、S 波最大振幅值随震中距变化如图 5 所示. 可以看出, 校正后的振幅值随震中距变化较小, 较好地消除了振幅的衰减影响, 达到了本文衰减校正所预期的结果.

3.3 衰减校正后的幅值比

为了得到衰减校正后的幅值比, 同样, 我们计算衰减校正后各台站记录的 A_I/A_S 、 A_P/A_S 值, 并对每个事件不同台站的判据值进行平均, 如图 6 所示. 通过逐点计算阈值法得到研究区衰减校正后爆破与地震 A_I/A_S 判据的阈值为 -0.52 , A_P/A_S 判据的阈值为 -0.15 . 从图 6 和表 2 可以看出: ① 经过衰减校正后, 幅值比判据的识别率提高了. A_I/A_S 识别错误 1 次地震, 正确识别率为 98%; 而 A_P/A_S 则全部识别正确, 正确识别率为 100%. ② 比较

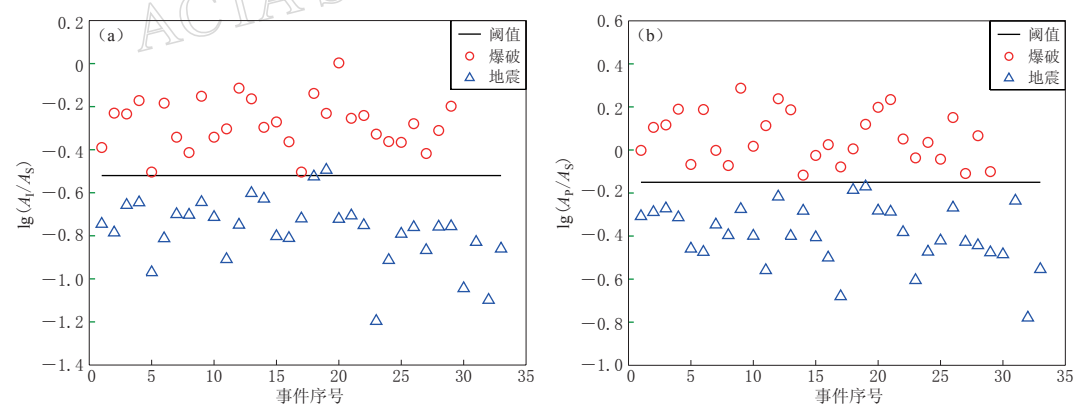


图 6 衰减校正后的 A_I/A_S 值(a)和 A_P/A_S 值(b)

Fig. 6 A_I/A_S (a) and A_P/A_S (b) values after attenuation correction where circles represent explosions, triangles represent earthquakes, and the straight line denotes the threshold

表 2 幅值比判据衰减校正前后的识别率

Table 2 Recognition rate of amplitude ratios before and after attenuation correction

判据	地震总数	爆破总数	衰减校正前			衰减校正后		
			地震误识个数	爆破误识个数	正确识别率	地震误识个数	爆破误识个数	正确识别率
A_I/A_S	33	29	5	5	84%	1	0	98%
A_P/A_S	33	29	1	4	92%	0	0	100%

图 6 与图 3 也可看出, 经过衰减校正后的幅值比同类特征更加聚集, 两类分离程度也有所增大. 因此上述两个幅值比判据相对衰减校正前的识别效果和识别可信度都有所提高, 说明对幅值比判据进行衰减校正是有必要的.

4 衰减曲线对未知事件性质的应用

对于未知性质的事件, 我们无法确定究竟是用地震还是爆破衰减拟合曲线进行校正, 因此我们只能分别用地震与爆破的衰减曲线对未知事件进行衰减校正, 并分析校正后的幅值比结果. 将 62 个事件作为未知属性样本, 分别用爆破与地震的衰减曲线进行校正, 绘制校正后判据值如图 7 所示.

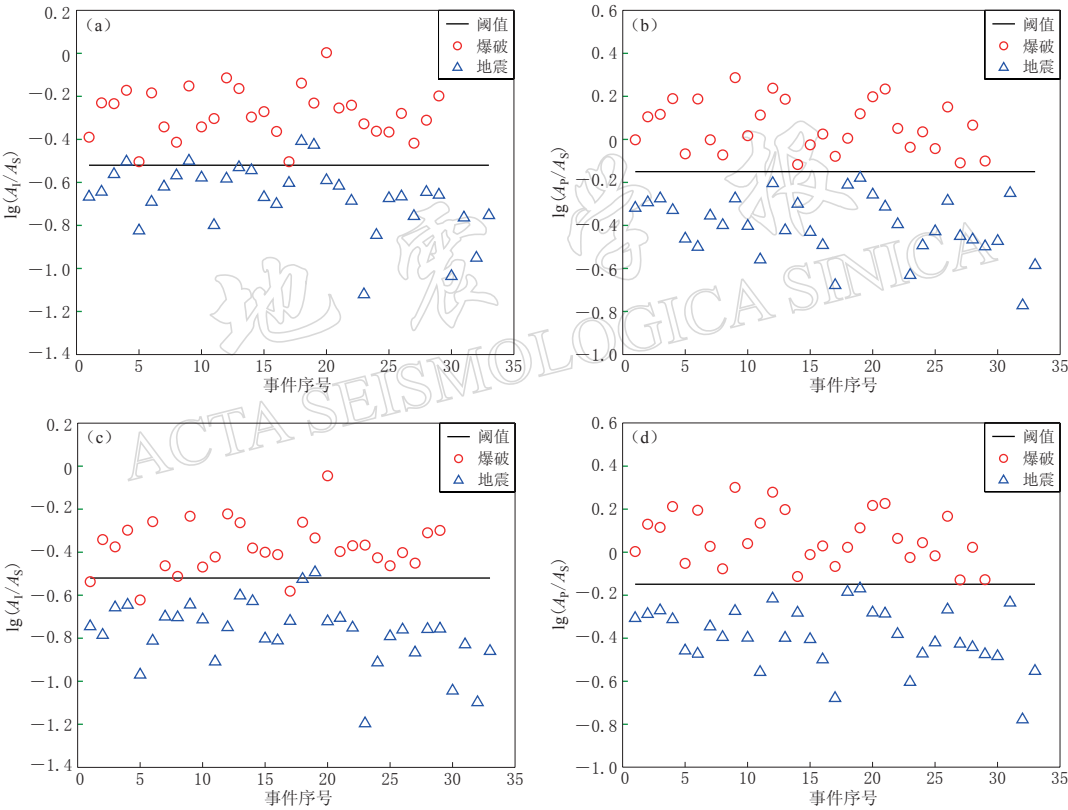


图 7 按爆破(a, b)与地震(c, d)衰减曲线校正后的幅值比

Fig. 7 Amplitude ratios after attenuation correction by explosion attenuation (a, b) and by earthquake attenuation curve (c, d)

Circles represent explosions, triangles represent earthquakes, and the straight line denotes the threshold

1) 以爆破衰减曲线为基准进行校正. 对于本是爆破事件的结果与图 6 一致, 有变化的只有地震事件. 从图 7a 中可以看出, 对于地震 A_1/A_5 判据有整体上移趋势, 即值变大, 结果将 4 次地震误识为爆破, 正确识别率为 94%; 图 7b 中地震 A_p/A_5 判据相对于图 6b 变化较小, 将地震与爆破完全识别正确, 正确识别率为 100%.

2) 以地震衰减曲线为基准进行校正. 相对于图 6 有变化的只有爆破的判据值. 从图 7c, d 中可以看出, 对于爆破 A_1/A_5 判据有整体下移趋势, 即值变小, 结果将 3 个爆破误识

为地震，一次地震误识为爆破，正确识别率为 94%；爆破 A_P/A_S 判据变化也较小，正确识别率为 100%。

分别以地震与爆破的衰减曲线进行校正，其结果的差异主要在于校正值，校正值即为衰减校正中($A_{100\text{理论}} - A_{R\text{理论}}$)一项，也是观测振幅值所需要加上的值，绘制地震与爆破的校正值如图 8 所示。可以看出，在震中距 80 km 前爆破振幅 A_S 、 A_P 和 A_I 的校正值小于地震，即爆破 $A_{R\text{理论}}$ 与 $A_{100\text{理论}}$ 的差异比地震大。这说明爆破 3 个震相振幅随震中距的衰减均比地震快。该结果符合非天然地震与天然地震波传播的理论模型，即非天然地震震源较浅，传播路径主要经过疏松表层，对振动波有较强的吸收作用。

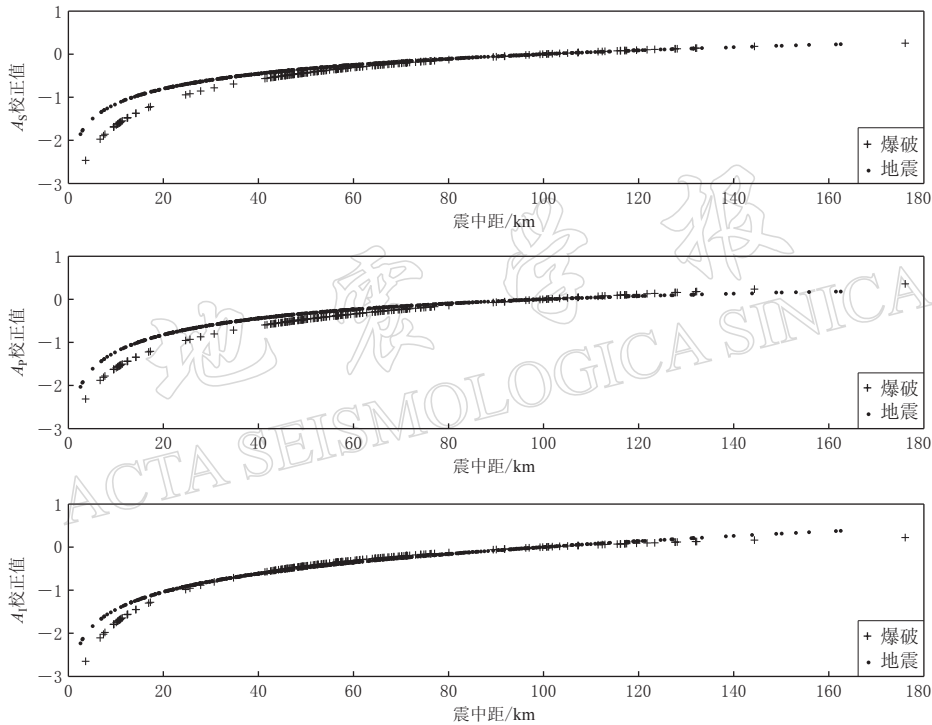


图 8 不同振幅的衰减校正值随震中距的变化

Fig. 8 Attenuation correction values of the amplitudes (A_S , A_P and A_I) versus epicentral distance

从地震与爆破校正值差异上分析，若将地震用爆破衰减曲线的校正值进行校正，各振幅值需要加上的 A_S 、 A_P 和 A_I 校正值相对变小，即校正后 3 个振幅值均变小。其中， A_S 变小较多， A_P 次之， A_I 变大幅度最小。因此经衰减校正后的 A_I/A_S 判据值变大，呈整体上移趋势， A_P/A_S 判据值变化较小。同样，将爆破用地震衰减曲线的校正值进行校正，各振幅值加上的校正值相对变大，即校正后 3 个振幅值均变大。其中， A_S 变大较多， A_P 次之， A_I 变大幅度最小。这样就导致了爆破 A_I/A_S 判据值变小，在判据分布图上整体下移， A_P/A_S 判据值变化较小。

虽然两种衰减曲线校正后的 A_I/A_S 判据值均识别错误 4 个事件，而 A_P/A_S 判据值完全识别正确，识别结果一致，但是由于爆破振幅值资料的震中距较为集中，而地震资料随震中距分布较均匀，且地震资料点较多，故得到的衰减拟合曲线更为准确。因此，我们建

议今后工作中先按地震衰减曲线进行校正为好.

5 讨论与结论

本文主要对小震级事件的幅值比判据进行研究. 首先从快速识别要求出发, 分析量取较为方便的 P 波初动振幅 A_I 与 S 波最大振幅 A_S 比值(A_I/A_S)和 P 波最大振幅 A_P 与 S 波最大振幅比值(A_P/A_S)对地震和爆破事件的识别能力; 其次考虑到传播路径对地震与爆破各振幅的影响, 分别研究地震与爆破 P 波、S 波各振幅随震中距的衰减特性, 并在 100 km 处对振幅进行衰减校正; 最后对比衰减校正前、后的 P/S 幅值比判据的识别能力. 本文得到的结论如下:

1) 在地震波时域速度记录上量取 P 波初动振幅 A_I , P 波最大振幅 A_P 和 S 波最大振幅 A_S , 操作简单方便, 满足快速识别的要求; 而且人工量取各震相振幅比用速度窗口计算量取的震相更单纯, 意义更明确, 量取误差较小.

2) 本文分别研究 P 波震相和 S 波震相振幅随震中距的衰减特性, 具有较明确的物理意义, 体现了地震与爆破不同震相受传播介质的影响不同, 并且单个震相的振幅衰减特性对震级的标定, 即量规函数的修正也有一定的参考意义.

3) 本文得到未经校正的各事件平均台站记录的幅值比判据 A_P/A_S 对地震与爆破的正确识别率为 92%, A_I/A_S 为 84%; 经衰减校正后 A_P/A_S 对地震与爆破的正确识别率为 100%, A_I/A_S 为 98%. 若按未知属性事件, 分别以地震与爆破的衰减曲线进行校正, 则校正后 A_P/A_S 的正确识别率均为 100%, A_I/A_S 为 94%. 这表明幅值比判据在小震级事件中应用效果较好, 经衰减校正后可提高识别能力. 以往研究仅选取 P 波与 S 波最大振幅比值, 本文同时进行初动幅值比的判据研究, 识别效果也较好. 因此在今后实际工作中当 A_P 记录有问题时, 初动振幅与 S 波最大幅值比值也可作为补充判据进行事件性质的识别.

对于我国周边地区, 一般情况下缺少近震中距的波形数据及震相资料, 因而对其小震级事件的震级判定和事件识别误差较大. 本文研究的小震级事件的震中距在 180 km 内, 可以补充一些地区的近震中距资料. 因此下一步工作将尝试用分布更广泛的地震与爆破振幅信息, 检验对周边地区的适用能力, 以提高对周边地区事件性质的识别.

参 考 文 献

- 边银菊, 王婷婷, 郭永霞. 2012. 用决策方法识别地震与爆破[J]. 地震学报, **34**(3): 397–407.
- Bian Y J, Wang T T, Guo Y X. 2012. Discrimination between earthquake and explosions based on decision-making algorithm[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(3): 397–407 (in Chinese).
- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 许力生, 李鸿吉, 牟其铎. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社: 92–93.
- Chen Y T, Wu Z L, Wang P D, Xu L S, Li H J, Mou Q D. 2000. *Digital Seismology*[M]. Beijing: Seismological Press: 92–93 (in Chinese).
- 潘常周, 靳平, 肖卫国. 2007a. 利用克里金技术标定新疆及附近地区 P/S 震相幅值比及其在地震事件识别中的应用[J]. 地震学报, **29**(6): 625–634.
- Pan C Z, Jin P, Xiao W G. 2007a. Calibration of P/S amplitude ratios for seismic events in Xinjiang and adjacent areas based on a Bayesian Kriging method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(6): 625–634 (in Chinese).
- 潘常周, 靳平, 王红春. 2007b. P/S 震相幅值比判据对低震级地震事件的适用性检验[J]. 地震学报, **29**(5): 521–528.
- Pan C Z, Jin P, Wang H C. 2007b. Applicability of P/S amplitude ratios for the discrimination of low magnitude seismic events[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(5): 521–528 (in Chinese).

- 王碧泉, 吴大铭, 边银菊. 1999. 中国华北峰值加速度的衰减特性及与北美东部的比较[J]. 地震学报, **21**(1): 24-31.
- Wang B Q, Wu D M, Bian Y J. 1999. Attenuation characteristics of peak acceleration in Northern China and comparison with eastern North America[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **21**(1): 24-31 (in Chinese).
- 王婷婷, 边银菊. 2011. 识别天然地震和人工爆破的判据选择[J]. 地震地磁观测与研究, **32**(6): 62-67.
- Wang T T, Bian Y J. 2011. Criterion selection of earthquake and explosion recognition[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **32**(6): 62-67 (in Chinese).
- 赵永, 刘卫红, 高艳玲. 1995. 北京地区地震、爆破和矿震的记录图识别[J]. 地震地磁观测与研究, **16**(4): 48-54.
- Zhao Y, Liu W H, Gao Y L. 1995. Distinguishing earthquake, explosion and mine earthquake in Beijing area[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **16**(4): 48-54 (in Chinese).
- Che I Y, Jun M S, Jeon J S. 2007. A compound linear discriminant method for small-magnitude seismic events and its application to the North Korea seismic event of October 9, 2006[J]. *Earth Planets Space*, **59**(10): e41-e44.
- Chun K Y, Wu Y, Henderson G A. 2011. Magnitude estimation and source discrimination: A close look at the 2006 and 2009 North Korean underground nuclear explosions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(3): 1315-1329.
- Fisk M D, Bottone S. 2002. Regional seismic event characterization using a Bayesian formulation of simple Kriging[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(6): 2277-2296.
- Fisk M D, Taylor S R, Patton H J, Walter W R. 2008. Applications of a next-generation MDAC discrimination procedure using two-dimensional grids of regional P/S spectral ratios[C]// *Proceedings of the 30th Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*. Portsmouth, Virginia: National Nuclear Administration; LA-UR-08-05261, **1**: 583-592.
- Fisk M D, Taylor S R, Walter W R, Randall G E. 2009. Seismic event discrimination using two-dimensional grids of regional P/S spectral ratios: Applications to Novaya Zemlya and the Korean Peninsula[C]// *Proceedings of the 30th Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*. Tucson, Arizona: National Nuclear Administration; 465-474.
- Hong T K, Rhie J. 2009. Regional source scaling of the 9 October 2006 underground nuclear explosion in North Korea [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **99**(4): 2523-2540.
- Pasyanos M E, Walter W R. 2009. Improvements to regional explosion identification using attenuation models of the lithosphere[J]. *Geophys Res Lett*, **36**(4): L14303.
- Pasyanos M E. 2010. A general method to estimate earthquake moment and magnitude using regional phase amplitudes [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(4): 1724-1732.
- Peng K Z, Wu F T, Song L. 1985. Attenuation characteristics of peak horizontal acceleration in Northeast and Southwest China[J]. *Earthquake Eng Struc*, **13**(3): 337-350.
- Rodgers A J, Walter W R, Schultz C A, Myers S C, Lay T. 1999. A comparison of methodologies for representing path effects on regional P/S discriminants[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **89**(2): 394-408.
- Shin J S, Sheen D H, Kim G. 2010. Regional observations of the second North Korean nuclear test on 2009 May 25[J]. *Geophys J Int*, **180**(1): 243-250.
- Taylor S R, Velasco A A, Hartse H E, Phillips W S, Walter W R, Rodgers A J. 2002. Amplitude corrections for regional seismic discriminants[J]. *Pure Appl Geophys*, **159**(4): 623-650.
- Taylor S R. 2011. Statistical discriminants from two-dimensional grids of regional P/S spectral ratios[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(4): 1584-1589.
- Walter W R, Mayeda K M, Gok R, Rodgers A J, Sicherman A, Hickling T, Dodge D, Matzel E, Ganzberger M, Parker V. 2005. Regional seismic discrimination optimization with and without nuclear test data: western US examples[C]// *Proceedings of the 27th Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*. Rancho, Mirage: National Nuclear Administration; 693-703.
- Yildirim E, Gülbag A, Horasan G, Dogan E. 2011. Discrimination of quarry blasts and earthquakes in the vicinity of Istanbul using soft computing techniques[J]. *Computers Geosciences*, **37**(9): 1209-1227.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, Yao Z X. 2008. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **98**(6): 2571-2589.