



## P/S型振幅谱比值单台多震相叠加法地震与爆炸震源鉴别

彭亚倩, 郝春月, 赵连锋, 谢小碧, 姚振兴

### 引用本文:

彭亚倩, 郝春月, 赵连锋, 等. P/S型振幅谱比值单台多震相叠加法地震与爆炸震源鉴别[J]. 地球物理学报, 2026, 69(3): 1079–1089.

Peng Y Q, Hao C Y, Zhao L F, et al. Multi-phase stacked P/S-type spectral ratio at a single station for discrimination between earthquake and explosion sources[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2026, 69(3): 1079-1089.

<https://doi.org/10.6038/cjg2025S0671>

## 相关论文

### 基于气枪震源信号的云南漾濞 $M_s6.4$ 地震前后波速变化

苏金波, 杨微, 李孝宾, 王伟涛, 杨军, 陈颀

地球物理学报 2022, 65(2): 649–662 doi: 10.6038/cjg2022P0636

### 利用基于均方根比值筛选的时间尺度相位加权叠加提升背景噪声互相关信噪比

徐嘉鹿, 范兴利, 杨英杰, 罗银河, 谢锦赞

地球物理学报 2026, 69(1): 143–156 doi: 10.6038/cjg2025S0637

### 应用海底地震仪接收函数的多层 $H-\kappa$ 叠加方法研究南海西南次海盆沉积层与洋壳结构

林泽晖, 于传海, 肖卓, 危自根, 宗健业, 吴越楚, 张亚运, 周勇, 苟浪, 徐敏

地球物理学报 2025, 68(12): 4970–4984 doi: 10.6038/cjg2025T0065

### 2021年5月21日漾濞 $M_s6.4$ 地震震源区三维P和S波速度结构与地震重定位研究

胡景, 赵韬, 白超英, 郭浩, 王莹, 李兴旺, 莘海亮

地球物理学报 2021, 64(12): 4488–4509 doi: 10.6038/cjg2021P0456

### 共转换点道集S变换谱相似性的多波地震数据横波波场提取技术

黄德智, 韩立国, 杨飞龙, 李辉峰, 苑强, 孙楠, 杨文平

地球物理学报 2021, 64(4): 1351–1363 doi: 10.6038/cjg2021O0212

### 利用远震P波接收函数研究漾濞 $M_s6.4$ 地震孕震环境

张天继, 金明培

地球物理学报 2021, 64(12): 4462–4474 doi: 10.6038/cjg2021P0374



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

彭亚倩, 郝春月, 赵连锋等. 2026. P/S 型振幅谱比值单台多震相叠加法地震与爆炸震源鉴别. 地球物理学报, 69(3): 1079-1089, doi: 10.6038/cjg2025S0671.

Peng Y Q, Hao C Y, Zhao L F, et al. 2026. Multi-phase stacked P/S-type spectral ratio at a single station for discrimination between earthquake and explosion sources. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 69(3): 1079-1089, doi: 10.6038/cjg2025S0671.



# P/S 型振幅谱比值单台多震相叠加法 地震与爆炸震源鉴别

彭亚倩<sup>1,2</sup>, 郝春月<sup>1\*</sup>, 赵连锋<sup>2\*</sup>, 谢小碧<sup>3</sup>, 姚振兴<sup>2</sup>

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

3 美国加州大学圣克鲁兹分校, 地球物理与行星物理研究所, 圣克鲁兹 CA 95064

**摘要** 爆炸震源与天然地震产生的地震记录具有显著差别. 前者接近各向同性震源, 产生丰富的 P 波但 S 波的能量较弱; 后者是与断层运动有关的位错源, 能产生较高能量的 S 波但 P 波能量较弱. 上述能量辐射差异为区分地下核试验和天然地震事件提供了物理基础. 2006 年 10 月 9 日朝鲜进行了首次地下核试验, 使用牡丹江 (MDJ) 单台垂直分量地震资料, 在 9.0~15.0 Hz 高频范围的 Pg/Lg 振幅谱比能够判断爆炸源属性. 由于局部随机效应影响, 单台观测资料可能因判别频带较窄而产生较高漏检率, 制约了在低频段的震源属性判别能力. 通过区域台网中多台数据叠加能够有效减少单台观测数据中的起伏, 将可识别频带向下拓展到 2.0 Hz, 因而能够在 2.0~15.0 Hz 频带中将朝鲜地下核爆炸从地震事件群组中识别出来. 上述经验启发我们通过叠加单一台站观测到的不同类型 P/S 谱比值提高区分各类震源的能力, 以适应在偏远地区只存在单台记录的情形. 我们尝试增加新的振幅比类型鉴别事件类型, 例如 Pg/Sn, 并对各种振幅进行了不同叠加方式的实验, 取得了优于常用的单台 Pg/Lg 振幅比得到的鉴别效果. 以朝鲜地下核试验为例, 在有限观测情况下, 基于单台观测资料得到的不同震相频谱比叠加能在 2.0~15.0 Hz 频带内有效地将地下核试验从地震事件群组中区分出来.

**关键词** P/S 振幅谱比值; 单台多震相叠加; 爆炸和天然地震识别; 朝鲜地下核试验

中图分类号 P315

收稿日期 2024-11-19, 2025-06-12 收修定稿

DOI: 10.6038/cjg2025S0671

CSTR: 32084.14.cjg2025S0671

## Multi-phase stacked P/S-type spectral ratio at a single station for discrimination between earthquake and explosion sources

PENG YaQian<sup>1,2</sup>, HAO ChunYue<sup>1\*</sup>, ZHAO LianFeng<sup>2\*</sup>, XIE XiaoBi<sup>3</sup>, YAO ZhenXing<sup>2</sup>

1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2 KLEPP, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California at Santa Cruz, Santa Cruz, CA 95064, USA

**Abstract** The seismograms from natural earthquakes and explosions are significantly different. Explosions tend to generate strong compressional waves and weak shear waves. In contrast, natural earthquakes are primarily driven by dislocation sources, resulting in strong shear waves and relatively weak compressional

基金项目 国际合作项目 (2017-1892) 和国家自然科学基金 (U2139206) 资助.

第一作者简介 彭亚倩, 女, 硕士研究生, 主要从事爆炸地震学研究. E-mail: peng\_yaqian@163.com

\* 通讯作者 郝春月, 女, 副研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: haovanila@sina.com

赵连锋, 男, 研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: zhaolf@mail.iggcas.ac.cn

waves. The differences in energy radiations between P- and S-waves can be used to identify explosions and natural earthquakes. On October 9, 2006, North Korea conducted the first underground nuclear test. When using the spectral ratio  $P_g/L_g$  from the vertical component seismic record at the Mudanjiang (MDJ) station to identify source types, it can discriminate between explosion source attributes at frequencies between 9 and 15 Hz. Due to the random effects in the data, using single-station records for discrimination may result in a narrow frequency band and a higher misdetection rate, especially at lower frequencies and for noisy data. Recent investigations have demonstrated that stacking spectral ratios from multiple stations in a regional network can reduce data fluctuations at individual stations, expand the useful frequency band, and successfully identify D.P.R. Korea nuclear explosions within earthquake populations within frequencies of 2 ~ 15 Hz. The above situation inspired us to consider stacking P/S type spectral ratios, such as  $P_g/L_g$ ,  $P_n/L_g$ , and  $P_n/S_n$ , observed at a single station, for effectively identifying earthquakes and explosions. We designed a method for stacking different types of spectral ratios at a single station. The new method achieved good identification results and demonstrated that the D.P.R. Korea underground nuclear tests can be discriminated from earthquake populations within frequencies of 2 ~ 15 Hz. The new method is suitable for situations where only a single station is available in remote areas. Also, we calculated and stacked the spectral ratio  $P_g/S_n$ .

**Keywords** P/S-type spectral ratio; Multi-phases stacked spectral ratio at a single station; Discrimination between earthquakes and explosions; D.P.R. Korea nuclear explosion

## 0 引言

爆炸震源近似于一个各向同性震源,能辐射丰富的 P 波但 S 波能量较弱;而构造地震的震源机制接近双力偶源,可产生较高能量的 S 波但 P 波能量较弱.而坍塌事件则表现出与爆炸相似但震源特性略有不同的特征,部分 P 波和 S 波震相比值可能介于核试验和天然地震之间.上述能量辐射的显著差异为区分地下核试验,天然地震以及坍塌事件提供了物理基础.早期超级大国进行的核试验往往当量巨大,很容易用全球台网的数据,例如 mb/Ms 震级比等,来识别震源类型.近年来,随着核武能力逐步向中小国家扩散,小型核试验越来越盛行.由于信噪比较低,小型地下核试验或低当量化学爆炸很难在全球台网产生高质量的地震记录并用于核侦测.另一方面,距离约 200 km 的区域台网不但更加接近震源,而且能够记录到丰富的区域震相.因而区域震相如  $L_g$  波能提供信噪比较高的高频信号,用于对爆炸事件的检测,尤其对于低震级事件表现突出(例如,林鑫等, 2019). Willis 等 (1963) 提出基于剪切波与压缩波最大振幅比值来判别事件类型.通过分析同一台站记录的美国内华达试验场的爆炸和余震事件的  $L_g/P_n$  比值,发现爆炸事件的比值为 2.0,地震事件的比值为 10.6 (Willis, 1963). Murphy 和 Bennett (1982) 利用  $L_g$  波振幅谱对美国内华达试验场及邻

近区域的构造地震进行研究,发现在 0.5 ~ 5.0 Hz 频段,地震和爆炸的  $L_g$  谱相差 3 倍,具有显著区分效果,可以作为有效判别依据.2006 年 10 月 9 日的朝鲜首次地下核试验, Kim 和 Richards (2007) 利用全球地震台网牡丹江台 (MDJ) 的 P/S 类型的振幅谱比值 ( $P_g/L_g$ ) 判断是一次爆炸事件.尽管仅采用单台数据,在 9.0 ~ 15.0 Hz 的高频范围内仍能够成功判定该事件为爆炸事件.

早期地震学大多基于单台观测数据进行研究,这种方法至今仍在偏远地区地震监测中发挥着重要作用,特别是在月震和火星震等行星地震学研究中起着重要作用 (Magotra et al., 1989; Ruud et al., 1988).然而,由于局部随机效应的影响,单台观测在区分地震与爆炸事件时存在明显局限性.一方面,可用的判别频带较窄,导致漏检率较高;另一方面,在较低频率下几乎无法实现有效判别.这种局限性主要来源于地震波对传播路径和接收结构的强烈依赖性,因此单台记录的  $P_g/L_g$  谱比值难以有效判别地震与爆炸事件.当震中距较大时,地震波传播路径中的介质不均匀性会显著影响 P/S 振幅谱比,因此需要考虑路径传播效应的校正 (Walter et al., 2018).与远震震相相比,区域地震波频率更高,主要在地壳和上地幔中传播,容易受到路径上不同尺度非均匀性的影响 (谢小碧和赵连锋, 2018).研究表明,采用台网平均的  $P_g/L_g$  振幅谱比值可有效降低路径和接收结

构效应的影响 (Kim et al., 1993). Zhao 等 (2008) 使用中国东北地区丰富的区域地震记录, 经过振幅-频率-距离校正后进行台网资料叠加处理, 获得了不同类型的 P 波和 S 波的振幅谱比值 (如 Pg/Lg、Pn/Lg 和 Pn/Sn), 拓展了使用数据的频带范围, 减少了单台观测造成的数据波动. 因而能够在 2 ~ 15 Hz 范围内有效区分朝鲜地下核爆炸与地震事件. He 等 (2018) 利用区域地震资料计算的 P/S 型谱比值 (如 Pg/Lg、Pn/Lg 和 Pn/Sn), 准确判定 2017 年 9 月 3 日在中朝边境附近的朝鲜核试验场发生的地震事件为爆炸事件, 并成功识别出 8 min 之后发生的巷道坍塌事件.

考虑拐角频率和震源特性对 P/S 振幅谱比值的影响, 能够进一步提高事件分类精度. 较大事件的震源谱往往具有较低的拐角频率 (Shearer, 2009). 在朝鲜核试验场的 6 次核试验中, 爆炸震级远大于历史上的天然地震, 造成地震记录中 P 波和 S 波的拐角频率的差异, 这种差异会影响 P/S 振幅谱比值. 当频率高于爆炸事件的 S 波拐角频率时, P/S 谱比值的判别效果更佳 (Koper et al., 2008). 根据震源特性、几何扩散、衰减和场地效应对频谱进行校准, 能够提升事件判别的准确率 (Hartse et al., 1997; Taylor et al., 2002). 经过震源和距离校正的 P/S 型谱比值能够在 2 Hz 及以上频段均有效区分朝鲜地下核试验与构造地震 (Ding et al., 2024; Walter et al., 2018).

1996 年联合国大会通过的《全面禁止核试验条约》, 迄今已获得全球 180 多个国家签署. 在全球范围对核试验进行监测以确保条约的实施, 已经成为地震学研究的前沿课题, 而利用 P/S 类型振幅谱比对事件进行识别成为其中一项重要内容. 在台网稠密地区, 可以利用多个台站的观测数据进行台网平均 P/S 振幅谱比值计算, 以减少路径效应和震源特性的不确定性, 从而提高事件识别的准确率. 然而, 在台站稀疏或难以部署地震台的地区 (如极地、深海及行星地震探测), 单台识别成为必要手段 (Giardini et al., 2020; Maguire et al., 2023; Sun et al., 2024; 常利军等, 2012). 为了提高单台资料的事件识别效率, 我们尝试使用单台多震相振幅谱比值叠加的方法. 该方法与传统的单震相谱比值相比, 能够降低局部路径效应和噪声影响, 增强单台数据对事件判别能力 (Tibi, 2021). 同时, 为了降低识别阈值并拓展判别频带, 我们特别引入了振幅谱比值 Pg/Sn 的计算, 探索和开发 P/S 型振幅谱比值单台多震相谱

比值叠加方法, 用于鉴别地震与爆炸震源属性. 本文利用 MDJ 台的数字记录对方法进行验证. 该台站距朝鲜核试验场约 372 km, 具有稳定的数据质量, 连续记录了 2006—2017 年以来的 6 次朝鲜地下核试验及其余震事件, 适合分析不同类型事件在 P/S 振幅谱比值上的差异, 并验证单台多震相谱比值叠加方法在核爆事件识别中的有效性.

## 1 区域范围内的单台地震数据

自 2006 年 10 月 9 日至 2017 年 9 月 3 日, 朝鲜在丰溪里核试验场共进行了 6 次地下核试验 (分别记为 NKT1-NKT6) (Zhao et al., 2008, 2016, 2012, 2014; 谢小碧和赵连锋, 2018), 其空间分布如图 1 所示, 具体参数详见表 1 (Yang et al., 2021). 6 次核试验的爆炸当量逐次增大, 其中 2017 年 9 月 3 日进行的第 6 次核试验体波震级达到 6.3, 估计当量为 120 ~ 200 kT (He et al., 2018; Yang et al., 2021). 此次爆炸导致大规模巷道坍塌, 诱发了构造地震 (Tian et al., 2018). 位于朝鲜核试验场东北方向约 372 km 处的牡丹江台完整记录了 6 次朝鲜地下核试验及其余震事件. 图 2 展示了该台对朝鲜地下核试验及邻近地震事件的垂直分量速度记录. 核爆炸的波形具有较高的相似性, 表现出典型的浅源爆炸特征, P 波能量强, Lg 波能量较弱, S 波不发育, 并出现 3 ~ 5 s 的短周期 Rayleigh 波.

## 2 多震相谱比值叠加震源属性鉴别方法

首先收集目标事件在区域范围内的垂直分量宽频带波形资料, 用于计算不同震相的振幅谱比值. 通过反褶积去除仪器响应后, 利用不同的群速度窗拾取区域震相, Pn 波的群速度范围为 7.8 ~ 6.4  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , Pg 波为 6.3 ~ 5.1  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , Sn 波为 4.6 ~ 4.0  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , Lg 波为 3.7 ~ 2.9  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  (e.g., Zhao et al., 2008). 对所获得的不同震相波列应用 20% 的余弦窗函数后进行了 Fourier 变换, 提取了位移谱. 为确保质量, 采用了具有纯大陆路径的数据, 使用相对稳定的事件前噪声计算信噪比, 忽略了前驱震相尾波噪声的影响 (e.g., Zhao et al., 2008). 由位移谱直接计算得到 P/S 型谱比值. 作为例子, 图 3a 给出了 Pn/Sn 振幅比, 其中灰色线为直接计算得到的振幅谱比. 该比值

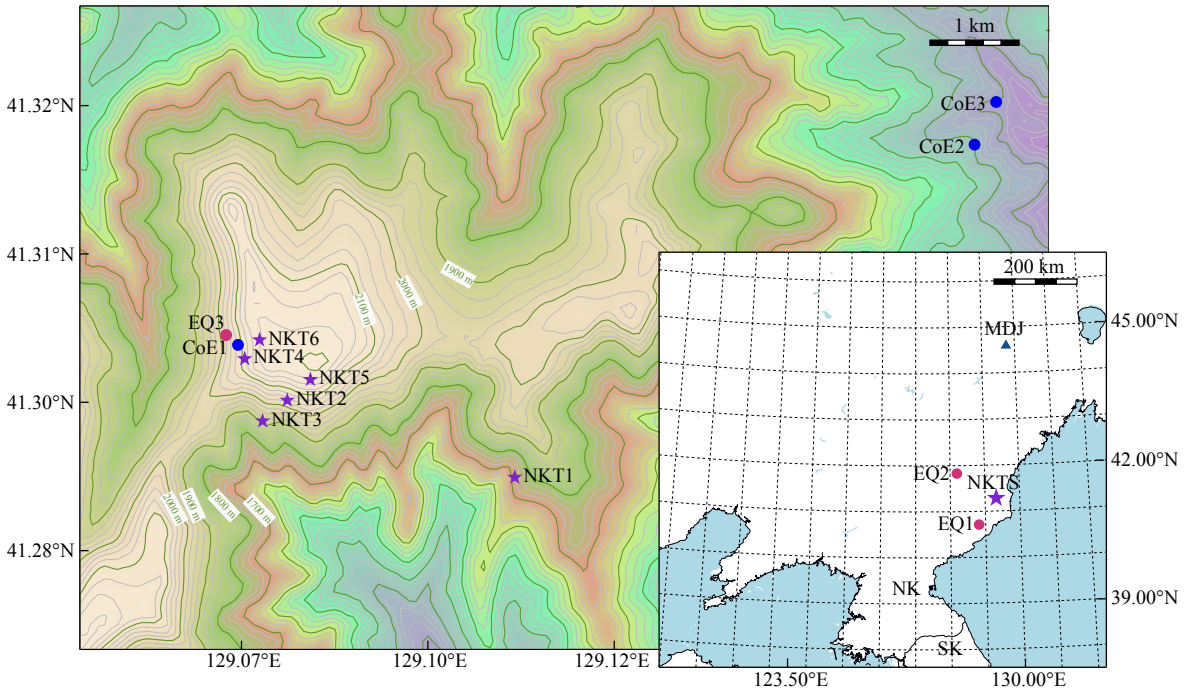


图 1 朝鲜核试验场及邻近事件位置图

五角星为 6 次朝鲜核试验 (NKT1-NKT6), 红色和蓝色实心圆分别为试验场周边的天然地震事件和爆炸诱发地震事件。  
内嵌地图展示了朝鲜核试验场、MDJ 台站, 以及试验场附近两个天然地震的震中位置。

Fig. 1 Map showing locations of the D.P.R. Korea test site and adjacent events

The pentagrams mark six D.P.R. Korea nuclear tests (NKT1-NKT6), and the red and blue solid circles represent natural earthquakes and subsequent collapses following the explosions. The inset map displays locations of the D.P.R. Korea test site, the MDJ station, and epicenters of two nearby natural earthquakes.

表 1 朝鲜核试验场邻近事件的定位和发震时刻

Table 1 Location and timing of seismic events near the D.P.R. Korea nuclear test site

朝鲜核试验场 邻近事件	日期	发震时刻 (hh:mm:ss.ssss) <sup>b</sup>	纬度 (°N) <sup>b</sup>	经度 (°E) <sup>b</sup>	震源深度(km) <sup>b</sup>	震级 <sup>b</sup>
NKT1 <sup>a</sup>	2006-10-09	01:35:28.0000	41.29	129.11	0.330	4.3
NKT2	2009-05-25	00:54:43.1409	41.30	129.08	0.540	4.7
NKT3	2013-02-12	02:57:51.2632	41.29	129.07	0.506	5.1
NKT4	2016-01-06	01:30:00.8655	41.30	129.07	0.468	5.1
NKT5	2016-09-09	00:30:01.3816	41.30	129.08	0.521	5.3
NKT6	2017-09-03	03:30:01.6188	41.30	129.07	0.570	6.3
CoE1	2017-09-03	03:38:32.7963	41.30	129.07	0 <sup>c</sup>	5.3 <sup>c</sup>
CoE2	2017-09-23	08:29:16.9110	41.32	129.17	5 <sup>c</sup>	3.6 <sup>c</sup>
CoE3	2017-10-12	16:41:08.2134	41.33	129.17	5 <sup>c</sup>	2.9 <sup>c</sup>
EQ1 <sup>e</sup>	2002-04-16	22:52:38.1900	40.71	128.67	10	4.6
EQ2 <sup>e</sup>	2004-12-16	18:59:14.6000	41.80	127.98	10	4.0
EQ3 <sup>e</sup>	2020-01-29	00:33:44.8800	41.30	129.07	10	2.6

注: <sup>a</sup> NKT1-6: 朝鲜地下核试验; CoE1-3: 坍塌事件; EQ1-3: 天然地震; <sup>b</sup> 来自 Yang et al., 2021; He et al., 2018; <sup>c</sup> 来自 U.S. Geological Survey, 国际地震中心 ISC 的事件以及数据。

在一定程度上消除了路径和激发函数中的共同影响, 突出了震源辐射 P 波和 S 波能量的差异, 为识别震源类型提供了依据。由于直接计算得到的谱振幅比具有剧烈的随机性, 在对数域对其进行了平滑

处理, 使用矩形平滑函数, 频率范围是  $[f_{ref}/\sqrt{2}, \sqrt{2}f_{ref}]$ , 其中  $f_{ref}$  为参考频率, 取值步长为 0.5 Hz (Bowman and Kennett, 1991; Hartse et al., 1997; Richards and Kim, 2007; Yang, 2002).

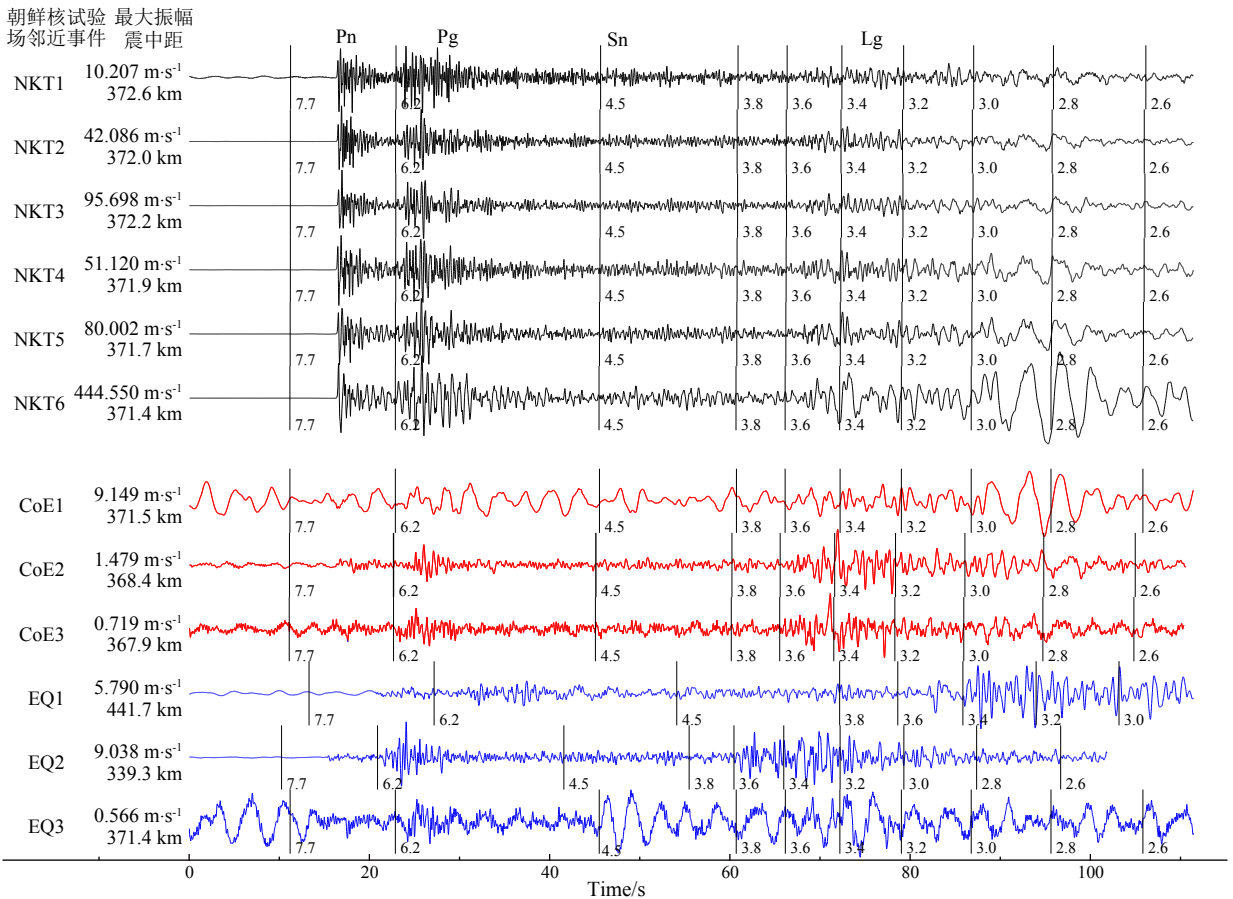


图 2 MDJ 台记录的发生在朝鲜核试验场附近事件的垂直分量速度记录 (滤波频段 0.5 ~ 20 Hz)

波形上的竖线标出了相应的群速度值。NKT1-NKT6 呈现出脉冲状的 P 波震相, 较弱的 Lg 震相和发育的 Rayleigh 波震相, 为典型的爆炸事件; CoE1 的波形中缺少高频成分, 且紧跟在 NKT6 之后, 表明可能是一个爆炸引起的坍塌; CoE2 和 CoE3 地震图中的 P 波能量明显低于 S 波, 表明其非爆炸源性; 天然地震事件 EQ1-EQ3 的地震图显示出相对发育的 S 波。

Fig. 2 Normalized vertical-component velocity seismograms recorded by MDJ for six known nuclear explosions, three aftershocks or collapses, and three nearby natural earthquakes

The event dates, maximum amplitudes, and epicenter distances are listed on the left. The vertical bars on the waveforms indicate apparent group velocities. Seismograms of the nuclear explosions are characterized by impulsive P-wave onsets, relatively weak Lg phases, and 3- to 5-second short-period Rayleigh waves. The waveform from CoE1 lacks high-frequency content. Considering it happens

在信噪比较低的情况下, 计算谱比值可能受到噪声的干扰, 无法准确反映谱的变化特征。因此, 考虑不同震相的信噪比至关重要 (图 3b 和 3c)。当信噪比低于给定阈值时, 应剔除计算得到的谱比值。以 Pn/Sn 为例, 仅当信噪比大于阈值 1.0 时 (其对数值为 0, 即图中的水平虚线), 振幅谱比值才有效 (Hartse et al., 1997; Zhao et al., 2008)。通过这样的筛选过程得到如图 3d 所示的用于区分天然地震与爆炸震源属性的谱比值。

### 3 朝鲜地下核试验事件识别

爆炸事件通常产生较强的高频能量, 这一特性使得 P/S 振幅谱比值成为区分地震与爆炸的重要判

据 (Koper et al., 2008)。在前人的研究中已经证明该方法能够有效识别 2006 至 2017 年朝鲜进行的地下核试验, 以及由此引发的坍塌事件 (Walter et al., 2018)。虽然 P/S 振幅谱比值方法经台网平均后能更加有效地区分核爆与地震 (Kim et al., 2018), 在台站稀疏地区或特殊环境下, 依赖单台数据进行事件鉴别仍然具有重要意义。为此, 我们发展了单台多震相谱比值叠加方法。首先对单台数据计算 Pn/Sn、Pn/Lg、Pg/Lg 和 Pg/Sn 等 P/S 类型的振幅谱比值, 然后通过对多种谱比值的综合叠加增强对事件识别的可靠性。利用牡丹江台对朝鲜地下核试验和天然地震的观测资料验证了该方法对爆炸事件识别的有效性 (图 4)。通常, 爆炸震源的能量释放集中, 信号频谱集中在较高频率范围, 因此通常爆炸信号的信噪

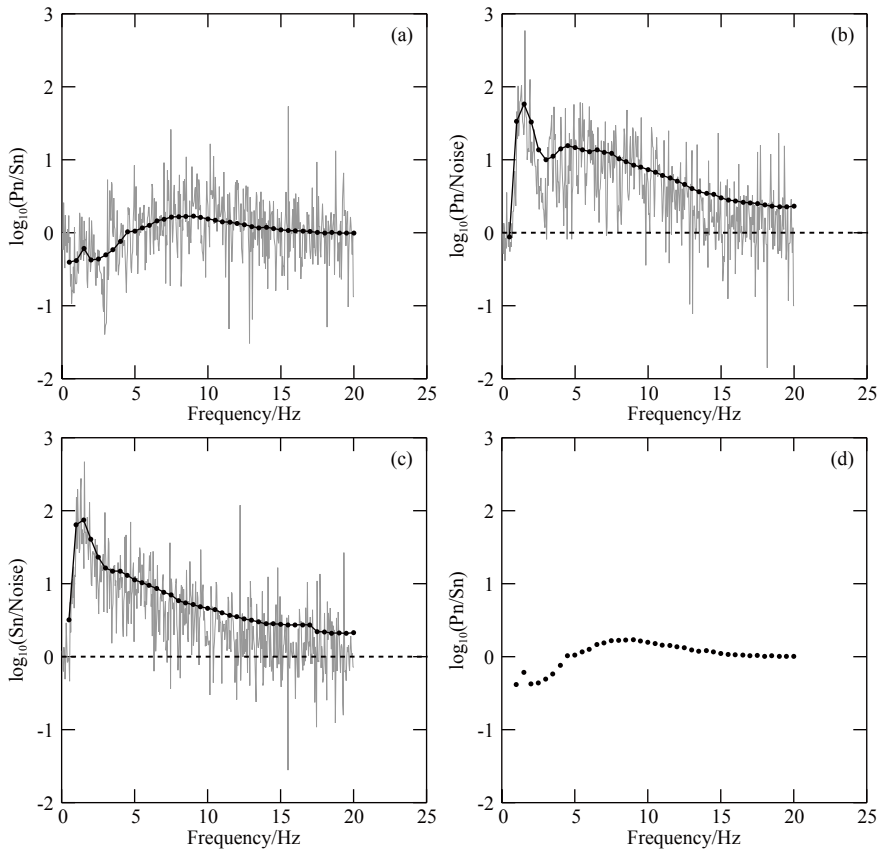


图 3 根据牡丹江台记录到的 2002 年 4 月 16 日天然地震垂直分量地震图计算 P/S 型振幅谱比的流程

(a) Pn/Sn; (b) Pn 震相信噪比; (c) Sn 震相信噪比; (d) 信噪比筛选后的 Pn/Sn 振幅谱比值. 其中纵坐标为对数振幅比, 横坐标为频率, 灰色线为直接计算的振幅比, 黑色实心圆连成的曲线为平滑后的结果, 其中平滑计算在对数域内进行.

Fig. 3 Vertical component P/S spectral ratios calculated from seismograms recorded by the MDJ for a natural earthquake that occurred on April 16, 2002

(a) Pn/Sn; (b) Pn signal-to-noise ratio; (c) Sn signal-to-noise ratio; (d) Pn/Sn amplitude spectral ratios screened by the signal-to-noise ratio threshold. The vertical axis represents the logarithmic ratio of spectral amplitudes, the horizontal axis represents frequency, the gray lines are directly calculated values, and the curves linking solid circles are their smoothed values.

比高. 在较低频段爆炸事件单一震相的最高信噪比达到 2.9, 且在整个频段始终高于给定阈值 1.0, 因此认为爆炸事件的振幅谱比值几乎不受噪声影响 (图 5). 通过比较地震和爆炸的谱比值, 可以看出地震的振幅谱比值较分散, 而爆炸事件的振幅谱比值则趋于一致 (图 6).

为研究地震与爆炸事件振幅谱比值的差异, 将从不同类型事件得到的各种震相的频谱比进行了比较. 图 7 展示了各种谱比值随频率的变化趋势. 在较高频率下爆炸事件的 P/S 比值显著高于天然地震和坍塌事件. 这是由于爆炸事件的震源特性更多体现在高频段; 地震源的剪切分量占优势, S 波能量强, 使得谱比值低于爆炸源.

在地震与核爆事件鉴别时, 通常会采用多参量分析方法, 已经取得了较好的应用, 其中组合两个或多个地震判别因子能够增强识别能力 (Anderson and

Taylor, 2002; Sandvin and Tjøstheim, 1978; Taylor et al., 1989). Tibi (2021) 经过比较认为 Pg/Lg 和 Pn/Lg 组合对爆炸和地震事件的区分能力最为显著. 本文提出将两个或多个不同震相振幅谱比值进行组合叠加, 从而得到一个更加有代表性的振幅比值, 以期能够减少单一谱比值中某些异常点对计算结果的影响, 获得更加稳定的识别效果. 以下我们提供三种对不同谱比值的组合方式. 计算组合的方法类似于计算谱比值的几何平均, 例如对 A, B, C 三种比值的几何平均值为  $(A \cdot B \cdot C)^{\frac{1}{3}}$ , 因此其对数值为  $\frac{1}{3} \log_{10}(A \cdot B \cdot C)$ :

(1) 将 Pn/Lg 与 Pg/Lg 进行组合, 其表达式为

$$\text{组合} \left( \frac{\text{Pn}}{\text{Lg}}, \frac{\text{Pg}}{\text{Lg}} \right) = \frac{1}{2} \log_{10} \left[ \frac{\text{Pn} \cdot \text{Pg}}{\text{Lg}^2} \right], \quad (1)$$

其效果见图 8a.

(2) 将振幅谱比值 Pn/Sn、Pn/Lg 和 Pg/Lg 进行叠加:

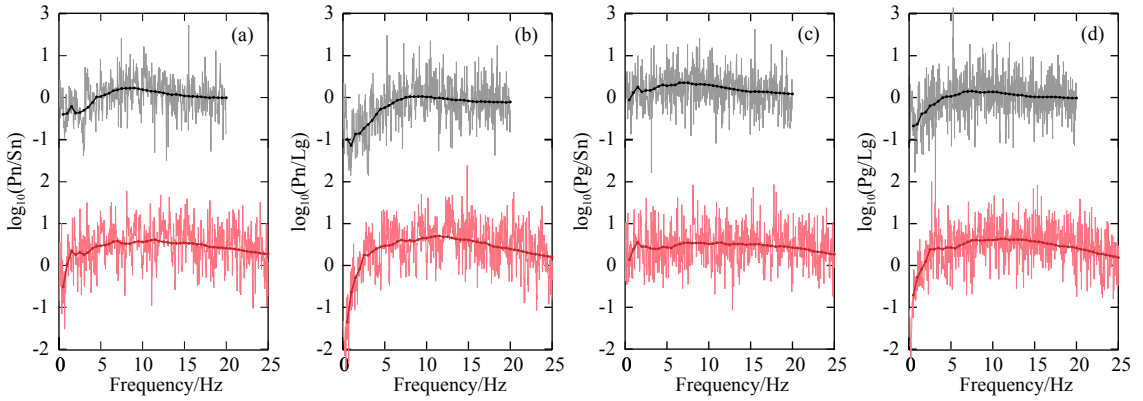


图 4 根据牡丹江台记录到的 2002 年 4 月 16 日天然地震 (黑色) 和 2009 年 5 月 25 日朝鲜核试验 (红色) 垂直分量地震图计算出的 P/S 型振幅谱比值

(a) Pn/Sn; (b) Pn/Lg; (c) Pg/Sn; (d) Pg/Lg. 其中纵坐标为对数振幅比, 横坐标为频率, 细线表示实测振幅比, 实心圆连成的粗线表示其平滑曲线, 其中平滑在对数域内计算.

Fig. 4 P/S spectral ratios calculated from vertical component seismograms recorded by MDJ for a natural earthquake occurred on April 16, 2002 (black lines) and a nuclear explosion on May 25, 2009 (red lines)

(a) Pn/Sn, (b) Pn/Lg, (c) Pg/Sn and (d) Pg/Lg. The vertical axis represents the logarithmic amplitude spectral ratio, and the horizontal axis represents frequency. The thin lines are directly calculated ratios, and the thick curves linking solid circles are their smoothed values.

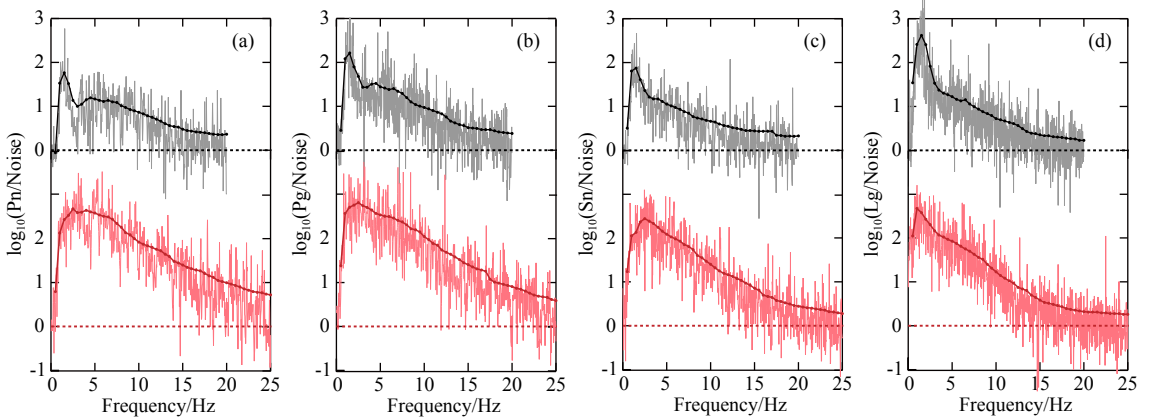


图 5 牡丹江台记录到的 2002 年 4 月 16 日天然地震 (黑色) 和 2009 年 5 月 25 日朝鲜核试验 (红色) 不同震相垂直分量记录的信噪比

(a) Pn/Noise; (b) Pg/Noise; (c) Sn/Noise; (d) Lg/Noise. 其中纵坐标为对数域信噪比, 横坐标为频率, 浅色线为实测振幅比, 深色实心圆连成的是平滑后的曲线, 平滑在对数域中计算.

Fig. 5 Vertical component signal-to-noise ratios

(a) Pn/Noise, (b) Pg/Noise, (c) Sn/Noise, (d) Lg/Noise. MDJ records data for a natural earthquake on April 16, 2002 (black lines) and a D.P.R. Korea nuclear explosion on May 25, 2009 (red lines). The vertical axis represents the logarithmic spectral ratio, the horizontal axis represents frequency, the thin lines are directly calculated ratios, and the thick curves linking solid circles are smoothed values.

$$\text{组合} \left( \frac{\text{Pn}}{\text{Lg}}, \frac{\text{Pg}}{\text{Sn}}, \frac{\text{Pg}}{\text{Lg}} \right) = \frac{1}{3} \log_{10} \left[ \left( \frac{\text{Pn}}{\text{Sn}} \right) \cdot \left( \frac{\text{Pg}}{\text{Lg}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

Sn 波是地幔顶部传播的 S 波, Lg 波是地壳中传播的导波, 将二者叠加在理论上可以减少单一震相识别的不确定性, 提高判别能力, 见图 8b.

(3) 将 Pn/Sn、Pn/Lg、Pg/Sn 与 Pg/Lg 四种类型振幅谱比值叠加, 可以表示为

$$\text{组合} \left( \frac{\text{Pn}}{\text{Sn}}, \frac{\text{Pn}}{\text{Lg}}, \frac{\text{Pg}}{\text{Sn}}, \frac{\text{Pg}}{\text{Lg}} \right) = \frac{1}{2} \log_{10} \left[ \frac{\text{Pn} \cdot \text{Pg}}{\text{Sn} \cdot \text{Lg}} \right]. \quad (3)$$

由于 Sn 波的加入, 低频 P/S 的识别能力减弱, 见图 8c. 不同类型 P/S 振幅谱比的叠加结果表明, 将 Pn/Lg 和 Pg/Lg 震相组合后, 爆炸事件的 P/S 比值显著高于地震和坍塌事件, 在高频段具有较高的判别能力. 因此, Lg 波在天然地震中较强, 在爆炸中较弱, P/S 振幅比在天然地震中较低, 在爆炸中较高, 形成显著的对比. Lg 波在低频部分信号较强, 路径衰减较小, 因此 Pn/Lg 和 Pg/Lg 比值的计算更稳定, 不易受到噪声影响; Sn 波在低频部分的信噪比较

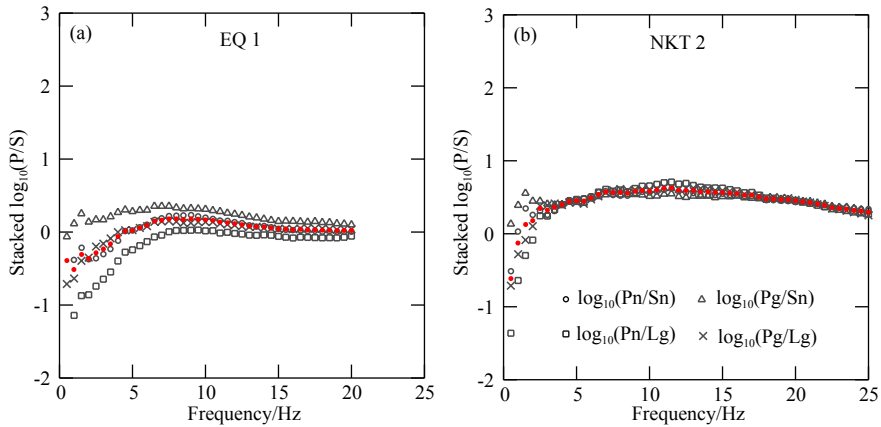


图 6 经信噪比阈值筛选的牡丹江台对 (a) 2002 年 4 月 16 日天然地震和 (b) 2009 年 5 月 25 日朝鲜核试验得到的四种振幅谱比值 (黑色符号) 以及它们在对数域的算术平均值 (红色实心圆)

Fig. 6 Four spectral amplitude ratios screened by signal-to-noise ratio threshold (black symbols) and their arithmetic means in logarithmic scale (red solid circles) for (a) an earthquake on April 16, 2002, and (b) the D.P.R. Korea nuclear test on May 25, 2009

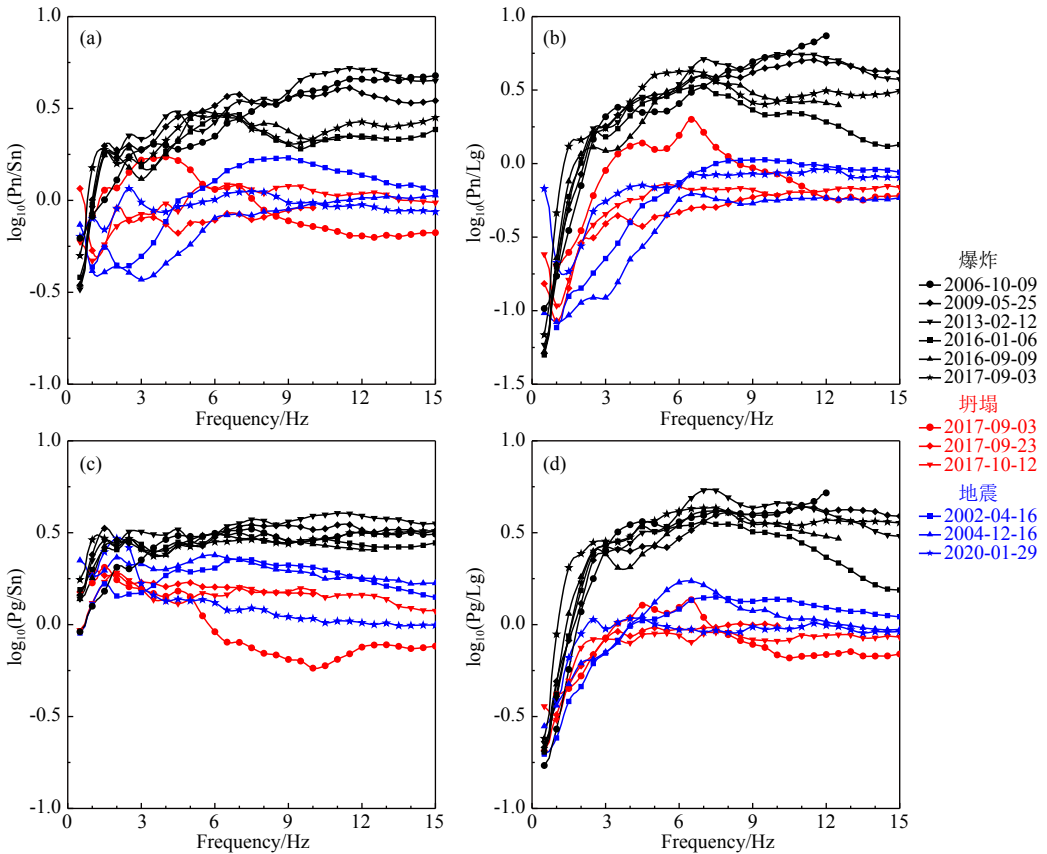


图 7 MDJ 台记录到的爆炸 (黑色)、地震 (蓝色) 和坍塌 (红色) 等不同类型事件的 P/S 振幅谱比值 (a) Pn/Sn; (b) Pn/Lg; (c) Pg/Sn; (d) Pg/Lg.

Fig. 7 Four types of P/S spectral ratios for different types of events recorded at MDJ station (a) Pn/Sn, (b) Pn/Lg, (c) Pg/Sn, and (d) Pg/Lg, the event types are explosions (black), earthquakes (blue), and collapses (red).

低, 导致其参与计算时均削弱低频段的判别能力。

为量化不同震相振幅谱比值判别事件属性的能力, 本文对朝鲜核试验场及邻近不同类型事件的振幅谱比值的对数值求取平均值, 计算 2.0 ~ 15.0 Hz

频带内爆炸与地震事件平均值之差, 即图 8d 中爆炸与地震曲线之间阴影的面积, 并以此作为不同类型事件振幅谱比值的区分度 (图 9). 选用频带时考虑到若频带过高, 信号易衰减且噪声影响大; 频带过

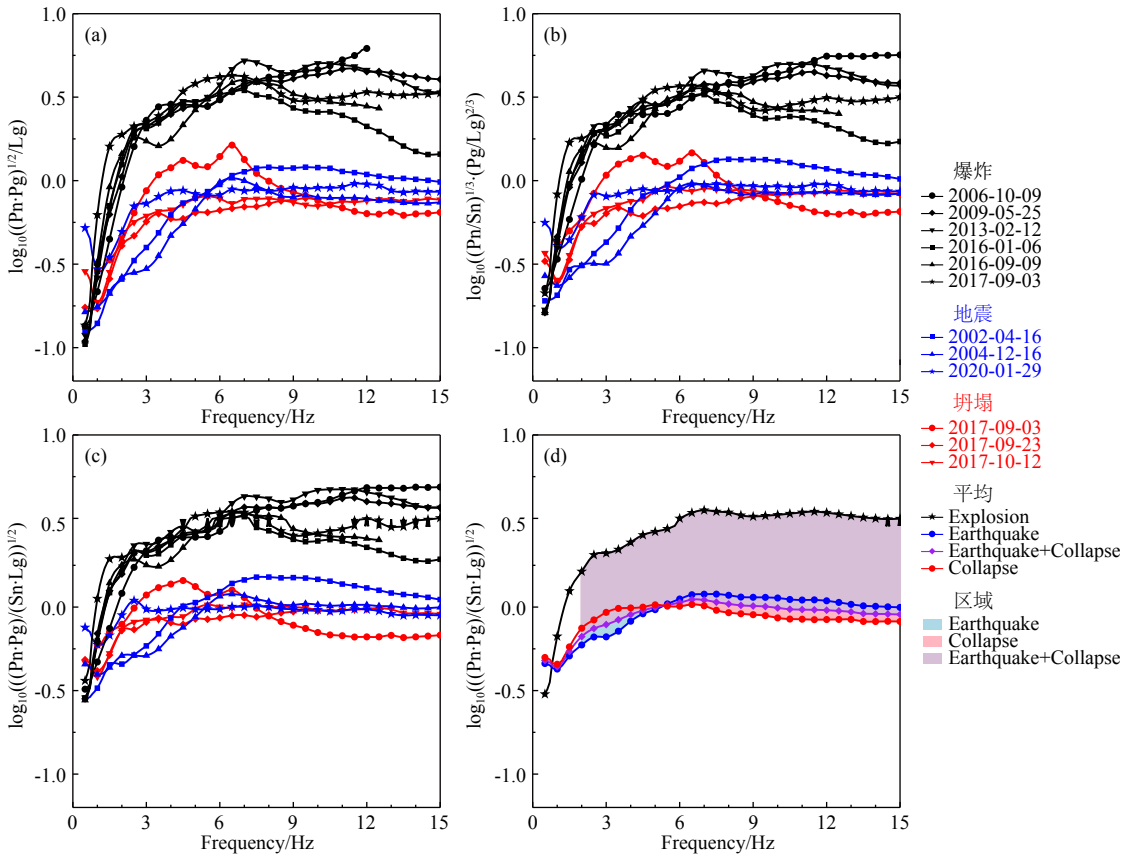


图 8 MDJ 台不同类型 P/S 振幅谱比值组合叠加结果

(a) Pn/Lg 与 Pg/Lg 叠加; (b) Pn/Sn、Pn/Lg 与 Pg/Lg 叠加; (c) Pn/Sn、Pn/Lg、Pg/Sn 和 Pg/Lg 叠加; (d) 将前述四种谱比值叠加后再分别对爆炸、地震和塌陷三类事件计算平均值。图中纵坐标为对数谱振幅比值, 横坐标为频率, 黑色符号为爆炸震源的结果, 蓝色符号为天然地震的结果, 红色符号为爆炸后余震震源的结果。

Fig. 8 Amplitude spectral ratios by using different stackings

(a) stacked Pn/Lg and Pg/Lg, (b) stacked Pn/Sn, Pn/Lg, and Pg/Lg, (c) stacked Pn/Sn, Pn/Lg, Pg/Sn, and Pg/Lg. (d) The above stacked ratios are further averaged based on three event types. The vertical axis is the logarithmic amplitude ratio and the horizontal axis is the frequency. Black symbols are for explosions, blue for natural earthquakes, and red for aftershocks from explosions.

低, 又不利于分辨爆炸所特有的高频特征, 因此选用既能兼顾到爆炸和地震的主要高频能量差异, 也适用于区域台网或小震事件的频带进行分析。

从图 9 可以看出四种震相中 Pn/Lg 区分效果最好, 三种组合都有效提高了单台数据对事件的判别能力, 其中 Pn/Lg 与 Pg/Lg 振幅谱比值组合具有最好的区分效果。虽然 Pn/Lg 等单一振幅比就有不错的区分效果, 但仅依赖单一个比值时, 可能在有些特殊震源或复杂路径条件下失效。不同振幅谱比值组合能够在不同程度提高区分度, 说明综合多个震相、多个频带、多个谱特征参数, 能够获得更稳定的事件识别结果。

## 4 结论

根据爆炸源与位错源的不同辐射特征, 本文利

用 P/S 振幅谱比值对地震与爆炸震源进行鉴别。受台网内多台振幅谱比值叠加技术的启发发展了单台多震相谱比值叠加方法。该方法能够利用单一台站地震记录有效识别核爆、核爆引起的余震事件, 以及天然地震事件。在已有的 Pn/Sn, Pn/Lg 以及 Pg/Lg 震相比值的基础之上, 增加了 Pg/Sn 震相比值计算。通过对牡丹江台记录到的朝鲜核试验和邻近其他类型地震事件的数据处理发现, Pg/Lg 和 Pn/Lg 两种振幅比叠加后的识别能力优于对其他类型震相比值的叠加。尽管单台多震相振幅谱比值叠加的识别能力不及台网振幅谱比值叠加, 但仍然能够根据单台数据较满意地区分爆炸和邻近地震事件。由于单台多震相谱比值叠加方法能够在台站稀疏区取得比未经叠加的数据更好的应用效果, 可为地震监测网络提供更加灵活的判别手段, 有益于实现对事件属性的实时自动提取。甚至能够将这种处理技术直接

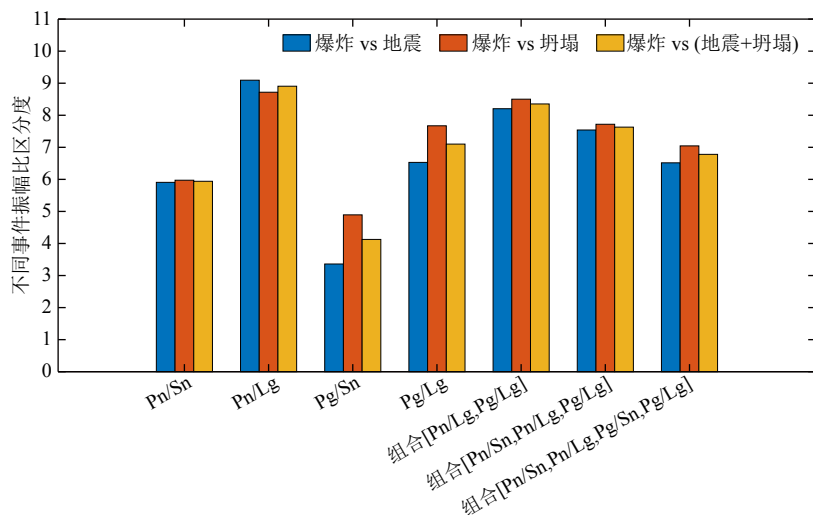


图 9 不同谱比值对不同类事件的区分度

纵坐标表示不同振幅比对各类事件的区分度, 蓝色为核爆炸与天然地震面积差, 红色为核爆炸与坍塌事件面积差, 黄色为核爆炸与地震事件的面积差。

Fig. 9 The discrimination capabilities versus various types of amplitude ratios

Blue is the area between the nuclear explosion and natural earthquake curves. Red is for explosion and collapse.

Yellow is for nuclear explosion and earthquake.

固化在观测设备之中, 为地震和爆炸事件的应急响应提供重要支持. 对于有充分台站分布的区域, 可在单台多震相谱比值叠加方法的基础上, 发展多台多震相谱比值叠加的事件属性鉴别方法, 甚至考虑开发多台多分量多震相谱比值叠加方法, 为核试验监测提供更多选择.

致谢 地震资料从全球地震台网收集, 在此表示感谢.

## References

- Anderson D N, Taylor S R. 2002. Application of regularized discrimination analysis to regional seismic event identification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6): 2391-2399, doi: 10.1785/0120010218.
- Bowman J R, Kennett B L N. 1991. Propagation of  $L_g$  waves in the North Australian Craton: Influence of crustal velocity gradients. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(2): 592-610, doi: 10.1785/bssa0810020592.
- Chang L J, Ding Z F, Sun W G. 2012. Seismological observation at the Great Wall Station during the 27th Chinese Antarctic expedition in the summer. *Chinese Journal of Polar Research (in Chinese)*, 24(1): 95-100, doi: 10.3724/SP.J.1084.2012.00095.
- Ding S B, Wang H C, Zhu H F, et al. 2024. Discrimination of seismic events in the North Korean Test Site and surrounding area using MDAC spectral ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114(2): 1140-1150, doi: 10.1785/0120230027.
- Giardini D, Lognonné P, Banerdt W B, et al. 2020. The seismicity of Mars.

*Nature Geoscience*, 13(3): 205-212, doi: 10.1038/s41561-020-0539-8.

Hartse H E, Taylor S R, Phillips W S, et al. 1997. A preliminary study of regional seismic discrimination in central Asia with emphasis on western China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3): 551-568, doi: 10.1785/bssa0870030551.

He X, Zhao L F, Xie X B, et al. 2018. High-precision relocation and event discrimination for the 3 September 2017 underground nuclear explosion and subsequent seismic events at the North Korean test site. *Seismological Research Letters*, 89(6): 2042-2048, doi: 10.1785/0220180164.

Kim W Y, Simpson D W, Richards P G. 1993. Discrimination of earthquakes and explosions in the eastern United States using regional high-frequency data. *Geophysical Research Letters*, 20(14): 1507-1510, doi: 10.1029/93gl01267.

Kim W Y, Richards P G. 2007. North Korean nuclear test: Seismic discrimination low yield. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 88(14): 158-161, doi: 10.1029/2007EO140002.

Kim W Y, Richards P G, Schaff D, et al. 2018. Identification of seismic events on and near the North Korean test site after the underground nuclear test explosion of 3 September 2017. *Seismological Research Letters*, 89(6): 2120-2130, doi: 10.1785/0220180133.

Koper K D, Herrmann R B, Benz H M. 2008. Overview of open seismic data from the North Korean event of 9 October 2006. *Seismological Research Letters*, 79(2): 178-185, doi: 10.1785/gssrl.79.2.178.

Lin X, Wang X T, Zhao L F, et al. 2019. A review of seismological research on nuclear test monitoring. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 62(11): 4047-4066, doi: 10.6038/cjg2019M0556.

Magotra N, Ahmed N, Chael E. 1989. Single-station seismic event detection and location. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(1): 15-23, doi: 10.1109/36.20270.

- Maguire R, Lekić V, Kim D, et al. 2023. Focal mechanism determination of event S1222a and implications for tectonics near the dichotomy boundary in southern Elysium Planitia, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128(9): e2023JE007793, doi: [10.1029/2023JE007793](https://doi.org/10.1029/2023JE007793).
- Murphy J R, Bennett T J. 1982. A discrimination analysis of short-period regional seismic data recorded at Tonto Forest Observatory. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(4): 1351-1366, doi: [10.1785/bssa0720041351](https://doi.org/10.1785/bssa0720041351).
- Richards P G, Kim W Y. 2007. Seismic signature. *Nature Physics*, 3(1): 4-6, doi: [10.1038/nphys495](https://doi.org/10.1038/nphys495).
- Ruud B O, Husebye E S, Ingate S F, et al. 1988. Event location at any distance using seismic data from a single, three-component station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1): 308-325, doi: [10.1785/bssa0780010308](https://doi.org/10.1785/bssa0780010308).
- Sandvin O, Tjøstheim D. 1978. Multivariate autoregressive representation of seismic *P*-wave signals with application to short-period discrimination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(3): 735-756, doi: [10.1785/bssa0680030735](https://doi.org/10.1785/bssa0680030735).
- Shearer P M. 2009. Introduction to Seismology. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, doi: [10.1017/CBO9780511841552](https://doi.org/10.1017/CBO9780511841552).
- Sun W J, Tkalčić H, Tang Q Y. 2024. Single-station back-azimuth determination with the receiver function rotation technique validated by the locations of earthquakes, impacts, and explosions. *Seismological Research Letters*, 95(5): 2925-2938, doi: [10.1785/0220240117](https://doi.org/10.1785/0220240117).
- Taylor S R, Denny M D, Vergino E S, et al. 1989. Regional discrimination between NTS explosions and western U. S. earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(4): 1142-1176, doi: [10.1785/bssa0790041142](https://doi.org/10.1785/bssa0790041142).
- Taylor S R, Velasco A A, Hartse H E, et al. 2002. Amplitude corrections for regional seismic discriminants. *Pure and Applied Geophysics*, 159(4): 623-650, doi: [10.1007/s00024-002-8652-8](https://doi.org/10.1007/s00024-002-8652-8).
- Tian D D, Yao J Y, Wen L X. 2018. Collapse and earthquake swarm after North Korea's 3 September 2017 nuclear test. *Geophysical Research Letters*, 45(9): 3976-3983, doi: [10.1029/2018GL077649](https://doi.org/10.1029/2018GL077649).
- Tibi R. 2021. Discrimination of seismic events (2006-2020) in North Korea using  $P/L_g$  amplitude ratios from regional stations and a bivariate discriminant function. *Seismological Research Letters*, 92(4): 2399-2409, doi: [10.1785/0220200432](https://doi.org/10.1785/0220200432).
- Walter W R, Dodge D A, Ichinose G, et al. 2018. Body-wave methods of distinguishing between explosions, collapses, and earthquakes: Application to recent events in North Korea. *Seismological Research Letters*, 89(6): 2131-2138, doi: [10.1785/0220180128](https://doi.org/10.1785/0220180128).
- Willis D E. 1963. Comparison of seismic waves generated by different types of source. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(5): 965-978, doi: [10.1785/bssa0530050965](https://doi.org/10.1785/bssa0530050965).
- Willis D E, DeNoyer J, Wilson J T. 1963. Differentiation of earthquakes and underground nuclear explosions on the basis of amplitude characteristics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(5): 979-987, doi: [10.1785/bssa0530050979](https://doi.org/10.1785/bssa0530050979).
- Xie X B, Zhao L F. 2018. The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 61(3): 889-904, doi: [10.6038/cjg2018L0677](https://doi.org/10.6038/cjg2018L0677).
- Yang G, Zhao L F, Xie X B, et al. 2021. High-precision relocation with the burial depths of the North Korean underground nuclear explosions by combining  $P_n$  and  $P_g$  differential traveltimes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(6): e2020JB020745, doi: [10.1029/2020JB020745](https://doi.org/10.1029/2020JB020745).
- Yang X. 2002. A numerical investigation of  $L_g$  geometrical spreading. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(8): 3067-3079, doi: [10.1785/0120020046](https://doi.org/10.1785/0120020046).
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2008. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(6): 2571-2589, doi: [10.1785/0120080128](https://doi.org/10.1785/0120080128).
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2012. Yield estimation of the 25 May 2009 North Korean nuclear explosion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2): 467-478, doi: [10.1785/0120110163](https://doi.org/10.1785/0120110163).
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2014. The 12 February 2013 North Korean underground nuclear test. *Seismological Research Letters*, 85(1): 130-134, doi: [10.1785/0220130103](https://doi.org/10.1785/0220130103).
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2016. Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test. *Geophysical Journal International*, 206(3): 1487-1491, doi: [10.1093/gji/ggw239](https://doi.org/10.1093/gji/ggw239).

## 附中文参考文献

- 常利军, 丁志峰, 孙为国. 2012. 第 27 次南极科学考察度夏期间长城站地震观测. *极地研究*, 24(1): 95-100, doi: [10.3724/SP.J.1084.2012.00095](https://doi.org/10.3724/SP.J.1084.2012.00095).
- 林鑫, 王向腾, 赵连锋等. 2019. 核试验监测的地震学研究综述. *地球物理学报*, 62(11): 4047-4066, doi: [10.6038/cjg2019M0556](https://doi.org/10.6038/cjg2019M0556).
- 谢小碧, 赵连锋. 2018. 朝鲜地下核试验的地震学观测. *地球物理学报*, 61(3): 889-904, doi: [10.6038/cjg2018L0677](https://doi.org/10.6038/cjg2018L0677).

(本文编辑 汪海英)