

赵连锋, 谢小碧, 何熹, 张蕾, 杨庚, 姚振兴. 2025. 利用区域地震资料监测朝鲜地下核试验的研究进展. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(2): 148-156. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-031.

Zhao L F, Xie X-B, He X, Zhang L, Yang G, Yao Z X. 2025. Research progress on monitoring the North Korean underground nuclear tests using regional seismic data. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(2): 148-156 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-031.

利用区域地震资料监测朝鲜地下核试验的研究进展

赵连锋^{1*}, 谢小碧², 何熹¹, 张蕾¹, 杨庚¹, 姚振兴¹

1 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

2 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: 根据朝鲜 6 次地下核试验在中国东北及邻近地区产生的宽频带区域地震资料, 中国科学院地质与地球物理研究所地震学学科组发展了一套用于监测地下核试验的地震学方法, 主要包括震级测量和当量估计、高精度震中定位以及爆炸与天然地震事件识别等. 在全球范围内, 存在多个用于震级-当量转换的经验公式, 确定何种公式适合于朝鲜半岛地区至关重要. 通过搜集一组用于地震测深的化学爆炸的当量和埋深, 并以这些已知爆炸源作为量规事件, 能够标定朝鲜地下核试验场的震级-当量关系, 从而实现了对朝鲜地下核爆进行当量估计. 在精确定位方面, 发展了利用多事件之间波形互相关方法精确测定它们之间的走时差从而完成高精度相对震中定位. 通过进一步利用 Pn 和 Pg 等多震相数据还实现了对核爆深度的相对定位. 在爆炸震源识别方面, 利用统计处理方法分析研究了不同类型事件所产生地震波的特征, 包括 6 次地下核试验、4 次天然地震和 3 次化学爆炸, 以及一些矿区塌陷等. 结果发现 P 和 S 类型波的振幅比, 例如 Pn/Lg、Pg/Lg 和 Pn/Sn 等, 在 2 Hz 以上能够较好区分各类震源. 其中爆炸震源产生的振幅比显著高于天然地震的值. 特别是, 通过计算谱振幅比的台网平均值能够显著提高识别的可靠性. 利用中国东北和邻近地区地震台网所提供的数据可以准确地将朝鲜地下核试验从周边天然地震事件中识别出来. 该方法同时得到化学爆炸的 P/S 谱振幅比值介于核爆炸和天然地震的群组之间.

关键词: 爆炸当量估计; 震源相对定位; 爆炸和天然地震识别; 朝鲜地下核试验

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-031

中图分类号: P315

文献标识码: A

Research progress on monitoring the North Korean underground nuclear tests using regional seismic data

Zhao Lianfeng^{1*}, Xie Xiao-Bi², He Xi¹, Zhang Lei¹, Yang Geng¹, Yao Zhenxing¹

1 Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

Abstract: Based on broadband regional seismic data generated by six North Korean underground nuclear tests, recorded by networks in Northeast China and adjacent areas, this paper developed a set of seismological methods to monitor North Korean underground nuclear tests, including magnitude measurement and yield estimation, high-precision relocation, and discrimination between atomic explosions and natural earthquakes. Since the North Korean nuclear test site (NKTS) is uncalibrated, it is crucial to determine the appropriate empirical magnitude-yield equation for the NKTS. This paper gathered ground truth data from chemical explosions used for deep seismic sounding, including their locations, yields, and charge depths, and determined a magnitude-yield relation suitable for the NKTS. A high-precision relative relocation method was applied to the six nuclear explosions at

收稿日期: 2024-08-02; 录用日期: 2024-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2139206)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2139206)

*通信作者: 赵连锋, 男, 研究员, 主要从事地震学研究. Email: zhaolf@mail.iggcas.ac.cn



NKTS. To further alleviate the tradeoff between the detonate time and the source depth, according to the fact that the Pn and Pg waves have different incident angles, Pn and Pg waveform correlations are jointly used to increase the accuracy of relative source depth calculation. By analyzing the P/S type spectral amplitude ratios, Pn/Lg, Pg/Lg, and Pn/Sn, for 6 nuclear tests, 4 natural earthquakes, and 3 chemical explosions, this paper found that, at above 2 Hz, the network averaged spectral amplitude ratios could reliably separate the North Korean nuclear tests from the natural earthquakes. The spectral amplitude ratios of 3 chemical explosions are located between those of the nuclear explosions and the natural earthquakes.

Keywords: yield estimation; relative epicenter relocation; discrimination between earthquakes and explosions; North Korea nuclear explosion

0 引言

自 2006 至 2017 年, 朝鲜民主主义人民共和国在丰溪里核试验场进行了 6 次地下核试验, 试验当量逐次增大. 这些地下核试验在中国东北及邻近地区激发了丰富的区域地震震相. 同一台站记录到的 6 次核爆炸的地震波形非常相似. P 波初至波形尖锐, 能量强, 地壳 Lg 波较弱, 短周期 Rayleigh 面波发育 (图 1). 事件的震级越大, 波形信噪比越高. 本文收集中国东北、朝鲜半岛和日本地区的区

域波形资料, 主要包括中国国家数字地震台网 (CNDSN)、全球地震台网 (GSN) 和日本 F-net 台网的台站记录 (图 2), 对朝鲜地下核试验开展了地震学监测研究, 主要包括对事件进行定位、识别和当量估计.

1 震级测量与当量估计

2006 年 10 月 9 日朝鲜进行了第一次地下核试验. 为测定核爆当量, 首先需要精确测量震级, 然

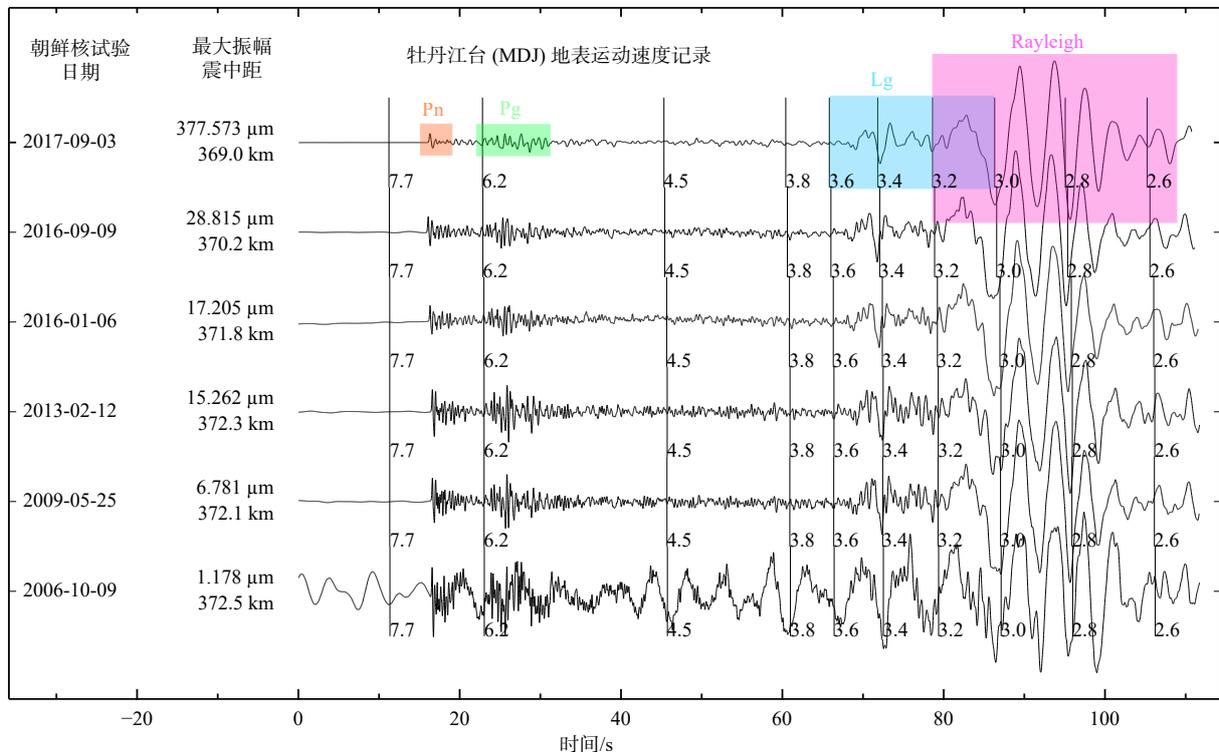


图 1 牡丹江台记录到的 6 次朝鲜地下核试验垂直分量速度地震图. 地震波形显示出典型浅埋爆炸源的特点, 具有显著的 P 波初至, 较弱的 Lg 波和比较发育的 3~5 s 短周期 Rayleigh 波 Rg. 图的左侧列出了核试验的日期、最大速度振幅和震中距. 在波形图上标出了不同的群速度值, 以及区域震相波形窗口, Pn、Pg、Lg 和 Rayleigh 波

Fig. 1 Normalized vertical-component velocity seismograms from 6 North Korean nuclear tests recorded at MDJ station. The event dates, maximum amplitudes, and epicentral distances are listed on the left. The marks on the waveforms indicate apparent group velocities. The color windows indicate phases, including Pn, Pg, Lg, and Rayleigh waves. The seismograms are characterized by impulsive P-wave onsets, relatively weak Lg phases, and well-developed short-period Rayleigh waves

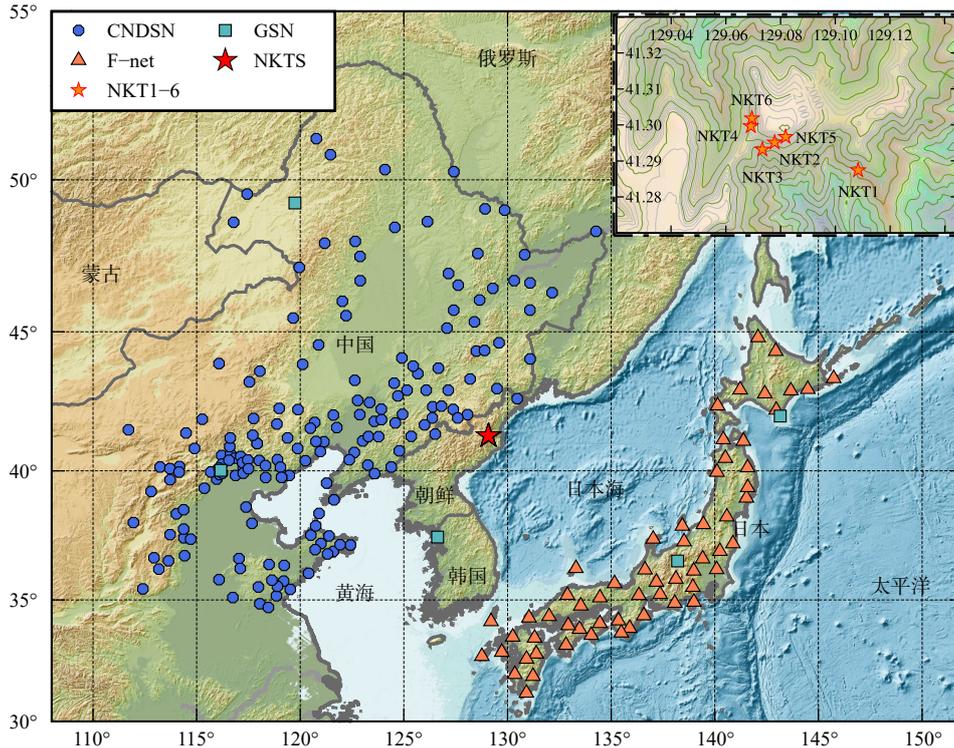


图 2 朝鲜地下核试验场及周边地区地形图. 红色五星是朝鲜核试验场的位置, 蓝色圆圈为 CNDSN 台站, 绿色方块为 GSN 台站, 红色三角为日本 F-net 台站. 右上角插图为朝鲜核试验场地图, 其中五星标出 6 次朝鲜核试验的位置 (引自 He et al., 2018)

Fig. 2 Map showing the locations of the North Korea test site (NKTS, red star) and the stations used in this study, including those from the China National Digital Seismic Network (CNDSN, blue circles), Global Seismic Network (GSN, green squares) and Full-Range Seismograph Network (F-net, red triangles). In the upper-right corner, the inset map illustrates the locations of six NKTS nuclear tests (red stars) (from He et al., 2018)

后根据震级-当量关系估算当量. 本文采用 L_g 波第三峰值振幅和均方根振幅两种方法测定震级 (Nutli, 1973, 1986; Schlittenhardt et al., 2010), 并对两者的结果进行了对比. 为获得更加可靠的震级测定结果, 首先利用中国东北和朝鲜半岛 2000 年 12 月至 2006 年 11 月期间在试验场附近的天然地震事件对所用地震台网进行了震级测量标定, 获得了各台的台基响应校正. 为从震级推断核爆当量值, 本文广泛研究了全球范围内不同核试验场的震级-当量经验公式. 选取了与朝鲜核试验场具有相近地质条件的经验公式. 由于朝鲜核试验场是一个未经标定的试验场, 需要选取已知当量的化学爆炸作为标准事件对所选取的震级-当量转换经验公式进行标定 (Chun and Henderson, 2009; Ringdal et al., 1992; Zhao et al., 2008). 张先康先生提供了中国-朝鲜边境地区用于地震测深的 10 个化学爆炸的震源信息, 包括当量和震源深度. 其中 3 个事件在区域台网中有清晰的记录 (表 1), 为选择适当的震级-当量关系式和准确估计爆炸当量提供了最有价值的量规事件 (张成科等, 2002; 张先康等, 2002). 最终,

使用修正的完全耦合的震级-当量关系 (Bowers et al., 2001), 获得了 2006 年 10 月 9 日朝鲜地下核试验在正常埋藏深度条件下的当量为 0.48 kt (千吨). 如果考虑到这次核试验极有可能是被深埋的 (over buried), 经深度校正后, 其当量可达 1.2~1.5 kt (Zhang and Wen, 2013). 根据中国东北及邻近地区 11 个地震台站的波形资料, 采用第三峰值振幅和均方根振幅的方法计算了朝鲜全部 6 次地下核试验的 L_g 波体波震级 (He et al., 2018; Zhao L F et al., 2008, 2012, 2014, 2016, 2017). 采用周期 8~25 s 的 Rayleigh 波最大振幅确定了面波震级 (范娜等, 2013). 经过路径衰减和台基响应校正后获得 6 次朝鲜地下核试验的 L_g 波体波震级 m_b (L_g) 分别为 3.93 ± 0.08 、 4.53 ± 0.12 、 4.91 ± 0.22 、 4.67 ± 0.19 、 4.83 ± 0.18 和 5.57 ± 0.22 ; Rayleigh 面波震级分别为 2.93 ± 0.18 、 3.62 ± 0.21 、 3.97 ± 0.17 、 4.04 ± 0.07 、 4.22 ± 0.08 和 5.10 ± 0.20 (谢小碧和赵连锋, 2018). 考虑到朝鲜核试验场建立在硬质岩石构成的地区, 采用建立在与硬质岩石完全耦合基础上的震级-当量经验公式估计核爆的当量 (Bowers et al., 2001), 同

表 1 张先康先生提供的量规爆炸事件的震源参数

Table 1 Source parameters of the calibrated explosive events provided by Prof. Zhang Xiankang

日期	时间	纬度/°N	经度/°E	深度/m	当量/(ton)
1998-08-12	15:00:08.18	42.865	128.223	7.4	1.5
1998-08-18	14:00:06.69	42.914	129.324	11.4	1.8
1998-08-19	15:00:07.79	42.091	128.739	28.8	1.45

时参考中国东北地区用于人工地震测深的已知当量化学爆炸事件(张成科等, 2002; 张先康等, 2002), 得到了 6 次朝鲜地下核试验的当量分别为 0.5、2.5、8.0、4.0、6.0 和 56 kt (谢小碧和赵连锋, 2018)。

因为朝鲜地下核试验震级逐次增大, 已能够从全球台网直接测定远震 P 波震级 m_b 。全面禁止核试验条约组织 (CTBTO) 由此得到 6 次事件的远震 P 波震级分别为 4.1、4.5、4.9、4.9、5.1 和 6.1, 美国地质调查局 (USGS) 得到结果是 4.3、4.7、5.1、5.1、5.3 和 6.3 (Voytan et al., 2019)。考虑 6 次朝鲜地下核试验位置和深度, 能够获得更为精确的爆炸当量的估计 (图 3)。根据 USGS 的远震 P 波震级和深度定位结果, 6 次朝鲜地下核试验的当量估计为 2.5、9.0、21.6、19.8、34.2 和 353.2 kt (表 2) (Yang et al., 2021)。

表 2 朝鲜核试验最佳拟合埋藏深度和爆炸当量

Table 2 Best-fit burial depths and explosive yields of the North Korean nuclear tests

事件代码	日期 (yyyy-mm-dd)	高程 ^① /m	埋藏 深度 ^② /m	标准差/m	m_b (Lg) ^④	当量 ^⑤ /kt	m_b (P) ^⑥ (CTBTO)	当量 ^⑨ /kt	m_b (P) ^⑦ (NEIC)	当量 ^⑩ /kt
NKT1	2006-10-09	1390 ^③	330	—	3.93	1.0	4.1	1.6	4.3	2.5
NKT2	2009-05-25	1498 ^③	540	主事件	4.53	6.1	4.5	5.7	4.7	9.0
NKT3	2013-02-12	1418	506	43	4.91	13.7	4.9	13.4	5.1	21.6
NKT4	2016-01-06	1639	468	48	4.67	7.5	4.9	12.6	5.1	19.8
NKT5	2016-09-09	1653	521	47	4.82	11.5	5.1	21.7	5.3	34.2
NKT6	2017-09-03	1604	570	57	5.56	66.1	6.1	225.7	6.3	353.2
化学爆炸1 ^⑧	1998-08-12	—	7	—	1.94	1.5 (ton)	—	—	—	—
化学爆炸2	1998-08-18	—	11	—	2.17	1.8 (ton)	—	—	—	—
化学爆炸3	1998-08-19	—	29	—	2.03	1.45 (ton)	—	—	—	—

注: ①震源位置的地表高程来自相对定位结果。

②根据与主事件的深度差计算得到的相对深度(NKT1—6 的地表高程依次为 1720 m、2038 m、1924 m、2107 m、2174 m 和 2174 m)。

③NKT1 和 NKT2 的高程根据隧道入口与埋藏位置之间具有 4% 斜率计算所得。

④来自谢小碧和赵连锋(2018)。

⑤NKT1—6 的当量估计根据埋藏深度作出调整(引自 Bowers et al., 2001)。

⑥来自 CTBTO。

⑦来自 USGS 国家地震信息中心(NEIC)。

⑧来自中国地震局地球物理勘探中心(GECCEA) (张先康先生提供)。

⑨使用 CTBTO 震级得到的当量估计。

⑩使用 NEIC 震级得到的当量估计。

2 高精度相对定位

确定爆炸物埋藏深度是准确估计爆炸当量的重要条件 (Zhang and Wen, 2013)。其中利用远震 pP 和 P 走时差可以直接计算震源与自由面的距离, 即埋藏深度 (Murphy and Barker, 2006; Yuan et al., 2020)。6 次核试验在同一试验场进行, 震中很接近, 到达同一台站的波形相似。在同一台站上, 记

录仪器和台基响应相同, 传播路径相差无几, 因此, Pn 波到时差主要由试验场下方的 Pn 波速度、震源深度和起爆时间等引起。由于震源深度与起爆时间之间存在强烈的折衷, 我们最初固定震源深度, 只反演起爆时间 (Zhao et al., 2014)。利用 Pn 波到时的互相关时差, 采用相对定位方法得到的则是震源的相对高程, 再参考地表高程也可以得到对埋藏深度的估计 (Wen and Long, 2010; Zhao et al., 2014)。

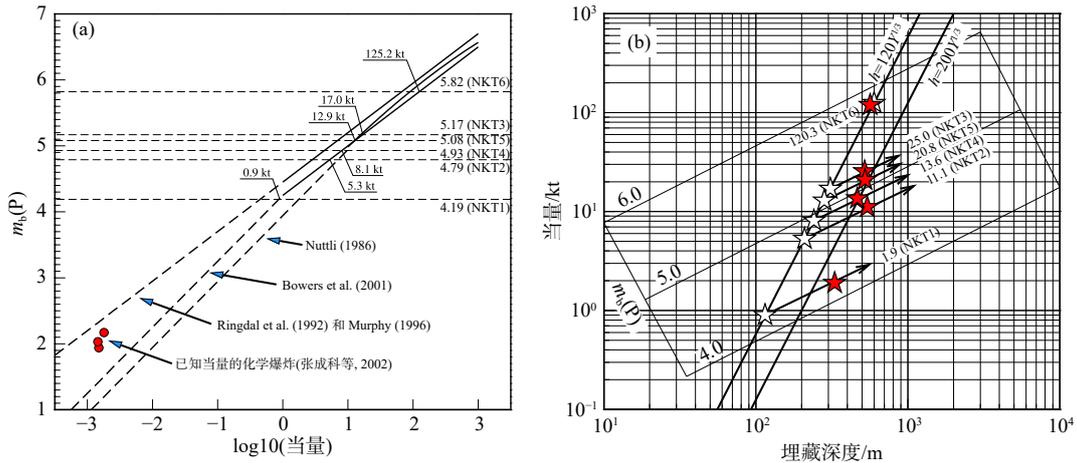


图 3 不同核试验场震级与当量之间的经验关系以及在 NKTS 考虑了爆炸埋深的震级-当量关系。(a) 在不同核试验场获得的震级-当量经验公式, 包括美国内华达地下核试验场 (引自 Nuttli, 1986)、位于东哈萨克斯坦的苏联核试验场 (引自 Murphy, 1996; Ringdal et al., 1992) 和位于 Novaya-Zemlya 的苏联核试验场 (引自 Bowers et al., 2001)。实线表示有数据支持部分, 虚线表示经验公式向小震级端适当外推的结果。红色圆圈为由张先康先生提供的已知源参数的 3 次化学爆炸的结果。(b) 使用 Bowers 等 (2001) 的经验公式得到的 NKT1—6 的当量估计结果。其中白色五星为假定震源处于正常埋藏深度 $h=120Y^{1/3}$ 得到的结果, 其中 h 表示深度, Y 表示当量。红色五星表示经过埋藏深度校正 $h=230Y^{1/3}$ 得到的当量, 箭头表示经震源深度校正后当量值的变化方向 (引自谢小碧和赵连锋, 2018)

Fig. 3 Empirical magnitude-yield relations for yield estimates. (a) Three magnitude-yield empirical relations at the Nevada test site (from Nuttli, 1986), East Kazakhstan (from Murphy, 1996; Ringdal et al., 1992), and Novaya Zemlya (from Bowers et al., 2001), where the solid lines are the parts supported by data and the dashed lines are extrapolations to smaller magnitudes. Illustrated are the yields of NKT1-6 estimated using the empirical equation of Bowers et al. (2001) based on an assumption of normally scaled burial depths and three small chemical explosions (red solid circles) with known source parameters. (b) Yield estimates for NKT1-6 without (white stars) and with (red stars) burial depth corrections. The normally scaled depth $h=120Y^{1/3}$ and another overburied scaled depth $h=230Y^{1/3}$ are included for reference (from Xie and Zhao, 2018)

随着朝鲜核试验的进行和可用资料的增加, 本研究尝试使用了 Pn 波和 Pg 波两个震相。由于两种波具有不同的出射角, 联合利用两种数据不仅可以直接反演地表相对位置和起爆时间, 同时还能确定相对埋藏深度 (Yang et al., 2021)。通过选择位于 (41.2952°N, 129.0778°E) 的 NKT2 作为主事件, 能够使用相对定位方法确定朝鲜地下核试验的相对

震中位置、相对高程和起爆时间 (He et al., 2018; Yang et al., 2021)。上地幔顶部 Pn 波速度固定为 8.0 km/s (Zhao L F et al., 2014, 2016)。根据朝鲜半岛地区地震波速度模型, NKTS 近地表 P 波速度值设定为 5.2 km/s (Bonner et al., 2008)。采用非线性的模拟退火算法求取模型参数 (表 3), 与前人的结果一致 (Gibbons et al., 2017; He et al., 2018;

表 3 朝鲜核试验最佳拟合震中位置和起爆时间

Table 3 Best-fit epicenter locations and origin times of the North Korean nuclear tests

事件代码	日期 (yyyy-mm-dd)	时间 (hh:mm:ss)	标准差/s	纬度/°N	经度/°E	相对定位不确定度 ^⑤ /m
NKT1 ^①	2006-10-09	01:35:28.0000 ^②	—	41.2874 ^③	129.1083 ^③	—
NKT2	2009-05-25	00:54:43.1409 ^④	主事件	41.2952 ^④	129.0778 ^④	主事件
NKT3	2013-02-12	57:51.3	0.0043	41.2931	129.0745	89
NKT4	2016-01-06	30:00.9	0.0048	41.2994	129.0721	83
NKT5	2016-09-09	30:01.4	0.0047	41.2973	129.0809	84
NKT6	2017-09-03	30:01.6	0.0057	41.3013	129.0741	98

①NKT1: 第一次朝鲜地下核试验。

②来自 USGS。

③来自卫星图像 (引自 Wen and Long, 2010; Zhao et al., 2014)。

④来自 Pn 波互相关走时差的相对定位结果 (引自 He et al., 2018)。

⑤随机抽取 80% 走时差数据反演得到椭圆误差长轴长度 (引自 Efron, 1983)。

Myers et al., 2018; Wen and Long, 2010; Zhang and Wen, 2013), 但同时得到了对各次核试验震源相对高程的估计, 然后根据地表高程换算得出对相对埋藏深度的估计 (图 4 和图 5)。

3 爆炸震源与天然地震震源的识别

根据朝鲜核试验场的 6 次地下核试验以及邻近地区 4 个天然地震在中国东北和朝鲜半岛 11 个地震台站记录到的垂直分量波形资料, 研究了对天然地震和爆炸震源的识别, 分别计算了不同类型 P 波和 S 波的振幅谱比值 P_n/L_g 、 P_n/S_n 和 P_g/L_g , 经过震中距校正后叠加获得对各个事件的台网平均频谱比 (图 6)。在高于 2 Hz 的频带, 这些谱比值能够

清晰地区分地震与爆炸事件群组. 结果表明, 在该地区, 现有的区域地震台网及 P/S 型谱比值方法能够有效识别发生在朝鲜核试验场的爆炸事件. 这种基于 P/S 型谱比值的天然地震与爆炸事件识别的方法, 不仅可适用于中国东北和朝鲜半岛地区 (He et al., 2018; 谢小碧和赵连锋, 2018; Zhao L F et al., 2008, 2014, 2016, 2017), 而且在其它区域, 如中国西北及邻近区域 (Ma et al., 2021)、中国东部区域 (Song et al., 2022; Zhao X et al., 2016) 和黎巴嫩地区 (Zhang et al., 2022) 等, 都具有较强的识别能力.

4 结 论

根据朝鲜地下核试验产生的区域地震波形资料,

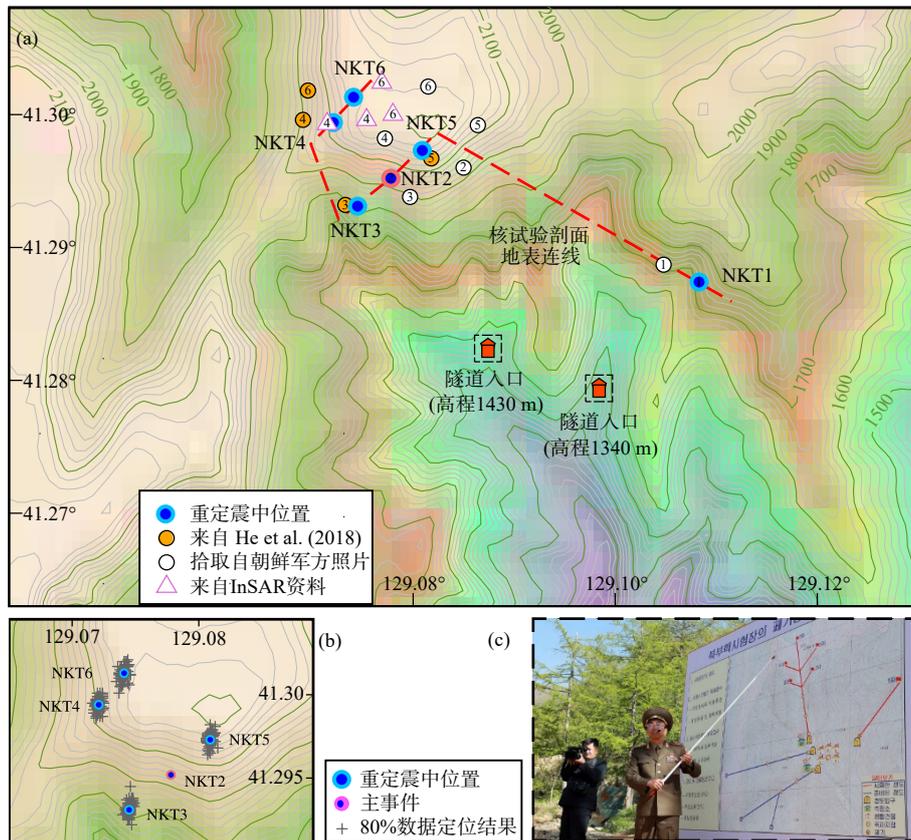


图 4 朝鲜核试验场地表地形图及重定位方法得到的震中分布图 (引自 Yang et al., 2021)。 (a) 以 NKT2 为主事件进行重定位结果 (蓝色实心圆圈), 以及与其他来源定位结果的对比, 其中实心圆来自 He 等 (2018), 空心圆来自朝鲜军方展示图中所示的位置, 三角形为从 InSAR 数据中获得的 NKT4 和 NKT6 的震中位置 (引自 Myers et al., 2018; Sreejith et al., 2020; Wang et al., 2018; Wei, 2017); 红色虚线设定了一个连接 6 次核试验的路径, 用来在图 5 中显示相对深度; (b) 利用 bootstrap 方法对重定位误差的估计; (c) 朝鲜军方展板中核试验位置的示意图

Fig. 4 Topography map of the NKTS and relocated epicenters of nuclear explosions (solid blue circles) relative to the master event NKT2 (red solid circle). Also shown in the map are epicenters by He et al. (2018) (yellow solid circles), epicenters given by the North Korean military (numbered white circles), and the epicenters of NKT4 and NKT6 obtained from InSAR data (white numbered triangles) (from Myers et al., 2018; Sreejith et al., 2020; Wang et al., 2018; Wei, 2017). The red dashed line illustrates a path through all six nuclear tests used to exhibit their relative depths in Fig. 5. (b) The relocation errors obtained using the bootstrap method, and (c) the poster shown by the North Korean military

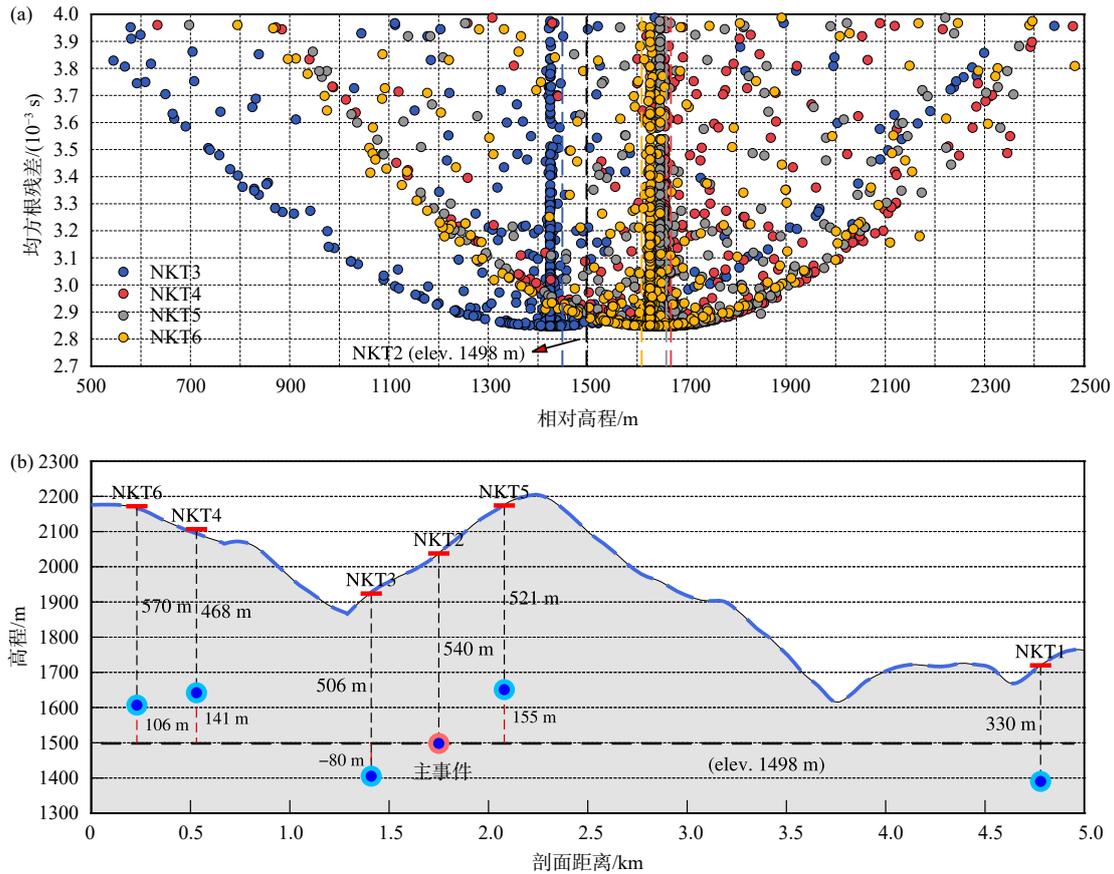


图 5 全部 6 次朝鲜核试验相对埋深的剖面图 (引自 Yang et al., 2021). 该图为沿着图 4a 中的虚线折线展开的剖面. (a) 反演过程中相对高程的均方根 (rms) 残差收敛特性, 相对于高程为 1498 m 的主事件 NKT2、NKT3、NKT4、NKT5 和 NKT6 的高程迅速收敛到 1418 ± 43 m、 1639 ± 48 m、 1653 ± 47 m 和 1604 ± 57 m. (b) 朝鲜核试验的埋藏深度, NKT1 (330 m) 和 NKT2 (540 m) 的埋深是根据隧道入口的高程来估计的, NKT2 的埋深作为参考深度, NKT3—6 的埋深是根据主事件的相对高程、地形和高程反演得到的

Fig. 5 (a) Convergence of the root mean square (rms) residuals of the relative elevations during the inversion (from Yang et al., 2021). The relative elevations of NKT3, NKT4, NKT5, and NKT6 rapidly converged to 1418 ± 43 , 1639 ± 48 , 1653 ± 47 , and 1604 ± 57 m, respectively, to the master event, NKT2 (1498 m). Dashed lines with decreasing residuals are shown when a relative elevation converges. (b) Profile showing the burial depths of 6 North Korean nuclear tests. The profile is along a zigzag line shown in Fig. 4a. The burial depths of NKT1 (330 m) and NKT2 (540 m) were estimated by assuming the elevations of the tunnel entrances, and the NKT2 was used as the reference event. The burial depths of NKT3-6 were obtained from the inverted relative elevations, topography, and elevation of the master event

测定了 6 次朝鲜地下核试验的 Lg 波体波震级和 Rayleigh 波面波震级. 通过邻近区域已知当量的化学爆炸数据, 选取了适合朝鲜核试验场的震级-当量经验公式, 估计了朝鲜地下核试验的爆炸当量. 发展了关于爆炸震源的多震相相对定位方法. 通过互相关计算 Pn 波和 Pg 波的到时差, 克服了单一震相难以避免起爆时间与震源深度之间的折衷关系, 从而获得了对各次核爆较为准确的震源深度估计. 震源深度信息可以显著提高通过震级计算当量的精度. 通过分析多种震相 P/S 型谱比值结果得到, 地下核爆炸、化学爆炸和天然地震产生的地震波具有不同的谱比值特征, 据此可分辨不同类型的震源. 如果利用台网计算谱比值的统计均值能够进一步提

高分辨可靠性. 上述结果表明, 利用当前台网和 2.0 Hz 以上的 P/S 型谱比值能够高效鉴别爆炸和天然地震事件. 综上, 本研究建立了一套利用区域地震波数据对低当量地下核爆炸进行震源定位, 事件类型识别, 以及通过测定震级计算爆炸当量的快速处理流程, 为监测朝鲜半岛潜在地下核试验提供了手段. 然而, 较低当量的地下核试验或化学爆炸事件, 因为震级较小, 地震记录信噪比较低, 所以对震源类型判断非常困难. 因此, 利用 150 km 范围之内较高信噪比的观测资料进行核爆当量估计和属性鉴别至关重要. 未来的核监测地震研究不仅限于区域地震范围, 而且需要开发和利用近震 (<150 km) 观测资料 (Koper et al., 2021).

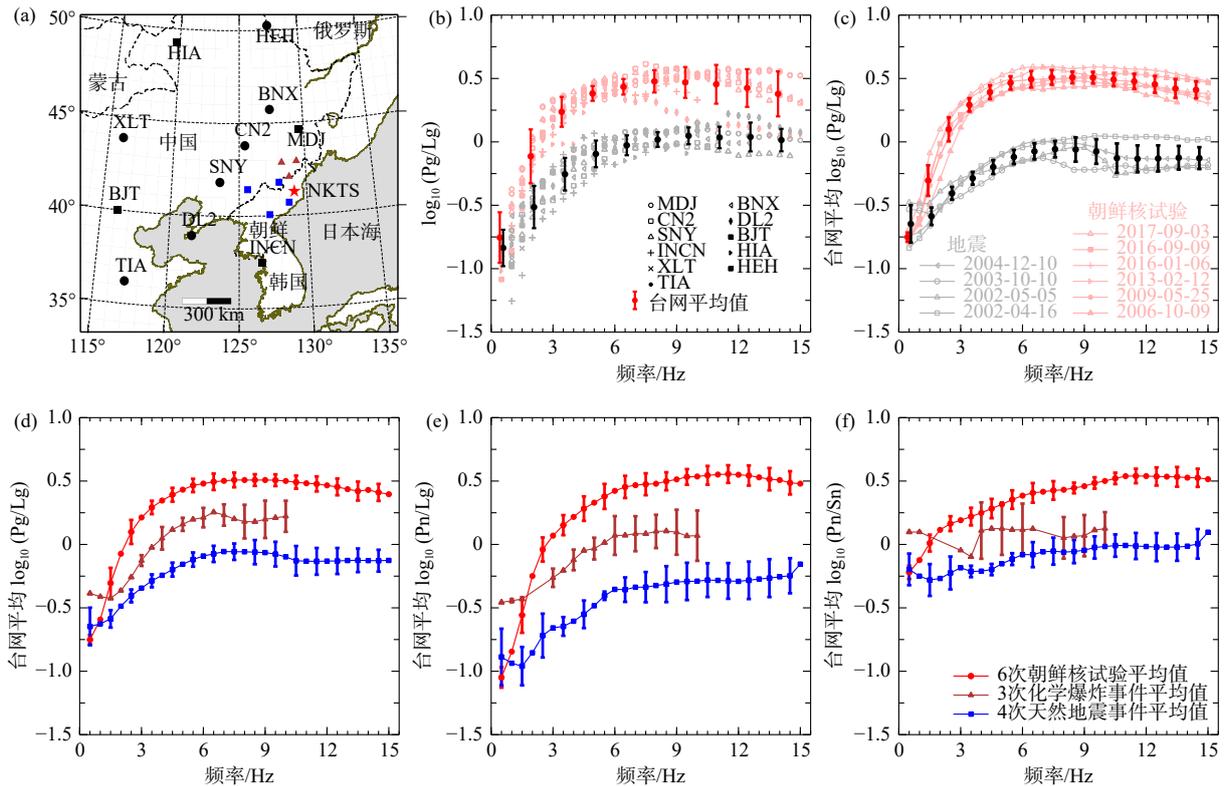


图 6 利用 P/S 型谱比值对天然地震与爆炸事件的识别 (引自 Song et al., 2022)。(a) 朝鲜核试验场 (NKTS, 红色五星) 及周边区域地图, 图中叠加了用于计算谱比值的地震台站位置 (黑色实心正方形和圆形)、天然地震的震中位置 (蓝色正方形) 和 3 次化学爆炸位置 (红色三角形); (b) 根据 11 个区域地震台站资料计算得出的台网平均频谱比值; (c) 核爆和天然地震两类震源谱比值分别叠加得到的统计结果; (d-f) 不同类型 P/S 谱比值, Pg/Lg、Pn/Lg 和 Pn/Sn 的台网平均值。从中可以显著区分 NKTS 的地下核试验 (红色)、化学爆炸 (紫色) 和天然地震 (蓝色) 的震源

Fig. 6 (a) Map showing the location of the NKTS (red star), locations of stations used for calculating the spectral ratios (solid squares and circles), epicenters of known natural earthquakes (blue squares), and three chemical explosions (red triangles). (b) Illustration of network averaged spectral ratios calculated based on data from 11 regional stations. (c) The network averaged spectral ratios from different source types. (d-f) Network averaged spectral ratios versus frequencies for Pg/Lg, Pn/Lg, and Pn/Sn, respectively. Shown in these panels are known NKTS nuclear tests (red), the chemical explosions (purple), and the natural earthquakes (blue) from top to bottom

致谢

谨以此文缅怀和纪念张先康先生为中国地球物理事业做出的杰出贡献!

References

Bonner J, Herrmann R B, Harkrider D, Pasyanos M. 2008. The surface wave magnitude for the 9 October 2006 North Korean nuclear explosion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5): 2498-2506.

Bowers D, Marshall P D, Douglas A. 2001. The level of deterrence provided by data from the SPITS seismometer array to possible violations of the Comprehensive Test Ban in the Novaya Zemlya region[J]. *Geophysical Journal International*, 146: 425-438.

Chun K Y, Henderson G A. 2009. Lg attenuation near the North Korean border with China, part II: Model development from the 2006 nuclear explosion in North Korea[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99: 3030-3038.

Efron B. 1983. Estimating the error rate of a prediction rule: Improve-

ment on cross-validation[J]. *Journal of The American Statistical Association*, 78: 316-331.

Fan N, Zhao L F, Xie X B, Yao Z X. 2013. Measurement of Rayleigh-wave magnitudes for North Korean nuclear tests[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(3): 906-915 (in Chinese).

Gibbons S J, Pabian F, Näsholm S P, et al. 2017. Accurate relative location estimates for the North Korean nuclear tests using empirical slowness corrections[J]. *Geophysical Journal International*, 208: 101-117.

He X, Zhao L F, Xie X B, Yao Z X. 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[J]. *Seismological Research Letters*, 89: 2042-2048.

Koper K D, Holt M M, Voyles J R, et al. 2021. Discrimination of small earthquakes and buried single-fired chemical explosions at local distances (< 150 km) in the western United States from comparison of local magnitude (M-L) and coda duration magnitude (M-C)[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111: 558-570.

Ma X, Zhao L F, Xie X B, et al. 2021. Regional seismic characteristics of chemical explosions on the eastern margin of the Junggar basin,

- northwest China, and of historical Semipalatinsk nuclear tests[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111: 606-620.
- Murphy J R. 1996. Type of Seismic Events and Their Source Descriptions[M]// Husebye E S, Dainty A M. Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. The Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 225-245.
- Murphy J R, Barker B W. 2006. Improved focal-depth determination through automated identification of the seismic depth phases pP and sP[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96: 1213-1229.
- Myers S C, Ford S R, Mellors R J, et al. 2018. Absolute locations of the North Korean nuclear tests based on differential seismic arrival times and InSAR[J]. *Seismological Research Letters*, 89: 2049-2058.
- Nuttli O W. 1973. Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North America[J]. *Journal of Geophysical Research*, 78: 876-885.
- Nuttli O W. 1986. Yield estimates of Nevada test site explosions obtained from seismic Lg waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 91: 2137-2151.
- Ringdal F, Marshall P D, Alewine R W. 1992. Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site[J]. *Geophysical Journal International*, 109: 65-77.
- Schlittenhardt J, Canty M, Grünberg I. 2010. Satellite earth observations support CTBT monitoring: A case study of the nuclear test in North Korea of Oct. 9, 2006 and comparison with seismic results[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 167: 601-618.
- Song Y S, Zhao L F, Xie X B, et al. 2022. Seismological observations on the 2019 March 21 accidental explosion at Xiangshui chemical plant in Jiangsu, China[J]. *Geophysical Journal International*, 228: 538-550.
- Sreejith K M, Agrawal R, Rajawat A S. 2020. Constraints on the location, depth and yield of the 2017 September 3 North Korean nuclear test from InSAR measurements and modelling[J]. *Geophysical Journal International*, 220: 345-351.
- Voytan D P, Lay T, Chaves E J, et al. 2019. Yield estimates for the six North Korean nuclear tests from teleseismic wave modeling and intercorrelation of and recordings[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124: 4916-4939.
- Wang T, Shi Q B, Nikkhoo M, et al. 2018. The rise, collapse, and compaction of Mt. Mantap from the 3 September 2017 North Korean nuclear test[J]. *Science*, 361: 166-170.
- Wei M. 2017. Location and source characteristics of the 2016 January 6 North Korean nuclear test constrained by InSAR[J]. *Geophysical Journal International*, 209: 762-769.
- Wen L X, Long H. 2010. High-precision location of North Korea's 2009 nuclear test[J]. *Seismological Research Letters*, 81: 26-29.
- Xie X B, Zhao L F. 2018. The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(3): 889-904 (in Chinese).
- 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 Pn and Pg differential traveltimes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(6): e2020JB020745.
- Yuan J L, Kao H, Yu J S. 2020. Depth-scanning algorithm: Accurate, automatic, and efficient determination of focal depths for local and regional earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7): e2020JB019430.
- Zhang C K, Zhang X K, Zhao J R, et al. 2002. Study on the crustal and upper mantle structure in the Tianchi volcanic region and its adjacent area of Changbaishan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(6): 812-820 (in Chinese).
- Zhang L, Zhao L F, Xie X B, et al. 2022. Yield estimation and event discrimination of the 4 August 2020 Beirut chemical explosion[J]. *Seismological Research Letters*, 93: 2004-2014.
- Zhang M, Wen L X. 2013. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test[J]. *Geophysical Research Letters*, 40: 2941-2946.
- Zhang X K, Zhang C K, Zhao J R, et al. 2002. Deep seismic sounding study on the deep structure of magma system in Tianchi volcanic area of Changbai Mountain[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 24(2): 135-143 (in Chinese).
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2008. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98: 2571-2589.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, Yao Z X. 2012. Yield estimation of the 25 May 2009 North Korean nuclear explosion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102: 467-478.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, Yao Z X. 2014. The 12 February 2013 North Korean underground nuclear test[J]. *Seismological Research Letters*, 85: 130-134.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2016. Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test[J]. *Geophysical Journal International*, 206: 1487-1491.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2017. The 9 September 2016 North Korean underground nuclear test[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107: 3044-3051.
- Zhao X, Feng W, Tan Y P, et al. 2016. Seismological investigations of two massive explosions in Tianjin, China[J]. *Seismological Research Letters*, 87: 826-836.

附中文参考文献

- 范娜, 赵连锋, 谢小碧, 姚振兴. 2013. 朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级测量[J]. *地球物理学报*, 56(3): 906-915.
- 谢小碧, 赵连锋. 2018. 朝鲜地下核试验的震学观测[J]. *地球物理学报*, 61(3): 889-904.
- 张成科, 张先康, 赵金仁, 等. 2002. 长白山天池火山区及邻近地区壳幔结构探测研究[J]. *地球物理学报*, 45(6): 812-820.
- 张先康, 张成科, 赵金仁, 等. 2002. 长白山天池火山区岩浆系统深部结构的深地震测深研究[J]. *地震学报*, 24(2): 135-143.

(本文英文校对 张艺新)