

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.

Xie X B, Zhao L F. 2018. The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(3):889-904, doi:10.6038/cjg2018L0677.

朝鲜地下核试验的地震学观测

谢小碧^{1*}, 赵连锋^{2,3}

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

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

3 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

摘要 自 2006 年至 2017 年, 朝鲜民主主义人民共和国在中朝边界地区的试验场进行了 6 次地下核试验. 本文综合报道根据东北亚地区的宽频带数字地震资料利用地震学方法对这六次地下核爆炸的研究. 结果表明, 朝鲜地下核试验在区域台网产生的地震记录具有典型浅源爆炸的特征. 针对上述资料发展了处理核爆数据的方法并据此得出各次朝鲜核爆的地震学参数, 包括事件识别、当量测定、以及震中相对定位等. 对 6 次核爆和 4 次天然地震 P/S 类型谱振幅比的统计分析表明, 2 Hz 以上台网平均谱振幅比可以正确地将朝鲜核爆从天然地震中识别出来, 从而有效监测在朝鲜半岛进行的当量大于 0.5 kt 的地下核试验. 同时也发现, 建立在体波-面波震级比之上的识别方法不适用于朝鲜核试验场. 通过建立中朝边界地区基于 Lg 波的体波震级系统, 计算了各次朝鲜核试验的体波震级 $m_b(Lg)$, 并由此估计了它们的地震学当量, 其值介于 0.5 kt 至 60 kt 之间. 由于缺少爆炸埋藏深度的数据, 上述当量有可能被低估, 因而有必要对深度影响做进一步研究. 以第一次爆炸的位置为参考震中, 利用 Pn 波相对走时数据和高精度相对定位方法获得了各次核爆在试验场中的精确定位.

关键词 地下核试验; 识别; 定位; 当量估计; 朝鲜

doi:10.6038/cjg2018L0677

中图分类号 P315

收稿日期 2017-11-02, 2018-01-16 收修定稿

The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests

XIE XiaoBi^{1*}, ZHAO LianFeng^{2,3}

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

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

3 *Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

Abstract Since 2006, North Korea (DPRK) conducted 6 underground nuclear tests at the test site located near the China-North Korea border. These explosions generated abundant broad band digital seismograms within regional distances. These seismograms show typical features of shallow explosions. Processing methods for event discrimination, yield estimation, and relocation of epicenters were developed to investigate these explosions. The spectral ratios Pg/Lg, Pn/Lg, and Pn/Sn were calculated for all 6 explosions and 4 nature earthquakes. The results show that network averaged P/S type spectral ratios can unambiguously separate explosions from natural earthquakes. With this method, a regional network can effectively monitor nuclear tests of 0.5 kt or larger in the Korea Peninsula. The results also revealed that the m_b-M_s magnitude ratio cannot

effectively discriminate the explosion and earthquake sources in this region. A body wave magnitude system based on regional phase Lg was created for the Northeast China-North Korea border region. Based on this method, the Lg wave magnitudes of these nuclear tests were calculated and their seismic yields were estimated ranging between 0.5 and 60 kt. Due to lack of depth of burial information, these yields may be underestimated. Further investigation of the depth effect on yield estimation is suggested. Using the location of the first nuclear test as a reference, the epicenters of other explosions were relocated using a high-precision relative location method.

Keywords Underground nuclear test; Discrimination; Relative location; Yield estimation; North Korea

0 引言

由于核武器的巨大破坏性和战略威慑力量,自它发明以来就一直受到各国的密切关注.出于不同目的,例如侦察对方的核能力、防止核扩散、反恐等,整个国际社会对侦测核试验投入了很大力量.目前采用的侦测手段主要包括地震学方法、次声法、水声法、放射性核素检测等.得益于其高灵敏度、高可靠性、以及可从远距离实施而不需要直接到达试验场地等特点,地震学方法已成为最广泛使用的核侦测手段.自核武器发展以来的几十年间,核试验的方式经历了很大改变,相应的侦测方法也产生了很大变化.早期核试验多在大气层或水中进行,无所谓隐蔽,侦测工作也相对直接.约从 20 世纪 60 年代初起,核试验逐步转入地下进行.这一时期的特点是,试验全部由主要核大国在有限且已知的试验场进行.为追求核弹的破坏力,爆炸当量比较大,常常达到百万吨量级.由此产生的地震信号可轻易被全球台网记录到.主要核国家大多有辽阔的国土面积或殖民地,侦察一方的地震观测很难推进到离试验场较近的距离进行.因此这一时期的观测主要依赖于全球台网或专用大孔径地震台阵记录到的远震体波和面波数据(如, Marshall and Basham, 1973; Ringdal et al., 1992).对天然地震和核爆事件的区分主要依据体波和面波震级差别.对当量的估计主要依据远震体波震级以及震级和当量之间的经验关系.由于对主要核试验场的研究比较透彻,而且美国、前苏联都曾公布过一批核爆炸的当量,又分别在对方的试验场进行过用于标定的化学爆炸试验,因此用于这些试验场的经验公式往往经过仔细标定,由此得到的当量比较准确.

进入 20 世纪 80 年代以后,核试验的形式和核监测工作有了比较大的变化.首先,国际上由部分禁止核

试验条约(Partial Nuclear Test Ban Treaty 或 PTBT)转入了全面禁止核试验条约(Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty 或 CTBT).监测所要求的当量门限值大大降低,要求能对 1 kt 或相当于 4 级以下的事件进行监测.另一方面,监测对象不再限于几个主要核大国.印度、巴基斯坦、朝鲜以及若干具有潜在核能力的国家均被纳入监测对象.与早期核大国进行的大当量核试验不同,这些国家进行的多数是小当量或极小当量的试验,很难从全球台网获得高质量的远震记录.不过,由于这些国家往往国土面积有限,缺乏广大腹地,使得从边界另一侧进行区域距离的监测成为可能.这一阶段地震监测技术的发展特点为,利用区域地震震相对小当量事件进行监测和分辨.例如利用 Pn 波进行事件定位;利用 Lg 波震级或短周期瑞利波 Rg 的震级等估计爆炸当量;利用区域震相的 P/S 类型谱振幅比来识别爆炸震源和天然地震等.相对于远震体波和面波,区域地震波的频率更高.它们主要在地壳和上地幔中传播,在传播过程中波与结构连续地耦合在一起,因而更容易受到路径上不同尺度非均匀性的影响.天然地震的发生频度与震级呈指数关系,低震级地震的数量远远大于高震级地震.大量采石和工业爆破也落入这一震级范围.这意味着降低监测当量门限会使待识别事件数目极大地增加.鉴于上述因素,再加上近年核试验数量少,可用于验证的实际数据少;试验场地重复使用率低,场地情况不明等众多原因,对利用区域地震震相研究地下核爆炸特征提出了新的挑战.

中国大陆及周边存在着国际上最为复杂的核试验场分布.除前苏联在哈萨克斯坦的试验场和中国的罗布泊试验场外,还存在印度、巴基斯坦、朝鲜等国的试验场,以及数个具有潜在核能力的国家和地区.这些试验场均位于中国地震台网和周边全球地震台网的区域地震范围内.无论是出于对国际社会的责任还是出于对自身安全的考虑,都应该加强对

现存试验场进行的核爆炸或潜在目标进行监测和分析.特别是,近年来在朝鲜的核试验场进行了数次核试验.上述试验是国际上近十几年来仅有的地下核试验,在我国境内和周边地震台中震中距涵盖了一百多千米至两三千千米的距离,留下了比较完整的高质量宽频带数字地震记录,提供了利用区域地震资料研究地下核爆炸的宝贵数据.因此,充分研究来自朝鲜地下核试验的数据,发展在中国周边地区根据区域地震资料分析核试验参数的方法具有十分重要的意义.

对潜在地下核试验进行研究的主要内容为事件定位、事件识别和爆炸当量估计等(Gibbons et al., 2017; Murphy et al., 2013; Schaff and Richards, 2004; Schlittenhardt et al., 2010; Selby, 2010; Shin et al., 2010; Wei, 2017; Wen and Long, 2010; Zhang and Wen, 2013; Zhao et al., 2008, 2012, 2014, 2016; 范娜等, 2013; 林鑫和姚振兴, 2016; 潘常周等, 2014; 田有等, 2015).本文研究近年朝鲜 6 次地下核爆炸产生地震信号的特征,并报道对它们的综合分析结果.

1 朝鲜地下核试验在中国和周边台网产生的地震数据

朝鲜核试验场位于中朝边界朝鲜一侧 100 km 左右.图 1 为朝鲜及周边地区地图,其中朝鲜核试验场的位置用红五星标出.处于区域地震范围内的主要地震台网包括中国数字地震台网(CNDSN),全球地震台网(GSN),以及日本 F-NET 台网.其所属台站在图中分别用实心圆、实心方块和实心三角标出.在 2006 年、2009 年、2013 年、2016 年的 1 月和 9 月、以及 2017 年 9 月在该试验场共进行了 6 次地下核试验.为方便起见称这六次核试验为 NKT1—NKT6(参数见表 1).这些爆炸事件在上述台网中产生了 Pn、Pg、Sn、Lg 和 Rg 等区域震相,成为研究朝鲜核爆的基本数据.朝鲜半岛大部由前寒武纪地层组成,核试验场出露的主要岩石为伟晶云母花岗岩、细粒花岗岩和闪长岩等(Institute of Geology, 1996).衰减成像结果显示,该区具有相对较高的 Lg 波 Q 值(Xie et al., 2006; Zhao et al., 2010).由 Pn 波传播揭示的上地幔顶部速度为 $7.4\sim 8.2\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (Hearn et al., 2004; Liang et al., 2004; Marshall et al., 1979; Pei et al., 2007; Rapine and Ni, 2003; Zhao et al., 2012; 胥颐等, 2008; 张成科等, 2002).

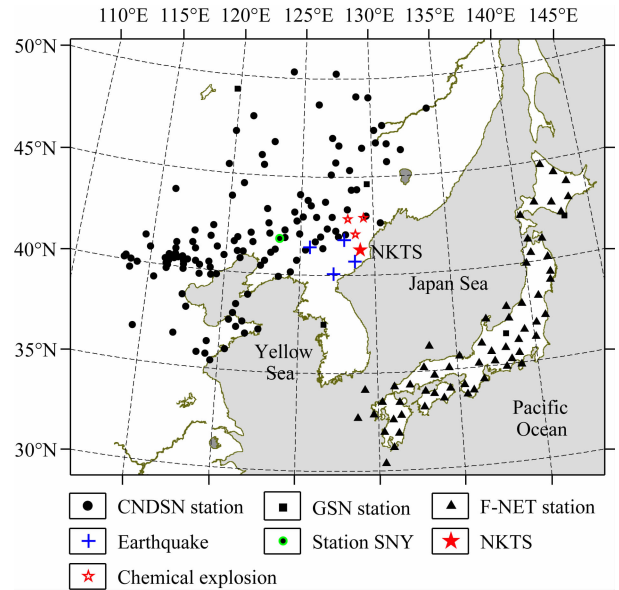


图 1 朝鲜地下核试验场及周边地区地图

红色五星标出的是朝鲜核试验场的位置,实心圆为 CNDSN 台站,实心方块为 GSN 台站,实心三角为日本 F-NET 台站.十字丝是 4 个天然地震的震中位置,空心五星为 3 个用于地震测深的小化学爆炸事件.

Fig. 1 Map of the North Korea nuclear test site and surrounding regions

The red star denotes the test site, solid circles are CNDSN stations, solid squares are GSN stations, and solid triangles are F-NET stations. The crosses are epicenters of 4 natural earthquakes for discrimination experiments, and hollow stars are epicenters of 3 small chemical explosions for seismic deep sounding.

这些结果表明朝鲜核试验场为处于稳定大陆区域的硬岩场地,结构比较均匀.图 2 所示为 6 次地下核试验在沈阳台记录到的垂直向速度波形,震中距为 460 km 左右.各次核试验震中位置相对集中,埋藏深度较浅,而且爆炸震源基本上是各向同性的,因此它们产生的地震波形高度一致,都具有清晰的浅爆炸震源的特征.Pn 和 Pg 波相对较强且具有比较尖锐的起始,Sn 波不太发育,相对弱的 Lg 波以及比较发育的短周期瑞利面波.除第一次爆炸由于当量较小信噪比稍低外均具有很高的信噪比.

作为例子,图 3 给出了 2017 年 9 月 3 日朝鲜核爆沿不同方向传播在若干地震台所生成的垂直向区域地震记录.其中图 3a 和 3b 分别是经过 $0.5\sim 10.0\text{ Hz}$ 和 $0.01\sim 0.1\text{ Hz}$ 滤波的波形,震中距均为 1000 km 左右.作为参考,图 3c 画出了沿不同方向大圆路径上的地壳剖面,莫霍面数据来自 Laske 等(2013).朝鲜核爆的地震波在方位角 185° 至 40° 之间主要进入中国大陆.在这些方向上,高频地震图中最显著的区域震相为 Lg 波,它可以被解释为在地壳

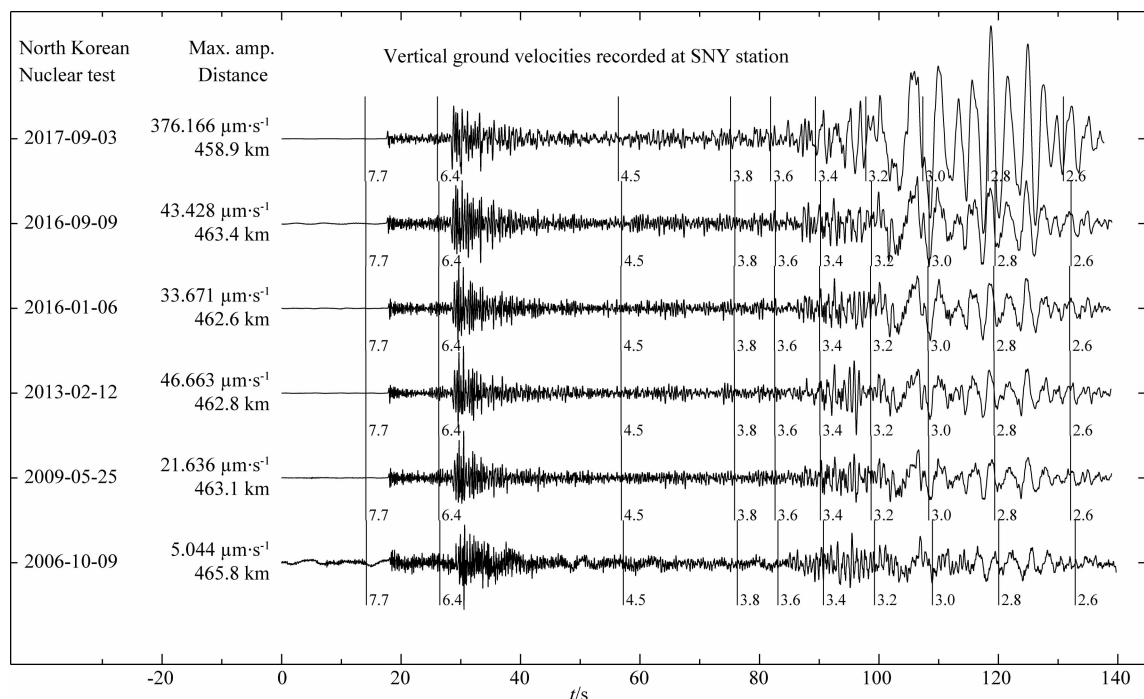


图2 沈阳台记录到的6个朝鲜地下核爆炸产生的垂直向地震图

地震图具有显著的P波初至、较弱的Lg波和比较发育的3~5 s的短周期Rayleigh波,显示出典型浅爆炸源的特点。

在图的左边列出了核试验的时间、垂直分量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。

Fig. 2 Normalized vertical-component velocity seismograms of six North Korea nuclear tests recorded at SNY. The event dates, maximum amplitudes and epicentral distances are listed on the left. The marks on the waveforms indicate apparent group velocities. These seismograms are characterized by impulsive P-wave onsets, relatively weak Lg phases and well developed short period Rayleigh waves.

波导中多次反射的剪切波或高阶面波(Xie and Lay, 1994). 中国东北和朝鲜地区同属中朝地台的东北部,为大陆型地壳(Li and Yuan, 2003; 翟明国, 2016). 由于大陆地壳比较厚,能够容纳足够多的简正振型(Zhang and Lay, 1995),因此可以形成Lg波并被稳定地追踪1000 km以上. 由图1和图3c可以看到,在朝鲜半岛东侧地壳变薄并逐步过渡到日本海之下的海洋型地壳(Chen et al., 2015; Kim et al., 2009; Xu et al., 2014),其厚度仅为10~15 km(Laske et al., 2013; 朱介寿, 2007),不能通过Lg波. 所以在60°至170°方位角通过海洋路径到达日本台站的记录中几乎观察不到Lg波. 此外,从朝鲜核试验场到南朝鲜仁川台的路径中也有一小段经过日本海,并因此影响到Lg波的通过效率. Lg波中包含丰富的具有不同出射角的信号,较少受到震源辐射花样的影响,因而成为在区域距离上研究天然地震震级最为有效的数据(Bowers et al., 2001; Murphy, 1996; Nuttli, 1986; Ringdal et al., 1992). 大量研究结果也发现,爆炸产生的Lg波振幅与爆炸当量之间有比较稳定的关系,因此也被广泛用于通过区域

震级估算核爆当量的重要数据. 由图3a还可以看到,Pn波在各个方向上都可以被清楚地观测到,且均为初至震相,但通过大陆与通过海洋路径的振幅存在一定差别(Zhao et al., 2015). Pn波在震中精确定位中起到重要作用. 核爆也产生了Sn和Pg等震相. 它们与Pn,Lg等震相结合可以构成识别爆炸和地震震源所需的数据. 图3b所示的低频地震图中最明显的震相是瑞利波. 沿大陆路径频散小,瑞利波表现为较短的脉冲形式;相比之下,通过海洋路径的瑞利波则表现为有强烈频散的波列. 在170°方位角附近的路径涉及海陆之间的交替,包含大陆架和海洋,构造比较复杂,因此通过这些路径的震相也比较复杂.

为研究如何识别爆炸与天然地震震源,我们也研究了若干发生在区域台网范围内的天然地震. 在图1中用“+”标明了用于此目的的4个发生在朝鲜半岛的天然地震震中. 作为例子,图4比较了天然地震和朝鲜核爆炸在区域范围内产生的垂直向地震图. 其中图4a和4b分别为发生在2002年4月和2004年12月的两个天然地震;图4c为2017年9月

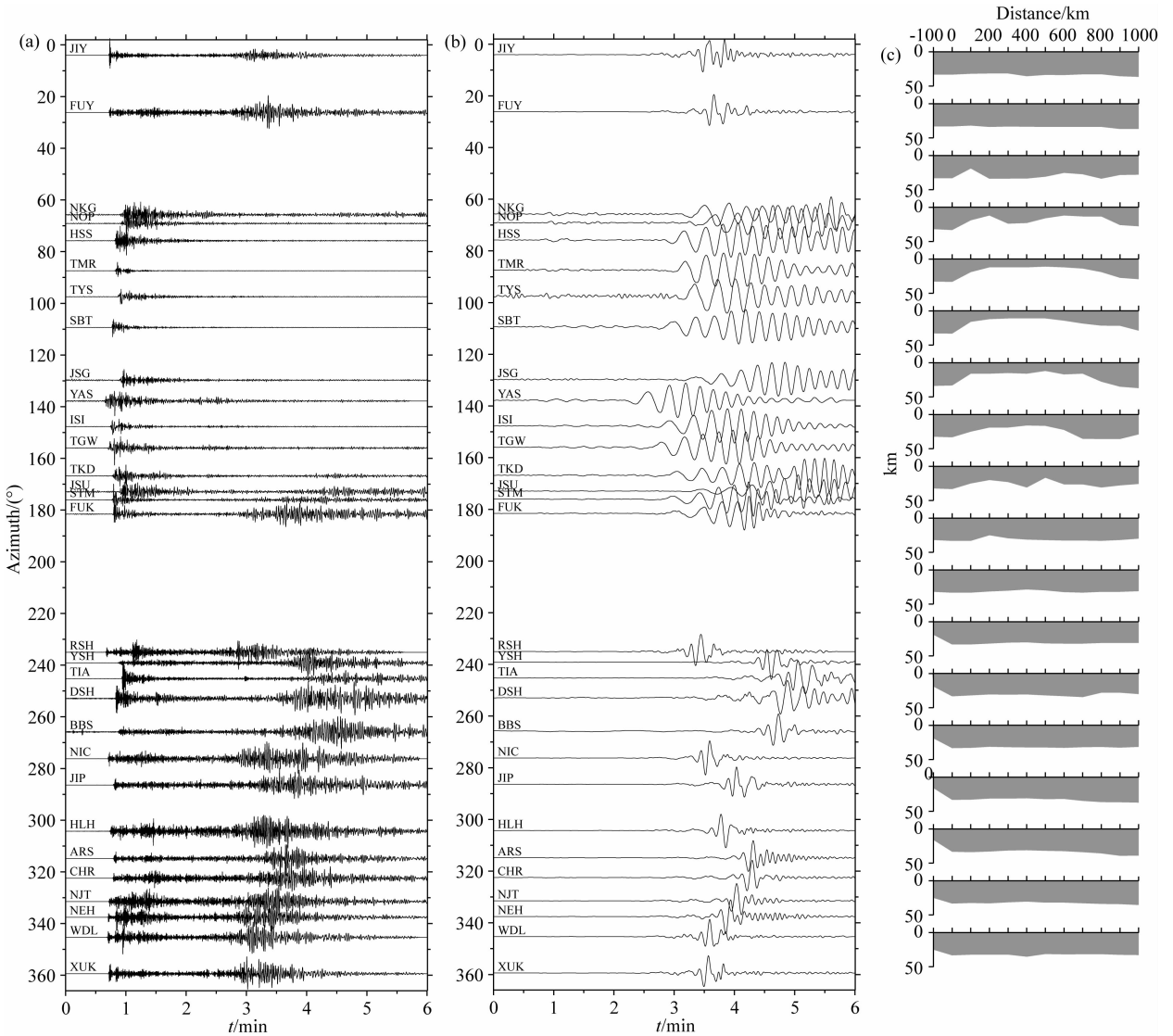


图3 2017年9月3日朝鲜核爆辐射的地震波沿不同方向传播产生的区域地震记录

(a) 经过0.5~10.0 Hz滤波的高频波形。(b) 经过0.01~0.1 Hz滤波的低频波形。纵坐标为离源方位角, 横坐标为时间。震中距均为1000 km左右。(c) 是沿相应方向大圆路径上的地壳剖面, 从10°至350°, 间隔20°。横坐标为距离, 纵坐标为深度。剖面从-100 km至1000 km, 朝鲜核试验场位于距离0 km处。

Fig.3 Azimuthal variations of regional phases generated by the September 3, 2017 North Korea nuclear test

(a) and (b) are high-frequency (0.5 to 10.0 Hz) and low-frequency (0.01 to 0.1 Hz) seismograms. Vertical coordinate is the azimuth, and horizontal coordinate is time. Epicenter distances for stations are roughly 1000 km. Shown in (c) are crust profiles along different azimuths from 10 degree to 350 degree with a 20 degree interval. The horizontal and vertical coordinates are distance and depth. These profiles are from -100 km to 1000 km, with the North Korea test site located at 0 km.

进行的核爆炸。走时曲线标明了不同区域震相的到达时刻。最显著的特点为天然地震具有较强的S波类震相如Lg波, 而爆炸震源在所有距离上都产生较强的P波类震相如Pn和Pg波, 以及比较明显的短周期面波。两种震源都没有产生显著的Sn波。提取地震图中两种震源表现出来的差异是识别爆炸和天然地震的关键。此外, 区域地震台网也记录到

若干在中朝边界中国一侧用于地震测深的已知当量化学爆炸(张成科等, 2002)。虽然它们的当量比较小, 但仍然可以为我们提供有用的参考。在图1中这些小爆炸的震中用空心五星表示。上述天然地震和化学爆炸的参数均列在表1中。这些观测数据结合起来为研究朝鲜地下核试验提供了重要约束。

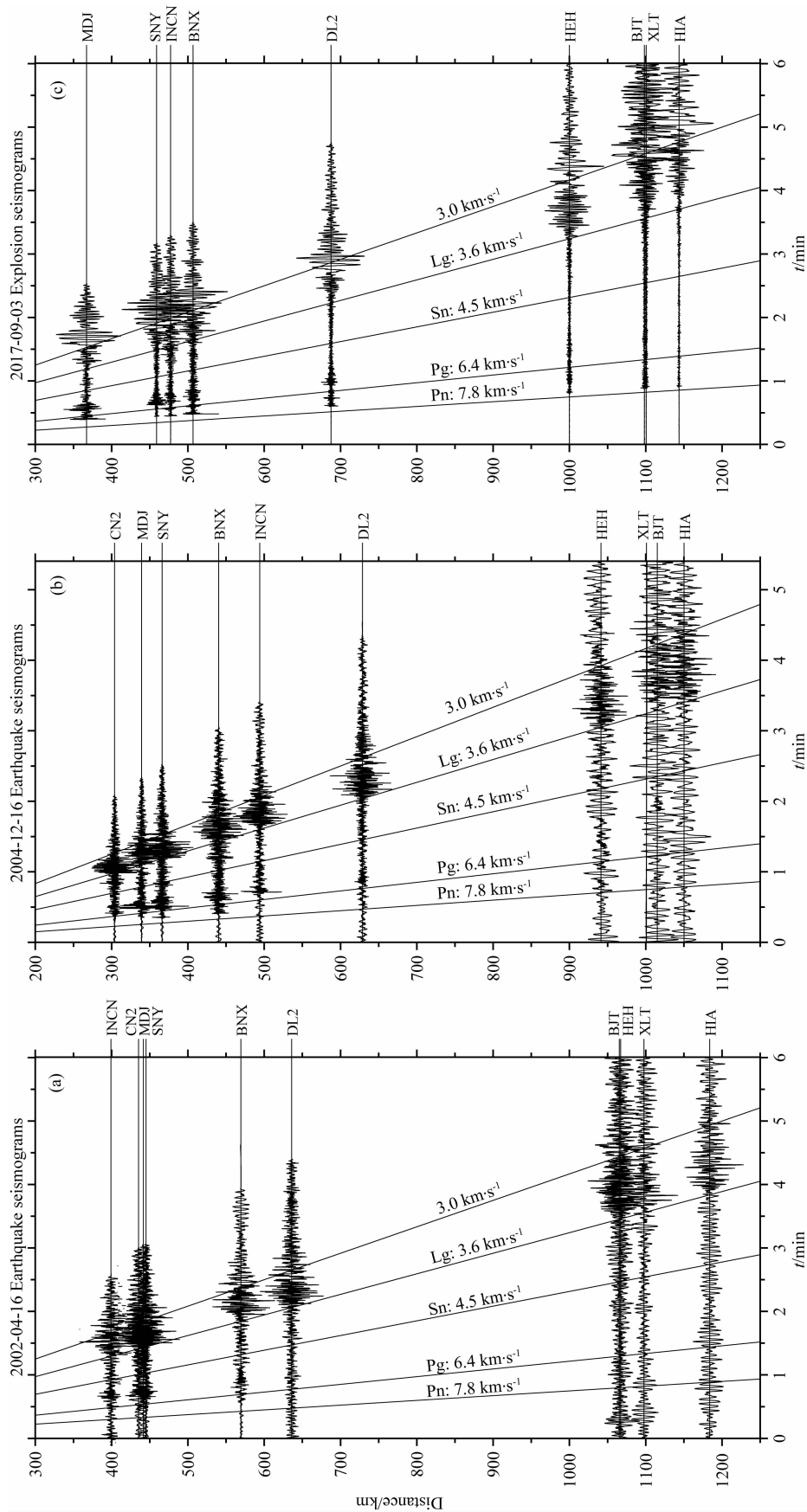


图4 朝鲜核爆炸与附近天然地震产生的区域震相的比较

(a)和(b)分别为发生在2002年和2004年的两个天然地震产生的地震波；(c)为2017年9月的核爆炸产生的地震波。走时曲线标明了不同区域震相的到达时刻。

Fig. 4 Comparison between regional phases generated by a North Korea nuclear test and two nearby earthquakes

Shown in (a) and (b) are seismicgrams from two natural earthquakes occurred in 2002 and 2004 (refer to Table 1), and in (c) are seismicgrams from the September 2017 North Korea nuclear test.

表 1 朝鲜地下核试验和邻近的地震、化学爆炸事件的震源参数

Table 1 Event parameters of the North Korean underground nuclear tests, nearby earthquakes and chemical explosions

事件	日期 (年-月-日)	时间 (UTC)	纬度 (°N)	经度 (°E)	深度 (km)	m_b /or 当量(ton)	m_b (Lg)	标准 偏差	M_s (Rayleigh)	标准 偏差	当量估计 (kt)	
											正常埋深	调整埋深**
NKT1	2006-10-09	01:35:28.00	41.287	129.108	0.360*	4.2	3.93	0.09	2.92	0.20	0.5	1
NKT2	2009-05-25	00:54:43.12	41.294	129.078	0.580*	4.7	4.53	0.13	3.65	0.07	2.5	6
NKT3	2013-02-12	02:57:51.27	41.292	129.073	0.410*	5.1	4.91	0.22	3.94	0.16	8	12
NKT4	2016-01-06	01:30:00.96	41.300	129.068	0.570*	4.9	4.67	0.19	4.05	0.08	4	9
NKT5	2016-09-09	00:30:01.39	41.298	129.080	0.780*	5.0	4.82	0.18	4.23	0.09	6	16
NKT6	2017-09-03	03:30:02.23	41.303	129.070	0.640*	6.3	5.56	0.20	5.05	0.20	56	72
地震 1	2002-04-16	22:52:38.19	40.71	128.67	10.0	4.6	4.17	0.12	3.07	0.19	—	—
地震 2	2002-05-05	10:02:23.10	40.06	127.24	15.0	—	2.96	0.20	2.50	0.56	—	—
地震 3	2003-10-10	13:34:27.80	41.43	125.65	15.0	—	3.08	0.19	2.75	0.28	—	—
地震 4	2004-12-16	18:59:14.60	41.80	127.98	10.0	4.0	4.12	0.17	3.08	0.38	—	—
化学爆炸 1	1998-08-12	15:00:08.18	42.865	128.223	0.007	1.50 (ton)	1.68	0.02	2.28	0.56	—	—
化学爆炸 2	1998-08-18	14:00:06.69	42.914	129.324	0.011	1.80 (ton)	1.91	0.00	2.30	0.56	—	—
化学爆炸 3	1998-08-19	15:00:07.79	42.091	128.739	0.029	1.45 (ton)	1.77	0.00	2.34	0.28	—	—

注: * 根据隧道入口与试验点位置的高程差估计的最小埋藏深度; ** 根据估计深度修正的值。

2 朝鲜核爆的体波和面波震级测定

震级是衡量地震事件大小的最基本度量之一,它也被用于区别爆炸震源与天然地震,或用于对爆炸当量的测定.对于较大的地下核爆炸传统上利用全球台网的远震P波计算它的体波震级 $m_b(P)$,但对于当量较小的核爆,例如朝鲜核爆,很难在全球台网获得具有足够信噪比的数据用于计算远震体波震级.为克服这一困难,Nuttli(1973, 1986),Patton和Schlittenhardt(2005)利用Lg波振幅定义了区域地震震级:

$$m_b(Lg) = 5.0 + \log_{10}[A(10)/C], \quad (1)$$

其中C是一个震级为 $m_b=5.0$ 的事件在震中距10 km处产生的Lg波振幅, $A(10)$ 是待测事件在同样距离处产生的Lg波振幅.利用Lg波的几何扩散因子和衰减模型可以将任意距离处观测到的Lg波数据归算到10 km处的振幅并进而计算 $m_b(Lg)$.对于内华达试验场和WWSSN短周期仪器记录,Nuttli(1973,1986)利用第三峰值法测定Lg波振幅得到 $C=110 \mu\text{m}$,而Patton和Schlittenhardt(2005)利用均方根振幅得到 $C=90 \mu\text{m}$.他们还用统计方法标定了内华达试验场的 $m_b(Lg)$ 与远震体波震级 $m_b(P)$ 之间的关系,使得二者之间可以互相替代.对于朝鲜核试验场,我们利用位于中朝边界的区域地震台网

建立了一个类似的Lg波震级系统(Zhao et al., 2008, 2010),并用一组同时被区域台网和全球台网记录到的历史地震标定了区域震级 $m_b(Lg)$ 与远震体波震级 $m_b(P)$ 之间的关系.为计算这一地区的 $m_b(Lg)$,还需要该地区的Lg波衰减模型.Zhao等(2010, 2013)建立了中国东北地区和华北地区的宽频带Lg波衰减模型.Yang(2002)通过数值计算得到的Lg波几何扩散系数被用来进行几何扩散校正.利用上述震级系统对6次朝鲜核爆得到的 $m_b(Lg)$ 列在表1中.

传统上,面波震级是在远震记录中测量周期为20 s左右的面波振幅得到的.在区域距离上,该周期的面波数据不易获得.Russell(2006)发展了一个时间域的方法将面波震级从远震低频信号推广到区域距离较高频率的信号.Bonner等(2006)尝试了将该方法用于不同数据集并证明了它在不同地区的适用性.不同作者利用该方法研究了朝鲜地下核试验的面波震级,得到了与远震数据一致的结果(Bonner et al., 2008; Chun et al., 2011; Murphy et al., 2013; 范娜等, 2013).我们利用中朝边境地区的11个台站构建了用于面波震级计算的台网,并用一组历史地震对瑞利波震级进行了标定(Zhao et al., 2017; 范娜等, 2013).利用标定后的台网计算得到的6次朝鲜核爆的Rg面波震级列在表1中.

3 朝鲜核爆炸与附近天然地震的识别

识别爆炸震源和天然地震主要依赖于两种震源所产生地震波的差别. 它们主要来源于下述几个方面. 首先是爆炸和天然地震的震源过程不同. 爆炸源通常空间尺度小, 延续时间短, 局部应力变化大. 而天然地震断层错动区的尺度通常大于爆炸震源. 再考虑到有限破裂速度, 它涉及的时间过程往往更长. 因而相似大小的爆炸和地震的震源谱往往具有不同的拐角频率, 其高频和低频成分的比例也不相同. 其次是震源机制的差别. 爆炸震源理论上是各向同性的扩张源, 理论上在各向同性全空间中只产生纵波而不会产生横波. 但实际情况中爆炸震源往往不是严格各向同性的. 例如爆心附近高温高压造成的非线性过程, 随爆炸过程在垂直方向发生的抛起和坠落(spallation)形成的垂直偶极分量以及由爆炸震动所释放的构造应力形成的双力偶成分等都会产生带有某种辐射花样的剪切波成分(Patton and Taylor, 2011; Rougier et al., 2011; Wallace, 1991). 震源附近存在的分界面(例如自由面和自由面起伏, 浅部结构中的其他分界面)以及不同尺度的非均匀性也会通过散射作用将一部分 P 波能量在近源区转化为 S 波能量(Gupta et al., 2005; He et al., 2008; Xie et al., 2005; Xie and Lay, 1994). 作为对比, 构造地震震源通常可以用双力偶源来表示, 含有更加丰富的 S 波能量. 两种震源的另一个重要差别是, 人工爆炸通常在浅表处进行, 而天然地震往往发生在较大深度. 震源深度的差别一方面会影响到地震波的激发, 例如, 不同模式和不同频率的面波激发本征函数随深度的变化是不同的. 另一方面, 不同深度处岩石物理特性和状态的差别, 例如密度、各种弹性模量、流体静压力等都会影响到地震波的辐射. 研究地震波所携带的上述信息可以提供对于震源特性的识别. 上述各种特性往往是高度耦合在一起的. 单一参数的改变往往会影响到一系列复杂的变化. 再加上实际数据的高度分散都会造成识别上的困难.

传统上对地下核试验的识别依靠直接比较远震面波震级 M_S 和体波震级 m_b . 对于给定面波震级的事件, 爆炸源通常产生比地震更大的体波震级. 对于较大事件, 体波震级 m_b 和面波震级 M_S 之间的差异是一个区分爆炸和地震的理想识别指标(Fisk et al., 2002; Selby et al., 2012; Stevens and Day, 1985). 如前所述, 远震体波震级 m_b 和面波震级 M_S 是在 1 s

和 20 s 左右的周期下测定的. 因此, 测定 m_b 和 M_S 的差别本质上是测定震源频谱中不同频段的振幅比. 在区域地震观测中由于激发函数的高度复杂性使得体波面波震级的差异不再是一个理想的指标, 特别是对震级较小的事件(Ford and Walter, 2015; Patton and Randall, 2002; Selby et al., 2012; Stevens and Day, 1985). 已有作者指出, 比较体波和面波震级的方法不能很好地识别朝鲜核试验(Bonner et al., 2008; Zhao et al., 2017; 范娜等, 2013). 图 5 所示为我们对 6 个朝鲜核试验及中国东北地区和朝鲜半岛的一批天然地震用第 2 节中的方法计算出来的区域体波震级 m_b (Lg)和面波震级 M_S (Rg). 可以看到爆炸震源和地震是高度重合的. 图中的实线和虚线分别是 Murphy 等(1997)和 Selby 等(2012)提出的用 $M_S : m_b$ 来筛除非爆炸事件的判据, 用于朝鲜半岛显然不太理想.

数字化宽频带地震记录提供了直接从频率域研究地震信号的条件. 在区域地震范围, 从宽频带地震资料中采集不同震相的频谱; 根据波的传播方式分别对它们的几何扩散、衰减等进行修正, 归算到统一的参考震中距; 然后在广泛的频率范围计算 P/S 类型的谱振幅比. 这种振幅比消除了来自传播过程的影响以及激发函数中的共同部分, 突出了来自不同震源之间的差别, 为识别震源类型提供有效的判据(Fisk, 2006; Kim et al., 1993; Taylor et al., 1989; Walter et al., 1995, 2007; Xie, 2002; Zhao et al., 2008, 2014, 2016, 2017; 赵连锋等, 2017). 对朝鲜核爆进行识别研究的数据来自 6 个已知的核爆震源和发生在同一台网监视范围内的 4 个天然地震(见表 1). 我们首先挑选出一组具有纯大陆路径的高质量台站(如图 5a 所示), 采集 Pn, Pg, Sn 和 Lg 波的垂直分量波形, 然后对各个台站的记录分别计算 Pg/Lg, Pn/Lg 和 Pn/Sn 谱振幅比, 具体方法见(Hartse et al., 1997; Zhao et al., 2008, 2014, 2016, 2017). 所得结果表明, 这些谱振幅比确实提供了区分爆炸和天然地震的信息. 但单台观测结果仍有一定的随机性, 造成识别上的不确定性, 特别是对偏离台网中心或信噪比较低的数据(Gupta et al., 1992; Kim et al., 1993; Richards and Kim, 2007; Zhao et al., 2008, 2014, 2016, 2017). 相比之下经过震中距校正后的台网平均振幅比可以大大提高识别可靠性(Zhao et al., 2008, 2014, 2016, 2017; 赵连锋等, 2017). 因此, 我们由单台振幅比计算台网平均振幅比, 所得结果显示在图 6 中. 其中图 6a 是所

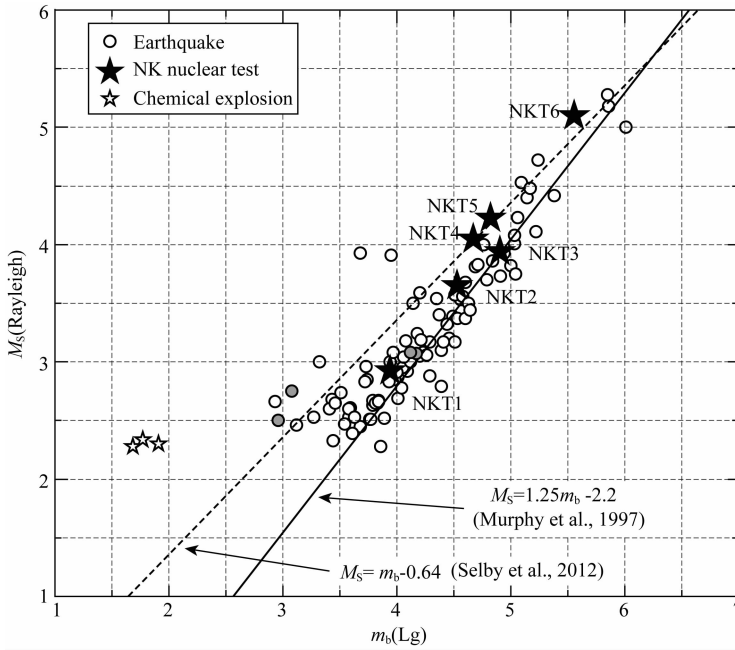


图 5 不同震源得到的面波震级与 Lg 体波震级的比较

纵坐标是面波震级 M_S (Rg), 横坐标是体波震级 m_b (Lg). 核爆炸震源由实心五星表示, 化学爆炸由空心五星表示, 用于进行识别试验的 4 个天然地震用灰色圆表示, 其余天然地震用空心圆表示. 实线和虚线分别是 Murphy 等(1997) 和 Selby 等(2012)提出的用 $M_S \cdot m_b$ 来筛除非爆炸事件的判据.

Fig. 5 Surface wave magnitude M_S (Rg) versus body wave magnitude m_b (Lg)

The solid stars are for North Korea explosions, hollow stars are small chemical explosions, circles filled with gray are earthquakes used in discrimination test, and open circles are for other earthquakes in Northeast China and the Korean Peninsula. The solid and dashed lines are screening criteria provided by Murphy et al. (1997) and Selby et al. (2012) for screening non-explosions using the m_b - M_S difference.

用台站位置, 图 6b—6d 分别为对上述 6 个地下核爆炸和 4 个天然地震计算得到的 Pg/Lg, Pn/Lg 和 Pn/Sn 的台网平均谱振幅比. 可以看出, 在 2 Hz 以上各种谱振幅比能够可靠地区分所有 10 个震源的性质. 以上结果表明, 利用上述区域台网数据, 对于发生在朝鲜半岛的 4 级以上事件, 经过震中距校正的台网平均谱振幅比可以作为识别爆炸震源和天然地震的可靠判据.

4 对朝鲜核爆地震当量的估算

地下核试验的地震当量可以根据标定过的震级-当量经验公式通过事件的体波震级(Bowers et al., 2001; Murphy, 1996; Nuttli, 1986; Ringdal et al., 1992; Zhang and Wen, 2013; Zhao et al., 2008, 2012)或面波震级(如, Patton, 2016; Stevens and McLaughlin, 2001; Stevens and Murphy, 2001)来得到. 各核大国均有一定数量公开了爆炸当量的事件. 例如, Sultanov 等(1999)给出了前苏联 1965 年至 1988 年期间用于和平目的的 122 个核爆炸(peaceful

nuclear explosions, PNE)的参数. Springer 等(2002)给出了所有美国地下核试验的参数. 这些参数包括爆炸时间、震中位置、当量和埋深等. 利用已知当量的事件可以标定试验场并由震级估算爆炸当量. 但对朝鲜核试验迄今没有公布过爆炸当量, 因此必须借助一些假设条件利用在其他试验场获得的经验公式来推算当量. Nuttli(1986)对内华达试验场得到饱和岩石情况下的 m_b (Lg)-当量经验公式为

$$m_b(\text{Lg}) = 3.943 + 1.124 \log Y - 0.0829(\log Y)^2, \quad (2)$$

其中 Y 是当量, 单位为 kt. 他建议这个公式也适合于美国其他地方以及位于撒哈拉沙漠的法国试验场, 并认为它也可能适用于其他大陆地区. Ringdal 等(1992)研究了前苏联在东哈萨克斯坦 Shagan River 的试验场进行的核爆炸的地震当量. Murphy (1996)研究了前苏联的核试验以及在不同地质条件下进行的用于和平目的的核爆炸. 他们建议对于稳定区域中进行的完全耦合的核爆炸, 例如前苏联在东哈萨克斯坦的试验场, 可以使用下述经验公式:

$$m_b = 4.45 + 0.75 \log Y. \quad (3)$$

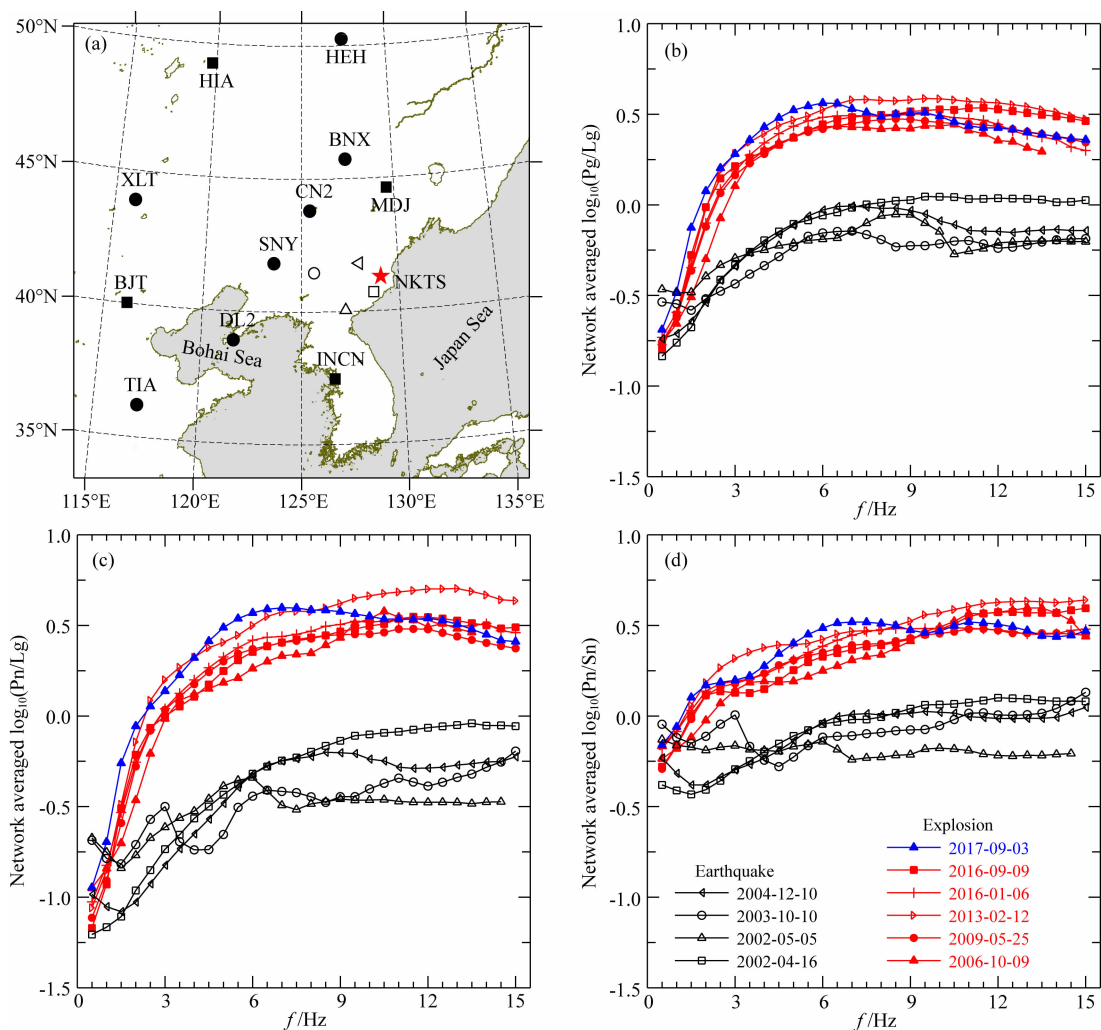


图 6 由天然地震和爆炸数据得到的不同类型的谱振幅比

(a) 计算谱振幅比所用地震台站的分布,其中五星为朝鲜核试验场,实心符号为台站位置,空心符号为天然地震震中。(b)–(d) 分别为对不同事件得到的 Pg/Lg, Pn/Lg 以及 Pn/Sn 的谱振幅比随频率的变化。其中纵坐标为对数振幅比,横坐标为频率,红色符号为爆炸震源的结果,黑色符号为天然地震的结果。2017 年 9 月的核爆炸用蓝色表示。

Fig. 6 Spectral ratios calculated from earthquake and explosion sources

(a) Station locations used in calculating spectral ratios, where star is the North Korea test site, solid circles are CNDNS stations, squares are GSN stations, and open symbols are epicenters of earthquakes. (b) to (d) are spectral ratios Pg/Lg, Pn/Lg and Pn/Sn versus frequencies, in which the vertical and horizontal coordinates are logarithmic amplitude and frequency, red symbols are for explosions, black symbols are for earthquakes, and blue symbols are for the September 2017 explosion.

考虑到在前苏联新地岛 (Novaya Zemlya) 试验场的 Pn 波速度略低于东哈萨克斯坦, Bowers 等 (2001) 提出了另一个经验公式:

$$m_b = 4.25 + 0.75 \log Y \quad (\text{for } Y \geq 1 \text{ kt}), \quad (4a)$$

$$m_b = 4.25 + \log Y \quad (\text{for } Y < 1 \text{ kt}). \quad (4b)$$

相比 (3) 式, 对给定的震级 (4) 式给出的当量更大些, 而且在 1 kt 之处有一个转折, 适合于把经验公式推广到更小的当量。图 7 所示为上述三个震级-当量经验公式, 三条曲线分别对应公式 (2)–(4)。其中实线部分为有较多数据支持的部分, 震级范围大致为

$4.5 \leq m_b \leq 6.5$ 。虚线部分为向小震级方向外推的部分。对于震级大于 5 级的事件, 不同经验公式给出的当量比较接近。但对震级小于 4 级的事件外推后的公式给出的结果比较分散。为了约束这些经验公式, 我们将前边提到的用于地震测深目的的三个化学爆炸用红色空心五星画在图 7 中。这些化学爆炸的当量为 2 t 左右的硝铵炸药 (张成科等, 2002), 可以粗略折算成 1 t 左右的 TNT (Zhao et al., 2014)。虽然它们比朝鲜核爆的当量小了约 3 个数量级, 但它们在低震级端比较接近 Bowers 等 (2001) 的经验曲

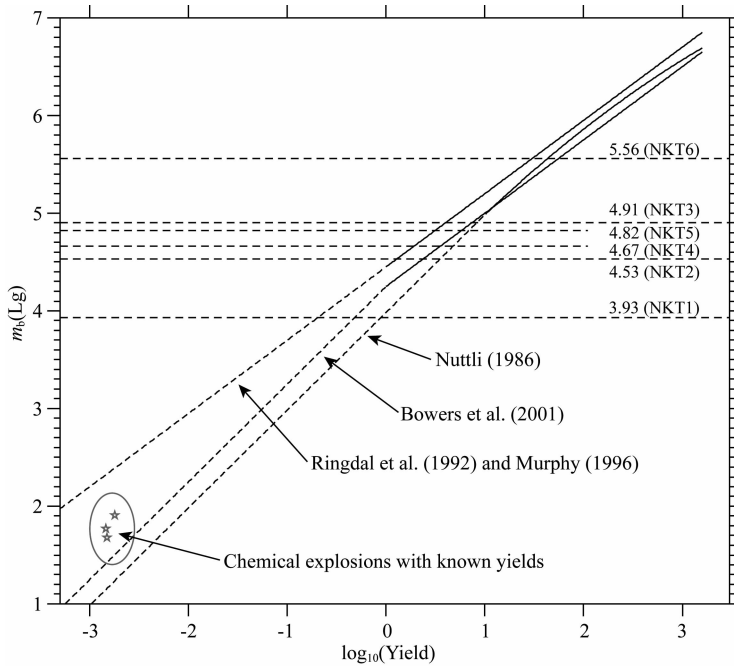


图 7 通过震级-当量经验曲线对地震当量的估计

垂直坐标为由 Lg 波得到的 m_b 震级, 水平坐标为对数当量. 曲线为不同作者得到的经验公式, 实线部分为以大量数据支持的关系曲线, 虚线段为少量数据支持的延伸线. 横虚线为 6 次核爆测得的区域震级 $m_b(Lg)$.

Fig. 7 Empirical relations for yield estimation

The vertical coordinate is the body wave magnitude obtained from Lg wave, and the horizontal coordinate is the logarithmic Yield. Curves are empirical magnitude-yield relations by different authors. Sections illustrated in solid lines are supported by observations, and in dashed lines are extrapolations. The horizontal dashed lines indicate estimated magnitudes for 6 North Korea nuclear tests. Three chemical explosions with known yields are illustrated with hollow stars.

线. 考虑到朝鲜核试验场处于稳定且地壳比较坚硬的地区, 接近前苏联新地岛的条件. 而美国内华达试验场的凝灰岩和流纹岩强度比较低. 再考虑到小当量化学爆炸的震级-当量关系, 我们选择 Bowers 等 (2001) 的经验曲线来推算朝鲜核爆的当量, 并将对所有 6 次事件得到的结果列在表 1 和图 7 中.

5 朝鲜核爆震中位置的高精度相对定位

常规地震定位一般有较大误差. 而相对定位方法选择一个参考事件, 通过测量地震波的相对走时来确定被测事件相对于参考事件的位置, 具有非常高的精度. 该方法常常被用来测定震群或一组核试验的相对位置. 中国数字地震台网、全球地震台网、以及日本 F-NET 台网构成的区域台网对朝鲜核爆提供了丰富的 Pn 波记录而且台站分布方位角比较完全 (见图 1 和图 3), 有利于用相对定位方法 (Murphy et al., 2013; Schaff and Richards, 2004;

Selby, 2010; Wen and Long, 2010; Zhang and Wen, 2013; Zhao et al., 2014, 2016) 对历次朝鲜核爆进行高精度相对定位. 我们从 260 个区域地震台站截取了各次核爆的 Pn 波记录. 选取其中信噪比高, 波形一致性好的数据利用互相关方法计算得到了 987 个相对走时, 并以此作为相对定位的数据. 将 USGS 给出的 2006 年朝鲜核爆的震中和起爆时刻设为参考震中和起爆时间, 将朝鲜核试验场附近的 Pn 波速度设定为 $7.99 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (如, Zhao et al., 2016), 然后将其余核爆的震中经纬度和起爆时刻作为未知数, 建立了一个反演问题来逼近 Pn 相对走时数据. 由于震源深度和起爆时刻之间存在一定的折衷因此没有将深度列为独立未知数. 利用模拟退火方法 (Kirkpatrick et al., 1983) 求解反问题, 寻找使观测 Pn 波相对走时与理论 Pn 波相对走时之差的 L2 范数达到极小的解即为其余各次核爆相对于参考事件的震中经纬度和起爆时刻. 对所有六次朝鲜核爆的震中反演结果列在表 1 中, 同时显示在图 8 中. 从定位结果来看, 第一次核试验是在试验场东南部进行

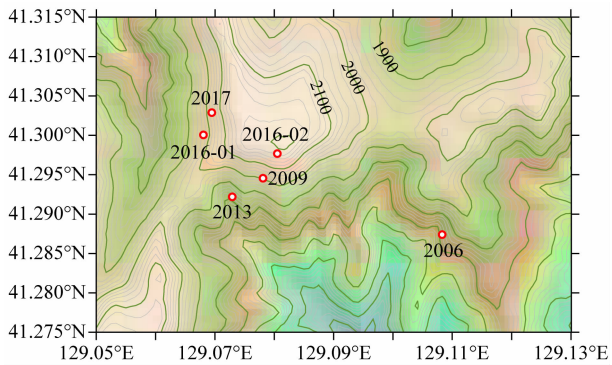


图 8 朝鲜核试验场附近的地形图以及
相对定位得到的 6 次试验的震中分布

Fig. 8 Epicenter relocation of 6 North Korea
nuclear explosions

的. 后几次试验逐渐西移, 至距离 2 km 左右的一座山下进行. 注意, 由于是相对定位, 它们的绝对位置依赖于预先给定的第一次核爆的位置.

6 讨论

朝鲜核试验场是一个未经标定的试验场. 迄今还没有已知当量的爆炸可供建立该试验场的震级-当量经验公式. 因此是在考虑试验场地质条件的情况下借用其他地区的经验公式估算当量. 这在很大程度上是受历史原因制约. 现有的震级-当量经验公式都是根据过去主要核大国进行的核试验得出的. 从那时到现在, 很多条件都发生了变化. 试验场地从详细研究过的少数试验场变成未知试验场; 数据类型从模拟地震仪记录的远震体波和面波变为宽频带数字地震仪记录的区域地震信号; 等等. 由于禁止核试验条约的签订, 获得大规模新数据标定试验场已经不可能. 目前采用的方法是将现在的数据“校正”回与获得原来震级-当量公式相近的条件, 然后借助过去的公式进行估算. 这一过程往往复杂而且含有大量不确定因素. 例如, 将一个试验场的经验公式转用于未标定过的试验场是否合适; 以往的经验公式是由较大当量的事件标定的, 将它们推广到小当量事件有什么问题; 用区域震级 $m_b(Lg)$ 来代替远震体波震级 $m_b(P)$ 是否存在系统误差; 震源埋藏深度和局部地质结构如何影响对当量的估算, 等等. 其中有些可能会引入较大误差. 例如, 埋藏深度极大地影响爆炸地震波的产生效率, 反过来也影响由观测资料对当量的估计. 震级-当量公式(9)并不显含深度变量, 这是因为公式中隐含了核试验在标准深度 (scaled depth) $h=122Y^{1/3}$ 进行. 这一深度-当量关系

主要是从美国内华达试验场的结果得到的. 为使震级-当量公式适用于不同地区和不同埋深的爆炸, Denny 和 Johnson(1991)研究了不同参数的量规关系 (scaling law) 得到了埋藏深度与爆炸球腔尺度之间的经验公式. Rougier 等(2011)的研究认为非线性数值模拟结果和近场观测数据支持 Denny 和 Johnson(1991)得到的深度与球腔尺度的关系. Patton 和 Taylor(2011)进一步由此得到对偏离标准埋藏深度爆炸的修正项为 $-0.7875\log(h/120Y^{1/3})$, 其中 h 为埋藏深度, 单位是 m. Patton 和 Taylor(2011), Zhang 和 Wen(2013)利用这一公式讨论了对朝鲜核爆当量的修正. 非线性数值模拟结果表明, 在花岗岩中标准埋藏深度的爆炸应产生明显的地表破坏, 而朝鲜核爆后并未观察到这一现象. 因此普遍认为 (例如 Rougier et al., 2011) 朝鲜核爆的埋藏深度有可能远大于标准深度. 图 9 绘出了对 6 次朝鲜核爆震级、深度和当量三者之间的折衷关系曲线 (depth of burial trade-off curve), 其中实心五星是根据公式(9)按标准深度估计的朝鲜核爆地震当量. 红色线段表示按 Patton 和 Taylor(2011)的深度修正产生的当量变化. 由于缺少对朝鲜核试验的深度数据, 我们将震中处的高程减去工程巷道入口处的高程作为对实际深度的粗略估计, 经修正后得到的地震当量列在表 1 中并用空心五星表示在图 9 中. 如果这一深度假设接近实际情况则朝鲜核爆的埋藏深度可能更加接近 $h=250Y^{1/3}$ 的量规关系. 目前, 如何对未经标定的核试验场进行当量测定仍是一个未完全解决的问题并有待新方法的提出.

7 结论

本文综合报道了利用区域地震台网记录到的宽频带数字地震记录研究朝鲜地下核试验的结果, 包括爆炸事件和天然地震的识别, 对核爆炸震级和地震当量的测定, 以及对爆炸中心的精确定位. 结果表明, 朝鲜地下核试验产生的地震波在区域台网的记录具有典型的浅源爆炸震源的特征. 纵波类型的 Pn, Pg 波比较强, 初动尖锐; 横波类型的 Sn 和 Lg 波较弱; 由于震源较浅, 短周期面波发育; Pn 波在所有方向都比较清晰. 由朝鲜核试验场朝向中国大陆方向, 爆炸地震波主要通过大陆地壳, Lg 波可以被追踪超过 1000 km. 在朝向日本海的方向, 由于海洋地壳的阻断作用, 位于日本的地震台站记录不到 Lg 波. 瑞利波可以在所有方向上观测到, 但通过大陆路

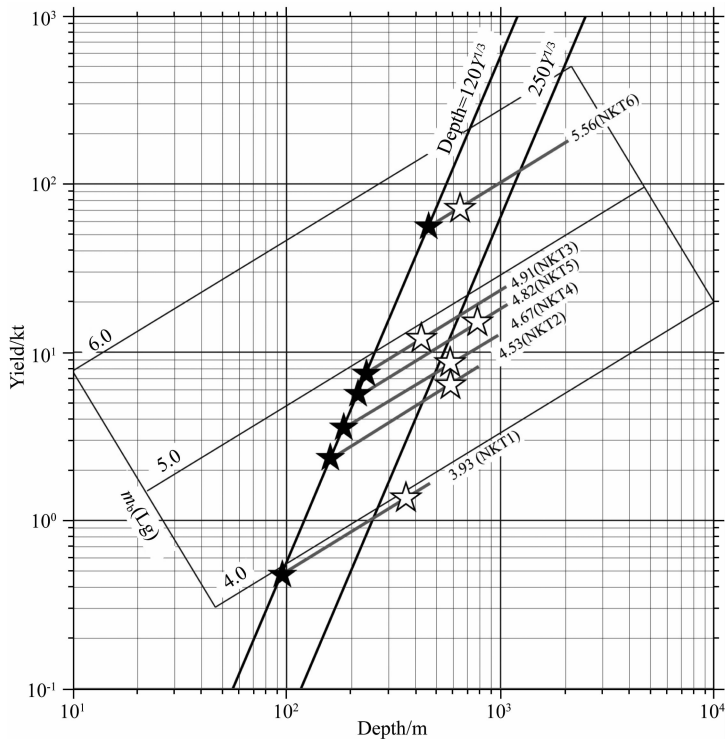


图 9 震级,深度和当量三者之间的折衷关系曲线

纵坐标和横坐标分别为当量和埋藏深度. 倾斜坐标是震级. 实心五星是根据标准深度估计的当量, 空心五星是考虑到深度修正的当量, 详见正文.

Fig. 9 Depth of burial trade-off curve for North Korea nuclear tests

The vertical and horizontal coordinates are yield and depth of burial. The oblique coordinate is the magnitude. Solid stars are yields estimated from equation (9) which assuming scaled depth, and the hollow stars are yields with depth adjustment. Details refer to text.

径的瑞利波频散小, 持续时间短, 呈脉冲形态; 通过海洋路径的瑞利波呈现为高度频散的波列.

利用上述地震资料研究了朝鲜 6 次地下核爆炸的参数. 利用 Pg/Lg, Pn/Lg 和 Pn/Sn 等 P/S 谱振幅比研究了 6 个朝鲜核爆炸和 4 个发生在区域台网内的天然地震. 结果表明, 2 Hz 以上台网平均 P/S 谱振幅比可以正确地将所有爆炸事件从天然地震中识别出来. 利用目前在中朝边界地区的区域地震台网所获得的数据和这里发展的分析方法可以有效监测在朝鲜半岛进行的当量大于 0.5 kt 的地下核试验. 建立了在中国东北和朝鲜半岛地区的 Lg 波震级系统以及 $m_b(Lg)$ 与 $m_b(P)$ 之间的联系, 测定了 6 次朝鲜核爆炸的震级. 鉴于朝鲜核试验场的地质特点, 我们利用 Bowers 等 (2001) 的震级-当量经验公式, 并假定这些地下核爆炸具有标准埋藏深度, 估计了它们的当量. 利用相对定位方法并以朝鲜第一次核试验的位置和起爆时间作为参考, 确定了 6 次核试验的起爆时间和相对位置. 不过, 上述定位方法是基于一维地球模型得到的. 有迹象表明 (Gibbons et

al., 2017) 朝鲜核试验场下部的横向不均匀性可能会影响相对定位的精度. 因此, 进一步的工作应考虑更复杂的局部结构模型. 2017 年 9 月 3 日的第 6 次核试验是在本文成文时进行的. 对于这次试验的结果是初步的.

致谢 谨此祝贺姚振兴先生从事地球物理教学科研工作 60 周年. 地震波形资料从中国地震台网中心 (CENC), 中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心 (郑秀芬等, 2009), 美国地震联合会数据管理中心 (IRIS DMC) 收集. 图件绘制采用 GMT 软件 (www.soest.hawaii.edu/gmt) (Wessel and Smith, 1998).

References

- Bonner J, Herrmann R B, Harkrider D, et al. 2008. The surface wave magnitude for the 9 October 2006 North Korean nuclear explosion. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98(5): 2498-2506, doi: 10.1785/0120080929.
- Bonner J L, Russell D R, Harkrider D G, et al. 2006. Development

- of a time-domain, variable-period surface-wave magnitude measurement procedure for application at regional and teleseismic distances, part II: Application and M_S - m_b performance. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96(2): 678-696, doi: 10.1785/0120050056.
- 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. *Geophys. J. Int.*, 146(2): 425-438.
- Chen S S, Liu J Q, Chen S S, et al. 2015. Variations in the geochemical structure of the mantle wedge beneath the northeast Asian marginal region from pre- to post-opening of the Japan Sea. *Lithos*, 224: 324-341, doi: 10.1016/j.lithos.2015.03.008.
- 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. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(3): 1315-1329, doi: 10.1785/0120100202.
- Denny M D, Johnson L R. 1991. The explosion seismic source function: Models and scaling laws reviewed. // Taylor S R eds. *Explosion Source Phenomenology*. Geophys. Monogr. Ser., Vol. 65, 1-24. AGU, Washington, D. C.
- Fan N, Zhao L F, Xie X B, et al. 2013. Measurement of Rayleigh-wave magnitudes for North Korean nuclear tests. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(3): 906-915, doi: 10.6038/cjg20130319.
- Fisk M D, Jepsen D, Murphy J R. 2002. Experimental seismic event-screening criteria at the prototype International Data Center. *Pure Appl. Geophys.*, 159(4): 865-888, doi: 10.1007/s00024-002-8662-6.
- Fisk M D. 2006. Source spectral modeling of regional P/S discriminants at nuclear test sites in China and the former Soviet Union. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96(6): 2348-2367, doi: 10.1785/0120060023.
- Ford S R, Walter W R. 2015. International monitoring system correlation detection at the North Korean Nuclear Test Site at Punggye-ri with insights from the source physics experiment. *Seismol. Res. Lett.*, 86(4): 1160-1170, doi: 10.1785/0220150029.
- 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. *Geophys. J. Int.*, 208(1): 101-117, doi: 10.1093/gji/ggw379.
- Gupta I N, Chan W W, Wagner R A. 1992. A comparison of regional phases from underground nuclear explosions at East Kazakh and Nevada test sites. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82(1): 352-382.
- Gupta I N, Chan W W, Wagner R A. 2005. Regional source discrimination of small events based on the use of Lg wavetrain. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(1): 341-346.
- 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. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 87(3): 551-568.
- He Y F, Xie X B, Lay T. 2008. Explosion-source energy partitioning and Lg-wave excitation; Contributions of free-surface scattering. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98(2): 778-792.
- Hearn T M, Wang S Y, Ni J F, et al. 2004. Uppermost mantle velocities beneath China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, 109: B11301, doi: 10.1029/2003JB002874.
- Institute of Geology, State Academy of Sciences, Democratic People's Republic of Korea. 1996. *Geology of Korea*. Jun P R, Gap K H, Pu J G eds. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House. 382.
- Kim C H, Park C H, Jeong E Y, et al. 2009. Flexural isostasy and loading sequence of the Dokdo seamounts on the Ulleung basin in the East Sea (Sea of Japan). *J. Asian Earth Sci.*, 35(5): 459-468, doi: 10.1016/j.jseaes.2009.02.009.
- 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. *Geophys. Res. Lett.*, 20(14): 1507-1510, doi: 10.1029/93gl01267.
- Kirkpatrick S, Gelatt C D Jr, Vecchi M P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598): 671-680, doi: 10.1126/science.220.4598.671.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. 2013. Update on CRUST1.0-A1-degree global model of Earth's crust. // EGU General Assembly 2013. Vienna, Austria, 2013.
- Li X Q, Yuan X H. 2003. Receiver functions in northeast China-implications for slab penetration into the lower mantle in northwest Pacific subduction zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 216(4): 679-691.
- Liang C T, Song X D, Huang J L. 2004. Tomographic inversion of P_n travel times in China. *J. Geophys. Res.*, 109: B11304, doi: 10.1029/2003JB002789.
- Lin X, Yao Z X. 2016. Yield and burial depth of the North Korean underground nuclear tests constrained by amplitude envelopes of regional seismic waveforms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 59(6): 2066-2079, doi: 10.6038/cjg20160613.
- Marshall P D, Basham P W. 1973. Rayleigh wave magnitude scale M_s . *Pure Appl. Geophys.*, 103(1): 406-414, doi: 10.1007/Bf00876419.
- Marshall P D, Springer D L, Rodean H C. 1979. Magnitude corrections for attenuation in the upper mantle. *Geophys. J. Int.*, 57(3): 609-637, doi: 10.1111/j.1365-246X.1979.tb06781.x.
- Murphy J R. 1996. Types of seismic events and their source descriptions. // Husebye E S, Dainty A M. *Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty*. Dordrecht; Springer, 225-245.
- Murphy J R, Barker B W, Marshall M E. 1997. Event screening at the IDC using the M_s / m_b discriminant. Maxwell Technologies Final Report, 23.
- Murphy J R, Stevens J L, Kohl B C, et al. 2013. Advanced seismic analyses of the source characteristics of the 2006 and 2009 North Korean nuclear tests. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103(3): 1640-1661, doi: 10.1785/0120120194.
- Nuttli O W. 1973. Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North America. *J. Geophys. Res.*, 78(5): 876-

- 885, doi: 10.1029/Jb078i005p00876.
- Nuttli O W. 1986. Yield estimates of Nevada test site explosions obtained from seismic *Lg* waves. *J. Geophys. Res.*, 91(B2): 2137-2151, doi: 10.1029/Jb091ib02p02137.
- Pan C Z, Jin P, Xu X, et al. 2014. Relative locations among the 2006, 2009 and 2013 North Korean underground nuclear tests. *Acta Seismologica Sinica*, 36(5): 910-918, doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.014.
- Patton H J, Randall G E. 2002. On the causes of biased estimates of seismic moment for earthquakes in central Asia. *J. Geophys. Res.*, 107(B11): ESE 8-1-ESE 8-16, doi: 10.1029/2001jb000351.
- Patton H J, Schlittenhardt J. 2005. A transportable m_b (*Lg*) scale for central Europe and implications for low-magnitude M_s - m_b discrimination. *Geophys. J. Int.*, 163(1): 126-140, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02663.x.
- Patton H J, Taylor S R. 2011. The apparent explosion moment: Inferences of volumetric moment due to source medium damage by underground nuclear explosions. *J. Geophys. Res.*, 116: B03310, doi: 10.1029/2010jb007937.
- Patton H J. 2016. A physical basis for M_s -yield scaling in hard rock and implications for late-time damage of the source medium. *Geophys. J. Int.*, 206(1): 191-204, doi: 10.1093/gji/ggw140.
- Pei S P, Zhao J M, Sun Y S, et al. 2007. Upper mantle seismic velocities and anisotropy in China determined through Pn and Sn tomography. *J. Geophys. Res.*, 112(B5): B05312, doi: 10.1029/2006JB004409.
- Rapine R R, Ni J F. 2003. Propagation characteristics of Sn and *Lg* in northeastern China and Mongolia. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93(2): 939-945, doi: 10.1785/0120010157.
- Richards P G, Kim W Y. 2007. Seismic signature. *Nat. Phys.*, 3(1): 4-6, doi: 10.1038/Nphys495.
- Ringdal F, Marshall P D, Alewine R W. 1992. Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site. *Geophys. J. Int.*, 109(1): 65-77, doi: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00079.x.
- Rougier E, Patton H J, Knight E E, et al. 2011. Constraints on burial depth and yield of the 25 May 2009 North Korean test from hydrodynamic simulations in a granite medium. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L16316, doi: 10.1029/2011gl048269.
- Russell D R. 2006. Development of a time-domain, variable-period surface-wave magnitude measurement procedure for application at regional and teleseismic distances, part I: Theory. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96(2): 665-677, doi: 10.1785/0120050055.
- Schaff D P, Richards P G. 2004. Repeating seismic events in China. *Science*, 303(5661): 1176-1178, doi: 10.1126/science.1093422.
- 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. *Pure Appl. Geophys.*, 167(4-5): 601-618, doi: 10.1007/s00024-009-0036-x.
- Selby N D. 2010. Relative locations of the October 2006 and May 2009 DPRK announced nuclear tests using international monitoring system seismometer arrays. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(4): 1779-1784, doi: 10.1785/0120100006.
- Selby N D, Marshall P D, Bowers D. 2012. m_b : M_s event screening revisited. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102(1): 88-97, doi: 10.1785/0120100349.
- Shin J S, Sheen D H, Kim G. 2010. Regional observations of the second North Korean nuclear test on 2009 May 25. *Geophys. J. Int.*, 180(1): 243-250, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04422.x.
- Springer D L, Pawloski G A, Ricca J L, et al. 2002. Seismic source summary for all U. S. below-surface nuclear explosions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92(5): 1806-1840.
- Stevens J L, Day S M. 1985. The physical basis of m_b : M_s and variable frequency magnitude methods for earthquake/explosion discrimination. *J. Geophys. Res.*, 90(B4): 3009-3020, doi: 10.1029/Jb090ib04p03009.
- Stevens J L, McLaughlin K L. 2001. Optimization of surface wave identification and measurement. *Pure Appl. Geophys.*, 158(8): 1547-1582, doi: 10.1007/Pl00001234.
- Stevens J L, Murphy J R. 2001. Yield estimation from surface-wave amplitudes. *Pure Appl. Geophys.*, 158(11): 2227-2251, doi: 10.1007/Pl00001147.
- Sultanov D D, Murphy J R, Rubinstein K D. 1999. A seismic source summary for Soviet peaceful nuclear explosions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89(3): 640-647.
- Taylor S R, Denny M D, Vergino E S, et al. 1989. Regional discrimination between NTS explosions and western United States earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 79(4): 1142-1176.
- Tian Y, Liu Y L, Liu C, et al. 2015. Comparative study on seismological characteristics of 2009 and 2013 nuclear explosions in North Korea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(3): 809-820, doi: 10.6038/cjg20150311.
- Wallace T C. 1991. Body wave observations of tectonic release. // Taylor S R, Patton H J, Richards P G. Explosion Source Phenomenology. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 161-170.
- Walter W R, Mayeda K M, Patton H J. 1995. Phase and spectral ratio discrimination between NTS earthquakes and explosions. Part 1: Empirical observations. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 85(4): 1050-1067.
- Walter W R, Matzel E, Pasyanos M E, et al. 2007. Empirical observations of earthquake-explosion discrimination using P/S ratios and implications for the sources of explosion S-waves. // 29th Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. SPE, 684-693.
- Wei M. 2017. Location and source characteristics of the 2016 January 6 North Korean nuclear test constrained by InSAR. *Geophys. J. Int.*, 209(2): 762-769, doi: 10.1093/gji/ggx053.
- Wen L X, Long H. 2010. High-precision location of North Korea's 2009 nuclear test. *Seismol. Res. Lett.*, 81(1): 26-29, doi: 10.1785/gssrl.81.1.26.
- Wessel P, Smith W H F. 1998. New, improved version of the

- generic mapping tools released. *Eos*, 79(47): 579.
- Xie J K. 2002. Source scaling of Pn and Lg spectra and their ratios from explosions in central Asia; Implications for the identification of small seismic events at regional distances. *J. Geophys. Res.*, 107: 2128, doi: 10.1029/2001JB000509.
- Xie J, Wu Z, Liu R, et al. 2006. Tomographic regionalization of crustal Lg Q in eastern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, 33(3): L03315, doi: 10.1029/2005GL024410.
- Xie X B, Lay T. 1994. The excitation of Lg waves by explosions; a finite-difference investigation. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84(2): 324-342.
- Xie X B, Ge Z X, Lay T. 2005. Investigating explosion source energy partitioning and Lg-wave excitation using a finite-difference plus slowness analysis method. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(6): 2412-2427, doi: 10.1785/0120050023.
- Xu Y, Li Z W, Liu J S, et al. 2008. Pn wave velocity and anisotropy in the Yellow Sea and adjacent region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(5): 1444-1450.
- Xu J Y, Ben-Avraham Z, Kelty T, et al. 2014. Origin of marginal basins of the NW Pacific and their plate tectonic reconstructions. *Earth Sci. Rev.*, 130: 154-196, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.10.002.
- Yang X. 2002. A numerical investigation of Lg geometrical spreading. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92(8): 3067-3079.
- Zhai M G. 2016. Comparative study of geology in North China and Korean peninsula; Research advances and key issues. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 32(10): 2915-2932.
- 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. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 45(6): 812-820.
- Zhang M, Wen L X. 2013. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test. *Geophys. Res. Lett.*, 40(12): 2941-2946, doi: 10.1002/grl.50607.
- Zhang T R, Lay T. 1995. Why the Lg phase does not traverse oceanic crust. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 85(6): 1665-1678.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2008. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98(6): 2571-2589, doi: 10.1785/0120080128.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2010. Seismic Lg-wave Q tomography in and around Northeast China. *J. Geophys. Res.*, 115: B08307, doi: 10.1029/2009JB007157.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2012. Yield estimation of the 25 May 2009 North Korean nuclear explosion. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102(2): 467-478, doi: 10.1785/0120110163.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2013. Crustal Lg attenuation within the North China Craton and its surrounding regions. *Geophys. J. Int.*, 195(1): 513-531, doi: 10.1093/gji/ggt235.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2014. The 12 February 2013 North Korean underground nuclear test. *Seismol. Res. Lett.*, 85(1): 130-134, doi: 10.1785/0220130103.
- Zhao L F, Xie X B, Tian B F, et al. 2015. Pn wave geometrical spreading and attenuation in Northeast China and the Korean Peninsula constrained by observations from North Korean nuclear explosions. *J. Geophys. Res.*, 120(11): 7558-7571, doi: 10.1002/2015JB012205.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2016. Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test. *Geophys. J. Int.*, 206(3): 1487-1491, doi: 10.1093/gji/ggw239.
- Zhao L F, Xie X B, He X, et al. 2017. Seismological discrimination and yield estimation of the 3 September 2017 Democratic People's Republic of Korea (DPRK) underground nuclear test. *Chin. Sci. Bull.* (in Chinese), 62(35): 4163-4168, doi: 10.1360/N972017-00979.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2017. The 9 September 2016 North Korean underground nuclear test. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 107(6): 3044-3051, doi: 10.1785/0120160355.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- Zhu J S. 2007. The structural characteristics of lithosphere in the continent of Eurasia and its marginal seas. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 14(3): 1-20.

附中文参考文献

- 范娜, 赵连锋, 谢小碧等. 2013. 朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级测量. *地球物理学报*, 56(3): 906-915, doi: 10.6038/cjg20130319.
- 林鑫, 姚振兴. 2016. 利用区域地震波振幅包络约束朝鲜地下核试验的埋深和当量. *地球物理学报*, 59(6): 2066-2079, doi: 10.6038/cjg20160613.
- 潘常周, 靳平, 徐雄等. 2014. 对朝鲜 2006 年、2009 年和 2013 年 3 次地下核试验的相对定位. *地震学报*, 36(5): 910-918, doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.014.
- 田有, 柳玉龙, 刘财等. 2015. 朝鲜 2009 年和 2013 年两次核爆的地震学特征对比研究. *地球物理学报*, 58(3): 809-820, doi: 10.6038/cjg20150311.
- 胥颐, 李志伟, 刘劲松等. 2008. 黄海及其邻近地区的 Pn 波速度与各向异性. *地球物理学报*, 51(5): 1444-1450.
- 翟明国. 2016. 朝鲜半岛与华北地质之对比研究: 进展与问题. *岩石学报*, 32(10): 2915-2932.
- 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. *地球物理学报*, 45(6): 812-820.
- 赵连锋, 谢小碧, 何熹等. 2017. 2017 年 9 月 3 日朝鲜地下核试验的地震学鉴别和当量估计. *科学通报*, 62(35): 4163-4168, doi: 10.1360/N972017-00979.
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁等. 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. *地球物理学报*, 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- 朱介寿. 2007. 欧亚大陆及边缘海岩石圈的结构特性. *地学前缘*, 14(3): 1-20.