

范娜, 赵连锋, 谢小碧等. 朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级测量. 地球物理学报, 2013, 56(3):906-915, doi:10.6038/cjg20130319.
Fan N, Zhao L F, Xie X B, et al. Measurement of Rayleigh-wave magnitudes for North Korean nuclear tests. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(3):906-915, doi:10.6038/cjg20130319.

朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级测量

范 娜¹, 赵连锋^{1*}, 谢小碧², 姚振兴¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球深部研究重点实验室, 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 利用 1995 年至 2009 年中国东北及邻近地区 11 个宽频带台站记录到的 77 个地震事件、3 个化学爆炸和 2 次朝鲜核爆的区域地震资料, 标定该区域台网的 Rayleigh 波震级. 通过对 8~25 s 周期的垂直分量 Rayleigh 波形进行分析, 获取基于最大振幅的面波震级. 计算 82 个区域事件不同周期的台基响应, 经过台基校正后取最大振幅的面波震级为事件震级. 2006 年和 2009 年两次朝鲜核爆的面波震级分别为 2.93 ± 0.19 和 3.62 ± 0.21 . 将地震和核爆事件的面波震级 M_s 与体波震级 $m_b(Lg)$ 进行比较, 发现根据该区域台网的数据利用 M_s-m_b 识别方法无法鉴别朝鲜地区的核爆与地震. 朝鲜核爆的面波震级相对较大, 使 M_s-m_b 识别方法失效, 其原因可能是源区介质的不均匀性、由核爆炸冲击引发的深部的拉伸破坏被抑制, 或者是近爆源区存在张性的构造预应力. 假定核爆可能的埋藏深度范围是 0.01~1.0 km, 用 Rayleigh 波震级估计朝鲜核爆的当量, 对 2006 年和 2009 年核爆当量的估值范围分别为 0.42~3.17 kt 和 2.06~15.53 kt.

关键词 Rayleigh 波, 震级, 台基校正, 核爆

doi:10.6038/cjg20130319

中图分类号 P315

收稿日期 2012-03-30, 2012-09-13 收修定稿

Measurement of Rayleigh-wave magnitudes for North Korean nuclear tests

FAN Na¹, ZHAO Lian-Feng^{1*}, XIE Xiao-Bi², YAO Zhen-Xing¹

1 *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, California, CA 95064, USA*

Abstract We collect regional seismic data recorded at broadband seismic stations from 77 earthquakes, 3 chemical explosions and 2 nuclear explosions between 1995 and 2009 in Northeast China and its vicinity. These data are used to calibrate the regional seismic network for measuring the Rayleigh-wave magnitude. Based on vertical-component Rayleigh wave records between 8 and 25 s, we obtain the maximum-amplitude surface-wave magnitudes. Using records from 82 events, we calculate the site corrections at different period for all stations. After removing the site response, we obtain the Rayleigh-wave magnitude for individual station-event pair. Finally the network average magnitude is obtained for each event. The Rayleigh-wave magnitudes are 2.93 ± 0.19 and 3.62 ± 0.21 for 2006 and 2009 North Korean nuclear explosions. The comparison between the Rayleigh-wave magnitude M_s and the body wave magnitude $m_b(Lg)$ suggests that M_s-m_b method is invalid in discriminating the nuclear explosions from earthquake populations in Northeast China/North Korea region and within the regional distances. The two North Korean nuclear explosions excited strong Rayleigh waves, leading to the poor performance of M_s-m_b .

基金项目 国家自然科学基金(41174048, 40974029)资助.

作者简介 范娜, 女, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事地震学研究. E-mail: fanna@mail.iggcas.ac.cn

* **通讯作者** 赵连锋, 男, 1972 年生, 副研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: zhaolf@mail.iggcas.ac.cn

discrimination. The possible reasons include near-source heterogeneities, asymmetric source or existing tensile tectonic release. Given the depth of burial between 0.01 and 1.0 km and using the obtained Rayleigh-wave magnitudes, the yields of the 2006 and 2009 North Korean nuclear tests are estimated to be 0.42~3.17 kt and 2.06~15.53 kt, respectively.

Keywords Rayleigh-wave, Magnitude, Site correction, Nuclear explosion

1 引言

Gutenberg(1945)给出面波震级测量的经典公式,它主要适用于震中距大于 20° 的远震震相^[1]. 随着震中距的减小, Rayleigh 波的高频成分更加丰富. 波形最大振幅出现在更短周期的波段内, 基于 20 s 周期的远震面波震级公式对区域性地震事件并不适用^[1-4]. 将面波震级测量公式扩展到较小的区域事件, 通常采用地动位移峰值振幅与周期比值的最大值代替最大振幅进行面波震级计算, 利用多个周期的 Rayleigh 波测定震级^[5-9].

地下核爆识别的调查研究促进了区域事件面波震级测定^[10]. M_s - m_b 核爆识别方法曾是远震距离核监测的有效手段之一^[11]. 但是, 该方法对中小震级地震和核爆识别的适用性一直存在争议. Patton(2001)研究了不同地区的中小型核爆和地震的资料. 结果表明, 当 M_s 约为 3.0 时核爆与地震群组会产生重叠^[12]. 对 M_s - m_b 识别方法在区域范围内的有效性研究依赖于对区域面波震级系统和精确的测定. 例如, Bonner 等(2003)^[4]将 Marshall & Basham(1972)^[8]的面波震级公式与 Rezapour & Pearce(1998)^[9]的公式进行了对比, 发现使用区域范围 7 s 周期的面波代替常规的 17~23 s 周期的面波测定 M_s , 能够获得更加一致的小事件面波震级^[4]. Patton & Phillips(2005)提出用地震 Lg 尾波度量震级^[13]. Taylor 等(2005)用 6~12 s 周期的 Rayleigh 波数据测量面波震级^[14]. Russell(2006)和 Bonner 等(2006)建立并验证了利用 8~25 s 周期的 Rayleigh 波计算面波震级. 采取最大振幅震级为事件震级的方法, 他们在美国内华达核试验场成功地检测出面波震级低于 3.0 的核爆事件并将其用于 M_s - m_b 识别方法^[15-16]. M_s - m_b 识别方法的有效性在世界范围内其它地区中小型核爆检测中得到验证^[17-18].

朝鲜在 2006 年 10 月 9 日和 2009 年 5 月 25 日分别进行了两次核试验, 它们触发了在全球范围内的地震记录. 由美国地质调查局(USGS)测定的两

次核爆的远震体波震级 m_b 分别为 4.3 和 4.7. Bonner 等(2008)测定第一次核爆的面波震级为 2.94 ± 0.17 ^[19]. Shin 等(2010)获得两次核爆的面波震级分别为 2.8 和 3.55^[20]. Chun 等(2011)得到的面波震级结果分别为 2.89 ± 0.11 和 3.52 ± 0.16 ^[21]. Murphy 等(2010)估计两次朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级分别为 2.93 ± 0.20 和 3.66 ± 0.10 ^[22]. 上述不同作者测定面波震级所用的方法类似, 但所得结果差异较大^[19-22]. 原因之一可能是使用地震数据时没有除去台基的影响. 我们利用一种基于区域地震台网的面波震级测定方法研究朝鲜核爆. 在 8~25 s 周期上分别计算台基响应, 选取台基校正后的最大振幅震级为事件震级, 有效地消除了台基和辐射花样的影响, 准确地测定了两次朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级.

2 区域地震资料

图 1 是测量朝鲜核爆的区域面波震级所用到的数字地震台站的位置图. 地震台网由 11 个宽频带数字地震台构成, 其中 CN2, SNY, BNX, DL2, HEH, TIA 和 XLT 隶属于中国国家数字地震台网(CNDSN), MDJ, INCN, BJT, 和 HIA 是全球地震台网(GSN)的台站. 这些地震台, 除了 INCN 台位于韩国外, 均分布于中国地区. 台站的相关参数列于表 1 中. 从这些台站到朝鲜核试验场的震中距在 372 至 1152 km 之间. 相应的地震记录中区域震相发育良好并相互分开, 避开了远距离上地幔的 Pn 与 Pg 波相互交叉的三重值现象. 全部的 CNDSN 和 GSN 台站都配置了宽频带地震仪, 仪器的速度响应在 0.03 和 8.0 Hz 之间接近平坦, 仪器的采样率列于表 1.

台网记录了 1995 年 10 月至 2009 年 9 月间包括 2 次朝鲜核爆在内的 79 个区域事件. 另外, 1998 年开展地震测深的 3 个小型化学爆炸事件被 4 个 GSN 台站所记录. 朝鲜核试验场(NKTS)的位置, 邻近 NKTS 的地震事件和化学爆炸的位置示于图 1 中. 事件参数列于表 2 中.

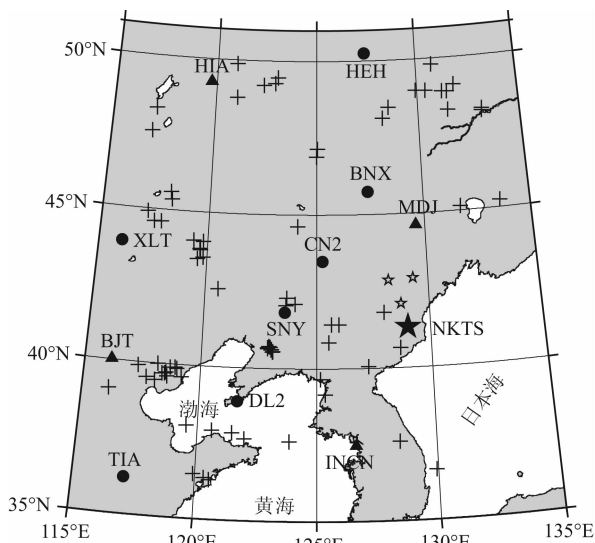


图1 中国东北及邻近地区的全球地震台网(GSN)台站(黑色三角形),中国国家地震台网(CNDSN)台站(黑色圆点),记录到的77次地震事件(黑色十字形)、3次化学爆炸事件(空心五角星)和2次朝鲜核爆(黑色实心五角星)
Fig. 1 Map showing the locations of events and stations in Northeast China and its neighboring areas including 77 earthquakes (crosses), 3 chemical explosions (open stars), 2 North Korean nuclear explosions (solid stars) and the CNDSN (solid circles) and GSN (triangles) stations

表1 台站参数

Table 1 The station parameters used in this study

| 台站 | 经度(°E) | 纬度(°N) | 高程(m) | 采样率(s ⁻¹) | 台网 |
|------|--------|--------|-------|-----------------------|--------------------|
| MDJ | 129.59 | 44.62 | 200 | 20/40/100 | GSN* |
| BJT | 116.17 | 40.02 | 137 | 20 | GSN |
| HIA | 119.74 | 49.27 | 610 | 20 | GSN |
| INCN | 126.63 | 37.48 | 419 | 40/20 | GSN |
| XLT | 116.07 | 43.89 | 1020 | 50 | CNDSN [§] |
| SNY | 123.58 | 41.83 | 54 | 50/100 | CNDSN |
| CN2 | 125.45 | 43.80 | 223 | 50/100 | CNDSN |
| BNX | 127.41 | 45.74 | 198 | 50/100 | CNDSN |
| HEH | 127.41 | 50.25 | 168 | 50/100 | CNDSN |
| DL2 | 121.63 | 38.91 | 62 | 50/100 | CNDSN |
| TIA | 117.12 | 36.21 | 300 | 50 | CNDSN |

注: * 全球地震台网(Global Seismic Network), [§] 中国国家数字地震台网(China National Digital Seismic Network).

3 Rayleigh 波震级测定方法

Russell(2006)提出一种时间域面波震级计算方法^[15].通过零相位 Butterworth 数字滤波后获得周期

范围 8~25 s 的 Rayleigh 波波形,读取峰值振幅计算面波震级.该方法扩展了地震事件测量的资料使用范围.即使对于较小的地震事件,也可以利用面波震级评估事件大小,不再局限于近场震级. Russell 给出的面波震级公式为

$$M_s = \log A + \frac{1}{2} \log(\sin \Delta) + 0.0031 \left(\frac{20}{T} \right)^{1.8} \Delta - 0.66 \log \left(\frac{20}{T} \right) - \log f_c - 0.43, \quad (1)$$

其中 A 是经过零相位 Butterworth 数字滤波的峰值振幅,单位为 nm; Δ 是震中距; T 为周期; $f_c = 0.6/T\sqrt{\Delta}$ 为滤波器拐角频率,相应的带通滤波的拐角频率为 $1/T - f_c$ 和 $1/T + f_c$; 当周期 $T = 20$ s 时为经典的面波计算公式.根据这一方法, Bonner 等(2008)用震中距从 3.32° 至 34.14° 的垂直分量 Rayleigh 波峰值振幅测定了朝鲜第一次核爆的面波震级为 2.94 ± 0.17 ^[19].

对于较小的地震事件,远距离观测资料信噪比较低,难以收集按方位角均匀分布的 Rayleigh 波波形资料,从而无法有效地消除源辐射花样和台基的影响.利用区域地震事件可以对地震台网进行面波震级测量的量归处理,获得台基校正值;对于台网内部的地震事件,其辐射花样的影响能够被有效压制.假定地震台网由 M 个台站构成,可利用 N 个量归事件.根据垂直分量波形资料,利用方程(1)计算每个事件周期范围为 8~25 s 的面波震级.对每个独立的周期 T 求取台基校正值

$$\Delta M_s(i, T) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[M_s(i, j, T) - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m M_s(i, j, T) \right], \quad (2)$$

其中 $m \leq M$ 为第 j 个事件的观测记录数; $n \leq N$ 为第 i 个台站所记录到的事件数.得到每个台站的台基校正值后,将每个台站-事件震级减去台基校正值之后在台网内进行平均,最终获得事件的 Rayleigh 波震级.

4 朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级测定

我们收集 82 个事件的区域地震资料,包括东西、南北和垂直分量.将两个水平分量进行旋转获得径向和切向分量地震图. Rayleigh 波主要存在于径向分量和垂直分量中, Love 波存在于切向分量中.经检测,在垂直分量记录中 Rayleigh 波的振幅最大、信噪比最高.因此,选定垂直分量波形记录为测

表 2 事件参数
Table 2 The event parameters used in this study

| 数据源 | 震源参数 | | | | | 测量的 Rayleigh 波震级, M_s | | |
|---------|------------|-------------|-------------------|-------------------|--------|-------------------------|------|-----|
| | 日期 | 时间(UTC) | 纬度($^{\circ}$ N) | 经度($^{\circ}$ E) | 深度(km) | M_s | 标准差 | 台站数 |
| ISC | 1995-10-05 | 22:26:55.39 | 39.73 | 118.53 | 8.6 | 3.98 | 0.01 | 3 |
| ISC | 1998-04-14 | 02:47:49.01 | 39.60 | 118.58 | 23.0 | 3.99 | 0.14 | 4 |
| ISC | 1998-07-24 | 23:12:16.10 | 48.89 | 131.48 | 14.3 | 3.56 | 0.38 | 4 |
| ISC | 1998-07-24 | 23:19:39.92 | 48.90 | 131.24 | 11.8 | 3.52 | 0.19 | 4 |
| GECCEA* | 1998-08-12 | 15:00:08.18 | 42.87 | 128.22 | 0.007 | 2.28 | 0.00 | 1 |
| GECCEA | 1998-08-18 | 14:00:06.69 | 42.91 | 129.32 | 0.011 | 2.29 | 0.56 | 4 |
| GECCEA | 1998-08-19 | 15:00:07.79 | 42.09 | 128.74 | 0.029 | 2.34 | 0.28 | 4 |
| ISC | 1998-09-26 | 14:16:43.93 | 42.30 | 123.67 | 10.0 | 2.50 | 0.07 | 3 |
| ISC | 1998-11-11 | 17:27:55.36 | 48.19 | 133.15 | 9.0 | 3.18 | 0.08 | 4 |
| ISC | 1999-04-01 | 01:59:47.39 | 39.65 | 125.16 | 10.4 | 2.32 | 0.05 | 4 |
| ISC | 1999-08-13 | 18:36:22.38 | 48.47 | 128.54 | 8.0 | 3.67 | 0.07 | 4 |
| ISC | 1999-08-14 | 00:04:37.69 | 48.11 | 128.24 | 44.5 | 2.67 | 0.13 | 4 |
| BJI† | 1999-09-03 | 11:23:32.70 | 48.96 | 130.41 | 29.0 | 2.86 | 0.32 | 3 |
| ISC | 1999-12-27 | 11:27:19.01 | 40.54 | 123.07 | 21.0 | 2.82 | 0.15 | 3 |
| ISC | 2000-01-11 | 23:43:56.00 | 40.55 | 123.10 | 5.0 | 4.35 | 0.16 | 3 |
| ISC | 2000-01-12 | 05:00:37.10 | 40.68 | 122.85 | 36.3 | 3.15 | 0.16 | 4 |
| ISC | 2000-05-14 | 15:48:50.23 | 48.98 | 129.92 | 5.5 | 3.19 | 0.18 | 4 |
| ISC | 2000-05-23 | 23:44:36.59 | 40.65 | 122.86 | 30.6 | 2.93 | 0.06 | 4 |
| BJI | 2000-11-08 | 13:06:37.10 | 45.59 | 118.14 | 31.0 | 2.67 | 0.31 | 10 |
| BJI | 2000-11-14 | 08:41:52.50 | 39.15 | 125.37 | 15.0 | 2.69 | 0.23 | 9 |
| BJI | 2000-12-13 | 09:59:26.40 | 40.85 | 125.53 | 27.0 | 2.65 | 0.31 | 8 |
| ISC | 2001-04-20 | 04:35:37.00 | 48.29 | 117.12 | 10.0 | 2.61 | 0.08 | 3 |
| SKHL‡ | 2001-09-03 | 03:09:34.00 | 48.26 | 133.15 | 13.0 | 2.53 | 0.04 | 2 |
| NEIC | 2001-09-19 | 08:07:26.07 | 38.04 | 119.53 | 33.0 | 3.68 | 0.23 | 9 |
| ISC | 2002-04-16 | 22:52:38.19 | 40.66 | 128.65 | 10.0 | 3.07 | 0.19 | 10 |
| ISC | 2002-04-30 | 03:22:43.56 | 40.69 | 122.96 | 15.0 | 2.85 | 0.33 | 9 |
| BJI | 2002-05-05 | 10:02:23.10 | 40.06 | 127.24 | 15.0 | 3.13 | 0.00 | 1 |
| BJI | 2002-06-13 | 07:36:03.70 | 49.26 | 122.94 | 20.0 | 2.59 | 0.34 | 11 |
| ISC | 2002-06-16 | 21:58:40.16 | 40.60 | 123.01 | 38.7 | 2.83 | 0.41 | 9 |
| ISC | 2002-08-29 | 18:32:12.66 | 49.45 | 123.07 | 16.6 | 3.01 | 0.23 | 8 |
| ISC | 2002-10-20 | 15:46:19.95 | 44.60 | 117.47 | 33.0 | 4.08 | 0.23 | 8 |
| ISC | 2002-10-20 | 15:52:10.54 | 44.91 | 117.14 | 10.0 | 3.39 | 0.07 | 8 |
| ISC | 2002-10-21 | 00:10:21.67 | 44.61 | 117.80 | 10.0 | 2.82 | 0.20 | 8 |
| BJI | 2003-03-30 | 11:00:44.40 | 42.05 | 123.63 | 28.0 | 2.66 | 0.29 | 10 |
| ISC | 2003-03-30 | 11:10:55.46 | 37.62 | 123.86 | 10.0 | 3.82 | 0.16 | 11 |
| NEIC | 2003-04-23 | 13:46:08.32 | 39.89 | 117.33 | 33.0 | 2.95 | 0.18 | 7 |
| NEIC | 2003-04-23 | 18:39:19.17 | 39.53 | 117.71 | 47.5 | 3.40 | 0.12 | 8 |
| BJI | 2003-05-03 | 12:35:24.70 | 42.10 | 124.04 | 21.0 | 2.27 | 0.11 | 5 |
| BJI | 2003-05-07 | 11:34:16.50 | 37.87 | 121.45 | 10.0 | 2.46 | 0.14 | 8 |
| ISC | 2003-05-22 | 08:48:46.88 | 39.45 | 118.06 | 10.0 | 2.70 | 0.21 | 6 |
| ISC | 2003-06-01 | 02:49:17.28 | 49.80 | 130.79 | 7.0 | 2.92 | 0.15 | 9 |

续表 2

| 数据源 | 震源参数 | | | | | 测量的 Rayleigh 波震级, M_s | | |
|--------|------------|-------------|--------|--------|--------|-------------------------|------|-----|
| | 日期 | 时间(UTC) | 纬度(°N) | 经度(°E) | 深度(km) | M_s | 标准差 | 台站数 |
| BJI | 2003-06-05 | 10:35:55.40 | 36.30 | 120.58 | 28.0 | 3.09 | 0.13 | 10 |
| ISC | 2003-06-05 | 23:18:42.55 | 36.48 | 119.94 | 33.0 | 2.74 | 0.28 | 9 |
| BJI | 2003-06-12 | 09:33:59.40 | 36.36 | 120.37 | 15.0 | 3.92 | 0.21 | 4 |
| SKHL | 2003-06-14 | 14:10:09.70 | 49.11 | 131.83 | 7.0 | 2.66 | 0.26 | 8 |
| ISC | 2003-06-18 | 14:24:31.50 | 47.53 | 116.99 | 16.2 | 3.36 | 0.25 | 10 |
| ISC | 2003-06-21 | 12:13:09.36 | 39.69 | 118.37 | 16.0 | 2.78 | 0.25 | 10 |
| ISC | 2003-08-16 | 10:58:40.76 | 43.81 | 119.66 | 8.8 | 5.00 | 0.20 | 10 |
| BJI | 2003-08-16 | 11:59:51.30 | 43.77 | 119.67 | 16.0 | 2.99 | 0.23 | 11 |
| BJI | 2003-08-17 | 05:24:23.70 | 44.04 | 119.80 | 20.0 | 2.45 | 0.39 | 11 |
| BJI | 2003-08-17 | 16:33:22.50 | 37.93 | 120.61 | 17.0 | 2.60 | 0.13 | 9 |
| BJI | 2003-09-09 | 05:09:29.60 | 44.06 | 119.35 | 19.0 | 2.53 | 0.12 | 10 |
| ISC | 2003-10-07 | 15:27:27.80 | 45.24 | 133.60 | 49.4 | 3.55 | 0.13 | 10 |
| ISC | 2003-10-09 | 15:53:29.88 | 41.44 | 125.98 | 8.0 | 2.40 | 0.20 | 10 |
| BJI | 2003-10-10 | 13:34:27.80 | 41.43 | 125.65 | 15.0 | 2.75 | 0.28 | 9 |
| ISC | 2003-10-17 | 01:38:30.75 | 43.53 | 119.82 | 10.0 | 3.10 | 0.16 | 11 |
| ISC | 2003-11-14 | 21:43:18.57 | 39.89 | 118.70 | 10.0 | 3.08 | 0.23 | 11 |
| ISC | 2004-01-20 | 08:34:12.05 | 39.86 | 118.98 | 23.4 | 3.81 | 0.43 | 10 |
| ISC | 2004-03-24 | 01:53:47.50 | 45.35 | 118.21 | 18.0 | 5.28 | 0.17 | 9 |
| NEIC | 2004-05-29 | 10:14:28.44 | 36.63 | 129.93 | 29.2 | 4.72 | 0.18 | 11 |
| NEIC | 2004-09-16 | 17:14:37.47 | 45.14 | 131.73 | 10.0 | 2.83 | 0.17 | 10 |
| NEIC | 2004-12-16 | 18:59:14.60 | 41.80 | 127.98 | 10.0 | 3.08 | 0.36 | 10 |
| NEIC | 2005-05-09 | 11:02:24.21 | 37.69 | 121.97 | 10.0 | 2.98 | 0.14 | 7 |
| NEIC | 2005-07-06 | 23:10:16.68 | 48.30 | 131.47 | 10.0 | 3.25 | 0.29 | 9 |
| NEIC | 2005-07-25 | 15:43:36.30 | 46.89 | 125.00 | 10.0 | 4.43 | 0.16 | 9 |
| CENC § | 2005-07-25 | 15:57:14.80 | 47.14 | 125.03 | 25.0 | 2.83 | 0.31 | 7 |
| NEIC | 2005-09-19 | 03:27:53.20 | 49.88 | 121.00 | 10.0 | 3.85 | 0.13 | 6 |
| NEIC | 2006-03-31 | 12:23:17.86 | 44.62 | 124.12 | 10.0 | 4.24 | 0.34 | 9 |
| BJI | 2006-05-03 | 00:26:37.50 | 48.78 | 121.05 | 35.4 | 3.04 | 0.29 | 7 |
| NEIC | 2006-05-03 | 13:53:40.61 | 39.99 | 118.15 | 10.0 | 3.05 | 0.06 | 5 |
| BJI | 2006-05-03 | 14:02:25.93 | 39.69 | 118.47 | 10.0 | 3.16 | 0.14 | 8 |
| NEIC | 2006-07-04 | 03:56:26.94 | 39.07 | 116.15 | 10.0 | 4.39 | 0.12 | 7 |
| NEIC< | 2006-10-09 | 01:35:28.00 | 41.29 | 129.11 | 0.0 | 2.93 | 0.19 | 8 |
| NEIC | 2006-11-03 | 06:21:39.28 | 43.47 | 119.56 | 10.0 | 3.56 | 0.18 | 8 |
| NEIC | 2007-01-20 | 11:56:53.66 | 37.59 | 128.48 | 10.0 | 3.83 | 0.20 | 3 |
| CENC | 2007-11-17 | 10:08:13.30 | 39.60 | 119.20 | 10.0 | 2.66 | 0.20 | 6 |
| NEIC | 2008-03-10 | 20:24:14.60 | 39.90 | 118.90 | 10.0 | 3.17 | 0.20 | 7 |
| NEIC | 2008-06-10 | 06:04:57.20 | 49.20 | 122.36 | 10.0 | 4.11 | 0.20 | 10 |
| NEIC | 2008-11-13 | 22:53:26.10 | 40.72 | 122.92 | 13.0 | 3.34 | 0.19 | 11 |
| NEIC | 2009-01-01 | 05:46:26.09 | 40.62 | 123.02 | 10.0 | 3.07 | 0.29 | 9 |
| CENC | 2009-01-22 | 20:27:04.70 | 42.54 | 120.57 | 2.0 | 3.46 | 0.36 | 6 |
| NEIC< | 2009-05-25 | 00:54:43.00 | 41.29 | 129.08 | 0.0 | 3.62 | 0.21 | 9 |

注: * 中国地震局地球物理勘探中心(The Geophysical Exploration Center of China Earthquake Administration), † 北京区域台网(Beijing regional network), ‡ 萨哈林岛区域台网(Sakhalin regional network), § 中国地震台网中心(China Earthquake Network Center), < 事件位置参数来自 Wen 和 Long(2010)^[23].

定面波震级的分量资料^[24-25].

首先选取宽频带垂直分量区域地震图,并移除仪器响应^[26-27],在 5.5~1.8 km/s 的群速度窗口内截取 Rayleigh 波波形,对时间积分生成地动位移记录.利用 Butterworth 滤波器生成 8~25 s 独立周期面波波形,测量最大峰值振幅,计算面波震级.图 2

为两次核爆事件在 MDJ 台的 8~25 s 的面波波形.由图可见,第二次核爆震级较大,具有更高的信噪比.图中给出归一化的波形图,最大峰值振幅,单位是 nm,和基于最大峰值振幅测得的面波震级.基于独立周期计算台基响应,选取台基校正后的最大震级为台站-事件震级.图3给出了典型周期(8 s、14 s、

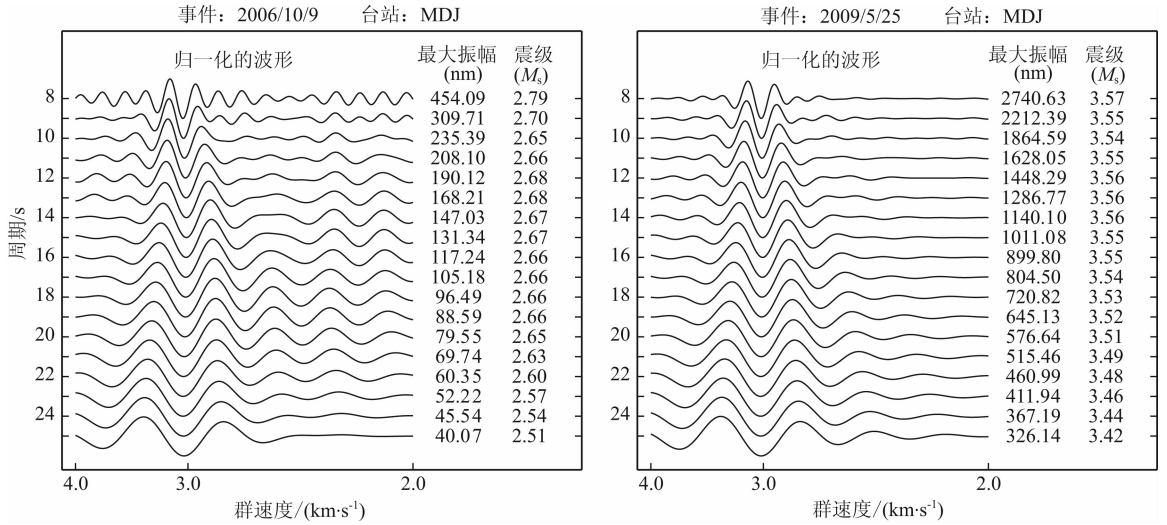


图 2 牡丹江台(MDJ)记录到的朝鲜核爆垂直分量 Rayleigh 波波形.其中周期范围是 8~25 s,不同周期的波形经过了归一化处理,最大振幅和面波震级列于右侧.

Fig. 2 Normalized vertical Rayleigh waveforms for two North Korean nuclear explosions recorded at MDJ station. The period range for the filtered waveforms is between 8 and 25 s. Listed in the right columns are maximum amplitudes and the calculated Rayleigh-wave magnitudes.

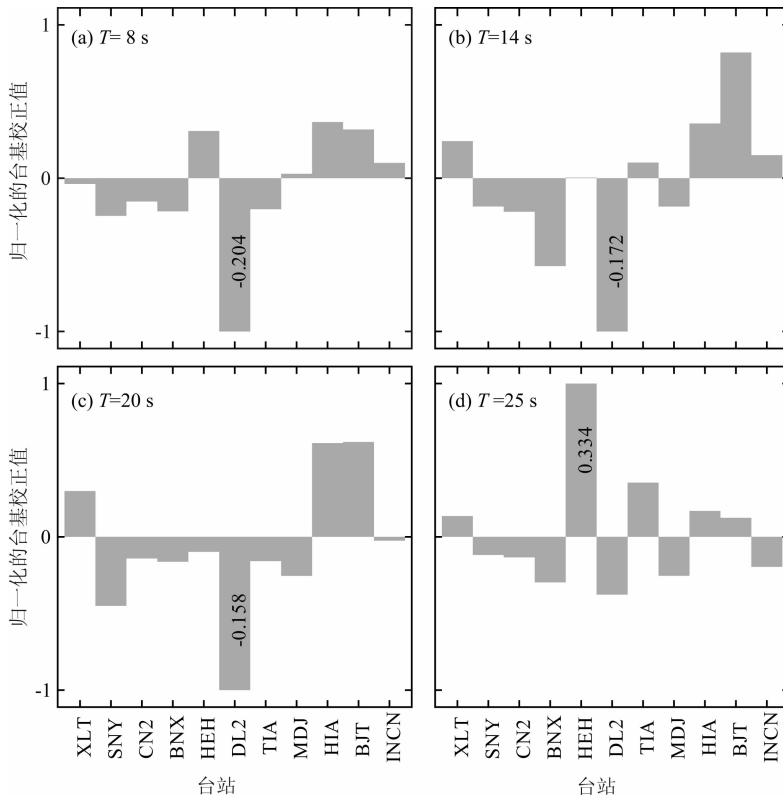


图 3 若干典型周期(8 s、14 s、20 s 和 25 s)下 Rayleigh 波震级测量的台基校正正值

Fig. 3 The site corrections for measuring Rayleigh-wave magnitude at typical periods, 8 s, 14 s, 20 s, and 25 s, respectively

20 s 和 25 s) 下的台基校正, 其中柱状图表示归一化的台基校正, 最大值标于图中. 获得台站-事件面波震级之后进行台网平均, 确定事件的 Rayleigh 波震级. 82 个事件的 Rayleigh 波震级测定结果列于表 2 中. 2006 年 10 月 9 日和 2009 年 5 月 25 日朝鲜核爆的面波震级分别为 2.93 ± 0.19 和 3.62 ± 0.21 . 表 3 列出了两次核爆的面波震级计算结果. 其中第一次核爆的结果与 Bonner 等 (2008) 的测定结果 2.94 ± 0.17 [19] 很一致.

5 核爆识别与当量估计

Zhao 等 (2012) 根据中国东北及邻近地区地震台网计算了全部 82 个事件的体波震级 m_b (Lg) [28], 其中两次朝鲜核爆的 m_b (Lg) 分别为 3.94 和 4.53. 通过与 Rayleigh 波震级进行比较, 可以检测 M_s - m_b 识别方法在区域范围内对朝鲜核试验场的适用性. 图 4 是 82 个区域事件 M_s - m_b 的对比图. 图中实线是 Murphy 等 (1997) 给出的地震核爆识别曲线

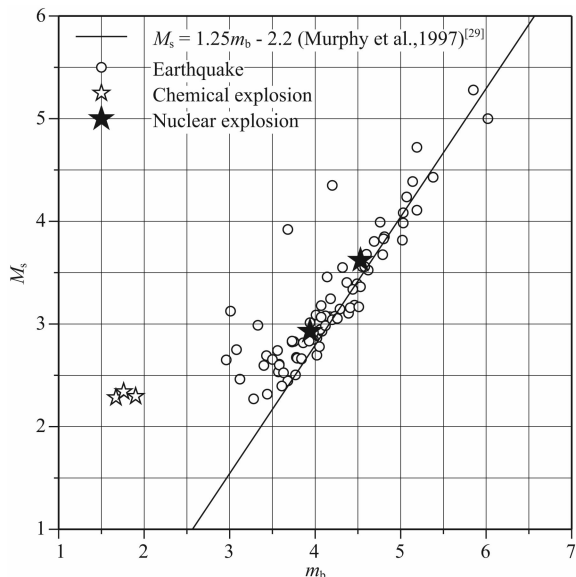


图 4 中国东北及邻近地区地震 (空心圆点), 化爆 (空心五角星) 及核爆 (实心五角星) 事件的 M_s - m_b 识别结果, 其中 M_s 值由本文计算得到, m_b 值来自 Zhao 等 (2012) [28], 识别曲线来自 Murphy 等 (1997) [29].

Fig. 4 M_s - m_b discrimination between earthquakes (open circles), chemical explosions (open stars) and nuclear explosions (solid stars) in Northeast China and its surrounding areas. The Rayleigh-wave magnitudes M_s are calculated in this study and body wave magnitudes m_b are from Zhao et al. (2012) [28]. The solid line is the screening line for M_s - m_b discrimination [29].

$M_s = 1.25m_b - 2.20$ [29].

3 个化学爆炸事件的 M_s - m_b 比值比较大, 可能是因为其埋藏深度远远小于经当量量规后的标准埋藏深度, 致使面波异常发育, 并导致 M_s 较大. 两次朝鲜核爆事件并没有展现出体波震级远大于面波震级的爆炸源属性, 结果与 Bonner 等 (2008) [19] 对第一次核爆识别结果一致. Murphy 等 (1997) [29] 的 M_s - m_b 识别曲线没有将地震事件 (空心圆点) 归总到曲线的一边, 两次核爆 (实心五角星) 也完全陷入地震事件群组中. 综上, 在区域地震范围内 M_s - m_b 事件识别方法对朝鲜核试验场并不适用.

利用面波震级与爆炸当量之间的关系可以估计核爆的当量 [30-31]. 对朝鲜核试验场目前尚无经过标定的面波震级与爆炸当量的经验公式, 在进行当量估计时需采用其它地区的经验公式. 利用 Bache (1982) 和 Stevens & Murphy (2001) 在其它核爆地区统计的 $M_s/\log Y$ 经验公式 [30-31], 获得 2006 年核爆的当量估计分别为 4.47 和 6.03 kt, 2009 年核爆的当量分别为 21.88 和 29.51 kt. 显然, 基于面波震级的朝鲜核爆当量估计远大于用其它方法得到的结果 [21-22, 28, 32]. Bonner 等 (2008) [19] 用 Denny & Johnson (1991) [33] 的模型进行了数值模拟实验, 证明低当量的核爆在高速围岩介质的环境下可能产生相对较大的面波震级, 并认为朝鲜核爆面波震级较大可能与特殊的核试验环境有关. 因此, 采用与埋藏环境有关的方法估计朝鲜核爆的当量更为合理.

Denny & Johnson (1991) 给出一种利用核爆当量和埋深计算爆炸地震矩的模型 [33]:

$$M_0 = \frac{1}{311} M_t P_0^{0.3490} 10^{-0.0269GP}, \quad (3)$$

式中, GP 是气体孔隙度, P_0 是压强, 与源区介质的密度 ρ (kg/m^3)、重力加速度 g (m/s^2) 和埋深 h (m) 有关, M_t 是理论地震矩,

$$M_t = \frac{4}{3} \pi \rho \alpha^2 R_c^3, \quad (4)$$

式中, α 是 P 波速度 (m/s), R_c 是核爆空腔半径 (m),

$$R_c = \frac{1.47 \times 10^4 Y^{1/3}}{\beta^{0.3848} P_0^{0.2625} 10^{0.0025GP}}, \quad (5)$$

其中 Y 表示爆炸当量 (kt), β 是 S 波速度 (m/s). 核爆地震矩是 P 波和 S 波的波速、当量和埋深的函数. 同时, 核爆地震矩与面波震级的关系式为 [19, 34]

$$M_s = \log M_0 - 11.8. \quad (6)$$

我们采用朝鲜地区的速度模型 [35]: P 波速度为 5.495 km/s, S 波波速为 3.269 km/s, 密度为

2.680 g/cm³. 气体孔隙度对计算影响很小,我们采用 Koper 等(2008)的值 0.5%^[36]. 利用式(3)–(6)可以对两次核爆进行当量估计,结果如图 5 所示. 假设核爆埋深在 0.01~10 km 之间,2006 年核爆的当量为 0.42~3.17 kt,2009 年核爆的当量为 2.06~15.53 kt.

6 结论与讨论

根据本文结果,我们可以得到下述主要结论:

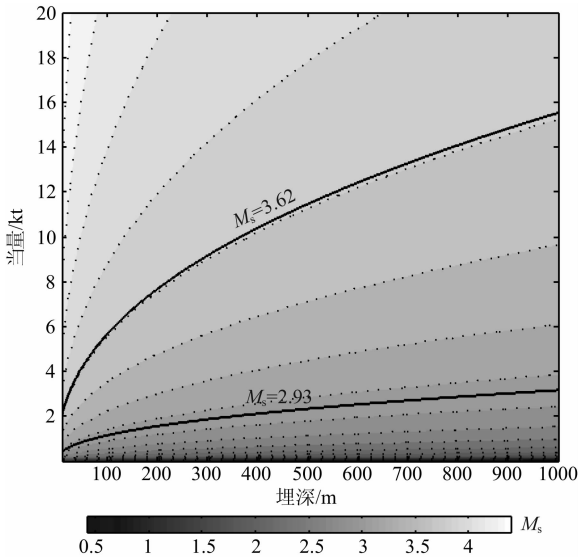


图 5 对朝鲜 2006 年和 2009 年核爆当量的估计

Fig. 5 Yield estimations for 2006 and 2009 North Korean nuclear explosions

表 3 朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级测量结果

Table 3 Rayleigh-wave magnitudes (M_s) of the two North Korean nuclear tests

| 台站 | 2006-10-9 | | 2009-05-25 | |
|------|-----------|--------|------------|--------|
| | M_s | 周期 (s) | M_s | 周期 (s) |
| SNY | 3.07 | 9 | 3.80 | 3.80 |
| CN2 | 3.08 | 18 | 3.77 | 8 |
| BNX | 2.58 | 15 | 3.11 | 25 |
| HEH | — | — | 3.65 | 18 |
| DL2 | 2.86 | 25 | 3.80 | 9 |
| MDJ | 2.78 | 8 | 3.60 | 13 |
| HIA | 2.91 | 20 | 3.71 | 11 |
| BJT | 3.02 | 15 | 3.59 | 14 |
| INCN | 3.14 | 8 | 3.56 | 16 |
| 平均值 | 2.93 | | 3.62 | |
| 标准差 | 0.19 | | 0.21 | |

(1)利用一种基于区域地震台网的面波震级测量方法测得朝鲜 2006 年和 2009 年核爆的 Rayleigh 波震级分别为 2.93 ± 0.19 和 3.62 ± 0.21 ; (2)通过对该区域地震台网获得的 82 个事件的面波震级与体波震级的比较,发现 M_s - m_b 核爆识别方法无法在区域范围内鉴别在朝鲜核试验场进行的核爆; (3)采用与核爆埋藏环境有关的方法通过 Rayleigh 波震级估计两次核爆的当量分别为 0.42~3.17 kt 和 2.06~15.53 kt.

基于最小埋藏深度假定,Zhao 等(2008, 2012)利用中国东北及邻近地区的地震 Lg 波资料得到两次核爆的当量估计分别为 0.48 kt 和 2.35 kt^[28,32], Chun 等(2011)用中朝边界附近流动台网所记录的区域 Lg 波资料获得的结果为 1.22 kt 和 6.51 kt^[21], Murphy 等(2010)利用远震 P 波资料得到 2006 年核爆埋深 200 m 当量 0.9 kt,2009 年核爆埋深 500 m 当量 4.6 kt^[22]. 不同核爆当量估计中存在的差异与震级测量结果和对核爆埋藏深度的估计有关.

与其它地区,例如美国 Nevada 试验场和前苏联的 Shagan River 试验场,具有相近 m_b 的核爆相比,朝鲜核爆的面波振幅和面波震级均偏大,从而导致 M_s - m_b 方法无法正确识别两次朝鲜核爆. 特别是,利用面波震级获得的核爆当量比利用体波得出的结果大. Ford 等(2009)对 2009 年朝鲜核爆 10~50 s 波形进行了全矩张量反演,获得该事件的震源主要由爆炸源构成但伴随着一个非各向同性的成分^[37]. 这一非各向同性成分使得径向和垂向分量上的 Rayleigh 波异常发育,并且在切向上激发了 Love 波. 他们认为 2006 年朝鲜核爆的震级太小导致 Love 波被淹没在噪声之中.

Patton & Taylor(2008)认为由核爆炸冲击波引发的深部的拉伸破坏被抑制的情况下观测到的面波能量增大^[38]. Schlittenhardt 等(2010)利用核爆前后卫星影像对比说明 2006 年核爆地点附近不存在显著的地表形变,也即不存在由核爆引起的地表拉伸破坏(散裂作用)^[39],支持了 Patton & Taylor 的分析结果. Murphy 等(2011)经模拟计算得到爆炸时伴随张性预应力释放将使面波震级 M_s 增大,而压缩预应力的释放使得 M_s 减小^[40]. Jin & Park(2006)根据 GPS 形变资料调查朝鲜地区的构造环境,得出该地区主要存在张性的构造应力^[41]. 核试验的冲击波引发此地区张性构造应力释放,从而导致测定的 M_s 值偏大. 解析朝鲜核爆面波振幅偏大的原因仍然需要进一步的工作.

致谢 中国东北及邻近地区的区域地震事件波形数据从中国地震台网中心(CENC)和美国地震学研究联合会(IRIS)收集. 刘瑞丰研究员提供了两次朝鲜核爆在中国国家地震台网的 BNX, SNY, DL2 和 CN2 地震台的波形数据. 研究中所用到的用于地震测深的、已知爆炸当量的人工事件参数由中国地震局地球物理勘探中心的张先康研究员提供. 作者之一谢小碧感谢 AFRL 基金 FA9453-11-C-0234 的部分支持.

参考文献(References)

- [1] Gutenberg B. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1945, 35(1): 3-12.
- [2] von Seggern D. Amplitude-distance relation for 20-second Rayleigh waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1977, 67(2): 405-411.
- [3] Yacoub N K. "Instantaneous amplitudes": a new method to measure seismic magnitude. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1983, 73(5): 1345-1355.
- [4] Bonner J L, Harkrider D G, Herrin E T, et al. Evaluation of short-period, near-regional M_s scales for the Nevada Test Site. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2003, 93(4): 1773-1791.
- [5] Vaněk J, Zatopek A, Karnik V, et al. Standardization of magnitude scales. *Bull. Acad. Sci. U. S. S. R., Geophys. Ser.*, 1962, 2: 108-111.
- [6] Basham P W. A new magnitude formula for short period continental Rayleigh waves. *Geophys. J. Int.*, 1971, 23(2): 255-260.
- [7] Evernden J F. Variation of Rayleigh-wave amplitude with distance. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1971, 61(2): 231-240.
- [8] Marshall P D, Basham P W. Discrimination between earthquakes and underground explosions employing an improved M_s scale. *Geophys. J. Int.*, 1972, 28(5): 431-458.
- [9] Rezapour M, Pearce R G. Bias in surface-wave magnitude M_s due to inadequate distance corrections. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1998, 88(1): 43-61.
- [10] 韩绍卿, 李夕海, 安跃文等. 核爆、化爆、地震识别研究综述. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1206-1218.
Han S Q, Li X H, An Y W, et al. A review on the identification of nuclear explosions, chemical explosions and natural earthquakes. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2010, 25(4): 1206-1218.
- [11] Patton H. M_s ; m_b relationships for small magnitude events; observations and physical basis for m_b based on regional phases. // Proceedings of the 22nd Seismic Research Review; Planning for verification of and compliance with the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (CTBT). 2000, 2: 293-300.
- [12] Patton H J. Regional magnitude scaling, transportability, and M_s ; m_b discrimination at small magnitudes. *Pure Appl. Geophys.*, 2001, 158(11): 1951-2015.
- [13] Patton H J, Phillips W S. Regional magnitude research supporting broad-area monitoring of small seismic events. // Proceedings of the 27th Seismic Research Review; Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. 2005: 606-611.
- [14] Taylor S R, Patton H J, Yang X N, et al. Regional event identification research in eastern Asia. // Proceedings of the 27th Seismic Research Review; Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. 2005: 673-682.
- [15] Russell D R. Development of a time-domain, variable-period surface wave magnitude measurement procedure for application at regional and teleseismic distances, part I: Theory. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2006, 96(2): 665-677.
- [16] Bonner J L, Russell D R, Harkrider D G, et al. 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. Seism. Soc. Am.*, 2006, 96(2): 678-696.
- [17] Patton H J, Schlittenhardt J. A transportable $m_b(L_g)$ scale for central Europe and implications for low-magnitude M_s - m_b discrimination. *Geophys. J. Int.*, 2005, 163(1): 126-140.
- [18] Zhou R M, Stump B W, Hayward C T. M_s ; m_b discrimination study of mining explosions in Wyoming, Usa, and in Qianan, China. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2006, 96(5): 1742-1752.
- [19] Bonner J, Herrmann R B, Harkrider D, et al. The surface wave magnitude for the 9 October 2006 North Korean nuclear explosion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2008, 98(5): 2498-2506.
- [20] Shin J S, Sheen D H, Kim G. Regional observations of the second North Korean nuclear test on 2009 May 25. *Geophys. J. Int.*, 2010, 180(1): 243-250.
- [21] Chun K Y, Wu Y, Henderson G A. Magnitude estimation and source discrimination: a close look at the 2006 and 2009 North Korean underground nuclear explosions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2011, 101(3): 1315-1329.
- [22] Murphy J R, Kohl B C, Stevens J L, et al. Exploitation of the IMS and other data for a comprehensive, advanced analysis of the North Korean nuclear tests. // Proceedings of the 2010 Monitoring Research Review; Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. 2010, 1: 456-465.
- [23] Wen L X, Long H. High-precision location of North Korea's 2009 nuclear test. *Seism. Res. Lett.*, 2010, 81(1): 26-29.
- [24] Lay T, Wallace T C. Modern Global Seismology. California: Academic Press, 1995.
- [25] 周仕勇, 许忠淮. 现代地震学教程. 北京: 北京大学出版社, 2010.
Zhou S Y, Xu Z H. Modern Seismology Tutorial (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2010.

- [26] 陈运泰, 吴忠良, 王培德等. 数字地震学. 北京: 地震出版社, 2000.
Chen Y T, Wu Z L, Wang P D, et al. Digital Seismology (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2000.
- [27] Havskov J, Ottemoller L. Routine Data Processing in Earthquake Seismology. New York: Springer, 2010.
- [28] Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. Yield estimation of the 25 May 2009 North Korean nuclear explosion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2012, 102(2): 467-478.
- [29] Murphy J R, Barker B W, Marshall M E. Event screening at the IDC using the M_s/m_b discriminant. Maxwell Technologies Final Report, 1997: 23.
- [30] Bache T. Estimating the yield of underground nuclear explosions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1982, 72: S131-S168.
- [31] Stevens J L, Murphy J R. Yield estimation from surface-wave amplitudes. *Pure Appl. Geophys.*, 2001, 158(11): 2227-2251.
- [32] Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2008, 98(6): 2571-2589.
- [33] Denny M D, Johnson L R. The explosion seismic source function: model and scaling laws revisited. // Taylor S R, Patton H J, Richards P G. Explosion Source Phenomenology. *American Geophysical Monograph*, 1991, 65: 1-24.
- [34] Herrmann R B. Computer Programs in Seismology, version 3. 30. St. Louis University, 2006.
- [35] Rougier E, Patton H J, Knight E E, et al. Constraints on burial depth and yield of the 25 May 2009 North Korean test from hydrodynamic simulations in a granite medium. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38(16): L16316.
- [36] Koper K D, Herrmann R B, Benz H M. Overview of open seismic data from the North Korean event of 9 October 2006. *Seism. Res. Lett.*, 2008, 79(2): 178-185.
- [37] Ford S R, Dreger D S, Walter W R. Source analysis of the Memorial Day explosion, Kimchaek, North Korea. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36(21): L21304, doi: 10.1029/2009GL040003.
- [38] Patton H J, Taylor S R. Effects of shock-induced tensile failure on m_b - M_s discrimination: Contrasts between historic nuclear explosions and the North Korean test of 9 October 2006. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35(14): L14301, doi 10.1029/2008GL034211.
- [39] Schlittenhardt J, Canty M, Grünberg I. 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.*, 2010, 167(4-5): 601-618.
- [40] Murphy J R, Stevens J L, Kohl B C, et al. Supplement analysis of the seismic characteristic of the 2006 and 2009 North Korean nuclear tests. // Proceedings of the 2011 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. 2011, 3: 513-523.
- [41] Jin S, Park P H. Strain accumulation in South Korea inferred from GPS measurements. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58: 529-534.

(本文编辑 何 燕)