

潘常周, 靳平, 徐雄, 王红春, 肖卫国, 沈旭峰, 张诚鎏, 徐恒垒. 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.

Pan C Z, Jin P, Xu X, Wang H C, Xiao W G, Shen X F, Zhang C L, Xu H L. 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.

对朝鲜 2006 年、2009 年和 2013 年 3 次地下核试验的相对定位^{*}

潘常周 靳平^{*} 徐雄 王红春
肖卫国 沈旭峰 张诚鎏 徐恒垒

(中国西安 710613 西北核技术研究所)

摘要 采用双差定位方法, 对朝鲜 2006 年、2009 年和 2013 年的 3 次核试验进行相对定位. 根据 19 个区域地震台和 8 个远震台的垂直分量波形资料, 计算了多种震相(P 波、S 波和 LR 波等)的互相关时差, 并由测量时差反演两两核爆的相对空间位置, 通过随机生成部分台站组合进行扰动实验以估算定位的不确定度. 结果表明, 相对于朝鲜 2009 年核试验, 2013 年核试验位于其南 257 m、西 385 m, 2006 年核试验位于其南 503 m、东 2589 m. 当扰动实验中随机选取的台站数目为 20 个时, 在 95% 置信度下, 朝鲜 2013 年和 2006 年核试验相对于 2009 年核试验的地表定位结果的不确定度约为 150 m.

关键词 核试验 朝鲜 相对定位 双差定位法

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.014 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Relative locations among the 2006, 2009 and 2013 North Korean underground nuclear tests

Pan Changzhou Jin Ping^{*} Xu Xiong Wang Hongchun
Xiao Weiguo Shen Xufeng Zhang Chengliu Xu Henglei

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

Abstract: The relative locations among the 9 October 2006, 25 May 2009, and 12 February 2013 North Korean underground nuclear tests are estimated by the double-difference location algorithm, using the relative times of P signals as well as those of S and LR signals. And location uncertainties are analyzed by bootstrap method. The relative times are measured with cross-correlation technique, using vertical waveform data recorded at 19 regional and 8 teleseismic stations. The results show that the 2013 test locates 257 m south and 385 m

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(41174033)资助.

收稿日期 2013-10-12 收到初稿, 2014-04-16 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: jinping668@sohu.com

west relative to the 2009 test with about 150 m uncertainty estimated with 20 stations resampling at 95% confidence level, and the 2006 test is about 503 m south and 2589 m east to the 2009 test with the same uncertainty.

Key words: nuclear tests; North Korea; relative location; double-difference earthquake location algorithm

引言

在核爆炸地震监测中, 精确的地震定位对于识别或澄清事件及可能开展的现场视察都具有非常重要的意义. 地震定位精度主要受到监测台站布局、理论走时的系统偏差和到时测量误差等因素的影响. 对于震源相近的地震事件, 采用相对定位方法, 包括震中联合定位(Douglas, 1967)、主事件定位(Evernden, 1969)、双差定位(Waldhauser, Ellswort, 2000)等, 可以消除理论走时系统偏差的影响, 提高定位精度. 因此, 相对定位方法已广泛用于同一场地的地下核试验定位(Blamey, Gibbs, 1968; Marshall *et al*, 1984, 1985; Lilwall, Marshall, 1986; Fisk, 2002). 其中, 相对时差通常采用波形互相关技术进行测量(Waldhauser, Ellswort, 2000; Schaff *et al*, 2004).

对于朝鲜分别于 2006 年 10 月 9 日和 2009 年 5 月 25 日进行的两次核试验, Wen 和 Long(2010)基于 9 个区域台站 Pn 波采用主事件定位法进行了相对定位, Selby (2010)基于 7 个远震台站 P 波采用震中联合定位法进行了相对定位. 两者在信号相对到时测量中都采用了波形互相关技术. 两者定位结果的最优解偏差约 540 m, 而且后者的最优解在前者的误差范围之外. 两者分析结果造成的差异可能是采用的定位方法不同, 或者是采用的台站组合不同所致. 朝鲜于 2013 年 2 月 12 日进行第 3 次核试验后, 我们搜集了朝鲜 2006 年、2009 年和 2013 年 3 次核试验的垂直分量波形数据, 计算多震相(P, Pn, Pg, Sn, Lg, LR)的互相关时差, 采用双差定位法对这 3 次核试验进行相对定位, 并通过随机选取部分台站组合进行定位的扰动实验, 分析其定位的不确定度.

1 数据

本文共用 27 个地震台站的波形数据对朝鲜 3 次核试验进行了相对定位. 其中, 远震台站 8 个, 分别为 CTBTO (Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization)和 IMS (International Monitor System)地震台网的 AKASG、ASAR、FINES、GERES、MKAR、NVAR、PDAR 和 WRA 台站; 区域震台站 19 个, 其中大部分为非 IMS 台站, 具体包括我国东北的 BNX、CN2、DL2、HLRA、MDJ、SNY 等 6 个台站, 日本的 IMG、IZH、KSK、MJAR、MMA、SAG、SBT、TMR、WJM、YTY 等 10 个台站, 韩国的 INCN 台和 KSAR 台, 俄罗斯的 USRK 台. 台站对事件形成了很好的包围效果(图 1), 最大间隙角约 42° , 最小和最大震中距分别约为 370 km 和 8975 km.

2 方法

双差定位法主要根据地震事件的震相走时差的观测值与理论值之残差确定其相对位置, 基本定位方程可表示为(Waldhauser, Ellswort, 2000)



图 1 朝鲜核试验场和分析台站的分布
星号表示核试验位置, 三角形表示地震
台站. 其中子图为区域台站分布

Fig. 1 Nuclear test site and seismic stations in North Korea. The asterisk stands for test site and triangles for stations. The subplot gives the distribution of regional stations

用以对每个方程加权的对角线矩阵. 反演中, 通常还需要加上一个表示所有地震事件经重新定位后其平均改变量为零(“矩心”不变)的约束条件, 即

$$\sum_{i=1}^N \Delta \mathbf{m}^i = 0, \quad (4)$$

由正则方程可以得到方程(3)的解为

$$\hat{\mathbf{m}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{d}. \quad (5)$$

根据上述方法, 定位误差主要受三方面因素影响: 一是事件之间震相到时差的测量误差; 二是震源区介质速度结构模型与地球介质理论模型的差异; 三是地震台站坐标的误差. 其中, 前者属于后验误差, 一般可以由震相到时差的残差估算; 后两者都属于先验误差, 根据震相到时差的残差难以准确估算. 到时差的测量误差通常可以看作随机误差. 对于不同台站, 坐标误差是随机的, 其在源区附近对应不同的传播路径, 不同传播路径介质结构与理论模型的差异, 一般也具有很强的随机性. 也就是说, 上述相对定位的误差, 对于不同台站而言总体上可以近似认为是一种随机扰动. 根据不同台站组合进行定位, 其结果相对于真实位置的偏差应具有随机分布的特点. 因此, 在监测台站数多, 而且相对事件形成较好包围效果的情况下, 通过随机选取其中不同台站组合进行定位的扰动实验, 可以统计分析定位结果的不确定度范围. 假设共有 n 个台站, 每次随机选取 m ($m < n$) 个台站, 共进行 p 次定位. 如果其中 q 次定位结果在某一空间区域 R 内, 则可以认为定位不确定度为 R 的置信度为 q/p .

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^j = dr_k^{ij}, \quad (1)$$

式中, $\Delta \mathbf{m}^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)^T$ 是第 i 次地震事件的震源参数 $(x^i, y^i, z^i, \tau^i)^T$ 的改变量, t_k^i 为第 i 次地震事件某震相到第 k 个台站的走时. dr_k^{ij} 是第 k 个台站记录到的 i, j 两个事件某一震相的走时差的观测值与理论计算值之残差, 即

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{\text{obv}} - (t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}. \quad (2)$$

将根据所有地震事件、所有台站、不同震相得到的形如式(1)的方程用矩阵形式表示, 可得

$$\mathbf{W} \mathbf{G} \mathbf{m} = \mathbf{W} \mathbf{d}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{G} 为一个 $M \times 4N$ 的偏微商矩阵, M 为双差观测的数目, N 为地震事件数; \mathbf{d} 为双差资料矢量; \mathbf{m} 是由 N 个事件的待定震源参数 $(x^i, y^i, z^i, \tau^i)^T$ 的改变量构成的 $4N$ 维矢量; \mathbf{W} 是

3 结果

图 2 为部分台站震相到时差测量情况. 图中给出了所用滤波频带和信号窗口, 以及按照测量结果对齐的波形比较. 可以看出, 朝鲜 2013 年核试验与 2009 年核试验的波形高度

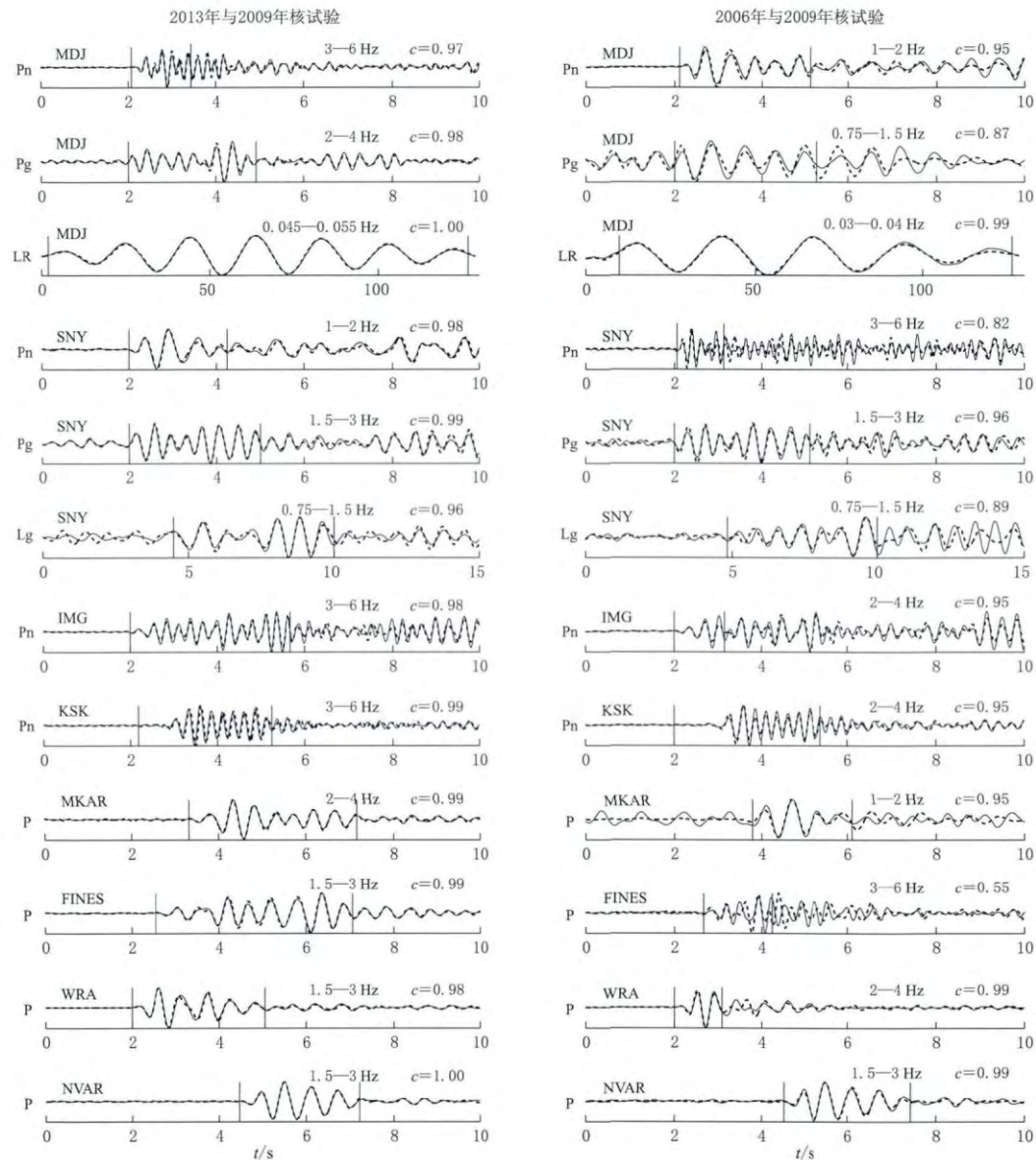


图 2 部分台站震相到时差测量. 各子图中两条竖线表示计算波形相关系数的信号窗口, 右侧数值给出滤波频带以及按照到时差测量结果对齐时波形的相关系数. 粗虚线表示 2009 年核试验波形

Fig. 2 Measurement of relative arrival times for some phases. In each subplot, signal window is set by two vertical lines, and waveforms with thick dashed line are the records of 2009 test and those with thin line are the records of 2013 test (left) and 2006 test (right). The correlative coefficient between each pair of waveforms aligned according to the relative arrival time and the filtering band are showed on the right side of each subplot

相似，所有震相的波形相关系数都在 0.95 以上；相比之下，其 2006 年核试验与 2009 年核试验的波形相似性稍差一些，特别是在个别台站(如 FINES 台)上相关系数较低. 所有台站不同震相到时差的测量结果见表 1.

表 1 不同震相到时差测量结果及其与理论值的残差
Table 1 Relative arrival times for different phases and their residuals

台站 名称	震中距 /°	方位角 /°	震相	2013 年与 2009 年		2006 年与 2009 年		2006 年与 2013 年	
				到时差 /ms	到时差 残差/ms	到时差 /ms	到时差 残差/ms	到时差 /ms	到时差 残差/ms
MDJ	3.34	6.6	Pn	39	52	−77	12	−120	3
			Pg	59	50	37	81	−110	24
			Lg	95	54	*	*	*	*
			LR	65	9	−70	−23	−170	−20
USRK	3.61	35.6	Pn	64	61	*	*	*	*
			Pg	39	7	*	*	*	*
			Lg	139	60	*	*	*	*
			LR	89	−12	*	*	*	*
CN2	3.65	314.5	Pn	−11	57	288	114	299	125
			Pg	−21	47	321	27	292	6
			Lg	79	162	595	50	466	−68
			LR	−11	79	678.1	13	749	98
KSAR	3.96	193.5	Pn	−61	31	−87	11	−41	12
			Sn	−86	44	−42	45	−2	2
SNY	4.13	279.2	LR	−236	−79	6	77	−120	−158
			Pn	−61	32	318	105	369	111
INCN	4.25	206.9	Pg	−61	42	388	40	428	23
			Lg	−71	69	558	−75	589	−137
			LR	−151	7	678	−90	1129	251
			Pn	*	*	−54	−31	*	*
BNX	4.60	345.5	LR	*	*	271	140	*	*
			Pn	11	42	128	101	136	124
SAG	6.03	145.3	Pn	−5	44	−362	−16	−364	−20
DL2	6.16	249.6	Pn	*	*	232	66	*	*
IZH	7.16	179.0	Pn	*	*	−217	−37	*	*
YTY	7.19	166.8	Pn	−40	30	−190	57	−251	−28
WJM	7.29	119.7	Pn	15	39	−407	14	−439	5
IMG	8.33	78.8	Pn	45	42	−377	37	−426	38
MMA	8.54	87.2	Pn	*	*	−352	77	*	*
MJAR	8.65	121.0	Pn	−3	23	−372	47	−378	62
SBT	8.67	109.2	Pn	35	50	−407	28	−454	12
TMR	9.27	87.1	Pn	41	42	−402	27	−462	12
KSK	9.36	105.2	Pn	63	76	−407	30	−475	−3
HLRA	10.50	325.0	Pn	−10	42	*	*	*	*
MKAR	33.55	295.5	P	−31	40	66	−20	78	−32
FINES	60.06	327.5	P	−8	44	−44	−42	−32	−35
WRA	61.44	174.3	P	−7	59	−146	14	−126	15
AKASG	64.57	316.3	P	−5	53	−36	−49	−46	−69
ASAR	65.14	175.1	P	−26	39	−147	9	−126	12
GERES	73.43	321.6	P	−1	54	−7	0	−21	−21
NVAR	79.42	47.3	P	27	57	−174	16	−220	−13
PDAR	80.74	39.4	P	−6	25	−156	18	−157	33

注：* 表示数据缺失，到时差表示扣除两个事件之间所有震相绝对到时差平均值之后的结果.

根据表 1 中所有到时差测量结果,采用上述方法对朝鲜的 3 次核试验进行了相对定位.定位程序中,体波理论走时根据 IASPEI91 地球介质速度结构模型计算,而 Lg 波和 LR 波的理论走时则是根据中国大陆震相走时表(国家地震局地球物理研究所,1980)的拟合曲线函数计算.考虑到 LR 波存在频散现象,而且其信号周期较长,波形相似性对事件偏移量不敏感等,均会影响到时差的测量精度,因此定位中 LR 波应取较小的权重.这里我们取其权重为其它震相的 1/4.朝鲜 3 次核试验的初始发震时间和震中位置均根据 USGS 地震目录输入,初始震源深度根据对 2009 年核试验的埋深估算结果,均设为 550 m (Murphy *et al*, 2010),初始震源参数及相对定位结果见表 2.图 3 根据定位结果给出了朝鲜 3 次核试验的震中相对位置以及震源深度和发震时间.相对朝鲜 2009 年核试验,2013 年核试验震中位于其南 257 m、西 385 m 处,震源较之深 55 m;2006 年核试验震中位于其

表 2 朝鲜 3 次核试验初始震源参数及相对定位结果

年-月-日	初 始 震 源 参 数				相 对 定 位 结 果			
	时:分:秒	纬度/°N	经度/°E	深度/m	时:分:秒	纬度/°N	经度/°E	深度/m
2013-02-12	02:57:51.300	41.308	129.076	550	02:57:51.285	41.302	129.055	603
2009-05-25	00:54:43.120	41.303	129.037	550	00:54:43.121	41.305	129.060	548
2006-10-09	01:35:28.020	41.294	129.094	550	01:35:27.974	41.300	129.091	553

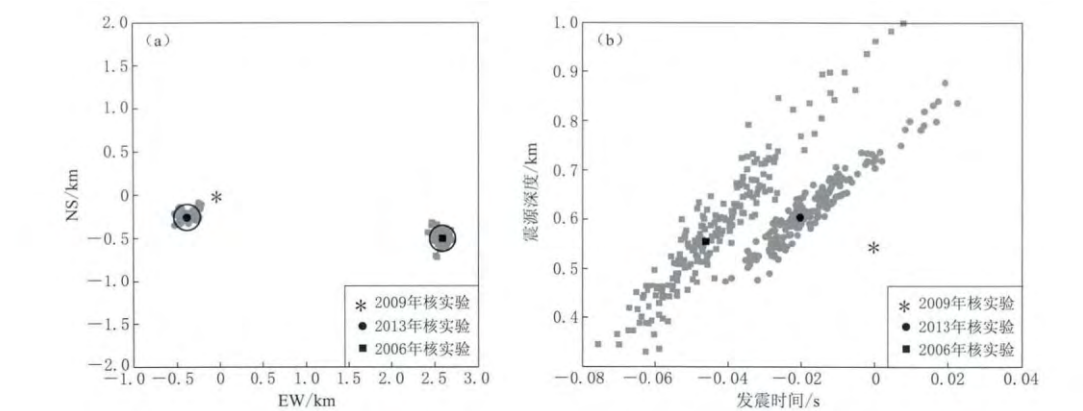


图 3 朝鲜 3 次核试验的相对定位结果

(a) 震中相对位置; (b) 震源深度和发震时间. 深色符号表示根据所有 27 个台站的定位结果, 浅色符号表示随机根据其中 20 个台站的定位结果, 圆圈表示统计的 95%置信度范围.

图(b)中横坐标发震时间为相对于初始参数的校正量

Fig. 3 Relative locations for the three nuclear tests in North Korea

(a) Relative epicenter; (b) Focal depth and origin time where the dark points are located using all of the 27 stations and the grey symbols are located using random 20 stations, with 95% confidence level in the dark circles. The horizontal axis in subplot (b) is the correction of occurrence time for the initial value

南 503 m、东 2589 m 处,震源较之深 5 m. 根据定位结果,图 4 给出了震相到时差观测值与理论值的比较,其残差见表 1.从图 4 和表 1 均可看出,总体上理论值与观测值吻合得很好,3 个事件对(2013 年与 2009 年、2006 年与 2009 年、2006 年与 2013 年核试验)残差的标准方差分别约为 34, 52 和 77 ms. 2013 年与 2009 年核试验的残差最小,主要是由于其波形相似性最高,造成测量误差小所致.

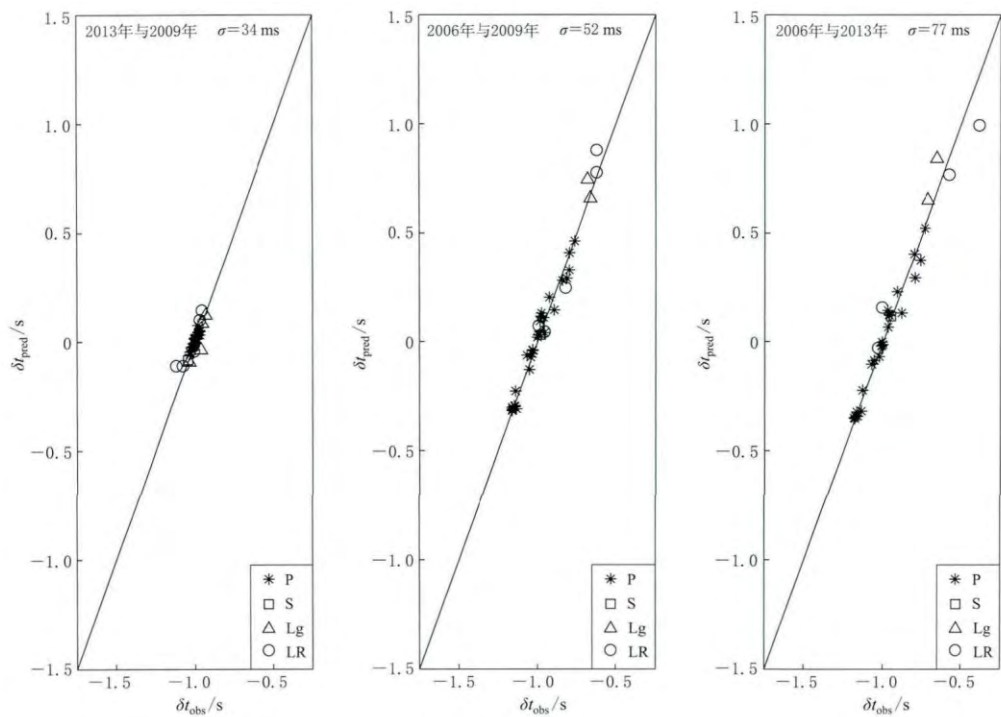


图 4 震相到时差实际观测值(δt_{obs})与理论值(δt_{pred})比较. σ 为残差的标准方差

Fig. 4 Comparison of observed relative arrival times with theoretical ones,
where σ is standard deviation of the residuals

图 3 中浅色点为扰动实验定位结果. 扰动实验中, 从上述 27 个台站随机选取其中 20 个台进行定位, 重复 200 次. 从图 3a 中可以看出, 对于震中位置, 扰动实验定位结果大致以所有台站定位结果为中心分布. 我们计算了扰动实验定位结果与所有台站定位结果的距离. 对于朝鲜 2013 年核试验, 其最大距离为 227 m, 191 次结果的距离小于 150 m; 对于朝鲜 2006 年核试验, 其最大距离为 226 m, 190 次定位结果的距离小于 150 m. 也就是说, 在 95%置信度下, 朝鲜 2013 年核试验和 2006 年核试验的定位结果的不确定度范围约为 150 m. 这样统计的不确定度范围主要取决于扰动实验中选取随机台站组合的台站数目. 如果选取 15 个或 10 个台站, 朝鲜 2013 年核试验的不确定度范围分别为 240 m 和 410 m; 2006 年核试验的不确定度范围分别为 300 m 和 490 m. 可见, 在台站数量较少的情况下, 如果对事件形成的包围效果不够好, 定位结果可能存在较大的误差. 从图 3b 中可以看出, 对于震源深度, 不确定度是比较大的, 而且震源深度与发震时间存在明显的均衡.

4 讨论与结论

本文利用 19 个区域震台站和 8 个远震台站, 采用双差定位法对朝鲜 2006 年、2009 年和 2013 年的 3 次核试验进行了相对定位. 结果表明, 相对于 2009 年核试验, 2013 年核试验位于其南 257 m、西 385 m, 2006 年核试验位于其南 503 m、东 2589 m. 通过随机生成的部分台站组合进行扰动实验定位, 统计分析其不确定度. 当随机生成的台站组合数目分别为 20, 15 和 10 个时, 在 95%置信度下, 2013 年核试验的定位不确定度范围分别是 150,

240 和 410 m; 2006 年核试验的定位不确定度范围分别是 150, 300 和 490 m. 这说明台网条件是影响定位结果的重要因素, 在台网对事件的包围效果不好的情况下, 其定位误差可能较大. 对于上述利用所有台站定位的结果, 其不确定度应该比扰动实验中只选取其中 20 个台站的不确定度范围要小.

对于朝鲜 3 次核试验的相对方位的分析结果, 本文与 Wen 和 Long (2010) 及 Selby (2010) 的研究结果完全一致. 但对于这 3 次核试验的相对距离的分析结果存在一定差异. 本文认为其主要原因是用于定位的台网不同. 对朝鲜 2006 年与 2009 年核试验的相对位置, Selby (2010) 仅利用 7 个远震台的定位结果为其南 (400 ± 600) m、东 (1800 ± 800) m; Wen 和 Long (2010) 利用 9 个区域台站的定位结果为其南 723 m、东 2235 m, 不确定度范围约 140 m. 本文的定位不确定度范围与 Selby (2010) 分析结果基本一致, 与 Wen 和 Long (2010) 分析结果偏差较大. 根据本文扰动实验分析, 10 个台站情况下的不确定度范围约为 490 m, 略小于 Selby (2010) 的结果, 而远大于 Wen 和 Long (2010) 的结果.

对于朝鲜 2013 年与 2009 年核试验的相对位置, 赵连锋等^①利用 53 个区域台站的定位结果为其南 (211 ± 45) m、西 (567 ± 66) m. 虽然其所用台站数量多, 但是对事件的包围效果并不好, 绝大多数(47 个)台站属于日本的 F-net 台网, 位于事件的正东和东南方向, 其它方向的台站非常少. 这种情况下, 如果每个台站的权重是相同的, 不同方位台站的权重将极不平衡, 容易导致定位结果偏差增大; 如果根据震相到时差的残差估算其不确定度范围, 结果很可能偏小.

在本文的相对定位中, 还对朝鲜 3 次核试验的相对震源深度进行了分析. 根据所有台站的定位结果, 这 3 次核试验的震源深度差别很小. 如果这 3 次核试验都是在具有相同洞口的廊道中进行的, 这一分析结果是比较合理的. 不过, 扰动实验定位结果表明, 相对震源深度的不确定度较大, 而且与发震时间存在明显的均衡. 根据 Murphy 等(2010)的分析结果, 2006 年和 2009 年核试验的埋深差别较大, 分别约为 200 m 和 550 m, 但爆炸埋深与爆心上方的山体高度密切相关. 另外, 本文在相对定位中除了采用常用的初至震相 P 波外, 还同时使用了 S、Lg、LR 等后续震相. 从分析结果(图 4)看, 这些后续震相也能够用来约束事件的相对位置, 其相对到时差均与定位结果吻合较好. 但是, 相对于初至震相 P 波, 后续震相的到时差的残差还是稍大一些. 主要原因是后续震相的相关性不如初至震相, 而且有的后续震相信号周期较长, 从而影响到时差测量精度. 因此, 在实际应用中, 应根据震相信号的相关性和优势频率赋予适当的定位约束权重.

本文所用地震波形数据主要从 CTBTO 的 IDC (International Data Center)、IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) 和日本的 NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) 提供的网络数据服务下载, BNX、CN2、DL2 和 SNY 台的波形数据由中国地震局地球物理研究所提供. 在此一并表示衷心的感谢.

参 考 文 献

国家地震局地球物理研究所. 1980. 震相走时便查表[M]. 北京: 地震出版社: 2-4.

^① 赵连锋, 谢小碧, 王卫民, 姚振兴. 2013. 2013 年 2 月 12 日朝鲜地下核试验的高精度定位. 中国科学院地质和地球物理研究所研究快报. [2013-06-12]. http://www.igg.cas.cn/xwzx/zhxw/201302/t20130228_3783953.html.

- Institute of Geophysics, State Seismological Bureau. 1980. *Look-up Table for Travel Time of Seismic Phase*[M]. Beijing: Seismological Press; 2–4 (in Chinese).
- Blamey C, Gibbs P G. 1968. The epicentres and origin times of some large explosions[J]. *Geophys J Int*, **16**(1): 1–7.
- Douglas A. 1967. Joint epicentre determination[J]. *Nature*, **215**(5096): 47–48.
- Evernden J F. 1969. Identification of earthquakes and explosions by use of teleseismic data[J]. *J Geophys Res*, **74**(15): 3828–3856.
- Fisk M D. 2002. Accurate locations of nuclear explosions at the Lop Nor test site using alignment of seismograms and IKONOS satellite imagery[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(8): 2911–2925.
- Lilwall R C, Marshall P D. 1986. *Body Wave Magnitudes and Locations of Soviet Underground Explosions at the Novaya Zemlya Test Site*[R]. AWRE Report O17/86, HMSO, London.
- Marshall P D, Bache T C, Lilwall R C. 1984. *Body Wave Magnitudes and Locations of Soviet Underground Explosions at the Semipalatinsk Test Site*[R]. AWRE Report O16/84, HMSO, London.
- Marshall P D, Lilwall R C, Warburton P J. 1985. *Body Wave Magnitudes and Locations of French Underground Explosions at the Mururoa Test Site*[R]. AWRE Report O12/85, HMSO, London.
- Murphy J R, Kohl B C, Stevens J L, Bennett T J, Israelsson H G. 2010. Exploitation of the IMS and other data for a comprehensive, advanced analysis of the North Korean nuclear tests[C]// *Proceedings of the 2010 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*. Orlando, Florida: National Nuclear Security Administration, LA-UR-10-05578, **1**: 456–465.
- Selby N D. 2010. Relative locations of the October 2006 and May 2009 DPRK announced nuclear tests using International Monitoring System Seismometer Arrays[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(4): 1779–1784.
- Schaff D P, Bokelmann G H R, Ellsworth W L, Zanker E, Waldhauser F, Beroza G C. 2004. Optimizing correlation techniques for improved earthquake location[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(2): 705–721.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward fault, California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6): 1353–1368.
- Wen L X, Long H. 2010. High-precision location of North Korea's 2009 nuclear test[J]. *Seism Res Lett*, **81**(1): 26–29.