

赵连锋,王卫民,李娟等. 利用相对静力学强度测定 1998 年 5 月 11 日印度核爆的当量. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1092 ~ 1097

Zhao L F, Wang W M, Li J, et al. Yield estimation of the 11 May 1998 Indian nuclear test using relative static source strength. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(5): 1092 ~ 1097

利用相对静力学强度测定 1998 年 5 月 11 日 印度核爆的当量

赵连锋, 王卫民, 李娟, 姚振兴

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 核爆当量是核试验的重要参数之一. 许多地震学家对 1998 年 5 月 11 日在印度 Pokhran 地区的核试验 (POK2) 进行研究, 给出了 (12 ~ 60) kt 的当量估计, 近 5 倍的估计偏差引起了较为广泛的关注. 基于全球数字地震台网宽频带体波资料, 我们通过波形反演计算等效震源模型参数, 包括静力学强度、特征频率 k 、以及震源深度 h 和 P 波在自由表面的反射系数 r_{pp} , 并利用相对的静力学强度估算了 POK2 事件的当量. 我们发现 Lay^[1] 在美国 Nevada 试验场 (NTS) 获得的相对静力学强度与当量的经验公式更适合印度核试验当量估计, 并据此计算了这次试验的当量约 36 kt. 这一结果支持 1998 年 5 月 11 日印度核试验的总当量低于 60 kt 的观点.

关键词 核爆当量, 相对静力学强度, 波形反演

文章编号 0001 - 5733(2005)05 - 1092 - 06 中图分类号 P315 收稿日期 2004 - 12 - 10, 2005 - 04 - 24 收修定稿

Yield estimation of the 11 May 1998 Indian nuclear test using relative static source strength

ZHAO Lian-Feng, WANG Wei-Min, LI Juan, YAO Zhen-Xing

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

Abstract The estimated total yield of the Indian nuclear tests at Pokhran on May 11, 1998 (POK2) ranges from 12 to 60 kt according to the reports. A factor of about five motivated this study. Based on the broadband seismic body wave data from the Global Seismic Network, we inverted the equivalent source model parameters and estimated the seismic yield for event POK2. We found that the empirical equation between the relative static strength and the yield in the Nevada test site (NTS) obtained by Lay^[1] is appropriate for estimating the Indian nuclear test. Our result of 36 kiloton (kt) for the event POK2 supports the point of view that the yield of POK2 is significantly less than 60 kt.

Key words Yield of nuclear explosion, Relative static strength, Waveform inversion

1 引 言

在 1998 年 5 月 11 日印度 Pokhran 地区核试验

(POK2) 之后, 许多地震学家对该事件的地震学当量进行了研究^[2-10], 给出了 POK2 的核爆当量范围在 12 ~ 60 kt 之间. 明显的当量估算偏差引发了此次核试验实际当量大小的争论^[10,11]. 核爆当量通常是利

基金项目 本研究由国家自然科学基金(40374016)和(40404004)、及博士后基金资助.

作者简介 赵连锋,男,1972年生,博士,主要从事地震学研究. E-mail: zhaolf@mail.igcas.ac.cn

用全球范围内不同地区的经验公式扩展到被研究区域的事件进行估算,势必受到区域地质条件及传播路径的限制. 一般情况下,核爆当量是通过体波震级或面波震级与当量的经验关系获得. 关于 POK2 事件的当量计算的争论主要体现在:(1)如何准确地确定震级;(2)选用经验公式的合理性. 以体波震级 m_b 为例,不同的研究者给出的震级在 5.0~5.5 之间. Douglas et al.^[9]认为 Pokhran 试验场地到印度北部的观测台站之间存在着路径吸收效应,取 $m_b = 5.2$ 更为合理;Evernden^[12]考虑了较低高程的台站资料,获得了与文献[9]一致的结果. 然而,Sikka et al.^[5]指出,POK2 事件是由两个同时引爆的子事件组成,需要考虑相互干涉效应,对这一事件的体波震级进行校正是有必要的. Roy et al.^[6]通过区域 Lg 波所获得的体波震级为 5.47.

除了震级估计的不确定性,利用不同的经验公式同样会导致很大的估计当量差异. 体波震级 m_b 与核爆当量 Y 的关系式为

$$m_b = a + b \lg Y, \quad (1)$$

其中 a 和 b 为常数. 系数 a 与源区介质的性质及地震波衰减有关, b 值通常取 0.8 左右,变化范围小. Shagan River 试验场地 (SRTS) 的 $m_b - Y$ 关系式中 a 和 b 分别取 4.45 和 0.75^[13];对于 Nevada 试验场地 (NTS), a 和 b 分别为 3.92 和 0.81^[14];对于全球范围内不同试验场地的统计结果 (DTS), a 和 b 分别取 4.08 和 0.77^[15].

除了震级与当量的关系式,地下核试验的当量还可以通过等效震源模型参数进行估计. 针对 Amchika 岛的三次核试验事件,Lay et al.^[16]认为相对静力学强度与当量的关系,即 $\lg \sigma_c$ 与 $\lg Y$ 之间的线性关系,较体波震级 m_b 与 $\lg Y$ 的关系要好,表明可以根据核爆等效震源的相对静力学强度给出当量的合理估计. 本文通过远震 P 波波形反演求解等效震源模型参数,利用相对静力学强度给出 POK2 事件的当量估计.

2 选择合理的经验公式

1974 年 5 月 18 日印度曾在 Pokhran 地区进行一次核试验 (POK1),印度 Bhabha 原子能研究中心 (BARC) 报道了 POK1 事件当量为 12 kt,与 Chidambaram et al.^[17]和 Marshall et al.^[18]测定的结果一致. 然而,Iyengar (BARC) 给出了 POK1 的核爆当

量为 8kt^[19]. 考虑 POK1 与 POK2 事件的源区一致性,利用公式

$$b \lg Y = \lg(A/T), \quad (2)$$

可以根据 POK1 的当量给出 POK2 事件当量的合理估计. (2) 式中 A 为短周期 (~ 1 Hz) P 波记录初始的几秒内最大峰值振幅的半幅, T 为与之对应的周期. Douglas et al.^[9]分析了 12 个台站的观测记录,得到这两次事件 $\lg(A/T)$ 的平均偏差为 0.37,经过校正后,Sikka et al.^[5]得到的平均偏差为 0.44. 利用公式 (2) 估计 POK2 事件的当量列于表 1. 结果表明方程 (1) 中的系数 b 对当量估算的影响较小,假设 POK1 事件的当量最低为 8kt,则 POK2 应不低于 28kt. 经验公式中 a 的取值分别为 4.45、3.92 和 4.08,根据 NEIS 测定的 m_b 值 ($= 5.2$),利用 SRTS、NTS 和 DTS 三个关系式可得 POK2 事件的当量值分别为 10kt、38kt 和 29kt. 由此可见系数 a 的取值为 4.45 时低估了爆破当量,也就是说采用 NTS 和 DTS 的经验关系较 SRTS 更适合印度核爆的当量估计.

表 1 利用偏差 $\lg(A/T)$ 估计的 POK2 事件的当量

		Table 1 Yield estimated from the bias $\lg(A/T)$					
$\lg(A/T)$		0.44					
b		0.75 (SRTS)		0.81 (NTS)		0.77 (DTS)	
Y_1 (kt)	8	12	8	12	8	12	
Y_2 (kt)	31	46	28	42	30	45	

注:考虑源区的一致性,取校正后的 $\lg(A/T)$ 和三个经验公式中的 b 值,利用 POK1 事件的当量 Y_1 计算 POK2 的当量 Y_2 .

根据 4 个已知当量事件,Lay^[11]发展了一种波形互相关方法,并测定了 NTS 场地 28 次地下核事件的等效震源相对静力学强度,得到了 NTS 的相对静力学强度与当量的经验公式:

$$\lg \sigma_c = (-2.589 \pm 0.214) + (0.860 \pm 0.076) \lg Y, \quad (3)$$

其中 $\sigma_c = \int_{\text{BOXCAR}} \dot{u} \dot{u} dt$, $\text{BOXCAR} = 1.3 \times 10^{11} \text{ cm}^3$,是 NTS 的 BOXCAR 事件的静力学强度,由近场数据获得. 由于 (3) 式是利用 28 次地下核爆获得的统计结果,有较高的可靠性. 因为 NTS 和 DTS 的公式更适合印度 Pokhran 地区,我们利用 (3) 式来估计 POK2 事件的当量.

3 数据收集与处理

在震中距 $30^\circ \sim 90^\circ$ 范围内选择远震体波波形资料,地震体波的地球介质响应近似地为 函

数. 自 Langston et al.^[20] 之后, 远场 P 波记录被广泛地应用于研究天然地震或地下核爆的震源参数. 按照文献[21], 我们采用了具有三个参量的 Haskell 修正震源模型

$$(\) = \left[1 - e^{-k} \left(1 + k + \frac{1}{2} (k)^2 - B(k)^3 \right) \right], \quad (4)$$

这里, 爆炸震源的折合位移势函数 (Reduced Displacements Potential, RDP) 的定义为 $(\)/R$, 为延迟时间, $= t - R/v$, R 为震源与台站的距离, v 为 P 波速度. lg 与 $lg Y$ 成正比. k 为上升时间的参数, 与震源模型的静力学强度有关, 比如震源强度越大, 持续时间就越长, 特征频率 k 越小. B 表示时间函数的过冲. 对于远场 P 波资料, 观测记录与模拟信号进行拟合最稳定的一部分只有记录初始的几秒, 因此同时求解震源模型的三个参量 lg 、 k 和 B 是很困难的. 解决这一难题的办法是令 B 为某一固定值, 如 Lay et al.^[11,22], 取 $B = 1.0$. 另外, 还需考虑 RDP 震源模型参数与地震波衰减 (t^*) 之间的平衡关系, t^* 为地震波走时与传播路径的品质因子均值之比 ($t^* = T/\bar{Q}$). 这样, 通过远场 P 波记录的模拟与反演, 可以确定震源模型参数的 lg 和 k .

爆炸点源的远场 P 波理论地震图的计算公式为

$$\begin{aligned} f(t) &= [E(t) + r_{pp} E(t - t_p)] * S(t) \\ &\quad * A(t, t^*) * I(t) \\ &= S(t) * E(t) * A(t, t^*) * I(t), \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$S(t) = [1 + r_{pp} (t - t_p)] * S(t), \quad (6)$$

这里, $E(t)$ 为 P 波的地球介质响应, r_{pp} 为 P 波在自由表面上的反射系数, t_p 为 pP 波相对于 P 波的走时差, $A(t, t^*)$ 表示地震波的衰减, $I(t)$ 为地震仪的脉冲响应.

对于震中距 $30^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的远震体波, t^* 可以近似为常数, 许多地震学的研究支持 $t^* = 1.0$ ^[23]. 因此, 我们近似地设置 t^* 为 1.0 进行波形模拟, 反演等效震源的模型参数, 进而估计 POK2 事件的核爆当量. 考虑实际观测误差及 t^* 的常数近似, 给出了当量估计的误差.

对于 POK2 事件, 从 IRIS 提供的 BHZ 频道地震记录中, 只能挑选出 20 个记录质量较好的远场 P 波记录. 原始的垂向 P 波波形记录如图 1 中上方的波形曲线所示. 图中还列出了相应的台站名称, 方位

角 A_z 和震中距 Δ . 从图 1 中可以看到, 原始的 P 波记录受长周期的干扰较为严重, 因此对原始的波形记录和波形反演过程中计算的理论地震图同时采用带宽为 0.3 ~ 9.0 Hz 的带通滤波器进行滤波. 滤波后的波形记录和计算的理论地震图如图 1 中的中间与下方的波形曲线所示.

根据文献[3], POK2 事件为同时引爆的两个地下核爆的组合, 核爆震源位于相距 1 km 近东西向排列的两个深井中. 除此之外, 有关爆炸震源的深度, 震源区的介质性质与参数在文献中均没有报道. 基于上述考虑, 我们在计算 POK2 事件的远场理论地震图时, 假定 POK2 事件是由东西方向相距 1 km、同时引爆的两个地下核爆组成. 令事件 1 和 2 的等效震源模型的相对静力学强度、特征频率和爆炸震源深度分别为 lg_1, lg_2, k_1, k_2 和 h_1, h_2 , 进行波形拟合与反演. 纪晨和姚振兴^[24] 将均匀设计、快速模拟退火方法^[25] 和单纯形方法相结合, 得到一种混合算法, 适于波形反演计算^[26,27]. 根据文献[28], 反演过程中的目标函数采用

$$E(t) = 1.0 - 2 \frac{\int f_{obs}(t) f_{syn}(t) dt}{\int (f_{obs}^2(t) + f_{syn}^2(t)) dt}, \quad (7)$$

其中 $f_{obs}(t)$ 和 $f_{syn}(t)$ 分别为观测记录与理论地震图. 在反演过程中, 令 $B_1 = B_2 = 1.0$, 参数 $lg_1/(lg_1 + lg_2), k_1, k_2, h_1$ 和 h_2 的取值范围如表 2 所示, 其中, 爆炸震源深度的取值范围是参考 POK1 事件的震源深度 $h = 107\text{m}$ ^[8] 后得出的. 由于我们对震源区的地壳分层结构一无所知, 简单地将其看成 P 波速度 $v = 4.2\text{km/s}$ 的半无限介质模型. 为了考虑震源区地表附近介质横向非均匀的影响, 我们将 pP 波在自由表面的反射系数 r_{pp} 也作为变量处理, 其取值范围为 $[-1.0, -0.4]$. 采用 $t^* = 0.7 \sim 1.3$, $t^* = 0.1$ 分别进行波形反演, 目标函数随 t^* 的变化如图 2 所示, 由图 2 可见, 当 $t^* = 1.0$ 时, 目标函数最小, 说明由核爆引起的远震 P 波在地球模型中传播的平均衰减因子取 1.0 是合理的. 最终反演计算所得的理论地震图如图 1 中下方的波形曲线所示.

表 2 反演参数的数值约束范围

Table 2 Numeric areas of the inversion parameters					
参数	k_1/Hz	k_2/Hz	h_1/km	h_2/km	$lg_1/(lg_1 + lg_2)$
Min.	9.0	8.0	0.4	0.2	0.6
Max.	11.0	13.0	1.0	0.6	0.95

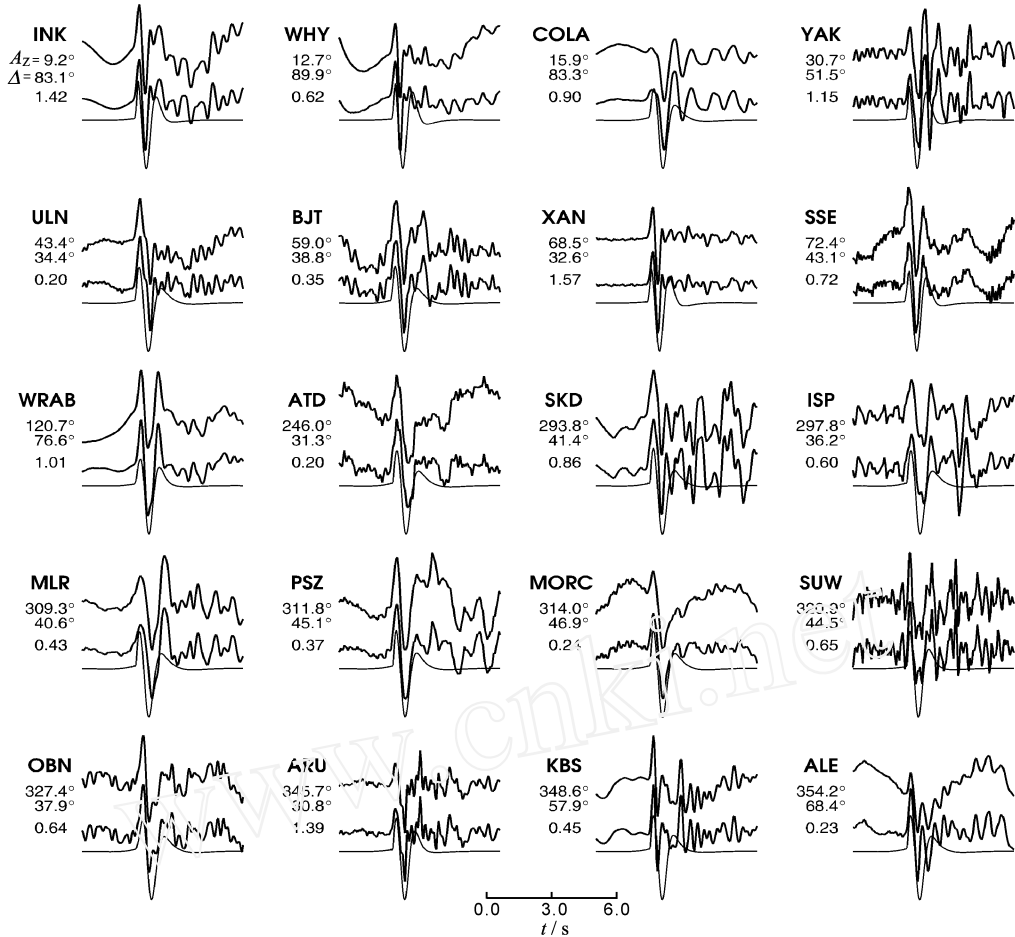


图 1 各个台站观测记录(上方曲线)、滤波后的地震图(中间曲线)和最终反演结果(下方曲线)的比较。每幅图左侧分别列出了台站名、方位角、震中距和观测记录与理论地震图的最大振幅比

Fig. 1 A comparison of observations (upper), the filtered seismograms (middle) and the final calculated results (lower) from waveform inversion

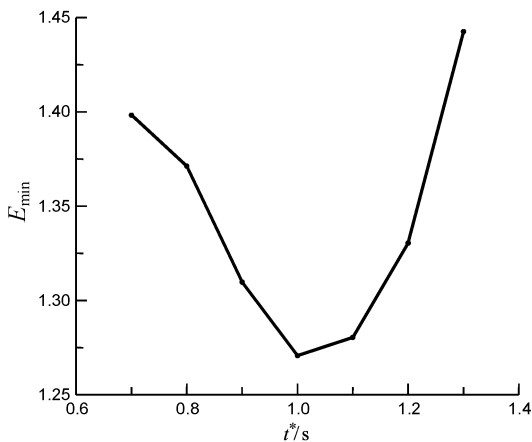


图 2 目标函数 E_{\min} 随衰减因子 t^* 的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of the object function E_{\min} with wave attenuation factor t^*

通过观测记录与理论地震图的最大振幅比,利用(3)式计算 POK2 事件的当量。反演结果,POK2 事

件的当量估计及估计误差如表 3 所示。

表 3 POK2 事件的等效震源参数及当量估计

Table 3 Effective source model parameters of POK2 event and yield estimations

POK2 事件	k/Hz	B	h/km	Aver. r_{pp}	Aver. (10^{10}cm^3)	Aver. c	Yield (kt)
事件 1	11.0	1.0	0.47	0.61	0.55	0.043	26.1 ± 2.2
事件 2	12.5	1.0	0.25		0.24	0.019	10.1 ± 1.7

4 结果与讨论

核爆当量估计一直是地震学家关注的重要问题之一。正确地确定 1998 年 5 月 11 日印度核试验的当量,对于合理评估这一高热原子核反应装置的成功性以及核试验进行地震学监测的可信性检验具有重要意义。根据实际情况,我们采用同时起爆的

两个子事件组合的等效震源模型,固定过冲值 $B_1 = B_2 = 1.0$,用相对静力学强度 σ_1 及其比值 $\sigma_1 / (\sigma_1 + \sigma_2)$,特征频率 k_1, k_2 ,和爆炸震源深度 h_1, h_2 等 6 个参量描述耦合震源时间函数,模拟了 POK2 事件的远场 P 波波形。

由于在最终的反演结果中,需要提取振幅信息,选择一个合理的与传播路径相关的平均衰减因子 (t^*) 是十分必要的。我们对不同的 t^* 值进行反演,当 $t^* = 1.0$ 时误差最小,表明设定 t^* 的值为 1.0 是合理的。

特征频率 k 是描述核爆震源上升时间的参数,随着 k 值的增大,相对静力学强度呈指数减小;而相对静力学强度越大,当量也越大。表 3 所示的计算结果与这一规律相符合,事件 1 的当量值较大,约占总当量的 70%。考虑观测误差,对反演参量进行扰动,通过多次计算来确定当量估计误差,结果表明相对较大当量的子事件的估计误差较大。反射系数 r_{pp} 作为未知参量进行反演。由于震源区 $r_{pp} = 4.2\text{km/s}$ 是一个假定值,因此所获得的两个子事件的爆炸深度只能是一个参考值。

Lay et al.^[16] 和 Lay^[1] 的结果表明,利用相对静力学强度来估算核爆当量比较合适。我们根据 Lay^[1] 给出的 NTS 地区相对静力学强度与当量的经验公式,获得 POK2 事件中的两个子事件的核爆当量分别为 10kt 和 26kt,这一结果与利用 NEIS 测定的 $m_b = 5.2$,由 NTS 公式计算的当量 38kt,或者假定 POK1 事件为 8kt 时,Sikka et al.^[5] 由 $\lg(A/T)$ 获得的 POK2 事件的当量为 30kt 接近。

对于印度 Pokhran 地区,由于进行地下核试验较少,经验公式 $m_b = a + b \lg Y$ 中的常数 a 和 b 需要进一步标定,才能根据体波震级 m_b ,尤其是根据区域 Lg 波测定的 m_b ,给出当量的合理估计。

根据 Douglas et al.^[9,10] 和 Sikka et al.^[2-5,11] 的工作,若采用 SRTS 地区的经验公式,给出的 POK2 事件的当量偏低,而采用 NTS 地区的经验公式较为合适,因此本文采用 Lay^[1] 的经验公式是合理的。我们的结果支持 1998 年 5 月 11 日印度核试验的当量低于 60kt 的观点。

致谢 在与谢小碧博士的讨论中受益匪浅,特此致谢。

参考文献 (References)

[1] Lay T. Estimating explosion yield by analytical waveform comparison.

Geophys. J. R. Astr. Soc., 1985, **82**: 1~30

- [2] Sikka S K, Roy F, Nair GJ, et al. Update on the yield of May 11 - 13, 1998 Nuclear Detonations at Pokhran. *BARC News. Lett.*, 1998, **178**: 1~5
- [3] Sikka S K, Roy F, Nair GJ. Indian explosions of 11 May 1998: An analysis of global seismic body wave magnitude estimates. *Curr. Sci.*, 1998, **75**: 486~491
- [4] Sikka S K, Nair GJ, Roy F, et al. The recent Indian nuclear tests: A seismic overview. *Curr. Sci.*, 2000, **79**(9): 1359~1366
- [5] Sikka S K, Roy F, Nair GJ, et al. Yield estimation of Indian nuclear tests of 1998. *Curr. Sci.*, 2001, **81**(8): 885~888
- [6] Roy F, Nair GJ, Basu T K, et al. Indian explosions of 11 May 1998: Analysis of regional Lg and Rayleigh waves. *Curr. Sci.*, 1999, **77**: 1669~1673
- [7] Barker B, Clark M, Davis P, et al. Monitoring nuclear tests. *Science*, 1998, **281**: 1967~1968
- [8] Wallace T C. The May 1998 India and Pakistan nuclear tests. *Seismol. Rec. Lett.*, 1998, **69**: 386~393
- [9] Douglas A, Marshall P D, Bowers D, et al. The yields of the Indian nuclear tests of 1998 and their relevance to Test Ban verification. *Curr. Sci.*, 2001, **81**(1): 72~74
- [10] Douglas A, Selby N D, Bowers D. Seismic magnitude and yield for the Indian nuclear test of 11 May 1998. *Curr. Sci.*, 2002, **83**(8): 989~992
- [11] Sikka S K, Roy F, Basu T K. Body-wave magnitude bias between Pokhran and eastern Kazakh nuclear test sites. *Curr. Sci.*, 2002, **83**: 992~997
- [12] Evernden J F. Estimation of yields of underground explosions with emphasis on recent Indian and Pakistani explosions. *Phys. Soc.*, 1998, **27**: 10~11
- [13] Ringdal F, Marshall P D, Alewine R W. Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site. *Geophys. J. Int.*, 1992, **109**: 65~77
- [14] Murphy J R. Identification of seismic sources. In: Husebye E S, Mykkeltveit S eds. *Earthquake or Underground Explosion*. Reidel, Dordrecht, 1981. 201~205
- [15] Bache T C. Estimating the yield of underground nuclear explosions. *Bull. Seim. Soc. Am.*, 1982, **72**: S131~S168
- [16] Lay T, Burdick L J, HelMBERGER D V. Estimating the yield of the Amchitka tests by waveform intercorrelation. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1984, **78**: 181~207
- [17] Chidambaram R, Ramanna R. Some studies of India's peaceful nuclear explosion experiment. Proc. Tech. Committee on Peaceful Nuclear Explosions IV, IAEA, Vienna, 1975. 421~427
- [18] Marshall P D, Springer D L, Rodean H C. Magnitude corrections for attenuation in the upper mantle. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1979, **57**: 609~638
- [19] Gupta V, Pabin F. Investigating the allegations of Indian nuclear test preparation in the Rajasthan desert. *Sci. Global Security*, 1997, **6**: 101~188
- [20] Langston C A, HelMBERGER D V. A procedure for modeling shallow dislocation sources. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1975, **42**: 117~

- 130
- [21] Burdick L J, Wallace T, Lay T. Modeling in the near-field and teleseismic observations from the Amchitka test site. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 4373 ~ 4388
- [22] Lay T, Helmberger D V, Harkrider D G. Source models and yield-scaling relations for underground nuclear explosions at Amchitka Island. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1984, **74**: 843 ~ 862
- [23] Anderson D L, Hart R S. Attenuation models of the earth. *Phys. Earth Planet Interiors*, 1978, **16**: 289 ~ 306
- [24] 纪 晨, 姚振兴. 用于地球物理反演的均匀设计优化算法. *地球物理学报*, 1996, **39**(2): 233 ~ 242
Ji C, Yao Z X. The uniform design optimized method for geophysics inversion problem. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(2): 233 ~ 242
- [25] Ingber L. Very fast simulated re-annealing. *Mathl. Comput. Modelling*, 1989, **12**: 967 ~ 973
- [26] 王卫民, 赵连锋, 李 娟等. 1999 年台湾集集地震震源破裂过程. *地球物理学报*, 2005, **48**(1): 132 ~ 147
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the Chi-Chi (Taiwan) earthquake in 1999. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(1): 132 ~ 147
- [27] 李 娟, 王卫民, 赵连锋, 姚振兴. 2004 年 7 月 11 日西藏 M_w 6.2 级地震震源破裂过程研究. *地球物理学报*, 2005, **48**(4): 843 ~ 850
Li J, Wang W M, Zhao L F, et al. Rupture process of the July 11, 2004, Tibet (M_w 6.2) earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(4): 843 ~ 850
- [28] Ji C, Helmberger D V, Wald D. Basin structure estimation by waveform modeling: forward and inverse methods. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2000, **90**, 964 ~ 976

www.cnki.net