

利用 Lg 波谱特征估计地下核爆炸装置的埋深^①

何永锋, 李 锴, 刘炳灿

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘要: Lg 波同时携带地球介质结构信息和爆炸源引起的二次源信息, 是研究地下爆炸震源机制及检测、识别手段的重要震相。基于对某一区域介质结构的了解, 将实测 Lg 波谱特征形态与理论波谱形态进行比对, 利用 Lg 波频谱曲线的低谷点随震源深度“左移”的特征, 作为辅助识别手段估计地下核爆炸装置的埋深。研究结果对深入地理解地下核爆炸震源机制有重要的参考意义。

关键词: Lg 波; 波谱低谷点; 谱比

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0601-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0601

Estimation of Underground Nuclear Explosive Device Depth Using Lg-wave Spectrum

HE Yong-feng, LI Kai, LIU Bing-can

(Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: The efficient frequency-wave number code could synthesize high-frequency (10 Hz) regional seismograms (up to a distance of more than 1 000 km) in a medium consisting of a large number of crustal layers, and investigate the effects of regional wave guides on Lg-waves. Lg-waves contain source information and the effect of the near-source structure. The scattering of explosion-generated Rg into S appears to be the primary contributor to the low-frequency Lg from nuclear explosive devices. For three typical crustal models, the synthetic seismograms calculated for EXP and Spall sources show that the generation mechanism of Lg-waves can be explained by a compensated linear-vector dipole source. If the velocity structure is well known, then the Lg-waveform can be synthesized, so we can compare the theoretical Lg-wave's spectrum with the observation's spectrum, and the results can not only be used to estimate the depth of the underground explosion equipment but also a discriminant. A deep understanding of the mechanism of the generation of Lg-waves can help us to create a new discriminant.

Key words: Lg-wave; spectral null; spectral ratios

0 引言

如何从观测资料出发来区分地下核爆炸与天然地震是我们所关心的重要问题, 自从实施地下核爆炸以来, 基于地震学方法的识别手段得到了较为深入、广泛的研究, 提出了许多种方法。然而大量的观测资料分析和理论研究结果表明, 寻找一个理想的

鉴别判据存在许多困难^[1-2], 理论上讲, 不存在一个理想的能够逃避核查的试验方法。迄今为止, 地震学方法仍然是在远区检测、识别他方隐蔽地下核试验的主要手段。

天然地震与地下核爆炸的本质区别是震源机制的差异, 两者的震源矩张量解具有完全不同的表现

^① 收稿日期: 2014-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40874023, 41374068)

作者简介: 何永锋(1966—), 男, 教授, 主要研究方向为核爆炸地震学。E-mail: heyfeng@sina.com

形式^[3-4]。地下核爆炸源辐射出来的地震波形较天然地震源辐射出来的波形而言比较简单,可通过台阵的聚束技术来分析;但随着地下核试验记录的增多,关于地下核爆炸的复杂波形的报道也逐渐增多^[5],使得基于波形复杂性的判据的实用性受到普遍怀疑。

震源深度是识别地下核爆炸与天然地震的重要指标,针对地震核查问题,通常利用谱分析手段来提高源深度的估计精度。地震波的频谱特性不仅与震源有关,与传播路径也有相当大的关系。即对一个核试验场适用的频谱判据,对于另外一个地区常常不适用,因此对于精确的介质模型,利用频谱来估计震源深度是十分重要的。

导波以及面波是由地球介质的竖向几何结构特征决定的,对传播路径的横向非均匀性的敏感程度相对体波来说要弱得多。地下核爆炸激发的 Lg 波在远区记录中稳定且占优势,利用其研究地下核爆炸的震源机制以及识别手段具有独特优势。理论上讲,球对称、短时的爆炸源在分层地球介质中激发的 Lg 波相对天然地震具有“简单性”,但是地下核爆炸过程的复杂性仍然使得 Lg 波复杂化,伴随地下爆炸源区的构造应力释放具有“特殊性”,如经过 CLVD 源调制的 Rg 波波谱具有低谷点特征等,这些特征是研究地下核爆炸震源机制的重要手段。有学者认为地下核爆炸的 Lg 波源自于近源区的 Rg 波^[6-8],因为 Lg 波波谱也具有低谷点特征,且低谷点频率随震源深度变化规律与 Rg 波一致,所以 Lg 波不仅携带地球竖向分层结构信息,而且携带有伴随爆炸过程的二次源信息,其波谱中的低谷点普遍被认为源自于伴随 CLVD 源过程。基于上述研究,本文首先分析 Lg 波激发与地球介质结构的关系,然后利用 Lg 波的特殊性,即其波谱低谷点特征,估计爆炸装置的埋深。

1 不同介质模型下 Lg 波的激发特征

形成地下核爆炸地震波 Lg 波所需的 S 波主要源于爆炸源引起的二次源,同时也受到源区介质结构的影响,本文利用理论地震图方法来说明这一观点。

层裂源的表现过程为:通常情况下地下核爆炸会导致源上方介质的破碎,并上抛,该物理过程可用张裂源(TCACK)模型进行描述;上抛物的回落会引起应力的重新分布,这种构造应力释放可以用逆倾滑形式的断层来描述,表现形状为顶点位于爆炸

源点的反向圆锥体,锥体低面位于层裂面甚至自由表面^[9]。这种形式的构造应力释放源可以用线性矢量偶极补偿源(CLVD)来描述^[10]。因此层裂源可以表现为张裂源和线性矢量偶极补偿源的组合。Day 用单力和张裂模型来描述层裂过程,结果表明,在频段 0~5 Hz 两种描述具有等价性^[11]。

与 CLVD 源激发的近源区 Rg 波谱相同,Lg 波谱中也具有低谷点特征,且其随频率变化的规律与近源区 Rg 波谱低谷点随频率变化的规律相同,有学者对此也进行了深入研究^[8,12]。本文采用适合东哈萨克斯坦区域的地球介质速度模型(模型 1)^[13],即地表高速模型,并对该模型进行修改,使其分别变为地表低速模型(模型 2),及含低速层模型(模型 3)。利用理论地震图方法,进一步研究单力源(SIN)、爆炸源(EXP)、张裂源(TCACK)及线性矢量偶极补偿源(CLVD)在不同地球介质结构中激发的区域震相特征,分析不同源模型激发的 Lg 波能量与介质模型及源模型之间的关系,以期更好地理解 Lg 波的激发机理。

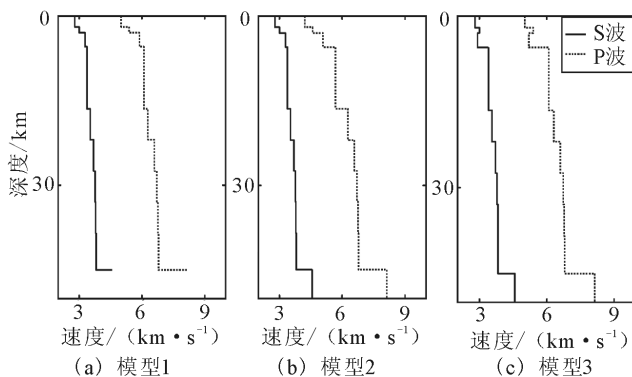


图 1 S 波和 P 波在 3 种模型下的速度

Fig.1 The velocities of S-wave & P-wave in the three models

理论上讲,球对称的爆炸源只激发 P 波,形成 Lg 波的 S 波只能源自 P 波在地表的转换波 P-S 波或由面波散射而形成的 S 波,但这样的激发机制对速度模型较敏感。Lg 波的能量依赖于爆炸源处 P 波速度与上地幔 S 波速度的比值^[14],如果该比值大于 1,P-S 波则不会陷于地壳中形成导波。而实际观测结果表明,像东哈萨克斯坦这样的地表高速地壳结构,地下核爆炸激发的 Lg 波同样是区域震相中的优势成分,说明激发 Lg 波的主要因素并不是球对称的爆炸源,而是与非爆炸源成分息息相关,或者说与球对称爆炸源引起的二次源有关。

模型 2 中地表 P 波速度低于上地幔 S 波速度,理论上讲,纯爆炸源在这样的速度模型中能激发能

量较大的 Lg 波;模型 3 含有一低速层,理论上来讲,该低速层利于导波的形成。

本文采用水平层状地球模型中理论地震图的计算方法^[15-16],其本质与 Yao^[17]的经典的广义反射-透射系数方法是一致的,具有能够模拟出全波场震相的优点。分别计算 SIN、EXP、TCACK 及 CLVD 源在三种模型下的区域理论地震图,震中距为 300 km,震源时间函数均取 δ 函数,理论计算时频率范围约束为 0~5.0 Hz。数值模拟结果如图 2 所示。

图 2 分别为 SIN、EXP、TCACK 及 CLVD 源在三种模型下的格林函数。可以看出,CLVD 源在三种速度模型下都能激发能量足够大的 Lg 波,而 EXP 源在相应模型下激发的 Lg 波能量要远低于 CLVD 源情况,尤其是在模型 1、模型 3 情况下。可见 EXP 源在地表高速模型下,地壳中会耦合能量很小的 S 波,而相应的 CLVD 源却能产生能量很大的用来激发 Lg 波的 S 波。究其原因可以从 CLVD 源

与 EXP 源空间分布特征得到解释,确切地说 CLVD 源对角分量的偏差直接激发 S 波,其速度要低于上地幔 S 波速,会在 Moho 反射形成能量足够大的导波。EXP 源在模型 2 会激发一定能量的 Lg 波,因为该模型为地表低速模型,地表转换波 P-S 波能够在 Moho 面反射、叠加形成导波。

TCACK 源也具有对角分量偏差,相比 CLVD 源小,因此激发的 Lg 波能量较小,但与 SIN 源激发的能量相当,在所考察频率范围内。支持 Day 的 SIN 和 TCACK 源在描述层裂物理过程中具有一致性观点^[11]。

从上述分析结果可以看出,无论是在地表高速、地表低速类型的地壳速度结构的区域,相对 EXP 源而言,CLVD 源激发 Lg 波对介质模型不敏感,并且与实际地下核爆炸激发的区域震相情况相符。由此可以证明伴随实际地下核爆炸的 CLVD 源担当了激发 Lg 波的主要任务。

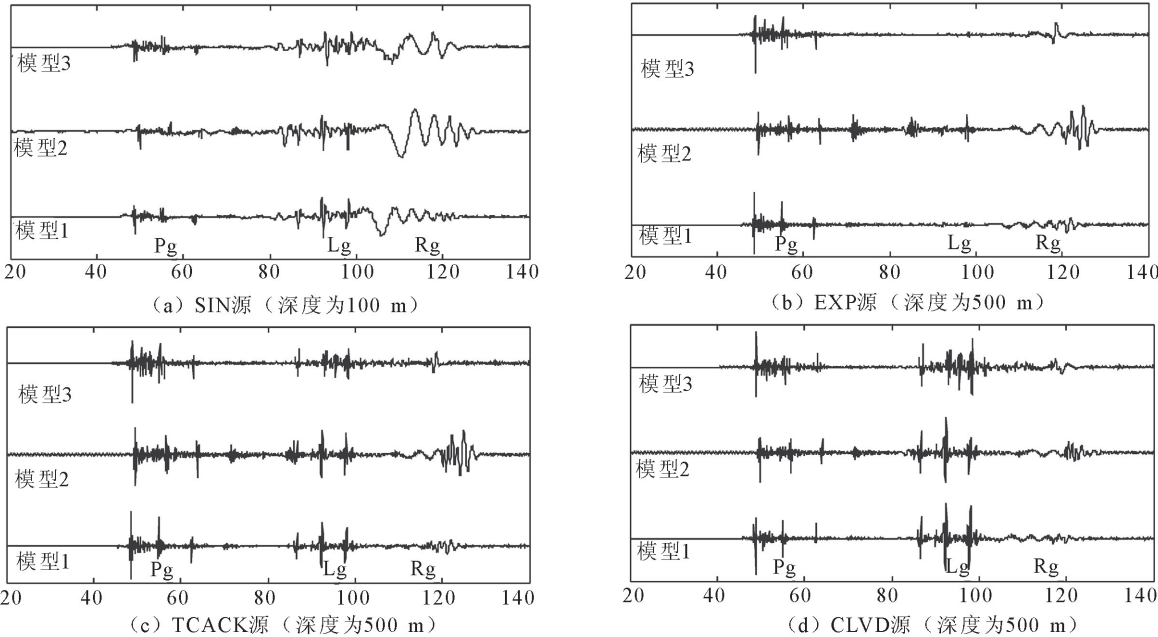


图 2 三种源在三种模型下的数值模拟结果(速度场)

Fig.2 Numerical simulations of three sources in the three models (velocity field)

2 波谱形态比对

2.1 谱比方法

震源机制和传播路径对地下核爆炸激发的地震波起着决定性作用。对地下核爆炸来说,除了球对称爆炸源外,需要考虑其他辅助震源模式,如伴随层裂过程的 TCACK、CLVD 源等;传播路径影响是造成地下核爆炸地震波波形复杂化的主要原因,且难以用数学形式精确描述,想要从波形资料中提取

出感兴趣的震源信息,如 Lg 波中与 CLVD 源相关信息,必须消除路径的影响。利用经验格林函数方法可以实现这一目的^[18-19];用过比例埋深的地下核爆炸事件作为格林函数,所谓过比例埋深是指爆炸装置的埋深相对其当量来说大于正常埋深的情况。过比例埋深的地下核爆炸的层裂效应很小,在 0~3 Hz 的频带范围内可近似为纯爆炸源,它在波谱比中的作用相当于经验格林函数,用以消除传播路径、接

受场地及记录仪器响应的影响。因此波谱比给出的结果主要是震源的影响因素造成的。

正常埋深地下核爆炸的远场位移谱(垂向)可以描述为:

$$u(\omega) = \mathbf{G}(\omega, h_e) : \mathbf{M}_e(\omega) + \mathbf{G}(\omega, h_x) : \mathbf{M}_x(\omega) \tag{1}$$

式中:冒号表示内积计算; $\mathbf{M}_e$ 为爆炸源矩张量; h_e 和 h_x 分别为爆炸源和层裂源的中心深度; $\mathbf{G}$ 为垂向分量位移场对应的格林函数; $\mathbf{M}_x$ 为描述层裂源的矩张量。单力模型下,层裂产生的位移场可以描述为:

$$u(x) = F_s \mathbf{G} \tag{2}$$

式中: F_s 是 σ_s 的面积分结果。 σ_s 为地球表面处的垂向牵引力。在点矩张量模型下,并在波长远大于层裂埋深的条件下,层裂过程中的张裂源的矩张量描述与点力描述在数学上是等价的。

相应地,作为经验格林函数的过比例埋深的地下核爆炸的远场位移(垂向)谱可描述为:

$$u^o(\omega) = \mathbf{G}(\omega, h_e^o) : \mathbf{M}_e^o(\omega) \tag{3}$$

如果这两个爆炸的位置接近且埋深相近,则有 $\mathbf{G}(\omega, h_e) = \mathbf{G}(\omega, h_e^o)$, 它们的位移谱比为:

$$\frac{u}{u^o} = \frac{M_o(\omega)}{M_o^o(\omega)} + \frac{\mathbf{G}(\omega, h_x) : \mathbf{M}_x(\omega)}{\mathbf{G}(\omega, h_e^o) : \mathbf{M}_e^o(\omega)} \tag{4}$$

$M_o(\omega)$ 、 $M_o^o(\omega)$ 分别为正常埋深和过比例埋深事件的地震矩时间函数谱,当 ω 取低频时式(3)第一项近似为当量比值^[6],影响谱比的因素主要为第二项。

针对适合东哈萨克斯坦区域的地壳速度模型^[13],分别计算 EXP、CLVD 源的格林函数,所采用参数同上。CLVD 源深度分别取 0.2 km、0.3 km、0.6 km、0.9 km,提取 Lg 波,将 EXP 的结果作为格林函数,进行式(4)第二项的运算。理论谱比结果如图 3 中实线所示(纵坐标已归一化),显示出不同震源深度低谷点随频率位置的变化规律。理论上讲,该变化规律反映了东哈萨克斯坦区域地下爆炸激发的 Lg 波谱低谷点形态与 CLVD 源深度之间的关系,即随源深度增加低谷点频率向低频方向移动。这一变化关系可以用来估计爆炸源深度。

2.2 实际应用

分别对我国乌鲁木齐台站记录到的两次哈萨克斯坦地下核爆炸事件(代号为 1988044 和 1987157)进行分析,震中距约 950 km,震级分别 $M_b = 6.1$ 、 $M_b = 5.0$ 。记录波形如图 3 所示,为发育较好的 Lg 波。将震级较小事件 1987157 作为经验格林函数,反卷积震级较大事件 1988044 的 Lg 波,将结果叠

加于理论谱比图 4 中,与理论值进行比对,虚线为 1988044 事件的谱比结果。可以看出,谱比值具有明显的低谷点特征,且其频率位置与 CLVD 源深度为 0.2 km 的理论谱比值一致。

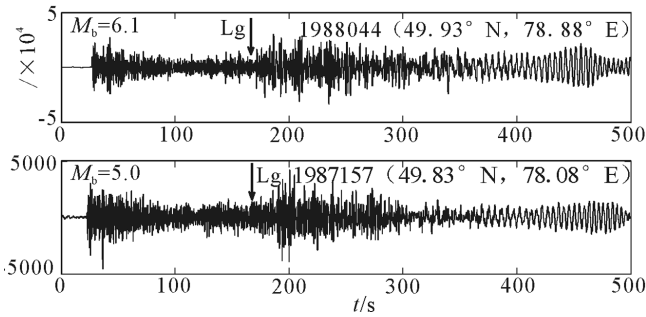


图 3 东哈萨克斯坦地下核爆炸垂向速度场地震波形(单位:counts)

Fig.3 Seismic waves in vertical velocity field caused by underground nuclear explosions of East Kazakh (unit: counts)

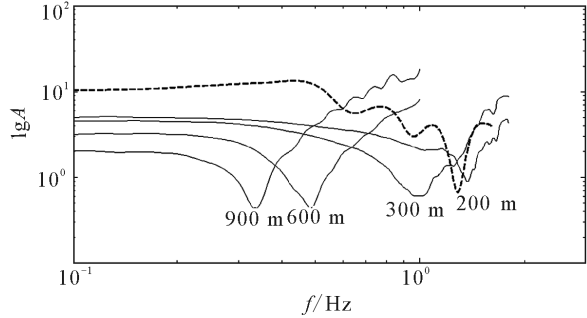


图 4 针对东哈萨克斯坦地壳速度模型的 Lg 波谱比

Fig.4 The Lg-wave spectral ratio calculated by crustal velocity model of East Kazakh

利用 CLVD 源深度与低谷点的关系式 $H_{CLVD} = V/16f_{NULL}$ ^[6],可以得出,低谷点频率范围为 0.94 ~ 1.87 Hz 的地下核爆炸的爆炸装置埋深范围为 0.5 ~ 1.0 km,这里取 $v = 5.0$ km/s,绝大多数震级为 $M_b = 6.0$ 左右的大当量地下核爆炸装置的埋深都在此范围内,与图 3 理论结果一致。CLVD 源深度约为爆炸源深度的 1/3^[6],据此可以判断出事件 1988044 地下核爆炸的爆炸装置的埋深约为 0.6 km,与利用 $H_{CLVD} = V/16f_{NULL}$ 估算出的结果一致,说明利用适合东哈萨克斯坦地区的地球介质模型得到的地下核爆炸理论 Lg 波谱比,可以用来估计实际地下爆炸装置的埋深。

3 结论

对重要震源机制进行相对深入的研究,是逐步

了解地下核爆炸震源物理过程的比较现实的方法。层裂源辅助源的重要性在于它是区域震相 Lg 波的主要激发因素,对 Lg 波具有调制作用,表现在 Lg 波谱低谷点的存在。低谷点位置随频率变化的客观事实,是由震源深度及介质几何分层结构特征的影响,所以说 Lg 波的低谷点同时携带有源和介质结构信息。

本文利用被地下核爆炸二次源“复杂化了”的 Lg 波的特殊谱形态,即低谷点特征,估计爆炸装置的埋深,将低谷点特征与源深度估计结合在一起。从识别的角度来看,该项工作比单纯估计震源深度更有意义。对发生在某一地下核试验区域的未知事件,如果 Lg 波谱比具有明显的低谷点,且深度估计范围在 1 km 以内,则可以作为判断该事件倾向于地下爆炸的一个重要的辅助判据。

参考文献(References)

- [1] Blandford R R. Discrimination Between Earthquakes and Underground Explosions[J]. *Ann Rev Earth Planet Soc*, 1977, 5: 111-122.
- [2] Taylor S R, Denny M. Regional Discrimination Between NTS Explosion Western U.S. Earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1989, 79: 1142-1176.
- [3] Minson S E, Dreger D S. Stable Inversions for Complete Moment Tensors [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 174: 585-592.
- [4] 陈继锋, 林向东, 何新社. 2013 年甘肃岷县 $M_s 6.6$ 地震矩张量反演及发震构造初探[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(3): 425-431. CHEN Ji-feng, LIN Xiang-dong, HE Xin-she. Moment Tensor Inversion and Seismogenic Tectonics of the 2013 Minxian $M_s 6.6$ Earthquake in Gansu[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 425-431. (in Chinese)
- [5] 何永锋, 赵克常, 张献兵, 等. 地下核爆炸地震波二次源特征[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(5): 1742-1748. HE Yong-feng, ZHAO Ke-chang, ZHANG Xian-bing, et al. The Characteristic of the Waveform from the Second Source Induced by Underground Explosion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(5): 1742-1748. (in Chinese)
- [6] Patton H J, Taylor R S. Analysis of Lg Spectral Ratios From NTS Explosions: Implications for the Source Mechanisms of Spall and Generation of Lg Waves[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1995, 85: 220-236.
- [7] Gupta I N, Zhang T R, Wangner R A. Low-Frequency Lg from NTS and Kazakh Nuclear Explosions-observations and Interpretation[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1997, 87: 1115-1125.
- [8] 何永锋, 陈晓非, 何耀峰, 等. 地下爆炸 Rg 波低谷点激发机理[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 643-648. HE Yong-feng, CHEN Xiao-fei, HE Yao-feng, et al. Generation of Null in Rg Wave by Underground Explosions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(3): 643-648. (in Chinese)
- [9] Masse R P. Review of Seismic Source Models for Underground Nuclear Explosions[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1981, 71: 1249-1268.
- [10] Knopoff L, Randall M J. The Compensated Linear Vector Dipole: a Possible Mechanism for Deep Earthquake[J]. *J Geophys Res*, 1970, 75: 4975-4963.
- [11] Day S M, McLaughlin K L. Seismic Source Representations for Spall[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1991, 81(1): 191-201.
- [12] 何永锋, 赵克常, 张献兵. 地下核爆炸的主要非爆炸源机制[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(3): 789-794. HE Yong-feng, ZHAO Ke-chang, ZHANG Xian-bing. Primary Non-explosive Source Mechanisms for Underground Nuclear Explosions[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(3): 789-794. (in Chinese)
- [13] McLaughlin K L, Barker T G, Day S M. Effects of Depth of Burial on Explosion and Earthquake Regional Seismograms: Regional Discrimination and Yield Estimation[R]. S_CUBED report SSS_R_88_9844, Jolla, California, 1988.
- [14] Xie X B, Lay T. The Excitation of Lg Wave by Explosions: a Finite-difference Investigation[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1994, 84: 324-342.
- [15] Chen X F. A Systematic and Efficient Method of Computing Normal Modes for Multilayered Half-space[J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 115: 391-409.
- [16] Chen X F. Seismogram Synthesis in Multi-Layered Half-space Part I[J]. *Theoretical Formulations*, *Earthquake Research in China*, 1999, 13: 149-174.
- [17] Yao Z X, Harkrider D G. A Generalized Reflection-transmission Coefficient Matrix and Discrete Wave Number Method for Synthetic Seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 1983, 73: 1685-1699.
- [18] Gupta I N, Chan W W, Wanger R A. A Comparison of Regional Phases from Underground Nuclear Explosions at East Kazakhstan and Nevada Test Sites[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1992, 82: 352-382.
- [19] He Yong-feng, Chen Xiao-fei, Zhang Hai-ming. The Effect of Spall on Lg Waves[J]. *Aata Seismological Sinica*, 2005, 18(3): 331-336.