

何永锋, 李锴, 刘炳灿. 2015. 不同模型下爆炸源和层裂源的 Lg 波特性研究. 地震学报, 37(4): 640–647. doi:10.11939/jass.2015.04.010.
He Y F, Li K, Liu B C. 2015. The characteristics of Lg waves excited by explosion source and spall based on different models. Acta Seismologica Sinica, 37(4): 640–647. doi:10.11939/jass.2015.04.010.

不同模型下爆炸源和层裂源的 Lg 波特性研究^{*}

何永锋^{*} 李 锴 刘炳灿

(中国北京 100072 装甲兵工程学院)

摘要 地下核爆炸区域及远区地震波信号中,有二次源即层裂源的贡献,其对区域震相 Lg 波具有调制作用.本文利用理论地震图数值模拟方法,分析爆炸源和层裂源在 3 种典型介质速度模型下的区域震相特征,得到了爆炸源和层裂源所激发的 Lg 波与介质速度模型的关系,并结合 CLVD 源所激发的 S 波随震中距的演化过程,对 Lg 波的形成机制进行了阐述.结果表明,CLVD 源是激发地下核爆炸低频 Lg 波的主要因素.

关键词 地下核爆炸 爆炸源 层裂源 Lg 波

doi:10.11939/jass.2015.04.010 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

The characteristics of Lg waves excited by explosion source and spall based on different models

He Yongfeng^{*} Li Kai Liu Bingcan

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

Abstract: Spall is defined as a secondary seismic source contributing to regional and far field seismic signals generated by underground nuclear explosions. It can modulate the regional phase, *i. e.*, Lg waves. This paper analyzed the characteristics of Lg waves excited by explosion source and spall based on three typical crustal models by using numerical simulation of theoretical seismograms, then obtained the relationship between the crustal velocity models and the Lg waves excited by explosion source and spall. To explain the generation mechanism of Lg waves, we investigated the variation of S waves induced directly by compensate linear vector dipole (CLVD) source with different epicentral distances. The results indicate that CLVD source plays an important role in generating low-frequency Lg waves by underground nuclear explosions.

Key words: underground nuclear explosion; explosion source; spall; Lg waves

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(41374068)资助.
收稿日期 2014-07-29 收到初稿, 2014-12-12 决定采用修改稿.
[†] 通讯作者 e-mail: heyfeng@sina.com

引言

地下核爆炸可以看作是人为的地震事件,其与天然地震的本质差别在于震源特性的不同,主要包括时间特性和空间特性的差异。天然地震的发生主要为介质中沿断层面发生的剪切滑动过程,而地下核爆炸的震源机制主要是压缩的球对称形式。Minson 和 Dreger (2008)利用面波资料,反演了美国内华达地下核爆炸的震源机制,所得到的全元素矩张量解中,除了球对称解成分外,还含有较大成分的补偿线性矢量偶极(compensate linear vector dipole, 简称为 CLVD)源。这一结果进一步证实了 Patton 和 Taylor(1995)关于封闭式地下核爆炸的震源机制的阐述,即 CLVD 源机制会体现在区域震相 Lg 波中。Lg 波是一种短周期的导波,该波主要由地壳中的 S 波在分层介质的临界处多次反射而形成(Bouchon, 1982; Campillo *et al*, 1984; Xie, Lay, 1994)。通常情况下, Lg 波相对稳定,是用来分析地下核爆炸震源特性及估计爆炸当量的重要震相。理论上讲,球对称的爆炸源只能激发 P 波,而构成 Lg 波的 S 波只能来源于地表附近的 P-S 转换波或由面波散射而成,但是这样形成的 Lg 波的能量非常弱,与实际观测结果差异较大。实际地下核爆炸所激发的波形数据中能够观测到丰富的 Lg 波(何永锋等, 2015),说明激发地下核爆炸中 Lg 波的主要因素并不是纯爆炸源,而是来源于其它非爆炸源所激发的 S 波。

从震源角度出发,利用震源矩张量来描述地震波场,并解释地震波场特性是地下核爆炸地震学研究的一个重要方向。许多震源模型被提出用来描述地下核爆炸激发地震波的物理过程。Masse(1981)对几种震源机制模式分别进行了评估和分析,指出地下核爆炸的主要震源机制为球对称的爆炸源,同时伴随有层裂源。在点源近似的情况下,可利用水平张裂模型描述层裂过程中介质破裂的物理机制,层裂过程中介质的回落拍击所引起的构造应力释放的过程可以用 Knopoff 和 Randall(1970)提出的 CLVD 源来描述。诸多研究结果表明, CLVD 源是激发地下核爆炸低频 Lg 波的主要因素(Day *et al*, 1983; Day, McLaughlin, 1991; Patton, 1991; Gupta *et al*, 1997; 何永锋等, 2005a)。CLVD 源具有对角分量偏差的空间分布特征,该特征有利于激发 S 波,从而形成较高能量的 Lg 波。CLVD 源作为重要的辅助震源模式,解释了地下核爆炸波形图中低频 Lg 波的产生机制,说明了基于 Lg/Pg 波比判据在 1 Hz 附近失效的原因(何永锋等, 2011),并解释了地下核爆炸在远场观测情况下 P 波的双脉冲特征(何永锋等, 2012)。层裂源机制对深入理解地下核爆炸震源机制具有重要意义。

震源模型和介质速度模型是控制及影响地震波激发与传播的基本因素。相同机制的震源在不同的介质结构中传播,由于其传播路径的差异,会产生不同的地震波场,因此在对地下核爆炸所激发的 Lg 波的研究中,介质速度模型的影响是一个不可忽略的因素。由于 Lg 波是典型的大陆型导波,其传播路径与地壳浅层结构联系密切。在远离地表处, Lg 波的能量会以指数形式迅速衰减,因此在对 Lg 波特性的研究中,地壳速度模型中的地表结构是关键的影响因素,尤其是地表结构中 P 波和 S 波的速度分布,对 Lg 波的激发及传播具有重要影响。Saikia(1994)对美国内华达地下核爆炸的区域震相的研究结果表明,地表结构中的速度梯度对 Lg 波具有削弱作用。Richards 和 Menke(1983)在地表结构中加入速度扰动分布的薄层来研究速度模型的影响,结果发现该结构也对 Lg 波具有削弱作用,同时会使 Lg 波的波列变宽,可以形成 Lg 波的尾波。

本文基于频率-波数域算法的理论地震波形图方法,研究地表高速、地表低速以及含低速层模型下爆炸源和层裂源所激发的 Lg 波的特征,并进行相关理论分析,以期对深入理解和利用 Lg 波提供参考.

1 地下核爆炸震源的数学描述

从理论上讲,地下核爆炸的震源机制是球对称的爆炸机制,爆炸能量会朝各个方向辐射,不会激发 SH 波.但实际情况并非如此.由于地壳结构是非均匀的,并且在各个方向上的构造不同,因此地下核爆炸的震源并不会出现理想中的对称性.另外,采用简单的球对称爆炸模型,无法合理解释地下核爆炸所激发的 Lg 波和 Rg 波,因此必须选择合适的震源模型来阐述地下核爆炸的震源机制(何永锋等,2005a, b).

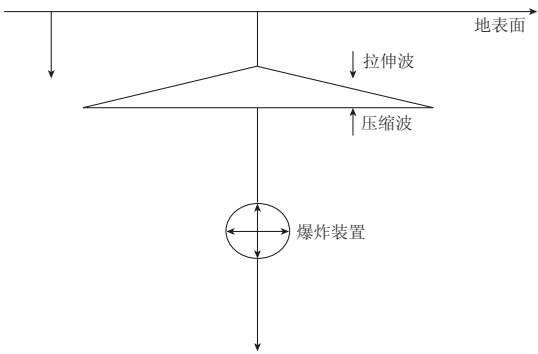


图 1 层裂源模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of source model for spall

述(Masse, 1981).该震源形状为顶点在爆炸点的倒立的圆锥体,锥体底面位于层裂面至地表面.

图 1 为层裂源模型.在垂直方向上,地下核爆炸所产生的爆炸冲击波从爆炸中心向上传播,经地表面反射后由压缩波转变为拉伸波,该拉伸波与继续向上传播的压缩波相互叠加后导致爆炸源上方的地表岩层破裂,该过程可以用张裂源进行描述.由于爆炸源上方的地表岩层破裂,引起应力场的重新分布,从而导致介质的构造应力释放,该过程可以用逆倾滑断层来描述,其物理机制主要表现为层裂破裂介质的回

落.此应力释放过程可以用 CLVD 源来描述

地下核爆炸的近场记录中,可以观察到明显的层裂现象.Springer(1974)对近场条件下代号为 BOXCAR 和 HUPMOBILE 的地下核爆炸分别进行了分析,计算结果中可以观察到非常明显的层裂二次源现象.Stump(1985)在 Springer(1974)研究的基础上,利用理论地震图方法对层裂源模型进行了详细分析,进一步阐述了波形数据与层裂源模型、震源时间函数以及介质速度模型之间的关系.

通过上述分析可知,从地下核爆炸的震源机制来看,除了对称爆炸源外,还包含爆炸冲击波所引起的张裂源,以及破碎介质回落的拍击效应.在数学上,它们均可以用矩张量进行描述.

1.1 爆炸源

对于球对称的爆炸源,其震源矩张量为(何永锋等,2005a)

$$M_E = M_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中, $M_0 = \Delta V(\lambda + 2/3\mu)$ 为爆炸源矩, ΔV 为球对称爆炸源所引起的体积变化, λ 和 μ 为拉梅常数.

1.2 张裂源

水平方向张裂源的震源矩张量为

$$M_T = M_{TC} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda + 2\mu)/\lambda \end{bmatrix}, \tag{2}$$

式中， $M_{TC} = \delta A \lambda$ 为张裂源矩， δ 为张裂面的平均张裂位移(面积为 A)。

1.3 CLVD 源

CLVD 源的主轴沿垂直地表方向(z 轴)，与张应力方向一致，其震源矩张量为

$$M_C = M_{CLVD} \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

式中 M_{CLVD} 为补偿线性矢量偶极源矩。

2 介质速度模型

本文将分析爆炸源、张裂源和 CLVD 源在 3 种典型介质速度模型下的区域震相特征，以了解这 3 种源所激发的 Lg 波与介质速度模型的关系。图 2 所示的 3 种介质速度模型中，模型 1 为 Steven 模型(McLaughlin *et al*, 1988)，是一种地表高速模型；模型 2 和模型 3 为 Steven 速度模型的修改结果。模型 2 中地表 P 波速度低于上地幔 S 波速度，理论上讲，爆炸源在这样的速度模型中能够激发能量较大的 Lg 波。模型 3 中含有一个低速层，用来模拟 Lg 波。

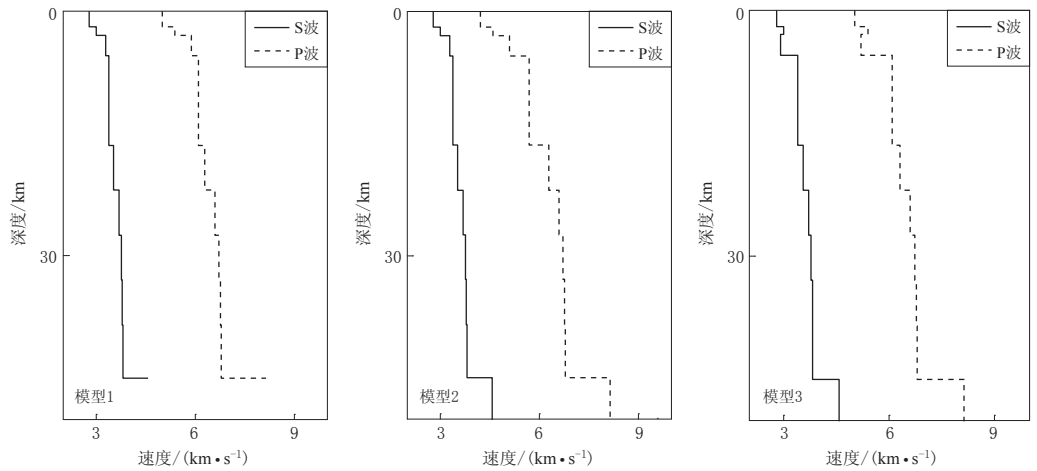


图 2 3 种介质速度模型下的 S 波和 P 波速度

Fig. 2 The velocities of S- and P-wave for the three velocity models

3 不同模型下的 Lg 波数值模拟

一个正常埋深的地下核爆炸的震源过程主要包括两部分：描述爆炸本身的纯爆炸源和由爆炸引起的层裂源(包括张裂源和 CLVD 源)。根据线性叠加原理，正常埋深的地下核爆炸的远场位移谱(垂向)可以描述为(Patton, 1991)

$$u(\omega) = \mathbf{G}(\omega, h_E) : \mathbf{M}_E(\omega) + \mathbf{G}(\omega, h_S) : \mathbf{M}_S(\omega), \tag{4}$$

式中：“：”表示内积计算； \mathbf{M}_E 为爆炸源矩张量； h_E 和 h_S 分别为爆炸源和层裂源的中心深度； \mathbf{G} 为相应的格林函数； \mathbf{M}_S 为描述层裂源的矩张量， $S=T, C$ 分别对应于张裂源和 CLVD 源。

本文采用 Chen(1993)基于广义反射系数方法的理论地震波形图方法，分别计算了基于 3 种介质速度模型的理论地震波形图。震源深度为 500 m，震源时间函数为 δ 函数，震中距为 300 km，得到的理论地震波形图(0—10 Hz)如图 3—5 所示。可以看出，CLVD 源在 3 种介质速度模型下都能够激发出能量足够大的 Lg 波，而爆炸源在相应模型下所激发的 Lg 波能量要远低于 CLVD 源，尤其在模型 1 和模型 3 下。可见爆炸源在地表高速模型下及含低速层模型下，在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低频 Lg 波的 S 波。这说明，该 S 波是由 CLVD 源对角分量的偏差激发所

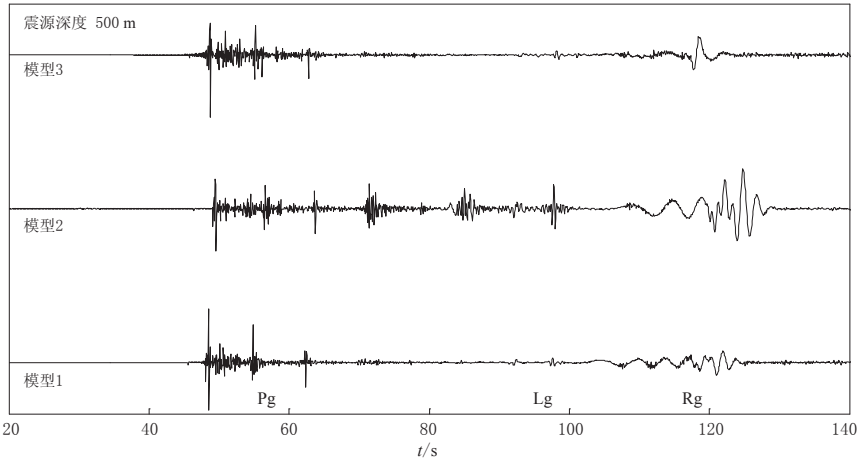


图 3 基于 3 种介质速度模型的爆炸源的理论地震波形图

Fig. 3 Theoretical seismograms excited by explosion source based on the three velocity models

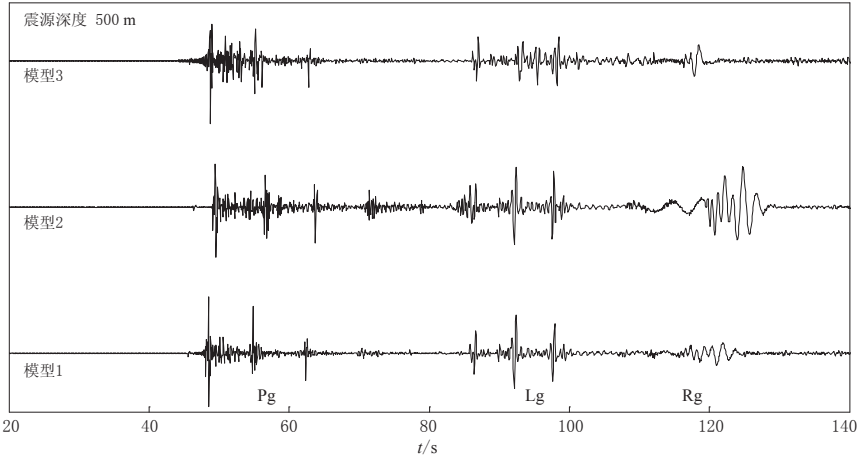


图 4 基于 3 种介质速度模型的张裂源的理论地震波形图

Fig. 4 Theoretical seismograms excited by tension crack source based on the three velocity models

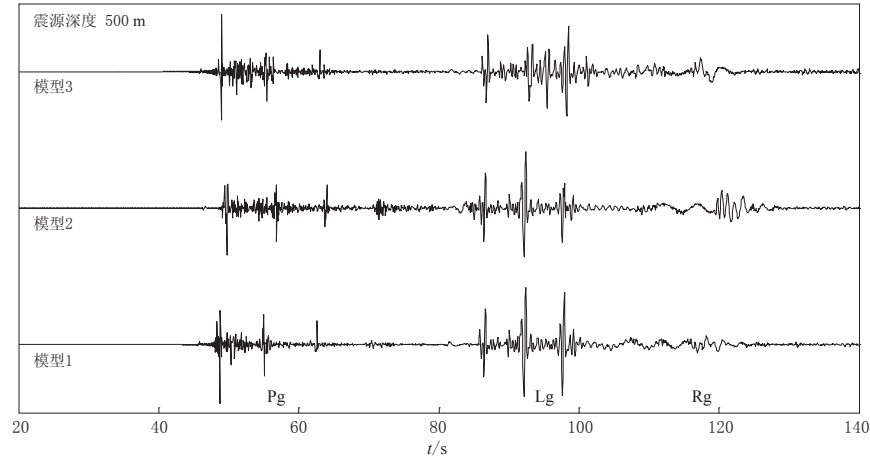


图 5 基于 3 种介质速度模型的 CLVD 源的理论地震图

Fig. 5 Theoretical seismograms excited by CLVD source based on the three velocity models

得，其速度要低于上地幔 S 波速度，这样就会在莫霍面发生反射，经过多次反射形成能量足够大的、稳定的波导。

对于爆炸源而言，震源激发所产生的 P 波在地表转换成 S 波，地表 P-S 转换波的能量基本上都泄露到地幔低速层中，因此所产生的 Lg 波的能量较弱。模型 2 之所以会激发一

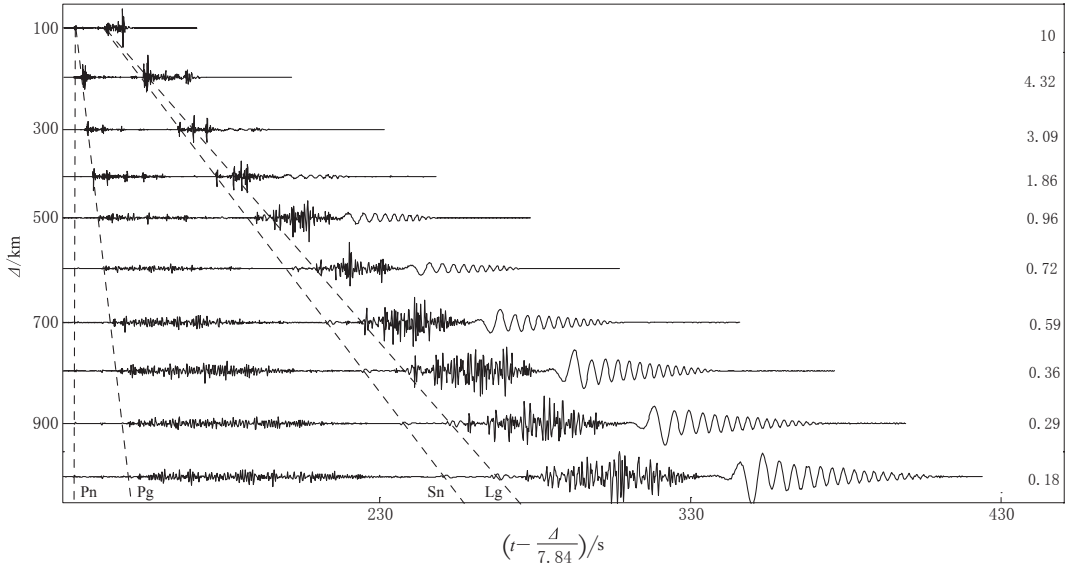


图 6 基于模型 1 的 CLVD 源所激发的不同震中距(Δ)上的理论地震波形图

以震中距为 100 km 的波形最大振幅为基准作归一化处理，归一化参数见图右侧；同时为满足

Pn 震相的起始时刻相同，将所有理论地震波形图的横坐标向左平移 $\Delta/7.84$ s

Fig. 6 Theoretical seismograms excited by CLVD source with different epicentral distances based on the model 1

Normalized processing is based on the maximum amplitude of waveforms with the epicentral distance 100 km, and normalized parameters are shown on the right side. At the same time, to satisfy the Pn phases having the same starting points, we define the abscissa axis of all theoretical seismograms with left-ward shift by epicentral distances divided by 7.84 seconds

定能量的 Lg 波,是因为该模型为地表低速模型。地表 P-S 转换波虽然能够在莫霍面反射、叠加形成波导,但其能量较弱,不能解释实际观测资料中富含 Lg 波的现象(何永锋等, 2015)。对于张裂源,其震源模型中也存在对角分量的偏差,但相对于 CLVD 源较小。3 种模型均可以产生少量的 Lg 波。

Lg 波是由地壳内多次反射的 S 波叠加形成的,对于天然地震来说, S 波源于震源剪切位错激发及 P-S 转换波。图 6 为模型 1 下 CLVD 源在不同震中距下所激发的理论地震波形图,可以看出 Lg 波的演化过程。其结果显示: P 波波列发育较丰富,主要由地壳内反射 P 波及 SV-P 转换波构成,而 P 波在地表转换的 P-S 波的能量在模型 1 下基本都泄露到地幔低速层中,这导致 Sn 波与 Lg 波列之间的 S 波很弱; CLVD 源对角分量偏差所激发的 S 波在地壳中经多次反射、叠加,并随震中距的增加形成能量很大的、稳定的 Lg 波波列,同时该 Lg 波表现出与天然地震所激发的 Lg 波不同的特性,如低谷点特征(Patton, Taylor, 1995; 何永锋等, 2005b)、Lg/Pg 波比判据失效等。理论及实践表明,低频 Lg 波是研究地下核爆炸震源特性的重要震相。

4 讨论与结论

本文利用合成理论地震波形图的方法,分析了地表高速模型、地表低速模型以及含有低速层模型下的爆炸源和层裂源的区域震相 Lg 波的特性。其中, CLVD 源由于对角分量存在偏差的特性,在激发 S 波方面发挥重要作用。在本文研究的 3 种介质速度模型中, CLVD 源均能激发出能量很大的 Lg 波。通过对 CLVD 源在不同震中距下所激发的理论地震波形图的分析,可以看出其对角分量偏差所激发的 S 波在地壳中干涉叠加形成 Lg 波波列的演化过程。本文的研究结果进一步支持了激发地下核爆炸低频 Lg 波的主要因素是伴随地下核爆炸层裂过程的 CLVD 源的观点。即使在地表低速模型中,纯爆炸源所激发的 Lg 波能量仍然很小。对于地下核爆炸而言,层裂源作为辅助震源模式是十分必要的,是区域乃至远场范围地下核爆炸地震波信号的重要二次源。本文结果对于地下核爆炸的震源物理机制和 Lg 波特性研究具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 何永锋,陈晓非,张海明. 2005a. 地下核爆炸 Lg 波的激发机制[J]. 地球物理学报, **48**(2): 367-372.
- He Y F, Chen X F, Zhang H M. 2005a. The excitation of Lg wave by underground nuclear explosions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(2): 367-372 (in Chinese).
- 何永锋,陈晓非,何耀峰,靳平. 2005b. 地下爆炸 Rg 波低谷点激发机理[J]. 地球物理学报, **48**(3): 643-648.
- He Y F, Chen X F, He Y F, Jin P. 2005b. Generation of null in Rg wave by underground explosions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **48**(3): 643-648 (in Chinese).
- 何永锋,赵克常,姚国政,张献兵,马裕然. 2011. 基于 Lg 波识别判据的特性分析[J]. 地震学报, **33**(6): 715-722.
- He Y F, Zhao K C, Yao G Z, Zhang X B, Ma Y R. 2011. Analysis on discriminants based on Lg wave[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(6): 715-722 (in Chinese).
- 何永锋,赵克常,张献兵,马裕然,王洋. 2012. 地下核爆炸地震波二次源特征[J]. 地球物理学报, **55**(5): 1742-1748.
- He Y F, Zhao K C, Zhang X B, Ma Y R, Wang Y. 2012. The characteristic of the waveform from the second source induced by underground explosion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(5): 1742-1748 (in Chinese).
- 何永锋,李锴,刘炳灿,姚国政,赵克常,张献兵,曾乐贵. 2015. 基于理论地震图方法的波导结构对地下核爆炸 Lg 波传播特性研究[J]. 地震学报, **37**(2): 257-265.

- He Y F, Li K, Liu B C, Yao G Z, Zhao K C, Zhang X B, Zeng L G. 2015. The characteristic of Lg waves induced by the underground nuclear explosions in the waveguides using frequency-wavenumber algorithm[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(2): 257–265 (in Chinese).
- Bouchon M. 1982. The complete synthesis of seismic crustal phases at regional distances[J]. *J Geophys Res*, **87**(B3): 1735–1741.
- Campillo M, Bouchon M, Massinon B. 1984. Theoretical study of excitation, spectral characteristics, and geometrical attenuation of regional seismic phases[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **74**(1): 79–90.
- Chen X F. 1993. A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space[J]. *Geophys J Int*, **115**(2): 391–409.
- Day S M, Rimer N, Cherry J T. 1983. Surface waves from underground explosions with spall: Analysis of elastic and non-linear source models[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(1): 247–264.
- Day S M, McLaughlin K L. 1991. Seismic source representations for spall[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **81**(1): 191–201.
- Gupta I N, Zhang T R, Wagner R A. 1997. Low-frequency Lg from NTS and Kazakh nuclear explosions: Observations and interpretation[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **87**(5): 1115–1125.
- Knopoff L, Randall M J. 1970. The compensated linear-vector dipole: A possible mechanism for deep earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **75**(26): 4957–4963.
- Masse R P. 1981. Review of seismic source models for underground nuclear explosions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **71**(4): 1249–1268.
- McLaughlin K L, Barker T G, Day S M, Shkoller B, Stevens J L. 1988. *Effects of Depth of Burial on Explosion and Earthquake Regional Seismograms: Regional Discrimination and Yield Estimation*[R]. S-CUBED report No. SSS-R-88-9844, Jolla, California.
- Minson S E, Dreger D S. 2008. Stable inversions for complete moment tensors[J]. *Geophys J Int*, **174**(2): 585–592.
- Patton H J. 1991. Seismic moment estimation and the scaling of the long-period explosion source spectrum[G]// *AGU Geophysical Monograph* 65: *Explosion Source Phenomenology*. San Francisco: AGU: 239–252.
- Patton H J, Taylor R S. 1995. Analysis of Lg spectral ratios from NTS explosions: Implications for the source mechanisms of spall and generation of Lg waves[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **85**(1): 220–236.
- Richards P G, Menke W. 1983. The apparent attenuation of a scattering medium[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(4): 1005–1021.
- Saikia C K. 1994. Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature: Modeling of Lg waves in eastern North America[J]. *Geophys J Int*, **118**(1): 142–158.
- Springer D L. 1974. Secondary sources of seismic waves from underground nuclear explosions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **64**(3–1): 581–594.
- Stump B W. 1985. Constraints on explosive sources with spall from near-source waveforms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(2): 361–377.
- Xie X B, Lay T. 1994. The excitation of Lg wave by explosions: A finite-difference investigation[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(2): 324–342.