

何永锋, 赵克常, 姚国正, 张献兵, 马裕然. 2011. 基于 Lg 波识别判据的特性分析. 地震学报, 33(6): 715-722.  
He Yongfeng, Zhao Kechang, Yao Guozheng, Zhang Xianbing, Ma Yuran. 2011. Analysis on discriminants based on Lg wave. *Acta Seismologica Sinica*, 33(6): 715-722.

# 基于 Lg 波识别判据的特性分析<sup>\*</sup>

何永锋<sup>1, \*</sup> 赵克常<sup>2)</sup> 姚国正<sup>1)</sup> 张献兵<sup>2)</sup> 马裕然<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100072 装甲兵工程学院基础部

2) 中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院

**摘要** Lg 波是检测、识别地下核爆炸的重要震相. 通常情况下, 地下核爆炸的低频段 Lg 波能量相对较强, 基于 Lg 波的识别判据在高频段表现较好. 然而在低频范围内却表现出难以用球对称爆炸源模式解释的现象, 如 Lg/Pg 判据在 1 Hz 附近失效等现象. 本文利用理论地震图方法, 分析了伴随层裂过程产生的主要辅助源——CLVD 源对 Lg 波低频成分的调制作用, 给出了基于 Lg 波的识别判据成功及失效的原因, 并将层裂过程视为输入扰动, 利用振型叠加原理, 进一步解释了基于 Lg 波识别判据特性的物理机制. 这对于更好地利用 Lg 波识别地下核爆炸, 具有较好的参考意义.

**关键词** 地下核爆炸 Lg 波 识别判据 CLVD 源

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.06.002 中图分类号: P315.02 文献标识码: A

## Analysis on discriminants based on Lg wave

He Yongfeng<sup>1, \*</sup> Zhao Kechang<sup>2)</sup> Yao Guozheng<sup>1)</sup>  
Zhang Xianbing<sup>2)</sup> Ma Yuran<sup>1)</sup>

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

2) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** Lg wave characteristic is widely used to discriminate underground nuclear explosions from earthquakes. In contrast, the high-frequency Lg/Pg discriminant appears to perform very well, but fails around 1 Hz. This phenomenon can not be explained by pure explosion source model, but the CLVD source appears to take a key role to explain it. In this paper, the effect of CLVD source on the performance of the discriminants based on Lg wave is studied by means of theoretical seismogram analysis. Considering the spall as an input of disturbance with special frequency, we proposed a physical mechanism of the performance of Lg/Pg based on the normal mode method. An understanding of the effect on Lg caused by CLVD source can be useful not only for improving the performance of existing regional discriminants, but also for exploring new discriminants.

**Key words:** underground nuclear explosion; Lg wave; discriminant; CLVD

\* 基金项目 国家自然科学基金项目(40874023)资助.

收稿日期 2011-01-13 收到初稿, 2011-05-23 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: [heyfeng@sina.com.cn](mailto:heyfeng@sina.com.cn)

## 引言

如何利用观测资料来区分地下核爆炸与天然地震是我们所关心的重要问题。自从实施地下核试验以来，基于地球物理方法的识别手段得到了较为深入、广泛的研究，许多种方法被提出来。通过对大量观测资料的分析和理论研究结果表明，基于 S 波、P 波的比对是研究识别判据的重要理论出发点(韩绍卿等, 2010; 潘常周等, 2007; Gupta *et al*, 2005; Bowers, Selby, 2009; Blandford, 1977; Douglas, Rivers, 1988; Dahlman, 1977)。Lg 波可被看作是大陆地壳内部传播的导波或高阶面波的叠加。在稳定的大陆地区，Lg 波十分发育，常常是区域地震图上幅值最大的震相，在震源特性分析、识别及当量估算方面，扮演着重要角色。

实际运用 Lg/Pg 识别判据的过程中，发现该判据随着频率的变化而变化(Gupta *et al*, 1992)。在高频处，地下核爆炸的 Lg/Pg 值通常要比天然地震的小，识别效果较好，但是在 1 Hz 附近却往往失效(Gupta *et al*, 2005; Taylor, 1989, 1996)。Lg 波高、低频段谱比判据，在某些区域发挥着较好的作用(Walter *et al*, 1995)。该现象很特殊，迄今为止，还没有找到具有说服力的理论模型来解释。

上述现象并不能用球对称爆炸源模式解释。越来越多的证据表明，地下核爆炸中的低频 Lg 波的激发主要源于 Rg 波的散射，爆炸震源的非对称性及伴随爆炸源的层裂源都有可能激发 Rg 波(靳平等, 1997, 1999; Patton, Taylor, 1995; 何永锋等, 2005a)。进而，其波谱表现出与天然地震很不相同的特征。本文利用理论地震图方法，通过对层裂源激发的 Lg 波谱特征的分析，解释了基于 Lg 波判据所表现出来的特性。这对于深入地理解地下核爆炸震源机制，具有较好的参考意义。

## 1 基于 Lg 震相的识别判据

理论上讲，天然地震要比相同量级的地下核爆炸激发更丰富的 S 波(靳平等, 1997; Press *et al*, 1962)。我们可以使用携带 S 波的参量，如短周期 S 波与短周期 P 波的振幅比、由 S 波测定的体波震级与由 P 波测定的体波震级之比等(Bowers, Selby, 2009; 潘常周等, 2007)来作为识别判据。基于 Lg 波的识别判据的理论依据同上，天然地震相对于等量级的地下核爆炸来说，会激发更丰富的 Lg 波，但却表现出很特殊的现象。其主要判据及其存在问题如下：

1) Lg/Pg。该判据随频率的变化而变化。在高频部，可以发挥较好作用，但在 1.0 Hz 附近却往往失效(Blandford, 1977; Gupta *et al*, 1992; Taylor, 1996)。图 1 为 Taylor 给出的不同频段 Lg/Pg 判据的识别能力示意图。结果可以明显看出，在高频段，分离效果很好，然而，在低频段( $<3.0$  Hz)重叠现象开始严重，尤其是在 1.0 Hz 附近，几乎失去识别能力，实际记录多数为低频信号，所以，该判据在 1.0 Hz 附近失效的特性，制约了该判据的应用。

2) Lg(1—2 Hz)/Lg(6—8 Hz)。经过对大量观测资料的分析，发现以 Lg 波的低、高频段的比值为判据，在某些区域，发挥着很好的作用(Walter *et al*, 1995)。判据的形式说明，地下核爆炸激发的高频 Lg 波要比天然地震低，然而，相应频谱段的 Pn 波谱比却不具备该特征。利用球对称爆炸源模型，显然难以解释上述现象。而从爆炸源的非对称性及其引发的源区附近的二次源寻找原因，不失为一种解决途径。

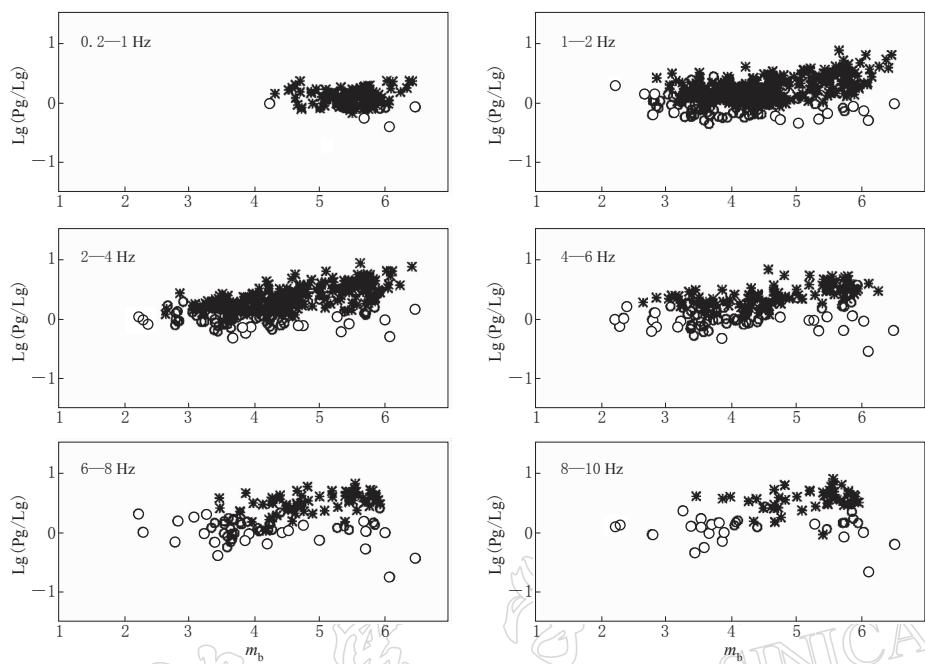


图 1 不同频段内 Pg/Lg 谱比随震级变化关系(Taylor, 1996). ○ 代表天然地震, \* 代表地下爆炸

Fig. 1 Logarithm of spectral Pg/Lg ratio for different frequency bands plotted as a function of magnitude (Taylor, 1996). ○ earthquake; \* underground explosion

对主要辅助源模式对面波、体波的影响进行分析, 是寻找答案的重要途径。该方法从震源物理本质出发, 理论依据充分、可靠。本文利用理论地震图方法, 分析了伴随层裂过程产生的主要辅助震源——补偿线性偶极源(compensated linear vector dipole, 简写为 CLVD)(Masse, 1981)对 Lg 波、P 波的影响, 以期寻找解释上述判据所表现出来的特性的原因。

## 2 CLVD 源模式的 Lg/Pg 特征分析

### 2.1 地下爆炸激发 Lg 波机制

地下核爆炸地震与天然地震的本质区别在于震源特性不同, 包括空间特性和时间特性的不同。地下核爆炸震源空间机制被认为主要是球对称压缩的, 而天然地震的空间机制是有限剪切破裂。地下核爆炸激发的区域震相 Lg 波由陷俘于地壳中的 S 波构成。理论上讲, 球对称爆炸源只激发 P 波, 地下核爆炸形成 Lg 波, 只能源自 P 波在地表的转换波 P-S 或由面波散射而成, 但这样形成的 Lg 波能量非常弱, 与实际观测结果不符(Xie, Lay, 1994)。而且, 这样的激发机制对速度模型较敏感, 如果爆炸源处 P 波速度大于上地幔 S 波速度(东哈萨克斯坦州(原苏联东哈萨克斯坦)地下核试验场区地壳就是这种地表高速模型(McLaughlin *et al*, 1988)), 这种情况下, 绝大部分的 P-S 波能量会泄露到下地幔, 不会陷俘于地壳中形成导波。

造成地下核爆炸激发 S 波的原因很多, 源区附近的构造应力释放是其主要原因。例如, 岩石块体的移动、应力释放及断层运动等; 伴随地下核爆炸产生的层裂现象会激发 SV

波；压缩波波前作用于非球形空腔几何体同样会产生剪切波(Gibson, 1994; 靳平等, 1997)；源区附近  $Rg$ -S 的散射现象, P 波波前作用于地球自由表面, 以及介质各向异性(靳平等, 1998), 都会激发 S 波. 上述任何一种具有合适慢度的 S 波, 都可能会陷浮于地壳中, 进而形成地下核爆炸中普遍观测到的区域优势震相  $Lg$  波. 有关这方面的工作很多, 目前多数学者认为地下核爆炸激发的低频  $Lg$  波主要源于地下爆炸产生的  $Rg$  波散射而来的,  $Rg$  波可能源于实际爆炸源偏离球对称的情况, 伴随层裂的 CLVD 源及介质的各向异性. 本文从 CLVD 源角度出发, 对  $Lg/Pg$  识别判据所表现出的特性进行分析.

地下核爆炸强地面记录中, 可观测到层裂现象. 近源区的矩张量反演结果也表明, 层裂可以很好地解释源时间函数的二次脉冲及矩张量对角分量的幅值偏差等现象. 对于多数地下核爆炸的层裂过程, 会伴随有逆倾滑断层形式的构造应力释放源, 这种源可以用 CLVD 来描述(Masse, 1981; Pattan, Taylor, 1995; 何永锋等, 2005b). Barker 和 Day (1990) 利用差分法数值模拟了地下核爆炸激发的 P 波和 S 波, 并与利用矩张量描述方法得到的结果进行了对比. 结果表明, 用一个单力偶源加上一个水平张裂源来描述地下核爆炸激发的地震波, 可以很好地模拟 P 波, 但是不能激发足够大的 S 波. 如果一个 CLVD 源加上张裂源, 就可以同时很好地模拟 P 波和 S 波. 更重要的一点是, 可以解释  $Lg$  波谱中的低谷点现象. 这表明 CLVD 源在激发区域震相  $Lg$  波的过程中扮演着重要角色, 越来越多的学者倾向于认为 CLVD 源是激发低频  $Lg$  波的主要因素之一.  $Lg$  波表现出来的特性, 显然与 CLVD 源对  $Lg$  波的影响机制相关.

## 2.2 $Lg/Pg$ 随频率变化特征

数值方法模拟计算不同源模型下的理论地震图, 是分析地下核爆炸的区域震相特征与震源机制关系的有力手段. 本文采用了水平层状地球模型中理论地震图的计算方法(Chen, 1993, 1999). 该方法在本质上与姚振兴的经典的广义反射-透射系数方法是一致的(Yao, Harkrider, 1983). 其优点是能够模拟出全波场震相.

基于东哈萨克斯坦州地壳速度模型(McLaughlin *et al*, 1998)下的爆炸源、CLVD 源激发的理论地震图(速度场)模拟结果(0—5 Hz), 震源深度分别为 100, 300, 500, 700, 900, 1 100 m 和 1 300 m, 震中距为 300 km, 如图 2、图 3 所示. 图中显示的理论地震图均为归一化后的结果, 归一化因子为对应于埋藏深度 0.1 km 理论地震图中  $Pg$  震相的最大振幅. 可

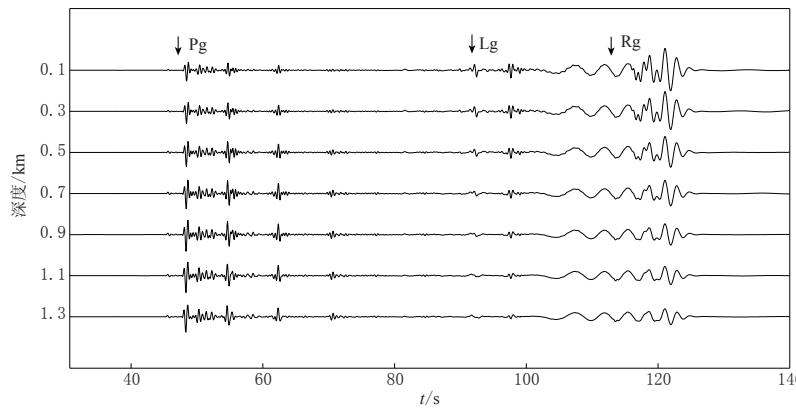


图 2 不同埋藏深度爆炸源(EXP)的垂向理论地震图(速度场)

Fig. 2 Synthetic vertical ground motion velocity due to EXP source buried at various depths

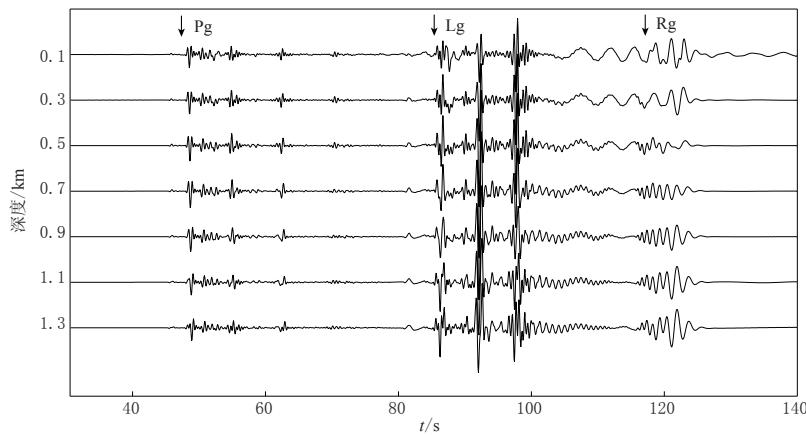


图 3 CLVD 源的垂向理论地震图(速度场)

Fig. 3 Synthetic vertical ground motion velocity due to CLVD source buried at various depths

以看出, 纯爆炸源激发的 Lg 波能量比较弱, 且随深度衰减较快。这是因为, 爆炸源激发的 P 波在地表的转换波 P-S 波能量基本上都泄漏到地幔低速层, 导致 Lg 波的能量很弱。

图 3 为相应的 CLVD 源激发的理论地震图。可以看出, Lg 波十分发育, 从能量角度来看, CLVD 源适合作为激发地下核爆炸低频 Lg 波的主要源, 其源的空间分布特征利于 S 波的形成, 即对角分量的偏差直接激发了 S 波。

激发地下核爆炸的 Lg 波的主要因素是伴随地下核爆炸层裂过程所普遍特有的辅助源模式, 这就使得其 Lg 波的表现与一般天然地震激发的 Lg 波不同, 这种不同必然会反映在频谱变化规律上。为此, 分别提取 P 波和 Lg 波段, 并计算了 Lg/Pg 谱比随频率的变化关系。图 4 为相应爆炸源波形的 Lg/Pg 谱比, 最上边及最下边曲线对应震源深度最浅及最深

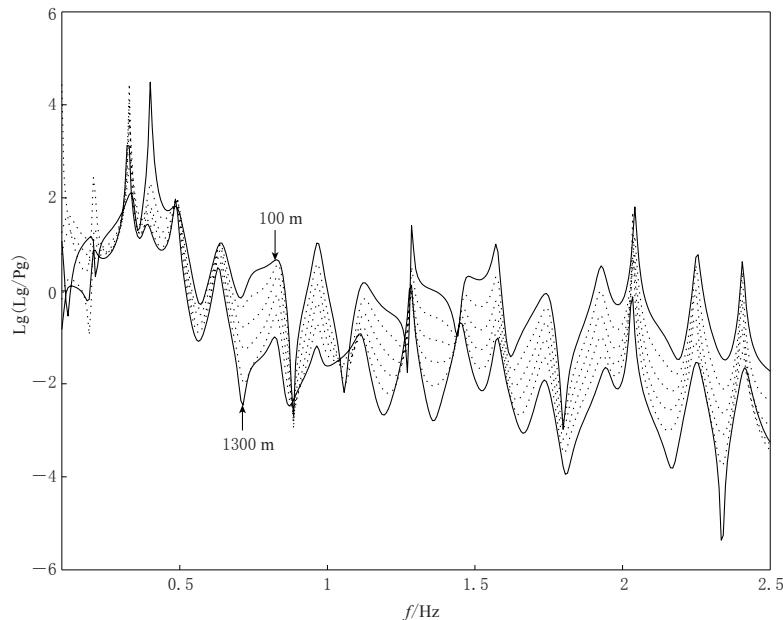


图 4 爆炸源(EXP)的 Lg/Pg 谱比随频率变化关系

Fig. 4 Logarithm of spectral Lg/Pg ratio due to EXP source plotted as a function of frequency

的谱比结果,而且100 m深的Lg/Pg谱比值比1300 m的Lg/Pg谱比值大(点线为介于100 m和1300 m之间的Lg/Pg波波谱比结果).需注意到,1—1.5 Hz的Lg/Pg谱比值普遍小于1.

图5为相应CLVD源波形的Lg/Pg谱比,对所有震源深度,Lg波幅值普遍要大于P波幅值,除具有与爆炸源结果相似的特征外.需要特别注意到的是,1—1.5 Hz谱比结果相对爆炸源的要大许多,说明伴随地下核爆炸的CLVD辅助源造成Lg波1.0 Hz附近能量增强.这可以解释Lg/Pg判据为何在1 Hz附近失效,也可以用来作为Lg波低、高频谱比识别判据成功的依据.需要说明的是,图5显示的Lg/Pg谱比随频率变化较小,与实际观测结果不符.这是一维模型过于简单造成的.

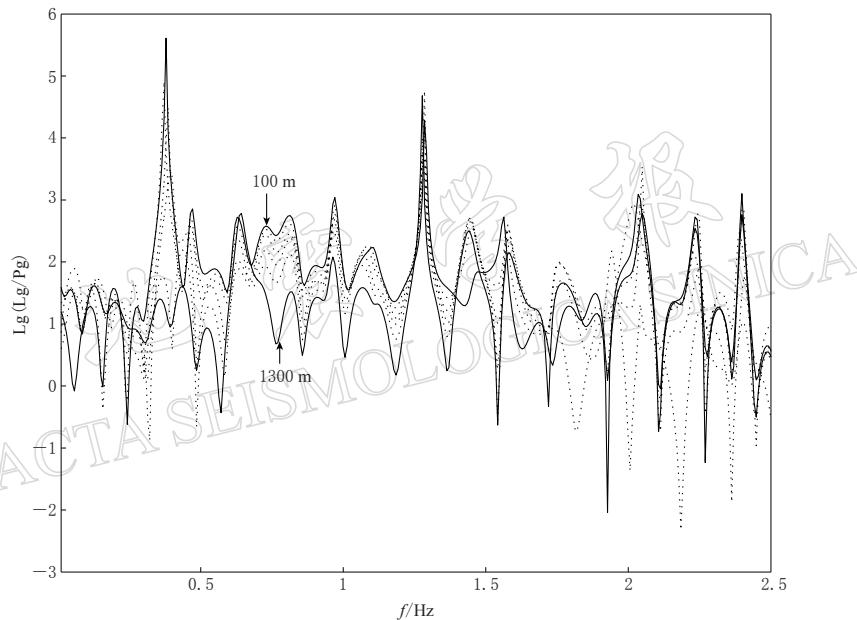


图5 CLVD源的Lg/Pg谱比随频率变化关系

Fig. 5 Logarithm of spectral Lg/Pg ratio due to CLVD source plotted as a function of frequency

一般情况下,地下核爆炸激发的Rg波的能量多集中在1 Hz附近,这与爆炸装置埋深以及伴随爆炸的2次源息息相关.本文在CLVD源模型下,给出了导致地下核爆炸的Lg/Pg谱比在1.0—1.5 Hz范围内增大的一种原因,其实际物理机制,有待于进一步研究.多数地下核爆炸的层裂周期在1.0 s左右(Patton, 1988).该周期可以看作爆炸起始与层裂物质回拍地球介质的时间间隔.笔者认为,层裂过程可以看作策动周期为1.0 s左右的输入扰动,该扰动会对频率为1.0 Hz左右的本征振型具有加强作用.本征振型的叠加构成Rg面波,而Rg面波的散射是Lg波形成的主要因素,这可以从Lg波谱中“遗传”了Rg波谱中的低谷点这一事实得到印证(Patton, Taylor, 1995).同样,上述加强作用也会“遗传”给Lg波,从而使得1 Hz左右的Lg波能量得到加强.

需要说明的是,不存在层裂的地下核爆炸,如果其爆炸源的非球对称机制与CLVD源机制相似,也会存在类似Lg/Pg谱比的变化规律,也会导致基于Lg波判据的特殊性.

### 3 讨论与结论

任何一种识别判据都需要合适的震源理论来做支持, 否则, 它的局限性可想而知。本文利用合成理论地震图方法, 分析了东哈萨克斯坦州地壳速度模型下的爆炸源、CLVD 源对地下核爆炸区域震相的影响。从 CLVD 源激发的理论地震图以及 Lg/Pg 谱比的变化规律可以看出, 在低频段, CLVD 源激发相对较强的 Lg 波, 这可以作为解释基于 Lg 波的识别判据成功及失效的一种原因。尽管该结果是从一维模型得到的, 但是, 从震源物理机制出发来寻求解释, 其途径是正确的, 所得结论对更好地理解基于 Lg 波的识别判据以及进一步开发基于 Lg 波的识别手段和利用 Lg 波估计当量, 都具有较好的参考意义。地球可以近似为一封闭系统, 本征振型函数构成完备系, 球对称爆炸可视为激发点源, 并激发系统本征振动。层裂扰动源对低频本征振型具有加强作用, 利用振型叠加原理, 该加强作用可以作为 Lg 波低频能量加强的物理机制。该观点比较新颖, 还有待于通过对大量资料的分析、研究进一步证实。

### 参 考 文 献

- 韩绍卿, 李夕海, 安跃文, 刘代志。2010. 核爆、化爆、地震识别综述[J]. 地球物理学进展, **25**(4): 1206–1218.
- 何永锋, 陈晓非, 张海明。2005a. 层裂对区域震相 Lg 波的影响[J]. 地震学报, **27**(3): 309–316.
- 何永锋, 陈晓非, 张海明。2005b. 地下核爆炸 Rg 波低谷点的激发机理[J]. 地球物理学报, **48**(3): 643–650.
- 靳平, 徐国明, 楼沕涛。1997. 受低频动态正压力加载的椭球腔的地震矩表示及其在无限介质中辐射的地震波[J]. 地震学报, **19**(5): 2–11.
- 靳平, 徐国明, 楼沕涛。1998. 点力源在横向各向同性介质中激发的弹性波[J]. 地球物理学报, **41**(4): 525–536.
- 靳平。1999. 中国地下核爆炸近区地震观测与总结[R]. 西安: 西北核技术研究所: 25–58.
- 潘常周, 靳平, 王红春。2007. P/S 震相幅值比判据对低震级事件的适用性检验[J]. 地震学报, **29**(5): 521–528.
- Barker T G, Day S. 1990. An analysis of the effects of spall on regional and teleseismic waveforms using two-dimensional numerical modeling of underground explosions[C]// *System Science and Software* (Report No: SSS-TR-90-11536). Washington: 88–100.
- Blandford R R. 1977. Discrimination between earthquakes and underground explosions[J]. *Ann Rev Earth Planet Soc*, **5**: 111–122.
- Bowers D, Selby N D. 2009. Forensic seismology and the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty[J]. *Ann Rev Earth Planet Soc*, **37**: 209–236.
- Chen X F. 1993. A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space[J]. *Geophys J Int*, **115**: 391–409.
- Chen X F. 1999. Seismogram synthesis in multi-layered half-space part I. Theoretical formulations[J]. *Earthquake Research in China*, **13**(2): 149–174.
- Dahlman O. 1977. *Monitoring Underground Nuclear Explosions*[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company: 134–149.
- Douglas A, Rivers D W. 1988. An explosion that looks like an earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **78**(2): 1011–1019.
- Gibson R L. 1994. Radiation from seismic sources in cylindrical cavities[C]// *16<sup>th</sup> Seismic Research Symposium*. Thornwood, New York.
- Gupta I N, Chan W W, Wagner R A. 2005. Regional source discrimination of small events based on the use of Lg wave-train[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **95**(1): 341–346.
- Gupta I N, Chan W W, Wagner R A. 1992. A comparison of regional phases from underground nuclear explosions at

- East Kazakh and Nevada Test Sites[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **82**(1): 352–382.
- Masse P R. 1981. Review of seismic source models for underground nuclear explosions[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **71**(4): 1249–1268.
- McLaughlin K L, Barker T G, Day S M. 1988. Effects of depth of burial on explosion and earthquake regional seismograms: Regional discrimination and yield estimation (Report No: SSS-R-88-9844)[R]// *S-CUBED Report*. California: Jolla.
- Patton H J. 1988. Source models of the Harzer explosion from regional observations of fundamental-mode and higher mode surface waves[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **78**(3): 1133–1157.
- Patton H J, Taylor R S. 1995. Analysis of Lg spectral ratios from NTS explosions: Implications for the source mechanisms of spall and the generation of Lg waves[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(1): 220–236.
- Press F, Dewart G, Gilman R. 1962. Release of tectonic strain by underground explosions[J]. *J Geophys Res*, **67**(1): 337–343.
- Taylor S R. 1989. Regional discrimination between NTS-explosions and earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **79**(4): 1142–1176.
- Taylor S R. 1996. Analysis of high-frequency Pg/Lg ratio from NTS explosions and western U S earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**(4): 1042–1053.
- Walter W R, Myeda K M, Patton H J. 1995. Phase and spectral ratio discrimination between NTS earthquakes and explosions. Part 1: Empirical observations[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(4): 1050–1067.
- Xie X B, Lay T. 1994. The excitation of Lg waves by explosions: A fine difference investigation[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**(2): 324–342.
- Yao Z X, Harkrider D G. 1983. A generalized reflection-transmission coefficient matrix and discrete wavenumber method for synthetic seismograms[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **73**(6): 1685–1699.