

地下爆炸 Lg 波地震矩与源地震矩关系数值模拟

王旭亮¹ 靳平^{2,*} 王晓明¹ 刘哲函¹ 唐伟¹ 徐妍妍¹ 李俊杰¹

1 禁核试北京国家数据中心和北京放射性核素实验室, 北京 100085

2 西北核技术研究所, 西安 710024

摘要: 针对地下爆炸当量估算问题, 基于理论地震图仿真和 Lg 波谱反演方法, 系统研究了不同场地中埋深、震源成分 (ISO 源、CLVD 源、DC 源及其组合) 对源地震矩 $M_0(\text{source})$ 与 Lg 波地震矩 $M_0(\text{Lg})$ 关系的影响。通过定量标定 $M_0(\text{source})/M_0(\text{Lg})$ 比值, 结果表明两者比值具有显著的场地依赖性: 朝鲜场地比值普遍高于 0.2, 而内华达场地低于 0.2。CLVD 和 DC 源等次生震源会显著降低朝鲜场地的 Lg 波激发效率 (降幅可达 50%), 同时埋深增大会减弱 P-S 转换效应, 导致比值进一步减小。进一步的, 结合震源模型建立了基于 Lg 波地震矩的当量估算方法, 并以朝鲜第六次核试验数据为例进行了验证。

关键词 源地震矩 Lg 波 震源模型 当量估算 理论地震图

中图分类号: P315 收稿日期: 2025-09-06

Numerical Simulation on the Relationship between Seismic Moment of Lg Wave and Source of Underground Explosion

WANG Xuliang¹ JIN Ping^{2,*} WANG Xiaoming¹ LIU Zhehan¹ TANG Wei¹ XU Yanan¹ LI Junjie¹

1) CTBT Beijing National Data Center and Beijing Radionuclide Laboratory, Beijing 100085, China

2) Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

Abstract Regarding the estimation of yield of underground explosions, this study systematically investigates the influence of burial depth, source components (ISO, CLVD, DC, and their combinations), and site conditions on the relationship between the source seismic moment $M_0(\text{source})$ and the Lg-wave seismic moment $M_0(\text{Lg})$. Based on theoretical synthetic seismogram simulations and Lg-wave spectral inversion methods, we quantitatively calibrated the $M_0(\text{source})/M_0(\text{Lg})$ ratio for different test sites. The results reveal significant site dependence: the ratio generally exceeds 0.2 for the North Korean site but falls below 0.2 for the Nevada site. Secondary sources (e.g., CLVD and DC) reduce Lg-wave excitation efficiency in the North Korean site by up to 50%, while increased burial depth weakens P-S conversion effects, further decreasing the ratio. By

第一作者: 王旭亮, 助理研究员, 主要从事禁核试核查地震监测方面研究。e-mail: wang.xuliang@ndc.org.cn.ORCID:0009-0005-0153-9002; *

通讯作者: 靳平, 研究员, 主要从事禁核试核查地震监测方面研究。e-mail: jinping@nint.ac.cn

integrating a seismic source model, we established a yield estimation method based on M_0 (Lg) and validated it using data from North Korea's sixth nuclear test.

Keywords: source seismic moment; Lg wave; source model; yield estimation; synthetic seismogram

引言

估算地下爆炸的当量一直是禁核试核查地震监测领域关注的热点问题 (Adushkin,2001;Jin et al.,2019;John et al.,1971;Pasyanos and Myers,2018), 目前常用的当量估算方法有基于统计结果的震级-当量关系 (John et al.,1971;Marshall et al.,1971;Zhao et al.,2013)、基于震源模型的台网平均 P 波频谱法 (Murphy and Barker,2001)和基于区域震相的振幅谱反演 (Sereno et al.,1988;Xie,1993;靳平等,2004)等方法。其中, 振幅谱反演方法根据 Pn 波或 Lg 波震相幅值反演得到事件的地震矩, 结合震源模型 (Denny and Johnson,1991;John et al.,1971) 中的地震矩-当量关系来估算当量。由于震源模型中的折合位移势本质上是距离归一化的 Pn 波位移势, 因此利用 Pn 波得到的源地震矩可以直接代入经典的震源模型进行当量估算。但实际上 Pn 波的几何扩散受上地幔速度梯度等因素的影响较为复杂, 反演得到的源地震矩不确定度较大。另外通过波形反演等方法反演事件震源机制 (徐志双等,2025;万永革, 2024;Herrmann,1995;Zhu and Ben-Zion,2013)也可以得到源地震矩, 但由于要计算格林函数, 所需时间较长、耗费计算资源较大。而 Lg 波作为区域震相中幅值最大、最稳定的震相 (何静等,2017), 利用其振幅谱可以快速反演得到 Lg 波地震矩, 结果也相对稳定。

因此通过标定 Lg 波地震矩与源地震矩关系, 可以快速确定地下爆炸地震矩和矩震级, 进一步结合震源模型实现对当量的快速估算。但目前来看, Lg 波地震矩与源地震矩的关系并不明确。Sereno et al(1988)曾对斯堪的纳维亚的工业爆破进行了研究, 得到 $M_0(\text{Lg}) \approx 0.27M_0(\text{exp})$, 但这一结论对其他核试验场地并不一定适用。本文以朝鲜和内华达核试验场地为例, 通过仿真不同情况下的理论地震图并反演 Lg 波地震矩, 对地下爆炸 $M_0(\text{Lg})/M_0(\text{exp})$ 关系进行了标定, 研究了源区介质、埋深和源成分等因素对两者关系的影响, 进而建立起基于 $M_0(\text{Lg})$ 的当量估算方法。

1 方法

1.1 Lg 波地震矩反演方法

根据 Xie (1993), 地下爆炸或地震事件在特定台站上的 Lg 波幅值谱可以表示为:

$$A(f) = S(f)G(\Delta) \exp\left(-\frac{\pi f \Delta}{Q(f)v}\right) X(f)r(f) \quad (1)$$

其中 $A(f)$ 为 Lg 波位移谱, $S(f)$ 为源频谱, Δ 为震中距 (km), $X(f)$ 表示场地效应, $r(f)$ 为随机干扰, G 表示几何扩散且 $G = (\Delta_0 \Delta)^{-1/2}$, Δ_0 为参考距离, 可取 100km, v 为 Lg 波群速度 (km/s), $Q(f) = Q_0 f^\eta$, 其中 Q_0 为 1Hz 时传播路径上的品质因子, η 为的频率指数。

对于地震事件, 源频谱可以表示为 (Street et al.,1975):

$$S^{eq}(f) = \frac{M_0}{4\pi\rho v_s^3} \frac{1}{1+f/f_c^2} \beta \quad (2)$$

其中 M_0 为地震矩($\text{N} \cdot \text{m}$), f_c 为源拐角频率, ρ 、 v_s 分别为源区介质密度 (kg/m^3) 和 S 波速度 (km/s)。

对于地下爆炸, Sereno (1988)提出了一种简化的 MM71 模型:

$$S^{exp}(f) = \frac{M_0}{4\pi\rho v_s^3} \frac{1}{[1+(1-2\beta)f^2/f_c^2 + \beta^2 f^4/f_c^4]^{1/2}} \quad (3)$$

其中 $\beta=4v_p^2/v_s^2$ 。

根据 (1) 式, 对某一特定事件, 可以得到第 i 个台站上实际观测到的 Lg 谱在第 j 个频率采样点与理论值的误差 (τ 为 Lg 波平均走时):

$$d_{ij} = \ln \frac{A_i(f_j)\sqrt{A_0\Delta_i}}{S(f_j)} + \frac{\pi f_j^{1-\eta_i} \tau_i}{Q_{0i}} \quad (4)$$

利用 (4) 式可以将反演问题转化为求参数 $m=[M_0^{\text{Lg}}, Q_0, f_c, \eta]$ 的最优解, 使得误差 d_{ij} 最小。进一步的, (4) 式可转化为求解下列方程:

$$-G\Delta m = \Delta d \quad (5)$$

其中 G 为位移谱对四个参数的偏导数矩阵, 对地震事件:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_{ij}}{\partial Q_{0i}} = -\frac{\pi f_j^{1-\eta_i}}{Q_{0i}^2} & \frac{\partial d_{ij}}{\partial \eta_i} = -\frac{\pi f_j^{1-\eta_i} \tau_i}{Q_{0i}^2} \ln f_j \\ \frac{\partial d_{ij}}{\partial \ln M_0} = -1 & \frac{\partial d_{ij}}{\partial f_c} = -\frac{2f_j^2}{f_j^2 + f_c^2} \frac{1}{f_c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于地下爆炸, 则有:

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial f_c} = \frac{(2\beta-1)f^2/f_c^3 + 2\beta^2 f^4/f_c^5}{(1+(1-2\beta)f^2/f_c^2 + \beta^2 f^4/f_c^4)} \quad (7)$$

对于 (5) 式的求解, 常用的有梯度下降算法、高斯牛顿法等。基本原理是预设一组初始解 m_0 , 代入 (5) 式得到 Δm , 令 $m_1=m_0+\Delta m$, 反复迭代直到 $|\Delta m|$ 小于预设的误差值, 即可得到最优化参数。Xie (1993) 反演了单次事件-多台的情况, 靳平等 (2004) 反演了多台-多事件的情况。

在实际中, 当预设的初始解 m_0 离最优解 m_i 较远时, 高斯牛顿算法往往不能收敛, 因此我们采用 Levenberg-Marquardt 方法, 即求解 (5) 式时引入阻尼因子 λ , 使得:

$$\Delta m = -(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T \Delta d \quad (8)$$

当 $\lambda=0$ 时, L-M 方法退化成高斯牛顿算法, 较大时, 则近似于梯度下降算法。

1.2 Q 值反演方法

一般地, 反演 Lg 波 Q 值的方法有单台法 (Xie and Nuttli,1988)、双台法 (Xie and Mitchell,1990) 和反双台法 (Chun et al.,1987) 等。本文仿真时采用的是一维层状速度模型, 因此当震源深度固定时, 利用双台法反演出两个台站之间路径的 Q 值, 即可视为震源到任意台站路径上的 Q 值。双台法的原理为: 当有两个台站记录到同一次事件的 Lg 波信号时 (假设两个台站与事件位于同一个大圆弧路径上), 利用 (1) 式可以得到它们的位移频谱比值。类似于 Xie(2002), 记 D 为 (忽略场地效应和随机干扰):

$$D = \frac{v}{\pi(\Delta_j - \Delta_i)} \ln \left(\sqrt{\frac{\Delta_j}{\Delta_i}} \frac{A_i}{A_j} \right) = \frac{f}{Q} \quad (9)$$

结合 Lg 波 Q 值定义 (Mitchell,1980): $Q=Q_0 f^n$, 则 D 与 Q 值在对数域满足下面的线性关系:

$$\ln D = -\ln Q_0 + (1 - \eta) \ln f \quad (10)$$

利用 (10) 式对观测数据进行拟合, 即可得到两个台站之间传播路径上的 Q 值。

2 理论波形标定结果

理论地震图仿真采用 Zhu 和 Rivera (2002) 基于频率波数积分方法开发的 fk 软件, fk 中可以以地震矩张量的形式设置震源。一般的, 地震矩张量 M 可以分解为各向同性源 (ISO)、线性补偿偶极源 (CLVD) 和双力偶源 (DC), 如下式所示:

$$M = M_{ISO} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + M_{DC} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + M_{CLVD} \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

在仿真时, 先设置好 ISO 源标量地震矩大小, 再根据情况设置次生震源相对强度, 利用 (11) 式得到震源的全矩张量, 并根据各分量计算总的地震矩强度, 如下式所示:

$$M_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 M_{ij}} \quad (12)$$

对于地下爆炸, 埋深一般与当量成比例, 因此本文通过假设不同当量研究埋深的影响。对于震源成分, 首先考虑 “ISO+CLVD” 源情况, 其中 CLVD/ISO 源相对强度用 F_{CLVD} 表示。

我们仿真了不同当量下的理论地震图, 假设当量分别为 10kt, 100kt, 1000kt 和 10000kt, 取比例埋深 $120m/kt^{1/3}$, 则对应的埋深分别为 0.26km, 0.6km, 1.2km 和 2.6km, 相应的地震矩可以根据 Denny et al (1991) 提出的震源模型 (DJ91) 和表 1 给出的源区介质参数得到, 其中内华达场地模型 (NTS) 参考 Stevens et al (1986), 朝鲜场地模型 (KOR) 采用 Ford 2009 模型 (Ford et al.,2009), 同时取 F_{CLVD} 分别为 0,0.3,0.5。

表 1 朝鲜和内华达场地速度模型 (部分)

Table 1 velocity models for North Korea and Nevada sites (partial)

朝鲜部分速度模型				内华达部分速度模型			
Layer/km	VS/km/s	VP/km/s	$\rho/g/cm^3$	Layer/km	VS/km/s	VP/km/s	$\rho/g/cm^3$
1	3.09	5.35	2.57	0.5	1	2	1.7
8	3.35	5.81	2.66	1	2	3.3	2.1
20	3.62	6.27	2.78	1.5	2.7	4.5	2.4
∞	4.37	7.91	3.17	1	3.4	5.9	2.75
				8	3.52	5.96	2.78
				9	3.61	6.11	2.8
				10	3.76	6.37	2.84

图 1 给出了朝鲜场地模型下, 埋深为 0.26km 时震中距为 400--1000km 台站上的仿真波

形, 红色表示用 3.0~3.6km/s 速度窗截取的 Lg 波波形, 图中可以看到明显的 Rg 震相。

利用截取的波形, 基于上文“双台法”反演 Lg 波 Q 值。为保证反演结果的准确性, 将不同震中距上的两个台站组成一个台站对, 对其 D 值叠加取平均作为反演的观测数据。选取台站对参照如下原则: 1.根据 (9) 式的物理意义, D 值不能为负, 因此当两个台站在某频率点 D 值为负时, 在该频率点舍去该台站对比值, 只考虑其他台站对的结果; 2.由于速度模型为层状介质, 不同台站对之间的 Lg 波位移谱比值趋势应该相同, 因此将偏离整体结果较大的台站对舍去。依据上述原则对不同震中距上的台站自由组合, 取平均结果保证 Q 值反演结果的准确性和稳定性。

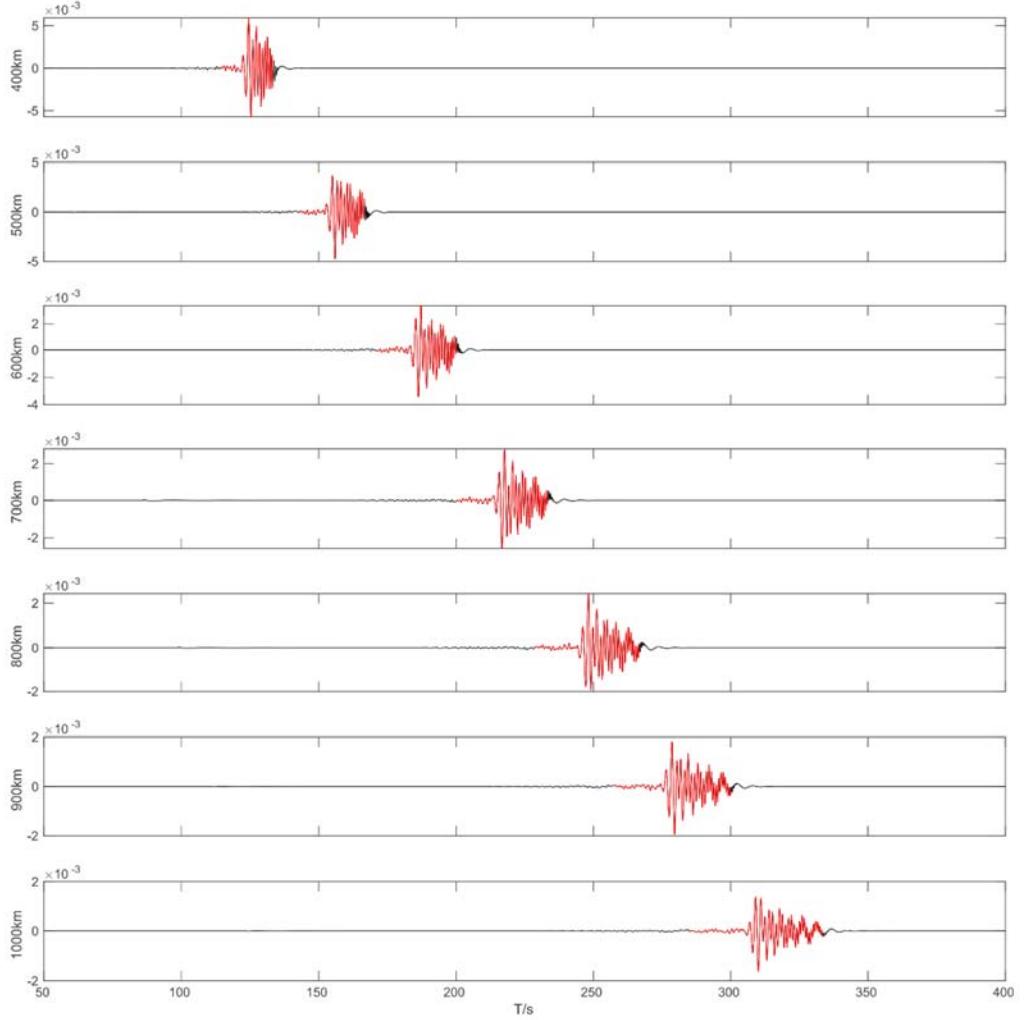


图 1 纯 ISO、埋深 0.26km 时, 400--1000km 震中距上的理论地震图, 红色为截取的 Lg 波, 速度窗口为 3--3.6km/s

Fig.1 With pure ISO and a depth of 0.26 km, theoretical seismogram at epicentral distances of 400 - 1000 km, the red curve represents the extracted Lg wave when the velocity window is 3 - 3.6 km/s.

对截取的仿真 Lg 波形做 4096 点快速傅里叶变换, 并取 10 点光滑后得到位移谱。对位移谱进行抽样, 类似于 Xie (2002), 抽样频带为 0.2—3.6Hz。计算各台站对的振幅谱比值, 为保证结果准确性, 将 5 组位移谱比值在相应的频率上叠加并取均值, 最后利用 (10) 式进

行拟合, 观测值和理论曲线如图 2 所示。

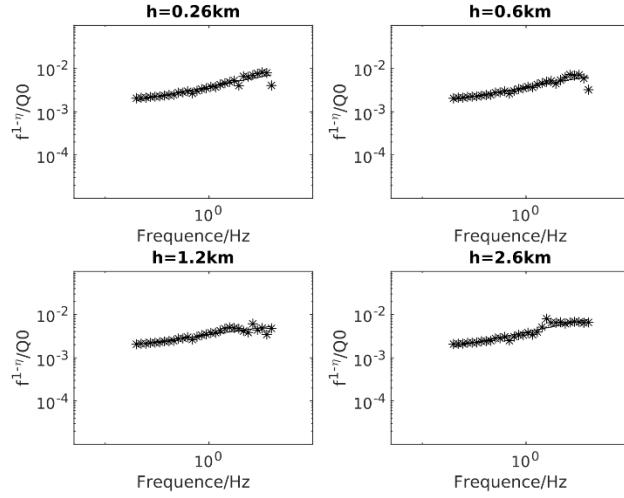


图 2 不同埋深时, Lg 波频谱比值随频率的变化, 星号表示观测值, 直线为拟合结果
 Fig.2 the Lg wave spectrum ratio with frequency at different burial depths. Asterisks indicate observed values, and straight lines indicate fitting results.

根据图 2 中的拟合结果, 我们得到传播路径上的 Q 值 (以埋深 0.26km 为例):

$$Q=259f^{0.5}, \quad 0.2Hz < f < 3.6Hz \quad (13)$$

根据双台法得到的 Q 值, 结合上节中 Lg 波谱反演方法进一步反演 Lg 波地震矩, 结果如图 3 所示。其中星号为各台站得到的 Lg 波地震矩, 直线表示源地震矩 ($2.8 \times 10^{15} N \cdot m$)。可以看出, 不同震中距上反演得到的 $M_0(Lg)$ 相对稳定, 说明了反演方法的合理性。图 3 下图给出了源拐角频率 f_c 的反演结果, 注意这里的 f_c 为视拐角频率。

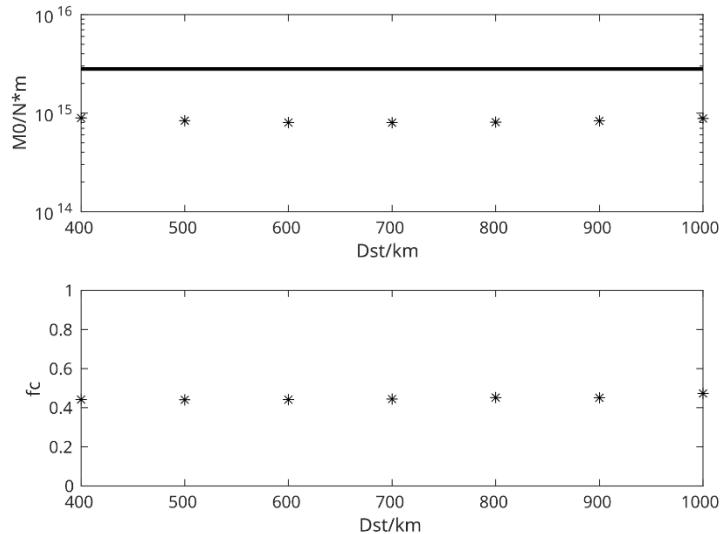


图 3 纯 ISO, 埋深 0.26km 时, 反演得到的 Lg 波地震矩及视源拐角频率, 直线表示源地震矩
 Fig.3 With pure ISO and a burial depth of 0.26 km, the Lg seismic moment and apparent source corner frequency obtained from inversion, with the straight line representing the source seismic moment.

按照以上步骤, 我们反演了不同埋深和 F_{CLVD} 值情况下的 Lg 波地震矩, 对不同场地, $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 与 F_{CLVD} 值关系如图 4 所示。可以看出, 对于朝鲜场地, 引入 CLVD 源后, $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 出现明显下降, 表明 CLVD 源会减弱 Lg 波的幅值, 并且在震源埋深较浅时, 这种减弱作用会随着 CLVD 源相对强度的增强而增强, 埋深较大时, CLVD 源的影响不再明显。对于内华达场地, 震源相对强度的影响不大, 不同源成分和埋深时的 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 比值接近。

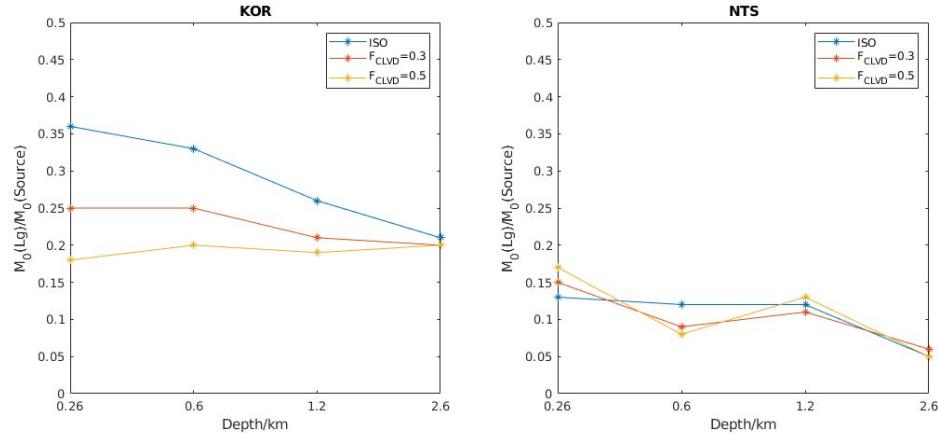


图 4 ISO+CLVD 源时, 不同场地 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 与 F_{CLVD} 值及埋深关系

Fig.4 Relationship between $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ and F_{CLVD} values and burial depth for different sites when using ISO+CLVD sources

只有 ISO 和 DC 源情况下的反演结果如图 5 所示, DC 源的相对强度可以用 F_{DC} 表示, 其定义为 $F = M_{DC}/M_{ISO}$, 对 F_{DC} 因子取 0.3—0.6。对于 KOR 场地, 相比于纯爆炸源情况, DC 源存在时 $M_0(Lg)$ 也出现明显下降, 但 DC 源对 Lg 的减弱作用没有 CLVD 源明显, 同时这种减弱作用也随着埋深增加而减小。对于 NTS 场地, DC 源会较轻微的减弱 $M_0(Lg)$ 。

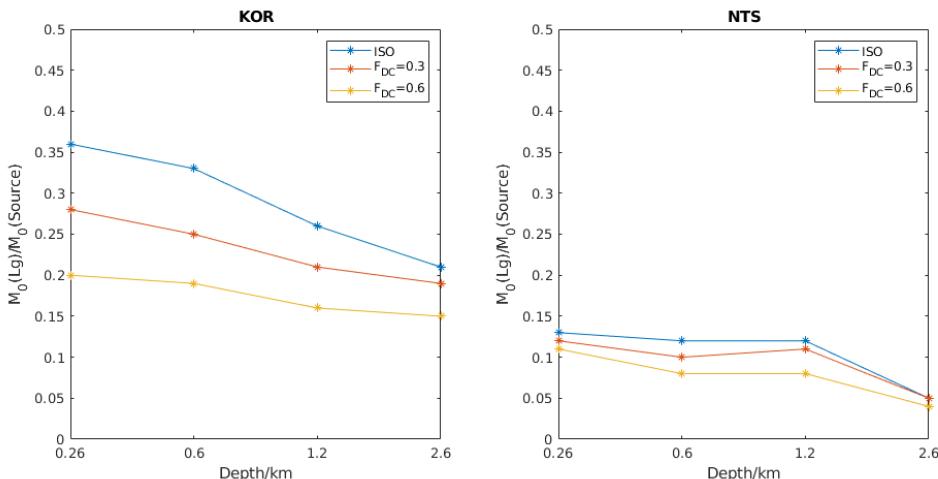


图 5 ISO+DC 源时, 不同场地 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 与 F_{DC} 值及埋深关系

Fig.5 Relationship between $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ and F_{DC} values and burial depth for different sites when using ISO+DC sources.

进一步考虑 ISO+CLVD+DC 源的情况, 设 $F_{DC}=0.3$, 反演结果如图 6 所示。结合图 4、图 5, 对于 KOR 场地, DC 和 CLVD 源共同作用进一步减弱了 Lg 波强度, 使得 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 比值相比单一次生震源的结果都要小。对于 NTS 场地, 次生震源的影响仍不明显, $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 比值整体相对 KOR 场地较小。

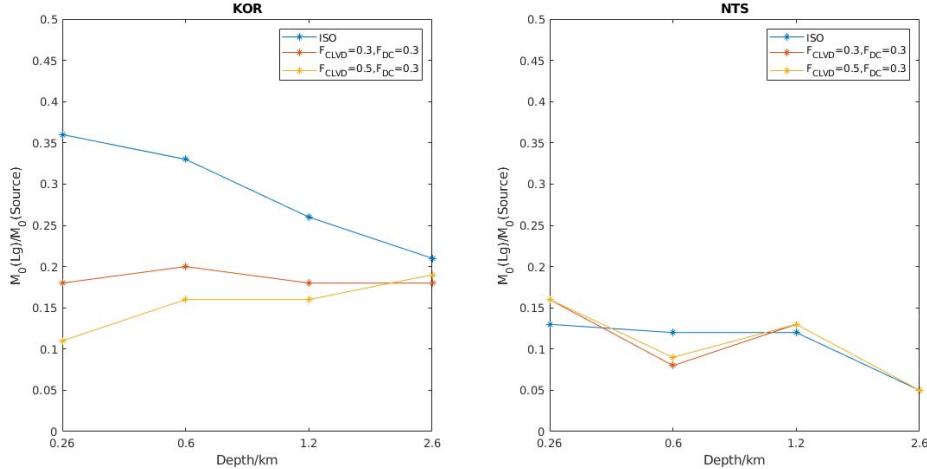


图 6 ISO+CLVD+DC 源时, 不同场地 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 与 K 值及埋深关系

Fig.6 Relationship between $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ and F_{CLVD} values and burial depth for different sites when using ISO+CLVD+DC sources

3 实际数据验证结果

本节根据前文结果, 利用 Lg 波地震矩估算朝鲜 2017 年核试验 (Kor17) 当量。反演 Lg 波地震矩所用地震数据主要来源于中国数字地震台网。去除幅值明显不合理的台站后, 从中筛选出震中距在 5° — 10° 范围内、Lg 波发育较好的台站波形作为反演所用数据。部分台站分布和 Kor17 事件位置如图 7 所示。

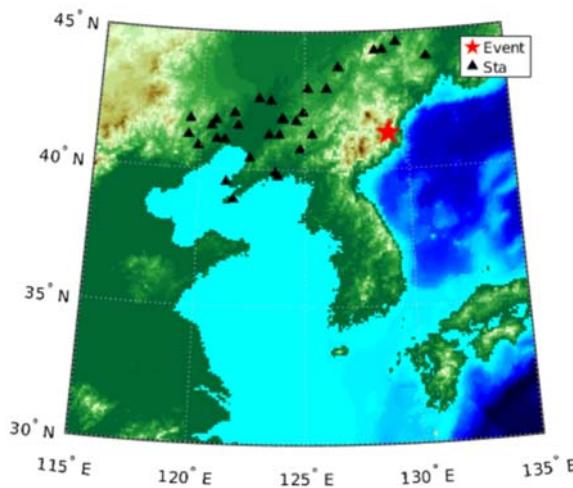


图 7 Kor17 事件位置和台站分布

Fig.7 Location of Kor17 event and distribution of stations.

Xu et al (2020)利用 gCAP 方法结合面波幅值比反演了 Kor17 的震源相对成分, 其中假定埋深 0.5km 和 1km 时得到 CLVD 源与 ISO 源相对强度均约为 0.46, 矩震级分别为 5.37 和 5.46, Liu et al. (2018)利用全波形反演方法得到埋深 1.5km 情况下, Kor17 中 ISO 源成分约为 55%~60%, CLVD 源成分约为 30%~45%, 即 CLVD/ISO 约为 0.5~0.8, 矩震级为 5.7。根据 Jin et al (2023)的结果, Kor17 的埋深约为 600m。综合以上结果, 假设 Kor17 埋深 0.6km, $M_{\text{CLVD}}/M_{\text{ISO}}$ 为 0.5, 结合上文图 4 中的反演结果, 则对于 Kor17, 有:

$$M_0^{Lg} \approx 0.27 M_0^{\text{exp}} \quad (14)$$

同时根据上文利用 Ford 2009 模型对 Lg 波 Q 值的反演结果, 埋深 0.6km、CLVD/ISO 相对强度 0.5 时有:

$$\begin{cases} Q_0=272 \\ \eta = 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

给定 Q_0 和 η 值后, 对图 7 中的台站数据, 利用 3.0-3.6 km/s 速度窗截取 Lg 波形, 对其做 FFT 变换后取 0.1-5Hz 频谱幅值, 利用上文中的方法反演 Lg 波地震矩, 部分台站的反演结果如图 8 所示, 其中黑色虚线表示观测 Lg 波频谱, 灰色为迭代曲线, 红色为最优的参数组合下的理论谱。

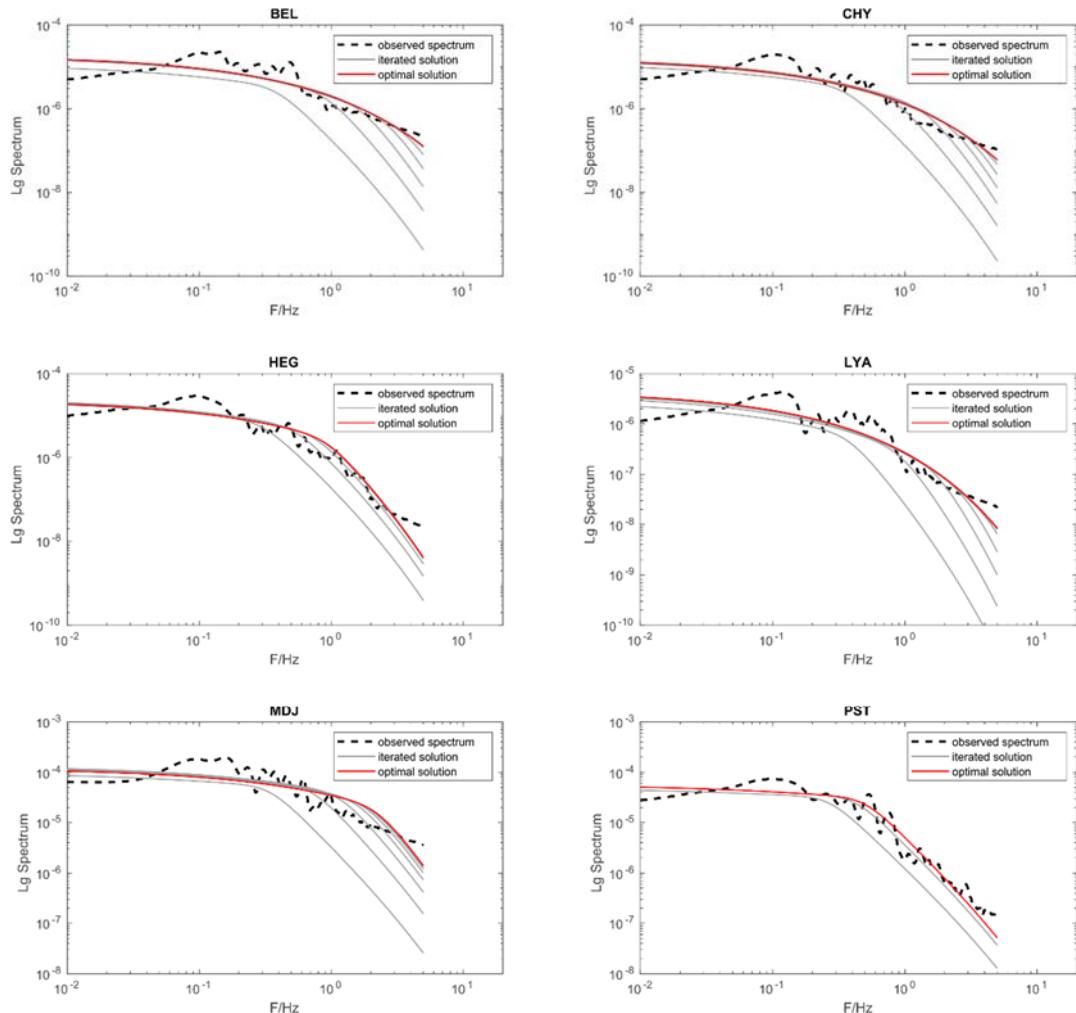


图 8 部分台站反演结果。黑色虚线为观测 Lg 波频谱, 灰色为迭代曲线, 红色为最优结果

Fig.8 Inversion results of partial stations. The black dotted line represents the observed Lg wave spectra, the gray line represents the iteration curve, and the red line represents the optimal result.

图 9 给出了各台站反演得到的 $M_0(Lg)$ 及其均值, 可以看出反演结果有一定的离散度, 其原因主要是反演前根据一维速度模型反演结果预先给定了统一的 Lg 波 Q 值, 对实际中不同方向上台站的传播路径并不完全适用, 因此反演结果会出现一定的离散度和误差。

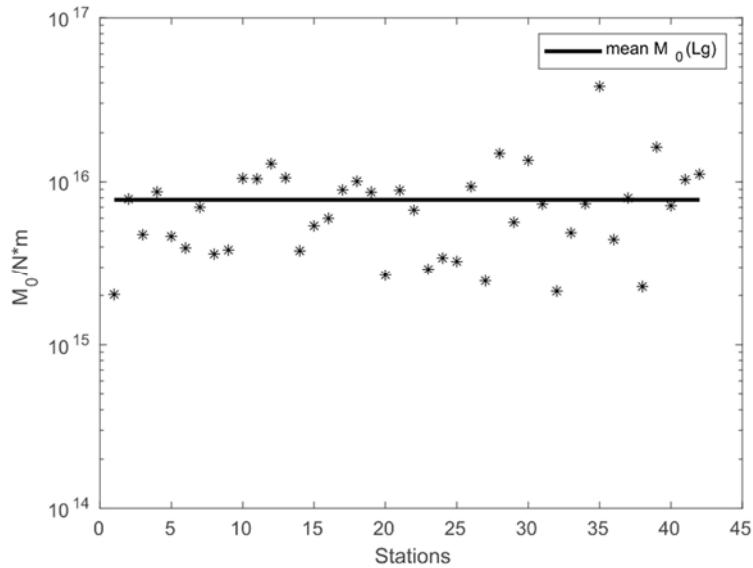


图 9 Kor17 Lg 波地震矩反演结果.

Fig.9 Seismic moment inversion results of Lg of Kor17.

根据反演结果均值, 结合 (12) 式估算 Kor17 的源地震矩, 利用 $M_0=4\pi\rho\alpha^2\varphi_\infty$ 得到地下爆炸折合位移势 φ_∞ , 其中 α 为 S 波波速。根据 DJ91 模型:

$$\varphi_\infty = \frac{3.4 \times 10^9 W}{\beta^{1.1544} (\rho g h)^{0.4385} 10^{0.0344 GP}} \quad (16)$$

其中 β 、 ρ 分别为源区 S 波波速和介质密度, GP 为空隙密度, W 为当量 (kt)。对于朝鲜场地, 参考 Ford 模型, 取 $\alpha=5000\text{m/s}$, $\beta=\alpha/\sqrt{3}$, $\rho=2700\text{kg/m}^3$, GP=1, 得到当量约为 210kt, 与其他研究估算的结果较为一致 (Jin et al., 2023; Lu et al., 2024)。

4 讨论

本文基于 Lg 波地震矩的当量估算方法利用了地下爆炸震源模型, 这一模型是 Denny et al (1991) 根据不同国家地下核爆炸、化爆和实验室爆炸测量结果, 采用回归分析方法得到的经验模型, 因此基于此模型得到是面向全球的平均结果。除模型本身外, 介质参数也会对当量估算结果有明显的影响。在对朝鲜第六次核试验当量估算中, 尽管我们已经根据朝鲜地区的速度模型选择了合适的参数, 但这些参数来源于一维速度模型, 无法完全代表试验场地精确的介质特性, 因此模型本身的形式以及参数的误差都会导致当量估算结果的误差。

针对本文发现的 Lg 波强度随埋深下降问题, 我们进一步测量了纯 ISO 源情况下, 不同深度时的 P/S 幅值比 (以朝鲜速度模型为例), 结果如图 10 所示 (图中分别给出了原始波形

和 1-2Hz 滤波后的幅值比)。可以看出随着深度的增加, P/S 幅值比也增大。由于爆炸源并不直接激发 S 波, 观测到的 S 波主要来自 P-S 转换, P/S 幅值比增大表明了 P-S 转换效应变弱, 而 Lg 波成因之一是 S 波在地壳内多次反射形成的导波(何静, 2017), 因此根据仿真结果, 可以推测随着爆炸埋深增大, P-S 转换效应变弱导致了 Lg 波强度的下降。

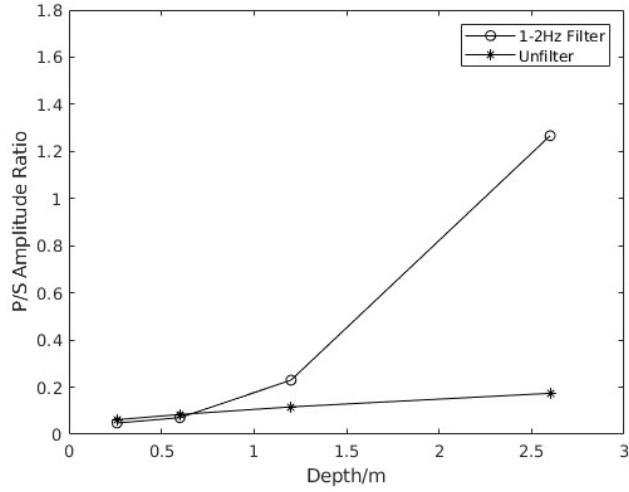


图 10 朝鲜速度模型下, P/S 幅值比随埋深变化

Fig.10 P/S amplitude ratio versus burial depth under the North Korean velocity model

5 结论

本文研究了朝鲜和内华达核试验场地 Lg 波地震矩与源地震矩关系并进行了标定, 分析了介质模型、源成分和埋深对 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 的影响, 结合地下爆炸震源模型建立了基于 Lg 波地震矩的当量估算方法。综合两个场地的反演结果, 可以得到以下结论:

- 1) $M_0(Lg)$ 与 $M_0(\text{exp})$ 关系对场地有强烈的依赖性, 不同场地的 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 比值可能会有较大差异, 朝鲜场地的比值基本在 0.2 以上, 而内华达场地在 0.2 以下。
- 2) 次生震源对不同场的影响不同, 对于朝鲜场地, CLVD 源和 DC 源会明显使 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 减小, 表明次生震源会减弱 Lg 波的激发。对于内华达场地, 由于单一 ISO 源激发的 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 已经较小, 次生震源的影响不明显。
- 3) 在纯爆炸源情况下, $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 整体上会随埋深增加而较小, 根据我们仿真实验结果, 主要是由于 P-S 转换效应变弱, S 波强度下降, 进一步导致了 Lg 波幅值减小。

通过理论仿真的方法, 我们标定了两种典型核试验场地的 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$, 并进一步以朝鲜 17 年核试验为例, 利用区域台阵波形反演了 $M_0(Lg)$ 并估算了核试验当量, 结果与其他研究结论较为一致, 表明了本文建立的基于 Lg 波地震矩估算源地下爆炸当量方法的可行性。

需要注意的是, 本文得到的 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 标定关系是基于一维速度模型得到的, 忽略了实际中地球介质横向不均匀性造成的不同方向传播路径差异(即 Q 值差异), 因此针对具体的场地和特定台站, 要想精确地标定 $M_0(Lg)/M_0(\text{exp})$ 比值或研究上述因素的影响, 还需要更精细的三维理论地震图仿真和反演工作。

致谢

本文研究所用波形数据来自中国地震台网中心，在此表示特别感谢。

作者贡献度：作者 1：完成了文章大部分研究内容和文章撰写；作者 2：提出了文章的整体研究思路，指导文章撰写；作者 3、4、5：对文章撰写和相关算法提供了指导；作者 6、7：完成了文章所涉及的数据处理。

References:

- Adushkin, V. V. (2001). Yield Estimation for Semipalatinsk Underground Nuclear Explosions Using Seismic Surface-wave Observations at Near-regional Distances. *Pure & Applied Geophysics* 158(11): 2217-2226.
- Chun, Kin-YipWest, Gordon F.Kokoski, Richard J.Samson, Claire (1987). A Novel Technique for Measuring Lg Attenuation—Results from Eastern Canada between 1 To 10 Hz. *Bulletin of the Seismological Society of America* 77(2): 398-419.
- Denny, Marvin D. and Johnson, Lane R. (1991). The Explosion Seismic Source Function: Models and Scaling Laws Reviewed, Explosion Source Phenomenology:1-24.
- Ford, Sean R., Dreger, Douglas S. and Walter, William R. (2009). Source Analysis of the Memorial Day Explosion, Kimchaek, North Korea. *Geophysical Research Letters* 36(21).
- Jin, P.Zhu, H. F.Xu, X., et al. (2019). Seismic Spectral Ratios Between North Korean Nuclear Tests: Implications for Their Seismic Sources. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124(5).
- Jin, PingXu, HengleiDing, Shiban, et al. (2023). Source Spectra of Pg and Lg Waves from North Korean Nuclear Tests Estimated Using a Nonmodel-Based Approach. *Bulletin of the Seismological Society of America* 114(2): 1151-1166.
- JohnR.Richard, et al. (1971). Seismic Characteristics of Underground Nuclear Detonations. *Bulletin of the Seismological Society of America* 61(6): 1693-1704.
- Liu, J.Li, L.Zahradník, J, et al. (2018). North Korea's 2017 Test and its Nontectonic Aftershock. *Geophysical Research Letters* 45.
- Marshall, P. D., Douglas, A. and Hudson, J. A. (1971). Surface Waves from Underground Explosions. *Nature* 234(5323): 8-9.
- Mitchell, Brian J. (1980). Frequency Dependence of Shear Wave Internal Friction in the Continental Crust of Eastern North America. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 85(B10).
- Murphy, J. R. and Barker, B. W. (2001). Application of Network-averaged Teleseismic P-wave Spectra to Seismic Yield Estimation of Underground Nuclear Explosions. *Pure & Applied Geophysics* 158(11): 2123-2171.
- Pasyanos, M. E. and Myers, S. C. (2018). The Coupled Location/Depth/Yield Problem for North Korea's Declared Nuclear Tests. *Seismological Research Letters* 89(6).
- Sereno, T. J, Bratt, S. R and Bache, T. C (1988). Simultaneous Inversion of Regional Wave Spectra for Attenuation and Seismic Moment In Scandinavia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93(B3).
- Stevens, Jeffry L. (1986). Estimation of Scalar Moments from Explosion-Generated Surface Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America* 76(1): 123-151.
- Street, R. L., Herrmann, R. B. and Nuttli, O. W. (1975). Spectral Characteristics of the Lg wave Generated by Central United States Earthquakes. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 41(1): 51-63.
- Xie and J (2002). Lg Q in the Eastern Tibetan Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America* 92(2): 871-876.
- Xie, J. and Mitchell, B. J. (1990). Attenuation of Multiphase Surface Waves in the Basin and Range Province, part I: Lg and Lg coda. *Geophysical Journal International* 102(1): 121-137.
- Xie, J. and Nuttli, O. W. (1988). Interpretation of High-Frequency Coda at Large Distances: Stochastic Modelling and Method Of Inversion. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 95(3): 579-595.

- Xie, Jiakang (1993). Simultaneous Inversion for Source Spectrum and Path Q Using Lg with Application to Three Semipalatinsk Explosions. *Bulletin of the Seismological Society of America* 83(5): 1547-1562.
- Xu, H.Ni, S.Liu, W., et al. (2020). Focal Mechanisms of the 2017 North Korean Nuclear Test and Its Early Collapse Event. *Geophysical Journal International* 220(2): 737-752.
- Zhao, L. F.Xie, X. B.Wang, W. M.Yao, Z. X. (2013). Yield Estimation of the 25 May 2009 North Korean Nuclear Explosion. *Bulletin of the Ssmological Society of America* 102(1): 467-478.
- Zhu, Lupei and Ben-Zion, Yehuda (2013). Parametrization of General Seismic Potency and Moment Tensors for Source Inversion of Seismic Waveform Data. *Geophysical Journal International* 194: 839-843.
- Zhu, Lupei and Rivera, Luis A. (2002). A Note on the Dynamic and Static Displacements from a Point Source in Multilayered Media. *Geophysical Journal International* 148(3): 619-627.
- Herrmann, Robert B. (1995). Broadband seismology and small regional seismic networks. Professional Paper.
- Lu, YuZhao, Lian-FengPang, Xin-LiangYao, Zhen-Xing (2024). Yield Estimation of North Korean Underground Nuclear Tests Using Lg-Wave Source Spectra. *Frontiers in Earth Science* 12 - 2024.
- Wan Yongge, 2024. Focal Mechanism Classification Based on Areal Strain of Horizontal Strain Rosette of Focal Mechanism and Characteristic Analysis of Overall Focal Mechanism of Earthquake Sequence. *Earth Science*, 49(7): 2675-2684. doi: 10.3799/dqkx.2022.245

附中文参考文献

- 何静, 吴庆举, 李永华, 等, 2017. 天然地震 Lg 波衰减研究进展及其在中国大陆地区的应用. 地球物理学进展 32(2): 10.
- 靳平, 肖卫国, 段克敏, 2004. 由 Lg 波振幅谱估算地震矩及 Lg 波 Q 值. 地震学报(S1): 21-30.
- 徐志双, 文鑫涛, 等, 2025. 2025 年西藏定日 MS6.8 级地震余震序列精定位与地震烈度. 地球科学, 50(5): 1759-1769.
- 万永革, 2024. 震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法及序列震源机制总体特征分析. 地球科学, 49(7): 2675-2684.