赵连锋,谢小碧,王卫民等. 2018. 中国东北和朝鲜半岛地区地壳 Lg 波宽频带衰减模型. 地球物理学报,61(3):856-871, doi:10.6038/cjg2018L0394.

Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2018. A broadband crustal Lg wave attenuation model in Northeast China and the Korean Peninsula. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),61(3):856-871,doi:10.6038/cjg2018L0394.

中国东北和朝鲜半岛地区地壳 Lg 波宽频带衰减模型

赵连锋^{1,2},谢小碧³,王卫民⁴,姚振兴^{1,2}

1 中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院地球与行星物理重点实验室,北京 100029

2 中国科学院地球科学研究院,北京 100029

3 美国加州大学圣克鲁兹分校,地球物理与行星物理研究所,圣克鲁兹 CA 95064

4 中国科学院青藏高原研究所,中国科学院大陆碰撞与高原隆升重点实验室,北京 100101

摘要 利用 1996 年 10 月至 2016 年 10 月间发生在中国东北、朝鲜半岛和日本南部的 113 个壳内地震在 602 个宽频带地震台站观测到的波形资料,建立 Lg 波衰减成像数据集.根据 22,551 条垂直分量波形,计算 Lg 波振幅谱,提取单台、双台和双事件数据,采用区域 Q 值、震源函数和台基响应联合反演方法,建立中国东北和朝鲜半岛地区 0.05~10.0 Hz的宽频带衰减模型.模型显示火山岩山脉地区如大兴安岭和长白山具有弱衰减特征,沉积盆地衰减 相对较强,海水覆盖区域如渤海、黄海和日本海等衰减最强.日本海具有较薄的海洋地壳,对地壳 Lg 波传播有阻挡作用.通过较大地震事件的跨海记录调查 Lg 波的传播,强衰减特征最为显著.

 关键词
 Lg 波; Q 值层析成像; 衰减; 中国东北和朝鲜半岛地区

 doi:10.6038/cjg2018L0394
 中图分类号
 P315

收稿日期 2017-06-29,2018-01-02 收修定稿

A broadband crustal Lg wave attenuation model in Northeast China and the Korean Peninsula

ZHAO LianFeng^{1,2}, XIE XiaoBi³, WANG WeiMin⁴, YAO ZhenXing^{1,2}

1 Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Santa Cruz, CA 95064, USA

4 Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift, Institute of Tibetan Plateau Research,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract Lg wave propagation characteristics are investigated in Northeast China and the Korean Peninsula based on seismograms from 113 crustal earthquakes that were recorded at 602 regional stations distributed throughout eastern China, South Korea, and southern Japan. Based on 22,551 vertical-component waveforms, we calculate the amplitude spectra of the Lg waves, extract the single-station, two-station, and two-event data, and construct a broadband Lg attenuation model between 0. 05 and 10.0 Hz in Northeast China and the Korean Peninsula by using a joint tomographic method to simultaneously obtain Q, source function, and site response. Results show that the sedimentary basin areas are characterized by relatively strong Lg attenuation, whereas the volcanic mountains such as Da Hinggan Ling and Changbai mountains attenuate the

基金项目 国家自然科学基金(41674060, 41374065, 41630210)和川滇国家地震监测预报实验场项目(2016 CESE 0203)资助.

第一作者简介 赵连锋,男,1972 年生,研究员,主要从事地震学研究. E-mail:zhaolf@mail.iggcas. ac. cn

ad hu and water including

Lg waves weakly. The strongest Lg attenuation regions are areas covered by sea water including Bohai Sea, Yellow Sea and Japan Sea. A thinner crust within a typical oceanic lithosphere for the Japan Sea blocks the Lg wave propagation, resulting in no signals can be observed across oceanic path from small earthquakes. We collect observations from large earthquakes with magnitude around m_b 6.0 to obtain strong Lg attenuation within the crust of Japan Sea.

Keywords Lg; Q tomography; Attenuation; Northeastern China and the Korean Peninsula

0 引言

地震 Lg 波是在大陆地区区域地震范围内可以 明显观测到的震相,非常稳定.Lg 波的成因可以归 结为S波在地壳内发生多次超临界反射叠加形成的 地壳内的导波,或者是由于多次高阶面波叠加形成 的高频面波(Bouchon, 1982; Kennett, 1984; Knopoff et al., 1973; Xie and Lay, 1994). 大陆地壳对 Lg 波的 衰减较小,使之适用于体波震级测定和核爆当量估 计(如,Nuttli, 1973, 1986a, 1986b). 天然地震激发的 Lg 波能量远大于地下核爆所激发的能量,使 P/Lg 的振幅比成为识别地震事件是天然地震还是地下核 爆的有力判据(Fisk, 2006; Fisk et al., 1996; Hartse et al., 1997; Richards and Kim, 2007; Taylor et al., 1989; Walter et al., 1995; Zhao et al., 2008, 2014, 2016,2017;赵连锋等,2017;谢小碧和赵连锋,2018). Lg 波能量散射与地壳内部介质的非均匀性及地壳 厚度的剧烈变化有关,Lg 波和 Lg 尾波已经被成功 地用于测量地壳的衰减结构(Aggarwal and Khan, 2016; Calvert et al., 2000; Cong and Mitchell, 1998; Fan and Lay, 2002, 2003a; Kadinsky-Cade et al., 1981; McNamara et al., 1996; Mellors et al., 1999; Mitchell et al., 1997, 2008; Mousavi et al., 2014; Nuttli, 1973; Ottemöller, 2002; Ottemöller et al., 2002; Phillips et al., 2005; Phillips and Stead, 2008; Ranasinghe et al., 2015; Rodgers et al., 1997; Sandvol et al., 2001; Singh et al., 2015; Xie, 2002; Xie et al., 2004, 2006; Zhao and Xie, 2016; Zhao et al., 2010, 2013a, 2013b; Zor et al., 2007).

通常使用地下介质的 Q 值来描述地震波衰减, Q 值 越大, 衰减 越弱, Q 值 越小, 衰减 越强(如, Knopoff, 1964). Lg 波振幅衰减依赖于地下岩石类 型和地壳的不均匀程度,与地壳地质结构密切相关. 通常稳定的古老陆块具有较高的 Lg 波 Q 值, 地质 年代较晚的陆块则对应于较低的 Lg 波 Q 值(如, Mitchell et al., 1997, 2008). Lg 波的强烈衰减与 构造活动性、高温异常和部分熔融、地壳厚度变化、 盆地沉积层厚度和海水覆盖等有关系(如, Bürgmann and Dresen, 2008; Campillo et al., 1985, 1993; Shapiro et al., 1996; Zhang and Lay, 1995).

中国东北和朝鲜半岛地区是西太平洋构造带、 北美大陆板块、中亚造山带、华北板块和扬子板块的 交汇部位.中-新生代以来经历了多次构造事件的叠 加,包括大陆汇聚碰撞、地体拼贴、大陆岩石圈减薄、 大型走滑断裂错移、西太平洋板块俯冲和转向、东亚 西太平洋裂谷系的形成等(如,葛肖虹,马文璞,2007; 李三忠等,2014).中国东北和朝鲜半岛地区广泛分 布着显生宙花岗岩,中生代晚期和新生代火山岩和 沉积盆地,包括松辽、海拉尔、二连、三江、渤海湾、黄 海和日本海盆地等.复杂的构造格局使中国东北和 朝鲜半岛地区有着丰富的地质演化记录,包括稳定 的洲际板块基底、地槽、褶皱、沉积盆地和火山发育等 (如,谢鸣谦,2000;徐峣等,2014;张克信等,2015).

Zhao 等(2010)使用 1995 年 10 月至 2007 年 8 月间 20 个地震台站和 125 个地震事件的 1720 个 Lg 波的振幅谱,调查了中国东北地区的地壳 Lg 波 衰减.大兴安岭和长白山等火山岩地区具有较高的 Q值,二连、三江和松辽盆地等沉积盆地地区具有相 对低的 Q 值. Ranasinghe 等(2015)收集了 127 个中 国东北地区流动台阵记录到的来自 78 个地壳内地 震事件的高质量观测资料,提取 11,642 个双台/逆 双台 Lg 波振幅谱,获得中国东北地区的 Q。值 (1 Hz Q)分布,分布范围是 50 至 1600. 尽管在数值 上存在偏差,他们得到了相同的Q值分布样式. Zhao 等(2013b)利用 1999 年 10 月至 2010 年 5 月 间 39 个台站和 176 个区域地震事件的 3517 个 Lg 波的振幅谱,获得了中国华北地区的地壳 Lg 波衰 减模型.模型显示,渤海湾盆地和日本海盆地的地壳 Q值较低.这与其他研究者得到的结果是一致的 (Ford et al., 2010; Hong, 2010; Pei et al., 2006; Phillips et al., 2000). 随着地震观测资料的不断增 加,我们能够从 Lg 波振幅数据中提取地壳衰减结 构更加详细的信息.例如,地震台站数量增加,使台

间数据大幅度增加,因此可以消除震源项的影响,从 而避开震源项与Q值之间的数据权衡,取得Q值成 像结果在数值上的一致性.

从 2006 年至 2016 年的 10 年间,朝鲜进行了 5 次地下核试验(如, Chun et al., 2009; Hong, 2013; Hong et al., 2008; Murphy et al., 2013; Richards and Kim, 2007; Wen and Long, 2010; Zhang and Wen, 2013, 2015; Zhao et al., 2008, 2012, 2014, 2016).尽 管核试验的当量较小,仍可激发能够明显观测到的 Lg 波.利用 Lg 波振幅测定震级,需要知道台站到 震中路径上 Lg 波 Q 值的大小(如, Nuttli, 1973, 1986a, 1986b).我们利用全球地震台网和高密度的 中国国家和区域数字地震台网的宽频带地震记录, 测定中国东北和朝鲜半岛地区的地壳 Lg 波 Q 值, 不仅能够获得地下地质块体的物理状态如压力、温 度、含水和破碎等信息,还可以为该地区区域震级的 测定提供基础数据.

1 资料

1.1 区域地震数据

从 1996 年 10 月到 2016 年 10 月间,在中国东 北、华北、朝鲜半岛和日本南部发生的 113 个区域事 件,在 602 个台站记录到 22,551 个宽频带垂直分量 数字地震图.这些资料从国际地震学联合会(IRIS) 和国家测震台网数据备份中心收集,用于中国东北 和朝鲜半岛地区地壳 Lg 波 Q 值成像.这些台站均 配置宽频带仪器,在 0.03 至 8.0 Hz 的带宽内具有 平坦的速度仪器响应曲线,采样间隔为 20、40、50 或 100 s⁻¹.图 1 所示的地形图,给出了台站和事件的 位置,其中方块表示台站,十字丝表示地震事件.

关于地壳结构的研究表明,中国东北和朝鲜半 岛地区 Moho 面深度变化较大.例如,日本海盆地具 有薄的海洋地壳,能够阻断 Lg 波的传播(Zhang and Lay, 1995);在渤海湾盆地 Moho 面深度较浅, 约 29 km,而在大兴安岭北部地区达到 50 km(Li et al., 2012;朱介寿等, 2006).我们根据 CRUST1.0 选择地壳内的地震事件,震级范围在 4.0 到 6.5 之 间,这样既可以避免震级过小无法观测到海水覆盖 路径的 Lg 波,又可以避免较大震级的事件破裂复 杂性的影响.因为可能会受到震中距过大、震级太 小、多事件叠加等因素的影响,需要删除噪声干扰较 大的波形和具有错误到时的波形.我们对每一条垂 盲分量地震波形图进行可视化处理和监测,从而保



图 1 中国东北和朝鮮丰岛地区地形图 图中红色十字丝和白色方块标出地震事件和台站的位置. Fig. 1 A tomographic map of Northeast China and the Korean Peninsula, showing the locations of the earthquakes (red crosses) and the seismological stations (squares) used in this study

证数据质量.质量控制环节会导致大量的数据移除, 但仍然能够获得可用于Q值成像的数据集.

模拟 Lg 波振幅谱,它的群速度值是一个重要 的参数.因为地壳厚度不同和震源区环境的差异,不 同地区的 Lg 波群速度可能会发生变化. Pasyanos 等(2009)利用带通滤波突出 Lg 震相,发现在伊朗 南部和阿拉伯板块中部 Lg 波群速度分别为 3.4 和 3.5 km • s⁻¹. Zhao 和 Xie(2016)采用波形能量叠加的 方法求取中东地区平均的 Lg 波群速度为 3.5 km • s⁻¹. 图 2 是中国东北和朝鲜半岛地区区域波形能量叠加 的结果.图 2a 是 2014 年 3 月 31 日的地震事件在 WDL 台的垂直分量速度记录,滤波频带范围是 0.5 至 5.0 Hz, 震中距是 1131.2 km. 图 2b 是归一化的 波形能量,其中标出了几个典型的群速度值,对全部 22,551条区域波形进行处理后获得叠加的能量分 布,如图 2c 所示.观测记录的震中距范围是 200 至 3000 km,初至 P 波和能量最强的 Lg 波的波列非常 清晰,Lg波的群速度是3.5 km • s⁻¹.通常,Sn 波的 群速度值为 $4.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,但在图 2c 中无法识别 Sn 波能量.因此,在中国东北和朝鲜半岛地区,可能因 为上地幔顶部衰减强烈,Sn 波不发育(Ranasinghe et al., 2015; Rapine and Ni, 2003; Zhao et al.,



图 2 区域地震波形实例,来自 2014 年 3 月 31 日地震事件在 WDL 台的 垂直分量记录(a)、归一化的能量(b)和归一化波形能量叠加(c) 图中标出了 IASP91 模型的初至 P 波到时, Lg 波震相能够清晰识别,

群速度为 3.5 km • s⁻¹. 在能量图上无法识别 Sn 波震相.

Fig. 2 (a) An example seismogram observed from the earthquake occurred on March 31, 2014, and recorded at WDL station, (b) its normalized waveform energy, and (c) the stacked energy distribution for all of the regional seismograms

used in this study

The typical group velocities are labelled in (a) and (b) by red lines with their values.

The Lg phase has a group velocity of 3.5 km \cdot s⁻¹, which is also labelled in (c).

2010, 2016).

1.2 Lg 波振幅测量

地震 Lg 波的 Fourier 振幅谱是进行地壳 Lg 波 Q 值成像的基础数据.获得 Lg 波振幅信号的数据 预处理主要分为 4 个步骤:首先分离 Lg 波与初至 P 波的波前噪声;然后计算 Lg 波和噪声的 Fourier 振 幅谱;拾取振幅谱值并计算信噪比;最后是去噪处 理,获得 Lg 波真振幅(如,Xie and Mitchell, 1990; Zhao et al., 2010, 2013b).

因为地震发生时刻、震中位置和震源深度等存 在较大的不确定性,Lg波的时间窗口会发生改变. 我们采用群速度为 0.6 km • s⁻¹的浮动窗口,在高 频(0.5~1.5 Hz)垂直分量地震图上确定能量最强的窗 口,滑动窗口的群速度范围是 3.72 至 2.8 km • s⁻¹ (Zhao and Xie, 2016).在P波初至前确定与 Lg波 等时间长度的窗口内提取噪声(如,Xie and Mitchell, 1990; Zhao et al., 2008).获得 Lg 波和 P 波前噪声的 有效波列后,通常在波列两端各增加时窗长度的 10%用于余弦镶边消减.对镶边的信号进行快速 Fourier 变换(FFT),得到 Lg 波和噪声的振幅谱 (如, Zhao et al., 2010, 2013b).图 3 是一个 Lg 波 Q值成像数据预处理的实例.图 3a 是 2014 年 3 月 31 日的地震事件在 WDL 台的垂直分量记录,最大 振幅是 6456.2 count.经过去仪器响应处理,获得如图 3b 所示的地面速度记录,最大振幅是 6442 nm • s⁻¹. 图中蓝色是采用浮动窗口获得的 Lg 波时窗,两边 有 10%的余弦镶边;灰色是 P 波前噪声窗口.图 3c 和 3d 是放大的 Lg 和噪声的波列.图 3e 是 Lg 波和 噪声的振幅谱和振幅采样.我们在 0.05 至 10.0 Hz 的频段内选取对数域等间隔的参考频率 f_{ref} ,Lg 波振 幅谱 $A(f_{ref}) = 0.04$.对于每个参考频率 f_{ref} ,Lg 波振

 $\sqrt{\frac{1}{M}}\sum_{i=1}^{M} [A(f_i)]^2$,其中 $f_i \in [f_{ref} - \Delta f, f_{ref} + \Delta f]$, 这里的 Δf 可由 $\Delta \log_{10}(\Delta f) = 0.02$ 来确定.这样, 在 0.05 至 10.0 Hz 的频段内选择 58 个参考频率点. 图 3f 是信噪比.由图可见,Lg 波振幅谱在 1.0 Hz 附 近的频带内具有足够的信噪比,信噪比与震源大小、



图 3 Lg 波数据预处理流程实例

(a) 原始地震记录图,(b) 去掉仪器响应得到的地表速度记录,(c) Lg 波,(d) P 波前噪声,(e) Lg 波和噪声的振幅谱,
 (f) 信噪比和(g)Lg 波信号谱.其中,当信噪比低于 2.0 时舍弃 Lg 波信号振幅.

Fig. 3 Data pre-processing procedure for Lg waves

(a) Original seismogram, (b) velocity record after deconvolving with the instrument response, (c,d) windowed Lg phase and pre-P noise, (e) Lg-wave and noise spectra, (f) signal-to-noise ratio, and (g) Lg-wave spectrum. Note that the data points have been dropped where the signal-to-noise ratio is below the threshold of 2.0.

仪器响应的截止频率和震中距有关.有些台站的记录具有较大的背景噪声,特别是震中距较大的台站记录.进行噪声校正可以有效提高谱振幅测量的精度.假定 Lg 波时窗内的波列为 Lg 波信号与噪声的能量叠加,同时 Lg 信号与背景噪声的谱振幅不相关,我们利用(1)式估计参考频率上的 Lg 信号(Ringdal et al., 1992; Zhao et al., 2010, 2013b),

 $A_{sig}^{2}(f_{ref}) = A_{obs}^{2}(f_{ref}) - A_{noi}^{2}(f_{ref}),$ (1) 其中 A 表示 谱振幅,下标 sig、obs 和 noi 分别指真 振幅、观测值和噪声, f_{ref} 为参考频率.图 3g 是参考 频率点上的 Lg 波信号谱.设定信噪比的门限值为 2.0 来构建 Lg 波 Q 成像的数据集.

2 地震 Lg 波衰减成像方法

利用区域 Lg 波调查地壳衰减结构,主要包括 单台法(Pasyanos et al., 2009; Pei et al., 2006; Xie, 1993; Zhao et al., 2010)、双台法(Fan and Lay, 2002, 2003a; Xie, 2002; Xie et al., 2004, 2006; Zor et al., 2007)、双台+逆双台法(Akinci et al., 1995; Bao et al., 2011; Chun et al., 1987; Fan and Lay, 2003b)和 单台+双台+双震数据体的混合法(Zhao and Xie, 2016; Zhao et al., 2013a, 2013b). 从单台法至双 台法,再到双台+逆双台法,因为震源函数和台基响 应的不确定性顺序降低,Lg 波衰减成像精度逐步增 加.但是,随着可使用资料的减少,Q值反演的空间 分辨率越来越低,特别是高频部分.为了消除衰减和 震源函数之间的数据权衡,同时获得较高的分辨率, 尤其是针对数据较少的高频部分, Zhao 等(2013a, 2013b)使用双台和单台数据一起反演获得了青藏 高原和华北克拉通地区高分辨率宽频带的地壳 Lg 波Q值模型.在给定观测系统的条件下,对于每个 频率,可以构建用于Q值成像的单台、双台和双事 件的 Lg 波谱振幅或振幅比值的数据集. 单台数据 有高密度的射线覆盖可能获得较高的成像分辨率; 双台数据因剔除了源函数而消除了或减少了衰减和 震源函数之间的权衡;双事件数据因剔除了台站项 而减少了台基响应和衰减之间的权衡. Zhao 和 Xie (2016)联合使用单台、双台和双事件数据,获得了中东地区高分辨率宽频带的地壳 Lg 波 Q 值模型.

2.1 模拟 Lg 波振幅谱

地震 Lg 波振幅谱可以表示为(Xie and Mitchell, 1990)

$$A(f,\Delta) = S(f)G(\Delta)\Gamma(f,\Delta)P(f)r(f), (2)$$

其中 f 为频率, \Delta 是震中距, A(f,\Delta) 为 Lg 波位移谱.

$$S(f) = \frac{M_0 R}{4\pi \rho v_s^3} \cdot \frac{1}{1 + f/f_c}$$
(3)

是震源函数,其中 M_0 是地震矩, R 是源辐射花样, ρ 和 v_s 分别是震源区域的密度和剪切波速度的平均 值. 对于中等强度的地震事件, 假定 Lg 波能量辐射 为各向同性, 即 R=1.

$$G(\Delta) = (\Delta_0 \Delta)^{-1/2} \tag{4}$$

是几何扩展因子, Δ_0 是参考距离,通常设定为 100 km (Herrmann and Kijko, 1983; Street et al., 1975). P(f)是台基响应函数,r(f)是 Lg 波传播过程中的 随机效应. $\Gamma(f,\Delta)$ 为衰减的函数,可以表示为

$$\Gamma(f,\Delta) = \exp\left[-\frac{\pi f}{V} \cdot \int_{\text{ray}} \frac{\mathrm{d}s}{Q(x,y,f)}\right], \quad (5)$$

其中 V 是 Lg 波的群速度, $\int_{ray} ds$ 是沿大圆路径的积分, Q(x, y, f) 是 Lg 波 Q 值, 它是频率与地表位置(x, y)的函数.

2.2 单台、双台和双事件数据

2.2.1 单台数据

根据公式(2),给定频率 *f*,对于事件 *k* 在台站 *j* 观测到的 Lg 波振幅谱 *A_{ki}* 可以表示为(如图 4a):

 $A_{kj} = S_k \cdot G_{kj} \cdot \Gamma_{kj} \cdot P_j \cdot r_{kj}, \qquad (6)$

其中 S_k 是事件 k 的震源函数, $G_{kj} = (\Delta_0 \Delta_{kj})^{-1/2}$ 是 几何扩展因子, Δ_{kj} 是事件 k 到台站 j 的震中距离. 衰减项 Γ_{kj} 可以被表示为:

$$\Gamma_{kj} = \exp\left[-\frac{\pi f}{V} \cdot \int_{k}^{j} \frac{\mathrm{d}s}{Q(x, y, f)}\right], \qquad (7)$$

其中 $\int_{k}^{j} ds$ 是事件 k 到台站 j 沿大路径的积分. P_{j} 是 台站 j 下方的局部地壳结构响应函数; r_{kj} 是 Lg 波 在事件 k 到台站 j 之间传播的随机效应.

2.2.2 双台数据

如果两个台站记录到同一个地震事件,而且它 们在或者近似在一条线上,如图 4b 和 4c 所示,双台 数据可以通过计算两个台站的 Lg 波振幅谱比值获 得(Xie et al., 2004; Zhao et al., 2013b).在理想 情况下,两个台站 $i \pi j$ 与事件 k 对齐,如图 4b,双 台振幅 A_{ij} 可以通过(8)式准确地计算:

$$A_{ij} = \frac{A_{kj}}{A_{ki}} = \left(\frac{\Delta_{kj}}{\Delta_{ki}}\right)^{-1/2} \cdot \left(\int_{i}^{j} \frac{\mathrm{ds}}{Q(x,y,f)}\right) \cdot \frac{P_{j}}{P_{i}}.$$
(8)

在实际应用中,两个台站与地震事件可能近似 在一条直线上,存在着一定的偏差.为了扩大可使用 的资料范围,Xie 等(2004)使用两个台站的方位角 偏差小于 15°来选取振幅比值.Zhao 等(2013b)在事 件 *k* 到台站 *j* 的路径上设置一个参考点*l*,令距离 *kl* 等于距离 *ki*,而且需要在台站 *i* 和参考点 *l* 之间的 距离小于成像网格边长的一半.当两个台站和地震



图 4 单台(a)、双台(b,c)和双事件(d,e)数据的地震事件与台站分布

在选取参考点时,无论是双台数据中的参考台站,还是双事件数据中的参考事件,均以其到达实际台站或事件的距离 不大于成像网格边长的十分之一作为数据提取的阀值.

Fig. 4 Schematics showing (a) event-station geometry for single-station method, (b) an ideal geometry for two-station method where the stations and the source are perfectly aligned, and (c) a more practical geometry where the source and stations are roughly aligned, (d) and (e) similar to (b)

and (c), respectively, but for two-event method

To make the approximation valid, we require the distances between locations i and

l, h and q smaller than one-tenth of an inversion grid.

事件符合这一标准时,计算台间振幅谱:

$$A_{ij} \approx \frac{A_{kj}}{A_{ki}} = \left(\frac{\Delta_{kj}}{\Delta_{kl}}\right)^{-1/2} \cdot \exp\left[-\frac{\pi f}{V} \cdot \left(\int_{l}^{j} \frac{\mathrm{d}s}{Q(x,y,f)}\right)\right] \cdot \frac{P_{j}}{P_{i}}, \quad (9)$$

其中 Δ_{kl} 是在事件 k 和参考点 l 之间的距离. 根据给定条件 $\Delta_{kl} = \Delta_{ki}$, 事件 k 到台站 i 和参考点 l 有相 似的传播路径,所以假定在台站 i 和参考点 l 观测的 Lg 波振幅相同.

2.2.3 双事件数据

与双台振幅类似,当一个台站记录到两个地震 事件时,如果它们在一条线上,双事件数据可以通过 计算振幅谱比值获得(Zhao and Xie, 2016).如图 4d 所示,台站 *j* 与事件*k* 和事件*h* 在一条直线上, 双事件振幅 *A*_{kk}可以表示为:

$$A_{hk} = \frac{A_{kj}}{A_{hj}} = \frac{S_k}{S_h} \cdot \left(\frac{\Delta_{kj}}{\Delta_{hj}}\right)^{-1/2} \\ \cdot \exp\left[-\frac{\pi f}{V} \cdot \left(\int_h^k \frac{\mathrm{d}s}{Q(x,y,f)}\right)\right].$$
(10)

在实际应用中,台站与两个地震事件难以完全 对齐.通过在射线路径 kj 上设置参考点 q,令距离 qj 等于距离 hj,并且要求事件 h 和参考点 q 之间的 距离不超过空间网格边长的一半,可以近似计算双 事件振幅 A_{ak}:

$$A_{qk} \approx \frac{A_{kj}}{A_{hj}} = \frac{S_k}{S_h} \cdot \left(\frac{\Delta_{kj}}{\Delta_{qj}}\right)^{-1/2} \\ \cdot \exp\left[-\frac{\pi f}{V} \cdot \left(\int_q^k \frac{\mathrm{d}s}{Q(x,y,f)}\right)\right], \quad (11)$$

其中 Δ_{qj} 是参考点q和台站j之间的距离.根据给定 条件 $\Delta_{qj} = \Delta_{hj}$,台站j到事件h和参考点q有相似 的传播路径,所以假定从事件h和参考点q到达台 站j的Lg波振幅相同.

2.3 Lg 波 Q 值层析成像

根据扰动理论,建立逐次线性化的 Lg 波 Q 值 成像方程(Zhao et al., 2010;赵连锋等, 2004).对 方程(2)两端取自然对数,假定方程右端 r(f)=1 而 忽略 Lg 波传播的随机效应,可得

$$\ln[A(f,\Delta)] = \ln[S(f)] + \ln[G(\Delta)] - \frac{\pi f}{V}$$
$$\cdot \int_{\text{ray}} \frac{\mathrm{d}s}{Q(x,y,f)} + \ln[P(f)]. \quad (11)$$

$$\frac{1}{Q(x,y,f)} \approx \frac{1}{Q^0(x,y,f)} - \frac{\delta Q(x,y,f)}{\left[Q^0(x,y,f)\right]^2}, \quad (12)$$

$$\ln[S(f)] = \ln[S^{\circ}(f)] + \delta \ln[S(f)], \quad (13)$$

$$\ln[P(f)] = \ln[P^{0}(f)] + \delta \ln[P(f)], \quad (14)$$

得

$$\tilde{h} = \sum_{i=1}^{N} [a_i \cdot \delta \ln Q_i] + e \cdot \delta (\ln S) + u \cdot \delta (\ln P),$$
(15)

其中

$$\tilde{h} = \ln[A(f,\Delta)] - \ln[S^{\circ}(f)] - \ln[G(\Delta)] + \frac{\pi f}{V} \cdot \int_{\text{ray}} \frac{\mathrm{d}s}{Q^{\circ}(x,y,f)} - \ln[P^{\circ}(f)]$$
(16)

是观测的 Lg 波振幅谱与合成数据的残差,其中上标 0 表示初始模型或在反演过程中某次迭代后所得的震源函数、Q值模型或者台基响应.δ表示残差,N是成像区域离散单元数,a是微分系数,e和 u分别是震源函数和台基响应的系数,均取值 1. 简化方程(15)中的对数表达,建立多台多事件的 线性系统

 $H = A \cdot \delta Q + E \cdot \delta S + U \cdot \delta P.$ (17) 同理,由方程(8)和(9),可得

 $H_{2\text{sta}} = A_{2\text{sta}} \cdot \delta Q + E_{2\text{sta}} \cdot \delta S, \qquad (18)$

其中下标 2sta 表示双台数据. 由方程(10)和(11), 可得

$$H_{2\text{eve}} = A_{2\text{eve}} \cdot \delta Q + U_{2\text{eve}} \cdot \delta P, \qquad (19)$$

其中下标 2eve 表示双事件数据. 这样,我们建立基 于单台、双台和双事件数据的 Lg 波 Q 值、震源函数 和台基响应的联合反演系统

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{H} \\ \boldsymbol{H}_{2\text{sta}} \\ \boldsymbol{H}_{2\text{eve}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} \\ \boldsymbol{A}_{2\text{sta}} \\ \boldsymbol{A}_{2\text{eve}} \end{bmatrix} \cdot \delta \boldsymbol{Q} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{E}_{2\text{eve}} \end{bmatrix} \cdot \delta \boldsymbol{S} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{U}_{2\text{sta}} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \cdot \delta \boldsymbol{P}.$$
(20)

使用最小二乘 QR 分解法(LSQR)求解方程 (20),其中包括数据规格化、阻尼和平滑约束(如, Paige and Saunders, 1982; Phillips et al., 2000). 初始输入模型是利用双台法求取的区域平均的 Q 值模型,迭代收敛条件是最小化观测的 Lg 波振幅 谱与合成数据之间残差的 L1 范数(Zhao et al., 2010, 2013b; 赵连锋等, 2004).

3 地壳 Lg 波衰减模型

根据中国东北、华北、朝鲜半岛和日本南部地区的 113个区域地震事件在 602个台站记录到的 22,551条 宽频带垂直分量数字地震波形,我们建立了中国东 北和朝鲜半岛地区地壳 Lg 波衰减模型.模型包括 0.05至10.0 Hz 的频带范围 58个 Lg 波 Q 值分布. 在中国东北和朝鲜半岛地区,不同频率的 Q 值 分布表现出相同的横向变化特征.例如,沉积盆地、 日本海、黄海等呈现低Q值,大兴安岭、长白山和朝 鲜半岛表现为高Q值.图5a—5c分别是0.5、1.0和 2.0 Hz的Q值图像.各个Q值图像使用不同的色 标.Q值随频率的增加呈增大的趋势.整个区域的平 均Q。值为507.Q。值的变化范围较大,从308至 808.在对数域低频Q值较高频Q值更为离散.Zhao 等(2010)获得中国东北地区的平均Q。值是469. Ranasinghe等(2015)利用中国东北地区高密度台 网资料,采用双台法测量台网覆盖区域的Lg波Q。 值,主要包括二连盆地、大兴安岭南段、松辽盆地和 长白山,平均的 Q。值是 950. Xie 等(2006)调查了欧 亚大陆的 Lg 波衰减并给出 Q。值图像. 他们获得中 国东北地区的 Q。均值大约是 500. 就共同的探测区 域而言,前人的结果与我们的成像结果很接近. 然 而,我们在研究中使用更多的台站资料,双台数据大 幅度增加,不仅获得空间上高分辨率的成像结果,而 且更加有效地处理震源函数与 Q 值之间的数据权 衡,使 Q 值结果更为准确. 图 5d 是利用棋盘格方法 对 1.0 Hz 的 Lg 波 Q 值成像进行分辨率分析重建 的 1.5°×1.5°的 Q 值扰动量图像. 可以看出,中国 东北和朝鲜半岛地区的成像分辨率达到1.5°,在射





图中标出了典型的地质块体单元,包括松辽盆地(SB)、渤海湾盆地(BB)、

长白山(CM)和日本海(JS)等.注意不同频率的Q值图像对应的色标不同.

Fig. 5 (a)—(c) Selected images at 0.5 Hz, 1.0 Hz and 2.0 Hz, respectively, and (d) Q perturbation recovery at 1.5°×1.5° for checkerboard resolution analysis at 1.0 Hz

at 1.5 × 1.5 for encekerboard resolution analysis at 1.0 Hz

The typical geo-blocks, Songliao basin (SB), Bohai bay basin (BB), Changbai mountains (CM), and Japan Sea (JS),

are labelled. Note that different scales for $Q_{\rm Lg}$ maps at individual frequencies.

线分布较好的区域,如渤海湾、长白山和朝鲜半岛, 成像的空间分辨率达到 1.0°以上.

Lg波衰减与地质构造具有较好的相关性.例 如,稳定的前寒武纪克拉通的Q值较高,中生代和 新生代以来的造山带地区地壳 Q 值较低(如, Mitchell et al., 1997, 2008; Zhao and Xie, 2016; Zhao et al., 2010, 2013a, 2013b). 对于不同的地质块体,使用统 计平均的 QLg 能够稳定地表达其衰减特性(Zhao and Xie, 2016; Zhao et al., 2010; 2013a, 2013b). 图 6显示了不同的构造区域宽频带 QLg 随频率的变 化.其中,图 6a 和 6b 分别是渤海湾盆地(BB)和长 白山(CM)的 Q_{Lg}值,对直接从成像结果中提取的 QLg值(浅灰色十字丝)进行统计,求取均值和方差 (红色三角形、蓝色圆圈和误差棒),图中标出了统计 的平均 Q。值和误差范围(Zhao et al., 2010, 2013a, 2015).图 6c 汇总了地质块体的平均 QLg 随频率的变 化,其中灰度区域展示了 0.2~2.0 Hz 频带内的 QLg值,它能够明显区分不同地质块体的衰减特征. 然而,在该频带以外的低频和高频 Q_{Lg}值重叠明显. 中国东北和朝鲜半岛地区的统计平均 Q。值是 393, 变化范围是 287~539. 火山岩山脉地区的衰减较 弱,Q。值较高(大兴安岭:575;长白山:516;朝鲜半 岛:516),沉积盆地衰减相对较强,Q。值稍稍偏低(松辽盆地:507;渤海湾盆地:360;二连盆地:490),海水覆盖区域衰减最为强烈,低Q。值特征显著(日本海:311;黄海:384;日本南部:314).

在 0. 2~2.0 Hz 之间的宽频带 Q_{Lg} 值能够有效 地表达不同地质块体的衰减属性,如图 6c 所示.因此, 通过计算该频带范围内的 Q_{Lg} 平均值,即 $Q_{Lg}(0.2~$ 2.0 Hz),我们提取宽频带地壳衰减的属性.最近, 我们用 $Q_{Lg}(0.2~2.0$ Hz)的低值异常约束了土耳 其一伊朗—青藏高原地区的地壳内高温异常区,给 出了青藏高原地区可能的地壳物质流动的模式 (Zhao and Xie, 2016; Zhao et al., 2013a).图 7a 显 示了中国东北和朝鲜半岛地区的宽频带 $Q_{Lg}(0.2~$ 2.0 Hz)图像.与以前的研究结果(图 7b)(Zhao et al., 2010, 2013b)相比,具有相同的地壳衰减特征. 然而,本研究所得到松辽盆地的 Q 值高于以前的研 究结果,这可能是采用更多的台站可以获得更多的 局部特征.

利用剖面图能够调查宽频带的地壳衰减结构与 区域构造之间的依赖关系(Zhao and Xie, 2016; Zhao et al., 2013a, 2013b).图 8 是 4 个纬度的 Q_{Lg} 剖面图.沿着不同的纬度剖面,从上至下比较了火山



图 6 (a)和(b)分别是渤海湾盆地(BB)和长白山(CM)的频率依赖的 Lg 波 Q 值, (c)是不同地质块体单元的 QL₂与频率的关系曲线

 (a)和(b)中灰色十字丝是直接测量的 Q 值,红色三角形和蓝色圆圈和它们的误差棒表示平均值,Q⁶ 值和标准差标于图中.(c)中 DM 为大 兴安岭,KP 为朝鲜半岛,ESA 指整个研究区域,SB 为松辽盆地,HB 为海拉尔盆地,EB 为二连盆地,JS 为日本海盆地,SJ 为日本南部地区. Fig. 6 (a),(b) Frequency-dependent Lg-wave Q for the Bohai bay basin (BB) and Changbai mountains (CM),

respectively. (c) $Q_{\rm Lg}$ versus frequency for different geo-blocks

In (a) and (b), gray crosses are directly measured *Q*, symbols with error bars are average values, and *Q*₀ values and their standard deviations values are labeled. In (c), DM, Da Hinggan Ling mountains; KP, Korean Peninsula; ESA, Entire studied area; SB, Songliao basin; HB, Hailar basin; EB, Erlian basin; JS, Japan Sea; SJ, Southern Japan.



图 7 不同观测结果的比较

(a)和(b)分别是本研究和 Zhao 等(2010, 2013b)获得的中国东北和朝鲜半岛地区 0.2~2.0 Hz 的宽频带平均 Q_{Lg},(c)是来自 CRUST1.0 地壳结构模型的沉积层厚度分布图(Laske et al., 2013),(d)为地球深部 100 km 处的热流密度(Artemieva and Mooney, 2001),(e)地壳厚度(Laske et al., 2013),(f)是 Zhao等(2015)获得的上地幔顶部 Pn 波衰减分布.图中给出了火山分布和 4 个主要的 地质块体单元:松辽盆地(SB),渤海湾盆地(BB),长白山(CM)和日本海(JS)等.

Fig. 7 Maps showing different observations for comparison

The average Q_{Lg} between 0.2 and 2.0 Hz obtained in this study (a) and by Zhao et al. (2010, 2013b) (b), (c) sediment thickness based on CRUST1.0 model (Laske et al., 2013), (d) estimated heat flow density at a depth of 100 km (Artemieva and Mooney, 2001), (e) crustal thickness (Laske et al., 2013) and (f) uppermost mantle Pn attenuation obtained by Zhao et al. (2015), along with volcanic mechanisms and major geological provinces. Songliao basin (SB), Bohai bay basin (BB), Changbai mountains (CM), and Japan Sea (JS).



Moho 面深度(Laske et al., 2013)和 QLg和QPn(Zhao et al., 2015)随频率的变化.

Fig. 8 Selected cross-sections of the broadband Q_{Lg} values for 4 latitudes

(a) 48°N, (b) 44°N, (c) 40°N and (d) 36°N. From top to bottom, the panels compare the volcanic mechanisms, surface topography, seismicity, Moho depth (Laske et al. , 2013), and Q_{Lg} and Q_{Pn}(Zhao et al. , 2015) versus frequency.

分布、地表地形、地震活动性、来自 CRUST1.0(Laske et al., 2013)的 Moho 面深度、Q_{Ls}和 Q_{Pn}随频率的 变化,其中 Q_{Pn}是根据朝鲜核爆的观测资料获得的 (Zhao et al., 2015).相应的纬度标于图中.主要的 火山和地质块体用英文缩写标出.如图 8a 所示,北 纬 48°剖面经过两个典型的火山区域,阿尔山(AES) 和五大莲池(WDLC).火山与上地幔顶部的强烈衰

减相对应,但地壳 Lg 波 Q 值图像没有明显异常.L 等(2016)利用高密度噪声成像获得五大莲池火山下 方的低速区,并推测为壳内岩浆囊,它的横向尺度约 为 10 km.因此,使用分辨率约为 1°的 Lg 波 Q 值成 像,无法分辨较小的壳内岩浆囊.图 8b 为北纬 44° 剖面,经过大兴安岭(DM)、松辽盆地(SB)和长白山 (CM)火山区域.长白山火山的起源可以追溯到上 地幔,但地壳衰减图像没有指示呈现强衰减的岩浆 囊的存在.图 8c为北纬40°剖面,经过大兴安岭 (DM)和长白山(CM)火山区域,中间是地震多发的 唐山地区.这一地区地震活动性非常强烈,可能指示 了岩石圈断裂的存在.日本海域地壳厚度变薄,阻挡 Lg 波的传播,出现较低的Q值(Zhang and Lay, 1995). 图 8d 为北纬36°剖面,经过渤海湾盆地(BB)、黄海 (HS)、朝鲜半岛(KP)和日本岛南部(JS).海水覆盖 和较厚的沉积层,可能是渤海湾盆地和黄海盆地出 现地壳强衰减的原因.日本岛南部构造运动活跃,地 震活动性强烈,地壳 Lg 波和上地幔 Pn 波衰减都很 强烈.

4 讨论

地震 Lg 波衰减与地壳结构、温度和流体相介 质密切相关(如, Bürgmann and Dresen, 2008; Campillo et al., 1985, 1993; Shapiro et al., 1996; Solomon, 1972; Zhang and Lay, 1995). 在中国东北和朝鲜半 岛地区,地壳内的强烈衰减区与海水覆盖和较厚沉 积相对应(Zhao et al., 2010, 2013b). 图 7 比较了 不同的观测结果.图 7a 和 7b 是使用不同数据得到 的 0.2~2.0 Hz 的宽频带 Q_{Lg}值. 图 7c 是地壳沉积 层的厚度(Laske et al., 2013),较厚的沉积层是该 地区 Lg 波强烈衰减的主要成因. 图 7d 是地球深部 100 km 处的热流密度(Artemieva and Mooney, 2001),高热流值与该地区上地幔 Sn 波不发育的区 域对应良好(Rapine and Ni, 2003). 图 7e 是地壳厚 度(Laske et al., 2013). 很明显,日本海地壳厚度较 薄,阻挡 Lg 波传播,呈现 Lg 波强烈衰减. Zhao 等 (2015)利用朝鲜核爆的观测资料获得的上地幔顶部 Pn 波衰减变化. 地壳 Lg 波和上地幔 Pn 波的衰减 并不对应,说明地壳上地幔结构是解耦的.中国东北 地区上地幔温度较高,大约为900~1350℃,热状态 相当于大洋下的上地幔温度(邓晋福等, 1987). 与 克拉通地区相比,处于过热状态可能是中国东北和 朝鲜半岛地区岩石圈构造活动的主要原因,与新生 代时期的大陆裂谷构造相吻合.

西太平洋板块的俯冲与微板块地体拼贴可能是 形成火山岩带的构造环境(如,李三忠等,2014).板 块俯冲作用使岩石圈底部发生弯曲,向下弯曲的地 方由于地幔对流作用发生拆沉(Seber et al., 1996),软流圈上涌使岩石圈拉张而形成裂谷盆地. 因为地幔对流存在不均匀性,岩石圈发生拆沉进入 软流圈会导致软流圈上涌,可能形成断陷盆地 (Ziegler and Cloetingh, 2004). 岩石圈与软流圈和 地壳与地幔的物质相互作用,都会产生大量的热上 涌.对于这样的裂谷盆地区域,因为底部加热使构造 活动性加强,会导致相对较强的 Lg 波衰减.中国东 北与朝鲜半岛地区上地幔 Pn 波和 Sn 波表现为低 速和强衰减(Rapine and Ni, 2003; Zhao et al., 2015). 这意味着地壳和上地幔之间作用强烈,在火山发育 的区域如五大莲池地区的下地壳与上地幔顶部的物 质可能处于半熔融状态.在中国东北和朝鲜半岛地 区的深部构造较为发育,如郯庐断裂带,构成幔源热 液的上升通道,可能使中地壳出现低速高导的软弱 层,在地表呈现出较高的大地热流值和温泉发育.

基于单台、双台和双事件数据的 Lg 波 Q 值成 像方法忽略了震源辐射花样和传播过程中产生的随 机误差,可能限制成像分辨率.因此,Q值模型对火 山通道、热点机制等没有直接的显示.通过对不同尺 度的地质块体进行统计分析,发现 Q 值与频率的关 系在宽频带范围内不再是对数域的线性关系.但在 某一窄的频段内,如0.05~1.5 Hz,0.5~2.0 Hz, 1.6~8.0 Hz,Q 值与频率仍然表现为对数域的线性 关系.中国东北和朝鲜半岛地区的地壳 Lg 波 Q 值 模型,有助于提高朝鲜地下核试验震级测定和核爆 当量估计的精度(Zhao et al., 2008, 2012, 2014, 2016, 2017;赵连锋等,2017;谢小碧和赵连锋, 2018).

5 结论

根据 113 个区域地震事件在 602 个宽频带地震 台站的垂直分量波形资料,我们发展了中国东北和 朝鲜半岛地区高分辨率的地壳 Lg 波 Q值模型.整 个研究区的平均 Q。值为 429,由南向北呈增大的趋势.较低的 Q值与沉积盆地相对应,较高的 Q值出 现在大兴安岭和长白山等火山岩山脉区域.活动构 造往往出现在 Q值梯度较大的位置.发生在中生代 的火山岩喷发后冷却和较厚的沉积层能够对较高和 较低的 Q值提供直接的地质解释(Feng et al., 2010; Shapiro et al., 1996).然而, Lg 波的强烈衰 减与深部构造活动性密切相关(Fan and Lay, 2002, 2003a, 2003b; Zhao and Xie, 2016; Zhao et al., 2013a), 这对研究中国东部岩石圈减薄具有重要意义.

致谢 谨此祝贺姚振兴先生从事地球物理教学科研 工作 60 周年. 地震波形资料从中国地震台网中心 (CENC),中国地震局地球物理研究所国家数字测 震台网数据备份中心(郑秀芬等,2009),美国地震 联合会数据管理中心(IRIS DMC)收集.图件绘制 采用 GMT 软件(www.soest.hawaii.edu/gmt) (Wessel and Smith, 1998).

References

- Aggarwal S K, Khan P K. 2016. Q_{Lg} tomography in Gujarat, Western India. Phys. Chem. Earth, 95: 135-149, doi: 10. 1016/j. pce. 2015. 12.003.
- Akinci A, Ibáñez J M, Del Pezzo E, et al. 1995. Geometrical spreading and attenuation of Lg waves. A comparison between western Anatolia (Turkey) and southern Spain. *Tectonophysics*, 250 (1-3): 47-60.
- Artemieva I M, Mooney W D. 2001. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study. J. Geophys. Res., 106(B8): 16387-16414.
- Bao X Y, Sandvol E, Ni J, et al. 2011. High resolution regional seismic attenuation tomography in eastern Tibetan Plateau and adjacent regions. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L16304, doi: 10. 1029/2011GL048012.
- Bouchon M. 1982. The complete synthesis of seismic crustal phases at regional distances. J. Geophys. Res., 87(B3): 1735-1741, doi: 10.1029/Jb087ib03p01735.
- Bürgmann R, Dresen G. 2008. Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 36(1): 531-567, doi: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124326.
- Calvert A, Sandvol E, Seber D, et al. 2000. Propagation of regional seismic phases (Lg and Sn) and Pn velocity structure along the Africa-Iberia plate boundary zone: Tectonic implications. *Geophys. J. Int.*, 142(2): 384-408, doi: 10.1046/j.1365-246x.2000.00160.
 x.
- Campillo M, Plantet J L, Bouchon M. 1985. Frequency-dependent attenuation in the crust beneath central France from Lg waves: Data analysis and numerical modeling. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75(5): 1395-1411.
- Campillo M, Feignier B, Bouchon M, et al. 1993. Attenuation of crustal waves across the Alpine range. J. Geophys. Res., 98 (B2): 1987-1996, doi: 10.1029/92jb02357.
- Chun K Y, West G F, Kokoski R J, et al. 1987. A novel technique for measuring Lg attenuation-results from eastern Canada between 1 to 10 Hz. Bull. Seism. Soc. Am., 77(2): 398-419.
- Chun K Y, Wu Y, Henderson G A. 2009. Lg attenuation near the North Korean border with China, Part I: Model development from regional earthquake sources. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99 (5): 3021-3029, doi: 10.1785/0120080316.
- Cong L L, Mitchell B J. 1998. Lg coda Q and its relation to the geology and tectonics of the Middle East. Pure Appl. Geophys., 153

(2-4): 563-585.

- Deng J F, E M L, Lu F X. 1987. The composition, structure and thermal condition of the upper mantle beneath Northeast China. Acta Petrologica Et Mineralogica (in Chinese), 6(1): 1-10.
- Fan G W, Lay T. 2002. Characteristics of Lg attenuation in the Tibetan plateau. J. Geophys. Res., 107(B10): ESE 14-1-ESE 14-15, doi: 10.1029/2001JB000804.
- Fan G W, Lay T. 2003a. Strong Lg attenuation in the Tibetan Plateau. Bull. Seism. Soc. Am., 93(5): 2264-2272.
- Fan G W, Lay T. 2003b. Strong Lg wave attenuation in the Northern and Eastern Tibetan Plateau measured by a twostation/two-event stacking method. Geophys. Res. Lett., 30 (10): 1530.
- Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. 2010. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, Northeast China. Basin Res., 22(1): 79-95, doi: 10.1111/j. 1365-2117.2009.00445. x.
- Fisk M D, Gray H L, McCartor G D. 1996. Regional event discrimination without transporting thresholds. Bull. Seism. Soc. Am., 86(5): 1545-1558.
- Fisk M D. 2006. Source spectral modeling of regional P/S discriminants at nuclear test sites in China and the former Soviet Union. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96(6): 2348-2367.
- Ford S R, Phillips W S, Walter W R, et al. 2010. Attenuation tomography of the Yellow Sea/Korean Peninsula from codasource normalized and direct Lg amplitudes. Pure Appl. Geophys., 167(10): 1163-1170.
- Ge X H, Ma W P. 2007. Mesozoic-Cenozoic tectonic framework of southern Northeast Asia. *Geology in China* (in Chinese), 34 (2): 212-228.
- Hartse H E, Taylor S R, Phillips W S, et al. 1997. A preliminary study of regional seismic discrimination in central Asia with emphasis on western China. Bull. Seism. Soc. Am., 87(3): 551-568.
- Herrmann R B, Kijko A. 1983. Short-period Lg magnitudes: Instrument, attenuation, and source effects. Bull. Seism. Soc. Am., 73(6A): 1835-1850.
- Hong T K, Baag C E, Choi H, et al. 2008. Regional seismic observations of the 9 October 2006 underground nuclear explosion in North Korea and the influence of crustal structure on regional phases. J. Geophys. Res., 113(B3): B03305, doi: 10.1029/ 2007jb004950.
- Hong T K. 2010. Lg attenuation in a region with both continental and oceanic environments. Bull. Seism. Soc. Am., 100(2): 851-858.
- Hong T K. 2013. Seismic discrimination of the 2009 North Korean nuclear explosion based on regional source spectra. J. Seismol., 17 (2): 753-769, doi: 10.1007/s10950-012-9352-1.
- Kadinsky-Cade K, Barazangi M, Oliver J, et al. 1981. Lateral variations of high-frequency seismic wave propagation at regional distances across the Turkish and Iranian plateaus. J. Geophys.

Res., 86(B10): 9377-9396, doi: 10.1029/Jb086ib10p09377.

- Kennett B L N. 1984. Guided wave propagation in laterally varying media. 1. Theoretical development. *Geophys. J. R. astr.* Soc., 79(1): 235-255.
- Knopoff L. 1964. Q. Rev. Geophys., 2(4): 625-660.
- Knopoff L, Schwab F, Kausel E. 1973. Interpretation of Lg. Geophys. J. R. astr. Soc., 33(4): 389-404, doi: 10.1111/j. 1365-246X.1973.tb02375.x.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. 2013. Update on CRUST1. 0-A 1-degree global model of Earth's crust. // EGU General Assembly 2013. Vienna, Austria.
- Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. 2014. Processes of ocean-continent transition and coupling. *Periodical of Ocean University of China* (in Chinese), 44(10): 113-133.
- Li Y H, Wu Q J, Pan J T, et al. 2012. S-wave velocity structure of northeastern China from joint inversion of Rayleigh wave phase and group velocities. *Geophys. J. Int.*, 190(1): 105-115, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05503. x.
- Li Z W, Ni S D, Zhang B L, et al. 2016. Shallow magma chamber under the Wudalianchi Volcanic Field unveiled by seismic imaging with dense array. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (10): 4954-4961, doi: 10.1002/2016GL068895.
- McNamara D E, Owens T J, Walter W R. 1996. Propagation characteristics of Lg across the Tibetan Plateau. Bull. Seism. Soc. Am., 86(2): 457-469.
- Mellors R J, Camp V E, Vernon F L, et al. 1999. Regional waveform propagation in the Arabian Peninsula. J. Geophys. Res., 104(B9): 20221-20235.
- Mitchell B J, Pan Y, Xie J K, et al. 1997. Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to crustal evolution. J. Geophys. Res., 102(B10): 22767-22779.
- Mitchell B J, Cong L L, Ekstrom G. 2008. A continent-wide map of 1-Hz Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to lithospheric evolution. J. Geophys. Res., 113(B4): B04303, doi: 10.1029/2007JB005065.
- Mousavi S M, Cramer C H, Langston C A. 2014. Average Q_{Lg}, Q_{Sn}, and observation of Lg blockage in the Continental Margin of Nova Scotia. J. Geophys. Res., 119(10): 7722-7744, doi: 10.1002/2014JB011237.
- Murphy J R, Stevens J L, Kohl B C, et al. 2013. Advanced seismic analyses of the source characteristics of the 2006 and 2009 North Korean nuclear tests. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 103(3): 1640-1661, doi: 10.1785/0120120194.
- Nuttli O W. 1973. Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North America. J. Geophys. Res., 78(5): 876-885, doi: 10.1029/Jb078i005p00876.
- Nuttli O W. 1986a. Lg magnitudes of selected east Kazakhstan underground explosions. Bull. Seism. Soc. Am., 76(5): 1241-1251.
- Nuttli O W. 1986b. Yield estimates of Nevada test site explosions obtained from seismic Lg waves. J. Geophys. Res., 91(B2): 2137-2151, doi: 10.1029/Jb091ib02p02137.

- Ottemöller L. 2002. Lg wave Q tomography in Central America. Geophys. J. Int., 150(1): 295-302.
- Ottemöller L, Shapiro N M, Singh S K, et al. 2002. Lateral variation of Lg wave propagation in southern Mexico. J. Geophys. Res., 107(B1): 2008, doi: 10.1029/2001JB000206.
- Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. ACM Trans. Math. Softw., 8(1): 43-71, doi: 10.1145/355984.355989.
- Pasyanos M E, Matzel E M, Walter W R, et al. 2009. Broad-band Lg attenuation modelling in the Middle East. Geophys. J. Int., 177(3): 1166-1176.
- Pei S P, Zhao J M, Rowe C A, et al. 2006. M_L amplitude tomography in North China. Bull. Seism. Soc. Am., 96 (4A): 1560-1566.
- Phillips W S, Hartse H E, Taylor S R, et al. 2000. 1 Hz Lg Q tomography in Central Asia. Geophys. Res. Lett., 27(20): 3425-3428.
- Phillips W S, Hartse H E, Rutledge J T. 2005. Amplitude ratio tomography for regional phase Q. Geophys. Res. Lett., 32 (21): L21301, doi: 10.1029/2005GL023870.
- Phillips W S, Stead R J. 2008. Attenuation of Lg in the western US using the USArray. *Geophys. Res. Lett.*, 35(7): L07307, doi: 10.1029/2007gl032926.
- Ranasinghe N R, Gallegos A C, Trujillo A R, et al. 2015. Lg attenuation in northeast China using NECESSArray data. *Geophys. J. Int.*, 200(1): 67-76, doi: 10.1093/gji/ggu375.
- Rapine R R, Ni J F. 2003. Propagation characteristics of Sn and Lg in northeastern China and Mongolia. Bull. Seism. Soc. Am., 93(2): 939-945.
- Richards P G, Kim W Y. 2007. Seismic signature. *Nat. Phys.*, 3 (1): 4-6, doi: 10.1038/Nphys495.
- Ringdal F, Marshall P D, Alewine R W. 1992. Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site. *Geophys. J. Int.*, 109(1): 65-77, doi: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00079.x.
- Rodgers A J, Ni J F, Hearn T M. 1997. Propagation characteristics of short-period Sn and Lg in the Middle East. Bull. Seism. Soc. Am., 87(2): 396-413.
- Sandvol E, Al-Damegh K, Calvert A, et al. 2001. Tomographic imaging of Lg and Sn propagation in the Middle East. Pure Appl. Geophys., 158 (7): 1121-1163, doi: 10. 1007/ Pl00001218.
- Seber D, Barazangi M, Ibenbrahim A, et al. 1996. Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and Rif-Betic mountains. *Nature*, 379(6568): 785-790.
- Shapiro N, Béthoux N, Campillo M, et al. 1996. Regional seismic phases across the Ligurian Sea: Lg blockage and oceanic propagation. *Phys. Earth Planet. Int.*, 93(3-4): 257-268, doi: 10.1016/0031-9201(95)03069-7.
- Singh C, Mondal P, Singh S, et al. 2015. Lg attenuation tomographic models of Himalaya and southern Tibet. Tectonophysics, 664: 176-181, doi: 10.1016/j.tecto.2015.09.009.

- Solomon S C. 1972. Seismic-wave attenuation and partial melting in the upper mantle of North America. J. Geophys. Res., 77 (8): 1483-1502.
- Street R L, Herrmann R B, Nuttli O W. 1975. Spectral characteristics of the Lg wave generated by central United States earthquakes. Geophys. J. R. astr. Soc., 41(1): 51-63.
- Taylor S R, Denny M D, Vergino E S, et al. 1989. Regional discrimination between NTS explosions and western United States earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am., 79(4): 1142-1176.
- Walter W R, Mayeda K M, Patton H J. 1995. Phase and spectral ratio discrimination between NTS earthquakes and explosions. Part 1. Empirical observations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85(4): 1050-1067.
- Wen L X, Long H. 2010. High-precision location of North Korea's 2009 nuclear test. Seism. Res. Lett., 81(1): 26-29, doi: 10. 1785/gssrl. 81. 1. 26.
- Wessel P, Smith W H F. 1998. New, improved version of the generic mapping tools released. EOS, 79(47): 579.
- Xie J, Mitchell B J. 1990. Attenuation of multiphase surface waves in the basin and range province, Part I: Lg and Lg coda. Geophys. J. Int., 102(1): 121-137.
- Xie J K. 1993. Simultaneous inversion for source spectrum and path Q using Lg with application to Semipalatinsk explosions. Bull. Seism. Soc. Am., 83(5): 1547-1562.
- Xie J. 2002. Lg Q in the eastern Tibetan plateau. Bull. Seism. Soc. Am., 92(2): 871-876.
- Xie J, Gök R, Ni J, et al. 2004. Lateral variations of crustal seismic attenuation along the INDEPTH profiles in Tibet from Lg Q inversion. J. Geophys. Res., 109(B10): B10308, doi: 10.1029/ 2004JB002988.
- Xie J, Wu Z, Liu R, et al. 2006. Tomographic regionalization of crustal Lg Q in eastern Eurasia. Geophys. Res. Lett., 33(3): L03315, doi: 10.1029/2005GL024410.
- Xie M Q. 2000. Collage Plate Tectonics and Its Drive Mechanism— The Tectonic Evolution in Northeast China and Its Adjacent Areas (in Chinese). Beijing: Science Press, 5-11.
- Xie X B, Lay T. 1994. The excitation of Lg waves by explosions: A finite-difference investigation. Bull. Seism. Soc. Am., 84(2): 324-342.
- Xie X B, Zhao L F. 2018. The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(3):889-904, doi:10.6038/cjg2018L0677.
- Xu Y, Zhang G B, Wang G M, et al. 2014. 3-D velocity structure and the deep mechanism of the origin of volcanoes in Northeast China. *Earth Sci. Front.* (in Chinese), 21(4): 255-265, doi: 10.13745/j. esf. 2014.04.026.
- Zhang K X, Pan G T, He W H, et al. 2015. New division of tectonic-strata superregion in China. Earth Sci. -J. China Univ. Geosci. (in Chinese), 40(2): 206-233, doi: 10.3799/dqkx.2015. 016.
- Zhang M, Wen L X. 2013. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test. *Geophys. Res. Lett.*, 40

(12): 2941-2946, doi: 10.1002/grl.50607.

- Zhang M, Wen L X. 2015. Seismological evidence for a low-yield nuclear test on 12 May 2010 in North Korea. Seism. Res. Lett., 86(1): 138-145, doi: 10.1785/02201401170.
- Zhang T R, Lay T. 1995. Why the Lg phase does not traverse oceanic crust. Bull. Seism. Soc. Am., 85(6): 1665-1678.
- Zhao L F, Wang W M, Yao Z X. 2004. Seismic attenuation tomography using the successive linearization method. *Chinese* J. Geophys. (in Chinese), 47(4): 691-696.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2008. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test. Bull. Seism. Soc. Am., 98(6): 2571-2589, doi: 10. 1785/0120080128.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2010. Seismic Lg-wave Q tomography in and around Northeast China. J. Geophys. Res., 115: B08307, doi: 10.1029/2009JB007157.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2012. Yield estimation of the 25 May 2009 North Korean nuclear explosion. Bull. Seism. Soc. Am., 102(2): 467-478, doi: 10.1785/0120110163.
- Zhao L F, Xie X B, He J K, et al. 2013a. Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography. Earth Planet. Sci. Lett., 383: 113-122, doi: 10.1016/j.epsl.2013.09.038.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2013b. Crustal Lg attenuation within the North China Craton and its surrounding regions. *Geophys. J. Int.*, 195(1): 513-531, doi: 10.1093/ gji/ggt235.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2014. The 12 February 2013 North Korean underground nuclear test. Seism. Res. Lett., 85 (1): 130-134, doi: 10.1785/0220130103.
- Zhao L F, Xie X B, Tian B F, et al. 2015. Pn wave geometrical spreading and attenuation in Northeast China and the Korean Peninsula constrained by observations from North Korean nuclear explosions. J. Geophys. Res., 120(11): 7558-7571, doi: 10.1002/2015JB012205.
- Zhao L F, Xie X B. 2016. Strong Lg-wave attenuation in the Middle East continental collision orogenic belt. *Tectonophysics*, 674: 135-146, doi: 10.1016/j.tecto.2016.02.025.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2016. Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test. *Geophys. J. Int.*, 206(3): 1487-1491, doi: 10. 1093/gji/ggw239.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2017. The 9 September 2016 North Korean underground nuclear test. Bull. Seism. Soc. Am., 107(6): 3044-3051, doi: 10.1785/0120160355.
- Zhao L F, Xie X B, He X, et al. 2017. Seismological discrimination and yield estimation of the 3 September 2017 Democratic People's Republic of Korea (DPRK) underground nuclear test. *Chin. Sci. Bull.* (in Chinese), 62: 4163-4168, doi: 10.1360/ N972017-00979.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph

Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(5): 1412-1417, doi: 10.3936/j.issn.0001-5733.2009.5.031.

- Zhu J S, Cai X L, Cao J M, et al. 2006. Lithospheric structure and geodynamics in China and its adjacent areas. *Geology in China* (in Chinese), 33(4): 793-803.
- Ziegler P A, Cloetingh S. 2004. Dynamic processes controlling evolution of rifted basins. *Earth-Sci. Rev.*, 64(1-2): 1-50.
- Zor E, Sandvol E, Xie J K, et al. 2007. Crustal attenuation within the Turkish plateau and surrounding regions. Bull. Seism. Soc. Am., 97(1B): 151-161, doi: 10.1785/0120050227.

附中文参考文献

- 邓晋福,鄂莫岚,路凤香. 1987. 中国东北地区上地幔组成、结构及 热状态. 岩石矿物学杂志,6(1):1-10.
- 葛肖虹,马文璞. 2007. 东北亚南区中-新生代大地构造轮廓. 中国 地质,34(2):212-228.
- 李三忠,赵淑娟,刘鑫等. 2014. 洋-陆转换与耦合过程. 中国海洋 大学学报,44(10):113-133.
- 谢鸣谦. 2000. 拼贴板块构造及其驱动机理:中国东北及邻区的大

地构造演化.北京:科学出版社,5-11.

- 谢小碧,赵连锋. 2018. 朝鲜地下核试验的地震学观测. 地球物理 学报,61(3):889-904, doi:10.6038/cjg2018L0677.
- 徐峣,张贵宾,汪国明等. 2014. 中国东北地区三维速度结构与火 山起源的深部机制. 地学前缘, 21(4): 255-265, doi: 10. 13745/j. esf. 2014. 04. 026.
- 张克信,潘桂棠,何卫红等.2015.中国构造 —— 地层大区划分新 方案.地球科学——中国地质大学学报,40(2):206-233,doi: 10.3799/dqkx.2015.016.
- 赵连锋,王卫民,姚振兴. 2004. 逐次线性化衰减层析成像方法研 究. 地球物理学报,47(4):691-696.
- 赵连锋,谢小碧,何熹等. 2017. 2017 年 9 月 3 日朝鲜地下核试验 的地震学鉴别和当量估计.科学通报,62:4163-4168,doi:10. 1360/N972017-00979.
- 郑秀芬, 欧阳飚, 张东宁等. 2009. "国家数字测震台网数据备份中 心"技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物 理学报, 52(5): 1412-1417, doi: 10.3936/j.issn.0001-5733. 2009.5.031.
- 朱介寿,蔡学林,曹家敏等. 2006. 中国及相邻区域岩石圈结构及 动力学意义. 中国地质, 33(4): 793-803.

(本文编辑 何燕)