



王凯明, 鲁来玉, 刘庆华, 等. 2018. 基于地震背景噪声互相关函数研究介质衰减综述. 地球物理学进展, 33(1): 0112-0124, doi: 10.6038/pg2018AA0552.

WANG Kai-ming, LU Lai-yu, LIU Qing-hua, et al. 2018. Review on the research of earth's attenuation based on the ambient seismic noise cross-correlation function. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(1): 0112-0124, doi: 10.6038/pg2018AA0552.

## 基于地震背景噪声互相关函数研究介质衰减综述

### Review on the research of earth's attenuation based on the ambient seismic noise cross-correlation function

王凯明<sup>1,2</sup>, 鲁来玉<sup>1,2\*</sup>, 刘庆华<sup>3</sup>, 王少瞳<sup>1,2</sup>

WANG Kai-ming<sup>1,2</sup>, LU Lai-yu<sup>1,2\*</sup>, LIU Qing-hua<sup>3</sup>, WANG Shao-tong<sup>1,2</sup>

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2. 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081

3. 河南省地震局, 郑州 450016

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2. Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Beijing 100081, China

3. Earthquake Administration of Henan Province, Zhengzhou 450016, China

**摘要** 近年来, 基于地震背景噪声互相关函数的地震层析成像技术在研究地球浅部结构中获得广泛应用. 目前, 绝大多数的背景噪声成像仅仅利用了互相关函数的相位信息, 即利用走时来反演地球介质的速度和各向异性特征. 利用互相关函数的振幅信息提取介质的衰减仍在研究之中. 从背景噪声场中提取的衰减信息可以从非弹性的角度更好地约束地壳和上地幔的精细结构, 为地球动力学解释提供更多证据. 利用背景噪声提取介质衰减, 有两种基本的方法: (1) 基于时间域噪声互相关函数的相对振幅随台间距变化, 即衰减介质中的地震干涉方法; (2) 基于频率域空间相干曲线的拟合, 即考虑衰减的空间自相关 (SPAC) 方法. 这两种衰减提取的方法在原理上是一致的. 本文分别评述这两种方法的理论发展和处理过程, 介绍背景噪声互相关技术提取衰减的应用成果. 背景噪声互相关函数幅度受噪声源分布、固有衰减、散射、聚焦和散焦等因素的共同影响, 文中对此做了评述. 利用背景噪声场提取衰减时, 需要谨慎对待这些因素的影响. 最后对背景噪声衰减提取和今后的发展前景进行了展望. 随着密集台阵的布设和衰减提取方法的不断完善, 噪声互相关幅度信息的研究将会获得更为广泛的应用.

**关键词** 噪声互相关函数; 衰减; SPAC; 空间相干

中图分类号 P315

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg2018AA0552

**Abstract** The tomography technology based on the cross-correlation function of ambient seismic noise has been widely applied in the research of the earth shallow structure in recent years. For most of the ambient noise tomography at present, the phase information of Noise Correlation Function (NCF), that is, the travel time measurement is used to extract the seismic velocity and anisotropy of the earth by performing an inversion. The theoretical basis of utilizing the NCF amplitude information to recover the earth's attenuation, however, is still being studied. Attenuation obtained from ambient noise cross-correlation function provides necessary constraint for fine structure of crust and upper mantle from the perspective of anelasticity, alleviating non-uniqueness in geophysical inversion and geodynamical interpretation. There are two fundamental methods to extract attenuation by ambient noise field: (1) curve fitting for the relative amplitude decrease of noise correlation function with interstation distance in time domain, which is also called seismic interferometry in dissipative medium; (2) performing fitting for noise spatial coherence curves in frequency domain, namely attenuated Spatial Autocorrelation method (SPAC). These two attenuation-extraction methods are equivalent in essence, one is performed in time domain while the other one is performed in frequency domain. In this paper, we present the development and processing procedure of these methods. The applications of using NCF to recover attenuation is summarized. The NCF amplitude is affected by noise source distribution, intrinsic attenuation, scattering, focusing and defocusing. These influencing factors are discussed respectively. The factors must be treated carefully when we extract attenuation from ambient noise field. In the last, the prospective on the method of attenuation recovery from ambient noise field is conducted. With the development of tomography technique and dense array deployments the amplitude of the ambient seismic noise is supposed to find more applications in the future.

**Keywords** noise cross-correlation function; attenuation; SPAC; spatial coherence

收稿日期 2017-07-15; 修回日期 2017-12-28.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 国家自然科学基金 (41674062) 资助.

第一作者简介 王凯明, 男, 1990 年生, 山西太原人, 博士研究生, 主要从事地震背景噪声成像的研究. (E-mail: wangkaiming@cea-igp.ac.cn)

\* 通讯作者 鲁来玉, 男, 中国地震局地球物理研究所研究员, 博士生导师, 主要从事地震波的传播与散射理论以及地震层析成像等方面的研究. (E-mail: laiyulu@cea-igp.ac.cn)

## 0 引言

基于地震事件的面波层析成像可以研究区域和全球尺度的地震波速和衰减结构。然而由于地震主要分布在板块边界,以及地震发生的时间具有偶然性,这种方法受限于震源的不均匀分布。例如,在地震发生较少的地区,成像研究依赖远震的震源,这使得重建可靠的短周期结果变得困难,而短周期信号对于约束地壳和上地幔结构至关重要。

随着计算能力的提升和观测数据的增加,地震学家最近利用地震背景噪声方法来研究地球速度结构。相比于地震事件的成像研究,背景噪声场拥有很多优势:(1)背景噪声场存在于地球的不同地区,一天之中的任意时刻都可以记录到活跃的背景噪声;(2)由于不需要震源,背景噪声成像结果的分辨率主要依赖于台站密度;(3)背景噪声场可提供短周期信息;这一范围通常是基于地震事件的层析成像无法获得的。

背景噪声方法的基本原理在很多年前就为人所知。1957年,Aki提出频率域的空间自相关方法(Spatial Auto-Correlation,SPAC)。地面运动的空间相关类似于零阶贝塞尔函数,利用这一关系可以研究台阵之下的相速度;1968年,Claerbout提出如下猜想:两个台站间的脉冲响应可以从空间相关的时域平均中恢复。许多研究者已将其应用在不同的领域,特别是在地震学中,已有众多学者利用背景噪声互相关函数产生近似的格林函数(Estimated Green's Function,EGF),得到了高分辨率的地球面波层析成像(Shapiro *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2010; 唐有彩等, 2011; Yao *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2011; 房立华等, 2013; 鲁来玉等, 2014; 范莉苹等, 2015; 范文渊等, 2015; 刘庆华等, 2015)。大量的理论研究和实际应用表明了这些方法在提取地震波走时信息方面的可靠性(Shapiro and Campillo, 2004; Sabra *et al.*, 2005; Sánchez-Sesma and Campillo, 2006; Yang and Ritzwoller, 2008; Yao *et al.*, 2009a; Yao and Van Der Hilst, 2009b)。背景噪声重建格林函数的方法在国内也获得了广泛的应用:房立华等(2009)基于背景噪声在华北地区开展了短周期 Rayleigh 波层析成像的研究;鲁来玉等(2009)讨论了华北地区背景噪声源的时空分布和频率特性;刘志坤和黄金莉(2010)、Chen等(2010)利用背景噪声互相关方法计算了汶川地震前后震区介质的波速变化;除了能量较强的基阶面波信号,Zhan等(2010)、Wang等(2010)尝试从噪声互相关函数中提取了较弱的体波信号;朱良保和王清东(2011)、徐义贤和罗银河(2015)进一步完善了背景噪声互相关重建格林函数的理论表达;Xie等(2016)对背景噪声重建长周期 Rayleigh 波的精度进行了讨论。

然而,目前大部分的研究仅关注 EGF 的相位信息,即利用背景噪声互相关测量地震波的走时,最近,有研究开始检测 EGF 的振幅信息。从背景噪声互相关中提取的有价值的振幅信息可以作为衰减成像的基础。

地球的衰减结构是地震学研究的一个基本方面。额外的衰减信息有利于解决地球动力学解释中非唯一性的问题。

地壳和上地幔的地震衰减成像十分重要,这主要体现在:(1)与地震速度相比较,地震衰减可以用来辨别地球温度和挥发性物质变化;(2)速度和衰减结构对于地震危险性分析十分重要。沉积盆地对地震波具有放大效应,但衰减会降低这种放大效应,不考虑衰减可能导致更高的衰减振幅预测;(3)从体波衰减的测量中剥离地壳和上地幔的衰减,对未来研究地球更深的衰减结构提供可能。

本文对背景噪声提取衰减做一评述。首先介绍了各种不同的理论模型及进展,然后论述了相关的数据处理方法和研究结果。最后讨论背景噪声提取衰减的影响因素并对未来研究进展提出展望。

## 1 衰减介质中格林函数的重建理论

利用背景噪声互相关函数(Noise Cross-correlation Function, NCF)提取介质的衰减信息,可以从如下两个角度进行,一是比较不同间距的台站对互相关函数相对幅度随台站间距的衰减变化,通过将预测模型和观测的衰减曲线进行拟合来推断介质的衰减系数。二是和衰减介质中扩展的 SPAC 方法类似,在频率域中给出衰减介质中背景噪声的空间相干表达式,将观测的背景噪声相干数据和该表达式进行拟合提取介质衰减。简单来说,这两种途径一个在时间域中进行,一个在频率域中进行,本节从这两个角度评述衰减介质中的地震干涉,即格林函数重建理论,部分描述对时间域和频率域并不做严格区分。

在进行评述之前,我们需要对衰减介质作一说明。众所周知,波在传播过程中的能量损耗有以下因素引起:波的几何扩散、多次散射、介质的固有衰减。多次散射相当于波经过散射体之后,散射体作为新的源引起的几何扩散,除了和几何维度有关外,也和散射体引起的辐射模式相关。从一次源出发的几何扩散,更易于校正和处理,因此,人们更多关注由多次散射和固有衰减引起的波的能量损耗。在地震干涉理论的发展过程中,多次散射一直扮演着重要角色(Larose *et al.*, 2008),Weaver 和 Lobkis(2001)首次基于简正模的能量等分,给出的互相关重建格林函数的理论解释及相应的实验就是针对扩散场的,多数关于互相关重建格林函数的理论模型也要求源尽可能的均匀,这意味着,介质非均匀程度越高,即多次散射效应越强,波场就越接近扩散场,互相关函数更快地收敛于系统的格林函数,这为很多实验所证实。一个极端的例子是,如果只有单一的源,只要介质足够非均匀,多次散射之后,波场相对于位于介质内部的接收位置可视为各向同性的源入射,也可以重建格林函数。由于本文主要关注固有衰减介质中的地震干涉理论,关于多次散射介质,本文仅做简单介绍,不做详细评述,因为多次散射本身在互相关重建格林函数中起着重要作用。早期关于弹性介质中地震干涉理论大都会提及多次散射。一方面,多次散射有助于格林函数的重建,另一方面,由地震干涉技术提取的介质衰减可能包含了散射衰减和固有衰减。在下面的叙述中,提到介质的衰减,更多的指介质的固有衰减,我们尽可能地将术语多次散射和固有衰减区分开来,但有时这种区分并不是特别明确。在第5节中,我们会对多次散射和固有衰减进行专门的

叙述.

### 1.1 非均匀和衰减介质中的地震干涉

假定在地表  $x_1$  和  $x_2$  处记录的波场分别为  $u(x_1)$  和  $u(x_2)$ , 则归一化的时间互相关定义为

$$C_{x_1 x_2}(t) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(x_1, \tau) u(x_2, \tau + t) d\tau, \quad (1)$$

其中  $t$  是时间延迟, 互相关时间长度为  $2T$ . 理论和研究表明: 对两个接收点的记录进行如(1)式所示的互相关运算, 可以得到两点之间的格林函数, 即相当于两个接收点中的一个为源, 在另一点记录到的脉冲响应(Wapenaar, 2004; Wapenaar et al., 2006, 2010a, b). 这种方法在不同领域获得了广泛的应用, 包括超声学(Weaver and Lobkis, 2001)、全球地震学(Campillo and Paul, 2003)、海洋声学(Brooks and Gerstoft, 2007)、勘探地球物理(Schuster, 2009)以及电磁学(Slob and Wapenaar, 2007)等. 在地震学领域, 通常用“地震干涉(Seismic Interferometry)”这一术语来描述这种现象(Schuster, 2009; 陶毅等, 2010), 为了更直接地表述这种方法的本质, 以及考虑到其他学科领域的习惯, 有时也采用更一般的“格林函数的重建(Retrieval of Green's Function)”这一术语.

在均匀弹性介质中, 互相关重建格林函数的理论已经比较成熟. 不同领域的研究者, 基于不同的物理视角和相应假设, 对其进行了理论解释, 比如最早的简正模的能量等分(Lobkis and Weaver, 2001)、均匀分布的非相关源(Snieder, 2004)、时间翻转声学(Derode et al., 2003)、互易定理(van Manen et al., 2006)等. 这些研究表明: 在均匀弹性介质中, 互相关函数(或者其时间微分)正比于系统的格林函数.

对于非均匀的弹性介质, 由于此时波场具有一次场和散射的二次场, 直观上来看, 场场互相关操作之后, 除了一次场与一次场互相关, 二次场与二次场互相关之外, 还有两个交叉项, 即一次场与二次场的互相关, 及反过来二次场与一次场的互相关. 理论研究表明(Snieder et al., 2008; Lu et al., 2011): 由于能量守恒, 这四项的总和仍然可以给出包含一次场和二次场的非均匀介质的格林函数, 光学定理保证了交叉项的取消, 这同时也提供了一种推导光学定理的途径. Snieder等(2008)利用广义光学定理解释了非均匀介质中格林函数重建中的虚假信号是如何消除的. Halliday和Curtis(2009)基于此推导了层状介质中面波的广义光学定理. Margerin和Sato(2011)则将这种思想推广到包含固有衰减的声学介质, 考虑均匀耗散(固有衰减)和多重散射(包含任意数量的散射体), 声源为随机均匀分布的平稳噪声源情形, 重建了多重散射波(尾波)的格林函数, 并给出了此种情况下广义光学定理的形式. Lu等(2011)给出了同时考虑P、SH、SV波散射时并矢形式的广义光学定理.

对于固有衰减介质, 全空间均匀分布的噪声源模型, Roux等(2005)首次证明了在衰减介质中, 互相关仍然可以重建系统的格林函数, 指出重建的格林函数是实际格林函数低通滤波之后的结果, 介质的衰减起到了低通滤波器的作用, 滤波器的频率依赖关系取决于衰减对频率的依赖关系.

对于标量的声学情形, Snieder(2007)将均匀介质的理论推广到包含任意非均匀的密度、压缩模量和固有衰减的介质中, 讨论了衰减声波的地震干涉原理. 特别地, 在均匀衰减介质时使用衰减波动方程, 稳相分析表明了体积分和面源的相对作用. 如果忽略体积分, 格林函数的相位和几何扩散可以从地震干涉中重建, 但是固有衰减信息无法恢复.

Matzel(2007)在实验中观测到NCF振幅随台间距增加而减少, 并认为当观测数据被适当地归一后, 利用幅度信息可以测量与地质构造相联系的细节. 利用空气压缩在有机玻璃板产生的噪声源, Larose等(2007)开展了被动源和主动源实验, 其中被动源互相关重建的振幅与从主动源实验获得的振幅相匹配. Larose等(2007)认为需要考虑一个合适的指数衰减来描述介质的衰减和散射. 国内利用互相关方法研究介质衰减可以更早地追溯到徐平等(2006)开展的场地实验. 通过布设一组线性的台阵, 徐平等(2006)研究了直达S波的衰减, 场地实验的结果表明: S波互相关函数的最大振幅与事件波形的振幅具有相同的衰减规律.

通过将加州中等地震的地面运动与脉冲响应函数相比较, Prieto和Beroza(2008)发现背景噪声互相关函数的相对振幅与地震观测到的振幅相匹配, 这表明从背景噪声互相关的格林函数中提取可靠的相位和振幅响应是可能的.

Gouédard等(2008)将数值实验中合成的原始噪声记录分为直达波部分和多重散射的尾波部分, 针对三种不同的噪声源分布, 分别讨论了利用直达波互相关函数和利用尾波互相关函数重建衰减的格林函数. 对于直达波的互相关函数, 当噪声源均匀分布所有空间时, 格林函数的相位和相对振幅可以被重建; 当噪声源位于稳相区内时, 格林函数的相位可以正确地重建, 尽管此时互相关函数相对振幅仅仅包含介质的衰减信息, 但是在感兴趣的频带范围, 介质的衰减可以忽略; 当噪声源位于稳相区外时, 无法可靠地重建格林函数的相位和振幅. 对于多重散射的尾波互相关函数, 源的分布对格林函数的重建没有影响.

对于三种不同的噪声源分布, Cupillard和Capdeville(2010)数值合成了沿球形表面传播的衰减地震信号. 通过将合成的互相关与精确格林函数全波形相比较, Cupillard和Capdeville(2010)讨论了噪声互相关函数的振幅信息和噪声互相关重建非弹性衰减的能力. 对于特定的源分布和适当的噪声处理过程, 线性台阵的振幅衰减与瑞利波格林函数的衰减是一样的, 此时NCF保留了精确的几何扩散和衰减.

在均匀的衰减介质中, Lin等(2011)认为对于脉冲力激发辐射的波, 给定频率的振幅  $A$  和传播距离  $r$  满足条件为

$$A(r) = \frac{1}{\sqrt{r}} e^{-\alpha r}, \quad (2)$$

其中  $1/\sqrt{r}$  表示几何扩散,  $\alpha$  为介质的衰减系数. 利用这一关系, Lin等(2011)通过拟合不同台间距的方位平均的互相关函数的相对幅度变化, 认为能提取可靠的介质衰减, 这和

Cupillard 和 Capdeville(2010) 的通过数值模拟得到的预测一致。

传统的背景噪声互相关处理,在计算互相关之前涉及到时域的归一化(Bensen *et al.*, 2007),比如 one-bit 操作,即只保留采样点记录的符号信息,正的记录一律取 +1, 负的记录一律取 -1, 这种操作是一种高度的非线性操作,但其互相关函数仍然保留了正确的相位信息。对于噪声源均匀分布的情形, Cupillard 等(2011) 针对 1D 的均匀水平分层模型,理论上解释了 one-bit 操作和原始噪声数据一样,可以保留正确的相位及相对幅度信息。和传统关注相位信息的互相关处理过程相比,为了获得正确的相对幅度信息,他们对互相关的长度给出了一定要求。

对于噪声源非均匀分布的情形, Weaver(2011) 给出了噪声源方向密度平滑变化时,沿台站  $i$  到台站  $j$  的射线,窄带滤波后的互相关函数的幅度表示为

$$X_{i-j} = s_i s_j B_i(\hat{n}_{i-j}) \sqrt{2\pi c/\omega} |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| \exp\left(-i \int_{r_j}^{r_i} \alpha dx\right), \quad (3)$$

其中  $s$  为场地因子,  $B$  为台站  $i$  处,从台站  $i$  指向台站  $j$  的噪声源强度。幅度沿路径呈几何扩散和指数衰减(包含散射和固有衰减)和格林函数的区别在于场地因子  $s$  和噪声源的强度  $B$ 。在连接两台站的方向上,只受强度  $B$  的影响。Weaver 等(2009) 的研究表明:只要噪声源密度沿方位平滑变化,台站间距远大于波长,  $B$  引起的幅度差异可以忽略。基于(3)式, Weaver(2011) 对一个波速均匀的衰减介质模型,台阵线性排列的情形进行了数值模拟,成功从非完全扩散场中重建了介质的衰减、场地因子及噪声源强度。通过数值模拟研究, Weaver(2013) 证明,在利用互相关提取介质衰减时,可以在一定程度上克服空间变化的衰减系数,不同的场地放大因子、非各向同性的噪声源分布等因素对互相关幅度的影响。

## 1.2 衰减介质中的空间相干表示

在 1.1 节中,我们提到的由互相关技术提取系统格林函数都是指时间域中的互相关,或者它们在频率域中的等价表达式。早在 1957 年, Aki 就提出利用空间相关技术提取随机波场的频散信息,从而对地下浅层结构进行反演成像。空间互相关定义为:固定时间的波场,在空间上的相关性,计算公式为

$$\phi(\xi, t) = \frac{1}{A} \int_A u(\mathbf{x}, t) u(\mathbf{x} + \xi, t) d\mathbf{x}, \quad (4)$$

其中  $\xi$  为空间改变量,类似时间互相关中的时间延迟,  $\mathbf{x}$  表示波场中某一点的位置,  $A$  描述了估计的波场区域,  $A$  的单位依赖于实际场的维度(例如,对于区域积分,单位为  $\text{m}^2$ ; 对于体积积分,单位为  $\text{m}^3$ )。(4) 式中区域  $A$  的积分和归一,平均了空间中不同位置  $\mathbf{x}$  的结果,因此  $\phi(\xi, t)$  也被叫做空间平均的相干(Asten, 2006)。

Aki(1957) 假设波场在空间和时间上是平稳的,“平稳”意味着振幅可以由随机统计来描述,其联合概率密度不随时间和空间改变。平稳场  $u(\mathbf{x}, t)$  的假设使得  $\phi(\xi, t)$  独立于波场的位置  $\mathbf{x}$ 。对于这样一个波场,(4) 式可以用一个时间积分替代,公式为

$$\phi(\xi) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(\mathbf{x}, t) u(\mathbf{x} + \xi, t) dt, \quad (5)$$

$T$  要求足够长以此来保证  $\phi(\xi)$  近似为一个不随时间变化的常数。

对所有台间距  $|\xi| = r$  的空间相干进行平均,得到“平均相干”  $\langle \phi \rangle$  为(Aki, 1957):

$$\langle \phi(r) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{|\xi|=r} \phi(\xi) d\xi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \phi(|\xi| = r) d\theta, \quad (6)$$

$\theta$  是台站对的方位角。将(5) 式代入(6) 式,可以得到:

$$\langle \phi(r = |\xi|) \rangle = \frac{1}{4\pi T} \int_0^{2\pi} \int_{-T}^T u(\mathbf{x}, t) u(\mathbf{x} + \xi, t) dt d\theta,$$

这里“平均相干”是时间和方位的平均。(5) 式中的相干是时间的平均。在噪声源方位均匀分布的理想条件下,有  $\phi(\xi) = \langle \phi(r = |\xi|) \rangle$ 。

Tsai 和 Moschetti(2010) 考虑一个单色波,并假定积分时间  $2T$  相比于波的周期足够长,计算(5) 式中的时间积分。在多重源的积分中,假定他们互不相关,这样不同源产生的信号的互相关(交叉项)消失。这一假设等同于 Aki(1957) 的平稳假设,在噪声互相关的理论研究中,大量作者都使用了这一假设。Tsai 和 Moschetti(2010)、Yokoi 和 Margaryan(2008) 分析表明,归一化后的空间平均相干为

$$\langle \phi(r, \omega) \rangle = \frac{\langle \phi(r, \omega) \rangle}{\phi(0, \omega)} = J_0\left(\frac{r\omega}{c(\omega)}\right), \quad (7)$$

$J_0$  是第一类零阶贝塞尔函数,  $c(\omega)$  是相速度。方程(7) 即为 Aki(1957) 中的(42) 式,它的左边即是空间自相关系数,它由能量  $\phi(0, \omega)$  归一。

现在来看空间相干和时域互相关的关系。(1) 式中时间互相关的谱可由其傅立叶变换表示,即:

$$\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega) = F[C_{x_1 x_2}(t)], \quad (8)$$

$F$  是表示傅里叶变换, Tsai 和 Moschetti(2010) 研究表明,互相关谱的实部与 SPAC 的结果是一致的,即:

$$\Re[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)] = \phi(\xi, \omega), \quad (9)$$

$\Re[\dots]$  表示取复数的实部,  $\xi = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2$ 。对于平稳场,类似于(7) 中的 SPAC,(1) 式求取时间互相关时,互相关谱也会收敛于一个值。(7) 和(9) 表明:当噪声源为各向同性的源分布时,  $\Re[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)]$  等同于  $J_0(|\xi|\omega/c(\omega))$  与一个常数的乘积,这个常数与噪声源的谱有关,  $\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)$  的虚部为零。

在(7) 式中,我们利用参考点自身的空间相干谱对 SPAC 系数进行了归一,类似的,定义  $E[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)]$  为  $\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)$  对不同时间窗的总体平均。对于波场中的  $\mathbf{x}_1$  和  $\mathbf{x}_2$ ,利用这两点的时间平均的能量对  $E[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)]$  进行归一,即用  $\sqrt{E[|u(\mathbf{x}_1, \omega)|^2]E[|u(\mathbf{x}_2, \omega)|^2]}$  进行归一。对于各向异性的源分布,对归一化的  $E[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)]$  进行方位平均,公式为

$$\gamma_1(\omega, r) = \frac{E[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)]}{\sqrt{E[|u(\mathbf{x}_1, \omega)|^2]E[|u(\mathbf{x}_2, \omega)|^2]}} \quad (10)$$

$r = |\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|$  和 SPAC 方法一样,这里方位平均是对所有方向的台站对进行平均。 $\gamma_1(\omega, r)$  称为频率域中归一化的空间相干。对于扩散场或时间和空间上平稳的随机场,归一化量有时也选取两个台站之一的能量进行归一,即:

$$\gamma_2(\omega, r) = \frac{\langle E[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)] \rangle}{\langle E[\hat{C}_{x_1 x_1}(\omega)] \rangle} = \frac{\langle E[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)] \rangle}{\langle E[u(x_1, \omega)] \rangle} \quad (11)$$

或者:

$$\gamma_3(\omega, r) = \frac{\langle E[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)] \rangle}{\langle E[\hat{C}_{x_2 x_2}(\omega)] \rangle} = \frac{\langle E[\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)] \rangle}{\langle E[u(x_2, \omega)] \rangle} \quad (12)$$

根据(7)和(9)式可知:

$$\text{Re}[\gamma_1(\omega, r)] = J_0(k_0 r) \quad (13)$$

这里  $k_0 = \omega/c(\omega)$ .

(10) 式是计算平均空间相干及 SPAC 方法的标准方法 (Okada, 2003), 即互相关的频谱先整体平均然后被平均能量谱归一. Weemstra 等 (2014) 称为“白化的平均相干”, 将互相关的谱进行归一化的过程称为谱白化. 相反, Lawrence 和 Prieto (2011) 和 Prieto 等 (2009) 则将整体平均和白化的次序进行了调换, 先将互相关频谱进行谱白化, 然后再取总体平均. 我们用  $\gamma_1'(\omega, r)$  表示, 即:

$$\gamma_1'(\omega, r) = \left\langle E \left[ \frac{\hat{C}_{x_1 x_2}(\omega)}{|u(x_1, \omega)| |u(x_2, \omega)|} \right] \right\rangle \quad (14)$$

Weemstra 等 (2014) 将其称为“平均的白化相干”. 对于弹性介质, 同样有:

$$\text{Re}[\gamma_1'(\omega, r)] = J_0(k_0 r) \quad (15)$$

在衰减介质中, 表面波衰减常常由衰减系数描述, 衰减系数  $\alpha$  与表面波品质因子  $Q$  相联系. 通过引入指数衰减系

数  $\alpha$ . Prieto 等 (2009) 把弹性情形对应的 SPAC 方法 ((15) 式) 推广到衰减介质中, 即频率域中 NCF 的振幅 (相干的实部) 等于几何扩散项 (零阶贝塞尔函数) 与随距离变化的指数衰减项的乘积, 即:

$$\text{Re}[\gamma_1'(\omega, r)] = J_0(k_0 r) e^{-\alpha(\omega) r} \quad (16)$$

这里, 复相干函数  $\gamma(\omega, r)$  使用  $|u(x_1, \omega)| |u(x_2, \omega)|$  进行归一, 即 (14) 式.

通过不同分布的噪声源数值模拟, Lawrence 等 (2013) 从 NCF 中准确恢复了相速度和衰减. 数值实验表明噪声互相关函数与指数项衰减和贝塞尔函数的乘积相匹配, 即数值合成的振幅与 Prieto 等 (2009) 预计的结果 (即 (16) 式) 一致, 尽管衰减测量相比于速度测量有较大的误差, 衰减系数仍可以被恢复.

然而, 对于衰减项  $e^{-\alpha(\omega) r}$  的引入, 仅仅是对弹性介质的一个简单推广, 并没有严格地理论推导, 对振幅测量无法量化其研究的精度. Tsai (2011) 针对二维情形, 应用 (10) 式的相干定义, 研究了图 1 所示的几种噪声源模型下, 衰减介质中的空间相干表示. 图 1 中的模型分别对应均匀分布的远场面波, 单边的远场面波, 任意非均匀的远场面波, 均匀分布的面波和截断的均匀分布的近场面波等几种不同的噪声源模型. Tsai (2011) 给出的空间相干表示如表 1 所示.

表 1 不同噪声源分布下的互相关、自相关、相干实部和信噪比 (Tsai 2011)

Table 1 Summary of the cross correlation, autocorrelation, (real part of the) coherency and Signal-to-Noise Ratio (SNR) for the different scenarios considered

	$2C_{xy}^E(t)$	$2C_{xx}^E(t)$	$\Re[\hat{C}_{xy}^E(\omega)]$	SNR
Uniform far-filed	$\frac{A^2 e^{-2\alpha R}}{R} \cos(\omega t) J_0\left(\frac{\omega r_{xy}}{c}\right)$	$\frac{A^2 e^{-2\alpha R}}{R} \cos(\omega t) I_0(\alpha r_{xy})$	$\frac{1}{I_0(\alpha r_{xy})} J_0\left(\frac{\omega r_{xy}}{c}\right)$	$F \equiv \sqrt{\frac{2c}{\pi \omega r_{xy}}} \frac{T_0}{T_\alpha}$
One-side far-filed	$\frac{A^2 e^{-2\alpha R}}{R} \Re[e^{i\omega t} (J_0 - iH_0)]$	$\frac{A^2 e^{-2\alpha R}}{R} \cos(\omega t) [J_0 - L_0]$	$\frac{J_0}{\sqrt{I_0^2 - L_0^2}}$	$F$
Arbitrary far-filed	$\frac{e^{-2\alpha R}}{R} \Re[e^{i\omega t} \sum_k (-i)^k a_k J_k]$	$\frac{e^{-2\alpha R}}{R} \cos(\omega t) \sum_k (-1)^k a_k I_k$	$\frac{\sum_k (-1)^k a_{2k} J_{2k}}{\sqrt{\sum_k a_k I_k} \sqrt{\sum_k (-1)^k a_k I_k}}$	$\frac{A_\theta^2}{A^2} \cdot F$
Including near-filed	$\frac{2A_\theta^2}{\alpha} e^{-\alpha r_{xy}} \cos(\omega t) J_0$	$\frac{2\bar{A}^2}{\alpha} \cos(\omega t)$	$\frac{A_\theta^2}{A^2} e^{-\alpha r_{xy}} J_0$	$\frac{A_\theta^2}{A^2} e^{-\alpha r_{xy}} \cdot F$
Near-filed( only)	$2\pi A_\theta^2 \cos(\omega t) J_0 \sqrt{R^2 - \frac{r_{xy}^2}{4}}$	$2\pi R \bar{A}^2 \cos(\omega t)$	$\frac{A_\theta^2}{A^2} \sqrt{1 - \frac{r_{xy}^2}{4R^2}} J_0$	$\frac{A_\theta^2}{A^2} \sqrt{1 - \frac{r_{xy}^2}{4R^2}} J_0 \cdot F$

正如所预计的, 不同的噪声源分布, 衰减介质中的空间相干表示不尽相同. 例如, 对于远场均匀分布的源, 相干的表达为

$$\text{Re}[\gamma_1(\omega, r)] = \frac{J_0(k_0 r)}{I_0(\alpha(\omega) r)} \quad (17)$$

包含近场的均匀分布的源时, 相干表达为

$$\gamma_1(\omega, r) = J_0(k_0 r) e^{-\alpha(\omega) r} \quad (18)$$

这些理论结果, 较好地解释了 Cupillard 和 Capdeville (2010) 中相应的 3 种模型的数值结果. 尽管 Tsai (2011) 从衰减波动方程出发, 但是他们只考虑了方程中的关于衰减系数的一次项, 这可能会导致他的结果与理论观点不相符. Nakahara (2012) 考虑衰减的二阶项, 利用 (9) 式所示的 SPAC 和地震干涉之间的关系, 指出 (16) 式仅仅在弱衰减和大的台站间距下成立.

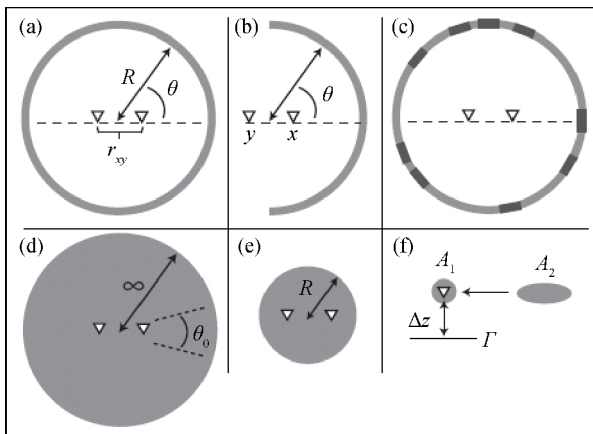


图1 不同噪声源的分布(Tsai 2011)

Fig.1 Schematic distributions of noise sources

与 Tsai(2011)不同,选择坐标原点位于台站  $x_1$  处.考虑(10)和(11)两种不同归一化因子导致的相干,Weaver(2012)分别推导了二维情形时单向平面波和各向同性平面波的噪声源分布的相干表达,其结果如表2所示.

表2 不同噪声源分布和不同定义的相干  
(据 Weaver(2012) 修改)

Table 2 Coherency expressions at different noise source distributions and different definitions

	$\gamma_1$	$\gamma_2$
	$J_0(k_0 r)$	$J_0(k_0 r + i\alpha r)$
	$\frac{J_0(k_0 r + i\alpha r)}{\sqrt{I_0(2\alpha r)}}$	$J_0(k_0 r + i\alpha r)$

这些理论结果表明:一方面,相干的空间平均和方位平均导致相位损失.这种与波速变化相关的相位损失可能会影响衰减的重建.另一方面,相干表达可能会受到参考点的选择,不同参考点的选择又对应着不同的源分布.因此 Weaver(2012)认为只有在较为严格的条件下,背景噪声的相干才可以被一个指数  $e^{-\alpha(\omega)r}$  和几何  $1/\sqrt{r}$  的衰减振荡拟合,并由此提取衰减.

在均匀开放介质的三种不同维度中,对于任意方向的平面波分布和均匀体分布的随机散射体所致的背景噪声场, Walker(2012) 别讨论了交叉谱和相干的闭合形式的表达,结合这两种情形, Walker(2012) 模拟了更为复杂的模型.同时, Walker(2012) 也指出衰减不可避免地引起平面波的非均匀

性,因此其空间相干依赖于归一化因子的选择及源的分布,从而导致相应的结果依赖参考系的选择.

因此,在衰减介质中,相干的定义、整体平均和白化的顺序,以及参考点的选择都会影响相干的表达形式.考虑这些因素,针对噪声源为远场入射的各向同性平面波的2D情形,王凯明等(2016)讨论了选取不同的参考点和叠加次序,衰减介质中的相干表达.相应的理论结果见表3和表4.

表3 先叠加后相关中不同坐标系下的  $\hat{R}_{ab}$ Table 3  $\hat{R}_{ab}$  at different coordinate systems

	$\hat{R}_{ab}^{(1)}$	$\hat{R}_{ab}^{(2)}$	$\hat{R}_{ab}^{(3)}$
	$\frac{J_0(k_0 r + i\alpha r)}{\sqrt{I_0(2\alpha r)}}$	$J_0(k_0 r + i\alpha r)$	$\frac{J_0(k_0 r + i\alpha r)}{I_0(2\alpha r)}$
	$\frac{J_0(k_0 r)}{I_0(\alpha r)}$	$\frac{J_0(k_0 r)}{I_0(\alpha r)}$	$\frac{J_0(k_0 r)}{I_0(\alpha r)}$

表4 先相关后叠加中不同坐标系下的  $\hat{C}_{ab}$ Table 4  $\hat{C}_{ab}$  at different coordinate systems

	$\hat{C}_{ab}^{(1)}$	$\hat{C}_{ab}^{(2)}$	$\hat{C}_{ab}^{(3)}$
	$J_0(k_0 r)$	$J_0(k_0 r + i\alpha r)$	$J_0(k_0 r - i\alpha r)$
	$J_0(k_0 r)$	$J_0(k_0 r + i\alpha r)$	$J_0(k_0 r - i\alpha r)$

这里先叠加后相关的  $\hat{R}_{ab}^{(1)}$ 、 $\hat{R}_{ab}^{(2)}$ 、 $\hat{R}_{ab}^{(3)}$  分别对应于“白化的平均相干”的三种相干表示  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ , 即(10)、(11)、(12)式;先相关后叠加的  $\hat{C}_{ab}^{(1)}$ 、 $\hat{C}_{ab}^{(2)}$ 、 $\hat{C}_{ab}^{(3)}$  分别对应于“平均的白化相干”的三种相干表示,例如  $\hat{C}_{ab}^{(1)}$  对应(14)式中的  $\gamma_1$ . 这个结果和 Tsai(2011) 及 Weaver(2012) 的同类结果一致.由于归一化因子的选择,源的分布以及叠加和相关次序对空间相关表达的影响,简单采用指数衰减形式((16)式)来反演介质的衰减系数可能具有潜在的不可靠性.

## 2 数据处理方法

基于背景噪声互相关提取介质衰减的理论进展,相应的处理方法也有两种不同的思路,即时间域地震干涉方法和频率域相干方法.

### 2.1 时域中互相关函数幅度提取衰减

使用时域中互相关函数幅度提取衰减的一般流程如图2所示.





图2 时域互相关函数幅度提取衰减的基本流程

Fig. 2 The principle and processing flow of attenuation extraction with NCF amplitude

### (1) 数据预处理

Bensen 等(2007)和 Lin 等(2008)描述了处理背景噪声记录的流程,包括去均值、去趋势、时域归一(例如 one-bit 归一)、谱白化、仪器响应的去除、时间序列的互相关计算、叠加时间对提取格林函数的影响、格林函数的对称性等。

这些处理可能会改变噪声记录的振幅值甚至减少有价值的振幅信息。因此当提取地震背景噪声互相关的振幅信息时,必须考虑是否应该使用这些传统处理步骤。大量研究关注 one-bit 归一和谱白化对互相关幅度的影响,不同的研究者给出的结论也不尽相同。Larose 等(2007)指出,相比于主动试验,使用谱白化(相干)和时域归一(one-bit)的互相关函数不能重建可靠的衰减。然而 Matzel(2007)的主要结果表明符号位(one-bit 操作)的信号可以保留振幅信息。Cupillard 和 Capdeville(2010)认为:尽管 one-bit 可能压缩重建信号的相对振幅,但当噪声源均匀时,one-bit 处理可以恢复介质的几何扩散和衰减信息,随后通过数值实验确认了他们的想法(Cupillard *et al.*, 2011)。Lin 等(2011)认为:尽管通过传统的背景噪声数据处理,绝对振幅信息会损失,但是相对振幅测量可以保留。曾祥方等(2012)研究表明:时域归一化和频率域归一化(谱白化)的操作并非必要,为了保留的原始振幅信息,可以直接计算较长时间地震记录的互相关函数,获得近似的经验格林函数。尽管他们的研究主要关注与背景噪声源强度有关的绝对振幅,但是包含衰减信息的相对幅度也会得到充分保留。

### (2) 互相关函数的幅度计算

研究某一频率范围内的衰减信息时,需要对互相关函数使用频率域的窄带滤波。为了获得互相关函数正确的相对幅度信息,需要对互相关函数的振幅进行互相关长度修正(归一)和方位修正(归一)(Lin *et al.*, 2011)。

### (3) 互相关函数的幅度拟合

对互相关函数振幅拟合时,首先对其进行几何扩散的修正,经过几何扩散修正后的振幅的对数与台间距之间存在线性关系,其斜率即为衰减系数。例如考虑均匀的衰减介质,可以分别使用(2)式和(3)式对不同台间距的互相关函数振幅进行线性拟合。

### (4) 衰减系数提取和品质因子

通过线性拟合,可以获得相应地区某一频带范围内平均的衰减系数。结合获得的衰减系数和品质因子的关系,可以计算不同周期对应的表面波品质因子  $Q$ 。关系式为

$$\alpha = \frac{\pi f}{UQ} \quad (19)$$

## 2.2 相干方法提取衰减

使用相干方法提取衰减的一般流程如图3所示。



图3 相干方法提取衰减的基本流程

Fig. 3 The principle and processing flow of attenuation extraction with coherency

### (1) 数据预处理

对于一般的数据预处理步骤,频率域相干方法与时间域的地震干涉方法是类似的,都需要去均值、去趋势、去地震信号。所不同的是许多研究(Prieto *et al.*, 2009; Lawrence and Prieto 2011)直接对原始记录的  $Z$  分量截取 2-h 短时窗。短时窗(例如 2-h)的使用不但会有有效的消除地震信号,也会保

留更多背景噪声振幅精确的信息. Seats 等 (2012) 表明: 相比更长的时间窗, 更多重复的短时窗 (30 s ~ 1 h) 的相干叠加会产生更好的源分布. 但是这一方法也会带来限制, 例如降低分辨率和缩短重建的 NCF. 实际上这一处理与传统的时域归一实质上是十分相似的. 尽管前人的结果 (Matzel, 2007; Cupillard and Capdeville, 2010; Lin *et al.*, 2011) 表明经 one-bit 处理后的互相关函数保留介质的衰减信息, 但是 one-bit 处理放大了散射效应 (Campillo and Paul, 2003), 其幅度信息可能更多地反映散射导致的衰减. 因此使用相干方法提取固有衰减时, 使用短时窗的原始噪声信号而不是 one-bit 处理后的信号可能更为有效. 另外, 为了去除仪器故障和显著地震信号的影响, 可以计算 2-h 时窗的均方根 (RMS), 去掉最大振幅大于 100 倍 RMS 的 2-h 的片段. 相干的定义 (15) 表明: 相干的结果包含了对数据的谱白化.

## (2) 计算相干

我们需要在频率域中计算相干. 即将各自的时窗进行傅里叶变换, 在频率域计算互相关. 依据相干的计算公式 (14) 式, 使用非重叠移动窗的方法 (Prieto *et al.*, 2009), 例如选用 2-h 互不重叠的噪声片段计算相干. 为了增加稳定性, 可以采用 Multi-taper 技术计算 (14) 式分母对应的振幅谱, 即分别平滑两个台站各自的振幅谱. 实际上, 直接使用两个台站的振幅谱, 不对振幅谱进行平滑处理也是可以的 (Weemstra *et al.*, 2013).

## (3) 相干的叠加与平均

通常需要给出相干的选取依据, 例如时长 6 个月以上, 信噪比大于 3, 周期 8 s 至 32 s, 台间距 30 km 至 600 km. 为了获得稳定的相干结果, 需要叠加相干从而获得整体平均的相干. 首先为了消除噪声源时间变化的影响, 需要对相干时域平均, 即将不同时间段对应的相干片段叠加. 其次为了消除噪声源的方位分布的影响, 需要对相干方位平均, 即相同台间距不同方位的相干叠加.

对于不考虑横向变化的一维衰减模型, 在相干的整体平均过程中, 每条相干都有相同的权重 (Weemstra *et al.*, 2013). 但是研究二维衰减结构横向变化时, 需要考虑相干的权重. 研究区域需要按一定方式划分成参数化网格 (Lawrence and Prieto, 2011). 对于其中的某一网格, 不同台间距路径的相干拥有不同的权重. 由于层析成像需要区域化数据, 因此对某一网格而言, 需要对接近该网格的相干加权, 对远离该网格的相干减权. 这需要选择合适的权重叠加方案来进行相干叠加. 最终获得某一网格 (相应子台阵) 加权平均的相干. 子台阵相干的台间距范围通常选择在一个波长至六个波长之间.

## (4) 相干曲线的拟合与衰减系数的提取

将不同台间距计算的相干与理论公式 (15) 和 (16) 进行拟合可以重建相速度与衰减系数. 首先, 使用相干实部反演一维相速度频散曲线, 定义残差为

$$\varepsilon_1(f) = \text{Re}[\gamma(f)] - J_0\left(\frac{2\pi fr}{c(f)}\right), \quad (20)$$

使用对从 2 km/s 与 6 km/s 之间的相速度网格搜索来寻找 L 范数 (L1) 残差的最小值.

其次, 为了获得衰减系数, 此时定义残差为 (姑且以理论

表达为例):

$$\varepsilon_2(f) = \text{Re}[\gamma(\omega)] - J_0\left(\omega r/c(\omega)\right) e^{-\alpha(\omega)r}. \quad (21)$$

结合已获得的相速度, 计算随距离变化的理论相干和观测相干的包络的对数. 进行另一个网格搜索, 最终获得衰减系数随周期变化的衰减曲线. 对于二维情形的每个网格, 利用网格搜索也可以寻找每个周期每个网格的最佳相速度和最佳衰减系数. 将获得的相速度频散曲线数值微分得到群速度, 结合衰减系数获得随周期变化的表面波品质因子.

## (5) 衰减系数成像

利用获得的相速度频散和衰减随周期变化的特征, 选择合适的反演方法, 例如线性迭代反演方法, 可以进一步计算随深度变化剪切波速度和剪切波品质因子, 从而获得了一维的弹性和非弹性介质结构.

对于反映二维横向变化的速度和衰减结构层析成像, 首先计算整个区域平均相速度频散曲线和衰减系数曲线作为成像最初的平均频散. 然后结合不同网格的计算结果, 使用合适的反演方法, 进而获得不同周期相速度和衰减系数的层析成像, 即二维的弹性和非弹性的介质结构.

使用背景噪声互相关函数振幅提取衰减和相干方法提取衰减在原理上是等同的, 基于 NCF 幅度的方法在时域中进行, 这种方法求得的衰减系数可能更为精确; 相干方法在频域中进行, 这种方法可以更好地反映衰减随周期的变化.

# 3 基于背景噪声互相关技术开展的衰减成像研究

在实际的衰减成像研究中, 背景噪声提取衰减的两种方法都有较为广泛的应用. 对于一组线性台阵, 通过测量不同台间距对应的互相关函数幅度, 可以获得可靠的地下衰减信息. 例如基于背景噪声获得的 NCF, Matzel (2008) 提出了一种反演地壳和上地幔地震衰减 ( $Q$ ) 的方法, 并考察了散射和衰减对观测结果的贡献, 最终获得了台阵下一个详细的地震衰减剖面. 通过观测背景噪声互相关函数的对称分量, Lin 等 (2011) 分别计算了周期 10 s 和 18 s 时 Rayleigh 波的空间平均衰减系数和相应的  $Q$  值. 为了与噪声互相关的结果相比较, Lin 等 (2011) 分别讨论了内达华地震和怀俄明州矿业爆炸计算的地震衰减. 噪声衰减与和地震衰减的一致性表明了噪声方法提取衰减的可靠性. Zhang 和 Yang (2013) 使用噪声互相关函数尾波的互相关 (C3) 测量了 USArray 中几个线性台阵的振幅. 通过将 C3 方法计算的周期为 18 s 衰减系数与地震数据估计的衰减结果相比较, Zhang 和 Yang (2013) 认为 C3 方法有效地降低偏差, 可以计算可靠的噪声衰减. 结合 Liu 和 Ben-Zion (2013) 的理论结果 (基本方程类似于 Weaver (2013)), Liu 等 (2015) 发展了一种新的反演方法, 并将这一方法应用到南加州地震台网的一组三元台阵和跨越圣哈辛拖断层 (San Jacinto Fault) 地区线性的阵列中, 最终反演了相应的品质因子.

目前使用线性台阵的方法可以获得台阵下方的一个或者几个衰减结果, 但无法更好地反映衰减结构的横向变化. 对一个二维分布的台阵, 相干方法为重建地下衰减的横向变化特征提供了可能. 将观测的背景噪声相干数据与 (16) 式进行拟合, Prieto 等 (2009) 计算了南加州地区随周期变化的相速度  $c$  (5 ~ 100 s) 和衰减系数  $\alpha$  (5 ~ 20 s). 利用所得的相



速度和衰减对典型地区和结构的区域化特征进行解释时取得了良好的结果. 衰减结果与相应的地质构造的一致性表明这种方法适用于显著地区或者显著结构特征的区域. 类似地, 使用宽频带海底地震计对几天的记录作互相关, Weemstra 等(2013)重建了频带在 0.2 ~ 0.6 Hz 之间与面波相关的经验格林函数. 通过与(16)式的匹配, 最终获得了频率依赖的衰减(品质因子  $Q$ ). Lawrence 和 Prieto (2011) 及 Prieto 等(2011)进一步将上述一维的衰减方法扩展到二维的情形中. 绘制了美国西部地区不同周期横向变化的相速度和地震衰减图像(8 ~ 32 s), 分别对应于地壳和上地幔深度弹性和非弹性结构. 这里背景噪声衰减的结果和 Phillips 和 Stead (2008) 的 Lg 波衰减的结果存在一致性. 此外, 结合 Yang 和 Forsyth (2008) 的长周期衰减系数, Prieto 等(2009)得到了南加州随深度变化的一维的剪切波速度( $V_s$ )模型(0 ~ 100 km)和剪切波衰减模型( $Q$ 值)(0 ~ 100 km). 其速度模型与 Yang 和 Forsyth (2006) 在南加州获得的模型相似, 而  $Q$  值模型与先前在加州的结果相吻合(Al-Khatib and Mitchell, 1991; Abercrombie, 1997; Olsen *et al.*, 2003).

解释这些衰减结果时, 需要考虑衰减的频率依赖性及其成因的复杂性. 由于瑞利波对波长的  $1/3$  深度最为敏感, 因此不同周期的表面波衰减结果( $\alpha$  或  $Q$ ) 反映不同深度的结构特征. 短周期的面波速度与衰减结果对浅层结构较为敏感, 而更长周期的结果可能反映更深处的衰减结构. 例如通过与两个钻井获得的岩石地层相比较, 可以发现不同频带范围的品质因子与不同深度的岩层结构相对应(Weemstra *et al.*, 2013).

由于无法分离散射衰减和固有衰减, 这些衰减结果可能受到散射和固有衰减的共同作用. 对于不同地区, 衰减异常的原因可能不尽相同(Lawrence and Prieto, 2011). 一方面, 沉积物和散射都可以引起高的衰减. 例如在短周期, 南加州沉积盆地存在低速和强衰减的特征. 这种低速和强衰减的特征可能与沉积盆地的较厚沉积物相关. 哥伦比亚河峡谷西北部短周期的高衰减可能是由于浅层玄武岩层中破裂和水泡的散射导致. 内华达山脉(Sierra Nevada Range)东部地沃克道地区(Walker Lane)长周期和短周期的高衰减可能与该地区广泛分布着走滑断层和正断层有关. 广布的破裂可以导致散射的增加, 这可以产生强烈的衰减. 在圣哈辛拖断层(San Andreas Fault)地区, 频带在 15 ~ 25 Hz 之间的  $Q$  值结果表明附近存在一个显著的断层损坏区域. 这与该地区观测到的断层区域的围陷波相一致. 另一方面, 地震波速和衰减可能对存在火山活动的地区特别敏感. 例如黄石公园附近的高衰减异常与低速异常可能来自于高温或者地壳的部分熔融. 这与黄石公园火山活动、高地热流和大量包含间歇泉的热液活动相关. 内华达的北中部长周期高衰减异常与巴特山高热流区相关. 这可能是从 1 ~ 20 km 深度的热液和岩浆活动导致的. 结合不同的构造背景, 不同地区的衰减异常可以得到相应的地质解释.

尽管这些研究在数据处理方法上不尽相同, 但最终获得的衰减结果与地震方法的结果相一致. 与地质构造相联系时, 它们都获得了较好的地质解释. 这些背景噪声衰减成像的结果表明: 通过适当的处理方法, 可以从背景噪声中提取

衰减信息.

#### 4 影响背景噪声互相关函数幅度的因素

背景噪声互相关的振幅受几何扩散、固有衰减、散射衰减、背景噪声源分布、聚焦和散焦等因素影响(Lawrence *et al.*, 2013). 考虑到地球介质弹性结构和噪声源的复杂性, 虽然在某些地区获得了较好的结果, 但是否可以从背景噪声互相关中提取真实可靠的衰减信息依旧存在争议. 固有衰减常常是我们关注的有用信息. 除此之外, 还有三个需要讨论的因素: 背景噪声源分布、散射衰减、聚焦和散焦. 毫无疑问, 如果无法分离这些因素, 那么从 NCF 的振幅提取有用信息(例如固有衰减)可能会变得困难.

背景噪声源的分布对 NCF 振幅的影响常常是众多学者争论的焦点. 在短周期, 噪声源主要来自于海洋, 地球的背景噪声源是不均匀分布的. NCF 提取衰减的许多争论很大程度上依赖于对背景噪声场的分布所做的不同假设. 数值试验(Gouédard *et al.*, 2008; Cupillard and Capdeville, 2010)表明噪声源的非均匀性使得地震干涉提取衰减变得十分困难. SPAC 的理论表达, 例如  $J_0(k_0 r) \cdot e^{-\alpha(\omega)r}$  适用于衰减和噪声源分布的不均匀性较弱的地区(Nakahara, 2012). 考虑噪声的来源, 台站位于海洋时, 使用  $J_0(k_0 r) \cdot e^{-\alpha(\omega)r}$  方法估计衰减是一个很好的近似, 但是  $J_0(k_0 r) \cdot e^{-\alpha(\omega)r}$  不适用于远离海洋的台站. 台阵路径方位平均可以有效减轻非均匀噪声源分布的效应(Prieto *et al.*, 2009, 2011; Nakahara, 2012). 对时间平均的归一化互相关可以减轻背景噪声源的方向性(鲁来玉等, 2009; Tsai and Moschetti, 2010; Lawrence *et al.*, 2013). 虽然等间距不同方位台站对的相干方位平均可以修正源分布的方位变化, 但是无法消除噪声源径向变化的影响. Tsai (2011)表明相干平均后, 远场面波源和近场面波源的相干表达不尽相同. 其中, 对于 2D 的远场面波源, 噪声源径向变化的影响表现为相干表达依赖于参考点的选择. 因此, 理论上, 相干的方位平均可能无法重建可靠的衰减系数. 利用 2D 远场面波源的分布模型可能无法描述完美的地球介质的衰减. 考虑噪声源的体积分布是必须的(Snieder, 2007; Nakahara, 2012; Walker, 2012).

另一方面, 由于研究中采用的噪声模型可能无法完全模拟实际的背景噪声, 数值实验和理论研究的结果与实际数据获得的结果存在很大的差异. 尽管数值实验(Gouédard *et al.*, 2008; Cupillard and Capdeville, 2010)和理论研究(Tsai, 2011; Weaver, 2011; Weaver, 2012; Weaver, 2013)都表明: 由于非均匀噪声源分布, 估计的衰减会偏差, 但是利用背景噪声互相关方法提取的美国西部地区的衰减结果(Prieto *et al.*, 2009; Lawrence and Prieto, 2011; Lin, 2011)的与地质构造相吻合. 特别地, Lawrence 和 Prieto (2011)的衰减异常与区域构造特征相一致. 源的不均匀性可能在某种程度上干扰观测的衰减结构(Harmon *et al.*, 2010). 但是实际处理中, 源的非均匀性的影响可能已被很大程度消除. 因为如果观测到的衰减异常是非均匀的噪声源导致的, 那么这种衰减异常将与台网几何形状相关, 而与构造特征无关.

地球介质的非均匀性导致地震波的散射. 固有衰减和散射衰减的分离一直以来受到很大的关注. 要研究地下结构,

预测和解释地震动,我们必须从散射和非弹性的角度解释地震的振幅。相关的理论结果 (Snieder, 2004; Weemstra *et al.*, 2015) 表明: 经过非均匀的弹性介质时, 噪声源激发的波被多次反射, 散射体的存在消除了非均匀噪声源的影响。与纯耗散引起的衰减相似, 纯弹性散射也可以产生一个额外的指数衰减, 这一衰减与互相关的长度相关。此时, 相干的结果近似于指数衰减的零阶贝塞尔函数。因此频率域相干的理论表达, 即  $J_0(k_0 r) e^{-\alpha(\omega) r}$  是一个受多重散射和固有衰减共同影响的结果。Prieto 等 (2009)、Lawrence 和 Prieto (2011) 等人获得的衰减系数包含了散射衰减和固有衰减。目前固有和散射衰减的分离是一个十分具有挑战性的问题。3D 速度模型的构建有利于这一问题的解决。分析和解释衰减时, 必须考虑相应的地质背景。固有衰减更多地与火山活动、热流等相关, 而散射引起的衰减可能与特殊的地质构造例如断层、裂隙等相联系。

场地放大、聚焦和散焦都可以看作某种特殊情形的散射。背景噪声的预处理技术, 例如时域归一和谱白化可以有效地压制场地放大效应。聚焦和散焦是由于地震波速度变化导致的。由于地震波速度的非均匀性, 三维的速度结构可能聚焦或散焦地震波能量, 导致弹性效应的振幅异常, 这可能会错误地解释为衰减特征。因此速度结构所致的地震波汇聚 (聚焦) 对地震波振幅有强烈的影响, 这可能会掩盖衰减效应。Prieto 等 (2009) 认为由于台站间路径的多样性, 相比于天然地震, 背景噪声拥有独特的优势。台站路径覆盖多样性会平均速度结构导致的聚焦和散焦的影响。相干的方位平均有效地压制它们对从互相关振幅中重建衰减的干扰。尽管已有的衰减结果 (Lawrence and Prieto, 2011) 与地壳和上地幔的速度结构、地热特征和化学性质相一致, 然而 Menon 等 (2014) 认为对于速度不均匀的介质, 相干的方位平均无法消除介质非均匀性的影响。在弹性介质中, 台站的平均可能产生导致一个与固有衰减相似的视衰减。Prieto 等 (2009) 中的相干平均可能无法消除聚焦和散焦的影响。这种方法获得的衰减可能包含了介质的固有衰减及散射、聚焦和散焦等导致的衰减。

## 5 讨论与展望

5.1 尽管已有的研究结果显示, 基于背景噪声获取的衰减图像与地质构造存在很好的一致性, 利用背景噪声提取地球介质衰减具有一定的可行性, 但是与基于地震事件的衰减提取相比, 这些从背景噪声场提取衰减的研究还不够充分, 相关理论尚不完备, 甚至还存在一些争议。以下几个方面, 可能是将来需要进一步解决的问题。

(1) 背景噪声互相关提取衰减的理论基础。传统的互相关重建格林函数的理论解释主要包含简正模等分、时间反演不变性、稳态相位近似和互易定理等。这些理论基础在一定程度上可以很好解释互相关重建格林函数, 同时也存在着各自的局限性, 考虑衰减介质时, 情况可能更为复杂, 甚至不同的理论解释还存在相互矛盾的地方。特别地, 仅从理论角度考虑背景噪声源分布的影响, 不同噪声源模型的理论空间相干表达存在差异, 某些情形下, 似乎无法提取可靠的衰减, 这也是当前噪声衰减提取争议的焦点所在。

(2) 噪声预处理方法。传统的噪声预处理, 例如 one-bit 和谱白化等可以从多大程度上保留背景噪声的幅度信息, 使用原始记录的短时窗可以多大程度压制地震信号, 这些都需要进行量化研究。或者利用背景噪声场提取衰减时, 这些方法可能不再适用, 需要探索新的预处理方法, 以更多地保留互相关函数的幅度信息, 提取可靠的衰减。

(3) 噪声源的时空分布和频率特性。从背景噪声场提取地下的衰减信息, 无法忽视背景噪声源的影响。相比于互相关函数的走时测量, 幅度信息可能更多地受到噪声源的影响。通常认为地震背景噪声源主要来自于海洋, 不同地区的噪声源存在差异。目前背景噪声提取衰减的研究主要集中于美国西部和挪威, 这些地区临近海洋。当我们把关注的焦点集中于中国大陆, 例如青藏高原、南北地震带等远离海洋的地区, 需要深入研究噪声源的特征, 并依据其显著不同的特征对背景噪声互相关提取衰减的方法做出相应的调整与改变。

(4) 散射衰减与固有衰减分离。目前考虑介质非均匀性引起的散射衰减时, 主要集中于定性的分析, 测量的衰减是散射与固有衰减共同作用的结果。如果无法量化这两种衰减的影响, 对衰减的分析存在不确定性, 进行地球物理解释时将产生一定的困难。因此深入研究散射衰减, 量化散射衰减的影响, 将散射衰减从固有衰减中分离, 可以进一步明确测量结果的物理含义。

(5) 场地放大、聚焦、频散等因素的影响。由于诸如场地放大、固有衰减、噪声源的方向性等都会影响噪声互相关函数的幅度。地震波的散射直接影响噪声源的强度, 从而影响互相关函数的幅度; 速度引起的聚焦和散焦也会影响幅度的测量; 除此之外, 波的频散引起的波包的传播速度不同, 会造成虚假的衰减信息; 所有这些因素最终将影响对介质衰减因子的提取。因此, 和波的到时信息相比, 从互相关函数中提取可靠的幅度信息更具有挑战性。考虑这些因素可以从理论的角度出发, 但也会使得最终的理论研究变得异常复杂。

5.2 相比基于地震事件的衰减研究, 基于背景噪声研究介质衰减具有一定优势, 比如: 除了不依赖于地震事件的分布外, 基于小尺度地区的密集台阵, 利用背景噪声互相关技术提取的较高分辨率的衰减信息, 将为盆地衰减散射及火山系衰减热流影响的相关机制提供新的观点。这也是利用背景噪声提取介质衰减引起人们的兴趣所在。背景噪声衰减的层析成像依赖于较大范围布设的密集观测台站。因此目前衰减的研究主要集中于美国的 USArray 台阵。国内的衰减成像主要还是基于地震事件的方法, 例如: 刘建华等 (2004) 基于  $L_g$  尾波的  $Q_0$  值地震成像; 周连庆等 (2008)、Zhao 等 (2013) 基于  $L_g$  波的  $Q$  值层析成像; 孙莲等 (2012) 基于  $S$  波的衰减成像。然而迄今为止还没有研究人员基于背景噪声互相关研究中国大陆地区的衰减。随着中国地震科学探测台阵 (ChinArray) 以及其他不同尺度台阵的不断布设, 密集的地震台网为背景噪声研究介质衰减提供了基础, 相信由背景噪声提取介质衰减信息在中国大陆可望获得广泛的应用。

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

## References

- Abercrombie R E. 1997. Near-surface attenuation and site effects from comparison of surface and deep borehole recordings [J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.* , 87(3): 731-744.
- Aki K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors [J]. *Bull. Earthq. Res. Inst.* , 35: 415-456.
- Al-Khatib H H, Mitchell B J. 1991. Upper mantle anelasticity and tectonic evolution of the western United States from surface wave attenuation [J]. *J. Geophys. Res.* , 96(B11): 18129-18146.
- Asten M W. 2006. On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods [J]. *Geophysics* , 71(6): V153-V162, doi: 10.1190/1.2345054.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, *et al.* 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements [J]. *Geophys. J. Int.* , 169(3): 1239-1260, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- Brooks L A, Gerstoft P. 2007. Ocean acoustic interferometry [J]. *J. Acoust. Soc. Am.* , 121(6): 3377-3385.
- Campillo M, Paul A. 2003. Long-range correlations in the diffuse seismic coda [J]. *Science* , 299(5606): 547-549.
- Chen J H, Froment B, Liu Q Y, *et al.* 2010. Distribution of seismic wave speed changes associated with the 12 May 2008  $M_w$  7.9 Wenchuan earthquake [J]. *Geophys. Res. Lett.* , 37(18): L18302.
- Claerbout J F. 1968. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response [J]. *Geophysics* , 33(2): 264-369.
- Cupillard P, Capdeville Y. 2010. On the amplitude of surface waves obtained by noise correlation and the capability to recover the attenuation: A numerical approach [J]. *Geophys. J. Int.* , 181(3): 1687-1700, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04586.x.
- Cupillard P, Stehly L, Romanowicz B. 2011. The one-bit noise correlation: a theory based on the concepts of coherent and incoherent noise [J]. *Geophys. J. Int.* , 184(3): 1397-1414, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04923.x.
- Derode A, Larose E, Campillo M, *et al.* 2003. How to estimate the Green's function of a heterogeneous medium between two passive sensors? Application to acoustic waves [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 83(15): 3054-3056.
- Fan L P, Wu J P, Fang L H, *et al.* 2015. The characteristic of Rayleigh wave group velocities in the southeastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 58(5): 1555-1567, doi: 10.6038/cjg20150509.
- Fan W Y, Chen Y S, Tang Y C, *et al.* 2015. Crust and upper mantle velocity structure of the eastern Tibetan Plateau and adjacent regions from ambient noise tomography [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 58(5): 1568-1583, doi: 10.6038/cjg20150510.
- Fang L H, Wu J P, Lü ZY. 2009. Rayleigh wave group velocity tomography from ambient seismic noise in North China [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 52(3): 663-671.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, *et al.* 2013. Love wave tomography from ambient seismic noise in North-China [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 56(7): 2268-2279, doi: 10.6038/cjg20130714.
- Gouépard P, Roux P, Campillo M, *et al.* 2008. Convergence of the two-point correlation function toward the Green's function in the context of a seismic-prospecting data set [J]. *Geophysics* , 73(6): V47-V53.
- Halliday D, Curtis A. 2009. Generalized optical theorem for surface waves and layered media [J]. *Phys. Rev. E* , 79(5Pt 2): 056603, doi: 10.1103/PhysRevE.79.056603.
- Harmon N, Rychert C, Gerstoft P. 2010. Distribution of noise sources for seismic interferometry [J]. *Geophys. J. Int.* , 183(3): 1470-1484.
- Larose E, Roux P, Campillo M. 2007. Reconstruction of Rayleigh-Lamb dispersion spectrum based on noise obtained from an air-jet forcing [J]. *J. Acoust. Soc. Am.* , 122(6): 3437-3444.
- Larose E, Roux P, Campillo M, *et al.* 2008. Fluctuations of correlations and Green's function reconstruction: Role of scattering [J]. *J. Acoust. Soc. Am.* , 103(11): 114907.
- Lawrence J F, Denolle M, Seats K J, *et al.* 2013. A numeric evaluation of attenuation from ambient noise correlation functions [J]. *J. Geophys. Res.* , 118(12): 6134-6145, doi: 10.1002/2012JB009513.
- Lawrence J F, Prieto G A. 2011. Attenuation tomography of the western United States from ambient seismic noise [J]. *J. Geophys. Res.* , 116(B6): B06302, doi: 10.1029/2010JB007836.
- Li H Y, Su W, Wang C Y, *et al.* 2009. Ambient noise Rayleigh wave tomography in western Sichuan and eastern Tibet [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 282(1-4): 201-211.
- Lin F C, Moschetti M P, Ritzwoller M H. 2008. Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and love wave phase velocity maps [J]. *Geophys. J. Int.* , 173(1): 281-298.
- Lin F C, Ritzwoller M H, Shen W S. 2011. On the reliability of attenuation measurements from ambient noise cross-correlations [J]. *Geophys. Res. Lett.* , 38(11): L11303, doi: 10.1029/2011GL047366.
- Liu J H, Liu F T, Yan X W, *et al.* 2004. A study of Lg coda attenuation beneath North China: Seismic imaging of Lg coda  $Q_0$  [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 47(6): 1044-1052, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2004.06.017.
- Liu Q H, Lu L Y, Wang K M. 2015. Review on the active and passive surface wave exploration method for the near-surface structure [J]. *Prog. Geophys.* (in Chinese) , 30(6): 2906-2922, doi: 10.6038/pg20150660.
- Liu X, Ben-Zion Y. 2013. Theoretical and numerical results on effects of attenuation on correlation functions of ambient seismic noise [J]. *Geophys. J. Int.* , 194(3): 1966-1983.
- Liu X, Ben-Zion Y, Zigone D. 2015. Extracting seismic attenuation coefficients from cross-correlations of ambient noise at linear triplets of stations [J]. *Geophys. J. Int.* , 203(2): 1149-1163, doi: 10.1093/gji/ggv357.
- Liu Z K, Huang J L. 2010. Temporal changes of seismic velocity around the Wenchuan earthquake fault zone from ambient seismic noise correlation [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 53(4): 853-863, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.010.
- Lobkis O, Weaver R. 2001. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field [J]. *J. Acoust. Soc. Am.* , 110(6): 3011-3017.
- Lu L Y, Ding Z F, Zeng R S, *et al.* 2011. Retrieval of Green's function and generalized optical theorem for the scattering of complete dyadic fields [J]. *J. Acoust. Soc. Am.* , 129(4): 1935-1944.
- Lu L Y, He Z Q, Ding Z F, *et al.* 2009. Investigation of ambient noise source in North China array [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 52(10): 2566-2572, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.015.
- Lu L Y, He Z Q, Ding Z F, *et al.* 2014. Azimuth anisotropy and velocity heterogeneity of Yunnan area based on seismic ambient noise [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 57(3): 822-836, doi: 10.6038/cjg20140312.
- Margerin L, Sato H. 2011. Reconstruction of multiply-scattered arrivals from the cross-correlation of waves excited by random noise sources in a heterogeneous dissipative medium [J]. *Wave Motion* , 2011, 48(2): 146-160.
- Matzel E. 2007. Imaging seismic attenuation in the crust and upper mantle by ambient noise correlation [C]. //AGU Fall Meeting Abstracts. Washington, DC: AGU, 8.
- Matzel E. 2008. Attenuation tomography using ambient noise correlation [C]. //AGU Fall Meeting Abstracts. Washington, DC: AGU, 4.
- Menon R, Gerstoft P, Hodgkiss W S. 2014. On the apparent attenuation in the spatial coherence estimated from seismic arrays [J]. *J. Geophys. Res.* , 119(4): 3115-3132, doi: 10.1002/2013JB010835.
- Nakahara H. 2012. Formulation of the spatial autocorrelation (SPAC) method in dissipative media [J]. *Geophys. J. Int.* , 190(3): 1777-1783.
- Okada H. 2003. The Microtremor Survey Method [M]. Sato K Trans. SEG.
- Olsen K B, Day S M, Bradley C R. 2003. Estimation of Q for long-period (> 2 sec) waves in the Los Angeles basin [J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.* , 93(2): 627-638.
- Phillips W S, Stead R J. 2008. Attenuation of Lg in the western US

- using the USArray[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35(7): L07307.
- Prieto G A, Beroza G C. 2008. Earthquake ground motion prediction using the ambient seismic field[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35(14): L14304.
- Prieto G A, Denolle M, Lawrence J F, *et al.* 2011. On amplitude information carried by the ambient seismic field[J]. *C. R. Geosci.*, 343(8-9): 600-614.
- Prieto G A, Lawrence J F, Beroza G C. 2009. Anelastic Earth structure from the coherency of the ambient seismic field[J]. *J. Geophys. Res.*, 114(B7): B07303, doi: 10.1029/2008JB006067.
- Roux P, Sabra K G, Kuperman W A, *et al.* 2005. Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(1): 79-84.
- Sabra K G, Gerstoft P, Roux P, *et al.* 2005. Surface wave tomography from microseisms in southern California[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(14): L14311, doi: 10.1029/2005GL023155.
- Sánchez-Sesma F J, Campillo M. 2006. Retrieval of the Green's function from cross correlation: The canonical elastic problem[J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96(3): 1182-1191.
- Schuster G T. 2009. *Seismic Interferometry*[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Seats K J, Lawrence J F, Prieto G A. 2012. Improved ambient noise correlation functions using Welch's method[J]. *Geophys. J. Int.*, 188(2): 513-523.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31(7): L07614, doi: 10.1029/2004GL019491.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, *et al.* 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[J]. *Science*, 307(5715): 1615-1618.
- Slob E, Wapenaar K. 2007. Electromagnetic Green's functions retrieval by cross-correlation and cross-convolution in media with losses[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(5): L05307.
- Snieder R. 2004. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase[J]. *Phys. Rev. E*, 69(4 Pt 2): 046610.
- Snieder R. 2007. Extracting the Green's function of attenuating heterogeneous acoustic media from uncorrelated waves[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(5): 2637-2643.
- Snieder R, Van Wijk K, Haney M, *et al.* 2008. Cancellation of spurious arrivals in Green's function extraction and the generalized optical theorem[J]. *Phys. Rev. E*, 78(3): 036606.
- Sun L, Li Y H, Wu Q J, *et al.* 2012.  $Q_0$  tomography of S wave attenuation in Northeast China and adjacent regions[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 55(4): 1179-1185, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.014.
- Tao Y, Fu L Y, Sun W J, *et al.* 2010. A review of seismic interferometry[J]. *Prog. Geophys. (in Chinese)*, 25(5): 1775-1784, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.035.
- Tang Y C, Chen Y S, Yang Y J, *et al.* 2011. Ambient noise tomography in North China Craton[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 54(8): 2011-2022, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.008.
- Tsai V C. 2011. Understanding the amplitudes of noise correlation measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 116(B9): B09311, doi: 10.1029/2011JB008483.
- Tsai V C, Moschetti M P. 2010. An explicit relationship between time-domain noise correlation and spatial autocorrelation (SPAC) results[J]. *Geophys. J. Int.*, 182(1): 454-460.
- Van Manen D J, Curtis A, Robertsson J O. 2006. Interferometric modeling of wave propagation in inhomogeneous elastic media using time reversal and reciprocity[J]. *Geophysics*, 71(4): SI47-SI60.
- Wang K M, Lu L Y, Liu Q H. 2016. On the spatial correlation of seismic noise in an attenuating medium[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 59(9): 3237-3247, doi: 10.6038/cjg20160909.
- Wang W T, Ni S D, Wang B S. 2010. Composition of high frequency ambient noise from cross-correlation: A case study using a small aperture array[J]. *Earthq. Sci.*, 23(5): 433-438.
- Walker S C. 2012. A model for spatial coherence from directive ambient noise in attenuating, dispersive media[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 132(1): EL15-EL21, doi: 10.1121/1.4726195.
- Wapenaar K. 2004. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 93(25): 254301.
- Wapenaar K, Draganov D, Snieder R, *et al.* 2010a. Tutorial on seismic interferometry: Part 1—Basic principles and applications[J]. *Geophysics*, 75(5): 75A195-75A209, doi: 10.1190/1.3457445.
- Wapenaar K, Slob E, Snieder R. 2006. Snieder R. Unified Green's function retrieval by cross correlation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 97(23): 234301.
- Wapenaar K, Slob E, Snieder R, *et al.* 2010b. Tutorial on seismic interferometry: Part 2—Underlying theory and new advances[J]. *Geophysics*, 75(5): 75A211-75A227, doi: 10.1190/1.3463440.
- Weaver R, Froment B, Campillo M. 2009. On the correlation of non-isotropically distributed ballistic scalar diffuse waves[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(4): 1817-1826.
- Weaver R L. 2011. On the amplitudes of correlations and the inference of attenuations, specific intensities and site factors from ambient noise[J]. *C. R. Geosci.*, 343(8-9): 615-622.
- Weaver R L. 2012. On the retrieval of attenuation from the azimuthally averaged coherency of a diffuse field[J]. *arXiv preprint arXiv:1206.6513*.
- Weaver R L. 2013. On the retrieval of attenuation and site amplifications from ambient noise on linear arrays: Further numerical simulations[J]. *Geophys. J. Int.*, 193(3): 1644-1657.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2001. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110(6): 3011-3017.
- Weemstra C, Boschi L, Goertz A, *et al.* 2013. Seismic attenuation from recordings of ambient noise[J]. *Geophysics*, 78(1): Q1-Q14.
- Weemstra C, Snieder R, Boschi L. 2015. On the estimation of attenuation from the ambient seismic field: Inferences from distributions of isotropic point scatterers[J]. *Geophys. J. Int.*, 203(2): 1054-1071.
- Weemstra C, Westra W, Snieder R, *et al.* 2014. On estimating attenuation from the amplitude of the spectrally whitened ambient seismic field[J]. *Geophys. J. Int.*, 197(3): 1770-1788.
- Xie J, Yang Y J, Ni S D. 2016. On the accuracy of long-period Rayleigh waves extracted from ambient noise[J]. *Geophys. J. Int.*, 206(1): 48-55.
- Xu P, Wang B S, Zhang W, *et al.* 2006. Estimating seismic attenuation using cross-correlation function[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 49(6): 1738-1744, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2006.06.021.
- Xu Y X, Luo Y H. 2015. Methods of ambient noise-based seismology and their applications[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 58(8): 2618-2636, doi: 10.6038/cjg20150803.
- Yang Y J, Forsyth D W. 2006. Rayleigh wave phase velocities, small-scale convection, and azimuthal anisotropy beneath southern California[J]. *J. Geophys. Res.*, 111(B7): B07306.
- Yang Y J, Forsyth D W. 2008. Attenuation in the upper mantle beneath southern California: Physical state of the lithosphere and asthenosphere[J]. *J. Geophys. Res.*, 113(B3): B03308.
- Yang Y J, Ritzwoller M H. 2008. Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography[J]. *Geochem. , Geophys. , Geosyst.*, 9(2): Q02008.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Levshin A L, *et al.* 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe[J]. *Geophys. J. Int.*, 168(1): 259-274.
- Yao H J, Gouédard P, Collins J A, *et al.* 2011. Structure of young East Pacific Rise lithosphere from ambient noise correlation analysis of fundamental-and higher-mode Scholte-Rayleigh waves[J]. *C. R. Geosci.*, 343(8-9): 571-583.
- Yao H J, Campman X, De Hoop M V, *et al.* 2009a. Estimation of surface wave Green's functions from correlation of direct waves, coda waves, and ambient noise in SE Tibet[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 177(1-2): 1-11.
- Yao H J, Van Der Hilst R D. 2009b. Analysis of ambient noise energy distribution and phase velocity bias in ambient noise tomography,

- with application to SE Tibet [J]. *Geophys. J. Int.*, 179(2): 1113-1132.
- Yokoi T, Margaryan S. 2008. Consistency of the spatial autocorrelation method with seismic interferometry and its consequence [J]. *Geophys. Prospec.*, 56(3): 435-451.
- Zeng X F, Ni S D, Xia Y J. 2012. Estimated Green's Function extracted from long time continuous seismic records [J]. *Prog. Geophys. (in Chinese)*, 27(5): 1881-1889, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.007.
- Zhan Z W, Ni S D, Helmberger D V, *et al.* 2010. Retrieval of Moho-reflected shear wave arrivals from ambient seismic noise [J]. *Geophys. J. Int.*, 182(1): 408-420.
- Zhang J, Yang X N. 2013. Extracting surface wave attenuation from seismic noise using correlation of the coda of correlation [J]. *J. Geophys. Res.*, 118(5): 2191-2205, doi: 10.1002/jgrb.50186.
- Zhao L F, Xie X B, He J K, *et al.* 2013. Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 383: 113-122.
- Zheng Y, Shen W S, Zhou L Q, *et al.* 2011. Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography [J]. *J. Geophys. Res.*, 116(B12): B12312.
- Zheng Y, Yang Y J, Ritzwoller M H, *et al.* 2010. Crustal structure of the northeastern Tibetan plateau, the Ordos block and the Sichuan basin from ambient noise tomography [J]. *Earthq. Sci.*, 23(5): 465-476, doi: 10.1007/s11589-010-0745-3.
- Zhou L Q, Zhao C P, Xiu J G, *et al.* 2008. Tomography of  $Q_{Lg}$  in Sichuan-Yunnan zone [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 51(6): 1745-1752, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.06.015.
- Zhu L B, Wang Q D. 2011. An expression of the cross-correlation of ambient seismic noise: A derivation based on the surface-wave theory [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 54(7): 1835-1841, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.07.017.
- 刘建华, 刘福田, 阎晓蔚, 等. 2004. 华北地区 Lg 尾波衰减研究——Lg 尾波  $Q_0$  地震成像 [J]. *地球物理学报*, 47(6): 1044-1052, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2004.06.017.
- 刘庆华, 鲁来玉, 王凯明. 2015. 主动源和被动源面波浅勘方法综述 [J]. *地球物理学进展*, 30(6): 2906-2922, doi: 10.6038/pg20150660.
- 刘志坤, 黄金莉. 2010. 利用背景噪声互相关研究汶川地震震源区地震波速度变化 [J]. *地球物理学报*, 53(4): 853-863, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.010.
- 鲁来玉, 何正勤, 丁志峰, 等. 2009. 华北科学探测台阵背景噪声特征分析 [J]. *地球物理学报*, 52(10): 2566-2572, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.015.
- 鲁来玉, 何正勤, 丁志峰, 等. 2014. 基于背景噪声研究云南地区面波速度非均匀性和方位各向异性 [J]. *地球物理学报*, 57(3): 822-836, doi: 10.6038/cjg20140312.
- 孙莲, 李永华, 吴庆举, 等. 2012. 中国东北及周边地区地壳横波衰减的成像研究 [J]. *地球物理学报*, 55(4): 1179-1185, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.014.
- 唐有彩, 陈永顺, 杨英杰, 等. 2011. 华北克拉通中部地区背景噪声成像 [J]. *地球物理学报*, 54(8): 2011-2022, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.008.
- 陶毅, 符力耘, 孙伟家, 等. 2010. 地震波干涉法研究进展综述 [J]. *地球物理学进展*, 25(5): 1775-1784, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.035.
- 王凯明, 鲁来玉, 刘庆华. 2016. 由地震背景噪声提取介质衰减: 衰减介质中的空间相干表示 [J]. *地球物理学报*, 59(9): 3237-3247, doi: 10.6038/cjg20160909.
- 徐平, 王宝善, 张尉, 等. 2006. 利用互相关函数求地震波衰减 [J]. *地球物理学报*, 49(6): 1738-1744, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.06.021.
- 徐义贤, 罗银河. 2015. 噪声地震学方法及其应用 [J]. *地球物理学报*, 58(8): 2618-2636, doi: 10.6038/cjg20150803.
- 曾祥方, 倪四道, 夏英杰. 2012. 由长时间连续记录不压制地震信号提取近似格林函数的可行性研究 [J]. *地球物理学进展*, 27(5): 1881-1889, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.007.
- 周连庆, 赵翠萍, 修济刚, 等. 2008. 川滇地区 Lg 波 Q 值层析成像 [J]. *地球物理学报*, 51(6): 1745-1752, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.06.015.
- 朱良保, 王清东. 2011. 地震背景噪声互相关函数的面波理论表达形式 [J]. *地球物理学报*, 54(7): 1835-1841, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.07.017.

## 附中文参考文献

- 范莉苹, 吴建平, 房立华, 等. 2015. 青藏高原东南缘瑞利波群速度分布特征及其构造意义探讨 [J]. *地球物理学报*, 58(5): 1555-1567, doi: 10.6038/cjg20150509.
- 范文渊, 陈永顺, 唐有彩, 等. 2015. 青藏高原东部和周边地区地壳速度结构的背景噪声层析成像 [J]. *地球物理学报*, 58(5): 1568-1583, doi: 10.6038/cjg20150510.
- 房立华, 吴建平, 吕作勇. 2009. 华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像 [J]. *地球物理学报*, 52(3): 663-671.
- 房立华, 吴建平, 王未来, 等. 2013. 华北地区勒夫波噪声层析成像研究 [J]. *地球物理学报*, 56(7): 2268-2279, doi: 10.6038/cjg20130714.