

背景噪声源分布对地震波形互相关及频散曲线提取影响对比分析

冯伟瑜, 沈旭章, 谭家炜, 王文天

Influence of Ambient Noise Source Distributions on Cross-correlation Derived Seismic Waveforms and Dispersion Curve Retrieval

FENG Weiyu, SHEN Xuzhang, TAN Jiawei, and WANG Wentian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2025.181>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

背景噪声和密集台阵成像技术在哈尔乌素露天煤矿采空区的应用

Application of Ambient Noise and Dense Seismic Array Imaging Techniques in Goaf Detection Beneath Coal Mines at Haerwusu

CT理论与应用研究. 2023, 32(4): 461–470

山西断陷带及其邻区背景噪声面波直接反演成像

Direct Surface-wave Tomography from Ambient Noise in the Shanxi Rift Zone and Adjacent Areas

CT理论与应用研究. 2025, 34(2): 175–189

多尺度曲率在渤海K油田断裂解释中的应用

Application of Multi-scale Curvature in Fault Interpretation of K Oilfield in Bohai Sea

CT理论与应用研究. 2024, 33(6): 773–780

基于EMD与EEMD的最优降噪光滑模型在地震波中的应用

Application of Optimal Noise Reduction Smooth Model Based on EMD and EEMD in Seismic Waves

CT理论与应用研究. 2020, 29(1): 11–21

基于先验信息约束的Curvelet域地震数据POCS插值方法

Seismic Data Reconstruction Based on the POCS Method in the Curvelet Domain with Prior Information

CT理论与应用研究. 2024, 33(2): 149–158

不同迭代重建算法在眼眶CT中的适用性研究

Applicability of Different Iterative Reconstruction Algorithms in Orbital Computed Tomography

CT理论与应用研究. 2024, 33(4): 487–496



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

冯伟瑜, 沈旭章, 谭家炜, 等. 背景噪声源分布对地震波形互相关及频散曲线提取影响对比分析[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(5): 803-814. DOI:10.15953/j.ctta.2025.181.

FENG W Y, SHEN X Z, TAN J W, et al. Influence of Ambient Noise Source Distributions on Cross-correlation Derived Seismic Waveforms and Dispersion Curve Retrieval[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(5): 803-814. DOI:10.15953/j.ctta.2025.181. (in Chinese).

背景噪声源分布对地震波形互相关及频散 曲线提取影响对比分析

冯伟瑜^{1,2}, 沈旭章^{1,2}, 谭家炜^{1,2}, 王文天³

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广州 510275
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275
3. 河北省防灾研究所地震动力学重点实验室, 河北 廊坊 065201

摘要: 密集台阵观测已成为获取高分辨率地下结构的关键手段。然而, 噪声源时空分布的非均匀性会显著降低背景噪声互相关函数(NCF)的信噪比, 进而影响频散曲线提取。本研究基于中国东西部典型构造区的密集台阵观测数据(青藏高原东北缘宁夏甘盐池拉分盆地、广东三水盆地及广西北流地震震源区), 分析不同研究区噪声源在低频段(0.1~1 Hz)和频段(1~10 Hz)范围内的噪声水平特征。结果表明, 中国南海北部陆缘的三水盆地与北流地震震源区密集台阵在低频段表现为较均匀的噪声水平分布, 在0.1~1 Hz频段范围内可以清晰获取高信噪比的Rayleigh波信号, 通过频率-贝塞尔变换法能有效提取出频散曲线。青藏高原东北缘的甘盐池拉分盆地台阵在低频段中呈现低噪声水平强度, 因其受盆山耦合地形影响, 导致NCF波形在零时刻附近产生前驱波干扰, 高频段的受局地非稳态噪声波场影响, 使NCF在4 km范围内呈现低信噪比Rayleigh波信号, 并存在杂乱非收敛的信号, 影响后续提取频散曲线。因此, 在背景数据采集之前需事先对测区噪声源分布特征与区域构造进行分析, 进而依此确定观测方案。

关键词: 背景噪声; 噪声水平; 地震波; 互相关函数; 信噪比

DOI:10.15953/j.ctta.2025.181 中图分类号: P 65; P 315 文献标识码: A

Influence of Ambient Noise Source Distributions on Cross-correlation Derived Seismic Waveforms and Dispersion Curve Retrieval

FENG Weiyu^{1,2}, SHEN Xuzhang^{1,2}, TAN Jiawei^{1,2}, WANG Wentian³

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. Guangdong Province Key Laboratory of Geodynamics and Geological Hazards, Guangzhou 510275, China
3. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China

Abstract: Dense-array observation has become a key method for obtaining high-resolution subsurface structures. However, the spatiotemporal heterogeneity of the noise source distribution significantly reduces the signal-to-noise ratio (SNR) of noise correlation functions (NCF), thereby affecting the extraction of dispersion curves. This study analyzed the noise level characteristics in low-frequency (0.1-1 Hz) and high-frequency (1-10 Hz) bands across dense arrays in typical tectonic regions of eastern and western China, including the Ganyanchi pull-apart basin in Ningxia on the northeastern Tibetan Plateau, the Sanshui Basin in Guangdong, and the Beiliu seismic source area in Guangxi. The Sanshui Basin and Beiliu seismic source area are located on the northern continental margin of the South China Sea and exhibit relatively uniform noise levels in the low-frequency band. High-SNR Rayleigh wave signals were successfully extracted in the 0.1-1 Hz range, enabling effective derivation of dispersion curves using the Frequency-Bessel transform method. Conversely, the Ganyanchi pull-apart basin in the northeastern Tibetan Plateau shows low noise intensity in the low-frequency band, where the basin-mountain coupled topography induces precursor wave interference with near-zero time delays in the

收稿日期: 2025-06-02。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(祁连造山带深部结构与晚新生代构造变形研究(42230305))。

第一作者: 冯伟瑜, 男, 硕士研究生, 主要从事地震背景噪声成像方面的研究, E-mail: fengwy29@mail2.sysu.edu.cn。

通信作者: 沈旭章[✉], 男, 教授, 主要从事地球深部结构、地震学和定点形变观测方面的研究, E-mail: shenxzh5@mail.sysu.edu.cn。

NCF waveforms. At high frequencies, localized nonstationary noise wavefields result in low-SNR Rayleigh wave signals within a 4 km range, accompanied by chaotic, non-convergent signals that hinder dispersion curve extraction. Thus, prior to ambient noise data acquisition, the distribution characteristics of ambient noise sources and regional tectonic features must be analyzed to determine the observation scheme.

Keywords: ambient noise tomography; noise level; seismic wave; noise correlation function; signal-to-noise ratio

地球表面普遍存在的微弱低振幅振动现象被称为背景噪声(亦称微震或微动信号),其能量来源可分为自然噪声源与人为噪声源。自然噪声源主要包括气压扰动、海浪-海底耦合作用及潮汐应力等自然活动,优势能量集中于 1 Hz 以下频段^[1-3]。人为噪声源则主要源自于交通系统振动、工业机械运转等人类生产活动,其能量主要分布在 1 Hz 以上频段。这些振动能量通过复杂的波场耦合机制,形成以面波(Rayleigh 波和 Love 波)为主导、包含体波(P 波和 S 波)的弹性波场,其中面波能量占比可达波场总量的 70% 以上^[4]。

背景噪声中的面波具有显著的频散特性,其相速度和群速度随频率变化,可有效约束地下介质的密度、纵波速度(V_p)及横波速度(V_s)等弹性参数的垂向分布^[5-6]。

基于波场互易性原理,通过对台站间长时间背景噪声记录进行互相关计算与叠加处理,可重构具有明确物理意义的经验格林函数(empirical Green's function, EGF),其波形特征等效于台站对之间虚拟震源激发的地震波场响应^[7-9]。随着观测资料的大量积累,研究者通过提取噪声互相关函数(noise correlation function, NCF)中的面波频散数据,已成功反演了全球多个构造区域的壳幔速度结构,显著深化了对岩石圈动力学过程的理解^[10-13]。

近年来,随着断裂带精细结构探测需求的增长及地震仪采样精度的提升,研究焦点逐步向高频段(> 1 Hz)延伸。通过优化布设密集台阵与信号处理算法,前人在大量研究中已有效提取到了 NCF 中的高频面波信号,并据此构建百米至千米尺度的近地表三维 S 波速度模型,为工程地质勘查和浅层构造探测提供了新的技术路径^[14-17]。

背景噪声互相关技术的理论基础建立于噪声源各向同性分布假设^[18-19],然而实际观测中噪声源时空分布的非均匀性显著增加了波场复杂性,导致了噪声 NCF 的低信噪比特征。前人研究表明^[20-23],NCF 正负半轴信号强度的差异受控于噪声源的空间分布及其季节性变化。同时,不同周期频段的背景噪声能量变化规律也呈现显著的季节差异性。

值得注意的是,在中国大陆区域,王芳等^[24]指出高频段(1~10 Hz)噪声强度存在空间异质性,西部和北部地区噪声水平普遍较低,中东部地区相对较高,而东南沿海地区则达到峰值,该分布格局与人文活动强度呈现出高度正相关性。而不均匀的噪声源分布会导致 NCF 的振幅发生变化,徐义贤等^[25]通过理论分析表明,非稳态相位域内优势噪声源会导致虚假信号的引入,造成 NCF 波形畸变。Zeng 等^[26]指出持续的局部微震源可能会产生高于沿大圆路径传播的面波信号的 PL 信号(Persistent localized 信号),甚至影响某些路径的 NCF 的形态。

对于短周期密集台阵观测,由于仪器主要频段通常较高且观测周期相对较短,局部噪声源的空间分布不均匀性将导致 NCF 信噪比呈现显著的空间变异性或不稳定性。其中,背景噪声低频段(< 1 Hz)以全球海洋微震等稳定源为主导,而高频段噪声能量则来源于海洋的地球第 2 微震、局地自然过程(如近岸浪涌作用)及高强度人类活动(交通、工业、人文活动),其时空异质性与非平稳性特征更为突出^[27],这直接导致高频段 NCF 稳定性显著低于低频段。

此外,受到局部地质结构的影响,高频噪声进一步加剧了波型转换和散射效应,产生了复杂的波场现象^[28]。洛杉矶盆地研究结果表明,沉积层厚度超过 500 m 时,NCF 中高阶 Rayleigh 波能量占比可达 40%^[29]。同时,在复杂的高频噪声类型及波场,NCF 中可能会出现体波信号^[30],Nakata 等^[31]在 Long Beach 台阵 3~10 Hz 的 NCF 中观测到超前于理论走时的 P 波信号。复杂波场特征与台站间非均匀噪声分布相互耦合,使得 NCF 中常出现非物理信号混叠现象^[32],其相位特性与正常面波高度近似^[33],严重影响频散曲线提取的可靠性。

尽管通过预处理(时间域归一化、谱白化等)及台阵几何优化设计可有效压制部分干扰信号^[34-36],以及通过不同的叠加时长可提升 NCF 信噪比^[21]。杨志高^[37]的研究表明,仅利用 10 天的背景噪声数据即可叠加获得信噪比较高的 NCF,而 5 年的叠加时长则能获得相对更稳定的结果。然而,针对短

周期密集台阵的观测特性，曾求等^[38]系统比较了不同叠加时长与 NCF 信噪比的关系，指出 1 天叠加所得结果与 1 个月叠加结果的信噪比几乎无显著差异。

因此，NCF 信噪比低、异常相位持续存在等问题，可能主要受强各向异性噪声场或复杂地质构造的影响^[18,31-32]。这也突显出噪声源方位特征先验约束的必要性——通过研究区目标频段噪声能量分布的系统性评估，优化台站布设方案，提升有效信号的空间相干性。

基于此，本研究选取宁夏甘盐池拉分盆地、广东三水盆地及广西北流地震震源区等 3 个研究区，根据其短周期密集台阵的连续背景噪声垂向观测数据，通过构建噪声功率谱密度与概率功率谱密度图，定量解析不同构造背景下噪声场的时空演化规律。

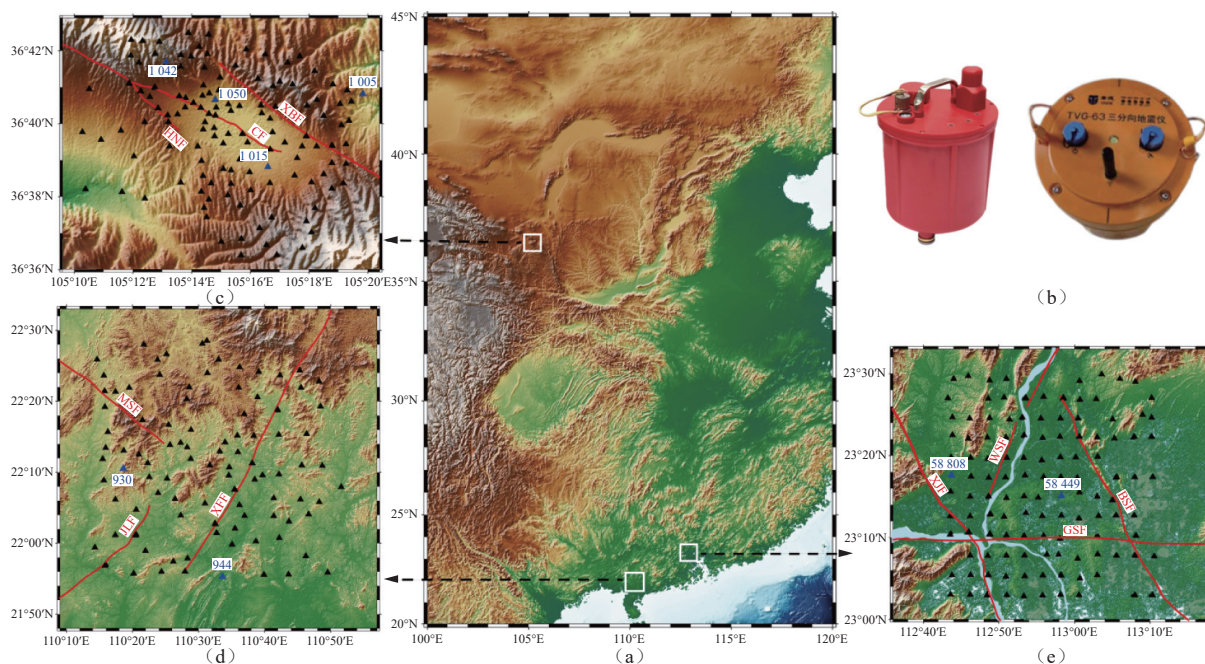
1 数据和方法

1.1 台阵概况

本研究的背景噪声数据主要来自课题组在广东省三水盆地、宁夏回族自治区甘盐池拉分盆地和广西壮族自治区北流地震震源区布设的短周期密集台阵。3 个台阵分布如图 1 所示，表 1 对各台阵布设情况做了简要展示。

1.2 噪声信号频谱分析

在地震学研究中，功率谱密度 (power spectrum density, PSD) 是表征噪声信号频域能量分布的核心参数。Peterson^[39]通过分析全球 75 个固定地震台站的背景噪声数据，首次构建了全球高噪声基准线 (NHNM) 和低噪声基准线 (NLNM) 双模型，为



注：(a) 研究区的区域位置图，白色虚框为 3 个台阵位置；(b) 左边为 EPS 短周期三分量地震仪，右边为 TVG-63 短周期三分量地震仪；(c) ~ (e) 分别为甘盐池拉分盆地、北流地震震源区和三水盆地台站分布情况；红色实线为区域断裂 (HNF: 黄家洼山北麓断裂；CF: 中央断裂；XBF: 西华山北麓断裂；MSF: 米场-石窝断裂；JLF: 蕉林断裂；XFF: 新丰断裂；XJF: 西江断裂；WSF: 吴川-四会断裂；BSF: 白泥-沙湾断裂；GSF: 广州-三水断裂)；黑色三角形为台站；蓝色三角形为后续噪声源频谱分析台站。

图 1 研究区区域位置图、台站分布图和仪器示例图

Fig.1 Regional maps of the study area showing station distribution, with an example of a seismic instrument

表 1 不同研究区的台阵布设情况
Table 1 Layout of seismic arrays in different study areas

研究区	项目					
	台站数	台间距/km	台阵长度/km ²	观测时长/天	观测仪器	仪器采样率/Hz
三水盆地	124	4~5	10 × 10	15	TVG-63	200
甘盐池拉分盆地	133	盆地内: 0.5~1, 盆地外: 1~2	50 × 50	25	EPS	100
北流地震震源区	121	5~6	60 × 60	24	EPS	100

注：本研究使用的地震观测仪器均为短周期三分量地震仪。

噪声水平评估提供了量化标准。通常使用离散傅里叶变换来计算功率谱密度,对原始数据进行有限范围内的快速傅里叶变换:

$$G(f, t_r) = \int_0^{t_r} g(t) \exp(-i2\pi ft) dt, \quad (1)$$

式中, $g(t)$ 表示为周期性的时间序列, t_r 为时间系列分段长度, f 为频率。其中傅里叶频率分量定义为:

$$G(f_k) = \frac{G(f_k, t_r)}{\Delta t}, \quad (2)$$

对于 $k = 1, 2, \dots, N$, 傅里叶频率分量 $f_k = k/N\Delta T$, ΔT 为采样间隔, N 为截取时间段的采样点。最终功率谱密度 (PSD) 定义为:

$$P_k = \frac{2\Delta t}{N} |G_k|^2. \quad (3)$$

然而,在噪声水平评估领域中,传统方法虽得到广泛应用,但其评估结果易受主观因素制约。特别是在噪声水平表征过程中,人为选取标准往往难以完整呈现台站噪声的复杂特征,如持续性人为活动干扰、周期性环境变化以及季节性波动等关键要素。

为系统评估台站噪声的特征,McNamara 和 Buland^[40]提出了基于概率密度统计的噪声功率谱分析方法 (probability density functions, PDF)。通过处理连续长周期波形数据,采用标准化流程对全量观测数据进行统一分析,将各类噪声源对背景噪声的时频域影响量化为概率密度函数 (PDF) 的统计特征,从而实现台站噪声水平的多维度客观表征。通常按倍频程间隔进行滑动计算目标范围内各中心频率的平均值:

$$T_c = \sqrt{T_s \cdot T_l}, \quad (4)$$

式中, T_s 为短周期, T_l 为长周期。通过对所有时间系列进行 PSD 计算,将所有 PSD 曲线进行频数统计。最终 PDF 表示为:

$$P_f(T_c) = \frac{N_{PT_c}}{N_T}, \quad (5)$$

N_{PT_c} 是功率谱密度值落在某个 1 dB 间隔范围内的数量, N_T 是中心周期 T_c 在功率谱密度值范围内估计值的总数。通过比较不同时间或不同地点的 PDF,可以研究噪声特性的变化,为环境变化或人为活动的影响提供证据。

在地震观测领域,PDF 分析法近年来已成为测震台网数据质量评估的重要技术手段。吴建平^[41]对华北区域进行了系统化 PDF 分析研究,揭示了

华北区域显著的地域性噪声分布规律,并认为 PDF 分析法可系统评估数据质量。刘迪^[42]利用 PDF 分析法对背景噪声数据质量进行筛选高质量数据段,减少了 NCF 的计算时间,减弱了干扰的影响,提高了面波信号的信噪比与计算效率。这些进展均证实,PSD 法与 PDF 法不仅可深度解析噪声特征,更能为数据质量控制提供量化依据。

2 互相关函数与频散曲线分析

当背景噪声源满足空间各向同性分布条件时,基于互相关理论原理,台站对间噪声互相关函数 (NCF) 的对称干涉信号可等效于两站点间格林函数的虚拟源响应^[7,9],其振幅包络直接反映波场在传播路径上的相干性衰减特征。然而,实际噪声场的方位往往是各向异性的,这会诱发产生多种类型的非收敛信号^[18,20],使 NCF 波形特征成为揭示区域噪声场空间相干性强度和分布特征。

根据不同台阵的布设情况,本研究依据 Bensen 等^[34]提出的数据处理流程,对宁夏甘盐池拉分盆地、广东三水盆地及广西北流地震震源区 3 个台阵的垂直分量连续噪声数据进行系统处理:首先对原始数据进行重采样(降采样至 50Hz)、仪器响应校正、去均值、去趋势及带通滤波(0.1~1Hz, 1~3Hz 和 3~10Hz);其次采用 One-bit 归一化进行时域振幅均衡,并通过频谱白化改善不同台站的频谱强度影响。在此基础上,采用 Li 等^[43]研发的 CC-FJpy 程序包进行 NCF 运算,通过时域叠加处理,显著提升了信号的信噪比水平。

研究分析表明,不同研究区的 NCF 呈现显著地震区域性特征。我国南海北部陆缘的北流地震震源区与三水盆地区域在 0.1~1Hz 频段展现出典型海洋微震主导的 NCF 响应,存在正负时移对称的 Rayleigh 波信号呈现高信噪比特征 (SNR > 5),视速度分布 (2~4km/s) 与区域地壳平均速度模型较为吻合,这印证了海岸带区域稳定的海洋微震源优势 (图 2(a) 和图 2(b))。

值得注意的是,北流台阵在台间距 50km 外的 NCF 的非因果分量 (左支) 和因果分量 (右支) 信号存在少许差异,可能与局部优势噪声源的空间聚集效应相关。位于内陆青藏高原东北缘的甘盐池拉分盆地台阵受益地内剧烈地形起伏和台站非均匀分布的影响,即使在经过严格的数据筛选和优化处理后,甘盐池拉分盆地仍展现出独特的噪声互相关特征,其 NCF 波形显著区别于海岸带区域。

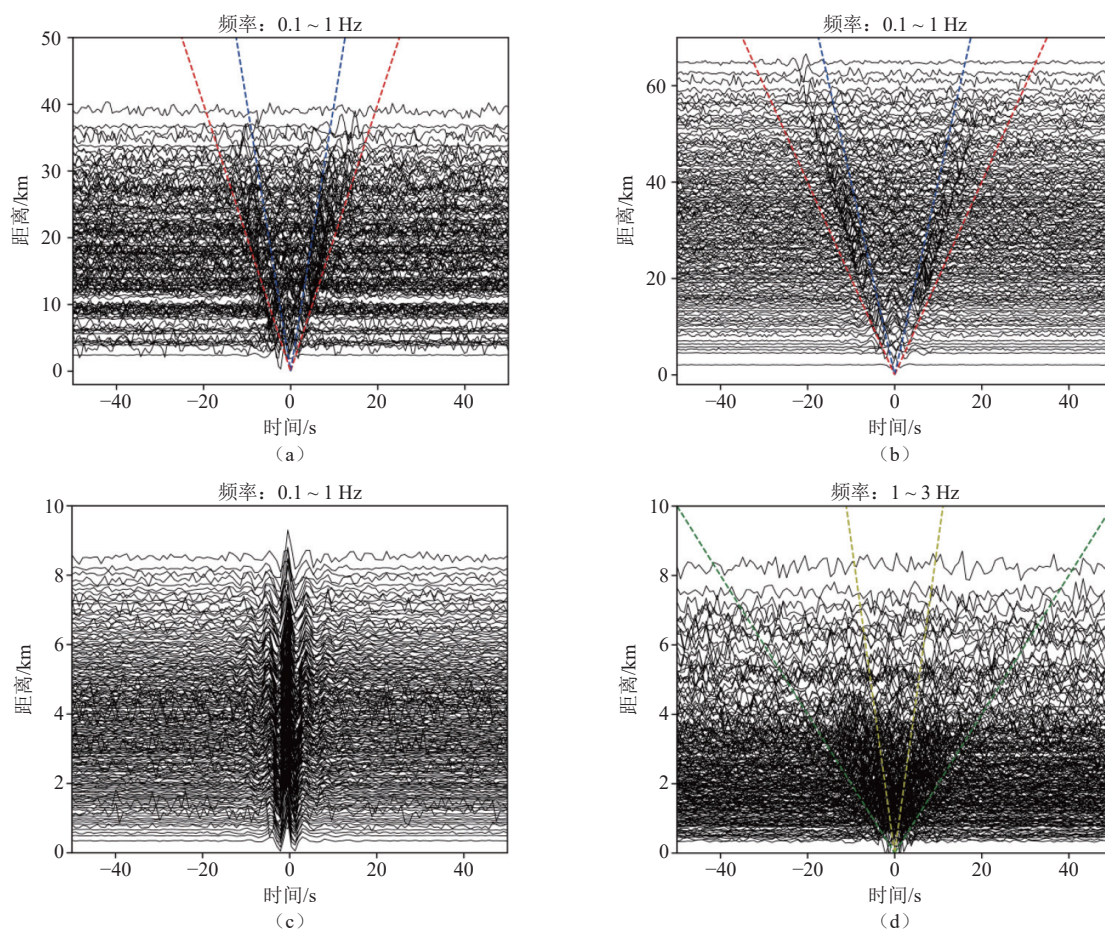
在 0.1~1 Hz 和 1~3 Hz 两个频段范围内的 NCF 均表现出明显的复杂性(图 2(c)和图 2(d))。在 0.1~1 Hz 低频段(图 2(c)), NCF 中完全缺失 Rayleigh 波信号,取而代之的是在零时刻窗(± 4 s)内持续存在的较强的前驱信号,且该前驱波走时与台站间距无线性相关性。该盆地位于南-西华山北麓断裂与黄家洼山南麓断裂构成的拉张区内,剧烈的构造隆升作用形成最大达 600m 的盆-山地势差,这种高地形梯度的盆缘陡倾断裂带与盆地沉积层构成的阻抗界面可能会诱发强烈的波场散射和折射,造成 NCF 中存在较强的前驱波信号。同时,台站在盆地内外的不规则分布导致噪声场空间采样不足,进一步抑制了 Rayleigh 波相干的形成。

在 1~3 Hz 频段范围内,甘盐池拉分盆地的 NCF 仍表现出复杂性,虽然在 4km 范围内可识别出视速度在 0.2~0.9 km/s 的弱 Rayleigh 波信号,但不同台间距的速度和波形都存在较大差异,在预期走时窗内观测未能发现稳定的信号包络,且存在杂乱

非收敛的信号。

NCF 表现出复杂性可能暗示此区域浅部介质的强非均匀性影响,甘盐池拉分盆地的人工地震剖面与钻孔数据结果显示^[44-45],盆地内第四系沉积层厚度在 0~600m 间剧烈变化,以前寒武片岩为盆地基底,这种垂向阻抗突变会导致高频面波发生显著的波型转换与频散效应。同时,高频噪声源受区域范围内的人类活动影响,因此其更容易形成不均匀的噪声水平,影响 NCF 的信噪比。3 个区域的 NCF 结果也印证了海洋微震源主导区域的频率更容易满足噪声场空间平稳性假设,其 NCF 信噪比也显著高于内陆区域。

在实际观测中由于受地形条件限制与噪声源时空分布不均,针对在复杂观测环境下频散信息提取问题,本研究采用台阵平均法来叠加不同方位的台站对波形以减小噪声源对频散提取的影响,压制非稳态噪声源引起的频散测量偏差^[3,35]。同时,利用频率-贝塞尔变换法(frequency-bessel



注: (a)三水盆地 0.1~1 Hz 的 NCF 结果; (b)北流地震震源区 0.1~1 Hz 的 NCF 结果; (c)甘盐池拉分盆地 0.1~1 Hz 的 NCF 结果; (d)甘盐池拉分盆地 1~3 Hz 的 NCF 结果。蓝色虚线为 4 km/s, 红色虚线为 2 km/s, 黄色虚线为 0.9 km/s, 绿色虚线为 0.2 km/s。

图 2 不同研究区域 NCF 结果

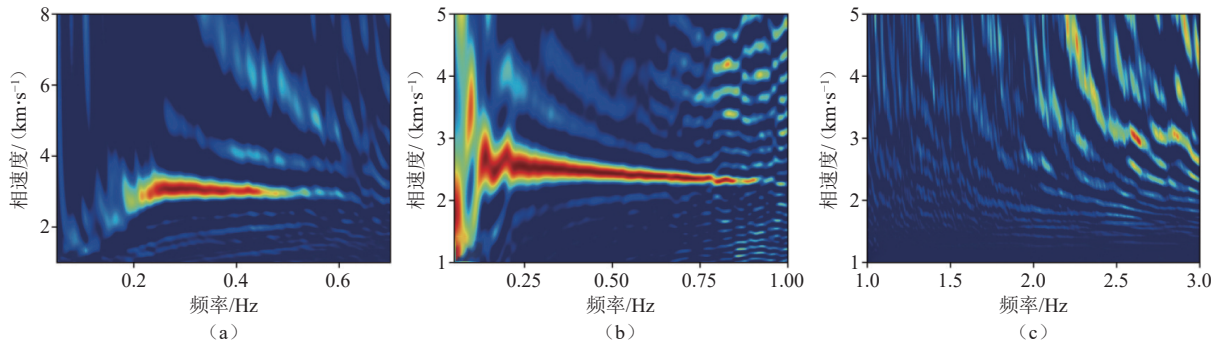
Fig.2 NCF results for different areas

transform method) 来获取频散能量图^[46], 该方法的优势为对台阵形状的要求不高, 对地形的依赖性较低, 所需的台站数量也较少, 对于地下结构复杂、台站间距不均匀的区域依旧能获取高质量的频散能量图^[47-48]。

本研究利用 CC-FJpy 程序包中频率-贝塞尔变换模块的对 3 个研究区进行频散能量图的获取^[43]。在 0.1~1Hz 频段, 我国南海北部陆缘的北

流地震震源区与三水盆地均表现出清晰连续的相速度频散曲线能量图; 在 0.2~0.6Hz (三水盆地) 及 0.1~1Hz (北流地震震源区) 范围内呈现典型地壳速度梯度特征 (图 3 (a) 和图 3 (b))。

反观甘盐池拉分盆地的 1~3Hz 高频段 NCF 中 Rayleigh 波信号存部分杂乱非收敛的信号混叠现象, 导致频散能量图出现能量带分散且不连续特征, 最终未能提取出相应的频散曲线 (图 3 (c))。



注: (a) 三水盆地 0.1~1Hz 的频散能量图; (b) 北流地震震源区 0.1~1Hz 的频散能量图; (c) 甘盐池拉分盆地 1~3Hz 的频散能量图。

图 3 不同研究区域频散能量图

Fig.3 Dispersion energy diagrams for different areas

3 噪声水平分析

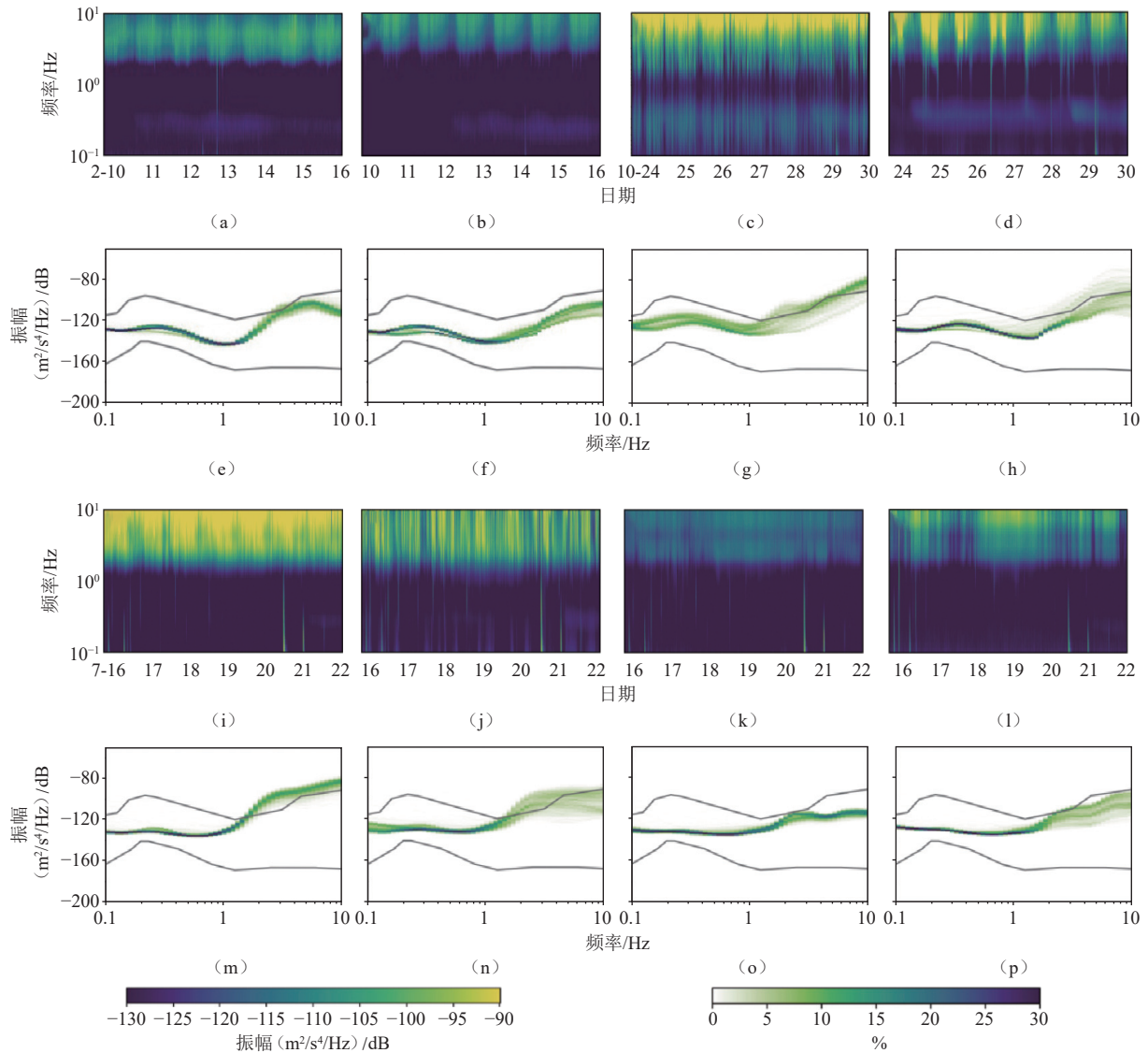
在地震台阵噪声抑制研究中, 不同几何构型阵列的方位响应特性存在显著差异, 多重三角形阵列凭借其对称拓扑结构表现出最优的噪声不均匀压制能力, 但对某些定向噪声源时, 依旧会得到较差的频散成像效果^[49]。基于背景噪声台阵记录的波场表征方法, 可通过分析各台站噪声场的频率-时间域分布特征实现对噪声源的动态描述。具体而言, 单台连续记录信号的功率谱密度 (PSD) 及其概率密度函数 (PDF) 统计结果, 可有效量化背景噪声场的时频能量分布特性。

本研究针对多台阵的垂向分量连续观测数据, 通过计算 7 日连续记录的 PSD 值及其 PDF 分布, 系统分析背景噪声场强度在空间维度上的差异性及其随时间演化的统计规律, 以期揭示区域噪声场的时空分布特征提供量化依据。

结果表明, 不同区域背景噪声场具有显著的时空分异特征。在 0.1~1Hz 低频段, 各研究区噪声场呈现均一化时频特征, 其 PSD 值严格约束于全球噪声模型 NLNM 与 NHNM 之间 (-140~-130dB), PDF 呈现稳定窄带分布 (图 4)。该频段噪声能量与海洋微震活动具有显著相关性, 其稳

态特性表明人类活动对该频段噪声场关联性较弱。

但在 1~10Hz 高频段的噪声特征呈现显著区域性差别, 其中三水盆地和广西北流地震震源区的 PSD 值在时间序列整体表现出显著的昼夜规律 (图 4 (a)~图 4 (d)), 噪声水平夜间较日间降低约 10%, 符合城市区域受人类规律性活动 (如通勤交通) 主导的噪声激发模式^[34]。在三水盆地, PSD 均值稳定于 -115dB 且 PDF 分布始终低于 NHNM 基准 (图 4 (e) 和图 4 (f)), 区域内的噪声源具有较好的稳态特征。而广西北流地震震源区 PSD 值达 -100dB (图 4 (g) 和图 4 (h)), 其昼夜周期变化强度与台站区域位置具有分异性 (图 4 (c) 和图 4 (d)), 其高强度噪声场可能与多个工业、交通等人类活动源密切相关。其中, 更具特征性的是甘盐池拉分盆地表现出显著的台址效应与地质构造分异效应, 不同台站的 PSD 值在时间序列变化上有所差异 (图 4 (i)~图 4 (l))。位于盆地内部的 1050 台站 PDF 分布在 1~10Hz 高频段内突破 NHNM 阈值达 -80dB, 超过 NHNM 模型基准线 10~20dB, 其 PSD 时间序列呈现与人类活动同步的弱周期性 (图 4 (i) 和图 4 (m))。而 1015 台站宽带 PDF 分布特征 (图 4 (j)) 呈现宽带特征, 结合其 PSD 时间系列无显著昼夜周期性特征, 该点位可能主要受



注：(a)、(b)、(e)、(f) 分别为三水盆地 PSD 时间变化和 PDF 分布；(c)、(d)、(g)、(h) 分别为北流地震震源区 PSD 时间变化和 PDF 分布；(i) ~ (p) 分别为甘盐池拉分盆地 PSD 时间变化和 PDF 分布。

图 4 不同研究区台站噪声水平

Fig.4 Noise level characteristics of stations in different study areas

局部间歇性噪声源（如工业设备非稳态运行）等影响。盆地外缘的 1042 台站和 1005 台站的 PDF 分布（图 4 (o) 和图 4 (p)）稳定在 -130dB 至 -100dB 之间，低于 NHNM 基准线，噪声水平强度明显相对较弱。

上述空间分异特征证实，盆地内呈现出更强的噪声水平特征，这可能受盆地地形对噪声能量的聚焦放大效应影响。

值得注意的是，不同研究区域的噪声水平强度以 $1\sim 2\text{Hz}$ 为分界线表现出噪声强度分异特征，低于 $1\sim 2\text{Hz}$ 频段主要呈现弱噪声强度，高于 $1\sim 2\text{Hz}$ 频段则呈现强噪声强度。由于 $0.1\sim 1\text{Hz}$ 频段是海洋初级与次级微震能量的核心集中区，是研究

海洋微震主导（如风暴、涌浪）对区域背景噪声影响的主要范围，而 $1\sim 10\text{Hz}$ 频段则涵盖了从高频微震到典型局部人类活动噪声（交通、工业、人文活动）及风成噪声的主要范围，能有效反映人类活动和近地表环境过程的影响，研究结果也清晰分离了海洋主导与人类主导的噪声机制。

为了了解研究区噪声水平的空间分布情况，通过利用不同频段的 PSD 平均值代表该台站某一频段范围内的噪声水平，以 1Hz 为频段界限，构建了 $0.1\sim 1\text{Hz}$ 与 $1\sim 10\text{Hz}$ 两个频段的 PSD 均值空间场，以系统揭示研究区背景噪声场的空间异质性特征（图 5）。

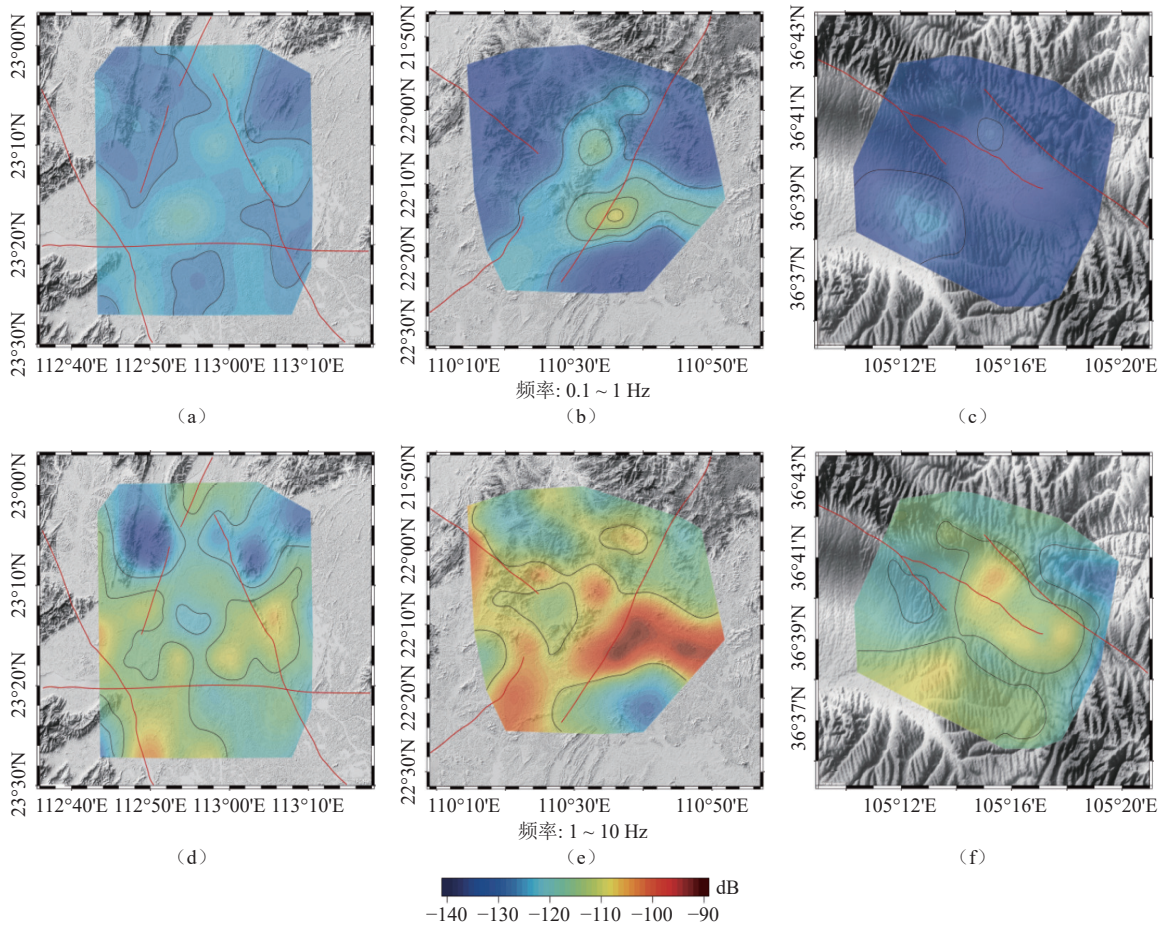
在 $0.1\sim 1\text{Hz}$ 低频段，各研究区呈现较好的均

匀化分布格局, 其中北流地震震源区虽存在局部 PSD 异常 (-110dB), 但其整体均值仍稳定在 -128dB 量级 (图 5(a) ~ 图 5(c))。甘盐池拉分盆地 (-130dB) 和三水盆地 (-125dB) 的 PSD 均值空间则更为均匀, 进一步验证了低频噪声场具有较好的区域均一特性。值得注意的是, 北流地震震源区中部异常源可能与 NCF 信号的非对称特征存在空间耦合关系, 该异常可能是造成了北流地震震源地区 NCF 的左右不对称现象的主要原因。

在 1~10Hz 高频段, 噪声场呈现显著的空间差异 (图 5(d) ~ 图 5(f)), 北流震源区形成多噪声源分布特征, 其 PSD 均值达 -101dB。三水盆地呈现南高北低特征, PSD 均值达 -118dB。而甘盐池拉分盆地则噪声水平分布形态与盆地地形具有相似性, 中心及西南部 PSD 值抬升至 -115dB, 表现出典型盆地放大效应。这揭示了受盆地形态影响, 盆地内更容易形成声学衍射场, 对噪声水平度产生聚焦增强效果。其中, 甘盐池拉分盆地内噪声水平最大值中心与现今推断的松散沉积层最大沉积中心

较为接近^[45]。

吴建平等^[41]研究表明沉积平原和沉积盆地的高频噪声干扰明显, 在沉积层厚度较薄和基岩广泛出露的地区噪声水平明显降低。因此, 台站噪声水平受人类活动干扰和盆地地形影响外, 还与台站所处位置的沉积层厚度有相关, 盆地内的松散沉积层会增强 1~10Hz 频段的噪声水平^[29,50]。受地形与沉积层放大效应影响下, 加剧局部噪声波场的不均匀性, 导致面波信号相干性较低, 使得 NCF 中的波形趋于复杂。高频噪声的传播受到浅层结构的不均匀性影响较大, 甘盐池拉分盆地中的垂直方向上存在较为复杂且倾斜的分层现象, 这可能会造成波场传播路径畸变, 从而产生一些非收敛信号^[51]。甘盐池拉分盆地 NCF 特征的复杂性主要受多尺度因素控制。在噪声水平尺度, 区域内人类活动强度的差异主导了高频噪声场宏观分布格局, 而盆地地形结构与厚第四系松散沉积层显著增强高频噪声能量, 加剧高频段噪声波场的不均匀性, 从而导致面波信号相干性较低, 使得 NCF 中的波形趋于复杂。在区域尺



注: (a)、(b)为三水盆地的噪声水平; (c)、(d)北流地震震源区的噪声水平; (e)、(f)甘盐池拉分盆地的噪声水平。

图 5 研究区噪声水平 0.1~1 Hz 和 1~10 Hz 频段范围内空间分布

Fig.5 Spatial distribution of noise levels in the 0.1-1 Hz and 1-10 Hz frequency bands across the study areas

度, 甘盐池拉分盆缘陡倾断裂带与盆内复杂且倾斜沉积层结构诱发区域内波场的复杂性, 造成 NCF 中存在非物理信号。

4 结论

本研究针对噪声源时空分布的非均匀特性及其对高频面波信号提取的影响展开分析。鉴于高频噪声源的复杂特性会显著影响从 NCF 中提取有效面波信号, 本研究采用噪声频谱分析法, 通过 3 个研究区域的密集台阵背景噪声数据的噪声水平分析, 揭示了不同噪声环境特征对 NCF 信号质量及频散曲线提取的影响。

研究结果显示, 不同构造单元的背景噪声场呈现显著频段差异特征。0.1~1 Hz 低频段噪声水平分布具有时空均匀性, 但复杂的盆山结构与倾斜的沉积层结构会导致噪声波场产生散射和折射效应, 使 NCF 中出现明显前驱波干扰。而 1~10 Hz 高频段则表现出强烈的空间异质性, 在盆地复杂的沉积构造及盆山地形环境的影响下, 会对高频噪声水平产生聚焦增强高频段噪声水平, 加剧了噪声波场的不均匀性, 产生一些非收敛信号, 影响着 NCF 的信噪比结果。而这些非物理信号容易导致信号的混叠, 影响后续频散曲线测量的准确性。因此, 在背景数据采集之前需事先对测区噪声源分布特征与区域构造进行分析, 依此使用合理的阵列排布(减少台间距、扩大观测区域或选择相宜的几何形状台阵等), 可以降低噪声源不均匀的影响。

参考文献

- [1] WEBB S C. The earth's 'hum' is driven by ocean waves over the continental shelves[J]. *Nature*, 2007, 445(7129): 754-756. DOI:10.1038/nature05536.
- [2] YANG Y J, RITZWOLLER M H, LIN F C, et al. Structure of the crust and uppermost mantle beneath the western United States revealed by ambient noise and earthquake tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B12): B12310. DOI:10.1029/2008JB005833.
- [3] 徐佩芬, 杜亚楠, 凌甦群, 等. 微动多阶瑞雷波 SPAC 系数反演方法及应用研究[J]. *地球物理学报*, 2020, 52(10): 2884-2892. DOI:10.6038/cjg202000148.
XU P F, DU Y N, LING S Q, et al. Microtremor survey method based on inversion of the SPAC coefficient of multi-mode Rayleigh waves and its application[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(10): 3857-3867. DOI:10.6038/cjg202000148. (in Chinese).
- [4] FRIEDRICH A, KRUGER F, KLINDE K. Ocean-generated microseisms located with the Gräfenberg array[J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 2(1): 47-64. DOI:10.1023/A:1009788904007.
- [5] BRENGUIER F, SHAPIRO N M, CAMPILLO M, et al. Postseismic relaxation along the San Andreas Fault at Parkfield from continuous seismological observations[J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1478-1481. DOI:10.1126/science.1160943.
- [6] BRENGUIER F, CAMPILLO M, HADZIIOANNOU C, et al. Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise[J]. *Nature: Geoscience*, 2008, 1(2): 126-130. DOI:10.1038/ngeo104.
- [7] LOBKISO I, WEAVER R L. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field[J]. *Ultrasonics*, 2001, 110(6): 3011-3017. DOI:10.1016/S0041-624X(02)00156-7.
- [8] SHAPIRO N M, CAMPILLO M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(7): L07614. DOI:10.1029/2004GL019491.
- [9] WAPENAAR K. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(25): 254301. DOI:10.1103/PhysRevLett.93.254301.
- [10] SHAPIRO N M, CAMPILLO M, STEHLY L, et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[J]. *Science*, 2005, 307(5715): 1615-1618. DOI:10.1126/science.1108339.
- [11] YAO H J, Van der HILST R D, de HOOP M V, et al. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-II: Interpretation of phase velocity maps in terms of crustal and uppermost mantle structure[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(3): 1485-1506. DOI:10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.
- [12] YANG Y J, RITZWOLLER M H, LEVSHIN A L, et al. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 168(1): 259-274. DOI:10.1111/j.1365-246X.2006.03203.x.
- [13] 张浩, 雷建设, 宋晓燕, 等. 山西断陷带及其邻区背景噪声面波直接反演成像[J]. *CT理论与应用研究(中英文)*, 2025, 34(2): 175-189. DOI:10.15953/j.ctta.2025.002.
ZHANG H, LEI J S, SONG X Y, et al. Direct surface-wave tomography from ambient noise in the Shanxi Rift Zone and adjacent areas[J]. *CT Theory and Applications*, 2025, 34(2): 175-189. DOI:10.15953/j.ctta.2025.002. (in Chinese).
- [14] ROUX P, SABRA K G, KUPERMAN W A, et al. Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 117(1): 79-84. DOI:10.1121/1.1830673.
- [15] YAO H J, ROBERT D, MAARTEN V. Surface wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic

- noise and two-station analysis-II: Crustal and upper-mantle structure[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 173(1): 205-219. DOI:10.1111/j.1365-246X.2007.03696.x.
- [16] 颜杰, 张立树, 洪鹤庭, 等. 背景噪声和密集台阵成像技术在哈尔乌素露天煤矿采空区的应用[J]. *CT理论与应用研究*, 2023, 32(4): 461-470. DOI:10.15953/j.ctta.2023.023.
- YAN J, ZHANG L S, HONG H T, et al. Application of ambient noise and dense seismic array imaging techniques in goaf detection beneath coal mines at Haerwusu[J]. *CT Theory and Applications*, 2023, 32(4): 461-470. DOI:10.15953/j.ctta.2023.023. (in Chinese).
- [17] NIKOLAI M, SHAPIRO N M, CAMPILLO M, et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[R]. *Science*, 2005, 307: 1615-1618. DOI:10.1126/science.1108339.
- [18] SNIEDER R. Extracting the Green's function of attenuating heterogeneous acoustic media from uncorrelated waves[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, 121(5): 2637-2643. DOI:10.1121/1.2713673.
- [19] 鲁来玉. 基于平面波模型重访地震背景噪声互相关及空间自相关 (SPAC)[J]. *地球与行星物理理论评*, 2021, 52(2): 123-163. DOI:10.16738/J.DQYXX.2020-016.
- LU L Y. Revisiting the cross-correlation and SPatial AutoCorrelation (SPAC) of the seismic ambient noise based on the plane wave model[J]. *Theoretical Review of Earth and Planetary Physics*, 2021, 52(2): 123-163. DOI:10.16738/J.DQYXX.2020-016. (in Chinese).
- [20] 王伟涛, 倪四道, 王宝善, 等. 中国中东部地震台站噪声互相关函数中面波前驱信号的分析研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(2): 503-512. DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2012.02.013.
- WANG W T, NI S D, WANG B S, et al. Studies on a persistent localized microseism source that produces precursors on noise correlation function observed using stations in central-eastern China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(2): 503-512. DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2012.02.013. (in Chinese).
- [21] 王冲鹏, 刘巧霞, 叶秀薇, 等. 广州—佛山地区短周期背景噪声源方位特征及对互相关函数信噪比的影响[J]. *地球物理学进展*, 2024, 39(6): 2176-2187. DOI:10.6038/pg2024HH0403.
- WANG C P, LIU Q X, YE X W, et al. Orientation characteristics of short-period ambient noise sources and its influence on cross-correlation function signal-to-noise ratio in Guangzhou-Foshan area[J]. *Progress in Geophysics*, 2024, 39(6): 2176-2187. DOI:10.6038/pg2024HH0403. (in Chinese).
- [22] 赵玲云, 庞卫东, 王伟涛, 等. 基于 NCF 的台阵聚束方法分析噪声源的时空分布[J]. *地震研究*, 2025, 48(3): 413-421. DOI:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0043.
- ZHAO L Y, PANG W D, WANG W T, et al. Analysis of Characteristics of the ambient noise source using the NCF-based beamforming[J]. *Journal of Seismological Research*, 2025, 48(3): 413-421. DOI:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0043. (in Chinese).
- [23] STEHLY L, CAMPILLO M, SHAPIRO N M. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B10): B10306. DOI:10.1029/2005JB004237.
- [24] 王芳, 王伟涛, 龙剑锋, 等. 中国大陆地区宽频带地震台网台基噪声特征[J]. *地震学报*, 2019, 41(5): 569-584. DOI:10.11939/jass.20190031.
- WANG F, WANG W T, LONG J F, et al. Seismic noise characteristics of broad-band seismic networks in Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2019, 41(5):569-584.DOI:10.11939/jass.20190031.(inChinese).
- [25] 徐义贤, 罗银河. 噪声地震学方法及其应用[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(8): 2618-2636. DOI:10.6038/cjg20150803.
- XU Y X, LUO Y H. Methods of ambient noise-based seismology and their applications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(8): 2618-2636. DOI:10.6038/cjg20150803. (in Chinese).
- [26] ZENG X F, NI S D. A persistent localized microseismic source near the Kyushu Island, Japan[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(24): L24307. DOI:10.1029/2010GL045774.
- [27] BONNEFOY-CLAUDET S, COTTON F, BARD P Y. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 79(3/4): 205-227. DOI:10.1016/j.earscirev.2006.07.004.
- [28] LIU X F, FAN Y H. On the characteristics of high-frequency Rayleigh waves in stratified half-space[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(2): 1041-1057. DOI:10.1111/j.1365-246X.2012.05479.x.
- [29] 田原, 瞿辰, 王伟涛, 等. 四川盐源盆地短周期密集台阵背景噪声分布特征分析[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(6): 2248-2261. DOI:10.6038/cjg2020N0063.
- TIAN Y, QU C, WANG W T, et al. Characteristics of the ambient noise distribution recorded by the dense seismic array in the Yanyuan Basin, Sichuan Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(6): 2248-2261. DOI:10.6038/cjg2020N0063. (in Chinese).
- [30] MA Y R, CLAYTON R W, LI D Z, et al. Higher-mode ambient-noise Rayleigh waves in sedimentary basins[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 206(3): 1634-1644. DOI:10.1093/gji/ggw235.
- [31] NAKATA N, CHANG J P, LAWRENCE J F, et al. Body wave extraction and tomography at Long Beach, California, with ambient-noise interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(2): 1159-1173. DOI:10.1002/2015JB011870.
- [32] 赵玲云, 王伟涛, 王芳, 等. 噪声源的时空分布及其对噪声互相关函数的影响: 以 ChinArray 二期数据

- 据为例[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(12): 4327-4340. DOI:10.6038/cjg2021O0054.
- ZHAO L Y, WANG W T, WANG F, et al. The distribution of noise source both in space and time and its influence on noise cross-correlation functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(12): 4327-4340. DOI:10.6038/cjg2021O0054. (in Chinese).
- [33] ZHENG Y, SHEN W S, ZHOU L Q, et al. Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, Northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B12): B12312. DOI:10.1029/2011JB008637.
- [34] BENSON G D, RITZWOLLER M H, BARMIN M P, et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2007, 169(3): 1239-1260. DOI:10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- [35] 高级, 张海江, 查华胜, 等. 台阵和噪声源分布对微动成像的影响及其在盐矿溶腔探测中的应用[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(6): 2489-2506. DOI:10.6038/cjg2022Q0219.
- GAO J, ZHANG H J, ZHA H S, et al. The effect of different arrays and noise source distribution on microtremor imaging and its application in solute salt mine cavity detection[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(6): 2489-2506. DOI:10.6038/cjg2022Q0219. (in Chinese).
- [36] LIU Q X, KOPER K D, BURLACU R, et al. Source locations of teleseismic P-, SV and SH waves observed in microseisms recorded by a large-aperture seismic array in China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 449: 39-47. DOI:10.1016/j.epsl.2016.05.035.
- [37] 杨志高. 中国大陆勒夫面波噪声层析成像[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2019.
- YANG Z G. Surface Wave Noise Tomography in Loew, China[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese).
- [38] 曾求, 储日升, 曾祥方, 等. 利用地震背景噪声提取西山村滑坡高频面波信号[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(5): 1830-1843. DOI:10.6038/cjg2020N0208.
- ZENG Q, CHU R S, ZENG X F, et al. Extraction of high-frequency surface waves on the Xishancun landslide from ambient seismic noises[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(5): 1830-1843. DOI:10.6038/cjg2020N0208. (in Chinese).
- [39] PETERSON J. Observations and modeling of seismic background noise[R]. USGS Open File Report 93-322. United States Geological Survey, Albuquerque, NM.
- [40] McNAMARA D E, BULAND R P. Ambient noise levels in the continental United States[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(4): 1517-1527. DOI:10.1785/012003001.
- [41] 吴建平, 欧阳飏, 王未来, 等. 华北地区地震环境噪声特征研究[J]. *地震学报*, 2012, 34(6): 818-829. DOI:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.06.008.
- WU J P, OUYANG B, WANG W L, et al. Ambient noise level of North China from temporary seismic array[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2012, 34(6): 818-829. DOI:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.06.008. (in Chinese).
- [42] 刘迪, 杨涛, 宋华东, 等. 基于功率谱密度筛选的高海拔区背景噪声快速成像技术[J]. *物探与化探*, 2024, 48(2): 437-442. DOI:10.11720/wtyht.2024.1110.
- LIU D, YANG T, SONG H D, et al. A fast imaging technology for screening ambient noise in high-altitude areas based on power spectral density[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2024, 48(2): 437-442. DOI:10.11720/wtyht.2024.1110. (in Chinese).
- [43] LI Z B, ZHOU J, WU G X, et al. CC-FJpy: A Python package for extracting overtone surface-wave dispersion from seismic ambient-noise cross correlation[J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 92(5): 3179-3186. DOI:10.1785/0220210042.
- [44] 雷生学, 冉勇康, 李彦宝, 等. 海原断裂带干盐池拉分盆地的沉积演化[J]. *地震地质*, 2018, 40(5): 1072-1085. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2018.05.008.
- LEI S X, RAN Y K, LI Y B, et al. Sedimentary evolution study on the Ganyanchi pull-apart basin along the haiyuan fault[J]. *Seismology and Geology*, 2018, 40(5): 1072-1085. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2018.05.008. (in Chinese).
- [45] 雷生学, 冉勇康, 李彦宝, 等. 海原断裂干盐池拉分盆地中央断层的形成机制探讨[J]. *地震地质*, 2021, 43(1): 36-52. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2021.01.003.
- LEI S X, RAN Y K, LI Y B, et al. A possible mechanism for reverse cross-basin fault in Ganyanchi asymmetric pull-apart basin along the Haiyuan Fault[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(1): 36-52. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2021.01.003. (in Chinese).
- [46] WANG J N, WU G X, CHEN X F. Frequency-Bessel transform method for effective imaging of higher-mode Rayleigh dispersion curves from ambient seismic noise data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(4): 3708-3723. DOI:10.1029/2018JB016595.
- [47] FU L, PAN L, LI Z B, et al. Improved high-resolution 3D Vs model of Long Beach, CA: Inversion of multimodal dispersion curves from ambient noise of a dense array[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 49: e2021GL097619. DOI:10.1029/2021GL097619.
- [48] 陈春林, 刘四新, 师伟, 等. 基于频率-贝塞尔变换法的浅地表三维 S 波速度成像[J]. *地球物理学进展*, 2023, 38(3): 1317-1327. DOI:10.6038/pg2023GG0428.
- CHEN C L, LIU S X, SHI W, et al. Three-dimensional S-wave velocity imaging of shallow surface based on frequency-Bessel transform method[J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(3): 1317-1327. DOI:10.6038/pg2023GG0428. (in Chinese).

- [49] 杨浪邕航, 李红星, 姚振岸, 等. 观测阵列和噪声源分布对两种微动成像方法的影响及适应性分析[J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 2024, 47(6): 550-563.
YANGLANG Y H, LI H X, YAO Z A, et al. Analysis of the impact and adaptability of observation arrays and noise source distributions on two microtremor imaging methods[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 47(6): 550-563. (in Chinese).
- [50] MALAGNINI L, ROVELLI A, HOUGH S E, et al. Site amplification estimates in the Garigliano Valley, Central Italy, based on dense array measurements of ambient noise[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1993, 83(6): 1744-1755. DOI:[10.1785/BSSA0830061744](https://doi.org/10.1785/BSSA0830061744).
- [51] LEI S X, COWGILL E, ELDON B, et al. Transition from reverse to left-slip on the eastern Haiyuan fault, NE Tibetan Plateau, from the structure and age of the Ganyanchi pull-apart basin[J]. Tectonics, 2024, 43. DOI:[10.1029/2024TC008422](https://doi.org/10.1029/2024TC008422).