



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

## 四川地区地震背景噪声特征分析

谢江涛 林丽萍 赵敏 湛亮

### Characteristics of seismic ambient noise in Sichuan region

Xie Jiangtao, Lin Liping, Zhao Min, Chen Liang

引用本文:

谢江涛, 林丽萍, 赵敏, 湛亮. 2021. 四川地区地震背景噪声特征分析. *地震学报*[J], 43(5): 533–550. DOI: 10.11939/jass.20200148

Xie J T, Lin L P, Zhao M, Chen L. 2021. Characteristics of seismic ambient noise in Sichuan region. *Acta Seismologica Sinica*[J], 43(5): 533–550. DOI: 10.11939/jass.20200148

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20200148>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于背景噪声的川滇地区勒夫波层析成像

Love wave tomography in Sichuan–Yunnan area from ambient noise

地震学报. 2017, 39(5): 633–647 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.001>

#### 台网噪声评估及其对气枪震源激发效果影响的研究

Station network ambient noise level evaluation and its influence on air gun source excitation effect

地震学报. 2017, 39(3): 330–342 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.03.003>

#### 基于噪声概率密度函数的地震计观测性能对比

Comparison on different seismometers performance based on probability density functions

地震学报. 2018, 40(4): 461–470 <https://doi.org/10.11939/jass.20170137>

#### 中国大陆地区宽频带地震台网台基噪声特征

Seismic noise characteristics of broad-band seismic networks in Chinese mainland

地震学报. 2019, 41(5): 569–584 <https://doi.org/10.11939/jass.20190031>

#### 利用背景噪声格林函数交叉项成像研究台湾地区面波相速度结构

Phase velocity maps of the Taiwan region from the ambient noise tomography of the cross terms in Green's function tensors

地震学报. 2019, 41(3): 302–313 <https://doi.org/10.11939/jass.20180133>

#### 大西洋中北部双频微动特征

Characteristics of double-frequency microseisms in the central and northern Atlantic Ocean

地震学报. 2021, 43(2): 204–214 <https://doi.org/10.11939/jass.20200103>

谢江涛, 林丽萍, 赵敏, 谌亮. 2021. 四川地区地震背景噪声特征分析. 地震学报, 43(5): 533–550. doi: 10.11939/jass.20200148.

Xie J T, Lin L P, Zhao M, Chen L. 2021. Characteristics of seismic ambient noise in Sichuan region. *Acta Seismologica Sinica*, 43(5): 533–550. doi: 10.11939/jass.20200148.

## 四川地区地震背景噪声特征分析<sup>\*</sup>

谢江涛<sup>†</sup> 林丽萍 赵 敏 谌 亮

(中国成都 610041 四川省地震局)

**摘要** 选取四川省数字测震台网 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日期间 60 个固定台站的三分量连续波形记录, 计算了台站噪声加速度功率谱密度及相应的概率密度函数分布, 统计了不同频率下的噪声功率谱密度值分布, 对不同区域、不同频率下背景噪声水平的变化特征予以分析. 结果表明: 大部分地震台站的高频段噪声由于受到台站附近人为的、规律的作息生活和生产方式的影响, 呈现明显的季节性变化和日变化, 即夏季噪声水平升高, 冬季降低, 在农历春节期间达到全年最低值, 地理空间分布特征不明显; 第二类地脉动冬季噪声水平升高, 夏季降低, 季节性变化明显, 平均变化为 1–5 dB, 且冬季峰值出现的频率向长周期方向移动 1–2 s, 呈现明显的地理空间分布特征, 川东地区平均噪声水平最高, 攀西地区次之, 川西高原最低; 与第二类地脉动相比, 第一类地脉动观测到的噪声能量较弱, 季节性变化不明显, 地理空间分布的噪声水平差异明显减小; 在 20 s 以上的长周期部分, 台站噪声未呈明显的季节性和地理空间分布差异. 此外, 将地震计安置在山洞和井下, 可以有效地降低台站周围干扰源、温度和压强对高频段和长周期观测的影响, 噪声水平低于地表安装方式.

**关键词** 四川地区 背景噪声 噪声水平 概率密度函数

doi: 10.11939/jass.20200148 中图分类号: P315.3<sup>†</sup>1 文献标识码: A

## Characteristics of seismic ambient noise in Sichuan region

Xie Jiangtao<sup>†</sup> Lin Liping Zhao Min Chen Liang

(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on the three-component continuous waveform data recorded by sixty permanent seismic stations in Sichuan seismic network from January 1, 2015 to December 31, 2018, this paper calculated the noise power spectral densities and corresponding probability density functions, then gave the statistical characteristics of noise power spectral density at different frequencies, and finally analyzed the characteristics of noise level at different regions and frequencies. The results show that the high-frequency seismic noises of most stations are affected by the nearby human activities, production mode and lifestyle, which has obvious seasonal and diurnal variations. The noise level increases during summer and decreases during winter with the lowest level during the Spring Festival in the whole year; and the geographical distribution is not obvious. For double-frequency microseisms, the noise level increases during winter and

<sup>\*</sup> 基金项目 国家重点研发计划(2018YFC1504002, 2018YFC1503305)资助。

收稿日期 2020-08-28 收到初稿, 2020-12-29 决定采用修改稿。

<sup>†</sup> 通信作者 e-mail: jiangtaoxie@outlook.com



decreases during summer, and has obvious seasonal variation with an average of 1–5 dB, which has obvious geographical distribution characteristics. The average noise level in eastern Sichuan is the highest, followed by Panxi region, and the lowest in western Sichuan Plateau. The microseism peaks have different amplitudes and occur at different frequencies in summer and winter, with the peaks shifted by 1–2 s toward longer periods in the winter. Compared with the double-frequency microseism band, the noise energy at primary microseism band is weaker, the seasonal variation is not obvious, and the difference of noise level in geographical distribution is significantly reduced. While the long-period ( $>20$  s) noise level has no obvious seasonal variation and no difference in geographical distribution. In addition, installing seismographs in caves and borehole can effectively reduce the influence of noise sources, temperature and pressure on high-frequency band and long-period observations, therefore the noise level is lower than that of shallow installations.

**Key words:** Sichuan region; ambient noise; noise level; probability density function

## 引言

地震台网主要为地震监测、震源和地球构造等研究提供高质量数据。地震信号通常是由一个天然或人工震源发出并经地下介质传播的瞬态波形,可用于震源定位、孕震过程分析及传播介质的速度结构研究,与之相对的地震噪声多指不符合研究信号特征的地震动成分(Bormann, Wielandt, 2013)。不同的研究需要不同周期的高信噪比数据,例如:进行区域地震震源机制和矩张量反演要求数据在 10—20 s 周期内具有较高的信噪比,而全球矩张量反演需要长周期( $>40$  s)体波和面波数据(Zhu, Zhou, 2016);地震定位分析中,特别是小震事件,人工震相识别往往会受到波形低信噪比的影响,基于地震模板的波形匹配、短时间窗均值比(short-time-average through long-time-average, 缩写为 STA/LTA)等方法的地震检测也要求波形在 1—20 Hz 频率范围内且具有较好的信噪比(Zhang, Wen, 2015),而相对地震定位方法通常采用波形互相关技术提取到时差以减小人工读数的误差(Waldhauser, Ellsworth, 2000)。在这些研究中被认为无用的地震背景噪声数据近年来发展成为可用的信号,例如,地震背景噪声可以作为输入信号分析地震计性能及监测台站设计结构(Torre, Sheehan, 2005; Sleeman, Melichar, 2012),也可以通过台站间连续背景噪声的互相关计算提取台站间的经验格林函数用以监测地壳内部介质波速变化(Brenguier *et al.*, 2014)、进行高分辨层析成像以研究地壳及上地幔速度结构(Shapiro, Campillo, 2004; Sabra *et al.*, 2005),还可以进行强地面运动的评估(Denolle *et al.*, 2013, 2014)等。而采用不同方法对地震数据进行处理时需要不同周期的高信噪比数据,因此,研究整个周期范围的地震背景噪声随时间和空间的变化对地震学的多方面研究具有重要意义。

一个地震台站能够记录的最小、最大观测周期由相应记录的采样率和所安装的地震计规格所决定,每个周期的环境噪声水平取决于台站附近的噪声源和观测仪器自噪声(Webb, 2002)。现代宽频带地震计在工作频带内的自噪声远低于环境噪声(Ringler, Hutt, 2010; Tasič, Runovc, 2012),因此通常主要考虑环境噪声源对台站噪声水平的影响。噪声源按照频率的不同,可分为人为噪声、自然噪声、微震噪声等。人为噪声主要与人类活动有关,如台站附近人类生产、生活活动、公路铁路交通、工厂施工等,多为高频段,以高频面波方式传播,且随距离和深度的增加而迅速衰减,具有较强的昼夜变化特征(Rastin *et al.*, 2012)。自然

噪声是指由自然因素引起的噪声, 如风(风在高低不平地面上摩擦、树木和其它植被或建筑物在风中摆动或振动)、急流(瀑布、河流和小溪中的湍急水流)、温度变化、气压变化等(McNamara, Buland, 2004). 风产生的是宽频带噪声, 既有长周期的, 也可能是高频的, 其频率低至 0.5 Hz, 高达 15—60 Hz (Young *et al.*, 1996), 但高频噪声的主要来源仍是人为噪声; 河流及其所携带的泥沙与河床摩擦震动可产生宽频带地震噪声(Burtin *et al.*, 2008), 其中: 持续高频噪声的昼夜变化特征不明显(谢江涛等, 2020). 微震噪声在 4—16 s 周期内存在两个明显的峰值(Peterson, 1993; McNamara, Buland, 2004), 该频段地震噪声与海浪活动有关(Longuet-Higgins, 1950; Hasselmann, 1963), 其中第一类地脉动(primary microseism)是海浪与近海海岸相互作用而产生, 频率为 10—16 s (Hasselmann, 1963); 第二类地脉动为双频微地动(double-frequency microseism), 由相向传播的海浪干涉叠加产生(Longuet-Higgins, 1950; Traer *et al.*, 2012; Traer, Gerstoft, 2014), 地震波振幅与风速和方向密切相关. 20 s 以上周期范围内, 温度和压力的变化可以产生与地球弹性变形无关的非地震噪声(Wolin *et al.*, 2015), 本地大气压强和温度变化以及仪器自噪声主导着地震台站的背景噪声谱.

Peterson (1993)选取全球范围内 75 个地震台站相对安静时段的波形记录(剔除了非地震噪声的记录, 如地震事件、仪器标定等), 通过计算地震噪声的加速度功率谱密度(power spectral density, 缩写为 PSD)得到了地球低噪声新模型(new low noise model, 缩写为 NLNM)和高噪声新模型(new high noise model, 缩写为 NHNM), 该模型被广泛应用于地震台站环境噪声水平的评价. McNamara 和 Buland (2004)发展了这一方法, 通过计算完整地震记录的功率谱密度, 得到相应的概率密度函数(probability density function, 缩写为 PDF)分布, 使整个周期范围内长时间的环境噪声水平评估成为可能. 目前, 通过噪声功率谱密度的概率密度函数(PSD-PDF)方法广泛地应用于地震台网低噪声模型评估(McNamara, Buland, 2004)、噪声随时间和空间的变化特征分析(Marzorati, Bindi, 2006; Rastin *et al.*, 2012)以及流动地震台站噪声水平评估(吴建平等, 2012; 谢江涛等, 2020). 上述结果表明, 地震台站噪声水平具有明显的地区差异. 由于台站附近噪声源及海浪作用的影响, 各台站日变化和季节性变化也不同. 四川地区深处内陆, 又是一个地震多发区, 长期以来一直是国内地震科学研究的热点区域, 自“十五”项目台站网络化改造后, 该地区积累了丰富的连续地震观测数据. 鉴于此, 本文拟采用噪声 PSD-PDF 方法计算长时间整个周期范围的台站噪声水平, 客观地评估四川地区观测台站的环境噪声特征, 以期能够进一步认识本地噪声来源及时空变化, 同时为优化地震台站设计、提升地震监测数据质量提供参考.

## 1 数据及方法

四川省数字测震台网(以下简称四川台网)通过“十五”项目和 5·12 汶川地震恢复重建项目, 建成了由 53 个区域数字地震台站和 7 个国家数字地震台站组成的数字地震台网, 为该区域的地震活动监测和科学研究提供基础数据资料, 特别是支撑了 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_{8.0}$  地震、2013 年 4 月 20 日芦山  $M_{7.0}$  地震、2014 年 11 月 22 日康定  $M_{6.3}$  地震、2017 年 8 月 8 日九寨沟  $M_{7.0}$  地震等中强地震的余震序列跟踪及科学考察研究(谢江涛等, 2019).

本文选取四川台网 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日期间 60 个固定台站记录的三分量连续波形资料, 台站的空间分布如图 1 所示. 地震计的防护装置和安装标准基本一致, 均为基岩台基, 根据地震台站设计结构的不同主要有地表、山洞和井下三种地震计安装方式.



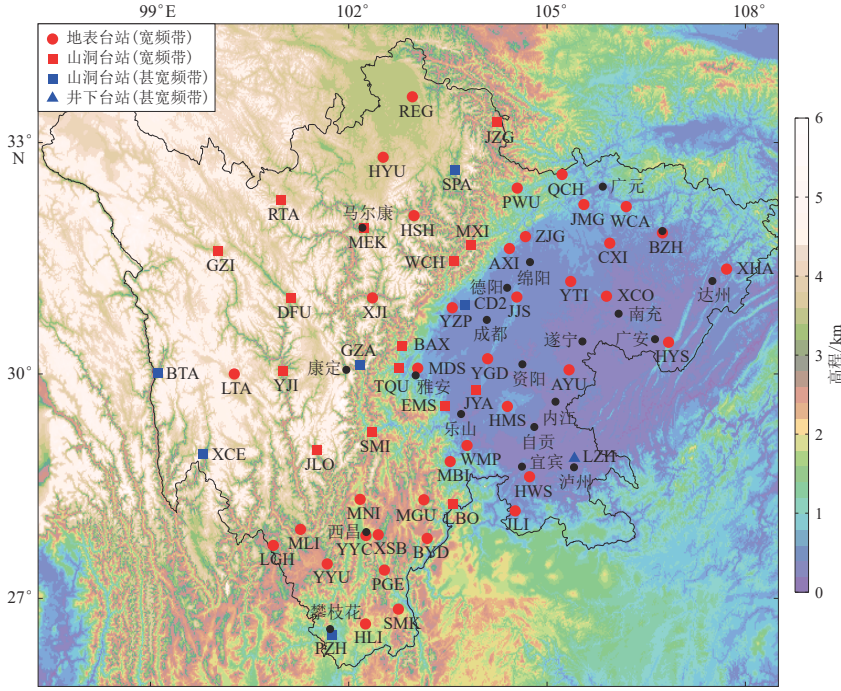


图 1 四川省数字测震台网固定台站分布图

Fig. 1 Distribution of permanent stations in Sichuan digital seismic network

区域数字地震台站采用英国 Guralp 公司生产的 CMG-3ESPC 型(60 s—50 Hz)或北京港震仪器设备有限公司(以下简称港震)生产的 BBVS-60 型宽频带地震计(60 s—50 Hz), 配备港震 EDAS-24IP 型 3 通道 24 位数据采集器; 国家数字地震台站主要采用中国地震局地震研究所生产的 CTS-1E 型甚宽频地震计(120 s—50 Hz), 配备港震 EDAS-24IP 型或 EDAS-24GN 型 6 通道 24 位数据采集器, 其中成都国家地震台采用中国地震局地震研究所生产的 JCZ-1 型(360 s—50 Hz)甚宽频带地震计、泸州国家地震台采用 Guralp 公司的 CMG-3ESPB 型(120 s—50 Hz)井下地震计, 台站统一采用 GPS 授时服务, 以 100 sps 采样率连续记录, 每月进行仪器标定检测, 确保地震仪器长时间工作的一致性。

环境噪声水平通过计算台站环境噪声加速度功率谱密度(PSD)来定量地评估, 功率谱密度采用基于改进的周期图经典谱估计的 Welch 方法(Welch, 1967)来计算. 首先, 将地震台站每个分量的连续波形数据分为 1 h (3 600 s)长度的时间序列, 每段数据重叠 50%, 这样每天有 48 条 PSD 数据, 一年(365 天)约 1 万 7 519 条 PSD 数据. 为了减小 PSD 数据的方差, 对每小时长度的数据段进行去均值、去长周期成分处理, 之后将其划分为 655.36 s 长的时间序列, 每段数据重叠 75%, 每小时的 PSD 则由该时段所有分段数据的 PSD 进行平均所得. 然后, 将速度 PSD 转换为加速度 PSD, 最后扣除仪器传递函数的影响. 为了减小数据断记的影响, 若每个分段数据的中断时间超过整段数据时长的 10% (360 s), 则对整段数据予以删除.

由地震台站所有时段内每小时的噪声加速度功率谱密度曲线分别计算中心周期  $T_c$  的 PSD 值及其在对数坐标下的概率密度函数分布(McNamara, Buland, 2004; 谢江涛等, 2018). 中心周期  $T_c$  为 1/8 倍频程间隔的几何平均值, 即  $T_c = \sqrt{T_s \cdot T_l}$ , 其中  $T_s$  为短周期,  $T_l$  为长周

期,  $T_1=2T_s$ , PSD 值为  $T_s$  与  $T_1$  之间的 PSD 平均值. 令  $T_s$  以 1/8 倍频程增加, 即新的  $T_s$  为前一次计算的  $T_s$  的  $2^{0.125}$  倍, 重新计算  $T_1$  和  $T_s$ , 并计算下一个中心周期  $T_c$  在  $T_1-T_s$  周期范围内的 PSD 平均值. 对于每一个给定的中心周期  $T_c$ , 其概率分布为 PSD 值落在某个 1 dB 间隔范围内的数量与整个估计值总数的比值.

基于统计分析的地震噪声加速度功率谱密度的概率密度函数分布能够反映长时间整个周期的地震台站的环境噪声水平. 图 2 分别为四川台网金鸡寺(JJS)和天全(TQU)地震台 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日三分量连续观测数据的噪声加速度功率谱密度的概率密

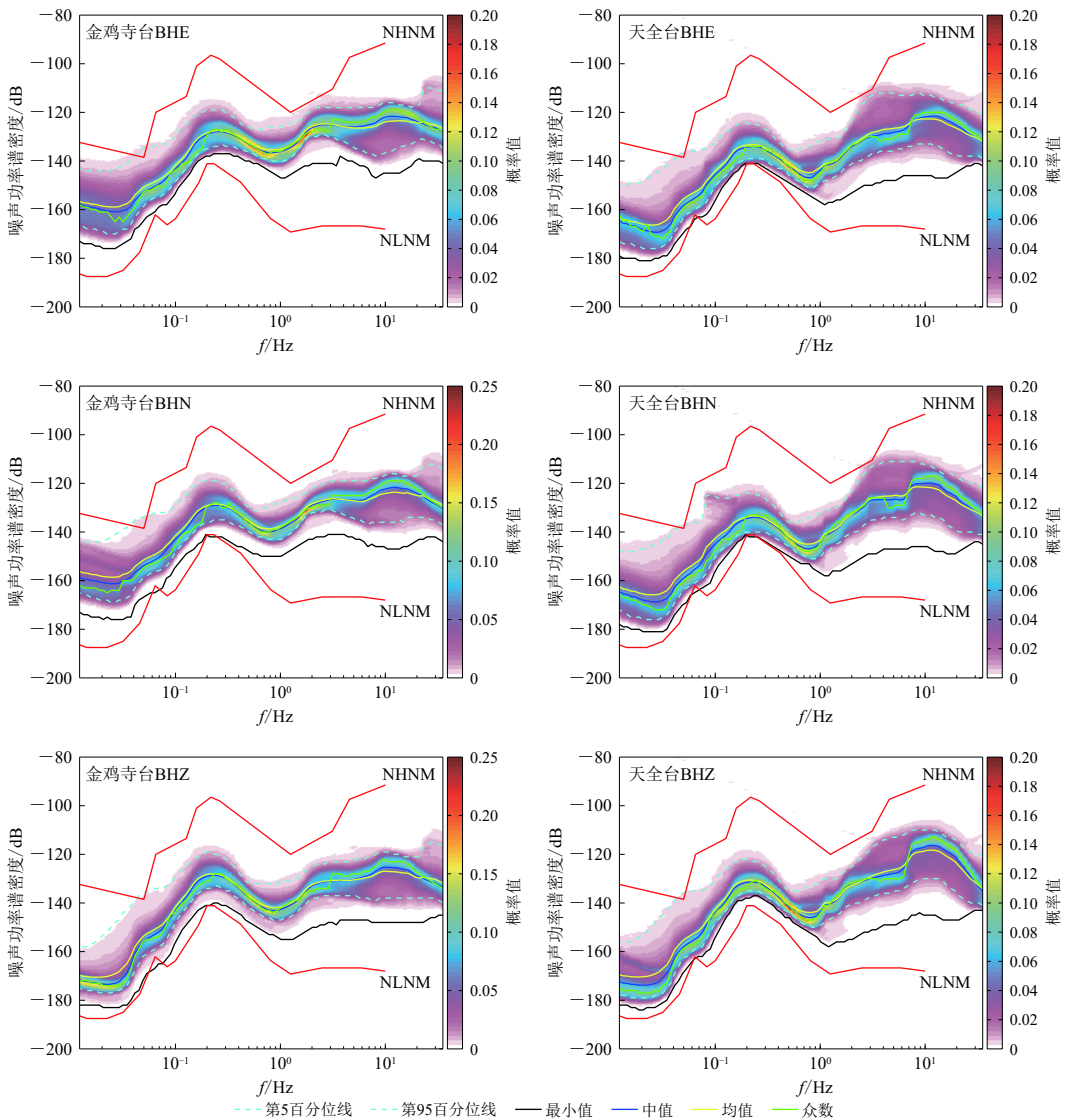


图 2 四川台网金鸡寺(JJS)和天全(TQU)地震台 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日三分量连续观测数据的噪声功率谱密度(PSD)的概率密度函数(PDF)分布图

Fig. 2 PSD-PDF distribution of three-component ambient noise at the stations JJS and TQU in Sichuan seismic network recorded from January 1, 2015 to December 31, 2018

度函数分布. 金鸡寺台为地表摆坑方式安装, 采用 Guralp CMG-3ESPC 型宽频带地震计和港震 EDAS-24IP 型三通道 24 位数据采集器; 天全台为山洞摆墩方式安装, 采用港震 BBVS-60 型宽频带地震计和 EDAS-24IP 型三通道 24 位数据采集器. 由图 2 可见, 中值与众数统计值相似且受数据影响波动小, 曲线平滑, 因此采用中值统计 PSD 值代表地震台站的平均噪声水平. 在地震观测中受台站建设和地震计安装条件的限制, 长周期频段的水平分量较垂直分量更易受温度扰动 (Wolin *et al*, 2015) 和大气压变化 (Beauduin *et al*, 1996) 产生的地倾斜的影响 (Webb, 1998), 使得水平分量的噪声水平显著增大, 正因为此, 金鸡寺台和天全台的水平分量长周期噪声水平均大于垂直分量, 如图 3 所示. 其中, 天全台采用山洞摆墩的安装方式, 其保温防风效果优于金鸡寺台采用的地表摆坑方式, 因此, 在两个台站垂直分量的长周期噪声水平相差不大的情况下, 天全台水平分量的噪声水平更低.

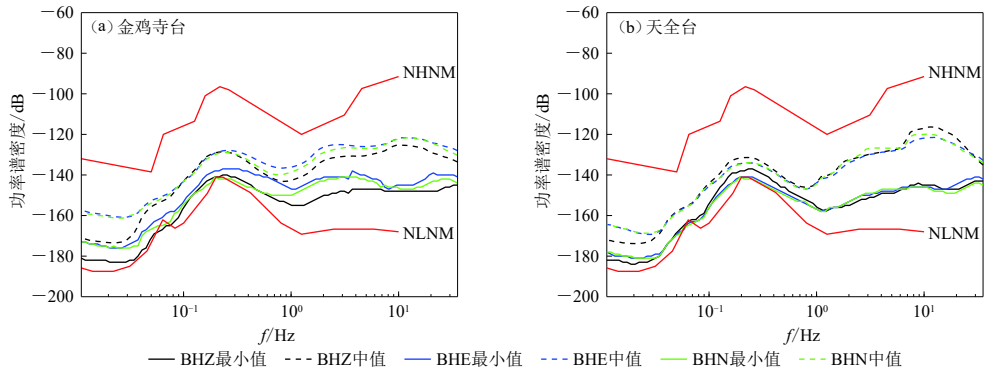


图 3 四川台网金鸡寺(JJST)台(a)和天全(TQU)台(b)三分量统计中值和最小值功率谱密度(PSD)曲线

Fig. 3 The three-component median and minimum PSD curves for the stations JJST (a) and TQU (b) in Sichuan seismic network

2 噪声的时间变化

2.1 日变化

地震台站高频段噪声主要是人为噪声, 与人类生产、生活密切相关, 有较强的昼夜变化, 噪声水平随噪声源距离和深度的增加而衰减 (McNamara, Buland, 2004; 葛洪魁等, 2013; Demuth *et al*, 2016). 四川地区大部分地震台站的高频段平均噪声水平受附近人为活动的影响表现出明显的日变化特征, 因台站与干扰源距离和地震计安装方式(地表、山洞和井下)不同, 其噪声的日变化特征也不同.

选取华蓥山台和道孚台作为人为环境嘈杂与安静台站的对比, 图 4 分别给出了这两个台站 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日垂直分量连续波形记录的噪声加速度功率谱密度的平均日变化. 华蓥山地震台位于川东华蓥山市天池镇伍家坳村, 附近 15 m 范围内有村民居住, 距最近的村村通道路 60 m、乡道 130 m、高速公路约 900 m, 地震计采用地表摆坑方式安装; 道孚地震台位于川西高原甘孜州道孚县城边, 附近 300 m 无居民居住, 距 G350 国道最近约 650 m, 地震计以山洞摆墩方式安装. 华蓥山台高频(> 3 Hz)环境噪声水平在北京时间 8 时开始升高, 20 时降低, 分别于 12 时和 18 时达到一天中的两个峰值, 与附近居民的生产、生活

作息较为一致，如图 4a 所示。道孚地震台由于采用山洞摆墩方式安装且远离居住点，高频噪声显著降低，其中：高频(> 10 Hz)平均环境噪声水平未呈现明显地与人为活动相关的昼夜变化特征；2—10 Hz 频段噪声水平在 8 时开始升高，22 时后逐渐降低，分别于 9 时和 18 时达到一天中的两个峰值，如图 4b 所示。

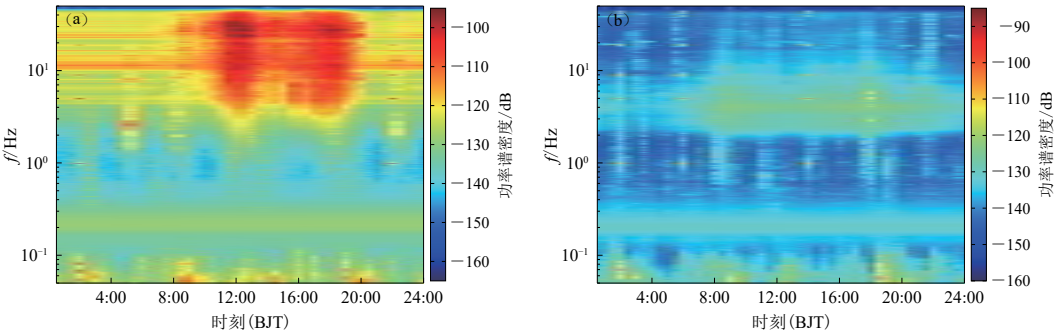


图 4 华蓥山台(HYS)台(a)和道孚(DFU)台(b)垂直分量噪声功率谱密度(PSD)值的日变化

Fig. 4 Diurnal variations of vertical-component ambient noise PSD for the station HYS (a) and DFU (b)

为了进一步分析台站高频段噪声水平及其日变化特征，我们选取地震台站 1 时至 6 时和 10 时至 18 时(北京时间)两个时段代表台站夜晚和白天记录时段，分别计算垂直分量夜晚和白天的噪声加速度功率谱密度及其概率密度函数分布。根据地震台站日变化特征将高频段划分为 3—10 Hz、10—20 Hz 和 20—40 Hz 三个频段，如图 5 所示。图中以各频段平均环境噪声水平的中值统计值代表台站夜晚和白天各频段的环境噪声水平，噪声水平日变值取同频段夜晚与白天时段的平均噪声水平的最大差值。

地震台站高频段噪声水平受附近人为、工业生产活动的影响各不相同，其中：位于人口密集区的环境噪声水平偏高，如冕宁、宝兴、安县、成都、峨眉山、华蓥山、宣汉和会理等地震台；而远离人口聚集区、附近工业生产活动较少地区的环境噪声水平相对偏低，如油榨坪、五马坪和道孚等地震台。川东地区的大部分地震台站位于相对安静的乡镇，附近人员活动、工业生产活动的影响较小，噪声水平整体偏低；川西高原大部分地区的工业生产活动较少，但是台站建台运行时间较长，台站建设初期远离县城和人口聚集区，随着地区经济和城镇化的发展，台址已处于城镇生活聚集区内，受附近人为活动的影响增大，10—20 Hz 频带噪声水平普遍偏高；攀西地区地形复杂，境内高山耸立，河谷深切，人口和工业主要沿河谷流域分布，台站也沿此分布，加之建台时间较长，台站噪声水平因而整体偏高。

四川地区地震台站噪声水平昼夜变化受附近噪声源的影响各不相同，如表 1 所示，可见：日变化最小为 0.62 dB，最大为 18.68 dB，其中仲家沟地震台夜晚的噪声水平较白天高 2.69 dB；大部分采用山洞安装方式的地震台站的噪声水平较地表安装方式的噪声水平低，且噪声平均日变化低于地表安装方式的地震台站，说明建设山洞摆房较地表摆坑或摆墩更能有效地降低台站周围环境噪声源的影响；在 20—40 Hz 频带，成都、乡城和五马坪地震台的噪声水平昼夜变化最小，分别为 0.62、0.65 和 0.93 dB，美姑、泸沽湖和盐源地震台昼夜变化最大，分别为 15.16、15.58 和 18.48 dB；在 10—20 Hz 频带，华蓥山、仲家沟和宣汉地震台的昼夜变化最小，分别为 1.77、1.81 和 1.91 dB，安岳、泸沽湖和盐源地震台的昼夜变化最大，



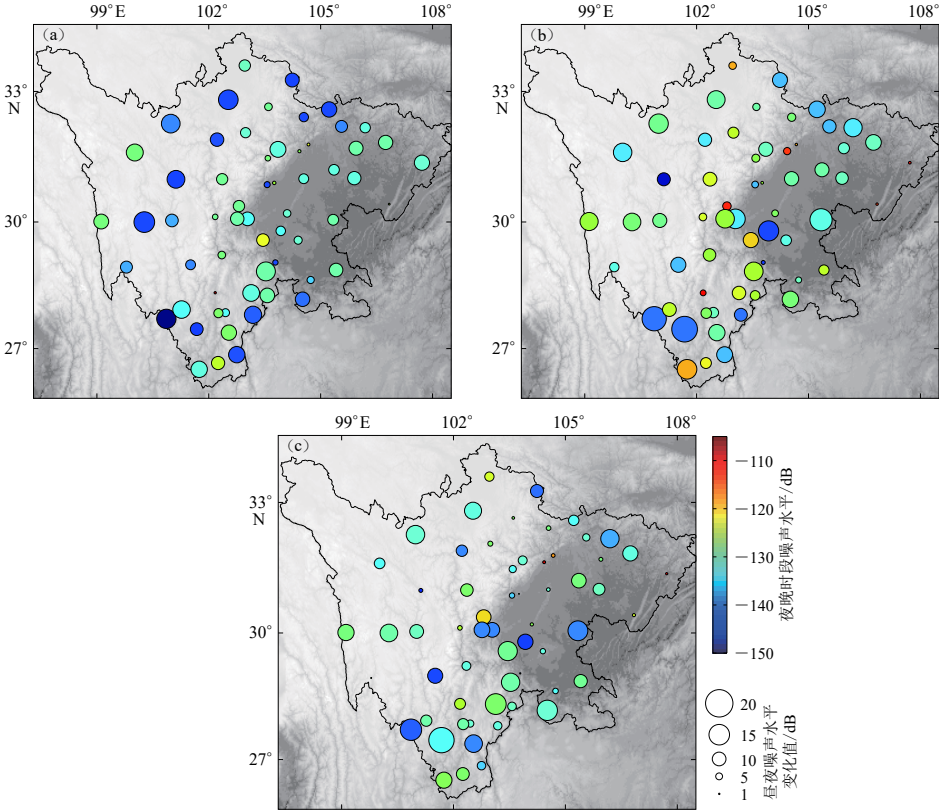


图 5 地震台站垂直分量夜晚时段的噪声水平及其与白天的噪声水平变化值  
Fig. 5 The vertical-component noise levels of the seismic stations at nighttime (color) and their difference from daytime (circles) in the selected period bands  
(a) 3—10 Hz; (b) 10—20 Hz; (c) 20—40 Hz

分别为 16.16, 17.69 和 18.68 dB; 在 3—10 Hz 频带, 华蓥山和冕宁地震台昼夜变化最小, 为 1.27 和 1.71 dB, 泸沽湖、红原和理塘地震台昼夜变化最大, 为 14.08, 14.29 和 15.07 dB. 成都、宝兴、茂县和峨眉山地震台均采用山洞安装方式, 但是由于台站位于县城内, 受附近人类生活、生产影响依然较大, 其高频段环境噪声水平也较高, 说明对高频段环境噪声水平起决定性作用的仍然是台站附近人为和工业生产活动, 山洞和井下(泸州台)的地震计安装方式只能在一定程度上降低这种影响. 地震台站夜晚噪声水平高且昼夜变化小, 说明良好的地震观测环境遭到破坏, 如冕宁、仲家沟、安县和成都地震台; 夜晚噪声水平较低且昼夜变化大, 说明台站受附近人为活动影响较大, 白天的地震检测能力相对减弱, 如泸沽湖、盐源和道孚地震台; 夜晚噪声水平较低且昼夜变化小是台站运行的较为理想的状态, 可提供全天候高精度的地震监测服务, 如油榨坪和五马坪地震台.

不同地区的噪声研究显示在高频段也能观测到相似的噪声水平日变化特征. McNamara 和 Buland (2004) 在美国观测到高频段(1—100 Hz)地表安装方式的台站噪声水平日变化为 15—20 dB, 而采用山洞方式安装地震计的台站噪声日变化约降低 10 dB; Marzorati 和 Bindi (2006) 在意大利北部同样观测到高频段(> 1 Hz)噪声水平日变化介于 10—20 dB 之间; Rastin 等(2012)在新西兰北岛观测到 1—10 Hz 频带的噪声日变化为 7—20 dB; 而 Demuth 等

表 1 四川数字测震台网各台站垂直分量夜晚时段的噪声水平及昼夜变化值  
Table 1 The vertical-component noise level at nighttime for the seismic stations of Sichuan digital seismic networks and their difference from daytime

序号	台站名称	台站代码	3—10 Hz 频带		10—20 Hz 频带		20—40 Hz 频带	
			夜晚噪声水平 /dB	昼夜变化 /dB	夜晚噪声水平 /dB	昼夜变化 /dB	夜晚噪声水平 /dB	昼夜变化 /dB
1	安县	AXI	-127.27	2.25	-118.32	5.21	-109.54	2.15
2	安岳	AYU	-131.74	8.00	-136.56	16.16	-138.21	14.52
3	宝兴	BAX	-130.44	8.31	-117.78	6.22	-120.61	10.66
4	巴塘	BTA	-129.44	10.80	-128.70	13.22	-129.35	11.84
5	丙乙底	BYD	-140.19	12.60	-140.18	9.43	-134.32	6.09
6	巴中	BZH	-131.37	10.40	-134.36	11.41	-134.25	11.08
7	成都	CD2	-125.10	2.56	-128.30	2.02	-129.47	0.62
8	苍溪	CXI	-131.53	10.28	-135.32	8.14	-129.87	2.86
9	道孚	DFU	-143.91	12.94	-148.38	9.48	-146.51	2.91
10	峨眉山	EMS	-121.74	9.20	-123.48	11.10	-130.33	13.96
11	姑咱	GZA	-130.59	4.06	-125.17	5.59	-124.94	3.35
12	甘孜	GZI	-129.86	12.40	-137.94	13.45	-135.92	7.78
13	会理	HLI	-123.38	9.63	-124.19	7.98	-128.13	9.39
14	花马石	HMS	-133.13	5.94	-136.34	7.78	-134.90	3.90
15	黑水	HSH	-133.09	7.44	-126.52	8.01	-128.26	3.66
16	汉王山	HWS	-136.54	5.29	-134.05	4.37	-135.98	4.09
17	华蓥山	HYS	-125.08	1.27	-118.83	1.77	-122.46	2.25
18	红原	HYU	-142.59	14.29	-133.77	13.00	-134.80	12.41
19	金鸡寺	JJS	-134.91	7.22	-133.69	10.42	-133.33	2.69
20	筠连	JLI	-139.43	10.59	-131.01	12.04	-133.60	14.78
21	九龙	JLO	-138.43	7.17	-138.66	10.98	-142.43	11.01
22	剑门关	JMG	-138.83	8.68	-138.19	9.74	-133.98	5.33
23	井研	JYA	-135.63	6.94	-143.38	14.73	-144.64	11.14
24	九寨沟	JZG	-143.93	10.13	-138.60	10.88	-139.05	9.52
25	雷波	LBO	-131.24	10.66	-127.53	7.02	-132.99	6.24
26	泸沽湖	LGH	-149.44	14.08	-140.25	17.69	-140.59	15.58
27	理塘	LTA	-142.38	15.07	-131.62	12.86	-131.36	12.89
28	泸州	LZH	-131.22	9.94	-126.66	7.42	-130.66	9.66
29	马边	MBI	-131.59	13.84	-127.66	13.60	-131.69	13.40
30	蒙顶山	MDS	-135.24	10.02	-137.06	14.35	-138.71	10.78
31	马尔康	MEK	-141.97	9.81	-137.25	9.69	-138.41	8.31
32	美姑	MGU	-134.78	12.20	-125.74	9.81	-128.07	15.16
33	木里	MLI	-135.31	12.81	-126.96	10.05	-131.70	8.18
34	冕宁	MNI	-108.62	1.71	-114.16	4.25	-124.79	7.96
35	茂县	MXI	-134.25	11.63	-134.37	10.36	-133.92	6.51
36	普格	PGE	-128.34	11.18	-133.24	11.94	-138.73	12.89
37	平武	PWU	-142.46	6.76	-131.86	5.99	-129.30	3.36
38	攀枝花	PZH	-134.60	11.94	-123.00	14.34	-127.04	11.74
39	青川	QCH	-142.28	11.17	-138.21	12.09	-135.66	7.61
40	若尔盖	REG	-132.80	8.29	-122.80	5.49	-122.06	6.80
41	壤塘	RTA	-138.34	13.67	-132.06	14.16	-133.48	13.50
42	石棉	SMI	-129.27	5.63	-128.19	9.15	-134.12	6.46
43	石门坎	SMK	-141.35	11.93	-138.73	11.61	-136.89	6.15
44	松潘	SPA	-130.44	5.59	-133.89	5.33	-128.07	1.97

续表 1

序号	台站名称	台站代码	3—10 Hz 频带		10—20 Hz 频带		20—40 Hz 频带	
			夜晚噪声水平 /dB	昼夜变化 /dB	夜晚噪声水平 /dB	昼夜变化 /dB	夜晚噪声水平 /dB	昼夜变化 /dB
45	天全	TQU	-131.84	9.86	-128.01	13.52	-138.34	11.40
46	旺苍	WAC	-134.56	7.56	-137.98	13.32	-137.63	13.41
47	汶川	WCH	-129.50	4.09	-129.94	5.84	-135.15	5.22
48	五马坪	WMP	-142.63	3.89	-145.97	2.85	-140.49	0.93
49	乡城	XCE	-137.05	8.75	-136.27	6.85	-128.68	0.65
50	西充	XCO	-134.28	9.76	-134.11	9.14	-132.33	8.64
51	宣汉	XHA	-133.50	11.09	-116.23	1.91	-110.09	1.65
52	小金	XJI	-130.91	8.22	-125.06	10.11	-128.29	9.12
53	玄生坝	XSB	-136.00	5.82	-134.56	7.61	-133.86	5.26
54	油罐顶	YGD	-133.25	5.53	-130.74	4.95	-127.52	2.33
55	雅江	YJI	-137.74	9.25	-132.05	10.21	-132.70	10.10
56	盐亭	YTI	-134.13	7.75	-133.68	10.24	-129.88	10.63
57	园艺场	YYC	-128.69	6.71	-130.78	7.70	-131.39	8.14
58	盐源	YYU	-144.94	9.33	-140.59	18.68	-135.41	18.48
59	油榨坪	YZP	-142.15	4.39	-138.50	4.90	-136.64	3.87
60	仲家沟	ZJG	-121.31	2.11	-122.69	1.81	-118.80	-2.69
最小值/dB		-149.44	1.27	-148.38	1.77	-146.51	-2.69	
最大值/dB		-108.62	15.07	-114.16	18.68	-109.54	18.48	
平均值/dB		-134.11	8.67	-131.67	9.33	-132.01	7.84	
中值/dB		-134.19	9.23	-132.65	9.72	-133.16	8.05	

(2016)在挪威观测到大部分地震台站的高频噪声水平的日变化小于 5 dB, 部分处于城镇嘈杂环境的地震台站的噪声水平日变化可达 15 dB. 与这些地区相比, 四川地区约有三分之一地震台站的高频段(3 Hz 以上)平均噪声水平的昼夜变化不大, 小于 7 dB, 这一方面是由于地区经济和城镇化的快速发展使得台站已位于人口密集区, 其区域背景噪声水平整体偏高, 另一方面是由于有些台站位于乡镇, 在城镇化发展过程中人口随着工业的发展向城市集聚, 位于乡镇台站附近人为和工业活动很少, 台站噪声水平整体偏低, 日变化不大.

2.2 季节性变化

地震台站微震频段噪声水平的季节性变化多与气候的季节性变化及海洋海浪高度相关 (Stutzmann *et al*, 2000, 2009; Traer *et al*, 2012). 四川地区位于北半球, 地震台站平均分布在 26°N 至 34°N 之间, 微震频段噪声与北半球高纬度地震台站微震频段记录的噪声特征 (Aster *et al*, 2008; Traer *et al*, 2012; Wolin *et al*, 2015) 相似. 图 6 和图 7 分别为道孚地震台三分量噪声加速度功率谱密度(PSD)值随时间变化的分布图以及中心周期为 0.32 s 和 4.695 1 s 时的 PSD 值随时间的变化, 其中, 冬季为上一年 12 月、今年 1 月和 2 月, 春季为 3 月至 5 月, 夏季为 6 月至 8 月, 秋季为 9 月至 11 月. 可见: 道孚地震台在微震频段(2—10 s 周期)内, 冬季噪声水平升高、夏季降低, 冬季平均噪声水平比夏季高 3 dB 左右, 垂直和水平分量的平均噪声水平变化不大, 有较明显的季节性变化; 在高频段(0.02—0.7 s 周期)内, 冬季噪声水平降低、夏季升高, 也表现出较明显的季节性变化, 在每年的 1—2 月期间出现 7—20 天的 PSD 低值. 在高频段(0.02—0.7 s 周期), 我们观测到大部分地震台站的垂直、水平分量的平均噪声水平都有较明显的季节性变化, 冬季噪声水平较低, 在每年的 1—2 月间达到一年的最低值,

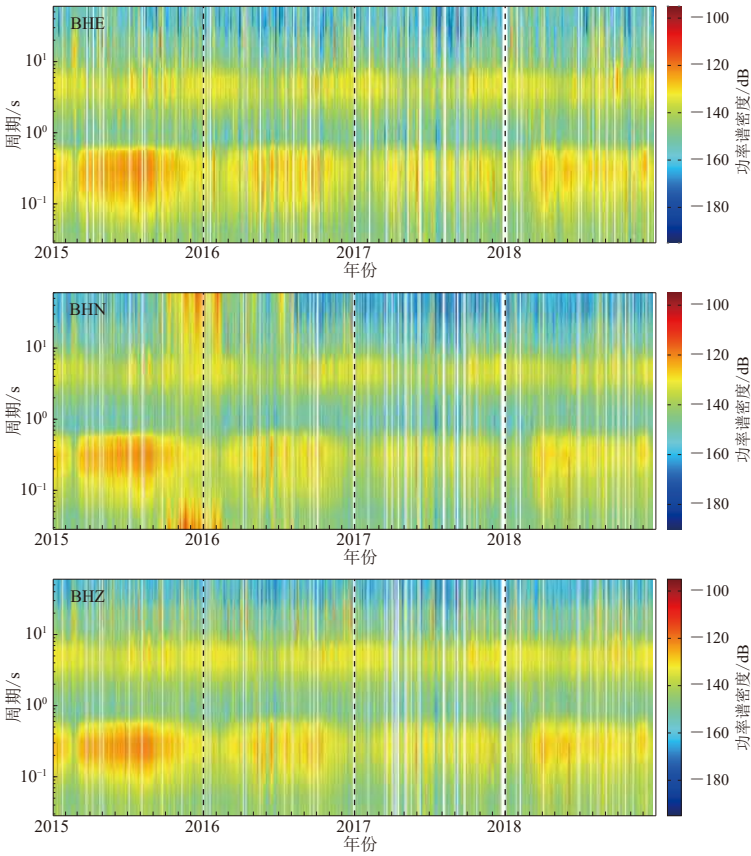


图 6 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日道孚(DFU)地震台三分量噪声加速度功率谱密度(PSD)值随时间的变化分布

Fig. 6 PSD spectrogram of ambient noise obtained from continuous three-component records at station DFU from January 1, 2015 to December 31, 2018

后逐渐升高,至夏季达到一年的最高值,后又逐渐降低.对比噪声加速度功率谱密度低值出现的时间和时长,可见其与当地生产、生活活动的季节性相关,以中国农历春节作为分界线,农历年除夕日分别在 2015 年 2 月 18 日、2016 年 2 月 7 日、2017 年 1 月 27 日和 2018 年 2 月 15 日,噪声在这一日前开始逐渐降低至最低值,随着春节假期结束噪声水平逐渐升高.春节作为中国最重要的传统节日,大部分工厂停工停产,学校放假,人们在这期间放下工作与家人享受一年团聚的假期时光,因此,高频段噪声水平在此期间达到一年最低值.在地震台站建设时,为减少人为噪声的影响,保障记录数据的高信噪比,多数台站选址在乡镇,台站所在地的工业生产活动不发达,受气候条件限制,以农业生产为主,农业生产活动遵循春种秋收,受此影响,夏季噪声水平高于冬季.在中国农历春节期间观测到地震台站环境噪声水平下降,与美国、欧盟等国家地区的台站所观测到的圣诞节和新年期间噪声水平下降的现象(Lecocq *et al*, 2020)类似.

以 0.1—0.5 Hz 频带(周期 2—10 s)内噪声中值统计模型的中值代表该频段内台站的平均噪声水平,分别计算地震台站冬季和夏季时段垂直分量噪声加速度功率谱密度的概率密度函数分布,结果如图 8 所示.可见:四川地区台站 0.1—0.5 Hz 频带的微震频段噪声水平的季



节性变化最为明显, 平均噪声变化为 1—5 dB. 相比之下, 在美国观测到频率 0.125 Hz (周期 8 s) 附近噪声水平的季节性变化介于 15—20 dB 之间 (McNamara, Buland, 2004); 在新西兰部分台站观测到 0.25—1 Hz 频带 (周期 1—4 s) 的噪声季节性变化处于 6—10 dB 之间, 0.1—0.25 Hz 频带 (周期 4—10 s) 的季节变化约为 5 dB (Rastin *et al.*, 2012); 在挪威观测到 0.125—0.25 Hz 频带的季节性变化为 7—22 dB (Demuth *et al.*, 2016).

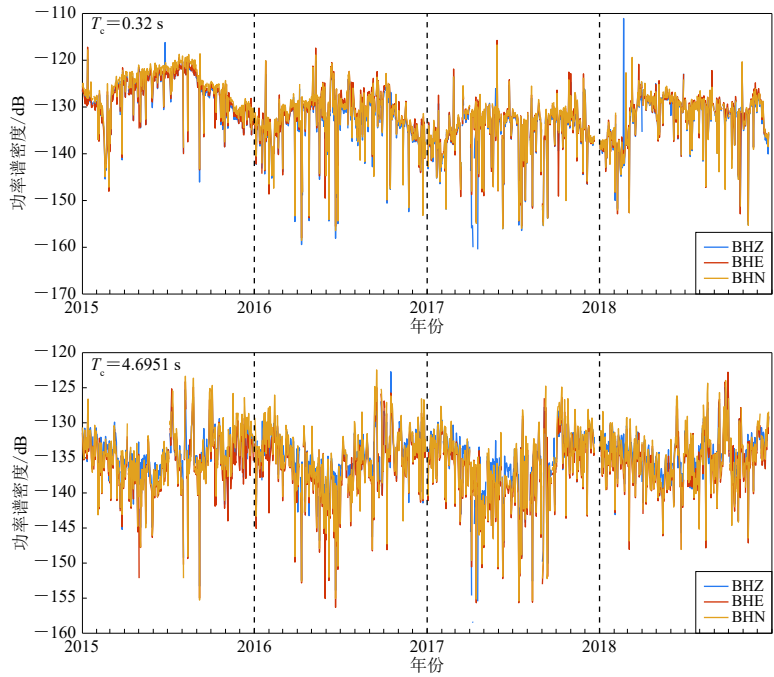


图 7 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日道孚(DFU)地震台中心周期  $T_c$  为 0.32 s 和 4.6951 s 时三分量背景噪声功率谱密度(PSD)值随时间的变化

Fig. 7 PSD values of ambient noise at the central periods  $T_c$  0.32 s and 4.6951 s obtained from continuous three-component records for the station DFU in Sichuan seismic network from January 1, 2015 to December 31, 2018

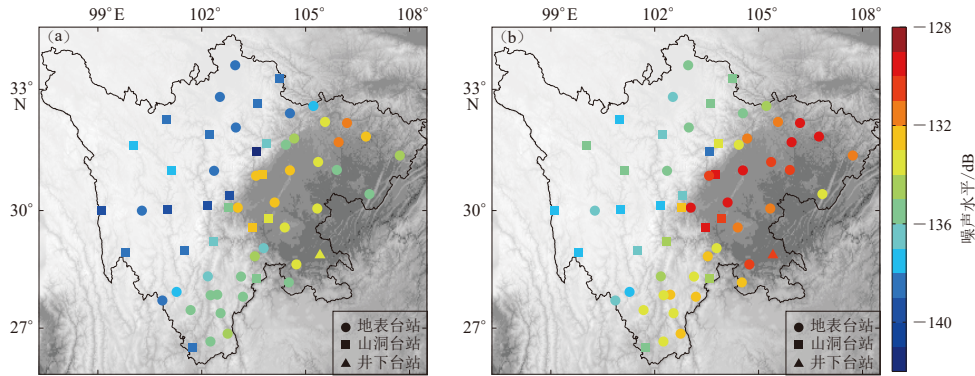


图 8 四川台网各台站夏季(a)和冬季(b) 0.1—0.5 Hz 频段的垂直分量噪声水平分布  
Fig. 8 Distribution of vertical-component noise level in Sichuan seismic network in the frequency band 0.1—0.5 Hz during summer (a) and winter (b)

图 9 分别为道孚台和金鸡寺台 2015—2018 年间夏季(6 月至 8 月)和冬季(12 月至次年 2 月)垂直分量的噪声加速度功率谱密度的概率密度函数分布以及相应加速度功率谱密度中值统计值表示的台站平均噪声水平. 其中: 道孚台位于川西高原, 平均海拔为 3 km, 冬季严寒且时间长, 当地以农业、畜牧业和旅游业为主, 生活、生产活动主要集中在夏季, 具有明显的季节性, 因此, 高频段噪声水平的季节性变化明显, 冬季低于夏季(图 9a); 金鸡寺台位于四川盆地, 气候适宜, 降雨充沛, 台站附近主要以农业生产为主, 冬季和夏季高频段平均噪声水平未呈明显的变化(图 9b). 由图 9 还可以看到, 地震台站冬季和夏季微震频段噪声水平的峰值不同, 冬季噪声水平峰值比夏季高 3 dB 左右, 峰值出现的频率也不同, 夏季噪声水

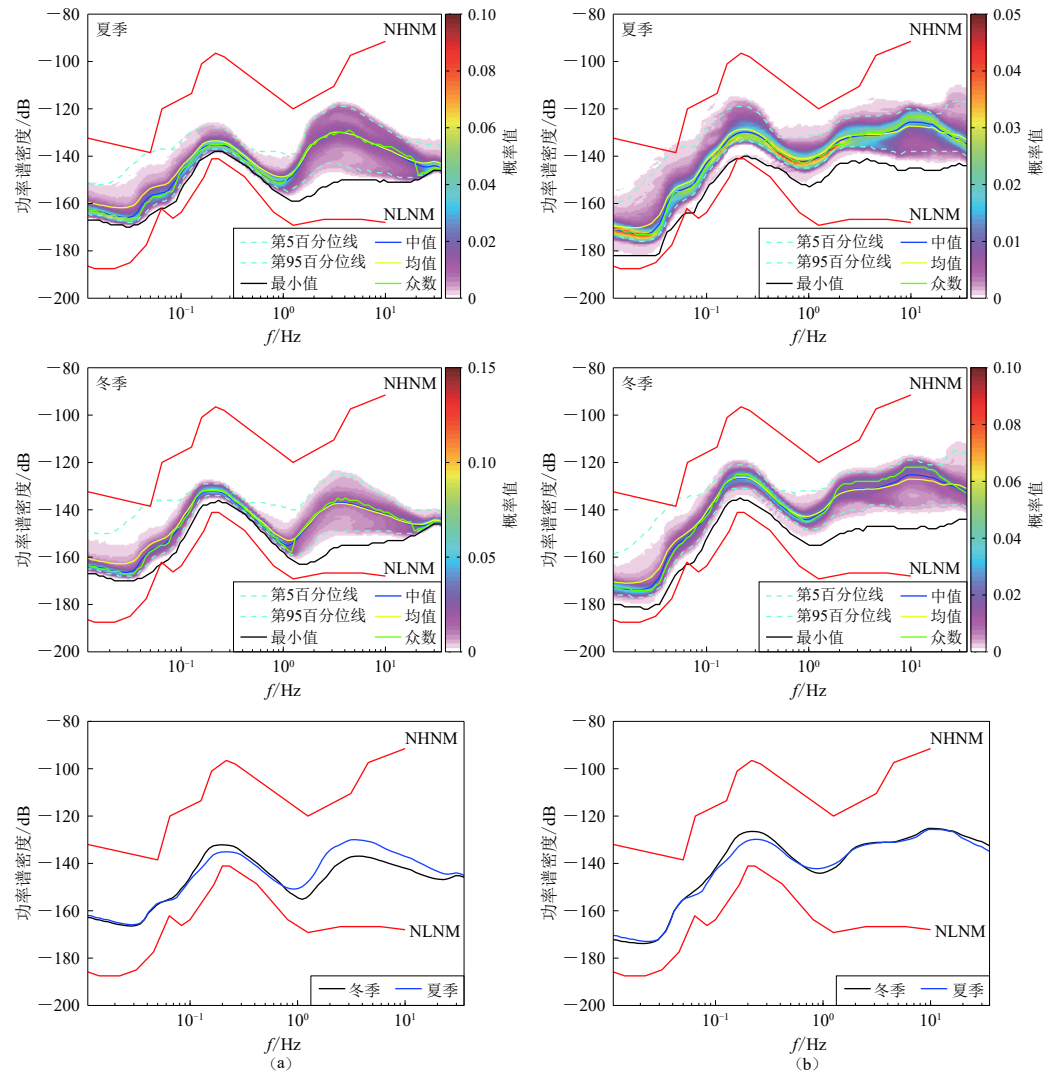


图 9 道孚(DFU)台(a)和金鸡寺(JJS)台(b)垂直分量夏季和冬季噪声功率谱密度(PSD)的概率密度函数(PDF)分布及中值、最小值 PSD 曲线

Fig. 9 The PDF distribution of PSD for vertical-component seismic noise in summer and winter for the stations DFU (a) and JJS (b) and the median and minimum PSD curves

平峰值在周期 5 s 附近, 冬季峰值出现的频率向低频(长周期)方向移动 1—2 s. 在北半球的挪威(Demuth *et al*, 2016)也观测到相似的结果, 而在南半球的新西兰部分台站观测到南半球微震频段冬季噪声峰值高于夏季, 冬季峰值向短周期方向移动(Rastin *et al*, 2012).

3 噪声的空间变化

为了分析四川不同地区的地震台站噪声水平, 我们以不同台站、不同周期的噪声加速度功率谱密度的中值统计值代表台站平均噪声水平, 并将其绘制在台站所在的空间位置上, 结果如图 10 所示. 可见: 频率大于 2 Hz 的高频段噪声因受台站附近人为、工业生产活动的影响, 噪声水平各不相同, 未呈明显的地理空间分布特征.

周期处于 1—10 s 范围内的微震噪声属于第二类地脉动, 主要由深海区和近海海岸海浪间的相互作用产生(Bromirski *et al*, 2005; Gerstoft, Tanimoto, 2007; Kedar *et al*, 2008; Yang, Ritzwoller, 2008), 是海浪传播到大陆的主要能量, 峰值位于 5 s 周期附近. 该频段噪声主要产生于近海海岸, 地震波振幅与风速和方向密切相关, 季节性变化最为明显, 且有较明显的地理空间分布特征. 四川地区位于欧亚大陆内部, 地震台站很难观测到由深海区产生进而传播至内陆的能量(Bromirski *et al*, 2013). 在频率 0.3285 Hz (周期 3.04 s) 和 0.1953 Hz (周期 5.12 s), 川东地区台站的噪声水平明显高于其它地区, 攀西地区次之, 川西高原的噪声水平

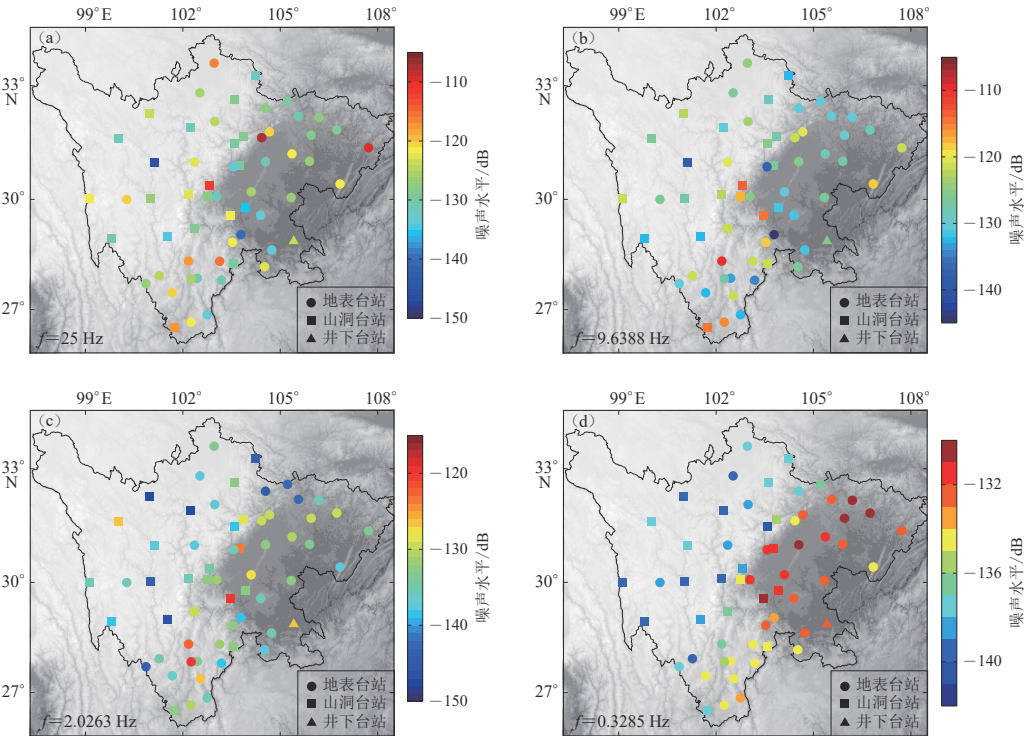


图 10 四川台网地震台站垂直分量不同周期的噪声水平空间分布

Fig. 10 Geographic distribution of vertical-component noise level for different periods at the seismic stations in Sichuan seismic network

(a)  $f=25.000\ 0\ \text{Hz}$ ; (b)  $f=9.638\ 8\ \text{Hz}$ ; (c)  $f=2.026\ 3\ \text{Hz}$ ; (d)  $f=0.328\ 5\ \text{Hz}$

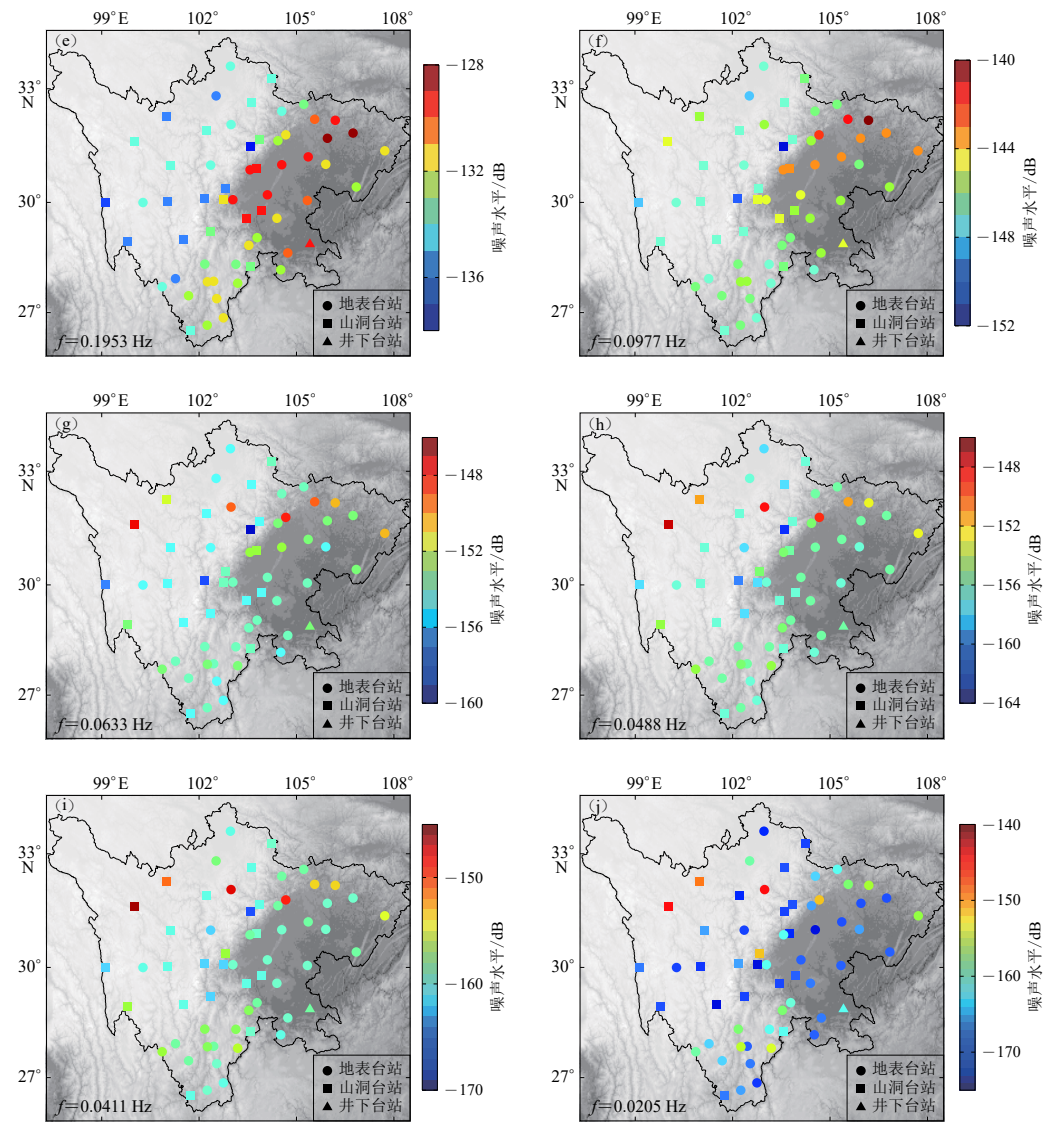


图 10 四川台网地震台站垂直分量不同周期的噪声水平空间分布

Fig. 10 Geographic distribution of vertical-component noise level for different periods at the seismic stations in Sichuan Seismic Network

(e)  $f=0.1953\text{ Hz}$ ; (f)  $f=0.0977\text{ Hz}$ ; (g)  $f=0.0633\text{ Hz}$ ; (h)  $f=0.0488\text{ Hz}$ ; (i)  $f=0.0411\text{ Hz}$ ; (j)  $f=0.0205\text{ Hz}$

最低, 这一地理空间分布特征与台站到近海海岸的距离相关, 即台站与近海海岸的距离越近, 噪声水平越高(图 8, 图 10d, e).

周期处于 10—20 s 范围内的微震噪声, 也就是第一类地脉动, 其周期与海浪的主要周期一致, 是在海浪与近海海岸的相互作用下产生(Hasselmann, 1963), 该频段噪声能量较第二类地脉动有所减弱, 峰值在周期 16 s 附近. 与近海岸台站相比, 四川地区台站很难观测到季节性变化, 推测其原因主要为噪声传播至大陆内部过程中经大地滤波作用的能量衰减. 在频率 0.063 3 Hz (周期 15.80 s) 和频率 0.097 7 Hz (周期 10.24 s), 地理空间分布的噪声水平差异



明显减小,川东地区、攀西地区和川西高原的噪声水平相近,其中甘孜台、黑水台和仲家沟台垂直分量噪声水平偏大(图 10f, g)。

在周期 20 s 以上的频带内,四川地区台站的噪声水平未呈明显的地理空间分布差异。由 0.048 8 Hz (周期 20.49 s)、0.041 1 Hz (周期 24.33 s) 和 0.020 5 Hz (周期 48.78 s) 的台站垂直分量噪声水平分布图(图 10h, i, j) 可见,大部分采用山洞方式安装的地震台站的长周期噪声水平比采用地表安装方式的噪声水平低,说明采用山洞安装方式可以有效地降低温度扰动和大气压强变化对长周期地震观测的影响。

## 4 讨论与结论

本文计算四川台网 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日期间 60 个固定地震台站三分量连续波形记录的噪声加速度功率谱密度及其概率密度函数分布,得到了四川地区地震台站噪声水平随时间和空间的变化特征,主要结论为:

1) 台站高频段噪声主要为人为噪声和自然噪声,地震计采用山洞和井下安装方式能够有效地降低周围干扰源的影响,起到保温、防风的作用,在一定程度上降低噪声源对高频段记录的影响,但是台站的环境噪声水平主要与台址附近干扰源距离和多种干扰源的叠加效应呈正相关。高频段 3—40 Hz 内大部分地震台站噪声的季节性变化和日变化特征明显,主要由台站附近人为规律的作息生产活动和受气候影响的生产生活方式决定,未呈明显的地理空间分布特征。台站夏季噪声水平升高,冬季降低,每年的农历春节假期期间为全年噪声水平最低值时段。受台站所处地区经济和城镇化发展的影响,约三分之一台站的噪声水平日变化小于 7 dB,昼夜变化的最大值为 18.68 dB。

2) 四川地区地处内陆,距海岸线较远,台站记录的微震频段噪声主要集中在 0.1—0.5 Hz 频段(周期 2—10 s)的第二类地脉动,季节性变化最为明显,冬季噪声水平升高,夏季降低,平均变化为 1—5 dB。受冬季和夏季海洋海浪高度的影响,冬季的噪声水平峰值比夏季高 3 dB,冬季峰值出现的频率向低频(长周期)方向移动 1—2 s。台站与近海海岸的距离不同,呈现明显的地理空间分布特征,川东地区平均噪声水平最高,攀西地区次之,川西高原最低。台站在 10—20 s 周期观测到的微震噪声能量减弱,季节性变化不明显,地理空间分布的噪声水平差异明显减小。

3) 周期在 20 s 上台站的噪声水平未呈明显的季节性变化和地理空间分布差异,该频段噪声水平主要与地震计安装方式和仪器自噪声相关。采用山洞安装方式可以有效地降低温度扰动和大气压强变化对长周期观测的影响,长周期噪声水平低于地表安装方式的地震台站。

本文的研究结果可为四川地区人为噪声对地震观测及地震监测能力影响的评估、地震计保护装置设计的优化以及台站地震观测环境的保护提供参考。

## 参 考 文 献

- 葛洪魁,陈海潮,欧阳颺,杨微,张梅,袁松湧,王宝善. 2013. 流动地震观测背景噪声的台基响应[J]. *地球物理学报*, **56**(3): 857–868.
- Ge H K, Chen H C, Ouyang B, Yang W, Zhang M, Yuan S Y, Wang B S. 2013. Transportable seismometer response to seismic noise in vault[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(3): 857–868 (in Chinese).
- 吴建平,欧阳颺,王未来,姚志祥,袁松湧. 2012. 华北地区地震环境噪声特征研究[J]. *地震学报*, **34**(6): 818–829.

- Wu J P, Ouyang B, Wang W L, Yao Z X, Yuan S Y. 2012. Ambient noise level of North China from temporary seismic array[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(6): 818–829 (in Chinese).
- 谢江涛, 林丽萍, 谌亮, 赵敏. 2018. 地震台站台基噪声功率谱概率密度函数 Matlab 实现 [J]. *地震地磁观测与研究*, **39**(2): 84–89.
- Xie J T, Lin L P, Chen L, Zhao M. 2018. The program of probability density function of power spectral density curves from seismic noise of a station based on Matlab[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **39**(2): 84–89 (in Chinese).
- 谢江涛, 林丽萍, 赵敏, 黄春梅, 李荪海. 2019. 应急流动观测组网技术在康定 6.3 级地震中的应用 [J]. *华南地震*, **39**(3): 23–31.
- Xie J T, Lin L P, Zhao M, Huang C M, Li S H. 2019. The application of emergency portable seismological observation network technology in Kangding  $M_s 6.3$  earthquake[J]. *South China Journal of Seismology*, **39**(3): 23–31 (in Chinese).
- 谢江涛, 林丽萍, 谌亮. 2020. 九寨沟  $M_s 7.0$  地震应急流动台站噪声水平分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, **40**(9): 962–969.
- Xie J T, Lin L P, Chen L. 2020. Ambient noise level of  $M_s 7.0$  Jiuzhaigou earthquake emergency mobile stations[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **40**(9): 962–969 (in Chinese).
- Aster R C, McNamara D E, Bromirski P D. 2008. Multidecadal climate-induced variability in microseisms[J]. *Seismol Res Lett*, **79**(2): 194–202.
- Beauduin R, Lognonné P, Montagner J P, Cacho S, Karczewski J F, Morand M. 1996. The effects of the atmospheric pressure changes on seismic signals or how to improve the quality of a station[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(6): 1760–1769.
- Bormann P, Wielandt E. 2013. Seismic signals and noise[G]//*New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)*. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum: 1–62.
- Brenguier F, Campillo M, Takeda T, Aoki Y, Shapiro N M, Briand X, Emoto K, Miyake H. 2014. Mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops[J]. *Science*, **345**(6192): 80–82.
- Bromirski P D, Duennebie F K, Stephen R A. 2005. Mid-ocean microseisms[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **6**(4): Q04009.
- Bromirski P D, Stephen R A, Gerstoft P. 2013. Are deep-ocean-generated surface-wave microseisms observed on land?[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **118**(7): 3610–3629.
- Burtin A, Bollinger L, Vergne J, Cattin R, Nábělek J L. 2008. Spectral analysis of seismic noise induced by rivers: A new tool to monitor spatiotemporal changes in stream hydrodynamics[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **113**(B5): B05301.
- de la Torre T L, Sheehan A F. 2005. Broadband seismic noise analysis of the Himalayan Nepal Tibet Seismic Experiment[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(3): 1202–1208.
- Demuth A, Ottemöller L, Keers H. 2016. Ambient noise levels and detection threshold in Norway[J]. *J Seismol*, **20**(3): 889–904.
- Denolle M A, Dunham E M, Prieto G A, Beroza G C. 2013. Ground motion prediction of realistic earthquake sources using the ambient seismic field[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **118**(5): 2102–2118.
- Denolle M A, Dunham E M, Prieto G A, Beroza G C. 2014. Strong ground motion prediction using virtual earthquakes[J]. *Science*, **343**(6169): 399–403.
- Gerstoft P, Tanimoto T. 2007. A year of microseisms in southern California[J]. *Geophys Res Lett*, **34**(20): L20304.
- Hasselmann K. 1963. A statistical analysis of the generation of microseisms[J]. *Rev Geophys*, **1**(2): 177–210.
- Kedar S, Longuet-Higgins M, Webb F, Graham N, Clayton R, Jones C. 2008. The origin of deep ocean microseisms in the North Atlantic ocean[J]. *Proc Roy Soc A: Math Phys Eng Sci*, **464**(2091): 777–793.
- Lecocq T, Hicks S P, Noten K V, Wijk K V, Koelemeijer P, Plaen R S M D, Massin F, Hillers G, Anthony R E, Apoloner M T, Arroyo-Solórzano M, Assink J D, Büyükapınar P, Cannata A, Cannavo F, Carrasco S, Caudron C, Chaves E J, Cornwell D G, Craig D, Ouden O F C D, Diaz J, Donner S, Evangelidis C P, Evers L, Fauville B, Fernandez G A, Giannopoulos D, Gibbons S J, Girona T, Grecu B, Grunberg M, Hetényi G, Horleston A, Inza A, Irving J C E, Jamalreyhani M, Kafka A, Koymans M R, Labeledz C R, Larose E, Lindsey N J, Mckinnon M, Megies T, Miller M S, Minarik W, Moresi L, Márquez-Ramírez V H, Möllhoff M, Nesbitt I M, Niyogi S, Ojeda J, Oth A, Proud S, Pulli J, Retailleau L,

- Rintamäki A E, Satriano C, Savage M K, Shani-Kadmiel S, Sleeman R, Sokos E, Stammer K, Stott A E, Subedi S, Sørensen M B, Taira T, Tapia M, Turhan F, Pluijm B V D, Vanstone M, Vergne J, Vuorinen T A T, Warren T, Wassermann J, Xiao H. 2020. Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures[J]. *Science*, **369**(6509): 1338–1343.
- Longuet-Higgins M S. 1950. A theory of the origin of microseisms[J]. *Philos Trans R Soc Lond A: Math Phys Eng Sci*, **243**(857): 1–35.
- Marzorati S, Bindi D. 2006. Ambient noise levels in north central Italy[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **7**(9): Q09010.
- McNamara D E, Buland R P. 2004. Ambient noise levels in the continental United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(4): 1517–1527.
- Peterson J R. 1993. *Observations and Modeling of Seismic Background Noise*[R]. Albuquerque: U.S. Geological Survey, **93-322**: 1–95.
- Rastin S J, Unsworth C P, Gledhill K R, McNamara D E. 2012. A detailed noise characterization and sensor evaluation of the North Island of New Zealand using the PQLX data quality control system[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(1): 98–113.
- Ringler A T, Hutt C R. 2010. Self-noise models of seismic instruments[J]. *Seismol Res Lett*, **81**(6): 972–983.
- Sabra K G, Gerstoft P, Roux P, Kuperman W A, Fehler M C. 2005. Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise[J]. *Geophys Res Lett*, **32**(3): L03310.
- 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.
- Sleeman R, Melichar P. 2012. A PDF representation of the STS-2 self-noise obtained from one year of data recorded in the Conrad observatory, Austria[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(2): 587–597.
- Stutzmann E, Roult G, Astiz L. 2000. Geoscope station noise levels[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(3): 690–701.
- Stutzmann E, Schimmel M, Patau G, Maggi A. 2009. Global climate imprint on seismic noise[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **10**(11): Q11004.
- Tasić I, Runovc F. 2012. Seismometer self-noise estimation using a single reference instrument[J]. *J Seismol*, **16**(2): 183–194.
- Traer J, Gerstoft P, Bromirski P D, Shearer P M. 2012. Microseisms and hum from ocean surface gravity waves[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **117**: B11307.
- Traer J, Gerstoft P. 2014. A unified theory of microseisms and hum[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **119**(4): 3317–3339.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6): 1353–1368.
- Webb S C. 1998. Broadband seismology and noise under the ocean[J]. *Rev Geophys*, **36**(1): 105–142.
- Webb S C. 2002. Seismic noise on land and on the sea floor[G]//*International Geophysics. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*. Amsterdam: Academic Press: **81**: 305–318.
- Welch P. 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms[J]. *IEEE Trans Audio Electroacoust*, **15**(2): 70–73.
- Wolin E, van der Lee S, Bollmann T A, Wiens D A, Revenaugh J, Darbyshire F A, Frederiksen A W, Stein S, Wyssession M E. 2015. Seasonal and diurnal variations in long-period noise at SPREE stations: The influence of soil characteristics on shallow stations' performance[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **105**(5): 2433–2452.
- 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.
- Young C J, Chael E P, Withers M M, Aster R C. 1996. A comparison of the high-frequency (>1 Hz) surface and subsurface noise environment at three sites in the United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1516–1528.
- Zhang M, Wen L X. 2015. An effective method for small event detection: Match and locate (M&L)[J]. *Geophys J Int*, **200**(3): 1523–1537.
- Zhu L P, Zhou X F. 2016. Seismic moment tensor inversion using 3D velocity model and its application to the 2013 Lushan earthquake sequence[J]. *Phys Chem Earth: Parts A/B/C*, **95**: 10–18.