

福建地区环境噪声特性研究^{*}

蔡辉腾^{1,2}, 陈 颀¹, 金 星², 徐嘉隽², 徐艺鹤³, 李 稳⁴

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210008; 2. 福建省地震局, 福建 福州 350003;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100810; 4. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450003)

摘要: 为进一步加强福建地区噪声特性的认识以及提升台站地震观测质量, 计算了2014年福建地震台网宽频带地震仪连续观测数据的功率谱概率密度函数, 并分析其影响因素和不同频段时空变化特性。结果表明: 人文噪声平均水平最高地区位于福建沿海福州至厦门一带, 07:00—18:00的功率谱密度要明显高于其它时间段, 12:00左右出现间歇性低谷期, 夜间有不同程度的降低, 日变化除了在春节假期大幅下降外, 均处于较为稳定态势; 福建地区次级微震主要成分是Rayleigh波, 主频约为2.7 s, 主微震主频约为16 s, 次级微震平均水平最高地区也位于沿海一带, 向内陆方向呈衰减趋势, 其日变化明显, 与台风和潮高有较高的相关性。

关键词: 福建地区; 环境噪声; 功率谱密度; 概率密度函数; 时空特性

中图分类号: P315.94

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)01-0064-08

0 引言

台站环境噪声是影响地震观测质量的主要因素之一, 地震学家历来重视其特性研究。地震环境噪声可视为平稳随机信号, 依据随机过程理论可用功率谱密度 (Power Spectral Density, 简称PSD) 来表征其特性。Peterson (1993) 研究了全球地震台网75个固定台站近2 000条地震环境噪声功率谱密度特性, 定量给出了全球地震环境噪声高噪声模型 (NHNM) 和低噪声模型 (NLNM), 该模型已成为衡量台站环境噪声水平的重要评判依据 (李孝宾等, 2017)。McNamara 和 Raymond (2004) 在 Peterson (1993) 的研究基础上运用功率谱概率密度函数 (Probability Density Function, 简称PDF) 来统计分析环境噪声水平, 该方法能更加全面地反映地震环境噪声的时空变化特性, 近年来已被越来越多的国内外同行应用。美国 I-RIS 和 ANSS 数据中心已成功将该方法应用于台站数据质量监控 (McNamara, Boaz, 2005; Díaz *et al.*, 2010)。在国内, 吴建平等 (2012) 利用华北流动地震台阵观测的环境噪声数据, 研究华北地

区地震环境噪声特征; 葛洪魁等 (2013) 和刘旭宙等 (2014) 结合流动台站连续观测数据, 通过计算不同频段范围内背景噪声的加速度功率谱密度函数, 研究了不同场地条件和环境噪声下流动地震观测台站的噪声特征; 杨龙翔等 (2015) 利用2008—2012年河南省地震台网连续波形数据, 计算三分量地震计记录到的波形数据的功率谱密度和相应的概率密度函数, 对河南地震台网背景噪声进行分析。

福建境内峰岭耸峙、丘陵连绵, 河谷、盆地穿插其间, 山地、丘陵占全省总面积的80%以上, 东南地区滨临台湾海峡, 海岸线长达3 752 km, 紧连环太平洋地震带, 属于中强地震活动较活跃的地区之一。对该地区地震环境噪声水平的正确评估及其特性的全面了解, 有助于进一步加强对本地区噪声特性的认识以及提升本地区固定台站或流动台站地震观测质量。廖诗荣和陈绯雯 (2008)、徐嘉隽等 (2010)、林彬华等 (2015) 将环境噪声概率密度函数方法分别应用于福建台址遴选、福建地震台网观测数据质量检测 and 噪声异常实时监测, 截至2018年4月, 尚没有针对福建地区噪声水平和特性的系统定量分析。鉴于此,

^{*} 收稿日期: 2018-04-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678539) 和 (41474071) 联合资助.

笔者采用 2014 年福建地震台网连续观测数据，计算各台站环境噪声功率谱概率密度函数，并分析其影响因素和不同频段时空变化特性。

1 数据和处理方法

定量分析台站环境噪声水平的通用方法是先计算噪声加速度功率谱密度（PSD），进而计算相应的概率密度函数（PDF）。该方法在计算过程中不必特意挑选连续平静的噪声记录，没必要排除爆破、地震等突发事件，而是将所选数据进行统一处理，把所有扰动事件作为低概率事件存在 PDF 中，故此 PDF 结果能较好地统计出台站环境噪声水平的动态变化特性。

1.1 数据来源

经过 20 余年建设，截至 2018 年 4 月，福建地震台网正式运行的台站有 88 个，其中 73 个配备宽频带地震计。本文收集了 2014 年 73 个宽频带地震台（图 1）的三分量（UD，NS，EW）连续数字波形记录，每个台每天形成一个 SAC 格式数据文件。表 1 给出所用台站地震仪型号的频带范围，其中 46 个台站带宽 120 s ~ 50 Hz，27 个台站带宽 60 s ~ 50 Hz，采样率均为 100 Hz。所用台站平均台间距约为 40 km。

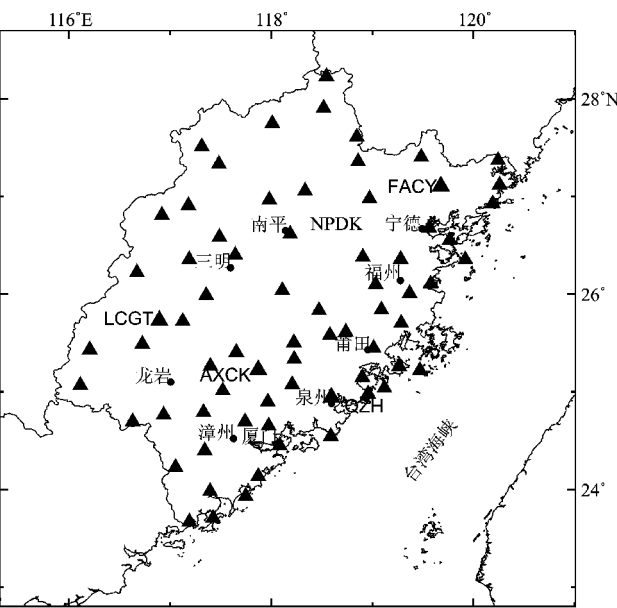


图 1 研究区台站分布图

Fig. 1 The distribution of stations in the study area

表 1 测震台站地震计属性		
Tab. 1 Seismometer attributes of seismic stations		
地震仪型号	频带范围	台数
CTS - 1	120 s ~ 50 Hz	1
BBVS - 60	60 s ~ 50 Hz	7
CMG - 3ESPC	60 s ~ 50 Hz	20
CMG - 3ESPC	120 s ~ 50 Hz	45

1.2 处理方法

先将各台站一天的三分量连续噪声记录去仪器响应、均值和线性趋势，再按长度为 327.68 s (2^{15} 个采样点) 进行截取，为尽量降低噪声 PSD 的方差，每段记录重合率取 50%，这样每个台站每一分量每天有 526 条数据段。每段数据计算自身功率谱概率密度函数步骤描述如下：

- (1) 为压制计算数据序列傅里叶变换的旁瓣效应，平滑傅里叶变换的计算结果，将正弦窗附加在数据序列上，加窗造成的影响在计算傅里叶变换后进行补偿。
- (2) 计算数据序列的功率谱密度，进一步转化为 PSD，以 dB 为单位进行表示，以便于和全球低噪声模型（NLNM）、全球高噪声模型（NHNM）进行对比分析。
- (3) 将得到的 PSD 进行 1/9 倍频程光滑，进而得到在对数坐标上均匀分布的 PSD。
- (4) 针对不同分析需求，采用不同台站不同分量不同时间段数据序列集，重复步骤（1）~（3），计算 PDF。

图 2 给出 2014 年 1 月 1 日福建地震台网 AXCK 台站记录的垂直向波形中所截取的一段噪声数据，可以看出噪声幅值量级为 $\pm 0.5 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 3 为该段序列经过步骤（1）~（3）得到的原始和光滑后的加速度功率谱密度。图 4 为 2014 年 1 月 1 日 AXCK 台站垂直向数据 526 段序列在 4 个周期（0.05 s，0.25 s，5 s，30 s），以 1 dB 为统计间隔的加速度功率谱密度分布直方图，把所有周期的加速度功率谱密度分布用不同色标表示出来即为 McNamara 和 Raymond（2004）提出的 PDF 图（图 5）。为进一步表征台站噪声水平，通用做法是设定第 5 百分位数和第 95 百分位数分别表示噪声功率谱密度的下限和上限水平；众数是功率谱密度取值可能性最大的值，最能反映噪声平均水平，

但是在 5 Hz 以上的频段由于人为噪声的影响, 容易出现跳变; 平均值表达噪声综合水平, 容易受极值影响而偏离众数统计较远; 中值统计曲线基本与众数统计曲线在 5 Hz 以下频段基本重合, 且曲线形态平滑。综上分析, 在后续的分析中取中值作为台站平均噪声水平的具体体现。

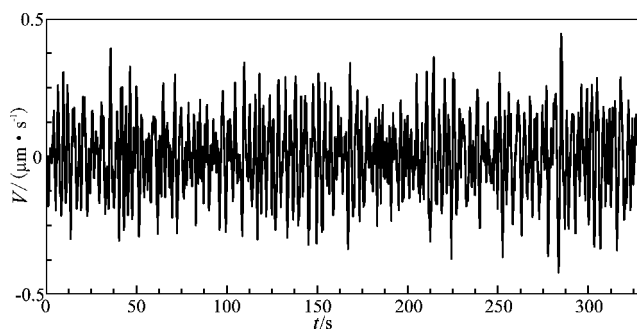


图2 2014年1月1日AXCK台站垂直向波形图
Fig. 2 Diagram of the vertical waveform recorded by AXCK station on Jan. 1, 2014

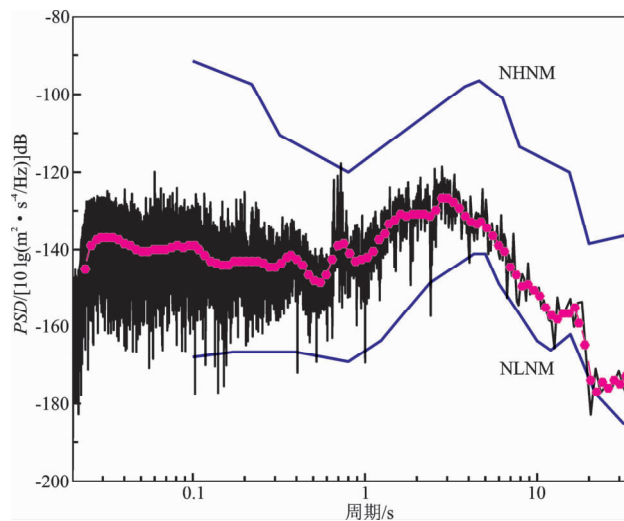


图3 AXCK台站垂直分量加速度功率谱密度(黑线)及其经1/9倍频程平滑后的结果(紫点)
Fig. 3 Acceleration power spectral density (black line) and its smoothing results after 1/9 octave (purple dot) of vertical component of AXCK station

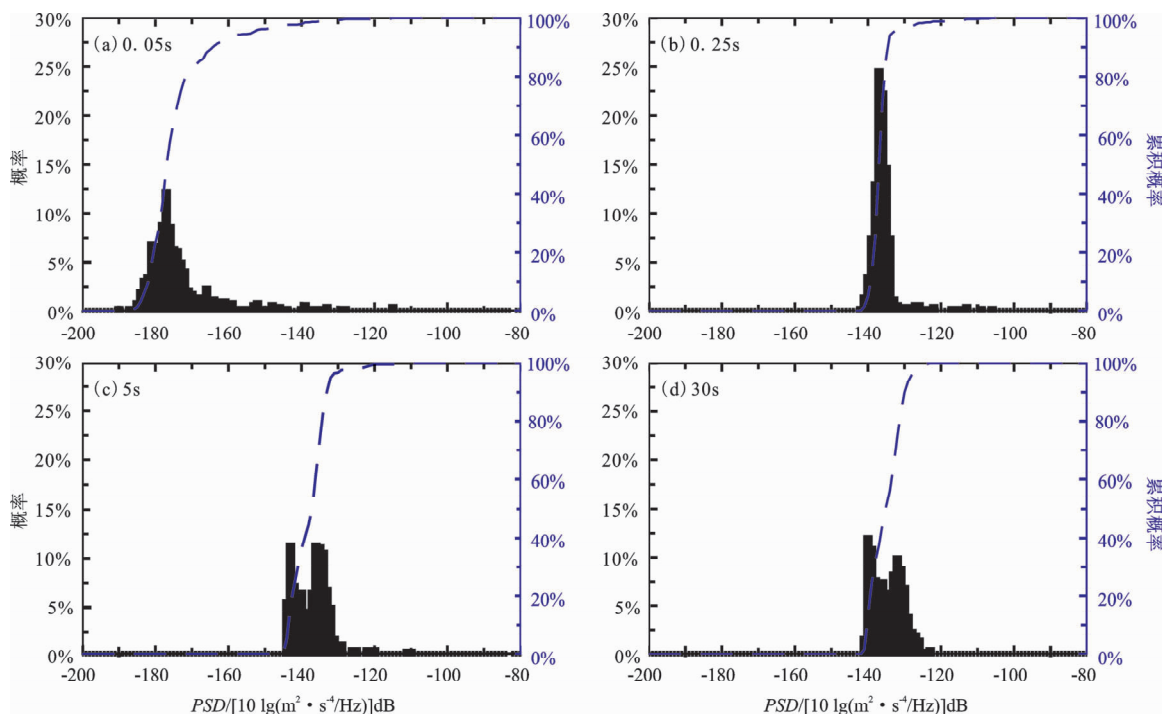


图4 AXCK台站4个周期功率谱密度分布直方图

Fig. 4 Histogram of power spectral density distribution of AXCK station at four periods

2 福建地区环境噪声特性分析

地震仪记录到的噪声主要由仪器自噪声和环境噪声构成, 现代宽频带地震仪在工作频带范围

内自噪声水平远低于环境噪声 (Ringler, Hutt, 2010), 故噪声记录可作为环境噪声来分析。考虑到不同频段噪声的来源和特性不同, 为便于对比分析, 参照葛洪魁等 (2013) 的研究, 根据数据来源中共有频带范围 (40 s ~ 50 Hz) 分成 4 个频

段：高频（0.025 ~ 0.2 s）、短周期（0.2 ~ 1 s）、微震（1 ~ 20 s）、长周期（20 ~ 40 s）。已有研究表明：高频段和短周期环境噪声主要是由人类活动（交通、工业等）引起的（Webb, 1998），部分也可能是由自然界因素引起的（Withers, *et al*, 1996; Hillers, Ben-Zion, 2011）。如图5所示，微震噪声在1 ~ 10 s和10 ~ 20 s有2个峰值，分别称之为次级微震和主微震（Webb, 1998; McNamara, Raymond, 2004），其形成机制是海洋波与海底或海岸带的非线性作用引起海底压力脉动（Longuet-Higgins, 1950）；长周期噪声主要来源于自然界风、急流（瀑布或河流）、温度变化、地倾斜等（Wilson, 2002）。下面就上述4个噪声频段在福建地区的时空分布特性进行分析。

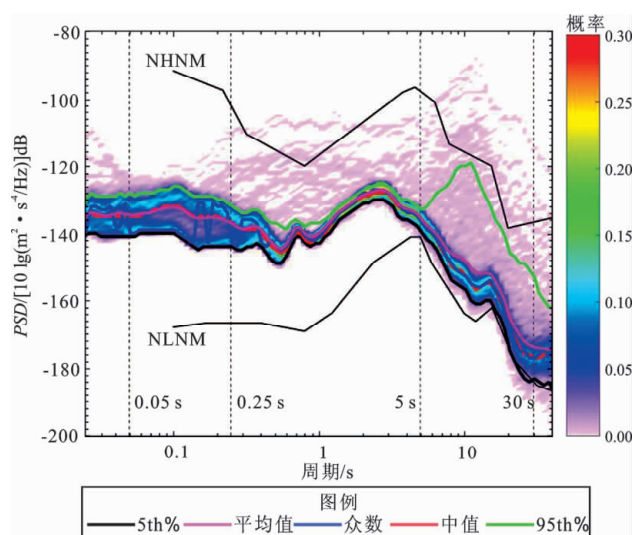


图5 2014年1月1日AXCK台站垂直分量
526条功率谱概率密度函数

Fig. 5 526 PDF of vertical component recorded by
AXCK station on Jan. 1, 2014

2.1 时变特性分析

为了对环境噪声时变特性有较全面了解，先计算每个台站垂直分量一年中每天同一时刻的PDF中值，然后按时间排序取3个典型台站结果，分别代表工业发达、中等和一般地区噪声平均水平，如图6所示。从图6中可以看出：高频和短周期段07:00—18:00的功率谱密度要明显高于其它时间段，在12:00左右则出现间歇性低谷期，FACY台反应最明显，夜间有不同程度的降低，LCGT台完

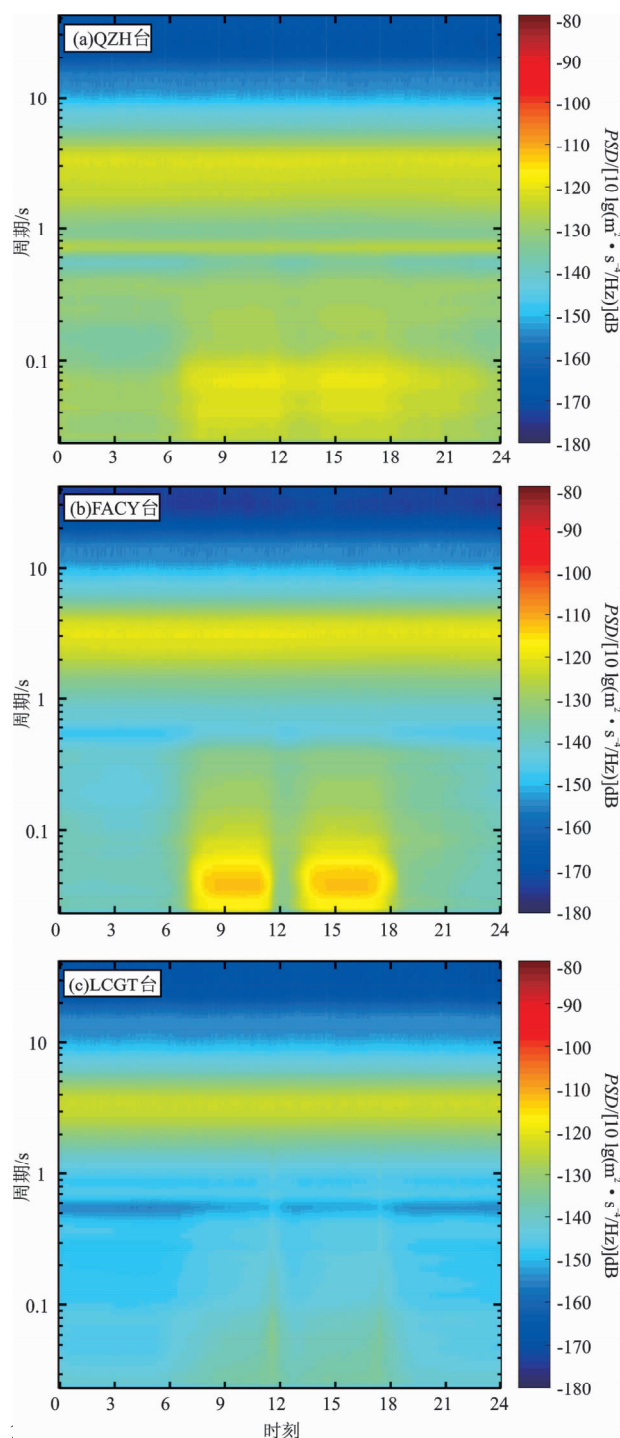


图6 QZH, FACY和LCGT台站时变化 (PDF
中值统计, 每个时间点约360条PSD)

Fig. 6 Time variability of QZH, FACY and LCGT
stations (PDF median statistics, about 360
PSD per time point)

的噪声水平，这种特征和人类的作息规律一致，表明高频和短周期段噪声主要为人为噪声；微震和长周期段噪声水平基本保持不变，3个台站均呈

现出较高的一致性,说明这3段频带范围噪声与人类活动相关性不大。

2.2 日变特性分析

为进一步了解环境噪声日变特性,结合时变特性分析结果,对分别代表福建沿海和内陆平均水平的泉州台(QZH)和南平台(NPDK)进行分析,这两个台站均位于山洞内,观测环境较好。为排除强烈的功率谱密度时变化对分析结果的影响,只使用每天00:00—06:00平均期的PDF中值按日排序。由图7可得到:

(1) 高频和短周期段噪声平均水平日变化除了在春节期间大幅下降外,其他时间均较为稳定,这种现象在福建地震台网所有台站计算结果中均有反映,与QZH和NPDK台比较结果一样,该频段范围内福建沿海地区平均噪声水平均高于内陆,这说明了人为干扰是环境噪声高频和短周期段的主要来源。

(2) 微震和长周期段噪声水平日变化明显,但福建地震台网所有台站计算结果反映这种变化趋势几乎是一致的,能在整个区域内形成这种一致的变化说明该频段范围内噪声来源于自然因素。为进一步分析噪声来源问题,将2014年对福建地区有一定影响的4个台风和天文大潮标注于图7,可以发现微震段的极值点与台风和天文大潮在时间上吻合较好;对比QZH台2.7 s和16 s处的PSD和厦门2014年2—12月每天00:00—06:00段潮汐潮高最大值,发现2.7 s处的PSD与潮高相关性较高,而16 s处则无明显相关性。前人的研究结果(Longuet-Higgins, 1950; Hasselmann, 1963; Haubrich, McCamy, 1944)表明,因海浪行波形成的微地震——主微震(Primary microseisms)较弱,主频为10~20 s;因风浪与海底、海岸碰撞摩擦后形成强烈的反射波,逆行的反射波与海浪行进波非线性耦合后进一步形成很强的海浪驻波,驻波冲击海底进而激发强烈的微地震——次级微震(Secondary microseisms),其能量远大于原生微地震的能量,其主频为1~10 s。由图5可知,福建地区2次微地震主频约为2.7 s,主微震主频约为16 s,结合金星和康兰池(2007)的研究结果,笔者认为福建地区噪声微震段主要来源于海洋次级微震,且其日变化特性与台风和潮高有较高的相关性。

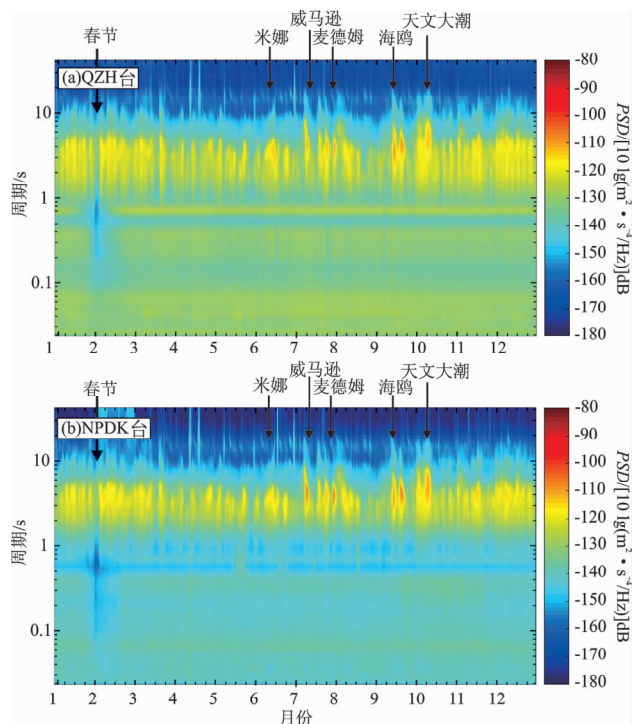


图7 2014年QZH和NPDK台站日变化(PDF中值统计,每天约526条PSD)

Fig. 7 Daily variability of QZH and NPDK stations in 2014 (PDF median statistics, about 526 PSD per day)

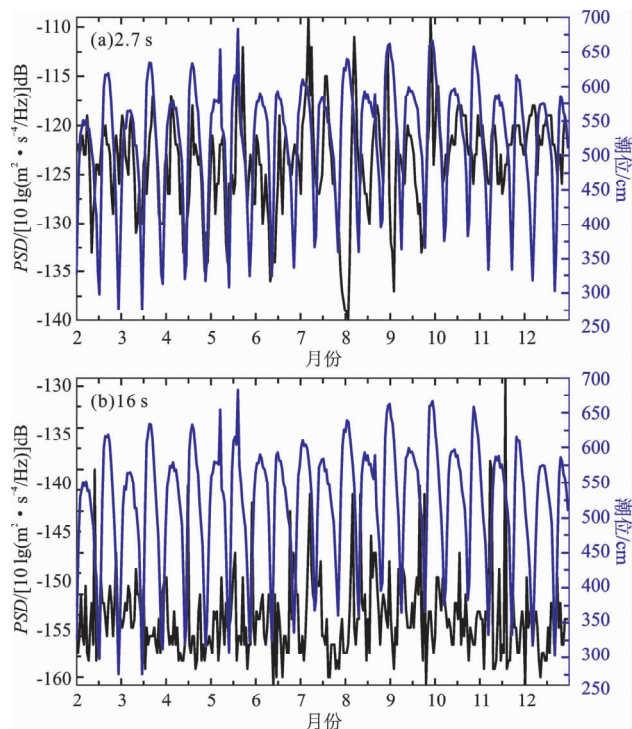


图8 2014年QZH台日变化与潮汐的关系

Fig. 8 Relationship between diurnal variation of QZH stations and tides in 2014

2.3 地区特性分析

为了更直观分析福建环境噪声平均水平地区分布特性, 将各台站人文噪声对应的 0.4 s 和海洋

次级微震对应的 2.7 s 年平均 PSD 值减去对应的 NLNM 值后, 插值在 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 的网格点上, 得到如图 9 和图 10 所示的福建地区环境噪声水平

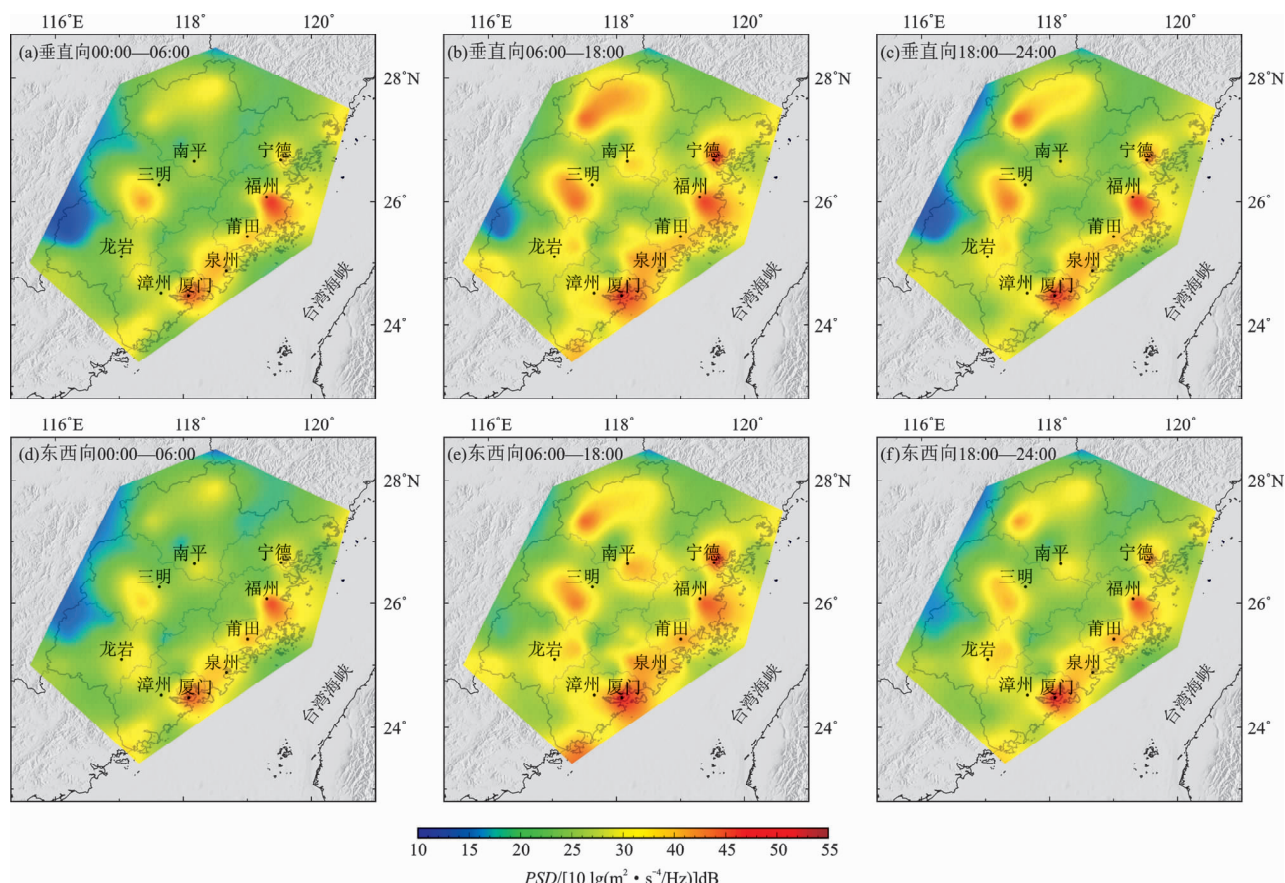


图 9 福建地区背景噪声 0.4 s 年平均均值高于 NLNM 值的 PSD 分布图

Fig. 9 PSD distribution of the annual average 0.4 s background noise is higher than the NLNM in Fujian area

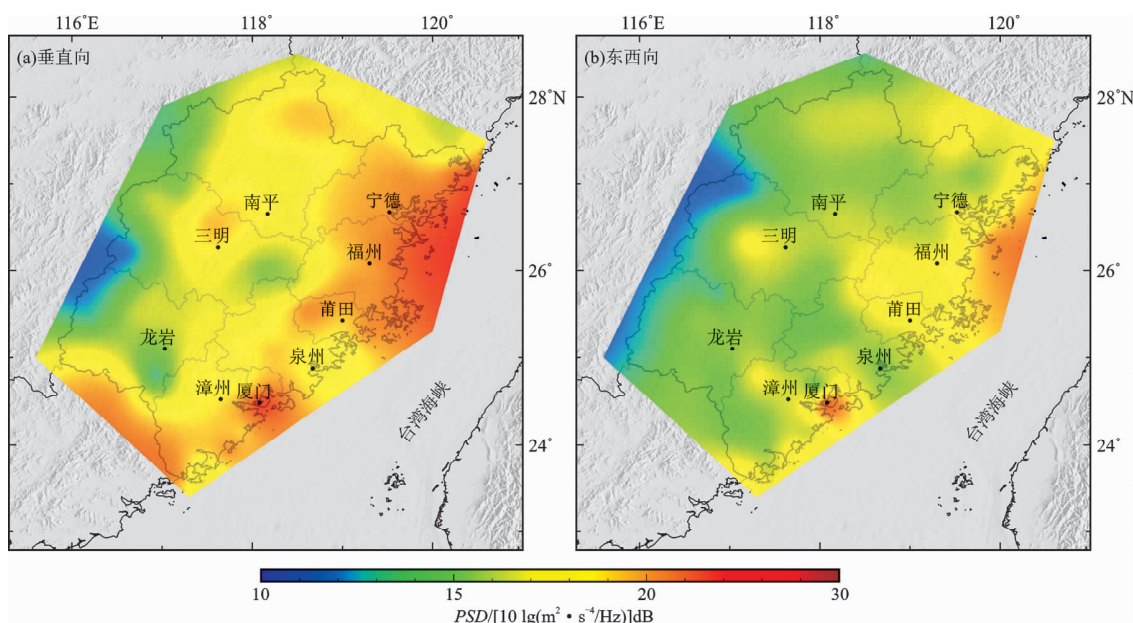


图 10 福建地区背景噪声 2.7 s 年平均均值高于 NLNM 值的 PSD 分布图

Fig. 10 PSD distribution of the annual average 2.7 s background noise is higher than the NLNM in Fujian area

分布图。由图可得:

(1) 高频和短周期段噪声平均水平日变化除了在春节期间大幅下降外,均处于较为稳定态势,这现象在福建测震台网所有台站计算结果均有反映。另外,对比沿海台站和内陆台站结果,均显示福建沿海该频段范围内平均噪声水平高于内陆,这仍说明了人为干扰是环境噪声高频和短周期段的主要来源。

(2) 前人的研究表明(Tanimoto, 2007; Yao, Hilst, 2009),次级微震形成的地脉动信号主要由 Rayleigh 波组成。次级微震最高地区也位于沿海一带,向内陆方向呈衰减趋势,垂直向比水平向高,也反映了该段噪声主要成分是 Rayleigh 波。

3 结论

通过计算 2014 年福建地震台网宽频带地震仪连续观测数据的功率谱概率密度函数,可知福建地区 2 次微地震主频约为 2.7 s,原生微地震主频约为 16 s,针对福建地区环境噪声特性进行分析,可得:

(1) 时变特性。高频和短周期段于 07:00—18:00 的功率谱密度要明显高于其它时间段,在 12:00 左右则出现间歇性低谷期,夜间有不同程度的降低,这种特征和人类的作息规律一致,表明高频和短周期段噪声属人文噪声;微震和长周期段噪声水平随当地时间基本保持不变。

(2) 日变特性。高频和短周期段噪声平均水平日变化除了在春节期间大幅下降外,均处于较为稳定态势;微震和长周期段噪声水平日变化明显,与台风和潮高有较高的相关性。

(3) 地区特性。人文噪声最高的地区位于福建沿海福州至厦门一带,该地区是福建经济和工业最为发达地区,也是人口密集地带;次级微震最高地区也位于沿海一带,向内陆方向呈衰减趋势,垂直向比水平向高,也反映了该段噪声主要成分是 Rayleigh 波。

两位审稿老师给出了宝贵意见,福建省地震局监测中心提供了所需的地震噪声数据,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 葛洪魁,陈海潮,欧阳飏,等. 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.
- 金星,康兰池. 2007. 利用宽频带速度记录的频域特征研究台风[J]. 自然灾害学报, (4): 27–35.
- 李孝宾,陈佳,高琼,等. 2017. 利用噪声功率谱密度的统计特征评价台站对主动源信号的接收效能[J]. 地震研究, 40(4): 572–580.
- 廖诗荣,陈维雯. 2008. 应用概率密度函数方法自动处理地震台站勘选测试数据[J]. 华南地震, 28(4): 82–92.
- 林彬华,金星,廖诗荣,等. 2015. 地震噪声异常实时监测[J]. 中国地震, 31(2): 281–289.
- 刘旭宙,沈旭章,李秋生,等. 2014. 青藏高原东北缘宽频带地震台阵远震记录波形及背景噪声分析[J]. 地球学报, 35(6): 759–768.
- 吴建平,欧阳飏,王未来,等. 2012. 华北地区地震环境噪声特征研究[J]. 地震学报, 34(6): 818–829.
- 徐嘉隽,廖诗荣,张红才,等. 2010. 福建测震台网观测数据质量检测软件研究[J]. 华南地震, 30(4): 97–104.
- 杨龙翔,王志铄,贾潔昭,等. 2015. 河南省测震台网背景噪声特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 35(3): 543–546.
- Diaz J, Villasenor A, Morales J, et al. 2010. Background noise characteristics at the IberArray broadband seismic network[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(2): 618–628.
- Hasselmann. 1963. A statistical analysis of the generation of microseisms[J]. Reviews of Geophysics, 1(2): 177–210.
- Haubrich R A, McCamy K. 1944. Microseisms; coastal and pelagic sources[J]. Reviews of Geophysics, 7(3): 539–571.
- Hillers G, Ben-Zion Y. 2011. Seasonal variations of observed noise amplitudes at 2~18 Hz in southern California[J]. Geophysical Journal International, 184(2): 860–868.
- Longuet-Higgins M S. 1950. A Theory of the Origin of Microseisms[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical & Engineering Sciences, 243(243): 1–35.
- McNamara D E, Boaz R I. 2005. Seismic noise analysis system, power spectral density probability density functions; standalone software package[R]. US Geol Surv Open File Report, 1438.
- McNamara D E, Raymond P B. 2004. Ambient noise levels in the continental United States[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(4): 1517–1527.
- Peterson J. 1993. Observations and Modeling of Seismic Background Noise[R]. US Geol Surv Tech Report, 94.
- Ringler A T, Hutt C R. 2010. Self-noise models of seismic instruments[J]. Seismological Research Letters, 81(6): 972–983.
- Tanimoto T. 2007. Excitation of microseisms[J]. Geophysical Research Letters, 34(5): 247–260.
- Webb S C. 1998. Broadband seismology and noise under the ocean[J]. Reviews of Geophysics, 36(1): 105–142.
- Wilson D. 2002. Broadband Seismic Background Noise at Temporary Seis-

- mic Stations Observed on a Regional Scale in the Southwestern United States[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(8):3335–3342.
- Withers M M, Aster R C, Young C J, *et al.* 1996. High – frequency analysis of seismic background noise as a function of wind speed and shallow depth[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(5):1507–1515.
- Yao H, Hilst R D V D. 2009. Analysis of ambient noise energy distribution and phase velocity bias in ambient noise tomography with application to SE Tibet[J]. *Geophysical Journal International*, 179(2):1113–1132.

Study on Ambient Noise Characteristics in the Fujian Region

CAI Huiteng^{1,2}, CHEN Yong¹, JIN Xing², XU Jiajun², XU Yihe³, LI Wen⁴

(1. *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210008, Jiangsu, China*)

(2. *Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, Fujian, China*)

(3. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100810, China*)

(4. *Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450003, Henan, China*)

Abstract

In order to enhance the understandings of characteristics of seismic noise and improve observation qualities of fixed or mobile seismic stations in Fujian region, we use continuous waveforms of broadband seismograph in Fujian region in 2014 to calculate the power spectral probability density function (PDF), and discuss the influencing factors and space – time features of PDF in different frequencies. The results show that, the areas with the highest human activity related noise are located in Fuzhou – Xiamen area along the coast of Fujian province. The power spectral density at 07: 00—18: 00 is obviously higher than other times, and an intermittent trough shows at around 12: 00 and decreases to different extent during night time. Except a sharp drop during the Spring Festival holidays, the diurnal variation was quite stable. The main component of the secondary microtremors in Fujian region is Rayleigh wave with a dominant frequency of about 2.7 s, while the dominant frequency of the primary microtremors is about 16 s. The highest level of the secondary microtremors mean level is also located in the coastal area, and tends to decay inland. There is an obvious diurnal variation for the secondary microtremors and it is highly correlated with typhoon and tidal height.

Keywords: Fujian region; ambient noise; power spectral density; probability density function; temporal – spatial characteristics