

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020051501

南海东部次海盆地地震背景噪声分析

刘亚楠^{1,2,3}, 刘保华^{3,4}, 刘晨光^{2,3}, 华清峰^{2,3}, 颜文华⁵

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
2. 自然资源部第一海洋研究所海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061
4. 国家深海基地管理中心, 青岛 266100
5. 陕西省地震局, 西安 710068

摘要: 背景噪声的强弱是影响地震台站观测的一个重要因素。获取背景噪声的分布特征对评估海底地震仪记录数据质量及对数据的降噪处理均具有重要的指示意义。利用概率密度函数方法获取台站数据的功率谱密度的概率分布特征并与全球背景噪声高值模型和低值模型进行对比是研究台站周围环境背景噪声水平的有利手段。本研究基于南海大规模的被动源海底地震仪台阵长期观测实验的部分数据, 利用概率密度函数方法研究了南海的背景噪声。首先, 在全频段上对背景噪声进行了分析, 并与其他台站做了对比, 发现海洋的背景噪声在微震段和低频段大于高值模型且在全频带上远大于陆基台站的背景噪声, 这表明海底地震仪数据质量并不高; 其次, 对观测过程中出现的地震事件以及其他典型信号的概率密度分布进行了归纳总结, 发现远震事件、近震事件和数据丢失现象分别具有不同的优势频段和特征, 这对后续滤波处理和质量检查具有重要指示意义; 最后, 研究了背景噪声的时间变化特征, 发现台风是导致微震段时间变化的主要原因。

关键词: 海底地震仪; 背景噪声; 概率密度函数; 南海

中图分类号: P738 **文献标识码:** A

Research on seismic background noise in the Eastern Subbasin of the South China Sea

LIU Yanan^{1,2,3}, LIU Baohua^{3,4}, LIU Chenguang^{2,3}, HUA Qingfeng^{2,3}, YAN Wenhua⁵

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China
3. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China
4. National Deep Sea Center, Ministry of Natural Resources of China, Qingdao 266100, China
5. Seismological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China

Abstract: The intensity of background noise is an important factor that affects the observation of seismic stations. Acquiring the characteristics of the background noise is of great significance to the evaluation of the quality of the data recorded by the Ocean Bottom Seismometer (OBS) and the noise reduction of the recorded data. Using the Probability Density Function (PDF) method to obtain the probability distribution characteristics of the Power Spectral Density (PSD) of the recorded data and comparing them with the results of new high-noise model (NHNM) and new low-noise model (NLNM) is a favorable method to research the background noise level around the station. Based on the long-term observation data of a large-scale passive source OBS array in the South China Sea (SCS), the background noise in the SCS is studied by using the PDF method. Firstly, the background noise in the whole frequency band is analyzed and compared with that from other stations. It is found that the background noise in the ocean is greater than the NHNM in the microseisms and low frequency band, and far greater than the background noise of the land-based station in the whole frequency band, which indicates that the data quality of the OBS is poor. Secondly, the probability density distribution of the earthquakes and other signals in the observation process is summarized, and it is found that the teleseismic, near earthquake and data dropout signal have different dominant frequency bands respectively, which has important significance for

资助项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目“海洋地质过程与环境”(U1606401); 全球变化与海气相互作用专项“西太平洋俯冲带及弧后盆地体系”(GASI-GEOGE-02), “OBS 海洋环境噪声数据整编”(GASI-01-01-01-24-OBS); 中国大洋矿产资源研究开发协会项目“大西洋靶区多金属硫化物调查区综合地球物理异常与找矿应用”(DY135-S2-2-04); 泰山学者工程专项经费(tspd20161007)

作者简介: 刘亚楠(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事海洋地球物理学研究, E-mail: ouliu@163.com

收稿日期: 2020-05-15; **改回日期:** 2020-07-07. 周立君编辑

subsequent filtering processing and quality inspection. Finally, the time variation characteristics of background noise are studied, and it is found that typhoon is the main cause of time variation in microseisms period.

Key words: ocean bottom seismometer; South China Sea; background noise; probability density function

地震台站的背景噪声研究是地震学研究的一个重要课题^[1-3]。Peterson 选取了全球地震台网中的 75 个地震台,利用它们记录的背景噪声数据,构建了著名的全球背景噪声高值模型和低值模型^[4]。Mcnamara 和 Buland 在传统的噪声功率谱密度分析方法的基础上提出了更全时段地分析地震台站噪声的概率密度函数统计分析方法^[5]。自此,通过概率密度函数统计分析方法获取台站数据的功率谱密度的概率分布特征,并与全球背景噪声新的高模型和低模型对比,已经成为评估台站周围环境背景噪声水平的最常用手段^[6-9]。

南海东部次海盆一直是海洋地质与地球物理研究的热点地区^[10-13]。然而,海域地震台站的缺失导致天然地震学方法在此区域的应用一直存在很大的限制。例如,前人的研究多依赖南海周边的海南岛、吕宋岛和中南半岛上的陆基台站接收到的远场地震数据,故天然地震学手段的应用仅限于层析成像等方法^[14-15]。而像接收函数分析、背景噪声分析这样依赖地震台站近场接收数据的研究是无法开展的。海底地震仪的出现大大拓展了直接在深海大洋中进行天然地震观测的能力^[16-18]。海底地震仪在海床上记录到的信号包括各种类型的地震信号、背景噪声信号等。因此,海洋背景噪声水平成为影响海底地震仪地震观测质量的一个重要因素^[19]。了解海洋背景噪声的分布特征对于评估地震观测质量及后续数据处理如何降低噪声均具有重要指示意义。

国家海洋局第一海洋研究所和同济大学共同实施了南海大规模的被动源海底地震仪台阵长期观测实验。Liu 等主要对台站 HY02 的微震频段的背景噪声进行了概率密度函数统计分析,并将其众数谱曲线与陆地和洋岛台站进行了对比^[16]。Xiao 等则利用部分数据对微震频段的背景噪声进行了功率谱密度分析,并对其影响因素进行了讨论^[20]。可以看出上述研究分析均聚焦于背景噪声的微震频段,缺乏对其他频段、其他台站、特殊地震信号等的讨论和对比。因此,本研究利用上述实验的部分数据对南海的背景噪声在全频段进行了讨论,并与其他台站做了对比;同时对观测过程中出现的地震以及其他信号的概率密度分布进行了归纳总结;最后研究了背景噪声的时间变化规律。

1 数据与方法

国家海洋局第一海洋研究所和同济大学共同实施了南海第一次大规模的被动源海底地震仪长期观测实验。2012 年 4 月,项目组利用国家自然科学基金船时共享计划,由“东方红 2”科学考察船实施了海底地震仪布放航次。该实验围绕黄岩-珍珠海山链呈网状布放了 18 台海底地震仪,绝大多数台站的布放水深超过了 3500 m。2013 年 4 月,项目组利用广东海洋大学的“天龙”科学考察船组织了回收航次,成功地回收了海底地震仪。

本研究利用了该实验中的三台海底地震仪的观测数据(台站编号:HY15、HY16、HY17),三台海底地震仪的型号均为 Guralp CMG-40T。布放位置均为残留扩张脊北侧,水深超过 3500 m(见图 1 和表 1)。台站的间距约 70 km。海底地震仪虽然在海底布放了一年的时间,但受电池容量的影响,它们的有效工作时间均只有两百多天。

海底地震仪的三分量数据首先去仪器响应转换为速度记录。将连续的速度记录分割为 24 h 的数据段;再分为长度为 1 h 的数据段,按照数据段的重合率为 50% 截取,这样一天将有 48 段数据;再将 1 h 的数据段分成长度 1000 s 的数据段,按照数据段的重合率为 80% 截取,由此 1 h 可以得到 14 段数据;对每小段数据去均值和线性趋势,最后计算这一小段时间序列的速度功率谱密度。重复计算每小段的速度功率谱密度并取平均值,从而得到速度功率谱密度随频率的分布^[7]。功率谱密度的计算过程如下。

周期时间序列 $g(t)$ 的傅里叶变换可表示为:

$$G(f, n) = \int_0^n g(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

其中, n 为时间序列的长度, f 为频率。对于离散频率值 f_k , 可定义为:

$$G_k = \frac{G(f_k, n)}{\Delta t}$$

$$f_k = k/(N\Delta t) \quad k = 1, 2, \dots, N$$

Δt 为采样间隔, N 为截取时间段的采样点数。

功率谱密度定义为:

$$P_k = \frac{2\Delta t}{N} |G_k|^2$$

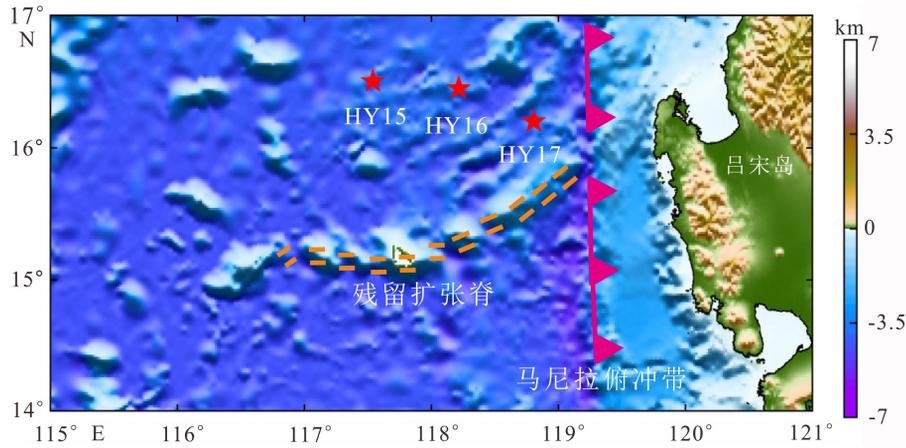


图 1 海底地震仪台站分布图

红色五角星代表海底地震仪布置位置, 橙黄色双虚线代表残留扩张脊, 粉色锋线为马尼拉俯冲带。

Fig.1 Location map of the stations

The red stars represent OBS stations, orange double dotted lines represent extinct spreading ridges, the pink solid line with triangles represents the Manila subduction zone.

表 1 南海东部次海盆台站布放资料

Table 1 The deployment data of OBS

台站编号	东经	北纬	水深/m	台站型号
HY15	117°32'	16°30'	3753	Guralp CMG-40T
HY16	118°12'	16°27'	3920	Guralp CMG-40T
HY17	118°48'	16°12'	3870	Guralp CMG-40T

为了对速度功率谱密度进行充分采样, 我们按照 1/8 倍频程间隔对整个频率周期进行重采样处理。功率值在短周期 T_s 与长周期 $T_l = 2 * T_s$ 之间进行平均, 对应的周期 T_c 为倍频程内的几何平均值:

$$T_c = \sqrt{T_s T_l}$$

T_s 按 1/8 倍频程增加, $T_s = T_s * 2^{1/8}$, 用于计算下一个间隔的平均功率。重复这一过程, 持续至原始资料时间序列长度最长的有效周期。为了便于后期与 NHRM 和 NLNM 进行对比分析, 需要将速度功率谱密度转化为加速度功率谱密度, 并将加速度功率谱密度的单位转变成分贝:

$$PSD = 10 \log(4\pi^2 f_k^2 P_k)$$

最后, 以 1 dB 为步长进行概率统计, 统计范围为 -200~-50 dB, N_f 是以 f 为中心频率的所有功率谱密度的个数, N_{df} 是频率 f 处功率谱密度在 $d \sim d + 1$ dB 范围内的个数, 则 (f, d) 处的概率密度为

$$P(f, d) = \frac{N_{df}}{N_f}$$

由此统计所有的频率, 得到功率谱密度在 -200~-50 dB 上的分布。

2 背景噪声特征

通过上述计算获得了台站 HY15 的三分量噪声功率谱密度的概率密度函数分布图, 如图 2 所示。直观来看, 在全频带范围内, 两水平分量的背景噪声水平是要高于垂直分量的。造成这种差别的主要原因是, 本研究所用海底地震仪的水平分量与海底的耦合程度受洋流或地形的影响较垂直分量差^[21-23]。Guralp CMG-40T 型海底地震仪记录的频带宽度为 50 Hz~60 s, 故将其频带宽度划分为 3 个范围来分析: 高频段(0.025~1 s, 1~40 Hz)、微震段(1~20 s, 0.05~1 Hz)、长周期段(20~50 s, 0.02~0.05 Hz)。

在长周期低频段, 三分量的噪声功率谱密度都呈现出一个明显高于 NHRM 的宽缓的峰值, 且两个水平分量的水平明显高于垂直分量。这一频带的噪声主要受洋流和极低频海浪的影响。洋流主要通过海底地震仪相互作用产生噪声, 例如, 其流过海底地震仪时会形成湍流从而影响水平分量。极低频海浪会作用于海底, 使之变形产生柔性噪声从而影响垂直分量, 而海底地震仪的倾斜又会使这些噪声泄漏到水平分量中^[24]。极低频海浪产生的次重力波仅在波长大于水深 h 的频率下才是显著的: $h=100$ m 时低于 0.12 Hz, $h=1000$ m 时低于 0.04 Hz, $h=4000$ m 时低于 0.02 Hz^[22]。

在微震段, 0.07 Hz 左右的单频微震峰的主要成因与海浪和近岸浅水区的相互撞击产生的地震能量有关, 它的频率与产生它的海浪的频率相同, 在远离

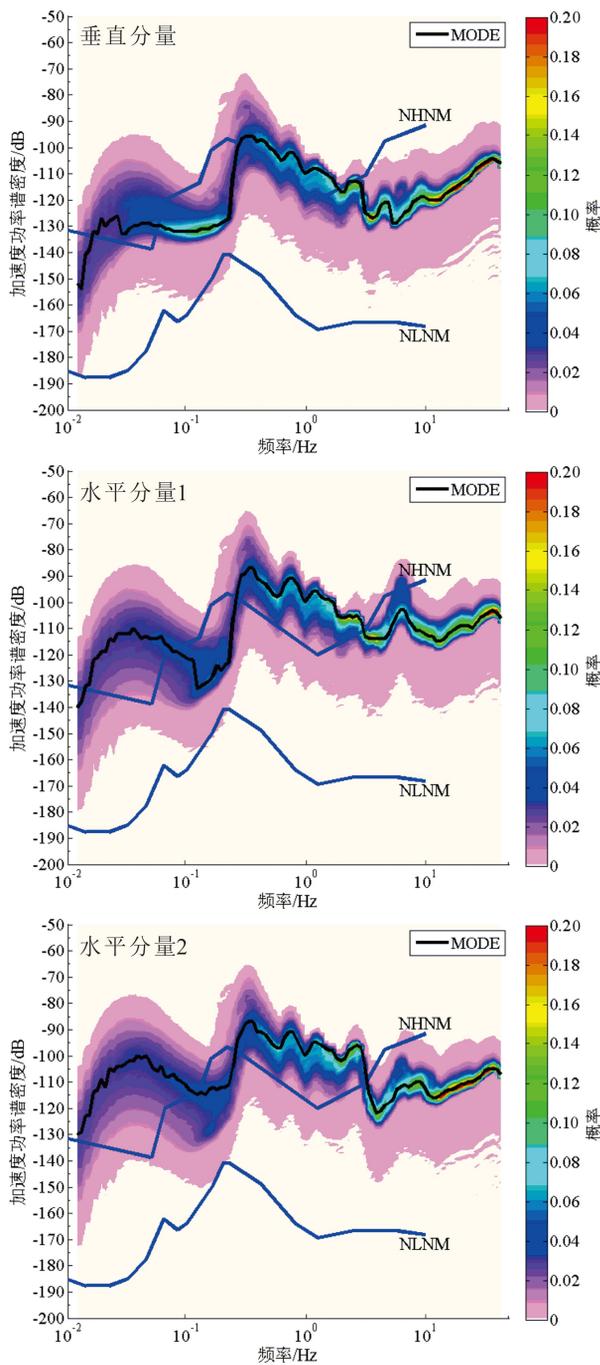


图2 台站HY15的三分量背景噪声功率谱密度的概率密度分布图

两条蓝色实线分别代表全球背景噪声高值和全球背景噪声低值；黑色实线代表众数值。

Fig.2 The PDF of station HY15

The two blue solid lines represent NHNM and NLNM.

The black solid line represents the mode value.

陆地的公海上较为微弱^[5]。台站HY15距离吕宋岛的海岸线较近,故此频率处的背景噪声水平高于NHNM。在0.3 Hz左右高于NHNM的最大峰值被称为双频微震峰,命名规则是因为它的观测频率两倍于产生它的海浪的频率。Longuet-Higgins解释了其成因,沿相

反方向传播的等周期的海浪叠加而产生半个标准海浪波周期的重力驻波,静止的重力波在水中引起扰动,这些扰动传播到洋底就是双频微震噪声^[25]。双频微震噪声有本地源(短周期,0.2~0.45 Hz)和远源(长周期,0.085~0.2 Hz)^[26-27]。本台站在微震段以0.2 Hz为界,小于0.2 Hz的噪声迅速降低意味着远源双频微震的缺失,主要原因是南海作为一个封闭的边缘海与产生远源双频微震的太平洋的联系较弱;大于0.2 Hz的双频微震噪声呈现出大的峰值,这表明本地的海浪是产生微震的主要源头。

在高频段,背景噪声水平处于NHNM和NLNM之间,在一个正常的水平范围内。高频段的背景噪声主要是人类活动引起的噪声,例如公路、铁路、工厂等产生的噪声^[7],这些噪声正是深海大洋中极度缺失的。

为了更好地分析南海东部次海盆的背景噪声水平,将台站HY15和与之距离较远的台站HY17进行了对比分析。由图3可知,在全频段上,台站HY17与台站HY15的背景噪声水平相近,表明由海底地震仪得到的背景噪声的覆盖范围是可以代表整个研究区的。但在一些频率处,两个台站仍有微小的差异波动,例如长周期段和微震段。两个台站处于同一个研究区,故台站所处的具体位置成为控制上述差异的主要因素。例如,台站HY17相比台站HY15距离海岸线更近,更容易受海浪拍击海岸的影响;台站HY17位于海山区,故相比于海盆区的台站HY15,其崎岖的海底地形会减弱海底洋流对海底地震仪的影响。

NHNM和NLNM是通过全球陆基地震台站的数据得出的,故再选取中国内陆的陕西安康台进行对比分析。由图4可知,安康台三个分量的单频微震噪声呈现出明显的峰值,双频微震的远源噪声也与NHNM和NLNM的峰值有较好的对应关系。在全频带上,安康台三个分量的背景噪声水平远远低于NHNM。本研究所用的海底地震仪与之相比,背景噪声水平明显偏高,差值最高可达80 dB。另外,海底地震仪的噪声功率谱的变化幅度明显宽于安康台,安康台的变化范围仅在众数谱线的上下10 dB内。这都表明海底地震仪的环境噪声要比陆基地震台站复杂的多,海底地震仪记录数据的质量要比陆基地震台站差的多。作为陆基固定地震台的陕西安康台,其选址、安装、入网是有严格标准的。而海底地震仪布放位置的选择往往只是考虑能否实现预期的科学目的,对于海底的观测环境的选择往往是无能为力的。

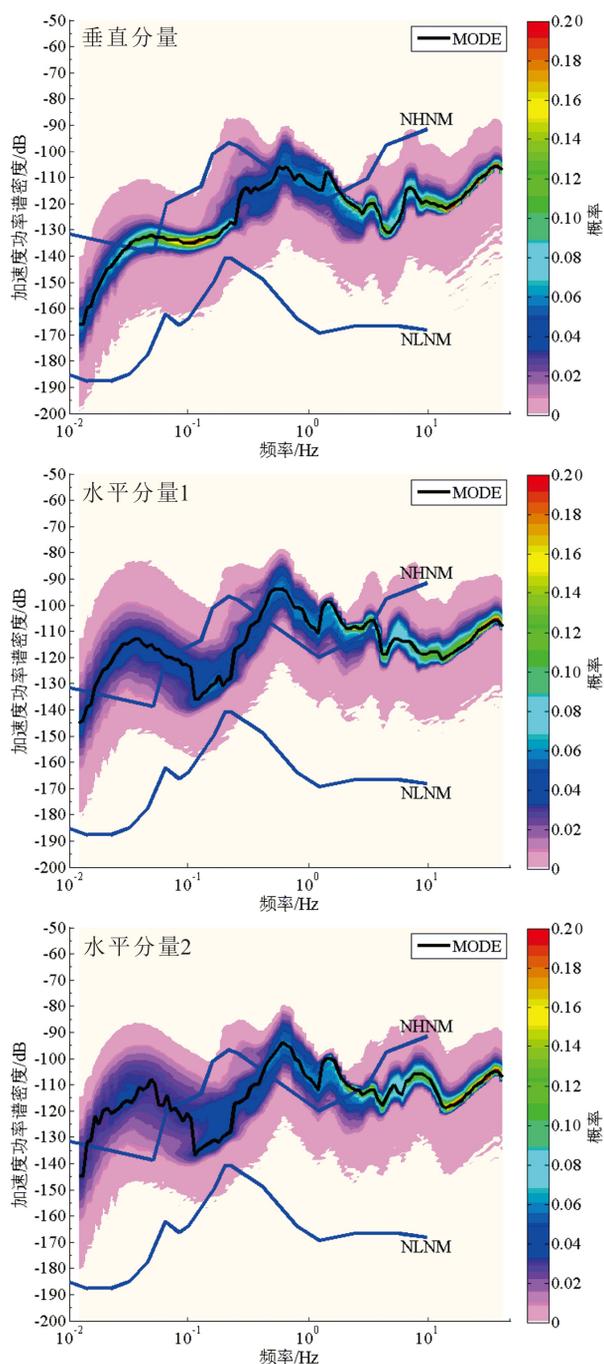


图 3 台站 HY17 的三分量背景噪声功率谱密度的概率密度分布图

两条蓝色实线分别代表全球背景噪声高值和全球背景噪声低值; 黑色实线代表众数值。

Fig.3 The PDF of station HY17

The two blue solid lines represent NHNM and NLNM. The black solid line represents the mode value.

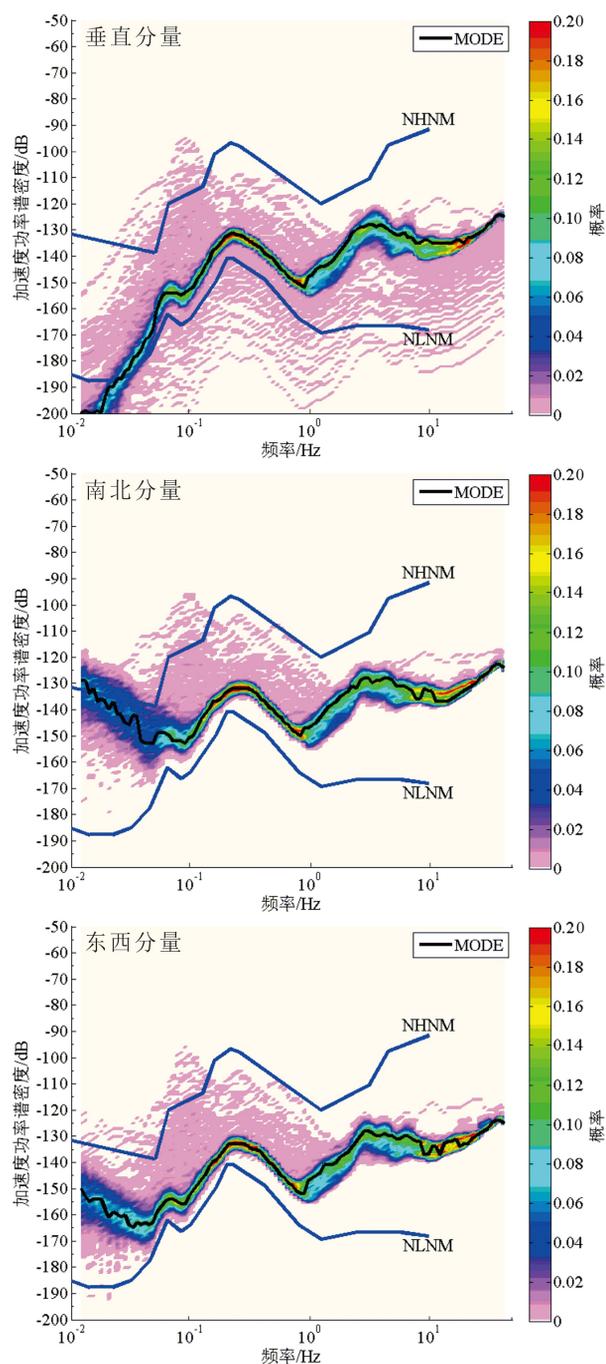


图 4 安康台的三分量背景噪声功率谱密度的概率密度分布图

两条蓝色实线分别代表全球背景噪声高值和全球背景噪声低值; 黑色实线代表众数值。

Fig.4 The PDF of station Ankang

The two blue solid lines represent NHNM and NLNM. The black solid line represents the mode value.

3 典型信号分析

传统的功率谱密度分析方法是选择一段没有地震发生、没有人为噪声产生的平静记录来评估台

站的噪声水平^[4, 28]。因此, 所谓的合理选择往往存在人为判断因素, 其结果应是局部时段有代表性的而不是全观测周期的反映台站的噪声水平, 例如, 非周期性的(地震和人为噪声)和周期性的(季节性的)突发干扰容易被人为剔除掉^[6]。而上述概率密

度函数分析方法在计算过程中不必排除地震等突发事件,不需要挑选连续平静的噪声记录,而是将记录到的连续时间信号进行统一处理,这些扰动将作为低概率事件存在于最后的统计分布中^[7]。

Guralp CMG-40T OBS 较宽的频带范围使其记录了不同周期范围的信号。因此,我们筛选了一些典型的时间序列进行了分析讨论。其中,图5展示了属于远震事件的2012年8月14日发生于鄂霍茨克海的7.7级大地震,各个震相(P、S)可以清楚分辨;图6展示了2012年10月8日发生于班达海的一个近震事件。另外,海底地震仪由于自身的原因也会产生一些特殊信号,如图7所示,海底地震仪发生数据丢失现象,波形被填充为零。

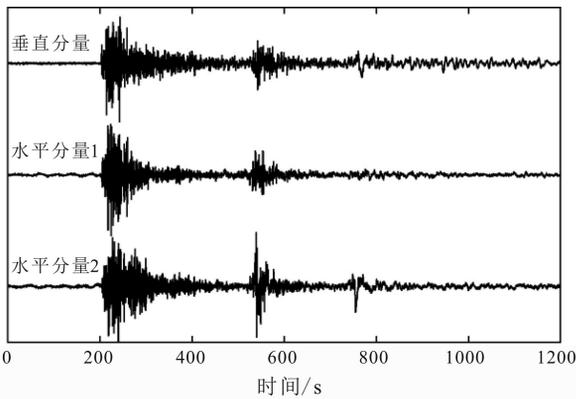


图5 台站HY16记录到的三分量远震事件波形
地震事件为2012年8月14日鄂霍茨克海发生的7.7级大地震。

Fig.5 The waveform of teleseismic of station HY16
This is a magnitude 7.7 earthquake occurred in Okhotsk Sea
on August 14, 2012.

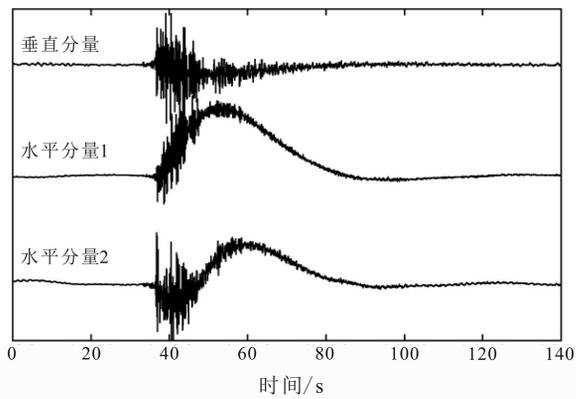


图6 台站HY17记录到的三分量近震事件波形
地震事件为2012年10月8日班达海发生的4级地震。

Fig.6 The waveform of near earthquake of station HY17
This is a magnitude 4 earthquake occurred in Banda Sea
on October 8, 2012.

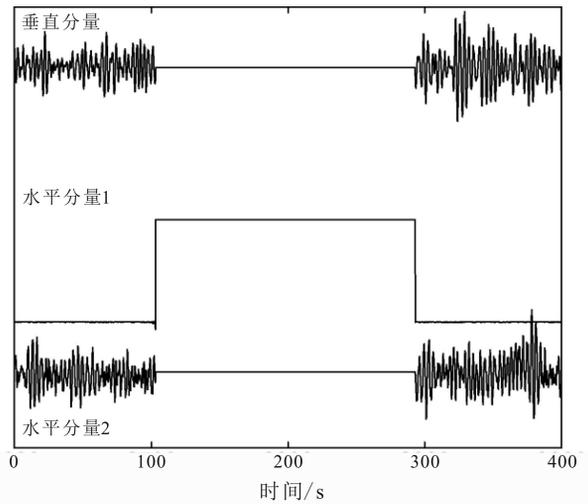


图7 台站HY15记录到的数据丢失现象
Fig.7 The data dropout signal of station HY15

由于上述波形示例的采样点数较少,将计算过程的参数进行了调整以获取正确的功率谱密度,用于揭示它们在整个概率密度分布中的位置。如图8所示,远震事件主要影响长周期低频段和微震段,与之相反的是,近震事件主要影响高频段。而数据丢失意味着没有记录任何噪声,其噪声水平在合理的范围之内,且功率谱的变化幅度较窄。

通过上一节的分析可知,海底地震仪的外部观测环境是难以改变的,理想的滤波频带选择成为数据降噪的唯一手段。因此,上述远震、近震事件功率谱的概率分布的确定对于后续滤波处理具有重要指示意义。例如,依据远震事件高于NHNM的频带范围,可以确定用于分离远震事件的带通滤波器的频率为0.02~0.15 Hz。另外,远震、近震和数据丢失现象的出现在整个观测周期内属于小概率发生事件,因此,其对整体的概率密度分布的影响是有限的,这对于数据质量的检查是具有重要意义的。例如,在不顺序检查所有记录波形的情况下,如果海底地震仪观测期内整体的概率密度分布接近数据丢失现象,是有理由怀疑此海底地震仪的数据记录出现了故障。

4 时间变化特征

将观测期内每一天的噪声功率谱密度按照日期顺序排列,可以获得台站观测期内噪声功率谱密度同时随时间和频率的变化图。图9展示了台站HY15和HY17连续记录了270多天的三分量功率谱密度时间图。可以发现,背景噪声在高频段几乎不随时间发生变化,而在微震段和长周期低频段却

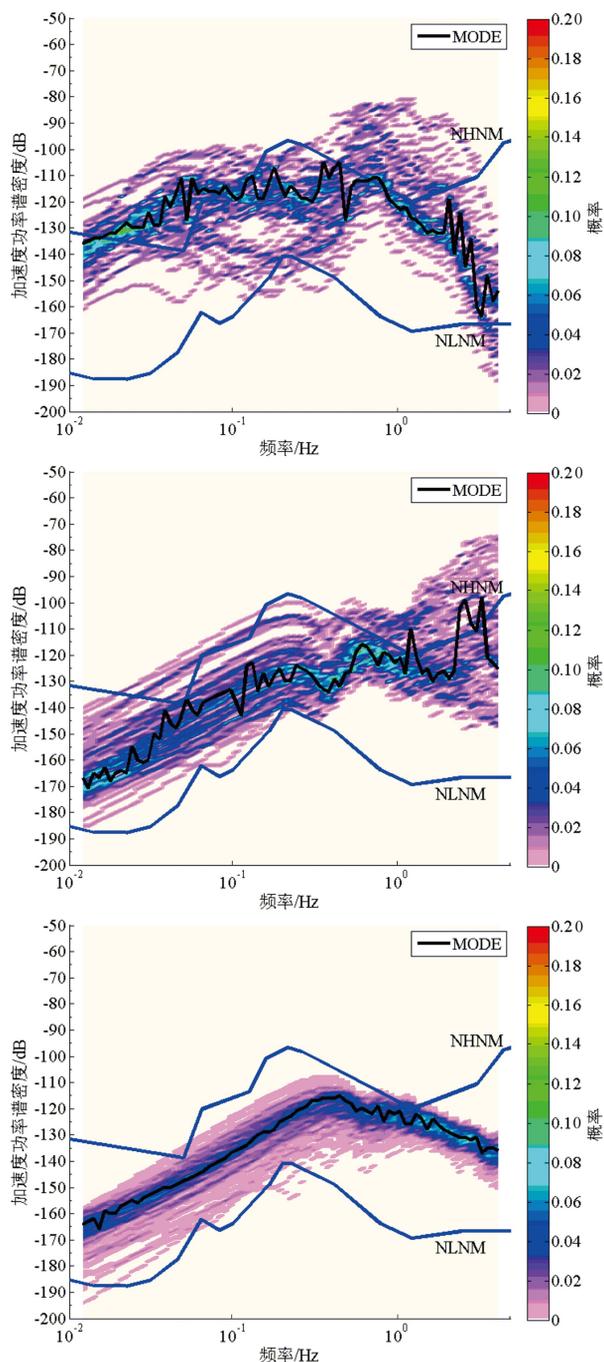


图 8 远震事件、近震事件和数据丢失现象的功率谱密度的概率密度函数分布图

其中, 上图为远震事件; 中图为近震事件; 下图代表数据丢失信号; 两条蓝色实线分别代表全球背景噪声高值和全球背景噪声低值; 黑色实线代表众数值。

Fig.8 The PDF of teleseismic, near earthquake and data dropout signal

The top panel represents teleseismic, the middle panel represents near earthquake, the bottom panel represents data dropout signal. The two blue solid lines represent NHNM and NLNM. The black solid line represents the mode value.

都显示出很大的时间变化, 例如, 儒略日 267 天存在一个明显的背景噪声增大。这揭示出影响这种变化的因素并不是人文噪声, 而是一种可以导致海浪或者洋流发生扰动的自然因素。另外, 这种时间变化的持续时间往往是一周左右, 而两次变化的间隔则长短不一。对比台站 HY15 和 HY17 可知, 两个台站的时间变化几乎是同步发生的。从图 1 可知, 两台站的间距非常大, 这揭示出造成这种变化的因素的影响范围是非常巨大的。而在海洋中能够造成这种时间变化尺度和空间影响范围的自然因素只有台风。南海是传统的台风区, 当台风影响南海或者过境南海的时候带来的巨大风浪增大了背景噪声水平。Xiao 等基于南海海盆的海底地震仪台站和周边的陆上地震仪记录的数据以及全球浪高模型, 利用功率谱密度分析、相关分析和极化分析, 对南海及其周边地区的微地动噪音源进行了定位, 对噪音的成分和传播进行了约束^[20]。他们的研究结果明确了台风对于微震的影响, 而本研究通过对背景噪声时间变化特征的分析讨论也将影响因素聚焦于台风。

5 结论

本研究基于南海东部次海盆的海底地震仪记录的数据, 利用功率谱密度分析方法、概率密度函数统计分析方法对南海东部次海盆的背景噪声进行了研究和讨论。

(1) 布放于南海东部次海盆的海底地震仪的背景噪声水平在微震段和长周期低频段高于全球背景噪声高值模型, 在全频段上高于陆基地震台的背景噪声水平, 这揭示出海底地震仪记录数据质量较陆基地震台站的数据质量差。

(2) 受背景噪声的影响, 远震事件的优势频带主要为长周期低频段和微震段, 近震事件的优势频带则为高频段, 数据丢失现象则表现为其功率谱密度位于全球背景噪声高、低值模型之间, 这对数据的降噪处理、数据的质量分析提供了重要指示。

(3) 南海东部次海盆的背景噪声在微震段和长周期低频段具有明显的时间变化特征, 此变化的持续时间、间隔和空间影响范围揭示出台风是造成这一时间变化现象的主要原因。

致谢: 感谢在被动源海底地震仪探测实验的布放航次和回收航次给予帮助的单位和个人。

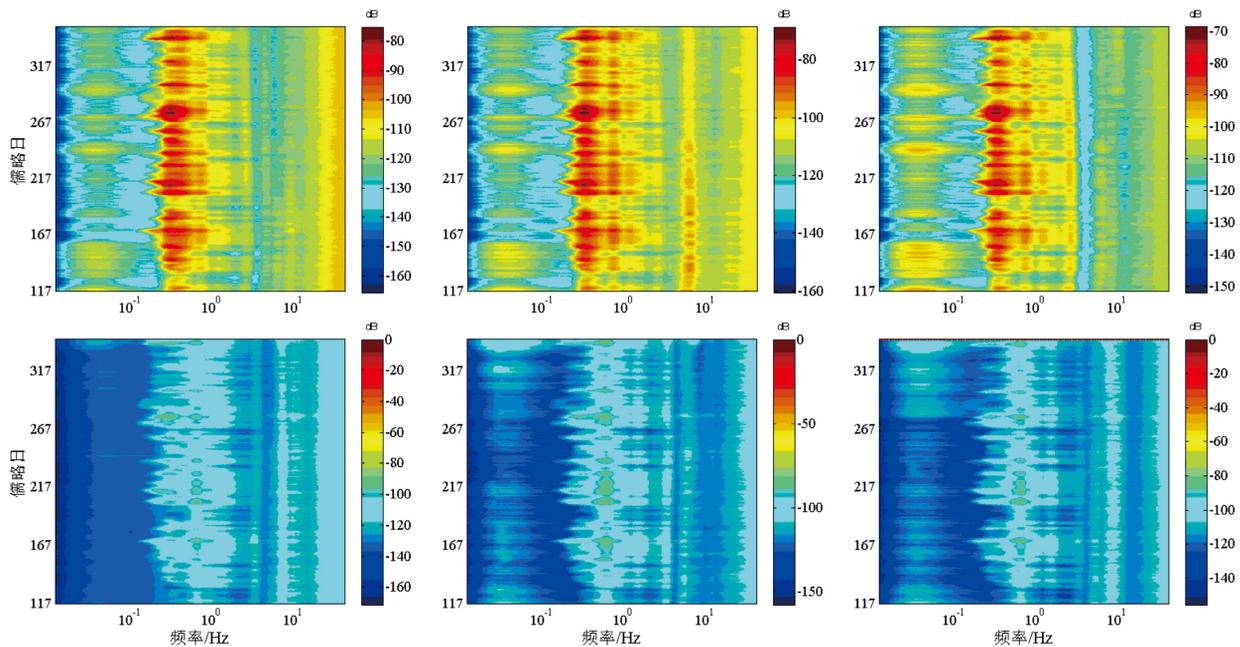


图9 台站HY15和HY17的背景噪声功率谱密度的时间变化图

其中上面3幅图为台站HY15,下面3幅图为台站HY17,从左到右分别为垂直分量、水平分量1、水平分量2。

Fig.9 The map of time variation of PSD of background noise. The above three maps are results of station HY15

From left to right, they are vertical component, horizontal component 1 and horizontal component 2 respectively. The following three pictures are results of station HY17.

参考文献 (References)

- [1] Agnew D C, Berger J. Vertical seismic noise at very low frequencies [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83 (B11): 5420-5424.
- [2] Berger J, Davis P, Ekström G. Ambient Earth noise: A survey of the global seismographic network [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B11307.
- [3] Webb S C. Broadband seismology and noise under the ocean [J]. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36 (1): 105-142.
- [4] Peterson J. Observations and modeling of seismic background noise[R]. U.S. Geological Survey Open File Report, 1993: 93-322.
- [5] 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.
- [6] 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. [WU Jianping, OUYANG Biao, WANG Weilai, et al. Ambient noise level of North China from temporary seismic array [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2012, 34 (6): 818-829.]
- [7] 葛洪魁, 陈海潮, 欧阳飏, 等. 流动地震观测背景噪声的台基响应[J]. *地球物理学报*, 2013, 56 (3): 857-868. [GE Hongkui, CHEN Haichao, OUYANG Biao, et al. Transportable seismometer response to seismic noise in vault [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56 (3): 857-868.]
- [8] 林彬华, 金星, 李军, 等. 台网噪声评估及其对气枪震源激发效果影响的研究[J]. *地震学报*, 2017, 39 (3): 330-342, 451. [LIN Binhua, JIN Xing, LI Jun, et al. Station network ambient noise level evaluation and its influence on air gun source excitation effect [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39 (3): 330-342, 451.]
- [9] 刘旭宙, 沈旭章, 张元生, 等. 基于噪声概率密度函数的地震计观测性能对比[J]. *地震学报*, 2018, 40 (4): 461-470. [LIU Xuzhou, SHEN Xuzhang, ZHANG Yuansheng, et al. Comparison on different seismometers performance based on probability density functions [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2018, 40 (4): 461-470.]
- [10] Li C F, et al. Opening of the South China Sea and its implications for Southeast Asian tectonics since the late Mesozoic[R]. IODP Proposal, 2008.
- [11] Li C F, Li J B, Ding W W, et al. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120 (3): 1377-1399.
- [12] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP expedition 349 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15 (12): 4958-4983.
- [13] Zhao M H, He E Y, Sibuet J C, et al. Postseafloor spreading volcanism in the central East South China Sea and its formation through an extremely thin oceanic crust [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19 (3): 621-641.
- [14] Lei J S, Zhao D P, Steinberger B, et al. New seismic constraints on the upper mantle structure of the Hainan plume [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173 (1-2): 33-50.
- [15] Xia S H, Zhao D P, Sun J L, et al. Teleseismic imaging of the mantle beneath southernmost China: New insights into the Hainan plume [J].

- [Gondwana Research](#), 2016, 36: 46-56.
- [16] Liu C G, Hua Q F, Pei Y L, et al. Passive-source ocean bottom seismograph (OBS) array experiment in South China Sea and data quality analyses [J]. [Chinese Science Bulletin](#), 2014, 59 (33): 4524-4535.
- [17] Laske G, Collins J A, Wolfe C J, et al. Probing the Hawaiian hot spot with new broadband ocean bottom instruments [J]. [EOS Transactions American Geophysical Union](#), 2009, 90 (41): 362-363.
- [18] Toomey D R, Allen R M, Barclay A H, et al. The Cascadia initiative: A sea change in seismological studies of subduction zones [J]. [Oceanography](#), 2014, 27 (2): 138-150.
- [19] Stähler S C, Sigloch K, Hosseini K, et al. Performance report of the RHUM-RUM ocean bottom seismometer network around La Reunion, western Indian Ocean [J]. [Advances in Geosciences](#), 2016, 41: 43-63.
- [20] Xiao H, Xue M, Yang T, et al. The characteristics of microseisms in South China Sea: results from a combined data set of OBSs, broadband land seismic stations, and a global wave height model [J]. [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 2018, 123 (5): 3923-3942.
- [21] Collins J A, Vernon F L, Orcutt J A, et al. Broadband seismology in the oceans: Lessons from the ocean seismic network pilot experiment [J]. [Journal of Geophysical Research](#), 2001, 28 (1): 49-52.
- [22] Crawford W C, Webb S C. Identifying and removing tilt noise from low-frequency (<0.1 Hz) seafloor vertical seismic data [J]. [Bulletin of the Seismological Society of America](#), 2000, 90 (4): 952-963.
- [23] Dahm T, Tilmann F, Morgan J P. Seismic broadband ocean-bottom data and noise observed with free-fall stations: Experiences from long-term deployments in the North Atlantic and the Tyrrhenian Sea [J]. [Bulletin of the Seismological Society of America](#), 2006, 96 (2): 647-664.
- [24] Araki E, Shinohara M, Sacks S, et al. Improvement of seismic observation in the ocean by use of seafloor boreholes [J]. [Bulletin of the Seismological Society of America](#), 2004, 94 (2): 678-690.
- [25] Longuet-Higgins M S. A theory of the origin of microseisms [J]. [Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences](#), 1950, 243 (857): 1-35.
- [26] Stephen R A, Spiess F N, Collins J A, et al. Ocean seismic network pilot experiment [J]. [Geochemistry, Geophysics, Geosystems](#), 2003, 4: 1092.
- [27] Bromirski P D, Duennebier F K, Stephen R A. Mid-ocean microseisms [J]. [Geochemistry, Geophysics, Geosystems](#), 2005, 6: Q04009.
- [28] Stutzman E, Roullet G, Astiz L. Geoscope station noise levels [J]. [Bulletin of the Seismological Society of America](#), 2000, 90 (3): 690-701.