

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240419001

红山地震台观测场地背景噪声模型的建立与特征*

李小军^{1,2}, 尹康达^{1,2}, 李冬圣^{1,2}, 张晓刚^{1,2}, 毛国良^{1,2}, 马旭东^{1,2}

(1. 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外观测研究站, 河北 邢台 055350; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要: 为了合理评估地震台站观测场地等级以挖掘地震观测潜力, 需要对地震台站背景噪声进行分析并获得对其特征的客观认识。使用两年的连续同址观测数据, 对红山台背景噪声进行分析, 提出天然背景噪声的提取方法。结合概率统计, 给出台站综合背景噪声区间模型(CBNM)及其典型值, 给出台站天然背景噪声区间模型(NBNM)及其典型值。研究发现CBNM的下边界在440 s至2 s的频率区间低于新低噪声模型(NLNM), NBNM的下边界在1 000 s至2 s的频率区间低于NLNM, 在低于33 s的频段NBNM整体上比CBNM低几个分贝。结果表明了天然背景噪声提取方法的有效性, 为修订由Peterson于1993年提出的全球噪声模型和建立符合我国区域特征的背景噪声模型提供了基础。

关键词: 综合背景噪声; 天然背景噪声; 典型值; 概率统计

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0969-07

Establishment and Characteristics of Background Noise Model for Observation Site of Hongshan Seismic Station

LI Xiaojun^{1,2}, YIN Kangda^{1,2}, LI Dongsheng^{1,2}, ZHANG Xiaogang^{1,2},
MAO Guoliang^{1,2}, MA Xudong^{1,2}

(1. Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Xingtai 055350, China;
2. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: To reasonably evaluate the site classification of seismic stations and tap into their seismic observation potential, it is necessary to analyze the background noise of seismic stations and obtain an objective understanding of its characteristics. Using two years of continuous co-located observation data, this study analyzed the background noise at the Hongshan station and proposed a method for extracting natural background noise. Combining probability statistics, a comprehensive background noise model (CBNM) and its typical values for the station were established, along with a natural background noise model (NBNM) and its typical values. The results indicated that the lower boundary of the CBNM was below the new low noise model (NLNM) in the frequency range from 440 s to 2 s. The lower boundary of the NBNM was below the NLNM in the frequency range from 1000 s to 2 s. In the frequency bands below 33 s, the NBNM was overall several decibels lower than the CBNM. The results

* 收稿日期:2024-04-19;修回日期:2024-06-16

基金项目:河北省地震科技星火计划(DZ2023120800013)、地震科技星火计划(XH24003A)、河北省地方标准制修订项目计划(FW202154)资助

作者简介:李小军(1981—),男,正高级工程师,硕士。主要从事地震专业仪器检测与观测场地评估研究。

E-mail:16661056@qq.com

demonstrate the effectiveness of the natural background noise extraction method, providing a foundation for revising the global noise model proposed by Peterson in 1993 and for establishing background noise models tailored to the regional characteristics of China.

Keywords: comprehensive background noise;natural background noise;typical value;probability statistics

0 引言

通常把在地震事件发生之间的,由地震台站所记录到的地面运动归为地震背景噪声,这些噪声与海浪活动、岸线变迁、气候变化、台站场地条件等存在密切联系^[1-3]。

对地震背景噪声模型的研究历史至少可以追溯到1959年,当时,J. N. Brune等^[4]发表了基于全球观测台站噪声的地震位移背景高低曲线模型。此后,J. Peterson等^[5-6]1980年基于20世纪70年代早期的地震研究观测(Seismic Research Observation,简称SRO)和高增益长周期(High-Gain Long-Period,简称HGLP)地震仪数据给出了美国地质调查局(United States Geological Survey,简称USGS)的低噪声模型(Low-noise Model,简称LNM),该模型覆盖的频段为100 s至10 Hz。该模型作为综合分析的结果,是将单个地震台站数据的功率谱图进行堆叠,在忽略窄带谱峰和谷的前提下,选取低噪声点建立。不久以后,通过分别引入重力观测数据^[7]及低噪声台站数据的分析结果^[8],又对该模型进行修订,将其覆盖的频段范围进一步拓展。高噪声模型(High-noise Model,简称HNM)是基于SRO中的沿海及岛屿台站数据给出的,方法与LNM相同。D. R. Breiding^[9]、P. W. Rodgers等^[10]和H. K. Given^[11]也发表过地震噪声研究成果,但都未形成模型。

现行的全球噪声模型(New Noise Model,简称NNM)是由J. Peterson^[12]于1993年发表,称为新低噪声模型(New Low-noise Model,简称NLNM)和新高噪声模型(New High-noise Model,简称NHNM),该模型是在当时全球地震观测仪器更新换代及地震台站分布发生变化的背景下,基于全球75个宽频带地震台站的观测数据分析得到。为了获取不同频段的噪声上下限,在建立NLNM和NHNM的过程中,分别挑选并使用到了不同采样率的数据,对分析结果进行了合成。NHNM与HNM的主要区别在于挑选数据的方法,HNM是基于一定时段的噪声最大幅值建立的,而NHNM则反映

的是高噪声场地的典型峰峰值。NLNM与LNM的差别则主要来源于观测系统的技术升级,尤其是地震计自噪声水平和数据采集器精度的改进。

上文中提到的各种地震背景噪声模型都是通过计算观测数据的功率谱,再按照一定规则对功率谱结果挑选得到的。在这些模型的建立过程中,始终有一个问题未得到重视和充分分析,即观测数据是观测场地天然背景噪声和观测系统自噪声组合的叠加结果,当组合中的任何一方发生变化时,就会导致该模型的适用性及准确性的下降。

事实上,J. Peterson^[12]已经指出随着观测技术及环境的变化,噪声模型应该得到适时修正。近年来,中国地震观测从站点布局到观测系统都发生了较大变化,NHNM及NLNM已经无法完全适应我国区域地震观测及其拓展应用的时空发展需求。

基于试验数据,本文提出了将地震背景噪声中的观测场地自然背景噪声与观测系统自噪声进行剥离的方法,并以单个台站为例,获取了观测场地综合背景噪声模型(Comprehensive Background Noise Model,简称CBNM)与天然背景噪声模型(Nature Background Noise Model,简称NBNM),并给出了对应的特征分析。

1 试验及数据挑选

在河北红山地震台使用一台Q330HRS六通道数据采集器连接两台STS2.5甚宽频带地震计作为测试仪器,该仪器组合也是IRIS及GSN很多地表型台站的测震观测专业仪器。Q330HRS六通道数据采集器的1-3通道为26位接1号地震计,4-6通道为24位接2号地震计,输入量程为 ± 20 V,STS2.5甚宽频带地震计电压灵敏度为 $1\ 500$ V/(m·s⁻¹),参数详见表1。

试验场地位于河北红山地震台观测山洞的摆墩上,该摆墩为基岩上浇筑的水泥墩。将两台地震计放在同一个摆墩上,进行长时间的同址观测试验。两台地震计的安装位置尽量靠近且方位一致,这样既可以减少由摆墩局部形变导致的重力耦合

入个别地震计某些分向的现象,还可以让两台地震计都处于可分辨信号的十分之一波长内,以达到保证两台地震计都可以拾取相同的输入地动信号的目的。

本文中用到两年的连续同址观测数据,数据采样率为 40 sps,单个数据长度为 3 h。通过筛选,剔除了含有地震事件、干扰信号、缺数补零、仪器标定等明显异常信息的数据。在计算功率谱前,对同址观测数据进行了方位校准。处理代码基于 obspy 平台^[13]和 Matlab 编写。

表 1 试验仪器参数

Table 1 Parameters of test instruments

序号	通道	转换因子/ (V/count)	地震计电压灵敏度/ (V/m/s)
1	1-3 通道	5.96×10^{-7}	1 500
2	4-6 通道	2.384×10^{-7}	1 500

2 综合背景噪声模型

使用观测数据计算功率谱^[14],对全部的功率谱结果先划分频带再进行统计分析,功率谱的计算参数组合参照 X. J. Li 等^[15]选取。具体为,先按照三分之一倍频程在 0.001 Hz 至 16.384 Hz 选取 43 个子频带中心频率,每个子频带中心频点的确定见式 (1),再对应子频带中心频点,以三分之一倍频程带宽,对全部的功率谱结果进行概率统计分析^[16-17],得到 43 个中心频点上的综合背景噪声水平概率分布情况如图 1 所示。按照概率统计结果将对应中心频点上的背景噪声结果进行加权求和,每个数值的权重为其概率值,最终获得综合背景噪声水平典型值的数学模型见图 1 中细实线。设定阈值,对每个中心频点上的综合背景噪声水平概率分布进行二次统计,得到了背景噪声区间模型的上下边界,见图 1 中的点划线。

$$f_k = 0.001 \times (2^{1/3})^{(k-1)} \quad (1)$$

式中, f_k 为按三分之一倍频程划分的中心频率点; k 为中心频率点的编号, $k = 1, \dots, 43$ 。

$$f_{k-h} = (0.001 \times (2^{1/3})^{(k-1)}) \times 2^{1/2} \quad (2)$$

$$f_{k-l} = (0.001 \times (2^{1/3})^{(k-1)}) \times 2^{-1/2} \quad (3)$$

式中, f_{k-h} 是以 f_k 为中心频点,按照三分之一倍频程进行子频带划分的频率上限; f_{k-l} 是频率下限。

$$Pr_{f_kj} = \frac{A_{f_kj}}{N_{f_k-total}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, j 为综合背景噪声水平值(变化范围为 -245 dB 至 -90 dB); A_{f_kj} 表示对应中心频点 f_k ,在 f_{k-l} 至 f_{k-h} 区间内综合背景噪声水平为 j dB 的功率谱计算结果出现的个数; Pr_{f_kj} 表示在中心频点 f_k ,综合背景噪声水平为 j dB 的功率谱计算结果出现的概率; $N_{f_k-total}$ 为 f_{k-l} 至 f_{k-h} 区间功率谱计算结果的总数。

$$PSD_{f_k-typical} = \sum_{j=-245}^{-90} j \cdot Pr_{f_kj} \quad (5)$$

$PSD_{f_k-typical}$ 是对应中心频点 f_k ,将全部的功率谱计算结果中频率范围在 f_{k-l} 和 f_{k-h} 之间的结果 j 与其对应概率 Pr_{f_kj} 相乘累加后求得值,作为 f_k 中心频点的综合背景噪声典型值,见图 1 细实线。

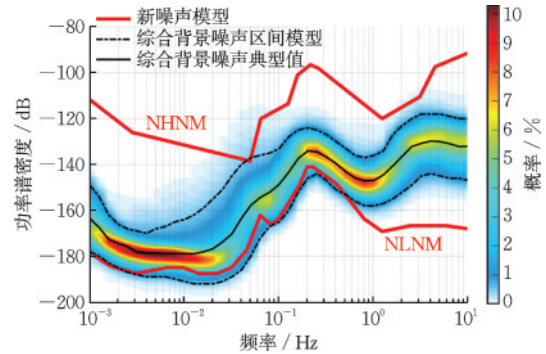


图 1 台站综合背景噪声区间模型(点划线)及典型值模型(细实线)

Fig.1 Station comprehensive background noise interval model (dashed-dotted line) and typical value model (solid line)

从分析结果看,对应每个中心频点 f_k , Pr_{f_kj} 的大小上都是随着 j 与 $PSD_{f_k-typical}$ 的差距变大而逐渐降低,为了建立综合背景噪声区间模型并体现集中性,选定累加 Pr_{f_kj} 不高于 95% 所覆盖的区域上下边界为综合背景噪声区间模型。

对应每个中心频点 f_k ,结果显示 Pr_{f_kj} 在 0.1% 到 10.3% 之间变化,设定阈值,从 0.1% 开始,以 0.1% 为步长进行调整,在每个中心频点 f_k 上,对大于阈值的 Pr_{f_kj} 进行累加,当累加结果首次小于等于 95% 时停止搜索,将此时累加所用到的 Pr_{f_kj} 对应的 j 的上下限作为综合背景噪声区间模型的上下边界,见图 1 黑色点划线。

从图 1 中可以看出,在分布区间,红山地震台的综合背景噪声主体分布与 NHNM(粗实线)和 NLNM(粗实线)所约束的范围重合度较高。相对于

NNM,CBNM(点划线)整体下移,CBNM的下限在440 s至2 s低于NLNM,其中,12 s至2 s区间CBNM的下限比NLNM低1个dB左右,在440 s至12 s区间CBNM的下限比NLNM低10 dB左右。从概率分布上看,红山地震台的综合背景噪声有2个高值区,第一个分布在800 s至40 s的频率区间,呈现为一个长的椭圆形,宽度约为10 dB;第二个分布在5 s至2 Hz的频率区间,基本覆盖了二类海洋脉动区间,其中在5 s至1.2 s区间与NNM走向基本一致,但在1.2 s至2 Hz区间出现了转折上升,宽度约为10 dB。值得注意的是,红山台在15 s左右的一类海洋脉动不明显。

3 天然背景噪声模型

基于同址观测试验,利用互相关理论,剔除互不相关的观测系统噪声,提取观测场地自然背景噪声。设定第*i*套观测系统的输出是 y_i ,地动输入是 x (由于处在同一观测基墩上,所以各个观测系统的输入 x 是相同的),观测系统传递函数是 h_i ,观测系统的自噪声是 n_i ,可以得到:

$$y_i = x \otimes h_i + n_i \quad (6)$$

式中, $i=1,2,3,\dots$; \otimes 表示卷积。

将式(6)转换到频域就可以得到:

$$Y_i = X \cdot H_i + N_i \quad (7)$$

式中, Y_i, X, H_i 和 N_i 分别为 y_i, x, h_i 和 n_i 的傅里叶变换。

在同址观测试验中,不同的观测系统自噪声之间是彼此不相关的,观测系统自噪声与观测系统的输入也是不相关的。那么就可以得到第*i*套和第*j*套观测系统输出之间的互功率谱 P_{ij} 如下:

$$P_{ij} = Y_i \cdot Y_j^* = P_{xx} \cdot H_i \cdot H_j^* + N_{ij} \quad (8)$$

式中,*表示复共轭; P_{xx} 是地动输入信号的自功率谱也就是观测场地自然背景噪声的功率谱; N_{ij} 是 n_i 和 n_j 的互功率谱,当 $i \neq j$ 时, $N_{ij}=0$,就可以推导得到:

$$P_{xx} = P_{ij} / (H_i \cdot H_j^*) \quad (9)$$

使用两年的数据计算 P_{xx} ,对 P_{xx} 按照三之一倍频程进行分频段,采用与综合背景噪声模型建立相同的概率统计方法,获得观测场地自然背景噪声区间模型以及典型值模型。

从图1和图2可以看出,在分布区间上,红山地震台的天然背景噪声主体分布与NHNM(粗实线)和NLNM(粗实线)所约束的范围重合度较高,在低

于2 s的频段出现了差异。相对于NNM,NBNM(点划线)整体下移,NBNM的下限在1 000 s至2 s区间低于NLNM,其中在12 s至2 s区间NBNM的下限比NLNM低1 dB左右,在1 000 s至416 s区间NBNM的下限紧贴且略低于NLNM,在416 s至12 s区间NBNM的下限比NLNM低2~10 dB。从概率分布上看,红山地震台的天然背景噪声同样有2个高值区,第一个分布在1 000 s至40 s的频率区间,呈现为一个长条带,宽度约为8 dB;第二个高值区分布在5 s至2 Hz的频率区间,基本覆盖了二类海洋脉动区间,其中在5 s至1.2 s区间与NNM走向基本一致,但在1.2 s至2 Hz区间出现了转折上升,宽度约为8 dB。与CBNM的结果类似,NBNM显示红山台的一类海洋脉动信号偏弱。

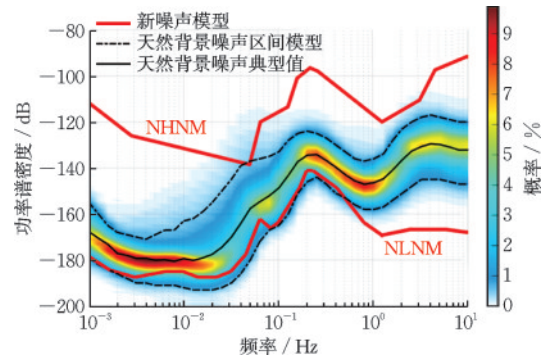


图2 台站天然背景噪声区间模型(点划线)及典型值模型(细实线)

Fig.2 Station natural background noise interval model (dashed-dotted line) and typical value model (solid line)

4 地震计自噪声模型

在提取观测场地自然背景噪声过程中,使用同址观测试验数据,利用互相关理论,剔除了互不相关的观测系统噪声,观测系统噪声主要包含地震计自噪声和数据采集器自噪声两部分,其中地震计自噪声占据主导。STS2.5甚宽频带地震计在120 s至50 Hz区间对地速度平坦,在120 s和1 000 s时的归一化幅度响应分别为0.707和0.017,具体如图3所示。

对地震计自噪声的计算,可通过同址观测试验数据,使用两台法^[18]计算,具体如下:

$$N_{ii} = \frac{1}{|H|^2} (P_{ii} - P_{ij}) = \frac{P_{ii}}{|H|^2} (1 - C_{ij}) \quad (10)$$

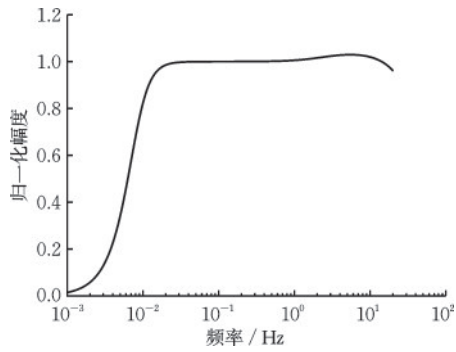


图3 STS2.5甚宽频带地震计幅频响应

Fig.3 Amplitude-frequency response of STS2.5 very broad-band seismometer

式中, $i=1$ 或 $2, j=1$ 或 2 , 且 $i \neq j$; N_{ii} 为第 i 号地震计的自噪声功率谱; P_{ii} 为第 i 号地震计的自功率谱; P_{ij} 为第 i 号与第 j 号地震计的互功率谱; C_{ij} 为第 i 号与第 j 号地震计的互相关系数; H 为地震计的归一化幅频响应。采用与综合背景噪声模型建立相同的概率统计方法, 获得 STS2.5 甚宽频带地震计自噪声区间模型以及典型值模型, 具体如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 在 1 000 s 至 10 Hz 的区间内, 地震计自噪声区间模型覆盖了一个宽为 20 dB 左右的条带区域。地震计自噪声典型值模型在 200 s 至 10 Hz 区间内低于 NLNM, 最低值为 -195.8 dB, 对应的频率为 0.064 Hz。

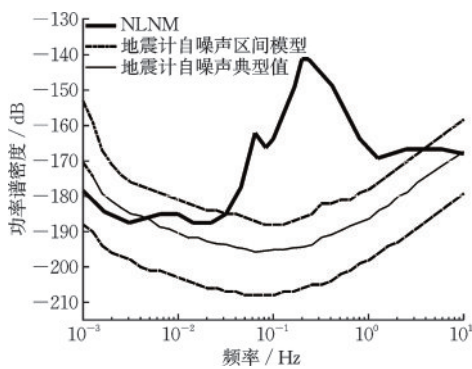


图4 地震计自噪声区间模型(点划线)及典型值模型(细实线)

Fig.4 Seismometer self-noise interval model (dashed-dotted line) and typical value model (solid line)

5 模型对比

从图 5 中可以看出, 整体上红山台综合背景噪声区间模型和天然背景噪声区间模型所约束的区

域与 NNM 重合度较高, 说明 NNM 对于红山台基本可用, 但两个区间模型的下边界均在 400 多 s 至 2 s 的频率区间低于 NLNM, 有的达到近 10 dB, 说明需要对 NNM 的下边界在部分区段进行修订以更加科学的评估观测场地和观测系统能力。

从图 5 中还可以看到, 整体上红山台综合背景噪声区间模型和天然背景噪声区间模型从约束的区域范围和形态上都很接近。两个区间模型的差异主要体现在低频段, 两个区间模型的上边界在低于 100 s 的频率区间开始分开, 并逐步扩大差异至 6 dB 左右, 两个区间模型的下边界在低于 26 s 的频率区间开始分开, 但差异稳定在 2 dB 左右。

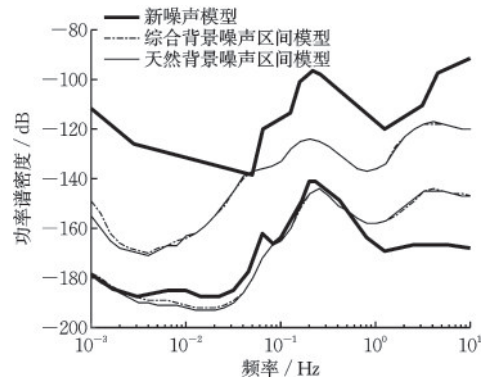


图5 台站综合背景噪声区间模型(点划线)、天然背景噪声区间模型(细实线)、新噪声模型(粗实线)比较

Fig.5 Comparison between station comprehensive background noise interval model (thin dashed-dotted line), natural background noise interval model (thin solid line), and new noise model (thick solid line)

从图 6 中可以看到, 红山台综合背景噪声典型值和天然背景噪声典型值的形态基本一致, 在高于 33 s 的频率区间, 二者数值基本一致, 在低于 33 s 的频率段, 天然背景噪声典型值开始低于综合背景噪声典型值。从图 6 和图 7 中可以发现, 在 1 000 s 至 10 Hz 的频带, 地震计自噪声典型值始终低于红山台综合背景噪声典型值和天然背景噪声典型值, 在 4 Hz 时差距最大达到 60 dB 左右, 在 1 000 s 时差距最小, 分别比红山台综合背景噪声典型值低 7 dB 和天然背景噪声典型值低 3 dB。

从图 7 中还可以看到, 在 33 s 至 1 000 s 的频段, 天然背景噪声典型值始终低于综合背景噪声典型值几个 dB, 并在 1 000 s 时达到最大 4 dB 左右。

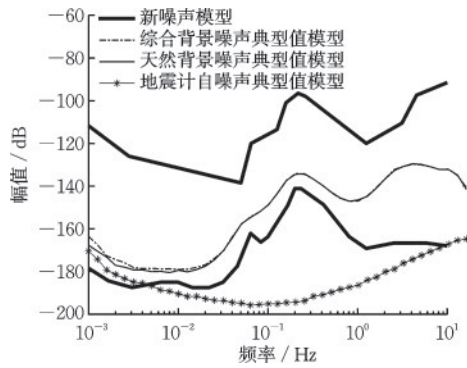


图6 台站综合背景噪声典型值(细点划线)、天然背景噪声典型值(细实线)、地震计自噪声典型值模型(星号线)比较

Fig.6 Comparison of typical values between station comprehensive background noise (thin dashed-dotted line), natural background noise (thin solid line), and seismometer self-noise typical value model (asterisk line)

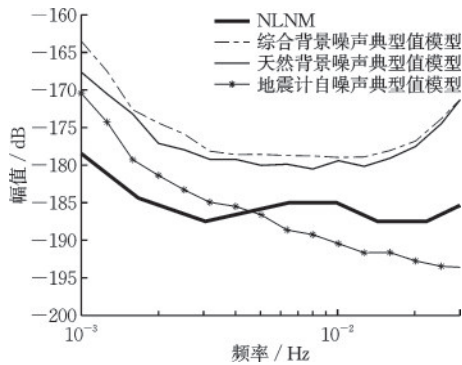


图7 台站综合背景噪声典型值(细点划线)、天然背景噪声典型值(细实线)、地震计自噪声典型值模型(星号线)局部比较

Fig.7 Partial comparison of typical values between station comprehensive background noise (thin dashed-dotted line), natural background noise (thin solid line), and seismometer self-noise typical value model (asterisk line)

6 结论

概率功率谱密度结果表明红山台综合背景噪声水平和天然背景噪声水平高概率部分主体上更接近于NLNM,说明红山台台基较好。其中存在40 s至低频、5 s至2 Hz的局部高概率区,说明该频率区内的自然背景信号能量较强,适于开展噪声成像等研究。

红山台综合背景噪声区间模型和天然背景噪声区间模型的下边界均在400多s至2s的频率区间

低于NLNM达到近10 dB,说明在低频段使用NLNM来评价红山台观测场地并不合适,需要对NLNM在部分区段进行修订以更加科学的评估观测场地和观测系统能力。

从红山台综合背景噪声和天然背景噪声的区间模型与典型值的差异对比发现,两者之前的区别主要集中在低于33 s的频段,说明观测系统噪声在低频段对观测记录的影响不可忽略,通过上文中给出的方法可以有效剥离观测系统噪声并获得对观测场地天然背景噪声水平的合理评价。

7 讨论

J. Peterson^[12]发表的新全球噪声模型是基于全球75个宽频带地震台站的观测数据分析得到,这是在当时全球地震观测仪器更新换代及地震台站分布发生变化的背景驱动下开展的一项工作,这与本文开展国内观测场地背景噪声模型提取与特征研究的背景基本一致。从研究结果看,有几个细节需要注意:

(1) 新全球噪声模型是基于全球75个地震台站的观测数据分析得到,具有当时的全球代表性;本文结果是基于红山台1个地震台站的观测数据得到的,给出的是单个台站背景噪声特征。

(2) 为了拓展频带以及找到最极限的结果,新全球噪声模型是用多种仪器多分向产生的多种采样率数据来计算得到的,本文中只用到了仪器垂直向的40 sps数据,为了拓展低频部分,采取了加大单个数据文件时间长度的方法。

(3) 在从综合背景噪声中剥离观测系统噪声并提取天然背景噪声的过程中,目前只做了一种观测系统的对比观测试验,且这种观测系统的自噪声水平在研究频段始终低于台站背景噪声水平,结果显示天然背景噪声典型值最多低于综合背景噪声典型值4 dB,换算成幅度比也就是60%左右,两者差异不大。但如果使用的观测系统自噪声水平在部分频段与台站背景噪声水平持平或是明显高于时,天然背景噪声典型值与综合背景噪声典型值是否会出现明显差异,需进一步验证。

通过初步工作,已经实现从台站综合背景噪声中有效剥离观测系统噪声并提取天然背景噪声,如何将该方法在各类台站上推广,并最终获取符合我

国区域地震观测背景噪声特征的模型,将是下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] Bernard P. Historical sketch of microseisms from past to future[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 1990, 63(3/4): 145-150.
- [2] Arduin F, Roland A. Coastal wave reflection, directional spread, and seismoacoustic noise sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117: 2011JC007832.
- [3] Arduin F, Herbers T H C. Noise generation in the solid Earth, oceans, and atmosphere, from non-linear interacting surface gravity waves in finite depth[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 716: 316-348.
- [4] Brune J N, Oliver J. The seismic noise of the Earth's surface[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1959, 49(4): 349-353.
- [5] Peterson J. Preliminary observations of noise spectra at the SRO and ASRO stations [R]. Reston: United States Department of Interior Geological Survey, 1980.
- [6] Peterson J, Hutt C R, Holcomb L G. Test and calibration of the seismic research observatory [R]. Reston: United States Department of Interior Geological Survey, 1980.
- [7] Agnew D C, Berger J. Vertical seismic noise at very low frequencies[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1978, 83(B11): 5420-5424.
- [8] Li T M C, Ferguson J F, Herrin E, et al. High-frequency seismic noise at Lajitas, Texas[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984, 74(5): 2015-2033.
- [9] Breiding D R. Seismic background noise at the norwegian regional seismic array [R]. Albuquerque: Sandia Nation Laboratories, 1987.
- [10] Rodgers P W, Taylor S R, Nakanishi K K. System and site noise in the regional seismic test network from 0.1 to 20 Hz[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, 77(2): 663-678.
- [11] Given H K. Variations in broadband seismic noise at IRIS/IDA stations in the USSR with implications for event detection[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1990, 80(6B): 2072-2088.
- [12] Peterson J. Observations and modeling of seismic background noise[R]. Reston: United States Department of Interior Geological Survey, 1993.
- [13] Breckpot R, Marzec M K. ObsPy: A python toolbox for seismology[J]. *Seismological Research Letters*, 2010, 81(3): 530-533.
- [14] Welch P D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms[J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1967, 15(2): 70-73.
- [15] Li X J, Yang D K, Xie J B, et al. Applicability of the welch method for examining self-noise level parameters for broadband seismometers[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, 6(3): 233-239.
- [16] Sleeman R, Melichar P. A PDF representation of the STS-2 self-noise obtained from one year of data recorded in the conrad observatory, Austria[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012, 102(2): 587-597.
- [17] 李小军, 谢剑波, 杨大克, 等. 基于概率统计的甚宽频带地震计自噪声水平分析[J]. *中国地震*, 2019, 35(1): 38-52.
- Li X J, Xie J B, Yang D K, et al. Analysis for self-noise level of the very broadband seismometer using probability statistic [J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 35(1): 38-52. (in Chinese)
- [18] Holcomb L G. A direct method for calculating instrument noise levels in side-by-side seismometer evaluations[R]. Reston: United States Department of Interior Geological Survey, 1989.

(本文编辑:张艺)