

林彬华,金星,黄玲珠,等.地震台站噪声水平定量评估及其在气枪源探测中的应用[J].地震工程学报,2020,42(6):1555-1564.  
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1555  
LIN Binhua, JIN Xing, HUANG Lingzhu, et al. Quantitative Assessment of Background Noise Levels of Seismic Stations and Their Application in Air-Gun Source Detection[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1555-1564. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1555

## 地震台站噪声水平定量评估及其在气枪源探测中的应用

林彬华<sup>1,2</sup>, 金星<sup>1,2</sup>, 黄玲珠<sup>2</sup>, 李军<sup>2</sup>, 张燕明<sup>2</sup>

(1. 福州大学, 福建 福州 350108; 2. 福建省地震局, 福建 福州 350003)

**摘要:**对福建气枪源探测实验中所接入 315 个实时传输台站分 1~10 Hz、0.1~1 Hz、10~60 s 3 个频段进行台网噪声水平评估研究。统计 240 个小时的背景噪声记录,得到各台站的噪声水平 MODE 线,再利用本文提出的全球新高低噪声模型线与 MODE 线所占面积比来量化台网噪声水平,根据不同色标将台网噪声水平划分为十个等级进行评估,评选出优质台站。进一步研究背景噪声对气枪激发效果的影响,验证了台站接收能力与背景噪声密切相关,分析了不同台基(固定、加密、流动、海底)环境噪声水平的影响,得出环境噪声水平由低到高分别为固定台、加密台、流动台、海底台。通过台网噪声评估能有效提高气枪震源信号的检测能力,也为优质台站重点维护提供重要参考。

**关键词:**噪声水平;噪声功率谱;全球新高低噪声模型;优质台站;气枪信号

**中图分类号:** P315

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2020)06-1555-10

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1555

## Quantitative Assessment of Background Noise Levels of Seismic Stations and Their Application in Air-Gun Source Detection

LIN Binhua<sup>1,2</sup>, JIN Xing<sup>1,2</sup>, HUANG Lingzhu<sup>2</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, ZHANG Yanming<sup>2</sup>

(1. Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

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

**Abstract:** In this study, 315 real-time transmission stations in Fujian province were accessed in the active air-gun source detection experiment. The noise levels of the network were estimated in three bands: 1-10 Hz, 0.1-1 Hz, and 10-60 s. First, the background noise records during 240 h were counted to obtain the MODE line of the noise level at each station. Then, the area ratio of the global high-noise model line and low-noise model line to the MODE line was used to quantify the noise level of the network. Based on the different color standards, we divided the noise levels of the network into 10 levels for estimation, and thereby got the high-quality stations. The influence of background noise on the explosive effect of the air gun was further studied. It is confirmed

**收稿日期:** 2019-11-04

**基金项目:**地震科技星火计划(XH18022Y);国家自然科学基金重大项目(4179460014);福建省地震局青年科技基金(Y201801)

**第一作者简介:**林彬华(1988-),男,工程师,博士,主要从事地震监测、主动源探测等方面研究。E-mail:626532175@qq.com。

that the receiving capability of the station is closely related to the background noise. We analyzed the environmental noise levels of different station bases and concluded that the environmental noise levels from low to high are fixed base, encrypted base, mobile base, and undersea base. The detection ability of the air-gun source signals would be efficiently improved by the noise assessment of the network, which would also provide an important reference for the maintenance of high-quality stations.

**Keywords:** noise level; noise power spectrum; global new high and low noise model; high quality station; air-gun signal

## 0 引言

台站背景噪声是影响地震观测质量的主要因素,高背景噪声会削弱地震台的地震检测能力、爆破识别和精确定位能力<sup>[1]</sup>。低背景噪声台可以获得高质量的地震数据,对人工地震研究、特殊的地震事件、震相识别以及定位都具有现实意义,所以研究地震台网的背景噪声对地震信号观测具有重要意义。

国内外针对背景噪声水平已有较为成熟的研究<sup>[2-10]</sup>,美国 USGS 的 Peterson<sup>[11]</sup>及其小组观测和研究了全球正常地球背景噪声,研究结果以噪声功率谱表示,确定了地球高噪声新模型(NHNM)和地球低噪声新模型(NLNM)。McNamara 等<sup>[12]</sup>提出了环境背景噪声概率密度函数(Probability Density Function, PDF)方法,该方法可用于台站噪声水平勘测和地震数据质量评定。葛洪魁等<sup>[13]</sup>使用 PDF 方法研究了流动观测背景噪声台基响应及噪声特征,对地震台阵背景噪声进行了评估和影响因素分析。当前固定台站已经有了相应的国家标准和规范<sup>[14]</sup>,规定环境地噪声水平等级划分成 I、II、III、IV、V 五个等级,其中: I 级环境地噪声水平:  $Enl_{dB} < -150 \text{ dB}$ ; II 级为  $-150 \text{ dB} \leq Enl_{dB} < -140 \text{ dB}$ ; III 级为  $-140 \text{ dB} \leq Enl_{dB} < -130 \text{ dB}$ ; IV 级:  $-130 \text{ dB} \leq Enl_{dB} < -120 \text{ dB}$ ; V 级为  $-120 \text{ dB} \leq Enl_{dB} < -110 \text{ dB}$ 。通常建在基岩的台站环境地噪声不大于 II 级低噪声水平,即  $Enl_{dB} < -140 \text{ dB}$ 。一些布设在土层、松软土质的流动台环境噪声会较高,可以达到 III、IV 级,特别是布设在海里的台站环境噪声更有可能达到 V 级。现行噪声等级划分标准是符合固定台、流动台、海里台的噪声等级划分,但是考虑到本文选取分析的台站绝大多数为固定台网,台站噪声水平多集中在 I、II 两个级别,若采用以上 5 个等级进行评估较难反应出台站间的噪声差异,使得台站噪声评估结果较粗糙。因此,本文提出一套基于噪声功率谱面积占比法来对各台站的噪声水平进行定量评估,通过面积比量化标准将台网噪声水平由

过去的 5 个等级细分为十档进行评估,能够更好地评估台站间的噪声水平差异,噪声水平单位由分贝转化为百分比表示,可以更加直观形象的评价台站间的噪声水平。同时进一步围绕背景噪声研究气枪震源信号检测能力、台站接收能力、信噪比随震中距的衰减关系,重点分析不同台基环境噪声的影响,对进一步发展这项技术具有重要意义。

## 1 数据资料

图 1 为福建省 2017 年陆海联测实验所接入的实时传输台站,含福建台网及周边省份台网共 315 台。其中福建固定测震台网 88 台、加密台网 40 台(在原有强震台站或 GNSS 台站的台基上加密布设测震台)、流动台网 34 台(在野外浇筑的混凝土墩上布设测震台)、周边省份测震台网 153 台(包含台湾 16 台)。剔除断记、异常台站后共得 287 个台站参与研究,利用噪声功率谱概率密度函数方法对 287 个台站的 240 小时(10 天)的背景噪声记录的垂直分量进行处理。

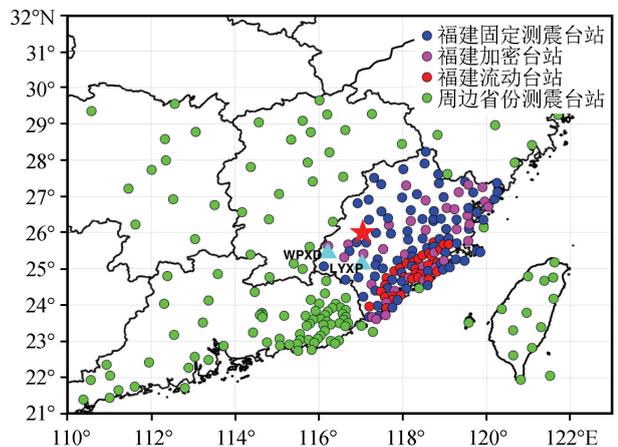


图 1 实验地震观测网台站及实验概况分布图(图中红色五角星表示安砂水库气枪主动源固定点激发位置)

Fig.1 Experimental earthquake observation stations and their distribution

选取 2017 年安砂水库气枪主动源定点连续激发 500 次记录的波形叠加结果作为研究资料。由于气枪信号的主频约为 5 Hz 左右<sup>[15-16]</sup>,因此本文统一选取 3~8 Hz 作为滤波频带。图 2 为安砂水库 500 次叠加波形的经过滤波后的共炮点图,初步估计最远可观测到 450 km,S 波能量比 P 波强。

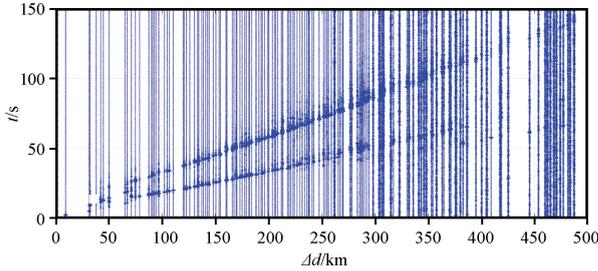


图 2 安砂水库 500 次叠加结果的共炮点图  
Fig.2 Common shot point diagram of 500 stack results of Ansha reservoir

## 2 方法介绍

通过统计一定时段的噪声垂直向记录,可以确定出各台站的噪声功率谱概率密度图(PDF 图),利用 PDF 图可以求出各个台站最大概率的噪声水平线(MODE 线),再将这些 MODE 线与全球新低噪声模型线(NLNM)比较求出噪声功率谱面积占比,确定出每个台站的噪声水平,并用百分比定量表示。

### 2.1 噪声功率谱计算

利用噪声记录计算噪声功率谱,主要包括 5 个数据处理步骤<sup>[17-18]</sup>:

(1) 记录段的选取。通常以每 5 分钟的噪声段进行截取,且为了减少 PSD 值的变化过大,对每段

记录间按 50% 的叠加率选取。记录段长度  $T_r$  是由感兴趣信号的最长周期  $T_L$  决定的,通常  $T_r$  的取值需达到  $T_L$  的 6 倍以上。因此取记录段长度 300 s,可以满足反映 50 s 低频地震噪声 PSD 值的需要。

$$T_r \geq 6T_L \quad (1)$$

(2) 速度功率谱密度值估算。对信号  $v(t)$  作傅里叶变换,

$$V(f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} v(n\Delta t) e^{-i2\pi f n \Delta t} \quad (2)$$

式中: $f=k/(N\Delta t)$  ( $k=0,1,\dots,N-1$ ); $N$  为采样点个数; $\Delta t$  为采样时间间隔; $v(n\Delta t)$  是每段原始噪声记录在时域中的数据系列; $V(f)$  是傅里叶变换得到的振幅谱。

对傅里叶振幅谱  $V(f)$  转化为功率谱,则表达式为:

$$PSD_v(f) = \frac{2}{N\Delta t} |V(f)|^2 \quad (3)$$

(3) 加速度功率谱密度的计算。速度功率谱密度  $PSD_v$  与加速度功率谱密度  $PSD_a$  的转换公式为:

$$PSD_a(f) = 4\pi^2 f^2 PSD_v(f) \quad (4)$$

式中: $PSD_v$  的单位为  $(m \cdot s^{-1})^2/Hz$ ;  $PSD_a$  的单位为  $(m \cdot s^{-2})^2/Hz$ 。

(4) 平滑处理。从图 3(a)可以看出,在高频处的功率谱锯齿起伏严重,很难观察到它的真正功率谱密度值,为了得到 PSD 在频率对数坐标中呈等间隔采样,本文采用 1/3 倍频程积分作为平滑处理:

$$PSD_a(f_c) = \frac{1}{n} \sum_{f=f_1}^{f_h} PSD_a(f) \quad (5)$$

其中:中心频率  $f_c$  以 1/9 倍频程为增加步长,即下

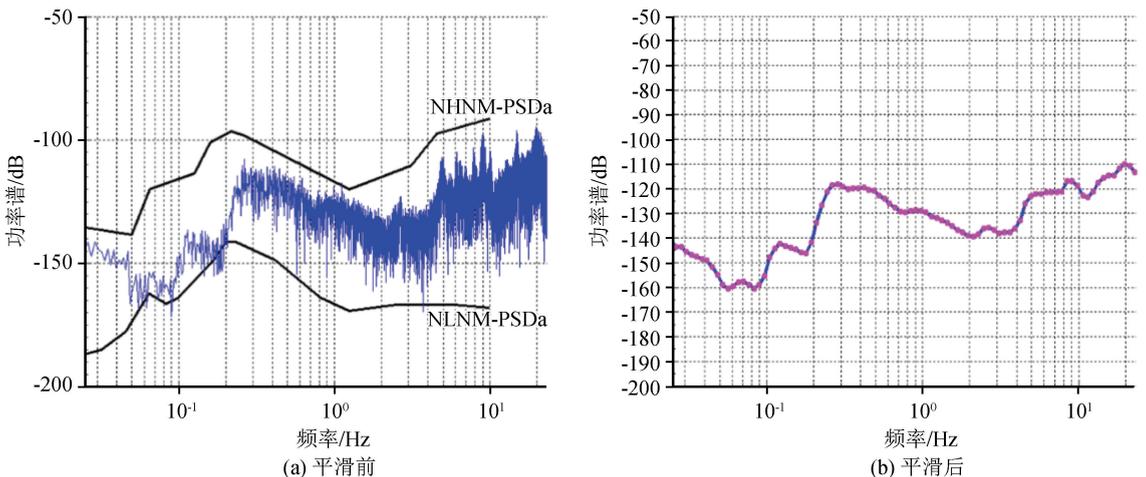


图 3 利用 1/3 倍频程积分作平滑处理

Fig.3 Smoothing processing results using 1/3 octave integral

一个中心频率  $f_c = f_c * 2^{1/9}$ 。  $f_l = f_c * 2^{-1/6}$  为低频拐角频率;  $f_h = f_c * 2^{1/6}$  为高频拐角频率;  $n$  为介于二者之间频率  $f$  的个数。  $PSD_a(f_c)$  为中心频率  $f_c$  的加速度功率谱在  $f_l$  与  $f_h$  之间的平均值。 这样在  $f_c$  的取值范围 0.02 至 40 Hz 内, 每个记录段的 PSD 值随频率变化情况可在对数坐标系呈等间隔采样的 107 个中心频率的 PSD 值来表示[图 3(b)]。

2.2 噪声功率谱的概率密度函数(PDF)计算

地震噪声可以视为平稳随机信号, 依据随机过程理论, 通常用概率统计的方法来描述随机信号。 McNamara 等<sup>[3]</sup> 提出应用概率密度函数(PDF)方法进行台站地震噪声水平监测, 该方法与以往的噪声研究方法有很大的不同, 它不要求剔除一些地震波、干扰、标定、仪器故障等波形, 而是应用概率统计方法将所有实际记录的波形都包括进去, 可以较好地反映包含仪器故障、环境影响等因素的真实台站数据质量。

噪声 PDF 的计算方法如下, 每个中心频率  $f_c$  的 PSD 概率密度函数为:

$$P_{PSD}(f_c) = N_{pic} / N_{fc} \quad (6)$$

其中:  $N_{fc}$  为  $f_c$  频点的记录段总数;  $N_{pic}$  为  $f_c$  频点的 PSD 值落在某 PSD 取值范围内的记录段个数, 通常 PSD 窗长与步长都取 1 dB, 变化范围从 -200 ~ -50 dB。 然后, 以频率为横坐标、以 PSD 为纵坐标、以  $P_{PSD}(f_c)$  为色块颜色深浅绘制三维平面图, 得到功率谱概率密度函数(PDF)分布图(图 4), 不同色块代表某频点在一定 PSD 窗内功率谱概率数。

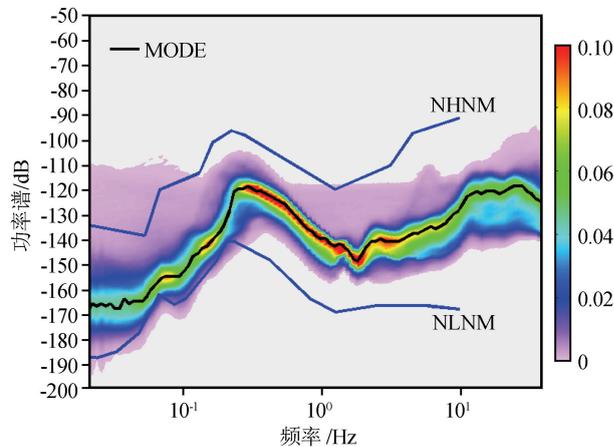


图 4 噪声功率谱概率密度函数图(PDF 图)

Fig.4 The graph of probability density function of noise power spectrum (PDF)

从 PDF 图中可以明显看出台站不同噪声水平所处的区域。 如图 4 所示, 颜色较深部分(蓝、绿、

黄、红区域)代表着台站正常噪声水平落入的区域。 颜色较浅部分(粉红色区域)代表着台站异常记录(地震波、外界噪声)所处的区域。

2.3 台站噪声水平 MODE 线确定

通过概率密度函数 PDF 图, 可以确定出台站的 MODE 线, 即各频点最大概率的连线, 代表该台站的平均噪声水平(图 4 黑线)。 通过 MODE 线与全球高低噪声模型线关系可进一步对异常台站进行剔除, 从而获得所有正常台站的噪声功率谱 MODE 线汇集(图 5)。 图中可以看出绝大多数台站的 MODE 线都落在全球高低噪声模型线之间, 侧面反映台站数据质量及仪器参数都正常, 且满足观测环境要求。

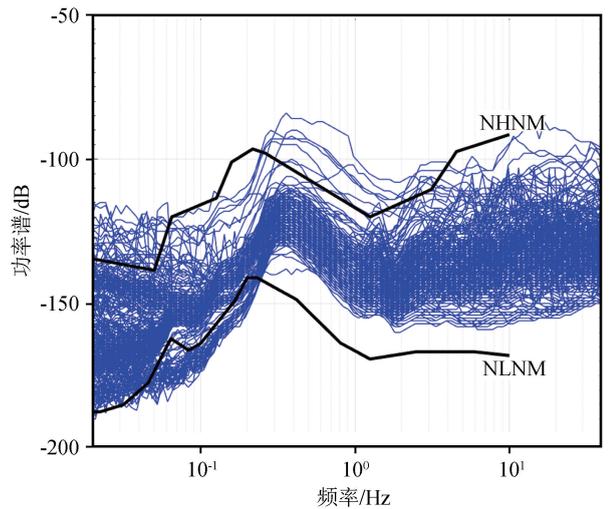


图 5 各台站噪声功率谱 MODE 线汇集图

Fig.5 MODE line convergence diagram of noise power spectrum of each station

2.4 面积占比噪声评估法

利用噪声功率谱与全球新低噪声模型线所占面积比对台站噪声水平进行量化(图 6), 并对所计算出的面积比用从 0% ~ 10%、10% ~ 20%、30% ~ 40%、40% ~ 50%、50% ~ 60%、60% ~ 70%、70% ~ 80%、80% ~ 90%、90% ~ 100% 细分为十个等级对台网噪声水平进行评估。 采用面积占比进行评估, 可以快速简便比较出台站间噪声水平高低, 这相比之前的 dB 表示来得形象、直观, 噪声等级划分更加合理。 如图 6 所示, 举例说明 1~10 Hz 频带的面积占比示意图。

台站噪声 Mode 线与全球新低噪声模型线的面积:

$$S = S_{psd} - S_{min} \quad (7)$$

全球新低噪声模型线与全球新高噪声模型线之

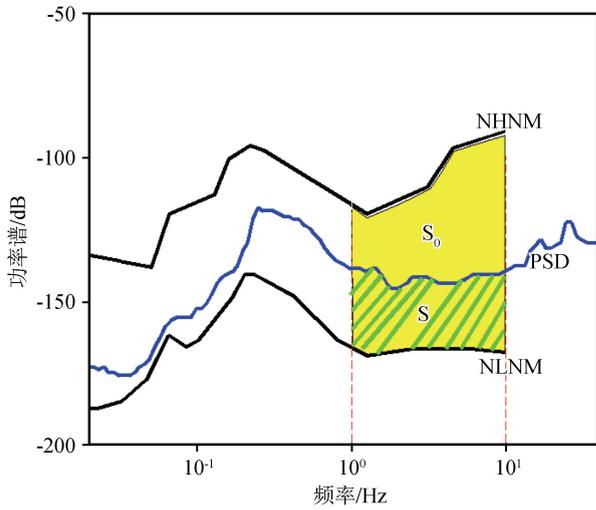


图 6 面积占比噪声评估法示意图

Fig.6 Schematic diagram of area ratio noise assessment method

间的面积:

$$S_0 = S_{\max} - S_{\min} \quad (8)$$

所以, 采用面积占比法可得出该台站的噪声水平:

$$\eta = S/S_0 \times 100\% \quad (9)$$

### 2.5 台网噪声水平评估分布图

分别对 1~10 Hz、0.1~1 Hz、10~60 s 3 个频段的垂直向分量噪声进行台网噪声水平评估, 根据不同颜色由深到浅表示台站噪声水平大小, 绘出不同颜色标注的台网分布图, 如图 7(a)~(c) 分别为 1~10 Hz、0.1~1 Hz、10~60 s 的台网噪声水平评估分布图。其中 1~10 Hz 频段的噪声多来自人为噪声干扰, 如公路、铁路、工厂、机械振动等引起的噪声<sup>[19]</sup>, 该频段也是气枪主动源激发信号感兴趣频

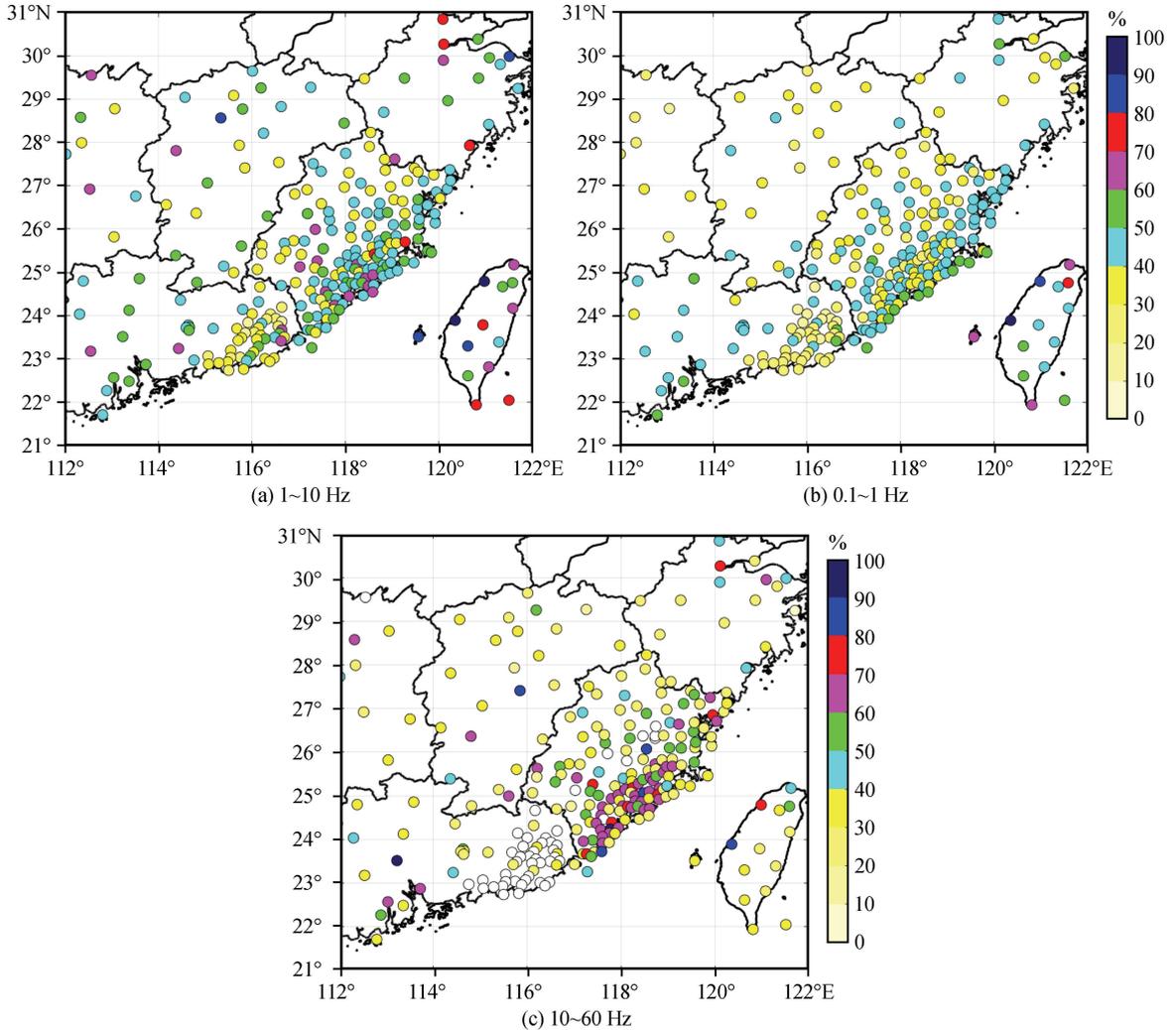


图 7 台网噪声水平定量评估分布图

Fig.7 The distribution map of the quantitative assessment of station network background noise level

带, 因此后续研究气枪激发效果影响就采用该频段的台网噪声评估结果。从图 7(a) 很好反映各台站

的环境背景噪声水平分布情况, 可以看出福建沿海台站多数噪声水平较高, 噪声水平面积占比率多达

0.5~0.7 以上;而福建内陆台站多数噪声水平较低,绝大部分低于 0.5。这主要跟沿海经济发达,人为活动较为丰富,使得部分沿海台站的环境噪声水平大于内陆台站。另外,广东沿海台阵的噪声水平较低,多数噪声水平面积占比率在 0.4 以下,主要因为这些台站多数布设在井下台基,受环境噪声的影响较小。

0.1~1 Hz 频段的噪声通常受海洋活动的影响,特别是沿海岸线区域台站受其影响更加强烈,该频段噪声在全球的地震观测台站中稳定存在,随着海洋的活动出现规律性季节变化。如图 7(b)所示福建沿海台站在该频段的噪声水平较高,特别是台湾台站表现更加明显。10~60 s 频段的噪声主要受自然因素引起,如风、急流、温度变化、地倾斜等导致长周期噪声。图 7(c)中白色空圈表示短周期仪器,

不参与该频带评估。另外可以看出福建沿海的流动台站呈现出高噪声水平,多数台站的噪声面积占比率大于 0.6 以上。这主要是因为流动台站通常布设在野外,自然环境较为恶劣,如风速高、日夜温差大等导致长周期噪声较大的缘故。

### 3 应用研究

#### 3.1 评选出优质台站

通过台网噪声水平定量评估可以确定出台网中的优质台站,可为台网维护人员对优质台站重点维护提供参考依据,保证优质台站观测数据的完整性。同时可为选取清晰、高质量的观测波形提供指导依据。

图 8 为安砂水库气枪固定点激发,50 次叠加信号波形图,震中距约为 100 km 的优质台站与非优

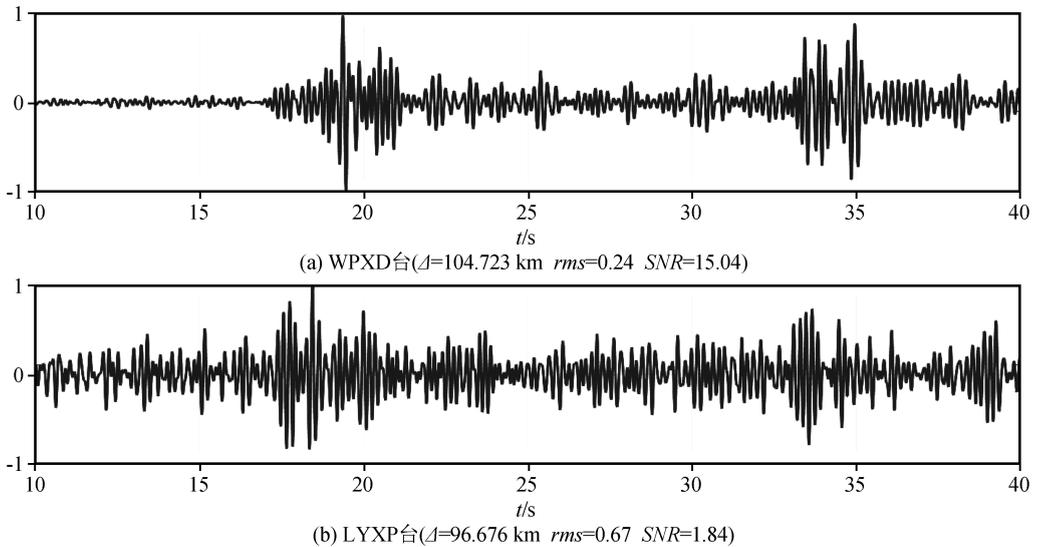


图 8 优质台站与非优质台站的观测记录比较

Fig.8 Comparison of observation records of high quality stations and non-high quality stations

质台站观测记录的比较,可以看出优质台站 WPXD 的噪声水平 0.24,记录到清晰的波形记录,信噪比为 15.04;而台站 LYXP 的噪声水平 0.67,信号几乎被噪声淹没,信噪比只有 1.84(图 1 中三角形表示台站位置)。可以说,优质台站的观测记录具有更高的信噪比,对于地下介质探测实验具有更高的价值意义。

绘出台站噪声水平面积占比率直方图(图 9),绝大部分台站的面积占比率在 0.30~0.60 之间,为了更好提取出优质台站,本文将噪声水平面积占比率低于 0.4 的评为一等优质台站,将噪声水平面积占比率 0.4~0.5 评为二等优质台站,考虑到流动加密台站与固定台网的台站属性,共评选出 20 台一等、20 台二等优质的测震固定台站列于表 1、2。气

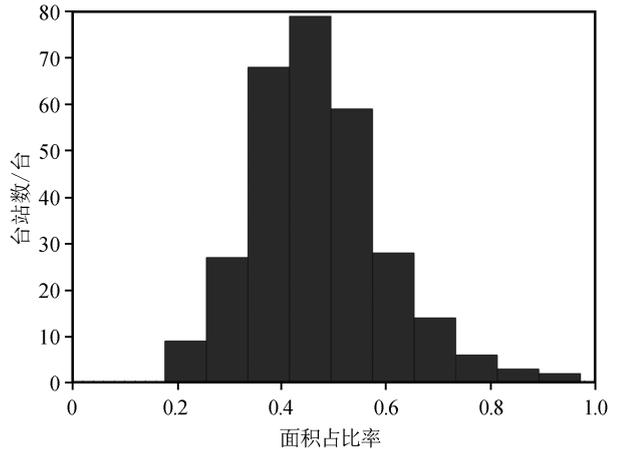


图 9 台网噪声水平面积占比率直方图

Fig.9 Histogram of area ratio of noise level in network

表 1 一等优质台站的噪声水平列表

Table 1 List of noise levels of first-class quality stations

| 台站代码 | 台站名  | 噪声水平<br>面积占比率 | 台站代码 | 台站名  | 噪声水平<br>面积占比率 |
|------|------|---------------|------|------|---------------|
| WPXD | 武平湘店 | 0.236         | PCNP | 浦城南浦 | 0.371         |
| TNSC | 泰宁杉城 | 0.333         | ZHNZ | 政和南庄 | 0.372         |
| SCLX | 顺昌岚下 | 0.336         | DHTT | 德化汤头 | 0.375         |
| JNSX | 建宁濂溪 | 0.338         | YDFS | 永定抚市 | 0.383         |
| XYXY | 仙游西苑 | 0.348         | JLNK | 将乐南口 | 0.386         |
| SNQY | 寿宁清源 | 0.350         | ZPYF | 漳平永福 | 0.390         |
| PCGL | 浦城官路 | 0.355         | FZRX | 福州日溪 | 0.391         |
| LCGT | 连城姑田 | 0.356         | SXJX | 松溪旧县 | 0.395         |
| PNTK | 屏南棠口 | 0.361         | WPPC | 武平平川 | 0.396         |
| LCJX | 连成莒溪 | 0.368         | GZLF | 光泽鸾凤 | 0.399         |

表 2 二等优质台站的噪声水平列表

Table 2 List of noise levels of second-class quality stations

| 台站代码 | 台站名  | 噪声水平<br>面积占比率 | 台站代码 | 台站名  | 噪声水平<br>面积占比率 |
|------|------|---------------|------|------|---------------|
| FACY | 福安城阳 | 0.412         | NPZH | 南平樟湖 | 0.434         |
| AXDP | 安溪大坪 | 0.414         | DHTZ | 德化唐寨 | 0.437         |
| YDXS | 永定仙师 | 0.415         | ZPGL | 漳浦古雷 | 0.437         |
| MHZQ | 闽侯竹岐 | 0.416         | XYSC | 仙游石苍 | 0.439         |
| AXCK | 安溪长坑 | 0.418         | YXBM | 尤溪坂面 | 0.441         |
| PHJF | 平和九峰 | 0.423         | CTCX | 长泰陈巷 | 0.442         |
| SXFK | 沙县富口 | 0.427         | XPSS | 霞浦三沙 | 0.444         |
| GTSK | 古田水口 | 0.430         | NPDK | 南平东坑 | 0.447         |
| NJJS | 南靖金山 | 0.432         | YTGL | 永泰葛岭 | 0.448         |
| JOJA | 建瓯建安 | 0.433         | MQXJ | 闽清雄江 | 0.449         |

枪主动源实验过程中重点确保一等台站的数据质量,兼顾确保二等优质台站数据质量,尽量多用一等台站的数据资料进行分析研究。评选出来的优质台站可为选取清晰可靠的波形,及典型台站研究分析提供重要参考依据。

### 3.2 台站背景噪声与信噪比关系

按照噪声水平高低将台站分成 3 组,如图 10 所示,横坐标表示震中距大小,纵坐标表示台站接收到信号的信噪比大小,噪声水平面积占比率小于 0.4 的台站为一组,用绿色圆圈表示,并拟合出信噪比随震中距的衰减曲线,图中绿色线;噪声水平面积占比率 0.4~0.5 的台站为一组,用蓝色圆圈表示,拟合出蓝色衰减曲线;噪声水平面积占比率大于 0.5 的台站分为一组,用紫色圆圈表示,拟合出紫色衰减曲线;可以明显看出信噪比拟合曲线由高到低分别为绿色、蓝色、紫色,对应的噪声水平面积占比率分别为小于 0.4、0.4~0.5、大于 0.5,说明噪声水平越高,信噪比越小。

### 3.3 背景噪声对气枪激发效果的影响

接下来进一步研究背景噪声对气枪激发效果的影响<sup>[20]</sup>,如图 11 为福建安砂水库气枪主动源激发

500 次叠加记录,接收到信号台站与背景噪声水平评估的空间分布图。图中将识别到信号的台站用黑色线将震中位置和台站连起来,黑线指到的台站为识别到信号台站。红色点划线圈表示 100、200、300、400 km 的位置,用于辅助查看激发传播距离。图上表明在 400 km 范围内大部分台站都能接收到

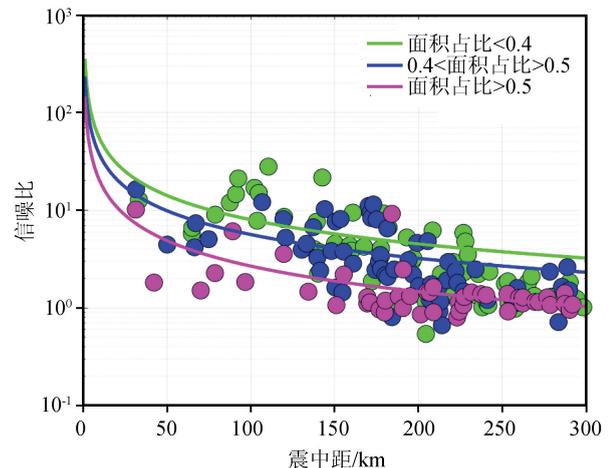


图 10 不同噪声水平的信噪比随震中距的关系  
Fig.10 The relationship between the signal-to-noise ratio of different noise levels and the epicenter distance

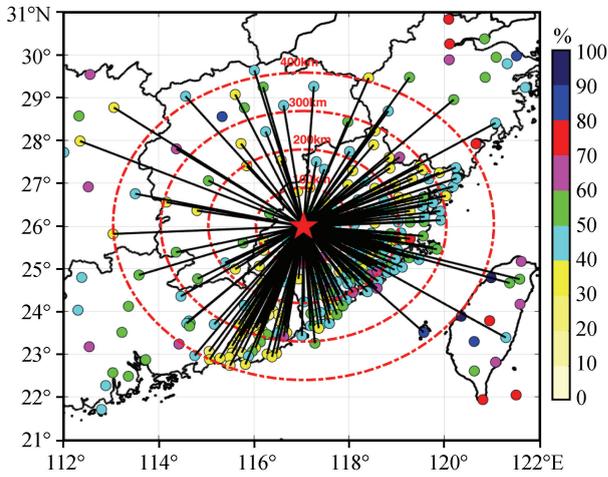


图 11 接收到信号台站与背景噪声水平评估的空间分布图

Fig.11 Spatial distribution of stations receiving signal and background noise level assessment

信号,只有个别几台噪声水平较高台站未能观测到信号(噪声水平面积占比 70%以上)。在 400 km 之外能接收到信号的台站绝大多数为低噪台站,最远观测台站为震中距 451 km 的江西井冈山台,该台站噪声水平面积占比为 33%,背景噪声水平低,因此可以观测到微弱信号。可见台站接收能力与背景噪声密切相关,低背景噪声台站接收气枪信号能力大于高背景噪声台站。

### 3.4 不同台基环境的噪声水平比较

将布设在不同台基环境下的台站噪声水平进行比较分析,主要有固定台、加密台(强震台基、GPS 台基)、流动台,另外还增加了海里 OBS 观测记录的噪声水平参与比较(图 12)。这里重点分析这几种不同台基下 1~10 Hz 频带的噪声水平情况,图中可以看出固定台站的 Mode 线比较稳定(蓝色线),有部分台站的 Mode 线达到较低水准,这是因为固定台基质量好(通常布设在基岩上),观测环境背景噪声低,因此台网 Mode 线基本处于低噪水平;强震加密台站布设在强震台网的台基上,该台基基本以基

岩为主,所以其 Mode 线水准也较低(绿色线);GPS 加密台是布设在 GNSS 台站的台基上,台站选址不如测震、强震台站严格,其 Mode 线(红色线)高于强震加密台站,噪声水平较高;流动台站通常布设在临时浇筑的混凝土墩上,台基质量较差,容易受周围环境干扰影响,故而噪声水平通常较高(紫色线);OBS 仪器是投放在海底,受海洋噪声干扰大,使得其 Mode 线(黄色线)极高,甚至高于全球高噪声模型线。基于此,不同台基的噪声水平由低到高依次为固定台、强震加密台、GPS 加密台、流动台、海里 OBS。

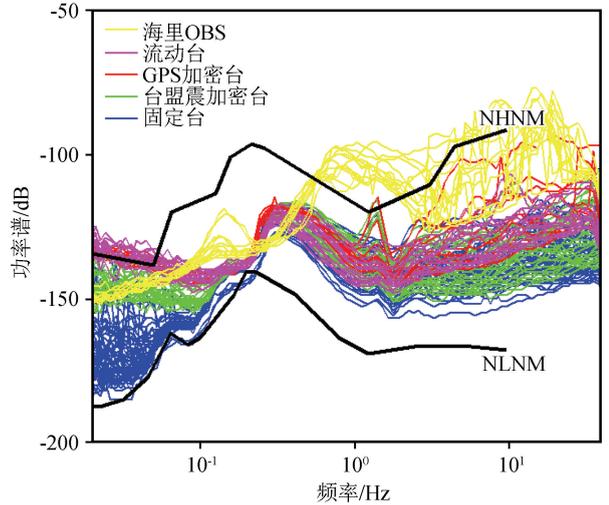


图 12 不同台基环境的噪声水平比较

Fig.12 Comparison of noise levels in different platform environments

进一步对这几类不同台基环境的噪声水平进行比较,选取不同台基台站的综合平均作为代表计算环境噪声水平  $Enl_{dB}$  和本文提出的噪声水平面积占比率,结果如表 3 所示。表中说明固定台、强震加密台和 GPS 加密台的  $Enl_{dB} < -150$  dB,属于 I 级环境噪声水平,噪声水平面积占比率分别为 0.42、0.53 和 0.61;流动台属于 III 级环境噪声水平,噪声水平面积占比率为 0.72;海里 OBS 属于 V 级环境噪声水平,噪声水平面积占比率为 0.95。

表 3 不同台基台站噪声水平的比较

|               | 固定台  | 强震加密台 | GPS 加密台 | 流动台  | 海里 OBS |
|---------------|------|-------|---------|------|--------|
| $Enl_{dB}/dB$ | -165 | -160  | -154    | -133 | -116   |
| 噪声等级          | I    | I     | I       | III  | V      |
| 噪声水平面积占比率     | 0.42 | 0.53  | 0.61    | 0.72 | 0.95   |

## 4 讨论与结论

本研究通过对福建省 2017 年气枪主动源探测

实验中所接入测震固定台、加密台、流动台及邻省测震台共 315 个台站分 1~10 Hz、0.1~1 Hz、10~60 s 3 个频段对台网噪声水平进行评估。利用 Mc-

Namara 提出的概率密度函数方法,结合网格概率自动选取技术,获得所有台站的噪声模型线,再利用全球新高低噪声模型线与噪声功率谱 PSD 线所占面积比来量化台网噪声水平,并采用不同色标将台网噪声划分为十个等级进行评估,相比以往将噪声水平划分为高、中、低 3 个等级进行评估,使得评估结果更加精细化,得到面积占比值可以定量表示台站噪声水平大小,也能更加形象直观地反映出台站间的噪声水平高低。

1~10 Hz 频段的噪声多来自人为噪声干扰,福建靠近沿海台站多数噪声水平较高,靠近内陆台站多数噪声水平较低。广东沿海台阵多数布设在井下台基,台站的噪声水平较低。0.1~1 Hz 频段的噪声通常受海洋活动的影响,特别是沿海岸线区域台站受其影响更加强烈,福建沿海台站在该频段的噪声水平较高,特别是台湾台站表现更加明显。10~60 s 频段的噪声主要受自然因素引起,由于流动台站通常布设在野外,受大风、日夜温差大等自然条件的影响,导致长周期频段呈现出高噪声状态。

根据气枪主动源的主频在 5 Hz 左右,因此选取 1~10 Hz 台网噪声评估结果评选出优质台站供后续研究使用。进一步研究背景噪声对气枪激发效果的影响,首先将噪声水平面积占比率小于 0.4、噪声水平 0.4~0.5、噪声水平大于 0.5 的台站进行分组,通过信噪比拟合曲线可以明显反映出台站噪声水平越高,信噪比越小。接着分析福建安砂水库气枪主动源激发 500 次叠加记录,接收到信号台站与背景噪声水平评估的空间分布图,得出远距离观测台站的噪声水平面积占比率通常都小于 0.4,验证了台站接收能力与背景噪声密切相关。重点分析了不同台基(固定、加密、流动、海底)环境噪声水平的影响,得出环境噪声水平由低到高分别为固定台、加密台、流动台、海底台。

通过台网噪声评估工作,一方面有效地分析气枪震源信号,另一方面台网维护人员可对低噪台站给予特别关注,及时重点维修,保证优质台站实验数据的完整性。同时生成一套规范化台网噪声水平评估流程,可以在其他省份进行推广应用。但是本文对背景噪声水平评估结果在气枪激发效果的应用研究还比较有限,还需要进一步扩展背景噪声水平评估在其他领域的应用,如在提高微震的检测能力、在台网分布优化等方面的研究。

## 参考文献(References)

- [1] 彼得·鲍曼.新地震观测实践手册[M].北京:地震出版社,2006.  
PETER Borman. New Manual of Seismological Observatory [M]. Beijing: Seismological Press, 2006.
- [2] MCNAMARA D E, BOAZ R I. Seismic Noise Analysis System Using Power Spectral Density Probability Density Functions: A Stand-Alone Software Package[R]. USGS Open File Report, 2005, 8: 1438-1452.
- [3] MCNAMARA D E, BULAND R P. An Assessment of Seismic Noise Levels for the Advanced National Seismic System Backbone Network and Selected Regional Broadband Stations[J]. USGS Open File Report, 2005, 47: 1077-1092.
- [4] SLEEMAN R. Towards An Automated Quality Control Manager for the Virtual European Broadband Seismograph Network[J]. Orfeus Newsletter, 2007, 7(1): 354-366.
- [5] MCNAMARA D E, HUTT C R, GEE L S, et al. A Method to Establish Seismic Noise Baselines for Automated Station Assessment[J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(4): 628-637.
- [6] RINGLER A T, GEE L S, HUTT C R, et al. Temporal Variations in Global Seismic Station Ambient Noise Power Levels [J]. Seismological Research Letters, 2010, 81(4): 605-613.
- [7] 廖诗荣, 陈绯雯. 应用概率密度函数方法自动处理地震台站勘测测试数据[J]. 华南地震, 2008, 28(4): 82-92.  
LIAO Shirong, CHEN Feiwen. Automated Seismic Noise Processing for Seismic Site Using Probability Density Functions Method[J]. South China Journal of Seismology, 2008, 28(4): 82-92.
- [8] 吴建平, 欧阳彪, 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.
- [9] 鲁来玉, 何正勤, 丁志峰, 等. 华北科学探测台阵背景噪声特征分析[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2566-2572.  
LU Laiyu, HE Zhengqin, DING Zhifeng, et al. Investigation of Ambient Noise Source in North China Array[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(10): 2566-2572.
- [10] 马鑫, 周云耀, 吕永清. 甚宽频带地震计噪声与环境耦合研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(2): 545-548.  
MA Xin, ZHOU Yunyao, LÜ Yongqing. Coupling Relationship between Noise of A Very Broad Seismometer and the Environment [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 545-548.
- [11] PETERSON J. Observations and Modeling of Seismic Background Noise[R]. U.S. Geological Survey. Open File Report, 1993, 32(7): 93-322.

- [12] 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.
- [13] 葛洪魁, 陈海潮, 欧阳彪, 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.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 地震台站观测环境技术要求第一部分: 测震 GB/T 19531.1-2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.  
National Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Technical Requirement for the Observational Environment of Seismic Stations-Part 1: Seismometry (GB/T 19531.1-2004) [S]. Beijing: China Standards Press, 2004.
- [15] 刘志国, 张元生, 邹锐, 等. 甘肃张掖 M5.0 地震前气枪信号走时变化研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(6): 1402-1406.  
LIU Zhiguo, ZHANG Yuansheng, ZOU Rui, et al. Travel Time Changes of the Airgun Signal before the Zhangye M5.0 Earthquake in Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1402-1406.
- [16] 黄艳丹, 李军, 金星, 等. 气枪信号触发台站的自动快速识别[J]. 地震工程学报, 2017, 39(2): 234-239.  
HUANG Yandan, LI Jun, JIN Xing, et al. Automatic Detection of Stations Triggered by Air-gun Signals [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 234-239.
- [17] 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.  
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.
- [18] 林彬华, 金星, 廖诗荣, 等. 地震噪声异常实时监测[J]. 中国地震, 2015, 31(2): 281-289.  
LIN Binhua, JIN Xing, LIAO Shirong, et al. Real-time Monitoring of Abnormal Seismic Noise [J]. Earthquake Research in China, 2015, 31(2): 281-289.
- [19] 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.  
WANG Fang, WANG Weitao, LONG Jianfeng, et al. Seismic Noise Characteristics of Broad-band Seismic Networks in Chinese Mainland [J]. Acta Seismologica Sinica, 2019, 41(5): 569-584.
- [20] 陈惠芳, 林彬华, 金星, 等. 福建南一水库气枪震源实验激发效果最优分析与研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(4): 667-676.  
CHEN Huifang, LIN Binhua, JIN Xing, et al. Study of the Optimal Excitation Effect of Air-gun Source Experiments in Nanyi Reservoir, Fujian Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 667-676.