

林彬华, 金星, 李军, 蔡辉腾, 廖诗荣, 陈惠芳. 2017. 台网噪声评估及其对气枪震源激发效果影响的研究. 地震学报, 39(3): 330-342. doi:10.11939/jass.2017.03.003.

Lin B H, Jin X, Li J, Cai H T, Liao S R, Chen H F. 2017. Station network ambient noise level evaluation and its influence on air gun source excitation effect. *Acta Seismologica Sinica*, 39(3): 330-342. doi:10.11939/jass.2017.03.003.

台网噪声评估及其对气枪震源激发效果影响的研究^{*}

林彬华^{1,2),†} 金星^{1,2)} 李军²⁾ 蔡辉腾²⁾
廖诗荣²⁾ 陈惠芳²⁾

1) 中国福州 350108 福州大学土木工程学院

2) 中国福州 350003 福建省地震局

摘要 为了研究背景噪声对长江地学气枪主动源实验激发效果的影响, 收集了 240 个台站激发前 72 小时的背景噪声数据及 20 个定点激发的叠加结果进行实验分析. 先剔除异常台站, 按照国标将台网噪声水平划分为高、中、低 3 个等级进行评估, 从而研究气枪波形信噪比与台站背景噪声的关系. 结果表明: ① 台站接收能力与背景噪声水平密切相关; ② 气枪信号的信噪比在一定范围内受背景噪声的影响大于距离衰减的影响; ③ 长江马鞍山—安庆流域段不同定点激发的场地条件基本一致; ④ 随气枪信号叠加次数的增加, 低噪台站的信噪比增长速度快于中、高噪台站, 若想获得同样的叠加效果, 高噪台站需要的叠加次数远大于低噪台站.

关键词 噪声水平 气枪震源 概率密度函数 信噪比 观测质量
doi:10.11939/jass.2017.03.003 中图分类号: P315.63 文献标志码: A

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

Lin Binhua^{1,2),†} Jin Xing^{1,2)} Li Jun²⁾ Cai Huiteng²⁾
Liao Shirong²⁾ Chen Huifang²⁾

1) College of Civil Engineering of Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

Abstract: In order to study the influence of background noise on excited effect of air gun active source experiment in the Yangtze River, we collected and analyzed ambient noise data from 240 stations with 72 hours before air gun excited, and superposition results of 20 fixed points excitation. After removing the abnormal stations, ambient noise level of the seismic network was divided into three grades including high, middle and low based on international standard for the assessment, which were used to analyze the relationship between signal to

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(41474071)和地震行业科研专项(2015419015) 共同资助.
收稿日期 2016-07-01 收到初稿, 2016-10-25 决定采用修改稿.
[†] 通讯作者 e-mail: lbhfzu@sina.com



noise ratio (SNR) of air gun waveforms and station ambient noise. The results showed that: ① the station receiving ability is closely related to ambient noise level; ② in a certain range, SNR of air gun signal is affected more by ambient noise than by the distance attenuation; ③ the field conditions of the different excited points are basically similar in Ma'anshan to Anqing river basin of the Yangtze River; ④ with the increasing of air gun signal superposition times, SNR of low noise station is growing faster than that of high noise station, that is, the high noise station needs much more superposition times to get the same result.

Key words: noise level; air gun source; probability density functions; signal to noise ratio; observation quality

引言

通常气枪主动源实验的激发效果是通过气枪激发信号的强弱来判断的,而气枪激发信号的强弱既与气枪特性、枪阵组合、水库水深、枪深和场地条件有关,也与观测站点的背景噪声水平有关。高背景噪声会削弱地震台站的地震检测能力及爆破识别和精确定位能力(Bormann, 2002),而低背景噪声台站可以获得高质量的地震数据,对人工地震和特殊地震事件的震相识别及定位都具有深远影响,因此研究地震台网的背景噪声对人工地震信号探测具有重要意义(张尉, 2008)。

台站背景噪声是影响地震观测质量的主要因素之一。地震观测台站的一个重要挑战就是通过改善台基、降低噪声水平来提高观测质量(葛洪魁等, 2013)。目前针对背景噪声水平前人已作了大量的研究,美国 USGS 的 Peterson(1993)及其研究小组观测和研究了全球正常背景噪声,研究结果以噪声功率谱表示,确定了地球高噪声新模型(new high noise model, 简称为 NHNM)和地球低噪声新模型(new low noise model, 简称为 NLNM)。McNamara和 Buland(2004)提出了环境背景噪声概率密度函数(probability density functions, 简称为 PDFs)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,无需剔除地震、爆破、较大干扰及异常波形等因素即可进行噪声水平的评估,给数据处理带来了极大的便利,近年来在国际上已被广泛使用(McNamara, Boaz, 2006; Sleeman, Vila, 2007; McNamara *et al.*, 2009; Ringler *et al.*, 2010)。在美国,该方法已被应用于联合地震研究所(Incorporated Research Institutions for Seismology, 简称为 IRIS)和国家地震监测台网(Advanced National Seismic System, 简称为 ANSS)的数据管理和流动台阵观测数据的质量控制,国内已有研究人员使用 PDFs 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,并对影响因素予以分析(鲁来玉等, 2009; 吴建平, 2012; 刘旭宙等, 2014)。

目前对于背景噪声水平的研究大多围绕被动源开展,对主动源影响的研究不多,特别是在气枪主动源应用方面则更少。气枪探测实验是我国具有创新性的一项研究工作,沿长江进行气枪激发实验具有较强的探索性和重要性。本文利用实验前 72 小时的背景噪声记录,采用概率密度函数方法计算出各台站的功率谱密度函数,再根据公式计算背景噪声水平,并将背景噪声水平划分为高、中、低 3 个等级对所有正常台站进行评估,以此来研究背景噪声对气枪激发效果的影响,为保证气枪实验激发效果提供可靠的依据,对进一步发

展这项技术具有重要意义.

1 安徽长江地学实验概况

安徽省内的秦岭—大别造山带是中国东部的一级构造单元, 将我国东部分割成华北地块与扬子地块; 同时, 贯穿岩石圈的郯庐断裂带, 其南段亦位于安徽省, 且中国东部历史上最大的 1668 年郯城 M8.5 大地震即发生在该断裂带上. 此外, 安徽的铜陵—马鞍山是长江中下游的成矿带, 据初步估算, 仅铁矿储量便达 30 亿吨之多. 安徽省独有的地质构造条件和地理位置(长江中下游), 为利用天然水体激发人工地震波探测地下结构提供了天然的科学实验场地, 对区域地质构造研究、矿产能源调查以及沿江城市地下环境监测等具有极其重要的意义(陈颢等, 2007).

为了探测安徽长江段地下深部构造, 中国地震局科学技术司在 2015 年 10 月 10 日组织开展了长江安徽段人工震源地下结构探测科学实验(以下简称“安徽实验”). 沿长江马鞍山—安庆流域 310 km 长的天然水体中, 采用“延平 2 号”震源船进行定点和走航式激发. 船上装有移动式震源系统, 震源系统包括: 气枪震源系统, 空压机、高压气瓶供气系统, 高压气汇和调节系统, 气枪阵列收放系统和导航、信号接收系统. 采用 4 支工作压力为 13.79 MPa 的 1500LL 型 BOLT 枪组成 6 m×8 m 的气枪阵列进行激发. 通过沿长江 500 km

表 1 20 个定点激发次数统计表

Table 1 Statistics of twenty fixed-points excitation times

定点	激发次数	定点	激发次数	定点	激发次数	定点	激发次数
D ₀₁	300	D ₀₆	150	D ₁₁	150	D ₁₆	120
D ₀₂	150	D ₀₇	50	D ₁₂	150	D ₁₇	200
D ₀₃	100	D ₀₈	200	D ₁₃	120	D ₁₈	150
D ₀₄	120	D ₀₉	150	D ₁₄	50	D ₁₉	120
D ₀₅	120	D ₁₀	150	D ₁₅	150	D ₂₀	200

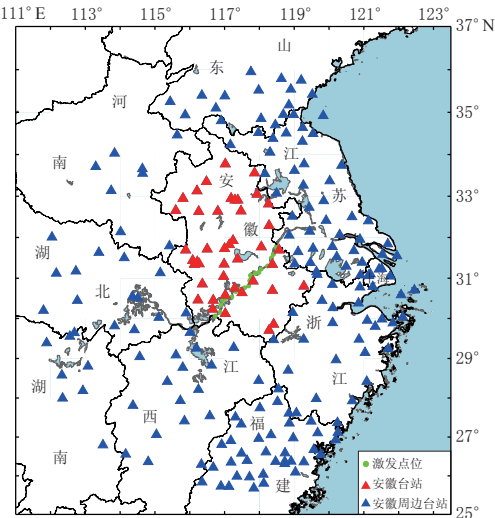


图 1 “安徽实验”台站分布图

Fig. 1 Stations distribution in “Anhui experiment”

布置固定台站及流动地震仪进行观测, 开展长江安徽段地下介质结构探测科学实验.

此次实验沿长江马鞍山—安庆流域共进行了 20 次定点激发和 19 段走航式激发, 激发频率皆为 90 s. 从 10 月 9 日至 18 日, 共定点激发 2900 次(表 1).

为了扩大地震观测范围, 本次实验共接入 220 个固定台, 外加布设在定点激发位置约 100 m 范围内的 20 台实时传输 Guralp 地震仪(简称流动台), 组成了 240 个实时传输地震台站, 对定点激发与走航式激发进行联合观测. 图 1 为长江地学实验实时传输台站分布图, 绿色点位为定点激发路线, 从东到西为长江马鞍山—安庆流域段; 红色三角形为安徽省 43 个台站;

蓝色三角形为此次实验沿长江 500 km 范围内布设的固定台站, 包括福建省 39 个台站、河南省 8 个台站、湖北省 15 个台站、湖南省 7 个台站、江苏省 38 个台站、江西省 18 个台站、山东省 15 个台站、上海市 13 个台站和浙江省 24 个台站. 本文收集了实验激发前 3 天的背景噪声数据作为计算各台站噪声水平的基础资料, 并整理了马鞍山—安庆沿线的 20 个定点激发的气枪数据及多次叠加结果作为本文研究的对象.

2 台网噪声水平评估

2.1 台站 MODE 线确定及异常台站剔除

确定台站背景噪声水平的标准方法是计算噪声功率谱密度(power spectral density, 简称为 PSD). 首先使用 McNamara 和 Buland (2004) 计算台站加速度功率谱密度及相应概率密度函数(PDFs)的方法, 确定出台站的模型线(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; 然后根据《地震台站观测环境技术要求第 1 部分: 测震》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2004)的规定, 求出噪声水平值, 并将噪声水平划分成高、中、低 3 个等级.

本文选取各台站 2015 年 10 月 1 日至 3 日记录的数据进行处理(廖诗荣, 陈绯雯, 2008; 林彬华等, 2015), 得到各台站的 PDFs 图和 MODE 线. 图 2 为利用某台站 72 小时噪声记录生成的 PDFs 图, 图 2a 还给出了安徽滁州台垂直分量的 MODE 线, 其全部落在地球高噪声新模型 NHNM 线与地球低噪声新模型 NLNM 线之间, 故该台站为正常台站. 虽然有部分淡紫色 MODE 线的反斜率超出 NHNM, 但这部分是由仪器标定所引起, 且所占比例非常小, 因此不会影响台站总体噪声水平的评估, 这也是概率密度函数方法的优势之一. 图 2b 显示了江苏高淳台垂直分量的 MODE 线, 在频点 0.3 Hz 处低于 NLNM. 通常情况下, 在该频点处的背景噪声水平受海洋活动影响较大, 因此正常台站的背景噪声加速度功率谱值在 0.3 Hz 处不应低于地球低噪声新模型. 然而当台站出现异常情况, 比如卡摆或地震计故障, 使得输出信号只是数采自振, 则绘出的 PDFs 图就如图 2b 所示. 若类似的异常台站参与台网的噪声水平评估, 会因异常波形振幅值太小而被判定为低背景噪声台站, 这将给后期台网噪声水平的评估造成错误导向, 因此需要将类似异常台站剔除. 利用上述方法对 240 个观测台站进行处理, 共剔除 28 个异常台站和 12 个断记台站, 利用保留

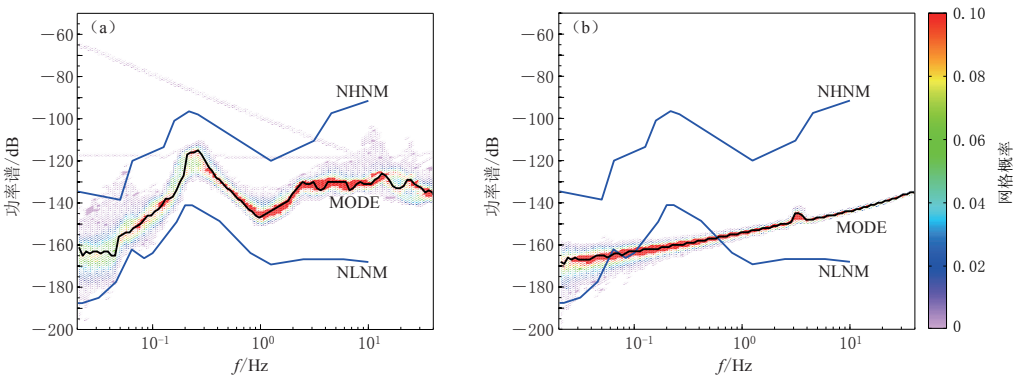


图 2 正常台站(a)和异常台站(b)72 小时背景噪声概率密度函数图

Fig. 2 Probability density functions of 72-hour ambient noise for normal (a) and abnormal (b) stations

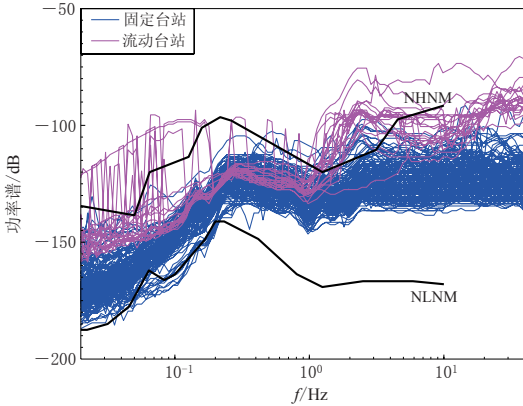


图 3 正常台站 MODE 线叠绘图

Fig. 3 Overlay mapping of MODE lines for normal stations

的 200 个正常台站进行台网噪声水平评估。

上述 PDFs 图及 MODE 线代表的是单台噪声水平, 对多台噪声水平的分析需要对比所有台站的 MODE 线. 图 3 为 200 个正常台站垂直分量的 MODE 线叠绘图. 可以看出, 大部分固定台站的 MODE 线均位于 NHNM 与 NLNM 之间, 但是在小于 0.3 Hz 的频段上有部分 MODE 线低于 NLNM, 这是因为参与评估的所有台站中部分台站属于短周期台站, 只能记录到 1—50 Hz 的信息, 更低频率则超出仪器所能记录的频带范围. 另外流动台站的 MODE 线总体上都高于固定台站, 这是因

为流动台埋深有限、受外界噪声干扰较大, 故台站背景噪声水平较高. 图中部分流动台的 MODE 线出现了大幅跳动, 这是由于数据传输过程中丢包所致.

2.2 噪声水平计算与噪声等级的划分

根据《地震台站观测环境技术要求第 1 部分: 测震》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2004), 固定台站的环境地噪声水平可划分为 5 级, 其中, I 级环境地噪声水平: $\text{Enl}_{\text{dB}} < -150 \text{ dB}$; II 级环境地噪声水平: $-150 \text{ dB} \leq \text{Enl}_{\text{dB}} < -140 \text{ dB}$; III 级环境地噪声水平: $-140 \text{ dB} \leq \text{Enl}_{\text{dB}} < -130 \text{ dB}$; IV 级环境地噪声水平: $-130 \text{ dB} \leq \text{Enl}_{\text{dB}} < -120 \text{ dB}$; V 级环境地噪声水平: $-120 \text{ dB} \leq \text{Enl}_{\text{dB}} < -110 \text{ dB}$. Enl_{dB} 表示台基背景噪声水平, 即噪声均方根 (root-mean-square, 简称为 RMS), 其计算方法为: 首先计算地面运动观测速度的自功率谱密度 (PSD), 然后根据前述标准, 用 1/3 倍频程滤波在 1—20 Hz 观测频带范围内按式 (1) 计算 RMS 值, 即得环境地噪声水平.

$$\text{RMS} = \sqrt{2Pf_0R}, \quad (1)$$

$$R = \frac{f_u - f_l}{f_0}, \quad (2)$$

式中, P 为每个中心频点所对应的功率谱密度 (PSD) 值, R 为相对带宽, f_0 为分度倍频程中心频率, f_u 为分度倍频程上限频率, f_l 为分度倍频程下限频率.

RMS 可计算的噪声频带为 1—20 Hz, 而气枪主动源激发的信号频带主要为 1—10 Hz, RMS 包含了研究所用的频带, 故采用 RMS 作为背景噪声水平研究对气枪激发效果的影响是合理的.

根据上述方法计算各台站背景噪声水平, 并将所有台站的 RMS 值绘制成直方图及散点图 (图 4). 从图 4a 中可以看出, RMS 主要分布在 -160 dB — -140 dB 之间, 这是因为固定台台基环境地噪声不能超过一定的噪声水平, 例如安放宽频带数字地震仪的台站, 噪声水平应不大于 II 级环境地噪声水平, 即 $\text{Enl}_{\text{dB}} < -140 \text{ dB}$. 而在图 4b 中序号在 180—200 之间的台站, 其 RMS 值都在 -130 dB 以上, 这是因为这部分台站属于流动台站, 噪声水平较高. 鉴于 III, IV, V 级噪声水平的台站数较少, 为了研究方便, 本文将其合为一级, 即将参与分析的 200 个台站的背景噪声水平划分成低、中、高 3 个等级, 其中, 低噪声水平为

$Enl_{dB} < -150$ dB，中噪声水平为 -150 dB $\leq Enl_{dB} < -140$ dB，高噪声水平为 $Enl_{dB} \geq -140$ dB，台站数分别为 103，63，34。

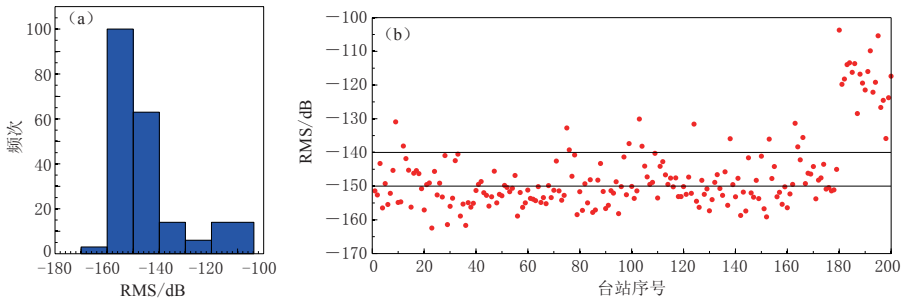


图 4 正常台站背景噪声水平分布情况
Fig. 4 Distribution of normal stations ambient noise level

2.3 台网噪声水平分布图

为了研究地理位置与背景噪声水平的关系，本文将所有台站的噪声水平以台网分布的形式展现出来，得到台网噪声水平分布图(图 5)。根据刘旭宙等(2014)的研究，在 1—20 Hz 频带上，公路及人为活动是主要影响因素，沉积层较厚的台站受影响尤甚。根据图 5 所反映的台网噪声水平分布特征可以看出，福建省台站基本均为低噪声水平，江西、湖北及安徽西南部的台站噪声水平也较低，而长江三角洲区域的台站背景噪声水平均偏高。张尉(2008)的研究结果表明，基岩台基的背景噪声水平比沉积层台基的背景噪声水平低约 13 dB，相当于近一个震级的检测阈值，可以推测台站台基与背景噪声水平有很大关系。由于福建省的台站基本都建在基岩上(李军，2006；蔡辉腾等，2016)，故台基背景噪声水平低；而长江三角洲区域的台站多数建在松散沉积层上，台基质量较差，故台站背景噪声水平高。另外，流动台(沿长江马鞍山—安庆流域段上布设的台站)全部呈现出高噪声水平，这是因为流动台是临时布设在长江沿岸坚硬的土层上，埋深有限，受外界噪声干扰较大，故台站背景噪声水平较高。

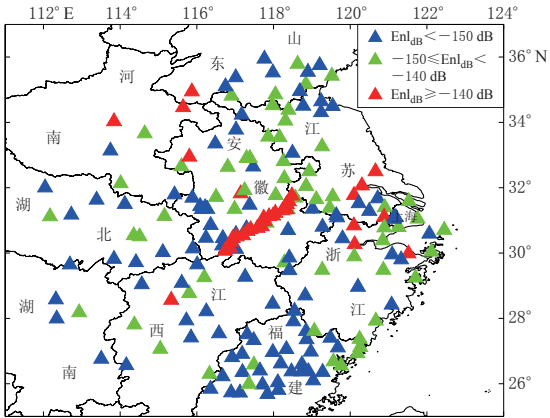


图 5 台网噪声水平 Enl_{dB} 分布图
Fig. 5 Distribution map of network noise level

3 背景噪声对气枪激发效果的影响

3.1 接收台站与背景噪声水平分布图

采用地震台网数据处理软件(multiple seismic data processing system, 简称为MSDP)对气枪信号的震相进行拾取，获得震相信息，再利用 matlab 编程将台网噪声评估结果与人工拾取的震相信息相结合，生成背景噪声与接收台站分布图。图 6 是定点 D_{13} 激发 100 次，从 100 次叠加波形中识别出气枪信号台站，然后联合背景噪声水平评估结果得到的激发效果的空间分布图。通过黑线与震中相连的台站为识别到信号的台站，红色点划线圈表示震

中距分别为 100, 200, 300, 400 km 范围, 用于辅助查看激发传播距离. 从图中可以看出: 震中距 100 km 范围内, 所有台站均能观测到气枪信号; 震中距 200 km 范围内, 大部分台站均能接收到信号, 仅个别背景噪声水平较高的台站未能接收到信号; 震中距 300 km 范围内, 大部分低、中噪声平台站均能接收到信号; 而震中距大于 300 km 时只有 7 个台站能观测到信号, 其中 5 个为低噪声平台站, 2 个为中噪声平台站, 无高噪声平台站. 最远观测台站为震中距 330 km 的福建浦城台(PCNP)、江西修水台(XIS)和浙江永康台(YOK), 这 3 个台站的背景噪声均为低噪声水平, 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.

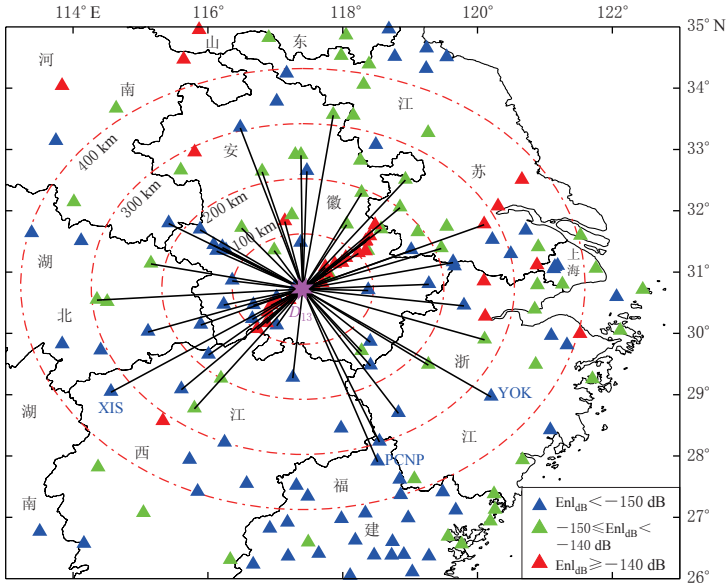


图 6 定点 D_{13} 叠加 100 次后接收到信号台站和背景噪声水平分布图
Fig. 6 The distribution map of received signal stations and ambient noise level in fixed-point D_{13} excitation with 100 superpositions

3.2 背景噪声水平和信噪比的关系

为了进一步研究台站背景噪声水平与信噪比的关系, 从上述统计结果中选取震中距均为 80 km, 含有高、中、低不同背景噪声水平台站的气枪信号进行对比(图 7), 观察其记录到的高噪台站东至香隅流动台(L3419)、中噪台站安徽舒城台(SCH)和低噪台站安徽白山台(BAS)垂直分量的背景噪声水平 MODE 线(图 7a), 可见 1—20 Hz 频带上这 3 个台站的 MODE 线自高向低分布. 采用上述计算噪声水平的方法, 得到 3 个台站的噪声水平 RMS 值分别为 -136 dB, -149 dB, -153 dB. 选取定点 D_{13} 激发下接收到气枪信号的 3 个台站(图 7b), 将其 100 次叠加结果的速度记录经过 3—8 Hz 滤波和归一化处理, 得到最大值为 1 的无量纲记录波形图(图 7c), 并以 6 km/s 的折合速度对气枪发震时刻进行折合, 得到的时刻作为零时刻, 近似为 P 波到时. 由于选取的是台站的垂直分向, 所以 P 波较 S 波清晰, 本文只计算 P 波信号与发震前背景噪声的信噪比. 因 P 波含有直达波、反射波等多组震相, 因此在计算信噪比时信号段需足够长. 通过计算得出, 台站 L3419, SCH 和 BAS 的信噪比依次为 2.51, 3.35, 7.68, 噪声水平最低的 BAS 台站的信噪比最优, 而噪声水平

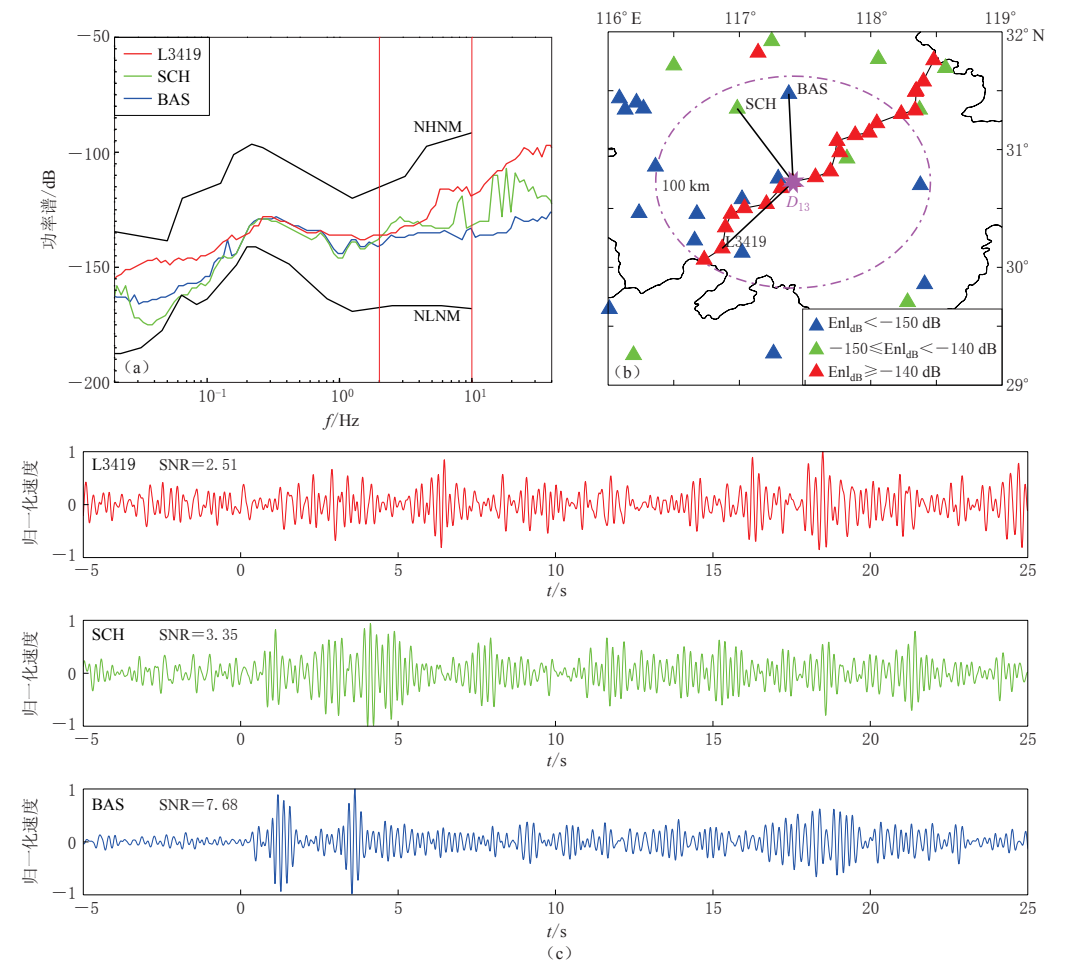


图 7 相同震中距不同背景噪声台站的信噪比对比图

(a) MODE 线比较, 红色竖线区域为气枪激发频率域, 下同; (b) 台站及震中位置图; (c) 波形信噪比

Fig. 7 SNR comparison diagram of the stations with different ambient noise and the same epicentral distance

(a) MODE lines comparison of different stations, the area between red lines is frequency domain of air gun excitation, the same below; (b) Stations and epicenter locations; (c) SNR of waveforms

最高的 L3419 台站的信噪比最差。

以上是对相同震中距样本的比较, 为了扩大样本数量, 本文对长江定点 D_{01} 叠加 250 次结果的单台记录进行分析, 比较多组近似震中距条件下, 不同背景噪声台站与信噪比的关系(图 8)。图 8 第 1—4 行分别给出了震中距约为 50, 100, 150, 200 km 的台站记录的不同背景噪声水平所对应的不同波形信噪比, 可以看出随着背景噪声水平的增大, 波形信噪比逐渐减小; 纵向对比波形信噪比的变化情况, 可以看出, 随着震中距的增大, 记录的信噪比并非逐渐降低, 而是震中距较远的安徽枞阳(ZOY)台站由于背景噪声水平较低, 信噪比反而出现较大的增大。可见台站背景噪声对信噪比的影响比距离衰减更大。

通常通过大量的数据统计获得的结果更为可靠, 因此本文利用长江地学实验定点 D_{01} 激发数据, 统计各台站叠加 250 次结果的信噪比, 以研究信噪比与背景噪声的关系(图 9)。

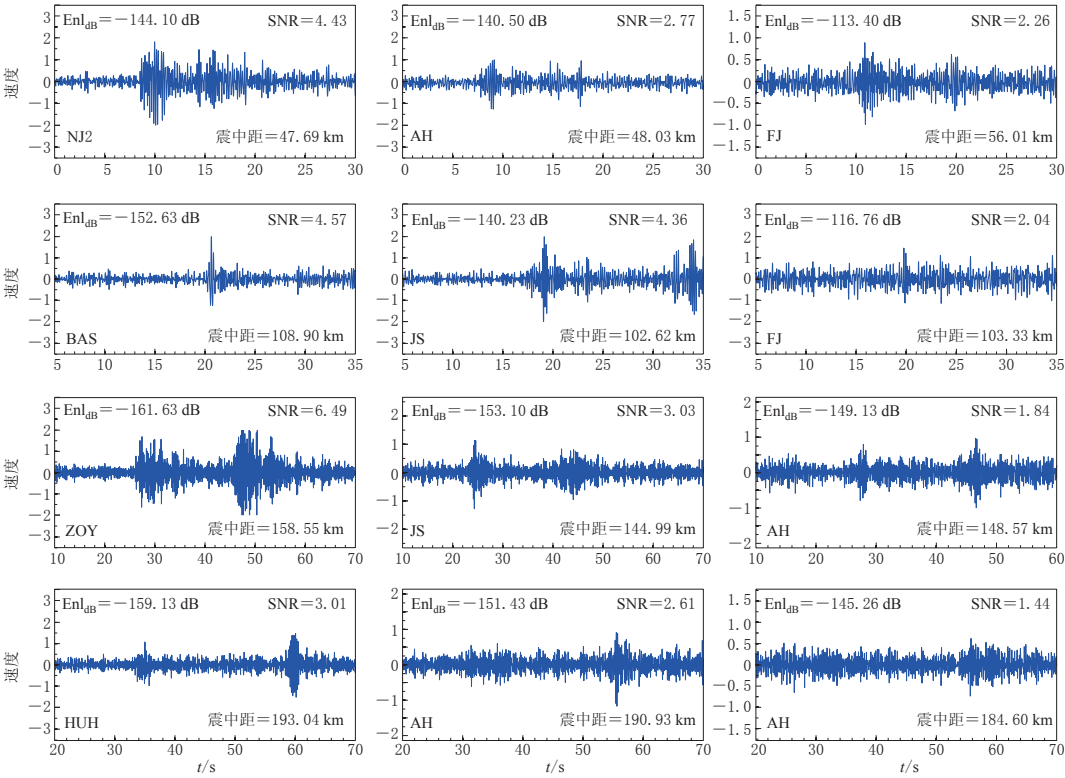


图 8 不同震中距和不同背景噪声与信噪比的关系

Fig. 8 The relations of SNR to different epicentral distances and to different ambient noise

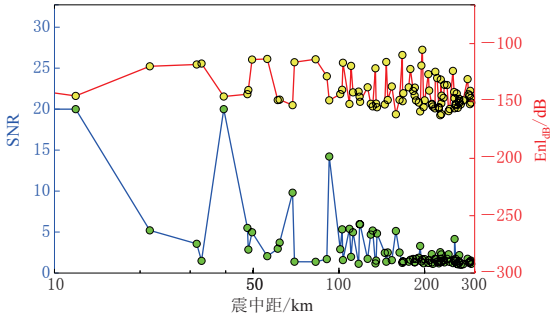


图 9 信噪比与背景噪声水平的关系

Fig. 9 Relationship between SNR and ambient noise

结果表明：震中距在 50 km 内时，信噪比衰减速度较快；在 100 km 内时，信噪比变化幅度较大；同时气枪信号的信噪比不是随震中距平稳衰减，而是出现明显的上下浮动，信噪比突然增大处所对应的背景噪声水平均处在较低水平，即信噪比的高值对应背景噪声的低值。气枪信号的信噪比随震中距的增大而不断衰减，但是从统计结果看，随着震中距的增大，某些台站的信噪比是增大的，而其对应的背景噪声均为低噪声水平，因此

此背景噪声在一定范围内对信噪比的影响大于距离的衰减。

3.3 典型台站背景噪声分析

在安徽长江实验现场观测中，发现部分台站在不同定点激发下，其单枪或叠加结果都比其它台站观测到的气枪信号更清晰，我们称这种台站为典型台站。现对实验过程中的典型台站的背景噪声进行分析。图 10 为震中距 170 km 处典型台站浙江淳安台(CHA)的背景噪声分析，图 10a 为该台站的气枪信号累加图，随着叠加次数自下往上依次增大，气枪

信号的信噪比也逐渐增大,且从 10 次叠加结果开始即可以观测到清晰的信号,可见该典型台站的观测质量非常高,其 MODE 线在 1—20 Hz 频带上相对其它固定台站位于低噪声水平(图 10b),这也是该典型台站可以记录到较清晰气枪信号的原因.

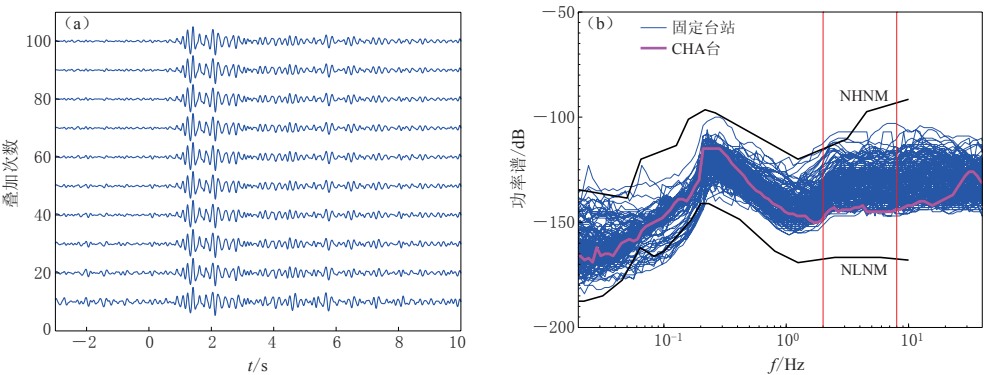


图 10 典型台站背景噪声分析

(a) 不同叠加次数对应的气枪信号波形图; (b) 台站 MODE 线

Fig. 10 Analysis of the typical station ambient noise

(a) Air gun signal waveforms corresponding to different superposition times; (b) MODE lines of all stations

鉴于此,在今后的实验中,可以事先对台网的背景噪声水平进行评估,选用低背景噪声水平的台站进行分析研究,这对于在有限的激发次数下,观测到远距离台站接收到的气枪信号具有重要意义.

3.4 不同定点激发条件的背景噪声分析

由于单个定点激发时,同一震中距的台站数有限,同时这些台站的背景噪声水平存在高低不一的情况.为了能够增加同一震中距不同背景噪声台站的数量,对不同定点激发下同一震中距的台站进行统计分析,同时验证激发效果与定点位置变化间的关系.本次安徽实验共进行了 20 个定点激发,已经获得了定点 D_{13} 的背景噪声分析结果,再采用类似方法对其它定点进行处理,得到不同定点激发条件下,震中距为 80 km 左右的不同背景噪声台站的信噪比的统计结果(表 2).

图 11 展示了 D_{02} , D_{03} , D_{09} , D_{13} 定点激发条件下,震中距约为 80 km 的台站 100 次叠加结果的信噪比与背景噪声的关系.从 D_{13} 激发结果可以看出,信噪比随着背景噪声的增大而减小.不同定点激发的同震中距不同背景噪声结果显示,信噪比总体随背景噪声递减.因此,在长江气枪激发条件下,气枪信号的信噪比主要取决于接收台站的背景噪声水平,而激发位置的变化对气枪激发效果的影响不大.然而从以往经验来看,不同场地对激发效果的影响很显著,比如在 2014 年福建省街面水库激发

表 2 不同定点激发条件下台站背景噪声及信噪比的统计表

Table 2 Statistics of station ambient noise and SNR with the different point excitation

定点	台站	震中距 /km	噪声水平 /dB	信噪比
D_{02}	L3408	70.33	-128.43	1.37
D_{03}	L3410	79.33	-119.43	1.03
D_{03}	TOL	80.31	-142.47	2.73
D_{09}	HSH	82.98	-146.17	3.19
D_{13}	L3419	80.31	-135.90	2.51
D_{13}	SCH	81.27	-149.13	3.35
D_{13}	BAS	81.39	-152.63	6.68
D_{13}	WJI	88.46	-158.87	8.19

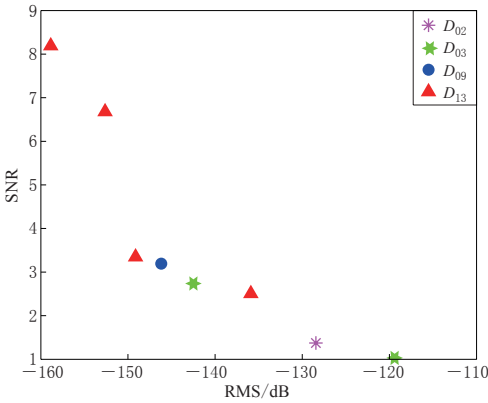


图 11 不同定点激发条件下背景噪声与信噪比的关系

Fig. 11 The relationship between ambient noise and SNR in the different fixed-point excitation conditions

次叠加结果,然后计算每 10 次叠加结果的信噪比,得到 3 组信噪比与叠加次数关系的数据,对这 3 组数据进行曲线拟合,得到高噪、中噪、低噪台站对应的叠加次数随信噪比变化的拟合曲线如图 12 所示.可以看出,随叠加次数的增加气枪信号的信噪比呈增长趋势,低噪台站随叠加次数的增加信噪比增长速度最快,其次是中噪台站,增长最慢的为高噪台站.若要获得同样的叠加效果(如 $SNR=2.5$),低噪台站需要叠加 50 次,中噪台站需要叠加 100 次,高噪台站需要叠加 250 次以上,3 种不同背景噪声台站在叠加效率上差别明显.因此在处理气枪数据时建议选用低、中噪台站,尽可能避免使用叠加效率较低的高噪台站.

4 讨论与结论

本文采用概率密度函数方法计算了各台站的背景噪声水平,对参加气枪主动源实验分析的所有台站进行噪声评估.首先剔除异常台站,然后将噪声水平划分为高、中、低 3 个等级进行评估,得到较为直观的台网噪声水平分布图.这不仅为后续研究提供了便利,还可以从地图上直观地反映出不同区域的噪声差异.

接收台站和背景噪声分布图进一步验证了台站接收能力与背景噪声水平密切相关,低背景噪声台站接收气枪信号的能力远大于高背景噪声台站.通过比较同一震中距下不同背景噪声水平的台站,得出背景噪声水平越低,所对应的波形信噪比越高.为了得到更为可靠的结果,统计分析长江地学实验定点 D_{01} 激发各台站叠加 250 次结果的信噪比,结果显

中,单枪最远可传播 200 km;在 2015 年石黄峰水库激发中,单枪最远可传播 40 km.而安徽长江沿线不同定点的激发效果变化不大,可能与长江马鞍山—安庆流域段的不同定点激发位置所在场地条件基本一致有关.

3.5 信噪比与叠加次数的关系

气枪记录的信噪比除了随震中距、背景噪声变化外,还随着叠加次数的增加而增大.下文针对不同背景噪声台站的信噪比随叠加次数的变化进行研究.

在长江定点 D_{01} 激发下,选取震中距 100 km 的 3 个不同背景噪声台站,即高噪台站安徽白山台(BAS)、中噪台站江苏金坛台(JT)、低噪台站江苏溧阳台(LY),进行分析.首先计算 3 个台站 10, 20, 30, ..., 250

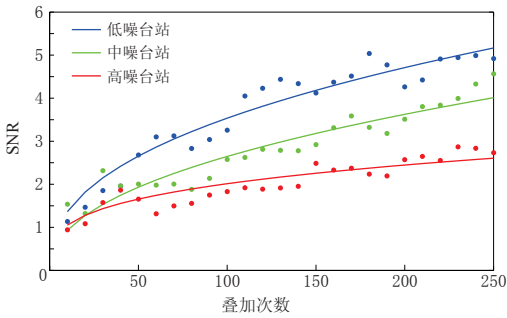


图 12 不同背景噪声台站气枪信号的信噪比随叠加次数的变化

Fig. 12 The SNR of air gun signal changes with the superposition times in different background noise level stations

示气枪信号信噪比并非全都随震中距增大而逐渐衰减,而是与台站背景噪声水平有显著的对应关系,可见背景噪声在一定范围内对信噪比的影响大于距离衰减。

在安徽长江实验现场观测中,发现部分台站在不同定点激发下,其单枪或叠加结果均比其它台站观测到的气枪信号更清晰,经过本文研究可知,这些台站均为质量较好的典型台站,其背景噪声水平均较低。这也是典型台站可以记录到较清晰气枪信号的原因。另外,为了验证激发效果与定点位置的关系,本文对不同定点激发同一震中距的台站进行了统计分析,得出安徽长江沿线不同定点的激发效果变化不大,这可能跟长江马鞍山—安庆流域段不同定点激发位置的场地条件基本一致有关。

通过对定点 D_{01} 激发 100 km 附近 3 个不同背景噪声台站进行分析,得出气枪信号的信噪比随着叠加次数的增加而增大,低噪台站随叠加次数的增加信噪比增长速度最快,其次是中噪台站,增长最慢的为高噪台站。3 种不同背景噪声台站在叠加效率上有着明显的区别,因此在气枪数据处理上建议选用低噪和中噪台站作为研究资料,尽可能避免使用叠加效率较低的高噪台站。

背景噪声是气枪激发效果的主要影响因素,此外还存在一些其它影响因素,比如场地、传播路径、气枪震源特性等等,需要今后继续深入、全面地研究其对激发效果的影响。作者将继续整理安徽长江实验数据,研究背景噪声及其它因素对气枪激发效果的影响,并与本文的结果进行比对,最终给出综合可靠的分析结果。

参 考 文 献

- 蔡辉腾,金星,王善雄,李培,陈伟. 2016. 宁化—大田—惠安地壳构造与速度结构特征[J]. 地球物理学报, **59**(1): 157–168. doi:10.6038/cjg20160113.
- Cai H T, Jin X, Wang S X, Li P, Chen W. 2016. The crust structure and velocity structure characteristics beneath Ninghua-Datian-Hui'an[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(1): 157–168. doi:10.6038/cjg20160113 (in Chinese).
- 陈颢,王宝善,葛洪魁,徐平,张尉. 2007. 建立地震发射台的建议[J]. 地球科学进展, **22**(5): 441–446.
- Chen Y, Wang B S, Ge H K, Xu P, Zhang W. 2007. Proposed of transmitted seismic stations[J]. *Advances in Earth Science*, **22**(5): 441–446 (in Chinese).
- 葛洪魁,陈海潮,欧阳颢,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. doi:10.6038/cjg20130315.
- 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. doi:10.6038/cjg20130315 (in Chinese).
- 李军. 2006. 福建地区脉动资料的处理与分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 5–22.
- Li J. 2006. *The Processes and Analysis of the Microseisms Records in Fujian Region*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 5–22 (in Chinese).
- 廖诗荣,陈绯雯. 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.
- Liao S R, Chen F W. 2008. Automated seismic noise processing for seismic site selection using probability density functions method[J]. *South China Journal of Seismology*, **28**(4): 82–92 (in Chinese).
- 林彬华,金星,廖诗荣,李军,黄玲珠,朱耿青. 2015. 地震噪声异常实时监测[J]. 中国地震, **31**(2): 281–289.
- Lin B H, Jin X, Liao S R, Li J, Huang L Z, Zhu G Q. 2015. Real-time monitoring of abnormal seismic noise[J]. *Earthquake Research in China*, **31**(2): 281–289 (in Chinese).
- 刘旭笛,沈旭章,李秋生,张元生,秦满忠,叶卓. 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.

- Liu X Z, Shen X Z, Li Q S, Zhang Y S, Qin M Z, Ye Z. 2014. An analysis of the tele-seismic waveforms and ambient noise of temporary broadband seismic array on the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, **35**(6): 759–768 (in Chinese).
- 鲁来玉, 何正勤, 丁志峰, 姚志祥. 2009. 华北科学探测台阵背景噪声特征分析[J]. 地球物理学报, **52**(10): 2566–2572. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.015.
- Lu L Y, He Z Q, Ding Z F, Yao Z X. 2009. Investigation of ambient noise source in North China array[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(10): 2566–2572. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.015 (in Chinese).
- 吴建平, 欧阳飏, 王未来, 姚志祥, 袁松涌. 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).
- 张尉. 2008. 利用小当量人工震源进行区域性深部探测的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学理学院地球科学系: 92–145.
- Zhang W. 2008. *The Experiments of Using Small Artificial Seismic Sources to Explore Regional Deep Structure of the Earth*[D]. Hangzhou: Department of Earth Science, Zhejiang University: 92–145 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2004. GB/T 19531.1–2004 地震台站观测环境技术要求 第1部分: 测震[S]. 北京: 中国标准出版社: 15–27.
- State Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2004. GB/T 19531.1–2004 *Technical Requirement for Observational Environment of Seismic Stations Part 1: Seismometry*[S]. Beijing: China Standards Press: 15–27 (in Chinese).
- Bormann P. 2002. *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*[M]. Potsdam: GeoForschungsZentrum: 1–36.
- McNamara D E, Buland R P. 2004. Ambient noise levels in the continental United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(4): 1517–1527.
- McNamara D E, Boaz R I. 2006. *Seismic Noise Analysis System Using Power Spectral Density Probability Density Functions: A Stand-Alone Software Package. USGS Open-File Report 2005-1438*[R]. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey: 1438–1452.
- McNamara D E, Hutt C R, Gee L S, Benz H M, Buland R P. 2009. A method to establish seismic noise baselines for automated station assessment[J]. *Seismol Res Lett*, **80**(4): 628–637.
- Peterson J. 1993. *Observations and Modeling of Seismic Background Noise. Open-File Report 93-322*[R]. Albuquerque, New Mexico: U. S. Department of Interior Geological Survey, **32**(7): 93–322.
- Ringler A T, Gee L S, Hutt C R, McNamara D E. 2010. Temporal variations in global seismic station ambient noise power levels[J]. *Seismol Res Lett*, **81**(4): 605–613.
- Sleeman R, Vila J. 2007. Towards an automated quality control manager for the virtual European broadband seismograph network (VEBSN)[J]. *ORFEUS Newsl*, **7**(1): 354–366.