2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2410-2429
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

徐峣,严加永,张永谦,等.2026.华南陆块西部宽频带流动地震台站背景噪声及其启示.地球物理学进展,41(5):2410-2429,doi:10.6038/pg2026KK0111.

XU Yao, YAN JiaYong, ZHANG YongQian, *et al*. 2026. Ambient seismic noise levels at temporary broadband seismic stations in the western South China Block and their implications. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2410-2429,doi:10.6038/pg2026KK0111.

华南陆块西部宽频带流动地震台站背景噪声及其启示

Ambient seismic noise levels at temporary broadband seismic stations in the western South China Block and their implications

徐峣[1,2],严加永[1,2*],张永谦[1,2],陈昌昕[1,2],张昆[1,2],刘家豪[1],徐志伍[1,2],聂慧梓[3]

XU Yao[1,2], YAN JiaYong[1,2*], ZHANG YongQian[1,2], CHEN ChangXin[1,2], ZHANG Kun[1,2], LIU JiaHao[1], XU ZhiWu[1,2], NIE HuiZi[3]

1. 中国地质科学院,北京 100037
2. 中国地质科学院深地探测与矿产勘查全国重点实验室,北京 100037
3. 航天规划设计集团有限公司,北京 102627

1. *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*
2. *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*
3. *China Aerospace Planning and Design Group Co., Ltd.*, *Beijing* 102627, *China*

摘 要 宽频带流动地震观测在华南陆块深部结构和动力学过程的研究中发挥着重要的作用.尽管学者们已经在华南陆块布设了大量的宽频带流动地震台站并取得了丰富的成果,但针对观测数据的质量评价工作仍存在着不足.背景噪声是衡量宽频带地震数据质量的重要参数,可通过计算观测数据的噪声功率谱密度(Power Spectral Density,PSD),以及统计相应的概率密度函数(Probability Density Function,PDF)进行表征.本研究首先利用 PSD PDF 方法获得了华南陆块西部 7 个宽频带流动地震台站的背景噪声水平,随后以 LH23 台站为例,对不同频段的背景噪声来源及其特征进行了分析,同时还探讨了 PSD 出现高异常值的原因以及其曲线特征.本研究的结果表明:人文噪声、微震噪声和地倾斜噪声是华南陆块西部宽频带流动地震台站不同频段背景噪声的主要来源,这些噪声源不仅具有日变化或季节性变化等规律,且同一噪声源对不同分量的干扰也存在着差距;地震事件、邻近台站强烈人为活动以及系统瞬变均会引起 PSD 出现高异常值,但这些不

Abstract Temporary broadband seismic observation plays a crucial role in the study of the deep structure and dynamic processes of the South China Block. However, although scholars have been deploying a large number of temporary broadband seismic stations across the South China Block and have achieved abundant research outcomes, systematic research on the quality of observation data from these stations remains insufficient yet necessary. Ambient seismic noise is an important parameter for evaluating the data quality of broadband seismic station, which can be quantitatively characterized by calculating the Power Spectral Density (PSD) of the observation data and statistically analyzing the corresponding Probability Density Function (PDF). Therefore, this study firstly obtains the ambient seismic noise levels at 7 temporary broadband seismic stations located in the western South China Block by using the PSD PDF method. Subsequently, taking station LH23 as a typical example, this study analyzes the main sources of ambient seismic noise in different frequency bands and their characteristics. In addition, this study also investigates the origins of high outliers in the PSD results, along with the morphological features of the corresponding curves. The results of this study indicate that cultural noise, microseism, and ground tilt noise are the main sources of ambient seismic noise in different frequency bands at the temporary broadband seismic stations in the western South China Block. These noise

收稿日期 2026-03-19; **修回日期** 2026-08-19. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1000306,2024ZD1000100)、国家自然基金项目(U2344220,42074099,42174092)和地质调查项目(DD20230008)联合资助.

第一作者简介 徐峣,男,1989 年生,助理研究员,主要从事地球深部结构探测与研究工作. E-mail:xy_cags@163.com

***通讯作者** 严加永,男,1977 年生,教授级高级工程师,主要从事地球深部探测和矿产资源勘查工作. E-mail:yanjy@163.com

同因素所导致的曲线变形却存在着显著的差异.在上述结果的基础上,本研究从场地选址、台基建设,以及仪器性能检测及台站维护等方面出发,提出了在华南陆块开展宽频带流动地震观测的工作建议.

关键词　华南陆块西部;宽频带流动地震台站;背景噪声;噪声功率谱密度;概率密度函数

中图分类号　P315

文献标识码　A

doi:10.6038/pg2026KK0111

CSTR:32085.14.pg2026KK0111

sources exhibit different diurnal or seasonal variations, and the interference of the same noise source on horizontal and vertical components also shows discrepancies. Seismic events, intense near-station anthropogenic activities, and system transients can all result in high outliers in the PSD results, while the corresponding deformation of curves induced by these different reasons present distinct characteristics. Based on the above results, this study further proposes suggestions for the deployment of temporary broadband seismic stations in the South China Block, from the aspects of station site selection, vault construction, as well as seismograph performance testing and station maintenance.

Keywords　The western South China Block; Temporary broadband seismic station; Ambient seismic noise; Power spectral density; Probability density function

0　引　言

地震学是一门以观测为基础的学科,观测数据的质量是开展后续研究的前提和保障,并从根本上决定着反演结果的精度和可信度(许卫卫,2018;包雪等,2023;许卫卫等,2023).背景噪声是衡量宽频带地震数据质量的重要参数,综合反映了仪器自噪声和外部噪声对观测数据的干扰(Ringler and Hutt,2010;Rastin *et al*.,2012;葛洪魁等,2013;许卫卫等,2017,2023;许卫卫,2018).较低的背景噪声水平说明地震台站受到的整体干扰较小,有助于宽频带地震仪(以下简称地震仪)发挥其观测能力,提高观测数据质量(葛洪魁等,2013;许卫卫等,2023).

定量评价地震台站背景噪声的方法主要包括计算观测数据的噪声功率谱密度(Power spectral density,PSD)(Peterson,1993),以及统计相应的概率密度函数(Probability density function,PDF)(McNamara and Buland,2004).PSD 描述的是噪声功率在频域的分布特征和规律,Peterson(1993)基于全球 75 个地震台站的 PSDs 结果,建立了全球高(NHNM)/低(NLNM)噪声模型,使分析和评价地震台站的背景噪声有了统一的标准.在该噪声模型的基础上,McNamara 和 Buland(2004)进一步提出了对 PSDs 进行统计的 PDF 方法.该方法通过对指定时间段内的所有 PSDs 进行统计,获取这些结果在不同频点的概率分布(McNamara and Buland,2004;McNamara *et al*.,2009),并且无需排除地震事件、邻近台站强烈人为活动,以及系统瞬变(如阶跃标定、数据缺失)等突发因素的干扰,可直观反映地震台站整体的背景噪声特征和动态变化情况(Rastin *et al*.,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;王芳等,2019;杨千里等,2019).

自提出以来,PSD PDF 方法迅速被纳入各个地震台网中心和数据中心的数据管理体系之中,并成为这些体系的核心技术环节(McNamara and Boaz,2006;刘瑞丰等,2008;郑秀芬等,2009;Rastin *et al*.,2012;许卫卫,2018;地震科学国际数据中心,2023).也有部分学者应用 PSD PDF 方法开展了针对性研究和实验.如分析不同波形段的 PSD 曲线特征(阶跃标定、数据缺失、摆锤校准、近震事件、远震事件,以及无异常干扰等)(McNamara and Buland,2004;McNamara *et al*.,2009;王芳等,2019;Ringler *et al*.,2021);比对不同观测条件(人文噪声源、台基岩性、台基深度等)的台基响应(葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;Hutt *et al*.,2017;刘政一等,2019;胡宝慧等,2020;许卫卫等,2023;杨亚运等,2023);以及统计地震台站的背景噪声水平随空间、昼夜和季节的变化规律等(McNamara and Buland,2004;Díaz *et al*.,2010;Rastin *et al*.,2012;吴建平等,2012;王芳等,2019;杨千里等,2019;胡宝慧等,2020;许卫卫等,2023).这些研究为开展地震台站工作状态评估和异常数据分析,以及完善地震台站的选址、建台和维护等方案提供了参考.

华南陆块是我国主要块体之一,其深部结构及动力学过程一直是研究的热点(舒良树,2012;张岳桥等,2012;张国伟等,2013),地震学也在其中发挥着重要的作用(图 1;张永谦等,2022).然而长期以来,华南陆块的宽频带地震探测与研究主要侧重反演结果的解释和讨论(如:Zhou *et al*.,2012;Shi *et al*.,2013;叶卓等,2013;常利军等,2015;高家乙等,2016;张耀阳等,2018;Jiang *et al*.,2021;檀玉娟等,2021;Zhang *et al*.,2021a,b,2023;陈昌昕等,2022;Li *et al*.,2022,2023;瞿梦茹等,2022;石玉涛和高原,2022;王冠之等,2022;韩如冰等,2023;Xi *et al*.,

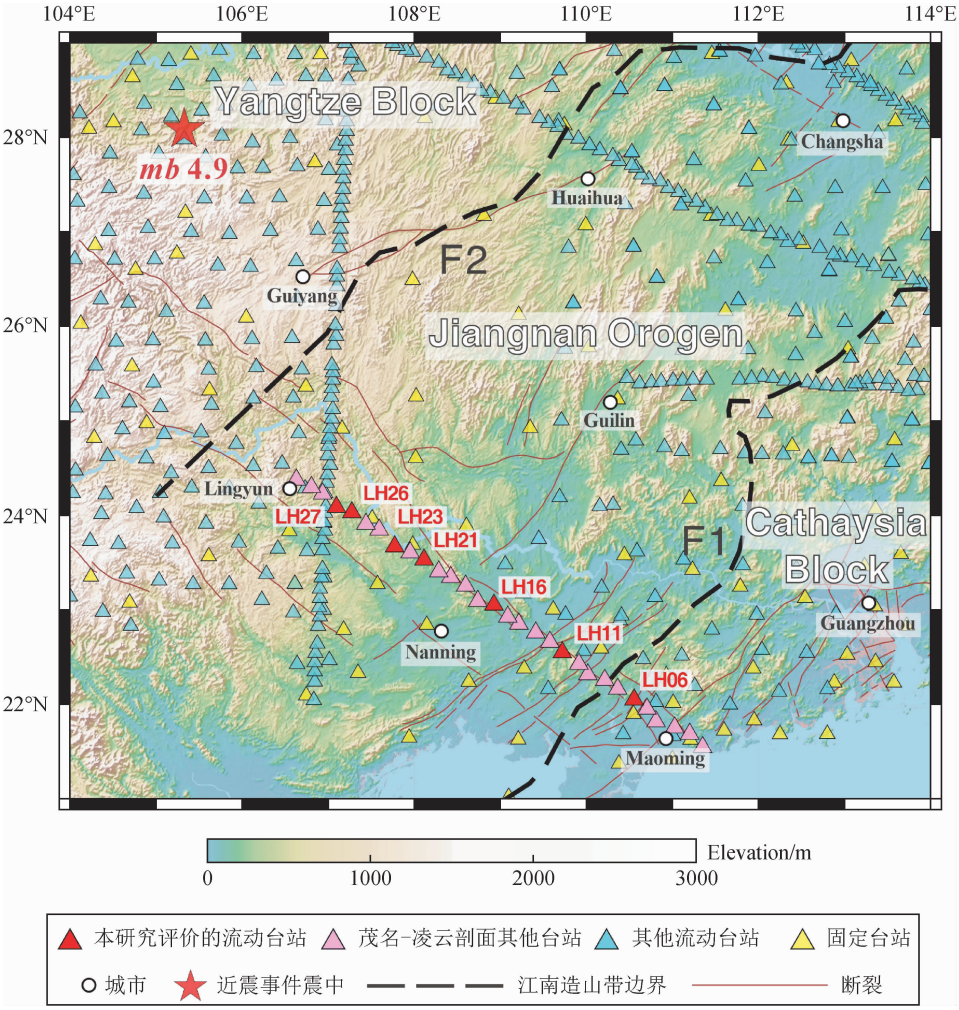


图 1 茂名—凌云宽频带流动地震剖面位置图

地震台站的点位信息收集自常利军等(2015)、张耀阳等(2018)、Zhang 等(2021a)、陈昌昕等(2022)、王冠之等(2022)、地震科学国际数据中心(2023)、韩如冰等(2023)、王祎然等(2024);F1、F2 为推测的江南造山带边界(严加永等,2022).

Fig. 1 Location of the Maoming—Lingyun temporary broadband seismic profile

Location information of broadband seismic stations is sourced from Chang *et al.* (2015), Zhang *et al.* (2018), Zhang *et al.* (2021a), Chen *et al.* (2022), Wang *et al.* (2022), International Earthquake Science Data Center (2023), Han *et al.* (2023) and Wang *et al.* (2024); F1 and F2 represent the inferred boundaries of the Jiangnan Orogen (Yan *et al.*,2022).

2023;王祎然等,2024;Xu *et al.*,2024;李思远等,2026),涉及数据质量分析和评价的研究却鲜见报道(Li *et al.*,2015;王芳等,2019;杨亚运等,2023).得益于较为完善的数据管理体系,宽频带固定地震台站(以下简称固定台站)的数据质量可以得到保证(刘瑞丰等,2008;郑秀芬等,2009;许卫卫,2018;王芳等,2019;地震科学国际数据中心,2023),但相比之下,宽频带流动地震台站(以下简称流动台站)的数据质量却参差不齐.首先,由于缺乏统一的流动台站观测技术规范(葛洪魁等,2013;刘政一等,2019;地震科学国际数据中心,2023),不同学者或机构布设的流动台站大多基于各自的野外经验(Li *et al.*,2015;许卫卫,2018).其次,流动台站在运行期间通常缺少维护,导致无法及时追踪地震仪的工作状态和性能变化(许卫卫,2018;包雪等,2023).最后,受密集覆盖的观测要求,以及经济成本、法律法规和人文风俗等因素的影响,流动台站在布设时会遇到各种复杂的岩性背景和台基条件,或者难以避开的噪声源等(表 1;葛洪魁等,2013;许卫卫等,2023).因此,有必要针对华南陆块流动台站的背景噪声水平和特征开展系统性的研究工作(图 1),分析其数据质量,避免非显性的异常数据被引入到后续的反演工作中,影响研究结果的可信度(Ringler *et al.*,2021).

基于上述原因,本研究利用 PSD PDF 方法,对华南陆块西部 7 个流动台站的背景噪声水平进行了计算,并对其特征及响应进行了研究.本研究旨在抛砖引玉,为后续针对华南陆块其他流动台站开展类似的工作提供参考,同时也为未来继续在华南陆块布设流动台站提供选址和建台等方面的参考依据.

1　数据与方法

茂名—凌云宽频带流动地震剖面位于华南陆块西部,在构造上横跨江南造山带西南段(图 1;严加永等,2022).该剖面布设于 2024 年 7 ~ 8 月,共由 30 个台站组成,台站之间的平均间距约为 20 km,使用的地震仪为 Güralp CMG-3TDE 一体机,频带范围为 120 s ~ 50 Hz.所有台站均用水泥浇筑"摆墩式"台基进行观测,数据的采样率为 50 Hz.同时还利用 PVC 套管、塑料桶、保温棉和塑料布等材料对地震仪进行了保温、防水以及防风等防护.除 LH27 台站以外(表 1),其余 29 个台站的台基深度均在 0.7 ~ 0.8 m 左右.本研究共收集该剖面 7 个台站 6 ~ 8 个月的观测数据开展了背景噪声水平的计算和分析工作(图 1;表 1).

表 1　本研究流动台站概况

Table 1　Summary of temporary broadband seismic stations used in this study

台站编号	数据时段	场地描述	近距离人文噪声源	下伏土层的土质或岩性结构	备注
LH06	2025/04/26—2025/10/23	位于房屋旁边鸡舍,场地内有日常家禽活动	人类及家禽(家畜)活动干扰	原土,土壤质地均匀	因地震仪故障,导致 2024/07—2025/04 采集的数据存在问题,于 2025/04/26 更换地震仪进行采集
LH11	2024/07/30—2025/04/23	位于房屋旁边空地,场地附近有日常人为活动	人类及家禽(家畜)活动干扰	回填土,但已经压实	无
LH16	2025/04/21—2025/10/19	位于农田,距离台站 2 m 有灌溉水渠且持续流水	水渠灌溉干扰	原土,土壤质地均匀	因地震仪存储模块遭到水汽腐蚀,导致 2024/07—2025/04 未采集到有效数据,于 2025/04/21 更换地震仪进行采集
LH21	2024/08/12—2025/04/30	位于房屋旁边鸡舍,场地内有日常家禽活动	人类及家禽(家畜)活动干扰	原土,土壤质地均匀	三分量均有约 1/3 的波形段存在数据缺失
LH23	2024/08/13—2025/05/02	位于农田,周围环境安静	无明显近距离人文噪声源	原土,土壤质地均匀	无
LH26	2024/08/13—2025/05/02	位于菜田,距离台站 2 m 为主路,但车流量不频繁	低车流量干扰	原土,土壤质地均匀	三分量均有约 1/10 的波形段存在数据缺失
LH27	2024/08/17—2025/05/03	位于农田,周围环境安静	无明显近距离人文噪声源	基岩	土壤较薄,向下挖掘约 0.2 m 即碰到基岩,挖掘难度较大,故用水泥将基岩平整后安装地震仪;另三分量均有约 1/4 的波形段存在数据缺失

PSD 计算和 PDF 统计参考 McNamara 和 Buland (2004)提出的方法.首先,将每个台站的连续波形数据按照分量(东西、南北和垂直分量,分别以 BHE、BHN 和 BHZ 表示)分别截取为时间长度为 1 h 的波形段(图 2e),相邻波形段的数据重叠率为 50%;其次,利用平均周期图法(Cooley and Tukey, 1965)计算每条 1 h 波形段的加速度 PSD(图 2d);最后,逐台站统计每个分量的 PSDs 结果,获得各台站的三分量 PDFs 分布特征(图 2 ~ 图 5;附图 1).关于该方法的原理和公式详见相应文献(McNamara and Buland,2004;McNamara and Boaz,2006;吴建平等,2012),在此不再赘述.其中,针对 1 h 波形段加速度 PSD 的计算步骤如下:

(1)将每条 1 h 波形段分为 16 小段,每小段的时间长度为 1310.70 s(65536 个采样点),相邻小段的数据重叠率约为 80%.

(2)对每小段波形数据进行去均值、去趋势和去除仪器响应等处理,并在去除仪器响应时输出为

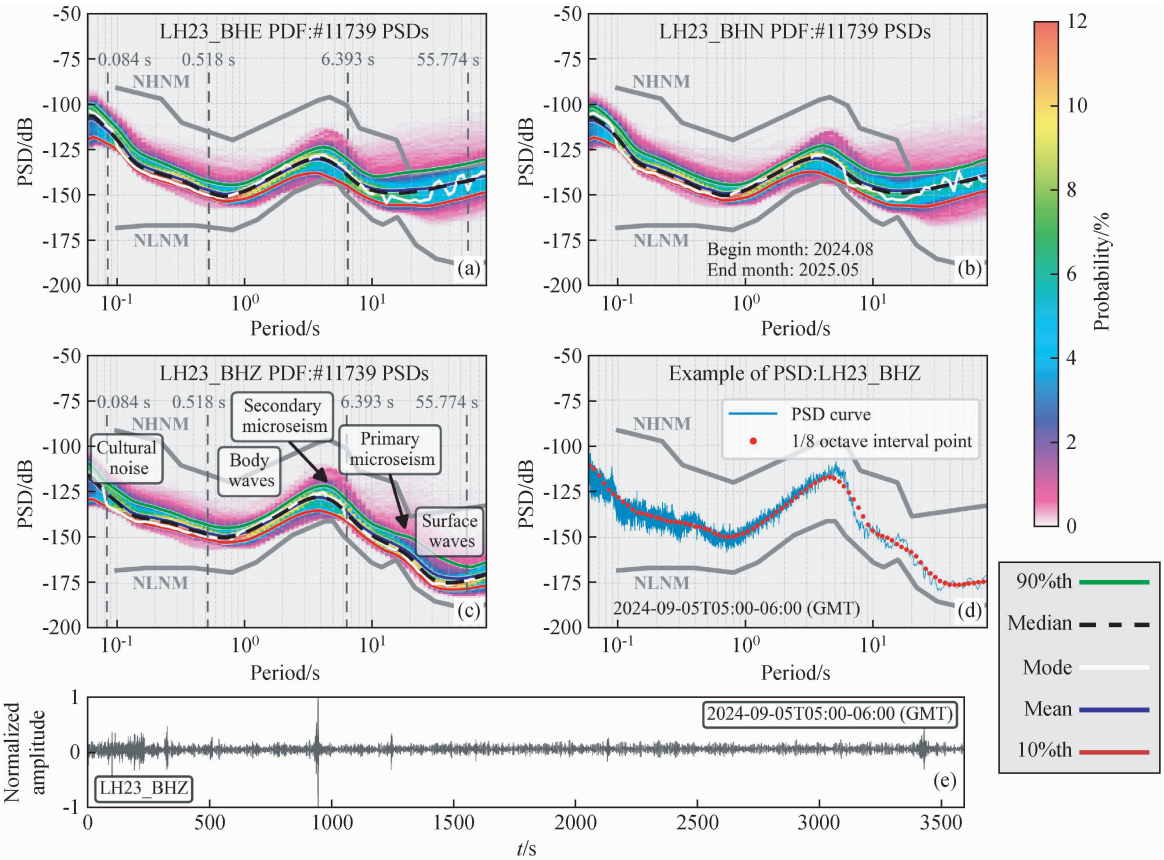


图 2 LH23 台站三分量 PDFs 分布图及垂直分量波形段的 PSD 曲线示例

(a—c) LH23 台站东西、南北和垂直分量 PDFs 分布图,各子图均给出了全球高/低噪声模型曲线(Peterson,1993),以及第 90 百分数、中位数、众数、均值和第 10 百分数统计曲线,图 2a、c 标注了四个中心周期的位置;(d) LH23 台站垂直分量波形段的 PSD 曲线及其经 1/8 倍频程滤波后的结果,图中给出了全球高/低噪声模型曲线(Peterson,1993);(e)图 2d 所示 PSD 曲线对应的波形段.

Fig. 2 Three-component PDFs at station LH23 and example of PSD curve for BHZ component waveform segment

(a—c) The PDFs of the BHE, BHN and BHZ components at station LH23. The new high/low noise model curves (Peterson,1993), as well as the 90% th, median, mode, mean and 10% th curves are shown in each subfigure. The four central periods are marked in Figs. 2a and 2c; (d) PSD curve of the BHZ component waveform segment at station LH23 and its average over full octaves in 1/8 octave intervals. The new high/low noise model curves (Peterson,1993) are shown in this subfigure; (e) The waveform segment corresponding to the PSD curve shown in Fig. 2d.

加速度波形数据.

(3)利用周期图法计算每小段加速度波形数据的 PSD,在计算时利用汉宁窗压制 FFT 变换产生的旁瓣效应,同时对因加窗而造成的能量损失进行校正.

(4)对所有 16 小段的加速度 PSDs 结果进行平均并将其转化为分贝(dB),获得整个 1 h 波形段的加速度 PSD(图 2d).

(5)对步骤(4)的结果进行 1/8 倍频程滤波,获得不同中心周期(频率)的 PSD(图 2d),并将其用于后续的 PDF 统计.

图 2 ~ 图 5 及附图 1 为 7 个台站的三分量 PDFs 分布图,各台站各分量参与统计的 PSDs 均超过了 8000 条,保证了 PDF 结果的可靠性. 这些 PDFs 分布图除反映台站的正常背景噪声以外,还包含了地震事件、邻近台站强烈人为活动以及系统瞬变等突发因素产生的干扰(图 6;Rastin *et al.*,2012;葛洪魁等,2013;王芳等,2019). 但由于这些突发因素通常以低概率事件存在于 PDF 分布图中,对整体结果的影响不大(Rastin *et al.*,2012;王芳等,2019),因此可认为图 2 ~ 图 5 及附图 1 基本反映了各台站的整体背景噪声水平和特征.

通过对 PDFs 分布图中第 90 百分数(90% th)、中位数(median)、众数(mode)、均值(mean)和第 10 百分数(10% th)等五条统计曲线分析后发现:第 90 百分数、第 10 百分数两条统计曲线基本限定了台站

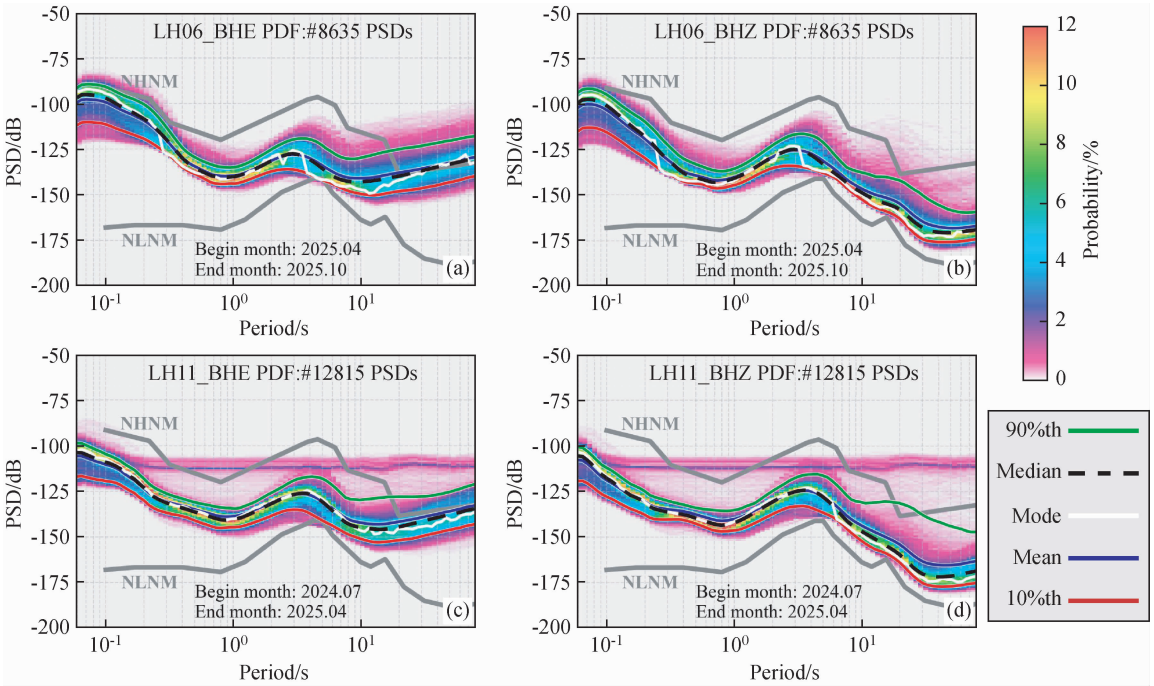


图 3　LH06、LH11 台站东西和垂直分量 PDFs 分布图

各子图均给出了全球高/低噪声模型曲线(Peterson,1993),以及第 90 百分数、中位数、众数、均值和第 10 百分数统计曲线.

Fig. 3　The PDFs of the BHE and BHZ components at stations LH06 and LH11

The new high/low noise model curves(Peterson,1993), as well as the 90% th, median, mode, mean and 10% th curves are shown in each subfigure.

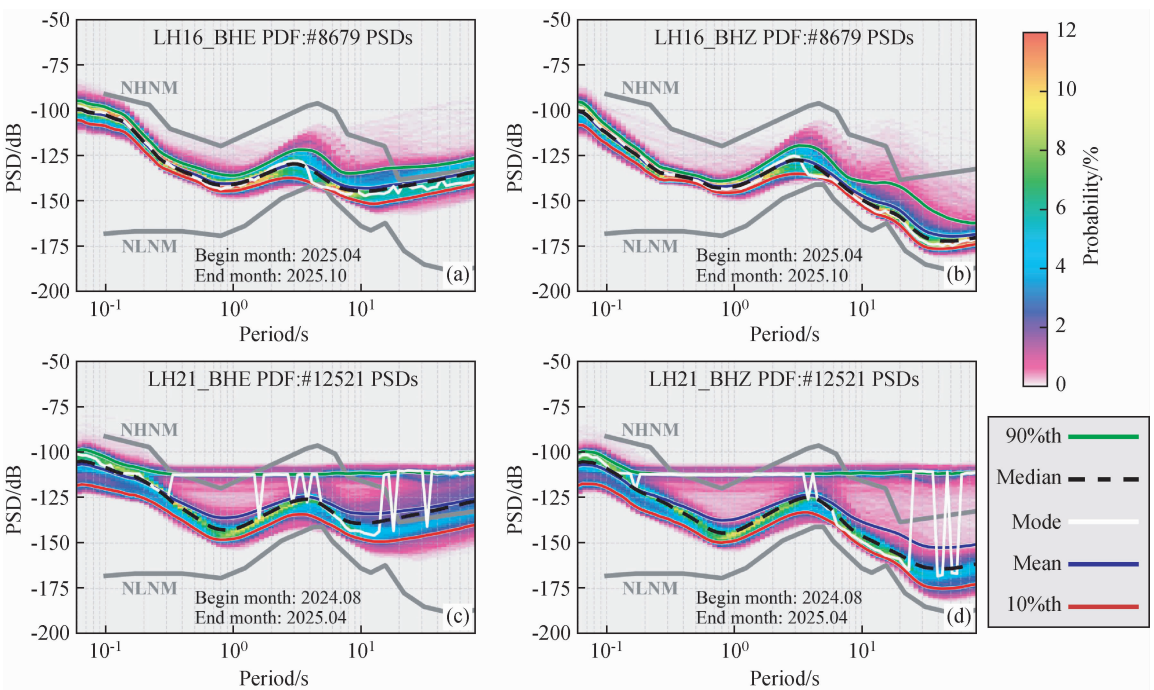


图 4　同图 3,LH16、LH21 台站东西和垂直分量 PDFs 分布图

Fig. 4　The same as Fig. 3 but at stations LH16 and LH21

背景噪声的上、下限;中位数、众数和均值统计曲线的重合性相对较好,特别是众数和中位数的统计曲线更加贴合(图 2 ~ 图 5;附图 1).然而,尽管众数统计最能客观反映台站的背景噪声水平,但其曲线容

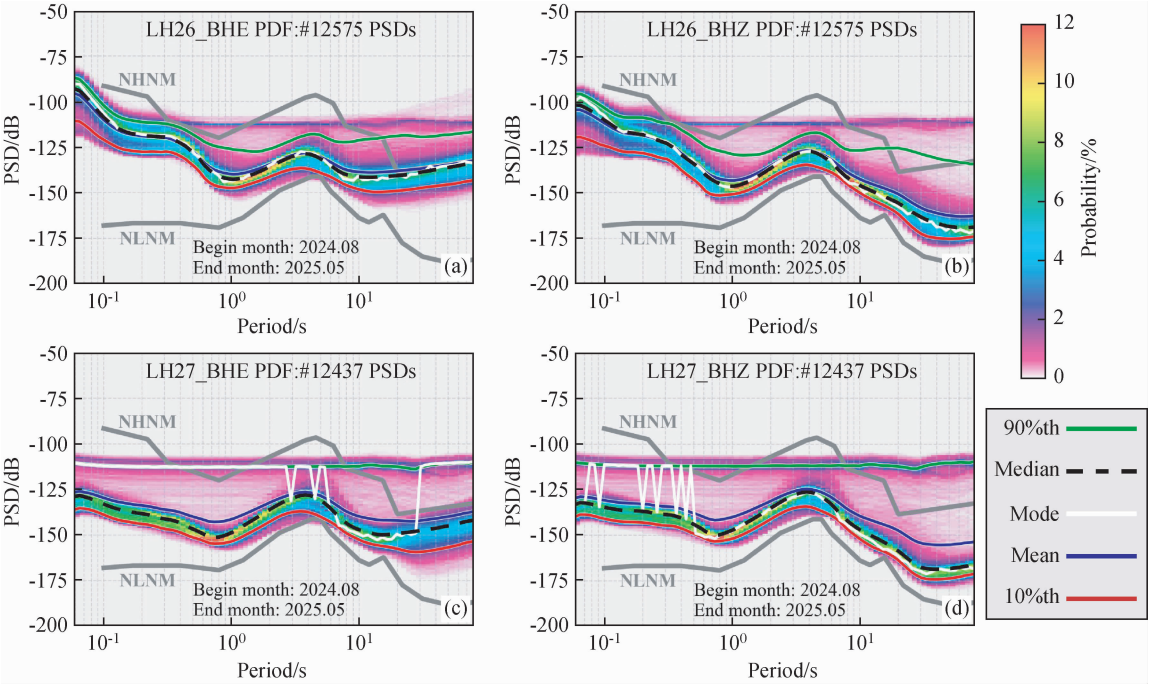


图 5 同图 3,LH26、LH27 台站东西和垂直分量 PDFs 分布图

Fig. 5 The same as Fig. 3 but at stations LH26 and LH27

易受仪器性能或人文噪声的影响而发生跳变(图 2 ~ 图 5;附图 1;McNamara and Buland,2004;Díaz *et al.*,2010;葛洪魁等,2013;王芳等,2019);均值统计的曲线虽然相对平滑,但也容易受异常值的影响而产生较大的偏离(图 2 ~ 图 5;附图 1;Díaz *et al.*,2010;葛洪魁等,2013;王芳等,2019). 因此,本研究采用中位数统计用来表征和对比各台站的背景噪声水平(图 6 ~ 图 8;McNamara *et al.*,2009;葛洪魁等,2013;Hutt *et al.*,2017;王芳等,2019;许卫卫等,2023). 由于两个水平分量的 PDFs 分布特征非常类似(图 2a—c;附图 2;许卫卫等,2023),本研究在后续正文中仅给出各台站东西分量 PDFs 分布图(图 3 ~ 图 5),南北分量 PDFs 分布图详见附图 1.

2 结果分析与讨论

地震台站的背景噪声主要包括仪器自噪声和外部噪声两大类型(Ringler and Hutt,2010;Rastin *et al.*,2012;葛洪魁等,2013;许卫卫等,2017;王芳等,2019;杨千里等,2019). 在性能正常的前提下,地震仪的自噪声水平相对较低(Ringler and Hutt,2010;许卫卫等,2017,2023;王芳等,2019),因此本研究各台站的背景噪声主要来自不同外部噪声源的干扰(图 2 ~ 图 5;附图 1).

2.1 流动台站不同频段的背景噪声来源及特征分析

对比 7 个台站的场地条件、观测环境和仪器性能(表 1),LH23 台站具有台基下伏土质质地均匀、观测环境安静,以及地震仪工作状态稳定等优点,综合观测条件位于前列. 本节以该台站为例,对流动台站不同频段的背景噪声来源及其特征进行分析和探讨.

2.1.1 LH23 台站背景噪声整体特征和规律

如图 2a—c 所示,LH23 台站三分量的 PSDs 曲线大部分介于 NHNM 和 NLNM 之间,且中位数统计曲线也均低于 NHNM,反映出该台站在 0.06 ~ 80 s 周期范围内整体较低的背景噪声水平,同时也说明这批观测数据的质量相对较好. 图 2d 为垂直分量典型 1 h 波形段(北京时间 13:00—14:00)的加速度 PSD 曲线,相应的波形段见图 2e. 尽管该波形段存在着明显的人文噪声干扰(图 2e),但 PSD 曲线依然具有较好的形态特征,且位于合理的区间范围之内(图 2d).

图 9 为 LH23 台站四个中心周期的噪声功率谱密度分布直方图,中心周期的位置见图 2a、c,分别代表了 LH23 台站不同频段的背景噪声特征及变化规律(McNamara *et al.*,2009;Díaz *et al.*,2010;葛洪魁

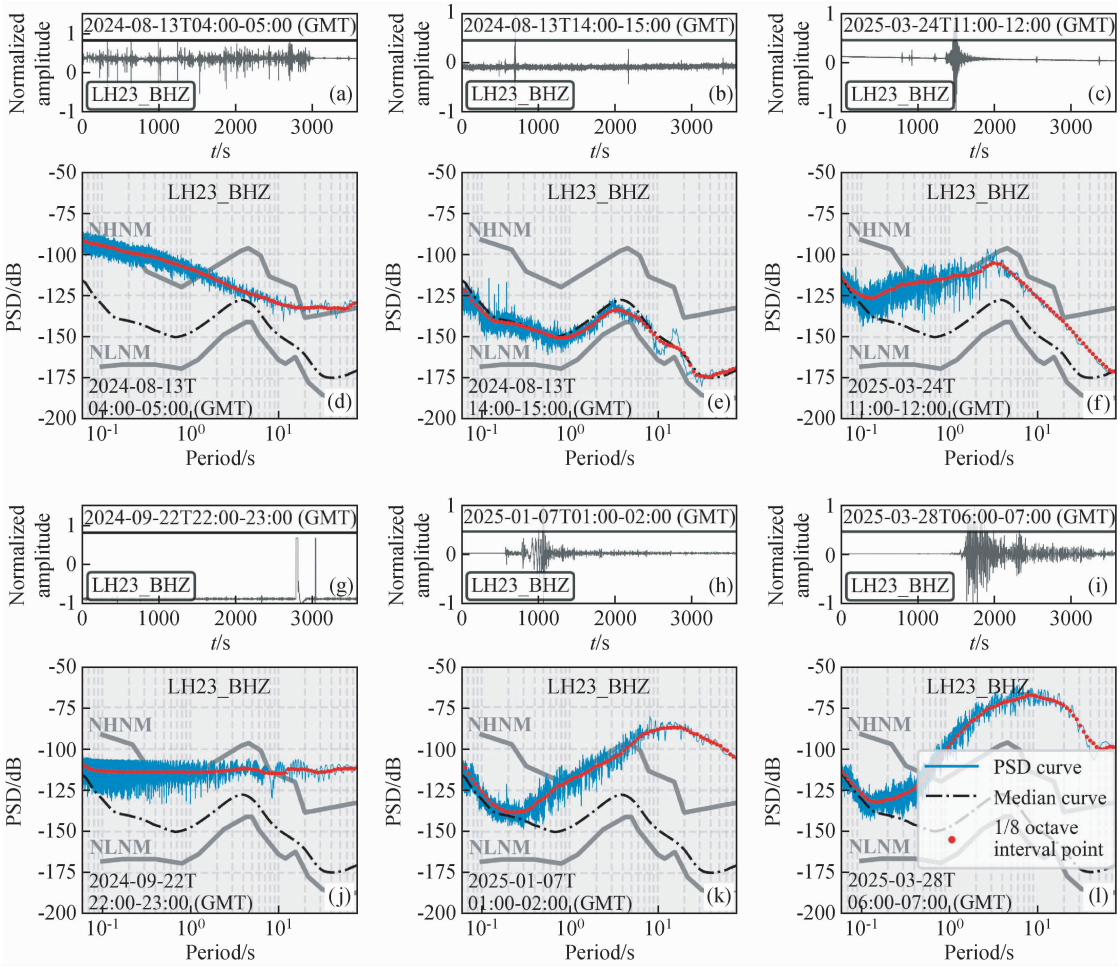


图 6　LH23 台站垂直分量波形段及对应 PSDs 曲线示例

(a、d)强烈人为活动干扰;(b、e)无异常干扰;(c、f)叙永县 mb 4.9 级地震,该近震事件的震中见图 1;(g、j) 阶跃标定和数据缺失组合;(h、k)定日县 M_W6.8 级地震;(i、l)缅甸 M_W7.9 级地震;图(d)—(f)、(j)—(l)中黑色点划线为 LH23 台站垂直分量 PDF 的中位数统计曲线.

Fig. 6　Examples of BHZ component waveform segments recorded at station LH23 and corresponding PSD curves

(a,d) Intense anthropogenic activity; (b,e) Daily condition; (c,f) Xuyong mb 4.9 earthquake, the epicentral location of this local event is shown in Fig. 1; (g,j) Combination of calibration pulse and data gap; (h,k) Dingri M_W6.8 earthquake. (i,l) Myanmar M_W7.9 earthquake. The black dash-dot line in subfigures (d)—(f) and (j)—(l) shows the PDF median curve of the BHZ component at station LH23.

等,2013;王芳等,2019;胡宝慧等,2020):

(1)在高频频段(<约 0.2 s),水平和垂直分量的 PSD 统计均呈双峰分布的形态特征,且水平分量的背景噪声水平高于垂直分量,最大可达 12 dB 左右.随着周期的增加,两个分量的背景噪声水平均有所衰减,且两者之间的差距也从约 0.1 s 开始逐渐缩小(图 7,图 8a,图 9a).

(2)在短周期频段(约 0.2 ~ 1 s),水平和垂直分量的 PSD 统计均逐渐转变为单峰分布的形态特征,两个分量的背景噪声水平基本相当,并且随着周期的增加逐渐衰减.同时在该频段,PSD 统计的集中度也相对较高(图 7,图 8a,图 9b).

(3)在微震频段(约 1 ~ 20 s),特别是次级微震附近,水平和垂直分量的 PSD 统计均呈双峰分布的形态特征,且水平分量的背景噪声水平与垂直分量相差不大,甚至还略低于垂直分量(图 7,图 8,图 9c).

(4)在长周期频段(>约 20 s),水平和垂直分量的 PSD 统计在形态特征和集中度方面均存在着较大的差别,水平分量呈双峰分布的形态特征,集中度相对较低;垂直分量呈单峰分布的形态特征,集中度相对较高.随着周期的增加,水平分量的背景噪声水平逐渐升高,但垂直分量却迅速衰减,两者之间的差距最大超过 30 dB(图 7,图 8a,图 9d).

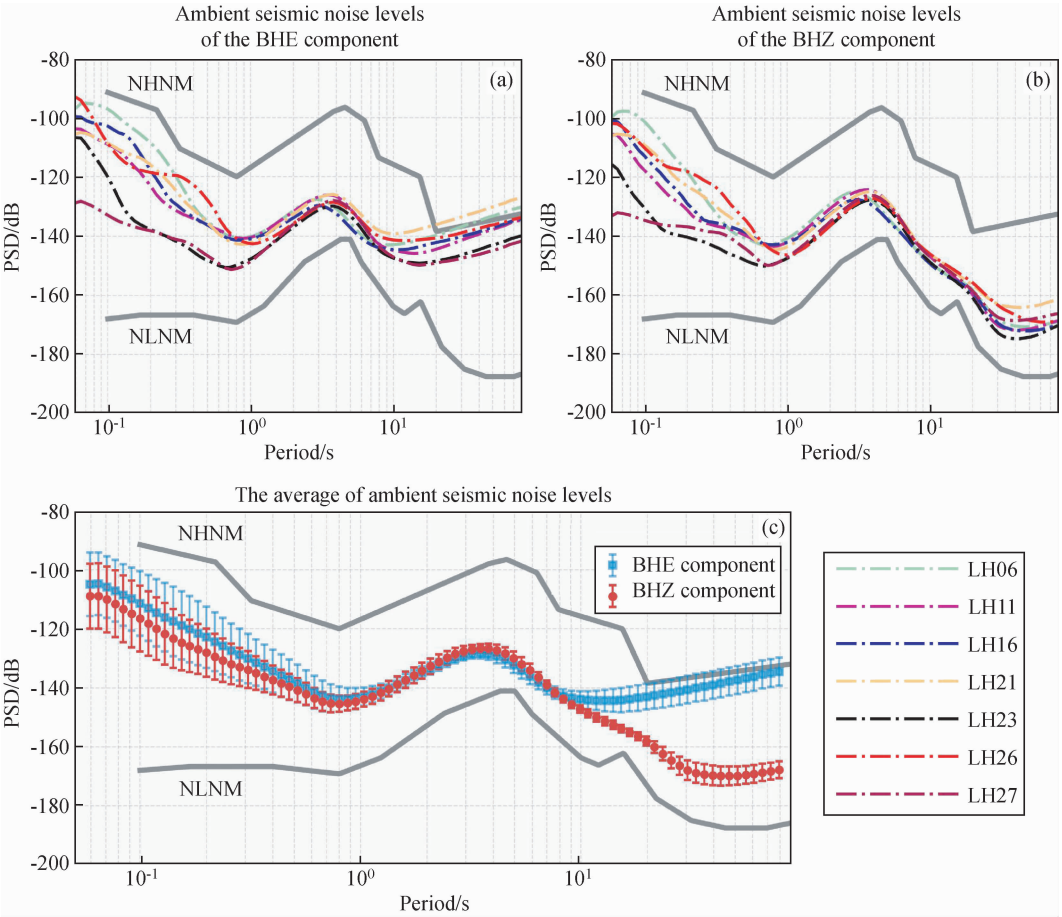


图 7 各台站东西和垂直分量背景噪声水平对比

(a)东西分量对比;(b)垂直分量对比;(c)东西和垂直分量背景噪声水平均值;采用 PDF 的中位数统计对比和计算背景噪声水平.

Fig. 7 Comparison of ambient seismic noise levels for the BHE and BHZ components across stations

(a) Comparison of the BHE component; (b) Comparison of the BHZ component; (c) Average ambient seismic noise levels for the BHE and BHZ components across stations. The PDF median statistics are used for comparing and calculating ambient seismic noise levels.

2.1.2 LH23 台站高频频段背景噪声来源及特征

高频频段的背景噪声主要来源于风、急流等自然因素引起的高频自然噪声,以及台站附近人为活动产生的人文噪声(Wilson *et al.*, 2002; McNamara and Buland, 2004; Bonnefoy-Claudet *et al.*, 2006; McNamara *et al.*, 2009; Díaz *et al.*, 2010; Rastin *et al.*, 2012;葛洪魁等, 2013;刘旭宙等, 2014;王芳等, 2019;胡宝慧等, 2020;张文文等, 2022). 由于 LH23 台站附近并不存在瀑布、小溪等持续性高频噪声源(表 1),因此其高频频段的背景噪声主要来自附近人为活动的干扰,并且呈现明显的日变化规律(图 10i、j,图 11a、b). 这些随机人为活动经过复杂叠加后在台站附近形成近似稳定的噪声场,持续对台站产生干扰(葛洪魁等,2013;王芳等,2019). 图 12 为基于偏振分析得到的 LH23 台站背景噪声源方位概率分布结果(Koper and Hawley, 2010;张丽娜等, 2025),如图所示,该台站高频频段的背景噪声源主要位于台站 130°~160°,以及 300°~360°的方位(图 12).

人文噪声主要以高频面波的方式进行传播(图 2;McNamara and Buland, 2004;Díaz *et al.*, 2010;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;王芳等,2019),因此其对水平分量的干扰要强于垂直分量,进而导致水平分量高频频段的背景噪声水平显著高于垂直分量(图 9a,图 10i、j,图 11a、b). 而 PSD 统计的双峰分布形态特征则进一步说明高频频段的背景噪声与台站附近的人为活动密切相关. 通过将 0.084 s 的噪声功率谱密度按照昼夜分别统计后发现,垂直和水平分量的双峰形态均得到了较好的分离,白日的背景噪声水平高出夜晚约 10 dB(图 10i、j,图 11a、b;

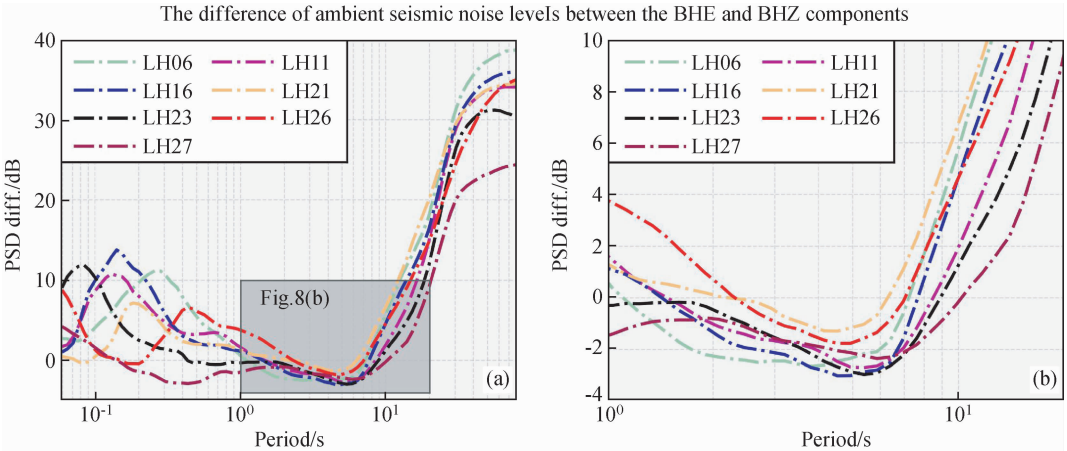


图 8　各台站东西和垂直分量背景噪声水平差值

采用 PDF 的中位数统计计算背景噪声水平.

Fig. 8　The difference of ambient seismic noise levels between the BHE and BHZ components at each station

The PDF median statistics are used for calculating ambient seismic noise levels.

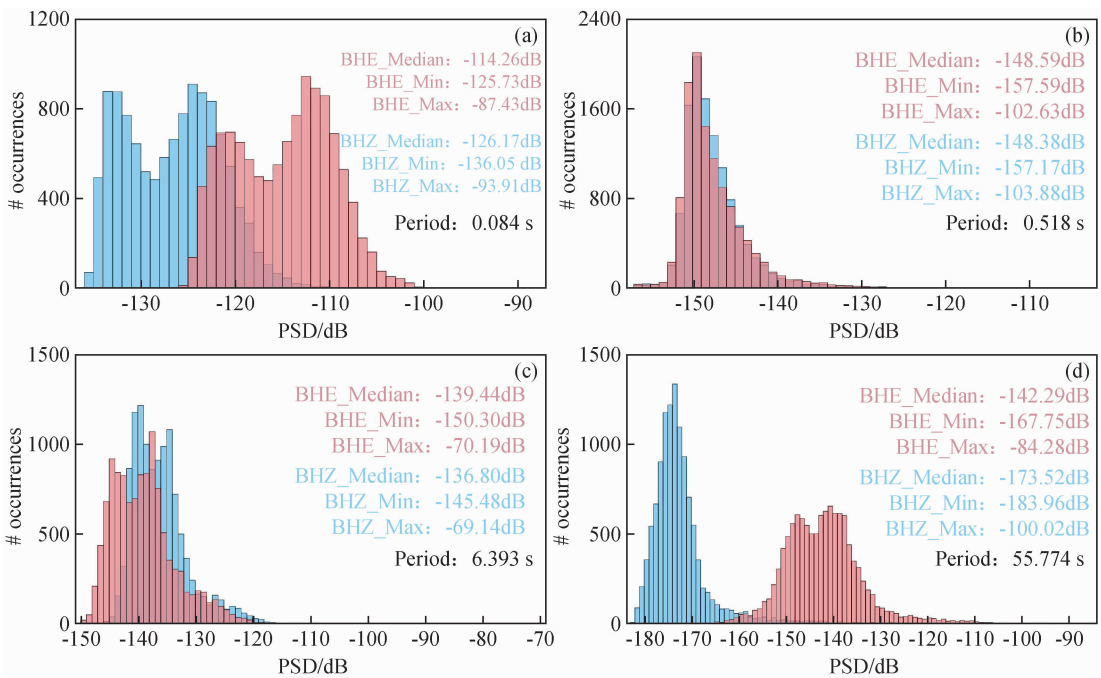


图 9　LH23 台站 0.084 s(a)、0.518 s(b)、6.393 s(c)和 55.774 s(d)四个中心周期的噪声功率谱密度分布直方图

各分量噪声功率谱密度的中位数、最大值和最小值见各子图右上角;中心周期的位置见图 2a、c.

Fig. 9　Histograms of PSDs at four central periods of 0.084 s (a), 0.518 s (b), 6.393 s (c) and 55.774 s (d) for station LH23

The median, maximum, and minimum of PSD results of each component are marked in the upper right corner of each subfigure.

The four central periods are indicated in Figs. 2a and 2c.

Bonnefoy-Claudet *et al.*,2006;Díaz *et al.*,2010;Rastin *et al.*,2012;刘旭宙等,2014;许卫卫等,2023).

2.1.3　LH23 台站短周期频段背景噪声来源及特征

短周期频段的背景噪声源同样以人文噪声为主,故也存在着相应的日变化规律(图 10i、j,图 11c、d;Wilson *et al.*,2002;McNamara and Buland,2004;Bonnefoy-Claudet *et al.*,2006;McNamara *et al.*,2009;Díaz *et al.*,2010;Rastin *et al.*,2012;葛洪魁等,2013;

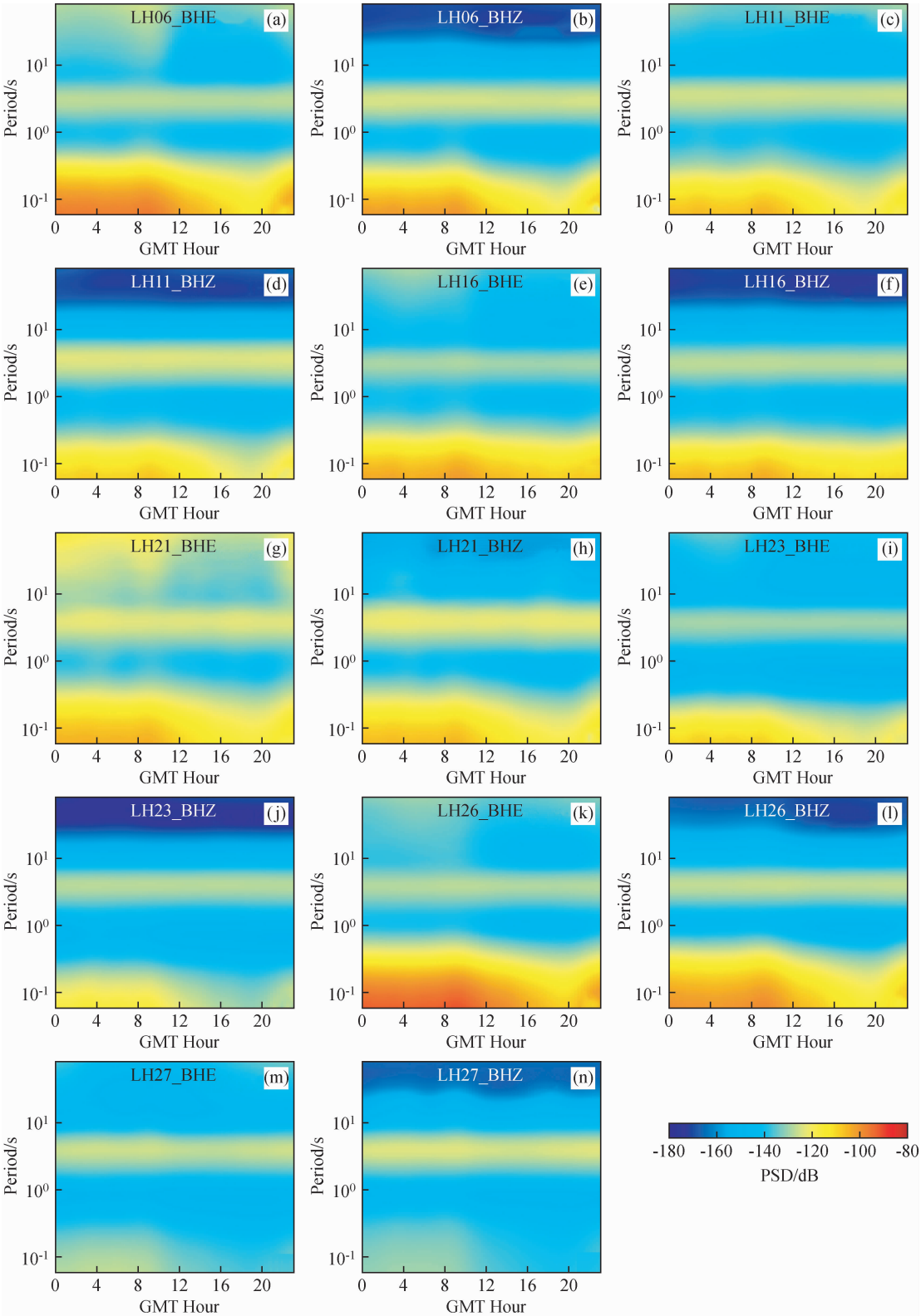


图 10 各台站东西和垂直分量背景噪声水平日变化图

Fig. 10 Diurnal variations of ambient seismic noise levels in the BHE and BHZ components at each station

刘旭宙等,2014;王芳等,2019;许卫卫等,2023). 如图 12 所示,LH23 台站短周期频段的背景噪声源主要位于台站 -60°~60°的方位. 但不同于高频频段的人文噪声源主要分布于台站附近,短周期频段的

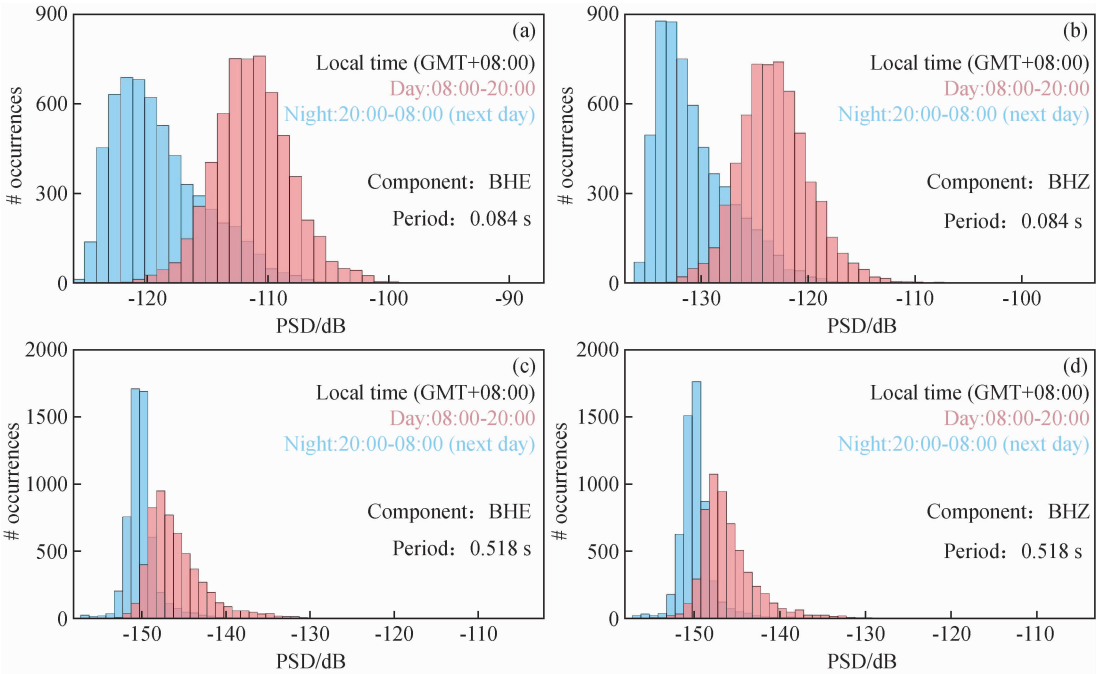


图 11　LH23 台站 0.084 s(a,b)和 0.518 s(c,d)中心周期噪声功率谱密度昼夜分布直方图

Fig. 11　Diurnal histograms of PSDs at central periods of 0.084 s (a,b) and 0.518 s (c,d) for station LH23

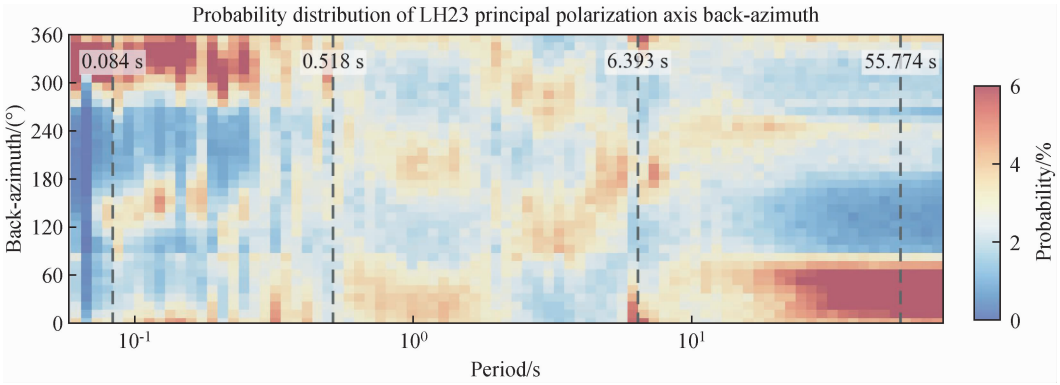


图 12　基于偏振分析得到的 LH23 台站噪声源反方位角概率分布

图中虚线代表图 2a、c 中心周期的位置.

Fig. 12　The probability distribution of back-azimuth of noise sources at station LH23 obtained from polarization analysis

The dashed lines indicate the central periods shown in Figs. 2a and 2c.

人文噪声源距离台站相对略远.由于高频面波会随着传播距离和深度的增加而迅速衰减(McNamara and Buland,2004;Díaz *et al.*,2010;葛洪魁等,2013;王芳等,2019),因此当远处的人文噪声干扰传播到 LH23 台站时,其整体能量已经有所衰减,且频率越高的成分衰减的越多,进而导致台站的背景噪声水平随着周期的增加而逐渐衰减(图 7,图 8a).由于大量高频成分已经被过滤,因此 PSD 统计在短周期频段的分布也更加集中,且昼夜之间的差距也不如高频频段明显(图 9a、b,图 10i、j,图 11).

2.1.4　LH23 台站微震频段背景噪声来源及特征

微震频段的背景噪声源以微震噪声为主(McNamara and Buland, 2004; McNamara *et al.*, 2009;Díaz *et al.*,2010;Rastin *et al.*,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;Wang *et al.*, 2018;王芳等,2019;胡宝慧等,2020;王俊等,2022;张文文等,

2022;张丽娜等,2025;裴烁瑾和周元泽,2026).微震噪声的成分比较复杂,主要以面波为主,同时还包含有部分体波(Bonnefoy-Claudet *et al.*,2006;Tanimoto *et al.*,2006;Koper and Hawley,2010;Koper *et al.*,2010;Landès *et al.*,2010;Wang *et al.*,2018),在PDFs分布图及PSDs曲线中表现为大、小两个峰值,分别被称为次级微震(第二类地脉动,Secondary microseism)和主微震(第一类地脉动,Primary microseism)(图2~图5;附图1).其中,次级微震被认为是由周期相同、方向相反的海洋波叠加并产生驻波所引起的;而主微震则被认为是由海洋波与海岸线耦合造成海底压力变化所导致的(McNamara and Buland,2004;Gerstoft and Tanimoto,2007;Díaz *et al.*,2010;Landès *et al.*,2010;葛洪魁等,2013;王芳等,2019;王俊等,2022;张文文等,2022;张丽娜等,2025;裴烁瑾和周元泽,2026).已有的研究结果表明,华南陆块微震噪声的来源比较复杂,包括阿拉斯加、南印度洋、北大西洋、南极洲等海域,以及我国东南部、南部沿海岸线一带的近海海域(Wang *et al.*,2018;王芳等,2019;王俊等,2022;张丽娜等,2025;裴烁瑾和周元泽,2026),这些方位在图12中均有不同程度的体现.

在本研究中,次级微震主要集中在约1~8 s的周期范围,受昼夜交替的影响不大,而与季节的变化有关(图2~图5,图10,图13;附图1;Tanimoto *et al.*,2006;Gerstoft and Tanimoto,2007;Díaz *et al.*,2010;Koper *et al.*,2010;Landès *et al.*,2010;Rastin *et al.*,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;王芳等,2019;胡宝慧等,2020).主微震则主要集中在约10~20 s的周期范围,但仅在部分台站垂直分量PDFs分布图中有所反映(图2~5;附图1).值得注意的是,在次级微震的周期范围内,LH23台站水平分量的背景噪声水平略低于垂直分量(图8,图9c),这一现象在其他台站中也均有反映(图8),暗示着次级微震对垂直分量的干扰要强于水平分量,推测可能与其包含的体波成分有关(Koper *et al.*,2010;Landès *et al.*,2010;刘旭宙等,2014).

2.1.5 LH23台站长周期频段背景噪声来源及特征

长周期频段的背景噪声源以长周期自然噪声为主,其主要成分也为面波(图2).长周期自然噪声的来源比较复杂,温度、气压、磁场等自然因素的变化,地面的局部沉降和变形,以及地球的自由振荡等,均可引起相应的长周期自然噪声(Wilson *et al.*,2002;McNamara and Buland,2004;McNamara *et al.*,2009;Rastin *et al.*,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;Matichard and Evans,2015;Hutt *et al.*,2017;王芳等,2019;许卫卫等,2023).其中,由温度和气压等自然因素变化所引起的地倾斜噪声是长周期频段的主要噪声源之一,这种温压的扰动会诱导重力产生微弱的变化(如地面的振动、倾斜或者形变),并且耦合到地震仪的观测数据中(McNamara *et al.*,2009;Koper and Hawley,2010;Rastin *et al.*,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;Matichard and Evans,2015;Hutt *et al.*,2017;许卫卫等,2023).已有的研究结果表明,地倾斜噪声对水平分量的干扰比较显著,需大幅度增加台基深度才能得以改善;对垂直分量的干扰则相对有限,仅需合理的保温隔离防护便可实现较好的降噪效果(Wilson *et al.*,2002;Rastin *et al.*,2012;Matichard and Evans,2015;Hutt *et al.*,2017;刘政一等,2019;许卫卫等,2023).尽管LH23台站已经实施了保温防风等隔离防护措施,但由于台基深度仅为0.7~0.8 m,尚未达到可以有效改善地倾斜噪声的深度(许卫卫等,2023),因此导致水平和垂直分量的背景噪声水平存在着较大的差距(图2a—c,图7,图8a,图9d,图10i、j).此外,从图10i和图14a中也可以看出,水平分量在长周期频段存在着一定的日变化规律,白日的背景噪声水平略高于夜晚,推测可能因为白日的温压变化相对活跃,导致地倾斜噪声水平相对较高(刘旭宙等,2014).相比之下,垂直分量的日变化规律却不明显(图10j,图14b),推测可能因为保温防风等隔离防护措施起到了作用.至于水平分量PSD统计双峰分布的形态特征(图9d),虽然该形态特征表现出一定的季节性变化规律(图14c;刘旭宙等,2014;杨千里等,2019),但由于引起长周期自然噪声的因素复杂各异(Rastin *et al.*,2012),故仍须开展深入的分析和研究.

2.2 PSD高异常值来源及其曲线特征

引起PSD出现高异常值的原因主要包括地震事件、邻近台站强烈人为活动以及系统瞬变等因素(图6).尽管这些低概率噪声属于叠加在正常背景噪声之上的额外干扰(McNamara and Buland,2004;Rastin *et al.*,2012;Ringler *et al.*,2021),但通过甄别相应的PSD曲线特征和波形段,以及分析这些高异常值产生的原因,可为仪器性能评估,以及数据筛选等工作提供参考.本节以LH23台站垂直分量为例,针对上述三种因素的PSDs曲线特征进行分析.

地震事件会导致PSD出现剧烈扰动,但受震中

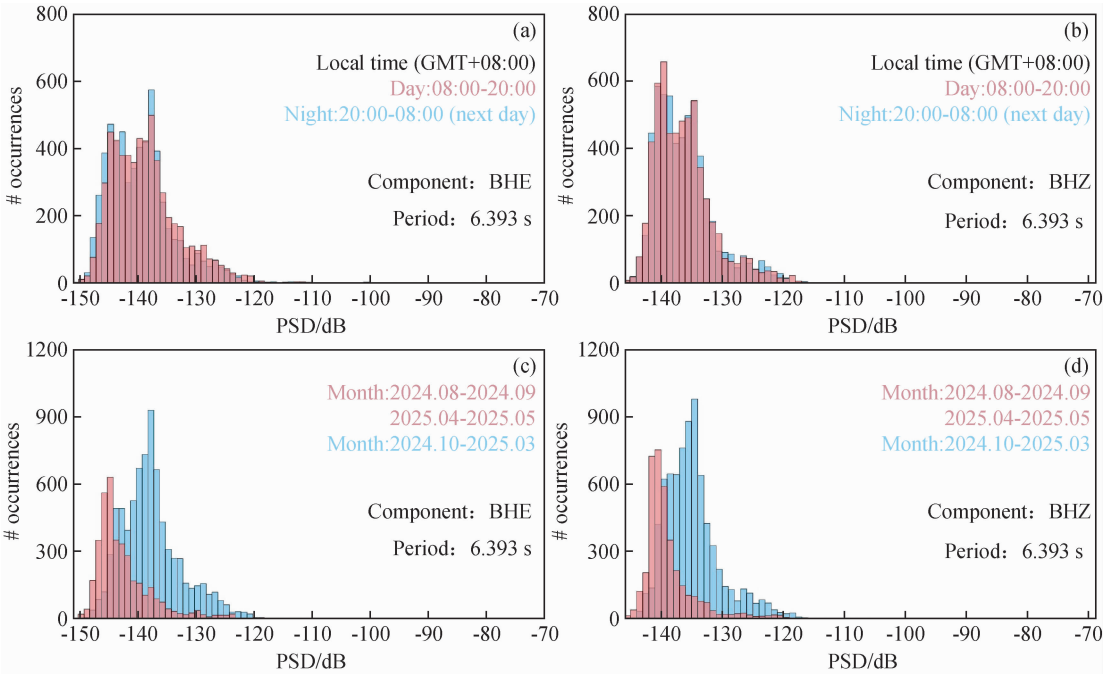


图 13　LH23 台站 6.393 s 中心周期噪声功率谱密度昼夜(a,b)和季节(c,d)分布直方图

Fig. 13　Diurnal (a,b) and seasonal (c,d) histograms of PSDs at central period of 6.393 s for station LH23

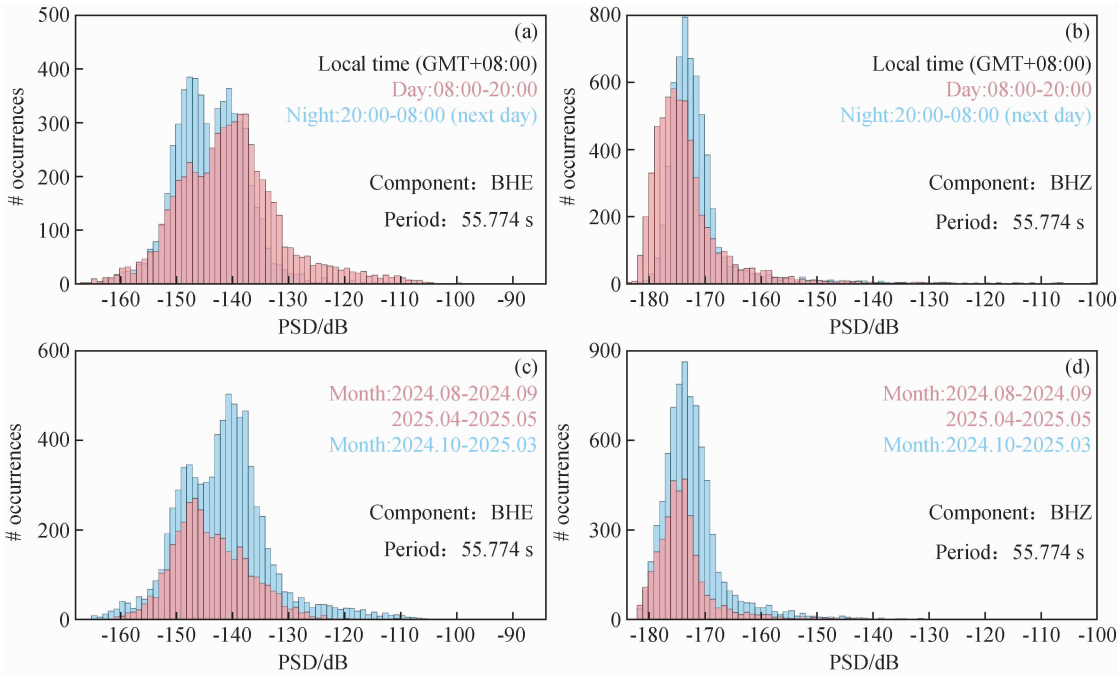


图 14　LH23 台站 55.774 s 中心周期噪声功率谱密度昼夜(a,b)和季节(c,d)分布直方图

Fig. 14　Diurnal (a,b) and seasonal (c,d) histograms of PSDs at central period of 55.774 s for station LH23

距、震级等因素的影响,近震和远震事件的 PSDs 曲线在形态上同样存在着差异(图 6c、f、h、i、k、l;McNamara and Buland,2004;王芳等,2019;杨千里等,2019). 图 6f 为典型小型近震事件的 PSD 曲线,相应的波形段见图 6c. 该近震事件的发震日期为 2025 年 3 月 24 日,震级 mb4.9 级,震中位于叙永

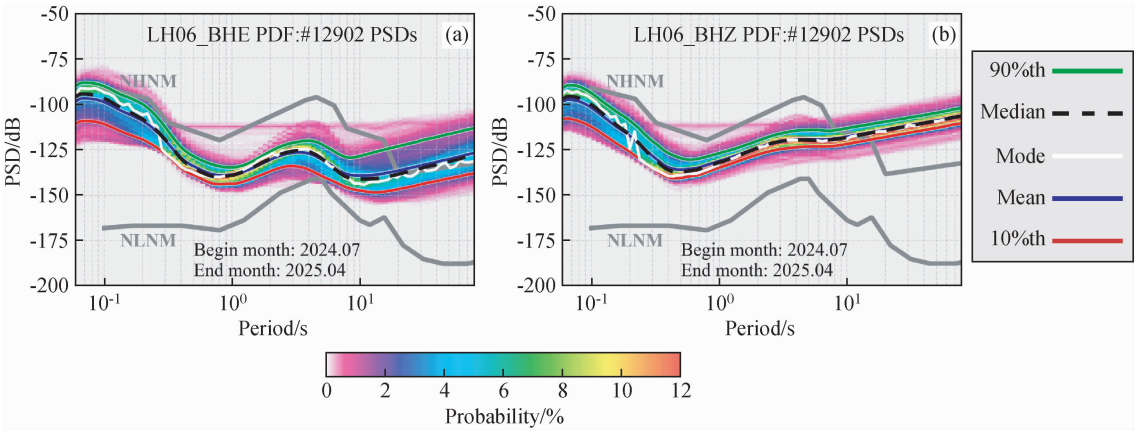


图 15 LH06 台站更换地震仪前东西和垂直分量 PDFs 分布图

各子图均给出了全球高/低噪声模型曲线(Peterson,1993),以及第 90 百分数、中位数、众数、均值和第 10 百分数统计曲线.

Fig. 15 The PDFs of the BHE and BHZ component at station LH06 prior to the seismograph replacement

The new high/low noise model curves(Peterson,1993), as well as the 90% th, median, mode, mean and 10% th curves are shown in each subfigure.

县,距离 LH23 台站约 550 km(图 1).尽管该近震事件的 PSD 曲线仍基本介于 NHNM 和 NLNM 之间,但已出现明显的变形,且显著高于台站的背景噪声水平(图 6f).相比之下,大型远震事件则会导致 PSD 曲线在 10 s 以后,甚至在 1 s 以后便显著高于 NHNM(图 6h、i、k、l;McNamara and Buland,2004;杨千里等,2019).如 6.393 s 和 55.774 s 垂直分量 PSD 的最大值(图 9c、d),便分别源于 2025 年 3 月 28 日缅甸 M_W7.9 级地震(图 6i、l)和 2025 年 1 月 7 日定日县 M_W6.8 级地震产生的干扰(图 6h、k).由于地震记录是层析成像(如:Jiang *et al.*,2021;Xi *et al.*,2023;Xu *et al.*,2024)、接收函数(如:张耀阳等,2018;Zhang *et al.*,2021a,b;瞿梦茹等,2022;李思远等,2026)以及剪切波分裂(如:常利军等,2015;石玉涛和高原,2022;王祎然等,2024)等研究的基础数据,因此由地震事件引起的 PSD 扰动越显著,越有利于开展后续的研究工作.

邻近台站强烈人为活动会导致 PSD 曲线发生畸变.如 0.084 s 和 0.518 s 垂直分量 PSD 的最大值便均源于布设台站时产生的干扰(图 6a、d,图 9a、b).该时段的 PSD 曲线不仅在大部分周期范围高于 NHNM,且形态特征也与 NHNM、NLNM 及中位数统计曲线严重不符(图 6d).但随着野外工作人员的撤离,PSD 曲线迅速恢复正常(图 6b、e).

系统瞬变是指地震仪在工作中因各种原因所产生的突发性扰动,如阶跃标定、数据缺失,以及摆锤校准等现象,同样会导致 PSD 曲线出现严重变形(McNamara and Buland,2004;Rastin *et al.*,2012;王芳等,2019;杨千里等,2019;Ringler *et al.*,2021).图 6g为 LH23 台站垂直分量的一种典型系统瞬变信号(约占波形段总数的 0.1%),具体表现为阶跃标定和数据缺失的组合.尽管该瞬变信号的整体持续时间未超过 5 min(图 6g),但仍导致 PSD 曲线在整个周期范围内沿着 110 dB 左右表现为一条近似直线(图 6j).系统瞬变产生的异常数据是开展后续研究时需关注的一个重点(Ringler *et al.*,2021),特别是一些工作年限较长的地震仪,其内部元器件已经出现了明显的老化或变形,因此系统瞬变也比较严重(表 1;图 3~图 5,图 15;附图 1,附图 5;许卫卫,2018;包雪等,2023).针对这些系统瞬变产生的异常数据,需根据其异常来源及持续时间进行严格的甄别,以便最大限度地利用这些受损数据开展研究工作(附图 5).

2.3 华南陆块宽频带流动地震观测的建议与思考

近些年来,尽管学者们已经在华南陆块开展了广泛的宽频带流动地震观测并取得了一系列成果,但仍存在大量的科学问题有待于深入探索和研究(图 1;张永谦等,2022).由于中国地震局牵头组织实施的“中国地震科学台阵探测计划”(ChinArray)(宋丽莉等,2012;常利军等,2015;高家乙等,2016;Wang *et al.*,2018;地震科学国际数据中心,2023)目前还尚未覆盖华南陆块,因此在未来一段时间内,华南陆块的宽频带流动地震观测仍将以小规模或针对性的局部观测为主(如:Shi *et al.*,2013;叶卓等,2013;张耀阳等,2018;檀玉娟等,2021;Zhang *et al.*,2021b,2023;陈昌昕等,2022;Li *et al.*,2022,2023;王

冠之等,2022;Xi *et al*.,2023;王祎然等,2024).结合本研究的结果,可为在华南陆块继续开展宽频带流动地震观测提供科学的选址和建台等依据.

2.3.1　场地选址的建议与思考

近距离人文噪声源是影响台站背景噪声的一个重要因素(Rastin *et al*.,2012;吴建平等,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;王芳等,2019;张文文等,2022).华南陆块地质条件复杂、自然地理特征丰富、交通繁忙、人口密度高但分布不均,且工业发展极不平衡,导致不同地区的人文噪声源在类型、空间和强度上表现出高度的复杂性和叠加特征,为流动台站的选址工作带来了极大的挑战.

考虑到仪器安全及民俗习惯等因素,野外工作人员通常会择优选择农(菜)田、废弃牲畜圈舍、家禽养殖用地、闲置房屋或者庭院空地等场地布设流动台站.但受客观条件的限制,仍无法避免一些近距离人文噪声源的干扰(杨千里等,2019).在本研究中,除 LH23 和 LH27 台站以外,其余 5 个台站均布设在了典型人文噪声源附近(表 1),主要包括人类及家禽(家畜)活动干扰(LH06、LH11 和 LH21 台站)、水渠灌溉干扰(LH16 台站),以及低车流量干扰(LH26 台站)等三种类型.这些人文噪声源的共同特点是对高频和短周期频段的背景噪声造成了显著的影响,而对微震和长周期频段的干扰则相对有限(图 3~图 5,图 7,图 8,图 10;附图 1).以垂直分量为例,在高频和短周期频段,5 个台站的背景噪声水平分别比 LH23 台站高出约 10~30 dB 不等,推测造成这些差距的原因可能与人文噪声源的强弱程度及其与台站的距离有关(图 7b、c).但在微震频段,5 个台站的背景噪声水平与 LH23 台站基本一致,彼此之间的差别仅为几个 dB(图 7b、c).在长周期频段,虽然 5 个台站的背景噪声水平与 LH23 台站相比均略有升高,但这些差距也基本在 10 dB 以内(图 7b、c).此外,LH16 台站高频频段的背景噪声并未像其他台站一样表现出明显的日变化规律(图 10),推测可能与水渠灌溉系统中的水流流动有关.

本研究的结果表明,在有效避开矿山、工厂以及大型工程施工等强人文噪声源的条件下,农(菜)田(LH16、LH23、LH26 和 LH27 台站)、家禽养殖用地(LH06 和 LH21 台站),以及庭院空地(LH11 台站)等场地均满足初步的流动台站选址要求.虽然高频和短周期频段可能会受到影响,但台站的整体背景噪声水平处于可接受的范围之内(图 2~图 5,图 7,图 8,图 10;附图 1).在这些场地的基础上,如果能够进一步避开弱人文噪声源,则还可以改善高频和短周期频段的背景噪声水平(LH23 和 LH27 台站),这也要求在选址时需要对台站周围的环境进行详细的踏勘(杨千里等,2019).同时,由于华南陆块交通网络比较发达,如果遇到无法避开的交通噪声干扰源(杨亚运等,2023),可以考虑在车流量较小的道路附近布设流动台站(LH26 台站).虽然会导致高频和短周期频段的背景噪声水平有所升高(但中位数统计曲线仍低于 NHNM),但可有效保证微震和长周期频段的背景噪声水平.

2.3.2　台基建设的建议与思考

现代地震仪由地震计和数据采集器两部分组成.其中,地震计会被埋置在摆坑之中并做好防护.为增强地震计与地面的耦合效果,野外工作人员通常会在摆坑底部建设台基用于安装地震计(直埋式地震计除外)(吴建平等,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;刘政一等,2019;胡宝慧等,2020;许卫卫等,2023;杨亚运等,2023).由于地震计是地震仪捕捉地面振动信号的核心部件,因此台基的类型和深度也在一定程度上影响着台站的背景噪声(Rastin *et al*.,2012;吴建平等,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;Hutt *et al*.,2017;许卫卫,2018;王芳等,2019;许卫卫等,2023).

首先关于台基类型,本研究台站采用“摆墩式”的台基进行观测,这也是国内流动台站较为常见的台基类型之一,不同台站的区别主要在于下伏土层的土质或岩性结构的差异,通常以基岩条件为最佳(表 1;吴建平等,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;刘政一等,2019;胡宝慧等,2020;包雪等,2023;许卫卫等,2023;杨亚运等,2023).由于华南陆块地质条件比较复杂,因此无法保证所有流动台站均可遇到理想的基岩条件.本研究的结果表明,当在非基岩条件下布设流动台站时,“摆墩式”台基对下伏土层的土质结构没有特殊要求,只需要保证坚实稳定即可(图 2~图 5,图 7,图 8,图 10).如 LH11 和 LH16 台站台基下伏土层的土质结构分别为回填土和原土,但两个台站的背景噪声水平并未出现较大的差距(图 7,图 8).不过如果遇到合适的基岩条件,仍推荐优先将地震计安装在基岩台基之上(LH27 台站;图 2~图 5,图 7,图 8,图 10).

其次关于台基深度,部分学者的实验结果表明,2 m 的台基深度可在一定程度上改善高频和长周期频段的背景噪声水平,是“摆墩式”台基一个可选的参考深度(葛洪魁等,2013;许卫卫等,2023).然而

在实际野外工作中,考虑到经济压力、施工条件、台站维护,以及研究目的等主客观因素,流动台站的台基深度很少能达到这一参考(吴建平等,2012;Li *et al.*,2015;胡宝慧等,2020).如茂名—凌云宽频带流动地震剖面大部分台站的台基深度为0.7~0.8 m左右,甚至LH27台站因基岩的原因,台基深度仅为0.2 m左右(图1;表1).本研究的结果表明,在做好保温防护等措施后,尽管台基深度不足1 m,垂直分量的中位数统计曲线仍较好地介于NHNM和NLNM之间,水平分量的背景噪声水平在长周期频段虽然相对较高,但通过合理的选址也可将中位数统计曲线控制在NHNM附近甚至之下(图2~图5,图7,图8,图10;附图1).因此本研究认为,在精心选址和有效防护的前提下,1 m左右的台基深度基本满足在华南陆块开展地壳和上地幔结构研究的观测需要,且在野外工作中还可根据实际条件进行灵活调整.如在基岩条件下,可以考虑将台基建设在浅地表甚至地面(LH27台站;图2~图5,图7,图8,图10;附图1).但若条件允许,本研究仍建议将台基深度增加到2 m甚至更深,以进一步改善台站的背景噪声水平(Rastin *et al.*,2012;葛洪魁等,2013;刘旭宙等,2014;Hutt *et al.*,2017;刘政一等,2019;杨亚运等,2023).

2.3.3 仪器性能检测和台站维护的建议与思考

由于工作年限较长,本研究使用的地震仪均出现了不同程度的系统瞬变甚至故障(图2~图6,图15;附图1,附图5;许卫卫,2018).这些系统瞬变以数据缺失为主(表1),在PDFs分布图中表现为沿着110 dB左右分布的直线,并导致众数统计曲线出现剧烈跳变(图3~图5;附图1;McNamara and Buland,2004;Ringler *et al.*,2021),直接影响观测数据的质量.对此,本研究建议在开展野外工作前需对投入使用的地震仪进行详细检测(许卫卫,2018),通过分析PSDs曲线及波形特征,初步掌握地震仪的性能状况并识别出故障仪器,避免出现无效的数据采集情况(LH06台站).如LH06台站便因仪器故障导致垂直分量的数据极不可靠,仅能应用于拾取强震震相等有限的研究领域(图15;附图5);但随着更换地震仪,台站的观测数据恢复正常(图3;附图1).

针对系统瞬变严重的地震仪,本研究建议在安装时需避开强人文噪声源并做好防护,以避免其性能继续出现严重的下滑(许卫卫,2018;包雪等,2023).同时还可合理延长观测时间,弥补因系统瞬变而导致有效观测数据的不足(吴建平等,2012).鉴于不少流动台站尚未配备远程数据传输系统,针对这些台站,本研究建议在其运行1~2周后开展一次巡查和检测工作,以便根据台站的运行状态及背景噪声水平及时更换地震仪甚至调整点位.如LH16台站在布设时状态正常,但由于螺丝松动等原因,致使水汽进入地震仪内部并腐蚀了存储模块,造成了长达8个月的数据损失(表1).

3 结 论

本研究首先利用PSD PDF方法,获得了华南陆块西部茂名—凌云宽频带流动地震剖面7个台站的三分量背景噪声水平.随后以LH23台站为例,针对华南陆块西部流动台站的背景噪声来源及其特征,以及引起PSD出现高异常值的原因及其曲线特征进行了分析和探讨.最后基于7个台站的背景噪声结果,并综合考虑场地条件、观测环境和仪器性能等因素,提出了在华南陆块继续开展宽频带流动地震观测的建议与思考.

(1)华南陆块西部流动台站的背景噪声主要来自人文噪声、微震噪声和地倾斜噪声,这些噪声源分别集中在不同的频段,不仅具有日变化或季节性变化等规律,且同一噪声源对水平和垂直分量的干扰也存在着差距.高频频段的背景噪声主要来源于台站附近的人文噪声,具有明显的日变化规律,对水平分量的干扰强于垂直分量;短周期频段的背景噪声同样来源于人文噪声,但由于与台站的距离相对略远,故日变化规律不如高频频段明显,且对水平和垂直分量的干扰基本相同;微震频段的背景噪声主要来源于微震噪声,具有季节性变化规律,其中次级微震对垂直分量的干扰略强于水平分量;长周期频段的背景噪声主要来源于地倾斜噪声,对水平分量的干扰比较显著,并在该分量上同时呈现日变化规律和季节性变化规律.

(2)地震事件、邻近台站强烈人为活动以及系统瞬变等因素会引起PSD出现高异常值,并导致曲线发生畸变.通过甄别和分析这些PSDs曲线和对应的波形段,有助于对地震仪的工作状态进行评估,同时还有助于防止异常数据被引入到后续的研究中.

(3)弱人文噪声源对台站整体的背景噪声影响不大,可以考虑在这些噪声源附近布设流动台站.若下伏土层的土质或岩性结构稳定,1 m左右的"摆墩式"台基基本满足在华南陆块开展地壳和上地幔结构研究的观测需要,但需注意对地震仪做好防护.针对仪器性能,本研究建议在开展野外工作前对拟投

入的地震仪进行检测,并根据检测结果设计观测和维护方案.

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见;感谢中国地震局地球物理研究所地震科学国际数据中心提供的台站信息(Doi:10.11998/IESDC);感谢曾庆贺、陈煜烽、王栩、余爱民、刘世俊、李宝文和杨卫东在数据收集阶段提供的帮助;感谢王祥提供的流动台站建台建议;在程序编写和文章撰写阶段,得到了程永志、张文文和陈昊等博士的大力支持和帮助,在此表示感谢;本研究的部分图件由 GMT6 绘制,感谢 Wessel 等(2019)提供的免费作图软件.

References

Bao X, Ye F, Zhang H, *et al*. 2023. Research on the progress of in-site testing methods for broadband seismograph performance. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(4): 1739-1756, doi: 10.6038/pg2023GG0162.

Bonnefoy-Claudet S, Cotton F, Bard P Y. 2006. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. Earth-Science Reviews, 79(3-4): 205-227.

Chang L J, Ding Z F, Wang C Y. 2015. Upper mantle anisotropy beneath the southern segment of North-South tectonic belt, China. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58(11): 4052-4067, doi: 10.6038/cjg20151114.

Chen C X, Lü Q T, Chen L, *et al*. 2022. Crustal thickness and composition in the South China Block: Constraints from earthquake receiver function. Science China Earth Sciences, 65(4): 698-713.

Cooley J W, Tukey J W. 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation, 19(90): 297-301.

Díaz J, Villaseñor A, Morales J, *et al*. 2010. Background noise characteristics at the IberArray broadband seismic network. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(2): 618-628.

Gao J Y, Li Y H, Xu X M, *et al*. 2016. P-wave crustal velocity structure and seismicity in Yunnan area. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(2): 508-516, doi: 10.6038/pg20160202.

Ge H K, Chen H C, Ouyang B, *et al*. 2013. Transportable seismometer response to seismic noise in vault. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(3): 857-868, doi: 10.6038/cjg20130315.

Gerstoft P, Tanimoto T. 2007. A year of microseisms in southern California. Geophysical Research Letters, 34(20): L20304, doi: 10.1029/2007GL031091.

Han R B, Yang D H, Li Q S, *et al*. 2023. Receiver function imaging of dense seismic array and deep dynamic mechanism beneath the eastern South China. Science China Earth Sciences, 66(6): 1289-1308.

Hu B H, Liu S, Chang J L, *et al*. 2020. Analysis of background noise characteristics of Heilongjiang seismic array. Seismological and Geomagnetic Observation and Research (in Chinese), 41(5): 63-68.

Hutt C R, Ringler A T, Gee L S. 2017. Broadband seismic noise attenuation versus depth at the Albuquerque seismological laboratory. Bulletin of the Seismological Society of America, 107(3): 1402-1412.

International Earthquake Science Data Center (in Chinese). 2023. doi: 10.11998/IESDC.

Jiang G M, Zhang G B, Zhao D P, *et al*. 2021. Mantle flow and dynamics beneath central-east China: New insights from P-wave anisotropic tomography. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(5): e2020JB020070, doi: 10.1029/2020JB020070.

Koper K D, Hawley V L. 2010. Frequency dependent polarization analysis of ambient seismic noise recorded at a broadband seismometer in the central United States. Earthquake Science, 23(5): 439-447.

Koper K D, Seats K, Benz H. 2010. On the composition of Earth's short-period seismic noise field. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(2): 606-617.

Landès M, Hubans F, Shapiro N M, *et al*. 2010. Origin of deep ocean microseisms by using teleseismic body waves. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 115(B5): B05302, doi: 10.1029/2009JB006918.

Li S Y, Li M K, Zhang S X. 2026. Study on mid-lithospheric discontinuities in the South China block based on S-wave receiver functions. Progress in Geophysics (in Chinese), 41(1): 115-129, doi: 10.6038/pg2026II0561.

Li T Z, Jiang M M, Zhao L, *et al*. 2022. Wedge tectonics in South China: Constraints from new seismic data. Science Bulletin, 67(14): 1496-1507.

Li T Z, Jiang M M, Zhao L, *et al*. 2023. Continental fragments in the South China Block: Constraints from crustal radial anisotropy. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128(10): e2023JB026998, doi: 10.1029/2023JB026998.

Li X F, Ouyang L B, Li H Y, *et al*. 2015. A broadband seismic network in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt, China. Seismological Research Letters, 86(3): 941-947.

Liu R F, Gao J C, Chen Y T, *et al*. 2008. Construction and development of digital seismograph networks in China. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 30(5): 533-539.

Liu X Z, Shen X Z, Li Q S, *et al*. 2014. An analysis of the tele-seismic waveforms and ambient noise of temporary broadband seismic array on the northeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau. Acta Geoscientica Sinica (in Chinese), 35(6): 759-768.

Liu Z Y, Yuan S Y, Xu W W, *et al*. 2019. A study on the posthole installation at broadband seismic stations. Seismological and Geomagnetic Observation and Research (in Chinese), 40(4): 130-137.

Matichard F, Evans M. 2015. Review: Tilt-free low-noise seismometry. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(2A): 497-510.

McNamara D E, Buland R P. 2004. Ambient noise levels in the continental United States. Bulletin of the Seismological Society of America, 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. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

McNamara D E, Hutt C R, Gee L S, *et al*. 2009. A method to establish seismic noise baselines for automated station assessment. Seismological Research Letters, 80(4): 628-637.

Pei S J, Zhou Y Z. 2026. Analysis of azimuthal characteristics of microseismic ambient noise sources in Chinese. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 48(2): 229-242.

Peterson J R. 1993. Observations and modeling of seismic background noise. Albuquerque, New Mexico: U.S. Geological Survey.

Qu M R, Liang K, Yang H Y. 2022. Lithospheric structure beneath the central Yunnan and its geodynamic implications. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(4): 1464-1474, doi: 10.6038/pg2022FF0494.

Rastin S J, Unsworth C P, Gledhill K R, *et al*. 2012. A detailed noise characterization and sensor evaluation of the North Island of New Zealand using the PQLX data quality control system. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(1): 98-113.

Ringler A T, Hutt C R. 2010. Self-noise models of seismic instruments. Seismological Research Letters, 81(6): 972-983.

Ringler A T, Mason D B, Laske G, *et al*. 2021. Why do my squiggles look funny? A gallery of compromised seismic signals. Seismological Research Letters, 92(6): 3873-3886.

Shi D N, Lü Q T, Xu W Y, *et al*. 2013. Crustal structure beneath the middle-lower Yangtze metallogenic belt in East China: Constraints

from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra-continental mineralization. Tectonophysics, 606: 48-59.

Shi Y T, Gao Y. 2022. Spatial distribution of shear wave splitting of the upper crust in the central South China block. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(9): 3268-3279, doi: 10.6038/cjg2022P0741.

Shu L S. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. Geological Bulletin of China (in Chinese), 31(7): 1035-1053.

Song L L, Yang W, Ge H K, *et al*. 2012. The current status and progress of portable seismic array observation in China. Recent Developments in World Seismology (in Chinese), (3): 16-21.

Tan Y J, Duan Y H, Lin J Y, *et al*. 2021. Crustal composition of the eastern South China Block based on the seismological study. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 64(9): 3150-3163, doi: 10.6038/cjg2021P0089.

Tanimoto T, Ishimaru S, Alvizuri C. 2006. Seasonality in particle motion of microseisms. Geophysical Journal International, 166(1): 253-266.

Wang F, Wang W T, Long J F, *et al*. 2019. Seismic noise characteristics of broad-band seismic networks in Chinese. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 41(5): 569-584.

Wang G Z, Chen Y S, Zhang C, *et al*. 2022. Mantle transition zone thickness anomaly at middle Southern China by receiver function: Evidence for Hainan Plume. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(10): 3871-3880, doi: 10.6038/cjg2022P0338.

Wang J, Zheng X F, Liu H G, *et al*. 2022. Characteristics and location of non-random persistent microseismic ambient noise sources in eastern China. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(5): 1660-1674, doi: 10.6038/cjg2022P0372.

Wang W T, Gerstoft P, Wang B S. 2018. Seasonality of P wave microseisms from NCF-based beamforming using ChinArray. Geophysical Journal International, 213(3): 1832-1848.

Wang Y R, Teng J W, Tian X B. 2024. Upper mantle anisotropy beneath the southwestern South China Block revealed by teleseismic shear wave splitting measurements. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(3): 829-842, doi: 10.6038/cjg2022Q0137.

Wessel P, Luis J F, Uieda L, *et al*. 2019. The generic mapping tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20(11): 5556-5564.

Wilson D, Leon J, Aster R, *et al*. 2002. Broadband seismic background noise at temporary seismic stations observed on a regional scale in the southwestern United States. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(8): 3335-3342.

Wu J P, Ouyang B, Wang W L, *et al*. 2012. Ambient noise level of North China from temporary seismic array. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 34(6): 818-829.

Xi J J, Jiang G M, Zhao D P, *et al*. 2023. Hot mantle upwelling and Mesozoic mineralization in Southeast China. Journal of Asian Earth Sciences, 258: 105648, doi: 10.1016/j.jseaes.2023.105648.

Xu W W, Yuan S Y, Ai Y S, *et al*. 2017. Applying multiple channel correlation technique in the self-noise measurement of broadband seismographs. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(9): 3466-3474, doi: 10.6038/cjg20170916.

Xu W W. 2018. Research progress on seismic data quality control. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(3): 998-1004, doi: 10.6038/pg2018AA0650.

Xu W W, Yuan S Y, Xu S H, *et al*. 2023. Comparisons between different installations of seismographs at soft soil site. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(5): 2069-2081, doi: 10.6038/cjg2022Q0753.

Xu Y, Lü Q T, Zhao D P, *et al*. 2024. Upper mantle shear velocity structure of the Cathaysia Block and surrounding areas: New insight into deep geodynamics. Tectonophysics, 892: 230542, doi: 10.1016/j.tecto.2024.230542.

Yan J Y, Lü Q T, Zhang Y Q, *et al*. 2022. The deep boundaries of Jiangnan orogenic belt and its constraints on metallogenic: From the understanding of integrated geophysics. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 38(2): 544-558.

Yang Q L, Hao C Y, Tian X. 2019. Ambient noise analysis by the technology of PSD and PDF in Hotan Seismic Array. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(7): 2591-2606, doi: 10.6038/cjg2019M0108.

Yang Y Y, Wang J, Fu Z, *et al*. 2023. Influence analysis of observation mode for seismic station on background noise. Progress in Earthquake Sciences (in Chinese), 53(6): 241-250.

Ye Z, Li Q S, Gao R, *et al*. 2013. Seismic receiver functions revealing crust and upper mantle structure beneath the continental margin of southeastern China. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(9): 2947-2958, doi: 10.6038/cjg20130909.

Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, *et al*. 2013. Tectonics of South China continent and its implications. Science China Earth Sciences, 56(11): 1804-1828.

Zhang L N, Liu X L, Dong P Y, *et al*. 2025. Microseism sources estimated with three-component broadband seismometer array in Fujian and its adjacent areas. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 68(2): 531-546, doi: 10.6038/cjg2024R0645.

Zhang W W, Zhang Y Q, Huang Y P, *et al*. 2022. Research progress and prospect of seismic ambient noise tomography. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(1): 125-141, doi: 10.6038/pg2022FF0241.

Zhang Y Q, Dong S W, Li J H, *et al*. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. Acta Geoscientia Sinica (in Chinese), 33(3): 257-279.

Zhang Y Q, Shi D N, Lü Q T, *et al*. 2021a. The crustal thickness and composition in the eastern South China Block constrained by receiver functions: Implications for the geological setting and metallogenesis. Ore Geology Reviews, 130: 103988, doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.103988.

Zhang Y Q, Shi D N, Lü Q T, *et al*. 2021b. A fine crustal structure and geodynamics revealed by receiver functions along the Guangchang-Putian line in the Cathaysia Block, South China. Tectonophysics, 815: 229007, doi: 10.1016/j.tecto.2021.229007.

Zhang Y Q, Shi Y T, Zhang H S, *et al*. 2022. Broad-band seismic study of the crustal and upper mantle structure in the eastern South China Block. Acta Geoscientica Sinica (in Chinese), 43(6): 755-770.

Zhang Y Q, Lü Q T, Shi D N, *et al*. 2023. The crustal and uppermost mantle Vs structure of the middle and lower reaches of the Yangtze River metallogenic belt: Implications for metallogenic process. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128(8): e2023JB026817, doi: 10.1029/2023JB026817.

Zhang Y Y, Chen L, Ai Y S, *et al*. 2018. Lithospheric structure of the South China Block from S-receiver function. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 61(1): 138-149, doi: 10.6038/cjg2018L0226.

Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, *et al*. 2009. Technical system construction of data backup centre for China seismograph network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.

Zhou L Q, Xie J Y, Shen W S, *et al*. 2012. The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography. Geophysical Journal International, 189(3): 1565-1583.

附中文参考文献

包雪, 叶放, 张晗, 等. 2023. 宽频带地震仪性能现场检测方法进展研究. 地球物理学进展, 38(4): 1739-1756, doi: 10.6038/pg2023GG0162.

常利军, 丁志峰, 王椿镛. 2015. 南北构造带南段上地幔各向异性特征. 地球物理学报, 58(11): 4052-4067, doi: 10.6038/cjg20151114.

陈昌昕, 吕庆田, 陈凌, 等. 2022. 华南陆块地壳厚度与物质组成:

基于天然地震接收函数研究. 中国科学:地球科学, 52(4):760-776.

地震科学国际数据中心. 2023. doi:10.11998/IESDC.

高家乙, 李永华, 徐小明, 等. 2016. 云南地区地壳速度结构和地震活动性研究. 地球物理学进展, 31(2):508-516, doi:10.6038/pg20160202.

葛洪魁, 陈海潮, 欧阳飚, 等. 2013. 流动地震观测背景噪声的台基响应. 地球物理学报, 56(3):857-868, doi:10.6038/cjg20130315.

韩如冰, 杨顶辉, 李秋生, 等. 2023. 华南东部密集台阵接收函数成像与深部动力学机制. 中国科学:地球科学, 53(6):1295-1315.

胡宝慧, 刘双, 常金龙, 等. 2020. 黑龙江省地震科学台阵背景噪声特征分析. 地震地磁观测与研究, 41(5):63-68.

李思远, 李孟奎, 张双喜. 2026. 基于S波接收函数的华南块体岩石圈中部不连续面研究. 地球物理学进展, 41(1):115-129, doi:10.6038/pg2026II0561.

刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 等. 2008. 中国数字地震台网的建设与发展. 地震学报, 30(5):533-539.

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. 地球学报, 35(6):759-768.

刘政一, 袁松湧, 许卫卫, 等. 2019. 宽频带流动地震台站中地震计浅井式安装研究. 地震地磁观测与研究, 40(4):130-137.

裴烁瑾, 周元泽. 2026. 中国大陆微震背景噪声源方位特征分析. 地震学报, 48(2):229-242.

瞿梦茹,梁坤,杨海燕.2022.滇中地区的岩石圈结构及其动力学意义.地球物理学进展,37(4):1464-1474,doi:10.6038/pg2022FF0494.

石玉涛, 高原. 2022. 华南块体中部上地壳剪切波分裂特征. 地球物理学报, 65(9):3268-3279, doi:10.6038/cjg2022P0741.

舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7):1035-1053.

宋丽莉, 杨微, 葛洪魁, 等. 2012. 中国地震科学台阵流动观测现状及进展. 国际地震动态, (3):16-21.

檀玉娟, 段永红, 林吉焱, 等. 2021. 华南大陆东部地壳物质组成的地震学研究. 地球物理学报, 64(9):3150-3163, doi:10.6038/cjg2021P0089.

王芳, 王伟涛, 龙剑锋, 等. 2019. 中国大陆地区宽频带地震台网台基噪声特征. 地震学报, 41(5):569-584.

王冠之, 陈永顺, 张晨, 等. 2022. 华南中部地幔转换带厚度异常:海南地幔柱?. 地球物理学报, 65(10):3871-3880, doi:10.6038/cjg2022P0338.

王俊, 郑秀芬, 刘红桂, 等. 2022. 我国东部地区非随机持续性微震背景噪声场源的特性及定位研究. 地球物理学报, 65(5):1660-1674, doi:10.6038/cjg2022P0372.

王祎然, 滕吉文, 田小波. 2024. 远震剪切波分裂研究华南西南部上地幔各向异性特征. 地球物理学报, 67(3):829-842, doi:10.6038/cjg2022Q0137.

吴建平, 欧阳飚, 王未来, 等. 2012. 华北地区地震环境噪声特征研究. 地震学报, 34(6):818-829.

许卫卫, 袁松湧, 艾印双, 等. 2017. 多通道相关分析用于宽频带地震仪自噪声检测. 地球物理学报, 60(9):3466-3474, doi:10.6038/cjg20170916.

许卫卫. 2018. 地震观测数据质量控制研究综述. 地球物理学进展, 33(3):998-1004, doi:10.6038/pg2018AA0650.

许卫卫, 袁松湧, 徐善辉, 等. 2023. 软土层地区地震仪安装效果比对研究. 地球物理学报, 66(5):2069-2081, doi:10.6038/cjg2022Q0753.

严加永, 吕庆田, 张永谦, 等. 2022. 江南造山带深部边界及成矿制约:来自综合地球物理的认识. 岩石学报, 38(2):544-558.

杨千里, 郝春月, 田鑫. 2019. 新疆和田台阵PSD与PDF分析. 地球物理学报, 62(7):2591-2606, doi:10.6038/cjg2019M0108.

杨亚运, 汪建, 傅卓, 等. 2023. 台基观测方式对地震台站背景噪声影响分析. 地震科学进展, 53(6):241-250.

叶卓, 李秋生, 高锐, 等. 2013. 中国大陆东南缘地震接收函数与地壳和上地幔结构. 地球物理学报, 56(9):2947-2958, doi:10.6038/cjg20130909.

张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学:地球科学, 43(10):1553-1582.

张丽娜, 刘祥龙, 董培育, 等. 2025. 基于三分量宽频带台阵数据的福建地区地震背景噪声源分析. 地球物理学报, 68(2):531-546, doi:10.6038/cjg2024R0645.

张文文, 张永谦, 黄跃鹏, 等. 2022. 地震背景噪声成像技术研究进展与展望. 地球物理学进展, 37(1):125-141, doi:10.6038/pg2022FF0241.

张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3):257-279.

张永谦, 石玉涛, 张洪双, 等. 2022. 华南大陆东部壳幔结构的宽频带地震学探测. 地球学报, 43(6):755-770.

张耀阳, 陈凌, 艾印双, 等. 2018. 利用S波接收函数研究华南块体的岩石圈结构. 地球物理学报, 61(1):138-149, doi:10.6038/cjg2018L0226.

郑秀芬, 欧阳飚, 张东宁, 等. 2009. "国家数字测震台网数据备份中心"技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物理学报, 52(5):1412-1417, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.