2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):1953-1966

地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn

ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

番绍辉,王光明,刘克骧,等.2026.腾冲火山台网地震背景噪声特征分析.地球物理学进展,41(5):1953-1966,doi:10.6038/pg2026JJ0291.

FAN ShaoHui, WANG GuangMing, LIU KeXiang, *et al*. 2026. Analysis of seismic background noise characteristics of Tengchong volcanic network. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):1953-1966,doi:10.6038/pg2026JJ0291.

腾冲火山台网地震背景噪声特征分析

Analysis of seismic background noise characteristics of Tengchong volcanic network

番绍辉[1,2],王光明[1,2],刘克骧[1,2],熊家伟[1,2],邵维晔[1,2],吴元辉[1,2]

FAN ShaoHui[1,2], WANG GuangMing[1,2], LIU KeXiang[1,2], XIONG JiaWei[1,2], SHAO WeiYe[1,2], WU YuanHui[1,2]

1. 云南省地震局,昆明 650051
2. 腾冲深部构造活动云南省野外科学观测研究站(筹),腾冲 679100

1. *Yunnan Earthquake Agency*, *Kunming* 650051, *China*
2. *Tengchong Deep Tectonic Activities*, *Observation and Research Station of Yunnan Province*, *Tengchong* 679100, *China*

摘 要 本研究以腾冲火山台网 10 个固定台站 2020—2022 年三分量连续地震波形数据为基础,综合运用噪声功率谱密度(PSD)与概率密度函数(PDF)分析方法,系统研究腾冲火山区域地震观测背景噪声特征.结果显示,腾冲火山台网高频段(>1 Hz)噪声呈现显著日变化特征,其强度与人类活动周期高度一致,日间受工业生产、交通及建筑施工影响,加速度噪声功率谱密度值较夜间高 20 dB 左右;0.1~1 Hz 频段的第二类地脉动噪声虽源于海洋波浪作用,但在处于内陆的腾冲地区仍为主要噪声成分,该频段噪声具有明显季节性变化,冬季噪声水平较夏季平均高出 2.5 dB 左右,且峰值频率向低频方向移动约 1 s.因各台站间距较小且距海岸距离相近,在 0.1~0.5 Hz 频段各台站噪声未呈现显著空间分布差异,但山洞台站较地表台站噪声水平高约 3 dB,分析认为山洞基岩的完整性可能形成波导通道,使能量在此频段内传播更高效,地脉动信号得以更清晰地记录.本研究成果明确了腾冲火山台网不同频段噪声源的主导因素,揭示了人为活动、地理环境及台站安装方式对噪声水平的影响机制,为该台网优化改造及数据质量提升提供了重要理论依据.

关键词 腾冲火山台网;背景噪声;变化特征;噪声功率谱密度;概率密度函数

中图分类号 P315

Abstract Based on the three-component continuous seismic waveform data of 10 fixed stations in Tengchong volcanic network from 2020 to 2022, this study systematically studies the background noise characteristics of seismic observation in Tengchong volcanic area by using noise Power Spectral Density (PSD) and Probability Density Function (PDF) analysis methods. The results show that the high-frequency (>1 Hz) noise of Tengchong volcanic network shows significant diurnal variation characteristics, and its intensity is highly consistent with the human activity cycle. The power spectral density of acceleration noise is about 20 dB higher than that at night due to the influence of industrial production, traffic and building construction during the day. Although the second type of microtremor noise in the 0.1~1 Hz frequency band originates from ocean waves, it is still the main noise component in the inland Tengchong area. The noise in this frequency band has obvious seasonal changes. The noise level in winter is about 2.5 dB higher than that in summer, and the peak frequency moves to the low frequency direction for about 1 s. Because the distance between each station is small and the distance from the coast is close, there is no significant spatial distribution difference in the noise of each station in the 0.1~0.5 Hz frequency band, but the noise level of the cave station is about 3 dB higher than that of the surface station. The analysis shows that the integrity of the cave bedrock may form a waveguide channel, which makes the energy propagate more efficiently in this frequency band, and the microtremor signal can be recorded more clearly. The results of this study have clarified the dominant factors of noise sources in different frequency bands of Tengchong volcanic network, revealed the influence mechanism of human activities, geographical environment and station installation mode on noise level, and provided an important theoretical basis for the optimization and transformation of the network and the improvement of data quality.

收稿日期 2025-09-15; **修回日期** 2026-01-19. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 云南省地震局青年地震科学基金(2025K04)、云南省科技人才与平台计划项目(202605AM340005)和云南省地震局创新团队(CXTD202508)联合资助.

第一作者简介 番绍辉,男,1993 年生,工程师,主要从事地震监测与研究. E-mail: 250336803@qq.com

文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026JJ0291
CSTR:32085.14.pg2026JJ0291

Keywords Tengchong volcanic network; Background noise; Variation characteristics; Noise power spectral density; Probability density function

0 引 言

地震背景噪声作为一种重要的地球物理信号,蕴含着丰富的地球内部结构及动力学信息,对其深入研究具有重要意义.地震背景噪声来源极为广泛,涵盖了地球内部多种物理过程、人类活动以及自然环境因素等诸多方面.噪声源按其优势频段可分为三类:人为噪声、自然噪声、微震噪声等,其中人为噪声主要集中在 1 Hz 频率以上的高频段,其与人类活动(交通、工业机械等)有关;自然噪声是由自然因素引起的噪声,包括风、河流、温度及气压变化等自然因素;微震频带范围内的噪声主要集中在 0.05 ~ 1 Hz 频段内,与海洋活动有关,其中第一类地脉动噪声是由海浪拍打海岸所产生的,频率在 0.05 ~ 0.1 Hz 内;第二类地脉动噪声是由相向传播的海浪干涉叠加而成的,频率主要集中在 0.1 ~ 1 Hz.低频段 0.05 Hz 以下噪声主要与温度变化和大气压的变化有关(谢江涛等,2021).对地震背景噪声的研究,不仅有助于提高地震监测数据的质量,还能为地球内部结构探测(张文文等,2022;陈凯琪等,2022)、火山活动监测等领域提供重要信息.

Peterson(1993)通过对全球七十五个地震台站相对安静时段的观测数据计算地震噪声的加速度功率谱密度(PSD),建立了地球高低噪声模型(NLNM 和 NHNM),为评估台站的背景噪声水平提供了重要的参考标准.McNamara 和 Buland(2004)进一步利用概率密度函数(PDF)对背景噪声进行分析,该方法能够评估台站的噪声水平和地震数据波形质量.目前,IRIS 数据管理中心、意大利地震台网、新西兰地震台网和福建地震预警台网都使用 PDF 方法评估本地区地震台站的背景噪声水平,并被用于分析意大利、新西兰、伦敦和福建的地震背景噪声特征(D'Alessandro *et al.*,2021;Rastin *et al.*,2012;Green *et al.*,2017;游秀珍等,2024).近年来,国内众多学者也运用 PSD 及 PDF 方法在不同地区开展了地震背景噪声的研究工作,如杨千里等(2019)对新疆和田台阵噪声特征进行了分析,得出新疆和田台阵长周期噪声功率谱密度具有较为明显的季节性变化特征且水平分量长周期噪声更易受温度和气压影响等特征;吴丽慧等(2025)通过对湖北省黄石市地震台噪声加速度功率谱密度和概率密度函数计算与分析,深入探讨了疫情防控措施对地震背景噪声的影响;立凯等(2021)、唐浩等(2024)、谢江涛等(2021)分别分析了江苏、宁夏、四川地区地震台网背景噪声的特征,包括日变化、季节性变化和空间分布特征等,并探讨了其影响因素,研究成果对优化台网布局、提升地震监测能力具有重要意义.目前针对腾冲火山区地震台站的地震背景噪声特征的研究仍存在欠缺,深入分析该区域的地震背景噪声特征,有助于提升地震监测数据质量、火山活动监测及地震监测能力.

腾冲火山区处于板块汇聚处,壳幔结构复杂且岩浆活动活跃,是我国重要的火山监测区域之一(范心甜等,2025;段毅等,2019).腾冲火山台网承担着该地区的地震和火山活动监测任务.然而,该地区复杂的地质条件和日益增多的人类活动,使得台网面临着较为严重的背景噪声干扰,这对准确监测地震和火山活动信号带来了挑战.因此,为系统解析腾冲火山台站背景噪声的时间和空间的变化特征,本研究选取腾冲火山台网 10 个固定监测台站 2020—2022 年的三分量连续地震波形数据为研究对象,采用 Welch(1967)周期图法对原始波形进行功率谱密度(PSD)与概率密度函数(PDF)的定量计算,分析腾冲火山台网背景噪声的昼夜变化、季节性变化等特征,结合台站地理位置与场地条件等关键要素进行分析,系统揭示火山台网的噪声特征分布规律.研究成果可为台站背景噪声的精准评估、后续台站优化升级以及提高地震监测数据质量提供重要的理论依据与技术支撑.

1 腾冲火山台网概况

腾冲火山台网始建于 2007 年,由热海台、马站台、箐口台、民振台、沙坝台、城子山台、热水塘台、新华台、老洋河台 9 个无人值守子台和腾冲国家台组成,图 1 为腾冲火山台网台站分布地形图.腾冲火山台网观测方式分为地表观测和山洞观测两种类型,

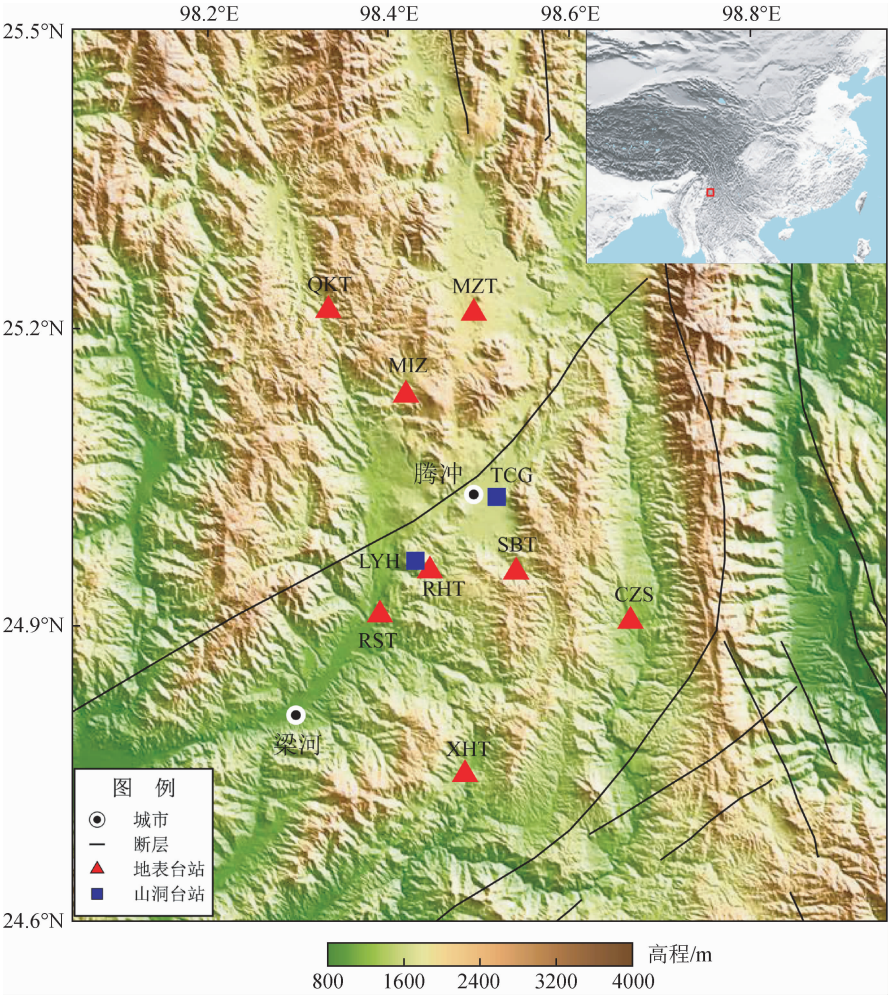


图 1　腾冲火山台网台站分布图

Fig. 1　Distribution of Tengchong volcano seismic network

其中,腾冲台和老洋河台站为山洞型台站,且二者洞室均采用巷道形洞室. 根据 Zürn 等(2022)的研究,不同洞室形状(如巷道型、圆形腔体、不规则洞穴等)会通过改变大气压力荷载引发的局部弹性形变传递路径,对地震仪水平分量低频噪声产生差异化干扰,相较于其他非规则形制洞室,巷道形洞室因走向固定、空间边界条件相对统一,其对水平向噪声的"局部形变耦合效应"具有更可量化的空间分布特征,明确该洞室参数可为后续台站水平分量低频噪声来源解析(如区分大气扰动与地质背景噪声)及数据质量评估提供关键基础信息. 腾冲台采用 CTS-1EF 型 120 s ~ 50 Hz 甚宽频带地震计,老洋河台采用 ITC-120 A 型 120 s ~ 50 Hz 甚宽频带地震计,腾冲台和老洋河台均采用 EDAS-24GN 型 6 通道 24 位数采,其余 8 个台站台站地震计为 JS-60 型 60 s ~ 40 Hz 宽频带地震计,为地表摆房型台站,采用 EDAS-24IP 型 6 通道 24 位数采,采样率为 100 SPS,10 个台站均采用 GPS 授时系统,各台站基本信息见表 1,在本文研究频段内,CTS-1EF 型与 ITC-120 A 型 120 s ~ 50 Hz 甚宽频带地震计的自噪声水平全频段低于 NLNM 模型;JS-60 型 60 s ~ 40 Hz 宽频带地震计在其有效频带内自噪声同样低于 NLNM,仅在 0.0167 Hz 频带下限附近与 NLNM 基本持平(吴双等,2024;王凯明等,2023;张敏等,2024),三种型号地震计的自噪声水平均能满足腾冲火山台网背景噪声研究对仪器性能的要求.

2　数据与方法

基于统计分析的地震噪声加速度功率谱密度 PSD 的概率密度函数分布 PDF 能够全面准确地反应地震台站在不同频段下的环境噪声水平(立凯等,2021). 本研究使用腾冲火山台网 10 个固定监测台

表 1 腾冲火山台网各台站基本情况

Table 1 Basic situation of each station of Tengchong volcanic network

台站名称	代码	台基	场地类型	高程/m	距太平洋最近距离/km	距印度洋最近距离/km	周围环境
腾冲台	TCG	第四系安山岩	山洞	1650	1520	826	城郊村庄旁
老洋河台	LYH	第四系安山岩	山洞	1692	1505	815	村庄
热海台	RHT	花岗岩	地表	1491	1490	814	热海公园
马站台	MZT	玄武岩	地表	1881	1530	839	火山公园
箐口台	QKT	花岗岩	地表	1825	1550	829	林场
民振台	MIZ	花岗岩	地表	1850	1510	830	公路及村庄
沙坝台	SBT	花岗岩	地表	1683	1460	821	林地
城子山	CZS	土层	地表	1333	1480	826	林地
热水塘	RST	花岗岩	地表	1191	1500	807	荷花景区,公路
新华台	XHT	片麻岩	地表	1208	1470	801	农田公路

站 2020—2022 年的三分量连续地震波形数据,应用 PSD-PDF 方法(McNamara and Buland,2004)计算观测数据加速度功率谱密度 PSD 和概率密度函数 PDF 分布,定量评估腾冲火山地区的噪声水平,具体计算流程如下:

首先,对各台站三分量波形数据进行预处理,包括去除长周期信号、数据去均值等;将每小时连续波形数据分段,各段之间设置 50% 的重叠率,以降低 PSD 计算的方差;对每个数据段进行快速傅里叶变换,获取以频率为变量的速度功率谱密度. 基于仪器传递函数,在频域内消除仪器响应影响. 其次,将各数据段的 PSD 结果进行算术平均,得到该小时的 PSD 值;以 1/8 倍频程为间隔,通过滑动平均方法计算平均功率谱;为便于对比分析全球高低噪声模型,将速度 PSD 值转换为加速度 PSD 值,并以分贝(dB)为单位. 最后,采用与 PSD 计算相同的数据处理流程,获取各台站每小时加速度 PSD 均值分布. 在此基础上,针对每个台站选取的数据段,统计其 PSD 均值分布特征. 以 -200 至 -40 dB 为取值区间,按 1 dB 的步长计算相应的概率密度函数(PDF)值,从而全面刻画背景噪声的概率分布特征.

老洋河台(LYH)和马站台(MZT)2020—2022 年三分量连续观测数据的噪声加速度功率谱密度的概率密度函数分布如图 2 所示. 颜色条表示概率值,反映了不同 PSD 值在统计意义上出现的概率密度,从图中可以观察到,不同台站和分量在特定频段存在颜色较深的区域,说明这些频段的 PSD 值出现概率较高,是噪声能量的主要集中频段. 两个台站中,在 0.1 ~ 1 Hz 频段均出现颜色较深区域,表明此频段是噪声能量的主要分布区域. 两个台站在噪声功率谱密度(PSD)的概率密度函数(PDF)分布上呈现出不同特征,在长周期频段,老洋河台各分向的噪声功率谱密度曲线波动范围较马站台小,如图 3 所示,分析认为在长周期频段的水平分量较垂直分量更易受温度扰动和大气压变化的影响(Wolin *et al.*, 2015),老洋河台为山洞台站,其地震计安装于山洞内,保温防风效果比马站台采用的地表摆坑方式较好,因此老洋河台在低频段的噪声水平低于马站台的噪声水平. 两台站低频段水平分量噪声功率谱密度值均大于垂直向,说明山洞台站和地表台站均受气压负荷显著干扰,这与 Zürn 等(2022)证实的低频段气压通过地壳弹性形变耦合至水平向传感器,引发倾斜噪声增强的结论一致. 在 1 Hz 以上的高频段,马站台噪声功率谱密度变化更为剧烈,且 1 ~ 10 Hz 频段的噪声功率谱密度值明显高于老洋河台,表明马站台背景噪声干扰较大. 研究表明,地表台站更容易受到周边复杂高频噪声源的影响,例如人类生产生活、交通、工业设备高频运转噪声等,而山洞环境能够有效抑制外界高频噪声源(方伟等, 2024). 从图 2 可以看出,中值反映了噪声功率谱密度的中间水平,是噪声分布的典型代表值,中值曲线的变化能够直观呈现噪声功率谱密度在不同频段的集中趋势,因此在后期分析中利用中值代表台站的平均噪声水平.

3 背景噪声特征结果与讨论

3.1 日变特征分析

在地震台站高频噪声(通常指频率高于 1 Hz 的

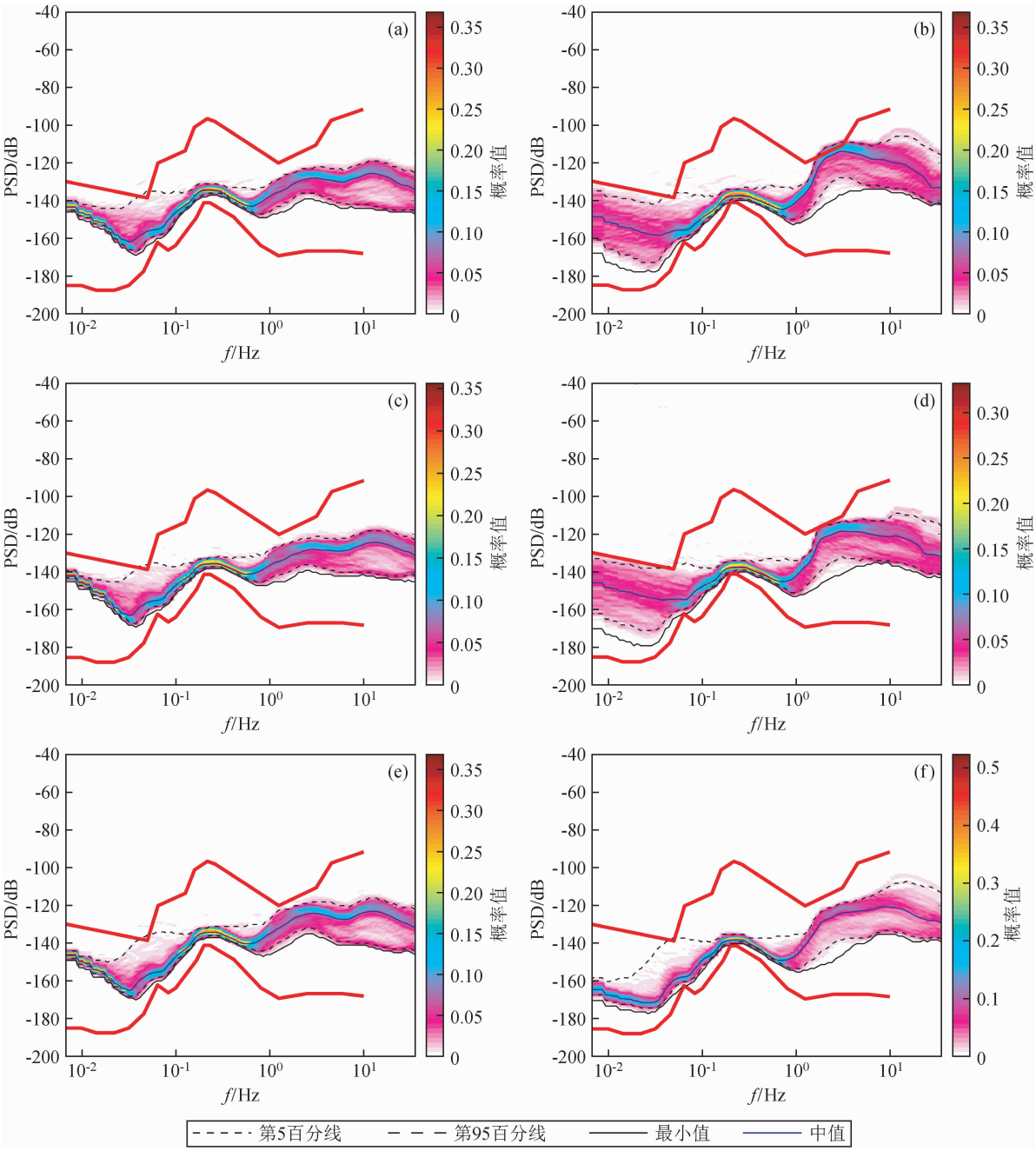


图 2　腾冲火山台网老洋河台(a,c,e)和马站台(b,d,f)2020—2022 年三分向噪声功率谱密度(PSD)的概率密度函数(PDF)分布图

(a, b)BHE;(c, d)BHN;(e, f)BHZ.

Fig. 2　Probability Density Function (PDF) distribution map of three-component noise Power Spectral Density (PSD) at LYH station(a,c,e)and MZT station(b,d,f) of Tengchong volcanic network in 2020—2022

噪声信号)的研究中,人为活动是主导性干扰源,如台站周边的人类的生产生活,公路交通,工厂运行及建筑工地施工等. 此类噪声源大多数是分散或移动的,其多方向波叠加形成复杂且近似稳定的随机噪声场,并以高频面波形式进行传播,随传播距离及深度快速衰减(葛洪魁等,2013). 为分析人类活动对腾冲火山台网台站噪声的影响程度,首先选取距离城市最近的腾冲台及远离城镇的新华台进行对比分析,进而对整个火山台网进行分析. 腾冲台与新华台存在不同的地理位置、周边环境特征及仪器安装方式,为对比分析不同环境条件下的地震台站背景噪声日变化特征提供了理想样本. 腾冲台地处城郊,距

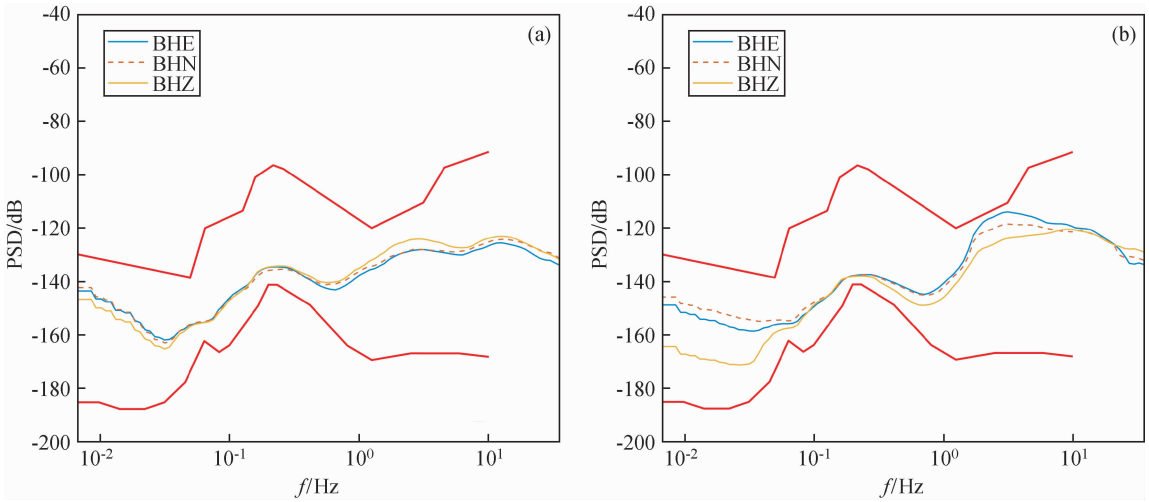


图 3 腾冲火山台网老洋河台(a)和马站台(b)2020—2022 年三分向中值噪声功率谱密度(PSD)曲线

Fig. 3 The three-component median noise Power Spectral Density (PSD) curves of LYH station (a) and MZT station (b) of Tengchong volcanic network from 2020 to 2022.

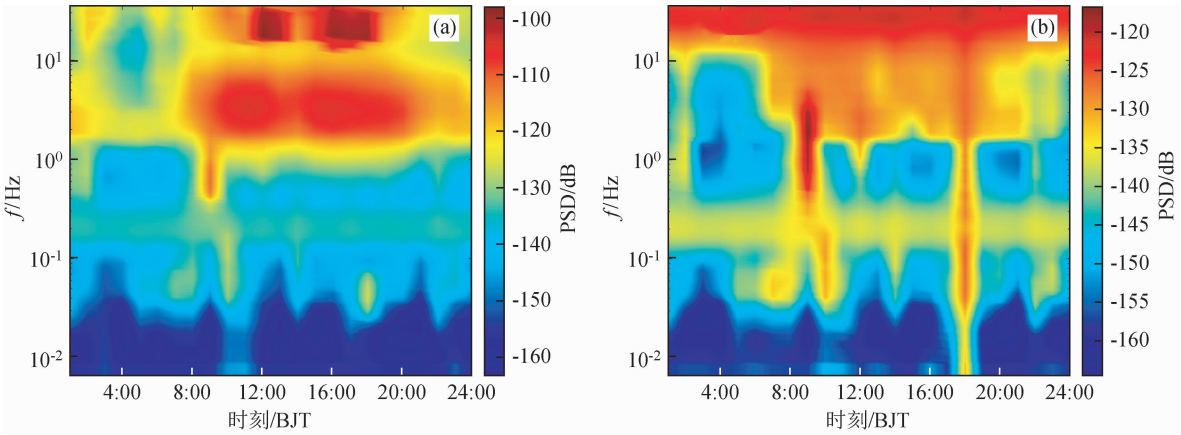


图 4 腾冲台(a)和新华台(b)垂直分量噪声功率谱密度值的日变化图

Fig. 4 Diurnal variation of noise power spectral density of vertical component at TCG station (a) and XHT station (b)

腾冲市区直线距离约 500 m,周边村落分布密集,该台站距区域交通干道仅 100 m,临近商业餐饮聚集区,人员活动干扰严重;新华台位于相对安静的乡村环境,距乡镇集市约 2 km,距乡道 1 km,其周边 1 km 范围内无居民聚落,且乡道车流量较低,人为活动干扰相对较弱. 腾冲台和新华台 2020—2022 年垂直分量噪声功率谱密度值的平均日变化图如图 4 所示,腾冲台及新华台在高频段 1 Hz 以上时具有明显的昼夜变化规律,白天高频段 PSD 普遍升高,夜间则显著降低,但两个台在功率谱密度值上也有差异,因腾冲台位于城市人口、车流等干扰源密集区,在 1 Hz 以上的高频段噪声功率谱密度值较新华台高 10 dB.

上述分析表明,腾冲火山台网高频段背景噪声呈现显著的日变化特征,其平均噪声水平受台站周边人为活动干扰显著. 为了进一步分析腾冲火山台网各台站高频段噪声水平的日变化情况,定义 01:00-05:00 为典型夜间时段,10:00-18:00 为白天时段,分别计算腾冲火山台网 10 个台站垂直分量夜晚和白天的噪声功率谱密度值,将高频段划分为 1 ~ 3 Hz、3 ~ 10 Hz、10 ~ 35 Hz 三个频段进行详细分析. 腾冲火山台网各台站垂直分量白天及夜晚时段的噪声水平和昼夜变化值如图 5 和表 2 所示.

表 2　腾冲火山台网各台站垂直分量白天时段的噪声水平及昼夜变化值

Table 2　Noise level and diurnal variation of vertical component of each station in Tengchong volcanic network during daytime

序号	台站名称	台站代码	1～3 Hz 频段		3～10 Hz 频段		10～35 Hz 频段	
			白天噪声水平/dB	昼夜变化/dB	白天噪声水平/dB	昼夜变化/dB	白天噪声水平/dB	昼夜变化/dB
1	城子山	CZS	-122.45	0.68	-114.4	5.17	-116.89	5.88
2	民振	MIZ	-139.73	11.73	-112.77	18.74	-108.67	19.07
3	马站	MZT	-123.04	10.8	-113.38	13.64	-113.66	13.69
4	箐口	QKT	-138.66	8.54	-125.38	7.82	-116.21	8.62
5	热海	RHT	-139.95	5.83	-124.29	0.92	-118.04	0.62
6	热水塘	RST	-129.08	9.06	-122.06	8.91	-120.6	8.31
7	腾冲台	TCG	-115.91	14.31	-113.46	15.19	-118.58	14.25
8	新华	XHT	-137.78	12.07	-131.95	7.67	-121.98	1.36
9	老洋河	LYH	-125.62	7.13	-124.13	10.9	-123.09	16.68
10	沙坝	SBT	-133.53	3.68	-123.97	6.52	-116.92	1.24

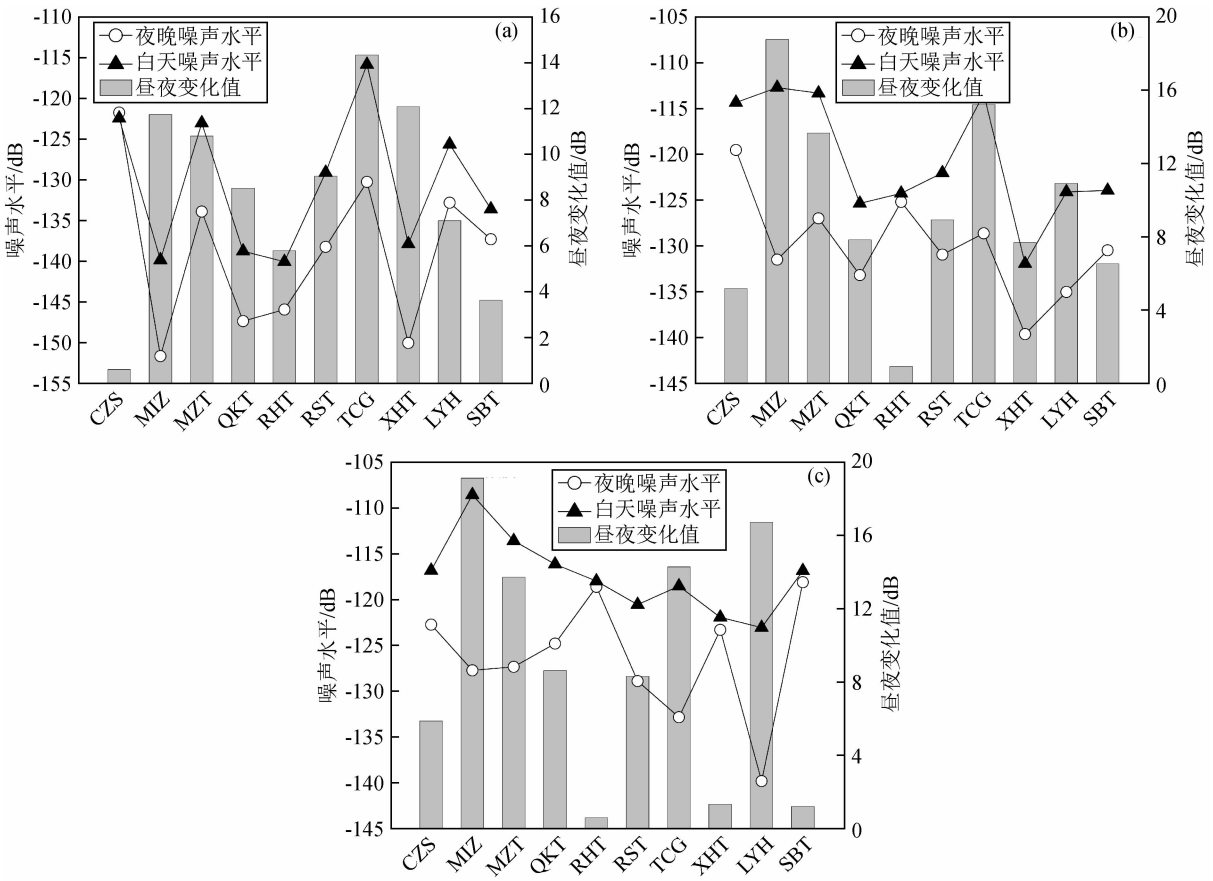


图 5　腾冲火山台网各台站垂直分量白天及夜晚时段的噪声水平和昼夜变化值图

(a)1～3 Hz 频段;(b)3～10 Hz 频段;(c)10～35 Hz 频段.

Fig. 5　Noise level and diurnal variation of vertical component of each station in Tengchong volcanic network during daytime and nighttime

(a) 1～3 Hz frequency band; (b) 3～10 Hz frequency band; (c) 10～35 Hz frequency band.

腾冲火山台网各台站昼夜噪声水平在不同频段表现出不同的特征,在1~3 Hz频段,大部分台站白天背景噪声水平显著高于夜晚,噪声水平昼夜变化最大值为腾冲台的14.31 dB,最小值为城子山台的0.68 dB;在3~10 Hz频段,所有台站白天背景噪声水平均高于夜晚,昼夜变化最大值为民振台的18.74 dB,最小值为热海台的0.92 dB;在10~35 Hz频段,所有台站白天背景噪声水平也均高于夜晚,昼夜变化最大值为民振台的19.07 dB,最小值为热海台的0.62 dB.上述三个频段内,背景噪声昼夜变化值均高于10 dB的台站是民振台、马站台和腾冲台,这3个台台基条件都相对较好,但均靠近城镇、村庄和公路,受人类活动干扰显著,故3个台在高频段背景噪声昼夜变化值较大.台站噪声水平较低且各频段昼夜变化值较小的台站是箐口台、热海台、新华台及沙坝台,这4个台站均远离村庄和公路,受人类活动干扰较小,故昼夜变化值相对较小.老洋河台和腾冲台为山洞台站,老洋河台地震计安装于洞内50 m处,位于村庄附近,腾冲台地震计安装于洞内15 m处,位于城郊,两台昼夜变化值都较大,但老洋河台昼夜变化值低于腾冲台,且背景噪声水平相对较低,这与腾冲台所处嘈杂环境有关.

腾冲火山台网各台站背景噪声水平日变化和昼夜变化值对比表明,地震台站地震计安装采用山洞安装方式、山洞较深并远离城镇、公路,背景噪声水平会显著降低,且昼夜变化值较小,在10 Hz以上频段,山洞型台站地震背景噪声水平低于大部分地表台站背景噪声水平.地震台站夜晚噪声水平较低但昼夜波动幅度显著,这一特征表明台站受周边人类活动干扰具有明显的日变规律,如老洋河台及民振台,该现象表明,此类台站在夜间具备更优的微弱地震信号监测能力,其监测效能的昼夜差异与人为噪声源的时域分布特征呈现显著的相关性,为地震台站噪声抑制与信号增强处理提供了参考依据.

3.2 季节性特征分析

为了研究腾冲火山台网各台站的季节性变化特征,根据我国的气象季节划分,将上一年的12月至当年2月划分为冬季,3月至5月为春季,6月至8月为夏季,9月至11月为秋季.

新华台和马站台2020—2022年垂直分量噪声功率谱密度随时间的变化如图6所示,在小于0.05 Hz的长周期频段内,新华台在温度较高的月份噪声水平显著高于温度较低的月份,马站台在此频段内未有明显的变化特征.在地震计安装时,马站台在地震计外安装有保温罩,而新华台并未在地震计外安装保温罩,新华台温度变化较大,分析认为这可能是两台站受温度变化影响长周期频段差异的主要原因.

新华台和马站台垂直分量四个季节的噪声功率谱密度中值曲线如图7所示,在0.1~0.5 Hz的微震频段内,两个台站具有相同的特征,春秋季节噪声功率谱密度值变化不大,夏冬季节噪声功率谱密度值变化较大,其中冬季噪声水平最高,夏季噪声水平最低,冬季的平均噪声水平较夏季高2.4 dB左右,均具有较为明显的季节性变化.但是对于1 Hz以上的高频段,新华台和马站台噪声水平表现出不同的特征:1~3 Hz频段新华台春季噪声水平高于其他季节,3 Hz以上频段夏季噪声水平高于其他季节;新华台位于新华坝子农田内,主要噪声来源为农民的生产生活,春季劳作以人工为主,夏季劳作以农机为主,根据高频噪声来源分析,1~3 Hz频段噪声来源主要是人工春季劳作,3 Hz以上高频段噪声来源主要农用机械所产生的噪声;冬季因台站周边农田基本处于闲置状态,故新华台春夏两季噪声水平明显高于冬季;马站台噪声水平在1~3 Hz频段,春季高于其他季节,马站台位于火山公园景区内,春季为旅游旺季,公园外为农田,景区春季观光车辆密集,交通噪声主导高频段干扰,呈现鲜明季节性特征,旅游及农民生产生活两种干扰源叠加在一起,故马站台春季噪声水平较其他季节高.

值得注意的是,在这三年的春节期间(尤其是2020年1月26日至2月20日),高频段的噪声水平明显低于全年其他时间,春节假期间,大部分人类生产活动少,交通噪声减少,故在春节期间台站,地震台站噪声水平较其余时段低.2020年1月26日至2月20日根据新冠疫情防控需要,腾冲市采取一系列的防控措施,包括居家办公,减少外出活动,交通道路封闭等,因此在这期间内高频噪声水平达到最低值,该现象与新疆测震台网(邓明文等,2021)受疫情防控措施影响类似.

为深入研究腾冲火山台网各台站的季节性变化特征,选取各台站夏季和冬季的数据,分别计算垂直分量0.1~0.5 Hz、1~10 Hz、10~35 Hz频段内夏季和冬季的噪声功率谱密度值,结果如表3所示,表中三个频段的中值统计值代表夏季和冬季的环境噪声水平,腾冲火山台网在0.1~0.5 Hz微震频段的噪声水平季节性变化最为明显,冬季噪声水平较夏季噪声水平高,噪声水平变化值在2~6 dB之间,这与王伟涛等(2011)、郑定昌等(2011)研究云南地区地

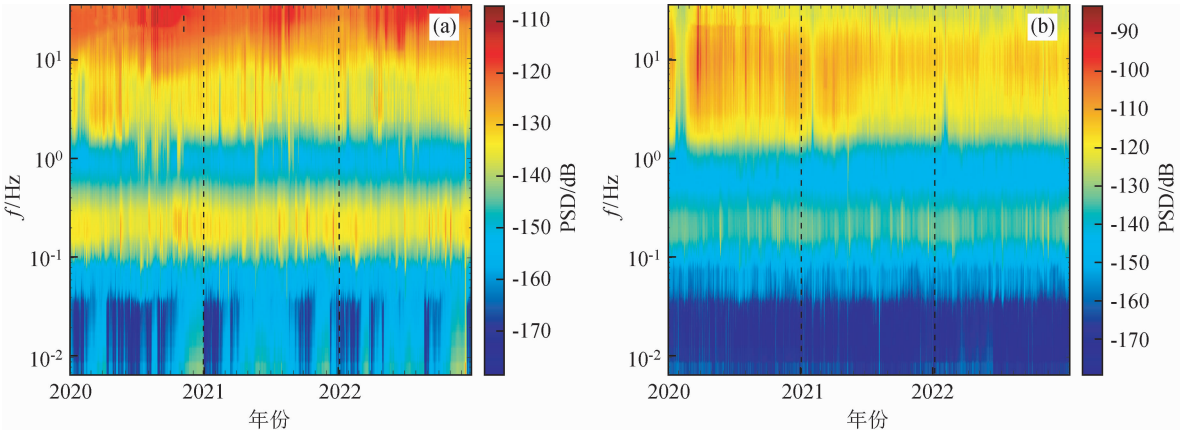


图 6　新华台(a)和马站台(b)2020 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日垂直分量噪声功率谱密度随时间的变化图

Fig. 6　The variation of power spectral density of vertical component noise with time from January 1,2020 to December 31,2022 in XHT station (a) and MZT station (b)

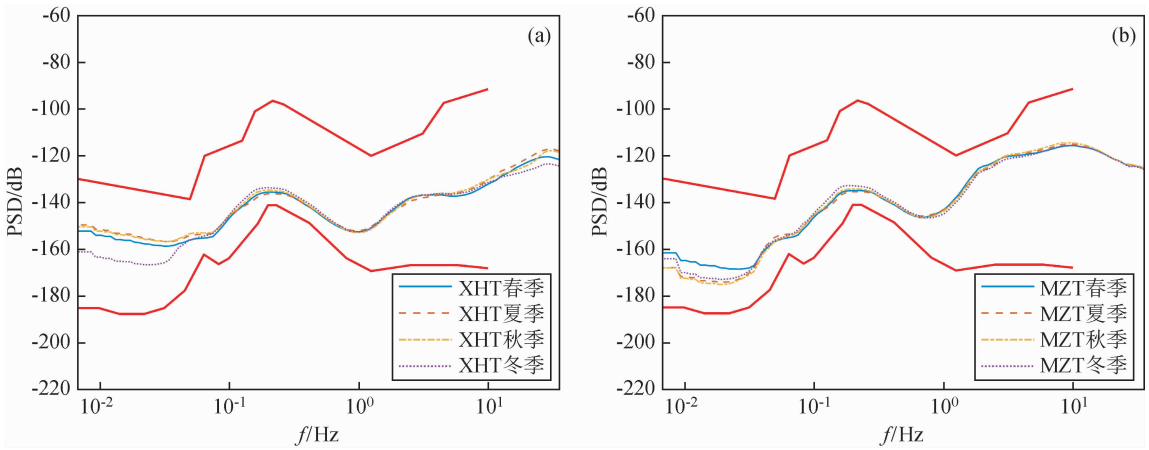


图 7　新华台(a)和马站台(b)垂直分量四季的噪声功率谱密度中值曲线图

Fig. 7　The median curve of noise power spectral density of the vertical component of XHT station (a) and MZT station (b) in four seasons

表 3　腾冲火山台网各台站垂直分量夏冬季节的噪声水平

Table 3　Noise level of vertical component of each station in Tengchong volcanic network in summer and winter

序号	台站名称	台站代码	0.1～0.5 Hz 频段		1～10 Hz 频段		10～35 Hz 频段	
			夏季噪声水平/dB	冬季噪声水平/dB	夏季噪声水平/dB	冬季噪声水平/dB	夏季噪声水平/dB	冬季噪声水平/dB
1	城子山	CZS	-139.828	-136.873	-122.241	-121.813	-120.394	-119.729
2	民振	MIZ	-139.852	-137.23	-134.213	-133.384	-114.209	-112.831
3	马站	MZT	-138.867	-137.129	-123.021	-123.47	-118.828	-119.944
4	箐口	QKT	-138.938	-136.991	-137.876	-138.873	-122.441	-124.567
5	热海	RHT	-138.673	-133.514	-135.739	-130.835	-118.832	-119.52
6	热水塘	RST	-138.768	-136.595	-131.539	-130.668	-122.998	-123.845
7	腾冲台	TCG	-138.783	-136.686	-120.915	-121.574	-123.174	-124.286
8	新华	XHT	-139.412	-137.561	-138.825	-138.821	-121.68	-123.509
9	老洋河	LYH	-137.348	-134.915	-128.28	-127.672	-126.432	-125.255
10	沙坝	SBT	-139.009	-136.969	-133.292	-133.697	-118.754	-119.761

脉动噪声季节变化特征一致;各台站微震频段内在冬季噪声水平峰值出现的频率较夏季噪声水平峰值出现的频率低,即冬季噪声水平峰值出现的频率向低频方向移动 1 s 左右,这可能与寒冷季节发生的波浪相互作用增加和更强大的大气扰动有关,这是北半球地震台站背景噪声的典型特征(Evangelidis and Melis,2012). 在 1 ~ 10 Hz 频段内,大部分台站噪声水平在夏冬两季无较大变化,噪声水平变化在 1 dB 以内,但热海台冬季噪声水平较夏季高 5 dB 左右,热海台位于腾冲热海 5A 级景区内,台站距离人流量最大的大滚锅景点直线距离仅 100 m 左右,而腾冲地处亚热带季风气候区,降水集中在夏季,冬季降水较少,冬春季节为旅游旺季,景区客流量较夏季大,而此频段内的噪声主要来源人为活动干扰,故热海台冬季噪声水平较夏季高. 在 10 ~ 35 Hz 频段内,大部分台站夏季噪声水平较冬季高,噪声水平变化在 2 dB 以内,其与农民的生产生活主要集中在夏季有关.

3.3 空间分布特征分析

腾冲火山台网各台站垂直分向的全频段功率谱密度中值曲线如图 8 所示,各台站在不同频段的功率谱密度值均位于全球高低噪声模型中,其背景噪声水平符合全球噪声分布规律,能够明显记录到第一类地脉动噪声和第二类地脉动噪声的两个峰值,表明腾冲火山台网各台站选址和设备运行状态良好,地震监测数据可靠,为地震信号分析提供了稳定的背景. 但不同台站的噪声功率谱密度在各频段展现出显著的差异,低于 0.04 Hz 频段,各台站噪声水平均处于下降趋势,噪声水平主要集中于 -170 ~ -150 dB 内,噪声水平相对较高的台站有新华台和老洋河台;在 0.04 ~ 0.5 Hz 频段内,各台站中值曲线密集交织,噪声水平的变化趋势基本一致且噪声水平相差较小;在 0.5 Hz 以上频段,各台站噪声水平的变化趋势各不相同. 在 1 ~ 3 Hz 频段,腾冲台噪声水平显著升高,腾冲台地处闹市区,人员流动较大,而人类日常行走产生的噪声在 1 ~ 3 Hz 左右(Pachi and Ji,2005),因此腾冲台在此频段内噪声水平显著高于其余台站. 在大于 3 Hz 频段,民振台背景噪声水平显著上升,这是由于民振台位于村边,村内有木材加工厂,造成高频段噪声远大于其他台站.

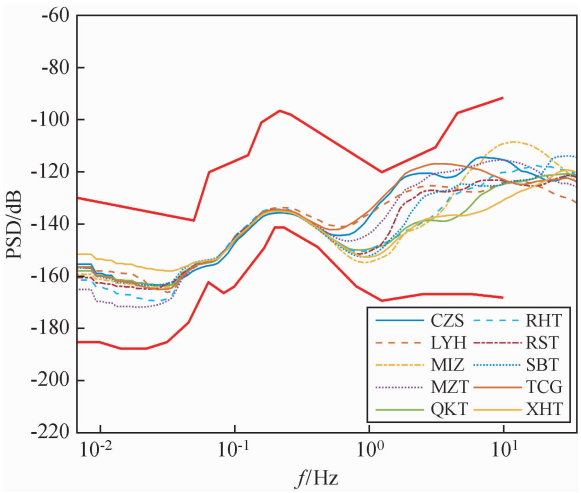


图 8 腾冲火山台网各台站垂直方向 PSD 中值曲线分布

Fig. 8 PSD median curve distribution in vertical direction of each station in Tengchong volcanic network

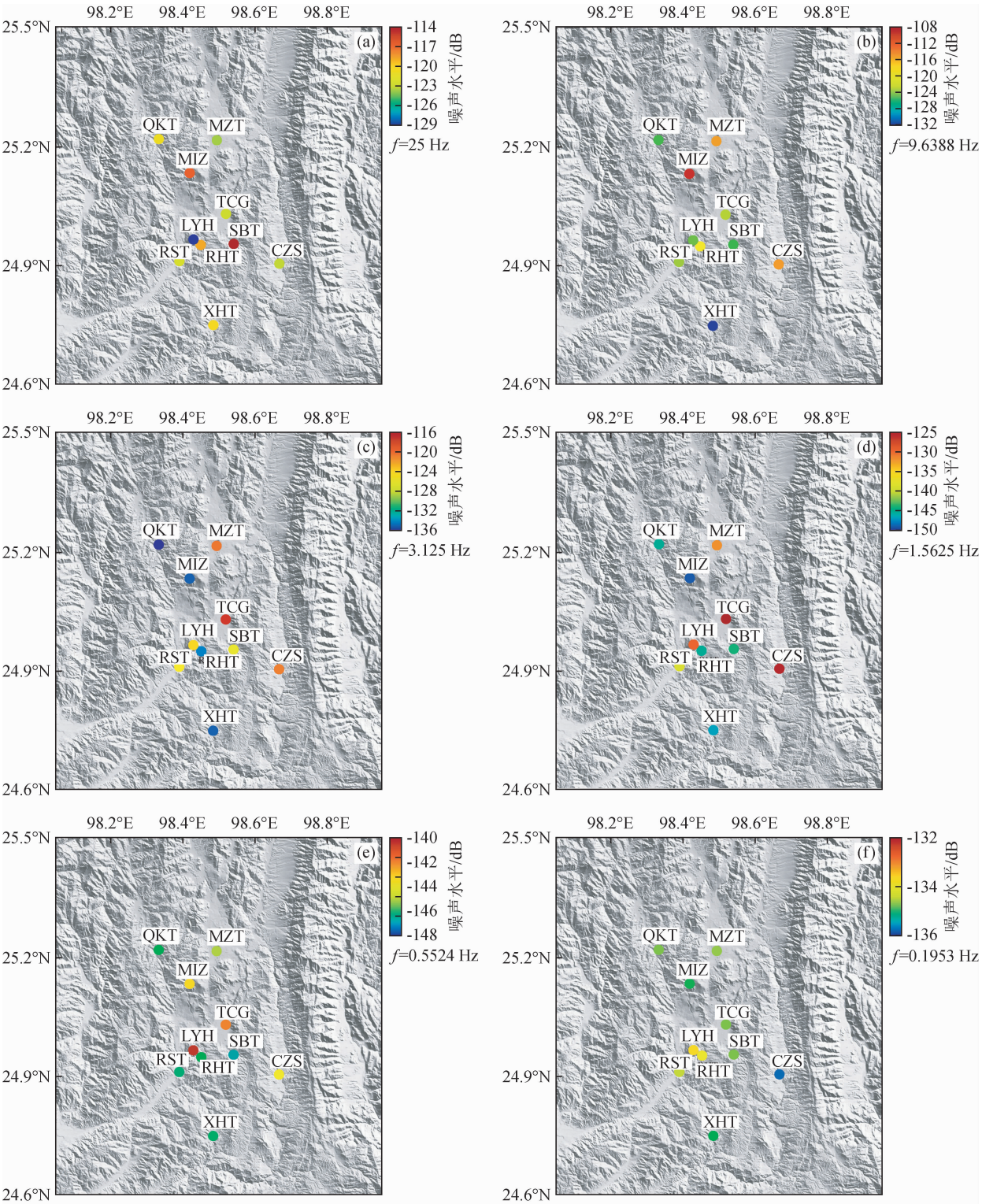
为进一步深入研究,将各台站垂直分向的功率谱密度中值绘制在空间分布图中,如图 9 所示,腾冲火山台网各台站不同频段垂直向噪声水平如表 4 所示. 在 1 Hz 以上的高频段,台站受附近人类生产生

表 4 腾冲火山台网各台站不同频段垂直向噪声水平

Table 4 Vertical noise levels of different frequency bands at each station of Tengchong volcanic network

序号	台站名称	台站代码	台站噪声水平/dB				
			0.05 ~ 0.1 Hz 频段	0.1 ~ 1 Hz 频段	1 ~ 3 Hz 频段	3 ~ 10 Hz 频段	10 ~ 35 Hz 频段
1	城子山	CZS	-153.9	-140.2	-125.7	-117.8	-120.6
2	民振	MIZ	-152.0	-142.4	-146.6	-121.9	-113.8
3	马站	MZT	-152.1	-140.2	-131	-117.9	-120.5
4	箐口	QKT	-152.5	-141.2	-143.6	-132.8	-122.2
5	热海	RHT	-151.5	-140.9	-143.8	-127.0	-118.9
6	热水塘	RST	-152.1	-141.3	-137.1	-125.2	-123.5
7	腾冲台	TCG	-152.4	-138.5	-124.1	-118.7	-123.4
8	新华	XHT	-151.9	-141.7	-145.1	-135.3	-123.9
9	老洋河	LYH	-152.4	-137.8	-129.4	-126.2	-126.5
10	沙坝	SBT	-151.6	-141.7	-140.8	-125.7	-119.0

活、交通等影响,噪声水平各不相同,腾冲台、城子山台、马站台、热海台、老洋河台噪声水平较高(大于 -130 dB),这些台站均距城市、集镇及村庄较近.周期在 0.1 ~ 1 Hz 频段第二类地脉动噪声主要源于深海与近海海岸间海浪的相互作用(包文超等,2024),腾冲地处内陆地区,火山台网各台站在此频段内噪声水平 -140 dB 附近,值得注意的是,采用山洞基岩摆墩安装的台站较地表松散层台站的噪声水平高约 3 dB,研究表明山洞基岩的完整性可能形成波导通道,使能量在特定频段内传播更高效,使得地脉动信号得以更清晰地记录(陈健云等,2002),而地表松散沉积层对低频噪声的吸收作用更强,导



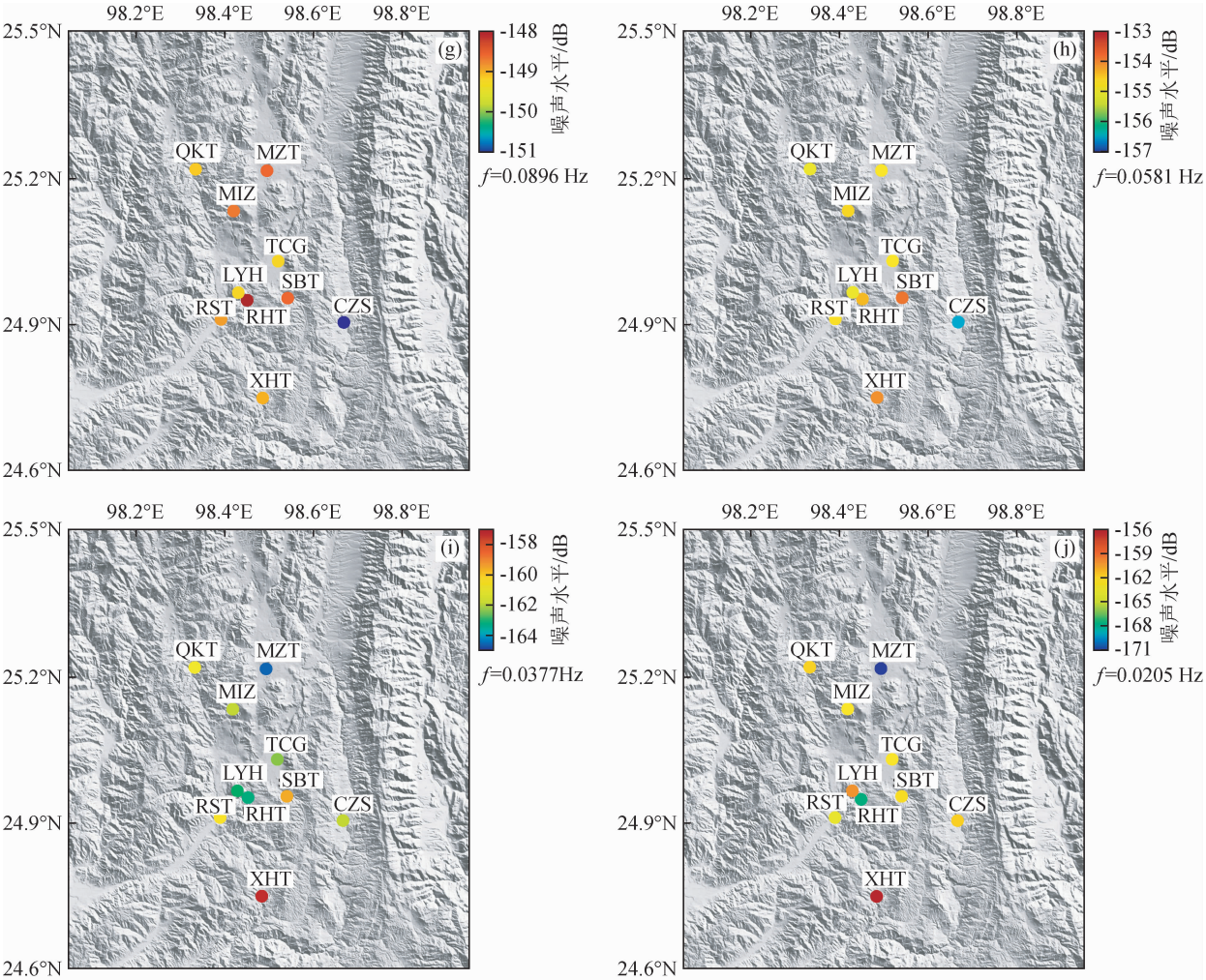


图 9 腾冲火山台网各台站垂直分量不同频率的噪声水平空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution of noise level at different frequencies of vertical component at each station of Tengchong volcanic network

致该频段背景噪声被部分压制(王芳等,2019),因此山洞台站在此频段的噪声水平较地表台站高. 在 0.05 ~ 0.1 Hz 频段,腾冲火山台网各台站噪声水平位于 -152 dB 附近,该范围内的噪声属于第一类地脉动,低于 0.1 ~ 1 Hz 频带范围内的噪声. 由于腾冲市距离最近的印度洋 800 km 以上,腾冲火山台网各台站记录到的微震噪声为第二类地脉动噪声,主要集中于 0.1 ~ 0.5 Hz,这与国内内蒙古(Bao *et al.*, 2024)等多数内陆台站类似,反映出内陆地区地脉动噪声源的共同特征. 因各台站间距较小且距海岸距离相近,在 0.1 ~ 0.5 Hz 频段各台站噪声未呈现显著空间分布差异.

4 结 论

本研究计算了腾冲火山台网 10 个固定台站 2020—2022 年记录的三分量连续波形数据的噪声加速度功率谱密度和相应的概率密度函数分布,分析腾冲火山台网各个台站背景噪声水平随时间和空间的变化特征,得出以下结论:

(1)腾冲火山台网在长周期 0.05 Hz 频段以下各台站的噪声未呈现出明显的季节性和空间变化分布特征,该频段台站的噪声水平主要与温度的变化和大气压的变化有关,地震计安装保温罩的台站噪声水平低于未安装保温罩的台站.

(2)腾冲火山台网各台站记录到的微震频段噪声主要集中在 0.1 ~ 0.5 Hz 频段,该频段噪声属于第二类地脉动噪声,受地理区位影响,腾冲火山地区地处内陆,距印度洋海岸线超过 800 km,其台网记录的背景噪声以第二类地脉动为主. 该频段内各台

站噪声水平呈现显著的季节性动态变化特征,冬季噪声水平峰值较夏季平均高 2 ~ 6 dB,且峰值出现的频率向较低频方向移动 1 s 左右;因各台站间距较小且距海岸距离相近,在 0.1 ~ 0.5 Hz 频段各台站噪声未呈现显著空间分布差异.

(3)腾冲火山台网在大于 1 Hz 以上的高频段噪声主要与人类活动有关.在此频段内,各台站噪声水平具有明显的昼夜变化规律,距离城镇、公路较近的台站昼夜变化规律愈发明显.在大于 10 Hz 以上的高频段部分台站具有明显的季节性变化,大部分台站夏季噪声水平高于冬季噪声水平.台站地震计安装采用山洞安装方式,山洞较深并远离城镇、公路等能有效降低高频段背景噪声水平.

地震背景噪声特征研究是提升地震监测效能的基础,本研究系统解析了腾冲火山台网背景噪声的日变化、季节性变化及空间分布规律,明确了不同频段噪声源的主导因素;通过地震计不同安装方式对比分析表明,地震计安装于山洞的台站较地表台站抗干扰能力较强,保温防风效果也优于地表台站;地震计安装保温罩也能有效降低温度变化对低频段噪声水平的干扰.研究结果为今后腾冲火山台网优化布局、提升数据监测质量提供理论参考,对推动腾冲火山区域地震监测能力现代化具有重要科学意义.

致　谢　感谢四川省地震局谢江涛老师的指导及各位审稿专家的建设性意见.

References

Bao W C, An Q, Guo Y, *et al*. 2024. Ambient noise levels of seismic stations located in urban agglomerations in central Inner Mongolia, China. PLoS One, 19(12): e0315004, doi: 10.1371/journal.pone.0315004.

Bao W C, Hu W, Shen Y, *et al*. 2024. Noise characteristics and monitoring capability analysis of Inner Mongolia reference station. North China Earthquake Sciences (in Chinese), 42(2): 94-101.

Chen J Y, Hu Z Q, Lin G. 2002. Random seismic response analysis of large-scale underground caverns. Journal of Hydraulic Engineering (in Chinese), (1): 71-75.

Chen K Q, Li Z W, Lin J M, *et al*. 2022. Crustal magma chamber beneath the Qiongbei volcano field in Hainan Island unveiled by seismic ambient noise tomography. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(4): 1379-1391, doi: 10.6038/pg2022DD0501.

D'Alessandro A, Greco L, Scudero S, *et al*. 2021. Spectral characterization and spatiotemporal variability of the background seismic noise in Italy. Earth and Space Science, 8(10): e2020EA001579, doi: 10.1029/2020ea001579.

Deng M W, Li X D, Zhang S, *et al*. 2021. Analysis of the impact of COVID-19 prevention and control measures on earth background noise in Xinjiang. Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese), 41(9): 985-990, doi: 10.14075/j.jgg.2021.09.019.

Duan Y, Wei Z G, Yang X L, *et al*. 2019. Research progress and prospect of structure in Tengchong volcanic area. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(4): 1288-1297, doi: 10.6038/pg2019CC0219.

Evangelidis C P, Melis N S. 2012. Ambient noise levels in Greece as recorded at the Hellenic Unified Seismic Network. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(6): 2507-2517.

Fan X T, Wei Z G, Chu R S, *et al*. 2025. Crust-mantle structure of Tengchong volcanic area and its implication for magmatic systems. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 68(3): 845-856, doi: 10.6038/cjg2023R0631.

Fang W, Wei J, Huang Y, *et al*. 2024. Research on the influencing factors of gravity station construction test: a case study of Yanziyan station in Yunnan. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(6): 2126-2136, doi: 10.6038/pg2024HH0556.

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.

Green D N, Bastow I D, Dashwood B, *et al*. 2017. Characterizing broadband seismic noise in central London. Seismological Research Letters, 88(1): 113-124.

Li K, Chen H, Zhang P, *et al*. 2021. Background noise characteristics of Jiangsu seismological network. North China Earthquake Sciences (in Chinese), 39(3): 66-71, 76.

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.

Pachi A, Ji T J. 2005. Frequency and velocity of people walking. Structural Engineer, 83(3): 36-40.

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

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.

Tang H, Xu J Y, He Q J, *et al*. 2024. Characteristics of seismic observation background noise in Ningxia region. Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese), 44(11): 1199-1206.

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 K M, Yu D X, Zhao L J, *et al*. 2023. Self-noise models of seismometers based on probability density function representation. Seismology and Geology (in Chinese), 45(5): 1187-1199.

Wang W T, Ni S D, Wang B S. 2011. Study on the characteristics of microseisms in the Yunan Region, China. Earthquake (in Chinese), 31(4): 58-67.

Welch P. 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 15(2): 70-73.

Wolin E, Van der Lee S, Bollmann T A, *et al*. 2015. Seasonal and diurnal variations in long-period noise at SPREE stations: The influence of soil characteristics on shallow stations' performance. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(5): 2433-2452.

Wu L H, Liao W L, Li J L, *et al*. 2025. Ambient noise characteristics at seismic stations in Huangshi City. China Earthquake Engineering Journal (in Chinese), 47(1): 152-159.

Wu S, Zhu C L, Cui H W, *et al*. 2024. Performance and record data coherence Analysis of GL-CS120 and JS-120 seismometers. South China Journal of Seismology (in Chinese), 44(4): 55-65, doi: 10.13512/j.hndz.2024.04.07.

Xie J T, Lin L P, Zhao M, *et al*. 2021. Characteristics of seismic ambient noise in Sichuan region. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 43(5): 533-550, doi: 10.11939/jass.20200148.

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.

You X Z, Lin B H, Li J, *et al*. 2024. Evaluation of observation data quality of Fujian earthquake early warning network. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(4): 1330-1342, doi: 10.6038/pg2024HH0282.

Zhang M, Gong J, Li K, *et al*. 2024. Observation performance of very broadband seismometers at Nanjing seismic station. South China Journal of Seismology (in Chinese), 44(3): 51-58, doi: 10.13512/j.hndz.2024.03.06.

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.

Zheng D C, Pang W D, Min Z X, *et al*. 2011. Investigation of ambient-noise source in Yunnan. Journal of Seismological Research (in Chinese), 34(2): 201-206.

Zürn W, Forbriger T, Widmer-Schnidrig R, *et al*. 2022. Modelling tilt noise caused by atmospheric processes at long periods for several horizontal seismometers at BFO—a reprise. Geophysical Journal International, 228(2): 927-943.

附中文参考文献

包文超, 胡玮, 申影, 等. 2024. 内蒙古基准站噪声特征与监测能力. 华北地震科学, 42(2): 94-101.

陈健云, 胡志强, 林皋. 2002. 超大型地下洞室群的随机地震响应分析. 水利学报, (1): 71-75.

陈凯琪, 李志伟, 林建民, 等. 2022. 海南琼北火山区上地壳岩浆囊的地震背景噪声成像研究. 地球物理学进展, 37(4): 1379-1391, doi: 10.6038/pg2022DD0501.

邓明文, 李晓东, 张森, 等. 2021. 新冠疫情防控措施对新疆地区地球背景噪声影响分析. 大地测量与地球动力学, 41(9): 985-990, doi: 10.14075/j.jgg.2021.09.019.

段毅, 危自根, 杨小林, 等. 2019. 腾冲火山结构研究进展和展望. 地球物理学进展, 34(4): 1288-1297, doi: 10.6038/pg2019CC0219.

范心甜, 危自根, 储日升, 等. 2025. 腾冲火山区壳幔结构及其对岩浆系统的启示. 地球物理学报, 68(3): 845-856, doi: 10.6038/cjg2023R0631.

方伟, 韦进, 黄雅, 等. 2024. 重力建站测试的影响因素研究——以云南燕子岩站为例. 地球物理学进展, 39(6): 2126-2136, doi: 10.6038/pg2024HH0556.

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.

立凯, 陈浩, 张朋, 等. 2021. 江苏省测震台网背景噪声特征. 华北地震科学, 39(3): 66-71, 76.

唐浩, 徐金银, 何秋菊, 等. 2024. 宁夏区域地震观测背景噪声特征. 大地测量与地球动力学, 44(11): 1199-1206.

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.

王凯明, 余大新, 赵立军, 等. 2023. 基于概率密度函数表示的地震计自噪声模型. 地震地质, 45(5): 1187-1199.

王伟涛, 倪四道, 王宝善. 2011. 云南地区地脉动噪声特征分析研究. 地震, 31(4): 58-67.

吴丽慧, 廖武林, 黎金玲, 等. 2025. 黄石市地震台背景噪声特征分析. 地震工程学报, 47(1): 152-159.

吴双, 朱成林, 崔华伟, 等. 2024. GL-CS120 和 JS-120 型地震计性能及记录数据相干性分析. 华南地震, 44(4): 55-65, doi: 10.13512/j.hndz.2024.04.07.

谢江涛, 林丽萍, 赵敏, 等. 2021. 四川地区地震背景噪声特征分析. 地震学报, 43(5): 533-550, doi: 10.11939/jass.20200148.

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.

游秀珍, 林彬华, 李军, 等. 2024. 福建地震预警台网观测数据质量评估. 地球物理学进展, 39(4): 1330-1342, doi: 10.6038/pg2024HH0282.

张敏, 宫杰, 立凯, 等. 2024. 南京地震台甚宽频地震计观测性能研究. 华南地震, 44(3): 51-58, doi: 10.13512/j.hndz.2024.03.06.

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.

郑定昌, 庞卫东, 闵照旭, 等. 2011. 云南地区背景噪声特征分析. 地震研究, 34(2): 201-206.