2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):1967-1978
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

安全,刘甜甜,马亮,等.2026.内蒙古地震背景噪声模型及应用研究.地球物理学进展,41(5):1967-1978,doi:10.6038/pg2026JJ0350.
AN Quan,LIU TianTian,MA Liang, *et al*. 2026. Study on regional background noise models and their application in Inner Mongolia. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):1967-1978,doi:10.6038/pg2026JJ0350.

内蒙古地震背景噪声模型及应用研究

Study on regional background noise models and their application in Inner Mongolia

安全[1],刘甜甜[1],马亮[1],李镇宇[1],包文超[1],韩晓明[2*],张荣莲[2],王树波[1],赵铁锁[1]
AN Quan[1],LIU TianTian[1],MA Liang[1],LI ZhenYu[1],BAO WenChao[1],HAN XiaoMing[2*],ZHANG RongLian[2],WANG ShuBo[1],ZHAO TieSuo[1]

1. 内蒙古自治区地震局,呼和浩特 010010
2. 二连浩特市地震局,二连浩特 011199
1. *Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region*, *Hohhot* 010010,*China*
2. *Erlianhaote City Earthquake Agency*, *Erenhot* 011199,*China*

摘 要 为提升内蒙古地震预警系统在数据质量评估与频域异常检测方面的能力,本研究基于全区 48 个基准站 2024 年连续 1 年观测数据,利用背景噪声功率谱概率密度函数(PDF)的第 10 与第 90 百分位数,分别构建了台站级地震噪声模型(L-PSD 与 H-PSD)和区域级地震噪声模型(MODEL-PSD-1、MODEL-PSD-2),旨在为台站运行监控、数据异常识别与科学选址提供依据.研究结果显示:(1)与全球噪声模型(NHNM/NLNM)相比,本地构建的台站级噪声模型在数据质量评估中灵敏度更高,能有效识别包括地震计摆线故障、安装方式变化、环境干扰及频带差异在内的多种异常情形;(2)所建立的区域噪声模型具有良好的区域代表性和季节适应性,能够覆盖不同观测环境下的噪声变化特征,为内蒙古及邻近地区新建台站勘选、观测环境评估及数据质量检验提供了可靠的区域量化基准;(3)噪声来源分析表明,低频段(0.02 ~ 0.05 Hz)主要受气流与温度变化影响,地脉动频段(0.1 ~ 0.5 Hz)与海洋活动密切相关,而高频段(1 ~ 20 Hz)则主要受人文活动支配.本研究构建的噪声模型,显著提升了内蒙古及周边地区测震站网的数据质量评估与数据频域异常检测能力,并为未来部署智能数据质量监控系统与新建台站选址奠定了科学基础.

Abstract To enhance the capabilities of the Inner Mongolia Earthquake Early Warning System in data quality evaluation and frequency-domain anomaly detection, this study employs the Power Spectral Density (PSD) values corresponding to the 10th and 90th percentiles of the background noise power spectral density Probability Density Function (PDF) as a method to establish station background noise models. Utilizing the full year 2024 of continuous observation data from 48 upgraded reference stations in Inner Mongolia, we have quantitatively derived the background noise models (L-PSD and H-PSD) for these 48 stations for the first time. Based on these individual station models, we further established regional background noise models for Inner Mongolia (MODEL-PSD-1 and MODEL-PSD-2). These models are intended to support station operation monitoring, data anomaly identification, and scientific site selection. The findings demonstrate that: (1) Compared to global noise models (NHNM/NLNM), the locally developed station-level noise models exhibit higher sensitivity in data quality assessment, effectively identifying various anomalies, including pendulum cable faults in seismometers, changes in installation configurations, environmental interference, and differences in frequency response; (2) The established regional noise models show strong regional representativeness and seasonal adaptability, encompassing noise variation characteristics across diverse observational environments. They provide a reliable quantitative regional benchmark for site selection, observational environment assessment, and data quality inspection of new stations in Inner Mongolia and adjacent areas; (3) Noise source analysis indicates that the low-frequency band (0.02 ~ 0.05 Hz) is predominantly influenced by airflow and temperature variations, the microtremor band (0.1 ~ 0.5 Hz) is closely associated with oceanic activity, and the high-frequency band (1 ~ 20 Hz)

收稿日期 2025-12-21; **修回日期** 2026-05-17. **投稿网址** http://www.progeophys.cn
基金项目 地震监测预警课题(CEA-JCYJ-202502002)和内蒙古自治区地震局局长基金(2023MS08)联合资助.
第一作者简介 安全,男,1988 年生,高级工程师,主要从事地震监测预警方面研究. E-mail:372841553@qq.com
***通讯作者** 韩晓明,男,1980 年生,研究员,主要从事地震学反演方法应用研究. E-mail:hxmpower@126.com

关键词 背景噪声模型;内蒙古;地震预警;数据质量

中图分类号 P315
文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026JJ0350
CSTR:32085.14.pg2026JJ0350

is mainly affected by anthropogenic sources. The noise models developed in this study significantly improve the capacity for data quality evaluation and frequency-domain anomaly detection within the seismic network of Inner Mongolia and surrounding regions. They also establish a scientific foundation for future deployment of intelligent quality monitoring systems and the selection of sites for new stations.

Keywords Background noise model; Inner Mongolia; Earthquake early warning; Data quality

0 引 言

测震站网的观测数据质量直接决定了地震烈度速报与预警系统(以下简称预警系统)产品的客观性与可靠性.随着我国地震预警系统正式投入运行,全国测震站网规模已扩大至近 1.6 万个(Peng *et al*., 2022).以内蒙古地区为例,其预警系统共接入站点 1269 个,其中包括省内站点 459 个和邻省站点 810 个.在系统运行过程中,若测震站网数据质量不达标,可能引发地震预警误差增大、烈度速报不准确甚至误触发等问题,进而影响震后应急救援决策的科学性,甚至导致社会公众恐慌.因此,对于已投入业务的预警系统而言,快速识别并定位数据异常,成为保障数据质量的关键环节,观测数据异常检测与质量提升也受到广泛关注(游秀珍等,2024).高质量的地震观测依赖于多重基础保障:包括科学的台站勘选与建设、先进的观测仪器及其标准化安装与防护,以及运行期间持续的数据异常监测与维护(许卫卫,2018).在数据异常检测方面,实现从定性评价向定量评价的转变尤为重要.目前,我国预警系统的站网监控平台已具备较强的时域异常定量告警能力,但在频域异常识别方面仍存在明显不足,其主要原因在于缺乏可用于频域异常判断的定量化指标或模型.

在全球地震观测研究中,1993 年美国地质调查局(USGS)提出的全球高噪声模型(NHNM)与低噪声模型(NLNM),已成为评估仪器性能与环境背景噪声水平的重要标准参考.McNamara 和 Buland (2004)进一步提出了基于功率谱概率密度函数(PDF)的地震噪声分析方法,为系统评估美国大陆的背景噪声及数据质量提供了有效工具.该方法随后在全球范围内获得广泛应用:例如,Sleeman (2007)在 Orfeus 数据中心实现了基于加速度功率谱密度(PSD)的实时数据质量自动检测;Aderhold 等(2015)利用该方法对比了流动台站与固定台站的数据质量;Rastin 等(2012)则据此构建了新西兰北岛国家地震台网的噪声模型.在国内,PDF 方法亦被成功引入区域地震台网的数据质量评估中.林彬华等(2015)基于功率谱概率密度函数(PDF)与网格概率法确立了福建测震台站的高低噪声参照线;黄玲珠等(2017)据此研发了自动监控系统,显著增强了台网运维效率;游秀珍等(2024)进一步将评估体系拓展至测震、强震与烈度计三网融合的预警台网,深化了对多类型传感器噪声特征及其对数据质量影响的认识,为地震预警的可靠性提供了关键支撑.丁莉莎等(2021)、潘国勇等(2023)、吴丽慧等(2025)、许卫卫等(2023)和安全等(2024)的研究进一步揭示了背景噪声的若干典型特征,如高频噪声主要受人文活动影响,某些特定频段(如 0.05 ~ 1 Hz)的三分向噪声表现一致且稳定,监测特定周期(如 0.5 Hz)的噪声变化有助于识别加速度计观测数据异常,凸显了 PSD 与 PDF 方法在台站状态监控与数据质量控制中的重要作用.

在国内,尽管相关研究已取得显著进展,但在单个台站及区域尺度上定量构建并实际应用地震背景噪声模型的案例尚待丰富.鉴于已有研究普遍指出,受人文与海洋活动、区域地质条件等因素影响,区域噪声水平常与全球模型存在差异(Custódio *et al*., 2014;Boese *et al*., 2015;Green *et al*., 2017;Xu *et al*., 2017),因此,开展针对内蒙古地区的地震背景噪声研究,构建适用于本区域的噪声模型,具有明确的必要性与应用价值.

为此,本研究将在现有成果基础上,采用 PDF 方法系统计算内蒙古基准站地震计的噪声 PSD,分别构建各站点的低噪声模型(L-PSD)与高噪声模型(H-PSD),并集成构建内蒙古区域地震背景噪声模型.该模型可直接用于提升站网数据质量评估能力,丰富频域异常检测指标,辅助运维人员快速识别与定位数据异常,从而增强地震预警系统的稳定性和可靠性.此外,本研究构建的噪声模型还可为内蒙古及周边地区的台站勘选与新建台站数据质量评估提供科学依据,并为未来部署基于深度学习的数据质

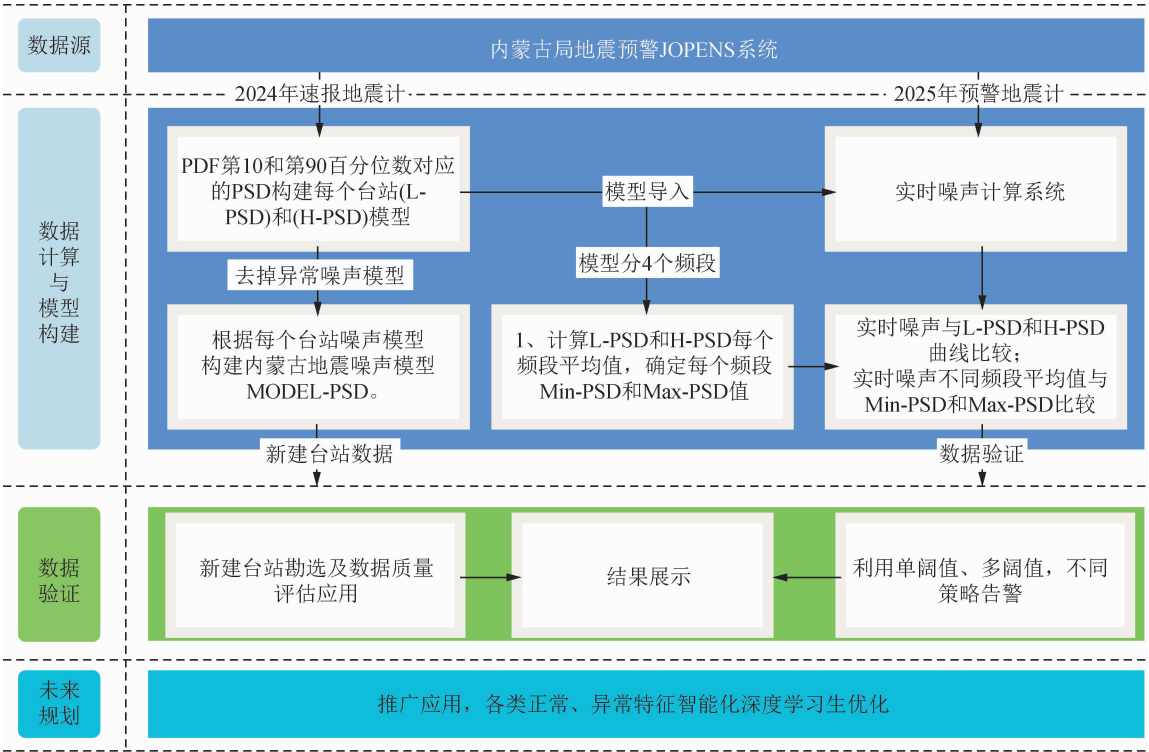


图 1　技术路线图

Fig. 1　Technology roadmap

量实时智能评估与异常判定系统奠定基础. 本研究的技术路线与未来规划如图 1 所示.

1　台站信息和数据来源

在国家地震烈度速报与预警项目及巨灾防范工程项目的支持下,内蒙古地区 48 个基准站已完成全面升级改造. 改造后,各基准站均配备了两套独立的地震计与数据采集器组合,分别用于测震速报与地震预警,并采用同址并行观测模式. 除 WUH 站的预警地震计外,其余所有地震计的频带范围均不低于 60 s. 观测方式涵盖四种类型:地表观测(16 个)、洞室观测(16 个)、浅井观测(包括地下室与摆坑,共 13 个)以及深井观测(3 个). 台站信息见图 2 和表 1,地震计技术参数详见表 2.

表 1　台站信息

Table 1　Station information

序号	台站	台基	海拔	速报地震计	预警地震计	速报数采	预警数采
1	AGL	辉绿岩	207	ITC-120A	JS-120	EDAS-24IP6	TDE-324FI
2	ARS	闪长岩	1077	GL-S120B	GL-CS120	EDAS-24IP6	TDE-324FI
3	BAC	花岗岩	1477	ITC-120A	ITC-120A	EDAS-24IP6	EDAS-24GN
4	BGL	花岗岩	1015	BBVS-60	ITC-60A	EDAS-24GN3	TDE-324FI
5	BHS	玄武岩	1510	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	HG-D6
6	BLM	花岗岩	1345	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	HG-D6
7	BTO	花岗岩	1305	BBVS-120	GL-CS120	EDAS-24GN6	HG-D6
8	BYT	花岗岩	1601	BBVS-60	JS-60	EDAS-24IP	HG-D6
9	CEK	花岗岩	937	GL-S120B	TBV-120VB	EDAS-24GN6	TDE-324FI
10	CHF	花岗岩	559	ITC-120A	JS-120	EDAS-24GN6	HG-D6
11	CHR	安山岩	797	GL-S60	GL-CS60	EDAS-24IP	TDE-324FI
12	CSQ	花岗岩	1067	BBVS-60	JS-60	EDAS-24IP	HG-D6

续表 1

Continued Table 1

序号	台站	台基	海拔	速报地震计	预警地震计	速报数采	预警数采
13	DQL	花岗岩	462	BBVS-60	JS-60	EDAS-24GN3	TDE-324FI
14	DSH	玄武岩	1466	BBVS-120	JS-120	EDAS-24IP	HG-D6
15	DSM	安山岩	1059	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	HG-D6
16	EKH	花岗岩	1532	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24GN3	HG-D6
17	GNH	花岗岩	731	CTS-1E	ITC-120A	EDAS-24GN6	TDE-324FI
18	HHC	花岗岩	1169	JCZ-1T	JCZ-360	EDAS-24IP6	HG-D6
19	HJN	花岗岩	627	BBVS-60DBH	TBV-60B	EDAS-24GN3	TDE-324FI
20	HLG	花岗岩	1180	BBVS-60	ITC-60A	EDAS-24IP	EDAS-24GN
21	HLH	灰岩	894	GL-S60	ITC-60A	EDAS-24IP	TDE-324FI
22	HLR	花岗岩	610	BBVS-120	JS-120	EDAS-24IP	TDE-324FI
23	IDR	红砂岩	238	BBVS-60	ITC-60A	EDAS-24IP	TDE-324FI
24	JIN	花岗岩	1377	BBVS-120	JS-120	EDAS-24IP	HG-D6
25	JIP	花岗岩	1081	BBVS-60	JS-60	EDAS-24IP	HG-D6
26	LCH	花岗岩	1271	BBVS-120	GL-CS120	EDAS-24IP	HG-D6
27	LIX	花岗岩	840	BBVS-60	JS-60	EDAS-24IP	HG-D6
28	LUB	花岗岩	303	GL-S60	ITC-60A	EDAS-24IP	TDE-324FI
29	MDG	花岗岩	721	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	TDE-324FI
30	MDL	花岗岩	1244	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24GN3	HG-D6
31	MDT	花岗岩	1061	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24GN3	HG-D6
32	MZL	花岗岩	755	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	TDE-324FI
33	NIC	花岗岩	693	GL-S60	JS-60	EDAS-24IP	HG-D6
34	NJT	花岗岩	291	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	TDE-324FI
35	QSH	变质岩	1185	BBVS-60	JS-60	EDAS-24IP	HG-D6
36	RLT	花岗岩	968	BBVS-120	JS-120	EDAS-24GN6	EDAS-24GN
37	TIS	花岗岩	396	BBVS-60	JS-60	EDAS-24IP	HG-D6
38	WJH	闪长岩	1092	JCZ-1	JCZ-360	EDAS-24GN6	HG-D6
39	WLH	砂岩	1515	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	HG-D6
40	WLJ	花岗岩	1398	BBVS-120	JS-120	EDAS-24GN6	HG-D6
41	WLT	花岗岩	377	ITC-120A	JS-120	EDAS-24GN6	TDE-324FI
42	WLY	花岗岩	871	BBVS-60	ITC-60A	EDAS-24GN3	TDE-324FI
43	WUH	片麻岩	1120	BBVS-60	HG-S02	EDAS-24IP	HG-D6
44	XIH	玄武岩	626	BBVS-60	JS-60	EDAS-24IP	HG-D6
45	XIQ	沉积岩	571	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	TDE-324FI
46	XLT	花岗岩	1027	BBVS-120	GL-CS120	EDAS-24IP	EDAS-24GN
47	XSZ	花岗岩	1118	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24GN	HG-D6
48	ZLT	闪长岩	413	BBVS-60	GL-CS60	EDAS-24IP	TDE-324FI

表 2 地震计主要参数

Table 2 Main parameters of seismometer

地震计	型号	灵敏度	自噪声水平	动态范围	频带宽度
速报地震计	BBVS、CTS-1、ITC-A、JCZ-1 系列	2000 V·s/m	-190 dB	优于 140 dB	不低于 60 s
预警地震计	GL-CS、ITC-A、JS、JCZ-1 系列	2000 V·s/m	-190 dB	优于 140 dB	除 WUH 台均不低于 60 s

本研究选取内蒙古地区 48 个基准站 2024 年 1 月至 12 月的测震速报地震计连续波形数据作为基础数据源. 数据处理参照 McNamara 等(2009)提出的概率密度函数(PDF)方法进行:首先基于各台站背景噪声功率谱的第 10 百分位数与第 90 百分位数所对应的功率谱密度(PSD)值,分别构建各站的低噪声模型(L-PSD)与高噪声模型(H-PSD),如图 3a 中橙线所示;在此基础上,进一步集成建立内蒙古区域地震背景噪声模型. 为验证模型适用性,本研究进一步计算了 2025 年随机时段内各基准站同址预警地震计的噪声 PSD(图 3a 黑线),并将其分别与对应台站的 H-PSD、L-PSD 模型及区域噪声模型进行比对,以实现对数据质量的系统评估. 根据 Ringler 和 Hutt(2010)的研究,地震计在工作频带内的自噪声水平显著低于地球低噪声新模型(NLNM),因此本研究未考虑地震计自噪声.

2　台站噪声模型及应用

图 3a 展示了基于 WUH 台站 365 天数据得到的地震背景噪声概率密度函数(PDF)和功率谱密度(PSD). 为探究数据时长对分析结果的影响,图 3b 进一步对比了基于 2 天、1 周、1 个月及 1 年数据分别计算的 H-PSD 与 L-PSD.

如图 3a 所示,WUH 台的 H-PSD 与 L-PSD 动态范围明显小于全球噪声模型 NHNM 与 NLNM,相差可达数个数量级,表明采用本台站的高低噪声模型作为数据质量评估依据具有更高的灵敏度. 在 2 ~ 3 Hz 频段,H-PSD 超出了 NHNM,这主要是由于 NHNM 在建模时仅选取了无地震、爆破等强干扰事件的安静时段数据,而 WUH 台数据则包含了此类信号,未予剔除. 从图 3b 可以看出,在 0.1 ~ 0.5 Hz 的微震频段(Stehly *et al.*, 2006; Yang and Ritzwoller, 2008),基于 1 年数据构建的噪声模型其动态范围显著大于基于日、周或月数据所建立的模型,说明使用年尺度数据才能较完整地覆盖台站噪声的变化特征. 因此,本研究在构建噪声模型时,均采用台站连续 365 天的年数据作为基础.

依据前述方法,本研究利用速报地震计 2024 年连续 365 天的数据,计算了各台站的背景噪声模型(文中仅列出垂直向结果). 随后,选取同址部署的预警地震计在 2025 年某单日的数据,计算了该日的背景噪声 PSD,并与对应台站的 H-PSD 和 L-PSD 参考模型进行了比对. 比对结果汇总于表 3,下文将对表 3 呈现的各类状态进行详细分析.

表 3　台站背景噪声模型与噪声水平比较结果

Table 3　Comparison results between the station background noise model and the noise level

序号	状态类型	数量	总占比
1	正常	33	69%
2	PSD 高频超幅	1	2%
3	PSD 低频超幅	4	8%
4	PSD 其他超幅	1	2%
5	噪声模型异常	9	19%

2.1　正常噪声模型和正常 PSD

从背景噪声 H-PSD、L-PSD 及 PSD 表现正常的 33 个台站中,选取 6 个代表性台站作进一步分析,结果如图 4 所示. 由图可见,各台站的 H-PSD 与 L-PSD 曲线形态与全球高噪声模型(NHNM)和低噪声模型(NLNM)基本相似,但其动态范围远小于全球模型,表明将台站自有噪声模型作为数据质量评估指标时,具有更高的灵敏度. 各台站噪声模型的差异主要出现在高于 1 Hz 的高频段,而在低于 1 Hz 的微震频段与低频段则一致性较高,尤其在 0.3 ~ 0.6 Hz 频段内一致性最为显著,且该频段噪声动态变化最小. 此外,在 0.02 ~ 40 Hz 的宽频带范围内,PSD 值均完全落入对应台站 H-PSD 与 L-PSD 所界定的范围内,验证了基于速报地震计构建的噪声模型可用于评估预警地震计的数据质量,并证明了定量化台站噪声模型在实际应用中的有效性与可靠性.

2.2　正常噪声模型与异常 PSD

如图 5 所示,6 个台站的预警地震计 PSD 幅度在不同频段出现了超出或低于该台站噪声模型的情况. 具体而言,图 5a 中大于 8 Hz 的高频段 PSD 超出该台 H-PSD,是由于该台噪声模型基于井下地震计数据构建,而预警地震计安装于地表,受高频环境噪声影响更为显著,相应的观测波形示例见图 5g;图 5b 中 0.85 ~ 1.2 Hz 频段 PSD 超出 H-PSD,与该台地震计摆线故障有关;图 5b—e 中多个台站在低频段的 PSD 普遍超出 H-PSD,主要因其预警地震计未安装保温防护,相应的观测波形示例见图 5h;图 5f 中 0.08 ~ 0.4 Hz 频段的 PSD 低于该台 L-PSD,是由于噪声模型由宽频带地震计(用于速报)数据计算得出,而用于对比的 PSD 数据来源于频响特性不同的短周期地震计,相应的观测波形示例见图 5i.

2.3　异常噪声模型

在 9 个台站的噪声模型中观察到不同程度的异常现象(图 6),其中图 6a—c 在大于 20 Hz 的高频段

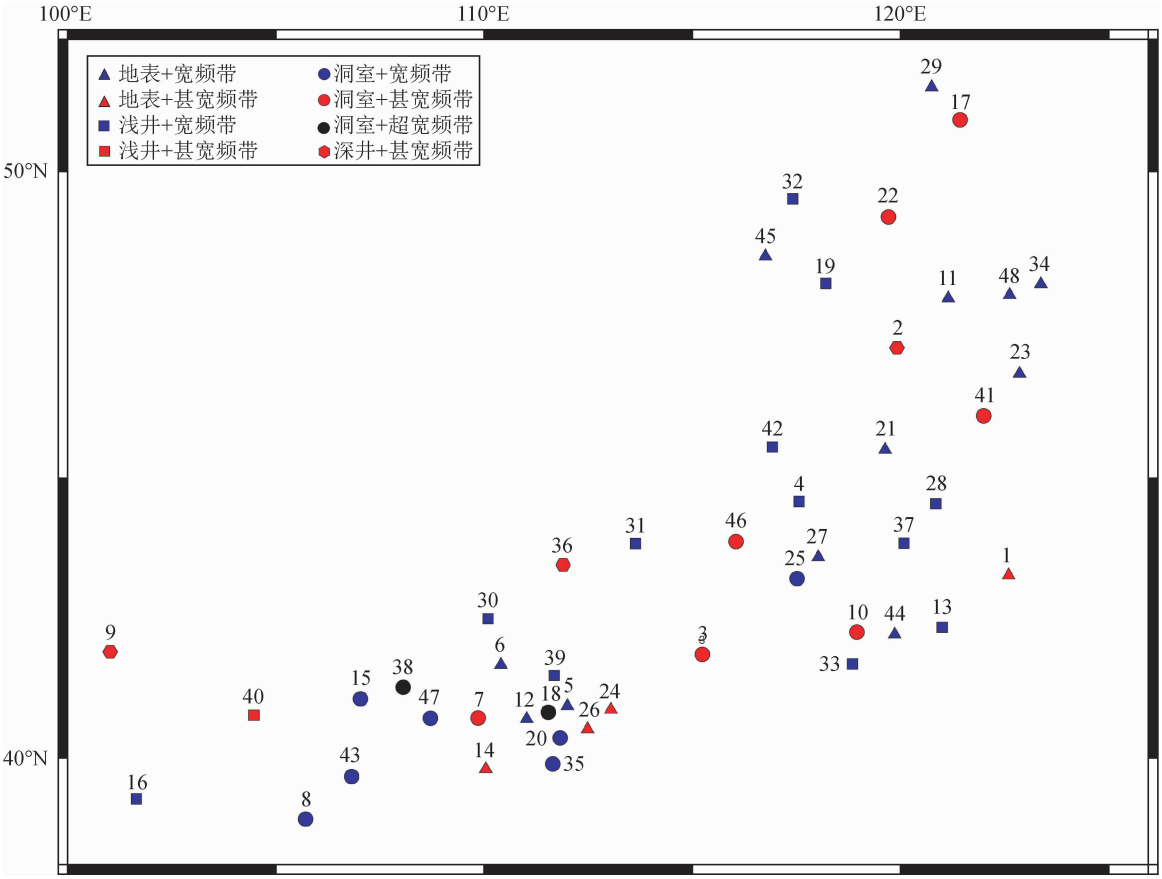


图 2 台站观测方式分布及地震计频带示意图

Fig. 2 Distribution of observation configurations and seismometer bandwidths

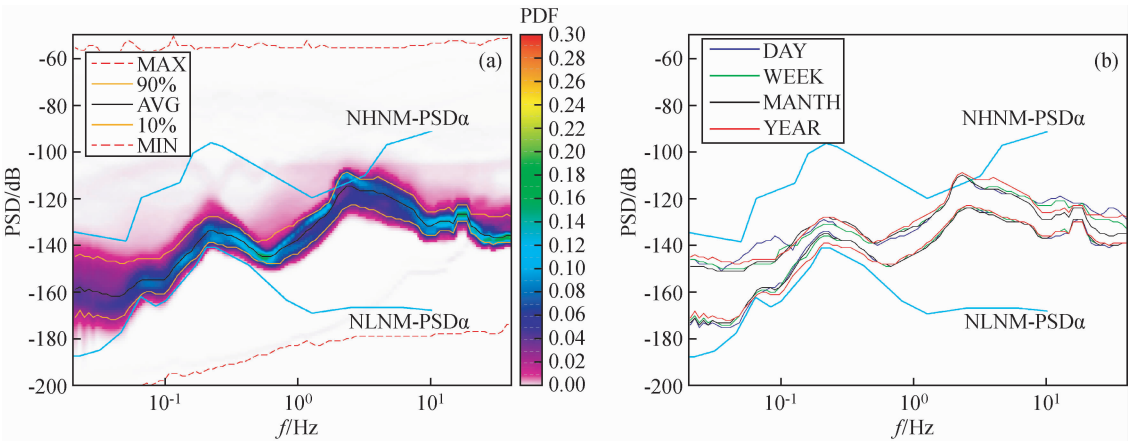


图 3 WUH 台 PDF、PSD、H-PSD、L-PSD 曲线

Fig. 3 PDF, PSD, H-PSD, and L-PSD curves for WUH station

表现出动态范围显著收窄,部分频点接近 0 dB,经排查这三个台站使用的速报地震计属同一厂家同期产品,推测该批次仪器在大于 20 Hz 频段可能存在记录能力不足的系统性缺陷;图 6d—h 中低频段 H-PSD 或 L-PSD 出现突跳,推测与地震计或防护罩安装不规范、布线不符合要求等因素有关;此外,图 6i 所示台站的噪声模型在形态、幅度及变化范围上均整体异常,确认由该台站周边强环境干扰、钻井未达标及地震计安装深度不足(仅 7 m)等因素共同导致.

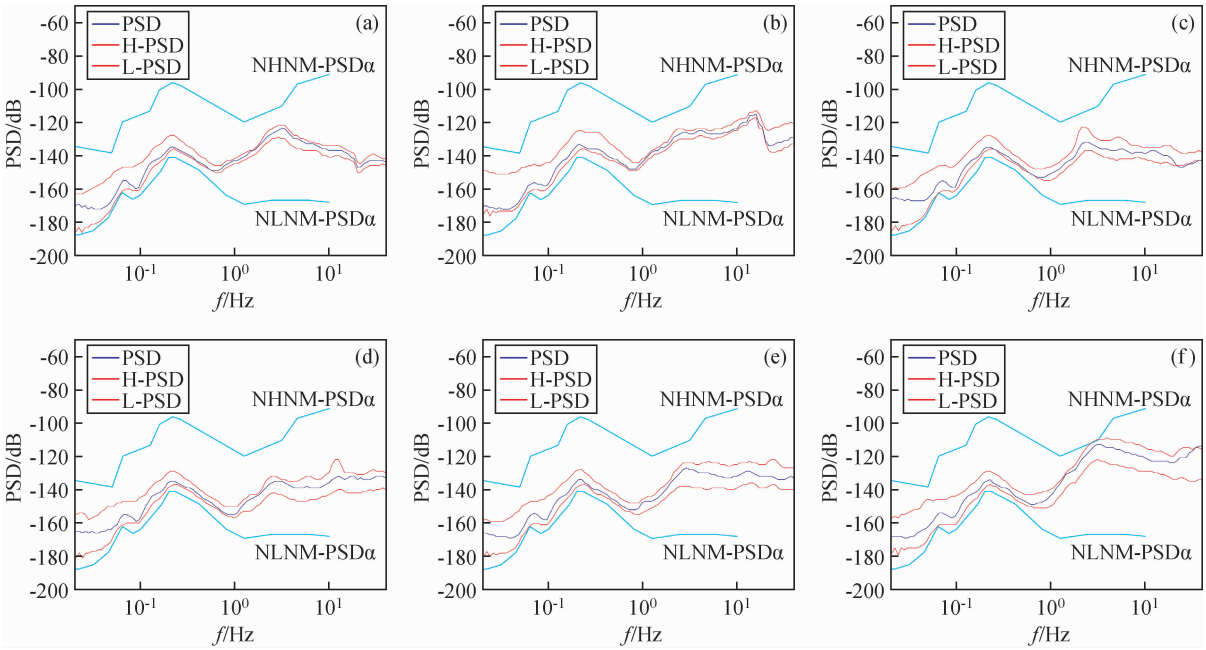


图 4　正常的台站噪声模型及正常 PSD

Fig. 4　Normal station noise models and normal PSD

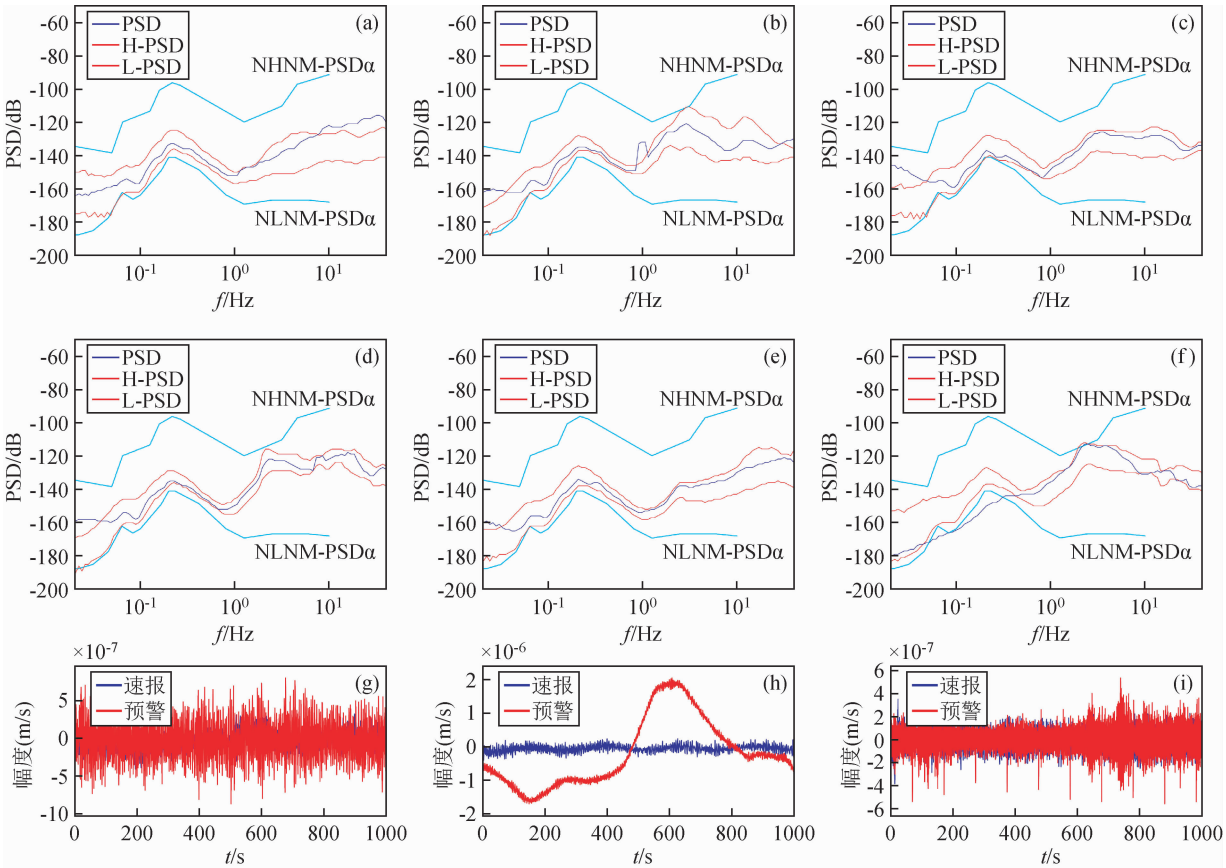


图 5　正常噪声模型与异常 PSD

Fig. 5　Normal noise models with abnormal PSD

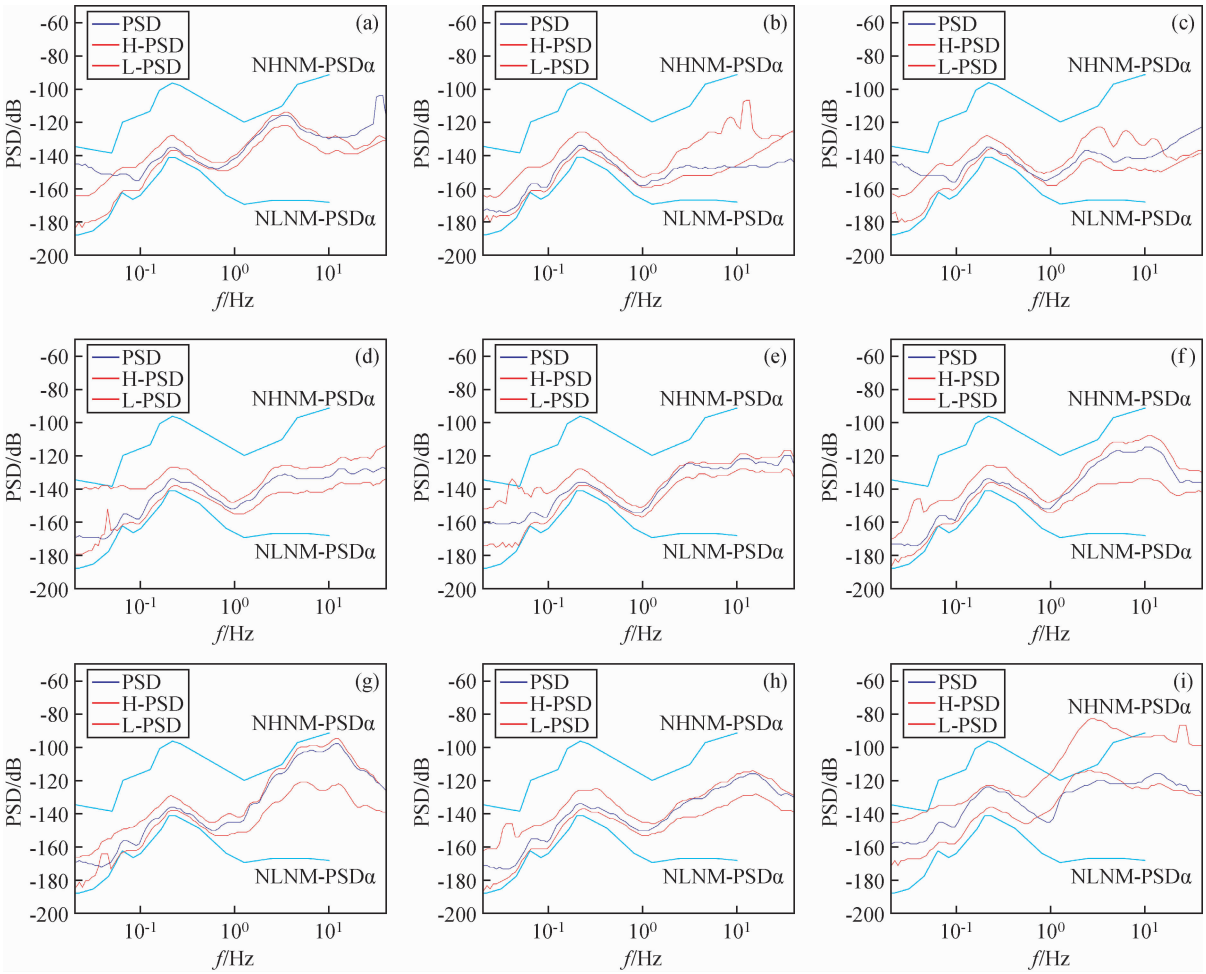


图 6 异常噪声模型

Fig. 6 Abnormal noise models

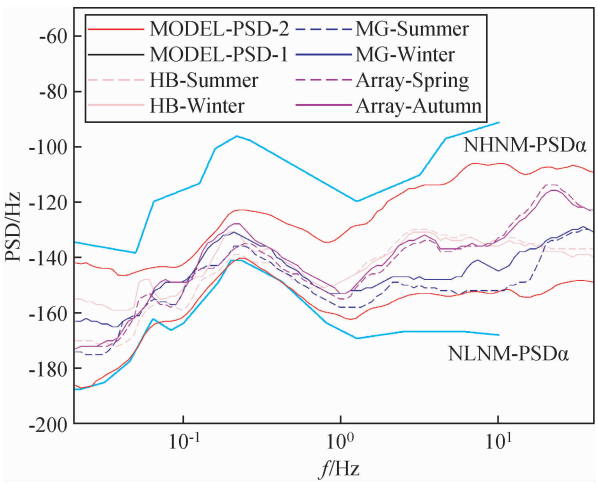


图 7 内蒙古地震背景噪声模型

Fig. 7 Regional background noise models for Inner Mongolia

3 内蒙古地震背景噪声模型

基于上述分析,本研究从 48 个台站中剔除了 9 个噪声模型异常以及 6 个 H-PSD 部分高于 NHNM 或 L-PSD 部分低于 NLNM 的台站,保留 33 个符合质量要求的台站. 在此基础上,基于各台站 H-PSD 与 L-PSD 的各频点平均值,构建了内蒙古地震背景噪声模型-1(MODEL-PSD-1),以反映内蒙古区域典型噪声水平. 为构建一个更宽泛的噪声范围,以涵盖不同区域、不同季节、不同观测环境下可能的噪声变化,依据 33 个台站 H-PSD 的各频点最大值与 L-PSD 的各频点最小值,构建了内蒙古地震背景噪声模型-2(MODEL-PSD-2),结果如图 7 所示.

为验证 MODEL-PSD-1 与 MODEL-PSD-2 的适用性,本研究选取了来自“一带一路”蒙古(MG)边境台站、河北省(HB)邻近内蒙古台站及“科学台阵

(Array)"台站分别在不同季节的单日数据,计算其背景噪声 PSD 并与所建模型进行比较. 如图 7 所示,在低于 0.8 Hz 的频段,三个台站的 PSD 基本位于 MODEL-PSD-1 范围内;在高于 1 Hz 的频段,MG 台站因环境安静其 PSD 低于 MODEL-PSD-1 的 L-PSD,而科学台阵在高于 15 Hz 频段因建于高噪声区其 PSD 高于 MODEL-PSD-1 的 H-PSD;所有 PSD 均位于 MODEL-PSD-2 范围内,表明该模型能够涵盖不同区域和季节的噪声变化. 基于图 7 特征,表 4 给出了 MODEL-PSD-1(< 0.8 Hz)和 MODEL-PSD-2(>0.8 Hz)部分频点的具体数值.

表 4　内蒙古地震背景噪声 MODEL-PSD 部分频点值

Table 4　Partial frequency point values of Inner Mongolia's regional background noise MODEL-PSD

MODEL-PSD-1			MODEL-PSD-2		
Frequency /Hz	L-PSD /dB	H-PSD /dB	frequency /Hz	L-PSD /dB	H-PSD /dB
0.021	-186.00	-142.00	0.837	-153.56	-146.00
0.031	-183.33	-143.97	0.904	-154.09	-146.28
0.042	-178.33	-146.67	1.055	-154.03	-145.81
0.052	-171.67	-145.00	2.278	-141.91	-130.53
0.061	-165.67	-144.00	3.100	-141.06	129.06
0.071	-163.33	-143.33	3.906	-141.19	-128.44
0.083	-163.00	-143.67	4.922	-141.44	-128.22
0.097	-162.00	-143.00	5.316	-141.38	-128.09
0.105	-160.33	-141.67	6.201	-141.00	-128.06
0.209	-141.33	-123.33	7.233	-140.59	-128.34
0.244	-140.33	-123.00	7.813	-140.34	-128.59
0.264	-141.33	-123.33	8.438	-140.34	-128.31
0.308	-144.00	-124.00	9.114	-140.34	-127.75
0.419	-149.00	-127.00	10.631	-139.78	-125.78
0.488	-151.67	-128.67	15.625	-139.06	-124.56
0.527	-153.33	-129.33	19.686	-140.91	-125.06
0.615	-156.33	-131.00	21.262	-140.81	-124.94
0.718	-159.00	-133.67	31.250	-140.38	-125.00
0.775	-159.67	-134.67	39.373	-140.47	-126.28

4　地震背景噪声源分析

图 8 展示了地表、洞室和浅井三种观测方式各 7 个台站在(0.02 ~ 0.05 Hz)、(0.05 ~ 0.1 Hz)、(0.1 ~ 0.5 Hz)和(1 ~ 20 Hz)四个频段的噪声 PSD 分布. 从图 8a 可以看出,在 0.02 ~ 0.05 Hz 频段,PSD 平均值由低到高依次为洞室、地表和浅井观测,与海岸线距离无明显关联,这与洞室恒温性能好、浅井内气流扰动大等因素有关(许卫卫等,2023),进一步印证了该频段噪声主要源于气流与温度变化(Doody *et al.*, 2018;包雪等,2023). 图 8b、c 显示,0.05 ~ 0.1 Hz 频段的 PSD 平均值与观测方式及海岸距离均无显著相关性;而在 0.1 ~ 0.5 Hz 频段,PSD 平均值随台站离海岸距离增大而降低,表明该频段噪声与海洋关联显著. 该频段属于地脉动噪声范围,其中 0.05 ~ 0.1 Hz 为第一类地脉动,0.1 ~ 0.5 Hz 为第二类地脉动,噪声源主要为海洋活动与固体地球的耦合作用(Stehly *et al.*, 2006; Yang and Ritzwoller, 2008). 图 8d 显示,1 ~ 20 Hz 频段的 PSD 平均值变化较大且无明显规律,结合台站资料可知该频段噪声与台站具体分布密切相关,噪声源主要来自人文活动(Webb, 1998;王芳等,2019).

5　内蒙古地震背景噪声模型应用

基于上述研究,本文将评估频段划分为四部分:低频段(0.02 ~ 0.05 Hz)、第一类地脉动频段(0.05 ~ 0.1 Hz)、第二类地脉动频段(0.1 ~ 0.5 Hz)和高频段(1 ~ 20 Hz),并据此计算了 MODEL-PSD-1 与 MODEL-PSD-2 在各频段高限(Max)与低限(Min)的平均值(表 5).

表 5　MODEL-PSD-1 和 MODEL-PSD-2 在不同频段平均值

Table 5　The average values of MODEL-PSD-1 and MODEL-PSD-2 across different frequency bands

Different frequency	MODEL-PSD-1		MODEL-PSD-2	
Frequency band/Hz	Min-1/dB	Max-1/dB	Min-2/dB	Max-2/dB
50-20 s	-176.37	-154.83	-181.38	-144.25
20-10 s	-161.82	-146.32	-164.37	-143.57
10-2 s	-143.59	-133.66	-148	-128.67
1-20 Hz	-142.77	-130.73	-154.79	-114.41

图 9 展示了 48 个预警地震计的 PSD 在四个评估频段内的平均值与 MODEL-PSD-1、MODEL-PSD-2 的高限(Max)及低限(Min)平均值的对比结果. 结果显示,在图 9a 所示的 0.02 ~ 0.05 Hz 频段,有两个台站的 PSD 平均值超过该频段 Max-1 并接近 Max-2,原因为其超宽频带(360 s)预警地震计未安装地震计罩. 图 9b、c 显示,在 0.05 ~ 0.1 Hz 及 0.1 ~ 0.5 Hz 频段,某一台站的 PSD 平均值低于 Min-2,系因该台站使用短周期地震计所致. 图 9d 表明,所有

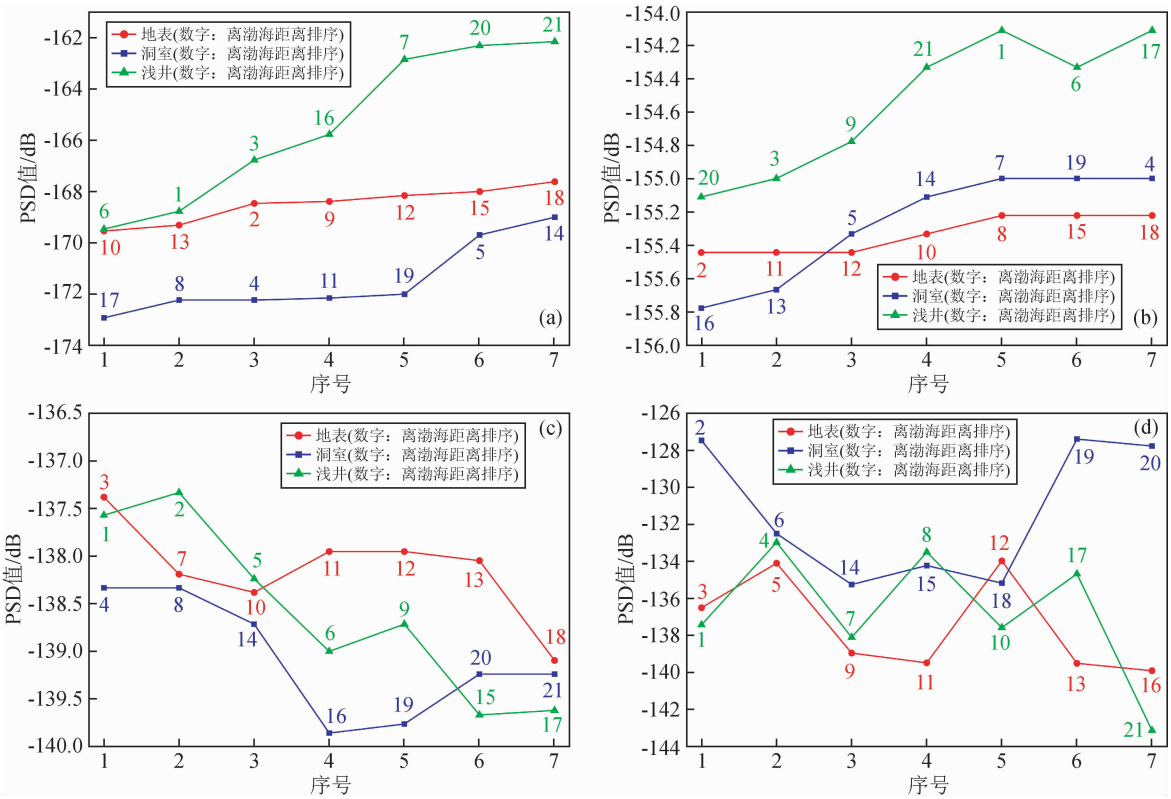


图 8 三种(地表、洞室、浅井)观测环境背景噪声 PSD 均值对比
(a)0.02～0.05 Hz;(b)0.05～0.1 Hz;(c)0.1～0.5 Hz;(d)1～20 Hz.
Fig. 8 Mean background noise PSD: surface vs. vault vs. shallow borehole

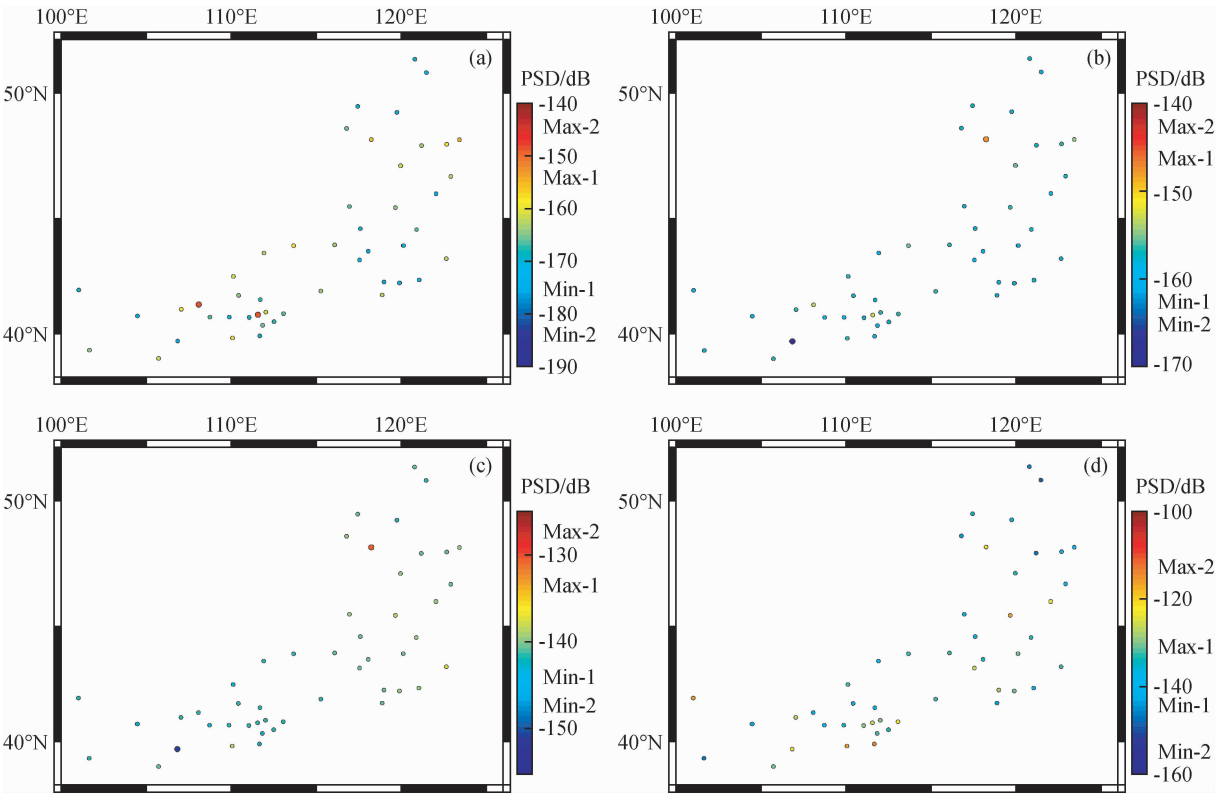


图 9 预警地震计 PSD 不同频段平均值
(a)0.02～0.05 Hz;(b)0.05～0.1 Hz;(c)0.1～0.5 Hz;(d)1～20 Hz.
Fig. 9 Average values of PSD in different frequency bands for early-warning seismometers

台站在 1 ~ 20 Hz 频段的 PSD 平均值均落在 Min-2 至 Max-2 范围内. 总体而言,图 9 所采用的分频段平均值空间分布展示方法,相较于图 5(PSD 与本台模型对比)与图 7(PSD 与区域模型对比),在结果呈现上更为直观简洁.

根据以上研究结果,在实际工作中可设置分频段多级告警机制,如类似图 9a 单频段异常触发一般告警,如图 9b、c 多频段异则触发严重告警等,从而提升台站监控系统对数据异常的自动识别与响应能力.

6　结　论

本研究利用内蒙古 48 个基准站 2024 年的连续观测数据,基于地震背景噪声功率谱概率密度函数(PDF)的第 10 与第 90 百分位数,首次系统构建了我区基准站的高、低噪声功率谱密度模型(H-PSD 与 L-PSD),在此基础上,进一步建立了适用于内蒙古区域的地震背景噪声综合模型(MODEL-PSD-1 与 MODEL-PSD-2). 主要结论如下:

(1)台站噪声模型的灵敏度优势:相比全球高/低噪声模型(NHNM/NLNM),基于本地数据构建的台站高低噪声模型(H-PSD/L-PSD)动态范围小,在数据质量评估中表现出更高的灵敏度,能更精确反映区域噪声变化特征.

(2)异常检测能力:台站噪声模型可有效识别多种数据异常情况,包括地震计摆线故障、仪器安装不规范、环境干扰变化、频带响应不一致等问题,为台站数据质量检测提供了定量化指标.

(3)区域噪声模型的构建与验证:MODEL-PSD-1 反映了区域典型噪声水平,MODEL-PSD-2 则因其基于各台站极值构建,能够涵盖不同区域、不同季节噪声变化,为内蒙古及邻近地区新建台站勘选、观测环境评估及数据质量检验提供了可靠的区域量化基准.

(4)噪声源频段特征分析:分析表明,0.02 ~ 0.05 Hz 频段噪声主要受气流扰动与温度变化,观测方式(洞室、地表、浅井)对其影响显著;0.1 ~ 0.5 Hz 次级微震频段的噪声水平与台站至海岸距离负相关,体现了海洋活动与固体地球的耦合作用;1 ~ 20 Hz 高频段噪声变化复杂,主要受人文活动影响,并与台站局部环境密切相关.

综上,本研究建立的台站与区域背景噪声模型,为内蒙古地区地震监测数据的质量评估、异常诊断和运维管理提供了有效的定量化指标,也为推进地震预警系统数据质量智能化检测奠定了坚实基础.

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Aderhold K, Anderson K E, Reusch A M, *et al*. 2015. Data quality of collocated portable broadband seismometers using direct burial and vault emplacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(5): 2420-2432.

An Q, Han X M, Bao W C, *et al*. 2024. Ambient noise and data quality analysis of strong motion stations in Inner Mongolia region. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 46(3): 490-501, doi: 10.11939/jass.20220211.

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.

Boese C M, Wotherspoon L, Alvarez M, *et al*. 2015. Analysis of anthropogenic and natural noise from multilevel borehole seismometers in an urban environment, Auckland, New Zealand. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(1): 285-299.

Custódio S, Dias N A, Caldeira B, *et al*. 2014. Ambient noise recorded by a dense broadband seismic deployment in western Iberia. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(6): 2985-3007.

Ding L S, Ma J M, Qi J W, *et al*. 2021. Discussion on monitoring the operating state of seismic station observation system by using fractal method of background noise. Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese), 41(4): 436-440, doi: 10.14075/j.jgg.2021.04.021.

Doody C D, Ringler A T, Anthony R E, *et al*. 2018. Effects of thermal variability on broadband seismometers: Controlled experiments, observations, and implications. Bulletin of the Seismological Society of America, 108(1): 493-502.

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.

Huang L Z, Lin B H, Wang S C. 2017. Automatic monitoring of real-time waveform data quality of seismic network. South China Journal of Seismology (in Chinese), 37(4): 20-25.

Lin B H, Jin X, Liao S R, *et al*. 2015. Real-time monitoring of abnormal seismic noise. Earthquake Research in China (in Chinese), 31(2): 281-289.

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, 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.

Pan G Y, Xia B, Liu F, *et al*. 2023. Comprehensive analysis of data quality of Shanghai Seismic Network. Seismological and Geomagnetic Observation and Research (in Chinese), 44(2): 64-72, doi: 10.3969/j.issn.1003-3246.2023.02.008.

Peng C Y, Jiang P, Ma Q, *et al*. 2022. Chinese nationwide earthquake early warning system and its performance in the 2022 Lushan M6.1 earthquake. Remote Sensing, 14(17): 4269, doi: 10.3390/rs14174269.

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.

Sleeman R. 2007. Towards an automated quality control manager for the

virtual European broadband seismograph network. Orfeus Newsletter, 7(1): 5-16.

Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. 2006. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B10): B10306, doi: 10.1029/2005JB004237.

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, doi: 10.11939/jass.20190031.

Webb S C. 1998. Broadband seismology and noise under the ocean. Reviews of Geophysics, 36(1): 105-142.

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, 47(1): 152-159, doi: 10.20000/j.1000-0844.20230518002.

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/cig2022Q0753.

Xu Y, Koper K D, Burlacu R. 2017. Lakes as a source of short-period (0.5-2 s) microseisms. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(10): 8241-8256.

Yang Y J, Ritzwoller M H. 2008. Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 9(2): Q02008, doi: 10.1029/2007gc001814.

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.

附中文参考文献

安全, 韩晓明, 包文超, 等. 2024. 内蒙古地区强震动台站背景噪声与数据质量分析. 地震学报, 46(3): 490-501, doi: 10.11939/jass.20220211.

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.

丁莉莎, 马洁美, 齐军伟, 等. 2021. 利用背景噪声的分形方法监控台站观测系统运行状态. 大地测量与地球动力学, 41(4): 436-440, doi: 10.14075/j.jgg.2021.04.021.

黄玲珠, 林彬华, 王士成. 2017. 测震台网实时波形数据质量自动监控. 华南地震, 37(4): 20-25.

林彬华, 金星, 廖诗荣, 等. 2015. 地震噪声异常实时监测. 中国地震, 31(2): 281-289.

潘国勇, 夏波, 刘菲, 等. 2023. 上海测震台网数据质量综合分析. 地震地磁观测与研究, 44(2): 64-72, doi: 10.3969/j.issn.1003-3246.2023.02.008.

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, doi: 10.11939/jass.20190031.

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, doi: 10.20000/j.1000-0844.20230518002.

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/cig2022Q0753.

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.