

吉林龙井台阵环境噪声源分析

孙婉婷, 李承雪, 施鸿昊, 孔 婧

吉林省地震局延边地震监测中心站, 吉林 延吉

收稿日期: 2026年3月17日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月29日

摘 要

为评估吉林龙井地震台阵观测环境状态, 保障边境地区地震监测效能, 本文通过实地摸排与连续地震观测, 系统开展了台阵周边30 km范围内的环境噪声源调研, 并将现今噪声功率谱与台阵试运行阶段的进行对比, 综合评价了台阵所属9个子台环境噪声水平。结果表明, 龙井台阵整体观测环境保持稳定, 周围存在8类噪声源, 其中地面观测环境受乡村道路通行和乡镇农工业生产的影响在高频段(1 Hz以上)较试运行期间略有抬升, 但对监测效能影响不大; 井下观测环境较试运行期间变化不大, 整体噪声环境仍处于良好状态。台阵7个子台噪声水平达到I类台站要求, 其中A0、A1子台受附近一般工厂影响处于II类台站观测标准。

关键词

龙井台阵, 环境噪声源, 背景噪声, 功率谱密度

Analysis of Environmental Noise Sources for the Jilin Longjing Seismic Array

Wanting Sun, Chengxue Li, Honghao Shi, Jing Kong

Yanbian Seismic Monitoring Center Station, Jilin Earthquake Agency, Yanji Jilin

Received: March 17, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

To evaluate the observational environment of the Jilin Longjing Seismic Array and ensure its seismic monitoring performance in border areas, this study systematically conducted an investigation of environmental noise sources within a 30 km radius around the array through field reconnaissance and continuous seismic observation. We compared the current noise power spectral density with that recorded during the array's commissioning phase, and comprehensively assessed the environmental noise levels of all 9 sub-stations belonging to the array. The results show that the overall observational

environment of the Longjing Seismic Array remains stable, with 8 categories of noise sources identified in the surrounding area. Among them, the surface observation environment, affected by traffic on rural roads and agricultural and industrial production in towns and townships, is slightly elevated in the high-frequency band (above 1 Hz) compared with that during the commissioning phase, but exerts a negligible effect on the monitoring performance. The downhole observation environment has little change from the commissioning phase, and its overall noise environment remains in good condition. 7 sub-stations of the array meet the requirements for Class I seismic stations, while the A0 and A1 sub-stations only comply with the observation standard for Class II stations due to interference from nearby ordinary industrial facilities.

Keywords

Longjing Seismic Array, Environmental Noise Sources, Ambient Noise, Power Spectral Density

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震台阵是在一定孔径范围内按照特定几何形态布设多个子台,通过阵列处理方法提高微弱信号识别能力、抑制随机干扰并增强地震波场分析能力的观测系统,以实现远距离微震事件的精准捕捉与定位[1]。自20世纪50年代末以来,地震台阵已从核爆信号监测逐步拓展至区域地震活动监测、地球内部精细结构探测等领域,成为边境、近海等常规台站布设受限区域提升地震监测能力的核心技术手段[2]。我国自20世纪90年代起,先后在上海、兰州、海拉尔等地建成多座不同孔径的地震台阵,在区域地震安全保障、核爆核查等工作中发挥了重要作用。

地震台阵的观测效能直接受背景噪声水平控制,而台站周边的环境噪声会随区域社会经济发展、人类活动强度变化发生动态改变。近年来,随着观测技术和计算技术的不断进步,台站噪声水平的实时或近实时分析已成为评估地震台站运行质量的重要技术指标。因此,对地震台站周边噪声水平进行长期动态监测和评估,是保障地震观测数据质量与可靠性的重要工作,具有显著的必要性。

吉林龙井地震台阵(以下简称龙井台阵)是中国地震局为加强边境地区地震监测能力而建设的重要观测设施。该台阵于2022年初开工建设,2023年1月进入试运行阶段,2023年下半年通过验收。在勘址期间,卢燕红等[3]对龙井台阵的阵址进行了勘选和设计,张洪艳等[4]对龙井台阵勘址数据的背景噪声功率谱进行了估计;在试运行阶段,吉林局对台阵背景噪声进行了均方根计算。上述研究成果为龙井台阵的建设奠定了稳固的基础。

目前针对龙井台阵的研究多集中于建设前的勘址分析,缺乏正式运行后的系统噪声源调研与效能评估。本文利用了2025年龙井台阵一年间的连续波形数据,参照《地震台站观测环境技术要求第1部分:测震》(GB/T19531.1-2004)规范,系统开展台阵周边环境噪声源调研分析,完成台阵观测效能的动态评价,为台阵长期运行评估和观测环境保护提供依据。

2. 台阵概况

龙井台阵位于吉林省延边朝鲜族自治州龙井市德新乡,地处长白山麓,东南距中朝边境线约30 km,边境线长142.5 km;东北与延吉市、图们市接壤;西南与和龙市毗邻;西北与安图县相接[3][4]。台阵所属区域地貌类型为轻微切割槽形盆地谷地,台阵观测场址位于谷地。在区域构造上位于延边优地槽褶皱

带，台基岩性为上白垩统龙井组灰绿色 - 紫红色含砾粗砂岩、细砂岩与页岩互层，基岩完整致密，具备良好的地震观测地质条件[3]。

龙井台阵为小孔径圆形台阵，孔径约 3 km，采用同心圆式均匀布局，共设置 9 个观测子台：1 个中心子台(A0)、3 个内圈子台(A1~A3，分布于半径约 500 m 的圆周上)、5 个外圈子台(B1~B5，分布于半径约 1500 m 的圆周上)。该布局可实现对各方向入射地震波的均匀接收，便于台阵数据的处理与应用。龙井台阵布局见图 1。

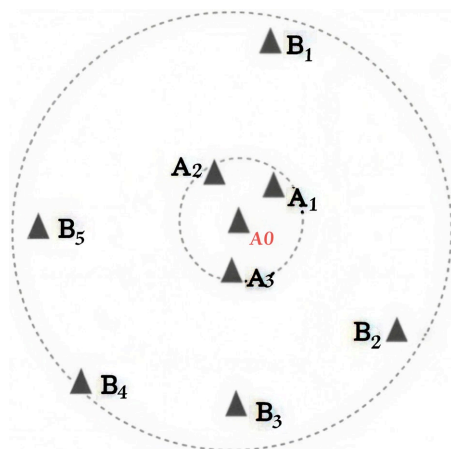


Figure 1. Substation distribution of Longjing Seismic Array
图 1. 龙井台阵的子台分布

所有子台均安装有北京港震公司生产的 GL-BH2 井下短周期地震计和 GL-CS2 地面短周期地震计，带宽均为 0.5~80 Hz。其中，中心台 A0 还安装有北京港震公司生产的 GL-CS120B 井下甚宽频带地震计和 GL-PH120 地面甚宽频带地震计，带宽为 0.008~80 HZ，这四种地震计的数据采样率均为每秒 100 个采样点。仪器参数见表 1。

Table 1. Parameters of the seismometer
表 1. 地震计仪器参数

型号	频带	灵敏度	工作环境	动态范围
GL-CS2	2 s~80 Hz	2000 V/m/s	-30~50℃	>140 dB
GL-BH2	2 s~80 Hz	4000 V/m/s	-30~50℃	>140 dB
GL-PH120	120 s~80 Hz	2000 V/m/s	-30~50℃	>140 dB (0.01~0.05 HZ) >160 dB (1.0~10 HZ)
GL-CS120B	120 s~80 Hz	2000 V/m/s	-25~60℃	>140 dB (0.01~0.05 HZ) >160 dB (1.0~10 HZ)

3. 噪声源调查

结合龙井台阵所在区域特征，对台阵半径 30 km 范围内的海洋、沿岸山系统；大湖；大坝、瀑布；大油管道；小湖；重型机械和往复运动机械；低瀑布、快流大河、流过大坝的间歇水流；铁路、频繁运输；机场、空中交通；非往复运动机械、平衡工业机械；繁忙的高速公路、大农场；乡村道路、高建筑；低建筑、高树和天线杆；高篱笆、矮树、高灌木丛、大岩石等噪声源进行调研[5] [6]。经调查，龙井台阵周边存在 8 类噪声源。以中心子台 A0 为例，列举部分具有代表性的噪声源与距离见表 2。

Table 2. Noise sources at central sub-station A0 of Longjing Seismic Array**表 2.** 龙井台阵中心子台 A0 噪声源

序号	噪声源分类	噪声源及距离
1	低瀑布、快流大河、流过大坝的间歇水流	布尔哈通河(19.54 km)、海兰江(13.63 km)、图们江(12.81 km)、嘎呀河(12.70 km)
2	铁路、频繁运输	延吉西站(24.97 km)、龙井站(15.58 km)、龙井客运站(15.51 km)、朝阳川站(25.40 km)、延边公路客运总站(26.05 km)
3	机场、空中交通	延吉朝阳川机场(21.03 km)
4	非往复运动机械、平衡工业机械	延吉水泥管厂(26.30 km)、龙井市喜旺焊接机械加工厂(15.20 km)、龙井德新粮库有限公司(0.62 km)、龙井市热力煤气总公司(15.14 km)、龙兴水泥制品有限公司(14.80 km)、方舟粮食加工厂(26.27 km)、延边星汇物流园(20.22 km)
5	繁忙的高速公路、大农场	G1221 延龙高速(26.71 km)、G12 珲乌高速(29.63 km)、龙井东盛种牛场(10.80 km)、鸿博生态农场(29.45 km)
6	乡村道路、高建筑	G333 国道(15.18 km)、G302 国道(22.09 km)、凤凰城(17.06 km)、水岸人家(16.45 km)、Y002 乡道(0.13 km)
7	低建筑、高树和天线杆	南阳村(2.66 km)、明新村(1.21 km)、帽儿山国家森林公园(17.30 km)、琵琶山风景区(18.24 km)、天线杆(0.02 km)、高树(0.22 km)、龙井市广播电视台(16.40 km)、
8	高篱笆、矮树、高灌木丛、大岩石	高篱笆(0.01 km)、矮树(0.01 km)、高灌木丛(无)、大岩石(无)

通过对 9 个子台周边进行详细摸排,发现各子台近距离噪声源有村落、天线杆、树木、乡村道路等,具体信息见表 3。

Table 3. Nearby noise sources of each sub-station**表 3.** 各子台周边近距离噪声源

子台编号	噪声源及距离
A0	河北村(468 km)、明新村(1213 km)、高篱笆(8 m)、矮树(12 m)、天线杆(21 m)、高树(223 m)、龙井德新粮库有限公司(628 m)、龙井市德新联校(1705 m)
A1	河北村(788 m)、龙井德新粮库有限公司(454 m)、明新村(1282 m)、龙井市德新联校(1642 m)、天线杆(4 m)
A2	德新乡人民政府(748 m)、龙井德新粮库有限公司(700 m)、明新村(1363 m)、龙井市德新联校(2048 m)、Y022 乡道(241 m)、乡村小路(5 m)、乡村小路(16 m)、天线杆(3 m)
A3	龙井德新粮库有限公司(600 m)、明新村(688 m)、河北村(922 m)、龙井市德新联校(1171 m)、Y022 乡道(56 m)、乡村小路(132 m)、乡村小路(64 m)
B1	乡村小路(92 m)、乡村小路(139 m)、河北村(1012 m)、德新乡人民政府(1780 m)、龙井德新粮库有限公司(1536 m)、龙岩村(1927 m)、Y022 乡道(518 m)、矮树(8 m)、高篱笆(10 m)
B2	兴隆村(1893 m)、龙井德新粮库有限公司(1556 m)、河北村(2051 m)、德新乡人民政府(1884 m)、乡村小路(7 m)、天线杆(4 m)
B3	南阳村(1442 m)、龙井市德新联校(652 m)、明新村(1267 m)、德新乡人民政府(1323 m)、龙井德新粮库有限公司(1520 m)、乡村小路(5 m)、Y022 乡道(746 m)、天线杆(15 m)
B4	德新乡人民政府(1566 m)、龙井德新粮库有限公司(1901 m)、明新村(1020 m)、南阳村(748 m)、龙井市德新联校(221 m)、Y021 乡道(26 m)、天线杆(15 m)
B5	南阳村(1891 m)、明新村(1224 m)、德新乡人民政府(2033 m)、乡村小路(6 m)、龙井市德新联校(1849 m)、河北村(2209 m)、天线杆(9 m)

通过对龙井台阵近距离噪声源调研可见,台阵周边分布以村落、耕地和乡村道路为主,农业劳作、车辆通行是台阵噪声的主要影响源。

4. 噪声功率谱密度计算

4.1. 方法原理

功率谱密度描述了噪声信号在频域内的能量分布情况，是研究背景噪声的常用方法[7]。本研究采用 Welch 平均周期图法[8]实现台站背景噪声功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)的计算。在计算信号的功率谱之前，对原始波形数据进行物理量标定与去直流处理。将长度为 N 的离散时间序列 $x(n)$ 划分为 K 个长度为 M 的重叠数据段，相邻分段重叠率 50%，对每个分段施加窗函数后计算单段周期图，最终通过多段周期图的算术平均得到 PSD 估计，以大幅降低传统周期图法的估计方差。单段周期图与最终 PSD 的计算公式为：

$$I_i(f) = \frac{1}{MF_s} \left| FFT(x_i(n)w(n), N_{fft}) \right|^2, P(f) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K I_i(f) \quad (1)$$

式中， F_s 为波形采样率， $x_i(n)$ 为第 i 个数据段， $w(n)$ 为窗函数，窗长 $M = 32,768$ 点， N_{fft} 为快速傅里叶变换点数， $N_{fft} = 32,768$ 点，频率分析范围为 10^{-3} Hz~ 10^2 Hz。

为消除偶然地震事件、瞬时人文干扰对噪声水平估计的影响，对同一台站同一通道的所有有效连续时段的 PSD 结果进行集合平均，平均次数为对应有效数据文件总数，最终得到台站稳态背景噪声的平均 PSD，并将功率谱转换为分贝单位($10\log_{10}(P_a(f))$)用于后续噪声水平评估与对比分析。

4.2. 噪声水平对比

选取龙井台阵 2025 年各子台全年的连续地震波形记录，计算各子台噪声功率谱均值，并与试运行期间的噪声测试结果进行比对，分析台阵的噪声水平变化。

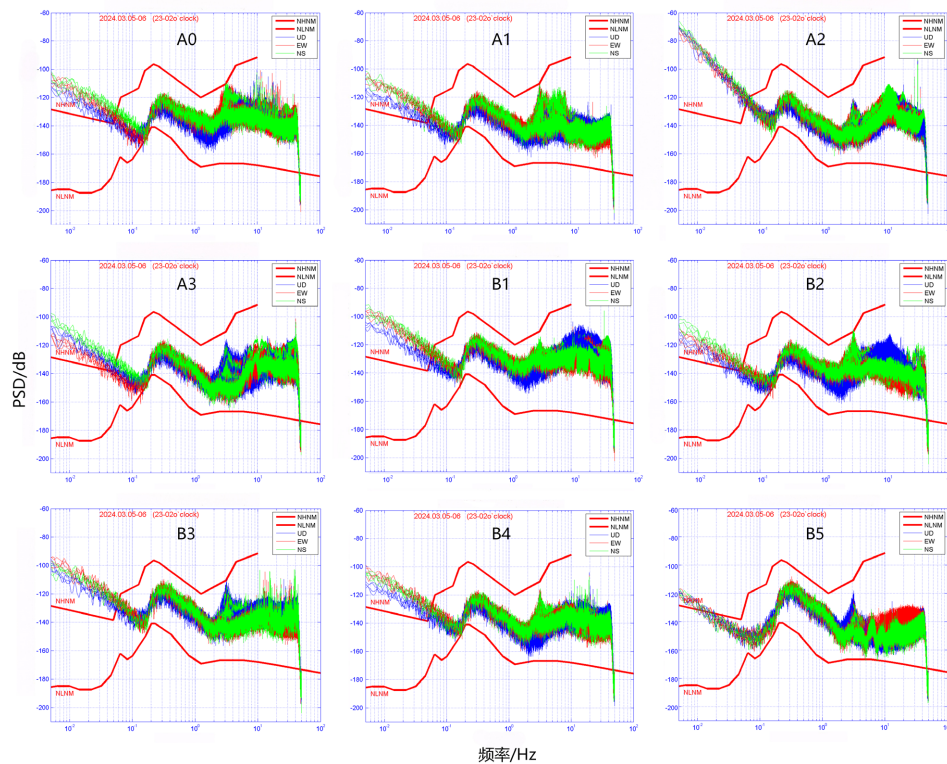


Figure 2. PSD of GL-CS2 substations during Longjing Array trial operation
图 2. 龙井台阵试运行期间各子台 GL-CS2 的 PSD

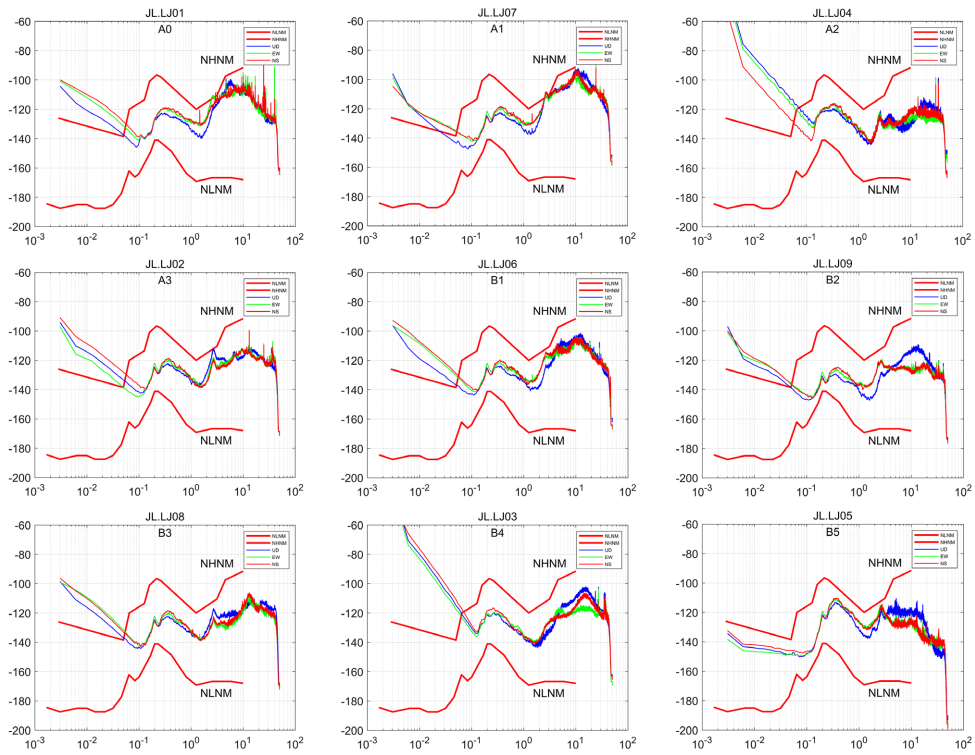


Figure 3. PSD of GL-CS2 stations in Longjing Array during 2025
图 3. 龙井台阵 2025 年间各子台 GL-CS2 的 PSD

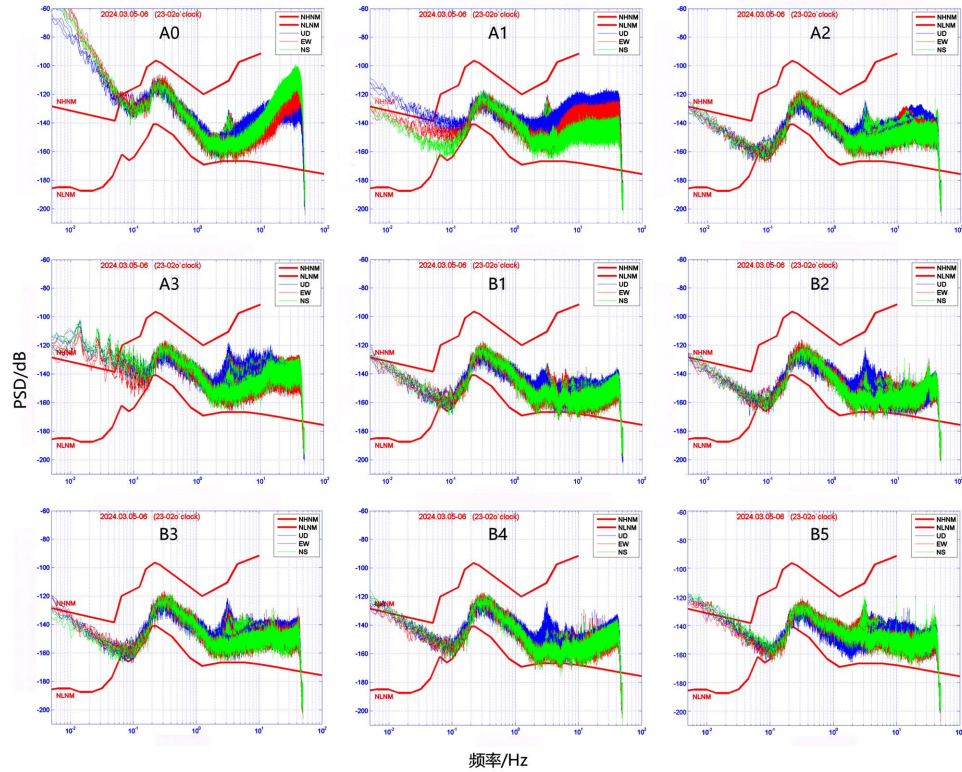


Figure 4. PSD of GL-BH2 substations during Longjing Array trial operation
图 4. 龙井台阵试运行期间各子台 GL-BH2 的 PSD

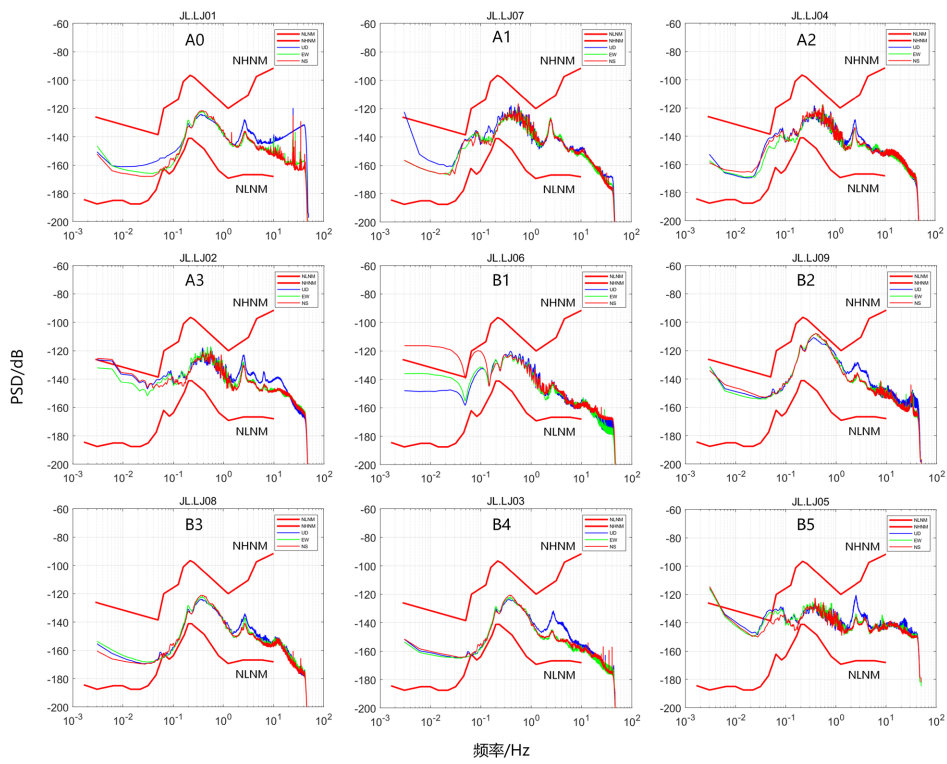


Figure 5. PSD of GL-BH2 stations in Longjing Array during 2025
 图 5. 龙井台阵 2025 年间各子台 GL-BH2 的 PSD

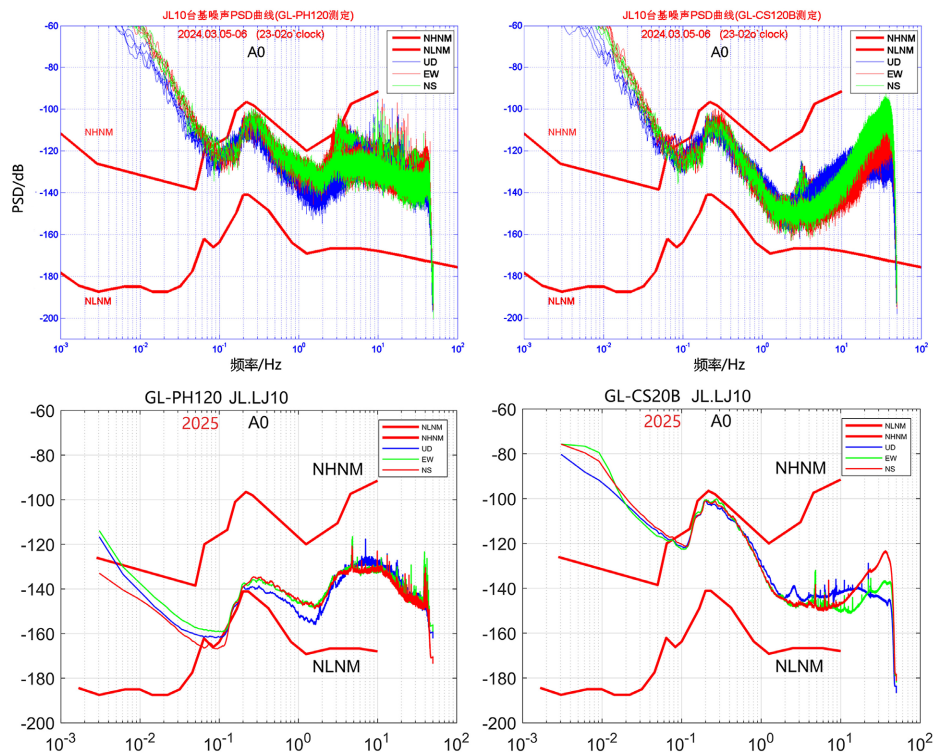


Figure 6. PSD comparison of VBB seismometer at station A0, Longjing Array
 图 6. 龙井台阵 A0 子台甚宽频带地震计的 PSD 对比

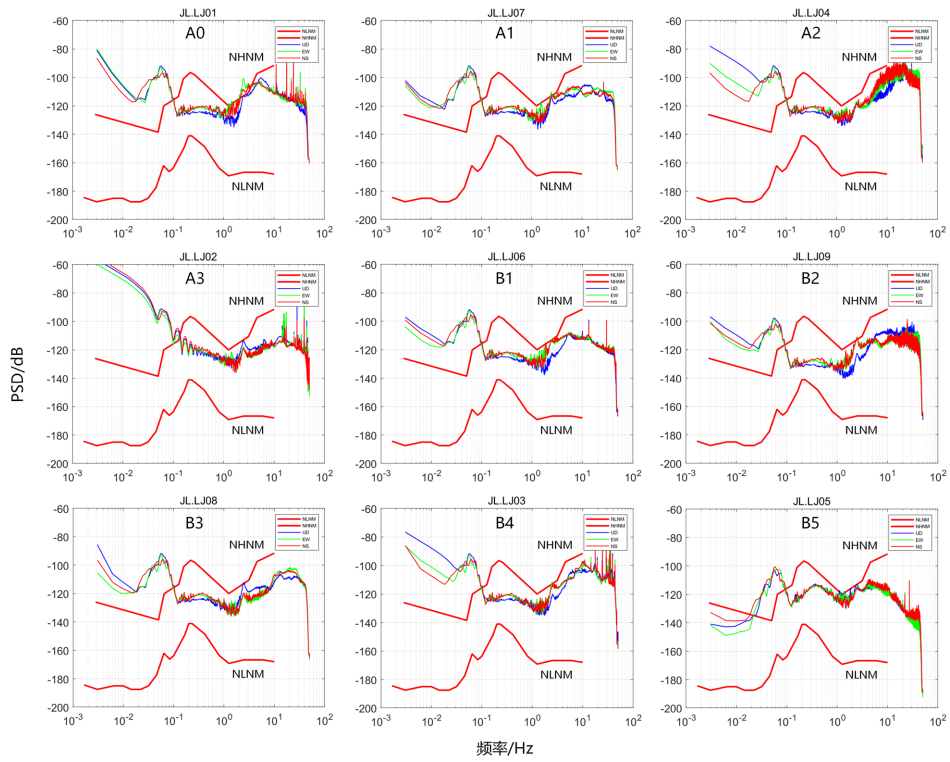


Figure 7. PSD of substations in Longjing Array during agricultural period
图 7. 龙井台阵农耕期各子台 PSD

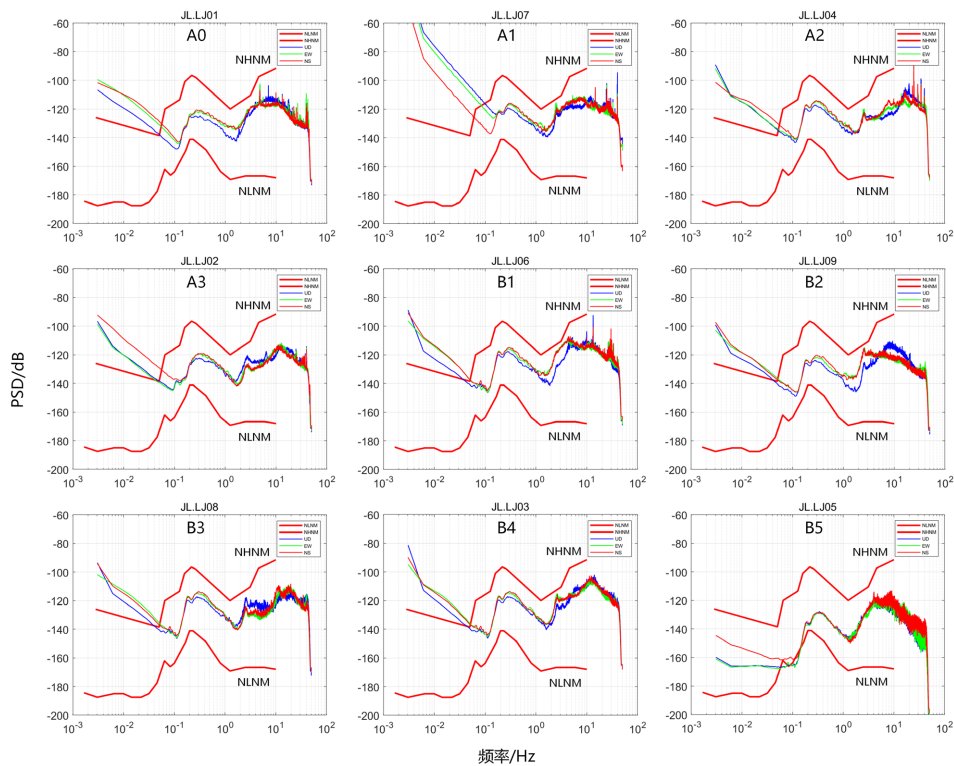


Figure 8. PSD of substations in Longjing Array during non-agricultural period
图 8. 龙井台阵非农耕期各子台 PSD

龙井台阵 9 个子台的地面短周期地震计 GL-CS2 的 PSD 的对比情况见图 2、图 3。

由噪声水平曲线图 2、图 3 的对比结果可知, 2025 年龙井台阵 9 个子台 GL-CS2 的噪声水平在高频段上(1 HZ 以上)均高于试运行期间, 但并未超出皮特森基准曲线边界范围。在高频段影响噪声高低的主要是人为噪声[9], 通过对龙井台阵噪声源调研可见, 该变化应为台阵周边乡村道路通行、乡镇农工业生产导致。

龙井台阵 9 个子台的井下短周期地震计 GL-BH2 的 PSD 的对比情况见图 4、图 5。

由噪声水平曲线图 4、图 5 的对比结果可知, 2025 年龙井台阵 9 个子台 GL-BH2 的噪声水平较试运行期间无显著差异, 均远低于全球新高噪声模型(NHNM)。

龙井台阵 A0 子台的甚宽频带地震计的 PSD 的对比情况见图 6。

由噪声水平曲线图 6 中的对比结果可知, 2025 年龙井台阵 A0 子台甚宽频带地震计的噪声水平较试运行期间总体变化不大, 三分量的噪声水平曲线均处于皮特森基准曲线边界范围内。

根据龙井台阵近距离噪声源调研结果以及 2025 年与试运行期间的 PSD 对比结果, 考虑台阵周边主要噪声为农耕时段的人为活动, 故选取 2025 年 9 月 15 日~10 月 15 日(农耕期)和 2025 年 12 月 1 日~12 月 31 日(非农耕期)台阵 9 个子台地面短周期地震计 GL-CS2 记录的连续波形数据, 计算各子台噪声功率谱月均值, 对比情况见图 7、图 8。

由噪声水平曲线图 7、图 8 的对比结果可知, 在 1 HZ 以上频段(10 HZ 以下), 2025 年 9 月 15 日~10 月 15 日噪声功率谱密度范围在-140 dB~-92 dB, 平均-116 dB, 而 2025 年 12 月 1 日~12 月 31 日噪声功率谱密度在-150 dB~-102 dB 的范围内变化, 平均-126 dB, 农耕时段台阵的噪声水平平均高于非农耕时段, 与噪声源的实际调查结果一致。

从台阵 2025 年和试运行期间的 PSD 对比结果可知, 龙井台阵整体本底噪声水平保持稳定, 9 个子台的噪声功率谱均低于全球新高噪声模型(NHNM), 多数子台的噪声水平接近全球新低噪声模型(NLNM), 与试运行期间的测试结果无显著差异。通过台阵农耕期与非农耕期的 PSD 对比进一步证实农业活动对台阵的噪声水平造成了一定的影响, 但其结果仍低于全球新高噪声模型(NHNM), 对监测效能的影响不大。整体来看, 龙井台阵自建成运行以来, 观测环境未发生显著变化, 无新增增强干扰源, 整体噪声水平仍保持优良状态。

5. 噪声水平评价

结合以上调查研究和测量结果, 根据中华人民共和国国家标准 GB/T19531.1-2004《地震台站观测环境技术要求第 1 部分: 测震》中规定的地震计安放位置与干扰源最小距离, 筛选目标台阵周围噪声源与子台之间的最小实际距离, 将实际距离与参照标准进行对照, 从而评估龙井台阵的噪声水平。评价结果见表 4, 可见龙井台阵噪声源水平基本达到 I 级台站环境地噪声水平, 其中除 A0、A1 子台受一般工厂影响处于 II 级台站环境地噪声水平外, 其余子台可达到 I 级台站环境地噪声水平。

Table 4. Evaluation results of the noise level in Longjing Seismic Array

表 4. 龙井台阵噪声水平评价结果

干扰源	I 级环境地噪声水平最小距离/km	与龙井地震台阵实际距离/km
III 级以上(含级 III)以上铁路	5	13.43
县级以上(含县级)公路	3.4	15.19
飞机场	10	19.84
重型机械厂、岩石破碎机、火力发电厂、水泥厂	6	26.30

续表

一般工厂、较大村落、旅游景点	2.4	0.45
大河流、江、瀑布	12	12.7
14层(含)以上的高大建筑物	2.2	16.45
6层楼以下(含6层)低建筑物、高大树木	2.04	0.01、0.223
高围栏、低树木、高灌木	2.03	0.01、0.008

6. 结论与展望

本文对吉林龙井台阵系统开展了台阵周边 30 km 范围的环境噪声源调研与背景噪声水平测试, 完成了台阵观测环境与监测效能的动态评价, 主要结论如下:

1、龙井台阵所在区域整体环境宁静, 无大型强干扰源, 地面观测环境较试运行阶段在高频段(1 HZ 以上)噪声水平略有上升, 推测为台阵周边乡村道路通行、乡镇农工业生产的影响导致, 但对监测效能影响不大; 井下观测环境较试运行期间变化不大, 台阵整体噪声环境仍处于良好状态。台阵中 7 个子台均满足 I 级台站环境噪声水平, A0、A1 子台受附近一般工厂影响处于 II 级台站环境噪声水平。

2、台阵的主要噪声源为乡村道路带来的固定高频噪声, 以及农耕作业带来的季节性噪声, 此类噪声对台阵观测的影响有限, 不会改变台阵的长期本底噪声水平, 可通过优化数据处理算法进一步降低其影响。

未来将持续开展龙井台阵噪声环境的常态化动态监测, 围绕噪声源定量贡献分析, 环境噪声互相关与结构成像应用、观测环境保护长效机制建设等方向开展深入研究, 持续提升龙井台阵的监测效能与应用价值, 保障我国东北边境地区的地震安全。

基金项目

厅局级课题项目: 吉林省地震局青年科技发展课题(JZQ-202515)。

参考文献

- [1] 朱元清, 宋俊高. 上海地震台阵观测系统的建立[J]. 地震地磁观测与研究, 2002(2): 2-12.
- [2] 张爽. 核查台阵、美国台阵与科学探测台阵现状综述[J]. 国际地震动态, 2016(12): 24-33.
- [3] 卢燕红, 陈俊杰, 张洪艳, 等. 吉林龙井地震台阵勘址分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(6): 63-68.
- [4] 张洪艳, 陈俊杰, 卢燕红, 等. 吉林龙井地震台阵勘选[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(6): 69-74.
- [5] 张淑珍, 杜建清, 周扬, 等. 兰州地震台阵环境噪声调研分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(6): 90-95.
- [6] 曲浩鑫, 王锋, 周金玲, 等. 海拉尔地震台阵噪声源调查[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(6): 82-89.
- [7] 李芯瑞, 郝春月. 兰州台阵噪声水平分析[J]. 地震, 2025, 45(3): 121-135.
- [8] 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, 70-73. <https://doi.org/10.1109/tau.1967.1161901>
- [9] 葛洪魁, 陈海潮, 欧阳飏, 等. 流动地震观测背景噪声的台基响应[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 857-868.