

万文涛, 陈畅, 王赞等. 2024. 地面与地下深部地震背景噪声对比分析. 地球物理学报, 67(2): 793-808, doi: 10. 6038/ cjpg2023R0104.

Wan W T, Chen C, Wang Y, et al. 2024. Comparative analysis of surface and deep underground seismic ambient noise. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(2): 793-808, doi: 10. 6038/ cjpg2023R0104.

## 地面与地下深部地震背景噪声对比分析

万文涛<sup>1,2</sup>, 陈畅<sup>1,2</sup>, 王赞<sup>1,2\*</sup>, 穆朝民<sup>3</sup>, 贺永胜<sup>4</sup>, 汪超<sup>5</sup>

1 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院“多波多分量”地震研究组, 北京 100083

2 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

3 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽淮南 232001

4 军事科学院国防工程研究院工程防护研究所, 河南洛阳 471000

5 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

**摘要** 深部地下空间具有低于地面的噪声环境, 为开展高精度多物理场观测提供了绝佳平台. 通过淮南潘一东矿区海拔-848 m 的井下巷道和地面的地震联测, 我们分析了深部地下与地面的地振动背景噪声特征. 对比结果显示, 大于 1.0 Hz 的高频段, 地面噪声功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)值高出地下 20~40 dB, 并呈现随人类活动变化的昼夜模式; 而井下观测不存在这一时变规律, 地下巷道上方 870 m 厚的沉积层有效衰减了浅层或地表的人文噪声. 0.1~1.0 Hz 频段二者差异相对减小, 地面 PSD 值平均高出地下 10 dB, 小于 0.1 Hz 的低频噪声差异较小, 或与井下气流干扰和仪器本底噪声有关. 在第二地脉动谱的对比中, 可发现明显的场地放大效应和地脉动峰的分裂现象. 此外, 深部地下低噪声环境突显了若干高频非时变信号, 根据频域极化分析可厘定这些稳定噪声为井下的固定振动源. 上述结果说明深部地下可以为高精度地震观测和震源定位提供优良环境, 同时也给深地实验室的后续建设以及相关深地研究提供重要参考.

**关键词** 地下深部; 地震观测; 背景噪声; 时变; 偏振分析

doi: 10. 6038/ cjpg2023R0104

中图分类号 P315

收稿日期 2023-02-19, 2023-06-17 收修定稿

### Comparative analysis of surface and deep underground seismic ambient noise

WAN WenTao<sup>1,2</sup>, CHEN Chang<sup>1,2</sup>, WANG Yun<sup>1,2\*</sup>, MU ChaoMin<sup>3</sup>,  
HE YongSheng<sup>4</sup>, WANG Chao<sup>5</sup>

1 School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3 School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China

4 Institute of Engineering Protection, Academy of National Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Luoyang Henan 471000, China

5 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

**Abstract** Deep underground spaces have a noise environment lower than the surface, providing an excellent platform for high-precision and multi-physical fields observation. By conducting a joint seismic observation of the underground roadway at -848 meters below sea level and the surface in the Panyidong mining field in Huainan, Anhui Province of China, we analyzed their

基金项目 国家自然科学基金项目(62127815, 42150201, 41874166)和黔科合平台人才项目([2021]5629)联合资助.

第一作者简介 万文涛, 男, 2000 年生, 在读研究生, 主要从事六分量地震研究. E-mail: 1198483420@qq.com

\* 通讯作者 王赞, 男, 1969 年生, 1998 年毕业于中国科学院地球物理研究所, 主要从事地震各向异性理论与多分量地震技术的研究.

E-mail: yunwang@mail.iggcas.ac.cn

characteristics of the ambient vibrations. The comparison results reveal that the Power Spectral Density (PSD) value of noise records at the surface above 1.0 Hz is 20~40 dB higher than that at the deep underground. Moreover, a day-night pattern variation with respect to human activities is observed at the surface. In contrast, the underground records do not exhibit this time-varying phenomenon, which can be attributed to attenuation of the 870 m thick sedimentation overlying the underground roadway. In the 0.1~1.0 Hz frequency band, the difference between the surface and deep underground is relatively reduced, with a power gap of 10 dB. The difference of low frequency noises below 0.1 Hz is small, possibly due to the interference of downhole airflow and the instrument background noise. When comparing the Double-Frequency (DF) microseism spectrum, the site amplification effect and the splitting of DF microseism peak are clearly observed. Additionally, the deep underground's low-noise environment highlights several high-frequency time-invariant signals, which can be identified as equipment-induced vibrating sources through polarization analysis in frequency domain. Overall, our results confirm that the deep underground provides an excellent environment for high-precision seismic observation and source location. This study also provides an important reference for the subsequent construction of deep underground laboratory and related researches.

**Keywords** Deep underground; Seismic observation; Ambient noise; Time-varying; Polarization analysis

## 0 引言

背景噪声对于天然地震观测具有重要的影响。不论从噪声成像的角度还是天然地震事件识别与拾取,大量研究讨论了地震观测环境中的背景噪声及其时频特征(McNamara and Buland, 2004; Zhu and Stensrud, 2019; 王芳等, 2019; Wu et al., 2020; Wang et al., 2020; 王宝善等, 2021)。其中, Earth's hum 被认为是无震背景下固体地球以 2~20 mHz 的连续振荡(Deen et al., 2018)。Kobayashi 和 Nishida(1998)利用 360 s 甚宽频带地震仪首次观测到该长周期信号,并将之归因于海洋重力波(Nishida et al., 2008; Nishida, 2013)。地脉动也是背景噪声的重要组成部分(Peterson, 1993; Berger et al., 2004),其激发机制存在两种模式:一般认为周期 10~20 s 的第一地脉动信号由海浪与海岸和浅滩的直接相互作用产生(Hasselmann, 1963),其频率与海浪相同,也被称为单频(Single-Frequency, SF)地脉动;振幅更大、周期在 2~10 s 的第二地脉动信号由相反方向传播的海浪之间的非线性作用产生(Longuet-Higgins, 1950),频率为海浪的两倍,被称为双频(Double-Frequency, DF)地脉动。地脉动的能量强且稳定,被广泛应用于地壳和上地幔的三维结构成像、海冰强度测量及海浪气候变化监测等(Bromirski et al., 1999; Shapiro et al., 2005;

Tsai and McNamara, 2011; Sufri et al., 2014)。

近年来,随着分布式光纤传感技术(DAS)的发展及其应用于城市地震,人类活动引发的噪声逐渐引起学者们的兴趣。Díaz 等(2017)利用宽频带地震仪对城市环境噪声进行了监测,分析不同人类活动引起的噪声在能量与频率上的区别。Wu 等(2020)对中国地质大学(武汉)南望山校区校园内噪声的日变化进行了观测和特征分析。Wang 等(2020)在美国加州帕萨迪纳玫瑰花车游行期间,利用与花车巡游路线部分重合的光纤电缆与 DAS,探究了摩托车、游行花车与游行乐队产生噪声的强度与频带分布。一些学者通过对比新型冠状病毒肺炎(COVID-19)流行前后的地震背景噪声变化,阐述了高频振动噪声与人类活动的强相关性(Xiao et al., 2020; 吴丽慧等, 2022; 王宁等, 2022),并提出利用地震学方法进行人类活动实时估计的可能(Lecocq et al., 2020)。

由于现代经济社会发展严重破坏了地震观测环境,利用地下低振动噪声的优势发展深地观测成为测震领域的热点(Rosat et al., 2018)。例如,王芳等(2017)曾利用位于云南普洱大寨井中布设的短周期地震计,验证了井下 375 m 深处的噪声比地表降低可达 40 dB。美国、日本在大量井中布设的地震观测也是充分利用深部地下的这一优势,开展了大量的地震观测、浅层场地效应和地层 Q 值的研究(Hauksson et al., 1987; Abercrombie, 1997; Satoh, 2006; Yamada

and Horike, 2007),但限于井筒环境,所执行的地震观测偏于 1 s 以上的中高频。

深部地下与地面相比,背景噪声各自具有什么不同的时空特点,却是鲜有讨论的问题。而对不同噪声的广泛研究,不仅是开展深地高精度观测的重要基础工作之一,也将促进相关科学问题的探索(王赞等, 2022; 王振宇等, 2022)。因此,我们在淮南深部地下—848 m 巷道(以下简称“深地”)和地面开展了地震的联合观测试验。同期的重力观测已证实井下重力场在 0.01~0.5 Hz 频段具有近两个量级的低噪声优势(张苗苗等, 2021; 孙和平等, 2022)。本文利用宽频带地震数据,对比分析深地与地面在地震观测频段的背景噪声特征。

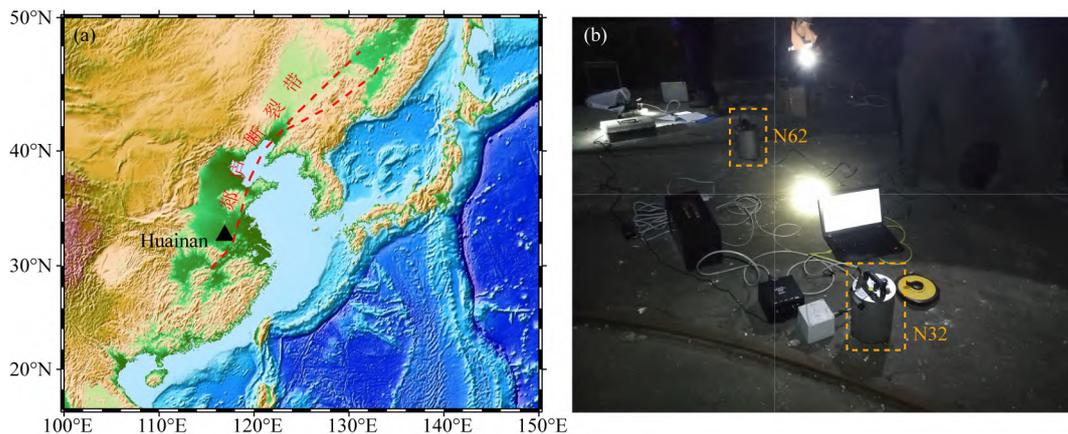


图 1 观测点位置(a)及仪器布设现场照片(b)(据王赞等, 2023 修改)

图(b)橙色虚线框标出了观测使用的两台 CMG-40TDE 宽频带地震仪。

Fig. 1 Location of observation point (a) and photo of the instrument deployment site (b)

(modified according to Wang et al., 2023)

The orange dashed boxes in figure (b) mark two CMG-40TDE broadband seismometers used for observation.

淮南深地观测试验开始于 2020 年 1 月,地面与地下均使用 CMG-40TDE 宽频带地震仪(图 1b),频带宽度为 30 s~100 Hz,设置采样率为 50 Hz,由蓄电池供电;地面与井下巷道布设点位如图 2a 所示,其中井下采用“L”型阵列(图 2b),三台仪器观测表现高度一致性,本研究中仅利用 L 阵列中心的 N32 台站;地面与深地联测有效观测时间段为 2020 年 1 月 18 日至 2 月 1 日,累计 350 h。

### 1.2 观测数据预处理

时间记录是地震数据最为重要的信息之一,其准确性将直接影响走时拾取和震相识别。深部地下观测无法直接接收 GNSS 信号,我们预先在地面对所有仪器进行了统一开机授时。后期室内数据处理中采用 0.01 s 的滑动时间窗口对井下与地面台站记录做互相关,并利用所得最大互相关系数对应的

## 1 观测

### 1.1 观测系统

淮南矿业集团潘一东矿区地处淮河北岸,郟庐断裂带西侧(图 1a)。煤矿停产,矿区留下了容积可达 80 多万立方米的地下空间资源以及配套齐全的井下人员驻留保障设施,为地球多物理场观测提供了适宜的条件(王赞等, 2023)。依托淮南深部地下实验室(简称“深地实验室”),本研究联合地面(高程 22 m)和深达 870 m 巷道(海拔深度—848 m)的宽频带地震观测数据,以探究深地与地面的背景噪声特征。

时间偏移量进行校正,以降低时间误差的影响。

按照不同的对比分析需求,将地面与地下地震台站联测时间段内的连续波形数据分割为不同长度的时间序列。进一步预处理包括对数据段进行去均值、去线性趋势和两端尖灭,并去除仪器响应,将采集器的电子计数转换为地动速度。

## 2 数据处理与分析

### 2.1 噪声水平对比

功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)是用来定量描述地震台站背景噪声水平的常规方法。Peterson(1993)通过分析全球 75 个地震观测台站的环境噪声 PSD,给出了全球新高噪声模型(New High Noise Model, NHNM)和低噪声模型(New

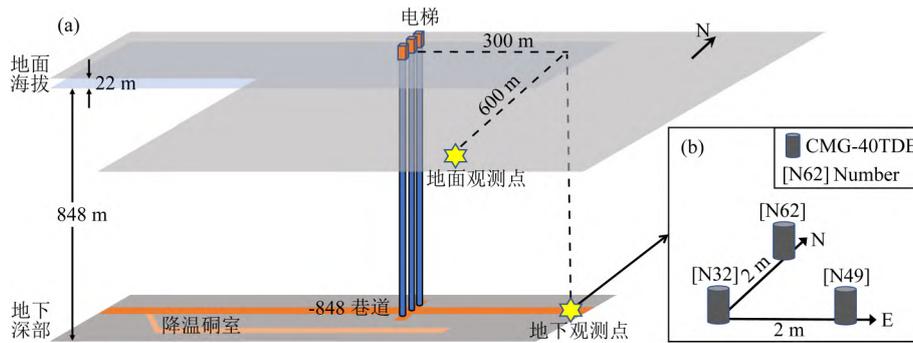


图 2 地面与地下地震联测点位(a)与井下仪器阵列分布(b)

Fig. 2 Joint observation points of the surface and deep underground (a) and distribution of the instrument array employed in underground tunnel (b)

Low Noise Model, NLNM). 这一模型作为衡量台站噪声水平的基准,被广泛应用于评估地震观测环境. McNamara 和 Buland(2004)进一步提出无需人为筛选数据的概率密度函数(Probability Density Function, PDF). 该方法统计一定时期内不同频点的 PSD 概率分布值,在广泛的时间平均作用下,能够更客观全面地反映台站的噪声变化特征(林彬华等, 2015; 谢江涛等, 2018). 为此,我们将地面与深地完整观测时间段内的连续波形数据划分为长度 3600 s (1 h) 的数据段,段间重叠 50%;采用 Welch (1967) 方法计算每小时段的加速度 PSD,并执行 1/8 倍频程平滑;统计整个周期范围内各中心频率的概率密度值,得到观测期间的 PDF 如图 3 所示. 计算结果表明,地面和地下观测的振动噪声概率密度函数在不同频段显示出不同对比特征:

(1) 1~25 Hz 高频段,地面的三分量 PSD 主要分布在 -120 dB 至 -100 dB,大于 10 Hz 的振动噪声以垂向为主. 同时观测到地面谱线明显分裂成多支(图 3a—c 橙色虚线框),可能与地面人类活动强度的时间变化有关;地下观测则具有显著低背景噪声特征,其三分量 PSD 平均小于地面 20~40 dB,概率分布相对集中. 值得注意的是,地下水平分量也呈现为两支,而垂直分量无分支现象. 经分时段对比发现,较高能量的分支集中在 1 月 19 日 0 时至 22 日 8 时. 该时段内,地面和地下均观测到了大量密集排列的尖峰信号且地面振幅明显高于地下,我们初步判定这些尖峰信号为矿区地表大型设备作业引起的噪声(孙和平等, 2022). 图 3 黄色箭头标识了该噪声在地面和地下 PDF 中的能量分支. 地下仅表现在水平分量,其 PSD 小于地面 20~40 dB,说明上覆地层能够有效衰减可能源自地表的高频噪声,且对垂向振动的抑制更为明显.

(2) 0.1~1 Hz 频段,地面噪声幅值仍高于地下,但随着频率的降低,二者差异逐渐减小,平均相差 10 dB;该频段地面和地下均观测到对应第二地脉动(2~10 s)的能量峰值,主要以面波和少量体波组成,一般情况下,基阶 Rayleigh 波和 Love 波占主导地位(Koper et al., 2010; Juretzek and Hadziioannou, 2016). Koper 和 Burlacu(2015)证实了陆地台站下方的场地条件对第二地脉动振幅具有调制作用. 显然,本研究中地面台站受局部场地效应的影响,第二地脉动谱(图 3a—c)表现出明显的振幅放大特征,优势频率在 0.3~0.7 Hz,其水平方向功率高出地下 10~15 dB,垂直分量差异相对较小. 上述特征与场地谐振频率及不同分量的放大系数有关(Roten et al., 2013; Chen et al., 2018; 张新阳, 2020).

(3) 在 0.03~0.1 Hz(10~30 s)的低频段,地面与地下记录的 PSD 随频率的减小呈现出一致的上升趋势,并维持在较高水平,推测与仪器本底噪声水平有关(陈畅等, 2022). 同时,二者水平分量 PSD 值均高于垂直分量,主要归因于地倾斜导致的重力加速度在水平分量上的投影,该规律已被以往的实验所证明(Peterson, 1993; Diaz et al., 2010; 马鑫等, 2019). 但在该频段内,井下记录 PSD-PDF 概率分布相对集中,功率略高于地面,这与常规认识有所不同. 分析可能的原因是地面地震仪安放在封闭的室内,而井下地震仪直接放置在巷道表面,会受到地下无间断通风设备产生的气流干扰,此差异需要补充观测实验进一步厘定.

## 2.2 噪声时变特征

在联测记录中截取 2020 年 1 月 25 日至 31 日 (UTC+8) 共 7 天的连续波形,划分为 7 条 24 h 的数据段;基于功率谱密度曲线,利用短时傅里叶变换 (Short Time Fourier Transform, STFT) 计算地面

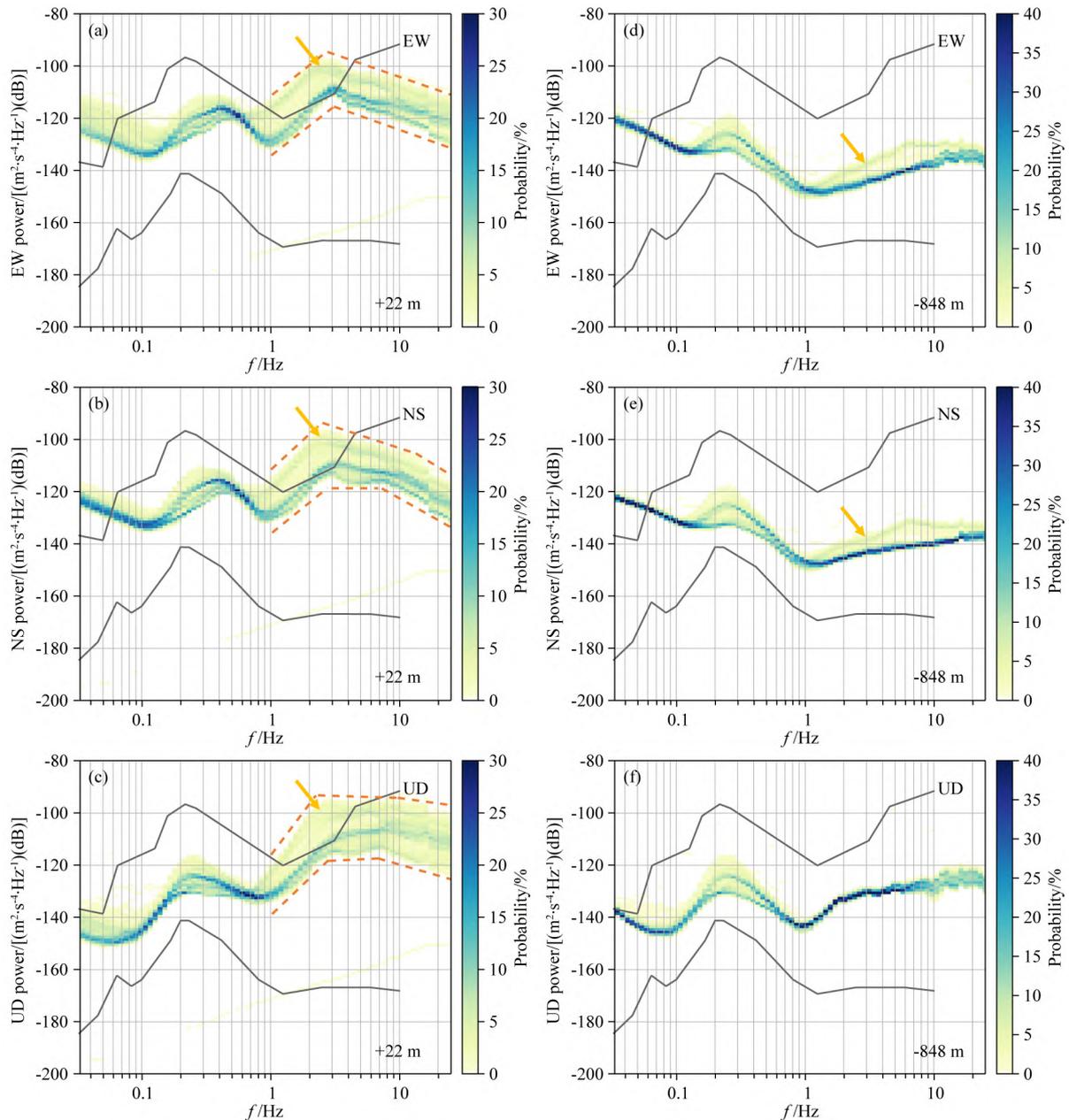


图3 地面与地下三分量环境噪声概率谱密度函数分布(频段: 0.033~25 Hz)

(a—c)和(d—f)分别表示地面与地下EW、NS、UD分量,灰线为全球高、低噪声模型(Peterson, 1993)。

Fig. 3 Probability spectral density functions (PDFs) of three-component (3-C) ambient noises observing at the surface and underground (frequency band: 0.033~25 Hz)

(a—c) and (d—f) represent EW, NS and UD components of surface and underground respectively;

The gray line is the new high & low-noise model (Peterson, 1993).

与地下环境噪声 24 h 的时频谱,滑动窗口为 8192 个采样点(163.84 s),相邻时窗重叠 50%以降低瞬时大振幅干扰信号的影响;对  $7 \times 24$  h 的时频谱进行线性平均,获得地面与地下三分量环境噪声的日变时频特征,如图 4 所示。

对比可见,地面高频噪声( $> 1$  Hz)波场复杂,相对其他频带能量更强( $> -120$  dB),且三分量均具有明显的时变特征,垂向占优,功率峰值集中在

6:00—18:00,表现出与人类活动的密切相关性,这也解释了地面 PSD-PDF 谱线的分裂现象(图 3a—c 橙色虚线框);而同频段的地下观测不具有这种时变特征,受上覆地层的高频噪声吸收衰减作用,若干稳定持续的信号在井下低噪声背景( $< -130$  dB)下得以凸显。值得注意的是,部分非时变单频噪声同时存在于地上、地下的时频谱,如 16.7 Hz。此类持续噪声极大概率来自矿区内的固定干扰,一定程度上影

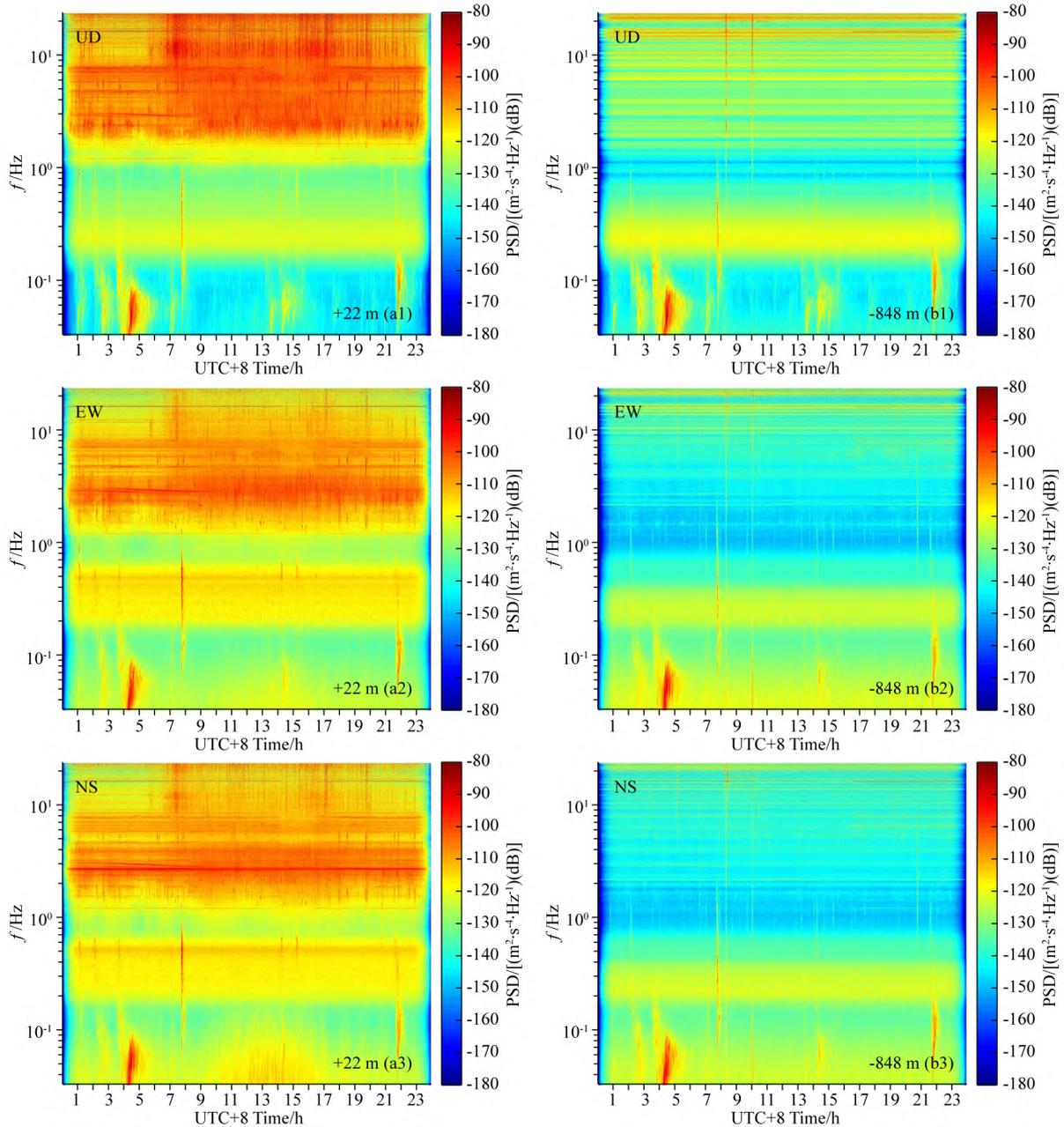


图4 地面与地下三分量环境噪声水平的日变化(频段: 0.033~25 Hz)

(a1— a3)和(b1— b3)分别表示地面与地下 UD、EW、NS分量。

Fig. 4 Diurnal variations of 3-C ambient noises observing at surface and underground (frequency band; 0.033~25 Hz)

(a1— a3) and (b1— b3) represent the surface and underground UD, EW, NS components respectively.

响到地下实验室的地震观测,在 2.3.2 节中进行了厘定。

地面和地下记录的第二地脉动信号(2~10 s 或 0.1~0.5 Hz)受人类活动干扰小,能量稳定,均不存在时变、日变特征。受浅层沉积的场地谐振频率影响,地面观测到了明显的面波的放大作用,水平分量在 0.4~0.5 Hz 加速度功率高出地下 10~15 dB;垂直分量差异不大,整体位于 -140 至 -120 dB,与此前分析一致。

相比于高频的对比分析结果,地面和地下在 0.033~0.1 Hz 频段具有较好的一致性,未表现出时变规律。图中若干频带分布宽、持续时间较短的 PSD 峰值来自地震产生的瞬变信号,如 4~5 h 处的能量高值为观测期间加勒比海发生的  $M_s$  7.9 地震面波。

早在 20 世纪, Gutenberg(1958)与 Asten 等(Asten, 1978; Asten and Henstridge, 1984)就对不同频带的噪声来源开展了大量研究(表 1),大致确定 1 Hz 以上

的噪声主要来自人文活动. 上述背景噪声的时频特征对比揭示了地面与地下地震观测在高频段 ( $>1$  Hz) 的显著差异, 支持以面波为主的高频人文噪声随深度衰减的认识 (Bonney-Claudet et al., 2006). 该频段地面环境噪声具有较强的时变特征, 包括昼夜、季节和节假日等 (Yamanaka et al., 1993; McNamara and Buland, 2004; Wu et al., 2020; Lecocq et al., 2020), 但此类噪声来自多种源的叠加, 其绝对水平及频率界限随地区变化. 因此, Seo 提出通过观察一段时间的波形及谱值变化, 并参考人类活动时间, 以更准确地衡量研究区的人文噪声水平及频带界限 (Bonney-Claudet et al., 2006).

表 1 不同来源噪声频带分布表 (单位: Hz)

Table 1 Frequency band distribution table of noises from different sources (Unit: Hz)

来源	Gutenberg (1958)	Asten, 1978; Asten and Henstridge, 1984
海洋波与海岸线的相互作用	0.05~1	0.5~1.2
季风/大规模气象扰动	0.1~0.25	0.16~0.5
海面上的飓风	0.3~1	0.5~3
区域尺度的气象变化	1.4~5	—
火山活动	2~10	—
城市活动	1~100	1.4~30

对 2020 年 1 月 25 日至 31 日 (UTC+8) 7 天的连续观测数据进行 1 Hz 高通滤波处理, 以突显地面与地下的人文噪声差异, 如图 5a1, b1, c1 所示. 为方便与人类活动时间对比, 截取了 1 月 30 日 0 时至 24 时的单日波形 (图 5a2, b2, c2), 并分别计算地上、地下昼夜 1 h 无震时段数据的加速度功率谱密度, 执行 1/8 倍频程平滑, 如图 5a3, b3, c3 所示.

图 5a1, b1, c1 显示, 在人类活动噪声频段 ( $>1$  Hz) 地面 7 天的三分量波形整体均呈现出强烈的日变化特征, 白天垂直分量最大振幅可达  $2.96 \times 10^4 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 约为水平分量的 5 倍, 说明人类产生的噪声以垂向振动为主. 为保证矿区安全, 深地实验室通风班、供电班和安检班等工作人员周六、周日仍会下井作业, 因而地面台站波形未显示出工作日幅值大于周末的周变特征; 地下观测的该频段噪声三分量波形则不存在日变或周变规律. 据现场记录, 若干高振幅的尖脉冲为井下人员在仪器旁走动产生的信号, 它们在不同分量的幅值有所差异, 与振动源的方向和震相有关.

地面单日波形的变化与人类活动的昼夜模式吻

合 (图 5a2, b2, c2), 在 23:00 至 05:00, 人员活动少、噪声水平较低, 三分量的平均振幅接近, 约  $1 \times 10^2$  至  $2 \times 10^2 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 期间若干峰值信号可能指示宿舍人员的起夜活动; 06:00 以后, 噪声逐渐增大, 振幅均值比午夜高 2~3 倍. 此外, 可以清楚地观察到白天的两个峰值: 第一个峰值范围是 06:30 至 08:30, 噪声的垂向最大振幅可达  $2.25 \times 10^4 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 该时段为矿上工作人员的上班时间; 09:00 后, 噪声有所减小并保持一定水平, 至 13:40 左右略有上升, 与午休人员活动有关; 另一个较为明显的峰值出现在 16:00 至 18:00, 垂向地动速度最大可达  $2.5 \times 10^4 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应工作人员的下班时间. 上述同步变化说明, 地面台站监测的高频 ( $>1$  Hz) 环境噪声强度变化与矿上职工的作息活动之间存在着密切的相关性, 即地面环境噪声受人类活动调节. 对比可见, 地下的同频段记录相对安静, 三分量均拥有更小的幅值, 平均速度在  $0.1 \times 10^2$  至  $0.5 \times 10^2 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 是地面午夜噪声水平的 1/10.

图 5a3, b3, c3 的平滑 PSD 曲线揭示, 地面白天人文噪声功率平均高出夜晚 10~15 dB, 而地下一致性较好. 可以界定具有显著昼夜差异且 PSD 值明显高于地下的人文噪声频带范围在 0.7~25 Hz, 说明研究区的地面人类活动噪声下界略向长周期移动. 此外, 低频段 ( $<0.1$  Hz) 的地面噪声 PSD 曲线也显示出昼夜差异, 而地下无上述特征. 已有的观测认识表明, 长周期频段 ( $>10$  s) 的噪声起伏主要与温度变化有关 (谢剑波等, 2007; 王晓蕾, 2012). 观测期间, 研究区的地面平均温差在  $7.06 \text{ }^\circ\text{C}/\text{日}$ , 井下巷道则控制在  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{日}$ , 深地相对恒温环境能较好规避温度变化对地震观测的影响.

综上, 井下环境噪声受人类活动影响小, 大于 0.7 Hz 的人文噪声能被浅层覆盖有效衰减, 该低背景噪声优势将为弱的地球核幔边界 (CMB)、内外核边界 (ICB) 反射震相 (1~2 Hz) 的拾取 (龙鑫和艾印双, 2018) 及地下介质时移变化等的长期稳定监测 (王爽等, 2018) 提供良好的环境.

## 2.3 深地环境噪声偏振分析与噪声源

### 2.3.1 频域偏振分析

频域偏振分析 (Park et al., 1987; Koper and Hawley, 2010) 是一种基于频率相关的质点运动特征统计分析方法. 该方法仅利用单个台站不同分量的数据来计算偏振信息, 同时具有保幅的优点. 但当信噪比较低时, 频域偏振分析估计的后方位角往往更加分散、模糊 (Harris, 1990; Suteau-Henson, 1990;

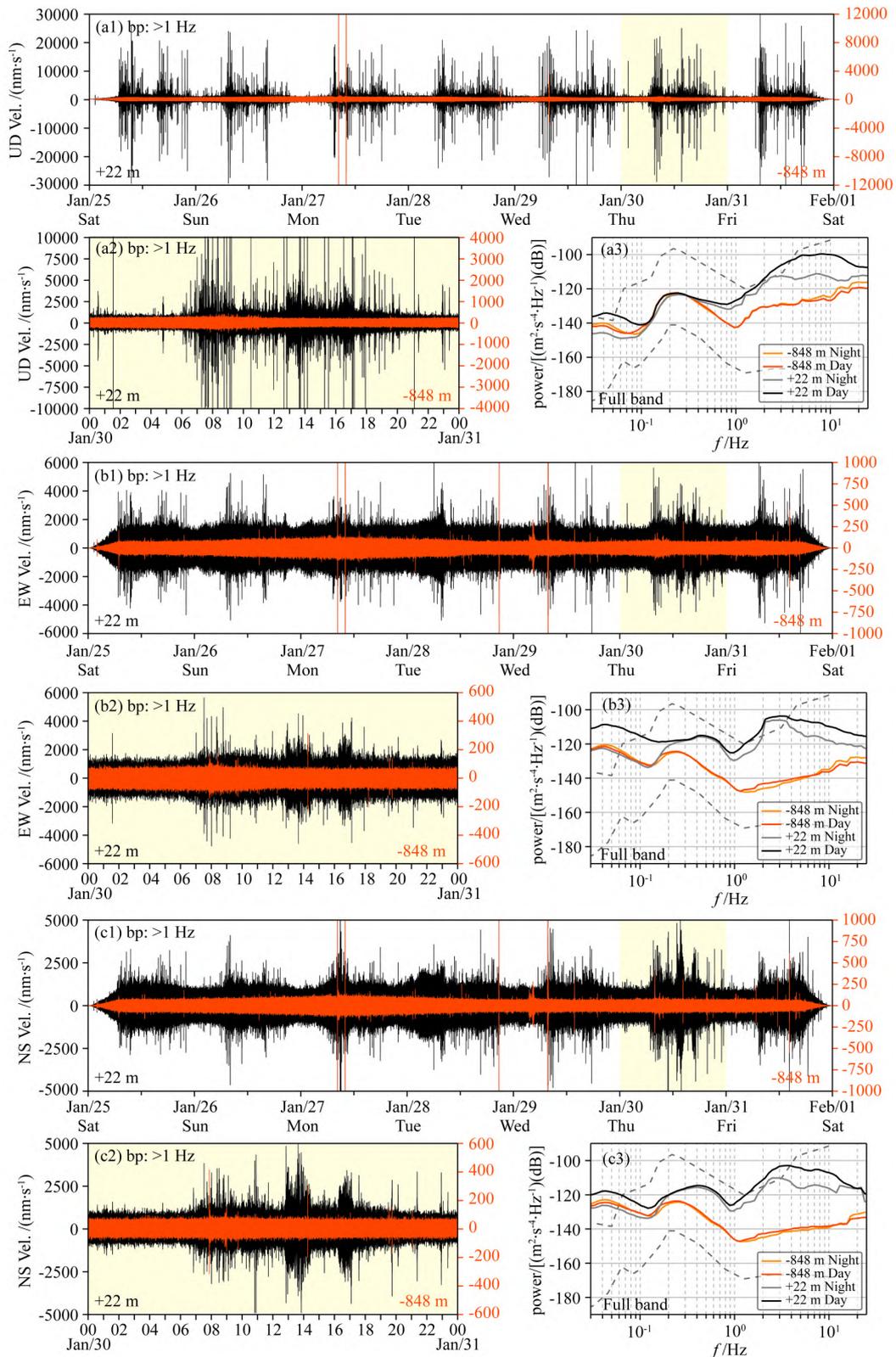


图5 地面与地下三分量波形及昼夜 PSD 曲线

(a1— a3) 分别表示 UD 分量的 7 天波形、24 h 单日波形及昼夜平滑 PSD 曲线; (b1— b3) 和 (c1— c3) 则显示了 EW、NS 分量的结果; 黑色和橘色曲线分别为地面与地下观测。bp: 带通滤波。

Fig. 5 Waveforms and day-night PSD curves of surface and underground three-component records (a1— a3) represent the 7-day waveforms, 24-hour single-day waveforms and day-night smooth PSD curves of the UD component respectively; (b1— b3) and (c1— c3) show the results of EW and NS components; The black and orange curves are surface and underground observations respectively. bp: bandpass.

Schulte-Pelkum et al., 2004). 基于此方法,我们用每小时的三分量地震数据来构建  $3 \times 3$  的 Hermitian 矩阵,其中 1 h 数据段划分的子窗口长度为 163.84 s,彼此重叠 50%. 进一步对谱协方差矩阵进行特征分解,从特征值和特征向量中提取随频率变化的偏振属性(Park et al., 1987),包括:

(1)主特征值( $\lambda$ ),反映三分量功率随频率变化的总体特征,当有两个分量的变化特征与另一个不一致时,变化趋势相同的两个分量对主特征值( $\lambda$ )变化特征的影响较大. 无论噪声在三个分量上如何分配,主特征值能很好地捕捉振幅的变化(Koper and Burlacu, 2015).

(2)极化程度( $\beta^2$ ),根据 Samson(1983)的定义用来衡量噪声的组织性,无量纲,当所有特征值相等时, $\beta^2 = 0$ ;当只有一个非零特征值时, $\beta^2 = 1$ ,代表纯线性偏振,如体波. 质点(或质元)的线性运动和椭圆运动均会导致  $\beta^2$  的高低变化(Koper and Hawley, 2010).

(3) $\Theta_H$ ,极化椭圆长轴的水平方位角,对应于 P 波或瑞利波的后方位角,变化范围从  $-180^\circ$  至  $180^\circ$ ;  $\Theta_V$ ,极化椭圆长轴与垂线的夹角,对应于 P 波的入射角,变化范围从  $0^\circ$  至  $90^\circ$ ;  $\phi_{VH}$ ,垂直分量和水平分量之间的相位差,表示该垂直平面内的椭圆度,变化范围从  $-90^\circ$  至  $90^\circ$ ;  $\phi_{HH}$ ,两个水平分量之间的相位差,表示水平面内的椭圆度,变化范围从  $-180^\circ$  至  $180^\circ$ .

### 2.3.2 深地环境噪声的偏振特征

为改善单一时段测量极化属性的不稳定问题,应用 McNamara 和 Buland(2004)提出的概率谱密度函数(PDF)方法,从所有可用的观测数据中提取不同偏振参数的概率分布值,如图 6 所示. 在广泛的时间平均作用下,地震、爆炸等瞬变信号影响可以忽略不计,同时海浪、风等产生的准静态信号得到增强,更能客观反映环境噪声的总体极化特征.

在低频段( $>10$  s),噪声的极化程度较高(图 6e),功率谱(图 6a, b, c)显示该频段的水平运动占主导地位,前述地倾斜造成的水平方向加速度是该部分能量的主要来源(Koper and Hawley, 2010),同时可能耦合了沿水平方向传播的第一地脉动面波以及井下气流的能量,导致  $\Theta_V$  在  $90^\circ$  附近的高概率分布(图 6g). 该频段东西向能量与南北向相当,使得  $\Theta_H$  的 PDF 主要聚集在  $135^\circ$  和  $315^\circ$  附近. 而  $\phi_{VH}$  的 PDF 相对分散,可能是质点垂向运动能量小的缘故

(Koper and Hawley, 2010).  $\phi_{HH}$  在一些角度的峰值指示着一定程度的水平椭圆运动(图 6i).

在双频(DF)地脉动周期范围内( $2 \sim 10$  s),三分量功率及主特征值曲线均可见与全球低噪声模型对应的第二地脉动峰值.  $3 \sim 5$  s 周期内谱线明显分裂为两支能量,最高相差 10 dB(4 s 处),推测受到观测期间的大规模海洋活动影响. 图 6d 显示的主特征值  $\lambda$  谱线捕捉到了两个明显不同的地脉动峰值,周期约为 4.0 s、5.2 s. DF 频带内多个亚峰的形成,与地震仪对同期多个源区的地脉动响应有关(Tanimoto, 2007; Bromirski et al., 2013; Koper and Burlacu, 2015),一些学者进一步将这种峰值分裂细分为短周期(SPDPF,  $2 \sim 5$  s)和长周期(LPDPF,  $5 \sim 10$  s)第二地脉动(Bromirski et al., 2005, 2013; Chi et al., 2010). 研究中, $\Theta_H$ (图 6f)和  $\phi_{VH}$ (图 6h)的概率密度可见,两个谱峰具有不同偏振特征,4.0 s 的 SPDPF 后方位角分散在  $150^\circ \sim 180^\circ$  及其相反方向( $330^\circ \sim 360^\circ$ ), $\phi_{VH}$  能量聚集在  $60^\circ$  附近,表明该信号在  $R-Z$  平面内呈较强的椭圆极化. 偏振分析计算的瑞利波后方位角会存在  $180^\circ$  的模糊,由于第二地脉动的源区一般来自海洋,可以排除指向内陆地区的可能. 参照淮南测点的地理位置,进一步确定 SPDPF 为来自  $SE150^\circ \sim 180^\circ$  方向的逆进瑞利波能量,指向东海或太平洋海域;5.2 s 的 LPDPF 后方位角分布在  $90^\circ$  或  $270^\circ$  附近,分析应指向黄海海域,其  $\phi_{VH}$  角度色散严重,可能是多种波的混合. 上述差异与它们来自不同地脉动源区的认识一致.

值得注意的是,本次观测的双频(DF)地脉动后方位角  $\Theta_H$  相对离散, $\phi_{VH}$  与  $\phi_{HH}$  的 PDF 也未能明显捕捉到对应 Rayleigh 或 Love 面波的相位特征. 分析可能的原因是,观测时间内第二地脉动的整体极化程度较低,加之数据长度较短,容易受到海洋风暴演化的影响,而导致极化性质不稳定(Koper and Burlacu, 2015). 因此,淮南深地实验室完善供电条件后,应当使用长期的观测数据来补充研究深地第二地脉动的波场极化特征.

随着频率的升高,短周期( $<1$  s)噪声的水平分量功率明显小于垂直分量,这也造成  $\Theta_V$  集中在  $0^\circ$ . 该频段时频谱(图 4)显示了多个非时变的单频干扰,其方位角  $\Theta_H$  大致分为两种不同的模式,大于 0.2 s 的能量聚集在  $0^\circ$  或  $180^\circ$  附近,小于 0.2 s 的则分布在  $90^\circ$  或  $270^\circ$  附近. 同时,二者的极化程度  $\beta^2$  均显示出普遍高值,说明该频段噪声波场相对单一,可能来自地震仪周围固定的干扰. 现场踏勘显示,地下测点

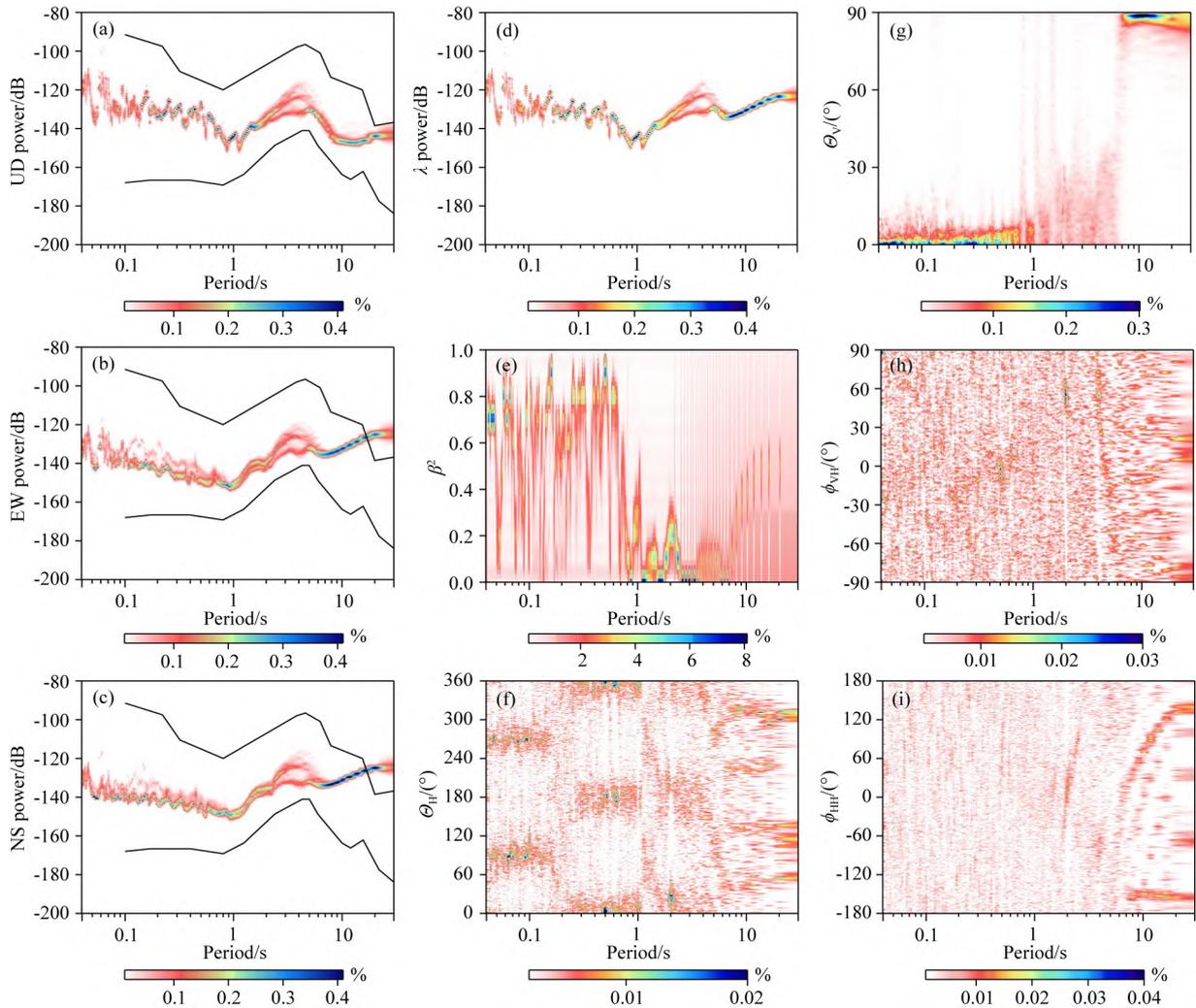


图 6 深地台站记录的环境噪声功率谱和极化特征的概率密度函数

(a—c) UD、EW、NS 分量功率谱密度; (d) 主特征值  $\lambda$ ; (e) 偏振程度  $\beta^2$ ; (f) 后方位角  $\Theta_H$ ;  
(g) 入射角  $\Theta_V$ ; (h) 垂直分量和水平分量的相位差  $\phi_{VH}$ ; (i) 两个水平分量的相位差  $\phi_{HH}$ 。

Fig. 6 The probability density function of ambient noise power spectrum and polarization characteristics recorded by deep underground stations

(a—c) The power spectral density for UD, EW and NS components respectively; (d) The principal eigenvalue  $\lambda$ ; (e) The polarization degree  $\beta^2$ ; (f) The back azimuth  $\Theta_H$ ; (g) The angle of incidence  $\Theta_V$ ; (h) The difference of phase  $\phi_{VH}$  between the vertical and horizontal components; (i) The difference of phase  $\phi_{HH}$  between the two horizontal components.

位于近东西向和南北向展布的巷道或铁轨的交叉拐点(图 1b),这与高频噪声的两个优势方向吻合。因此,我们初步判断可能是矿区内大型设备(如风井)引发的铁轨振动或巷道高压输电系统产生的电磁激励响应。

上述结果经过频域的平滑处理,一定程度上减少了谱估计的方差,但也降低了频率分辨率,可见偏振分析方法获得的高频段 PSD 曲线并不连续(图 6a—c)。为细化对可能人为引入的高频非时变噪声研究,以此频段能量最强的 16.63~16.7 Hz 干扰(图 4b1)为例,我们利用两个相隔一定距离的井下

台站 N484(图 7c)和 N32 进行交切定位。

### 2.3.3 深地噪声来源初步分析

常规的  $R$ - $T$  旋转方法利用振幅能量变化进行角度试算,以获得信号的最佳极化方位(傅旦丹等, 2003; 温书亮等, 2004)。旋转后的径向  $R$  分量波场可能为  $P/SV$  型偏振或  $SH$  型偏振,因此,真实的震源位置可能在  $R$  分量( $\theta \pm 180^\circ$ )的方位,或者  $T$  分量  $\pm 180^\circ$  的连线。我们设置步长为  $1^\circ$ ,对目标信号频带的傅里叶变换(FFT)振幅均值进行遍历  $0^\circ \sim 360^\circ$  的  $R$ - $T$  旋转扫描,获得两个井下观测点的最佳极化方位及交切定位结果,如图 7 所示。

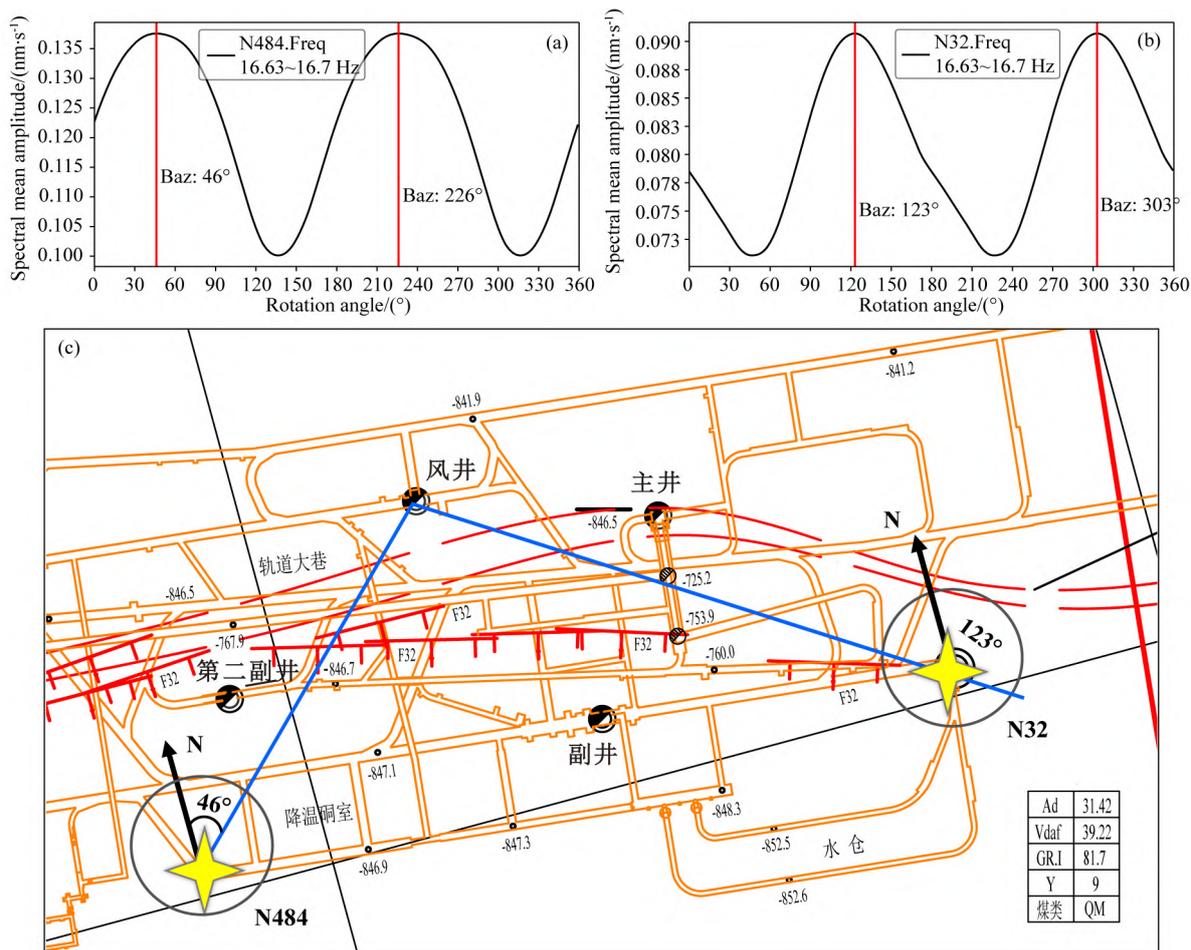


图 7 高频非时变噪声的最佳极化方位及交切定位示意图

(a), (b) 分别为 N484 和 N32 台站的 R-T 旋转结果; (c) 为交切定位示意, 黄色星形符号指示了测点位置, 蓝线表示最佳极化方位的延长线。

Fig. 7 The optimal polarization orientation and intersection location diagram of high frequency time-invariant noise (a) and (b) are the R-T rotation results of N484 and N32 stations respectively; (c) presents the intersection positioning schematic, where the yellow star symbols indicate the observation positions, and the blue lines represent the extension of the optimal polarization direction.

地下 16.63~16.7 Hz 非时变噪声在 N484(图 7a)和 N32(图 7b)台站的最佳极化方位分别为 46°/226°和 123°/303°,二者在矿区施工平面图的投影交于风井的位置(图 7c),其中 N484 台站距风井约 245 m,N32 台站约 322 m,因而 N484 台站记录到了此频带更高的振幅均值。此外,同期的噪声专项调查显示,风机产生的谐波基频集中在 16~17 Hz,一致说明该高频非时变信号来自风机的振动,井下多点的观测能够有效提取震源的位置信息。

### 3 讨论

#### 3.1 仪器带宽与低频观测精度

本次观测实验使用的仪器带宽及采样率将噪声

的对比限制在 30 s~25 Hz。加速度功率谱显示的地面与地下噪声记录在 >10 s 的长周期段 PSD 值均存在显著抬升,无法分辨第一地脉动(10~20 s)的谱峰。为此,我们利用深地同址、同期、不同周期地震仪的观测对比分析,如图 8 所示。CMG-40TDE(30 s)和 CMG-3ESPCDE(120 s)地震仪在中高频段(<2 s)响应基本一致。DF 频带(2~10 s)内,二者均清晰地捕捉到了第二地脉动峰值的分裂现象,短周期(SPDF)和长周期(LPDF)第二地脉动子峰分别在 4.8 s 和 6.9 s,对应于不同的源区(Tanimoto, 2007; Bromirski et al., 2013)。此前的分析中,该频带第二地脉动峰值分裂并不明显,一定程度上受到海洋震源区的活动强度及较重的 PSD 平滑处理的影响(Koper and Burlacu, 2015)。但是两种仪器在低频

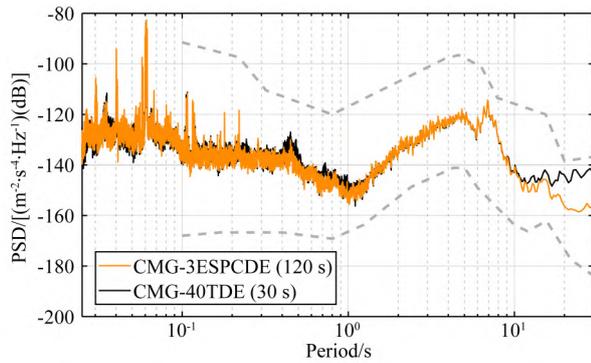


图8 井下长、短周期地震仪的垂向噪声 PSD 对比  
(频带范围: 25 Hz~30 s)

Fig. 8 Power spectral density (PSD) comparison of vertical noise between long-period and short-period seismometers in deep underground (frequency band: 25 Hz~30 s)

段( $>10$  s)产生了显著差异,长周期仪器清晰地观测到了第一地脉动的峰值信号(14 s),其 PSD 曲线与短周期仪器最大相差 15 dB,说明前述低频噪声的异常高值与仪器的观测精度和频带宽度有关。从而可以推测,未来更宽频带、更高精度地震仪的投入,将为深地噪声补充更充分的实验数据,进而加深我们对深部地下环境噪声的认识。同时,这利于捕捉诸如 Earth's hum (2~20 mHz)等弱长周期信号,以用于地球深部结构成像及动力学研究(Nishida et al., 2009; Haned et al., 2016; Deen et al., 2018)。

### 3.2 深地观测环境

淮南深地实验室目前的观测条件较为简陋,尚未达到标准测震台站的要求。停产的煤矿井下巷道在提供大深度观测空间的同时,也带来了一些诸如电梯、抽水泵和通风系统等设备运行的固有噪声。此外,仪器未安装摆罩,可能受到地下无间断通风设备产生的气流、气压干扰,缺少观测台墩导致地震仪倾斜、或与地面耦合不佳,无卫星授时,仪器记录的时间精度不高等等均会影响震相识别和拾取。

因陋就简的初次观测不足以客观反映深部地下噪声环境。在深地实验室后续的建设中,应结合完备的现场踏勘记录,对井下固定噪声源进行进一步的专项调查,为干扰信号的分离和滤波提供可靠参考。同时,应提升巷道内的观测条件,保障仪器的密封性,加装专用水泥台墩,使用网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)等授时观测技术,并计算仪器的倾斜参数(Bell et al., 2015; Hung et al., 2019),通过分量旋转进行倾斜校正,以进一步提高深地观测数据质量。可以预期,在装配高精度平动以及大型旋转观测仪器的基础上(李栋青等, 2021; Chen et

al., 2023),随着深地实验室的改造完成,深部地下将成为优越的地震观测平台。

### 3.3 矿震监测

深地实验室附近的淮南其他煤矿区采掘作业破坏了煤岩体原岩的应力状态,内部积聚的能量以微地震的形式释放。这些微震频率高、信噪比低(刘劲松等, 2013),是煤与瓦斯突出、突水等灾害的共性前兆信息(任波等, 2021)。而深地观测在高频段能够提供远低于地面的噪声环境,对于矿区微震的识别具有明显优势。另一方面,当开采深度大于 500 m 时,矿震能量衰减严重,地面测站难以拾取有效信号(贾宝新和李国臻, 2010)。联合地面、井下不同深度的测点形成的矿震立体监测网络,将能有效提高震源定位的精度,以服务于采动可能引发灾害的预警(杨柳, 2022)。

### 3.4 场地效应

浅层场地效应会对背景噪声及地震波的部分频带产生放大和衰减作用(Abercrombie, 1997; Roten et al., 2013; Chen et al., 2018)。图 9 给出了联测期间东海海域  $M_s 5.5$  地震波及振幅谱,可见地面观测的水平分量在 0.3~0.7 Hz 比地下最大高出 10 倍,而垂向差异较小,这与前文第二地脉动谱(图 3)的优势放大频带吻合。确定浅层沉积的谐振频率和放大系数是下一步工作的重点,淮南深地实验室直接位于松散沉积层下方,拥有一般基岩参考站无法替代的优势,自然成为研究场地效应的理想场所。

此外,淮南矿区的钻孔提供了地层岩性、密度、速度、厚度等信息,支持开展场地的数值模拟与实测数据对比(Ferritto, 1996),以揭示场地放大特征与土层条件的相关性,并为了解邻区无钻孔资料测点的土层地质情况提供参考(Field and Jacob, 1993)。场地效应是值得深入研究的问题,也是发挥深地优势的重要一环。

## 4 结论

淮南深部地下与地面的联合地震观测试验,为研究深地与地面噪声环境的特点提供了可靠的数据。通过地震观测噪声对比和分析,可以获得如下结论:

深部地下具有远低于地面的噪声环境。由于上覆沉积层对高频噪声的吸收衰减作用,源于地表或浅层的噪声得到有效屏蔽,使得井下观测的 1~25 Hz 高频噪声 PSD 值比地面低 20~40 dB;衰减量随

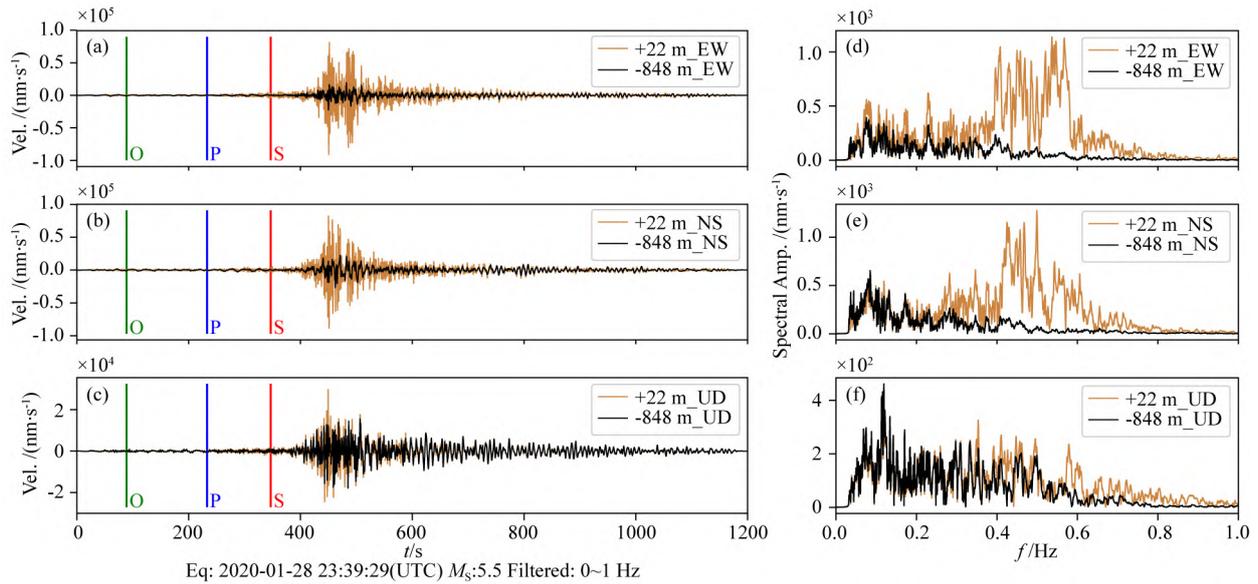


图9 东海海域  $M_s$ 5.5 地震三分量波形(a—c)及振幅谱(d—e)

蓝色与红色标注线分别为根据 iasp91 模型计算的 P 波与 S 波理论到时;棕色和黑色曲线分别为地面与深地观测。

Fig. 9 3-C waveforms (a—c) and amplitude spectrums (d—e) of  $M_s$ 5.5 earthquake in the East China Sea

The blue and red lines are the theoretical arrival times of P wave and S wave calculated according to the iasp91 model respectively;

The brown and black curves are surface and underground observations respectively.

着频率的降低而减小,在 0.1~1 Hz 频段二者的噪声 PSD 值平均相差 10 dB。此外,受局部场地效应的影响,我们在该频段地面地震记录的第二地脉动谱中观测到了明显的振幅放大特征;但地下与地面在 0.033~0.1 Hz 的低频段噪声水平相近,可能受仪器观测精度的限制和井下气流干扰。

深部地下噪声未呈现时变特征。地面观测的噪声信号随人类活动的变化趋势较明显,表现为白天能量强、夜晚能量弱的昼夜模式。而地下环境噪声受人类活动影响小,不具有日变或周变的特征。通过地面与地下的振幅与谱值变化对比,界定了研究区的人文噪声频带下界在 0.7 Hz,高于此频率的人为干扰能被浅层覆盖有效衰减,十分利于开展深地地震观测。

深部地下环境的高频噪声( $<1$  s)极化特征明显,后方位角  $\theta_H$  集中在  $0^\circ/180^\circ$  和  $90^\circ/270^\circ$  附近,初步推断可能是矿区内大型设备引发的铁轨振动或巷道高压输电系统产生的电磁激励响应;DF 频带内(2~10 s),第二地脉动谱峰分裂成周期为 4.0 s、5.2 s 的两个亚峰,二者具有明显不同的偏振特征,支持它们来自不同源区的认识;低频噪声( $>10$  s)能量主要来自地倾斜产生的水平加速度,但不可忽略仪器低频观测精度的影响。另外,以深地低噪声环境下突显的非时变信号为例,通过  $R$ - $T$  旋转扫描和交切定位,确定了该信号的振动源。此类井下稳定噪声的厘

定,可为深地实验室的后续建设以及开展地下矿震监测提供重要参考。

致谢 感谢军事科学院国防工程研究院、淮河能源集团淮南矿业公司与安徽理工大学对淮南深部地下观测提供了诸多便利条件,在深地环境安全保障等方面做了大量的支撑工作。

## References

- Abercrombie R E. 1997. Near-surface attenuation and site effects from comparison of surface and deep borehole recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3): 731-744.
- Asten M W, Henstridge J D. 1984. Array estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. *Geophysics*, 49(11): 1828-1837.
- Asten M W. 1978. Geological control on the three-component spectra of Rayleigh-wave microseisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(6): 1623-1636.
- Bell S W, Forsyth D W, Ruan Y Y. 2015. Removing noise from the vertical component records of ocean-bottom seismometers: Results from year one of the Cascadia Initiative. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1): 300-313.
- Berger J, Davis P, Ekström G. 2004. Ambient earth noise: a survey of the global seismographic network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B11): B11307, doi: 10.1029/2004JB003408.
- 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.
- Bromirski P D, Duennebier F K, Stephen R A. 2005. Mid-ocean microseisms. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(4): Q04009, doi: 10.1029/2004GC000768.
- Bromirski P D, Flick R E, Graham N. 1999. Ocean wave height determined from inland seismometer data; implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9): 20753-20766, doi: 10.1029/1999JC900156.
- Bromirski P D, Stephen R A, Gerstoft P. 2013. Are deep-ocean-generated surface-wave microseisms observed on land? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7): 3610-3629, doi: 10.1002/jgrb.50268.
- Chen C, Wang Y, Guo G Y, et al. 2022. Deep underground observation comparison of rotational seismometers. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(12): 4569-4582, doi: 10.6038/cjg2022Q0318.
- Chen C, Wang Y, Sun L, et al. 2023. Six-component earthquake synchronous observations across Taiwan Strait: Phase velocity and source location. *Earth and Space Science*, 10(12), doi: 10.1029/2023EA003040.
- Chen H C, Tsai V C, Niu F L. 2018. Observations and modeling of long-period ground-motion amplification across northeast China. *Geophysical Research Letters*, 45(12): 5968-5976.
- Chi W C, Chen W J, Kuo B Y, et al. 2010. Seismic monitoring of western Pacific typhoons. *Marine Geophysical Researches*, 31(4): 239-251, doi: 10.1007/s11001-010-9105-x.
- Deen M, Stutzmann E, Arduin F. 2018. The earth's hum variations from a global model and seismic recordings around the Indian ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(10): 4006-4020.
- Díaz J, Ruiz M, Sánchez-Pastor P S, et al. 2017. Urban seismology: on the origin of earth vibrations within a city. *Scientific Reports*, 7(1): 15296, doi: 10.1038/s41598-017-15499-y.
- Díaz J, Villasenor 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, doi: 10.1785/0120090085.
- Ferritto J M. 1996. Repeatability of microseism measurements in Port Hueneme case study. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(2): 428-435.
- Field E, Jacob K. 1993. The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 20(24): 2925-2928.
- Fu D D, Liu Y F, Wen S L, et al. 2003. Orientation correction for horizontal components in marine multi-component seismic exploration. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 42(4): 460-463, 468.
- Gutenberg B. 1958. Microseisms. *Advances in Geophysics*, 5: 53-92.
- Haned A, Stutzmann E, Schimmel M, et al. 2016. Global tomography using seismic hum. *Geophysical Journal International*, 204(2): 1222-1236, doi: 10.1093/gji/ggv516.
- Harris D B. 1990. Comparison of the direction estimation performance of high-frequency seismic arrays and three-component stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(6B): 1951-1968.
- Hasselmann K. 1963. A statistical analysis of the generation of microseisms. *Reviews of Geophysics*, 1(2): 177-210, doi: 10.1029/RG001i002p00177.
- Hauksson E, Teng T L, Henry T L. 1987. Results from a 1500 m deep, three-level downhole seismometer array: site response, low Q values, and fmax. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6): 1883-1904.
- Hung T D, Yang T, Le B M, et al. 2019. Effects of failure of the ocean-bottom seismograph leveling system on receiver function analysis. *Seismological Research Letters*, 90(3): 1191-1199, doi: 10.1785/0220180276.
- Jia B X, Li G Z. 2010. The research and application for spatial distribution of mines seismic monitoring stations. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 35(12): 2045-2048, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2010.12.001.
- Juretzek C, Hadziioannou C. 2016. Where do ocean microseisms come from? A study of love-to-Rayleigh wave ratios. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9): 6741-6756, doi: 10.1002/2016JB013017.
- Kobayashi N, Nishida K. 1998. Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances. *Nature*, 395(6700): 357-360, doi: 10.1038/26427.
- Koper K D, Burlacu R. 2015. The fine structure of double-frequency microseisms recorded by seismometers in North America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3): 1677-1691.
- 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.
- Lecocq T, Hicks S P, Van Noten K, et al. 2020. Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures. *Science*, 369(6509): 1338-1343.
- Li D Q, Wang Y, Sun L X. 2021. Calculating rotational components of ground motions by finite difference method. *Earth Science* (in Chinese), 46(1): 369-380, doi: 10.3799/dqkx.2019.265.
- 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.
- Liu J S, Wang Y, Yao Z X. 2013. On micro-seismic first arrival identification: A case study. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(5): 1660-1666, doi: 10.6038/cjg20130523.
- Long X, Ai Y S. 2018. Collecting PcP and PKiKP phases pair using global small aperture arrays. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 33(5): 1824-1833, doi: 10.6038/pg2018AA0227.
- Longuet-Higgins M S. 1950. A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 243(857): 1-35, doi: 10.1098/rsta.1950.0012.
- Ma X, Zhou Y Y, Lv Y Q. 2019. Coupling relationship between noise of a very broad seismometer and the environment. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 41(2): 545-548.
- 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.
- Nishida K, Kawakatsu H, Fukao Y, et al. 2008. Background love and Rayleigh waves simultaneously generated at the Pacific ocean floors. *Geophysical Research Letters*, 35(16): L16307, doi: 10.1029/2008GL034753.
- Nishida K, Montagner J P, Kawakatsu H. 2009. Global surface wave tomography using seismic hum. *Science*, 326(5949): 112, doi: 10.1126/science.1176389.
- Nishida K. 2013. Earth's background free oscillations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41: 719-740.
- Park J, Vernon F L, Lindberg C R. 1987. Frequency dependent polarization analysis of high-frequency seismograms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B12): 12664-12674.
- Peterson J. 1993. Observations and modeling of seismic background noise. Albuquerque; U. S. Geological Survey, 93-322.
- Ren B, Yu G F, Wang M H, et al. 2021. Application and thinking of microseismic monitoring in Huainan mining area. *Shaanxi Coal* (in Chinese), 40(4): 1-4.
- Rosat S, Hinderer J, Boy J P, et al. 2018. A two-year analysis of the iOSG-24 superconducting gravimeter at the low noise underground laboratory (LSBB URL) of Rustrel, France; Environmental noise estimate. *Journal of Geodynamics*, 119: 1-8.
- Roten D, Fah D, Bonilla L F. 2013. High-frequency ground motion amplification during the 2011 Tohoku earthquake explained by soil dilatancy. *Geophysical Journal International*, 193(2): 898-904, doi: 10.1093/gji/ggt001.
- Samson J C. 1983. Pure states, polarized waves, and principal components in the spectra of multiple, geophysical time-series. *Geophysical Journal International*, 72(3): 647-664.
- Satoh T. 2006. Inversion of QS of deep sediments from surface-to-borehole spectral ratios considering obliquely incident SH and SV waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3): 943-956.
- Schulte-Pelkum V, Earle P S, Vernon F L. 2004. Strong directivity of ocean-generated seismic noise. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(3): Q03004, doi: 10.1029/2003GC000520.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307(5715): 1615-1618.
- Sufri O, Koper K D, Burlacu R, et al. 2014. Microseisms from superstorm sandy. *Earth and Planetary Science Letters*, 402: 324-336.
- Sun H P, Chen X D, Wei Z G, et al. 2022. A preliminary study on the ultra-wide band ambient noise of the deep underground based on observations of the seismometer and gravimeter. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(12): 4543-4554, doi: 10.6038/cjg2022Q0559.
- Suteau-Henson A. 1990. Estimating azimuth and slowness from three-component and array stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(6B): 1987-1998.
- Tanimoto T. 2007. Excitation of microseisms. *Geophysical Research Letters*, 34(5): 2006GL029046.
- Tsai V C, McNamara D E. 2011. Quantifying the influence of sea ice on ocean microseism using observations from the Bering Sea, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 38(22): L22502, doi: 10.1029/2011GL049791.
- Wang B S, Zeng X F, Song Z H, et al. 2021. Seismic observation and subsurface imaging using an urban telecommunication optical-fiber cable. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 66(20): 2590-2595, doi: 10.1360/TB-2020-1427.
- Wang F, Li L, Wang B S. 2017. Ability of decreasing noise and the characteristics of near-surface wave field around Dazhai borehole in Pu'er. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 39(6): 831-847, doi: 10.11939/jass.2017.06.002.
- Wang F, Wang W T, Long J F, et al. 2019. Seismic noise characteristics of broad-band seismic networks in Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 41(5): 569-584, doi: 10.11939/jass.20190031.
- Wang N, Mao G L, Yin K D, et al. 2022. Influence of COVID-19 prevention and control measures on background noise of seismic stations of Hebei network. *North China Earthquake Sciences* (in Chinese), 40(4): 77-82, doi: 10.3969/j.issn.1003-1375.2022.04.011.
- Wang S, Sun X L, Qin J L, et al. 2018. Fine fault structure of Xinfengjiang water reservoir area from high-frequency ambient noise tomography. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(2): 593-603, doi: 10.6038/cjg2018L0434.
- Wang X L. 2012. The influence of temperature on the performance and output of very-broadband seismometer [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Earthquake Forecasting.
- Wang X, Williams E F, Karrenbach M, et al. 2020. Rose parade seismology: signatures of floats and bands on optical fiber. *Seismological Research Letters*, 91(4): 2395-2398.
- Wang Y, Jian Y F, He Y S, et al. 2022. Underground laboratories and deep underground geophysical observations. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(12): 4527-4542, doi: 10.6038/cjg2022Q0404.
- Wang Y, Yang Y X, Sun H P, et al. 2023. Observation and research of deep underground multi-physical fields—Huainan -848 m deep experiment. *Science China Earth Sciences*, 66(1): 54-70, doi: 10.1007/s11430-022-9998-2.
- Wang Z Y, Wang Y, Xu R G, et al. 2022. Environmental noise assessment of underground gravity observation in Huainan and the potential capability of detecting slow earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(12): 4555-4568, doi: 10.6038/cjg2022Q0375.
- Wen S L, Niu B H, Fu D D, et al. 2004. Orientation correction of horizontal components for 3-D multi-component seismic exploration in Bohai Bay. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 34(1): 142-145.
- Wu L H, Liao W L, Li J L, et al. 2022. Analysis of seismic ambient noise before and after the prevention and control of COVID-19 pandemic at Enshi station, Hubei Province. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 44(1): 145-151, doi: 10.20000/j.1000-0844.20211207004.
- Wu L H, Wang D, Lei Z G, et al. 2020. Campus vibration in Nanwangshan campus, China University of Geosciences at Wuhan monitored by short-period seismometers. *Journal of Earth Science*, 31(5): 950-956, doi: 10.1007/s12583-020-1332-8.

- Xiao H, Eilon Z C, Ji C, et al. 2020. COVID-19 societal response captured by seismic noise in China and Italy. *Seismological Research Letters*, 91(5): 2757-2768.
- Xie J B, He S Q, Lv J S, et al. 2007. Installation of broadband seismometer. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 28(1): 57-63.
- Xie J T, Lin L P, Chen L, et al. 2018. The program of probability density function of power spectral density curves from seismic noise of a station based on Matlab. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 39(2): 84-89.
- Yamada K, Horike M. 2007. Inference of Q-values below 1 Hz from borehole and surface data in the Osaka Basin by three-component waveform fitting. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(4): 1267-1278.
- Yamanaka H, Dravinski M, Kagami H. 1993. Continuous measurements of microtremors on sediments and basement in Los Angeles, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5): 1595-1609.
- Yang L. 2022. Study on the early warning of Rockburst event of a coal mine in Hegang mining area based on mine earthquake and Microseismic monitoring [Master's thesis] (in Chinese). Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, doi: 10.27490/d.cnki.gggy.2022.000041.
- Zhang M M, Chen X D, Xu J Q, et al. 2021. A preliminary analysis of gravity noise levels at the deep geophysical experimental field in Huainan. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 36(5): 500-509, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.033.
- Zhang X Y. 2020. Investigation of low-frequency ground motion amplification in sedimentary basin in NE China using seismic ambient noise [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Petroleum (Beijing).
- Zhu T Y, Stensrud D J. 2019. Characterizing thunder-induced ground motions using fiber-optic distributed acoustic sensing array. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(23): 12810-12823, doi: 10.1029/2019JD031453.
- 龙鑫, 艾印双. 2018. 基于全球小口径地震台阵的 PcP 和 PKiKP 震相研究. *地球物理学进展*, 33(5): 1824-1833, doi: 10.6038/pg2018AA0227.
- 马鑫, 周云耀, 吕永清. 2019. 甚宽频带地震计噪声与环境耦合研究. *地震工程学报*, 41(2): 545-548.
- 任波, 余国锋, 汪敏华等. 2021. 淮南矿区微震监测应用与思考. *陕西煤炭*, 40(4): 1-4.
- 孙和平, 陈晓东, 危自根等. 2022. 基于地震和重力观测的深地超宽频带背景噪声初探. *地球物理学报*, 65(12): 4543-4554, doi: 10.6038/cjg2022Q0559.
- 王宝善, 曾祥方, 宋政宏等. 2021. 利用城市通信光缆进行地震观测和地下结构探测. *科学通报*, 66(20): 2590-2595, doi: 10.1360/TB-2020-1427.
- 王芳, 李丽, 王宝善. 2017. 普洱大寨深井噪声压制效果及井孔附近波场特征研究. *地震学报*, 39(6): 831-847, doi: 10.11939/jass.2017.06.002.
- 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.
- 王宁, 毛国良, 尹康达等. 2022. 新冠疫情防控措施对河北台网地震台背景噪声影响. *华北地震科学*, 40(4): 77-82, doi: 10.3969/j.issn.1003-1375.2022.04.011.
- 王爽, 孙新蕾, 秦加岭等. 2018. 利用密集地震台网高频环境噪声研究广东新丰江库区浅层地下结构. *地球物理学报*, 61(2): 593-603, doi: 10.6038/cjg2018L0434.
- 王晓蕾. 2012. 温度对甚宽频地震计的性能及输出影响的研究[硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.
- 王赞, 菅一凡, 贺永胜等. 2022. 地下实验室与深地环境下的地球物理观测. *地球物理学报*, 65(12): 4527-4542, doi: 10.6038/cjg2022Q0404.
- 王赞, 杨亚新, 孙和平等. 2023. 深部地下多物理场观测研究——淮南—848 m 深地试验. *中国科学: 地球科学*, 53(1): 55-71.
- 王振宇, 王赞, 徐如刚等. 2022. 淮南深地重力观测的环境噪声评估与慢地震探测潜力. *地球物理学报*, 65(12): 4555-4568, doi: 10.6038/cjg2022Q0375.
- 温书亮, 牛滨华, 傅旦丹等. 2004. 渤海三维多分量地震勘探水平分量方位校正. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(1): 142-145.
- 吴丽慧, 廖武林, 黎金玲等. 2022. 新冠疫情防控前后湖北恩施地震台背景噪声变化分析. *地震工程学报*, 44(1): 145-151, doi: 10.20000/j.1000-0844.20211207004.
- 谢剑波, 何寿清, 吕金水等. 2007. 宽频带地震计的安装. *地震地磁观测与研究*, 28(1): 57-63.
- 谢江涛, 林丽萍, 谌亮等. 2018. 地震台站台基噪声功率谱概率密度函数 Matlab 实现. *地震地磁观测与研究*, 39(2): 84-89.
- 杨柳. 2022. 基于矿震和微震监测的鹤岗矿区某煤矿冲击地压事件预警研究[硕士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, doi: 10.27490/d.cnki.gggy.2022.000041.
- 张苗苗, 陈晓东, 徐建桥等. 2021. 淮南深部地球物理实验场重力噪声水平初步分析. *地球科学进展*, 36(5): 500-509, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.033.
- 张新阳. 2020. 基于噪声的中国东北沉积盆地内低频地震波放大特征研究[硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京).

(本文编辑 何燕)