

郭德顺, 陈建涛, 谢剑波, 等. 汕头试验井地面与井下环境地噪声对比测试分析[J]. 华南地震, 2014, 34 (3): 57-64. [GUO Deshun, CHEN Jiantao, XIE Jianbo, et al. The Comparison Test Analysis of Environment Seismic Noise on Ground Surface and Underground at Shantou Pilot Hole [J]. South china journal of seismology, 2014, 34(3): 57-64.]

## 汕头试验井地面与井下环境地噪声对比测试分析

郭德顺<sup>1,2,3</sup>, 陈建涛<sup>1,2,3</sup>, 谢剑波<sup>1,2,3</sup>, 叶春明<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东省地震局, 广东 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广东 广州 510070;  
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室(筹), 广东 广州 510070)

**摘要:** 试验井位于汕头市衡山路, 观测系统为井下宽频地震计 TBG-60B 和地面宽频带地震计 TDV-60B, 频带为 60S~50 Hz, 选取的地面观测数据与对应的井下观测数据都是同一时间的, 使用童汪练研究员的地噪声分析软件和 MATLAB 绘图工具, 研究台站环境地噪声随观测井深度的变化特征, 得到井深与观测地噪声之间的对比关系, 为井下地震台站勘探和工程建设提供基础数据。发现地噪声水平从覆盖层进入到基岩有很大变化, 从强风化层进入到中微风化层也有明显变化, 考虑钻井建设成本和台站建设地噪声水平要求之间的综合效益, 在粤东地区典型的地质结构条件, 较佳的平衡点应该是至少需要进入完整中微风化层基岩 10 m。

**关键词:** 环境地噪声; 地面与井下; 宽频带地震计; 汕头试验井

中图分类号: X827 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2014) 03-0057-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.03.010

## The Comparison Test Analysis of Environment Seismic Noise on Ground Surface and Underground at Shantou Pilot Hole

GUO Deshun<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jiantao<sup>1,2,3</sup>, XIE Jianbo<sup>1,2,3</sup>, YE Chunming<sup>1,2,3</sup>

(1. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Project, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** The test well located in Hengshan road of Shantou, and the pilot hole observation system consist of the model TBG-60B bore-hole wide frequency seismometer and the model TDV-60B surface wide frequency seismometer with the frequency band of 60 s~50 Hz both. The authors have concluded the contrast relationship between the hole depth and the observation seismic noise through researching variation characteristics of station environment seismic noise with pilot hole depth by using the seismic noise analysis software belongs to Tong Wanglian and the MATLAB software on the premise of selecting the observation data between ground surface and underground corresponding to the same time, which supplied the basic data of seismic station exploration in underground and engineering construction. The results show that seismic noise level has significant change from

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: 中国地震局地震行业科研专项 (201208014)

作者简介: 郭德顺 (1978-), 男, 工程师, 主要从事地震监测管理、仪器维修维护工作。

E-mail: 81677264@qq.com.

overburden to bedrock and from strongly-weathered bed to intermediately-weathered bed also including weakly-weathered bed. The optimized equilibrium is to enter the whole intermediately-weathered bed and weakly-weathered bed 10 meters at least, considering the comprehensive benefit between the drilling construction cost and station construction seismic noise requirement in special geological structure conditions of east-area in Guangdong.

**Key words:** Environment seismic noise; Ground surface and underground; Wide frequency seismometer; Shantou pilot hole

## 0 引言

本试验项目属于广东省防震减灾“十二五”地震预警台网建设的前期项目,位于汕头市市中心,属于干扰比较大的城市典型地区和粤东典型沉积层覆盖地区。钻了一个孔径 146 mm、井深 200 m 的测试井,同时在地表建设土层仪器墩;安装宽频带地震计,井下安装扣座式井下宽频带地震计,通过计算和对比不同深度下不同频段地面与井下的地动脉噪声,获得粤东地区典型地质结构条件下,噪声随观测井深度的变化特征,给出准确、科学、可靠的结论,为井下地震台站工程建设及效益的最优化提供基础数据。

## 1 试验井及其观测系统概况

### 1.1 试验井概况

汕头试验井由汕头市粤东工程勘察院负责钻井建设施工和地质勘测,于 2012 年 8 月 13 日进场施工,于 2012 年 10 月 31 日完成,钻探深度为 203.14 m,下管深度为 200 m。试验井的地质情况:第四系松散覆盖层厚度为 0~42.80 m,42.80~46.40 m 为强风化花岗岩,46.40~203.14 m 以下为微风化花岗岩。

成井套管采用 1Cr18Ni9Ti 材质不锈钢管,外径为 146 mm,壁厚 5~6 mm,套管连接处采用涂

抹环氧树腊,再缠绕生料带进行密封,以防止地下水渗入。下管后在管内高压注入高标号(参合防水剂)的水泥浆翻浆至井口进行固井。固井完成后的第 4 天进行洗井,并吸干井内残浆。

经专业单位北京港震有限公司检测,汕头试验井的井斜为  $2.1^\circ$ ,满足成井井斜小于  $2.5^\circ$  的设计要求。

地表观测仪器墩按长 60 cm、宽 60 cm、距离地面高度 20 cm、误差 5% 的标准设计,完整接触到原土层。要求先打入 4 根直径 20 mm,长 1.5 m 的钢筋,在 60 cm×60 cm 范围内均匀分布,表面留出约 50 cm 与仪器墩衔接,然后用强度等级不低于 C30 的素混凝土一次性浇注,振捣密实后抹平,表面无裂缝、蜂窝和麻面,墩面平整  $1^\circ$ 。摆墩面的四边与地理东、南、西、北方位一致。摆墩不与任何建筑体相连;四周有隔震槽,隔震槽宽约 0.1 m,深约 0.3 m,槽底及四周采取防潮措施,槽内充填防水材料。

### 1.2 观测系统概况

测试仪器主要由数据采集器、井下宽频带地震计、地表宽频带地震计、电源系统、通信系统组成、测试仪器现场见图 1 和表 1。

按照数字测震台网技术系统的要求,井下宽频带地震计选用 TBC-60B,是集成井下宽频带地震仪和采集记录器的一体化设备;地表对比观测



图 1 井下摆与地面摆现场图片

Fig.1 The scene photograph of bore-hole seismometer and surface seismometer

表 1 设备清单

Table 1 The equipment list

序号	设备名称	产品性能及描述	数量
1	井下宽频带地震计 (型号 TBG-60B)	地震计与数采一体,三分向,频带宽度:60 s~50 Hz,3dB 速度平坦, >145dB,电子罗盘定位,三分向程控自动调零,电子锁摆。	1
2	地面宽频带地震计 (型号 TDV-60B)	三分向一体结构,频带宽度:60 s~50 Hz,3dB 速度平坦,>145 dB, 三分向程控自动调零,机械锁摆。	1
3	3 通道数据采集器	24 位 3 通道采集,多种采样率数据同时输出,动态范围大于 135 dB, 支持 TCP/IP、UDP/IP 等多种传输协议,大容量存储器记录连续数据和 事件数据,内置 GPS 授时,锁相环(PLL)压控调节,长期稳定性优于 10~8 s。	1
4	直流电源	220 交流输入,12 伏直流输出,交、直流完全隔离	1

宽带地震计频带宽度选用 TDV-60B; 数据采集器选用 3 通道数据采集器 TDE-324CI。为保障观测数据的安全和质量, 数据记录方式采用现场本地存储和远程实时传输存储两种方式, 现场本地存储采用笔记本电脑与数据采集器通过 RS232 接口直接连接来存储数据, 远程采用 VPN 有线网络传输方式, 可以实时获取数据进行远程储存。供电采用交流转直流输出供电模式, 接入交流 220 V、50 Hz 的市电, 为防止市电中断, 选用 2 个 100 AH 蓄电池作备用供电电源。笔记本电脑用来现场检查数据接收情况, 并对观测数据进行初步分析。

2 地噪声分析

2.1 数据选取

- (1) 按规范安装好井下地震计和地表地震计<sup>[1]</sup>,
- (4) 地面观测数据选取与不同井深同一时间

数据采集器设置采样率 100 Hz, 并对井下地震计和地表地震计分别做脉冲标定和正弦波标定, 以确定整套设备是否有系统偏差。

(2) 连续记录地表地震计记录的实时波形数据, 井下地震计在不同深度分别安装好后, 经测试设备正常且稳定后, 再开始记录其记录的实时波形数据。

(3) 井下观测数据选取深度分别为 0 m、10 m、20 m、30 m、40 m、42 m、43 m、44 m、45 m、46 m、48 m、50 m、65 m、80 m、120 m、150 m、199 m。其中深度在 40 m 至 50 m 之间进行多次加密测试, 这是因为这段深度是覆盖土层转变成强风化花岗岩和中微风化花岗岩的地方, 需要进行详细研究。详见表 2。

表 2 井下仪器测试记录表

Table 2 The test record table of bore-hole seismometer

日期	开始时间	电缆标记/m	仪器位置/m	等效安装方位角/(°)
2013-01-08	10:50	337+1	0	235
2013-01-08	16:30	327	10	356
2013-01-08	22:21	317	20	140
2013-01-09	7:32	307	30	294
2013-01-09	12:18	257	80	305
2013-01-09	17:38	217	120	263
2013-01-09	22:00	297	40	290
2013-01-10	10:10	287	50	307
2013-01-10	16:31	272	65	160
2013-01-11	8:13	187	150	255
2013-01-15	16:48	142	199	243
2013-04-04	11:24	295	42	281
2013-04-04	23:55	293	44	311
2013-04-05	12:43	291	46	283
2013-04-06	0:05	289	48	195
2013-04-06	15:32	294	43	239
2013-04-07	0:17	292	45	110
2013-04-07	14:30	142	199	222

注: 等效方位角, 是指井下仪器固定后, 仪器的北与地理的北之间的夹角, 角度顺时针为正。

的测试数据, 保证地面和其对应的井下数据都是同一时段的。

(5) 待井下宽频带地震计和地表宽带地震计稳定后, 有效数据记录长度不少于 4 h 连续的波形数据; 从中选取外界重大干扰事件比较少, 没有地震事件和爆破事件的 1 h 数据进行计算。

## 2.2 计算方法

环境地噪声值是指地面运动速度记录的功率谱密度(PSD)在 1~20 Hz 频带范围的均方根值(RMS 值)<sup>[1]</sup>。使用童汪练研究员的地噪声分析软件和 MATLAB 绘图工具, 计算了地噪声的功率谱密度和计算 1~20 Hz 频率段的速度均方根 RMS 值<sup>[3-4]</sup>。

## 2.3 数据处理

### 2.3.1 方位角校正

为了能够正确科学的进行地面噪声和井下噪声的对比计算, 需要把地面摆与井下摆的方位角校正到一致。如表 2, 虽然在测试过程中提供了井下摆的等效方位角, 但是地面摆的安装由于使用地质罗盘, 受到环境干扰和精度不高等因素的影响, 因此, 地面摆的安装并不严格符合地理北的方位角要求, 不是绝对的地理北, 而是有一定的误差, 所以, 井下摆的等效方位角不等于地面摆与井下摆的实际方位角之差。

在测试期间, 地面摆和井下摆都记录到了 2013 年 1 月 22 日 06 时 22 分印尼苏门答腊北部 M6.0 地震、2013 年 4 月 5 日 21 时 00 分中俄交界 M6.5 地震和 2013 年 4 月 6 日 12 时 42 分印尼 M7.0 地震。根据方位角的相关性分析理论, 有地

震记录的相关性比无地震记录的相关性高很多, 使用谢剑波等人的地震计方位角相关性分析方法<sup>[2]</sup>, 得到地面摆与井下摆之间的实际方位角等于表 2 提供的等效方位角加上 15°, 由于地面摆的方位角一直保持不动, 仅需要对井下摆等效方位角之值加上 15°, 就能得到井下摆与地面摆的实际方位角之差。

对于不同深度的井下摆记录到的数据, 根据上述方法进行校正, 使得井下摆与地面摆的三分向方位角一致。

### 2.3.2 地噪声水平评估方法

根据国家有关规范<sup>[9]</sup>, 环境地噪声水平分为五级:

I 级环境地噪声水平:  $Enl < 3.16 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ;

II 级环境地噪声水平:  $3.16 \times 10^{-8} \text{ m/s} \leq Enl < 1.00 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ;

III 级环境地噪声水平:  $1.00 \times 10^{-7} \text{ m/s} \leq Enl < 3.16 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ;

IV 级环境地噪声水平:  $3.16 \times 10^{-7} \text{ m/s} \leq Enl < 1.00 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ;

V 级环境地噪声水平:  $1.00 \times 10^{-6} \text{ m/s} \leq Enl < 3.16 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

计算噪声功率谱密度的时候, 直接引用美国 USGS 的 J.Peterson<sup>[3]</sup>及其所领导的研究小组, 观测和研究的全世界各地正常地球噪声得到的地球高噪声新模型 NHNM 和地球低噪声新模型 NLNM。

## 2.4 处理结果

根据实验井的目的和有关规范<sup>[9]</sup>的相关要求, 测试数据处理过程和结果见图 2、3、4、5 和表 3

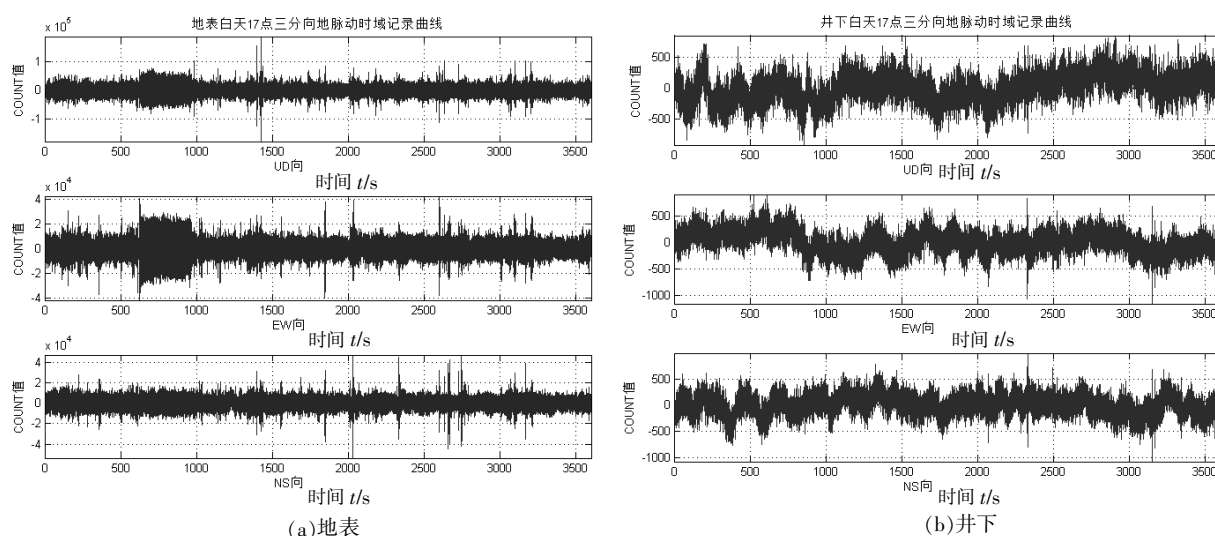


图 2 地表与井下 199 m 白天 17 点时段的地动脉时域记录

Fig.2 The earth pulsation time domain records of ground surface and 199 meters underground at 17:00

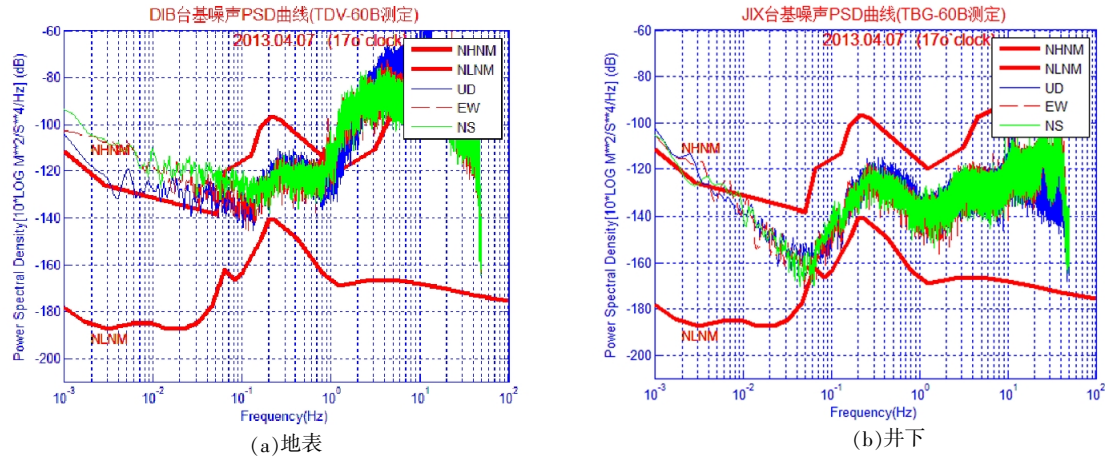


图3 地表与井下199 m 白天17点时段的功率谱密度图

Fig.3 The power spectral density chart of ground surface and 199 meters underground at 17:00

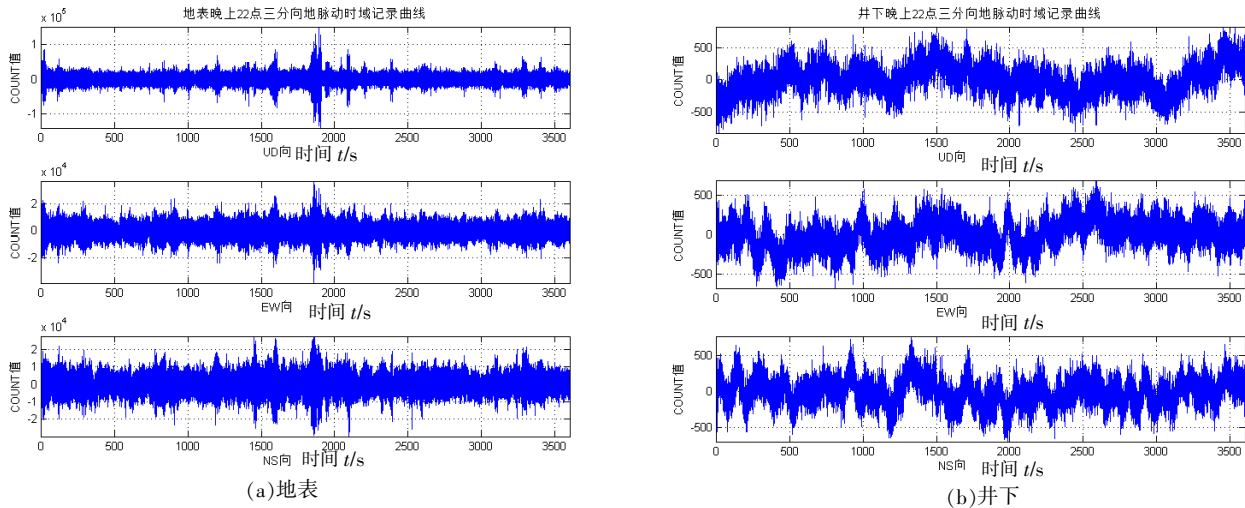


图4 地表与井下199 m 晚上22点时段的地动脉时域记录

Fig.4 The earth pulsation time domain records of ground surface and 199 meters underground at 21:00

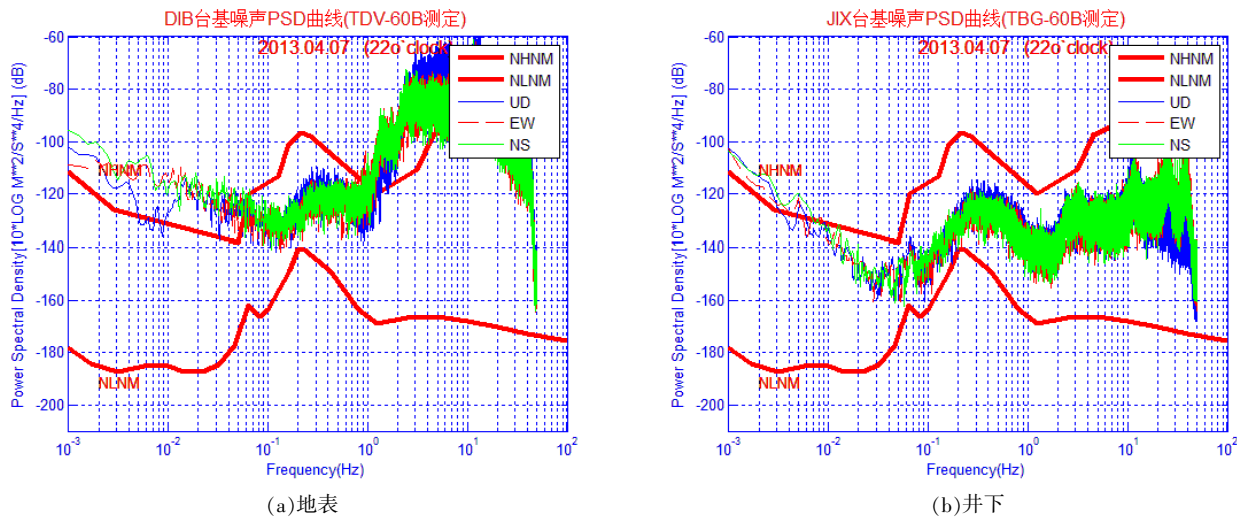


图5 地表与井下199 m 晚上22点时段的功率谱密度图

Fig.5 The power spectral density chart of ground surface and 199 meters underground at 21:00

表 3 1~20 Hz 频率段 RMS 值结果

Table 3 The result of RMS value between 1~20 Hz frequency ranges

深度/m	类型	UD 向速度 RMS 值 (m/s)	EW 向速度 RMS 值 (m/s)	NS 向速度 RMS 值 (m/s)	国标等级
10	地面	2.036 02 E-05	8.156 60 E-06	7.182 99 E-06	>V
	井下	6.972 17 E-06	4.058 41 E-06	5.155 06 E-06	>V
20	地面	1.066 10 E-05	4.681 54 E-06	4.925 52 E-06	>V
	井下	2.540 28 E-06	3.250 54 E-06	4.601 51 E-06	>V 至 V
30	地面	2.472 31 E-05	9.344 35 E-06	8.295 85 E-06	>V
	井下	3.056 37 E-06	3.419 01 E-06	3.688 34 E-06	>V 至 V
40	地面	1.128 45 E-05	5.519 34 E-06	6.019 25 E-06	>V
	井下	8.919 54 E-07	2.027 36 E-06	1.727 63 E-06	V 至 IV
42	地面	1.528 95 E-05	5.650 85 E-06	5.553 30 E-06	>V
	井下	4.792 36 E-07	1.195 18 E-06	1.126 20 E-06	V 至 IV
43	地面	1.423 69 E-05	6.037 87 E-06	5.797 55 E-06	>V
	井下	2.789 94 E-07	4.081 48 E-07	2.996 31 E-07	IV 至 III
44	地面	1.292 54 E-05	4.650 39 E-06	4.156 91 E-06	>V
	井下	2.340 99 E-07	1.713 39 E-07	2.264 30 E-07	III
45	地面	1.059 02 E-05	4.667 58 E-06	4.635 60 E-06	>V
	井下	1.329 53 E-07	1.663 93 E-07	1.723 51 E-07	III
46	地面	1.557 05 E-05	5.749 42 E-06	4.361 79 E-06	>V
	井下	2.233 03 E-07	1.008 20 E-07	1.222 07 E-07	III
48	地面	1.049 54 E-05	4.492 78 E-06	3.663 71 E-06	>V
	井下	1.693 86 E-07	7.784 02 E-08	1.128 73 E-07	III 至 II
50	地面	9.604 84 E-06	4.590 46 E-06	5.226 84 E-06	>V
	井下	9.826 13 E-08	4.911 57 E-08	1.000 23 E-07	III 至 II
65	地面	2.181 88 E-05	9.201 89 E-06	8.238 77 E-06	>V
	井下	1.226 37 E-07	9.190 93 E-08	1.083 12 E-07	III 至 II
80	地面	3.292 86 E-05	1.541 53 E-05	9.745 70 E-06	>V
	井下	1.233 49 E-07	8.797 57 E-08	1.015 22 E-07	III 至 II
120	地面	1.898 61 E-05	7.909 83 E-06	7.587 28 E-06	>V
	井下	7.836 52 E-08	6.315 26 E-08	6.507 79 E-08	II
150	地面	3.454 87 E-05	1.102 42 E-05	1.012 31 E-05	>V
	井下	7.968 31 E-08	7.233 62 E-08	6.813 41 E-08	II
199	地面	5.197 90 E-06	2.228 57 E-06	2.078 46 E-06	>V
	井下	3.154 14 E-08	1.901 34 E-08	1.832 87 E-08	I

(图件由于篇幅关系，只提供一部分)。

(1) 计算同一时段、不同深度的井下观测噪声和地表观测噪声的功率谱密度，得到相同时段的噪声功率谱密度随深度的变化情况，并将结果与 NLNM 和 NHNM 噪声模型进行比较，使用 MATLAB 软件工具进行图形绘制<sup>[9]</sup>。

(2) 计算 1~20 Hz 频率段下，同一时段、不同深度的井下观测噪声和地表观测噪声的速度 RMS 值(m/s)，得到同一频率段下，相同时段的速度 RMS 值(m/s) 随深度的变化情况，并且根据地噪声水平评估方法进行等级划分。

2.5 分析结果

(1) 把同一时段、不同深度的井下地动脉与地面地动脉的速度 RMS 值计算结果进行对比，使

用 MATLAB 软件工具进行图形绘制<sup>[9]</sup>，见图 6。

从图 6 可以看出，井深 0~30 m，井下 RMS 值降低不明显；40~46 m，RMS 值下降变化比较大，43 m 和 46 m 的变化较明显；48~150 m，RMS 值下降不太明显，199 m RMS 值降低效果明显。

地面 RMS 值都是大于 V 类，当井深进入到松散覆盖层时(0~43 m)，井下 RMS 值基本在 IV 类以上，降低效果不明显；当井深进入到强风化花岗岩(43~46 m)，井下 RMS 值保持在 III 类，下降变化明显；进入到中微风化花岗岩(46~199 m)，井下 RMS 值保持在 II 到 III 类，降低效果比较好；50~150 m，变化不大；199 m 属于 I 类，变化明显，噪声最低。

(2) 把地面和井下的三分向 RMS 值计算结果进行比对，得到地面噪声与井下噪声的相比倍数，

见图 7。

从图 7 中可以很看出, 随着井深的增加而相比倍数一直在增加。0~40 m, 相比倍数变化不大, 在 10 倍范围内; 42~48 m 一直有明显的倍数增加变化, 在 20 倍以上, 其中, 43 m 处有较大变化; 在井深 50 m 处, 相比倍数变化也较大, 高达 50~100 倍之间; 80~199 m, 相比倍数 100~300 之间。特别指出, 南北向相比倍数比其他方向都

低, 这是因为测试现场附近有一条南北走向的城市道路主干道, 严重影响南北向的噪声水平。垂直向倍数比其他方向高, 说明井下垂直向的噪声降低效果相对较好。

当井深进入到松散覆盖层时(42 m 以下), 井下噪声降低不多, 10 倍以下; 当进入到强花岗岩时(43~46 m), 井下噪声有较大的降低变化, 倍数为几十倍; 当进入中微风化花岗岩(48 m 以上),

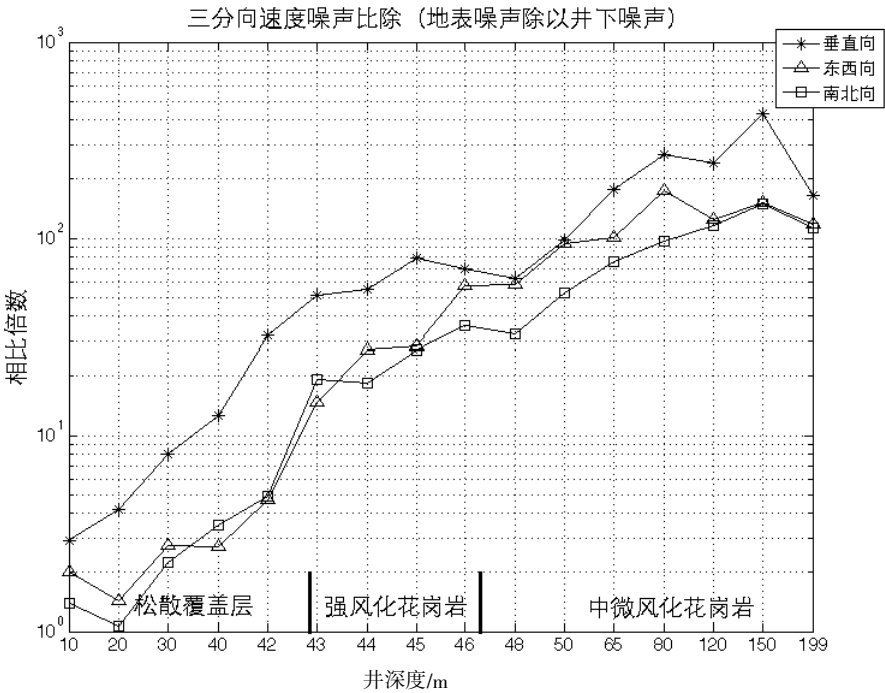


图 6 井下与地面速度 RMS 值计算结果对比

Fig.6 Computing result comparison of the speed RMS value between underground and ground surface

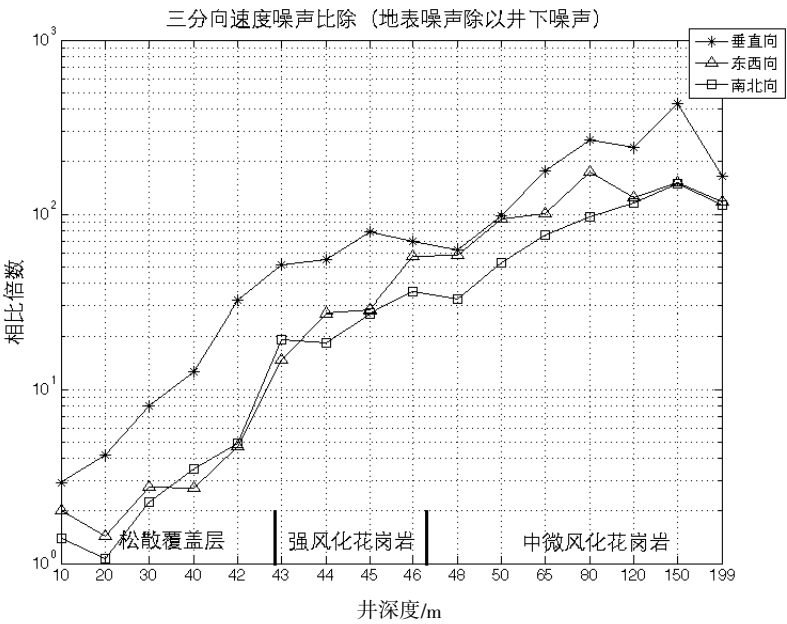


图 7 井下与地面噪声相比倍数

Fig.7 The noise compared multiple between underground and ground surface

噪声降低效果比较好, 倍数基本保持在 50 以上; 井深 120 m 以上, 倍数保持 100 以上, 得到很好的噪声水平。

综上所述, 考虑到钻井深度和噪声水平, 当进入到中微风化花岗岩 10 m 内, 即井深 50 m 左右, 为本试验比较好的效益平衡点, 井深 50 m 处可以达到 II 类, 噪声降低 50~100 倍, 噪声水平比较低。

### 3 结论

(1) 环境地噪声降低效果, 从覆盖层进入到基岩有很大变化, 从强风化层进入到中微风化层也有较大变化。因此, 在粤东地区典型地质结构条件下, 井下地震台站建设必须至少钻进入到花岗岩的中微风化层。据野外考察和地质资料, 粤东地区覆盖土层平均 40 m 左右, 所以一般需要钻井 40~50 m 才能接触到花岗岩。

(2) 井深 150~48 m 处(即刚进入中微风化层)有明显变化, 但不是很大。因此, 从钻井建设成本和观测信噪比之间的效益考虑, 较佳的平衡点应该是至少需要进入完整中微风化层 10 m。

(3) 进入到完整中微风化层 10 m, 噪声可以降低到 50~100 倍。因此, 勘选时候, 地面噪声 1~20 Hz 速度 RMS 值要求小于  $5.00 \times 10^{-6}$  (m/s), 根据上述总结, 井下噪声 1~20 Hz 速度 RMS 值将小于  $1.00 \times 10^{-7}$  (m/s), 可达到地震台站观测环境技术要求的国家标准 II 类<sup>[1]</sup>。

(4) 地面活动干扰对井下水平向影响较大, 对井下垂直向影响相对较小。因此, 勘选的时候, 应该避开地面大干扰源, 即井下地震台站周边 1 公里不能有大型工厂、矿井、采石场、高速路、铁路等。

### 参考文献:

- [1] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19531.1-2004 地震台站观测环境技术要求第 1 部分: 测震[S]. 北京: 地震出版社, 2010.
- [2] 谢剑波. 地震记录的时间域反褶积、仿真及在地震计方位角相对测量中的应用[J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 167-178.
- [3] Peterson. J. Observation and Modelling of background Seismic Noise [J]. Open File Report, U. S.G. S, 1993: 93-322.
- [4] Peter Bormann. Seismic signals and noise, new manual of seismological observatory practice[M]. GeoForschungsZentrum, 2002: 1-10.
- [5] 董霖. MATLAB 使用详解: 基础、开发及工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.