

水下节点地震仪在陆地主动源探测中的应用

孙点峰, 王亚红, 秦满忠, 邹锐, 王文琦, 王志栋

Research on the application of underwater node seismograph in land active source detection

Sun Dianfeng, Wang Yahong, Qin Manzhong, Zou Rui, Wan Wenqi, and Wang Zhidong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzcxjz.2023-015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

背景噪声提取体波方法研究进展

Research progress of the extraction body waves from ambient noise

地震科学进展. 2021(10): 433-451

地震流动观测实用技术研究

Research on practical technology of transportable seismic observation

地震科学进展. 2020(9): 8-15

利用背景噪声研究新疆呼图壁储气库周边浅层介质结构及其变化

Shallow structure and temporal variation monitoring around Hutubi underground gas storage in Xinjiang based on seismic ambient noise

地震科学进展. 2018(1): 45-46

地震应急通讯技术在台湾海峡西部地壳深部结构探测中的应用

Application of earthquake emergency communication technology in detection of deep crustal structure in the west of Taiwan Strait

地震科学进展. 2018(2): 26-31

主动气枪震源波形数据的整理和归档模式研究

Research on collation and archive mode of active airgun source about waveform data

地震科学进展. 2018(8): 85-85

鄂尔多斯活动地块边界带地震动力学模型与强震危险性研究项目及进展

Project plan and research progress on geodynamic models of earthquakes and strong seismic hazards in boundary zone of the Ordos active block

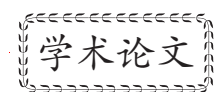
地震科学进展. 2020(4): 1-21



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙点峰, 王亚红, 秦满忠, 等. 水下节点地震仪在陆地主动源探测中的应用 [J]. 地震科学进展, 2023, 53(12): 561-566. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-015

Sun D F, Wang Y H, Qin M Z, et al. Research on the application of underwater node seismograph in land active source detection[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(12): 561-566. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-015



水下节点地震仪在陆地主动源探测中的应用*

孙点峰 王亚红 秦满忠* 邹 锐 万文琦 王志栋

(甘肃省地震局, 甘肃兰州 730000)

摘要 主动源激发的精确时刻非常重要, 为了获取更加精确的激发时刻, 我们通过在刘家峡主动源调试安装水下节点地震仪观测系统, 记录激发数据。实验证明, 该水下节点地震仪观测系统能够清晰记录到气枪震源激发信号。同时对平静时观测数据进行背景噪声分析, 噪声功率谱密度低于 NHNM 噪声曲线, 各分项背景噪声值小于 -120 dB, 与岸边架设仪器背景噪声进行比较, 水下地震仪记录噪声略高于岸边陆地地震仪噪声, 这可能与水浪、风以及船舶航行等有关。对激发数据进行频谱分析, 优势频率在 2~8 Hz 范围内, 与前人研究结果一致, 可以作为刘家峡主动源激发信号记录的参考台之一。水下节点地震仪在陆地主动源探测中的应用, 将对提高气枪主动源观测精度以及气枪主动源地震监测系统建设和数据处理有一定的价值。

关键词 气枪主动源; 水下地震仪; 背景噪声; 频谱分析

中图分类号: P315.62 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2023)12-0561-06

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2023-015

Research on the application of underwater node seismograph in land active source detection

Sun Dianfeng, Wang Yahong, Qin Manzhong, Zou Rui, Wan Wenqi, Wang Zhidong
(Gansu Earthquake Agency, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract The precise timing of the active source excitation is very important. In order to obtain more accurate excitation timing, we debugged and installed the underwater node seismometer observation system in the Liujiaxia active source, and recorded the excitation data. Experiments show that the underwater node seismometer observation system can clearly record the excitation signal of the air gun source. At the same time, the ambient noise analysis was carried out for the observation data in calm. The noise power spectral density was lower than the NHNM noise curve, and the ambient noise value of each item was less than -120 dB. Compared with the ambient noise of the instruments erected on the shore, the noise recorded by the underwater seismometer was slightly higher than the noise of the onshore seismometer, which may be related to water waves, wind and ship navigation. Spectrum analysis of excitation data shows that the

* 收稿日期: 2023-02-24; 采用日期: 2023-06-14。

基金项目: 甘肃省科技重大专项(21ZD4FA011)资助。

第一作者: 孙点峰(1992-), 男, 工程师, 主要从事气枪主动源重复探测及数据应用研究。E-mail: 1044869778@qq.com。

* 通信作者: 秦满忠(1981-), 男, 副研究员, 主要从事地球内部结构研究。E-mail: qinmzh@163.com。



dominant frequency is within the range of 2~8 Hz, which is consistent with previous research results and can be used as one of the reference stations for recording active source excitation signal in Liujiaxia. The application of underwater node seismometer in land active source detection will be of certain value for improving the observation accuracy of air-gun active source and the construction of air-gun active source seismic monitoring system and data processing.

Keywords air-gun active source; underwater seismograph; ambient noise; spectrum analysis

0 引言

利用主动源重复探测技术,在强震多发的研究区域开展地震前后结构变化的实证性研究^[1],有望成为地震科技创新的重要突破点。利用高性能人工震源主动探测地壳介质物性变化已成为探索地震预报新途径的一个重要发展方向。

利用主动源观测地下介质波速变化^[2],就是利用主动源激发的重复性,在正确获取主动源激发的精确时刻后,对主动源观测台站记录的波形进行截取,然后对截取的波形进行滤波、去势等处理,利用相关方法得到一定时间内的波速变化^[3]。因此,正确获取主动源激发的精确时刻是非常重要的。如何准确记录主动源激发时刻是亟待解决的问题,为此借鉴海上人工地震(主动源)勘探经验^[4],在刘家峡主动源试验场开展了水下节点地震仪观测系统的布设与观测。

本文结合刘家峡主动源水下节点地震仪的安装应用,着重论述了水下节点地震仪在刘家峡主动源实验场的安装调试、数据收集和初步分析。

1 刘家峡主动源简介

刘家峡主动源位于永靖县岷源镇,距永靖县城 15 km。监测区域位于鄂尔多斯、青藏块体和阿拉善块体等大陆活动块体交汇区域(图 1)。在该区域内曾发生过 1927 年古浪 8.0 级地震、1920 年海原 8.5 级地震、1654 年天水南 8.0 级地震和 1879 年武都南 8.0 级地震等多次历史强震。震源激发点年平均水深为 29 m 左右,水面宽约 5 km,是开展主动源重复探测实验的理想场地。激发系统主要包括水上激发平台、水上工作平台(图 2)、供电系统、供气系统和辅助用房等^[5]。2020 年 10 月成功实现首次实验激发,至今已连续运行两年多,开展激发试验 120 余次,有效激发 10000 余枪,积累了大量观测数据。

对距离激发点约 600 m 的岸边架设的陆上参考台记录的一次激发数据进行频谱分析(图 3),结果表明刘家峡主动源激发信号优势频率在 3~8 Hz,这一结果与前人计算结果一致。以首次激发为参考,其他激发信号与首次激发信号做相关性分析(图 4),可以

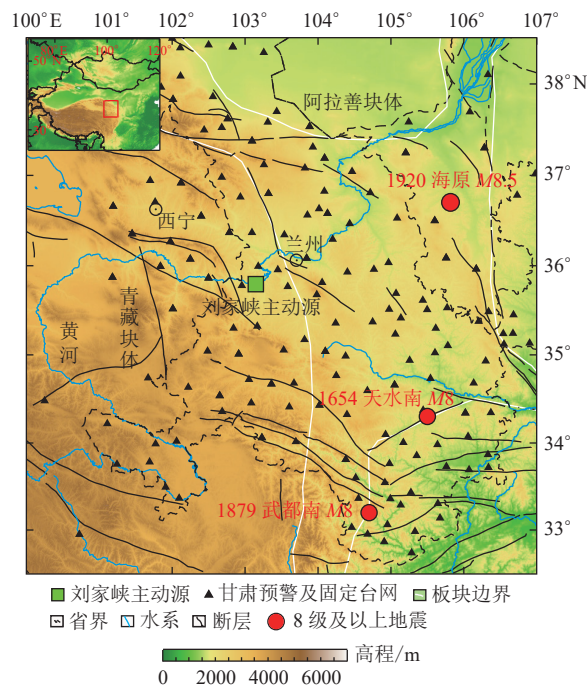


图 1 刘家峡主动源位置图

Fig. 1 Location of active source in Liujiaxia



图 2 水上激发平台、水上工作平台图

Fig. 2 Diagram of water excitation platform and water working platform

看出刘家峡气枪震源一致性较高。

2 仪器概况及安装

2.1 水下节点地震仪概况

水下节点地震仪观测系统由水下节点地震仪、线缆、数据采集器、GNSS 授时器、路由器、智能电源等组成。

本文所使用的 TDO-74 海底节点地震仪是由珠

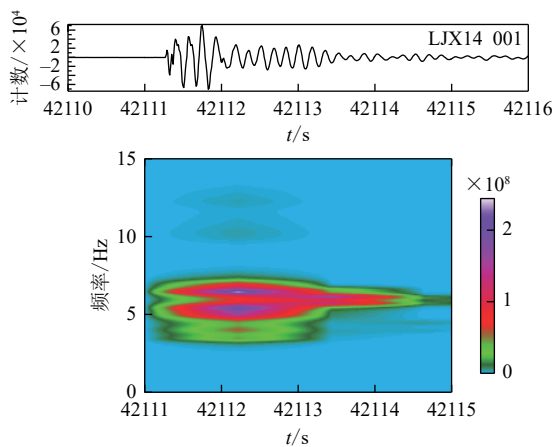


图 3 岸边参考台观测数据频谱结果

Fig. 3 Spectrum results of observational data from shore reference stations

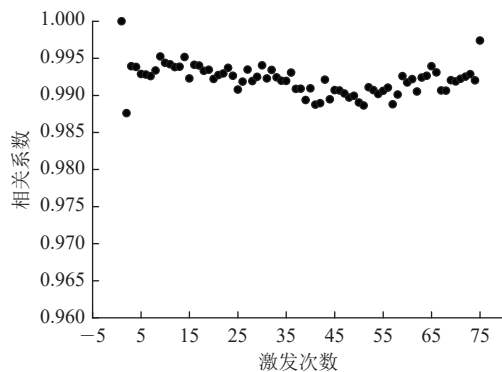


图 4 气枪震源激发信号相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient of air-gun source excitation signal

海市泰德企业有限公司自主研发的新一代三分向地震仪^[6]。系统采用了高性能、低功耗的 RISC 处理器/DSP 器件、高可靠性的实时操作系统(RTOS)、24 位 ADC 器件。该数据采集在符合中国数字地震观测网络(区域测震设备)要求的基础上,具有以下特点:①采用国际上最新推出的 24 位 ADC 器件,相对于上一代采集器,具有动态范围更大,谐波总失真(THD)更小等特点,从而为系统的高性能提供了保障;②采用高集成度、低功耗设计模式,具有大容量电子硬盘(TF 卡)实现数据存储、具备 USB 存储高速下载接口和 USB 实时数据接收接口,通讯、配置、数据读取灵活方便;③内置 18650 锂电池,容量高达 450 Wh,续航能力约 40 天,也可通过 220VAC 市电电源适配器供电和充电、内置完善充电电路,最大充电功率达 25 W。图 5 左侧为水下地震计,右侧为数据采集器及智能电源。



图 5 水下节点地震仪、智能电源与数据采集器

Fig. 5 Underwater node seismograph, intelligent power supply and data collector

2.2 仪器安装调试

为了记录信号清晰准确,水下节点地震仪的安装位置应在距离激发震源较近的位置,且水下节点地震仪安装倾角在 10°范围内。通过对激发点周边静态水深进行测量(表 1),完成仪器投放位置水底坡度计算。通过测量安装范围内水深(测量点的分布如图 6),得出浮台 AM 一侧水底坡度约为 4.564°,浮台至趸船 OU 连线水底坡度约为 2°,均在 10°范围内。

表 1 水位测量结果

Table 1 Measurement results of water level

序号	水深/m	序号	水深/m	序号	水深/m	序号	水深
A	20.061	G	21.345	L	20.083	Q	20.197
B	20.287	H	20.976	M	19.511	R	20.180
C	20.673	I	21.013	N	19.221	S	19.468
D	20.944	J	20.402	O	19.395	T	17.385
E	21.019	K	20.091	P	19.789	U	15.649
F	21.081						

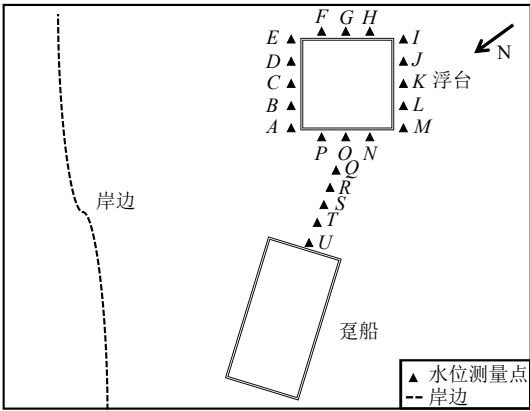


图 6 水位测量点位示意图

Fig. 6 Schematic diagram of water level measurement points

本文选择在 O 点和 U 点分别进行水下节点地震仪测试。由于激发点水位年变化幅度在 18 m 左右,为避免水位升降、激发产生的漂移、水浪等对仪器的影响,充分预留线缆和固定钢丝绳。测试正常后,再次检查确保 TDO-74C 各接头和承重扣连接可靠,并

锁紧后开始投放,在投放点水面平台或船只上,通过电缆(具有承重性能)缓慢把地震仪下放至水底。仪器投放至水底后,通电接收数据,检查投放是否发生翻侧或倒置。如果发生翻侧或倒置,需通过提拉线缆调整,直至投放正常后,保证线缆处于较松弛的状态下固定好线缆。线缆连接之后进行启动参数设置,启动设备。

由于 O 点距离激发点较近,数据可以清晰记录气枪震源激发初动时刻,但由于地震仪投放位置在震源正下方,距离气枪震源较近,记录出现限幅。 U 点距离激发点约 150 m,数据可以准确记录到激发初动时刻,且激发波形记录清晰(图 7)。

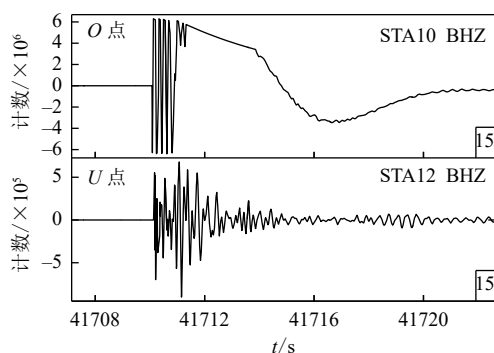


图 7 O 点、 U 点垂直向数据对比

Fig. 7 Comparison of vertical data at point O and point U

3 数据分析

3.1 波形记录分析

选择 2022 年 12 月 5 日的一次激发记录(图 8),水下节点地震仪三向数据清楚记录到气枪震源的激发。以水下节点地震仪记录首次激发为参考,其他激发信号与首次激发信号做相关性分析(图 9),相关

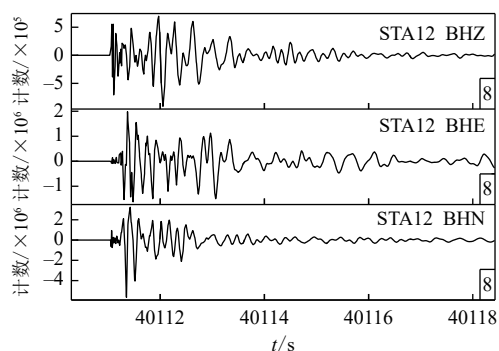


图 8 水下节点地震仪记录的激发数据

Fig. 8 Excitation data recorded by underwater node seismograph

系数均在 0.99 以上,部分相关系数在 0.995 以上,与陆地地震仪计算结果进行对比,一致性更高。

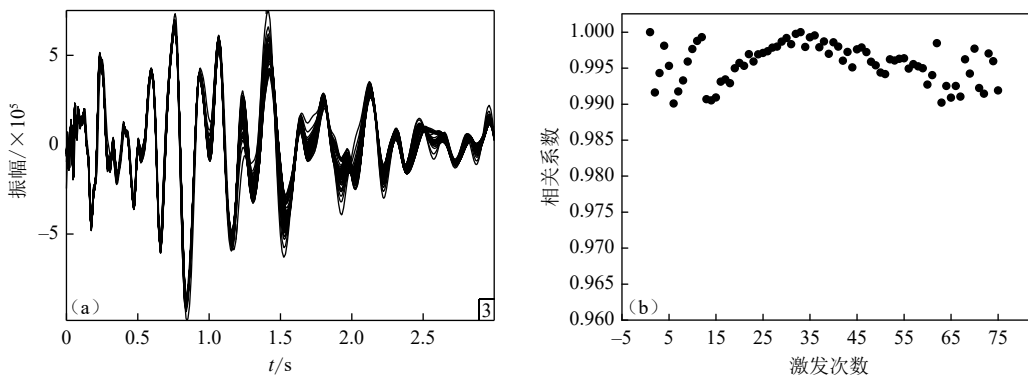
对比水下节点地震仪与陆地地震仪记录波形(图 10)发现以下结果:①水下节点地震仪记录的气枪震源激发时刻早于陆地地震仪记录的激发时刻;②陆地地震仪记录数据平滑程度较水下节点地震仪高;③水下节点地震仪记录数据振幅较陆地地震仪大。这一结果与两台地震仪距离激发点的距离有关。

3.2 数据分析

对水下节点地震仪在平静时和激发时的数据分别进行背景噪声分析和频谱分析。

环境噪声是影响测震台站观测数据质量的主要因素之一。台基噪声水平分析已成为评估地震台站运行质量的重要技术指标。功率谱密度(PSD)是定量评价地震台站环境噪声水平的常规参数。国内外科研人员在背景噪声方面均有研究^[7-12],1993 年,USGS 发布了 Peterson 模型^[13],该模型被广泛应用于地震台站环境噪声水平评价。

对水下节点地震仪平静时记录的观测数据进行



(a)75 次激发叠加结果;(b)气枪震源激发信号相关系数

(a)75 excitation stacking results;(b)Correlation coefficient of air-gun source excitation signal

图 9 一致性分析

Fig. 9 Consistent analysis

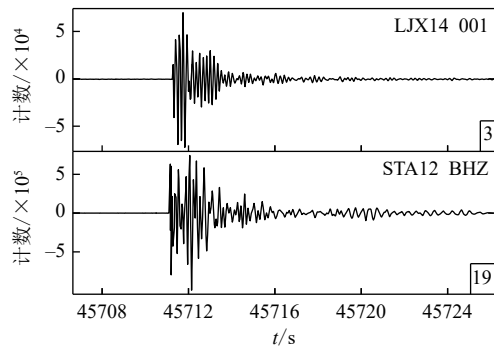


图 10 水下节点地震仪和岸边测震仪器记录数据对比

Fig. 10 Comparison of data recorded by underwater node seismograph and shoreside seismograph

背景噪声分析后发现, 噪声低于 NHNM 曲线, 各分

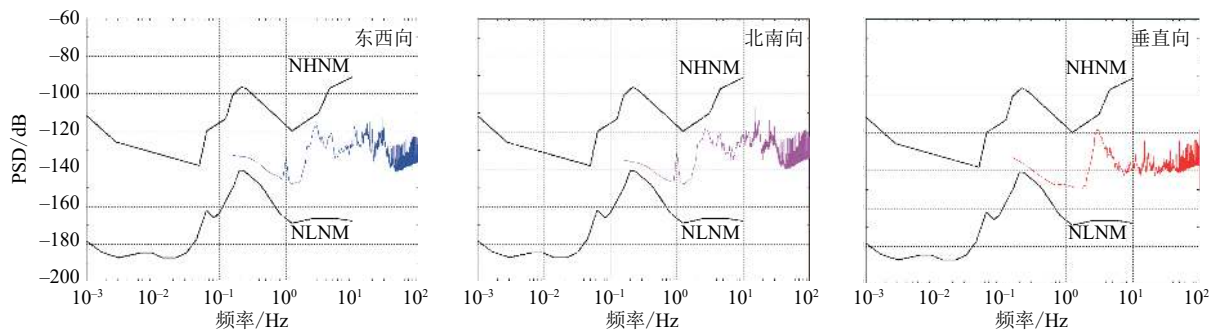


图 11 背景噪声分析结果

Fig. 11 Ambient noise analysis results

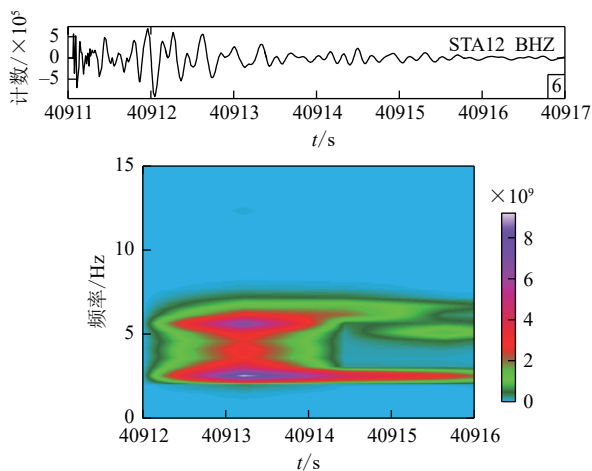


图 12 水下地震仪激发信号频谱分析结果图

Fig. 12 Spectrum analysis results of excitation signal of underwater node seismograph

4 讨论与结论

水下节点地震仪的安装使用突破了陆地参考台记录的局限。通过对比发现: ①与陆地地震仪计算结果进行对比, 水下节点地震仪记录的激发信号首枪

项背景噪声值小于-120 dB, 与岸边架设仪器背景噪声进行比较, 水下地震仪记录噪声略高于岸边陆地地震仪的噪声, 这可能与水浪、风以及船舶航行等有关(图 11)。

许多学者^[14-15]对气枪主动源激发信号进行了分析, 本文选取 2022 年 12 月 5 日的一次激发垂直向信号进行频谱分析(图 12), 发现水下地震仪记录到的气枪震源激发信号优势频率范围为 2~8 Hz, 这与前人结果基本一致。水下地震仪计算得出的优势频率范围较岸边地震仪记录信号的频谱分析结果略大, 这一结果说明气枪震源从激发到岸边地震仪记录存在一定程度的衰减, 证明水下地震仪更能够精确的反映气枪震源激发的过程。

和其他信号相关系数更高, 震源一致性更高; ②对比水下节点地震仪与陆上地震仪记录波形, 发现水下节点地震仪记录的气枪震源激发时刻早于陆上地震仪记录的激发时刻, 陆上地震仪记录数据平滑程度较水下节点地震仪高, 水下节点地震仪记录数据振幅较陆上地震仪大, 这一结果与两台地震仪距离激发点的距离有关; ③对水下节点地震仪平静时记录的观测数据进行背景噪声分析, 噪声低于 NHNM 曲线, 各项背景噪声值小于-120 dB, 与岸边架设仪器背景噪声进行比较, 水下地震仪记录噪声略高于岸边陆地地震仪噪声, 这可能与水浪、风以及船舶航行等有关; ④水下地震仪计算得出的优势频率范围较岸边地震仪记录信号的频谱分析结果略大, 这一结果说明气枪震源从激发到岸边地震仪记录存在一定程度的衰减, 证明水下地震仪能够更精确的反映气枪震源激发的过程。

通过水下节点地震仪的安装和数据记录分析, 发现水下节点地震仪因为架设位置的特殊性, 记录气枪震源激发过程更加全面, 记录信号较岸边参考

台站记录数据衰减较小,记录的激发时刻早于岸边地震仪记录激发时刻,记录更加精准。同时,由于架设点 O 点出现数据超限,在今后工作中仍然要进一步调整仪器位置,使其在记录完整激发信号的同时

更加接近震源。

水下节点地震仪的安装为今后开展各项研究工作奠定了硬件基础,也对气枪主动源地震监测系统建设和数据处理有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 陈颢,王宝善,姚华建.大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用[J].中国科学:地球科学,2017,47(10):1153-1165
Chen Y, Wang B S, Yao H J. Seismic airgun exploration of continental crust structures[J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 60(10): 1739-1751
- [2] Silver P G, Daley T M, Niu F, et al. Active source monitoring of cross-well seismic travel time for stress-induced changes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(1B): 281-293
- [3] 刘旭宙.利用主动源研究祁连山地区地震波走时变化[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2018
Liu X Z. Study of seismic wave travel time variation in Qilian Mountains area using active source[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 2018
- [4] 刘训矩,郑彦鹏,刘洋廷,等.主动源OBS探测技术及应用进展[J].地球物理学进展,2019,34(4):1644-1654
Liu X J, Zheng Y P, Liu Y T, et al. Active OBS exploration and its application progress[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1644-1654
- [5] 郭晓,张元生,刘旭宙,等.甘肃主动源建设发展与展望[J].地震工程学报,2020,42(5):1146-1150
Guo X, Zhang Y S, Liu X Z, et al. Development and prospects of active-source construction in Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1146-1150
- [6] 陈洁,赵圣麟,关作金,等.节点地震仪电路设计中减小对授时模块干扰的方法[J].地震科学进展,2023,53(8):337-342
Chen J, Zhao S L, Guan Z J, et al. Method to improve the anti-interference ability of seismograph in time service[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(8): 337-342
- [7] 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
Ge H K, Chen H C, Ouyang B, et al. Transportable seismometer response to seismic noise in vault[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 857-868
- [8] 吴建平,欧阳飏,王未来,等.华北地区地震环境噪声特征研究[J].地震学报,2012,34(6):818-829
Wu J P, Ouyang B, Wang W L, et al. Ambient noise level of North China from temporary seismic array[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(6): 818-829
- [9] 刘旭宙,沈旭章,张元生,等.基于噪声概率密度函数的地震计观测性能对比[J].地震学报,2018,40(4):461-470
Liu X Z, Shen X Z, Zhang Y S, et al. Comparison on different seismometers performance based on probability density functions[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(4): 461-470
- [10] 颜文华,张元生,秦满忠,等.甘东南地区宽频带地震台阵背景噪声特征分析[J].地震学报,2016,38(5):719-727
Yan W H, Zhang Y S, Qin M Z, et al. Characteristics of ambient seismic noise of broadband seismic array in the southeastern Gansu region[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(5): 719-727
- [11] 杨千里,郝春月,田鑫.新疆和田台阵PSD与PDF分析[J].地球物理学报,2019,62(7):2591-2606
Yang Q L, Hao C Y, Tian X. Ambient noise analysis by the technology of PSD and PDF in Hotan Seismic Array[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(7): 2591-2606
- [12] Mcnamara D E, Buland R P. Ambient noise levels in the continental United States[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(4): 1517-1527
- [13] Peterson J R. Observations and modeling of seismic background noise[R]. Albuquerque: Geological Survey Open File Report, 1993: 93-322
- [14] Wei C X, Qin M Z, Zhang Y S, et al. Airgun excitation experiments at different placement depths in the Qilian Mountain of Gansu Province, China[J]. Seismological Research Letters, 2012, 89(3): 974-982
- [15] 吕敏,张元生,刘旭宙,等.甘肃祁连山主动源不同枪组激发效果对比[J].地震工程学报,2020,42(5):1132-1140
Lü M, Zhang Y S, Liu X Z, et al. Comparison of the excitation effects of air guns with various combinations in the Qilian Mountain in Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1132-1140