www.cagsbulletin.com www.地球学报.com

青藏高原东北缘宽频带地震台阵远震记录 波形及背景噪声分析

刘旭宙^{1,2)}, 沈旭章^{1,2)}, 李秋生^{3)*}, 张元生^{1,2)}, 秦满忠^{1,2)}, 叶 卓³⁾

1)中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,甘肃兰州 730000; 2)中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000; 3)中国地质科学院地质研究所,北京 100037

摘 要:本文利用远震极性分析和概率密度函数统计法对国家深部探测专项 SinoProbe "青藏高原东北缘宽 频带地震台阵"40 个台站的远震记录波形和背景噪声进行了评估和影响因素分析。结果表明:(1)该台阵对 远震有较好的记录和识别能力,且单台定位结果较好;(2)被检测台站背景噪声达到或接近同类地区固定台 站的噪声水平标准,观测数据品质较高;(3)根据实际观测资料计算的各台站概率密度函数 PDF 分析结果建 议,在青藏高原东北缘黄土层较厚地区开展宽频带流动观测,应首选基岩台基以保证三分量观测效果,在不 得已选择非基岩台基情况下,应深埋地震计以达到最大程度降噪。

关键词: 青藏高原东北缘; 宽频带地震观测; 远震极性分析; 背景噪声分析

中图分类号: P315.2; P631.443 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.06.12

An Analysis of the Tele-seismic Waveforms and Ambient Noise of Temporary Broadband Seismic Array on the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau

LIU Xu-zhou^{1, 2)}, SHEN Xu-zhang^{1, 2)}, LI Qiu-sheng^{3)*}, ZHANG Yuan-sheng^{1, 2)}, QIN Man-zhong^{1, 2)}, YE Zhuo³⁾

Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Lanzhou, Gansu 730000;
 Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou, Gansu 730000;
 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: According to the analysis of tele-seismic waveforms and Probability Density Function (PDF), the ambient noise of the broadband seismic array with 40 stations on the northeastern margin of the Tibetan Plateau was estimated. The results from polarity analysis were also used to test the recording capability of the tele-seismic event. Some conclusions have been reached: (1) the array has good capability for tele-seismic event; (2) the level of background noise of the seismic array is close to that of the permanent stations, the quality of records is high; (3) the results from PDF analysis imply that the best choice of the base for seismometer is the bed rock. The seismometer should be buried beneath the ground if there is no bed rock.

Key words: northeastern margin of the Tibetan Plateau; broadband seismic observation; polarity analysis of tele-seismic waveforms; ambient noise analysis

青藏高原东北缘是三大构造域(青藏块体、阿拉 善块体、鄂尔多斯块体)交汇地区,是一个典型的似 三联点构造(田勤俭等,1998)。它是青藏高原向大陆 内部扩展的前缘部位,处在地球上板块碰撞最强烈的区域边缘(Kind et al., 2010)。在高原整体不断隆升和向北东侧向挤压的背景下,该区域从晚新生代到

本文由中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(编号: 2012IESLZ03; 2012IESLZ09)和国家专项"深部探测技术与实验研究"课题"宽频地震观测与壳幔速度研究"(编号: SinoProbe-02-03)联合资助。

收稿日期: 2014-01-14; 改回日期: 2014-07-26。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 刘旭宙, 男, 1976 年生。高级工程师。主要从事地震学研究。通讯地址: 730000, 兰州市东岗西路 450 号。E-mail: liuxz@gssb.gov.cn。

^{*}通讯作者: 李秋生, 男, 1958 年生。研究员。长期从事大陆岩石圈结构的地震学探测与研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: liqiusheng@cags.ac.cn。

现今构造变形十分强烈(高锐等,2011)。作为青藏高 原最新的和正在形成的重要组成部分,青藏高原东 北缘近年来已成为青藏高原研究的新热点区域之 一。

宽频带地震流动观测是目前地震学中一个极为 活跃和重要的研究方法和手段,由于其具有分辨率 高,探测深度大,布设灵活的优点,适合于地震的 精确定位、特定研究区地球结构分析及大震动态跟 踪等综合研究,已成为开展高分辨率地震观测的重 要手段(高原,1996;吴庆举等,1998;李秋生等, 2001;赵文津等,2008;高锐等,2009)。

为了揭示青藏高原东北缘深部结构, 探讨青藏 高原向大陆内部扩展前缘的岩石圈变形机制和地球 动力学背景, 国家专项"深部探测技术与实验研究" (SinoProbe)在青藏高原东北缘针对黄土塬自然地理 条件进行了宽频带流动观测实验, 于 2011 年 11 月 完成 40 个台站的布设并维护运行到 2012 年 11 月。

台站噪声是影响地震观测质量的主要因素之一。在流动观测方法出现之前的年代,固定台站分 布稀疏,通常可以通过严格选址,远离噪声源,或 在山洞中建台等措施达到降低背景噪声,保证观测 质量的目的。宽频地震流动观测是 20 世纪 90 年代 才兴起的地震观测新技术。流动观测通常是针对特 殊对象(如火山喷发),或应急性观测(如灾难性地震 后余震观测)。由于台站密度大,选址范围受限,台 基建设较仓促,固定台站时代采用的规避噪声源的 措施已经变得不现实,噪声与生俱来地存在于流动 观测数据中,因此对流动台阵观测采集到的数据进 行质量评估和背景噪声影响因素分析就成为宽频地 震流动观测实验研究必不可少的重要内容之一。

随着全球台网密度的提高,目前全球中强地震的定位结果精度都较高,利用流动台阵单台远震记录,通过单台极性分析方法确定地震位置,和全球定位结果对比,可以对仪器的地震事件记录能力及 仪器的记录是否正确进行初步分析。其次,概率密度函数(Probability Density Function, PDF)统计法是 在传统的噪声功率谱密度(PSD)分析方法的基础上, 更全时段地分析地震观测台站噪声水平的方法,由 Mcnamara 和 Raymonnd 首次提出(McNamara et al., 2004),近年来已被越来越多的国际同行应用。在美 国该方法已被应用于 IRIS、ANSS 的数据管理和流动台阵观测数据质量控制。国内,葛洪魁等(2013)、 吴建平等(2012)用 PDF 方法分析了华北地区的背景 噪声、台基响应及噪声特征。

一般情况下,由于可选择台址的局限性,各种 环境噪声对流动台站的影响甚于同地区的固定台站, 截止目前,尚未有工作对青藏高原东北缘宽频地震 流动观测台阵的噪声背景进行系统定量分析。本文 采用一年的观测资料,首先利用远震记录的单台极 性分析结果,对仪器记录地震事件的正确性进行了 检验。之后,计算了各台站的功率谱概率密度函数 (PDF)并进行了影响因素分析,其结果可供今后在 该地区进行宽频带地震流动观测时参考。同时作为 一个自然地理和人文条件特殊地区,也可为建立中 国大陆噪声特征模型积累科学数据。

1 台阵地质地理背景简介

2011年11月至2012年11月,中国地质科学院 地质研究所和中国地震局兰州地震研究所合作,在 青藏高原东北缘架设了40套宽频地震仪,测线近南 北向延伸,平均台站间距15km,总长度近600km。 测线最南端台站位于四川省红原县瓦切乡,向北依 次穿过松潘甘孜地块、西秦岭、祁连山和河西走廊, 终止于阿拉善地块南缘,最北端台站位于甘肃省景 泰县红水镇。测线跨越东昆仑断裂、西秦岭断裂、 海原断裂等多条现代活动断裂(图1)。

青藏高原东北缘自然条件艰苦,交通不便,经 济欠发达。在该区开展宽频带地震观测实验,工作 条件十分复杂。南部为高海拔、少数民族聚集地区, 北部为黄土高原、沙漠地区。青藏高原东北缘宽频 地震观测台阵是一个线性台阵,整体呈南北走向, 沿线自然地理条件变化明显,依地貌和基岩出露情 况,可以大致划分为南部若尔盖高原和西秦岭山地, 北部临夏一兰州—景泰黄土塬地区。南部的特点是 多有基岩出露,以牧区为主,藏、回、汉多民族聚居,



Fig. 1 Distribution of the observation station array

背景噪声源以非工业噪声为主;北部的特点是少有 基岩出露,地表被巨厚黄土覆盖,临夏、兰州、景泰 等大中城市有较强的工业噪声,人文噪声也较南部 强许多。

总体来说, 青藏高原东北缘地震观测的背景噪 声随着地理、地质条件的变化而差异显著。而观测 台阵所配备仪器的良好观测性能则保证了在宽频的 范围内可以真实地反应出地表的噪声信息, 并进而 对背景噪声进行细致的分析。台阵的各台站配备了 REFTEK-130B 型数据采集器(简称数采)和 Guralp CMG-3T(或 3ESP)型地震计(表 1), 各台站的采样率 统一使用 50 次/s。

2 波形记录及极性分析

2.1 原始记录波形

为了对本项目所布设的每台仪器的记录效果和 准确性进行分析,我们选择观测期间记录的两次大 震级的远震(表 2),将这两个地震事件的部分台站的 垂直分量原始记录波形按震中距进行排列(图 2),并 将根据 IASP91 模型计算主要震相的理论到时。

对于1[#]地震,虽然震中距超过了120°,仍然可 以清晰的看到 Pdiff震相,这应该和1[#]地震的震级较 大,并且发震时间在北京时间的午夜,各台站的背 景噪声在较低的水平有一定关系。对于 2[#]地震,

表 1 台阵观测仪器的参数 Table 1 Parameters of the instrument

数采:	REFTEK-130B	地震计: Guralp CMG-3T			
动态范围	>135 dB@100 sps	温度灵敏度	<0.8 V/10℃ (标准响应)		
GPS 精度	$\pm 10 \ \mu s$	频率响应	60 s-50 Hz		
AD 分辨率	24 位	工作温度	-20~75℃(最低可到-55℃)		
		线性度	>107 dB(水平) >111 dB(垂直)		



图 2 关于 1[#](A)、2[#](B)两次地震的台阵垂直分量的原始波形记录 Fig. 2 Primary waveforms of component UD of earthquake 1[#](A) and 2[#](B)

表	2	两次地震的目录
Table 2	Ca	talog of two earthquake

					0		-					
序号	发震地点	年	月	日	时	分	秒	纬度/°	经度/°	震级 Ms	深度/km	
1#	墨西哥南部	2012	03	20	18	02	47.44	16.493	-98.231	7.4	20	
$2^{\#}$	印尼苏门答腊	2012	04	11	08	38	36.72	2.345	93.073	8.6	20	
												1

注: 来自 USGS 网站 http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/的地震目录搜索,表中时、分、秒为世界时(UTC)。

由于震级达到了 8.6, 各主要震相都非常清晰。这表明台阵的记录质量总体情况良好。

2.2 单台极性测试

为了进一步分析项目所布设的每台仪器记录的 准确性,我们利用单台记录的远震波形资料进行单 台极性分析,以此来检验仪器三分量的摆放位置是 否正确。在两次地震的波形记录中,有 30 个台站有 完整的三分向波形记录可以进行极性分析。

分析时选取震相(1[#]地震为 PP 震相, 2[#]地震为 P 震相)附近 3 s 左右的波形。图 3 为 sta102 台站的极 性分析示意图,可以看出两次地震极性分析中结果 和理论值的差别很小,说明该台站的极性正确。并 且实际值的能量都比较集中,说明台阵对于这两次 地震的对应分析震相有很好的识别能力。对于各台 站的分析结果(表 3),总体来说两次地震极性分析的 实际值和理论值的差别较小;个别台站有一定的差 别是因为分析时并没有做滤波处理,从而受到了局 部干扰的影响,但是其方位和慢度仍然基本正确。

通过远震的波形记录查看以及资料初步分析, 可以看出青藏高原东北缘野外宽频带地震台阵有较 好的观测精度和地震识别能力,单台定位的结果与 全球地震目录相符,各台站仪器的三分向极性正确, 能客观记录地震事件。

3 台阵 PDF 分析

3.1 典型特征台站介绍

青藏高原东北缘黄土塬台阵由南至北架设在不同的地质和自然地理环境中,噪声情况差异明显。 在计算分析台阵各台站的噪声背景后,我们选取了 有代表性的 6 个台站针对不同环境的噪声进行了详 细的对比研究。6 个台站的周围都没有飞机场、大 河流、工厂、矿场、变电站、学校、水库、铁路、 高大建筑物和高大树木等干扰因素,因此可以认为 背景噪声主要来源于自然噪声和人为噪声(包括公 路交通引起的噪声)。其差别主要是观测台站所在的 地质环境,以及台站的台基、保温措施和人为噪声 影响(主要为公路车辆和人畜走动等影响)情况。6 个 台站的具体描述如表 4。

3.2 数据处理方法

计算噪声功率谱密度(PSD)是分析背景噪声的 传统方法,计算时往往选取外界噪声较小、没有较 大地震发生的时段来进行 PSD 计算。这种方法固然 可以反映有代表性的台站噪声水平,但是却不能全 面反映出台站的噪声水平,而计算时段本身也值得 讨论。McNamara 和 Raymonnd 提出了用概率密度函 数(PDF)统计法分析地震观测台站噪声水平的方



Mark "P", "PP" in the figure is the phase name

		1#1	山宇	1		2#1	山雷	
		」 上	也辰	1 H		۲ <u>۲</u>	21辰	
	极性分	竹 结果	坦泊		极性分	析结果	埋泊	
	慢度/(s/°)	方位角/°	慢度/(s/°)	方位角/°	慢度/(s/°)	方位角/°	慢度/(s/°)	方位角/°
sta102	6.325	18.435	6.639	25.055	6.083	189.462	8.743	197.977
sta103	6.325	18.435	6.639	24.931	6.083	189.462	8.743	197.780
sta104	8.544	20.556	6.639	24.952	9.220	192.529	8.743	197.820
sta105	7.280	15.945	6.639	24.922	9.000	180.000	8.743	197.774
sta107	6.325	18.435	6.676	25.024	8.544	200.556	8.743	197.944
sta109	7.280	15.945	6.676	24.600	12.806	218.660	8.743	197.261
sta110	7.280	15.945	6.676	24.475	8.062	209.745	8.691	197.065
sta111	5.831	30.964	6.676	24.627	7.280	195.945	8.691	197.313
sta113	6.083	9.462	6.676	24.792	8.246	194.036	8.691	197.583
sta114	6.325	18.435	6.676	24.901	10.000	180.000	8.691	197.759
sta115	8.602	35.538	6.676	24.977	8.944	206.057	8.691	197.881
sta116	9.434	32.005	6.676	24.872	9.849	203.963	8.691	197.715
sta117	8.246	14.036	6.676	24.710	8.246	194.036	8.638	197.460
sta118	8.544	20.556	6.676	24.818	9.220	192.529	8.638	197.632
sta119	8.246	14.036	6.712	24.969	8.246	194.036	8.638	197.872
sta120	8.246	14.036	6.712	25.046	9.487	198.435	8.638	197.994
sta123	8.944	26.565	6.712	25.302	9.849	203.963	8.638	198.399
sta124	7.616	23.199	6.712	25.176	10.440	196.699	8.638	198.200
sta125	7.280	15.945	6.748	25.261	13.000	202.620	8.638	198.333
sta126	7.280	15.945	6.748	25.364	8.944	206.565	8.638	198.496
sta127	7.280	15.945	6.748	25.374	9.055	186.340	8.582	198.511
sta128	5.831	30.964	6.748	25.339	8.246	194.036	8.582	198.455
sta129	9.434	32.005	6.748	25.336	8.544	200.556	8.582	198.448
sta130	7.211	33.690	6.748	25.327	11.180	190.305	8.582	198.435
sta131	8.602	35.538	6.748	25.295	10.296	209.055	8.582	198.384
sta132	6.708	26.565	6.748	25.470	11.402	195.255	8.582	198.653
sta133	7.616	23.199	6.785	25.596	8.544	200.556	8.582	198.847
sta135	8.602	35.538	6.785	25.629	8.544	200.556	8.522	198.895
sta137	8.544	20.556	6.785	25.603	8.544	200.556	8.522	198.851
sta138	7.071	8.130	6.785	25.500	9.220	192.529	8.522	198.692

表 3 各台站极性分析结果 Table 3 The results of polar analysis of each station

表 4 对比分析台站的相关信息 Table 4 Information of stations for comparative analysis

台夕 地理位署	地理位署	沉和巨蒲匡	抽丰覆主	南八敗斯南/m	拾震器	
Ц 11	地建匹重	りしついろ (等)手	地化极血	南五西距南/ш	保温措施	台基
sta102	四川若尔盖	厚	粘土	100	А	а
sta115	甘肃合作	薄	出露基岩	1000	Α	а
sta117	甘肃合作	薄	碎石土	2000	Α	b
sta123	甘肃临夏	巨厚	黄土	500	Α	b
sta132	甘肃景泰	薄	碎石土	4000	Α	b
sta133	甘肃景泰	薄	碎石土	200	В	а

注:表中,A为室(洞)内、三层隔温防风(双层塑料桶、一层棉被);B为室(洞)外、双层隔温防风(双层塑料桶);a为硬实水泥地面;b为水泥墩。

法(McNamara et al., 2004),这种方法有别于传统的 PSD 计算方法,在计算中不需要排除包括地震在内 的突发事件,而是对所有记录数据进行一样的处理, 在保持数据连续性的同时,各种对背景噪声的影响 体现在概率密度函数 PDF 的概率值中。

在实际的资料处理中,本文选取各台站 2011年 11月1日至 2012年 10月 31日一整年的记录波形, 利用葛洪魁等(2013)的数据处理方法对该数据进行 处理,并最终采用速度功率谱密度与 NHNM 和 NLNM 对比。NHNM 和 NLNM 是 Peterson 在定量 分析了全球各地 75 个固定地震台站的地震背景噪 声功率谱密度后,得到的全球地震背景噪声模型 (Peterson, 1993),分别为新高噪声模型(NHNM)和新 低噪声模型(NLNM)。



图 4 sta115 台站垂直分量 PDF(根据 8294 条 PSD 结果) Fig. 4 PDF of component UD of station115 (based on 8294 PSDs) NHNM-新高噪声模型; NLNM-新低噪声模型 NHNM-new high-noise model; NLNM-new low-noise model

图 4 为台站 stal15 的垂直分量在 2011 年 11 月 1 日至 2012 年 10 月 31 日记录的波形数据处理后的 结果。由于平均值则容易受到极值的影响,中值曲 线则平滑并接近众数统计曲线(葛洪魁等, 2013)。图 4 中对各台站的 PDF 结果均计算了均值和中值。可 以看出,中值更接近实际的功率谱概率密度最大 值。

3.3 台阵噪声水平评价

国家地动噪声标准对于长期观测的固定测震台 站有一定的要求,在设备完成安装并进行系统校准 后连续观测 48 h,对 48 h的数据,抽取白天和晚上 各 4 h的噪声记录数据进行 PSD 计算,检验计算结 果是否满足台站环境地噪声分级要求,不满足时地 震记录资料降级使用(GB/T 19531.1—2004)。但是流 动台站尚未出台相应的技术标准。

本文利用了之前计算过的 PDF 中值评估台阵的 环境噪声水平,其结果更能代表环境噪声的真实水 平。6 个对比分析台站的垂直分量和东西分量的噪 声水平和参照国家地动噪声标准后的地噪声级别如 表 5。

对于甘肃东南地区安放宽频带数字地震仪的固 定台站,环境地噪声水平在各类地区应符合不大于 II 级环境地噪声水平要求。流动台站因为选台的限制,环境噪声水平自然会比固定台站差一些。不过 通过对选取的 6 个台站的噪声评价可以看出,各台 站地噪声水平大体在 I 级到III级之间,满足流动观 测的噪声水平要求。其原因在于台址选择时即注意 避免了诸多影响观测的因素,因此影响地噪声的因 素主要为公路车流、人为活动以及近震、温度、气 流等。在对上述因素进行一定有效地规避后,台站 在 1~20 Hz 范围可以保证有较好的环境地噪声水 平。其中 2 个 III 级环境噪声水平台站,其主要噪 声影响来自于非干道的车流、弱人为活动以及气 流。

3.4 PDF 对比

在宽频带地震仪的正常频带记录范围内, 仪器 噪声是远低于自然噪声的,因此噪声功率谱得到的 结果基本上反应了外界自然噪声的实际情况。大体 上,可以将噪声分为高频(1 Hz 频率以上)、低频 (1~10 s)和长周期(10~50 s)三个部分。前人的研究表 明: 高频部分的干扰主要以诸如铁路、公路、工厂 以及人类活动等为主,这种干扰随距离的衰减也是 最快的,另外气流等自然因素也会形成高频的干扰, 并对水平方向更为明显,还有就是地方震对背景噪 声的影响(McNamara et al., 2004); 低频部分的干扰 主要来自微震噪声,一般认为海洋波与海底或海岸 线的非线性相互作用引起海底压力扰动 (Longuet-Higgins, 1950; Frontera et al., 2010), 主要 成分为面波。此外中远震会影响到这一频率范围的 背景噪声;长周期部分的噪声则主要和自然因素相 关(Bonnefoy-Claudet et al., 2006), 如风、急流(瀑布 和河流)、温度变化、气压变化、地倾斜等都会导致 长周期噪声,其中地倾斜使重力耦合到水平分量中, 因此水平分量的长周期噪声会高过垂直分量 (Wielandt, 2002)。此外远震的各类波也在低频和长 周期范围内影响背景噪声。

3.4.1 台站间对比

对比6个台站的垂直分量PDF中值曲线以及加入 sta120 台站后的水平分量中值曲线(图 5),可以看出:

Table 5 Ground noise level of each station (component UD and Ew)							
	垂直分	量	东西分	量			
台站号	噪声水平(Enl _{dB})/dB	地噪声级别	噪声水平(Enl _{dB})/dB	地噪声级别			
sta102	-136.10	Ш	-141.06	Π			
sta115	-158.72	Ι	-159.14	Ι			
stal17	-155.92	Ι	-155.71	Ι			
sta123	-137.23	Ш	-138.07	Ш			
sta132	-161.17	Ι	-157.63	Ι			
sta133	-149.16	Ш	-151.69	Ι			

表 5 各台站的地噪声级别(垂直分量和东西分量)



图 5 6 个对比研究台站的 PDF 中值对比 Fig. 5 Comparison of PDF's medians of 6 stations A-垂直分量; B-东西分量 A-component UD; B-component EW

1)在高频部分,垂直分量的背景噪声和水平分量大致在同一水平。公路车流、人为活动以及沉积层的厚度是影响背景噪声的主要因素。其中,沉积层较薄的 sta133 台站虽然距离公路较近,但是却明显比厚黄土层覆盖的 sta123 有更低的背景噪声。一般来说,超过 1000 m 后(对于干道),公路的影响将大为降低。从远离公路的台站噪声对比中可以看出, 气流等其他因素对水平分量背景噪声的影响大过垂直向。

2)在低频部分,特别是在周期 2~10 s 区间,6 个 台站的垂直分量背景噪声差别很小,水平分量的差 别略大于垂直分量。每个台站两个分量的噪声水平 中,垂直向大过水平分量约 3~5 dB。在这一频率范 围背景噪声主要受到共同的噪声源-微震噪声的影 响,各台站各分量也均表现出微震噪声峰值。

3)在长周期部分,各个台站垂直分量的背景噪 声呈现出较为相同的分布,东西分量也有同样的表 现(基岩台除外)。而每个台站的垂直分量和东西分 量之间又表现出较大的差异(基岩台除外),非基岩 台水平分量的背景噪声高过垂直分量可以达到 10 dB 到 20 dB。如前述,地倾斜使重力耦合到水平 分量中是形成这一频率范围水平噪声的重要原因, 地倾斜的产生可以是地面荷载变化如重型机械、大 气压变化等多种因素引起的(Wielandt, 2002; 谢剑 波, 2007),只有在整体岩性很好的情况下(stal15 台 站)会有显著降低的水平分量背景噪声。

在东西分量的背景噪声对比中加入了地震计较 深掩埋的 sta120 台站, sta120 台站临近 sta123 台站, 位于较厚的黄土层覆盖的区域,其地震计埋在地面 下 2 m 深的坑中。可以看出,地震计较深的掩埋对 于降低 sta120 台站长周期部分的背景噪声起到了一 定的作用,在 3 dB 左右。此外,温度变化时机械部 件热补偿的不一致会破坏地震计内部的平衡状态, 从而在这一频率范围内也会影响背景噪声。图 5B 中,保温措施较差的 sta133 台站则明显有更高的背 景噪声,说明温度、气流等因素对于长周期范围背 景噪声的影响也是很明显的。

3.4.2 单台站分时域对比

我们将每个待分析台站一年的 PSD 分为较温暖 (5—10 月)和较寒冷(11 月—次年 4 月)两个时段,并 分别统计 PDF 以观察背景噪声在一年当中的变化。

各台站垂直分量的季节性差异并不明显(图 6), 高频部分暖季相对略高,低频部分变化很小,仅在 微震噪声峰值附近可以清楚看到有微小的变化,长 周期部分暖季相对略低。相对于垂直分量,水平分 量的变化则较为明显(图 7),其变化基本上在高频部 分和长周期部分,暖季时这两个频率范围的噪声更 高,表明水平分量的背景噪声对季节性差异更敏 感。

两个分量在高频部分季节性的差异应与季节性 人为活动的密度相关。在长周期部分,因为垂直分 量受地倾斜的影响较小,因此其背景噪声的季节性 差异主要源于温度和气流的季节性变化。对于水平 分量,由于暖季时有更大的昼夜温差,并且地倾斜 的问题也更为严重,因此其长周期部分的背景噪声 明显更高。值得注意的是海拔更高、属地气候温差 更大的 sta102 和 sta117 台站的整体季节性差异较其 他台站更大,可能是更大的温差导致沉积层的结构 特性有较大的差别,从而使得两个台站在高频和长 周期范围有较大的背景噪声差异。

将各台站一年的数据分别按照每天白天(8 点至 20 点)和夜晚(20 点至 8 点)两个时段统计计算 PDF 并进行对比(垂直分量的对比为图 8,水平分量的对 比为图 9),高频部分各台站的垂直分量和水平分量 显示一致性的差异,白天高过晚上5~10 dB,其原因 主要为人为活动的差异;低频部分没有明显的差异, 是因为其噪声源来自于微震噪声及中远震影响;长



图 8 各台站垂直分量 PDF 中值曲线昼夜对比 Fig. 8 Comparison of PDF's medians of each station in different periods (component UD)

周期部分水平分量的差异频率范围和差异幅度均大 过垂直分量,垂直分量的差异原因与白天更大的气

流、温度、气压变化有关,水平分量对于上述因素 更为敏感,并且由于上述因素耦合到地倾斜中,使



图 9 各台站东西分量 PDF 中值曲线昼夜对比 Fig. 9 Comparison of PDF's medians of each station in different periods (component EW)

得水平分量的差异频率范围和差异幅度都较垂直分 量有增加。

4 结论

1)通过两次远震的波形记录查看及资料分析, 可以看出青藏高原东北缘野外宽频带地震台阵有较 好的观测精度和地震识别能力,极性分析结果显示 各台站仪器三分量方位正确。对选取的 6 个台站进 行的噪声评价,台站地噪声水平在 I 级到III级之间, 满足流动观测噪声水平要求。

2)PDF 方法对比研究背景噪声, 知其分布特征 如下:

1 Hz 以上以及 0.2 Hz 以下频率范围的台站背景 噪声最易受影响。在 1 Hz 以上频率范围, 公路、人 为活动等是主要影响因素, 较厚沉积层环境的台站 受影响尤甚, 黄土覆盖较厚的地区, 特别需要注意 这一因素。气流也会影响这一频率范围的背景噪声。 在 0.2 Hz 以下的频率范围, 水平分量的背景噪声较 垂直分量更容易受到地倾斜、温度、气流等因素的 影响, 地倾斜对于背景噪声的影响一般可能会大过 其他因素。当台站架设在整体岩性好的基岩上, 并 采取较好的保温、防气流措施后, 其背景噪声会显 著降低。另外, 地震计深埋 2 m 以上有降低 3 dB 左 右的背景噪声的效果。

细分不同时段对比后发现, 暖季(5—10月)和白 天(8—20时)伴随整体背景噪声高。水平分量的背景 噪声在不同时段中的变化大过垂直分量, 高寒地区 在暖季的时候地倾斜、温度、气流等影响因素也更 突出, 季节性温差可能导致沉积层结构特性的差异 从而加大背景噪声的季节性差别。

台站基础建设和监测环境是记录资料质量的保 证。对于流动观测来说,一般不具备足够的投入可 以像固定台站一样建设基础观测设施。因此合理地 选择观测环境对于观测质量的保证尤为重要。实验 表明地震计深埋能起到一定的降噪效果,此方法适 用于土层较厚的地区。在整体性较好的基岩上架设 台站则能保证各分量的观测效果。在高寒地区的台 站,需要经常巡视,注意在不同的季节中调节地震 计的水平状态。青藏高原东北缘是地震学者所关注 的热点地区,在宽频带地震流动观测广泛应用的今 天,确保台站观测质量是相关研究的重要基础。进 一步的实验是用更多的仪器进行不同观测条件下的 背景噪声对比。

致谢:本文的资料处理使用了 Sandia 实验室的 Matseis 软件,以及 Lawrence Livermore 实验室的 SAC软件,图1绘制使用了GMT软件(Wessel et al., 1995),在此表示谢意。

参考文献:

- 高锐,王海燕,王成善,尹安,张玉修,李秋生,郭彤楼,李文 辉. 2011. 青藏高原东北缘岩石圈缩短变形——深地震反 射剖面再处理提供的证据[J]. 地球学报, 32(5): 513-520.
- 高锐, 熊小松, 李秋生, 卢占武. 2009. 由地震探测揭示的青藏 高原莫霍面深度[J]. 地球学报, 30(6): 761-773.
- 高原. 1996. 宽频带地震学与中强地震破裂过程的研究[J]. 地球 物理学进展, 11(4): 34-46.
- 葛洪魁,陈海潮,欧阳飚,杨微,张梅,袁松涌,王宝善. 2013. 流动地震观测背景噪声的台基响应[J].地球物理学报, 56(3): 857-868.
- 国家质量监督检验检疫总局. 2004. 地震台站环境技术要求第 一部分: 测震 GB/T 19531.1—2004[S]. 北京: 中国标准出 版社.
- 李秋生, 史大年. 2001. 宽频带数字地震观测数据子库[J]. 地球 学报, 22(6): 507-512.
- 田勤俭, 丁国瑜. 1998. 青藏高原东北隅似三联点构造特征[J]. 中国地震, 14(4): 27-35.

- 吴建平, 欧阳飚, 王未来, 姚志祥, 袁松涌. 2012. 华北地区地 震环境噪声特征研究[J]. 地震学报, 34(6): 818-829.
- 吴庆举,曾融生. 1998. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的 地壳结构[J]. 地球物理学报, 41(5): 669-679.
- 谢剑波,何寿清,吕金水,吴永权,张政平,黎珠博,王国望. 2007. 宽频带地震计的安装[J]. 地震地磁观测与研究, 28(1):57-63.
- 赵文津,吴珍汉,史大年,熊嘉育,薛光琦,宿和平,胡道功, 叶培盛. 2008. 国际合作 INDEPTH 项目横穿青藏高原的深 部探测与综合研究[J]. 地球学报, 29(3): 328-342.

References:

- BONNEFOY-CLAUDET S, COTTON F, BARD P Y. 2006. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature revies[J]. Earth-Science Reviews, 79(3-4): 205-227.
- FRONTERA T, UGALDE A, OLIVERA C, JARA J A, GOULA X. 2010. Seismic Ambient Noise Characterization of a New Permanent Broadband Ocean Bottom Seismometer Site offshore Catalonia (Northeastern Iberian Peninsula)[J]. Seismological Research Letters, 81(5): 740-749.
- GAO Rui, WANG Hai-yan, WANG Cheng-shan, YIN An, ZHANG Yu-xiu, LI Qiu-sheng, GUO Tong-lou, LI Wen-hui. 2011.
 Lithospheric Deformation Shortening of the Northeastern Tibetan Plateau: Evidence from Reprocessing of Deep Seismic Reflection Data[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(5): 513-520(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, XIONG Xiao-song, LI Qiu-sheng, LU Zhan-wu. 2009. The Moho Depth of Qinghai-Tibet Plateau Revealed by Seismic Detection[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(5): 513-520(in Chinese with English abstract).
- GAO Yuan. 1996. Broadband Seismology and Studies on the Rupture Process of Intermediate and Large Earthquakes[J]. Progress in Geophysics, 11(4): 34-46(in Chinese with English abstract).
- GE Hong-kui, CHEN Hai-chao, OUYANG Biao, YANG Wei, ZHANG Mei, YUAN Song-yong, WANG Bao-shan. 2013. Transprotable seismometer response to seismic noise in vault[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(3): 857-868(in Chinese with English abstract).
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2004. Technical requirement for observational environment of seismic stations Part 1: Seismometry GB/T 19531.1-2004[S]. Beijing:

China Standard Press(in Chinese).

- LONGUET-HIGGINS M S. 1950. A theory of the origin of microseisms[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serries A, Mathematical and Physical Sciences, 243(857): 1-35.
- KIND R, YUAN X H. 2010. Seismic Images of the Biggest Crash on Earth[J]. Science, 329: 1479-1480.
- LI Qiu-sheng, SHI Da-nian. 2001. The Sub-Database of Broadband Digital Seismographic Survey[J]. Acta Geoscientica Sinica, 22(6): 507-512(in Chinese with English abstract).
- MCNAMAR D E, BULAND R P. 2004. Ambient noise levels in the continental United States[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(4): 1517-1527.
- PETERSON J. 1993. Observations and modeling of seismic background noise[R]. U.S. Geological Surv. Open File Report, 1993: 93-322.
- TIAN Qin-jian, DING Guo-yu. 1998. The Tectonic Feature of a Quasi-trijunction in the Northeastern Corner of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Earthquake Research in China, 14(4): 27-35(in Chinese with English abstract).
- USGS. 2013. Earthquake Archive Search & URL Builder[EB/OL]. [2013-01-11]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/.
- WESSEL P, SMITH W. 1995. New Version of the Generic Mapping Tools Released[J]. EOS, 76: 329.
- WIELANDT E. 2002. Seismic Sensors and their Calibration[M/OL]. [2013-01-11]. http://www.docin.com/p-627048690.html.
- WU Jian-ping, OUYANG Biao, WANG Wei-lai, YAO Zhi-xiang, YUAN Song-yong. 2012. Ambient noise level of North China from temporary seismic array[J]. Acta Seismologica Sinica, 34(6): 818-829(in Chinese with English abstract).
- WU Qing-ju, ZENG Rong-sheng. 1998. The Crustal Structure of Qinghai-Xizang Plateau inferred from Broadband Teleseismic Waveform[J]. Acta Geophysica Sinica, 41(5): 669-679(in Chinese with English abstract).
- XIE Jian-bo, HE Shou-qing, LÜ Jin-shui, WU Yong-quan, ZHANG Zheng-ping, LI Zhu-bo, WANG Guo-wang. 2007. Installation of broadband seismometer[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 28(1): 57-63(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Wen-jin, WU Zhen-han, SHI Da-nian, XIONG Jia-yu, XUE
 Guang-qi, SU He-ping, HU Dao-gong, YE Pei-sheng. 2008.
 Comprehensive Deep Profiling of Tibetan Plateau in the INDEPTH Project[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(3): 328-342(in Chinese with English abstract).