

谢江涛, 林丽萍, 赵敏, 等. 应急流动观测组网技术在康定 6.3 级地震中的应用[J]. 华南地震, 2019, 39(3): 23–31. [XIE Jiangtao, LIN Liping, ZHAO Min, et al. The Application of Emergency Portable Seismological Observation Network Technology in Kangding $M_s6.3$ Earthquake[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3): 23–31]

应急流动观测组网技术在康定 6.3 级地震中的应用

谢江涛, 林丽萍, 赵 敏, 黄春梅, 李荪海

(四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 以 2014 年 11 月 22 日四川康定发生 6.3 级地震后开展应急流动观测为例, 描述了在应急流动观测组网中, 如何应对震区高原环境, 完成 4 个流动台选址架台、快速组网、运维保障; 并通过对流动台址地动噪声功率谱密度分析计算, 获得的台基达 II 或 III 级环境地动噪声水平, 余震微小震检测能力与定位精度得到极大改善。流动台网运行期间, 提高了震区监测台站覆盖面, 记录到了大量余震微小震, 加密台站对震区定位精度提升了量级, 震源深度、震级更加准确。结果表明: 一旦大震发生后, 及时组织开展应急流动观测是必要的, 而完成好一次大震后快速有效的应急流动监测, 必须综合考虑震区地域环境、人员配备、预案选择、通信条件、设备可靠诸多因素与运维保障, 采用固定与流动台联合组网方式, 应急流动发挥效益最佳。

关键词: 应急流动观测; 组网技术; 康定地震; 固定与流动台

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)03-0022-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.004

The Application of Emergency Portable Seismological Observation Network Technology in Kangding $M_s6.3$ Earthquake

XIE Jiangtao, LIN Liping, ZHAO Min, HUANG Chunmei, LI Sunhai

(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

Abstract: The Kangding $M_s6.3$ earthquake occurred on Nov. 22nd, 2014 in Sichuan province. Taking the Kangding earthquake emergency temporary observation as an example, this paper introduces how to deal with the plateau environment in earthquake area, completes 4 temporary seismic stations, rapid networking, operation and maintenance support. A certain number of data from observation stations are randomly selected to analyze the noise power spectral density, and the results show that the ambient noise level of temporary seismic

收稿日期: 2018-03-19

基金项目: 四川省地震局科技专项(项目编号: LY1505, LY1810, LY1809); 国家科技支撑计划(项目编号: 2014BAK03B04); 九寨沟 7.0 级地震震后科学考察联合资助。

作者简介: 谢江涛(1986-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事数字地震观测、地震预警及背景噪声层析成像研究。

E-mail: jiangtaoxie@outlook.com.

stations is II or III, aftershock monitoring capability and positioning accuracy have been greatly improved. The temporary seismic network improves the distribution of the stations in earthquake area, thousands of aftershocks were recorded, the hypocentral location, focal depth and magnitude of earthquake are more accurate after the stations are encrypted. The results show that it is very necessary to carry out effective temporary seismologic observation after a large earthquake. The rapid and effective emergency temporary seismologic observation must comprehensively consider many factors such as the environment in the earthquake area, staffing, communication conditions, plan selection, reliable equipment, and maintenance support, and the combination of permanent and temporary seismic stations is the best way.

Keywords: Temporary seismological observation; Network organization; Kangding earthquake; Permanent and temporary seismic stations

0 引言

应急流动观测台网是测震台网的重要组成部分,是我国固定台站密度不高的情况下获取地震记录的有效补充,主要用于震前加密观测和震后余震监测,改善区域性地震活动定位精度,震后快速余震监测^[1]、震群监测等。通过“十五”项目期间和汶川 8 级地震灾后重建项目,四川省数字测震台网(简称:四川台网)固定台站数达到 60 个,全省地震监测能力整体有了较大提升。但四川台网台站主要分布在南北地震带的中段,受台站布局 and 密度所限,对川西地区地震监测能力仍然较弱。2014 年 5 月中国地震局地球物理研究所与四川省地震监测中心在川西开展流动加密观测,沿鲜水河断裂带的道孚县加拉宗村(JJLZ)、八美镇(JBMT),康定县榆林乡(JYLT)架设了 3 个流动测震观测台,提高了对该区域地震监测能力和地震定位精度。

2008 年 5.12 汶川地震后,四川省地震局逐步建立了应对破坏性地震的应急流动观测的预案并定期组织演练,以保障大震来临时能够快速有效的组织地震应急流动观测。与汶川地震、芦山地震等破坏性地震一样,康定 6.3 级地震发生后,中国地震局迅速启动了地震应急 II 级响应,四川省地震局及时派遣技术人员奔赴康定地震现场开展应急流动观测工作,本文介绍了应急流动观测组网技术在康定 6.3 级地震中的应用。

1 台网布局

据中国地震台网中心测定:2014 年 11 月 22 日 16 时 55 分在四川甘孜藏族自治州康定县

(30.3°N, 101.7°E)发生 6.3 级地震,震源深度 14.6 km (<http://earthquake.usgs.gov>),发震构造位于北西向的鲜水河断裂带中段康定至道孚之间的色拉哈断裂^[2]。在印度洋板块与欧亚板块碰撞后,巴颜喀拉块体沿大型走滑断裂带向东和南东方向“逃逸”^[3-4],鲜水河断裂带作为块体的南边界,自 1700 年以来,沿其断裂发生过至少 26 次 6.0 级以上的地震^[5]。此次康定地震震中位于康定县城北西方向塔公乡,震区地处海拔 3 700 多米的川西高原,固定台站稀疏,距离震中最近的姑咱固定台(GZA)大约 50 km,距离最近的八美流动台(JBMT)约 30 km,为提高震区余震监测能力及地震定位精度,跟踪余震活动规律,为震后趋势判定与地震预测提供依据,选用了沿鲜水河断裂走向围绕震中布设的组网方案,流动台尽可能均匀分布在余震区周围,以提升震区地震监测能力,同时考虑断裂破裂方向、地震迁移及现有台站分布,对震区近台适当加密、补充。经过对震中现场踏勘,选定了塔公乡江巴村(LJBT)和警卫室(LTGT),雅拉乡中谷村(LZGT)和头道桥村(LTDQ)4 个供电通信条件较好、环境噪声水平较低、仪器能安全运行观测点架台,与震前已架设的巴美流动台(JBMT)和榆林流动台(JYLT)组成监视震中 40 km 范围内流动监测网,沿鲜水河断裂带北西向分布台间距平均为 15 km,加上距离震中较远的道孚(DFU)、姑咱(GZA)、雅江(YJI)3 个固定台与震前加拉宗(JJLZ)加密台,完成了本次地震固定和流动台联合组网的流动监测台网,较好的包围了余震活动区及可能存在的断裂破裂区。康定 6.3 级地震应急流动观测联合组网台站分布如图 1 所示。

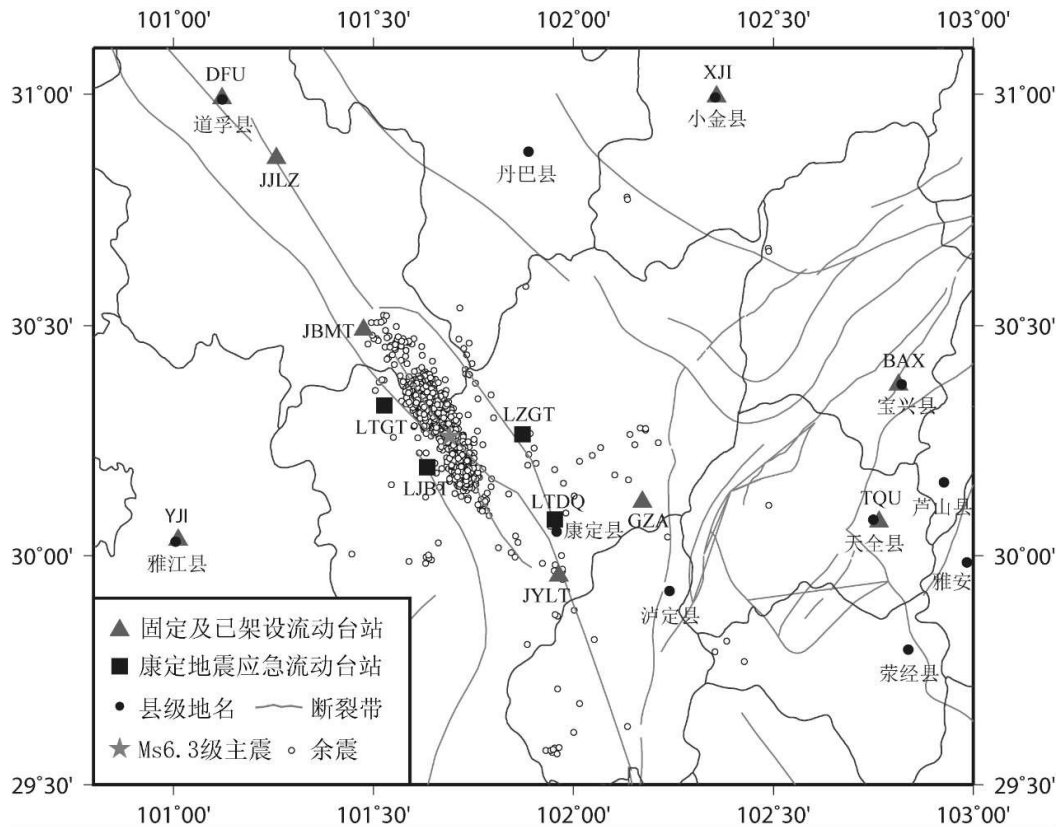


图 1 康定 6.3 级地震应急流动观测加密台与四川台网固定台及流动台站分布示意图

Fig.1 The distribution map of temporary seismic stations for Kangding temporary seismological observation and permanent and temporary seismic stations in Sichuan seismic network

2 台网技术系统

2.1 台站基本配置

康定 6.3 级地震应急流动观测台网的 4 个流动台配备了 Guralp 公司 CMG-40TDE 短周期(2 s~50 Hz)一体化地震仪, 仪器系统频响好, 能够记录地方高频小震。为保障流动台地震仪的安装质量, 采用了流动观测常用的坑体土层和硬土地表两种安装方式, 具体见图 2, 图 2(a)为头道桥流动台(LTDQ)坑体安装; 图 2(b)为江巴流动台(LJB)硬土地表安装。由于康定地震震区地处高原, 地域环境复杂, 震后的地质条件和部分地区交流供电极度不稳, 针对实际我们灵活采取了不同的供电方式, 主要由太阳能+蓄电池组和交流电+蓄电池组两种, 线路连接具体见图 3。本次流动观测台网先期投入运行台站是 2014 年 11 月 23 日架设的江巴流动台(LJB)和塔公流动台(LTGT), 11 月 25 日架设的中谷流动台(LZGT)和 26 日架设的头道桥流动台(LTDQ), 之后康定地震流动观测台网投入

观测运行。流动台详细信息见表 1。

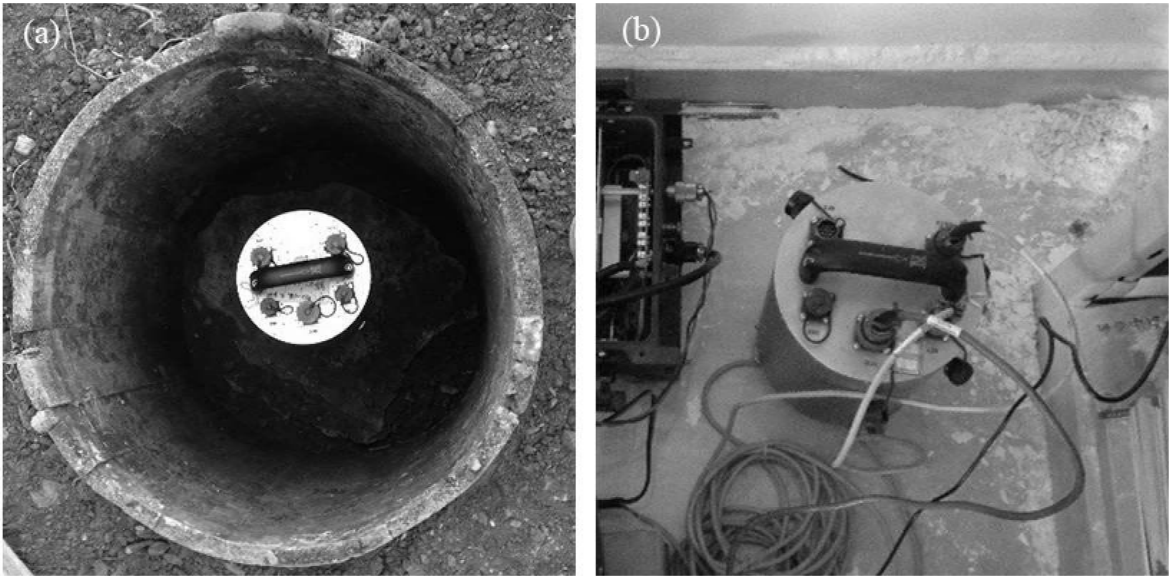
本次流动观测台网运维保障由 2 名技术人员和 1 辆应急流动车组成。为保障架设的流动台设备安装后正常运行, 流动台后续加密与运维保障同时进行, 从 11 月 24 日起开始下一流动台点遴选、设备安装前, 对出现故障设备进行及时维修和故障排除, 优先保证已安装设备流动台工作正常。

2.2 组网

四川台网台站实时数据传输, 采用的是有线宽带与无线移动蜂窝网络组合方式, 把台站观测记录波形实时传输至台网数据处理中心, 再通过光纤专线传输至中国地震台网中心与各市州县局数据共享平台实现数据共享服务。无线移动蜂窝网络成本低、适应性好、移动方便、组网灵活等优点, 广泛使用在我国地震台网, 特别是应用在应急流动观测组网中。历经四川 5.12 汶川大地震后, 四川电信运营商基站提高了应对大地震等突发性事件的应对能力, 康定地震震区的无线网络

信号覆盖较好。因此,在康定 6.3 级地震应急流动观测台站和省台网中心的数据传输采用了电信运营商 CDMA(3G)移动蜂窝数据服务,基于四川台网 VPDN(Virtual Private Dialup Network)认证平台,将省台网中心网络接入 CDMA 分组数据网的 ATM IP 承载网,使台站无线 CDMA 终端与省台网中心之间建立 L2TP 隧道,实现虚拟专网连接。目前,CDMA 分组数据网全部基于 IP 数据分发交换网络,网络中传送的数据包采用 TCP/IP 协议进行传输与

分发。台站无线终端通过拨号方式就近接入电信基站进入 CDMA 分组数据网,再由电信运营商通过专用 VPDN 光纤接入省台网中心机房核心路由器,省台网中心的 AAA 认证服务器经认证后可为每个台站终端分配唯一 IP 地址,从而实现省台网中心与台站(固定台或流动台)的双向通信与控制^[9]。康定 6.3 级地震应急流动监测台网通信链路拓扑结构见图 3。



(a)头道桥流动台(LTDQ)坑体安装,(b)江巴流动台(LJBT)硬土地表安装。
图 2 流动台常用地震仪安装方式。

Fig.2 The common installation type for portable seismic stations

表 1 康定 6.3 级地震应急流动观测台站信息表

Table 1 Basic information table about Kangding $M_s6.3$ earthquake emergency temporary observation network							
台站名称	台站代码	设备型号	频带范围	观测条件	地点	数据传输方式	运行时间/年-月-日
江巴台	LJBT	CMG-40TDE	2 s~50 Hz	水泥地表	塔公乡江巴村	电信 3G	2014-11-23
塔公台	LTGT	CMG-40TDE	2 s~50 Hz	水泥地表	塔公乡警卫室	电信 3G	2014-11-23
中谷台	LZGT	CMG-40TDE	2 s~50 Hz	坑体土层	雅拉乡中谷村	电信 3G	2014-11-25
头道桥台	LTDQ	CMG-40TDE	2 s~50 Hz	坑体土层	雅拉乡头道桥村	电信 3G	2014-11-26

3 台站环境地噪声水平

地震流动观测台网主要目的是监测震区的余震活动,开展定位分析,监视余震活动规律,为震后余震后续发展,震后趋势判定、断层活动等研究提供充分真实、丰富完善的基础数据。因此,流动台架设完成后流动台基环境地噪声水平的评估分析环节十分重要。

采用马秀敏等^[7]计算龙门山断裂带 WFSN 台网

台站背景噪声选取数据的方法,选择 2014 年 12 月康定地震流动观测台网 4 个台站地脉动记录,随机选取 6 天数据,将每天观测数据分成 6 个观测时间段,从每个观测时段抽取 100 s 连续记录波形;选取数据样本避开有地震、标定信号或其他偶然干扰波形(如车辆、牲畜、人员活动等引起),共选取 3600 s 数据为分析样本。采用 Welch 方法^[8]计算样本数据的加速度功率谱密度 (PSD)评估台基环境地动噪声水平^[9],为减少计算 PSD 方差,将 1 个小时

的样本数据分成 13 段, 每段数据之间重叠 50%, 1 个小时功率谱密度值由 13 个段功率谱密度值平均得到; 再将计算速度功率谱密度转换为加速度功率谱密度; 扣除仪器传递函数影响。

根据《地震台站观测环境技术要求》GB/T 19531.1-2004^[10], 台站地噪声水平由地面运动速度记录的功率谱密度 (PSD) 在 1 Hz~20 Hz 频带范围的均方根(rms)得到。

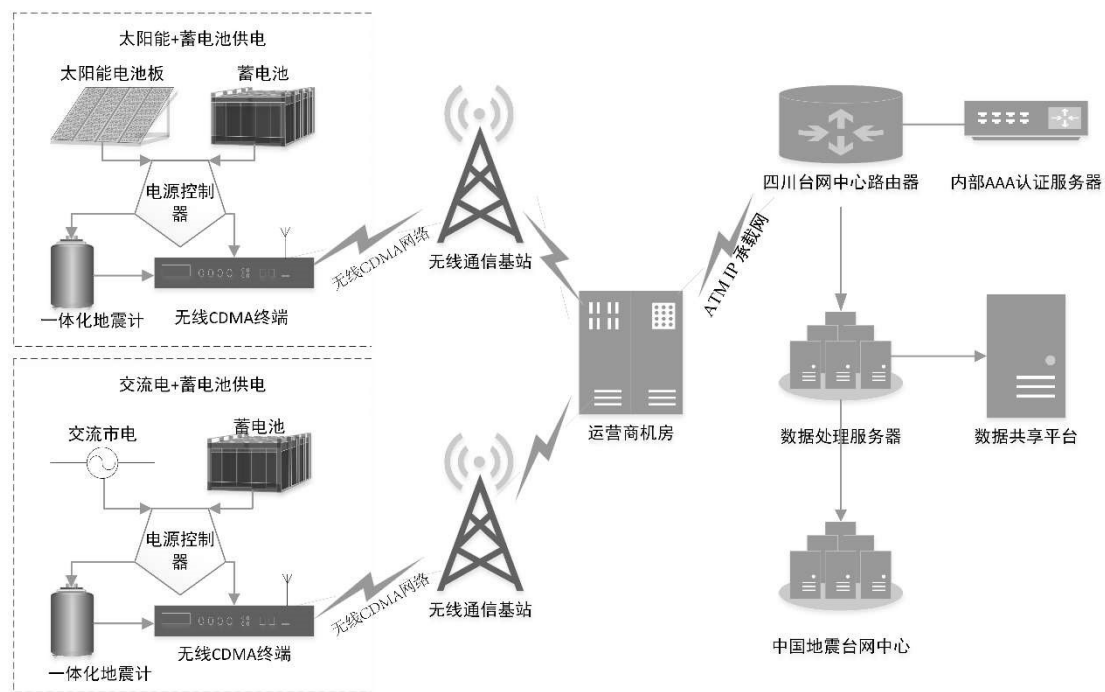


图3 康定 6.3 级地震应急流动监测台网通信链路拓扑图

Fig.3 Network topology map of the temporary digital seismic network of Kangding M_s 6.3 earthquake

$$\text{rms} = \sqrt{2 \times \text{PSD} \times f_0 \times \text{RBW}} \quad (1)$$

式中: f_0 为分度倍频程中心频率; RBW 为相对带宽; PSD 为功率谱密度。

相对带宽计算:

$$\text{RBW} = (f_u - f_l) / f_0 = 2^{n/2} - 2^{-n/2} \quad (2)$$

式中: $f_u = 2^{n/2} f_0$ 为分度倍频程上限频率; $f_l = 2^{-n/2} f_0$ 为分度倍频程下限频率, n 为倍频程带宽。

如果选择倍频程则

$$\text{RBW} = 2^{1/6} - 2^{-1/6} \approx 0.2316 \quad (3)$$

由公式(1)计算选取样本数据的加速度功率谱密度, 从而得到各流动台倍频程台基环境地动噪声功率谱密度曲线(见图3)和 1~20 Hz 频带范围内环境地动噪声水平值(见表2)。康定地震流动观测台网台站台基均达到 II 或 III 级环境地动噪声水平, 最优可达到 0.4967×10^{-7} m/s。

图4中(a)、(c)、(e)和(g)依次为 LJBT、LTDQ、LTGT 和 LZGT 台三分向记录波形记录; 图4中(b)、(d)、(f)和(h)为相应台站地动噪声加速度功率谱密度曲线。上、下两条红色实线表示新高、低地动噪声曲线模型。

4 余震监测结果分析

震区流动台架设完成后, 通过无线 CDMA 网络构建的 VPDN 链路将波形数据实时传输至四川省台网中心, 与省台网固定台站联合组网对震区余震进行定位分析。在 2014 年 11 月 22 日至 12 月 31 日期间, 共记录震区余震 4 073 次, 剔除仅靠单台定位地震后共 1621 次(中国地震台网中心提供), 其中 $M_L \leq 1.0$ 地震 684 次, $1.0 < M_L \leq 2.0$ 地震 852 次, $2.0 < M_L \leq 3.0$ 地震 79 次, $3.0 < M_L \leq 4.0$ 地震 5 次, $M_L > 4.0$ 地震 1 次。本文选取震中区部分不同震级地震, 分别对使用康定地震流动台网加密台站数据与未使用加密台站数据地震定位分析进行对比, 见表3、4。

震区流动台站架设完成后大幅提高了震区余震监测能力, 余震监测震级下限降低。从表3可见, 流动台网记录到了四川省台网固定台无法有效监测的 $M_L \leq 1.0$ 级微小震, 在台站覆盖较好地区对 $M_L \leq 0.3$ 级地震可完成多台定位。随着余震震级增大, 能够清晰记录地震波形台站数量不断增加,

对余震的台站覆盖能力增强,微小震定位结果更加可靠、精度更高,其中 2014 年 11 月 27 日 01 时 18 分 00.09 秒发生的康定 $M_L 1.0$ 级地震,就有 4

个加密流动台的完整记录波形,震相分辨清晰,见图 5。

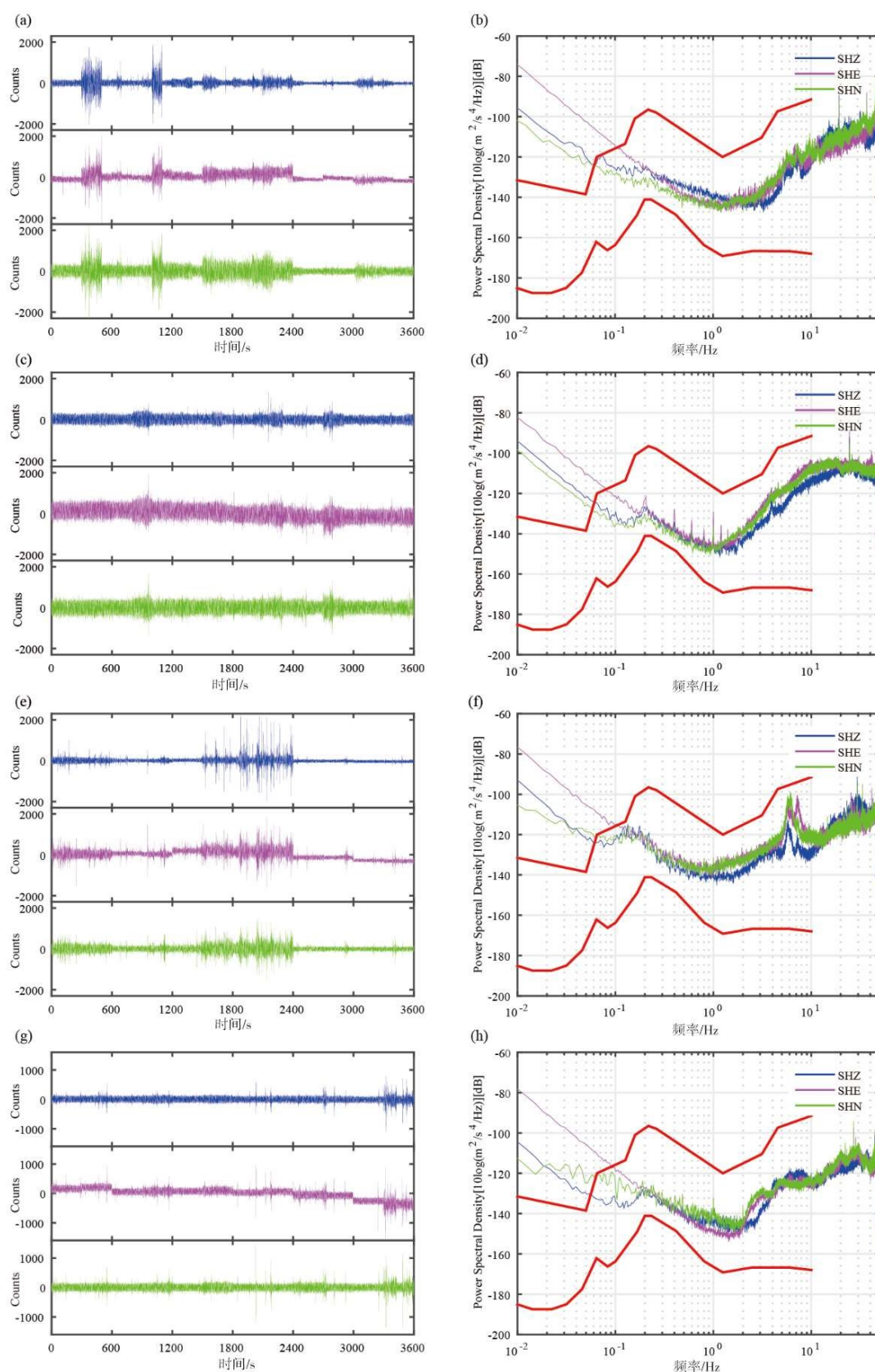


图 4 流动台基三分向记录地脉动及相应地动噪声加速度功率谱密度图

Fig.4 Three-components seismic waveform records and acceleration noise power spectral density maps of the station bases

表 2 康定地震应急流动观测台网各子台地动噪声水平

Table 2 Ground noise level of each sub-station of Kangding earthquake emergency temporary observation network

台站名称	rms/(10 ⁻⁷ m/s)			平均值/(10 ⁻⁷ m/s)
	SHZ	SHE	SHN	
江巴台	0.7492	0.6119	0.7748	0.7119
头道桥台	0.9238	1.7846	1.5911	1.4331
塔公台	0.5481	1.1359	1.1317	0.9386
中谷台	0.4805	0.4712	0.5383	0.4967

康定地震应急流动台网快速提高了震区微小地震监测能力,通过与固定台联合组网定位,地震定位精度得到不断改善。对于震区 $M_L\geq 2.0$ 级地震,增加震中近台,定位结果(发震时刻、震中位置、震源深度和震级)相差不大,而震区 $1.0<M_L\leq 2.0$ 级地震,增加震中近台,改善了台站方位角覆盖面,使靠单台或双台定位的地震成为多台定位

(至少 4 个有效台记录),无论是发震时刻,还是震中位置,以及震级都有较大改善,精度提高,见表 4。从整个余震分布图看(图 1),应急流动台的加密架设使震区及南部台站分布空区得到有效补充,对余震活动区域进行了有效的台站覆盖,提升了震区地震监测能力及地震定位精度。

表 3 康定 6.3 级地震部分余震($M_S\leq 1.0$)定位结果对比

Table 3 Comparison of positioning results of partial aftershocks with $M_S\leq 1.0$ of the Kangding M_L 6.3 earthquake

序号	发震时刻	震中位置		震源深度/ km	震级 M_L	加密台站是否 使用	台数	评价
	年-月-日 h:min:s	$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$					
1	2014-12-09 05:04:40.77	101.690	30.276	7	0.1	是 否	3 0	仅流动台记录
2	2014-12-09 21:03:11.24	101.696	30.247	11	0.3	是 否	3 0	仅流动台记录
3	2014-12-04 06:18:59.37	101.727	30.178	7	0.5	是 否	3 0	仅流动台记录
4	2014-11-27 00:57:07.17	101.714	30.212	7	0.6	是 否	3 0	仅流动台记录
5	2014-12-04 04:54:35.22	101.735	30.175	8	0.8	是 否	5 0	4 个流动台记录, JBMT 台有记录
6	2014-12-02 01:34:22.91	101.721	30.186	8	1.0	是 否	5 0	4 个流动台记录, JYLT 台有记录

表 4 康定 6.3 级地震部分余震($M_S>1.0$)定位结果对比

Table 4 Comparison of positioning results of partial aftershocks with $M_S>1.0$ of the Kangding M_L 6.3 earthquake

序号	发震时刻	震中位置		震源深度/ km	震级 M_L	加密台站是否 使用	台数	评价
	年-月-日 h:min:s	$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$					
1	2014-11-27 06:08:26.46	101.717	30.202	8	1.2	是	5	仅单台记录,定位震级误差较大
	2014-11-27 06:08:26.28	101.724	30.199	10	0.6	否	1	
2	2014-11-27 20:43:16.99	101.673	30.273	8	1.5	是	6	加密后台网能较好定位震级、深度
	2014-11-27 20:43:16.96	101.712	29.890	5	0.8	否	2	
3	2014-11-27 21:37:59.16	101.692	30.232	8	2.0	是	8	加密后台网能较好定位震级、深度
	2014-11-27 21:37:59.20	101.693	30.239	4	1.7	否	4	

(转下表)

(接表 4)

序号	发震时刻	震中位置		震源深度/ km	震级 M_L	加密台站是 否使用	台数	评价
	年-月-日 h:min:s	$\lambda_E /(^{\circ})$	$\varphi_N /(^{\circ})$					
4	2014-11-30 01:01:18.16	101.705	30.202	8	2.1	是	10	基本吻合
	2014-11-30 01:01:17.90	101.698	30.201	9	2.0	否	6	
5	2014-11-28 08:06:25.25	101.697	30.215	11	2.3	是	10	基本吻合
	2014-11-28 08:06:25.20	101.701	30.211	9	2.1	否	6	
6	2014-11-30 18:06:17.53	101.605	30.383	12	2.7	是	21	基本吻合
	2014-11-30 18:06:17.60	101.606	30.384	10	2.6	否	17	

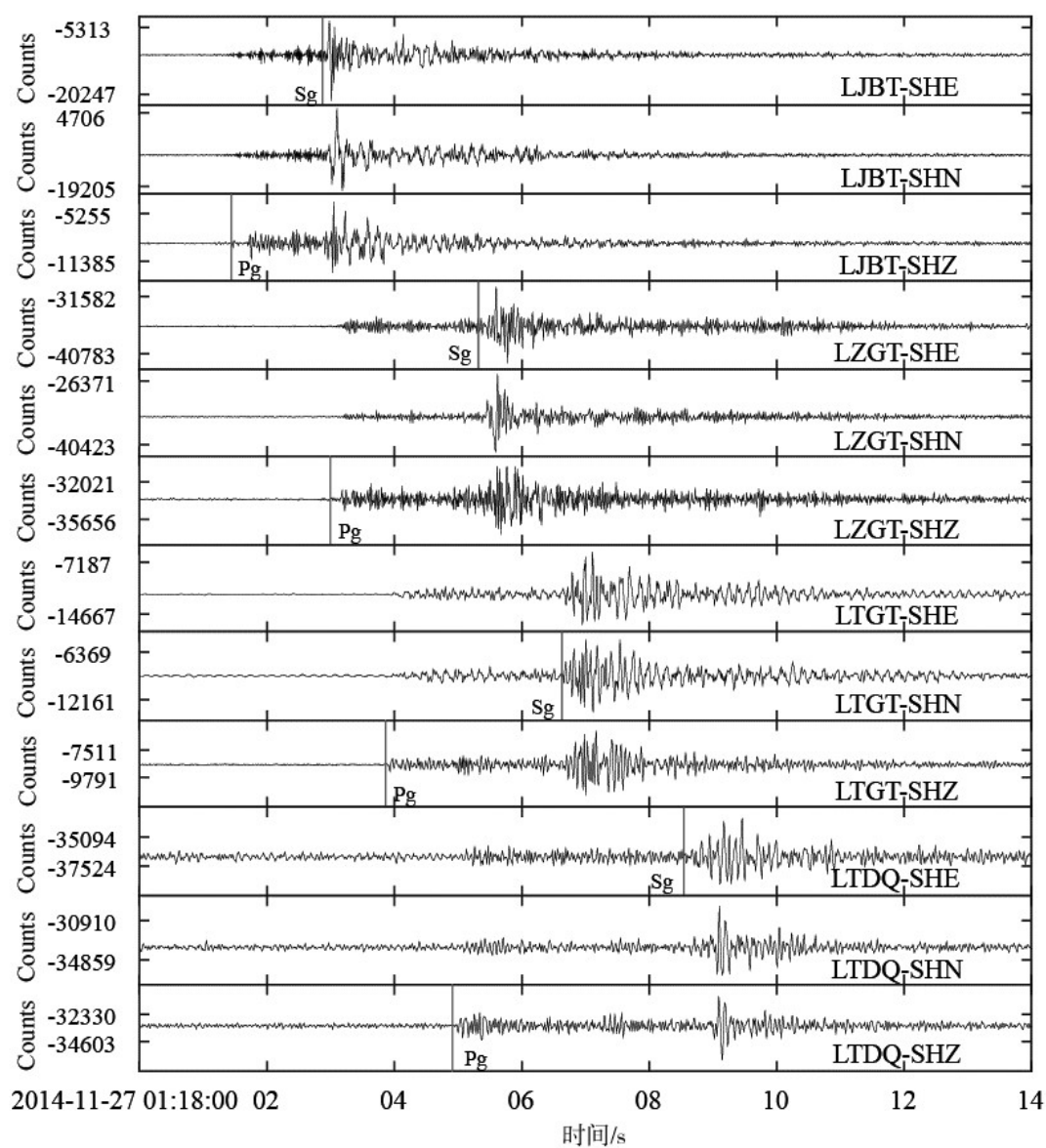


图 5 流动台记录康定 M_L 1.0 级地震波形(北京时间 2014 年 11 月 27 日 01 时 18 分 00.09 秒)及 Pg、Sg 波到时(由中国地震台网中心提供)

Fig.5 The earthquake waveform of Kangding M_L 1.0 earthquake recorded by temporary seismic stations (Beijing time,01:18:00.09, 27th November,2014,)and arrival time of Pg ,Sg waves(provided by China Earthquake Network Center)

5 结语

康定6.3级地震应急流动观测是继汶川地震、芦山地震以来,四川省地震监测人员在应急流动台及流动地震台阵架设经验基础上的又一次较大规模的地震应急流动观测实战。流动组网采用了先进的一体化短周期数字地震仪,实现了对震区有效地震监测台站覆盖,通过固定和流动台联合组网方式,极大提升了对震区余震活动监测能力及改善定位精度。通过对流动台基地动噪声数据样本功率谱密度分析,获得各台基地动噪声加速度功率谱密度与台基倍频程 1~20 Hz 频带范围内环境地动噪声水平值,台基均达到Ⅱ或Ⅲ级环境地动噪声水平,最优可达到 $0.4967 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 。有效获取了大量的余震记录,尤其是记录了丰富的 $M_L \leq 1.0$ 级微小震活动,对此次地震孕震过程、余震活动、震后趋势判定及区域地质构造的分析研究提供了珍贵的基础资料。

在此次应急流动观测在获取丰富重要地震波形资料同时,我们也得到以下几点启示:

应急流动地震观测的时效性和机动性强,需要在日常工作中建立了应急流动观测保障机制,才能在震后第一时间快速做出反应,确保应急观测的及时有效。对于高海拔震区的无线网络通信和交流供电保障的不稳定条件状况,流动台采取加装高增益天线增强信号强度并采用多模多频段无线通信终端是改善观测数据传输的重要条件;采取交流供电并兼容不同输入电压,同时具有太阳能浮充和蓄电池保障供电方式适应高海拔环境流动台基础条件。

流动台提高了震区余震特别是微小震的检测能力,联合组网可以改善固定台网无法定位微小震的定位能力。余震震中距小,较大地震流动台记录易出现限幅,与固定台联合组网可有效实现对余震联合定位,检测微小余震,提高台站方位角覆盖面。对较大震级余震记录,且初动清晰、震相分辨准确,有利于改善地震定位精度。

流动台架设具有灵活机动,投资少的特点。地震应急时及时架台,完毕后迅速撤出,平时时可演练训练,具有较大灵活性。

加强流动观测技术和装备的研究与技术人员培训演练,才能够在出现地震应急时,依据地震特点、断裂破裂方向等因素开展流动台的快速选址,在较低台基环境地动噪声水平台站完成流动台仪器安装与调试,使应急流动台网在震后流动监测中发挥最大作用。

致谢:感谢四川省地震监测中心流动应急观测组的同事们,也感谢四川省甘孜州政府工作人员的大力协作和支持。

参考文献:

- [1] 林伟,李敬,刘少文等. 东源 M4.8 级地震现场流动监测的作用[J]. 华南地震,2012,32(b11): 29 - 37.
- [2] 胡朝忠,杨攀新,梁朋等. 2014 年康定 $M_s 6.3$ 级地震震源断裂的古地震研究[J]. 科学通报,2015, (23): 2236 - 2244.
- [3] Tapponnier P, Peltzer G, Dain A Y L, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 1982, 10(10): 611.
- [4] Peltzer G, Tapponnier P, Armijo R. Magnitude of late quaternary left-lateral displacements along the north edge of Tibet[J]. Science, 1989, 246(4935): 1285 - 1289.
- [5] 熊探宇,姚鑫,张永双. 鲜水河断裂带全新世活动性研究进展综述[J]. 地质力学学报,2010, 16(2): 176 - 188.
- [6] 湛亮,张艺,戴仕贵. CDMA VPDN 构建 IP 数字测震台网[J]. 地震地磁观测与研究,2008(01): 70 - 76.
- [7] 马秀敏,彭华,姜景捷,等. 龙门山断裂带 WFSD 数字地震台网监测能力及动态范围分析[J]. 地质力学学报, 2011(01): 27 - 40.
- [8] Welch P D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms [J]. IEEE Trans Audio Electroacoust, 1967, 15(2): 70-73.
- [9] Peterson J. Observations and modeling of seismic background noise[J]. USGS Open File Report, 1993, 322.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地震台站观测环境技术要求(第 1 部分): 测震(GB/T 19531.1-2004)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.