第37卷 第1期(227~238)	中 国 地 震	Vol. 37 No. 1
2021年3月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Mar. 2021

余洋洋,戴仕贵,杜瑶,等,2021.四川泸州地区测震台网地震监测能力研究.中国地震,37(1):227~238.

四川泸州地区测震台网地震监测能力研究

余洋洋 戴仕贵 杜瑶 王宇玺 庄园旭

四川省地震局,成都 610041

摘要 为加强川南泸州区域的地震监测能力,新建15个流动测震台站,与泸州和荣昌2个 固定台站形成泸州台网。根据《地震震级的规定 GB 17740—2017》,计算了泸州台网的震级监测 能力,并通过实际地震事件的统计分析,验证了震级监测能力计算结果的准确性和合理性。基于 D 值理论,计算了泸州台网在研究区域的震中定位误差和震源深度定位误差,对比 8 个合成 事件的定位结果,验证了台网的理论定位误差在一定范围内的准确性。对于 M_L0.5 监测能力内 的区域,定量分析了台网对于 0.5 级地震事件的理论定位误差水平,说明理论震级监测能力和理 论定位误差计算相结合的应用合理可行。

关键词: 测震台网 监测能力 D值理论 [文章编号]1001-4683(2021)01-0227-12 [中图分类号]P315 [文献标识码]A

0 引言

表 1

四川盆地南缘川南地区 2019 年地震活动频繁,发生 6.0 级地震 1 次,5.0~6.0 级地震 7 次(表 1),且这一系列地震的震源较浅,普遍为 15km 左右,造成不同程度的财产损失和人员 伤亡(四川省地震局,2019;易桂喜等,2019;Lei et al,2019)。

	71 H378 C			эленият о ,-	,
震级	发震时刻 (年-月-日T时:分:秒)	北纬/(°)	东经/(°)	深度/km	参考位置
5.2	2019-12-18 T 08:14:05	29.59	104.82	14	四川内江市资中县
5.4	2019-09-08 T 06:42:13	29.55	104.79	10	四川内江市威远县
5.6	2019-07-04 T 10:17:58	28.41	104.74	8	四川宜宾市珙县
5.4	2019-06-22 T 22:29:56	28.43	104.77	10	四川宜宾市珙县
5.3	2019-06-18 T 07:34:33	28.37	104.89	17	四川宜宾市长宁县
5.1	2019-06-17 T 23:36:01	28.43	104.77	16	四川宜宾市珙县
6.0	2019-06-17 T 22:55:43	28.34	104.90	16	四川宜宾市长宁县
5.3	2019-01-03 T 08:48:06	28.20	104.86	15	四川宜宾市珙县

川南地区 2019 年 M>5.0 地震统计(中国地震台网中心,2019)

[收稿日期] 2020-06-04 [修定日期] 2020-10-30

[[]项目类别]中石油项目(XNS25JS2019-57-02)、四川省中央引导地方科技发展专项项目(2020ZYD026)和四川省地震局 科技创新团队(201901)共同资助

[[]作者简介] 余洋洋,男,1989年生,工程师,主要从事地震学和微地震监测研究。E-mail:yuyy219@163.com

37 卷

川南地区是四川盆地人口较为密集的地区,工业和农业较为发达,地震灾害的破坏性和 危险性较大,是科学研究和社会关注的热点区域(阮祥等,2008;胡晓辉等,2020;张致伟等, 2019)。由于地震灾害频发,目前内江市、自贡市、宜宾市等地区均已有相当规模的地震监测 台站,能够较好地开展区域地震活动性和地震危险性分析等研究工作。与这些区域相邻的 泸州地区,同样面临着一定程度的地震灾害风险,且位于其北部的重庆荣昌地区也是地震灾 害的高发区,因此对泸州地区加强地震监测工作十分必要。但由于目前泸州地区的地震监 测台站相对较少,地震监测能力和定位精度有限,因此,需要增加测震台站的数量用于监测 该区域的地震事件,以充分研究区域的地震活动性,进而为地震危险性分析等工作提供基础 数据。

基于此,中石油和四川省地震局于 2019 年 10 月在泸州投资建设了 15 个流动测震台站,加上荣昌和泸州 2 个固定台站,共 17 个台站,形成了一定规模的泸州区域测震台网(图 1),研究区域的范围为 105°~106°E,28.6°~29.6°N,区域内主要存在 NE-SW 向的华蓥山断裂(邓起东等,2002),且台站在泸县周边的断层两侧均有分布,能够较好地监测断层活动。该台网自 2019 年 11 月 3 日开始运行,流动台站预计持续观测到 2024 年 11 月,截至 2020 年 4 月 15 日,台网运行状况良好,在研究区域内共记录到 1456 个地震事件,3.0 级以上地震 2 次,1.5 级以下地震 1225 个,中强地震活动性较低,小震较为活跃。



图 1 研究区域地形图、台站及地震事件震中分布

228

229

测震台网是地震活动性和地震危险性分析、余震监测、速度结构探查等研究的基础,而 地震监测能力是衡量测震台网监测水平的重要标志之一,是台网布局和台站地震监测能力 的综合体现(王鹏等,2016;王亚文等,2017)。地震监测能力的科学评估对地震监测预报和 地球科学研究具有重要的基础作用,因此有必要对测震台网进行地震监测能力的研究(刘芳 等,2014;李瑞红,2019)。

区域测震台网监测能力评估方法一般分为2类:一类是对测震台网能够监测记录到的 最小地震震级进行评估,主要有统计地震学方法,如最大曲率法(MAXC),最优拟合度法 (GFT)(Wiemer et al,2000),完整性震级范围法(EMR)(Woessner et al,2005),利用重复地 震描述台网监测能力空间分布法(蒋长胜等,2005),以及基于概率的完整性震级法(PMC) (Schorlemmer et al,2008、2010)等,这类方法多基于历史地震事件,无法开展实时评估;此外 还有根据震级衰减关系和噪声水平给出理论监测能力的方法(Sereno et al,1989),该方法基 于理论计算,与实际情况存在一定差距。另一类是对台网的定位能力的评估,包括 Sato 等 (1965)提出的蒙特卡洛算法,可用于台网监测能力的数值计算研究,Kijko(1977)基于 D 值 最优设计理论提出的微震台网设计方案,基于台站分布和台址条件的监测能力评估(吴开统 等,1991),对已知的爆破事件进行标定来评价台网监测能力(郭飙等,2002)等。

由于台网运行时间较短,地震事件的数量、分布范围、震级跨度均不足以支持 MAXC、 GFT、EMR、PMC 等方法的计算研究,因此,选用根据震级衰减关系和噪声水平的方法计算台 网的震级监测能力。根据项目需求以及客观经济条件,选用应用较为广泛的 D 值最优理论 计算研究区域内台网的理论定位误差。D 值为震源参数协方差矩阵的行列式大小,能够反 映监测台网的优劣,但不能准确反映台网定位能力。为此,巩思园等(2010)基于 D 值最优 设计理论,构建了台网布置优化及评价系统,能够在一定程度上反映台网的理论定位能力 (高永涛等,2013)。本文结合台网的地震震级监测能力和台网的理论定位误差水平,综合评 价四川泸州地区测震台网的监测能力。

1 台网监测能力评估方法

1.1 台网震级监测能力方法

对于台网能够监测记录到的地震震级的评估一般选用不同震级控制范围等值线图的方 式表达,这取决于台站的密度、空间的分布范围以及台站的背景噪声水平等因素(曹舸斌等, 2019)。

在台站的密度和空间位置已经确定的情况下,为客观了解台站的背景噪声现状,并保证 地震计的稳定性,选取各台站 24h 无震或无明显干扰的波形数据,进行去平均、去趋势、 1~20Hz带通滤波等数据预处理工作,然后对 24h 的地震记录取平均(许可等,2017;侯颉等, 2019)。根据台站布设范围和研究目标区域,主要考虑近震事件,以水平分量 S 波最大振幅 的绝对值 V_s 作为计算事件震级的标准。为保证拾取事件的准确性,保证地震信号能够清晰 识别,则需要信噪比≥6,即 V_s/V_n≥6,其中台站的背景噪声值 V_n 为台站东西和南北 2 个水 平分量背景噪声记录的算术平均值,由仪器参数和仪器背景噪声记录计算求得。

根据国家行业标准《地震震级的规定 GB 17740—2017》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2017)数字台网用速度型记录测定近震体波的公式为

1期

中国地震

$$M_{\rm L} = \lg \left(\frac{V_{\rm s}}{2\pi f} \right) + R(\Delta)$$
(1)

为保证拾取事件的准确性,S 波最大振幅绝对值为背景噪声水平的6倍,即 V_s =6× V_n ,近震的频率一般取f=2~5Hz,这里选用最小频率2Hz,对于四川地区选用国家行业标准《地 震震级的规定 GB 17740—2017》中的R13 作为研究区域的量规函数 $R(\Delta)$ 。

台站数 N≥4 时可以求出地震基本参数以及震源定位的观测误差,当有 4 个及以上台站 能够同时观测到地震事件时,该事件所在的区域,为该事件对应震级的有效观测区域(吴开 统等,1991;季爱东等,2001)。因此,本文采用地震排序法计算研究区域内能够监测的理论 震级分布。将研究区域网格化,假设每一个网格点为一个虚拟震源,对于虚拟震源 *i* 把台网 所有台站按式(1)计算出震级,然后将震级由小到大进行排序,选取第 4 号震级为该虚拟震 源能够被监测到的地震震级。然后按照此法计算研究区域的所有虚拟震源点,绘制等值线, 即可得到台网能够监测的地震震级等值线分布图(谢静等,2014;卫超等,2017)。

1.2 台网 D 值理论定位方法

影响地震监测台网定位精度的主要因素包括:地震台站的空间分布、地震波到达台站的 到时读数准确性、使用的理论地球速度结构模型与真实地球速度结构模型的一致程度、地震 波走时的区域异常情况等方面(邱宇等,2020)。其中速度模型和区域异常等因素可以通过 联合震中测定技术来消除,而 P 波读取误差和台站相对震源的几何位置等随机因素却无法 消除,这也是本研究的重点(巩思园等,2010)。

Kijko(1977)提出了基于 D 值最优设计理论的地震台网设计方法,认为测站位置的优化 取决于震源参数协方差矩阵 $(A^{T}A)^{-1}$,其中 A 为震源参数相对于走时的偏导数矩阵。求取 协方差矩阵行列式的最小值,最小值越小,震源参数的分布越集中,对参数的估值越准确。

假设某个地震事件的震源参数为 $H(x_0, y_0, z_0, t_0)$,编号为 $i(i=1,2,3, \dots, n)$ 的台站坐标 为 $X_i(x_i, y_i, z_i), v_p$ 为介质 P 波波速, t_0 为震源发震时刻, t_i 为台站 i 接收 P 波的信号的时刻, 则震源 H 到台站 i 的走时为

$$T_{i}(H, v_{0}, X_{i}) = t_{i} - t_{0} = \frac{\sqrt{(x_{i} - x_{0})^{2} + (y_{i} - y_{0})^{2} + (z_{i} - z_{0})^{2}}}{v_{0}}$$
(2)

因此,震源参数协方差矩阵为

$$\boldsymbol{C} = k(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}$$
(3)

式中,k为常数,A为震源参数相对走时的偏导数矩阵。

$$\boldsymbol{A} = \begin{cases} 1 & \frac{\partial T_1}{\partial x_0} & \frac{\partial T_1}{\partial y_0} & \frac{\partial T_1}{\partial z_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{\partial T_n}{\partial x_0} & \frac{\partial T_n}{\partial y_0} & \frac{\partial T_n}{\partial z_0} \end{cases}$$
(4)

考虑到随机误差的 P 波波速影响和 P 波到时拾取误差,建立对角矩阵 W,因此,新的协方差矩阵为 $C = (A^T W A)^{-1}$ 。随机误差矩阵中对角元素为

230

МҮК

$$W = \frac{1}{\left(\frac{\partial T_{i}}{\partial v_{p}}\right)^{2} (\sigma v_{p})^{2} + (\sigma t_{p})^{2}}$$
(5)

其中, σv_p 为随机 P 波速度误差, σt_p 为随机 P 波到时拾取误差。本研究主要讨论台网的监测能力, 简便起见, 假设地下介质为均匀各向同性速度模型, P 波速度误差在 10% 以内随机 变化, P 波到时拾取误差在 0.01~0.1s 之间随着虚拟震源点与台站间的距离变化而变化。

Kijko(1977)定义震中位置标准差为平面圆的半径,该圆的面积等于在(x₀,y₀)处标准误 差椭圆的面积,由此确定震中定位误差为

$$dh = \sqrt{\sqrt{C_{22}C_{33} - C_{23}^2}} \tag{6}$$

以及震源的深度误差为

$$dz = \sqrt{C_{44}} \tag{7}$$

其中, C_{22} 、 C_{33} 、 C_{44} 为新的协方差矩阵 C 的对角线元素, C_{23} 为矩阵 C 第 2 行第 3 列元素。

结合台网的地震震级监测能力和台网的 D 值理论定位误差水平,能够从不同方面评价 测震台网的监测能力。

2 泸州台网震级监测能力

泸州地区测震台网的 17 个台站的参数如表 2 所示,15 个流动台站的地震计为 GL-CS2 或 GL-CS60,固定台站的地震计为 CMG-3ESPC,数据采集器均为 EDAS-24GN,采样率为 100Hz。台网的最大台间距为 56.1km,最小台间距为 4.8km,平均台间距为 25.6km,仪器供 电以太阳能为主,数据记录以 4G 无线传输方式传入四川省测震台网中心。

+	-
	.,
AX	-

泸州台网 17 个台站的参数及台站背景噪声值

台站(代码)	东经/(°)	北纬/(°)	高程/m	地震计型号	数据采集器型号	背景噪声值/(μm ·s ⁻¹)
茂坝(MBA)	105.50	29.09	348	GL-CS2	EDAS-24GN	0.067288
新屋(XWU)	105.61	29.22	377	GL-CS60	EDAS-24GN	0.750126
金龙村(JIL)	105.35	29.02	255	GL-CS2	EDAS-24GN	0.034367
嘉明(JMT)	105.33	29.25	290	GL-CS2	EDAS-24GN	0.084226
董湾(DWT)	105.48	29.28	313	GL-CS60	EDAS-24GN	0.098288
一心村(YXT)	105.31	29.10	311	GL-CS60	EDAS-24GN	0.053405
桂凤村(GFT)	105.22	29.05	282	GL-CS2	EDAS-24GN	0.170458
金钱村(JQC)	105.25	29.14	317	GL-CS2	EDAS-24GN	0.064508
华通村(HTC)	105.49	29.15	313	GL-CS2	EDAS-24GN	0.038916
奇峰镇(QFZ)	105.53	29.12	331	GL-CS2	EDAS-24GN	0.169595
宝丰村(BFC)	105.57	29.11	366	GL-CS60	EDAS-24GN	0.016016
劳动村(LDC)	105.57	29.17	337	GL-CS2	EDAS-24GN	0.070578
红山村(HSC)	105.50	29.19	297	GL-CS2	EDAS-24GN	0.035429
河嘴村(HZC)	105.24	29.23	309	GL-CS2	EDAS-24GN	0.035643
响石镇(XSZ)	105.17	29.28	315	GL-CS60	EDAS-24GN	0.023357
荣昌(ROC)	105.44	29.38	352	CMG-3ESPC	EDAS-24GN	0.016857
泸州(LZH)	105.41	28.87	283	CMG-3ESPC	EDAS-24GN	0.013407

1期

МҮК

中	玉	地	震		37	卷	ŝ
---	---	---	---	--	----	---	---

台站仪器的背景噪声实际记录为 *A*,单位为 counts;数据采集器的满量程出入电压为 *U*, 单位为 V;数据采集器的 ADC 字长为 *n*,则 *R* 为 2ⁿ;数据采集器的实际工作增益为 *K*;地震计 工作灵敏度为 *S*,单位为 V · s/m。根据以上仪器参数能够计算台站背景噪声值 *V*_n,具体公 式如下(侯颉等,2019)

$$V_{\rm n} = \frac{A \times U}{R \times K \times S} \tag{8}$$

由于 $V_s = 6 \times V_n$,即可得到横波水平分量最大振幅记录 V_s ,将 V_s 代入式(1),即可计算得 到台网的震级监测能力 M_L 。

将研究区域按 1km 的步长网格化,计算台网的理论震级监测能力如图 2 所示。由图 2 可以看出台网覆盖区域的 80%能够达到 *M*_L0.5 地震监测能力,研究区域内大部分区域能够 达到 *M*_L1.0 地震监测能力,整个研究区域均能够达到 *M*_L1.5 地震监测能力。



图 2 台网理论震级监测能力等值线分布

为验证理论震级监测能力计算结果的准确性,将泸州台网 2019 年 11 月 3 日—2020 年 4 月 15 日记录到的地震事件,分别从整个研究区域和 M_L 0.5 地震监测能力范围内的区域进行 分析,计算 地震震级 M 与地震事件数量 lgN 的关系,即G-R关系定律, lgN = a - bM (Gutenberg et al,1944;胡先明等,2010)。根据G-R关系,可以确定地震台网观测地震活动的 震级下限值,拟合直线段顶端最低震级即为台网的监测下限震级(许俊奇,1991)。对于我国 境内 5.0 级以下的地震,当震中距<1000km 时, M_L 与区域面波震级 M_s 基本一致,在实际应 用中无须对其进行震级的换算(刘瑞丰等,2007)。因此,本文在研究G-R关系时,将 M_L 震级 代入震级 M 进行计算分析。

如图 2 所示,整个研究区域 1456 个地震事件主要集中在 *M*_L0.5 地震监测能力范围以内,有 1302 个地震事件,占所有事件的 89.4%,其他 154 个事件中有 121 个事件位于 *M*_L0.5 与 *M*_L1.0 地震监测能力范围之间,有 33 个事件位于 *M*_L1.0 与 *M*_L1.3 地震监测能力范围

232

MYK

233

之间。

对 $M_L 0.5$ 地震监测能力范围以内的事件进行G-R关系计算,如图 3(b)所示,1.2 级为次 数最多的点位,地震累积数量 lgN 与震级 M 的拟合直线为 lgN=3.492-0.943M,相关系数为 0.9744,拟合直线顶端最低震级为 0.5,因此泸州台网对于该区域的监测下限震级为 0.5,与 理论震级监测能力 $M_L 0.5$ 的计算结果一致。对 $M_L 0.5 与 M_L 1.0$ 地震监测能力范围之间的事件进行 G-R 关系计算,如图 3(d)所示,地震累积数量 lgN 与震级 M 的拟合直线为 lgN=3.084-1.125M,相关系数为 0.9403,拟合直线顶端最低震级为 1.0,与理论震级监测能力 $M_L 1.0$ 的计算结果一致。由于 $M_L 1.0$ 与 $M_L 1.3$ 地震监测能力范围之间的事件样本数量较 \mathcal{O} ,故而不对其进行G-R关系计算。通过对不同监测范围内地震事件进行数量与震级的G-R 关系计算,验证了理论震级监测能力计算结果的准确性。



图 3 *M*_L0.5 监测能力范围内地震事件分析(a)和G-R关系分析(b), 以及 *M*_L0.5 与 *M*_L1.0 地震监测能力范围之间地震事件分布(c)和G-R关系分析(d)

另外,对于整体研究区域内 0.5 级以下的 324 个事件(图 4),有 317 个事件位于 *M*_L0.5 地震监测能力范围以内,占比 97.8%,其他 7 个事件也位于 *M*_L0.5 等值线附近的台站周边, 说明泸州台网在 *M*_L0.5 监测能力范围以内对 0.5 级及以上的事件均能监测到。因此,根据 台站背景噪声记录,计算得到的泸州台网震级监测能力等值线分布图是合理准确的。

1期



图 4 台网理论震级监测能力及 0.5 级以下地震事件分布

3 泸州台网定位能力

本节将基于 D 值理论,对泸州台网的理论定位能力进行讨论分析。为验证计算结果的 准确性,应用 Zhu 等(2002)基于一维模型计算地震波形的 fk3.1 数据合成软件,以 P 波最大 振幅为标准,添加随机噪声,合成 8 个信噪比为 3.0 的理论地震事件(图 5)。采用均匀各向 同性速度模型,根据全球地壳速度模型 CRUST1.0(2015)以及四川地区一维地壳速度模型 (赵珠等,1987;王宇航等,2019),P 波速度为 6000m/s,S 波速度为 2690m/s,震源类型为爆 破点源,震源深度为 10km。通过长短时窗比 STA/LTA 方法拾取合成数据的 P 波到时 (Allen,1978;吴治涛等,2010),统计表明 P 波到时的拾取误差在 0~0.03s 之间变化,平均误 差为 0.005s。采用非线性牛顿迭代方法进行地震定位计算(Thurber,1985;田玥等,2002),得 到合成事件的震中定位误差(图 5(a)中白色字体)和震源深度定位误差(图 5(b)中白色字 体)。

应用 D 值理论,将研究区域按 1km 的步长网格化,假设震源深度均为 10km,采用均匀各向同性速度模型,P 波速度为 6000m/s,对于每个虚拟震源点,计算理论定位误差时,P 波速度误差在 1%以内随机变化,根据合成事件的 P 波到时拾取误差结果,本研究 P 波拾取误差取 0.005s。计算每个虚拟震源点的震中理论定位误差 dh(图 5(a))和震源深度理论定位误差 dz(图 5(b)),并绘制等值线图。震中误差变化范围远小于深度误差变化,为对比直观,图 5(a)和图 5(b)的色标变化范围不同。

对比研究区域内理论定位误差等值线分布和合成数据的定位误差结果,合成数据的定 位误差结果普遍较小,但在台网覆盖范围附近,两者的定位误差水平相当,尤其是震中定位 误差 *dh* 基本相同。由于 *D* 值理论的误差椭球存在置信区域,距离台网的布设中心越远,理 论定位误差的可信性越低(巩思园等,2010)。因此,选取图 5(a)中震中理论定位误差 *dh* 在

СМҮК

37 卷



图 5 研究区域的震中(a)和震源深度(b)理论定位误差分布 (a)中白色字体为 8 个合成事件的震中定位误差;(b)中白色字体为 8 个合成事件的震源深度定位误差

60m 等值线以内的区域,以及震源深度理论定位误差 dz 在 100m 等值线以内的区域为可信 性较高的区域,即为置信区域。在置信区域内,对比基于 D 值理论的定位误差和合成数据的 定位误差,两者的误差水平比较接近,且误差变化趋势均是由台网中心向外围逐渐增大。

在置信区域内,合成数据的定位误差结果能够验证泸州台网理论定位误差等值线分布 的准确性。

4 泸州台网的综合分析

为定量地说明泸州台网能够监测到的 0.5 级地震事件的定位误差变化情况,本文计算 了 0.5 监测能力范围内的震中理论定位误差(图 6(a))和震源深度理论定位误差(图 6 (b)),为对比直观,图 6(a)和图 6(b)的色标变化范围不同。

之前对泸州台网分别从理论震级监测能力和理论定位误差水平进行了研究,通过对记录到的地震事件进行统计分析,验证了 *M*_L0.5 监测能力范围的合理性和准确性;通过对 8 个合成事件进行定位误差分析,验证了在置信区域内,台网理论定位误差计算结果的准确性。由于 *M*_L0.5 监测能力范围完全位于置信区域内,可以将两者结合起来,圈定 *M*_L0.5 监测能力范围区域为理论震级监测能力和理论定位误差合理准确的区域。因此,图 6 中对于 *M*_L0.5 监测能力范围内理论定位误差计算的结果是合理准确的。

从图 6(a)可以看到,震中的理论定位误差呈现中间及南北两侧偏小,东西两侧偏大的 现象,变化范围为 10~30m。震中误差最小的点在台网的中心泸县附近,且越靠近台网的边 缘,震中误差越大。从图 6(b)可以看到,震源深度的理论定位误差呈现中间略大,东西两侧 偏小的趋势,大致在 30~70m 之间变化。泸县附近的震源深度定位误差偏大,而台网东南侧 LDC、BFC、QFC、MBA 和 HTC 等台站密度较大的区域震源深度定位误差偏小。所以,震中的 理论定位误差可能与台网的整体几何布设形态有关,误差由几何中心向边缘增大;震源深度

中国地震



图 6 M_L0.5 监测能力范围内的震中(a)和震源深度(b)理论定位误差分布

的理论定位误差可能与台站密度有关,台站密度越大,理论深度误差越小。以此为例,说明 了将理论震级监测能力与理论定位误差计算相结合的应用是合理可行的。

5 结论

川南地区是近期研究的热点,对泸州台网的建设是对该区域的地震活动监测很好的补充。本文根据《地震震级的规定 GB 17740—2017》,计算了泸州台网的震级监测能力,通过计算分析不同震级监测范围区域内地震事件数量与震级的G-R关系,验证了震级监测能力计算结果的准确性和合理性。另外,通过 0.5 级以下地震事件的分布情况,进一步说明了 *M*_L0.5 监测能力范围计算结果的准确性。基于 *D* 值理论,计算了泸州台网在研究区域的震中定位误差和震源深度定位误差,对比 8 个合成事件的定位结果,说明了震中理论定位误差 *d* 在 60m 等值线以内、震源深度理论定位误差 *d* 在 100m 等值线以内的区域为置信区域,验证了台网在置信区域内理论定位误差的准确性。对于 *M*_L0.5 监测能力范围内的区域,定量分析了台网对于 0.5 级地震事件的理论震中定位误差和震源深度定位误差,初步总结了误差变化的规律,说明了将理论震级监测能力和理论定位误差计算相结合的应用是合理可行的。

结合理论震级监测能力和理论定位误差计算,能够对泸州台网的监测能力进行多方面 评估,说明了理论分析方法的可行性与合理性。虽然两者都是理论计算的结果,与实际情况 有一定的差距,但是对于缺乏地震资料的新建台网,理论计算分析的结果能够定性以及定量 地评估台网的监测能力,对于台网后期的调整和加密工作有重要的指导意义。

参考文献

曹舸斌,蔡明军,李文涛,等,2019. 云南测震台网地震监测能力分析. 地震地磁观测与研究,40(2):71~76. 邓起东,张培震,冉勇康,等,2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学:(D辑),32(12):1020~1030. 高永涛,吴庆良,吴顺川,等,2013. 基于 D 值理论的微震监测台网优化布设. 北京科技大学学报,35(12):1538~1545.

CMYK

236

37 卷

巩思园, 窦林名, 曹安业, 等, 2010. 煤矿微震监测台网优化布设研究. 地球物理学报, 53(2):457~465. 郭飙,刘启元,陈九辉,等,2002. 首都圈数字地震台网的微震定位实验. 地震地质,24(3):453~460. 候颉,余大新,叶庆东,等,2019. 北京测震台网台基背景噪声特征. 华北地震科学,37(3):56~61,80. 胡晓辉,盛书中,万永革,等,2020.2019年6月17日四川长宁地震序列震源机制与震源区震后构造应力场研究.地球物理 学进展,35(5):1675~1681. 胡先明,邵玉平,2010. 水库地震台网监测能力计算方法——基于G-R关系式. 地震地质,32(4):647~655. 季爱东,石玉燕,2001. 山东数字遥测地震台网地震监测能力评估. 高原地震,13(2):47~52. 蒋长胜,吴忠良,2005. 由"重复地震"给出的中国地震台网的定位精度估计. 中国地震,21(2):147~154. 李瑞红,2019. 基于地脉动噪声的呼伦贝尔地区监测能力研究. 防灾减灾学报,35(1):58~61. 刘芳,蒋长胜,张帆,等,2014. 内蒙古区域地震台网监测能力研究. 地震学报,36(5):919~929. 刘瑞丰,陈运泰,任枭,等,2007.中国地震台网震级的对比.地震学报,29(5):467~476. 邱宇,蒋长胜,司政亚,2020. 地震监测台网优化布局技术方法综述. 地球物理学进展,35(3):866~873. 阮祥,程万正,张永久,等,2008.四川长宁盐矿井注水诱发地震研究.中国地震,24(3):226~234. 四川省地震局,(2019-12-30)[2020-1-10]. 四川省地震局地震专辑,http://www.sedzj.gov.cndzpddzzj. 田玥,陈晓非,2002. 地震定位研究综述. 地球物理学进展,17(1):147~155. 王鹏,郑建常,李铂,2016. 基于 PMC 方法的山东省测震台网监测能力评估. 地球物理学进展,31(6):2408~2414. 王宇航,唐淋,黄春梅,等,2019. 四川地区一维地壳速度模型研究. 四川地震,(3):8~12. 王亚文,蒋长胜,刘芳,等,2017.中国地震台网监测能力评估和台站检测能力评分(2008-2015年).地球物理学报,60 $(7) \cdot 2767 \sim 2778.$ 卫超,郭德科,迟新萍,等,2017. 河南省区域数字测震台网监测能力分析. 地震地磁观测与研究,38(6):48~51. 吴开统,焦远碧,杨满栋,1991.中国地震台网布局的优化方案.地震学刊,(1):22~37. 吴治涛,李仕雄,2010. STA/LTA 算法拾取微地震事件 P 波到时对比研究. 地球物理学进展,25(5):1577~1582. 谢静,刘双庆,孙路强,2014. 区域台网地震监测能力评估算法的 Matlab 实现. 山西地震,(4):1~3. 许俊奇,1991.陕西测震台网监测能力评价. 地震地磁观测与研究,12(4):12~16,11. 许可,柳艳丽,高也,等,2017. 天津测震台网地震监测能力分析. 地震地磁观测与研究,38(4):194~198. 易桂喜,龙锋,梁明剑,等,2019.2019年6月17日四川长宁 Ms6.0 地震序列震源机制解与发震构造分析.地球物理学报, **62**(9):3432~3447. 张致伟,龙锋,王世元,等,2019.四川宜宾地区地震定位及速度结构.地震地质,41(4):913~926. 赵珠,张润生,1987.四川地区地震波分区走时表的编制.四川地震,(3):29~35. 中国地震台网中心,(2019-12-30)[2020-1-10].中国地震台网历史查询,http://www.ceic.ac.cn/history. 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,2017. 地震震级的规定 GB 17740-2017. 北 京:中国标准出版社. Allen R V, 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. Bull Seismol Soc Am, 68(5):1521~1532. Gutenberg B, Richter C F, 1944. Frequency of earthquakes in California. Bull Seismol Soc Am, 34(4):185~188. Kijko A, 1977. An algorithm for the optimum distribution of a regional seismic network-II. An analysis of the accuracy of location of local earthquakes depending on the number of seismic stations. Pure Appl Geophys, 115(4):1011~1021. Lei X L, Wang Z W, Su J R, 2019. The December 2018 ML 5.7 and January 2019 ML 5.3 earthquakes in South Sichuan Basin induced by shale gas hydraulic fracturing. Seismol Res Lett, 90(5):2092~2093. Sato Y, Skoko D, 1965. Optimum distribution of seismic observation points. II . Bull Earthquake Res Inst, 43(3):451~457.

Schorlemmer D, Mele F, Marzocchi W, 2010. A completeness analysis of the national seismic network of Italy. J Geophys Res: Solid Earth, **115**(B4): B04308.

Schorlemmer D, Woessner J, 2008. Probability of detecting an earthquake. Bull Seismol Soc Am, 98(5):2103~2117.

Sereno Jr T J, Bratt S R, 1989. Seismic detection capability at NORESS and implications for the detection threshold of a hypothetical network in the Soviet Union. J Geophys Res; Solid Earth, **94**(B8):10397~10414.

Thurber C H, 1985. Nonlinear earthquake location: theory and example. Bull Seismol Soc Am, 75(3):779~790.

1期

MYK

238

37 卷

Wiemer S, Wyss M, 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan. Bull Seismol Soc Am, **90**(4):859~869.

Woessner J, Wiemer S, 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. Bull Seismol Soc Am, 95(2):684~698.

Zhu L P, Rivera L A, 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. Geophys J Int, 148(3):619~627.

Study on the Earthquake Monitoring Capacity of Seismic Network in Luzhou Area of Sichuan Province

Yu Yangyang Dai Shigui Du Yao Wang Yuxi Zhuang Yuanxu Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China

Abstract In order to strengthen the earthquake monitoring capability of Luzhou region in south Sichuan Province, 15 seismic stations are newly built, plus two fixed stations, forming Luzhou seismic monitoring network. According to the national standard of "Provisions on Earthquake Magnitude GB7740—2017", the magnitude monitoring capability of Luzhou seismic network is calculated. The accuracy and rationality of the calculation results of magnitude monitoring capability are verified by the statistical analysis of actual earthquake events. Based on the *D*-value theory, the epicenter errors and source depth errors of Luzhou seismic network in the study area are calculated. Compared with the positioning results of 8 synthetic events, it shows that the theoretical positioning error of the network is accurate within a certain range. For the area within the $M_L 0.5$ monitoring capacity, the theoretical positioning errors of the network for the earthquake events of $M_L 0.5$ magnitude is quantitatively analyzed. It is reasonable and feasible to combine theoretical magnitude monitoring capability with theoretical positioning error calculation.

Keywords: Seismic network; Monitoring capability; Theory D-value