

王莉婵,毛国良,李小军,等,2020. 2020 年 7 月 12 日唐山  $M_s$ 5.1 地震预警处理能力分析. 中国地震,36(3):394~406.

# 2020 年 7 月 12 日唐山 $M_s$ 5.1 地震 预警处理能力分析

王莉婵 毛国良 李小军 王宁 王亚玲

河北省地震局,石家庄 050021

**摘要** 2020 年 7 月 12 日,河北唐山发生  $M_s$ 5.1 地震,河北省地震预警系统成功地处理并产出了这次地震预警各种结果数据,本文借助此次地震对河北地震预警网内震中距 200km 范围内台站产出质量以及地震预警前 5 次处理结果进行详细分析。此次地震发生在河北地震预警网内,平均台间距为 10km,首台触发后 3s、震后 6s 发布首次处理结果,与编目结果相比,震级偏差为 -1.3,震中位置偏差为 2.6km,盲区半径为 18km。随着参与定位台站数量增多,震级与位置偏差越来越小,但震级仍整体偏小。河北地震预警网台站产出质量整体较高,其中烈度台作为地震预警最重要的组成部分,是决定预警效果的关键因素。本次地震震中距 200km 范围内,烈度台平均信噪比为 48,震中距 50km 范围内平均信噪比为 112,符合预警系统对信噪比的要求。本次地震预警结果表明,河北地震预警网内台站布局基本合理,波形质量较高,地震预警系统处理软件在本次地震中预警产出效果较好,已经具备了一定的地震预警能力。

**关键词:** 地震预警系统 唐山  $M_s$ 5.1 地震 数据质量 预警处理能力

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0394-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震预警的设想最早是在 1868 年美国旧金山大地震后,由 Cooper 于 1968 年提出,其主要原理是利用电磁波传播速度大于地震波的传播速度,根据震中附近的地震台所记录到的最早到达的地震波信息快速计算地震三要素、影响范围及其破坏程度,并抢在破坏性地震波到达之前发布预警信息(张红才等,2012)。利用地震预警系统提供的几秒至几十秒的预警时间,公众可以逃生,重大基础设施及生命线工程可以实施紧急处置,从而减轻地震时次生灾害的发生。因此积极推进地震预警,在减少地震人员伤亡与减轻重大工程灾害损失上具有极强的减灾意义(于培青等,2019;高峰等,2014)。

一些国家及地区的地震预警事业发展较早,如日本、美国、墨西哥、欧盟及中国台湾。作为一个地震灾害较多的国家,日本是世界上最早建设地震预警系统的国家之一,并于 20 世

[收稿日期] 2020-08-07; [修定日期] 2020-09-05

[项目类别] 河北省地震局测震专业仪器系统检测评估与观测场地遴选创新团队、河北省省科技厅项目“紧急地震信息服务系统在政府和教育部门的研究和应用”(17275407D)共同资助

[作者简介] 王莉婵,女,1988 年生,工程师,主要从事地震监测与预警工作。E-mail:wlc84872583@163.com

毛国良,通讯作者,男,1979 年生,高级工程师,主要从事地震监测与预警研究。E-mail:99112mao@163.com

纪 50 年代与 80 年代分别建立了铁路预警系统与紧急地震速报系统,2007 年日本气象厅正式对全国公众发布预警的警报信息,称为“紧急地震速报”(马强,2008;袁志祥等,2007;杨程等,2018),经过数十年的发展,日本地震预警系统取得了较好的应用成果,同时也完善了相应的法律制度。美国于 1994 年开始研究地震预警,最初使用的是 Elarm 系统,经过技术不断更新,在 ElarmS3 的基础上建成了 ShakeAlert 系统,该系统融合了 ElarmS3 和 Finder 两种算法(马强,2008;杨陈,2018;王红蕾等,2019)。墨西哥于 1991 年建成了墨西哥市地震预警系统 SAS(马强,2008;杨陈,2018)。中国台湾于 1994 年开始进行地震预警工作,并建立了“及时强地动观测系统”,并由最初的仅为花莲地区提前发布警报信息转变为目前的台湾全岛地震预警模式(郑秀芬等,2005;萧乃祺,2007)。

而我国作为地震高风险国家之一,建立一套完善的地震预警系统势在必行,因此中国地震局及其下属单位于 2008 年开始实施国家科技支撑和地震行业科研专项“地震预警技术研究及系统建设”与“首都圈地区地震预警参数确定关键技术研究”等工作,并于 2009 年 12 月实施“地震预警与烈度速报系统的研究与应用”等项目,初步研发了地震预警以及地震烈度速报系统软件,并依托于福建及首都圈地区台网对该软件进行实验运行。在取得初步实验成果的基础上,福建与首都圈地区开始进行地震烈度速报与预警系统的初步建设,测试表明,首都圈地区已经初步具备地震预警与烈度速报系统的建设能力。中国地震局于 2018 年正式实施国家地震烈度速报与预警工程。目前,河北省地震局已完成部分预警台站建设及预警系统的安装,并进入实验运行阶段。

2020 年 7 月 12 日 06 时 38 分,河北唐山市古冶区发生  $M_s$ 5.1 地震,震源深度 10km,本次地震震中位于唐山-巍山-长山南坡断裂北部,距 1978 年唐山大地震震中 30km,周边断裂发育(张素欣等,2020),北京、天津、辽宁等多地区有感,河北地震预警网震后 6s 产出本次地震预警警报信息第一报。本文利用此次地震,对河北地震预警网内台站数据产出质量以及采用的深圳防灾减灾技术研究院研制的地震预警和烈度速报处理软件(以下简称“JEEW”)进行评估,对未来河北地震预警网预警系统的改进及应用提供参考依据。

## 1 河北地震预警网现状

河北省地震局最早于 2015 年建成唐山烈度速报实验网,包含烈度台 147 个,2018 年建成河北地震预警和烈度速报示范网,包含烈度台 367 个,并与唐山烈度速报实验网并行试用,成立河北地震预警网。目前河北地震预警网包括测震台 130 个(北京 28 个,天津 31 个,河北 71 个),强震台 80 个(北京 22 个,天津 10 个,河北 48 个),烈度台 367 个(张家口 100 个,唐山 147 个,北京 40 个,天津 80 个),预警网内(北京、天津、唐山及张家口地区)平均台间距为 9~12km,台站密度大且布局合理。台站分布见图 1。

不同类型的台站配备的传感器与数据采集器不同(表 1),其中传感器决定了观测频带,而不同的数据采集器的传输协议决定了实时数据的传输速率。与测震台、强震台仪器相比,MEMS 烈度仪是低成本的地震观测设备,具有体积小、对安装环境要求低等优点,在全球地震预警系统中得到了广泛应用,保证了地震预警与烈度速报功能的实现(Peng et al,2019;许可等,2019)。为保证台站时间的准确性,测震台与强震台采用 GNSS 授时(授时精度  $<100\mu\text{s}$ ),烈度台采用 NTP 授时(授时精度  $<100\text{ms}$ )。所有台站均采用实时数据传输模式,

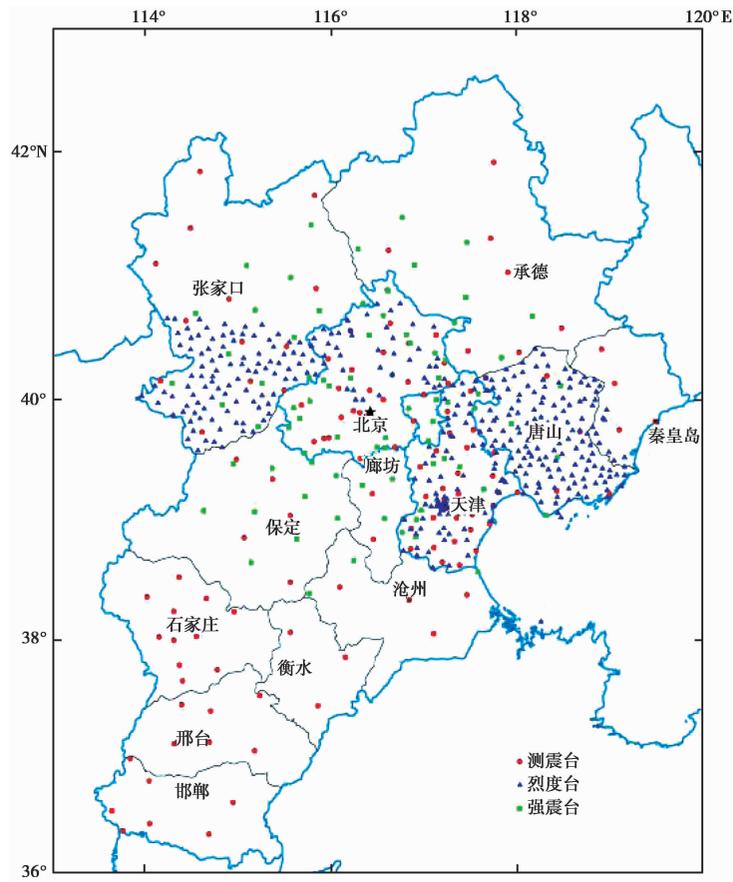


图 1 河北地震预警网台站分布

表 1 不同类型台站传感器及对应数据采集器

	传感器	数据采集器
测震	BBVS-60	EDAS-24GN、EDAS-24 IP
	BBVS-60DBH	EDAS-24 IP
	BBVS-120	EDAS-24GN、EDAS-24 IP
	3ESPC-60	CMG-DM24、EDAS-24GN
	3ESP-60	CMG-DM24
	CMG-3TB	CMG-DM24
	CTS-1	EDAS-24 IP
	FSS-3DBH	EDAS-24 IP、EDAS-24GN
强震	传感器	数据采集器
	SLJ-100	REFTEK-REN
烈度	一体机(包含传感器与数据采集器)	
	GL-P2B、MI3000、PALERT、PALERT Advance	

网内地震可在震后 5~10s 发布第一报预警信息,初步实现了地震预警与烈度速报功能。

## 2 地震预警处理系统

河北地震预警网目前安装部署的地震预警处理系统是由黄文辉等(2016)研制的 JEEW。该系统可实时接收不同台站类型的数据,实现了测震、强震和烈度等 3 种不同类型台网的无缝融合,结合该系统开发的地震预警定位算法和震级快速估算方法,实现了超快地震速报。

JEEW 最大限度地提高了软硬件在数据处理速度与准确度等方面的性能。该系统包含了新的地震数据流服务器模块,模块采用 HTTP 作为数据传输协议,将数据打包模式由原来的 512 字节更改为 256 字节,从而缩短了实时数据时延。为了准确地检测到初至 P 波,采用长短时窗比算法(信噪比 $\geq 20$ )和 AIC 算法,实时检测地震波形,拾取到的 P 波震相会立即被转发到触发池以进行事件关联。系统采用 Tnow 方法(Horiuchi et al,2005)对触发和未触发台站进行地震定位,并采用  $P_d$  算法(Kuyuk et al,2013)估算预警震级。当震中附近(10km 之内)台站 S 波被检测到,该系统将直接利用地方震级  $M_L$  算法计算震级,这是因为地震动峰值会在横波到达后不久到达,通常小于 1s 或 2s。为了降低误触发的概率,该系统在事件处理结束和信息发布之前,增加了滤波器,至少触发 2 个台站,并利用地震波的频率区分地方震与远震等(Peng et al,2020)。

## 3 唐山 $M_s5.1$ 地震预警处理结果分析

### 3.1 台站运行质量分析

台站运行质量主要包括台站的连续性、时间的准确性、信噪比、观测系统时延等。其中台站的连续性、时间的准确性是保障预警系统正常工作的最基本要求,若台站断记较多,则无法保证台站分布以及台间距,会影响预警时间,扩大预警盲区。台站时间的准确性则依赖于台站授时,如果授时错误,台站的时间会早于或晚于实际时间,即台站为负延时或延时过大,从而影响预警系统的定位结果。可以利用台站的初动震相到时检测台站时间的准确性。波形的信噪比是指地震波的振幅与台基噪声振幅的比值,反映了台站检测地震的能力,只有当波形信噪比达到系统要求时,JEEW 才会检测到并认为其是一个地震事件。地震观测系统时延是指地震观测信号从产生至到达接收端所需要的时间,包括地震仪检测信号、数据采集器转换和封装信号、信号传输和信号交换等环节时延的总和(中国地震局,2015)。时延越大,预警时间越长。

由于地震预警的警报要求快速处理,因此预警系统处理过程主要依赖于震中附近的台站,即震中附近的台站质量决定了地震的预警效果。同时,借助此次地震,对预警网内其他范围内台站质量进行分析,但由于随着震中距增大,台站记录信噪比下降,可分析性降低,因此本次地震台站数据质量分析分为 2 部分,即震中距 50km 与震中距 200km 范围内(图 2)。

#### 3.1.1 台站的连续性

以中国地震台网中心正式编目结果为准,根据台站经纬度信息,计算得到震中距 50km 范围内台站 89 个,其中包含 83 个烈度台,3 个测震台,3 个强震台;震中距 200km 范围内台站共计 365 个,其中包含 252 个烈度台,70 个测震台,43 个强震台。通过查看地震波形可

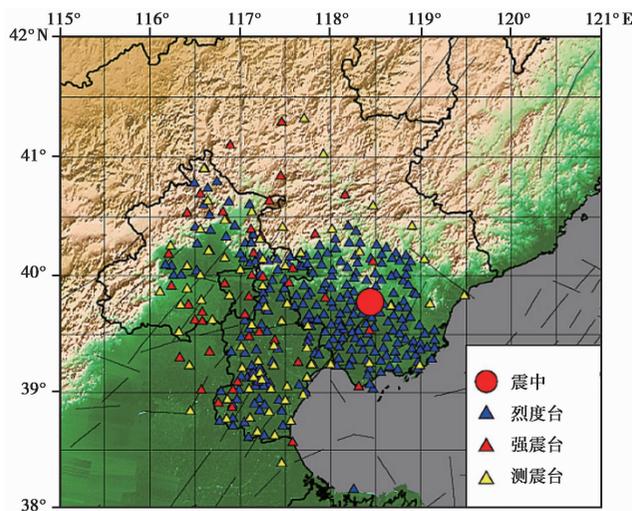


图2 唐山  $M_s5.1$  地震震中距 200km 范围内台站分布

知,震中距 200km 内完全中断台站 25 个,多为烈度台;数据丢包台站 7 个,其中震中距 50km 范围内数据丢包台站 2 个,均为烈度台。

### 3.1.2 台站初动时间

本文根据编目结果中的发震时刻,计算震中距 200km 范围内每个台的  $P_g$  或  $P_n$  震相走时,并绘制震中距与走时拟合曲线,若该台站初动时间正确,则该台站走时符合拟合曲线的趋势(图 3 中橙色与蓝色的点),否则该台站将偏离拟合曲线趋势(图 3 中红色的点)。根据走时拟合图并结合地震波形,共发现 20 个台站初动存在时间错误(偏差为  $\pm 1.5s$  以上),其多为烈度台。震中距 50km 范围内初动时间错误台站有 3 个,均为唐山地区烈度台,时间残差均小于 3s。造成初动时间异常和错误的因素较多。

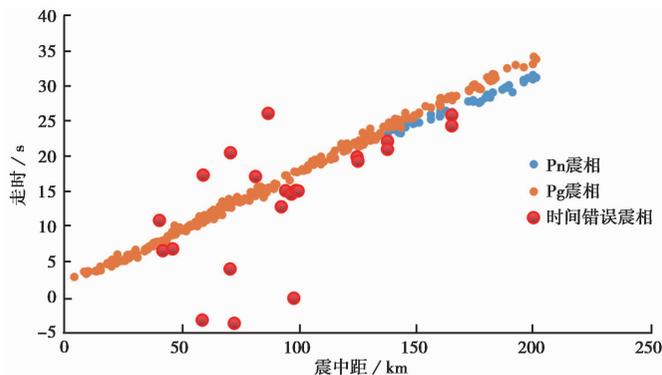


图3  $P_g$ (橙色)与  $P_n$ (蓝色)震相震中距与走时拟合曲线

### 3.1.3 波形的信噪比 SNR

信噪比一般是指有效信号与相对背景噪声的比值,对于地方震或近震而言,一般选择 1~20hz 频带地震波的有效值与台基噪声有效值的比值(中国地震局监测预报司,2017)。据此,在上述初动到时拾取的基础上,计算得到震中距 200km 范围内每个台站的信噪比。由于

烈度台密度最大,是预警系统的重要组成部分,所以本文仅针对烈度台信噪比进行详细分析,如图 4 所示,震中距 50km 范围内信噪比最高,且随着震中距增大,信噪比逐渐降低,但部分台站信噪比有明显增高,通过查看台站参数可知,这些台站为基岩台,所以相对于土层台信噪比有所增加。另外,将所有台站按照类型分类统计,测震台平均信噪比为 695,强震台平均信噪比为 145,烈度台平均信噪比为 48,其中,震中距 50km 范围内为 112,完全满足预警系统对波形信噪比的要求。

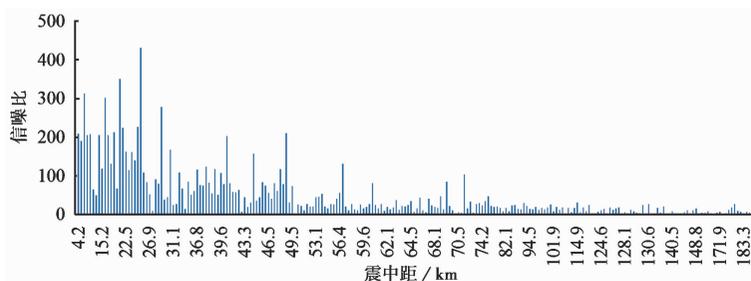


图 4 震中距 200km 范围内烈度台信噪比

### 3.1.4 地震观测系统时延

地震预警需要秒级处理,数据时延 1s 就意味着地震警报晚 1s,预警盲区半径增加约 4km。因此,地震预警一般要求地震观测系统时延小于 2.5s(中国地震局,2015)。取台站震前 1min 时延数据进行统计分析(表 2),4 个台站为负延时,根据 JEEW 要求,这 4 个台站将不参与定位处理。时延在 2s 以内的台站共 296 个。扣除时延异常大的台站,按照台站类型分类,烈度台站平均时延 1.71s,测震台平均时延 1.59s,强震台平均时延 1.45s,基本满足预警时效。

表 2 震中距 200km 范围内台站时延统计

时延/s	<0.00	0~0.50	0.51~1.00	1.01~1.50	1.51~2.00	>2.00
台站数量	4	12	40	208	36	29

## 3.2 预警处理结果分析

理想的地震预警效果是利用最短的时间发布最准确的地震信息,但预警系统仅是利用震中附近少数台站的 3s 内的 P 波数据测定地震参数,地震波传播时间短,不能表征全部的地震信息。因此,预警信息的发布速度与信息的准确度一直是地震预警技术需要研究和突破的问题。对此,本文以唐山  $M_s5.1$  地震的预警为例,探讨地震预警在信息准确度(震中位置及震级)与盲区的范围(用时的长短)这 2 个方面的问题。

### 3.2.1 地震预警系统的参数测定

地震预警参数测定包括地震发震时刻、震中位置和地震震级。唐山  $M_s5.1$  地震预警系统共产出系列地震警报 22 报(表 3)。距震中最近的台站为烈度台 B0028,震中距为 4.2km,在首台触发后 3s,相当于震后 6s,JEEW 发布第 1 次警报处理结果。相较于中国地震台网中心正式测定结果,第 1 报结果定位偏差为 2.6km,震级偏差为 -1.3。随着触发台站数量的增

加和时间的扩展,后续的警报处理结果趋于稳定,但震级一直偏小,具体情况见表2。为了较为全面地探讨 JEEW 在唐山  $M_s5.1$  地震中的预警效果,同时考虑预警的时效性,本文仅针对预警系统的前5次警报处理结果进行详细分析,分析内容主要包括:初动时间异常台站处理情况,初动震相到时拾取精度,定位结果的震中位置偏差与震级偏差。

表3 河北唐山市古冶区  $M_s5.1$  地震 JEEW 处理情况

序号	发布时间 (年-月-日 T时:分:秒)	发震后 秒值 /s	触发台 站数	使用台 站数	预警发震时刻 (年-月-日 T时:分:秒)	北纬 /(°)	东经 /(°)	预警 震级	定位 偏差 /km	震级 偏差
1	2020-07-12T06:38:30.4	6.0	23	7	2020-07-12T06:38:25.4	39.7565	118.4417	3.8	2.6	-1.3
2	2020-07-12T06:38:31.6	7.2	36	19	2020-07-12T06:38:25.0	39.763	118.4486	4.1	2.0	-1.0
3	2020-07-12T06:38:32.8	8.4	52	33	2020-07-12T06:38:24.9	39.7652	118.4527	4.2	2.0	-0.9
4	2020-07-12T06:38:34.6	10.2	68	49	2020-07-12T06:38:24.9	39.7677	118.4565	4.3	2.0	-0.8
5	2020-07-12T06:38:35.6	11.2	86	67	2020-07-12T06:38:24.9	39.7684	118.4549	4.4	1.8	-0.7
6	2020-07-12T06:38:36.7	12.3	113	92	2020-07-12T06:38:25.0	39.7723	118.4527	4.4	1.4	-0.7
7	2020-07-12T06:38:38.6	14.2	145	126	2020-07-12T06:38:25.1	39.7695	118.4536	4.4	1.6	-0.7
8	2020-07-12T06:38:40.3	15.9	177	161	2020-07-12T06:38:25.1	39.7717	118.4531	4.5	1.5	-0.6
9	2020-07-12T06:38:42.1	17.7	209	193	2020-07-12T06:38:25.1	39.7733	118.4528	4.5	1.3	-0.6
10	2020-07-12T06:38:45.1	20.7	245	229	2020-07-12T06:38:25.0	39.7762	118.4516	4.6	1.1	-0.5
11	2020-07-12T06:38:47.6	23.2	276	257	2020-07-12T06:38:25.1	39.7763	118.4529	4.5	1.2	-0.6
12	2020-07-12T06:38:50.5	26.1	309	285	2020-07-12T06:38:25.1	39.7768	118.4549	4.5	1.3	-0.6
13	2020-07-12T06:38:54.6	30.2	334	304	2020-07-12T06:38:25.1	39.7769	118.4558	4.5	1.4	-0.6
14	2020-07-12T06:38:58.9	34.5	346	313	2020-07-12T06:38:25.1	39.7769	118.456	4.4	1.4	-0.7
15	2020-07-12T06:39:01.1	36.7	353	317	2020-07-12T06:38:25.1	39.7769	118.456	4.4	1.4	-0.7
16	2020-07-12T06:39:05.3	40.9	369	323	2020-07-12T06:38:25.1	39.777	118.4561	4.4	1.4	-0.7
17	2020-07-12T06:39:09.3	44.9	380	324	2020-07-12T06:38:25.1	39.777	118.4561	4.5	1.4	-0.6
18	2020-07-12T06:39:13.5	49.1	392	335	2020-07-12T06:38:25.1	39.7769	118.4561	4.5	1.4	-0.6
19	2020-07-12T06:39:17.7	53.3	400	337	2020-07-12T06:38:25.1	39.7769	118.4561	4.5	1.4	-0.6
20	2020-07-12T06:39:29.6	65.2	472	398	2020-07-12T06:38:25.1	39.7765	118.4553	4.5	1.4	-0.6
21	2020-07-12T06:39:33.9	69.5	477	401	2020-07-12T06:38:25.1	39.7765	118.4552	4.5	1.4	-0.6
22	2020-07-12T06:39:37.9	73.5	481	402	2020-07-12T06:38:25.1	39.7765	118.4552	4.6	1.4	-0.5

(1)初动时间异常台站处理

唐山  $M_s5.1$  地震 50km 范围内台站初动时间错误的台站有 3 个,震中距 200km 范围内有 20 个,最大时间偏差超过 -17s,对异常台站的处理也反映了预警系统的处理能力。对于数据负延时台站,JEEW 已自动将其剔除;台站初动时间偏差在 2.5s 以上,JEEW 会检测并触发,但未让其参与定位;初动时间偏差在 2s 以内,会被系统检测触发并参与定位;初动时间偏差在 2.0~2.5s 之间,会在中间处理过程中参与定位,但随着触发台站增多,这些台站最终也会被舍弃,而且由于参与定位台站数量较多,这些初动时间错误的台站对最终结果的影响并不大。由此可以看出,在台站选择方面,JEEW 将初动到时误差基本控制在 2s 以内,较好地保证了定位结果的准确性。

### (2) 初动震相的拾取

唐山  $M_s5.1$  地震震中距 200km 范围内的大部分台站信噪比较高,震中距 50km 范围内信噪比最高,为初动震相到时的自动高质量提取提供了良好的数据基础。JEEW 第 5 次处理结果共使用台站 67 个,最远台站震中距为 47km,处于信噪比相对最高的范围内,将预警系统自动拾取到时与实际到时相比,平均残差为 0.05s,说明其震相拾取精度较高。

### (3) 位置测定偏差

唐山  $M_s5.1$  地震第 1 次处理结果使用台站数量为 7 个(图 5),均为唐山地区烈度台,台站分布的最大空隙角为  $85.2^\circ$ 。后续 4 次处理结果中使用的台站数量不断增加,最大空隙角也不断减小,从  $40^\circ$ (第 2 次结果)逐渐减小至  $11^\circ$ ,定位偏差为 1.8km,小于第 1 次处理结果(2.6km)。由此可以看出,空隙角越小,定位结果越好,因此可知台站的分布情况对预警结果有较大的影响,同时也可以看出 JEEW 所采用的算法在唐山  $M_s5.1$  地震定位中适用性较好。

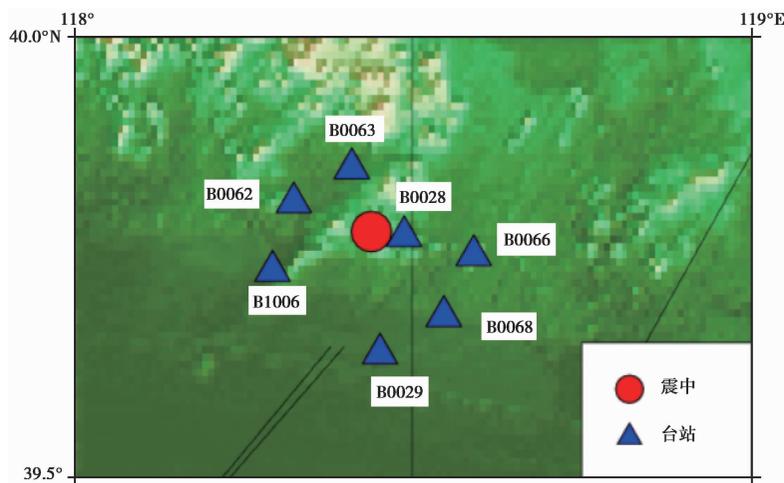


图 5 JEEW 第 1 次处理使用台站分布

### (4) 震级偏差

由表 3 可知,唐山  $M_s5.1$  地震第 1 次处理结果的震级与正式结果震级偏差为 -1.3,前 5 次结果平均偏差为 -0.9,偏差较大。根据正式编目结果,部分震中距大于 70km 测震台震级才达到 5.0 级及以上,JEEW 前 5 次结果使用的台站均在 50km 之内,且使用的最远测震台 LUX 台的 JEEW 处理结果为 4.1,编目结果也仅为 3.8。图 6 为前 5 次处理过程中所使用的台站类型及其震级,所有台站震级均偏小,尤其是数量最多的烈度台,因此,JEEW 前 5 次处理结果偏小属于正常情况。

JEEW 处理结果中第 22 次结果的震级偏差最小,为对比相同震中距范围内不同类型台站的震级估算特点,将第 22 次结果中震中距 100km 范围内的台站,以 10km 为间隔分为 10 组,统计每组中不同类型台站的平均震级(表 4),由表可知,同震中距范围内,测震台平均震级略大于强震与烈度台,说明 JEEW 在计算烈度与强震台震级方面有待改进。

为更好地评价 JEEW 在震级估算方面的稳定性,统计第 1 次处理过程中使用的 7 个台

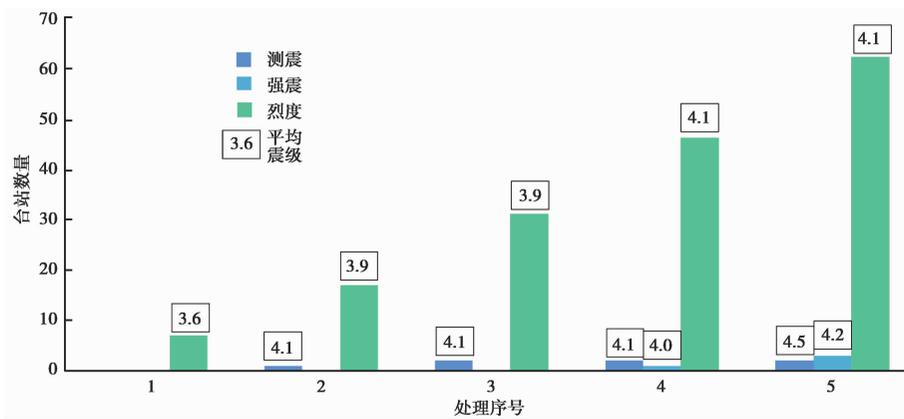


图 6 JEEW 前 5 次处理使用台站数量及各类型台站的平均震级

表 4 JEEW 第 22 次处理结果中相同震中距内不同类型台站平均震级 (震中距 100km 内)

震中距范围/km	平均震级		
	烈度台	测震台	强震台
0~10	3.3	3.8	
10~20	3.6		
20~30	3.8	4.1	3.8
30~40	3.9		3.7
40~50	3.3	4.4	3.5
50~60	3.8	3.9	
60~70	4.0	4.2	
70~80	4.2	4.1	4.1
80~90	4.2	4.3	3.9
90~100	4.3		4.4

站在前 5 次处理过程中的震级变化。由图 7 可知,随着时间变化,单台震级有增大趋势,但基本稳定。

### 3.2.2 唐山 $M_s 5.1$ 地震预警盲区

预警盲区是指地震预警信息发送至报警目标区域时,破坏性地震波已经到达并扫过该地区。这是由于地震发生后,地震波到达监测台站需要时间,且处理地震和发布警报均需要时间,而在这个时间内地震波依然传播。地震警报发出时,以震中为圆心,以破坏性最大的 S 波走过的距离为半径的区域即为地震预警的盲区。由于盲区离震中最近,往往就是破坏性最严重的极震区(孙文韬,2016)。盲区范围大小与 P 波传播至台站的时间、数据传输的时间、系统处理及信息发布时间均有关系(杨陈,2013)。盲区半径可根据盲区计算公式(李佳威等,2016)得到

$$r_{BZ} = \sqrt{(t_p + t_1 + t_2)^2 v_s^2 - h^2}$$

其中,  $t_p$  为 P 波走时,  $t_1$  为所用 P 波数据长度,  $t_2$  为处理、发布及延时等累计用时,  $v_s$  为横波

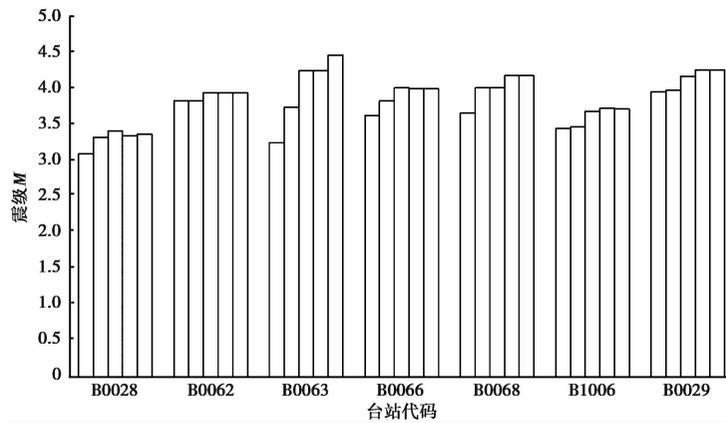


图 7 单台震级随时间变化(JEEW 前 5 次处理结果)

速度,  $h$  为震源深度(单位为 km)。

唐山  $M_s5.1$  地震预警前 5 次处理结果分别用时 6s、7.2s、8.4s、10.2s、11.2s, 即对应公式中的  $t_p+t_1+t_2$ 。本次地震位于燕山南麓低山丘陵与南部倾斜平原交界部位, 基岩出露较好, 地震波传播速度较快, 根据 crust2.0,  $v_s$  取值 3.4km/s; 根据中国地震台网中心正式目录结果, 本次地震震源深度为 10km, 据此计算得到本次地震前 5 次处理的预警盲区半径分别为 18km、22km、27km、33km、37km, 并基于用时、定位偏差、震级偏差、盲区半径等综合评价前 5 次处理结果(表 5)。第 1 次处理结果用时最短, 盲区半径最小, 但定位偏差也最大。后续结果中定位偏差越来越小, 但盲区半径也在不断增大, 表明地震发生后, 预警信息的准确性与时效性相互矛盾, 因此在不断改进预警系统的同时, 发布策略的制定也非常重要。

表 5 JEEW 前 5 次处理结果

处理序号	用时/s	定位偏差/km	震级偏差	盲区半径/km
1	6.0	2.6	-1.3	18
2	7.2	2.0	-1.0	22
3	8.4	2.0	-0.9	27
4	10.2	2.0	-0.8	33
5	11.2	1.8	-0.7	37

对比杨陈(2013)与本文的研究结果(表 6), 可知唐山  $M_s5.1$  地震第 1 次处理结果盲区半径小于杨陈(2013)的研究结果, 这主要是因为目前预警网内台站波形打包由 512 字节减小为 256 字节, 时间缩短 1s, 即意味着盲区半径可以减少约 4km, 可以减轻人员伤亡, 因此, 秒级的速度提升在地震预警中至关重要。

表 6 杨陈(2013)与唐山  $M_s5.1$  地震盲区半径对比

	最近台站震中距/km	震源深度/km	触发台数	P 波截取长度/s	$v_s$ /km	盲区半径/km
杨陈(2013)	0	10	3	3	3.5	21
唐山 $M_s5.1$ 地震	4.2	10	7	3	3.4	18

## 4 结论与讨论

### (1) 震中位置测定

唐山  $M_s5.1$  地震发生后,河北地震预警系统 JEEW 在地震发生 6s 时即发布第 1 次处理信息,前 5 次处理结果中到时拾取偏差仅为 0.05s,且在定位过程中不断剔除初动时间错误的台站,保证了定位结果的准确性。当然后续处理也还在不断修正中,因此该系统在本次地震预警的震中位置精度一直较高,说明河北地震预警网内台站分布较好,JEEW 定位算法的稳定性与准确性较高。

### (2) 地震震级的快速测定

地震震级的估算是地震预警中最难确定的部分(金星等,2012),根据 Wu 等(2007)的计算,目前常用估算地震震级的  $\tau_c$  和  $P_d$  这 2 种方法对于预警第 1 报的处理结果大体上为 4、5 级地震的准确度误差较小,大地震和小地震误差较大。这是地震预警目前存在的技术问题。本次地震预警震级第 22 报总体上偏小,但整体基本稳定,主要原因是地震预警震级测定的方法还需要改进。和传统地震台网震级测定的最大不同是地震预警在前几报处理中只采用了 P 波的前几秒数据。对于 P 波前几秒数据是否可以测定出准确的震级,是地震学家一直在研究的问题,一种观点认为,P 波前几秒数据本身就无法代表地震破裂全过程,用其计算的震级或地震强度有较大误差。目前地震预警的实际情况对于第一报的处理结果是小地震往往偏大,大地震往往偏小,中等地震误差小一些。本次地震前 5 报震级误差为 0.7,应该是正常的。

另外,本次地震预警网大多数台站仪器为加速度计,测定的震级均偏小,由加速度转换的 P 波位移幅值  $P_d$  的误差可能也存在问题,需要后续借助更多的震例进行分析探讨。

### (3) 地震预警的盲区

理想的预警效果是利用最短的时间发布最准的地震信息,将盲区半径控制至最小,但从唐山  $M_s5.1$  地震预警的数据处理分析可知,目前地震预警技术的“快”和“准”存在矛盾。前 5 报数据已经使用了 67 个台站数据,特别是第一报处理结果,发出仅用 6s,地震预警盲区半径控制在 18km,已经达到了理论计算的水平。这次地震预警处理结果表明,第一报产出较快,但地震震级估算误差较大,准确度会降低。注重地震震级估算的准确度,就会增加预警时间,加大盲区。如前所述第 5 报时盲区半径为 37km,而第 22 报时盲区半径达到 250km 左右,已经没有实际意义。

地震预警是复杂的社会工程,上述地震预警技术存在的问题,会直接影响地震预警的效能,因此,在今后的预警工作中如何制定有效的发布策略也亟需解决。

### (4) 台站运行质量

台站运行质量对地震预警系统至关重要。台站运行质量包括数据连续性、时间的准确性及波形信噪比等,直接关系到预警处理结果的好坏,因此,从源头确保台站运行质量才能保证预警效果。分析本次地震预警处理结果,暴露了台站数据连续性、时间的准确性及波形信噪比等方面的问题,后续应加强台站运行质量。目前,除了台站连续性,河北省测震台网时间服务、信噪比、零漂等方面的运行情况均是依靠人工手动监控。但随着国家预警项目的不断建设,河北省未来将建成 1300 多个台站,全部依靠人工监控并不现实,而开发智能一体

化台网运行监控系统不仅可以保证台站的正常运行,还可以提供台网监测能力的动态变化,为地震预警处理质量提供背景数据,因此,亟需开发智能一体化台网运行监控系统。

**致谢:** 本文部分图件使用开源软件 GMT 软件绘制,中国地震局地球物理研究所彭朝勇研究员以及评审专家提出宝贵建议,在此表示感谢。

## 参考文献

- 高峰,杨学山,马树林,2014. 地震预警系统综述. 自然灾害学报, **23**(5):62~69.
- 黄文辉,沈玉松,吕作勇,等,2016. 地震超快速报系统试运行结果评估. 华南地震, **36**(4):1~7.
- 金星,张红才,李军,等,2012. 地震预警震级确定方法研究. 地震学报, **34**(5):593~610.
- 李佳威,吴忠良,2016. 地震预警系统的“盲区”控制问题——以首都圈地震预警原型系统为例. 中国地震, **32**(4),584~594.
- 马强,2008. 地震预警技术研究及应用. 博士学位论文. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 孙文韬,2016. 首都圈地震预警系统效能理论分析. 硕士学位论文. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 王红蕾, Walter M, 高景春,等,2019. 美国地震预警系统 ShakeAlert 测试与评估. 国际地震动态, **1**(5):17~25.
- 萧乃祺,2007. 台湾即时强震动观测于地震预警之应用. 博士学位论文. 台北:国立中央大学地球物理研究所.
- 许可,郭巍,高也,等,2019. 天津简易烈度计地震预警实验区建设. 震灾防御技术, **14**(2):456~463.
- 杨陈,2013. 中国地震预警系统建设的几个关键问题. 工程研究-跨学科视野中的工程, **5**(4):354~364.
- 杨陈,2018. 地震预警设计中的若干系统工程问题研究. 博士学位论文. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 杨程,解全才,刘泉,等,2018. 日本地震预警系统发展历程. 地震地磁观测与研究, **39**(4):126~134.
- 于培青,符衡,林彬华,等,2019. 地震预警在广西北流  $M_s$ 5.2 地震中的实践与应用. 华北地震科学, **37**(增刊):43~46,66.
- 袁志祥,单修政,徐世芳,等,2007. 地震预警技术综述. 自然灾害学报, **16**(6):216~223.
- 张红才,金星,李军,等,2012. 地震预警震级计算方法研究综述. 地球物理学进展, **27**(2):464~474.
- 张素欣,边庆凯,张子广,等,2020. 唐山断裂北段地震分布特征及其构造意义. 地震研究, **43**(2):270~277.
- 郑秀芬,陈朝辉,张春贺,2005. 台湾地震观测系统的发展与现状. 地震地磁观测与研究, **26**(3):100~107.
- 中国地震局,2015. DB/T 60-2015 地震台站建设规范 地震烈度速报与预警台站. 北京:地震出版社.
- 中国地震局监测预报司,2017. 测震学原理与方法. 北京:地震出版社.
- Horiuchi S, Negishi H, Abe K, et al, 2005. An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms. Bull Seismol Soc Am, **95**(2):708~718.
- Kuyuk H S, Allen R M, 2013. A global approach to provide magnitude estimates for earthquake early warning alerts. Geophys Res Lett, **40**(24):6329~6333.
- Peng C Y, Jiang P, Chen Q S, et al, 2019. Performance evaluation of a dense mems-based seismic sensor array deployed in the Sichuan-Yunnan border region for earthquake early warning. Micromachines, **10**(11):735.
- Peng C Y, Ma Q, Jiang P, et al, 2020. Performance of a hybrid demonstration earthquake early warning system in the Sichuan-Yunnan border region. Seismol Res Lett, **91**(2A):835~846.
- Wu Y M, Kanamori H, Allen R M, et al, 2007. Determination of earthquake early warning parameters,  $\tau_c$  and  $P_d$ , for southern California. Geophys J Int, **170**(2):711~717.

## The Analysis of Early Warning Processing Capacity for Tangshan $M_s5.1$ Earthquake

*Wang Lichan Mao Guoliang Li Xiaojun Wang Ning Wang Yaling*

Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China

**Abstract** On July 12, 2020, an  $M_s5.1$  earthquake occurred in Tangshan, Hebei Province. The earthquake early warning system of Hebei Province has successfully processed and output all kinds of related data for earthquake early warning. In this paper we analyzed the output data quality of stations within 200km away from the epicenter in the Hebei early warning network, as well as the first 5 processing results of the JEEW earthquake early warning system of the Research Institute of Shenzhen. The earthquake occurred within the Hebei early warning network with an average distance of 10km between stations. Compared to formal reports of China Earthquake Networks Center, the first alarm of JEEW was generated in 3s after the first station triggered, in 6s after the earthquake, with a location error of 2.6km, and magnitude error of  $-1.3$ , and blind spot radius of 18km. With the increase of participation number positioning stations, the magnitude and location error are getting smaller and smaller, but the absolute value of magnitude is still small. For Hebei early warning network, the average signal-to-noise ratio of the intensity stations within 200km of epicenter is 48, and the average signal-to-noise ratio of the intensity stations within 50km of epicenter is 112, which fully meets the requirement of early warning system of signal to noise ratio. The earthquake early warning results of the Tangshan  $M_s5.1$  earthquake show that the layout of the stations within the network is basically reasonable, the waveform quality is high, and the JEEW earthquake early warning system of Shenzhen Research Institute has a good early warning effect in this earthquake. Overall, Hebei early warning network has been of a certain earthquake early warning ability.

**Keywords:** Earthquake early warning system; Tangshan  $M_s5.1$  earthquake; Data quality; Early warning processing capacity