

# 烈度速报子系统在2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4地震中的应用\*

许亚吉, 庞卫东

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 介绍了烈度速报子系统的产品产出流程、云南地区台站接入情况、仪器烈度算法, 并以云南漾濞  $M_s$  6.4 地震为例, 从烈度速报子系统的输入数据、产出情况、仪器烈度与宏观调查烈度的对比介绍该系统的应用情况。该系统产出的震中附近仪器烈度与宏观调查烈度在空间走向上基本吻合, 二者在 VI ~ VIII 度区仪器烈度与宏观调查有一定程度的对应, 但各烈度区涉及的分布范围有所不同, 仪器烈度能较为客观地反映震区灾害情况。

**关键词:** 漾濞  $M_s$  6.4 地震; 烈度速报子系统; 仪器烈度

**中图分类号:** P315.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)03-0407-07

## 0 引言

地震烈度是衡量地震对地表和工程建筑结构的影响和破坏程度的重要参数, 通常由地震工作者在震后数天通过分析处理实地调查资料得到。仪器地震烈度是指利用仪器记录到的地震动观测数据, 通过峰值加速度、峰值速度等地震动参数与地震烈度之间的统计关系估算出台站附近的破坏情况, 在震后数分钟或数十分钟便可得到, 其快速、直观的特点有助于抗震救灾工作的及时展开。

目前国内外使用较多的仪器地震烈度算法有: 美国 Shakemap 方法综合利用加速度峰值、速度峰值计算仪器烈度 (Wald *et al.*, 1999); 日本气象厅 (JMA) 利用仪器记录到的三分向记录, 经傅立叶变换、滤波等方法处理后, 合成有效峰值加速度进而计算仪器烈度 (Shabestari, Yamazaki, 2001; Karim, Yamazaki, 2002; 解全才等, 2020)。袁一凡 (1998) 提出地震烈度模糊评定方法, 综合利用峰值加速度、傅立叶谱卓越频率、相对持时 (地震动三要素) 和相应频率点对应的反应谱值确定强震

台的仪器烈度。崔建文等 (2008) 利用随机有限断层法合成观测点的地震动, 然后采用模糊评定方法计算各观测点的仪器烈度。王玉石等 (2008) 利用谱烈度与地震烈度的相关性来计算强震动记录对应的仪器烈度。金星等 (2013) 参考日本气象厅仪器烈度的算法, 充分考虑我国的房屋建筑类型和建筑材料的差异、主要建筑的自振周期, 设计了纯幅值的带通滤波器, 用该滤波器对三分量的加速度记录滤波后合成有效峰值加速度。李亮等 (2018) 在研究了美国地质调查局和日本气象厅的仪器烈度算法的基础上, 对地震动数据记录进行滤波处理, 之后将三分量的加速度和速度进行合成后的峰值代入经验公式求出仪器烈度值。我国先后颁布实施《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008)、《地震仪器烈度表》(DB35/T 1308—2012)、《仪器地震烈度计算规程》(试行) (2015)、《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020) 对地震动记录的选取、处理、记录转换、数字滤波、记录合成、计算合成峰值加速度和峰值速度及仪器烈度的方法做了明确规定。部分地区结合自身实际, 又出台了各自的地方标准, 例如福建地区就有自己的地震仪器烈度表。

\* 收稿日期: 2021-06-21.

基金项目: 云南省地震局科技人员传帮带培养项目 (CX2-2021001) 资助.

第一作者简介: 许亚吉 (1983-), 工程师, 主要从事地震监测、数字地震学工作. E-mail: xu5149381@163.com.

日本、美国、中国台湾等国家和地区均建设了地震烈度速报系统或城市地震烈度速报台网。随着国家地震烈度速报与预警工程云南子项目的推进,云南省地震局于2020年7月部署由福建省地震局技术团队研发的预警项目定制软件——烈度速报子系统。试运行1年,该系统对责任区内 $M \geq 3.0$ 地震均有响应,产出了仪器烈度图、峰值加速度等值线图、峰值速度等值线图等一系列烈度速报产品。本文从烈度速报产品的产出流程、台站接入情况、仪器烈度算法对该系统进行介绍,并以2021年5月21日云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震为例,从烈度速报子系统的输入数据、产出情况、仪器烈度与宏观调查烈度的对比等方面介绍其实际应用情况。

## 1 地震烈度速报子系统

### 1.1 烈度速报产品产出流程

烈度速报子系统通过核心处理模块从数据流服务器接收实时波形数据,在接收到来自EQIM平台的地震三要素信息后进行触发计算,得到各观测台站仪器烈度数据。仪器烈度绘图服务接收核心处理程序的计算结果后,调用GMT进行绘图,生成仪器烈度分布图、峰值加速度等值线图、峰值速度等值线图、加速度反应谱等值图等数据产品,并通过消息中间件等对外服务。同时烈度速报客户端接收计算结果,在客户端进行展示。烈度速报产品产出流程如图1所示。

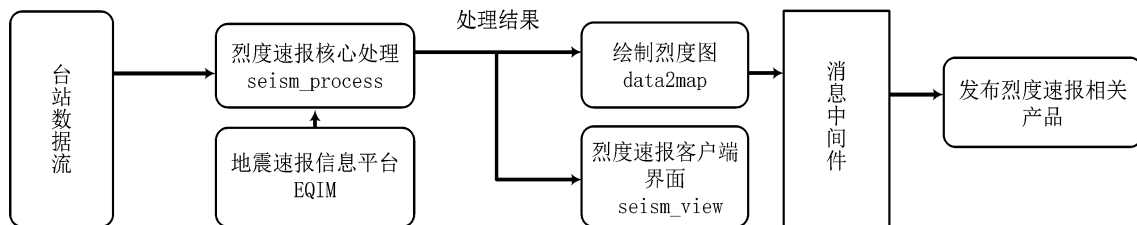


图1 烈度速报子系统数据产品产出流程图

Fig. 1 Data flow diagram of the Rapid Intensity Reporting Subsystem

### 1.2 台站接入情况

目前烈度速报子系统接入的云南地区台站为测震台站和预警一般站,其中测震台站68个、一般站1230个,台站平均台间距约为15 m,台站分布如图2所示。台站观测数据通过公用网络,实时将数据传回中心。测震台站配备宽频带和甚宽频带地震仪,记录数据为地震动速度,采样率为100 sps,使用GPS进行授时。一般站设备为泰德TMA-33、瑞琪VH-GL-LDY01、港震GL-P2B、台湾Palert Advance四种烈度仪,主要技术参数见表1,其传感器为微机械加速度传感器(MEMS加速度传感器),记录数据为地震动加速度,采样率为100 sps,使用NTP服务(网络时间协议)进行授时。MEMS加速度传感器是微电子技术与传统机械工程结合发展的一种惯性器件,与传统加速度计相比体积更小、成本更低,利于大面积布设。在云南地震局预警项目攻坚团队和云南铁塔公司的共同努力下,云南地区一般站运行状态良好,台站运行率保持在97%以上,数据传输延时在2 s以内的台站达到96%以上。

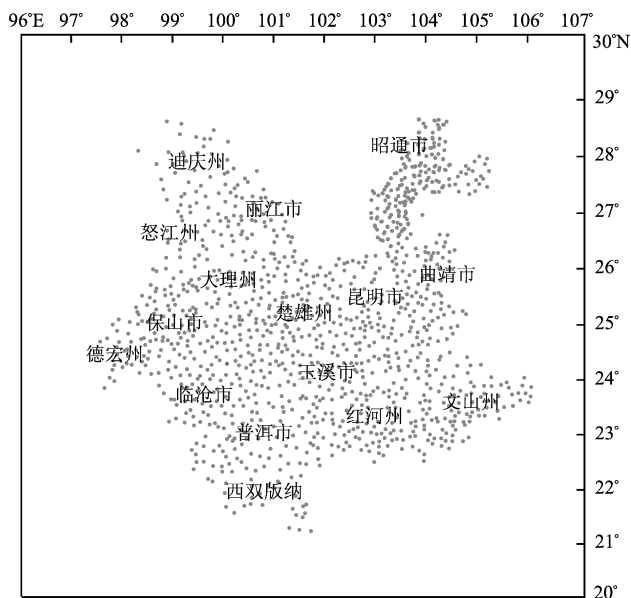


图2 云南地区台站分布

Fig. 2 Distribution of stations

### 1.3 仪器烈度计算方法

使用台站实测记录,在进行基线校正、记录转换、数字滤波后,计算合成峰值加速度和合成

表1 烈度仪主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of intensity meters

烈度计型号	传感器类型	分辨率	观测范围	动态范围/dB	最大采样率/sps
TMA-33	MEMS	24位	垂直向：-1~3 g，水平向：±2.0 g	≥90	200
VH-GL-LDY01	MEMS	24位	垂直向：-1~3 g，水平向：±2.0 g	≥95	200
GL-P2B	MEMS	28位	垂直向：-1~3 g，水平向：±2.0 g	≥90	200
Palert Advance	MEMS	16位	垂直向：+1~-3 g，水平向：±2.0 g	≥90	200

峰值速度，根据仪器烈度计算的国家标准（或地方标准）得到单个测点的仪器烈度值。利用震中附近台站资料拟合烈度衰减关系，台站的选择遵循以下条件： $M < 5.5$  地震选取震中距在 100 km 内台站， $5.5 \leq M < 6.5$  地震选取震中距 150 km 内台站， $M \geq 6.5$  地震选取震中距 200 km 内台站。利用得到的衰减关系插值结合台站实际烈度得出仪器烈度分布图（金星等，2010，2013；张红才，王士成，2008）。台站对最近的插值网格的权重影响较大，对于台站较稀疏的地区，以衰减关系为主；对于台站较密集地区（平均台间距在 12 km 以内），使用各测点的仪器烈度已基本可以得到烈度分布情况（王士成等，2017；徐钦等，2019）。单个测点的仪器烈度值在作为输入数据计算震中附近烈度时，需对台站的可信度做

筛选，对可信度较低的台站采取权重为零处理。筛选条件为：①利用台站波形记录的信噪比和功率谱密度（PSD）对异常台站进行筛查，剔除信噪比低、功率谱密度曲线异常台站；②根据震中附近烈度衰减关系，用实际计算值与理论计算值做比较，剔除烈度偏差超过 2 度的台站。

2 烈度速报子系统在漾濞  $M_s6.4$  震中的检验

2.1 产出情况

2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分云南漾濞发生  $M_s6.4$  地震，22:00:48 系统产出第一张烈度分布图（图 3a），随后陆续产出震中附近仪器烈度分布图（3b）、峰值加速度等值线图（图 4a）、峰值速度

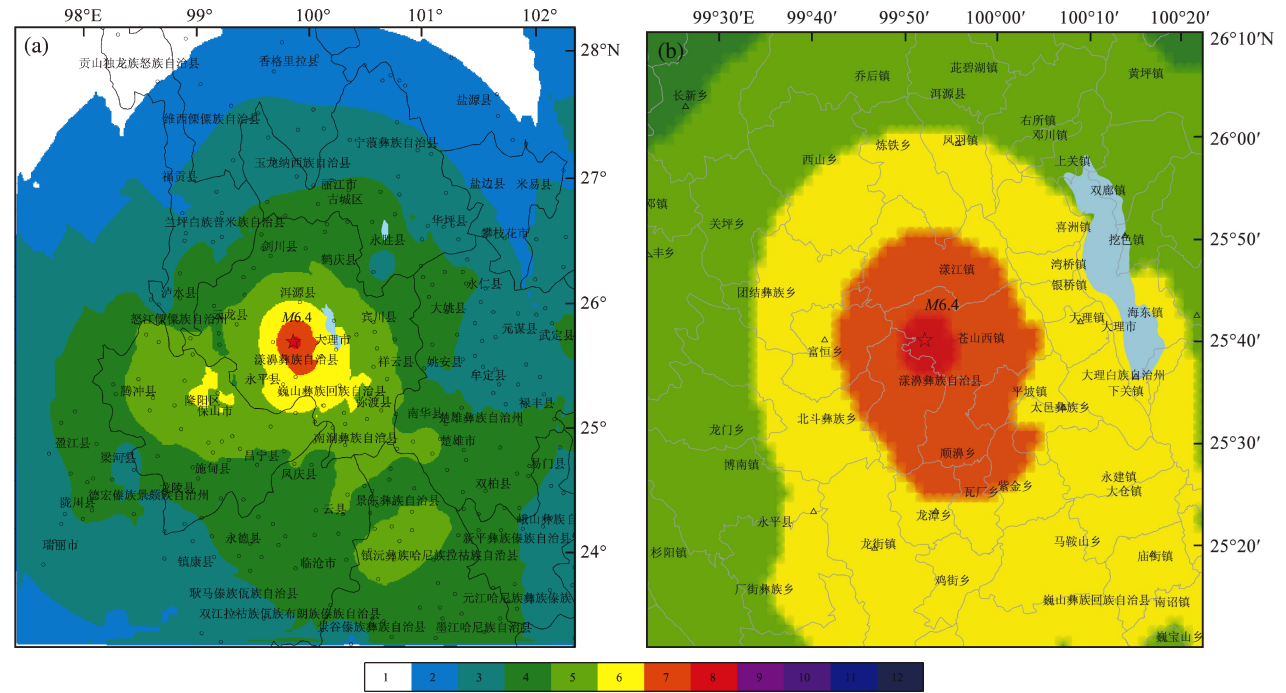


图3 漾濞  $M_s6.4$  地震 (a) 及震中附近 (b) 仪器烈度分布

Fig.3 Distribution of instrumental intensity of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake (a) and in its epicenter area

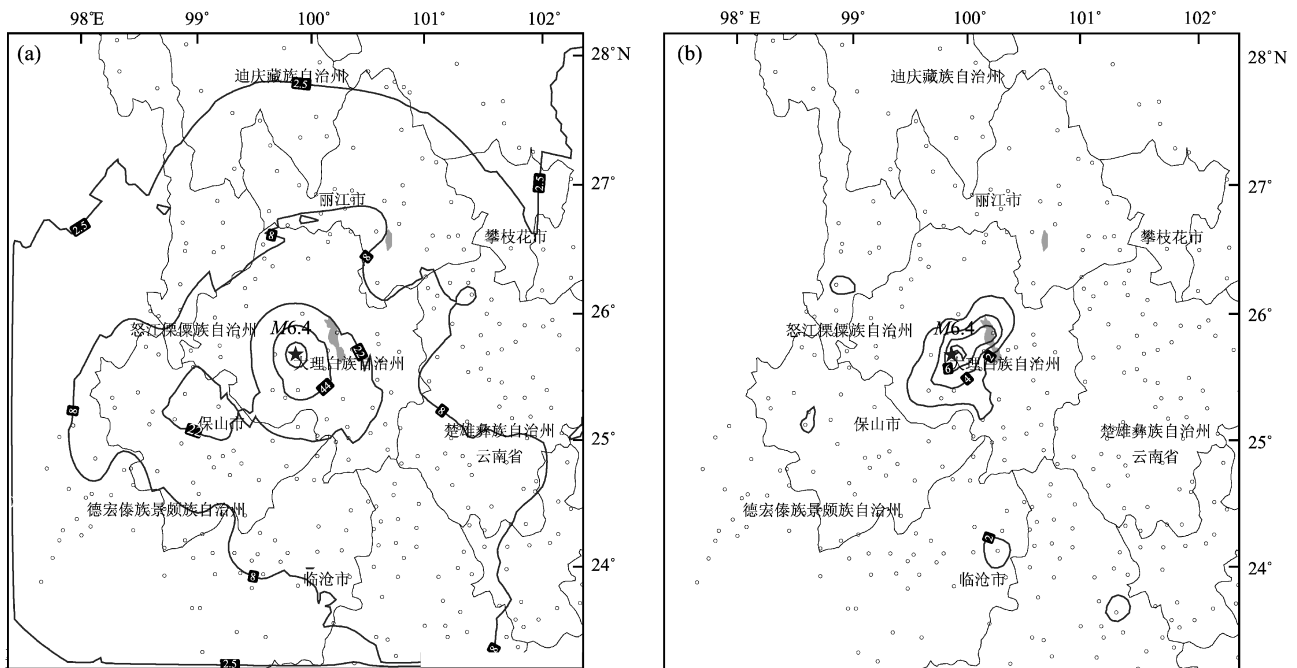


图4 峰值加速度 (a)、峰值速度 (b) 等值线图

Fig. 4 Isogram of peak acceleration (a) and peak velocity (b)

等值线图 (图 4b)、加速度反应谱等值图 (图 5)、2 度以上乡镇烈度报告、2 度以上县市烈度报告。震后 16 min 产出所有烈度速报产品。

烈度速报子系统在接收到来自 EQIM 平台的地震信息后, 选用位于 ( $23.67^{\circ} \sim 28.17^{\circ} \text{N}$ 、 $97.37^{\circ} \sim 102.17^{\circ} \text{E}$ ) 范围内的台站数据进行处理, 通过上述的筛选方法最终选取 476 个台站的数据作为输入数据集。选取震中距在 150 km 范围内的台站拟合烈度衰减关系, 根据得到的衰减关系插值并结合台站实际计算结果得出仪器烈度分布图。对于此次地震, 由于系统中没有较为详细的发震断层信息和震源过程信息, 故选用基于点源模型的衰减关系进行插值计算, 参照 EPRI (2003) 推荐的方法将衰减关系式中的震中距转换为等价断层距 (张红才, 王士成, 2016)。地震动峰值 ( $PGA$ 、 $PGV$ ) 等值线图通过拟合地震动衰减关系进行插值结果与台站实测值得到。目前拟合地震动衰减关系时, 台站场地均选择为 I 类场地。后续随着软件本地化——台站场地效应工作的持续开展, 场地条件将按照台站实际场地选择。

此次地震最高仪器烈度为 VIII 度, 主要涉及漾濞县苍山西镇、太平乡 2 个乡 (镇)。仪器烈度 VII 度区主要涉及漾濞县漾江镇、瓦厂乡、平坡镇、

龙潭乡、富恒乡、顺濞镇, 永平县北斗彝族乡, 巍山县紫金乡以及大理市太邑乡 9 个乡 (镇)。仪器烈度 VI 度区主要涉及漾濞县、洱源县、永平县、弥渡县、巍山县、宾川县、大理市、云龙县、保山隆阳区、昌宁县的 42 个乡 (镇)。

## 2.2 仪器烈度与宏观调查烈度对比

图 6 为云南省地震局现场工作队通过宏观调查绘制的漾濞  $M_{\text{s}}6.4$  地震烈度分布图。地震烈度 VIII 度区主要涉及漾濞县苍山西镇、漾江镇、太平乡 3 个乡镇。地震烈度 VII 度区主要涉及漾濞县苍山西镇、漾江镇、富恒乡、太平乡、顺濞镇、平坡镇, 云龙县团结乡, 洱源县西山乡、炼铁乡, 巍山县紫金乡和大理市太邑乡等 11 个乡 (镇)。VI 度区主要涉及漾濞县、洱源县、云龙县、永平县、巍山县、大理市的 42 个乡 (镇) 和 2 个街道办事处。图 3b 震中附近仪器烈度在空间上呈北西向分布, 与宏观调查烈度走向基本吻合。仪器烈度分区与各宏观调查烈度分区具有一定程度的对应关系, 但在面积和分布范围上有所不同。这主要是因为仪器烈度计算的是地震动的物理参数, 直接由台站的实测记录计算得到; 宏观调查烈度是通过房屋破坏程度等受灾情况得到, 受地震动强度、房屋结构等因素影响, 故二者不可能完全一致。

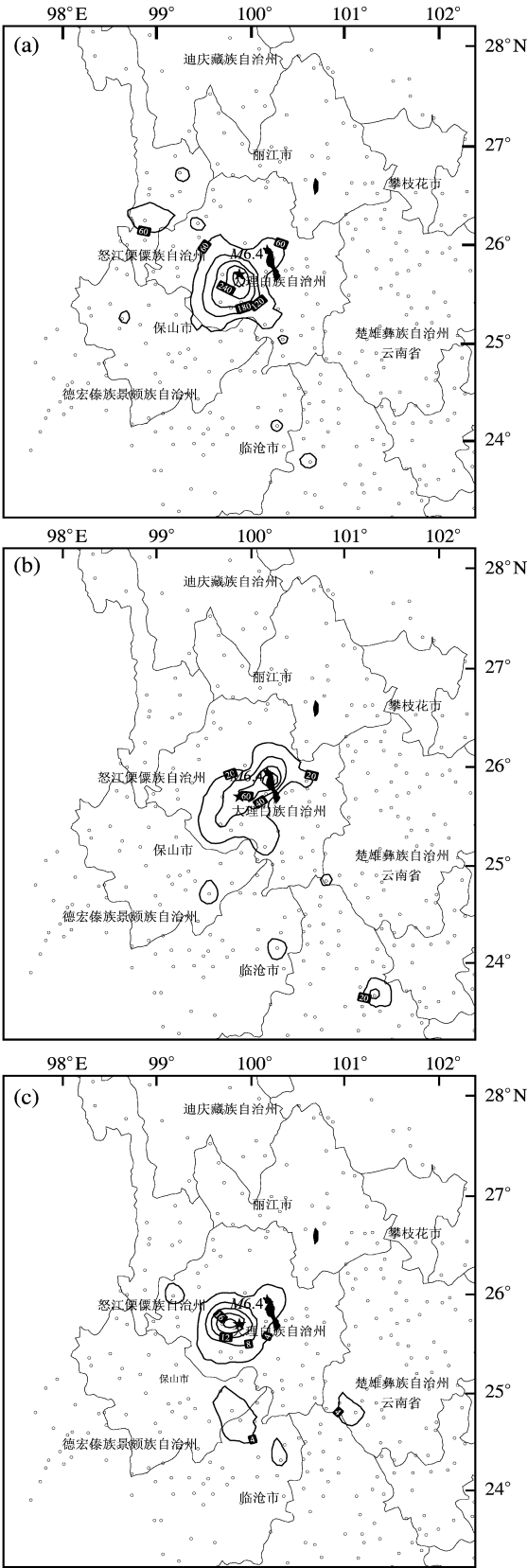


图5 周期分别为0.3 s (a)、1.0 s (b)、3.0 s (c) 的加速度反应谱等值图

Fig.5 Isogram of acceleration response spectra of  $T=0.3\text{ s}$  (a),  $T=1.0\text{ s}$  (b),  $T=3.0\text{ s}$  (c)

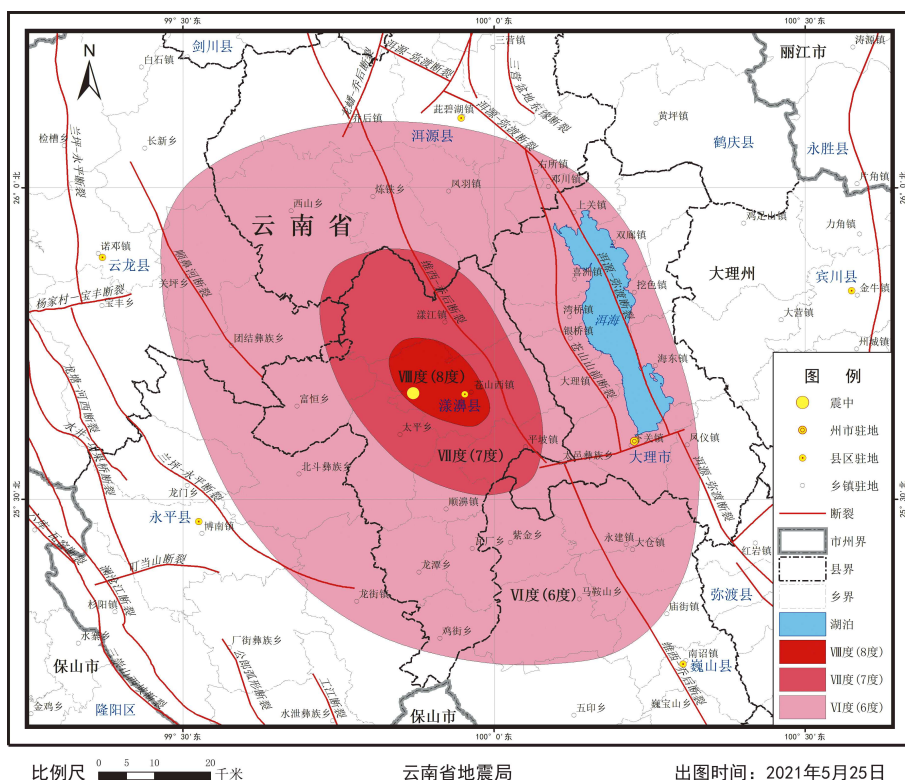
表2给出了位于宏观烈度Ⅵ度区以上的28个台站记录的仪器烈度。将各台站仪器烈度与宏观调查烈度进行对比可以看出,Ⅵ度区内仪器烈度值具有一定的离散性,与宏观调查烈度值偏差在 $\pm 1$ 度以内的占66.7%,Ⅶ~Ⅷ度区内仪器烈度值与宏观调查烈度值偏差均在 $\pm 1$ 度以内。如果仪器烈度值与宏观调查烈度值偏差在 $\pm 1$ 度以内是可接受的,对仪器烈度值四舍五入取整后,二者有一定程度的对应,能较为客观地反映震区灾害情况。

表2 宏观烈度Ⅵ度区台站仪器烈度值

Tab.2 Values of instrumental intensity in macroseismic intensity Ⅵ area

台站代码	台站名	台站类型	震中距/km	仪器烈度	宏观烈度
L2203	漾濞太平	一般站	6.7	7.8	Ⅷ
L2201	漾濞富恒	一般站	16.8	6.3	Ⅶ
L2204	漾濞漾江	一般站	17.5	7.2	Ⅶ
L2205	漾濞顺濞	一般站	21.9	6.6	Ⅶ
L3003	洱源西山	一般站	25.7	4.8	Ⅵ
L0102	古城太邑	一般站	29.0	5.4	Ⅵ
L0101	古城大理	一般站	30.1	6.9	Ⅵ
L2202	漾濞龙潭	一般站	30.2	6.2	Ⅵ
L0105	大理喜洲	一般站	34.8	5.9	Ⅵ
L3001	洱源炼铁	一般站	35.6	4.5	Ⅵ
L2803	永平曲硐	一般站	35.6	6.0	Ⅵ
L2801	永平北斗	一般站	36.6	4.1	Ⅵ
L3004	洱源凤羽	一般站	37.3	5.0	Ⅵ
L2906	云龙关坪	一般站	38.3	4.5	Ⅵ
L2802	永平龙街	一般站	38.4	5.4	Ⅵ
L2806	永平栗树坪	一般站	39.3	4.4	Ⅵ
TUS	团山	测震台站	40.4	4.7	Ⅵ
L0103	古城挖色	一般站	42.1	6.6	Ⅵ
L0104	大理上关	一般站	43.2	4.0	Ⅵ
L2702	巍山马鞍山	一般站	44.5	5.9	Ⅵ
L2903	云龙南新	一般站	46.2	4.8	Ⅵ
L2701	巍山大仓	一般站	47.5	6.8	Ⅵ
L2703	巍山庙街	一般站	57.5	5.1	Ⅵ
L2805	永平抱龙	一般站	57.6	4.6	Ⅵ
L2807	永平仁寿	一般站	59.4	4.4	Ⅵ
L2909	云龙长新	一般站	59.8	4.5	Ⅵ
L3002	洱源乔后	一般站	60.0	3.9	Ⅵ
L2707	巍山五印	一般站	63.0	5.2	Ⅵ



图6 云南漾濞  $M_s 6.4$  地震宏观调查烈度分布图Fig. 6 Distribution of the macroseismic intensity of the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake in Yunnan

### 3 结论

预警工程定制软件——烈度速报子系统在云南部署近一年时间,对责任区内  $M \geq 3.0$  地震均有响应。通过漾濞  $M_s 6.4$  地震,该系统经受了一次很好的实战检验。本文从输入数据、烈度速报产出情况、仪器烈度与宏观调查烈度的对比情况详细介绍了烈度速报子系统在此次地震的应用。该系统在震后 16 min 快速产出了烈度速报产品。对比仪器烈度与宏观调查烈度发现震中附近二者在空间走向上基本吻合,在 VI ~ VIII 度区有一定程度的对应,但涉及的面积和分布范围有所不同。总体上看,仪器烈度能较为客观地反映震区灾害情况。该系统产出的结果在地震应急初期可为抗震救援决策提供一定程度的科学依据,对地震现场工作队开展现场灾害调查有一定程度的指导意义。从图件的实用性上来看,该系统产出的震中附近烈度分布图未能包含震中附近全部 VI 区,图幅自适应方面还有进一步优化的空间。

感谢国家地震烈度速报与预警工程云南子项目攻坚团队、云南省地震局漾濞地震现场工作队及福建省地震局王士成在本文成稿过程中给予的帮助。两位审稿专家对本文的完善提出了非常宝贵的意见,在此一并表示感谢。

### 参考文献:

- 崔建文,卢大伟,高东,等. 2008. 基于合成地震动的震区烈度划分[J]. 地震研究, 31(4): 388-393.
- 金星,张红才,李军,等. 2013. 地震仪器烈度标准初步研究[J]. 地球物理学进展, 28(5): 2336-2351.
- 金星,张红才,韦永祥,等. 2010. 基于地震监测台网资料近实时插值计算震动图的初步研究[J]. 防灾减灾学报, 26(1): 1-11.
- 李亮,李山有,纪忠华,等. 2018. 仪器烈度计算方法研究[J]. 震灾防御技术, 13(4): 801-809.
- 王士成,金星,张红才,等. 2017. 台网密度对地震烈度速报的影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 37(6): 162-168.
- 王玉石,周正华,王伟. 2008. 基于假设检验的地震动强度(烈度)速报方法[J]. 地震工程与工程振动, 28(5): 49-54.
- 解全才,马强,张景发. 2020. 2016 年日本熊本  $M_w 7.0$  地震强震动记录特征分析[J]. 地震研究, 43(1): 125-133.

### 地震烈度图说明

2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分在云南漾濞县(北纬 25.67 度,东经 99.87 度)发生 6.4 级地震。此次地震最高烈度为 VIII 度(8 度), VI 度(6 度)区及以上面积约 6600 平方公里(含洱海),共涉及大理州 6 县市。

VIII 度(8 度)区面积约 170 平方公里,主要涉及漾濞县苍山西镇、漾江镇、太平乡 3 个乡镇。东起漾濞县苍山西镇河西村,西至苍山西镇大烂坝,南自苍山西镇沙河村,北达漾江镇弯坡村—桑不老村一带。

VII 度(7 度)区面积约 930 平方公里,主要涉及漾濞县苍山西镇、漾江镇、富恒乡、太平乡、顺源镇、平坡镇,云龙县团结乡,洱源县西山乡、炼铁乡,巍山县紫金乡,大理市太邑乡,共 11 个乡镇。东起大理市太邑乡外红岩小组,西至云龙县团结乡门神小组,南自漾濞县顺源镇哈蜡左村—大理市太邑乡恩祖小组,北达漾濞县漾江镇抱荷岭。

VI 度(6 度)区面积约 5500 平方公里,主要涉及漾濞县、洱源县、云龙县、永平县、巍山县、大理市,共 42 个乡镇。东起大理市凤仪镇江西村,西至云龙县关坪乡大甸子,南自漾濞县鸡街乡政府所在地,北达洱源县乔后镇花坪—乔后村一带。

此外,位于 VI 度(6 度)区之外的部分地区也受到波及,个别老旧房屋出现破坏受损现象。

### 本图涉及烈度解释

VIII 度(8 度): 木构架房屋个别柱脚位移,少数墙体倒塌,部分局部倒塌,多数开裂、墙体外闪,普遍掉瓦;砖混房屋部分墙体开裂;框架房屋部分墙柱、墙梁结合部位开裂,少数剪裂。

VII 度(7 度): 木构架房屋个别墙体倒塌,部分开裂、掉瓦;砖混房屋、框架房屋少数墙柱、墙梁结合部位开裂。

VI 度(6 度): 木构架房屋少数墙体开裂、掉瓦;框架房屋个别墙柱、墙梁结合部位开裂。

- 徐钦,陈琳荣,张宇,等. 2019. 吉林松原 $M_s5.7$ 、 $M_s5.1$ 地震强震动记录特征分析[J]. 地震研究,42(4):627–634.
- 袁一凡. 1998. 由地震动三要素确定地震动强度(烈度)的研究[R]. 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所,1–42.
- 张红才,王士成. 2016. 地震烈度速报产品可靠性分析[J]. 地震工程与工程振动,36(5):65–75.
- 张红才. 2008. 基于地震监测台网资料的震动图及震动烈度研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 中国地震局. 2015. 仪器地震烈度计算规程(试行)[S].
- Wald D J, Vincent Q, Heaton T H, *et al.* 1999. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and Modified Mercalli Intensity in California[J]. Earthquake Spectra, 15(3):557–564.
- Karim K R, Yamazaki F. 2002. Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31(5):1191–1212.
- Shabestari K T, Yamazaki F. 2001. A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records[J]. Earthquake Spectra, 17(4):711–723.
- GB/T 17742—2008, 中国地震烈度表[S].
- GB/T 17742—2020, 中国地震烈度表[S].
- DB35/T 1308—2012, 地震仪器烈度表[S].

## Application of the Rapid Intensity Reporting Subsystem to the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake

XU Yaji, PANG Weidong

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

In this paper, we firstly introduced the Rapid Intensity Reporting Subsystem about its products output process, linked-up stations and algorithm of the instrumental intensity. Then we described the subsystem about its data input, intensity output, and the comparison between the instrumental intensity and the macroscopic intensity when the subsystem is used to handle the  $M_s6.4$  earthquake. We found that the spatial trend of the instrumental intensity was roughly consistent with the macroscopic intensity in the vicinity of the epicenter. The instrumental intensity and the macroscopic intensity in VI–VIII areas to some extent corresponded to each other. In general, the instrumental intensity objectively reflected the damage in the disaster area.

**Keywords:** the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake; the Rapid Intensity Reporting Subsystem; instrumental intensity