

# 2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4 地震仪器地震烈度与 宏观地震烈度对比分析\*

明小娜, 崔建文\*, 杨健强, 于江

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 利用云南省强震动及地震预警台网获得的漾濞  $M_s$  6.4 地震地震动记录数据, 根据《中国地震烈度表》的仪器烈度计算方法, 得到各台站的仪器地震烈度。对比分析了漾濞  $M_s$  6.4 地震的仪器烈度图与宏观烈度图的异同, 发现二者最高烈度相同、等震线长轴走向相似, 但各烈度区面积与形状不相同; 对比分析了仪器烈度与调查点的评估烈度的吻合性, 发现二者完全吻合的比例为 81.25%, 偏差  $\pm 1$  度的比例为 93.75%, 说明仪器地震烈度在一定程度上能客观反映实际的震害情况。

**关键词:** 仪器地震烈度; 宏观地震烈度; 漾濞  $M_s$  6.4 地震; 地震动记录

**中图分类号:** P315.91

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)03-0422-07

## 0 引言

《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020) 定义地震烈度为地震引起的地面震动及其影响的强弱程度, 该烈度又称为宏观烈度。宏观烈度是由调查人员根据现场建(构)筑物震害、人的感觉和器物反应以及地表破坏综合得出的评估结果, 烈度调查工作量大、耗时长。仪器烈度是使用记录到的地震动数据, 利用特定滤波器和算法计算出来的烈度值。仪器烈度实际反映的是地震动的强度(孙得璋等, 2018), 它通过将地震动强度与宏观烈度吻合使地震动能反映震害, 以实现地震影响的快速估计。与宏观烈度相比较, 仪器烈度以地震动记录为基础, 科学概念和逻辑性清楚, 具有客观、产出快速的特点。相关研究表明: 仪器烈度对宏观调查时宏观震中位置、震中最大烈度和烈度图长轴方向的确定有重要的参考价值(徐钦等, 2013; 李亮等, 2018; 冯蔚等, 2014; 王玉石等, 2010; 孙柏涛等, 2019; 田秀

丰等, 2020)。由于宏观烈度和仪器烈度都会受诸多因素的影响, 往往导致两者之间存在差异, 限制了仪器烈度的应用。因此, 通过实际地震资料, 找出导致两者之间不一致的原因以及可能的解决办法, 将有利于提高仪器烈度与宏观烈度的吻合度, 更好地发挥二者在地震应急工作中的协同作用。

2021年5月21日21时48分, 云南漾濞(25.67°N, 99.87°E)发生  $M_s$  6.4 地震。震后, 云南强震动及地震预警台网在震中距 140 km 范围内快速获取了 156 个台站的地震动记录数据, 30 min 内生成了仪器烈度图, 云南省地震局地震现场工作组历经 5 天圈定了本次地震的烈度图。本文对比分析了该次地震仪器烈度图与宏观烈度图的异同, 探讨了仪器烈度图对震害的反映能力; 对比了仪器烈度与调查点烈度的吻合性, 检验了《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020) 仪器烈度计算方法在云南高原山区地震中的适用性; 通过分析仪器烈度与调查点烈度差异的原因, 为改善仪器烈度图提供参考。

\* 收稿日期: 2021-06-28.

基金项目: 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2020EEVL0204)资助.

第一作者简介: 明小娜(1986-), 工程师, 硕士, 主要从事地震应急理论方法研究工作.

E-mail: 378223651@qq.com.

✉ 通讯作者简介: 崔建文(1961-), 研究员, 博士, 主要从事强震动观测与研究等. E-mail: 273514873@qq.com.

## 1 台站获取的记录

漾濞  $M_s 6.4$  地震造成大理州漾濞县、大理市、洱源县、巍山县、云龙县和永平县 6 个县(市) 42 个乡镇、2 个街道不同程度受灾。震区断裂构造复杂, 发育有 NW 向和 NE 向两组断裂, 地震序列沿维西—乔后断裂西侧呈 NW 向展布<sup>①</sup>。云南省强震动及烈度速报台网获取了震中距 140 km 范围内 156 个台站

(图 1) 的地震动记录, 其中包含 9 个强震台和 147 个一般站, 一般站仪器架于云南铁塔基站上。强震仪记录器数采通道为 3 通道, 采样率为 200 sps, 频带范围 0~80 Hz, 烈度计记录器数采通道为 3 通道, 采样率为 100 sps, 频带范围 DC~40 Hz, 各台站获取记录波形完整, 震相清晰。震中距为 8.6 km 的 53YBX 漾濞强震台记录了本次地震最大加速度为 720 Gal (EW 向为 380 Gal, NS 向为 720 Gal, UD 向为 448 Gal), 根据记录计算出仪器地震烈度为 8.4。

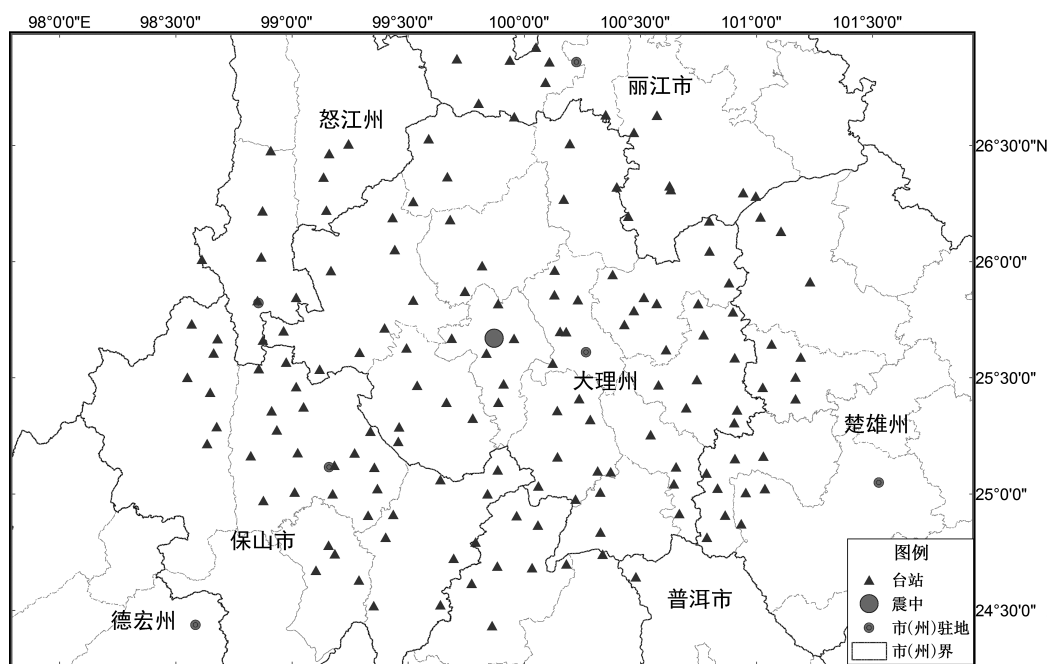


图 1 研究区台站点位分布图

Fig. 1 Distribution of strong-motion stations in the study area

## 2 仪器地震烈度计算

目前常见的仪器烈度算法有美国 ShakeMap 仪器烈度计算方法、日本 JMA 仪器烈度计算方法(马鹏举, 2020)、福建仪器烈度计算方法(金星等, 2013)、王玉石等(2010)的谱烈度法、袁一凡的模糊方法以及 2020 年 7 月颁布实施的《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020) 仪器烈度计算方法等。美国 ShakeMap 系统仪器地震烈度计算方法对获取的地震动记录经场地校正后得到峰值加速度 (PGA)、峰值速度 (PGV), 再利用 Wald 等 (1999) 的研究成果计算出烈度值;

日本气象厅 JMA 仪器烈度算法首先将地震记录预处理、转换到频域、滤波、变换到时间域等中间过程合成加速度, 再取持时 0.3 s 所对应的加速值作为参考加速度  $a_0$  计算仪器烈度值并取整, 最后根据日本仪器烈度与日本气象厅的烈度对应表确定其烈度值(马鹏举, 2020); 福建仪器烈度借鉴日本气象厅 (JMA) 的计算方法, 选择持时 0.5 s 为参考加速度的持时域值(金星等, 2013)。本文选取《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020) 中规定的仪器烈度计算方法, 其具体计算方法为: ①基线校正。采用记录时间过程减去地震事件前记录的算术平均值方法对获取的地震动记录进行基线校正处理, 事前记录时间

① 云南省地震局. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞  $M_s 6.4$  地震灾害直接经济损失评估报告.

长度宜为 10 s。②记录转换。将加速度记录转换为速度记录。③数字滤波。对地震动加速度和速度记录的每个分向采用数字滤波器进行 0.1 ~ 10 Hz 的带通滤波, 滤波器通带波纹小于 0.5 dB, 滤波器带外衰减大于 12 dB/oct。④记录合成。采用三分向 (EW、NS、UD 向) 计算合成加速度记录  $a(t_i)$ , 即式 (1), 合成速度记录  $v(t_i)$ , 即式 (2)。⑤采用式 (3) 和式 (4) 计算三分向合成地震动参数  $PGA$  和  $PGV$ 。⑥用式 (5) 和式 (6) 分别计算加速度峰值对应的仪器地震烈度  $I_A$  和速度峰值对应的仪器地震烈度  $I_V$ , 并用式 (7) 计算仪器测定的地震烈度  $I_I$ 。笔者运用该方法计算出结果并四舍五入取值, 得到了 156 个台站的仪器地震烈度 (图 2)。

$$a(t_i) = \sqrt{a^2(t_i)_{EW} + a^2(t_i)_{NS} + a^2(t_i)_{UD}} \quad (1)$$

$$v(t_i) = \sqrt{v^2(t_i)_{EW} + v^2(t_i)_{NS} + v^2(t_i)_{UD}} \quad (2)$$

$$PGA = \max[a(t_i)] \quad (3)$$

$$PGV = \max[v(t_i)] \quad (4)$$

$$I_A = 3.17 \lg(PGA) + 6.59 \quad (5)$$

$$I_V = 3.00 \lg(PGV) + 9.77 \quad (6)$$

$$I_I = \begin{cases} I_V & (I_A \geq 6.0 \text{ 且 } I_V \geq 6.0) \\ (I_A + I_V)/2 & (I_A < 6.0 \text{ 且 } I_V < 6.0) \end{cases} \quad (7)$$

### 3 仪器烈度与宏观烈度对比分析

#### 3.1 仪器烈度图与宏观烈度图对比分析

笔者以宏观烈度 VI 度区内台站仪器烈度值为基础数据, 结合烈度衰减关系, 绘制出漾濞地震的仪器烈度分布图 (图 2 中红色线条区域), 仪器烈度最高为 VIII 度, VIII 度区面积约 90 km<sup>2</sup>, VII 度区面积约 365 km<sup>2</sup>, VI 度区面积约 2 900 km<sup>2</sup>。VII 度、VIII 度等震线平滑, 长轴趋于北偏西向, VI 度区边界呈不规则状。图 2 中红色渐变区域为宏观烈度图<sup>①</sup>, 烈度最高为 VIII 度, VIII 度区面积约 170 km<sup>2</sup>, VII 度区面积约 930 km<sup>2</sup>, VI 度区面积 5 500 km<sup>2</sup>, 等震线长轴呈 NNW 向。

从仪器烈度图与宏观烈度图叠置图 (图 2) 可以看出, 二者最高烈度均为 VIII 度; 仪器烈度 VII 度、VIII 度等震线长轴与宏观烈度的长轴走向相似, 且这 2 个仪器烈度区基本位于对应的宏观烈度区内; VI 度区仪器烈度与宏观烈度在空间上具有一定的重合率, 说明二者在空间分布方面较为

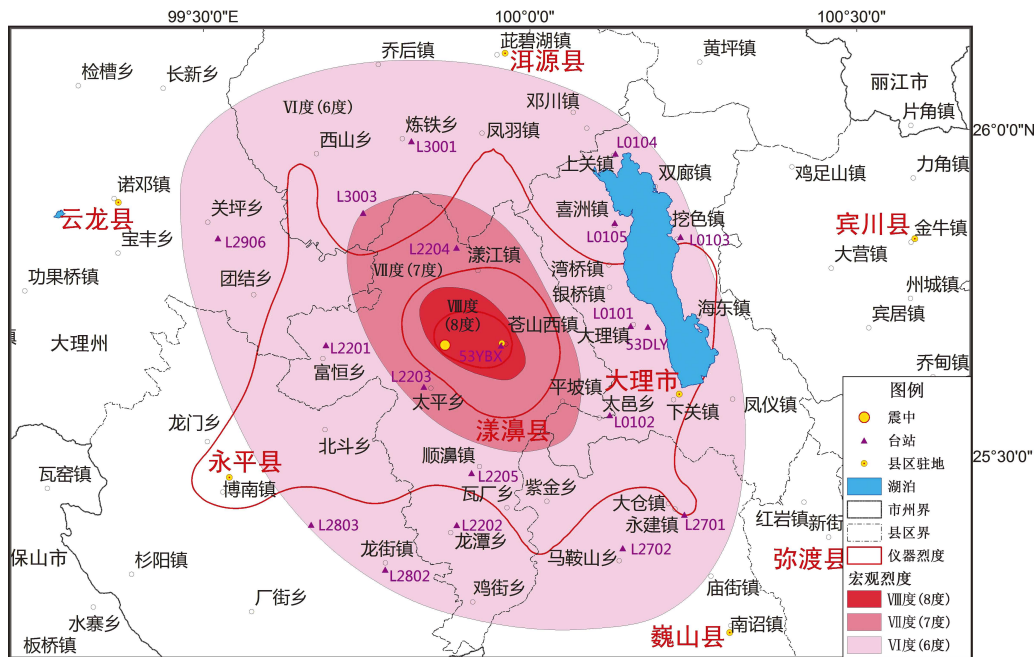


图 2 漾濞  $M_{\text{S}}6.4$  地震仪器烈度图及宏观烈度对比图

Fig. 2 Comparison between instrumental seismic intensity and macro-seismic intensity of the Yangbi  $M_{\text{S}}6.4$  earthquake

① 云南省地震局. 2021. 2021 年漾濞  $M_{\text{S}}6.4$  地震灾评报告.

相似，它在一定程度可反映该区域内整体震害水平。仪器烈度边界呈不规则状与台站地震动强度、台站数量以及台站分布的均匀度影响有关；宏观烈度是地震直接损失评估的基础性资料，为便于灾害数据统计计算，通常情况下经过了图形平滑处理，因此边界呈规则形状。假设按照Ⅵ度台站点位的外接矩形绘制内接椭圆，并将其作为仪器烈度图的Ⅵ度区，则仪器烈度

图与宏观烈度图空间分布会更吻合。

3.2 仪器烈度与调查点烈度的对比分析

由于云南台网一般站架设于铁塔公司基站上，且部分基站所在位置附近没有居民点，因此，宏观震害调查点与台站往往不重合，为对比分析仪器烈度与调查点烈度，笔者选取台站周围 5 km 范围内的调查点（表 1），对烈度存在差异的站点及其原因展开分析。

表 1 仪器地震烈度与调查点烈度对比表

Tab. 1 Comparison between instrumental seismic intensity and survey – spot intensity

台站名称	台站编码	仪器烈度	调查点位置	调查点烈度	距离/km	调查点总体震害特征描述
漾濞	53YBX	Ⅷ	苍山西镇城区	Ⅷ	0.8	土木和砖木结构个别柱脚位移、少数穿斗木构架损坏，少数墙体倒塌或局部倒塌，多数墙体开裂、墙体外闪、屋面梭掉瓦；砖混结构少数呈“X”型剪裂，少数构造柱与墙体连接处纵向开裂，多数墙体沿窗洞、门洞、楼梯间出现水平裂缝；框架房屋少数墙柱、墙梁结合部位开裂
漾濞	53YBX	Ⅷ	龙井小组	Ⅷ	2.9	
漾濞	53YBX	Ⅷ	下街村	Ⅷ	0.5	
漾濞太平	L2203	Ⅶ	弯坡村	Ⅶ	1.9	土木结构个别穿斗木构架倾斜，部分填充墙体局部外闪倒塌，多数屋面梭掉瓦，开天窗；砖混结构个别承重墙裂缝，少数墙体沿窗洞、门洞出现水平裂缝，多数墙体室内抹灰层脱落；框架结构个别门窗洞口受剪斜裂；墙梁结合部有水平裂缝；少数楼梯间横墙出现裂缝
漾濞太平	L2203	Ⅶ	箐头村	Ⅶ	4.2	
漾濞太平	L2203	Ⅶ	箐头村小学	Ⅶ	2.8	
漾濞太平	L2203	Ⅶ	大平地	Ⅶ	3.6	
漾濞太平	L2203	Ⅶ	龙潭	Ⅶ	1.7	
漾濞太平	L2203	Ⅶ	楂子树	Ⅶ	3	
漾濞太平	L2203	Ⅶ	构平小组	Ⅶ	3.4	
洱源西山	L3003	Ⅵ	狮子头搬迁点	Ⅶ	3.8	
洱源西山	L3003	Ⅵ	房后组	Ⅶ	2.2	
洱源西山	L3003	Ⅵ	横洞组	Ⅵ	1.7	
古城大理	L0101	Ⅶ	马久邑村	Ⅵ	4.1	土木和砖木结构个别围护墙体山尖墙局部垮塌，少数围护墙体与木构架结合处掉土坯，部分墙体老裂加宽加长、部分屋面梭掉瓦；砖混结构少数抹灰层开裂脱落、楼梯间过梁处有水平细裂缝；框架结构部分装饰掉落，个别墙柱、墙梁结合部位抹灰层掉落
月溪井	53DLY	Ⅶ	马久邑村	Ⅵ	4.2	
古城挖色	L0103	Ⅶ	大成村	Ⅵ	2.1	
云龙关平	L2906	Ⅳ	旧街小组	Ⅵ	2.8	
云龙关平	L2906	Ⅳ	字衙村小组	Ⅵ	2.1	
洱源炼铁	L3001	Ⅵ	皎家组	Ⅵ	4.4	
洱源炼铁	L3001	Ⅵ	前甸村	Ⅵ	0.5	
古城太邑	L0102	Ⅵ	太邑村	Ⅵ	1.7	
喜洲镇	L0105	Ⅵ	寺里村	Ⅵ	2.8	
喜洲镇	L0105	Ⅵ	沙村	Ⅵ	1.6	
漾濞富恒	L2201	Ⅵ	富恒小组	Ⅵ	2	
漾濞龙潭	L2202	Ⅵ	大浪滩小组	Ⅵ	2.8	
漾濞漾江	L2204	Ⅵ	恩龙小组	Ⅵ	4	
漾濞漾江	L2204	Ⅵ	安南小组	Ⅵ	3.3	
顺濞镇	L2205	Ⅵ	顺濞乡政府	Ⅵ	1.5	
顺濞镇	L2205	Ⅵ	迤古么小组	Ⅵ	4.2	
顺濞镇	L2205	Ⅵ	下腊午么小组	Ⅵ	4.4	
顺濞镇	L2205	Ⅵ	小村外村小组	Ⅵ	4.7	
巍山马鞍山	L2702	Ⅵ	漾林村	Ⅵ	2.5	
巍山大仓	L2701	Ⅵ	永瑞村	Ⅵ	2.5	

台站仪器烈度与调查点烈度对比分析显示,在Ⅵ度区,仪器烈度与调查点烈度吻合的比例为80%,相差-2度的比例为10%(图3a);在Ⅶ度区,两者吻合的比例为77.78%,相差 $\pm 1$ 度的比例为22.22%(图3b);在Ⅷ度区,两者完全吻合(图3c);总体而言,仪器地震烈度与调查点烈度完全吻合的占比为81.25%,相差 $\pm 1$ 度以内的占比为93.75%(图3d)。如果仪器地震烈度与调查点烈度相差 $\pm 1$ 度是可以接受的,说明对于云南高

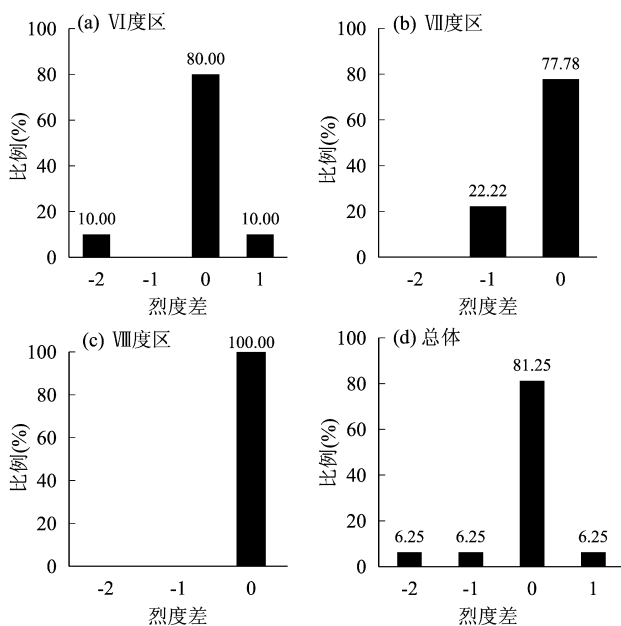


图3 仪器烈度误差统计

Fig. 3 Statistics of the instrumental - intensity error

原山区的地震,采用《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)的地震烈度仪器计算方法是可行的。

L3003 台站仪器烈度为Ⅵ度,其附近有两个调查点。距离该台站 3.8 km 的西山乡团结村狮子头搬迁点土木结构墙体局部倒塌(图4a)、砖木结构部分围护墙体局部倒塌(图4b),多数墙体开裂,屋面梭瓦,个别吊顶大面积脱落,调查点烈度评估为Ⅶ度,比仪器烈度高 1 度。距离该台站 1.7 km 的团结村横涧小组土木结构个别墙体开裂,部分墙皮脱落,部分屋面梭瓦(图4c),调查点评估烈度为Ⅵ度,与仪器烈度吻合。这表明台站离调查点越近,二者局部场地越相似,仪器烈度一定程度上可反映该调查点的实际震害。

L0101、53DLY 台站位于洱海西南侧,仪器烈度为Ⅶ度。距 L0101 台站 4.1 km 的大理市银桥镇马久邑村调查点房屋结构以砖木结构、砖混结构为主,砖木结构部分山墙开裂(图5a),少数倒塌,砖混结构未受损,调查点烈度评估为Ⅵ度,比仪器烈度低 1 度。L0103 台站位于洱海东侧,仪器烈度为Ⅶ度。这一方位的挖色镇大成村房屋结构以土木和砖混结构为主,土木结构少数墙体裂缝,墙皮局部脱落,屋面掉瓦;砖混结构个别墙体与构造柱结合部位细裂缝(图5b),调查点烈度评估为Ⅵ度,比仪器烈度低 1 度。以上 3 个台站仪器烈度偏高的原因可能受到了局部场地条件的影响,其所处的洱海流域,地层为第四系全新统,



图4 L3003 台站附近调查点房屋震害

Fig. 4 Earthquake damages to buildings near Number L3003 station



图5 调查点房屋震害

Fig. 5 Earthquake damages to buildings at the survey spot

软土层岩性为砂、砾、粘土、砂质粘土、局部夹泥炭(吕洲珩, 2020), 湖相沉积的软土具有高压缩性、高孔隙比, 高含水量的特点。软土地场地震动频率含量丰富, 在各个周期段内对结构加速度的放大作用尤为明显, 笔者采用美国全球 vs30 模型及相应的振幅调整方法, 将台站记录按软土调整到硬土, 仪器烈度四舍五入取整后得到的烈度均为Ⅵ度, 与调查点烈度相符。

L2906 台站仪器烈度为Ⅳ度。调查点旧街小组以土木结构和砖混结构为主, 土木结构墙体轻微裂缝(图5c), 砖混结构连接处墙体开裂, 裂缝加宽, 调查点烈度评估为Ⅵ度, 比仪器烈度高2度。该台站为一般台, 仪器架设在铁塔公司位于山腰的移动基站上, 该区域处于顺濞河断裂附近, 仪器烈度偏低可能是受局部场地、地形和地质条件的影响。笔者采用美国全球 vs30 模型及相应的振幅调整方法将台站记录调整到软土情况, 由于其本身的幅值太小, 修正后仪器烈度为Ⅴ度, 比调查点烈度低1度。

## 4 结论

本文利用漾濞  $M_s 6.4$  地震获取的地震动记录, 对仪器烈度与宏观烈度进行比较和分析, 得到以下几点结论:

(1) 本文对比了漾濞地震仪器烈度图与宏观烈度图, 仪器烈度Ⅶ度、Ⅷ度长轴方向与宏观烈度长轴方向相似, 且2个烈度区基本位于对应的宏

观烈度区内, 说明仪器烈度与宏观烈度在空间分布方面较为相似, 在一定程度可宏观反映该区域内整体震害水平。但二者面积和边界形状不同, 仪器烈度图边界形状受台站地震动强度强弱、台站数量的多少以及台站分布的均匀度影响呈不规则状。

(2) 将根据《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020) 计算得到的仪器地震烈度与台站附近的调查点实际烈度对比, 完全吻合的比率为81.25%, 偏差 $\pm 1$ 度以内的比率为93.75%, 三者吻合性高, 表明该仪器烈度计算方法在云南高原山区具有较好的适用性。

(3) L0101、53DLY、L0103 和 L2906 这4个台站仪器烈度与调查点烈度不匹配, 一方面由于地震动本身复杂, 仪器烈度值除了与仪器安装方式、仪器频带和烈度计算方法等因素有关, 还受局部场地、地形以及地质条件等因素影响。云南台网一般台架设在铁塔公司移动基站上, 目前缺乏这些基站详细的场地资料, 建议开展台站局部场地和地形调查, 便于计算仪器烈度时考虑场地修正。另一方面, 宏观烈度为综合指标, 烈度评定受地震动特性、调查点场地条件、建(构)构筑物结构类型、调查人员对震害特征的认识等因素影响, 因此二者存在差异。

本次地震中 L2803、L2802、L0104 这3个台站附近5 km 范围内无调查点。建议将台站附近的建(构)构筑物纳入调查范围, 通过地震动和结构基础资料的积累修正仪器地震记录与仪器烈度计算的

统计关系,减少仪器烈度与宏观烈度的离散性,发挥仪器烈度与宏观烈度在抗震救灾中的协同服务效能。

### 参考文献:

- 冯蔚,姜立新,杨天青,等. 2014. 芦山 7.0 级地震强震台仪器地震烈度与调查点烈度的对比分析[J]. 地震地质, 36(1): 222–229.
- 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.
- 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.
- 吕洲珩. 2020. 洱海流域地质环境承载力评价研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 马鹏举. 2020. 仪器地震烈度计算方法[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 孙柏涛,闫佳琦,李山有. 2019. 宏观地震烈度发展与其用途的演变[J]. 地震工程与工程振动, 39(2): 1–8.
- 孙得璋,张仁鹏,孙柏涛. 2018. 浅谈仪器地震烈度在地震烈度评定中的应用[J]. 建筑结构, 48(S2): 279–283.
- 田秀丰,张卫东,袁洁,等. 2020. 汶川 8.0 级地震仪器地震烈度与宏观地震烈度对比分析[J]. 地震工程学报, 42(5): 1226–1231.
- 王玉石,周正华,兰日清. 2010. 利用修正谱烈度确定我国西部地区仪器烈度的建议方法[J]. 应用基础与工程科学学报, (S1): 119–128.
- 徐钦,田秀丰,王维欢,等. 2018. 2013 年甘肃岷县—漳县 6.6 级地震仪器地震烈度与宏观调查烈度比较分析[J]. 地震工程学报, 40(2): 124–129.
- Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, et al. 1999. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified mercalli intensity in California[J]. Earthquake Spectra, 15(3): 557–564.
- GB/T 17742—2020, 中国地震烈度表[S].

## Comparative Analysis of the Instrumental Seismic Intensity and the Macro-seismic Intensity of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s$ 6.4 Earthquake

MING Xiaona, CUI Jianwen, YANG Jianqiang, YU Jiang  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

According to the *China Earthquake Intensity Table*, we use the ground motion records of the Yangbi, Yunnan  $M_s$ 6.4 earthquake on May 21, 2021 obtained by strong-motion stations to calculate the instrumental seismic intensity. Then we compare the map of instrumental seismic intensity and the map of macroscopic seismic intensity of the Yangbi  $M_s$ 6.4. We find that the two maps have the same highest intensity and the similar long axis of the isoseismal lines, but the area and shape of each intensity zone are different; the consistency of the instrumental intensity at the stations and the intensity on the corresponding survey sites is 81.25%, and the ratio of 1-degree deviation is 93.75%. It can be seen that the instrumental seismic intensity can objectively reflect the actual earthquake damage to some extent.

**Keywords:** instrumental seismic intensity; macroscopic seismic intensity; the Yangbi  $M_s$ 6.4 earthquake; ground motion records