

张红才, 金星, 李军, 王士成. 2017. 烈度仪用于地震预警的可靠性研究——以高雄  $M_s$ 6.8 地震为例. 地震学报, 39(6): 955-964. doi:10.11939/jass.2017.06.013.

Zhang H C, Jin X, Li J, Wang S C. 2017. Reliability of seismic intensity instrument used in earthquake early warning: Taking the Gaoxiong  $M_s$ 6.8 earthquake as an example. *Acta Seismologica Sinica*, 39(6): 955-964. doi:10.11939/jass.2017.06.013.

# 烈度仪用于地震预警的可靠性研究 ——以高雄 $M_s$ 6.8 地震为例<sup>\*</sup>

张红才<sup>1),\*</sup> 金 星<sup>1,2)</sup> 李 军<sup>1)</sup> 王士成<sup>1)</sup>

1) 中国福州 350003 福建省地震局

2) 中国哈尔滨 150008 中国地震局工程力学研究所

**摘要** 以2016年2月6日我国台湾高雄  $M_s$ 6.8 地震中烈度仪观测网的实际记录为研究对象, 通过对烈度仪台站的震相拾取结果精度、峰值地震动衰减关系适用性、预警震级计算结果准确性等3方面的对比分析, 研究了烈度仪用于地震预警时的优势和可靠性, 并讨论了可能存在的问题和风险。研究结果表明: 对于震中附近具有较高信噪比的烈度仪台站, 采用现有震相拾取方法即可获得较准确的震相到时信息; 现有的地震动衰减关系并不完全适用于烈度仪台网, 直接应用这些关系式时存在一定风险; 基于密集布设的烈度仪观测台网, 在较短时间即可获取大量信息, 采用已有预警震级估算方法的计算结果有较高的准确性。

**关键词** 烈度仪 震相拾取 地震动衰减 震级

doi:10.11939/jass.2017.06.013 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

## Reliability of seismic intensity instrument used in earthquake early warning: Taking the Gaoxiong $M_s$ 6.8 earthquake as an example

Zhang Hongcai<sup>1),\*</sup> Jin Xing<sup>1,2)</sup> Li Jun<sup>1)</sup> Wang Shicheng<sup>1)</sup>

1) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

2) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150008, China

**Abstract:** Based on the seismic intensity instrument (SSI) records of Gaoxiong  $M_s$ 6.8 earthquake in Taiwan, China which occurred on February 6, 2016, we studied the advantage and reliability of SSI used in earthquake early warning (EEW) through the analysis on precision of phase pick, applicability of peak ground motion attenuation relationships and accuracy of earthquake magnitude estimation results. Meanwhile, we also discussed shortcuts and risks of using SSI during the EEW process. The results showed that for SSI stations with near-epicenter and high signal to noise ratio (SNR), the existing phase pick

\* 基金项目 中国地震局地震科技星火计划(XH16020Y)资助。

收稿日期 2017-01-03 收到初稿, 2017-06-27 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: zhanghc@fjea.gov.cn



methods are applicable to obtain accurate P phase arrival time. The existing peak ground motion attenuation laws may not fully apply to SSI stations, and a certain risk exists when apply them to SSI station directly. As a result of dense SSI stations layout, a great quantity of useful information may be acquired in a short time, which is very favorable for earthquake magnitude estimation during the EEW process, and magnitude estimation results could have a good accuracy by using existing methods.

**Key words:** seismic intensity instrument; phase pick; ground motion attenuation; magnitude

## 引言

相较于传统测震台站和强震台站建设周期长、工作环境要求严格、观测设备昂贵、维护成本高等缺点和不足，烈度仪台站的建设和运维具有一定的优势。相关的理论分析、实验测试及实际应用均已表明(Holland, 2003; Horiuchi *et al*, 2009; Wu *et al*, 2013; Evans *et al*, 2014; Wu, 2014; Chen *et al*, 2015a, b; Hsieh *et al*, 2015; Tasi *et al*, 2015)，在一定频段内，烈度仪产出的记录波形与强震和测震台站的记录波形有较高的一致性，积分后获得的速度波形与位移波形之间有较好的可比性(张红才等, 2017)。“国家地震烈度速报与预警工程”项目建设方案的设计，正是基于烈度仪的上述特点，拟在华北地震预警区、南北地震带地震预警区、东南沿海地震预警区和新疆北天山地震预警区等4个重点地区建设约12 000余个由烈度仪构成的一般站，以期成为测震台和强震台的有益补充，并有望在减少地震预警信息发布用时、提高产出参数准确性等方面发挥重要作用。

为了解和掌握烈度仪的性能特点，2014年中国地震局在河北唐山和福建莆田两个地区组织开展了烈度仪观测网的试验。通过对烈度仪观测网所记录到的一些地震事件(例如2015年9月14日河北昌黎  $M_{\text{L}} 4.5$  地震)的分析，获得了对烈度仪观测记录能力的直观认识，也为国家工程项目建设方案的设计提供了必要的支持。作为烈度仪台网试验应用的主要区域之一，台湾烈度仪观测网的建设起步较早，并获得了丰富的实际观测资料。

本文拟将2016年2月6日台湾高雄  $M_{\text{s}} 6.8$  地震( $120.54^{\circ}\text{E}$ ,  $22.94^{\circ}\text{N}$ , 震源深度为15 km)中烈度仪台网记录到的数据作为研究对象，通过对烈度仪所记录震相到时的检拾结果、峰值地震动衰减及震级计算结果准确性的分析对比，讨论烈度仪用于地震预警的可靠性及可能存在的问题。

## 1 数据

自2010年起，台湾大学Wu等(2013)基于微机电系统(micro-electro-mechanical system, 简写为MEMS)研发了低价位的加速度仪Palert，并被广泛地安装于台湾各地。截至2016年年底，全岛共建成551个Palert台站，平均台间距约为8 km，并通过公用网络，以每秒一个封包的方式实时传送观测数据。Palert的观测范围为 $\pm 2 \times 9.8 \text{ m/s}^{-2}$ ，采样率为100 Hz，采用网络时间协议(network time protocol, 简写为NTP)时钟服务器授时，并内置16位A/D转换器。在线运行结果表明，该台网能够在震后15 s内产出地震预警信息，当观测到超过阈值的地震动后(位移幅值  $P_d \geq 0.5 \text{ cm}$ )，也可发出现地预警。此外，历史事件

的离线分析结果表明,将 Palert 与专业台网合并处理后能够提升预警系统的产出速度,产出参数结果的准确性和稳定性也有一定的提高(Wu, 2014; Chen *et al.*, 2015b).

2016 年 2 月 6 日高雄  $M_s 6.7$  地震中,布设于全岛的 551 个 Palert 台站中有 373 个台站获得了此次地震的观测记录(图 1),其中最近的 Palert 台站距离震中仅为 5.5 km. 除中央山脉地区未布设台站外,全岛大部均有台站分布,尤其以台北都会区周边最为密集. 对这些记录经过逐一检查后发现,其中 24 个台站的记录存在不同程度的瑕疵,例如丢头、掉尾、异常突跳等. 因此,本文仅采用其中 349 个记录波形目测正常的台站. 此外,作为对比,作者还收集了台湾地震工程研究中心提供的此次地震中 31 个强震台站(图 1)的记录,一并分析讨论. 这些强震台站均采用美国凯尼公司生产的 Etna 强震仪,采样率为 100 Hz.

## 2 烈度仪记录的 P 波拾拾精度

作为地震预警处理的首个关键环节,地震动到时震相的准确判断和拾拾直接影响地震预警的功效(张红才, 2013). 本文分别采用长短时平均(short time average to long time average, 简写为 STA/LTA)(Allen, 1978, 1982)和长短时平均联合(Akaike information criterion, 简写为 AIC)算法(马强, 2008; 马强等, 2013)这两种自动拾拾方法判别初至震相到时的位置,并与人工拾拾结果进行对比. 其中,长时窗长、短时窗长、触发阈值等参数的设置采用马强(2008)研究中的推荐值.

需要说明的是,尽管有 349 个 Palert 台站的观测数据可供分析,但当震中距超过 180 km 后,由于记录的信噪比过低,即使有经验的专业人员也无法明确地判别 P 波震相到时的位置,而自动拾拾方法在震中距超出 170 km 后也无法有效地识别 P 波到时. 因此,实际人工可拾拾 P 波震相的 Palert 台站仅有 208 个,自动拾拾方法可判别其中的 194 个. 对于 31 个强震台,人工均能识别初至震相,但自动拾拾方法则仅能对震中距 200 km 内的 26 个台站的初至震相进行判别. 本文相关分析仅针对 194 个 Palert 台站和 26 个强震台站. 图 2 给出了采用两种自动拾拾方法判别得到的 P 波震相到时的位置与人工拾拾结果间的偏差对比情况.

由于 STA/LTA 方法中设置了触发阈值,因此采用该方法判别得到的初至震相到时通常滞后于编目震相到时,特别是对于震中距较远、信噪比较低的台站,这种情况更为突出(图 2a). 但使用 AIC 方法补充判别后,初至震相的拾拾精度则得到明显提高(图 2b). 众所周知,信噪比(signal to noise ratio, 简写为 SNR),即均方根与噪声均方根之比,是影响震

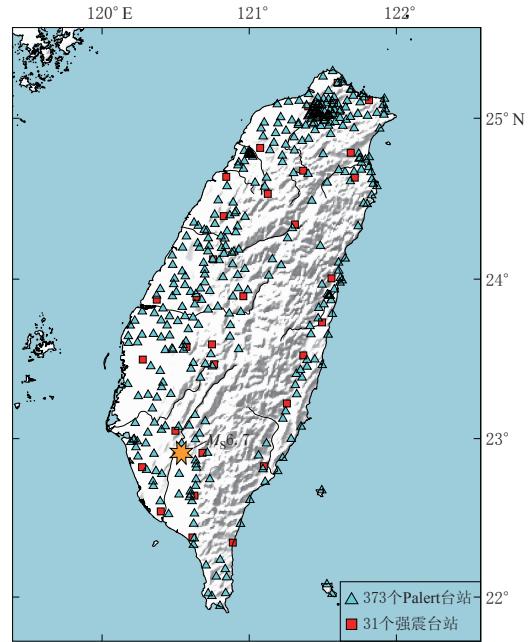


图 1 本文所用 Palert 台站和强震台站分布

Fig. 1 Distribution of Palert stations (triangles) and strong motion stations (squares) used in this study

相检拾精度的主要因素。以震中距 38.9 km 的 L025 台站为例(图 3), 尽管该台站距离震中较近, 但由于 P 波初动的信噪比水平较低, 因此采用自动方法检拾的偏差较大。

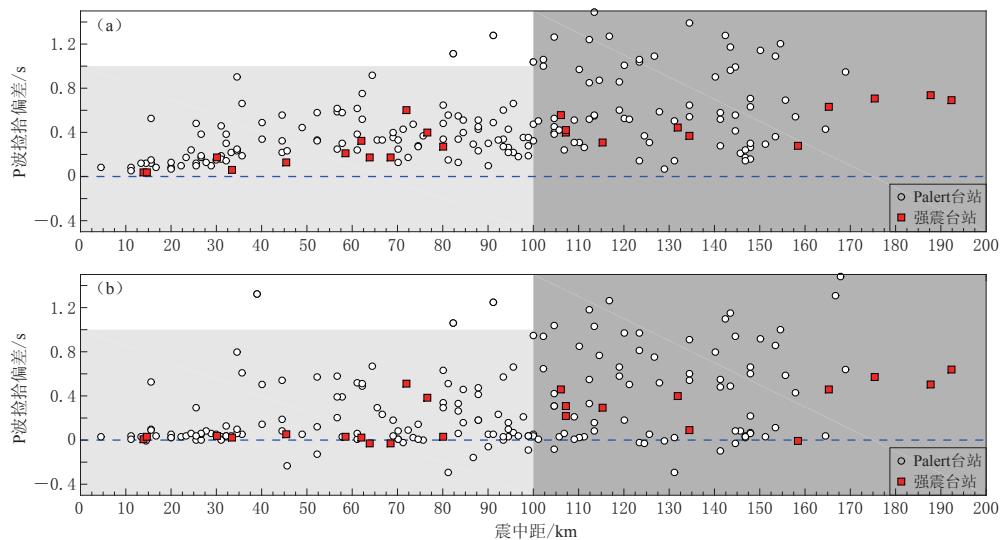


图 2 长短时平均算法 STA/LTA (a) 和长短时平均联合算法 STA/LTA+AIC (b) 的 P 波相检拾结果与人工检拾结果(虚线)的偏差对比

Fig. 2 Comparisons of P phase pick deviations between manual picks (dashed line) and picks by STA/LTA (a) or STA/LTA+AIC (b) method

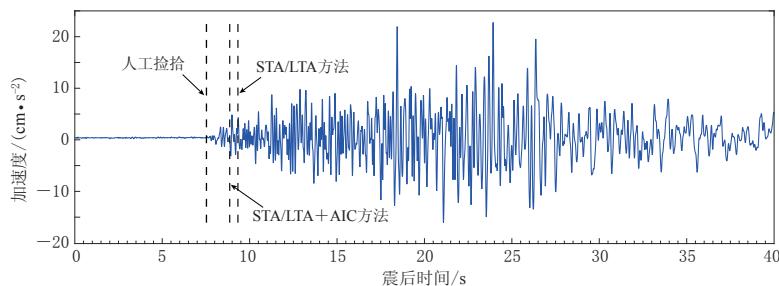


图 3 2016 年 2 月 6 日台湾高雄  $M_s 6.7$  地震后 L025 台 P 波震相到时的检拾结果

Fig. 3 Arrival time picks of P phase at L025 station after Gaoxiong  $M_s 6.7$  earthquake in Taiwan on June 2, 2016

此外, 以震中距 100 km 为界, 也可以较清楚地展示不同信噪比情况下初至震相检拾结果的精度(图 2): 当震中距小于 100 km 时, 采用 STA/LTA 方法和 STA/LTA+AIC 方法的检拾结果与人工检拾结果的偏差大都小于 1.0 s; 而当震中距超过 100 km 后, 自动检拾结果的偏差则呈发散状, 最大偏差甚至超过 2.5 s. 与之形成鲜明对比的则是 26 个强震台的检拾结果, 其大多数台站的自动检拾结果的偏差均在 1.0 s 以内. 从图中可以看出, 尽管仅采用 STA/LTA 方法判别初至震相到时存在一定的滞后, 但自动检拾结果的偏差均不大, 甚至当震中距为 200 km 左右时检拾偏差仍小于 1.0 s.

图 4 为 Palert 台站和强震台站记录的信噪比随震中距的变化. 显然, 台站记录的信噪比随震中距的增加而逐渐衰减, 但在相同震中距条件下, 强震台站的信噪比通常显著高于

Palert 台站的信噪比,这主要是由于强震台站的噪声水平远低于 Palert 台站(张红才等,2017). 此外,由于 Palert 采用的 A/D 转换器仅为 16 位,记录波形呈现“台阶状”,也会对震相到时拾拾的准确判断造成不利影响.

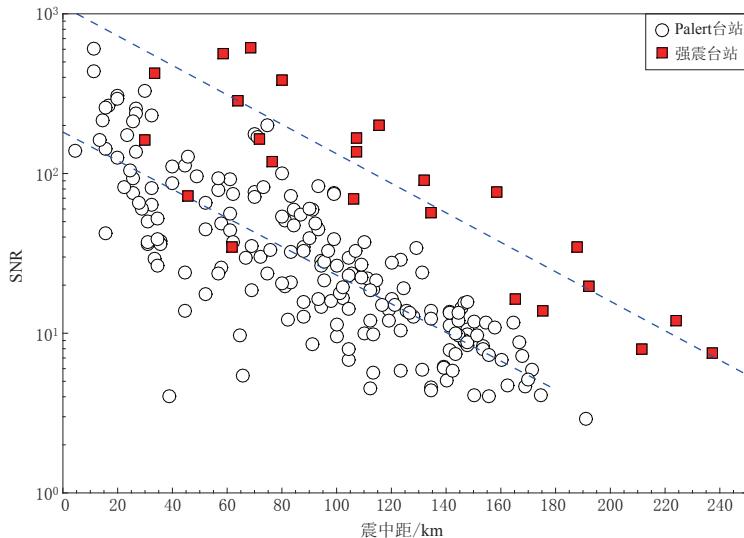


图 4 台站记录的信噪比 SNR 随震中距的变化

Fig. 4 SNR recorded by stations varies accordingly with epicentral distance

综上,当信噪比满足一定条件时(以本次地震为例,  $\text{SNR} \geq 20$ ), STA/LTA 算法、STA/LTA+AIC 算法等震相到时拾拾算法可直接用于烈度仪台站, 拾拾结果具有一定的准确性.

### 3 烈度仪峰值地震动衰减

地震预警的主要目标,即为在破坏性地震动对目标地区造成影响之前,及时地对可能的影响程度和范围作出快速的估计和判断. 在观测台站分布较为稀疏的情况下,仅有十分局限的少量信息可供利用,因此对危险区的估计必然存在较大偏差;而当观测台站分布密集时,能够快速地获取近场台站的峰值地震动,然后结合已有地震动衰减关系即可对地震可能造成的影响程度和范围作出可靠的评估,从而使地震预警系统的准确性得以提升,这也是烈度仪用于地震预警的突出优势之一. 由于现有的地震动衰减关系大都依据测震、强震的观测记录统计得出,因而其是否同样适用于烈度仪也是值得研究的问题.

本文收集了 5 种台湾地区目前较为常用的峰值加速度(peak ground acceleration, 简写为 PGA)衰减关系(Chang *et al*, 2001; Wu *et al*, 2001; Liu, Tsai, 2005; 翁乃祺, 2007; Lin, Wu, 2010),并将烈度仪和强震台实际记录到的峰值地震动与其进行对比,结果如图 5 所示. 从图中可以看出,所收集的 5 种衰减关系之间均存在一定的差异,这主要与统计中所使用的记录样本数量、地震类型和回归关系式的形式等有关;另一方面,烈度仪和强震台实际记录的峰值地震动与这 5 种衰减关系的匹配性似乎均存在一些问题,即现有的地震动衰减关系可能并不完全适用于烈度仪台站,因此直接应用这些关系式进行估计时存在一定风险.

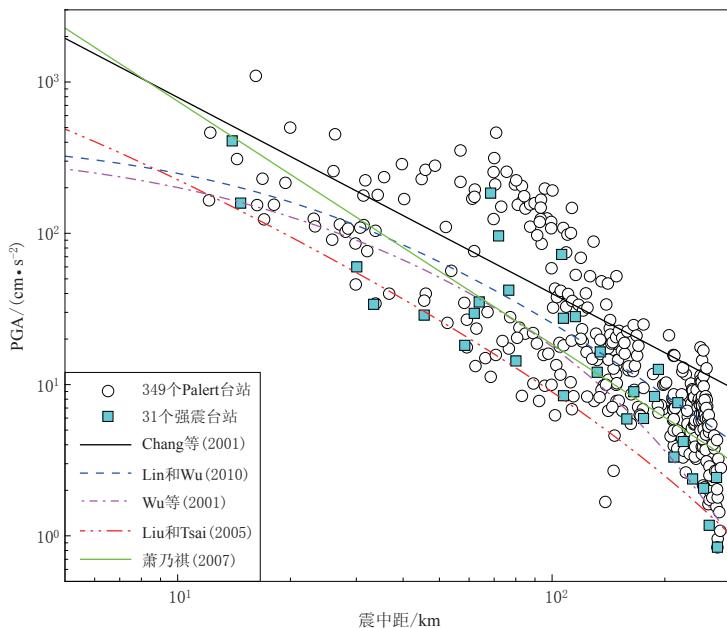


图 5 台站记录的峰值地震动衰减与台湾地区 5 种常用的 PGA 衰减关系的对比

Fig. 5 Comparison between attenuation of peak ground motions recorded by stations and five commonly used attenuation relationships of PGA in Taiwan

吴逸民等(2015)对布设于台湾地区的 Palert 记录进行统计后发现,由于烈度仪大都布设于建筑物内,因此相较于布设于基岩或土层中的强震台站,安装在一楼的 Palert 记录的峰值会被平均放大 1.08 倍,安装于二楼的 Palert 记录的峰值会被平均放大 1.42 倍,这可能也是造成烈度仪台站的 PGA 记录与 5 种衰减关系之间不能良好匹配的主要原因。此外,由于现有的地震动衰减关系通常均基于以往地震中所获取记录的综合平均结果,并不对发震断层的类型、震源机制等进行详细区分,相同震级地震事件的地震动参数相当离散,不同地震事件之间的地震动衰减关系也存在较大的不确定性,因此对于单个地震而言,出现不匹配的情形也属正常。

2015 年发布的地震行业标准《地震台站建设规范: 地震烈度速报与预警台站》(DB/T 60—2015)(中国地震局, 2015)对烈度仪台站(一般站)的建设位置作出如下规定:“一般站宜建在地面上。若一般站建在建筑物上,建筑物宜为二层或以下小型建筑且地基处无 1 m 以上回填土”。该要求即是考虑到应尽量避免建筑响应、场地效应等因素对实测记录的过多影响,从而保证根据烈度仪的记录能尽可能准确地获得地表仪器的地震烈度分布。但烈度仪布设于不同位置时对实际记录的影响有何不同及需要哪些相应的修正方法等问题尚需更多实测资料的支持,作者也将继续进行深入研究。

如前文所述,在地震预警应用中,可充分利用烈度仪观测台网密集布设的优势,依据震中附近少量烈度仪台站实际观测到的峰值地震动,选择最适宜的地震动衰减关系式进行危险区域的评估判定,这将有助于大幅提升地震预警信息发布的准确性和可靠性,提高地震预警信息发布的效率。

## 4 预警震级的可靠性

地震预警震级计算是地震预警系统的关键问题,同时也是难点之一(金星等,2012)。由于 Palert 台站多布设于建筑物中,其产出的记录多为建筑物的反应,因此若将其直接用于地震震级的计算很可能造成震级高估,并导致误报。Wu 等(2013)的研究认为,对于 Palert 台网可利用 P 波段幅值计算地震预警震级,Chen 等(2015a)则在 Palert 台网与台湾气象厅专业台网两网融合地震预警应用中,重新拟合得到了震级、幅值与震中距等参数之间的统计关系式,并用于地震预警震级估计。目前,由于缺乏必要的数据支持,暂时无法获得相关的统计关系式,但本文仍分别选用  $\tau_c$  和  $P_d$  两个参数对 Palert 台站的预警震级进行计算讨论。此外,为了更真实地反映随着时间的增加和可用信息量的不断增多,震级估计结果的变化,作者以首个烈度仪台站触发为起始参考点,分别以 1—20 s 内所有可用台站的震级计算结果的算术平均值作为该时刻的预警震级估计结果,并以方差表示该结果的稳定性,结果如图 6 所示。

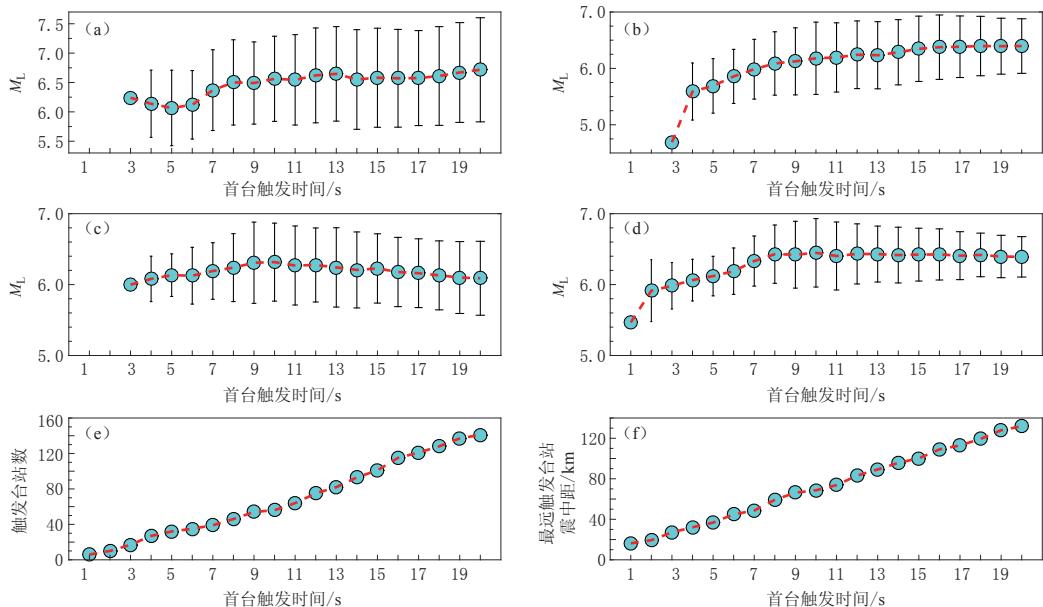


图 6 预警震级估计结果分析

竖线棒表示每个时刻震级估计的方差,虚线为每个时刻震级估计结果的连线。(a)–(d)分别为采用  $\tau_c$  参数(引自 Wu *et al.*, 2007)、 $P_d$  参数(引自 Wu *et al.*, 2007)、改进的  $P_d$  参数(0.075 Hz 高通滤波, 引自张红才, 2013)和改进的  $P_d$  参数(1 Hz 高通滤波, 引自 Li *et al.*, 2013)的震级计算结果;

(e)为触发台站数随时间的变化;(f)为最远触发台站震中距随时间的变化

Fig. 6 Analysis of early warning magnitude estimation results

The vertical bar represents magnitude estimation variance at each moment, and dashed line is the linkage of magnitude estimation result at each moment. (a)–(d) are the magnitude estimation results using  $\tau_c$  value (after Wu *et al.*, 2007),  $P_d$  value (after Wu *et al.*, 2007), modified  $P_d$  value (0.075 Hz high pass filtered, after Zhang, 2013) and modified  $P_d$  value (1 Hz high pass filtered, after Li *et al.*, 2013), respectively;

(e) is numbers of triggered stations *versus* time; (f) is epicentral distance of the farthest triggered station *versus* time

对比 4 种方法的震级估计结果可知, 采用  $\tau_c$  参数的结果(图 6a)最为准确, 且震级估计结果的变化幅度也较小。但随着可用台站数量的增多, 震级估计结果的方差不但没有减小反而逐渐增大。造成这一现象的主要原因为,  $\tau_c$  的准确性与记录的质量密切相关, 尤其是将加速度时程积分两次而获得位移时程时, 若原始记录的信噪比较低, 则在积分过程中必然会引入较大的误差, 进而影响参数计算结果的准确性。在一定程度上, 由于烈度仪记录的信噪比普遍较低, 这种现象无法避免, 这也是烈度仪用于震级计算的突出缺点之一。采用  $P_d$  参数的震级估计结果在开始阶段则存在明显低估(图 6b, d), 且需要较长一段时间才能达到稳定的估计结果, 但随着可用信息量的不断增多, 震级估计结果的稳定性较  $\tau_c$  参数优势明显, 尤其是采用 1 Hz 高通滤波的  $P_d$  参数。而采用改进的  $P_d$  参数(0.075 Hz 高通滤波, 图 6c)的震级估算结果的准确性和稳定性则呈现出总体平衡的特点, 但相比于其它 3 种方法, 该方法的震级估算结果与编目震级结果间的偏差最大。因此, 无论采用哪种参数均能获得较准确的震级估计结果, 但不同参数结果的稳定性存在一定差异, 需要结合实际需求综合考虑。

仅以高雄  $M_S 6.8$  地震为例, 尽管直接沿用原有  $P_d$ ,  $\tau_c$  参数统计关系式的震级计算结果并不十分准确, 但差异性也并不显著。因此, 作者认为在无法提供新的统计关系式的情况下, 原有统计公式仍可用于烈度仪台网地震预警震级的估计。此外, 在图 6 的对比分析中, 密集布设的烈度仪观测台网的优势凸显。以首台触发 10 s 为例, 此时采用 4 种方法的震级估计结果分别为  $M_S 6.5$ ,  $M_S 6.2$ ,  $M_S 6.3$ ,  $M_S 6.5$ , 与编目震级结果均较为接近, 可认为是可接受的震级估计结果。此时, 已触发台站达到 59 个, 最远的触发台站距离震中 70 km, 盲区半径为 40 km 左右, 因此对于盲区以外的用户仍可提供一定的应急响应时间。综上, 密集布设的烈度仪观测台网, 在较短时间内即有一定数量的观测台站被触发, 相同时间内可供利用的信息量大幅增加, 将有利于地震预警震级的可靠估计。

## 5 讨论与结论

本文通过对 2016 年 2 月 6 日台湾高雄  $M_S 6.8$  地震中烈度仪观测台网记录的分析和对比, 重点讨论了密集布设的烈度仪台网用于震相拾拾、地震动估计和预警震级计算等地震预警应用的适用性, 并获得了烈度仪台网用于地震预警可靠性的初步认识:

- 1) 烈度仪记录的信噪比较低, 但对于震中附近满足一定信噪比条件的台站, 现有的成熟震相自动拾拾算法可直接应用, 拾拾结果也有较高的准确性;
- 2) 现有的地震动衰减关系可能并不完全适用于烈度仪观测台站, 因此直接应用目前常用的关系式进行地震动水平估计时存在一定风险;
- 3) 由于烈度仪台站成本低廉, 易于密集布设, 因此在较短时间内即有丰富信息可供利用, 采用现有预警震级算法也能获得较准确的震级估计结果, 对于地震预警信息的准确产出具有重要意义。

尽管本文仅局限于一次事件、一种类型的烈度仪台站, 研究结果可能不具有代表性, 但从本文的相关分析结果中可以看出烈度仪台站在地震预警应用中的突出优势, 它将成为现有测震和强震台站的有益补充并将发挥重要作用。作者也将结合其特点, 继续开展提高记录信噪比、获取可靠到时信息、适用于烈度仪台网的地震动参数衰减关系式和预警震级计算公式等方面的研究。

## 参 考 文 献

- 金星, 张红才, 李军, 韦永祥, 马强. 2012. 地震预警震级确定方法研究[J]. 地震学报, **34**(5): 593–610.
- Jin X, Zhang H C, Li J, Wei Y X, Ma Q. 2012. Research on earthquake early warning magnitude estimate[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(5): 593–610.
- 马强. 2008. 地震预警技术研究及应用[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 14–39.
- Ma Q. 2008. *Study and Application on Earthquake Early Warning*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 14–39 (in Chinese).
- 马强, 金星, 李山有, 陈绯斐, 廖诗荣, 韦永祥. 2013. 用于地震预警的 P 波震相到时自动拾取[J]. 地球物理学报, **56**(7): 2313–2321.
- Ma Q, Jin X, Li S Y, Chen F W, Liao S R, Wei Y X. 2013. Automatic P-arrival detection for earthquake early warning [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(7): 2313–2321 (in Chinese).
- 吴逸民, 谢佳桦, 何美仪, 陈燕玲, 甘志文. 2015. 台湾地区震度图测绘整合系统之探讨[R]. 台北: 台湾气象局: 478–482.
- Wu Y M, Xie J H, He M Y, Chen Y L, Gan Z W. 2015. *Analysis on Shakemap System Integration in Taiwan Region*[R]. Taipei: Taiwan Weather Bureau: 478–482.
- 萧乃祺. 2007. 台湾即时强地动观测于地震预警之应用[D]. 台北: 台湾“中央大学”: 77–90.
- Hsiao N Q. 2007. *The Application of Real-Time Strong-Motion Observations on the Earthquake Early Warning in Taiwan*[D]. Taipei: Taiwan “National Central University”: 77–90 (in Chinese).
- 张红才. 2013. 地震预警系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 43–70.
- Zhang H C. 2013. *Study of Key Technologies in Earthquake Early Warning System*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 43–70 (in Chinese).
- 张红才, 金星, 王士成, 李军. 2017. 烈度仪记录与强震及测震记录的对比分析: 以 2015 年河北昌黎  $M_{\text{L}}$  4.5 地震为例 [J]. 地震学报, **39**(2): 273–285.
- Zhang H C, Jin X, Wang S C, Li J. 2017. Comparative analyses of records by seismic intensity instrument with strong ground motion records and seismograph stations records: Taking the  $M_{\text{L}}$  4.5 Changli earthquake of Hebei Province for an example[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **39**(2): 273–285 (in Chinese).
- 中国地震局. 2015. 地震台站建设规范: 地震烈度速报与预警台站(DB/T 60—2015)[S]. 北京: 地震出版社: 3.
- China Earthquake Administration. 2015. *Specification for the Construction of Seismic Station: Seismic Intensity Rapid Reporting and Earthquake Early Warning Station* (DB/T 60—2015)[S]. Beijing: Seismological Press: 3 (in Chinese).
- Allen R V. 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **68**(5): 1521–1532.
- Allen R V. 1982. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **72**(6B): S225–S242.
- Chang T Y, Cotton F, Angelier J. 2001. Seismic attenuation and peak ground acceleration in Taiwan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **91**(5): 1229–1246.
- Chen D Y, Hsiao N C, Wu Y M. 2015a. The Earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **105**(2A): 568–579.
- Chen D Y, Wu Y M, Chin T L. 2015b. Incorporating low-cost seismometers into the Central Weather Bureau seismic network for earthquake early warning in Taiwan[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, **26**(5): 503–513.
- Evans J R, Allen R M, Chung A I, Cochran E S, Guy R, Hellweg M, Lawrence J F. 2014. Performance of several low-cost accelerometers[J]. *Seismol Res Lett*, **85**(1): 147–158.
- Holland A. 2003. Earthquake data recorded by the MEMS accelerometer: Field testing in Idaho[J]. *Seismol Res Lett*, **74**(1): 20–26.
- Horiuchi S, Horiuchi Y, Yamamoto S, Nakamura H, Wu C J, Rydel P A, Kachi M. 2009. Home seismometer for

- earthquake early warning[J]. *Geophys Res Lett*, **36**(5): L00B04. doi:10.1029/2008GL036572.
- Hsieh C Y, Chao W A, Wu Y M. 2015. An examination of the threshold-based earthquake early warning approach using a low-cost seismic network[J]. *Seismol Res Lett*, **86**(6): 1664–1667.
- Li J, Jin X, Wei Y X, Zhang H C. 2013. Continuous estimates on the earthquake early warning magnitude by use of the near-field acceleration records[J]. *Earthquake Science*, **26**(5): 351–356.
- Lin T L, Wu Y M. 2010. Magnitude determination using strong ground-motion attenuation in earthquake early warning [J]. *Geophys Res Lett*, **37**: L07304. doi:10.1029/2010GL042502.
- Liu K S, Tsai Y B. 2005. Attenuation relationships of peak ground acceleration and velocity for crustal earthquakes in Taiwan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(3): 1045–1058.
- Tasi C Y, Lin T L, Wu Y M. 2015. Application of waveform stacking to low-cost local earthquake early warning arrays in Taiwan[J]. *Seismol Res Lett*, **86**(6): 1668–1673.
- Wu Y M, Shin T C, Chang C H. 2001. Near real-time mapping of peak ground acceleration and peak ground velocity following a strong earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **91**(5): 1218–1228.
- Wu Y M, Kanamori H, Allen R M, Hauksson E. 2007. Determination of earthquake early warning parameters,  $\tau_e$  and  $P_d$ , for southern California[J]. *Geophys J Int*, **170**(2): 711–717. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03430.
- Wu Y M, Chen D Y, Lin T L, Hsieh C Y, Chin T L, Chang W Y, Li W S, Ker S H. 2013. A high-density seismic network for earthquake early warning in Taiwan based on low cost sensors[J]. *Seismol Res Lett*, **84**(6): 1048–1054.
- Wu Y M. 2014. Progress on development of an earthquake early warning system using low-cost sensors[J]. *Pure Appl Geophys*, **172**(9): 2343–2351. doi:10.1007/s00024-014-0933-5.