

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 $M_L 4.5$ 地震为例. 地震学报, 39(2): 273-285. doi:10.11939/jass.2017.02.010.

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 $M_L 4.5$ Changli earthquake of Hebei Province for an example. *Acta Seismologica Sinica*, 39(2): 273-285. doi:10.11939/jass.2017.02.010.

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 $M_L 4.5$ 地震为例*

张红才^{1),*} 金星^{1,2)} 王士成¹⁾ 李军¹⁾

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 2015 年河北昌黎 $M_L 4.5$ 地震中测震、强震及烈度仪台站记录到的事件波形为研究对象, 通过对比分析挑选的两组观测台站的记录波形以及不同台站的噪声记录特征, 获得了烈度仪台站观测记录能力及特点的认识. 结果表明: 烈度仪台站产出的记录在部分频段(1—10 Hz)与传统强震台站、测震台站均有较好的一致性, 但在中长周期部分存在较大差异; 在相同观测频带(0.1—10 Hz)下, 由烈度仪台站记录积分得到的速度时程、位移时程也与强震台站、测震台站的观测结果具有良好的相关性, 说明烈度仪台站产出的加速度记录具有一定的可积分性; 烈度仪台站记录的噪声水平远超出强震台站和测震台站, 基本为仪器自噪声, 不包含天然地脉动成分. 此外, 由于本研究所用的烈度仪采用了 16 位的 A/D 转换器, 对震相到时的精确拾取产生了不利影响. 综上, 本文认为烈度仪台站较适用于中强地震的近场观测.

关键词 烈度仪 高频部分 噪声 A/D 转换器

doi:10.11939/jass.2017.02.010

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

Comparative analyses of records by seismic intensity instrument with strong ground motion records and seismograph stations records: Taking the $M_L 4.5$ Changli earthquake of Hebei Province for an example

Zhang Hongcai^{1),*} Jin Xing^{1,2)} Wang Shicheng¹⁾ Li Jun¹⁾

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

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

Abstract: Based on seismic records of Changli $M_L 4.5$ earthquake in Hebei Province, by analyzing two groups of waveforms and comparing seismic noise characteristics of seismograph station, strong ground motion station and seismic intensity instrument (SII) station, this paper acquires basic understanding of each kind of these stations, especially the SII station, such as the ability to record micro-earthquakes. The results show that, in certain frequency band

* 基金项目 地震科技星火计划(XH16020Y)资助.

收稿日期 2016-06-07 收到初稿, 2016-08-24 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: zhanghc@fjea.gov.cn



(1–10 Hz), seismic waveforms are quite similar for both the SII station and the strong ground motion station or the seismograph station, but large differences appear in mid-long period part. For the same frequency band (0.1–10 Hz band-pass filtered), velocity history and displacement history that are integrated by the SII station data have good correlations and coherences with those from seismograph stations and strong ground motion stations, suggesting that the SII records have certain integrability to some extent. The noise levels of SII stations are far beyond seismograph stations and strong ground motion stations, normally are instrument noise without micro-tremor at all. As a result of only a 16 bit A/D convertor applied, the precision of sampled data is limited and then the accuracy of seismic phase picking will be adversely affected. In conclusion, we think that SII stations are more suitable for moderate to large near-field earthquakes monitoring.

Key words: seismic intensity instrument; high frequency; seismic noise; A/D convertor

引言

近年来,烈度仪以其造价低廉、安装快捷、维护简便等特点受到了越来越多的关注,研究及应用也发展迅速.随着“国家地震烈度速报与预警工程”项目各项工作的不断推进,未来5—10年内我国将在华北地震带、南北地震带、华南沿海地震带、新疆北天山地震带等4个重点地震预警区内布设一大批地震观测台站.其中,将有超过12 000台烈度仪台站在这些区域内建成.为了较全面地了解和掌握烈度仪台站的地震观测特点、仪器特性等,中国地震局自2014年起率先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,以期对烈度仪用于地震观测、地震预警、地震烈度速报等方面的能力有一定了解.

除此之外,针对烈度仪用于地震观测的可行性、记录结果的准确性等问题也开展了很多理论分析和试验测试. Holland(2003)针对微机电机械系统(micro electro mechanical system, 简称为MEMS)用于地震观测的可行性进行了研究,并给予了积极的评价; Evans等(2014)通过对比几种不同价位的MEMS加速度计的记录特性,对其用于地震观测的优缺点进行了分析;而基于MEMS研发的相关加速度计(或称烈度仪)也已在我国台湾(Wu *et al*, 2013; Wu, 2014; Chen *et al*, 2015a, b; Hsieh *et al*, 2015; Tasi *et al*, 2015)和日本(Horiuchi *et al*, 2009)等地区布设和应用.我国大陆地区的很多学者也进行了相关的研究,例如:许建华(2006)通过对MEMS在不同环境下噪声监测能力的研究认为,由于烈度仪中的MEMS加速度计存在精度差、灵敏度低的特点,能否用于地震监测还有待于实测数据的支持;刘钢锋等(2011)认为,MEMS加速度计在低频响应和低噪声方面均优于传统地震仪,但在使用中需要埋置于一定深度,且周围环境振动也要处于较低水平;王浩和丁炜(2011)的试验结果表明,MEMS加速度计记录结果中含有最大幅值约为 1 cm/s^2 的自噪声,因此仅适用于较大幅值地震动的观测;李昌珑(2013)的研究也得出了烈度仪观测记录与传统强震仪的高频段记录波形基本一致的结论.

上述工作大都侧重于MEMS加速度计性能和指标的讨论,而利用实际观测资料的对比研究鲜有开展.鉴于此,本文拟以2015年9月14日河北昌黎 $M_L 4.5$ 地震(118.80°E ,

39.73°N, 震源深度为 14 km) 中测震台网、强震台网及烈度仪试验台网的实际观测记录为对象, 通过记录波形、频谱等方面的对比分析, 对烈度仪台网的记录特点及其地震监测能力进行深入研究.

1 数据

2015 年河北昌黎 $M_L 4.5$ 地震中, 布设在震中周围的测震台网、强震台网及烈度仪试验台网均获取了丰富的观测数据, 本研究即基于这些数据展开. 如图 1 所示, 本文挑选了两组台站记录波形进行分析对比, 一组是位于同一观测台址的强震台站 13SZH 和烈度仪台站 FRSZH, 其震中距为 59 km; 另一组则是相邻的测震台站 DOH 和烈度仪台站 KPDOH, 其震中距分别为 40 km 和 43 km. 严格地说, 本文挑选的第二组台站相距相对较远, 并不是同台址观测台站, 因此二者之间不存在完全的可比性, 但由于此次地震中没有获取其它更合适的测震台站和烈度仪台站的波形记录, 本文仅以这对相邻台站为例, 通过其记录波形特征的对比分析对烈度仪台站的特点进行归纳总结. 此外, 由图 1 可见, 此次地震中还有另一组紧邻的强震台站和烈度仪台站, 即位于唐山市周边的 13XGZ 强震台站和 SQLGT 烈度仪台站. 经分析, 这组台站的记录特征与本文所挑选的第一组台站的分析结果基本一致, 而本文挑选的第一组台站的地震峰值加速度 PGA 更大, 展示性会更好些, 故本文仅以第一组台站为例进行分析.

上述两组对比台站中, 强震台站 13SZH 使用的地震计为 SLJ-100 型加速度计, 测量频带为 0—80 Hz; 测震台站 DOH 使用的地震计为 BBVS-60 型宽频带速度计, 测量频带为 50 Hz—60 s; 烈度仪台站 FRSZH 和 KPDOH 则均为台湾三联公司生产的 Palert 型 MEMS 加速度计, 测量频带为 0—20 Hz.

2 烈度仪台站与强震台站记录对比

强震台站 13SZH 和烈度仪台站 FRSZH 的三分向时程记录如图 2 所示. 由该图可见, 二者无论是大体的波形形状, 还是记录峰值均十分相似. 本文分别以相关系数 ρ_{xy} (式(1)) 和幅值平方相干系数 φ_{xy} (式(2)) 为指标, 定量评价二者在时间域和频率域的匹配程度.

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)D(y)}}, \quad (1)$$

$$\varphi_{xy}(f) = \frac{|R_{xy}(f)|^2}{R_{xx}(f)R_{yy}(f)}, \quad (2)$$

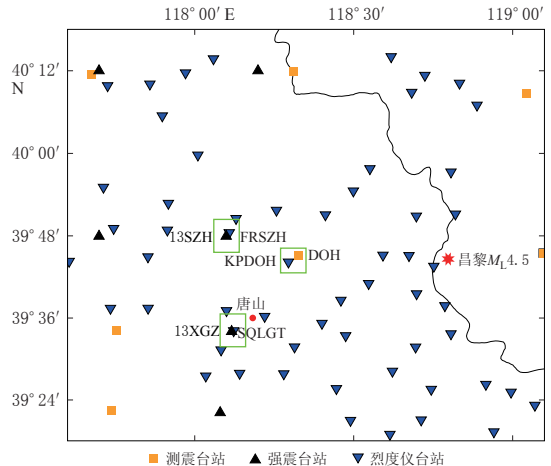


图 1 昌黎 $M_L 4.5$ 地震震中附近的地震观测台站分布
Fig. 1 Distribution of seismic observation stations near the epicenter of the Changli $M_L 4.5$ earthquake
Squares represent seismograph stations, triangles represent strong ground motion stations, and inverted triangles represent seismic intensity instrument stations

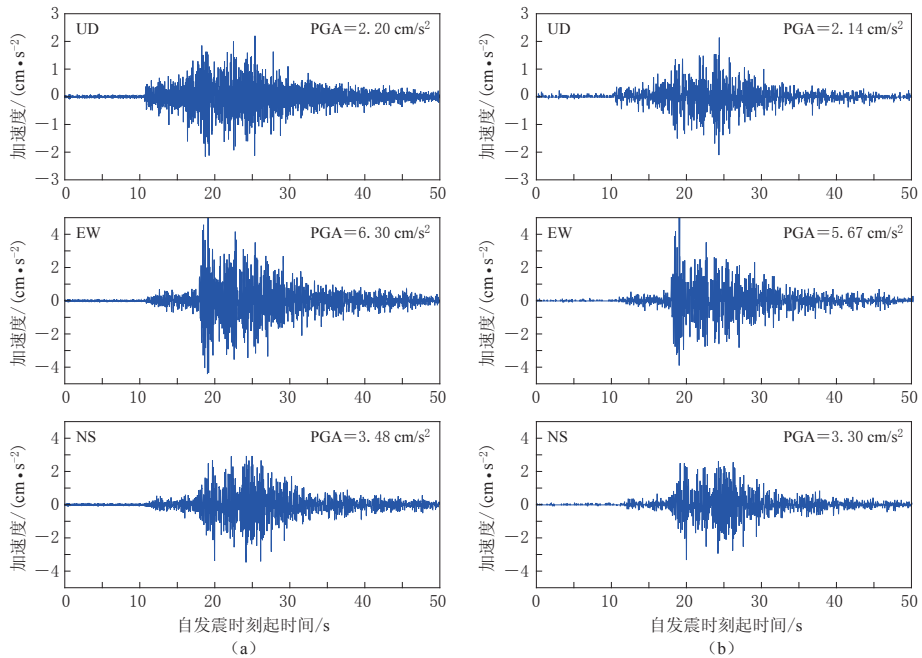


图 2 强震台站 13SZH(a)与烈度仪台站 FRSZH(b)原始记录波形对比

Fig. 2 Comparison of original records of the strong ground motion station 13SZH (a) with those of the seismic intensity instrument (SII) station FRSZH (b)

式中: $cov(x, y)$ 为 x, y 两个时程的协方差; $D(x)$ 和 $D(y)$ 为分别为 x, y 两个时程的自方差; $R_{xy}(f), R_{xx}(f)$ 和 $R_{yy}(f)$ 分别为两时程的互功率谱和自功率谱.

需要说明的是, 由于本文所使用的强震记录为触发式记录, 无法准确获取授时信息, 因此本文以 P 波到时为依据, 参照有准确授时的烈度仪台站的相关信息对强震记录进行截取. 此外, 由于强震台站的采样率为 200 sps, 而烈度仪台站的采样率为 100 sps, 因此本文选取 8 阶切比雪夫(Chebyshev)I 型低通滤波器将强震台站记录采样率降至 100 sps, 从而使其尽可能在时间域内一一对应. 经计算可得, 强震台站 13SZH 与烈度仪台站 FRSZH 的 UD, EW, NS 三分向波形记录间的相关系数分别为 0.30, 0.92, 0.91, 即除了 UD 向的一致性较差外, 两水平方向是高度相关的(图 3). 采用相干分析方法分别计算强震台站与烈

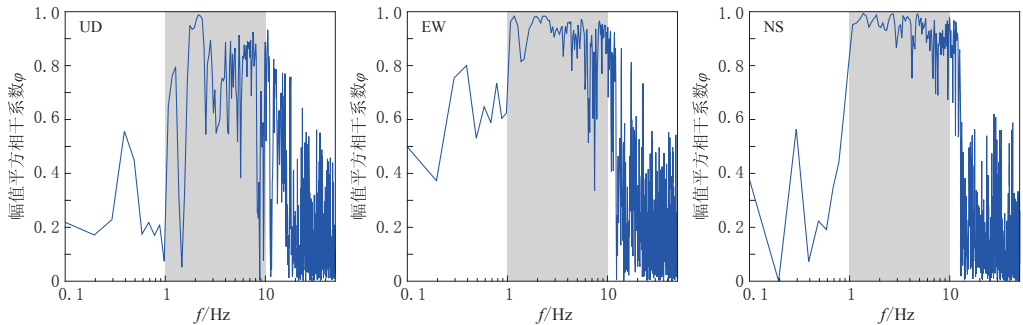


图 3 强震台站 13SZH 与烈度仪台站 FRSZH 原始记录幅值平方相干性分析结果

Fig. 3 Magnitude squared coherence indices between the strong ground motion station 13SZH and the SII station FRSZH

度仪台站的记录波形在不同频段的相干性, 结果如图 4 所示. 可见, 在 1—10 Hz 频率范围内, 强震台站和烈度仪台站的波形相干性最好, 尤其是两水平通道. 图 4 同时还给出了 1—10 Hz 内波形记录的信噪比变化, 可见, 在该频段内, 除烈度仪台站 UD 向记录的信噪比相对较低外, 其余各通道事件记录部分的强度普遍超过噪声部分 1 个数量级以上, 说明本文相关分析结果具有较高的可信度. 而较低的信噪比水平可能也是导致二者 UD 向匹配程度不高的重要因素之一.

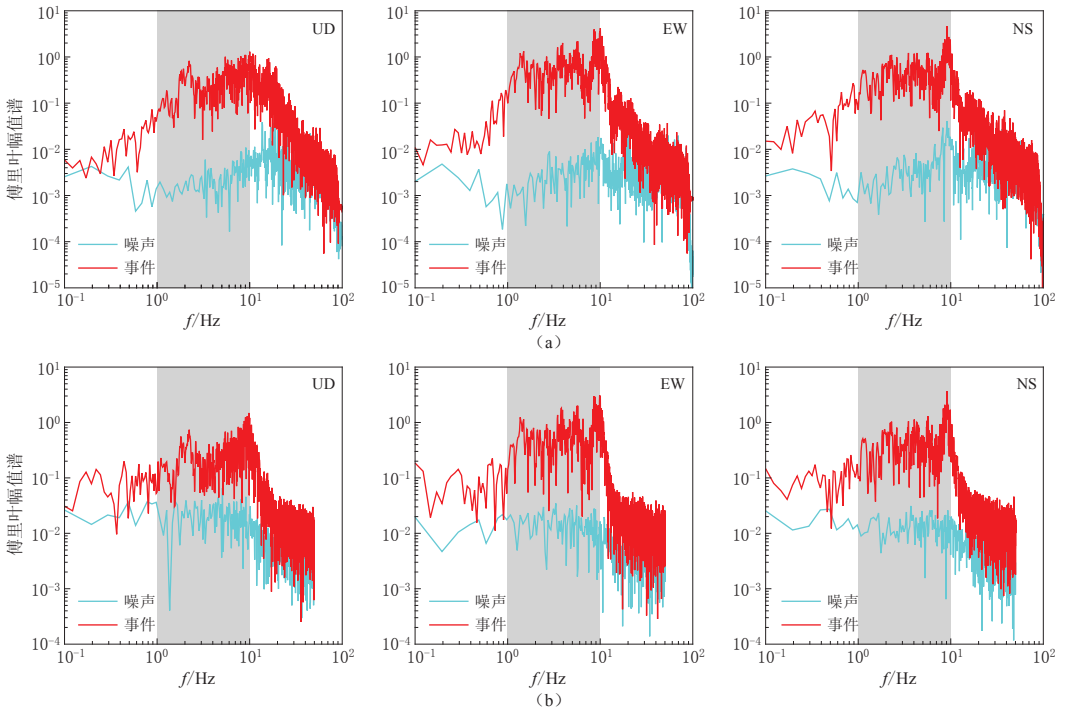


图 4 强震台站 13SZH(a)与烈度仪台站 FRSZH(b)原始记录信噪比分析结果

Fig. 4 SNR analysis results of the strong ground motion station 13SZH (a) and the SII station FRSZH (b)

综上, 除垂直向波形记录一致性相对较差外, 强震台站与烈度仪台站记录之间存在较高的相关性和匹配度; 同时, 由于二者所使用地震计在观测频带、观测能力等方面均存在较大差异, 因此在波形细节上还存在一定差异.

由于仪器观测频带不同, 本文依据《仪器地震烈度计算》(征求意见稿)(中国地震局, 2015)中推荐的 0.1—10 Hz 频率范围采用 4 阶巴特沃斯(Butterworth)带通滤波器对强震台站和烈度仪台站的记录波形分别进行滤波处理, 结果如图 5 所示. 可见, 滤波后二者波形之间的相似性进一步增强, 三分向记录的地震峰值加速度 PGA 也更为接近, 分别为 1.68 与 1.62 cm/s^2 , 5.40 与 4.70 cm/s^2 , 3.03 与 2.99 cm/s^2 ; 波形记录之间的相关系数略有提高, 分别为 0.33, 0.93, 0.92. 带通滤波后, 三分向波形的相干性分析结果如图 6 所示. 与图 3 中结果类似, 1—10 Hz 范围内二者的相干性最好, 说明在该频段内二者的波形记录较为一致; 但对于 0.1—1 Hz 的中长周期部分, 二者则存在较为显著的差异. 上述结果表明, 相较于强震仪良好的中长周期记录特性, 烈度仪的中长周期记录可能并不完全可靠.

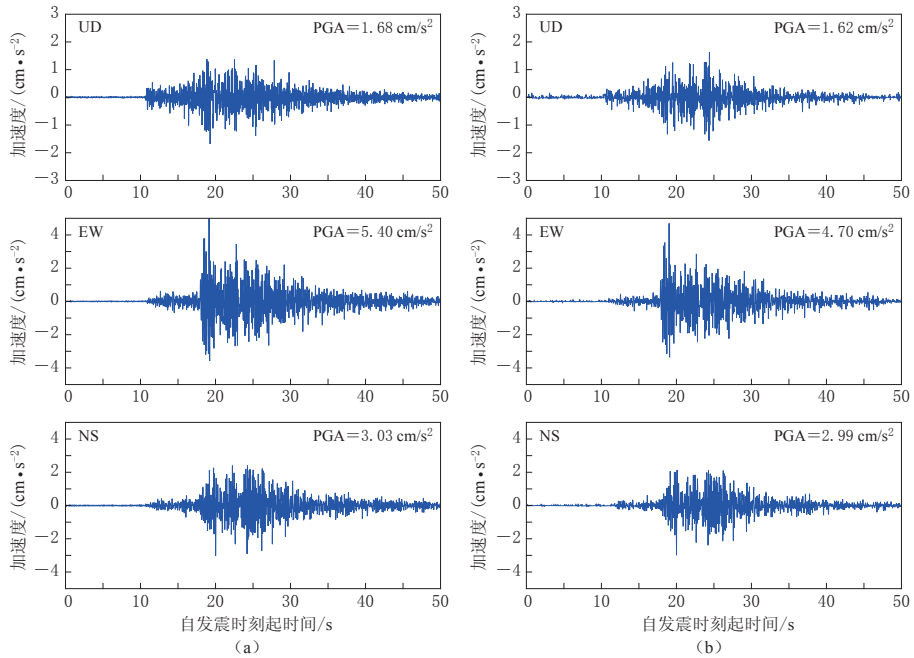


图 5 0.1—10 Hz 巴特沃斯带通滤波后强震台站 13SZH(a)与烈度仪台站 FRSZH(b)的波形对比

Fig. 5 Comparison of seismic waveforms of the strong ground motion station 13SZH (a) with those of the SII station FRSZH (b) after 0.1–10 Hz band-pass filter

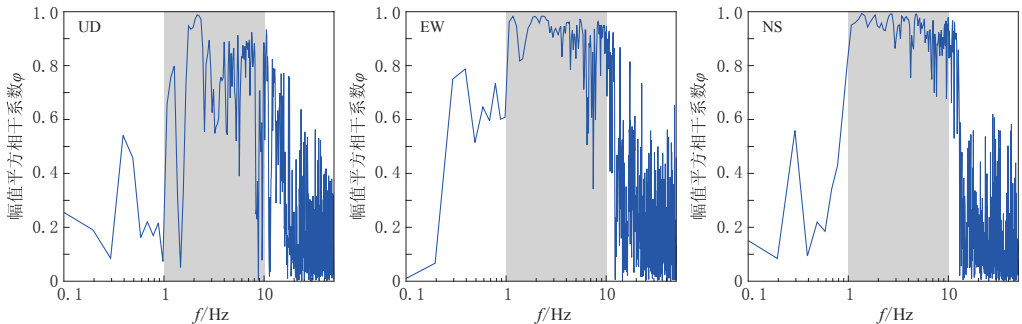


图 6 0.1—10 Hz 带通滤波后强震台站 13SZH 与烈度仪台站 FRSZH 幅值平方相干性分析结果

Fig. 6 Magnitude squared coherence indices between the strong ground motion station 13SZH and the SII station FRSZH after 0.1–10 Hz band-pass filter

在地震预警、烈度速报等实际应用中,通常需要将产生的加速度型记录积分为速度、位移型记录.例如,目前地震预警震级计算中广泛使用的 P_d 参数即定义为 0.075 Hz 高通滤波后垂直向位移记录 P 波之后 3 s 内的峰值(Wu *et al*, 2006; Wu, Zhao, 2006; Lin *et al*, 2011; 金星等, 2012; Jin *et al*, 2013; Zhang *et al*, 2016), 因此需要将加速度记录积分两次才能获取 P_d 参数;而在《仪器地震烈度计算》(征求意见稿)(中国地震局, 2015)中,仪器地震烈度的计算需要综合考虑观测台站实测记录的峰值加速度 PGA 或峰值速度 PGV 值,因此也需要将加速度记录积分为速度记录才能获取 PGV. 因此,不同观测仪器产出记录的可积分性也是值得关注和研究的. 本文采用直接积分的方式分别将强震仪和烈度仪记

录转换为速度和位移时程，然后采用 4 阶巴特沃斯带通滤波器(0.1—10 Hz)进行滤波. 图 7 和图 8 分别给出了按照上述处理流程后得到的 EW 通道速度记录和位移记录的时程对比及相干分析结果. 其余两通道的结果与之类似，故不再赘述. 对比可见，积分并滤波后的速度时程和位移时程之间也存在高度的相似性，峰值速度 PGV 和峰值位移 PGD 分别为 0.16, 0.15 cm/s 和 0.0084, 0.0081 cm，相关系数分别为 0.95 和 0.98，即基本是一致的. 波形幅值平方相干性分析结果(图 8)表明，1—10 Hz 范围内，二者的频率构成基本相同，因此在该区间内的幅值平方相干系数也最大，接近于 1.0. 综上所述，烈度仪产出的加速度时程在 1—10 Hz 频段内具有一定的可积分性，即积分后的数据与其它仪器的记录具有相关可比性.

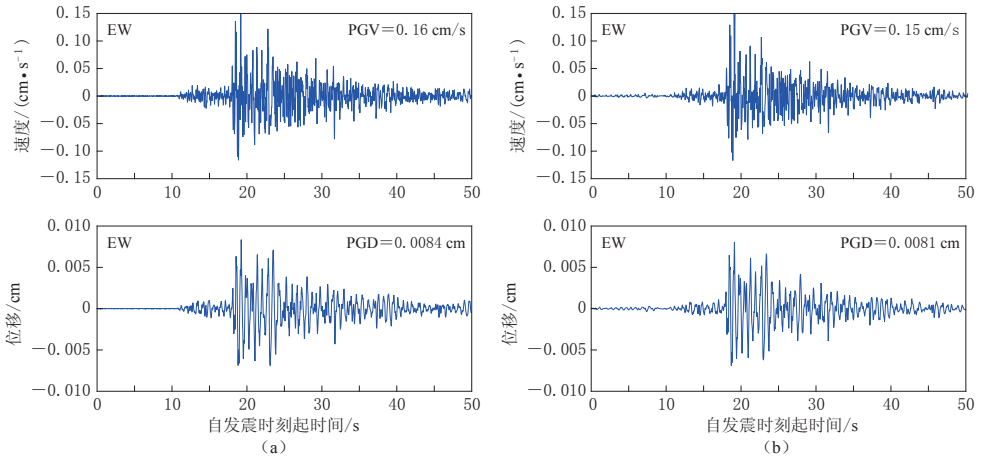


图 7 强震台站 13SZH (a)与烈度仪台站 FRSZH (b)EW 通道积分速度(上)和位移(下)时程的对比

Fig. 7 Time history comparisons of velocity (upper panels) and displacement (lower panels) between the strong ground motion station 13SZH (a) and the SII station FRSZH (b) after integration for EW channel

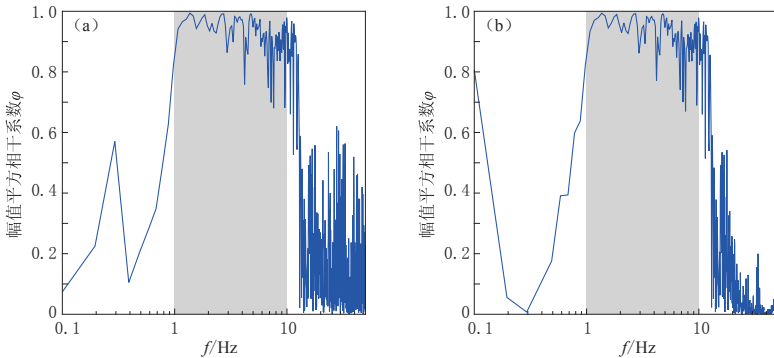


图 8 强震台站 13SZH 与烈度仪台站 FRSZ EW 通道积分速度(a)和位移(b)时程的幅值平方相干性分析结果

Fig. 8 Magnitude squared coherence indices of velocity time histories (a) and displacement time histories (b) between the strong ground motion station 13SZH and the SII station FRSZH after integration for EW channel

3 烈度仪台站记录与测震台站记录对比

本文分析的第二组记录来自于测震台站 DOH 和烈度仪台站 KPDOH. 由于二者记录的物理量不同, 首先将测震台的速度时程微分一次转换为加速度时程, 以便进行对比; 同时, 应用 4 阶巴特沃斯带通滤波器(0.1—10 Hz)分别对两组记录时程进行滤波处理, 结果如图 9 和 10 所示. 对比可见, 二者的时程记录在形状上具有一定的相似性(三分向波形相

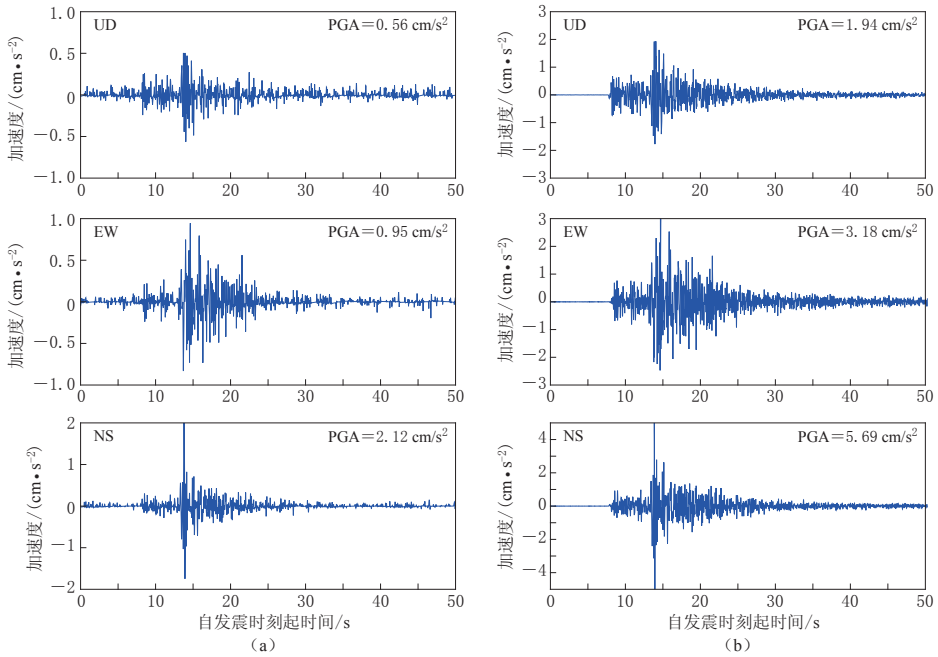


图 9 0.1—10 Hz 带通滤波后烈度仪台站 KPDOH(a)与测震台站 DOH(b)记录波形对比

Fig. 9 Waveform comparison of the SII station KPDOH (a) and the seismograph station DOH (b) after 0.1—10 Hz band-pass filter

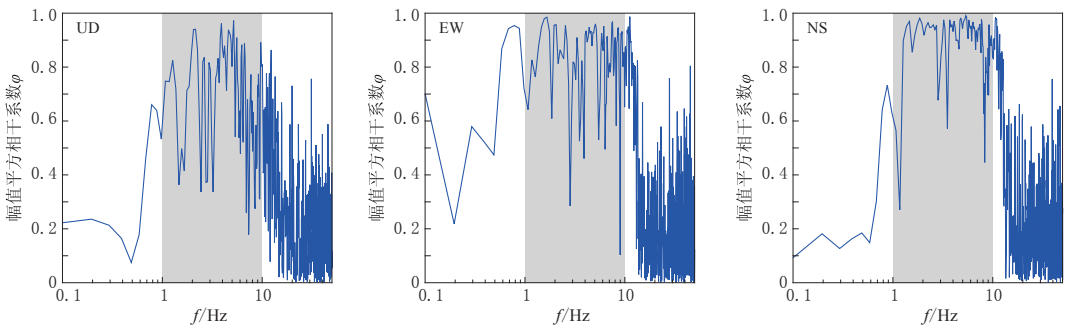


图 10 0.1—10 Hz 带通滤波后烈度仪台站 KPDOH 记录与测震台站 DOH 记录幅值平方相干性分析结果

Fig. 10 Magnitude squared coherence indices between the SII station KPDOH and the seismograph station DOH after 0.1—10 Hz band-pass filter

关系数分别为 0.71, 0.83, 0.87), 相干性分析结果也表明二者在 1—10 Hz 内有较高的一致性, 甚至在 10—15 Hz 时相干程度仍然较高, 但峰值加速度 PGA 存在较大差异, UD, EW, NS 三通道的 PGA 值分别为 0.56, 1.94 cm/s^2 , 0.95, 3.18 cm/s^2 , 2.12, 5.69 cm/s^2 . 实际上, 由于二者并非同台址台站, 因此并不存在完全的可比性, 存在差异也属正常. 波形记录信噪比分析结果(图 11)表明, 1—10 Hz 范围内, 烈度仪记录的事件部分的强度与噪声部分的差异并不明显, 这也导致了波形记录直接对比存在一些困难. 此外, 由于上述两个观测台站的位置十分接近, 震中距几乎相同, 通过二者记录信噪比的对比也可获得烈度仪观测记录能力的一些认识. 由于测震台站大都建于人类活动少、环境干扰小的安静区域, 而烈度仪台站则一般布设于人类活动密集的建筑体内. 显然, 相同震中距条件下, 测震台站记录的信噪比显著高于烈度仪台站. 实际上, 通过下文的分析也可以看出, 由于烈度仪的仪器自噪声水平已超出地脉动水平, 不能观测记录到有效地脉动, 因此烈度仪记录信噪比普遍偏低. 以该组记录(图 11)为例, 根据测震台站记录能够清晰准确地获取初至震相到时信息, 而烈度仪记录的初至震相则湮没于背景噪声之中, 准确获取到时信息存在一定的困难. 此外, 本文还分别对比分析了速度和位移时程, 并得出了类似的结论, 限于篇幅, 不再分别罗列.

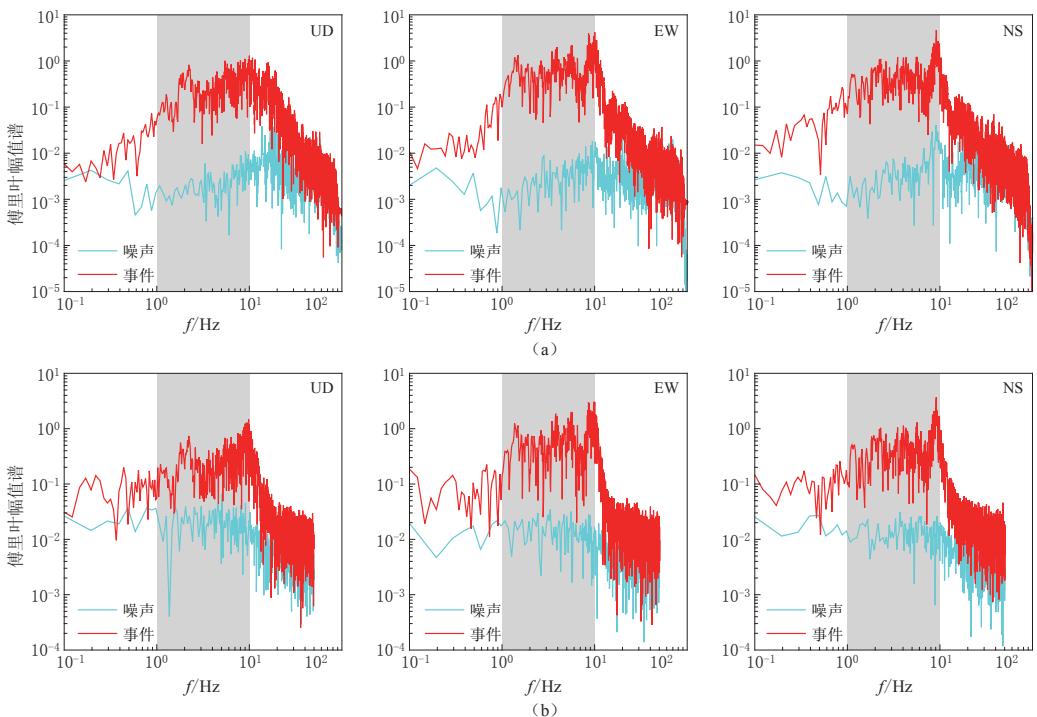


图 11 0.1—10 Hz 带通滤波后测震台站 DOH (a) 与烈度仪台站 KPDOH (b) 记录信噪比分析结果

Fig. 11 SNR analysis results of the seismograph station DOH (a) and the SII station KPDOH (b) after 0.1–10 Hz band-pass filter

4 噪声记录对比

观测仪器的记录噪声水平在一定程度上能够直接反映仪器的实际记录能力,尤其是记录中小地震事件的能力.因此,本文从事件记录中截取3种不同类型台站UD方向的部分噪声记录(10 min)进行分析.作者注意到,烈度仪记录的噪声水平也不尽相同,这可能与烈度仪的安装位置有关.因此从中挑选了LNMCH台站和LNRGZ台站进行对比(图12),其中LNMCH台站的噪声水平明显高于LNRGZ台站.研究中,同样将测震台站CLI的记录微分一次转换为加速度,强震台站选择为13SZH台站.为方便对比,计算各台站记录加速度均方值(RMS)作为反映噪声水平的指标,分别为0.11, 0.05, 0.02, $7.4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}^2$,如图12所示.

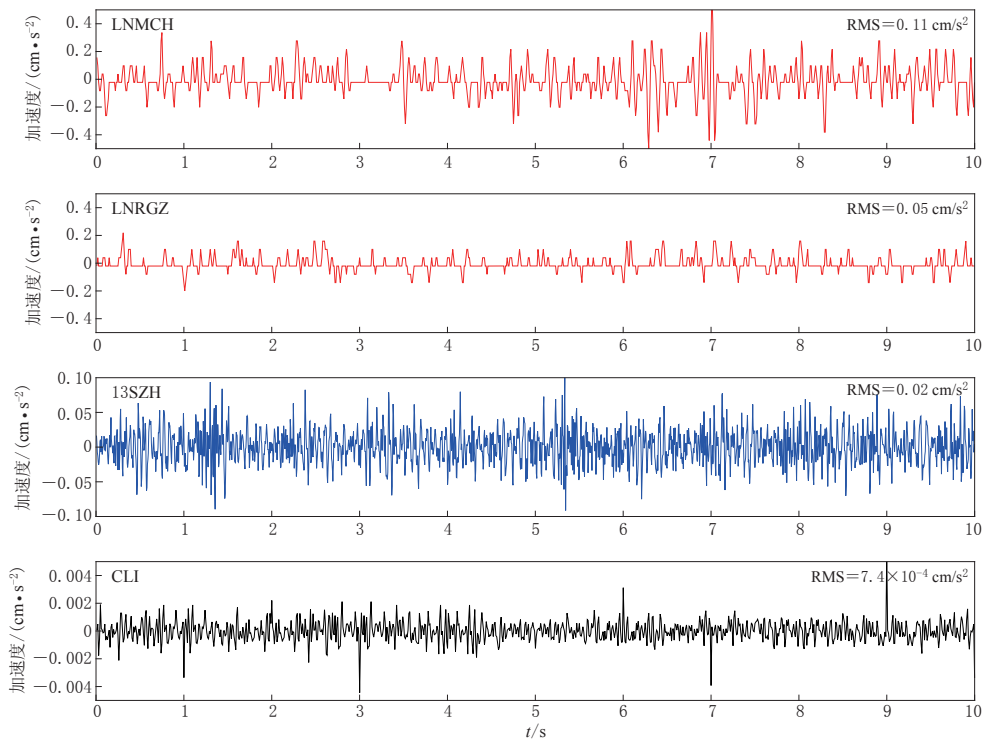


图12 烈度仪台站(LNMCH, LNRGZ)和强震台站(13SZH)及测震台站(CLI)UD通道噪声记录对比

Fig. 12 Comparison of seismic noise records among the SII station LNMCH and LNRGZ, strong ground motion station 13SZH and the seismograph station CLI in UD channel

图13则分别给出了上述4段噪声记录的傅里叶幅值谱对比情况.由加速度均方值和傅里叶谱的对比可见,烈度仪台站记录的噪声水平较强震仪台站总体至少高出1个数量级,而强震仪台站记录的噪声水平则较测震台站高出1个数量级.因此,不同仪器的地震监测记录能力显然存在较大的差异.

从图12还可以看到,由于本文中所使用的烈度仪采用了16位的A/D转换器,因此导致数据采样精度不高,产出的加速度记录呈明显“台阶”状,由此必然会对震相到时的精确判定捡拾造成一些不利影响.

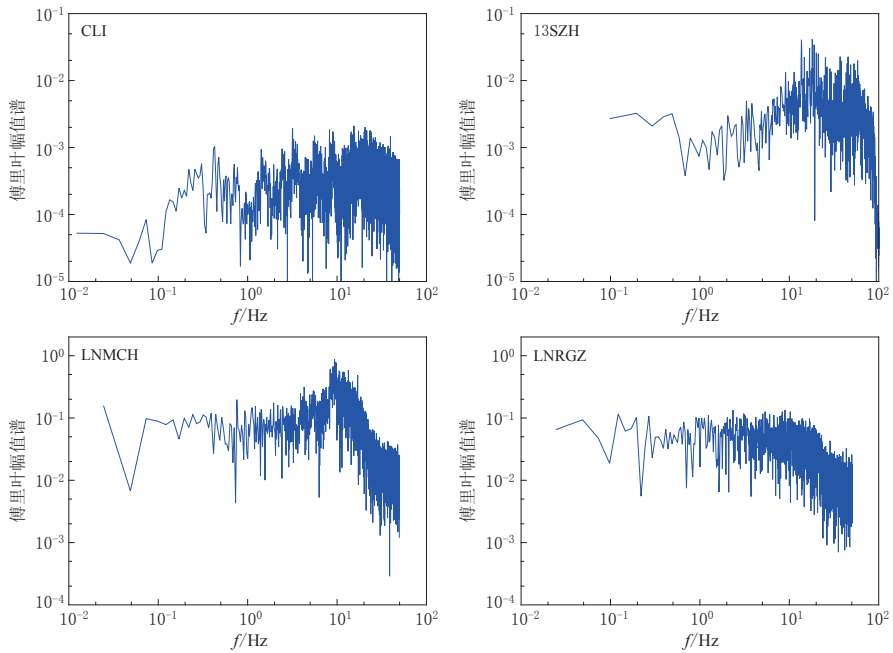


图 13 4 个台站 UD 通道噪声记录的傅里叶谱对比

Fig. 13 Comparison of Fourier spectra of seismic noise for four stations in UD channel

基于上述噪声记录，本文还分别计算得到了加速度噪声功率谱(Peterson, 1993; Geller, Takeuchi, 1995; McNamara, Buland, 2004; 廖诗荣, 陈绯雯, 2008), 如图 14 所示. 显然可见, 测震台站 CLI 的加速度噪声功率谱均处于高噪声模型(new high noise model, 简称为 NHNM)与低噪声模型(new low noise model, 简称为 NLNM)之间, 而强震台站 13SZH 的噪声功率谱值约为 -120 dB, 两个烈度仪台站的噪声功率谱值均为 -80 dB 左右, 远高于 NHNM. 由此可得, 相比于测震台站对地脉动噪声记录的完整记录, 强震台站仅能对 0.1 Hz 以上的天然噪声进行可靠记录, 而烈度仪台站产生的噪声则完全是仪器自噪声, 天然地脉动湮没在其中不能分辨.

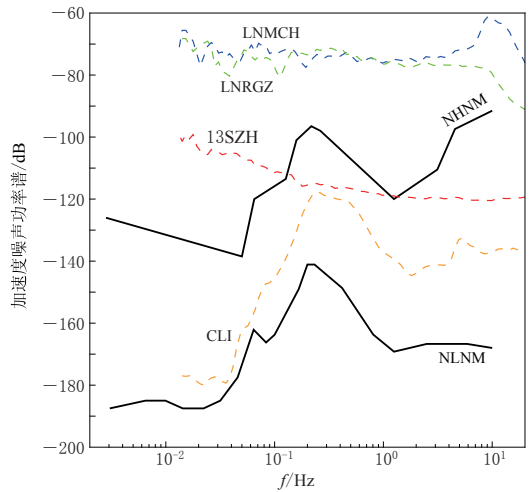


图 14 4 个台站的噪声功率谱计算结果

Fig. 14 Power spectra based on seismic noise data of four stations

5 讨论与结论

本文利用 2015 年河北昌黎地震的实际观测记录, 通过同台址强震台站(测震台站)和烈度仪台站记录波形的定量对比, 以及不同类型台站记录噪声水平的分析, 讨论了烈度仪

用于地震观测时的可靠性及记录波形的可用性. 总结本文相关研究, 可得出以下结论:

1) 烈度仪台站波形记录的部分频段(1—10 Hz)与强震台站、测震台站产出的结果有较好的一致性, 但中长周期段波形存在显著差异;

2) 将烈度仪台站产出的加速度时程积分转换为速度、位移后在部分频段(1—10 Hz)也基本与强震台站、测震台站记录有良好的相干性, 说明烈度仪台站产出的加速度时程在此频段内具有一定的可积性;

3) 由于烈度仪采用的 A/D 转换器位数较低, 记录波形呈“台阶状”, 可能影响到震相到时的准确判定拾;

4) 烈度仪台站的噪声水平较强震台站至少高出 1 个数量级, 较测震台站至少高出 2 个数量级, 且远超出地脉动噪声水平, 主要为仪器自噪声.

综上, 本文认为烈度仪台站可以作为现有测震台站、强震台站的有益补充, 在中强地震的近场观测中将发挥重要作用. 由于烈度仪台站造价低、建设周期短, 因此易于大面积布设和规模化应用, 在未来的地震预警、地震烈度速报等应用中也将得到充分利用. 本文仅从波形记录的一致性方面论证了烈度仪台站记录的可用性, 其波形记录用于地震预警、烈度速报等产出时的准确性、适用性等问题将另文讨论. 此外, 本文仅局限于一次事件和一种型号的烈度仪, 因此认识可能不够全面和深入, 得出的相关结论也可能不具普遍性. 作者也将继续收集其它事件、其它类型的烈度仪展开研究.

中国地震局工程力学研究所国家强震动台网中心提供强震数据支持, 河北省地震局提供测震、烈度仪台网数据, 两位审稿专家为完善本文提出了重要的修改建议, 作者在此一并表示感谢.

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 (in Chinese).
- 李昌珑. 2013. 基于 MEMS 加速度传感器的地震烈度监测技术研究是实现[D]. 武汉: 中国地震局地震研究所: 18–39.
- Li C L. 2013. *Research and Achievement on Earthquake Intensity Monitoring Technology Based on MEMS Accelerometer*[D]. Wuhan: Institute of Seismology, China Earthquake Administration: 18–39 (in Chinese).
- 廖诗荣, 陈绯雯. 2008. 应用概率密度函数方法自动处理地震台站勘选测试数据[J]. 华南地震, **28**(4): 82–92.
- Liao S R, Chen F W. 2008. Automated seismic noise processing for seismic site selection using probability density functions method[J]. *South China Journal of Seismology*, **28**(4): 82–92 (in Chinese).
- 刘钢锋, 朱威, 邹彤, 林强. 2011. MEMS 加速度传感器在强震观测中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, **31**(增刊): 168–170.
- Liu G F, Zhu W, Zou T, Lin Q. 2011. Application of MEMS acceleration sensor to macroseism observation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **31**(Suppl): 168–170 (in Chinese).
- 王浩, 丁炜. 2011. MEMS 加速度计与传统地震加速度计的比较研究[J]. 大地测量与地球动力学, **31**(增刊 II): 93–95.
- Wang H, Ding W. 2011. Comparison among MEMS accelerometer and traditional seismometer[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **31**(Suppl II): 93–95 (in Chinese).
- 许建华. 2006. 基于微型传感器的地震加速度监测系统技术研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 17–37.
- Xu J H. 2006. *The Engineering System for Detection Earthquake Acceleration Based on Micromachined Accelerometer* [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 17–37 (in Chinese).

- 中国地震局. 2015. 仪器地震烈度计算(征求意见稿)[S/OL]. [2016-05-16]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/465/539/20161115104509713440448/index.html>.
- China Earthquake Administration. 2015. *Calculation of Instrumental Seismic Intensity (Draft for Soliciting Opinions)* [S/OL]. [2016-05-16]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/465/539/20161115104509713440448/index.html> (in Chinese).
- 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.
- Geller R J, Takeuchi N. 1995. A new method for computing highly accurate DSM synthetic seismograms[J]. *Geophys J Int*, **123**(2): 449–470.
- 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, Rydelek 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.
- Jin X, Zhang H C, Li J, Wei Y X, Ma Q. 2013. Earthquake magnitude estimation using the τ_c and P_d method for earthquake early warning systems[J]. *Earthquake Science*, **26**(1): 23–31.
- Lin T L, Wu Y M, Chen D Y, Hsiao N C, Chang C H. 2011. Magnitude estimations in earthquake early warning for the 2010 Jiasian, Taiwan, earthquake[J]. *Seismol Res Lett*, **82**(2): 201–206.
- McNamara D E, Buland R P. 2004. Ambient noise levels in the continental United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(4): 1517–1527.
- Peterson J. 1993. *Observations and Modeling of Seismic Background Noise*[R]. USGS Open File Report 93–322. Albuquerque, New Mexico: U. S. Department of Interior Geological Survey: 322.
- 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, Zhao L. 2006. Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning[J]. *Geophys Res Lett*, **33**(16): L16312.
- Wu Y M, Yen H Y, Zhao L, Huang B S, Liang W T. 2006. Magnitude determination using initial P waves: A single-station approach[J]. *Geophys Res Lett*, **33**(5): L05306.
- 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.
- Zhang H C, Jin X, Wei Y X, Li J, Kang L C, Wang S C, Huang L Z, Yu P Q. 2016. An earthquake early warning system in Fujian, China[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **106**(2): 755–765.