

孙丽,梁建宏,徐志国,等,2021. 虚拟地震学家(VS)方法在中国地震台网中的测试和评估. 中国地震,37(4):843~856.

# 虚拟地震学家(VS)方法 在中国地震台网中的测试和评估

孙丽<sup>1)</sup> 梁建宏<sup>1)</sup> 徐志国<sup>2)</sup> 刘杰<sup>1)</sup>

1) 中国地震台网中心,北京 100045

2) 国家海洋局环境预报中心,北京 100081

**摘要** 建设中国地震预警系统是国家地震烈度速报与预警工程的主要内容,国内外学者通过对预警系统中确定地震参数的方法研究,发现实时确定准确震级这一问题最具挑战性,亟需一种可用的震级实时测定方法用于建设中国的地震预警系统。本文简要介绍了虚拟地震学家(VS)方法,描述了VS方法在中国地震台网用于实时测定地震参数的软件的实现流程,剖析用该方法实时确定2019年6月17日四川长宁6.0级地震的 $M_{VS}$ 的过程。通过实时在线测定134个 $M \geq 3.0$ 地震的 $M_{VS}$ 和回放事件波形测定24个 $M \geq 5.0$ 地震的 $M_{VS}$ ,对VS方法进行测试,评估其可用性。结果表明,使用VS方法实时确定的 $M_{VS}$ 变化平稳,可用性较好。当3个台站的P波信息可用时,第一次测定 $M_{VS}$ 时偏差 $\delta$ 的平均值为0.32, $\delta \leq 0.5$ 的占79%,平均用时为20s。随着时间的推移,更多可用台站及波形的使用可有效提升测定 $M_{VS}$ 准确度。该方法在中国地震台网的应用具有适用性和可行性,是一种可选的实时确定震级的方法,在地震预警中具有较好的应用潜力。

**关键词:** VS方法 地震预警  $M_{VS}$  实时测定

[文章编号] 1001-4683(2021)04-0843-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震预警的目的是提供实时的地震参数,在强震动到达给定场地前的几秒到十几秒采取减灾行动,承载着减轻地震灾害和损失的期望。近年来,地震预警系统得到了长足发展,世界上多个国家和地区已开始运行或测试地震预警系统(Aranda et al, 1995; Hoshiha et al, 2008; Cua et al, 2009; Mărmureanu et al, 2011; Peng et al, 2011; Böse et al, 2014; Zollo et al, 2014; Behr et al, 2015; Chen et al, 2015)。

目前,绝大部分地震预警方法使用的是基于点源的时空强参数预测震中附近的强地面运动,当震级或地面运动峰值超过给定阈值时向震中周边发出警报。在实时确定点源的时空强参数时,震级的确定尤其关键,震级的大小直接决定了预测地面运动的强弱和警报是否

[收稿日期] 2020-12-25 [修定日期] 2021-07-25

[项目类别] 地震科技星火计划项目(XH19053)资助

[作者简介] 孙丽,女,1983年生,高级工程师,主要从事地震速报预警方法研究与台网管理工作。E-mail: sunli@seis.ac.cn  
梁建宏,通讯作者,男,1975年生,正高级工程师,主要从事地震监测方法与技术研究。E-mail: liangjh@seis.ac.cn

发布,震级偏小可能造成漏报,偏大则可能造成误报或虚报,从而减小地震预警的社会效益,削弱人们对地震预警的信任。

为了更快地发布地震预警警报,使地震预警的社会效益最大化,有些学者已经研究了一些实时确定震级的方法,主要有2类:第一类是根据地震波的周期(或频率)估计震级的方法,比如 Kanamori(2005)提出的基于P波初始部分的周期与震级关系的方法,随后其他一些学者对该方法进行了研究(Allen et al, 2003; Olson et al, 2005; Wu et al, 2005, 2008; Lockman et al, 2005; Wolfe, 2006; 马强, 2008; Yamada et al, 2009);第二类是根据地震波的振幅估计震级的方法,比如 Wu 等(2006)提出的基于P波前3s峰值位移与震级关系的方法,其后 Lancieri 等(2008)对该方法进行了研究。除了上述2类,还有 Odaka 等(2003)提出的使用波形包络计算震级的方法、Yamamoto 等(2008)提出的烈度震级方法等。

Cua(2005)提出了虚拟地震学家(The Virtual Seismologist, VS)方法。VS方法是一种依次考虑地震学和用户响应问题的贝叶斯方法,根据观测到的正在发生的地震产生的地面运动峰值、先验信息和地面运动峰值与震中距的衰减关系估计地震的震级、震中和峰值地面运动分布(Cua et al, 2009),并随着后续的地面运动峰值到达不断更新地震参数。该方法已成为美国加利福尼亚州综合地震台网早期预警的3种算法之一,并应用于 Seiscomp3 系统中(Behr et al, 2016),分别在瑞士、瑞典、希腊、新西兰、罗马尼亚、土耳其、冰岛和美国南加利福尼亚州地震台网进行测试。

我国目前正在实施的国家烈度速报与预警工程项目建设完成后,中国地震台网将由15000多个台站组成,分别装备测震仪、强震仪和烈度仪,承载地震烈度速报与预警使命,发挥实质性减灾效益。作为该项目主要建设内容的中国地震预警系统,面临着实时确定可靠的地震参数这一巨大挑战,亟需一种稳定可用的实时测定震级方法。国内一些学者在地震预警和快速确定震级方面做了很多研究工作(金星等, 2004a、2004b、2012; 马强, 2008; 张红才等, 2012; 彭朝勇等, 2013、2019; Peng et al, 2017; 陈锋等, 2019; 胡安冬等, 2020; Wang et al, 2020; Zhu et al, 2021)。本研究在对VS方法进行前期研究的基础上,将该方法集成到了中国地震台网实时测定地震参数软件中,以评估其确定震级的稳定性和准确性,讨论该方法在中国地震台网应用的适用性和可行性。

目前国家烈度速报与预警工程项目的台站还在建设中,本文对VS方法的研究及评估使用的是现有的“十五”项目建设的中国地震台网的数据。“十五”项目建设的中国地震台网包含约1000个台站,主要装配CTS-1、KS2000、CMG-3ESPC、CMG-3 ESPCB、BBVS-60、STS-1、STS-2和JCZ-1等宽频带或甚宽频带速度平坦型地震仪以及JDF-2、FSS-3DBH和FSS-3B等短周期速度平坦型地震仪,台间间距在东部密集地区达到30~60km,在新疆及青藏高原等部分地区达到100~200km(刘瑞丰等, 2008)。对于研究使用的震例,3个台触发确定震级需要大约20s,与VS方法在南加利福尼亚州台网评估时的用时相当(Cua et al, 2009),虽然时效较差,但本文的重点是评估VS方法实时确定震级的准度及在中国地震台网应用的可行性,故不讨论时效对地震预警效益的影响。

## 1 VS方法

VS方法是一套完整的地震预警解决方案,能够将先验信息包括在贝叶斯框架中,利用正

在发生的地震的地面运动包络振幅估计震级、震中、深度、发震时间和峰值地面震动分布(Cua, 2005)。从震级估计和地面运动预测出发,推导出下列关系式(Cua, 2005; Cua et al, 2007)。

### 1.1 P-S 波判别式

$$PS = 0.41\lg(ZA) + 0.55\lg(ZV) - 0.46\lg(HA) - 0.55\lg(HV) \quad (1)$$

其中,ZA 和 ZV 分别表示垂直向上的加速度包络和速度包络,HA 和 HV 分别表示水平向上的加速度包络和速度包络,其值取 EW 向与 SN 向包络的均方根。若  $PS > -0.1$ , 则认为是 P 波,否则认为是 S 波。式(1)量化了 P 波在垂直通道上的振幅较大、而 S 波在水平通道上的振幅较大的概念。

### 1.2 基于地面运动比率的单台震级估计式

$$ZAD = 0.36\lg(ZA) - 0.93\lg(ZD) \quad (2)$$

其中,ZAD 是与震级最相关的垂直向上的加速度包络(ZA)和位移包络(ZD)之间的地面运动比率,与地震大小成反比,对于高频能量更丰富的点源小地震,取值相对较大;而对于具有较丰富的低频能量需要有限破裂描述的较大事件,取值相对较小。对于 P 波,  $M_{ZAD} = -1.63ZAD + 8.94$ ; 对于 S 波,  $M_{ZAD} = -1.46ZAD + 8.05$ 。

### 1.3 包络衰减关系式

$$\lg \bar{Y}(M, R) = aM + bR(M) + d\lg R(M) + e \quad (3)$$

其中,  $R(M) = R + C(M)$ ,  $C(M) = c1 \cdot \arctan(M - 5) \cdot \exp[c2 \cdot (M - 5)]$ ,  $M$  为震级,当  $M < 5$  时,  $R$  表示震中距,单位为 km; 当  $M > 5$  时,  $R$  表示距断层最近的距离或 Joyner-Boore 距离(Boore et al, 2008)。在基岩和土层 2 种场地条件下,对于水平和垂直通道的加速度、速度和位移的最大 P 波和 S 波振幅,共有 24 组不同的系数 ( $a, b, c1, c2, d, e$ ) (Cua et al, 2007),适用于  $2 < M < 8$  的震级范围和  $R < 200\text{km}$  的震中距范围。

### 1.4 多台震级和位置估计式

$$L(M, lat, lon) = \frac{(ZAD_{ij} - \bar{Z}_j(M))^2}{2\sigma^2 ZAD_i} + \sum_{k=1}^4 \frac{(\lg Y_{obs,ijk} - \lg Y_{ijk}(M, lat, lon))^2}{2\sigma_{ijk}^2} \quad (4)$$

其中, $i$  为台站数,取  $1, 2, \dots, n$ ;  $j$  取 1 和 2, 分别对应 P 波和 S 波;  $k$  取 1, 2, 3, 4, 分别对应垂直向速度包络 ZV、水平向加速度包络 HA、水平向速度包络 HV 和水平向位移包络 HD,  $\bar{Z}(M)_{jP} = -0.62M + 5.50$ ,  $\sigma_{Z(M)P} = 0.28$ ,  $\bar{Z}(M)_{jS} = -0.69M + 5.52$ ,  $\sigma_{Z(M)S} = 0.25$ ,  $\lg Y_{obs,ijk}$  为 ZV、HA、HV 和 HD 的观测值。 $L(M, lat, lon)$  表示各个观测值与其理论值的拟合程度,各个观测值与其理论值相差越小,拟合越好,反之亦然。在给定观测包络值的情况下,使得式(4)取最小值的  $(M, lat, lon)$ , 就是最可能的震级和震中估计。目前 VS 方法依据来自外部的定位信息,仅提供对震级的估计,因此式(4)中  $Y_{ijk}(M, lat, lon)$  的纬度和经度由外部模块提供。

上述 4 种关系式中的包络值定义为给定通道在 1 秒窗口内的最大绝对值。

## 2 VS 方法在实时测定地震参数软件中的实现

在对 VS 方法进行初步研究后,本研究研发了 vsmag 软件模块,将 VS 方法集成在已有的中国地震台网实时测定地震参数软件中,vsmag 软件主要功能模块见图 1,其数据处理流程见图 2。

vsmag 模块首先读取波形数据缓冲区中多个台站不断更新的三分向速度记录,使用拐角

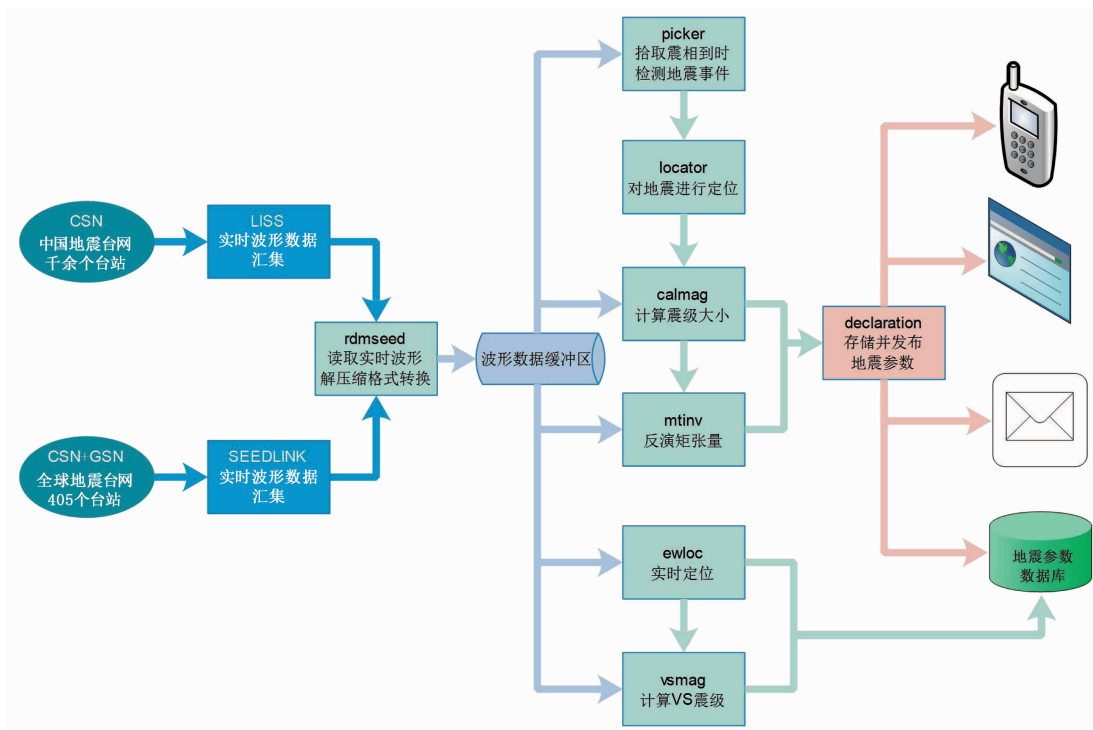


图1 中国地震台网实时测定地震参数软件主要功能模块

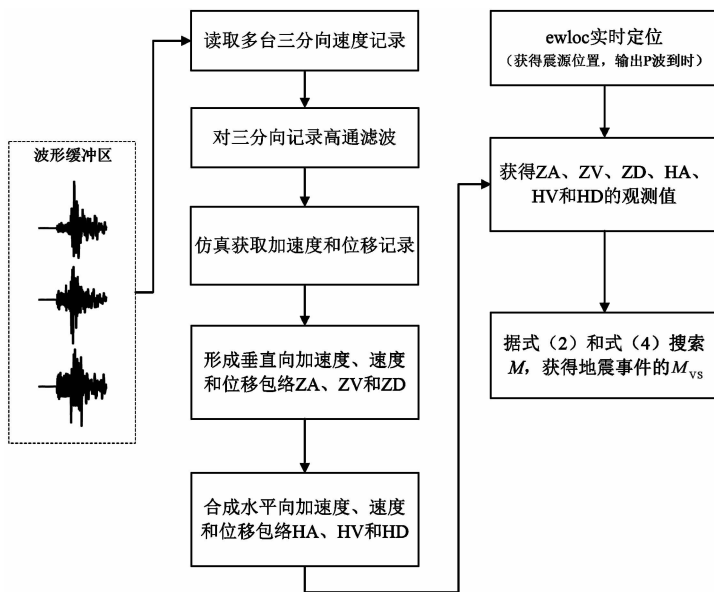


图2 vsmag 软件模块功能与数据处理流程

频率为 0.33Hz 的 4 阶巴特沃斯滤波器进行高通滤波, 仿真获得各台站加速度和位移记录, 在 1s 时间窗内取加速度、速度和位移记录绝对值的最大值, 形成每个台站三分向加速度包络、速度包络和位移包络, 取 EW 向和 SN 向包络的均方根, 得到水平向包络值, 至此获得实时连续的各台站垂直向上的加速度包络(ZA)、速度包络(ZV)和位移包络(ZD)以及水平向上的加速度包络(HA)、速度包络(HV)和位移包络(HD)。一旦有地震发生, P 波到达 3 个以上台站且自动拾取了 P 波到时, ewloc 模块使用触发台站的到时与未触发台站的信息进行实时定位(Horiuchi et al, 2005; Satriano et al, 2008), 震中信息即时输出到 vsmag 模块, vsmag 模块计算每个台站 S 波的理论到时, 将 S 波理论到时时与 P 波到时的差作为 P 波窗长, 当 P 波窗口内有至少 3s 波形可用时, 取 P 波窗口内 ZA、ZV、ZD、HA、HV 和 HD 的最大值, 即垂直向上的峰值加速度 PVA、峰值速度 PVV、峰值位移 PVD 与水平向上的峰值加速度 PHA、峰值速度 PHV 和峰值位移 PHD 作为 ZA、ZV、ZD、HA、HV 和 HD 的观测值, 基于 ZA 和 ZD 的观测值使用式(2)获得每个台站的 ZAD 观测值, 基于 ZAD、ZV、HA、HV 和 HD 的观测值使用式(3)和式(4), 通过搜索  $M$ , 取  $L(M)$  最小值, 使后验概率密度函数最大, 此时的  $M$  即为所求的震级  $M_{VS}$ 。随着更多的台站 P 波到达及单台 P 波窗口内更多的波形可用, vsmag 以 1s 间隔不断搜索更新  $M_{VS}$  的值。当  $R < 100\text{km}$  的最远台站 P 波窗口完全可用时, 最后测定一次  $M_{VS}$ , 随即停止计算过程。

考虑到震级计算的实时性及 P—S 波判别式的不确定性, 本研究仅使用 P 波而不使用 S 波计算  $M_{VS}$ 。依据包络衰减关系, 尽管可以使用  $R < 200\text{km}$  的所有台站, 但考虑到目前中国地震台网的台站密度、震级稳定性及时效需求, 在计算  $M_{VS}$  时设定使用  $R < 100\text{km}$  的台站。

VS 方法中使用先验信息主要解决的是确定震源早期观测数据稀少时震级和震源位置之间的耦合问题, 本研究使用的震源位置来自 ewloc 实时定位模块, VS 方法仅用于计算震级, 不存在震级和震源位置之间的耦合问题, 因此在计算  $M_{VS}$  时, 没有使用与位置相关的地震活动性、台站位置等先验信息, 仅将与震级相关的古登堡-里克特震级-频度关系作为先验信息, 供需要时选用。

vsmag 模块于 2019 年初开始上线测试, 使用“十五”项目建设的中国地震台网数据, 产出了部分地震的  $M_{VS}$ 。通过对  $M_{VS}$  偏差和稳定性评估, 对 vsmag 模块进行持续完善。自 2020 年初, vsmag 模块基本稳定, 处于测试运行状态, 对于台站分布较好的  $M \geq 3.0$  地震事件能够计算其  $M_{VS}$ 。

### 3 应用 VS 方法实时确定长宁 6.0 级地震的 $M_{VS}$

2019 年 6 月 17 日, 位于青藏高原东缘四川盆地南缘的宜宾市长宁县发生 6.0 级地震, 造成严重的人员伤亡和财产损失, 距离震中约 260km 的成都市区震感明显, 中国地震台网实时测定地震参数软件在线产出了本次地震的参数, 震中分布、台站分布与定位结果分布见图 3。图中红色五角星为人工速报震中位置, 黄色五角星为 ewloc 模块基于三个触发的台站(图中黑色三角形)和周边未触发台站(空心三角形)在震后 16s 定出的震中位置, 二者相差 12km。

图 4 以震中距为 37km 的 HWS 台(位置见图 3)为例, 简要描述 vsmag 模块获取单台垂直向包络 ZA 和 ZD、垂直向峰值 PVA 和 PVD 及 ZAD 的过程。由上所述, ZAD 与地震辐射的

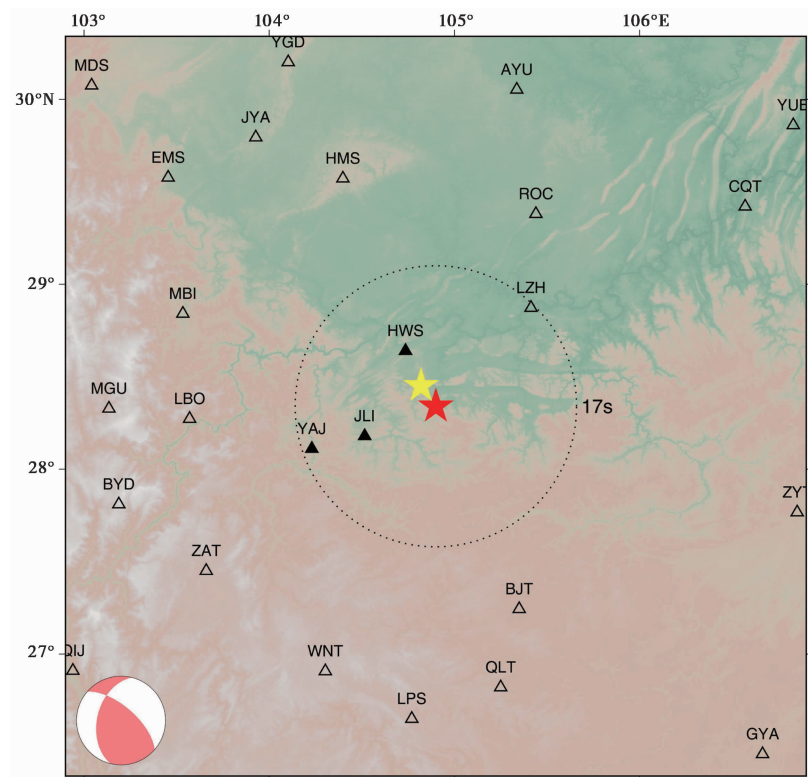


图3 长宁 6.0 级地震的震中分布、台站分布与定位结果分布

P 波能量的频率成分相关,与震级大小成反比。由图 4(a)、(b)可见,P 波窗口内低频能量较丰富,特别是早期 P 波低频成分占主导地位,导致 ZA 较小,ZD 较大,从而使得 ZAD 较小, $M_{ZAD}$ 较大;后期高频成分增多,ZA 变大,ZD 变小,从而使得 ZAD 变大, $M_{ZAD}$ 减小。

当3个以上台站 P 波窗口内有 3s 以上的波形可用时,基于计算的 ZAD 与 ZV、HA、HV 和 HD 开始计算  $M_{VS}$ 。图 5 为使用本次地震  $R < 100\text{km}$  范围内 4 个台站随时间进程持续计算并更新  $M_{VS}$  的过程,期间未使用先验信息。3 个台站(图 3 中虚线圈中的黑色三角形)触发后 ewloc 模块进行定位,定位结果输出到 vsmag 模块。当震中距为 70km 的第 3 个台站 YAJ 满足 P 波 3s 长度时,此时距离发震时刻 17s(图 5 蓝色虚线标示的位置)。根据 3 个台站的 ZAD 以及 ZV、HA、HV 和 HD 的观测值,由式(3)和式(4)通过搜索  $M$ ,取  $L(M)$  最小值,由此获得  $M_{VS}$  为 5.9(图 6)。随着 P 波时间窗内越来越多的波形记录可用,以及更多的台站触发,不断重复搜索  $M$ , $M_{VS}$  值也在不断更新。当  $R = 78\text{km}$  的第 4 个台站 LZH 的 P 波窗口完全可用时,此时距离发震时刻 26s(图 5 中绿色虚线标示的位置), $M_{VS}$  更新为 6.0。由图 5(e)可见, $M_{VS}$  在  $[5.7, 6.0]$  的范围内小幅变化,获得的事件震级  $M_{VS}$  是稳定可用的,与正式速报结果  $M6.0$  接近。

#### 4 VS 方法的测试和评估

选择台站分布较密集且震源深度小于 30km 的浅源地震事件对 VS 方法进行测试和评

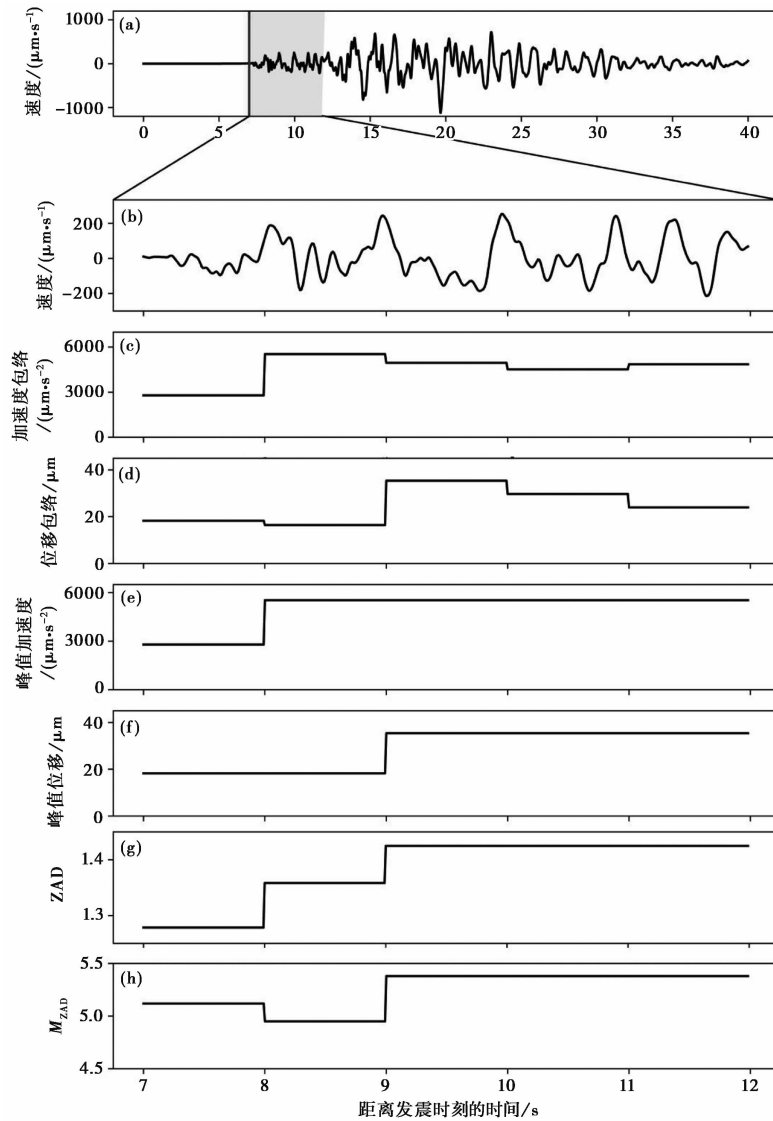


图 4 获取单台垂直向包络 ZA 和 ZD、垂直向峰值 PVA 和 PVD 及 ZAD 的过程

(a) 经拐角频率为 0.33Hz 的 4 阶巴特沃斯滤波器高通滤波后垂直向速度记录, 灰色框为根据 S 波理论到时间与拾取的 P 波到时的差确定的长度为 5s 的 P 波窗口; (b) P 波窗口内的记录; (c) 加速度包络 ZA; (d) 位移包络 ZD; (e) 峰值加速度 PVA; (f) 峰值位移 PVD; (g) 据式(2)计算的 ZAD; (h) 据  $M_{ZAD} = -1.63ZAD + 8.94$  计算的单台震级  $M_{ZAD}$

估, 选择的事件包括在线实时处理的 2020 年发生的 134 个  $M \geq 3.0$  地震以及以回放事件波形模拟实时在线处理的 2017—2019 年发生的 24 个  $M \geq 5.0$  地震, 共 158 个地震事件, 其震中分布见图 7。对于回放的地震事件, 在确定  $M_{VS}$  时将其速报目录的经纬度作为定位结果, 统计  $M_{VS}$  计算用时则考虑到“十五”项目建设的台站实时传输方式、延迟与数据包长度, 将用时加 4s 以弥补数据包长度与传输延迟。

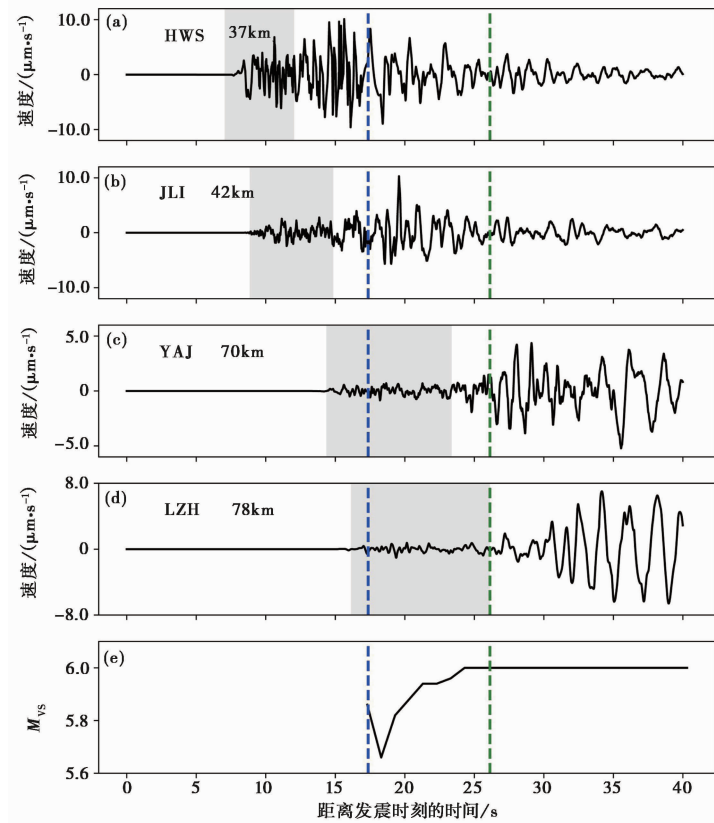


图 5 长宁 6.0 级地震随时间进程计算及更新  $M_{VS}$  的过程

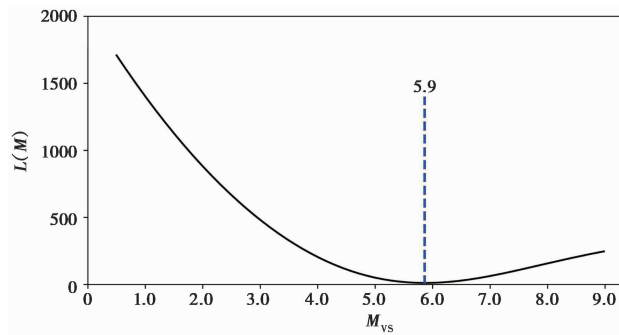


图 6 第 3 个台站 P 波长度满足要求后搜索获得的震级  $M_{VS}$

根据 vsmag 确定  $M_{VS}$  的流程,当 3 个以上台站触发且 P 波长度达到至少 3s,开始第一次测定  $M_{VS}$ ,当  $R < 100\text{km}$  内的最远台站 P 波窗口完全可用或距离发震时刻超过 30s 时,最后一次测定  $M_{VS}$ ,随即停止计算过程,得到的  $M_{VS}$  与人工速报震级  $M$  的对比见图 8。以  $\delta$  表示  $M_{VS}$  的偏差,对比图 8(a)、图 8(b) 和图 8(c) 可见,第一次测定的  $M_{VS}$  分布较散, $\delta$  较大,最后一次测定的  $M_{VS}$  及  $M_{VS}$  中值分布较集中, $\delta$  较小,整体上对于  $M \geq 5.0$  的地震  $M_{VS}$  偏小,对于  $M < 4.0$



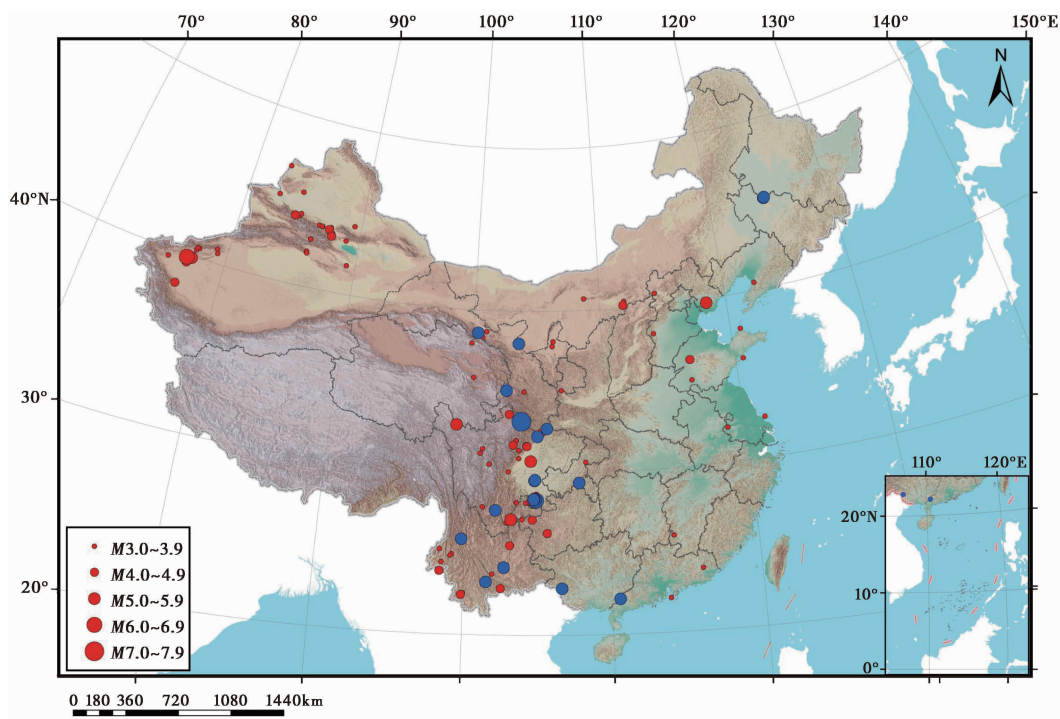


图 7 用于测试和评估 VS 方法的地震事件分布

红色圆点为在线实时处理的地震事件；蓝色圆点为回放的地震事件

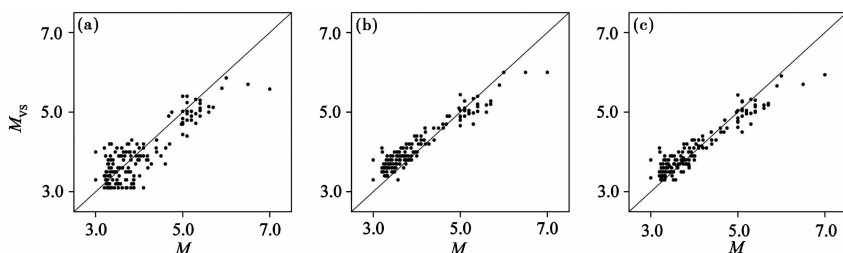


图 8  $M_{VS}$  与人工测定震级  $M$  的对比

- (a) 第一次测定的  $M_{VS}$  与人工速报震级  $M$  的对比；
- (b) 最后一次测定的  $M_{VS}$  与人工速报震级  $M$  的对比；
- (c) 测定过程中产生的多个  $M_{VS}$  的中值与人工速报震级  $M$  的对比

的地震  $M_{VS}$  偏大。从数值上看,第一次测定  $M_{VS}$  时  $\delta$  平均值为 0.32,  $\delta$  中值为 0.28, 最大值达到 1.4,  $\delta \leq 0.5$  的占 79%, 平均用时为 20s; 最后一次测定  $M_{VS}$  时  $\delta$  平均值为 0.24, 中值为 0.21, 最大值减至 1.0,  $\delta \leq 0.5$  的占 95%, 平均用时为 45s;  $M_{VS}$  中值的  $\delta$  平均值为 0.21, 中值为 0.18, 最大值为 1.1,  $\delta \leq 0.5$  的占 94%, 平均用时为 33s。该结果与预期相符, 使用更多台站和更多可用波形能够有效改善测定  $M_{VS}$  的准确度, 特别是在早期对  $M_{VS}$  改善明显。

## 5 讨论与结论

在地震预警等应用中实时测定震级的常用方法有 2 类, 一类是基于周期的方法, 另一类

是基于振幅的方法。虚拟地震学家(VS)方法利用地震波周期和振幅2种信息,将观测ZAD和观测振幅与理论模型拟合,以寻求拟合最好的震级,为2类方法的综合应用。

本文简要介绍了VS方法,描述了VS方法在中国地震台网用于实时测定地震参数的软件的实现流程,分析利用该方法实时确定2019年6月17日四川长宁6.0级地震的 $M_{VS}$ 的过程。通过实时在线测定134个 $M \geq 3.0$ 地震的 $M_{VS}$ 和回放事件波形测定24个 $M \geq 5.0$ 地震的 $M_{VS}$ ,对VS方法进行测试,评估其可用性。结果表明,使用VS方法实时确定的 $M_{VS}$ 变化平稳,可用性较好,该方法适于实时测定震级的应用。当3个台站的P波信息可用时,第一次测定的 $M_{VS}$ 平均偏差为0.32,偏差小于等于0.5的占79%,平均用时为20s。随着时间的推移,更多台站和可用波形的使用能有效提升测定 $M_{VS}$ 的准确度。

VS方法不考虑震源深度,在实时确定震级的应用中使用极少的台站估计震源深度极具挑战性,而本研究关注的是VS方法在预警等实时减灾中的应用,故未涉及基本没有破坏或破坏程度较小的中深源地震。在获得震中位置后,VS方法用P波之后3s的波形开始确定震级,这与基于周期的方法(Wu et al, 2006)和基于振幅的方法(Zollo et al, 2014)需要P波触发后3~4s的波形长度类似且时效相当,震级偏差基本上能控制在 $\pm 0.5$ 的范围内也与上述2类方法确定的震级偏差相当(Nakamura et al, 2007; Allen, 2007)。尽管本文使用的地震样本数量不够丰富, $M \geq 5.0$ 的震例较少,但在较大程度上仍反映了VS方法用于中国地震台网确定震级的准度和时效,该方法可作为一种可选的实时确定震级的方法,在地震预警等应用中发挥作用。

VS方法应用于不同地区的偏差不同,这与不同地区使用的地震数量、震级范围、台站分布有关,也与不同地区构造环境存在差异有关。Cua等(2009)将VS方法应用于南加州地区,得到的偏差中值为0.17,优于本研究的结果。但之后VS方法陆续在瑞士、瑞典、希腊、新西兰、罗马尼亚、土耳其、冰岛和南加州7个构造环境不同、地震活动差异大、台站密度和配置各异的地震台网进行了测试,结果表明, $M_{VS}$ 偏差在 $\pm 0.5$ 范围内的有68%(Behr et al, 2016),低于本研究的结果。VS方法应用于南加州地区的偏差较小,可能是因为ZAD与 $M_{ZAD}$ 的关系以及衰减模型都是基于南加州地区的数据拟合得到的,而其他地区的构造环境与南加州地区不同,从而造成在其他地区应用该方法测出的震级偏差较大。尽管如此,测试结果预示着基于南加州地区的数据拟合得到的ZAD与 $M_{ZAD}$ 的关系以及衰减模型可以应用于全球其他地区(Behr et al, 2016)。

南加州地震中心(SCEC)可接受的震级偏差为 $\pm 1.0$ (Cua et al, 2009),国家地震烈度速报与预警工程服务于高铁地震预警的设计方案中,要求震级偏差小于1.0<sup>①</sup>,本文研究结果 $\pm 0.5$ 的震级偏差虽然从传统测量震级的角度看偏差较大,但还是满足预警等实时应用需求,结果表明,VS方法能够应用于地震预警,在中国地震台网具有适用性和应用可行性。基于中国各地区的数据,未来还可以进一步拟合获取符合当地构造环境的ZAD与 $M_{ZAD}$ 的关系以及衰减模型,使用VS方法得到更准确的震级。

值得注意的是,在对VS方法进行测试评估时使用的震级最大的九寨沟M7.0地震,其 $M_{VS}$ 偏差也是最大的,使用3个台初次测量的 $M_{VS}$ 为5.6,偏小1.4,最后一次测量的 $M_{VS}$ 为

① 中国地震局,2018. 国家地震烈度速报与预警工程初步设计方案和投资概算报告. 内部资料.

6.0, 偏小 1.0, 其原因并非台站分布和构造环境差异可以解释, 主要与大地震破裂的复杂性和用少量波形确定震级存在较大不确定性有关, 同时也与该地震的发布震级所依赖的面波震级偏大有关。测定  $M_{VS}$  使用的是距离震中最近的台站, 对于九寨沟  $M7.0$  地震, 其震源破裂的方向性效应对近场记录的影响是不容忽视的。相关研究表明, 九寨沟地震沿一条走向为 SE-NW 的发震断层破裂, 破裂覆盖了震中西北 15km 至震中东南 10km 的区域, 整体表现为不对称的双侧破裂模式, 其中西北方向的破裂略占优势(单新建等, 2017; 郑绪君等, 2017)。本研究测量  $M_{VS}$  时使用的台站主要分布在断层两侧而非破裂方向上, 特别是初次测量  $M_{VS}$  时使用的 3 个台站有 2 个位于断层的两侧, 接收到的地震辐射能量较低, 幅值较小, 这可能导致了测量的  $M_{VS}$  偏小。即便如此, 确定的震级 5.6 仍达到了发布预警的触发阈值, 随着时间的推移震级偏差会逐步改善。另外, 速报发布的震级  $M7.0$  来自于面波震级, 多个研究结果表明九寨沟  $M7.0$  地震的矩震级为 6.5(单新建等, 2017; 郑绪君等, 2017; 梁姗姗等, 2018; 申文豪等, 2019), 面波震级偏大也是导致  $M_{VS}$  偏差较大的因素。

本研究第一次测定  $M_{VS}$  的平均用时为 20s, 与 VS 方法在南加州台网评估时使用 4 个台站第一次测定用时中值 22s(Cua et al, 2009) 相当。本研究的用时基于现有的“十五”项目建设的台站密度、分布以及数据包格式, 如使用中国地震烈度速报与预警工程建成后台间距达到 10~15km 的台站密度、分布及数据包格式, 维持 3 个台站触发且时间窗满足要求, 用时无疑会有较大缩短, 使时效有较大改善, 预期能满足地震预警对时效的要求。

作为一种贝叶斯方法, 虚拟地震学家(VS)方法可以包含多种先验信息, 如地震活动性、台站位置和古登堡-里克特震级频度关系。本文使用 VS 方法的震中信息来自外部, 无需解决震级和震源位置之间的耦合问题, 故未考察先验信息对  $M_{VS}$  的影响。另外, 是否使用先验信息由用户主观需求决定, 若对误报的容忍度低, 则应将古登堡-里克特震级频度关系作为先验信息, 若对漏报的容忍度低, 则不应把古登堡-里克特震级频度关系作为先验信息。

地震具有复杂的破裂过程, 不同规模的地震在破裂过程的早期是否可以区分是一个有争议的话题。有些研究表明, 地震发生后最初几秒钟内辐射的地震能量的频率成分随震级的变化而变化, 这意味着确定性(Olson et al, 2005); 有些研究表明, 大地震的最初的波形可能类似于小地震(Abercrombie et al, 1994; Ide, 2019; Abercrombie, 2019), 无法从最初的波形区别地震大小; 有些研究表明, 当破裂进展到震源时间函数的 35%~55% 时, 可以区分最终破裂大小(Meier et al, 2017); 还有一些研究提出, 从破裂持续时间的 20% 开始, 就可以预测破裂的长度(Danré et al, 2019; Hutchison et al, 2020)。这些观点都基于观测数据支持, 也进一步证明地震破裂的复杂性和在破裂扩展过程中实时确定震级的难度之大。

用少量地震波形实时确定震级, 不仅是地震学问题, 而且还是结合实践经验不断优化的工程问题。现阶段我们需要对实时确定的震级偏差有更多的容忍度, 随着积累更多的经验, 不断修正优化确定震级的流程, 震级偏差会逐步减小, 应用于地震预警的效益也将越来越好。

**致谢:** 审稿专家对本文提出了建设性意见, 绘图使用了 GMT(Wessel et al, 2019) 和 matplotlib(Hunter, 2007) 软件包, 在此一并表示感谢。

## 参考文献

- 陈锋,杨建思,王伟平,等,2019. 基于高频 GPS 峰值地动位移的震级标度探讨. 中国地震, **35**(1):25~37.
- 胡安冬,张海明,2020. 机器学习在地震紧急预警系统震级预估中的应用. 地球物理学报, **63**(7):2617~2626.
- 金星,马强,李山有,2004a. 利用数字强震仪记录实时仿真地动速度. 地震工程与工程振动, **24**(1):49~54.
- 金星,马强,李山有,2004b. 利用数字化速度记录实时仿真位移与加速度时程. 地震工程与工程振动, **24**(6):9~14,38.
- 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.
- 梁姗姗,雷建设,徐志国,等,2018. 2017年四川九寨沟  $M_s$ 7.0 强震的余震重定位及主震震源机制反演. 地球物理学报, **61**(5):2163~2175.
- 刘瑞丰,高景春,陈运泰,等,2008. 中国数字地震台网的建设与发展. 地震学报, **30**(5):533~539.
- 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.
- 彭朝勇,杨建思,2019. 利用 P 波参数阈值实时估算地震预警潜在破坏区范围. 地震学报, **41**(3):354~365.
- 彭朝勇,杨建思,薛兵,等,2013. 基于汶川主震及余震的预警参数与震级相关性研究. 地球物理学报, **56**(10):3404~3415.
- 单新建,屈春燕,龚文瑜,等,2017. 2017年8月8日四川九寨沟 7.0 级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演. 地球物理学报, **60**(12):4527~4536.
- 申文豪,李永生,焦其松,等,2019. 联合强震记录和 InSAR/GPS 结果的四川九寨沟 7.0 级地震震源滑动分布反演及其地震学应用. 地球物理学报, **62**(1):115~129.
- 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.
- 郑绪君,张勇,汪荣江,2017. 采用 IDS 方法反演强震数据确定 2017 年 8 月 8 日九寨沟地震的破裂过程. 地球物理学报, **60**(11):4421~4430.
- Abercrombie R, Mori J, 1994. Local observations of the onset of a large earthquake: 28 June 1992 Landers, California. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(3):725~734.
- Abercrombie R E, 2019. Small and large earthquakes can have similar starts. *Nature*, **573**(7772):42~43.
- Allen RM, 2007. The ElarmS earthquake early warning methodology and application across California. In: Gasparini P, Manfredi G, Zschau J. *Earthquake Early Warning Systems*. Heidelberg: Springer, 21~43.
- Allen RM, Kanamori H, 2003. The potential for earthquake early warning in Southern California. *Science*, **300**(5620):786~789.
- Aranda J M E, Jimenez A, Ibarrola G, et al, 1995. Mexico City seismic alert system. *Seismol Res Lett*, **66**(6):42~53.
- Behr Y, Clinton J, Kästli P, et al, 2015. Anatomy of an earthquake early warning (EEW) alert: predicting time delays for an end-to-end EEW system. *Seismol Res Lett*, **86**(3):830~840.
- Behr Y, Clinton J F, Cauzzi C, et al, 2016. The virtual seismologist in SeisComP3: a new implementation strategy for earthquake early warning algorithms. *Seismol Res Lett*, **87**(2A):363~373.
- Boore D M, Atkinson G M, 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s. *Earthq Spectra*, **24**(1):99~138.
- Böse M, Allen R, Brown H, et al, 2014. CISENShakeAlert: an earthquake early warning demonstration system for California. In: Wenzel F, Zschau J. *Early Warning for Geological Disasters*. Heidelberg: Springer, 49~69.
- Chen D Y, Hsiao N C, Wu Y M, 2015. The Earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan. *Bull Seismol Soc Am*, **105**(2A):568~579.
- Cua, 2005. *Creating the Virtual Seismologist: Developments in Ground Motion Characterization and Seismic Early Warning*. Ph.D. Thesis, California Institute of Technology.
- Cua G, Heaton T, 2007. The Virtual Seismologist (VS) method: a Bayesian approach to earthquake early warning. In: Gasparini P, Manfredi G, Zschau J. *Earthquake Early Warning Systems*. Heidelberg: Springer, 97~132.
- Cua G, Fischer M, Heaton T, et al, 2009. Real-time performance of the virtual seismologist earthquake early warning algorithm in Southern California. *Seismol Res Lett*, **80**(5):740~747.
- Damrè P, Yin J X, Lipovsky B P, et al, 2019. Earthquakes within earthquakes: patterns in rupture complexity. *Geophys Res Lett*, **46**(13):7352~7360.
- 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.
- Hoshihara M, Kamigaiichi O, Saito M, et al, 2008. Earthquake early warning starts nationwide in Japan. *EOS, Trans Amer Geophys Union*, **89**(8):73~74.
- Hunter J D, 2007. Matplotlib: a 2D graphics environment. *Comput Sci Eng*, **9**(3):90~95.
- Hutchison AA, Böse M, Manighetti I, 2020. Improving early estimates of large earthquake's final fault lengths and magnitudes leveraging source fault structural maturity information. *Geophys Res Lett*, **47**(14):e2020GL087539.
- Ide S, 2019. Frequent observations of identical onsets of large and small earthquakes. *Nature*, **573**(7772):112~116.
- Kanamori H, 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **33**:195~214.
- Lancieri M, Zollo A, 2008. A Bayesian approach to the real-time estimation of magnitude from the early *P* and *Swave* displacement peaks. *J Geophys Res: Solid Earth*, **113**(B12):B12302.
- Lockman A B, Allen R M, 2005. Single-station earthquake characterization for early warning. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(6):2029~2039.
- Mărmureanu A, Ionescu C, Cioflan C O, 2011. Advanced real-time acquisition of the Vrancea earthquake early warning system. *Soil Dyn Earthq Eng*, **31**(2):163~169.
- Meier MA, Ampuero JP, Heaton TH, 2017. The hidden simplicity of subduction megathrust earthquakes. *Science*, **357**(6357):1277~1281.
- Nakamura Y, Saita J, 2007. UrEDAS, the earthquake warning system: today and tomorrow. In: Gasparini P, Manfredi G, Zschau J. *Earthquake Early Warning Systems*. Heidelberg: Springer, 249~281.
- Odaka T, Ashiya K, Tsukada S Y, et al, 2003. A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(1):526~532.
- Olson E L, Allen R M, 2005. The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, **438**(7065):212~215.
- Peng CY, Yang J S, Zheng Y, et al, 2017. New  $\tau_c$  regression relationship derived from all *P* wave time windows for rapid magnitude estimation. *Geophys Res Lett*, **44**(4):1724~1731.
- Peng H S, Wu Z L, Wu Y M, et al, 2011. Developing a prototype earthquake early warning system in the Beijing capital region. *Seismol Res Lett*, **82**(3):394~403.
- Satriano C, Lomax A, Zollo A, 2008. Real-time evolutionary earthquake location for seismic early warning. *Bull Seismol Soc Am*, **98**(3):1482~1494.
- Wang Y, Li SY, Song JD, 2020. Threshold-based evolutionary magnitude estimation for an earthquake early warning system in the Sichuan-Yunnan region, China. *Sci Rep*, **10**(1):21055.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, et al, 2019. The generic mapping tools version 6. *Geochem, Geophys, Geosyst*, **20**(11):5556~5564.
- Wolfe C J, 2006. On the properties of predominant-period estimators for earthquake early warning. *Bull Seismol Soc Am*, **96**(5):1961~1965.
- Wu Y M, Kanamori H, 2005. Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(1):347~353.
- Wu Y M, Kanamori H, 2008. Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals. *Sensors*, **8**(1):1~9.
- Wu Y M, Zhao L, 2006. Magnitude estimation using the first three seconds *P*-wave amplitude in earthquake early warning. *Geophys Res Lett*, **33**(16):L16312.
- Yamada M, Mori J, 2009. Using  $\tau_c$  to estimate magnitude for earthquake early warning and effects of near-field terms. *J Geophys Res: Solid Earth*, **114**(B5):B05301.
- Yamamoto S, Rydelek P, Horiuchi D, et al, 2008. On the estimation of seismic intensity in earthquake early warning systems. *Geophys Res Lett*, **35**(7):L07302.
- Zhu JB, Li SY, Song JD, et al, 2021. Magnitude estimation for earthquake early warning using a deep convolutional neural network. *Front Earth Sci*, **9**:653226.
- Zollo A, Colombelli S, Elia L, et al, 2014. An integrated regional and on-site earthquake early warning system for southern Italy: concepts, methodologies and performances. In: Wenzel F, Zschau J. *Early Warning for Geological Disasters*. Heidelberg: Springer, 117~137.

## Testing and Evaluation of Virtual Seismologist( VS) Method in China Seismological Network

Sun Li<sup>1)</sup> Liang Jianhong<sup>1)</sup> Xu Zhiguo<sup>2)</sup> Liu Jie<sup>1)</sup>

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China

**Abstract** The construction of Chinese earthquake early warning system is the main content of the national earthquake intensity quick report and early warning project. In the study and practice on the methods of determining earthquake parameters in the early warning system, scholars in and abroad found that the problem of the determination of the accurate magnitude in real time is challenging. Therefore, there is an urgent need for available real-time magnitude measurement methods to be used in the construction of Chinese earthquake early warning system. This paper briefly introduces the virtual seismologist(VS) method, describes the implementation process of VS method in the software for real-time determination of seismic parameters in China seismic network, and analyzes the process of using this method to determine the  $M_{VS}$  of Sichuan Changning M6.0 earthquake on June 17, 2019. Using the data of China seismic network constructed by the tenth five year plan project, the  $M_{VS}$  of 134 earthquakes with  $M \geq 3.0$  and 24 earthquakes with  $M \geq 5.0$  are measured by real-time online measurement and playback event waveform. The VS method is tested and its availability is evaluated. The results show that the  $M_{VS}$  determined in real time by VS method changes smoothly and has good availability. When the P-wave information of three stations is available,  $M_{VS}$  is measured for the first time, the average value of deviation  $\delta$  is 0.32, the number of earthquakes with  $\delta \leq 0.5$  accounted for 79%, and the average time was 20s. As time goes on, the use of more stations and available waveforms can effectively improve the accuracy of  $M_{VS}$  measurement. The application of this method in China seismic network is applicability and feasibility. It is an optional method for determining earthquake magnitude in real time, and has good application potential in earthquake early warning.

**Keywords:** VS method; Earthquake early warning;  $M_{VS}$ ; Determined in real time