https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.167



考虑P波预警参数的震源破裂特征实时持续估测方法

彭朝勇^{1,2},程振鹏¹,郑 钰¹,徐志强¹

中国地震局地球物理研究所,北京 100081
 中国地震局震源物理重点实验室,北京 100081

摘 要:在地震预警系统中引入震源破裂特征实时持续估测方法,可有效克服传统基于点源模型估测目标预警烈度和潜在破坏区的不足.现有方法的实时性通常只能达到分钟级,无法满足地震预警系统的高时效性要求.基于地震台站实时观测数据,通过引入地震预警P波特征参数,开展有限破裂模板匹配技术研究,形成了一套时效性更强的震源破裂特征实时估测方法.测试结果表明:利用本方法在震后同一时刻得到的结果相对于有限破裂探测器(FinDer)算法结果在速度上要快3s左右,个别震例结果要快5s;破裂初期,由于受到地震辐射多样性、场地、传播路径等因素的影响,走向θ会存在较大的波动.随着破裂的延展,θ逐渐收敛至参考值;对于M7.0级以下地震,震后6~10s即可获得较稳定的破裂特征参数结果,而对于M7.0+地震,则需要更长的时间,尤其是类似于汶川8.0级这种特大地震,其结果在台网较为稀疏的情况下需到震后40s才能逐渐稳定. **关键词:**震源破裂特征;P波预警参数;有限模板匹配;实时波形数据;天然地震.

中图分类号: P315 **文章编号:** 1000-2383(2024)02-391-12 **收稿日期:** 2023-01-30

Real-Time Continuous Estimation of Seismic Source Rupture Characteristics Considering P-Wave Early Warning Parameters

Peng Chaoyong ^{1,2}, Cheng Zhenpeng¹, Zheng Yu¹, Xu Zhiqiang¹

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China
 Key Laboratory of Earthquake Source Physics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: By introducing the real-time estimation method of seismic source rupture characteristics in to an earthquake early warning system (EEWS), we can effectively overcome the shortcomings of the traditional point-source-model-based estimation of target warning intensity and potential damage zones, and improve the disaster mitigation effectiveness of an EEWS. The real-time performance of existing methods is usually only at the minute level, which cannot meet the high timeliness requirements of EEWSs. In this work, we developed a real-time method to continuously estimate source rupture characteristics considering P-wave warning parameters. This method is an improvement of the finite rupture template matching method, namely FinDer. The system test results show that the results obtained using this method are about 3 s faster compared to the FinDer algorithm results at the same moment after the earthquake, and the results of individual earthquake cases are 5 s faster. Additionally, at the early stage of rupture, there are large fluctuations in the obtained strike θ due to the influence of seismic radiation diversity, site, propagation path and other factors. As the rupture continues, θ will gradually converge to the reference value. Moreover, for earthquakes of magnitude less than M7.0, relatively stable rupture characteristic parameter results can be obtained 6-10 s after the earthquake origin, while for M7.0+ earthquakes, it takes longer time, especially for mega-earthquakes such as the Wenchuan M8.0 event,

引用格式:彭朝勇,程振鹏,郑钰,徐志强,2024.考虑P波预警参数的震源破裂特征实时持续估测方法.地球科学,49(2):391-402. **Citation:** Peng Chaoyong, Cheng Zhenpeng, Zheng Yu, Xu Zhiqiang, 2024.Real-Time Continuous Estimation of Seismic Source Rupture Characteristics Considering P-Wave Early Warning Parameters.*Earth Science*,49(2):391-402.

基金项目:中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(Nos. DQJB23X11, DQJB20B17);北京市自然科学基金(No. 8202051). 作者简介:彭朝勇(1982-),男,研究员,博士,主要从事实时地震学研究. ORCID: 0000-0002-5946-7647. E-mail: pengchaoyong@cea-igp.ac.cn

whose results need to be gradually stabilized only at 40 s after the origin with relatively sparse station coverage. **Key words:** source rupture characteristics; P-wave early-warning parameters; finite template matching; real-time waveform data; earthquake.

0 引言

我国是世界上地震灾害最严重的国家之一,地 震多、分布广、强度大、灾害重是我国的基本国情. 地震预警作为一种震灾预防手段,可以有效减轻地 震损失、降低地震次生灾害和减少人员伤亡(彭朝 勇等,2013;Allen and Melgar,2019;崔鹏等,2022). 根据用户与地震震中之间的距离不同,地震预警系 统可为城市和生命线工程提供数秒至数十秒的紧 急处置时间.据国内相关地震预警研究成果(夏玉 胜和杨丽萍,2000),如果预警时间为5s,地震伤亡 人数可能减少20%;如果预警时间为30s,地震伤亡 人数可能减少80%.

大地震发生时,自初始破裂点开始,沿发震断 层主破裂方向,以一定破裂速度演化发展,其能量 以地震波的形式向四周传播,强烈的地震动导致地 震灾害.而现有的大部分地震预警系统在对地震的 震级、地震动场等参数进行估测时,一般将震源视 为点源,没有考虑震源的有限性,采用有限波形的 经验关系实时持续估计震级,应用部分震相到时估 计震源位置,进而利用地震动预测方程(GMPE)预 测地震动.在此情况下,对于中小地震(震级小于6 级),可以得到与实际情况较为符合的估测结果.但 是较大地震发生时,由于断层破裂尺度往往达到数 十甚至数百公里,若不考虑断层破裂的方向和长 度,仍以点源模型估计地震动场,将会使得估算结 果与实际情况偏差过大,影响地震预警信息的准确 发布. 如在 2011年日本东北"311" Mw9.0 地震预警 处理过程中,其紧急地震速报系统给出的东京地区 烈度估测结果为日本气象厅地震烈度(Japan Meteorological Agency,简写为JMA)4度.由于该系统在 当时未考虑断层破裂的长度,包括东京在内的日本 关东部分地区出现了预测烈度被低估的问题,严重 影响了该区域的紧急处置对策,而东京地区的实测 烈度达到了 JMA5 度 (Hoshiba et al., 2011; Kurahashi and Irikura, 2011). 地震预警系统在面对此类 大震时,如果能够迅速地估测出断层的破裂尺度、 模式和方向,则可用于对震级和地震动参数进行修 正,从而提高估算结果的准确度,有效发挥系统的 减灾效能.

目前,针对震源破裂方向、尺度及其特征的实时估计开展的相关研究不多,仅有少数几位学者从 震源有限特征简化的角度进行了探索,提出了一些 近实时的断层破裂方向和尺度的估测方法,时效性 可达到亚分钟级.如土耳其伊斯坦布尔预警系统中 采用的 PreSEIS 方法(Böse, 2006),Yamada and Heaton(2008)提出的一种基于高频地震动确定破 裂方向和破裂长度的方法,Yamada(2014)提出的利 用Fisher线性判别函数将台站分类为近源和远源后 确定出断层破裂方向和尺度范围的方法,以及 Böse *et al.*(2012)提出的有限断层破裂探测器(finite fault rupture detector;FinDer)方法.

其中,最具代表性、国际上主要采纳的方法就 是FinDer方法,目前已被集成至多国地震预警系统 中,如美国ShakeAlert系统、意大利PRESTo系统、 瑞士ETHZ-SEDSeisComp系统等,并在多个国家 与地区得到实际线上检验(Chung et al., 2020; Li et al., 2021; Massin et al., 2021; Böse et al., 2023). 该方法基于密集的地震台网和一组预先计算好的 破裂模板,在地震发生时根据实时测定的地面运动 振幅参数,采用图像识别技术自动实时计算震源破 裂(假设为线源)在地表投影的中心位置、破裂长度 L和走向θ.在时效性方面,该方法具有较明显的优 势,不仅对于接收到的新数据包的处理可在1秒内 完成,而且在断层破裂过程中能够持续等间隔给出 破裂特征估算结果.但是,从其实际运行结果来看, 表现并不理想,其可靠度和时效性还有待进一步提 升. 在 2019 年美国里奇克莱斯特 (Ridgecrest) M_w7.1级地震预警处置过程中,该方法明显低估了 破裂长度(估算结果为21km,实际破裂长度~46 km),而且在得到相对稳定的结果时,断层破裂也已 停止(Chung et al., 2020). 究其原因,主要是该方法 是以实际观测到的各台站当前时刻峰值加速度 PGA作为输入,要想获取到较稳定和准确的结果, 往往需要等到主要破裂结束,因此其时效性还无法 满足地震预警系统的要求(卢建旗和李山有, 2021). 如果能够结合 P 波预警参数和地震动参数的 相关性(Peng et al., 2017;彭朝勇和杨建思, 2019) 对PGA或峰值速度PGV进行提前预估,则可以有 效缩减算法所需耗时,从而更快地获取到震源破裂

特征参数.

针对于此,本文在有限断层破裂探测研究的基础上,基于地震台站观测数据,通过引入初期P波预 警参数估算现地地震动,作为有限破裂模板匹配技术的输入,发展了一套考虑P波预警参数的震源破 裂特征实时持续估测方法,并利用多次震例开展线 下模拟验证,以避免传统采用点源方法估算预警烈 度或潜在破坏区的不足.

1 P波预警参数与地震动参数相关性

传统一般使用 P 波 3 s 位移幅值参数 P_d与 PGV 的相关性来预测现地地震动(彭朝勇等,2013;Peng et al., 2014; 宋晋东等, 2018), 而很少采用其他类 别的P波幅值参数,如速度幅值P,或加速度幅值 Pa. 在获取 Pd参数时,通常需要将加速度记录两次 积分到位移,而积分操作会引入额外的低频漂移. 当所用的加速度数据为质量较高的力平衡加速度 仪记录时,积分获得的位移记录还相对可靠,不会 出现明显的偏差.但是,考虑到十三五"国家地震烈 度速报与预警工程"项目部署的10000多台一般站 主要采用微机电系统(micro-electro-mechanical-system,缩写为MEMS)传感器记录地面加速度,相对 于力平衡加速度仪,其采集到的数据质量会更低, 尤其是对于动态范围在80dB或以下的简易烈度计 (张红才等,2017; Peng et al., 2020, 2021). 在此情况 下,应避免使用P_a参数预估现地地震动.

在彭朝勇等(2021)中,利用国内外大量强震动 观测记录,构建了基于不同P波幅值参数的现地地 震动预测模型,并在结合已有 MEMS 地震事件记录 评估的基础上,获得了最终适用于 MEMS 地震烈度 仪的现地地震动预测模型.考虑到本工作所用数据 的特点和拟发展方法的输入参数(PGA),我们这里 直接采用其利用1阶巴特沃斯滤波器处理得到的全 P 波段垂直向加速度预警参数 PA_{all}与 PGA 的相 关性:

lg(PGA)=0.848 6lg(PA_{all})+0.8960, (1) 该相关性的标准差为0.2634,相关系数R为0.850 3,其对应的拟合曲线如图1所示.

2 有限破裂模板匹配技术

2.1 有限破裂模板库构建

有限破裂模板匹配技术的基本原理是利用图



图1 全P波段垂直向加速度预警参数PA_{al}与PGA的拟合 曲线(彭朝勇等,2021)

Fig.1 Fitting curve of the vertical acceleration early-warning parameter PA_{all} obtained from the full P wave window with PGA(Peng *et al.*, 2021)

像识别技术与提前生成的有限破裂模板库进行比 对,以获取地震破裂过程中当前时刻的矩心位置、 破裂长度L和走向θ,实时自动检测震源破裂的地 表投影.为了构建有限破裂模板库,本文采用与 Böse *et al.*(2012,2018)类似的处理方法.

由于收集的近年来我国大陆发生的地震事件 数据绝大部分发生在四川、云南等区域,同时不考 虑分震级、分区域的GMPE,我们直接选用俞言祥 和汪素云(2006)建立的中国西部地区水平向基岩 PGA衰减关系(式2),建立有限破裂模板库.

 $lg(PGA) = 2.206 + 0.532M - 1.954lg(R + 2.018e^{0.406M}),$ (2)

式中:M为面波震级 M_s ,R为震中距,单位km.在实际应用该衰减关系时,进行了一定的扩展处理:当M < 5时,R为震中距;当 $M \ge 5$ 时,R为至有限破裂模板中假定有限断裂对应的断层距($R_{\rm m}$).而断层破裂的长度则采用Wells and Coppersmith(1994)提出的公式进行获取:

$$lg(L) = (M - 4.33)/1.49, \qquad (3)$$

此外,将震级范围扩展至 $M4.0 \sim M8.0$,对应的断层 破裂长度为 $L=0.6 \sim 300$ km.按照震级0.1级为间 隔,固定走向 $\theta=0$,共生成41个有限破裂模板.在 进行有限破裂模板匹配时,会对模板按照1为间隔





旋转至180°,以获取震源破裂的方向.这里之所以 仅匹配走向0°~180°,是因为这些模板围绕其线源 对称,因此θ与θ+180°是等效的.

生成的有限破裂模板根据设定的阈值按照二 值图进行存储,以5km为间隔进行格网划分,每个 格点对应的值为:

$$T_{\text{threshold}}(x,y) = \begin{cases} 1, \text{if:} T(x,y) \geqslant \text{PGA}_{\text{threshold}}, \\ 0, \text{otherwise} \end{cases}$$
(4)

对于阈值设定,如果阈值过大,中强地震对应的破裂方向性就会难以获得,相反,如果过小,又会对破裂尺度的估计精度造成影响.根据FinDer算法的实际应用效果,这里直接利用该算法中在震级为*M*5.0、震中距*R*为5km时对应的PGA峰值90.7 cm/s²作为设定的阈值(Böse *et al.*, 2018),该值与我国的7度等值线对应的值(93.6 cm/s²)接近.

2.2 有限破裂模板匹配

有限破裂模板匹配技术基于 FinDer 算法,结合 实时 P 波预警参数估算的地震动 PGA 值或 S 波已 到达的近台实测地震动值,利用 Vs30 进行场地校 正,然后插值生成地震动影响场,并根据设定阈值 生成二值图,与有限破裂模板库中的模板一一匹 配,获取最佳匹配模板,以获取当前时刻对应的矩 心位置、破裂长度 L 和方向 θ. 完整处理流程见图 2 所示,具体步骤如下:

(1)对各台站利用P波特征参数估测的地震动值 或S波已到达的近台实测地震动值进行联立插值,并 依据设定阈值得到一个二值图像;

(2)通过相关性匹配,从生成的破裂模板库中检 索最大相关位置,将其作为矩心.其相关性匹配公式为:

 $R(x,y|L,\theta) = I(x,y) \star T(x,y|L,\theta),$ (5) 式中: $T(x,y|L,\theta)$ 为生成的破裂模板库,I(x,y)为当 前根据插值数据生成的二值图像.为了增加计算速度, 以确保其性能满足地震预警的高时限性要求,这里利 用相关性理论将其转换至傅里叶域计算:

 $I(x,y) \star T(x,y|L,\theta) \Leftrightarrow \tilde{I}(k_x,k_y)\tilde{T}^*(k_x,k_y|L,\theta), (6)$ 上式表示将空间相关性转换成傅里叶变换 $\tilde{I}(k_x,k_y)$ 和 $\tilde{T}^*(k_x,k_y|L,\theta)$ 在小波域 (k_x,k_y) 的乘积.

(3)得到与二值图像最佳匹配的模板,将其线 源参数作为当前检索得到的震源模型.这里采用公 式(7)获取最佳匹配模板.

 $E(L,\theta) =$

$$\frac{\sum_{x',y} \left[I\left(x+x',y+y'\right) - T\left(x',y'|L,\theta\right) \right]^2}{\sum_{x',y'} \sigma_m^2\left(x',y'\right) \left[I\left(x+x',y+y'\right) + T\left(x',y'|L,\theta\right) \right]'},$$
(7)

表1 线下模拟所用4次破坏性地震事件信息

Table 1 The four damaging earthquakes used for off-line simulation							
事件名	发震时刻	震中经度	震中纬度	深度	震级	走向θ	破裂长度L
		(°N)	(°E)	(km)	$M_{ m s}$	(°)	(km)
四川汶川地震	2008-05-12	103.42	31.01	14	8.0	231/51	290
	14:28:00						
四川芦山地震	2013-04-20	102.99	30.30	17	7.0	218/38	40
	08:02:48						
青海门源地震	2022-01-08	101.26	37.77	10	6.9	284/104	31
	01:45:28						
日本熊本地震	2016-04-16	130.76	32.75	12	7.4	226/46	65
	01:25:17						

式中: $x'=0, \cdots, w-1, y'=0, \cdots, h-1, w \times h$ 为匹配 模板的大小.

在地震发生过程中,随着更多的台站被触发和 每个台站记录到更多的后续波形数据,持续迭代地 进行模板匹配,以对矩心位置、L和θ进行修正.

3 线下模拟验证与讨论

利用4次历史地震事件记录(表1)作为输入,以 秒为时间间隔进行处理,模拟和分析本方法的性能,并与实测PGA作为输入的FinDer算法结果进 行比较.表中震级统一采用中国地震台网中心公布 的*M*s震级.这里忽略了由数据传输和预警信息发 布所引起的额外时间延时.在验证过程中,只要有 两个或以上台站的估测或实测PGA超过设定阈值 (20 cm/s²)时,就开始立即进行处理.

3.1 2008年5月12日四川汶川8.0级地震

图 3 为震后各时间点对应的输出结果对比,图 4 展示了本方法和FinDer算法在部分时间节点估计 的 L 和 θ 的变化以及最终的输出结果.从图 3 可见, 利用 P 波预警参数预估地震动值,并与破裂模板联 合开展破裂特征估测,在精度相当的情况下,震后 同一时刻得到的结果相对于仅利用实测地震动值 (FinDer)开展匹配会更快(~3 s)接近标准参考值.

按照设定的启动条件,汶川地震在震后9s才开 始产出第一次结果,这主要是由于在当时部署的强 震动台网密度较稀疏引起,震中50km范围内仅有3 个站点.本方法在该时刻得到的L和M分别为25 km和6.41,而FinDer算法估算得到的L和M分别 为15km和6.08.随着破裂的延展,本方法得到的结 果会更快地接近标准参考值.而对于θ,在地震破裂 初期,得到的结果基本都在0附近变化,以北向为 主,主要是由离震中较近的北边几个台站的预测或 实测PGA值较大引起.本方法得到的走向在震后~ 48 s开始趋于稳定,变化幅度在20°范围内,而FinDer算法得到的 θ 在震后~53 s才开始趋于稳定,慢了 5 s.最终较稳定的线源模型约在震后100 s左右确 定,其L和 θ 分别为280 km和59°/239°(本方法)或 250 km和63°/243°(FinDer).本方法得到的线源模 型结果与Zhang et al.(2014a)的反演结果(L=300 km, θ =225°)及沿北东一南西方向长约330 km的余 震分布(黄媛等,2008)较为吻合.从图上还可以看 出,100 s后测得的L仍然在持续增加,直到120 s时 的395 km,这主要是由于北东向破裂末端的台网极 其稀疏,没有控制点对插值算法进行有效限定导 致,进而引起得到的线源模型不够稳定.

3.2 2013年4月20日四川芦山7.0级地震

四川芦山7.0级地震震后各时间点对应的输出 结果对比见图5.从图中可见,利用本方法在震后同 一时刻得到的结果相对于FinDer算法结果会更快 (~3 s)接近标准参考值,而且同一时刻对应的精度 相当.对于该地震,本方法可在震后6s产出第一次 结果,在L都为10km的情况下,比FinDer算法产出 的第一次结果要早2s.同样,随着地震破裂的持续, 本方法结果变化的趋势会更快地接近标准参考值. 而对于θ,在地震破裂的初期,虽然其变化幅度较 大,但是仍然围绕标准参考值上下变动.两种结果 都在震后~15s开始稳定,变化幅度控制在20°范围 内.最终较稳定的线源模型也在此时刻确定,L和 θ 分别为 50 km 和 19°/199°(本方法)或 45 km 和 37°/ 217°(FinDer). 两种方法得到的破裂长度皆比 Zhang et al. (2014b)的破裂反演结果(~20 km)、 Fang et al. (2013)的余震重定位分布(~35 km),还 有中国地震局发布的烈度II度圈的长轴长度(~30



Fig.3 Comparison of simulation results of *M*8.0 Wenchuan, Sichuan earthquake at different moments after the origin with those obtained by the FinDer algorithm

km)要略长一些.走向θ与美国地质调查局公布的 数值(θ=218°)以及Fang et al.(2013)重定位的余震 分布(θ=N40°~50°E)比较吻合.但是,随着时间的 持续,两种方法得到的L仍在持续增加,直至~80 km,本方法得到的结果更是达到了95 km,与烈度 WI度圈的长轴长度(~90 km)相当.究其原因,可能 与芦山地震的能量释放有关.这次地震释放的高频 能量较大,且主要集中在破裂前10 s,进而引起较大 的预测和实测PGA,而两种方法都是以PGA作为 输入,未来可以考虑引入对高频相对不敏感的其他 参数进行完善,如峰值速度PGV等,也可以考虑采 用神经网络模型的预测结果作为输入(王墩和孙 琨,2022; 胡进军等,2023).

3.3 2022年1月8日青海门源6.9级地震

青海门源 6.9级地震发生在十三五"国家地震 烈度速报与预警工程"项目一般站建设完成后,由 于引入大量低成本 MEMS 地震烈度仪,台网密度得 到了明显的提高,部分区域台站间距缩小至10 km. 图 6 是该次地震震后各时间点对应的输出结果对 比.从图中可见,两种方法的第一次结果都随着台 网密度的提高而更快地进行了产出,而且提升效果 明显.整体来看,利用本方法在震后同一时刻得到 的结果相比 FinDer 算法结果要快约 2~3 s,且精度 也更加优越.本方法在震后3s产出第一次结果, FinDer算法的第一次结果晚了1s,测得的L皆为 10 km.随着地震破裂的持续,本方法快速趋向于标 准参考值,而FinDer算法则相比要慢5s以上.最终 利用本方法得到的线源模型在震后8s稳定,其L和 θ 分别为35 km和119°.而利用FinDer算法得到的 线源模型在震后11s稳定,慢了3s,其L和 θ 分别为 20 km和154°, θ 比标准参考值偏了约50°,而本方法 得到的 θ 只偏15°.造成 θ 偏差的原因可能与震中东 部和东北部50 km范围内无台站部署引起,使得在 插值生成二值图时无法对该区域进行有效控制.

3.4 2016年4月16日日本熊本7.4级地震

图 7 为 2016 年 4 月 16 日发生的日本熊本 7.4 级 地震震后各时间点输出结果对比.从图中可以看 出,利用本方法在震后同一时刻得到的结果相对于 FinDer算法结果在速度上要快 2~3 s,且更快地趋 向于标准参考值.在第一次输出的破裂特征参数 L和 θ 分别皆为 10 km 和 68°的情况下,本方法在震后 3 s就能产出第一次结果,而FinDer算法要慢 1 s. 破 裂初期,两种方法得到的走向与标准参考值 226°皆 存在较大偏差,且波动范围也较大,超过 40°.稳定 的结果约在震后 19 s开始获得,该时刻两种方法得 到的线源模型 L 和 θ 分别为 50 km 和 37°/217°(本方



图4 震后不同时刻四川汶川8.0级地震模拟结果

Fig.4 Simulation results of *M*8.0 Wenchuan, Sichuan earthquake at different moments after the origin. 按照从左到右,从上到下的顺序,奇数为利用本方法得到的模拟结果,偶数为利用FinDer算法得到的模拟结果.其中,黑色实线和黑色圆点分 别为获得的破裂线段和根据估测或实测PGA得到的二值图中值为1的格点,正方形为所使用的台站,颜色显示了每个时刻预测或实测PGA 值,蓝色圆标记了中国地震台网中心发布的震中位置



Fig.5 Comparison of simulation results of *M*7.0 Lushan, Sichuan earthquake at different moments after the origin with those obtained by the FinDer algorithm





Fig.6 Comparison of simulation results of M6.9 Menyuan, Qinghai earthquake at different moments after the origin with those obtained by the FinDer algorithm

法)或45km和35°/215°(FinDer),并最终在震后25 s稳定至65km和41°/221°(本方法)或60km和36°/ 216°(FinDer).在震后31s时间点后,L会有一个明 显的增加趋势,最终增长至80km.这可能是由于在 震后 30 s左右,主震在东北方向约 80 km 处触发了 一次 M5.5级地震(Kodera *et al.*, 2016),该次地震释 放的高频地震动与主震地震动相叠加,进一步增加 了 L 的估算长度.该结果表明,采用本方法或 FinD-



Fig.7 Comparison of simulation results of M7.4 Kumamoto, Japan earthquake at different moments after the origin with those obtained by the FinDer algorithm

er算法可以有效处理在同一区域内、很短时间内接 连发生的地震事件,而现有的依托点源算法构建的 地震预警系统对于此种情况会无法处理或出现错 误处理.

4 结论与展望

针对现有震源破裂特征估测方法在时效性方 面只能达到分钟级,无法满足地震预警系统要求的 问题,本文基于地震台站实时观测数据,通过引入 地震预警P波特征参数,开展了有限破裂模板匹配 技术研究,最终形成了一套时效性更强的震源破裂 特征实时持续估测方法,可有效避免传统点源方法 估算目标区预警烈度或潜在破坏区的不足.测试结 果表明:

(1)由于采用了各站点破裂初期的P波特征参数估算该站点后续地震动,在与FinDer算法处理结 果精度整体相当的情况下,利用本方法在震后同一 时刻得到的结果相对于FinDer算法结果在速度上 要快3s左右,个别震例结果要快5s,从而更快地趋 近于标准参考值;

(2)在破裂初期,由于受到地震辐射多样性、场
 地、传播路径等多因素的影响,获得的走向θ会存在
 较大的波动.随着破裂的延续,θ会逐渐收敛至标准

参考值;

(3)对于M7.0级以下地震,震后6~10s即可获 得较稳定的破裂特征参数估测结果,而对于M7.0+ 地震,则需要更长的时间,尤其是对于像四川汶川 M8.0这种特大地震,其较稳定结果一般需要到震后 40s左右才能获得.当然,这与地震台网本身的密 度密切相关.

具体应用本方法时,为了有效缩减预警盲区范 围、增加有效预警时间,可以采用多报预警信息和 由内(近震中)向外(远离震中)的发布策略,以及点 源与线源相结合的处理模式.在大地震破裂开始阶 段,破裂长度L较短,再加上此时得到的θ会存在较 大的变化,这时直接应用点源算法处理的结果即 可.而随着破裂的延展,L逐渐增加,得到的θ开始 稳定,这时可以采用本方法得到的线源估测结果, 并依据设定的L增加量向外持续更新发布结果.

需要注意的是,本方法在利用估测的L推算震级M时,直接采用了Wells and Coppersmith(1994) 提出的震级与破裂长度的经验关系.从其结果来 看,对于M7.0级左右地震事件,即使得到的破裂长 度明显超过标准参考值,利用该关系式计算得到的 震级M也明显比标准参考值小,比如对于四川芦山 7.0级地震,直接利用关系式得到的L为61 km,而 根据破裂反演结果和余震重定位分布得到的结果 则分别只有~20 km(Zhang et al., 2014b)和~35 km (Fang et al., 2013). 反之,如果利用L为30 km反推 震级,则对应的M为6.5级,2022年青海门源6.9级 地震就出现了该情况.但是,对于较大的地震事件, 如汶川8.0级、青海玛多7.4级,又会出现相反的结 果,即依据经验关系给出的L会比实际的L短.因 此,直接采用该关系式会引入较大的不确定性,未 来有必要对该关系式进行本地化处理,以获取更加 适用于国内的震级与破裂长度的经验关系,也可以 考虑采用Cheng et al.(2020)提出的针对中国大陆 的地震破裂尺度关系.

另外还需要考虑的因素包括本方法对台网密 度的要求和台站场地校正对破坏性地震动的影响. 对于前者,FinDer算法在提出时要求地震台网的台 间距小于50 km(Böse *et al.*, 2012),但并未给出具 体的理由,因此有必要从台网布局的均匀度、不同 台网密度下得到的结果精度等角度给出详细的分 析.而对于后者,我们在根据实测和预测地震动参 数生成二值图时,目前利用 Vs30 对 PGA 进行了场 地校正,以获取基岩地震动参数,并未深入分析简 单的场地校正对破坏性地震动的影响.这些都将是 我们下一步研究中需要考虑的内容.

近年来,随着"国家地震烈度速报与预警工程" 项目的实施,即将建成包含测震、强震、烈度仪等多 网融合的、超过15000个台站的密集观测台网.对 于正在研发中的国家地震预警系统,其核心关键功 能之一就是如何实时、快速地估算震源破裂特征参 数.目前,该系统还未实现此功能,仍然以传统的点 源算法为主,虽然按计划拟引入FinDer算法,但是 从前面的分析结果和实际的系统运行结果(Chung et al., 2020)来看,FinDer算法在时效性上仍然无法 完全满足地震预警的高时效性要求.通过本方法的 研究和实际系统的研发,可以进一步提高获取震源 破裂特征参数的时效性,有助于盲区范围的减小和 有效预警时间的增加.

致谢:中国地震局工程力学研究所强震动观测 中心和日本国立地球科学与防灾研究所(http:// www.kyoshin.bosai.go.jp/)为本研究提供了数据支 持,审稿人提出了建设性的意见,作者在此一并表 示感谢.

References

Allen, R.M., Melgar, D., 2019. Earthquake Early Warning: Advances, Scientific Challenges, and Societal Needs. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 47(1): 361-388. https://doi. org/10.1146/annurev - earth - 053018-060457

- Böse, M., 2006. Earthquake Early Warning for Istanbul using Artificial Neural Networks(Dissertation). Karlsruhe University, Karlsruhe, 19-24.
- Böse, M., Heaton, T.H., Hauksson, E., 2012. Real-Time Finite Fault Rupture Detector (FinDer) for Large Earthquakes. *Geophysical Journal International*, 191(2): 803-812.https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.0 5657.x
- Böse, M., Smith, D.E., Felizardo, C., et al., 2018. FinDer v. 2: Improved Real - Time Ground - Motion Predictions for M2-M9 with Seismic Finite-Source Characterization. *Geophysical Journal International*, 212(1): 725-742. https://doi.org/10.1093/gji/ggx430
- Böse, M., Andrews, J., Hartog, R., et al., 2023. Performance and Next-Generation Development of the Finite-Fault Rupture Detector (FinDer) within the United States West Coast ShakeAlertWarning System. Bulletin of the Seismological Society of America, 113(2): 648–663.https://doi.org/10.1785/0120220183
- Cheng, J., Rong, Y.F., Magistrale, H., et al., 2020. Earthquake Rupture Scaling Relations for Mainland China. *Seismological Research Letters*, 91(1): 248-261. https: //doi.org/10.1785/0220190129
- Chung, A. I., Meier, M. A., Andrews, J., et al., 2020. ShakeAlertEarthquake Early Warning System Performance during the 2019 Ridgecrest Earthquake Sequence. Bulletin of the Seismological Society of America, 110 (4): 1904-1923.https://doi.org/10.1785/0120200032
- Cui, P., Wang, J., Wang, H., et al., 2022. How to Scientifically Prevent, Manage and Prewarn Catastrophic Risk?. *Earth Science*, 47(10): 3897-3899 (in Chinese with English abstract).
- Fang, L.H., Wu, J.P., Wang, W.L., et al., 2013. Relocation of the Mainshock and Aftershock Sequences of *M*_s7.0 Sichuan Lushan Earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 58: 3451-3459.https://doi.org/10.1007/s11434-013-6000-2
- Hoshiba, M., Iwakiri, K., Hayashimoto, N., et al., 2011. Outline of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M_w 9.0): Earthquake Early Warning and Observed Seismic Intensity. *Earth Planets & Space*, 63 (7): 547-551.https://doi.org/10.5047/eps.2011.05.031
- Hu, J.J., Ding, Y.T., Zhang, H., et al., 2023. A Real-Time Seismic Intensity Prediction Model Based on Long Short-Term Memory Neural Network. *Earth Science*,

48(5):1853-1864 (in Chinese with English abstract).

- Huang, Y., Wu, J.P., Zhang, T.Z., et al., 2008. Relocation of the Wenchuan M₈8.0 Great Earthquake and Its Aftershock Sequences. Science in China: Earth Sciences, 38 (10):1242-1249 (in Chinese).
- Kodera, Y., Saitou, J., Hayashimoto, N., et al., 2016. Earthquake Early Warning for the 2016 Kumamoto Earthquake: Performance Evaluation of the Current System and the Next-Generation Methods of the Japan Meteorological Agency. *Earth Planets & Space*, 68(1): 202. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0567-1
- Kurahashi, S., Irikura, K., 2011. Source Model for Generating Strong Ground Motions during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets & Space*, 63 (7): 571-576.https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.044
- Li, J. W., Böse, M., Feng, Y., et al., 2021. Real-Time Characterization of Finite Rupture and its Implication for Earthquake Early Warning: Application of FinDer to Existing and Planned Stations in Southwest China. Frontiers in Earth Science, 9: 699560. https://doi.org/ 10.3389/feart.2021.699560
- Lu, J.Q., Li, S.Y., 2021. Detailed Analysis and Preliminary Performance Evaluation of the FinDer: A Real-Time Finite Fault Rupture Detector for Earthquake Early Warning. World Earthquake Engineering, 37(1): 152-164 (in Chinese with English abstract).
- Massin, F., Clinton, J., Böse, M., 2021. Status of Earthquake Early Warning in Switzerland. *Frontiers in Earth Science*, 9: 707654.https://doi.org/10.3389/feart.2021.707654
- Peng, C.Y., Yang, J.S., Xue, B., et al., 2013. Research on Correlation between Early - Warning Parameters and Magnitude for the Wenchuan Earthquake and Its Aftershocks. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(10): 3404-3415 (in Chinese with English abstract).
- Peng, C.Y., Yang, J.S., Xue, B., et al., 2014. Exploring the Feasibility of Earthquake Early Warning using Record of the 2008 Wenchuan Earthquake and its Aftershocks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 57: 86–93.https: //doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.11.005
- Peng, C.Y., Yang, J.S., Zheng, Y., et al., 2017. New τ_c Regression Relationship Derived from all P Wave Time Windows for Rapid Magnitude Estimation. *Geophysical Research Letters*, 44: 1724–1731. https://doi. org/ 10.1002/2016GL071672
- Peng, C.Y., Yang, J.S., 2019. Real-Time Estimation of Potentially Damaged Zone for Earthquake Early Warning Based on Thresholds of *P*-Wave Parameters. Acta Seismologica Sinica, 41(3): 354-365 (in Chinese with Eng-

lish abstract).

- Peng, C.Y., Ma, Q., Jiang, P., et al., 2020. Performance of a Hybrid Demonstration Earthquake Early Warning System in the Sichuan-Yunnan Border Region. Seismological Research Letters, 91: 835-846.https://doi.org/ 10.1785/0220190101
- Peng, C.Y., Jiang, P., Ma, Q., et al., 2021. Performance Evaluation of an Earthquake Early Warning System in the 2019-2020 M6.0 Changning, Sichuan, China, Seismic Sequence. Frontiers in Earth Science, 9: 699941.https://doi.org/10.3389/feart.2021.699941
- Peng, C.Y., Zheng, Y., Xu, Z.Q., et al., 2021. Construction and Verification of Onsite Ground Motion Prediction Models for Seismic Intensity Instrument. Acta Seismologica Sinica, 43(5): 643-655 (in Chinese with English abstract).
- Song, J.D., Jiao, C.C., Li, S.Y., et al., 2018. Prediction Method of First-Level Earthquake Warning for High Speed Railway Based on Two-Parameter Threshold of Seismic P-Wave. China Railway Science, 39(1): 138-144 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D., Sun, K., 2022. How the Big Data Seismology and AI Refine Rapid Determination of Source Parameters of Large Earthquakes? *Earth Science*, 47(10): 3915-3917 (in Chinese with English abstract).
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.https://doi.org/10.1007/BF00808290
- Xia, Y.S., Yang, L, P., 2000. Research on Earthquake Prediction (Warning) System and its Disaster Reduction Benefit. Northwestern Seismological Journal, 22(4): 425-457 (in Chinese with English abstract).
- Yamada, M., Heaton, T., 2008. Real-Time Estimation of Fault Rupture Extent Using Envelopes of Acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(2): 607-619.https://doi.org/10.1785/0120060218
- Yamada, M., 2014. Estimation of Fault Rupture Extent Using Near-Source Records for Earthquake Early Warning. In: Wenzel, F., Zschau, J., eds., Early Warning for Geological Disasters, Advanced Technologies in Earth Sciences, Springer, Berlin, 29-48.
- Yu, Y. X., Wang, S. Y., 2006. Attenuation Relations for Horizontal Peak Ground Acceleration and Response Spectrum in Eastern and Western China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 1(3): 1-12 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, H.C., Jin, X., Wang, S.C., et al., 2017. Comparative Analyses of Records by Seismic Intensity Instrument with Strong Ground Motion Records and Seismograph Stations Records: Taking the M_L4.5 Changli Earthquake of Hebei Province for an Example. Acta Seismologica Sinica, 39(2): 273-285 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Wang, R.J., Zschau, J., et al., 2014a. Automatic Imaging of Earthquake Rupture Processes by Iterative Deconvolution and Stacking of High - Rate GPS and Strong Motion Seismograms. *Journal of Geophysical Research*, 119(7): 5633-5650. https://doi.org/10.1002/ 2013JB010469
- Zhang, Y., Wang, R.J., Chen, Y.T., et al., 2014b. Kinematic Rupture Model and Hypocenter Relocation of the 2013 Mw6.6 Lushan Earthquake Constrained by Strong-Motion and Teleseismic Data. Seismological Research Letters, 85: 15-22.https://doi.org/10.1785/0220130126

附中文参考文献

- 崔鹏,王姣,王昊,等,2022.如何科学防控与预警巨灾风险?.地球科学,47(10):3897-3899.
- 胡进军,丁袆天,张辉,等,2023.基于长短期记忆神经网络的 实时地震烈度预测模型.地球科学,48(5):1853-1864.
- 黄媛,吴建平,张天中,等,2008.汶川8.0级大地震及其余震

序列重定位研究.中国科学:地球科学,38(10):1242-1249.

- 卢建旗,李山有,2021. 地震预警断层参数实时识别方法 (FinDer)详解及其性能初步评价. 世界地震工程,37(1): 152-164.
- 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.
- 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,郑钰,徐志强,等.2021.面向地震烈度仪的现地地震 动预测模型的构建与验证.地震学报,43(5):643-655.
- 宋晋东,教聪聪,李山有,等,2018.基于地震P波双参数阈值 的高速铁路I级地震警报预测方法.中国铁道科学,39 (1):138-144.
- 王墩,孙琨,2022.地震大数据和AI如何改进全球大震参数 快速测定?地球科学,47(10):3915-3917.
- 夏玉胜,杨丽萍,2000.地震预警(报)系统及减灾效益研究. 西北地震学报,22(4):425-457.
- 俞言祥,汪素云,2006.中国东部和西部地区水平向基岩加速 度反应谱衰减关系.震灾防御技术,1(3):206-217.
- 张红才,金星,王士成,等,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M₁4.5地震为例.地 震学报,39(2):273-285.