

郝美仙,周银兴,张建中,等,2020.  $\tau_c$ 方法在内蒙古地区预警震级计算中的应用. 中国地震,36(1):136~145.

# $\tau_c$ 方法在内蒙古地区预警震级计算中的应用

郝美仙<sup>1)</sup> 周银兴<sup>2)</sup> 张建中<sup>1)</sup> 张珂<sup>1)</sup> 尹战军<sup>1)</sup>

1)内蒙古自治区地震局,呼和浩特 010010

2)中国地震局地震预测研究所,北京 100036

**摘要** 地震预警技术是减轻地震灾害的有效手段之一,而在预警系统中,震级的测定是最重要,也是最困难的。考虑到地震预警震级估算方法的区域性特点,本文利用内蒙古测震台网2016~2018年 $M_L \geq 2.0$ 地震波形数据共120条,分别采用P波3s时间窗内垂直向位移时程和P波全波段垂直向位移时程计算特征周期参数值,得到了地震预警震级的计算公式,并对其结果进行对比分析。结果显示,采用P波全波段关系式得到的结果较采用P波3s固定时间窗计算值收敛性更好,关系式拟合相关系数更接近1,能够对预警地震震级做出较好的估计。同时结合数据处理结果,探讨了地震预警的警报快速性和准确性之间的关系。

**关键词:** 地震预警  $\tau_c$ 值 震级估算

[文章编号] 1001-4683(2020)01-0136-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震预警是减轻地震灾害的有效手段之一,该技术已被国际上越来越多的国家和地区所重视,相应地建立了各自的地震预警系统,并在实际应用中取得了较为明显的减灾效果(Allen et al,2003;Wu,2005;Bose et al,2009)。其基本原理是利用部署在潜在震源区周围的实时传输地震观测台站,在破坏性地震发生后的极短时间内,根据距离震中较近的若干个触发台站的信息,迅速测定地震发生的地点和规模,并利用地震波P波传播速度大于更具破坏性的S波和面波传播速度的特点和地震波传播速度远远小于电磁波的原理,在破坏性地震动到达之前向周围可能遭受地震影响的地区发出警报(马强,2008)。

随着我国经济的快速发展和城市化进程的加快,核电站、大型石化工程等重大基础设施不断涌现,高速铁路、长输管线、城市管网等生命线工程日趋密集、复杂。重大基础设施和生命线工程一旦遭遇破坏性地震,在遭受直接灾害的同时,还会导致更为严重的次生灾害,造成重大的社会影响。如何减轻地震灾害、最大限度地降低地震造成的人员伤亡和经济损失,是政府和全社会极为关注的课题。地震预警系统可以在检测到破坏性地震发生时,自动启动城市及重大工程地震紧急处置系统,快速地向相关行业及公众提供预警信息,切实地减轻

[收稿日期] 2019-10-22; [修定日期] 2020-03-17

[项目类别] 内蒙古自治区地震局局长基金(2018ZD03、2019ZH04)共同资助

[作者简介] 郝美仙,女,1980年生,高级工程师,主要从事测震台网速报工作。E-mail:1153404095@qq.com

周银兴,通讯作者,男,1980年生,硕士,工程师,主要从事数字地震台站、强震台站建设等工作。

E-mail: Zhouyx@geodevice.cn

地震灾害。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》<sup>①</sup>中明确提出要“重点研究开发地震、台风、暴雨、洪水、地质灾害等监测、预警和应急处理关键技术,森林火灾、溃坝、决堤险情等重大灾害的监测预警技术以及重大自然灾害综合风险分析评估技术”;陈颢(2004)在《2020年中国地震科学和技术发展研究》中更是明确提出了要建设地震灾害预警平台。目前,我国正在开展建设的国家地震烈度速报与预警工程的关键核心任务之一就是建设覆盖全国范围的地震预警系统。

但是,地震预警系统中存在着一个关键的难题,就是如何从一个正在发生的地震事件中估算出震级大小(金星等,2012a)。由于计算预警震级时往往只有附近少数触发台站的有限时间长度内的信息可以利用,因此不可能采用常规震级算法进行计算。同时,地震预警系统还要求所发布的信息具有足够可靠性,因此必须发展一些非常规的、稳定可靠的实时震级计算方法(金星等,2012a)。

目前国际上已发展了一些实用的实时震级计算方法,根据方法的特点大致可分为三类(张红才等,2012):与周期或频率相关的算法、与幅值相关的算法以及与辐射能量强度相关的算法。我国学者也针对其开展了一定的研究,金星等(2012b)利用日本 KiK-net 台网数据和四川汶川地震余震序列获取到了特征周期  $\tau_c$  和位移幅值  $P_d$  与震级的相关性,并将其应用到福建研发的地震预警系统中;彭朝勇等(2013)使用 2008 年汶川地震序列强震动观测数据来研究适用于四川地区的预警参数与最终震级大小之间的相关性,为建立适用于四川地区的地震预警系统提供参考。从上述研究结果可以看出,预警震级估算方法有其地域特点。因此,在建设地震预警系统时,需要首先利用本地的数据重新构建地震预警系统震级估算模型,并对其开展分析研究,以进一步提高预警震级的可靠性。

本文使用内蒙古地区测震台站记录到的地震事件数据,来研究适用于本区域的  $\tau_c$  值与预警震级之间的相关性,为“十三五”国家地震烈度速报与预警工程在我区的实际应用提供技术支撑。

## 1 $\tau_c$ 方法简介

Nakamura(1988)提出 P 波卓越周期( $\tau_p$ ),即利用实时速度记录计算地震动卓越周期的算法。多位学者(Allen et al,2003;Kanamori,2005;Olson et al,2005)采用该方法进行了一系列相关研究,其计算公式如下

$$\tau_{pi} = 2\pi \sqrt{\frac{X_i}{Y_i}} \quad (1)$$

式中, $X_i = \alpha X_{i-1} + x_i^2$ , $Y_i = \alpha Y_{i-1} + (dx/dt)_i^2$ , $X_i$  为平滑后垂直向地面运动速度的平方值; $Y_i$  为平滑后地面运动速度导数的平方值; $\tau_{pi}$  为  $i$  秒时测定的卓越周期; $x_i$  为记录的地面运动速度值; $\alpha$  为平滑参数,决定了平滑的速度,一般取为 0.999。Wolfe(2006)研究认为, $\tau_p$  是幅值和频率的非线性函数,对不同的幅值和频率分量有着不同的权重。Wu(2005)的研究结果显示, $\tau_p$  方法的准确性和稳定性与采样率及记录的预处理过程关系密切。当选用不同长度的时间窗或不同低通滤波器,特征周期的计算结果均会产生较大变化。对记录选用较大的高

<sup>①</sup> [http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/200811/t20081129\\_65774\\_6.htm](http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/200811/t20081129_65774_6.htm)

频截止频率进行低通滤波处理后,计算得出的特征周期结果会明显偏小。Olson 等(2005)研究则认为 P 波在 3~4s 窗内的最大  $\tau_p$  值与震级之间存在着线性关系。

针对  $\tau_p$  方法的局限性,Kanamori (2005) 提出另外一种改进后的 P 波特征周期计算方法,即  $\tau_c$  方法,其计算公式如下

$$\tau_c = 2\pi \frac{\int_0^{t_0} u^2(t) dt}{\sqrt{\int_0^{t_0} \dot{u}^2(t) dt}} \quad (2)$$

式中,积分区间  $[0, t_0]$  从台站触发开始计时,  $t_0$  的单位为 s,  $u(t)$  代表高通滤波后垂直分向地震动位移值。时间窗长度  $t_0$  的选择直接关系到预警信息发布的时间,如果  $t_0$  选择太长,预警信息发布的时间就会变短;如果  $t_0$  选择太短,则不能对地震规模进行准确的估算。Kanamori(2005) 结合各种因素综合考虑,建议一般情况下  $t_0$  取值为 3s。在实际应用中,不同学者对  $\tau_c$  方法计算震级有各自的研究结果。Wu(2005) 通过研究得出,在该段时间内,可以利用  $\tau_c$  参数较为准确地估算地震的大小,对其是否具有破坏性能够作出快速的判断。

运用巴什瓦(Parseval)定律对式(2)进一步分析表明,得出的  $\tau_c$  就是位移谱重心位置处的周期。采用中小地震的 Brune 震源模型可以证明,计算得出的周期参数  $\tau_c$  其实就是 P 波的拐角频率;对于破坏性较大的地震,  $\tau_c$  是确定地震大小的有效参数。因此,本文采用  $\tau_c$  方法进行计算。

## 2 数据选取和预处理

张红才等(2012)在地震预警震级计算方法研究中得出,  $\tau_c$  方法更适用于我国台网建设的现状,即使使用单个台站的波形数据也能得到比较稳定的震级估算值,推荐该方法作为我国地震预警系统中优先采用的震级算法之一。根据内蒙古测震台网台站间距较大、单个地震事件记录台站较少的实际情况,本文对震级估算仅采用  $\tau_c$  方法进行研究。

本文采用内蒙古测震台网地震波形数据,选取时间范围为 2016~2018 年,因内蒙古地区发生的较大地震较少,故选取  $M_L \geq 2.0$  地震波形数据(Kuyuk et al, 2013),共 120 条。本研究测定的震级标度为  $M_L$ 。所选地震事件和台站分布如图 1 所示,所用事件和记录情况统计如图 2 所示。

因地震发生的成因很复杂,对于同一个地震的不同台站的波形记录,所提取的特征参数不尽相同。但对同一个地震事件取多个台站的观测结果,用平均值进行相关研究,震级统计结果将更具有可靠性。鉴于目前内蒙古台网现状,我们选择了震中距在 200km 以内的台站记录参与分析计算。实际上地震预警需要更密集的观测网。

对于筛选得到的各台站事件记录数据,首先通过手动方式选取 P 波和 S 波到时,然后对台站垂直向的速度记录和加速度记录分别进行一次积分和二次积分,以获取位移时程,并对位移时程进行连续巴特沃斯(Butterworth)高通滤波器滤波处理(截至频率 0.075Hz),以移除由于积分操作带来的低频漂移影响。前人研究结果显示,在对数据进行滤波处理时,利用较多的滤波器极点数目可以有效地压制  $\tau_c$  值的发散性,从而提高震级估算结果的准确度。考虑到我国的测震观测数据相对于国外数据质量较差,而  $\tau_c$  参数对数据质量要求较高,因此,

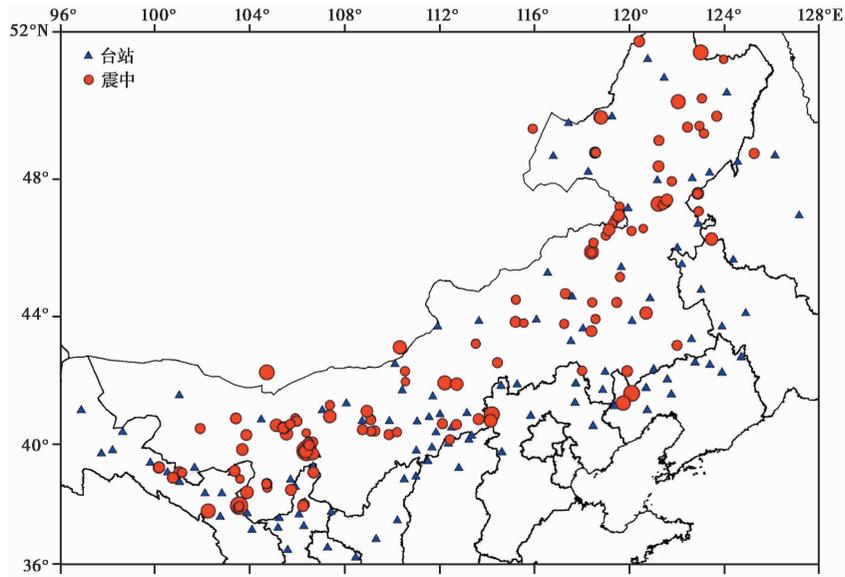


图 1 本文选取地震事件与台站分布

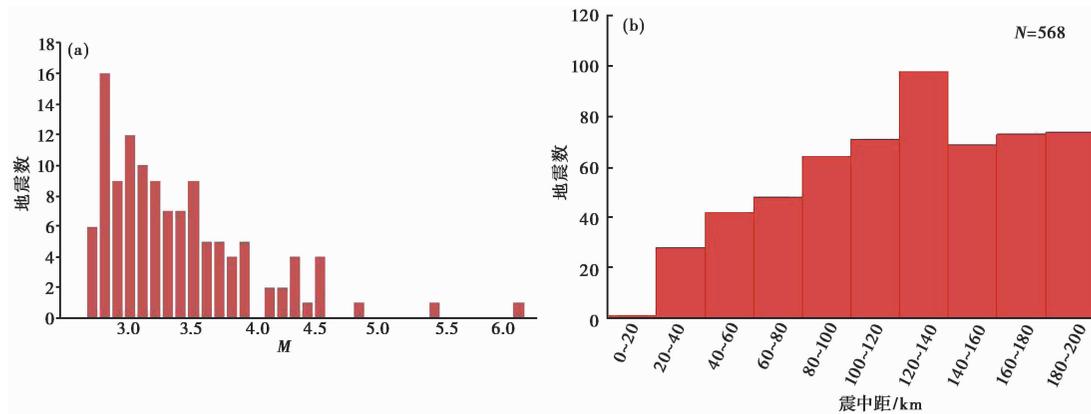


图 2 本文所用事件和记录情况统计

(a) 所用事件的震级情况；(b) 所用记录的震中距情况

$N$  为记录事件个数

本文在对数据进行预处理时采用的是含有 4 个极点的巴特沃斯高通滤波器，而不是通常使用的只含有 2 个极点的巴特沃斯高通滤波器。最后，根据 P 波后 3s 时间窗内垂直向位移时程和 P 波全波段(P 波到达后至 S 波之间)垂直向位移时程，计算周期参数  $\tau_c$  值。

### 3 $\tau_c$ 方法计算结果

本研究基于选取的内蒙古测震台网记录的地震事件波形，采用 P 波后 3s 时间窗内垂直向位移时程和 P 波全波段垂直向位移时程，分别按照不同梯度的地震震级进行计算，具体为  $M \geq 3.0$ 、 $M \geq 3.5$ 、 $M \geq 4.0$  和  $M \geq 4.5$  四个震级标度区间计算  $\tau_c$  值，再采用  $M = a + b \lg(\tau_c)$  拟合，分别得到了不同震级段 P 波 3s 内和 P 波全波段特征周期与震级之间的关系，拟合结果

如图3所示。实际应用时推荐采用  $M \geq 4.5$  的拟合公式,同时加上其他预警参数或地震动参数阈值判定,以避免由于小震震级估高带来的误报问题。

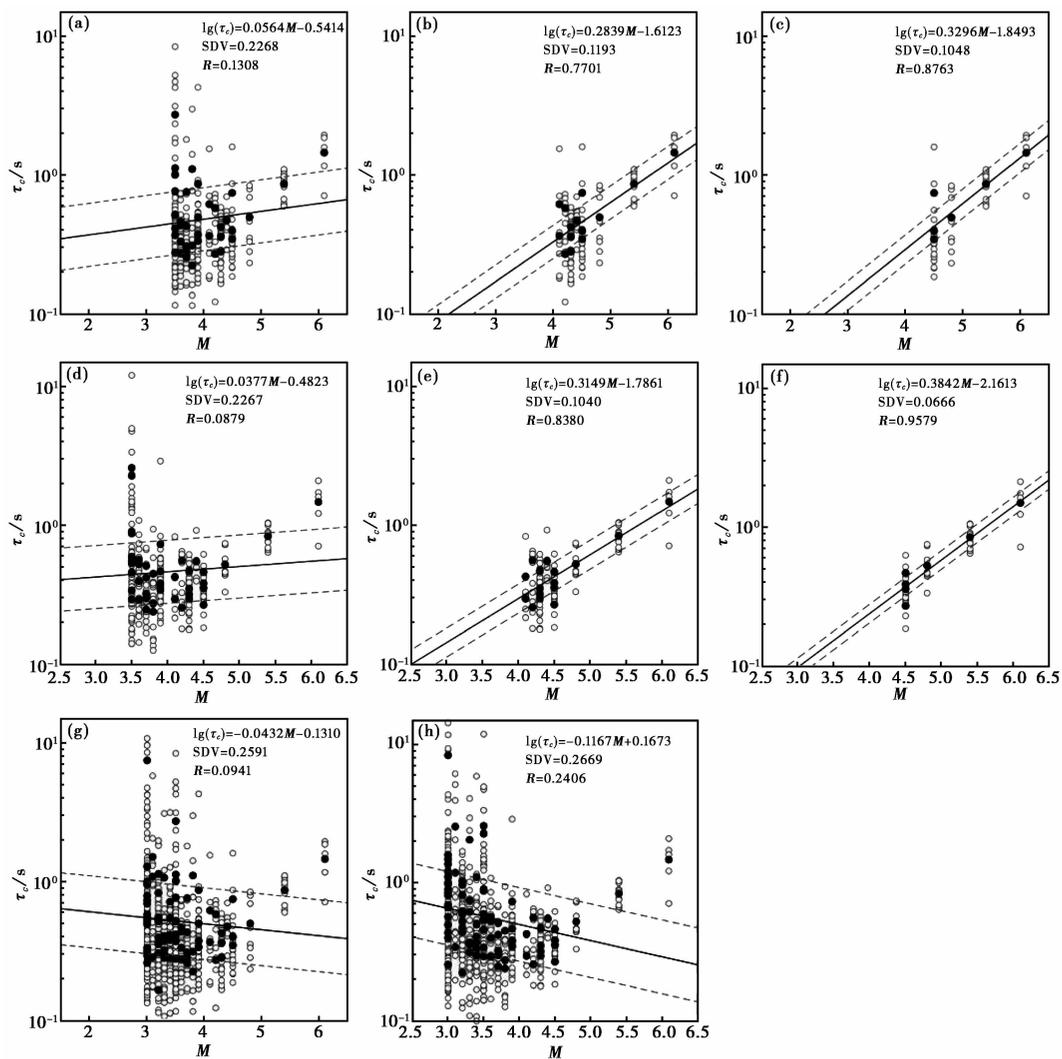


图3 特征周期  $\tau_c$  与震级在时窗 P 波后 3s(a)、(b)、(c)、(g) 和 P 波全波段(d)、(e)、(f)、(h) 的相关关系  
 圆点表示每条台站记录的  $\tau_c$  值;黑色实线表示线性拟合曲线;黑色虚线表示 1 倍标准方差;  
 实心圆为一次地震各个台站  $\tau_c$  值的均值;空心圆为每个台站计算得到的  $\tau_c$  值

图3(a)~3(c)为分别采用 P 波后 3s 时间窗内按照不同震级计算得出的  $\tau_c$  值与震级之间的拟合关系式。实际结果完全符合使用的一般规律:“小报大,大报小,不大不小还好”,即用 P 波前几秒处理地震震级往往是小地震时会偏大,大地震时会偏小,而中等地震还比较接近。当然这里指的是地震预警的最快的警报,也就是第一报,这其实是地震预警的技术局限性之一。后续的警报会越来越准确,但是这样发出去的警报将会使预警盲区越来越大,接收警报的人就越来越少,地震预警减少灾害的效能越来越小。图3(d)~3(f)分别为采用 P 波

全波段时按照不同震级计算得出的  $\tau_c$  值与震级之间的拟合关系式。从图 3 的结果可以看出,根据斜率、SDV(标准偏差)及  $R$ (相关系数)参数的对比,随着震级下限的增大,斜率随之增大。利用  $M \geq 4.0$  地震拟合时,上述 3 个参数的 3 条线斜率基本是一定的,周期参数  $\tau_c$  能较好地反映地震规模,且采用 P 波全波段计算得到的  $\tau_c$  值统计关系的离散性明显优于采用窗长 3s 的计算结果。此外,图 3(h)、3(i)分别为  $M \geq 3.0$  地震采用 P 波后 3s 时间窗和 P 波全波段计算得出的  $\tau_c$  值与震级之间的拟合关系式,从图 3 可以看出,  $2.0 \leq M < 3.5$  地震由于记录数据的信噪比较低,再加上小地震频谱复杂程度比大地震高,使得计算获得的  $\tau_c$  值变化范围过大。

特征周期  $\tau_c$  对于信噪比的要求较高,通常来说小地震频谱较高,但是小地震的频谱复杂程度要比大地震高,也就是说,如果地震波传输路径带有非线性介质,是可能产出多种频率成分的,因此使用  $\tau_c$  法往往会使小震误报为大震,因此较小的地震事件(如  $M < 4.0$ )不宜采用该方法估计预警震级。

#### 4 数据实际应用分析

为了将本文的研究结果应用到实际中,选取文中统计震例范围外的 2 次地震事件开展震级估算线下模拟,分别为 2017 年 6 月 3 日 18 时 11 分内蒙古阿拉善左旗  $M_L 5.4$  地震和 2016 年 6 月 23 日 08 时 37 分河北尚义  $M_L 4.5$  地震,分别按照  $M \geq 4.0$ 、 $M \geq 4.5$  全波段值和窗长 3s 的 P 波段信息拟合的特征周期  $\tau_c$  与地震震级间的关系式,对地震震级进行计算

$$\lg(\tau_c) = 0.3149M - 1.7861 \quad (3)$$

$$\lg(\tau_c) = 0.2839M - 1.6123 \quad (4)$$

$$\lg(\tau_c) = 0.3842M - 2.1613 \quad (5)$$

$$\lg(\tau_c) = 0.3296M - 1.8493 \quad (6)$$

$M \geq 4.0$  地震 P 波全波段与 P 波后窗长 3s 特征周期  $\tau_c$  与震级统计如式(3)、(4)所示,  $M \geq 4.5$  地震 P 波全波段与 P 波后窗长 3s 特征周期  $\tau_c$  与震级统计如式(5)、(6)所示。

图 4(a)、5(a)为利用式(3)、(4)计算的震级值,图 4(b)、5(b)为利用式(5)、(6)计算的震级值。结果显示,采用 P 波全波段值拟合  $\tau_c$  与地震震级间的关系式计算得出的震级,震级离散型更小,明显优于采用窗长 3s 的 P 波段拟合关系式得出的震级值。但由于现有内蒙古测震台网台间距过大,超过 150km,导致在对地震震级进行估算时,需要较长的时间。

此外,利用  $M \geq 4.5$  地震拟合关系式得出的震级值,更接近所选地震的最终编目震级,且震级总体变化趋势更为集中,偏差较小。

利用本文的全 P 波  $\tau_c$  方法,对于 5 级左右地震,在 P 波到达 20s 后即可接近实际地震震级,这对于快速测定地震震级具有实际应用价值。同时,对于地震预警,在 3s 之内的测定的震级仍然有较大误差,这符合上述的结论,而这个问题从地震观测原理来说,是由于 3s 内 P 波并不能代表地震释放的全部能量,所以用它来快速测定地震震级,会带来误差,这也恰恰是地震预警技术需要改进和突破的瓶颈。在目前这种情况下,地震预警技术发布策略也是需要引起注意的问题。

#### 5 讨论与结论

本文根据内蒙古测震台网地震目录,选取了内蒙古测震台网满足一定筛选条件的波形

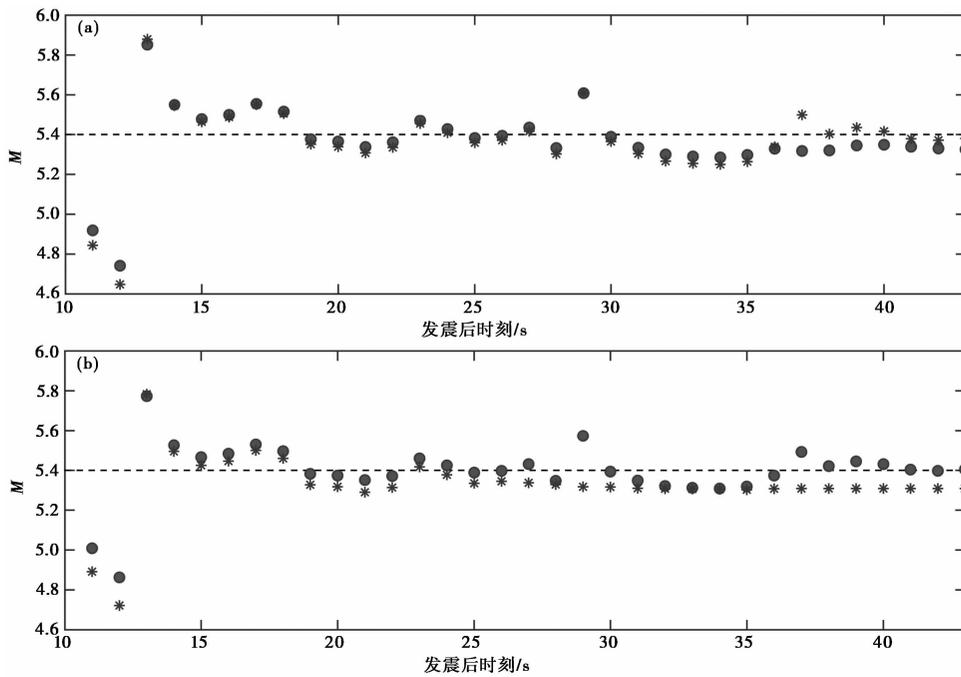


图4 内蒙古阿拉善左旗  $M_L 5.4$  地震震级拟合图

(a) 按照  $M \geq 4.0$  地震拟合公式得出; (b) 按照  $M \geq 4.5$  地震拟合公式得出

实点为 P 波全波段  $\tau_c$  拟合; \* 为 P 波后  $3\sigma\tau_c$  拟合

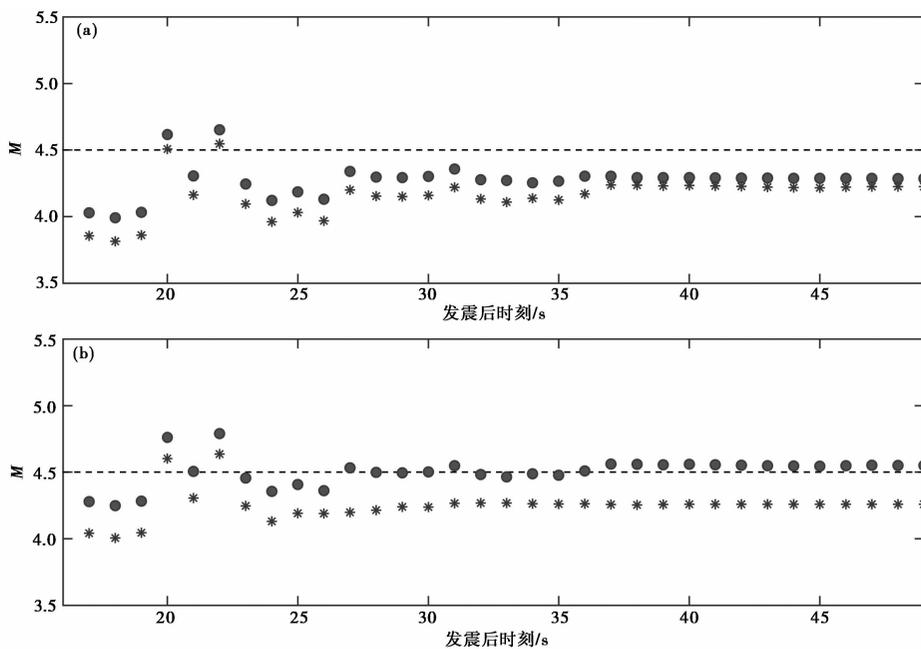


图5 河北尚义  $M_L 4.5$  地震震级拟合图

(a) 按照  $M \geq 4.0$  地震拟合公式得出; (b) 按照  $M \geq 4.5$  地震拟合公式得出

实点为 P 波全波段  $\tau_c$  拟合; \* 为 P 波后  $3\sigma\tau_c$  拟合

记录,对所选记录进行人工识别 P 波和 S 波震相,之后对 P 波后 3s 时间窗内和 P 波全波段的垂直向位移时程进行  $\tau_c$  值计算,得出在  $M \geq 3.0$ 、 $M \geq 3.5$ 、 $M \geq 4.0$  和  $M \geq 4.5$  时,P 波 3s 时间窗和 P 波全波段的  $\tau_c$  值与地震震级之间的关系。统计结果显示,随着计算  $\tau_c$  值时选取震级的增大,拟合结果直线的斜率也随之增加。因为  $\tau_c$  方法对数据噪声要求比较高,因此,当采用  $M \geq 3.0$ 、 $M \geq 3.5$  地震事件记录时,拟合曲线斜率很小,使得该参数失去了实时震级估算的意义。当采用  $M \geq 4.0$  事件记录计算时, $\tau_c$  值更为收敛,P 波全波段的  $\tau_c$  值较 P 波 3s 时间窗计算值收敛性更好,拟合相关系数更接近 1。由于本文没有 7 级以上地震的实例,因此无法用此方法对大地震进行震级计算的验证。尽管如此,我们获得了大量实际观测和计算的宝贵数据,综合研究表明:

(1) 特征周期  $\tau_c$  能够对预警地震震级作出较好的估计,P 波全波段的  $\tau_c$  值较 P 波 3s 时间窗计算值收敛性更好。实验表明 P 波全波段  $\tau_c$  方法对于 5 级左右地震,在 P 波到达 20s 以后即可接近实际地震震级,但较小的地震事件(如  $M < 4.0$ )不适宜采用该方法估计预警震级,这对于快速测定地震震级具有实际应用价值,可以大大提高区域地震台网地震速报的速度。但是,本研究表明,利用  $\tau_c$  方法无法在地震预警要求的极短时间内(例如 3s)测量计算出较准确的震级,也就是说,这个方法在地震到达台站 15~20s 之内测量震级的误差还是比较大的。这个现象还表明,地震 P 波前 3s 或者 P 波全波段的信息还无法代表整个地震能量释放的信息,因此无法代表地震准确的震级。在这种情况下,最初发出的地震预警信息中地震震级误差较大是必然的,这个问题就是我们常说的目前地震预警技术的局限,也是地震预警技术在震级快速测定上需要不断改进之处。

(2) 对于地震预警,即使理想状态下可以很快地测算出准确的地震参数,也很难预估出警报接收地的震动强度,这里同样受到地震破裂过程、地震波传播特性、警报接收地当地场地效应等诸多因素的影响。因此,地震预警的警报发布需要根据目前地震震级测定水平及地震预警接收地的地震烈度估计水平等复杂的情况,确定警报发布的策略和方式。单一的周期参数在一定程度上能够反映地震的规模,但不能反映地震的全部特征。因此,预警震级的估算应结合多个参数综合判定。

(3) 由于内蒙古自治区内台站少、分布广,目前平均台间距超过 150km,导致在较小地震发生后,大部分台站记录的信噪比较低,使得利用 P 波特征周期计算预警震级的稳定性和可靠性受到限制,预警盲区较大。但是,随着国家地震烈度速报与预警工程的建立,台网密度将会大大增加,盲区的范围将大大缩小,对预警震级的准确测定会有极大的提升。

只有密集的地震预警网才能发挥地震预警的效益,一般认为地震预警网的台站密度应为台间距 10km,这需要大量采用低成本的 MEMS 传感器。尽管如此,对于内蒙古地区应该根据实际情况来布设的,对于人口稠密的地区和大中城市,应该布设密集的地震预警台网,当然,对于高烈度区域或者具有发生大地震的危险区域,也需要布设密集地震预警网,一方面,对于该地区发生大地震可以快速预警,另一方面,也是对远处人口稠密地区的守备式地震预警。对于人口稀少和无人地区则无需密集的地震预警网。

(4) 综上所述,地震预警技术在实际应用中,存在对地震震级快速测定的不确定性,通常是“小报大,大报小,不大不小还好”及“快就不准”,这必定影响地震预警参数计算的不确定性,导致在指定对应的阈值时会出现较大的偏差。Minson 等(2018、2019)指出在使用较低

的预警参数阈值时,目前采用以快速发出警报优先的策略,对于经过有效训练的公众来说,虽然收到的误报事件会很多,但是却能将预警效能最大化,因为公众在收到预警信息后所采取的动作(如蹲下、掩护、抓紧)的成本投入非常低。对于内蒙古地区而言,在实际部署和运行地震预警系统时,也可以采用类似的方法,以便有效提高预警系统的效能。对于其处理策略和方法,今后还需进一步开展研究。

本文主要针对内蒙古地区开展预警参数关系式研究,采用的全 P 波段的方法也是 Peng 等(2017)所采用的一种新方法。这种方法只是在做拟合关系时的应用,实际在做线下模拟和应用至地震预警系统时,采用的仍然是 P 波触发后第一秒数据就开始持续应用的模式,一直到 S 波截止,不同的是采用新的拟合关系式进行震级估算。由于缺乏  $M \geq 7.0$  大地震的实例检测,本文的研究结果仅限于中强以下地震。

**致谢:** 感谢彭朝勇研究员在本文撰写过程中给予的指导,感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见。

## 参考文献

- 陈颢,2004. 2020 年中国地震科学和技术发展研究. 见:2020 年中国科学和技术发展研究暨科学家讨论会论文集(下册). 北京:中国科学技术协会.
- 金星,张红才,李军,等,2012a. 地震预警连续定位方法研究. 地球物理学报, **55**(3):925~936.
- 金星,张红才,李军,等,2012b. 地震预警震级确定方法研究. 地震学报, **34**(5):593~610.
- 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,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.
- 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.
- Allen R M, Kanamori H, 2003. The potential for earthquake early warning in southern California. *Science*, **300**(5620):786~789.
- Bose M, Hauksson E, Solanki K, et al, 2009. A new trigger criterion for improved real-time performance of onsite earthquake early warning in southern California. *Bull Seismol Soc Am*, **99**(2A):897~905.
- Kanamori H, 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **33**:195~214.
- Kuyuk H S, Allen R M, 2013. A global approach to provide magnitude estimates for earthquake early warning alerts. *Geophys Res Lett*, **40**(24):6329~6333. doi:10.1002/2013GL058580.
- Minson S E, Baltay A S, Cochran E S, et al, 2019. The Limits of earthquake early warning Accuracy and Best Alerting strategy. *Sci Rep*, **9**(1):2478.
- Minson S E, Meier M A, Baltay A S, et al, 2018. The limits of earthquake early warning: Timeliness of ground motion estimates. *Sci Adv*, **4**(3): eaaq0504.
- Nakamura Y, 1988. On the Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS). In: Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-Kyoto: 9WCEE Organizing Committee, 673~678.
- Olson E L, Allen R M, 2005. The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, **438**(7065):212~215.
- 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, 2005. Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the Beginning of P Waves. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(3):1181~1185.
- Peng C Y, 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.

## Application of $\tau_c$ Method in the Early Warning Magnitude Calculation in Inner Mongolia Region

*Hao Meixian*<sup>1)</sup> *Zhou Yinxing*<sup>2)</sup> *Zhang Jianzhong*<sup>1)</sup> *Zhang Ke*<sup>1)</sup> *Yin Zhanjun*<sup>1)</sup>

1) Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China

2) Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

**Abstract** Earthquake early warning (EEW) is one of the effective means to reduce earthquake disaster. Magnitude measurement is the most difficult and important parameter in the early warning system. Considering the regional characteristics of magnitude estimation method for earthquake early warning, we used 120 seismic waveform data of  $M_L \geq 2.0$  and above of Inner Mongolia Seismological Network from 2016 to 2018, and calculated the characteristic period parameters by using the vertical displacement time history in P-wave 3S time window and the vertical displacement time history in P-wave full band, respectively. The formulas for calculating earthquake warning magnitude are obtained, and the results are compared and analyzed in this paper. We found that the results obtained by P-wave full-band relation are more convergent than those calculated by P-wave 3S fixed time window, and the correlation coefficient fitted by the relation is more close to 1, which can make a better estimation of the magnitude of early warning earthquakes. Finally, combined with the data processing results, the relationship between the speed and accuracy of earthquake early warning is discussed.

**Keywords:** Earthquake early warning;  $\tau_c$  method; Magnitude estimation