

张红才, 金星, 李军, 陈智勇. 2017. $P_d-\tau_c$ 相容性检验方法在触发事件判别分析中的应用. 地震学报, 39(1): 102-110. doi:10.11939/jass.2017.01.009.

Zhang H C, Jin X, Li J, Chen Z Y. 2017. Application of $P_d-\tau_c$ compatibility criterion to distinguishing triggered events. Acta Seismologica Sinica, 39(1): 102-110. doi:10.11939/jass.2017.01.009.

$P_d-\tau_c$ 相容性检验方法在触发事件判别分析中的应用^{*}

张红才^{1),*} 金星^{1,2)} 李军¹⁾ 陈智勇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 结合福建地区地震预警系统的运行情况和处理能力, 利用日本 KiK-net 台网和福建地震台网记录的天然地震事件和人工爆破事件实测数据, 探讨了 $P_d-\tau_c$ 相容性检验方法在触发事件类型实时判别中应用的可行性. 结果表明, $P_d-\tau_c$ 相容性检验方法能够较好地地区分大震级地方震与误触发事件, 也能对远震事件进行粗略判别, 但对于小震级地方震和人工爆破事件则无法有效判别. 随后, 以 $P_d-\tau_c$ 相容性检验结果为基础, 本文设定强度参数 $P_d=10^{-3}$ cm 为界线, 即可从众多触发事件中甄选出可能产生破坏的大震级地方震事件. 本文方法有助于提高触发事件类型判别结果的可靠性、预警系统的处理效率和系统产出信息的准确度.

关键词 地震预警 $P_d-\tau_c$ 相容性 触发事件判别

doi:10.11939/jass.2017.01.009

中图分类号: P315.01

文献标志码: A

Application of $P_d-\tau_c$ compatibility criterion to distinguishing triggered events

Zhang Hongcai^{1),*} Jin Xing^{1,2)} Li Jun¹⁾ Chen Zhiyong¹⁾

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

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

Abstract: Combining the operation status of the earthquake early warning (EEW) system in Fujian Province, this paper discusses the feasibility of the $P_d-\tau_c$ compatibility criterion in discrimination of triggered events, based on seismic records of KiK-net in Japan and seismic monitoring networks of Fujian Province, in which both spontaneous earthquakes and artificial explosion events are included. The results show that, for large local earthquakes and false triggering events, $P_d-\tau_c$ criterion is quite reliable with less error. Also, teleseismic earthquake events may be roughly judged by the criterion. But artificial explosions and/or small magnitude local earthquakes cannot be effectively distinguished only by this criterion. Furthermore, based on the $P_d-\tau_c$ compatibility

* 基金项目 地震科技星火计划(XH16020Y)和国家科技支撑计划(2014BAK03B02)资助.

收稿日期 2016-03-14 收到初稿, 2016-05-17 决定采用修改稿.

▲ 通讯作者 e-mail: zhanghc@fjea.gov.cn



test results, this paper sets an intensity test standard by the parameter $P_d = 10^{-3}$ cm, by which those destructive earthquakes can be identified more accurately. The present method will help to improve the reliability of triggered events discrimination, promote processing efficiency of the whole EEW system, eventually generate more accurate seismic alert message.

Key words: earthquake early warning; P_d - τ_c compatibility criterion; triggered events discrimination

引言

汶川大地震后,为全面掌握地震预警的相关技术,福建省地震局率先开展了地震预警系统的算法研究、软件开发及在线试验.2012年12月地震预警系统研发完成并开始在福建地震台网示范运行,自2015年1月起为福建省地震局工作人员提供试验性地震的预警短信服务.示范运行期间,该系统已成功处理并发布了多个福建、台湾及周边地区发生的地震事件(Zhang *et al.*, 2016),取得了良好的社会效益.

由于地震预警的时效性和准确性要求较高,这使得传统的地震学方法很难直接应用于地震预警系统,因此需要研发专门的算法以满足该系统的分析处理需求(张红才等, 2013).此外,地震预警系统的处理过程也非常复杂,包含多个关键处理模块,例如地震实时分析检测、实时地震定位、地震震级测定、预警目标区地震烈度预测、地震预警信息发布.其中,地震实时分析检测环节是从实时获取的地震动波形记录中提取出震相到时信息,并据此对触发事件进行判别.该环节是地震预警系统的关键所在,将直接影响到后续环节处理结果的准确性和可靠性.

对福建地区现有地震预警系统在线处理结果的分析表明,采用 STA/LTA(short term averaging/long term averaging)算法平均粗略拾取结合 AIC(Akaike information criterion)精确拾取的震相识别方法(马强, 2008; 马强等, 2013)即可对初至震相进行可靠的分析和判断,其震相到时分析结果的精度也较高.由于该预警处理系统现阶段主要考虑采用震相关联算法从拾获震相中挑选和组合出满足地震动走时规律的触发事件,并未对触发事件类型进行判别,因此处理结果中仍存在一些包含近场人工爆破和远震事件的情形,不仅是对有限计算机资源的浪费,而且还有可能造成地震预警误报事件的产生.

鉴于此,本文拟采用 P_d - τ_c 相容性检验方法,利用预警系统实时产生的相关信息对触发事件的类型进行判断,并从中判别出具有一定破坏性的天然地震事件,尽可能排除误触发、人工爆破、小地震等事件的干扰,进而提高地震预警系统的处理效率和预警信息发布的准确性、可靠性.

1 方法

P_d 和 τ_c 是两个在地震预警震级计算研究中提出和发展起来的参数(Kanamori, 2005; Wu, Kanamori, 2005, 2008; Wu, Li, 2006; Zollo *et al.*, 2008; 金星等, 2012; 张红才等, 2012).其中,参数 P_d 定义为垂直向位移记录经 0.075 Hz 高通滤波后在 P 波后 3 s 时间窗口内的峰值,参数 τ_c 则可由下式计算得到:

$$\tau_c = \frac{2\pi}{\sqrt{r}}, \quad r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt}, \quad (1)$$

式中, $u(t)$ 和 $\dot{u}(t)$ 分别为 0.075 Hz 高通滤波后的位移和速度时程; 积分区间 $[0, \tau_0]$ 即从 P 波到达开始计时, 积分上限 τ_0 (积分时长) 一般取为 3 s (Kanamori, 2005). 参数 τ_c 与地震震级 M 之间的统计关系式一般可写成

$$M = a_1 \lg \tau_c + b_1 \pm \sigma_1, \quad (2)$$

式中, a_1 和 b_1 为拟合系数, σ_1 为拟合公式的方差. 应用巴什瓦 (Parseval) 定理对式 (1) 进一步分析表明, 计算得到的 τ_c 值与位移谱重心位置处的周期相对应, 因此 τ_c 值大致相当于 P 波首脉冲的宽度 (Wu, Kanamori, 2005). 假定前 3 s 内的波形全部为 P 波, 采用中小地震的 Brune 震源模型则可以证明, τ_c 值也与 P 波的拐角周期相一致 (张红才, 2013).

参数 P_d 不仅与地震震级 M 之间存在较好的相关性, 与地震动速度峰值 PGV 也有良好的统计关系, 因此参数 P_d 也可以作为预警目标区地震烈度估计的判据之一 (Wu *et al.*, 2007), 其与 PGV 之间的统计关系式一般表示为

$$\lg \text{PGV} = a_2 \lg P_d + b_2 \pm \sigma_2. \quad (3)$$

目前, 在线试运行的美国加州地震预警系统 ShakeAlert 中即采用了 Hellweg 等 (2010) 的研究成果计算地震震级, 并据此估计地震是否具有破坏性等 (Serdar *et al.*, 2014). Böse 等 (2009) 根据 P_d 和 τ_c 两个参数的不同属性并结合地震动速度峰值 PGV 随震级 M 和震中距 R 的衰减关系

$$\lg \text{PGV} = a_3 M + b_3 \lg(R + 10) + c_3 \pm \sigma_3 \quad (4)$$

提出了判别触发信息是否属于地震事件的方法, 即 P_d - τ_c 相容性检验方法. 首先, 将式 (4) 中的 PGV 转换为 P_d 参数随震级和震中距衰减的关系式, 即

$$\lg P_d = a' M + b' \lg(R + 10) + c' \pm \sigma'; \quad (5)$$

然后, 将其中的震级 M 项转换为由 τ_c 参数表示, 即

$$\lg P_d = a'' \lg \tau_c + b'' \lg(R + 10) + c'' \pm \sigma'', \quad (6)$$

由此即可得到 P_d - τ_c 相容性检验关系, 如图 1 所示.

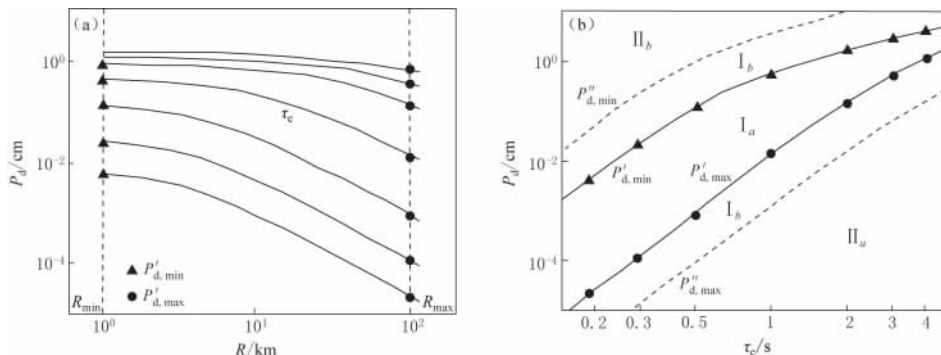


图 1 P_d - τ_c 相容性检验关系推导示意图

(a) P_d 随震中距 R 及 τ_c 的衰减; (b) P_d - τ_c 相容性检验关系(实线)及扩展控制线(虚线)

Fig. 1 Schematic diagram of derivation of P_d - τ_c compatibility relations

(a) P_d attenuates with epicentral distance R and τ_c value; (b) P_d - τ_c compatibility test relations (solid lines) and extension control lines (dashed lines)

图 1b 中, 两条实线(P_d 值分别为 $P'_{d, \min}$ 和 $P'_{d, \max}$) 分别为根据记录震中距 R_{\min} 和 R_{\max} 所确定的上下两条界线, 两条虚线(P_d 值分别为 $P''_{d, \min}$ 和 $P''_{d, \max}$) 则分别表示根据统计关系式的方差 σ'' 所确定的扩展界线. 由图 1b 可见, P_d - τ_c 相容性检验方法将检测区域划分为 I_a , I_b , II_a , II_b 等 4 个象限. 其中, I_a 区域中的 P_d 和 τ_c 两个参数充分相容, I_b 区域中 P_d 和 τ_c 两个参数部分相容, 而处于 II_a 和 II_b 两个区域中的参数则存在不相容的情况, 据此即可对触发事件的类型作出判别. 本文拟在已有工作(张红才, 2013; 张红才, 金星, 2014)的基础上, 收集日本 KiK-net 台网的历史地震事件记录和福建地震台网 2015 年度的编报事件, 研究 P_d - τ_c 相容性检验方法用于触发事件类型判别的可行性.

2 数据

本文主要收集两部分实测事件记录用于相关讨论分析: 其一是日本 KiK-net 台网记录到的 2008 年 1 月—2015 年 10 月的 116 次陆上及近海浅源(<50 km)地震事件(日本气象厅震级 $M_j \geq 4.0$)(图 2a), 最大震级事件为 2008 年 6 月 14 日宫城岩手县 $M_j 7.2$ 地震; 其二是福建地震台网 2015 年全年记录到的 1546 次事件(图 2b), 包括福建省及其周边地区的天然地震事件 166 次和人工爆破事件 1261 次以及台湾及其它区域的天然地震事件($M \geq 3.0$)119 次.

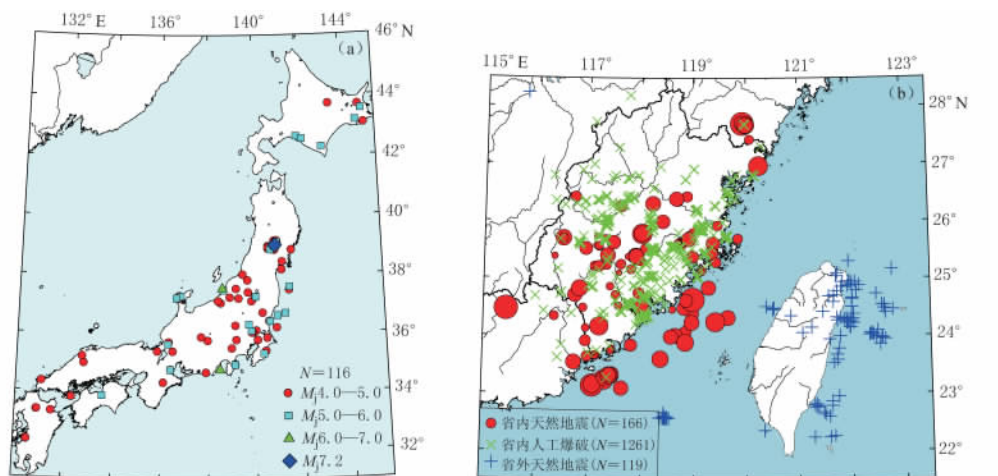


图 2 本文研究所使用地震事件分布情况

(a) 日本 KiK-net 台网 116 次事件分布; (b) 福建省及周边地区 1546 次事件分布

Fig. 2 Distribution of earthquake events used in this study

(a) Distribution of 116 events recorded by KiK-net; (b) Distribution of events within and beyond Fujian

Province, where red dots and blue plus signs represent spontaneous earthquakes within and beyond Fujian Province, respectively, and green crosses represent artificial explosion events in Fujian Province

由于地震预警主要针对发生于近场且可能产生一定破坏的大震级地震事件进行处理和发布, 因此本文选取的日本 KiK-net 台网事件和福建省及其周边地区天然地震事件均发生于陆域及近海地区, 且均有震中距较近的台站记录. KiK-net 台网事件的震级均较大, 而福建及其周边地区天然地震事件的震级普遍为 $M_L < 2.0$. 本文即利用这两种不同震级大小的事件, 来研究 P_d - τ_c 相容性方法对不同强度事件的检测区分效果. 与此同时, 还利用发生

在台湾地区及福建省外其它地区的天然地震事件分析验证 $P_d\text{-}\tau_c$ 相容性检验方法是否可用于排除远震事件的影响. 此外, 如前文所述, 由于未对触发事件类型进行判别, 福建地区现有预警系统的处理结果中尚存在人工爆破事件; 本文则基于这些事件记录, 分析 $P_d\text{-}\tau_c$ 相容性检验方法对该类事件的区分效果. 为保证参数 P_d 和 τ_c 计算结果的准确性和可靠性, 对于 KiK-net 台网事件, 本文仅选取震中距 $R<100\text{ km}$ 且信噪比(P 波后 3 s 与前 3 s 的均方根速度值之比) $\text{SNR}\geq 3$ 的台站记录参与分析计算, 共计 278 条; 对于福建地震台网记录的省内及其周边地区地震和爆破事件, 则从中选择 $R<100\text{ km}$ 且 $\text{SNR}\geq 3$ 的首个记录台站参与分析计算; 对于震中位于福建省外的地震事件, 仅分析福建地震台网首个记录台站中 $\text{SNR}\geq 3$ 的台站. 此外, 本文还利用记录情况较好的福州城门台(FZCM)的噪声记录, 采用人工随机指定的方式, 从 2015 年 3 月的连续波形记录中挑选出 3587 段波形, 模拟 $P_d\text{-}\tau_c$ 相容性方法用于误触发信息判别时的应用效果.

3 结果与分析

基于以上数据, 本文分别计算得到了大震级地方震、小震级地方震、近震、人工爆破、模拟误触发等情况下的 P_d 值和 τ_c 值, 并应用 $P_d\text{-}\tau_c$ 相容性检验方法进行分析, 结果如图 3 所示.

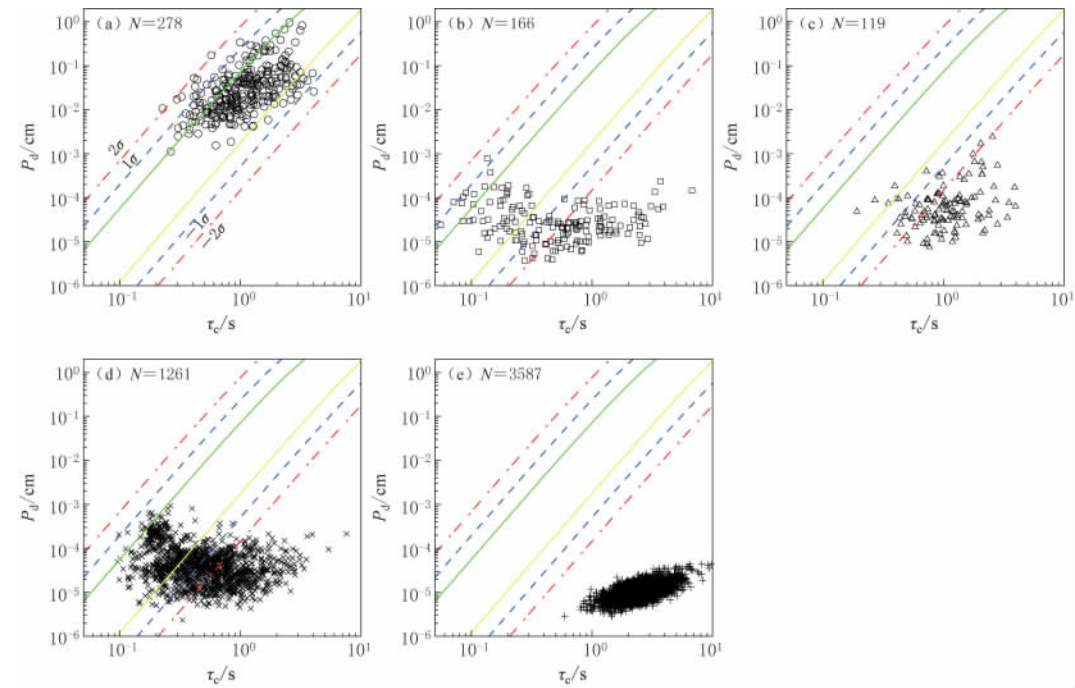


图 3 基于不同事件类型的 $P_d\text{-}\tau_c$ 相容性分析结果

(a) KiK-net 台网事件; (b) 福建省及其周边地区小震级天然地震事件; (c) 台湾及其周边地区天然地震事件; (d) 福建省及其周边人工爆破事件; (e) 模拟误触发事件

Fig. 3 Test results of $P_d\text{-}\tau_c$ compatibility criterion based on different types of events
(a) KiK-net events; (b) Earthquake events with small magnitude within Fujian Province and its vicinity;
(c) Earthquake events within Taiwan region and its vicinity; (d) Artificial explosion events within Fujian Province and its vicinity; (e) Simulated false trigger events

图 3 中, 上下两条实线同样为根据分析所使用观测记录的震中距情况(0—100 km)所确定的两条控制线, 而与其相邻的虚线则是由 1 倍拟合方差确定的两条扩展控制线, 点画线则为由 2 倍拟合方差确定的扩展控制线(张红才, 金星, 2014)。

由图 3 可见: 基于 KiK-net 台网大震级事件计算得到的 P_d 值和 τ_c 值均较大且绝大部分均充分相容, 大都处于 I_a 象限, 即两条实线控制线之间(图 3a), 这与其它几种情况存在显著差异, 因而应用 P_d - τ_c 相容性检验方法能够较清楚地进行区分; 而在模拟误触发情况下, 计算得到的 τ_c 值较大而 P_d 值则较小, 两个参数互不相容, 且都处于 2 倍扩展控制线之外, 因而 P_d - τ_c 相容性检验方法也可应用于排除误触发干扰中(图 3e); 远震情况下(图 3c), 大部分数据均处于控制线之外, 一部分原因是记录台站的震中距已超过控制线所表示的震中距(100 km), 另一部分原因则是随着震中距的增大, 记录的信噪比有所降低, 一定程度上影响到 P_d 和 τ_c 的计算结果的准确性, 这也可能是最主要的影响因素。以 2008 年 6 月 14 日宫城岩手县 $M_j 7.2$ 地震为例, 分别计算 212 个不同震中距台站的 τ_c 值和 P_d 值, 并应用 P_d - τ_c 相容性检验关系进行分析, 如图 4 所示, 可见其结果与上述分析相一致。综上可见, 相同震级条件下, 远震事件的 τ_c 值与近场 KiK-net 事件的 τ_c 值差别不大, P_d 值则随震中距的增大而减小, 这说明 τ_c 参数与震中距无关, 因而能够用于预警震级的估计。在震中距未知的情况下, 可综合利用 P_d 和 τ_c 两个参数对事件是否为远震事件作出粗略判断。

P_d - τ_c 相容性检验方法无法有效区分小

震级地方震与人工爆破事件。对比图 3b 与图 3d 可见, 两种事件的 P_d - τ_c 相容性检验结果较为近似, 即 τ_c 值普遍较小且分布范围较广(0.1—4.0 s), 而 P_d 值则大都小于 10^{-3} cm。因此, 仅采用该方法无法实现小震级地方震与人工爆破事件的实时准确判别。实际上, 由于天然地震事件与人工爆破事件的波形记录及其特征均较为相似, 应用单一特征参数难以自动准确区分(王婷婷, 边银菊等, 2011)。有经验的分析人员则主要从 P 波初动方向、P—S 波最大振幅比、面波是否发育、尾波持续时间、波形特征等方面进行判别。为达到自动判别的目的, 研究人员也提出了多种算法, 例如小波变换(黄汉明等, 2010)、多元统计分析法(张晁军等, 2004)等, 但这些方法大都是离线算法, 需要利用整条波形记录进行处理, 且自动识别结果的准确性也并不理想, 这充分说明了人工爆破事件与小震级天然地震事件自动识别的困难性和复杂性。福建地区在线示范运行的地震预警系统中, 为尽量避免将人工爆破事件误报为大震级地方震, 采用“ M - I_1 ”强度准则对正式发布事件进行筛选(Zhang et al, 2016), 即当且仅当估计震级 $M \geq 3.0$ 且至少一个台站实测地震仪器烈度值(金星等, 2013) $I_1 \geq 3$ 时, 预警系统才会产出和发布预警信息。由于地震仪器烈度算法综合考虑了三

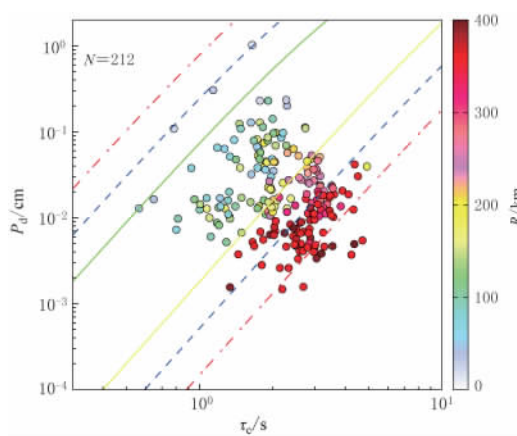


图 4 宫城岩手县 $M_j 7.2$ 地震不同震中距 R 台站的 P_d - τ_c 相容性分析结果

Fig. 4 P_d - τ_c compatibility test results based on the records of the $M_j 7.2$, Iwate-Miyagi, earthquake from the stations with different epicentral distance R

分向地震动峰值、频谱、持时等因素的影响,而人工爆破事件的地震仪器烈度值大都难以达到或超过 3 度,故应用该准则能够较好地排除大部分人工爆破事件的影响。

本文研究借鉴“ $M-I_1$ ”准则思想,在 $P_d-\tau_c$ 相容性检验方法的基础上设定 $P_d=10^{-3}$ cm 为界线,即可对触发事件的类型进行可靠的分析判别,如图 5 所示。可见,本文计算的小震级地方震事件、人工爆破事件、近震事件、误触发事件的 P_d 均小于 10^{-3} cm,因此以该值为界线即可以从众多触发事件中挑选出具有一定强度并可能产生破坏的事件。如上所述,参数 P_d 不仅可用于地震震级的估算,还与峰值地震动参数存在较好的统计关系。Wu 等(2007)的研究结果显示,当 $M_w \geq 6.0$ 时近场台站的 P_d 值大都大于 0.1 cm,因此建议以 $P_d=0.1$ cm 为界线值作为启动原地预警的主要判据之一。总之,参数 P_d 作为一个良好的强度特征指标,可在预警系统中发挥重要作用。

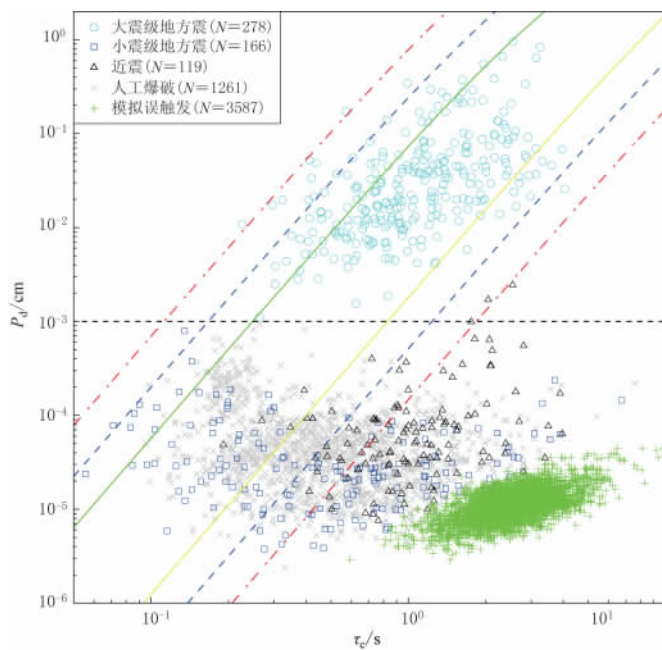


图 5 设定 $P_d=10^{-3}$ cm 为界线对触发事件类型进行检验的结果

Fig. 5 Triggered events test after setting a threshold value of $P_d=10^{-3}$ cm

4 讨论与结论

本研究以福建地区现有地震预警系统为基础,结合预警系统在线运行中需要解决的相关问题,利用 $P_d-\tau_c$ 相容性检验分析方法,收集不同区域历史地震事件、人工爆破事件等观测数据,研究该方法用于实时判别不同触发事件类型的可行性。研究结果表明, $P_d-\tau_c$ 相容性检验方法不仅能够较好地地区分大震级地方震、误触发事件,也能对近震事件进行粗略的判别,但对于小震级地方震及人工爆破事件则无法有效判别。在此基础上,设定参数 $P_d=10^{-3}$ cm 为强度指标,即可从众多的触发事件中挑选出发生在近场且可能产生一定破坏的大震级事件,提高触发事件类型判别结果的可靠性,最终提高地震预警系统的处理效率。

尽管本研究中的 $P_d-\tau_c$ 相容性检验控制线是依据日本相关资料分析所得,将其直接应用于福建地区时可能会存在适用性方面的问题。但从目前的实际应用检验效果来看,根据

该控制线可以较好地触发事件类别进行判别, 从一个侧面说明了该方法的有效性. 另一方面, 由于福建地区相关观测数据较为欠缺, 尤其是大震级事件记录几乎空白, 这也使得直接获取更准确的相容性检验控制线存在诸多困难. 因此, 建议直接使用本文提出的相容性控制线来判别事件类型.

此外, 尚存在一些问题值得进一步讨论和研究. 首先, 由于本研究所用数据有限, $P_d-\tau_c$ 相容性检验方法的有效性和可靠性尚需更多事件数据的验证和分析; 其次, 本研究是基于离线事件数据进行的, 因此情形大都较为简单, 而预警系统实际在线运行中的情况则复杂得多, 本文相关方法有可能存在不完全适用的情况. 因此, 需要通过长期的在线测试, 发现和总结需要改进和完善的部分, 并有针对性地展开研究, 从而改善该方法的实际应用效果. 另外, 本研究中提出的界线值 $P_d=10^{-3}$ cm 是根据经验所得, 该值是否合适尚需进一步讨论和研究.

感谢 3 位审稿专家提出宝贵修改意见和建议.

参 考 文 献

- 黄汉明, 边银菊, 卢世军, 蒋正锋, 李锐. 2010. 天然地震与人工爆破的波形小波特征研究[J]. 地震学报, 32(3): 270–276.
- Huang H M, Bian Y J, Lu S J, Jiang Z F, Li R. 2010. A wavelet feature research on seismic waveforms of earthquakes and explosions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 32(3): 270–276 (in Chinese).
- 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).
- 金星, 张红才, 李军, 康兰池, 韦永祥, 马强. 2013. 地震仪器烈度标准初步研究[J]. 地球物理学进展, 28(5): 2336–2351.
- Jin X, Zhang H C, Li J, Kang L C, Wei Y X, Ma Q. 2013. Preliminary study on instrumental seismic intensity standard [J]. *Progress in Geophysics*, 28(5): 2336–2351 (in Chinese).
- 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 Earthquake Mechanics, China Earthquake Administration: 14–39 (in Chinese).
- 马强, 金星, 李山有, 陈绯雯, 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).
- 王婷婷, 边银菊. 2011. 识别天然地震和人工爆破的判据选择[J]. 地震地磁观测与研究, 32(6): 62–67.
- Wang T T, Bian Y J. 2011. Criterion selection of earthquake and explosion recognition[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 32(6): 62–76 (in Chinese).
- 张晔军, 王丽萍, 马丽, 李勇, 黄建平, 尹宝军. 2004. 多元统计分析法识别地震与爆破[C]//中国地球物理学会第 20 届年会会议文集. 西安: 中国地球物理学会: 233.
- Zhang C J, Wang L P, Ma L, Li Y, Huang J P, Yin B J. 2004. Discriminate earthquakes and explosions by using the multivariate statistical analysis method[C]//*Proceedings of 20th Annual Meeting of Chinese Geophysical Society*. Xi'an: Chinese Geophysical Society: 233 (in Chinese).
- 张红才, 金星, 李军, 韦永祥, 马强. 2012. 地震预警震级计算方法研究综述[J]. 地球物理学进展, 27(2): 464–474.
- Zhang H C, Jin X, Li J, Wei Y X, Ma Q. 2012. Review on magnitude estimation methods applied to earthquake early

- warning systems[J]. *Progress in Geophysics*, **27**(2): 464–474 (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: 21–70.
- Zhang H C. 2013. *Study of Key Technologies in Earthquake Early Warning System*[D]. Harbin: Institute of Earthquake Mechanics, China Earthquake Administration: 21–70 (in Chinese).
- 张红才, 金星. 2014. 地震预警信息可靠度研究[J]. *地震学报*, **36**(4): 615–630.
- Zhang H C, Jin X. 2014. Reliability research of earthquake early warning information[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(4): 615–630 (in Chinese).
- Böse M, Hauksson E, Solanki K, Kanamori H, Wu Y M, Heaton T H. 2009. A new trigger criterion for improved real-time performance of onsite earthquake early warning in southern California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **99**(2A): 897–905.
- Hellweg M, Allen R M, Brown H, Neuhauser D S, Khainovsky O. 2010. CISEN ShakeAlert: Progress toward using early warnings for earthquakes in California[C]// *American Geophysical Union Fall Meeting 2010 Abstracts*. San Francisco: AGU: #NH33A-1368.
- Kanamori H. 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **33**: 195–214.
- Serdar Kuyuk H, Allen R M, Brown H, Hellweg M, Henson I, Neuhauser D. 2014. Designing a network-based earthquake early warning algorithm for California: ElarmS-2[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(1): 162–173.
- Wu Y M, Kanamori H. 2005. Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(1): 347–353.
- Wu Y M, Li Z. 2006. Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning [J]. *Geophys Res Lett*, **33**(16): L16312. doi:10.1029/2006GL026871.
- Wu Y M, Kanamori H, Allen R M, Hauksson E. 2007. Determination of earthquake early warning parameters, τ_c and P_d , for southern California[J]. *Geophys J Int*, **170**(2): 711–717.
- Wu Y M, Kanamori H. 2008. Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals [J]. *Sensors*, **8**(1): 1–9.
- 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.
- Zollo A, Lancieri M, Nielsen S. 2006. Earthquake magnitude estimation from peak amplitude of very early seismic signals on strong motion records[J]. *Geophys Res Lett*, **33**(23): L23312. doi:10.1029/2006GL027795.