

基于波形互相关的微地震事件自动识别及初至拾取

魏梦祎¹ 谭玉阳^{1,2} 毛中华³ 冯刚³ 胡天跃^{1,†} 何川^{1,†}

1. 北京大学地球与空间科学学院石油与天然气研究中心, 北京 100871; 2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026; 3. 中国石油化工集团公司石油工程地球物理有限公司胜利分公司, 东营 257086;
† 通信作者, E-mail: tianyue@pku.edu.cn (胡天跃), chuanhe_pku@163.com (何川)

摘要 根据具有相似震源位置及破裂机理的微地震事件通常在地震记录上表现出相似波形特征的原理, 提出一种基于波形互相关的微地震事件自动识别及初至拾取方法。首先, 通过计算道间互相关函数, 对微地震记录进行时差校正; 然后, 通过计算道间相似系数的方法识别连续地震记录中的微地震事件。在完成事件识别的同时, 对时差校正后的多道记录进行叠加, 并采用STA/LTA方法对叠加道进行初至拾取, 结合各道间的时差信息即可获得各道微地震事件的初至到时。为了检验所提方法的可行性和有效性, 分别对模型数据和实际资料进行处理, 结果表明利用所提方法可以在有效地识别微地震事件的同时, 得到较为准确的初至拾取结果。

关键词 微地震; 事件识别; 初至拾取; 互相关函数; 时差校正

中图分类号 P315

Automatic Microseismic Event Detection and Arrival Picking Based on Waveform Cross-Correlation

WEI Mengyi¹, TAN Yuyang^{1,2}, MAO Zhonghua³, FENG Gang³, HU Tianyue^{1,†}, HE Chuan^{1,†}

1. Institute of Oil & Gas, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026; 3. Shengli Branch, Sinopec Geophysical Company, Dongying 257086;
† Corresponding authors, E-mail: tianyue@pku.edu.cn (HU Tianyue), chuanhe_pku@163.com (HE Chuan)

Abstract Generally, a cluster of seismic events which share similar source locations and focal mechanisms will show similar waveforms on the record. Based on this assumption, a method have been developed for microseismic event detection and arrival picking based on waveform cross-correlation. This method achieves moveout correction for the seismic records based on cross-correlation functions, then calculates a multi-channel semblance coefficient to identify the microseismic events. Meanwhile, the seismic records after moveout correction are superposed. The STA/LTA method is adopt to pick the arrivals for the stacked traces, the arrival times of the microseismic events are then automatically obtained. The performance of the method is evaluated using both synthetic and real datasets. Analysis of the results demonstrates that the proposed method can not only detect the microseismic events, but also obtain relatively accurate arrival picks at the same time.

Key words microseismic; event detection; arrival picking; cross-correlation function; moveout correction

近年来, 随着非常规油气资源勘探开发技术逐渐成熟, 水力压裂微地震监测技术得到快速发展。微地震监测是通过观测分析由岩石破裂或错断导致的微小地震事件来监测地下人工裂缝发育过程与发育状态的地球物理技术, 主要用于在水力压裂作业

过程中解释裂缝的走向、方位和几何形态以及评价压裂效果。目前, 微地震监测技术已成功地应用于油气田开发、矿山开采以及地质灾害监测等多个领域, 其有效性和可靠性得到广泛认可^[1-6]。

微地震事件的识别及初至拾取是微地震数据处

理的关键环节之一。通过人工识别并提取微地震事件初至的工作量极大,且容易引入人为误差。许多学者研究并提出多种自动识别微地震事件及拾取事件初至到时的方法,其中以 STA/LTA 方法为代表^[7-10]。STA/LTA 方法最早用于对天然地震进行震相识别^[11-13],基本原理是利用有效信号与环境噪声在振幅(或能量)方面存在的特征差异,计算长、短滑动时窗内信号振幅(或能量)的平均值之比,作为检测微地震事件存在与否的依据,并提取微地震事件初至。优点是原理简单,容易实现,并且运算量较小,能够满足实时处理的要求;缺点是对于某些信噪比较低的微地震事件往往无法取得令人满意的效果。

Gibbons 等^[14]的研究表明,具有相似震源位置及破裂机理的地震事件通常在记录上表现出相似的波形特征。根据这一发现,一些学者提出基于波形互相关的微地震事件识别方法^[15-20]。该类方法的基本思路是,选择一系列主震事件,将主震事件与连续分段记录进行互相关处理。若某一分段记录与主震事件的波形具有较高的相似度,则认为该分段记录中包含一个微地震事件。通常情况下,主震事件需要利用 STA/LTA 方法来确定^[17,20],主震事件的选取对此类方法的应用效果有明显的影响。若 STA/LTA 方法无法有效地识别部分主震事件,则可能造成与这些主震事件具有相似震源机理的微地震事件被漏识。此外,由于确定主震事件需要足够长的一段记录,且主震事件在处理过程中需要进行更新,可能导致该方法无法满足实时处理的要求。

本文提出一种基于波形互相关的微地震事件自动识别及初至拾取方法。该方法利用各道记录之间的波形相似性来识别微地震事件,能够有效地避免由于记录中某几道数据信噪比过低使得主震事件被漏识,从而遗漏整个事件的情况发生。同时,该方法通过对地震波初至进行自动拾取,有效地避免了人为识别微地震事件及拾取初至到时的困难。本文分别采用合成数据和实际资料对方法的应用效果进行验证和分析。

1 方法原理

1.1 事件识别

选用一个滑动时窗,将时间连续的地震记录划分成多段记录。对每一个分段记录进行时差校正,将记录中可能存在的微地震事件 P 波或 S 波初至

拉平。时差校正通过两种方法实现。一种方法是选择一道信噪比较高的记录作为参考道,计算该参考道与其他各道记录的互相关函数,即

$$c_{i,j}(k) = \frac{\sum_{n=1}^N x_i(n)x_j(n+k)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x_i^2(n)\sum_{n=1}^N x_j^2(n)}}, \quad (1)$$

其中, $x_i(n)$ 和 $x_j(n)$ 分别表示选定的参考道及其他任意一道的数据。假设互相关函数 $c_{i,j}(k)$ 的最大值为 $C_{i,j}$, 对应的时刻为 $\Delta t_{i,j}$, 表示当 $x_j(n)$ 向左($\Delta t_{i,j}$ 为正值)或向右($\Delta t_{i,j}$ 为负值)平移 $\Delta t_{i,j}$ 时, $x_i(n)$ 和 $x_j(n)$ 的波形具有最大的相似度,故可将 $\Delta t_{i,j}$ 视为两道之间的时差。根据 $\Delta t_{i,j}$ 调整各道的时窗位置,即可对分段记录进行时差校正。

另一种时差校正方法无须选定参考道,其基本原理是根据 $\Delta t_{i,j}$ 与各道相对到时 t_i (定义为某一震相初至相对于某参考发震时刻的到时,可由该震相的绝对到时减去参考发震时刻得到)之间的关系建立线性方程组求解 t_i , 并根据 t_i 对各道记录进行时差校正^[21-24]。假设 t_i 和 t_j 分别表示第 i 道和第 j 道记录 P 波或 S 波的相对到时, t_i , t_j 与 $\Delta t_{i,j}$ 之间的关系如下:

$$t_i - t_j = \Delta t_{i,j}. \quad (2)$$

式(2)仅在 t_i , t_j 与 $\Delta t_{i,j}$ 均不含任何误差的条件下成立。然而,在实际情况中,由于地震波传播到各个检波器的路径不同以及环境噪声等因素的影响,同一微地震事件在各道记录上的波形存在一定的差异。因此,根据式(1)计算得到的 $\Delta t_{i,j}$ 总会存在一定误差。尽管如此,仍可根据式(2)建立如下线性方程组(以 5 道记录为例):

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta t_{12} \\ \Delta t_{13} \\ \Delta t_{14} \\ \Delta t_{15} \\ \Delta t_{23} \\ \Delta t_{24} \\ \Delta t_{25} \\ \Delta t_{34} \\ \Delta t_{35} \\ \Delta t_{45} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

假设记录中包含 M 道数据,则利用式(3)进行计算

时需进行 $M(M-1)/2$ 次互相关运算, 得到 $M(M-1)/2$ 组道间时差信息。将式(3)简写为如下形式:

$$A\mathbf{t} = \Delta\mathbf{t}, \quad (4)$$

其中, A 为稀疏系数矩阵, $\Delta\mathbf{t}$ 为观测数据向量(由 $\Delta t_{i,j}$ 构成), \mathbf{t} 为待求参数向量(由 t_i 构成)。式(4)的最小二乘解为

$$\mathbf{t} = (A^T A)^{-1} A^T \Delta\mathbf{t}. \quad (5)$$

利用式(5)求解出 \mathbf{t} 后, 即可根据各道的相对到时 t_i 对各道记录进行时差校正。

如果某一分段记录中包含微地震事件的 P 波或 S 波初至, 那么经过时差校正后, 该初至波的同相轴会被拉平, 此时微地震事件的 P 波或 S 波初至在各道记录上能够表现出较好的波形一致性; 如果该分段记录中只包含随机噪声, 那么经过时差校正后的记录中仍然只包含噪声, 而随机噪声序列是互不相关的。因此, 在完成时差校正后, 可通过计算一个自定义的道间相似系数对二者进行区分, 作为衡量和区分微地震事件与背景噪声的重要指标。构造函数时, 设定道间相似系数的取值范围为 0~1, 即各地震道记录波形相似度越高, 其值越接近 1。当且仅当各道地震记录的波形完全相同时取值为 1。该相似系数的计算公式为

$$S = \frac{\sum_{n=1}^N \left(\sum_{i=1}^M x_i(n) \right)^2}{M \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^M x_i^2(n)}, \quad (6)$$

其中, N 为记录的采样点数, M 为道数。本文方法利用该相似系数作为检测微地震事件存在与否的依据, 即如果某一时刻其值超过预先设定的触发阈值, 则认为该时刻存在一个疑似微地震事件。

1.2 初至拾取

对于利用式(6)识别出的有效微地震事件, 经过时差校正后可得到初至同相轴拉平的记录。将拉平后的各道记录进行叠加, 得到的叠加道信噪比通常高于叠加前的各道记录。本文方法的下一步是采用 STA/LTA 方法对叠加道进行初至拾取。STA/LTA 方法的基本思路是选定一组长、短滑动时窗, 利用两个时窗内信号的平均值之比来反映信号振幅或能量的变化。STA(短时窗平均值)主要反映局部信号的振幅水平, LTA(长时窗平均值)则反映背景噪声的振幅水平。在初至到时附近, STA 比 LTA 变化

快, 相应的 STA/LTA 值会出现一个明显的极值。计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{n=i}^{i+N} x(n)/N}{\sum_{n=i}^{i+M} x(n)/M}, \quad (7)$$

其中, $x(n)$ 为地震记录, M 和 N 分别表示长、短时窗长度。一般近似地认为 R 的最大值点是地震波的初至点。

利用 STA/LTA 方法得到叠加道的初至到时 T_0 , 结合式(3)中各道的相对到时 t_i , 即可利用下式计算得到实际的初至到时:

$$T_i = T_0 + t_i. \quad (8)$$

2 模型数据试算

首先采用模型数据检验本文方法的应用效果。图 1 为合成微地震记录, 其中包含 3 个具有不同信噪比的微地震事件(其信噪比从左到右逐渐增大)。这些事件均由一个指数衰减的正弦波按照不同的走时规律合成得到。同时, 对不同事件分别乘以不同的振幅加权系数, 且加权系数在各道之间按指数规律衰减, 目的是模拟不同传播路径对地震波产生的衰减效应。

根据式(6)计算得到相似系数曲线, 并对 3 个分量的相似系数取均方根, 如图 2 所示。可以看出, 在 3 个微地震事件出现的时刻附近, 相似系数曲线具有明显的峰值。通过将触发阈值设为 0.1, 即可将这 3 个事件识别出来。图 3 为图 2 中识别出来的 3 个微地震事件 P 波和 S 波的波形记录以及采用互相关函数法进行时差校正后的波形图, 可以看出, 两个震相的初至基本上能够拉平, 表明通过计算道间互相关函数可以得到相对准确的时差 $\Delta t_{i,j}$ 。

将图 3 中经过时差校正的各道记录进行叠加, 利用 STA/LTA 方法得到叠加道的初至到时。图 4 为 3 个微地震事件中 X, Y, Z 三个分量的均方根对应的初至到时。根据计算出的相对到时 t_i 以及利用式(8)计算得到的该微地震事件的 P 波和 S 波初至到时如图 5 所示。可见, 利用本文方法可以得到较为准确的地震波初至到时。

3 实际资料处理结果

采用本文方法对实际的微地震监测资料进行处

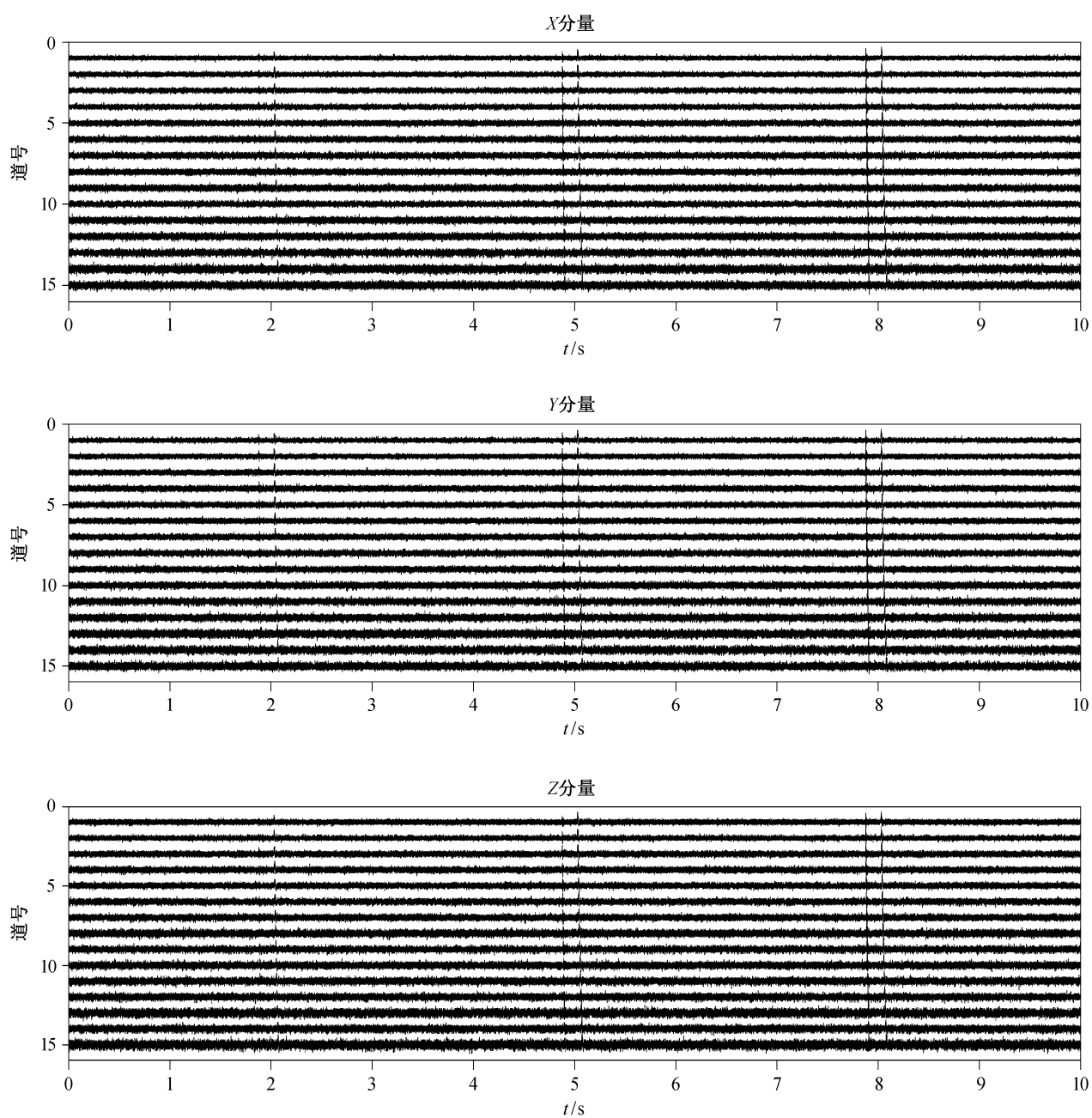


图 1 合成微地震记录
Fig. 1 Synthetic microseismic records

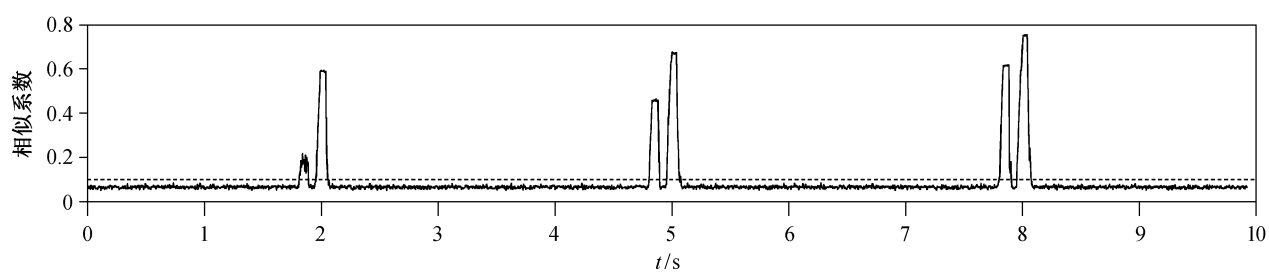
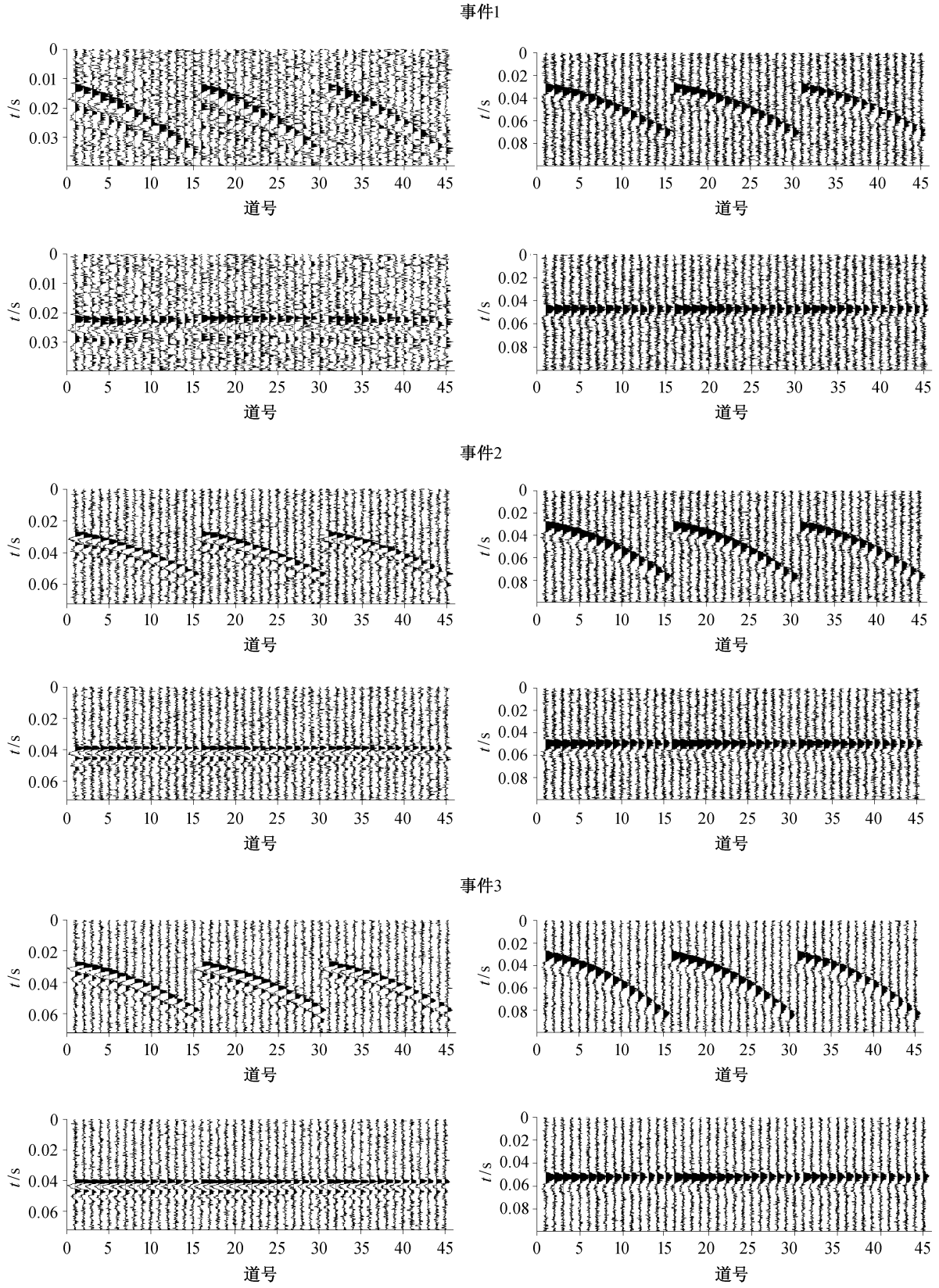


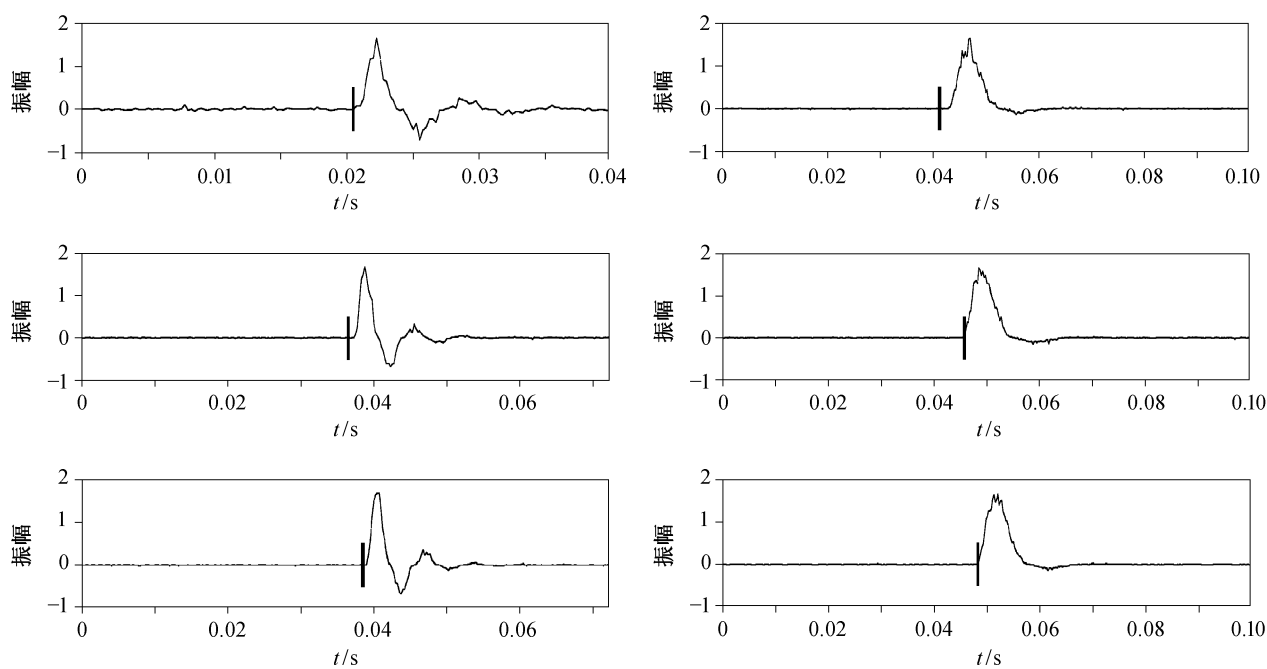
图 2 合成微地震记录的相似系数曲线
Fig. 2 Semblance coefficient curves of synthetic microseismic records



左列为 P 波, 右列为 S 波; 1~15 道为 X 分量, 16~30 道为 Y 分量, 31~45 道为 Z 分量; 每个事件的上图为校正前, 下图为校正后

图 3 图 1 中微地震事件时差校正前后波形对比

Fig. 3 Comparison of the waveforms of the P- and S-wave arrivals of the microseismic event shown in Fig. 1



从上至下依次为事件 1~3; 左列为 P 波, 右列为 S 波

图 4 图 3 所示微地震事件叠加道记录及其初至拾取结果

Fig. 4 Waveforms of the stacking traces of the microseismic event shown in Fig. 3 and their arrival picks

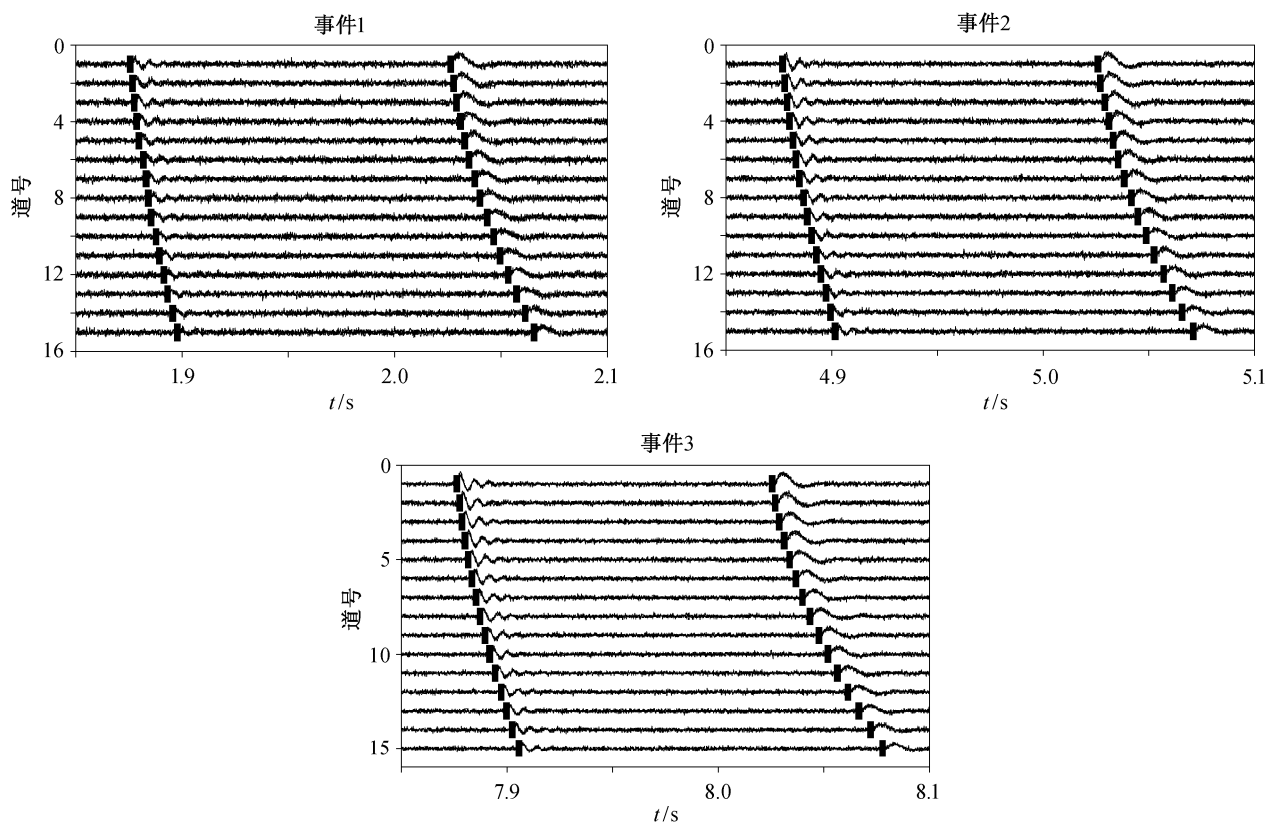


图 5 合成微地震事件初至拾取结果

Fig. 5 Arrival picking results of the synthetic microseismic events

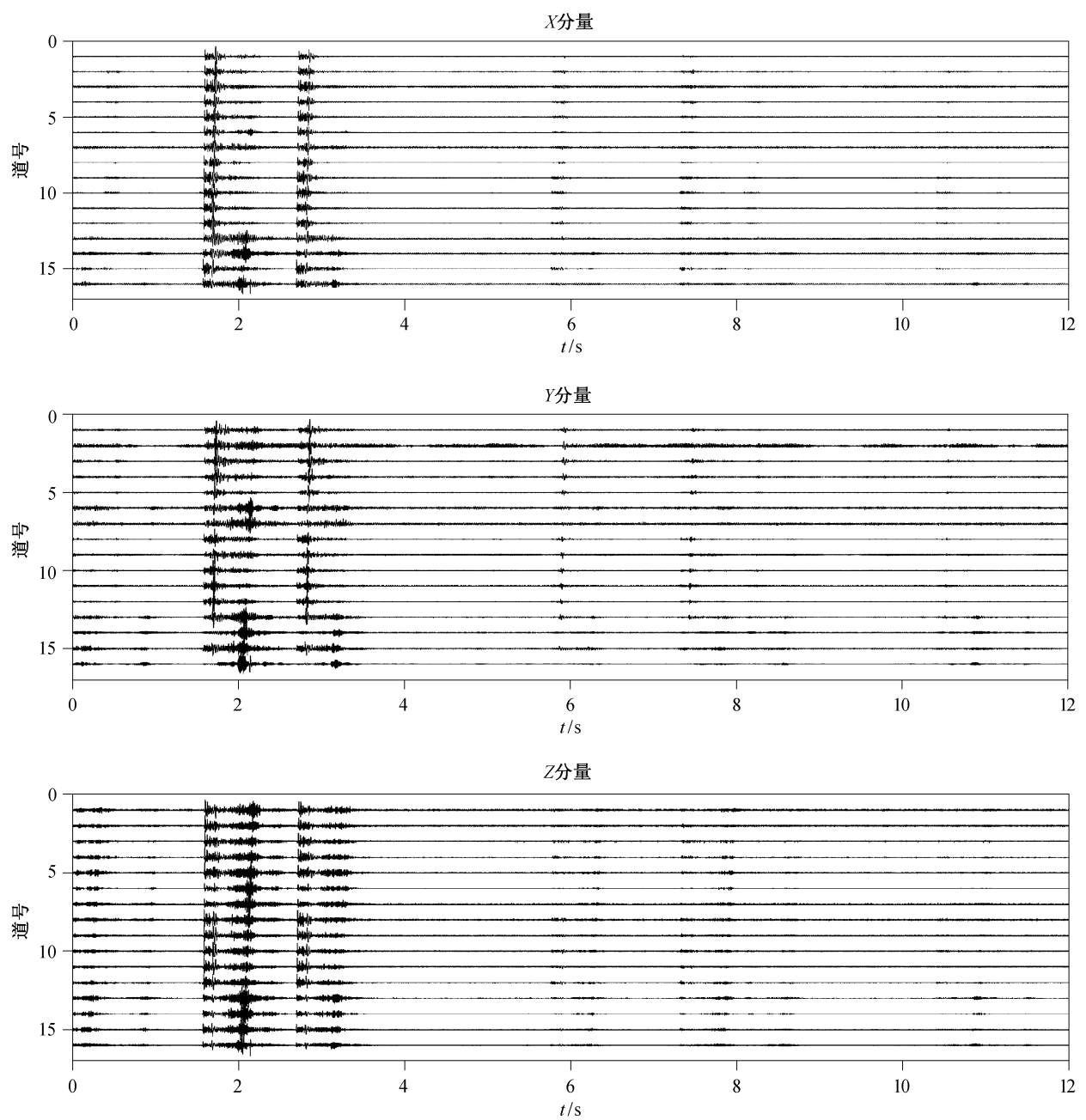


图 6 实际微地震记录
Fig. 6 Real microseismic records

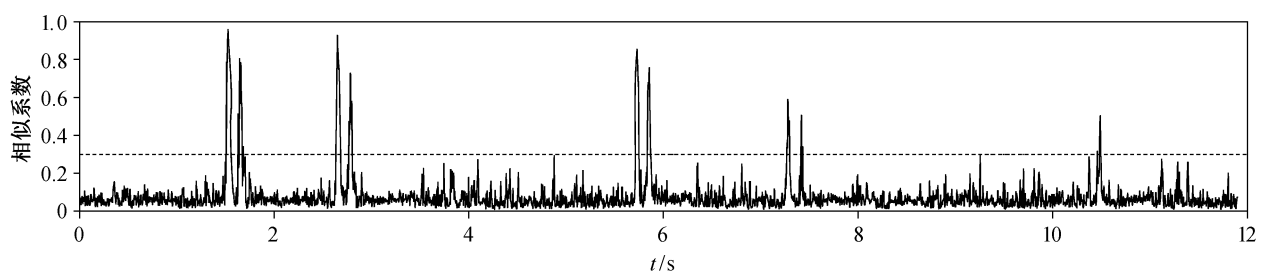


图 7 实际地震记录的相似系数曲线
Fig. 7 Semblance coefficient curves of real microseismic records

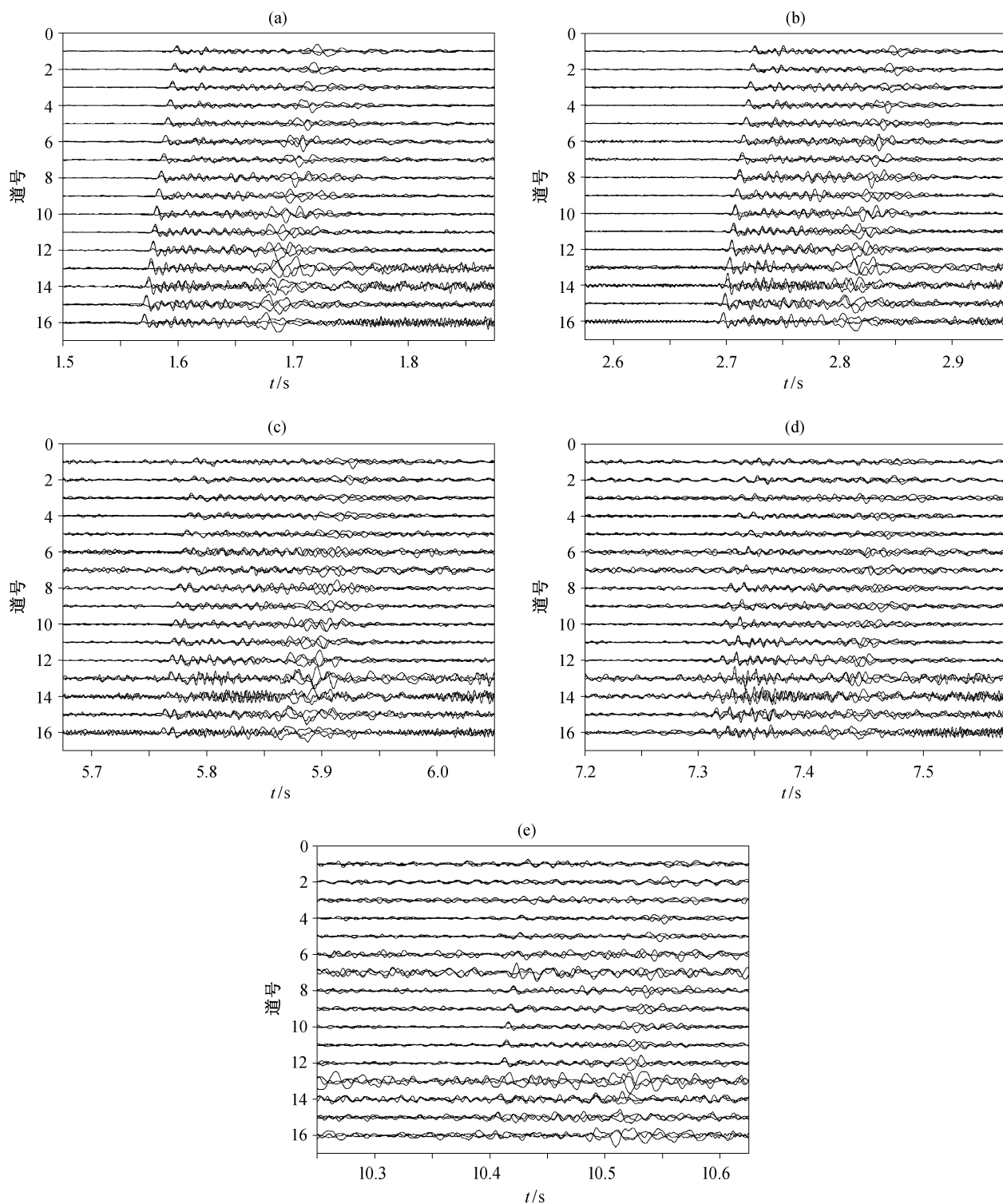
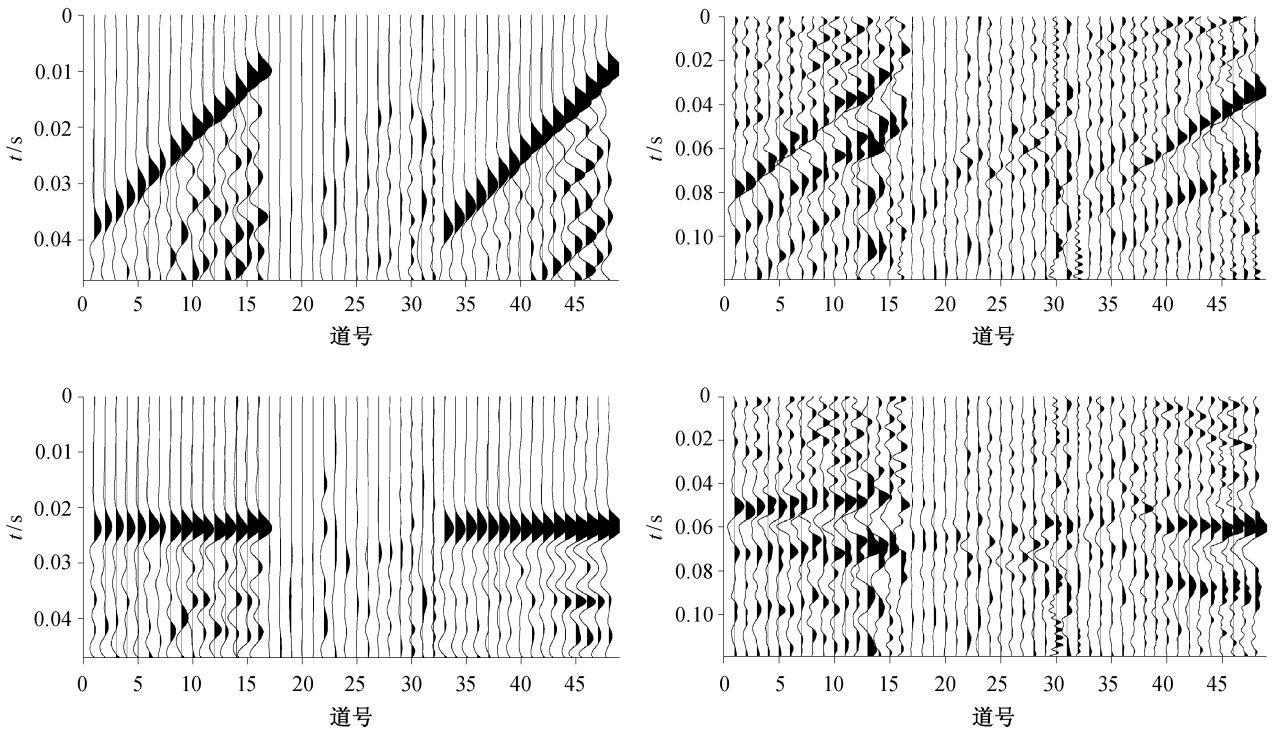


图 8 图 6 所示微地震记录中识别出的事件
Fig. 8 Detected events in the records shown in Fig. 6

理和分析, 图 6 为从实际资料中截取的一段时长为 12 s 的典型记录, 图 7 为计算得到的相似系数曲线。该曲线是 X , Y , Z 三个分量的道间相似系数曲

线的均方根, 可以看出该相似系数曲线具有 5 个明显的峰值, 表明该记录中存在 5 个疑似微地震事件。图 8 为包含这 5 个事件的分段记录。



左列为 P 波, 右列为 S 波; 上图 of 校正前, 下图为校正后

图 9 图 8(a)所示微地震事件时差校正前后波形对比

Fig. 9 Waveforms of the P- and S-wave arrivals of the microseismic event shown in Fig. 8(a)

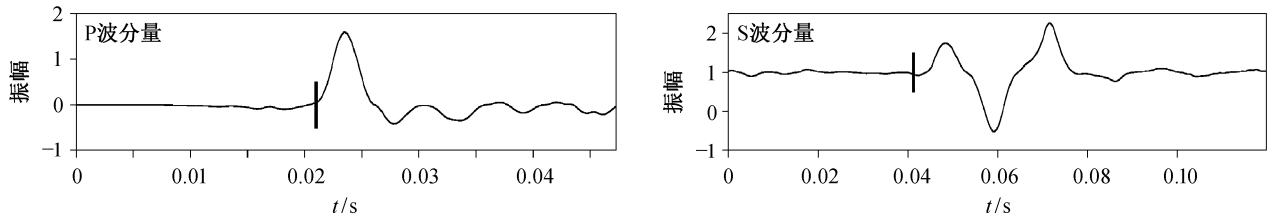


图 10 图 9 所示微地震事件叠加道记录及其初至拾取结果

Fig. 10 Waveforms of the stacking traces of the microseismic event shown in Fig. 9 and their arrival picks

图 9 为图 8(a)所示微地震事件时差校正前后的波形对比。可以看出, 经过时差校正后, 该事件 P 波和 S 波的同相轴基本上能够拉平。将时差校正后的各道记录进行叠加, 并利用 STA/LTA 方法求得叠加道的初至到时, 结果如图 10 所示。之后, 根据式(8)计算得到该事件 P 波和 S 波初至到时, 结果如图 11(a)所示。可以看出, 采用本文方法能够得到较准确的初至到时。

采用本文方法对图 8(b)~(e)的 4 个微地震事件进行初至拾取, 结果分别如图 11(b)~(e)所示。相对来说, 图 11(d)和(e)所示微地震事件 S 波记录的初至拾取结果不够理想, 下面对这两个微地震事件进

行分析。从图 7 可知, 图 8(d)所示微地震事件的 P 波道间相似系数值较高, 结合图 12 可以看出, 该微地震事件的波形相似性高于图 8(e)所示微地震事件 P 波的相似性。因此, 图 11(d)所示的微地震事件的 P 波初至拾取效果明显高于图 11(e)中 P 波的初至拾取结果。对这两个微地震事件的 S 波初至拾取结果进行分析, 可以看出图 11(e)中微地震事件 S 波的拾取精度相对较差。从图 7 可知, 图 11(e)的微地震事件道间相似系数值小于图 11(d)所示的微地震事件, 并且从图 13 可以看出, 图 11(e)的微地震事件波形相似程度也低于图 11(d)所示的微地震事件。由此可知, 在本文方法中, 各道地震记录的波

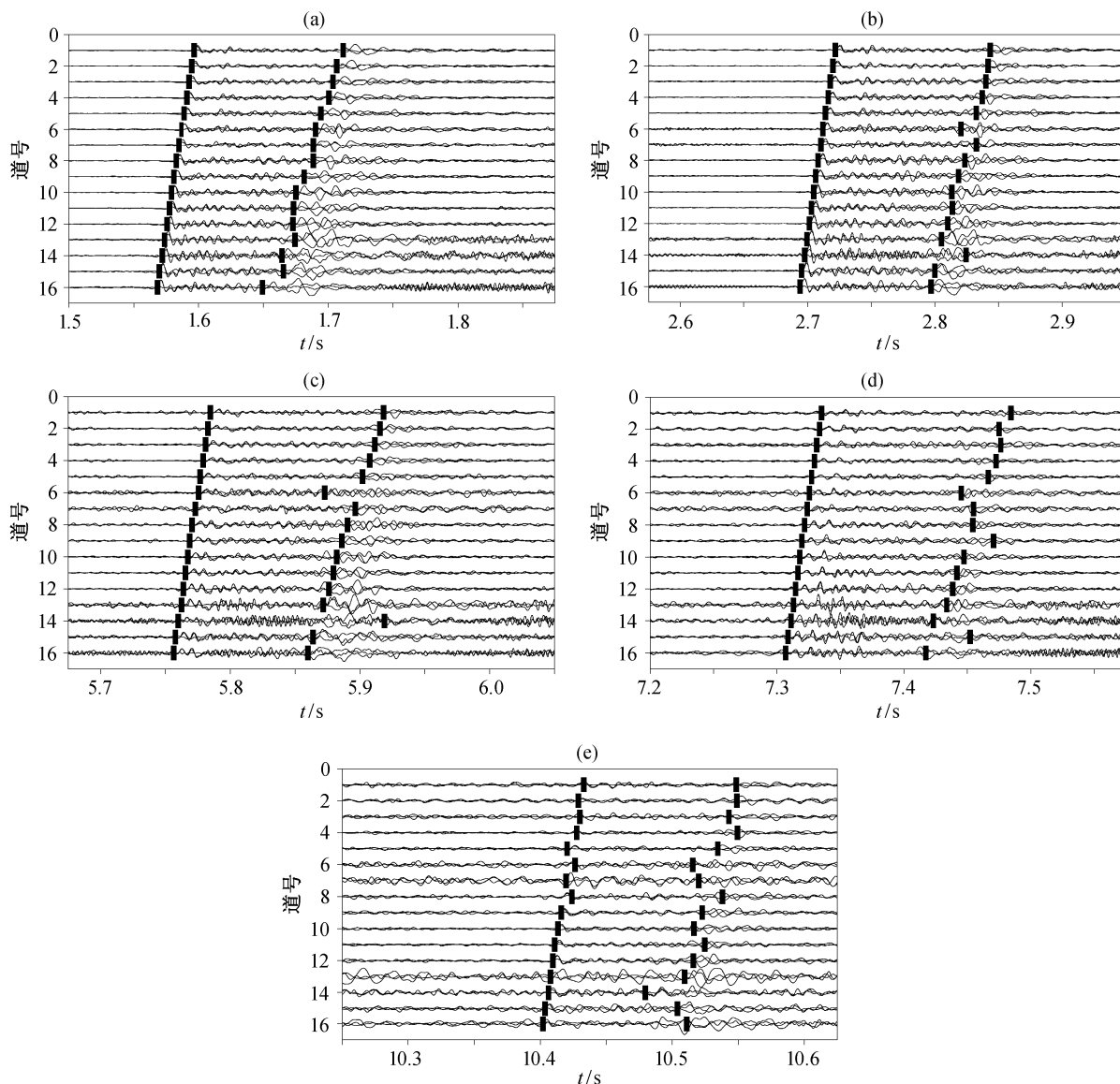


图 11 图 8(a)~(e)所示有效微地震事件初至拾取结果
Fig. 11 Arrival picking results of the microseismic events shown in Fig.8(a)~(e)

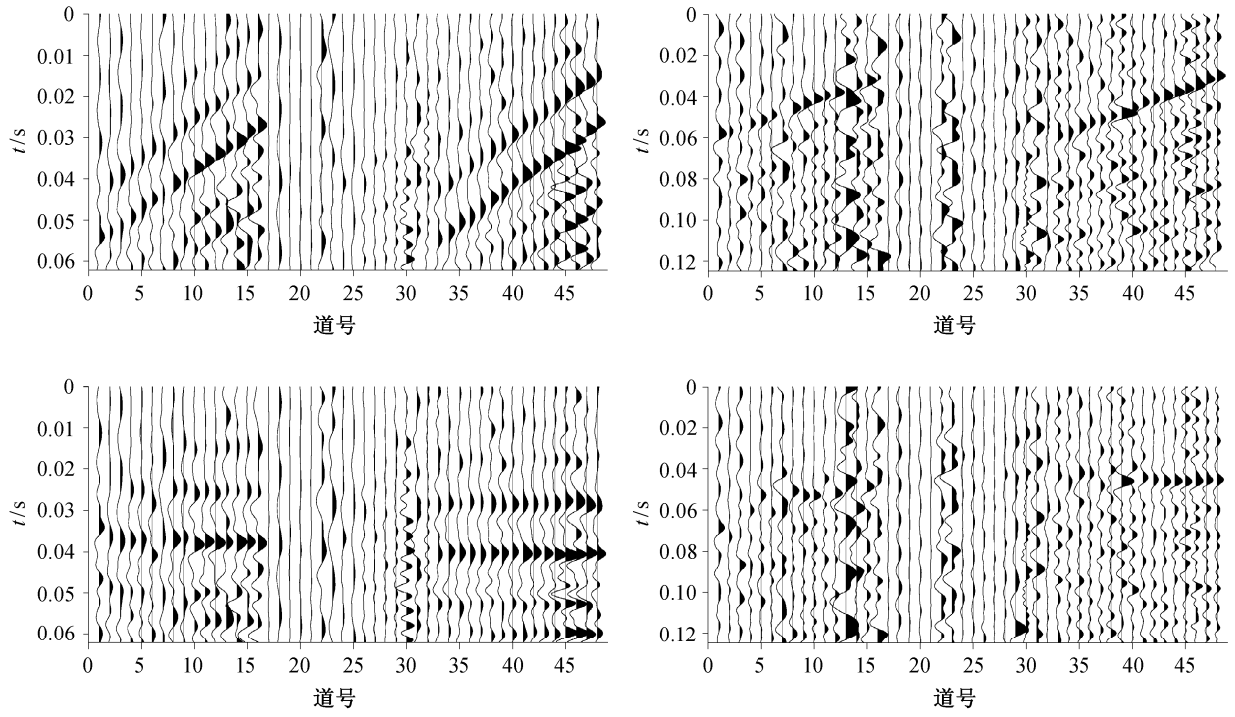
形相似程度是影响初至拾取结果精确性的重要因素。地震记录的波形相似性越高,初至拾取的结果越精确。

4 结论

本文提出一种基于波形互相关的微地震事件自动识别及初至提取的方法,利用各道记录之间的波形相似性来识别微地震事件并提取其初至到时。通过计算一个道间相似系数来综合各道的波形信息,进行事件识别,能够有效地避免由于微地震事件中某几道数据的信噪比过低而遗漏整个事件的情况。

同时,通过对传统互相关函数计算方法的改进,可以避免由于时窗长度选取不合理而使得有效波形信息无法完全被校正的情况。另外,根据各道记录的波形相似性,利用互相关法进行时差校正,通过多道叠加提高数据的信噪比,可以得到较为准确的初至拾取结果。通过对合成数据和实际资料进行处理,证明该方法在有效地识别微地震事件的同时,能够较准确地提取初至到时。

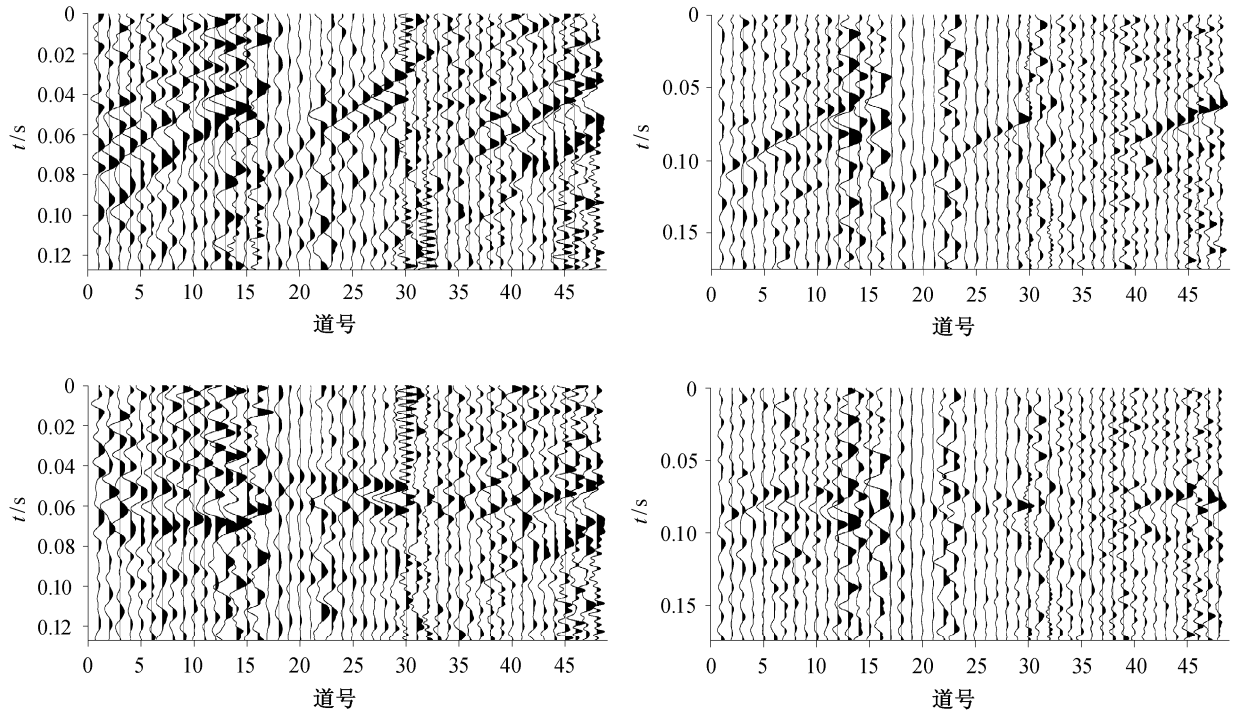
本文方法主要适用于较小的观测范围,可以较好地地区别波形相似性高的微地震记录与不规则噪声干扰。当井中存在井筒波等规则噪声干扰时,由于



左列为图8(d)所示微地震事件, 右列为图8(e)所示微地震事件; 上图为校正前, 下图为校正后

图 12 图 8(d)和(e)所示的微地震事件 P 波记录及其时差校正结果

Fig. 12 P-wave waveforms of the microseismic event shown and its waveform after moveout correction in Fig. 8(d) and (e)



左列为图8(d)所示微地震事件, 右列为图8(e)所示微地震事件; 上图为校正前, 下图为校正后

图 13 图 8(d)和(e)所示的微地震事件 S 波记录及其时差校正结果

Fig. 13 S-wave waveforms of the microseismic event shown and its waveform after moveout correction in Fig. 8(d) and (e)

井筒波与仪器噪声波形具有一定的自相似性,会出现有效事件的误拾情况。在这种情况下,可以根据井筒波传播速度稳定且较低、其视速度与有效信号的视速度相差明显以及仪器噪声没有时差等特点,通过时差约束来排除规则噪声干扰。

参考文献

- [1] 张山, 刘清林, 赵群, 等. 微地震监测技术在油田开发中的应用. 石油物探, 2002, 41(2): 226-231
- [2] 刘百红, 秦绪英, 郑四连, 等. 微地震监测技术及其在油田中的应用现状. 勘探地球物理进展, 2005, 28(5): 325-329
- [3] 刘振庆, 李娟娟, 于建忠, 等. 微地震技术在采矿安全监测中的应用研究. 能源技术与管理, 2014, 39(4): 6-8
- [4] 柳云龙, 田有, 冯暄, 等. 微地震技术与应用研究综述. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1801-1808
- [5] 裴琳. 微地震监测技术在地下工程中应用研究. 工程地球物理学报, 2008, 5(5): 554-559
- [6] 赵博雄, 王忠仁, 刘瑞, 等. 国内外微地震监测技术综述. 地球物理学进展, 2014, 29(4): 1882-1888
- [7] Munro K A. Automatic event detection and picking of P-wave arrivals [R]. Calgary: CREWES Research Report, 16. 2004: 12.1-12.10
- [8] Chen Z. A multi-window algorithm for automatic picking of microseismic events on 3-C data // 75th SEG Annual Meeting Expanded Abstracts. San Francisco, 2005: 1288-1291
- [9] Han L, Wong J, Bancroft J C. Time picking and random noise reduction on microseismic data [R]. Calgary: CREWES Research Report, 21. 2009: 30.1-30.13
- [10] Sabbione J I, Velis D R. An automatic method for microseismic events detection based on earthquake phase pickers // 82nd SEG Annual International Meeting Expanded Abstracts. Las Vegas, 2012: 1-5
- [11] Ambuter B P, Solomon S C. An event-recording system for monitoring small earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 1974, 64(4): 1181-1188
- [12] Stevenson P R. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: a study using automatic earthquake processing. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(1): 61-80
- [13] Stewart S W. Real-time detection and location of local seismic events in central California. Bulletin of the Seismological Society of America, 1977, 67(2): 433-452
- [14] Gibbons S J, Ringdal F. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. Geophysical Journal International, 2006, 165(1): 149-166
- [15] Arrowsmith S J, Eisner L. A technique for identifying microseismic multiplets and application to the Valhall field, North Sea. Geophysics, 2006, 71(2): V31-V40
- [16] Eisner L, Abbott D, Barker W B, et al. Noise suppression for detection and location of microseismic events using a matched filter // 78th SEG Annual International Meeting Expanded Abstracts. New Orleans, 2008: 1431-1435
- [17] Song F, Kuleli H S, Toksöz M N, et al. An improved method for hydrofracture-induced microseismic event detection and phase picking. Geophysics, 2010, 75(6): A47-A52
- [18] Cieplik R, Eisner L, Abbott D. Correlation detection and location for microseismic events induced by hydraulic fracturing // 74th EAGE Conference and Exhibition Extended Abstracts. Copenhagen, 2012: D018
- [19] Greig D W. Analysis of the Crooked Lake sequence near Fox Creek, Alberta: Comparison of a waveform correlation detection method to a traditional STA/LTA picker // 84th SEG Annual International Meeting Expanded Abstracts. Denver, 2014: 2173-2177
- [20] Song F, Warpinski N R, Toksöz M N, et al. Full-waveform based microseismic event detection and signal enhancement: an application of the subspace approach. Geophysical Prospecting, 2014, 62(6): 1406-1431
- [21] VanDecar J C, Crosson R S. Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross-correlation and least squares. Bulletin of the Seismological Society of America, 1990, 80(1): 150-169
- [22] Shearer P M. Improving local earthquake locations using the L1 norm and waveform cross correlation: application to the Whittier Narrows, California, aftershock sequence. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B4): 8269-8283
- [23] Rowe C A, Aster R C, Phillips W S, et al. Using automated, high-precision repicking to improve delineation of microseismic structures at the Soultz geothermal reservoir. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159: 563-596
- [24] Kummerow J. Joint arrival time optimization for microseismic events recorded by seismic borehole arrays // 75th EAGE Conference and Exhibition Extended Abstracts. London, 2013: Tu-06-10