

黄雅芬, 李红谊, 李炎臻, 葛慧颖, 张盛中. 2025. 基于聚类的重复地震识别方法及应用. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(1): 94-101. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-020.

Huang Y F, Li H Y, Li Y Z, Ge H Y, Zhang S Z. 2025. A clustering-based repeating earthquakes identification method and its application. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(1): 94-101 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-020.

基于聚类的重复地震识别方法及应用

黄雅芬¹, 李红谊^{1,2*}, 李炎臻^{1,2}, 葛慧颖^{1,2}, 张盛中³

1 陆内火山与地震教育部重点实验室 (中国地质大学 (北京)), 北京 100083

2 中国地质大学 (北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083

3 中国地质大学 (北京) 信息网络与数据中心, 北京 100083

摘要: 重复地震是指不同时期发生在断层同一位置的一组地震, 表现为波形和震源机制上的高度相似. 重复地震可用于探测断层深部形变、刻画断层行为、评估地震灾害. 然而, 重复地震的识别条件阈值设置尚没有统一的标准, 常用的识别参数存在较大的主观性, 会导致识别重复地震存在误差. 为解决上述问题, 本研究利用基于机器学习中的层次聚类算法构建了一个自动高效的重复地震识别方法. 首先采用波形并行互相关技术计算地震波形之间的互相关系数, 结合 S-P 到时差方法估算地震震源之间的距离, 再利用层次聚类方法将地震聚类, 获得重复地震. 本文将该方法应用至甘孜—玉树断裂带和东昆仑断裂带地区的地震活动, 识别重复地震并估算断层滑动速率. 在甘孜—玉树断裂带附近共识别出 6 组重复地震组, 它们均沿甘孜—玉树断裂带走向布展, 平均断层滑动速率为 7.4 mm/a. 东昆仑断裂带附近共识别出 3 组重复地震组, 平均断层滑动速率为 6.9 mm/a. 沿东昆仑断裂东段, 断层滑动速率呈现出速率向东逐渐降低的趋势, 显示该区域复杂的动力作用过程. 这些结果与野外地质观测和 GPS 大地测量结果较为一致. 基于实际数据测试和验证, 结果表明本文发展的基于聚类的识别重复地震方法具有自动、高效、便捷的特性, 为准确识别重复地震提供了重要的基础资料, 为分析断层活动性提供了重要约束.

关键词: 重复地震; 聚类分析; 甘孜—玉树断裂带; 东昆仑断裂带

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-020

中图分类号: P315

文献标识码: A

A clustering-based repeating earthquakes identification method and its application

Huang Yafen¹, Li Hongyi^{1,2*}, Li Yanzhen^{1,2}, Ge Huiying^{1,2}, Zhang Shengzhong³

1 Key Laboratory of Intraplate Volcanoes and Earthquakes (China University of Geosciences, Beijing),

Ministry of Education, Beijing 100083, China

2 School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3 Information Network Center, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: Events with highly similar waveforms and rupturing of the same fault patch are interpreted as repeating earthquakes, which can be applied in detecting deep fault deformation, characterizing fault behavior, and assess seismic hazards. In this study, we develop a clustering-based repeating earthquakes identification method by using the hierarchical clustering algorithm in machine learning. First, the parallel waveform cross-correlation method is adopted to calculate the cross-correlation coefficient (CC). Then, the S-P differential time is used to measure the inter distance of events. Finally, the hierarchical clustering is applied to obtain repeating clusters. We utilize this

收稿日期: 2024-05-16; 录用日期: 2024-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1939203)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1939203)

第一作者: 黄雅芬 (1995-), 女, 博士研究生, 主要从事小震定位的研究. E-mail: hyfariel@163.com

*通信作者: 李红谊 (1976-), 女, 教授, 主要从事面波层析成像、小震定位和断层带结构的研究. E-mail:

lih@cugb.edu.cn



method to investigate the seismicity around the Ganzi-Yushu fault (GYF) and the eastern Kunlun fault (EKLF). We identify 6 repeating clusters along the GYF, with an average fault slip rate of 7.4 mm/a. Around the EKLF, we identify 3 repeating clusters, with an average fault slip rate of 6.9 mm/a. Along the EKLF, the fault slip rates gradually decreases from the west to the east along the strike, indicating a complex dynamic process. Our results agree with geology observation and GPS data. Based on real data testing, our results show that the method to identify repeating earthquakes is automatic, efficient and convenient and provides basic information for accurate identification of repeating earthquakes and places constraints on fault activity.

Keywords: repeating earthquakes; clustering analysis; the Ganzi-Yushu fault; the eastern Kunlun fault

0 引言

重复地震是指不同时期发生在断层同一位置的一组地震, 往往表现为波形和震源机制上高度相似. 板块边界和板块内部发育的多条断裂带上, 研究人员均识别到了重复地震, 如土耳其的 North Antolian 断层 (Peng and Ben-Zion, 2005)、美国的 Parkfield 断层 (Nadeau and McEvilly, 1999)、日本的海沟俯冲带 (Matsubara et al., 2005)、中国的川滇地区龙门山断裂带 (Li L et al., 2011)、小江断裂带 (李乐等, 2013) 等. 目前普遍认为, 当断层面上可积累应变的小凹凸体被周围无震蠕滑的介质所环绕时, 这些凹凸体较容易以稳定的大小重复破裂形成重复地震 (Beeler et al., 2001; Vidale et al., 1994), 因此可以用于刻画断层行为. 重复地震的一个重要应用就是估算断层滑动速率相关的断层滑动性研究, 通过重复地震的震级大小和发震时间间隔, 就能够推算断层不同深度的滑动速率. 除此之外, 重复地震还被应用于探究深海温度变化 (Wu et al., 2020)、地球内核的时变性 (Yang and Song, 2020)、地震与滑坡灾害 (Yamada et al., 2016) 等研究中. 因此, 准确地识别重复地震是开展重复地震分析的基础.

大部分重复地震的研究中, 一般先采用波形互相关技术, 再结合地震定位方法, 来综合判断识别重复地震. 因为重复地震发生于断层面上同一凹凸体内, 地震的位置必须足够近, 所以地震波形的相似程度十分高. 利用波形互相关技术得到互相关系数 (cross-correlation coefficient, CC), 指示地震波形的相似程度, 再设置阈值, 若两个地震的 CC 大于该阈值则被判定为是一组相似地震. 波形互相关技术的计算过程简单, 对数据要求低, 可用于快速筛选重复地震. 通过互相关计算得到相似地震组后, 再使用地震定位方法获得地震精确位置信息, 计算地震震源间的相对距离和地震对的破裂半径, 根据

两者的相对关系, 判断地震震源的破裂区域是否重叠, 以此来进一步筛选, 确认地震对是否位于断层相同的凹凸体上. 当台站分布较为稀疏时, 可采用 S-P 到时差技术 (Li L et al., 2011) 作为替代方法, 近似估算震源间距离.

前人统计不同重复地震研究中 CC 阈值选择不同, 范围为 0.7~0.98 (Gao et al., 2021). 判断破裂区域重叠度时, 有的要求震源之间的距离小于破裂半径之和 (Cauchie et al., 2020; Li L et al., 2011), 有的要求小于地震中较大的破裂半径 (Gao et al., 2021) 等. 正因为识别重复地震的阈值具有较大的主观性, 因此上述的识别重复地震方法存在着一些问题. 如果需要不断调整阈值 (如互相关系数), 那么需要重新开始, 获得相似地震组, 再从相似地震组判断重复地震破裂区域是否重叠, 获得重复地震. 并且需要人工参与筛选, 时间成本高、效率低下.

为解决上述问题, 本研究结合机器学习的层次聚类算法, 发展了一个自动高效的重复地震识别方法. 通过引入 S-P 到时差方法, 解决台站稀疏情况下震源间距离估算问题, 并改进波形互相关技术, 并行计算波形互相关系数, 最后采用层次聚类方法将地震聚类识别重复地震. 本文将该方法分别应用到台站较为稀疏的青海甘孜—玉树断裂带玉树段和台站相对密集的东昆仑断裂带东段区域, 识别出重复地震, 并计算断层滑动速率, 开展断层活动分析.

1 方法

该方法具体流程如图 1 所示. 主要分为两个阶段. 第一阶段中, 输入数据为定位后的地震目录和相对应的地震事件波形, 通过多进程实现并行计算波形互相关、地震震源之间的距离和地震的破裂半径. 第二阶段中, 根据采用机器学习中的层次聚类方法将地震进行聚类, 根据设置好的阈值参数, 输

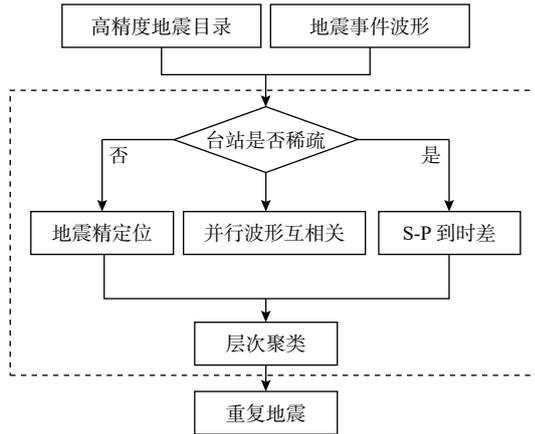


图1 基于聚类的重复地震识别方法工作流程图

Fig. 1 Workflow for the clustering-based repeating earthquakes identification method

出识别到的重复地震. 一般情况下采用输入的高精度地震目录文件计算地震震源之间的距离, 而在台站稀疏的情况下, 则采取 S-P 到时差作为替代方法, 近似估算地震震源之间的距离.

1.1 波形互相关并行技术

本文采用时间域波形互相关技术, 根据输入的地震目录对两两地震之间进行互相关计算, 并按照相应的台站数量求取平均互相关系数, 作为该地震地震对的最终互相关系数. 计算互相关的时间窗口需要同时包含 P 波和 S 波震相, 互相关时间窗口较长, 并且由于每两个地震之间都需要进行互相关计算, 所以本研究提出了一个波形互相关并行技术, 利用 Python 中的 multiprocessing 库实现多进程计算. 先将两两地震进行组合, 生成所有待计算的地震对队列后, 将每一个地震对视为独立单元进行处理, 可同时进行多个地震对的互相关计算, 实现并行计算.

本文使用 ObsPy 库 (Beyreuther et al., 2010) 对地震数据进行读取、存储、互相关、滤波等处理. 识别重复地震时, 计算互相关的具体时间窗口视地震与台站分布的不同而不同, 所以程序还提供了计算互相关的时间窗口参数 window, 形式为 Python 中的 list 列表格式, 以 P 波震相到时为参考, 自行设置. 如 [-2, 10], 表示 P 波到时前 2 s 至后 10 s 的时间窗口, 作为互相关计算窗口. 参数 thread 表示最大并行核数, 该参数过小会导致并行效率低, 参数过大会影响电脑基础功能正常运行.

1.2 S-P 到时差方法

确定震源位置后, 可以计算地震震源之间的距

离, 进而判断震源破裂区域是否重叠. 然而, 为了确定地震破裂半径是否重叠, 相对地震定位的精度必须足够高. 许多研究利用波形相关的到时差来获得高精度的相对地震定位 (Yu et al., 2013). 重复地震由于具有高度相似的特点, 因此通过波形互相关方法可以得到高精度的到时差. 其中, 双差地震定位方法是一个经典的相对地震定位方法, 能进行高精度地震定位, 误差的不确定性可以到几十米 (Waldhauser and Ellsworth, 2000). 然而, 在台站分布稀疏的条件下, 并不能获得很高的震源位置准确性. 因此, Li L 等 (2011) 利用基于 S-P 到时的双差定位方法来约束震源间的相对距离:

$$\Delta x \geq V_p \Delta t_{S-P} / (\gamma - 1) \quad (1)$$

其中, γ 是 P 波与 S 波的速度速比值, 一般取 1.73, Δx 是两个地震的相对距离, 单位为米 (m). 得到地震对之间的相对距离后, 再使用震源大小估计地震位置的重叠度. 由于重复地震震级较小, 一般采用破裂区域符合标准的圆盘模型假设, 圆盘的破裂半径可以根据震源谱的拐角频率进行计算 (Brune, 1970):

$$r = kV/f_c \quad (2)$$

其中, k 是与体波种类有关的常数, V 是 P 波或者 S 波速度. 受到观测数据质量所限, 小地震的拐角频率难以准确估算. 因此通常会假设应力降 $\Delta\sigma$ 为某个固定值, 然后采用以下公式计算破裂半径 (Eshelby, 1957):

$$r = (7M_0/16\Delta\sigma)^{1/3} \quad (3)$$

其中, M_0 为地震矩, 一般通过 Kanamori 和 Anderson (1975) 的公式计算:

$$\log(M_0) = M_L + 9.8 \quad (4)$$

前人研究中, 通常参考区域背景地震的平均应力降水平来设定应力降, 比如, 假设应力降为 3、5 或者 10 MPa (Li L et al., 2011). S-P 相对到时差方法, 可以减少对区域速度模型的依赖, 具有较好的稳定性.

1.3 层次聚类方法

聚类算法是机器学习中一种无监督学习方法 (Gillis et al., 2015). 该算法不依赖于标签数据, 通过自主学习数据特征, 将数据集划分为多个不相干的集合 (又被称为簇), 使得每个簇内的数据尽可能相似, 簇间的数据差异尽可能大. 层次聚类是

聚类算法中的一种, 该方法首先认为每一个地震是一个独立的簇, 然后根据每个簇之间的距离, 将距离最近的两个簇合并, 不断重复, 直到所有地震合并为一个簇, 算法结束。

该算法不需要事先指定最终的聚类数目, 非常适用于重复地震识别问题, 因为重复地震的数量是

未知的. 其次, 该方法通过层状结构能清晰地展示出不同距离阈值下的聚类结果, 方便进行查看和筛选. 为方便理解, 图 2 展示了层次聚类的示意图, 红色区域则为聚类后的地震事件组, 聚类原则为互相关值大于 0.8. 该示意图形象展示了层次聚类方法的原理, 逻辑简单, 且易于解释。

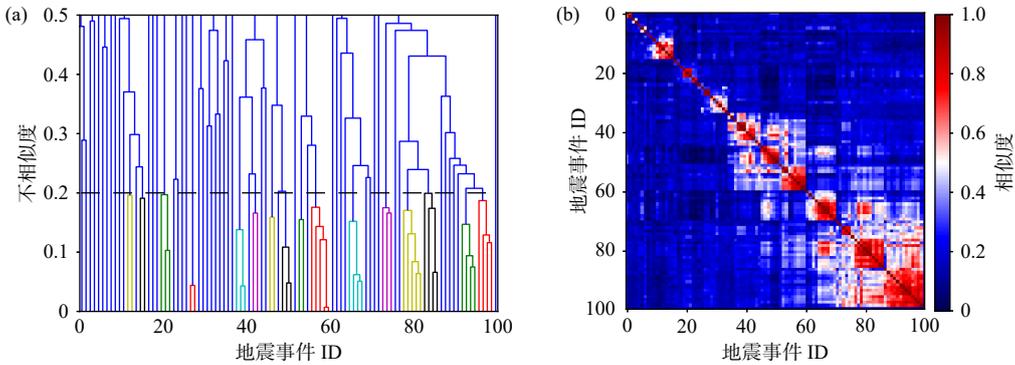


图 2 地震事件的层次聚类示意图. (a) 100 个地震事件的层次聚类树状图. 横轴纵轴代表地震 ID, 颜色代表不相似性. 黑色虚线代表阈值为 0.2, 即互相关值大于 0.8 进行聚类. (b) 根据图 (a) 的结果, 100 个地震事件的波形相似性

Fig. 2 A diagram illustrating the hierarchical clustering of earthquakes. (a) A dendrogram of hierarchical clustering for 100 events. The horizontal and vertical axis represents the earthquake ID and the waveform dissimilarity, respectively. The black dashed line marks the threshold (0.2), which means that events with a cross-correlation coefficient greater than 0.8 are clustered together. (b) Waveform similarity (CC value) for 100 events according to results from Fig. (a)

本文使用了 Python 中 SciPy 库来实现层次聚类功能, 并提供了互相关阈值、重复地震组最小地震数目和重复地震组最小地震间隔三个参数选项. 重复地震组最小地震数目, 表示一个重复地震组中最少需要几个地震事件, 容易得知该参数最少为 2. 重复地震组最小间隔表示一个重复地震组中地震间发生的时间间隔最少为几天. 在进行断层滑动速率估计时, 对该参数有严格要求, 但是一般情况下可以设置为 0, 表示不将该参数作为识别重复地震的标准. 程序还提供了画图功能 `plot_flag`, 设置为 True 时, 将对识别到的每一组重复地震的层次聚类过程绘制成图, 方便进行查看和确认. 由于画图功能会降低层次聚类算法的时间效率, 默认为 False.

2 应用

2.1 甘孜—玉树断裂带

甘孜—玉树断裂带位于青藏高原东缘, 是松潘—甘孜地块和羌塘块体的边界, 呈北西走向. 印度板块向欧亚板块的推力作用, 导致青藏高原的不断抬升, 松潘—甘孜次级块体向东移动. 近些年来, 甘孜—玉树断裂带及其附近区域发生了多次中至大

型地震, 如 2010 年 7.1 级青海玉树地震、2013 年 5.1 级杂多地震、2016 年 6.2 级杂多地震和 2021 年 7.4 级玛多地震 (Li Z et al., 2011; Shan et al., 2011; 王未来等, 2021; 张勇等, 2010). 本文收集了 Huang 等 (2023) 在甘孜—玉树断裂带附近区域利用模板扫描和地震去噪筛选后的共 5574 个地震事件, 用于搜寻重复地震. 首先根据地震目录, 截取地震事件波形, 并进行 1~16 Hz 的带通滤波, 再使用基于深度学习的震相拾取工具 PhaseNet (Zhu and Beroza, 2018) 自动拾取 P 波和 S 波震相到时. 结合地震事件与台站分布情况, 选择了 P 波前 2 s 至后 28 s 共 30 s 的时间窗口, 作为互相关计算的时间窗口, 以确保 P 和 S 震相都包含在该时间窗口内, 设置互相关阈值为 0.8. 由于研究区域的台站分布较为稀疏, 本文选择了 S-P 相对到时差的方法来估算地震震源间的距离. 当震源间距离大于地震对的破裂半径之和时, 判定破裂区域重叠.

通过层次聚类对地震事件进行聚类, 共识别了 6 组重复地震, 每一组重复地震组至少包含两个地震事件. 图 3 显示识别到的重复地震组沿着甘孜—玉树断裂带走向展布. 图 4 展示了一组包含两个地震事件的重复地震, 为 YUS 台站记录的垂向分量. 我们可以清楚地观测到高度相似的地震波形, 且震

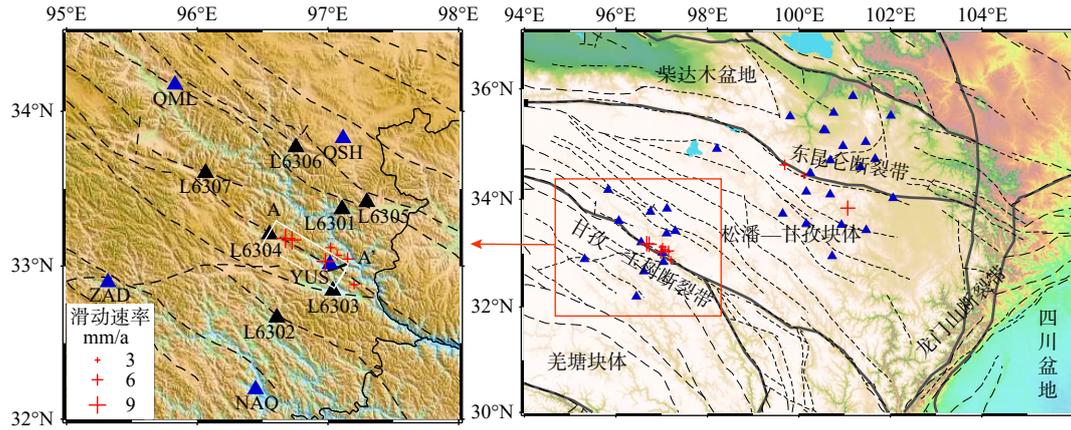


图 3 青海甘孜—玉树断裂带重复地震分布图. 蓝色和黑色三角形分别代表了固定和流动地震台站. 红色十字代表了识别到的重复地震, 大小代表由此估算的滑动速率. 黑色虚线代表区域内断层. 右图中代表了大构造区域, 红色方框指示了研究区域

Fig. 3 The distribution of repeating earthquakes along the GYF. Blue and black triangles denote permanent and temporary seismic stations. Red crosses mark repeating clusters. The sizes of crosses indicate estimated slip rates from repeating earthquakes. Black dashed lines denote faults. The figure on the right suggest a larger map of the study region (the right box)

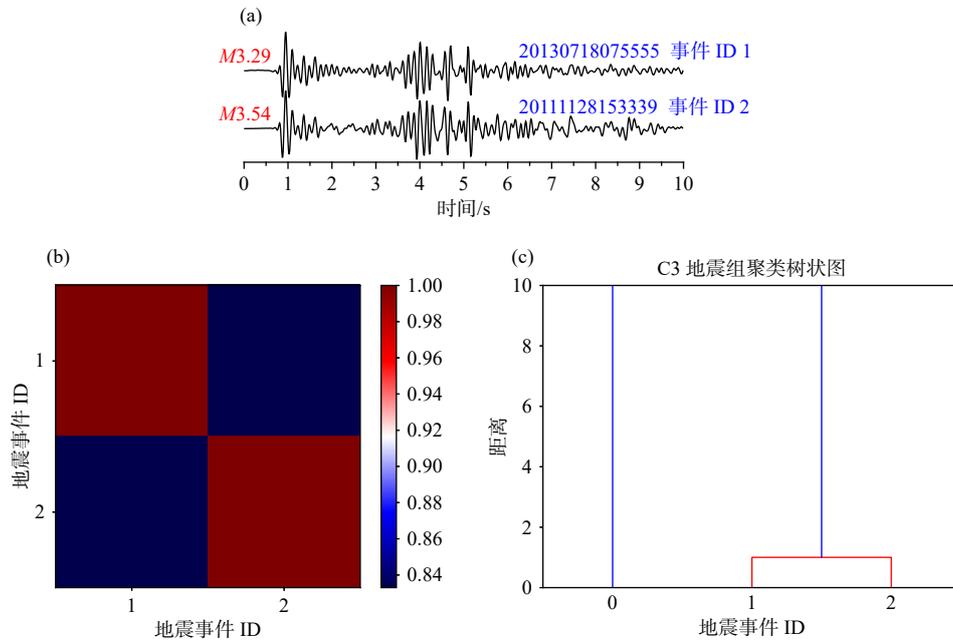


图 4 青海甘孜—玉树断裂带识别到的一个重复地震对. (a) 重复地震波形图, 由台站 YUS 记录到的垂向分量. 左侧和右侧分别表示震级大小和地震发震时刻. (b) 该重复地震组内地震事件的平均互相关系数矩阵, 颜色代表互相关系数大小, 范围在 [0, 1] 之间. (c) 层次聚类过程中 ID 为 1 和 2 的地震事件 (红色实线) 被聚为一组

Fig. 4 An example of repeating cluster detected along the GYF. (a) The vertical component waveforms of the repeating cluster recorded by station YUS. The magnitude and origin time of earthquakes are marked to the left and right, respectively. (b) The average cross-correlation matrix for the repeating cluster. The color represents the cross-correlation coefficient, ranging from 0 to 1. (c) Event ID 1 and 2 (marked by the red solid line) are grouped into a cluster

级相近; 同时根据互相关系数矩阵也容易得知两个地震之间的平均互相关系数为 0.84 左右, 符合设置的互相关系数筛选阈值. 根据识别到的重复地震, 进一步估算断层滑动速率. 基于圆盘破裂的断层模型假设, 估算出地震的破裂半径后, 滑动量 d 可以通过下面的公式估算:

$$d = M_0 / \mu \pi r^2 \quad (5)$$

其中, μ 为剪切模量, 取 3×10^{10} . 选择发生间隔大于 50 天的重复地震, 根据重复地震的累积滑动量的线性拟合来获取最终的断层滑动速率. 结果显示, 甘孜—玉树断裂带的滑动速率范围在 3.3~10.8 mm/a, 平均滑动速率为 7.4 mm/a.

2.2 东昆仑断裂带

东昆仑断裂带是松潘—甘孜地块与柴达木地块

的边界, 呈现近东西走向. 百余年来东昆仑断裂带曾先后发生了 1902 年阿拉克湖西 7 级地震、1937 年花石峡 7.5 级地震、1963 年阿拉克湖东 7 级地震和 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震, 但是在东昆仑断裂带东段 (98°E 以东) 尚未有破坏性大地震的记载 (Lin et al., 2006). 马胜男等 (2024) 使用模板匹配技术对东昆仑断裂带东段地区进行小震识别与定位, 共获得 7427 个地震事件. 本文收集了这些定位后的地震事件, 进行重复地震的识别. 首先对每个地震事件波形进行 1~16 Hz 的带通滤波, 再使用 PhaseNet 人工拾取 P 和 S 震相. 结合研究区域的地震与台站分布, 选择了 P 波前 2 s 至后 28 s 共 30 s 的时间长度作为互相关计算窗口, 互相关阈值设置为 0.8, 并且筛选复发间隔大于 50 天的重复地震计算断层滑动速率.

最终一共识别到了 3 组重复地震 (图 5), 显示有 2 组重复地震沿着东昆仑断裂带的走向展布. 图 6 所示, 可以观测到地震波形高度相似, 根据互相关系数矩阵获得平均互相关系数在 0.84 以上. 沿主断裂带由西至东估算出的断层滑动速率分别为 6.8、4.3 和 9.7 mm/a, 平均滑动速率为 6.9 mm/a.

3 讨论与结论

通过横跨断层的 GPS 观测数据, 使用地表水平位移或者形变来分析甘孜—玉树断裂带、东昆仑断裂带的构造变形和速度场, 已经取得了众多研究

成果 (王敏等, 2003; 张培震等, 2002, 2003). 位于松潘—甘孜地块的南缘的甘孜—玉树断裂带, 野外构造地质观测数据显示平均滑动速率为 3.1~8.0 mm/a (彭华等, 2006). 青藏高原向东的力的作用, 释放在甘孜—玉树断裂带上约为 8 mm/a (Lin et al., 2006; Zhang et al., 2004). 本文通过识别到的 6 组重复地震, 估算平均滑动速率, 约为 7.4 mm/a, 这与地质观测资料和大地测量技术是一致的.

位于松潘—甘孜地块北边界的近东西走向的东昆仑活动断裂, 在西段、中段和东段呈现不同的滑动速率, 具有较大的差异. 形变资料显示东昆仑断裂带的平均走旋走滑速率为 7~15 mm/a, 中部各段走滑速率较高, 向两端逐渐衰减 (Wang et al., 2001; 张培震等, 2002). 东昆仑断裂带中西段 (98°E 以西) 的左旋走滑速率为 10~12 mm/a, 而相对中西段, 断裂带东段滑动速率变低, 在托索湖段滑动速率降低至 6~7 mm/a, 玛曲段附近则下降至 2~6 mm/a (Harkin et al., 2010; Kirby et al., 2007; 李陈侠等, 2011; Wang et al., 2017). 通过识别到的沿着东昆仑东段玛曲段分布的 2 组重复地震, 由西至东估算的滑动速率分别为 4.3 mm/a 和 6.8 mm/a, 这与大地测量资料的结果基本一致, 显示出该区域存在复杂的动力作用过程.

针对重复地震识别过程中面临的时间成本高和效率低等问题, 本文结合机器学习, 发展了一个自动高效的基于聚类的重复地震识别方法. 该方法首

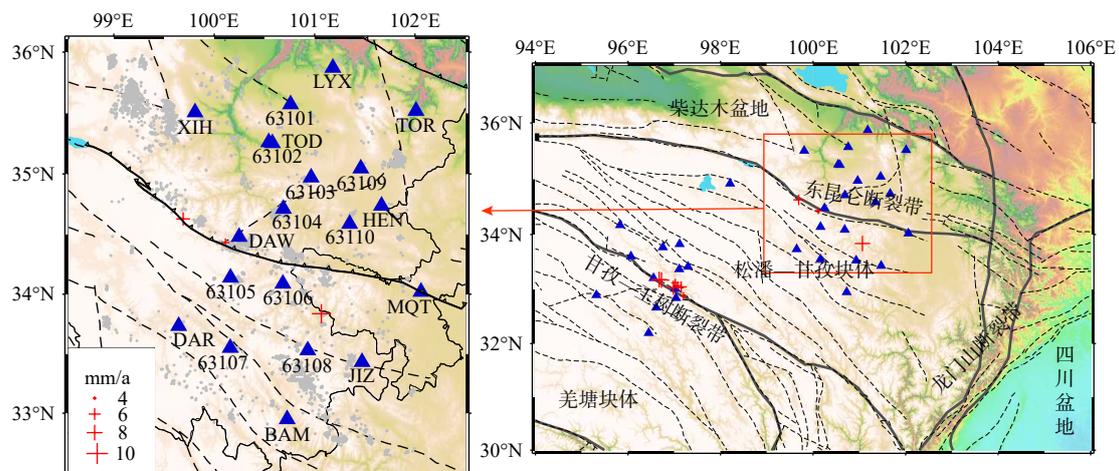


图 5 青海东昆仑断裂带东段重复地震分布图. 灰色圆圈代表定位后的地震事件, 三角形代表地震台站, 红色十字代表识别到的重复地震, 大小代表估算的滑动速率. 黑色虚线代表区域内的断层. 右图中代表了大构造区域, 红色方框指示了研究区域

Fig. 5 The distribution of repeating earthquakes along the EKLf. Gray circles denote events after relocation. Triangles donate seismic stations. Red crosses mark repeating clusters. The sizes of crosses indicate estimated slip rates from repeating earthquakes. Black dashed lines denote faults. The figure on the right suggests a larger map of the study region (the red box)

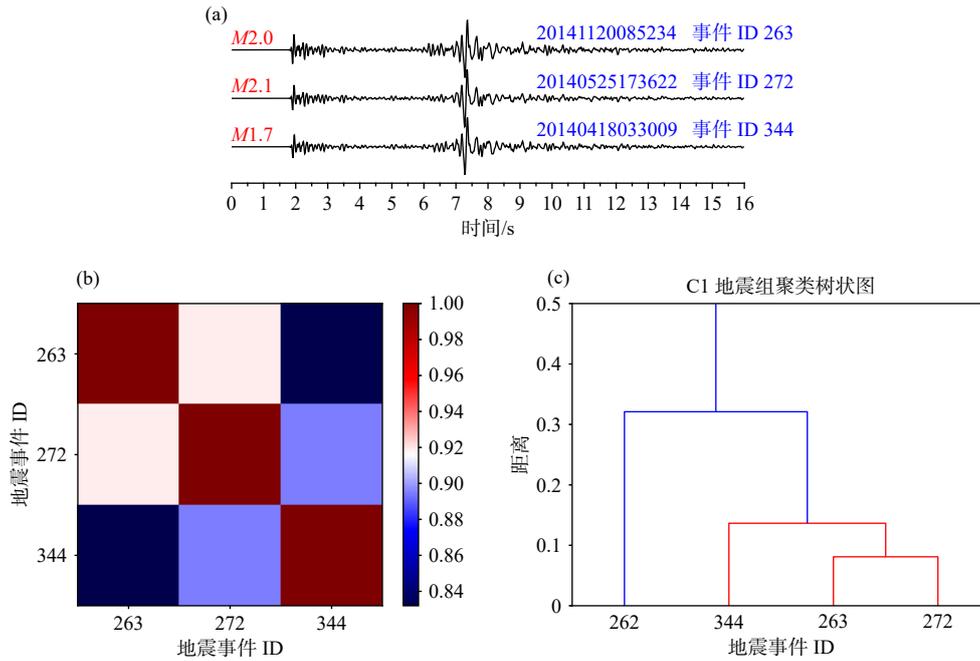


图 6 青海东昆仑断裂带东段识别到的一组重复地震。(a) 重复地震波形图, 由台站 JIZ 记录到的垂向分量. 左侧和右侧分别表示震级大小和地震发震时刻。(b) 该重复地震组内地震事件的平均互相关系数矩阵, 颜色代表互相关系数大小, 范围在 [0, 1] 之间。(c) 层次聚类过程中 ID 为 263、272、344 的地震事件 (红色实线) 被聚为一组

Fig. 6 An example of repeating cluster detected along the EKLf. (a) The vertical component waveforms of the repeating cluster recorded by station JIZ. The magnitude and origin time of earthquakes are marked to the left and right, respectively. (b) The average cross-correlation matrix for the repeating cluster. The color represents the cross-correlation coefficient, ranging from 0 to 1. (c) Event ID 263, 272 and 344 (marked by the red solid line) are grouped into a cluster

先采用并行的波形互相关技术大幅提升计算互相关系数, 然后引入 S-P 到时差方法, 解决台站稀疏情况下震源之间的距离估算问题. 最后, 利用机器学习中的无监督学习方法层析聚类对地震进行聚类, 获得重复地震组. 本文利用该方法研究了青海甘孜—玉树断裂带和东昆仑断裂带附近的地震活动. 在甘孜—玉树断裂带和东昆仑断裂带附近分别识别到 6 组和 3 组重复地震, 由此估算两处断裂带的平均滑动速率分别为 7.4 mm/a 和 6.9 mm/a.

References

Beeler N M, Lockner D L, Hickman S H. 2001. A simple stick-slip and creep-slip model for repeating earthquakes and its implication for microearthquakes at Parkfield[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(6): 1797-1804.

Beyreuther M, Barsch R, Krischer L, et al. 2010. ObsPy: A Python toolbox for seismology[J]. *Seismological Research Letter*, 81(3): 530-533.

Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 75(26): 4997-5009.

Cauchie L, Lengline O, Schmittbuhl J. 2020. Seismic asperity size evolution during fluid injection: case study of the 1993 Soultz-sous-Forets injection[J]. *Geophysical Journal International*, 221(2): 968-980.

Eshelby J D. 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 241(1226): 376-396.

Gao D W, Kao H, Wang B. 2021. Misconception of waveform similarity in the identification of repeating earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(13): e2021GL092815.

Gillis N, Kuang D, Park H. 2015. Hierarchical clustering of hyper-spectral images using rank-two nonnegative matrix factorization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4): 2066-2078.

Harkins N, Kirby E, Shi X, et al. 2010. Millennial slip rates along the eastern Kunlun fault: Implications for the dynamics of intracontinental deformation in Asia[J]. *Lithosphere*, 2(4): 247-266.

Huang Y F, Li H Y, Ma Y H, et al. 2023. Long-term spatial-temporal evolution of seismicity of the 2010 $M_s7.1$ Yushu, Qinghai, China earthquake[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 1-9.

Kanamori H, Anderson D L. 1975. Theoretical basis for some empirical relations in seismology[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5): 1073-1095.

Kirby E, Harkins N, Wang E Q, et al. 2007. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault[J]. *Tectonics*, 26(2): TC2010.

Li C X, Xu X W, Wen X Z, et al. 2011. Rupture segmentation and slip partitioning of the mid-eastern part of the Kunlun Fault, north Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Science*, 41(9): 1295-1310 (in Chinese).

Li L, Chen Q F, Niu F L, et al. 2011. Deep slip rates along the Long-

- men Shan fault zone estimated from repeating microearthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B9): B09310.
- Li L, Chen Q F, Niu F L, et al. 2013. Estimates of deep slip rate along the Xiaojiang Fault with repeating microearthquake data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(10): 3373-3384 (in Chinese).
- Li Z, Elliott J R, Feng W, et al. 2011. The 2010 M_w 6.8 Yushu (Qinghai, China) earthquake: Constraints provided by InSAR and body wave seismology[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116: B10302.
- Lin A, Guo J, Kano K, et al. 2006. Average slip rate and recurrence interval of large magnitude earthquakes on the western segment of the strike-slip Kunlun fault, northern Tibet[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(5): 1597-1611.
- Ma S N, Li H Y, Huang Y F, et al. 2024. Microearthquake detection and structural analysis of the eastern segment of the east Kunlun fault zone in the Tibetan plateau[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 19(2): 276-287.
- Matsubara M, Yagi Y, Obara K. 2005. Plate boundary slip associated with the 2003 Off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(8): L08316.
- Nadeau R M, McEvilly T V. 1999. Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes[J]. *Science*, 285(5428): 718-721.
- Peng H, Ma X M, Bai J Q, Du D P. 2006. Characteristics of Quaternary activities of the Ganzi-Yushu fault zone[J]. *Journal of Geomechanics*, 12(3): 295-304 (in Chinese).
- Peng Z G, Ben-Zion Y. 2005. Spatiotemporal variations of crustal anisotropy from similar events in aftershocks of the 1999 $M7.4$ İzmit and $M7.1$ Düzce, Turkey, earthquake sequences[J]. *Geophysical Journal International*, 160(3): 1027-1043.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2011. The co-seismic Coulomb stress change and expected seismicity rate caused by 14 April 2010 $M_S=7.1$ Yushu, China, earthquake[J]. *Tectonophysics*, 510(3-4): 345-353.
- Vidale J E, Ellsworth W L, Cole A, et al. 1994. Variations in rupture process with recurrence interval in a repeated small earthquake[J]. *Nature*, 368(6472): 624-626.
- Waldhauser F, Ellsworth L W. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6): 1353-1368.
- Wang M, Shen Z K, Niu Z J, et al. 2003. Current crustal movements and activate tectonic block models in mainland China[J]. *Science China Earth Science*, 33(S1): 21-32+209 (in Chinese).
- Wang Q, Zhang P Z, Freymuller J T, et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. *Science*, 294(5542): 574-577.
- Wang W L, Fang L H, Wu J P, et al. 2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 M_S 7.4 Maduo Earthquake, Qinghai, China[J]. *Science China Earth Science*, 51(7): 1193-1202 (in Chinese).
- Wang Y Z, Wang M, Shen Z K. 2017. Block-like versus distributed crustal deformation around the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 140(9): 31-47.
- Wu W, Zhan Z, Peng S, et al. 2020. Seismic ocean thermometry[J]. *Science*, 369(6510): 1510-1515.
- Yamada M, Mori J, Matushi Y. 2016. Possible stick-slip behavior before the Rausu landslide inferred from repeating seismic events[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(17): 9038-9044.
- Yang Y, Song X. 2020. Temporal changes of the inner core from globally distributed repeating earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(3): e2019JB018652.
- Yu W C, Song T R, Silver P G. 2013. Repeating aftershocks of the great 2004 Sumatra and 2005 Nias earthquakes[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 67-68: 153-170.
- Zhang P Z, Wang Q, Ma Z J. 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 430-441 (in Chinese).
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. 2003. The strong earthquake activities and active tectonic blocks in mainland China[J]. *Science China Earth Science*, 33(S1): 12-20 (in Chinese).
- Zhang P Z, Shen Z, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. *Geology*, 32(9): 809-812.
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. 2010. Source process of the 2010 Yushu, Qinghai, earthquake[J]. *Science China Earth Science*, 40(7): 819-821 (in Chinese).
- Zhu W Q, Beroza G C. 2018. PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival time picking method[J]. *Geophysical Journal International*, 216(1): 261-273.

附中文参考文献

- 李陈侠, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2011. 东昆仑断裂带中东部地震破裂分段性与走滑运动分解作用[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 41(9): 1295-1310.
- 李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等. 2013. 基于重复微震的小江断裂带深部滑动速率研究[J]. *地球物理学报*, 56(10): 3373-3384.
- 马胜男, 李红谊, 黄雅芬, 等. 2024. 青藏高原东昆仑断裂带东段微震检测与构造分析[J]. *震灾防御技术*, 19(2): 276-287.
- 彭华, 马秀敏, 白嘉启, 杜德平. 2006. 甘孜玉树断裂带第四纪活动特征[J]. *地质力学学报*, 12(3): 295-304.
- 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 2003. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 33(增刊): 21-32+209.
- 王未来, 房立华, 吴建平, 等. 2021. 2021年青海玛多 M_S 7.4地震序列精定位研究[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 51(7): 1193-1202.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. *地学前缘*, 9(2): 430-441.
- 张培震, 邓超东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 33(S1): 12-20.
- 张勇, 许力生, 陈运泰. 2010. 2010年青海玉树地震震源过程[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 40(7): 819-821.