

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.206>



四川木里 2017 年 $M_L4.9/M_S4.4$ 级地震序列高精度地震目录重建

柳存喜¹, 刘骅标², 张晨¹, 刘冠男³, 杜兴忠²

1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610051

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州贵阳 550000

3. 电子科技大学资源与环境学院, 四川成都 611731

摘要: 为了认识四川木里 2017 年 $M_L4.9/M_S4.4$ 级地震序列活动特征, 基于轻量化人工智能方法、模板匹配技术及地震定位方法, 构建了从原始连续地震波形数据到地震震相检测、地震事件识别、地震定位的全流程框架, 对四川木里 $M_L4.9/M_S4.4$ 级地震震源区周边 60 km 内 2017 年 9 月 1 日至 9 月 30 日期间 28 个台站记录的原始连续地震波形数据进行了处理, 重建了包括前震、主震及余震序列 9 252 次事件的高分辨率地震目录, 结合 43 次 $M_L \geq 2.5$ 级地震震源机制解对本次地震序列进行了分析, 高精度地震目录反映出了更符合震级-频度关系分布的规律, 并清晰地揭示了地震时空演化特征. 本次地震序列发生在锦屏山断裂所围限的 NW-SE 向复杂走滑型断层系统内部, 地震序列自主震向 NW 和 SE 双向扩展, 初步推测其成因为余滑作用驱动.

关键词: 木里地震; 地震目录; 地震检测识别; 全流程框架; 地震学.

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2026)01-173-12

收稿日期: 2025-06-30

2017 $M_L4.9/M_S4.4$ Muli, Sichuan, Earthquake Sequence: A High-Precision Seismic Catalog Reconstruction

Liu Cunxi¹, Liu Huabiao², Zhang Chen¹, Liu Guannan³, Du Xingzhong²

1. *Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China*

2. *Guiyang Engineering Corporation Limited of Power China, Guiyang 550000, China*

3. *School of Resources and Environment, University of Electronical Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*

Abstract: To investigate the characteristics of the 2017 $M_L4.9/M_S4.4$ earthquake sequence in Muli, Sichuan, an end-to-end framework, involving raw continuous seismic waveform data processing to seismic phase detection, earthquake event identification, and earthquake location, was constructed based on lightweight artificial intelligence methods, template matching techniques, and earthquake location methods. This system was used to process raw waveform data from 28 stations within a 60 km radius of the epicentral area between September 1 and 30, 2017, reconstructing a high-resolution seismic catalog containing 9 252 foreshocks, mainshocks, and aftershocks. Based on focal mechanism solutions of 43 $M_L \geq 2.5$ earthquakes, it conducted a comprehensive analysis of the seismicity patterns. The refined catalog exhibits enhanced consistency with Gutenberg-Richter

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2022YFC3004402).

作者简介: 柳存喜(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事地震监测等相关工作. ORCID: 0000-0002-6370-9696. E-mail: tsunxi@yeah.net

引用格式: 柳存喜, 刘骅标, 张晨, 刘冠男, 杜兴忠, 2026. 四川木里 2017 年 $M_L4.9/M_S4.4$ 级地震序列高精度地震目录重建. 地球科学, 51(1): 173–184.

Citation: Liu Cunxi, Liu Huabiao, Zhang Chen, Liu Guannan, Du Xingzhong, 2026. 2017 $M_L4.9/M_S4.4$ Muli, Sichuan, Earthquake Sequence: A High-Precision Seismic Catalog Reconstruction. *Earth Science*, 51(1): 173–184.

magnitude-frequency statistics and clearly delineates spatiotemporal evolutionary features. The seismic sequence occurred within a complex NW-SE trending strike-slip fault system bounded by the Jinpingshan Fault, with the bilateral expansion of events from the mainshock toward the NW and SE, and it was preliminarily attributed to driving by afterslip.

Key words: Muli earthquake; seismic catalog; seismic detection and identification; end-to-end framework; seismology.

0 引言

2017年9月12日四川木里发生 $M_L4.9/M_S4.4$ 级地震(木里地震),震前3 min发生 $M_L3.0$ 、 $M_L4.0$ 级地震各1次,震后10天内记录了近10次 $M_L\geq 3.0$ 级的余震事件,地震序列呈现显著前震-主震-余震活动特征.本次地震序列发生在作为川滇菱形块体内部次级块体边界的丽江-小金河断裂带(计昊旻等, 2024)的西北侧(图1),整个地震序列被围限在锦屏山推覆构造带内.地震序列中心距丽江-小金河断裂约20 km(图1),震源区周边整体以推覆构造为主导,呈西北向东南的逆冲推覆运动(余明烈, 1990).研究表明丽江-小金河断裂以木里为界在东北段呈

强闭锁状态(刘晓霞和邵志刚, 2020),断裂具有发生6级以上地震的能力(徐锡伟等, 2017; 丁锐等, 2018).根据国家地震科学数据中心(<https://data.earthquake.cn>)记录,沿着丽江-小金河断裂,在木里地震震源区西南侧曾发生1954年 $M_S5.2$ 、1976年 $M_S5.6$ 、 $M_S6.7$ 、1978年 $M_S5.6$ 及2001年 $M_S6.0$ 等5次中强地震(图1),在震源区东北侧地震活动总体处于较弱水平.研究本次地震序列为认识木里周边推覆构造带内断层几何形态、地震活动特征具有重要科学意义.高精度地震目录是刻画断层几何形态、反映断层变形机制的重要手段(Ross *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2021; Lomax and Savvaidis, 2022).当前主流的地震目录构建方法包括模板匹配检测和人工智

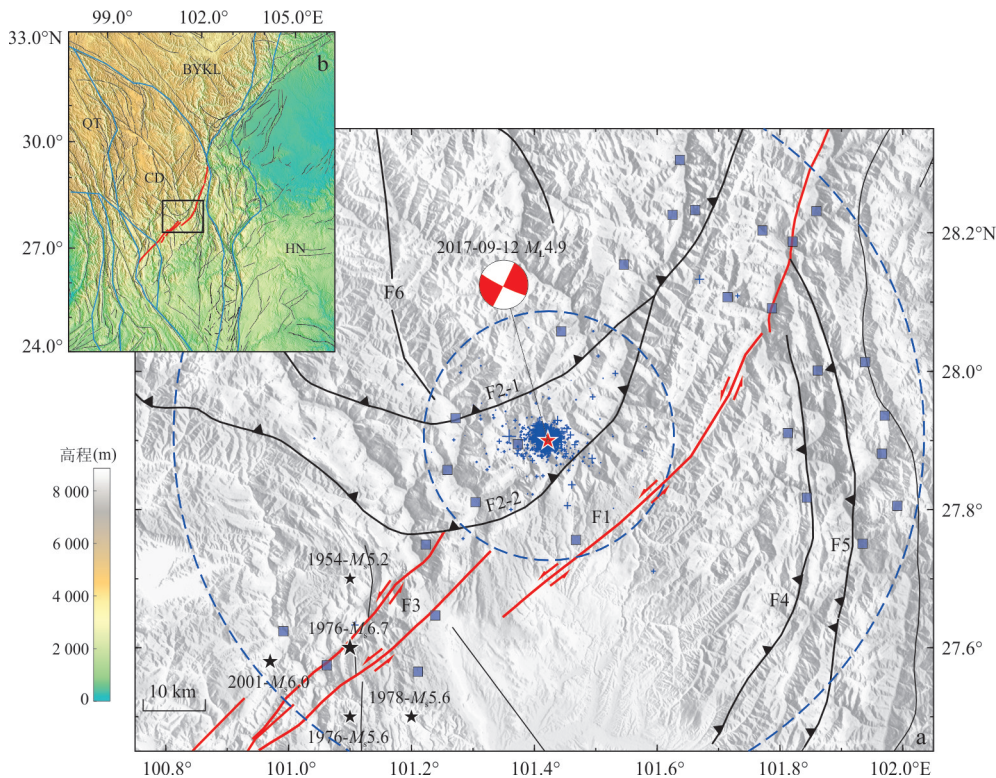


图1 木里地震震源区构造分布图

Fig.1 Tectonic distribution map of the Muli earthquake seismogenic zone

a. 实线代表断层 (Wu *et al.*, 2024), 红色 F1、F3. 丽江-小金河断裂带; 黑色 F2-1、F2-2. 锦屏山断裂; 黑色 F4. 盐源断裂; 黑色 F5. 金沙江-澜沧江断裂; 黑色 F6. 理塘断裂; 红色五角星代表木里地震震中, 红色沙滩球代表震源机制解, 蓝色十字代表人工拾取余震震中, 黑色五角星代表震源区沿着丽江-小金河断裂震级在 $M_S\geq 5.0$ 地震事件, 蓝色方块代表震源区周边 60 km 台站分布, 蓝色的虚线分别代表距木里地震震中 20 km、60 km 等值线. b. 黑色方框代表研究区域, 红色线条代表丽江-小金河断裂带, 淡蓝色线条代表板块边界 (张培震等, 2003). CD. 川滇块体; HN. 华南块体; QT. 羌塘块体; BYKL. 巴颜喀拉块体

能检测.其中基于人工智能的震相检测技术凭借高效波形特征提取能力,可快速构建长时间序列、大样本地震目录(Ross *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2022),但人工智能震相识别模型是在人工拾取数据集上进行训练的(Zhang and Fang, 2025).人工拾取的微震事件受噪声、人为分析认识等因素影响,微震事件的拾取精度、准确性均受到制约,训练集受到相应影响,基于人工智能的震相检测技术对小震级地震事件检测存在一定的不确定性.相比之下,模板匹配方法通过波形互相关检测,在微震事件检测方面显示出明显的优势,虽计算成本较高,却能显著提升目录完备性(Mousavi *et al.*, 2020),并能够测量互相关走时差,便于HypoDD(Waldhauser and Ellsworth, 2000)、GrowClust(Trugman and Shearer, 2017)等相对定位算法实现更高精度定位,但基于模板匹配的地震识别技术依赖预先准备的模板事件.近年来,融合两类方法优势的混合框架在2013年云南洱源地震(Liu *et al.*, 2022)、2021年云南漾濞地震(Zhou *et al.*, 2021)的高精度地震目录构建、断层成像中表现出了显著的潜力.

本文以木里地震序列为切入点,利用人工智能地震识别技术与模板匹配技术共同约束的策略,结合地震绝对定位和相对定位方法构建了包括木里地震前震、主震及余震序列地震事件的高精度地震目录.通过高分辨率目录分析了地震序列时空演化特征,结合基于初动的小地震震源机制解讨论了断层结构和地震活动特征,为认识锦屏山推覆带浅部构造几何形态提供了关键观测约束,对深入理解丽江-小金河断裂闭锁-解锁动力学过程具有重要的参考意义.

1 地震构造背景

丽江-小金河断裂带位于青藏高原东南缘,是川滇菱形地块内一条重要的左旋走滑断裂带(图1b),形成于中生代龙门山-锦屏山逆冲推覆构造带上.受印度板块与欧亚板块的碰撞,青藏高原东南向挤出,新生代以来丽江-小金河断裂带随着川滇块体东南向挤出生顺时针旋转(徐锡伟等, 2003; 张天继等, 2024).在复杂的构造作用中孕育了该断裂北东段以左旋走滑为主兼逆断层分量、南西段以左旋走滑为主兼有正断层分量的特征(丁锐等, 2018),形成了切割川滇菱形地块的重要二级边界

断层(Chen *et al.*, 2024),向NE120°~165°方向运动(张培震等, 2003),其水平滑动速率为3~4 mm/a(计昊旻等, 2024).丽江-小金河断裂带呈NE分布,倾向NW,倾角为60°~80°,全长300余公里,南起剑川盆地,北与鲜水河断裂在石棉附近交汇,断裂带大致以木里和丽江为分割点呈三段(丁锐等, 2018; Li *et al.*, 2023),木里地震序列发生在丽江-小金河断裂带分割点木里附近(图1a).

丽江-小金河断裂带附近区域被认为是青藏高原物质向东南方向流动的重要通道(Dong *et al.*, 2024),该断裂带形成与青藏高原的隆升和向东南方向扩展有关,其活动方式和强度直接影响着区域地壳的稳定性与地震活动(Chen *et al.*, 2024).丽江-小金河断裂周边强震频发,1900年以来, $M_S \geq 5.0$ 级地震超过80次,其中最大震级为1996年宁蒗7.5级地震,最近一次为2022年宁蒗 $M_S 5.5$ 级地震.在空间上,丽江-小金河断裂带强震活动以木里为界,其中丽江-小金河断裂北东段的木里至冕宁为 $M_S 5.0$ 级地震空区(张天继等, 2024),地震活动总体呈较弱状态(李乐等, 2008), $M_S 5.0$ 级以上地震均发生在木里以西.基于古地震的研究表明全新世在丽江-小金河断裂中段存在3次古地震,最大地震高达 $M 7.5$ 级,复发周期约3000年(丁锐等, 2018),其他研究也表明丽江-小金河断裂存在发生7级地震的可能(刘晓霞和邵志刚, 2020; Li *et al.*, 2023).

2 数据和方法

2.1 数据

本研究挑选了木里地震震源区周边60 km范围内的28个地震台站记录的原始连续地震波形数据进行处理(图1),台站中26个为FSS-3M型的2 s~40 Hz短周期地震计,2个为BBVS-60型的2 s~60 Hz宽频带地震计.台站连续波形数据时间范围为2017年9月1日至2017年9月30日,采样率为100 Hz.

2.2 地震目录构建流程及方法

结合轻量化人工智能方法LPPN(Yu and Wang, 2022)和模板匹配技术MESS(Zhou *et al.*, 2022)及绝对定位方法HypoInverse(Klein, 2002)和相对定位方法HypoDD(Waldhauser and Ellsworth, 2000),设计了从原始连续地震波形到地震震相检测、地震事件识别、地震定位的流程(图2),通过对原始连续地震波形数据处理,构建了木里地震前震、主震及余震序列高精度地震目录.

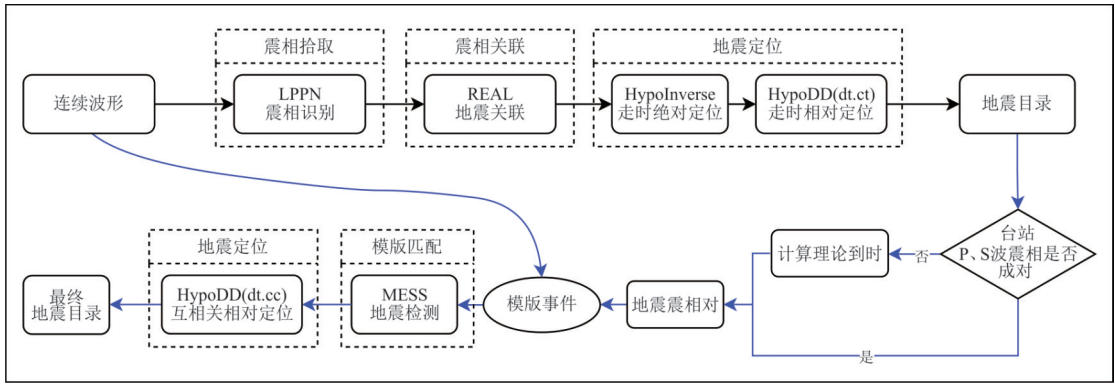


图 2 地震震相检测、事件识别及精定位流程

Fig.2 Integrated workflow of seismic phase detection, event identification and precise hypocenter relocation
黑色、蓝色流程线分别代表 LPPN、MESS 方法输入输出关系

2.2.1 人工智能震相检测和地震识别 LPPN (Yu and Wang, 2022) 是基于轻量化的人工智能地震震相拾取方法, 该方法采用深度分离卷积优化了理论计算复杂度、同时也减少了训练参数, 模型使用全国 100 Hz 数据训练, 具有良好的泛化能力, 得到了广泛应用. 在木里地震序列构建中, 初始震相检测采用 LPPN 方法对震源区 28 个台站 30 天的三分量连续地震波形数据进行了初至震相到时拾取, 拾取阈值概率为 0.3.

地震关联是目录构建过程中关键步骤, 本文利用基于走时表的网格搜索方法 REAL (Zhang *et al.*, 2019) 进行地震关联, 该方法通过台站距离、台站个数、震相个数、走时残差等参数共同约束提高关联准确性, 并采用模拟退火法进行初步定位. 本研究中, 地震关联网格搜索在水平方向设置为 0.1° , 间隔 0.02° , 深度范围在 20 km 内, 间隔为 2 km, 每 5 s 识别一个事件; 利用检测到的震相数量进行了严格约束, 将走时残差不超过 0.5 s、同时至少具有 3 个 Pg、Sg 震相且 Pg、Sg 震相总数不小于 8 个的关联为 1 次地震事件, 其中关联采用的走时表是通过在川滇地区公共 3D 速度模型 2.0 (Liu *et al.*, 2023) 中提取的研究区域平均 1D 速度模型构建.

关联后, 利用走时数据首先基于梯度下降反演的绝对位置定位方法 HypoInverse (Klein, 2002) 进行定位, 在绝对定位的基础上再计算到时差, 利用 HypoDD (Waldhauser and Ellsworth, 2000) 进行相对定位. 在木里地震序列定位中, 1D 速度模型与关联阶段所采用的速度模型一致, 在 HypoInverse 绝对定位中对至少有 4 个台站记录的事件进行了定位, 设置了余弦距离加权因子, 距离

为 50 km, 残差为 0.16 s, 在 HypoDD 走时差相对定位中, 设置事件对的最大震源距离为 10 km, 进行了 2 组定位反演, 每组反演迭代 5 次, 两组反演的震源距离 (WDCT) 分别设置为 6 km 和 4 km.

2.2.2 模板匹配震相检测及地震识别 2017 年木里 $M_L 4.9$ 级/ $M_s 4.4$ 级地震序列最终地震目录采用基于模板匹配技术的 MESS 方法构建, 该方法通过模板事件与连续地震波形匹配 (Match)、互相关峰值扩展 (Expand)、检测偏移 (Shift) 及台站叠加 (Stack) 等四步实现地震检测和互相关到时差的测量. 该阶段以人工智能震相检测、地震关联和地震定位后的地震事件作为模板事件, 采用 MESS 对连续地震波形数据进行模板匹配地震检测识别. MESS 在匹配阶段事件模板长度需同时覆盖 P 波和 S 波震相, 为解决在人工智能震相检测、地震关联阶段部分台站存在只检测到 P 波或 S 波震相的情况, 针对台站未检测到的震相基于川滇地区公共速度模型 2.0 计算了理论到时, 构建了 P-S 震相对进行了模板事件约束. 在地震序列检测中, 设置模板事件至少被 4 个台站记录到, 每个台站截取 P 波前 1 s、长度为 9 s 的窗长, 确保覆盖 P 波和 S 波震相; 在基于互相关震相拾取时设置了 P 波窗长为 2 s, S 波窗长为 3 s, 检测互相关阈值为 0.3, 并进行了 1~20 Hz 滤波.

最后基于 MESS 测量地震震相互相关数据和川滇地区公共速度 2.0 模型, 利用 HypoDD 对模板匹配识别的地震事件进行了高精度相对地震定位. 在定位过程中, 选取了至少被 4 个模板同时检测且具有 4 个台站记录, P 波、S 波互相关系数均大于 0.3 的地震事件进行定位, 对选定事件进行了 2 组反演, 每组迭代 5 次, 两组反演

震源距离(WDCC)分别设置为 6 km 和 4 km.

3 结果

基于人工智能的 LPPN 方法检测 Pg 震相 160 835 个、Sg 震相 177 005 个;经 REAL 关联后识别有效 Pg 震相 46 597 个、Sg 震相 53 259 个,初步定位地震事件 5 809 次,采用走时-距离关系评估了关联后的有效 Pg、Sg 震相走时残差,其中 Pg、Sg 震相走时残差在 1.0 s 内的分别占总数的 99.3% 和 95.5%. 对震相到时数据采用 HypoInverse 绝对定位、HypoDD 相对定位后共保留地震事件 5 422 次;以前一阶段识别地震事件为模板,经 MESS 方法检测识别地震 9 475 次,基于互相关数据重定位后,最终共识别地震 9 252 次,地震数量是基于 LPPN 方法检测识别地震数量的 1.7 倍,最终地震目录 E-W、N-S 和 U-D 三个方向的不确定性分别为 2 m、2 m、5 m,平均走时残差为 1 ms,地震分布如图 3 所示.

本研究在全流程地震震相检测、地震关联、定位过程中均作了严格控制,在 REAL 关联阶段通过台站数、走时残差、P 波 S 波震相数目进行了限制,HypoInverse 绝对定位前利用走时-距离关系对误差较大的震相剔除,MESS 完成后通过互相关系数、台站个数、关联模板数量共同约束进行事件识别,最终获得了高精度的地震目录.图 3 为木里地震高精度地震序列空间分布,图 3a 为地震事件在水平方向分布,图 3b 为地震序列与周边断层分布关系,图 3c 为深度上沿着地震序列分布优势方向 AB 剖面两侧 0.8 km 范围内地震事件分布,图 3d~3f 为深度方向上沿着 CD、EF、GH 剖面位置两侧 0.55 km 范围内地震事件分布.

定位结果显示,木里地震震中为 101.422°E 、 27.903°N ,震源深度 9.31 km.通过基于密度聚类的 DBSCAN 方法以邻域(eps)为 0.75、最小地震数量为 80 个的标准进行了地震事件空间聚类.聚类结果显示,地震在水平和深度方向均呈现出显著的丛集

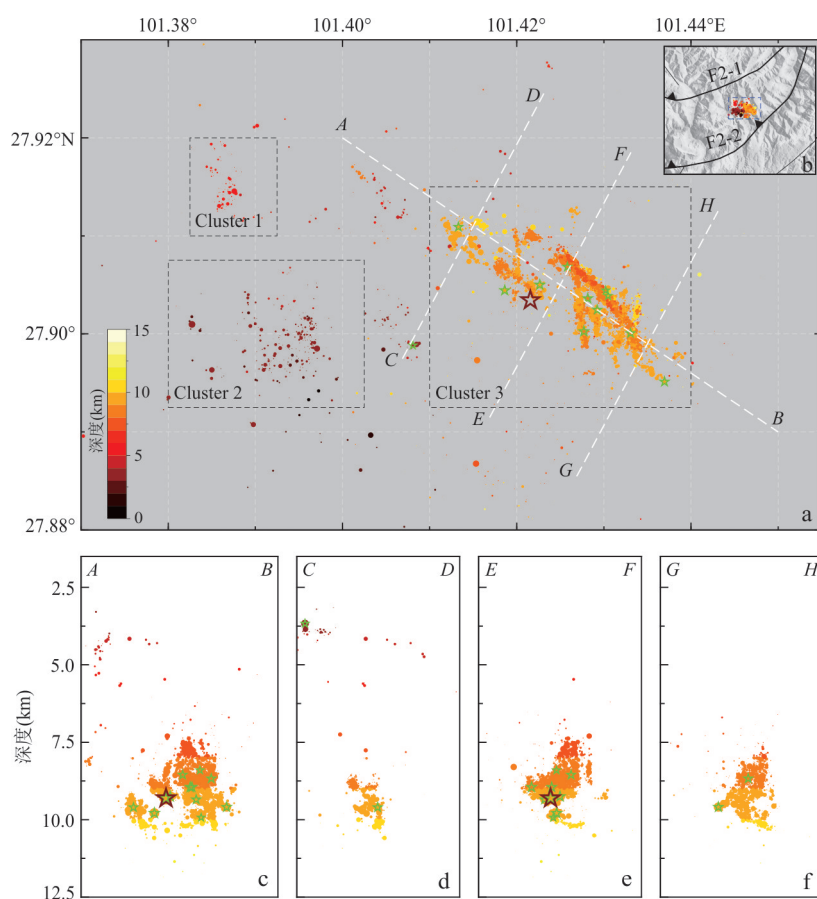


图 3 地震序列分布

Fig.3 Spatial distribution of the earthquake sequence

彩色的点代表不同深度的地震事件,深度颜色代表深度如左下角色标所示;红色五角星代表木里地震,绿色五角星代表地震序列中 $M_L \geq 3.0$ 级地震事件;黑色的虚线框代表 3 个丛集区;白色的虚线代表剖面位置

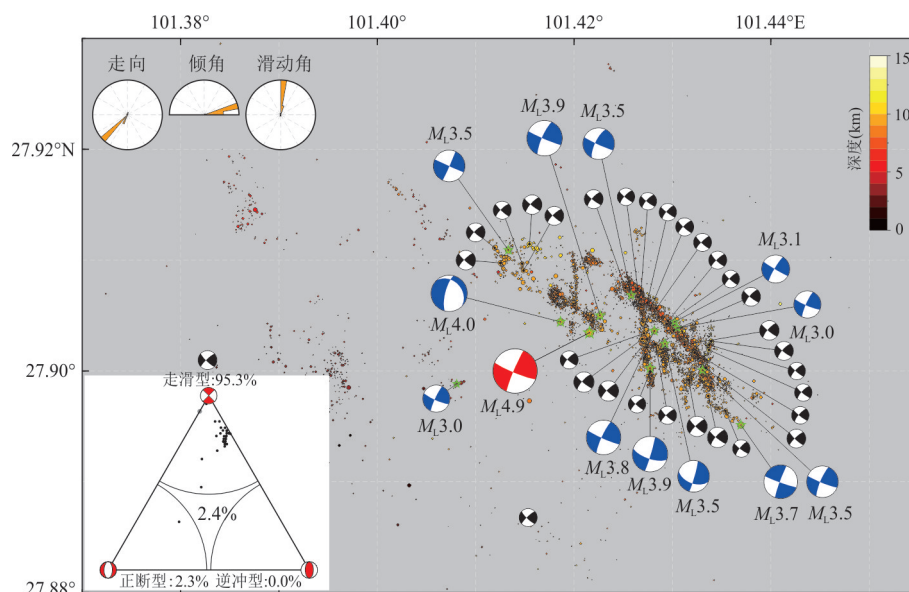


图4 震源机制解、地震类型三角形图解及节面参数统计分布

Fig.4 Synoptic representation of focal mechanisms, seismotectonic classification and nodal plane parameterization

彩色的点代表不同深度的地震震中分布,不同颜色代表的深度如右上角色标所示;红色沙滩球代表 $M_L 4.9$ 级地震震源机制解,蓝色、黑色沙滩球分别代表 $M_L \geq 3.0$ 级、 $2.5 \leq M_L < 3.0$ 级地震事件震源机制解;左下角、左上角分别代表震级 $M_L \geq 2.5$ 级的43次地震事件类型的三角形图解、震源机制解节面参数统计

特征(图3),总体在3个区域丛集(图3a),其中Cluster1、Cluster2主要为前震序列,震源平均深度分别为3.45 km、5.20 km,Cluster3主要为木里地震的余震序列,震源平均深度为8.96 km.余震序列总体分布在主震的东北侧(Cluster3),被围限在锦屏山断裂(F2-1、F2-2)之间(图3b)、呈NW-SE向分布,扩展长度约3.5 km,深度集中在7.5~10.5 km间;局部特征上余震在主震附近呈现出南北向无显著地震活动的区域,结合深度分布特征可以发现在该区域的西侧震源深度由西南向东北逐渐增加(图3d),在空区的东侧呈现出相反特征(图3f),深度剖面(CD、EF、GH)反映出余震序列所勾勒的断层面倾角较陡峭(图3d~3f),沿着走向(AB)断层倾角变化不明显(图3c).

本次研究对 $M_L \geq 2.5$ 级的43次地震事件采用人工分析拾取的初动计算了震源机制解,图4展示了木里地震序列震中分布和震源机制解、震源机制三角解(Frohlich, 1992)及节面分布,结果显示地震事件震源机制解的走向、倾向、滑动角基本一致,以走滑断层型地震为主,其中走滑型地震占95.3%,节面走向优势方向主要集中沿NW-SE和NE-SW两个方向分布,结合余震序列在长轴走向上的分布特征确定节面方向为NW-SE向.高精度的地震分布勾勒出了木里地震序列清晰的几何形态,结合震源机制解特征反映出本次地震序

列发生在一个呈NW-SE分布的走滑型断层系统.

4 讨论分析

4.1 检测结果对比

图5显示了木里地震震源区2017年9月份人工拾取分析地震目录(图5a)、人工智能震相检测目录(图5b)及模板匹配震相检测目录(图5c),其中人工挑选地震目录按照常规流程构建,即根据经验人工拾取可分辨震相并采用locate3D定位方法进行定位,地震目录共包含3 843次地震,平均走时残差0.39 s.与人工拾取地震目录在空间分布(图5a)相比,重建地震目录具有更高的分辨率,表现出了明显丛集特征(图5c).人工拾取目录(图5a)基于川滇三维速度模型(吴建平等, 2009)绝对定位构建,地震事件在空间上呈有序的规则分布,定位位置准确度在水平和深度方向均表现较差,不能清晰反映地震事件在空间上演化,无法达到刻画断层几何形态的目的.本研究重建的地震目录最终相对走时残差为0.01 s、水平方向定位不确定度优于2 m、垂直不确定度优于5 m,地震事件分布清晰地反映出震源在空间上变化,地震事件在水平方向和深度方向呈明显的丛集特征(图5c).与基于走时定位的目录相比(图5b),基于互相关数据的相对定位对地震

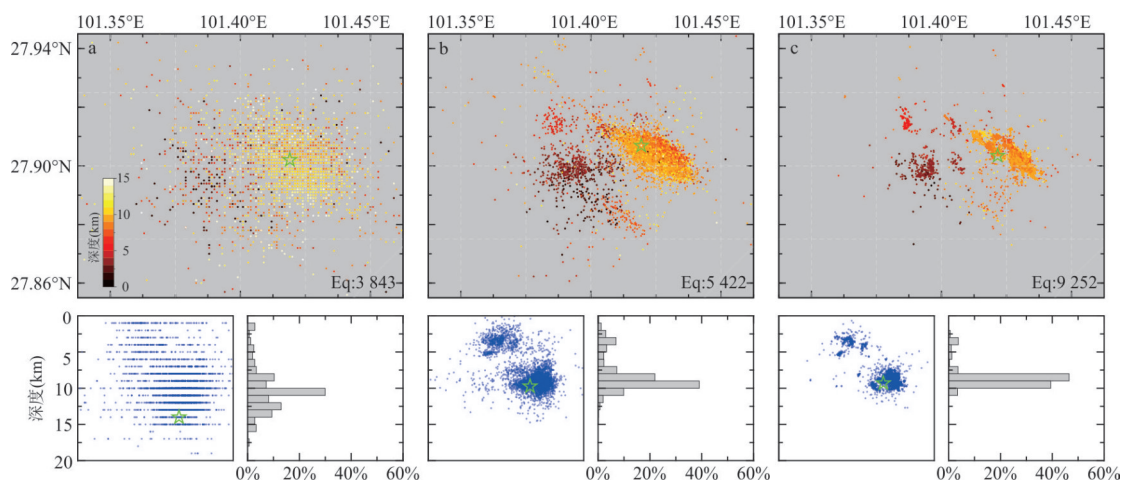


图 5 检测定位结果对比

Fig.5 Comprehensive benchmarking between manually curated catalogs and algorithmically generated seismicity inventories

a. 人工拾取分析地震目录; b. 人工智能震相检测目录; c. 模板匹配震相检测目录. 绿色五角星代表木里地震位置

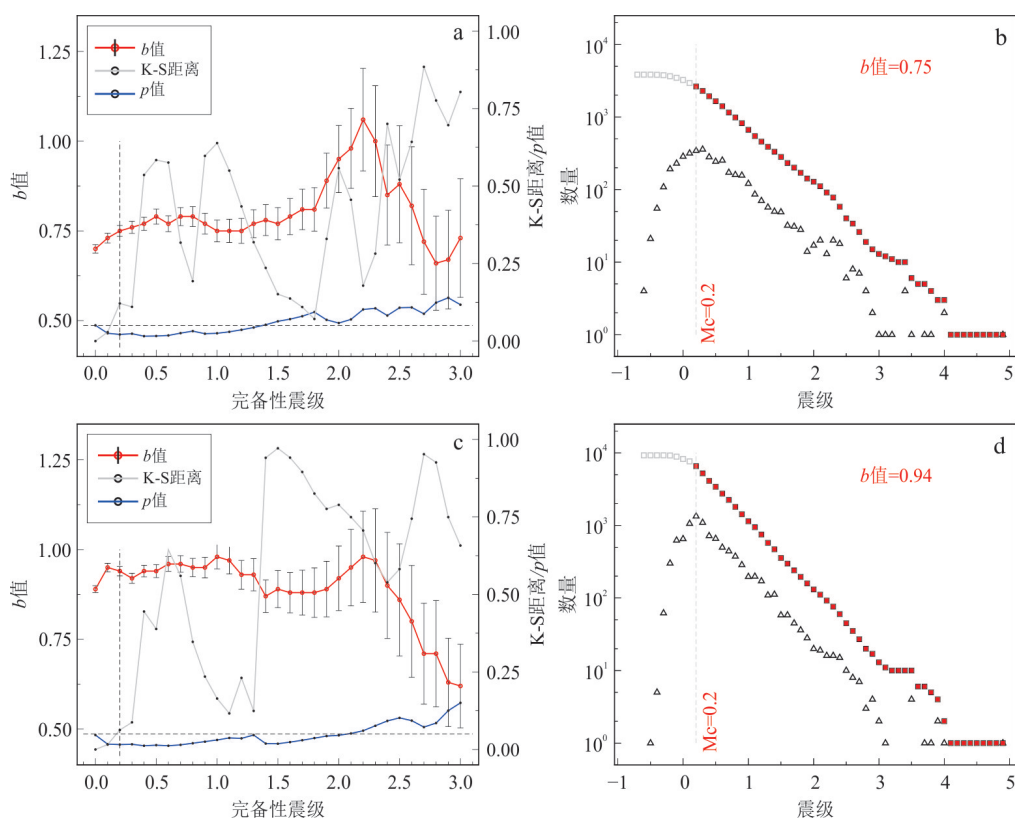


图 6 地震目录统计分析对比

Fig.6 Statistical benchmarking of manually curated and algorithmically generated seismic catalogs

a、b. 分别为人工拾取地震目录 M_c 与 b 值关系、震级-频度关系分布; c、d. 分别为本文构建地震目录 M_c 与 b 值关系、震级-频度关系分布. 图 a、c 中 b 值分布中竖线表示 b 值计算的残差

序列具有显著的约束作用,为进一步分析地震活动特征提供了条件.

地震的震级-频度分布遵循古腾堡-里克特定律(G-R定律)(Gutenberg and Richter, 1944),这一定律是验证地震目录质量的重要手段.本研究采用

同时估计 b 值和 M_c 的方法(Mizrahi *et al.*, 2021),通过 10 000 次与原始样本量相同的随机抽样模拟实现,每组样本计算观测累积分布函数(CDF)与理论 CDF 的 K-S 距离进行比较,分别计算了人工拾取地震目录和本研究重建地震目录的完备性震级 M_c

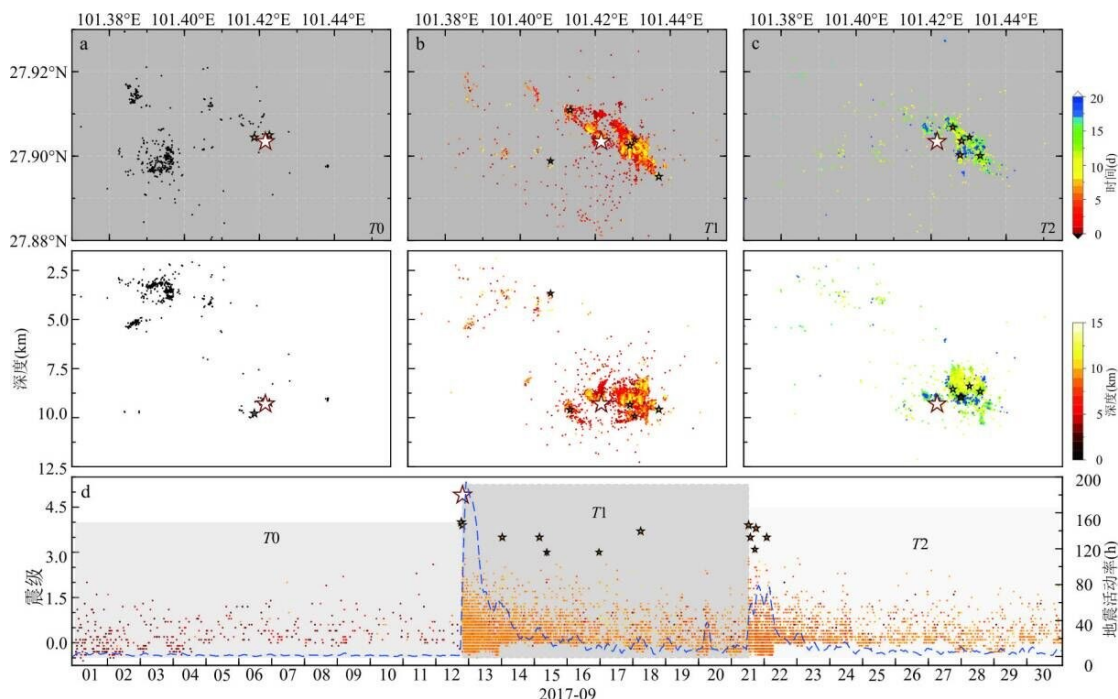


图7 地震活动时空演化分布

Fig.7 Evolution of seismicity distribution

a. T0(9月1日-9月12日18时)为木里地震前阶段;b. T1(9月12日18时-9月21日12时)木里地震后、 M_L 3.9级最大余震发生前阶段;c. T2(9月21日12时-9月30日) M_L 3.9级最大余震发生后阶段;图a~c中的不同颜色代表以木里地震为参考点的时间;d. 时间与震级、地震活动率分布,蓝色虚线代表地震活动率,不同颜色的点代表地震震源深度.图中红色五角星代表木里地震,黑色五角星代表地震序列中 $M_L \geq 3.0$ 的地震

和 b 值, p 值为K-S距离超过 M_c 的比例,取 p 值大于0.05对应的震级为最小完备性震级,其中人工拾取目录完备性震级为 M_L 0.2, b 值为0.75(图6a),重建目录的完备性震级为 M_L 0.2, b 值为0.94.图6b、图6d分别显示了人工拾取目录和重建目录的震级-频度关系,可以发现在 M_L 2.0~ M_L 3.0震级范围基于混合策略重建的地震目录震级-频度关系相较于人工拾取目录显示出与G-R定律更高的一致性,表明重建地震目录是有效的,且与之对应的 b 值更稳定、更具可信度.

最小完备性震级(M_c)是评估地震目录完备性和地震台网监测能力的关键指标,通常人工智能、模板匹配等地震检测方法在微震识别方面的能力显著优于人工拾取,可识别更小震级的地震事件(Mousavi *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2021)、降低 M_c 下限.然而本文中人工拾取地震目录与基于混合策略重建的地震目录的 M_c 均为 M_L 0.2,并未表现出混合策略重建目录具有降低完备性震级的显著优势.初步分析,一方面反映了该研究中选取的地震台网监测能力具有较好的稳定性,另一方面可能是因人工拾取地震震级与MESS方法地震震级计算方法不同所引起,人工拾取地震震级按

照《地震震级的规定》计算,取DD-1短周期地震计仿真后的水平向S波振幅大于2倍噪声的最大振幅,并结合地方量规函数进行计算;MESS方法采用台站S波振幅、距离校正项,基于Richter(1935)方法进行估计,然而在多数情况下距离校正项不适用(Boore, 1989),这可能致使MESS方法在小地震震级计算中比人工拾取震级估计偏大.

4.2 时空特征及孕震结构

结合木里地震序列活动特征,将地震序列在时间维度上划分为T0(9月1日至9月12日18时)、T1(9月12日18时至9月21日12时)、T2(9月21日12时至9月30日)三个阶段.图7展示了本研究重建目录地震事件在不同时间段的分布,在木里地震发生前,该区域T0阶段地震主要分布在主震西侧,震源深度基本不超过5 km(图7a),在主震发生前(图7d)主震震源区附近发生 M_L 3.0、 M_L 4.0级地震各一次;在主震发生后,余震序列可分为T1、T2两个阶段(图7d),T1阶段地震序列深度在7.5~10 km范围内,水平方向上扩展长约3.5 km、呈NW-SE向带状分布(图7b);T2阶段,余震序列基本沿T1阶段破裂区域在主震SE侧分布,并伴有数次震级 M_L 3.0级

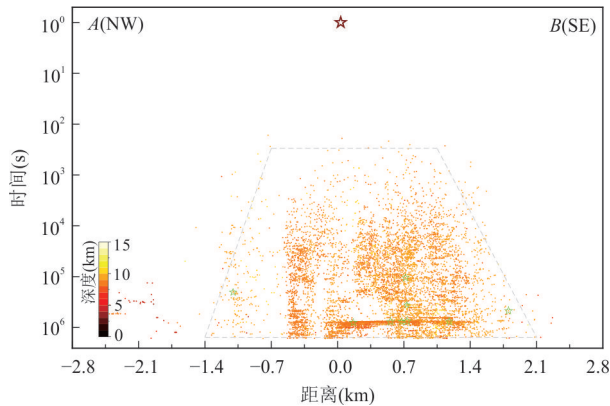


图 8 余震序列时空扩展分布

Fig.8 The occurrence times of aftershocks since the Muli earthquake versus the along-strike distances

以上余震事件,最大震级 $M_L 3.9$ 级(图 7c). T_0 、 T_1 、 T_2 三个阶段地震分布特征反映出本次地震活动是一次由前震触发、以主震事件为中心分别向 NW 和 SE 方向破裂的地震序列. 另外, T_1 、 T_2 阶段震源深度基本被局限在 7.5~10 km, 未出露至地表, 初步推测本次地震序列发生在小规模的隐伏断层.

余震时空分布是地震应力传播过程的表现, 主震破裂区经常伴随余震扩展现象, 通常认为余震触发存在静态应力变化 (Kilb *et al.*, 2000; Richards-Dinger *et al.*, 2010)、动态应力变化 (Felzer, 2006) 及余滑 (Peng and Zhao, 2009) 三种机制. 为了进一步判断木里地震序列特征, 将 T_1 、 T_2 阶段丛集区 3 (图 3a) 的地震序列沿着 NW-SE 扩展方向 (AB 剖面) 投影到时间维度 (图 8), 余震序列分布显示出以木里地震为中心呈现向双侧扩展的特征, 其中向 SE 侧扩展长度约 2.1 km、向 NW 侧扩展长度约 1.4 km, 两侧扩展速率表现出明显的差异 (图 8), 余震序列分别向两侧扩展长度与时间的对数总体呈线性关系, 这一特征与 2004 年美国 Parkfield $M_w 6.0$ 地震序列 (Peng and Zhao, 2009)、2017 年九寨沟 $M_S 7.0$ 级地震余震序列 (房立华等, 2018) 分布特征基本一致. 木里地震序列在其主要分布方向呈双侧扩展与余滑驱动序列典型行为吻合, 同时木里地震余震序列明显缺乏 $M_L \geq 3.0$ 级的余震事件 (图 6d), 推测部分应力可能以余滑等形式释放, 且震源所在的木里区域地处丽江-小金河断裂滑动亏损转换区 (刘晓霞和邵志刚, 2020), 这些特征共同揭示了木里地震余震序列存在余滑驱动可能. 川滇地区地震 3D 速度结构 (Liu *et al.*, 2023) 显示, 木里地震震源区西北侧呈

低速区、东南侧呈高速区, 木里地震序列处在低速过渡区域, 同时木里-盐源地区深部电性结构研究 (张炯等, 2022) 显示在木里地震震源区周边呈现高导电性的塑性特征, 初步推测本次地震是由丽江-小金河断裂在木里区域物质性质差异所致.

5 结论

本文基于轻量化人工智能方法 LPPN、模板匹配技术 MESS 及绝对定位方法 HypoInverse 和相对定位方法 HypoDD 构建了从原始连续地震波形到地震震相检测、地震事件识别、地震定位的全流程框架, 对木里地震震源区周边 60 km 范围内 2017 年 9 月 1 日至 9 月 30 日期间 28 个地震台站记录的连续地震波形数据进行了分析处理, 重建了包括木里地震前震、主震及余震序列 9 252 次事件的高分辨率地震目录, 结合 43 次 $M_L \geq 2.5$ 级地震事件震源机制解对木里地震序列进行了分析. 主要结论如下:

(1) 从原始连续地震波形数据到高精度地震目录的全流程地震分析框架相较于人工拾取方法, 表现出具有构建更符合震级-频度关系的高精度地震目录的能力, 为地震活动性参数估计和断层几何结构厘定提供了条件.

(2) 高精度地震目录反映出木里地震序列发生在锦屏山断裂 (F2-1、F2-2) 围限的推覆构造之间, 主震震中为 101.422°E、27.903°N, 震源深度 9.31 km, 地震序列呈现明显的时空丛集特征, 余震序列呈 NW-SE 分布, 震源集中在 7.5~10.5 km 深度, 通过高分辨率的地震目录和震源机制解综合判断, 本次地震序列发生在一个呈 NW-SE 分布的走滑型断层系统.

(3) 木里地震余震序列呈现明显的时空迁移特征, 以木里地震为中心分别向西北和东南扩展, 扩展长度约 3.5 km, 本次地震序列可能是一次余滑驱动的地震序列, 结合地震波速度结构和电性特征初步推测本次地震序列是由丽江-小金河断裂在木里区域物质性质差异所致.

致谢: 本文图件主要采用 GMT (Wessel *et al.*, 2019) 绘制, 流程图采用 draw.io (<https://www.drawio.com>) 绘制, 本文所用地震目录构建的软件/程序代码 (LPPN、MESS、HypoInverse、HypoDD) 均已在正文中引用参考文献 (Waldhauser and Ellsworth, 2000; Klein, 2002; Zhou *et al.*, 2022; Yu and Wang, 2022), 在此一并表示感谢!

References

- Boore, D. M., 1989. The Richter Scale: Its Development and Use for Determining Earthquake Source Parameters. *Tectonophysics*, 166(1–3): 1–14. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90200-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90200-X)
- Chen, Y. Q., Ding, R., Zhang, S. M., et al., 2024. Characteristics and Tectonic Implications of the Geomorphic Indices of the Watersheds around the Lijiang-Jinpingshan Fault. *Remote Sensing*, 16(20): 3826. <https://doi.org/10.3390/rs16203826>
- Ding, R., Ren, J. J., Zhang, S. M., et al., 2018. Late Quaternary Paleoearthquakes on the Middle Segment of the Lijiang-Xiaojinhe Fault, Southeastern Tibet. *Seismology and Geology*, 40(3): 622–640 (in Chinese with English abstract).
- Dong, G. J., Liu, S. L., Sun, K. L., et al., 2024. Spatial Distribution of Mid-Lower Crustal Flow in the SE Tibetan Plateau Revealed by *P*-Wave Velocity and Azimuthal Anisotropy beneath the Lijiang-Xiaojinhe Fault and Its Vicinity. *Geophysical Journal International*, 237(2): 931–948. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae080>
- Fang, L. H., Wu, J. P., Su, J. R., et al., 2018. Relocation of Mainshock and Aftershock Sequence of the $M_s 7.0$ Sichuan Jiuzhaigou Earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 63(7): 649–662 (in Chinese).
- Felzer, K. R., Brodsky, E. E., 2006. Decay of Aftershock Density with Distance Indicates Triggering by Dynamic Stress. *Nature*, 441(7094): 735–738. <https://doi.org/10.1038/nature04799>
- Frohlich, C., 1992. Triangle Diagrams: Ternary Graphs to Display Similarity and Diversity of Earthquake Focal Mechanisms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 75(1–3): 193–198. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(92\)90130-N](https://doi.org/10.1016/0031-9201(92)90130-N)
- Gutenberg, B., Richter, C. F., 1944. Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4): 185–188. <https://doi.org/10.1785/bssa0340040185>
- Ji, H. M., Ren, Z. K., Liu, J. R., 2024. Review of Structural Deformation in the Upper Crust of the Southeastern Margin of the Tibetan Plateau since the Late Cenozoic. *Earth Science*, 49(2): 480–499 (in Chinese with English abstract).
- Kilb, D., Gomberg, J., Bodin, P., 2000. Triggering of Earthquake Aftershocks by Dynamic Stresses. *Nature*, 408(6812): 570–574. <https://doi.org/10.1038/35046046>
- Klein, F. W., 2002. User's Guide to HYPOINVERSE - 2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes. Open-File Report. U.S. Geological Survey, Menlo Park.
- Li, L., Chen, Q. F., Niu, F. L., et al., 2008. Slip Rate along the Lijiang-Ninglang Fault Zone Estimated from Repeating Microearthquakes. *Chinese Science Bulletin*, 53(23): 2925–2932 (in Chinese).
- Li, Y. C., Shan, X. J., Gao, Z. Y., et al., 2023. Interseismic Coupling, Asperity Distribution, and Earthquake Potential on Major Faults in Southeastern Tibet. *Geophysical Research Letters*, 50(8): e2022GL101209. <https://doi.org/10.1029/2022GL101209>
- Liu, M., Li, H. Y., Zhang, M., et al., 2022. Investigation of the 2013 Eryuan, Yunnan, China $M_s 5.5$ Earthquake Sequence: Aftershock Migration, Seismogenic Structure and Hazard Implication. *Tectonophysics*, 837: 229445. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229445>
- Liu, X. X., Shao, Z. G., 2020. Current Fault Movement Characteristics in the Lijiang-Xiaojinhe Fault Zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 1117–1126 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Yu, Z. Y., Zhang, Z. Q., et al., 2023. The High-Resolution Community Velocity Model V2.0 of Southwest China, Constructed by Joint Body and Surface Wave Tomography of Data Recorded at Temporary Dense Arrays. *Science China Earth Sciences*, 66(10): 2368–2385. <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1161-7>
- Lomax, A., Savvaidis, A., 2022. High-Precision Earthquake Location Using Source-Specific Station Terms and Inter-Event Waveform Similarity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(1): e2021JB023190. <https://doi.org/10.1029/2021JB023190>
- Mizrabi, L., Nandan, S., Wiemer, S., 2021. The Effect of Declustering on the Size Distribution of Mainshocks. *Seismological Research Letters*, 92(4): 2333–2342. <https://doi.org/10.1785/0220200231>
- Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W. Q., et al., 2020. Earthquake Transformer—An Attentive Deep-Learning Model for Simultaneous Earthquake Detection and Phase Picking. *Nature Communications*, 11: 3952. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17591-w>
- Peng, Z. G., Zhao, P., 2009. Migration of Early Aftershocks Following the 2004 Parkfield Earthquake. *Nature Geoscience*, 2(12): 877–881. <https://doi.org/10.1038/ngeo697>
- Richards-Dinger, K., Stein, R. S., Toda, S., 2010. Decay of Aftershock Density with Distance does not Indicate Triggering by Dynamic Stress. *Nature*, 467(7315): 583–586. <https://doi.org/10.1038/nature09402>

- Richter, C. F., 1935. An Instrumental Earthquake Magnitude Scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(1): 1—32. <https://doi.org/10.1785/bssa0250010001>
- Ross, Z. E., Meier, M. A., Hauksson, E., 2018. P Wave Arrival Picking and First-Motion Polarity Determination with Deep Learning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(6): 5120—5129. <https://doi.org/10.1029/2017JB015251>
- Trugman, D. T., Shearer, P. M., 2017. GrowClust: A Hierarchical Clustering Algorithm for Relative Earthquake Relocation, with Application to the Spanish Springs and Sheldon, Nevada, Earthquake Sequences. *Seismological Research Letters*, 88(2A): 379—391. <https://doi.org/10.1785/0220160188>
- Waldhauser, F., Ellsworth, W. L., 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6): 1353—1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., et al., 2019. The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11): 5556—5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- Wu, X. Y., Xu, X. W., Yu, G. H., et al., 2024. The China Active Faults Database (CAFD) and Its Web System. *Earth System Science Data*, 16(7): 3391—3417. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3391-2024>
- Wu, J. P., Huang, Y., Zhang, T. Z., et al., 2009. After-shock Distribution of the $M_s8.0$ Wenchuan Earthquake and Three Dimensional P-Wave Velocity Structure in and around Source Region. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(2): 320—328 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Zheng, R. Z., et al., 2003. Pattern of Latest Tectonic Motion and Its Dynamics for Active Blocks in Sichuan-Yunnan Region, China. *Scientia Sinica Terrae*, 33(S1): 151—162 (in Chinese).
- Xu, X. W., Wu, X. Y., Yu, G. H., et al., 2017. Seismo-Geological Signatures for Identifying $M \geq 7.0$ Earthquake Risk Areas and Their Preliminary Application in Mainland China. *Seismology and Geology*, 39(2): 219—275 (in Chinese with English abstract).
- Yu, M. L., 1990. Study on the Nappe Structure in Muli Western Sichuan. *Regional Geology of China*, 9(1): 46—50, 59 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. Y., Wang, W. T., 2022. LPPN: A Lightweight Network for Fast Phase Picking. *Seismological Research Letters*, 93(5): 2834—2846. <https://doi.org/10.1785/0220210309>
- Zhang, J., Chen, X. B., Cai, J. T., et al., 2022. Deep Electrical Structure and Tectonic Implications beneath the Muli-Yanyuan Area. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(1): 268—279 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Fang, L. H., 2025. Characterizing Pick Error Models for Local Seismic Phases. *Journal of Earth Science*, 1—22. <https://doi.org/10.1007/s12583-025-0203-8>
- Zhang, M., Ellsworth, W. L., Beroza, G. C., 2019. Rapid Earthquake Association and Location. *Seismological Research Letters*, 90(6): 2276—2284. <https://doi.org/10.1785/0220190052>
- Zhang, P. Z., Deng, Q. D., Zhang, G. M., et al., 2003. Active Tectonic Blocks and Strong Earthquakes in the Continent of China. *Scientia Sinica Terrae*, 33(S1): 12—20 (in Chinese).
- Zhang, T. J., Jin, M. P., Li, Q. F., et al., 2024. The Study of Crustal Thickness and Poisson's Ratio on Both Sides of the Lijiang-Xiaojinhe Fault by H- κ -c Method. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(6): 2075—2089 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. J., Ghosh, A., Fang, L. H., et al., 2021. A High-Resolution Seismic Catalog for the 2021 $M_s6.4/M_w6.1$ Yangbi Earthquake Sequence, Yunnan, China: Application of AI Picker and Matched Filter. *Earthquake Science*, 34(5): 390—398. <https://doi.org/10.29382/eqs-2021-0031>
- Zhou, Y. J., Yue, H., Fang, L. H., et al., 2022. An Earthquake Detection and Location Architecture for Continuous Seismograms: Phase Picking, Association, Location, and Matched Filter (PALM). *Seismological Research Letters*, 93(1): 413—425. <https://doi.org/10.1785/0220210111>
- Zhu, W. Q., Hou, A. B., Yang, R., et al., 2022. QuakeFlow: A Scalable Machine-Learning-Based Earthquake Monitoring Workflow with Cloud Computing. *Geophysical Journal International*, 232(1): 684—693. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac355>

中文参考文献

- 丁锐, 任俊杰, 张世民, 等, 2018. 丽江-小金河断裂中段晚第四纪古地震历史. *地震地质*, 40(3): 622—640.
- 房立华, 吴建平, 苏金蓉, 等, 2018. 四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震主震及其余震序列精定位. *科学通报*, 63(7): 649—662.
- 计昊旻, 任治坤, 刘金瑞, 2024. 青藏高原东南缘上地壳晚新生代构造变形综述. *地球科学*, 49(2): 480—499.
- 李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等, 2008. 利用“重复地震”估算丽江-宁蒗断裂带的深部滑动速率. *科学通报*, 53(23): 2925—2932.

- 刘晓霞, 邵志刚, 2020. 丽江-小金河断裂带现今断层运动特征. 地球物理学报, 63(3): 1117—1126.
- 吴建平, 黄媛, 张天中, 等, 2009. 汶川 M_s 8.0 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究. 地球物理学报, 52(2): 320—328.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等, 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 151—162.
- 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 等, 2017. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用. 地震地质, 39(2): 219—275.
- 余明烈, 1990. 川西木里推覆构造的厘定. 中国区域地质, 9(1): 46—50, 59.
- 张炯, 陈小斌, 蔡军涛, 等, 2022. 木里-盐源地区深部电性结构及构造意义. 地球物理学报, 65(1): 268—279.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 12—20.
- 张天继, 金明培, 李秋凤, 等, 2024. 利用 H- κ -c 方法研究丽江-小金河断裂两侧的地壳厚度与泊松比. 地球物理学报, 67(6): 2175—2189.

《地球科学》

2026 年 2 月 第 51 卷 第 2 期 要目预告

- 基于机器学习的黄土关键力学参数概率预测统一框架体系 宋超等
- 沉积深度对非饱和原状黄土压缩及湿陷特性的影响 许领等
- 面向秦岭生态修复的可调型水凝胶材料构建: 重构性能与微观机理 刘瑾等
- 秦岭北麓(西安段)人类活动与生态环境互馈的海拔梯度特征 王瑞等
- 秦岭北麓乡村人-地-业系统互馈模式与机理 杨如玉等
- 藏北白垩纪构造演化与铜金成矿作用 柏佳伟等
- 挥发分对稀土成矿的意义: 以山东微山和薛庄碱性岩体为例 曾曦等