

# 川滇块体西南边界中段显著的断层外地震活动

曾宪伟<sup>1</sup>, 俞春泉<sup>1,2,3\*</sup>, 古饶<sup>1</sup>, 张功恒<sup>1</sup>, 姚强<sup>1</sup>, 张倩锋<sup>1</sup>

1. 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518055

2. 南方科技大学广东省地球物理高精度成像技术重点实验室, 深圳 518055

3. 南方科技大学地震预测与风险评估应急管理部重点实验室, 深圳 518055

\* 通讯作者, E-mail: [yucq@sustech.edu.cn](mailto:yucq@sustech.edu.cn)

2025-05-28收稿, 2026-04-03修回, 2026-05-14接受, 2026-07-20网络版发表

深地国家科技重大专项项目(2024ZD1001100)和广东省地球物理高精度成像技术重点实验室项目(2022B1212010002)资助

**摘要** 断层外地震活动是指发生在主要断层迹线之外的地震, 其在地壳变形过程和地震危险性评估中具有重要作用, 但在构造复杂地区往往难以被清晰识别。川滇块体西南边界中段是地震活动高度活跃的区域, 近年来多次中等强度地震(如2013年洱源 $M_S5.5$ 地震、2016年云龙 $M_S5.0$ 地震和2017年漾濞 $M_S5.1$ 地震)发生在远离已知主要断层的位置, 凸显了系统刻画断层外变形特征的必要性。本研究利用2021年1月至5月期间布设的200台密集地震台站, 对13005个地震事件进行了高精度重定位, 并反演获得432个震源机制解, 揭示了研究区广泛分布的断层外地震活动以及维西-乔后-巍山断裂(WQWF)两侧显著不同的地震活动模式。WQWF西侧的断层外地震呈明显簇集分布, 并与近年来发生的 $M \geq 5$ 地震密切相关。2013年洱源地震和2017年漾濞地震分别发生在一条正断层和一条与其相交的走滑断层上, 且2013年洱源余震序列中由正断走向滑机制的转变指示了断层的动态相互作用。2016年云龙地震发生在一条沿断层走向几何结构显著变化的复杂断层上。相比之下, WQWF东侧地震活动呈弥散分布, 反映出高度破碎的地壳结构和复杂的断裂系统。尽管两侧构造特征存在显著差异, 其震源机制整体仍与区域NNW–SSE向的背景构造应力场一致。此外, 断层外地震随时间迁移的地震群、持续活动特征及其在深度上的集中性表明, 热液活动和地壳流变性在断层外地震孕育过程中发挥了重要作用, 这一点也得到了大地电磁低阻异常和地震层析成像低速异常的支持。本研究加深了对断层外地震机制、断层相互作用及区域应力演化的认识, 对滇西北及其他构造复杂地区的地震危险性评估具有重要意义。

**关键词** 断层外地震活动, 川滇块体, 发震构造, 密集台阵, 地震危险性评估

## 1 引言

断层外地震活动(off-fault seismicity)是指发生在主要断层迹线之外、通常位于其周围地壳区域内的地震及相关地震活动(Ross等, 2017)。这类地震源于断层外变形过程, 包括次级断裂活动、颗粒流以及其他脆性变形机制(Bloom等, 2022; Milliner等, 2015)。了解断层外地震活动对于认识地壳变形过程、揭示地震孕育机制及评估地震灾害风险具有重要意义, 因为这类地震虽然不是发生于已知主要断层上, 但仍可能造成显著破坏。例如, 2011年Mineral地震发生在美国弗吉尼亚州中部地震带的

一条未被识别的断层上, 造成了大面积的建筑破坏(Horton等, 2015); 2023年中国西北地区的积石山 $M_w6.0$ 地震同样发生在一条此前未知的断层上, 造成百余人遇难并带来重大经济损失(Zhang L等, 2025)。类似地, 对美国加州圣哈辛托断裂带的精细研究表明, 在一个由走滑断层和正断层组成的复杂网络中, 广泛发育着断层外地震活动(Ross等, 2017)。

川滇块体西南边界位于青藏高原东南缘, 是断层外地震活动高度发育的典型区域之一(图1)。该边界带通过一系列大型走滑断裂吸收显著的剪切变形(徐锡伟等, 2003; 常祖峰等, 2014)。过去十余年中, 多次中等强度

中文引用格式: 曾宪伟, 俞春泉, 古饶, 张功恒, 姚强, 张倩锋. 2026. 川滇块体西南边界中段显著的断层外地震活动. 中国科学: 地球科学, 56(8): 3069–3081, doi: 10.1360/N072025-0244

英文引用格式: Zeng X, Yu C, Gu R, Zhang G, Yao Q, Zhang Q. 2026. Abundant off-fault seismicity along the central southwestern boundary of the Sichuan-Yunnan Block. Science China Earth Sciences, 69(8): 3024–3036, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1958-y>

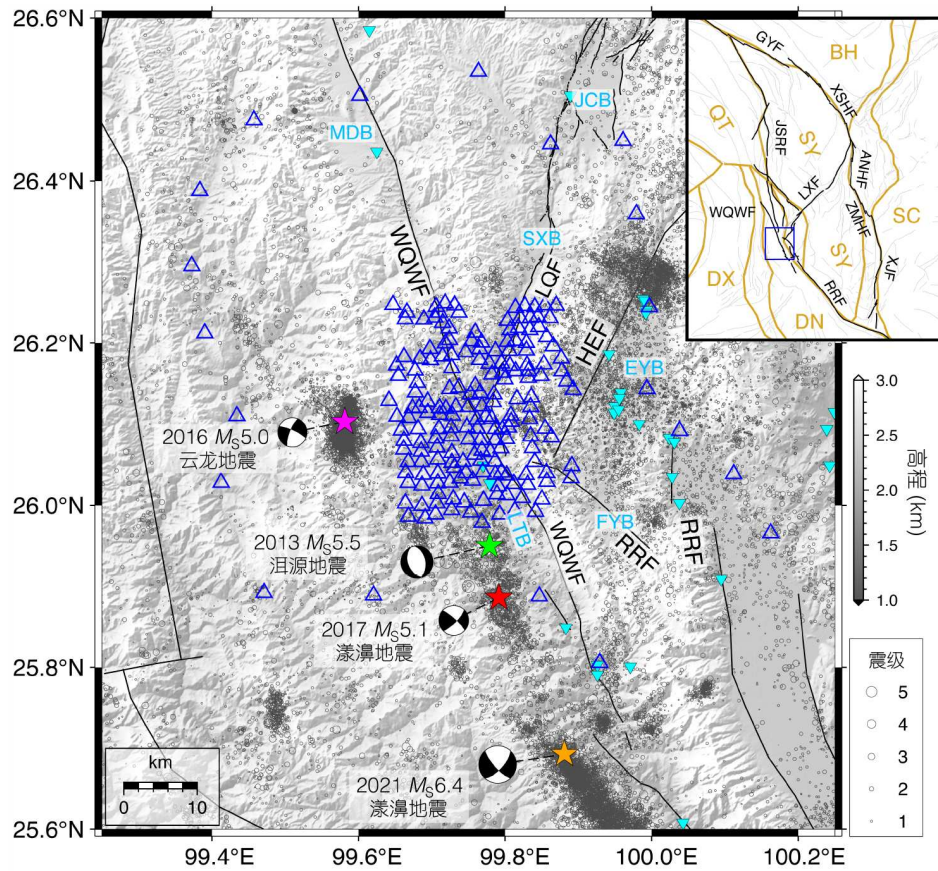


图1 川滇块体西南边界中段的构造背景及台站分布。蓝色三角形表示密集台阵的节点式地震仪分布。黑色和灰色线条表示地表断层迹线(徐锡伟等, 2016), 黄色线条表示块体边界。灰色圆圈表示2008年10月至2025年9月期间中国地震台网中心确定的历史地震分布。绿色、品红色、红色和橘色五角星分别表示2013年洱源 $M_s5.5$ 地震、2016年云龙 $M_s5.0$ 地震、2017年漾濞 $M_s5.1$ 地震和2021年 $M_s6.4$ 漾濞地震震中。青色倒三角表示温泉分布(Wu等, 2023)。断层缩写: XSHF, 鲜水河断裂; ANHF, 安宁河断裂; ZMHF, 则木河断裂; XJF, 小江断裂; RRF, 红河断裂; WQWF, 维西-乔后-巍山断裂; JSRF, 金沙江断裂; LXJ, 丽江-小金河断裂; LQF, 龙蟠-乔后断裂; HEF, 鹤庆-洱源断裂; GYF, 甘孜-玉树断裂。盆地缩写: LTB, 炼铁盆地; FYB, 凤羽盆地; EYB, 洱源盆地; SXB, 沙溪盆地; JCB, 剑川盆地; MDB, 马登盆地。块体缩写: SY, 川滇块体; SC, 华南块体; BH, 巴颜喀拉块体; QT, 羌塘块体; DX, 滇西块体; DN, 滇南块体

地震相继发生于该边界中段附近, 包括2013年洱源 $M_s5.5$ 、2016年云龙 $M_s5.0$ 、2017年漾濞 $M_s5.1$ 以及2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震, 其中维西-乔后-巍山断裂(WQWF)是区域的主要边界断裂带(图1)。尽管这些地震的震中距离较近(如2013年洱源与2017年漾濞地震震中间距约8 km; 图1), 其震源机制却存在显著差异, 表明该区域断裂结构具有高度复杂性。然而, 这些中强震的发震断层归属仍存在较大争议。例如, 2013年洱源地震被认为可能发生于WQWF上(常祖峰等, 2014; 赵小艳和付虹, 2014), 也有研究将其归因于炼铁盆地边界断裂带(黄小龙等, 2015; 杨军等, 2015); 而2017年漾濞地震则被解释为发生在WQWF上(潘睿等, 2019; 李姣等, 2020), 或发生在WQWF西侧一条尚未标绘的隐伏断层上(崔华伟等, 2022)。

造成上述不确定性的一个关键原因在于传统地震观

测的空间分辨率有限, 难以精确约束小尺度断裂结构及分布式变形特征(赵小艳和付虹, 2014; Jiang等, 2019; 李姣等, 2020)。近年来, 密集台阵观测和基于机器学习的地震检测与定位方法显著提升了地震探测能力、震源定位精度和断裂几何结构解析能力(Ross等, 2019; Zhu和Beroza, 2019; Waldhauser等, 2021)。这些新技术在揭示隐伏断裂结构、深化对断层外变形力学机制的认识方面表现出尤为突出的优势。

在本研究中, 我们在川滇块体西南边界中段布设了由200台地震仪组成的密集台阵(图1), 系统研究了该区域断层外地震活动的空间分布特征及其力学机制。通过综合高精度地震重定位、震源机制解分析和区域应力反演, 旨在: (1)精细刻画断裂带的几何结构特征; (2)探讨主要断裂与次级断裂之间的相互作用关系; (3)揭示驱动断层外变形与孕震过程的物理机制。这些研究结果为

断层外地震活动在区域构造变形中的作用提供了新的见解，并有助于改善该构造复杂地区的地震危险性评估。

## 2 构造背景

川滇块体位于青藏高原东南缘，是亚洲大陆内部构造活动和地震活动最为强烈的区域之一。其变形主要受印度板块与欧亚板块持续汇聚作用的控制。该汇聚过程始于约50–60 Ma，导致青藏高原的整体隆升，并促使地壳物质向东南方向挤出至华南块体(Tapponnier等, 2001)。这种侧向挤出主要通过一系列大型走滑断裂系统调节，这些断裂构成了川滇块体的主要边界，包括西侧的金沙江断裂(JSRF)、西南侧的红河断裂(RRF)以及东侧的安宁河-则木河-小江断裂带(徐锡伟等, 2003; Shen等, 2005)。

本研究关注的川滇块体西南边界中段位于多条主要边界断裂之间的过渡带内，其特征为活动断裂网络复杂、地震活动强烈以及地壳变形高度分散(图1)。在这些断裂中，WQWF是一条重要的NW–SE向走滑断裂，连接西北端的金沙江断裂与东南端的红河断裂(常祖峰等, 2014; 任俊杰等, 2007; 徐锡伟等, 2003)。WQWF以右旋走滑运动为主，兼具一定的正断分量，这与区域张扭性质的构造应力场相一致(常祖峰等, 2014; 任俊杰等, 2007)。在其中段，WQWF与NE–SW向的龙蟠-乔后断裂(LQF)相交，在炼铁盆地附近形成构造上高度复杂的断裂交汇区。大地测量结果表明，该区域具有较高的剪切应变速率，表现为以NNW–SSE向挤压和ENE–WSW向伸展为主的变形特征(Su等, 2024; Wang和Shen, 2020)。

川滇块体西南边界中段同时也是块体南、北两段的过渡区，其分界断裂为丽江-小金河断裂(LXF; 图1)。北段具有较高的地表高程、较厚的地壳以及相对较低的地震活动性，而南段则表现为地形较低、地壳较薄且地震活动更为频繁(Li L等, 2024; Wang等, 2017)。最新的高分辨率地震层析成像结果显示，部分熔融和高温状态的低速异常在川滇块体北段中-下地壳中广泛分布，而在南段则主要集中于其东缘(Li C等, 2024)。这些观测结果表明，区域地壳流变性质存在显著的空间差异，并可能进一步影响构造变形在局部断层滑动与分散性韧性流动之间的分配方式。

因此，包含WQWF-LQF交汇区及炼铁盆地在内的川滇块体西南边界中段，是认识块体南、北段力学过渡特征的关键区域。该区高应变速率、频繁的中等强度地震活动以及显著差异的流变与构造特征，使其成为研究断层成熟度、应力传递及断层外变形过程的理想天然实验室。

## 3 数据与方法

### 3.1 密集台阵布设

为研究发震构造及潜在的断层相互作用特征，我们于2021年1月中旬至5月初在研究区布设了一个由200台节点式地震仪组成的密集台阵。台阵以WQWF与LQF的交汇区为中心，覆盖约80 km×80 km的区域(图1)。其中，180台地震仪密集分布于约20 km×30 km的核心区域内，平均台站间距约为1.5 km；其余20台台站布设于外围，以增强方位覆盖能力。所用地震仪拐角频率为0.2 Hz，连续记录采样率为250 Hz的地震波形，为小震探测及精细断裂结构解析提供了高质量的数据基础。

### 3.2 一维速度模型的构建方法

精确的地震定位与震源参数反演依赖于合适的速度模型。本文利用环境噪声地震干涉方法构建研究区的平均一维S波速度模型。按照常规的数据预处理流程，我们对垂直分量的连续波形数据进行了预处理，包括重采样、去趋势、带通滤波(0.02–2 Hz)、时域白化及频谱白化等操作(Bensen等, 2007)。使用CC-FJpy程序(Li等, 2021)计算所有台站对之间的互相关函数，并进行线性叠加以提高信噪比。随后，利用Stockwell-Bessel(S-J)变换方法提取基阶瑞利波频散曲线(Zhang G等, 2025)，并对其反演以获得研究区的平均一维S波速度模型(网络版附图S1)。P波速度和密度参数则依据Brocher经验关系式估算得到(Brocher, 2005)。

### 3.3 地震探测与定位

地震探测与定位采用LOC-FLOW工作流程完成，该流程集成了基于深度学习的震相拾取、震相关联及重定位方法(Zhang等, 2022)。首先，利用深度学习模型PhaseNet(Zhu和Beroza, 2019)对原始的250 Hz连续波形数据进行P波和S波自动拾取，保留概率不小于0.3的震相。随后，采用REAL(Rapid Earthquake Association and Location)算法(Zhang等, 2019)完成震相关联与初始定位。在其中我们设置了严格的质量控制条件，要求关联的地震事件包括至少16个震相(其中不少于8个P波震相)、至少4个同时具有P、S波震相的台站、最大方位间隙角不超过280°，以及走时残差不超过0.5 s。最终共关联到15041个地震事件，获得672066个P波和656417个S波走时数据(附图S2)。

事件的初始绝对位置采用VELEST方法定位(Kissling等, 1994)，随后利用hypoDD方法进行双差相对重定位(Waldhauser和Ellsworth, 2000)，其中选取震源间距小于

8 km且至少包含8个共同震相的事件对进行重定位。为进一步提高定位精度,本文利用波形互相关计算了事件对之间的到时差,并采用GrowClust算法(Trugman和Shearer, 2017)对互相关系数大于0.7的事件对进行最终相对重定位,最终精确重定位了13005个地震事件。

### 3.4 震源机制反演

由于密集台阵记录的事件以小震为主,本文基于P波初动极性和S/P振幅比来反演震源机制解(附图S3)。我们采用两种独立方法:基于P波初动极性的CHNXTX方法(俞春泉等, 2009),以及同时利用P波初动极性和S/P振幅比的HASH方法(Hardebeck和Shearer, 2003)。在反演前,首先去除仪器响应,将波形旋转至径向、切向和垂向分量,并进行0.8–15 Hz的带通滤波。P波初动极性利用Crazyseismic软件手动拾取(Yu等, 2017),S/P振幅比则基于三分量位移波形计算(Hardebeck和Shearer, 2003)。最后仅保留两种方法反演结果一致的震源机制解,以确保震源参数的可靠性。

### 3.5 应力场反演

为刻画研究区的区域应力状态,本文基于Wallace-Bott假设(Wallace, 1951; Bott, 1959),利用震源机制解数据进行了应力场反演。反演工作采用SATSI软件包完成(Hardebeck和Michael, 2006),其中假设研究区应力场在空间上均匀,反演目标是最小化观测滑动方向与理论剪应力方向之间的偏差。最终获得的应力张量会给出最大主应力( $\sigma_1$ )、中间主应力( $\sigma_2$ )和最小主应力( $\sigma_3$ )的空间方位,以及表征三者相对大小关系的应力比 $R$ ,可以为认识区域构造应力特征提供重要约束。

## 4 结果

### 4.1 显著的断层外地震活动

本研究得到了13005个高精度重定位的地震事件(图2A),与同时间段中国地震台网中心(CENC)记录的约650个事件相比,显著提高了研究区地震活动的空间分辨率。重定位地震的震级范围为-1.4–4.4。我们以CENC目录为参考对震级进行了校正(附图S4和S5),得到的完备震级约为-0.9(图2D),明显低于CENC目录和ChinArray-CREDIT-X1目录(Li L等, 2024)。震级-频度关系分析表明, $b$ 值约为0.87,略低于典型的Gutenberg-Richter定律值1.0(图2D)。我们的地震目录以小震为主,且台阵的探测能力呈现出明显的昼夜变化特征,白天探测能力显著降低,可能与人类活动或白天的高频噪声有关(Wang等,

2020)(附图S6)。研究区地震主要发生在较浅深度范围内,在考虑研究区平均地表高程约2.45 km的情况下,大多数事件的震源深度浅于8 km(图2C)。

地震活动广泛分布于整个研究区域,且一个显著特征是:大量地震并未发生在已知的主要断层上,而是发生在主断层之外(图2A)。仅约1400个地震事件分布在距离已探明的主要断层2 km范围内,占整个地震目录的不足12%;而约7600个事件沿四条推断的隐伏断层(F1–F4,见讨论部分)分布,占地震目录的约58%(图2E)。主要断层上的地震、与F1–F4相关的断层外地震活动以及所有断层外地震事件的震级-频度分布并无显著差异(图2F)。这样的分布模式表明,在川滇块体西南边界,断层外变形和次级断裂活动在区域构造变形中起着关键作用。为评估定位结果的不确定性,在GrowClust重定位过程中我们进行了100次bootstrap分析。所有重定位事件的平均水平和垂直误差约为0.09 km,其中超过85%的事件定位误差小于0.2 km(附图S7)。各事件在95%置信区间下的定位不确定性进一步验证了所识别断层外地震活动的可靠性(附图S8)。此外,CENC和CREDIT-X1目录覆盖更长时间尺度的区域地震活动同样显示出广泛的断层外分布特征(图1和附图S9)。

反演的432个地震事件的震源机制以走滑型(43.8%)和正断型(27%)为主(图2B和网络版附表S1)。由震源机制得到的P轴和T轴取向与区域应力场高度一致(图3)。应力反演结果显示,最大主应力 $\sigma_1$ 的走向为166.9°、俯角(plunge angle)为25.7°,最小主应力 $\sigma_3$ 的走向为257.7°、俯角为11.9°(图3C和3D)。应力比 $R$ 约为0.12,表明区域应力场以近水平、NNW–SSE向的挤压应力为主,这与前人研究结果一致(Su等, 2024; Tian等, 2019; Wang和Shen, 2020)。

### 4.2 WQWF两侧不同的地震活动特征

WQWF构成了一条明显的构造分界线,其东西两侧的地震活动模式存在显著差异(图2A)。在西侧,地震主要集中在分布于若干清晰的地震簇中,形成明显的地震条带。其中,一条NNW–SSE向地震带位于炼铁盆地以西,另一条NNE–SSW向地震带位于中心台阵西侧。值得注意的是,这些地震密集区近年来曾发生多次 $M \geq 5$ 地震,可以为理解其发震机制提供了重要见解,相关问题将在后文中进一步讨论。相比之下,东侧地震活动更为弥散,地震事件呈离散分布,未明显沿主要断层展布。

震源机制进一步揭示了WQWF两侧的差异(图2B)。在西侧,正断型地震主要集中分布于NNW–SSE向的地震带,而走滑型地震主要分布于NNE–SSW向的地震带;在

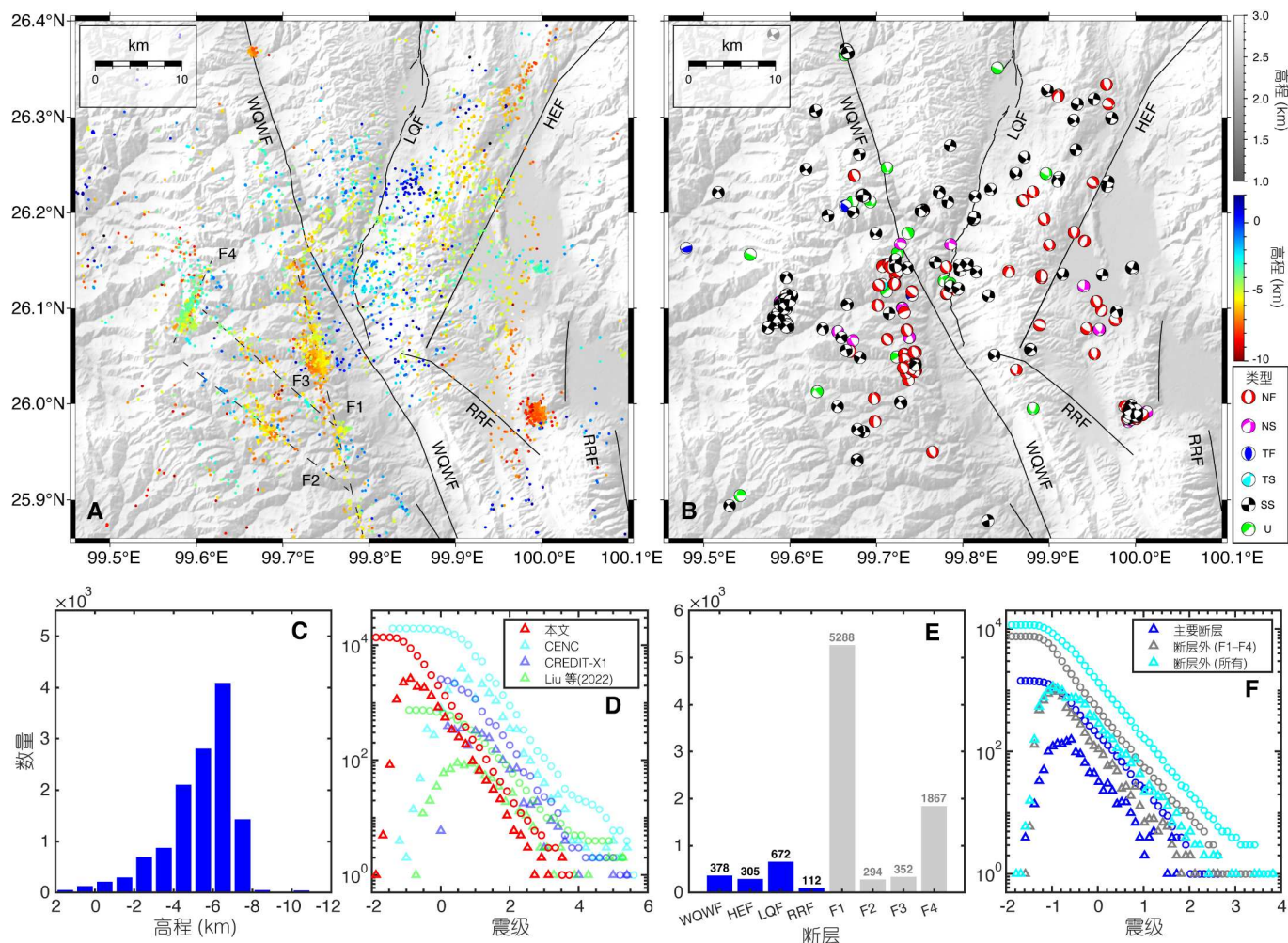


**图2** 地震重定位与震源机制解反演结果。(A) 重定位地震的空间分布。彩色圆点表示地震位置，其颜色表示震源深度(以高程表示)，虚线表示推断的隐伏断层(F1、F2、F3和F4)。(B) 震源机制的空间分布。震源机制类型按照全球应力场分类标准进行划分(Zoback, 1992)。震源机制类型包括：NF，正断型；NS，以正断为主并伴随走滑分量；TF，逆断型；TS，以逆断为主并伴随走滑分量；SS，走滑型；U，不确定型。(C) 地震频度-深度(以高程表示)分布。(D) 频度-震级分布(FMD)。三角形和圆点分别表示格点频数和累积频数。红色、青色、蓝色和绿色分别对应本文目录、CENC目录、CREDIT-X1目录和Liu等(2022)地震目录。CENC目录时间跨度为2009年1月至2025年9月，CREDIT-X1目录覆盖2011年3月至2013年12月，Liu等(2022)目录仅包含2013年漾濞 $M_S5.5$ 地震序列(2013年3–4月)。本文和Liu等(2022)中的震级均相对于CENC目录进行了校正(附图S4和S5)。(E) 主要断层及与F1–F4相关的断层外地震事件数量统计。(F) 主要断层地震(蓝色)、沿F1–F4分布的断层外地震(灰色)以及所有断层外地震(青色)的频度-震级分布

东侧，两类断层活动均较为分散，其中正断型地震的走向变化更为显著。从西侧向东侧，P轴和T轴走向表现出一定程度的逆时针旋转(图3)。基于两侧震源机制分别进行的应力场反演结果显示， $\sigma_1$ 发生约 $1^\circ$ 的旋转，而 $\sigma_3$ 发生约 $12^\circ$ 的旋转(附图S10)，整体上与前人研究结果一致(Su等, 2024; Tian等, 2019)。

## 5 讨论

### 5.1 近期数个 $M \geq 5.0$ 地震的发震构造

在过去十余年中，WQWF以西先后发生了多次中等

强度地震( $M \geq 5.0$ )，包括2013年洱源 $M_S5.5$ 地震、2016年云龙 $M_S5.0$ 地震以及2017年漾濞 $M_S5.1$ 地震(图1)。尽管已有研究对这些地震的孕震构造开展了分析，但相关认识仍存在较大争议(崔华伟等, 2022; 黄小龙等, 2015; 李姣等, 2020; 潘睿等, 2019; 杨军等, 2015; 赵小艳和付虹, 2014; Liu等, 2022)。本研究基于密集台阵观测获得的高精度地震目录和震源机制结果，为重新认识这些地震序列提供了新的约束。

2013年3月3日发生了洱源 $M_S5.5$ 地震，其后约44天在其东南侧发生了一次 $M_S5.0$ 余震(图4A)。这两次地震均表现为正断型破裂机制，断层走向为NNW–SSE(杨军等,

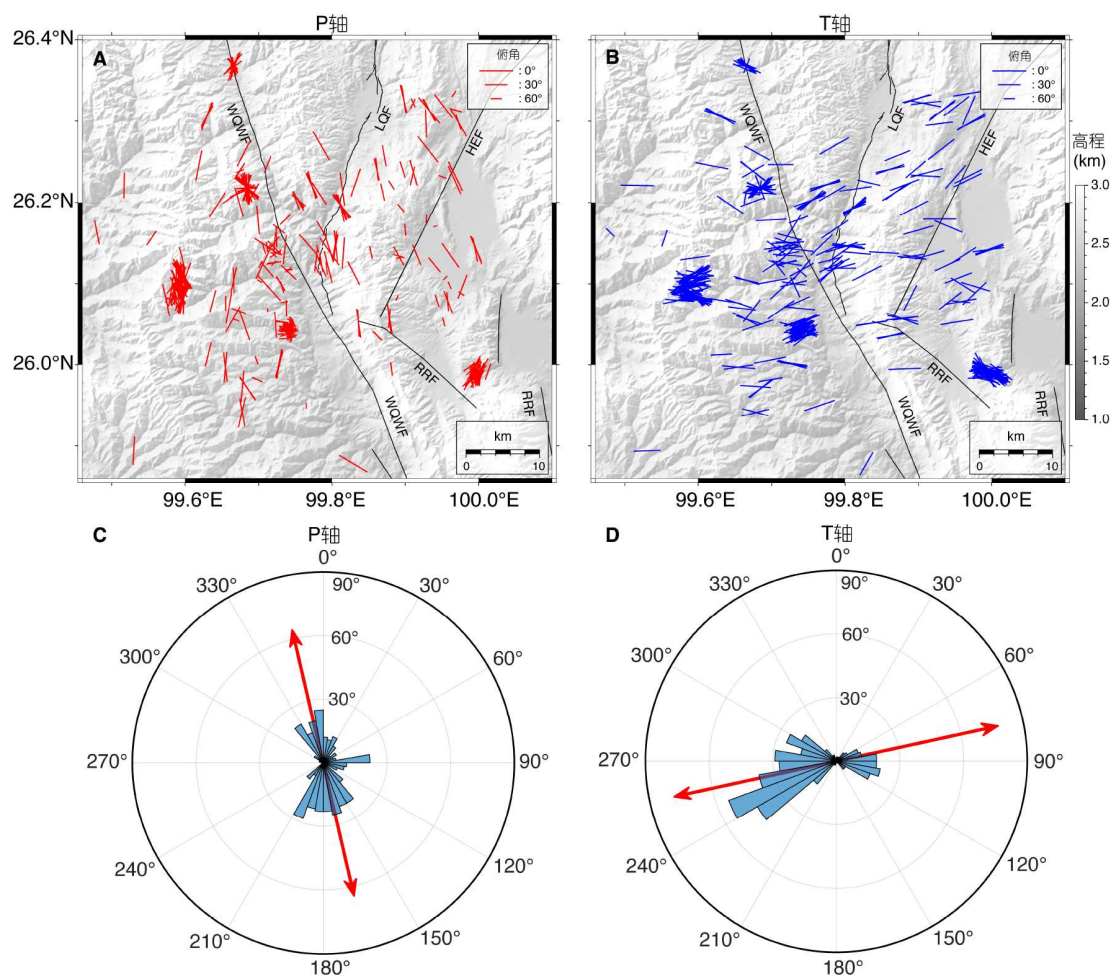


图3 432个震源机制的P轴、T轴分布及应力场方向。(A、B)分别为P轴和T轴的水平投影分布, 线段长度表示俯角大小。(C、D)分别是P轴和T轴的玫瑰统计图, 径向轴表示统计数量。红色箭头分别表示最大和最小主应力轴方向, 箭头长度对应于 $90^\circ$ 减去应力方向的俯角

2015; 赵小艳和付虹, 2014)。然而, 随后发生的余震序列显示出从正断型向走滑型的转变(杨军等, 2015; 赵小艳和付虹, 2014), 可能指示了一个动态的应力传递过程以及邻近走滑断层的再活化。我们密集台阵记录的地震活动表明, 洱源地震序列主要与一条NNW–SSE向的正断层(F1)有关, 该断层贯穿主震震中(图4A和4B)。沿F1的地震活动主要集中在4–8 km深度范围内, 断层在北段向西南倾斜, 倾角约 $50^\circ$ , 在南段倾角约 $45^\circ$ (图4C和4D)。该断层与炼铁盆地西边界基本一致, 且沿线分布有两处温泉(图2A、图4A和图4C), 表明断层活动可能与区域热流体活动密切相关。

2017年漾濞 $M_{\text{S}}5.1$ 地震发生在2013年洱源 $M_{\text{S}}5.5$ 地震以南数公里处, 靠近洱源 $M_{\text{S}}5.0$ 余震位置(图4A)。值得注意的是, 漾濞地震及其余震的震源机制以走滑型为主, 与2013年洱源地震序列后期余震的震源机制特征高度相似(图4B)。密集台阵地震活动结果表明, 漾濞地震主要

发生在一条NW–SE向的走滑断层(F2)上, 该断层在其东南端与F1相交(图4A)。这一断层交汇部位可能为应力集中提供了有利条件, 促进了断层间的相互作用, 并在2013年洱源地震序列之后诱发了F2的再活动。

将本文地震目录与前人重定位结果(包括CENC、CREDIT-X1及其他区域地震目录)进行对比可以发现(附图S11), 尽管个别地震的位置存在一定差异, 但整体地震活动的空间分布特征及震源机制类型具有良好的一致性。洱源地震序列中的正断型事件主要集中于北部区域, 而洱源和漾濞地震序列中的走滑型事件则主要分布于南部(附图S12)。这一空间分布特征支持本文提出的解释, 即2013年和2017年地震分别发生在正断型断层F1和与其相交的走滑型断层F2上。NNW–SSE向正断型构造与NW–SE向走滑型构造的交替分布, 可能代表了一个更大尺度变形断裂带内几何上不同但力学上相互耦合的构造单元(附图S13)。类似的构造组合也出现在研究区以南的

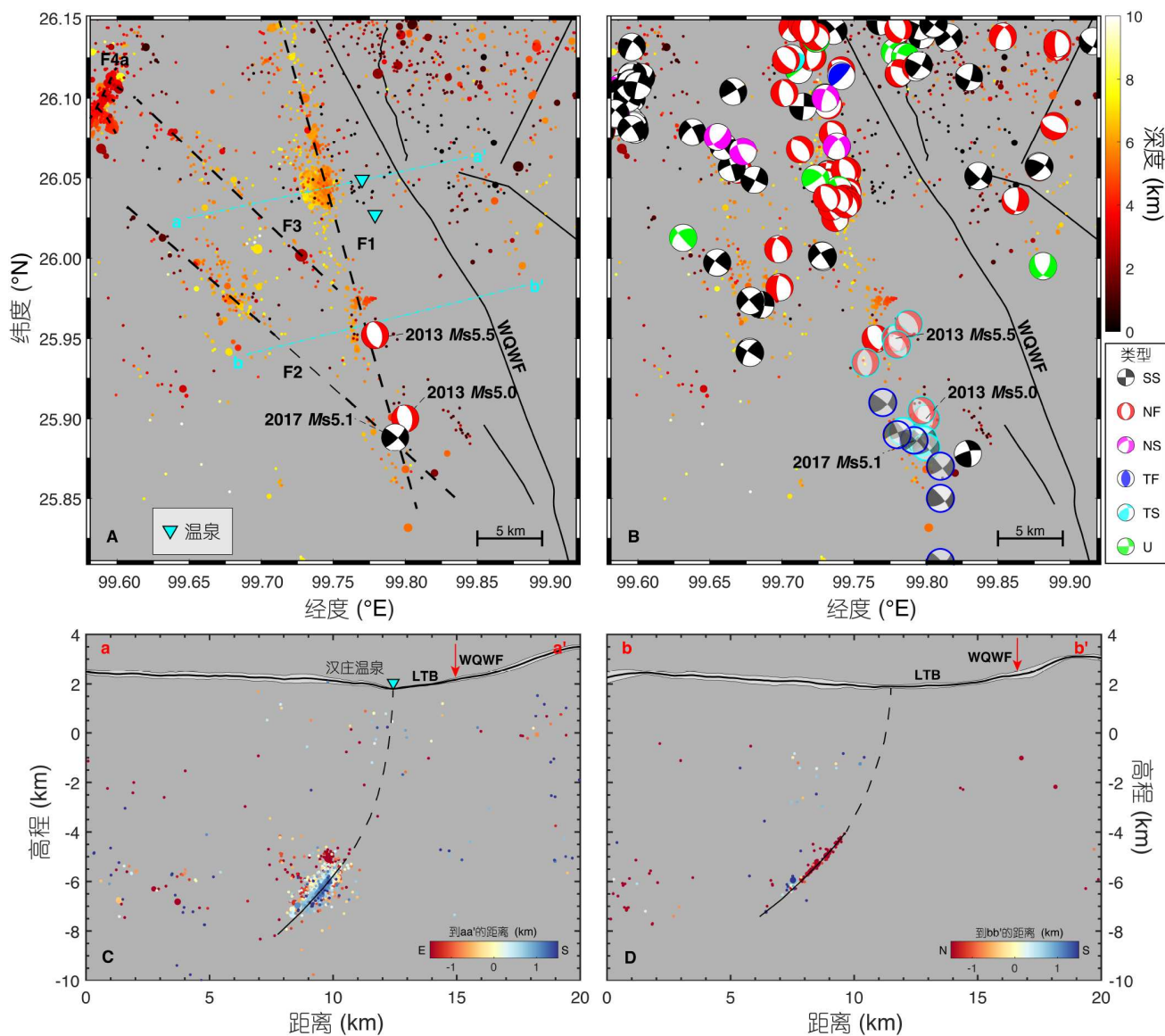


图4 2013年洱源 $M_s5.5$ 地震和2017年漾濞 $M_s5.1$ 地震震中附近的地震活动分布。(A) 重定位地震的平面分布。其中颜色表示震源深度，黑色实线和黑色虚线分别表示已知断层和本文推断断层，青色虚线表示剖面aa'和bb'位置。青色三角形表示汉庄(北)和上江咀(南)温泉位置。(B) 震源机制分布。不同填充颜色表示不同类型的震源机制。带青色边框和蓝色边框的半透明震源机制分别引自赵小艳和付虹(2014)(2013年洱源地震序列)和潘睿等(2019)(2017年漾濞地震序列)。(C、D)为沿剖面aa'和bb'的地震活动分布。黑色虚线表示推断的断层结构，红色箭头指示地表WQWF出露位置。粗黑线表示地表地形，灰色背景表示剖面投影范围内的地形起伏，青色倒三角表示汉庄温泉位置

2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震区域，其中NW–SE向高倾角走滑型震源机制与NNW–SSE向正断型震源机制呈现出相似的空间分布特征(Zeng和Yu, 2025)，与2013年洱源和2017年漾濞地震序列的构造特征高度一致(附图S13)。

相比之下，2016年云龙 $M_s5.0$ 地震发生在WQWF以西更远处，可能属于一个不同的断层系统，其震源机制以走滑型为主(图5)。前人研究指出其余震主要沿NNE–SSW向分布(Jiang等, 2019)，这一结果与本文观测一致。然而，基于密集台阵数据获得的绝对和相对定位结果显

示，本文地震位置相较于前人结果存在约1 km的整体偏移(附图S14)，这可能反映了更合适的速度模型和密集台阵数据带来的更高精度的定位结果。

云龙地震的主要破裂断层(F4a)长度约5 km，走向为NNE–SSW，震源深度范围为3–8 km。断层沿走向和倾向方向均表现出明显的几何变化，指示其存在构造分段特征。其中，断层东北段与西南段的走向差异约 $10^\circ$ (图5A和5B)。在东北段，断层在浅部(<4.5 km)呈陡倾特征，随后在4.5–6.0 km深度范围内转为向WNW倾斜，在更深

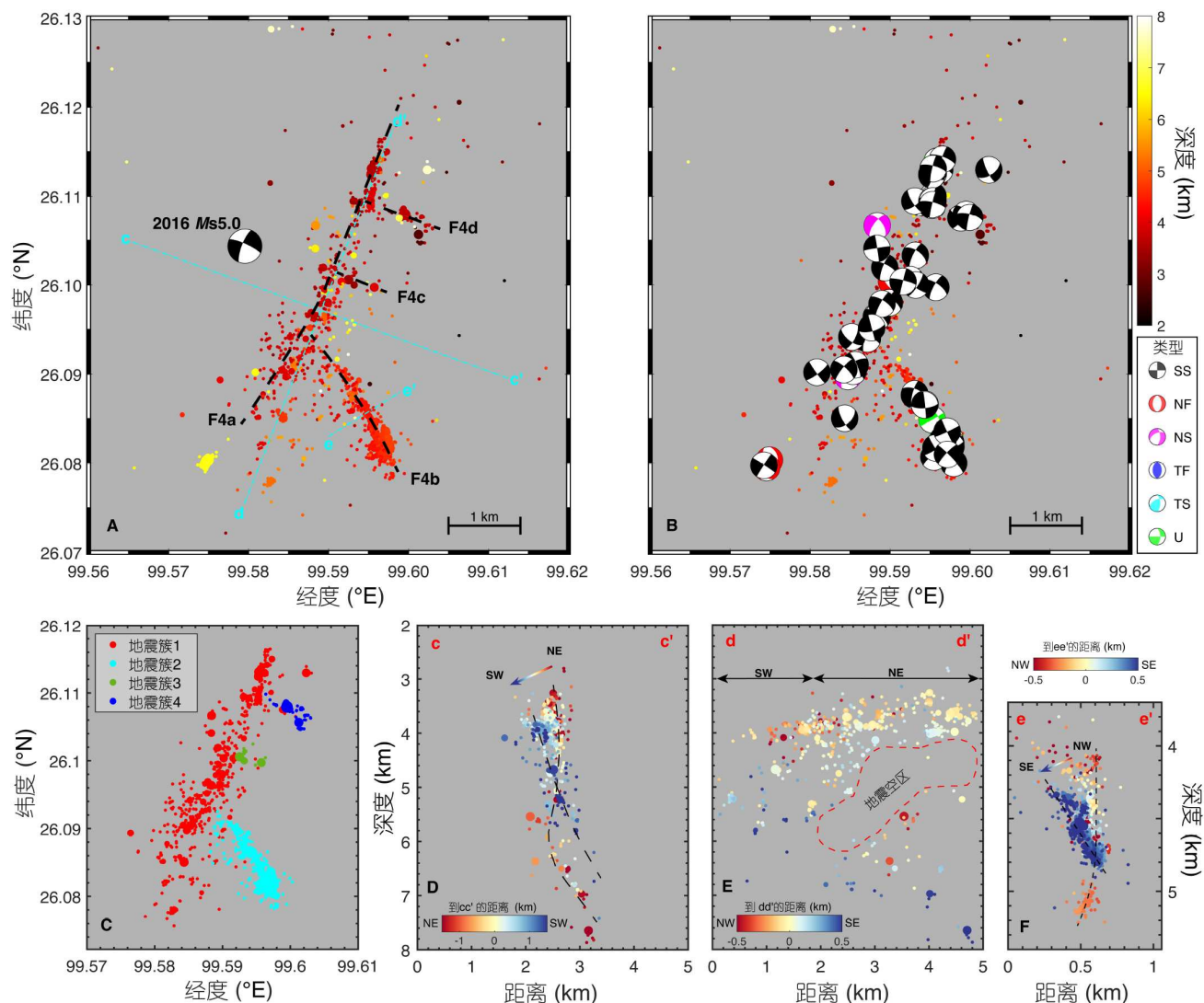


图5 2016年云龙 $M_s5.0$ 地震震中附近的地震活动分布。(A) 重定位地震的平面分布, 颜色表示震源深度, 圆点大小表示震级。云龙地震的震源机制引自Jiang等(2019)。黑色虚线表示可能的断层分布, 青色虚线表示剖面cc'、dd'和ee'的位置。(B) 云龙地震附近震源机制的空间分布。(C) 四个地震簇的空间分布。(D-F)分别为沿剖面cc'、dd'和ee'的地震活动分布, 颜色表示到剖面的距离。黑色虚线表示推断的断层结构, 红色虚线表示地震活动空区

部又重新转为向ESE倾斜; 而在西南段, 断层整体保持约 $70^\circ$ 向ESE倾斜(图5D)。此外, 西南段地震活动的深度上限明显深于东北段(图5E)。并在4.5–6.0 km深度范围内出现的一个显著地震活动空区, 可能对应于2016年云龙 $M_s5.0$ 地震的主破裂区, 这一特征与前人基于余震分布的研究结果一致(Wetzler等, 2018; Yu等, 2019)。除主破裂断层F4a外, 其周围还识别出多个地震簇(簇2、3和4), 共同勾勒出三条与F4a相交的小型断层(F4b–F4d)(图5)。其中, F4b记录了该区域近一半的地震事件(约900个), 并在F4a沿走向的构造弯折部位与F4a相交; 而F4c和F4d则在水平向上表现为与F4a近乎正交。这些特征表明, 云龙地震区是一个高度分段、相互交错的复杂断层网络。

## 5.2 断层外地震活动成因

研究区内断层外地震活动广泛分布, 既包括WQWF以西三次历史 $M \geq 5$ 地震序列相关的孕震断层附近的地震, 也包括WQWF以东呈弥散分布的地震活动(图2)。WQWF两侧地震活动模式的显著差异表明, 该区域在断层成熟度、应变补偿方式以及地壳变形机制方面存在本质差别。西侧以结构化的地震带为特征, 可能受控于发育程度较高的断层体系; 而东侧则以地震分布离散、震源机制走向变化较大为特征(图6A和6B), 反映了由次级断层组成的复杂构造网络及分布式变形过程。上述差异表明, 区域应力在不同构造单元中的释放方式存在明显不同, 从而影响了WQWF及其周缘断层系统的地震构造

演化。

WQWF以东的弥散型地震活动(图2和6A)可能主要受川滇块体南、北段之间相互作用的控制。川滇块体南段整体呈顺时针旋转,而来自北段的挤压作用在块体边界处导致了局部的拉张应力,尤以红河断裂(RRF)及其北延段附近最为明显(徐锡伟等, 2003; Guo等, 2024)。同时, RRF作为重要的块体边界断裂,在南部地区承担了显著的剪切应变,其剪切变形向北传递,促进了断层体系尾部的破碎化(魏顺民等, 1996)。这种复杂的构造相互作用导致断层系统高度动态化,从而形成不规则的地震活动分布格局。

尽管次级断层发育和分布式变形增加了构造复杂性,研究区的断层外地震活动整体上仍主要受区域构造应力场控制。数值模拟结果显示, 2013年洱源 $M_s5.5$ 地震、2016年云龙 $M_s5.0$ 地震以及2017年漾濞 $M_s5.1$ 地震的模拟滑动角与观测值之间的偏差分别仅为 $1^\circ$ 、 $24^\circ$ 和 $12^\circ$ (附图S15, 附表S2),表明这三次地震序列均主要受背景构造应力控制。模拟结果对应了较高的相对剪应力水平,可能解释该区同时发育正断型和高倾角走滑型震源机制的

现象(附图S15)。对于WQWF以东的断层外地震活动,尽管地震在空间上呈弥散分布、未形成明显的地震簇(图6),但其震源机制P轴和T轴的取向与区域构造应力场高度一致,表明这些地震同样主要受背景构造应力控制(附图S10)。

尽管川滇块体西边界中段复杂的地震活动特征整体是受控于背景构造应力场,但在不同子区域可能具有不同的发震机制。WQWF以东的大多数地震集中发生在4–8 km深度范围内,并在此形成一个显著的“基底界面”(图6C和6D)。这一特征指示了上部脆性地壳与更具韧性特征的中下地壳之间的力学转换,中下地壳由于较高的温度和压力条件会抑制脆性破裂(Chen等, 2012)。类似的地震深度受限现象在川滇块体其他区域亦有发现(Wang和Chu, 2020; Yao等, 2025; Zhou等, 2025)。而沿该流变性质边界积累的剪应力被认为可能有利于中等强度地震的孕育,这与许多 $M>6$ 地震往往起始于脆-韧性转换带附近的观测结果一致(Yao等, 2025; Yoshida等, 2022)。因此,上地壳与中下地壳之间增加的剪应力可能是这些断层外地震活动在深度上聚集的一种可能机制。

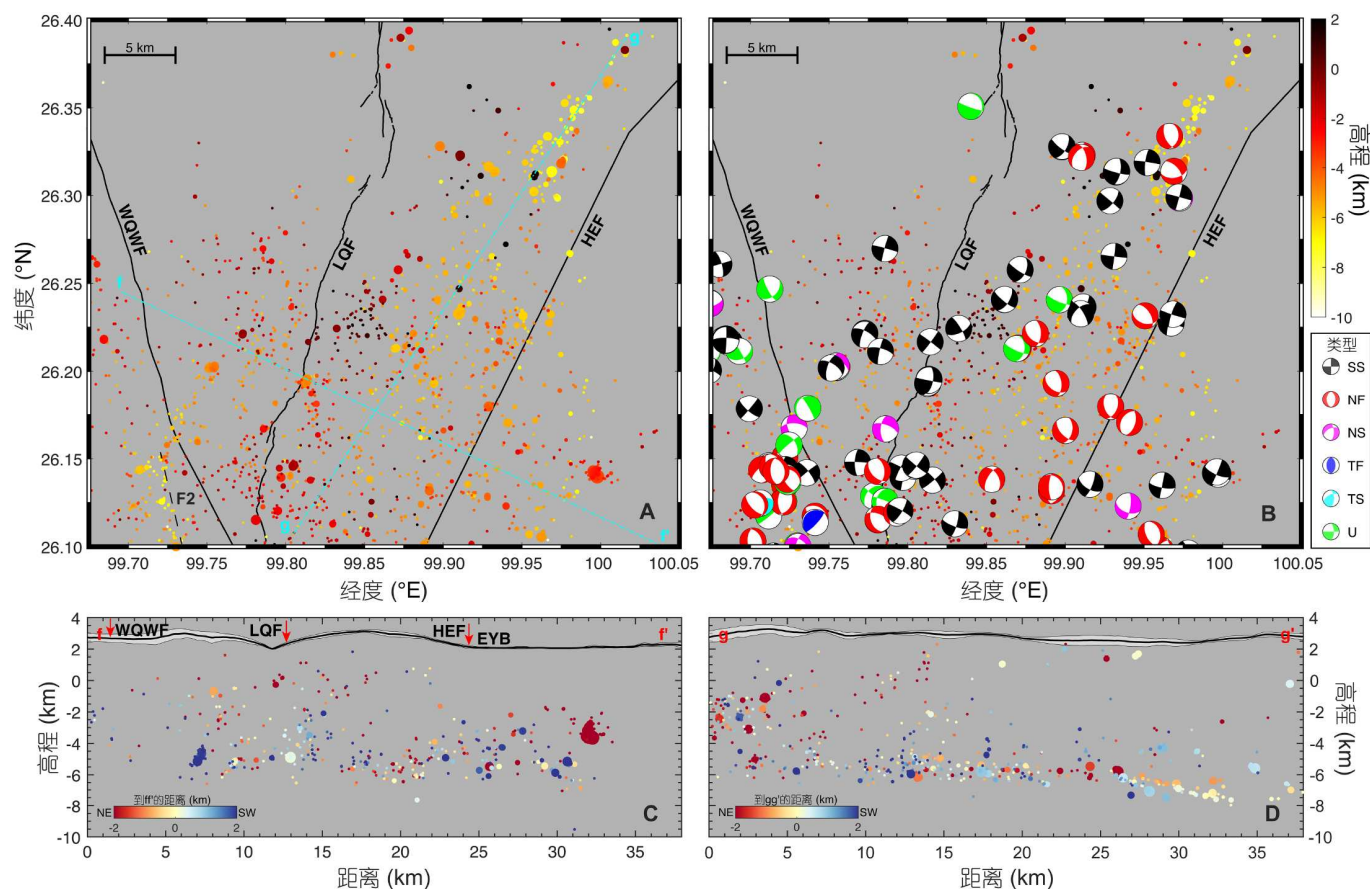


图6 密集台阵东北部的地震活动分布。(A) 重定位地震的平面分布,颜色表示震源深度(以高程表示),青色虚线表示剖面ff'和gg'的位置;(B) 台阵东北部的震源机制分布;(C、D)分别为沿剖面ff'和gg'的地震活动分布,其余标注同图4

热液流体活动可能是影响断层外地震活动的另一关键因素。研究区内温泉广泛分布,尤其集中于洱源盆地及炼铁盆地边缘,与强烈地震活动的空间聚集高度吻合

(图1)。其中若干地震簇表现出清晰的时间迁移特征(图7)。基于Shapiro等(1997)的流体扩散模型,我们估算了多个地震群的流体扩散系数约为 $0.04\text{--}2.9\text{ m}^2/\text{s}$ (图7)。这

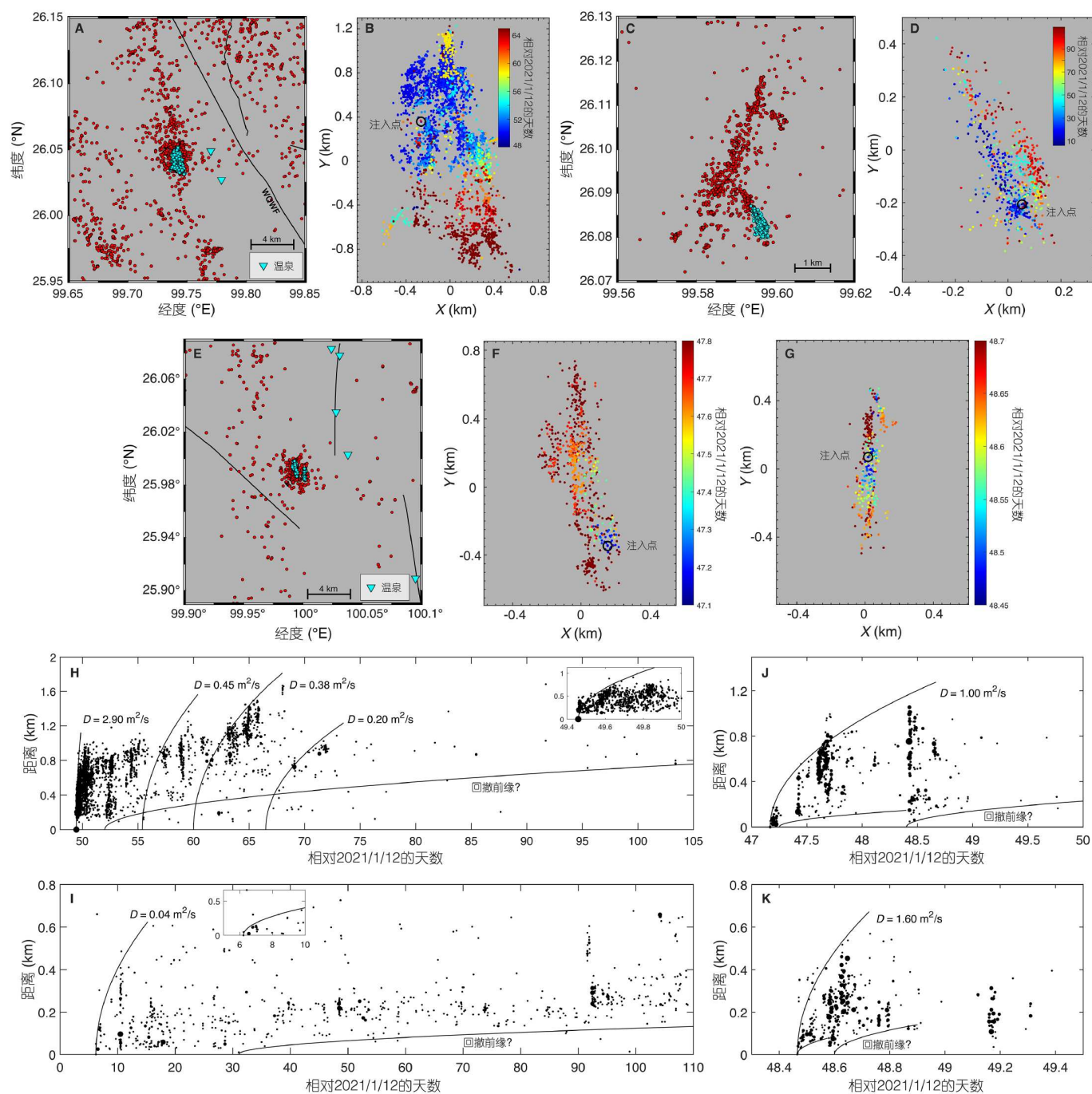


图7 研究区内三个具有时间迁移特征的地震群分布。(A、C、E)分别为洱源 $M_s$  5.5地震震区、云龙 $M_s$  5.0地震震区及研究区东部的精定位地震分布;青色圆点表示(B、D、F、G)中展示的地震群。地震群通过0.1 km的连接距离聚类得到;(B、D、F、G)中颜色标度表示自2021年1月12日密集台阵布设以来的天数。(H–K)分别显示了(B、D、F、G)中地震群可能的流体扩散模型。在这些模型中,我们假设每个地震群中的第一个事件为流体注入点。黑色圆点表示地震,符号大小表示震级,黑线表示相应的流体扩散模型和流体回撤迁移模式。(H)中,初始扩散率达到 $2.90\text{ m}^2/\text{s}$ ,随后多次向南扩散,且扩散率逐渐降低。(I)中,云龙震群地震最初沿走向迁移,扩散率约为 $0.04\text{ m}^2/\text{s}$ ,随后沿倾向方向穿过“Z”字形构造(图5F)向深处扩散。(H)和(I)中的插图表示缩放的初始扩散时间段。(J、K)中推断的扩散率分别约为 $1.00$ 和 $1.60\text{ m}^2/\text{s}$ 。所有地震群都显示出后回撤前缘迁移特征,可能指示断层带内的多次流体注入过程(Liu等, 2023)

些扩散过程既可能受到同震应力扰动的增强作用(图7H),也可能受断层带几何形态控制(图5F、7D和7I),此外还表现出多次重复扩散现象,指示可能存在多阶段流体注入过程(图7H、7J和7K)。地震随时间的迁移特征表明,这些地震群可能由流体压力扩散或非同震滑移所驱动(De Barros等, 2020; Liu等, 2023)。该机制能够合理解释持续性地震活动、间歇性爆发以及延迟余震现象(Vidale和Shearer, 2006; Amezawa等, 2023),例如2013年洱源主震发生一个多月后才出现的洱源 $M_s5.0$ 余震。而流体参与的“断层阀”机制也可能可以解释云龙地区自2016年后持续活跃的地震活动(附图S9)。在“断层阀”模型框架下(Sibson, 1981; Ross和Cochran, 2021),较大地震可能破裂断层底部的不透水屏障,使高压流体向上运移,从而在较长时间尺度内维持高孔隙压力并延长断层滑动过程。

其他独立的地球物理观测结果进一步支持可能的流体作用。大地电磁成像显示,洱源、云龙和漾濞地区下方存在显著的低电阻率异常,与强烈地震活动区高度对应(Zhou等, 2025)。这些异常自中下地壳向上延伸,表明脆-韧性转换带附近可能存在流体上涌或部分熔融。地震层析成像同样在2013年洱源地震震源区下方识别出低 $V_p$ 和高 $V_p/V_s$ 异常(Duan等, 2022; Jia等, 2021),与流体富集或部分熔融特征一致。从更大尺度来看,地震层析结果显示,川滇块体北段的下地壳物质可能沿丽江-小金河断裂(LXF)和龙蟠-乔后断裂(LQF)等主要构造通道向南迁移(Fu等, 2017; Li C等, 2024)。这种下地壳流动过程可能提高区域地温梯度,促进流体循环及与上地壳的耦合(Luo等, 2023)。因此,下地壳和上地壳之间的耦合机制可能是区域断层外地震活动的另一种可能的成因机制。

WQWF两侧表现出的不同地震活动模式——西侧结构化的断层外地震簇与东侧弥散分布的地震活动——与其他地区分布式变形的研究结果一致。例如, Ross等(2017)在美国加利福尼亚州圣哈辛托断裂带识别出大量与主断裂共轭的断层外地震活动,表现为走滑型与正断型断层交错分布;在川滇块体东缘的小江断裂带, Zhou等(2022)发现断层外地震活动与地热弱化和分布式剪切密切相关;在意大利中部, Collettini等(2022)则将广泛的断层外微震活动归因于高剪应变率和过压流体在非均质地壳中的共同作用。相比之下,滇西北地区的斜向共轭断层几何结构反映了一种更具区域特色的变形样式,其中区域构造应力、地壳流变特性与热液过程协同作用,共同导致了断层外地震活动的高度发育。这一过程凸显了在构造活动强烈地区,上地壳断层活动与深部地壳过

程之间复杂的力学-热学耦合关系。

### 5.3 对区域地震危险性评估的启示

WQWF两侧地震活动分布格局的差异表明,该区域存在不同水平的地震危险性。断层体系的成熟度通常与断层分段数量、大震发生历史及地震活动分布特征相关(Perrin等, 2016; Liu等, 2022; Guo等, 2023),也是地震危险性评估中的关键因素。与川滇块体东缘主要边界断裂带上发生的大规模且频繁的强震相比, WQWF两侧的地震活动整体表现为相对不成熟断层的特征。然而, WQWF以东地震活动分布弥散、缺乏显著历史中强震,表明该区断层体系的成熟度可能低于西侧。相对而言,西侧断层带在过去十余年中已发生多次中强地震(李姣等, 2020; 赵小艳和付虹, 2014; Yang等, 2022),显示出更高的成熟度,也意味着未来发生中强地震的可能性更大。

尽管WQWF沿线尚未记录到历史性大地震,但研究区东南约20 km处的RRF北段曾发生1925年大理 $M7.0$ 地震(Yang等, 2022)。地质调查表明, WQWF自晚更新世以来持续活动,其右旋走滑速率约为1.8–2.4 mm/a,垂向滑动速率约为0.30–0.35 mm/a(常祖峰等, 2014; 常祖峰等, 2016; 任俊杰等, 2007)。因此,目前RRF北段及WQWF表现出较低的地震活动性,可能正处于断层闭锁或震间应力积累阶段,其潜在地震危险性仍不容忽视。

此外,中强地震也可能起始于主断层附近的次级断层上(Ren等, 2024),或跨越多个断层段发生联合破裂(Ando和Kaneko, 2018; Ross等, 2019)。因此,有必要进一步深入研究这些具有高地震危险性的主断层附近次级断层的发震构造及其孕震机制。本研究通过系统揭示断层外地震活动的构造特征和孕震过程,为该区乃至类似构造环境下的地震危险性评估与风险防控提供了重要科学依据。

## 6 结论

本研究利用密集地震台阵资料,对川滇块体西南边界中段的断层外地震活动开展了系统研究。通过综合地震精定位、震源机制反演及应力场分析,识别出维西-乔后-巍山断裂两侧显著不同的地震活动模式:断裂以西地震活动呈簇状分布,与相对成熟的断层体系密切相关;断裂以东则以弥散型地震活动为主,反映出高度破碎的断层网络结构。2013年洱源地震和2017年漾濞地震分别发生在相交的正断层与走滑断层上,而2016年云龙地震则发生在一个几何结构高度复杂的断层带上。尽管发震构造结构复杂,但地震的震源机制总体上与区域NNW–

SSE向挤压应力场一致, 凸显了区域构造应力在地震活动中的主导作用。此外, 断层相互作用、热液活动及地壳流变特性等机制也可能作用于复杂的区域断层外地震活动。本研究深化了对断层外变形、断层相互作用及区域应力演化过程的认识, 为滇西北及其他构造复杂地区的地震危险性评估提供了新的科学依据。

**致谢** 感谢编委和两位匿名审稿人提出的建设性意见和宝贵建议, 这些意见显著提升了本文的质量。感谢中国地震台网中心的张建勇博士、云南省地震局的姜金钟博士、中国地震局地球物理研究所的孟繁昌博士, 以及中国地震台网中心提供地震目录数据。感谢野外工作团队在本研究数据采集过程中付出的辛勤努力与奉献, 以及南方科技大学的王蕊嘉博士、达尔豪斯大学的张森博士、中国地质大学(北京)的刘敏博士和加州大学伯克利分校的朱蔚强博士在软件使用方面给予的帮助。本文所使用的重定位地震目录、震源机制解和事件波形可以从以下网页获取: <https://zenodo.org/records/15192629>。

**补充材料** 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责, 详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

## 参考文献

- 常祖峰, 常昊, 臧阳, 等. 2016. 维西-乔后断裂新活动特征及其与红河断裂的关系. *地质力学学报*, 22: 517–530
- 常祖峰, 张艳凤, 周青云, 等. 2014. 2013年洱源 $M_s 5.5$ 地震烈度分布及震区活动构造背景研究. *中国地震*, 30: 560–570
- 崔华伟, 郑建常, 万永革, 等. 2022. 2021年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震序列发震构造及其与2013年洱源、2017年漾濞地震的异同. *地球物理学报*, 65: 620–636
- 魏顺民, 向宏发, 计凤桔, 等. 1996. 红河断裂带第四纪右旋走滑与尾端拉张转换关系研究. *地震地质*, 18: 301–309
- 黄小龙, 吴中海, 蒋瑶, 等. 2015. 2013年3月3日云南大理洱源 $M_s 5.5$ 地震烈度分布及发震构造. *地质通报*, 34: 135–145
- 李姣, 姜金钟, 杨晶琼. 2020. 2017年漾濞 $M_s 4.8$ 和 $M_s 5.1$ 地震序列的微震检测及重定位. *地震学报*, 42: 527–542
- 潘睿, 姜金钟, 付虹, 等. 2019. 2017年云南漾濞 $M_s 5.1$ 及 $M_s 4.8$ 地震震源机制解和震源深度测定. *地震研究*, 42: 338–348
- 任俊杰, 张世民, 侯治华, 等. 2007. 滇西北通甸-巍山断裂中段的晚第四纪滑动速率. *地震地质*, 29: 756–764
- 万永革. 2020. 震源机制与应力体系关系模拟研究. *地球物理学报*, 63: 2281–2296
- 徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平, 等. 2016. 中国及邻近地震构造图. 北京: 地震出版社
- 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D辑: 地球科学*, 33(增刊): 151–162
- 杨军, 苏有锦, 李孝宾, 等. 2015. 2013年洱源 $M_s 5.5$ 地震序列 $M_L \geq 3.4$ 地震的震源机制解研究. *地震研究*, 38: 196–202
- 俞春泉, 陶开, 崔效锋, 等. 2009. 用格点尝试法求解P波初动震源机制解及解的质量评价. *地球物理学报*, 52: 1402–1411
- 赵小艳, 付虹. 2014. 2013年洱源 $M_s 5.5$ 和 $M_s 5.0$ 地震发震构造识别. *地震学报*, 36: 640–650
- Amezawa Y, Hiramatsu Y, Miyakawa A, et al. 2023. Long-living earthquake Swarm and intermittent seismicity in the northeastern tip of the Noto Peninsula, Japan. *Geophys Res Lett*, 50: e2022GL102670
- Ando R, Kaneko Y. 2018. Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016  $M_w$  7.9 Kaikoura earthquake. *Geophys Res Lett*, 45: 12875–12883
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophys J Int*, 169: 1239–1260
- Bloom C K, Howell A, Stahl T, et al. 2022. The influence of off-fault deformation zones on the near-fault distribution of coseismic landslides. *Geology*, 50: 272–277
- Bott M H P. 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geol Mag*, 96: 109–117
- Brocher T M. 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. *Bull Seismol Soc Am*, 95: 2081–2092
- Chen W P, Hung S H, Tseng T L, et al. 2012. Rheology of the continental lithosphere: Progress and new perspectives. *Gondwana Res*, 21: 4–18
- Collettini C, Barchi M R, De Paola N, et al. 2022. Rock and fault rheology explain differences between on fault and distributed seismicity. *Nat Commun*, 13: 5627
- De Barros L, Cappa F, Deschamps A, et al. 2020. Imbricated aseismic slip and fluid diffusion drive a seismic swarm in the Corinth Gulf, Greece. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL087142
- Duan M, Zuo K, Zhao C, et al. 2022. Seismogenic environment and mechanism of the Yangbi  $M_s$  6.4 earthquake in Yunnan, China. *Earthq Sci*, 35: 297–310
- Fu Y Y, Gao Y, Li A, et al. 2017. Lithospheric structure of the southeastern margin of the Tibetan Plateau from Rayleigh wave tomography. *J Geophys Res-Solid Earth*, 122: 4631–4644
- Guo H, Lay T, Brodsky E E. 2023. Seismological indicators of geologically inferred fault maturity. *J Geophys Res-Solid Earth*, 128: e2023JB027096
- Guo L, He Z, Ren Z, et al. 2024. Recent Holocene activity and regional tectonic significance of the northern segment of the Red River fault zone. *J Struct Geol*, 185: 105194
- Hardebeck J L, Michael A J. 2006. Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *J Geophys Res*, 111: B11310
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2003. Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes. *Bull Seismol Soc Am*, 93: 2434–2444
- Horton J W, Chapman M C, Green R A. 2015. The 2011 Mineral, Virginia, earthquake, and its significance for seismic hazards in eastern North America—Overview and synthesis. *Geol Soc Am Spec Paper*, 509: 1–25
- Jia J, Wu Q, Wang F. 2021. Three-dimensional crustal P-wave velocity structure in the Yangbi and Eryuan earthquake regions, Yunnan, China. *Earthq Sci*, 34: 358–366
- Jiang J, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016  $M_s$  5.0 Yunlong earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications. *Pure Appl Geophys*, 176: 1225–1241
- Kissling E, Ellsworth W L, Eberhart-Phillips D, et al. 1994. Initial reference models in local earthquake tomography. *J Geophys Res*, 99: 19635–19646
- Li C, Yu C, Hillenbrand I, et al. 2024. Three-dimensional crustal channel flows beneath the southeastern Tibetan Plateau revealed by full-waveform ambient noise tomography. *Geophys Res Lett*, 51: e2024GL110704
- Li L, Wang W, Yu Z, et al. 2024. CREDIT-X1local: A reference dataset for machine learning seismology from ChinArray in Southwest China. *Earthq Sci*, 37: 139–157
- Li Z, Zhou J, Wu G, et al. 2021. CC-FJpy: A Python Package for extracting

- overtone surface-wave dispersion from seismic ambient-noise cross correlation. *Seismol Res Lett*, 92: 3179–3186
- Liu M, Li H, 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
- Liu M, Li L, Zhang M, et al. 2023. Complexity of initiation and evolution of the 2013 Yunlong earthquake swarm. *Earth Planet Sci Lett*, 612: 118168
- Luo Z, Zhou X, He M, et al. 2023. Earthquakes evoked by lower crustal flow: Evidence from hot spring geochemistry in Lijiang-Xiaojinhe fault. *J Hydrol*, 619: 129334
- Milliner C W D, Dolan J F, Hollingsworth J, et al. 2015. Quantifying near-field and off-fault deformation patterns of the 1992  $M_w$  7.3 Landers earthquake. *Geochem Geophys Geosyst*, 16: 1577–1598
- Perrin C, Manighetti I, Ampuero J, et al. 2016. Location of largest earthquake slip and fast rupture controlled by along-strike change in fault structural maturity due to fault growth. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 3666–3685
- Ren C, Wang Z, Taymaz T, et al. 2024. Supershear triggering and cascading fault ruptures of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake doublet. *Science*, 383: 305–311
- Ross Z E, Cochran E S. 2021. Evidence for latent crustal fluid injection transients in southern California from long-duration earthquake swarms. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL092465
- Ross Z E, Hauksson E, Ben-Zion Y. 2017. Abundant off-fault seismicity and orthogonal structures in the San Jacinto fault zone. *Sci Adv*, 3: e1601946
- Ross Z E, Idini B, Jia Z, et al. 2019. Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence. *Science*, 366: 346–351
- Shapiro S A, Huenges E, Borm G. 1997. Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site. *Geophys J Int*, 131: F15–F18
- Shen Z, Lü J, Wang M, et al. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 110: B11409
- Sibson R H. 1981. Fluid flow accompanying faulting: Field evidence and models. In: Simpson D W, Richards P G, eds. *Earthquake Prediction: An International Review*. Washington DC: American Geophysical Union. 593–603
- Su P, Luo Y, Zhao L. 2024. Regional stress field in the SE margin of the Tibetan Plateau revealed by the focal mechanisms of small and moderate earthquakes. *Tectonophysics*, 885: 230420
- Tapponnier P, Zhiqin X, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Tian J H, Luo Y, Zhao L. 2019. Regional stress field in Yunnan revealed by the focal mechanisms of moderate and small earthquakes. *Earth Planet Phys*, 3: 243–252
- 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. *Seismol Res Lett*, 88: 379–391
- Vidale J E, Shearer P M. 2006. A survey of 71 earthquake bursts across southern California: Exploring the role of pore fluid pressure fluctuations and aseismic slip as drivers. *J Geophys Res*, 111: B05312
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull Seismol Soc Am*, 90: 1353–1368
- Waldhauser F, Michele M, Chiaraluce L, et al. 2021. Fault planes, fault zone structure and detachment fragmentation resolved with high-precision aftershock locations of the 2016–2017 Central Italy Sequence. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL092918
- Wallace R E. 1951. Geometry of shearing stress and relation to faulting. *J Geol*, 59: 118–130
- Wang M, Shen Z. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e2019JB018774
- Wang Q, Chu R. 2020. Earthquake source parameters in southwestern China and their rheological implications. *Seismol Res Lett*, 91: 936–947
- Wang R, Schmandt B, Zhang M, et al. 2020. Injection-induced earthquakes on complex fault zones of the Raton Basin Illuminated by machine-learning phase picker and dense nodal array. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL088168
- Wang W, Wu J, Fang L, et al. 2017. Crustal thickness and Poisson's ratio in southwest China based on data from dense seismic arrays. *J Geophys Res-Solid Earth*, 122: 7219–7235
- Wetzler N, Lay T, Brodsky E E, et al. 2018. Systematic deficiency of aftershocks in areas of high coseismic slip for large subduction zone earthquakes. *Sci Adv*, 4: eaao3225
- Wu Y, Zhou X, Zhuo L, et al. 2023. Structural controls of the northern Red River Fault Zone on the intensity of hydrothermal activity and distribution of hot springs in the Yunnan-Tibet geothermal belt. *Geothermics*, 109: 102641
- Yang T, Li B, Fang L, et al. 2022. Relocation of the foreshocks and aftershocks of the 2021  $M_s$  6.4 Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China. *J Earth Sci*, 33: 892–900
- Yao Q, Yu C, Zeng X. 2025. Shallow focal depths of the 2022  $M_s$  6.8 Luding earthquake and its  $M \geq 3$  aftershocks. *Seismol Res Lett*, 96: 35–51
- Yoshida K, Uchida N, Kubo H, et al. 2022. Prevalence of updip rupture propagation in interplate earthquakes along the Japan trench. *Earth Planet Sci Lett*, 578: 117306
- Yu C, Hauksson E, Zhan Z, et al. 2019. Depth determination of the 2010 El Mayor-Cucapah earthquake sequence ( $M \geq 4.0$ ). *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 6801–6814
- Yu C, Zheng Y, Shang X. 2017. Crazyseismic: A MATLAB GUI-based software package for passive seismic data preprocessing. *Seismol Res Lett*, 88: 410–415
- Zeng X, Yu C. 2025. CrazyBeachball: A MATLAB GUI-based software package for focal mechanism inversion. *Earthq Sci*, 38: 441–449
- Zhang G, Chen X, Yu C, et al. 2025. A Stockwell-Bessel transform based method for extracting broadband dispersion curve from seismic ambient noise data. *J Geophys Res-Solid Earth*, 130: e2024JB030311
- Zhang L, He Z, Wang S, et al. 2025. The 2023  $M_w$  6.0 Jishishan earthquake: A slow unilateral rupture on a blind thrust fault revealed by high-precision earthquake locations and dynamic modeling. *Seismol Res Lett*, 96: 2105–2114
- Zhang M, Ellsworth W L, Beroza G C. 2019. Rapid earthquake association and location. *Seismol Res Lett*, 90: 2276–2284
- Zhang M, Liu M, Feng T, et al. 2022. LOC-FLOW: An end-to-end machine learning-based high-precision earthquake location workflow. *Seismol Res Lett*, 93: 2426–2438
- Zhou Y, Yue H, Zhou S, et al. 2022. Microseismicity along Xiaojiang Fault Zone (Southeastern Tibetan Plateau) and the characterization of interseismic fault behavior. *Tectonophysics*, 833: 229364
- Zhou Z, Yu N, Wang T, et al. 2025. Episodic earthquakes controlled by the migration of crustal fluids and fault valve behavior. *Geophys Res Lett*, 52: e2024GL114093
- Zhu W, Beroza G C. 2019. PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival time picking method. *Geophys J Int*, 216: 261–273
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *J Geophys Res*, 97: 11703–11728