中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 3 期： 1171–1183
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

川南工业开采区地震簇时空演化规律——多源数据融合与机器学习增强分析

龚丽文[1,2]，张怀[1*]，陈石[3,4]，石耀霖[1]，陈丽娟[2]，尹光耀[1]，李永波[3,4]

1. 地球系统数值模拟与应用全国重点实验室，中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049
2. 重庆市地震局，重庆 401147
3. 中国地震局地球物理研究所，北京 100081
4. 北京白家疃地球科学国家野外观测科学研究站，北京 100095
* 通讯作者，E-mail：hzhang@ucas.ac.cn

2025-03-31收稿，2025-09-25修回，2025-10-30接受，2026-02-05网络版发表
国家自然科学基金联合基金项目(U2239205)和国家自然科学基金面上项目(42174073)资助

摘要 川南工业开采区作为页岩气水力压裂的核心区域，其地震活动性在2016年后呈指数级增长，成为川滇菱形块体东缘最活跃的震群区之一。本研究聚焦于海量地震数据中时空演化规律的智能提取这一科学问题，通过多源数据融合与人工智能增强分析，揭示开采扰动下地震活动的时空演化与迁移规律。主要开展(1)构造-工程耦合分析：整合地表褶皱形态、基底埋深分区、志留系龙马溪组开采层位空间配置及高分辨率地震反射剖面，解析地震分布的构造主控因素；(2)地震簇智能识别：基于机器学习算法(Hdbscan聚类+KNN监督分类等)，从精定位地震目录中提取31个典型地震簇，定量表征空间脆弱区及其动态迁移规律；(3)时空特征解耦：结合时间序列聚类分离干扰事件，构建地震簇“空间形态-时间丛集”演化模型，揭示开采应力与区域构造应力的协同驱动机制。结果发现：地震集中分布于长宁背斜、威远南翼基底交界带等褶皱构造单元，受已知断层控制较弱；地震簇呈现定向迁移特征，威远-长宁区块向东南迁移，荣昌-泸县区块向西南迁移，最终在泸县-大安形成新生的地震易发区。本研究构建的地震簇时空演化特征模型为该地区政府长期经济发展规划和油气开采管控提供重要的指导意义和决策依据。

关键词 页岩气，机器学习，地震簇，地震迁移规律，地震活动趋势

1 引言

川南地区位于扬子地台四川台坳南缘，构造背景相对稳定，但深层沉积序列中蕴藏丰富的页岩气与常规油气资源(He等，2019；常祖峰等，2020)。自2015年大规模水力压裂技术应用于页岩气开发以来，区域地震活动性显著增强，2008–2023年间累计记录M≥3.0有感地震1283次(图1)，其空间分布与基底埋深梯度带(如威远背斜基底埋深<5 km区)及志留系龙马溪组开采层位展布(埋深2–3 km区)呈现显著耦合特征(张岳桥，2020)，导致区域地震危险性持续攀升。作为人口密集与工业集聚的核心区，川南的地震活动性演变备受学界关注。国内外研究团队已在珙县-长宁、荣县-威远及荣昌-泸县等开采区布设密集观测台网，系统地开展了地震活动性、构造动力学、介质属性、震源物理和孕震机理等研究，如揭示隐伏断裂活化与褶皱应力场的相互作用机制(雷兴林等，2020；Zuo等，2020)；通过速度结构反演刻画开采扰动下的地壳各向异性特征(Sheng等，2022)；精确定位震源参数并量化流体注入-应力调整的触发贡献(王志伟等，2018；Wang Z等，2020；Wang等，2023)；构建“构造应

中文引用格式：龚丽文, 张怀, 陈石, 石耀霖, 陈丽娟, 尹光耀, 李永波. 2026. 川南工业开采区地震簇时空演化规律——多源数据融合与机器学习增强分析. 中国科学: 地球科学, 56(3): 1171–1183, doi: 10.1360/SSTe-2025-0077
英文引用格式：Gong L, Zhang H, Chen S, Shi Y, Chen L, Yin G, Li Y. 2026. Temporal and spatial evolution patterns of earthquake clusters in the southern Sichuan industrial mining zone—Advanced analysis based on multisource data fusion and machine learning. Science China Earth Sciences, 69(3): 1135–1148, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1745-3

© 2026《中国科学》杂志社

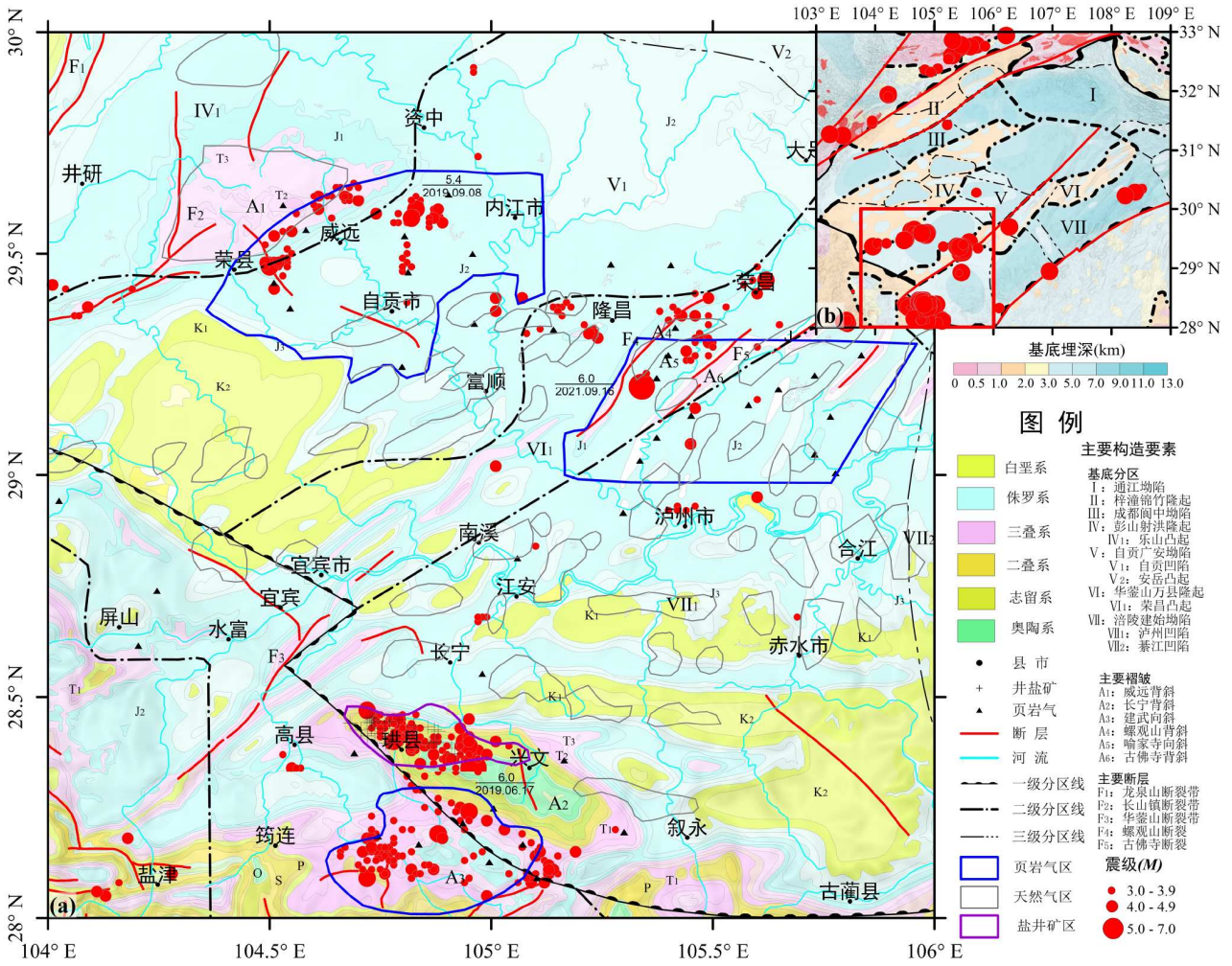


图 1　研究区地震构造图(改自李冰等，2018；雷兴林等，2020；马新华等，2020)。(a) 川南地区地震分布图；(b) 四川盆地基底埋深构造分区

力累积-压裂流体扩散”双驱动诱发地震理论框架(Wei等，2022)等。研究成果十分丰硕，然而针对大区域、长时间跨度的地震时空演化与迁移趋势研究还是空白，这也是当地政府和企业居民最为关注的科学问题之一。

面对海量地震数据，传统分析方法难以有效提取时空演化规律。冗余信号(如微震、爆破干扰)掩盖构造主导的迁移模式，基于单一物理参数(如b值、震源机制)的研究难以解析多尺度耦合过程。因此，有必要针对海量数据进行特征提取，获得具有不同时空特征的地震簇，凸显地震时空演化与迁移规律。地震簇是震源在空间集中分布的地震群体事件，其空间形态受控于发震构造的展布特征(Ross等，2020)，并受应力传递或孔隙流体驱动表现出一定的迁移趋势，不同地震簇也存在相互触发关系(Kagan和Jackson，1991；Roland和McGuire，2009；Fischer等，2023)。地震簇在不同的时间尺度表现出差异的演化特征，而不同时期的地震簇在空间上又具有一定的继承关系(Kagan和Jackson，1991；Zaliapin和Ben-Zion，2013)，并与周边大地震和区域应力场表现出高度相关性(Kanamori，1972)，地震簇可以作为深处流体活动和震源结构瞬变的指标(Skoumal等，2016；Peng等，2021)。地震簇的快速自动提取是研究地震簇的前提，而机器学习与数据挖掘方法在地学中的深入应用(Omran等，2007；Bergen等，2019；Kong等，2019)使地震簇的快速分类和特征的自动提取成为可能(Zaliapin和Ben-Zion，2013；Novianti等，2017)。因此，本研究聚焦上述瓶颈问题，提出多源数据融合驱动的机器学习增强分析范式，旨在通过地震簇智能提取与时空解译分析，揭示工业开采区内及相互之间的地震迁移趋势和时空演化特征，为震情形势研判提供有力证据。

2　数据与方法

随着人工智能方法在震相识别等地震领域的深入应

用，川南工业开采区(104°E–106°E，28°N–32°N)地震活动的持续，大量科研工作者在该地区开展了精定位工作，产出了丰硕的成果数据(Wong等，2021；Lai等，2023；吴建平等，2024)，特别是吴建平等(2024)利用川滇地区固定地震台和多期流动地震台，共1624个台站波形数据，采用三维速度模型(CSES-VM1.0)对川滇实验场2009–2020年的地震进行了重定位，时间跨度长，空间精度较高，其中，川南地区共有75550次(约占1/4)，主要分布在工业开采区附近，结合重庆对荣昌地区长期的数据补充(李翠平等，2022)，共获得78845次精定位数据，其中0–1级为32131次、1–2级为38178次、2–3级7377次、>3级872次，96%地震的定位精度<0.5 km。为了获得更长时段的地震时空演化特征，本文收集了该地区2008–2023年陆续发生的0级以上地震事件共157155次(台网正式目录)，用于长期样本分析。

针对长期积累的海量地震数据，川南地区地震活动呈现多因素耦合特征：长期累积的地震能量通过多期次地震事件释放，时空分布离散性强，缺乏类似余震序列的规律性迁移特征。其复杂性源于多机制协同作用，包括固体潮汐应力调制、工业开采诱发地层形变、季节性降雨渗透弱化断层带以及邻近中强地震的远程应力触发效应。这些因素导致地震事件在时间上呈现间歇性丛集、空间上随机弥散分布，短期内难以辨识显著统计规律，显著增加了区域地震危险性评估的复杂度。本文拟采用机器学习相关算法增强分析，对地震群进行特征提取，剔除掉离散分布的“噪声地震”，凸显时空演化特征，具体方法步骤如图2所示。

3 地震分布特征

由于目前页岩气开采层位多为志留纪和奥陶纪地层，其中志留纪地层以灰色泥页岩为主，岩性较软，水力压裂后，容易吸水变形；上覆的二叠纪-侏罗纪灰岩和砂岩，岩性相对较硬，应力积累容易形成地震。由于该地区的地震主要位于开采区附近，为了研究开采层深度与地震的对应关系，本文结合前人恢复的志留纪古岩相埋深(刘树根等，2016；王海燕等，2017)，来分析地震的分布特征和受控因素，图3a显示：(1)地震主要集中分布在三个工业开采区附近，对应志留纪埋深较浅的三个隆起区，其上覆地层主要为二叠纪和三叠纪的海相沉积(以灰岩为主)，以及侏罗纪的河湖相沉积(以泥砂岩为主)(图3b)。(2)地震分布的密集程度受隆起区的大小影响，其中，建武向斜和威远背斜隆起幅度较大，范围较小，地震分布较密集，而荣昌-泸县地区则相反(图3a)。(3)早期(2015年以前)，受工业废水回注和盐井开采影响较大，地震主要分布在长宁背斜，螺罐山背斜和自流井背斜附近；晚期(2015年以后)，受页岩气开采活动影响，地震主要分布在建武向斜，白马镇向斜和喻家寺向斜内部。(4)地震受地表的断裂构造影响较小，除了墨林场断层附近地震沿断层呈线状排布外，大部分地震呈团簇状散布在开采区附近。

3.1 荣县-威远地区

威远背斜呈北东向展布的不对称椭圆型穹隆构造，其形态结构受基底的控制。新近纪以来，威远背斜的核部快速隆升，使得核部应力集中，发育一些高陡的节理带，出露的最老地层为下三叠统嘉陵江组，岩性以灰岩为主；断层沿着穹隆向四周呈放射状展布；近期在威远背斜东南翼发生大量地震，地震呈多个簇状分布于威远县四周。威远背斜基底埋藏深度较浅，背斜为南翼陡而北翼缓(柴顺琪等，2023)；威远地区的主体断层受基底

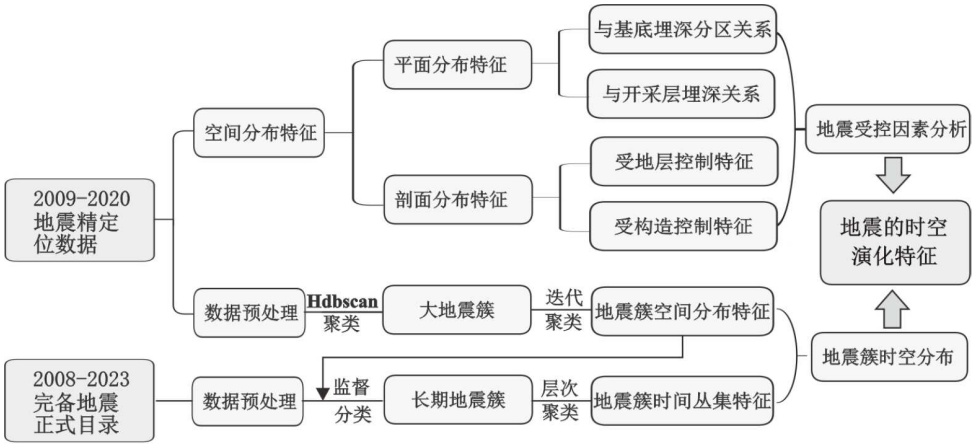


图2 方法流程图

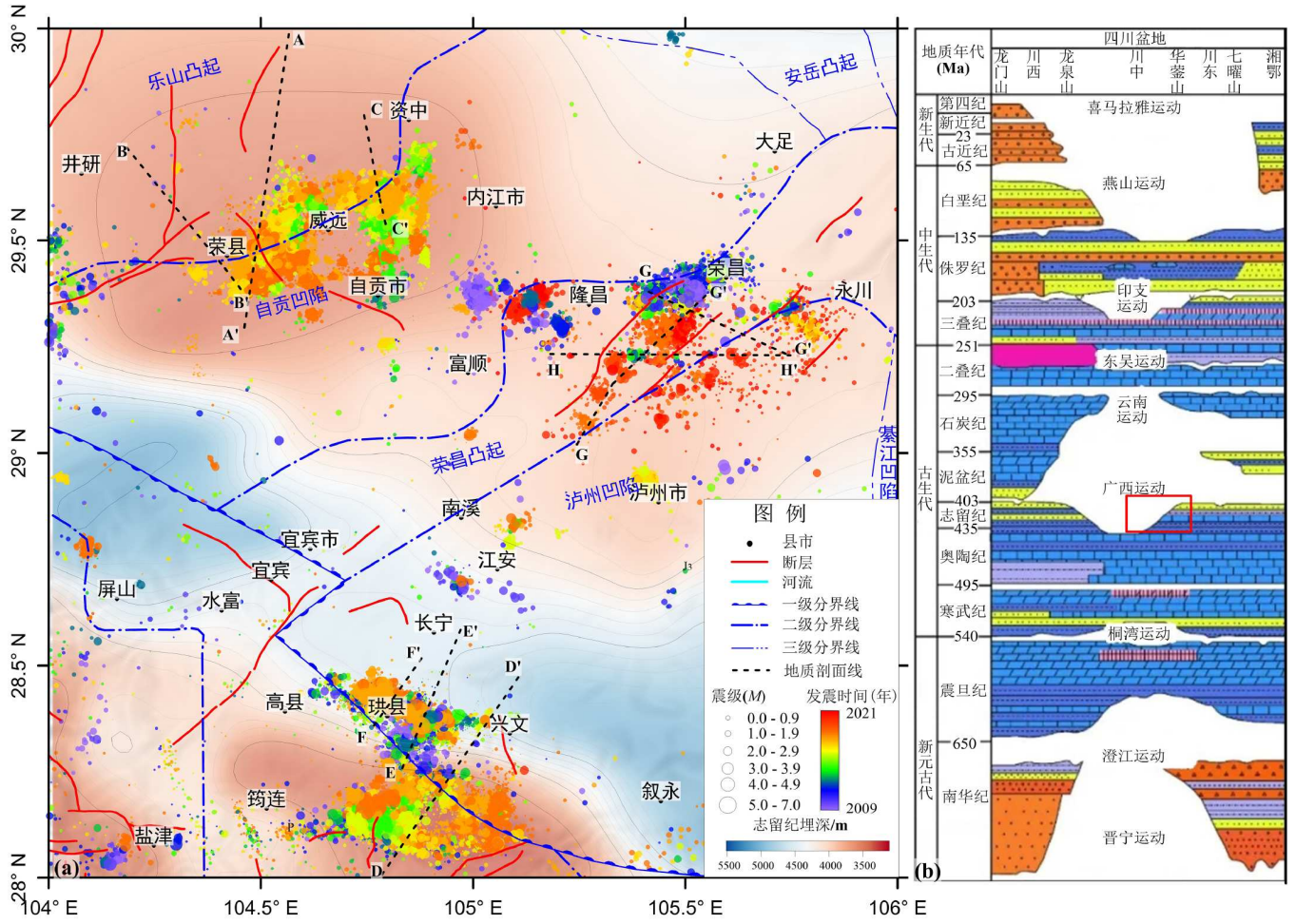


图 3　工业开采层埋深及地震分布特征(改自刘树根等，2016)。(a) 志留纪沉积地层埋深及地震分布特征；(b) 四川盆地构造沉积序列及构造运动

的控制很明显，该断层由南向北上冲，兼具走滑力学性质(可以等，2022)，基本上是沿着结晶基底和变质基底的分界发育，由于其岩性力学性质的差异，控制着断层展布的发育，而上覆的沉积盖层将其“焊接”在一起，在应力作用下，沉积地层很容易应力集中，发生破裂，形成地震(Wei等，2022)。

结合该区域附近3条地震反射剖面和钻探结果可知：(1)威远背斜的深部为花岗岩结晶基底，基底坚硬不易变形，控制了威远背斜的主体发育，而背斜东南部深部成层的沉积岩或者碎屑岩，岩性较软，受力容易变形。(2)沉积地层中存在三套软弱滑脱层，分别为寒武系页岩、志留系页岩和三叠系蒸发岩，从而形成了多套滑脱断裂和构造楔，在楔体的尖端发生多次中强地震，地震序列表现出一连串前震和余震的级联性质(Wang M等，2020)。(3)逆冲构造的下倾部分与沉积盖层的寒武系页岩分离，并与深基底逆冲斜坡相连接，地震则主要分布在变质基底与盖层交界处，特别是早古生代地层中(易桂喜等，2020)，该区域岩石力学性质变化最大，应力集中容易释放，形成了大量的中小地震(图4)。

3.2　珙县-长宁地区

珙县-长宁地区的地震主要分布在长宁背斜的西段和建武向斜内部，该褶皱系形成于燕山期，后在喜马拉雅期得到改造。长宁背斜由多个次级褶皱和伴生断层组成，NE和NW向节理发育，已剥蚀成谷，主要为井盐开采区，在NE向构造应力场作用下，节理发生构造强化、贯通，并进一步破裂，发生了长宁6.0级地震，震源机制为逆冲兼左旋走滑(易桂喜等，2019)，地震从中部向北西端迁移(Jia等，2020；Jiang等，2020；常祖峰等，2020)。建武向斜为宽缓向斜，主要的页岩气开采区域，地震呈多个簇状分布在向斜的两翼，以中小地震为主。其中北翼的小微地震较多，震源机制解节面的定向性较差；而南翼在东西两个地震簇之间分布了大量的3.0级以上地震，震源机制解节面具有方向性(胡幸平等，2021)。

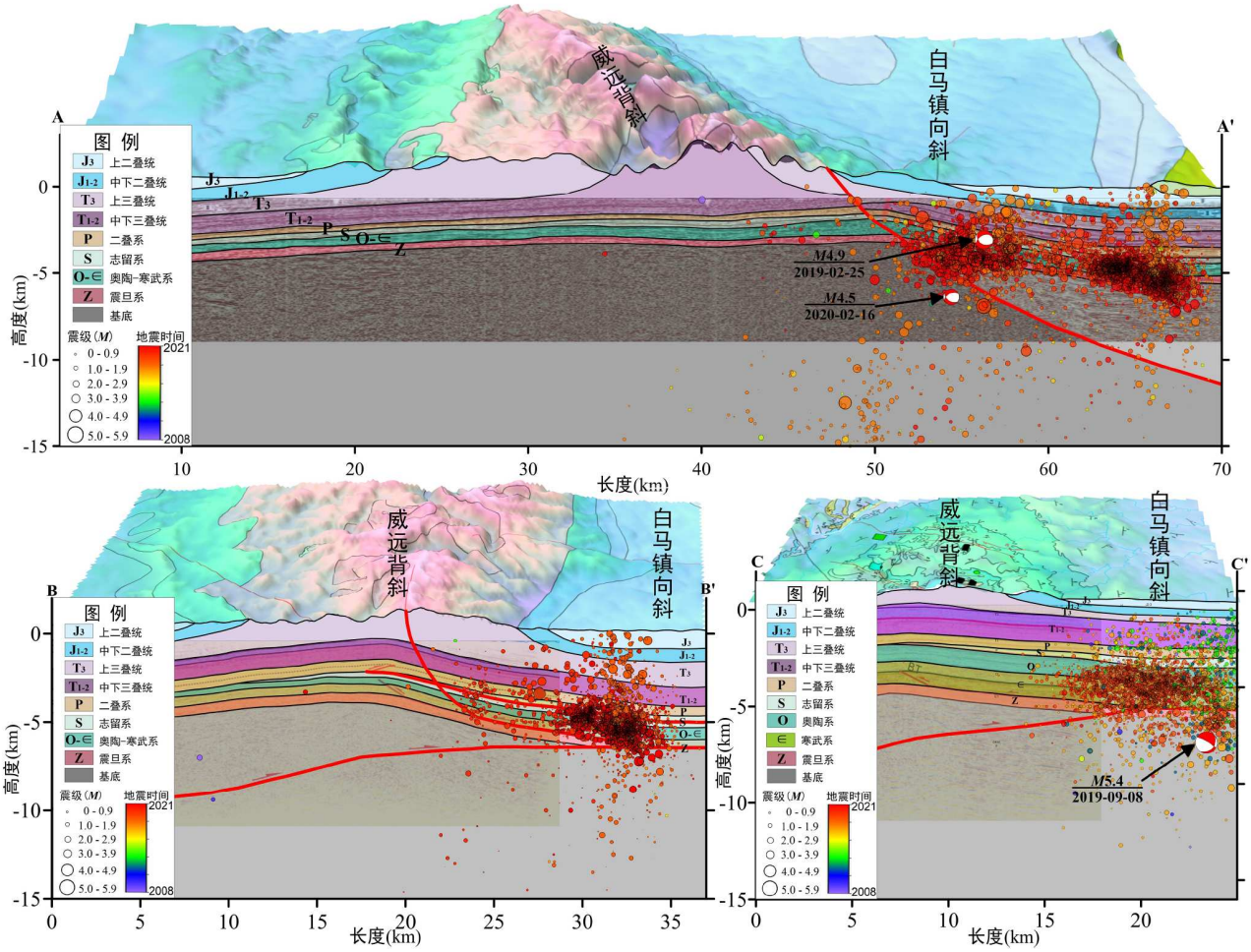


图 4 威远-荣县开采区地震剖面特征(改自Wang M等，2020；可以等，2022)。AA′为北北东向纵穿威远穹隆构造长浅层地震剖面；BB′为北西向横跨威远背斜西南端浅层地震剖面；CC′为北北西向横跨威远背斜东北端浅层地震剖面

结合该区域地震反射剖面和地质构造资料(Lu等，2021)，分别绘制了3条地震地质剖面图，并将剖面线5 km范围内的地震精定位数据投影到剖面图上(图5)，结果显示：地震主要分布在沉积地层中，局部受褶皱构造形态控制；长宁背斜和建武向斜下伏基底内可能发育有基底逆冲断层(Lu等，2021)，切穿了寒武系、奥陶系和志留系，寒武系内膏盐岩及泥页岩等软弱层发生塑性变形，形成层内的滑脱面，基底断层呈坡-坪式展布的特征，最终形成了长宁基底断弯褶皱(He等，2019；Zhang等，2020)。其中，DD′剖面地震主要分布在建武向斜两翼，地震活动始于北西翼，并在向斜内部呈多期复发；EE′剖面地震主要分布在长宁背斜核部和南东翼，其中核部自始至终地震均较活跃，而南东翼地震活动集中于2016年前后；FF′剖面地震主要发生在背斜核部的寒武系和震旦系灰岩中，随着地震活动增加，地震深度逐渐加深。

3.3 泸县-荣昌地区

泸县-荣昌地区位于川东陷褶束内的北东向隔挡式褶皱，背斜成山，向斜为盆地，多滑脱层是控制四川盆地薄皮变形的主要因素，也是制约四川盆地沉积盖层内断裂发育的主要因素。在背斜核部或两翼发育压扭性逆冲断层，形成近NE向的褶断带，分别为螺罐山褶断带、古佛山褶断带、新店子褶断带、西山褶断带，其中螺罐山褶断带北段早期地震活动较活跃，在其东北端曾发生多次5.0级左右地震，可能受控于北东向的华蓥山基底断裂带。后续随着页岩气开采的持续，地震逐渐向喻家寺向斜迁移，并在2021年9月发生泸县6.0级地震，由沉积盖层不均匀变形引起的局域NE-SW压应力集中，主震破裂与被重新激活余震断层共同勾勒出沉积盖层中逆冲楔(Zhao等，2023)。

地震剖面结果显示，泸县-荣昌地区地层产状变化较平缓，受三叠纪膏盐层滑脱作用，形成四川盆地典型隔

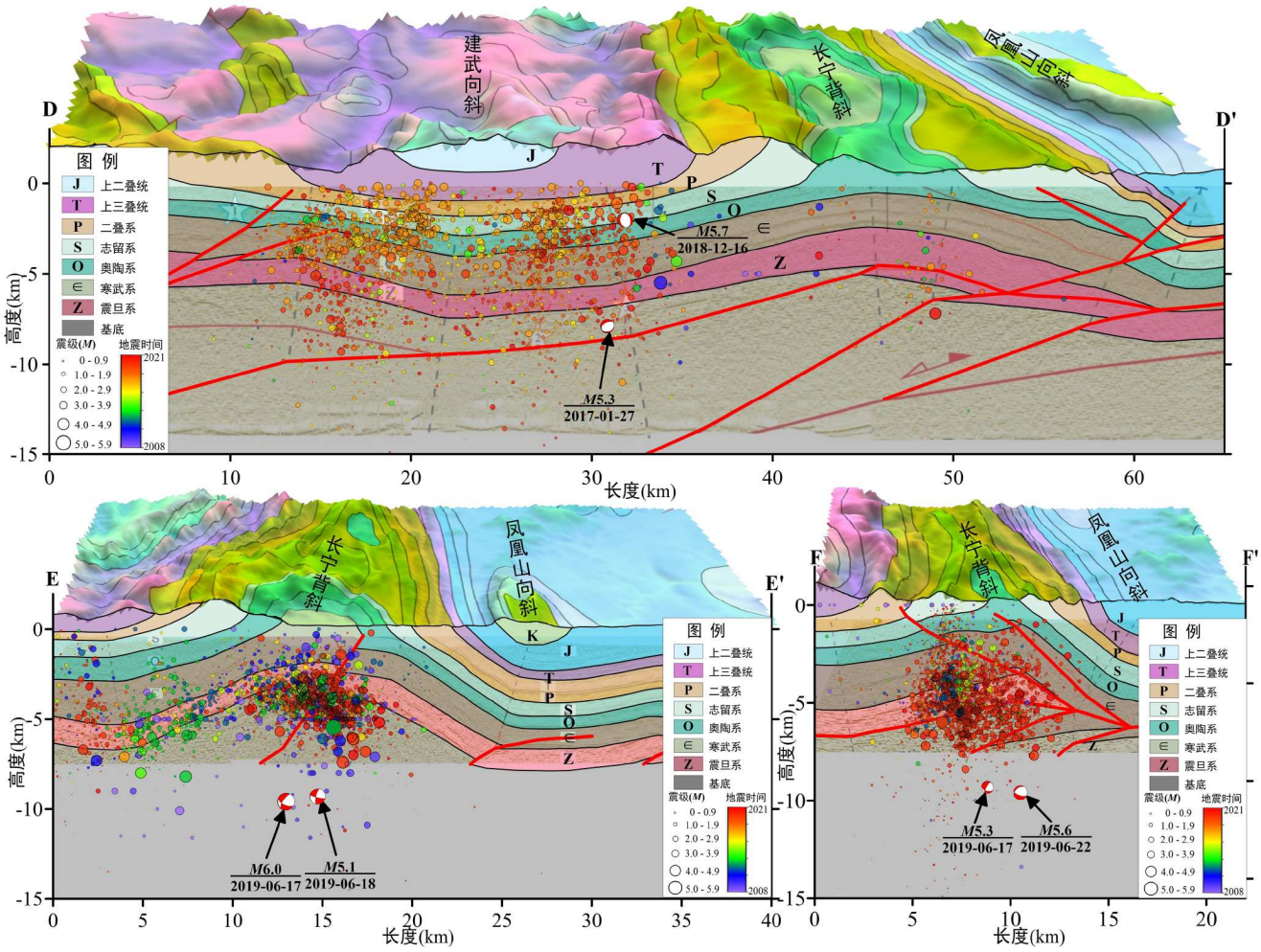


图 5　珙县-长宁开采区地震剖面特征(改自Lu等，2021)。DD′为北东向横穿建武向斜与长宁背斜东南端浅层地震剖面；EE′为北东向横穿长宁背斜中段浅层地震剖面；FF′为北东向横穿长宁背斜北西端浅层地震剖面

挡式褶皱，褶皱引起的地层变形主要体现在上部三叠纪地层，地震主要分布在下古生界地层中，受褶皱构造的控制作用较小，地震相对较分散(图6)。(1)北东向剖面(GG′)地震分布在各个区域呈现出明显的分期特征，整体表现为从北东(蓝色)向西南(红色)方向的迁移，2021年泸县地震后，地震活动明显增强，震级增大，深度主要位于三叠系以下。(2)东西向剖面(HH′)可以解译出多条隐伏断层，但对地震的控制作用较弱，地震相对较分散，在古佛山褶断带邻近区域呈多期复发状态，发生的最大地震位于褶皱基底上部与沉积盖层交界部位。(3)北西向剖面(JJ′)横穿螺罐山褶断带、喻家寺向斜、新店子褶断带，地震集中分布在螺罐山褶断带东北端，呈多期复发持续活动，地震相对较集中；喻家寺向斜中两条隐伏断层交汇处的上下地层也发生多期地震，地震相对较集中(图6)。

4　地震簇的提取与分类

随着人工智能和机器学习方法在地学中的应用，特别是震相识别和震源参数的计算(Zhu和Beroza，2018；Bergen等，2019；Kong等，2019；Mousavi等，2020；Kuang等，2021)，产出了大量地震数据，这些地震在空间上呈簇状分布，时间上也具有较好的丛集性。目前，需要一种方法简化冗余信息，剔除干扰地震，强化特征参数，高效提取地震簇的时空特征，而机器学习在数据清洗与处理中具有较强的优势(Pedregosa等，2012)，甚至可以通过机器学习处理地震目录构建的统计特征，提取出破坏性地震前兆信号(Girona和Drymoni，2024)。因此，本文主要用机器学习相关方法对地震数据进行特征提取，利用聚类分析和监督分类将不同特征的地震簇区分开，并分别研究各地震簇的迁移与演化特征。主要方法包括：

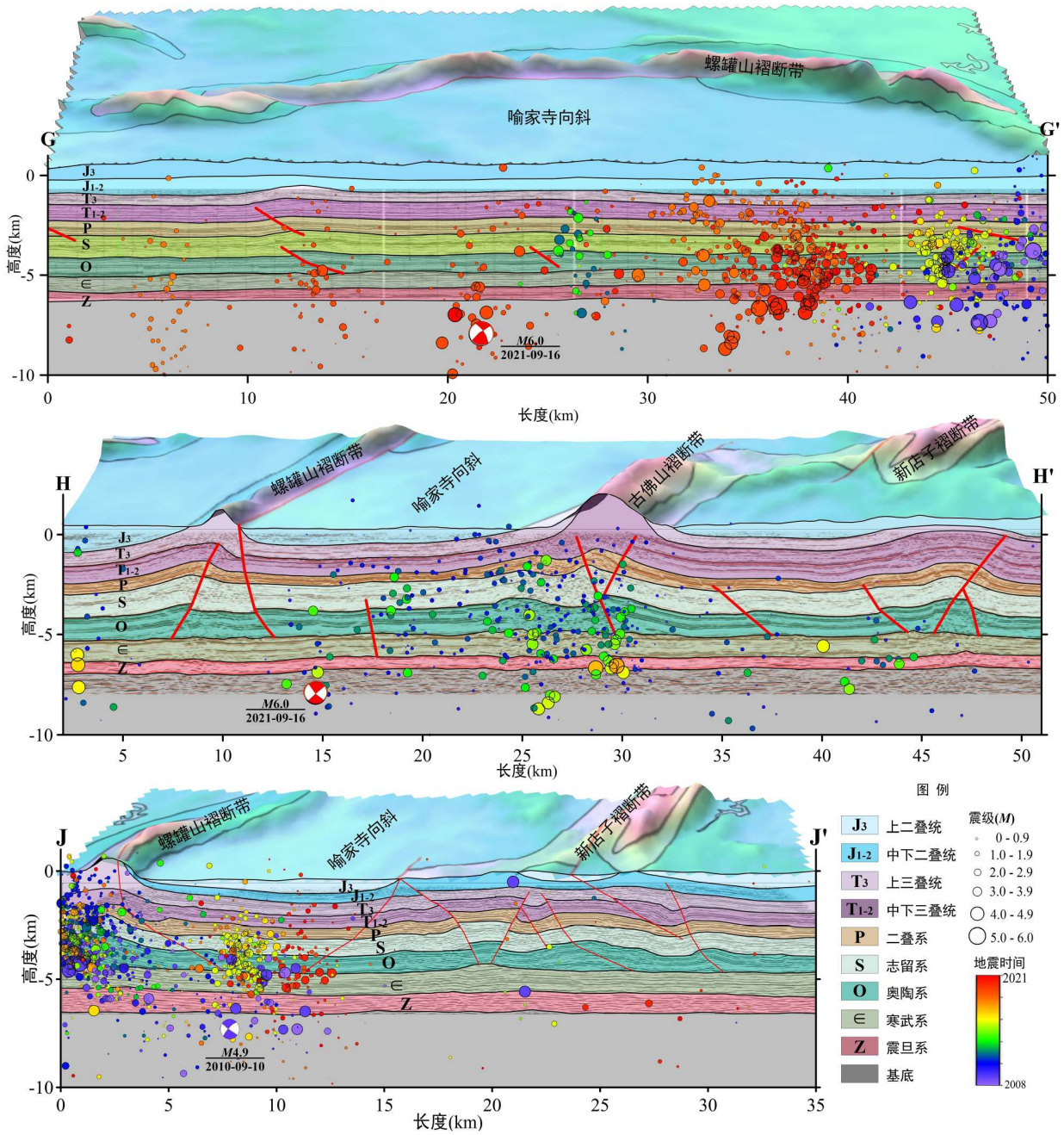


图 6 荣昌-泸县开采区地震剖面特征。GG′为北东向沿着喻家寺向斜轴部浅层地震剖面；HH′为东西向横跨螺罐山背斜中段和喻家寺向斜浅层地震剖面；JJ′为北西向横跨螺罐山背斜北东端浅层地震剖面

地震精定位数据的聚类分析：地震精定位是采用精细的三维结构模型和双差定位算法，对震源位置进行精细化定位，其定位精度较高，地震丛集性较好，进而利用密集分布的地震提取发震构造和震源结构特征。为此，本文选择Hdbscan聚类算法，它通过构建数据点之间的距离矩阵生成有向有权的图，通过遍历这个图来获得所有的簇，它的优势是可以自动确定最佳的参数值，获得任意形状和大小的簇(Rahman等，2016)。通过Hdbscan聚类分析(min_cluster_size=100)，去除分散的地震后(地震分类标签值为−1)，获得11个地震簇，各地震簇中地震个数差距较大，有两个簇地震数大于30000个，主要分布在威远和长宁地区(图7a)。为了获得更加精细的地震簇，本文通过不断迭代聚类算法，利用轮廓系数检验聚类效果，最终获得聚类效果较好的18个地震簇(图7b)。

长期地震目录数据再分类：台网目录具有更长的时间跨度，在同一地震台网地区，地震记录较稳定，编目

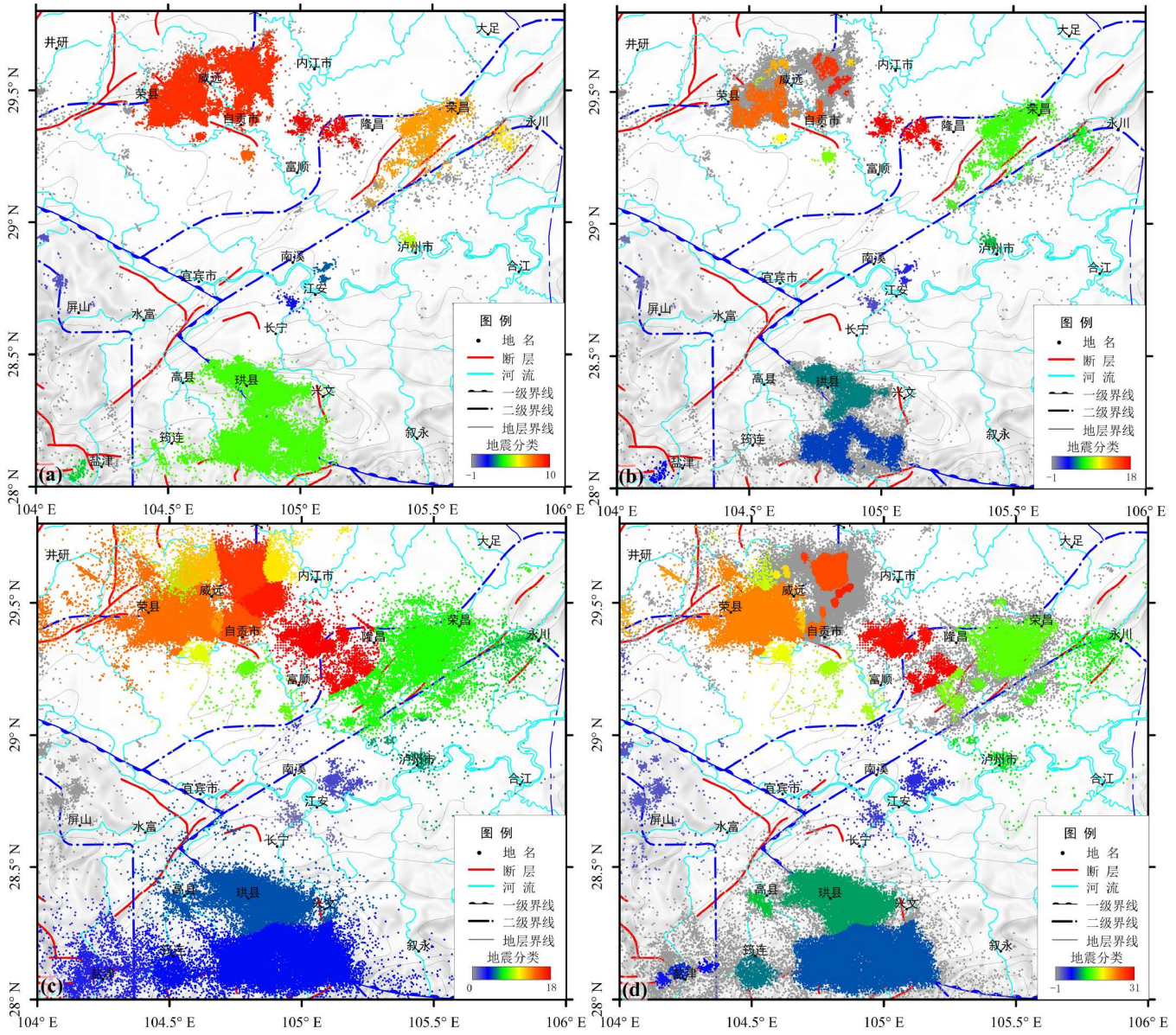


图 7　地震聚类分析与分类结果。(a) 通过Hdbscan聚类方法对川南地区精定位数据聚类结果；(b) 通过迭代聚类进一步剖分工业开采区的大地震簇；(c) 通过K邻近分类将长期地震按精定位聚类结果进行分类；(d) 通过密度聚类剔除地震簇周围分散的地震

规则较统一，地震时间分辨率较可靠，可以获得较长的时间跨度，更有利于研究该地区地震形势的长期演化特征。因此，本文结合地震精定位聚类结果，按地震簇进行K近邻(KNN)分类，即将待分类的数据标签用其邻近K个已分类标签代替(Zhang和Zhou，2007)，获得各地震簇附近的长期地震目录，在保留空间聚类特征的同时，延长了地震簇演化的时间跨度(图7c)。对地震数目较多的地震簇，利用高斯混合模型聚类方法进一步剖分，其核心思想是使用多个高斯分布的组合来拟合数据，这种方法的优越性在于其对数据的弹性拟合能力和生成性质(Zhang等，2021)。通过迭代优化过程将数据划分不同高斯分布的簇，更加合理地优化了分类结果，最终获得31个地震簇(图7d)。

5　地震迁移与演化特征

本文地震在空间上呈多个簇状集中分布，而不同地震簇的地震发生时间具有一定的丛集性，大部分地震簇呈多个时段复发的演化特征。鉴于此类特征，本文利用机器学习方法分别对不同地震簇进行时间聚类分析，提取各类地震簇的时间演化特征，通过对该区域主要地震簇的时间聚类结果可知：(1)工业开采区的大部分地震始于2015年前后，并在2018–2022年地震数量达到高峰，在

此之前地震主要集中在长宁背斜和喻家寺向斜北端，可能与该地区构造位置及较早开展工业开采活动有关。(2)不同地区地震簇时间演化特征不一致，主要表现在地震丛集持续的时间长短和复发间隔的区别，其中威远背斜和建武向斜2018年后地震持续时间较长、复发时间间隔较短、地震活动较频繁，而长宁背斜2010年后呈多个周期复发，并在2018年后达到巅峰。(3)根据地震簇活动的强弱程度可以分为爆发型、缓和型、脉冲型和多期型等多个类别，其中缓和型地震主要表现为地震数量逐渐增多，持续一段时间后逐渐消失，如建武向斜附近的地震(图8a-A)；爆发型主要表现为地震数量突然增多，然后逐渐衰减，如长宁背斜附近的地震(图8a-B)；脉冲型表现为地震在某个时段集中爆发，并快速衰减恢复平静，如喻家寺向斜附近的地震(图8a-C)；多期型主要表现在地震丛集持续时间较长的地震簇，在地震活动时间范围内，地震数量呈一定周期的多期波动变化，如墨林场断层附近的地震(图8a-D)。

基于地震簇的时空解耦分析(图8b)，本研究通过融合空间聚类与时间丛集特征，将区域地震活动分解为3类具有显著差异的地震亚簇，并揭示其定向迁移规律。(1)全域迁移趋势：地震活动整体呈现“黄绿色(早期)→蓝紫色(中期)→红色(近期)”的东向迁移序列，反映出在区域最大主应力场下，能量释放与应力场调整的过程(Lei等，2017)。(2)分区异质性：长宁-威远区块，部分注入诱发地震是由水力压裂引发的，地震亚簇向东南迁移，与页岩气水平井压裂扩展方向(SE)、流体扩散方向及基底断裂活化趋势高度耦合(Meng等，2019；Tan等，2020)；荣昌-泸县区块，亚簇向西南迁移，可能是由于前期荣昌地区开采井废水回注(雷兴林等，2020；Wang Z等，2020)，而后期泸县地区的页岩气开采(Zhao等，2023)，在南西向华蓥山基底断裂的控制下，发生地震活动迁移造成的。根据工业开采与地震活动活跃情况，将时空演化周期分为三个显著阶段：勘探与开采前期、高速开采阶段和开采管控阶段。

(1)勘探与开采前期(2008–2018年)。地震活动集中于喻家寺向斜(早期天然气开发)及长宁背斜(井盐开采诱发微震)，荣昌地区因邻近华蓥山基底断裂率先出现构造型地震丛集；2015年前后，水力压裂技术引入导致震群空间重组，威远东北部与建武向斜西翼成为新兴活跃区(图8c)。

(2)高速开采阶段(2018–2021年)。威远区块：地震垂直墨林场断层(走向N45°E)两侧向断层带迁移，震源深度变深，指示压裂流体向深部裂隙网络渗透；长宁区块：地震从背斜核部向东南建武向斜迁移，向斜内部地震从中部(初始压裂段)向两翼(裂缝扩展区)扩散，形成“核部卸载-翼部加载”应力传递模式；荣昌区块：地震活动相对较分散，可能受该地区基底构造特征、开采层埋深条件和工业开采进度等多重因素影响(图8d)。

(3)开采管控阶段(2021年至今)。威远、长宁区块实施压裂限产后，M≥3.0地震频次下降，但深部构造薄弱带(如威远基底交界带)仍持续发生应力调整型地震；泸县-大安新生簇的快速发育揭示管控政策下工业开采活动与地震形势变化的复杂反馈机制(图8e)。

综上所述，地震时空演化受“构造应力场主导-开采扰动调制-流体运移强化”三元耦合系统驱动，其中褶皱核部高应变区与基底不连续面构成能量优先释放通道，形成以构造应力场变化为主导，受开采活动的扰动，在地壳介质薄弱的区域有规律地迁移。

6 讨论

本文通过人工智能增强的地震学分析方法，重构了工业开采区地震时空演化特征的研究。突破传统单事件或静态分区的局限，以动态地震簇为研究单元，揭示开采扰动下地震的时空演化与迁移特征。开发了一套地震簇自动提取与时空演化分析流程，为风险评估提供新指标(如簇群规模大小与迁移速率)，支撑地方政府制定“开采强度-地震风险-应急响应”协同管控方案。

(1)地震簇空间分布特征

川南地区作为油气资源富集区，其长宁-珙县、荣县-威远及荣昌-泸县开采区的地震活动呈现显著的多尺度耦合特征，具体表现为空间分布的双层控制机制。① 水平方向：地震活动与工业开采区空间耦合性显著，与传统构造地震的断层主导模式形成鲜明对比。开采区地震展布受褶皱几何形态主导(如长宁背斜核部密集分布)，而盆地内部地震则受多重因素调控，包括褶皱基底埋深、志留系开采层位空间配置及邻区构造带动态应力传递(如威远背斜南翼基底交界带地震丛集)。② 垂向分层：基于地震反射剖面分析，地震呈“深-大、浅-小”的分层特征。深部老地层(如寒武系)因围压高、岩性致密，需积累更大能量触发破裂(M_L≥3.0)；浅部新生界则以水力压裂诱发的微震(M_L≤2.0)及应力调整事件为主，这与长宁开采井小尺度范围的地震分布特征一致，可能形成于两种完全不同的成因机理模式(Tan等，2020，2023)。褶皱构造通过地层产状差异控制垂向应变分配(如建武向斜全层弥散分布vs.长宁背斜核部垂向集中)，基底分区边界(如结晶基底与褶皱基底过渡带)则通过力学性质不协调性加剧盖层应力释放。

(2)地震簇的时空演化特征

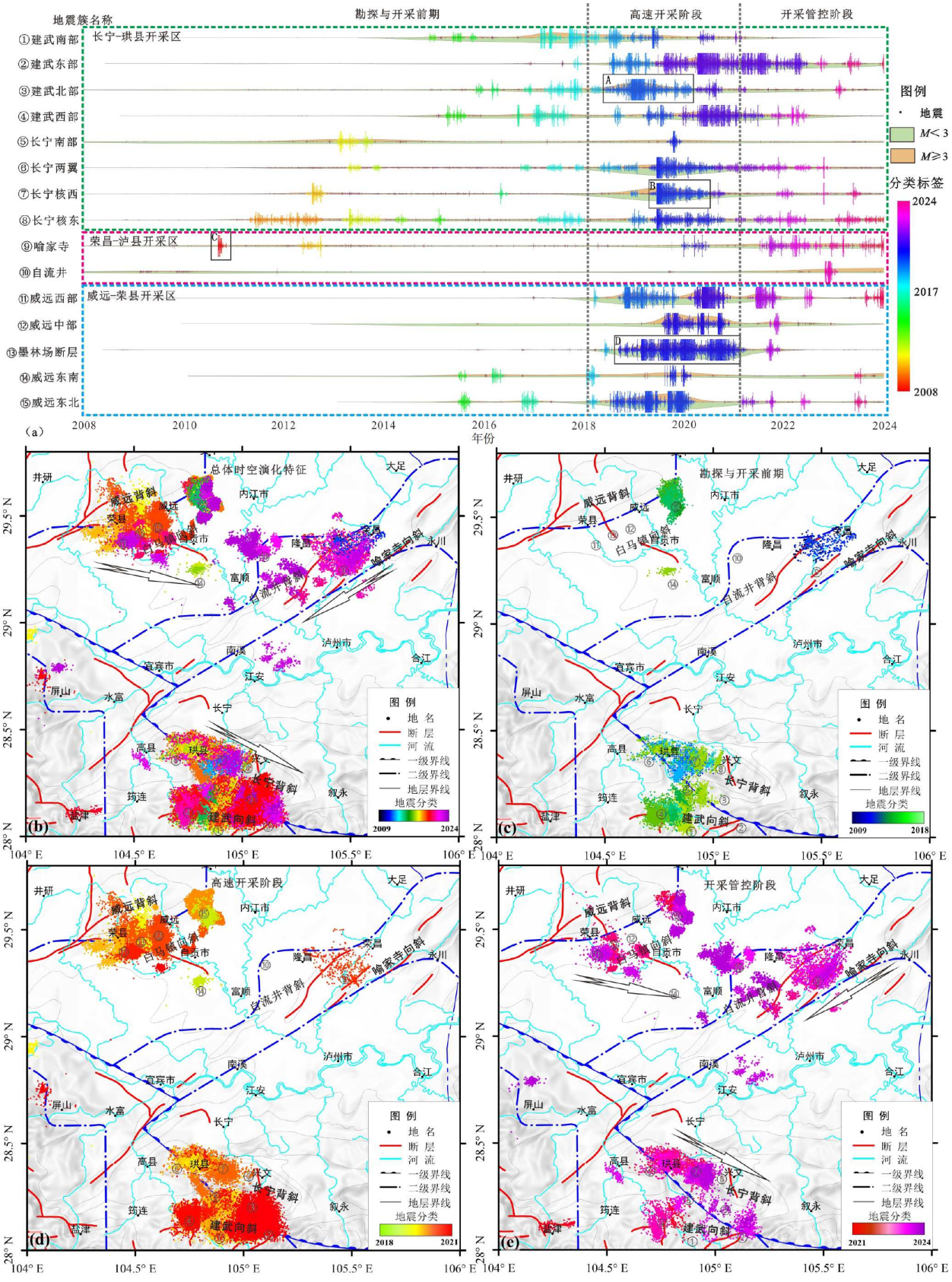


图 8　地震时间聚类结果及时空演化特征。(a) 通过时间聚类分析提取各地震簇的时间丛集特征；(b) 具有不同时间丛集特征的地震簇在空间的演化特征与迁移规律；(c) 勘探与开采前期地震时空演化特征；(d) 高速开采阶段地震时空演化特征；(e) 开采管控阶段地震时空演化特征

地震长期时空演化特征提取一直是地震形势研判最直接有效的方法。2016年页岩气大规模水力压裂开发以来，地震频次呈指数增长，传统地震学研究方法(如余震序列分析、震源机制解)受限于海量数据的复杂性，难以揭示地震活动的长期时空迁移规律。本研究引入地震簇智能提取技术，通过机器学习算法(如Hdbscan时空聚类、监督分类特征提取)实现以下突破。① 空间维度：地震簇的空间聚集性可量化表征区域应力集中带与岩体薄弱区(如长宁背斜核部高密度簇指示隐伏断裂活化风险)，可以实时的表征震源三维几何结构。② 时间维度：簇内事件的时间丛集性揭示多期应力加载-释放循环，可以用于量化局部区域的地震活跃度。③ 时空演化特征：结合地层埋深模型、基底构造分区及时间演化参数，建立地震簇-地质结构-地震活动的关联网络，显著提升地震时空演化与迁移特征的凸显度。

(3)地震簇时空演化特征的成因机理

川南地区的地震主要分布在威远-荣县、长宁-珙县和荣昌-泸县等工业开采区附近，地震簇的形态特征受褶皱形态、断层、基底埋深、开采层深度等多种因素控制，其时空演化特征在各个开采区及开采区之间表现出一定的迁移规律。大量研究表明由于水力压裂和流体回注可能会诱发地震(雷兴林等，2020；Wang Z等，2020；Zhang等，2020；Sheng等，2022；Zhao等，2023)，工业活动是否是影响地震迁移的主要因素主要从以下三个方面分析。

① 空间尺度：大尺度上，构造薄弱带主导地震的丛集分布，特别是中强地震并不完全受控于钻井平台的分布，大部分地震簇的分布和形态特征受附近构造薄弱带空间分布影响(Yang等，2020；Li等，2023)。中尺度上，地震簇位于基底埋深梯度带和褶皱核部高应变区，受构造带展布方向控制，可能是由于水力压裂重新激活并促进了已有断层的活动(Tan等，2023；Zhang等，2024；Xu等，2025；Zi等，2025)。小尺度上，虽然钻井平台在选址时普遍避开已知隐伏断裂带，且压裂段设计多限制在低曲率地层，但部分页岩气套管仍然存在不同程度的变形，在变形附近出现大量微地震(<0级)，其分布受天然裂缝的控制(陈朝伟等，2021)。

② 时间异步：应力调整滞后与多期复发。压裂峰值期与地震丛集期存在18–24个月滞后，反映流体扩散-裂隙贯通-应力调整的链式响应过程(Wang Z等，2020)，而工业开采井开始压裂后，在较长一段时间都会持续稳定的输气，工业开采井不会短时间迁移；此外，自2015年开采以来，地震活动也呈多周期复发现象，即便在2021年开采管控后，泸县6.0级地震仍发生于基底断裂活化带深度范围内，揭示深部构造应力持续累积-释放的自主性(Wei等，2022)。

③ 能量阈值：构造敏感区优先破裂机制。水力压裂直接诱发地震的能级存在天然上限，水力压裂直接产生的震级多为0级以下(Das和Zoback，2013)，高渗透率地层在恒定注液速率下更易发生无震滑动，而低渗透构造带则通过突发破裂释放应变能(Alghannam和Juanes，2020)。本文统计的地震震级多为0级以上，通常这些地震分布在离流体加压区之外的构造薄弱带上，其破裂能量远超压裂流体注入能量(Bhattacharya和Viesca，2019)。

因此，地震的时空迁移规律受控于多重因素。小尺度范围内，在某个钻井平台附近，流体扩散可活化邻近断层或裂隙，造成小微地震的迁移或套管的变形；中尺度范围内，在某个工业开采区内部，不同期次的工业开采活动，如水力压裂、废水回注、井盐开采等，可能改变地壳介质结构、孔隙和应力状态，造成中小地震多期复发与空间迁移；大尺度范围内，在小区域多期地震活动积累下，可能受控于区域构造应力场的调整，在构造薄弱带附近，由于邻近地震活动或工业开采作用的相互触发下形成中强地震的时空演化特征。

7 结论

川南工业开采区地震活动呈现构造-工业耦合驱动的独特时空分异特征，主要结论如下。

(1)空间分布主控机制。地震活动集中分布于长宁背斜、威远背斜南翼及建武-喻家寺向斜等褶皱构造单元，其空间展布受褶皱几何形态主导，与传统断层控制型地震存在本质差异。水平分异：地震的分布不完全依赖于断层的空间展布特征，还受褶皱形态、基底埋深、岩层性质和开采层位等联合控制。垂向分层：深部寒武系地层，岩石破裂能量阈值高，以M_L≥3.0地震为主，浅部侏罗系-二叠系则以压裂诱发微震丛集为特征，长宁背斜核部地层产状突变区形成垂向应力释放通道。

(2)地震簇时空迁移规律。基于机器学习聚类算法识别出31个典型地震簇，揭示差异化迁移模式。威远和长宁区块的地震簇向东南方向迁移，可能是由于水力压裂等人为活动激活先存断层以及地震滑移后的应力扰动等作用共同造成的。荣昌-泸县区块的地震簇向西南迁移，可能是在基底断裂的控制下，前期的废水回注与后期水力压裂等工业活动造成的，最终在泸县-大安一带形成新生地震簇，该地区可作为重点监测区，建议布设密集台阵并实施开采强度动态调控。

致谢 吴建平研究员共享了南北地震带地震精定位数据，

地震编目系统提供了正式地震目录数据，审稿专家对本文提出了宝贵意见，在此一并致谢。

参考文献

柴顺琪, 李传新, 卞从胜, 等. 2023. 川中地区南华纪裂谷结构及深层油气意义. 天然气地球科学, 34: 1203–1217

常祖峰, 张艳凤, 王光明, 等. 2020. 2019年四川长宁M_S6.0地震的地质构造成因——区域性构造节理贯通、破裂结果. 地球学报, 41: 469–480

陈朝伟, 张浩哲, 周小金, 等. 2021. 四川长宁页岩气套管变形井微地震特征分析. 石油地球物理勘探, 56: 1286–1292

胡幸平, 崔效锋, 张广伟, 等. 2021. 长宁地区复杂地震活动的力学成因分析. 地球物理学报, 64:1–17

可以, 孙玮, 李泽奇, 等. 2022. 四川威远地区地震活动与地质条件的关系. 成都理工大学学报(自然科学版), 49: 104–110

雷兴林, 苏金蓉, 王志伟. 2020. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联. 中国科学: 地球科学, 50: 1505–1532

李冰, 宋燕兵, 王启, 等. 2018. 四川盆地的场特征及地质意义. 物探与化探, 42: 937–945

李翠平, 唐茂云, 郭卫英, 等. 2022. 荣昌及周边三维速度结构初步研究. 地震地质, 44: 205–219

刘树根, 邓宾, 钟勇, 等. 2016. 四川盆地及周缘下古生界页岩气深埋藏——强改造独特地质作用. 地学前缘(中国地质大学(北京)), 23: 11–28

马新华, 谢军, 雍锐, 等. 2020. 四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素. 石油勘探与开发, 47: 841–855

王海燕, 高锐, 卢占武, 等. 2017. 四川盆地深部地壳结构——深地震反射剖面探测. 地球物理学报, 60: 2913–2923

王志伟, 王小龙, 马胜利, 等. 2018. 重庆荣昌地区注水诱发地震的时空分布特征. 地震地质, 40: 523–538

吴建平, 蔡妍, 王薇, 等. 2024. 藏高原东缘中国地震科学实验场三维速度模型及其构造意义. 中国科学: 地球科学, 54: 2304–2326

易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2019. 2019年6月17日四川长宁M_S6.0地震序列震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, 62: 3432–3447

易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2020. 四川盆地荣县-威远-资中地区发震构造几何结构与构造变形特征: 基于震源机制解的认识和启示. 地球物理学报, 63: 3275–3291

张岳桥. 2020. 四川盆地南部地震区发震构造及其新构造背景. 地质学报, 94: 3161–3176

Alghannam M, Juanes R. 2020. Understanding rate effects in injection-induced earthquakes. Nat Commun, 11: 1–6

Bergen K J, Johnson P A, de Hoop M V, et al. 2019. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. Science, 363: eaau0323

Bhattacharya P, Viesca R C. 2019. Fluid-induced aseismic fault slip outpaces pore-fluid migration. Science, 364: 464–468

Das I, Zoback M D. 2013. Long-period long-duration seismic events during hydraulic stimulation of shale and tight-gas reservoirs—Part 2: Location and mechanisms. Geophysics, 78: KS97–KS105

Fischer T, Hainzl S, Vlček J. 2023. Fast migration episodes within earthquake swarms. Geophys J Int, 235: 312–325

Girona T, Drymoni K. 2024. Abnormal low-magnitude seismicity preceding large-magnitude earthquakes. Nat Commun, 15: 7429

He D, Lu R, Huang H, et al. 2019. Tectonic and geological setting of the earthquake hazards in the Changning shale gas development zone, Sichuan Basin, SW China. Pet Explor Dev, 46: 1051–1064

Jia K, Zhou S, Zhuang J, et al. 2020. Nonstationary background seismicity rate and evolution of stress changes in the Changning salt mining and shale-gas hydraulic fracturing region, Sichuan Basin, China. Seismol Res Lett, 91: 2170–2181

Jiang D, Zhang S, Ding R. 2020. Surface deformation and tectonic background of the 2019 M_S6.0 Changning earthquake, Sichuan Basin, SW China. J Asian Earth Sci, 200: 104493

Kagan Y Y, Jackson D D. 1991. Long-term earthquake clustering. Geophys J Int, 104: 117–134

Kanamori H. 1972. Relation between tectonic stress, great earthquakes and earthquake swarms. Tectonophysics, 14: 1–12

Kong Q, Trugman D T, Ross Z E, et al. 2019. Machine learning in seismology: Turning data into insights. Seismol Res Lett, 90: 3–14

Kuang W, Yuan C, Zhang J. 2021. Real-time determination of earthquake focal mechanism via deep learning. Nat Commun, 12: 1432

Lai G, Jiang C, Wang W, et al. 2023. Spatial-temporal distribution and focal mechanisms for the shallow earthquakes in the Rongchang-Luxian region in southern Sichuan Basin, China. Seismol Res Lett, doi: 10.1785/0220220339

Lei X, Huang D, Su J, et al. 2017. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to M_w 4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. Sci Rep, 7: 7971

Li J, Xu J, Zhang H, et al. 2023. High seismic velocity structures control moderate to strong induced earthquake behaviors by shale gas development. Commun Earth Environ, 4: 188

Lu R, He D, Liu J Z, et al. 2021. Seismogenic faults of the Changning earthquake sequence constrained by high-resolution seismic profiles in the southwestern Sichuan Basin, China. Seismol Res Lett, 92: 3757–3766

Meng L, McGarr A, Zhou L, et al. 2019. An investigation of seismicity induced by hydraulic fracturing in the Sichuan Basin of China based on data from a temporary seismic network. Bull Seismol Soc Am, 109: 348–357

Mousavi S M, Ellsworth W L, Zhu W, et al. 2020. Earthquake transformer—An attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. Nat Commun, 11: 3952

Novianti P, Setyorini D, Rafflesia U. 2017. K-means cluster analysis in earthquake epicenter clustering. Int J Adv Intell Inf, 3: 81

Omran M G H, Engelbrecht A P, Salman A. 2007. An overview of clustering methods. Intell Data Anal, 11: 583–605

Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, et al. 2012. Scikit-learn: Machine learning in Python, J Mach Learn Res, 12: 2825–2830

Peng W, Marsan D, Chen K H, et al. 2021. Earthquake swarms in Taiwan: A composite declustering method for detection and their spatial characteristics. Earth Planet Sci Lett, 574: 117160

Rahman M F, Liu W, Suhaim S B, et al. 2016. Hdbscan: Density based clustering over location based services. arXiv: 1602.03730

Roland E, McGuire J J. 2009. Earthquake swarms on transform faults. Geophys J Int, 178: 1677–1690

Ross Z E, Cochran E S, Trugman D T, et al. 2020. 3D fault architecture controls the dynamism of earthquake swarms. Science, 368: 1357–1361

Sheng M, Chu R, Peng Z, et al. 2022. Earthquakes triggered by fluid diffusion and boosted by fault reactivation in Weiyuan, China due to hydraulic fracturing. J Geophys Res Solid Earth, 127: e2021JB022963

Skoumal R J, Brudzinski M R, Currie B S. 2016. An efficient repeating signal detector to investigate earthquake swarms. J Geophys Res Solid Earth, 121: 5880–5897

Tan Y, Hu J, Zhang H, et al. 2020. Hydraulic fracturing induced seismicity in the southern Sichuan Basin due to fluid diffusion inferred from seismic and injection data analysis. Geophys Res Lett, 47: e2019GL084885

Tan Y, Qian J, Hu J, et al. 2023. Tomographic evidences for hydraulic fracturing induced seismicity in the Changning shale gas field, southern Sichuan Basin, China. Earth Planet Sci Lett, 605: 118021

Wang C, Liang C, Liao J, et al. 2023. Temporary stress regime reversal immediately after the complete release of the localized compressive stress by the 2021 Luxian M_S6.0 earthquake, Sichuan Basin. Earth Planet

Sci Lett, 618: 118282
Wang M, Yang H, Fang L, et al. 2020. Shallow faults reactivated by hydraulic fracturing: The 2019 Weiyuan earthquake sequences in Sichuan, China. Seismol Res Lett, 91: 3171–3181
Wang Z W, Lei X, Ma S, et al. 2020. Induced earthquakes before and after cessation of long-term injections in Rongchang gas field. Geophys Res Lett, 47: e2020GL089569
Wei Z, Chu R, Xie J, et al. 2022. Crustal structure in the Weiyuan shale gas field, China, and its tectonic implications. Tectonophysics, 837: 229449
Wong W, Zi J P, Yang H F, et al. 2021. Spatial-temporal evolution of injection induced earthquakes in Weiyuan area by machine-learning phase picker and waveform cross-correlation. Earth Planet Phys, 5: 485–500
Xu J, Li J, Yang W, et al. 2025. Shallow lingering and deep transient seismicity related to hydraulic fracturing in the Changning shale gas field, Sichuan Basin, China. J Geophys Res Solid Earth, 130: e2024JB030279
Yang H, Zhou P, Fang N, et al. 2020. A shallow shock: The 25 February 2019 ML 4.9 earthquake in the Weiyuan shale gas field in Sichuan, China. Seismol Res Lett, 91: 3182–3194
Zaliapin I, Ben-Zion Y. 2013. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability. J Geophys Res Solid Earth, 118: 2847–2864
Zhang M L, Zhou Z H. 2007. ML-KNN: A lazy learning approach to multi-label learning. Pattern Recognit, 40: 2038–2048
Zhang B, Lei J, Zhang G. 2020. Seismic evidence for influences of deep fluids on the 2019 Changning M_s6.0 earthquake, Sichuan Basin, SW China. J Asian Earth Sci, 200: 104492
Zhang N, Zhou L, Duan M, et al. 2024. The temporal and spatial evolution characteristics of induced seismicity in the Changning shale gas field based on dense array. Sci Rep, 14: 25287
Zhang Y, Li M, Wang S, et al. 2021. Gaussian mixture model clustering with incomplete data. ACM Trans Multim Comput Commun Appl, 17: 1–14
Zhao Y, Jiang G, Lei X, et al. 2023. The 2021 M_s6.0 Luxian (China) earthquake: Blind reverse-fault rupture in deep sedimentary formations likely induced by pressure perturbation from hydraulic fracturing. Geophys Res Lett, 50: e2023GL103209
Zhu W, Beroza G C. 2018. PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival time picking method. Geophys J Int, 261: 273
Zi J, Yang Y, Yang H, et al. 2025. The 11-month precursory fault activation of the 2019 M_L5.6 earthquake in the Weiyuan shale gas field, China. Commun Earth Environ, 6: 175
Zuo K, Zhao C, Zhang H. 2020. 3D crustal structure and seismicity characteristics of Changning-Xingwen area in the southwestern Sichuan Basin, China. Bull Seismol Soc Am, 110: 2154–2167

（责任编委：姚华建）