引用格式：代树红，孙朝阳，2026. 正应力对走滑断层亚失稳协同化影响数值模拟[J]. 地质力学学报，32（2）：427−438. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025022

Citation: DAI S H，SUN Z Y，2026. Numerical simulation of the influence of normal stress on sub-instability synergy of strike-slip faults[J]. Journal of Geomechanics，32（2）：427−438. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025022

正应力对走滑断层亚失稳协同化影响数值模拟

代树红，孙朝阳

DAI Shuhong，SUN Zhaoyang

辽宁工程技术大学力学与工程学院，辽宁 阜新 123000

School of Mechanics and Engineering, *Liaoning Technical University*, *Fuxin* 123000, *Liaoning*, *China*

Numerical simulation of the influence of normal stress on sub-instability synergy of strike-slip faults

Abstract: ［**Objective**］In order to reveal the synergy law of strike-slip faults under different normal stresses, this study systematically investigates the instability process of strike-slip faults through numerical simulation methods.［**Methods**］A numerical model of a strip-slip fault (elastic modulus 22.3 GPa, Poisson's ratio 0.25) is established using FLAC3D software and a frictional-hardening and frictional-softening model. Six normal stress schemes (0.1–3.5 MPa) are set, with a constant loading rate of 0.5 mm/min for all schemes. By comparing the spatiotemporal evolution characteristics of the shear strain field of strike-slip faults under different normal stress conditions, the influence of normal stress on the evolution of the shear strain field and fault displacement is discussed. Based on changes in the shear strain field and fault displacement, the degree of synergy is quantitatively determined.［**Results**］Under the same conditions, the normal strain perpendicular to the fault direction decreases with increasing time steps, while the shear strain parallel to the fault direction exhibits similar evolution patterns at different monitoring points, albeit with different mean values. The mean shear strain at monitoring point 1 is negative, that at monitoring point 11 is positive, and the mean values at monitoring points 2 to 10 tend to zero (monitoring points indicate locations where changes are observed). In the sub-instability stage, as fault stress accumulates to the critical point, the shear strain in weak areas increases significantly first. The concentrated shear strain area gradually expands and connects, eventually forming a continuous shear strain connection area. Normal stress is positively correlated with both coseismic displacement and shear strain, and the change in shear strain energy density is also positively correlated with stress. Normal stress has an important influence on displacement in the sub-unstable stage. As normal stress increases, the synergy coefficient gradually decreases, while the degree of synergy increases. In the sub-instability stage, the synergy coefficient shows a significant downward trend.［**Conclusions**］Normal stress significantly affects the degree of synergy in the sub-instability stage of strike-slip faults by regulating the spatial distribution and release process of shear strain energy. An increase in normal stress leads to an increase in co-seismic displacement and an accumulation of shear strain energy, which effectively improves the degree of fault synergy. The synergy coefficient can be used as a key indicator to quantify the degree of synergy before fault instability and has application value in identifying the sub-instability state of faults.［**Significance**］This study clarifies the positive correlation between normal stress and the degree of synergy of strike-slip faults, providing an important scientific basis for earthquake prediction, as well as fordisaster prevention and mitigation.

Keywords: sub-instability; synergy; normal stress; strike-slip fault; numerical simulation

---

基金项目：国家自然科学基金重点项目（U1839211）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1839211).

第一作者及通信作者：代树红（1978—），男，博士，教授，主要从事地震动力学研究。Email：dsh3000@126.com

收稿日期：2025−03−06；**修回日期：**2025−09−08；**录用日期：**2025−09−08；**网络出版日期：**2025−09−08；**责任编辑：**范二平

Received：2025−03−06；Revised：2025−09−08；Accepted：2025−09−08；Available Online：2025−09−08；Handling Editor：FAN Erping

摘 要：为揭示走滑断层在不同正应力作用下的协同化规律，通过数值模拟方法系统研究了走滑断层的失稳过程。通过对比分析不同正应力条件下走滑断层剪应变场的时空演化特征，探讨了正应力对剪应变场演化和断层位移的影响，并基于剪应变场和断层位移的变化，对协同化程度进行了定量判定。研究结果表明：在相同条件下，垂直于断层方向的正应变随时间步增长呈递减趋势；而平行于断层方向的剪应变在不同监测点的演化规律相似但均值大小不同，1号监测点剪应变均值为负值，11号监测点剪应变均值为正值，2—10号监测点剪应变均值趋向于0，其中监测点为获取数据变化的监测位置；在亚失稳阶段断层应力累积至临界时，模型的薄弱区域剪应变率先显著增加，剪应变集中区域范围逐渐扩展并贯通，最终形成连续的剪应变连通区域；同震位移、剪应变和剪应变能密度同正应力呈正相关关系；随着正应力的增加，协同化系数逐渐减小，协同化程度增加，在亚失稳阶段协同化系数出现明显的下降趋势。最终得出以下结论：正应力通过调控剪应变能的空间分布与释放过程，显著影响走滑断层亚失稳阶段的协同化程度；正应力增大导致同震位移增加、剪应变能积累增强，并有效提升断层的协同化程度；协同化系数可作为量化断层失稳前协同化程度的关键指标，对识别断层亚失稳状态具有应用价值。这一研究明确了正应力与走滑断层协同化程度之间的正相关关系，为地震预测和防灾减灾提供了重要的科学依据。

关键词：亚失稳；协同化；正应力；走滑断层；数值模拟

中图分类号：P554; P315.72+7 **文献标识码：**A **文章编号：**1006−6616(2026)02−0427−12

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025022

0 引言

地震是一种常见的地质灾害，其本质是断层在短时间内的急剧运动并伴随能量的突然释放(梅江洲等, 2022; 邹小波等, 2024; 陆诗铭等, 2025)。断层作为地壳中岩层或岩体沿破裂面发生显著位移的地质构造，广泛分布于地壳之中，断层失稳滑动是触发地震的动力学条件(籍庆佳等, 2024; 杨镇等, 2025; 赵洪宝等, 2025)。在众多断层类型中，走滑断层是触发地震活动的典型构造，其黏滑过程的动力学机制是理解浅源地震的关键。断层结构的黏滑是破坏性浅源大地震的主要成因，这一观点已被广泛接受并成为解释浅源地震发震机理的主流理论(Brace and Byerlee, 1966; Byerlee, 1978)。断层的黏滑过程通常可划分为2个阶段：黏着状态和滑动失稳状态。以往研究往往侧重某一阶段，对断层从准静态能量释放到动态能量释放的转换过程的研究相对匮乏(Ellsworth and Beroza, 1995; 马胜利等, 2003)。马瑾等(2012)针对这一问题提出亚失稳概念，其力学机理及物理场演化特性研究已成为学者关注的热点。亚失稳过程作为断层进入全面失稳阶段前的关键阶段，标志着应力积累向应力释放的转变(张淑亮等, 2021)。

地震的发生需满足2个主要条件：断层具有较高协同化程度以及部分区域累积高不可逆剪应变。协同化指孤立断层段的扩展转变为断层段间相互作用下的连接，当协同化程度较高时，可迅速形成长距离快速错动的断层段。该过程旨在揭示断层不同部位在活动过程中的相互作用机制。当断层各部分独立滑动时，这种独立活动转化为协调统一的活动过程，称为失稳错动。该过程不仅是物理现象的呈现，更是地质动力学复杂交互作用的体现。协同化的本质是随时间推移，断层受破坏弱化部位持续增加，稳定区域逐渐减少。相对强化的剪应变累积区在持续应力作用下最终转变为快速失稳区，往往伴随剧烈地质变动并对环境产生显著影响。

诸多学者通过实验分析物理场变化，证实协同化对地震研究的重要性。在应力应变场研究方面，马瑾和郭彦双(2014)通过分析应变场的时空演化特征，证明断层活动协同化程度是判定断层应力状态的重要标志。在断层位移场研究方面，卓燕群等(2013)通过定义表征断层位移累积值离散程度的协同化系数，揭示了断层失稳过程的协同化特征，证实高协同化程度可作为亚失稳阶段的标志。在温度场研究方面，温度场观测表明协同化与断层活动密切相关(任雅琼等, 2013)。协同化研究不仅限于实验室，相关学者通过实际案例分析证实其与亚失稳密切相关，可作为地震前兆判据(宋春燕等, 2018; 张希等, 2020; 郭树松等, 2021; 张淑亮等, 2021; 李腊月等, 2023)。实验与案例分析结果均表明，断层带剪应变释放区的加速扩展是进入必震阶段的

标志。目前协同化定性研究已取得重要进展，但正应力对亚失稳协同化的影响分析仍显不足。

文章针对不同正应力对协同化的影响，进行了不同正应力对走滑断层亚失稳协同化影响的数值模拟研究。基于摩擦强化−摩擦弱化模型进行黏滑曲线数值模拟，通过增加正应力增强摩擦阻力促使剪应变能向成核区域积聚。剪应变的时空演化受摩擦强化−摩擦弱化模型调控，非均匀能量累积导致断层薄弱区域率先软化，形成剪应变释放区并通过级联效应扩展贯通，驱动能量从局部积聚区域向整体连通扩散。最终，这种能量驱动的变形连通性促使断层从独立段活动转向协同滑动。正应力通过摩擦强化−摩擦弱化模型影响能量演化，进而控制协同化进程。针对正应力对协同化的影响进行定量分析，研究不同正应力下监测区域剪应变场的变化和断层位移变化，从剪应变场、位移场演化特征分析不同正应力对失稳前协同化的影响，同时引入协同化系数对协同化程度进行量化分析。

1　数值模拟试验

1.1　走滑断层模型

大尺度走滑断层黏滑实验系统的立体示意图如图 1 所示，系统由刚性框架制成的模型架、正应力加载装置、水平位移加载装置、力和位移监测系统和 DIC（Digital Image Correlation）观测系统等组成。正应力加载装置与水平位移加载装置分别用于施加相应方向的载荷。力和位移监测系统由轮辐式力传感器及激光位移传感器组成，用于监测实验中的数据。CCD（Charge Coupled Device）相机对监测区域进行图像采集与变形监测。基于实验室大尺寸走滑断层黏滑的实验研究成果，建立数值模拟模型，材料参数通过实验获得，模型的弹性模量为 22.3 GPa，泊松比为 0.25。数值模型尺寸和监测区域监测点如图 2 所示，该模型的断层左盘尺寸数据为 1000 mm×150 mm×50 mm，断层右盘尺寸数据为 1200 mm×150 mm×50 mm，并在监测区域建立坐标系。除了监测区域面和左盘右盘接触面外，其他面均是约束面。通过对左盘施加恒定速度与不同正应力进行模拟，监测区域内沿 x 轴方向在左盘均匀布设 11 个监测点进行数据采集。

1.2　数值模拟方案

基于亚失稳理论，采用 FLAC^{3D} 软件模拟研究

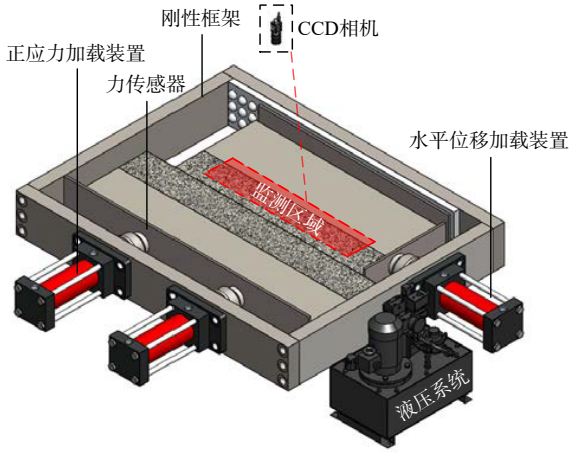


图 1　实验室模型示意图

Fig. 1　Schematic of the laboratory model

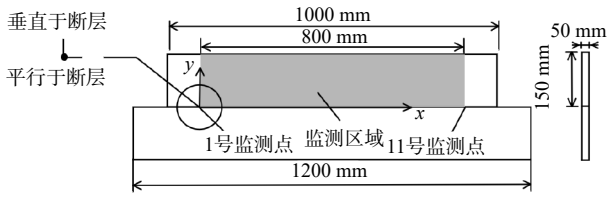


图 2　监测区域与监测点分布

Fig. 2　Monitoring area and monitoring point distribution

正应力对走滑断层协同化的影响，运用摩擦强化−摩擦弱化模型（Wang et al., 2013）进行计算，引入了黏滑循环中的增量塑性剪切应变，以控制内摩擦角的演变，具体公式如下：

$$\phi = \phi_{\mathrm{Min}} + \frac{\Delta\gamma^{p}}{\Delta\gamma^{p}_{\mathrm{Max}}}(\phi_{\mathrm{Max}} - \phi_{\mathrm{Min}}) \tag{1}$$

式中，ϕ—内摩擦角；ϕ_{Min}—内摩擦角最小值；ϕ_{Max}—内摩擦角最大值；$\Delta\gamma^{p}$—塑性剪应变；$\Delta\gamma^{p}_{\mathrm{Max}}$—塑性剪应变最大值。

数值模拟共设置 6 组正应力方案，正应力范围为 0.1～3.5 MPa，断层加载速率设为 0.5 mm/min，ϕ_{Min} 为 20°，ϕ_{Max} 为 40°，$\Delta\gamma^{p}_{\mathrm{Max}}$ 为 0.0004，具体参数详见表 1。在数值模拟中使用时间步，一个时间步为 0.02 s，通过模拟不同正应力条件下走滑断层的亚失稳滑动过程，分析亚失稳阶段的剪应变与位移特征，揭示正应力对协同化过程的影响机制。

2　亚失稳阶段应变协同化特征

2.1　垂直于断层和平行于断层的应变变化特点

为揭示断层在失稳过程中不同方向应变演化的差异性，对 S1 组数值模拟结果中监测区域的正应

表 1 数值模拟方案

Table 1 Numerical simulation scheme

试验组别	加载速率/(mm/min)	正应力/MPa
S1	0.5	0.1
S2	0.5	0.5
S3	0.5	1.0
S4	0.5	1.5
S5	0.5	2.5
S6	0.5	3.5

变与剪应变进行了分析，垂直于断层方向的正应变（ε_{yy}）变化如图 3a 所示，平行于断层方向的剪应变（ε_{xy}）变化如图 3b 所示。垂直于断层方向各监测点之间的正应变演化规律差异不显著，整体呈现递减趋势，断层在该方向上发生压缩变形。平行于断层方向 1 号监测点剪应变数值为波动的负值，11 号监测点剪应变数值为正值，表明不同方向剪切变形的幅度变化，2～10 号监测点剪应变数值在 0 附近波动。靠近 1 号监测点的剪应变数值更接近负值，在黏滑过程中剪切变形方向与 1 号监测点一致；靠近 11 号监测点的剪应变数值更接近正值，在黏滑过程中剪切变形方向与 11 号监测点一致。

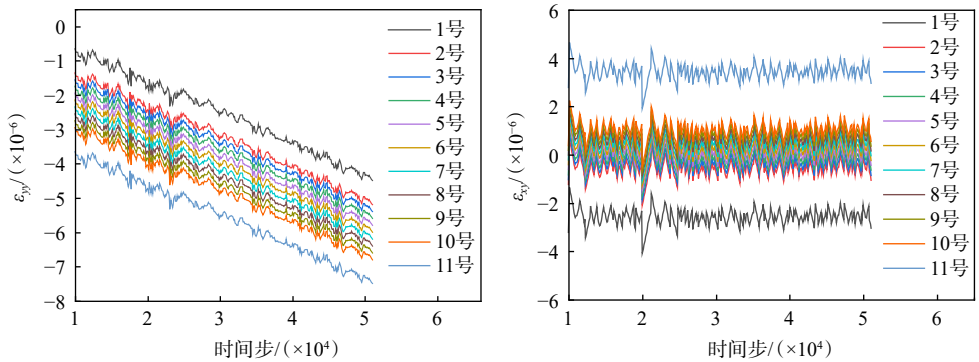
2.2 亚失稳阶段剪应变变化过程

S1 组一次黏滑事件的剪应力−时间图如图 4 所示，断层黏滑失稳过程经历了几个关键变形阶段，线性变形阶段（*LM* 段）、偏离线性阶段（*MO* 段）、亚失稳阶段（*OAB* 段；包括亚失稳 I 阶段 *OA* 段和亚失稳 II 阶段 *AB* 段）、失稳滑动阶段（*BC* 段）以及失稳后调整阶段（*C* 点后）。当应力由积累转变为释放时，断层由稳态滑动进入亚失稳滑动的临界点为 *O* 点。亚失稳阶段自 *A* 点曲线斜率显著增大。由亚失稳阶段进入失稳阶段的临界点为 *B* 点。应力最低对应点为 *C* 点。

断层不同区域的抗剪强度存在空间差异，由于断层强度的不均匀性，亚失稳过程中较弱部位率先发生弱化。剪应变释放区的形成，本质上是应力集中导致的局部软化。随着释放区数量的增加和相互作用的增强，应变集中区域扩展速率显著加快，最终失稳。为进一步解析亚失稳阶段的剪应变扩展过程，选取左盘接触面，具体范围如图 5 所示，选取 S4 组中失稳前的时间点进行分析。*O*、*A*、*B*、*C*4 个时间点的剪应变云图如图 6 所示。在模拟过程中，剪应变释放区呈阶段性演化特征。初始阶段，其集中分布于接触面中部，形成局部高剪应变增大区，剪应变值显著高于周边区域。在黏滑过程中，该区域剪应变持续增大并向周围扩展，范围不断增大。扩展过程具有显著方向性，主要表现为向右延伸且速率渐增。扩展过程中，不同剪应变释放区相互作用不断增强，协同化程度逐步提高，驱动断层从亚失稳状态向失稳状态转变。

2.3 不同正应力对监测区域剪应变场的影响

不同正应力条件下监测区域的剪应变云图如图 7 所示，数据取自第 51000 步模拟结果。随着正应力增大，监测区域剪应变值呈增长趋势，协同化程度相应增强。协同化增强表现为近断层区域的剪应变值增大且更趋向相同数值。断层薄弱区域在正应力作用下剪应变变化更为显著，更易形成剪



(a) 垂直于断层的正应变曲线图　(b) 平行于断层的剪应变曲线图

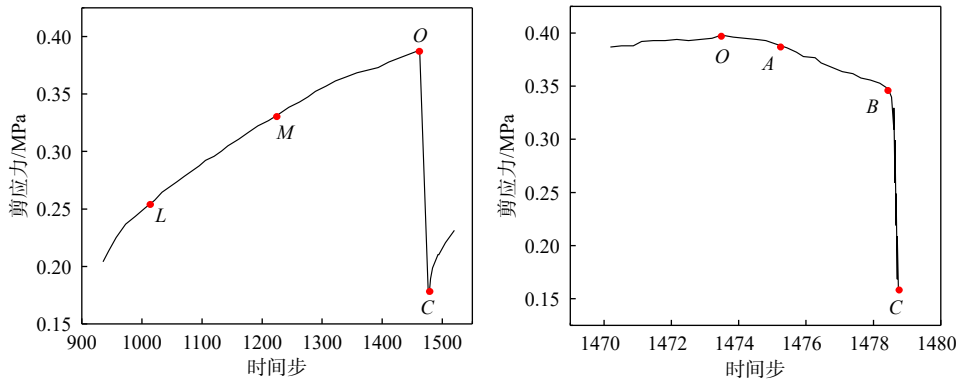
ε_{yy}—垂直于断层方向的正应变；ε_{xy}—平行于断层方向的剪应变

图 3 垂直于断层的正应变曲线图与平行于断层的剪应变曲线图

Fig. 3 Curves of normal strain perpendicular to the fault and shear strain parallel to the fault

(a) The normal strain curve perpendicular to the fault; (b) The shear strain curve parallel to the fault

ε_{yy}—The normal strain perpendicular to the fault; ε_{xy}—The shear strain parallel to the fault



(a) S1组一次黏滑事件　　(b) 失稳前局部放大图

图 4　剪应力−时间步图

Fig. 4　Shear stress–time step graph

(a) A stick-slip event in the S1 group; (b) Local enlargement before instability

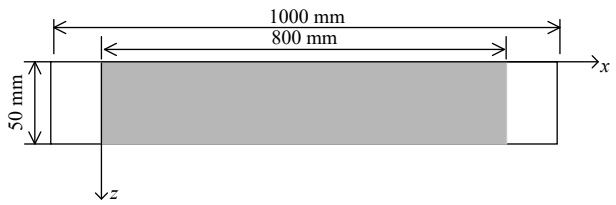
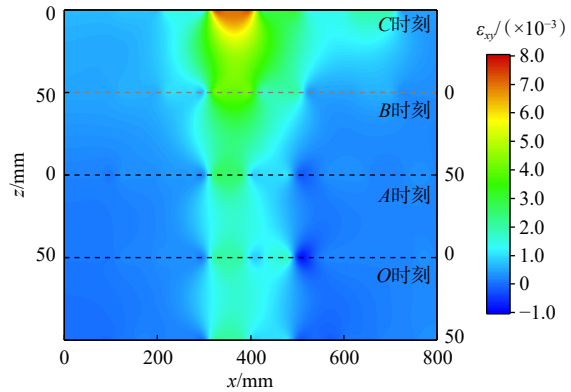


图 5　左盘接触面范围

Fig. 5　Contact surface range of the left part



ε_{xy}—剪应变

图 6　左盘接触面剪应变云图

Fig. 6　Shear strain contour map of the contact surface on the left part

ε_{xy}—shear strain

应变释放区。随着正应力增加，剪应变释放区范围持续扩大并向周边扩展，最终形成连通区域。这种现象在应力增大后尤为显著，表明断层区域在正应力作用下具有非均匀变形与应力集中特征。断层剪应变集中区域分布在多个非连通孤立区域。

协同化加速扩展是准静态到准动态扩展过渡的重要特征（马瑾和郭彦双，2014）。在此过程中，扩展机制从弱化断层段的孤立扩展转变为断层段间的相互作用和连接，促使断层进入必震阶段。准静态扩展阶段变形速率相对较慢，而准动态阶段变形加速并伴随必震状态的形成。正应力的增加加速了这一转变进程，显著提升了协同化程度。

断层协同化与失稳过程本质上是力学性质差异区域相互作用的结果。级联反应作为一种典型的相互作用形式（马胜利等，2002），表现为连续事件的链式能量传递：薄弱断层段剪应变释放通过剪应力变化触发相邻区域的应力调整，进而引发失稳错动。数值模拟中，断层薄弱部位率先出现剪应变释放，释放区的形成通过应力调整影响相邻区域。滑动方向上剪应力的累积加速断层向破裂演化，而正应力的增加会增加摩擦力，从而抑制断层的失稳破坏。薄弱部位的剪应变释放不仅会触发同类区域活动，还会促使高强度区域剪应变进一步累积。在此循环作用下，释放区长度突破临界值，协同化程度和区域累积的不可逆剪应变增加，最终引发失稳滑动。级联反应不仅导致局部剪应变累积，更促使不同区域剪应变值趋同，形成协同化发展趋势。

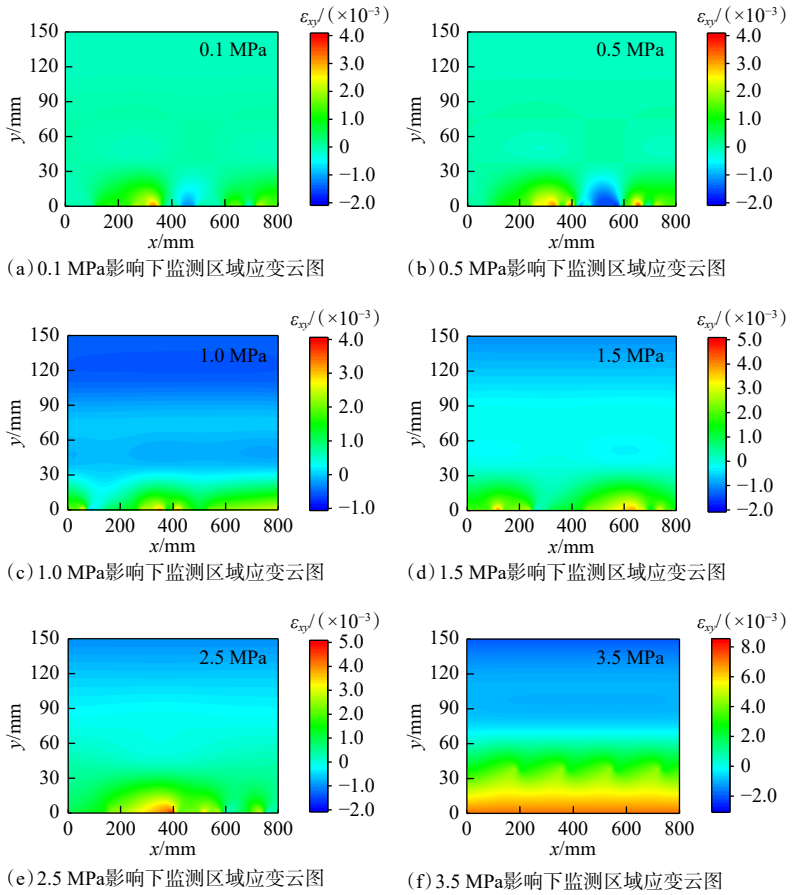
2.4　不同正应力对应变能密度变化的影响

采用应变能密度表征断层摩擦过程中的能量积累与释放（韩秀会等，2017；邓琳琳，2019）。应变能密度与应变数值和材料本身性质有关，其公式为

$$U=\frac{E}{2}\left(\varepsilon_{xx}^{2}+\varepsilon_{yy}^{2}+2\mu\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy}\right) \tag{2}$$

式中，ε_{xx}—平行于断层方向正应变；ε_{yy}—垂直于断层方向正应变；E—弹性模量；μ—泊松比。

不同正应力条件下的应变能密度演化规律具有一致性（图 8），随正应力增加，应变能密度峰值显



(a) 0.1 MPa影响下监测区域应变云图 (b) 0.5 MPa影响下监测区域应变云图

(c) 1.0 MPa影响下监测区域应变云图 (d) 1.5 MPa影响下监测区域应变云图

(e) 2.5 MPa影响下监测区域应变云图 (f) 3.5 MPa影响下监测区域应变云图

ε_{xy}—剪应变

图 7 不同正应力下的剪应变云图

Fig. 7 Shear strain contour maps under different normal stresses

(a) Contour map under 0.1 MPa; (b) Contour map under 0.5 MPa; (c) Contour map under 1.0 MPa; (d) Contour map under 1.5 MPa; (e) Contour map under 2.5 MPa; (f) Contour map under 3.5 MPa

ε_{xy}—shear strain

著升高。正应力通过增强断层界面的摩擦阻力，促使更多外部能量以弹性正应变能形式存储于断层系统中。随着正应力增大，断层两侧岩体接触更为紧密，滑动摩擦消耗的能量减少，而弹性变形积累的能量增加，从而形成更强的失稳驱动力。

亚失稳阶段的应变能密度演化存在明确的临界标志点。*O* 点对应能量积累速率的最大值。*A* 点标志着积累速率显著降低，表现为曲线斜率减小或出现平台。*B* 点则是能量积累终止并转为快速释放的起始点，对应曲线陡降段。

失稳前，由于各区域抗滑能力差异，薄弱部位率先形成应力集中区。当外部载荷作用时，薄弱部位通过微小滑移释放局部应力，而高阻力区域仍保持锁定状态，导致应变能密度呈现波动性特征。正应力增大会加剧断层界面的摩擦差异。薄弱部位滑移时需克服更大的阻力，而高正应力使其他区域的锁定更加牢固，导致应力进一步集中。进入亚失稳阶段后，前期积累的正应变能因薄弱区强度突破而集中释放，表现为应变能密度的急剧下降。高正应力不仅增强了系统的能量存储能力，使断层更容易失稳，还通过加速系统达到临界状态，显著缩短了稳态至失稳的过渡时间，促使断层更快进入失稳阶段。

3 亚失稳阶段位移协同化特征

3.1 不同正应力对断层位移演化的影响

一次完整黏滑事件的滑动面位移演化模型图如图 9 所示。随剪应力增加，滑动面位移同步增长，反映系统处于震间黏滞及前兆滑移阶段。此阶

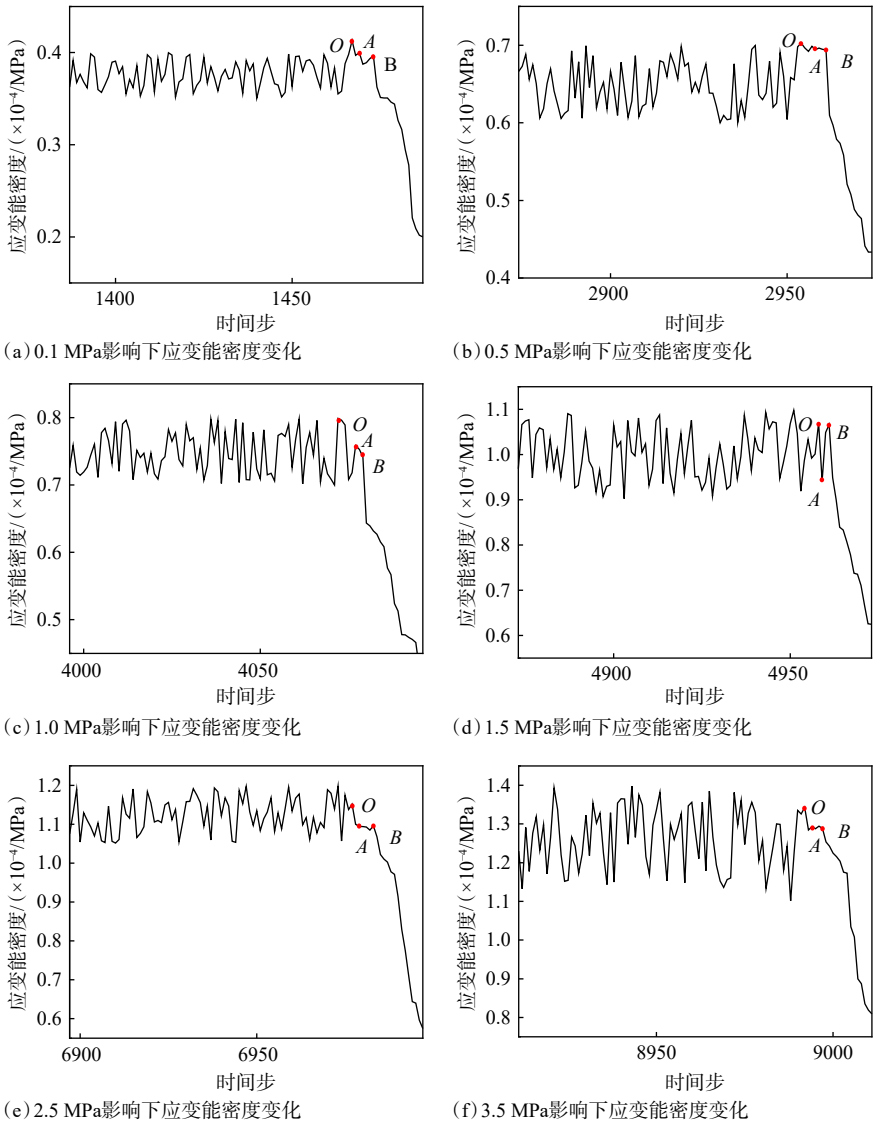


图 8　不同正应力下应变能密度变化图局部放大图

Fig. 8　Local magnified diagrams of strain energy density variation under different normal stresses

(a) Variation under 0.1 MPa; (b) Variation under 0.5 MPa; (c) Variation under 1.0 MPa; (d) Variation under 1.5 MPa; (e) Variation under 2.5 MPa; (f) Variation under 3.5 MPa

段有限的能量积累未导致明显位移变化，当局部应力达临界值后突发应力降，引发位移跃升，标志着系统进入同震滑移阶段并呈现显著动态响应。

随着正应力增加，断层面摩擦阻力均匀化的速率显著提升，导致滑动面位移增速逐渐加快（图 10）。不同正应力条件下，断层在震间黏滞阶段和前兆滑移阶段的位移量均随正应力增加而逐步上升。稳态阶段中，位移随模拟步骤缓慢增加；而失稳阶段则表现为位移突增，从稳态到失稳的过渡存在位移骤增现象。同震滑移阶段的位移增量与正应力呈正相关（宋义敏等，2012），表明尽管不同正应力下位移量存在差异，但其位移变化曲线呈现趋同性，这与断层的均阻化特性密切相关。

滑动不均匀性指走滑断层因断层面摩擦阻力、应力分布及障碍物差异，导致区域间位移量、滑动速率和变形模式显著分异的现象。正应力增加通过提升断层面均阻化效率，促使凹凸体接触更紧密，减少局部应力集中，从而抑制滑动不均匀性。

断层的错动阻力呈现非均匀分布特征，这种非均质性显著影响大范围错动区域的应力突变（赵德康等，2025）。研究表明，断层系统由多尺度非均匀结构组成，其中小尺度障碍物分布是阻力分异的关键因素（王绳祖和施良骐，1985；李建国和王绳祖，1992；李烨波等，2024）。滑动过程中，低障碍物区域

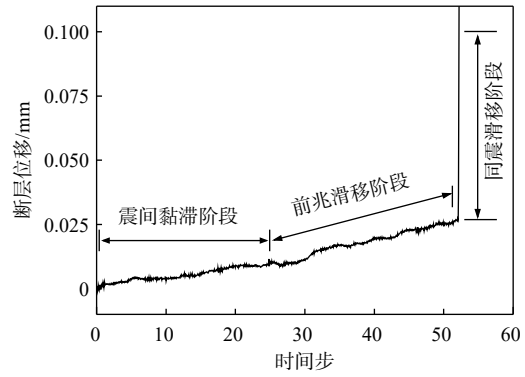


图 9 断层位移模型图

Fig. 9 Fault displacement model

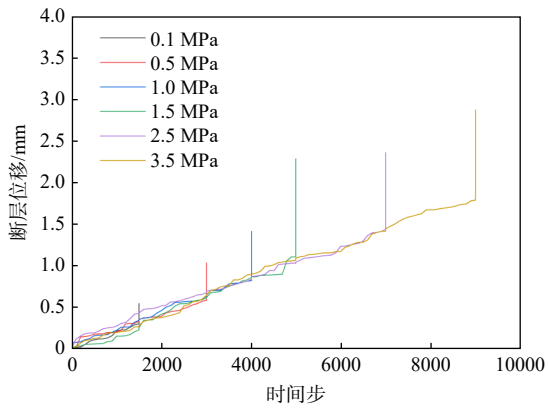


图 10 不同正应力下断层位移

Fig. 10 Fault displacement under different normal stresses

优先发生预滑，而高障碍物区域因阻力较大处于准锁定状态。随着能量逐步耗散至阻力均匀化阈值，系统迅速滑移并进入新的非均阻状态。正应力增加通过增强断层面凹凸体接触紧密度，促进应力分布均匀化，有效降低局部应力集中，进而抑制滑动不均匀性。这一机制表明，正应力的增强不仅加速均阻化进程，还推动断层系统向稳定滑动状态演化。

3.2 不同正应力对协同化系数的影响

采用协同化系数 S 量化协同化程度，具体公式如下所示：

$$S = \frac{\sigma}{1+\bar{d}} \tag{3}$$

式中，$\bar{d}$—N 个点位移的平均值；σ—N 个点位移的标准差。

为确保计算精度，增加了监测点数量，沿图 2 中 x 轴方向以 10 mm 为间隔依次布点，共设定 81 个监测点。S 被限定于一个黏滑周期内的失稳滑动完成之前的时段，当系统进入下一黏滑周期时，S 需重新计算确定。

数值模拟中，S 是量化断层系统协同滑移行为的关键指标，其物理意义在于反映断层各部位位移变化的离散程度，反映断层从独立分段活动向整体协同滑移的演化进程。协同化系数数值越小，表明断层各部位的位移变化协同性越高，变形过程的一致性越显著，其取值范围被限定为不小于 0。协同化系数 S 的计算结果如图 11 所示，在断层活动不同阶段呈现不同变化趋势：稳态阶段 S 相对稳定且数值较大，表明断层位移只在局部区域变化均匀；失稳阶段 S 显著减小，说明断层位移变化趋于一致并伴随能量快速释放。

在亚失稳阶段中（图 11），O 点为协同化系数开始显著下降的起始点，标志着断层从稳态阶段进入亚失稳阶段。A 点为 S 下降过程中，缓降转为陡降的点。从 A 点到 B 点，协同化系数进一步下降至初始值 25%。C 点为失稳滑动阶段后的调整点，是 S 维持最低值的起始点。

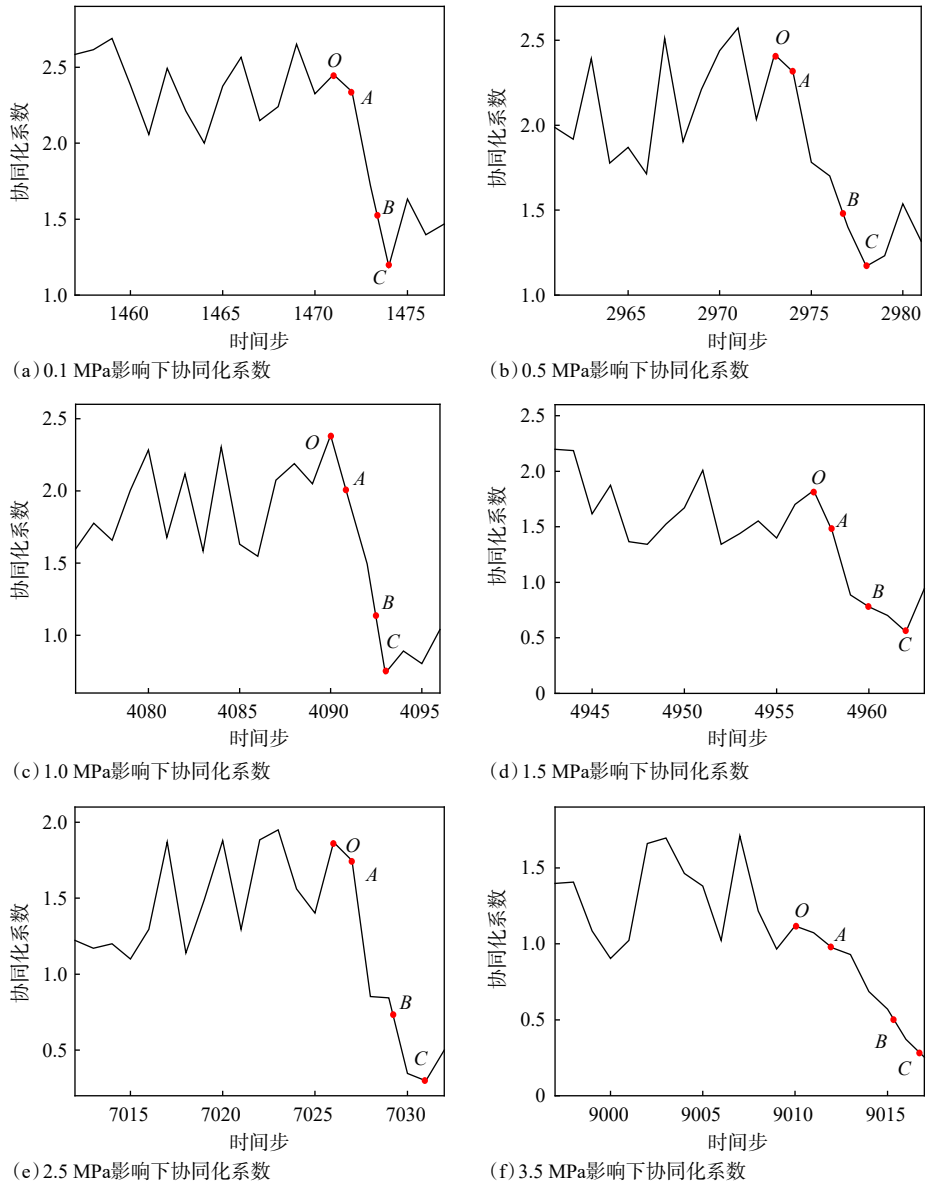
在亚失稳 I 阶段协同化系数开始降低，断层开始从独立活动向区域性预滑过渡，局部应力场调整主导协同化进程。亚失稳 II 阶段协同化系数持续降低并且在失稳前呈现不可逆状态，即协同化系数持续降低无明显增大现象，协同位移范围扩大，断层进入“准均匀滑动”状态，系统刚度整体下降，失稳临界条件逐渐满足。协同化系数的降低意味着断层位移的协同化程度提高，即断层各部分的运动趋向于一致，显示出一种协同化的活动。这表明断层在失稳前由各点独立活动逐渐转向一致活动

随着正应力逐渐增大，协同化系数整体呈现减小趋势。正应力增加可使断层面应力分布更均匀，促进各部位协同变形，同时增强断层均阻化效率，使摩擦阻力分布均匀化，从而提升协同化程度。这一现象表明正应力与协同化程度呈正相关，与 S 呈负相关关系，即正应力越大系统协同化程度越高，对应 S 越低。

4 讨论

4.1 正应力驱动断层协同化的力学本质

研究通过数值模拟揭示的正应力对走滑断层亚失稳协同化的调控机制，与岩石摩擦实验及野外地震序列观测形成跨尺度印证。从微观机制看，正应力通过增强断层面颗粒间咬合强度（Byerlee, 1978），抑制局部滑移的随机性，促使剪应变能向高



(a) 0.1 MPa影响下协同化系数　(b) 0.5 MPa影响下协同化系数

(c) 1.0 MPa影响下协同化系数　(d) 1.5 MPa影响下协同化系数

(e) 2.5 MPa影响下协同化系数　(f) 3.5 MPa影响下协同化系数

图 11　亚失稳阶段协同化系数

Fig. 11　Synergy coefficient of the sub-instability stage

(a) Synergy coefficient under 0.1 MPa; (b) Synergy coefficient under 0.5 MPa; (c) Synergy coefficient under 1.0 MPa; (d) Synergy coefficient under 1.5 MPa; (e) Synergy coefficient under 2.5 MPa; (f) Synergy coefficient under 3.5 MPa

阻力区域集中。模拟结果与马胜利等(2002)在均匀断层模型中观测到的高正应力下成核区扩展速率提升现象一致。正应力通过增强断层面颗粒间咬合强度，抑制局部滑移的随机性(Lee et al., 2024; Cheng et al., 2025)，促使剪应变能向高阻力区域集中。当正应力从 0.1 MPa 增至 3.5 MPa 时，剪应变集中区扩展速率提升，印证了应力均匀化加速能量临界积累的理论假设。从变形场角度分析，协同化系数随正应力增加而降低的规律与卓燕群等(2013)基于数字图像相关技术的实验结果高度吻合，两者均表明高正应力通过强化断层段间力学耦合，降低位移场离散度。

4.2　协同化进程的阶段性与地震序列的时空关联

近年来的观测与建模研究表明，走滑断层的失稳过程通常由初始的局部滑移逐步演化为区域性的协同滑动，其亚失稳阶段表现出显著的阶段性协同化特征。该过程受到断层几何复杂性、正应力调控及局部应力集中的综合影响。

基于 InSAR 与地震定位结果揭示，在 2022 年阿富汗 Baghlan 地震序列中，主震破裂路径早期已由数个小震引导形成空间协同趋势，表明震前协同化过程具有可观测性(Mou et al., 2023)。通过实验室

断层滑移试验发现,剪应变能释放过程表现为“点状激发—带状连接—面状联动”的空间过渡模式,该模式是亚失稳阶段滑移协同演化的微观物理基础(李世念等, 2021)。复杂断层网络结构直接影响滑移稳定性与破裂协同性,更加简单的几何结构更倾向于连续滑移而非突发失稳(Lee et al., 2024)。

从地震波形分析角度研究2023年土耳其双震事件中多个断层段的破裂序列,Liu et al.(2023)指出前震、小震与主震滑移面之间存在显著时间–空间同源关系,反映出亚失稳过程中断层段间协同滑动的发展轨迹。此外,在三维数值模拟中证实,正应力的升高不仅增加了系统能量积累阈值,还缩短了局部滑移扩展至系统协同滑动所需的临界时间(Liu and Rice, 2007)。

4.3 模型局限性与复杂地质条件的耦合需求

尽管研究揭示了正应力的主导作用,但模型简化可能导致以下偏差:未考虑断层带内摩擦性质的空间分异,这可能使剪应变能密度的计算偏于理想化。断层几何结构影响震后滑动与地表隆起的空间分布(Ando et al., 2025)。活动断层滑移范围会对邻近断层系统的应力传递产生影响(杨镇等, 2025)。未考虑孔隙流体压力的动态影响,流体压力会显著影响断层面的滑移行为与能量释放模式(赵德康等, 2025)。实验表明,流体压力升高可使有效正应力降低30%以上,显著加速应变释放区扩展。未模拟多段断层的相互作用,这可能导致对协同化连通路径的预测偏差。

未来研究需融合多物理场数据。通过黏弹性模型(李烨波等, 2024)耦合介质流变参数,分析正应力与地壳黏度的交互作用。基于机器学习算法,反演天然断层的正应力分布与地震复发周期的统计关系(李腊月等, 2023)。通过耦合热–水–力(THM)过程的三维数值模型,成功模拟了流体压力诱导下的剪应变能演化,揭示高压流体可在局部削弱剪切强度,加速亚失稳滑移过程(颜丙乾等, 2021)。将电磁辐射信号与剪切带滑动同步观测,发现电磁异常响应强烈依赖剪应变集中程度,为亚失稳识别提供了非机械信号指标(冯小军等, 2023)。

4.4 协同化系数的潜在应用与地震预测框架

研究中提出的协同化系数可作为断层系统有序性的量化指标。与地震活动性参数结合,当S低于0.5且小震b值(一定区域内不同大小地震频数的比例关系)显著下降时(李元辉等, 2009),可能预示断层进入亚失稳Ⅱ阶段;在工程应用中,S可为断层的风险评估提供帮助。如对高正应力断裂段(Jiang et al., 2015)需重点监测位移场协同化趋势。

协同化系数的应用需结合断层几何特征,需结合三维模型与应力分布特征进行拓展(Lee et al., 2024)。对于具有凹凸体的直立断层(李烨波等, 2024),高正应力可能导致闭锁区边缘的剪应变集中更显著,此时协同化系数的临界值可能低于平直断层模型。未来需通过更多实验数据,建立不同断层类型的协同化判据数据库。

协同化系数可与现有位移检测技术(如GNSS、InSAR)配合使用时(李烨波等, 2024),可将位移检测数据作为输入参数之一,参与协同化系数的计算,同时利用协同化系数对位移检测数据进行修正与验证,提高数据准确性。当位移检测数据显示某区域出现异常位移趋势时,结合协同化系数分析,可判断该位移是正常波动还是潜在风险的前兆,从而为工程决策提供更全面、准确的依据。

5 结论

(1)走滑断层失稳过程的数值模拟研究中,在相同正应力及加载速率下,垂直断层方向不同监测点正应变数值存在差异,但数值递减趋势一致。平行断层剪应变空间分布差异性显著,1号监测点数值为负值,11号监测点数值为正值,2—10号监测点数值在0附近波动。

(2)当正应力累积至临界阈值时,断层体系中强度较低的薄弱区首先出现应力集中,剪应变集中区域迅速扩张,并通过级联效应与周边薄弱部位相互连通,最终形成连续的剪应变连通带。

(3)正应力与同震位移、剪应变能密度呈正相关,通过增强摩擦阻力促进能量存储与均匀化变形,促使协同化系数随正应力增大而减小,协同程度显著提升。协同化程度的定量分析可应用于活动断层赋存区域的地震风险评估,为重大工程断层避让设计、地震预警阈值设定以及区域防灾减灾规划提供了科学依据。

作者贡献声明: 代树红负责论文构思、研究方法和论文写作;孙朝阳参与数据分析、技术手段的实践应用、绘图和论文修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: DAI Shuhong conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; SUN Zhaoyang participated in data analysis, practical application of technical approaches, figure generation, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

ANDO R, FUKUSHIMA Y, YOSHIDA K, et al., 2025. Nonplanar 3D fault geometry controls the spatiotemporal distributions of slip and uplift: evidence from the Mw 7.5 2024 Noto Peninsula, Japan, Earthquake[J]. Earth, Planets and Space, 77(1): 53.

BRACE W F, BYERLEE J D, 1966. Stick-slip as a mechanism for earthquakes[J]. Science, 153(3739): 990-992.

BYERLEE J, 1978. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 116(4): 615-626.

CHENG J H, YANG H S, ALMAKARI M, et al., 2025. FASTDASH: an implementation of 3-D earthquake cycle simulation on complex fault systems using the boundary element method accelerated by H-matrices[J]. Geophysical Journal International, 242(2): ggaf230.

DENG L L, 2019. Study on rock friction sliding instability mechanism and acoustic emission evolution characteristics[D]. Beijing: North China University of Technology. (in Chinese with English abstract)

FENG X, DING Z, WANG E, et al., 2023. Stick-slip meta-instability of coal under uniaxial loading and AE and EMR response characteristics[J]. Coal Science and Technology, 51(5): 72-81. (in Chinese with English abstract)

ELLSWORTH W L, BEROZA G C, 1995. Seismic evidence for an earthquake nucleation phase[J]. Science, 268(5212): 851-855.

GUO S S, ZHU Y Q, XU Y M, et al., 2021. Gravity evidence of meta-instable state before the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Seismology and Geology, 43(6): 1368-1380. (in Chinese with English abstract)

HAN X H, ZHAO Z X, DENG L L, 2017. Study of energy release characteristics of rock fault instability sliding[J]. Coal Technology, 36(6): 131-133. (in Chinese with English abstract)

LI S, MA J, JI Y, et al., 2021. The spatio-temporal evolution of the fault defomation during the meta-instability quasi-dynamic phase and the coseismic stage: A view from laboratory[J]. Seismology and Geology, 43(1): 1-19. (in Chinese with English abstract)

JI Q J, ZHOU W W, HAN R S, et al., 2024. Characteristics of life-cycle stages and reservoir control in the development of extensional faults in the Dongying Sag[J]. Journal of Geomechanics, 30(4): 595-608. (in Chinese with English abstract)

JIANG G Y, XU X W, CHEN G H, et al., 2015. Geodetic imaging of potential seismogenic asperities on the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault system, southwest China, with a new 3-D viscoelastic interseismic coupling model[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(3): 1855-1873.

LEE J, TSAI V C, HIRTH G, et al., 2024. Fault-network geometry influences earthquake frictional behaviour[J]. Nature, 631(8019): 106-110.

LI J G, WANG S Z, 1992. Resistance nonuniformity and sudden instability of sliding zone in rocks[J]. Seismology and Geology, 14(1): 79-88. (in Chinese with English abstract)

LI L Y, YIN H Q, MA L L, et al., 2023. A retrospective study of two M_S7.0 earthquakes in Lijiang and Lushan and discussions on the characteristics of meta-instability[J]. Journal of Seismological Research, 46(4): 461-472. (in Chinese with English abstract)

LI Y B, HUANG L Y, YAO R, et al., 2024. Spatiotemporal evolution of interseismic coupling and stress accumulation near an asperity on a vertical strike-slip fault: insights from three-dimensional viscoelastic numerical simulation[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 878-892. (in Chinese with English abstract)

LI Y H, LIU J P, ZHAO X D, et al. , 2009. Study on *b*-value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 30(9): 2559-2563, 2574. (in Chinese with English abstract)

LIU C, LAY T, WANG R, et al., 2023. Complex multi-fault rupture and triggering during the 2023 earthquake doublet in southeastern Türkiye[J]. Nature communications, 14(1): 5564.

LIU Y, RICE J R, 2007. Spontaneous and triggered aseismic deformation transients in a subduction fault model[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B9): B09404.

LU S M, WU Z H, HUANG T, 2025. Characteristics of geological hazard development and disaster-inducing environment of the M_S6.2 earthquake in Jishishan, Gansu Province[J]. Journal of Geomechanics, 31(1): 139-155. (in Chinese with English abstract)

MA J, SHERMA S I, GUO Y S, 2012. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault[J]. Science China Earth Sciences, 55(6): 869-881. (in Chinese with English abstract)

MA J, GUO Y S, 2014. Accelerated Synergism prior to fault instability: evidence from laboratory experiments and an earthquake case[J]. Seismology and Geology, 36(3): 547-561. (in Chinese with English abstract)

MA S L, MA J, LIU L Q, 2002. Experimental evidence for seismic nucleation phase[J]. Chinese Science Bulletin, 47(9): 769-773. (in Chinese with English abstract)

MA S L, LIU L Q, MA J, et al., 2003. Experimental study on nucleation process of stick-slip instability on homogeneous and non-homogeneous faults[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(2): 56-66. (in Chinese with English abstract)

MEI J Z, MA G, ZOU Y X, et al., 2022. Review of studies on the stick-slip behavior of granular fault gouge[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 52(7): 984-998. (in Chinese with English abstract)

MOU Y, LIANG H, SU N, et al., 2023. Control of pre-existing faults on transtensional and transpressional fault systems: A perspective from analogue modelling[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 252: 105689.

REN Y Q, LIU P X, MA J, et al., 2013. Experimental study on evolution of thermal field of en echelon fault during the meta-instability stage[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(7): 2348-2357. (in Chinese with English abstract)

SONG C Y, MA J, WANG H T, et al., 2018. Study on meta-instability stage

and instable section of the fault before strong earthquake: taking western section of southern Tianshan as an example[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(2): 604-615. (in Chinese with English abstract)

SONG Y M, MA S P, YANG X B, et al., 2012. Experimental study on the dynamic displacement evolution of fault in stick-slip process[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(1): 171-179. (in Chinese with English abstract)

WANG S Z, SHI L Q, 1985. Asperity of sliding zone and two different kinds of sudden instabilities in rocks[J]. Seismology and Geology, 7(3): 73-80. (in Chinese with English abstract)

WANG X B, MA J, PAN Y S, 2013. Numerical simulation of stick-slip behaviours of typical faults in biaxial compression based on a frictional-hardening and frictional-softening model[J]. Geophysical Journal International, 194(2): 1023-1041.

YAN B Q, REN F H, CAI M F, et al., 2021. Research review of rock mechanics experiment and numerical simulation under THMC multi-field coupling[J]. Chinese Journal of Engineering, 43(01): 47-57. (in Chinese with English abstract)

YANG Z, ZHONG N, ZHANG X B, et al., 2025. Avoidance distance and influence range of active faults: a case study of Litang fault[J]. Journal of Geomechanics, 31(1): 124-138. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S L, WANG X, GUO W F, et al., 2021. Sub-instability phenomena in various geophysical fields observation data[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(2): 571-583. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X, JIA P, LIU X, et al., 2020. Cross-fault short-term and impending anomalies before the Minxian-Zhangxian strong earthquake and the characteristics of meta-instable state[J]. Seismology and Geology, 42(5): 1205-1217. (in Chinese with English abstract)

ZHAO D K, HAN B, ZENG Y F, et al., 2025. Permeability evolutionary patterns of fractured rock masses in fault zones under seepage-stress coupling[J]. Coal Geology & Exploration, 53(7): 154-165. (in Chinese with English abstract)

ZHAO H B, ZHANG B, ZHANG C, et al., 2025. Mining-induced fault slip: Assessment model and method for determining fault instability ranges[J]. Coal Geology & Exploration, 53(3): 23-33. (in Chinese with English abstract)

ZHUO Y Q, GUO Y S, JI Y T, et al., 2013. Slip synergism of planar strike-slip fault during meta-instable state: experimental research based on digital image correlation analysis[J]. Science China Earth Sciences, 56(11): 1881-1887. (in Chinese with English abstract)

ZOU X B, LI X J, SHAO Y X, et al., 2024. Tectonic deformation and seismic mechanism of the 2021 Aksai M_S 5.5 earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 978-990. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

邓琳琳, 2019. 岩石摩擦滑动失稳机制及声发射演化特征研究[D]. 北京: 北方工业大学.

冯小军, 丁增, 王恩元, 等, 2023. 预制裂纹煤体静载黏滑亚失稳及声电信号响应特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 72-81.

郭树松, 祝意青, 徐云马, 等, 2021. 汶川地震前失稳过程的重力场观测证据[J]. 地震地质, 43(6): 1368-1380.

韩秀会, 赵泽鑫, 邓琳琳, 2017. 岩石断层失稳滑动能量释放特征分析[J]. 煤炭技术, 36(6): 131-133.

籍庆佳, 周维维, 韩润生, 等, 2024. 东营凹陷张性断层发育的生命演化阶段特征及其控藏作用[J]. 地质力学学报, 30(4): 595-608.

李建国, 王绳祖, 1992. 岩石错动面的非匀阻性与突发失稳[J]. 地震地质, 14(1): 79-88.

李腊月, 尹海权, 马伶俐, 等, 2023. 丽江与芦山两次 M_S7.0 地震震例回溯研究及亚失稳特征探讨[J]. 地震研究, 46(4): 461-472.

李世念, 马瑾, 2021. 亚失稳准动态及同震过程变形场时空演化特征: 实验与分析[J]. 地震地质, 43(01): 1-19.

李烨波, 黄禄渊, 姚瑞, 等, 2024. 直立走滑断层凹凸体附近闭锁程度和应力积累的时空演化: 来自三维黏弹性数值模拟的视角[J]. 地质力学学报, 30(6): 878-892.

李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等, 2009. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 30(9): 2559-2563, 2574.

陆诗铭, 吴中海, 黄婷, 2025. 甘肃积石山 M_S6.2 地震地质灾害发育特征及孕灾环境分析[J]. 地质力学学报, 31(1): 139-155.

马瑾, SHERMAN S I, 郭彦双, 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别: 以5°拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. 中国科学: 地球科学, 42(5): 633-645.

马瑾, 郭彦双, 2014. 失稳前断层加速协同化的实验室证据和地震实例[J]. 地震地质, 36(3): 547-561.

马胜利, 马瑾, 刘力强, 2002. 地震成核相的实验证据[J]. 科学通报, 47(5): 387-391.

马胜利, 刘力强, 马瑾, 等, 2003. 均匀和非均匀断层滑动失稳成核过程的实验研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(S1): 45-52.

梅江洲, 马刚, 邹宇雄, 等, 2022. 颗粒断层泥黏滑运动的研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 52(7): 984-998.

任雅琼, 刘培洵, 马瑾, 等, 2013. 亚失稳阶段雁列断层热场演化的实验研究[J]. 地球物理学报, 56(7): 2348-2357.

宋春燕, 马瑾, 王海涛, 等, 2018. 强震前断裂亚失稳阶段及失稳部位的特征研究: 以新疆南天山西段为例[J]. 地球物理学报, 61(2): 604-615.

宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等, 2012. 断层黏滑动态变形过程的实验研究[J]. 地球物理学报, 55(1): 171-179.

王绳祖, 施良骐, 1985. 岩石错动面的凹凸不平及两种突发失稳[J]. 地震地质, 7(3): 73-80.

颜丙乾, 任奋华, 蔡美峰, 等, 2021. THMC 多场耦合作用下岩石力学实验与数值模拟研究进展[J]. 工程科学学报, 43(01): 47-57.

杨镇, 钟宁, 张献兵, 等, 2025. 活动断层的避让距离与影响范围: 以理塘断裂为例[J]. 地质力学学报, 31(1): 124-138.

张淑亮, 王霞, 郭文峰, 等, 2021. 多种地球物理场观测数据中亚失稳现象[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(2): 571-583.

张希, 贾鹏, 刘峡, 等, 2020. 岷县漳县强震前的跨断层短临异常及亚失稳状态特征[J]. 地震地质, 42(5): 1205-1217.

赵德康, 韩冰, 曾一凡, 等, 2025. 渗流−应力耦合下断层带裂隙岩体渗透演化规律[J]. 煤田地质与勘探, 53(7): 154-165

赵洪宝, 张博, 张驰, 等. 采动诱发断层滑移评估模型及失稳范围确定方法[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 23-33.

卓燕群, 郭彦双, 汲云涛, 等, 2013. 平直走滑断层亚失稳状态的位移协同化特征: 基于数字图像相关方法的实验研究[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1643-1650.

邹小波, 李兴坚, 邵延秀, 等, 2024. 2021 年阿克塞 M_S 5.5 地震区形变特征及发震机制研究[J]. 地质力学学报, 30(6): 978-990.