第 31 卷第 6 期
2025 年 12 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 31 No. 6
Dec. 2025

引用格式：杨树新，姚瑞，李玉江，等，2025. 地应力与地震研究进展及展望[J]. 地质力学学报，31（6）：1127−1145. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025104

Citation: YANG S X，YAO R，LI Y J，et al.，2025. Progress and perspectives in research on crustal stress and earthquakes[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1127−1145. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025104

地应力与地震研究进展及展望

杨树新[1]，姚　瑞[1]，李玉江[1]，黄禄渊[2]，胡幸平[1]

YANG Shuxin[1]，YAO Rui[1]，LI Yujiang[1]，HUANG Luyuan[2]，HU Xingping[1]

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京 100085；
2. 中国地震局地球物理研究所，北京 100081

1. *National Institute of Natural Hazards*, *Ministry of Emergency Management of China*, *Beijing* 100085, *China*;
2. *Institute of Geophysics*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100081, *China*

Progress and perspectives in research on crustal stress and earthquakes

Abstract: ［**Objective**］The crustal stress state is a key physical parameter for understanding lithospheric dynamics, elucidating earthquake preparation mechanisms, and assessing regional seismic hazards. It also provides essential data for the optimal design, safe construction, and operation of major underground energy and geotechnical engineering projects. Systematically reviewing the research context in this field and clarifying the current progress and challenges can provide guidance for future research. ［**Methods**］Through a systematic review and synthesis, we summarize the technical methodologies and the evolution of development paradigms in three interconnected domains: acquisition of crustal stress data, analysis and modeling of stress fields, and stress processes associated with earthquakes. ［**Results**］(1) Progress in stress information acquisition: Observation techniques have advanced from shallow to deep levels and from single-site measurements to network-based monitoring. Traditional methods have been continuously refined, while deep borehole in-situ techniques, such as elastic strain recovery (ASR) and differential strain curve analysis (DSCA), have extended observation depths beyond 5 km. The integration of multidisciplinary data has become a prominent trend. (2) Advances in stress field analysis and modeling: Methodologies have evolved from analytical and numerical approaches to an intelligent framework that integrates mechanisms, data, and knowledge. Numerical models have developed from two-dimensional elastic formulations to three-dimensional visco-elastoplastic representations, enabling the dynamic characterization of regional four-dimensional stress fields. (3) Developments in earthquake-related stress processes: In-situ stress measurements, Coulomb stress modeling, and combined physical–numerical experiments jointly reveal the cyclic pattern of “ quiescence–accumulation–release–adjustment” during earthquake initiation, as well as stress triggering and shadow effects, and the physical mechanisms underlying fault instability nucleation. ［**Conclusion**］Current research still faces challenges such as the scarcity of deep stress data, the complexity of integrating multi-source data, and the high uncertainty in determining the initial stress field. Future studies should focus on (1) developing intelligent, multi-method technologies for deep stress observation; (2) constructing machine learning–based inversion and four-dimensional dynamic stress field models constrained by physical principles; (3) advancing research on thermo–chemical–mechanical coupling rheology; and (4) promoting a new paradigm for seismic prediction that integrates stress mechanisms, big data, and expert knowledge.

基金项目：国家自然科学基金项目（42174120，41804052）；国家科技重大专项（2024ZD1000703）；国家重点研发计划（2018YFC1503403）
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42174120 and 41804052), the National Science and Technology Major Project (Grant No. 2024ZD1000703), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFC1503403).

第一作者：杨树新（1963—），男，博士，研究员，主要从事岩石圈应力状态、地应力测量、地震动力过程数值实验等方面的研究工作。Email：yangshuxin1964@263.net

通信作者：姚瑞（1985—），女，硕士，助理研究员，主要从事基于实测地应力数据和数值模拟的断层稳定性研究。Email：yaorui_4123@163.com

收稿日期：2025−08−22；**修回日期**：2025−11−18；**录用日期**：2025−11−19；**网络出版日期**：2025−11−21；**责任编辑**：吴芳

Thereby, future studies will provide a more robust scientific foundation for seismic risk assessment and disaster prevention and mitigation. [**Significance**] This review of advancements and prospects in crustal stress and earthquake research provides references and insights for the observation and analysis of seismic stress processes and for the research on seismic dynamic prediction methods.

Keywords: crustal stress; earthquake nucleation; numerical simulation; physical mechanisms; intelligent forecasting

摘　要：地应力是理解岩石圈动力学过程、揭示地震孕育机制及评估区域地震危险性的核心物理参数，同时可为地下能源资源开发与重大岩土工程的优化设计、安全施工和运营提供基础数据。文章系统梳理该领域的研究脉络，明确当前研究进展与挑战，可为未来研究提供方向。通过系统回顾与综合分析法，从地应力信息获取、应力场分析与建模、地震应力过程3个维度出发，总结了技术方法体系与发展范式演进：在信息获取方面，观测技术实现了从浅部向深部、单点向网络化的跨越，传统方法持续优化，非弹性应变恢复（ASR）、差应变曲线分析（DSCA）等深井原位测量技术将观测深度推进至5 km以深，多学科数据融合成为显著特征；在应力场分析和建模方面，研究方法从解析法、数值模拟演进至“机理+数据+知识”的智能分析新范式，数值模型从二维弹性发展为三维黏弹塑性，实现了区域四维应力场的动态刻画；在地震应力过程方面，实测应力、库仑应力模型与物理−数值实验共同揭示了地震孕育的“平静−积累−释放−调整”循环特征、应力触发与影区效应以及断层失稳成核的物理机制。当前研究仍面临深部数据匮乏、多源数据融合困难、初始应力场不确定性高难挑战。未来应重点发展多手段智能化深部应力观测技术、构建物理约束的机器学习反演与四维动态应力场模型、深化“热−化−力”耦合流变研究，并推动建立“应力机理−海量数据−专家知识”协同的地震预测新范式，为地震风险评估与防灾减灾提供更坚实的科学支撑。通过梳理地应力与地震研究进展及对其展望，为地震应力过程的观测与分析、地震动力学预测方法研究提供了参考与借鉴。

关键词：地应力；地震孕育；数值模拟；物理机制；智能预测

中图分类号：P315.72+7; P553　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)06−1127−19

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025104

0　引言

地应力是揭示块体相互作用与地震机理的关键物理参数，直接影响岩土工程安全、深部资源开发及地下空间利用。自李四光提出地震是地壳应力长期积累后突然释放的过程(李四光，1977)，并倡导将地应力测量用于地震监测预报以来，地应力研究始终是地球动力学与地震科学交叉的前沿方向，其目标不仅在于刻画应力场的时空分布规律，更在于建立应力演化与地震活动之间的定量联系，为破解地震预测难题提供力学依据。

地应力研究的进展与观测技术的革新密不可分。20世纪中叶，水压致裂法、应力解除法、钻孔崩落法、声发射(Kaiser效应)等传统方法相继提出，首次实现地壳浅部(<1 km)应力的直接测量(谢富仁，2006)。Zoback(1992)整合全球7300余条应力数据，编制了首版世界应力图(WSM)，揭示了板块边界力是控制区域应力场方向的主导因素；李方全和刘光勋(1986)通过全国范围内的应力解除法地应力测量数据资料，揭示了中国大陆东、西部构造应力场的差异；德国KTB超深钻孔(9.1 km)联合水压致裂与声波测井，获取了深部应力剖面(Brudy et al.，1997)。同期，日本、美国、中国等国也陆续开展应力应变观测，如美国PBO计划将圣安德烈斯断裂深井地应力测量纳入核心内容，探索板块运动与地震孕育的力学机制(谢富仁，2006)。

进入21世纪，地应力观测呈现“深地化、多源化、智能化”的发展趋势。ASR法、DSCA法等深井原位测量技术突破超深孔(>5 km)与高温高压环境限制，例如在塔里木盆地实现7 km深度应力测量(Sun et al.，2017)。密集地震台阵、GPS与InSAR等大地测量技术为应力场动态监测提供了新维度，如高原等(2018)通过剪切波分裂分析揭示川滇地区地壳20～30 km深度的应力方向异质性；Wu et al.(2022)利用InSAR数据反演龙门山断裂带应变率场，为强震后应力重分布研究提供高分辨率约束。全球应力数据量从1992年的7300条激增至2025年的100842条，世界应力图(Heidbach et al.，2025)与中国应力图

（谢富仁和崔效锋，2015）的持续更新为应力场精细化建模奠定了数据基础。

分析方法上，地应力场研究经历了从解析法、数值模拟到“机理+数据+知识”智能分析范式的演进。早期解析法基于弹性理论，适用于简单地质条件（陈卫忠等，2012），但难以处理复杂结构。数值方法则从二维弹性模型（Otsuki, 1985）发展为三维黏弹塑性模型（Luo and Liu, 2018），并借助千万级至亿级网格实现区域四维应力场的动态刻画（张怀等，2009；祝爱玉等，2015）。近年来，人工智能技术的引入催生了研究新范式，例如融合 FEM/DEM 与 XGBoost 的混合框架在复杂地质条件下表现出色（Zhou et al., 2023），周华等（2025）研发的智能反演系统在工程应用中精度超过 85%，展现出巨大潜力。

地壳应力与地震的关联研究是地应力应用的核心内容。大量观测证实，强震伴随应力场的显著重构与方向偏转（郭啟良等，2009；吴满路等，2010）。以库仑应力变化（ΔCFS）为代表的模型成功揭示了地震间的触发与抑制作用（King et al., 1994；沈正康等，2003）。物理实验与数值模拟则从微观机制到宏观规律深化了对断层失稳成核、破裂传播及应力降行为的理解（马瑾等，2012；石耀霖等，2018；Zhou et al., 2018）。然而，该领域仍面临深部（>5 km）应力数据稀缺、多源数据融合困难、初始应力场不确定性高等挑战（孔维林等，2021；苏培臻等，2025），地震预测仍缺乏可靠的物理模型支撑。

鉴于此，文章系统综述地应力状态及其对地震孕育发生影响的研究进展。从地应力信息获取与应力场分析方法演进切入，进而聚焦实测应力特征、库仑应力变化与应力过程实验，阐述应力与地震的关联机制，最后结合前沿研究提出未来趋势与总结，以期为地应力信息获取、高精度建模、地震风险评估与工程安全提供参考。

1　地应力状态研究

1.1　地应力信息获取

地应力信息的获取依赖多学科、多尺度的观测与反演手段，主要有以下途径：

（1）基于岩石力学的原位探测与观测

该类方法通过直接测量获取地壳浅部应力的方向与量值，是应力场研究的直接证据（李方全和刘光勋，1986；Zoback, 1992；蔡美峰，1993）。传统方法如水压致裂法、应力解除法应用广泛；近年来，非弹性应变恢复（ASR）、差应变曲线分析（DSCA）和差应变率分析（DCDA）等新技术迅速发展，推动了地应力观测向更深部拓展。在多个国际科学钻探项目中（如德国 KTB 超深钻，中国塔里木盆地深地塔科一井、松科二井、汶川科钻、车笼铺科钻，日本“地球号”探测船相关钻孔），这些新方法在超深孔、高温高压环境中展现出了显著优势（Cui et al., 2014；Sun et al., 2017；Lin et al., 2024）。例如，ASR 法在塔里木盆地实现 7 km 深度的应力测量（Sun et al., 2017），德国 KTB 钻孔在 9.1 km 深度综合运用水压致裂、孔壁崩落与声波测井等技术，获取了深部应力剖面（Brudy et al., 1997）。钻孔应力应变观测是地应力信息获取的重要地球物理途径，通过在地下 10～1000 m 钻孔布设高精度传感器，可直接捕获构造活动引发的地壳介质微小形变与应力变化，在地震科学中成效显著：同震响应上，其记录的地震波动态应变与同震阶跃为反演震源机制、判断地震类型提供独立应力信息约束，如汶川地震（池顺良等，2009）、日本东北大地震（Uchida and Bürgmann, 2021）的记录与 GPS、地震波反演模型吻合；前兆捕捉上，该方法可获取震前疑似短期前兆应力信号（Johnston et al., 2006；张鹏等，2017；谭成轩等，2019）

（2）基于测震学的震源机制解析与波速反演

震源机制解是研究中上地壳构造应力场的重要手段，可反演主应力方向及其相对大小（许忠淮，1985）。随着反演方法与密集台阵的进步，震源资料的应用趋于精细化（严川等，2015）。剪切波分裂分析（如直达 S 波、Ps 转换波、SKS 波）可揭示不同深度范围内介质的各向异性，进而推断应力方向（高原和吴晶，2008；高原等，2018）。该方法高度依赖台站布设，密集台阵的建设为其带来新的发展机遇。

（3）基于大地测量学的地表形变分析

GPS 与 InSAR 等技术实现了高精度、大范围、全天候的地壳形变监测，为区域应力场动态研究提供了关键数据（Wu et al., 2022；刘传金等，2024）。这些数据被广泛应用于断裂带形变监测（Elliott et al., 2016；Li et al., 2023）、应变率场构建（Li et al., 2019；Wang and Shen, 2020）以及数值模型的边界约束（Huang et al., 2023；Pang et al., 2023），成为构造应力场动态演化研究的重要支撑。

（4）基于构造形迹的应力场推断

通过分析共轭剪切节理、断层滑动矢量、火山

链排列等地质构造形态，可推断古应力场与现代应力场的特征（李四光，1947；马杏垣，2004）。利用断层滑动方向反演构造应力张量的方法自 Bott（1959）提出以来，不断发展并应用于断层解析与震源机制解研究中（谢富仁等，1993），已成为当前构造应力场研究的有效手段之一。

（5）基于地球物理测井数据的应力反演

结合测井资料与弹性模型，可通过声波、密度等数据反演岩石力学参数，进而计算地应力并构建井孔应力剖面（Zoback et al.，2003；周文等，2007）。近年来，为提高预测精度，学者们提出了多种新方法，如基于裂缝导水性的反演法在 KTB 钻孔中验证了其可靠性（王浩男等，2024）；流变模型引入应变率与蠕变参数，提升了地应力剖面预测的实用性（孙东生等，2020；孟文等，2022）；横波时差估算模型的优化也提高了常规测井的反演精度。当前趋势强调多方法融合，如综合水压致裂、成像测井与数值模拟，系统分析岩性、埋深、构造背景等因素，以实现应力状态的综合判定（孟文等，2022；张皎生等，2025）。

1.2 应力场分析方法

随着理论完善与技术进步，地应力场分析方法经历了从传统解析法到数值模拟，再到当前“机理+数据+知识”融合的智能分析范式的演进。以下系统梳理 3 类方法的进展与现存问题。

（1）解析法

作为传统研究手段，解析法基于弹性力学理论，通过建立数学物理方程推导应力场解析表达式，在理论体系完善与工程应用方面成效显著。应力函数法的引入推动了初始地应力场反演的发展，衍生出半解析应力函数法、多项式回归法、边界载荷反演法及智能优化算法等多种反演方法，能够有效表征工程区域初始应力场的分布规律与量值特征，为地下工程设计与稳定性评价提供关键参考（陈卫忠等，2012）。王志云等（2023）提出改进算法，将构造应力假设为随埋深变化的梯形载荷，通过分离垂直主应力求解回归系数，进而反演水平主应力相关系数，显著提升了计算效率与方法的鲁棒性。弹性力学理论在钻孔应变–地层系统分析中也得到成功应用，研究人员推导了边界差异构造应力条件下该系统位移场与应力场的解析表达式，将远场差异构造应力分解为均匀应力与偏构造应力分量，为解释钻孔应变计观测到的地震应变阶跃、慢地震等现象提供了地球动力学机制（周龙寿等，2020）。然而，解析法在处理断层、节理、岩性不均等复杂地质条件时存在明显局限，对非线性问题适应性较差，且高度依赖简化假设，导致其在复杂实际工程中的应用精度有限，这也成为推动数值模拟方法发展的重要动因。

（2）数值法

利用有限元法、边界元法、有限差分法等数学工具，数值法通过构建区域物理模型、施加动力学约束条件，并基于合理的本构关系对地壳应力场进行理论模拟与计算（石耀霖和曹建玲，2010；Hergert and Heidbach，2011）。近年来，随着对地球内部结构认识的深化和高性能计算技术的飞速发展，应力场数值模拟在多个维度取得了显著进展：模型维度从二维拓展至三维（Coblentz et al.，1998；石耀霖和 Assumpção，2000；杨树新等，2003；Rajabi et al.，2017）；本构关系从简单的弹性模型发展为更符合地壳介质行为的黏弹性及黏弹塑性模型（Luo and Liu，2018）；模型网格分辨率从千万量级（张怀等，2009）提升至亿级水平。同时，约束资料日趋多元，越来越多研究综合集成应力方向、应力量值或应力形因子、GPS 观测数据、断层滑动速率以及历史地震序列等多源信息作为模型约束（孙云强和罗纲，2018；Li et al.，2022；刘皓晴等，2023）。尽管如此，现有数值模型在多学科应力、应变观测数据的深度融合方面仍显不足，且研究多聚焦于应变率场或应力变化场（张怀等，2009；孔维林等，2021；王帅杰，2025）。当前获取的地应力数据源于不同学科，观测尺度涵盖数米至数百千米，是对应力状态局部或特定侧面的描述。因此，如何通过数值实验实现多尺度地应力数据的有效融合，已成为获取研究区真实三维应力状态的关键。此外，非线性问题导致的参数确定困难、计算效率与精度之间的平衡，亦是复杂地质条件下应力场数值分析面临的严峻挑战。

（3）智能分析法

近年来，人工智能技术的兴起推动了“机理+数据+知识”智能分析法的发展，该范式为解决极端复杂地质环境下的地应力场预测与可视化难题提供了革命性工具（Zoback，2010）。①工程化应用取得突破：华能水电研发的“一种层状围岩三维地应力场反演智能分析系统及方法”专利，整合了三维地质建模、智能反演分析与验证模块，构建了适用于隧道、地下洞室群等工程的专用平台（周华等，2025），显著提高了复杂地质条件下地应力场分析

精度。②多源异构数据融合成效显著：在深部矿产开发领域，融合数值模拟、机器学习算法及地质统计学的混合建模框架，有效解决了传统方法难以应对的复杂地质与采动应力耦合问题（Zhou et al., 2023）。③稀少样本算法与迁移学习取得进展：李飞等（2019）提出的 GMDH（批数据处理）神经网络算法，仅利用 6 个测点数据即可实现 84% 的反演精度，克服了传统 BP 神经网络对大量样本的依赖；相关团队研发的迁移学习框架，通过域适应技术显著降低了跨区域预测的精度损失，提升了模型在未知区域的泛化能力（Wang et al., 2022）。④数字岩石力学方案创新应用：李海涛等（2024）提出了“物性+结构=应力”的数据逻辑及“四步法”作业模式，在煤炭智能开采中实现了采场应力场的动态可视化，并构建了冲击地压风险预警机制，预警准确率得到显著提高。智能分析法通过整合物理机制、数据驱动和专家知识，不仅综合考虑了地质构造、岩石性质等静态因素，还引入了地温、地下水等动态影响变量，从而能够更全面地评估地应力场的实际情况，实现更高精度和效率的反演与预测。然而，该方法目前仍面临模型泛化与跨区域迁移能力不足、地应力实测数据成本高昂且分布稀疏导致的训练样本匮乏、物理机理与数据驱动难以有效平衡以及实时性与工程应用转化困难等诸多挑战。

1.3　应力场模型研究

应力场模型的演进经历了从理论假设与实验推演，到基于实际观测数据的发展历程。早期模型以静岩压力模型为代表（Heim, 1878），随后相继提出双轴应力模型（Karl and Richart Jr, 1952）、三维构造应力模型（Anderson, 1905）以及基于岩石力学实验外推的深部应力剖面模型（Goetze and Evans, 1979；孔维林等，2021）。基于实际探测的应力模型研究始于胡佛大坝岩体中绝对原位地应力的成功测定（Lieurance, 1933），其后全球多个地区的实测结果普遍证实，在地壳浅部（数百米以浅），水平应力通常显著大于垂直应力（Gay, 1975）。

世界应力图（World Stress Map, WSM）计划于 1986 年在国际岩石圈计划框架下启动，由美国科学院院士 Mary Lou Zoback 主导，汇聚多国科学家力量，系统集成全球地应力数据与研究成果。自 2009 年起，该计划由德国地学研究中心（GFZ）继承并持续发展，其数据库规模从 1992 年版的 7300 余条数据（Zoback, 1992），显著扩充至 2025 年版的 100842 条（http://www.world-stress-map.org）。其最重要的科学贡献在于揭示了全球不同地区地壳应力场存在着不同尺度的应力场特征（图 1），对应着不同尺度的力学成因（Heidbach et al., 2010, 2025；胡幸平，2018）。

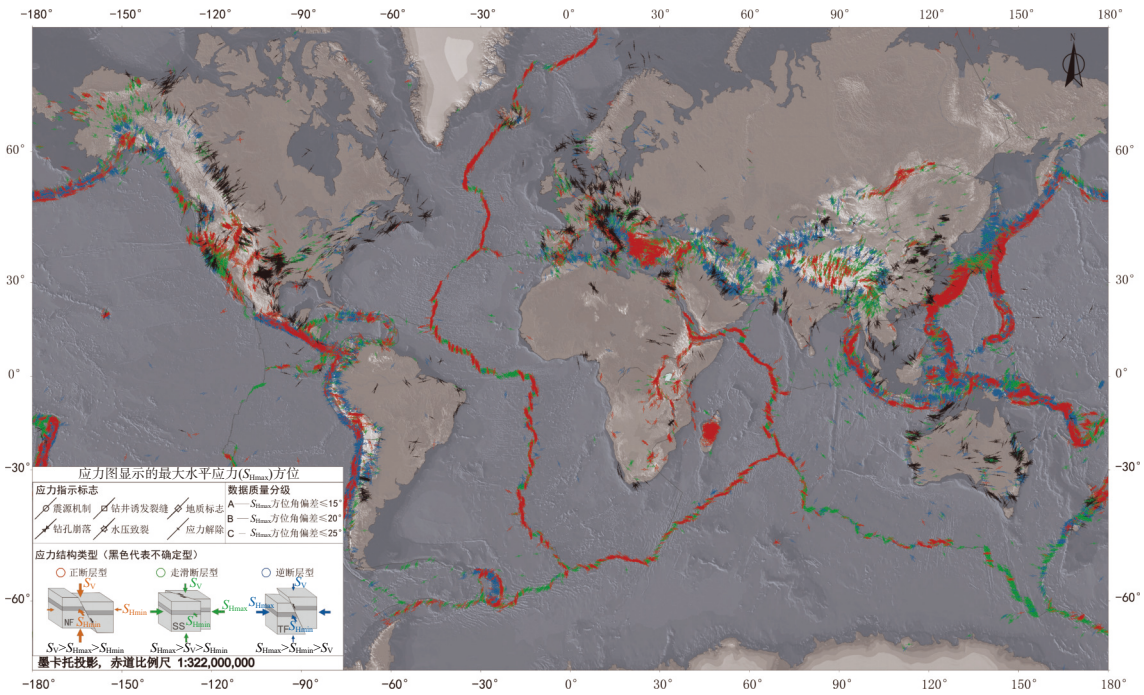

图 1　2025 版世界应力图（据 Heidbach et al., 2025 修改）

Fig. 1　World stress map 2025 (modified from Heidbach et al., 2025)

中国内陆地区的构造应力场研究始于20世纪70年代。学者们综合利用震源机制解、原位地应力测量(如水压致裂、井孔崩落、应力解除等)及地质资料(如断层擦痕、微构造取向、火山链排列等),系统揭示了中国及邻区的应力状态特征(李方全和刘光勋, 1986; 杨树新等, 2012a; Yang et al., 2014; 姚瑞等, 2017)。“中国大陆地壳应力环境基础数据库”于2001年启动建设(谢富仁等, 2003),系统收集并整合了中国内陆范围内的多类地应力观测资料,包括震源机制解、钻孔崩落、断层滑动、应力解除、水压致裂及连续应力应变测量数据。经持续更新,该数据库目前已收录万余条应力数据(Hu et al., 2017)。在此基础上,谢富仁和崔效锋(2015)编制了更新版《中国及邻区现代构造应力场图》(图2),全面呈现了区域应力场的空间格局。

图2 中国及邻区现代构造应力场图(谢富仁和崔效锋, 2015)

Fig. 2 Map of the modern tectonic stress field of China and adjacent areas (Xie and Cui, 2015)

近年来,以地震科学实验场为依托的区域性构造应力模型研究在国际上形成热潮,尤以美国南加州地震中心(SCEC)所推动的公共应力模型(Community Stress Mode, CSM)为代表。CSM致力于强化应力场约束能力,搭建观测数据与模型间的物理解释桥梁。该模型体系涵盖应力模型与应力加载模型两大类,方法上包括薄壳模型、震源机制解模型、静态库仑应力模型、剪切波分裂模型、边界元模型及块体模型等(Bird, 1999, 2017; Hardebeck and Michael, 2004; Luttrell and Sandwell, 2012; Yang and Hauksson, 2013)。中国正在推进的“中国地震科学实验场”计划,亦将川滇地区公共应力模型构建列为“透明地壳”计划的核心内容之一(中国地震科学实验场科学设计编写组, 2019)。川滇地区构造背景复杂,动力作用强烈,强震活跃,是中国地壳应力场研究程度最高的区域之一。学者们通过地应力测量(Meng et al., 2015; Wu et al., 2016)、地质分析(谢富仁等, 1993)、剪切波分裂(高原等, 2018)、深部构造与变形机制研究(田建慧和高原, 2024)、震源资料反演(许忠淮等, 1987; 崔效锋和谢富仁, 1999; 王晓山等, 2015)及数值模拟(张怀等, 2009; 祝爱玉等, 2015)等多种方法,从不同尺度揭示了该区

地壳应力状态，一致指出川滇地区构造应力场具有较强的非均匀性（孔维林等，2021）。近期研发的川滇地区三维应力场模型 SYRSMo1.0 在一定程度上具备合理性与可靠性，为理解该区应力环境及构造背景提供了新视角，但其在绝对应力值的分辨率与可靠性方面仍存在局限，有待进一步改进（苏培臻等，2025）。

当前，应力场模型研究仍面临一系列共性挑战，如不同方法所获数据离散性大、深浅部应力状态对应关系不明确等。随着地应力研究方法的持续深化与数据资源的不断积累，地壳应力场研究在精度与时空维度上有望实现新的跨越。未来，全球应力模型将逐步发展为融合平面与垂向结构的精细三维模型，并进一步嵌入时间维度，形成四维动态应力场。结合深度学习等人工智能技术在地学领域的快速推广（Mousavi et al., 2020; Uchide et al., 2022），高精度、多时空维度的地壳应力模型时代将加速到来。

2　地壳应力与地震关系研究

2.1　地震的实测应力特征

（1）地震发生前后，震源区与外围区域应力状态表现出系统性差异

实测资料表明，震中区应力值普遍低于周边区域，外围地区主应力值可达震中区的约 1 倍，最大剪应力可达震中区的 2～3 倍，主应力方向在震后短期内往往偏离区域构造应力场背景，随应力调整过程逐步恢复一致（李方全，1983）。震源区主应力方向表现出明显的动态演化行为，呈现“震前转向促破裂方向–震时快速偏转–震后逐渐恢复”的典型模式。例如，汶川地震前主应力方向向发震破裂优势方向旋转，震后浅部应力变化沿断裂走向呈现梯度分布，且方向旋转幅度与水平主应力比值负相关（Meng et al., 2023）。昆仑山 M_S8.1 地震后，最大水平主应力方向由 N45°E 转为 N66°E，进一步体现了震后应力方向的重新调整（Liao et al., 2003）。

（2）强震前后应力集中与释放现象尤为显著

昆仑山 M_S 8.1 地震前应力水平达区域背景值的 4～6 倍，震后下降约 2/3（Liao et al.,2003; 谭成轩等，2019）；汶川地震后发震断裂上盘最大与最小水平应力分别下降约 29% 和 23%（郭啟良等，2009）；芦山地震前龙门山断裂带南段处于高应力状态，最大剪应力与平均应力之比 μ_m 介于 0.39～0.56，接近 Byerlee 摩擦强度下限，反映地壳处于极限平衡状态（王成虎等，2014）；钻孔应力应变观测清晰记录到同震动态应变响应与阶跃现象，如 2008 年汶川地震（池顺良等，2009）和 2011 年日本东北大地震（Uchida and Bürgmann, 2021）的观测结果均与 GPS 及地震波反演模型高度一致，为震源机制约束提供独立证据。此外，观测中还识别出了可能的短期前兆信号，包括震前数小时至数十天内出现的应力应变加速、慢滑移事件及特定频段波动（Johnston et al., 2006; 张鹏等，2017; 谭成轩等，2019），然其可重复性与普适性仍需更多实例验证；震后应变弛豫过程（时间尺度为数天至数年）的观测为研究地壳流变特性提供了关键窗口，通过反演可有效约束震源区及周边介质黏弹性结构与余滑分布，深化对地壳力学行为的认识（Diao et al., 2021）。

（3）地震孕育至发生过程中，震源区应力状态呈现“平静–积累–激增–释放–恢复平静”的准周期性演化

以日本兵库县东南部 1978—2000 年 8 次地应力测量为例，μ_m 从 1978 年的 0.18 持续上升，至 1994 年达约 0.6，1995 年兵库县南部 M_L7.3 地震后迅速降至 0.2，完整记录了应力积累至释放的完整过程（田中丰和祁英男，1999）。

综上，多种观测手段系统揭示了地震全周期应力演化规律，为发震机制理解与地震预测研究提供了关键力学依据。

2.2　库仑应力与地震触发

库仑应力变化（ΔCFS）模型基于库仑破裂准则建立，其核心观点是：当一次地震导致周边断层面上的库仑应力增加时，将促进该断层发生地震；反之，则对地震产生抑制（King et al., 1994）。

（1）库仑应力模型已在全球多个地震序列中获得实证支持

例如，北安纳托利亚断裂带在 1939—1992 年间发生的 10 次 $M\geqslant6.7$ 地震中，有 9 次位于应力增强区（Stein et al., 1997）；青藏高原东北缘自 1920 年以来 16 次 $M\geqslant7.0$ 地震中，13 次发生于应力增强区域，触发率达 81.25%（万永革等，2007）；巴颜喀拉块体周缘 2001—2017 年 7 次 $M\geqslant6.5$ 强震序列中，汶川地震对芦山地震表现为应力触发（ΔCFS 为正），而对九寨沟地震则起到延迟作用（ΔCFS 为负）。该区强震活动整体受控于巴颜喀拉块体持续向东南挤压

的构造背景，强震间的应力触发在此过程中发挥调制功能（贾科和周仕勇，2018）。然而，该模型在俯冲带地区适用性受限。例如，2011 年日本 M_W 9.1、2010 年智利 M_W 8.8 和 2004 年苏门答腊 M_W 9.0 等特大地震的余震中，位于 ΔCFS 正值区的比例仅为 47.0%～49.8%，最佳触发率不足 60%（缪森和朱守彪，2012），显著低于板内地震（如汶川地震、集集地震的＞85%）。这一差异可能与俯冲带复杂的断层结构、流体作用及非均匀应力状态密切相关。

（2）库仑应力模型在实际应用中不断拓展

Stein et al.（1997）较早将 ΔCFS 转化为地震发生概率增益（Probability Gain），发现北安纳托利亚断裂带上的应力变化使后续十年发震概率平均提高 3 倍，其中瞬态效应占主导。朱守彪和缪森（2016）通过引入构造环境中摩擦系数的变化，有效解决了“库仑应力随摩擦系数增加而增大”这一与传统认知矛盾的问题，提升了模型的物理一致性。Mildon et al.（2019）指出，忽略断层的自然弯曲可导致高达±2.7×10^5 Pa 的计算误差，进而可能完全误判应力影区或触发区的分布，并指出在评估断层危险性时，除关注平均 ΔCFS 外，还应综合考虑断层面上正应力区的比例及最大应力值，以更全面反映断层破裂的可行性。石富强等（2024）发展了基于地质参数与库仑应力的地震触发概率计算方法，通过综合地质构造背景确定库仑应力阈值，显著提高了预测可靠性。Dahm and Hainzl（2022）提出的时间相关应力响应模型（TDSR）将库仑破裂准则与速率−状态摩擦定律相结合，实现了对余震衰减、应力影效应及亚临界应力状态下触发行为的统一描述，推动库仑应力模型向物理机制更清晰、预测能力更强的方向发展。此外，区域构造应力场的量级与方向对库仑应力空间分布具有重要控制作用（龚炜程等，2023）。

（3）库仑应力演化分析已成为地震危险性评估的重要工具

2021 年玛多 M_S7.4 地震显著增强了东昆仑断裂带中段、达日断裂中西部等断层部位上的应力水平，提升了未来地震风险（Li et al., 2021；冯雅杉等，2022）；2022 年门源 M_W 6.7 地震也对西侧“托莱山地震空区”产生了明显应力加载（牛鹏飞等，2025）。李玉江等（2020）系统计算了川滇地区 1515 年以来 M≥7.0 强震引起的同震与震后应力变化，发现鲜水河断裂南段、安宁河断裂、小江断裂北段、龙门山断裂南段等区域的累积库仑应力增加显著（≥0.1 MPa），未来强震危险性较高。龚炜程等（2023）对青藏高原东北缘的研究表明，阿尔金断裂、东昆仑断裂中段等多个断层部位累积库仑应力变化已超过 0.01 MPa 的触发阈值，指示这些区域具备较高地震危险性。冰岛雷克雅内斯半岛的累积应力模型进一步显示，应力增强区与历史强震区分布吻合，未来地震可能发生于西南、中部和东部 3 个应力集中区，其中东部区域发震潜力最大（Birgisdóttir, 2023）。上述研究共同表明，库仑应力变化不仅调控短期余震分布，对中长期地震危险性亦具重要指示意义。

需要指出的是，由历史地震与震间构造加载累积形成的总应力远大于单次同震应力变化，因此应力触发分析必须考虑长期累积的应力演化历史（万永革等，2007）。另外，由于初始应力状态难以直接约束，多数研究简化为地壳在重力作用下处于均衡状态（祝爱玉等，2015），或直接忽略初始构造应力场的影响（石耀霖和曹建玲，2010）。然而，地震发生与否本质上取决于断层初始应力状态与应力变化的共同作用。因此，在发展库仑应力模型过程中，加强基于初始应力状态的断层应力演化研究，对提升地震研判能力具有重要意义。

2.3 地震应力过程实验研究

地震应力过程的物理实验研究通过实验室尺度模拟，深化了对断层破裂、摩擦滑动与应力演化机制的理解（董鹏和夏开文，2022）。①实验技术实现了对断层应力状态与多物理场的精细控制及监测。双轴与三轴压缩实验通过控制围压和差应力模拟地壳深部环境（Byerlee, 1978），结合声发射（AE）、应变场及温度场光学观测等技术，可原位高分辨率监测微破裂萌生、成核、动态传播及物理场演化（马胜利等，2004；马瑾等，2012；Zhou et al., 2018）。例如，高速摄像与激光干涉技术揭示破裂前沿应力集中特征（张康华等，2023），分布式温度传感捕捉断层亚失稳阶段体应变变化（马瑾等，2012）；Xu et al.（2023）通过米尺度断层实验，进一步揭示断层表面地形对破裂速度与应力降的系统性控制。②应力演化与协同化是断层失稳前的关键过程。实验表明，断层失稳错动是断层各个部位活动从独立向协同化转化的过程；拐折断层实验中，应力−时间曲线偏离线性标志应力释放与协同作用开始，亚失稳阶段以应力释放占优且协同化为特征（马瑾等，2012）；大震前 地震活动平静或与断层“蠕滑−匀阻化”相关，挤压型雁列断层、含凹凸体

断层等实验中，失稳前普遍出现声发射活动显著平静期，对应新生断层段蠕滑及摩擦阻力均匀化（马胜利等，2004）。③应力降与破裂速度受控于断层物理性质与正应力。破裂速度可加速至接近瑞利波速，Zhou et al.（2018）发现，局部动态应力降、局部破裂应力降随静态摩擦系数增加线性减小，临界裂纹长度随正应力增加或粗糙度降低而减小，导致破裂增加。Xu et al.（2023）进一步指出，较不粗糙断层宏观峰值强度低、平均应力降大，破裂倾向亚剪切传播；更粗糙断层破裂速度范围宽，破裂方式涵盖慢滑至超剪切。④断层界面微观接触面积动态变化控制地震孕育与触发。Wu and Barbot（2025）通过透明丙烯酸材料模型与高速成像，首次观测到快速破裂阶段约 30% 接触面积在毫秒级消失，导致断层剧烈弱化并驱动破裂，为“速率与状态”摩擦定律提供物理解释，证实状态变量对应断层真实接触面积，且同步影响电导率、水力渗透性及波传播特性。⑤应力积累的几何控制与成核机制主导地震孕育。Bayart et al.（2016）结合实验与断裂力学模型，揭示应力积累受断层几何显著影响，局部应力阈值处的缓慢无震蠕变是地震破裂的必要前提，该过程始于微小二维摩擦斑块，随断层几何约束扩展并触发动态破裂；马瑾等（2012）对拐折断层的研究亦表明，微小方向变化显著影响断层失序过程与应力空间分布。综上，相关研究从宏观应力演化（马瑾等，2012）、声发射活动序列（马胜利等，2004）到微观接触行为（Wu and Barbot, 2025）及定量破裂参数（Zhou et al., 2018），极大丰富了地震孕育−发生物理机理认知，支撑地震物理模型约束与验证，为数值模拟提供关键参数（董鹏和夏开文，2022）。未来需结合热−水−力−电多物理场耦合监测（Moein et al., 2023），深化全周期地震过程实验重构，推动地震物理预测与减灾研究。

地震应力过程数值实验作为关键研究手段，借助计算机模拟揭示了断层力学行为及应力积累与释放的复杂过程。①数值实验方法的发展与多样化：地震应力数值实验始于 20 世纪中叶，早期采用弹簧−滑块模型模拟断层准静态滑动，为地震循环研究奠定基础（Burridge and Knopoff, 1967）。王仁等（1980）运用平面应变弹塑性有限元法，反演华北地区近 700 年 14 次 7 级以上强震序列，通过调整断层摩擦系数与保留错距，实现历史地震迁移规律的数值模拟。21 世纪后，数值方法趋向多样化与精细化。有限元法（FEM）成为区域构造应力场研究核心工具，用于模拟强震应力场演化、库仑破裂应力变化及震后黏弹性松弛（陈连旺等，2001；孟秋等，2021）；离散元法（DEM）与非连续变形分析（DDA）可有效处理断层不连续问题，混合方法如连续−离散单元法（CDEM）能实现多断层自发破裂全周期模拟（赵由佳等，2018）。同时，研究聚焦多物理场耦合与复杂系统模拟：流固耦合（FSI）模型量化孔隙流体与固体应力场相互作用（Sibson, 1992）；Monte Carlo 方法用于区域初始构造应力场优化反演（董培育等，2019）；离散元与颗粒流模型助力断层网络动态行为模拟（Lei et al., 2017）。高性能并行计算支撑复杂地球模型构建，提升同震形变与应力场计算精度（黄禄渊等，2017）。杨树新等（2012b）建立了中国大陆三维有限元模型，通过“单元降刚法”解释强震远距离跳迁；石耀霖等（2018）提出中国地震数值预报系统框架，强调自主动力学模式与多维度数据库建设。②数值实验揭示的地震应力积累、释放、转移与触发规律：三维黏弹性模拟显示，1966 年邢台地震震时库仑破裂应力呈对称分区，震后因下地壳流变效应调整，部分应力增加区转为减小区（陈连旺等，2001）；2008 年汶川地震模拟再现逆冲断层应力积累、同震释放及震后层间应力调整（孟秋等，2021）。耿鲁明等（1993）通过非线性网络模型发现，稳定边界应变速率下，系统应力场与应变能呈准周期性变化，地震活动具轮回特征且主体活动区空间转移。杨树新等（2012b）研究表明，强震区承载能力丧失引发大范围应力调整（兆帕量级），是强震远距离（超 2000 km）跳迁的关键，且主体活动区迁移受边界载荷影响。2010 年智利 Maule 地震模拟显示，70.9% 余震位于库仑应力变化>10 kPa 区域，主震应力变化（约 10 kPa）相当于 Illapel 地区 15 年构造应力积累，加速了 2015 年 Illapel 地震发生（黄禄渊等，2017）；陈连旺等（2001）指出，邢台地震为唐山地震断裂面创造了加速发震的应力环境。③数值实验深化了对地震触发、成核及断层相互作用的认知。地震成核始于局部应力集中区，受速率−状态摩擦定律弱化过程驱动，成核区尺度与断层性质相关，为地震预警提供潜在指标（Dieterich, 1994）；断层系统中应力相互作用普遍存在，静态与动态应力变化可触发远场地震，形成复杂序列（Steacy et al., 2005），如邢台地震对后续强震孕育有加速作用（陈连旺等，2001）。耿鲁明等（1993）发现前兆异常与地震发生

非一一对应，平静期与活跃期前兆特征差异显著。此外，介质不均匀性与复杂几何结构对同震应力应变场影响显著，忽略会低估应力降（王仁等，1980；黄禄渊等，2017；孟秋等，2021）；杨树新等（2012b）模拟表明，后续强震位置受加载方式、地质构造等多因素控制，单个地震位置预测难度大，但主体活动区趋势可通过边界加载与应力场关联研究预测。综上所述，随着计算能力提升与数值方法完善，地震应力过程数值实验领域模拟已从简单模型发展为高精度多物理场耦合模型（Lapusta et al., 2000；Lei et al., 2017），为地震物理预测与风险评估提供重要科学依据。未来，需推动高性能计算与人工智能融合，实现高精度跨尺度实时模拟；发展复杂地球模型、探究多物理场耦合机制、加强不确定性量化、改进单元破坏准则（杨树新等，2012b），并建立科学的地震预测评估与发布体系，推动地震数值预报从探索走向业务化应用（石耀霖等，2018）。

3 发展趋势与展望

3.1 深部原位应力精准观测：从技术融合到多尺度验证

地壳应力场的直接测量是认知其绝对大小、方向和空间分布的可靠手段，也是检验间接分析方法与数值模型的基石。然而，获取深部（>3 km），尤其是活动断裂带深部的原位应力信息，始终是该领域的研究焦点与技术难点。当前的研究热点集中于深部钻孔应力测量技术的集成应用与持续创新。未来地应力观测技术将呈现 3 个发展趋势。① 深地化与网络化，即在更深（>5 km）的科学钻探中实施应力测量，例如德国 KTB 超深钻孔在 5 km 深度测得最大水平应力达 200 MPa（Dobson et al.，2016），并在关键构造断裂带构建长期、网络化的应力监测系统（丰成君等，2017）；② 多物理场耦合观测，即集成温度、孔隙流体压力等多类物理参数，实现原位、同步、长期监测；③ 智能化数据解译，结合人工智能与大数据技术，发展智能化的数据解译系统，以提高数据处理效率、结果的客观性与不确定性定量评估能力。

建议开展基于地应力基准站的多学科、多手段地壳应力场综合评估方法研究。

（1）构建深井地应力基准站

在典型构造部位，建立以深井观测为核心的地应力基准站。通过集成水压致裂、综合测井、高精度应变观测等多种技术，开展从浅表至深部的多尺度原位应力探测与连续监测，使其成为关联不同深度与尺度应力探测结果的“锚点”，为构建统一的应力参考系奠定基础。

（2）融合空-天-地形变监测

利用高密度 GPS 连续站网与多源时序 InSAR 卫星影像，捕捉大范围地表形变场的高时空分辨率演化特征。通过数据融合处理，反演地表应力−应变场的动态变化及其空间分布模式，为空-天−地协同观测提供关键的地表约束。

（3）布设密集地震台阵

在基准站区域布设密集地震台阵，精细监测微震活动。通过震源机制解反演与应力张量计算，定量估计目标震源区的主应力方向与应力形因子等参数，特别致力于厘清强震孕育过程中震源区初始应力状态的下限值，为物理预测提供核心参数。

（4）发展四维动力学数值模型

基于基准站获取的原位数据、地表形变场及震源应力信息，构建融合地质结构、岩石力学属性、断层活动性及大地测量约束的四维（空间三维+时间）地壳动力学数值模型。通过多参数耦合数值实验，实现不同方法、不同尺度地应力观测数据的相互验证、解释与融合，系统研究不同构造加载、介质响应及地震成核过程中应力场的演化规律，最终发展出多学科交叉约束的地壳应力场综合定量评估方法。

上述研究的最终目标是形成覆盖浅表至深部、静态背景至动态演化的应力场与形变场全过程立体观测能力。通过多学科手段的联合与相互验证，突破地壳应力场刻画尺度单一、观测手段分立、验证机制薄弱的瓶颈，显著提升应力场评估的可靠性与分辨率，建立地应力探测、观测与研究的基准体系——金钉子，为地壳稳定性评价、地震灾害风险评估及地球动力学研究提供坚实的力学基础支撑。

3.2 应力场分析与建模：从静态反演到多源数据融合的四维动态模型构建

鉴于直接应力观测成本高昂且空间覆盖范围有限，利用地球物理和大地测量数据，通过反演等方法构建区域乃至全球尺度的三维、四维地壳应力场，已成为应力场研究的核心方向。当前的研究热点是多源数据的融合反演。单一数据源仅能反映应力场的某个侧面：地震震源机制解主要提供震源

区的主应力方向与应力结构信息；GPS 和 InSAR 等大地测量数据反映了岩石圈的变形运动学特征（Kreemer et al., 2014; 曹泽斌和刘丽军, 2024）；而钻孔原位测量则提供了米级以下尺度的点位绝对应力状态。将不同来源、尺度、物理意义的数据在统一的物理框架下进行有机融合，是构建高精度、高分辨率应力场模型的关键。常用方法是建立参数化的物理模型，以最小化模型预测与多源观测数据之间的残差为目标进行优化求解，例如利用三维回归反演方法将有限的钻孔应力测量值外推至整个工程区域（刘允芳等, 1993）。

未来的研究方向将聚焦于构建物理驱动、动态、高分辨率的区域应力场模型。①发展基于物理约束的机器学习方法，将数值模拟与机器学习算法相结合，在模型的损失函数中引入物理控制方程作为约束；②实现应力场的实时数据同化，借鉴气象数值预报的思想，建立“背景”应力场模型，并利用不断更新的观测数据进行实时调整与校正；③精细化断层带内部的应力场结构，解析活动断裂带内部高度不均匀的应力分布特征，这依赖于更高分辨率的近断层观测数据和更精细的数值模型（石耀霖等, 2018）。

建议推进岩石圈应力模型研究，聚焦更精细物理过程和更强动力学耦合：①构建完全耦合的“热–化–力”模型，在统一动力学框架内耦合模拟岩石圈热演化、化学组分变化和力学变形；②加强对深部过程的约束，利用重力场、地磁场及地震波各向异性等数据，联合约束地幔流动格局和岩石圈–软流圈耦合机制（曹泽斌和刘丽军, 2024）；③发展基于震后形变和冰后回弹的流变学研究，通过高精度大地测量和精细化数值模拟，研究大地震后地壳形变（沈正康等, 2004）和末次冰期后地壳均衡调整（赵斌等, 2020），反演岩石圈和地幔流变参数。

3.3　地壳应力与地震研究：从应力触发到孕震机理与“机理–数据–知识”协同新范式

将精准的应力场信息与地震孕育发生的物理过程直接关联，是从力学角度探索地震机理的关键，其核心在于理解应力积累如何导致断层从稳定蠕滑或闭锁状态跃迁至不稳定的动态破裂，以期回答“地震为何在此处、此刻发生”这一根本问题。

未来研究将致力于构建“物理驱动的地震预测模型”。①建立“断层系统”数值实验室，发展大规模数值模拟平台，模拟完整的地震循环与复发规律，深入研究断层失稳机理与相互间的应力影响；②聚焦“天然实验室”的强化观测，在地震科学实验场、深部矿区、油气开采区等特殊地点开展密集的多学科综合观测，以检验和修正物理模型；③量化应力状态与地震活动性参数的关系，将高精度应力场数据与地震目录中的统计参数进行关联分析，发展基于物理机制、可随应力场动态演化而更新的地震危险性评估新方法（东京大学地震研究所广报委员会, 2003; 中国地震科学实验场科学设计编写组, 2019）。

（1）建议开展立足动力学原理的地震数值实验与概率预测研究

地震孕育发生的宏观物理过程，主要体现于 3 个核心要素：应力状态决定了驱动破裂的力量；岩体（断层）强度标志着抵抗破坏的极限；而孕震体能量的积累与释放则直接控制了地震的震级。水、热、电、磁、声、光等丰富的地球物理场信息，或作为间接因素影响这 3 个核心要素，或为其伴生现象，这些信息可通过数据同化技术有效利用，为地震预测提供重要约束。基于动力学的地震数值预测路径可概括为：以岩石破裂物理准则为根基，严格遵循系统能量守恒定律，构建能够描述地壳应力积累、断层强度演化及能量释放全过程的物理模型；以真实、多源的地球物理观测数据为边界条件和约束，运用高性能计算平台开展大规模、高精度的数值模拟实验；通过系统性的数值实验生成海量“人工合成地震”样本库，结合实时同化的观测信息，量化特定时空域内发生不同强度地震的概率，最终实现基于物理机制的概率性地震预测（石耀霖等, 2018）。这一研究方向的意义在于其有着坚实的物理内核，并力图从物质运动的根本规律出发，揭示地震孕育发生的物理链条，而非仅仅依赖经验统计关联。数值实验可在可控条件下“观测”地震全过程，洞悉地应力如何突破断层强度、孕震体能量如何转化释放。由此产生的概率预测，其科学基础将更为深厚，物理机制更为透明，对理解地震规律、探索预测途径具有积极的推动作用。

（2）建议开展“应力机理–海量数据–专家知识”协同驱动的地震预测技术研究

传统的地壳应力分析与地震预测方法，主要依赖于简化的物理模型和有限的观测数据，难以捕捉地壳活动的复杂非线性特征，因而预测的时效性和准确性受到很大限制。随着全球地震、地磁、形变

等观测网络的日益密集，地球科学已步入大数据时代。如何有效利用这些海量、多源、异构的数据，从中挖掘出与地震活动相关的深层次规律，成为科学界亟待解决的问题。人工智能，特别是深度学习技术的崛起，为应对这一挑战提供了强有力的工具。AI模型强大的非线性拟合与特征学习能力，使其在处理复杂地球科学数据方面展现出巨大潜力。然而，纯数据驱动的“黑箱”模型往往缺乏物理意义上的可解释性，其预测结果的稳定性和泛化能力也备受质疑。破局之道在于融合创新。亟需开创性地发展“应力机理−海量数据−专家知识”三元深度协同的研究范式：深入融合地壳应力传递、库仑破裂准则、岩石损伤演化等物理规律，为模型构建坚实的物理内核；充分发挥深度学习、图神经网络等技术在挖掘TB级地震目录、形变场、地球物理场时序数据中隐藏的复杂关联与微弱前兆信号的强大作用；将地球物理学家、地质学家长期积累的构造背景认知、孕震模式经验、异常现象判据等宝贵先验知识，内化为模型的结构性约束与逻辑规则。通过将数据驱动的灵活性、物理机理的普适性以及知识驱动的先验约束性有机结合，旨在构建更为鲁棒、精准和可信的下一代地震预测模型。

4 结论

文章系统梳理了地壳应力状态及其对地震孕育发生影响的研究进展，围绕地应力信息获取、应力场分析与建模以及地震应力过程研究3大核心方向，总结了关键方法与成果，并展望了未来发展趋势。

（1）在地应力信息获取方面，观测技术已实现从浅部向深部、从单点向网络化、从单一方法向多源融合的跨越。传统水压致裂、应力解除与钻孔崩落方法持续优化，ASR、DSCA等深井原位测量技术突破高温高压环境限制，推动应力数据向更深部拓展。同时，震源机制解析、剪切波分裂、GPS/InSAR形变监测、测井反演及构造形迹分析等多学科手段，共同构建了多尺度、多维度的地应力观测体系。未来，应着力发展智能化、网络化的深部原位应力观测系统，推动多物理场耦合监测与数据融合，建立以基准站为核心的多尺度验证平台，提升应力数据的深度覆盖与解释能力。

（2）在应力场分析与建模方面，研究方法经历了从解析法、数值模拟到“机理+数据+知识”智能分析范式的演进。数值模拟从二维弹性模型发展为三维黏弹塑性模型，实现了区域4D应力场的动态刻画；智能分析方法融合物理机制与数据驱动，显著提升了复杂地质环境下应力场反演的精度与效率。世界应力图、中国应力图等及相应数据库的持续更新，为应力场建模提供了丰富数据支撑。然而，多源数据融合中的尺度失配、反演非唯一性、初始应力场不确定性等问题仍是当前瓶颈。未来应重点发展物理约束的机器学习方法，构建四维动态应力场模型，推动岩石圈“热−化−力”耦合流变模型的精细化，提升应力场模型的精准性与实用性。

（3）在地震应力过程研究方面，实测应力特征、库仑应力变化模型与物理−数值实验共同揭示了应力积累、触发、释放与调整的全过程规律。地震前后应力值与方向的显著变化、应力“平静−积累−释放”循环特征、库仑应力触发与影区效应等实证研究，深化了对地震成核与触发机制的理解。实验室尺度摩擦实验与大规模数值模拟则为断层失稳、破裂传播与应力降行为提供了物理机制支撑。未来需加强深浅部应力耦合机制研究，发展“应力机理−海量数据−专家知识”协同的地震预测新范式，构建基于动力学原理的地震数值实验与概率预测体系，推动地震预测从经验统计向物理机制驱动转型。

综上，地壳应力研究正迈向多学科交叉、多尺度融合、智能驱动的新阶段。通过持续技术创新、数据积累与模型深化，地应力研究将为揭示地震孕育机制、评估区域地震风险提供更为坚实的科学支撑。

致谢：衷心感谢各位审稿专家在本文修改过程中从论文结构、内容组织、研究方法分类以及语言表达等多个方面提出的宝贵意见和建设性建议，对提升本文质量起到了至关重要的作用，在此致以诚挚的谢意。

References

ANDERSON E M, 1905. The dynamics of faulting[J]. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8(3): 387-402.

BAYART E, SVETLIZKY I, FINEBERG J, 2016. Fracture mechanics determine the lengths of interface ruptures that mediate frictional motion[J]. Nature Physics, 12(2): 166-170.

BIRD P, 1999. Thin-plate and thin-shell finite-element programs for forward dynamic modeling of plate deformation and faulting[J]. Computers & Geosciences, 25(4): 383-394.

BIRD P, 2017. Stress field models from Maxwell stress functions: southern California[J]. Geophysical Journal International, 210(2): 951-963.

BIRGISDÓTTIR Á G, 2023. Coulomb stress changes on the Reykjanes Peninsula from 1998-2022 and earthquake triggering[D]. Reykjavik: University of Iceland: 1-82.

BOTT M H P, 1959. The mechanics of oblique slip faulting[J]. Geological Magazine, 96(2): 109-117.

BRUDY M, ZOBACK M D, FUCHS K, et al., 1997. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: implications for crustal strength[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B8): 18453-18475.

BURRIDGE R, KNOPOFF L, 1967. Model and theoretical seismicity[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 57(3): 341-371.

BYERLEE J, 1978. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 116(4-5): 615-626.

CAI M F, 1993. Review of principles and methods for rock stress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 12(3): 275-283. (in Chinese with English abstract)

CAO Z B, LIU L J, 2024. Driving forces of continental lithospheric deformation[J]. Science China Earth Sciences, 67(12): 3950-3956.

CHEN L W, LU Y Z, GUO R M, et al., 2001. Evolution of 3D tectonic stress field and fault movement in North China[J]. Acta Seismologica Sinica, 23(4): 349-361. (in Chinese with English abstract)

CHEN W Z, WU G J, YANG J P, et al. , 2012. Stability analysis of fractured rock masses in underground engineering: theory and engineering applications[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

CHI S L, CHI Y, DENG T, et al. , 2009. The necessity of building national strain-observation network from the strain abnormality before Wenchuan earthquake[J]. Recent Developments in World Seismology(1): 1-13. (in Chinese with English abstract)

"China Seismic Experimental Site: Scientific Challenges" Editorial Team, 2019. China seismic experimental site: scientific challenges[M]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)

COBLENTZ D D, ZHOU S H, HILLIS R R, et al., 1998. Topography, boundary forces, and the Indo-Australian intraplate stress field[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B1): 919-931.

CUI J W, LIN W R, WANG L J, et al. , 2014. Determination of three-dimensional in situ stresses by anelastic strain recovery in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1)[J]. Tectonophysics, 619-620: 123-132.

CUI X F, XIE F R, 1999. Preliminary research to determine stress districts from focal mechanism solutions in southwest China and its adjacent area[J]. Acta Seismologica Sinica, 21(5): 513-522. (in Chinese with English abstract)

DAHM T, HAINZL S, 2022. A coulomb stress response model for time-dependent earthquake forecasts[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(9): e2022JB024443.

DIAO F Q, WANG R J, XIONG X, et al., 2021. Overlapped postseismic deformation caused by afterslip and viscoelastic relaxation following the 2015 Mw 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(3): e2020JB020378.

DIETERICH J, 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99(B2): 2601-2618.

DOBSON P, TSANG C F, KNEAFSEY T, et al. , 2016. Deep borehole field test research activities at LBNL[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory: LBNL-106044.

DONG P, XIA K W, 2022. Laboratory investigations probing earthquake source process[J]. Chinese Science Bulletin, 67(13): 1378-1389. (in Chinese with English abstract)

DONG P Y, CHENG H H, SHI Y L, et al., 2019. Numerical inversion of regional initial tectonic stress based on Monte Carlo method: a case study of Bayan Har block[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(8): 2858-2870. (in Chinese with English abstract)

ELLIOTT J R, WALTERS R J, WRIGHT T J, 2016. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes[J]. Nature Communications, 7(1): 13844.

FENG C J, ZHANG P, MENG J, et al., 2017. In situ stress measurement at deep boreholes along the Tanlu fault zone and its seismological and geological significance[J]. Progress in Geophysics, 32(3): 946-967. (in Chinese with English abstract)

FENG Y S, XIONG X, SHAN B, et al., 2022. Coulomb stress changes due to the 2021 M_S7.4 Maduo Earthquake and expected seismicity rate changes in the surroundings[J]. Science China Earth Sciences, 65(4): 675-686.

GAO Y, WU J, 2008. Compressive stress field in the crust deduced from shear-wave anisotropy: an example in capital area of China[J]. Chinese Science Bulletin, 53(18): 2840-2848.

GAO Y, SHI Y T, CHEN A G, 2018. Crustal seismic anisotropy and compressive stress in the eastern margin of the Tibetan Plateau and the influence of the M_S8.0 Wenchuan earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 63(19): 1934-1948. (in Chinese with English abstract)

GAY N C, 1975. In-situ stress measurements in Southern Africa[J]. Tectonophysics, 29(1-4): 447-459.

GENG L M, ZHANG G M, SHI Y L, 1993. Preliminary research on the relations between field and source in earthquake preparation[J]. Earthquake Research in China, 9(4): 310-319. (in Chinese with English abstract)

GOETZE C, EVANS B, 1979. Stress and temperature in the bending lithosphere as constrained by experimental rock mechanics[J]. Geophysical Journal International, 59(3): 463-478.

GONG W C, SUN Y Q, QIU X P, et al., 2023. Coulomb stress evolution and seismic hazards along major faults in the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. China Earthquake Engineering Journal, 45(3): 585-597. (in Chinese with English abstract)

GUO Q L, WANG C H, MA H S, et al., 2009. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan M_S8.0 earthquake of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(5): 1395-1401. (in Chinese with English abstract)

HARDEBECK J L, MICHAEL A J, 2004. Stress orientations at intermediate angles to the San Andreas Fault, California[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 109(B11): B11303.

HEIDBACH O, TINGAY M, BARTH A, et al., 2010. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008[J]. Tec-

tonophysics, 482(1-4): 3-15.

HEIDBACH O, RAJABI M, DI GIACOMO D, et al. , 2025. World Stress Map 2025. GFZ Data Services, doi:10.5880/WSM.2025.002.

HEIM A, 1878. Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung, im Anschluss an die geologische Monographie der Tödi-Windgällen-Gruppe[M]. Basel: Benno Schwabe.

HERGERT T, HEIDBACH O, 2011. Geomechanical model of the Marmara Sea region: II. 3-D contemporary background stress field[J]. Geophysical Journal International, 185(3): 1090-1102.

HU X P, ZANG A, HEIDBACH O, et al., 2017. Crustal stress pattern in China and its adjacent areas[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 149: 20-28.

HU X P, 2018. Crustal stress pattern across different scales in China[D]. Hefei: University of science and technology of China. (in Chinese with English abstract)

HUANG L Y, ZHANG B, QU W L, et al., 2017. The co-seismic effects of 2010 Maule earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(3): 972-984. (in Chinese with English abstract)

HUANG Y, MENG G J, CHENG X, et al., 2023. Present-day crustal deformation in the southeastern Tibetan Plateau: insights from three-dimensional finite-element modeling[J]. Tectonophysics, 863: 229983.

JIA K, ZHOU S Y, 2018. Triggering relationship in strong earthquake sequence around the Bayan Har block and its tectonic significance based on Coulomb stress changes and seismicity[J]. Acta Seismologica Sinica, 40(3): 291-303. (in Chinese with English abstract)

JOHNSTON M J S, BORCHERDT R D, LINDE A T, et al., 2006. Continuous borehole strain and pore pressure in the near field of the 28 September 2004 M 6.0 Parkfield, California, earthquake: implications for nucleation, fault response, earthquake prediction, and tremor[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(4B): S56-S72.

KARL T, RICHART JR F E, 1952. Stresses in rock about cavities[J]. Géotechnique, 3(2): 57-90.

KING G C P, STEIN R S, LIN J, 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(3): 935-953.

KONG W L, HUANG L Y, YAO R, et al., 2021. Review of stress field studies in Sichuan-Yunnan region[J]. Progress in Geophysics, 36(5): 1853-1864. (in Chinese with English abstract)

KREEMER C, BLEWITT G, KLEIN E C, 2014. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15(10): 3849-3889.

LAPUSTA N, RICE J R, BEN-ZION Y, et al., 2000. Elastodynamic analysis for slow tectonic loading with spontaneous rupture episodes on faults with rate- and state-dependent friction[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B10): 23765-23789.

LEE S G, 1947. Fundamentals and methods of geomechanics[M]. Shanghai: Zhonghua Book Company. (in Chinese)

LEE S G, 1977. On earthquakes[M]. Beijing: Geological Press: 1-173. (in Chinese)

LEI Q H, LATHAM J P, TSANG C F, 2017. The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks[J]. Computers and Geotechnics, 85: 151-176.

LI F, ZHOU J X, WANG J A, 2019. Back-analysis and reconstruction method of in-situ stress field based on limited sample data[J]. Journal of China Coal Society, 44(5): 1421-1431. (in Chinese with English abstract)

LI F Q, 1983. Application of in-situ stress measurement in earthquake geology research[J]. North China Earthquake Sciences, 1(2): 71-76. (in Chinese)

LI F Q, LIU G X, 1986. The present state of stress in China and related problems[J]. Acta Seismologica Sinica, 8(2): 156-171. (in Chinese with English abstract)

LI H T, QI Q X, DU W S, et al., 2024. Digital rock mechanics solutions for underground engineering problems such as coal mining[J]. Coal Science and Technology, 52(9): 150-161. (in Chinese with English abstract)

LI X R, HERGERT T, HENK A, et al., 2022. Contemporary background stress field in the eastern Tibetan Plateau: insights from 3D geomechanical modeling[J]. Tectonophysics, 822: 229177.

LI Y H, SONG S W, HAO M, et al., 2023. Present-day crustal deformation across the Daliang Shan, southeastern Tibetan Plateau constrained by a dense GPS network[J]. Geophysical Journal International, 232(3): 1619-1638.

LI Y J, LIU M, LI Y H, et al., 2019. Active crustal deformation in southeastern Tibetan Plateau: the kinematics and dynamics[J]. Earth and Planetary Science Letters, 523: 115708.

LI Y J, SHI F Q, ZHANG H, et al., 2020. Coulomb stress change on active faults in Sichuan-Yunnan region and its implications for seismic hazard[J]. Seismology and Geology, 42(2): 526-546. (in Chinese with English abstract)

LI Y J, HUANG L Y, DING R, et al., 2021. Coulomb stress changes associated with the *M*7.3 Maduo earthquake and implications for seismic hazards[J]. Natural Hazards Research, 1(2): 95-101

LIAO C T, ZHANG C S, WU M L, et al., 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the Ms 8.1 Kunlun earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 30(20): SDE3.

LIEURANCE R S, 1933. Stresses in foundation at Boulder (Hoover) Dam[R]. Denver: U. S. Bureau of Reclamation Technical Memorandum: 346.

LIN W, SAKAI Y, KAMIYA N, et al. , 2024. A review of the anelastic strain recovery (ASR) technique for in-situ stress measurements: a suggested test protocol and further challenges[C]//58th U. S. rock mechanics/geomechanics symposium. Golden: ARMA: ARMA-2024-0161.

LIU C J, JI L Y, ZHU L Y, et al., 2024. Kilometer-resolution three-dimensional crustal deformation of Tibetan Plateau from InSAR and GNSS[J]. Science China Earth Sciences, 67(6): 1818-1835.

LIU H Q, LI Y J, CHEN L W, 2023. Mechanisms of the different senses of fault slip in the north and south segments of the Huya Fault zone, eastern Tibetan Plateau: constraints from numerical modeling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(7): 2757-2771. (in Chinese with English abstract)

LIU Y F, GONG B X, LUO C W, et al., 1993. Geostress survey in deep borehole and analysis of geostress field and its application[J]. Journal of

Yangtze River Scientific Research Institute, 10(2): 41-49. (in Chinese with English abstract)

LUO G, LIU M, 2018. Stressing rates and seismicity on the major faults in eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(12): 10968-10986.

LUTTRELL K, SANDWELL D, 2012. Constraints on 3-D stress in the crust from support of mid-ocean ridge topography[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117(B4): B04402.

MA J, SHERMAN 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.

MA S L, JIANG H K, HU X Y, et al., 2004. A discussion on mechanism for seismic quiescence before large earthquakes based on experimental results of acoustic emission[J]. Seismology and Geology, 26(3): 426-435. (in Chinese with English abstract)

MA X Y, 2004. Analytical tectonics[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

MENG Q, GAO K, CHEN Q Z, et al., 2021. Seismogenic, coseismic and postseismic deformation and stress evolution of the 2008 Wenchuan earthquake: numerical simulation analysis[J]. Journal of Geomechanics, 27(4): 614-627. (in Chinese with English abstract)

MENG W, CHEN Q C, ZHAO Z, et al., 2015. Characteristics and implications of the stress state in the Longmen Shan fault zone, eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 656: 1-19.

MENG W, TIAN T, SUN D S, et al., 2022. Research on stress state in deep shale reservoirs based on in-situ stress measurement and rheological model[J]. Journal of Geomechanics, 28(4): 537-549. (in Chinese with English abstract)

MENG W, LIN W R, CHEN Q C, et al., 2023. Spatial and temporal stress variations before and after the 2008 Wenchuan M_W 7.9 earthquake and its implications: a study based on borehole stress data[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 97(1): 226-242.

MIAO M, ZHU S B, 2012. A study of the impact of static Coulomb stress changes of megathrust earthquakes along subduction zone on the following aftershocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(9): 2982-2993. (in Chinese with English abstract)

MILDON Z K, ROBERTS G P, FAURE WALKER J P, et al., 2019. Coulomb pre-stress and fault bends are ignored yet vital factors for earthquake triggering and hazard[J]. Nature Communications, 10(1): 2744.

MOEIN M J A, LANGENBRUCH C, SCHULTZ R, et al., 2023. The physical mechanisms of induced earthquakes[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 4(12): 847-863.

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[J]. Nature Communications, 11(1): 3952.

NIU P F, HAN Z J, GUO P, et al., 2025. The coulomb stress triggering effect of 2016 M_W5.9 and 2022 M_W6.7 earthquakes in Menyuan, Qinghai and their influence on the surrounding seismogenic faults[J]. Seismology and Geology, 47(1): 325-344. (in Chinese with English abstract)

OTSUKI K, 1985. Plate tectonics of eastern Eurasia in the light of fault systems[J]. Tohoku University, Science Report 2nd Series (Geology), 55(2): 141-251.

PANG Y J, WU Y Q, LI Y J, et al., 2023. The mechanism of the present-day crustal deformation in southeast Tibet: from numerical modelling and geodetic observations[J]. Geophysical Journal International, 235(1): 12-23.

Public Relations Committee, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2003. *Earthquake Research Institute Annual Report (2003–2004)* [R]. Tokyo: Earthquake Research Institute, the University of Tokyo. (in Japanese)

RAJABI M, TINGAY M, KING R, et al., 2017. Present-day stress orientation in the Clarence-Moreton Basin of New South Wales, Australia: a new high density dataset reveals local stress rotations[J]. Basin Research, 29(S1): 622-640.

SHEN Z K, WAN Y G, GAN W J, et al., 2003. Viscoelastic triggering among large earthquakes along the east Kunlun fault system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 46(6): 786-795. (in Chinese with English abstract)

SHEN Z K, WAN Y G, GAN W J, et al., 2004. Crustal stress evolution of the last 700 years in North China and earthquake occurrence[J]. Earthquake Research in China, 20(3): 211-228. (in Chinese with English abstract)

SHI F Q, SU L N, YANG C Y, 2024-03-26. Earthquake triggering probability calculation method and system based on geological parameters and coulomb stress: CN, 117761777A[P]. (in Chinese)

SHI Y L, ASSUMPCAO M, 2000. Genetic algorithm-finite element inversion of stress field of Brazil[J]. Chinese Journal of Geophysics, 43(2): 166-174. (in Chinese with English abstract)

SHI Y L, CAO J L, 2010. Some aspects in static stress change calculation: case study on Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(1): 102-110. (in Chinese with English abstract)

SHI Y L, SUN Y Q, LUO G, et al., 2018. Roadmap for earthquake numerical forecasting in China: reflection on the tenth anniversary of Wenchuan earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 63(19): 1865-1881. (in Chinese with English abstract)

SIBSON R H, 1992. Implications of fault-valve behaviour for rupture nucleation and recurrence[J]. Tectonophysics, 211(1-4): 283-293.

STEACY S, GOMBERG J, COCCO M, 2005. Introduction to special section: stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110(B5): B05S01.

STEIN R S, BARKA A A, DIETERICH J H, 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering[J]. Geophysical Journal International, 128(3): 594-604.

SU P Z, LUO Y, ZHAO L, 2025. Three-dimensional crustal stress model construction for the Sichuan-Yunnan region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 68(5): 1730-1750. (in Chinese with English abstract)

SUN D S, SONE H, LIN W R, et al., 2017. Stress state measured at～ 7 km depth in the Tarim Basin, NW China[J]. Scientific Reports, 7(1): 4503.

SUN D S, PANG F, LI A W, et al., 2020. In-situ stress profile prediction

based on the rheological model: a case study of Well AY-1 in the Qianbei area of Guizhou Province[J]. Natural Gas Industry, 40(3): 58-64. (in Chinese with English abstract)

SUN Y Q, LUO G, 2018. Spatial-temporal migration of earthquakes in the northeastern Tibetan Plateau: insights from a finite element model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(6): 2246-2264. (in Chinese with English abstract)

TAN C X, ZHANG P, LU S L, et al., 2019. Significance and role of in-situ crustal stress measuring and real-time monitoring in earthquake prediction research[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 866-876. (in Chinese with English abstract)

TIAN J H, GAO Y, 2024. Research actuality of crustal stress field in the Sichuan-Yunnan region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(9): 3436-3453. (in Chinese with English abstract)

TIAN Z F, QI Y N, 1999. Seismic prediction using crustal stress and geodetic deformation observations[J]. Overview of Disaster Prevention(1): 44-50. (in Chinese)

UCHIDA N, BÜRGMANN R, 2021. A decade of lessons learned from the 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. Reviews of Geophysics, 59(2): e2020RG000713.

UCHIDE T, SHIINA T, IMANISHI K, 2022. Stress map of Japan: detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(6): e2022JB024036.

WAN Y G, SHEN Z K, ZENG Y H, et al., 2007. Evolution of cumulative coulomb failure stress in northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its effect on large earthquake occurrence[J]. Acta Seismologica Sinica, 29(2): 115-129. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, SONG C K, GUO Q L, et al., 2014. Stress build-up in the shallow crust before the Lushan Earthquake based on the in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(1): 102-114. (in Chinese with English abstract)

WANG H N, ZHANG S H, MA X D, 2024. Inversion of in-situ stress profile based on fracture hydraulic conductivity: a case study of the ultra-deep scientific drilling borehole KTB[C]//2024 Annual meeting of Chinese geoscience union (CGU). Xiamen: Chinese Geophysical Society: 67-70. (in Chinese)

WANG M, SHEN Z K, 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2): e2019JB018774.

WANG R, HE G Q, YIN Y Q, et al., 1980. A mathematical simulation for the pattern of seismic transference in North China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2(1): 32-42. (in Chinese with English abstract)

WANG S J, YAN D P, ZHOU Z C, et al, 2025. Tectonic Characteristics and Evolution of the Qiyueshan Fault in the Xuefengshan Foreland Fold-and-Thrust Belt: Insights from Discrete Element Numerical Simulations[J]. Geoscience, 39(1): 18-30.

WANG X S, LÜ J, XIE Z J, et al., 2015. Focal mechanisms and tectonic stress field in the North-South Seismic Belt of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(11): 4149-4162. (in Chinese with English abstract)

WANG Z, GOETZ J, BRENNING A, 2022. Transfer learning for landslide susceptibility modelling using domain adaptation and case-based reasoning[J]. Geoscientific Model Development Discussions, 15: 8765-8784.

WANG Z Y, YU S, LI S J, et al., 2023. An improved algorithm for regression inversion analysis of ground stress field and its applications[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 42(4): 397-403. (in Chinese with English abstract)

WU B N, BARBOT S, 2025. Evolution of the real area of contact during laboratory earthquakes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 122(23): e2410496122.

WU M L, ZHANG Y Q, LIAO C T, et al., 2010. Preliminary results of in-situ stress measurements along the Longmenshan fault belt after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 84(9): 1292-1299. (in Chinese with English abstract)

WU M L, ZHANG C Y, FAN T Y, 2016. Stress state of the Baoxing segment of the southwestern Longmenshan Fault Zone before and after the M_S 7.0 Lushan earthquake[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 121: 9-19.

WU Y Q, ZHENG Z J, NIE J L, et al., 2022. High-precision vertical movement and three-dimensional deformation pattern of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(4): e2021JB023202.

XIE F R, ZHU J Z, LIANG H Q, et al., 1993. Basic characteristics of recent tectonic stress field in Southwest China[J]. Acta Seismologica Sinica, 15(4): 407-417. (in Chinese with English abstract)

XIE F R, CUI X F, ZHAO J T, 2003. Analysis of global tectonic stress field[J]. Earth Science Frontiers, 10(S1): 22-30. (in Chinese with English abstract)

XIE F R, 2006. Introduction of the program "fundamental database of the environment of crustal stress in Chinese mainland"[J]. Recent Developments in World Seismology, 27(9): 20-25. (in Chinese with English abstract)

XIE F R, CUI X F, 2015. Recent tectonic stress map of China and its adjacent areas[M]. Beijing: SinoMaps Press. (in Chinese)

XU S Q, FUKUYAMA E, YAMASHITA F, et al., 2023. Fault strength and rupture process controlled by fault surface topography[J]. Nature Geoscience, 16(1): 94-100.

XU Z H, 1985. Mean stress field in Tangshan aftershock area obtained from focal mechanism data by fitting slip directions[J]. Acta Seismologica Sinica, 7(4): 349-362. (in Chinese with English abstract)

XU Z H, WANG S Y, HUANG Y R, et al., 1987. Directions of mean stress axes in southwestern China deduced from microearthquake data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 30(5): 476-486. (in Chinese with English abstract)

YAN C, XU L S, ZHANG X, et al., 2015. An inversion technique for mechanisms of local and regional earthquakes: generalized polarity and amplitude technique (Ⅱ): an application to real seismic events[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(10): 3601-3614. (in Chinese with English abstract)

YANG S X, CHEN L W, XIE F R, 2003. A study of regression analysis and numerical simulation on modern tec-stress field in China mainland[J]. Rock and Soil Mechanics, 24(S2): 357-360. (in Chinese with English abstract)

YANG S X, YAO R, CUI X F, et al., 2012a. Analysis of the characteristics of

measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 4207-4217. (in Chinese with English abstract)

YANG S X, LU Y Z, CHEN L W, et al., 2012b. The mechanism of long-distance jumping and the migration of main active areas for strong earthquakes occurred in the Chinese continent[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(1): 105-116. (in Chinese with English abstract)

YANG S X, HUANG L Y, XIE F R, et al., 2014. Quantitative analysis of the shallow crustal tectonic stress field in China mainland based on in situ stress data[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 85: 154-162.

YANG W Z, HAUKSSON E, 2013. The tectonic crustal stress field and style of faulting along the Pacific North America Plate boundary in Southern California[J]. Geophysical Journal International, 194(1): 100-117.

YAO R, YANG S X, XIE F R, et al., 2017. Analysis on magnitude characteristics of the shallow crustal tectonic stress field in Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent region based on in-situ stress data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(6): 2147-2158. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H, WU Z L, ZHANG D N, et al., 2009. Virtual ChuanDian: a parallel numerical modeling of Sichuan-Yunnan regional strong earthquake activities: model construction and parallel simulation[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(10): 1585-1598.

ZHANG J S, JU W, LI D S, et al. , 2025. The present-day in-situ stress field in Yanchang Formation Chang 8 reservoir of Jiyuan region: characteristics and influencing factors[J/OL]. Geological Bulletin of China, https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250320. (in Chinese with English abstract)

ZHANG K H, DONG P, XU R, et al., 2023. Experimental study of the effect of dynamic triggering on the meta-instable stage of faults before earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(12): 4973-4986. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P, QU Y M, GUO C B, et al., 2017. Analysis of in-situ stress measurement and real-time monitoring results in Nyching of Tibetan Plateau and its response to Nepal M_S8.1 earthquake[J]. Geoscience, 31(5): 900-910. (in Chinese with English abstract)

ZHAO B, WANG M, HU Y, et al., 2020. Rock rheology and observations of postseismic deformation following strong earthquakes in China and its surrounding region[J]. Earthquake Research in China, 36(4): 806-816. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y J, ZHANG G H, ZHANG Y F, et al., 2018. Two-dimensional whole cycle simulation of spontaneous rupture of the 2008 Wenchuan earthquake using the continuous-discrete element method[J]. Seismology and Geology, 40(1): 12-26. (in Chinese with English abstract)

ZHOU H, YANG X L, XIANG T B, et al. , 2025-07-22. Layered surrounding rock three-dimensional crustal stress field inversion intelligent analysis system and method: CN, 120354762A[P]. (in Chinese)

ZHOU J, CHEN Y X, CHEN H, et al., 2023. Hybridizing five neural-metaheuristic paradigms to predict the pillar stress in bord and pillar method[J]. Frontiers in Public Health, 11: 1119580.

ZHOU L S, HU C B, CAI Y E, et al., 2020. Analysis of in-situ stress distribution of inclusion-stratum system under far-field differential tectonic stress[J]. Progress in Geophysics, 35(2): 519-529. (in Chinese with English abstract)

ZHOU W, YAN Z H, WANG S Z, et al. , 2007. Evaluation methods and applications of present-day stress field in oil and gas reservoirs[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

ZHOU X P, MA W, YANG L H, et al., 2018. Experimental study of stick-slip failure processes and effect of physical properties on stick-slip behavior[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(1): 653-673.

ZHU A Y, ZHANG D N, JIANG C S, 2016. Numerical simulation of the segmentation of the stress state of the Anninghe-Zemuhe-Xiaojiang faults[J]. Science China Earth Sciences, 59(2): 384-396.

ZHU S B, MIAO M, 2016. On the study of earthquake triggering: solution to paradox that Coulomb stresses increase with frictional coefficients[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(1): 169-173. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, BARTON C A, BRUDY M, et al., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1049-1076.

ZOBACK M D, 2010. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

ZOBACK M L, 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B8): 11703-11728.

附中文参考文献

蔡美峰，1993. 地应力测量原理和方法的评述[J]. 岩石力学与工程学报，12(3)：275-283.

曹泽斌，刘丽军，2024. 大陆岩石圈形变驱动力[J]. 中国科学：地球科学，54(12)：3999-4004.

陈连旺，陆远忠，郭若眉，等，2001. 华北地区断层运动与三维构造应力场的演化[J]. 地震学报，23(4)：349-361.

陈卫忠，伍国军，杨建平，等，2012. 裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用[M]. 北京：科学出版社.

池顺良，池毅，邓涛，等，2009. 从 5.12 汶川地震前后分量应变仪观测到的应变异常看建设密集应变观测网络的必要性[J]. 国际地震动态(1)：1-13.

崔效锋，谢富仁，1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报，21(5)：513-522.

東京大学地震研究所広報委員会，2003. 東京大学地震研究所要覧(2003—2004)[R]. 東京：東京大学地震研究所.

董培育，程惠红，石耀霖，等，2019. 基于 Monte Carlo 方法数值反演区域初始构造应力场：以巴颜喀拉块体为例[J]. 地球物理学报，62(8)：2858-2870.

董鹏，夏开文，2022. 实验室研究揭示地震震源过程[J]. 科学通报，67(13)：1378-1389.

丰成君，张鹏，孟静，等，2017. 郯庐断裂带及邻区深孔地应力测量与地震地质意义[J]. 地球物理学进展，32(3)：946-967.

冯雅杉，熊熊，单斌，等，2022. 2021 年玛多 M_S7.4 地震导致的周边地区库仑应力加载及地震活动性变化[J]. 中国科学：地球科学，52(6)：1100-1112.

高原，吴晶，2008. 利用剪切波各向异性推断地壳主压应力场：以首都圈地区为例[J]. 科学通报，53(23)：2933-2939.

高原, 石玉涛, 陈安国, 2018. 青藏高原东缘地震各向异性、应力及汶川地震影响[J]. 科学通报, 63(19): 1934-1948.

耿鲁明, 张国民, 石耀霖, 1993. 地震孕育发生的场源关系初步研究[J]. 中国地震, 9(4): 310-319.

龚炜程, 孙云强, 邱鑫鹏, 等, 2023. 青藏高原东北缘主要断裂带的库仑应力演化及其强震危险性[J]. 地震工程学报, 45(3): 585-597.

郭啟良, 王成虎, 马洪生, 等, 2009. 汶川 M_S8.0 级大震前后的水压致裂原地应力测量[J]. 地球物理学报, 52(5): 1395-1401.

胡幸平, 2018. 中国地壳应力模式跨尺度研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学.

黄禄渊, 张贝, 瞿武林, 等, 2017. 2010 智利 Maule 特大地震的同震效应[J]. 地球物理学报, 60(3): 972-984.

贾科, 周仕勇, 2018. 基于库仑应力改变和地震活动性研究巴颜喀拉块体周缘强震序列的触发关系及其构造意义[J]. 地震学报, 40(3): 291-303.

孔维林, 黄禄渊, 姚瑞, 等, 2021. 川滇地区应力场研究进展[J]. 地球物理学进展, 36(5): 1853-1864.

李方全, 1983. 原地应力测量在地震地质研究工作中的应用[J]. 华北地震科学, 1(2): 71-76.

李方全, 刘光勋, 1986. 我国现今地应力状态及有关问题[J]. 地震学报, 8(2): 156-171.

李飞, 周家兴, 王金安, 2019. 基于稀少样本数据的地应力场反演重构方法[J]. 煤炭学报, 44(5): 1421-1431.

李海涛, 齐庆新, 杜伟升, 等, 2024. 煤炭开采等地下工程问题的数字岩石力学解决方案[J]. 煤炭科学技术, 52(9): 150-161.

李四光, 1947. 地质力学之基础与方法[M]. 上海: 中华书局.

李四光, 1977. 论地震[M]. 北京: 地质出版社: 1-173.

李玉江, 石富强, 张辉, 等, 2020. 川滇地区主要断裂带上的库仑应力变化及其对地震危险性的指示[J]. 地震地质, 42(2): 526-546.

刘传金, 季灵运, 朱良玉, 等, 2024. 联合 InSAR 和 GNSS 构建青藏高原千米分辨率三维地壳形变场[J]. 中国科学: 地球科学, 54(6): 1845-1862.

刘皓晴, 李玉江, 陈连旺, 2023. 青藏高原东缘虎牙断裂带南北段运动方式差异性机理: 来自数值模拟的约束[J]. 地球物理学报, 66(7): 2757-2771.

刘允芳, 龚壁新, 罗超文, 等, 1993. 深钻孔地应力测量和地应力场分析及其应用[J]. 长江科学院院报, 10(2): 41-49.

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.

马胜利, 蒋海昆, 扈小燕, 等, 2004. 基于声发射实验结果讨论大震前地震活动平静现象的机制[J]. 地震地质, 26(3): 426-435.

马杏垣, 2004. 解析构造学[M]. 北京: 地质出版社.

孟秋, 高宽, 陈启志, 等, 2021. 2008 年汶川大地震孕震、同震及震后变形和应力演化全过程的数值模拟[J]. 地质力学学报, 27(4): 614-627.

孟文, 田涛, 孙东生, 等, 2022. 基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究[J]. 地质力学学报, 28(4): 537-549.

缪淼, 朱守彪, 2012. 俯冲带上特大地震静态库仑应力变化对后续余震触发效果的研究[J]. 地球物理学报, 55(9): 2982-2993.

牛鹏飞, 韩竹军, 郭鹏, 等, 2025. 青海门源 2016 年 M_W5.9 和 2022 年 M_W6.7 2 次地震的库仑应力触发作用及其对周边发震断裂的影响[J]. 地震地质, 47(1): 325-344.

沈正康, 万永革, 甘卫军, 等, 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究[J]. 地球物理学报, 46(6): 786-795.

沈正康, 万永革, 甘卫军, 等, 2004. 华北地区 700 年来地壳应力场演化与地震的关系研究[J]. 中国地震, 20(3): 211-228.

石富强, 苏利娜, 杨晨艺, 2024-03-26. 基于地质参数和库仑应力的地震触发概率计算方法及系统: 中国, 117761777A[P].

石耀霖, ASSUMPCAO M, 2000. 巴西构造应力场的遗传有限单元法反演[J]. 地球物理学报, 43(2): 166-174.

石耀霖, 曹建玲, 2010. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论: 以汶川地震为例[J]. 地球物理学报, 53(1): 102-110.

石耀霖, 孙云强, 罗纲, 等, 2018. 关于我国地震数值预报路线图的设想: 汶川地震十周年反思[J]. 科学通报, 63(19): 1865-1881.

苏培臻, 罗艳, 赵里, 2025. 川滇地区地壳三维应力场模型的构建[J]. 地球物理学报, 68(5): 1730-1750.

孙东生, 庞飞, 李阿伟, 等, 2020. 基于流变模型的地应力剖面预测: 以贵州黔北地区安页 1 井为例[J]. 天然气工业, 40(3): 58-64.

孙云强, 罗纲, 2018. 青藏高原东北缘地震时空迁移的有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, 61(6): 2246-2264.

谭成轩, 张鹏, 路士龙, 等, 2019. 原位地应力测量与实时监测在地震预报研究中的作用和意义[J]. 地质力学学报, 25(5): 866-876.

田建慧, 高原, 2024. 川滇地区地壳应力场研究现状[J]. 地球物理学报, 67(9): 3436-3453.

田中丰, 祁英男, 1999. 根据地壳应力, 地形变观测结果预测大地震的发生[J]. 地震科技情报(1): 44-50.

万永革, 沈正康, 曾跃华, 等, 2007. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响[J]. 地震学报, 29(2): 115-129.

王成虎, 宋成科, 郭启良, 等, 2014. 利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累[J]. 地球物理学报, 57(1): 102-114.

王浩男, 张诗淮, 马晓冬, 2024. 基于裂缝导水性的地应力剖面反演: 以超深科学钻孔 KTB 为例[C]//2024 年中国地球科学联合学术年会. 厦门: 中国地球物理学会: 67-70.

王仁, 何国琦, 殷有泉, 等, 1980. 华北地区地震迁移规律的数学模拟[J]. 地震学报, 2(1): 32-42.

王帅杰, 颜丹平, 周志成, 等, 2025. 基于离散元数值模拟的雪峰山前陆褶皱冲断带齐岳山分界断裂性质与形成过程[J]. 现代地质, 39(1): 18-30.

王晓山, 吕坚, 谢祖军, 等, 2015. 南北地震带震源机制解与构造应力场特征[J]. 地球物理学报, 58(11): 4149-4162.

王志云, 于申, 李守巨, 等, 2023. 地应力场反演分析的改进算法及其工程应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 42(4): 397-403.

吴满路, 张岳桥, 廖椿庭, 等, 2010. 汶川地震后沿龙门山裂断带原地应力测量初步结果[J]. 地质学报, 84(9): 1292-1299.

谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等, 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征[J]. 地震学报, 15(4): 407-417.

谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 2003. 全球应力场与构造分析[J]. 地学前缘, 10(S1): 22-30.

谢富仁, 2006. “中国大陆地壳应力环境基础数据库”项目成果介绍

[J]. 国际地震动态, 27(9): 20-25.

谢富仁, 崔效锋, 2015. 中国及邻区现代构造应力场图[M]. 北京: 中国地图出版社.

许忠淮, 1985. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场[J]. 地震学报, 7(4): 349-362.

许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等, 1987. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征[J]. 地球物理学报, 30(5): 476-486.

严川, 许力生, 张旭, 等, 2015. 一种地方与区域地震震源机制反演技术: 广义极性振幅技术(二): 对实际震例的应用[J]. 地球物理学报, 58(10): 3601-3614.

杨树新, 陈连旺, 谢富仁, 2003. 中国大陆现今构造应力场的回归分析研究[J]. 岩土力学, 24(S2): 357-360.

杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 等, 2012a. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J]. 地球物理学报, 55(12): 4207-4217.

杨树新, 陆远忠, 陈连旺, 等, 2012b. 用单元降刚法探索中国大陆强震远距离跳迁及主体活动区域转移[J]. 地球物理学报, 55(1): 105-116.

姚瑞, 杨树新, 谢富仁, 等, 2017. 青藏高原及周缘地壳浅层构造应力场量值特征分析[J]. 地球物理学报, 60(6): 2147-2158.

张怀, 吴忠良, 张东宁, 等, 2009. 虚拟川滇: 基于千万网格并行有限元计算的区域强震演化过程数值模型设计和构建[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(3): 260-270.

张皎生, 鞠玮, 李德生, 等, 2025. 姬塬地区延长组长 8 储层现今地应力特征及其影响因素[J/OL]. 地质通报, [2025-03-19]. https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250320.

张康华, 董鹏, 徐冉, 等, 2023. 动态触发对断层亚失稳过程影响的实验研究[J]. 地球物理学报, 66(12): 4973-4986.

张鹏, 曲亚明, 郭长宝, 等, 2017. 西藏林芝地应力测量监测与尼泊尔 M_S8.1 级强震远场响应分析[J]. 现代地质, 31(5): 900-910.

赵斌, 王敏, 胡岩, 等, 2020. 中国及邻域强震震后变形监测及岩石流变性质研究[J]. 中国地震, 36(4): 806-816.

赵由佳, 张国宏, 张迎峰, 等, 2018. 基于连续-离散单元法的汶川地震动力学二维自发破裂全周期模拟研究[J]. 地震地质, 40(1): 12-26.

中国地震科学实验场科学设计编写组, 2019. 中国地震科学实验场科学设计[M]. 北京: 中国标准出版社.

周华, 杨小龙, 向天兵, 等, 2025. 一种层状围岩三维地应力场反演智能分析系统及方法: 120354762A[P].2025-07-22.

周龙寿, 胡才博, 蔡永恩, 等, 2020. 远场差异构造应力作用下包体-地层地应力分析[J]. 地球物理学进展, 35(2): 519-529.

周文, 闫长辉, 王世泽, 等, 2007. 油气藏现今地应力场评价方法及应用[M]. 北京: 地质出版社.

祝爱玉, 张东宁, 蒋长胜, 2015. 安宁河-则木河-小江断裂带应力状态分段特征的数值模拟研究[J]. 中国科学: 地球科学, 45(12): 1839-1852.

朱守彪, 缪淼, 2016. 地震触发研究中库仑应力随摩擦系数增加而增大的矛盾及其解决[J]. 地球物理学报, 59(1): 169-173.