

川西南金石地区筇竹寺组岩石力学及地应力场模拟

白育玮, 王 恒

成都理工大学能源学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月30日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月15日

摘 要

中国南方海相页岩气资源潜力巨大, 但川西南地区下寒武统筇竹寺组页岩普遍经历多期构造运动, 导致储层非均质性强、地应力场复杂, 制约了页岩气的高效开发。地应力是控制页岩储层裂缝发育、井壁稳定及水力压裂效果的关键因素。现有研究多集中于单一井点的地应力测量或简化模型的数值模拟, 缺乏基于高精度三维地质模型与多期构造约束的应力场协同演化研究。本文以川西南金石地区筇竹寺组为研究对象, 通过系统的岩石力学测试、构造年代学分析, 结合三维地质建模与有限元数值模拟技术, 旨在: 1) 查明研究区页岩岩石力学参数特征; 2) 厘定关键构造期次及古今地应力大小与方向; 3) 建立三维地质力学模型, 模拟多期构造应力场演化过程; 4) 阐明地应力场分布规律及其对页岩气产能的控制作用。研究成果可为该区页岩气勘探开发的工程决策提供科学支撑。

关键词

金石地区, 筇竹寺组, 岩石力学, 地应力场

Rock Mechanics and Geostress Field Simulation of the Qiongzhu Temple Formation in the Jinshi Area of Southwest Sichuan

Yuwei Bai, Heng Wang

College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: March 30, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

The potential for marine shale gas resources in southern China is enormous, but the Xiangzhushi Formation shale in the southwestern Sichuan region has generally experienced multiple tectonic events, resulting in strong reservoir heterogeneity and a complex stress field, which constrain the efficient development of shale gas. Geostress is a key factor controlling fracture development in shale reservoirs, wellbore stability, and hydraulic fracturing efficiency. Existing studies mostly focus on geostress measurements at a single well or numerical simulations based on simplified models, lacking research on the coordinated evolution of stress fields based on high-precision three-dimensional geological models and multiple tectonic constraints. This study takes the Xiangzhushi Formation in the Jinshi area of southwestern Sichuan as the research object. Through systematic rock mechanics testing and tectonic chronology analysis, combined with three-dimensional geological modeling and finite element numerical simulation techniques, the objectives are to: 1) identify the characteristics of rock mechanical parameters in the study area; 2) determine key tectonic periods and the magnitude and direction of paleo and present-day geostress; 3) establish a three-dimensional geomechanical model to simulate the evolution of multi-phase tectonic stress fields; 4) clarify the distribution pattern of geostress fields and their controlling effect on shale gas productivity. The research results can provide scientific support for engineering decision-making in shale gas exploration and development in the area.

Keywords

Jinshi Area, Xiangzhushi Formation, Rock Mechanics, Geostress Field

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

页岩气作为一种清洁、高效的非常规天然气资源,已成为全球能源勘探开发的热点领域,其中中国南方海相页岩气资源潜力尤为巨大,是保障国家能源安全的重要战略接替资源。下寒武统筇竹寺组是川西南地区页岩气勘探开发的核心目标层位,广泛发育一套浅海-陆棚相黑色页岩、粉砂质页岩沉积,具备良好的页岩气成藏条件[1]。然而,受四川盆地多期构造运动叠加影响,川西南金石地区筇竹寺组页岩经历了印支期、燕山期、喜马拉雅期多期强烈构造改造,导致储层岩性、矿物组成及微观结构呈现显著的非均质性,地应力场分布复杂且时空演化特征不明,严重制约了页岩气井的井壁稳定控制、水力压裂优化及产能提升,成为该区页岩气高效开发的关键瓶颈[2] [3]。

地应力是控制页岩储层裂缝发育、岩石力学性质演化及水力压裂效果的核心因素,其大小、方向及分布规律直接决定了页岩气储层的改造潜力与开发效率。目前,国内外学者针对页岩气储层地应力及岩石力学特征开展了大量研究,主要集中于单一井点的室内岩石力学测试、现场地应力测量,或基于简化地质模型的地应力场数值模拟,取得了一系列阶段性成果[4] [5]。但针对川西南金石地区筇竹寺组,现有研究仍存在明显不足:一是缺乏对研究区多期构造运动约束下,地应力场时空演化过程的系统研究,难以揭示古今地应力场的演化规律及控制因素;二是现有地应力模拟多忽略储层岩性、矿物组成的垂向与横向非均质性,导致模拟结果与实际地质条件偏差较大,难以精准指导工程实践;三是对岩石力学参数与地应力场分布的内在关联、地应力场对页岩气产能的控制机制研究不够深入,未能形成“地质-力学-工程”一体化的研究思路[6] [7]。

基于上述研究现状与存在问题, 本文以川西南金石地区下寒武统筇竹寺组为研究对象, 整合钻井、测井、地震及室内实验数据, 采用“地质分析-实验测试-数值模拟-验证分析”的技术路线, 通过系统的岩石力学测试、构造年代学分析, 结合三维地质建模与有限元数值模拟技术, 开展岩石力学及地应力场模拟研究。研究旨在明确研究区页岩岩石力学参数特征及非均质性成因, 厘定关键构造期次及古今地应力大小与方向, 建立高精度三维地质力学模型, 模拟多期构造应力场演化过程, 阐明地应力场分布规律及其对页岩气产能的控制作用。

本研究成果不仅能够丰富川西南地区海相页岩地应力场演化及岩石力学特征的研究理论, 填补该区域多期构造约束下应力场协同演化研究的空白, 还能为金石地区筇竹寺组页岩气勘探开发中的水平井轨迹优化、水力压裂参数设计、井壁稳定控制等工程决策提供科学支撑, 对推动川西南地区页岩气高效开发具有重要的理论价值与实际意义。

2. 区域地质概况

2.1. 构造概况

研究区位于四川盆地西南缘的金石背斜构造带。下寒武统筇竹寺组为研究的目标层位, 岩性以黑色页岩、粉砂质页岩为主, 属于浅海-陆棚相沉积[8][9]。研究区经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期多期强烈构造运动。印支运动以挤压为主, 形成北东向宽缓褶皱及逆断层, 奠定构造格架; 燕山运动继承并强化挤压, 使褶皱更紧闭, 断裂更发育; 喜马拉雅运动受青藏高原隆升影响, 表现为差异抬升与走滑改造, 最终定型现今构造格局[10]。

研究区主体属金石背斜构造带, 该背斜北东向展布, 核部出露筇竹寺组, 两翼地层平缓(见图 1(a), 图 1(b))。区内发育北东、近南北和北西向三组断裂, 构成复杂断裂网络[11]。其中北东向逆断层规模最大, 是主体构造; 这些断裂控制着地层完整性、裂缝发育及地应力分布, 为地应力场建模提供了关键地质边界[12]。

2.2. 地层概况

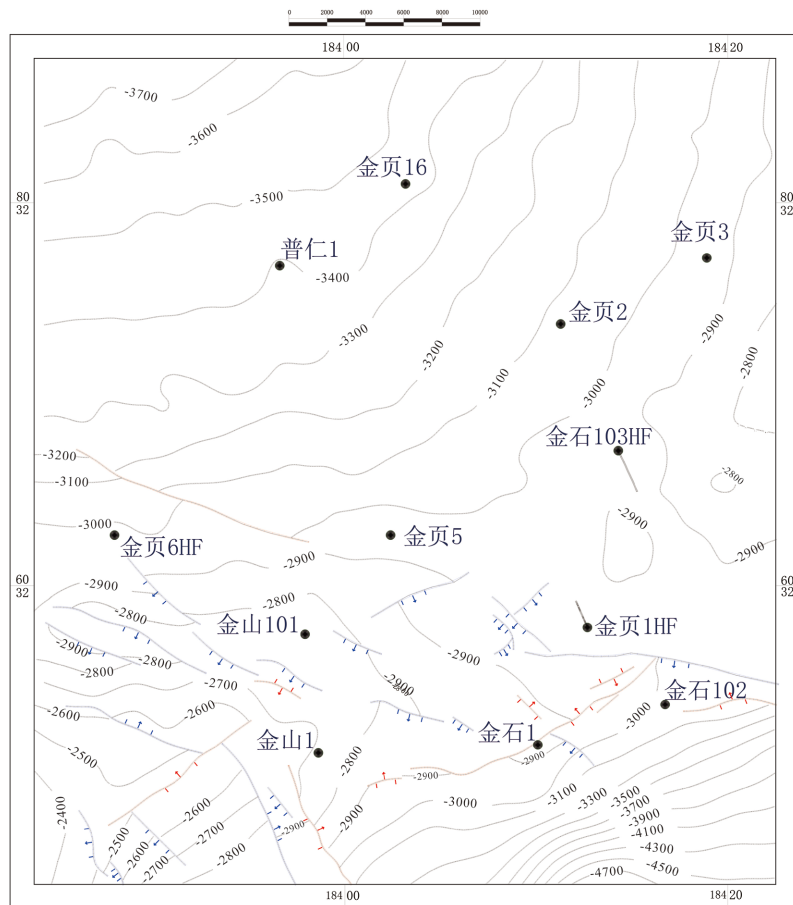
基于显微岩心薄片观察, 筇竹寺组 6~8 小层岩性均以粉砂质页岩为主, 核心差异体现在粒度及矿物分布的垂向非均质性: 浅部第 8 小层以细-粗粉砂为主, 石英、长石为主要颗粒, 粘土基质均一, 孔隙不发育; 中部第 7 小层粒级变化大, 粗粉砂富集段与粘土质粉砂纹层交替, 刚性矿物含量较高, 脆性较强, 指示相对高能沉积环境; 深部第 6 小层细粒物质含量高, 基质致密, 粘土矿物平行层理排列, 塑性较强。这种垂向变化反映了沉积能量的波动, 且直接影响岩石力学性质, 其中 7 小层更利于水力压裂形成复杂缝网。相关岩性特征可通过显微照片(见图 2)及岩性柱状图(见图 3)直观观察, 钻井位置及构造特征(见图 1)。

3. 典型井岩石力学测试特征

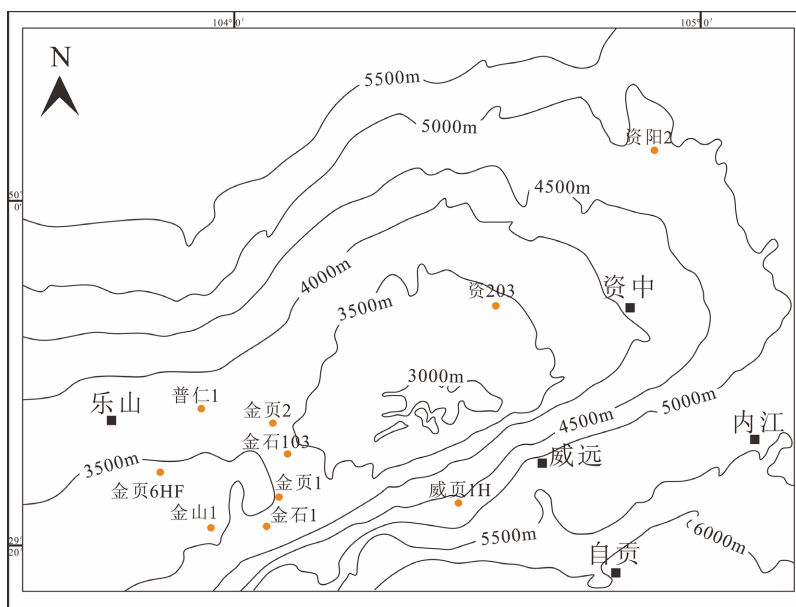
研究以金页 6HF 井为重点, 系统采集筇竹寺组 6~8 小层岩心样品采用 RTR-1000 型岩石力学测试系统, 进行了抗拉强度(巴西劈裂法)、三轴压缩、声发射(Kaiser 效应)、古地磁定向、差应变及波速各向异性测试, 获取弹性模量、泊松比、抗压/抗拉强度及地应力大小、方向等参数。

3.1. 抗拉强度试验

金石地区筇竹寺组页岩抗拉强度变化范围极大, 介于 0.24 MPa 至 12.66 MPa 之间, 显示出研究层段页岩抗拉强度具有极强的非均质性。整体上, 抗拉强度未与埋藏深度表现出严格的线性关系, 表明其主要受控于岩石本身的矿物组成、结构、胶结程度、微裂缝发育情况等内在因素, 而非单纯的压实效应。

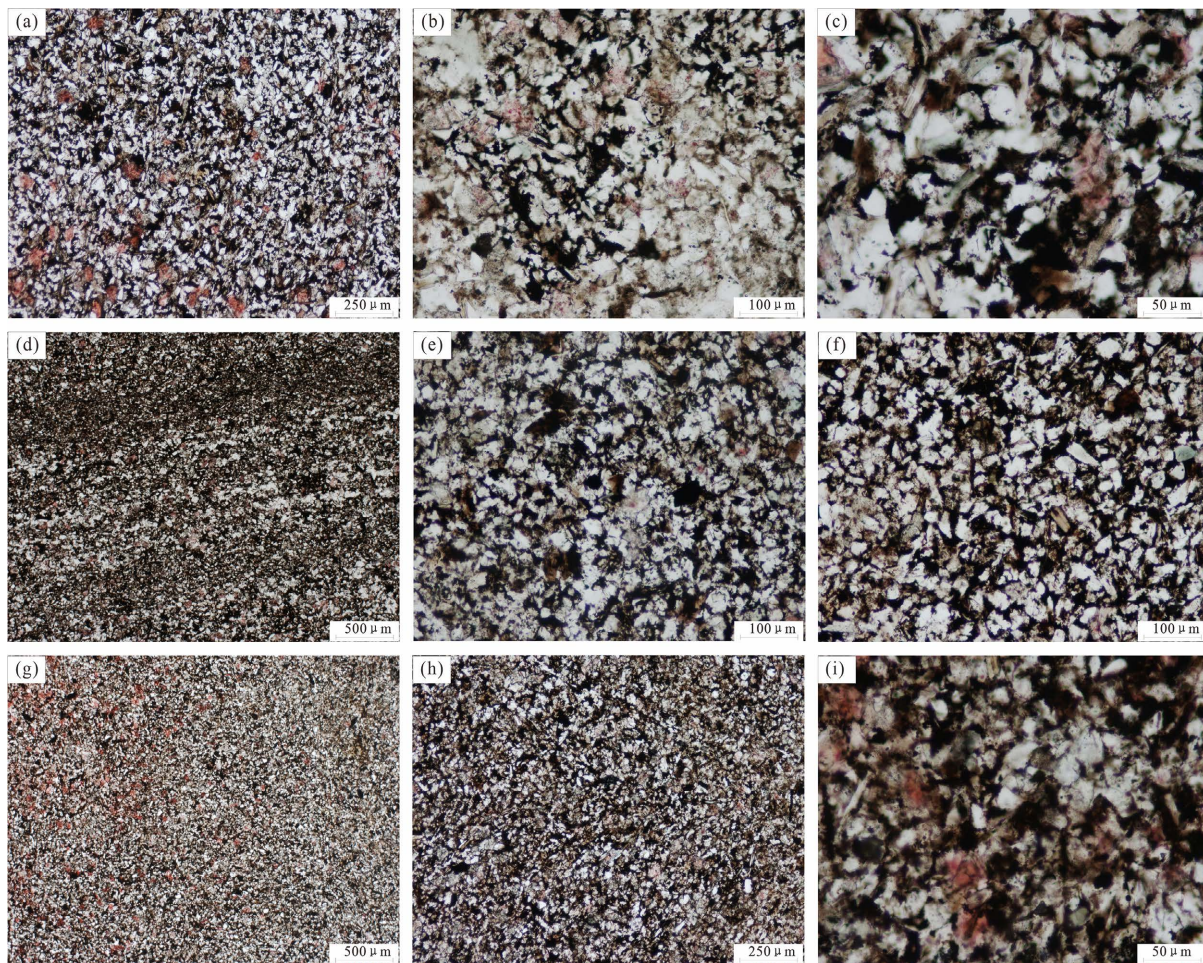


(a)



(b)

Figure 1. (a) Drill location map of the Qiongzhusi formation in the southern Sichuan region, (b) Structural map of the bottom boundary of the 7 sub-layers of the Qiongzhusi formation in the Jinshi area
图 1. (a) 川南地区筇竹寺组钻井位置图, (b) 金石地区筇竹寺组 7 小层底界构造图



(a) 3243.75 m, 8 小层, 粒级以细 - 粗粉砂为主, 5 \times ; (b) 3258.50 m, 8 小层, 粒级以细 - 粗粉砂为主, 10 \times ; (c) 3243.75 m, 8 小层, 粒级以细 - 粗粉砂为主, 20 \times ; (d) 3272.17 m, 7 小层, 粒级以粗粉砂为主, 2.5 \times ; (e) 3283.64 m, 7 小层, 粒级以细 - 粗粉砂为主, 10 \times ; (f) 3277.30 m, 7 小层, 粒级以粗粉砂为主, 10 \times ; (g) 3265.15 m, 6 小层, 粒级以细 - 粗粉砂为主, 10 \times ; (h) 3272.17 m, 6 小层, 粒级以粗粉砂为主 2.5 \times ; (i) 3272.17 m, 6 小层, 粒级以细 - 粗粉砂为主 20 \times 。

Figure 2. Lithological characteristics of the qiongzhu temple formation

图 2. 筇竹寺组岩性特征

金页 6HF 井 3241.44 m 处样品抗拉强度达到最大值 12.66 MPa, 该位置为 8 小层黑色页岩, 胶结致密, 微裂缝不发育(见表 1); 3270.12 m 处样品抗拉强度仅 0.24 MPa, 该位置 7 小层纹层发育, 存在微裂缝, 岩石完整性较差。抗拉强度的强非均质性反映了研究区页岩微观结构和矿物组成的空间差异, 是水力压裂过程中裂缝起裂压力差异的重要原因。

3.2. 三轴压缩试验

金石地区泊松比数值较低, 在 0.05~0.23 之间, 总体上呈现出随深度增加而减小的趋势。最浅的两个样品泊松比较高, 而最深的样品泊松比最低。这表明随着埋深增加, 岩石在受力时侧向膨胀(横向应变)的能力减弱, 脆性增强。弹性模量变化范围较大, 从 12.76 GPa 到 46.83 GPa。与深度无明显一致的线性关系。弹性模量最高的样品和最低的样品深度差异不大, 表明弹性模量主要受岩性、矿物组成、微观结构等非均质性控制, 而非单纯的压实作用(见表 2)。

金页6井

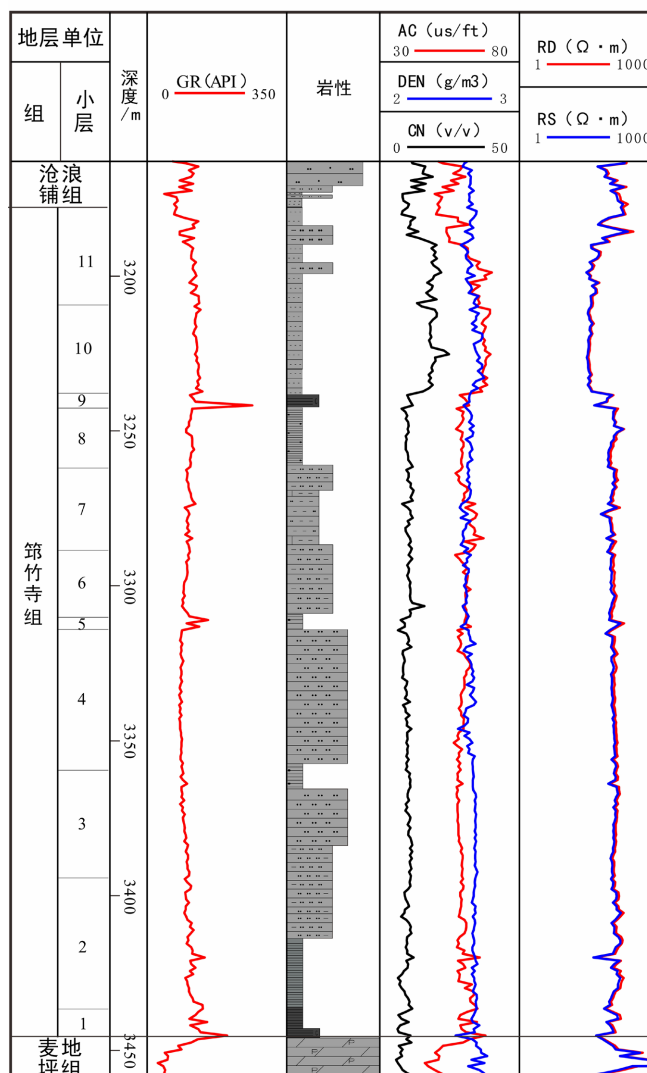


Figure 3. Lithology columnar diagram of jinye 6HF qiongzhu temple group
图 3. 金页 6HF 筲竹寺组岩性柱状图

Table 1. Experimental analysis results of rock tensile strength
表 1. 岩石抗拉强度实验分析结果

检测编号	原始样品	井位	深度/m	实验测试	长 (cm)	直径 (cm)	最大载荷 (KN)	抗拉强度 (MPa)
ZS-4	1	金页 6HF	3272.7	单轴抗拉强度测试	2.374	2.52	5.44	5.79
ZS-6	2	金页 6HF	3270.12	单轴抗拉强度测试	2.378	2.52	0.22	0.24
ZS-7	3	金页 6HF	3281.85	单轴抗拉强度测试	2.354	2.52	3.18	3.41
ZS-9	4	金页 6HF	3285.51	单轴抗拉强度测试	2.354	2.522	2.29	2.46
ZS-14	6	金页 6HF	3251.92	单轴抗拉强度测试	2.368	2.524	6.94	7.39
ZS-15	5	金页 6HF	3241.44	单轴抗拉强度测试	2.33	2.522	11.69	12.66

Table 2. Analysis results of elastic parameters from triaxial high-temperature and high-pressure rock mechanics experiments on Jin Ye 6HF rock**表 2.** 金页 6HF 岩石三轴高温高压岩石力学实验弹性参数分析结果

样品编号	深度/m	泊松比	弹性模量(MPa)	抗压强度(MPa)
ZS-1	3248.23	0.23	12.76	91.21
ZS-2	3255.52	0.23	24.97	217.80
ZS-3	3266	0.09	46.83	225.62
ZS-5	3279.1	0.09	20.09	214.06
ZS-8	3283.74	0.08	26.87	261.47
ZS-11	3296.07	0.05	36.06	298.53
ZS-12	3296.07	0.07	32.83	274.41

金页 6HF 井筇竹寺组页岩的三轴实验表明, 其力学性质表现出显著的垂向非均质性和明显的脆性化趋势。该套页岩整体上属于中 - 高弹性模量、高抗压强度的脆性岩石, 具备通过水力压裂进行体积改造的岩石力学基础。

将力学参数与岩性柱状图、薄片微观结构进行耦合对比(表 1、表 2, 图 2、图 3), 明确 7 小层粗粉砂纹层发育, 石英与常识含量高, 弹性模量、抗压强度高, 抗拉强度中等, 脆性最优; 8 小层粉砂含量较高, 力学参数中等; 6 小层粘土矿物含量高, 塑性增强, 弹性模量相对较低。

3.3. 声发射实验

声发射 Kaiser 效应实验通过测量岩心在不同方向上的历史最大应力, 可以间接推断地应力的方向, Kaiser 点应力值最高的方向近似于现今最大水平主应力的方向。

研究区典型井样品 3# 100/163 在 90°方向的 Kaiser 点应力值最高(22.52 MPa), 表明该点现今最大水平主应力方向可能大致为 90°方向。样品 7 8/162 同样在 90°方向的 Kaiser 点应力值最高(25.61 MPa), 同样指示最大水平主应力方向可能为 90°方向(见表 3)。两个样品的一致性结果强化了该区最大水平主应力方向为近东西向的认识, 这与区域构造应力场背景相符。

Table 3. Test result data table of triaxial stress values of underground samples from Qiongzhu temple formation in Jinshi area**表 3.** 金石地区筇竹寺组井下样品三向应力值的测试结果数据表

样品编号	井深/m	kaiser 点应力值(MPa)				最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	最大地应力梯度 (MPa/100)	最小地应力梯度 (MPa/100)
		0°	45°	90°	垂直				
1#	3252.21	20.49	19.44	22.52	74.8	74.99	55.93	2.306	1.812
2#	3286.29	21.56	22.44	25.61	81.3	45.17	25.07	2.592	1.980

声发射 Kaiser 效应实验通过测量岩心不同方向的 Kaiser 点应力值, 实现了地应力大小和方向的推断, 核心结果如下:

地应力方向: Kaiser 点应力值最高的方向近似于现今最大水平主应力方向, 研究区典型井样品在 90°方向的 Kaiser 点应力值均为最高, 表明该区现今最大水平主应力方向为近东西向, 与区域构造应力场背景相符。

地应力大小：研究区垂向主应力范围为 74.8~81.3 MPa，最大水平主应力范围为 45.17~74.99 MPa，最小水平主应力范围为 25.07~55.93 MPa，地应力梯度最大为 2.592 MPa/100 m，最小为 1.812 MPa/100 m。

应力状态与非均质性：样品 1#表现为走滑应力状态($\sigma_H \approx \sigma_v > \sigma_h$)，样品 2#表现为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 的正断层应力状态，反映局部应力异常；水平主应力值在短距离内相差巨大，表明研究区地应力场具有强烈的非均质性。

3.4. 差应变实验

采用差应变法对研究区 4 块岩心样品进行了地应力测试，得到了各样品垂向地应力、最大水平地应力、最小水平地应力的大小及梯度，核心结果如下：

垂向地应力范围为 65.50~75.07 MPa，最大水平地应力范围为 68.64~73.84 MPa，最小水平地应力范围为 47.20~50.73 MPa，整体与声发射实验结果吻合，验证了地应力测试数据的可靠性。垂向地应力梯度均为 0.02254 MPa/m，最大水平地应力梯度范围为 0.01676~0.02107 MPa/m，最小水平地应力梯度范围为 0.01490~0.01832 MPa/m，水平地应力梯度的差异反映了研究区构造挤压作用的空间不均一性。研究区最大水平地应力略大于垂向地应力，远大于最小水平地应力，进一步验证了研究区以水平构造挤压为主的应力状态，与川西南地区区域构造背景一致。见表 4 为地应力测试数据。

Table 4. Differential strain experimental measurement results

表 4. 差应变实验测量结果

岩心序号	垂向地应力 σ_v		最大水平地应力 σ_H /MPa		最小水平地应力 σ_h /MPa	
	大小 (MPa)	梯度 (MPa/m)	大小 (MPa)	梯度 (MPa/m)	大小 (MPa)	梯度 (MPa/m)
S1	65.50	0.02254	73.84	0.02107	50.73	0.01832
S2	65.55	0.02254	72.59	0.01993	49.38	0.01710
S4	72.44	0.02254	69.04	0.01912	47.20	0.01728
S5	75.07	0.02254	68.64	0.01676	48.57	0.01490

4. 三维地质建模与古今应力场数值模拟

4.1. 三维地质模型构建

基于地震、测井及钻井数据，采用 Petrel 软件建立了包含复杂断层系统的金石地区筇竹寺组三维地质模型。建模流程包括构造建模、地层网格化及属性建模。构造建模是建立断层模型与地层层面模型，刻画金石背斜及北东、北北向断层空间形态。地层网格化采用角点网格对地质模型进行离散，生成三维网格体，平面网格 50 m × 50 m，垂向网格 2 m，采用角点网格，共 45,663 个节点、140,991 个单元。属性建模是利用序贯高斯模拟方法，将岩性、矿物成分(石英、黏土含量)、及岩石力学参数(弹性模量、泊松比等)空间展布属性赋至三维网格，构建非均质地应力学模型。

4.2. 多期构造应力场边界条件

结合方解石 U-Pb 定年(224 ± 4.0 Ma、 171.5 ± 5.3 Ma)与区域构造背景，厘定印支期、燕山期、喜马拉雅期、现今四期边界条件，结果见表 5。

Table 5. Boundary conditions for multi-stage constructed stress field simulation
表 5. 多期构造应力场模拟边界条件

构造期	加载边界	应力/位移数值	加载方式	依据
印支期	南北边界挤压 320 MPa, 东西边界挤压 50 MPa	右旋走滑 50 MPa, 底部全约束	南北向挤压为主	印支期南北向挤压构造背景
燕山期	北西 - 南东边界挤压 200 MPa, 北东 - 南西边界挤压 50 MPa	右旋走滑 50 MPa, 底部全约束	挤压加剧, 剪切增强	燕山期构造强化运动
喜马拉雅期	东西边界挤压 350 MPa, 南北边界挤压 50 MPa	右旋走滑 50 MPa, 底部全约束	近东西向挤压为主	青藏高原隆升远程效应
现今	东西边界挤压 110 MPa, 南北边界挤压 40 MPa	底部全约束	稳定构造挤压	现今地应力实测约束

4.3. 古今应力场数值模拟

将三维地质模型导入有限元软件(如 ANSYS), 以岩石力学参数为属性, 以关键构造期应力方向与大小为边界约束, 开展了多期应力场模拟[13]。

现今应力场数值模拟结果如图 4 所示, 现今期 JY6HF 井最大水平应力在 40~72 MPa, 应力强度在 18~24 MPa; JS1 井最大水平应力在 40~75 MPa, 应力强度在 18~23 MPa。水平最大主应力、最小主应力沿断层呈长条状分布, 沿断层两侧应力差异性分布, 断层结合区或者交汇部位应力呈现高值; 水平最小主应力沿近 SN 向和 EW 向断层呈长条状分布, 最大主应力沿 EW 向和 NE-SW 向断层呈条带状分布。垂向主应力介于 0.000450 至 0.000959 之间, 水平最小主应力数值介于-0.0000194 至 0.0000176 之间, 水平最大主应力介于-0.0000436 至 0.0000176 之间。应力强度及弹性应变受不同方向断层的影响, 呈长条状、环带状分布; 平面 XY 剪应力、剪应变呈零星点状分布, 主要表现为右旋走滑作用, 呈 NE-SW 向和 EW 向走向展布; 应力方向沿断层位置出现转向的特征。

4.4. 模型可行性验证

本次研究构建的三维地质模型及古今应力场数值模拟模型, 通过多源数据对比、交叉验证、地质规律符合性分析三种方法进行可行性验证, 确保模型的准确性和可靠性, 验证结果表明模型能够真实反映研究区的地质特征和地应力场分布规律, 可用于指导研究区页岩气勘探开发。

4.4.1. 多源数据对比验证

将数值模拟结果与室内岩石力学测试、现场地应力测试(声发射、差应变、古地磁)、测井资料(钻井诱导缝、井壁崩落)等多源数据进行对比, 验证结果如下:

地应力大小: 模拟得到的现今最大水平主应力(40~75 MPa)、最小水平主应力(20~50 MPa)与声发射实验(45.17~74.99 MPa, 25.07~55.93 MPa)、差应变实验(68.64~73.84 MPa, 47.20~50.73 MPa)结果高度吻合, 误差在 10% 以内。

地应力方向: 模拟得到的现今最大水平主应力方向为近东西向, 与声发射实验、古地磁实验及测井资料(钻井诱导缝走向)确定的方向一致, 验证了应力方向模拟的准确性。

岩石力学参数: 模型中赋予的弹性模量、泊松比等参数与室内三轴压缩实验、波速各向异性实验结果一致, 模拟得到的岩石抗压强度分布与岩性、矿物成分分布规律匹配, 脆性矿物含量高的区域抗压强度模拟值更高。

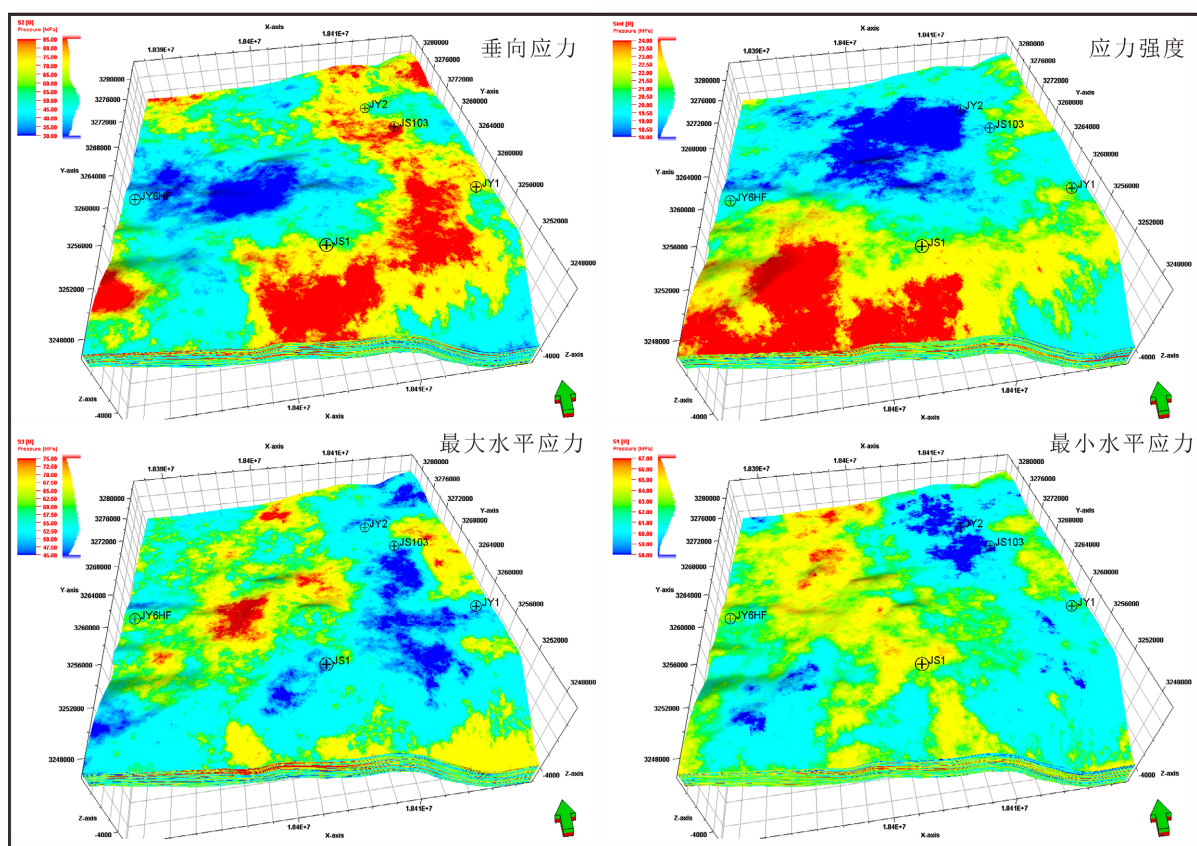


Figure 4. Current stress field simulation map
图 4. 现今应力场模拟图

4.4.2. 交叉验证

采用屏蔽井验证法对三维地质模型进行交叉验证, 即屏蔽金石 1 井的实测数据, 利用剩余井(金页 6HF、金石 2、3 井)的资料进行模型插值预测, 将预测值与金石 1 井的实测值对比, 结果显示:

岩性预测: 筇竹寺组各岩性的预测分布与实测岩性吻合度达 85% 以上, 塑性岩性与脆性岩性的边界预测准确。

矿物成分预测: 石英、黏土矿物含量的预测值与实测值的相关系数达 0.82, 误差在 5% 以内。

地应力预测: 金石 1 井现今最大水平主应力的预测值为 45 MPa, 与实测值(48 MPa)误差仅 6.25%, 验证了模型的插值精度和预测能力。

4.4.3. 地质规律符合性分析

将模拟结果与研究区区域构造演化规律、岩石力学性质规律、孔隙结构规律进行对比, 验证模型的地质符合性:

与构造演化规律吻合: 古应力场模拟结果反映了印支期→燕山期→喜马拉雅期的应力场演化过程, 即南北向挤压→挤压加剧→北西-南东向改造, 与川西南地区区域构造演化背景高度一致, 方解石脉体的温压特征也验证了古应力场的温压环境。

与岩石力学规律吻合: 模拟得到的地应力分布与岩石力学性质的非均质性匹配, 脆性岩性区应力值高于塑性岩性区, 层理发育区存在应力各向异性, 与室内实验结果一致。

与孔隙结构规律吻合: 孔隙发育区(有机质孔隙、构造裂缝孔隙)的应力传递效率更高, 应力分布更均

匀, 孔隙不发育区易形成应力集中, 与孔隙结构对于地应力场的影响规律一致。

5. 结论

本文通过系统的地质、岩石力学实验与数值模拟, 取得的结论如下:

1) 金石地区筇竹寺组页岩呈现强非均质性, 整体为中-高模量、高抗压、低泊松比的脆性岩石, 力学参数受矿物组成与微观结构控制, 7小层脆性最优, 为压裂有利层段。

2) 现今地应力场以近东西向水平挤压为主, 主应力关系 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$; 多期模拟揭示应力场由印支期南北向挤压, 向喜马拉雅期近东西向挤压演化, 与区域构造背景高度吻合。

3) 建立的高精度三维地质力学模型经连续剖面验证可靠, 断裂与岩性共同控制地应力空间分布, 断层交汇区为应力高值, 背斜核部应力相对较低。

4) 综合以上认识对页岩气勘探开发提出以下启示: 明确背斜翼部、近断层(0.5~1 km)、低应力差为开发甜点区, 断层带、高应力核部为风险区, 研究成果可直接指导勘探开发工程部署。

参考文献

- [1] 陆争光. 中国页岩气产业发展现状及对策建议[J]. 国际石油经济, 2016, 24(4): 48-54, 90.
- [2] 徐干成, 袁伟泽, 李成学, 等. 某工程区水压致裂法地应力测试及其分布特征研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 163-169.
- [3] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689-701.
- [4] 苏宏刚, 罗黎明. 地应力测试技术研究现状[J]. 陕西煤炭, 2023, 42(1): 59-62.
- [5] 王生奥, 韩复兴, 孙章庆, 等. 地应力测量及其对油气运移和断层封堵性影响的发展现状与趋势[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(2): 675-688.
- [6] 张小菊, 何建华, 徐庆龙, 等. 合川地区须二段现今地应力场分布特征与扰动机制研究[J]. 矿物岩石, 2022, 42(4): 71-82.
- [7] 郑马嘉, 郭兴午, 伍亚, 等. 四川盆地德阳-安岳裂陷槽寒武系筇竹寺组超深层页岩气地质工程一体化高产井培育实践[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(3): 112-124.
- [8] 陈丽清, 吴娟, 何一凡, 等. 四川盆地绵阳-长宁拉张槽中段下寒武统筇竹寺组页岩裂缝脉体特征及古流体活动过程[J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 142-152.
- [9] 熊亮, 邓虎成, 吴冬, 等. 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒沉积特征与影响因素[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 857-871.
- [10] 徐宏杰, 桑树勋, 易同生, 等. 黔西地应力场特征及构造成因[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 1960-1966.
- [11] 李曙光. 川西南寒武系筇竹寺组优质页岩地震综合预测[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(2): 237-245.
- [12] 马顺婷, 李瑞雪, 宿航, 等. 川南井研地区筇竹寺组页岩现今地应力场特征及对压裂缝的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2026, 55(1): 213-231.
- [13] 王勇, 杨维好. 基于 ANSYS 的三维初始地应力场模拟方法[J]. 煤炭工程, 2016, 48(10): 77-80.