

# 川南龙马溪组深层页岩现今地应力场特征

罗彬

成都理工大学能源学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年12月26日; 录用日期: 2026年1月23日; 发布日期: 2026年2月10日

## 摘要

页岩气应力场特征的分析评价是深层页岩气勘探开发的重要环节, 对压裂预测走向和井网部署具有重要指导意义。四川盆地储藏大量页岩气, 由于页岩气储层孔隙度和渗透率较低, 需要通过水力压裂技术实现页岩气效益开发, 而岩石力学参数和地应力特征是影响裂缝扩展的重要因素。以川南页岩气储层龙马溪组龙-1<sup>1</sup>小层为研究对象, 结合室内实验和现场测井资料, 计算岩石力学参数, 分析单井地应力大小、方向。结果表明, 岩石动态杨氏模量介于33.6~47.1 GPa, 动态泊松比介于0.20~0.23, 明确静态杨氏模量为39.4~46.9 GPa, 静态泊松比为0.25~0.28, 动静态参数具有良好的线性关系。利用组合弹簧模型计算单井最大水平主应力97~115 MPa, 最小水平主应力77~99 MPa, 垂向应力86~106 MPa, 地层主要呈走滑应力状态 $\sigma_h > \sigma_v > \sigma_b$ ; 单井地应力方向NE向(100°~120°)为主, 岩石力学参数和地应力特征的研究为油气勘探开发提供了可靠的技术支撑。

## 关键词

川南盆地, 深层页岩气, 岩石力学参数, 地应力特征

# Characteristics of Current *In-Situ* Stress of the Longmaxi Formation Deep Shale, Southern Sichuan Basin

Bin Luo

College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: December 26, 2025; accepted: January 23, 2026; published: February 10, 2026

## Abstract

The analysis and evaluation of stress field characteristics constitute a critical component of deep shale gas exploration and development, providing essential guidance for fracture prediction and

**well pattern deployment. Shale in the Sichuan Basin is widespread and shale gas resources are abundant. Due to low porosity and low permeability of shale reservoirs, the hydraulic fracturing is a key technology for the benefits development of shale gas resources. Rock mechanical parameters and *in-situ* stress significantly influence fracture propagation. This study focuses on the Long-1 small layer in southern Sichuan basin. Integrating laboratory experiments and field logging data, we calculated rock mechanical parameters and analyzed individual well stress characteristics. The results indicate that the dynamic Young's modulus of is 33.6~47.1 GPa, with a dynamic Poisson's ratio is 0.20~0.23. Static Young's modulus is 39.4~46.9 GPa, and static Poisson's ratio is 0.25~0.28, showing a good linear relationship between dynamic and static rock mechanical parameters. Using the combined spring model, the maximum horizontal principal stress was calculated at 97~115 MPa, with minimum horizontal principal stress at 77~99 MPa and vertical stress at 86~106 MPa. The stress regime primarily exhibited strike-slip ( $\sigma_{h\max} > \sigma_v > \sigma_{h\min}$ ), with the maximum horizontal principal stress orientation being northeast (100°~120°). The study of rock mechanics parameters and *in-situ* stress characteristics provide reliable technical support for oil and gas exploration and development.**

## Keywords

**Southern Sichuan Basin, Deep Shale Gas, Rock Mechanics Parameters, *In-Situ* Stress**

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

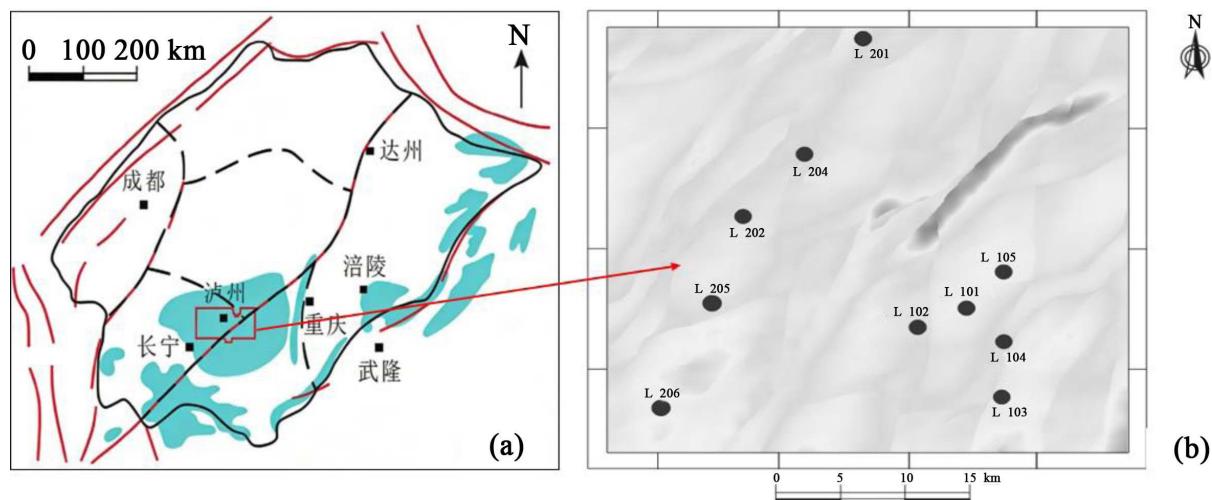
目前，世界能源发展正由“固态、高碳”向“气态、低碳”转变，天然气作为低碳化石能源的核心地位，需求增长潜力强劲[1]。近年来，中国天然气产需缺口持续扩大，2024年，我国天然气对外依存度高达40.9%，能源安全保障面临严峻挑战[2]。随着非常规油气勘探开发的难度日益增大，加大非常规油气开采力度是解决我国油气供应压力的重要举措之一。中国页岩气资源丰富，四川盆地作为中国页岩气重要的勘探核心区域。目前，我国对3500 m以浅层页岩气已形成成熟的勘探开发技术，但四川盆地深层页岩储层(埋深≥3500 m)占比65%[3]。水力压裂技术是实现深层页岩气经济开采的主体技术，现今地应力和岩石力学参数是影响裂缝发育的主要因素，并且，水力裂缝与天然裂缝相互作用形成的缝网程度决定了压裂效果[4]。

针对页岩储层岩石力学参数和地应力的研究，国内外学者开展了大量室内实验和数值模拟研究，刘绍军等[5]通过室内试验、测井资料和数值模拟，建立了岩石力学动静态参数转换关系式，明确单井地应力特征。韩松等[6]开展不同围压下三轴压缩测试，结合测井数据，构建了区块地应力适应性模型。孟文等[7]综合原位地应力测试，应用成像技术确定深层页岩储层的最大主应力方向，并利用偶极声波测井的岩石力学参数。张相权[8]采用现场岩心测试、X射线衍射分析、岩石三轴力学及声发射地应力测试等手段，分析储层的基本力学性质，设计合理的施工参数。近年来，结合压缩试验、声发射监测和测井资料来确定岩石的力学参数和三向应力的大小和方向，受到了广泛关注，但是目前的主要研究聚焦在3500 m以浅的页岩储层，关于深层页岩储层相关研究较少。

以川南龙马溪组深层页岩储层为例，储层深度在3700 m以上，综合理论分析、岩石声发射实验和测井资料明确该地区动态、静态岩石力学参数的相关性和单井地应力大小和方向，获得深部条件不同埋深下三向应力的分布情况，为后续勘探开发、井位优化和压裂设计提供有力指导。

## 2. 研究区概况

四川盆地位于我国西南方向，盆地构造复杂，内部丘陵、平原交错，地势北高南低，构造地貌呈现出多旋回、多期构造动力、多层次结构的特点[9]。川南盆地龙马溪组深层页岩区域内部的褶皱多呈带状分布，发育走向逆断层[10]，龙马溪组厚度分布范围在108.1~657 m之间，在北西向南东方向沉积厚度逐渐增大，储层内以剪切裂缝为主，少数垂直裂缝和水平滑移裂缝(见图1)。

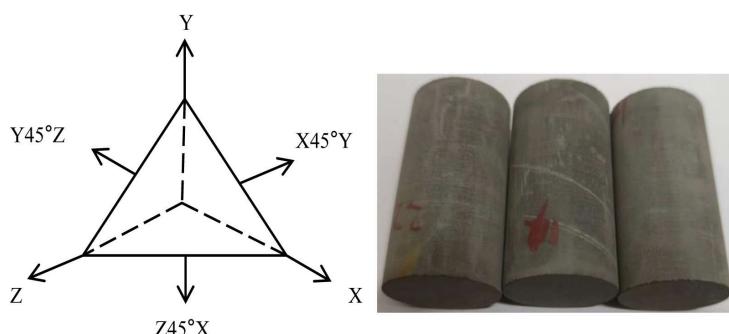


**Figure 1.** Structural features of the Sichuan South Basin [4] (a) and distribution map of well locations (b)  
**图 1.** 川南盆地构造[4] (a)和井位分布图(b)

## 3. 实验和参数计算方法

岩石力学参数石油田勘探的重要数据，在储层改造过程中，与压裂裂缝的大小、形状和分布相关。静态法是在实验室中对岩心进行加压，观察应力 - 应变曲线关系，是研究岩石力学参数的重要方法。采用三轴压缩方法，即通过径向液压油模拟围压、轴向加载模拟垂向应力。虽然该方法测量的结果精度高，但是工作量大而复杂，测试成本高，处理数据多，资金消耗巨大[11][12]。动态法即是提取测井资料中的纵横波参数，计算岩石力学参数。通过实验和测井手段，结合静态和动态资料，计算岩石力学参数，建立了更加广泛的适用计算式，为明确岩石力学参数和该区块地应力分布研究奠定基础。

### 3.1. 岩石力学三轴实验



**Figure 2.** Direction of sample orientation and sampling  
**图 2.** 试样定向取样方向

选取川南龙马溪组 10 口井的岩心，将岩样恢复到现场的原始状态，在岩样上找一个水平面，建立 X、Y、Z 在空间坐标系，改变岩心位置，钻取 X、Y、Z、X45°Y、X45°Z、Y45°Z 六个方向岩样，制作成直径 25 mm，高度 50 mm 的标准圆柱形试样(见图 2)。试样两端磨平，在发射探头涂抹凡士林并使用 AB 胶进行固定在试样上，为避免试样上下端面摩擦产生的噪声，在试样上下端面涂抹凡士林以消除噪声，设置声发射门限值 40 dB，设置加载速率 0.05 mm/min 施加轴压，直至岩石破裂，停止加载。图 3 记录了岩石应力 - 应变曲线和岩石破裂过程中的声发射信号[13] [14]。

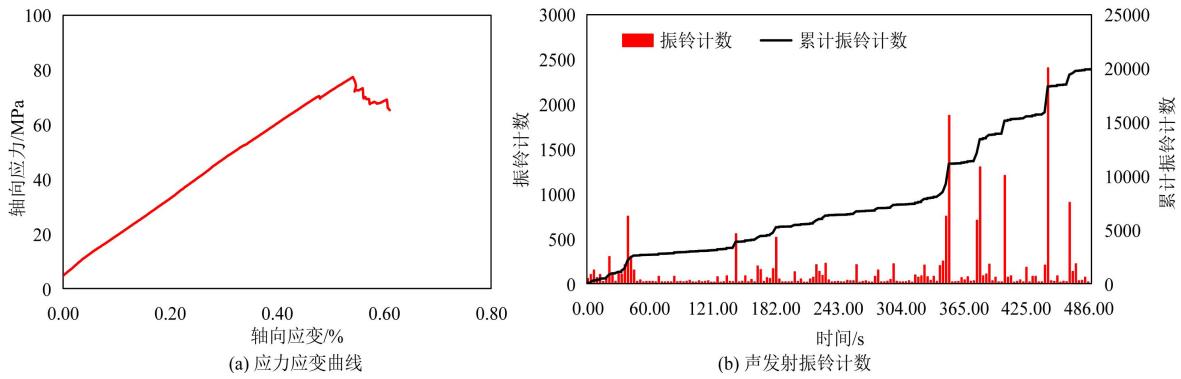


Figure 3. Experimental results

图 3. 实验结果图

### 3.2. 岩石力学参数和应力计算

#### (1) 岩石力学参数

杨氏模量是表征固体材料抵抗变形能力，表示本质为应力和形变之间的比。泊松比是指轴向应变和径向应变的比，又称横向压缩系数[15]。通过三轴力学实验系统采集到岩石应力 - 应变曲线数据，之后根据公式(1)和公式(2)计算静态杨氏模量、静态泊松比[16]。

$$E_s = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\varepsilon_a} \quad (1)$$

$$\nu_s = \frac{\Delta\varepsilon_r}{\Delta\varepsilon_a} \quad (2)$$

式中： $E_s$  为静态杨氏模量，GPa； $\Delta\sigma_a$  为轴向应力变化量，MPa； $\Delta\varepsilon_a$  为轴向应变变化量； $\nu_s$  为静态泊松比； $\Delta\varepsilon_r$  为径向应变变化量。

岩石动态参数依托于阵列声波测井的纵、横波速度和密度测井数据，纵波时差、横波时差能够有效反映地层抗压与抗剪等特性，表征杨氏模量、泊松比等参数。通过测井资料计算出全井段的动态杨氏模量[17]。

$$E_d = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \quad (3)$$

$$\nu_d = \frac{1}{2} \frac{\Delta t_p^2 - 2\Delta t_p}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p} \quad (4)$$

式中： $E_d$  为动态杨氏模量，GPa； $\nu_d$  为动态泊松比； $\rho$  为岩石密度，g/cm<sup>3</sup>； $\Delta t_s$  为横波时差，μs/ft； $\Delta t_p$  为纵波时差，μs/ft。

## (2) 三向应力计算

垂向应力( $\sigma_v$ )是地壳中由上覆岩石自重产生的应力分量，与上覆岩石的密度和深度相关，随着深度的增加，垂向应力也增加[18]。

$$\sigma_v = \int_0^z \rho_z g dz \quad (5)$$

黄荣樽教授于1984年提出黄氏模型。在此基础上，考虑、泊松比和杨氏模量的影响，假设岩石是均质、各向同性的线弹性体[19]。

$$\begin{aligned} \sigma_H &= \alpha P_p + \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E \xi_H}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \xi_h}{1-\nu^2} \\ \sigma_h &= \alpha P_p + \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E \xi_h}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \xi_H}{1-\nu^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $\sigma_v$ 为垂向应力，MPa； $\sigma_H$ 为最大水平主应力，MPa； $\sigma_h$ 为最大水平主应力 MPa； $\rho_z$ 为上覆岩石密度，g/cm<sup>3</sup>； $g$ 为重力加速度，9.8 m/s<sup>2</sup>； $z$ 为地层深度，m； $\xi_H$ 、 $\xi_h$ 为最大、最小应力方向的应变。

水平应力差异系数直接影响压裂效果。根据调研发现水平应差异系数较小的区块容易形成网状压裂缝，压裂效果比较好。水平应力差异系数计算式如下：

$$\eta = (\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_H \quad (7)$$

式中： $\eta$ 为水平应力差异系数。

## (3) 声发射 Kaiser 效应测试地应力方法

声发射法主要是利用岩石的 Kaiser 效应，在单井的不同位置利用取心仪器取出岩心，由于岩石进行多次加载或卸载后，再对其岩心进行加压处理，如果所施加的应力值低于岩心此前所承受的最大应力值，仪器监测到的声发射较少，如果所施加的压力值比此前承受的应力值更大，将会监测到显著的声发射现象[20]。每个试件的 Kiser 效应特征点对应的应力  $\sigma_K$  为[13]：

$$\sigma_K = 10P_K / F \quad (8)$$

式中： $\sigma_K$ 为Kaiser 效应特征点应力，MPa； $P_K$ 为Kaiser 效应特征点对应的荷载，kN； $F$ 为试件横截面积，cm<sup>2</sup>。

$X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $X45^\circ Y$ 、 $X45^\circ Z$ 、 $Y45^\circ Z$ 六个方向的应力分量[14]：

$$\begin{aligned} \sigma_X &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,X_i}}{n} & \sigma_{X45^\circ Y} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,X45^\circ Y_i}}{n} \\ \sigma_Y &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Y_i}}{n} & \sigma_{Y45^\circ Z} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Y45^\circ Z_i}}{n} \\ \sigma_Z &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Z_i}}{n} & \sigma_{Z45^\circ X} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Z45^\circ X_i}}{n} \end{aligned} \quad (9)$$

式中： $\sigma_X$ 、 $\sigma_Y$ 、 $\sigma_Z$ 、 $\sigma_{X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{Z45^\circ X}$ 为 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $X45^\circ Y$ 、 $Y45^\circ Z$ 、 $Z45^\circ X$ 六个方向的应力分量； $\sigma_{K,X}$ 、 $\sigma_{K,Y}$ 、 $\sigma_{K,Z}$ 、 $\sigma_{K,X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{K,Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{K,Z45^\circ X}$ 为 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $X45^\circ Y$ 、 $Y45^\circ Z$ 、 $Z45^\circ X$ 六个方向各试件的 Kaiser 效应特征点对应的应力； $n$ 为每个方向的试件数量。

设主应力  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )与 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 各坐标轴间夹角的余弦分别为  $l_i$ 、 $m_i$  和  $n_i$ ，设  $\alpha_i$ 为主应力  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )与 $Z$ 坐标轴正向夹角， $\theta_i$ 为主应力  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )在 oxy 平面上的投影与 $X$ 轴正向夹角，则可得主应力与各坐标轴间的夹角余弦为：

$$\begin{aligned} l_i &= \sin \alpha_i \cos \theta_i \\ m_i &= \sin \alpha_i \sin \theta_i \\ n_i &= \cos \alpha_i \end{aligned} \quad (10)$$

## 4. 岩石力学参数计算和地应力评价论文写作注意事项

### 4.1. 动静态岩石力学参数

基于岩石力学三轴试验, 获得岩心的静态杨氏模量和静态泊松比, 结果表明: 岩石静态杨氏模量在39.4~46.9 GPa, 静态泊松比在0.25~0.28, 动态杨氏模量在33.6~47.1 GPa, 动态泊松比在0.20~0.23。由于测井资料得到的数据与实验结果之间有一定差距, 动、静态岩石力学参数常呈现线性或二项式关系。将龙马溪组页岩动、静态杨氏模量和泊松比进行拟合, 发现二者呈良好的线性关系, 拟合相关系数良好, 建立了该区块动静态杨氏模量、动静态泊松比的经验公式(见图4)。

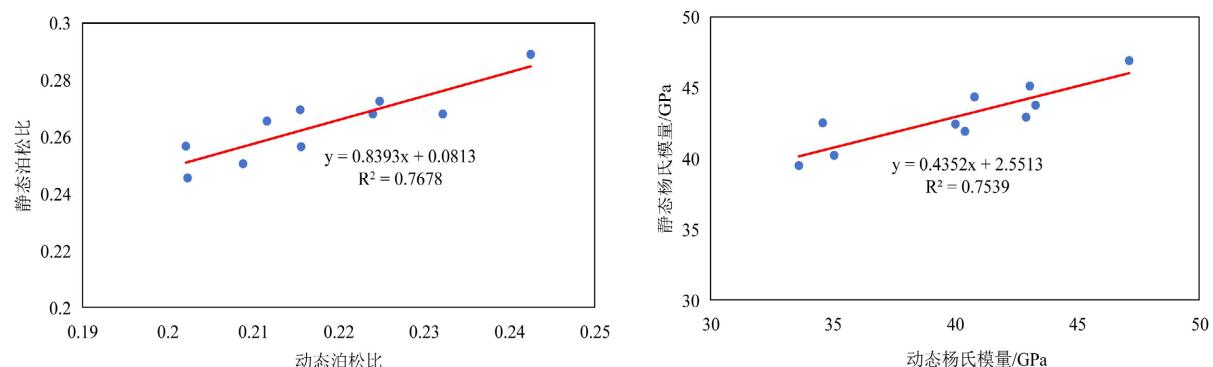


Figure 4. Dynamic and static rock mechanics parameter relationship  
图4. 动静态岩石力学参数关系

### 4.2. 单井地应力特征

#### 4.2.1. 地应力监测方法

地应力是指以上覆岩层应力、地层孔隙压力和构造应力为主的, 存在于地壳中未被其他因素干扰的天然内应力。地层下各点受力状态因地下情况复杂而不同, 与埋深、地质构造、地形和岩石力学性质都息息相关, 为明确地层地应力分布特征, 需要通过实验和测井方法可以得到单井的现今地应力。目前, 将地应力测试方法分为室内实验和现场测量(见表1)。

Table 1. In-situ stress testing method [21]

表1. 地应力测试方法[21]

方法	测量方法	原理	优点	缺点
室内实验法	差应变法	对岩心定向加载, 主应力方向为 $\sigma_H$ , 根据应变比值判断主应力大小。	室内测定, 需要大量的设备和人员	很难模拟井下条件, 岩心定向困难, 实验难度大
	声发射法	通过识别声发射信号突变的Kaiser点, 确定试件在天然状态下承受的最大应力值		
	古地磁法	测量岩样中磁性矿物因应力作用产生的剩磁参数变化, 结合应力-磁性关联模型, 反推地应力的大小、方向		

续表

	压裂法	压裂曲线记录破裂压力和闭合压力(最小主应力), 是目前测量地应力最直接、最可靠的方法之一		
现场 测量法	地层倾角测井	利用井径倾角仪记录井壁的变形及其方位, 井眼扩径的方向通常指示 $\sigma_H$ 方向。	准确、定量的描述原地地应力场特点	施工工序多, 成本高昂
	无源地震测井	水力压裂为震源, 接收并分析纵横波信号确定裂缝方向, 该方向为 $\sigma_H$ 方向		

#### 4.2.2. 单井地应力大小和方向

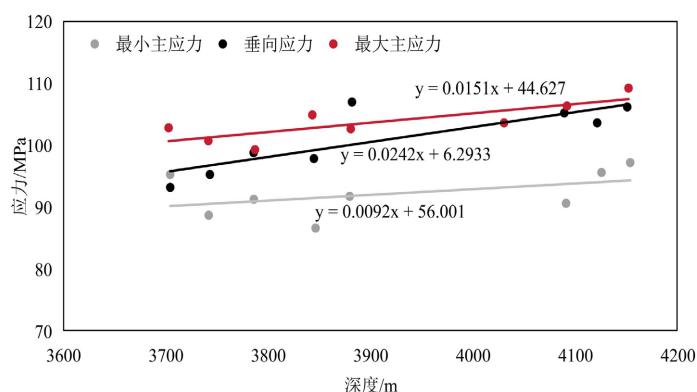
地应力大小与裂缝扩展方向相关, 水力裂缝总是垂直于最小水平主应力方向扩展, 地应力的主要是一个是垂直方向的受力, 还有是水平方向的受力, 由于水平方向上受到大小不等、方向垂直的两个主应力的影响, 将两个主应力称为最大、最小水平主应力。研究地应力的分布特征对页岩储层压裂增产有重要意义, 储层破裂压力与最大、最小水平主应力相关, 在油气田开发过程中扮演着重要的角色[22]。

结合现场静水压力测试以及声发射结果, 利用组合模型计算得到的最大、最小主应力值基本符合需求。结果表明, 单井水平最大主应力主要分布在 97~115 MPa 之间, 水平最小主应力主要分布在 77~99 MPa 之间, 垂向应力分布在 86~106 MPa 之间, 单井地应力方向 NE 向( $100^\circ\sim120^\circ$ )为主(见表 2)。

**Table 2.** The results of the laboratory experiment and the interpretation of the well logging data

**表 2. 室内实验结果和测井解释结果**

井号	垂向 应力(MPa)	室内试验		测井解释		应力 差异 系数	最大水平 主应力方 向
		最大水平 主应力(MPa)	最小水平 主应力(MPa)	最大水平 主应力(MPa)	最小水平 主应力(MPa)		
L101	103.68	113.51	97.94	113.03	93.31	0.16	N110.9°E
L102	98.9	99.7	88.1	106.10	94.98	0.11	N113.6°E
L103	106.7	115.64	99.6	115.15	98.47	0.14	N113.8°E
L104	90.15	97.92	87.3	99.2	91.30	0.11	N115.5°E
L105	105.3	114.4	98.65	114.06	99.22	0.13	N102.7°E
L201	86.3	89.69	77.91	88.37	77.32	0.13	N107.0°E
L202	97.9	104	87.8	104.10	87.80	0.16	N95°E
L204	95.4	101.3	89.7	102.6	88.00	0.13	N85°E



**Figure 5.** The relationship between triaxial stress and burial depth  
**图 5. 三向应力与埋深的关系**

图 5 主要表示随着埋深的增加，三向应力呈线性增加的趋势，所测埋藏深度的地应力以水平构造应力为主，但随着埋深的增加，水平构造应力的主导作用有所减弱，垂直主应力的作用效果增加，垂向应力的增加速率远高于水力主应力，根据拟合公式得知，在深度为 4300 m 时，垂向应力逐渐超过最大水平主应力，起主导作用。

## 5. 结论

- (1) 基于室内三轴试验和测井解释，建立岩石静态、动态力学参数转换关系，二者呈现良好的线性关系，岩石动态杨氏模量介于 33.6~47.1 GPa，动态泊松比介于 0.20~0.23，静态杨氏模量为 39.4~46.9 GPa，静态泊松比为 0.25~0.28。
- (2) 基于多方法对地应力大小和方向进行表征，单井最大水平主应力的范围 97~115 MPa，最小水平主应力的范围 77~100 MPa，垂向应力的范围 86~106 MPa，主要是走滑应力状态，单井垂向应力随埋深的增加速率最快，地应力方向 NE 向(100°~120°)为主。

## 参考文献

- [1] 周淑慧, 王军, 梁严. 碳中和背景下中国“十四五”天然气行业发展[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 171-182.
- [2] 王红岩, 蔚远江, 常宝华, 等. 能源低碳转型背景下中国天然气工业的发展路径[J/OL]. 世界石油工业: 1-10. <https://doi.org/10.20114/j.issn.1006-0030.20250329001>, 2025-10-23.
- [3] 郭彤楼. 中国页岩气发展的回顾与思考——从志留系到寒武系[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(03): 339-348.
- [4] 李勇, 何建华, 邓虎成, 等. 深层页岩储层现今地应力场特征及其对页岩储层改造的影响——以川南永川页岩气区块五峰-龙马溪组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(3): 546-563.
- [5] 刘绍军, 刘勇, 赵圣贤, 等. 泸州北区深层页岩现今地应力场分布特征及扰动规律[J]. 地球科学进展, 2023, 38(12): 1271-1284.
- [6] 韩松, 李丽丽, 胡智凡, 等. 大庆油田 A 开发区岩石力学参数及地应力演变规律[J]. 石油地质与工程, 2025, 39(3): 85-91.
- [7] 孟文, 田涛, 孙东生, 等. 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, 2022, 28(4): 537-549.
- [8] 张相权. 川东南地区深层页岩气水平井压裂改造实践与认识[J]. 钻采工艺, 2019, 42(5): 124-126.
- [9] 郑珊珊. 川南地区五峰一龙马溪组页岩储层特征及成岩演化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [10] 唐鑫. 川南地区龙马溪组页岩气成藏的构造控制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [11] 石学文, 吴伟, 胡海燕, 等. 泸州地区深层五峰-龙马溪组页岩气储层全孔径表征及其主控因素[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 158-172.
- [12] 王振. 页岩气储层岩石力学参数及脆性测井评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [13] 刘利斌, 段东, 郑朝阳. 基于岩石声发射 Kaiser 效应的地应力测试研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 45-50.
- [14] 彭瑞, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 不同岩性岩石声发射地应力测试及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(9): 3377-3384.
- [15] 张兵, 冯兴强, 米洪刚, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区致密砂岩储层岩石力学参数和地应力分析[J]. 中国海上油气, 2023, 35(6): 51-59.
- [16] 卢蕊. 泥页岩储层岩石力学参数与地应力表征方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [17] Zhong C, Qin Q.R., Zhou J.L. and Hu D.F. (2018) Study on Fault Sealing of Organic-Rich Shale by Present Stress: A Case Study of Longmaxi Formation in Dingshan Area, Southeast Sichuan. *Journal of Geomechanics*, 24, 452-464.
- [18] Lauten, W.T., Tahini, A. and Khan, M. (2001) Application of the Kaiser Effect to the Measurement of *in-Situ* Stress in Arabian Devonian Sandstone. *International Symposium of the Society of Core Analysts*, Edinburgh, 17-19 September 2001.
- [19] 姚勇. 玉北古近系盐膏岩地层地应力研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016.

- 
- [20] Zhang, J.Y., Chen, J.B., Lei, J.J., Xiong J, Nie X.R., Gong D.G., Ning P.Z. and Shi R.D. (2025) Kaiser Acoustic Emission Ground Stress Testing Study on Shale Oil Reservoir in Y Block of Ordos Basin, China. *Scientific Reports*, 15, Article No. 12038. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95565-y>.
  - [21] 谢润成. 川西坳陷须家河组探井地应力解释与井壁稳定性评价[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2009.
  - [22] 佟恺林, 蔡鸿燕, 李金玺, 等. 四川 LZ 页岩储层现今地应力方向及主控因素——以龙一段为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3224-3236.