

基于叠前地震反演弹性参数的渝西W井区页岩储层水平地应力预测

刘鸿宇, 陈志愿, 吴骏豪, 吴欣雨

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年9月9日; 录用日期: 2026年10月11日; 发布日期: 2026年10月22日

摘 要

针对页岩储层井间地应力难以连续表征的问题, 以渝西W井区五峰组-龙一1亚段为研究对象, 基于测井、岩心实验及叠前地震资料开展水平地应力预测。首先利用叠前同时反演获得纵、横波速度和密度等弹性参数, 并计算杨氏模量和泊松比; 结合岩心实验建立杨氏模量动静态转换关系, 在此基础上利用弹性参数约束的水平地应力计算关系, 预测最大、最小水平主应力及水平应力差异比(DHSR), 并采用DFIT及岩心声发射实验资料进行验证。结果表明, 研究区最大水平主应力约为82~128 MPa, 主体为95~118 MPa; 最小水平主应力约为71~109 MPa, 主体为80~100 MPa; DHSR约为0.08~0.25, 主体为0.12~0.21, 均表现出一定的空间非均质性。水平地应力空间变化与构造埋深并非简单对应, 其非均质性受上覆载荷、岩石弹性性质、裂缝柔度和局部构造等条件共同影响。井点验证结果表明, 预测结果与实测及实验资料具有较好的一致性, 可实现水平地应力由井点向井间的连续表征, 为页岩储层地质-工程评价提供参考。

关键词

页岩储层, 叠前同时反演, 弹性参数, 水平地应力, 水平应力差异比

Horizontal *In-Situ* Stress Prediction of Shale Reservoirs in the W Well Area of Western Chongqing Based on Elastic Parameters from Prestack Seismic Inversion

Hongyu Liu, Zhiyuan Chen, Junhao Wu, Xinyu Wu

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: September 9, 2026; accepted: October 11, 2026; published: October 22, 2026

文章引用: 刘鸿宇, 陈志愿, 吴骏豪, 吴欣雨. 基于叠前地震反演弹性参数的渝西W井区页岩储层水平地应力预测[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(10): 1446-1460. DOI: 10.12677/ag.2026.1610128

Abstract

To address the difficulty of continuously characterizing interwell *in-situ* stress in shale reservoirs, the Wufeng Formation-Longyi-1 submember in the W well area of western Chongqing was selected as the study interval. Horizontal *in-situ* stress prediction was conducted using well-log, core experimental, and prestack seismic data. Prestack simultaneous inversion was first applied to obtain P-wave velocity, S-wave velocity, and density, from which Young's modulus and Poisson's ratio were calculated. A dynamic-to-static conversion relationship for Young's modulus was established based on core experimental data. Subsequently, the maximum horizontal principal stress, minimum horizontal principal stress, and differential horizontal stress ratio (DHSR) were predicted using an elastic-parameter-constrained stress calculation method, and the results were validated using DFIT and core acoustic-emission data. The results show that the maximum horizontal principal stress ranges from approximately 82 to 128 MPa, mainly between 95 and 118 MPa, while the minimum horizontal principal stress ranges from approximately 71 to 109 MPa, mainly between 80 and 100 MPa. The DHSR ranges from approximately 0.08 to 0.25, mainly between 0.12 and 0.21, exhibiting evident spatial heterogeneity. The spatial variation in horizontal *in-situ* stress does not show a simple correspondence with structural burial depth, and its heterogeneity is jointly influenced by overburden loading, rock elastic properties, fracture compliance, and local structural conditions. Validation results show good agreement between the predicted and measured/experimental stress values. The proposed approach enables continuous characterization of horizontal *in-situ* stress from wells to interwell areas and provides a reference for geological-engineering evaluation of shale reservoirs.

Keywords

Shale Reservoir, Prestack Simultaneous Inversion, Elastic Parameters, Horizontal *In-Situ* Stress, Differential Horizontal Stress Ratio

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

随着四川盆地页岩气勘探开发不断拓展,页岩储层具有致密、非均质性强及地应力条件复杂等特点,地应力对水平井部署、水力压裂裂缝起裂与扩展及储层改造效果具有重要影响[1]。渝西地区是四川盆地页岩气勘探的重要区域之一,该区页岩储层地应力具有一定的空间非均质性。因此,准确刻画页岩储层最大、最小水平主应力的空间分布,是开展页岩气储层地质工程评价和后续开发方案优化的重要基础。

目前,储层地应力主要通过现场原位测试、岩心实验、测井解释以及地质力学数值模拟等方法获取。DFIT 可获得井点附近较为可靠的地应力信息,岩心声发射和力学实验可为岩石力学性质及应力状态评价提供约束,但上述方法主要局限于井点或有限深度范围,难以表征井间地应力的连续变化。地质力学数值模拟虽可综合考虑构造、断层、岩石力学性质和边界条件等因素,但其结果受地质模型精度、边界条件及力学参数赋值影响较大[2]。

相比单井资料,三维地震资料具有覆盖范围广、横向连续性好的优势。叠前同时反演可获得纵波速度、横波速度和密度等弹性参数体,并进一步计算杨氏模量和泊松比,为地应力空间预测提供连续参数基础。然而,地震反演不能直接获得原位地应力,需要建立弹性参数与地应力之间的力学转换关系。页岩储层地应力受上覆载荷、岩石弹性性质及区域构造作用等因素共同影响。因此,如何将地震反演获得的纵、横波速度和

密度转换为岩石力学参数，并进一步计算最大、最小水平主应力，是实现井间地应力连续预测的关键[3]。

因此，本文以渝西区块 W 井区五峰组 - 龙马溪组龙一 1 亚段页岩为研究对象，在叠前地震反演基础上，利用纵波速度、横波速度和密度计算杨氏模量、泊松比等岩石力学参数，并结合弹性参数约束的水平地应力计算关系，预测最大、最小水平主应力及应力差异比。利用 DFIT 测试及岩心声发射实验结果进行验证，进一步分析目的层水平地应力及水平应力差异比的空间分布特征，为研究区页岩储层地应力空间表征及地质 - 工程评价提供参考。

2. 区域地质背景

2.1. 构造位置

四川盆地处于扬子地块西北缘，为多期构造 - 沉积演化形成的大型叠合盆地。渝西地区位于盆地南部 - 东南部，处于川中平缓构造带与川南低陡构造带过渡区，区域构造总体呈北东 - 南西向展布。

渝西 W 井区位于渝西区块中部偏西，处于西山构造西侧、蒲吕场向斜中部附近。工区邻区构造轴线及主要断裂以北东 - 南西向为主，较大规模断裂主要分布于构造主体两翼。研究区主体深部构造相对平缓，五峰组 - 龙一 1 亚段整体具有较稳定的空间展布。

2.2. 地层、沉积及储层特征

研究目的层为上奥陶统五峰组至下志留统龙马溪组龙一 1 亚段，其中龙一 1 亚段划分为 1~4 小层。井震资料表明，五峰组 - 龙一 1 亚段横向连续性较好，整体由南西向北东略有减薄，五峰组厚度相对稳定。

五峰组 - 龙马溪组沉积期经历明显海平面变化。晚奥陶世 - 早志留世海侵背景下，研究区主要发育陆棚沉积，其中深水陆棚环境有利于有机质保存和富有机质硅质页岩发育。五峰组上部至龙一 1 亚段下部水体较深，随后受海平面下降及陆源碎屑输入增强影响，龙一 1 亚段自下而上逐渐变浅，岩相由富有机质硅质页岩向中 - 贫有机质硅质、混合质及黏土质页岩过渡，形成明显的纵向非均质性。向上至 2~3 小层逐渐过渡为中有机质硅质及混合质页岩，4 小层以贫有机质硅质、混合质及黏土质页岩为主，储层品质总体变差。因此，本文选取五峰组 - 龙一 1 亚段作为地应力地震预测目的层[4] (图 1)。

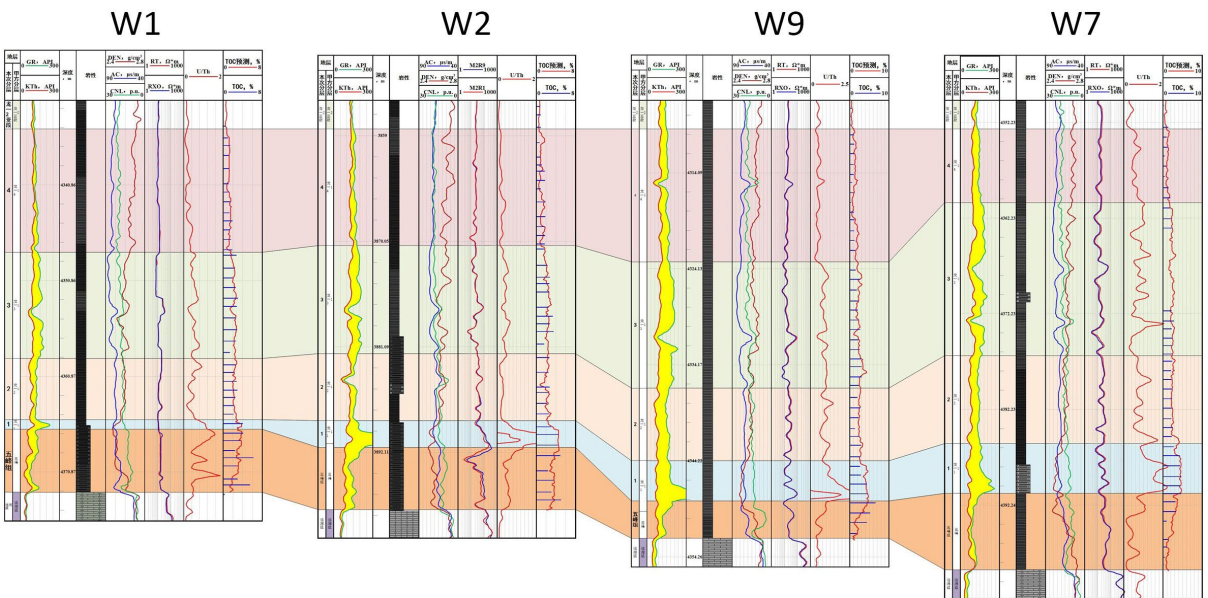


Figure 1. Cross-well profile of wells W1-W2-W9-W7, Wufeng-Longyi-1 sub-member
图 1. 过 W1-W2-W9-W7 井五峰 - 龙一 1 亚段连井剖面图

3. 页岩储层弹性参数与岩石力学特征

3.1. 弹性参数响应特征

研究区五峰组-龙一1亚段页岩以石英和黏土矿物为主要矿物组分,同时含有一定比例的碳酸盐矿物、长石及黄铁矿。实验资料表明,研究区多数井石英含量为40%~60%,平均约48.60%;黏土矿物含量为20%~40%,平均约31.52%。

不同矿物具有不同的弹性响应特征,研究区五峰组上部及龙一1亚段1小层富-中有机质硅质页岩较发育,而向上至龙一1亚段2~4小层,混合质和黏土质组分有所增加。因此,不同层段页岩在纵、横波速度以及杨氏模量和泊松比等参数上具备产生差异响应的地质基础。其中研究区页岩脆性与矿物组成具有较为明显的关系,硅质矿物含量增加通常对应较高的刚度,而黏土矿物增加多表现出较高泊松比和低弹性模量特征[5]。

从岩石物理角度看,纵波速度 V_p 受岩石体积模量、剪切模量和密度共同影响,横波速度 V_s 主要受剪切模量和密度控制。因此,单一纵波速度往往难以完整描述页岩岩石力学性质,而同时利用 V_p 、 V_s 和密度 ρ 可以获得更全面的弹性信息,并进一步计算杨氏模量和泊松比。

对于各向同性线弹性介质,其动态剪切模量 G_d 和动态体积模量 K_d 可分别表示为:

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$$K_d = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (2)$$

由此可进一步计算动态杨氏模量 E_d 和动态泊松比 ν_d :

$$E_d = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (3)$$

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (4)$$

式中, V_p 和 V_s 分别为纵、横波速度, ρ 为岩石密度。

3.2. 动态与静态岩石力学参数转换

基于纵、横波速度及密度计算得到的杨氏模量和泊松比属于动态岩石力学参数,而岩心力学实验获得的静态参数主要反映岩石在准静态加载条件下的变形特征。受加载频率、应变幅度以及岩石内部孔隙、微裂隙等因素影响,动态参数与静态参数在数值上存在一定差异。尤其对于杨氏模量,动静态实验结果之间通常具有较为明显的系统差异,因此将地震预测的弹性参数用于地应力计算之前,有必要开展动静态参数校正[6]。

本文选取研究区12组具有深度对应关系的岩心力学实验获得的静态杨氏模量与相应深度处由声波资料计算得到的动态杨氏模量进行配对分析。结果表明,动态杨氏模量与静态杨氏模量总体具有较好的线性相关性,可通过线性回归建立二者之间的转换关系。本文采用的动静态杨氏模量转换关系为:

$$E_s = 1.46E_d - 19.85 \quad (5)$$

式中, E_d 为动态杨氏模量, E_s 为静态杨氏模量。通过该转换关系,可将测井及叠前地震反演获得的动态杨氏模量校正至静态尺度。由图2可见,动静态杨氏模量具有较好的线性相关性。图3中转换后的静态杨氏模量与实测值整体接近1:1一致性关系,说明该转换关系能够有效减小动静态杨氏模量之间的差异。

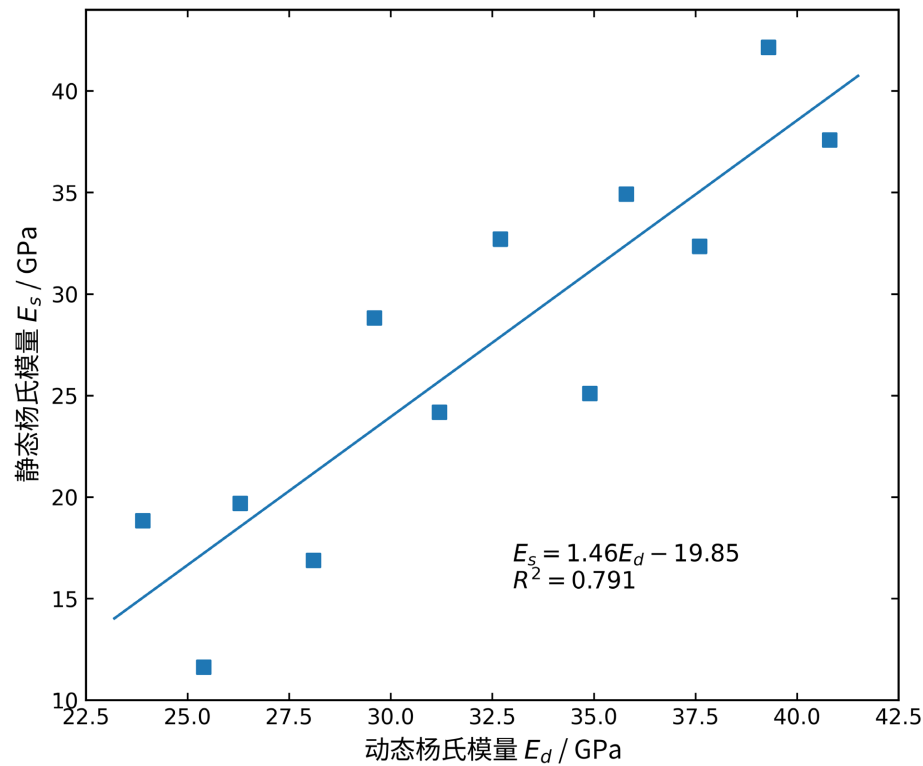


Figure 2. Fitting of dynamic Young's modulus and measured static Young's modulus
图 2. 动态杨氏模量与实测静态杨氏模量拟合

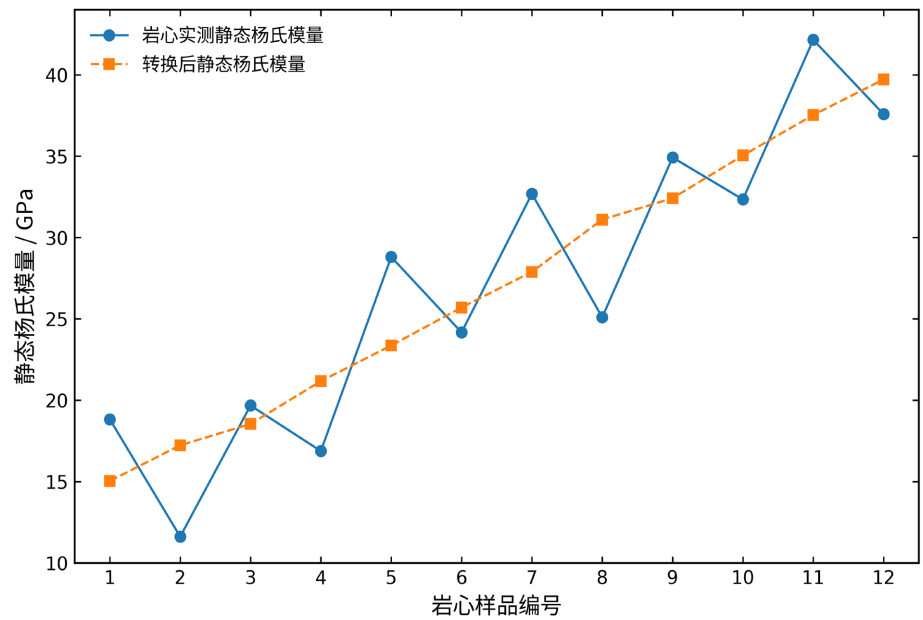


Figure 3. Consistency between converted and measured static Young's modulus
图 3. 转换后静态杨氏模量与实测静态杨氏模量一致性关系

与杨氏模量不同，基于岩心实验测试结果，统计研究区全部样本的动、静态泊松比，其相对误差普遍小于 3%， R^2 约为 0.98，未表现出显著系统性误差，且泊松比本身为无量纲参数，有限样本下强行校正反而增加参数误差。因此，本文不对泊松比进行动静转换。

综上,后续地应力计算中杨氏模量采用动静态标定后的静态杨氏模量 E_s ,泊松比采用动态泊松比 ν_d ,并将其应用于地震反演数据体(表 1)。

Table 1. Experimental data of dynamic and static Poisson’s ratio for partial core samples
表 1. 部分岩心样本动静态泊松比实验数据

岩心编号	动态泊松比	静态泊松比	相对误差%
Core1	0.230	0.229	0.44
Core2	0.241	0.244	1.23
Core3	0.217	0.222	2.25
Core4	0.253	0.249	1.61

4. 叠前地震反演及弹性参数预测

4.1. 叠前同时反演基本原理

相较于常规叠后波阻抗反演,叠前地震反演能够综合利用不同入射角地震反射信息,联合纵波阻抗、横波阻抗及密度等弹性参数,为页岩储层岩石力学参数及地应力预测提供基础。

叠前同时反演以 Zoeppritz 方程及其近似表达为理论基础,将不同入射角条件下的纵波反射系数与纵、横波阻抗和密度变化建立联系[7]。其基本方程为 Fatti 近似式,表达式为:

$$R(\theta) = \left(1 + \tan^2 \theta\right) \frac{\Delta I_p}{2I_p} - 8 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \frac{\Delta I_s}{2I_s} \sin^2 \theta + \left[4 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \sin^2 \theta - \tan^2 \theta\right] \frac{\Delta \rho}{2\rho} \tag{6}$$

4.2. 叠前同时反演流程

叠前同时反演的可靠性受到地震资料品质、井震标定、层位解释以及初始模型精度等因素影响。本文在叠前地震资料处理和测井资料标准化的基础上,通过井震结合建立低频初始模型,并利用不同角度叠加数据开展叠前同时反演。

首先,对叠前地震数据进行分角度叠加、测井曲线标准化、制作合成地震记录,通过子波提取及井震标定建立测井深度域与地震时间域的对应关系,完成主要层位的精细标定。

其次,对目的层开展层位平滑和空间插值,并将测井纵波速度、横波速度及密度等弹性信息沿解释层位进行空间外推,建立具有地质结构约束的低频初始模型,低频模型用于补充地震资料自身缺失的低频信息。随后,将不同角度叠加地震数据、测井弹性参数和低频模型载入叠前同时反演。通过不断调整模型参数,使模型正演记录与实际不同角度地震资料之间的误差逐步减小,最终获得纵波阻抗 Z_p 、横波阻抗 Z_s 、纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 及密度 ρ 等三维弹性参数数据体。叠前同时反演技术流程如图 4 所示。

4.3. 反演结果及井点精度验证

基于叠前同时反演获得研究区纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 和密度 ρ 等弹性参数数据体,并进一步计算得到杨氏模量和泊松比。沿五峰组 - 龙一 1 亚段提取相应层位属性,得到杨氏模量、泊松比、纵、横波速度及密度平面分布结果(图 5)。

预测结果表明,研究区各弹性参数总体具有较好的空间连续性,同时表现出不同程度的横向非均质性。其中,纵、横波速度的空间变化特征具有一定相似性,局部高、低值区域具有较好的对应关系。密度同样表现出一定的横向变化,但局部非均质特征相对更加明显。相比之下,泊松比整体变化相对平缓,

局部存在一定的横向差异；其空间响应与杨氏模量并不完全一致。

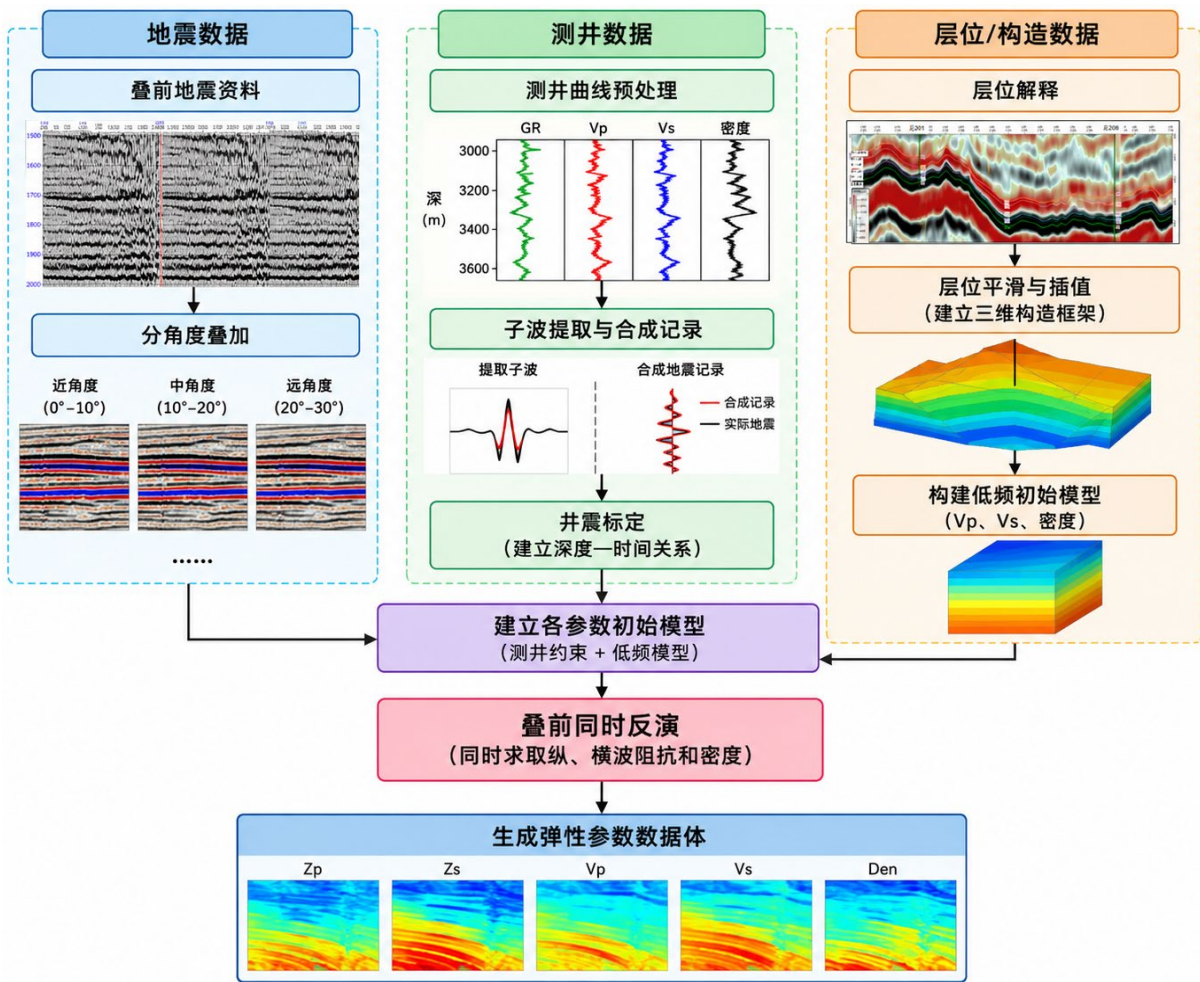
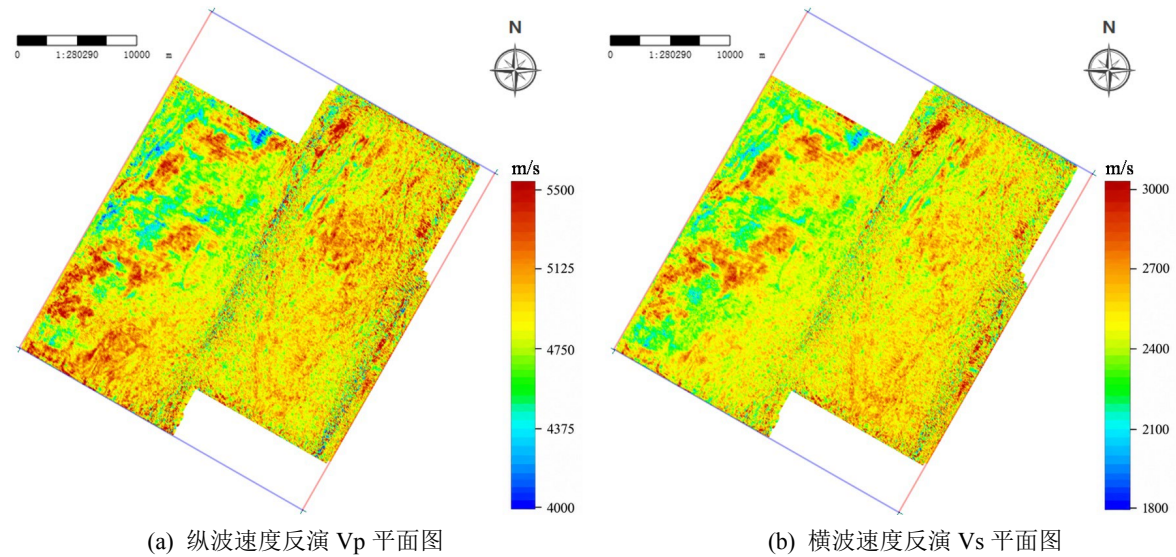


Figure 4. Workflow of prestack simultaneous inversion
图 4. 叠前同时反演技术流程图



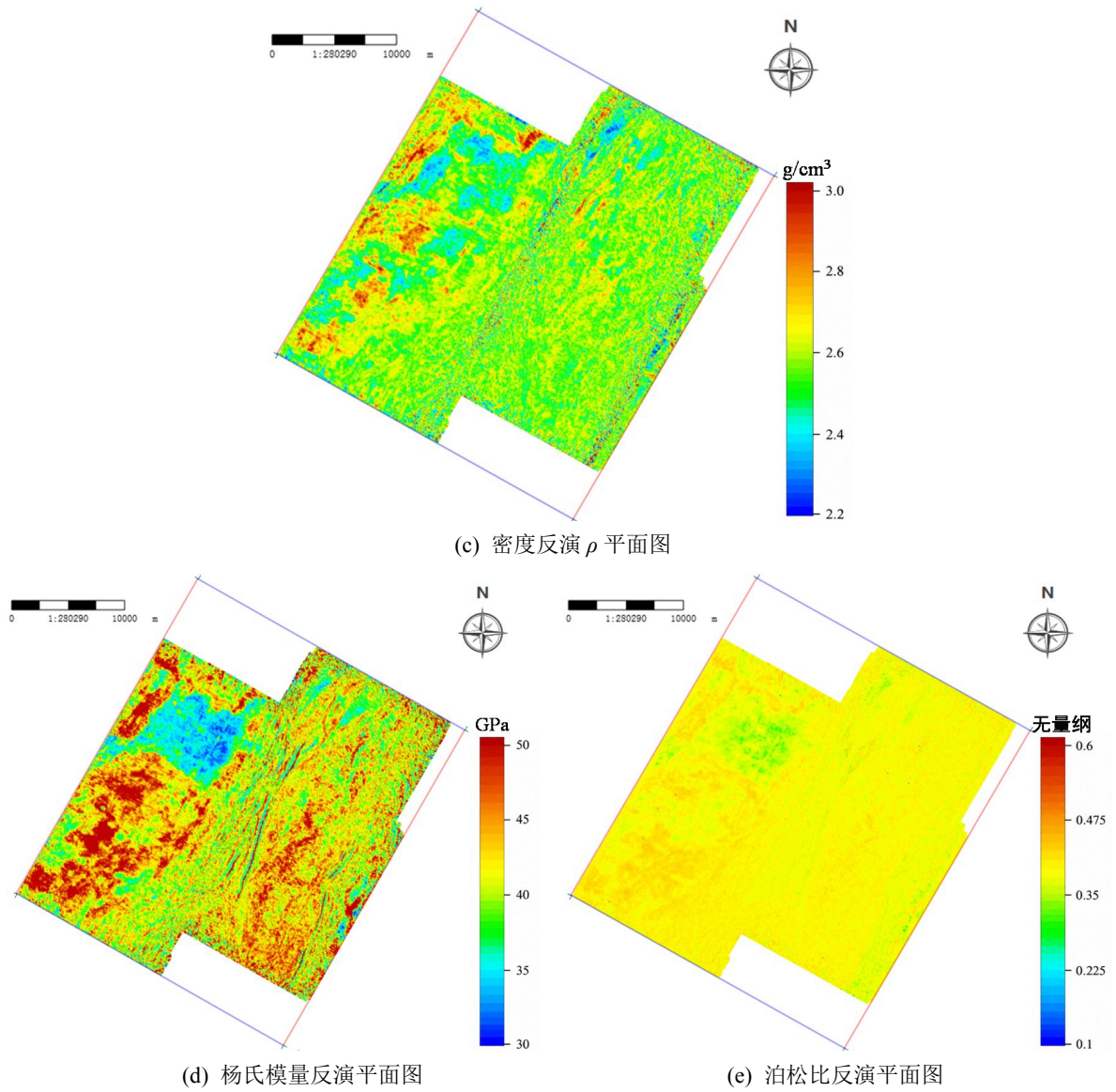


Figure 5. Planar distribution of elastic parameters in the Wufeng Formation-Longyi-1 submember in the W well area, western Chongqing

图 5. 渝西 W 井区五峰组 - 龙一 1 亚段弹性参数平面分布图

在此基础上, 进一步通过相关系数、均方根误差等指标对井点反演精度进行定量评价:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

式中, x_i 和 y_i 分别为测井实测值和对应位置的反演值, R 为相关系数, RMSE 为均方根误差。在定性对比的基础上, 选取 4 口代表井对反演结果进行定量评价。分别提取井点 V_p 、 V_s 和密度反演曲线, 与测井曲

线进行对比,采用 R 和 RMSE 评价反演精度,结果见表 2。各参数相关系数 R 为 0.87~0.94,表明反演结果与测井曲线具有较好的一致性,且 RMSE 整体较小。结合过井剖面及井曲线对比结果,认为本次反演结果能够较好地反映目的层弹性参数变化。

Table 2. Well-based accuracy evaluation of prestack simultaneous inversion results
表 2. 叠前同时反演结果井点精度评价

井名	参数	相关系数 R	RMSE
W1 井	V_p	0.93	176 m/s
	V_s	0.91	128 m/s
	ρ	0.89	0.057 g/cm ³
W2 井	V_p	0.91	203 m/s
	V_s	0.88	146 m/s
	ρ	0.92	0.052 g/cm ³
W3 井	V_p	0.94	164 m/s
	V_s	0.93	117 m/s
	ρ	0.90	0.061 g/cm ³
W6 井	V_p	0.89	218 m/s
	V_s	0.92	139 m/s
	ρ	0.87	0.068 g/cm ³

5. 基于弹性参数约束的地应力预测

5.1. 水平地应力计算方法理论基础

在叠前地震反演获得杨氏模量和泊松比等岩石力学参数的基础上,本文采用基于弹性约束的地应力计算公式开展研究区目的层地应力预测[8]。该公式通过建立岩石弹性参数与水平应力之间的定量关系,实现最大、最小水平主应力及应力差异比的计算[9]。

其最大、最小水平地应力及上覆压力表达式为:

$$S_{H\min} = \sigma_z \frac{\nu(1+\nu)}{1+EZ_N-\nu^2} \quad (9)$$

$$S_{H\max} = \sigma_z \frac{\nu(1+EZ_N+\nu)}{1+EZ_N-\nu^2} \quad (10)$$

$$\sigma_z = \int_0^z \rho(z)g dz \quad (11)$$

水平应力差异比表达式为:

$$DHSR = \frac{S_{H\max} - S_{H\min}}{S_{H\max}} = \frac{EZ_N}{1+EZ_N+\nu} \quad (12)$$

式中, E 为杨氏模量; ν 为泊松比; Z_N 为法向柔度; σ_z 为上覆压力; $S_{H\max}$ 和 $S_{H\min}$ 为最大、最小水平主应

力; $\rho(z)$ 为地层体积密度; g 为重力加速度; z 为垂向深度[8]。

5.2. 模型假设分析

本文采用的水平地应力计算关系建立在线性滑动理论基础上, 将裂缝引起的附加柔度引入背景弹性介质, 并利用弹性本构关系建立垂向应力、岩石弹性参数、裂缝柔度与水平主应力之间的定量关系。为简化区域尺度地应力预测, 将目的层背景介质近似视为各向同性弹性介质, 裂缝影响通过法向柔度参数 Z_N 等效表征。该假设主要用于描述地震尺度下水平地应力的区域变化, 适用于构造相对简单、目的层横向连续性较好的研究区页岩储层, 对于局部复杂裂缝和强构造变形区域存在一定局限性。

法向柔度 Z_N 是线性滑动理论中描述裂缝法向变形能力的重要参数, 反映裂缝面在法向应力作用下的柔顺程度。法向柔度与裂缝法向弱度 Δ_N 之间满足:

$$Z_N = \frac{\Delta_N}{M(1 - \Delta_N)} \quad (13)$$

式中, M 为纵波模量, Δ_N 为裂缝法向弱度, 其理论取值范围为 $(0 < \Delta_N < 1)$ 。考虑到本文主要利用地震可反演弹性参数建立水平地应力空间预测流程, 重点表征上覆压力、岩石弹性参数及裂缝柔度约束下的区域水平地应力变化, 因此孔隙压力未作为独立变量显式引入计算。对于研究区区域尺度的地震地应力预测, 该处理有利于保持模型参数与地震反演结果之间的直接对应关系; 对于局部异常孔隙压力发育层段, 孔隙压力变化可能对有效应力状态产生一定影响。

5.3. 地应力预测结果及实测资料验证

在完成地应力模型参数确定的基础上, 以叠前同时反演获得的三维数据体为基础计算弹性参数。其中, 杨氏模量采用动静态转换关系进行校正, 泊松比不进行动静态转换。随后, 对研究区五峰组-龙一1亚段进行逐点地应力计算, 获得最大水平主应力 S_{Hmax} 和最小水平主应力 S_{Hmin} 预测数据体, 并计算水平应力差异比, 从而实现水平地应力由井点向井间空间的连续预测[10]。

为检验地震预测结果的可靠性, 选取研究区 W3、W6、W8 和 W10 井进行井点验证, 其中 W6、W8 井采用 DFIT 实测资料, W3、W10 井采用岩心声发射试验资料。其中 DFIT 具有原位测试精度高的优点, 但成本较高且仅能获取井点数据, 声发射实验依托岩心加载实验获取地应力数据, 二者地应力实测资料都往往数量有限且获取难度高, 但具有一定的精度和可靠性。通过联合两种实测数据对预测结果进行验证, 增加预测的可靠性。在对应井位及目的层位置提取地震预测值, 并分别与测井计算值及实测实验值进行对比, 以实测实验值作为地应力预测精度评价的主要依据。结果表明, 各验证井地震预测值与实测值总体较为接近。其中, 最大水平主应力预测绝对误差为 1.62~2.50 MPa, 最小水平主应力预测绝对误差为 0.10~3.36 MPa (表 3)。

考虑到最大、最小水平主应力在数值范围及物理意义上存在差异, 本文不将两类应力数据混合拟合, 而是分别建立地震预测值与实测值之间的一致性交会关系, 并采用决定系数 R^2 、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)评价预测效果。 S_{Hmax} 预测结果的 R^2 为 0.902, MAE 和 RMSE 分别为 1.99 MPa 和 2.02 MPa; S_{Hmin} 预测结果的 R^2 为 0.897, MAE 和 RMSE 分别为 2.20 MPa 和 2.56 MPa。两类应力的决定系数均接近或达到 0.90, 且 MAE 和 RMSE 相对于研究区整体地应力水平较小。

综合误差统计和交会分析, 在现有有限验证样本条件下, 预测结果与实测资料尽管部分井点存在一定程度的预测偏差, 但总体预测误差较小。表明基于叠前地震反演弹性参数和水平地应力计算关系建立的地应力预测方法能够较好地表征研究区实际水平地应力变化。

Table 3. Comparison between predicted and measured horizontal *in-situ* stress in the W well area
表 3. 渝西 W 井区水平地应力预测结果与实测结果对比

井名	应力类型	测井计算值/MPa	地震预测值/MPa	实测值/MPa	绝对误差/MPa
W3 井	S_{Hmax}	101.10	102.04	99.54	2.50
	S_{Hmin}	83.58	83.67	80.40	3.27
W6 井	S_{Hmax}	111.00	115.52	113.90	1.62
	S_{Hmin}	92.00	92.80	94.86	2.06
W8 井	S_{Hmax}	108.00	111.71	113.90	2.19
	S_{Hmin}	92.00	98.07	101.43	3.36
W10 井	S_{Hmax}	99.36	104.53	102.89	1.64
	S_{Hmin}	85.19	86.88	86.78	0.10

6. 地应力预测结果及空间分布特征

6.1. 最大、最小水平主应力及应力差异比分布特征

沿目的层提取 S_{Hmax} 、 S_{Hmin} 及 DHSR 平面属性，最大水平主应力 S_{Hmax} 平面分布如图 6 所示。整体来看，研究区五峰组 - 龙一 1 亚段 S_{Hmax} 约为 82~128 MPa，主体分布于约 95~118 MPa，整体处于较高水平地应力背景。平面上具有较明显的横向非均质性，其中研究区中北部局部发育相对低值区；外围及部分南部区域应力相对较高，局部超 120 MPa。部分区域可见条带状或局部高、低值异常。

最小水平主应力 S_{Hmin} 整体约为 71~109 MPa，主体位于 80~100 MPa，其平面分布与 S_{Hmax} 并不完全一致。图 6 显示，研究区北部 - 中北部局部形成相对高值区，局部应力接近或超过 100 MPa；中部及南部部分区域相对较低。相比最大水平主应力，最小水平主应力局部异常的集中程度更加明显。

本文采用水平主应力差异比 DHSR 对目的层水平应力差异进行评价。由图 7 可见，研究区 DHSR 整体约为 0.08~0.25，主要位于 0.12~0.21，不同区域两向水平主应力之间存在不同程度的相对差异，具有较明显的空间非均质性，其中中北部局部区域以相对低值为主；西部、南部及部分外围区域 DHSR 相对较

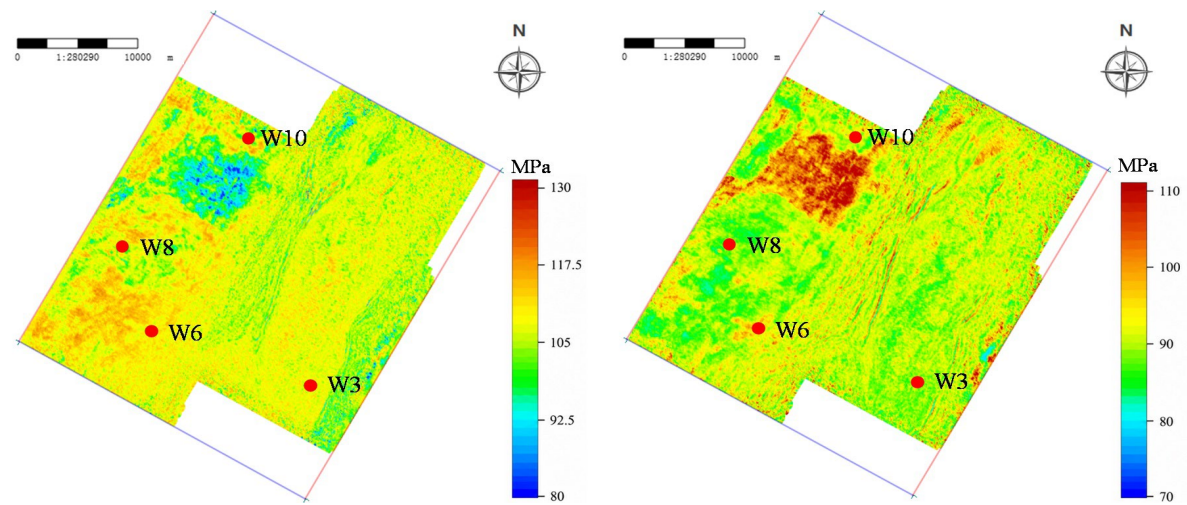


Figure 6. Planar distributions of maximum horizontal principal *in-situ* stress (left) and minimum horizontal principal *in-situ* stress (right)

图 6. 最大水平主应力(左)与最小水平主应力(右)平面分布图

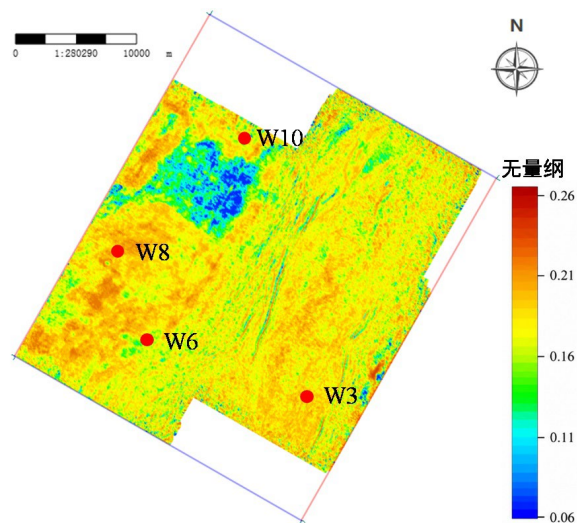


Figure 7. Planar distribution of differential horizontal stress ratio (DHSR)
图 7. 水平应力差异比平面分布图

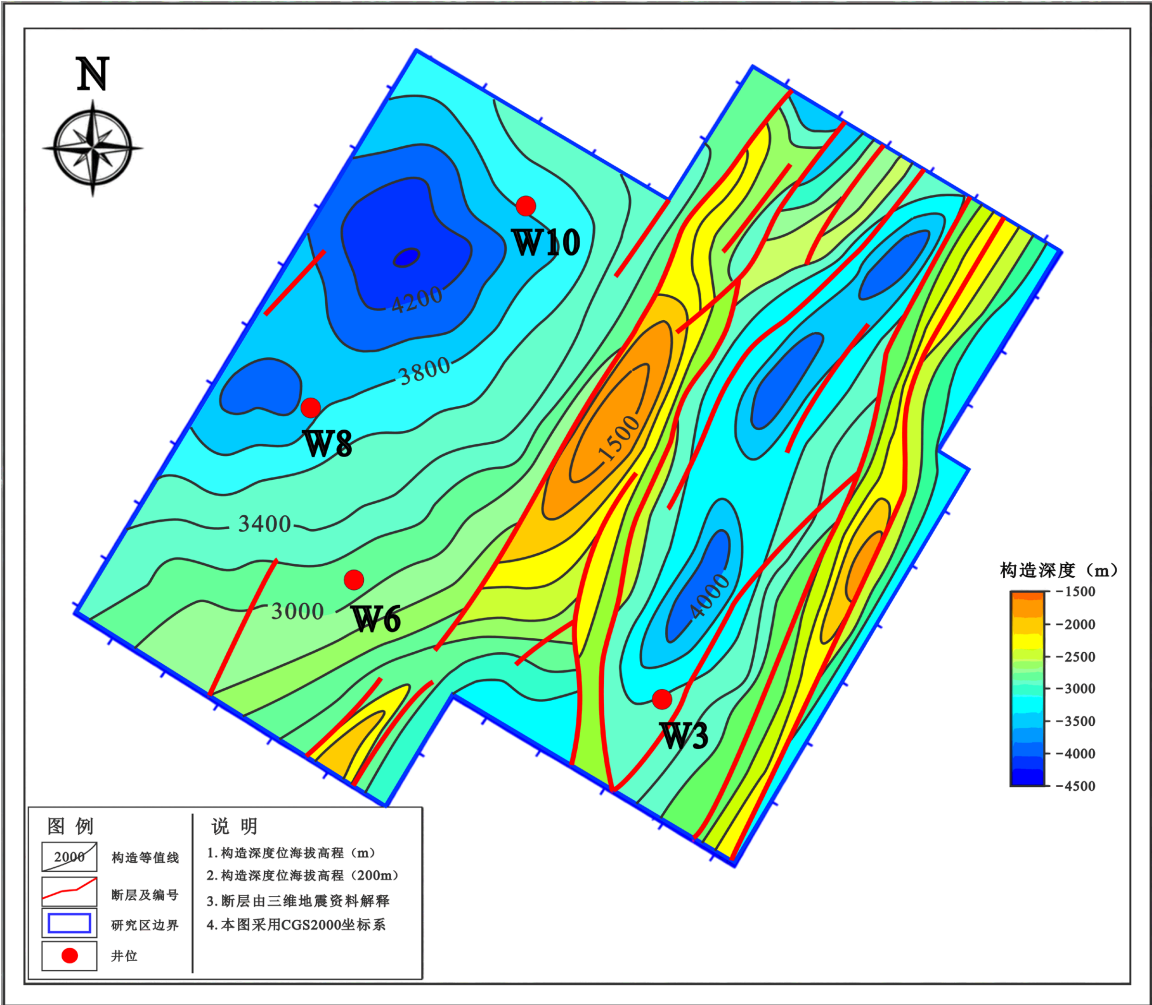


Figure 8. Structural characteristics map of the study area
图 8. 研究区构造特征图

高。DHSR 较低表明最大、最小水平主应力相对接近，两向水平应力状态的分异程度相对较弱；较高的区域则说明分异更加明显。对比弹性参数平面分布结果可知，三类地应力属性的局部异常区并非完全重合，其空间变化受多种参数共同影响，并非单一参数的简单映射。

6.2. 构造背景与水平地应力空间非均质性

为进一步分析研究区水平地应力空间非均质性的地质成因，将水平主应力及 DHSR 平面分布与目的层构造和断裂展布进行对比(图 8)。研究区构造具有明显的空间分区特征，西部整体相对平缓，西北部埋藏较深；中部 - 东部构造起伏增强，并发育多条近北东 - 南西向断裂，局部断裂较为密集。

对比发现，水平地应力空间变化与构造埋深并非简单对应。上覆载荷为区域地应力提供基础应力背景，但 S_{Hmax} 和 S_{Hmin} 还受到岩石弹性性质、裂缝柔度及局部构造条件的共同影响。例如，W10 井位于西北部相对深埋区，但附近 S_{Hmax} 相对较低；W6 井埋深相对较浅，而 S_{Hmax} 相对较高，表明单一埋深因素不足以解释水平地应力的空间差异。

研究区中部 - 东部断裂较为发育，部分水平主应力及 DHSR 异常区与断裂发育和构造变化较快区域具有一定空间对应关系，表明断裂及局部构造变化可能对地应力产生一定调整。综合来看，研究区水平地应力空间非均质性是上覆载荷、岩石弹性性质、裂缝柔度及构造背景共同作用的结果，从而使 S_{Hmax} 、 S_{Hmin} 和 DHSR 在整体连续分布的基础上表现出局部差异。

7. 讨论

7.1. 预测方法的可靠性、适用性和局限性

本文以叠前同时反演获得的弹性参数为基础，通过岩石弹性参数动静态校正和地应力计算方法实现井间地应力预测。验证结果表明该流程在研究区具有一定适用性，为在有限条件下开展地应力连续预测提供了一种可行方法。受现有资料限制，本文主要考虑地震弹性参数约束的影响，未显式引入断层、天然裂缝等条件，而是在预测结果解释阶段结合构造及断裂分布讨论地应力空间非均质性的可能地质成因。因此对局部应力异常的刻画仍存在一定局限，后续可结合更多实测地应力及裂缝等资料进行约束[11]。

7.2. 关键参数敏感性与不确定性分析

本文为评价模型输入参数对水平地应力预测结果的影响，选取杨氏模量、泊松比、法向柔度 Z_N 和垂向应力进行敏感性分析。在保持其他参数不变的条件下，分别对单一参数施加-10%、-5%、0、+5%和+10%的相对扰动，计算 S_{Hmax} 、 S_{Hmin} 及 DHSR 相对于基准结果的变化率(图 9)。

结果表明，不同参数对预测结果的敏感程度存在差异。垂向应力对 S_{Hmax} 和 S_{Hmin} 具有直接影响，而对 DHSR 基本无影响；泊松比 ν 对两向水平主应力较为敏感，随 ν 增大， S_{Hmax} 和 S_{Hmin} 均明显增大。相比之下， E 和 Z_N 对水平主应力的影响相对较小，但对 DHSR 较为敏感。

在相同相对扰动幅度下， E 与 Z_N 的敏感性曲线重合，这是由于二者在计算关系中以乘积 EZ_N 的形式共同参与计算，相同比例的单因素扰动产生相同的数学响应。因此，实际预测不确定性不仅取决于参数敏感程度，还取决于自身的误差范围。

总体来看， S_{Hmax} 和 S_{Hmin} 主要受 ν 和 σ_z 变化影响，DHSR 则对 E 和 Z_N 更为敏感。因此，地应力预测中应重点控制弹性参数反演、动静态转换及法向柔度确定过程中的误差。本文采用单因素扰动评价参数不确定性的传播特征，尚未考虑不同参数误差的耦合作用，后续可结合更多实测资料进一步开展概率不确定性评价。

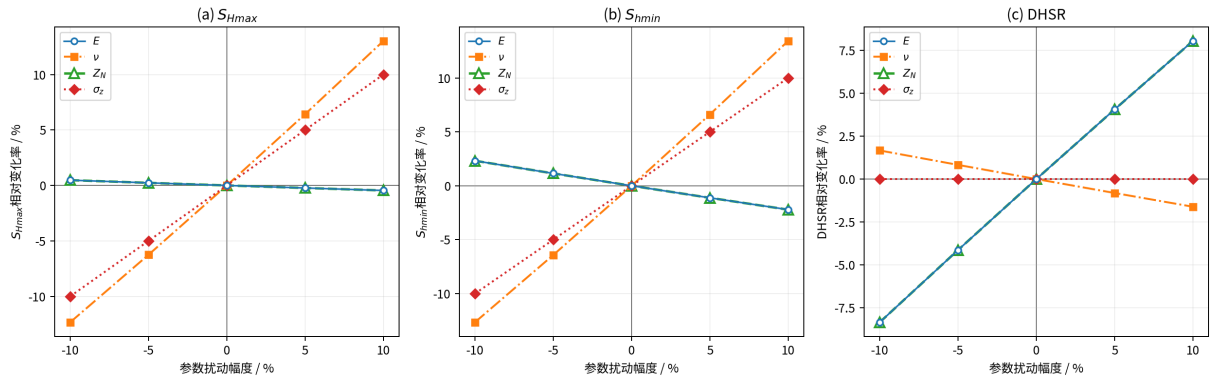


Figure 9. Parameter sensitivity analysis
图 9. 参数敏感性分析图

8. 结论

本文以渝西 W 井区五峰组 - 龙一 1 亚段为研究对象, 基于测井、岩心实验、叠前地震资料及实测地应力数据, 开展岩石力学参数分析、叠前同时反演及水平地应力预测, 主要认识如下:

1) 叠前同时反演获得了具有较好空间连续性的 V_p 、 V_s 和密度数据体, 井点反演结果与测井曲线总体吻合较好。在此基础上计算杨氏模量和泊松比, 为地应力预测提供了弹性参数基础。

2) 基于岩心实验与测井资料建立杨氏模量动静态转换关系, 对动态杨氏模量进行静态校正; 泊松比不进行动静态转换。在此基础上, 结合弹性参数约束的水平地应力计算关系, 建立了叠前地震反演约束下的水平地应力预测流程。

3) 研究区五峰组 - 龙一 1 亚段最大水平主应力主要分布于 95~118 MPa; 最小水平主应力主要集中于 80~100 MPa, 水平应力差异比 DHSR 主体集中于 0.12~0.21, 整体处于较高水平地应力数值特征, 具有明显的空间非均质性。

4) 水平地应力空间变化与构造埋深并非简单对应。上覆载荷构成区域应力背景, 岩石弹性性质、裂缝柔度及局部构造条件共同影响水平地应力空间分异, 部分应力及 DHSR 异常区与断裂发育和构造变化较快区域具有一定空间对应关系。

5) 参数敏感性分析表明, S_{Hmax} 和 S_{Hmin} 对泊松比和垂向应力的变化较为敏感, 而 DHSR 对杨氏模量和法向柔度更为敏感。在现有有限验证样本条件下, 井点验证结果具有较好的一致性, 可实现水平地应力由井点到井间的连续预测, 为页岩储层地质 - 工程评价及后续压裂开发部署提供参考。

基金项目

重庆科技大学科技创新基金项目“页岩储层地应力的 LightGBM-SHAP 智能地震预测方法与应用——以渝西 W 井区龙马溪组页岩储层为例”(立项编号: YKJCX2520107)资助。

参考文献

- [1] 林长城, 丁文龙, 王兴华, 等. 页岩储层地应力研究进展[J]. 科技通报, 2018, 34(7): 1-8+20.
- [2] 何建华, 熊亮, 王濡岳, 等. 川东南地区龙马溪组页岩现今地应力场扰动因素及其开发地质意义[J]. 石油学报, 2025, 46(4): 743-762.
- [3] 黄蕾. 页岩储层岩石物理特征及地应力地震预测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2024.
- [4] 蒋立伟, 刘成林, 董明祥, 等. 渝西地区五峰-龙马溪组页岩不同构造部位孔隙结构特征与发育模式[J]. 地质科学, 2026, 61(1): 176-190.

-
- [5] 宗国洪, 郭莉, 林卫东, 等. 渝西地区五峰组-龙马溪组深层页岩储层特征及甜点评价[C]//西安石油大学, 中国石油大学(华东), 陕西省石油学会. 2021 油气田勘探与开发国际会议论文集(中册). 2021: 782-791.
 - [6] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3300-3306.
 - [7] 曾靖. 基于 Zoeppritz 方程的叠前地震弹性参数反演方法研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
 - [8] Gray, F.D., Schmidt, D.P. and Delbecq, F. (2010) Optimize Shale Gas Field Development Using Stresses and Rock Strength Derived from 3D Seismic Data. *Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference*, Calgary, October 2010, SPE-137315-MS. <https://doi.org/10.2118/137315-ms>
 - [9] Gray, F.D., Anderson, P.F., Logel, J., Delbecq, F., Schmidt, D. and Schmid, R. (2012) Estimation of Stress and Geomechanical Properties Using 3D Seismic Data. *First Break*, **30**, 59-68. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2011042>
 - [10] 孙振森, 潘树林. 基于叠前地震反演的地应力预测方法研究与应用[C]//中国地球物理学会油气地球物理专业委员会. 第五届油气地球物理学术年会论文集. 2023: 572-577.
 - [11] 王静波, 敬朋贵, 陈祖庆, 等. 面向深层页岩气“甜点”预测的地震勘探技术进展——以 DX 探区全方位三维地震为例[J]. 石油物探, 2023, 62(6): 1154-1167.