

非均质致密油藏三维地应力场数值模拟评价

——以渤南油田Y176块为例

魏欣伟

中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营

收稿日期: 2023年5月18日; 录用日期: 2023年9月11日; 发布日期: 2023年9月18日

摘要

地应力是致密油气藏高效勘探开发的重要基础参数, 渤南油田Y176区块致密油藏沙四上亚段断裂构造复杂和非均质岩石的力学性质导致区域地应力变化复杂。研究基于高精度三维层位、断层地震解释数据构建了区域三维地质模型, 通过单井测井解释-井间地震体数据联合建模方法确定了非均质致密油藏岩石力学参数展布, 进一步应用构造应变系数法开展三维地应力场模拟, 结果与井点实测地应力大小、方向吻合较好。模拟结果表明: Y176块沙四上亚层段现今地应力数值呈西南低、东北高的分布趋势; 油藏断裂构造和非均质岩性对局部地应力场影响显著, 断块内及不同断块之间的现今地应力场差异明显。针对非均质性致密油藏的三维地应力数值模拟研究为渤南油田致密储层高效勘探开发提供了准确的三维地应力场数据。

关键词

非均质致密油藏, 岩石力学模型, 构造应变系数, 三维地应力场, 数值模拟

Numerical Evolution of the Three-Dimensional Stress Field of the Heterogeneous Tight Reservoir

—A Case Study of Y176 Area' Bonan Sag

Xinwei Wei

Geophysical Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

Received: May 18th, 2023; accepted: Sep. 11th, 2023; published: Sep. 18th, 2023

Abstract

In-situ stress is the fundamental basis for efficient exploration and development of tight reservoirs. Affected by regional fault structure and heterogeneous rock mechanical properties, the current stress field of tight oil reservoir in Y176 block of Bonan Oilfield varies complicatedly. In this research, 3D geological model is constructed based on high precision seismic interpretation data of 3D layers and faults. The heterogeneous rock mechanics parameters model of tight oil reservoir is established by well logging data and seismic volume data sampling. The three-dimensional stress field simulation is carried out by using the structure strain coefficient method, and the results are in good agreement with the measured *in-situ* stress magnitude and direction at the well site. The simulation results show that the *in-situ* stress is lower in southwest region and higher in northeast region for the Es₄ layer of Y176 block. The effect of fault structure and heterogeneous lithology on local stress field is significant. The *in-situ* stress fields change obviously within and between fault blocks. The numerical simulation of three-dimensional geostress in heterogeneous tight oil reservoirs provides accurate basic data for efficient exploration and development of tight reservoirs in Bonan Oilfield.

Keywords

Heterogeneous Tight Reservoir, Rock Mechanical Model, The Structure Strain Coefficient Method, Three-Dimensional Stress Field, Numerical Simulation

Copyright © 2023 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. 前言

渤海湾盆地渤南洼陷已进入复杂隐蔽油气藏精细勘探阶段，非常规致密油藏成为该区域新的勘探重点。地应力是致密油气勘探、钻井、储层改造方案设计重要的基础数据[1] [2]，掌握高精度现今三维地应力变化规律，对于满足勘探开发一体化的需求，提高致密油藏开发效果意义重大[3] [4] [5]。

国内外学者以地球物理参数为基础对地应力的求取技术进行了大量研究工作[6] [7]。国内学者从岩石力学参数同地应力关系方面开展研究，如刘建伟等[8]以测井岩石物理参数分析为基础，建立多元线性回归拟合力学计算公式，实现基于叠前弹性参数反演的三维应力场地震预测；张广智[9]等建立了基于页岩石物理等效模型的地应力预测方法；马妮[10]等基于正交各向异性介质理论的地应力计算模型，利用叠前方位地震数据估算了正交各向异性水平应力差异比。随计算机技术的发展，国外学者开展基于构造活动的数值分析方法预测地下地应力，并取得较好的应用效果，Parsons 等[11]以研究区 GPS 数据为边界约束，采用有限元数值模拟方法，研究了区域构造应力场特征；Matsuki 等[12]采用接触单元模拟断层影响，开展了含断层区块地应力场变化有限元模拟；国内在采用数值模拟分析基础上，尝试将测井、测试等岩石物理数据同数值模拟相结合开展非均质储层地应力预测，取得一定的效果，刘显太等[13]以研究区关键井地应力测量、计算结果为约束条件，采用弹性平面有限元模拟了纯 41 断块现今地应力场变化；徐珂等[14]构建了高尚堡油田深层油藏三维非均值岩石力学场并模拟分析了该区域现今地应力场的三维空间分布。

渤南油田致密油藏的岩性、矿物组分、岩石结构存在较大差异，油藏地应力受区域构造和岩性差异

的双重控制影响。本文基于渤南油田 Y176 区块致密储层高精度三维解释数据构建三维地质模型，单井测井解释和区块地震属性联合构建非均质致密储层三维岩石力学属性模型，采用有限元数值模拟方法获取研究区域非均质致密储层现今三维地应力场分布规律，既考虑了致密油藏非均质影响，又充分利用了数值模拟在构造应力场预测的优势，预测效果显著，为区块进一步的高效勘探开发提供指导。

2. 区域地质概况

渤南油田 Y176 块是致密油藏未动用储量中的典型代表，该区块属沾化洼陷东北部义南断裂和义东断裂的下降盘，目的层为沙四上亚段。区块含油井段长、埋藏深度大、油层纵向分散、储量丰度低。储集层岩性主要为细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩，胶结较疏松，测井孔隙度 2.739%~11.729%，渗透率 $0.012 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 6.355 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，泥灰岩储层厚 1.00 米，占钻遇地层厚度的 0.3%，较致密，未见裂缝，综合评价为低孔特低渗致密储层。

3. 三维地质模型构建

三维地质模型是准确获取研究区域现今三维地应力场的前提条件。渤南油田 Y176 区块三维地质模型主要包括层位模型和断层模型两个部分。层位模型采用高精度三维地震构造解释层位数据拟合构成空间曲面，并根据单井点钻井、测井资料，在小层划分对比和构造精细解释的基础上，对所建立地质层面模型井点局部层位进行校正。断层模型基于地震构造解释获取的断层面空间数据信息构建，结合研究区构造特征、测井资料进行调整拟合。将层位模型与断层模型组合，构建研究区块三维地质模型。

所建立的渤南油田 Y176 区块致密油藏三维地质模型如图 1 所示，包括 Es₃-13、T6、T7' 三组地震解释层位模型及研究区内 33 组断层模型。三组层位模型与断层模型联合建模，层位与断层、断层与断层交汇位置采用布尔运算获取层位之间断层空间分布形态，进而构建 Y176 区块三维地质模型。

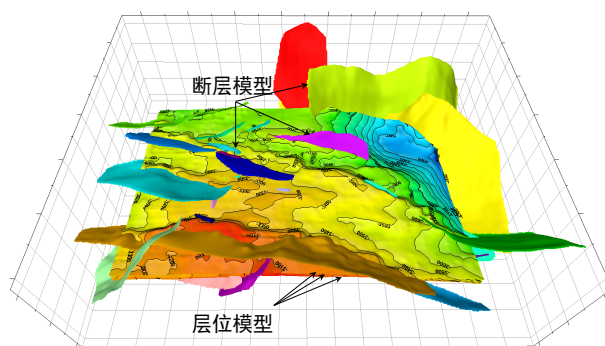


Figure 1. 3D geological model of tight reservoir in Y176 block
图 1. Y176 区块致密储层三维地质模型

4. 非均质岩石力学参数模型

致密油藏岩石力学模型是地球物理解释、储层改造和井壁稳定等问题的基础，岩石力学性质差异对储层三维地应力场预测精度的影响显著[15]。Y176 区块非均质致密储层岩石力学参数模型采用单井分层岩石力学参数解释与井间地震体数据采样联合建模的方式建立[16]。

声波测井资料作为油气田的常规资料，数据丰富且便于获取，为地应力剖面的连续计算创造了条件[17]。统计研究区内具备阵列声波测井资料的单井信息，提取纵 - 横波速度参数，建立 Y176 区块致密储层纵波、横波波速转换关系式：

$$v_p = 1.713 \times v_s + 320.76 \quad (1)$$

式中： v_p 为纵波速度，m/s， v_s 为横波速度，m/s。

利用弹性体中弹性波速度与岩石力学参数的关系，由 Y176 区块单井纵波速度 v_p 、横波速度 v_s 计算获取研究区块单井致密层段动态杨氏模量和泊松比变化，并进行动静态岩石力学参数转换[18]。

$$E_d = \rho v_s^2 \frac{3v_p^2 - 4v_s^2}{v_p^2 - v_s^2} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

$$\mu_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3)$$

$$E_s = 0.5615 \times E_d + 3012 \quad (4)$$

$$\mu_s = 0.6972 \times \mu_d + 0.015 \quad (5)$$

式中：式中： E_d 为动态杨氏模量，MPa， μ_d 为动态泊松比， ρ 为致密储层岩石密度， g/cm^3 ， E_s 为静态杨氏模量，MPa， μ_s 为静态泊松比。

测井资料获取的是研究区块内单个井点沿井身轨迹岩石力学参数变化规律，而开展致密油藏三维地应力场分析需要进一步掌握研究区块空间非均匀三维岩石力学参数变化特征。提取 Y176 区块三维地震数据体中的岩石密度、纵波速度、横波速度数据，并以测井密度、速度为基础，对地震采样数据进行校正。单井测井数据与井间地震属性联合，利用公式(2)、(3)计算获取 Y176 区块致密层段三维非均匀岩石力学参数展布如图 2(a)、图 2(b)所示。

Y176 区块致密油藏三维岩石力学参数差异性显著。杨氏模量分布在 10.0~50.0 GPa 范围，泊松比集中于 0.18~0.32，其中 Y171、Y171-X5、Y178 等单井所在区域杨氏模量较低、泊松比高，储层脆性指数相对较低；而 Y177，Y193 等井所在区域杨氏模量较高，储层具有较高脆性指数，压裂改造有利于形成体积缝网。

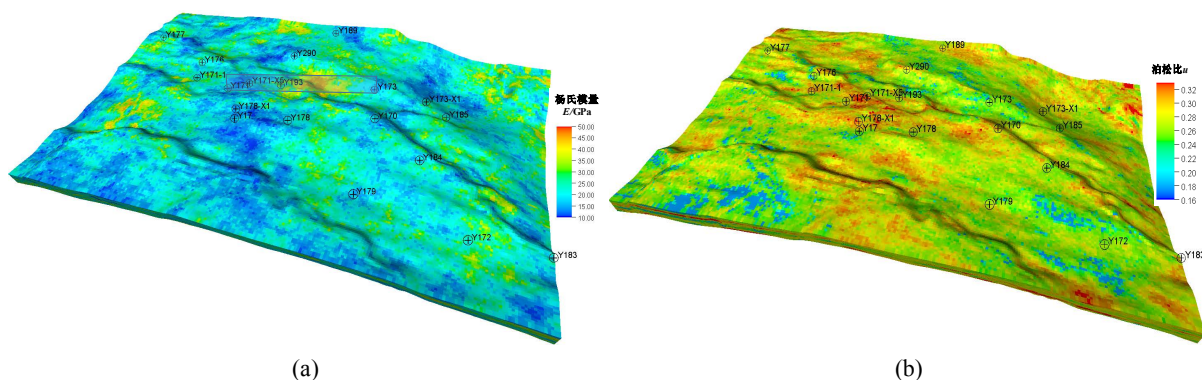


Figure 2. Three-dimensional heterogeneous rock mechanical parameters model for Y176 block. (a) Young's modulus model; (b) Poisson's ratio model

图 2. Y176 区块三维非均匀岩石力学参数模型。(a) 杨氏模量模型；(b) 泊松比模型

沿 Y171 井-Y173 井连线提取典型井间剖面杨氏模量参数变化如图 3。由于储层非均质影响，井间剖面岩石力学参数呈区域性、分散型分布形态。Y171 井 3400 m~3450 m 层位杨氏模量集中分布于 23~26 GPa，而 3450 m~3500 m 层位杨氏模量降低至 16~18 GPa，致密储层段岩石力学参数呈上下部较高，中间层段较低变化模式；Y173 井分层应力模型中 3950 m~4000 m 层位杨氏模量达到 32~35 GPa，该井分层岩

石力学参数呈中间层位高，上下两侧较低分布形态。

5. 非均质致密油藏三维地应力场模拟分析

以渤南油田 Y176 区块复杂构造三维地质模型与非均质岩石力学参数模型为基础，采用构造应变系数方法开展致密储层三维地应力场有限元模拟。

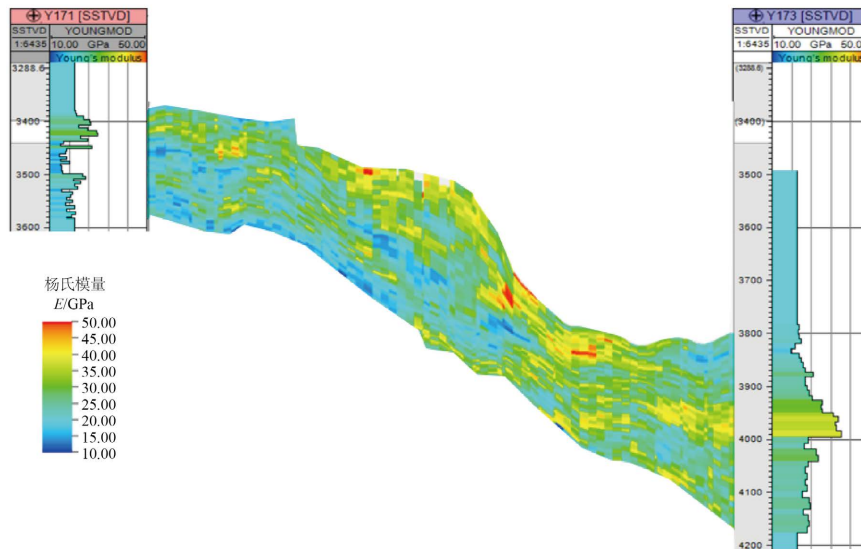


Figure 3. Variations of Young's modulus between layers of well tie profile
图 3. 连井剖面层间杨氏模量变化

5.1. 地应力构造应变系数模型

构造应变系数模型假设岩石为横观各向同性体，在沉积及后期地质构造过程中，其内部各岩层之间不发生相对移动，两水平方向的应变系数为常数[1]。由广义胡克定律可以得到：

$$\begin{aligned}\sigma_h - \alpha \times P_p &= \frac{v_s}{1-v_s}(\sigma_z - \alpha \times P_p) + \frac{E_s \times \xi_h}{1-v_s^2} + \frac{v_s \times E_s \times \xi_H}{1-v_s^2} \\ \sigma_H - \alpha \times P_p &= \frac{v_s}{1-v_s}(\sigma_z - \alpha \times P_p) + \frac{E_s \times \xi_H}{1-v_s^2} + \frac{v_s \times E_s \times \xi_h}{1-v_s^2}\end{aligned}\quad (6)$$

式中： σ_H ， σ_h 分别为最大、最小水平主应力，MPa； ξ_H ， ξ_h 分别为最大、最小水平主应变； α 为Boit固结系数； P_p 为致密储层孔隙压力，MPa。

根据 Y176 区块已压裂施工的多口井压裂施工记录和裂缝方位监测报告，可以获取压裂层段最大、最小水平地应力的大小和方向。该区域井点压裂层段最大水平地应力 70.5~97.0 MPa，最小水平地应力 63.6~73.2 MPa。最大水平主应力方向 NE72°~NE111°，沙三下至沙四上致密储层段现今地应力场以近东西向挤压构造变形为主。

利用压裂井实测的应力大小、岩石力学参数解释数据，根据公式(6)求出单井构造应变系数。区块三维地应力场构造应力系数以单井构造应变系数为参考，以单井实测地应力大小、方向为约束，调试修正边界条件，使有限元模拟结果与实测结果之间的误差达到最小，利用该边界条件开展三维地应力场数值模拟。根据经过多次测试，采用 $\xi_h = 4.32 \times 10^{-4}$ 和 $\xi_H = 1.02 \times 10^{-3}$ 作为三维地应力数值模拟中最小水平主应力和最大水平主应力方向上的构造应变系数。

5.2. 有限元模型构建及边界条件

为避免边界效应对致密储层三维应力场模拟结果的干扰，地应力有限元计算模型中需要将致密储层三维地质模型在空间方向上延伸，一般取地质模型平面、高度尺寸的 2~3 倍。研究区块三维地应力场计算模型如图 4 所示，其中外延模型包括上覆岩层、下部岩层及侧向岩层，覆盖从地面到深度-20,000 m 左右的范围。

模型网格采用致密储层地质模型局部网格加密，上覆岩层、下覆岩层及侧向岩层逐步过渡到粗网格的划分形式，共计划分 2,916,822 个网格单元。模型侧向施加构造应变边界条件，其它侧向及底边施加法向位移约束边界条件，垂直方向根据深部变化施加等效的岩体自重载荷 σ_v 。

$$\sigma_v = \int_0^H \rho(h)gdh \tag{7}$$

式中： σ_v 为垂向地应力，MPa； H 为计算模型深度，m。

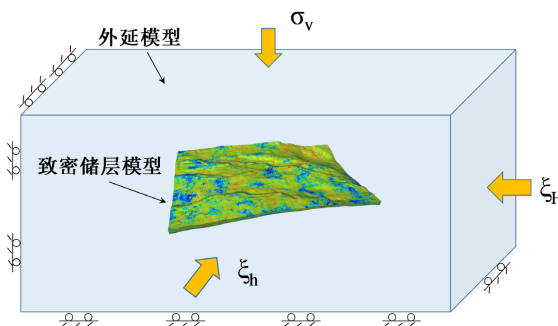


Figure 4. Calculation model of *in-situ* stress field
图 4. 地应力场计算模型

5.3. 测试结果精度分析

研究区内 Y173 井致密储层分层地应力测井解释和三维地应力有限元模拟分析结果对比如表 1。该井不同深度垂向地应力、最大水平地应力、最小水平地应力测井解释结果与三维地应力场数值模拟结果取得较好的一致，误差小于 12%。研究区块最大水平主应力方向模拟结果与实测结果对比如表 2，最大误差为 13.3%，平均误差为 7.8%，满足分析精度要求。

Table 1. Accuracy analysis of *in-situ* stress testing of Y173 well
表 1. Y173 井地应力测试精度分析

| 深度 m | 垂向地应力/MPa | | | 最大水平地应力/MPa | | | 最小水平地应力/MPa | | |
|---------|-----------|--------|-------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | 测井解释 | 模拟分析 | 误差(%) | 测井解释 | 模拟分析 | 误差(%) | 测井解释 | 模拟分析 | 误差(%) |
| 3800 | 91.62 | 95.27 | 3.83 | 81.83 | 84.97 | 3.70 | 72.22 | 74.1 | 2.54 |
| 3850 | 95.55 | 100.07 | 4.52 | 82.09 | 87.07 | 5.72 | 72.96 | 75.86 | 3.82 |
| 3900 | 95.6 | 101.21 | 5.54 | 87.95 | 88.43 | 0.54 | 78.32 | 76.96 | 1.77 |
| 3950 | 95.76 | 103.45 | 7.43 | 94.85 | 88.71 | 6.92 | 82.85 | 77.56 | 6.82 |
| 4000 | 103.99 | 105.3 | 1.24 | 108.77 | 97.62 | 11.42 | 94.72 | 86.29 | 9.77 |
| 4050 | 98.96 | 106.01 | 6.65 | 103.8 | 96.75 | 10.19 | 88.95 | 87.99 | 1.09 |
| 4100 | 97.91 | 105.51 | 7.20 | 89.33 | 92.8 | 3.74 | 78.86 | 80.69 | 2.27 |

Table 2. Simulation results and accuracy analysis of *in-situ* stress orientation in Y176 Block
表 2. Y176 区块现今地应力方向模拟结果及精度分析

| 井号 | 现场测试 | 确定方法 | 模型结果 | 误差 |
|------|----------|--------|--------|-------|
| Y177 | NE120° | 阵列声波测井 | NE130° | 8.3% |
| Y176 | NE 76.7° | 微地震监测 | NE85° | 10.8% |
| Y193 | NE95° | 阵列声波测井 | NE105° | 10.5% |
| Y189 | NE111° | 阵列声波测井 | NE115° | 3.6% |
| Y173 | NE81.6° | 诱导裂缝识别 | NE92° | 13.3% |
| Y185 | NE110° | 井壁崩落 | NE115° | 4.5% |
| Y183 | NE102° | 井壁崩落 | NE110° | 7.8% |
| Y179 | NE110° | 阵列声波测井 | NE115° | 4.5% |

6. 渤南油田 Y176 区块致密储层地应力场分布规律

渤南油田 Y176 区块沙四上层段最大水平地应力方向如图 5，沙四上层段大部分区域以近东西方向水平挤压为主，最大水平地应力方向为北东 110~125°。受储层非均质性和断层构造的共同影响，同一断块内单井最大主应力方向产生了局部转向：Y176 井局部模拟方向为北东 85~100°，而 Y177 井局部模拟方向为北东 120~135°。

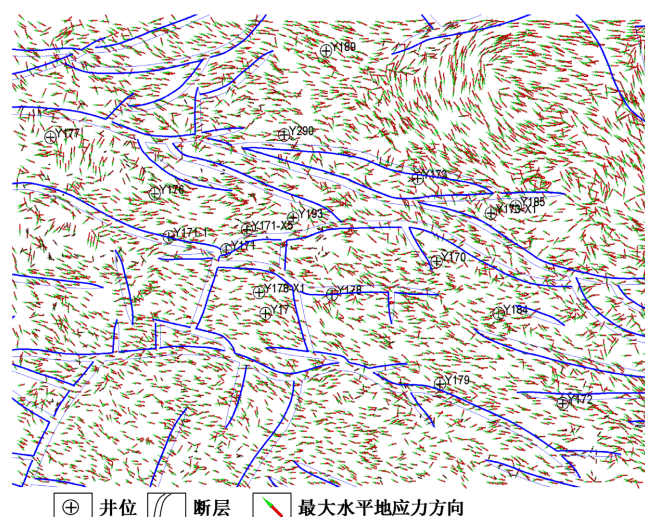


Figure 5. Orientation of maximum horizontal *in-situ* stress for the Es4 layer of Y176 block

图 5. Y176 区块沙四上最大水平地应力方位

Y176 区块沙四上层段地应力场大小变化受层位埋深、岩石力学性质与断层结构共同控制，如图 6(a)，区域非均质性分布显著。研究区块西南部埋深 3200~3400 m，区域最大水平地应力 65~75 MPa；区块东北部区域埋深增大至 4400~4800 m，最大水平地应力增大为 100~110 MPa。模拟结果表明同一断块内不同单井地应力差异较大：Y177 井、Y193 井最大水平地应力较高，达到 90~100 MPa；Y176 井，Y171-1 井最大水平地应力为 75~80 MPa。

沙四上层段水平应力差变化如图 6(b)，水平地应力差值变化范围 4~20 MPa。其中 Y176、Y17 等井

所在区域应力差较小，为 4.0~8.0 MPa，致密体积压裂改造过程缝间应力干扰效应形成应力转向，有利于增大裂缝的复杂性、形成体积缝网，获得较好的压裂改造效果；而 Y189、Y177 等井所在区域水平应力差大于 8.0 MPa，由于最大水平主应力对裂缝扩展的控制作用，压裂改造为主裂缝扩展形态。

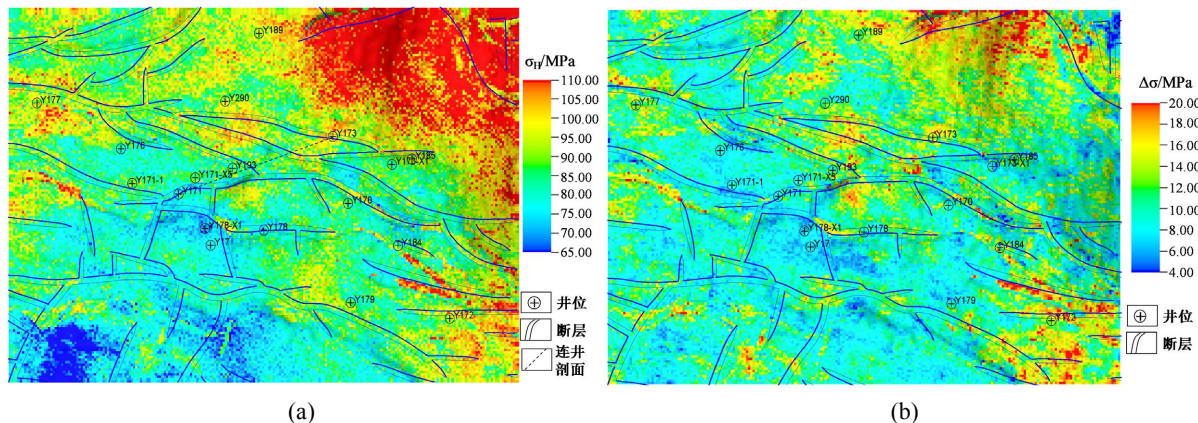


Figure 6. Change of *in-situ* stress field for the Es4 layer of Y176 block. (a) Variation of maximum horizontal stress; (b) Differences of horizontal stress
图 6. Y176 区块沙四上层段地应力场变化。(a) 最大水平地应力变化；(b) 水平应力差

层间地应力变化是控制致密储层压裂裂缝高度扩展的重要因素，沿 Y171 井-Y173 井连线层间最大水平地应力变化如图 7 所示。沿 Y171 井致密储层段剖面，最大水平地应力为上、下部层段应力高、中间层段应力较低，压裂过程中能够形成上、下部应力遮挡。Y173 井中间层段应力较高，上、下部应力较低，压力过程中应采取有效的缝高控制措施。

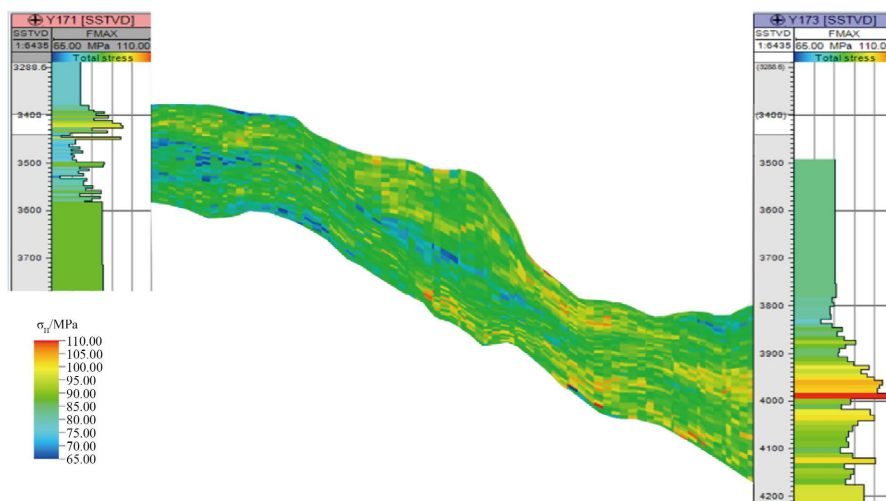


Figure 7. Variations of maximum horizontal *in-situ* stress between layers of well tie profile
图 7. 连井剖面层间最大水平地应力变化

7. 结论

1) 利用渤海油田 Y176 区块高精度三维层位、断层地震解释数据构建三维地质模型，通过单井分层岩石力学参数与井间地震体数据联合建立非均质致密储层岩石力学模型，应用构造应变系数模型开展三

维地应力场有限元模拟, 结果与井点实测地应力大小、方向取得较好的一致。

2) 渤海油田 Y176 区块沙四上层段西南部区域最大水平地应力 65~75 MPa; 区块东北部区域最大水平地应力为 100~110 MPa; 受油藏断裂构造和非均质岩性变化的影响, 研究区断块内及不同断块之间的现今地应力场差异明显; 连井剖面岩石力学参数、分层地应力呈区域性、分散型分布形态。

3) 本文方法考虑区域断裂构造和非均质岩石力学性质因素, 精细刻画了非均质致密储层现今三维地应力场分布特征, 为研究区块致密储层的高效勘探开发提供了准确的基础依据。

基金项目

胜利油田分公司科技攻关项目(YKK2313); 胜利油田分公司科技攻关项目(YGW2202)。

参考文献

- [1] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [2] Zoback, M.D. (2007) Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>
- [3] Zang, A. and Stephansson, O. (2010) Stress Field of the Earth's Crust. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8444-7>
- [4] 李志鹏, 刘显太, 杨勇, 等. 渤海油田低渗透储集层岩相对地应力场的影响[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 693-702.
- [5] Zoback, M.D. and Barton, C.A. (2003) Determination of Stress Orientation and Magnitude in Deep Wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**, 1049-1076. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.001>
- [6] 印兴耀, 马妮, 马正乾, 等. 地应力预测技术的研究现状与进展[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 488-504.
- [7] 孙建孟, 韩志磊, 秦瑞宝, 等. 致密气储层可压裂性测井评价方法[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 74-80.
- [8] 刘建伟, 张云银, 曾联波, 等. 非常规油藏地应力和应力甜点地球物理预测——渤海地区沙三下亚段页岩油藏勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(4): 792-800.
- [9] 张广智, 陈娇娇, 陈怀震, 等. 基于页岩岩石物理等效模型的地应力预测方法研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 2112-2122.
- [10] 马妮, 印兴耀, 孙成禹, 等. 基于方位地震数据的地应力反演方法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(2): 697-706.
- [11] Parsons, T. (2006) Tectonic Stressing in California Modeled from GPS Observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **111**, B03407. <https://doi.org/10.1029/2005JB003946>
- [12] Matsuki, K., Nakama, S. and Sato, T. (2009) Estimation of Regional Stress by FEM for Heterogeneous Rock Mass with a Large Fault. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **46**, 31-50. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.03.005>
- [13] 刘显太, 戴俊生, 徐建春, 等. 纯 41 断块沙四段现今地应力场有限元模拟[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 126-128.
- [14] 徐珂, 戴俊生, 商琳, 等. 高尚堡油田深层油藏南区现今地应力场预测及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 19-29.
- [15] 闫治涛, 杨斌, 李行船, 等. 分层地应力描述技术及应用[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(1): 63-65.
- [16] 朱传华, 王伟锋, 王青振, 等. 非均质储层三维构造应力场模拟方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(5): 1580-1588.
- [17] 范宜仁, 魏周拓, 陈雪莲. 基于测井资料的地层应力计算及其影响因素研究[J]. 测井技术, 2009, 33(5): 415-420.
- [18] 林英松, 葛洪奎, 王顺昌. 岩石动静力学参数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 216-222.