

引用格式:李辉,游瑜春,曾大乾,等.深层碳酸盐岩强非均质储层双重介质三维地质建模——以普光气田飞仙关组—长兴组储层为例[J].油气地质与采收率,2024,31(1):44-53.

LI Hui, YOU Yuchun, ZENG Daqian, et al. 3D geological modeling of strongly heterogeneous dual-medium deep carbonate reservoirs: A case study of Feixianguan-Changxing Formations in Puguang Gas Field[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(1): 44-53.

## 深层碳酸盐岩强非均质储层双重介质三维地质建模 ——以普光气田飞仙关组—长兴组储层为例

李辉<sup>1,2</sup>, 游瑜春<sup>1,2</sup>, 曾大乾<sup>1,2</sup>, 刘国萍<sup>1,2</sup>, 郑文波<sup>1,2</sup>, 张睿<sup>1,2</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石化海相油气藏开发重点实验室, 北京 102206)

**摘要:**普光气田碳酸盐岩储层具有地层埋深大、礁滩相发育、基质物性差、天然裂缝广泛发育、储层非均质强等特征,开展此类强非均质储层双重介质的三维地质建模具有很大的挑战。为此,将储层建模对象划分为基质与裂缝2大介质,基于单井解释数据与地震波阻抗数据体,通过井-震结合、逐级相控、多趋势融合概率体约束建立基质模型;按照分尺度、分期次建模思路,通过融合成因-地质-地震、综合构造应力场、距断层远近和裂缝地震敏感属性,采用熵权法联合专家经验评价的方式,多元融合构建裂缝空间展布约束体;在该约束体约束下,以离散裂缝网络建模方法构建裂缝模型。对融合后的基质-裂缝双重介质模型开展气藏数值模拟,各井历史拟合率最高可达90%,拟合误差控制在20%以内,模型拟合精度较高。

**关键词:**深层碳酸盐岩储层;强非均质性;多趋势融合概率体;双重介质;三维地质建模

文章编号:1009-9603(2024)01-0044-10

DOI:10.13673/j.pgre.202305033

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## 3D geological modeling of strongly heterogeneous dual-medium deep carbonate reservoirs: A case study of Feixianguan-Changxing Formations in Puguang Gas Field

LI Hui<sup>1,2</sup>, YOU Yuchun<sup>1,2</sup>, ZENG Daqian<sup>1,2</sup>, LIU Guoping<sup>1,2</sup>, ZHENG Wenbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>

(1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 102206, China*; 2. *Key Laboratory for Marine Oil and Gas Reservoir Production, SINOPEC, Beijing City, 102206, China*)

**Abstract:** The carbonate reservoir in Puguang Gas Field has the characteristics of large burial depth, developed reef-flat facies, poor matrix properties, widespread development of natural fractures, and strong heterogeneity. The challenge is to construct three-dimensional geological modeling of such strongly heterogeneous dual-medium reservoirs. We divided the reservoir modeling object into two major media: matrix and fracture. Based on single well interpretation data and seismic wave impedance data, the matrix model was established by using well-seismic combination, step-by-step facies control, and multi-trend fusion probability constraint volume construction. According to the idea of multi-scale and multi-stage modeling, the entropy weight method combined with expert experience evaluation was used to construct the spatial distribution constraint volume of fracture through the integration of mechanism-geology-seismic data, as well as tectonic stress fields, distances to the fault, and seismic sensitive attributes of fractures. Under the constraints of the constraint volume, the fracture model was constructed by the discrete fracture network modeling. The numerical simulation of the gas reservoir was conducted on the established matrix-fracture model. The historical fitting rate of

收稿日期:2023-05-30。

作者简介:李辉(1995—),男,山东东营人,助理研究员,博士,从事储层地质学及油气藏描述。E-mail:lhui0809@163.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究”(U19B6003),中国石化首席科学家工作室项目“普光气田剩余气分布及提高采收率技术”(P23198),中国石化科技攻关项目“礁滩相高含硫气藏储层精细表征及剩余气分布规律研究”(P20077kxjgz)。

each well reaches 90%, and the fitting error is controlled within 20%, indicating a high fitting accuracy of the model.

**Key words:** deep carbonate reservoir; strong heterogeneity; multi-trend fusion probability volume; dual-medium; 3D geological modeling

三维地质建模研究是贯穿油气藏描述与剩余油气挖潜的关键环节,具有重要的承上启下作用<sup>[1-4]</sup>。在深层碳酸盐岩储层中存在孔隙和裂缝2类油气储集空间,现有建模技术对单一介质模型和高孔高渗透的孔隙型碎屑岩储层较为成熟,但对于储集空间类型多样、孔渗关系复杂的深层碳酸盐岩储层,除构建基质模型外,还需构建裂缝模型<sup>[5-7]</sup>。董少群等多采用离散裂缝网络(DFN)方法对强非均质储层中发育的裂缝开展建模研究<sup>[8-16]</sup>,其建模难点多为如何构建控制裂缝空间展布的约束体(密度体)。裂缝空间展布约束体的构建多通过对叠后地震数据体提取构造相关属性如 likelihood、相干、蚂蚁追踪和方差等方法,再与井上解释裂缝密度做相关性分析<sup>[17-22]</sup>;或者基于叠前地震数据体进行叠前 AVO 裂缝密度反演<sup>[23-32]</sup>。但上述常规方法虽能直接获取裂缝空间展布约束体,但受限于地震品质与分辨率的影响,对中小尺度裂缝尚无法完全响应;且仅从地球物理的角度去构建,缺乏裂缝成因机制与地质认识的约束。为此,笔者在井-震结合、逐级相控、概率体约束基质模型的基础上,通过开展多期构造应力场模拟,从应力成因角度预测多期次裂缝展布;再基于研究区构造特征建立裂缝发育地质模式,明确裂缝发育与断层的定量关系;最后将应力预测裂缝展布结果与地震敏感属性进行主客观联合评价,其中主观评价采用专家经验打分,客观评价采用熵权法,基于成因-地质-地震多元融合后的约束体构建离散裂缝网络模型。由于储层具有基质和裂缝2大类储集空间,导致孔隙度和渗透率类型多样。为了精准构建储层模型,将基质模型与裂缝网络模型进行融合,并对融合后的双重介质模型开展气藏数值模拟,结果表明各井历史拟合程度进一步提高。该方法为提高气藏采收率以及开发技术政策的调整提供了精准模型基础,为同类型气藏的开发提供了指导意义。

## 1 地质背景

普光气田位于四川盆地东北部,并与铁山坡气田相接,东南部与渡口河气田相邻,属特高含硫、深层、特大型礁滩相碳酸盐岩气田。研究区位于川东断褶带,逆断层发育,整体呈现为NE低、WS高的

NNE向大型长轴断背斜型构造(图1),并历经多期构造运动,造缝期为燕山晚期和喜马拉雅早期<sup>[33-34]</sup>。燕山晚期之前盆地整体构造活动较为平缓,无构造形成;而燕山晚期,构造运动强烈,来自ES向的挤压使得NE向构造形成;喜马拉雅早期再次发生强烈构造运动,来自NE向的挤压使得WN向构造形成;喜马拉雅晚期由于区域构造应力场强度发生明显减弱,川东北盆地构造基本定型,最终造就研究区共发育NE和NW向2组逆冲断裂体系。普光气田主力储层为上二叠统长兴组、飞仙关组二段至一段以及下三叠统飞仙关组三段。



图1 普光气田区域构造位置  
Fig.1 Structural location of Puguang Gas Field

## 2 强非均质储层基本特征

### 2.1 岩石学与物性特征

研究区储层基质岩性以白云岩为主,灰岩次之,主要为晶粒白云岩、颗粒白云岩和生物格架白云岩,且白云石含量越高,储层物性越好;沉积相以碳酸盐岩礁滩相为主,其中长兴组主要发育生物礁相,飞仙关组主要发育滩相,储层发育与沉积关系紧密。

由普光气田PG302-1井飞仙关组二段至一段储层孔渗关系(图2)可以看出,储层基质大致分为I型和II型。其中I型基质储层的孔渗特征表现为渗透率随着孔隙度增大而快速增大,常规测井曲线

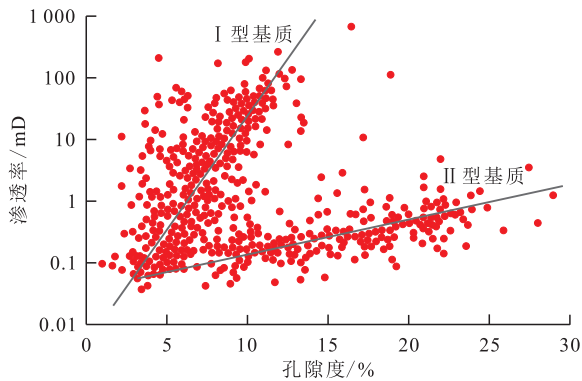


图2 普光气田PG302-1井飞仙关组二段至一段储层孔渗关系

Fig.2 Porosity and permeability relationship of second-to-first sections of Feixianguan Formation in Well PG302-1 of Puguang Gas Field

表现为低密度、高声波和高中子孔隙度的特征；II型基质储层的孔渗特征表现为渗透率随着孔隙度增大而缓慢增大，渗透率主要集中在1 mD以内，常规测井曲线表现为密度低值，中子孔隙度曲线与声波曲线近乎重合，并与密度曲线形成包络。储层平均孔隙度为8%，平均渗透率为4 mD，整体表现为高孔低渗透的物性特征。

2.2 裂缝发育特征

基于岩心与铸体薄片观察，研究区目的层段主要发育应力成因的构造裂缝，如中低角度裂缝、高角度裂缝等(图3a—3b)；岩心裂缝面常见擦痕等构造痕迹(图3c)，裂缝内未见充填物质(图3d)，镜下见多期次裂缝(图3e)。

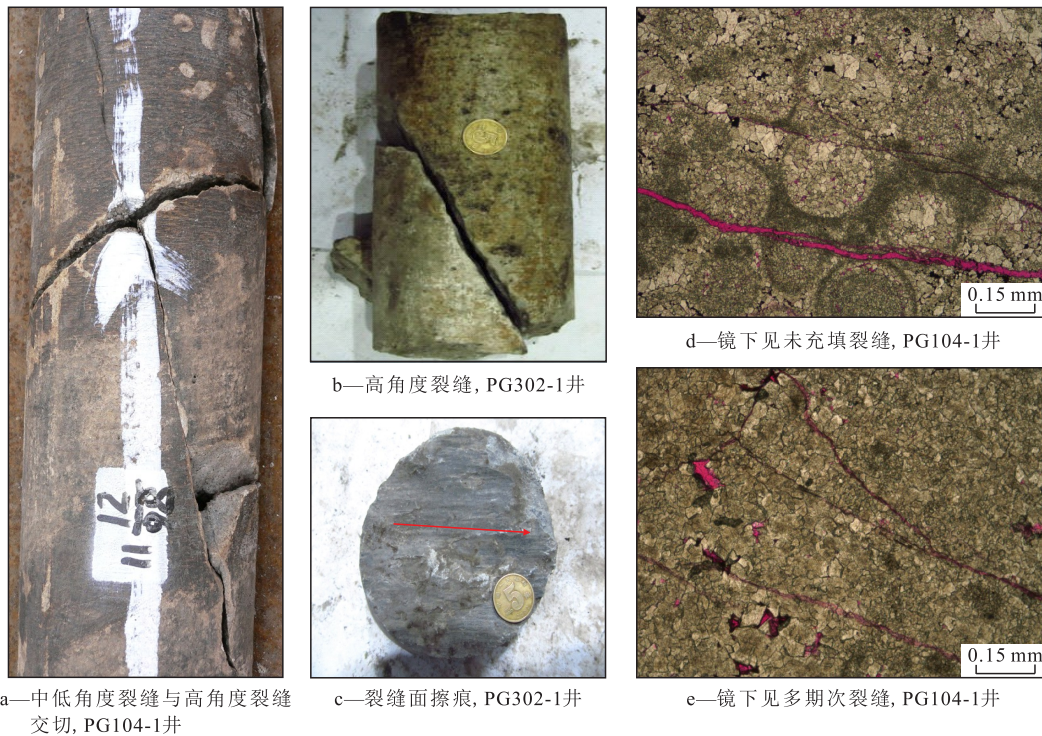


图3 普光气田典型井岩心与铸体薄片照片

Fig.3 Photos of cores and thin sections of typical wells in Puguang Gas Field

由图4a可以看出，研究区主要发育中低角度裂缝和高角度裂缝，裂缝以未充填为主，占比为95.8%；偶见方解石、有机质和泥质充填，占比为4.2%(图4b)。基于成像测井解释结果，裂缝平均开度为15 μm，主要分布于5~20 μm(图4c)。裂缝倾向以N倾为主，ES倾次之(图4d)；走向以近EW向为主(图4e)。

3 多趋势融合概率体约束储层基质建模

研究区飞仙关组发育I型与II型基质储层，长

兴组仅发育I型基质储层。以飞仙关组分型模型的构建为例，主要步骤为：①准备多类型输入数据，垂向上统计分析测井解释的不同基质储层类型的分型比例函数，平面上基于地震波阻抗数据体提取各分型基质储层厚度图，三维上采用波阻抗反演体作进一步的空间约束。②对输入数据基于Kriging插值算法，采用线性加权组合的方法构建不同分型基质储层概率体模型。其中垂向约束和平面约束要遵从输入数据，同时还需在沉积相模型的约束下进行，以界定储层的边界范围。③以单井解释储层基质分型数据为依据，井间以第②步构建的基质储层概率体为约束，采用序贯指示模拟算法，通过多

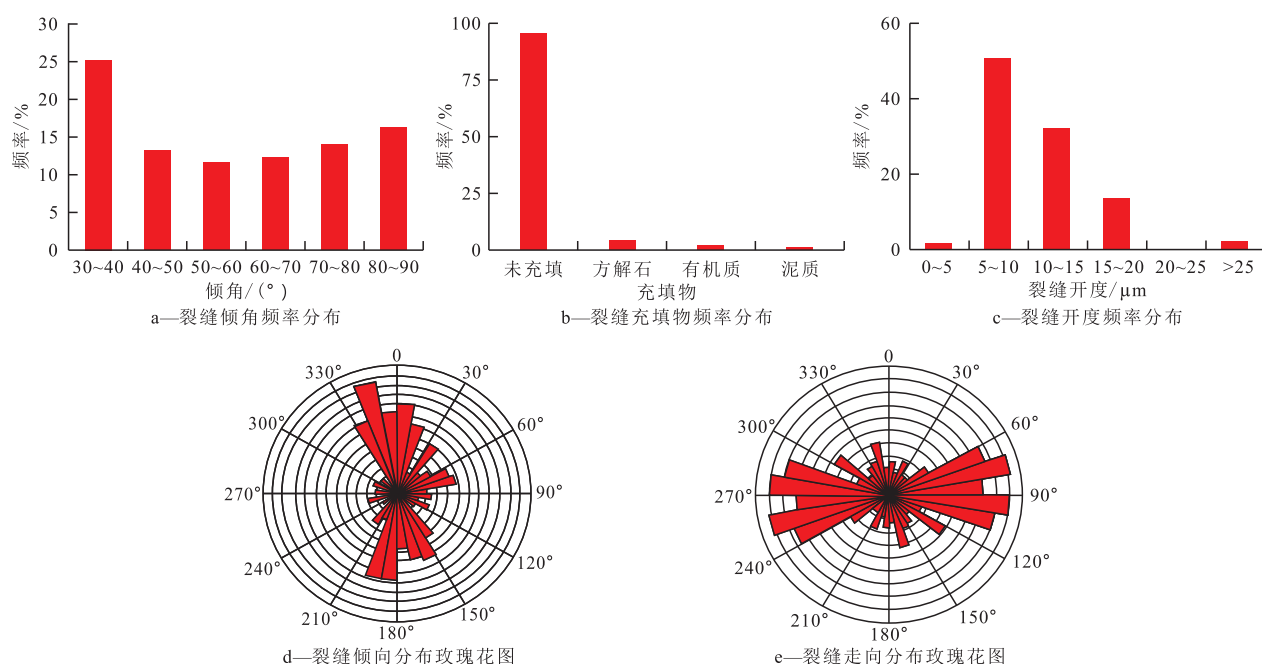


图4 普光气田储层裂缝发育特征

Fig.4 Development characteristics of reservoir fractures in Puguang Gas Field

次模拟求平均以消除一定程度的数据离散性,构建飞仙关组 I 型与 II 型基质储层模型(图 5)。该方法能融合井点垂向分型比例函数、不同类型基质储层厚度以及重采样后地震波阻抗的趋势,实现对多种趋势的融合,进一步提高储层基质建模的精度。

## 4 成因-地质-地震融合储层裂缝建模

### 4.1 约束体构建

裂缝发育受多重因素的耦合影响随机性强,空间分布规律复杂,如何构建符合地质规律且与实际井-震数据相符的裂缝模型存在很大挑战。为此,采用主客观联合评价的方法,即客观基于熵权法和主观基于专家经验打分,将基于构造应力场预测裂缝的应力成因约束体、基于裂缝发育与断层间关系的地质模式约束体以及基于裂缝的地震敏感属性约束体进行融合,构建多元融合约束体,进一步提高裂缝预测建模的精度。

#### 4.1.1 应力成因约束体

构造裂缝的形成是地应力场的产物,应力是其根本驱动力。基于构造应力场数值模拟技术,获得普光气田造缝期的应力场空间分布,并通过计算裂缝密度构建应力成因约束体,达到定量预测裂缝空间分布的目的。

模拟结果(图 6)显示,研究区燕山期裂缝主要集中在普光气田的西北部,裂缝密度多为 3.0~4.5

条/m,裂缝富集区域多集中在 NE 向断层附近等构造部位;喜马拉雅期裂缝主要集中在普光气田的西南部,裂缝密度多为 3.5~4.5 条/m;裂缝富集区域多集中在 NW 向断层周边以及西南部位的褶皱区域。

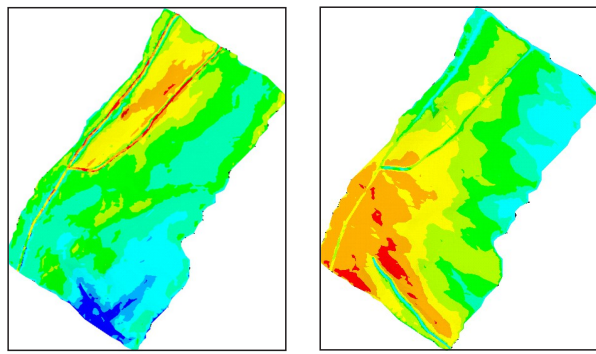
#### 4.1.2 地质模式约束体

构造裂缝受断层的宏观控制与断层存在伴生关系,多集中分布于断层附近,且距断层距离越近,裂缝越发育。通过统计和拟合研究区成像测井解释的裂缝强度与距断层垂直距离的关系(图 7a),构建了距断层远近裂缝强度约束体(图 7b)。从图 7 可以看出,断层对裂缝的控制作用随着距断层垂直距离的增大逐渐减弱,当距断层垂直距离大于 2 780 m 时,裂缝强度降至 1.0 以下;当距断层垂直距离小于 380 m 时,裂缝较发育,裂缝强度在 2.5 以上。

#### 4.1.3 地震敏感属性约束体

运用地震数据可以三维立体呈现、连续覆盖全部工区,大范围地识别储层内部发育的裂缝。基于叠后地震资料的地震属性分析技术,通过探测地震体中的同相轴不连续可以间接预测裂缝的发育范围。用于检测地震体同相轴不连续的敏感地震属性包括相干、Chaos、曲率、方差、likelihood、蚂蚁体等,通过地震属性优选,提取 Chaos 地震属性作为裂缝敏感属性。通过分析井点裂缝强度与 Chaos 地震属性的关系(图 8a),建立了 Chaos 裂缝强度约束体(图 8b)。从图 8 可以看出,Chaos 地震属性与裂缝强度相关性较强,能够较显著地表征裂缝空间分布,在断层处、褶皱隆起处、构造层面曲率变化较大



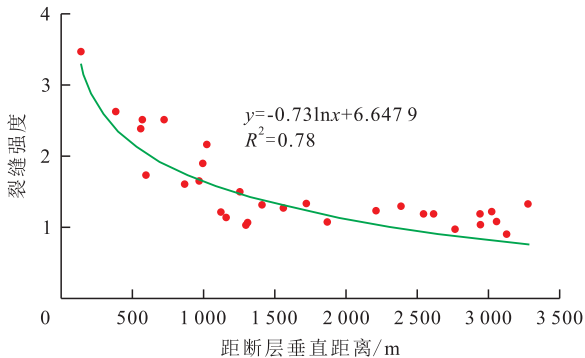


a—燕山期 b—喜马拉雅期

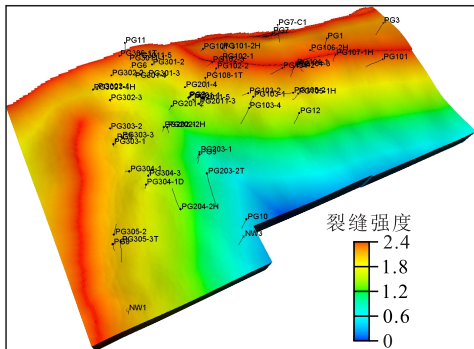
裂缝密度/(条·m<sup>-1</sup>)  
0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5

图6 构造应力场预测裂缝空间分布

Fig.6 Prediction of fracture spatial distribution based on tectonic stress fields



a—裂缝强度与断层层垂直距离的关系



b—距断层远近裂缝强度约束体

图7 距断层远近裂缝发育地质约束体

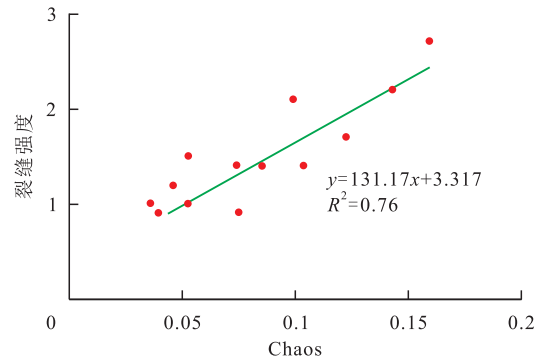
Fig.7 Geological constraint volume of fracture construction based on distances to fault

其中:

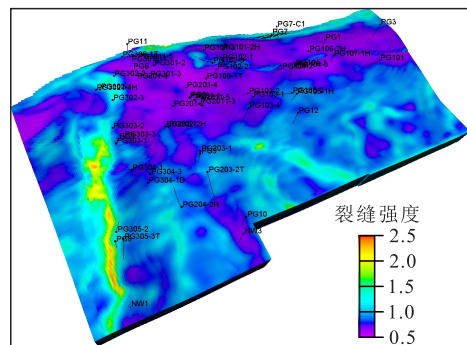
$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (2)$$

基于专家经验评价的各约束体权重的表达式为:

$$F_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (3)$$



a—裂缝强度与Chaos地震属性的关系



b—Chaos裂缝强度约束体

图8 地震敏感属性约束体

Fig.8 Seismic sensitive attribute constraint volume

将主观专家经验对各约束体的评价赋权,与客观熵权法对各约束体的评价赋权进行融合联合,其计算公式为:

$$I_j = \kappa A_j + (1 - \kappa) B_j \quad (4)$$

通过熵权法结合专家经验评价,对各约束体的权重进行评价赋值。设定应力成因约束体权重为0.52,地质模式约束体权重为0.28,地震敏感属性约束体权重为0.2,再将3种约束体进行融合,构建成因-地质-地震多元融合约束体(图9)。结果表明,在紧靠断层等构造部位的区域具有更为突出的裂缝密度响应,而远离断层区域的裂缝低发育区,其内部分布差异性更显著,尤其是研究区东南区域的裂缝密度差异响应相较于其他单一方法更明显。

#### 4.2 裂缝模型建立

采用离散裂缝网络(Discrete Fracture Network)建模方法,以随机模拟离散裂缝片的方式构建三维真实裂缝网络模型。建立离散裂缝网络模型时,裂缝几何形态定义为四边形,长宽比为4:1,裂缝分布采用多元融合约束体定义,裂缝产状采用断层产状进行约束(图10a),之后,对所建离散裂缝片赋予渗透率属性。渗透率基于裂缝开度进行计算,而裂缝开度需遵循成测井解释的裂缝开度结果。

基质-裂缝双重介质模型的构建是将离散裂缝网络模型采用Oda算法粗化至基质模型中(图10b)。

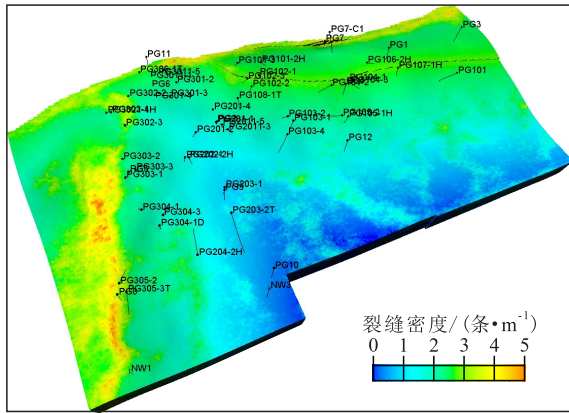
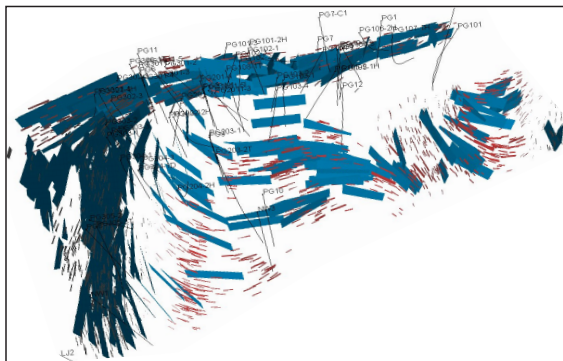
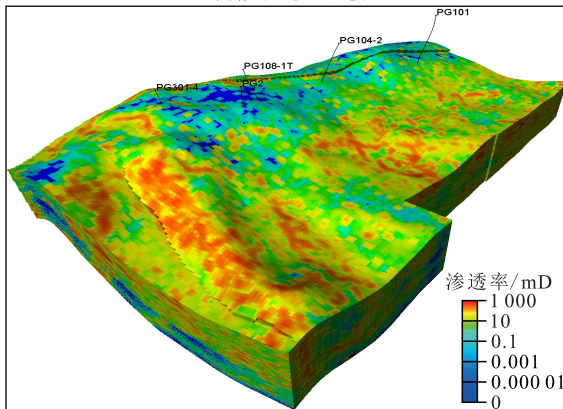


图9 成因-地质-地震多元融合约束体

Fig.9 Multiple fusion constraint volume construction based on mechanism-geology-seismic data



a—离散裂缝网络模型



b—双重介质渗透率模型

图10 离散裂缝网络模型与双重介质渗透率模型  
Fig.10 Discrete fracture network and dual-medium permeability models

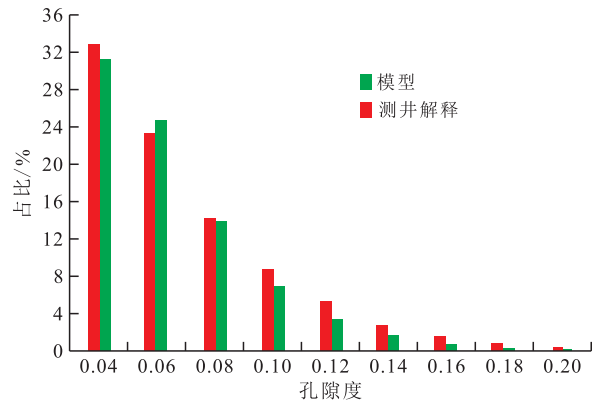
从双重介质渗透率模型可以看出,研究区NW向断层附近的渗透率较大,最高可达1 000 mD;同时高渗透区也主要沿NW向断层分布,此处裂缝集中发育,说明裂缝在该处渗透率贡献上占主导作用。

### 5 双重介质模型验证及应用

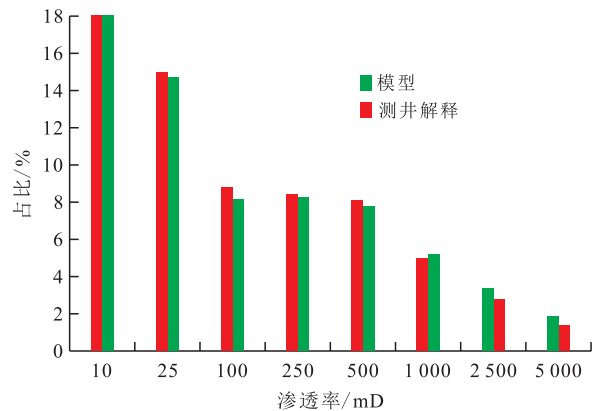
#### 5.1 数据一致性检验

将基于普光气田双重介质模型所得的孔隙度、

渗透率与测井解释的相对比,从图 11 可以看出,各参数的数值分布趋势较一致,各数值分布区间误差控制在 10% 以内,模型与测井解释数据一致性大于 90%,说明构建的模型准确性较高。



a—模型与测井解释孔隙度对比



b—模型与测井解释渗透率对比

图 11 双重介质模型数据一致性检验

Fig.11 Consistency test of dual-medium model

#### 5.2 数值模拟历史拟合

对构建的双重介质模型开展气藏数值模拟,结果(图 12)显示,各井历史拟合率最高可达 90%,拟合误差控制在 20% 以内,说明该双重介质模型历史拟合效果较好,无论在拟合速度还是拟合精度上均较优,进一步验证了模型与生产动态匹配性较高,能较准确地反映气藏储层实际地下情况。

## 6 结论

采用多趋势融合概率体约束的方法,联合单井数据、储层平面厚度与地震波阻抗,确定性与随机性相结合精准构建储层基质模型,进一步提高了模型的准确度。针对普光气田经历了多期构造活动、裂缝空间分布随机性强、裂缝发育规律复杂、模型构建难度大的问题,采用成因-地质-地震的多元融合约束体控制裂缝空间展布,进一步降低了裂缝建模的不确定性。普光气田储层受基质孔隙和天然

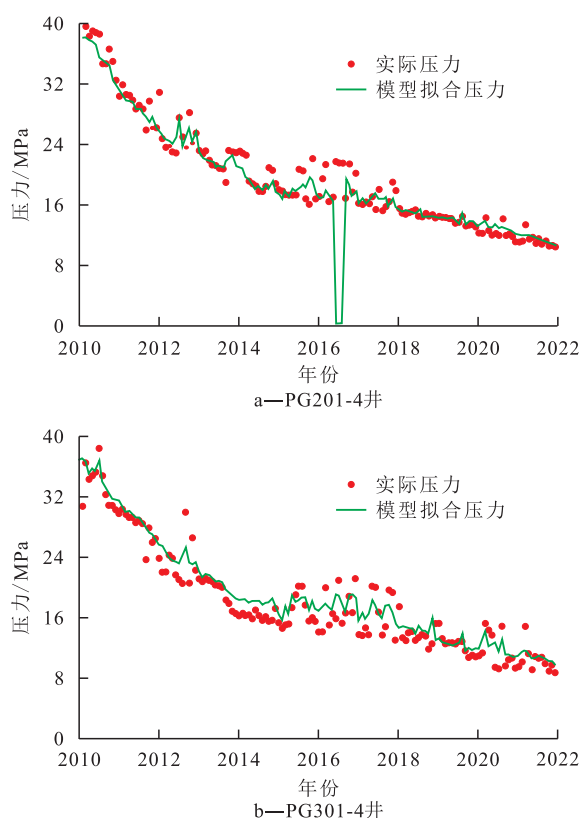


图12 双重介质模型数值模拟压力历史拟合  
Fig.12 Pressure historical fitting of numerical simulation of dual-medium model

裂缝的双重耦合控制,精细构建储层基质模型和裂缝网络模型是提高采收率的核心关键。

符号解释

- $A_j$  —— 各约束体主观评价权重的赋权值;
- $B_j$  —— 各约束体客观评价权重的赋权值;
- $E_j$  —— 各约束体的信息熵;
- $F_j$  —— 各约束体的权重;
- $i$  —— 第  $i$  种评价目标;
- $I_j$  —— 各约束体主客观融合后的权重;
- $j$  —— 第  $j$  类指标;
- $m$  —— 第  $j$  类指标的最大值;
- $n$  —— 第  $i$  种评价目标的最大值;
- $P_{ij}$  —— 第  $i$  种评价目标在第  $j$  类指标中所占的百分比, %;
- $x_{ij}$  —— 第  $i$  种评价目标的第  $j$  类指标的数值;
- $\kappa$  —— 影响偏好设定系数。

参考文献

[ 1 ] 林承焰,陈仕臻,张宪国,等.多趋势融合的概率体约束方法及其在储层建模中的应用[J].石油学报,2015,36(6):730-739.  
LIN Chengyan, CHEN Shizhen, ZHANG Xianguo, et al. Probability constraint method based on multiple trend integration and its application in reservoir modeling [J]. Acta Petrolei Sinica,

2015, 36(6): 730-739.  
[ 2 ] 何治亮,赵向原,张文彪,等.深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向[J].石油与天然气地质,2023,44(1):16-33.  
HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 16-33.  
[ 3 ] 贾爱林,郭智,郭建林,等.中国储层地质模型30年[J].石油学报,2021,42(11):1 506-1 515.  
JIA Ailin, GUO Zhi, GUO Jianlin, et al. Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past three decades [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1 506-1 515.  
[ 4 ] 胡向阳,袁向春,侯加根,等.多尺度岩溶相控碳酸盐岩缝洞型油藏储集体建模方法[J].石油学报,2014,35(2):340-346.  
HU Xiangyang, YUAN Xiangchun, HOU Jiagen, et al. Modeling method of carbonate fractured-cavity reservoirs using multi-scale karst facies-controlling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 340-346.  
[ 5 ] 但玲玲,史长林,文佳涛,等.多信息融合裂缝建模技术在碳酸盐岩双重介质油藏开发中的应用[J].油气地质与采收率,2022,29(1):46-52.  
DAN Lingling, SHI Changlin, WEN Jiatao, et al. Application of multi-information fusion modeling technology for fractures in dual-medium carbonate reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 46-52.  
[ 6 ] 乔占峰,郑剑锋,张杰,等.海相碳酸盐岩储层建模和表征技术进展及应用[J].海相油气地质,2019,24(4):15-26.  
QIAO Zhanfeng, ZHENG Jianfeng, ZHANG Jie, et al. The latest progress on reservoir characterization for marine carbonate and its significance [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(4): 15-26.  
[ 7 ] 郭军参,张辉.礁滩型碳酸盐岩储层建模方法研究——以塔中62井区为例[J].石油地质与工程,2020,34(1):16-19.  
GUO Juncan, ZHANG Hui. Study on modeling method of reef-shoal carbonate reservoir-Bu taking Tazhong 62 well area as an example [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(1): 16-19.  
[ 8 ] 董少群,吕文雅,夏东领,等.致密砂岩储层多尺度裂缝三维地质建模方法[J].石油与天然气地质,2020,41(3):627-637.  
DONG Shaoqun, LÜ Wenya, XIA Dongling, et al. An approach to 3D geological modeling of multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 627-637.  
[ 9 ] 林承焰,李辉,马存飞,等.致密砂岩储层天然裂缝建模方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2019,43(5):21-33.  
LIN Chengyan, LI Hui, MA Cunfei, et al. Modeling method of natural fractures in tight sandstone reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2019, 43(5): 21-33.  
[ 10 ] 李阳,吴胜和,侯加根,等.油气藏开发地质研究进展与展望[J].石油勘探与开发,2017,44(4):569-579.



- LI Yang, WU Shenghe, HOU Jiagen, et al. Progress and prospects of reservoir development geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 569-579.
- [11] 郎晓玲,郭召杰.基于DFN离散裂缝网络模型的裂缝性储层建模方法[J].*北京大学学报:自然科学版*,2013,49(6):964-972.  
LANG Xiaoling, GUO Zhaojie. Fracture reservoir modeling method based on discrete fracture network model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(6): 964-972.
- [12] 冯建伟,孙建芳,张亚军,等.塔里木盆地库车坳陷断层相关褶皱对裂缝发育的控制[J].*石油与天然气地质*,2020,41(3):543-557.  
FENG Jianwei, SUN Jianfang, ZHANG Yajun, et al. Control of fault-related folds on fracture development in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 543-557.
- [13] 赵向原,游瑜春,胡向阳,等.基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”建模方法——以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例[J].*石油与天然气地质*,2023,44(1):213-225.  
ZHAO Xiangyuan, YOU Yuchun, HU Xiangyang, et al. Classified-staged-grouped 3D modeling of multi-scale fractures constrained by genetic mechanisms and main controlling factors: A case study on biohermal carbonate reservoir of the Upper Permian Changxing Fm in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 213-225.
- [14] 商晓飞,王鸣川,李蒙.基于Fault Likelihood属性分区标定的裂缝预测与三维地质建模——以川西坳陷新场气田须二段气藏为例[J].*东北石油大学学报*,2022,46(4):62-76.  
SHANG Xiaofei, WANG Mingchuan, LI Meng. Fracture prediction and 3D geological modeling based on partition calibration of Fault Likelihood attribute: a case study of the 2nd member of Xujiache Formation in Xinchang Gas Field, West Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022, 46(4): 62-76.
- [15] LI Hui, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Quantitative prediction of multi-period tectonic fractures based on integrated geological-geophysical and geomechanics data in deep carbonate reservoirs of Halahatang oilfield in northern Tarim Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 134: 105377.
- [16] 张雨晴,王晖,范廷恩,等.花岗岩潜山储层裂缝建模表征方法——以渤海花岗岩潜山A油田为例[J].*吉林大学学报:地球科学版*,2016,46(5):1312-1320.  
ZHANG Yuqing, WANG Hui, FAN Tingen, et al. Granite buried hill reservoir characterization and modeling: Taking offshore an oilfield in Bohai Bay as an example [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2016, 46(5): 1312-1320.
- [17] 王军,李艳东,甘利灯.基于蚂蚁体各向异性的裂缝表征方法[J].*石油地球物理勘探*,2013,48(5):763-769.  
WANG Jun, LI Yandong, GAN Lideng. Fracture characterization based on azimuthal anisotropy of ant-tracking attribute volumes [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(5): 763-769.
- [18] 李蒙,商晓飞,赵华伟,等.基于likelihood地震属性的致密气藏断裂预测——以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例[J].*石油与天然气地质*,2020,41(6):1299-1309.  
LI Meng, SHANG Xiaofei, ZHAO Huawei, et al. Prediction of fractures in tight gas reservoirs based on likelihood attribute: A case study of the 2nd member of Xujiache formation in Xinchang area, western Sichuan depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1299-1309.
- [19] 刘忠群,秦锐,郝前勇,等.涪陵油田长8致密油藏地震Likelihood裂缝预测[J].*成都理工大学学报:自然科学版*,2016,43(5):609-616.  
LIU Zhongqun, QIN Rui, HAO Qianyong, et al. Seismic likelihood fracture prediction technology for Chang-8 tight oil reservoir in Jinghe oil field, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2016, 43(5): 609-616.
- [20] 崔正伟,程冰洁,徐天吉,等.基于构造导向滤波与梯度结构张量相干属性的储层裂缝预测方法及应用[J].*石油地球物理勘探*,2021,56(3):555-563.  
CUI Zhengwei, CHENG Bingjie, XU Tianji, et al. Reservoir fracture prediction method and application based on structure-oriented filtering and coherent attribute of gradient structure tensor [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(3): 555-563.
- [21] 刘军,龚伟,黄超,等.塔里木盆地顺北5号走滑断裂带北段超深层裂缝储层的地震属性表征方法研究及应用[J].*地质科技通报*,2022,41(4):1-11.  
LIU Jun, GONG Wei, HUANG Chao, et al. Seismic attribute characteristics of an ultradeep fractured reservoir in the northern section of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(4): 1-11.
- [22] 刘俊州,韩磊,时磊,等.致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术——以川西XC地区为例[J].*石油与天然气地质*,2021,42(3):747-754.  
LIU Junzhou, HAN Lei, SHI Lei, et al. Seismic prediction of tight sandstone reservoir fractures in XC area, western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 747-754.
- [23] 马晓宇,王军,李勇根,等.基于蚂蚁追踪的叠前裂缝预测技术[J].*石油地球物理勘探*,2014,49(6):1199-1203.  
MA Xiaoyu, WANG Jun, LI Yonggen, et al. Prestack fracture prediction based on ant tracking [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(6): 1199-1203.
- [24] 姜晓宇,宋涛,甘利灯,等.全方位叠前道集在花岗岩基岩潜山缝洞型储层预测中的应用——以乍得Bongor盆地Baobab潜山为例[J].*石油学报*,2022,43(7):969-976.  
JIANG Xiaoyu, SONG Tao, GAN Lideng, et al. Application of full-azimuth prestack gathers in the prediction of fracture-vuggy reservoirs of granite bedrock buried hills: a case study of Baobab buried hill in Bongor Basin, Chad [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(7): 969-976.
- [25] 李博南,刘财,郭智奇.基于等效介质模型和频变AVO反演的裂缝储层参数估算方法[J].*吉林大学学报:地球科学版*,2017,47(1):234-244.  
LI Bonan, LIU Cai, GUO Zhiqi. Estimation of fractured reser-

- voir parameters based on equivalent media model and frequency-dependent AVO inversion [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2017, 47(1): 234-244.
- [26] 徐静,叶小明,刘小鸿,等.不同岩性裂缝油气藏定量表征关键技术[J].*油气地质与采收率*,2023,30(4):1-8.  
XU Jing, YE Xiaoming, LIU Xiaohong, et al. Key techniques for quantitative characterization of fractured reservoirs with different lithology [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(4): 1-8.
- [27] 邵绪鹏,刘振峰,刘忠群,等.川西坳陷新场地区须二段断缝体地震预测与地质发育模式[J].*油气地质与采收率*,2022,29(4):1-11.  
SHAO Xupeng, LIU Zhenfeng, LIU Zhongqun, et al. Seismic prediction and geological development of fault fracture bodies in 2<sup>nd</sup> member of Xujiache Formation in Xinchang area of western Sichuan Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(4): 1-11.
- [28] 李辉,林承焰,马存飞,等.基于地质模式约束的致密砂岩储层断缝体地质建模[J].*大庆石油地质与开发*,2021,40(1):38-46.  
LI Hui, LIN Chengyan, MA Cunfei, et al. Geological modeling of the fault-fracture body in the tight sandstone reservoir based on the geological model constraint [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(1): 38-46.
- [29] 李黎,沈水荣,吴意明,等.全波形反演与断控层析反演联合速度建模——以南海东部A油田为例[J].*中国海上油气*,2020,32(5):107-113.  
LI Li, SHEN Shuirong, WU Yiming, et al. Velocity modeling combining full waveform inversion with fault controlled tomographic inversion: A case study of A oilfield in the eastern South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(5): 107-113.
- [30] 孙珂,徐珂,陈清华.低渗透储层构造裂缝长度表征及应用——以四川盆地磨溪—高石梯地区寒武系龙王庙组为例[J].*石油实验地质*,2022,44(1):160-169.  
SUN Ke, XU Ke, CHEN Qinghua. Characterization of the length of structural fractures in low permeability reservoirs and its application: a case study of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti areas, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(1): 160-169.
- [31] 张立安,王少鹏,张岚,等.通过地质建模剖析古潜山碳酸盐岩裂缝性储层地质特征[J].*油气藏评价与开发*,2021,11(5):688-693.  
ZHANG Li'an, WANG Shaopeng, ZHANG Lan, et al. Analysis on geological characteristics of fractured carbonate reservoir in buried-hill by geological modeling [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(5): 688-693.
- [32] 梁志强,李弘,唐金良.断裂及其裂缝发育带三维空间刻画技术[J].*断块油气田*,2022,29(4):496-501.  
LIANG Zhiqiang, LI Hong, TANG Jinliang. The description technology of three dimensional space for fault and its fracture [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(4): 496-501.
- [33] 唐永,梅廉夫,肖安成,等.川东北宣汉—达县地区晚中生代—新生代构造应力场转化及其油气意义[J].*石油学报*,2013,34(1):59-70.  
TANG Yong, MEI Lianfu, XIAO Ancheng, et al. Transition of tectonic stress field and hydrocarbon significance of the late Mesozoic-Cenozoic in Xuanhan-Daxian region, northeastern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 59-70.
- [34] 胡明,邓绍强,陈蓉,等.川东北地区构造应力场及与油气运移关系研究[J].*特种油气藏*,2008,15(3):14-19.  
HU Ming, DENG Shaoqiang, CHEN Rong, et al. Tectonic stress field and hydrocarbon migration in Northeast Sichuan Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2008, 15(3): 14-19.

编辑 何青芳