

引用格式:唐建东,张顺康,林式微,等.苏北盆地深层致密储层“甜点”表征及体积压裂参数优化方法[J].油气藏评价与开发,2025,15(3):349-356.  
TANG Jiandong, ZHANG Shunkang, LIN Shiwei, et al. Characterization of “sweet spots” and optimization of volume fracturing parameters in deep tight reservoirs of Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(3): 349-356.  
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.03.002

# 苏北盆地深层致密储层“甜点”表征及体积压裂参数优化方法

唐建东<sup>1</sup>, 张顺康<sup>2</sup>, 林式微<sup>2</sup>, 葛政俊<sup>2</sup>, 林波<sup>2</sup>

(1. 中国石化江苏油田分公司, 江苏扬州 225009; 2. 中国石化江苏油田勘探开发研究院, 江苏扬州 225009)

**摘要:**按照“油层下面找油层”的思路,江苏油田的勘探开发逐步向深层进军,苏北深层致密、特低渗油藏已逐步成为油田增储建产的重要领域。受复杂构造、沉积、裂缝等因素影响,苏北深层致密储层效益开发难度大。围绕苏北深层致密油藏储量有效动用进行了研究:“甜点”描述方面,针对苏北深层致密油藏特点,通过融合地质、物探、油藏、工程、经济等多学科的资料,形成了地质-地震一体化致密砂岩储层表征方法、多参数综合表征和评价方法,实现了致密储层的精准刻画,有效地指导了致密储层分类与“甜点”优选;体积压裂方面,通过采用提高压裂缝控体积、暂堵转向提高裂缝复杂程度、组合加砂提高裂缝充填体积等工艺,并结合区块储层特征开展针对性优化,初步形成了适合江苏深层致密储层特征的体积压裂改造技术;技术政策优化方面,通过开展井型、开发方式、压裂参数的优化和井网方案的迭代优选,保障致密油藏稳产;钻井高效提速配套方面,通过优化钻井工艺和布井方案,实现了提速降本、节约投资。研究成果有效指导了矿场试验,在X17、F125、Y48区块部署实施7口常规井和1口水平井。其中,常规井单井平均产油量超过6 t/d,水平井产油量稳定在10 t/d以上,实现了苏北深层致密油藏储量有效动用,研究方法和现场试验可以为其他致密油藏储量的开发提供技术参考和借鉴。

**关键词:**深层致密;有效动用;一体化;“甜点”描述;体积压裂

中图分类号:TE357

文献标识码:A

## Characterization of “sweet spots” and optimization of volume fracturing parameters in deep tight reservoirs of Subei Basin

TANG Jiandong<sup>1</sup>, ZHANG Shunkang<sup>2</sup>, LIN Shiwei<sup>2</sup>, GE Zhengjun<sup>2</sup>, LIN Bo<sup>2</sup>

(1. Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. Exploration and Development Research Institution, Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

**Abstract:** In line with the strategy of “finding oil layers beneath oil layers”, exploration and development in the Jiangsu Oilfield have progressively extended into deeper formations. Deep, tight, and ultra-low permeability reservoirs in northern Jiangsu have become key targets for reserve enhancement and production expansion. However, due to complex structural settings, sedimentary conditions, and natural fractures, the effective utilization of these reservoirs remains highly challenging. This study conducted research on the effective utilization of deep tight reserves in northern Jiangsu. For “sweet spot” characterization, an integrated geological-seismic approach was developed by synthesizing multidisciplinary data from geology, geophysics, reservoir engineering, engineering, and economics. A multi-parameter comprehensive characterization and evaluation methodology was established for tight sandstone reservoirs, accurate delineation of tight reservoirs and effectively guiding reservoir classification and “sweet spot” selection. For volume fracturing, engineering techniques were implemented such as increasing fracture-controlled volume, using temporary plugging and diversion to enhance fracture complexity, and employing combined proppant injection to increase fracture filling volume. These techniques were further optimized based on the characteristics of specific reservoir blocks, resulting in a preliminary volume fracturing technology tailored to the deep tight reservoirs of Jiangsu. To optimize development strategies, well types, production methods, fracturing parameters, and well pattern designs were systematically refined to ensure stable production. For more efficient and cost-effective drilling, improvements in drilling techniques and

收稿日期:2024-09-06。

第一作者简介:唐建东(1965—),男,博士,正高级工程师,从事油田勘探开发的研究工作。地址:江苏省扬州市邗江区文汇西路1号,邮政编码:225009。E-mail:tangjd.jsyt@sinopec.com

通信作者简介:张顺康(1979—),男,博士,高级工程师,从事油田开发方面的研究工作。地址:江苏省扬州市邗江区维扬路188号,邮政编码:225009。E-mail:zhangsk.jsyt@sinopec.com

基金项目:中国石化科技攻关项目“小断块特低渗致密储层有效开发关键技术研究”(P23149)。

well placement schemes were introduced, achieving accelerated drilling speed and cost reductions. The study provided effective guidance for field implementation. A total of 7 conventional wells and 1 horizontal well were drilled in block X17, block F125, and block Y48. The average daily oil production per conventional well exceeded 6 tonnes, while the horizontal well maintained a stable daily output of over 10 tonnes. The results demonstrate the effective utilization of deep tight reserves in northern Jiangsu. The research methodology and field practices can provide technical references for the development of other tight oil resources.

**Keywords:** deep tight reservoirs; effective utilization; integration; “sweet spot” characterization; volume fracturing

随着大型压裂改造工艺的逐渐成熟和大规模矿场应用的推进,中国致密油、页岩油等非常规油气勘探开发取得了重大进展,先后在鄂尔多斯盆地、松辽盆地等多个地区获得重要突破<sup>[1-6]</sup>。与此同时,按照“油层下面找油层”的思路,江苏油田的勘探开发逐步向深层进军,苏北深层致密、特低渗油藏已逐步成为油田增储建产的重要领域。近年来,针对苏北盆地高邮凹陷加大了深层致密油藏勘探评价<sup>[7-10]</sup>,永安、富民、肖刘庄、北斜坡等地区发现多个深层致密含油断块。截至2023年底,江苏油田探明未动用储量共计 $4\ 754.15\times 10^4$  t,深层致密油藏储量占80%以上。

因致密储层物性差,有效驱替系统难以构建,目前主要利用体积压裂工艺进行开发<sup>[11-13]</sup>。但是,压裂以后主要采用溶解气驱或衰竭的方式进行开采,单井产量递减快、采收率低<sup>[14-16]</sup>。因此,致密储层如何实现有效动用将成为今后一段时期的重点研究方向。基于此,针对江苏油田深层致密储层地质特点,在“甜点”描述、体积压裂、技术政策优化和钻井高效提速配套等方面开展了探索,创新工程工艺降本增效方法,推动致密油藏储量效益产建。初步形成了相应的技术系列并有效指导了矿场试验,实现了苏北深层致密油藏储量有效动用,研究方法及时现场试验可以为其他致密油藏储量的开发提供技术参考和借鉴。

## 1 油藏地质特征

苏北深层致密油藏具有“深、小、碎、薄、低”的特点,复杂小断块的特性使其难以实现规模化建产。从探明未动用储量统计可见,苏北地区致密油藏埋深总体大于2 800 m,单区块储量规模较小,单区块平均地质储量为 $67\times 10^4$  t。储层物性低,平均渗透率小于 $10\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的特低渗、致密油藏储量超过 $3\ 500\times 10^4$  t,占探明未动用储量的75%;储量品位低,储量丰度普遍小于 $50\times 10^4$  t/ $\text{km}^2$ ;油井产能低,常规压裂投产区块单井累产小于1 500 t,难以实现效益开发。

苏北深层致密储层同时具有油藏类型多样的特点,从已发现致密油藏来看,主要发育构造、岩性和特殊类型3类油藏(图1)。其中,极复杂构造类型、构造岩性型和岩墙封挡裂缝型油藏是近年来攻关的重点

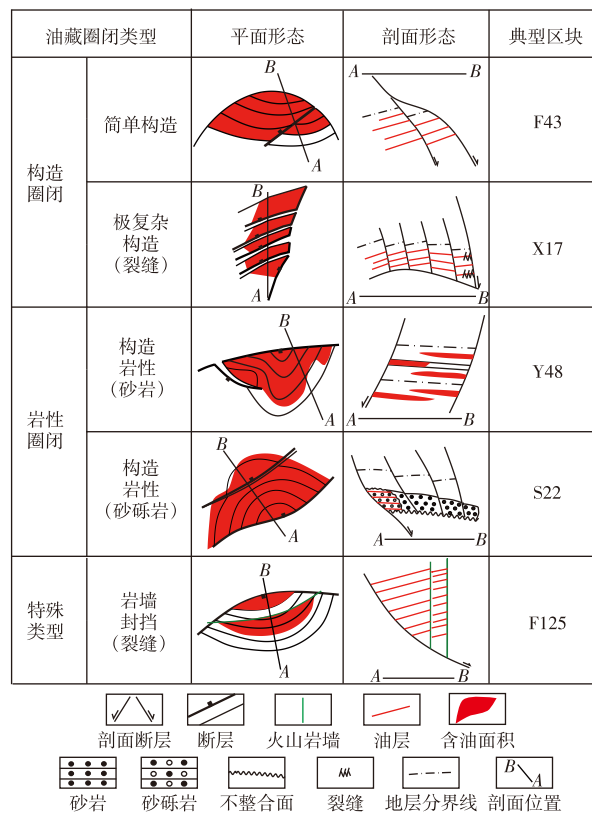


图1 江苏油田已发现致密油藏类型

Fig. 1 Types of discovered tight oil reservoirs in Jiangsu Oilfield

类型。

受复杂构造、沉积、裂缝等因素影响,苏北深层致密油藏描述难度大。构造描述方面,由于构造复杂破碎,地震资料品质差,断层的精准刻画难度大,特别是对于断阶区内极复杂构造致密油藏,断块零散破碎,断层组合样式多样,地震解释多解性强,直接影响后期体积压裂与补能效果;储层描述方面,目前已发现构造岩性油藏多以三角洲前缘亚相砂泥岩薄互层为主,储层厚度小,平均单砂体厚度小于3 m,同时储层相变快,非均质性强,储层预测和精细描述难度大;裂缝描述方面,由于复杂断层的影响,多尺度裂缝发育,同时部分油藏天然裂缝具有强非均质性特点,如富民地区F125断块为直立火山岩墙控制的特殊类型油藏,受火山岩墙侵入影响,试油、试采表现出天然裂缝分区发育的特点,进一步增加了“甜点”预测的难度。

## 2 致密油藏储量有效动用技术

### 2.1 “甜点”描述

中国陆相致密油藏地质条件复杂,非均质性强,目前在地质综合评价和储层“甜点”预测方面还存在诸多理论和技術上的难题。针对致密油藏主要通过建立沉积-成岩约束的基质模型、多尺度的裂缝模型、含油饱和度模型和地质力学模型,多角度表征致密油藏的强非均质性,从

而指导致密油藏的“甜点”识别。苏北深层致密油藏具有构造复杂破碎、油藏类型多样、储层薄层强非均质性等特点,需进一步融合地质、物探、油藏、工程和经济等多学科信息开展“甜点”综合描述。

#### 2.1.1 地质-地震一体化精准刻画储层

针对特低渗、薄层、构造岩性和裂缝非均质性强等油藏特点,开展了地质建模与地球物理建模相结合的单砂体“甜点”描述与多尺度裂缝精细表征研究(图2)。以地

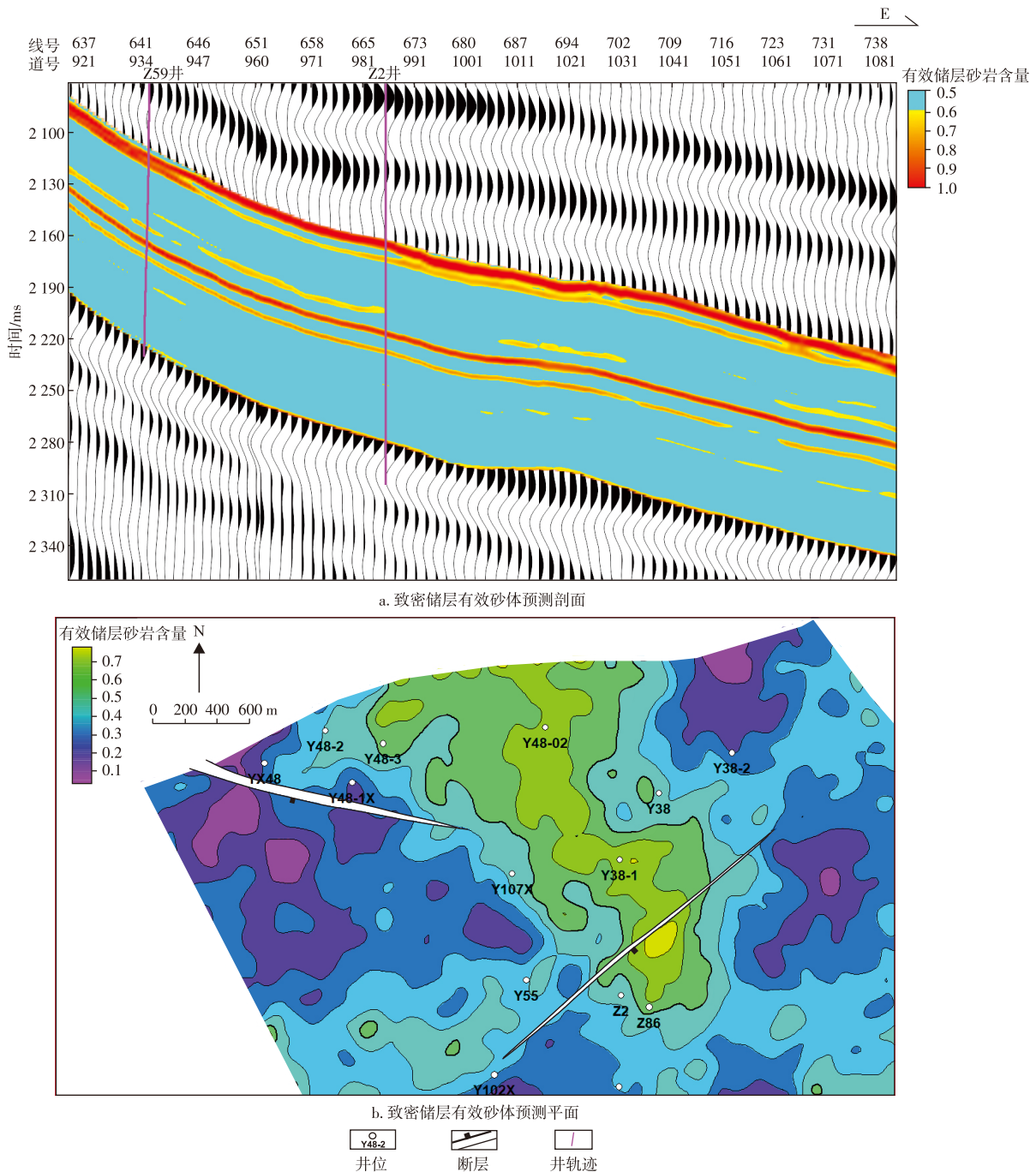


图2 江苏油田Y48区块戴南组一段地质地震一体化致密储层有效砂体表征方法

Fig. 2 Integrated geological-seismic characterization method for effective tight sand bodies in the first member of Dainan Formation of block Y48, Jiangsu oilfield

质模型为指导,不断深化致密油潜力区带综合评价:一方面,从油藏解剖出发,持续开展致密油藏类型总结与探索,明确潜力产建区带,在富民-永安区块致密油藏成功实践的基础上,通过区域分析认为花庄戴南组一段三亚段具有埋深更浅、砂体更发育、油藏类型多样的特点,同时,富民花庄地区火成岩墙封挡具有“规模成藏、孔缝双储”的优势,随着滚动勘探评价认识的不断深入,致密油藏类型不断得到扩展;另一方面,针对成熟区块,从岩心相出发,逐级聚焦致密油藏有利相带描述,通过逐级约束的微相描述,指导储层“甜点”预测与有效识别。储层描述方面根据不同沉积砂体类型,重点开展地球物理方法攻关。对扇三角洲河道砂、三角洲前缘薄砂和陡坡砂砾岩3类储层,分别建立了差异化的预测工作流程,有效提高了储层描述精度。Y48区块为多层系、岩性构造油藏,通过储层精细标定、地震相识别、属性预测、波形指示反演等研究,重点开展古地貌约束下的砂体精细预测,有效指导了油藏砂体边界的认识。天然裂缝描述方面通过多轮次迭代,形成多信息融合的裂缝分级描述方法。在裂缝发育模式指导下,基于叠后地震资料,形成了一套适合于不同尺度裂缝方向与裂缝密度预测流程与方法。X17区块利用相干、曲率表征大尺度裂缝,依据倾角一致性、曲率一致性表征中尺度裂缝,在小尺度裂缝预测上则是依据动静态资料综合预测。针对F125区块裂缝强非均质性储层,综合地震属性优选、裂缝主控因素分析、成像测井、试油试井资料,开展天然裂缝分层分区预测及建模精细表征,为后续新井投产及补能提供依据。同时为了进一步提升有效储层的预测精度,通过综合多专业、多参数交汇开展储层“甜点”描述。致密油“甜点”描述精度受资料品质和数量限制,存在一定不确定性。通过开展“叠后反演+多点地质建模”以及“叠前、叠后融合反演”方式来尽可能降低风险,有效提高了“甜点”预测精度。比如在永安南,通过开展地震约束下的单砂体多点地质统计学建模,指导了“甜点”储层的钻遇,Y48-02探井、F125-1滚动井等一批井验证了此方法可有效提高砂泥岩薄互层岩性砂体预测精度。

### 2.1.2 多参数综合表征与评价

1) 通过“宏观-微观”结合的致密储层多参数评价技术,进行储层质量分类。根据孔喉组合关系和孔喉大小分布特征,总体发育5种孔喉结构类型。结合恒速压汞和核磁共振统计数据,将苏北致密砂岩微观孔喉特征分为3类。在此基础上,从致密储层成因、孔隙结构、物性、渗流和油藏等特征参数中优选出10个指标,形成特低渗致密砂岩储层综合评价的指标体系,基于分类指数,综合宏观、微观、工艺评价,有效指导了致密储层质量分类评价。

2) 形成“地质-工程”结合的致密油藏模型一体化表

征技术,为致密油地质、油藏、工程全周期模拟优化提供支撑,主要取得了4个方面的进展:地质模型方面,通过从一维到三维递进的水平井砂体归位及精细建模,指导致密油水平井高效钻遇(图3),利用模型精确控制水平井轨迹兼探南部F35断块含油性,实现一井多能;油藏模型方面,充分考虑致密储层启动压力梯度与毛管力影响,提高数模计算精度;地质力学模型方面,针对致密砂岩各向异性强、局部应力变化大难题,首次开展了以有限元正演模拟的致密油地应力建模技术探索,实现了地应力大小和方向精细量化表征,同时在模拟过程中充分考虑了岩墙与断层的影响;压裂缝网模型方面,通过建立理论地质模型,模拟不同压裂工艺、地质力学参数对人工裂缝影响。同时在油藏数值模拟过程中也进一步深化天然裂缝约束下的压后缝网模拟研究,提升复杂断块致密油藏压后缝网表征精度。

3) “经济-油藏”结合,综合开展致密油藏储量开发价值评估。基于盈亏平衡理论,建立了多个经济界限模型,并基于现金流分析法,形成了致密油藏储量综合评价方法,为致密油藏经济有效动用提供依据。

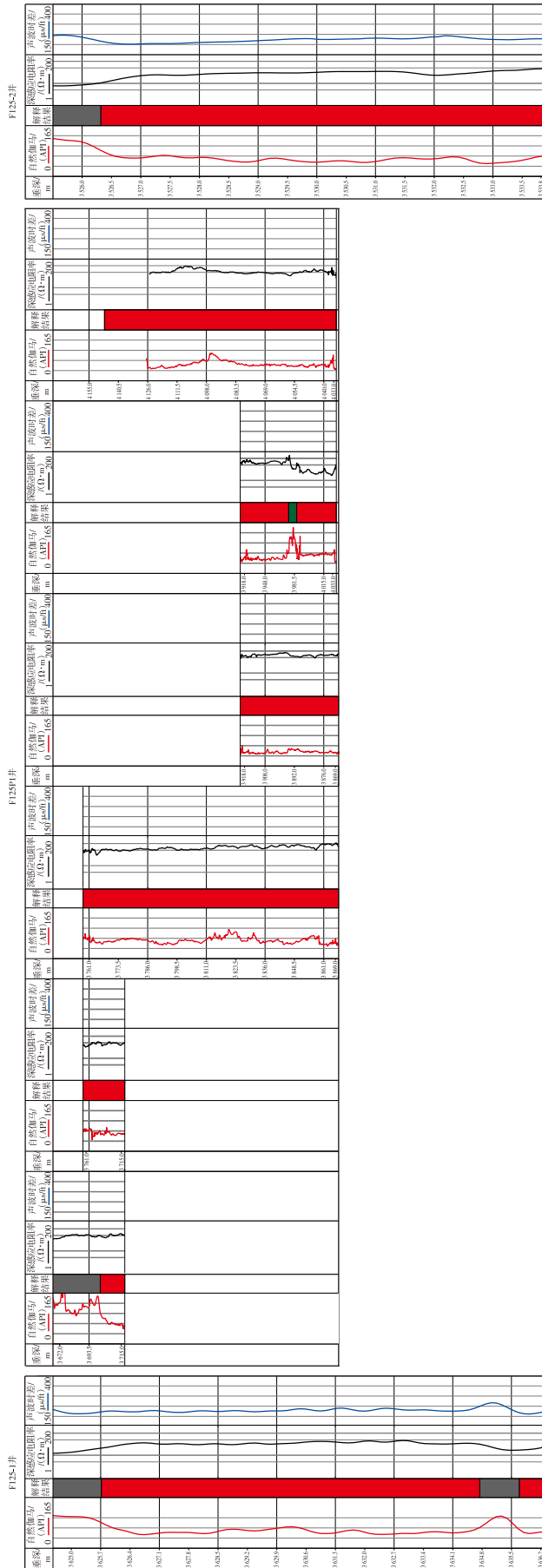
## 2.2 体积压裂

中国一些其他油田先于江苏油田开展了体积压裂的现场试验:吉林油田通过扩大储层改造规模达到了较好的压裂增油效果,但由于补能规模不够,产量下降较快<sup>[17]</sup>;姬源油田在实施体积压裂之后,单井产能和采油速度都得到明显的提升,但由于缺少对蓄能压裂相关参数的优化,使得压裂费用的控制面临较大挑战<sup>[18]</sup>。

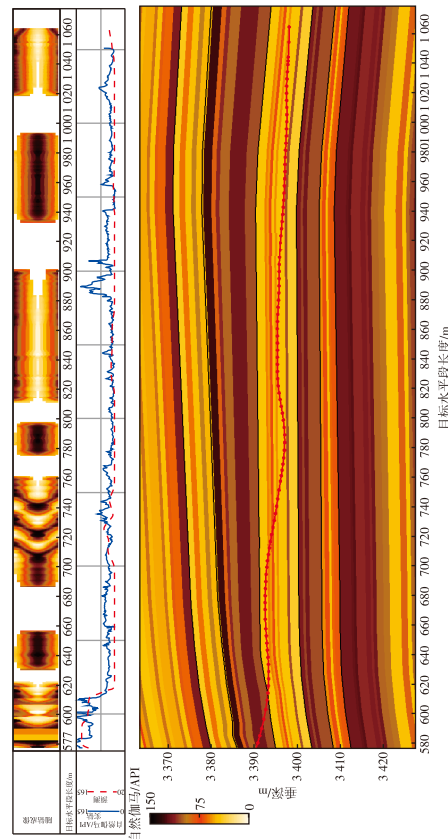
2022年以来,为了有效动用江苏深层致密油藏储量,借鉴中国非常规储层压裂理念<sup>[19-21]</sup>,围绕“增复杂、扩体积、补能量”的目标,通过采用提高压裂缝控体积、暂堵转向提高裂缝复杂程度、组合加砂提高裂缝充填体积等工艺,并结合区块储层特征开展针对性优化,初步形成了适合江苏深层致密储层特征的体积压裂改造技术。

### 2.2.1 变黏压裂液造缝工艺

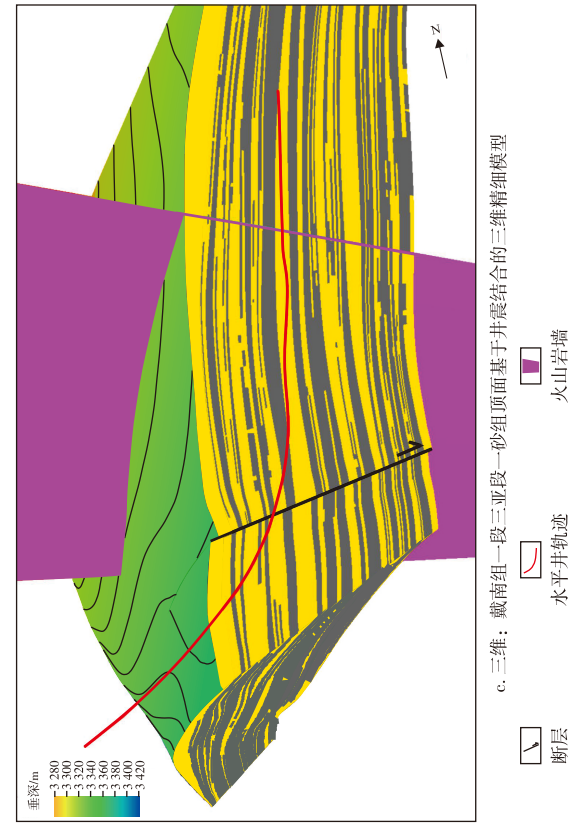
体积压裂一般采用大排量、大液量的施工工艺,在大规模注入压裂液以后,由于储层岩石破裂形成人工裂缝并进一步与周围天然裂缝相连而形成了复杂的缝网。传统的压裂液配液过程繁琐,不能实现即配即用、随时变黏,因而无法达到现场施工要求。为此,研究团队在大量室内实验研究的基础上研制了可在线混配、随时变黏的一体化滑溜水压裂液体系,该体系同时具备“造缝-增能-渗吸”的作用。当减阻剂质量浓度为1.0 g/L时,减阻率能够达到70%以上。该一体化滑溜水体系配方为“0.7~1.0 g/L减阻剂+1.0 g/L防膨剂+1.0 g/L助排剂”。



a. 一维：基于真厚度敏感的水平井对比



b. 二维：基于正演模拟的导向剖面模型



c. 三维：戴南组一段三亚段一砂组顶部基于井震结合的三维精细模型

图3 一维到三维递进的水平井砂体归位及精细建模技术

Fig. 3 Progressive 1D to 3D horizontal well sand body positioning and fine-scale modeling technology

注：1ft = 0.3048 m

### 2.2.2 多粒径组合加砂工艺

裂缝有效导流能力往往与支撑剂类型、支撑剂粒径和加砂强度有关。目前,体积压裂形成的主缝和次级裂缝的支撑剂主要以陶粒为主,而微裂缝的支撑剂主要以石英砂为主。如果支撑剂粒径与缝宽不匹配,不能进入分支缝及天然微裂缝,会导致无支撑而闭合。考虑体积压裂以后能够形成复杂的多级缝网:在压裂的起始阶段,选择70/140目石英砂用于近井筒打磨降滤、支撑微裂缝和分支缝;在主体携砂阶段,加40/70目陶粒用于支撑主裂缝;在最后施工结束阶段,适当尾追30/50目陶粒,强化支撑,提高长期导流能力。最终形成“70/140目石英砂+40/70目陶粒+30/50目陶粒”组合加砂模式,实现了支撑剂由“单一尺度全支撑”向“多级全尺度组合支撑”的转变。

### 2.2.3 缝内多级暂堵工艺

缝内多级暂堵转向是一项增加裂缝的复杂程度、提升储层改造体积的工艺。为了提高压裂以后的缝网复杂程度,有必要采取多级暂堵转向工艺。在实施压裂的混砂过程中投放暂堵剂,跟随压裂液进入已压开的裂缝,形成强度较高的滤饼桥堵,封堵高渗通道,迫使井底的压力逐步升高,最终在应力更高的区域形成新的裂缝,从而提高缝网的复杂程度,实现了裂缝形态从“双翼单缝”为主变为“多级分支复杂缝”。实验优选了缝内全可溶暂堵剂,复配比例为2:1,封堵率为91.3%,承压为8.65 MPa,建立了不同暂堵位置处缝宽、缝高和不同承压条件下的暂堵剂用量计算图版(图4)。

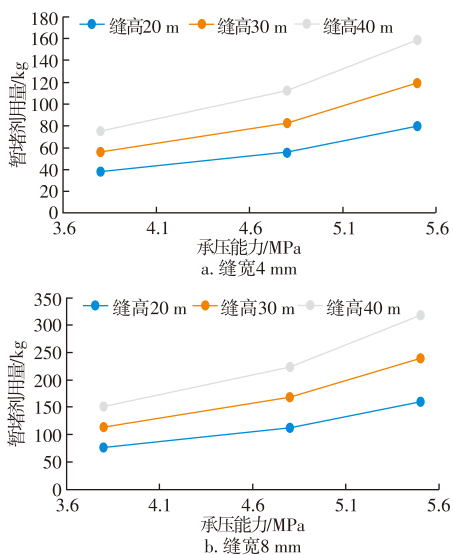


图4 不同缝宽条件下暂堵剂用量计算图版

Fig. 4 Chart illustrating temporary plugging agent dosage calculation under different fracture width conditions

## 2.3 技术政策优化

### 2.3.1 井型设计优化

X17、F125区块根据“甜点”描述研究成果,利用油藏数值模拟方法,考虑常规井、水平井等不同井型,开展井型、井网井距的优化设计(图5),迭代优化致密油开发方案。X17区块初期通过“大斜度井钻遇、大规模体积压裂控藏、大液量蓄能、强加砂保渗”提产能,后期吞吐驱油一体化提采收率。F125、Y48区块初期大型蓄能压裂,同时结合微压驱补能。通过多轮次迭代优化,X17区块部署常规油井3口,井距介于200~250 m;F125区块部署常规油井2口,井距介于450~600 m;Y48区块部署常规油井2口,井距介于300~600 m。

### 2.3.2 压裂参数优化

数值模拟显示,随着蓄能液量增多,地层压力平均增量、蓄能面积也随之增大,但当蓄能液量达到1 300 m<sup>3</sup>时,增长速率变缓,综合成本考虑,优化蓄能压裂液量在1 300~1 800 m<sup>3</sup>之间。X17、Y48、F125三个难动用区块7口井自喷生产周期由过去5 d延长到现在60 d以上。

#### 1) 排量优化

物模实验和数模研究表明,高的排量会增加液体驱替压力,因而会使得天然裂缝更容易开启扩展。同时,高的排量会降低水平应力差影响,有利于裂缝转向延伸,提高裂缝复杂度。结合纵向应力特征、层内有效改造和井筒安全,优选排量为8~12 m<sup>3</sup>/min。

#### 2) 暂堵剂注入参数优化

通过模拟套管压裂方式下,暂堵剂流入各分支裂缝引起出口流量变化来分析施工液量、排量、液体黏度和暂堵剂质量浓度对暂堵效率影响,在满足封堵率≥90%和可注入性条件下,根据实验数据折算,推荐注入参数:排量为6 m<sup>3</sup>/min,黏度为25 mPa·s,暂堵剂质量浓度为20 g/L。

#### 3) 支撑剂铺置优化

采用三级支撑剂、超前加砂实现裂缝全支撑工艺,同时优化各级裂缝导流能力及铺砂质量浓度,加砂强度为2.0~5.0 t/m,主缝、分支缝、微裂缝的支撑剂占比为6.0:1.5:1.0。同时,改变布缝方式,由原来的所有压裂层连续射孔改为压裂层选择性簇式射孔。一方面可以减少射孔数量,有利于支撑剂运移;另一方面可以避免大排量下裂缝缝高失控,同时提高支撑剂在油层内的有效支撑。

### 2.3.3 开发方式优化

X17区块自然产能低,弹性开发采收率低,设计3种开发方式:①“体积压裂投产+天然能量开发”;②“体积

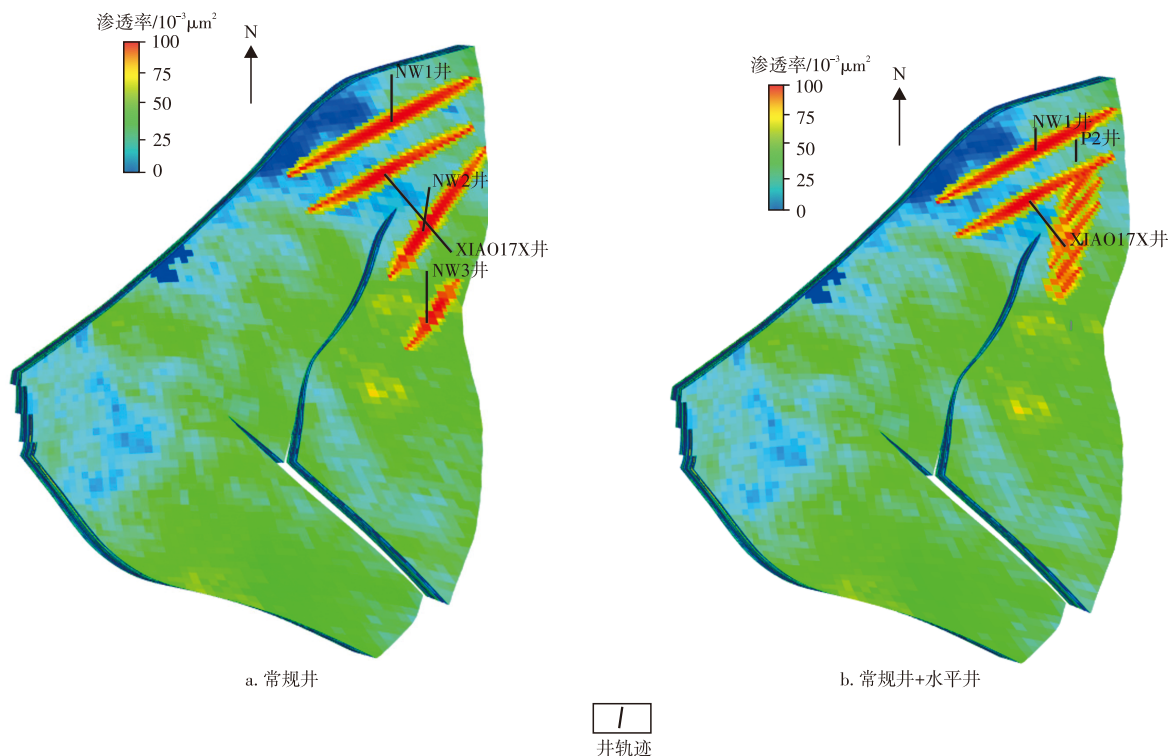


图5 X17区块不同井型优化

Fig. 5 Optimization of well types in block X17

压裂投产+单井CO<sub>2</sub>吞吐”;③“体积压裂投产+CO<sub>2</sub>驱替”保持地层压力开发。利用数值模拟方法对这3种开发方式的开发效果进行预测,结果表明,采用“体积压裂投产+CO<sub>2</sub>驱替”保持地层压力的方式最终开发效果最好。

F125区块地饱压差22.1 MPa,属于饱和压力较高的未饱和油藏。在高于饱和压力阶段,依靠地层岩石和流体的弹性可以采出一定量的原油。为优选开发方式,考虑天然能量开发和压裂后利用CO<sub>2</sub>吞吐这2种开发方式,利用油藏数值模拟方法对开发效果进行预测,结果表明:先进行压裂投产,随后利用CO<sub>2</sub>进行3个周期的注气吞吐开发效果最好。

Y48区块储层物性差,油藏自然产能低,因而初期采取蓄能、体积压裂和天然能量的开发方式,后期考虑CO<sub>2</sub>或者天然气驱提高采收率。具体设计3种能量补充方式:①“体积压裂+CO<sub>2</sub>吞吐补充能量”;②“体积压裂+CO<sub>2</sub>吞吐与CO<sub>2</sub>驱复合增能”;③“体积压裂+CO<sub>2</sub>吞吐与伴生气驱复合增能”。利用油藏数值模拟方法对天然能量开采以及3种能量补充方式分别进行开发效果预测,结果表明采用“体积压裂+CO<sub>2</sub>吞吐与CO<sub>2</sub>驱复合增能”的能量补充方式最终开发效果最好。

## 2.4 钻井高效提速配套

### 1) 优化钻井工艺,强化“四提”技术应用

推广应用四合一钻井提速,平均机械钻速提高

32.9%,实钻周期较定额减少112 d,相比定额降低12.7%,高效完成致密油提速10%、降本10%目标。

### 2) 优化布井方案

推广集约化布井方式,减少征地,节约投资开展井工厂布井方案应用研究,节约土地使用,减少征地费用,提高钻井时效和钻井液综合利用效率。X17、F125、Y48区块临时征地由4.00×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>降至1.67×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,永久征地由7 000 m<sup>2</sup>减少到3 000 m<sup>2</sup>,节约钻前费用180万元。

## 2.5 现场实施情况

2022年以来,根据致密油产能建设方案部署,在X17、F125、Y48区块部署实施7口常规井,新井投产以后全部自喷。其中,3口井自喷期超80 d,单井平均产油量超过6 t/d,4口邻井驱替受效增油,新建产能为2×10<sup>4</sup> t。2023年下半年,根据F125区块生产情况,江苏油田部署实施了致密油开发首口水平井F125区块平1井,目前产油量稳产在10 t/d以上。

## 3 苏北复杂断块致密油藏效益技术瓶颈突破路径

通过苏北深层致密油藏储量有效动用的技术探索与实践,证实了苏北深层致密油藏储量具有良好的开发前景。目前,部分开发单元取得了较好的开发效果,但是仍然存在着储层改造认识不清、渗流机理和产能主控因

素不明确等问题。

1) 储层“甜点”预测及综合评价:针对江苏油田复杂小断块、特低渗致密砂岩储层特点,开展基于储层、裂缝、工程参数精细描述的“甜点”预测研究,建立储层“甜点”分类评价标准。

2) 复杂缝网的建模数模方法:在以天然裂缝、压裂缝网精确表征为重点的高精度地质建模基础上,开展流-固耦合的全周期油藏数值模拟研究,包括三维裂缝建模与力学建模、人工裂缝模拟、油藏数值模拟等。

3) 渗流机理及产能预测:研究启动压力、应力敏感、毛管力等渗流机理,对比分析不同储层条件下的渗吸、驱替规律及差异。针对流体流动规律,考虑非线性渗流特征、渗吸、储层改造状况等因素及其影响程度,分析评价各个因素对产量的影响,建立致密油藏产能计算模型。

4) 高效改造工艺技术:从提高人工缝网、流体与储层适应性出发,研究提高致密储层压裂效果的关键技术,形成一套适用于江苏油田致密油藏特点的压裂配套工艺。包括分类储层“甜点”渗吸蓄能技术、分类储层“甜点”配套适宜压裂工艺等。

5) 合理开发方式及技术政策研究:针对不同深层致密储层类型,结合小断块断层发育、储层多段薄层强非均质性的特点,综合利用油藏工程及数值模拟方法,以储量控制和动用最大化、效益最大化为目标研究开发技术政策。

## 4 结论

1) 针对江苏油田深层致密储层地质特点,在“甜点”描述、体积压裂、技术政策优化、钻井高效提速配套等方面开展了探索,创新工程工艺降本增效方法,推动致密油藏储量效益产建,初步形成了相应的技术系列。

2) 通过在X17、F125、Y48等区块开展矿场试验,实现了苏北深层致密油藏储量有效动用,研究方法及相关现场试验可以为其他致密油藏储量的开发提供技术参考和借鉴。

3) 随着地质、油藏、工程一体化技术的不断发展和进步,一批深层致密油藏储量有望转化为产能,成为江苏油田百万吨稳产的重要支撑。

### 参考文献

- [1] 陶登海,詹雪函,高敬文,等.三塘湖盆地马中致密油藏注水吞吐探索与实践[J].石油钻采工艺,2018,40(5):614-619.  
TAO Denghai, ZHAN Xuehan, GAO Jingwen, et al. Study and practice of cyclic water injection in Mazhong tight oil reservoir in the Santanghu Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(5): 614-619.
- [2] 皮伟,陈敬轶.鄂尔多斯盆地北部致密砂岩储层特征及测井识别[J].科学技术与工程,2023,23(31):13265-13272.  
PI Wei, CHEN Jingyi. Characteristics of tight sandstone reservoirs and logging identification in the northern Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31): 13265-13272.
- [3] 杨可薪,肖军,王宇,等.松辽盆地北部青山口组致密油特征及聚集模式[J].沉积学报,2017,35(3):600-610.  
YANG Kexin, XIAO Jun, WANG Yu, et al. A study on Qingshankou formation's tight oil characteristics and accumulation mode in the northern Songliao basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(3): 600-610.
- [4] 王跃祥,牟瑜,谢冰,等.川中地区沙溪庙组致密砂岩含气性测井评价技术[J].测井技术,2023,47(1):42-47.  
WANG Yuexiang, MU Yu, XIE Bing, et al. Gas-bearing properties log evaluation technique for tight sandstone of Shaximiao formation in the central region of Sichuan Basin[J]. Well Logging Technology, 2023, 47(1): 42-47.
- [5] 郑贵强,连会青,杨德方.沁水盆地柿庄北地区致密砂岩含气性测井评价研究[J].煤炭工程,2018,50(12):117-122.  
ZHENG Guiqiang, LIAN Huiqing, YANG Defang. Well logging evaluation on tight sandstone gas content in North Shizhuang area of Qinshui Basin[J]. Coal Engineering, 2018, 50(12): 117-122.
- [6] 刘忠宝,刘光祥,胡宗全,等.陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义:以四川盆地中下侏罗统为例[J].天然气工业,2019,39(12):10-21.  
LIU Zhongbao, LIU Guangxiang, HU Zongquan, et al. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: a case study of the Middle and Lower Jurassic strata in the Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 10-21.
- [7] 周磊,王永诗,于雯泉,等.基于物性上、下限计算的致密砂岩储层分级评价:以苏北盆地高邮凹陷阜宁组一段致密砂岩为例[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1308-1316.  
ZHOU Lei, WANG Yongshi, YU Wenquan, et al. Classification assessment of tight sandstone reservoir based on calculation of lower and upper limits of physical properties: a case study of the tight sandstone reservoir in the 1st member of Funing Formation in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1308-1316.
- [8] 于雯泉.致密砂岩储层成因类型与致密化过程差异性:以高邮凹陷阜一段为例[J].沉积学报,2023,41(4):1271-1280.  
YU Wenquan. Genetic type analysis of tight sandstone reservoirs: A case study of the First member of the Funing Formation in Gaoyou Sag, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(4): 1271-1280.
- [9] 于雯泉,王路,陆梅娟.高邮凹陷阜一段致密砂岩孔隙演化差异分析[J].复杂油气藏,2017,10(1):9-16.  
YU Wenquan, WANG Lu, LU Meijuan. Differences analysis for porosity evolution of tight sandstone in the first member of Funing Formation in Gaoyou Sag[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(1): 9-16.
- [10] 于雯泉.致密砂岩储层成因类型分析:以苏北盆地高邮凹陷阜一段为例[J].复杂油气藏,2018,11(4):1-6.  
YU Wenquan. Analysis of genetic type of tight sandstone reservoirs: A case study of the first member of Funing Formation in Gaoyou Sag [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2018, 11(4): 1-6.
- [11] 刘小明.大庆油田致密油水平井体积改造技术发展与建议[J].石油地质与工程,2023,37(4):108-112.  
LIU Xiaoming. Development and suggestions for volume transformation of tight oil by horizontal wells in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2023, 37(4): 108-112.