

引用格式:钟志国,于雯泉,段宏亮,等.苏北盆地中低TOC复杂断块页岩油勘探进展与攻关方向[J].油气藏评价与开发,2025,15(1):11-18.

ZHONG Zhiguo, YU Wenquan, DUAN Hongliang, et al. Progress and research direction of shale oil exploration in complex fault blocks with low to medium TOC in Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 11-18.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.01.002

苏北盆地中低TOC复杂断块页岩油勘探进展与攻关方向

钟志国¹,于雯泉¹,段宏亮¹,杨保良^{1,2}

(1.中国石化江苏油田分公司,江苏扬州225009;2.同济大学海洋与地球科学学院,上海200092)

摘要:苏北盆地页岩油资源潜力大,其中阜宁组二段(以下简称阜二段)和阜宁组四段(以下简称阜四段)页岩厚度大、分布面积广、脆性矿物含量高、纹层发育、有机质类型好,具有中低TOC(总有机碳含量)、构造岩性双复杂、断层/裂缝发育等典型地质特征,是勘探的主要目的层。2011年来,江苏油田通过加强基础研究和攻关实践,建立了中低TOC复杂断块页岩油差异富集理论,集成创新了勘探开发关键技术,探索了绿色低碳开发模式,取得高邮凹陷阜二段、阜四段页岩油勘探突破。但仍面临页岩油富集高产规律认识不清,工程工艺技术适配性待提升,效益开发技术政策不明确,开发成本较高等挑战。深化页岩油富集高产主控因素等基础研究,持续攻关迭代关键技术,优化一体化组织管理运行机制,最大限度提高优质储层钻遇率、页岩油储量动用程度和采收率,进一步降本增效,是实现页岩油规模建产与效益开发的主要途径。

关键词:苏北盆地;高邮凹陷;复杂断块页岩油;勘探进展;攻关方向

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Progress and research direction of shale oil exploration in complex fault blocks with low to medium TOC in Subei Basin

ZHONG Zhiguo¹, YU Wenquan¹, DUAN Hongliang¹, YANG Baoliang^{1,2}

(1. Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Shale oil resources in the Subei Basin show significant potential. The second and fourth members of the Funing Formation (hereafter referred to as Funing Member 2 and Funing Member 4) are the main target layers for exploration. These layers are characterized by substantial thickness, wide distribution, high content of brittle minerals, well-developed laminated structure, and favorable organic matter types, with typical geological features, including low to medium total organic carbon (TOC), complex tectonics and lithology, and developed faults/fractures. Since 2011, Jiangsu Oilfield has strengthened basic research and exploration practices, leading to the establishment of the theory of differential enrichment of shale oil in complex fault blocks with low to medium TOC. Key technologies for exploration and development have been integrated and innovated, green and low-carbon development models have been explored, and significant breakthroughs have been achieved in shale oil exploration of Funing Member 2 and Funing Member 4 in the Gaoyou Sag. However, there are still many challenges, such as an unclear understanding of the patterns of shale oil enrichment and high yield, insufficient adaptability of engineering technologies, undefined technical policies for cost-effective development, and high development costs. Main approaches to achieving large-scale production and cost-effective development of shale oil include: deepening the fundamental research on the main controlling factors of shale oil enrichment and high yield, tackling main challenges and advancing key technologies, optimizing integrated organizational management and operation mechanisms, and maximizing the drilling success rate in high-quality reservoirs, the utilization rate of shale oil reserves, and the recovery efficiency to further reduce costs and improve efficiency.

Keywords: Subei Basin; Gaoyou Sag; shale oil in complex fault block; exploration progress; research direction

收稿日期:2024-09-18。

第一作者简介:钟志国(1967—),男,硕士,正高级工程师,主要从事油气勘探开发与管理工作。地址:江苏省扬州市文汇西路1号,邮政编码:225009。E-mail:zhongzg.jsyt@sinopec.com

通信作者简介:杨保良(1988—),男,博士,助理研究员,从事非常规细粒沉积与页岩油气储层评价研究。地址:江苏省扬州市文汇西路1号,邮政编码:225009。E-mail:yangbl564@163.com

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾超级盆地油气富集规律与新领域勘探技术”(2024ZD1400100);中国石化科技开发部项目“内陆断陷湖盆断块型页岩油勘探开发技术”(P23189)。

中国陆相页岩油资源丰富,是国内原油增储上产的重要现实接替领域。近年来,中国加大陆相页岩油的攻关力度,设立了新疆吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区、大庆古龙陆相页岩油国家级示范区、胜利济阳陆相断陷湖盆页岩油国家级示范区等3个国家级页岩油示范区^[1],在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷、松辽盆地古龙凹陷、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地等地陆相页岩油勘探开发取得重大突破,展现了广阔的发展前景,促进了陆相页岩油地质理论的创新和工程工艺技术水平进步^[2-3]。苏北盆地是中国东部陆相断陷盆地群的重要组成部分,盆地自下向上发育泰州组二段(以下简称泰二段)、阜宁组二段(以下简称阜二段)和阜宁组四段(以下简称阜四段)3套页岩层系。“十四五”期间,中国石化江苏油田围绕页岩油“一年见成效、三年上规模、五年成接替”的目标,联合中国石化石油勘探开发研究院、石油工程技术研究院、经纬公司等多家直属院所、科研机构 and 高校,聚焦古近系阜二段和阜四段,通过加强理论技术攻关与开发先导试验,落实页岩油地质资源量 14.65×10^8 t,取得“高邮和金湖2个凹陷,阜二段和阜四段2套页岩层系,混积页岩和灰云页岩2种岩相,水平井和直斜井2种井型”页岩油勘探突破,新增页岩油控制、预测储量超 1.5×10^8 t,累计产页岩油气超 14×10^4 t,证实苏北盆地阜二段、阜四段具有良好的勘探前景。通过梳理总结苏北盆地中低TOC复杂断块页岩油的勘探进展及面临的主要问题与挑战,提出了解决对

策与攻关方向,以期为中国东部陆相断陷盆地页岩油的勘探开发提供借鉴。

1 页岩油地质特征

苏北盆地位于郯庐断裂东侧,属苏北—南黄海盆地的陆上部分,是晚白垩世发育起来的陆相中—新生代断陷湖盆,面积约为 $35\,000\text{ km}^2$,共发育2个一级负向构造单元和11个二级负向构造单元,其中高邮凹陷页岩油富集条件最有利^[4-6](图1),阜二段和阜四段是主要目的层。

与中国其他陆相页岩岩相比,苏北盆地高邮凹陷页岩在构造特征、岩石类型、有机质丰度等方面具有独特性(表1):①构造复杂、断层/裂缝发育,阜二段经过多期构造运动改造,发育复杂的断裂系统,并被不同级别断层切割形成一系列北东东走向的复杂断块^[7-8](图1),断块短轴长度多小于2 km,页岩储层发育复杂的无机孔—缝系统^[9-10],层理缝和裂缝有效沟通了基质孔隙^[6];②中低TOC(总有机碳含量),阜二段TOC平均为0.96%,阜四段TOC平均为1.50%;③中等成熟度,阜二段有利区 R_o (镜质体反射率)介于0.7%~1.0%,阜四段有利区 R_o 介于0.7%~1.2%;④岩石类型以混积页岩为主,阜二段主要矿物组分由长英质、黏土质、碳酸盐岩矿物按4:3:3比例组成,脆性矿物平均含量超60%^[9],页岩纹层结构发育;⑤厚度大,阜二段页岩厚度介于240~350 m,阜四段页岩厚度介于400~500 m^[11];⑥有机质类型好,阜二段有机

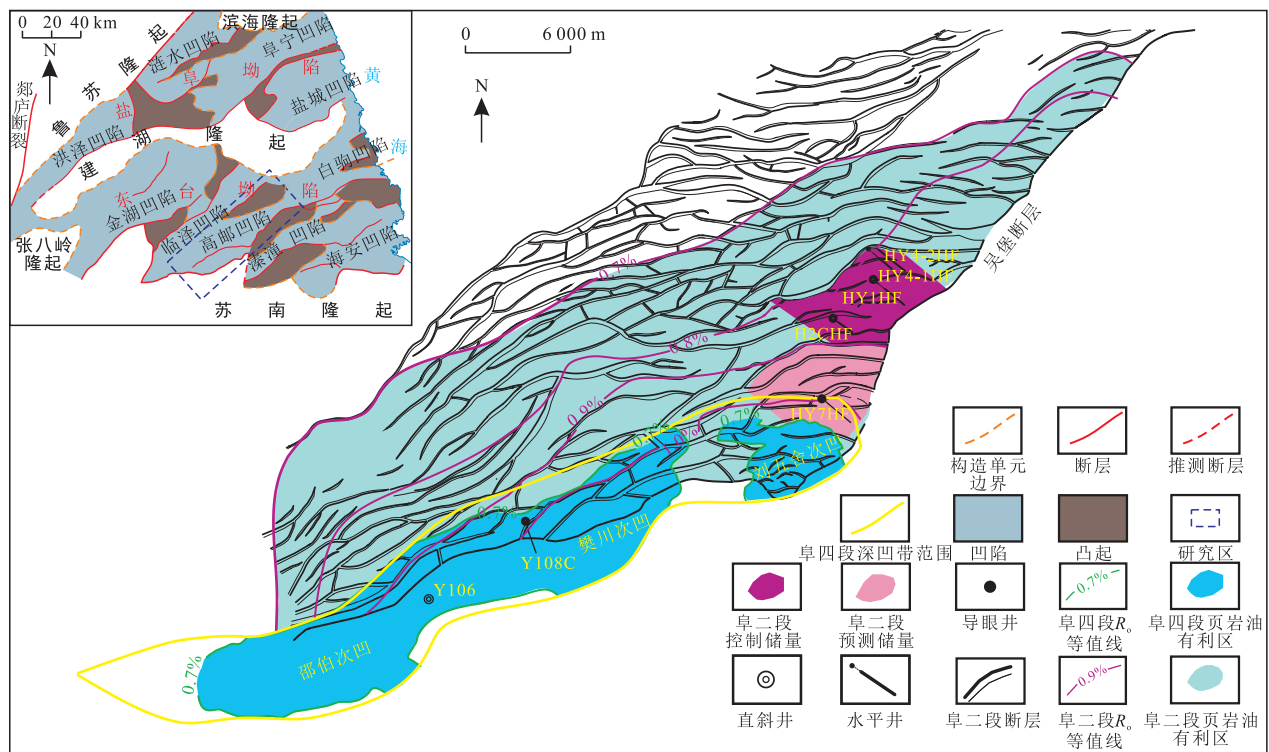


图1 苏北盆地高邮凹陷阜二段、阜四段断裂体系及页岩油有利区叠合

Fig. 1 Fault system and superimposed of favorable shale oil areas in Funing Member 2 and Member 4 of the Gaoyou Sag, Subei Basin

表1 苏北盆地高邮凹陷阜二段、阜四段页岩油有利区基础地质特征

Table 1 Basic geological characteristics of favorable shale oil areas in Funing Member 2 and Member 4 of the Gaoyou Sag, Subei Basin

| 层位 | 源岩品质 | | | 储层品质 | | | 保存条件 | | 油藏品质 | | | 工程条件 | | | |
|-----|---------|-------------------------|----------|---------------------|--------------|-----------------------------|---------|--------|----------|---------|--------------------------------|------------------------------|-------------|--------------|-----------|
| | 页岩厚度/m | $\omega(\text{TOC})/\%$ | $R_o/\%$ | $S_1/(\text{mg/g})$ | $\varphi/\%$ | 渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 岩相 | 断裂发育程度 | 底板泥岩厚度/m | 压力系数 | 原油密度/ (g/cm^3) | 气油比/ (m^3/t) | 埋深/m | 脆性矿物含量/ $\%$ | 两向应力差/MPa |
| 阜二段 | 240~350 | 0.96 | 0.7~1.0 | 2.19 | 4.8 | 0.32 | 纹层状混积页岩 | 发育 | 17~25 | 1.2~1.6 | 0.81~0.88 | 50~300 | 3 400~4 500 | 69.8 | 1.1~5.9 |
| 阜四段 | 400~500 | 1.50 | 0.7~1.2 | 1.25 | 5.2 | 1.31 | 纹层状混积页岩 | 不发育 | 120~130 | 1.4~1.8 | 0.80 | 300~500 | 3 500~5 200 | 62.4 | 3.7~5.5 |

注: S_1 为游离烃含量,单位mg/g; $\omega(\text{TOC})$ 为总有机碳含量, $\%;$ φ 为孔隙度, $\%。$

质类型主要为 I 型、II₁型干酪根,有机显微组分以藻类体为主^[6],阜四段有机质类型以 II 型干酪根为主。

2 页岩油勘探进展

2.1 建立中低 TOC 复杂断块页岩油富集地质理论

通过页岩热演化模拟实验和典型井解剖,认为咸化湖盆早生烃、高转化和复杂的孔缝系统是苏北盆地阜二段中低 TOC 页岩油富集的关键;断层封闭性、底板条件和岩相(组合)共同控制了断块内页岩油差异富集,其中断层控制页岩油井间差异富集,底板控制页岩油层间差异富集,岩相(组合)控制页岩油层内差异富集。

2.2 复杂断块页岩油勘探开发关键技术

复杂断块页岩油地质评价技术、页岩油“甜点”描述技术、页岩油优快钻井和高效压裂技术、以控压为核心的生产调控技术、绿色低碳开发模式等勘探开发核心技术,为苏北盆地页岩油高效开发提供了有力支撑。

2.2.1 页岩油地质评价技术

通过开展混积岩岩相划分与分类评价、页岩油“甜点”综合评价,实现了页岩油“甜点”分级评价,为页岩油井位部署提供支撑。

1) 混积岩岩相划分与分类评价技术

针对阜二段页岩岩性混杂、非均质性强及纵向“甜点”优选难度大等特点,创建了基于三端元矿物组分(长英质矿物、碳酸盐矿物、黏土矿物)的混积页岩岩性划分方案,依据该方案划分出不同岩性的生油性、含油性、储集性存在明显差异,且与常规测井曲线具有较好的对应关系。在岩性划分的基础上,结合层理类型进一步划分页岩岩相类型,并对各岩相类型的含油性、储集性、可动性和可压性等参数进行赋值打分,开展不同岩相类型的分级评价,明确了阜二段发育 I 类岩相 7 种、II 类岩相 3

种、III 类岩相 4 种;最终结合页岩基干剖面,落实纵向上 I、II、III 类岩相的分布特征,从而明确阜二段纵向上发育 V-4—V-9、IV-2—IV-7 小层和 II—III 亚段等 3 套有利层(图 2)。在此基础上,创建页岩储层全尺度孔隙联合表征技术^[12],揭示了不同页岩岩相孔隙成因类型、孔喉结构特征及其差异性,明确了纹层状长英质-灰质/白云质混积页岩夹白云岩条带组合为有利组合类型,表现为孔隙类型多样、孔缝协同发育,其中 IV-5—IV-7 小层有利组合发育厚度最大,为最优“甜点”层。

2) 页岩油“甜点”综合评价技术

立足苏北盆地阜二段页岩油地质特点,优选了 R_o 、地层压力系数、岩相、 S_1 、含油饱和指数、断层发育程度等作为页岩油选区、选层和定目标的关键参数(表 2)。首先,以 R_o 和地层压力系数优选有利区;其次,以岩相为基础,结合 TOC、 S_1 、含油饱和指数、孔隙度、顶底板泥岩厚度等关键参数优选有利层;最后,结合断层发育程度及规模等定目标,形成了“选区、选层、定目标”的“甜点”评价流程。评价结果表明:高邮凹陷阜二段页岩油形成条件最有利,金湖凹陷、海安凹陷和盐城凹陷为潜力区。

2.2.2 页岩油“甜点”描述技术

1) 深度域精确成像及随钻快速处理技术

针对阜二段页岩断层发育、水平井地质导向难等问题,以深度域精确成像为目标,攻关形成高质量炮检距向量片(OVT)域叠前时间偏移处理技术、倾斜各向异性(TTI)介质建模和深度偏移成像技术、随钻快速深度偏移成像-解释一体化技术等复杂断块页岩油水平井随钻快速成像技术系列,实现随钻 24 h 快速成像,保障水平井精准实施,随钻资料井震误差率 0.2%,靶窗钻遇率达 95% 以上。

2) 地质-工程双“甜点”关键参数地球物理预测技术

通过开展地震响应特征和分段岩石物理特征分析,

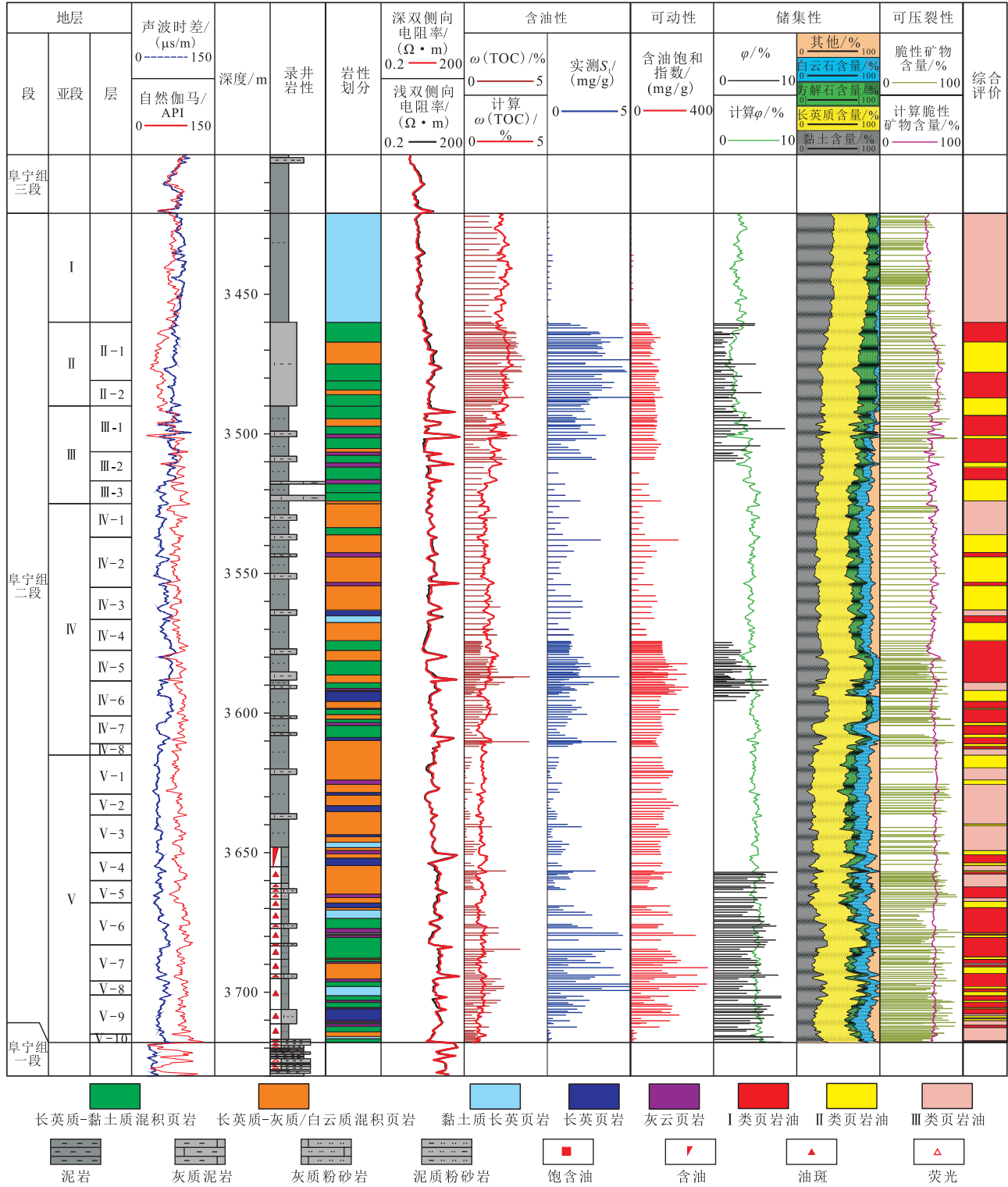


图2 苏北盆地高邮凹陷阜二段综合地层特征^[9]

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic characteristics of Funing Member 2 of the Gaoyou Sag, Subei Basin^[9]

表2 苏北盆地中低TOC复杂断块页岩油地质评价标准

Table 2 Geological evaluation criteria for shale oil in complex fault blocks with low to medium TOC in Subei Basin

| 分级评价 | 选区 | | 选层 | | | | | 定目标 | |
|------|------------------|------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|--------------|----------------|------------|
| | R_o /% | 地层压力系数 | 岩相 | $\omega(\text{TOC})/\%$ | $S_I/(\text{mg/g})$ | 含油饱和度/ (mg/g) | $\varphi/\%$ | 顶底板泥岩厚度/m | 断层发育程度及规模 |
| I级 | ≥ 0.9 | ≥ 1.4 | 纹层状混积页岩 夹白云岩条带 | ≥ 1.5 | ≥ 1.5 | ≥ 150 | ≥ 6 | ≥ 40 | 断层不发育 |
| II级 | $0.8 \sim < 0.9$ | $1.2 \sim < 1.4$ | 纹层状混积页岩 | $1.0 \sim < 1.5$ | $1.0 \sim < 1.5$ | $100 \sim < 150$ | $4 \sim < 6$ | $20 \sim < 40$ | 断距不超过 20 m |
| III级 | $0.7 \sim < 0.8$ | $1.0 \sim < 1.2$ | 纹层状灰云质混积页岩 | < 1.0 | < 1.0 | $50 \sim < 100$ | < 4 | < 20 | 断距大于 20 m |

综合利用正演模拟、叠前叠后反演、波形聚类、属性分析等多种地球物理手段对苏北盆地复杂断块页岩油地质-工程关键“甜点”参数开展系统性、针对性研究,形成了基于分段岩石物理建模的地质-工程“甜点”叠前叠后预测技术、基于神经网络模型的混积页岩岩相组合预测技术和基于机器学习的应力场预测技术,建立了页岩油地质-工程双“甜点”关键参数地球物理综合评价标准和流程,落实了高邮凹陷花庄地区阜二段和阜四段深凹带有利区,为页岩油井位科学部署和实施提供了技术基础。

3) 断缝系统分级精细描述技术与布井模式

在综合利用相干、曲率、蚂蚁体等属性定性描述不同尺度断裂的基础上,根据相干属性与三级断层走向吻合度较高,曲率属性与四级断层匹配性较好,蚂蚁体对于五级断层更为敏感等特点,建立了适用于苏北盆地复杂断块页岩油断缝系统分级描述技术。并利用成像测井资料构建弥散裂缝模型,开展裂缝定性刻画与半定量预测。通过对倾角滤波和各向异性弥散滤波预处理,提高针对构造和地层结构特征描述的地震资料分辨率,改善微断裂成像质量,进而开展裂缝自动追踪建立弥散裂缝网络模型,精细刻画页岩“甜点”区断缝系统。在此基础上,根据断块短轴长度、断层断距与有利层厚度配置关系,形成复杂断块页岩油5种布井模式(图3)。目前已试验4种布井模式,均取得良好勘探成效。

2.2.3 页岩油优快钻井和高效压裂技术

1) 页岩油优快钻井技术

针对阜二段页岩断层发育、地层破碎易垮塌、安全密度窗口窄等施工难点,在导向提速工艺、体系优化、装备和工具配套等方面开展技术迭代升级,形成等寿命钻具设计、强化钻井参数、定制异型齿钻头 etc 3项提速技术,井身结构简化、油基泥浆减量、钻井液低油水比等3项降本技术,跨断层轨迹控制、旋转导向随钻跟踪、防窜安全钻井、双凝双密度固井等4项提质技术,应用于15口井,实现钻井周期由77.14 d下降至31.96 d(图4a)。

2) 页岩油高效压裂技术

针对阜二段页岩断层和裂缝发育、纵向非均质性强、应力高、两向应力差大等地质条件,先后试验大排量穿层造缝、大液量增能提产,提高改造体积;差异化逆向设计、密切割布缝、复合暂堵工艺,提升单井EUR(最终可采储量);高强度均衡压裂、多维综合降本,提高单井效益;压裂改造从压得开,向压得好、压出效转变,最终迭代形成“超密切割+聚能造缝+复合转向+饱和加砂”深层压裂技术。实现压裂加砂强度由2.7 t/m提升至5.1 t/m,综合砂液比由2.6%提升至4.7%,水平井(井深5 700 m,水平段长1 200 m)钻井总投资控制在5 000万元以内、平均单井EUR超 4×10^4 t(图4b—图4d)。

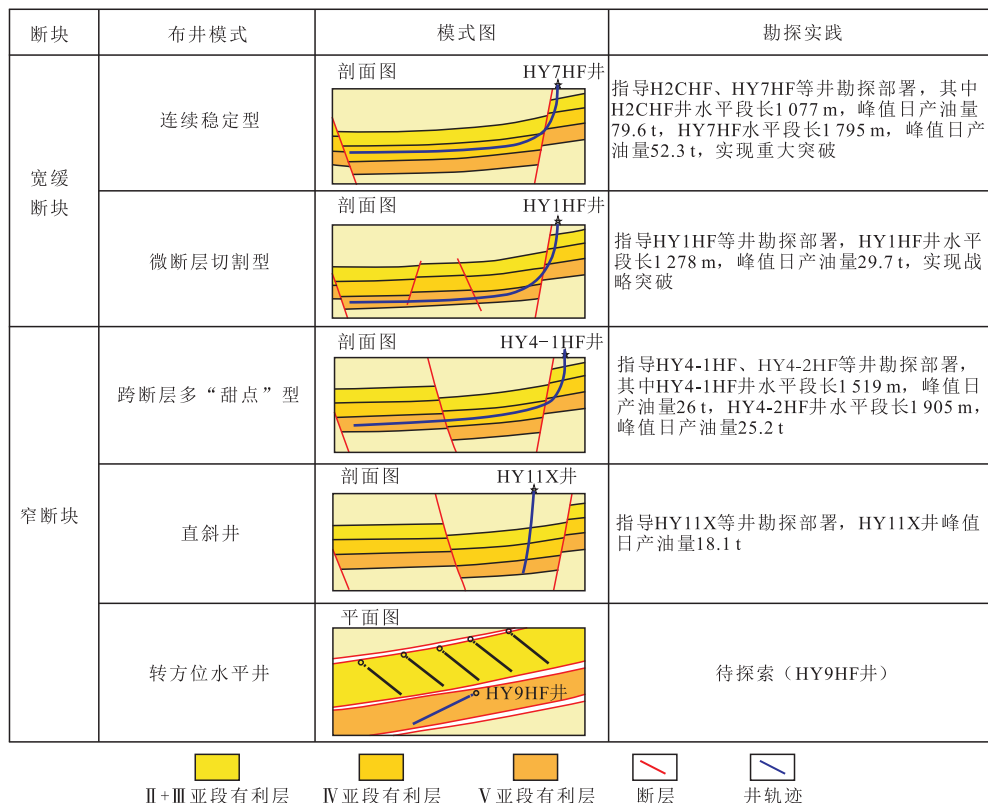


图3 苏北盆地高邮凹陷阜二段布井模式

Fig. 3 Well placement patterns in Funing Member 2 of the Gaoyou Sag, Subei Basin

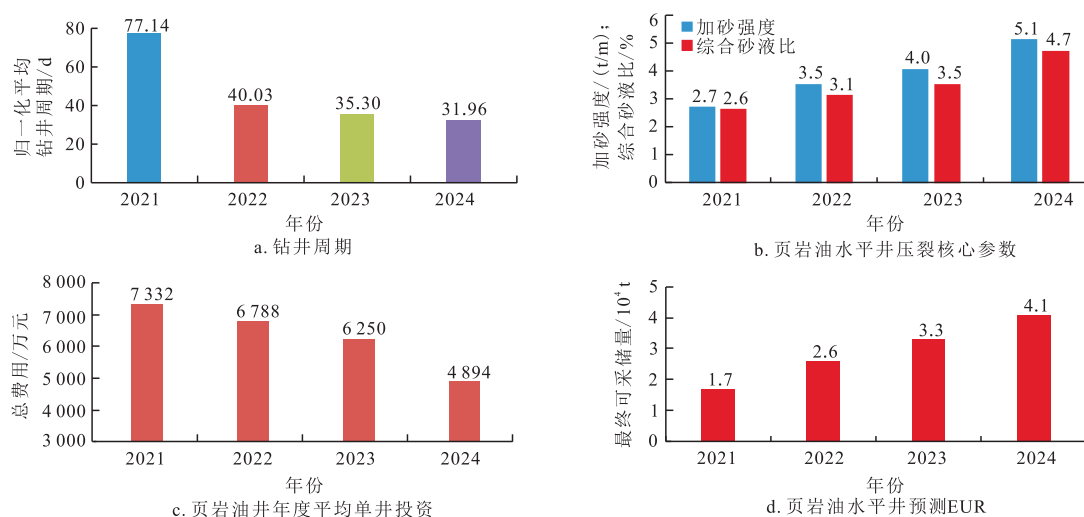


图4 苏北盆地高邮凹陷阜二段页岩油水平井核心参数对比

Fig. 4 Comparison of core parameters of horizontal wells for shale oil in Funing Member 2 of the Gaoyou Sag, Subei Basin

2.2.4 以控压为核心的生产调控技术

以最高单井可采储量为优化目标,通过研究不同生产阶段(焖井、自喷期、机采期)产量及压力变化规律,建立了页岩油试井解释模型,形成以控压为核心的生产调控技术,指导生产调控,水平井平均单井EUR提升至 4×10^4 t以上。明确了阜二段IV亚段合理焖井时间为10 d左右,V亚段合理焖井时间为20 d左右。通过协调基质—裂缝—井筒供液速度,科学利用能量,自喷初期,利用2~5 mm油嘴逐级增大生产制度,放大生产压差,增加含水率下降速度,压降速度控制在0.06~0.10 MPa/d;自喷中期,利用5~2 mm油嘴逐级减小工作制度控压稳产,压降速度控制在0.02~0.05 MPa/d;自喷后期,井口压力低于2 MPa,针对各井特点制定“一井一策”方案。自喷期结束后,根据地层深度折算初始井底静止压力,根据水平段井深设计下泵深度,确保基质—微裂缝—分支缝—主缝之间供液平衡,机采期最低井底压力须保持在饱和压力以上。

2.2.5 探索绿色低碳开发模式

走生态优先、绿色发展之路,加快发展绿色转型新模式,助力实现“碳中和”目标,积极探索页岩油绿色低碳高效开发模式,助力长三角地区生态保护和高质量发展^[13],措施包括:①坚持以“加快绿电覆盖、加速清洁替代”为目标,加快打造“源网荷储”新能源特色模式,推动风光电项目建设;②推广绿色修井、绿色钻井工艺技术应用,加大泥浆不落地、油泥油砂处置工作力度,实施固体废弃物从产生到贮存再到转化全生命周期管理,实现减量化、无害化、资源化;③充分发挥CO₂在压裂改造、增能提

产、吞吐及高压混相驱提高采收率过程中的有利作用,最大程度提升单井EUR,提高采收率的同时实现CO₂封存;④探索低成本碳捕集技术,扩大碳封存应用规模,加快CCUS(碳捕集、利用与封存)示范区建设,打造集油气、绿电、碳封存为一体的区域综合性清洁能源供应商。

2.3 阜二段和阜四段页岩油勘探取得重大突破

2021年以来,按照“突破高邮、准备金湖,点上突破、层上拓展、面上展开”的思路,优先针对阜二段实施页岩油井13口,探索高邮和金湖2个凹陷页岩油勘探潜力,评价阜二段3套有利层页岩油产能,开展井型、井距试验。目前11口井投产,其中有5口井累计产油气超 1×10^4 t,1口井累计产油气超 3×10^4 t,11口井累计产油气超 14×10^4 t,落实阜二段页岩油地质资源量 10.49×10^8 t,新增控制、预测储量超 $7\,000 \times 10^4$ t;证实阜二段中低TOC、复杂断块页岩具备页岩油富集高产条件,落实高邮凹陷花庄地区阜二段IV亚段整体具备效益开发的物质基础。

在阜二段复杂断块页岩油勘探突破的基础上,加大阜四段与阜二段页岩对比研究,认为高邮凹陷阜四段页岩厚度大、成熟度高、压力系数高、构造稳定,勘探思路由斜坡区阜二段复杂断块向深凹区阜四段拓展。优选高邮凹陷深凹带,常非兼探部署直斜井Y106井和水平井Y108C井,压裂测试峰值日产油气当量分别为32.9、54.6 t,取得苏北盆地阜四段新层系页岩油勘探突破,落实地质资源量 4.16×10^8 t,新增预测储量超 $8\,000 \times 10^4$ t。

至此,江苏油田在苏北盆地取得“高邮和金湖2个凹陷,阜二段和阜四段2套页岩层系,混积页岩和灰云页岩2种岩相,水平井和直斜井2种井型”页岩油勘探突破,新增控制预测、储量超 1.5×10^8 t,为江苏油田高质量二次创业奠定良好的资源基础。

3 挑战与攻关方向

3.1 挑战

通过勘探实践基本落实了阜二段、阜四段2套有利层和高邮凹陷规模增储区带,初步形成了勘探开发工程技术,但要实现规模建产、效益开发,仍面临以下挑战。

1) 页岩油富集高产规律待落实

基于已钻井分析,明确了页岩成熟度、岩相、复杂的孔缝系统、断层和顶底板条件是影响页岩油富集的关键要素,阜二段IV-5—IV-7小层为最优“甜点”层^[6]。但由于阜二段有利区断层和裂缝发育,导致横向地层压力系数、地应力变化较大,页岩油富集规律复杂,“甜点”区刻画难度大,亟须建立不同级别断层对页岩油富集影响程度的定量评价标准,地质-工程一体化落实页岩油富集高产主控因素,指导页岩油纵横向展开部署。

2) 工程工艺技术适配性待提升

页岩油钻井过程中涌漏同存,仪器故障率较高。压裂过程中由于断层对水力裂缝有较强诱导作用,导致人工裂缝局部突进,形成近井筒复杂缝网难度较大,井筒两翼裂缝延伸不均,造成井间窜通。回顾性评价证实高邮凹陷花庄地区产能较低井均为井距试验过程中压裂液沿断层沟通,发生井间窜扰影响压裂改造效果所致。目前虽已形成不同尺度断层差异化避让、分类施策、差异化密切割布缝对策和暂堵剂缝内转向+暂堵球簇间转向的复合暂堵技术,但井组控缝防窜及差异化高效压裂技术水平有待进一步提升。

3) 效益开发技术政策尚不明确

页岩油开发技术政策包括井型、井网井距及提高采收率技术等方面。阜二段3套有利层单层厚度介于60~85 m,前期单层勘探均已取得突破,但层间产能差异较大,且受断块宽度影响水平段长度多介于800~1 200 m,能否实现多层立体效益开发还有待攻关试验。此外,前期试验表明:300、360 m井距无法适应复杂断块页岩油地质特点,亟须开展井网井距和压裂工艺试验,落实适应性开发技术对策。目前虽基于页岩造缝物理模型实验,初步开展了页岩油注CO₂机理、补能介质及开发方式研究,揭示了页岩油注CO₂“扩散作用动用基质、选择性剥离原油、极性吸附反转润湿”3种增油机制,但增油效果有待验证。

4) 开发成本较高

目前聚焦最优“甜点”层,通过精细轨迹设计,提高靶窗钻遇率。采用老井侧钻、瘦身井试验、差异化地质导向提速技术,使用低油水比柴油基钻井液,降低钻井成本;

采用差异化压裂工艺对策,一体化、自主化压裂施工模式,简化液体配方,页岩油水平井完全成本基本控制在5 000万元以内,EUR在4×10⁴ t以上,平衡油价50美元/桶左右。但要实现规模建产和效益开发,仍需进一步提产降本增效。

3.2 主要对策

3.2.1 深化基础理论研究

立足苏北盆地复杂断块页岩油地质特征,加强页岩油勘探开发基础理论研究。加强自有科研创新力量整体统筹和优化配置,内引外联、开放合作,深化与高等院校、科研院所、单位之间交流合作,组建跨企业、跨学科、跨区域创新联合体,借助国家重点实验室平台,加强中低TOC复杂断块页岩油富集高产规律和开发机理研究,建立不同级别断层影响页岩油富集程度定量评价标准,攻关不同级别断层精细描述技术,进一步落实页岩油“甜点”区和“甜点”层,建立高效开发生产技术政策体系,提高优质页岩钻遇率和单井EUR。

3.2.2 持续攻关迭代关键技术

开发技术迭代是实现陆相页岩油规模效益开发的必由之路^[14-16],聚焦页岩油效益开发“卡脖子”问题,加快构建优势互补的全链条创新体系。重点围绕页岩油“甜点”立体评价、井网立体优化、水平井立体压裂等,加强全要素一体化建模模拟,指导先导实验部署与实施,攻关“一井一策”提产补能技术;加强井组防碰绕障轨迹控制技术、高效破岩和导向等提速提效关键技术、套变和套损预防及治理技术攻关;加强压裂增能机理与压裂规模优化技术,井组控缝防窜压裂技术攻关,进一步提升缝网复杂度,优化压裂规模,提高页岩油储量动用程度和采收率的同时,实现提产降本。

3.2.3 优化一体化组织管理运行机制

继续优化生产组织架构,探索实施以重点工作项目化管理为手段,科学、高效的“四化”管理组织机制。发挥油田页岩油领导小组、技术小组、专家工作室优势,统筹部署、协同推进,提升组织运行效率。建立涵盖地质综合评价、地球物理预测、压裂设计优化、开发政策优选等多专业、跨部门一体化联合协作作战模式。加快推进数智化油田建设,引入大数据、人工智能、物联网等先进技术,提升信息处理能力,优化生产流程,构建复杂断块页岩油全生命周期地质-工程一体化管理体系。通过管理创新和模式创新,最大限度降本增效,推动陆相页岩油规模效益开发^[17]。

4 结论

1) 苏北盆地阜二段、阜四段页岩厚度大、分布面积广、脆性矿物含量高、纹层发育、有机质类型好、复杂无机孔-缝系统发育,具有中低TOC、构造岩性双复杂、断层/裂缝发育的典型地质特征。

2) 经过攻关实践,建立了苏北盆地中低TOC复杂断块页岩油富集地质理论,集成创新了复杂断块页岩油勘探开发关键技术,探索形成了绿色低碳开发模式,实现了高邮凹陷阜二段、阜四段页岩油勘探突破。

3) 苏北盆地中低TOC复杂断块页岩油勘探开发仍面临富集高产规律认识不清,工程工艺技术适配性待提升,效益开发技术政策不明确,开发成本较高等挑战。深化页岩油富集高产主控因素等基础理论研究,持续攻关迭代关键技术,优化一体化组织管理运行机制,最大限度提高优质储层钻遇率、页岩油储量动用程度和采收率,进一步降本增效,是实现页岩油规模建产与效益开发的主要途径。

参考文献

- [1] 郭旭升,黎茂稳,赵梦云.页岩油开发利用及在能源中的作用[J].中国科学院院刊,2023,38(1):38-47.
GUO Xusheng, LI Maowen, ZHAO Mengyun. Shale oil development and utilization and its role in energy industry[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 38-47.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J].地质学报,2022,96(1):155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1):155-171.
- [3] 孙龙德,刘合,朱如凯,等.中国页岩油革命值得关注的十个问题[J].石油学报,2023,44(12):2007-2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [4] 舒良树,王博,王良书,等.苏北盆地晚白垩世一新近纪原型盆地分析[J].高校地质学报,2005,11(4):534-543.
SHU Liangshu, WANG Bo, WANG Liangshu, et al. Analysis of northern Jiangsu prototype basin from Late Cretaceous to Neogene[J]. Geological Journal of China Universities, 2005,11(4): 534-543.
- [5] 方志雄,肖秋生,张殿伟,等.苏北盆地陆相“断块型”页岩油地质特征及勘探实践[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1468-1478.
FANG Zhixiong, XIAO Qiusheng, ZHANG Dianwei, et al. Geological characteristics and exploration of continental fault-block shale oil reservoirs in the Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1468-1478.
- [6] 段宏亮,孙雅雄,杨保良.苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集主控因素[J].石油实验地质,2024,46(3):441-450.
DUAN Hongliang, SUN Yaxiong, YANG Baoliang. Main controlling factors of shale oil enrichment in second member of Paleogene Funing Formation Gaoyou Sag of Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(3): 441-450.
- [7] 张克鑫,漆家福,任红民,等.苏北盆地高邮凹陷断层演化规律研究[J].大庆石油地质与开发,2008,27(2):21-24.
ZHANG Kexin, QI Jiafu, REN Hongmin, et al. Study on faults evolution in Gaoyou fault depression of Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(2): 21-24.
- [8] 朱光,姜芹芹,朴学峰,等.基底断层在断陷盆地断层系统发育中的作用:以苏北盆地南部高邮凹陷为例[J].地质学报,2013,87(4):441-452.
ZHU Guang, JIANG Qinqin, PIAO Xuefeng, et al. Role of basement faults in faulting system development of a RIFT Basin: An example from the Gaoyou sag in southern Subei Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(4): 441-452.
- [9] 朱相羽,段宏亮,孙雅雄.苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义[J].石油学报,2023,44(8):1206-1221.
ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Break-through and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1206-1221.
- [10] 温丹妮.苏北盆地高邮凹陷阜四段泥页岩孔隙结构特征及储层测录井识别[D].成都:西南石油大学,2016.
WEN Danni. Pore structure characteristics and reservoir logging identification of the fourth member of Funing Formation in Gaoyou sag, Subei Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [11] 邱旭明,刘玉瑞,傅强.苏北盆地上白垩统:第三系层序地层与沉积演化[M].北京:地质出版社,2006:3-4.
QIU Xuming, LIU Yurui, FU Qiang. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Upper Cretaceous Tertiary in Subei Basin [J]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 3-4.
- [12] 付茜,段宏亮,刘世丽,等.高邮凹陷花庄地区阜二段页岩储层孔喉结构特征研究[J].复杂油气藏,2024,17(2):131-138.
FU Qian, DUAN Hongliang, LIU Shili, et al. Study on pore throat structure characteristics of shale reservoirs in the second member of Funing Formation in the Huazhuang area of Gaoyou Sag[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(2): 131-138.
- [13] 钟志国.加快绿色能源转型促进油田高质量发展[J].中国石油石化,2024,27(21):34-35.
ZHONG Zhiguo. Accelerate the transformation of green energy and promote high-quality development of oil fields[J]. China Petrochem, 2024, 27(21): 34-35.
- [14] 齐洪岩,吴承美,胡可,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发关键技术与实践[J].新疆石油天然气,2024,20(3):15-22.
QI Hongyan, WU Chengmei, HU Ke, et al. Key technologies and practice of shale oil cost-effective development in Jimsar Sag Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(3): 15-22.
- [15] 孙焕泉,王海涛,杨勇,等.陆相断陷湖盆页岩油开发技术迭代与发展方向[J].石油勘探与开发,2024,51(4):865-877.
SUN Huanquan, WANG Haitao, YANG Yong, et al. Iteration and prospect of shale oil development technology for continental rift lake basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 865-877.
- [16] 屈雪峰,何右安,尤源,等.鄂尔多斯盆地庆城油田页岩油开发技术探索与实践[J].大庆石油地质与开发,2024,43(4):170-180.
QU Xuefeng, HE You'an, YOU Yuan, et al. Research and practice of shale oil development technology in Qingcheng Oilfield of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(4): 170-180.
- [17] 李阳,赵清民,吕琦,等.中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J].石油勘探与开发,2022,49(5):955-964.
LI Yang, ZHAO Qingmin, LYU Qi, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 955-964.

(编辑 尹淑容)