

苏北盆地陆相“断块型”页岩油地质特征及勘探实践

方志雄¹,肖秋生¹,张殿伟²,段宏亮¹

(1. 中国石化 江苏油田分公司, 江苏 扬州 225009; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要: 中国东部陆相断陷盆地群中-新生代发育多套巨厚的湖相富有机质页岩, 蕴含丰厚的页岩油资源, 但富有机质页岩普遍受断层切割, 形成若干独立断块, 与北美连续稳定分布的页岩地层条件存在较大差异, 能否获得稳定的商业油流是勘探面临的首要问题。基于苏北盆地高邮凹陷古近系阜(阜宁组)二段页岩岩性、烃源岩品质、储层品质研究与综合评价, 研究认为阜二段发育3套厚层有利层, 具备“多层楼”立体勘探开发条件; 基于阜二段有利层、断层和断块发育地质现状, 提出水平井在同一断块内或跨断块、在同一或多个有利层长距离穿行的“断块型”页岩油勘探思路; 根据断层断距与有利层厚度之间的配置关系, 将“断块型”页岩油划分为“连续稳定”型、“微断层切割”型和“跨断块多甜点”型等3种勘探目标类型。通过勘探实践, 证实3种勘探目标类型均可获得稳定的商业油流。研究成果丰富了中国陆相页岩油勘探领域和类型, 对陆相断陷盆地页岩油勘探具有重要借鉴意义。

关键词: “断块型”; 地质特征; 页岩油; 阜宁组二段; 古近系; 苏北盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Geological characteristics and exploration of continental fault-block shale oil reservoirs in the Subei Basin

FANG Zhixiong¹, XIAO Qiusheng¹, ZHANG Dianwei², DUAN Hongliang¹

(1. Jiangsu Oilfield Branch, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: Continental faulted basins in eastern China contain multiple suites of significantly thick lacustrine organic-rich shales of the Mesozoic and Cenozoic, thus boasting abundant shale oil resources. However, these organic-rich shales are extensively dissected by faults, resulting in multiple isolated fault blocks. This is a big difference compared with the shale strata in North America in continuous and stable distribution, and poses the challenge to obtain stable commercial oil flow in exploration. Based on the investigation and comprehensive assessment of the lithology, and quality of source rocks and reservoir of shales in the 2nd member of the Funing Formation (also referred to as the Fu 2 Member) in the Gaoyou Sag, Subei Basin, we hold that three suites of thick target intervals are developed in the Fu 2 Member, which can be explored and exploited as a whole. Given the current geological conditions of the target intervals, faults, and fault blocks in the Fu 2 Member, we propose an idea for fault-block shale oil reservoir exploration, that is, to have long laterals landed within a single or across multiple target intervals within a single or multiple fault blocks. Considering the correlation between fault throw and target interval thickness, we divided the fault-block shale oil reservoirs into three types for exploration, that is, the continuous and stable reservoir, reservoir dissected by micro-faults, and the reservoir spanning multiple fault blocks with multiple sweet spots. It has been verified through practical exploration that all these exploration targets can yield stable commercial oil flow. The study results have expanded the exploration targets and reservoir types for continental shale oil in China, thus serving as a significant reference for shale oil exploration in continental faulted basins.

Key words: fault-block reservoir, geological characteristics, shale oil, the 2nd member of the Funing Formation (Fu 2 Member), Paleogene, Subei Basin

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-10-02。

第一作者简介: 方志雄(1962—), 男, 博士、教授级高级工程师, 油气勘探开发研究与管理。E-mail: fangzx.jsyt@sinopec.com。

通信作者简介: 段宏亮(1977—), 男, 博士、高级工程师, 油气勘探。E-mail: duanhl.jsyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技开发部项目(P21113, P23189)。

引用格式: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. DOI: 10.11743/ogg20230611.

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. DOI: 10.11743/ogg20230611.

页岩油是继页岩气之后又一新的资源接替领域^[1-4],目前已在北美 Permian 盆地和 Williston 盆地等取得巨大成功^[5-6]。与北美前陆盆地、克拉通盆地沉积并稳定保存的海相页岩层系不同^[6-8],中国页岩油主要分布于东部断陷盆地陆相页岩层系中,这些页岩普遍形成于盆地演化伸展断陷期^[9-10],页岩纵、横向非均质性强^[11];后期普遍遭受断层切割、错断,形成若干独立的断块,具有断块宽度窄、面积小、现今应力场复杂的特征^[12-14]。目前已经取得突破的渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔(孔店组)二段页岩水平两向应力差可达 21.0 ~ 25.4 MPa^[15],苏北盆地高邮凹陷古近系阜(阜宁组)二段页岩水平两向应力差平均为 12.5 MPa,渤海湾盆地沾化凹陷古近系沙河街组三段下亚段页岩水平两向应力差较小,为 7.8 ~ 7.9 MPa^[16];较大的水平两向应力差限制了水平井的布井方位,影响了储层压裂改造效果^[17],页岩油勘探开发难度大,能否获得稳定的商业油流是勘探开发面临的首要问题。笔者针对苏北盆地阜二段断层发育、断块面积小、地应力条件复杂等现状,在阜二段页岩地质特征分析和综合评价的基础上,结合有利页岩层厚度和断层断距之间的配置关系,提出了“断块型”页岩油的勘探思路,并划分出了3种典型的“断块型”页岩油勘探类型,对其分别进行了勘探实践和分析,优选了有利的勘探目标类型,以期为中国陆相页岩油勘探提供参考。

1 地质背景

苏北盆地是中国东部陆相断陷盆地群的重要组成部分^[18-19],是晚白垩世发育起来的陆相中-新生代沉积盆地。盆地北以嘉山-响水断裂与鲁苏隆起为界,西以郯庐断裂带与张八岭隆起为界,南邻苏南隆起,东与南黄海盆地相接(图1a),面积约 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地经历了断-拗、断陷和拗陷等3个演化阶段,对应沉积了泰州组-阜宁组(K_2t-E_1f)、戴南组-三垛组(E_2d-E_2s)、盐城组(N_y)等3套地层^[20-22](图1d)。受构造演化和沉积体系控制,晚白垩世-古新世拗陷期盆内广泛发育了泰二段(K_2t^2)、阜二段(E_1f^2)和阜四段(E_1f^4)3套半深湖-深湖相暗色泥页岩层系,其中 E_1f^2 页岩厚度大、分布范围广,生油条件有利,热演化程度适中,是页岩油

勘探的首选层位^[23-26]。

阜二段沉积后,盆地经历了吴堡、真武、三垛、盐城等多期构造运动,形成了NEE向和近EW向两组不同规模、不同性质的断裂系统^[27-28](表1;图1b,图1c),其中吴堡期断层和长期活动断层将连续稳定分布的阜二段页岩切割、错断。以高邮凹陷北斜坡为例,这些不同级别断层相互切割、围限,形成一系列NEE走向断块,断块以条带状为主,部分为楔状和不规则多边形状;长度多介于4.0 ~ 16.0 km,平均为8.0 km;宽度介于0.5 ~ 4.0 km,平均为1.5 km;面积介于2 ~ 32 km²,普遍小于20 km²。

2 “断块型”页岩油基础地质特征

高邮凹陷阜二段整体为一套深湖-半深湖相泥页岩,厚250 ~ 350 m,纵向上非均质性强。依据岩性和电性等特征,可细分为5个亚段(图2)。其中,I亚段—III亚段厚度均在30 ~ 40 m;IV亚段和V亚段厚度分别介于90 ~ 100 m和100 ~ 110 m,根据岩性、电性特征又分别被细分为8个和10个小层。

2.1 泥页岩特征

高邮凹陷阜二段整体以暗色泥页岩为主,纵向非均质性强。其中I亚段和II亚段为层-块状结构,见少量生物碎屑。III—V亚段以层-纹层状结构为主,纹层以极细粒粉砂质纹层、泥质纹层及灰云质纹层为主,局部发育白云石条带和顺层方解石脉,单个纹层厚度在0.3 ~ 1.5 mm,白云石条带厚度一般在5 ~ 15 cm;纹层状页岩厚度累计占比小于40%。

阜二段岩石矿物组分以石英、长石、方解石、白云石和黏土矿物为主。其中,长英质矿物含量在30% ~ 60%,碳酸盐矿物含量在15% ~ 55%,黏土矿物含量在15% ~ 45%(图2),具有明显的混积页岩特征,且以长英质-泥质混积页岩和长英质-灰云质混积页岩为主(图3)。

2.2 生烃特征

高邮凹陷阜二段暗色泥页岩有机质丰度中等,总有机碳含量(TOC)介于0.72% ~ 3.65%,平均为1.62%;游离烃含量(S_1)介于0.65 ~ 5.12 mg/g,平均

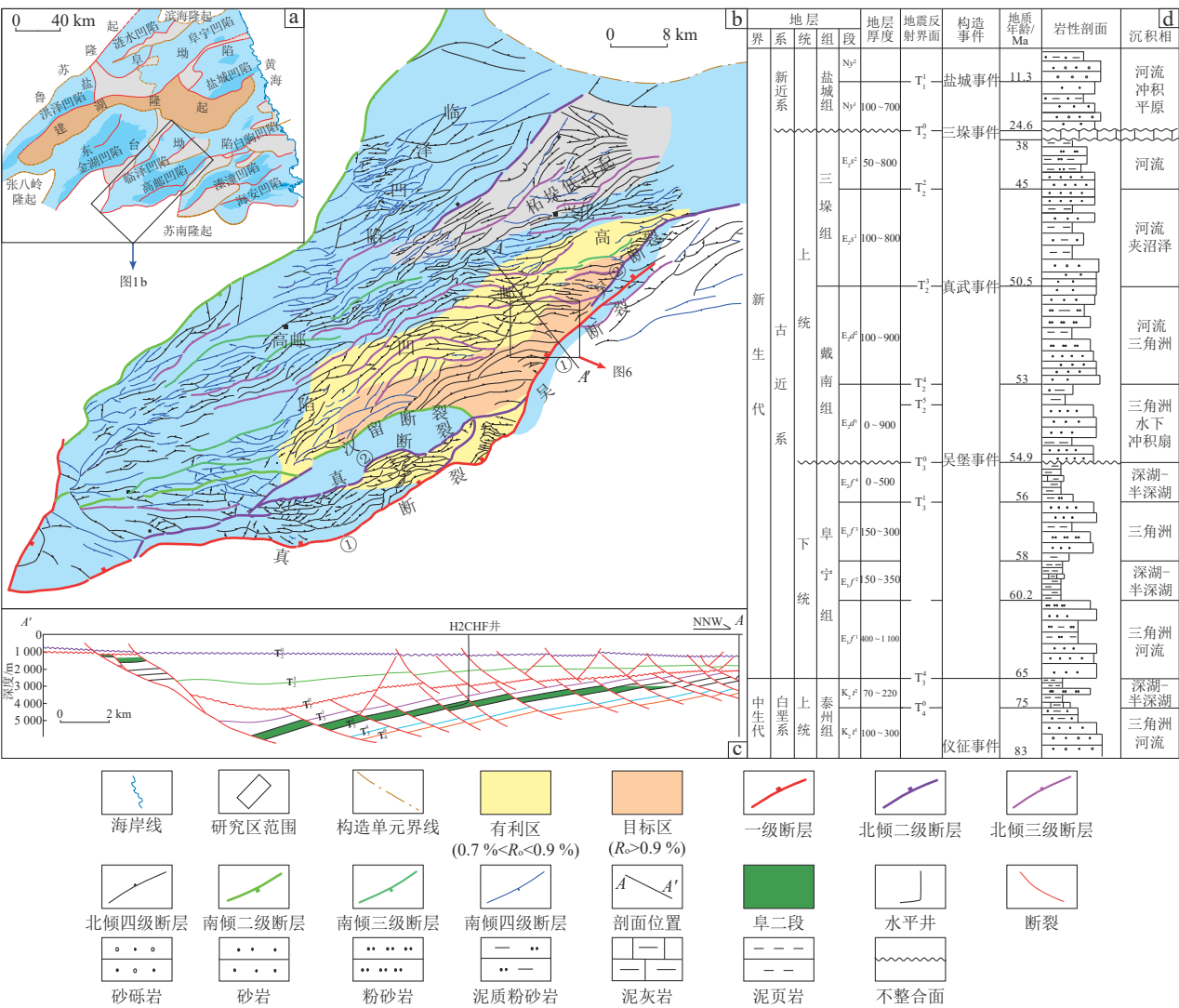


图1 高邮凹陷阜二段断裂体系及地层综合柱状图

Fig. 1 Fault system in the Fu 2 Member in the Gaoyou Sag and the composite stratigraphic column for the Subei Basin
a. 苏北盆地构造单元划分; b. 高邮凹陷阜二段断裂体系; c. 高邮凹陷 NNW-SSE 向剖面; d. 高邮凹陷地层综合柱状图

表1 高邮凹陷断块及其边界断层要素统计

Table 1 Parameter statistics for fault blocks and their boundary faults in the Gaoyou Sag

断层级别	尺度	主要活动期	断距/m	走向	断层影响
一级-二级	数十千米—数百千米	吴堡期—盐城期	500 ~ 5 000	NE向为主	控制盆地、凹陷的形成及烃源岩热演化
三级	数千米—十几千米	吴堡期—三垛期	200 ~ 500	NE向和NEE向为主	凹陷内控制构造带或断块群形成及发育
四级	数百米—数千米	吴堡期—三垛期	40 ~ 200	NE向和近EW向为主	发育在沉积层中,是划分自然断块的依据

为2.23 mg/g。纵向上各亚段页岩品质存在差异,自下而上具有有机质丰度由低变高(图2)、有机质类型由Ⅲ型向Ⅰ型过渡的趋势。其中,V亚段有机质类型多为Ⅱ型和Ⅲ型,Ⅰ—Ⅳ亚段有机质类型以Ⅰ和Ⅱ₁型为主。阜二段各亚段含油饱和度指数(OSI , $OSI=S_1/TOC$)普遍高于100 mg/g,可动性较好^[29-30],其中Ⅳ-3—Ⅳ-7小层和Ⅴ-6—Ⅴ-8小层可动性最好, OSI 最高可达412 mg/g。

平面上,高邮凹陷阜二段页岩镜质体反射率(R_0) 在0.4%~1.1%,其中埋深大于2 900 m的中坡带—内坡带页岩 R_0 介于0.7%~1.1%,有机质热演化程度适中,是页岩油勘探有利区(图1b)。

2.3 储集特征

高邮凹陷阜二段页岩物性差异较大(图2),其中Ⅱ亚段和Ⅲ亚段孔隙度一般大于3.0%,最高为

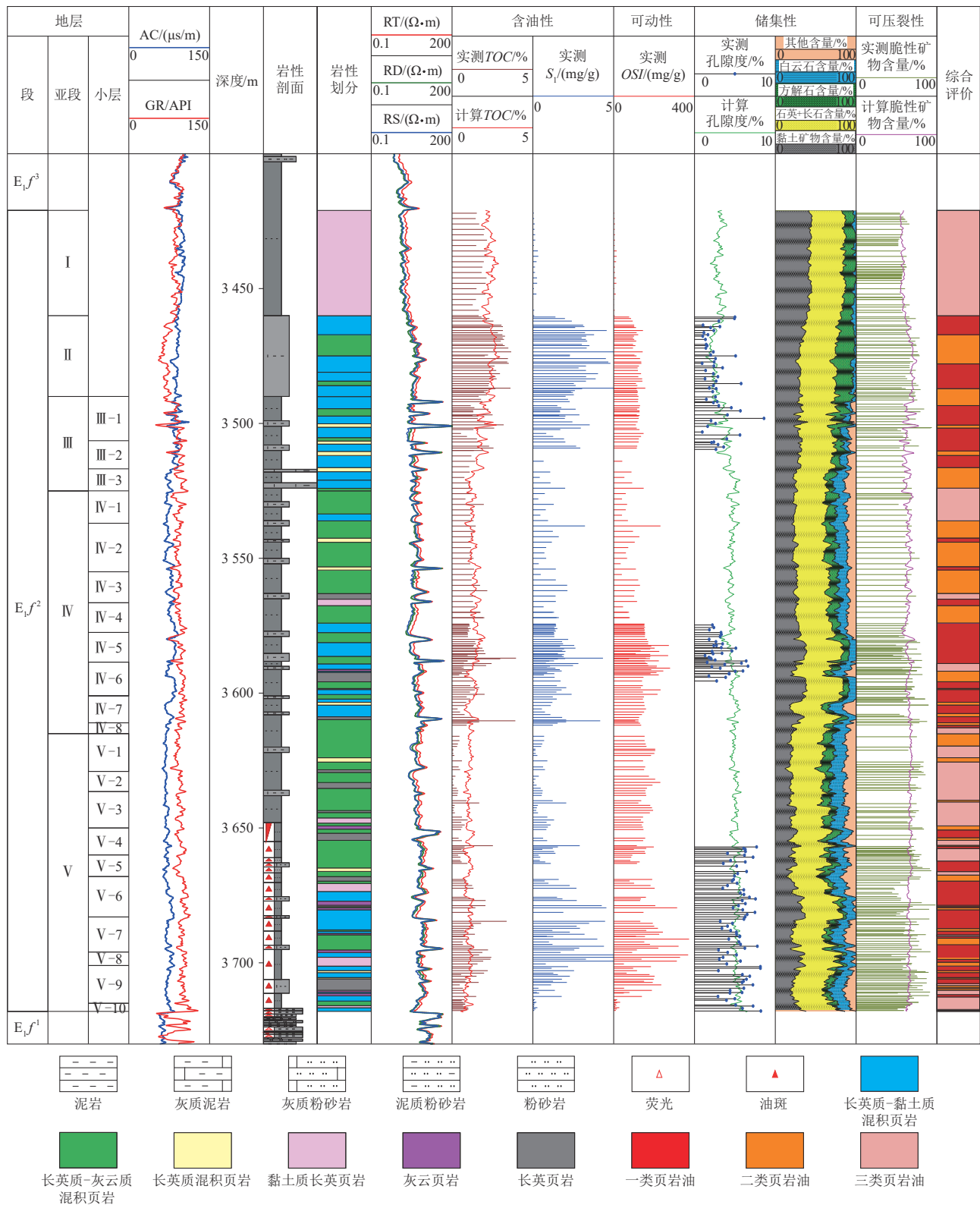


图2 高邮凹陷阜二段综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Fu 2 Member, Gaoyou Sag

5.56%; IV亚段和V亚段各小层平均孔隙度均大于4.0%,最高可达6.29%,储集物性相对较好。页岩发育构造裂缝、层理缝和微孔隙等多种类型储集空间,其中天然裂缝发育,既发育宏观大-中尺度裂缝,又有丰

富的微-小裂缝。岩心普遍见高角度剪切缝,裂缝切穿白云石条带和顺层方解石脉,形成缝洞,并与层理缝、顺层方解石脉等构成复杂的裂缝网络,普遍含油(图4a,b),是页岩油的主要储集空间。此外,长英质

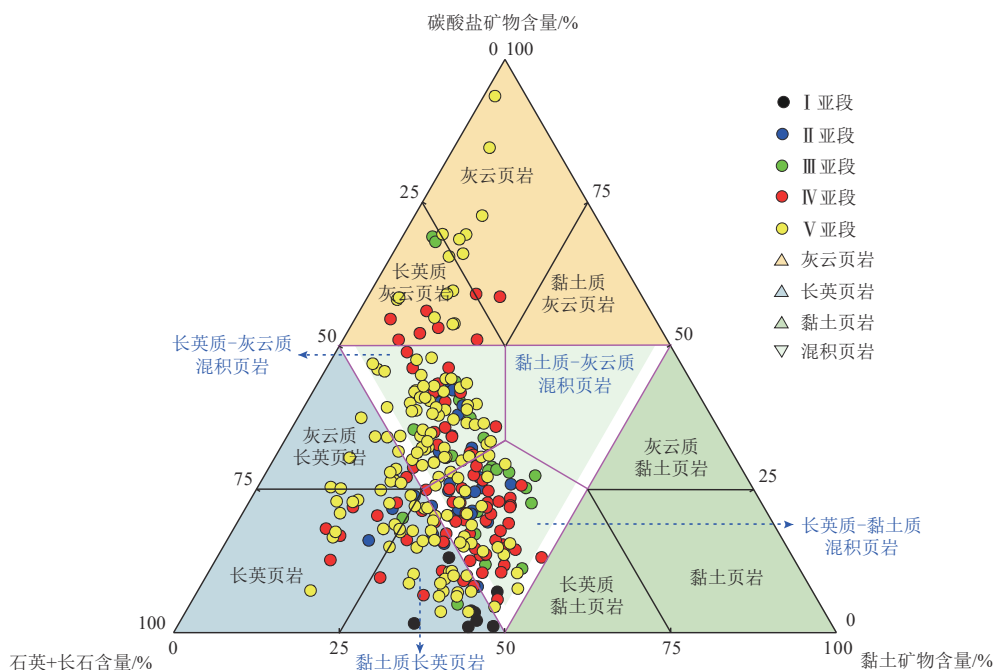


图3 高邮凹陷阜二段页岩岩石矿物组分三端元图解

Fig. 3 Ternary diagram of mineral compositions in shales of the Fu 2 Member, Gaoyou Sag

粒间孔、白云石粒(内)间(溶)孔、黏土矿物晶间孔和有机质孔等是主要的孔隙类型(图4c—h)。纵向上, IV亚段—V亚段纹层、白云石条带和顺层方解石脉发育程度高,储集性能更好。

除I亚段、IV-6小层和IV-7小层外,其余小层脆性矿物含量均高于60%(图2),在纵向上具有较好脆性;但岩石力学实验结果表明,阜二段页岩水平两向应力差为12.5 MPa,应力差异系数为0.19,造复杂缝难度较大。

2.4 综合评价

基于页岩生油性、含油性、可动性、储集性和可压性等关键参数(表2),对比可知阜二段V亚段—III亚段各小层孔隙度和脆性矿物含量相差不大,将TOC小于1%或OSI小于100的小层均评价为III类,TOC大于1%且OSI大于100的小层评价为I类,其余的评价为II类;II亚段孔隙度略低,评价为II类;I亚段各项指标参数均较低,评价为III类。综合评价结果显示:高邮凹陷阜二段发育3套有利层(综合评价为一类和二类储层),分别位于II-III亚段、IV-2—IV-7小层和V-4—V-9小层(图2;表2)。其中II-III亚段有利层厚约65 m,页岩生油性、含油性和可动性较好;IV-2—IV-7有利层厚约72 m,总体具有较好的生油性和含油性,储集性和可动性好;V-4—V-9有利层厚约65 m,生油性中等偏低,但含油性、储集性、可动性和可压性较

好。3套有利层厚度大,具备“多层楼”立体勘探开发的条件;IV亚段有利层和V亚段有利层之间发育厚约39 m的隔层。

3 “断块型”页岩油类型与特征

与北美海相连续稳定分布的页岩不同,苏北盆地阜二段页岩受同沉积正断层和后期正断层切割,形成了一系列NEE走向的分割断块,断块短轴方向与水平最小主应力方向一致,长度多小于2 km;断块内页岩层水平主应力差较大,水平两向应力差异系数平均为0.19。为确保水平井压裂改造效果,其轨迹方向应平行于断块短轴方向;但受断块短轴长度影响,水平井在同一断块内穿行距离有限,从而会影响页岩油单井产能。

基于上述地质现状,结合区内阜二段发育多套厚层有利层和发育不同级别断层的地质特点,提出水平井在同一断块内或跨断块、在同一有利层或多个有利层长距离穿行的“断块型”页岩油勘探思路。与北美大面积连续稳定分布的页岩油对比,“断块型”页岩油具有如下典型特征:①发育多套有利层,后期被不同级别断层切割、错断成独立断块,沿断块长轴方向可成排进行水平井部署;②断层断距小于页岩层厚度,断层两侧有利层对置;③水平井在同一断块内或跨断层在同一有利层或多个有利层可实现长距离穿行;④通过相对

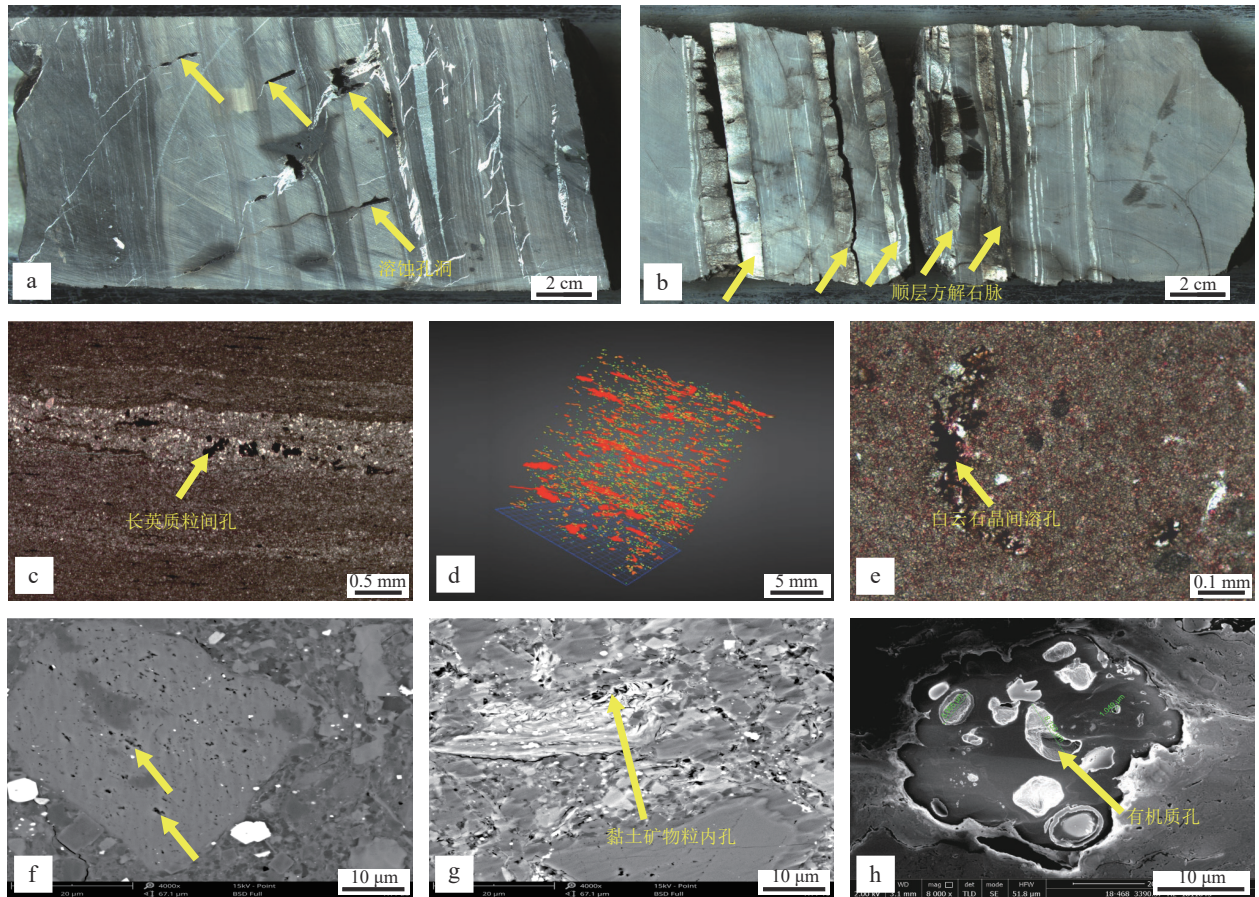


图4 高邮凹陷阜二段富有机质页岩主要储集空间类型显微照片

Fig. 4 Micrographs showing the primary storage space types of organic-rich shales in the Fu 2 Member, Gaoyou Sag

a. 白云石条带中发育剪切缝,缝面局部被溶蚀,残留孔洞外渗原油,HY1井,埋深3 702.60 m,V亚段,岩心;b. 层理缝,顺层方解石脉含油,HY1井,埋深3 683.18 m,V亚段,岩心;c. 长英质粒间孔,含油,HY1井,埋深3 663.20 m,V亚段,单偏光;d. H2井,埋深3 464.95 m,IV亚段,微米CT;e. 白云石晶间溶孔,H2井,埋深3 466.59 m,IV亚段,单偏光;f. 碳酸盐矿物粒内溶孔,HY1井,埋深3 667.57 m,V亚段,SEM;g. 黏土矿物粒内孔,HY1井,埋深3 657.13 m,V亚段,SEM;h. 有机质孔,H2井,埋深3 390.37 m,III亚段,SEM

表2 高邮凹陷阜二段各页岩层段关键参数

Table 2 Key parameters of the shale intervals in the Fu 2 Member, Gaoyou Sag

地层	厚度/m	TOC/%	$S_p/(mg/g)$	OSI/(mg/g)	孔隙度/%	脆性矿物含量/%	综合评价
I亚段	39	1.50~2.25(1.83)	0.10~0.34(0.18)	8~16(12)	2.00~3.06(2.41)	55~58(57)	三类
II+III亚段	65	1.08~3.63(2.36)	0.66~5.07(2.75)	61~142(117)	2.09~5.56(3.42)	61~72(68)	一类、二类
IV亚段	IV-1	12	0.82~1.95(1.50)	0.32~1.31(0.88)	58~68(64)	4.03~5.59(5.17)	三类
	IV-2—IV-7	74	1.12~3.65(1.75)	0.72~4.28(1.78)	60~189(127)	3.33~6.29(5.38)	一类、二类
	IV-8	4	0.92~1.04(0.95)	1.27~1.29(1.28)	127~129(128)	4.49~4.56(4.54)	二类、三类
V亚段	V-1—V-3	35	0.22~1.47(0.83)	0.24~1.98(0.53)	73~218(160)	4.03~5.63(5.09)	二类、三类
	V-4—V-9	65	0.72~3.12(1.24)	0.65~5.12(2.52)	63~412(193)	3.49~8.30(5.24)	一类、二类
	V-10	3	0.82~1.11(0.92)	0.14~0.30(0.22)	16~31(24)	5.16~7.43(5.60)	三类

注:表中数据为最小值~最大值/(平均值)。

长的水平段钻井和大型体积压裂改造,能够获得稳定商业油流。

根据断块短轴长度、断层断距与有利层厚度配置关系,将“断块型”页岩油划分为“连续稳定”型、“微断层切割”型和“跨断块多甜点”型等3种类型(图5)。

3.1 “连续稳定”型页岩油

“连续稳定”型页岩油是指当断块面积大,断块内部不发育断层,地层横向分布连续稳定,水平井能够在同一断块、同一有利层内稳定穿行1 000 m以上(图5)。

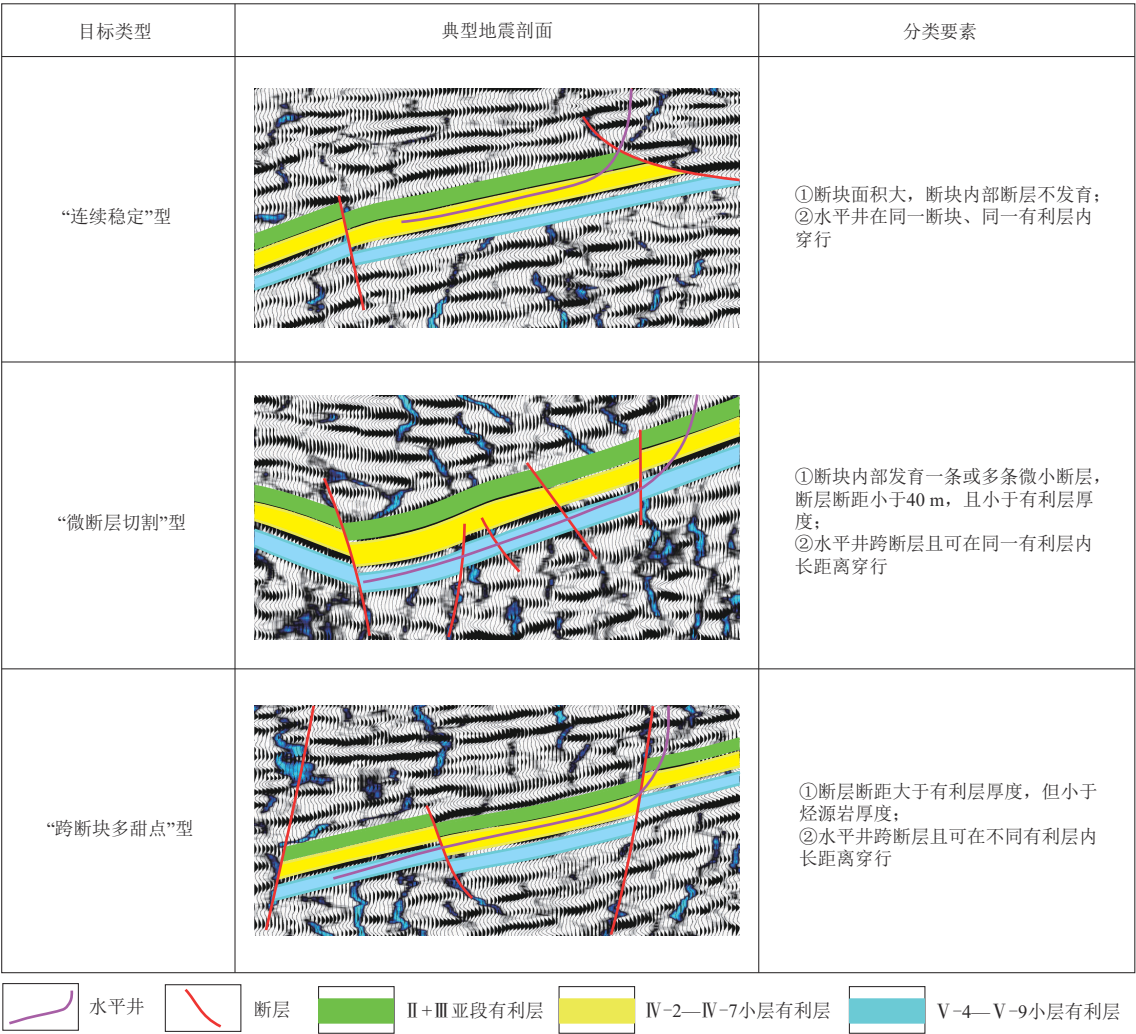


图5 “断块型”页岩油3种勘探目标类型典型剖面及特征

Fig. 5 Typical sections and characteristics of three types of exploration targets for fault-block shale oil reservoirs

高邮凹陷该类断块边界断层断距一般小于200 m,小于阜二段泥页岩层系的厚度,断层的封闭性较好,有利于页岩油的保存,是最有利的勘探目标类型。

3.2 “微断层切割”型页岩油

“微断层切割”型页岩油与“连续稳定”型页岩油基本相似,不同之处在于断块与页岩层系内部发育一条或多条地震能识别的微断层,错断但未错开有利层,水平井穿过断层可在同一有利层内穿行1 000 m以上(图5)。高邮凹陷上述微断层发育在页岩层内,平面上延伸距离较短,且呈现为互相孤立的形态;纵向上断距一般小于40 m,小于有利层厚度。

3.3 “跨断块多甜点”型页岩油

“跨断块多甜点”型页岩油是指水平井跨断块在不同有利层内长距离穿行的勘探目标(图5)。在高邮凹陷,当阜二段断块分割断层断距介于12~151 m时,

可跨断层在III+IV亚段有利层穿行;当断距介于39~178 m时,可在IV+V亚段有利层穿行;当断距在125~255 m时,可在III+V亚段有利层穿行。

4 “断块型”页岩油勘探实践

近年来,江苏油田针对“断块型”页岩油勘探难点问题,通过加强断层精细描述与水平井轨迹设计技术、随钻地质导向技术、优快钻完井技术和体积压裂改造技术攻关与试验,能够精细识别和刻画20 m级小断层,确保水平井跨断层有利层钻遇率、优快钻完井和压裂改造效果。在高邮凹陷花庄地区阜二段针对“连续稳定”型、“微断层切割”型和“跨断块多甜点”型页岩油分别开展勘探实践,均获得稳定的商业油流。

4.1 “连续稳定”型勘探效果

针对“连续稳定”型页岩油勘探目标类型,在高邮

凹陷花庄地区部署实施了H2CHF井(图6,图7a),靶窗为IV-3—IV-7有利层。

H2CHF井所在断块为两条近EW向展布的断层夹持的长条形断块,断块宽1 500~1 700 m,目的层倾向SE,埋深3 350~3 750 m。断块南、北边界断层均为四级断层,纵向上都断穿 E_{1f} ,向上延伸至 E_{2s} ;北部边界断层断距为120 m,南部边界断层断距为45 m(图7a)。该井井口至井底水平位移1 309 m,水平段未钻遇断层,有利层钻遇率100%。分20段进行大型体积压裂改造后,于2022年5月底放喷试采,日产油由20 t逐步上升到30~40 t,目前3.5 mm油嘴控压生产,日产油超50 t。该井压裂过程平稳,返排生产过程中压力平稳,证实断块边界断层封闭性较好,“连续稳定”型页岩油是有利的勘探目标。

4.2 “微断层切割”型勘探效果

针对该类页岩油,在高邮凹陷花庄地区部署实施HY1HF井(图6,图7b),靶窗为V-4—V-8有利层。

HY1HF井所在断块面积较大,宽度在2 400~2 500 m。北部边界断层(F_N)倾向SSE,断距50 m;南部边界断层(F_S)倾向NW,断距大于2 000 m,为控凹边界断层。断块内部发育5条微断层(F_1 — F_5)(图7b;表3),

其中A靶前钻遇断层1条,断距20 m;B靶处钻遇断层1条,断距25 m;A、B靶间水平段钻遇断层2条(F_3 , F_4),断距分别为14 m和19 m。该井跨断层在V-4—V-8有利层穿行1 278 m,靶窗钻遇率95%。分22段进行大型体积压裂改造后,于2022年2月初放喷试采,3.5 mm油嘴日产油29.7 t;目前3 mm油嘴控压生产,日产油稳定在20 t以上;示踪剂检测结果显示,各压裂段对产油均有贡献。该井钻进过程中在微断层附近未见钻具放空、井涌、井漏及气测异常等现象;压裂过程中通过在断层两侧采取15~20 m避让距离等措施,断层两侧压裂施工曲线反映压裂裂缝未沟通断层;返排生产过程中压力平稳,未见明显套变,断层两侧液量无明显异常,反映有利层内低序级微断层封闭性较好,对钻井、压裂和产液影响不明显,“微断层切割”型也是较为有利的勘探目标。

4.3 “跨断块多甜点”型勘探效果

针对该类型部署实施HY3HF井和HY4-2HF井(图6,图7c,图7d),其中HY3HF井水平段跨断层分别穿行于IV-3—IV-7有利层和V-5—V-9有利层。

HY3HF井跨花页1和花页1北两个断块,断块间分割断层(F_D)倾向SSW,断距58 m。该井在花页1断

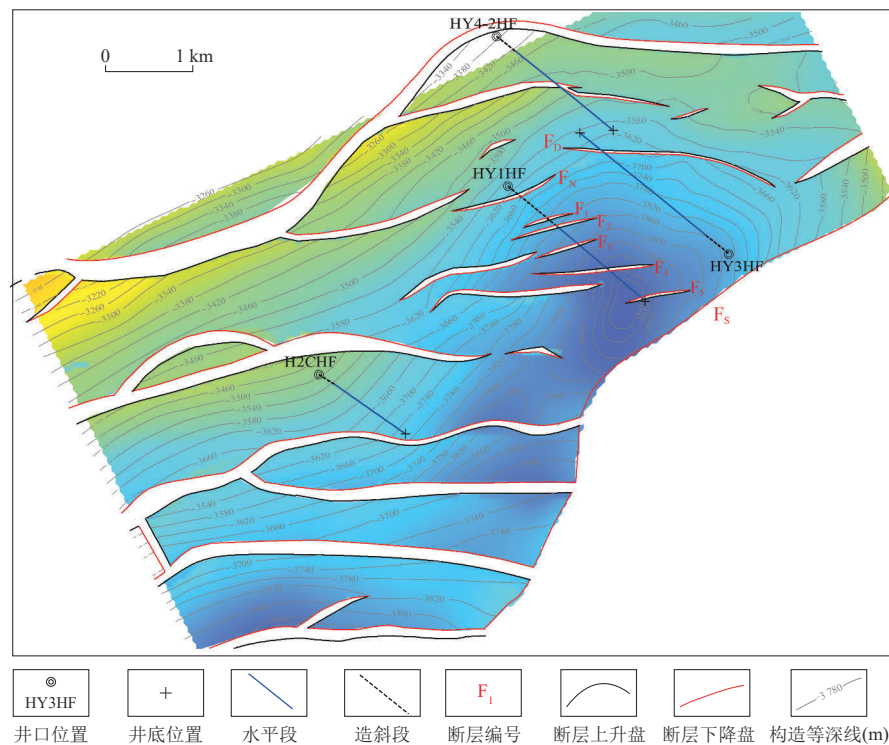


图6 高邮凹陷花庄地区阜二段V亚段顶面构造(构造位置见图1b)

Fig. 6 Structural map showing the top of the submember V of the Fu 2 Member in the Huazhuang area, Gaoyou Sag (see Fig. 1b for the structural location)

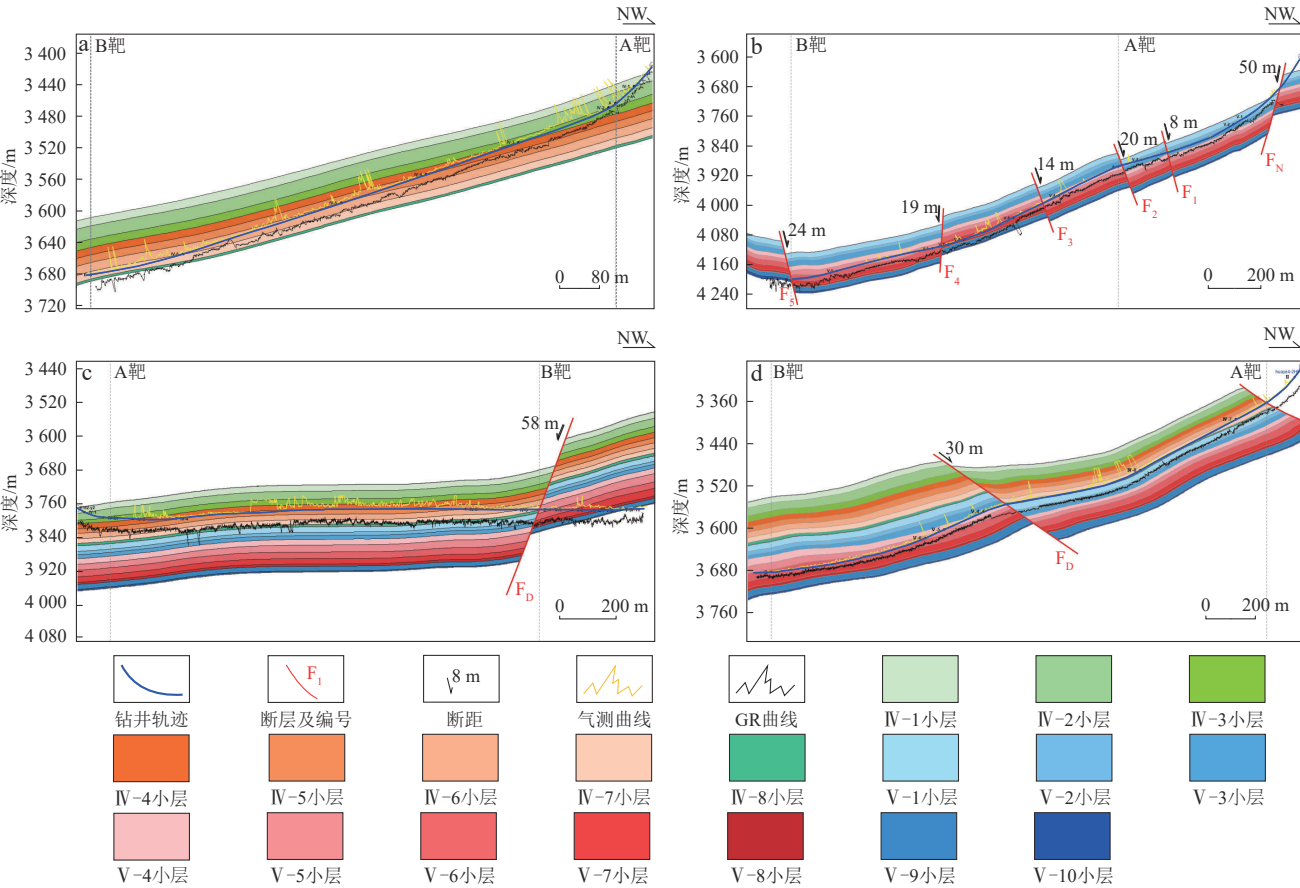


图7 高邮凹陷典型钻井轨迹示意图

Fig. 7 Schematic diagrams showing the trajectories of typical wells in the Gaoyou Sag

a. H2CHF井,“连续稳定”型页岩油;b. HY1HF井,“微断层切割”型页岩油;c. HY3HF井,“跨断块多甜点”型页岩油;
d. HY4-2HF井,“跨断块多甜点”型页岩油

表3 苏北盆地HY1HF井钻遇断层要素统计

Table 3 Parameter statistics of faults encountered in drilling well HY1HF in the Subei Basin

断层编号	断夹层位	断距/m	走向/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)
F ₁	E ₁ f ¹ —E ₁ f ²	8	75	345	43
F ₂	E ₁ f ¹ —E ₁ f ³	20	75	345	40
F ₃	E ₁ f ¹ —E ₁ f ²	14	71	341	44
F ₄	E ₁ f ¹ —E ₁ f ²	19	85	175	78
F ₅	E ₁ f ¹ —E ₁ f ³	24	73	343	56

块于IV-3—IV-7有利层穿行1 521 m,后于B靶点穿过断层(F_D)进入花页1北断块V-5小层,其后在V-5—V-10有利层穿行310 m(图7c),有利层钻遇率100%。分32段进行大型体积压裂改造后,于2022年7月中旬放喷试采,最高日产油26.1 t;示踪剂分析表明,断层前、后各压裂段均有产油贡献,得到有效动用。该井钻进过程中在断块间分割断层(F_D)附近未见钻具放空、井涌、井漏及气测异常等现象;压裂过程中通过采取合理的避射距离,以及暂堵转向等工艺,并未发生滤失等

异常现象,有效降低了中等尺度断层对页岩油勘探开发的影响。

上述实践表明,3种“断块型”页岩油勘探目标类型均可获得稳定的商业油流。其中,“连续稳定”型和“微断层切割”型是首要的勘探目标;“跨断块多甜点”型目标通过加强断层精细描述与水平井轨迹设计技术,并采用合理的分段分簇优化及暂堵和转向压裂工艺,能够确保有利层钻遇率,有效降低断层对水平井压裂改造影响,是较有利勘探目标。

5 结 论

1) 苏北盆地高邮凹陷阜二段页岩具有厚度大、有机质丰度中等、热演化程度适中、可动性可压性较好等特点。阜二段页岩后期被断层切割、错断形成宽度窄、面积小的断块,断块内页岩水平最小主应力方向与断块短轴方向一致,且水平两向应力差较大;水平井在同一断块内穿行距离有限。

2) 根据苏北盆地阜二段页岩地质特点,提出水平井在同一断块内或跨断块在同一有利层或多个有利层长距离穿行的“断块型”页岩油勘探思路。依据断层断距和阜二段有利层厚度的配置关系,划分出“连续稳定”型、“微断层切割”型和“跨断块多甜点”型3种典型“断块型”页岩油类型。勘探实践证实,“连续稳定”型和“微断层切割”型是页岩油勘探首要目标类型,采用适应的工程、工艺技术,可确保有利层钻遇率和压裂改造效果,形成稳定商业油流。

3) 断层对页岩油富集及开发影响的定量评价(包括断层附近套变、套损风险评估),以及中高水平应力差条件下沿断块长轴方向布井的可行性和相关技术是“断块型”页岩油下步攻关的主要方向。

参 考 文 献

- [1] 郭秋麟,王建,陈晓明,等. 页岩油原地量和可动油量评价方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1451-1463.
GUO Qiulin, WANG Jian, CHEN Xiaoming, et al. Discussion on evaluation method of total oil and movable oil in-place[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1451-1463.
- [2] 黎茂稳,马晓潇,金之钧,等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 1-25.
- [3] 金之钧,张谦,朱如凯,等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [4] 周庆凡,金之钧,杨国丰,等. 美国页岩油勘探开发现状与前景展望[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 469-477.
ZHOU Qingfan, JIN Zhijun, YANG Guofeng, et al. Shale oil exploration and production in the U. S.: Status and outlook[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 469-477.
- [5] 邹才能,潘松圻,荆振华,等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [6] 邓舟舟. 美国页岩油分布规律及主控因素研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
DENG Zhouzhou. Study of distribution and main control factors of shale oil in USA [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [7] 张林晔,李钜源,李政,等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711.
ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-711.
- [8] 黎茂稳,马晓潇,蒋启贵,等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 13-28.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIANG Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 13-28.
- [9] 武晓玲,高波,叶欣,等. 中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 455-462.
WU Xiaoling, GAO Bo, YE Xin, et al. Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 455-462.
- [10] ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Geologic significance and optimization technique of sweet spots in unconventional shale systems[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 178: 3-19.
- [11] 赵文智,朱如凯,胡素云,等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1079-1089.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1079-1089.
- [12] 胡素云,赵文智,侯连华,等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819-828.
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.
- [13] 金之钧,朱如凯,梁新平,等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1276-1287.
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xiping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [14] 金之钧,王冠平,刘光祥,等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 821-835.
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.
- [15] 周立宏,刘学伟,付大其,等. 陆相页岩油岩石可压裂性影响因素评价与应用——以沧东凹陷孔二段为例[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 670-678.
ZHOU Lihong, LIU Xuewei, FU Daqi, et al. Evaluation and application of influencing factors on the fracturability of continental shale oil reservoir: A case study of Kong 2 member in Cangdong Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 670-678.
- [16] 薛仁江. 济阳坳陷页岩油储层裂缝起裂与扩展机理研究[D].

- 成都: 西南石油大学, 2018.
- XUE Renjiang. Fracture initiation and propagation mechanism of shale oil reservoir in Jiyang Depression[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [17] 齐晴. 地应力预测技术在页岩气水平井开发中的应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(3): 1117-1122.
- QI Qing. Application of in-suit stress prediction technology in shale gas horizontal wells development[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3): 1117-1122.
- [18] 朱夏, 徐旺. 中国中生代沉积盆地[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- ZHU Xia, XU Wang. Mesozoic and Cenozoic sedimentary basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [19] 刘玉瑞. 苏北后生-同生断陷盆地油气成藏规律研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 721-731.
- LIU Yurui. Petroleum accumulation rules in hystero-genetic reconstructive-syngenetic rift basins, North Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(6): 721-731.
- [20] 段宏亮, 刘世丽, 付茜. 苏北盆地古近系阜宁组二段富有机质页岩特征与沉积环境[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 612-617.
- DUAN Hongliang, LIU Shili, FU Qian. Characteristics and sedimentary environment of organic-rich shale in the second member of Paleogene Funing Formation, Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 612-617.
- [21] 马存飞. 湖相泥页岩储集特征及储层有效性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- MA Cunfei. Study on characteristics and effectiveness of lacustrine shale reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.
- [22] 周学文. 苏北盆地金湖凹陷古新统阜二段湖相碳酸盐岩沉积特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- ZHOU Xuewen. Sedimentological analysis of the lacustrine carbonate successions from the Paleocene second member, Funing Formation, Jinhu Depression of the Subei Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.
- [23] 杨元. 苏北盆地阜二段泥页岩储层非均质性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- YANG Yuan. Shale reservoir heterogeneity of the second member of Funing Formation in Subei Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2015.
- [24] 王超, 陆永潮, 杜学斌, 等. 油页岩岩性非均质性特征及地球物理精细刻画——以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 814-821.
- WANG Chao, LU Yongchao, DU Xuebin, et al. Characteristics and geophysical prediction of lithology heterogeneity of oil shale: Taking the 2nd Member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin, as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 814-821.
- [25] 付茜, 刘启东, 刘世丽, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 625-631.
- FU Qian, LIU Qidong, LIU Shili, et al. Shale oil accumulation conditions in the second member of Paleogene Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 625-631.
- [26] 姚红生, 胥灵, 高玉巧, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 776-783.
- YAO Hongsheng, ZAN Ling, GAO Yuqiao, et al. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 776-783.
- [27] 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.
- [28] 能源, 漆家福, 张春峰, 等. 金湖凹陷石港断层构造演化及油气聚集特征[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 667-671, 677.
- NENG Yuan, QI Jiafu, ZHANG Chunfeng, et al. Structural evolution of Shigang Fault and features of hydrocarbon accumulation in Jinhu Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 667-671, 677.
- [29] 张林晔, 包友书, 李钜源, 等. 湖相页岩油可动性——以渤海湾盆地济阳凹陷东营凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 641-649.
- ZHANG Linye, BAO Youshu, LI Juyuan, et al. Movability of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 641-649.
- [30] 姜振学, 李廷微, 宫厚健, 等. 沾化凹陷低熟页岩储层特征及其对页岩油可动性的影响[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1587-1600.
- JIANG Zhenxue, LI Tingwei, GONG Houjian, et al. Characteristics of low-mature shale reservoirs in Zhanhua Sag and their influence on the mobility of shale oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1587-1600.

(编辑 张玉银)