

引用格式:姚红生,云露,答灵,等.苏北盆地溱潼凹陷阜二段断块型页岩油定向井开发模式及实践[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):141-151.

YAO Hongsheng, YUN Lu, ZAN Ling, et al. Development mode and practice of fault-block oriented shale oil well in the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 141-151.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.002

苏北盆地溱潼凹陷阜二段断块型页岩油 定向井开发模式及实践

姚红生,云露,答灵,张龙胜,邱伟生

(中国石化华东油气分公司,江苏南京 210019)

摘要:为探索溱潼凹陷断块型页岩油效益开发路径,在阜二段页岩油地质特征研究基础上,提出定向井加拟水平井压裂开发模式,实施两口井均获成功。研究表明:苏北盆地溱潼凹陷深凹带东西两翼为构造复杂区,发育断块型页岩油,具有“厚度大、天然缝网发育、压力系数高、可动性和可改造性好”的地质特点,不适合长水平井开发,具备定向井开发的地质条件。厚层页岩油多套层系开发,定向井矩形井网有利于开展CO₂吞吐,菱形反九点井网是CO₂驱开发的合理井网模式。采用“规模注液蓄能量+限流射孔促均衡+调节排量稳缝网+三级支撑保充填+全电泵连续施工”为主的压裂工艺技术体系,定向井“拟水平井压裂”能达到水平井的改造效果,单段改造体积较水平井提升28.6%。页岩油定向井具有“初期产能高、见油早、返排率低、含水下降快,稳产时间长”的生产特点,单段弹性产率高、采出程度高、经济效益好,率先实现页岩油效益开发,展现了构造复杂区定向井评价页岩油的良好前景。

关键词:效益开发;拟水平井压裂;定向井;断块型页岩油;溱潼凹陷;苏北盆地

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Development mode and practice of fault-block oriented shale oil well in the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin

YAO Hongsheng, YUN Lu, ZAN Ling, ZHANG Longsheng, QIU Weisheng

(Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: In order to explore the beneficial development path of fault-block shale oil in Qintong Sag, a development mode for the fracturing of directional wells combined with pseudo-horizontal wells has been proposed based on the study on the geological characteristics of shale oil in the second member of Funing Formation, and two wells are successfully implemented. The results show that the east and west wings of the deep sag belt of Qitong Sag in Subei Basin are structural complex areas with fault-block shale reservoirs, which are with large thick, developed natural fracture network, high pressure coefficient, and good mobility and transformability. The geological conditions here is not suitable for the development of long horizontal wells but for the directional wells. For the multi-layer development of thick shale oil, the rectangular directional well pattern is conducive to the CO₂ huff and puff, while the diamond reverse nine-spot well pattern is reasonable for the CO₂ flooding. Therefore, with the fracturing technology system based on “large-scale liquid injection energy storage & flow limiting perforation promotion and equalization & flow adjustment and fracture-stabilizing network & three-stage support and maintenance filling & continuous construction with all electric pumps”, the fracturing of the directional wells took as the “pseudo-horizontal well” can achieve the transformation effect of the horizontal wells, and the transformation volume of the single stage is 28.6 % larger than that of horizontal wells. This new develop mode of shale oil has high initial productivity, early oil breakthrough time, low flowback rate, fast water cut decline, and

收稿日期:2023-02-14。

第一作者简介:姚红生(1968—),男,本科,正高级工程师,本刊第二届编委会委员,从事非常规油气资源勘探开发科研生产及管理工作。

地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail:yaohs_hdsj@sinopec.com

基金项目:中国石化科技部项目“苏北盆地页岩油地质工程一体化关键技术研究”(P21112);中国石化科技部项目“苏北CCUS-EOR一体化技术研究”(P21107)。

long stable production time. The single stage has high elastic productivity, high recovery degree, and good economic benefits, realizing beneficial development of shale oil in advance. The beneficial development shows a good prospect for the evaluation of shale oil in complex structural areas by the directional wells.

Keywords: beneficial development; pseudo-horizontal well fracturing; directional well; fault-block shale oil; Qintong Sag; Subei Basin

美国通过页岩油气革命实现了能源独立,推动油气勘探开发理念和技术的发展^[1-3]。近年来,中国原油产量维持在 2×10^8 t左右,随着经济不断增长,原油对外依存度越来越高,亟需寻找新的资源接替,保障能源安全。近年来,各大油公司加大中国陆相页岩油勘探开发力度,在松辽盆地白垩系青山口组^[4-5]、鄂尔多斯盆地延长组^[6-7]、准噶尔盆地二叠系芦草沟组^[8]、济阳拗陷古近系沙四上亚段及沙三下亚段^[9-11]、苏北盆地阜宁组二段^[12]等取得重大突破,陆相页岩油勘探开发获得快速发展^[13-14]。海相页岩油气通过长水平井大规模体积压裂和滚动接替模式,获得持续高产、稳产。中国陆相泥页岩相变快、储层非均质性强、热演化程度相对较低,陆相页岩油油质重、黏度高、原油流动性较差,同时断层发育、甜点区分布面积小,主要采用大平台立体开发、水平井体积压裂的开发模式,钻井和压裂成本高,陆相页岩油效益开发难度仍然较大^[15-16]。

溱潼凹陷是在中生代拉张背景下形成的南断北超、南深北浅的箕状断陷^[17],面积约 $1\ 100\text{ km}^2$,位于苏北盆地东南部,呈北东东向展布,先后经历了仪征、吴堡、三垛等构造运动,断裂比较发育。与国内其他盆地相比,溱潼凹陷阜二段泥页岩具有“面积小、厚度大、埋藏深、有机质丰度低、矿物组成均匀”等特征。2020年以来,优选溱潼凹陷深凹带构造稳定相继实施SD1等6口探评井均获成功,目前3口井累产油量超 1×10^4 t,其中QY2HF井为苏北盆地首口页岩油百吨井,揭示了溱潼凹陷页岩油良好的勘探开发前景。

溱潼凹陷东西两翼为构造复杂区,断层发育,以断块型页岩油藏为主,由于断块面积相对较小,针对该类油藏尚无成熟的开发方式。定向井在鄂尔多斯盆地致密油^[18-19]和四川盆地致密气^[20]开发中取得较好效果,影响定向井裂缝扩展的因素包括射孔相位、井斜角和方位角等^[21-22]。青海油田在柴达木盆地开展定向井评价页岩油试验^[23-24],单井日产量均在15 t以上,具备良好的稳产能力。根据溱潼凹陷构造复杂

区阜二段地质特点,结合近期研究和实践工作,提出定向井加拟水平井压裂开发理念,对断块型页岩油藏的开发方式及压裂工艺技术进行探索,对于具有类似地质条件页岩油效益开发具有一定的借鉴意义。

1 断块型页岩油地质特征

1.1 构造特征

根据断裂级次、构造形态,溱潼凹陷自西向东划分为斜坡带、深凹带、断阶带3个构造带。深凹带阜二段埋深较大(大于3 500 m),为中高热演化区(R_o 为0.9%~1.1%),是目前页岩油勘探开发的主阵地。深凹带中部构造稳定,断层不发育,地层较缓,地层倾角 $7^\circ \sim 10^\circ$,发育连续性基质型页岩油藏;东西两翼为构造复杂区,断层均较发育(图1、图2),发育断块型页岩油藏。其中,东部为高陡复杂区,地层倾角 $8^\circ \sim 18^\circ$,断层多为南西—北东向,断层长度0.9~13.8 km,断距10~200 m;西部地层较缓,地层倾角 $7^\circ \sim 10^\circ$,断层更为发育,断层长度1.3~6.0 km,断距10~350 m,被切割为多个小断块。斜坡带阜二段为中低热演化区(R_o 为0.7%~0.9%),断层较发育,断层长度1.2~10.6 km,断距10~260 m,发育断块型页岩油藏。

1.2 储层特征

溱潼凹陷阜二段主要为半深湖—深湖亚相,地层厚度200~450 m,纵向上划分为5个亚段(图3),中下部主要为深灰色、灰黑色纹层状/层状含灰云页岩、灰云质页岩夹薄层灰黑色泥岩,中部为灰黑色块状泥岩夹层状灰云质页岩,中上部为灰黑色块状灰质泥岩、块状泥岩。阜二段泥页岩储集空间包括基质孔隙、层理缝和高角度缝(图4)。纵向上I—II亚段层理缝和高角度缝均比较发育,平面上东西两翼构造复杂区受断层影响,高角度缝更为发育(图5),高角度缝与水平层理缝、微裂缝以及基质孔隙形成了立体的孔缝系统,有效改善储层渗透性^[25]。阜二段

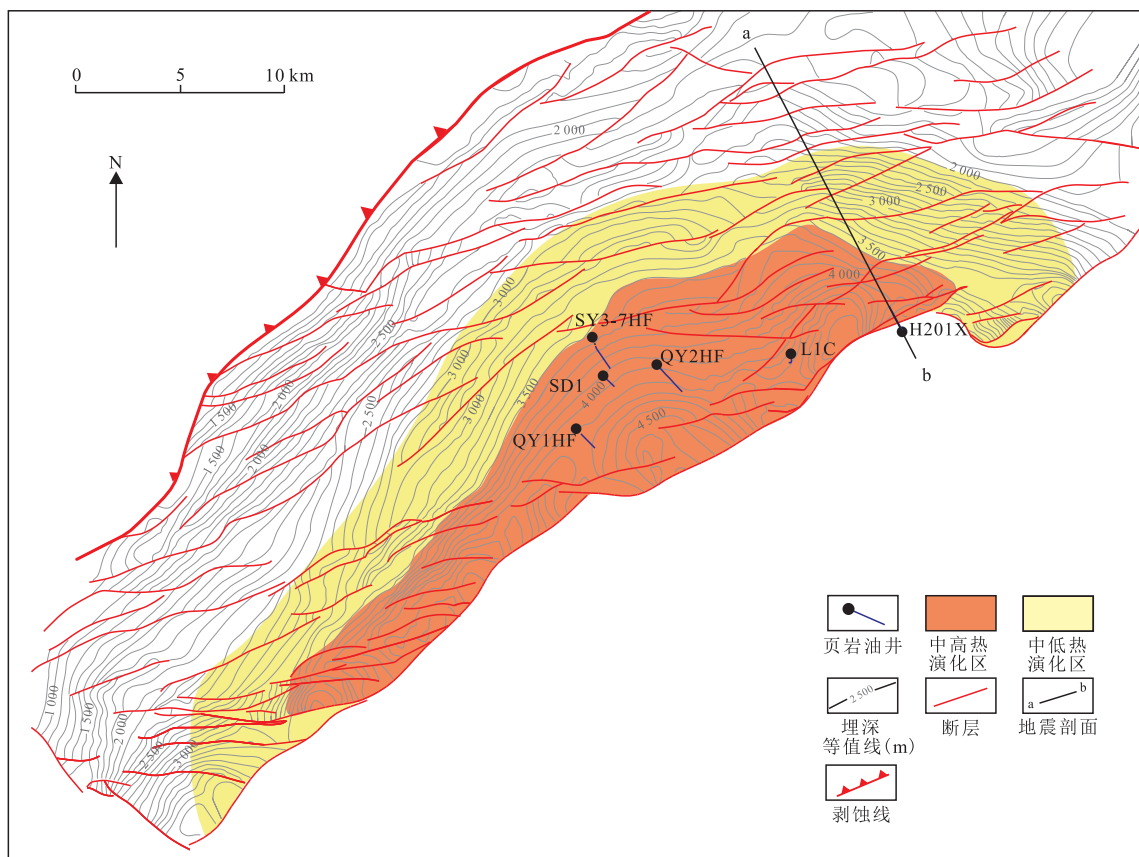


图1 苏北盆地溱潼凹陷阜二段页岩油有利区分布

Fig. 1 Distribution of shale oil favorable area in the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin

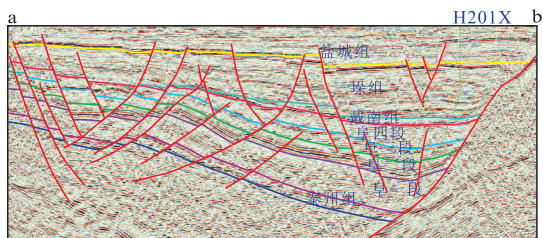


图2 苏北盆地溱潼凹陷东部构造剖面

Fig. 2 Sectional view of the eastern structure of Qintong Sag, Subei Basin

泥页岩实测孔隙度0.2%~9.1%,平均4.16%。孔隙结构呈单峰分布,主要以介孔(2~50 nm)为主,发育少量宏孔(大于50 nm)。阜二段有效储层段渗透率(0.005~2.890)×10⁻³ μm²,平均0.082×10⁻³ μm²。

1.3 可改造条件

阜二段泥页岩脆性矿物主要为石英、长石、方解石、白云石^[26],自下而上脆性矿物含量逐渐减小

(图3), I 亚段脆性矿物含量最高(70.2%), II-IV 亚段相近,平均 65.8%, V 亚段脆性矿物含量最低(49.1%)。黏土矿物以伊/蒙混层为主,占比 50.1%,其次为伊利石和绿泥石,岩石具有亲水性,有利于渗吸置换。苏北盆地形成于张性构造应力背景,最小水平主应力为 54~77 MPa,平均 67.1 MPa,最大水平主应力为 58~82 MPa,平均 72.4 MPa,两向应力差异系数 0.08。阜二段具有较高杨氏模量(大于 30 GPa)、较小泊松比(小于 0.3),纵向上岩石力学特征相差不大,有利于压裂改造。

1.4 油藏特征

溱潼凹陷深凹带阜二段具有大面积连片分布、整体含油的特点,断块型页岩油藏类型为深层、高温、高压油藏。油藏埋深 3 500~4 100 m,原油密度为 0.838 1~0.898 7 g/cm³,50 °C 条件下地面原油黏度 11.45~78.1 mPa·s,随埋深增大油质逐渐变好。气油比 20~60 m³/t,胶质 9.14%,沥青质 4.48%,凝固

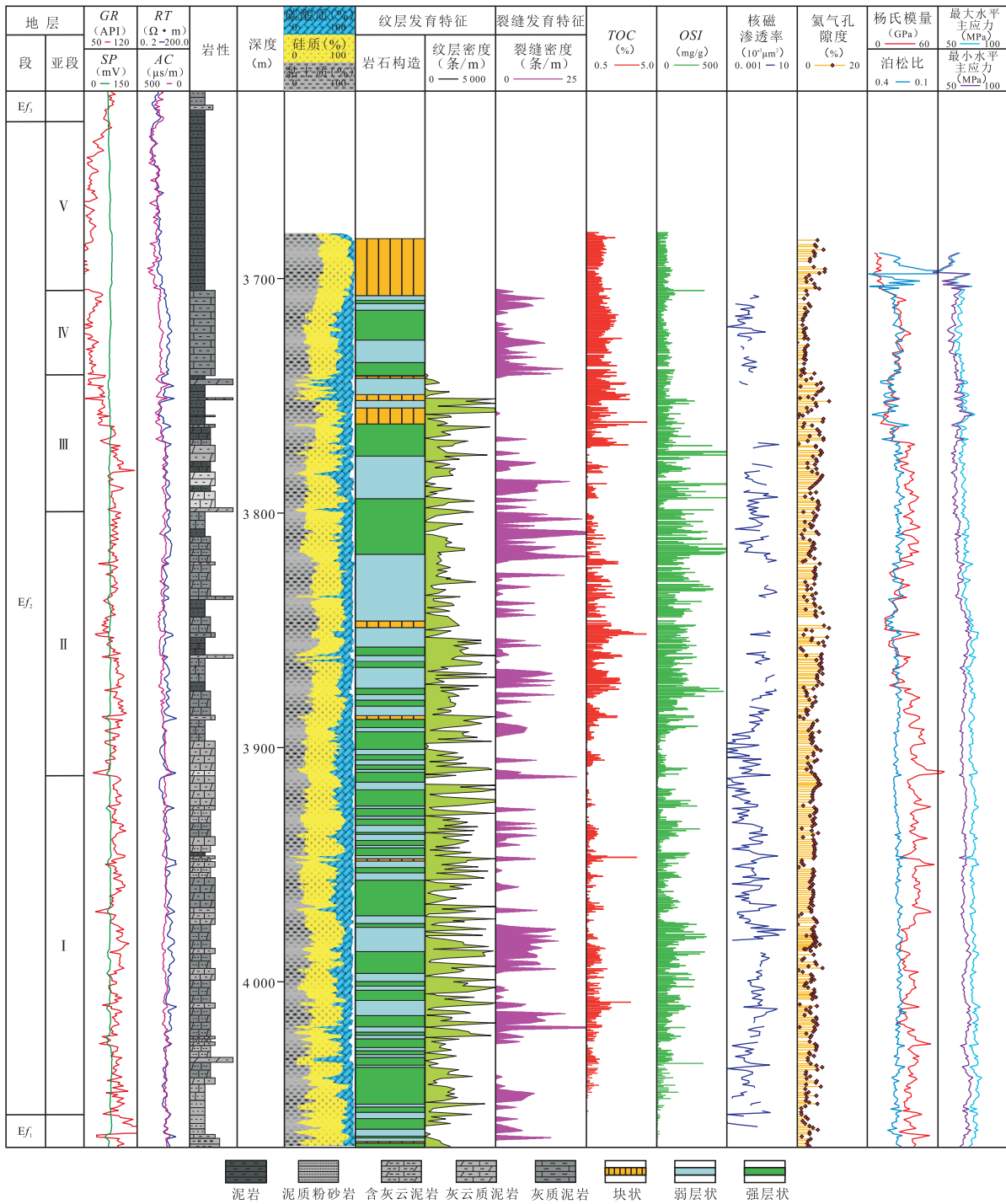


图3 苏北盆地溱潼凹陷阜二段泥页岩储层综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive column diagram of mud shale reservoir in the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin

点34℃,含硫0.21%,为低含硫中质常规油特征。天然气中甲烷含量67.76%,乙烷含量12.72%,不含硫化氢。深凹带整体为异常高压,压力系数1.2~1.6,地温梯度3.05℃/hm,地层温度为120~140℃。

2 定向井开发模式

目前,中国陆相页岩油开发理论和技术均处在

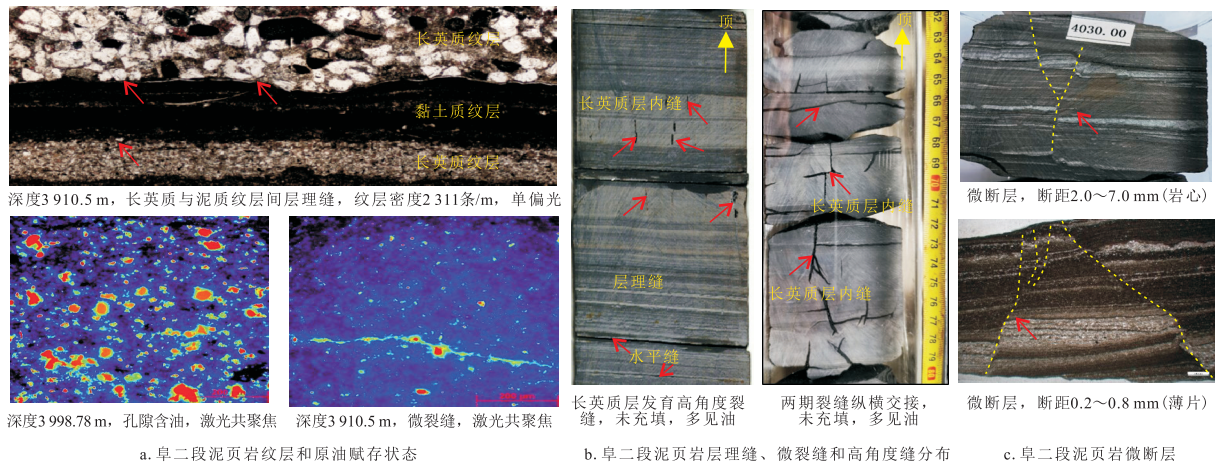


图4 苏北盆地溱潼凹陷阜二段泥页岩储集空间特征

Fig. 4 Reservoir space characteristics of mud shale in the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin

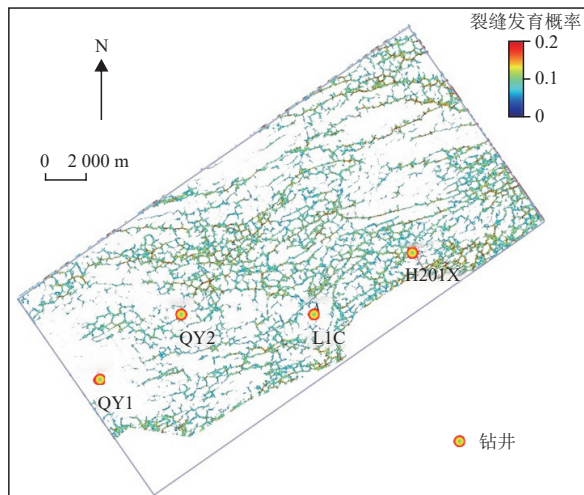


图5 苏北盆地溱潼凹陷中、东部阜二段I亚段裂缝预测平面图

Fig. 5 Fracture prediction plan of I sub-member in the second member of Funing Formation in middle and eastern Qintong Sag, Subei Basin

起步阶段,尚无成熟的开发模式,而断块型页岩油藏效益开发更面临诸多难点。首先由于构造复杂、断层发育、地层倾角较大,断块长不超过2 km,宽不超过1 km,面积普遍小于2 km²,由于地层为高温、高压,且天然裂缝发育,不具备1 000 m以上水平井实施条件,短水平井则增加开发成本和施工风险,优快钻完井难度大。顺断层走向布井,由于与最大水平主应力方向平行,压裂效果难以保证;穿断层布井甜点钻遇率低,且压裂时需避开断层,影响经济效

益。阜二段甜点厚度较大,I-II亚段甜点段厚度达220~250 m,水平井压裂缝高在30 m左右,纵向动用厚度较小,在考虑效益开发的条件下纵向资源动用率不高。同时,水平井井网只能弹性开采或者后期吞吐,不能形成注采井网。水平井钻完井周期长、投资大,根据构造稳定区水平井井组投资和产能测算,1 000 m水平井的平衡油价为68美元/桶,显然构造复杂区实施短水平井效益开发难度更大。基于以上原因,结合断块型页岩油藏地质特点,提出定向井加拟水平井压裂的开发模式,探索页岩油效益开发新路径。

2.1 开发方式

与常规砂岩油藏的注水、注气等开发方式相比,由于页岩油藏具有超低的基质渗透率和复杂的人工和天然缝网,导致难以形成有效的注采系统,一次采油采用弹性开发方式,后期可采用注水压吞和注CO₂压吞/驱替技术。

注水吞吐主要机理是利用页岩亲水性强的特点,基质小孔隙的毛管力自吸裂缝或大孔隙中的水将小孔隙中油置换出来的过程^[27-28]。实践中采用清水高压快速注入加焖井的方式,注入清水降低了地层水矿化度,使地层通过矿物溶解实现再次固液平衡,达到提高渗透率的作用。高压快速注入提高了驱替压差,波及范围增大,注水完毕后焖井有利于充分发挥基质渗吸作用。

CO₂不但具有水的渗吸提高页岩油采收率的作用,同时具有黏度低、注入性好、易混相、扩散能力强

的特性,比水更能实现页岩基质小孔隙中原油的动用。溱潼凹陷阜二段页岩岩心注 CO_2 实验、注 CO_2 数值模拟表明,在多个注采参数中, CO_2 注入量对大规模多段压裂的页岩油藏敏感性最强,其次为注入速度和焖井时间。合理注入量与压裂液注入量相关性最强,当注入量超过压裂液注入量($2.5 \times 10^4 \text{t}$)后,裂缝中 CO_2 单相网格显著增加(图6),换油率表现为突然下降的趋势,因此 CO_2 注入量不能超过压裂液用量。

天然能量开发、注水吞吐、注 CO_2 吞吐、 CO_2 驱等开发方式数值模拟预测表明(图7), CO_2 驱采出程度最高,可达15.34%,一次采油采用弹性开发方式,后期采用 CO_2 吞吐/驱替增能。

2.2 开发层系划分

溱潼凹陷阜二段页岩油为连续性油藏,纵向上无明显隔夹层,开发层系划分主要取决于人工压裂缝高。定向井单段压裂结果表明,用量达到一定规模后,缝长缝高增加趋势变缓,压裂改造体积(SRV)趋于稳定。通过压裂监测确定合理压裂规模及缝高,依据缝高确定单套层系厚度。以上下层系互不干扰为原则,结合甜点层分布特点划定开发层系。压裂监测表明,88 m定向井段压裂液用量超过 $2.38 \times 10^4 \text{m}^3$ 后(图8),SRV出现了明显的拐点,此时

缝高为53 m,最大缝高为61 m。同时定向井单段采用 $1.2 \times 10^4 \text{m}^3$ 液、 500m^3 砂压后反演表明,缝高为58 m。因此适宜的压裂段长为60 m左右,上下段无明显干扰,有利于压裂造长缝。阜二段I-II亚段甜点段厚度250 m左右,可划分4个开发层系。

2.3 井网井距

根据溱潼凹陷页岩油井压裂裂缝监测方位,阜二段最大水平主应力方向为 75° ,定向井压裂反演表明支撑半缝长300 m,缝宽200 m。根据压裂改造体积,设计定向井组沿 75° 方向的矩形井网或菱形反九点井网(图9),试验井距600 m、排距200 m。实现既能发挥定向井成本优势,又能达到类似水平井开发的效果。矩形井网有利于开展 CO_2 吞吐,与水平井开发相比,定向井矩形井网采用逐层上返开发的方式、开展 CO_2 吞吐可在平面上达到更均匀波及,避免水平井某一单段突进的问题。菱形反九点井网有利于开展 CO_2 驱替,可避免裂缝方向过早气窜,平面动用均匀,开发后期通过角点井转注可转成矩形五点井网,进一步提高储量动用程度。

2.4 定向井“拟水平井压裂”技术

“拟水平井压裂”是以提升有效支撑缝长为核

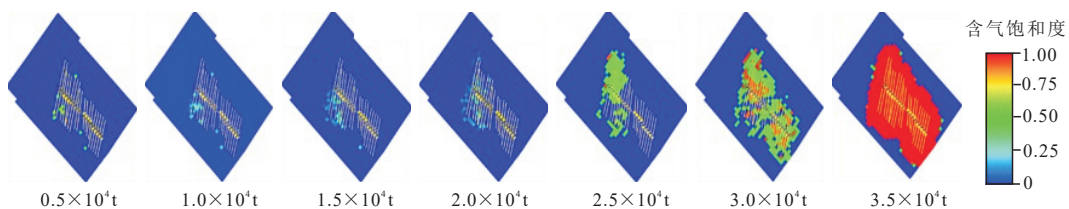


图6 不同注气量条件下焖井结束时的裂缝网格含气饱和度

Fig. 6 Gas saturation of fracture grid at the end of braised well under different gas injection conditions

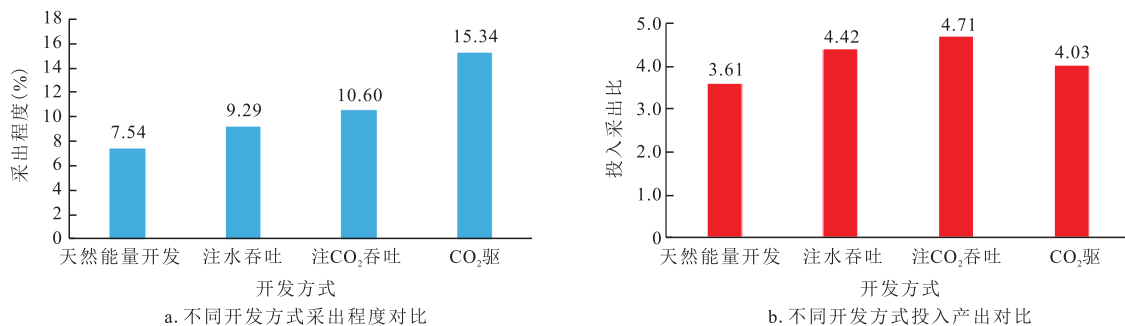


图7 不同开发方式数值模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of numerical simulation results of different development methods

心,采用“大砂量、大液量、大排量”造长缝,实现定向井达到水平井开发效果,缝控储量大幅度提升,在压裂阶段实现“压裂—渗吸—增能—驱油”协同提高采收率^[29]效果。基于溱潼凹陷阜二段泥页岩地质特点,采取“规模注液蓄能量+限流射孔促均衡+调节排量稳缝网+三级支撑保充填+全电泵连续施工”为主的压裂工艺技术体系。由于阜二段泥页岩伊蒙混层含量较高、立体缝网发育,有利于润湿相快速渗吸驱替出孔缝原油,水平井注液强度 53~58 m³/m,定向

井注液强度达到 150 m³/m 以上。段簇设计方面,考虑到目前的分层压裂工艺容易导致纵向改造不均匀,因此,通过限流压裂工艺严格控制炮眼的数量,提升滑溜水经过孔眼的摩阻,迫使液体分流,同时使用超过常规限流压裂所需的施工排量,单层设计 3~4 簇,单簇 8~10 孔,使得所有射孔层位均被打开,实现优质储层的充分动用。同时针对阜二段泥页岩纹层极其发育,易开启大量天然裂缝,在近井地带产生过度复杂的缝网,难以实现造长缝的情况,选择“变排量稳缝网”施工工艺,根据净压力变化情况实时调整施工排量,使得注入液量与滤失量保持平衡,从而维持整体施工净压力稳定,抑制裂缝过度复杂化,促进裂缝向远处延伸,提升平面动用程度。针对大规模注液施工时间长,多次施工中间存在停待,支撑剂在此期间快速沉降,影响有效支撑缝长的增加,配套长时运转电动压裂泵、大通径管汇等装备,实现单次泵注时间从 4 h 增加至 12 h,一次完成万方液施工。压裂数值模拟表明,拟水平井压裂较常规压裂支撑半缝长 131 m 提升至 296 m、改造体积由 63×10⁴ m³ 提升至 147×10⁴ m³(图 10)。

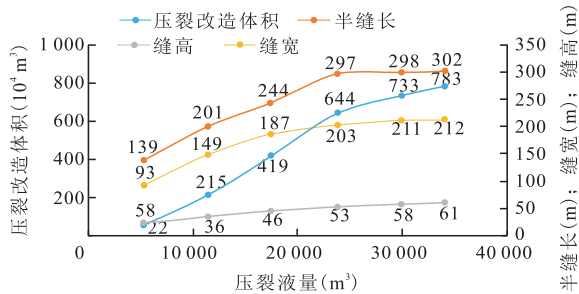


图 8 定向井压裂液量与裂缝参数关系

Fig. 8 Relationship between fracturing fluid volume and fracture parameters in directional wells

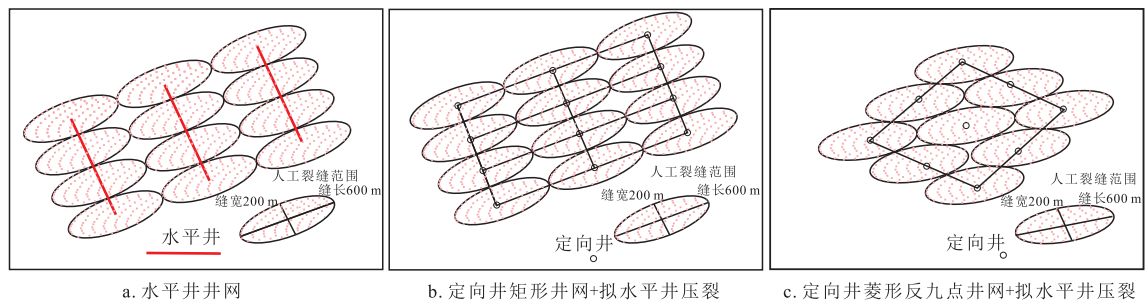


图 9 不同井网形式示意图

Fig. 9 Schematic diagram of different well patterns

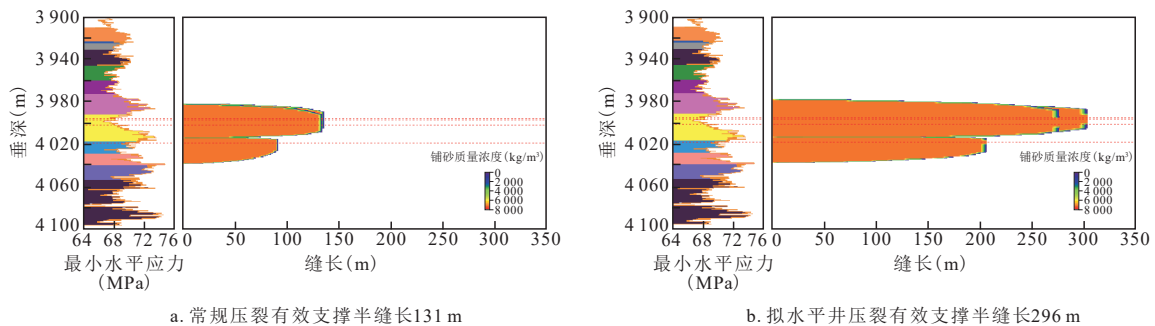


图 10 4 000 m³液 100 m³砂与 12 000 m³液 500 m³砂裂缝缝长对比

Fig. 10 Comparison of crack length between the mode of 4 000 m³ liquid+100 m³ sand and the mode of 12 000 m³ liquid+500 m³ sand

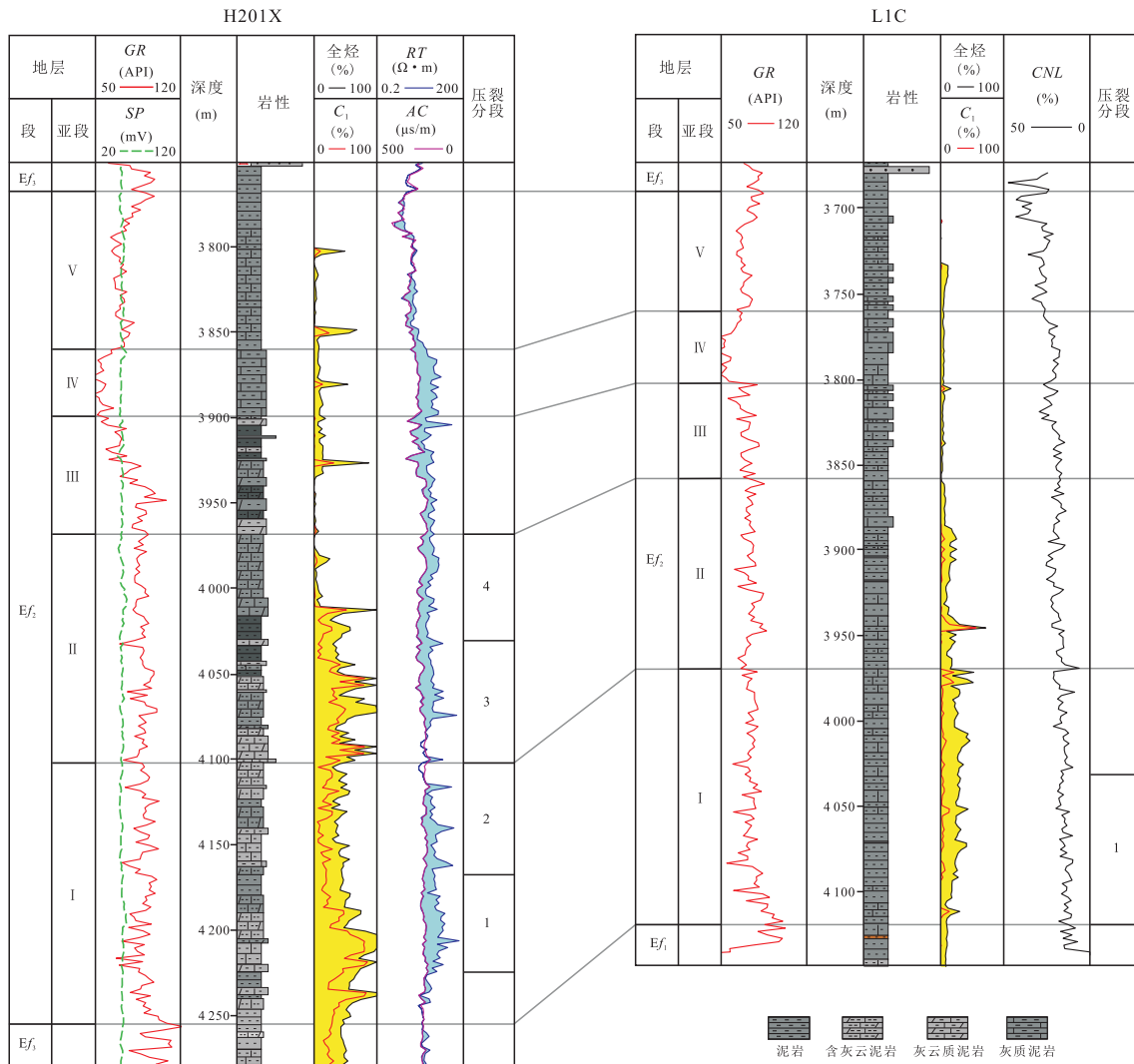
3 页岩油开发实践

3.1 开发效果

2022年,在断块型页岩油定向井开发模式研究的基础上,优选东部构造复杂区实施H201X井和L1C井(图11),H201X井采用多层分压合采,L1C井采用单层单压生产,评价构造复杂区页岩油定向井产能、探索开发技术政策。H201X井阜二段埋深为3563~4015 m,TOC为0.49%~3.5%,平均1.54%; S_1 (游离烃)为0.2~3.3 mg/g,平均1.29 mg/g;气测全烃为0.7%~99%,平均36%,I、II亚段气测全烃平均52%。I、II亚段256 m分4段压裂,总液量47870.2 m³,注液强度187 m³/m,总砂量1929.8 m³,

加砂强度7.5 m³/m。破裂压力56~70 MPa,停泵压力36.5~40.6 MPa。4 mm油嘴放喷,套压26.4 MPa,放喷第二天见油,见油时返排率0.21%,初期含水下降快,下降速率达到7.3%/d,返排率1.58%时含水稳定49%,日产油量69.4 t。目前日产油量70.9 t,套压16.39 MPa,日产液量114.5 t,含水率38%,氯根14438 mg/L,生产气油比20~30 m³/t,累产油7235 t。

L1C井阜二段埋深3622~4044 m,I、II亚段气测全烃3%~72%,平均22.5%。对I亚段88 m压裂,总液量34081.4 m³,注液强度387.29 m³/m,总砂量1016.6 m³,加砂强度11.55 m³/m,破裂压力69~84.5 MPa,停泵压力34~36 MPa。4 mm油嘴放喷,返排率4.39%时见油,目前日产油量26.6 t,套压



注: C₁为甲烷, CNL为补偿中子。

图11 苏北盆地溱潼凹陷H201X井和L1C井阜二段地层对比

Fig. 11 Stratigraphic correlation between inclined Well-H201X and the second member of Funing Formation on the side of Well-L1C, Qintong Sag, Subei Basin

7.66 MPa,含水率62%,氯根19 482 mg/L,累产油量4 036 t。页岩油定向井具有“初期产能高、见油早、返排率低、含水下降快,稳产时间长”的生产特点(图12)。峰值日产油量34.3~79.1 t,1~10 d见油,返排率0.21%~4.39%,每天含水下降速度0.4%~3.4%,H201X井69 t以上稳产已99 d,L1C井26 t以上已稳产116 d。

3.2 启示

1) 定向井“拟水平井压裂”大幅提高单段改造

体积,弹性产率高、采出程度高、经济效益好。定向井单段改造体积高于水平井,单井液量 $11.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 降至 $4.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,单井砂量 $3\,262 \text{ m}^3$ (22段)降至 $1\,925 \text{ m}^3$ (4段),单段改造体积由 $115 \times 10^4 \text{ m}^3$ 提升至 $148 \times 10^4 \text{ m}^3$,提升28.6%。渗吸置换效率高,能量利用率高,定向井分压合采、单段弹性产率更高(142 t/MPa),高于水平井的102 t/MPa。定向井技术可采储量(EUR) $2.1 \times 10^4 \text{ t}$,取得较好的经济效益。

2) 在溱潼凹陷深凹带东部构造复杂区,创新实践页岩油定向井评价新模式,均取得良好效果,展现

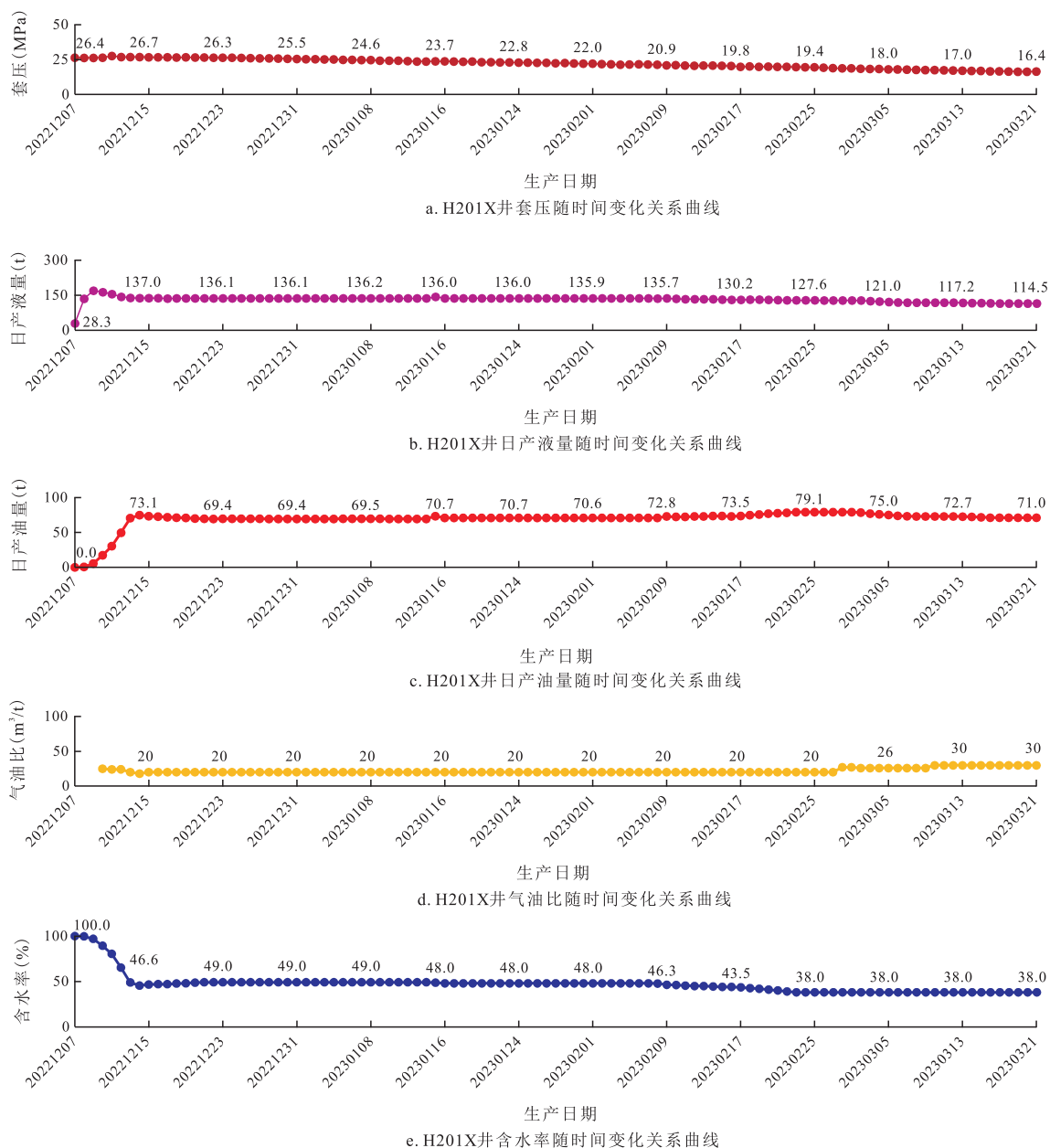


图12 苏北盆地溱潼凹陷H201X井生产曲线

Fig. 12 Production curve of Well-H201X, Qintong Sag, Subei Basin

了构造复杂区定向井评价页岩油的良好前景,坚定了对复杂小断块页岩油藏采用定向井评价的信心。苏北盆地阜二段页岩油资源量 $15 \times 10^8 \text{t}$, 主要为断块型页岩油藏, H201X井和LIC井的突破, 对于实现苏北盆地复杂断块页岩油效益动用具有重要带动意义。

4 结论

1) 溱潼凹陷深凹带东西两翼为构造复杂区, 发育断块型页岩油藏, 具有“厚度大、天然缝网发育、压力系数高、可动性和可改造性好”的地质特点, 具备实施定向井开发的地质条件。

2) 溱潼凹陷断块型页岩油一次采油采用弹性开发方式, 后期采用 CO_2 吞吐/驱替提高采收率技术可行。压裂监测和压后反演表明定向井单层合理厚度为 60 m 左右。厚层页岩油多套层系开发, 定向井矩形井网有利于开展 CO_2 吞吐, 菱形反九点井网是 CO_2 驱开发的合理井网模式。

3) 采用“规模注液蓄能量+限流射孔促均衡+调节排量稳缝网+三级支撑保充填+全电泵连续施工”为主的压裂工艺技术体系, 定向井“拟水平井压裂”能达到水平井的改造效果, 单段改造体积较水平井提升 28.6%。

4) 页岩油定向井具有“初期产能高、见油早、返排率低、含水下降快, 稳产时间长”的生产特点, 单段弹性产率高、采出程度高、经济效益好, 率先实现页岩油效益开发, 对于实现苏北盆地复杂断块页岩油效益动用具有重要带动意义。

参考文献

- [1] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 224-237.
HU Suyun, BAI Bin, TAO Shizhen, et al. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 224-237.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 1-14.
HE Wenyuan, MENG Qi'an, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 1-14.
- [5] 柳波, 刘俊杰, 付晓飞, 等. 松辽盆地陆相页岩油地质研究方法 with 勘探评价进展[J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 239-248.
LIU Bo, LIU Junjie, FU Xiaofei, et al. Progress in geological research methods and exploration evaluation of continental shale oil in Songliao Basin[J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 239-248.
- [6] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 601-614.
FU Jinhua, NIU Xiaobing, DAN Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 601-614.
- [7] 李锦锋, 张凤博, 杨连如, 等. 下寺湾油田延长组长7段页岩油储层特征及勘探开发新突破[J]. 非常规油气, 2021, 8(2): 33-42.
LI Jinfeng, ZHANG Fengbo, YANG Lianru, et al. The reservoir characteristics and new breakthrough in exploration and development of various types of shale oil in Chang 7 member of Yanchang Formation in Xiasiwang Oilfield[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(2): 33-42.
- [8] 高阳, 叶义平, 何吉祥, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油开发实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 133-141.
GAO Yang, YE Yiping, HE Jixiang, et al. Development practice of continental shale oil in Jimsar sag in the Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 133-141.
- [9] 刘惠民. 济阳拗陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 73-87.
LIU Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 73-87.
- [10] 林腊梅, 程付启, 刘骏锐, 等. 济阳拗陷渤南洼陷沙一段页岩油资源潜力评价[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 85-96.
LIN Lamei, CHENG Fuqi, LIU Junrui, et al. Evaluation of shale oil resource potential in the Es1 Member in Bonan sag, Jiyang depression [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 85-96.
- [11] 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 等. 济阳拗陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1717-1729.
LIU Huimin, LI Junliang, LIU Peng, et al. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1717-1729.
- [12] 姚红生, 晷灵, 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 & Experiment*, 2021, 43(5): 776-783.
- [13] 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.
- [14] 蔚远江,王红岩,刘德勋,等.中国陆相页岩油示范区发展现状及建设可行性评价指标体系[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 191-205.
YU Yuanjiang, WANG Hongyan, LIU Dexun, et al. Development status and feasibility evaluation index system of continental shale oil demonstration area in China[J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 191-205.
- [15] 鲜成钢,李国欣,李曹雄,等.陆相页岩油效益开发的若干问题[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 14-29.
XIAN Chenggang, LI Guoxin, LI Caoxiong, et al. Key evaluation aspects for economic development of continental shale oil[J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 14-29.
- [16] 张方,高阳,李映艳,等.页岩油不同类型甜点对水平井压裂产能影响规律[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 123-131.
ZHANG Fang, GAO Yang, LI Yingyan, et al. Effects of different types of sweet spots on fracturing and productivity of horizontal wells in shale oil reservoirs [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(5): 123-131.
- [17] 管灵,骆卫峰,印燕铃,等.苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油形成条件及有利区评价[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(2): 233-241.
ZAN Ling, LUO Weifeng, YIN Yanling, et al. Formation conditions of shale oil and favorable targets in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(2): 233-241.
- [18] 慕立俊,李宪文,唐梅荣.定向井体积压裂工艺设想及实践[C]//第一届国际压裂酸化大会论文集.西安:陕西省石油学会, 2010.
MU Lijun, LI xianwen, TANG Meirong. The assumption and practice of new multi-fracture fracturing technology for directional well[C]//1ST Hydraulic Fracturing & Acidizing. Xi'an: Shaanxi Petroleum Society, 2010.
- [19] 李凯凯,安然,王秀坤,等.安83区页岩油定向井注水吞吐采油实践及认识[C]//IPPTC国际石油石化技术会议论文集.西安:陕西省石油学会, 2021.
LI Kaikai, AN Ran, WANG Xiukun, et al. Practice and analysis of water flood stimulation of directional wells in An83 shale oil block[C]//Proceedings of IPPTC International Petroleum and Petrochemical Technology Conference. Xi'an: Shaanxi Petroleum Society, 2021.
- [20] 颜晋川,刁素,朱礼平,等.定向井压裂优化设计及现场应用[J]. *油气地质与采收率*, 2008, 15(5): 102-104.
YAN Jinchuan, DIAO Su, ZHU Liping, et al. Optimization and field application of hydraulic fracturing design of directional wells[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(5): 102-104.
- [21] 谭苗.渭北长3定向井多裂缝形成机理及压裂技术研究[J]. *新疆石油天然气*, 2016, 12(4): 44-47.
TAN Miao. Fracturing technology research&formation mechanism of multiple fractures in directional well of chang 3 layer in Weibei oilfield[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2016, 12(4): 44-47.
- [22] 王磊.定向井压裂裂缝扩展规律研究[D].青岛:中国石油大学(华东), 2011.
WANG Lei. Research on prolongation law of hydraulic fracture for directional well[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [23] 李国欣,朱如凯,张永庶,等.柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 18-31.
LI Guoxin, ZHU Rukai, ZHANG Yongshu, et al. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiangling shale oil in Qaidam Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 18-31.
- [24] 李国欣,伍坤宇,朱如凯,等.巨厚高原山带式页岩油藏的富集模式与高效动用方式——以柴达木盆地英雄岭页岩油藏为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 144-157.
LI Guoxin, WU Kunyu, ZHU Rukai, et al. Enrichment model and high-efficiency production of thick plateau mountainous shale oil reservoir: A case study of the Yingxiangling shale oil reservoir in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 144-157.
- [25] 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.
- [26] 李小龙,孙伟.页岩油储层“七性”关系评价研究——以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段为例[J]. *非常规油气*, 2022, 9(6): 34-41.
LI Xiaolong, SUN Wei. Research on seven properties relationship evaluation of shale oil reservoir: A case study of the second member of Funing Formation in Qintong Sag of Subei Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022, 9(6): 34-41.
- [27] 龚兵.盐间页岩油藏注水吞吐技术研究[J]. *江汉石油职工大学学报*, 2019, 32(2): 28-30.
GONG Bing. A study of water injection-production technology for inter-salt shale reservoir[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers*, 2019, 32(2): 28-30.
- [28] 赵艳玲.江汉盆地潜江组盐间页岩油注水渗吸—驱替机理研究[D].青岛:中国石油大学(华东), 2020.
ZHAO Yanling. Study on the mechanism of water imbibition and displacement for inter-salt shale oil in Qianjiang Depression, Jiangnan Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2020.
- [29] 蒋廷学.非常规油气藏新一代体积压裂技术的几个关键问题探讨[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 1-9.
JIANG Tingxue. Discussion on several key issues of the new-generation volume fracturing technology for unconventional reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(2): 1-9.