



## 松辽盆地北部上白垩统青山口组一段页岩油战略调查成果综述

杨建国, 李士超, 姚玉来, 肖飞, 李昂, 张丽艳, 黄一鸣

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

**摘要:** 松辽盆地北部上白垩统青山口组一段页岩油资源丰富, 以往的勘探目的层主要是泥页岩裂缝、泥页岩中夹的薄砂条和介形虫层, 受目的层分布范围限制, 页岩油勘探效果一直不理想。本次调查以盆地内广泛发育的泥页岩储层为重点, 创新了陆相盆地泥页岩储层页岩油地质认识, 形成了泥页岩储层页岩油勘查技术体系。部署实施的松页油 1 井、松页油 2 井和松页油 3 井的 3 口直井压后抽汲分别获得日产油 3.22 m<sup>3</sup>、4.93 m<sup>3</sup> 和 3.46 m<sup>3</sup> 的工业油流; 松页油 1HF 井压后自喷获得日产 14.37 m<sup>3</sup> 高产工业油流, 松页油 2HF 井压后抽汲获得 10.06 m<sup>3</sup>/d 高产工业油流。实现了松辽盆地北部页岩油战略调查的重大突破。

**关键词:** 松辽盆地; 齐家凹陷; 古龙凹陷; 三肇凹陷; 青山口组一段; 泥页岩储层; 页岩油

## STRATEGIC SURVEY RESULTS OF SHALE OIL IN THE FIRST MEMBER OF QINGSHANKOU FORMATION, UPPER CRETACEOUS IN NORTHERN SONGLIAO BASIN

YANG Jian-guo, LI Shi-chao, YAO Yu-lai, XIAO Fei, LI Ang, ZHANG Li-yan, HUANG Yi-ming

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

**Abstract:** The shale oil resources are abundant in the first member of Qingshankou Formation, Upper Cretaceous, in northern Songliao Basin. The previous exploration was targeted at shale fractures and interbedded thin sands and ostracod layers. Due to the limitation of distribution range of target layers, the shale oil exploration results have not been satisfactory. Focusing on the widely-developed shale reservoirs in the basin, the survey refreshes the geological understanding of shale oil in the shale reservoirs of continental basin, and forms the exploration technology system. The industrial oil flows of SYY1, SYY2 and SYY3 wells pumped after fracturing yield 3.22, 4.93 and 3.46 m<sup>3</sup>/d respectively, the flowing high-yield industrial oil run of 14.37 m<sup>3</sup>/d from SYY-1HF well and pumping oil run of 10.06 m<sup>3</sup>/d from SYY-2HF well after fracturing, achieving a major breakthrough in the strategic survey of shale oil in northern Songliao Basin.

**Key words:** Songliao Basin; Qijia Sag, Gulong Sag; Sanzhao Sag; first member of Qingshankou Formation; shale reservoir; shale oil

### 0 引言

关于页岩油的定义, 国内许多石油地质学者做了

详细的论述<sup>[1-4]</sup>, 强调以游离、溶解或吸附状态赋存于有效生烃泥页岩中的液态烃类, 是泥页岩生排烃后的

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2021-05-17. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽盆地北部页岩油战略调查”(DD20190114); “大庆齐家-古龙地区页岩油气战略调查与评价”(DD20179613).

作者简介: 杨建国(1967—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事页岩油调查与石油地质综合研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//yangjianguo@mail.cgs.gov.cn

残余滞留聚集,基本未经历运移或仅在源岩内短距离初次运移;页岩油主要储集在纳米级孔喉和裂缝系统中,多沿片状层理面或与其平行的微裂缝分布;页岩油是赋存在泥页岩中自生自储的非常规石油,泥页岩既是石油的烃源岩,又是石油的储集岩.源储一体、源内成藏、油气未发生运移是页岩油与致密油最本质的区别<sup>[5-6]</sup>.页岩油类型划分,国内不同学者有不同的划分方案,有的学者以赋存空间为主,将页岩油划分为基质含油型、夹层富集型和裂缝富集型3种类型<sup>[1]</sup>;有的学者以岩性组合为主,将页岩油划分为源储分异型(I类)、源储一体型(II类)和纯页岩型(III类)3种类型<sup>[7]</sup>,在生产实践中,通常将3种类型相应称为砂岩型、砂泥岩互层型和纯泥页岩型,这种划分方案已经被油田公司采用<sup>[8]</sup>;有的学者以有机质成熟度为依据,将页岩油划分为中低成熟度页岩油和中高成熟度页岩油两种类型<sup>[9]</sup>,中低成熟度页岩油勘探开发手段主要是原位开采,中高成熟度页岩油主要是水平井钻探和大型体积压裂技术进行开采,目前国内页岩油勘探开发的主攻方向是中高成熟度的页岩油.

随着北美成功实现页岩油的商业开发<sup>[10]</sup>,陆相页岩油勘探开发越来越受到石油勘探者的关注<sup>[11-13]</sup>.根据美国能源情报署(EIA)发布的报告,中国页岩油技术可采资源量位居世界第三位<sup>[14]</sup>,资源潜力巨大.与美国页岩油主要分布在海相盆地不同<sup>[15-16]</sup>,中国页岩油主要分布在松辽<sup>[17-22]</sup>、渤海湾<sup>[23-27]</sup>、鄂尔多斯<sup>[8,28]</sup>、准噶尔<sup>[29]</sup>和四川等陆相盆地.

目前,针对粉砂岩和碳酸盐岩夹层较发育湖相泥页岩层系中的页岩油,在渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组<sup>[23-27]</sup>、鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段<sup>[8,29]</sup>和准噶尔盆地吉木萨尔凹陷<sup>[29]</sup>二叠系芦草沟组业已实现工业化开发.而针对湖相泥页岩基质型页岩油,近年来在松辽盆地北部也取得突破性进展.

松辽盆地是在海西期褶皱基底之上发育起来的晚中生代裂谷盆地,位于中国东北黑龙江、吉林、辽宁三省境内,面积为 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是目前世界上已发现的油气资源最为丰富的非海相沉积盆地<sup>[30-31]</sup>.盆地内的油气总体上具有上油下气的分布特征,天然气主要发育在断陷期火石岭组、沙河子组、营城组,为陆相含煤火山碎屑岩建造.石油主要发育在拗陷期登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组,为

陆相碎屑建造.页岩油主要赋存在齐家、古龙、三肇和长岭凹陷青山口组一段深湖—半深湖相黑色泥页岩中<sup>[17-22]</sup>.松辽盆地北部青山口组泥页岩裂缝中油气显示最早见于20世纪60年代,在钻井取心过程中,发现泥页岩层段有沿着层理面渗油的现象,从而揭开页岩油勘探的序幕.20世纪80年代以来,将泥页岩裂缝油藏作为勘探与评价目标<sup>[32]</sup>,但一直没有大的突破.2016年以来,在齐家凹陷、古龙凹陷和三肇凹陷相继获得工业油流,进入了泥页岩储层页岩油战略调查重大突破阶段<sup>[33]</sup>.

## 1 页岩油战略调查历程

2016—2020年,中国地质调查局沈阳地质调查中心和中国石油大庆油田有限责任公司部署钻探了6口页岩油参数井,涵盖了松辽盆地北部齐家、古龙、三肇和黑鱼泡四大凹陷(图1),其中直井3口、水平井2口、大口径地质井1口.地层含油气性测试5口井,全部获得工业油流.2016年7月至2017年2月完成齐家凹陷南部松页岩油1井和古龙凹陷北部松页岩油2井部署,2017年3—8月完成了2口井的钻探施工,2017年9—12月完成了2口井地层含油气性测试,均获得工业油流.2018年4月至2019年8月完成了松页岩油1HF井和松页岩油2HF井的地质论证、钻探和地层含油气性测试施工,2口水平井获得高产工业油流.在高压、高热演化程度的齐家、古龙凹陷获得页岩油战略调查突破的基础上,转向更难攻克的常压、中等热演化程度的三肇凹陷进行页岩油攻关.2019年4月至2020年8月完成了松页岩油3井的地质论证、钻探和地层含油气性测试施工,松页岩油3井获得 $3.46 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业油流,实现了常压、中等热演化区页岩油战略调查突破.

## 2 页岩油勘查成果

### 2.1 钻探成果

#### (1) 齐家凹陷松页岩油1井和松页岩油1HF井

松页岩油1井部署在松辽盆地北部齐家凹陷杏西地区(图1),设计井深2 527.00 m,完井井深2 547.00 m,钻遇青山口组厚度451 m,其中青山口组一段91 m.目的层取心进尺127.20 m,心长122.07 m,收获率95.97%.目的层青一段见荧光显示90 m/21层,气测异常19 m/8层.录井解释青一段页岩油油层3层,II类

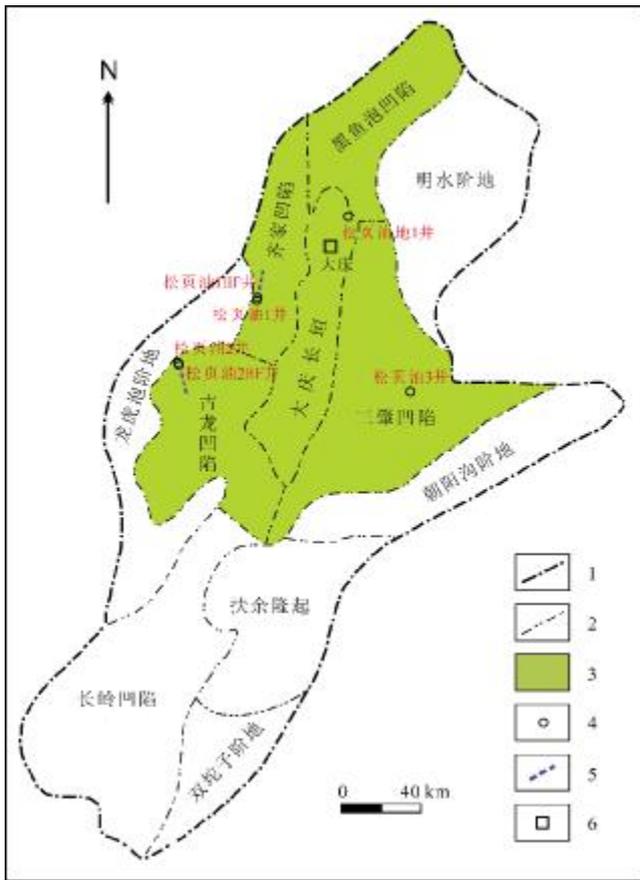


图1 松辽盆地北部页岩油勘查区及参数井分布图

Fig. 1 Shale oil exploration areas and distribution of parameter wells in northern Songliao Basin

1—一级构造单元边界 (boundary of first-order tectonic unit); 2—二级构造单元边界 (boundary of second-order tectonic unit); 3—勘查区范围 (exploration area); 4—井位 (well location); 5—水平井轨迹方向 (direction of horizontal well); 6—城市 (city)

页岩油层 47 m/2 层, III类页岩油层 5.3 m/1 层. 测井解释青一段 II 类页岩油层 47.2 m/2 层, III类页岩油层 5.3 m/1 层.

在齐家凹陷南部部署实施的松页油 1 井获得突破基础上,为了进一步了解泥页岩储层横向变化特征,扩大页岩油战略调查成果,对松页油 1 井进行了直改平施工. 松页油 1HF 井是松页油 1 井的直改平水平井,设计井深 3 485.00 m,完井井深 3 486.00 m,水平段长 831 m. 目的层青一段见荧光显示 1 065.0 m/32 层,气测异常 808 m/84 层. 地化录井数据显示青一段各项地球化学参数值普遍较高,TOC 最小值为 0.95%,最大值为 3.62%,平均值为 1.93%;  $S_1$  最小值为  $2.09 \times 10^{-3}$ ,最大值为  $12.29 \times 10^{-3}$ ,平均值为  $5.82 \times 10^{-3}$ ;  $S_2$  最小值为

$3.63 \times 10^{-3}$ ,最大值为  $17.18 \times 10^{-3}$ ,平均值为  $8.58 \times 10^{-3}$ . 综合解释青一段水平段 I 类页岩油储层 258 m/11 层, II 类页岩油储层 560.5 m/3 层.

### (2) 古龙凹陷松页油 2 井和松页油 2HF 井

松页油 2 井部署在松辽盆地北部古龙凹陷巴彦查干地区,设计井深 2 340.00 m,完井井深 2 350.00 m,钻遇青山口组厚度 300 m,其中青山口组一段 94 m. 目的层取心进尺 183.37 m,心长 181.47 m,收获率 98.96%. 目的层青一段滴照普遍见荧光显示,共 83 m/26 层,青一段岩心共发现 25 处裂缝和层理面见油,其中 8 处见油流出,气测异常 16 m/9 层. 录井解释青一段页岩油油层 3 层,其中 II 类页岩油油层 48 m/2 层, III类页岩油油层 9.6 m/1 层. 测井解释青一段 II 类页岩油层 57.6 m/3 层.

在古龙凹陷北部部署实施的松页油 2 井获得突破基础上,为了进一步了解泥页岩储层横向变化特征,扩大页岩油战略调查成果,对松页油 2 井进行了直改平施工. 松页油 2HF 井是松页油 2 井的直改平水平井,设计井深 3 154.00 m,完井井深 3 062.00 m,水平段长 739 m. 目的层青一段见荧光显示 779.0 m/29 层,气测异常 779.0 m/29 层. 地化录井数据显示青一段各项地球化学参数值普遍较高,青一段 TOC 最小值为 1.5219%,最大值为 5.3859%,平均值为 3.5449%;  $S_1$  最小值为  $0.43 \times 10^{-3}$ ,最大值为  $7.02 \times 10^{-3}$ ,平均值为  $4.84 \times 10^{-3}$ ;  $S_2$  最小值为  $4.69 \times 10^{-3}$ ,最大值为  $11.33 \times 10^{-3}$ ,平均值为  $8.28 \times 10^{-3}$ . 综合解释青一段水平段 I 类页岩油储层 489.0 m/6 层, II 类页岩油储层 48.0 m/2 层.

### (3) 三肇凹陷松页油 3 井

松页油 3 井部署在松辽盆地北部三肇凹陷中部,设计井深厚 2 545 m,完钻井深 2 547 m,钻遇青山口组厚度 405 m,其中青山口组一段 93 m. 目的层取心进尺 123.28 m,心长 116.13 m,收获率 94.2%. 目的层青山口组一段发现气测异常 70 m/6 层,油膜 82 处,岩心干照见明显荧光,有黄绿色页岩油流出. 录井解释青山口组一段页岩油油层 94.6 m/11 层,其中 I 类 60.3 m/7 层, II 类 31.2 m/3 层, III类层 3.1 m/1 层;测井解释青山口组一段页岩油油层厚度 94.6 m/11 层,其中 I 类 45.3 m/5 层, II 类 46.2 m/5 层, III类 3.1 m/1 层.

## 2.2 试油成果

### (1) 齐家凹陷松页油 1 井和松页油 1HF 井

优选并确定松页油1井青山口组一段85、87号层,2层厚52.3 m,为本井的地质和工程双甜点层段,进行地层含油气性测试.松页油1井累计排液953.75 m<sup>3</sup>,累计出油36.44 m<sup>3</sup>,总返排率41.06%;采用抽深2100 m,动液面1900 m/36次工作制度,获得3.22 m<sup>3</sup>/d工业油流.

依据松页油1HF井钻井、录井、测井等资料,综合考虑岩性、电性、物性、含油性、烃源岩特征、脆性和可压性等参数,同时兼顾固井质量,优选了松页油1HF井青一段水平段10段,采用分压合试方式进行地层含油性测试.松页油1HF井试油施工经历油嘴排液、敞口排液和2次关井放喷求产4个阶段,共计排液3682.74 m<sup>3</sup>,总出油504.8 m<sup>3</sup>,返排率为18.73%.24 h敞口自喷求产,获得14.37 m<sup>3</sup>/d高产工业油流.

#### (2)古龙凹陷松页油2井和松页油2HF井

优选并确定松页油2井青山口组一段35、36、37号层,3层厚65.8 m,为本井的地质和工程双甜点层段,进行地层含油气性测试.松页油2井累计排液857.22 m<sup>3</sup>,累计出油54.70 m<sup>3</sup>,总返排率37.88%;采用抽深1990 m,动液面1790 m/36次工作制度,获得4.93 m<sup>3</sup>/d工业油流.

利用松页油2HF井岩屑录井、气测录井、地化录井、脆性矿物、固井质量5项指标,优选岩屑录井显示好、气测录井值高、地化录井数据大、脆性矿物含量高、固井质量好的10个层段,采用分压合试方式进行地层含油性测试.松页油2HF井试油施工经历关井前钻塞放喷、放喷排液、敞放排液、电泵排液,开井后放喷排液、敞放排液、洗井冲砂、冲砂后敞放排液、抽汲排液求产和求最大日出油量共10个阶段,共计排液2979.38 m<sup>3</sup>,总排油197.99 m<sup>3</sup>,返排率为17.42%;抽汲求产,抽深1230 m,动液面930~940 m,抽次18次,获得10.06 m<sup>3</sup>/d高产工业油流.

#### (3)三肇凹陷松页油3井

优选并确定松页油3井青山口组一段23、25和27号层,3层厚42.5 m,为本井的地质和工程双甜点层段,进行地层含油气性测试.松页油3井试油经历了4个阶段放喷抽汲排液和2次关井压力恢复,累计排液915.65 m<sup>3</sup>,累计出油109.64 m<sup>3</sup>,总返排率37.75%;采用抽深1880 m,动液面1680 m/12次工作制度,获得3.46 m<sup>3</sup>/d工业油流.

### 3 页岩油勘查地质理论认识

#### 3.1 页岩油目标区和井位优选的综合评价体系

提出了松辽盆地北部页岩油有利目标区和井位优选的七性六要素综合评价体系.岩性、物性、电性、含油性、烃源岩特征、脆性、地应力七性关系综合分析研究表明,齐家、古龙凹陷是页岩油勘探最有利地区,三肇凹陷是页岩油勘探的有利区;有机碳、有机质成熟度、含油指数、压力系数、脆性矿物含量、储层气测异常厚度六要素优选了钻探目标,在齐家、古龙、三肇三大凹陷部署了5口页岩油参数井,均获得成功.

#### 3.2 页岩油富集规律新认识和勘探思路创新

提出了页岩油主要发育在深湖相泥页岩储层的新认识.松页油1井和松页油2井钻探表明,目的层青山口组一段泥页岩十分发育,泥岩裂缝、砂条、介形虫层不发育.青一段泥页岩中S<sub>1</sub>含量高,松页油1井最高达19.2×10<sup>-3</sup>,松页油2井最高达12.6×10<sup>-3</sup>;青一段泥页岩的含油性和物性自上而下逐渐变好,青一段下部最好.依据松页油1井、松页油2井、松页油3井和松页油地1井钻探成果,重新认识青一段页岩油储层特征,研究表明,青一段泥页岩基质储层物性和含油性自上而下明显变好,青一段下部发育的泥页岩是页岩油最主要的富集层段.依据页岩油富集层段的新认识,提出了深湖区发育的巨厚泥页岩具有丰富的页岩油资源,是页岩油勘探的主要目的层.因此改变勘探思路,由以往寻找分布局限的泥岩裂缝、砂条、介形虫层储层,转向寻找分布广泛的含油性好、纹层发育的泥页岩储层.试油结果表明,两口直井都获得工业油流.勘探思路创新,是页岩油战略调查获得重大突破的关键.

#### 3.3 页岩油富集地质理论认识

创新提出沉积环境控源、沉积相控类、有机碳热演化和岩相控油的页岩油富集地质理论认识.松辽盆地大型湖泊的深湖还原环境,控制了青一段泥页岩的沉积和有机质保存;半深湖—深湖相和前三角洲相控制了基质型页岩油,三角洲外前缘控制了夹层型页岩油,三角洲内前缘控制了砂岩型页岩油;有机碳、热演化和岩相控制了页岩油的富集和分布,明确了纹层、TOC是优质储层发育和页岩油富集的主控因素,中—高有机质泥页岩是页岩油主要赋层位.

#### 3.4 页岩油地质和工程甜点评价体系

建立了基于储集性、含油性、流动性和可压性的页

岩油甜点评价体系. 利用松页油 1 井、松页油 2 井、松页油 3 井 3 口直井和松页油 1HF 井、松页油 2HF 井 2 口水平井录井、测井、分析化验获得的物性、含油性、可动性和脆性数据,综合研究,优选了 3 口直井和 2 口水平井试油压裂的地质、工程双甜点,5 口井全部获得工业油流.

### 3.5 页岩油资源潜力

优选了页岩油资源量计算参数和计算方法,重新计算齐家、古龙、三肇重点凹陷页岩油资源量. 采用含油饱和度法计算参数、体积法计算齐家凹陷青一段页岩油资源量为  $19.79 \times 10^8$  t, 古龙凹陷青一段页岩油资源量为  $27.29 \times 10^8$  t, 三肇凹陷青一段页岩油资源量为  $32.54 \times 10^8$  t, 三大凹陷页岩油总资源量  $79.62 \times 10^8$  t. 页岩油资源量潜力巨大,具有良好的勘探开发潜力.

## 4 页岩油勘查技术

### 4.1 钻井液体系

探索形成了陆相泥页岩储层高效钻进的直井水基钻井液体系、水平井油基泥浆钻井液体系. 松页油 1 井、松页油 2 井和松页油 3 井 3 口直井钻井采用了氯化钾聚胺型水基钻井液体系,在出现井下掉块、井壁失稳的情况下,及时上提钻井液密度,同时增加抑制材料和封堵材料,顺利完成 3 口直井施工. 由于环保原因,松页油 2HF 井是利用 NAPG 水基钻井液完成的国内第一口陆相泥页岩储层的水平井,在施工过程中频繁发生掉块、阻卡、憋泵等一系列问题,严重影响了工程进度. 尽管摸索和创新一系列技术措施,最终完成了钻探施工,但是耗费时间长,投入资金大,难以保证高效进行页岩油水平井钻探工作. 借鉴松页油 2HF 井钻探经验,松页油 1HF 井钻井液由水基泥浆改为油基泥浆,安全、环保、高效完成了钻探施工.

### 4.2 储层改造组合技术和工艺流程

探索形成了覆膜石英砂、酸性压裂液体系、段塞加砂、纤维加砂、液态  $\text{CO}_2$  增能的储层改造组合技术和工艺流程. 针对泥页岩储层改造的四大难点——黏土矿物含量较高,支撑剂易嵌入;地层塑性较强,加砂难度大,易砂堵;应力差值较大,很难形成复杂缝网;储层物性较差,压裂液返排难度大——制定详细的储层改造措施:采用纤维加树脂覆膜砂、羧甲基羟丙基肌胶酸性压裂液体系、段塞加砂、纤维加砂、液态  $\text{CO}_2$  增能组

合新技术,进行体积压裂改造. 形成针对陆相泥页岩储层改造的压裂工艺流程:采用大液量、小粒径、低砂比、小台阶加砂模式,增加冻胶液用量的比例,在滑溜水携粉陶阶段增加冻胶液段塞,滑溜水携中砂阶段控制砂比在 8% 以内,胶液携砂采用台阶递增砂比的方法.

### 4.3 提高排采效率新工艺和新方法

探索形成针对常压、中等热演化地区陆相泥页岩储层的压裂液伴注互溶剂等提高排采效率新工艺和新方法. 借鉴松页油 1 井、松页油 2 井两口直井和松页油 1HF 井、松页油 2HF 井两口水平井地层含油气性测试的成功经验,在采用 CMHPG 压裂液体系、前置液态  $\text{CO}_2$  增能工艺技术、树脂覆膜石英砂、纤维伴注加砂等技术的同时,针对松页油 3 井目的层成岩作用差的特点,在松页油 3 井压裂施工中,有针对性地采用了 3 项新技术、新方法:一是前置液伴注互溶剂技术,添加互溶剂,助排效果明显;二是改进纤维加入装置,伴注纤维加砂阶段,纤维加水浸泡注入,解决了成团堵塞问题;三是进一步优化返排液排采制度,压裂规模在液体  $2\ 000\ \text{m}^3$ 、砂量  $100\ \text{m}^3$  砂的情况下,放喷阶段控制返排速度小于  $50\ \text{m}^3/\text{d}$ ,抽汲阶段液面下降控制在  $200\ \text{m/d}$  以下的工作制度,松页油 3 井获得工业油流.

### 4.4 试油排采工作制度

探索出了适合于陆相页岩油储层的试油排采工作制度. 页岩油储层物性较差,压裂后返排阶段需要制定适当的排采制度,保证储层压力平稳,裂缝才能一直保持开启不闭合,出液量就能稳定. 松页油 2HF 井前期排采制度不当造成出液量减少,调整排采制度,后期抽汲排液出液量稳定,并成功进行求产. 依据页岩油储层物性特点,借鉴松页油 2HF 井的排采经验,确定了压裂规模在  $17\ 000\ \text{m}^3$  液、 $700\ \text{m}^3$  砂的情况下,单日报降在  $0.5\ \text{MPa}$  左右,单日报液量小于  $50\ \text{m}^3$  的排采制度,松页油 1HF 井试油自喷,见到好效果.

## 5 结论

(1)松页油 1 井、松页油 2 井、松页油 3 井压后抽汲分别获得  $3.22, 4.93, 3.46\ \text{m}^3/\text{d}$  的工业油流,松页油 1HF 井压后自喷获得  $14.37\ \text{m}^3/\text{d}$ ,松页油 2HF 井压后抽汲获得  $10.06\ \text{m}^3/\text{d}$  高产工业油流,实现了陆相页岩油战略调查重大突破.

(2) 创新形成了陆相页岩油富集地质理论认识。一是提出了松辽盆地北部页岩油有利目标区和井位优选的综合评价体系;二是提出了页岩油主要发育在深湖相泥页岩储层的新认识;三是创新提出沉积环境控源、沉积相控类、有机碳热演化和岩相控油的页岩油富集地质理论认识;四是建立了基于储集性、含油性、流动性和可压性的页岩油甜点评价体系;五是优选了页岩油资源量计算参数和计算方法,重新计算齐家、古龙、三肇重点凹陷页岩油资源量  $79.62 \times 10^8$  t。

(3) 创新形成了陆相泥页岩钻探、储层改造、排采技术体系。一是探索形成了陆相泥页岩储层高效钻进的直井水基钻井液体系、水平井油基泥浆钻井液体系;二是探索形成了覆膜石英砂、酸性压裂液体系、段塞加砂、纤维加砂、液态  $\text{CO}_2$  增能的储层改造组合技术和工艺流程;三是探索形成针对常压、中等热演化地区陆相泥页岩储层的压裂液伴注互溶剂等提高排采效率新工艺和新方法;四是探索出了适合于陆相页岩油储层的试油排采工作制度。

#### 参考文献(References):

- [1] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.  
Zhang J C, Lin L M, Li Y X, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [2] 宋国奇, 张林晔, 卢双舫, 等. 页岩油资源评价技术方法及其应用[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 221-228.  
Song G Q, Zhang L Y, Lu S F, et al. Resource evaluation method for shale oil and its application [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 221-228.
- [3] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.  
Zou C N, Yang Z, Cui J W, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [4] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184-196.  
Jiang Z X, Zhang W Z, Liang C, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [5] 周庆凡, 杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 541-540, 570.  
Zhou Q F, Yang G F. Definition and application of tight oil and shale oil terms [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541-540, 570.
- [6] 杨智, 侯连华, 陶士振, 等. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 555-565.  
Yang Z, Hou L H, Tao S Z, et al. Formation conditions and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 555-565.
- [7] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568.  
Du J H, Hu S Y, Pang Z L, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.
- [8] 付金华, 牛小兵, 徐黎明, 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 J H, Niu X B, Xu L M, 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.
- [9] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10.  
Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.
- [10] Soeder D J. The successful development of gas and oil resources from shales in North America [J]. J Petrol Sci Eng, 2018, 163: 399-420.
- [11] 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 L Y, Li J Y, Li Z, 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.
- [12] 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 M W, Ma X X, Jiang Q G, 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.
- [13] 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 C N, Pan S Q, Jing Z H, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [14] US Energy Information Administration. Technically recoverable shale gas and shale oil resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States [OL]. EIA/ARI World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment, <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/overview>, 2013.
- [15] 边瑞康, 武晓玲, 包书景, 等. 美国页岩油分布规律及成藏特点[J].

- 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(1): 1-14.
- Bian R K, Wu X L, Bao S J, et al. Distribution law and reservoir forming characteristics of shale oil in America [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(1): 1-9.
- [16] 陈晓智, 陈桂华, 肖钢, 等. 北美 TMS 页岩油地质评价及勘探有利区预测 [J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 77-84.
- Chen X Z, Chen G H, Xiao G, et al. Geological evaluation prediction of favorable exploration zones of TMS shale oil in North America [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 77-84.
- [17] 柳波, 吕延防, 冉清昌, 等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 280-285.
- Liu B, Lv Y F, Ran Q C, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 280-285.
- [18] 李士超, 张金友, 公繁浩, 等. 松辽盆地北部上白垩统青山口组泥岩特征及页岩油有利区优选 [J]. 地质通报, 2017, 36(4): 654-663.
- Li S C, Zhang J Y, Gong F H, et al. The characteristics of mudstones of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and favorable area optimization of shale oil in the north of Songliao Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 654-663.
- [19] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 828-838.
- Liu B, Shi J X, Fu X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 1-11.
- [20] 崔宝文, 蒙启安, 白雪峰, 等. 松辽盆地北部石油勘探进展与建议 [J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(3): 1-9.
- Cui B W, Meng Q A, Bai Y F, et al. Petroleum exploration progress and suggestions for north Songliao Basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 1-9.
- [21] 吴河勇, 林铁锋, 白云风, 等. 松辽盆地北部泥(页)岩油勘探潜力分析 [J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 78-86.
- Wu H Y, Lin T F, Bai Y F, et al. Analyses of the mudstone (shale) oil exploration potential in North Songliao Basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 78-86.
- [22] 张君峰, 徐兴友, 白静, 等. 松辽盆地白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 47(4): 1-16.
- Zhang J F, Xu X Y, Bai J, et al. Enrichment and exploration of deep lacustrine shale oil in the First Member of Cretaceous Qingshankou Formation, southern Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 47(4): 1-16.
- [23] 宁方兴. 济阳凹陷页岩油富集主控因素 [J]. 石油学报, 2015, 36(8): 905-914.
- Ning F X. The main control factors of shale oil enrichment in Jiyang depression [J]. Acta Petroli Sinica, 2015, 36(8): 905-914.
- [24] 卢双舫, 陈国辉, 王民, 等. 辽河坳陷大民屯凹陷沙河街组四段页岩油富集资源潜力评价 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 1-13.
- Lu S F, Chen G H, Wang M, et al. Potential evaluation of enriched shale oil resource of Member 4 of the Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaohe Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 8-13.
- [25] 王勇, 王学军, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷泥页岩岩相与页岩油富集关系 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 676-704.
- Wang Y, Wang X J, Song G Q, et al. Genetic connection between mud shale lithofacies and shale oil enrichment in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 696-704.
- [26] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 陆相湖盆页岩层系基本地质特征与页岩油勘探——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段一亚段为例 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 361-372.
- Zhao X Z, Zhou L H, Pu X G, et al. Geological characteristics of shale rock system and shale oil exploration in a lacustrine basin: A case study from the Paleogene 1st sub-member of Kong 2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 361-372.
- [27] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集规律认识及勘探实践 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 225-235.
- Song M S, Liu H M, Wang Y, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 225-235.
- [28] 杨华, 牛小兵, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油勘探潜力 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 512-520.
- Yang H, Niu X B, Xu L M, et al. Exploration potential of shale oil in Chang7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 512-520.
- [29] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 524-534.
- Zhi D M, Tang Y, Yang Z F, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 524-534.
- [30] 高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- Gao R Q, Cai X Y. Formation conditions and distribution of oil and gas fields in Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 321. (in Chinese)

- [22]Chen X Y, Li M H, Sperling E A, et al. Mesoproterozoic paleo-redox changes during 1500–1400? Ma in the Yanshan Basin, North China [J]. *Precambrian Research*, 2020, 347: 105835.
- [23]Zhang S H, Li Z X, Evans D A D, et al. Pre-Rodinia supercontinent Nuna shaping up: A global synthesis with new paleomagnetic results from North China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 353–354: 145–155.
- [24]李怀坤, 张健, 田辉, 等. 华北克拉通北缘燕辽裂陷槽中-新元古代地层年代学研究进展[J]. *地质调查与研究*, 2020, 43(2): 127–136.  
Li H K, Zhang J, Tian H, et al. Recent advances in the study of the Meso- to Neoproterozoic chronostratigraphy of the Yanliao Aulacogen on the northern margin of the North China Craton [J]. *Geological Survey and Research*, 2020, 43(2): 127–136.
- [25]Su W B, Zhang S H, Huff W D, et al. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised subdivision of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(3): 543–553.
- [26]Li H K, Lu S N, Su W B, et al. Recent advances in the study of the Mesoproterozoic geochronology in the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 216–227.
- [27]McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2(4): 2000GC000109.
- [28]Taylor S R, McLennan S M. *The continental crust: its composition and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [29]Alibo D S, Nozaki Y. Rare earth elements in seawater: particle association, shale-normalization, and Ce oxidation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3/4): 363–372.
- [30]祁钰, 顾尚义, 赵凤其. 南华盆地南沱冰期海水氧化还原特征 [JOL]. *沉积学报*. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=CJXB20210125000>, 2021-01-26.  
Qi Y, Gu S Y, Zhao F Q. Redox characteristics of marine environment of Nantuo Glaciation, Nanhua Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=CJXB20210125000>, 2021-01-26.
- [31]Frimmel H E. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator [J]. *Chemical Geology*, 2009, 258(3/4): 338–353.
- [32]De Baar H J W, Bacon M P, Brewer P G, et al. Rare earth elements in the Pacific and Atlantic Oceans [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(9): 1943–1959.
- [33]Bau M, Möller P, Dulski P. Yttrium and lanthanides in eastern Mediterranean seawater and their fractionation during redox-cycling [J]. *Marine Chemistry*, 1997, 56(1/2): 123–131.
- [34]Zhang T, Sun S L, Sun Q S, et al. Geochemical characteristics of the lower Jurassic black shales in the Jinyang Basin, Northeast China: Implications for organic matter accumulation [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 360(1): 012051.
- [35]Morford J L, Emerson S. The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(11/12): 1735–1750.
- [36]Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111–129.
- [37]Elderfield H, Greaves M J. The rare earth elements in seawater [J]. *Nature*, 1982, 296(5854): 214–219.
- [38]Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, et al. Applying sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of organic-rich shale deposition in the Sichuan Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 163: 52–71.
- [39]Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/3): 65–82.
- [40]Algeo T J, Li C. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 8–26.
- [41]Crockford P W, Hayles J A, Bao H M, et al. Triple oxygen isotope evidence for limited mid-Proterozoic primary productivity [J]. *Nature*, 2018, 559(7715): 613–616.

(上接第 238 页 / Continued from Page 238)

- [31]白静, 徐兴友, 陈珊, 等. 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段沉积相特征与古环境恢复——以吉页油 1 井为例 [J]. *中国地质*, 2020, 47(1): 220–235.  
Bai J, Xu X Y, Chen S, et al. Sedimentary characteristics and paleo-environment restoration of the first member of Qingshankou Formation in Qian'an area, Changling sag, Songliao Basin: A case study of Jiyeou 1 Well [J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 220–235.
- [32]高瑞祺. 泥岩异常高压带油气的生成排出特征与泥岩裂缝油气藏的形成 [J]. *大庆石油地质与开发*, 1984, 3(1): 160–167.  
Gao R Q. Characteristics of petroleum generation and expulsion in abnormal pressure shale zones and the formation of fractured shale reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1984, 3(1): 160–167.
- [33]杨建国, 李士超, 姚玉来, 等. 松辽盆地北部陆相页岩油调查取得重大突破 [J]. *地质与资源*, 2020, 29(3): 300.  
Yang J G, Li S C, Yao Y L, et al. Significant breakthrough in the continental shale oil survey in northern Songliao basin [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(3): 300.