

引用: 杨阳, 郑兴范, 肖毓祥, 等. 中国石油中高成熟度页岩油勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 23-33.

Yang Yang, Zheng Xingfan, Xiao Yuxiang, et al. Progress in exploration and development of high-mature shale oil of PetroChina[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 23-33.

# 中国石油中高成熟度页岩油勘探开发进展

杨阳<sup>1</sup> 郑兴范<sup>2</sup> 肖毓祥<sup>1</sup> 雷征东<sup>1</sup> 邢厚松<sup>2</sup> 熊铁<sup>2</sup> 刘明杨<sup>2</sup> 刘书剑<sup>1</sup>  
侯鸣秋<sup>1</sup> 张亚丽<sup>1</sup>

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油油气和新能源分公司)

**摘要:** 页岩油是保障国家长期稳产和上产的重要战略资源, 中国石油在鄂尔多斯、准噶尔、松辽等盆地均已取得重大勘探突破, 发现不同岩相组合类型的页岩油。为确保我国原油  $2 \times 10^8$  t 稳产、提升国家能源安全保障能力, 2021 年中国石油加大页岩油勘探开发力度, 取得了 4 项进展: (1) 规模开发陇东页岩油, 建成陇东页岩油百万吨整装示范区; (2) 推进新疆吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区与大庆古龙陆相页岩油国家级示范区建设, 吉木萨尔页岩油产能跃上百万吨、古龙页岩油开启纯页岩型页岩油新篇章; (3) 持续加大新区勘探力度, 多个盆地勘探取得历史性突破; (4) 理论、技术和管理持续创新, 提质增效见到明显效果。总体来看, 不同类型的页岩油还处于不同的勘探开发阶段, 但距离实现规模效益开发目标还有差距。

**关键词:** 页岩油; 中高成熟度; 国家示范区; 阶段认识; 挑战与对策

中图分类号: TE122.11 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.03.003

## Progress in exploration and development of high-mature shale oil of PetroChina

Yang Yang<sup>1</sup>, Zheng Xingfan<sup>2</sup>, Xiao Yuxiang<sup>1</sup>, Lei Zhengdong<sup>1</sup>, Xing Housong<sup>2</sup>, Xiong Tie<sup>2</sup>, Liu Mingyang<sup>2</sup>, Liu Shujian<sup>1</sup>,  
Hou Mingqiu<sup>1</sup>, Zhang Yali<sup>1</sup>

(1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 PetroChina Oil, Gas & New Energies Company)

**Abstract:** Shale oil is an important strategic resource to ensure the long-term steady oil production and production growth in China. PetroChina has made significant exploration breakthroughs in Ordos, Junggar, and Songliao basins, and has discovered shale oil with various lithofacies association types. In order to ensure the steady oil production of  $2 \times 10^8$  t/a and improve the security of national energy supply, PetroChina strengthened its efforts in shale oil exploration and development in 2021 and achieved progress in four aspects: (1) The large-scale shale oil development has been conducted in Longdong area, and an integral shale oil demonstration zone has been established with a capacity of one million tons; (2) The construction of Xinjiang Jimsar and Daqing Gulong National Continental Shale Oil Demonstration Zones has been promoted, obtaining shale oil production capacity of up to one million tons in Jimsar area and opening a new chapter in pure type shale oil development in Gulong area; (3) Great efforts have continuously been made in new areas, and historic exploration breakthroughs have been achieved in several basins; (4) The theory, technology, and management have continuously been innovated, obtaining significant results in quality and efficiency improvement. On the whole, the exploration and development different types of shale oil are still in different stages, but there is still a gap to achieve the large-scale benefit development.

**Key words:** shale oil, middle-high maturity, national demonstration zone, stage understanding, challenge and countermeasure

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“古龙页岩油开发渗流理论与提高采收率机理研究”(U22B2075)。

第一作者简介: 杨阳(1988—), 男, 河北任丘人, 博士, 2016年毕业于中国石油大学(北京), 高级工程师, 现主要从事页岩油/致密油体积开发方面的研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院致密油所, 邮政编码: 100083。E-mail: lomen@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-05-30; 修改日期: 2023-04-20

## 0 引言

自“十三五”以来,我国原油消费量稳居世界第2位,但目前国内石油勘探开发面临着“优质石油储量发现难、已开发主力油田产量稳定难”的挑战,国内的原油产量远不能满足需求量,2021年我国石油对外依存度攀升至72%。页岩油资源是能源重大战略接替领域,美国为应对石油高对外依存度,依靠页岩革命实现了能源独立,一跃成为全球第一大石油生产国。而我国页岩油虽然具有雄厚的资源基础,技术可采总量在全世界范围内仅次于美国和俄罗斯,但由于构造条件复杂、多期构造破坏剧烈,储层黏土矿物含量较高,地层压力系数较低,以及流体黏度高、气油比低等陆相页岩油特点,与北美页岩油开发效果相比还存在很大差距,暴露出产量和压力递减快、单井EUR低、不满足效益开发等问题。

目前国际上对页岩油定义尚无统一标准,国家标准化委员会实施的《页岩油地质评价方法》(GB/T 38718—2020)中对页岩油做出了定义<sup>[1-9]</sup>。按页岩层系热成熟度,我国陆相页岩油可分为中高成熟度页岩油( $R_o=1.0\%\sim 1.5\%$ )和中低成熟度页岩油( $R_o=0.5\%\sim 1.0\%$ )两类<sup>[10-21]</sup>。中高成熟度页岩油是现阶段最具现实意义的开发对象,其甜点的主要类型可划分为夹层型、混积型和页岩型3种<sup>[22]</sup>,其

中夹层型页岩油甜点的典型代表为鄂尔多斯盆地延长组长7<sub>1+2</sub>亚段,混积型页岩油甜点的典型代表为准噶尔盆地吉木萨尔芦草沟组芦一段,页岩型页岩油甜点的典型代表为松辽盆地古龙青山口组青一段。夹层型页岩油甜点的认识、开发工程、工艺技术已基本成型,混积型页岩油甜点已实现局部有利区成功开发,页岩型页岩油甜点在多个地区均有突破。本文通过总结“十四五”开局之年中国石油在鄂尔多斯、准噶尔、松辽等盆地的勘探开发进展,揭示了页岩油示范区的开发认识,提出页岩油规模效益开发面临的挑战与对策,对实现页岩油“十四五”目标具有重要的指导意义。

## 1 中高成熟度页岩油勘探开发概况

### 1.1 整体勘探开发形势良好,展现增储上产前景

我国陆上中高成熟度页岩油资源量丰富,初步评价结果为 $283\times 10^8\text{t}$ ,其中中国石油矿权区为 $201\times 10^8\text{t}$ 。截至2021年底,中国石油在多个盆地的页岩油领域取得了突破性进展(表1),其中鄂尔多斯盆地庆城油田和准噶尔盆地吉木萨尔凹陷已实现工业化开发,松辽盆地古龙凹陷单井产量取得突破,开发技术尚在探索,其他盆地、区块页岩油也快速发展,先后突破出油关。

表1 中国石油各盆地中高成熟度页岩油统计表

Table 1 Statistics of medium-high mature shale oil of PetroChina in various basins

盆地	地区(区块)	层系	面积/ $10^4\text{km}^2$	地质资源量/ $10^8\text{t}$
鄂尔多斯	陇东、陕北	延长组长7段	6.5	60.5
准噶尔	吉木萨尔	芦草沟组	6.4	25.1
	玛湖	风城组		
渤海湾	沧东	孔店组孔二段	0.6	30.9
	歧口	沙河街组沙一段、沙三段	2.3	
三塘湖	条湖、马朗	芦草沟组	0.36	3.9
松辽	古龙	青山口组青一段、青二段	9.2	54.5
	大情字井等			
柴达木	英雄岭	干柴沟组	1.1	5.9
四川	川渝	凉高山组、自流井组	14	20.2

针对中高成熟度页岩油, 中国石油各地区累计提交三级储量约  $40 \times 10^8 \text{t}$ , 其中鄂尔多斯盆地庆城油田累计探明地质储量超过  $10 \times 10^8 \text{t}$ , 松辽盆地古龙新增预测储量  $12.68 \times 10^8 \text{t}$ , 准噶尔盆地玛湖风城组落实预测储量  $1.24 \times 10^8 \text{t}$ 。

截至2021年底, 中国石油各油田累计完钻页岩油水平井1682口, 产能建设进一步加快, 年度产量快速攀升至  $257 \times 10^4 \text{t}$ , 年增长率达到了38% (图1), 其中长庆油田和新疆油田的产量占比约为90%。

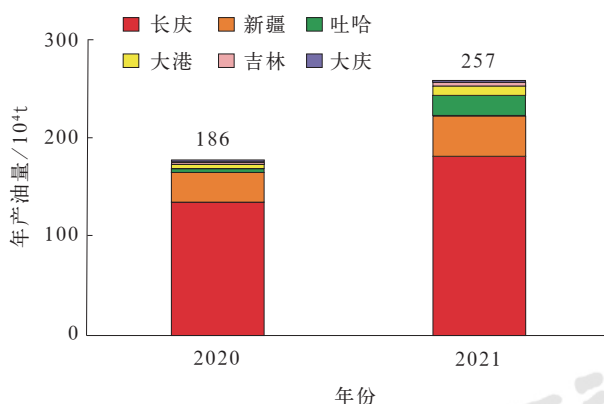


图1 2020—2021年中国石油各油田页岩油产量构成与对比图

Fig.1 Comparison of shale oil production of various PetroChina companies during the 2020–2021

## 1.2 重点地区推进顺利, 成效显著

### 1.2.1 长庆庆城页岩油快速上产, 已建成百万吨整装示范区

庆城油田是国内规模最大页岩油田, 自2018年至2021年底规模建设以来, 水平井水平段长度逐年增加, 由平均1596m提升至1783m, 其中H90-3井水平段长度为5060m, 刷新亚洲最长水平段长度纪录。初期单井平均日产油超过14t, 目前页岩油年产量跃上  $100 \times 10^4 \text{t}$ , 建成百万吨陇东页岩油示范区。

### 1.2.2 新疆吉木萨尔页岩油扎实推进, 量效齐增

新疆吉木萨尔芦草沟组页岩油不断精细甜点评价, 扩大压裂规模, 建成产能跃上百万吨, 年产量突破  $42 \times 10^4 \text{t}$ 。2021年58号平台新投井开井即见油, 初期单井日产油峰值达57t, 投产半年平均日产油34t, 增产效果显著, 其中JHW05815井投产一年, 累计产油量超  $1 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

### 1.2.3 大庆古龙页岩油获重大战略突破, 开启纯页岩型新篇章

大庆古龙页岩油平1井7mm油嘴放喷日产油30.5t, 获得重大战略突破, 习近平总书记针对大庆

古龙页岩油做出重要批示, 大力推进古龙页岩油先导试验。2021年8月古龙陆相页岩油国家级示范区揭牌, 标志着大庆油田古龙页岩油发展迈入新阶段。2021年先导试验顺利推进, 1号先导试验井组12口井均见油, 最高单井日产油超  $40 \text{m}^3$ 。

### 1.2.4 其他多盆地多类型页岩油亮点纷呈, 实现历史性突破

四川盆地侏罗系凉高山组平安1井10mm油嘴放喷获日产油超  $100 \text{m}^3$ 、日产气超  $10 \times 10^4 \text{m}^3$ , 试采稳定, 揭开了侏罗系页岩油气勘探序幕; 柴达木盆地英雄岭干柴沟组柴平1井4mm油嘴放喷获油超  $100 \text{m}^3$ , 展现出规模效益开发巨大潜力; 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组玛页1井获  $50.6 \text{m}^3/\text{d}$  高产, 长期试采稳产, 有望继吉木萨尔之后形成新的亿吨级页岩油资源接替区; 渤海湾盆地沧东GY5-1-1L井孔二段试油日产量达  $208 \text{m}^3$ , 歧口歧页1H井沙一下亚段获  $41.16 \text{t}/\text{d}$  高产油流, 预测资源量为  $3.65 \times 10^8 \text{t}$  [23]。

## 1.3 理论、技术和管理持续创新, 提质增效见到明显效果

中国石油历经10余年研究探索, 初步创立了“中国陆相页岩油富集地质理论”和“中国陆相页岩油体积开发理论”。针对陆相页岩“生油”“储油”“富油”的重大科学问题, “中国陆相页岩油富集地质理论”创建了陆相富有机质页岩沉积模式, 发现了页岩纳米级孔喉储油系统, 揭示了“连续型”页岩油甜点区/段富集规律; 针对陆相页岩油开发机理、模式等问题, “中国陆相页岩油体积开发理论”构建了“人工油气藏”, 人工干预实现页岩油规模有效开发, 其内涵是通过水平井大规模体积压裂改造, 形成复杂缝网体系, 将单一储层基质改造为主压裂缝—一次压裂缝—基质多重介质, 建立人造高渗区, 大幅度改变储层流体渗流环境 [24–27]。

目前针对长庆庆城页岩油和新疆吉木萨尔页岩油, 通过基础研究和现场试验, 基本形成了地质评价、油藏开发、工程工艺三大技术系列 [28–30], 其他地区的技术适应性正在探索。页岩油地质评价技术系列包括平面甜点优选、纵向黄金靶层优选等关键技术, 例如吉木萨尔页岩油示范区建立了考虑原油黏度、I类油层厚度和可动储量丰度的甜点分类评价体系, 确定了有利甜点区分布, 平面优选富集区  $129.59 \text{km}^2$ ; 页岩油油藏开发技术系列包括地质体精细描述、地质工



程一体化开发部署、能量高效利用与有效补充等关键技术，例如庆城油田创新黄土塬“宽频、宽方位、高密度”三维地震采集技术、形成“高保真、高分辨率”薄储层识别处理技术，砂体识别精度由15m提高到5m，水平井油层钻遇率由72.3%提高至79.3%；页岩油工程工艺技术系列包括水平井钻完井配套、体积压裂2.0等关键技术，例如新疆吉木萨尔58号平台升级体积压裂技术，平均完井工期为49.9天，平均指标缩短48%，50天完成全部312级施工，总施工用量为 $55.1\times 10^4\text{m}^3$ 、加砂量为 $5.74\times 10^4\text{m}^3$ ，平均单井用量超 $7\times 10^4\text{m}^3$ 、加砂量为 $7000\text{m}^3$ ，簇间距从10~15m缩小至5.8m，段间距从76m缩小至45m，平均加砂强度为 $4.0\text{m}^3/\text{m}$ ，打造了单井加砂量、一次性拉链式作业井数、单日施工级数等多个国内第一。

各油田转变思维，持续创新管理模式，实现降本增效目标。例如新疆吉木萨尔页岩油全面下放15项经营自主权，打造油田开发生产的改革开放“特区”，通过开展钻井费用对标、放开钻井市场等工作，与国内多家钻井单位进行谈判，最终选定工程施工单位，使得单井钻井工程总费用下降56.7%，将压裂大包模

式改为压裂施工及准备、压裂液技术服务、支撑剂、射孔及桥塞服务4个标段分别招标，选商谈判后压裂费用下降42%，最终单井投资较2019年降幅40%。

2 页岩油示范区开发认识

2018年以来，长庆油田在陇东开展页岩油示范区（陇东示范区）建设，国家能源局先后批复设立了新疆吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区（吉木萨尔示范区）和大庆古龙陆相页岩油国家级示范区（古龙示范区），3个示范区分别代表了3种甜点类型的页岩油，开发取得认识对其他地区页岩油建产具有重要的指导意义。

2.1 陇东页岩油示范区开发认识

长庆陇东示范区位于鄂尔多斯盆地西南部，延长组长7段为半深湖—深湖相细粒沉积、横向连续性较差，平均埋深为1500~3000m，厚度为100~120m，压力系数为0.6~0.8，广泛发育富有机质泥岩、页岩，夹多期薄层砂岩，其中长7<sub>1</sub>亚段、长7<sub>2</sub>亚段为泥页岩夹多期薄层粉—细砂岩的岩性组合，是典型的夹层型页岩油（图2）。

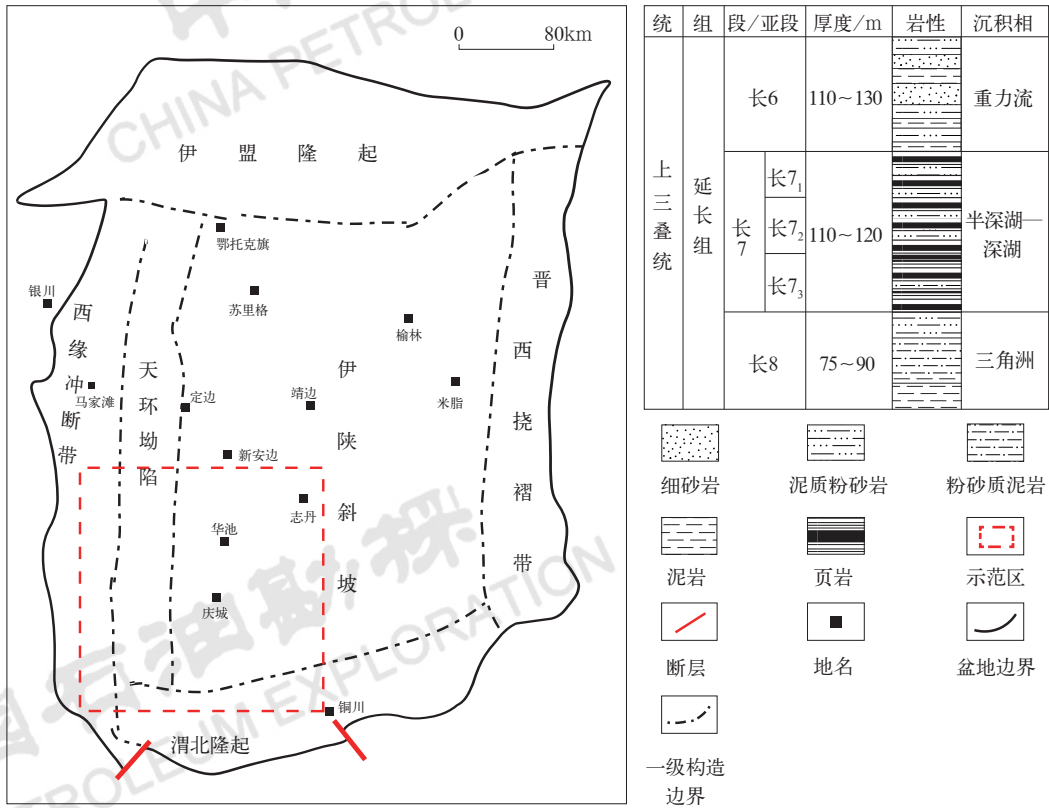


图2 鄂尔多斯盆地构造区划分图（左）及长7段综合柱状图（右）（修改自文献[31]）

Fig.2 Division of structural units in Ordos Basin (left) and comprehensive stratigraphic column of the seventh member of Yanchang Formation (right) (modified after reference [31])

陇东页岩油逐步形成了“长水平井、小井距、立体式、密切割体积压裂”的主体开发技术, 在开发过程中取得了以下认识:

(1) 提升改造技术与地质储层适配性, 可大幅提高单井产量。一是要优化压裂段簇设计, 突出优质甜点改造。示范区投产满半年为 190 口水平井统计结果表明, 百米水平段累计产油量与优质储层改造段数、裂缝密度及单簇改造强度呈正相关, 而随着单段簇数的增多, 百米水平段首年累计产油量先增加后下降(图 3), 大段多簇的压裂改造模式虽然节约了成本, 但对产量有影响。二是要改进压裂方式, 提高起裂效率。受簇间非均质性和应力阴影影响, 多簇

均衡起裂和延伸难度大, 施工特征表现为暂堵升压低、有效时间短。示范区开展绳结暂堵球多簇压裂试验, 避免了常规暂堵剂封堵孔眼用量大、封堵质量差的缺陷, 升压有效作用时间大幅延长, 暂堵有效率由 67.3% 提升至 86.8%。三是要优选压裂液体系, 补能、增产并举。受压裂液影响原油易发生乳化增黏现象, 造成低产, 示范区开展纳米变黏滑溜水体系试验, 试验井注入压裂液超前补充地层能量, 地层压力系数由 0.8 提高至 1.2, 返排液油水界面清晰、无乳化现象, 同时纳米粒子可有效改善储层润湿性, 油水渗吸置换效率由 10% 提升至 37%, 多口井试油效果显著, 其中陇页 1 井日产油超 50t。

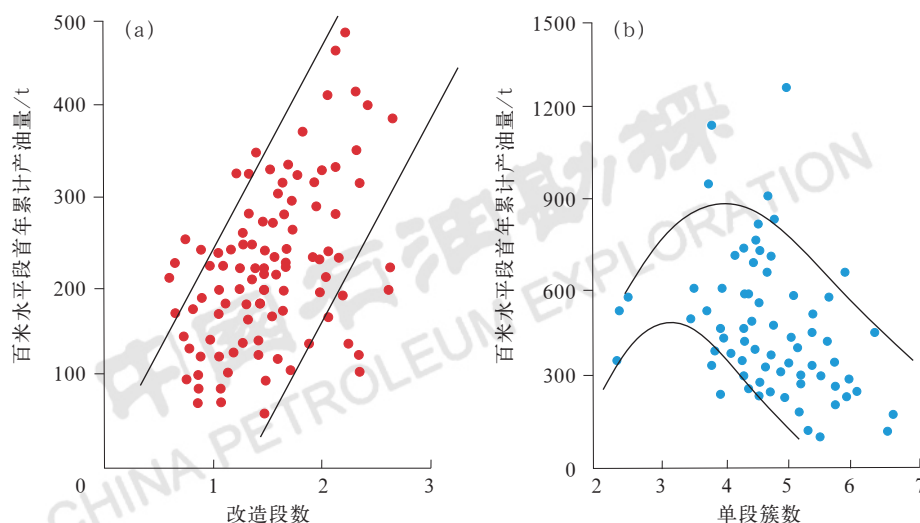


图3 百米水平段首年累计产油量与改造段数及单段簇数关系图

Fig.3 Relationship between cumulative oil production per hundred meters in the first year and the number of fracturing stages and clusters in a single stage

(2) 制定合理开发技术政策, 可降低递减率、提高单井 EUR。一是要综合考虑单井钻井投资、平台整体压裂周期、偏磨及后期采油问题, 优化平台合理井数, 示范区优化结果为 300m 井距单平台单层系部署水平井不超过 8 口, 400m 井距单平台单层系部署水平井不超过 6 口。二是由于大平台建设及井间压裂干扰等原因, 导致焖井时间过长, 易产生结垢, 造成井筒堵塞, 结合焖井压力曲线、岩心渗吸实验、矿场实践, 优化合理焖井时间应为 30~60 天。三是优化放喷排液制度, 示范区明确排液期百米水平段日返排量为  $2.0 \sim 3.0 \text{ m}^3$ , 可有效避免井筒压力激动导致的地层吐砂, 平均单井吐砂量由  $29 \text{ m}^3$  降低至  $18 \text{ m}^3$ 。

(3) 加强经济政策研究, 降本不能以牺牲产量为代价。近年来, 陇东示范区面对投资成本控降要求,

水平井钻井和压裂投资逐年下降, 水平井单井改造段数、进液强度和加砂强度均取下限值, 对单井产量造成影响。为扭转产量下降趋势, 2021 年 8 月以后压裂段数上升, 单段簇数下降, 压裂费用增加, 预测单井 EUR 提高  $0.2 \times 10^4 \text{ t}$  左右。油田开发应在经济效益达标前提下提高产量, 不能为了降低成本而牺牲产量, 因此需要分区、分类确定投资指标及相应的经济政策。

## 2.2 吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区开发认识

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部, 是东部隆起区的一个次级构造单元。吉木萨尔凹陷芦草沟组发育以半深湖—深湖为主的细粒沉积体系, 埋深为 1800~4500m, 压力系数为 1.4~1.6, 陆源碎屑、碳酸盐矿物与少量火山物质混杂堆积, 纵向 170~250m

发育上、下两个甜点段,其中上甜点主要发育在芦二段中上部,优势岩性为云质粉砂岩和粉砂质云岩,下

甜点主要发育在芦一段中上部,粉砂岩与碳质页岩高频互层,是典型的混积型页岩油(图4)。

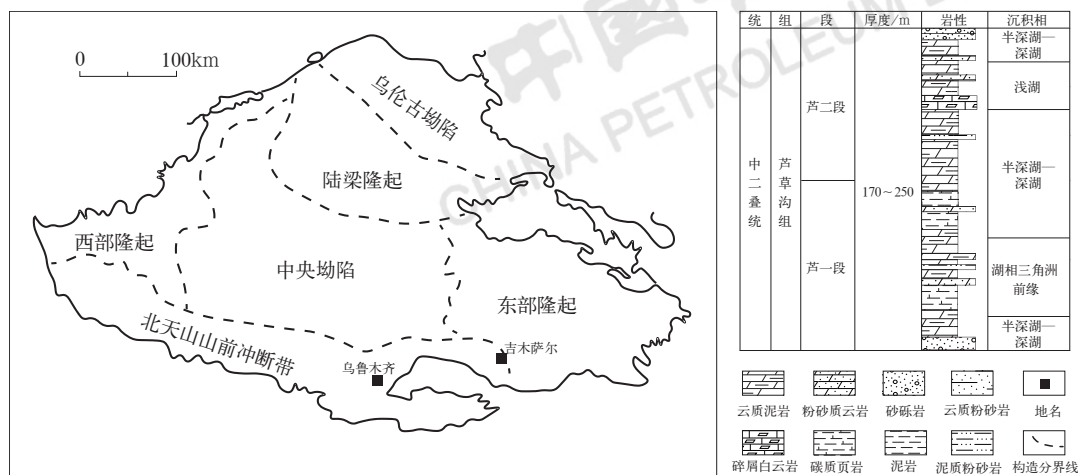


图4 准噶尔盆地构造区划分图(左)及芦草沟组综合柱状图(右)(修改自文献[32])

Fig.4 Division of structural units in Junggar Basin (left) and comprehensive stratigraphic column of Lucaogou Formation (right) (modified after reference [32])

2020年国家能源局、自然资源部联合复函同意设立“新疆吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区”,推动吉木萨尔页岩油进入规模建产阶段,在开发过程中取得了以下认识。

(1) 平面上可动油储量丰度、I类油层厚度、原油黏度是甜点有利区的关键地质参数;纵向上孔隙度、含油饱和度、可压裂性指数等是影响页岩油产量的关键参数,综合评价可将油层划分为3类,I+II类油层是水平井的最优靶体。

(2) 立体井网部署、大规模井群压裂可显著提高单井产量。2021年投产的58号平台对下甜点芦草沟组2-2小层和2-3小层采用小井距、立体式、长井段、小段距、多簇数、大液量、高砂比工艺,平均单井水

平段长1799m、压裂39级300簇、液量为73214m<sup>3</sup>、加砂量为7161m<sup>3</sup>,压裂停泵压力整体提升10MPa左右,单井初期日产量由30t提高至50t以上。

(3) 合理扩大井距,提高单井控制储量,可进一步提高单井EUR。58号平台单井与可对比零散老井相比,含水率下降速度快,但由于井距小(单层200~250m,立体100m),单井控制储量低,产量递减快,相同生产时间/返排率条件下压降较大。利用动态法预测同平台不同井距单井EUR及单井控制储量(图5),结果表明当井距为100m时,单井EUR为(2.6~2.8)×10<sup>4</sup>t,当井距扩大至150~200m时,单井EUR为(3.0~3.2)×10<sup>4</sup>t,当井距扩大至250~300m时,单井EUR为(3.5~3.9)×10<sup>4</sup>t。

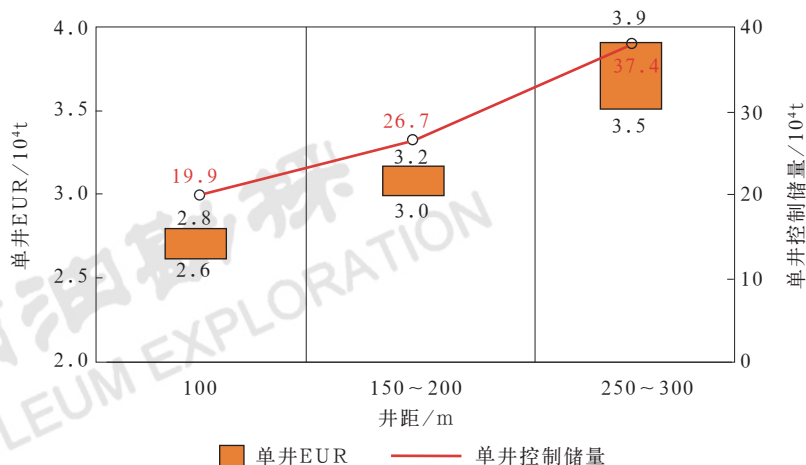


图5 吉木萨尔示范区同平台不同井距下预测单井EUR及单井控制储量图

Fig.5 Predicted single well EUR and controlled reserves with various well spacings on one platform in Jimsar Demonstration Zone

(4) CO<sub>2</sub> 前置压裂可有效提高高黏区单井产量。效益均较好, 预计增油  $1 \times 10^4$ t 以上, 投入产出比达 J10043-H 井采用 CO<sub>2</sub> 前置压裂, 开发效果和经济 1:6.2 (图 6)。

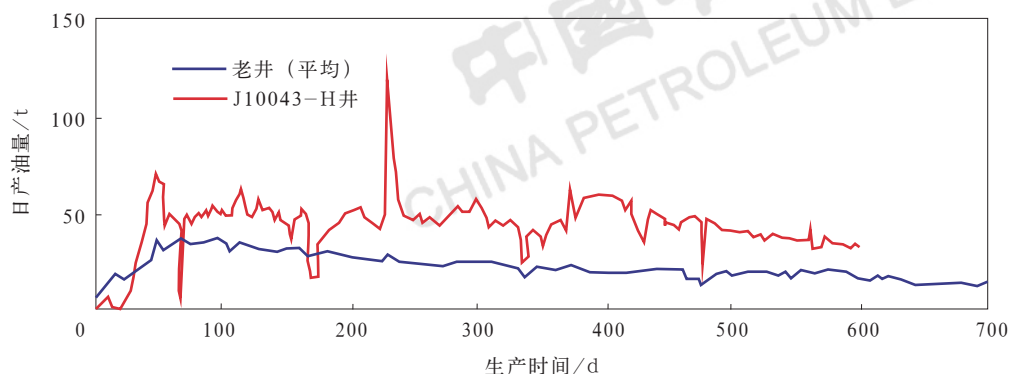


图6 J10043-H 井与老井产量对比图

Fig.6 Comparison of oil production between old well and Well J10043-H

### 2.3 古龙陆相页岩油国家级示范区开发认识

古龙凹陷位于松辽盆地北部, 古龙青山口组青一段为半深湖—深湖相沉积, 埋深为 1800~2400m, 压

力系数为 1.2~1.58, 页岩层系分布连续稳定, 厚度为 100~150m, 页理极其发育, 精细描述结果表明岩心页理达 1000~3000 条 /m, 纵向上含油性变化不大, 整体规模含油, 是典型的页岩型页岩油 (图 7)。

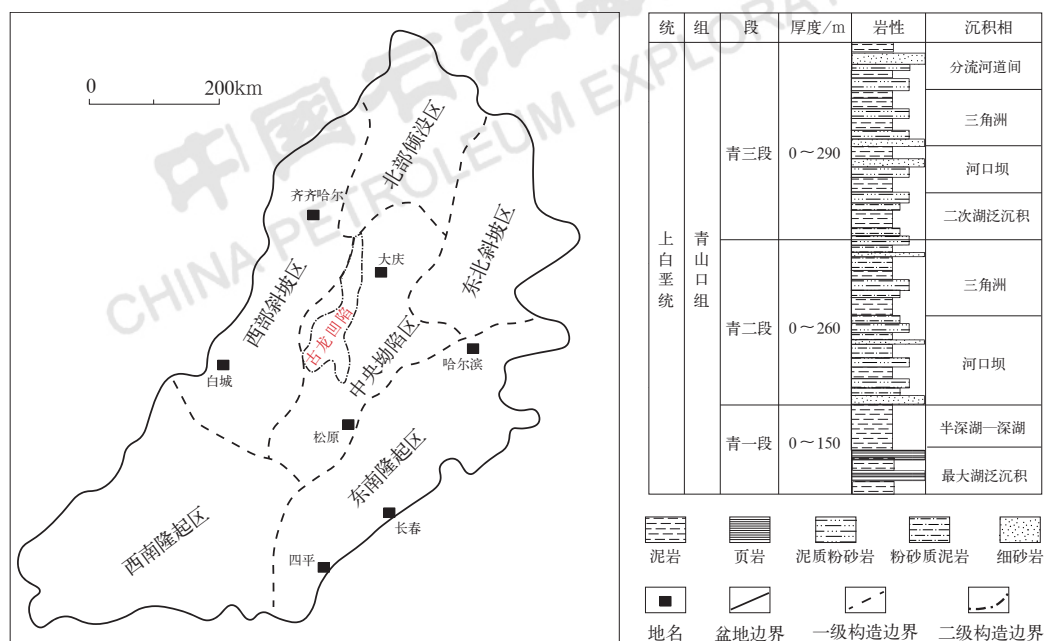


图7 松辽盆地构造区划分图 (左) 及青山口组综合柱状图 (右) (修改自文献 [33])

Fig.7 Division of structural units in Songliao Basin (left) and comprehensive stratigraphic column of Qingshankou Formation (right) (modified after reference [33])

2021 年国家能源局批准正式设立“大庆古龙陆相页岩油国家级示范区”, 部署 5 个先导试验井组, 通过前期探评井及 1 号井组试验取得了以下认识:

(1) 古龙页岩油富有机质页岩 S<sub>1</sub>、氯仿沥青“A”等滞留烃含量均高, 含油性最佳, 但从可动性看, 紧邻优质烃源岩的页岩发育较大孔隙, 石英成层好, 易形成有效孔缝, 轻烃富集。古页岩油平 1 井示踪剂测试

结果显示, 紧邻优质烃源岩的长英质页岩钻遇长度仅占水平段长度的 30%, 但产油贡献约占 60%。

(2) 古龙页岩页理发育, 穿层难度大, 平均缝高为 7~10m, 纵向储量动用程度低; 经全直径物模实验证实压裂后裂缝呈“丰”形, 而非不规则复杂缝网。

(3) 微地震、井口压力、示踪剂等动态监测结果表明, 井距低于 350m, 井间干扰严重, 且井距越小



干扰越明显。例如 1 号试验井组示踪剂监测结果显示 83% 的先导试验水平井存在井间干扰。

(4) 古龙页岩储层整体弱亲水, 以纳米孔喉为主,

导致油相启动压力高, 现场采取放大油嘴、带压下泵等措施增大生产压差, 能有效缩短见油时间 (图 8), 见油后通过调整工作制度稳定生产。

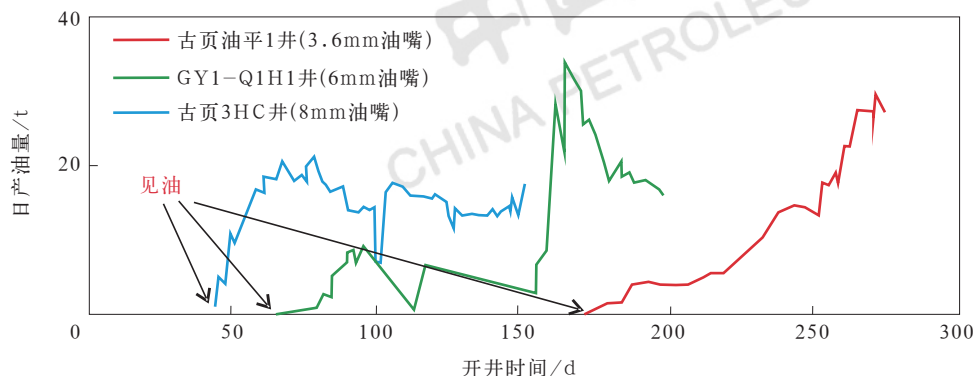


图 8 不同放喷制度下油井生产动态图

Fig.8 Comparison of well production performance with different flow regimes

### 3 开发面临挑战与对策

虽然页岩油勘探开发进展迅速, 在示范区取得了诸多认识和成效, 但目前还不能实现效益开发。例如 2021 年吉木萨尔页岩油阶梯油价效益产能仅为  $20 \times 10^4$  t, 庆城页岩油在 45 美元油价下也无法实现达

标建产, 与北美页岩油相比还存在很大差距, 这主要是由于中国陆相页岩油虽然资源量丰富, 但具有构造条件复杂、多期构造破坏剧烈, 储层黏土矿物含量较高, 地层压力系数较低, 流体黏度高、气油比低等特点 (表 2)。中国石油页岩油要实现“十四五”产量规划下 45 美元效益达标, 还面临开发技术、成本效益和管理模式三方面挑战。

表 2 国内外同类型页岩油储层及流体特征对比表

Table 2 Comparison of reservoir and fluid characteristics of the same type shale oil at home and abroad

储层及流体特征参数	夹层型		页岩型	
	Bakken 油层	鄂尔多斯盆地长 7 <sub>1+2</sub> 亚段	二叠盆地 Wolfcamp 油层	大庆古龙青一段
孔隙度 / %	8~12	6~12	9	6.2
$R_o$ / %	0.6~1.0	0.6~1.1	0.7~1.0	1~1.5
含油饱和度 / %	75~92	70	65~80	60~75
地层原油黏度 / (mPa·s)	0.15~0.45	1.7~1.9	0.15~0.45	<1
黏土矿物含量 / %	—	—	22.8	38
气油比 / (m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	89~240	20~120	700~1200	50~400
地层压力系数	1.35~1.58	0.6~0.8	1.0~1.51	1.2~1.58

#### 3.1 开发技术挑战与对策

虽然中国石油页岩油勘探开发已经过 10 年的探索实践, 但是在目前国内外油气形势下, 依然面对大幅度提高单井产量、提高单井 EUR、提高采收率的需求, 开发上还存在优质储层钻遇率低、改造工艺与储层适配性差、方案实施不达标、产量递减快等问题。

针对这些难题, 需要坚持问题导向, 强化基础开发理论和技术攻关, 固化并不断升级技术模板。一是要加强地质工程一体化, 精细前期地质基础研究, 利

用高精度地质力学建模指导靶点及井轨迹优化, 解决主力产层在哪、井轨迹如何设计的难题, 提高优质储层钻遇率; 二是要升级非均质储层体积改造与不同类型页岩压裂适配性技术, 优化压裂设计、压裂液体系, 大幅提高单井产能; 三是要优化体积开发井网部署, 兼顾压裂储量动用和后期能量补充, 制定合理开发技术政策, 明确井网、井距等部署参数和焖井时间、排采制度等技术参数, 有效控制递减率; 四是要探索攻关注入不同介质 (如烃类、CO<sub>2</sub> 等) 驱渗结合提高采收率技术, 延长油井生命周期, 提高产量和效益。



### 3.2 成本效益挑战与对策

2021年中国石油页岩油平均完全成本比2020年降低了8个百分点,但目前根据各地区投资成本,要实现油价45美元/bbl效益开发,则需较高的单井EUR下限,其中陇东示范区为 $2.6 \times 10^4$ t、吉木萨尔示范区为 $4.5 \times 10^4$ t、古龙示范区为 $2.8 \times 10^4$ t(图9)。立足低油价,应以“事前算盈、事中干赢、事后保赢”为目标,坚持多专业协同,资源共享,提高施工效率、装备利用率和劳动生产率;坚持市场化运作,成本打开分析,找到控降成本路径;建立提产激励制度,调动各方积极性,激发创新热情,实现双赢;加强有关技术、经济、政策研究,分区、分类建立投资标准,避免降成本以牺牲产量为代价。另外,还需争取财税政策以减轻负担。

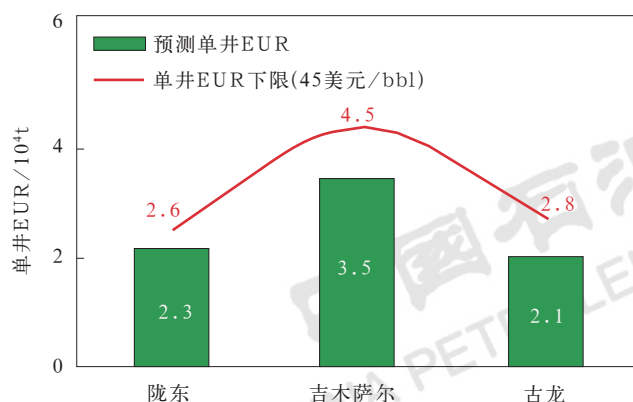


图9 页岩油示范区效益建产单井EUR指标对比图

Fig.9 Comparison of single well EUR for benefit capacity construction in major shale oil demonstration zones

### 3.3 管理模式挑战与对策

页岩油资源发展,不能依靠传统学科专业接力式管理,急需针对其独特的地质特征和工程制约性,形成一套适合页岩油特点的管理模式。近两年中国石油在总结长庆、新疆等油田页岩油开发项目管理经验基础上,创新形成了页岩油“一全六化”管理模式,即项目上全生命周期管理、设计上一体化统筹、实施中专业化协同、组织上市场化运作、辅助保障上社会化支持、生产运行上数字化管理、绿色化发展。该管理模式在吉木萨尔示范区建设中取得了良好效果,例如在社会化支持方面,吉木萨尔页岩油依托红旗地方企业建成 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储液池,以年为单位进行租用,省去固定投资和各种协调成本,存储处理后的压裂返排液,用于压裂再利用,处理成本降低了80%,远低于外排处理费用。

## 4 结语

“十四五”开局之年,中国石油大力提升页岩油勘探开发力度,技术取得明显进步,提质增效见到明显效果。陇东、吉木萨尔、古龙等示范区建设取得了阶段性重要认识,一是明确了水平井靶层特征,吉木萨尔示范区为孔隙度高、含油饱和度高、可压裂性指数高、原油黏度低的油层,古龙示范区发育紧邻优质烃源岩的长英质页岩;二是初步形成了针对不同储层特征的差异化压裂技术;三是优化了立体部署井网井距等关键开发参数,其中井距优化结果为陇东示范区400m、吉木萨尔示范区300m、古龙示范区不小于350m;四是优化了合理开发技术政策,陇东示范区合理焖井时间为30~60天,小油嘴控压生产,而古龙示范区由于地质特殊性,需要大油嘴甚至下泵快速排液见油,再调整至合理生产压差稳产;五是探索了补充地层能量方式,吉木萨尔示范区采用前置 $\text{CO}_2$ 补能,预计增油 $1 \times 10^4$ t以上。渤海湾、柴达木、四川等其他盆地区块页岩油也先后获得了突破,展现了广阔发展前景。

中国石油陆相页岩油开发尚处于起步阶段,在复杂的国内外形势下,立足低油价,依然面临技术、成本、管理等挑战。但我国页岩油资源量丰富、发展迅猛,需要紧紧围绕“技术进步提单产、管理创新提效率”两条主线,强化基础开发理论和技术攻关、找到控降成本路径、坚持管理创新,才能满足页岩油高质量发展新要求,支撑中国石油 $2 \times 10^8$ t稳产。

### 参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [2] 付金华, 刘显阳, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油勘探发现与资源潜力[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(5): 1–11.  
Fu Jinhua, Liu Xianyang, Li Shixiang, et al. Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 1–11.
- [3] 范谭广, 徐雄飞, 范亮, 等. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组页岩油地质特征与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 125–136.  
Fan Tanguang, Xu Xiongfei, Fan Liang, et al. Geological characteristics and exploration prospect of shale oil in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 125–136.

- [4] 王广昫, 王凤兰, 赵波, 等. 大庆油田公司勘探开发形势与发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021,26(1):55-73.  
Wang Guangyun, Wang Fenglan, Zhao Bo, *et al.* Exploration and development situation and development strategy of Daqing Oilfield Company[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(1):55-73.
- [5] 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 Chang 7 member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):601-614.
- [6] 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.
- [7] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):1-13.  
Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):1-13.
- [8] 孙焕泉, 蔡勋育, 周德华, 等. 中国石化页岩油勘探实践与展望[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):569-575.  
Sun Huanquan, Cai Xunyu, Zhou Dehua, *et al.* Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):569-575.
- [9] 许琳, 常秋生, 冯玲丽, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):649-660.  
Xu Lin, Chang Qiusheng, Feng Lingli, *et al.* The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):649-660.
- [10] 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 Jinhua, Hu Suyun, Pang Zhenglian, *et al.* The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):560-568.
- [11] 支东明, 唐勇, 郑孟林, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油藏地质特征与成藏控制因素[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):615-623.  
Zhi Dongming, Tang Yong, Zheng Menglin, *et al.* Geological characteristics and accumulation controlling factors of shale reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):615-623.
- [12] 梁世君, 罗劝生, 王瑞, 等. 三塘湖盆地二叠系非常规石油地质特征与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):624-635.  
Liang Shijun, Luo Quansheng, Wang Rui, *et al.* Geological characteristics and exploration practice of unconventional Permian oil resources in the Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):624-635.
- [13] 杨国丰, 周庆凡, 卢雪梅. 页岩油勘探开发成本研究[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):576-588.  
Yang Guofeng, Zhou Qingfan, Lu Xuemei. Study on the cost of shale oil exploration and development[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):576-588.
- [14] 孙建博, 孙兵华, 赵谦平, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组长 7 湖相页岩油地质特征及勘探潜力评价[J]. 中国石油勘探, 2018,23(6):29-37.  
Sun Jianbo, Sun Binghua, Zhao Qianping, *et al.* Geological characteristics and exploration potential evaluation of Chang 7 lacustrine shale oil in Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(6):29-37.
- [15] 赵贤正, 周立宏, 赵敏, 等. 陆相页岩油工业化开发突破与实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):589-600.  
Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Zhao Min, *et al.* Breakthrough and practice of industrial development on continental shale oil: a case study on Kong-2 member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):589-600.
- [16] 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.
- [17] 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. 石油学报, 2021,42(1):1-14.  
Kuang Lichun, Hou Lianhua, Yang Zhi, *et al.* Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021,42(1):1-14.
- [18] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. 石油学报, 2021,42(5):561-569.  
Fu Suotang, Jin Zhijun, Fu Jinhua, *et al.* Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021,42(5):561-569.
- [19] 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.
- [20] 李国欣, 刘国强, 侯雨庭, 等. 陆相页岩油有利岩相优选与压裂参数优化方法[J]. 石油学报, 2021,42(11):1405-1416.  
Li Guoxin, Liu Guoqiang, Hou Yuting, *et al.* Optimization method of favorable lithofacies and fracturing parameter for continental shale oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021,42(11):1405-1416.
- [21] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景: 以渤海湾盆地黄骅凹陷古近系为例[J]. 石油学报, 2021,42(2):143-162.  
Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Zhou Lihong, *et al.* Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil

- in lacustrine facies zone of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021,42(2):143–162.
- [22] 焦方正, 邹才能, 杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020,47(6):1067–1078.
- Jiao Fangzheng, Zou Caineng, Yang Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(6):1067–1078.
- [23] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩型页岩油勘探开发理论技术与实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2022,49(3):616–626.
- Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, *et al.* Theories, technologies and practices of lacustrine shale oil exploration and development: a case study of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022,49(3):616–626.
- [24] 杨智, 邹才能. 论常规—非常规油气有序“共生富集”: 兼论常规—非常规油气地质学理论技术[J]. *地质学报*, 2022,96(5):1635–1653.
- Yang Zhi, Zou Caineng. Orderly “symbiotic enrichment” of conventional & unconventional oil and gas: discussion on theory and technology of conventional & unconventional petroleum geology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022,96(5):1635–1653.
- [25] 杨智, 邹才能, 陈建军, 等. “进(近)源找油”: 油气地质理论创新与重点领域勘探思考[J]. *石油学报*, 2021,42(10):1310–1324.
- Yang Zhi, Zou Caineng, Chen Jianjun, *et al.* “Exploring petroleum inside or near the source kitchen”: innovations in petroleum geology theory and reflections on hydrocarbon exploration in key fields[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021,42(10):1310–1324.
- [26] 中国石油报. 中国石油2021年度十大科技创新成果[J]. *石油勘探与开发*, 2021,48(6):1288.
- China Petroleum Daily. Top 10 scientific and technological innovation achievements of PetroChina in 2021[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021,48(6):1288.
- [27] 焦方正. 鄂尔多斯盆地页岩油缝网波及研究及其在体积开发中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2021,42(5):1181–1188.
- Jiao Fangzheng. FSV estimation and its application to development of shale oil via volume fracturing in the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021,42(5):1181–1188.
- [28] 王剑, 周路, 刘金, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩层系甜点体烃类可流动性影响因素[J]. *天然气地球科学*, 2022,33(1):116–124.
- Wang Jian, Zhou Lu, Liu Jin, *et al.* Influencing factors of hydrocarbon mobility in sweet spot of the Lucaogou Formation shale in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022,33(1):116–124.
- [29] 李国欣, 吴志宇, 李桢, 等. 陆相源内非常规石油甜点优选与水平井立体开发技术实践: 以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. *石油学报*, 2021,42(6):736–750.
- Li Guoxin, Wu Zhiyu, Li Zhen, *et al.* Optimal selection of unconventional petroleum sweet spots inside continental source kitchens and actual application of three-dimensional development technology in horizontal wells: a case study of the member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021,42(6):736–750.
- [30] 王俊超, 李嘉成, 陈希, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油立体井网整体压裂设计技术研究与实践[J]. *石油科技论坛*, 2022,41(2):62–68.
- Wang Junchao, Li Jiacheng, Chen Xi, *et al.* Research and practice of integrated fracturing design technology for 3D well pattern of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Depression in Junggar Basin[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2022,41(2):62–68.
- [31] 杜晓宇, 金之钧, 曾联波, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7页岩油储层天然裂缝发育特征与控制因素[J/OL]. *地球科学*, 2022:1–16 [2023–04–14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220621.1446.014.html>.
- Du Xiaoyu, Jin Zhijun, Zeng Lianbo, *et al.* Development characteristics and controlling factors of natural fractures in Chang 7 shale oil reservoir, Longdong area, Ordos Basin [J/OL]. *Earth Science*, 2022: 1–16[2023–04–14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220621.1446.014.html>.
- [32] 刘兵兵, 马东正, 秦臻, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔南部中上二叠统沉积古环境分析: 来自泥页岩生物标志化合物和元素地球化学方面的证据[J]. *天然气地球科学*, 2022,33(10):1571–1584.
- Liu Bingbing, Ma Dongzheng, Qin Zhen, *et al.* Analysis of sedimentary paleoenvironment of Middle and Upper Permian in southern Jimsar, Junggar Basin: evidence from biomarkers and elemental geochemistry of mudstone[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022,33(10):1571–1584.
- [33] 何文渊, 柳波, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油地质特征及关键科学问题探索[J]. *地球科学*, 2023,48(1):49–62.
- He Wenyuan, Liu Bo, Zhang Jinyou, *et al.* Geological characteristics and key scientific and technological problems of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Earth Science*, 2023,48(1):49–62.