

我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究

闫 林^{1,2}, 陈福利^{1,2}, 王志平^{1,2}, 阎逸群^{1,2}, 曹瑾健¹, 王坤琪¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 国家能源致密油气研发中心, 北京 100083)

摘 要:页岩油的规模效益开发对我国的能源安全具有重要意义,但目前资源品质、开发技术、配套设施、市场化程度等方面存在诸多挑战。为此,在分析低油价时期美国二叠盆地页岩油开发实现大幅降本增效成功经验的基础上,指出我国页岩油规模效益开发需要采用理念转变、技术创新、管理创新和市场运作的技术思路,并提出了页岩油甜点识别与评价新方法、差异化压裂优化设计和全生命周期开发优化等 3 项关键技术,对实现我国页岩油规模效益开发具有一定的推动作用。

关键词:页岩油; 降本增效; 甜点评价; 差异化压裂; 全生命周期

中图分类号: TE357 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2020)03-0063-07

Challenges and Technical Countermeasures for Effective Development of Shale Oil in China

YAN Lin^{1,2}, CHEN Fuli^{1,2}, WANG Zhiping^{1,2}, YAN Yiqun^{1,2}, CAO Jinjian¹, WANG Kunqi¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083, China; 2. National Energy Tight Oil and Gas R & D Center, Beijing, 100083, China)

Abstract: The benefit of scaled development of shale oil is of great significance to national energy security in China. However, there are many challenges at present in terms of resource quality, development technology, supporting facilities, and the degree of commercialization and widespread adoption. This paper analyzes the successful experiences in the Permian Basin of the United States in significantly reducing costs and boosting efficiency in the shale oil development, despite a general environment of low oil prices. By looking at this case study, we can see that the technical ideas of concept transformation, technical innovation, management innovation and market operation are necessary for China as well, if China is to realize benefit development of shale oil and three key technologies. For example, new methods of shale oil sweet spot identification and evaluation, differential fracturing design optimization and full life cycle development optimization are applicable to China. They are advanced in this paper and will provide some help in achieving the goal of scaled benefit development of shale oil in China.

Key words: shale oil; cost reduction and efficiency increase; sweet spot evaluation; differential fracturing; full life cycle

目前全球油气勘探开发已进入常规油气稳定上产、非常规油气快速发展阶段^[1],页岩油作为非常规油气资源的重要组成部分和典型代表,拥有巨大可采的资源基础、逐步成熟的开发技术和不断攀升的工业产量,正成为全球非常规油气开发的亮点,是继页岩气突破后的又一热点领域^[2-6]。目前,以北美二叠(Permian)、巴肯(Bakken)、鹰滩(Eagle Ford)等为代表的页岩油已实现了规模效益开发,进而推动了美国能源独立,改变了世界能源格局。我国页岩油资源丰富,自 2010 年开始开发页岩油以来已取得了重大突破和显著进展,但整体仍面临资源品质差、单井产量低、投资成本高等开发难题,如何实现

页岩油开发大幅降本增效,推动页岩油规模效益开发,对于保障我国能源安全具有重要意义。为此,分析了我国页岩油开发在降本增效方面所面临的挑战,进而剖析了在低油价时期,美国通过理念转变、技术创新、管理创新、市场运作等多方聚力,实现二

收稿日期: 2019-12-19; 改回日期: 2020-03-08。

作者简介: 闫林(1978—),男,陕西子长人,2001年毕业于西北大学矿产普查与勘探专业,2004年获西北大学石油及天然气地质专业硕士学位,2007年获中国石油勘探开发研究院油气田开发工程专业博士学位,高级工程师,主要从事油气藏开发地质方面的研究工作。E-mail: yanlinbob@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“陆相致密油甜点成因机制与精细表征”(编号:2015CB250901)资助。

叠盆地页岩油大幅降本增效、规模效益开发的成功经验与启示,提出了页岩油甜点识别与评价新方法、差异化压裂优化设计和全生命周期开发优化等3项关键技术,以实现我国页岩油开发降本增效、规模效益开发的目的。

1 我国页岩油开发降本增效面临的挑战

我国页岩油资源丰富,估算中高成熟度页岩油地质资源量约 132×10^8 t,是我国未来石油勘探开发最为主要的接替资源^[7-8]。目前,我国页岩油开发在储集层类型、源储关系、甜点主控因素以及页岩油聚集类型等方面已形成较为系统的认识,并提出了以水平井规模重复“压采”开发为主导的一体化开发模式,主要包括“一体化”设计、“平台式”长

水平段水平井钻井、“规模化”体积压裂、“重复式”改造、“控制式”采油、“工厂化”作业、“集中式”地面建设等关键技术^[8-15],有力地支撑了我国陆相页岩油藏勘探开发,已累计建成 300×10^4 t以上产能。但是,与北美页岩油开发相比,我国页岩油开发在资源品质、开发技术、配套设施和市场化程度等方面存在诸多挑战。

1)页岩油资源品质。我国页岩油藏主要为陆相页岩油藏,各页岩油区块虽然整体资源规模较大,但具有平面上有利区分布面积相对偏小、纵向上主力层薄且分散,储层岩石类型多、物性较差、非均质性强,含油饱和度差异大,原油密度、气油比、压力系数分布范围宽,岩石脆性、地应力差变化大等特点。我国和北美典型页岩油藏的主要特征对比见表1^[5,16]。

表1 我国和北美典型页岩油藏主要特征对比

Table 1 Comparison on the main characteristics of typical shale oil reservoirs in China and the North America

油藏名称	有利面积/(10^4 km^2)	资源量/(10^8 t)	厚度/m	孔隙度,%	渗透率/mD	岩性	储集层宏观分布特征
美国Bakken	7.0	566.0	5~55	5~13	0.1~1.0	白云质-泥质粉砂岩	平面分布范围广,纵向分布层系集中
美国Eagle ford	4.0		30~90	2~12	<0.1	泥灰岩	
鄂尔多斯盆地延长组(长7段)	2.0~5.0	35.5~40.6	20~80	2~12	0.01~1.0	粉细砂岩	分布整体范围较广,但单层厚度薄、纵向不集中、横向不连续
松辽盆地扶余油层	1.5~2.0	19.0~21.3	5~30	2~15	0.6~1.0	粉细砂岩	
准噶尔盆地芦苇沟组	0.7~1.5	15.0~20.0	80~200	3~178	<0.1,占90%	灰质粉砂岩,灰质白云岩	
油藏名称	原油密度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	原油黏度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	气油比	压力系数	初期日产油/t	单井最终可采油量/(10^4 m^3)	
美国Bakken	0.81~0.83	0.15~0.45	100~1 000	1.20~1.80	35.0~250.0	1.80~10.20	
美国Eagle ford	0.82~0.87	0.17~0.58	500~15 000	1.35~1.80	13.0~65.0	0.50~3.10	
鄂尔多斯盆地延长组(长7段)	0.80~0.86	1.00~2.00	73~112	0.75~0.85	2.0~35.0	0.50~2.36	
松辽盆地扶余油层	0.78~0.87	0.80~5.16	27~46	0.90~1.30	1.4~55.0	0.30~2.89	
准噶尔盆地芦苇沟组	0.88~0.92	73.00~112.00	15~17	1.10~1.75	2.4~67.0	0.50~3.70	

2)页岩油开发技术。我国陆相页岩油开发既不同于常规油藏开发具备成熟的配套技术和良好经济效益,也不同于北美页岩油资源品质优良、水平井分段压裂开发技术成熟且可复制等有利条件,需要根据我国页岩油的地质特点,借鉴北美页岩油开发的一些成功经验,研究形成我国页岩油有效开发配套技术。我国和北美页岩油开发关键技术的适应性分析结果(见表2)表明,对于长水平段水平井,必须考虑水平段长度与优质油层钻遇率的匹配情况,不能不考虑陆相页岩油优质储层平面变化快

的特点,一味追求增加水平段长度;对于小井距,在水平段长度一定的情况下,井距越小,井控储量越小,单一依靠提高采出程度无法实现单井产量和经济效益的大幅提高,优化井距时必须考虑单井控制储量和油层动用程度之间的匹配;对于立体式开发,必须充分考虑含油层系整体动用程度与经济效益的关系;对于密切割压裂,也不能刻意追求大液量、大砂量和大排量,需做好压裂设计优化,力争做到缝控储量最大化与压裂成本相对最小的匹配。

3)页岩油开发配套能力。一是我国钻井完并能

表 2 我国和北美页岩油开发关键技术适应性分析

Table 2 Adaptability analysis of key technologies for the unconventional oilfields development in China and North America

关键技术	页岩油主要地质特点		技术适应性要求
	我国	北美	
长水平段水平井	陆相,非均质性强	海相,相对较均质	水平段长度与优质油层钻遇率匹配
小井距	低储量丰度	高储量丰度	单井控制储量与油层动用程度匹配
立体布井	多为薄互层	厚层分布广	含油层系整体动用程度与经济效益匹配
复杂缝网	脆性差异大	脆性指数大	缝控储量与压裂成本匹配

力和效率有了明显提升,如长庆油田页岩油开发在水平井钻井提速、压裂提效、单井提产等方面取得了重要进展,水平井(平均井深 3 500 m,其中水平段平均长度 1 500 m)最短钻井周期仅 9.88 d,平均试油压裂周期缩短至 19.5 d,但不同地区钻井完井能力和效率存在差异,部分地区有待进一步提升;二是目前页岩油采用多水平井平台开发模式,对井场规模、压裂液用量、环境保护等方面提出了更高的要求,但受地形地貌、水资源匮乏等因素影响,在实际开发中一些先进理念和创新技术的规模化应用受到制约。

4)页岩油开发市场化程度。自 2011 年我国开始页岩油开发以来,钻井、压裂、材料等方面的市场化程度逐步提高,其中大庆油田、吉林油田通过下放管理权限,采用多轮次招投标、签订产量与效益挂钩的服务合同等方式,开发成本明显下降,但整体而言,页岩油开发市场化程度仍有提升空间。

2 美国二叠盆地页岩油开发降本增效的启示

二叠盆地(Permian)是美国三大核心页岩油产区之一,且在国际油价低于 40 美元/桶时,是唯一还能实现增产的页岩油产区,是页岩油成本最低的核心生产区^[17-18]。调研认为,层层堆叠巨厚的页岩油资源、不断革新的开发理念和技术、逐步提升的高效钻井压裂能力、开放的市场机制和优惠政策,共同促成了二叠盆地页岩油开发不断将降本增效做到极致,实现了低油价环境下的逆袭。

1)层层堆叠巨厚的页岩油资源是基础。二叠盆地层厚度大(390~550 m),主力产油层多,像千层饼一样层层堆叠,可以划分出 10~15 层甚至更多,且横向分布稳定,连续性好,这一特点与鹰滩、巴肯以及我国主要页岩油区块有明显区别,这也

是二叠盆地页岩油开发降本增效取得突破的资源基础^[1]。

2)不断革新的开发理念和技术是关键。二叠盆地页岩油开发技术可以分为战略和战术 2 个层面:战略层面上,在低油价时期,页岩油开发向核心区转移,以使开发商专注高回报油区,利用有限的投资获得优质高产井;战术层面上,采用“大井丛、小井距、密切割、立体式”的开发模式,实现对页岩油核心区优质资源的充分动用和采出程度最大化。例如,加拿大 Encana 能源公司对二叠盆地堆叠式页岩油资源采取了立体开发模式,在面积 0.131 km²的井场,分 A、B 两层设计部署了 64 口水平井,A 层和 B 层水平井的井距分别为 150 和 85~130 m,A、B 两层垂向井距 85 m。该开发模式可以提高设备、基础设施的利用率及人员工作效率,同时使用多台钻机的做法能够缩短钻井周期而且有利于服务共享。该立体开发模式不仅降低了开发成本,而且提高了油藏采收率,估算开发成本仅 28 美元/桶^[1-2]。

3)逐步提升的高效钻井压裂能力是核心。北美页岩油开发在水平井钻井及分段压裂技术之后并未出现较大的技术革命,但渐进式技术革新不断提高单井生产效率。钻井方面,水平井水平段长度逐年增长,从 2013 年的平均 1 676 m 增长到 2016 年的 2 438 m,超过 3 048 m 也屡见不鲜;虽然水平段越来越长,但通过采取缩短造斜段长度、强化钻井参数、水平段旋转导向钻进等技术措施,钻井周期却越来越短,目前钻井周期已缩短至 10 d 以内。压裂方面,随着水平段改造段数、簇数的增加,压裂液用量、支撑剂用量也在大幅增加,但压裂效率却在不断提高,目前已具有每天压裂 6~7 段的施工能力。钻井和压裂能力的不断提高,在大井丛、工厂化作业的背景下,形成了大幅提高单井产量、采出程度和经济效益的核心能力^[17-18]。

4)开放的市场机制和优惠政策是保障。美国先

后出台了一系列支持非常规油气发展的相关政策,据不完全统计,有 32 项扶持政策 and 15 年的补贴政策,为从事页岩油气开发的相关公司提供了政策保障;同时,美国开放的市场经济体制限制了垄断,使大量有特色专项技术的中小企业得以自由进入能源领域。此外,美国活跃的金融市场为企业开展页岩油气开发与合作提供了资金支持,一些风险投资基金、银行等金融机构,纷纷为页岩油气开发投资、贷款,形成了页岩油气产业与金融业的有效融合^[17-18]。

3 我国页岩油有效开发关键技术研究

从北美页岩油高效开发的成功经验以及目前我国页岩油开发效果来看,先进的开发理念是实现页岩油规模效益开发的根源,先进、适用、低成本的工程技术是提高产量和效益的关键,只有理念转变、技术创新、管理创新和市场运作等多个方面共同发力,才能取得显著的降本增效效果,实现页岩油规模效益开发。

单从页岩油开发工程技术而言,目前“水平井+密切割体积压裂”已成为页岩油开发的主体技术^[19-22],但面临着较大的降本增效压力。为此,结合近年来我国页岩油开发取得的主要进展和高效开发面临的技术需求,进行了页岩油甜点识别与评价方

法、差异化压裂优化设计和全生命周期开发优化等 3 项关键技术研究,在推动我国页岩油开发降本增效方面起到了一定作用。

3.1 页岩油甜点识别与评价方法

页岩油甜点是实现规模效益开发的物质基础。针对我国陆相页岩油储层岩性、物性、含油性具有强烈的非均质性,常规测井响应特征弱化,单一测井信息多解性强的挑战,研究形成了基于常规测井曲线的页岩油测井多信息融合甜点识别与评价方法,主要识别评价流程为:1)测井曲线敏感性分析,确定敏感性测井曲线;2)转化为相同定性指向的标准化曲线;3)赋予各曲线点对应 RGB 颜色值;4)计算确定 RGB 空间特征值 L ;5)将融合的 RGB 颜色值(即 L 端点对应的颜色值)在对应测井深度上显示,并依据融合的 RGB 空间特征值设定显示宽度(如图 1 所示);6)获得测井信息融合可视化结果。该方法具有“多种测井信息融合、测井识别分辨率高、评价结果可视化显示”的特点,在鄂尔多斯盆地长 7 段页岩油、准噶尔盆地芦苇沟组页岩油、松辽盆地扶余页岩油的储层评价中进行了应用,解释结果与目前的地质认识一致,与生产动态特征匹配程度较高,可以快速直观地识别页岩油甜点,判别烃源岩品质及源储配置关系,分析评价水平井水平段钻遇储层情况,从而为优化压裂设计物质基础。

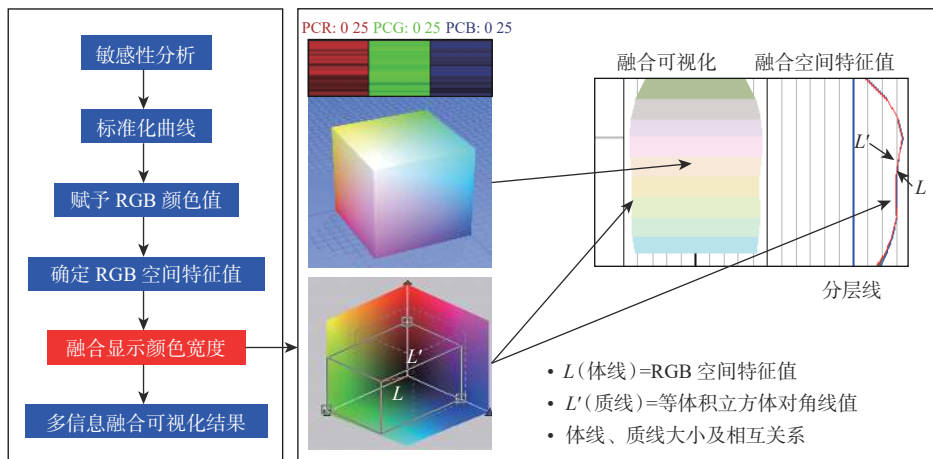


图 1 基于常规测井曲线的多信息融合测井甜点识别与评价方法

Fig.1 Sweet spot identification and evaluation method of multi-information fusion logging based on conventional well log

基于常规测井曲线的页岩油测井多信息融合甜点识别与评价方法提高了测井识别的分辨率,可部分替代核磁、成像等特殊测井方法,达到认识复杂地质特征的目的,在解决油田开发实际问题的同时,还可以大幅降低测井作业成本^[23-27]。

3.2 页岩油差异化压裂优化设计

2011 年以来,我国页岩油开发呈现水平井水平段越来越长、压裂规模越来越大、分段分簇越来越密集的态势,单井产量明显提高,但这导致压裂成本大幅增加,单井投资居高不下,造成页岩油无法

规模效益开发。为此,按照效益倒逼的理念,基于页岩油甜点识别与预测结果,提出了差异化压裂优化设计方法,以达到控制单井投资基本不变,明显改善单井开发效果,整体降本增效的目的。

假设某页岩油开发区块一口水平段长度 1 500 m 的水平井,分别钻遇 I、II、III 类储层各 500 m,其孔隙度、渗透率、饱和度、可动油饱和度存在明显差异(见表 3),应用自主研发的页岩油产能评价软件对该井差异化压裂设计下的单井初产量及累计产量进行了预测,结果见图 2 和图 3。预测结果表明,若采

用分类压裂,即充分压裂 I 类优质储层,适度压裂 II 类储层,少压或不压 III 类储层(情况 1),单井初产量、累计产量及净现值最高;若不考虑储层类别,采用笼统的均匀布缝和压裂(情况 2),在与情况 1 压裂规模相当的情况下,单井初产量、累计产量及净现值较低;若水平段均钻遇 II 类储层,且采用笼统的均匀布缝和压裂(情况 3),单井初产量、累计产量最低。由此可见,优质储层钻遇率和优质储层充分压裂改造是获得单井高产和较好经济效益的主要控制因素,也说明差异化压裂具有明显的降本增效作用。

表 3 某页岩油开发区块不同类型储层属性参数对比

Table 3 Comparison on the attribute parameters of different reservoirs in a shale oil development block

储层类型	储层厚度/m	孔隙度, %	渗透率/mD	含油饱和度, %	可动油饱和度, %
I 类	12	12	0.20	0.65	0.50
II 类	12	8	0.12	0.50	0.35
III 类	12	5	0.06	0.35	0.20

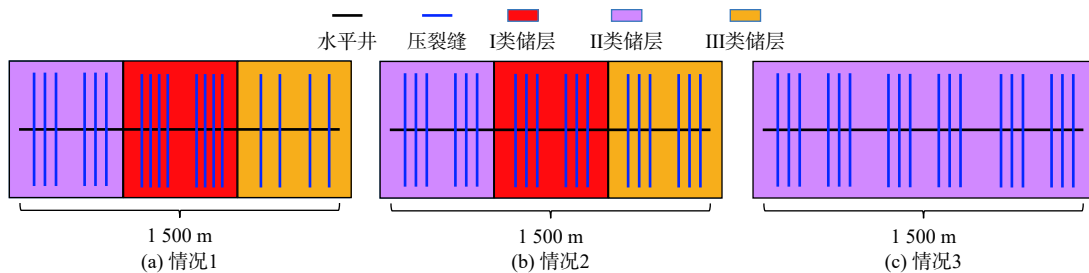


图 2 不同类型储层类别的布缝方式对比

Fig.2 Comparison on the fracture patterns for different reservoir types

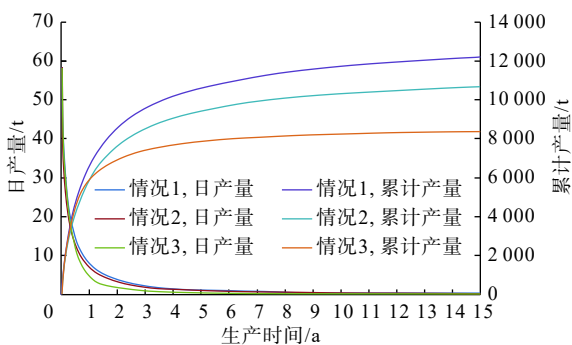


图 3 不同储层采用不同压裂方案的预测效果对比

Fig.3 Prediction effect comparison of different fracturing schemes for different reservoirs

3.3 页岩油全生命周期开发优化

页岩油开发初期,基本都采用“初期高产、快速回收投资”的压力衰竭式开发方式,尤其是在高油价时期,美国大部分石油公司都采取放喷的方

式,以使油井在短时间内达到最大产量,从而尽快回收前期投入成本。这一做法会导致油井产量迅速递减(L 形递减)和单井最终可采储量(EUR)损失,需持续钻新井开发新区块来弥补。在低油价和提高资源利用率的双重作用影响下,压力衰竭式开发变得难以为继,国内外石油公司逐步转变开发理念,更加注重长期效益,秉持“成本是设计出来的”的理念,提出了以全生命周期开发方式优选为核心的开发方案编制方法,高度重视方案整体优化、开发全过程优化,从源头上降本增效。主要做法为:1) 通过全生命周期开发方式优选,实现管控投资的前提下,最大限度地提高页岩油采收率,以获得最大的经济效益;2) 从最初的放喷生产转变为控压生产,以求获取最大的单井 EUR,例如,北美某页岩油区块采取控压生产后,产量和井口压力的递减率都得到了有效控制,单井前 5 年的累积采收率可增加

30%~50%,净现值也得到了大幅提高;3)采用体积压裂注气吞吐等开发技术,有效补充地层能量,大幅提高页岩油采收率,获得更高的经济效益。例如,国内某页岩油开发区块,采用压力衰竭式开发方式时的采收率不到10.0%,采用体积压裂注气吞吐开发后,预测采收率可提高至26.9%。

4 结论

1)北美品质好的页岩油资源、不断革新的开发理念和技术、逐步提升的钻井压裂能力、开放的市场机制和优惠政策共同促成了页岩油开发成本不断降低,实现了页岩油规模效益开发。

2)我国页岩油开发在资源品质、开发技术、配套设施和市场化程度等方面存在诸多挑战,只有理念转变、技术创新、管理创新和市场运作等多个方面共同发力,才能取得显著的降本增效效果,实现页岩油规模效益开发。

3)提出了页岩油开发降本增效的3项关键技术:基于常规测井曲线的页岩油测井多信息融合甜点识别与评价方法,可在测井成本保持不变的情况下,对页岩油储层进行更为精细和快速的识别和评价;差异化压裂优化设计可在压裂投资保持不变的情况下,明显提高单井产量,达到整体降本增效的目的;全生命周期开发方式优化并应用控压生产、注气吞吐等技术,可实现降本增效。

参 考 文 献

References

- [1] 邹才能,杨智,张国生,等.常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J].石油勘探与开发,2014,41(1):14-27.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHANG Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: concept and practical significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 14-27.
- [2] 邹才能,陶士振,杨智,等.中国非常规油气勘探与研究新进展[J].矿物岩石地球化学通报,2012,31(4):312-322.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, YANG Zhi, et al. New advance in unconventional petroleum exploration and research in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(4): 312-322.
- [3] 魏漪,冉启全,童敏,等.致密油压裂水平井全周期产能预测模型[J].西南石油大学学报(自然科学版),2016,38(1):99-106.
WEI Yi, RAN Qiquan, TONG Min, et al. A full cycle productivity prediction model of fractured horizontal well in tight oil reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2016, 38(1): 99-106.
- [4] 李阳.中国石化致密油藏开发面临的机遇与挑战[J].石油钻探技术,2015,43(5):1-6.
LI Yang. Opportunities and challenges for Sinopec to develop tight oil reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(5): 1-6.
- [5] 闫林,冉启全,高阳,等.陆相致密油藏差异化含油特征与控制因素[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(6):45-54.
YAN Lin, RAN Qiquan, GAO Yang, et al. The differentiation oil-bearing characteristic and control factors of continental tight oil[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2017, 39(6): 45-54.
- [6] 张映红,路保平,陈作,等.中国陆相致密油开采技术发展策略思考[J].石油钻探技术,2015,43(1):1-6.
ZHANG Yinghong, LU Baoping, CHEN Zuo, et al. Technical strategy thinking for developing continental tight oil in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(1): 1-6.
- [7] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 343-350.
- [8] 杜金虎,刘合,马德胜,等.试论中国陆相致密油有效开发技术[J].石油勘探与开发,2014,41(2):198-205.
DU Jinhu, LIU He, MA Desheng, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 198-205.
- [9] 彭晖,刘玉章,冉启全,等.致密油储层不同储渗模式下生产特征研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(5):133-138.
PENG Hui, LIU Yuzhang, RAN Qiquan, et al. An analysis on performance characteristics of the tight oil reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2015, 37(5): 133-138.
- [10] 杨正明,骆雨田,何英,等.致密砂岩油藏流体赋存特征及有效动用研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(3):85-92.
YANG Zhengming, LUO Yutian, HE Ying, et al. Study on occurrence feature of fluid and effective development in tight sandstone oil reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2015, 37(3): 85-92.
- [11] 贾光亮,邵彤,殷晓霞,等.杭锦旗区块致密气藏混合水体体积压裂技术[J].石油钻探技术,2019,47(2):87-92.
JIA Guangliang, SHAO Tong, YIN Xiaoxia, et al. Volumetric fracturing with mixed water in tight gas reservoirs in the Hangjinqi Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2): 87-92.
- [12] 路宗羽,赵飞,雷鸣,等.新疆玛湖油田砂砾岩致密油水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(2):9-14.
LU Zongyu, ZHAO Fei, LEI Ming, et al. Key technologies for drilling horizontal wells in Glutenite tight oil reservoirs in the Mahu Oilfield of Xinjiang[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2): 9-14.
- [13] 陶亮,郭建春,李凌铎,等.致密油藏水平井重复压裂多级选井方法研究[J].特种油气藏,2018,25(4):67-71.
TAO Liang, GUO Jianchun, LI Lingduo, et al. Multi-stage well selection for refracturing operations in horizontal wells for tight oil reservoir development[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(4): 67-71.
- [14] 廖腾彦,余丽彬,李俊胜.吉木萨尔致密砂岩油藏工厂化水平井

- 钻井技术[J].石油钻探技术,2014,42(6):30-33.
- LIAO Tengyan, YU Libin, LI Junsheng. A factory-like drilling technology of horizontal wells for tight sandstone reservoirs in the Jimusaer Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(6): 30-33.
- [15] 雷浩,何建华,胡振国.潜江凹陷页岩油藏渗流特征物理模拟及影响因素分析[J].特种油气藏,2019,26(3):94-98.
- LEI Hao, HE Jianhua, HU Zhenguo. Physical simulation and influencing factor analysis of the flow characteristics in the shale oil reservoir of Qianjiang Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 94-98.
- [16] 闫林,袁大伟,陈福利,等.陆相致密油藏差异化含油控制因素及分布模式[J].新疆石油地质,2019,40(3):262-268.
- YAN Lin, YUAN Dawei, CHEN Fuli, et al. A study on differentiated oil-bearing controlling factors and distribution patterns of continental tight oil reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(3): 262-268.
- [17] 汪红,张焕芝,钟文新,等.美国百年二叠盆地“焕发青春”的奥秘[R].北京:中国石油经济技术研究院,2018.
- WANG Hong, ZHANG Huanzhi, ZHONG Wenxin, et al. The mystery of “rejuvenating youth” in Permian Basin of the United States in the past 100 years[R]. Beijing: CNPC Economics & Technology Research Institute, 2018.
- [18] 张焕芝.美国非常规油气降本增效案例剖析[R].北京:中国石油经济技术研究院,2018.
- ZHANG Huanzhi. Case analysis of unconventional oil and gas cost reduction and efficiency increase in the United States[R]. Beijing: CNPC Economics & Technology Research Institute, 2018.
- [19] 杜金虎.中国陆相致密油[M].北京:石油工业出版社,2016.
- DU Jinhua. Continental tight oil in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [20] 胡罡,田选华,陆正元,等.致密油藏长水平段水平井压裂参数优化研究[J].广东石油化工学院学报,2016,26(6):4-7.
- HU Gang, TIAN Xuanhua, LU Zhengyuan, et al. Hydro-fracturing parameter optimization of long lateral horizontal well in tight oil reservoirs[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2016, 26(6): 4-7.
- [21] 闵春佳,卢双舫,唐明明,等.致密油储层水平井压裂参数优化模拟[J].断块油气田,2015,22(6):794-797.
- MIN Chunjia, LU Shuangfang, TANG Mingming, et al. Hydro-fracturing parameter optimization and simulation of horizontal well in tight oil reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(6): 794-797.
- [22] 魏漪,冉启全,童敏,等.致密油储层压裂水平井产能预测与敏感性因素分析[J].水动力学研究与进展,2014,29(6):691-699.
- WEI Yi, RAN Qiquan, TONG Min, et al. Productivity prediction and sensitivity analysis of fractured horizontal well in tight oil reservoirs[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6): 691-699.
- [23] 陈福利,童敏,闫林,等.致密油“甜点”甜度评价方法研究[J].特种油气藏,2017,24(2):12-17.
- CHEN Fuli, TONG Min, YAN Lin, et al. Sweetness evaluation method for “sweet spot” of tight oil reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(2): 12-17.
- [24] 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 Zhi, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 555-565.
- [25] 李婷婷,王钊,马世忠,等.地震属性融合方法综述[J].地球物理学进展,2015,30(1):378-385.
- LI Tingting, WANG Zhao, MA Shizhong, et al. Summary of seismic attributes fusion method[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 378-385.
- [26] 张宝辉.红外与可见光图像融合系统及应用研究[D].南京:南京理工大学,2013.
- ZHANG Baohui. The infrared and visible image fusion system and application research[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2013.
- [27] 鲍海娟,刘旭,周亚丽,等.吉木萨尔凹陷致密油有利区预测及潜力分析[J].特种油气藏,2016,23(5):38-42.
- BAO Haijuan, LIU Xu, ZHOU Yali, et al. Favorable area and potential analyses of tight oil in Jimsar Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(5): 38-42.

[编辑 陈会年]