

中国陆相致密油开采技术发展策略思考

张映红, 路保平, 陈 作, 蒋海军

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 中国陆相致密油藏主要有咸化湖、淡水湖两种基本类型。其中, 咸化湖致密油成藏组合多为毯式结构, 储层主要为细碎屑岩/碳酸盐岩复合体, 可压性接近北美海相致密油藏, 但原油流动性较差、储层非均质性较强; 淡水湖致密油成藏组合为箱式或毯式结构, 储层主要为砂岩及含油页岩, 可压性较差、工程参数敏感性较强、流动机制及压力系统复杂。在分析中国陆相致密油藏开采技术现状与问题的基础上, 指出应采用“油藏导向、基础先行、逆向思维、辩证施治, 注重原创、集成配套, 由易到难、滚动发展”的开发策略, 且不同类型致密油藏应采用不同开发模式, 需重点对陆相致密油藏甜点描述与评价、协同地质导向、增大储层接触面积钻井、精细复合压裂、致密油原位改质、提高采收率技术等关键技术进行攻关研究。

关键词: 陆相致密油 地质特征 发展策略 关键技术 中国

中图分类号: TE348 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2015)01-0001-06

Technical Strategy Thinking for Developing Continental Tight Oil in China

Zhang Yinghong, Lu Baoping, Chen Zuo, Jiang Haijun

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: China's continental tight oil reservoirs were mainly two types that originated from saline lake and fresh water lake. The saline lake tight oil reservoir looks like blanket structure, which composed fine clastic rock with carbonate. Its compressibility was close to that of North American marine tight oil reservoir, with poor fluidity of crude oil and strong heterogeneity of formation. The fresh water lake tight oil reservoir likes blanket or box structure, including mainly sandstone and shale, with poor compressibility, varied pore pressures and different fluidity of crude oil, more sensitive to engineering parameters. On the basis of analyzing the developing status and problems of China's continental tight oil, a proposal was presented for development of tight oil that "taking the reservoir engineering as guidance, with good foundation, reversed thinking, diagnosis and treatment, continuous innovation, a complete of technologies integrated, rolling development of it from easy to difficult operations". Different types of tight oil reservoirs should be developed in different modes. The key technologies should be researched, including sweet point description and evaluation, the theory of drilling the limit, coordinated with geo-steering drilling, fine composite fracturing, the performance of tight oil changed inside the reservoir, integration of fracturing and production, etc.

Key words: continental tight oil; geological characteristics; technology development strategy; key technology; China

中国致密油可采资源量居全球第三位, 其中具有陆相成因的占 93.4%^[1]。目前, 在我国传统油区年新增石油探明储量中, 致密油储量已约占 70%, 其经济有效开采对于我国油气工业的可持续发展意义重大。我国陆相致密油藏的发现始于 20 世纪 60 年代, 开采方式经历了直井兼探(1967—1985)、直井多层压裂(1986—2009)和水平井多级压裂(2009 年至今)3 个发展阶段。2010 年以来, 我国已在鄂尔多斯、渤海湾、松辽、准噶尔等 10 余个含油气盆地开展

了陆相致密油开发试验, 虽然在鄂尔多斯盆地西 233、

收稿日期: 2014-12-28。

作者简介: 张映红(1963—), 女, 四川泸州人, 1984 年毕业于云南大学地球物理专业, 2000 年获得中国石油大学(北京)沉积学专业博士学位, 教授级高级经济师, 现主要从事油气能源及石油工程战略规划方面的研究。

联系方式: (010)84988080; zhangyh.sripe@sinopec.com

基金项目: 中国工程院战略研究课题“中国致密油发展战略研究”及中国石化科技创新基础研究项目“中国石化致密油工程技术发展策略研究”(编号: P14143)联合资助。

安83等示范区初见成效^[2],但尚未形成工业化生产能力^[3]。对于大多数原油流度小于1.0 mD/mPa·s的陆相致密油藏,实现经济有效开采的关键技术依然没有取得实质性突破。为此,笔者基于对中国陆相致密油藏地质特征的再认识,以及国内外致密油藏开采技术的对比,对我国陆相致密油开采技术发展策略进行了探讨。

1 致密油藏概念的拓展

致密油藏的概念最早由Ledingham于1947提出,用于描述含油的致密砂岩^[4]。2008年以来,国内外众多学者和机构先后对致密油的定义进行了修改完善^[5]。目前,北美将致密油定义为分布在成熟烃源岩内、空气渗透率小于1 mD、孔隙度<10%、单井无自然工业产能的致密砂岩油藏和页岩油藏^[5]。

随着我国陆相致密油开采的持续深入,越来越多的源外或空气渗透率大于1 mD、孔隙度>10%、单井无工业产能的致密油藏被发现。为了有利于我国陆相致密油资源的开采和动用,笔者将致密油定义进一步拓展为:以吸附或游离状态赋存于渗透率极低的生烃灶内外砂岩和/或碳酸盐岩层、生烃泥页岩中,空气渗透率小于2 mD、流度小于1.0 mD/mPa·s,单井无自然工业产能或自然产能低于工业油流下限的轻质油聚集。与国外大多数致密油定义相比,该定义增加了源外油藏、取消了孔隙度10%的上限,并将空气渗透率上限放宽到2 mD;与中国国家标准^[6]相比,该定义主要增加了流度和油品制约。笔者对北美和中国主要致密油藏的流度和孔隙度进行了统计分析(如图1所示),发现这些油藏的空气渗透率均小于2 mD,但孔隙度变化范围较宽。由此也可以看出,国内外主要致密油藏符合笔者给出的致密油定义。

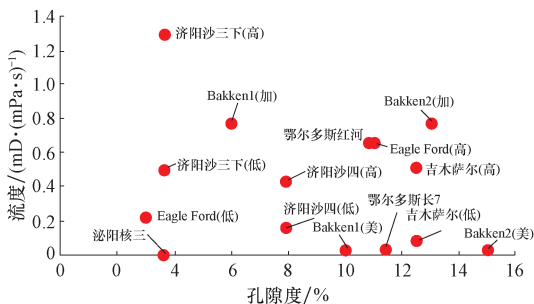


图1 国内外致密油藏孔隙度-流度交会图
Fig.1 Crossplot of porosity and fluidity for tight reservoir at home and abroad

2 中国陆相致密油藏的地质特征

我国陆相致密油藏具有咸化湖、淡水湖两种基本类型,其中,咸化湖致密油藏主要分布在准噶尔盆地二叠系、三塘湖盆地芦苇沟组、柴达木盆地中下侏罗统、渤海湾盆地沙四段/局部沙三下段/局部沙一段、松辽盆地中白垩统,泌阳凹陷核三段、江汉盆地潜江组、以及苏北盆地晚白垩—古新统等成熟烃源岩中,现已发现的15个致密油藏中,68%为咸化湖类型。淡水湖致密油藏主要分布在鄂尔多斯盆地三叠系、四川盆地侏罗系,以及渤海湾和松辽盆地的非咸化湖地层。由于海、陆相致密油藏的成盆、成岩、成烃、成藏和保存环境不同,其油藏地质特征不同。

我国陆相沉积盆地具有与北美大陆海相盆地迥然不同的构造和沉积特征。前者具有更加复杂的大地构造背景,先后经历过印支、燕山、喜山等多期构造运动,发育伸展、走滑、反转、逆冲、滑脱、底壁或刺穿等多种构造断裂样式,多期断裂体系交织;主要接受近物源沉积,沉积物分选较差、湖盆水体局限、水体振荡频繁、沉积与沉降中心空间叠置度较高;油气多沿断层输导体系呈阶梯式分布,源外油藏较丰富。故我国陆相沉积盆地成藏组合的空间形态具有平面分布局限、纵向层系丰富、埋深跨度较大、横向非均质性明显等特点。渤海湾、松辽、鄂尔多斯等盆地致密油成藏组合的纵向跨度约1 000.00~1 500.00 m,油藏面积3~300 km²,单层有效厚度1.40~35.00 m,累计最大厚度780.00 m,多为箱状、毯式。北美致密油藏纵向跨度700.00~1 000.00 m,油藏面积100~1 165 km²,单层有效厚度10.00~20.00 m,累计厚度最高90.00 m,主要为毯式、裙边状^[7]。

我国陆相致密油主要为低硫石蜡基原油,其密度为0.80~0.90 g/cm³、含蜡为11.12%~29.70%、含硫为0.07%~0.85%、黏度为10~700 mPa·s、气油比为40~200 m³/m³,渗流阻力较大、流动机制复杂。美国海相致密油主要为含硫型环烷基原油,其密度为0.79~0.87 g/cm³、含蜡为1.5%~5.27%、含硫为0.86%~1.94%、黏度小于1 mPa·s、气油比为103~5 041 m³/m³。海相、陆相致密油性出现差异的主要原因是:陆相烃源岩的生油母质包括水生生物和高等植物两类,其中后者是原油中石蜡含量的主要来源;加之陆相源岩不同显微组分具有不同的主生烃期,以及陆相盆地火成岩水解矿物的催化作用,因而陆相盆地多见低熟油^[8]。

我国淡水湖陆相致密油储层主要为(扇)三角洲、滨岸砂、重力流、近岸扇、河流相砂岩/砂砾岩沉积,以及深湖—半深湖相泥页岩;岩石矿物组分主要为石英+长石(30%~32%)、碳酸盐(27%~30%)、黏土(28%~30%)、黄铁矿和干酪根(5%~6%);储集空间主要为粒间孔、晶间孔、溶蚀孔缝、有机微孔、构造缝;孔隙连接以细吼道为主,喉道半径中值一般小于 0.4 μm ;水平缝较发育;弹性模量 20~30 GPa、泊松比 0.23~0.25,脆性指数 39%~43%;古近纪致密油储层的可压性相对较小,水敏性和压敏性较强。咸化湖陆相致密油储层多为粉屑/砂屑白云岩、灰质泥岩/泥灰岩/沉凝灰岩,溶蚀孔缝较发育;弹性模量 10~60 GPa、泊松比 0.10~0.35,脆性指数 45%~90%,可压性与北美海相致密油储层接近。

受成藏条件的影响,我国陆相致密油藏的含油饱和度、压力系数差别较大。源内处于生烃窗内、成藏配置好、具有较好保存条件的致密油藏,其含油饱和度与压力系数较高。例如,济阳坳陷沙三下段部分致密油藏含油饱和度 80%、压力系数 1.2~1.6,接近北美致密油平均水平(含油饱和度 70%~87%,压力系数 1.05~1.80)。源内经历剥蚀卸载区的致密油藏,其压力系数和含油饱和度关系较为复杂。例如,鄂尔多斯长 7 段储层含油饱和度为 65%~85%、压力系数 0.60~0.80。源内外成藏配置条件不好或断层输导体系较发育的生烃系统中,致密油藏含油饱和度通常较低、压力系数总体较低。例如,鄂尔多斯红河地区长 8 段源内断裂发育区致密油藏含油饱和度为 30%~50%、压力系数 0.94^[2]。

作为陆相沉积盆地的独特标志,频繁和大规模的岩浆活动一直在陆相致密油藏成藏过程中扮演着十分独特而重要的角色。高温岩浆冷凝过程中形成的 COH 热液沿断层和高渗透层流动,易导致陆相沉积盆地流场结构调整、地层水性质多变、高渗透砂层热液浸染、成烃过程畸变,以及成岩作用复杂化^[9]。

总体上,中国陆相致密油藏不仅与北美海相致密油藏在地质特征上异大于同,而且不同成藏环境中形成的致密油藏也各具特色。其与北美致密油藏特征的局部相似性,如咸化湖致密油藏的空间结构和可压性等,决定了开采技术的有限可借鉴性。其与北美致密油藏明显不同的共性特征,如原油流动性差、油藏天然能量不足、储层非均质性明显、工程参数敏感性较强等,决定了陆相致密油藏的共性技术难题和重大攻关需求。陆相致密油藏之间的个性

化差异,则决定了特色技术和个性化配套技术需求的不同。

3 陆相致密油藏开采技术现状与问题

北美致密油开采技术快速发展,呈现个性化、精细化、一体化、实时动态和全周期管理趋势,突出体现四个层次(井位、层位、压裂段、射孔簇)的精细选位、开采方案优化设计和方案动态调整,基本形成了与产业化发展相适应的技术与方法体系。我国在 2010 年以后全面加快致密油开采,在技术研发上取得了长足进展,但由于陆相致密油藏的特殊性,制约其产业化发展的重大关键技术还处于艰难的探索阶段。

3.1 致密油藏甜点评价技术

北美致密油藏甜点分析和评价包含地质、工程、经济三大类指标,在实现技术上主要包括实验室分析技术、测井七性关系评价技术、地震甜点识别技术、基于三维叠前地震数据体的钻完井工程参数体反演技术等。随着越来越多的、具有强大科研实力的大型国际油公司、油服公司、科研院校进入北美致密油藏开发与研究领域,以及大量地质、工程、油藏参数的积累和全球致密油藏信息共享程度的增加,对北美海相致密油藏的成藏机理、岩石力学特征、裂缝发育规律、渗流规律等基础研究呈快速深化态势,并应用于优化甜点预测和评价模型,例如“压裂黄金窗”的研究等。

我国已初步形成了致密油藏测井七性关系评价方法及地震甜点预测等技术^[2]。在三塘湖盆地,通过研究芦苇沟组致密油储层岩石物理响应特征,结合岩性分析数据,建立了致密油储层岩性识别和岩石力学计算方法^[10]。在济阳坳陷,采用联合频带处理技术和三参数小波合成成像技术,进一步提高了薄互层内幕识别精度,并通过优选敏感地震属性,提高了平面储层预测精度,滩坝砂致密油藏吻合率可达 80%,建立了“井震协同建模型、全局寻优算结果、正演验证控质量、交互反演提精度”的协同交互反演储层预测技术。在辽河油田雷家地区,采用纵横波联合反演与测井七性关系评价相结合,有效预测了白云岩致密油储层的分布。与北美相比,主要差距在于原始资料积累较少、致密油藏分类过于粗化,对含蜡型低流动性原油的渗流规律、陆相致密油储层中裂缝的发育规律、水平页理发育致密油藏的

压力敏感性等关键问题还缺乏深入研究。

3.2 致密油藏的开发模式

致密油藏开发模式需要与成藏组合空间结构、地应力场分布、储层各向异性、油藏开采方式、体积压裂需求、油藏动态监测,以及地面工程条件等相适应。

北美海相致密油主要采用天然能量开采,近年来开始研究适应致密油藏的CO₂混相和非混相驱油技术。在美国Bakken和Eagle Ford等毯式油藏分布区,平台水平井组的钻井数量呈增加态势,井距从300.00 m减小至100.00 m左右,部分井区将进一步减小至57.00 m;最大水平段3 500.00 m;部分水平井间部署直井监测^[11]。在加拿大Bakken等裙边油藏分布区,平台水平井间距320.00~640.00 m,水平段400.00~1 350.00 m;部分区块采用同层分支水平井体积压裂。

我国陆相致密油大多需考虑补充能量开采,开发模式尚在探索过程中。鄂尔多斯盆地长7段等辫状河及三角洲陆相致密油区,成藏组合为毯式结构、地应力差及非均质性相对较小、储层黏土含量较低、天然能量不足,采用了平台化水平井组体积压裂,井间距600.00~1 000.00 m,用一平四(直)注的注采井网注水或水吞吐,局部进行了CO₂驱油试验。济阳坳陷桩西等地区以浊积岩为主,纵向具有多层低渗透油藏分布,成藏组合为箱状结构,地应力差偏大,水平页理较发育,主要开展了直井分层压裂、水平井压裂、多层分支水平井压裂等开采试验,采用了笼统压裂、机械分段压裂、电缆桥塞分段压裂等技术,井网排距约150.00 m,井距480.00~560.00 m,压裂规模总体较小。准噶尔盆地芦苇沟组、辽河油田雷家等成藏组合为毯式结构的多个咸化湖致密油区,主要开展了高通道压裂等新技术试验。

3.3 致密油藏水平井钻井技术

近年来,北美海相致密油藏大位移水平井钻井技术取得一系列进展,包括基于地震和工程参数数据体的一体化钻井优化设计技术、随钻地层评价与旋转导向相结合的导向钻井技术、连续管钻井/鱼骨井等增大油藏接触面积钻井技术^[12]、适用于高黏土含量储层的新型钻井液等关键技术;高压射流钻井等前沿技术^[13];以及录井导向、低油水比油基钻井液、新型钻头实用降本新技术,并通过学习曲线持续降低钻井成本。

水平井等复杂结构井钻井技术一直作为低品位

油藏经济有效开采的“牛鼻子”技术得到国内各大油公司高度重视,并快速跟进国际前沿。目前,中石化已初步研发形成钻井地质与工程环境因素描述,地质导向和旋转导向钻井,长水平段水平井优快钻井及其钻井液/固井技术,以及多分支水平井钻井、连续管钻井、鱼骨井等复杂结构井钻井技术。截至2014年5月,中国石油仅辽河油田实施的复杂结构井就达到了1 322口,其中静52-H1Z井是我国第一口双分支水平井和国内分支井眼最多、储层内水平段最长的20分支鱼骨形水平井,钻遇油层厚度仅0.50 m^[14]。但由于我国陆相致密油储层横向变化明显、甜点影响因素复杂、导眼井密度不足,导致油藏地质模型不确定性较大;加之随钻测井和导向钻井技术应用程度较低,影响了我国致密油藏水平井钻井的整体效果。

3.4 致密油藏压裂改造技术

近年来,北美海相致密油藏在压裂改造时,通过将随钻地层评价与地应力分析相结合,对每一口井的压裂段、射孔簇进行精细选位和个性化压裂方案优化设计;部分区块对长水平段实施混合压裂,即在水平段趾端用多级滑套压裂,跟端用泵送桥塞压裂,以提高压裂效率^[15]。近期,北美推出了高通道和宽序序列压裂技术,后者可对单一射孔簇进行定向强化压裂增产精准控制。在压裂施工动态监测方面,北美采用微地震技术监测每级压裂的起裂、延伸、耦合,判断裂缝几何形态和方位,实时微调施工参数以改善体积压裂效果;采用连续管、示踪剂等生产测试技术与试井技术相结合,精细分析各段生产能力。在压后评估方面,北美应用3G裂缝建模、Mangrove等新一代建模技术与(微)地震结合,进行压后裂缝建模、油藏模拟和油藏管理^[16]。2014年以来,作为全周期管理的一部分,Haynesville和北科达州Bakken致密油气区相继开展了重复压裂试验。

我国自20世纪80年代以来,一直加强低渗透油藏增产技术的研究,并快速跟随水平井多级压裂为核心的现代增产技术。目前针对我国陆相致密油藏的特征,初步研究形成以构建立体缝网、实现储量控制最大化为核心的工厂化整体压裂技术。济阳坳陷盐227井区成功实施了首个深层砂砾岩“三层楼式井工厂”设计,分四类储层进行压裂方案研究,并采用了泵送桥塞、多段塞加砂、实时裂缝监测、实时工艺优化、同步压裂等多项技术,实现了体积压裂,井区平均日产油113.6 t。鄂尔多斯盆地西233示范

区水平井采用体积压裂改造后,试油产量均超过 $100 \text{ m}^3/\text{d}$,安 83 丛式水平井工厂化压裂试验区建成产能 $30 \times 10^4 \text{ t}$,水平井单井平均日产油量比直井提高了 8 倍^[2]。然而,我国陆相致密油藏的压裂改造技术还面临一系列技术难题。例如,因致密油的高含蜡、高黏度及低气油比等特征,以及油藏天然能量不足,导致陆相致密油藏压后产量普遍递减快的问题;在近断层的致密油区,超前注水或水驱开采出现不同程度的水锁、水窜和暴性水淹等复杂问题;在咸化湖致密油区,高通道压裂等新技术达不到预期效果的问题;在水平层理或页理较发育的致密油区,直井兼探的常规试油日产油量高,但水平井压裂试油产油量反而较低等问题。总体上,我国陆相致密油藏压裂增产技术还有大量基础问题有待研究、有大量关键技术有待攻关。

客观地看,源内陆相致密油藏虽然含油丰度尚可,但埋深较深;源外陆相致密油藏虽埋深适中,但丰度通常偏低;加之油藏特征复杂、单井改造后的压裂油藏体积(SRV)较小、技术实现难度大、基本都需要补充能量开采,因此,其开采经济性面临比海相致密油藏更加严峻的挑战。

4 中国陆相致密油开采技术发展策略

大量实践表明,北美海相致密油藏开采技术对我国陆相致密油藏的适用性是有限的。我国陆相致密油藏开采技术经过艰难探索之后,即将进入从跟随到跨越的战略转折期。为此,需要深入思考未来的技术发展策略。

4.1 发展策略

我国陆相致密油藏技术发展可以采用以下四大策略。

一是油藏导向,基础先行。对陆相致密油藏进行精细分类,加快不同类型致密油藏的成藏机理、渗流机理、裂缝规律等基础研究,实现致密油藏的充分认识和评价,推动原始创新,布局产业发展。

二是逆向思维,辩证施治。进一步突破思想禁锢,转变技术创新思路。如针对陆相致密油藏箱状结构,采用多层分支水平井压裂或水平井垂向分支井压裂方式,进行纵向序列改造;针对陆相致密油藏可压性较差的特征,将体积压裂等储层改造技术,转变为沿生排烃路径逆向储层改造技术等。

三是注重原创,集成配套。陆相致密油藏的独

特性决定了原始创新的技术需求,为此,要以原始创新为点、集成配套为面,针对不同油藏类型,以点带面实现战略性突破。

四是由易到难,滚动发展。虽然陆相致密油藏面临大量技术难题,但不同类型油藏的开采难题不尽相同,需要本着由易到难的原则,对现有致密油藏进行排序;在技术上,采用储备一代、攻关一代、推广一代的三级科技创新机制滚动发展,持续推动产业化进程。

4.2 开发模式

我国陆相致密油藏的开发既不能沿袭传统模式、也不能盲目照搬北美模式,需要针对不同类型致密油成藏组合及其特征,将井工厂模式、增大储层接触面积钻井技术、致密油原位改质及补充能量技术相结合,研究形成不同的开发模式。

对于成藏组合具有箱状结构,主力产层水敏性较强、可压性较差、地应力差较大、水平缝压力敏感性较强、孔喉比较大,不宜采用水平井体积压裂和注水开采的致密油区,可采用直井分层压裂与鱼骨井等相结合的开发模式,依靠在主力产层增大储层接触面积和原位改质实现增产。对于成藏组合具有箱状结构,主力产层可压性较好,水敏性不强、地应力差较小的致密油区,可采用多层水平分支井体积压裂,平采直注或平采平注的开发模式。对于成藏组合具有毯式结构,地应力差较小,以及天然能量不足的致密油区,可采用水平井、同层分支井压裂,平采平注或平采直注的开发模式。对于近断层、油水关系复杂的致密油区,可采用水平井鱼骨井等增大储层接触面积的开发模式。

4.3 基础前瞻研究

围绕制约我国陆相致密油藏开采的关键技术问题,需重点开展陆相致密油藏成藏规律、渗流规律、裂缝发育规律与失效机理、工程参数敏感性等基础研究,逆向经络性储层改造技术、致密油原位改质新型支撑剂、纳米材料复合驱油技术等前沿技术研究。

4.4 关键技术攻关

为实现我国陆相致密油藏的经济有效开采,建议开展六大关键技术攻关:

1) 陆相致密油地质与工程环境因素描述及甜点评价技术,核心是地震/地质/工程参数转换模型、精细致密油藏描述、地质及工程甜点评价模型。

2) 基于三维地震及工程参数体的高精度综合导向技术,包括高分辨增强前视随钻测井、随钻地层评价与大数据传输、地震及工程参数体的实时体变换,以及一体化协同导向工作环境。

3) 陆相致密油藏增大储层接触面积钻井技术,重点攻关水平井垂直分支井组钻井、水平井鱼骨井和高压射流等复杂结构井钻井新技术。

4) 致密油藏精细压裂技术,主要针对陆相致密油藏复杂的地质特征,进行多井型、多压裂组合方式个性化精细压裂设计方法,体积压裂、混合压裂、逆向压裂等压裂技术,精细生产测试与产能评价技术,微地震压裂动态监测、建模和压后评价技术等攻关研究。

5) 陆相致密油原位改质技术,研发具有除蜡、降黏、解束缚、溶孔喉、驱动、广谱抗敏 6 大影响流动性的低成本处理剂,配合较长时间焖井,实现陆相致密油的地下原位改质。

6) 陆相致密油提高采收率技术,包括水平缝重启、重复转向均衡改造、混合驱油、压采一体化技术等。

5 结束语

中国陆相致密油的战略价值已在业界形成广泛共识。未来 5 年将是陆相致密油技术实现跨越式发展、致密油开采实现产业化突破的关键时期,但现有技术储备相对于急迫和挑战性的勘探开发需求,存在一定的不足和滞后。建议在国家和企业“十三五”油气科技规划中,重点做好中国陆相致密油藏勘探开发技术与产业化发展谋划和布局,依靠有序、协同、高效地开展关键技术攻关及国家产业政策扶持,加快我国致密油产业化发展进程。

参 考 文 献

References

- [1] EIA/ARI world shale gas and shale oil resource assessment [R]. Arlington: Advanced Resources International Inc, 2013.
- [2] 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 & Development, 2014, 41(2): 198-205.
- [3] 贺春禄. 中国致密油革命:看得见的未来[EB/OL]. [2014-10-15]. <http://wenku.baidu.com/view/196a4955a300a6c30c229f4e.html>.
He Chunlu. Tight Oil revolution in China: tangikle future[EB/OL]. [2014-10-15]. <http://wenku.baidu.com/view/196a4955a300a6c30c229f4e.html>.
- [4] Ledingham G W. Santiago Pool, Kern County, California: geological note[J]. AAPG Bulletin, 1947, 31(11): 2063-2067.
- [5] 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.
- [6] SY/T6943—2013 致密油地质评价方法[S].
SY/T6943—2013 Geological evaluating methods for tight oil [S].
- [7] Canada National Energy Board. Tight oil developments in Western Canada Sedimentary Basin[EB/OL]. [2014-10-15]. <https://www.nerb-one.gc.ca/nrg/ststsc/crdlndprlmpdct/rprt/archive/tghtdvlpmntwcsb2011/tghtdvlpmntwcsb2011-eng.html>.
- [8] 牛嘉玉,张映红,袁选俊,等. 中国东部中、新生代火成岩石油地质研究、油气勘探前景及面临问题[J]. 特种油气藏, 2003, 10(1): 7-12, 21.
Niu Jiayu, Zhang Yinghong, Yuan Xuanjun, et al. Petroleum geology study, oil and gas exploration future and problems faced in Mesozoic and Cenozoic igneous rocks in eastern China [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2003, 10(1): 7-12, 21.
- [9] 张映红,顾家裕. 热液环流——侵入岩-外变质带储层发育的重要影响因素[J]. 特种油气藏, 2003, 10(1): 86-89.
Zhang Yinghong, Gu Jiayu. Hydrothermal circular flow——significant influence on reservoirs in intrusion rock-exomorphic zone[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2003, 10(1): 86-89.
- [10] 梁辉,蒲振山,张璐. 致密油储层测井评价方法研究:以三塘湖盆地马郎凹陷芦草沟组致密油勘探为例[J]. 新疆地质, 2013, 31(增刊1): 147-151.
Liang Hui, Pu Zhenshan, Zhang Lu. Logging evaluation research for tight oil reservoir: for example as tight oil exploration of Lucaogou Group in Santanghu Basin[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(supplement 1): 147-151.
- [11] Richard Borstmayer, Neil Stegent, Albert Wagner, et al. Approach optimizes completion design[EB/OL]. [2014-10-15]. http://wenku.baidu.com/link?url=T-4M_ojFWS-wH1AFNd0sWtLgY1uXmFCRPO8lalwS8MZY-O4RrJe_VD-ExiUvNAJcbp-g0vjLbK1z4hlQkR_GDDrjDanksOxho3jCFO-fvz6Uym.
- [12] Freyer R, Shaoul J R. Laterals stimulation method [R]. SPE143381, 2011.
- [13] Freyer R, Hafratjord. Method and device for producing an opening from a motherbore and into a formation; United States, 2013/0056277A1[P]. 2013-03-07.
- [14] 张晗. 辽河油田复杂结构井技术已入佳境[EB/OL]. [2014-10-15]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2014/05/28/001489311.shtml>.
Zhang Han. Drilling technologies for complex casing program wells in Liaohe Oilfield have been mature[EB/OL]. [2014-10-15]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2014/05/28/001489311.shtml>.
- [15] Hybrid completion isolates 38 Bakken zones with no lost time [EB/OL]. [2014-10-15]. <http://www.weatherford.com/dn/WFT206709>.
- [16] Ahmed Ouenes. Predicting microseismicity from geomechanical modeling of multiple hydraulic fractures interacting with natural fractures; application to the Marcellus, Eagle Ford and Wolfcamp [J]. Denver Geophysical Society: The Record, 2014, 39(10): 17.

[编辑 陈会年]