

致密油藏特征及一种新型开发技术

方文超¹, 姜汉桥¹, 孙彬峰², 顾浩¹, 刘洪霞¹

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249
2. 中国石化河南油田分公司石油工程技术研究院, 南阳 473132

摘要 致密油包含源储接触和源储紧邻两种典型源储配置关系,且致密油不包含页岩油,这明晰了致密油的定义和分类。从构造、岩石物性和流体性质3个方面总结了致密油的储层特征。中国致密油资源潜力巨大,是目前中国非常规油气开发领域最为现实的选择。HiWAY 流道水力压裂技术在开发致密油方面极具潜力,已在全球10个国家的40多个非常规油气田成功作业,平均增产20%以上,并大幅度节约了用水量和支撑剂使用量,其技术的关键在于通过交替式间歇注入支撑剂和高强度凝胶压裂液在裂缝中产生流道,并利用一种新型的纤维添加物来使流道保持稳定分布。

关键词 致密油;储层特征;资源分布和潜力;HiWAY 流道水力压裂技术

中图分类号 TE349

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.07.011

Characteristics of Tight Oil Reservoir and A Novel Key Technique for Its Development

FANG Wenchao¹, JIANG Hanqiao¹, SUN Bin Feng², GU Hao¹, LIU Hongxia¹

1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Petroleum and Engineering Technology Research Institute, Henan Oil Field Company, Sinopec, Nanyang 473132, China

Abstract As shown by the actual reservoir development, for ideal tight oil reservoirs, we have two typical kinds of source-reservoir relationship, i.e., the source contacts with the reservoir and the source adjoins the reservoir, and the ideal shale oil is not included in the tight oil. Thus, the definition and the classification of the tight oil are clear. The characteristics of the tight oil reservoirs are summarized, including the aspects of the structure, the petrophysics, and the fluid property. In China, the tight oil has a huge resource potential, which is the most realistic alternative in the unconventional oil and gas development field. HiWAY flow-channel hydraulic fracturing technique has a huge potential in the development of the tight oil, which has been applied in more than forty unconventional oil and gas fields in ten countries successfully, increasing the production by more than 20% while saving plenty of water and proppant. The keys of this new technique are the alternative and intermittent injection of the proppant and the high intensive gelled fracturing fluid, and a patented fabric additive keeping the stable distribution of flow-channel. This technique has not been applied in China so far.

Keywords tight oil; reservoir characteristic; distribution and potential of resource; HiWAY flow-channel hydraulic fracturing technique

近10年来,致密油在非常规油气资源领域受到的重视程度大幅度攀升,逐渐成为一种极具潜力的接替资源。美国威利斯顿盆地巴肯组致密油日产量从2003年的 $0.159 \times 10^4 \text{ m}^3$ 急剧上升至2010年的 $7.282 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[1],被美国地质调查局

(USGS)专家预言将成为“下一个沙特阿拉伯”^[2]。中国的致密油资源丰富,据预测,中国致密油的可采资源总量为 $35 \times 10^8 \sim 40 \times 10^8 \text{ t}$,约占世界可采资源总量的6.7%~8.8%^[3]。此外,对非常规连续型油气聚集理论的研究创新^[4,5]、致密储层中纳米孔

收稿日期:2013-08-20;修回日期:2013-12-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB228000)

作者简介:方文超,博士研究生,研究方向为油气藏开发工程,电子邮箱:wenchaoxue2007@163.com

引用格式:方文超,姜汉桥,孙彬峰,等.致密油藏特征及一种新型开发技术[J].科技导报,2014,32(7):71-76.

隙^[6]的重大发现以及长水平井钻井技术、水平井分段压裂改造技术等非常规油气开发技术的巨大进步,使致密油成为中国近阶段非常规资源开发中更为现实的选择。鉴于此,本文结合目前致密油勘探开发实际,明晰业界一直存在争论的关于致密油定义、分类等的基本问题;阐述致密油的储层特点,分析中国致密油的资源分布和潜力,并提出一种国外应用非常成功的新型水力压裂技术,旨在为中国的致密油深层次有效开发提供借鉴。

1 致密油的定义和分类

广义角度讲,致密油是指储层孔隙度和渗透率极低,需要借助水力压裂等技术手段才能实现经济开采的原油^[1,7],该定义仅描述了致密油的储层特点。目前,国内外学者主要从致密油的成藏特点和储层特点描述致密油,但存在两种不同的定义。一种定义认为,致密油是指以吸附或游离状态赋存于富含有机质且渗透率极低的暗色灰岩、泥质粉砂岩和砂岩夹层系统中自生自储、连续分布的石油聚集;页岩生成的油气在原地滞留的部分(占总生烃量的50%以上)也称为致密油^[8-10]。另一种定义认为,致密油是指以吸附或游离状态赋存于生油岩,或与生油岩互层、紧邻的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集岩中,未经过大规模长距离运移的石油聚集^[11-13]。可以看出,两种定义的区别主要体现在源储配置关系和储集岩岩性上,前者强调致密油的源储一体关系,因而将同样具有该特点的页岩油也包含其中;而后者更强调源储直接接触或紧邻的关系,且将储集岩类型限定为砂岩和碳酸盐岩,不包含页岩油储层。

对于致密油源储配置关系问题,目前的勘探成果证实了第二种定义的准确性。如威利斯顿盆地的巴肯组储层,主要分为上巴肯段页岩、中巴肯段白云岩和灰岩、下巴肯段页岩3个部分,其中上下巴肯段页岩是烃源岩,生成的油气经过短距离运移到达中巴肯段形成致密油储层^[14];又如中国最具代表性的致密油储层——鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长6—长7段,长7段为该层段的主力生油岩层,其生成的油气经过短距离运移到长6段和长7段的砂岩储集空间中形成致密油储层^[15]。对于致密油是否应该包含页岩油的问题,由于同一类油层可以采用相同或类似的方式进行开采,因此开采方式应该是考虑的主要因素。而实际情况表明,致密油和页岩油需要不同的开采技术,特别是泥页岩凝析油或轻质油,需要特殊的开采方法^[9],从而页岩油并不等同于致密油。综上所述,两种致密油定义中,后者更具科学性。

从岩性角度分类,致密油主要分为致密砂岩油和致密碳酸盐岩油两大类,而后者又主要包含致密灰岩油和致密白云岩油两种类型。贾承造等^[13]从储层孔渗特征的角度(孔隙度, Φ)将中国的致密油分为I($\Phi=7\% \sim 10\%$)、II($\Phi=4\% \sim 7\%$)、III($\Phi < 4\%$)3类(空气渗透率均小于 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$);依据致密储层的成因类型及致密油体系的地质特点,将中国的致密油分为

湖相碳酸盐岩致密油(如准噶尔盆地中二叠统芦苇沟组)、深湖水下三角洲砂岩致密油(如松辽盆地上白垩统青山口组和泉头组)、深湖重力流砂岩致密油(如鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长6—长7段)3大类。

2 致密油的储层特征

2.1 致密油储层的聚集特征

致密油储层内广泛发育纳米级孔喉系统(孔喉直径 $< 1000 \text{ nm}$)^[15],使储层流体的水柱压力与浮力作用受限,储层内无统一的油/水、油/气界面和压力系统,油、气、水常多共存^[16-18]。储层的含油气边界主要受以排烃压力为主的聚集动力和以毛管力为主的聚集阻力二者耦合控制^[9]。因此,致密油气的成藏并不局限于二级构造单元。油气大面积连续分布在盆地的斜坡和中心凹陷地带,具有全盆地普遍含油气的勘探特点。中国主要致密油区块含油气面积普遍小于北美区块^[3,11,13],如松辽盆地白垩系青山口组—泉头组探明面积为 $1.5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \text{ km}^2$,四川盆地侏罗系大安寨组为 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,准噶尔盆地二叠系芦苇沟组—平地泉组为 $0.15 \times 10^4 \text{ km}^2$,鄂尔多斯盆地延长组长6—长7段为 $0.12 \times 10^4 \text{ km}^2$;而北美Bakken油区探明含油面积为 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$,Eagle Ford为 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。造成中国与北美致密油区块含油面积差别大的主要原因是前者以陆相沉积为主,分布范围有限,而后者以海相沉积为主,分布稳定且面积大。

2.2 致密油储层的构造特征

与常规油气储层具有明显圈闭构造不同,致密油成藏主要受水动力控制,基本不受局部构造影响^[19-21]。如四川盆地侏罗系致密油储层,其构造在整体上为西北倾的斜坡,上部发育局部的背斜圈闭,但侏罗系的油井除分布在背斜圈闭外,在斜坡、向斜等非圈闭聚集构造部位同样钻获工业致密油气流。侏罗系5套油层平面上叠合连片分布。图1为美国威利斯顿盆地巴肯组储层构造示意图^[14,22,23],纵向上分为上巴肯段页岩、中巴肯段白云岩/灰岩和下巴肯段页岩3个层位,其中上下两部分页岩为致密油烃源岩层,中间为致密油储集层;东西方向构造为两边向斜、中间背斜,背斜处发育一羚角构造,为巴肯组致密油最早产出部位;除背斜圈闭外,两边斜坡处分别建有Elm Coulee油田^[24,25]和Parshall油田^[26,27],也证明了致密油分布不受常规圈闭构造控制的理论。

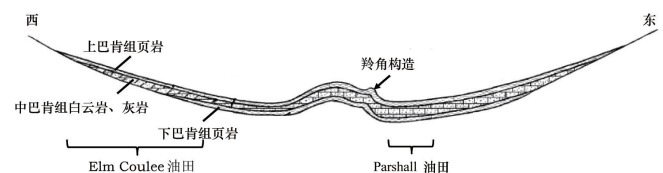


图1 美国威利斯顿盆地巴肯组东西向构造示意

Fig. 1 Schematic diagram of east-west geology for Bakken formation in Williston Basin

2.3 致密油储层的岩石物性和流体特征

致密油储层的储集空间类型主要有有机孔、无机孔和微裂缝3种。有机孔是有机质中的孔隙,多存在于源储一体的页岩油储层中;无机孔则多存在于近源致密油储层中,无机孔包括溶蚀孔和残余原生孔,以晶(粒)间、粒内溶孔为主^[6]。致密油储层中脆性物质含量较高(一般大于35%^[13]),天然裂缝较发育,如Mullen^[28]在测定巴肯组天然裂缝对产量的影响时,发现目标井在甜点区钻遇800多条天然裂缝,可见巴肯组致密油甜点区天然裂缝相当发育。此外,四川盆地侏罗系致密油产量受裂缝影响明显,裂缝发育区往往能获得高产,形成甜点。

常规油气田储层的孔喉直径为毫米到微米级,而非常规油气田储层的孔喉系统多为纳米级^[29,30],如鄂尔多斯盆地延长组长6段的纳米级孔隙占到总体孔隙的95%以上^[6],主体孔喉直径为60~800 nm;四川盆地川中侏罗系大安寨组储层主体孔喉直径为50~800 nm^[3]。经统计研究,致密砂岩油储层和致密灰岩油储层的孔喉直径分别为50~900 nm和40~500 nm^[3]。

目前被广泛认可的依据储层孔渗参数识别致密油藏的标准为:孔隙度 $\Phi < 10\%$, 覆压渗透率 $K < 0.1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (或空气渗透率 $< 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$)。致密油油品较好,流动性较强,一定程度上弥补了储层致密给生产带来的不足^[24,31],其密度一般小于40°API(即在15.6℃时密度大于0.8251 g/cm³)。延长组长6段地面原油密度一般为0.84 g/cm³,黏度为6.12 mPa·s,凝固点为17.6℃,初馏点为76.3℃,具有低密度、低黏度、低含硫、低凝固点的特点,原油性质较好。此外,准噶尔盆地二叠系致

密油黏度为0.87~0.92 mPa·s,四川盆地侏罗系为0.76~0.87 mPa·s,渤海湾盆地沙河街组为0.67~0.86 mPa·s。巴肯组致密油密度为0.82 g/cm³,黏度更低,为0.36 mPa·s,气油比 $1.0335 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{t}$,流动性相对更好。

3 中国致密油资源分布和潜力

20世纪70年代中国就已经开始致密油气的勘探工作^[32]。目前,中国在鄂尔多斯盆地三叠系延长组、准噶尔盆地二叠系、松辽盆地白垩系、四川盆地侏罗系、渤海湾盆地古近系沙河街组等均有致密油的工业性发现^[13,33]。其中,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组近年来多口探井见到厚层油气显示,2010年对吉23井芦草沟组2309~2386 m采取连续油管酸压,获日产油1.96 m³,从而证实了芦草沟组致密储集层的工业含油性^[34];四川盆地川中地区已发现6个致密油田,预测储量 $5649 \times 10^4 \text{ t}$,2010年,该地区80%的原油产量(约 $7.184 \times 10^4 \text{ t}$)产自侏罗系大安寨组致密油层^[11];鄂尔多斯盆地华庆油田三叠系延长组致密油层在实施水平井分簇多段压裂后,4口实验井平均日产油53.5 m³,其中庆平2井日产纯油105.6 m³^[11]。

中国致密油纵向上具有多层位富集的特点,志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系—白垩系、古近系等均有致密油富集^[35];平面上致密油分布在中国主要的几个产油气盆地(图2)。各盆地致密油含油层系及储层特征、预测资源量如表1^[3,11,13,36,37]所示。鄂尔多斯盆地延长组长6—长7段、准噶尔盆地二叠系和四川盆地侏罗系应是目前中国致密

表1 中国主要含致密油盆地分布、储层特征及资源量

Table 1 Distribution, reservoir characteristics and reserves of main basins containing tight oil in China

含油盆地	含油层系	储层类型	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	预测资源量/ 10^8 t
鄂尔多斯盆地	延长组长6—长7段	粉细砂岩	2~12	0.01~1	19.9
四川盆地	侏罗系	粉细砂岩、介壳灰岩、泥质灰岩	2~7	0.0001~1	10.7
塔里木盆地	志留系	致密砂岩	7~10	0.02~1	15.9
三塘湖盆地	芦草沟组	白云岩、灰岩、黑色泥岩	3~13	0.1~1	5.6
吐哈盆地	侏罗系	粉细砂岩	4~10	<1	1~1.5
酒西盆地	白垩系	粉砂岩、碳酸盐岩	5~10	<0.1	1.8~2.3
柴达木盆地	干柴沟组	泥灰岩、藻灰岩、粉砂岩	5~8	<1	4~5
松辽盆地	青山口组青一段	泥岩裂缝	2~15	0.6~1	1.8~4.4
	高台子油层高三、高四段	致密砂岩			4
	扶杨油层	致密砂岩			>10
准噶尔盆地	芦草沟组	白云石化岩类	3~10	<1	13.17
	平地泉组	白云石化岩类			7.48
	风城组	白云石化岩类			8.35
渤海湾盆地	沙河街组一段	湖相白云岩	5~10	0.2~1	3.8~4.5
	沙河街组三、四段	致密砂岩			6~7.5

油勘探开发的首选区块^[38]。

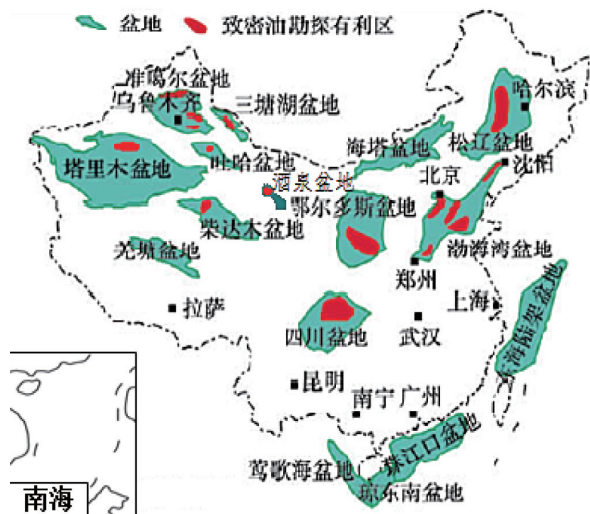


图2 中国主要产油气盆地区的致密油分布

Fig. 2 Distribution of tight oil in main basins containing oil and gas in China

4 HiWAY 流道水力压裂技术

4.1 技术特点及实施效果

HiWAY 流道水力压裂技术(HiWAY flow-channel hydraulic fracturing technique)是 2010 年出现的一种新型水力压裂技术。传统水力压裂施工是在压开的裂缝中形成支撑剂充填层,使流体在支撑剂颗粒间的缝隙中流向井筒。通过优选支撑剂颗粒大小和强度可以增强裂缝的导流能力,但无论如何,裂缝的导流能力始终受支撑剂充填层渗流能力的束缚。HiWAY 流道水力压裂技术通过在裂缝中形成支撑剂充填塞,让流体通过充填塞之间的流道流向井筒,从而使裂缝具有无限导流能力^[39,40]。图 3 是两种水力压裂技术在裂缝中形成的渗流通道对比。该技术目前在中国尚未见相关应用报道。

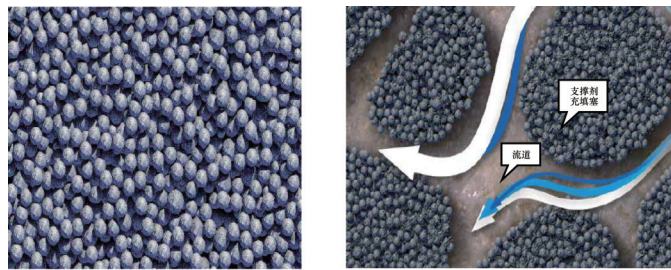


图3 传统水力压裂(左)与HiWAY流道水力压裂(右)渗流通道对比

Fig. 3 Comparison of flow path generated by traditional hydraulic fracturing (left) and HiWAY flow-channel hydraulic fracturing (right)

自 2010 年起,HiWAY 流道水力压裂技术已经在美国、加拿大、俄罗斯、墨西哥等 10 个国家的非常规油气开采中得到成功应用,累计压裂级数达 5000 多级,平均增产 20% 以上。最近一次在美国 Eagle Ford 油田的压裂施工中,该技术使作业区两个月内的累积产油、气量分别增加 43% 和 61%。据统计,该技术的成功应用已减少用水量约 $9.5 \times 10^5 \text{ m}^3$,相当于 1700 个家庭一年的用水量;已减少支撑剂使用量 $3.4 \times 10^5 \text{ t}$,减少 CO_2 排放量近 3000 t,并使支撑剂的返排率降至 0.04%,达到行业领先水平^[41],显示出其在非常规油气开采领域的巨大潜力。

4.2 增产机理

流道的产生是 HiWAY 流道水力压裂技术增产的关键,增产的机理主要表现在 4 个方面:

- 1) 裂缝中的流道使流体的渗流阻力大大减小,裂缝的导流能力不再受支撑剂充填层的约束,从而使其具有无限导流能力;
- 2) 相较于传统支撑剂充填层与油藏的孔隙接触,流道与油藏具有更大的接触面积;
- 3) 流道的存在使压裂液的压力损失降低,有利于压出更长的裂缝半长^[42];
- 4) 裂缝的无限导流能力使压裂液的反排更加充分,从而减少了压裂液残渣对裂缝壁面的伤害^[43];此外,反排能力的增强也是保证裂缝半长增加的前提。

4.3 技术关键

HiWAY 流道水力压裂技术的关键在于流道的产生及稳定,因而产生了两项关键性的技术创新^[44]。

流道的产生主要依靠支撑剂和压裂液注入方式的改变。HiWAY 流道水力压裂中支撑剂采用的是间歇式浓度脉冲注入方式,脉冲间歇时注入高浓度凝胶压裂液(图 4)。这种交替式间歇注入方式能使每一周期中支撑剂在压裂液的作用下形成分散的支撑剂充填塞,从而形成流道。

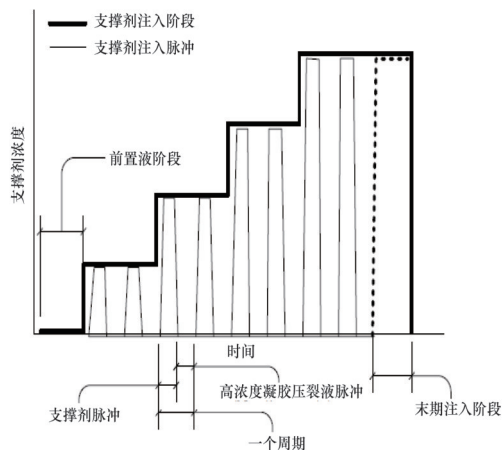


图4 HiWAY流道水力压裂技术地面注入方案
Fig. 4 Injection strategy of HiWAY flow-channel hydraulic fracturing technique

伴随压裂液注入的一种新型纤维添加物是保证支撑剂段塞从地面注入到井底过程中不发生分散,以及在裂缝闭合前流道保持稳定的关键^[45],其作用机制表现在两个方面:

1) 纤维物质的加入能使支撑剂段塞的屈服应力增加 10~20 Pa,从而有效防止支撑剂的分散;

2) 纤维物质能均衡压裂液在流道中流动的速度剖面,从而减小支撑剂段塞所受的剪切应力。室内测试表明,纤维物质的加入能有效降低组成支撑剂柱的颗粒在裂缝中的沉降速度,从而使其在裂缝中稳定分布,这一点在压裂垂直裂缝时尤为重要。

5 结论

1) 致密油主要包含源储接触和源储紧邻两种源储配置关系。从开采方式角度看,致密油不应该包含页岩油。

2) 依据致密储层的成因类型及致密油体系的地质特点,可将中国的致密油分为湖相碳酸盐岩致密油、深湖水下三角洲砂岩致密油、深湖重力流砂岩致密油 3 大类。

3) 致密油储层内广泛发育纳米级孔喉系统,无统一油水界面和压力系统,无明显构造圈闭,油气大面积连续分布,具有全盆地普遍含油气的特点。

4) 中国致密油资源潜力大,在 10 个主要产油气盆地区均有不同程度的致密油富集,其中鄂尔多斯盆地延长组长 6—长 7 段、准噶尔盆地二叠系和四川盆地侏罗系应是目前中国致密油勘探开发的重点区块。

5) HiWAY 流道水力压裂技术能使压开的裂缝产生无限导流能力,大大提高油气产量,并大幅度减少单井用水量和支撑剂使用量,是目前非常规油气开采领域极具潜力的一种新型水力压裂技术,势必会对致密油的开采产生深远影响。

参考文献 (References)

- [1] 黄昌武. 2011 年国际石油十大科技进展[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 213.
Huang Changwu. 2011 top 10 science and technology progress for international petroleum industry[J]. Exploration and Development, 2012, 39(2): 213.
- [2] Miller B, Paneitz J, Yakely S, et al. Unlocking tight oil: Selective multi-stage fracturing in the Bakken Shale[R]. Colorado: The Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [3] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [4] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-682.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and

evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.

- [5] Zou C N, Tao S Z, Zhu R K, et al. Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant province: A case from the Upper Triassic Xujiahe Formation giant gas province, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 307-319.
- [6] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [7] 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): 541-544.
Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541-544.
- [8] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30.
Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30.
- [9] 景东升, 丁锋, 袁际华. 美国致密油勘探开发现状、经验及启示[J]. 国土资源情报, 2012(1): 18-19.
Jing Dongsheng, Ding Feng, Yuan Jihua. Status quo, experience and enlightenment of tight oil exploration in the United States[J]. Land and Reservoir Information, 2012(1): 18-19.
- [10] 窦宏恩, 马世英. 巴肯致密油藏开发对我国开发超低渗透油藏的启示[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(2): 120-124.
Dou Hongen, Ma Shiyong. Lessons learned from oil production of tight oil reservoirs in Bakken play[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(2): 120-124.
- [11] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [12] 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 8-17.
Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, et al. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 8-17.
- [13] 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.
- [14] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1127-1153.
- [15] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum

- Exploration and Development, 2012, 39(1): 13–26.
- [16] U S Geological Survey National Oil and Gas Resource Assessment Team. 1995 national assessment of united states oil and gas reservoirs [C]// Geological Survey Circular 1182. Washington: United States Government Printing Office, 1995: 20.
- [17] Schmoker J W. A resource evaluation of the Bakken Formation (upper devonian and lower mississippian) continuous oil accumulation, Williston basin, North Dakota and Montana[J]. The Mountain Geologist, 1996, 33(4): 95–104.
- [18] Schmoker J W. U S geologic survey assessment concepts for continuous petroleum accumulations[C]// Petroleum Systems and Geologic Assessment of Oil and Gas in the Southwestern Wyoming Province, Wyoming, Colorado, and Utah. Colorado, USA: U S Geological Survey, 2005: 7.
- [19] Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum system [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851–1852.
- [20] Dawson F M. Unconventional gas in Canada opportunities and challenges[R]. Alberta: Canadian Society for Unconventional Gas, 2010.
- [21] 杨光, 杨家静, 杨金利, 等. 四川盆地侏罗系非常规致密油成藏地质条件研究[C]//中国油气论坛2011——非常规油气勘探开发技术专题研讨会论文集. 北京: 世界石油工业, 2011: 99–105.
Yang Guang, Yang Jiajing, Yang Jinli, et al. Study on geological conditions for Jurassic tight oil reservoirs in Sichuan Basin[C]// 2011 China Oil & Gas Forum: Symposium of Unconventional Oil and Gas Exploration and Development Technology. Beijing: World Petroleum Industry, 2011: 99–105.
- [22] Meissner F F. Petroleum geology of the Bakken Formation Williston Basin, North Dakota and Montana[C]// Williston Basin Proceedings. Billings: Montana Geological Society, 1978: 207–227.
- [23] Miller B, Paneitz J, Mullen M. The successful application of a compartmental completion technique used to isolate multiple hydraulic-fracture treatments in horizontal Bakken shale wells in North Dakota[R]. Colorado: SPE, 2008.
- [24] Cox S A, Cook D M, Dunek K, et al. Unconventional resource play evaluation: A look at the Bakken shale play of North Dakota[R]. Colorado: SPE, 2008.
- [25] Shoib S, Tech M, Hoffman B T. CO₂ flooding the Elm Coulee field [R]. Colorado: SPE, 2009.
- [26] Dechongkit P, Prasad M. Recovery factor and reserves estimation in the Bakken petroleum system (analysis of the antelope, Sanish and Parshall fields)[R]. Alberta: SPE, 2011.
- [27] Simenson A. Depositional facies and petrophysical analysis of the Bakken Formation, Parshall Field, Mountrail County, North Dakota[D]. Colorado: Colorado School of Mines, 2010.
- [28] Mullen M, Pitcher J, Hinz D. Does the presence of natural fractures have an impact on production? A case study from the Middle Bakken Dolomite, North Dakota[R]. Florence: SPE, 2010.
- [29] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(3): 329–340.
- [30] Wardlaw N C, Cassan J P. Oil recovery efficiency and the rock-pore properties of some sandstone reservoirs[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1979, 27(2): 117–138.
- [31] Luo S Q, Neal L, Arulampalam P, et al. Flow regime analysis of multi-stage hydraulically-fractured horizontal wells with reciprocal rate derivative function: Bakken case study[R]. Alberta: SPE, 2010.
- [32] 舟丹. 致密油气成非常规油气资源新亮点[J]. 中外能源, 2011, 16(9): 62.
Zhou Dan. Tight oil and gas has become a new bright spot in unconventional resources[J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(9): 62.
- [33] 张舒雅. 我国致密油气开发亟待升温[N]. 中国石油报, 2011–12–9(4).
Zhang Shuya. Chinese tight oil and gas urgently in need of development[N]. China Petroleum Daily, 2011–12–9(4).
- [34] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 657–667.
Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 657–667.
- [35] 康玉柱. 中国非常规致密岩油气藏特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(5): 1–4.
Kang Yuzhu. Characteristics of tight hydrocarbon reservoirs in China [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 1–4.
- [36] 杨晓宁, 张惠良, 朱国华. 致密砂岩的形成机制及其地质意义——以塔里木盆地英南2井为例[J]. 海相油气地质, 2005, 10(1): 31–36.
Yang Xiaoning, Zhang Huiliang, Zhu Guohua. Formation mechanism and geological implication of tight sandstones: A case of well YN-2 in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(1): 31–36.
- [37] 李红, 柳益群, 梁浩, 等. 新疆三塘湖盆地中二叠统芦草沟组湖相白云岩成因[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 45–58.
Li Hong, Liu Yiqun, Liang Hao, et al. Origin of lacustrine dolostones of the Middle Permian Lucaogou Formation in Santanghu Basin of Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 45–58.
- [38] 许怀先, 李建忠. 致密油——全球非常规石油勘探开发新热点[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 99.
Xu Huaixian, Li Jianzhong. Tight oil: A new hot spot in global unconventional petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 99.
- [39] Peña A, Gutierrez L, Archimio A, et al. New treatment creates infinite fracture conductivity[J]. Exploration and Production, 2010, 38(10): 71–73.
- [40] Johnson J, Turner M, Weinstock C, et al. Channel fracturing: A paradigm shift in tight gas stimulation[R]. Texas: SPE, 2011.
- [41] Schlumberger. HiWAY flow-channel hydraulic fracturing increases production using less water and proppant[EB/OL]. [2013–08–20]. <http://www.slb.com/hiway.aspx>.
- [42] Ajayi B, Walker K, Wutherich K, et al. Channel hydraulic fracturing and its applicability in the marcellus shale[R]. Ohio: SPE, 2011.
- [43] Ahmed M, Shar A H, Ahmed M. Optimizing production of tight gas wells by revolutionizing hydraulic fracturing[R]. Doha: SPE, 2011.
- [44] Gillard M, Medvedev O, Peña A, et al. A new approach to generating fracture conductivity[R]. Florence: SPE, 2010.
- [45] Valenzuela A, Guzmán J, Chávez S, et al. Field development study: Channel fracturing increases gas production and improves polymer recovery in burgos basin, mexico north[R]. Texas: SPE, 2012.

(责任编辑 王媛媛)