

文章编号:0253-9985(2011)06-0815-08

四川盆地川中侏罗系致密储层石油勘探前景

廖群山^{1,2}, 胡 华³, 林建平⁴, 刘中良¹, 穆献中¹

(1. 北京工业大学, 北京 100124; 2. 中国石油天然气集团公司 咨询中心, 北京 100724;

3. 中国石油 西南油气田 勘探事业部, 四川 成都 610041; 4. 中国石油 西南油气田 川中油气矿, 四川 遂宁 629001)

摘要:从连续型石油聚集和与美国 Williston 盆地 Bakken 组对比的角度,对四川盆地川中侏罗系致密储层的石油勘探前景进行了探讨。研究认为:1)四川盆地侏罗系储层孔隙度平均为 1.0%~3.7%,渗透率平均为 $0.35 \times 10^{-3} \sim 0.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值孔喉半径平均为 0.05~0.24 μm ,属于典型的致密储层。2)川中侏罗系产油层纵、横向上与生油层密切共生,源内或近源聚集;主力油层连续分布在斜坡区和凹陷区,没有明显的圈闭界限,不受局部构造控制;多层系叠合连片,大面积整体含油;多数含油区块为异常高压系统,油藏无水,没有统一的油-水边界,为较典型的连续型石油聚集,与 Bakken 组基本相同。3)Bakken 组致密储层石油在近几年相对高油价背景下,主要以水平井及分段压裂技术实现了规模效益勘探开发;川中侏罗系受认识、投入和技术的制约,近十几年来未有实质性进展。4)从研究认识着手,建立先导性试验区,加强水平井及分段压裂等关键工艺攻关,有效提高单井产量,这是打开川中侏罗系致密储层石油勘探开发新局面的有效途径。

关键词:分段压裂;水平井;连续型石油聚集;勘探前景;致密储层;侏罗系;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin

Liao Qunshan^{1,2}, Hu Hua³, Lin Jianping⁴, Liu Zhongliang¹, Mu Xianzhong¹

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. CNPC Advisory Center, Beijing 100724, China;

3. Exploration Business Division, CNPC Southwest Oil/Gas field, Chengdu, Sichuan 61004, China;

4. Petroleum Resource Plant of Central Part of Sichuan, CNPC Southwest Oil/Gas field, Suining, Sichuan 629001, China)

Abstract: From viewpoint of continuous petroleum accumulation and comparison with Bakken Formation in Williston Basin (USA), the paper discussed petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin. The Jurassic reservoirs in Sichuan Basin are typical tight ones with an average porosity of 1~3.7%, average permeability of $0.35 \times 10^{-3} \sim 0.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ and median pore throat radius of 0.05~0.24 μm . The Jurassic reservoirs contact closely with source rocks both laterally and vertically in central Sichuan Basin. The hydrocarbons accumulate within source rocks or in reservoirs close to the source rocks. The major reservoirs are continuously distributed in the slope area and sags, have no distinct trap boundaries, and are not controlled by local structures. Multiple reservoirs superimposed vertically and connected laterally, forming a large hydrocarbon-bearing areal extent. Most oil-bearing blocks have an abnormal overpressure system, no water in the reservoir and no uniform oil/water contact. The Jurassic oil accumulation in central Sichuan Basin is a typical continuous one basically similar to the Bakken Formation. In recent years, the Bakken tight oil have been developed in large scale with horizontal well and multi-stage fracturing techniques thanks to the relatively high oil price. In contrast, exploration and development of the Jurassic tight reservoirs in central Sichuan Basin have no breakthrough due to the constraints of understanding, investment and technology. Improving geological under-

收稿日期:2011-10-01。

第一作者简介:廖群山(1968—),男,高级工程师、博士后,油气资源战略研究和勘探评价。

standing, strengthening research of key technologies such as horizontal drilling and multi-stage fracturing and increasing single well production are critical to the successful exploration and development of the Jurassic tight reservoir in central part of Sichuan Basin.

Key words: multi-stage fracturing, horizontal well, continuous petroleum accumulation, exploration prospect, tight reservoir, Jurassic, Sichuan Basin

四川盆地川中是一个历经了50年风风雨雨的老油区,以往曾开展3次石油会战、原油 30×10^4 t上产等较大规模工作,几上几下,一直未有大的突破。2000年以来,石油勘探开发面临萎缩,产量有逐年下降的趋势,目前年产仅 10×10^4 t左右。产油层中、下侏罗统是一套特低孔、特低渗的陆相砂岩和介壳灰岩,岩性致密,物性很差,这是川中石油多年来没有取得突破、前景也不为人看好的一个重要原因。

近十几年来,美国在致密储层领域的油气勘探开发取得了巨大成功,致密砂岩气、煤层气、页岩气3种非常规天然气产量已超过常规天然气产量,占据了“半壁江山”。特别是最近两三年,“致密油(tight oil)”勘探开发成为美国本土非常规油气资源发展的新热点,Williston盆地Bakken组、Denver-Julesburg盆地Niobrara组、Maverick盆地Eagle Ford组等“致密油”实现了商业化规模开采,其中2010年底Williston盆地Bakken组“致密油”年产水平达到 2200×10^4 t。国外文献中的“致密油”不是一个确切的术语,应理解为赋存在岩性致密的细砂岩、粉砂岩、碳酸盐岩甚至页岩等储层中的非常规石油更为贴切,实际上应是“致密储层油”。这类致密储层物性差^[1-3],但尚未有公认的孔隙度、渗透率标准。Bakken组、Niobrara组和Eagle Ford组产油层孔隙度以2%~10%居多,地面渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,自然产能低,以往用常规技术难以有效开采;2008年以来随着水平井及分段压裂技术的日臻成熟和国际油价的逐渐回升走高,勘探开发取得突破^[4-6],出现犹如“井喷”式的生产热潮。

从物性上看,川中侏罗系产油层孔隙度一般为1%~6%,地面渗透率一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是典型的致密储层,其特征与国外“致密油”有无类似之处?借鉴美国先进的技术工艺和成功的发展经验,川中石油勘探开发能否取得新的突破?发展前景如何^[7-8]?这些问题值得研究和探索。

1 四川盆地侏罗系致密储层主要特征

1.1 侏罗系致密储层主要特征

四川盆地石油主要产自川中地区,产层为内陆河湖相沉积的中、下侏罗统,由下至上为下侏罗统自流井组珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段、大安寨段和凉高山组,以及中侏罗统沙溪庙组。其中,珍珠冲段、东岳庙段、大安寨段、凉高山组和沙溪庙组5套地层都发现了油层,储集岩有碳酸盐岩和碎屑岩两种,均表现为特低孔、特低渗特征。碳酸盐岩储层分布在大安寨段和东岳庙段,岩性为介壳灰岩,以大(大安寨)一、大三段为主。大安寨介壳灰岩储层单层厚度为3~20 m,累计厚度为5~40 m;孔隙度一般小于2%,平均为1.04%;渗透率一般为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。碎屑岩储层分布在沙溪庙组、凉高山组和珍珠冲段,岩性为岩屑石英砂岩或长石石英砂岩,石英含量为50.5%~60.9%,钙质(碳酸盐胶结物)含量为1.1%~11.4%。其中,凉高山组储层以凉(凉高山组)上段粉砂岩、细砂岩为主,单层厚度为1~4 m,累计厚度为10~20 m;孔隙度一般为1%~4%,平均为1.74%;渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。沙溪庙组砂岩以沙(沙溪庙组)一段底部粉-细砂岩和中、上部细-中粒砂岩为主,厚度为5~30 m不等;孔隙度一般为2%~6%,平均为3.72%;渗透率一般为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.38 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据岩心、薄片、扫描电镜等观察结果,无论是砂岩储层还是介壳灰岩储层,均表现为裂缝+孔隙双重介质特征,储集空间非单一的裂缝,基质孔隙都是含油的。其中,沙溪庙组、凉高山组砂岩储集空间以残余粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔和微孔为主;大安寨段介壳灰岩主要储集空间为粒间溶孔、粒间溶洞、晶间溶孔、晶内溶孔和裂缝。从

压汞分析资料来看,沙一段砂岩中值喉道半径为 $0.04 \sim 0.61 \mu\text{m}$, 平均为 $0.24 \mu\text{m}$, 属于细喉(国内标准为 $0.04 \sim 0.50 \mu\text{m}$); 凉上段砂岩中值喉道半径为 $0.02 \sim 0.51 \mu\text{m}$, 平均为 $0.12 \mu\text{m}$, 以细喉为主; 大安寨段介壳灰岩中值喉道半径为 $0.01 \sim 0.07 \mu\text{m}$, 平均为 $0.05 \mu\text{m}$, 以微喉(国内标准为小于 $0.04 \mu\text{m}$) 为主。孔隙度与折算覆压渗透率的关系与 Bakken 组中段比较接近(图 1)。不管是沙溪庙、凉高山的砂岩油层, 还是大安寨的灰岩油层, 生产井采油曲线都反映出早期产量高但递减快(第 1 年递减率可达 $40\% \sim 70\%$)、中后期产量低但稳定期长(递减率 10% 左右)的两阶段生产特征, 与 Bakken 组致密储层的产量曲线十分相似(图 2); 孔隙和裂缝对产量的贡献约各占一半, 表明孔隙对储量和长期低产稳产的贡献十分重要^[9]。

1.2 侏罗系石油聚集主要特征

川中侏罗系发育凉高山组、大安寨段、东岳庙段和珍珠冲段 4 套以生油为主的烃源岩, 沙溪庙组、凉高山组、大安寨段、东岳庙段和珍珠冲段 5 套储油层与这 4 套生油层密切共生, 组成多层“夹饼干”式的生、储组合, 属于源内或近源聚集^[9]。最新油-源对比资料证实, 各层原油都只同附近的生油岩对比得好, 而很难远距离对比。从 20 世纪 50 年代末川中石油第一次会战到 2010 年底, 川中地区共完钻侏罗系探井、开发井 1 205 口, 绝大部分均见良好油气显示, 其中工业油气流井 733 口、低产油气流井 227 口。平面上, 这 960 口油井分布在南北长 200 km、东西宽 190 km、面积近 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的川中中生界北倾大斜坡上; 纵向上, 从南部的磨溪到北部的龙岗, 同一油层顶面海拔相

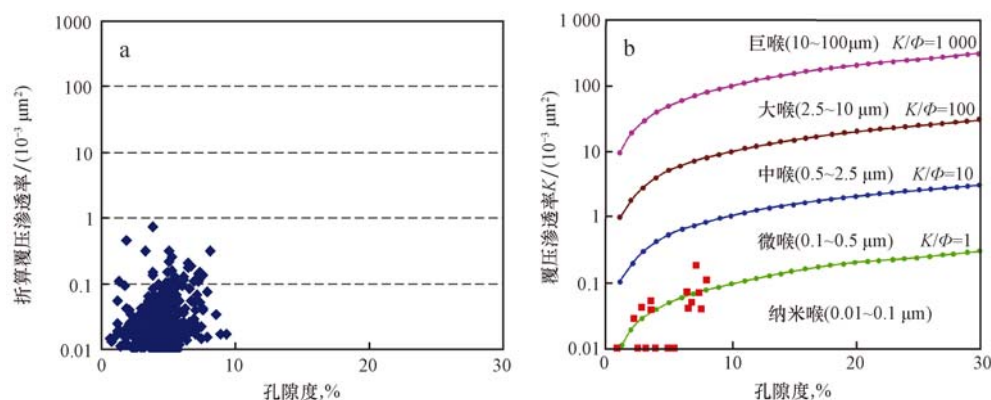


图 1 川中侏罗系沙溪庙组和美国 Williston 盆地 Bakken 组中段孔隙度与渗透率的关系

Fig. 1 Relationship between porosity and permeability of the Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin and the middle Bakken Formation in Williston Basin, USA

a. 川中公山庙油田沙溪庙组; b. Williston 盆地 Elm Coulee 油田 Bakken 组中段

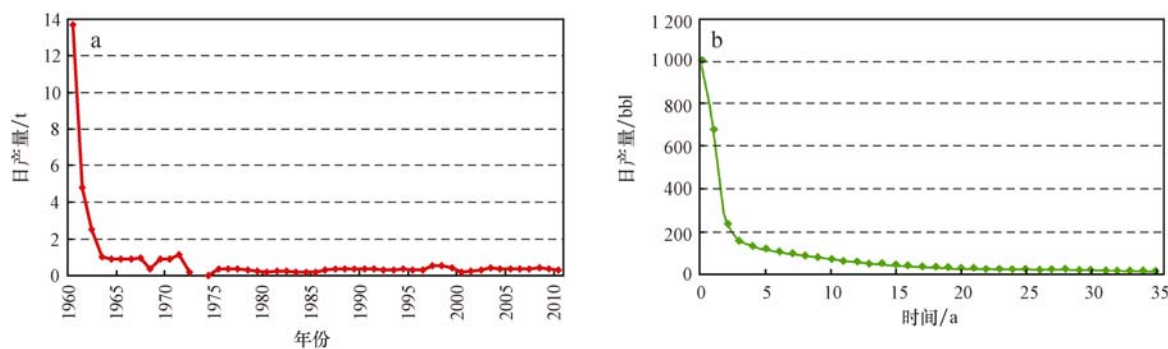


图 2 川中罗 30 井凉高山油层生产曲线(a)与美国 Williston 盆地 Bakken 组油层典型生产曲线(b)对比

Fig. 2 Comparison of production profile of the Lianggaoshan pay zone in L30 well in central Sichuan Basin (a) with the typical production profile of Bakken Formation pay zone in Williston Basin, USA (b)

差近 2 000 m,在此高差范围内,局部构造的高、低部位及斜坡上、向斜内均有工业油流井,含油范围远远超出构造圈闭范围,呈现出大面积、叠合连片含油特征(图 3)。根据川中侏罗系油藏大剖面的初步编制成果,大安寨油层和凉上段油层在区域上分布稳定,从南部的桂花油田到北部的龙岗地区,虽然这两套储层的岩性局部有所变化,但都是含油的,油层延展 100 ~ 200 km,没有明显的圈闭界限。以中北部为例,由公山庙向龙岗湖盆中心方向,大安寨段埋藏深度虽然从 2 500 m 左右增加到 3 500 m,但都是油层;而且凉高山组和沙溪庙组向湖盆中心方向,砂体并未减薄,反而增厚。

侏罗系油藏多数属于异常高压系统,大安寨段、凉高山组和沙溪庙组油层压力系数分别为 1.23 ~ 1.72, 0.97 ~ 1.20 和 1.46 ~ 1.63。已发现的 5 个油田和 18 个含油构造(区块)几乎不含水,无论是大安寨油藏还是凉高山、沙溪庙油藏,都没有见到明显的边水和底水,均无统一的油-水界

面,属于无水油田。绝大部分生产井无水产出,2010 年川中所有产油区块当年产油 8.9×10^4 t,但产水仅 1.02×10^4 m³;经几十年生产期,产水量只占总产液量的 10%。至 2010 年底,累计产油 478.93×10^4 t,但累计产水仅 44.11×10^4 m³,只占累计产液量的 8%。即使是投产了 50 a 的生产井,也不见水或产水量极低,如桂花油田桂 14、桂 24、大石 13 井投产 50 a 之久,累计产油量分别达 4.86×10^4 , 7.28×10^4 , 7.52×10^4 t,桂 14、桂 24 井一直未产水,大石 13 井累计产水也不过 902.30 m³,其中部分水还是注水井注入的水。从总体上看,桂花油田地质构造为南高北低的单斜层,而地层水仅分布于该油田的西南角,形成了水高油低的态势^[10]。1966—1967 年曾在华蓥山西侧以凉高山组、大安寨段为主要目的层,在已经裸露地表的华蓥西构造陡带共钻井 19 口,仅 2 口井见油,余者大都产水^[10]。结合侏罗系构造特征和油层分布特征,初步判断川中地区侏罗系地层的东部(华

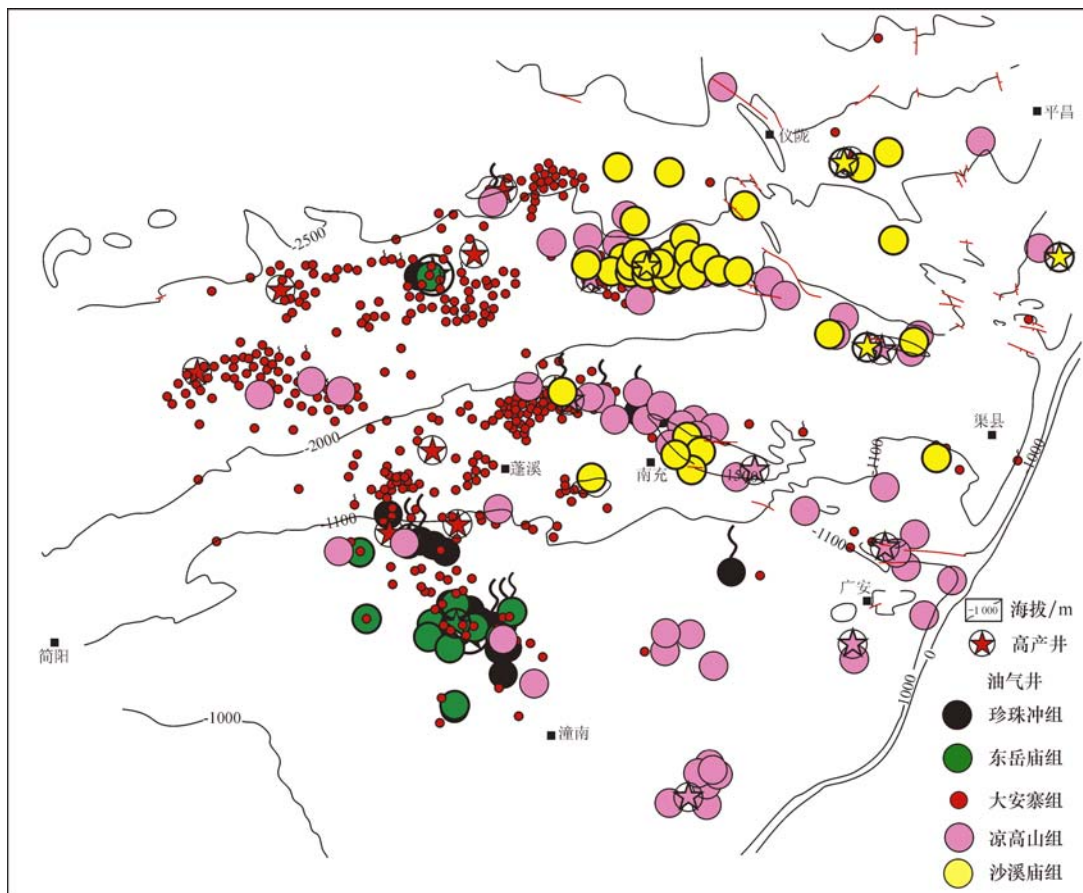


图 3 川中侏罗系 5 套含油层系油井叠合连片分布(据梁狄刚等,2011)

Fig. 3 Vertical superimposition and lateral connection of 5 Jurassic reservoirs in central Sichuan Basin (from Liang Digang, 2011)

莹山西侧)和南部(威远-荣昌一带)上倾方向高部位,大安寨段、凉高山组等地层不仅出露地表或分布于近地表,而且也远离北部的生油中心,以产水为主;而其西和其北低部位的广大川中地区均以产油、无水为特征。所有这些都说明,川中侏罗系石油聚集不存在以地层水的浮力和重力分异为动力的大规模二次运移。

上述特征表明,川中侏罗系石油应当是较典型的连续型石油聚集:储层致密,基质孔隙度、渗透率很低;纵、横向上与生油层密切共生,源内或近源聚集;主力油层连续分布在斜坡区和凹陷区,没有明显的圈闭界限,不受局部构造控制;多层系叠合连片,大面积整体含油;多数为异常高压系统,几乎不产水,属于无水油田,二次运移不明显,石油生成后在生油层内或向其附近就近聚集。这与 Schmoker(1995)提出的连续型油气聚集特征基本一致,即:①缺失明显圈闭与盖层;②可横穿岩性边界;③巨大的分布面积;④相当低的基质渗透率;⑤异常压力(或高/或低);⑥与烃源岩密切共生^[11]。这种非常规的石油聚集,储量规模可能很大,但要用非常规工艺技术进行开采^[9]。

2 Williston 盆地 Bakken 组致密储层特征及勘探开发启示

Williston 盆地位于美国蒙大纳州、北达科他州和加拿大马尼托巴省、萨斯喀彻温省境内,面积约 $34 \times 10^4 \text{ km}^2$,为一大型拗陷盆地。位于泥盆系与密西西比系之间的 Bakken 组是一套海相碎屑岩沉积,局部夹薄层碳酸盐岩,划分为上、中、下3个岩性段。其中,上段和下段为富含有机质(有机碳含量平均为11%)的黑色页岩,累计厚度分别约为2~6 m和0~12 m,是主要烃源岩发育层段,镜质体反射率约为0.6%~0.9%;中段厚约2~20 m,一般为5~10 m,是主要储集层段。因此,Bakken组在纵向上形成了“夹心饼干”式的生、储组合(图4)。

2.1 Bakken 组致密储层及其石油聚集的主要特征

Bakken 组中段属于海相细碎屑岩沉积,以细砂岩、粉砂岩为主,局部与薄层灰黑色页岩互层。储层岩性主要为泥质粉砂岩、白云质粉砂岩和钙

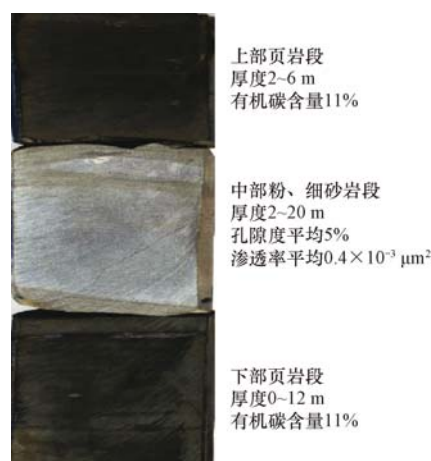


图4 美国 Williston 盆地 Bakken 组地层结构简图

Fig. 4 Schematic diagram of stratigraphy of the Bakken Formation in Williston Basin, USA

质细砂岩,泥质和钙质含量普遍较高,可分别达12%~25%和13%~44%;石英含量一般为12%~44%。

根据 Williston 盆地 Elm Coulee, Sanish 和 Rose 等主要油田的统计资料,Bakken 组中段孔隙度一般为2%~8%,平均约为5%;覆压渗透率一般为 $0.001 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均约为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,分别相当于地面渗透率 $0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低-特低孔、特低渗储层。孔隙类型主要有粒间孔、晶间孔和半径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的微孔,局部发育垂直裂缝和水平裂缝。从孔隙度和渗透率的关系图上分析,Elm Coulee 油田 Bakken 组中段储层的喉道主要为纳米喉(喉道半径 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$,美国标准),其次为微喉(喉道半径 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$,美国标准)(图1);而 Rose 油田则属于纳米喉。

根据 USGS(美国地质调查局)的研究,基质孔隙发育使得 Bakken 油层产量提高^[12];Elm Coulee 油田 Bakken 组产出的油也主要来自于基质孔隙^[13]。因此,基质孔隙是 Bakken 组石油的主要储集空间和重要渗滤通道。钻遇天然裂缝的井或经过压裂改造形成人工裂缝的井大多能获得高产油流,但投产初期产量递减快,第1年的递减率可达50%~70%;第3年后递减率保持在10%左右,日产油1~5 t的低产稳产期可长达20~30 a以上(图2),呈现出典型的低-特低孔、渗油层的生产特征。

虽然 Bakken 组储层薄、渗透能力差、非均质性强、横向上岩性和厚度有所变化,但总体上分布十分稳定,面积达 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。目前在围绕 Bakken 组沉降中心 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的范围内,不论是构造高点或其翼部,还是斜坡,甚至坳陷中心,都发现了油气,呈现出大面积含油的特征。从 Elm Coulee, Antelope 和 Sanish 等油田的储层特征和生产特征看, Bakken 组油层均为异常高压,几乎不产水。这些特征表明, Bakken 组石油是典型的连续型油气聚集^[14]。既然 Bakken 组石油呈“连续型”分布,钻揭 Bakken 组的井几乎不可能是干井。但由于储层渗透率极低,能否获得工业油流还要取决于是否存在天然裂缝或进行水力压裂形成人工裂缝,以使储层中的石油流动^[14],进入到井筒。

2.2 Bakken 组致密储层石油勘探开发的启示

Bakken 组油层早在 1953 年就被发现,但直到 21 世纪初,勘探开发一直没有大的突破,日产量还只有几千桶。主要原因是储层致密,单井产量低,尚未有针对性的储层增产改造工艺技术,效益差。

2008 年以来,美国的一些中小型独立油气生产商如 EOG, Continental, Hess, XTO 和 Enerplus 等石油公司,将日臻成熟的页岩气关键勘探开发技术——水平井钻井和分段压裂技术推广应用到 Williston 盆地 Bakken 组致密储层石油领域,取得了巨大成功^[15-16],日产量大幅上升,从 2007 年底的 $7.5 \times 10^4 \text{ bbl}$ (约 $1.0 \times 10^4 \text{ t}$) 飙升到 2010 年底的 $45.8 \times 10^4 \text{ bbl}$ (约 $6.2 \times 10^4 \text{ t}$),年产水平达到 $2\,200 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中,美国北达科他州 Bakken 组

2010 年底日产量为 $3.3 \times 10^4 \text{ t}$,年产水平达 $1\,200 \times 10^4 \text{ t}$,使该州石油产量在短短的两年半之内翻了一番(图 5),成为仅次于德克萨斯、阿拉斯加、加利福尼亚的第四产油大州。

Bakken 组致密储层石油勘探开发成功的关键因素有 3 点。一是 Bakken 组虽然只有 1 套储层,厚度也不大(2~20 m),但属于海相沉积,地层横向分布稳定,地层水不活跃,硅质和钙质含量高,适宜于水平井钻井和大规模压裂。二是近两三年北美地区尤其是美国的水平井及分段压裂技术已非常成熟,斯伦贝谢、哈丁·歇尔顿等大型石油技术公司的工程服务成本逐渐降低,使涌入到 Williston 盆地的中小石油公司能大规模推广应用这项技术进行 Bakken 组的勘探开发。目前 Bakken 组 95% 以上的井均是水平井,水平段长度为 1 200~3 300 m 不等,进行 15~38 级分段压裂,单井测试产量可以达到 100~500 t/d。三是 2009 年以来,国际原油价格逐渐走高,2011 年上半年达到 100~120 美元/bbl。根据美国北达科他州石油委员会及独立油气生产商的评估,当国际油价达到 50~60 美元/bbl 时, Bakken 组石油的勘探开发就有效益。

随着技术和产量的突飞猛进,对 Bakken 组石油资源量的评价也不断提高。1974 年计算的总资源量只有 $100 \times 10^8 \text{ bbl}$ (约 $14 \times 10^8 \text{ t}$);2008 年 USGS 计算出的美国境内 Bakken 组技术可采储量为 $36.5 \times 10^8 \text{ bbl}$ ^[12] (约 $5 \times 10^8 \text{ t}$);而根据北达科他州地质调查局近两年的评价结果,仅该州内的 Bakken 组资源量就达 $1\,490 \times 10^8 \text{ bbl}$ ^[17] (约 $203 \times 10^8 \text{ t}$)。USGS 认为, Bakken 组石油是美国本土迄

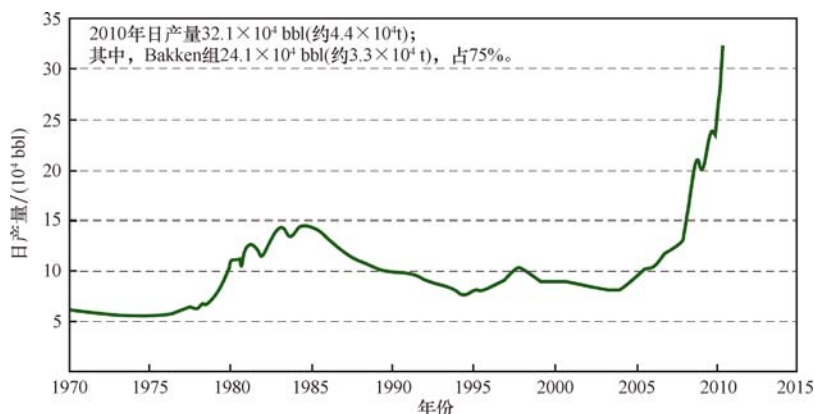


图5 美国北达科他州历年石油产量及2010年 Bakken 组日产量

Fig. 5 Annual oil production of North Dakota State and daily oil production of Bakken Formation in 2010, USA

今发现的最大的连续型石油聚集^[12]。作为一个典型的连续型非常规石油聚集,Bakken 组的石油地质特征和发展经验可以为其他类似石油目标区的研究和勘探提供借鉴^[14]。

Bakken 组致密储层石油的发展历程至少给予我们这样一个启示:非常规油气资源要用非常规的研究思路去认识,用非常规的技术手段去攻克,一旦突破,必将打开勘探领域的一个新局面。

3 从川中侏罗系与 Bakken 组对比看川中石油发展前景

川中侏罗系与 Bakken 组除沉积、构造背景有差异外,在储层特征和石油聚集特征方面,两者有较多的相似性,又各具优势(表1)。从总体上看,川中侏罗系储层的岩性、储集类型、渗透率、喉道半径、埋藏深度与 Bakken 组类似,生、储层配置关系和油气聚集特征基本相同,均属于大面积的连

续型石油聚集;川中侏罗系储层孔隙度比 Bakken 组略低,但川中侏罗系有 5 套油层,累计厚度要比 Bakken 组大得多。川中侏罗系生油岩有机碳丰度无法与 Bakken 组黑色页岩相媲美,但厚度却要高出一个数量级,可以弥补有机碳丰度的不足。

导致川中侏罗系石油勘探开发多年来未取得实质性进展、工作量逐渐萎缩和产量下滑的主要原因有 3 个:认识、投入、技术。川中石油多年来一直不引人注意,长期以来对侏罗系石油形成的“裂缝性油藏”、“低产”、“贫矿”等固有认识降低了对其勘探开发前景的信心,减少了实物工作量的投入;实物工作量少,势必影响到工艺技术的发展,不可能进行针对性的技术攻关;而关键技术没有突破,川中侏罗系这种非常规石油资源就不可能进行规模效益勘探开发。目前侏罗系储层一般只进行酸洗和小规模加砂压裂来增产改造,长期以来一直依靠油层的自然弹性溶气驱和自喷+间喷消耗衰竭式开采方式生产、“靠天吃饭”来维持

表1 四川盆地川中侏罗系与 Williston 盆地 Bakken 组对比
Table 1 Comparison of the Jurassic in central Sichuan Basin with the Bakken Formation in Williston Basin, USA

对比项	四川盆地川中侏罗系	Williston 盆地 Bakken 组
沉积、构造背景	陆相,大型斜坡	海相,大型拗陷
有利分布面积	4×10 ⁴ km ²	7×10 ⁴ km ²
目的层埋深	1 500~3 500 m	2 500~3 300 m
生、储层组合	凉上段、大安寨段储层夹于生油层之间,沙一段紧邻生油层,源内或近源聚集	储层夹于生油层之间,源内聚集
生油岩性质、厚度	黑色页岩为主(有机碳含量 1.0%~2.4%),厚50~200 m	黑色页岩(有机碳含量 11%),厚 2~18 m
储层岩性	细砂岩、粉砂岩(石英+碳酸盐胶结物含量 52%~72%)、介壳灰岩	泥质粉砂岩、细砂岩、白云质粉砂岩(硅质+钙质含量 75%~88%)
储层厚度	5 套,累计厚度可达 100 m 以上;单层厚:沙溪庙组 5~30 m,凉高山组 1~4 m,大安寨段 3~20 m	1 层,2~20 m
孔隙度	沙溪庙组一般 2%~6%,平均 3.72%;凉上段一般 1%~4%,平均 1.74%;大安寨段一般<2%,平均 1.04%	Elm Coulee 油田 2%~8%,Sanish 油田 1%~10%,Rose 油田 3%~7%;平均 5%
地面渗透率	0.01×10 ⁻³ ~1×10 ⁻³ μm ² ;沙溪庙组平均 0.38×10 ⁻³ μm ² ,凉上段平均 0.35×10 ⁻³ μm ² ,大安寨段平均 0.53×10 ⁻³ μm ²	Elm Coulee 油田 0.1×10 ⁻³ ~1×10 ⁻³ μm ² ,Sanish 油田 0.01×10 ⁻³ ~1×10 ⁻³ μm ² ,Rose 油田 0.1×10 ⁻³ ~0.2×10 ⁻³ μm ² ;平均 0.4×10 ⁻³ μm ²
中值喉道半径	沙溪庙组 0.04~0.61 μm,凉高山组 0.02~0.51 μm,大安寨组 0.01~0.07 μm	喉道半径以 0.01~0.1 μm 为主,其次 0.1~0.5 μm
原油性质	地面密度 0.80~0.89 g/cm ³ ,粘度 5.0~28.8 mPa·s	相对密度 40~44° API,地面密度 0.81~0.83 g/cm ³
油层产水、压力情况	不产水,异常高压	地层水不活跃,异常高压
原始采收率	估算 6.6%	10%
发现时间	1958 年	1953 年
主要勘探开发技术	直井+酸洗,自喷+间喷衰竭式开采	水平井+多级分段压裂
2010 年产量	8.9×10 ⁴ t	年产水平 2 200×10 ⁴ t

相对的稳产。要打破这个“怪圈”,就要从认识着手,对侏罗系的资源、储层、油藏、技术适应性进行重新认识,特别要加强对这种致密储层的孔隙结构特征、渗流机理、油层保护和压裂地质等增产措施的攻关;要适当加大投入,针对沙溪庙组、凉高山组砂岩油层和大安寨段介壳灰岩油层分别建立勘探开发一体化先导性试验区,开展水平井及分段压裂等以提高单井产量和采收率为主的工艺技术攻关,形成川中侏罗系致密储层的勘探开发配套技术。

Williston 盆地 Bakken 组致密储层石油开发成功的经验,为国内致密储层石油勘探开发提供了有意义的参考案例。川中侏罗系致密储层石油属于大面积的非常规石油聚集是肯定无疑的。川中油区 10 多年来在工作量萎缩、勘探基本处于停滞状态、主要依靠衰竭方式开发的情况下,在生产了半个世纪后,还能保持年产 10×10^4 t 左右的相对稳产,这个客观事实足以说明川中石油具备相当的资源潜力,勘探开发技术也有很大的发展空间。若能攻克关键技术瓶颈,则几代石油人在川中发现大油田,原油真正上产,实现满盆气、半盆油的梦想定能实现。而在当前国际油价走高的经济背景下,川中致密储层石油的勘探开发也是有效益的,前景应当是光明的。

4 结论

1) 川中侏罗系储层孔隙度平均为 $1.0\% \sim 3.7\%$,渗透率平均为 $0.35 \times 10^{-3} \sim 0.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值孔喉半径平均为 $0.05 \sim 0.24 \mu\text{m}$ 。无论是沙溪庙组、凉高山组砂岩还是大安寨段介壳灰岩,均属于裂缝-孔隙型致密储层。

2) 川中侏罗系储层基质孔隙度、渗透率很低;纵、横向上与生油层密切共生,源内或近源聚集;主力油层连续分布在斜坡区和凹陷区,没有明显的圈闭界限,不受局部构造控制;多层系叠合连片,大面积整体含油;多数含油区块为异常高压系统,几乎不产水,无统一的油-水边界,属“无水油藏”,为较典型的连续型石油聚集,勘探潜力很大。

3) 川中侏罗系和 Williston 盆地 Bakken 组储层特征类似,石油聚集特征相同,均属于大面积的非常规连续型石油聚集,都有 50 多年的发展历程。近几年国际油价逐渐走高,Bakken 组致密储

层通过水平井及大规模多级分段压裂技术,在孔隙度平均 5% 、渗透率平均 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低孔、特低渗油层中实现了规模效益勘探开发。如果对川中侏罗系石油转变观念,学习和引进 Bakken 组石油的勘探开发经验,用非常规技术对待这类非常规石油,那么川中侏罗系石油就可能出现一个新局面。

4) 打破川中侏罗系石油当前的僵局,必须从研究着手,对其资源、储层、油藏和技术进行重新认识,加强致密储层的孔隙结构特征、渗流机理和压裂地质等研究。若能适当加大投入,建立先导性试验区,攻克水平井及分段压裂等关键工艺技术,有效提高单井产量和采收率,则川中侏罗系致密储层石油勘探开发定能跃上新台阶。

致谢:中国石油天然气集团公司咨询中心梁狄刚教授对本文进行了悉心指导,深表谢意!

参 考 文 献

- [1] 陈祥,王敏,严永新,等. 泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件[J]. 石油与天然气地质,2011,32(4):568-576.
Chen Xiang, Wang Min, Yan Yongxin, et al. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4):568-576.
- [2] 邓秀芹,刘新社,李士祥. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透储层致密史与油藏成藏史[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2):156-161.
Deng Xiuqin, Liu Xinshe, Li Shixiang. The relationship between compacting history and hydrocarbon accumulating history of the super low permeability reservoirs in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2):156-161.
- [3] 郑和荣,尹伟,胡宗全,等. 中国中西部碎屑岩领域油气富集主控因素与勘探方向[J]. 石油与天然气地质,2010,31(6):753-762.
Zheng Herong, Yin Wei, Hu Zongquan, et al. Main controlling factors for hydrocarbon accumulation and potential exploration targets in clastic sequences in western-central China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):753-762.
- [4] Williams P. Bakken Shale: the play book, US overview[Z]. Hart Energy Publishing, 2008:2-15.
- [5] Williams P. Bakken Shale: the play book, Canadian Bakken overview[Z]. Hart Energy Publishing, 2008:16-21.
- [6] NETL. Bakken—the biggest oil resource in the United States? [Z]. NETL Winter Issue, 2011:1-20.
- [7] 王毓俊. 四川盆地找到大油田的可能性分析[J]. 石油科技论坛, 2010, 29(1):26-31.

(下转第 838 页)

- Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. China lake-facies carbonate rock [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993: 100–115.
- [13] Bathurst R G. Developments in sedimentology: carbonate sediments and their diagenesis [M]. New York: Elsevier, 1971, 12: 1–7.
- [14] 朱同兴, 黄志英. 地质记录中的海水白云岩化 [J]. 岩相古地理, 1993, 13(5): 16–25.
- Zhu Tongxing, Huang Zhiying. Seawater dolomitization in geologic records [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1993, 13(5): 16–25.
- [15] 傅宁, 邓运华, 张功成, 等. 南海北部叠合断陷盆地海陆过渡相烃源岩及成藏贡献——以珠二坳陷白云凹陷为例 [J]. 石油学报, 2010, 21(4): 559–566.
- Fu Ning, Deng Yunhua, Zhang Gongcheng, et al. Transitional source rock and its contribution to hydrocarbon accumulation in superimpose rift-subsidence basin of northern South China Sea-taking Baiyun Sag of Zhu II Depression as an example [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 21(4): 559–566.
- [16] 徐希坤, 刘树根, 时华星, 等. 中伊朗盆地 Kashan 地区油气地质条件研究 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2009, 31(3): 62–68.
- Xu Xikun, Liu Shugen, Shi Huaxing, et al. The hydrocarbon geology conditions of Kashan area in central Iranian Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(3): 62–68.
- [17] 张宁生, 任晓娟, 魏金星, 等. 柴达木盆地南翼山混积岩储层岩石类型及其与油气分布的关系 [J]. 石油学报, 2006, 27(1): 42–46.
- Zhang Ningsheng, Ren Xiaojuan, Wei Jinxing, et al. Rock types of mixed sedimentary reservoirs and oil–gas distribution in Nanyishan of Qaidam Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 42–46.
- [18] 冯进来, 胡凯, 曹剑, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义 [J]. 高校地质学报, 2011, 17(2): 297–307.
- Feng Jinlai, Hu Kai, Cao Jian, et al. A review of mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum–gas geological significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(2): 297–307.

(编辑 张亚雄)

(上接第 822 页)

- Wang Yujun. Feasibility analysis of discovering large oilfield in Sichuan Basin [J]. Oil Forum, 2010, 29(1): 26–31.
- [8] 蒋裕强, 漆麟, 邓海波, 等. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 22–26.
- Jiang Yuqiang, Qi Lin, Deng Haibo, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 22–26.
- [9] 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 四川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 on-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 8–17.
- [10] 翟光明. 中国石油地质志 (卷十): 四川油气区 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 20–448.
- Zhai Guangming. Petroleum geology of China (Vol 10): sichuan oil and gas area [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 20–448.
- [11] 查全衡. 美国 1995 年油气资源评价——陆地及州属海域部分简介 [J]. 世界石油工业, 1997, 4(4): 22–27.
- Zha Quanheng. 1995 national assessment of United States oil and gas resources (Land and State's offshore) [J]. World Petroleum Industry, 1997, 4(4): 22–27.
- [12] USGS. Assessment of undiscovered oil resources in the Devonian-Mississippian Bakken Formation, Williston Basin Province, Montana and North Dakota [Z]. USGS Fact Sheet 2008–3021, 2008.
- [13] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1127–1153.
- [14] Nordeng S H. The Bakken petroleum system: an example of a continuous petroleum accumulation [J]. DMR Newsletter, 2009, 36(1): 21–24.
- [15] 颜磊, 刘立宏, 李永明, 等. 水平井重复压裂技术在美国巴肯油田的成功应用 [J]. 国外油田工程, 2010, 26(12): 21–25.
- Yan Lei, Liu Lihong, Li Yongming, et al. Application of the multiple fracturing techniques for horizontal wells in Bakken Oilfield of U. S. A [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010, 26(12): 21–25.
- [16] Ghiselin D. Bakken Shale: the play book, key technologies—inspiration, innovation unlock Bakken pay [Z]. Hart Energy Publishing, 2008: 68–85.
- [17] Murphy E. The oil potential of the Bakken source system [J]. DMR Newsletter, 2010, 37(2): 11–13.

(编辑 李 军)