

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2015.05.002

鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及 规模富集可开发主控因素

付金华^{1,2} 喻建³ 徐黎明^{2,4} 牛小兵^{2,4} 冯胜斌^{2,4} 王秀娟³ 尤源^{2,4} 李涛³

(1 中国石油长庆油田公司; 2 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室; 3 中国石油长庆油田公司油藏评价处;
4 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院)

摘要: 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组中与烃源岩互层或紧邻的致密砂岩储层地面空气渗透率小于0.3mD, 赋存于该致密砂岩储层中的石油资源是典型的致密油。截至2014年, 探明了中国第一个亿吨级大型致密油田——新安边油田, 建成了3个致密油藏水平井技术示范区和3个规模开发试验区。研究认为, 优质烃源岩广覆式分布、细粒级砂体大面积展布、储层2~8 μm的小孔隙极发育、充注成藏动力强等有利的成藏条件及四者间的有效组合是形成鄂尔多斯盆地致密油规模富集的关键; 长7致密砂岩储层工程品质好、原油油质好且溶解气含量高、油层中性—弱亲水润湿性, 有利于致密油的采出; 盆地致密油勘探潜力巨大, 初步评价长7致密油资源量达20×10⁸t, 是油田可持续稳产的重要资源保障。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 长7油层组; 致密油; 勘探开发关键技术; 规模富集; 可开发; 主控因素

中图分类号: TE122

文献标识码: A

New Progress in Exploration and Development of Tight Oil in Ordos Basin and Main Controlling Factors of Large-scale Enrichment and Exploitable Capacity

Fu Jinhua^{1,2}, Yu Jian³, Xu Liming^{2,4}, Niu Xiaobing^{2,4}, Feng Shengbin^{2,4}, Wang Xiujuan³, You Yuan^{2,4}, Li Tao³

(1 PetroChina Changqing Oilfield Company; 2 National Engineering Laboratory of Exploration and Development of Low-Permeability Oil and Gas Fields; 3 Reservoir Assessment Department of PetroChina Changqing Oilfield Company;
4 Petroleum Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company)

Abstract: In the Chang-7 member of YanChang Formation in Ordos Basin, the tight sandstone reservoir is inter-bedded with or adjacent to source rock. Its surface air permeability is less than 0.3mD and the oil reserve in the tight sand reservoir is typically tight oil. As of 2014, China's first large-scale tight oil field with the reserve reaching 100 million tons – Xin'anbian Oilfield – has been proven, with three demonstration zones of tight oil horizontal well technology and three pilot zones for large-scale development established. The study indicates a series of favorable conditions for accumulations, such as a wide distribution of high-quality source rock, large-area extension of fine-grained sand body, development of small-size pore with a diameter of 2-8 μm, and filling ability for accumulation. Effective combination of those favorable conditions holds the key to large-scale enrichment of tight oil in Ordos Basin. The Chang 7 tight sandstone reservoir is good for engineering quality and crude oil quality and high in dissolved gas content, with a neutral-weak hydrophilic wettability of oil reservoir, thus being in favor of crude oil production. The basin has a great potential for tight oil exploration. Based on a preliminary assessment, tight oil reserve is as high as 20×10⁸t, providing the important resources for the oil field to keep its production stable.

Key words: Ordos Basin, Chang 7 Member, tight oil, key exploration and development technology, large-scale enrichment, exploitable, controlling factors

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)“淡水湖盆细粒沉积与富有机质页岩形成机理”(2014CB239003); 国家自然科学基金重大项目“中国非常规油气储层特征、分类与典型地质模型建立”(41390451)。

第一作者简介: 付金华(1963—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授级高级工程师, 现从事石油天然气地质综合研究及油气勘探管理工作。地址: 陕西省西安市未央路151号中国石油长庆油田公司, 邮政编码: 710018。E-mail: fjh-cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2015-08-07; 修改日期: 2015-08-24

致密油是目前最为现实的非常规油气资源,已成为全球石油勘探开发的亮点领域^[1-2]。2013年,美国致密油日产量达到 348×10^4 bbl,占美国原油日产量(773×10^4 bbl)的45%;加拿大致密油日产量为 34×10^4 bbl,占加拿大原油日产量(352×10^4 bbl)的近10%。致密油已成为北美地区近年原油探明储量和原油产量持续增长的主要驱动力^[3-4]。借鉴北美地区致密油的勘探开发经验,世界上大部分国家和地区已不同程度地发现了致密油资源^[4]。中国致密油资源丰富,是未来重要的石油接替资源^[5-11],但致密油研究及勘探开发总体处于技术准备和攻关阶段^[4-5,12-13]。鄂尔多斯盆地致密油是中国陆相致密油的典型代表,相比国内其他盆地,致密油的勘探开发攻关已取得初步成效^[14-19]。本文通过详实的勘探开发生产资料,阐述了长庆油田近年在鄂尔多斯盆地开展致密油攻关取得的最新进展,并分析了鄂尔多斯盆地致密油规模富集可开发的主控因素,以期为中国致密油勘探开发提供借鉴。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西南部,是中国第二大沉积盆地。晚三叠世该盆地沉积了一套厚千余米的黄绿色、灰绿色砂岩夹浅色泥岩、暗色泥岩和黑色页岩的河流相—三角洲相—湖泊相地层,平均厚度达1000m以上,层位归属上三叠统延长组,自下而上可划分长10—长1共10个油层组。其中,富有机质的黑色页岩和暗色泥岩在长7油层组最为发育,构成该盆地中生界最主要的油源岩。延长组具多层系含油的特点,10个油层组均有油藏发现。低孔低渗是该盆地延长组砂岩储层最为显著的特征,其孔隙度主要分

布于6%~16%,渗透率多分布于0.1~3.0mD^[20]。延长组10个油层组之间及同一油层组在不同地区砂岩储层物性存在较大差异^[21-22]。总体上,长4+长5油层组以上和长8油层组以下及东北物源沉积区储层物性相对较好,渗透率平均值大于1.0mD;长8油层组、长7油层组和长6油层组砂岩储层渗透率相对较低。长8砂岩储层平均渗透率分布于0.3~1.0mD;长6油层组除合水地区砂岩储层平均渗透率小于0.3mD外,其他地区砂岩储层平均渗透率大于0.3mD;相比之下,长7油层组砂岩储层渗透率最低,平均渗透率小于0.3mD。按照国内以储层地面空气渗透率小于1mD作为致密油划分的标准^[1,5],鄂尔多斯盆地勘探开发的主力油层长8油层组、长6油层组及渗透率最低的长7油层组均属致密油的范畴。2008年以来,针对长8油层组、长6油层组中发育的低渗透油藏,长庆油田通过对开发关键技术的持续攻关,形成了直井采用油层改造、解堵增产、超前注水等增产技术,使姬塬、华庆、镇北等地区渗透率为0.3~1.0mD的油田相继实现了规模有效开发(图1)。致密油是需要采用水平井+体积压裂开采方可以获得商业性开发的石油资源^[1,23-25],按照国内外这一统一的致密油内涵认识,结合油田勘探开发现状分析,鄂尔多斯盆地致密油是指赋存于地面空气渗透率小于0.3mD的致密砂岩储层中的石油资源,已规模开发的长8油藏和长6油藏应归属“常规油藏”;长7油层组是该盆地致密油的典型代表,亦是当前致密油攻关的主要目标。

长7油层组沉积厚度为90~110m,根据沉积旋回特征,可进一步划分为长7₃、长7₂和长7₁等亚油层组。长7₃亚油层组主要发育富有机质的黑色页岩

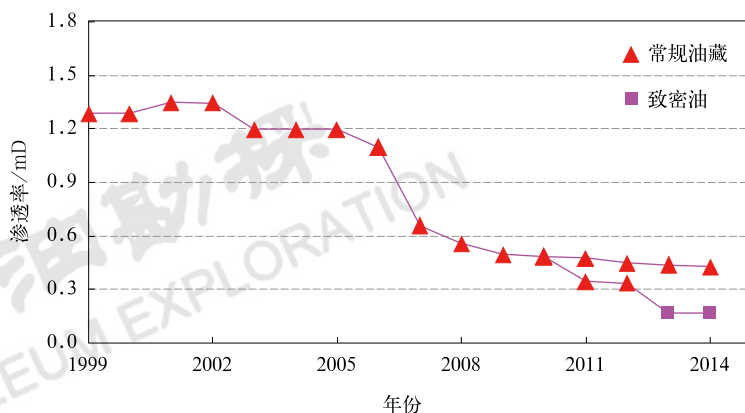


图1 鄂尔多斯盆地近年主力开发油田渗透率变化图

Fig.1 Permeability variation diagram of main oil fields under development in Ordos Basin in recent years

和暗色泥岩,间夹薄层的油积岩;长 7_2 亚油层组和长 7_1 亚油层组主要发育三角洲前缘水下分流河道和砂质碎屑流成因的致密砂岩,局部地区发育富有机质的黑色页岩和暗色泥岩。长 7_2 亚油层组和长 7_1 亚油层组是致密油发育的主要层段。

2 致密油勘探开发新进展

2.1 致密油资源量

资源量是油气工业数据链“资源量—储量—产量—消费量”的源头,是一个盆地或区块制订勘探战略与规划部署决策的主要依据^[26]。2013年,长庆油田年产油气当量跨越 $5000 \times 10^4 \text{t}$,积极寻找保障油田可持续稳产的后备资源是油田的当务之急。因此,致密油资源规模的客观评估对研究区致密油的勘探开发战略部署及油田上产、稳产的整体规划具有非常重要的意义。国外已形成类比法、统计法及成因法等较为成熟的致密油资源评价方法体系^[27],国内学者亦探索了适合中国陆相致密油地质特点的资源评价方法^[27-29]。参照国外致密油资源评价方法体系及国内致密油资源评价成果认识,结合鄂尔多斯盆地长7致密油特点,优选了体积法、资源丰度类比法和EUR类比法3种方法对长7致密油进行了资源量评价,评价结果分别为 $21 \times 10^8 \text{t}$ 、 $22 \times 10^8 \text{t}$ 、 $17 \times 10^8 \text{t}$ 。考虑3种方法的可靠性,通过对3种方法的权重系数分配,综合评价鄂尔多斯盆地长7致密油资源量达 $20 \times 10^8 \text{t}$ 。

2.2 致密油储量规模

按照稀井广探的理念,目前采用直井已落实鄂尔多斯盆地长7致密油勘探有利目标区14个,这些目标区致密油资源相对已经落实。但对致密油储量,考虑储量的难动用性这一特点,须遵循水平井整体有效开发后再提交储量的原则。有鉴于此,按照盆地长7致密油的勘探和开发程度,2013—2014年,先后在陇东Z1井区和新安边地区提交了预测储量、控制储量和探明储量,其中在新安边地区探明了亿吨级致密油储量,成为国内首次发现亿吨级大型致密油田的盆地,为油田 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 可持续稳产奠定了资源基础。

2.3 致密油藏水平井开发技术示范区

2011年以来,鄂尔多斯盆地致密油攻关在深化地质综合研究基础上,优选致密油“甜点区”开展了

致密油藏水平井开发攻关试验。2011—2012年,在陇东地区Z1井区实施了水平段长1500m的10口水平井,进行了丛式水平井钻井、速钻桥塞分段多簇压裂、体积压裂改造参数等关键技术的试验。试验区10口井试油日产量平均为119t,试采初期日产量平均达14t,截至2015年5月,10口水平井累计产油达92586t,且有4口井至今仍自喷式开采。2013—2014年,为扩大致密油藏水平井开发试验成果,并继续完善和优化体积压裂关键参数、体积压裂改造工艺及工厂化作业等关键技术,在陇东地区Z2井区实施了10口水平井。该试验区10口水平井试油日产量平均为103t,试采初期日产量平均达14t。对试验区内水平井与直井两种不同的开发井型,进行单井同周期的试采动态资料对比分析,结果表明,水平井产量是直井产量的4~6倍。可见,采用水平井+体积压裂开发方式使致密油藏单井产量得到了有效提高。

2.4 勘探开发关键技术

北美地区致密油的勘探突破,归因于水平井+体积压裂技术在致密储层中的应用。与北美海相致密油相比,鄂尔多斯盆地陆相致密油层纵横向变化大,储层非均质性强,油藏压力系数低,地理地貌条件复杂,国外的致密油勘探开发技术难以照搬应用。2011年以来,长庆油田以“提高单井产量、提高作业效率、降低作业成本”为目标,探索致密油富集区地球物理预测评价技术、攻关长水平段水平井钻井技术、创新水平井体积压裂工艺等致密油勘探开发关键技术,以致密油水平井技术示范区为依托,边应用、边总结、边提升,形成了以“水平井+体积压裂”为核心的致密油勘探开发技术系列。

2.5 致密油产能与产量

鄂尔多斯盆地致密油水平井开发技术示范区的建成与致密油勘探开发技术系列的集成,为致密油规模有效开发提供了理论依据和技术支撑。截至2014年底,建成了Z1、Z2和Z3井区3个致密油规模有效开发先导性试验区,年生产能力达 $70 \times 10^4 \text{t}$ 。随着致密油勘探开发的进一步推进,致密油产量必会继续上升,占油田总原油产量的比例将增大。

3 规模富集主控因素

与北美海相致密油相比,中国陆相致密油分布面积、规模总体较小。从目前国内致密油勘探现状

看^[5,12], 相比其他盆地, 鄂尔多斯盆地在资源规模、有利区面积等方面呈现大规模致密油聚集区的态势。为此, 有必要对该盆地致密油规模富集的主控因素进行分析与总结, 以便进一步推动致密油的勘探进程, 同时为同类盆地的致密油勘探提供借鉴。

3.1 富有机质泥页岩广覆式分布是形成连续性致密油藏的基础

致密油与烃源岩互层共生或紧邻烃源岩发育的特征说明, 烃源岩对致密油藏的重要性较常规油藏显得更为突出。鄂尔多斯盆地长 7 烃源岩主要发育在半深湖—深湖的淡水环境, 有机质母源以湖生藻类为主, 有机母质类型为腐泥型—混合型, 长 7 烃源岩镜质组反射率 R_o 分布于 0.7%~1.2%, 达到了热成熟阶段和生排烃阶段。根据沉积构造、岩石组成和有机碳含量, 长 7 烃源岩可划分为黑色页岩和暗色泥岩两种岩相类型。黑色页岩有机质纹层发育, 有机质类型为

Ⅱ₁型和Ⅰ型, TOC 平均值为 13.81%; 暗色泥岩陆源泥与粉砂含量较高, 有机质类型为Ⅱ₁型和Ⅱ₂型, TOC 平均值为 3.75%。基于测井数据较地球化学分析数据对烃源岩的刻画更具代表性和平面上的约束性特点, 采用岩心刻度的测井参数, 对钻穿长 7 油层组的 2000 余口井进行了两种类型烃源岩厚度的统计, 从全盆地范围对长 7 烃源岩这两种岩相类型进行了空间展布的精细刻画。研究结果发现, 长 7 富有机质的黑色页岩和暗色泥岩两种岩相均具大面积、广覆式分布的特征 (图 2)。黑色页岩面积达 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 暗色泥岩面积达 $6.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 且两种岩相在平面上呈互补性分布, 黑色页岩发育区暗色泥岩不发育或厚度较薄, 反之亦然。可见, 鄂尔多斯盆地具备形成连续性致密油藏的有利生烃条件, 富有机质暗色泥岩与黑色页岩叠合面积大于 $6.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, 潜在的致密油区分布范围大。

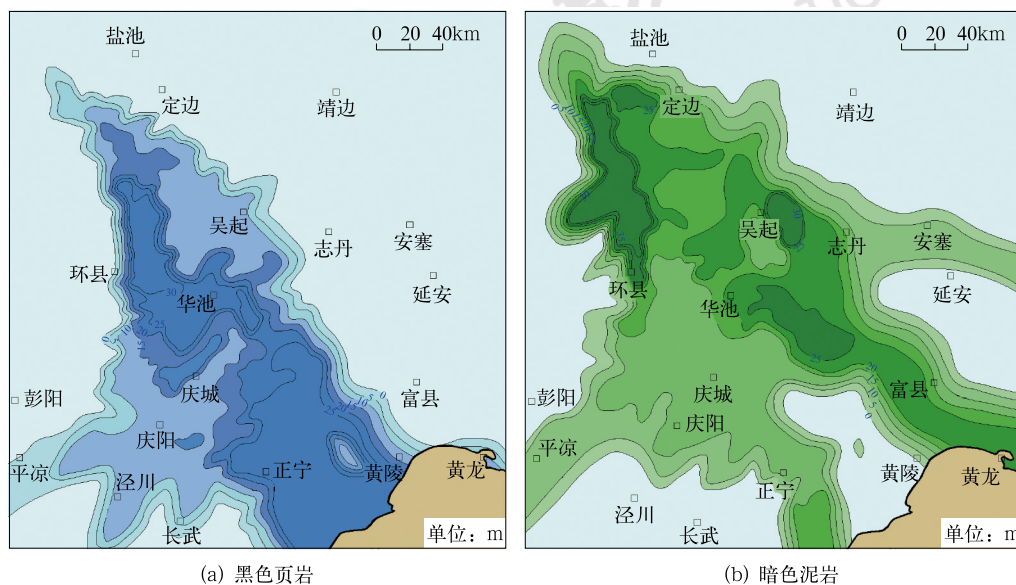


图 2 鄂尔多斯盆地长 7 烃源岩等厚图

Fig.2 Isopach map of Chang 7 Member source rock in Ordos Basin

3.2 大面积分布的细粒级砂体为形成大规模致密油藏奠定了重要条件

砂体 (碳酸盐岩) 是油气赋存的主要载体, 其分布面积和厚度决定了油藏规模。从沉积环境来看, 不管是碳酸盐岩储集类型, 还是砂岩储集类型, 陆相致密油储集体多形成于半深湖—深湖区^[5], 这在一定程度上影响了致密油储集体发育的规模。鄂尔多斯盆地致密油储集体为形成于半深湖三角洲和深湖重力流沉积环境的砂岩, 砂岩粒径主要分布于 0.15~0.07mm,

为偏细的细砂岩。由此可见, 砂体的分布规律和预测研究是陆相致密油勘探的关键, 为此开展了湖盆底形、构造环境和物源等因素对砂体规模和分布规律影响的研究。通过印模法古地形恢复, 揭示长 7 期湖盆底形总体呈东部较为宽缓、西南部较为陡窄的不对称拗陷形态, 且湖区发育多级坡折带 (图 3)。通过对长 7 油层组中火山灰、震积岩、滑塌岩、浊积岩和砂质碎屑流等构造事件沉积的识别, 结合前人对盆地南缘秦岭造山带广泛分布的印支期岩浆岩活动期次分析, 明确了长 7 期处于多期次的强烈构造活动背景。古物源

分析表明,长7期发育东北、西南、西北、西部和南部多个物源区,且受构造活动影响,源区供屑能力强。盆地内部钻井岩心与盆地周缘露头剖面的砂岩组分及标型矿物的对比分析表明,长7油层组沉积主要受西

南和东北两大物源区的控制。由上述可知,鄂尔多斯盆地在长7期,受多物源、活跃构造活动和底形坡折带发育等因素的影响,半深湖—深湖区具有形成大面积重力流沉积的有利条件。

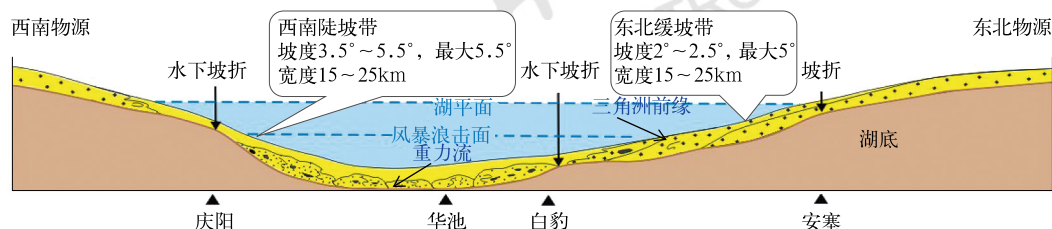


图3 鄂尔多斯盆地长7期湖盆底形特征示意图

Fig.3 Schematic drawing of lake bottom characteristics of Chang 7 Member in Ordos Basin

图4表明,在三角洲与重力流沉积复合作用控制下,鄂尔多斯盆地从斜坡边缘区—斜坡区—坡脚—湖底平原区普遍发育细粒级砂体。地质露头与钻井岩心剖面及沉积相精细对比表明,鄂尔多斯盆地深水区重力流沉积主要受“水道+朵体”沉积作用控制。深水斜坡区受水道控制,砂体顺物源方向延伸远;坡脚及湖底平原区受朵体沉积控制,砂体连片分布。另外,受从长7₃期—长7₂期—长7₁期湖退作用控制,砂体沉积不断向湖盆中心迁移,形成了长7₁沉积作用较

长7₂沉积作用强、总体深湖区砂体分布广的特征。从图5可以看出,受频繁的构造活动作用的控制,砂质碎屑流与浊流事件沉积多期次发育,纵向上形成砂质碎屑流与浊流或多期砂质碎屑流叠加的砂体组合。对2000余口井砂体厚度数据统计表明,致密油砂体累计厚度达15~50m,单层砂体厚度为3~15m。砂体展布图表明,在长7₂、长7₁亚油层组,半深湖—深湖区砂体叠合连片沉积,分布广、厚度较大(图6),这为形成大规模致密油藏奠定了重要条件。

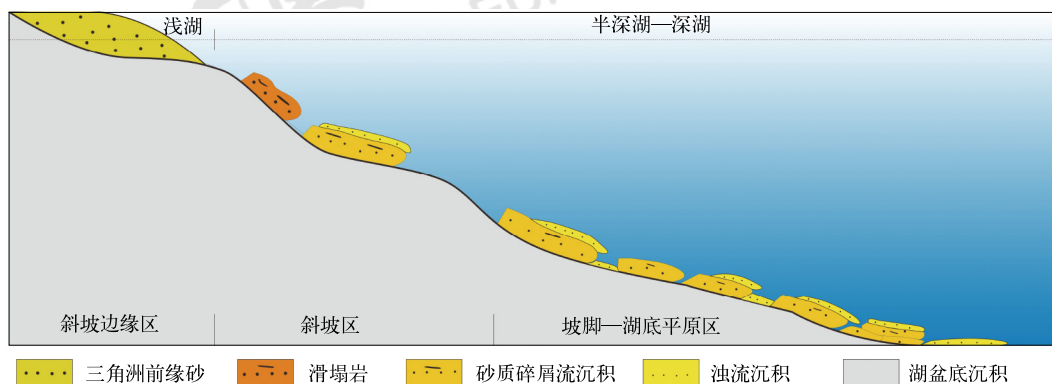


图4 鄂尔多斯盆地长7期沉积模式图

Fig.4 Sedimentary model of Chang 7 Member in Ordos Basin

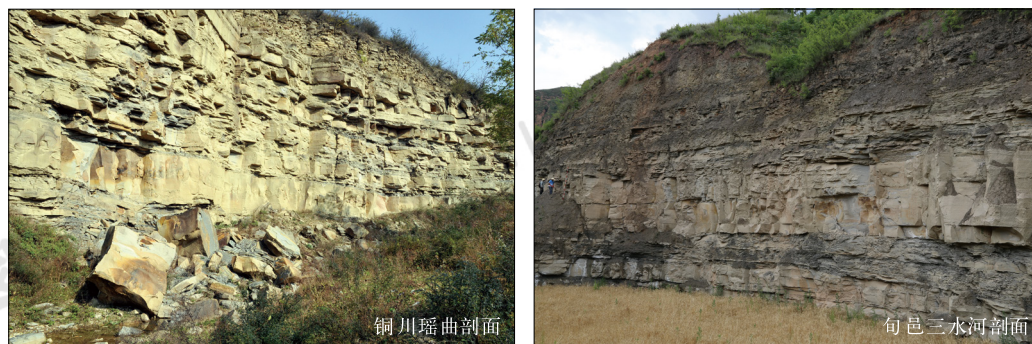


图5 鄂尔多斯盆地长7露头剖面重力流沉积砂体叠加特征照片

Fig.5 Superimposed characteristics of gravity flow sedimentary sand body of Chang 7 Member outcrop section in Ordos Basin

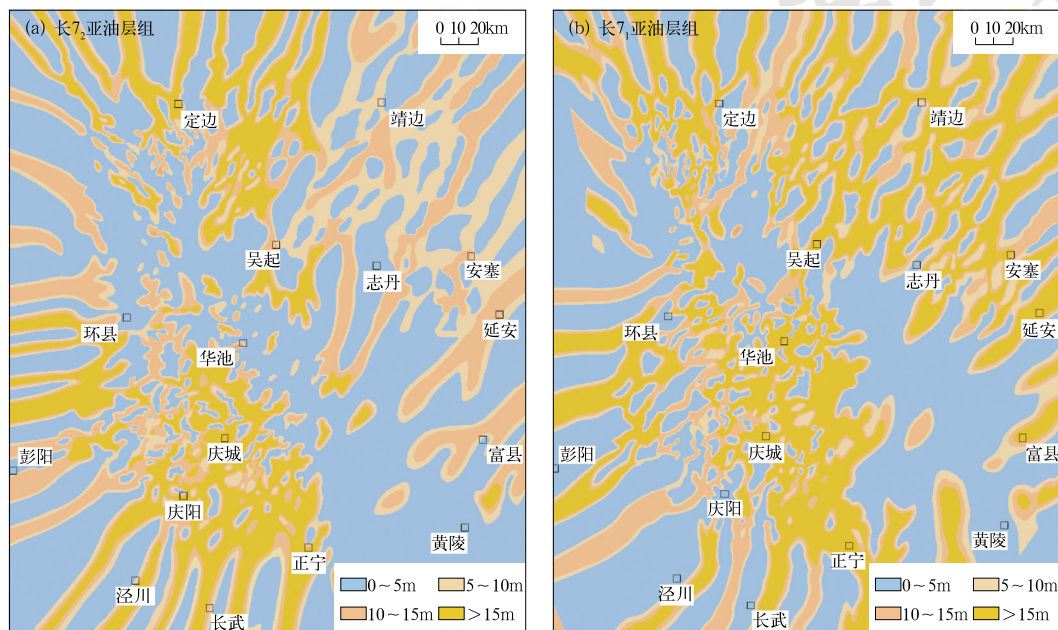


图6 鄂尔多斯盆地长7致密油砂体展布图

Fig.6 Distribution of tight oil sand body of Chang 7 Member in Ordos Basin

3.3 小孔隙发育是致密储层石油富集的关键

储集空间依然是致密油能否富集的重要条件,储集空间越大(或孔隙度越高),致密储层中潜在的储油量越多。但是,受致密储层形成于深水环境的影响,通常致密储层沉积物粒度细、填隙物组分含量高、成岩作用复杂。因此致密储层的储集空间特征受到人们的普遍关注^[1,20,30]。同时,致密储层孔喉微小,常规测试技术在致密储层研究中受限。采用场发射扫描电镜、微(纳)米CT、微图像拼接(MAPS)等新技术,对鄂尔多斯盆地致密砂岩样品进行了多方法、多手段的综合分析。研究发现,长7致密砂岩储层发育多类型孔隙,但主要以残余粒间孔、溶蚀孔和黏土矿物晶间孔为主;孔隙尺度范围变化大,呈大孔隙($>20\mu\text{m}$)、中孔隙($10\sim 20\mu\text{m}$)、小孔隙($2\sim 10\mu\text{m}$)、微孔隙($0.5\sim 2\mu\text{m}$)、纳米孔隙($<0.5\mu\text{m}$)多尺度孔隙共存的特征(表1)。值得说明的是,本次研究中,创新了孔隙体积评价不同尺度孔隙对储集空间贡献率的分析方法,通过微米CT扫描结合数字岩心算法对长7致密砂岩样品的定量表征,首次明确了 $2\sim 8\mu\text{m}$ 的小孔隙是鄂尔多斯盆地致密储层的主要储集空间(图7)。对同一体积单元(2.11mm^3)的低渗透储层(长8油层组)和长7致密砂岩储层样品,进行不同尺度孔隙对储集空间贡献率的对比研究,发现致密储层主要储集空间由小

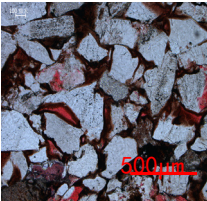
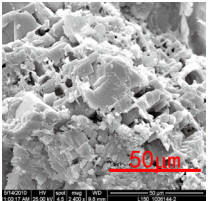
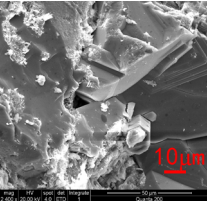
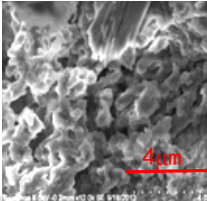
孔隙($2\sim 8\mu\text{m}$)构成,而低渗透储层主要储集空间由大于 $8\mu\text{m}$ 的孔隙构成;致密储层的孔隙数量是低渗透储层的3~5倍(图8)。据此分析,盆地长7致密砂岩储层虽然渗透率极低,但因发育数倍于长8低渗透储层的孔隙数量,形成其孔隙度(平均值主要分布于7.5%~12.0%)与低渗透储层相近(平均值主要分布于8.0%~14.0%)的特征,储集性能较好。

3.4 良好源储配置、持续充注与近源聚集控制形成了含油饱和度高的规模致密油藏

致密油藏因储层孔喉细微,油气非浮力聚集,而是以烃源岩排烃压力为聚集主动力^[1],因而较常规油藏具备更苛刻的成藏条件,即源储共生或紧邻,且具有较大的生烃增压。鄂尔多斯盆地长7致密油源储组合好,根据烃源岩与致密砂岩储层的组合关系,长7致密油源储组合类型可划分为多生厚层夹储型(I型)、底生多层串联型(II型)和底生夹层自储型(III型)3种(图9),且以I型、II型为主。生烃模拟实验及成藏古压力分析表明,长7泥页岩系统排烃前封闭条件下其生烃增压可达到38.5MPa,成藏期储层古压力为18~26MPa,烃源岩、致密砂岩过剩压力差一般为8~16MPa,可见长7致密储层具有高压充注的成藏动力条件,大孔隙至纳米孔隙均含油^[31]。长7烃源岩连续油相运移的排烃方式^[32]揭示,长7

表 1 鄂尔多斯盆地长 7 致密砂岩储层孔隙类型、尺度特征表

Table 1 Types and sizes of pores of Chang 7 tight sandstone reservoir in Ordos Basin

| 孔隙分类 | 大孔隙 | 中孔隙 | 小孔隙 | 微孔隙 | 纳米孔隙 |
|----------------------|---|---|--|---|---|
| 孔隙半径 / μm | > 20 | 10~20 | 2~10 | 0.5~2 | < 0.5 |
| 孔隙类型 | 原生粒间孔 铸模孔 | 粒间孔隙 颗粒溶孔 岩屑溶孔 | 残余粒间孔 粒内溶孔 杂基溶孔 | 残余粒间孔 溶蚀微孔隙 晶间孔隙 黏土矿物晶间孔 | 微溶孔 晶间孔隙 晶内孔隙 晶体缺陷 |
| 孔隙数量 | 少 | 较少 | 多 | 丰富 | 很丰富 |
| 孔隙图像 |  |  |  |  |  |

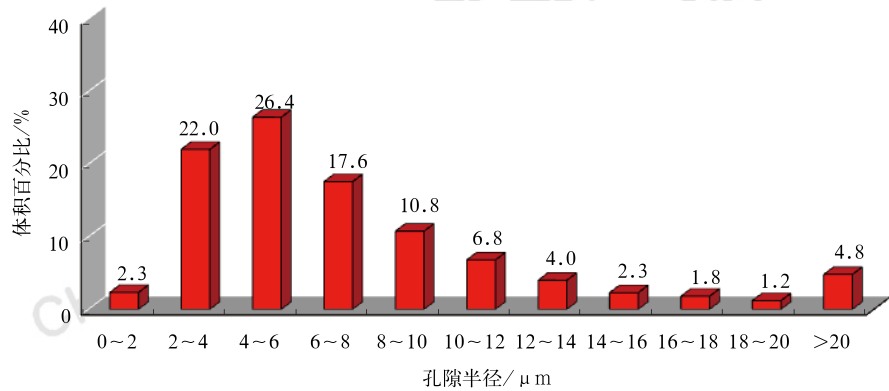


图 7 鄂尔多斯盆地长 7 致密储层不同尺度孔隙体积百分比构成

Fig.7 Percentage of pore volumes in different sizes in Chang 7 tight oil reservoir in Ordos Basin

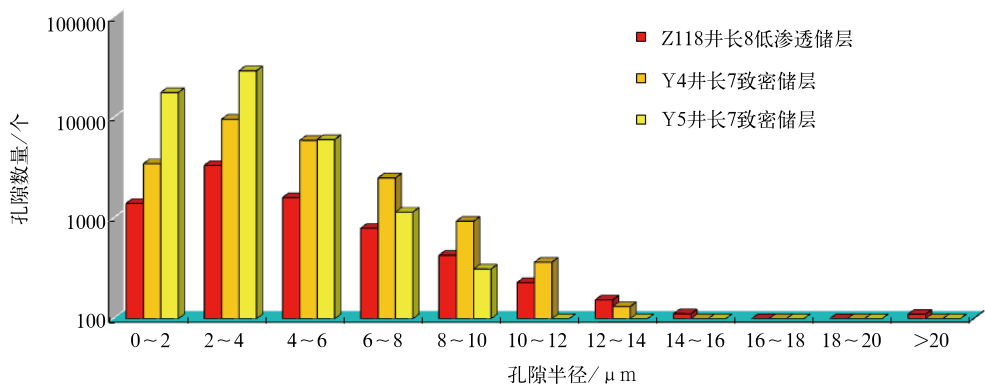


图 8 鄂尔多斯盆地低渗透储层、致密储层不同尺度孔隙数量对比图

Fig.8 Comparison of pore numbers in different sizes in low-permeability and tight reservoirs in Ordos Basin

致密储层经历了持续充注成藏过程。对地质条件下的长 7 致密储层充注成藏与石油富集过程进行模拟, 实验表明, 随着烃类持续充注和驱替压力提高, 致密储层中含油饱和度呈先快后慢式增长, 经历了快速成藏

和持续充注富集两个阶段。长 7 油层组总沉积厚度为 90~110m, 长 7 致密油具“近水楼台先得月”的短距离运移有利条件。长 7 致密油层密闭取心测试, 含油饱和度达 70% 以上, 含油饱和度较高。

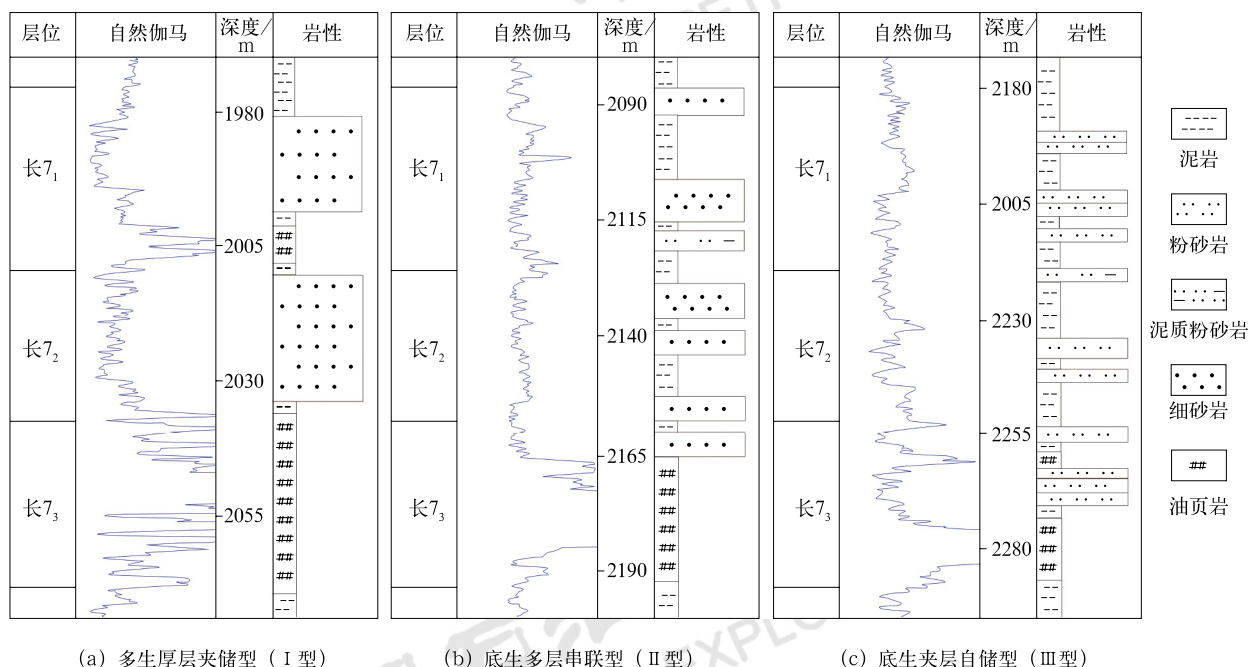


图 9 鄂尔多斯盆地长 7 致密油源储组合类型

Fig.9 Types of tight oil source-reservoir assemblage of Chang 7 Member in Ordos Basin

综上所述, 优质烃源岩分布控制着致密油分布范围, 细粒级砂体控制致密油藏规模, 储集空间控制石油储集量, 运聚动力控制含油饱和度, 几者的有效组合是形成鄂尔多斯盆地致密油规模富集的关键。

4 可开发主控因素

4.1 储层工程品质对压裂改造的影响

由岩石的脆性、力学性质、裂缝发育程度等因素控制的储层工程品质^[33], 决定了致密油气储层的压裂改造效果, 也是决定致密油气能否可经济开发的最为关键的要素。鄂尔多斯盆地长 7 致密砂岩储层岩石组分主要由石英、长石、岩屑组成, 三者含量在 65% 以上, 黏土矿物平均含量小于 15%, 脆性矿物组分含量较高, 脆性指数与威利斯顿盆地巴肯组致密油层相近 (表 2)。露头剖面、钻井岩心、成像测井及岩石薄片资料统计表明, 长 7 致密砂岩中发育宏观剪裂缝和微观张裂缝, 其中宏观剪裂缝以高角度斜交缝和垂直缝为主, 裂缝走向以 NEE 和 NWW 为主。采用破

裂值、应变能“二元”拟合实测裂缝面密度法, 对鄂尔多斯盆地致密砂岩构造裂缝进行定量预测, 长 7 致密储层裂缝发育程度为较低—中等级别^[34], 平面上具有差异性, 盆地东南部裂缝相对较发育。应用微米 CT 成像分析, 鄂尔多斯盆地致密砂岩中微观张裂缝较为发育, 且微观张裂缝将宏观剪裂缝与基质孔喉系统连通。已有研究认为, 储层水平两向应力差小有利于压裂形成复杂缝网系统。长 7 致密砂岩储层水平两向应力差相对较小 (表 2), 综合脆性指数、裂缝特征及储层应力特征分析, 长 7 致密砂岩储层有利于开展体积压裂, 形成缝网系统。鄂尔多斯盆地 23 口井 191 段井下微地震裂缝监测结果表明, 长 7 致密储层进行体积压裂后, 形成了人工裂缝与天然裂缝沟通的较为复杂的缝网系统。

4.2 原油物性对致密油采出的影响

纳米 CT 测试分析表明, 鄂尔多斯盆地长 7 致密砂岩储层喉道半径主要分布于 25~100nm。因此, 原油物性是影响以基质孔隙为主要储集空间的致密油开

表 2 鄂尔多斯盆地长 7 致密储层与威利斯顿盆地巴肯组致密储层工程品质参数对比表
Table 2 Comparison of engineering quality parameters of Chang 7 tight oil reservoir in Ordos Basin with those of Bakken Formation in Williston Basin

| 致密油区 | 区块 | 层位 | 埋深 /m | 脆性指数 /% | 水平两向应力差 /MPa | 裂缝发育程度 | 裂缝面密度 / (m · m ⁻²) |
|--------|----|------------------|-------|-----------|--------------|--------|-----------------------------------|
| 威利斯顿盆地 | — | 巴肯组 | >2500 | 45.0~55.0 | 1.0~3.0 | 发育 | — |
| 鄂尔多斯盆地 | Z1 | 长 7 ₂ | 1980 | 42.5 | 6.3 | 中等 | 0.07~0.10 |
| | Z2 | 长 7 ₁ | 1840 | 47.8 | 7.4 | 中等 | 0.08~0.12 |
| | Z3 | 长 7 ₂ | 2180 | 42.0 | 4.3 | 较低 | 0.03~0.04 |

采的另一重要因素。长 7 致密砂岩油层抽提物氯仿沥青“A”族组成中,非烃+沥青质含量低,在 22.0%左右。6 口井的长 7 地下原油物性数据统计表明,地层原油密度平均为 0.77g/cm³,地层原油黏度平均为 1.34mPa·s。可见,长 7 致密油原油物性较好,油质轻。另外,长 7 致密油原油中溶解气含量较高,气油比达 78~123m³/t。对鄂尔多斯盆地致密油试验区水平井的生产规律进行分析发现,原油中的溶解气是致密油开采过程中一种重要的驱动能量,溶解气油比越大,水平井单井产量越高,且稳产的时间越长。

4.3 储层润湿性对致密油藏注水吞吐开发方式的影响

鄂尔多斯盆地长 7 致密油藏低压(压力系数为

0.7~0.9)的特征决定了开发方式不同于北美地区的高压致密油藏。长 7 致密油藏水平井开发方式对比试验表明,长 7 致密油藏前期采用衰竭式,后期能量不足时采用注水吞吐的开发模式是一种较为有效的开发方式^[17]。注水吞吐试验及矿场实践表明,储层亲水性越强,越有利于注水吞吐采油^[35-36]。表 3 说明,长 7 致密砂岩储层润湿性表现为中性—弱亲水,油层有利于注入水与基质小孔隙中的油气产生置换,从而被置换至复杂缝网系统的油气被采出。鄂尔多斯盆地 Z3 井区两口水平井衰竭式开发方式与注水吞吐模式对比发现,在同一时间周期内,采用注水吞吐模式单井日产油明显提高,阶段采出程度提高了 0.17%。

表 3 鄂尔多斯盆地长 7 致密砂岩储层润湿性特征表

Table 3 Wettability characteristics of Chang 7 tight sandstone reservoir in Ordos Basin

| 试验区块 | 层 位 | 岩样直径 /mm | 渗透率 /mD | 孔隙度 /% | 无因次吸油 /% | 无因次吸水 /% | 润湿性评定 |
|-------|------------------|----------|---------|--------|----------|----------|--------|
| Z1 井区 | 长 7 ₂ | 2.49 | 0.06 | 10.13 | 1.37 | 1.37 | 中性 |
| Z2 井区 | 长 7 ₁ | 2.47 | 0.07 | 9.52 | 1.14 | 1.55 | 中性—弱亲水 |
| Z3 井区 | 长 7 ₂ | 2.50 | 0.15 | 11.30 | 0.44 | 0.87 | 中性—弱亲水 |

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组主要为富有机质的黑色页岩和暗色泥岩与细粒级致密砂岩共生的沉积组合,其中致密砂岩储层地面空气渗透率小于 0.3mD,赋存于该致密砂岩储层中的石油资源是典型的致密油,是盆地目前攻关的主要目标。

(2) 长 7 油层组具有富有机质黑色页岩和暗色泥

岩广覆式分布、三角洲前缘水下分流河道和深水重力流沉积细粒级砂体大面积展布、储层 2~8 μm 的小孔隙极发育、充注成藏动力强等有利的致密油成藏条件,四者间的有效组合控制形成了大规模高含油饱和度的致密油藏。

(3) 长 7 致密砂岩储层脆性指数较高、剪裂缝与张裂缝较为发育、水平两向应力差较小,有利于压裂改造;原油中非烃与沥青质含量低、溶解气含量较高,

有利于小孔隙中的流动; 储层为中性—弱亲水润湿性, 有利于注水吞吐开发。

(4) 鄂尔多斯盆地致密油攻关已取得初步成效, 发现了中国第一个亿吨级大型致密油田——新安边油田, 建成了 3 个致密油藏水平井技术示范区和规模开发试验区。

(5) 鄂尔多斯盆地致密油勘探潜力巨大, 初步评价长 7 致密油资源量达 $20 \times 10^8 \text{t}$, 是油田 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 可持续稳产的重要资源保障。

参考文献

- [1] 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 instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173–187.
- [2] 邹才能, 陶士振, 白斌, 等. 论非常规油气与常规油气的区别和联系[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 1–16.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Bai Bin, *et al.* Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1): 1–16.
- [3] 赵前, 杜伟. 美国致密油增长潜力与发展前景[J]. 国际石油经济, 2014, 10: 80–83.
Zhao Qian, Du Wei. Growth potential and development prospects of tight oil in United States[J]. *International Petroleum Economy*, 2014, 10: 80–83.
- [4] 张君峰, 毕海滨, 许浩, 等. 国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 127–137.
Zhang Junfeng, Bi Haibing, Xu Hao, *et al.* New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(2): 127–137.
- [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): 343–349.
Jia Chenzao, 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): 343–349.
- [6] 何海清, 李建忠. 中国石油“十一五”以来油气勘探成果、地质新认识与技术进展[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 1–13.
He Haiqing, Li Jianzhong. PetroChina's oil and gas exploration results, new geological theories and technological achievements since 11th Five-Year Plan Period[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(6): 1–13.
- [7] 王玉华, 蒙启安, 梁江平, 等. 松辽盆地北部致密油勘探[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4): 44–53.
Wang Yuhua, Meng Qi'an, Liang Jiangping, *et al.* Tight oil exploration in northern Songliao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(4): 44–53.
- [8] EIA. Technically recoverable shale oil and shale gas resource: an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[EB/OL]. [2013.6.20]. <http://www.eia.gov/analysis/studies/world shale gas/overview>.
- [9] 崔俊, 周莉, 张小波, 等. 柴达木盆地乌南油田致密砂岩储层特征[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(1): 22–28.
Cui Jun, Zhou Li, Zhang Xiaobo, *et al.* Characteristics of compact rock reservoir of Wunan oil field in Qaidamu Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(1): 22–28.
- [10] 李秀英, 肖阳, 杨全凤, 等. 二连盆地阿南洼槽岩性油藏及致密油勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(6): 56–61.
Li Xiuying, Xiao Yang, Yang Quanfeng, *et al.* Lithologic reservoir and tight oil exploration potential in Anan subsag, Erlian Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(6): 56–61.
- [11] 韩国猛, 周素彦, 唐鹿鹿, 等. 歧口凹陷歧北斜坡沙一下亚段致密砂岩油形成条件[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 89–96.
Han Guomeng, Zhou Suyan, Tang Lulu, *et al.* Geological conditions for Lower Es₁ tight sandstone oil in Qibei slope of Qikou depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(6): 89–96.
- [12] 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): 12–25.
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): 12–25.
- [13] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(1): 1–9.
Du Jinhua, He Haiqing, Yang Tao, *et al.* Progress in China's tight oil exploration and challenges[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(1): 1–9.
- [14] 新华网. 长庆油田发现中国首个亿吨级大型致密油田. [2015.5.26]. http://news.xinhuanet.com/fortune/2015-05/26/c_1115417051.htm.
Xinhua Online. The first YiDunJi large tight oil fields discovered by Changqing oilfield in China. [2015.5.26]. http://news.xinhuanet.com/fortune/2015-05/26/c_1115417051.htm.
- [15] 赵继勇, 刘振旺, 谢启超, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长 7 致密油储层微观孔喉结构分类特征[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(5): 73–80.
Zhao Jiyong, Liu Zhenwang, Xie Qichao, *et al.* Micro pore throat structural classification of Chang 7 tight oil reservoir of Jiyuan oilfield in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(5): 73–80.
- [16] 付金华, 罗安湘, 张妮妮, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 油层组有效储层物性下限的确定[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 82–88.
Fu Jinhua, Luo Anxiang, Zhang Nini, *et al.* Determine lower limits of physical properties of effective reservoirs in Chang 7 oil formation in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(6): 82–88.
- [17] 李忠兴, 屈雪峰, 刘万涛, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 段致密油合理开发方式探讨[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 217–221.
Li Zhongxing, Qu Xuefeng, Liu Wantao, *et al.* Development modes of Triassic Yanchang Formation Chang 7 Member tight oil in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(2): 217–221.
- [18] 徐美娥, 尹伟, 陈冬, 等. 鄂尔多斯盆地红河油田延长组致密砂岩储层反演预测[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 63–68.
Xu Meie, Yin Wei, Chen Dong, *et al.* Inversion prediction of tight sandstone reservoir of Yangchang Formation of Honghe oilfield in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1): 63–68.

- [19] 葛云锦, 贺永红, 焦健, 等. 鄂尔多斯盆地周缘地区长9油层组油积岩及致密油勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4): 30–36.
Ge Yunjin, He Yonghong, Jiao Jian, *et al.* Tight oil exploration of Chang 9 turbidity in Zhouchang area of Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(4): 30–36.
- [20] 冯胜斌, 牛小兵, 刘飞, 等. 鄂尔多斯盆地长7致密油储层储集空间特征及其意义[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(11): 4574–4580.
Feng Shengbin, Niu Xiaobing, Liu Fei, *et al.* Characteristics of Chang 7 tight oil reservoir space in Ordos Basin and its significance[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2013, 44(11): 4574–4580.
- [21] 贺静, 冯胜斌, 黄静, 等. 物源对鄂尔多斯盆地中部延长组长6砂岩孔隙发育的控制作用[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 80–86.
He Jing, Feng Shengbin, Huang Jing, *et al.* Characteristics of Chang 6 sandstone controlled by various directions source and influential factors of its porosity development in the center of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 80–86.
- [22] 贺静, 冯胜斌, 袁效奇, 等. 鄂尔多斯盆地周缘延长组露头剖面砂岩组分及地质意义分析[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(6): 30–36.
He Jing, Feng Shengbin, Yuan Xiaoqi, *et al.* An Analysis of sandstone composition of outcrops of Yanchang Formation in the margin of Ordos Basin and its geological significance[J]. lithologic oil–gas reservoir, 2011, 23(6): 30–36.
- [23] Madden B, Vossoughi S. US shale gas and tight oil boom — the opportunities and risks for America[J]. SPE 165770, 2013.
- [24] 金成志, 杨东, 张永平, 等. 松辽盆地北部非均质致密油水平井增产改造设计优化技术[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 40–46.
Jin Chengzhi, Yang Dong, Zhang Yongping, *et al.* Optimization techniques for stimulation design of horizontal wells of heterogeneous tight oil in northern Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(6): 40–46.
- [25] 任勇, 冯长青, 胡相君, 等. 长庆油田水平井体积压裂工具发展浅析[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(2): 75–81.
Ren Yong, Feng Changqing, Hu Xiangjun, *et al.* Analysis of volume–fracturing tools developed for horizontal wells in Changqing oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(2): 75–81.
- [26] 周庆凡, 张亚雄. 油气资源量含义和评价思路的探讨[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 474–480.
Zhou Qingfan, Zhang Yaxiong. A discussion on petroleum resources concepts and assessment approaches[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 474–480.
- [27] 王社教, 蔚远江, 汪少勇. 致密油资源评价进展[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1095–1105.
Wang Shejiao, Yu Yuanjiang, Wang Shaoyong. New advances in resources evaluation of tight oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1095–1105.
- [28] 郭秋麟, 陈宁生, 吴晓智. 致密油资源评价方法研究[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(2): 67–76.
Guo Qiulin, Chen Ningsheng, Wu Xiaozhi. Method for assessment of tight oil resource[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(2): 67–76.
- [29] 汪少勇, 李建忠, 李登华. EUR分布类比法在川中地区侏罗系致密油资源评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1757–1766.
Wang Shaoyong, Li Jianzhong, Li Denghua. EUR distribution analogous method: application to tight oil assessment in Jurassic, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1757–1766.
- [30] Philip H N. Pore–throat sizes in sandstones, tight sand–stones and shales[J]. AAPG, 2009, 3: 329–340.
- [31] 牛小兵, 冯胜斌, 刘飞, 等. 低渗透致密砂岩储层中石油微观赋存状态与油源关系——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 288–292.
Niu Xiaobing, Feng Shengbin, Liu Fei, *et al.* Microscopic occurrence of oil in tight sandstones and its relation with oil sources—a case study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 288–292.
- [32] 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用——强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289–293.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, *et al.* Leading effect of high–class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil–gas accumulation—Hydrocarbon generation and ex pulsion mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289–293.
- [33] 赵政璋, 杜金虎. 致密油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
Zhao Zhengzhang, Du Jinhua. Tight oil gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [34] 牛小兵, 侯贵廷, 张居增, 等. 鄂尔多斯盆地长6—长7段致密砂岩岩心裂缝评价标准及应用[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(3): 571–578.
Niu Xiaobing, Hou Guiting, Zhang Juzeng, *et al.* Assessment criteria for Member 6 and 7 tight sand in Ordos Basin and its applications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(3): 571–578.
- [35] 黄大志, 向丹. 注水吞吐采油机理研究[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(5): 39–43.
Huang Dazhi, Xiang Dan. Study of oil production mechanism by waterflood stimulation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(5): 39–43.
- [36] 王贺强, 陈智宇, 张丽辉, 等. 亲水砂岩油藏注水吞吐开发模式探讨[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 86–88.
Wang Heqiang, Chen Zhiyu, Zhang Lihui, *et al.* Discussions on developing hydrophilic sandstone reservoir by water injection–production[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 86–88.