

文章编号: 1000-0550(2017)02-0383-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.015

鄂尔多斯盆地延长组超低渗透油藏形成过程分析 ——以古峰庄—麻黄山地区为例

屈雪峰^{1,2}, 温德顺^{1,2}, 张龙³, 崔争锋⁴, 张瀚丹^{1,2}, 马静^{1,2}

1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018

2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018

3. 中国石油长庆油田分公司油田开发处, 西安 710018

4. 中国石油长庆油田分公司第十采油厂, 甘肃庆城 745100

摘要 鄂尔多斯盆地古峰庄—麻黄山地区长6、长8超低渗透油藏具有典型性和代表性。通过流体包裹体均一温度与沉积埋藏史—热史综合分析表明, 古峰庄—麻黄山地区长6、长8油藏为一期成藏, 成藏时间为早白垩世。成藏过程中, 长7油源成藏早期向长8单向充注, 成藏中期向长6、长8双向充注, 成藏后期则向长6单向充注。成藏过程的这种动态变化主要由源储距离及其垂向组合关系、油源岩生烃高峰、储层边致密边成藏等成藏要素联合作用控制。

关键词 成藏过程; 超低渗透油藏; 延长组; 古峰庄—麻黄山地区; 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 屈雪峰, 女, 1972年出生, 高级工程师, 石油开发地质, E-mail: qxf_cq@petrochina.com.cn

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

低渗透砂岩油藏是鄂尔多斯盆地石油勘探的主要对象。根据李道品等^[1]提出的分类方案, 低渗透砂岩油藏包括三类: 储层平均渗透率 $(10 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏为一般低渗透油藏, 储层平均渗透率 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏为特低渗透油藏, 储层平均渗透率 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏为超低渗透油藏。历经几十年的勘探开发, 鄂尔多斯盆地一般低渗透油藏、特低渗透油藏和超低渗透油藏已经成为了中国低渗透油藏的典型代表, 尤其是近年新增的石油储量和产量大多来自三叠系延长组超低渗透油藏^[2-5]。三叠系延长组自上而下划分为长1—长10共10个油层组, 总体反映了大型拗陷湖盆形成、发展和消亡的全过程^[6]。其中, 长8沉积时期盆地充填已由河流沉积体系演化为大型三角洲沉积体系, 紧随其后的长7沉积时期湖盆达到鼎盛阶段, 发育了长达40 m的优质烃源岩, 而长6沉积期是长7最大湖泛事件之后的大型三角洲主要建设时期。对油气勘探来说, 长7烃源岩与相邻的长6、长8三角洲砂岩具有最佳的成藏组合关系, 新发现的亿吨级整装大油田(西峰油田、环江油田、镇泾油田、姬塬油

田、华庆油田)集中分布在延长组长6和长8超低渗透砂岩中。

近年来, 许多学者对鄂尔多斯盆地低渗透油藏的成藏规律开展了大量的研究工作, 阐述了优质烃源生排烃特征^[7-10]、油源关系^[11-14]、成藏动力学系统特征^[15-16]、裂缝与成藏关系^[17-19]、成藏期次^[20-23]、储层致密化与成藏史^[24-26]、成藏机理与成藏模式^[27-32]等, 但在成藏过程定量化分析方面的研究鲜见报道。以鄂尔多斯盆地古峰庄—麻黄山地区延长组长6、长8超低渗透油藏为例, 从成藏条件解剖入手, 利用流体包裹体均一化温度测试结果, 对定量分析石油从长7油源向长6、长8地层中双向充注的动态过程进行了尝试性探索, 以期为鄂尔多斯盆地延长组低渗透油藏勘探开发提供可靠的地质科学依据, 并进一步丰富陆相石油成藏理论。

研究区古峰庄—麻黄山地区隶属于宁夏回族自治区盐池县, 构造位置处于鄂尔多斯盆地天环拗陷中部(图1)。随着石油勘探开发程度的提高, 该区延长组中取得了良好的勘探成果, 长6、长8油藏已经规模开发。岩芯物性测试结果统计分析, 长6、长8砂岩的平均孔隙度为10%, 渗透率集中分布在 $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于典型的超低渗透油藏。

收稿日期: 2015-08-26; 收修改稿日期: 2016-04-22

基金项目: 中国石油天然气集团公司重大攻关项目(2011E-13) [Foundation: Major research projects of China National Petroleum Corporation, No. 2011E-13]

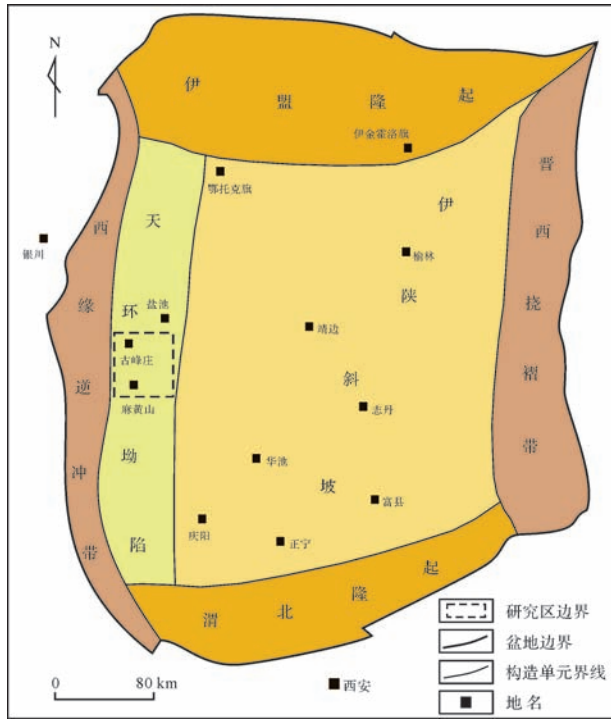


图1 研究区古峰庄—麻黄山地区位置图

Fig.1 The location of Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin

1 超低渗透油藏成藏条件分析

1.1 源岩生烃增压是石油运移的动力

鄂尔多斯盆地在大型坳陷湖盆背景上形成了延长组长7优质烃源岩^[7-10]。长7沉积期为延长期鄂尔多斯湖的最大湖泛期,湖水覆盖面积达 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,水体深度达60 m,在半深湖—深湖环境下沉积的长7泥页岩厚度大(40 m以上),分布面积广($5 \times 10^4 \text{ km}^2$),有机质丰度高(有机碳含量大于2%),干酪根类型好(I型或II型),普遍达到成熟(泥岩干酪根镜质体反射率为0.74%~1.10%),生油强度高达 $(330 \sim 400) \times 10^4 \text{ t/km}^2$,是中生界低渗透油藏最主要的烃源岩^[11-14,33]。研究区古峰庄—麻黄山地区长7沉积期为半深湖—深湖环境,沉积的优质烃源岩厚度普遍大于40 m(图2),为长6、长8油藏的成藏提供了丰厚的物质基础。

生烃模拟实验结果^[10]表明,长7油源岩累计生成的石油体积占岩石体积的8.0%~18.7%,由此增加了4.5~312.4 MPa的孔隙压力,导致产生强大的超压,成为超低渗透油藏形成过程中石油运移的主要动力^[15-16,28]。在强大的超压作用下,形成的天然水力微裂缝“接通”了处于异常高压的油源和处于常压的超

低渗透储层,在源储压差控制下石油涌入储层^[34-35]。可见,厚层优质油源岩生烃增压不仅为超低渗透油藏的形成提供了动力,也为石油运移提供了良好的通道。

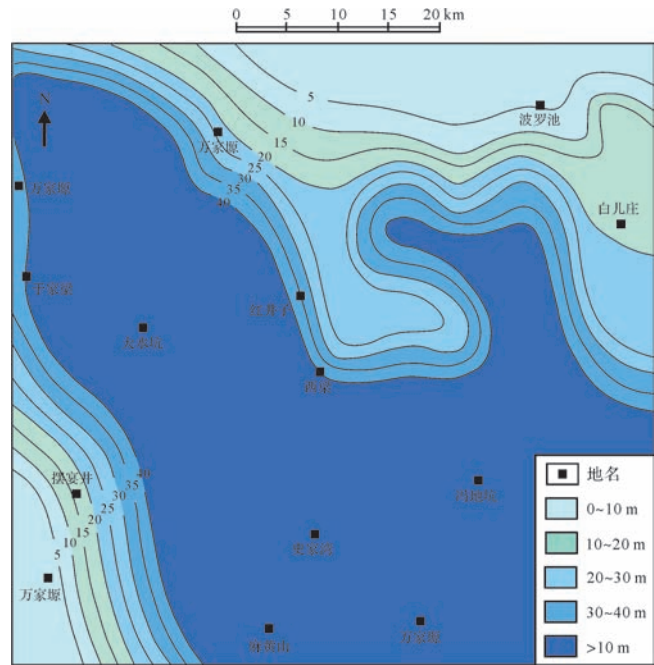


图2 古峰庄—麻黄山地区长7泥页岩厚度分布

Fig.2 Thickness distribution of Chang 7 source rock in Gufengzhuang-Mahuangshan area

1.2 源储广覆式接触是石油成藏的基础

延长组沉积时期,研究区位于当时湖盆的西北岸,沉积物源来自西北方向,流入湖后形成三角洲沉积。其中,长8、长6沉积期是大型三角洲主要建设时期,在古峰庄—麻黄山地区形成了大面积叠合连片的储集砂体。长7沉积期形成的厚层优质烃源岩夹持于长8、长6储集砂体之间,呈现出上下为储层、中间夹源岩的接触关系。由于烃源岩与储层均稳定分布,源储大面积广覆式接触,形成了超低渗透油藏“三明治”式源储组合(图3)。

1.3 储层超低渗透率是油藏保存的关键

根据古峰庄—麻黄山地区长6、长8油层组200多个样品的压汞测试数据,分别建立了长6、长8渗透率与排驱压力之间的关系(图4),可以看出渗透率与排驱压力具有较好的幂函数关系,随着渗透率降低,砂岩排驱压力增加。由图4中分别读取不同渗透率的排驱压力值,经换算得到地层条件下的毛细管阻力(表1)。在砂岩渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 情况下,排驱压力一般超过2 MPa,在地层状态下毛细管阻力

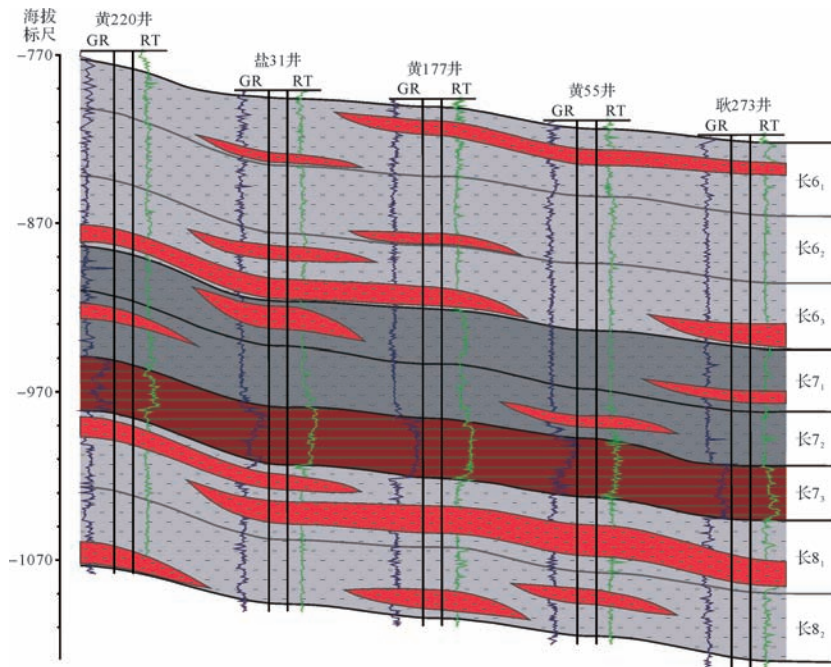


图 3 古峰庄—麻黄山地区长 6—长 8 超低渗透油藏剖面

Fig.3 Ultra-low permeability reservoir section of Chang 6 and Chang 8 member in Gufengzhuang-Mahuangshan area

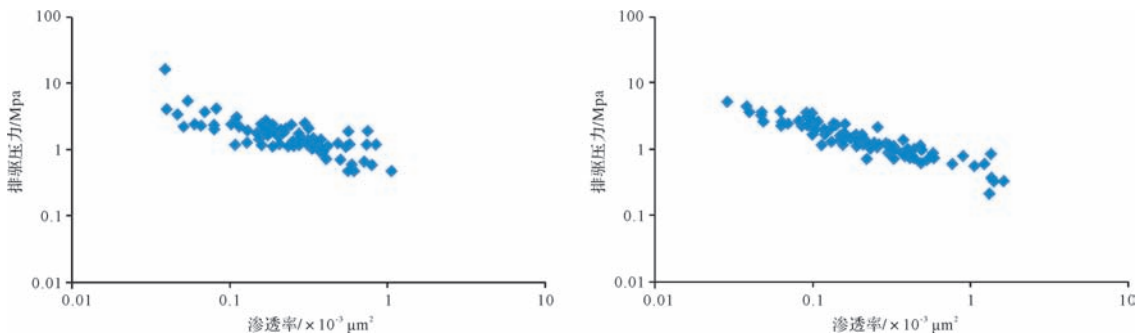


图 4 古峰庄—麻黄山地区长 6(上)、长 8(下)排驱压力与渗透率关系

Fig.4 The relationship of displacement pressure and permeability in Chang 6 member(upper) and Chang 8 member(lower) of Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin

超过 0.5 MPa。当砂岩渗透率减小时,排驱压力增加,地层状态下所受毛细管阻力也明显增加。

表 1 古峰庄—麻黄山地区超低渗透油藏浮力驱动石油运移的临界油柱高度

Table 1 The critical oil column height driven by buoyancy for ultra-low permeability reservoir in Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin

储层渗透率 / $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	排驱压力 /MPa	油藏状态下毛细管 阻力/MPa	临界油柱高度/m	
			垂向运移	侧向运移
0.1	2.97	0.74	479	27 420
0.3	1.58	0.40	255	14 609
0.5	0.94	0.23	151	8 653
0.8	0.34	0.09	55	3 173
1.0	0.06	0.02	10	571

石油在砂岩中运移要求浮力大于毛细管阻力。古峰庄—麻黄山地区长 6、长 8 地层倾角一般不足 1° ,在计算石油横向运移时,以 1° 作为地层倾角,求取浮力作用下石油运移的临界油柱高度(表 1)。由表 1 可知,当砂岩渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,石油发生垂向运移的临界高度为 479 m,侧向运移的临界高度为 27 420 m。古峰庄—麻黄山地区长 6、长 8 超低渗透油藏呈透镜状,围岩一般是粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和钙质砂岩,强烈的压实和胶结作用导致围岩渗透率急剧减小到 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下。透镜体油藏面积一般小于 20 km^2 (长度一般不足 6 km,宽度不超过 4 km,厚度小于 10 m),难以达到石油运移的临界油柱高度。因此,石油不可能在浮力作用下突破围岩而

发生横向运移和垂向运移是超低渗透油藏得以保存的关键。

2 超低渗透油藏成藏期次分析

流体包裹体分析是研究油气成藏期次的一种有效手段^[36-38]。根据成岩矿物生长序列及流体包裹体产状,在古峰庄—麻黄山地区长6、长8石英、长石颗粒及方解石胶结物中识别出1期与油气充注有关的包裹体。其中以石英颗粒中的包裹体为主,多沿切穿颗粒的微裂隙或溶蚀孔成条带状分布,单个包裹体直径3~15 μm,形状多为椭圆形、不规则形,一般为淡黄色—灰色,相态为气液两相(图5a);荧光显示黄绿色、绿色(图5b);从与其伴生的盐水包裹体均一温度统计(图5c)看,长6、长8包裹体均一温度的主频均在80℃~120℃。

将沉积埋藏史、热史与包裹体均一温度数据结合

可确定石油成藏时间^[20-23,36-38]。参考前人在鄂尔多斯盆地地层剥蚀厚度^[6]和古地温^[39-41]方面的研究结果,编制了研究区长6、长8的沉积埋藏史—热史剖面图,将包裹体均一温度投影到埋藏史—热史剖面图上,求取石油的充注时间(图6)。由图6可以看出,古峰庄—麻黄山地区长6、长8石油充注时间发生在138.5~100.0 Ma,即从早白垩世早期到早白垩世晚期。

当含烃流体充注入长6、长8时,便开始了石油聚集成藏的过程。

3 超低渗透油藏成藏过程分析

由图5c可知,虽然古峰庄—麻黄山地区长6、长8包裹体均一温度主频均在80℃~120℃,但二者特征明显不同:长8包裹体均一温度表现为“前峰型渐变式”,地层温度70℃~80℃时石油开始充注,80℃~90℃期间充注量激增至最大,尔后90℃~120℃时充

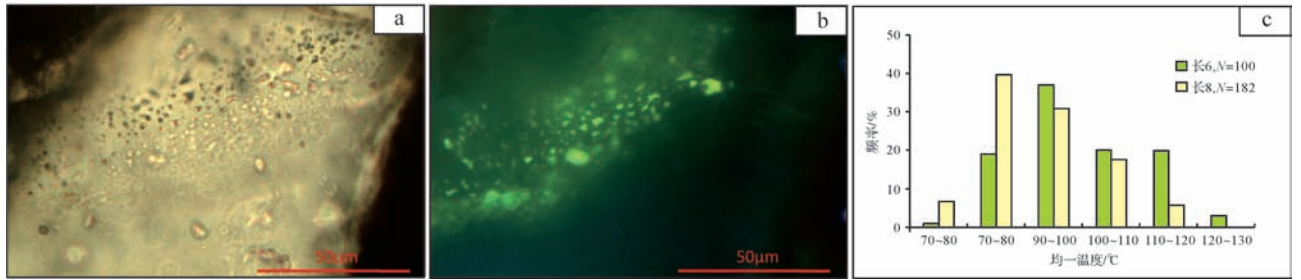


图5 古峰庄—麻黄山地区长6、长8流体包裹体显微照片及其均一温度分布

a.池107井,长8,2789.7 m,石英颗粒溶蚀孔中气液2相包裹体,透射光下淡黄色—无色;b.同a,荧光下显示黄绿色;c.长6、长8与烃类包裹体伴生的盐水包裹体均一温度分布直方图。

Fig.5 The fluid inclusion microscope photos and homogenous temperatures of Chang 6 and Chang 8 reservoirs in Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin

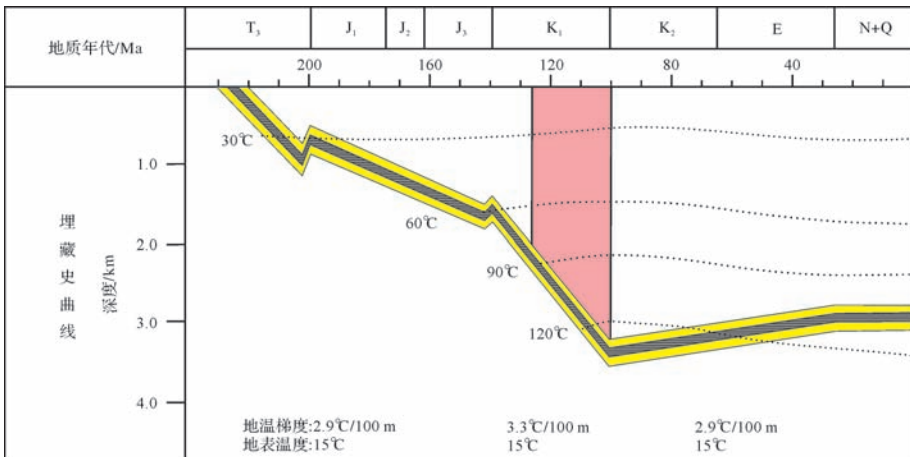


图6 古峰庄—麻黄山地区长6—长8埋藏史—热史与油气充注史

Fig.6 Diagram showing hydrocarbon charging ages by fluid inclusion homogenization temperatures projecting on geothermal-burial historical chart of Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin

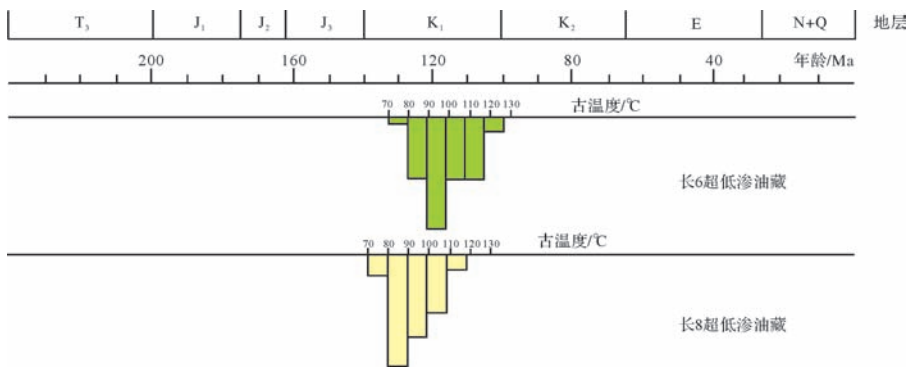


图7 古峰庄—麻黄山地区长6—长8油藏石油充注时间定量分析

Fig.7 Quantitative analysis of oil charging time in Chang 6 and Chang 8 reservoir of Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin

注量逐渐降低;而长6包裹体均一温度表现为“中峰型阶梯式”,70℃~80℃时少量(不足2%)油气充注,80℃~90℃时充注量(约20%)阶梯式增大,90℃~100℃时充注量(约40%)达到最大,随后100℃~110℃、110℃~120℃时充注量均为约20%,120℃~130℃时降低至2%。

在埋藏史—热史剖面投影包裹体均一温度确定油气充注时间(图6)的约束下,确定出10℃间隔的石油充注时间和地层埋藏深度,然后将长6、长8的石油充注时间分别标注在同一时间轴上(图7)。研究区长8地层厚度80~100 m,长7地层厚度90~100 m,长6地层厚度100~120 m;早白垩世古地温梯度为3.3℃/100 m,由此推算,长6、长8地层中部的温度差约7℃,长6顶部与长8底部温度差约10℃。在实际编制图7时,为了便于对比长6、长8成藏特征的差异,将二者成藏期的温度差近似为10℃。由图7可见,石油充注始于长8,结束于长6,充注高峰长8早于长6。

根据上述超低渗透油藏成藏条件及成藏过程的分析,恢复了鄂尔多斯盆地古峰庄—麻黄山地区长6、长8油藏成藏过程,该过程可以分为7个连续的成藏阶段(图8)。下面就成藏过程的各个阶段给予简要文字说明。

第一阶段为长8石油充注开始阶段 长8地层埋藏深度为1660~1970 m,温度为70℃~80℃,石油充注时间为138.5~133.0 Ma。该阶段长7优质烃源岩开始生烃,生烃增压提供了流体运移的动力和通道,石油近距离充注入长8砂岩储层。此时,生烃增压产生的裂缝尚未扩展至长6地层。

第二阶段为长8石油充注高峰阶段 石油充注

时间为133.0~127.5 Ma,长8地层温度为80℃~90℃,长6地层温度为70℃~80℃。此阶段长8石油充注已达高峰,而天然水力裂缝才扩展到长6地层,充注量很少。

第三阶段为长8石油充注减弱阶段 石油充注时间段为127.5~122.0 Ma,长8、长6地层温度分别为90℃~100℃和80℃~90℃。这一时期,大量裂缝已发展至长6,长8石油充注量开始减弱,而长6石油充注呈阶梯状增加。

第四阶段为长8石油充注大幅衰退阶段 石油充注时间为122.0~116.5 Ma,长8、长6地层温度分别为100℃~110℃和90℃~100℃,裂缝已基本贯穿长6。此阶段表现为长8石油充注量急剧下降,而长6石油充注达到高峰期。

第五阶段为长8石油充注结束阶段 时间为116.5~111.0 Ma,长8、长6地层温度分别为110℃~120℃和100℃~110℃。此阶段长8石油充注期结束,而长6石油充注量阶梯式骤减。

第六阶段为长6石油充注维持阶段 时间为111.0~105.5 Ma,长8、长6地层温度分别为120℃~130℃和110℃~120℃。该阶段表现为长6石油充注量与第五阶段持平。

第七阶段为石油充注结束阶段 时间为105.5~100.0 Ma,长8、长6地层温度分别为130℃~140℃和120℃~130℃。长6石油充注量阶梯式减少至彻底结束。

综上所述,研究区长8、长6超低渗透油藏的成藏过程发生着动态变化:长8石油充注达高峰时,长7油源向长8单向充注;长6发生石油充注及达到高峰时,长7油源向长6、长8双向充注;成藏后期则向长6单向充注。

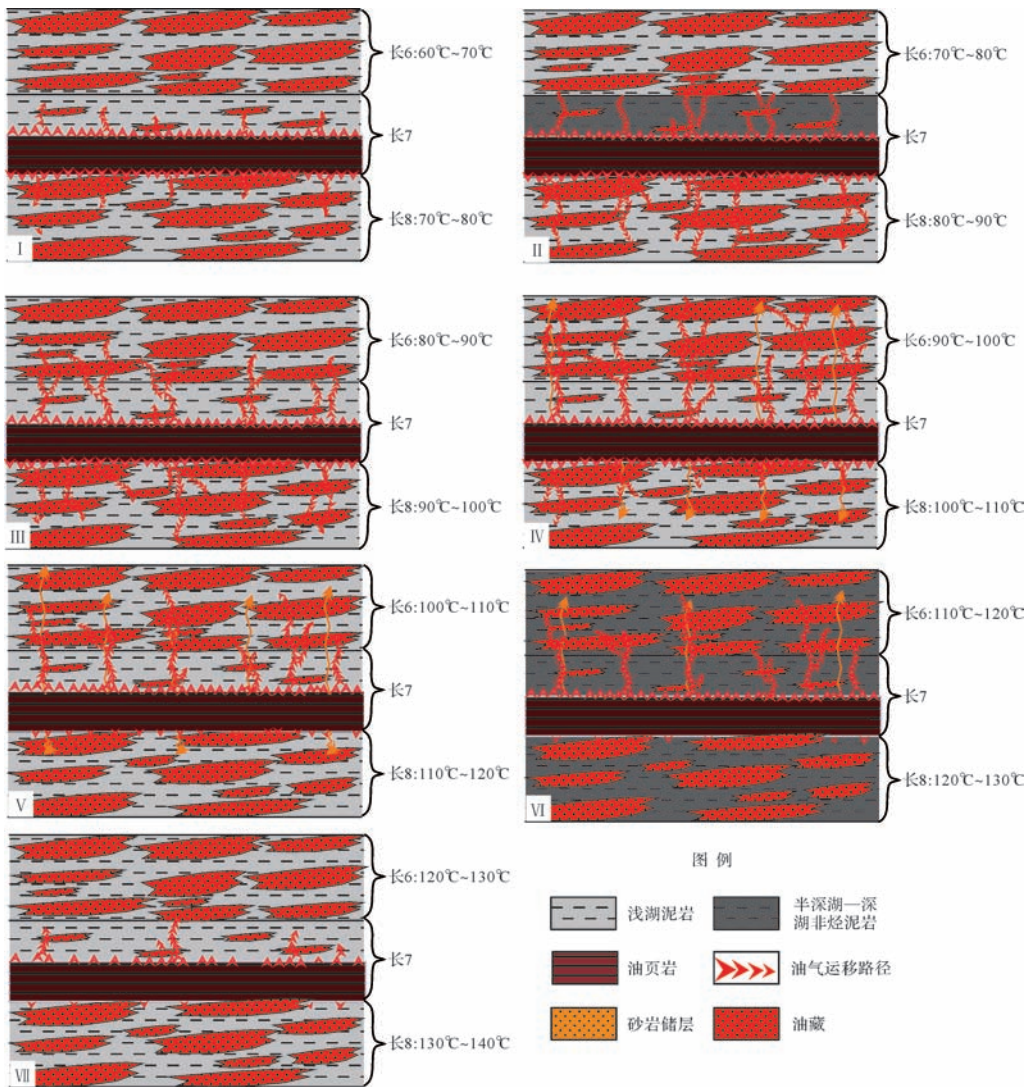


图8 古峰庄—麻黄山地区长6、长8超低渗透油藏成藏过程

Fig.8 The accumulation process of ultra-low permeability reservoir in Chang 6 and Chang 8 reservoir of Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin

4 成藏过程动态变化的控制因素分析

4.1 源储距离控制着石油充注的起始时间

由古峰庄—麻黄山地区延长组地层发育特征可知,长8储层与长7优质源岩间隔10~20 m的泥岩,而长6储层与长7源岩间隔超过60 m,长8储层有着“近水楼台先得月”的成藏优势。

长8储层紧邻长7源岩,生烃增压产生的水力裂缝率先扩展至长8储层,沟通了油源与储层。在裂缝尚未到达长6之际,长8石油充注量很快达到高峰。随着水力裂缝扩展到长6,长6的石油充注量阶梯式上升,相应地长8的石油充注量逐渐下降。这种现象

充分说明了源储的距离对成藏过程有着重要影响,尤其是在石油充注的起始时间上起着控制作用,表现为近距离优先充注。

4.2 生烃高峰控制着石油充注高峰

综合分析图5c、图6、图7、图8可知,长7烃源岩生烃高峰期时古地温为80℃~110℃。生烃高峰伊始(80℃~90℃),紧邻烃源岩的长8石油充注即刻达到生烃高峰;生烃高峰中期(90℃~100℃),生烃增压形成的水力裂缝扩展到距离烃源岩较远的长6,长6石油充注量阶梯式激增,导致长8石油充注量减弱;生烃高峰晚期(100℃~110℃),水力裂缝贯穿长6,长6石油充注达到高峰,相应地引起长8石油充注量骤

减。总体上看,长7生烃高峰期控制着长6、长8石油充注的高峰期,但长6、长8充注高峰期有着此消彼长的特点。

由此得到提示,对于鄂尔多斯盆地延长组低渗透油藏而言,某一层位的包裹体均一温度特征仅能反映石油的充注过程,不能完全反映烃源岩的生、排烃过程;若同时考虑烃源岩的上覆和下伏油藏,则能够动态揭示石油的生、排、聚过程。

4.3 源储垂向组合关系控制着石油充注的发展方向

石油在亲水介质中依靠油、水流体势差运移^[42]。综合分析鄂尔多斯盆地延长组的石油地质条件,石油向长6、长8运移的流体势差可能由生烃增压、油的浮力和毛细管阻力的联合作用决定。生烃增压(双向排烃)是石油运移的动力;油的浮力对长6而言是动力,但对长8就是阻力;生烃增压形成的裂缝比较平直,直径变化不大,一般为 $0.003\sim 0.01\ \mu\text{m}$,毛细管阻力较小^[42],可忽略不计。这种情况下的流体势差主要由生烃增加的压力与油的浮力二者共同决定。

在水力裂缝未扩展至长6时,长7烃源岩生成的石油尚处在向长8单向排烃的过程,生烃增加的压力转化为石油向长8运移的动力,运移动力强劲,远大于石油所受到的浮力(阻力),使大量石油充注入长8。当水力裂缝扩展至长6时,石油双向充注,生烃增加的压力一分为二,那么向长8运移的动力强度减弱,在浮力作用下,石油运移受阻,充注量减弱;而对长6而言,浮力是动力,与生烃增加的压力叠加,动力强度较大,石油源源不断地进入长6。随着烃源岩生烃强度减弱(110°C 以后),生烃增加的压力减弱,浮

力的作用明显增强,导致长8石油充注衰落,而长6仍然持续充注。

4.4 边致密边成藏对石油聚集成藏有着重要影响

鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层的质量与成岩作用密切相关^[24-25]。对古峰庄—麻黄山地区长6、长8砂岩储层质量与成岩作用关系的研究表明^{①②},早期的胶结作用(高岭石、方解石)和压实作用引起孔隙度损失率达70%,导致早成岩阶段末期砂岩物性已较差,孔隙度约为12%,渗透率约为 $1.0\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$;中成岩阶段石油充注过程中,长石溶蚀产生的次生孔隙虽然对物性有一定改善,但晚期高岭石和方解石胶结导致储层质量进一步变差,目前砂岩平均孔隙度为10%,平均渗透率为 $0.24\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,这说明在中成岩阶段石油充注的过程中砂岩储层边致密边成藏。

在聚集阶段初期,石油首先进入喉道较粗的孔隙中,随着石油的持续充注,较粗喉道对应的孔隙中充满时,将继续向喉道较细的孔隙中充注,此时毛细管阻力增大,石油难以进入,导致部分孔隙中仍几乎被水饱和。同时,毛细管阻力大,油的浮力难以将水向下排驱。总之,超低渗透储层孔隙微小,毛细管阻力大,石油仅占据了部分孔隙,而部分与小喉道连接的孔隙中仍饱含水,表现为超低渗透油藏含油饱和度低(图9),油水分异不清,开采初期含水率就高达40%。

5 结论

(1) 流体包裹体均一温度与沉积埋藏史—热史综合分析表明,古峰庄—麻黄山地区长6、长8油藏具有一期成藏的特点,成藏温度为 $70^\circ\text{C}\sim 130^\circ\text{C}$,成藏

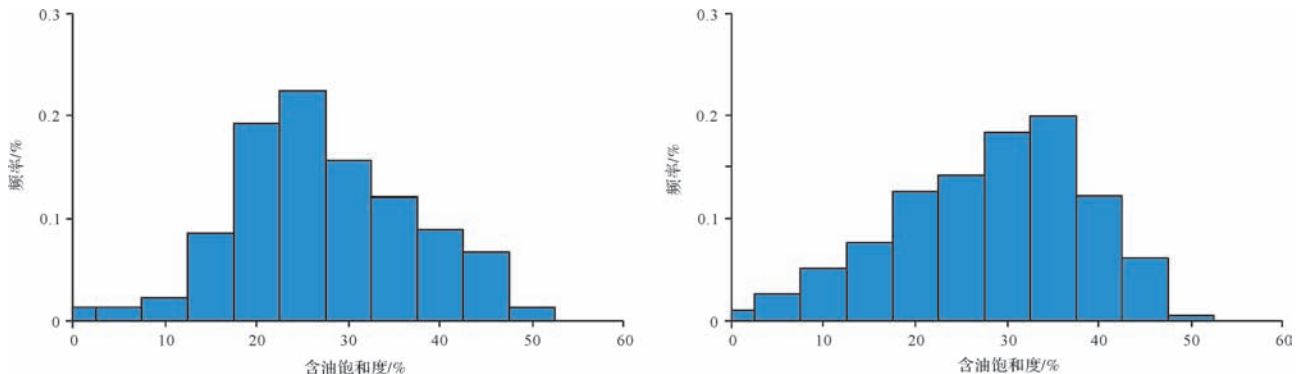


图9 古峰庄—麻黄山地区长6(左)、长8(右)油藏含油饱和度频率直方图

Fig.9 The histogram of oil saturation in Chang 6 member(left) and Chang 8 member(right) of Gufengzhuang-Mahuangshan area, Ordos Basin

①顾岱鸿,周晓峰,王建国,等. 姬塬西北部长6油藏建产潜力研究,长庆油田勘探开发研究院内部资料,2014.

②何顺利,周晓峰,王建国,等. 盐池地区成藏规律及开发潜力研究,长庆油田勘探开发研究院内部资料,2014.

时间为138.5~100.0 Ma,对应地质时代为早白垩世。

(2) 成藏过程定量分析表明,成藏早期(138.5~127.5 Ma)长7油源向长8单向充注直至成藏高峰;成藏中期(127.5~111.0 Ma)向长6、长8双向充注,这一时期长6达到成藏高峰,而长8充注量逐渐减少;成藏后期(111.0~100.0 Ma)则向长6单向充注。

(3) 长6、长8超低渗透油藏成藏过程的差异性主要由源储距离及垂向组合关系、生烃高峰、储层边致密边成藏等成藏要素联合作用控制着。源储距离近者优先充注,生烃高峰期控制着充注高峰期,在浮力作用下石油总是有着向上运移的趋势,边致密边成藏导致形成的油藏含水饱和度高,油水分异不清。

参考文献(References)

- [1] 李道品,罗迪强,刘雨芬,等. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社,1997:1-9. [Li Daopin, Luo Diqiang, Liu Yufen, et al. The Development of the Low Permeability Sandstone Oil Field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1-9.]
- [2] 史成恩,万晓龙,赵继勇,等. 鄂尔多斯盆地超低渗透油层开发特征[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2007,34(5):538-542. [Shi Cheng'en, Wan Xiaolong, Zhao Jiyong, et al. Development characteristics of super-low permeability oil layers in Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2007, 34(5): 538-542.]
- [3] 李书恒,赵继勇,崔攀峰,等. 超低渗透储层开发技术对策[J]. 岩性油气藏,2008,20(3):128-131. [Li Shuheng, Zhao Jiyong, Cui Panfeng, et al. Strategies of development technology for ultra-low permeability reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(3): 128-131.]
- [4] 屈红军,杨县超,曹金丹,等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深层油气聚集规律[J]. 石油学报,2011,32(2):243-248. [Qu Hongjun, Yang Xianchao, Cao Jinzhou, et al. Oil accumulation rules in deep zones of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 243-248.]
- [5] 姚泾利,邓秀芹,赵彦德,等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发,2013,40(2):150-158. [Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150-158.]
- [6] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京:石油工业出版社,2003:88-173. [He Zixin. The Evolution and Petroleum of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 88-173.]
- [7] 张文正,杨华,杨奕华,等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学,2008,37(1):59-64. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59-64.]
- [8] 张文正,杨华,彭平安,等. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响[J]. 地球化学,2009,38(6):573-582. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Ping'an, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2009, 38(6): 573-582.]
- [9] 张文正,杨华,解丽琴,等. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响——以鄂尔多斯盆地长7烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发,2010,37(4):424-429. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Xie Liqin, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 424-429.]
- [10] 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 expulsion mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.]
- [11] 郭艳琴,李文厚,陈全红,等. 鄂尔多斯盆地安塞-富县地区延长组-延安组原油地球化学特征及油源对比[J]. 石油与天然气地质,2006,27(2):218-224. [Guo Yanqin, Li Wenhou, Chen Quanhong, et al. Geochemical behaviors of oil and oil-source correlation in Yanchang-Yan'an Formations in Ansai-Fuxian area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 218-224.]
- [12] 侯林慧,彭平安,于赤灵,等. 鄂尔多斯盆地姬塬-西峰地区原油地球化学特征及油源分析[J]. 地球化学,2007,36(5):497-506. [Hou Linhui, Peng Ping'an, Yu Chiling, et al. Geochemical characteristics and oil-source analysis of crude oils in Jiyuan-Xifeng oilfield, Ordos basin[J]. Geochimica, 2007, 36(5): 497-506.]
- [13] 赵彦德,罗安湘,孙柏年,等. 鄂尔多斯盆地西南缘三叠系烃源岩评价及油源对比[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2012,48(3):1-6,13. [Zhao Yande, Luo Anxiang, Sun Bainian, et al. Hydrocarbon source evaluation and oil source contrast of the Triassic system in southwest margin, ordos Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2012, 48(3): 1-6, 13.]
- [14] 李相博,刘显阳,周世新,等. 鄂尔多斯盆地延长组下组合油气来源及成藏模式[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):172-180. [Li Xiangbo, Liu Xianyang, Zhou Shixin, et al. Hydrocarbon origin and reservoir forming model of the lower Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 172-180.]
- [15] 段毅,吴保祥,郑朝阳,等. 鄂尔多斯盆地西峰油田油气成藏动力学特征[J]. 石油学报,2005,26(4):29-33. [Duan Yi, Wu Baoxiang, Zheng Chaoyang, et al. Pool-forming dynamic properties of Xifeng oilfield in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 29-33.]
- [16] 邓秀芹,姚泾利,胡喜锋,等. 鄂尔多斯盆地延长组超低渗透岩性油藏成藏流体动力系统特征及其意义[J]. 西北大学学报:

- 自然科学版,2011,41(6):1044-1050. [Deng Xiuqin, Yao Jingli, Hu Xifeng, et al. Characteristics and geological significance of hydrodynamic system on ultra-low permeability reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2011, 41(6): 1044-1050.]
- [17] 曾联波,李忠兴,史成恩,等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报,2007,81(2): 174-180. [Zeng Lianbo, Li Zhongxing, Shi Cheng'en, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 2007, 81(2): 174-180.]
- [18] 邓虎成,周文,彭军,等. 鄂尔多斯麻黄山地区裂缝与油气成藏关系[J]. 新疆地质,2010,28(1):81-85. [Deng Hucheng, Zhou Wen, Peng Jun, et al. Relationship between fracture and hydrocarbon accumulation of Ma Huangshan area in Ordos Basin[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(1): 81-85.]
- [19] 李士祥,邓秀芹,庞锦莲,等. 鄂尔多斯盆地中生界油气成藏与构造运动的关系[J]. 沉积学报,2010,28(4):798-807. [Li Shixiang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian, et al. Relationship between petroleum accumulation of Mesozoic and tectonic movement in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 798-807.]
- [20] 高振东,赵靖舟,曹青,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组油藏成藏年代分析[J]. 西北地质,2008,41(3):92-98. [Gao Zhendong, Zhao Jingzhou, Cao Qing, et al. Geochronological analysis of oil accumulation in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2008, 41(3): 92-98.]
- [21] 黄志龙,江青春,席胜利,等. 鄂尔多斯盆地陕北斜坡带三叠系延长组和侏罗系油气成藏期研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(1):21-24. [Huang Zhilong, Jiang Qingchun, Xi Shengli, et al. Study on oil and gas accumulation period of Yanchang Formation of Triassic and Jurassic in North Shaanxi slope zone, Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2009, 24(1): 21-24.]
- [22] 梁宇,任战利,史政,等. 鄂尔多斯盆地富县—正宁地区延长组油气成藏期次[J]. 石油学报,2011,32(5):741-748. [Liang Yu, Ren Zhanli, Shi Zheng, et al. Classification of hydrocarbon accumulation phases of the Yanchang Formation in the Fuxian-Zhengning area, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 741-748.]
- [23] 付金华,柳广弟,杨伟伟,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透油藏成藏期次研究[J]. 地学前缘,2013,20(2):125-131. [Fu Jinhua, Liu Guangdi, Yang Weiwei, et al. A study of the accumulation periods of low permeability reservoir of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 125-131.]
- [24] 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.]
- [25] 孙致学,孙治雷,鲁洪江,等. 砂岩储集层中碳酸盐胶结物特征——以鄂尔多斯盆地中南部延长组为例[J]. 石油勘探与开发,2010,37(5):543-551. [Sun Zhixue, Sun Zhilei, Lu Hongjiang, et al. Characteristics of carbonate cements in sandstone reservoirs: A case from Yanchang Formation, middle and southern Ordos Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 543-551.]
- [26] 潘高峰,刘震,赵舒,等. 砂岩孔隙度演化定量模拟方法——以鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组为例[J]. 石油学报,2011,32(2):249-256. [Pan Gaofeng, Liu Zhen, Zhao Shu, et al. Quantitative simulation of sandstone porosity evolution: A case from Yanchang Formation of the Zhenjing area, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 249-256.]
- [27] 罗晓容,张刘平,杨华,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长81段低渗透油藏成藏过程[J]. 石油与天然气地质,2010,31(6):770-778,837. [Luo Xiaorong, Zhang Liuping, Yang Hua, et al. Oil accumulation process in the low-permeability Chang-81 member of Longdong area, the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 770-778, 837.]
- [28] 李明诚,李剑.“动力圈闭”——低渗透致密储层中油气充注成藏的主要作用[J]. 石油学报,2010,31(5):718-722. [Li Mingcheng, Li Jian. “Dynamic trap”: a main action of hydrocarbon charging to form accumulations in low permeability-tight reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 718-722.]
- [29] 赵靖舟,白玉彬,曹青,等. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透—致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质,2012,33(6):811-827. [Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, et al. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: A new pattern for large tight sand oilfields in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 811-827.]
- [30] 郭彦如,刘俊榜,杨华,等. 鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密岩性油藏成藏机理[J]. 石油勘探与开发,2012,39(4):417-425. [Guo Yanru, Liu Junbang, Yang Hua, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic oil reservoirs in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 417-425.]
- [31] 楚美娟,李士祥,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地延长组长8油层组石油成藏机理及成藏模式[J]. 沉积学报,2013,31(4):683-692. [Chu Meijuan, Li Shixiang, Liu Xianyang, et al. Accumulation mechanisms and modes of Yanchang Formation Chang 8 interval hydrocarbons in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 683-692.]
- [32] 杨伟伟,柳广弟,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透砂岩油藏成藏机理与成藏模式[J]. 地学前缘,2013,20(2):132-139. [Yang Weiwei, Liu Guangdi, Liu Xianyang, et al. The accumulation mechanism and accumulation models of oil in low permeability reservoir of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 132-

- 139.]
- [33] 杨华,刘显阳,张才利,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透岩性油藏主控因素及其分布规律[J].岩性油气藏,2007,19(3):1-6. [Yang Hua, Liu Xianyang, Zhang Caili, et al. The main controlling factors and distribution of low permeability lithologic reservoirs of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 1-6.]
- [34] 胡济世.异常高压、流体压裂与油气运移(上)[J].石油勘探与开发,1989(2):16-23. [Hu Jishi. Abnormal pressure, fluid fracturing, and migration of oil and gas (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 1989(2): 16-23.]
- [35] 胡济世.异常高压、流体压裂与油气运移(下)[J].石油勘探与开发,1989(3):16-23. [Hu Jishi. Abnormal pressure, fluid fracturing, and migration of oil and gas (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 1989(3): 16-23.]
- [36] 李荣西,席胜利,邸领军.用储层油气包裹体岩相学确定油气成藏期次:以鄂尔多斯盆地陇东油田为例[J].石油与天然气地质,2006,27(2):194-199,217. [Li Rongxi, Xi Shengli, Di Lingjun. Oil/gas reservoiring phases determined through petrographic analysis of hydrocarbon inclusions in reservoirs: Taking Longdong oilfield, Ordos Basin, as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 194-199, 217.]
- [37] 陈红汉,吴悠,肖秋苟,等.昌都盆地古油藏的流体包裹体证据[J].地质学报,2010,84(10):1457-1469. [Chen Honghan, Wu You, Xiao Qiugou, et al. Fluid inclusion evidence of paleo-oil reservoirs in Changdu Basin, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(10): 1457-1469.]
- [38] 周振柱,周瑶琪,陈勇,等.流体包裹体地层学在石油勘探开发中的应用[J].石油勘探与开发,2011,38(1):59-66. [Zhou Zhenzhu, Zhou Yaoqi, Chen Yong, et al. Application of fluid inclusion stratigraphy to petroleum exploration and production[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 59-66.]
- [39] 任战利,赵重远,张军,等.鄂尔多斯盆地古地温研究[J].沉积学报,1994,12(1):56-65. [Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan, Zhang Jun, et al. Research on paleotemperature in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 56-65.]
- [40] 任战利.鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J].石油学报,1996,17(1):17-24. [Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and oil-gas accumulation in the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 17-24.]
- [41] 任战利,张盛,高胜利,等.鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨[J].地质学报,2006,80(5):674-684. [Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 674-684.]
- [42] 李明诚.石油与天然气运移研究综述[J].石油勘探与开发,2000,27(4):3-10. [Li Mingcheng. An overview of hydrocarbon migration research[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 3-10.]

Accumulation Process of Ultra-low Permeability Reservoirs in Yanchang Formation Ordos Basin: A case from Gufengzhuang-Mahuangshan area

QU XueFeng^{1,2}, WEN DeShun^{1,2}, ZHANG Long³, CUI ZhengFeng⁴, ZHANG HanDan^{1,2}, MA Jing^{1,2}

1. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

2. National Engineering Laboratory for Low Permeability Petroleum Exploration and Development, Xi'an 710018, China

3. Oilfield Development Department of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

4. The Tenth Oil Production Plant of PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingcheng, Gansu 745100, China

Abstract: Oil reservoirs in Chang 6 and Chang 8 members of Yanchang Formation in Gufengzhuang-Mahuangshan area of Ordos Basin are typical ultra-low permeability reservoirs. Comprehensive analysis of homogenous temperatures of fluid inclusions and geothermal and burial history shows that oil accumulation of Chang 6 and Chang 8 members happened in early Cretaceous. During the oil accumulation petroleum generating from Chang 7 source rock only charged into Chang 8 reservoir at the early stage, then charged up and down into Chang 6 and Chang 8 at the middle stage, and only filled into Chang 6 reservoir at the late stage. The difference of accumulation process was controlled by the relationship between source and reservoir, and the peak time of hydrocarbon generation, and the reservoir tightness prior to the accumulation.

Key words: accumulation process; ultra-low permeability reservoir; Yanchang Formation; Gufengzhuang-Mahuangshan area; Ordos Basin