

鄂尔多斯盆地延长组储层致密化 及其影响下的致密油充注特征

郭继刚¹, 郭凯², 宫鹏骐³, 徐静⁴, 郭晶¹

(1. 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034; 2. 中国石油长城钻探工程有限公司解释研究中心, 北京 100101;
3. 中国石油长城钻探工程有限公司井下作业分公司, 北京 100101; 4. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249)

摘要:通过对鄂尔多斯盆地延长组储层成岩作用、致密历史、油水分布特征的分析,并结合充注动力与阻力的计算,探讨了储层早期致密化影响下的致密油充注特征。结果表明,延长组长 6-长 8 段储层孔隙演化经过 4 个阶段,在中成岩阶段 A₁ 期基本达到致密,而此时油气大规模充注尚未开始。储层早期致密化形成的高充注阻力导致浮力难以成为驱替致密油运移的有效动力。同时,结合该区具有紧邻源岩的致密砂岩普遍含油、“甜点”富油且流体分异性差的特征,认为广泛发育的长 7 段烃源岩与长 6 和长 8 段储层间的剩余压力差是致密油充注的主要动力,且是导致致密砂岩含油而甜点富油的重要因素。

关键词:储层致密化;充注动力;致密油;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Reservoir densification and tight-oil charging in Yanchang Formation, Ordos Basin

Guo Jigang¹, Guo Kai², Gong Pengqi³, Xu Jing⁴, Guo Jing¹

(1. Strategic Research Center of Oil and Gas Resources, MLR, Beijing 100034, China;

2. Geoscience Center, CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China;

3. Downhole Service Company, CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China;

4. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin, is characterized by low porosity and permeability and is considered as a tight-oil reservoir. However, reservoir densification and its influence on oil charging are not well-understood. Based on the analysis of reservoir diagenesis, densification history, oil-water distribution, driving force and resistance, the oil charging process in tight-sand reservoirs was discussed. The results showed that porosity evolution of the Chang 6-Chang 8 reservoirs has gone through four stages, and they became tight during the diagenetic A₁ stage, which was prior to oil charging. And the large resistance due to narrow pore throats made it impossible for buoyancy to be a driving force. Since the tight-sand reservoir is currently oil-saturated with “sweet spots” in locally high-quality reservoir, the excess pressure difference between the Chang 7 source rock and the Chang 6-Chang 8 reservoir is considered to be the main driving force for oil charging in the tight reservoirs.

Key words: reservoir densification; charging force; tight oil; Yanchang Formation; Ordos Basin

致密油是指赋存在与生油岩互层、紧邻的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储层中,未经大规模长距离运移形成的石油聚集^[1-4];储层低孔低渗,孔隙度一般小于 10%,基质覆压渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,单井无自然工业产能,多采用水平井压裂技术进行开发^[1,3]。近年来,随着勘探开发技术的不断进步,致密油成为继致密气、煤层气、页岩气之后非常规油气勘探的又一新热点^[1-5]。目前,致密油

已在美国、加拿大、阿根廷等国家实现商业开发^[6-8],我国目前在鄂尔多斯、准噶尔、三塘湖等盆地勘探开发致密油,已探明储量十分巨大,但总体上还处于起步和探索阶段^[2]。鄂尔多斯盆地致密油气资源丰富,具有很大的勘探开发潜力,延长组是其致密油分布的主要层位,目前已在延长组相继发现西峰、姬塬和华庆等 3 个 10 亿吨级的致密油储量规模区^[9-11]。本文在研究区已有资料的基础上,

收稿日期: 2016-11-29; 修订日期: 2017-02-17。

作者简介: 郭继刚(1986—),男,博士,助理研究员,从事油气地质综合研究。E-mail: guojigang1986@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1262205)资助。

通过对采集的沉积储层等样品的分析,对陇东地区延长组致密储层成岩作用、致密化历史、油水分布特征进行了研究,并探讨了致密储层背景下石油的充注动力,以期对该区致密油的勘探部署提供地质依据。

1 研究区概况

鄂尔多斯盆地面积 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是发育在华北克拉通之上的多旋回叠合盆地^[12], 分为伊盟隆起、渭北隆起、伊陕斜坡、天环坳陷、西缘逆冲带和晋西挠褶带 6 个一级构造单元(图 1)。其中,伊陕斜坡是东北高西南低的平缓斜坡,倾角不到 1° , 为油气聚集的主要构造单元。陇东地区位于盆地的西南部,地跨天环坳陷和伊陕斜坡 2 个构造单元,面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。

上三叠统延长组是鄂尔多斯盆地主要的石油勘探层系,自下而上分为长 10—长 1 等 10 个油层组,各油层组又进一步分为多个油层段^[13]。延长组沉积期间,湖盆水体由浅变深再变浅,代表着湖盆产生、发展与消亡的全过程。湖盆从长 10 沉积期开始发育,到长 7 沉积期达到鼎盛,发育一套含较厚油页岩的暗色泥岩,成为盆地内中生界的主力烃源岩^[14];长 4+5 沉积期后湖盆开始收缩消亡^[15]。

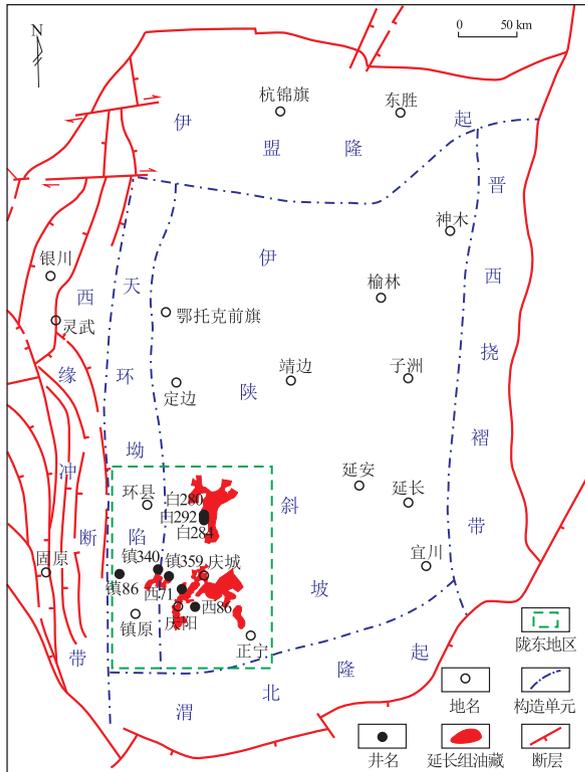


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及研究区位置

Fig.1 Structural units and location of the study area in the Ordos Basin

除长 4+5 期也发育较大范围暗色泥岩沉积外,其他各时期砂泥岩互层沉积、砂岩为主的沉积或泥质岩为主的沉积均有发育。长 6—长 8 油层组是陇东地区的主力油层,储集砂体主要为三角洲前缘水下分流河道、河口坝、前缘席状砂以及滑塌浊积砂体^[16]。

2 储层成岩作用与致密史

2.1 岩石学特征与储集特征

2.1.1 岩石学特征

陇东地区砂岩储层主要为岩屑长石砂岩,其次为长石砂岩和长石岩屑砂岩(图 2)。砂岩的成分成熟度普遍较低,碎屑颗粒中石英含量平均仅为 41%,长石含量为 32.2%,岩屑含量为 26.8%,以喷发岩、隐晶岩、千枚岩、板岩和沉积岩屑为主。杂基含量明显较低,平均为 1%~2%,而胶结物平均含量为 6.8%,以绿泥石、高岭石、方解石、铁方解石、铁白云石和硅质胶结物为主。该地区砂岩主要为细砂岩,分选性较好,但磨圆度较差,以次棱角状为主,反映沉积区近物源的特点。接触方式主要为线接触,其次为点—线接触;胶结类型以孔隙胶结和薄膜—孔隙胶结为主。

2.1.2 孔隙结构与物性

陇东地区延长组砂岩储层的储集空间主要为原生粒间孔、粒内溶孔、晶间微孔、粒间溶孔及微裂缝等。其中,原生粒间孔大多是经过压实作用或胶结作用形成的残余粒间孔,占总孔隙类型的 37%~67%;长石溶孔是最主要的次生孔隙类型,占总孔隙类型的 21%~49%;岩屑溶孔占总孔隙类型的 5%~8%。陇东地区延长组 400 余组砂岩压汞数据分析结果表明,长 8 段储层砂岩孔隙结构较为复杂,孔隙中值半径介于 $0.02 \sim 0.58 \mu\text{m}$,平均 $0.2 \mu\text{m}$,

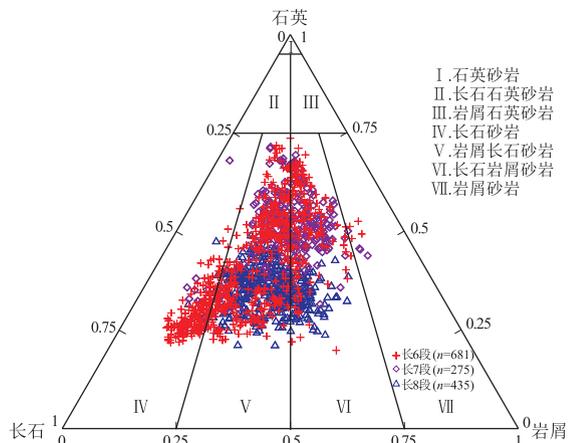


图 2 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组储层岩石类型划分

Fig.2 Ternary plots of rock composition of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩储层压汞数据统计
Table 1 Sandstone reservoir mercury injection statistics of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin

| 层位 | 中值半径/ μm | 平均中值 压力/MPa | 排替压力/ MPa | 分选系数 | 最大进汞 饱和度/% |
|----|-------------------|----------------|------------------|-----------------|---------------|
| 长3 | (0.04~1.0)/0.4 | 3.8 | (0.12~2.66)/0.59 | (0.13~3)/2.1 | (54~93)/82.4 |
| 长6 | (0.02~0.42)/0.12 | 9.3 | (0.06~9.1)/2.53 | (0.05~2.6)/1.23 | (28~95)/75.6 |
| 长7 | (0.016~0.26)/0.11 | 9.9 | (0.1~10)/2.56 | (0.04~2.3)/1.1 | (25~91)/72.8 |
| 长8 | (0.02~0.58)/0.2 | 7.5 | (0.07~7.7)/1.54 | (0.2~2.9)/1.7 | (30~91)/72 |

注:表中数字意义为(最小值~最大值)/平均值。

孔喉半径多小于 7.5 μm,以 0.2~1 μm 为主;分选系数平均为 1.7,储层排替压力平均为 1.54 MPa (表1)。与长8段相比,长7段和长6段孔隙结构更为复杂,孔隙也更小;上部长3段具有明显较好的储集性,平均中值半径可达 0.4 μm,平均排替压力和中值压力明显较小,最大进汞饱和度可达 82.4%(表1)。

陇东地区延长组 1 000 余块岩石样品物性测试结果表明,长6—长8段储层孔隙度主要分布在 5%~10%,渗透率多小于 1×10⁻³ μm²(图3),平均孔隙度约为 8%,平均渗透率为 (0.1~0.4)×10⁻³ μm²,为低孔超低渗储层。而上部长3段储层物性明显较好,孔隙度主要分布在 10%~15%,渗透率分布在 (0.1~10)×10⁻³ μm²(图3),平均孔隙度和渗透率可达 11%和 3.5×10⁻³ μm²。长6—长8段储层中值孔喉直径主要分布在 50~400 nm,而上部长3段储层孔喉直径较大,但也多小于 1 000 nm。结合前人^[2,17]对延长组储层孔喉大小的分析可知,陇东地区延长组储层已进入纳米级孔喉范围,为典型的致密砂岩储层。

2.2 成岩作用类型

2.2.1 压实作用

陇东地区延长组长6—长8段储层经历了中

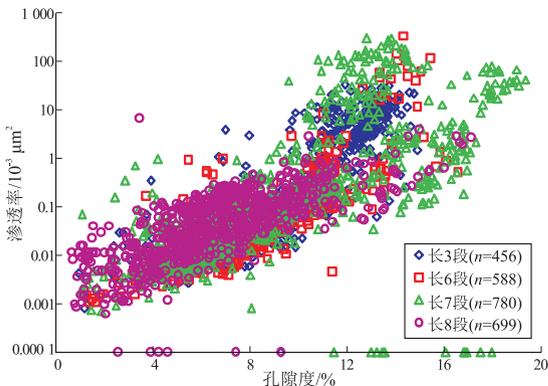


图3 鄂尔多斯盆地陇东地区
延长组储层孔隙度和渗透率交会图

Fig.3 Cross plots of reservoir permeability and porosity of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin

等强度的压实作用,主要压实现象包含:云母和泥质岩屑等塑性组分发生弯曲变形,石英、长石等刚性颗粒形成碎裂纹或微裂缝(图4a);碎屑颗粒主要为线接触和点一线接触,凹凸接触和缝合线接触基本不发育,说明储层尚未进入强烈的压溶阶段。大量塑性组分假杂基化挤占原生孔隙空间,说明压实作用是该区砂岩物性降低的主要因素^[18]。

2.2.2 胶结作用

长6—长8段储层硅质胶结物主要为石英自生加大边和自形石英晶体^[18],含量变化较大,一般为 0.2%~6.6%,平均 1.85%,扫描电镜下可见充填于粒间孔隙中的六方双锥状自生石英晶体(图4b)。自生黏土矿物以绿泥石最为常见,含量多为 0.4%~13%,平均为 3.1%,主要以孔隙衬边方式产出或充填于孔隙中^[18-20],扫描电镜下的绿泥石衬边常以针叶状集合体向孔隙中心生长(图4b)。高岭石含量多在 0.2%~8%,平均为 2.5%,以孔隙充填的方式产出,扫描电镜下的高岭石单个晶体呈六方板状,集合体呈书页状或蠕虫状,有时与自生石英共生(图4c)。

2.2.3 碳酸盐胶结物

长6—长8段储层碳酸盐胶结物十分发育,平均占胶结物总量的 27%,以方解石、铁方解石和铁白云石为主,少量白云石和零星的菱铁矿^[21]。成岩早期以方解石为主^[18],晚期铁碳酸盐胶结物多形成连晶状或嵌晶状胶结(图4d-e)。铁碳酸盐胶结物不仅充填原生粒间孔隙,而且充填长石和岩屑溶蚀产生的次生孔隙(图4d)。

2.2.4 溶蚀作用

延长组储层的溶蚀作用发生在长石、岩屑与碳酸盐胶结物之中,以长石的溶蚀作用最为普遍,溶蚀形成的次生孔隙被石油充注或被后期含铁碳酸盐胶结物充填(图4d)。

2.2.5 破裂作用

陇东地区延长组广泛发育构造裂缝,而且相当数量的裂缝被铁方解石充填(图4f)。广泛发育的

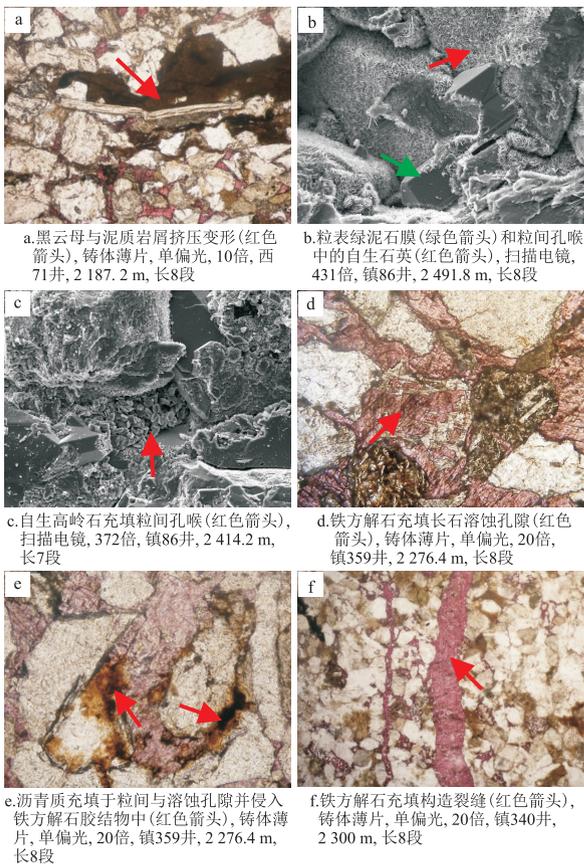


图 4 鄂尔多斯盆地陇东地区长 6—长 8 段主要成岩现象

Fig.4 Major diagenetic process of Chang 6—Chang 8 members in Longdong area, Ordos Basin

构造裂缝是该区烃类流体的重要活动通道,可有效沟通烃源岩与储层并提高储层的渗流能力^[22]。

2.3 成岩序列与致密史

2.3.1 成岩序列

长 6—长 8 段储层中发育绿泥石膜的颗粒表面未见石英次生加大现象,仅在粒间孔中可见自形石英晶体,说明绿泥石膜形成于成岩早期(图 4b);长石溶蚀孔中可见铁方解石胶结物,说明铁方解石胶结物的形成时间同步或晚于长石颗粒的溶蚀(图 4d);长石溶蚀孔中可见烃类侵位形成的沥青质,碎屑颗粒与铁方解石胶结物接触部位可见残余沥青质,且在铁方解石内部也可见部分烃类活动留下的褐色痕迹,说明烃类侵位时间晚于长石颗粒溶蚀,同步或稍早于铁方解石的形成时间(图 4e)。结合前人的研究^[18-20,23-25],将长 6—长 8 段储层的成岩序列总结为:早期方解石沉淀—绿泥石膜形成—石英次生加大—有机酸性流体注入—长石与岩屑溶蚀—自生高岭石形成—自生石英晶体发育—烃类充注—晚期铁方解石充填原生或次生孔隙—晚期铁白云石交代。根据碎屑岩成岩阶段划分标准^[26],结合陇东地区延长组地层埋藏史—热

史,建立了长 6—长 8 段储层的成岩序列演化史(图 5)。结果表明,目前长 6—长 8 段储层位于中成岩阶段 A 期。

2.3.2 孔隙演化史

根据对陇东地区延长组地层埋藏史、成岩作用及胶结物含量、溶蚀增孔等的分析,并结合前人对延长组成岩作用与孔隙演化的研究成果^[18,27-28],将长 6—长 8 段储层孔隙演化划分为 4 个阶段。

第一阶段:三叠纪末—侏罗纪末,储层主要处于早成岩阶段,孔隙快速减小。强烈的压实作用及早期胶结作用使该阶段储层孔隙度从原始的 35% 减小到 11%~13%。第二阶段:侏罗纪末—早白垩世中期,储层处于中成岩阶段 A₁ 亚期,次生孔隙发育阶段;有机质脱羧基作用产生的大量有机酸性流体进入储层,导致长石、岩屑等易溶矿物溶蚀形成次生孔隙,此阶段孔隙度增加 1%~2%。第三阶段:从早白垩世早期—早白垩世末期,孔隙度缓慢减小阶段,烃源岩成熟伴生的有机酸和二氧化碳等酸性流体进入储层发生溶蚀作用被缓释后,随着成岩环境的变化形成晚期含铁碳酸盐胶结,导致孔隙度进一步减小,约减小 3%~5%。第四阶段:晚白垩世至今,储层仍处于中成岩阶段 A 期,孔隙保持阶段。由于盆地抬升剥蚀,成岩作用基本停止,储层保持了最大埋深时的孔隙特征,孔隙度变化不大,现今孔隙度约为 8%。

3 储层含油性与油水分布特征

3.1 含油饱和度低

对陇东地区延长组 120 余块岩心样品相对渗透率的分析结果表明,长 6—长 8 段储层残余油饱和度较低,主要在 24%~51%,平均 39%;束缚水饱和度较高,主要分布在 19%~45%,平均 29%。800 余块岩心样品含油饱和度测试结果也表明,该区长 6—长 8 段储层含油饱和度低,主要分布于 5%~45%(图 6)。由于该含油饱和度为岩心中残留石油的饱和度,实测结果偏低,不能代表储层的原始含油饱和度。根据低渗透砂岩储层的束缚水饱和度可推测其含油饱和度一般不超过 70%。从长 6—长 8 段储层含油饱和度与孔隙度和渗透率的关系可以看出,含油饱和度与孔隙度和渗透率的关系复杂(图 6),不像常规砂岩储层一样表现出良好的相关性,说明储层物性对含油饱和度没有明显的控制作用。

3.2 紧邻源岩储层普遍含油

陇东地区长 6 和长 8 段储层与长 7 段主力烃

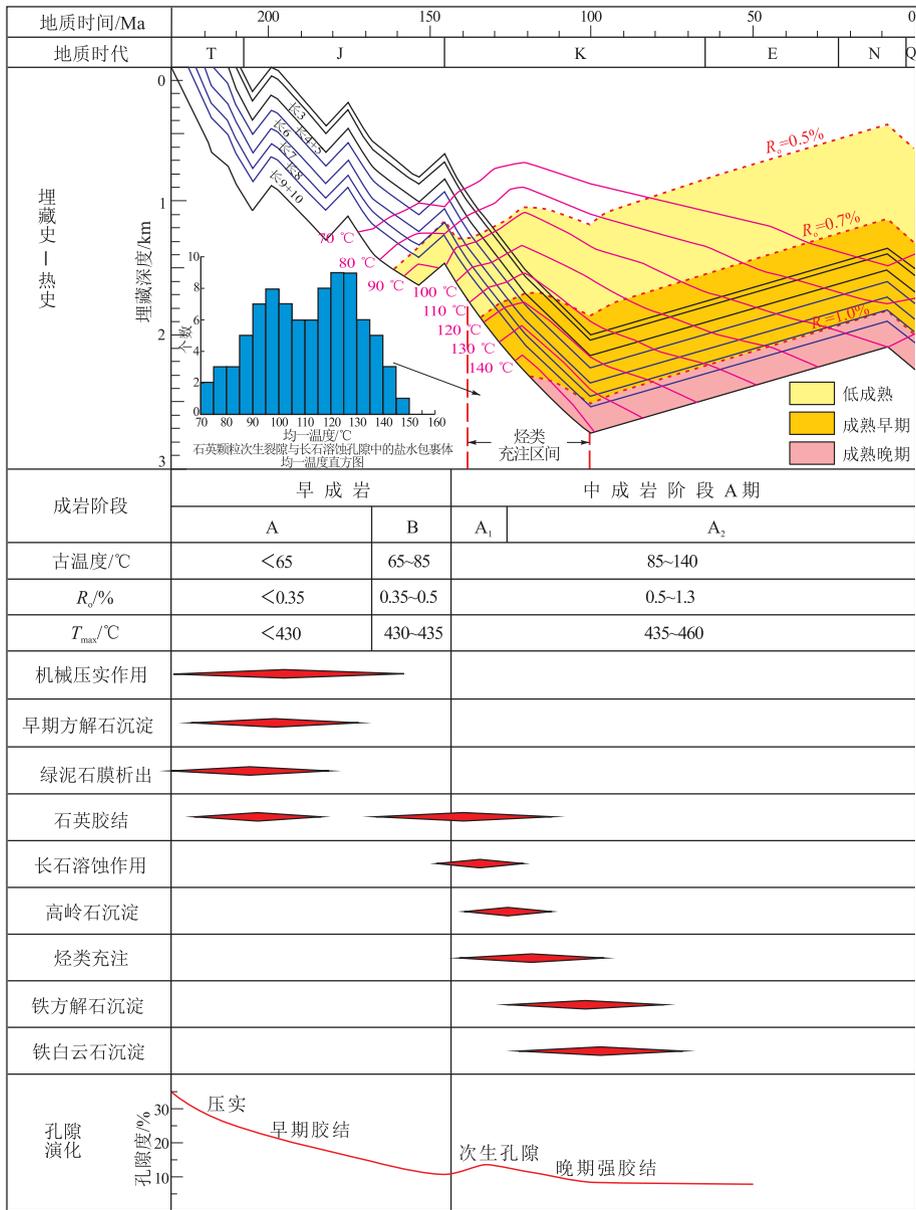


图 5 鄂尔多斯盆地陇东地区长 6–长 8 段储层成岩序列及孔隙演化
包裹体均一温度数据来自文献[29]。

Fig.5 Diagenetic sequence and pore evolution of Chang 6–Chang 8 members in Longdong area, Ordos Basin

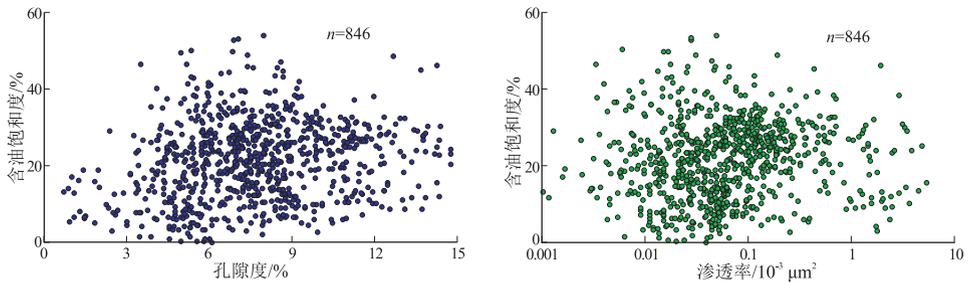


图 6 鄂尔多斯盆地陇东地区长 6–长 8 段储层含油饱和度与孔隙度及渗透率的关系

Fig.6 Oil saturation vs. porosity and permeability of Chang 6–Chang 8 members in Longdong area, Ordos Basin

源岩紧邻接触,形成垂向叠置的源储组合关系,因此,长 6 段和长 8 段砂岩具有有利的烃类充注条件,砂层普遍含油。而远离长 7 段主力烃源岩的长

3 段储层,以水层或含油水层分布为主,仅在少量物性较好的砂层中分布油层或油层。以西 86 井为例(图 7),长 3 段纵向上大多数砂层为水层,

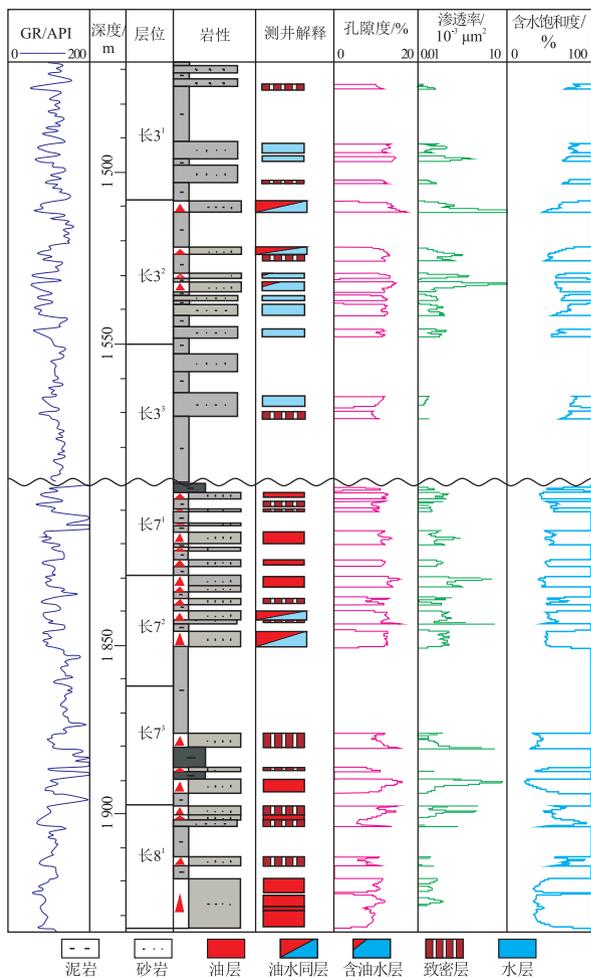


图 7 鄂尔多斯盆地陇东地区西 86 井长 3 段和长 7—长 8 段砂岩含油特征

Fig.7 Oil bearing characteristics of Chang 3 member and Chang 7–Chang 8 member sandstones in well Xi 86 in Longdong area, Ordos Basin

仅物性较好的极少部分砂层为油水层,含油砂层渗透率均大于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含油饱和度不超过 45%。而该井长 7 和长 8 段砂层虽然物性较差,但普遍含油。可见,垂向上远离烃源岩的砂层含油性普遍较差,水层居多,而与烃源岩紧密接触或相邻的砂层则普遍含油。

3.3 “甜点”砂岩更富油

陇东地区长 6—长 8 段储层整体上大面积分布低孔低渗的致密砂岩。通过分析砂层实测物性及其试油结果可知,油层和油水层的孔隙度通常大于 7%,渗透率可低至 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但多大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;而水层和干层的孔隙度多小于 10%,渗透率多小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 8),这说明长 6—长 8 段大面积致密砂岩背景下的相对高孔渗“甜点”砂岩更富油。对该区 150 余口井长 6—长 8 段 2 000 余砂层测井解释含油饱和度统计结果也表现出致密砂岩普遍含油,而“甜点”砂岩富油的特征。

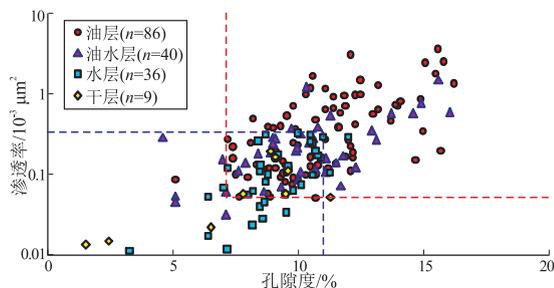


图 8 鄂尔多斯盆地陇东地区长 6—长 8 段储层实测物性与含油性的关系

Fig.8 Cross plots of porosity and permeability of Chang 6–Chang 8 reservoirs in Longdong area, Ordos Basin

以油层为代表的“甜点”砂岩含油饱和度更高,一般介于 48%~70%,平均为 57.5%;而以致密层和干层为代表的致密砂岩含油饱和度较低,分别介于 25%~60%和 10%~50%,平均为 40%和 30%。

3.4 流体分异性差

陇东地区延长组砂体具有垂向叠置、侧向大面积叠合连片分布的特点,该区没有明显的构造圈闭,以岩性圈闭为主^[15]。从图 9 可看出,该区低渗透油藏为多砂体叠置连片含油,形成大面积的连续石油聚集;流体分异性差,同一砂层高部位常为差油层或致密层,而低部位为油层,油藏表现出明显的滞留特征;无统一的油水界面和圈闭界限,油层、水层或干层在垂向上叠置,在侧向上相互连接;含油性变化大,干层、致密层、差油层、油水层或油层普遍发育,具有整体含油的特征,但仅在局部砂层富集形成油层。

4 致密储层控制下的油气充注动力

4.1 油气大规模充注时的古孔渗及古排替压力

早白垩世是陇东地区延长组主要生排烃期与石油充注成藏期(图 5)。成岩分析表明,石油大规模充注的时间晚于储层的大规模压实的时间,因此在恢复油气充注时储层的古孔隙度可忽略晚期压实作用造成的孔隙度损失。而晚期铁碳酸盐胶结作用是导致储层致密的主要因素,且其作用时间稍晚于石油的大规模充注时间^[18,30],因此,石油大规模充注时的古孔隙度近似等于现今孔隙度与石油充注后期含铁碳酸盐胶结导致的孔隙度损失之和^[30]。

薄片统计表明,陇东地区长 8、长 7、长 6 和长 3 段含铁碳酸盐胶结物平均导致的孔隙度损失分别为 4.31%,4.05%,3.59%,4.01%,结合储层现今孔隙度可计算出石油大规模充注时储层的古孔隙度(表 2)。现今储层孔隙度和渗透率具有良好的相关性(图 3),假定古孔渗关系与现今孔渗关系基本

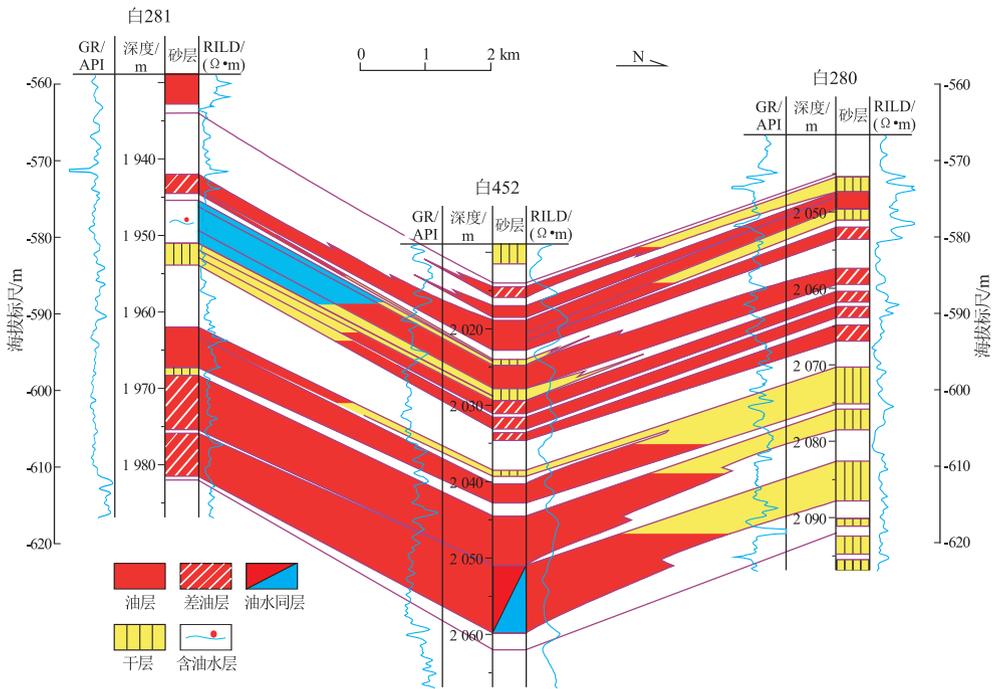


图 9 鄂尔多斯盆地陇东地区白 281 井—白 280 井延长组长 6³亚段油藏剖面

Fig.9 Oil reservoir profile from well Bai 281 to Bai 280 highlighting Chang 6³ sub-member in Longdong area, Ordos Basin

表 2 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组石油大规模充注时的古孔渗与古排替压力

Table 2 Paleo-porosity, paleo-permeability, paleo-displacement pressure of Yanchang Formation during large-scale oil charging in Longdong area, Ordos Basin

| 层位 | 现今孔隙度/ % | 铁碳酸盐胶结 导致的孔隙 损失/% | 古孔隙度/ % | 古渗透率/ 10 ⁻³ μm ² | 压汞条件下的古 排替压力/MPa | 油藏条件下的古 排替压力/MPa |
|-----|------------------|-------------------------|---------------------|---|---------------------|---------------------|
| 长 3 | (9.2~15.4)/11.35 | 4.01 | (13.21~19.41)/15.36 | (2.9~101)/9.92 | (0.03~0.3)/0.14 | (0.003~0.026)/0.012 |
| 长 6 | (5.5~10.5)/8.04 | 3.59 | (9.09~14.09)/11.63 | (0.06~0.54)/0.19 | (0.84~3.08)/1.59 | (0.07~0.26)/0.14 |
| 长 7 | (5~10.7)/7.9 | 4.05 | (9.05~14.75)/11.95 | (0.09~1.27)/0.35 | (0.5~2.47)/1.09 | (0.04~0.21)/0.1 |
| 长 8 | (5.1~13.2)/8.8 | 4.31 | (9.41~17.51)/13.11 | (0.19~4.6)/0.82 | (0.23~1.56)/0.65 | (0.02~0.13)/0.06 |

注:表中数字意义为(最小值~最大值)/平均值。

一致,那么据古孔隙度,可推算出石油大规模充注时各段储层的古渗透率(表 2),可见石油大规模充注时长 6—长 8 段储层已经致密,而浅层长 3 段则具有相对较好的储集物性。

同样假定古排替压力与古渗透率的关系与现今一致,那么利用排替压力与储层渗透率的关系(图 10),并结合表 2 中的古渗透率可大致计算出石油大规模充注时长 8、长 7、长 6 和长 3 段的古排替压力,利用公式(1)将其转换为油藏条件下的储层排替压力,平均分别为 0.06,0.1,0.14,0.012 MPa(表 2)。

$$P_{cr} = 0.086P_{cHg} \quad (1)$$

式中: P_{cr} 为油藏条件下的储层排替压力; P_{cHg} 为压汞条件下的储层排替压力。

4.2 古浮力不是致密储层石油充注的主要动力

在渗透性地层中,石油必须要达到临界油柱高

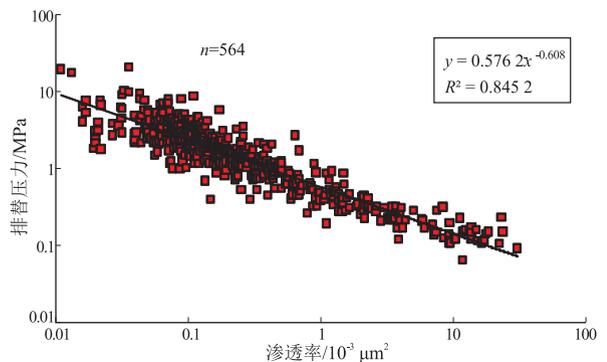


图 10 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透砂岩排替压力与渗透率的关系

Fig.10 Cross plots of reservoir displacement pressure and permeability of low-permeability sandstones in Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin

度,浮力才能克服储层的毛细管阻力而使石油发生运移^[31]。倾斜地层条件下,石油从烃源岩排入储层后,在浮力的作用下先运移至储层顶部,然后再

沿储层顶部向上倾方向运移^[31]。假设石油完全在浮力作用下发生垂向或侧向运移,则必须要达到一定的临界油柱高度,浮力才能克服进入储层的最小阻力即排替压力。石油垂向运移需要的临界油柱高度(Z_{vc})可根据公式(2)计算得出,侧向运移所需的临界油柱高度(Z_{lc})可根据公式(3)计算得出。

$$Z_{vc} = 10^6 P_{cr} / (\rho_w - \rho_o) g \quad (2)$$

$$Z_{lc} = 10^6 P_{cr} / (\rho_w - \rho_o) g \cdot \sin\alpha \quad (3)$$

式中: P_{cr} 为油藏条件下的储层排替压力; ρ_w 为地层水密度; ρ_o 为石油密度; g 为重力加速度; α 为地层倾角。

陇东地区延长组地层平缓,取其较大的地层倾角(α)约为 1.5° ,地层水密度平均为 1.05 g/cm^3 ,地下原油密度为 0.75 g/cm^3 ,油藏条件下的古排替压力见表2,将这些数值代入公式(2)和公式(3),便可推算出假设延长组石油大规模充注时完全在浮力作用下发生垂向和侧向运移的临界油柱高度与长度(表3)。由推算结果可知,仅长3段所需临界油柱高度较小,长6—长8段所需临界油柱高度普遍较大,仅垂向运移就需形成 $18.9\sim 46.5 \text{ m}$ 的平均连续油柱,这对于研究区一般为 $5\sim 25 \text{ m}$ 的单层砂岩厚度来说较难实现。假设浮力驱动延长组原油进行侧向运移,则需要沿连续砂体展布的方向形成至少几十千米长的连续油柱(表3),研究区的砂带延伸最远虽然可达 80 km ,但需要在砂带全部连续含油这种最理想的情况下才能达到侧向运移的临界长度,在实际中这种情况很难实现,况且研究区的地层倾角多小于 1° ,石油侧向运移所需要的临界油柱长度更要远远大于表3中的推算值。因此,长6—长8段低渗透储层中原油大规模充注时,浮力难以驱动石油进行长距离侧向运移,部分砂层连续分布且物性较好的“甜点”区可能存在短距离的侧向运移。

表3 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组浮力作用下的石油运移临界油柱高度与距离

Table 3 Critical oil column height and distance of oil migration driven by buoyancy of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin

| 层位 | 垂向运移临界油柱高度/m | 侧向运移临界油柱高度/m | 侧向运移临界油柱长度/km |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|
| 长3 | (1~8.8)/4.2 | (39~337)/160 | (1.5~12.9)/6.1 |
| 长6 | (24.5~90)/46.5 | (936~3 437)/1 775 | (35.7~131.3)/67.8 |
| 长7 | (14.6~72.2)/32 | (556~2 757)/1 221 | (21.3~105.3)/46.7 |
| 长8 | (6.7~45.7)/18.9 | (254~1 744)/724 | (9.7~66.6)/27.7 |

注:表中数字意义为(最小值~最大值)/平均值。

前人研究表明,浮力驱动下的油气运移主要通过优势运移通道进行,砂体输导层通常只占整个充注输导层的 $1\%\sim 10\%$ ^[32-33],渗透率级差控制下的油气充注运移往往会造成低渗透区域无或很少有油气充注运移,而油气充注运移主要发生在相对高渗透区域^[34]。结合前述研究区致密油具有致密砂岩含油而甜点富油的特征可知,以浮力驱动的充注运移方式难以导致这种区域性普遍含油的特征,而应受其他因素控制。

4.3 异常压力为致密储层石油充注提供动力

异常高压是油气聚集成藏的主要动力之一^[5,31]。前人研究结果表明,异常高压为鄂尔多斯盆地延长组致密油藏的形成提供了充足的动力^[35-36]。本文利用泥岩声波时差资料,采用平衡深度法研究了陇东地区长6—长8段最大埋深时期的地层压力,并计算了长7段烃源岩与长6段、长8段储层的剩余压力差(图11)。结果表明,长7段与长6段的剩余压力差在研究区大部分范围都有发育,多为 $1\sim 10 \text{ MPa}$ (图11a);长7段与长8段的剩余压力差也广泛分布于研究区内,多为 $1\sim 7 \text{ MPa}$ (图11b)。根据表2中的推算结果,油藏条件下长6—长8段致密储层的古排替压力不到 0.5 MPa ,远小于长7段与长6段、长8段的地层剩余压力差。因此,陇东地区广泛分布的源储剩余压力差可为长6—长8段致密储层的石油充注提供充足的动力。

储层早期致密化导致较高的充注运移阻力存在,因而只有在后期较高的源储剩余压力差的驱动下,大规模的油气充注运移才会发生。烃源岩与致密储层的“三明治”式紧密接触关系导致油气充注主要以整体式充注运移为主,即致密砂岩与甜点均能在异常高压的驱动下发生油气充注运移。由于甜点具有更低的充注阻力,因而可以达到更高的含油饱和度,从而形成研究区致密砂岩含油而“甜点”富油的特征。

5 结论

(1) 陇东地区延长组储层经历的成岩作用主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用、破裂作用等,长6—长8段储层位于中成岩阶段A期,孔隙演化可以划分为孔隙快速减小、次生孔隙发育、孔隙缓慢减小、孔隙保持等4个阶段。

(2) 紧邻长7段烃源岩的长6和长8段储层普遍含油,含油饱和度较低;远离长7段烃源岩的长3段仅优质储层含油。长6—长8段大面积致密砂

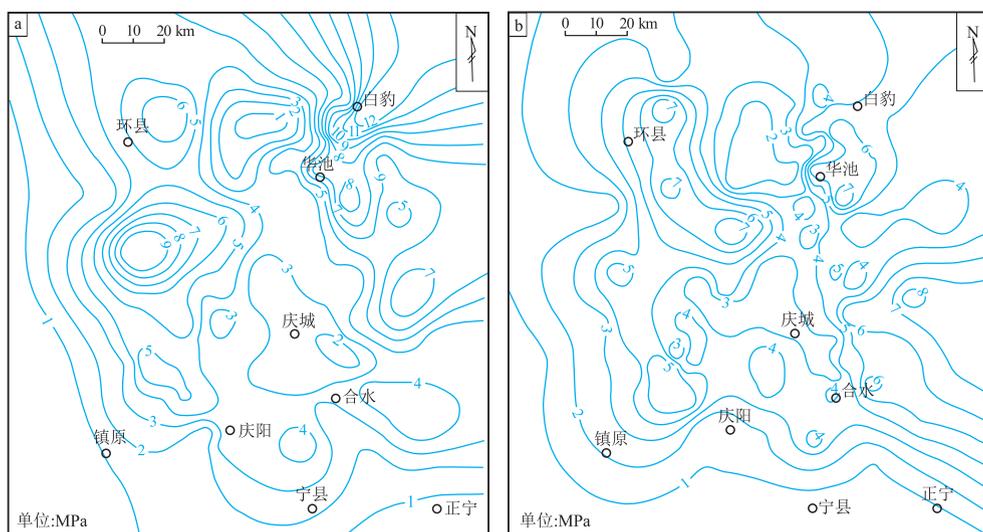


图 11 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 与长 6 段、长 8 段最大埋深时期源储剩余压差分布

Fig.11 Residual pressure difference between source rock and reservoir at the maximum buried depth of Chang 6, 7, 8 members in Longdong area, Ordos Basin

岩普遍含油,相对高孔渗“甜点”砂岩更富油。长 6 和长 8 段储层流体分异性差,无统一的油水界面和圈闭界限。

(3)致密储层背景下,浮力不是石油充注进陇东地区长 6—长 8 段储层的主要动力,长 7 段烃源岩与长 6、长 8 段致密储层的剩余压力差为石油充注提供了充足的动力。

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 an instance[J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(2):173-187.

[2] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报,2013,34(1):1-11.
Yang Hua,Li Shixiang,Liu Xianyang.Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2013,34(1):1-11.

[3] 赵政璋,杜金虎.致密油气[M].北京:石油工业出版社,2012:100-128.
Zhao Zhengzhang,Du Jinhui.Tight oil & gas[M].Beijing:Petroleum Industry Press,2012:100-128.

[4] 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.

[5] Jiang Fujie,Pang Xiongqi,Guo Fengtao,et al.Critical conditions for natural gas charging and delineation of effective gas source rocks for tight sandstone reservoirs[J].Geological Journal,2016,51(1):113-124.

[6] U.S. Energy Information Administration.How much shale (tight) oil is produced in the United States? [EB/OL].[2016-06-14].
<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=847&t=6>.

[7] U.S. Energy Information Administration.World tight oil production to more than double from 2015 to 2040 [EB/OL].[2016-08-12].
<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27492>.

[8] U.S. Energy Information Administration.Initial production rates in tight oil formations continue to rise [EB/OL].[2016-02-11].
<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=24932>.

[9] 姚泾利,王琪,张瑞,等.鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长 6 砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义[J].沉积学报,2011,29(1):72-79.
Yao Jingli,Wang Qi,Zhang Rui,et al.Forming mechanism and their environmental implications of chlorite-coatings in Chang 6 sandstone (Upper Triassic) of Hua-Qing area,Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica,2011,29(1):72-79.

[10] 邓秀芹,李文厚,李士祥,等.鄂尔多斯盆地华庆油田延长组长 6 油层组深水沉积组合特征[J].地质科学,2010,45(3):745-756.
Deng Xiuqin,Li Wenhui,Li Shixiang,et al.Deepwater sedimentary association of Chang 6 oil bearing formation, Yanchang Formation of Huaqing oilfield in Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Geology,2010,45(3):745-756.

[11] 付金华,罗安湘,喻建,等.西峰油田成藏地质特征及勘探方向[J].石油学报,2004,25(2):25-29.
Fu Jinhua,Luo Anxiang,Yu Jian,et al.Geological features of reservoir formation and exploration strategy of Xifeng oilfield [J].Acta Petrolei Sinica,2004,25(2):25-29.

[12] 杨华,付金华,刘新社,等.鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J].石油勘探与开发,2012,39(3):295-303.

- Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 295-303.
- [13] 徐黎明, 李志成, 梁晓伟. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 8₂ 优质储集层成因机理研究 [J]. *古地理学报*, 2016, 18(2): 237-250.
- Xu Liming, Li Zhicheng, Liang Xiaowei. Formation mechanism for the high-quality reservoir in the Chang 8₂ interval of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(2): 237-250.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王志坤, 王多云, 郑希民, 等. 陕甘宁盆地陇东地区三叠系延长组长 6—长 8 储层沉积特征及物性分析 [J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(5): 380-385.
- Wang Zhikun, Wang Duoyun, Zheng Ximin, et al. Depositional characteristics and physical behavior analysis of the Chang 6-8 reservoir of Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Shanganning [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(5): 380-385.
- [17] 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 nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [18] 李红, 柳益群, 刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长 8₁ 低渗透储层成岩作用 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(2): 209-217.
- Li Hong, Liu Yiqun, Liu Linyu. Diagenesis of Chang 8₁ reservoir with low permeability in Xifeng oilfield, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(2): 209-217.
- [19] 张金亮, 司学强, 梁杰, 等. 陕甘宁盆地庆阳地区长 8 油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 225-233.
- Zhang Jinliang, Si Xueqiang, Liang Jie, et al. Diagenesis of lacustrine deltaic sandstones and its impact on reservoir quality [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 225-233.
- [20] 王琪, 嵇喜准, 陈国俊, 等. 鄂尔多斯西部长 6 砂岩成岩演化与优质储层 [J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 17-23.
- Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. Diagenetic evolution and high-quality reservoir in Chang 6 sandstone in the western Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 26(5): 17-23.
- [21] 史基安, 王金鹏, 毛明陆, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长 6-8 段储层砂岩成岩作用研究 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 373-380.
- Shi Ji'an, Wang Jinpeng, Mao Minglu, et al. Reservoir sandstone diagenesis of member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng oilfield, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 373-380.
- [22] 郭凯, 曾灏辉, 李元昊, 等. 陇东地区延长组构造裂隙方解石脉特征及其与烃类流体活动的关系 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2013, 37(2): 36-42.
- Guo Kai, Zeng Jianhui, Li Yuanhao, et al. Geochemical characteristics of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang Formation of Longdong area and its relationship with hydrocarbon fluid flow [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 2013, 37(2): 36-42.
- [23] 文华国, 郑成才, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地白豹—华池地区长 6 砂岩储层特征 [J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 46-51.
- Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Chen Hongde, et al. Characteristics of Chang 6 sandstone reservoir in Baibao-Huachi region of Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 28(4): 46-51.
- [24] 王琪, 嵇喜准, 陈国俊, 等. 延长组砂岩中碳酸盐胶结物氧碳同位素组成特征 [J]. *天然气工业*, 2007, 27(10): 28-32.
- Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate cements in Triassic Yanchang sandstone in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(10): 28-32.
- [25] 于波, 南珺祥, 张忠义. 鄂尔多斯盆地西峰油田长 8 储层的砂岩成岩作用 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2007, 43(6): 13-17.
- Yu Bo, Nan Junxiang, Zhang Zhongyi. Sandstone diagenesis of Chang-8 reservoir in Xifeng oilfield of Ordos Basin [J]. *Journal Of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2007, 43(6): 13-17.
- [26] 国家经济贸易委员会. SY/T 5477—2003 碎屑岩成岩阶段划分 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. SY/T 5477—2003 The division of diagenetic stages in clastic rocks [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [27] 罗静兰, Morad S, 阎世可, 等. 河流-湖泊三角洲相砂岩成岩作用的重建及其对储层物性演化的影响: 以延长油区侏罗系—上三叠统砂岩为例 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2001, 31(12): 1006-1016.
- Luo Jinglan, Morad S, Yan Shike, et al. Reconstruction of the diagenesis of the fluvial-lacustrine deltaic sandstones and its influence on the reservoir quality evolution: Evidence from Jurassic and Triassic sandstones, Yanchang oil field, Ordos Basin [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(7): 616-634.
- [28] 王金鹏, 彭仕宓, 赵艳杰, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长 6—8 段储层成岩作用及孔隙演化 [J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(2): 170-174.
- Wang Jinpeng, Peng Shimi, Zhao Yanjie, et al. Reservoir diagenesis and pore evolution of Chang 6-8 Formation in Heshui area,

- Ordos Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2):170-174.
- [29] 郭凯,曾澦辉,刘涛涛,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组含油气流体活动期次与石油充注史[J].现代地质,2013,27(2):382-388.
- Guo Kai,Zeng Jianhui,Liu Taotao,et al.Hydrocarbon fluid flow stages and oil migration history in Yanchang Formation of Longdong area,Ordos Basin[J].Geoscience,2013,27(2):382-388.
- [30] 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.
- [31] 张厚福,方朝亮,高先志,等.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1999.
- Zhang Houfu,Fang Chaoliang,Gao Xianzhi,et al.Petroleum geoscience[M].Beijing:Petroleum Industry Press,1999.
- [32] Hindle A D.Petroleum migration pathways and charge concentration: A three-dimensional model [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9):1451-1481.
- [33] 姜振学,庞雄奇,曾澦辉,等.油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J].地学前缘,2005,12(4):507-516.
- Jiang Zhenxue,Pang Xiongqi,Zeng Jianhui,et al.Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4):507-516.
- [34] 吴胜和,曾澦辉,林双运,等.层间干扰与油气差异充注[J].石油实验地质,2003,25(3):285-289.
- Wu Shenghe,Zeng Jianhui,Lin Shuangyun,et al.Interlayer interference and differential injection of hydrocarbon into a trap [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(3):285-289.
- [35] 姚泾利,段毅,徐丽,等.鄂尔多斯盆地陇东地区中生界古地层压力演化与油气运聚[J].天然气地球科学,2014,25(5):649-656.
- Yao Jingli,Duan Yi,Xu Li,et al.Pressure evolution and oil-gas migration and accumulation in Mesozoic palaeo-strata in Longdong area of the Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5):649-656.
- [36] 郭凯,曾澦辉,刘涛涛.鄂尔多斯盆地延长组石油充注动力的包裹体热动力学模拟[J].地质科技情报,2015,34(2):152-158.
- Guo Kai,Zeng Jianhui,Liu Taotao.Petroleum inclusion thermodynamic simulation on oil charging pressure of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(2):152-158.

(编辑 徐文明)

(上接第168页)

- [13] 于炳松.页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J].地学前缘,2012,19(3):252-258.
- Yu Bingsong.Particularity of shale gas reservoir and its evaluation [J].Earth Science Frontiers,2012,19(3):252-258.
- [14] 聂海宽,张金川.页岩气储层类型和特征研究:以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].石油实验地质,2011,33(3):219-225.
- Nie Haikuan,Zhang Jinchuan.Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3):219-225.
- [15] 李新景,胡素云,程克明.北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J].石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.
- Li Xinjing,Hu Suyun,Cheng Keming.Suggestions from the development of fractured shale gas in North America [J].Petroleum Exploration and Development,2007,34(4):392-400.
- [16] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
- Zhang Jinchuan,Jin Zhijun,Yuan Mingsheng.Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J].Natural Gas Industry, 2004, 24(7):15-18.
- [17] 张金川,姜生玲,唐玄,等.我国页岩气富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):109-114.
- Zhang Jinchuan,Jiang Shengling,Tang Xuan,et al.Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China [J].Natural Gas Industry,2009,29(12):109-114.
- [18] 梁兴,叶熙,张介辉,等.滇黔北下古生界海相页岩气藏赋存条件评价[J].海相油气地质,2011,16(4):11-21.
- Liang Xing,Ye Xi,Zhang Jiehui,et al.Evaluation of preservation conditions of Lower Paleozoic marine shale gas reservoirs in the northern part of Dianqianbei Depression [J].Marine Origin Petroleum Geology,2011,16(4):11-21.
- [19] 聂海宽,金之钧,边瑞康,等.四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气“源—盖控藏”富集[J].石油学报,2016,37(5):557-571.
- Nie Haikuan,Jin Zhijun,Bian Ruikang,et al.The “source-cap hydrocarbon-controlling” enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery [J].Acta Petrolei Sinica,2016,37(5):557-571.
- [20] 刘超英.页岩气勘探选区评价方法探讨[J].石油实验地质,2013,35(5):564-569.
- Liu Chaoying.Discussion on methods of shale gas exploration evaluation [J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(5):564-569.
- [21] 徐政语,姚根顺,梁兴,等.扬子陆块下古生界页岩气保存条件分析[J].石油实验地质,2015,37(4):407-417.
- Xu Zhengyu,Yao Genshun,Liang Xing,et al.Shale gas preservation conditions in the Lower Paleozoic, Yangtze block [J]. Petroleum Geology & Experiment,2015,37(4):407-417.

(编辑 韩 彧)