



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401652

引用格式:丁超,郭顺,郭兰,等.致密砂岩储层油气充注物性下限厘定:以鄂尔多斯盆地富县地区长8油藏为例[J].科学技术与工程,2025,25(2):484-493.

Ding Chao, Guo Shun, Guo Lan, et al. Determination of physical properties lower limits of oil-gas charging of Chang8 tight sandstone: taking Chang8 reservoir in Fuxian Area, Ordos Basin as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 484-493.

天文学、地球科学

致密砂岩储层油气充注物性下限厘定: 以鄂尔多斯盆地富县地区长8油藏为例

丁超^{1,2}, 郭顺³, 郭兰⁴, 王奇⁴

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065;
3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司资源与勘探开发部, 西安 710075; 4. 延长油田股份有限公司, 延安 716000)

摘要 为了查明致密砂岩储层油气充注物性下限。通过大量岩心化验数据分析,明确长8储层类型、孔喉结构及物性情况。利用含油产状(试油)法、排驱压力法、统计学法、每米采油指数法、最小孔喉半径法等厘定有效储层现今物性下限,结合油气成藏时序与孔隙演定量,反演油气充注期物性临界值。结果表明:富县地区长8储层类型以长石砂岩和岩屑长石砂岩为主,孔喉关系复杂,为低—特低孔、特低—超低致密储层;优选出现今长8有效储层临界下限值分别为7.0%和0.15 mD;反演I期油气充注(距今192.5~152.0 Ma),物性下限值分别为20.8%和7.37 mD,II期油气充注(距今152.0~126.0 Ma),物性下限值分别为8.2%和0.22 mD,III期油气充注(距今65.0~36.5 Ma),为调整逸散,与现今物性下限基本一致。研究结果可为该区储层含油性评价与有利区预测提供地质依据。

关键词 致密储层;长8油藏;物性下限;油气充注;孔隙演化

中图分类号 P618.13; 文献标志码 A

Determination of Physical Properties Lower Limits of Oil-Gas Charging of Chang8 Tight Sandstone: Taking Chang8 Reservoir in Fuxian Area, Ordos Basin as an Example

DING Chao^{1,2}, GUO Shun³, GUO Lan⁴, WANG Qi⁴

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

3. Department of Resource Exploration and Development, Yanchang Oil (Group) Limited Liability Company, Xi'an 710075, China;

4. Yanchang Oil Field Company, Yan'an 716000, China)

[Abstract] The physical properties lower limits of oil-gas charging in tight sandstone reservoirs are identified through a large number of core test and analysis data. The Chang8 reservoir types, pore-throat structure, and physical properties were clarified. Methods such as oil-gas occurrence, displacement pressure, physical property statistics, oil recovery index, and minimum pore-throat radius were employed to determine the current reservoir physical properties lower limit. By integrating the period of hydrocarbon accumulation and pore evolution, the critical physical properties during oil-gas charging were inverted. The results show that the reservoir types of Chang 8 are mainly feldspar sandstone and lithic feldspar sandstone in Fuxian area, with complex pore-throat relationship. These reservoirs are classified as tight reservoirs with low to extra-low porosity and extra-low to ultra-low permeability. It is preferred that the physical properties lower limits of the current reservoir are 7.0% and 0.15 mD, respectively. For inversion of oil-gas charging in Phase I (192.5~152.0 Ma), the lower limits of physical properties are 20.8% and 7.37 mD, respectively, for oil-gas charging in Phase II (152.0~126.0 Ma), the lower limits of physical properties are 8.2% and 0.22 mD. For oil-gas charging in Phase III (65.0~36.5 Ma), the lower limits of physical properties are basically consistent with the current lower limits of physical properties. The research findings provide a significant geological basis for the evaluation of reservoir and the prediction of favorable in the study area.

[Keywords] tight reservoir; Chang 8 reservoir; lower limits of physical properties; oil-gas charging; pore evolution

收稿日期: 2024-03-09; 修订日期: 2024-10-31

基金项目: 陕西省教育厅基金(20JS115); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JQ4013); 西安石油大学博士科研启动基金(2014BS04)

第一作者: 丁超(1983—), 男, 汉族, 吉林吉林人, 博士, 副教授。研究方向: 盆地构造与油气成藏年代学。E-mail: dingchao608@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

油气主要成藏时期允许油气进入圈闭并形成工业性油气藏的储层孔隙度、渗透率等参数下限值被称为成藏期物性下限^[1]。油气成藏期物性下限研究对于致密储层资源潜力评价,成藏机理研究提供重要约束与参数。现今油藏下限研究是地质储量计算的核心内容,近些年,随着非常规致密储层勘探取得的成功,为油田的稳产增储提供了新的思路与领域^[14]。已有勘探开发实践表明,三叠系延长组是鄂尔多斯盆地内最为重要的含油层系,具有油气分布广、含油层位多、油层厚度大、孔隙度和渗透率低等特点^[5-8]。致密砂岩储层主要发育在延长组的中组合长4+5、长6油层组,下组合长7、长8、长9油层组。众多学者对延长组致密砂岩储层含油层系现今物性下限进行了大量研究,获得了一定的共识。中组合致密砂岩油层物性下限为:孔隙度大于7%~8%,渗透率大于0.2 mD^[2-3,9-10]。下组合致密砂岩油层物性下限为:孔隙度大于6%~7%,渗透率大于0.1~0.2 mD^[11-13]。但由于致密储层的非均质性强,且成岩过程中储层经历了不同程度的后期改造,现今油层物性下限已经无法反映油气成藏充注时期储层物性特征,极大限制了致密储层含油性评价的准确性与有利区预测的精确性。

近些年,关于鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密储层油气成藏期物性下限研究相对较少。张凤奇等^[14]通过孔隙度反演法获得了盆地东南部长7油层组早白垩世油气充注的物性下限为:孔隙度≥7.79%,渗透率≥0.10 mD。史兵兵等^[15]基于地史

模拟法,分析了盆地西部镇泾地区长8油层组早白垩世和晚白垩世两期油气充注的孔隙度下限分别为27.0%和17.0%,给出了先成藏后致密的新认识,并有效地指导了该区的含油性评价与有效潜力层的勘探与开发。

本次研究的长8油藏在盆地南部富县地区勘探获得了一定的工业油流,但试油的成功率较低^[16-17],对于长8油层的含油性评价与成藏过程分析等科学问题急需系统认识与分析。因此,现以鄂尔多斯盆地南部延长组长8油层组为研究对象,以现今油层物性下限为切入点,通过油气成藏期次研究,恢复油气成藏时间坐标,关键成藏时期,结合成岩作用与孔隙演化过程研究,定量获取油气成藏期储层孔隙度、渗透率等油气成藏物性临界参量,为鄂尔多斯盆地南部地区延长组长8油藏勘探开发提供重要依据。

1 地质概况

研究区地处鄂尔多斯盆地陕北斜坡南部,区域上为宽缓的西倾大单斜,构造单一,地形平坦,构造圈闭不发育。鄂尔多斯盆地晚三叠世进入陆内河湖相沉积环境,在盆地周边发育了多个大型三角洲,研究区位于富县三角洲前缘区域,沉积体系多样,发育多期次多类型的砂体,形成垂向叠置横向连片的复合砂体带[图1(a)],具备形成大型岩性圈闭的有利条件^[16]。已有勘探钻井资料显示,富县地区长8油层组地层厚度为80~100 m,根据区域

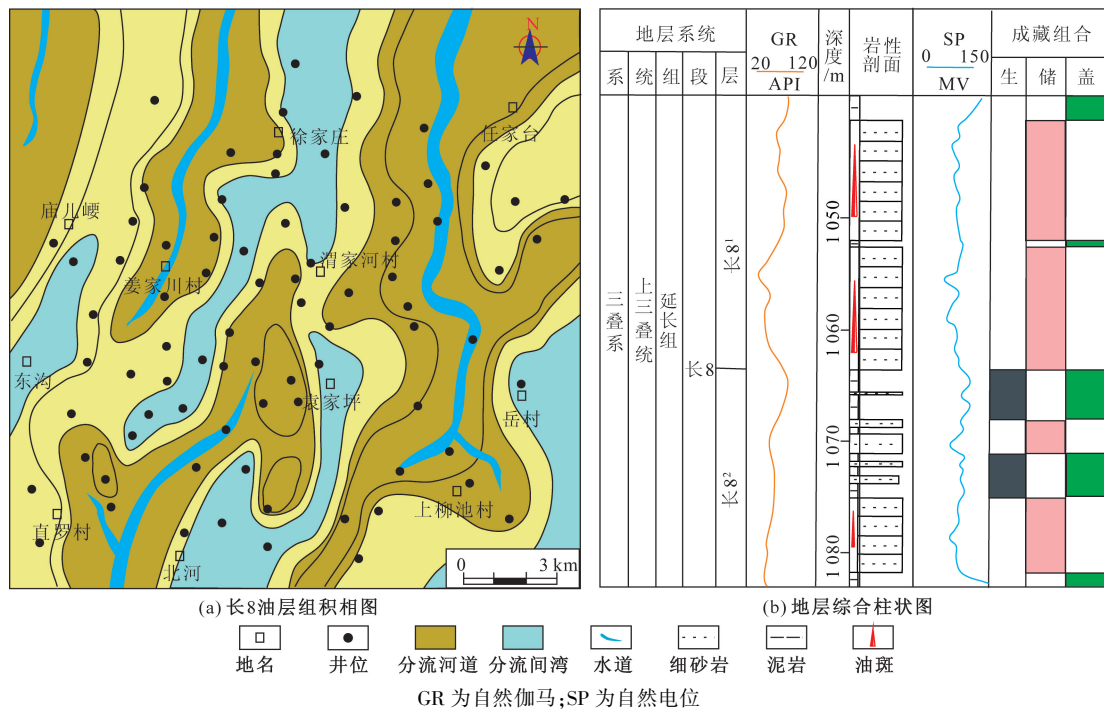


图1 研究区长8油层组沉积相与地层综合柱状图

Fig. 1 Sedimentary facies diagram and stratigraphic system of Chang8 Formation in study area

沉积旋回特征,将长8油层组划分为长8¹和长8²两个油层亚组[图1(b)],压裂试油日产能在0.5~9.7 t/d,显示出良好的勘探开发潜力^[18-20]。

长8油层组上下被长7油层组张家滩页岩和长9油层组李家畔页岩所夹持,形成了“三明治”型油气成藏组合模式。富县地区张家滩页岩厚度大(平均值为35 m),总有机碳含量(total organic carbon, TOC)为高-极高,成熟度高(R_o 介于1.04%~1.08%),为研究区主力烃源岩^[21-23]。盖层为长8油层组内部厚泥岩、钙质泥岩,长7油层组深湖一半深湖相泥岩成为长8油藏的区域盖层^[16]。有利的生-储-盖条件为富县地区长8储层油气聚集成藏提供了基本保障。

2 储层地质特征

2.1 岩石学特征

通过对富县地区25口取心井的37块长8储层砂岩薄片鉴定结果表明,储层类型为长石砂岩和岩屑长石砂岩(图2)。其中,石英含量介于14%~28%,平均值为20.6%;钾长石含量介于30%~54%,平均值为39.5%;斜长石含量介于4%~20%,平均值为15.8%;岩屑含量介于5%~15%,平均值为9.7%。填隙物包括泥质杂基和胶结物,其中泥质杂基含量平均值为2.7%,主要发育在颗粒相对细粒的岩屑长石砂岩中;胶结物中方解石含量较高(平均值为3.4%),其次为绿泥石、石英加大、长石加大(表1)。

岩粒径介于0.16~0.23 mm,以中-细砂岩为主,总体表现为下部粒度较粗,向上逐渐变细。标准偏差介于0.66~1.09,粒度均值介于2.23~3.0,分选性中等、磨圆度较好。

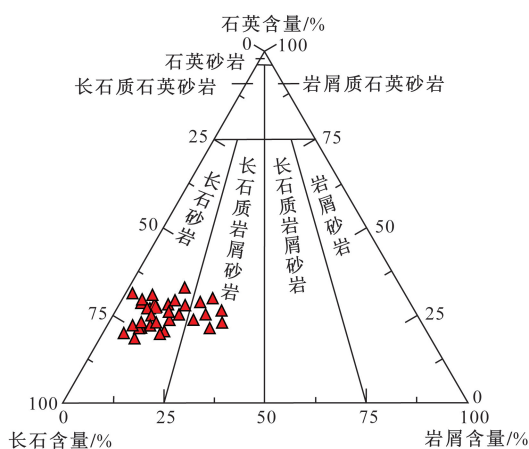


图2 长8储层砂岩石英-长石-岩屑三角分类

Fig. 2 Classification of quartz, feldspar, lithic sandstone of Chang8 reservoir

表1 研究区长8储层砂岩填隙物组分百分含量

Table 1 Statistics of different fillings components of Chang8 reservoir in study area

层位	参数	杂基/%		胶结物/%		
		泥质	绿泥石	方解石	石英加大	长石加大
长8	最值范围	1.0~7.0	1.0~6.0	1.0~13	1.0~3.0	1.0~3.0
	平均值	2.7	2.3	3.4	1.4	1.4

2.2 孔喉结构特征

储层评价中孔隙度和渗透率为两个基本参数,有效孔隙度决定了储层的储集能力,有效渗透率决定了储层的产油能力。孔隙与喉道的配置关系影响着储层的有效性。

通过已有岩心薄片观察,富县地区长8储层孔隙类型包括粒间孔(体积分数为1.83%)、长石溶孔(体积分数为0.66%)、岩屑溶孔(体积分数为0.14%)、晶间孔(体积分数为0.11%)、微裂缝(体积分数为0.03%)等,面孔率为介于0.1%~15.1%,平均值为3.78%。

富县地区长8储层35块砂岩样品高压压汞资料显示(表2),曲线形态差异较大,参数范围分布较广,排驱压力介于0.11~22.31 MPa,中值压力介于1.01~66.29 MPa,中值半径介于0.01~0.73 μm ,分选系数介于0.02~4.89,最大进汞饱和度介于12.5%~98.3%,总体表现出细-微细喉道、非均质性强、连通性差等特点。结合研究区长8储层的核磁共振分析[图3(a)],品质较好储层 T_2 截止值相对较高(介于10.43~13.44 ms),以饱和分量曲线表现为单峰,孔喉以中孔-微纳孔为主,品质一般储层 T_2 截止值相对较低(介于8.63~9.40 ms),以饱和分量曲线表现为双峰,已微纳米-纳米孔为主。

基于25口探井100余块岩心物性化验资料,如图3(b)所示,长8储层孔隙度介于2.1%~15.1%,平均值为6.7%,渗透率介于0.03~1.07 mD,平均值为0.22 mD,总体为低-特低孔、特低-超低渗致密储层。

3 物性下限综合分析

致密储层的储集空间、渗流能力主要受控于孔隙度和渗透率两个因素,只有达到了某一临界值以上时,储层才具有开采价值,这一临界值即为致密储层物性下限。通过大量的岩心物性分析数据,结合多井点、多层段、不同类型储层的试油、试采结果,运用统计学法、每米采油指数法等,综合确定富县地区长8油层组储层物性下限。

3.1 含油产状(试油)法

大量勘探钻井取心表明,岩心的含油级别与储

表2 研究区长8储层砂岩压汞参数统计

Table 2 Statistical of sandstone mercury injection parameters of Chang 8 reservoir in study area

参数	排驱压力/MPa	中值压力/MPa	中值半径/ μm	分选系数	均值	最大SHg/%	退汞效率/%
最值范围	0.11~22.31	1.01~66.29	0.01~0.73	0.02~4.89	0.02~14.10	12.5~98.3	3.7~51.1
平均值	2.57	12.93	0.15	0.82	5.42	78.6	27.0

层含油情况关系密切,且具有正相关性。鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩含油级别在油迹或油斑以上,试油结果通常可以达到工业油流^[17,20,24]。此方法为本次研究的核心技术(表3)。利用富县地区长8储层110余块岩心观察,通过荧光仪测试得出油斑、油迹和荧光3个含油级别,当渗透率 $\geq 0.12\text{ mD}$,孔隙度 $\geq 7\%$ 时,以油迹或油斑为主,可以划定为长8储层含油的物性下限[图4(a)]。

基于研究区长8油藏的试油、试采井的测试资料,结果为油层、水层和干层,结合取心层段的物性分析,当渗透率 $\geq 0.12\text{ mD}$,孔隙度 $\geq 7.5\%$ 时,储层流体以油水同层为主[图4(b)]。

3.2 排驱压力法

砂岩孔喉大小,配置关系影响着储层品质的好坏,通过压汞参数的分析,编制了排驱压力与渗透率、孔隙度的关系图版[图4(c)和图4(d)],微纳米—纳米孔相互连通性差,非均质性强,含油性差,排驱压力高,而中孔—微纳孔的压汞参数较好,具备较好的含油性,排驱压力低,二者之前有明显的陡坎或转折,此方法为本次研究的辅助技术(表3)。

利用富县地区FX28井、FX45井等12块长8储层砂岩压汞资料分析,当渗透率为 1.50 mD ,孔隙度为 7% 时,排驱压力变化明显,可作为有效储层临界

物性分界。

3.3 统计学法

鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密油藏勘探实践证明,累积产能丢失小于 5% ,储集能力小于 10% ,累计频率丢失小于 15% ,可以作为有效储层的物性下限^[14],此方法为本次研究的核心技术,如表3所示。

根据富县地区27口探井140余块物性分析数据,换算有效储层厚度之后,在渗透率、孔隙度直方图基础之上,绘制长8储层产能丢失和储能丢失曲线。

从图4(e)和图4(f)可知,当渗透率下限临界值为 0.15 mD 时,累计丢失产能 5% ,累计频率丢失 10% ,孔隙度下限临界值为 7% 时,累计丢失储能 8.0% ,累计频率丢失 12% ,满足统计学法的要求,可以作为有效储层物性下限。

3.4 每米采油指数法

每米采油指数是指日产量与含油储层厚度的比值,可作为评价有效储层的重要参数^[9-13]。当每米采油指数趋近于0时,对应储层段的物性值即为下限临界点,此方法(表3)为本次研究的辅助技术。通过富县地区12口探井压裂试油数据分析,长8有效储层的每米采油指数介于 $0\sim 0.6\text{ t/m}$,对

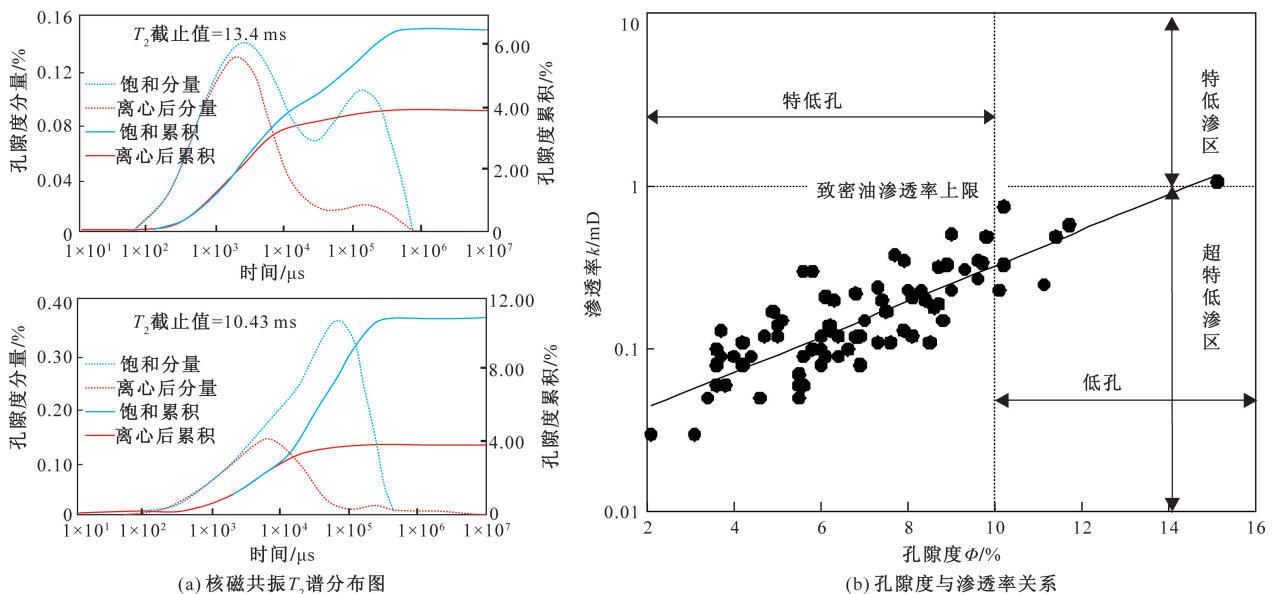


图3 富县地区长8储层孔隙结构特征

Fig. 3 Pore structure characteristics of Chang8 reservoir in Fuxian area

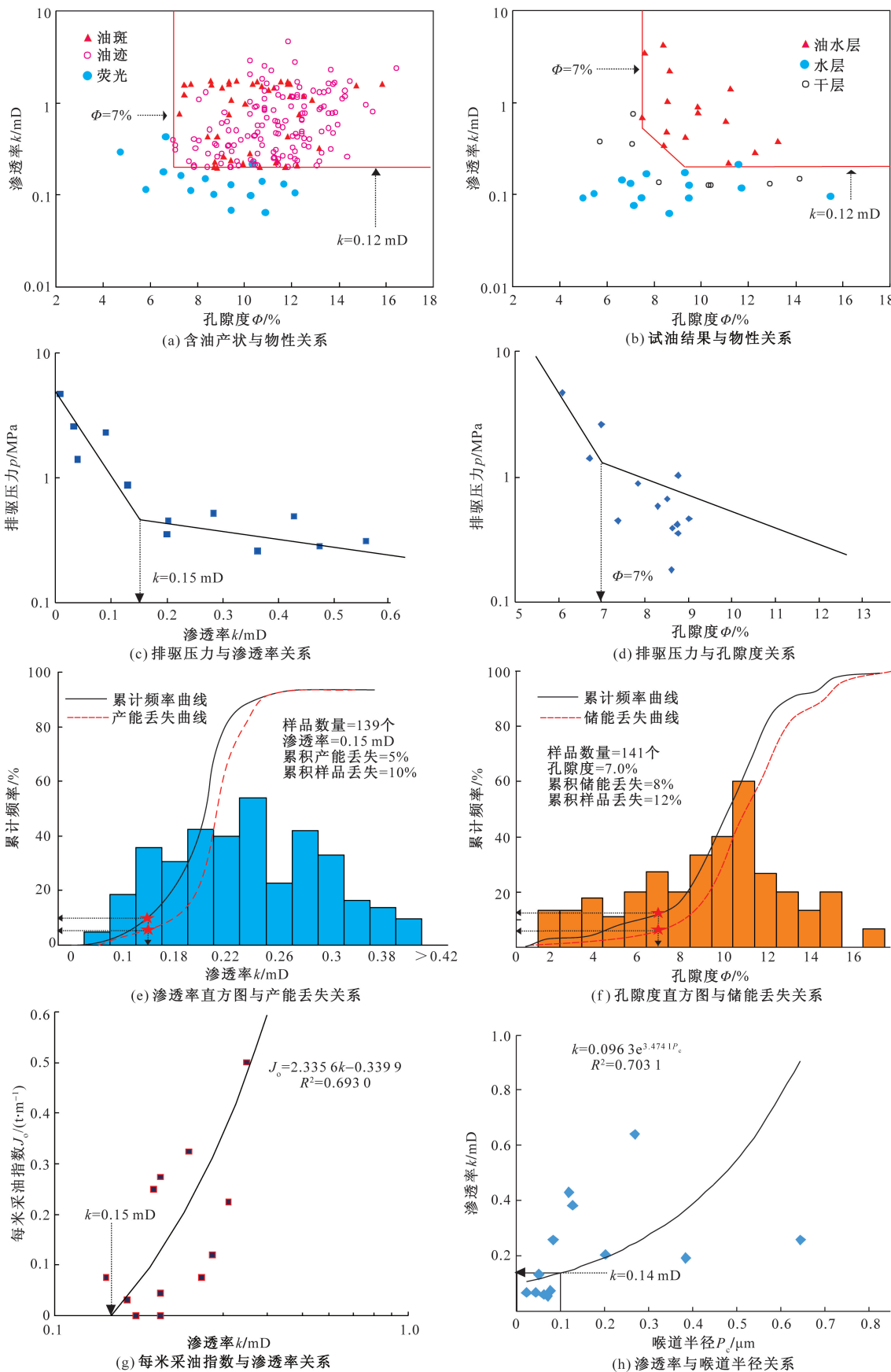


图4 富县地区长8有效储层物性下限

Fig. 4 The physical properties lower limits of Chang8 effective reservoir in Fuxian area

应岩心分析渗透率介于 0.1 ~ 1.0 mD, 建立渗透率与每米采油指数的拟合公式, 即

$$J_o = 2.3356k - 0.3399 \quad (1)$$

式(1)中: J_o 为每米采油指数, t/m; k 为渗透率, mD。

拟合公式的相关程度较高 ($R^2 = 0.6930$), 符合有效储层评价要求^[24], 当每米采油指数趋近于 0 时, 长8有效储层渗透率下限临界值 0.15 mD [图 4(g)], 结合渗透率与孔隙度交汇图 [图 3(b)], 孔隙度下限临界值 7.0%。

3.5 最小孔喉半径法

基于大量岩心与喉道分析资料表明, 当喉道半径 $\leq 0.1 \mu\text{m}$ 时, 受到孔喉中毛管压力的作用, 流体无法进入储层形成油气藏^[25-27], 此方法为本次研究的辅助技术(表 3)。

根据富县地区 10 余口探井长 8 储层参数分析, 孔隙喉道半径介于 0.01 ~ 0.6 μm , 且与渗透率具有较好的正相关性, 建立了指数拟合公式, 即

$$k = 0.0963e^{3.4741P_c} \quad (2)$$

式(2)中: P_c 为喉道半径, μm 。

当喉道半径 = 0.1 μm 时, 长 8 有效储层渗透率下限临界值 0.14 mD, 对应的孔隙度下限临界值 6.6% [图 4(h)]。

3.6 致密储层物性下限综合分析

通过有效储层物性下限综合分析(表 3), 优选含油产状(试油)法、统计学法等可靠性较高的核心技术, 同时参考排驱压力法、每米采油指数法等可靠性一般的辅助技术。

综合确定富县地区延长组长 8 有效储层物性临界下限为: 渗透率 ≥ 0.15 mD, 孔隙度 $\geq 7\%$ 。对比鄂尔多斯盆地三叠系延长组下组合有效厚度物性下限值^[11-13, 15], 本次研究的有效储层物性下限取值合理、可靠。

4 油气关键充注期

4.1 流体包裹体分析

根据富县地区长 8 储层包裹体已有研究成果^[18-19], 长 8 储层主要发育 2 ~ 3 期烃类包裹体。

第一期烃类包裹体主要发育在石英颗粒内部, 沿着裂缝或加大边分布, 在单偏光下液态烃包裹体多呈褐色, 直径介于 5 ~ 10 μm , 烃类包裹体丰度 (grains containing oil inclusions, GOI) 介于 3% ~ 5%, 气态烃包裹体呈深褐色, 紫外荧光照射下烃类包裹体呈绿色或黄绿色荧光。盐水包裹体均一温度介于 61.1 ~ 121.7 $^{\circ}\text{C}$, 峰值温度 85 $^{\circ}\text{C}$ [图 5(a)], 盐度分布 3.2% ~ 14.5% [图 5(b)]。

第二期烃类包裹体, 主要发育在切穿石英及加大边的裂缝、方解石胶结物中, 气液比值 $\leq 5\%$, GOI 介于 4% ~ 6%, 紫外荧光下呈蓝绿色荧光。盐水包裹体均一温度介于 106.2 ~ 155.7 $^{\circ}\text{C}$, 峰值温度为 120 $^{\circ}\text{C}$ [图 5(a)], 盐度分布在 5.5% ~ 16.3%, 如图 5(b) 所示。

第三期烃类包裹体, 主要发育在晚期方解石或切穿石英愈合裂缝中, 包裹体直径一般小于 7 μm , GOI 介于 3% ~ 6%, 紫外荧光下呈蓝白色荧光, 成熟度较高。盐水包裹体均一温度介于 92.2 ~ 130.5 $^{\circ}\text{C}$, 峰值温度 105 $^{\circ}\text{C}$ [图 5(a)], 盐度分布 4.1% ~ 15.9% [图 5(b)]。

4.2 油气成藏年代学分析

利用与烃类共生的盐水包裹体均一温度, 获取第一期至第三期的油气成藏温度。根据包裹体峰温的组合以及包裹体产状、荧光、成分分析, 明确了油气成藏温度期次与时序关系, 结合埋藏史—热史曲线, 可以确定储层内成岩矿物形成和烃类充注的地质年代。

表 3 富县地区长 8 有效储层物性下限综合分析

Table 3 Comprehensive analysis of lower limits of Chang 8 effective reservoir properties in Fuxian Area

方法	特点与适用性	孔隙度/%	渗透率/mD
含油产状(试油)法	需要大量的试油数据与取心观察分析, 成本较高。广泛应用于致密储层有效厚度物性下限分析, 可靠性较高, 为核心技术	$\geq 7.0 \sim 7.5$	≥ 0.12
排驱压力法	基于高压压汞数据, 要求取心具有连续性和完整性, 物性数据覆盖较全面, 临界转折点多解性强。适用取心较多的低—高孔渗储层, 可靠性一般, 为辅助技术	≥ 7.0	≥ 0.15
统计学法	依据大量岩心化验分析数据, 通过统计学的方法, 获得有效储层物性下限。适用于油藏丢失产能较为明显的低—高孔渗储层, 可靠性较高, 为核心技术	≥ 7.0	≥ 0.15
每米采油指数法	基于油藏产量的一种确定有效储层物性下限的方法, 受压裂工艺和有效储层厚度的影响, 每米采油指数不易确定; 适用于稳产期的低—高孔渗储层, 可靠性一般, 为辅助技术	≥ 7.0	≥ 0.15
最小孔喉半径法	通过储层孔喉大小与物性相关性分析的一种方法, 关键点确定束缚水膜厚度, 适用于常规储层, 对于致密储层可靠性一般, 为辅助技术	≥ 6.6	≥ 0.14
综合分析	取可靠性较高的值(平均值)	≥ 7.0	≥ 0.15

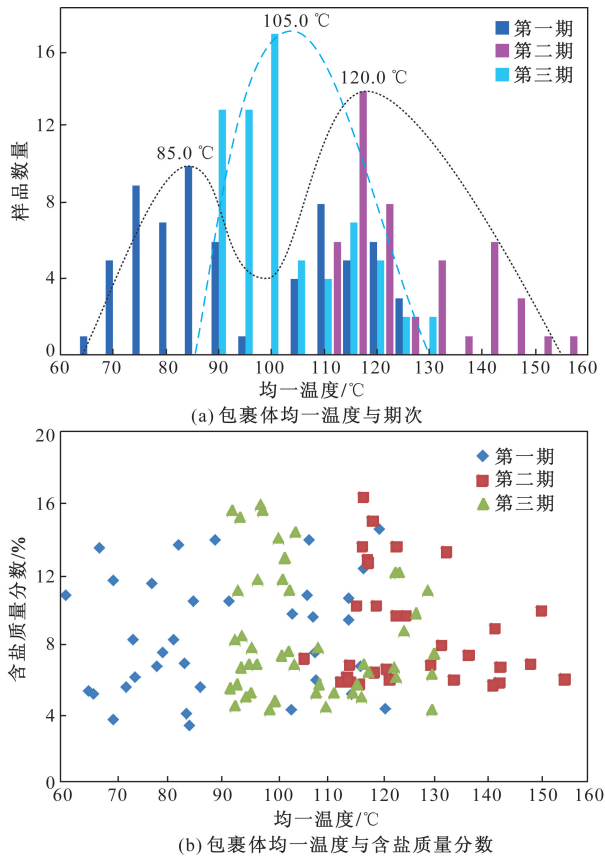


图5 富县地区长8储层包裹体均一温度与盐度
Fig. 5 Homogenization temperature and salinity of inclusions of Chang8 reservoir in Fuxian Area

第一期至第二期的油气成藏温度进行投影,获得了长8储层的油气成藏年代。结果表明:早侏罗世—早白垩世(距今192.5~152 Ma)长8储层中发生了第一期油气成藏事件,油气充注的峰值年龄为182 Ma。第二期发生在早白垩世(距今152~126 Ma),此时长8储层埋藏最深,热演化程度最大,导致了油气大规模的生成、运移、聚集成藏,峰值年龄为150 Ma。第三期发生在古近纪(距今65~36.5 Ma),为油气调整逸散阶段,新近纪以来,鄂尔多斯盆地全面进入了抬升改造阶段(图6)。

5 孔隙演化与充注物性下限

5.1 孔隙演化过程

致密储层成岩作用伴随着砂岩物性的变化,分析关键成岩期孔隙度的变化特征有助于正确认识储层物性演化与油气充注成藏的关系。

参照鄂尔多斯盆地碎屑岩初始孔隙度经验公式为

$$\Phi_1 = 20.91 + \frac{22.9}{S_0} \quad (3)$$

式(3)中: Φ_1 为初始孔隙度,%; S_0 为特拉斯克分选

系数。

由以上计算出富县地区长8储层砂岩原始孔隙度在36.4%~39.2%,平均值为38.0%(表4)。

压实作用后孔隙度 Φ_2 公式为

$$\Phi_2 = C_e + P_r \quad (4)$$

式(4)中: C_e 为胶结物含量,%; P_r 为残余粒间孔隙度,%。

根据压实作用的计算公式,获得长8储层压实后的孔隙度介于12.9%~34.7%,平均值为21.6%,对比原始孔隙度 Φ_1 数据,得出压实孔隙度损失率在11.5%~66.2%,平均值为43.3%,如表4所示。

储层砂岩经过胶结与交代后孔隙度进一步减小,公式为

$$\Phi_3 = \Phi_2 - C_e \quad (5)$$

式(5)中: Φ_3 为压实、胶结作用后的孔隙度,%。

胶结作用过程中长8储层孔隙度损失率介于17.8%~59.0%,平均值为38.6%,经过胶结作用后孔隙度介于1.7%~11.6%,平均值为6.9%,如表4所示。

在薄片鉴定中长8储层砂岩的溶蚀作用主要表现为长石溶孔、岩屑溶孔等。溶蚀作用所产生的次生孔隙(Φ_4)使储层砂岩物性变好,增加了烃类的储集空间。溶蚀后孔隙度 Φ_5 计算公式为

$$\Phi_5 = \Phi_3 + \Phi_4 \quad (6)$$

式(6)中: Φ_4 为残余粒间孔隙度、长石溶孔和岩屑溶孔总和,%。

溶蚀作用在物性较好的储层表现明显,增加孔隙度介于2.0%~6.6%,溶蚀作用后孔隙度介于7.2%~15.2%,平均值为10.8%,经过覆压校正后,孔隙度平均值为8.1%(表4)。

5.2 油气充注物性下限

根据富县地区油气充注期次与孔隙演化过程,结合已有的成岩演化分析,长8储层经历了机械压实(压溶)作用→孔隙度减小(平均值为21.6%)→I期油气充注→大量胶结物生成(孔隙度<10%,已经致密化)→II期油气充注(溶蚀孔隙增加)→III期油气充注(构造抬升)→孔隙度增加(平均值10.8%),具有“先致密后成藏”的特点(图6)。

油气充注物性下限为现今有效储层物性下限与油气充注成藏期物性变化差值之和。I期油气充注发生在早侏罗世(距今192.5 Ma),II期油气充注发生在早白垩世(距今152 Ma),孔隙度变化值分别为13.5%、1.2%,厘定两期油气充注有效储层孔隙度下限值分别为20.8%和8.2%,结合孔隙度与渗透率关系图[图3(b)],渗透率下限值为7.37 mD和0.22 mD。晚白垩世末以后,鄂尔多斯盆地进入

表4 长8油层组砂岩孔隙度演化定量计算结果

Table 4 Quantitative calculation results of porosity evolution of sandstone in Chang8 reservoir

参数	初始孔隙度 Φ_1 /%	压实作用 Φ_2 /%	减孔率 K_1 /%	胶结作用 Φ_3 /%	减孔率 K_2 /%	溶蚀作用 Φ_4 /%	增孔率 K_3 /%	计算孔隙度 Φ_5 /%	覆压校正 孔隙度/%
最值范围	36.4~39.2	12.9~34.7	11.5~66.2	1.7~11.6	17.8~59.0	2.0~6.6	5.3~17.3	7.2~15.2	5.2~11.3
平均值	38.0	21.6	43.3	6.9	38.6	3.9	10.2	10.8	8.1

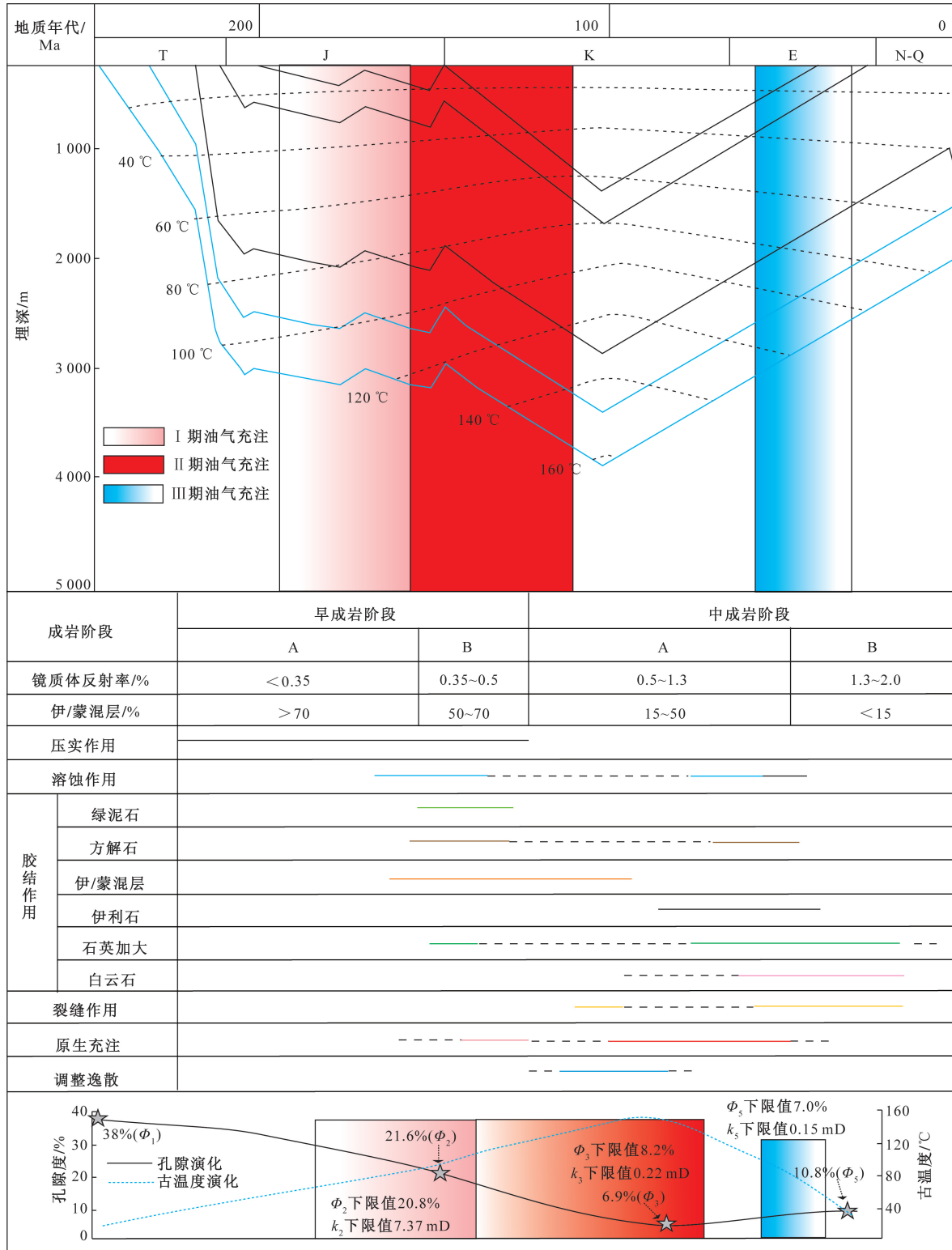


图6 长8储层油气充注时序与孔隙演化综合图

Fig. 6 Comprehensive map of reservoir oil-gas charging sequence and pore evolution of Chang8 reservoir

了多旋回的抬升改造阶段,引发了油气的二次运移与调整逸散(Ⅲ期油气充注,距今65~36.5 Ma),演化至现今长8储层孔隙度最终为10.8%,油气充注有效储层孔隙度下限值为7.0%,渗透率下限值0.15 mD。

6 结论

(1)富县地区长8储层类型以长石砂岩和岩屑长石砂岩为主,分选性中等,磨圆度较好。储集空间主要为粒间孔、长石溶孔、岩屑溶孔和晶间孔,局部见微裂缝。孔喉关系较为复杂,非均质性强,品质较好储层以中孔-微纳孔为主,品质一般储层已微纳米-纳米孔为主。储层物性较差,为低-特低孔、特低-超低渗致密储层。

(2)通过大量岩心化验分析数据,结合试油、试采资料,基于含油产状(试油)法、排驱压力法、统计学法、每米采油指数法、最小孔喉半径法等,综合分析长8有效储层物性临界下限渗透率 ≥ 0.15 mD,孔隙度 $\geq 7\%$ 。

(3)富县地区长8储层砂岩孔隙演化较为复杂,经过压实作用后,长8储层孔隙度平均值21.6%,Ⅰ期油气充注(距今192.5~152 Ma),随着大量胶结物生成,孔隙度 $< 10\%$ (储层致密化);Ⅱ期油气充注(距今152~126 Ma),随着油气的大量生成,溶蚀孔隙发育;构造抬升导致了油气的调整逸散(Ⅲ期油气充注),微裂缝和溶蚀孔隙导致了孔隙空间有所增加(平均值为10.8%)。

(4)根据油气成藏时序与孔隙演化量化过程,结合现今有效储层物性下限,反演油气充注期物性临界值,Ⅰ期油气充注,孔隙度下限值为20.8%,渗透率下限值为7.37 mD;Ⅱ期油气充注,孔隙度下限值为8.2%,渗透率下限值为0.22 mD,Ⅲ期油气充注,物性临界值与现今基本一致,确定的油气充注物性下限值为富县地区长8储层含油性评价及有利区预测提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] 胡素云,陶士振,王民,等.陆相湖盆致密油充注运聚机理与富集主控因素[J].石油勘探与开发,2023,50(3):481-490,529.
Hu Suyun, Tao Shizhen, Wang Min, et al. Migration and accumulation mechanisms and main controlling factors of tight oil enrichment in a continental lake basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 481-490, 529.
- [2] 王春艳,王波,龚建涛.致密砂岩储层“四性”关系及有效储层下限研究——以鄂尔多斯盆地东部王庄区长6油层组为例[J].科学技术与工程,2023,23(16):6775-6784.
Wang Chunyan, Wang Bo, Gong Jiantao. Four properties relationship and the effective lower limit of the tight sandstone reservoir: a case study of the Chang 6 oil member in the Wangzhuang Area, eastern of Ordos Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6775-6784.
- [3] 秦子桢,武富礼,袁珍,等.致密油藏有效储层下限参数评价——以鄂尔多斯盆地中部Z区块长4+5油层组为例[J].科学技术与工程,2022,22(5):1852-1860.
Qin Zizhen, Wu Fuli, Yuan Zhen, et al. Evaluation of effective reservoir lower limit parameters of tight reservoir: a case study of block Chang 4 + 5 in Z area of central Ordos Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 1852-1860.
- [4] 李春霞.致密油有效储层物性下限的确定——以高尚堡油田G区块Es₃V油层组为例[J].石油地质与工程,2024,38(1):44-49.
Li Chunxia. Determination of the lower limit of physical properties for effective tight oil reservoirs: a case study of Es₃V oil formation in Block G of Gaoshangpu Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2024, 38(1): 44-49.
- [5] 潘继平.中国油气勘探开发新进展与前景展望[J].石油科技论坛,2023,42(1):23-31.
Pan Jiping. New progress and outlook of China's oil and gas exploration and development [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2023, 42(1): 23-31.
- [6] 吴晓智,柳庄小雪,王建,等.我国油气资源潜力、分布及重点勘探领域[J].地学前缘,2022,29(6):146-155.
Wu Xiaozhi, Liuzhuang Xiaoxue, Wang Jian, et al. Petroleum resource potential, distribution and key exploration fields in China [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 146-155.
- [7] 张才利,刘新社,杨亚娟,等.鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):253-263.
Zhang Caili, Liu Xinshe, Yang Yajuan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing Oilfield in Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 253-263.
- [8] 付金华,董国栋,周新平,等.鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J].中国石油勘探,2021,26(3):19-40.
Fu Jinhua, Dong Guodong, Zhou Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 19-40.
- [9] 钟高润,李亚军,张国强,等.鄂尔多斯盆地中部长6₃段致密砂岩储层石油有效充注物性下限[J].地球物理学进展,2023,38(6):2663-2673.
Zhong Gaorun, Li Yajun, Zhang Guoqiang, et al. Determination of lower limit of effective oil filling property of Chang 6₃ member tight sandstone reservoir in central Ordos Basin [J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(6): 2663-2673.
- [10] 张彬,张刚,李春生.鄂尔多斯盆地定边油田长4+5致密油藏有效储层参数下限评价[J].桂林理工大学学报,2021,41(1):47-54.
Zhang Bin, Zhang Gang, Li Chunsheng, et al. Evaluation of lower limit of effective reservoir parameters of Chang 4 + 5 tight reservoir in Dingbian Oilfield, Ordos Basin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(1): 47-54.
- [11] 丁点儿,吴少波,吴志明,等.富县油田D区长8致密砂岩油藏有效储层物性下限研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2022,24(6):22-25,70.
Ding Dian'er, Wu Shaobo, Wu Zhiming, et al. Lower limit of ef-

- fective reservoir physical property of Chang 8 Tight Sandstone Reservoir in D Block, Fuxian Oilfield[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 24(6): 22-25, 70.
- [12] 许璟, 贺永红, 马芳侠, 等. 鄂尔多斯盆地定边油田主力油层有效储层厚度[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(5): 107-119.
Xu Jing, He Yonghong, Ma Fangxia, et al. Effective reservoir thickness of main oil layers in Dingbian Oilfield, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(5): 107-119.
- [13] 王浩男, 肖晖, 苗晨阳, 等. 致密砂岩储层油充注下限综合确定方法及其应用——以鄂尔多斯盆地马岭地区长8油藏为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(2): 147-156.
Wang Haonan, Xiao Hui, Miao Chenyang, et al. Comprehensive determining method of the lower limit of the oil-charging in tight sandstone reservoirs and its application; a case of Chang-8 oil reservoir in Maling area of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2): 147-156.
- [14] 张凤奇, 钟红利, 魏登峰, 等. 鄂尔多斯盆地陕北斜坡东南部长7段致密砂岩油藏成藏物性下限[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(2): 232-240.
Zhang Fengqi, Zhong Hongli, Wei Dengfeng, et al. Lower limits of porosity and permeability for tight oil accumulations in the Chang 7 member, southeastern Shaanbei Slope, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(2): 232-240.
- [15] 史兵兵, 常象春, 尹伟, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区长8致密储层成藏期临界物性厘定[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 231-243.
Shi Bingbing, Chang Xiangchun, Yin Wei, et al. Determination of lower limits of critical properties of tight sandstone reservoirs, Zhenjing Block, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 231-243.
- [16] 王雅琳. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组油气成藏条件研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
Wang Yalin. Hydrocarbon accumulation conditions of Yanchang Formation in Fuxian Area, Ordos Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (EastChina), 2021.
- [17] 郭兰, 丁超, 门艳萍, 等. 富县油田三叠系延长组长8²致密储层评价[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(5): 5-9.
Guo Lan, Ding Chao, Men Yanping, et al. Research on tight reservoir of Chang 8² member of Triassic Yanchang Formation in Fuxian oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(5): 5-9.
- [18] 张思玉, 庞雄奇, 丁超, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长8油层组差异成藏过程[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 11871-11879.
Zhang Siyu, Pang Xiongqi, Ding Chao, et al. Differential reservoir forming process of Chang 8 reservoir in Yanchang Formation, south Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(27): 11871-11879.
- [19] 丁超, 郭顺, 郭兰, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长8油藏油气充注期次[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(4): 21-31.
Ding Chao, Guo Shun, Guo Lan, et al. Hydrocarbon charging time of Chang 8 reservoir of Yanchang Formation in southern Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(4): 21-31.
- [20] 刘秀婵, 陈西洋. 鄂尔多斯盆地富县地区长8油层组致密油成藏主控因素分析[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(1): 1-7.
Liu Xiuchan, Chen Xipan. Analysis on main controlling factors of tight oil reservoirs in Chang 8 reservoir of Fu County, Ordos Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(1): 1-7.
- [21] 林进, 孙建博, 罗腾跃. 富县地区张家滩页岩地化特征与油气地质意义[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(6): 1122-1132.
Lin Jin, Sun Jianbo, Luo Tengyue. Geochemistry characteristics and petroleum geological significance of Zhangjiantan shale in Fuxian Area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(6): 1122-1132.
- [22] 付金华, 郭雯, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地长7段多类型页岩油特征及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(12): 1749-1761.
Fu Jinhua, Guo Wen, Li Shixiang, et al. Characteristics and exploration potential of multi-type shale oil in the 7th Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(12): 1749-1761.
- [23] 师良, 范柏江, 王霞, 等. 鄂尔多斯盆地长9页岩烃源岩的元素组成及其古沉积环境[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1254-1263.
Shi Liang, Fan Bojiang, Wang Xia, et al. Element composition and sedimentary environment of Chang 9 shale source rocks in the Ordos Basin[J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1254-1263.
- [24] 白延广. 陕西省富县区域石油地质特征及勘探有利区优选[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Bai Yanguang. Petroleum geological characteristics and exploration favorable area optimization of Fuxian Area in Shaanxi Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [25] 朱童童. 劳山油田万81井区延长组长4+5、长6储层计算参数研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
Zhu Tongtong. Research on the reserve calculation parameters of Chang 4+5 and Chang 6 in Yanchang Formation in Wang 81 Well Area of Laoshan Oilfield[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2022.
- [26] 王伟明, 卢双舫, 田伟超, 等. 吸附水膜厚度确定致密油储层物性下限新方法——以辽河油田大民屯凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 135-140.
Wang Weiming, Lu Shuangfang, Tian Weichao, et al. A new method to determine porosity and permeability cutoffs of tight oil reservoirs by using thickness of adsorption waterfilm: a case study from the Damintun Sag, Liaohe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 135-140.
- [27] 周能武, 卢双舫, 王民, 等. 中国典型陆相盆地致密油成储界限与分级评价标准[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(5): 939-949.
Zhou Nengwu, Lu Shuangfang, Wang Min, et al. Limits and grading evaluation criteria of tight oil reservoirs in typical continental basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 939-949.