

鄂尔多斯盆缘PY地区长8段流体饱和度特征及校正研究

梁正中¹, 许红涛², 常利娜¹

(1. 榆林学院化学与化工学院, 陕西 榆林 719000; 2. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要:致密砂岩油藏是当前非常规油气勘探中的最现实领域之一。鄂尔多斯盆地西南缘PY地区长8段主力油层非均质强、含油性差异大,相关流体饱和度参数测试分析与对比校正极为重要。通过地面测量的含油饱和度一般小于30%,常存在流体饱和度损失而和地下储层真实值之间存在较大差距,为此本文采用数理统计方法建立了该区流体饱和度校正模型。结果表明,校正之后的长8含油饱和度参数提高15%以上,更加吻合测录井显示及试油对比结果。但PY地区整体含油饱和度仍显著低于湖盆内部,其原因在于供烃成藏条件相对不利造成本区欠充填型油藏发育。由于储层物性相对较好导致可动油饱和度略高,从而出现含油显示虽差而出油尚可的情况,提出应在流体饱和度校正基础上进一步开展可动油评价。

关键词:流体饱和度;校正模型;欠充填;长8段;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122 文献标志码:A

Fluid saturation characteristics and correction for Chang 8 reservoir of Yanchang Formation in the PY area, the southwestern margin of Ordos Basin

LIANG Zhengzhong¹, XU Hongtao², CHANG Lina¹

(1. College of Chemistry Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China;

2. School of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The tight sandstone reservoirs are one of the most realistic areas in current unconventional oil and gas exploration. In the PY area of the southwest margin of the Ordos Basin, the main oil reservoir in the Chang 8 section has strong reservoir heterogeneity and large oil-bearing differences, so the relevant fluid saturation parameters are extremely important for test analysis and comparative calibration. The oil saturation of the PY reservoir measured in the laboratory is generally less than 30%, and there is often a large difference between the fluid saturation loss and the real value of the subsurface reservoir. Therefore, a correction model of fluid saturation in this region was established by using mathematical and statistical methods. The results show that the corrected oil saturation of the Chang 8 reservoir is improved by more than 15%, which is more consistent with the results of logging data and oil testing comparison. However, the overall oil saturation in the PY area is still significantly lower than that in the interior of the lake basin, which is due to the relatively unfavorable hydrocarbon supplying reservoir formation conditions causing the development of underfilled reservoirs in this area. Due to the relatively better reservoir physical properties, the mobile oil saturation is slightly higher, resulting in a situation where the oil-bearing indication is poor but oil production is still feasible, and it is proposed that further mobile oil evaluation should be carried out based on fluid saturation correction.

Key words: fluid saturation; correction model; under saturated filling; Chang 8 reservoir; Ordos Basin

引用格式:梁正中,许红涛,常利娜.鄂尔多斯盆缘PY地区长8段流体饱和度特征及校正研究[J].复杂油气藏,2023,16(2):179-184.

LIANG Zhengzhong, XU Hongtao, CHANG Lina. Fluid saturation characteristics and correction for Chang 8 reservoir of Yanchang Formation in the PY area, the southwestern margin of Ordos Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2):179-184.

在加大国内油气勘探开发力度的背景下,近年来有越来越多的低充填、低渗透致密油藏相继被发现。鄂尔多斯盆地中生界延长组主要含油层系低渗透致密油气资源潜力巨大^[1-3],早期开发集中于盆地内部主体部位。近来西南缘PY地区延长组深层长8段数口井获得良好油气发现,但取心实测含

油饱和度平均不足30%,甚至个别井目的层段含油

收稿日期:2022-07-21;改回日期:2023-01-06。

第一作者简介:梁正中(1978—),副教授,现主要从事非常规油气综合地质研究。E-mail:lzzdatong@sina.com。

基金项目:陕西省科学技术厅重点研发计划(2020SF-369),榆林市科技局项目(CXY-2022-73)。

饱和度小于10%,测井综合解释多油水同层,测试也有一定的油气产量。

一方面源于在现有的现场钻井取心工艺技术条件下,岩心样品从地层到地面在温度、压力以及流体分布状态等方面存在很大的区别,实验室测定的饱和度系列参数不能真实反映地下储层流体状态^[4-7],由此出现探井试油显示较好或产纯油层,含油饱和度数值却低于出油下限的现象。此外,鄂尔多斯盆地长8段储层非均质性强、含油性平面差异大,加上研究区毗邻构造复杂的西缘冲断带,因此影响盆缘地区含油性的地质因素相比盆内区块更为复杂。为厘清PY地区低含油饱和度特征及成因,有必要首先开展岩心含油饱和度数据校正工作^[8]。

本文在总结前人流体饱和度校正方法的基础上,针对研究区低渗透致密储层特点采用数学推导法建立了校正模型,并探讨了长8段含油饱和度差异形成的原因,以期对中国陆相盆地中同类油藏的勘探开发起到一定的指导作用。

1 校正问题的提出

1.1 研究区地质概况

PY地区行政区划包括宁夏回族自治区彭阳县、甘肃省镇原县东部、环县南部等,地表属于黄土地貌,构造上位于中国第二大致密油气盆地鄂尔多斯盆地西南缘,横跨盆地天环坳陷与西缘逆冲带两大构造单元。区内自下而上钻遇的地层以中生界三叠系延长组、侏罗系延安组、直罗组和安定组以及白垩系、古近系、新近系、第四系为主。

前期以侏罗系浅层勘探为主,发现了演武等侏罗系高产含油区,主要开发了延安组油藏。三叠系延长组为一套湖泊—三角洲相陆源碎屑沉积,是鄂尔多斯盆地中生界重要的石油储层和主力产层之一^[9],已发现油气藏类型主要为岩性、构造—岩性油藏。

前人根据沉积旋回特征,将延长组自下而上可划分为长10—长1共10个段。长10段沉积期湖盆形成,长9—长8段沉积期湖盆扩张,长7段沉积期湖盆强烈拗陷且其中沉积的暗色泥页岩为优质烃源岩,长6—长4段沉积期湖盆逐渐萎缩,长3—长1

段沉积期湖盆逐渐消亡。其中延长组长8段主要属于三角洲沉积体系,目前盆缘区内近年来发现了大量油气显示。长3段已有过百口井获工业油流,长8段亦有超20口井获工业油流,长8段增储稳产潜力较大,有待进一步加强该区储层地质参数与油气富集特征探讨。

1.2 含油饱和度分布

鄂尔多斯盆地长8段储层普遍具有低孔、低渗、低含油饱和度的特点,且储层非均质性较强,有效油气层识别难度大。其中油藏相关饱和度主要受生烃排驱动力、储层岩石物性、孔隙结构、含油柱高度和流体性质等因素的联合控制。PY地区录井统计显示油迹、油斑普遍,油浸少见,测井综合解释多见油水同层,油水分异性差。相比盆内勘探开发成熟区油藏高含油饱和度、大规模充注的特征,PY及相邻地区长8段油藏充注程度、规模及分布相对有限,欠充注型特征显著。

统计区内50余口钻井岩心分析含油饱和度一般小于30%(图1),实测含水饱和度一般大于40%。计算各井油、水饱和度之和明显不足100%,流体损失介于20%~50%之间,整体较为严重。由此可见,实验室岩心测定的饱和度参数不能确切表征区内地下储层原始流体分布情况。典型探井如M56井长8段2 363.50~2 366.00 m实测含油饱和度10.68%,M87新井取心分析含油饱和度12.15%,明显小于PY周缘环江、镇北密闭取心测试结果(图2、图3)。可见,室内岩心饱和度分析结果非常低,但对应深度试油分别获得10.37 t/d和10.88 t/d的产油量,出现试油显示较好而实验含油饱和度却低于一般出油下限的问题。

流体饱和度作为储层地质特征描述和开发研究的极其重要参数,公认最准确和直接常用的获取方法仍然是在实验室内对取样岩心进行饱和度的分析测定。由于储层岩心从原始地层到地面后,温度、压力及应力条件均发生了较大改变,导致了岩石孔隙结构特征、孔内流体分布状态均存在不同程度的变化,并出现不同程度的流体损失。因此出现PY地区流体分析数据与测录井解释和最终试油结论偏差较大的情况,需要进行必要的校正以真实反映原始储层流体状态。

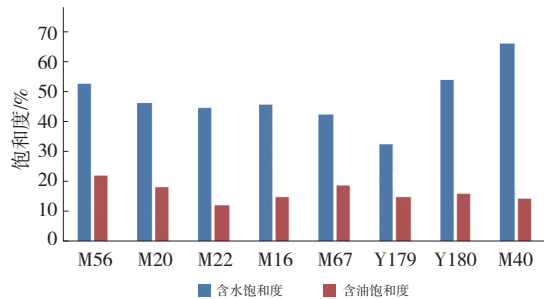


图1 西南缘地区延长组长8段含油(水)饱和度分布

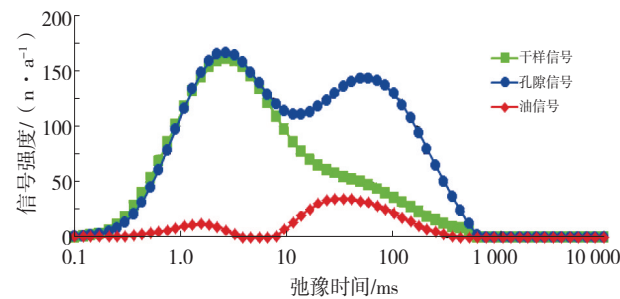


图2 M56井核磁录井T2谱分布

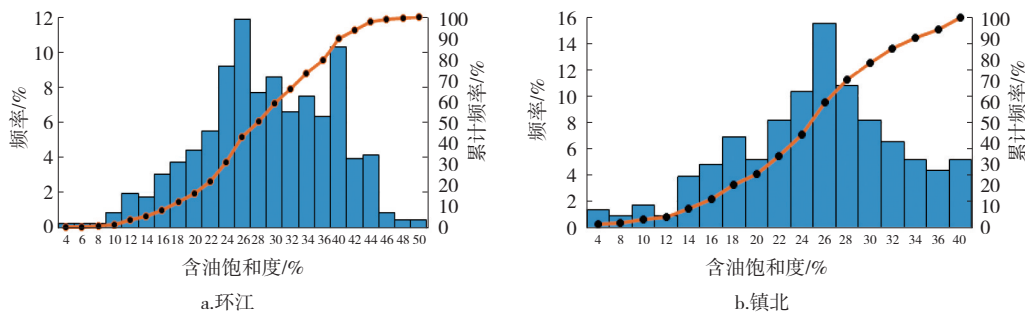


图3 邻区密闭取心测试含油饱和度分布

2 校正模型理论与特点

2.1 理论基础

前人研究发现,导致现今含油、含水饱和度损失的主要原因是原岩层孔隙中的流体降压脱气、岩石孔隙体积调整变化以及伴随岩样在保存、运输和测试过程中的流样损失。现有地面实验测量的饱和度值和地下实际赋存值之间一般存在较大差距。常规取心(或密闭取心)饱和度分析的最大局限性为不能够保持原始地层压力状态,即导致岩心分析误差的最主要原因在于岩心在从原地层中取出后,由于压力下降引起脱气现象而使得油、水的饱和度发生变化。

目前,储层流体饱和度校正方法可以总体归纳为实验测定分析法、数理统计法、经验公式法等3种方法^[8]。实验分析法是通过物理模拟岩心的压力降低引起的溶解气解析过程,从而校正流体的损失量,但其实验成本偏高。同时,低渗油藏计量的误差对油水饱和度的校正恢复影响更大,油藏试验模拟地层压力高也存在一定安全隐患,因此降压脱气模拟试验分析并不适用于低渗储层,而数理统计法应用于此类储层就发挥出其独特优势。本质上而言,数理统计推导法是针对影响流体饱和度损失的所有潜在因素进行的数学处理,对于通过录井获取

的大量取心数据进行系统性规模校正效率较高。

本次校正方法是基于假定最初圈闭中的储集空间只有地层水的存在,即岩心含水饱和度为100%。当油气由烃源岩生成后经过运移充注进入储层,在内外压力差的作用下油气开始驱替原孔隙中的水。随着排替作用的不断进行,孔隙中的含水饱和度将不断减小,而含油气饱和度则不断增大,但两者占据的总体积之和不会发生变化,一直保持在100%。因此,原始地层状态下,当储层孔隙空间中只存在油水两相流体而不存在游离气相时,其油水饱和度之间的关系理论上满足下式:

$$S_o + S_w = 1 \tag{1}$$

式中, S_o 是原始状态下储层的含油饱和度,小数; S_w 是原始状态下储层的含水饱和度,小数。

大量蒸馏抽提饱和度数据分析表明,对于同一口井同一层位,其油水饱和度之间一般满足较好的线性关系。这种线性关系的截距和斜率虽不再是1和-1,但误差不是杂乱无章的,而是总体上呈线性统计关系。室内测定岩样油、水饱和度之和普遍会小于100%,通过数学平移和旋转处理可恢复到原始地层条件下的含油、含水饱和度。

同时,即使在流体饱和度损失较大的情况下,实验室分析的取心含油、含水饱和度(分别为 S_{o1} 和 S_{w1})数据仍保持良好的线性关系。通过回归分析得

出下式:

$$S_{w1}=a+bS_{o1} \quad (2)$$

假设经过挥发以后油相的剩余率为 c ,水相的剩余率为 d ,则有

$$S_o = S_{o1}/c \quad (3)$$

$$S_w = S_{w1}/d \quad (4)$$

式中, S_{o1} 为岩心测量的残余含油饱和度,小数; S_{w1} 为岩心测量的残余含水饱和度,小数; S_o 为原始状态下储层的含油饱和度,小数; S_w 为原始状态下储层的含水饱和度,小数。

综合上述公式(1)、(3)和(4),岩心测量所得的油水饱和度应满足以下关系:

$$S_{o1}/c+S_{w1}/d=1 \quad (5)$$

对上式简单变形就可以得到如下线性关系式:

$$S_{w1}=d-S_{o1}d/c \quad (6)$$

由公式(6)可知,经过挥发以后岩心测量所得油水饱和度也呈线性关系,其斜率和截距大小与油水的剩余率有关,即油水的散失挥发率决定着岩心测量的油水饱和度的线性关系式。为此,根据油水两相各自的剩余率可恢复到地层条件下的原始流体组成状态。

因此,前述建立的饱和度校正方法的理论基础为经过挥发后实验室测量的岩心残余油水饱和度呈线性相关关系,然后依据两者之间的关系分区分析油水两相的剩余率,进而求取流体总损失量中油水各自的损失比例,最终进行油水饱和度的有效校正。

2.2 流体饱和度校正步骤

对低渗储层岩心分析饱和度数据进行数理统计而得到比较准确的处理校正结果,必须基于性质相近的岩心进行分区线性回归。

按实测油、水饱和度之和分区。原则为油水饱和度和之和相近为一个区,油水饱和度和之和的步长控制在5个百分点内,以保证油水饱和度交会图相关性满足要求;剔除畸变点,按分区好的数据分批进行线性拟合(图4);根据线性拟合提取所需参数(c 、 d),用校正参数对原始油水饱和度进行恢复,统计总平均值。

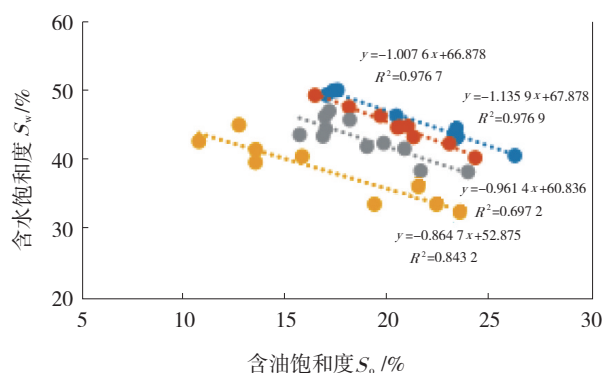


图4 M67分区校正模型

2.3 校正模型的特点

鄂尔多斯盆地中生界陆相储层普遍非均质性强,前已述及具有低渗、低含油饱和度的特征,室内分析测定的饱和度参数一般难以准确表征原始储层流体特征。与现有技术相比,本文所提出的校正方法具有以下突出特点:1)本方法计算过程简单,而且具有较高的校正精度,能快速准确地恢复原始储层油水两相流体组成比例。2)可对畸变点进行剔除,有效地避免了室内实验过程中人为因素导致的含油饱和度、含水饱和度测量不准确问题,提高了线性拟合相关计算精度。3)校正时应根据储层岩石样品饱和度数据量及实际数据分布情况确定合适步长。

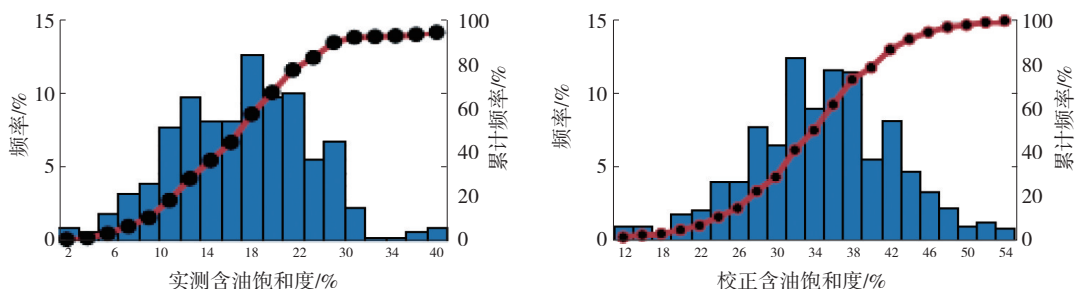


图5 PY地区实测与校正含油饱和度分布

3 校正结果检验及讨论

3.1 校正结果检验

按上述理论模型经过拟合校正之后,PY地区岩

心含油饱和度平均值达34%,含油饱和度整体提高15%以上(图5)。同一口井连续取心校正结果与测井解释曲线规律符合较好,并且饱和度参数更加吻合试油对比结果。将试油结论与饱和度匹配发现,

试油显示比较好的井,尤其是试油显示产纯油的储层,相应校正含油饱和度比较高(表 1)。

表 1 长 8 储层流体饱和度参数校正结果

井号	实测含油饱和度/%	校正含油饱和度/%	产油量/(t·d ⁻¹)	产水量/(t·d ⁻¹)
M20	18.70	34.88	21.42	0
M22	12.38	32.22	6.0	26.1
M40	14.55	22.09	0	3.7

3.2 校正模型适用范围

岩心样品由地下储层到地面,从钻井现场到室内过程中造成样品流体饱和度测试偏差的干扰因素复杂多变,针对性地开展低渗储层流体饱和度精确恢复与校正处理要求极高。本次基于数理统计所建立的统计校正模型也有其使用限制,如果岩样经历诸如模拟水洗和雨淋实验的情况,岩心真实的油、水饱和度剩余率就会被严重破坏,其恢复校正结果也没有实际意义。因此,该技术校正前的岩心要确保是经过自由散失挥发而使得含油、含水饱和度降低,亦即实验室测得的油、水饱和度之间是否存在良好线性关系是本方法应用的基础。

3.3 讨论

3.3.1 含油饱和度分布影响因素

油气藏的形成和聚集分布是烃源岩、沉积储层、盖层、圈闭、运移和保存等多种成藏地质条件联合控制的结果,而低渗致密非常规油气充注和最终流体饱和度高低控制因素较为复杂。鄂尔多斯盆地已发现的主要中生界油藏具有突出典型的“源控成藏”特征,大多位于盆内延长组长 7 优质烃源岩发育中心及相邻地区^[9],综合延长组油源条件、储层物性和成藏动力等条件,前人将其油藏充注模式划分为过充注、正常充注、欠充注等类型^[10]。盆地中心强生烃作用引起的高强度充注形成了源内高含油饱和度油藏的富集。

PY 地区经过上述校正之后的饱和度仍然明显低于盆内环江、西峰地区,其重要原因在于距离盆地内部生烃中心较远^[11-12]。通过烃源岩展布、有机质丰度、类型和热演化程度等各项指标比较,西缘地区烃源品质相较盆内主力区块均显著变差,由此 PY 整体供烃成藏条件相对不利,造成区内欠充注油藏发育。另外,相较盆内伊陕斜坡主体构造简单、稳定的特点,边缘地区构造活动作用较强。受到晚侏罗—早白垩世燕山运动持续影响及晚期喜山运动作用下,西缘地区后期发生强烈抬升,相应断层

活动加剧,引起西缘冲断带内油气藏调整改造较大,造成早期聚集油气散失/破坏,残余油藏饱和度进一步降低。

3.3.2 可动油饱和度对比

国内低含油饱和度油藏在许多油田都有勘探发现,其储层中共存水饱和度常远大于一般束缚水饱和度,常引起误判而漏掉有价值的油层。同样,原油在储层中的赋存状态决定油井产量高低。在油田开发中通常只有具流动性的原油才具有工业价值,而不能参与流动的流体在目前工艺技术条件下无法成功采出。在低渗致密储层中,当孔喉半径减小到一定程度时,原油为毛细管所束缚,不能参与流动即成为束缚油^[13-15]。

研究区前述数口探井含油饱和度虽远低于常规出油下限,但仍获得较为可观的产量,这可能主要源于盆缘长 8 段目标储层相对盆内储层物性较好,该类储层中主要物性参数孔隙度、渗透率与可动流体饱和度指标之间均表现出良好的正相关关系。可动油饱和度流体特征描述刻画对于下阶段低渗致密油气开发极为关键,需要在核磁共振储层物性测定分析基础上,进一步深入开展相关探讨。

4 结论

(1)PY 地区长 8 低渗-致密储层非均质性强、含油性差异较大,有效油气层识别难度大。通过地面测量的岩心含油饱和度一般小于 30%,流体饱和度损失严重。但对于同一口取心井样品,统计发现在经过自由挥发后其油水饱和度之间仍保持较好的线性相关性。

(2)采用数理统计方法建立了本区低渗-致密储层流体饱和度校正模型。经恢复与校正后的长 8 含油饱和度值整体提高 15% 以上,更加吻合测录井显示及实际试油结论对比结果。

(3)PY 地区整体含油饱和度显著低于湖盆内部主体区块,其形成原因在于充注成藏条件不利造成本区欠充注型油藏发育。由于盆缘储层物性相对较好导致可动油饱和度略高,从而出现含油显示虽弱而测试出油的情况。因此,可在流体饱和度校正基础上进一步开展可动油评价以指导同类油藏的勘探开发。

参考文献:

[1] 朱如凯,邹才能,吴松涛,等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6):

- 1168-1183.
- [2] 闫林,冉启全,高阳,等.陆相致密油藏差异化含油特征与控制因素[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(6):45-54.
- [3] 王香增,任来义,贺永红.鄂尔多斯盆地致密油的定义[J].油气地质与采收率,2016,23(1):1-7.
- [4] 谭锋奇,杨长春,李洪奇,等.密闭取心井油水饱和度校正方法[J].地球科学(中国地质大学学报),2013,38(3):592-598.
- [5] 刘丽.基于物理模拟实验的密闭取心井油水饱和度校正[J].石油钻采工艺,2009,31(2):82-85,90.
- [6] 张亮.密闭取心井岩心饱和度校正物理模拟实验[J].油气地质与采收率,2009,16(2):94-95,98.
- [7] 杨胜来,胡学军,李辉.密闭取心流体饱和度误差的影响因素及修正方法[J].石油大学学报(自然科学版),2004,28(6):64-67.
- [8] 芦凤明,马文华,白晶,等.大港油田储层岩心饱和度校正方法优选[J].长江大学学报(自然科学版),2019,16(12):50-53.
- [9] 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.
- [10] 石玉江,李高仁,周金昱,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组低渗透致密油藏充注模式测井识别[J].测井技术,2016,40(2):202-208.
- [11] 郭凯,曾溅辉,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.
- [12] 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.
- [13] 池云刚.吴定地区延长组储层流体饱和度校正模型及应用[D].西安:西安石油大学,2018.
- [14] 王飞龙.低渗油田可动油储集层流体性质评价方法一以鄂尔多斯盆地红河油田为例[J].录井工程,2019,30(4):74-78.
- [15] 喻建,杨孝,李斌,等.致密油储层可动流体饱和度计算方法一以合水地区长7致密油储层为例[J].石油实验地质,2014,36(6):767-772,779.

(编辑 刘义梅)

(上接第178页)

- [2] 尚凯,郭辉,夏永涛,等.塔中顺托果勒地区志留系柯坪塔格组下段沉积相[J].海相油气地质,2013,18(3):48-54.
- [3] 葛善良,鲁新便,盛海波,等.塔中顺9井区柯下段致密砂岩储层特征及成岩演化[J].油气地质与采收率,2014,21(4):42-45.
- [4] 张伟.塔里木盆地顺托果勒地区志留系储层致密化过程与油气充注关系[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
- [5] 刘若涵,王明,姜在兴,等.塔河地区志留系柯坪塔格组下段沉积相研究[J].沉积学报,2016,34(2):326-335.
- [6] 马晓娟,张忠民,陈占坤.塔河南部志留系柯坪塔格组层序地层及沉积相[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(3):35-40.
- [7] 冯兴强,张忠民,张卫彪.塔河油田志留系油气成藏特征及勘探方向[J].现代地质,2013,27(1):180-185.
- [8] 丁勇,王允诚,徐明军.塔河油田志留系成藏条件分析[J].石油实验地质,2005,27(3):232-237.
- [9] 郭长敏.塔里木盆地志留系柯坪塔格组沉积相及平面展布[J].天然气技术,2008,2(1):19-22,31.
- [10] 张晶晶.断陷湖盆致密砂砾岩储层特征及主控因素[J].大庆石油地质与开发,2017,36(6):52-57.
- [11] 李易隆,贾爱林,何东博.致密砂岩有效储层形成的控制因素[J].石油学报,2013,34(1):71-82.
- [12] 谢俊,张金亮,梁会珍,等.塔里木盆地志留系柯坪塔格组沉积相与沉积模式研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2008,23(2):1-5.
- [13] 陈占坤,张忠民,冯兴强.塔河油田志留系沉积相与层序地层学研究[J].石油地质与工程,2009,23(6):1-4.
- [14] 郭倩,蒲仁海,杨林,等.塔里木盆地塔河地区志留系上倾尖灭圈闭油气成藏[J].石油实验地质,2011,33(2):120-123,128.
- [15] 王毅,陈元壮.塔河地区南部志留系柯坪塔格组油气藏形成条件[J].石油与天然气地质,2008,29(5):632-638.
- [16] 李玉胜,谢传礼,邓兴梁,等.英买34、35井区志留系柯坪塔格组储层特征及其控制因素[J].中国地质,2009,36(5):1087-1098.
- [17] 张鑫,张金亮,覃利娟.塔里木盆地志留系柯坪塔格组砂岩岩石学特征与物源分析[J].矿物岩石,2007,27(3):106-115.

(编辑 刘义梅)