

致密砂岩储层敏感性评价及影响因素分析 ——以鄂尔多斯盆地盐池地区长8储层为例

柴光胜^{1,2} 师永民^{1,2,†} 杜书恒³ 魏云⁴ 张志强^{1,2} 郭春安^{1,2} 孙彤^{1,2}

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 4. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 克拉玛依 834000; † 通信作者, E-mail: sym@vip.163.com

摘要 以鄂尔多斯盆地盐池地区长8储层为例, 利用薄片鉴定、X射线衍射、高压压汞和岩芯流体驱替实验等手段, 对储层的敏感性开展定量评价, 并深入剖析其影响因素。结果表明, 鄂尔多斯盆地盐池地区长8致密砂岩储层的敏感性主要表现为中等偏强水敏、弱-中等偏弱酸敏、弱-中等偏弱碱敏和弱盐敏特征。储层的敏感性特征受黏土矿物成分、岩石矿物学特征、孔隙结构和物性影响, 其中黏土矿物的含量和组成是主要影响因素, 实际开发过程中应予以高度重视。研究结论可为致密砂岩油藏开发中后期提高采收率提供重要的科学依据。

关键词 致密砂岩储层; 敏感性; 鄂尔多斯盆地; 盐池地区; 长8储层

Sensitivity Evaluation and Influencing Factors Analysis of Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of the Chang-8 Reservoir in Yanchi Area of Ordos Basin

CHAI Guangsheng^{1,2}, SHI Yongmin^{1,2,†}, DU Shuheng³, WEI Yun⁴,
ZHANG Zhiqiang^{1,2}, GUO Chun'an^{1,2}, SUN Tong^{1,2}

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Oil and Gas Research Center, Peking University, Beijing 100871; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 4. Experimental Testing Research Institute of Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000; † Corresponding author, E-mail: sym@vip.163.com

Abstract Taking the Chang-8 reservoir in Yanchi area of Ordos Basin as an example, combined with thin slice identification, X-ray diffraction, high pressure mercury intrusion and core fluid flooding test, the reservoir sensitivity is quantitatively evaluated and its influencing factors are deeply analyzed. The results show that the sensitivity of the Chang-8 tight sandstone reservoir in Yanchi area of Ordos Basin is mainly characterized by moderately strong water sensitivity, weak-medium weak acid sensitivity, weak-moderate weak alkali sensitivity, and weak salt sensitivity. Reservoir sensitivity are mainly affected by clay mineral composition, rock mineralogical characteristics, pore structure and physical properties. The content and composition of clay minerals are the main factors, which should be highly valued in actual development. The research conclusions will provide important scientific support for enhanced oil recovery in the middle and late stages of the development of tight sandstone reservoirs.

Key words tight sandstone reservoirs; sensitivity; Ordos Basin; Yanchi area; Chang-8 reservoir

致密储层指基质渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其中所含油气运移距离较短, 需进行大规模储层压裂改造才能开采的储层^[1-5]。作为致密储层的典型代

表, 鄂尔多斯盆地延长组长8段致密储层的勘探开发近年来引起广泛关注^[6-9], 其储层敏感性评价作为储层表征、储层保护及地层损害评价的重要内容,

国家科技重大专项(2017ZX05013005-009)资助

收稿日期: 2019-03-18; 修回日期: 2019-09-30

对致密储层的高效开发具有重要的指导意义^[10-13]。区别于常规储层,致密储层由于具有低孔低渗的特点,如果开发措施不当,更易发生储层损害^[14-19],因此敏感性评价对高效开发该类油藏具有重要的现实意义。

储层敏感性评价实验研究比较成熟,多在储层岩石矿物学、储层物性和孔隙结构等的研究的基础上开展岩芯流体驱替实验,进行储层的敏感性评价。Afshin等^[20]采用控制变量的方法,研究不同物性条件下储层对相同低矿化度注入水的响应。Song等^[21]通过驱替实验,模拟研究低于地层饱和压力时气液两相的渗流规律,并分析不同压力下盐析现象引起的储层堵塞程度。Han等^[22]使用X射线衍射和扫描电子显微镜等方法,详细测定储层中各酸敏矿物的含量,并分析储层中酸敏异常的主要控制因素。

前人对鄂尔多斯盆地致密储层的敏感性评价问题进行了大量的研究,涉及不同的层位和区域。王玉霞等^[23]选取鄂尔多斯盆延长组长4+5致密储层的样品,开展天然岩芯驱替实验,得出矿物组成及孔喉结构是研究区致密储层敏感性主控因素的结论。师俊峰等^[24]以吴起油田寨子河地区延长组6段油层为例,在储层敏感性评价的基础上,分析黏土矿物对致密储层敏感性的影响程度。杨孝等^[25]研究鄂尔多斯盆地长7段的应力敏感性,发现岩石骨架的颗粒组分、颗粒粒径、填隙物和孔隙结构等都对储层敏感性有影响。何永宏^[26]研究鄂尔多斯盆地姬塬油田长8储层,发现成岩相带的分布是影响储层敏感性的主要因素。

虽然前人已经开展大量工作,但由于鄂尔多斯盆地较为辽阔,不同地区和层位储层的敏感性存在一定程度的差异,给油气勘探开发带来困扰,因此对新地区的储层敏感性开展研究依然具有必要性。

本文以鄂尔多斯盆地盐池地区长8储层为例,通过扫描电子显微镜分析、岩芯样品鉴定、X射线衍射分析及岩芯流体驱替实验等方法,对该致密储层进行敏感性评价,并分析其影响因素,以期对鄂尔多斯盆地致密储层以及同类油藏的有效开发提供科学依据。

1 地质背景

选取鄂尔多斯盆地盐池西油田为研究区(图1),目的层段为三叠系延长组长8储层。盐池西油田位于盆地西部天环拗陷的东端,紧邻西缘逆冲断裂

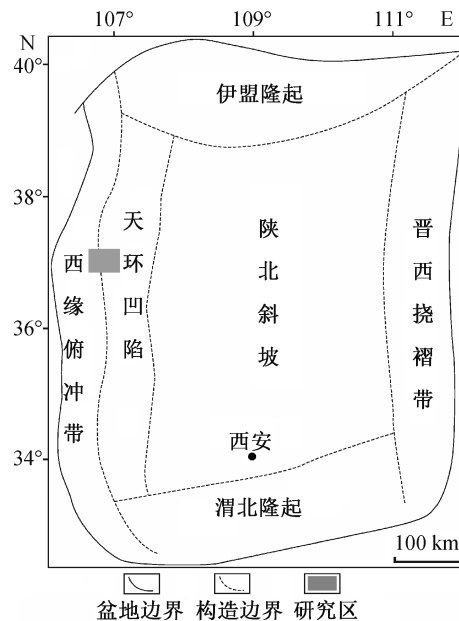


图1 研究区位置
Fig. 1 Location of the study area

带^[27-29]。中生代延长组发育较厚的河流-三角洲-湖泊相沉积,水下分流河道砂体为该地区的骨架砂体^[30-34],其沉积物的粒度为中等,岩性以中细砂岩和细砂岩为主。砂体呈层状,分布稳定,多含夹隔层,常发育卷曲构造、平行层理和交错层理^[35-37],埋藏深(2500~2700 m),岩性致密,为典型的非常规致密油藏,是近年来勘探开发的重点层位之一。

2 致密储层敏感程度测定

为研究盐池地区长8致密砂岩储层的敏感性,本研究采用岩芯流体驱替方法,对20余件样品进行敏感性测定。依据行业标准《储层敏感性流动实验评价方法》(表1),评价储层的敏感性等级。

2.1 水敏指数测定

水敏感性指外来流体进入储层后,与黏土矿物发生反应,引起黏土矿物膨胀、分散并运移,使得

表1 储层敏感性评价标准^[38]
Table 1 Reservoir sensitivity evaluation standard^[38]

损害程度/%	敏感性等级
≤5	无
5~30	弱
30~50	中等偏弱
50~70	中等偏强
70~90	强
≥90	极强

渗流通道发生变化,导致岩石渗透率发生变化的现象^[39]。本次水敏实验模拟地层压力为60 MPa,流动介质为地层水(35.0 g/L的标准盐水溶液)、二分之一矿化度地层水(17.5 g/L的标准盐水溶液)和蒸馏水,实验结果见表2。盐池西油田长8储层的水敏指数主要介于23.4~84.3之间,平均值为50.68,根据水敏感性评价标准,水敏程度属于中等偏强。因此,在注水开发的过程中,需要根据实际情况及开发效果,适当地提高砂液比,减少液量,从而减小储层的水敏伤害。

2.2 酸敏指数测定

酸敏感性指外来的酸性溶液进入储层后,与其中矿物及流体发生溶解反应或生成沉淀,导致储层渗透率发生变化的现象。酸敏指数是样品酸化处理后渗透率变化的百分比。本次实验选用15%的HCl进行酸敏感性评价,地层水矿化度为35.0 g/L,液体体积用模拟地层水正向驱替孔隙体积的10~15

倍,并保持pH值不变,测定岩样的水相渗透率,实验结果如表3所示。研究区长8储层的酸敏指数在5.3~38.3之间,平均值为19.56,酸敏程度属于弱~中等偏弱。因此,在油气田开发过程中,可适当添加酸化措施,提高开发效果。

2.3 碱敏指数测定

碱敏感性指外来的碱性液体与储层中的矿物反应,使其分散、脱落或生成新的沉淀或胶状物质,堵塞孔隙喉道,造成储层渗透率变化的现象^[40]。碱敏感性评价实验的目的在于了解外来工作液对储层是否造成伤害及伤害程度,找出碱敏感性发生的临界pH值,为各类工作液的设计提供依据^[41]。本次实验选用不同浓度的NaOH溶液进行碱敏感性评价,地层水矿化度为35.0 g/L,在pH分别为7, 8.5, 10, 11.5和13的条件下,测试渗透率碱敏损害程度,结果如表4所示。随着pH加大,岩芯样品的渗透率持续下降,当pH为8.5左右时,岩芯渗透率损害变

表2 盐池地区长8储层样品水敏实验数据
Table 2 Water sensitivity test data of Chang-8 reservoir in Yanchi area

样品号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/mD			水敏指数/%	水敏程度
			地层水	二分之一矿化度地层水	蒸馏水		
Y114-1	2399.1	9.424	0.000310	0.000205	0.000165	46.6	中等偏弱
Y67-1	2487.8	4.757	0.000003	0.000002	0.000002	44.5	中等偏弱
Y67-2	2487.9	5.210	0.000031	0.000024	0.000022	28.1	弱
Y218-1	2669.1	13.886	0.040900	0.033000	0.015900	61.1	中等偏强
Y218-2	2669.2	12.522	0.017100	0.011300	0.012400	27.8	弱
Y218-3	2669.3	13.378	0.026800	0.017400	0.004200	84.3	强
Y218-4	2669.4	13.454	0.029500	0.022800	0.022600	23.4	弱
f38-1	2698.6	6.294	0.000009	0.000007	0.000003	69.7	中等偏强
f38-2	2698.6	5.325	0.000008	0.000006	0.000004	54.1	中等偏强
f38-3	2705.5	6.408	0.000004	0.000003	0.000001	59.3	中等偏强
f38-4	2698.6	6.117	0.000029	0.000021	0.000012	58.6	中等偏强

表3 盐池地区长8储层样品酸敏实验数据
Table 3 Acid sensitivity test data of Chang-8 reservoir in Yanchi area

样品号	井深/m	孔隙度/%	渗透率/mD			酸敏指数/%	酸敏程度
			地层水	酸化前	酸化后		
F42-1	2430.5	10.30	0.001006	0.001010	0.000898	10.7	弱
Y292-1	2566.9	8.94	0.003760	0.003760	0.002320	38.3	中等偏弱
F44-1	2487.5	7.04	0.001400	0.001400	0.001470	5.3	无
F39-1	2339.5	11.53	0.068900	0.068900	0.051800	24.8	弱
Y184-1	2513.9	6.57	0.006870	0.006870	0.004940	28.1	弱
F48-1	2505.6	11.61	0.003280	0.003280	0.002930	10.7	弱
Y293-1	2499.8	9.98	0.018000	0.018000	0.012700	29.6	弱

表 4 盐池地区长 8 储层样品碱敏实验数据
Table 4 Alkali sensitivity test data of Chang-8 reservoir in Yanchi area

样品号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/mD					碱敏指数/%	碱敏程度
			pH=7 (地层水)	pH=8.5	pH=10	pH=11.5	pH=13		
Y207-1	2563.1	8.54	0.000684	0.000548	0.000517	0.000532	0.000485	29.1	弱
Y207-2	2563.2	3.56	0.000179	0.000146	0.000134	0.000135	0.000130	27.4	弱
Y292-1	2566.9	8.94	0.003760	0.002870	0.002680	0.002660	0.002520	33.0	中等偏弱
F44-1	2487.5	7.04	0.001400	0.001110	0.000980	0.000960	0.000930	33.3	中等偏弱
F45-1	2439.8	6.45	0.000029	0.000024	0.000022	0.000023	0.000020	30.6	中等偏弱
Y76-1	2294.3	5.79	0.000065	0.000047	0.000047	0.000049	0.000048	26.6	弱
F41-1	2527.8	4.80	0.000038	0.000028	0.000027	0.000029	0.000026	30.9	中等偏弱
Y86-1	2540.6	4.73	0.000068	0.000058	0.000053	0.000051	0.000052	23.0	弱

化率最大, 储层的碱敏指数介于 23.0~33.3 之间, 平均值为 29.24。碱敏感性的临界 pH 为 8.5, 碱敏程度属于弱-中等偏弱。

2.4 盐敏程度测定

盐敏感性指矿化度不同于地层水的外来流体进入油藏储层后, 影响黏土矿物的层状结构, 使黏土矿物膨胀或分散、运移, 堵塞喉道, 进而造成储层渗透率下降的现象^[17]。盐敏感性评价的目的是确定其发生的条件以及由其引起的储层损害程度。本次实验分别选用地层水、浓度为 17.5, 12.25 和 7 g/L 的盐水溶液及蒸馏水, 测试储层渗透率盐敏损害程度, 结果如表 5 所示。研究区长 8 储层的盐敏感性较弱, 盐敏感性的临界盐度介于 12.25~17.50 g/L 之间, 变化幅度较小。因此, 在开发过程中, 盐度变化对储层渗透率伤害较低, 合理地控制工作液和注入水盐度即可有效地降低储层盐敏损害。

3 盐池地区长 8 储层敏感性影响因素

储层敏感性实验结果表明, 盐池地区长 8 致密

砂岩油藏储层具有中等偏强水敏、弱-中等偏弱酸敏、弱-中等偏弱碱敏以及弱盐敏的特点。影响储层敏感性的因素很多, 包括岩石学特征、孔隙结构特征、物性特征和黏土矿物特征等, 其中黏土矿物的类型和含量是主要因素^[40]。

3.1 岩石学特征

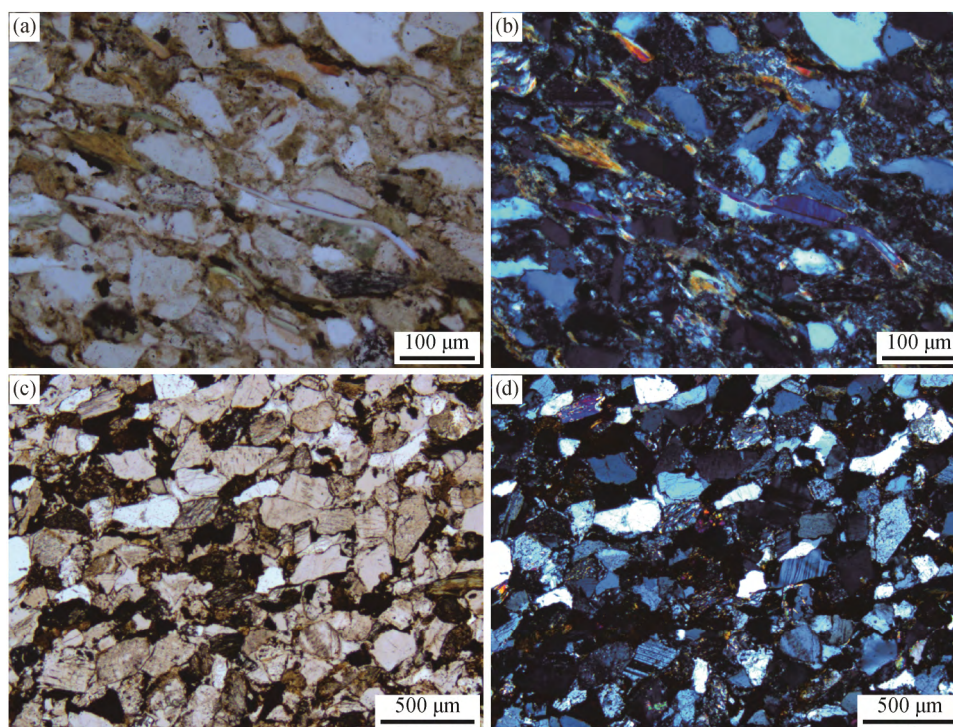
盐池地区长 8 储层以中细粒长石岩屑砂岩(图 2)为主, 胶结物主要为硅质, 部分样品中也有钙质胶结物, 填隙物较多, 颗粒多为棱角状和次棱角状, 部分矿物晶体因受力被挤压成长条形, 有一定的定向性, 成分成熟度和结构成熟度均属于中等。

样品的 X 射线衍射检测结果显示, 研究区长 8 储层的矿物成分主要是石英和长石, 二者总含量约为 76.33%。石英平均含量为 54.83%, 钾长石平均含量为 4.67%, 斜长石平均含量为 16.83%, 方解石平均含量为 7.83%, 黏土矿物含量为 21.83%。

按照 Basan 等^[42]的评价标准, 当储层黏土矿物含量 < 5% 时, 属于低黏土矿物储层; 当储层黏土矿物含量为 10%~15% 时, 属于中黏土矿物储层; 当储

表 5 盐池地区长 8 储层样品盐敏实验数据
Table 5 Salt sensitivity test data of Chang-8 reservoir in Yanchi area

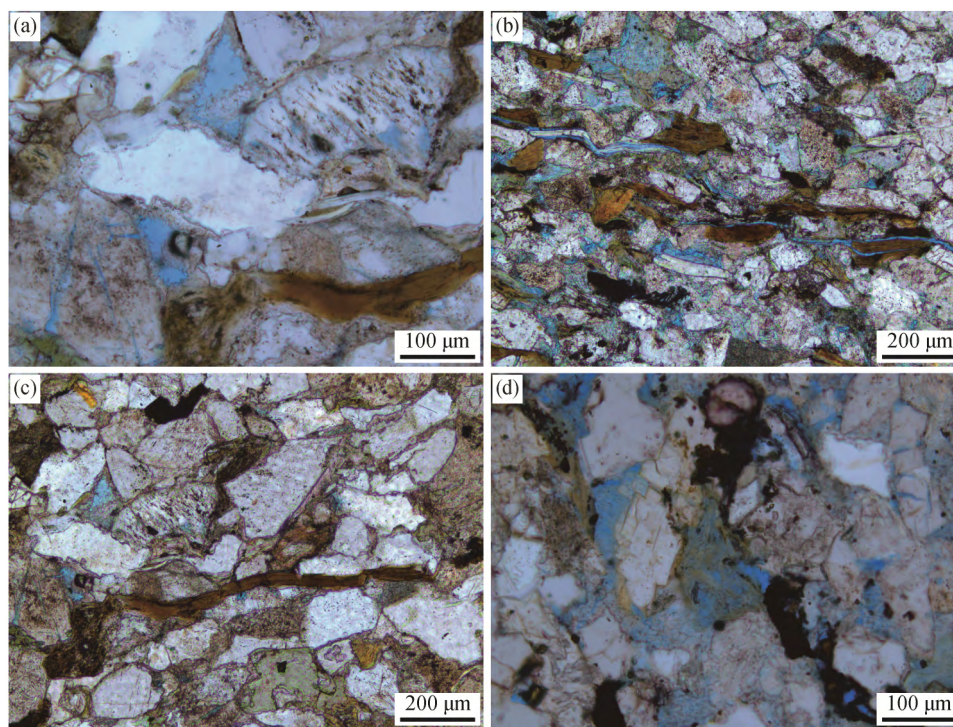
样品号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/mD					临界盐度/ (g·L ⁻¹)
			35 g/L 盐水(地层水)	17.5 g/L 盐水	12.25 g/L 盐水	7 g/L 盐水	蒸馏水	
Y207-1	2563.1	8.54	0.000684	0.000533	0.000489	0.000535	0.000392	17.50
Y207-2	2563.2	3.56	0.000179	0.000161	0.000144	0.000139	0.000101	12.25
Y292-1	2566.9	8.94	0.003760	0.002849	0.002659	0.003139	0.002723	17.50
F44-1	2487.5	7.04	0.001400	0.001177	0.001102	0.001125	0.000969	17.50
Y76-1	2294.3	5.79	0.000065	0.000053	0.000048	0.000046	0.000031	12.25
F41-1	2527.8	4.8	0.000038	0.000032	0.000030	0.000028	0.000016	17.50
Y86-1	2540.6	4.73	0.000068	0.000053	0.000049	0.000049	0.000028	17.50



(a) 中细粒岩屑长石砂岩, 长条形定向矿物, 单偏光; (b) 石英和长石含量较高, 正交偏光; (c) 致密胶结, 单偏光; (d) 石英和长石含量较高, 正交偏光下可见明显的长石条纹, 正交偏光

图2 盐池地区长8储层样品岩石薄片特征

Fig. 2 Rock slice light mirror characteristics of Chang-8 reservoir in Yanchi area



(a) 粒间孔隙、长石溶蚀孔隙; (b) 孔隙较少, 且互不连接; (c) 片状细喉道; (d) 部分样品发育微裂隙

图3 盐池地区长8储层样品铸体薄片特征

Fig. 3 Cast sheet light mirror characteristics of Chang-8 reservoir in Yanchi area

层黏土矿物含量>15%时,属于高黏土矿物储层。研究区长 8 储层的黏土矿物相对较高,属于高黏土矿物储层,在开发过程中容易因储层的敏感性而受到伤害,导致开发效果下降。

3.2 孔隙结构特征

储层的孔隙结构特征指孔隙与喉道的几何形态、大小、分布及联通情况^[17]。研究区长 8 储层孔隙类型以粒间孔隙、长石溶蚀孔隙(图 3(a))和微裂隙(图 3(b))为主,岩石较致密,空隙较少,且联通性差(图 3(c)),粒间孔隙较小,孔径多在 10 μm 以下,孔隙内充填大量的黏土矿物、书页状高岭石和发丝状伊利石等。铸体薄片鉴定显示,研究区长 8 储层颗粒间接触关系以点、线接触为主,喉道类型多为片状细喉道(图 3(d))。

如表 6 所示,通过压汞实验,测得研究区长 8 储层排驱压力在 1.21~2.24 MPa 之间,平均值为 1.83 MPa;孔喉中值半径集中分布于 0.10~0.15 μm 之间(图 4),平均值为 0.09 μm,分选系数在 1.55~2.32 之间,平均值为 1.96。说明储层喉道较细且分选程度一般,为细孔喉型。

综上所述,研究区长 8 储层孔隙结构为细孔细

喉型,且孔隙多被充填,喉道多为片状细喉道,这种孔隙类型决定了在储层孔隙流体发生变动时,孔喉极易被堵塞伤害,影响渗透率。

3.3 物性特征

样品测试结果表明,研究区长 8 储层的孔隙度和渗透率极小,物性较差。孔隙度在 1%~8%之间,平均值约为 5%;渗透率在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均值为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。如图 5 所示,研究区长 8 储层的孔隙度与渗透率具有明显的正相关关系,孔隙度控制着渗透率。因孔隙堵塞严重,除水敏特征变化较大(因水敏矿物含量较大导致储层渗透率前后变化较大)外,储层其余的敏感性特征的变化均较小。

3.4 黏土矿物特征

储层的黏土矿物特征是储层敏感程度的主控因素,无论是水敏和盐敏,还是酸敏和碱敏,都直接受制于黏土矿物的组成和含量。盐池地区的黏土矿物以自生类型为主,主要以杂基的方式充填于储层孔隙中。

X 射线衍射分析结果表明,盐池地区长 8 储层黏土矿物含量为 14%~32%,平均值为 21.83%。其中,伊蒙混层黏土矿物含量较高,为 41%~74%,平均 50.67%;伊蒙间层黏土矿物含量约为 32.5%;高岭石含量为 0~54%,平均 20.33%;绿泥石含量为 10%~29%,平均 19.83%;伊利石含量为 4%~16%,平均 9.17%。

蒙脱石、伊蒙混层以及绿蒙混层等黏土矿物是影响储层显现水敏感性的主要因素。伊蒙混层黏土矿物多呈半蜂窝状分布(图 6(a)),堵塞孔隙,影响储层的渗透率。根据黏土矿物组成,可知造成该区储层水敏感性较强的主要原因是伊蒙混层黏土矿物的

表 6 盐池地区长 8 储层样品高压压汞实验数据

Table 6 Experimental data of high pressure mercury injection of Chang-8 reservoir in Yanchi area

样品号	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙度/%	孔喉半径/ μm		分选系数	排驱压力/ MPa
			最大	中值		
F41-3	0.02	5.40	0.33	0.03	2.07	2.24
F47-1	0.11	6.90	0.33	0.11	1.84	2.24
Y67-4	0.03	4.10	0.33	0.12	1.55	2.24
Y86-2	0.19	7.50	0.61	0.15	2.32	1.21
Y114-1	0.08	8.00	0.61	0.06	2.04	1.21

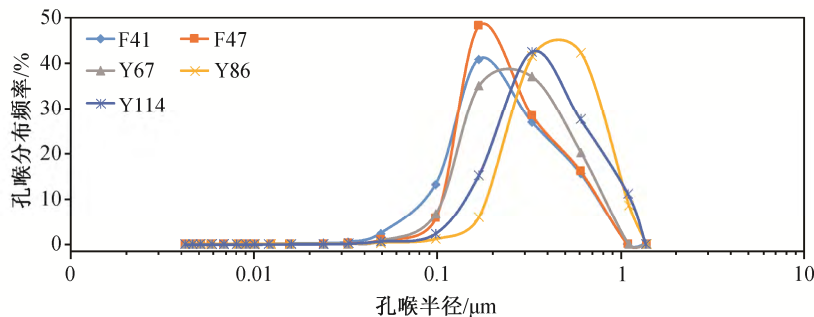


图 4 盐池地区长 8 储层样品孔喉半径分布频率

Fig. 4 Pore throat radius distribution frequency of Chang-8 reservoir in Yanchi area

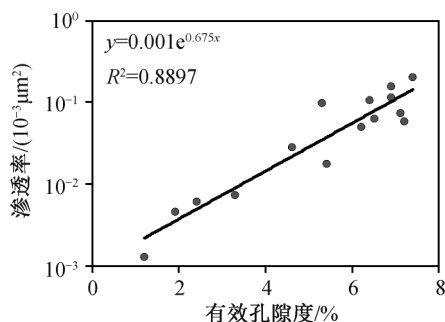


图5 盐池地区长8储层样品渗透率与有效孔隙度的关系

Fig. 5 Relationship between permeability and effective porosity of Chang-8 reservoir in Yanchi area

含量很高(50.67%),当注入水的矿化度与地层水的矿化度不匹配时,伊蒙混层黏土矿物会不同程度地吸水膨胀,使储层孔喉变小,甚至堵塞孔喉,造成渗透率下降。

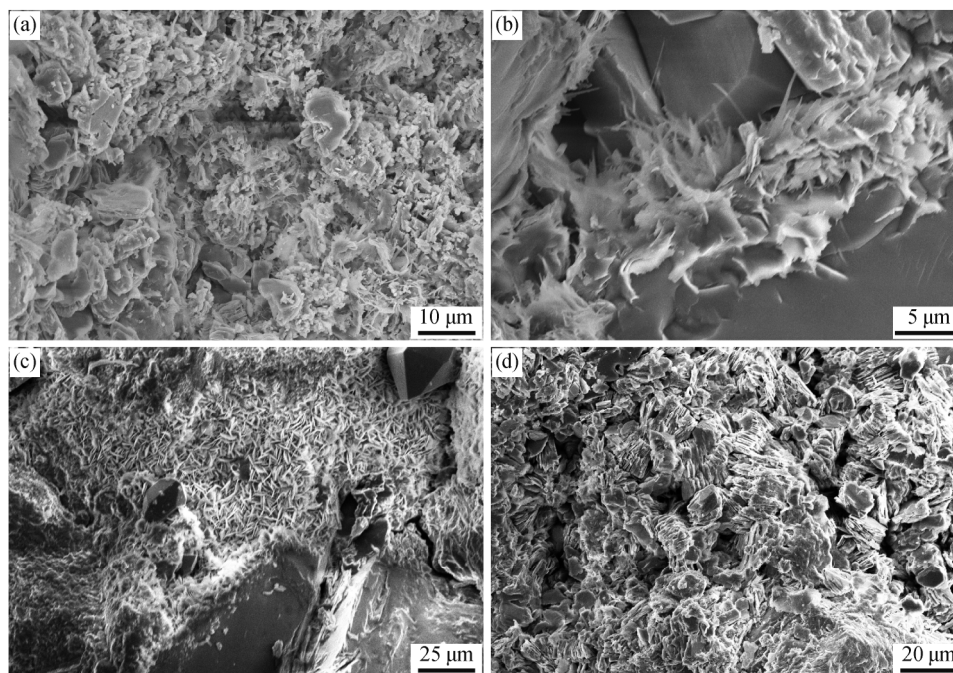
伊利石等黏土矿物的含量影响储层的盐敏感性。当储层流体矿化度的改变超过一定限度时,除部分伊利石的微弱膨胀外,颗粒间的发丝状伊利石也被溶解破坏,发生扩散运移,进而堵塞喉道,降低渗透率。研究区内伊利石以发丝状和薄片状充填于储层孔隙中(图6(b)),含量相对较少(9.17%),所以本地区储层的盐敏感性不明显。

影响储层酸敏感性的黏土矿物主要是绿泥石。由于绿泥石中含较多的铁离子和镁离子,当酸性流体进入孔隙时会发生反应,生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀,堵塞孔喉,降低储层的孔隙度和渗透率。研究区的绿泥石主要呈针叶状(图6(c)),作为杂基充填于储层孔喉,部分呈薄膜状附着于颗粒表面。由于研究区长8储层中绿泥石含量不多(占黏土矿物总含量的19.83%),所以该地区储层的酸敏感性不明显。

影响储层碱敏感性的黏土矿物主要是高岭石。在碱性流体环境中,高岭石会发生溶解作用,分散并运移,溶解作用产生的物质又以胶体或颗粒的形式沉淀在孔喉部位,对储层渗透率产生影响。研究区储层中高岭石主要以书页状集合体的形式充填于孔隙中(图6(d)),其含量仅占黏土矿物总含量的20.33%,因此该地区储层的碱敏感性较弱。

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地盐池地区长8致密砂岩油藏储层的水敏指数为50.68,酸敏指数为19.56,碱敏指数为29.24,敏感性的临界盐度在12.25~17.50 g/L之间,显示中等偏强水敏、弱-中等偏弱酸敏、弱-



(a) 半蜂窝状伊蒙混层; (b) 薄片状和细丝状伊利石; (c) 针叶状绿泥石; (d) 书页状高岭石

图6 盐池地区长8储层样品扫描电子显微镜照片

Fig. 6 Electron microscopic image features of Chang-8 reservoir in Yanchi area

中等偏弱碱敏和弱盐敏特征。

2) 影响储层敏感性的因素很多,黏土矿物的类型和含量是主要因素。此外,岩石学特征、孔隙结构特征和物性特征等因素也有一定的影响。

3) 研究区储层的黏土矿物中,伊蒙混层黏土矿物的含量最高,达 50.67%,直接导致储层中等偏强水敏的特征。储层中虽然也含其他黏土矿物,但由于本地区储层渗透率极低,导致其他敏感性不明显。

4) 由于致密储层孔渗低和矿物组成复杂的特点,更易发生储层敏感性伤害,因此进行敏感性评价不仅可以为本地区油气开发提供依据,而且对该类油藏的高效开发有重要意义。

参考文献

- [1] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素. 石油学报, 2014, 35(1): 184-197
- [2] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150-158
- [3] 赵政璋, 杜金虎. 致密油气. 北京: 石油工业出版社, 2012: 1-10
- [4] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136
- [5] 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. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187
- [6] 李树同, 姚宜同, 乔华伟, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 致密储层溶蚀作用及其对储层孔隙的定量影响. 天然气地球科学, 2018, 29(12): 1727-1738
- [7] 李阳, 张文选, 李树同, 等. 鄂尔多斯盆地长 8 砂岩储层碳酸盐胶结物特征及其对物性的影响. 地质科技情报, 2018, 37(4): 175-183
- [8] 赖锦, 王贵文, 柴毓, 等. 致密砂岩储层孔隙结构成因机理分析及定量评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 油层组为例. 地质学报, 2014, 88(11): 2119-2130
- [9] 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. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350
- [10] Hatcher G B, Chen H. Evaluating formation damage risks in a glauconitic sandstone reservoir: a case history from the offshore north west shelf of Australia [R]. Adelaide: SPE, 1996, 37014(MS): 461-475
- [11] 钟高润, 张小莉, 杜江民, 等. 致密砂岩储层应力敏感性实验研究. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1300-1306
- [12] 吴小斌, 王志峰, 崔智林, 等. 镇北地区超低渗储层敏感性评价及机理探讨. 断块油气田, 2013, 20(2): 196-200
- [13] Moghadasi J, Kakavandi M, Kordestany A. An experimental approach to investigate permeability alteration caused by underbalanced drilling in oil reservoir [R]. Louisiana: SPE, 2010, 127953(MS): 1-10
- [14] 邓杰, 王震亮, 高潮, 等. 定边张韩地区长 2 低渗储层敏感性分析. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(2): 285-290
- [15] 党犇, 赵虹, 康晓燕, 等. 鄂尔多斯盆地陕北斜坡中部延长组深部层系特低渗储层敏感性微观机理. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1100-1107
- [16] 卢进才, 李玉宏, 魏仙祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 928-932
- [17] Rahman M, Sarma H K. Enhancing tight gas recovery through hydraulic fracture treatment design optimization. Advances in Petroleum Exploration and Development, 2013, 5(2): 1-7
- [18] 马海勇, 周立发, 张小刚, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 储层成岩作用与有利成岩相研究. 石油实验地质, 2013, 35(4): 378-383
- [19] Jü Binshan, Fan Tailiang, Wang Xiaodong. A new practical method to quantitatively evaluate the changes in formation permeability during production [R]. London: SPE, 107026(MS), 2007: 1-5
- [20] Afshin D, Behnam M. Sensitivity analysis of reservoir and rock properties during low salinity water injection. Energy Reports, 2019, 5: 1001-1009
- [21] Song Liyang, Wang Jiwei, Su Jianzheng, et al. The pressure sensitivity test and plugging mechanism analysis in salt-out reservoir. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 242(3): 1-5
- [22] Han Denglin, Wang Qianqian, Wang Chenchen, et al. Controls of acid-sensitive minerals on reservoir sensitivity testing: an example from the silurian keepingtage formation in Tazhong area, Tarim Basin. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2018, 92(5): 1973-1980
- [23] 王玉霞, 周立发, 焦尊生, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区延长组致密砂岩储层敏感性评价. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(4): 981-990

- [24] 师俊峰, 师永民, 高超利, 等. 致密砂岩储层黏土矿物特征及敏感性分析——以鄂尔多斯盆地吴起油田寨子河地区长6油层为例. 科学技术与工程, 2018, 18(20): 88–95
- [25] 杨孝, 冯胜斌, 王炯, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段致密油储层应力敏感性及其影响因素. 中国石油勘探, 2017, 22(5): 64–71
- [26] 何永宏. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长8储层敏感性研究. 断块油气田, 2014, 21(1): 87–91
- [27] 解爱国, 张庆龙, 郭令智. 鄂尔多斯盆地西缘和南缘古生代前陆盆地及中央古隆起成因与油气分布. 石油学报, 2003, 24(2): 18–23
- [28] 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 等. 中国中西部两期前陆盆地的现成及其与油气的关系. 石油学报, 2003, 24(2): 13–17
- [29] 夏义平, 徐礼贵, 郑良合, 等. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲断裂带构造特征及油气勘探方向. 石油地质, 2005, 5(3): 13–19
- [30] 冯娟萍, 郭艳琴, 余芳. 鄂尔多斯盆地富县探区延长组物源与沉积体系分析. 西安科技大学学报, 2013, 33(2): 178–184
- [31] 郭艳琴, 惠磊, 张秀能, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积体系特征及湖盆演化. 西北大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 593–602
- [32] 陈全红, 李文厚, 高永祥, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深湖沉积与油气聚集意义. 中国科学: 地球科学, 2007, 37(增刊1): 39–48
- [33] 郭德运, 郭艳琴, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地白豹地区延长组中段沉积特征与沉积模式. 石油实验地质, 2010, 32(3): 252–257
- [34] 武富礼, 李文厚, 李玉宏, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化. 古地理学报, 2004, 6(3): 307–315
- [35] 蔡玥, 李勇, 成良丙, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长8低渗透砂岩储层微观孔隙结构特征研究. 新疆石油地质, 2015, 33(1): 107–111
- [36] 廖朋, 唐俊, 庞国印, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长8¹段储层特征及控制因素分析. 矿物岩石, 2012, 32(2): 97–104
- [37] 马海勇, 周立发, 张小刚, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长8储层成岩作用与有利成岩相研究. 石油实验地质, 2013, 35(4): 378–383
- [38] 油气田开发专业标准化委员会. 储层敏感性流动实验评价方法: SY/T535—2010. 北京: 国家能源局, 2010: 1–20
- [39] 裘怿楠, 薛叔浩. 油气储层评价技术. 北京: 石油工业出版社, 1997: 284–342
- [40] 石小虎, 安文宏, 王少飞, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界储层敏感性实验研究. 石油化工应用, 2013, 32(1): 25–30
- [41] 景海权, 张烈辉, 赵连水, 等. 大港油田张东地区低渗储层黏土矿物分析及敏感性研究. 特种油气藏, 2012, 19(2): 110–112
- [42] Basan P B, Erco N L. Formation damage index number: a model for the evaluation of fluid sensitivity in shale sandstones [R]. Las Vegas: SPE, 1985, 14317 (MS): 1–7