

## 鄂尔多斯盆地姬塬油田东部长 8<sub>2</sub>油层组 储层酸敏特征及主控因素

茆书巍<sup>1,2</sup>, 焦滔<sup>3</sup>, 熊涛<sup>3</sup>, 秦智<sup>3</sup>, 高银山<sup>3</sup>, 鲍志东<sup>1,2</sup>,  
郑锡<sup>3</sup>, 李军建<sup>3</sup>, 宋健<sup>1,2</sup>, 何陵沅<sup>1,2</sup>, 覃勤<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油长庆油田分公司第五采油厂, 陕西 西安 710021)

**摘要:**基于 X-射线衍射、扫描电镜、薄片鉴定以及酸敏实验等测试分析手段,对鄂尔多斯盆地姬塬油田东部长 8<sub>2</sub>油层组储层酸敏性进行分析。结果表明:储层黏土质和钙质胶结严重,非均质性较强,主要的酸敏矿物为绿泥石和方解石/铁方解石,储层酸敏性主要以改善型—弱酸敏型为主;酸敏实验中,部分原始大孔隙样品出现减孔现象,主要是部分绿泥石包膜及针叶状晶体溶蚀、崩落所致,实验中 Fe(OH)<sub>3</sub>沉淀及凝胶体在短时间内对储层酸敏性影响有限,方解石/铁方解石的溶解能有效补偿 Fe(OH)<sub>3</sub>沉淀及凝胶体对储层的影响;在碳酸盐胶结物富集区, CaF<sub>2</sub>沉淀是储层物性变差的直接因素,总体呈现出盐酸对储层的改善程度要好于土酸;酸敏矿物较发育于水下分支河道微相,并呈现出近物源区绿泥石胶结物含量较高、远物源区方解石/铁方解石胶结物含量较高的分布特征;酸敏矿物的含量、类型、分布受沉积物源、沉积微相以及成岩作用等控制,特别是有机质热解-脱羧作用在成岩过程中与溶蚀作用、交代作用相伴生,对酸敏矿物的形成、类型及赋存状态具有重要影响。

**关键词:**酸敏矿物;孔隙特征;主控因素;成岩作用;长 8<sub>2</sub>油层组;姬塬油田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P618.130.2;TE122

文献标志码:A

## Acid Sensitivity Characteristics of Reservoir and Main Controlling Factors of Chang-8<sub>2</sub> Oil-bearing Interval in Eastern Jiyuan Oilfield of Ordos Basin, China

MAO Shu-wei<sup>1,2</sup>, JIAO Tao<sup>3</sup>, XIONG Tao<sup>3</sup>, QIN Zhi<sup>3</sup>, GAO Yin-shan<sup>3</sup>, BAO Zhi-dong<sup>1,2</sup>,  
ZHENG Xi<sup>3</sup>, LI Jun-jian<sup>3</sup>, SONG Jian<sup>1,2</sup>, HE Ling-yuan<sup>1,2</sup>, QIN Qin<sup>1,2</sup>

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. No. 5 Oil Production, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on XRD, SEM, slice image and acid sensitivity experiment, the acid sensitivity of reservoir of Chang-8<sub>2</sub> oil-bearing interval in the eastern Jiyuan oilfield of Ordos Basin was analyzed. The results show that the acid sensitivity of reservoir of Chang-8<sub>2</sub> oil-bearing interval is dominated with amendment-weak sensitivity; clay and calcareous cements of reservoir are serious, the heterogeneity is strong, and the main acid sensitivity minerals are chlorites and

收稿日期:2017-08-08

基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX05004-004)

作者简介:茆书巍(1986-),男,安徽巢湖人,理学博士研究生,E-mail:maow100@163.com。

通讯作者:鲍志东(1964-),男,安徽巢湖人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:baozhd@cup.edu.cn。

calcite minerals; the relative large porosities of some samples are reduced by the spallation of partial coniferous chlorite and chlorite film, which blocks the porosities and throats in the acid sensitivity experiment; meanwhile, the effects of the precipitation of ferric hydroxide ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) and gel on the reservoir physical properties are limited, and the corrosion of calcareous cement compensates the negative effects on reservoir; whereas, the calcium fluoride ( $\text{CaF}_2$ ) is the direct factor to the damage of physical properties in acid sensitivity experiment, indicating that the hydrochloric acid is more suitable for the reservoir improvement than mud acid; the underwater distributary channel is the suitable place for the development of acid mineral, including that the chlorite and calcite/ferrocalcite, and the chlorites cement with high content distribute well near the provenance, while the distribution of a relative high content of calcites/ferrocalcites is far away from provenance; the contents, types, and distribution of acid mineral are controlled by sedimentary provenance, sedimentary microfacies and diagenesis, especially the thermolysis and decarboxylation of organic material in Chang-8<sub>2</sub> oil-bearing interval occur along with the dissolution and metasomatism during the diagenetic stage, having an important influence on the formation, types and the existence condition of acid mineral.

**Key words:** acid sensitivity mineral; pore characteristic; main controlling factor; diagenesis; Chang-8<sub>2</sub> oil-bearing interval; Jiyuan oilfield; Ordos Basin

## 0 引言

伴随着世界石油勘探技术及能源需求的发展,非常规油气资源越来越受到重视<sup>[1-2]</sup>,其中致密砂岩储层是近年来研究的焦点。由于致密砂岩储层中黏土矿物类型多样、含量高,且钙质胶结往往较为严重,致使储层物性较差,油藏高效开发难度大<sup>[3]</sup>。近年来研究表明,致密砂岩储层酸化是有效开发油藏的重要途径之一。然而,在酸化过程中由于不同储层矿物组成不同,处置不当会损害储层并造成减产<sup>[4]</sup>。鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8<sub>2</sub> 致密砂岩储层是目前继罗 1 井区长 8<sub>1</sub> 储层开发之后又一重点层位,由于在开发过程中对储层损害方面认识不够,导致长 8<sub>2</sub> 储层单井注采能力较低,制约了油田的进一步开发,所以需要对该储层进行储层敏感性评价,特别是储层酸性研究,准确掌握储层酸性特征和酸敏矿物分布特征,有利于提出储层酸敏预防方案,调整储层开发措施<sup>[5]</sup>。柳娜等以矿物学分析为基础,指出在酸敏实验中绿泥石膜生成的氢氧化物沉淀严重影响储层微观孔喉,是储层酸敏的主要因素<sup>[6-7]</sup>;何永宏认为,姬塬地区储层渗透率降低主要是绿泥石、伊蒙混层矿物造成的,区域储层酸性受酸敏矿物的影响<sup>[8]</sup>。然而,这些研究多从酸敏实验结果分析储层酸敏特征,没有对储层酸性差异特征进行较为深入的分析,同时对造成储层酸敏的主控因素分析也不够

全面。因此,本文主要通过岩芯薄片观察、X-射线衍射分析、阴极发光(CL)图像、扫描电镜图像(SEM)以及酸敏实验对鄂尔多斯盆地姬塬油田东部长 8<sub>2</sub> 油层组储层酸性差异进行分析,揭示研究区储层酸敏矿物类型及分布特征,并在此基础上揭示影响储层酸敏性的主控因素,从而为油田增产上储决策提供技术支撑。

## 1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组具有多旋回、多层系、多套生储盖组合、多种能源共生等特点<sup>[9]</sup>。延长组碎屑岩属于典型内陆湖盆的沉积产物,在延长组沉积过程中,长 8 油层组沉积于盆地缓慢沉降的湖侵阶段,盆地周边发育典型的浅水三角洲沉积体系<sup>[10]</sup>,并发育大型岩性油藏,其原油主要来源于长 7 段及长 8 段烃源岩双重贡献<sup>[11]</sup>。目前,长 8 油层组是姬塬油田增储上产速度最快、开发效果最好的主力油层之一。长 8 油层组可以划分为长 8<sub>1</sub> 和长 8<sub>2</sub> 两大油层组(表 1),其中长 8<sub>2</sub> 油层组砂体厚度大,是目前研究的重点层位,特别是长 8<sub>2</sub> 油层组底部砂体连片分布,是目前油气开发的主力层位。

姬塬油田位于鄂尔多斯盆地中西部,区域构造属于伊陕斜坡,区内构造简单,具东高西低的宽缓单斜构造特征,平均坡度小于 1°,每千米坡降 6~7 m,多发育一系列小型的鼻状隆起构造<sup>[9,12]</sup>。本次研究范围主要位于姬塬油田东部麻黄山一线以东,王盘

表 1 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组长<sub>8</sub>油层组地层

Tab. 1 Strata Division of Chang-8 Oil-bearing Interval of Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan Area of Ordos Basin

地层系统					厚度/m	岩性描述	湖盆演化	
系	统	组	段	油层组			湖平面 低 高	基准面 旋回
三叠系	上统	延长组	第三段	长7	80~100	以深灰色、灰黑色泥岩为主,夹部分粉—细砂岩,局部可见少量凝灰岩薄层		
				长8 <sub>1</sub>	35~45	以灰色粉—细砂岩、暗色泥岩、粉砂质泥岩及灰色粉—细砂岩互层为主,可见少量煤线层		
			第二段	长8 <sub>2</sub>	40~50	以暗色泥岩、粉砂质泥岩及灰色粉—细砂岩互层为主,可见平行层理、交错层理,局部可见少量煤线		
				长9	80~120	以暗色泥岩、页岩夹灰色粉—细砂岩为主		
				长8				

山—樊学一线以西,北抵红柳沟以南第五采油厂管护区边界,南达刘崆塬第五采油厂管护区边界附近,面积约为 1 270 km<sup>2</sup>(图 1)。姬塬油田东部长<sub>8</sub><sub>2</sub>油层组物源区来自 NE 向<sup>[13]</sup>,沉积期为典型的浅水三角洲前缘沉积环境,沉积微相以水下分支河道、水下天然堤、支流间湾为主,河口坝不发育。沉积过

程中,河口坝和远砂坝砂体容易被后期水下分支河道冲刷变薄,甚至消失殆尽<sup>[14]</sup>,其岩性主要以灰色、深灰色细砂岩、泥质粉砂岩以及暗色泥岩为主。目前,长<sub>8</sub><sub>2</sub>油层组开发区主要位于研究区南部,油藏面积连片并且具有较高产能,是油田重点研究目标区。

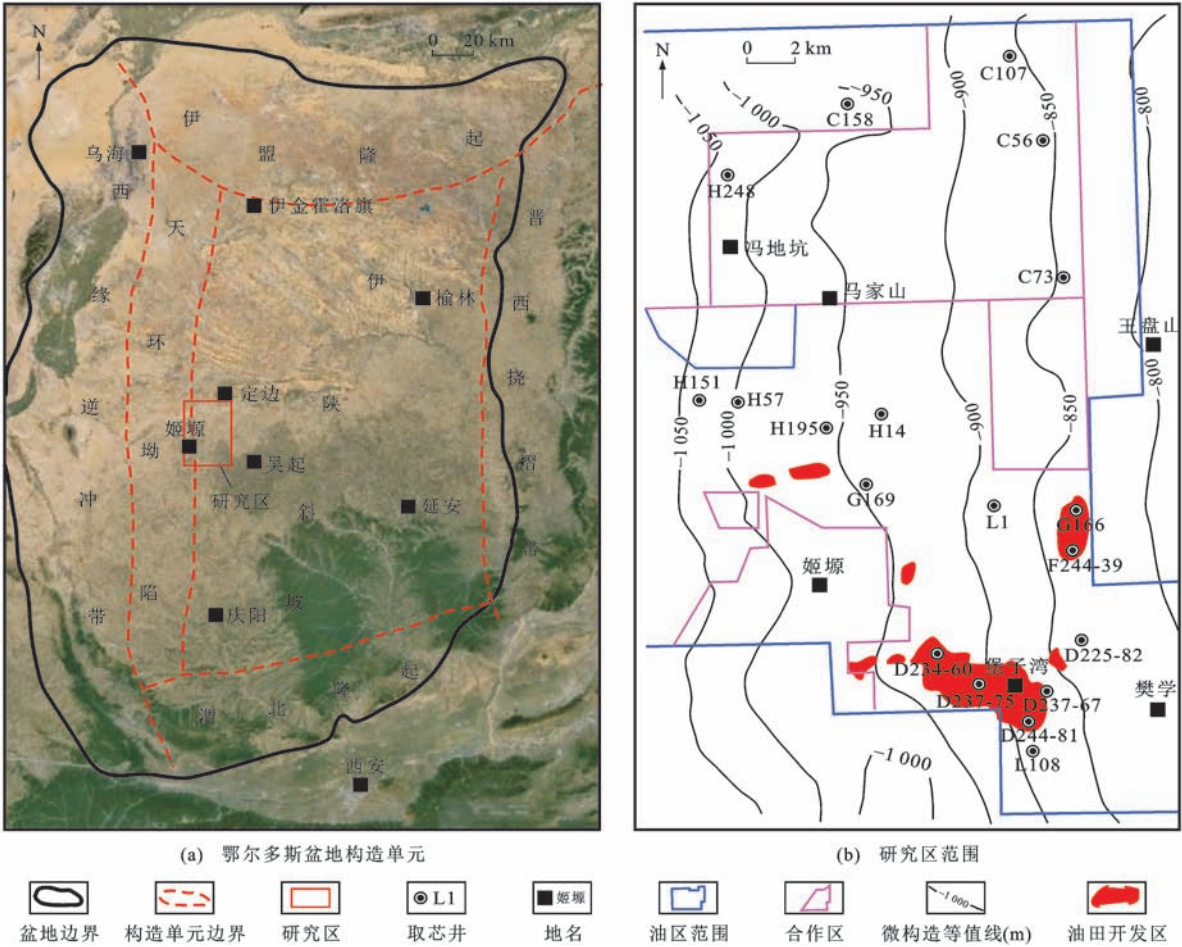


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元及研究区范围

Fig. 1 Structure Unit and the Study Area in Ordos Basin



2 样品采集及测试方法

在鄂尔多斯盆地姬塬油田长 8<sub>2</sub> 油层组共取芯 24 口井,采集 328 个样品分别进行了普通薄片、铸体薄片、阴极发光、扫描电镜以及 X-射线衍射全岩及黏土测试分析。其中,全岩与小于 2 μm 部分的 X-射线衍射分析在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成,所用设备为 Bruker AXS 公司生产的 D8 Focus X-射线衍射仪,设置扫描角度(2θ)为 4.5°~50.0°,步长为 0.02°,每步时间为 0.06 s,执行标准为 SY/T 5163—1995,精度误差小于 0.5%。

选取近物源区、远物源区及重点开发区长 8<sub>2</sub> 油层组 6 口井岩芯,共计 12 个样品进行酸敏实验。该实验在中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院分析实验中心完成,实验设备为自主研发成岩溶蚀模拟实验设备,执行标准为 SY/T 5385—2002<sup>[15]</sup>,实验温度设置为 30 ℃,地层水采用 NaCl : CaCl<sub>2</sub> : MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 为 8 : 1 : 1 的标准盐水。对实验样品分别进行酸前、酸后的物性测试分析。本次实验采用了盐酸(15% HCl)以及土酸(12% HCl + 3% FH),并分别对研究区长 8<sub>2</sub> 油层组进行了酸敏实验,实验步骤以盐酸酸敏实验为例(土酸酸敏实验亦比照进行)。

实验步骤:①将砂岩切制成直径为 2.5 cm、长度为 2.5~5.0 cm 的岩芯柱塞样;②用已配置与地层水矿化度相当的标准盐水(NaCl、CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O)正向注入驱替测定酸前样品渗透率,流速控制在低于 0.5 mL · min<sup>-1</sup><sup>[16]</sup>;③配置酸液,将 15% HCl 加入 1%缓蚀剂备用;④将样品反向注入 0.5~1.0 倍孔隙体积分数的 15% HCl,并收集流出液,静置反应 2 h;⑤正向注入地层水,排除残液,同时测定岩芯注酸后的渗透率,当流量稳定时停止。实验完毕后,结合酸敏指数(*I<sub>a</sub>*)对岩样酸敏性进行评价(表 2)<sup>[7]</sup>。酸敏指数表达式为

$$I_a = (K_f - K_i) / K_f \tag{1}$$

式中:*K<sub>f</sub>* 为注酸处理之前用与地层水相同矿化度的 KCl 测得的渗透率;*K<sub>i</sub>* 为注酸处理之后用与地层水相同矿化度的 KCl 测得的最小渗透率。

3 区域储层特征

3.1 储层岩石学特征

鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8<sub>2</sub> 油层组砂岩的主要骨架碎屑成分为长石、石英和岩屑,岩石类型为岩

表 2 酸敏性与酸敏指数的关系  
Tab. 2 Relationship Between Acid Sensitivity and Acid Sensitivity Index

酸敏指数范围	酸敏性与酸敏指数的关系
$I_a \leq 0$	改善型
$0 < I_a \leq 0.05$	无酸敏
$0.05 < I_a \leq 0.30$	弱酸敏
$0.30 < I_a \leq 0.70$	中等酸敏
$I_a > 0.70$	强酸敏

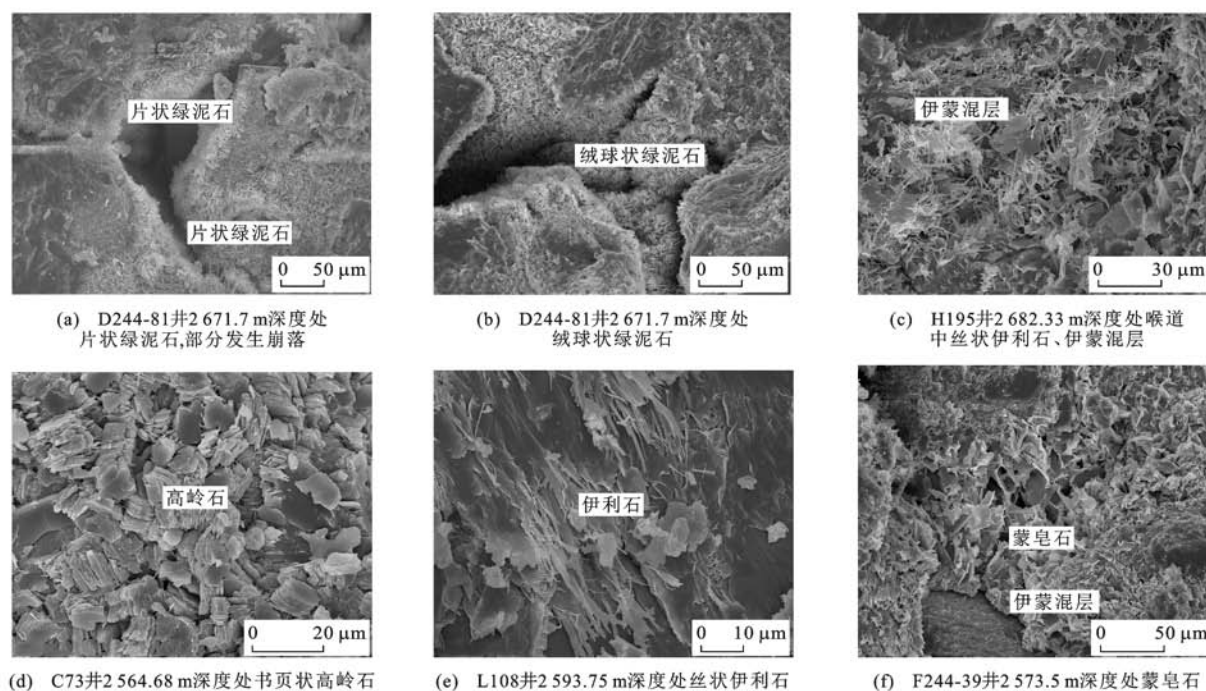
屑质长石砂岩和长石质岩屑砂岩<sup>[8]</sup>。石英以单晶石英为主,偶见多晶石英,含量(体积分数,下同)在 16.00%~46.00%之间,平均值为 28.55%;长石含量在 12.00%~45.00%之间,主要集中在 25.00%~40.00%,平均值为 31.25%,长石的蚀变作用较为普遍,以钾长石高岭石化为最常见的蚀变现象;岩屑含量在 20.00%~35.00%之间,平均值为 28.32%,岩屑中以高含量的中基性火山岩岩屑和变质岩岩屑为特征;填隙物平均含量为 18.30%,其中绿泥石和方解石/铁方解石含量分别占总填隙物含量的 31.20% 和 36.80%,其他填隙物含量较少。储层孔隙类型主要为粒间孔和粒内溶蚀孔,平均孔隙度为 9.6%,平均渗透率为 0.78 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。目前,国际上关于致密砂岩储层划分标准最为一致的渗透率界定为原地渗透率小于 0.1 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,但是中国使用的渗透率通常是在实验室常规或者模拟地下条件下测定的渗透率,与原地渗透率相差较大,后者的 0.1 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup> 相当于前者的 (0.5~1.0) × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup><sup>[17-19]</sup>。因此,姬塬地区长 8<sub>2</sub> 油层组砂岩储层应属于致密砂岩储层范畴。

3.2 储层酸敏矿物特征

3.2.1 黏土矿物

基于 X-射线衍射分析以及扫描电镜的测试分析实验,姬塬油田东部长 8<sub>2</sub> 油层组黏土矿物主要有绿泥石、伊利石、伊蒙混层、高岭石等。在黏土矿物中,绿泥石和伊利石含量相对最多,分别为 43.0% 和 25.8%;伊蒙混层及高岭石含量较低,分别为 16.4% 和 10.5%;蒙皂石含量较小,为 4.3%。

绿泥石在酸作用下极易发生反应,因此,黏土矿物的酸敏性问题主要是由绿泥石引起的<sup>[6]</sup>。扫描电镜分析表明:姬塬油田东部长 8<sub>2</sub> 油层组中的绿泥石主要为片状、针叶状集合体和绒球状集合体,其中针叶状多呈栉壳状附着于颗粒表面[图 2(a)],而绒球状多充填于孔隙中[图 2(b)],对储层物性影响最大,使渗透率降低;同时,在镜下可见伊利石片状集

图2 长 $8_2$ 油层组黏土矿物扫描电镜图像Fig. 2 SEM of Clay Cements in Chang- $8_2$  Oil-bearing Interval

合体呈栉壳状附着于颗粒表面,或者呈丝带或发丝状沿颗粒表面向孔隙与喉道处伸展[图2(e)].在发育过程中,丝状伊利石可能会进一步分散,当外来流体进入时造成伊利石微粒运移,进而堵塞孔道,伊蒙混层主要呈膜状附着在颗粒表面[图2(c)].高岭石多充填于岩石孔隙中,在扫描电镜下可见高岭石书页状集合体,但多数单晶因后期溶蚀而变得晶形不完整[图2(d)].蒙皂石在镜下较为少见[图2(f)],可能在成岩过程中大部分蒙皂石转化成了伊利石<sup>[20]</sup>。

### 3.2.2 碳酸盐矿物

镜下薄片观察及X-射线衍射全岩分析表明,碳酸盐胶结物是姬塬油田东部长 $8_2$ 油层组重要的胶结物类型(图3)。样品分析表明,方解石的平均含量为42.6%,铁方解石为50.2%,白云石及菱铁矿等为8.7%,碳酸盐胶结物多以充填孔隙的形式出现,部分长石溶蚀被方解石/铁方解石交代[图3(c)].镜下观察碳酸盐胶结物在晶形和成分上有较大差别,这主要是由于在成岩过程中受控于成岩流体成分、pH值、氧化还原电位等条件参数<sup>[21]</sup>。碳酸盐胶结物的酸敏性主要是由于方解石类物质与外界一定流体(如土酸)发生反应,生成沉淀、絮凝产物(如 $\text{CaF}_2$ 沉淀物),从而阻塞孔隙喉道,降低储层渗透性,使储层物性变差。因此,开展对研究区碳酸盐胶结物的特征及分布研究对于油气开采极为重要。

## 4 酸敏实验特征及结果分析

储层酸敏性是指酸液进入地层后与地层中的酸敏矿物(如绿泥石、方解石等)及地层流体发生反应,产生沉淀或释放出微粒使地层渗透率下降的程度<sup>[8,16]</sup>。研究储层酸敏性的实验包括酸液实验、浸气实验和流动酸敏实验,其目的在于检验岩样与处理地层用的酸(如盐酸、土酸)是否对地层造成损害及损害程度,以寻求有效的酸化处理方法,从而提高油气采收率。本次着重采用酸液-流动酸敏实验来研究姬塬油田东部长 $8_2$ 油层组储层酸敏特征及作用机理。

### 4.1 储层物性变化特征

对研究区长 $8_2$ 油层组取样岩芯做酸敏实验分析,结果显示,实验前后样品储层物性变化较大,储层酸敏性矿物发育,储层非均质性强(表2)。首先采用盐酸(15% HCl)实验,以D237-67井4块岩芯样品实验为例,盐酸酸敏反应前孔隙度为6.8%~14.7%,反应后孔隙度为8.9%~14.5%,然而其中大孔隙样品(如样品S4-1、S5-1)均呈现出减孔特征(图4、表3)。而地层水渗透率由反应前的 $(0.000\ 01\sim 3.834\ 00)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 改善为 $(0.078\ 90\sim 12.119\ 00)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,渗透率改善效果明显,酸敏性表现为改善型—无酸敏型(表3)。

在对D237-67井岩芯样品进行土酸(12% HCl+3% HF)实验后测得样品物性大部分出现孔渗变差



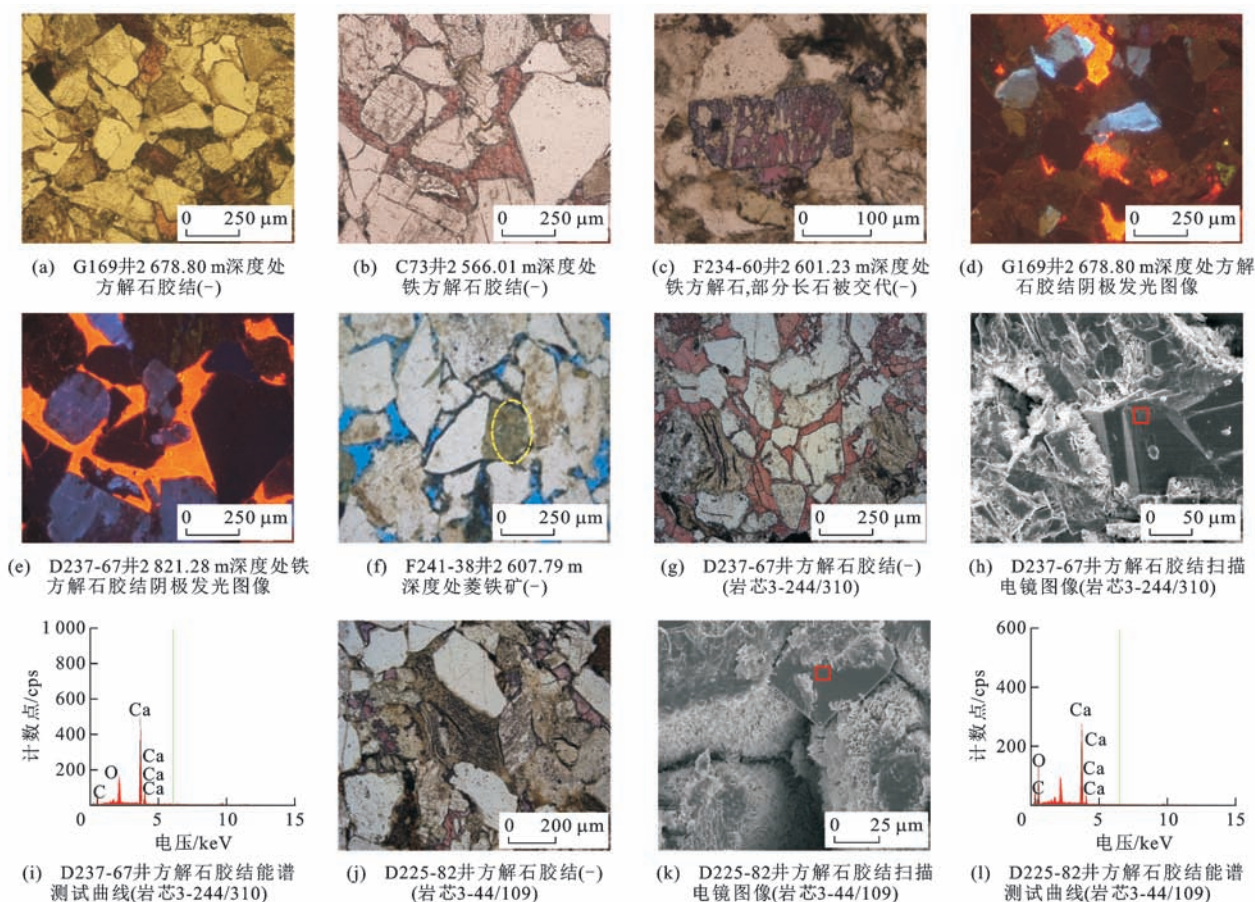
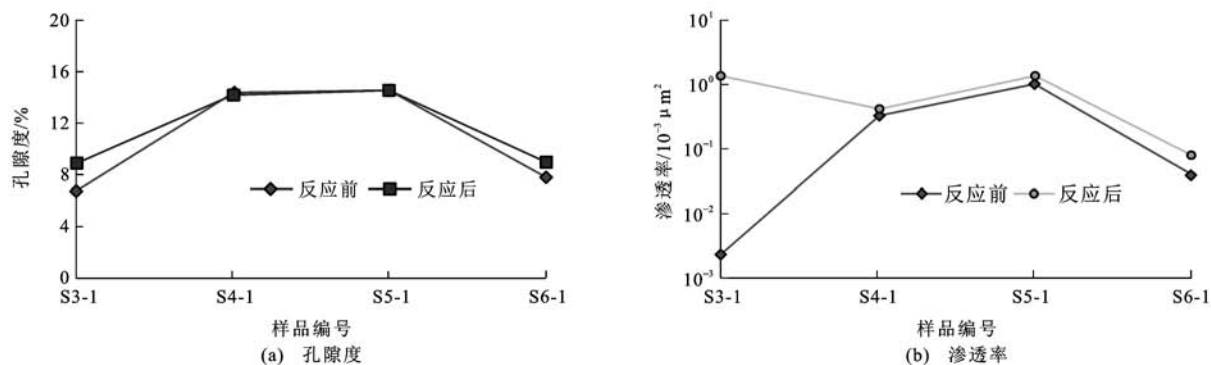
图3 长<sub>8</sub><sub>2</sub>油层组镜下碳酸盐胶结物类型及特征Fig. 3 Types and Characteristics of Carbonate Cements in Chang-8<sub>2</sub> Oil-bearing Interval

图4 D237-67井样品盐酸酸敏实验物性特征

Fig. 4 Characteristics of Physical Properties of Samples from Well D237-67 in Hydrochloric Acid Sensitivity Experiment

现象(图5),孔隙度由反应前的7.5%~14.9%变为反应后的8.3%~14.7%。部分大孔隙样品同样呈现出减孔特征,地层水渗透率由反应前的 $(0.003\ 1\sim 1.345\ 0)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 变化为反应后的 $(0.032\ 5\sim 1.243\ 0)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,酸敏性表现为改善型—弱酸敏型(表3)。

通过对研究区长<sub>8</sub><sub>2</sub>油层组12个岩芯样品进行酸敏性分析,结果表明:姬塬油田东部长<sub>8</sub><sub>2</sub>油层组储层酸敏性主要以改善型—弱酸敏型为主(图6、

表2);盐酸酸敏实验中,储层改善率为83.34%,无酸敏率和弱酸敏率均为8.33%;土酸酸敏实验中,储层改善率为41.67%,无酸敏率和弱酸敏率分别为16.67%和41.66%。同时,在酸敏实验中,盐酸对储层物性的改善程度明显好于土酸,因此,研究区长<sub>8</sub><sub>2</sub>油层组经盐酸酸化处理能较好地提高储层物性,进而提高油气采收率。

#### 4.2 酸敏特征分析

姬塬油田东部长<sub>8</sub><sub>2</sub>油层组以绿泥石、方解石/

表 3 长 8<sub>2</sub> 油层组酸敏实验敏感性评价结果

Tab.3 Results of Acid Sensitivity Evaluation of Reservoir in Chang-8<sub>2</sub> Oil-bearing Interval

类别	样品编号	井号	岩芯编号	孔隙度/%		地层水渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$		酸敏指数	酸敏程度评价
				反应前	反应后	反应前	反应后		
盐酸	S1-1	H195	10-84/97	5.1	15.4	0.071 4	0.078 9	-0.11	改善
	S2-1	H195	10-95/97	6.0	7.9	0.003 0	0.348 0	-116.17	改善
	S3-1	D237-67	3-68/310	6.8	8.9	0.002 4	1.419 0	-597.73	改善
	S4-1	D237-67	3-102/310	14.4	14.2	0.384 0	0.414 0	-0.08	改善
	S5-1	D237-67	3-232/310	14.7	14.5	1.055 0	1.347 0	-0.28	改善
	S6-1	D237-67	3-244/310	7.9	9.1	0.041 5	0.081 0	-0.95	改善
	S7-1	F241-38	2-81/115	12.5	11.9	0.129 0	0.122 0	0.05	无酸敏
	S8-1	F241-38	3-50/151	6.7	8.0	0.001 1	0.020 0	-18.42	改善
	S9-1	D225-82	3-44/109	7.5	8.1	0.001 1	0.002 4	-1.27	改善
	S10-1	D225-82	3-91/109	0.8	3.9	0.000 1	12.119 0	-121 189.00	改善
	S11-1	C56	10-6/45	6.3	7.2	0.018 0	0.015 3	0.15	弱酸敏
	S12-1	C73	9-115/138	9.6	10.1	0.139 2	2.085 2	-14.00	改善
土酸	S1-2	H195	10-84/97	15.3	14.4	0.060 3	0.050 2	0.17	弱酸敏
	S2-2	H195	10-95/97	6.5	7.2	0.001 5	1.714 0	-1 134.10	改善
	S3-2	D237-67	3-68/310	7.5	8.3	0.003 1	0.368 0	-118.87	改善
	S4-2	D237-67	3-102/310	14.3	14.1	0.405 0	0.350 0	0.01	无酸敏
	S5-2	D237-67	3-232/310	14.9	14.7	1.345 0	1.043 0	0.22	弱酸敏
	S6-2	D237-67	3-244/310	8.2	9.0	0.040 4	0.030 5	0.25	弱酸敏
	S7-2	F241-38	2-81/115	13.3	13.2	0.203 0	0.157 0	0.23	弱酸敏
	S8-2	F241-38	3-50/151	5.4	6.2	0.000 8	2.063 0	-2 431.78	改善
	S9-2	D225-82	3-44/109	7.8	7.7	0.001 3	0.001 8	-0.33	改善
	S10-2	D225-82	3-91/109	0.9	5.3	0.000 1	2.959 0	-29 589.00	改善
	S11-2	C56	10-6/45	6.8	7.5	0.018 0	0.017 5	0.04	无酸敏
	S12-2	C73	9-115/138	8.9	9.3	0.129 6	0.097 2	0.25	弱酸敏

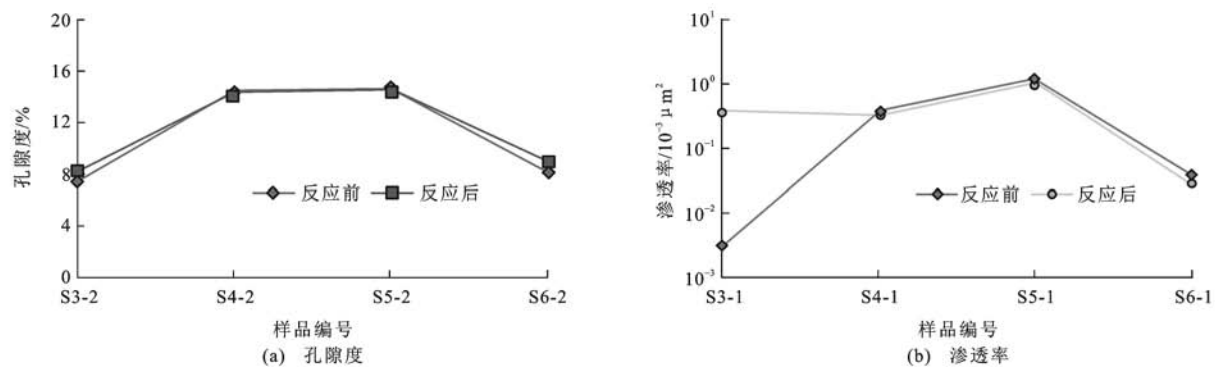
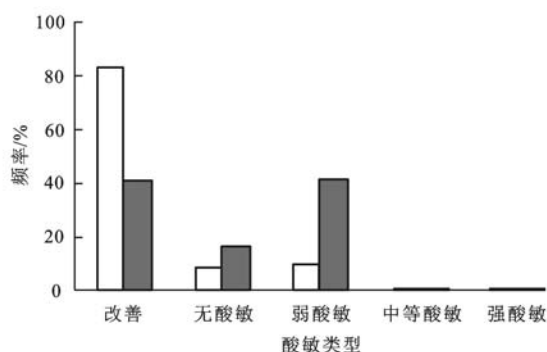


图 5 D237-67 井样品土酸酸敏实验物性特征

Fig. 5 Characteristics of Physical Properties of Samples from Well D237-67 in Mud Acid Sensitivity Experiment

铁方解石胶结为主。酸敏实验分析表明,盐酸和土酸对同一储层具有不同的酸敏表征,其中 D237-67 井样品 S6 在盐酸酸敏反应中为改善型,但是在土酸反应中表现为弱酸敏型。X-射线衍射、扫描电镜分

析表明,样品 S6 钙质胶结较为明显,岩石矿物组分为绿泥石(含量为 6.6%)、石英(35.1%)、长石(44.7%)和方解石(13.3%) [图 3(g)~(i)]。样品 S6 方解石含量较高,绿泥石含量相对较低。在盐酸

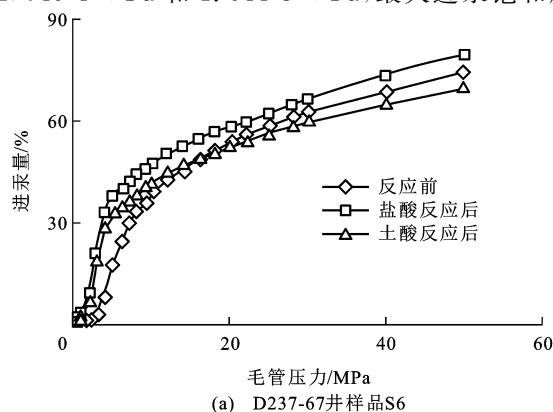
图6 长<sub>82</sub>油层组酸敏类型统计Fig. 6 Statistics of Acid Sensitivity Types in Chang-8<sub>2</sub> Oil-bearing Interval

和土酸反应过后,排驱压力由反应前的 3.357 6 MPa,分别减小到反应后的 0.735 5 MPa 和 1.619 6 MPa;最大进汞饱和度由反应前的 74.72%,分别转变为 78.93%和 70.52%。在盐酸酸敏反应中,方解石被大部分溶解,孔隙空间增加明显,储层物性得到改善,最大进汞饱和度得以提高,酸敏性表现为改善型;土酸酸敏实验中,样品 S6 中的方解石、绿泥石与土酸中的盐酸成分发生溶蚀,导致排驱压力下降,孔喉半径总体增大,但随后土酸中的 HF 与方解石/铁方解石反应生成的  $\text{CaF}_2$  沉淀及部分凝胶体阻塞了部分孔隙喉道,导致样品内部渗透率下降,从而使最大进汞饱和度减小,酸敏性表现为弱酸敏型[图 7(a)]。

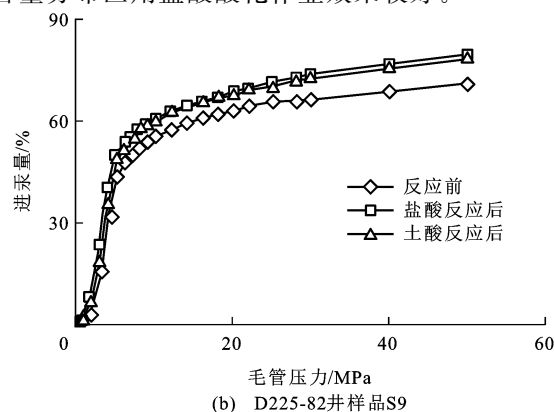
相比较而言,D225-82 井样品 S9 在两组实验中储层物性均得以改善,且以盐酸改善程度高(盐酸酸敏指数为-1.27)。样品 S9 岩石矿物组分为绿泥石(含量为 12.2%)、石英(37.8%)、长石(37.9%)、方解石/铁方解石(10.8%)和黏土(含量稍高于方解石)[图 3(j)~(l)]。样品 S9 经过盐酸、土酸酸敏反应过后,排驱压力由初始的 2.133 7 MPa,分别减小到 1.045 4 MPa 和 1.644 3 MPa,最大进汞饱和度

由反应前的 71.20%,分别提高到 79.16%和 78.62%,盐酸较土酸对储层物性的改善略好[图 7(b)]。在盐酸酸敏反应中,方解石/铁方解石发生溶蚀,是储层物性得以改善的最直接原因。虽然样品中绿泥石部分溶解释放出一定量的  $\text{Fe}^{2+}$ ,后经氧化生成部分  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀物阻塞孔隙喉道,但方解石溶蚀增孔效率大于绿泥石减孔效率,因此,敏感性整体表现为改善型;土酸酸敏反应中,由于土酸中的 HF 与方解石/铁方解石反应生成了  $\text{CaF}_2$  沉淀物,对于岩芯孔隙喉道具有直接的阻塞作用。由于土酸中的盐酸成分对钙质胶结物及绿泥石成分进行溶解反应增生部分孔隙,并且喉道中的自生石英被 HF 所溶蚀,又扩大了样品的孔隙喉道,总体上减缓了所生成的  $\text{CaF}_2$  沉淀物对孔隙喉道的阻塞效应,总体表现为改善型。这表明方解石/铁方解石含量在储层酸敏实验中占主导作用,对储层物性影响最大。

利用 ICP-AES 测试仪对浸泡 2 d 后的所有酸敏实验样品的盐酸反应后残液进行检测,发现溶液中均出现了大量的  $\text{Ca}^{2+}$  和一定量的  $\text{Fe}^{2+}$  及少量  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀物,这表明在实验中钙质胶结物以及绿泥石发生了溶解。综上所述,虽然实验过程中生成的部分  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀物对储层物性影响较大,但是只要一定量的钙质胶结物溶解,就可以补偿  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀物对样品渗透率的影响,整体上使样品物性得以改善。部分原始大孔隙样品在盐酸、土酸实验中,孔隙度有所减小[图 4(a)、图 5(a)、表 2],主要是孔隙表面内衬针叶状绿泥石反应过程中发生崩落阻塞了孔隙所致[图 2(a)]。同时,反应过程中生成的  $\text{CaF}_2$  沉淀物对样品孔隙喉道的影响最为直接,因此,碳酸盐胶结物是姬塬油田东部长<sub>82</sub>油层组储层酸敏性直接影响因素,在方解石/铁方解石高含量分布区用盐酸酸化作业效果较好。



(a) D237-67井样品S6



(b) D225-82井样品S9

图7 酸敏反应毛管压力-进汞量关系

Fig. 7 Relationships Between Capillary Pressure and Mercury Content in Acid Sensitivity Reaction



## 5 储层酸敏矿物主控因素

基于酸敏实验分析,姬塬油田东部长 $8_2$ 油层组储层酸敏性主要受绿泥石、方解石/铁方解石含量的控制。通过对沉积物源、沉积微相以及主要成岩作用的分析,探讨绿泥石胶结物及方解石/铁方解石胶结物的形成、分布特征等,进而分析影响研究区储层酸敏性的主控因素。

### 5.1 沉积物源

姬塬地区长 $8_2$ 沉积期物源主要来自NE向的阴山古陆和NW向的阿拉善古陆,而姬塬地区东部则以NE向物源为主<sup>[13,22]</sup>。姬塬地区早期火山活动较为强烈,喷出了富含钙的大量基性喷出岩和碱性喷出岩,而长 $8$ 沉积期碎屑物主要来自火山弧物源区<sup>[23]</sup>。薄片鉴定和X-射线衍射分析表明,研究区以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,在火山岩岩屑含量富集区,绿泥石含量相对较高(图8),这是由于火山岩岩屑中的黑云母、角闪石等在成岩作用阶段会发生蚀变,为绿泥石形成提供了大量的铁、镁离子等<sup>[24-25]</sup>,从而造成绿泥石的发育。同时,在长石高含量区,碳酸盐岩胶结物含量相对较高(图9),且薄片观察可见未被铁方解石完全胶结的溶蚀长石[图4(c)],表明长石溶蚀先于碳酸盐岩胶结物沉淀,且为碳酸盐岩胶结物形成提供了重要的物质 $\text{Ca}^{2+}$ 。钙长石溶解方程式为<sup>[26]</sup>

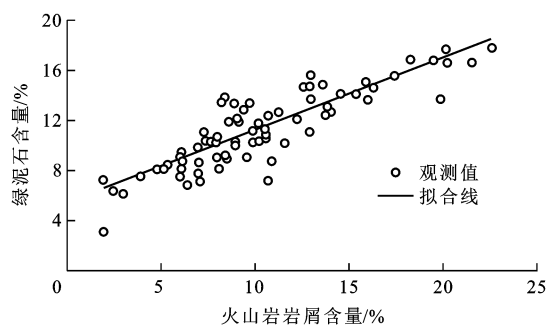
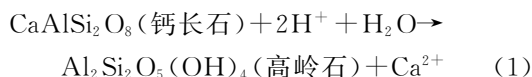


图8 火山岩岩屑含量与绿泥石含量关系

Fig. 8 Relationship Between Contents of Volcanic Fragment and Chlorite

### 5.2 沉积微相

姬塬油田东部长 $8_2$ 沉积期主要发育浅水三角洲前缘水下分支河道微相、水下天然堤微相以及支流间湾微相,河口坝欠发育(图10)。不同沉积相带或沉积微相的沉积环境存在较大差异,在水动力较强区域碎屑颗粒的分选性和磨圆度较好,粒度较粗,

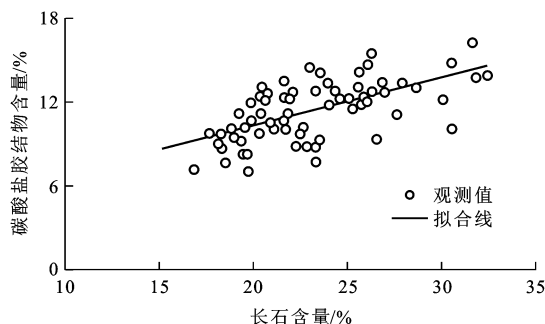
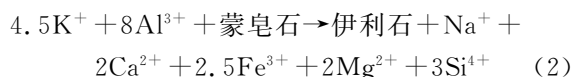


图9 长石含量与碳酸盐胶结物含量关系

Fig. 9 Relationship Between Contents of Feldspar and Carbonate Cements

原始粒间孔隙较为发育<sup>[27]</sup>,可以为后期酸敏矿物提供一定的赋存空间。

岩芯观察发现,纵向上伴随着沉积相带的变化往往呈现出在砂泥岩分界面极易形成钙质胶结物的现象。长 $8_2$ 油层组钙质胶结主要是泥页岩层中的黏土矿物(如蒙皂石)在沉积初期碱性孔隙流体作用下发生了伊利石化,进而生成绿泥石,同时为碳酸盐岩胶结物的形成提供了 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等物质基础。其涉及的化学反应为<sup>[28]</sup>



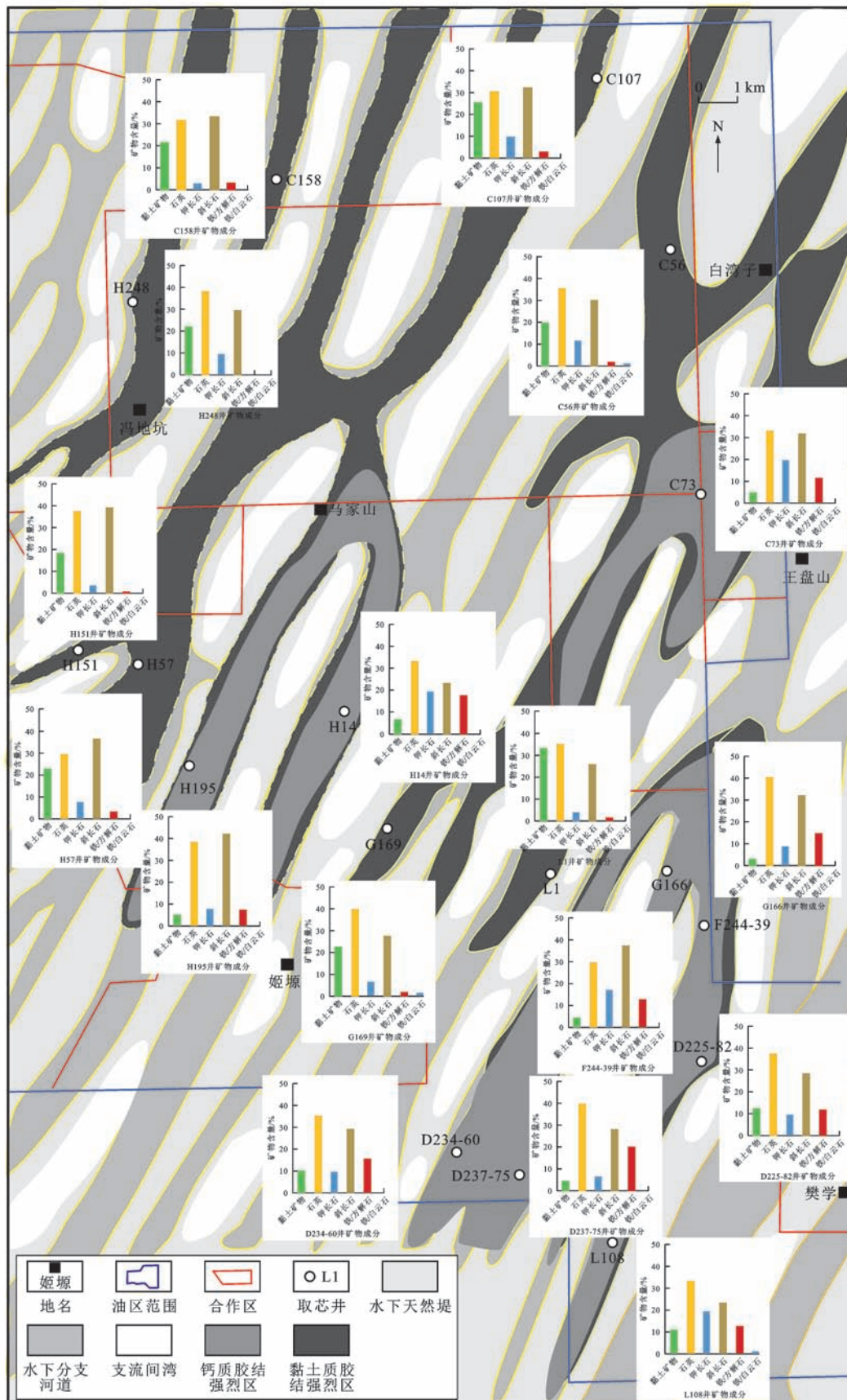
结合取样点、镜下观察及样品X-射线衍射分析表明,水下分支河道是酸敏矿物发育的主要场所,且近物源区黏土质胶结物(以绿泥石为主)含量较高,远物源区钙质胶结物(以方解石/铁方解石为主)含量相对较高(图10)。因此,沉积微相直接或者间接地控制胶结物的形成、分布及含量,进而影响储层酸敏性。

### 5.3 成岩作用

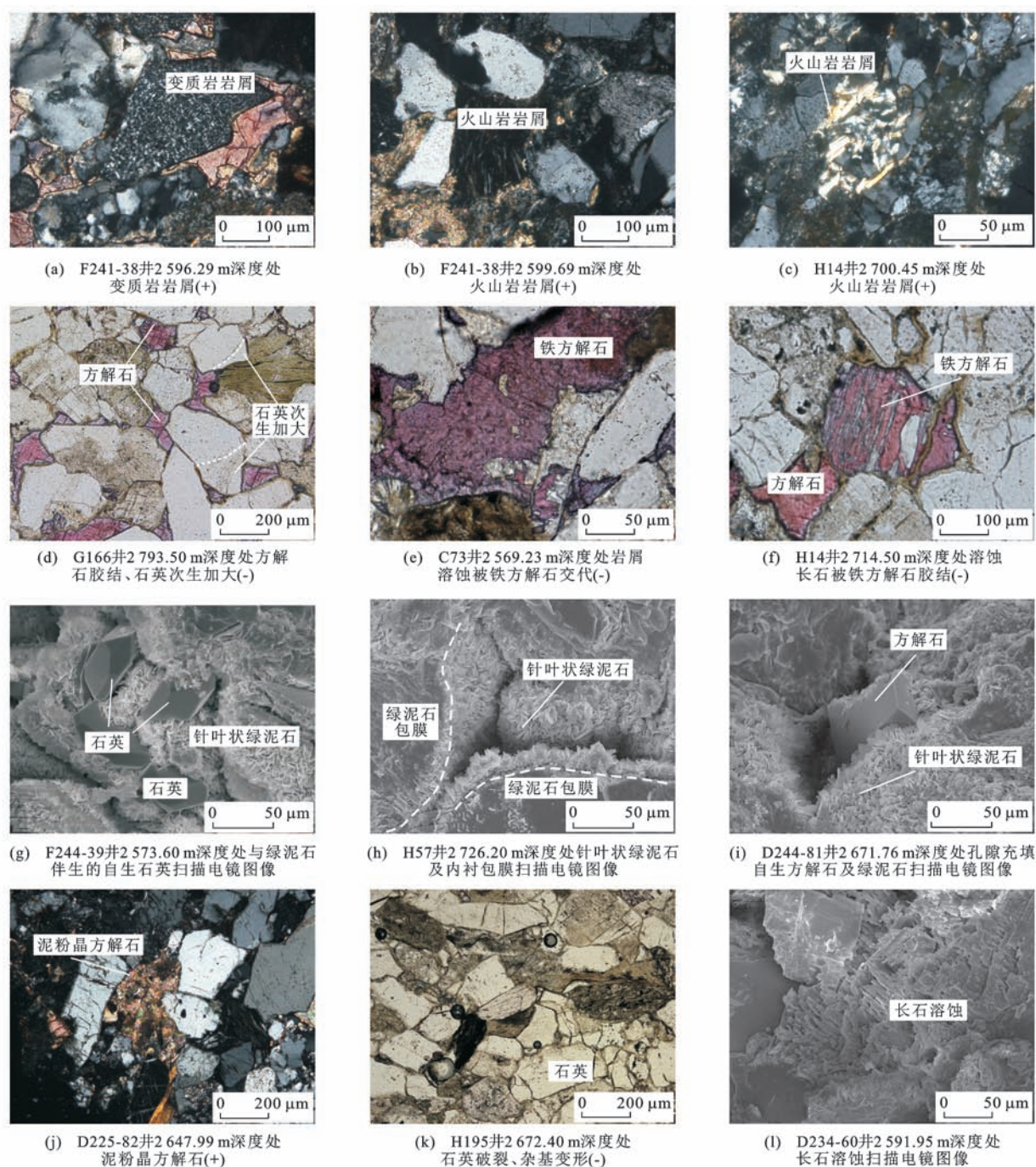
成岩作用对储层物性影响较大,特别是沉积物在沉积后经历地层温度、压力及pH值的变化导致地下成岩流体组分发生变化,从而造成部分矿物溶蚀以及酸敏矿物的生成,对储层物性影响最大。在酸化作业过程中,酸化产物产生的微粒难以有效排出是形成储层酸敏性的直接原因<sup>[10]</sup>。在成岩过程中,成岩流体演化伴随着溶蚀作用、交代作用,直接影响酸敏矿物的形成、类型与分布。

#### 5.3.1 溶蚀作用

研究区矿物溶蚀作用现象普遍,部分长石在强烈溶蚀作用下呈残骸状。薄片观察分析可见基性火山岩岩屑,其次为变质岩岩屑[图11(a)~(c)、(f)]。部分未被胶结物充填的溶蚀孔隙表明其在碳酸盐胶结物大量形成前已发生溶蚀。在成岩早期弱碱性孔

图 10 长 8<sub>2</sub> 油层组沉积微相及酸敏矿物分布特征Fig. 10 Distribution of Sedimentary Microfacies and Acid Sensitivity Mineral in Chang-8<sub>2</sub> Oil-bearing Interval



图 11 长 $8_2$ 油层组储层岩石矿物显微照片Fig. 11 Micrographs of Rock Mineral in Chang-8<sub>2</sub> Oil-bearing Interval

隙流体作用下,部分钾长石发生溶蚀,进而生成绿泥石及石英<sup>[29]</sup>,亦是储层酸敏矿物形成的重要来源。在扫描电镜观察中可见自生的绿泥石和石英[图 11(g)]是这一物质转换的有力证据。在钾长石、钙长石等溶解及蒙皂石转化过程中,释放出的大量 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等离子对黏土质及碳酸盐岩类胶结物的形成提供了充足的物质来源。同时,形成的次生孔隙也是绿泥石、方解石/铁方解石等胶结物发育的重要场所。溶蚀作用伴随着酸敏矿物的生

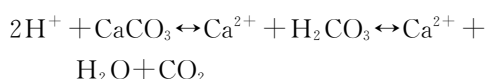
成与再分布,对其他成岩作用具有重要影响。

### 5.3.2 有机质热解-脱羧作用

在浅埋藏成岩环境,砂泥岩界面区域过饱和的碱性流体是早期泥晶、微晶方解石胶结物[图 11(j)]形成的直接原因。伴随着埋深增大,地层温度升高以及压力、pH 值增大,有机质热演化强度增强,释放出的有机酸及一定量 $\text{CO}_2$ 使孔隙流体的酸性增强,部分绿泥石、长石以及早期形成的方解石发生溶蚀,导致孔隙流体中出现大量 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$



等。在压实作用下,部分原先在颗粒表面吸附的极细黏土微粒受到富  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  孔隙流体的介入,形成了初始的自生绿泥石包膜[图 11(h)]。伴随着孔隙流体继续介入,绿泥石继续发育,形成针叶状绿泥石,并且可在孔隙间形成方解石晶体[图 11(i)]。在成岩作用中后期,当高成熟阶段有机质热演化生成的  $\text{CO}_2$  分压降低时,这些  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  进入到方解石晶格中,从而形成铁方解石<sup>[27]</sup>。在成岩作用后期,伴随着地层温度和压力继续增大,部分有机酸发生脱羧作用生成了大量的  $\text{CO}_2$ 。纪友亮等认为后期形成的铁方解石没有被溶解的原因是高成熟有机质释放大量的  $\text{CO}_2$ ,从而使碳酸盐岩溶解进行逆反应,造成了晚期铁方解石不易被溶解。其化学反应为<sup>[30]</sup>



除此之外,随着热成熟反应的进行,释放的有机酸和  $\text{CO}_2$  含量会逐渐降低,导致储层孔隙流体压力及酸度减小<sup>[31-33]</sup>,同时又由于孔隙中发育的绿泥石胶结物在一定程度上阻碍了酸性流体对铁方解石的溶解,造成研究区铁方解石较为发育。

### 5.3.3 交代作用

交代作用是姬塬油田东部长  $8_2$  油层组酸敏矿物形成的重要成岩类型,碎屑颗粒、长石等被绿泥石、硅质、铁方解石等交代[图 3(c)和图 11(e)、(f)]。交代作用对储层在成岩作用过程中孔隙演化具有一定影响<sup>[34]</sup>,但由于交代作用只是矿物之间的转化,所以对储层孔隙空间变化影响较小。交代作用为酸敏矿物提供了生长发育的场所,是储层成岩中后期重要的成岩作用类型,特别是铁方解石交代长石是储层致密及酸敏性的重要原因。

## 5.4 小结

综上所述,储层酸敏性受沉积物源、沉积微相以及成岩作用的共同影响。沉积物源控制了研究区储层酸敏矿物形成的物质基础;沉积微相控制了酸敏矿物的分布;成岩作用过程中,溶蚀作用、有机质热解-脱羧作用及交代作用相互伴生,共同影响着酸敏矿物的类型及赋存状态。

## 6 结 语

(1)鄂尔多斯盆地姬塬油田东部长  $8_2$  油层组储层酸敏性以改善型—弱酸敏型为主。主要的酸敏矿物为绿泥石和方解石/铁方解石,在酸敏实验过程中,部分绿泥石发生溶蚀作用,生成的部分  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀阻塞孔径,但是钙质胶结物的溶解补偿了  $\text{Fe}(\text{OH})_3$

沉淀及凝胶体对样品物性的影响,钙质胶结物发生溶解对储层物性起到了直接的改善作用。

(2)在酸敏实验中,原始大孔隙的致密砂岩样品中出现减孔现象,主要是绿泥石包膜及针叶状晶体的溶解、崩落后所致。钙质胶结物对储层酸敏性影响最为有效,在碳酸盐胶结物富集区,  $\text{CaF}_2$  沉淀是储层物性变差的直接因素,总体呈现出盐酸对储层的改善程度要好于土酸。

(3)水下分支河道微相是酸敏矿物发育的有效场所,研究区长  $8_2$  油层组呈现出近物源区绿泥石胶结物含量较高、远物源区方解石类胶结物含量相对较高分布特征。在火山岩岩屑含量富集区,绿泥石含量相对较高;在长石高含量区,碳酸盐岩胶结物含量相对较高。

(4)酸敏矿物的含量、类型、分布受沉积物源、沉积微相以及成岩作用等控制,特别是有机质热解-脱羧作用在成岩过程中与溶蚀作用、交代作用相伴生,对酸敏矿物的形成、类型及赋存状态具有重要影响。

## 参 考 文 献 :

## References :

- [1] 李玉喜,张金川.我国非常规油气资源类型和潜力[J].国际石油经济,2011(3):61-67.  
LI Yu-xi,ZHANG Jin-chuan. Types of Unconventional Oil and Gas Resources in China and Their Development Potential[J]. International Petroleum Economics,2011(3):61-67.
- [2] 胡文瑞.我国非常规天然气资源、现状、问题及解决方案[J].石油科技论坛,2012,31(6):1-5.  
HU Wen-rui. Resources, Current Situation, Problems and Solutions of Unconventional Natural Gas[J]. Oil Forum,2012,31(6):1-5.
- [3] 李勇明,郭建春,赵金洲.裂缝性低渗透油藏酸岩反应理论模型研究及应用[J].油气地质与采收率,2004,11(2):37-39.  
LI Yong-ming, GUO Jian-chun, ZHAO Jin-zhou. Research and Application on Theoretical Model of Acid-rock Reaction for Fractured and Low-permeability Oil Reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2004,11(2):37-39.
- [4] ECONAMIDES M J, NOLTE K G. 油藏增产措施[M]. 张宏选,译.北京:石油工业出版社,1991.  
ECONAMIDES M J, NOLTE K G. Reservoir Stimulation[M]. Translated by ZHANG Hong-xuan. Beijing: Petroleum Industry Press,1991.
- [5] 谢 姗,李治平,姜兆辉,等.大庆三肇地区扶余油层储层敏感性分析[J].天然气与石油,2011,29(6):63-65.

- XIE Shan, LI Zhi-ping, JIANG Zhao-hui, et al. Analysis of Sensitivity of Fuyu Oil Reservoir in Daqing Sanzhao Area[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(6): 63-65.
- [6] 柳娜, 南珺祥, 刘伟. 鄂尔多斯盆地中部长6和长8储层特征及酸敏机理[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 588-591.
- LIU Na, NAN Jun-xiang, LIU Wei. Reservoir Characteristics and Acid Sensitivity Mechanism of Chang-6 and Chang-8 Reservoirs in the Central of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 588-591.
- [7] 邓钧耀, 胡雪涛, 陈建. 麻柳场、丹凤场构造致密砂岩储层酸敏性评价[J]. 吐哈油气, 2010, 15(2): 269-271, 289.
- DENG Jun-yao, HU Xue-tao, CHEN Jian. Evaluation on Acid Sensitivity of Tight-sandstone Reservoir in Maliuchang and Danfengchang Structure[J]. Tuha Oil and Gas, 2010, 15(2): 269-271, 289.
- [8] 何永宏. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长8储层敏感性研究[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 87-91.
- HE Yong-hong. Research on Sensitivity of Chang-8 Reservoir of Jiyuan Oilfield in Ordos Basin[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2014, 21(1): 87-91.
- [9] 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.
- HE Zi-xin. The Evolution and Petroleum of Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [10] 陈朝兵, 朱玉双, 陈新晶, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长 $8^2$ 储层沉积成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 685-693.
- CHEN Zhao-bing, ZHU Yu-shuang, CHEN Xin-jing, et al. Sedimentation and Diagenesis of Chang- $8^2$  Reservoir in the Yanchang Formation in Jiyuan Region, Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(5): 685-693.
- [11] 郑荣才, 牛小兵, 梁晓伟, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田延长组原油性质与来源分析[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 142-146.
- ZHENG Rong-cai, NIU Xiao-bing, LIANG Xiao-wei, et al. Study on the Property and Origin of Crude Oil of Yanchang Formation in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 142-146.
- [12] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- YANG Jun-jie. Tectonic Evolution and Distribution of Petroleum in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [13] 赵小强, 万友利, 易超, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长8段沉积相研究[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 94-99.
- ZHAO Xiao-qiang, WAN You-li, YI Chao, et al. Study on Sedimentary Facies of Chang-8 Member in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 94-99.
- [14] 韩永林, 王成玉, 王海红, 等. 姬塬地区长8油层组浅水三角洲沉积特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1057-1063.
- HAN Yong-lin, WANG Cheng-yu, WANG Hai-hong, et al. Sedimentary Characteristics of Shallow-water Deltas in Chang-8 Subsection of Yanchang Formation, Jiyuan Area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1057-1063.
- [15] SY/T 5358—2002, 储层敏感性流动实验评价方法[S].
- SY/T 5358—2002, Experimental Evaluation Method of Reservoir Sensitivity[S].
- [16] 赵峥延, 蒋建勋, 张哲, 等. 鄂尔多斯盆地环县地区长8储层敏感性评价[J]. 油气藏评价与开发, 2013, 3(4): 12-15.
- ZHAO Zheng-yan, JIANG Jian-xun, ZHANG Zhe, et al. Sensitivity Evaluation of Chang-8 Reservoir in Huan County of Ordos Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(4): 12-15.
- [17] HOLDITCH S A. Tight Gas Sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6): 86-93.
- [18] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. “连续性”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-681.
- ZOU Cai-neng, TAO Shi-zhen, YUAN Xuan-jun, et al. Global Importance of “Continuous” Petroleum Reservoirs: Accumulation, Distribution and Evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-681.
- [19] 郭迎春, 庞雄奇, 陈冬霞, 等. 致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 717-722.
- GUO Ying-chun, PANG Xiong-qi, CHEN Dong-xia, et al. Progress of Research on Hydrocarbon Accumulation of Tight Sand Gas and Several Issues for Concerns[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(6): 717-722.
- [20] 石广仁. 蒙皂石向伊利石转化的溶解沉淀模型[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 47-50.
- SHI Guang-ren. Dissolution-precipitation Model for Smectite-illite Transformation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 47-50.
- [21] 姚涇利, 王琪, 张瑞, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长

- 组砂岩中碳酸盐胶结物成因与分布规律研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 943-950.
- YAO Jing-li, WANG Qi, ZHANG Rui, et al. Origin and Spatial Distribution of Carbonate Cements in Yanchang Fm. (Triassic) Sandstones Within the Lacustrine Center of Ordos Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 943-950.
- [22] 银晓, 罗顺社, 李鑫, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长 8 时期物源分析[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(3): 59-63.
- YIN Xiao, LUO Shun-she, LI Xin, et al. Provenance Analysis of Chang-8 Period in Jiyuan Area of Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(3): 59-63.
- [23] 王昌勇, 郑荣才, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地早期构造演化与沉积响应: 以姬塬地区长 8—长 6 油层组为例[J]. 中国地质, 2010, 37(1): 135-143.
- WANG Chang-yong, ZHENG Rong-cai, LI Shi-xiang, et al. Early Tectonic Evolution and Sedimentary Response of Ordos Basin: A Case Study of Chang-8-Chang-6 Oil Layers of Yanchang Formation in Jiyuan Area[J]. Geology in China, 2010, 37(1): 135-143.
- [24] 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): 72-78.
- YAO Jing-li, WANG Qi, ZHANG Rui, et al. Forming Mechanism and Their Environmental Implications of Chlorite-coatings in Chang-6 Sandstone(Upper Triassic) of Huaqing Area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 72-78.
- [25] 徐黎明, 李志成, 梁晓伟, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 8<sup>2</sup> 优质储集层成因机理研究[J]. 古地理学报, 2016, 18(2): 237-250.
- XU Li-ming, LI Zhi-cheng, LIANG Xiao-wei, et al. Formation Mechanism for the High-quality Reservoir in the Chang-8<sup>2</sup> Interval of Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(2): 237-250.
- [26] 赖兴运, 于炳松, 陈军元, 等. 碎屑岩骨架颗粒溶解的热力学条件及其在克拉 2 气田的应用[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2004, 34(1): 45-53.
- LAI Xing-yun, YU Bing-song, CHEN Jun-yuan, et al. Thermodynamic Conditions for Dissolution of Petrogenetic Minerals of Clastic and Its Application in Kela2 Gasfield[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2004, 34(1): 45-53.
- [27] 刘昊伟, 王健, 刘群明, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组长 8 油层组有利储集层分布及控制因素[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 285-294.
- LIU Hao-wei, WANG Jian, LIU Qun-ming, et al. Favorable Reservoir Distribution and Its Controlling Factors of the Chang-8 Interval of Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan Area, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 285-294.
- [28] LONGSTAFF F J. Clays and Resource Geology[M]. Calgary: Mineralogical Association of Canada, 1981.
- [29] JEFHY D G. Origin and Growth Mechanism of Authigenic Chlorite in Sandstones of the Lower Vicksburg Formation, South Texas[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(1): 27-36.
- [30] 纪友亮, 赵澄林, 刘孟慧. 东濮凹陷沙河街组碎屑岩成岩作用与有机质演化的关系[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 148-155.
- JI You-liang, ZHAO Cheng-lin, LIU Meng-hui. Diagenesis of Clastic Rock in Shahejie Formation, Dongpu Depression and Its Relation to Organic Matter Evolution[J]. Oil and Gas Geology, 1995, 16(2): 148-155.
- [31] 吴松涛, 朱如凯, 崔京钢, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 湖相泥页岩孔隙演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 167-176.
- WU Song-tao, ZHU Ru-kai, CUI Jing-gang, et al. Characteristics of Lacustrine Shale Porosity Evolution of Triassic Chang-7 Member in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 167-176.
- [32] 郝芳, 姜建群, 邹华耀, 等. 超压对有机质热演化的差异抑制作用及层次[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2004, 34(5): 443-451.
- HAO Fang, JIANG Jian-qun, ZOU Hua-yao, et al. Differential Retardation of Organic Matter Maturation by Overpressure[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2004, 34(5): 443-451.
- [33] 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等. 超压环境有机质热演化和生烃作用机理[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 9-18.
- HAO Fang, ZOU Hua-yao, FANG Yong, et al. Kinetics of Organic Matter Maturation and Hydrocarbon Generation in Overpressure Environment[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 9-18.
- [34] 钟大康, 祝海华, 孙海涛, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 61-68.
- ZHONG Da-kang, ZHU Hai-hua, SUN Hai-tao, et al. Diagenesis and Porosity Evolution of Sandstones in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 61-68.