

文章编号: 1000-0550(2003)03-0373-08

# 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<sup>①</sup>

史基安<sup>1</sup> 王金鹏<sup>1</sup> 毛明陆<sup>2</sup> 王琪<sup>1</sup> 郭正权<sup>2</sup> 郭雪莲<sup>1</sup> 卢龙飞<sup>1</sup>

1(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学重点实验室 兰州 730000)

2(中国石油长庆油田公司勘探开发研究院 西安 710004)

**摘要** 鄂尔多斯盆地西峰油田的储集岩—三叠系延长组长6—8段砂岩是典型的低孔低渗储集岩,具有粒径细、成分成熟度低、磨圆度较差、分选性较好的特点。运用薄片鉴定、粘土矿物、稳定同位素分析及物性分析等资料,研究了延长组长6—8段的成岩作用特征,分析了它们对储层物性的影响状况,确定了储层砂岩的成岩作用阶段,指出西峰油田优质储层的发育取决于储集砂岩中粘土膜形成作用、烃类侵位作用和溶蚀作用的发育状况。

**关键词** 鄂尔多斯盆地 三叠系延长组 成岩作用

**第一作者简介** 史基安 男 1958年出生 研究员 储层沉积学与储层地球化学

**中图分类号** P618.130.2<sup>+</sup>1 **文献标识码** A

碎屑岩储层的成岩演化是一个复杂的物理化学变化过程,尤其是发生在成岩阶段中晚期的化学变化常对储层孔隙结构和矿物组成的变化产生重要影响,而这种变化通常是由孔隙流体性质的改变所引起的,来自于烃源岩的富含有机酸的酸性流体可改变储层砂岩孔隙中的地球化学环境,造成砂岩溶蚀作用的发生以及矿物组成和物性条件的改变。

鄂尔多斯盆地西峰油田的主力产油层为三叠系延长组长6—8段湖相砂岩,该砂岩是典型的低孔低渗储集岩,其成岩作用类型非常复杂,在埋藏成岩过程中各种成岩作用对砂岩的原生孔隙的保存和次生孔隙的发育都产生一定影响,次生孔隙在长6—8段砂岩中发育非常广泛,成为砂岩最主要的储集空间之一,它的发育状况直接影响了储集砂岩的孔渗条件,因此储集砂岩成岩作用的研究对西峰油田储层评价和预测具有重要意义。

## 1 储集砂岩的岩石学特征

西峰油田三叠系延长组长6—8段储集砂岩岩性特征明显受控于其所处沉积环境和物源区性质,主要为河流、三角洲和浊流沉积环境中形成的碎屑岩(图版I-1,2),并且大都具有沉积时离物源区较近,搬运距离较短,堆积速度相对较快的特点。镜下观察及统计表明,砂岩以长石砂岩为主(占51.3%),其次为岩屑

长石砂岩(占30.7%)和长石岩屑砂岩(占15.5%)。砂岩的成分成熟度普遍较低,碎屑颗粒中石英的含量仅为48.6%,长石含量达到30.9%,岩屑含量为21.5%(图1、图版I-1,2)。砂岩的粒度普遍较细,70%以上为细砂岩,中砂岩及粗砂岩的含量不到10%。长8段砂岩的粒径相对较粗,中砂岩的含量也明显高于其它层段,这主要与长8段沉积时水动力较强有关。长6—8段砂岩的分选性普遍较好,但磨圆度相对较差,绝大多数碎屑颗粒为次棱角状,反映了沉积区距离物源较近,沉积水动力较强的特点。大多数砂岩的杂基含量为2%~8%,以陆源杂基为主,少量样品存在呈微晶或泥晶基质的碳酸盐内杂基,长8段砂岩(特别是长8<sup>1</sup>砂岩)杂基含量明显较低,长7段砂岩的杂基含量普遍较高。

## 2 储集砂岩的成岩作用特征

### 2.1 压实作用

西峰油田三叠系延长组砂岩经历了中等强度的压实作用,常见的压实现象有:塑性的云母碎片发生绕曲、泥岩屑挤压变形,形成假杂基,刚性颗粒断裂等,反映碎屑颗粒变形显著。砂岩碎屑颗粒间的接触关系以线接触、点—线接触和点接触为主。随着埋深的加大等,机械压实作用使碎屑颗粒由游离状、点接触状逐步调整为线接触状,造成粒间孔隙的大量损失。机械压实作用影响的最大埋藏深度,通常认为在2500m左

<sup>①</sup> 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043310)、国家自然科学基金项目(批准号:40072050、40272065)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-128)资助

收稿日期:2003-01-21 收修改稿日期:2003-06-21

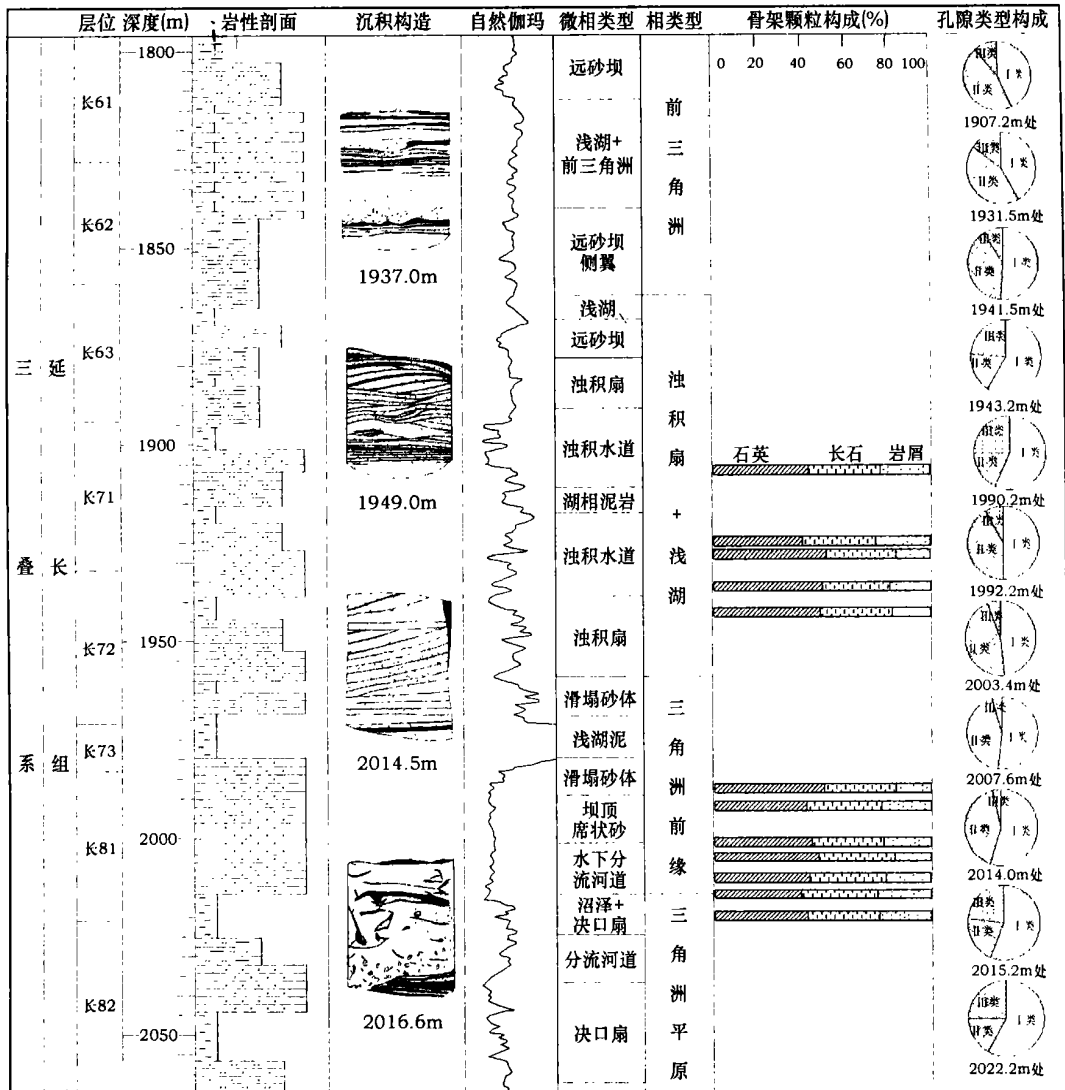


图1 西峰油田三叠系延长组长6—8段综合柱状图

Fig. 1 Generalized stratigraphic column of Member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic) in Xifeng Oilfield

右, 研究区许多井段砂岩的埋藏达到2000 m左右时, 碎屑颗粒大多呈线接触状, 表明砂岩骨架颗粒结构已很稳定, 不易被进一步压实。研究区延长组储层砂岩中基本不发育碎屑颗粒的凸凹接触和缝合线接触, 砂岩基本没有进入压溶阶段, 从压实作用角度考虑, 绝大多数延长组储层砂岩所经历的成岩阶段不会超过晚成岩早期。

## 2.2 胶结作用

### (1) 硅质胶结物

硅质胶结物在研究区砂岩中分布普遍, 但含量较少(1%~2%±), 主要以石英次生加大和自形石英晶体产出在碎屑石英颗粒表面、粒间孔壁和粒内溶孔中。

通常认为提供硅质胶结物SiO<sub>2</sub>来源主要来自碎屑石英颗粒间的压溶作用<sup>[1-2]</sup>, 而在研究区有岩芯薄片的井段中, 石英颗粒间压溶现象很少被观察到。薄

片分析表明, 在酸性环境中不稳定矿物如斜长石、钾长石以及由其组成的凝灰岩屑、花岗岩屑中普遍发生过溶蚀作用, 形成高岭石。在该反应中一个单位体积的钾长石可产生0.43个单位体积的SiO<sub>2</sub>, 为硅质胶结物的形成提供了主要物质来源。部分硅质胶结物的来源可能与上覆地层在印支暴露的时间间隔中石英广泛溶解提供的游离SiO<sub>2</sub>有关。

### (2) 粘土矿物胶结物

#### 绿泥石

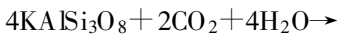
延长组长6—8段砂岩中绿泥石最主要的赋存状态是作为孔隙衬里方式产出的粘土膜(图版I-3), 电镜和探针分析表明<sup>①</sup>, 靠近碎屑颗粒的早期绿泥石较

① 黄思静等. 鄂尔多斯盆地中南部延长组主要油层组有利储集体特征及展布研究(内部报告). 2001

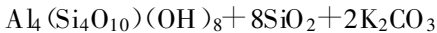
为富铁,自形程度较低。靠近孔隙边缘的绿泥石含铁量相对较低,自形程度较高。表明是在同生成岩阶段陆源绿泥石沿孔隙环边沉淀后,在埋藏成岩阶段继续生长而形成的。因此绿泥石粘土膜形成于成岩早期,目前的绿泥石粘土膜是不同世代混合的产物。

#### 高岭石

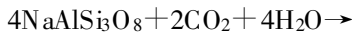
延长组长6—8段砂岩中高岭石主要赋存状态是作为孔隙充填方式产出,单个高岭石晶体呈六方板状,集合体呈书页状或蠕虫状,有时与自生石英共生,其成因主要与长石、花岗岩屑等骨架颗粒的溶蚀作用有关(图版I-4)。由于长6—8段砂岩的成分成熟度较低,颗粒中含有较多的长石成分,在酸性环境下极易发生溶蚀,生成大量自生高岭石矿物,其成岩反应过程可表达如下<sup>[1]</sup>:



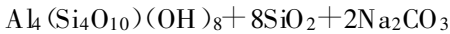
(钾长石)



(高岭石) (石英)



(钠长石)



(高岭石) (石英)

因此,自生高岭石的形成是长石类颗粒溶蚀后进入酸性流体的复杂络合物在适合的温度压力和氧化还原电位等条件下结晶沉淀而成。

#### (3) 碳酸盐胶结物

在西峰油田延长组储层砂岩的成岩作用和孔隙演化中,自生碳酸盐矿物扮演了十分重要的角色。碳酸盐胶结物在长6—8砂岩中非常普遍,含量变化也非常大。主要呈粒间胶结物、交代物或次生孔隙内填充物形式出现。常见微晶状、晶粒状或连晶状产出,成分上主要以方解石、铁方解石、白云石及铁白云石为主,并且有明显的多期次形成特征(图版I-5,6)。碳酸盐胶结物在不同成岩阶段均有产出,不同阶段的碳酸盐胶结物其晶体特征和矿物成分存在较大差异,主要受控于不同成岩阶段温压条件、流体—岩石相互作用的效应、成岩流体酸碱度、氧化还原电位等成岩环境参数。

碳酸盐矿物氧碳同位素测定方法:将研磨过的粉状样品<100目,加入5%稀盐酸,进行充分反应,生成的CO<sub>2</sub>气体用MAT-252型同位素质谱仪测定其 $\delta^{13}C$ 值和 $\delta^{18}O$ 值(表1),以PDB为测试标准,分析误差小于0.2‰。本项测试在中国科学院兰州地质研究气体地球化学实验室完成。

碳酸盐矿物的氧碳同位素分析表明<sup>[3]</sup>,方解石的

碳同位素( $\delta^{13}C$ )相对较重,为-0.31~-3.3(‰)(PDB),氧同位素( $\delta^{18}O$ )较轻,分布范围为-19.5~-22.1 $\delta^{18}O$ (‰)(PDB)(图2),说明它的形成与有机质的脱羧基作用关系不大,而与湖泊的碳酸钙过饱和及沉积时的碱性条件有关,因此形成时间相对较早,其较轻的氧同位素特征说明,该类方解石在成岩过程中已发生了重结晶作用,镜下也可常见该类方解石常发生重结晶作用,甚至呈连晶状。铁方解石的碳同位素( $\delta^{13}C$ )相对较轻,为-3.23~-8.02(‰)(PDB),氧同位素( $\delta^{18}O$ )也较轻,分布范围为-19.7~-22.9 $\delta^{18}O$ (‰)(PDB),它的形成明显与有机质的脱羧基作用有关,较低的 $\delta^{13}C$ 说明这类方解石中有一定数量的有机碳参与,而且形成温度相对较高,其沉淀时间应该是早成岩阶段晚期—晚成岩阶段早期。铁白云石的碳同位素( $\delta^{13}C$ )相对较重,为0.84~-1.92(‰)(PDB),氧同位素( $\delta^{18}O$ )变化较大,分布范围为-12.6~-20.5 $\delta^{18}O$ (‰)(PDB)。主要反映了在成岩埋藏水中存在一定量的古代海相碳酸盐提供的碳,有机碳的加入量比较有限,说明它的形成与有机质的脱羧基作用关系不大,铁白云石的 $\delta^{18}O$ 特征结合其自形程度较高、普遍含铁的特点,可以说明其形成时间大致在有机质脱羧基作用以后的晚成岩阶段的中晚期,在成岩作用较晚期阶段的孔隙水中铁离子的含量较高,因此比较容易取代镁离子,形成含铁碳酸盐矿物,如铁方解石、铁白云石等。

#### 2.3 溶解作用

鄂尔多斯盆地西峰油田延长组砂岩中,溶解作用非常发育,其中最主要的是长石溶蚀作用,它是储层次

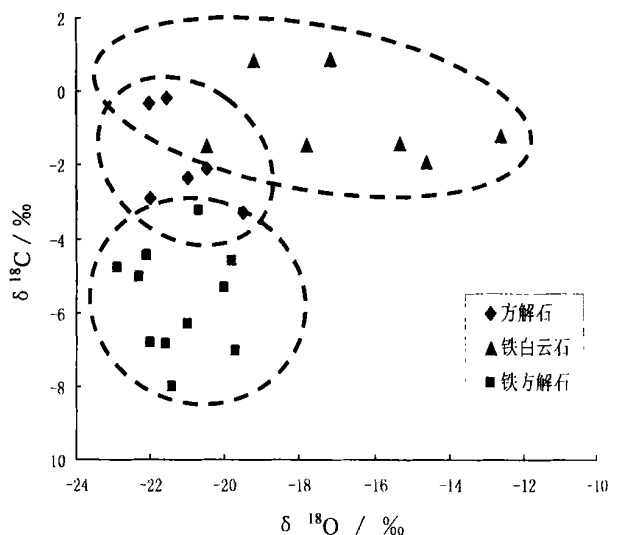


图2 砂岩中碳酸盐胶结物氧碳稳定同位素分布

Fig. 2  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{18}O$  distribution of carbonate cements in sandstone

表1 砂岩中碳酸盐胶结物氧碳稳定同位素分析数据

Table 1  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  composition of carbonate cements in sandstone

样品号	岩性	胶结物类型	层位	井深/m	含油性	$\delta^{13}\text{C}$ PDB/‰	$\delta^{18}\text{O}$ PDB/‰
A3-2	灰色钙质粗砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	2015.2	不含油	-4.77	-22.9
A3-4	灰黑色钙质砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	2007.6	油浸	-4.44	-22.1
A3-7	深黑色钙质砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	1990.2	不含油	-5.05	-22.3
A3-8	灰白色钙质砂岩	方解石	长7	1942.3	不含油	-0.31	-22.0
A3-9	灰黄色细砂岩	铁白云石	长7 <sup>2</sup>	1941.5	油浸	0.87	-17.1
A3-10	灰黄色钙质砂岩	铁白云石	长7 <sup>1</sup>	1931.5	油斑	0.84	-19.2
A3-11	灰黄色钙质砂岩	方解石	长7 <sup>1</sup>	1931.4	不含油	-0.19	-21.6
B1-1	灰白色中砂岩	铁方解石	长8 <sup>2</sup>	2032.5	不含油	-4.61	-19.8
B1-3	灰色中砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	2006.5	含油	-6.82	-22.0
B1-4	灰色中砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	1999.5	油浸	-3.23	-20.7
B1-8	灰色细砂岩	铁白云石	长7 <sup>2</sup>	1919.2	油迹	-1.44	-17.8
B1-9	灰色细砂岩	铁白云石	长7 <sup>1</sup>	1910.8	油迹	-1.92	-14.6
C9-1	灰色钙质砂岩	方解石	长8 <sup>1</sup>	2154.5	不含油	-3.30	-19.5
C9-3	灰黑色细砂岩	方解石	长8 <sup>1</sup>	2142.5	油浸	-2.17	-20.5
D3-1	深黑色砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	2316.4	油斑	-5.31	-20.0
D3-2	深黑色砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	2313.1	油浸	-6.32	-21.0
D3-5	灰绿色砂岩	铁白云石	长6 <sup>2</sup>	2164.5	油浸	-1.48	-20.5
E3-2	灰黄色砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	2275.0	油浸	-7.02	-19.7
E3-3	灰白色钙质砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	2274.0	不含油	-6.61	-21.0
E3-5	灰黄色钙质砂岩	铁方解石	长8 <sup>1</sup>	2272.4	油浸	-6.45	-21.6
E3-6	深灰色钙质砂岩	方解石	长8 <sup>1</sup>	2266.8	不含油	-2.36	-21.0
F9-1	灰黄色砂岩	铁方解石	长8 <sup>2</sup>	1708.8	油浸	-8.02	-21.4
F9-2	灰黄色砂岩	方解石	长8 <sup>2</sup>	1700.1	油浸	-2.93	-22.0
F9-3	灰黄色细砂岩	铁白云石	长7 <sup>1</sup>	1568.0	油浸	-1.43	-15.3
F9-4	灰黄色砂岩	铁白云石	长7 <sup>1</sup>	1556.8	油浸	-1.41	-15.3

生形成的最主要因素(图版 I -3、4)。粘土矿物、碳酸盐矿物和石英颗粒等溶蚀作用虽也能见到,但它们所产生的次生孔隙非常有限。该油田主要储集层的镜下统计表明,砂岩孔隙中至少有三分之一是次生孔隙,部分样品的次生孔隙含量高于原生孔隙,次生孔隙的发育状况对该区低孔低渗砂岩物性条件的改善起到了举足轻重的作用。

储层砂岩中长石的溶蚀是在富含  $\text{CO}_2$  的孔隙水作用下进行的,在早成岩晚期和晚成岩早期,大部分形成碳酸的  $\text{CO}_2$  来源与沉积物中有机质热成熟作用和生物化学作用产生的羧酸有关<sup>[4]</sup>。在  $80\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围内,油田水中所含的醋酸根可高达  $5\ 000\times 10^{-6}\sim 10\ 000\times 10^{-6}$ <sup>[5]</sup>,试验证明,与油田水相同浓度和相同温度范围内的醋酸溶液能使铝的溶解度增加一个数量级,而草酸溶液则能使铝的溶解度增加三个数量级,溶解铝能以一种有机络合物  $[\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^-]$  的方式迁移<sup>[6]</sup>。西峰油田的延长组是一套富含有机质的泥质岩与细砂岩和粉砂岩交互沉积的层序,因此在早成岩晚期和晚成岩早期来自泥质岩富含有机酸的溶液大量侵入,是造成砂岩长石颗粒发生广泛溶蚀的主要

原因。

### 3 成岩阶段及成岩序列

#### 3.1 成岩阶段划分

对研究区延长组储层砂岩成岩阶段的确定不仅考虑了岩石中镜质体反射率( $R_o$ ),并考虑了自生矿物的成分、形态、产状、生成顺序和组合特征以及岩石颗粒接触特征和孔隙组合类型,因为前者主要受控于温度、压力、孔隙流体组分和酸碱度特征,是反映成岩环境的重要证据,后者不仅是成岩演化阶段最直接的反映,而且是比较容易观察到的成岩现象(表2)。西峰油田长6~8段碎屑岩的镜煤反射率通常在  $0.7\%\sim 0.9\%$  之间,砂岩普遍经受了较强的压实作用改造,碎屑颗粒大都以线接触为主,砂岩中原生孔隙已大量丧失,次生孔隙普遍发育,铁方解石、铁白云石等晚期碳酸盐胶结物大量出现,长石、岩屑以及碳酸盐碎屑等常发生明显的溶蚀作用,高岭石、伊利石、绿泥石等自生粘土矿物比较常见。这些特征充分说明,研究区长6—8段储集砂岩的成岩阶段主要处于晚成岩阶段的A期。

#### 3.2 成岩序列分析

根据以上对成岩作用及自生矿物成因分析,结合

表 2 鄂尔多斯盆地陇东地区碎屑岩成岩阶段划分表

Table 2 Diagenetic stages of clastic rocks in Longlong area of Ordos basin

成岩阶段	$R_o$ / %	成岩温度 / °C	泥质岩		机械压实作用	压溶作用	自生矿物						溶蚀作用			孔隙类型	颗粒接触类型	次生孔隙生成	油气形成
			混层类型	S / %			高岭石	绿泥石	方解石	铁方解石	铁白云石	石英长石增生	沸石	碳酸盐类	长石				
早成岩阶段	A	0.4	< 70	> 70	强		自生高岭石	栉壳状	泥晶方解石	泥晶菱铁矿			方沸石				I 类为主	点状为主	生化甲烷
	B	0.5	90	50	弱	强	晶体完好的高岭石增多	绒球状	亮晶方解石	泥晶铁方解石	泥晶铁白云石	弱	片沸石	弱	弱	弱			次生孔隙形成
晚成岩阶段	A	1.3	130	20		较强			亮晶铁方解石	亮晶铁白云石	强	浊沸石	强	强	强	I—II 类	点—线状	次生孔隙大量发育	大量油气生成
	B	2.0	170	< 20		弱	高岭石向伊利石转化	片状				浊沸石、绿纤石	弱	弱	弱			II—III 类	线状—凹凸状凹凸状—缝合状
	C	> 2.0	> 170	0												III—IV 类			干气

镜下的各类成岩现象,进行成岩序列分析。具体表现为:

(1) 以绿泥石为主的粘土矿物,呈等厚薄膜状覆盖在颗粒表面,在粘土膜包围的石英颗粒罕见次生加大,原生粒间孔中仅偶见颗粒较小的石英单体,说明粘土膜的形成早于自生石英,为成岩早期沉积(图版 I - 3)。

(2) 部分石英次生加大边被方解石交代,在长石溶蚀孔隙中可常见到铁方解石胶结物,因此铁方解石的沉淀晚于石英次生加大和长石颗粒的溶蚀作用。

(3) 方解石胶结物呈微细晶状,部分已重结晶呈连晶状,常可见到自形白云石和铁白云石菱面体交代方解石,说明白云石形成于方解石之后。

(4) 长石溶蚀孔隙中常见有自生高岭石矿物的分布,两者具有明显的共生关系,其形成时间基本一致。

(5) 在粘土膜表面吸附有烃类物质,形成沥青边。长石溶蚀孔隙中也可清晰见到烃类侵位的痕迹,部分

长石溶蚀孔隙中已充填铁方解石胶结物(图版 I - 5),但在长石颗粒与方解石胶结物接触部位仍可清楚见到烃类充注留下的褐色沥青边。

因此,根据上述分析确定西峰油田的成岩序列为:早期粘土膜形成→机械压实→石英次生加大→方解石沉淀→有机流体注入→长石颗粒溶解→自生高岭石形成→方解石溶解→石油侵位→晚期铁方解石充填→晚期白云石充填或交代碎屑颗粒(图 3)。由于自生矿物的形成需要一定时间完成,因此上述各成岩作用必然会出现重叠的情况<sup>[7~8]</sup>。

### 4 储层砂岩孔隙类型及控制因素分析

在对西峰油田延长组砂岩孔隙特征的研究过程中,着重考虑了溶蚀作用对原生和早期形成孔隙的改造作用,运用了一种以孔隙产状为主要划分依据的孔隙类型划分方案。首先将孔隙按产状划分为粒间、粒内、填隙物内和裂缝四种类型,经溶蚀改造后衍生出四

成岩阶段		早成岩阶段 A 期	早成岩阶段 B 期	晚成岩阶段 A 期	晚成岩阶段 B 期
成 岩 作 用	机械压实作用	————		-----	
	粘土膜沉淀作用	————	————		
	石英次生加大	————	————		
	方解石沉淀	————	————		
	长石溶蚀作用		————	————	-----
	自生高岭石形成		————	————	-----
	铁方解石充填			————	-----
	铁白云石充填、交代			————	-----
	孔隙损失	————	————	————	-----
	次生孔隙形成		————	————	-----
	烃类侵位作用			————	-----

图 3 西峰油田三叠系延长组砂岩成岩作用序列

Fig. 3 Standstone diagenetic sequence of Yanchang Formation (Triassic) in Xifeng Oilfield

种孔隙类型,即粒间溶孔、粒内溶孔、填隙物内溶孔及裂缝溶孔。为了便于统计和分析,将孔隙类型归纳为粒间孔隙(I类)、粒间溶孔(II类)、组分内孔隙(III类)和裂缝孔隙(IV类)四种类型。

延长组砂岩孔隙类型主要为粒间孔隙(I类)、粒间溶孔(II类)和组分内孔隙(III类)。I类孔隙(粒间孔隙)基本上是原生孔隙,其含量的高低直接决定了砂岩的储集条件。II类孔隙(粒间溶孔),是在I类孔隙基础上发育起来的,基本上反映了砂岩中次生孔隙的发育条件和发育状况。III类孔隙(主要包括晶间孔、杂基孔和粒内溶孔等组分内孔隙),既有原生的也有次生成因的,具有孔径较小、连通性较差的特点,相对含量较高时往往砂岩的孔渗条件较差。研究区长6段储层砂岩的孔隙构成中,I类孔隙占35%~38%,II类孔隙所占的比例远远超过I类孔隙,达到52%左右,III类孔隙所占的比例也比较高,达到15%左右。长8段储层砂岩的孔隙构成中仍以I类孔隙为主,所占比例超过45%,II类孔隙所占的比例也超过40%,III类孔隙所占的比例有所下降,一般小于10.7%(图1)。

据成岩作用对储层物性的改善和破坏结果,可划分为建设性成岩作用和破坏性成岩作用。破坏性成岩作用主要是通过占据孔隙空间而达到破坏储层的目的,在本区破坏性成岩作用包括机械压实作用、石英次生加大、自生高岭石析出作用、方解石胶结物沉淀作用、硅质胶结作用、晚期含铁碳酸盐矿物的沉淀和交代作用等。机械压实作用在成岩作用早期,使碎屑沉积物迅速压实,粒间孔隙度损失较快;高岭石、石英、碳酸盐等自生矿物的形成,主要是在粒间孔壁和粒内溶孔中结晶沉淀析出,从而使得孔隙度减小,降低储层的储

集性能;对于矿物颗粒的溶解作用在孔渗条件较差、孔隙喉道比较细的砂岩中即便发生溶蚀作用后,大部分溶蚀物质不能随孔隙流体带出,从而在粒间孔隙中发育了大量自生粘土矿物(最常见的是高岭石),砂岩的孔渗条件并没有得到有效的改善,相反大量的粘土矿物妨碍了石油的流动,使储层物性变差,通常见到的产油较差的暗色储层,大都是这类储层。

本区最主要的建设性成岩作用为溶蚀作用、粘土膜形成作用和烃类侵位作用。

溶蚀作用:主要发生在早成岩B期和晚成岩A期早期,即古地温在70~130℃之间,有机质处于低成熟—成熟阶段,生油岩中的有机质开始大量脱羧基,并释放出CO<sub>2</sub>,这些物质进入孔隙流体中,使水介质呈较强的酸性,在热对流作用的驱动下,酸性流体可以在砂岩的孔隙系统中流动并对其中易溶骨架颗粒和早期碳酸盐胶结物进行溶蚀,形成大量的粒间和粒内溶蚀孔隙,有时将数个颗粒和颗粒间胶结物一同溶蚀形成特大孔隙。长6~8段砂岩中基本上以长石颗粒或含长石的岩屑颗粒溶解作用为主,而早期碳酸盐胶结物溶解形成的次生孔隙含量并不高。

粘土膜形成作用:在成岩作用初期绿泥石粘土膜就已覆盖了颗粒表面(图版I-3),但粘土膜达到一定厚度时( $>5\mu\text{m}$ ),被包裹的碎屑矿物就失去了成核作用的能力,因而就不能形成共轴生长胶结物<sup>[4]</sup>,如富含SiO<sub>2</sub>的孔隙流体无法找到结晶基点,从而不能形成自生石英晶体。因此粘土膜发育可有效地保护粒间孔,砂岩孔隙度通常较高。

烃类侵位作用:富含有机酸的有机流体进入砂岩孔隙系统后<sup>[9-10]</sup>,将原来的水—岩两相系统改变为水

一油一岩三相系统,改变了岩石的地球化学环境及水湿润性,使原来水岩介质中发生的无机成岩反应(如石英增生、自生伊利石等)受到抑制,加快了长石、碳酸盐矿物等的溶解作用,因此有利于储层砂岩次生孔隙的发育和物性条件的改善(图版I-6)。

## 5 结论

(1) 西峰油田三叠系延长组储层砂岩为典型的低孔低渗储集岩,其岩石类型主要为长石砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑砂岩,砂岩具有成分成熟度较低、分选性较好、磨圆度较差、杂基含量变化较大的特点。

(2) 西峰油田的储集砂岩经历的主要作用为压实作用、胶结作用和溶解作用,目前通常处于晚成岩阶段的A期,其成岩序列为:早期粘土膜形成→机械压实→石英次生加大→方解石沉淀→有机流体注入→长石颗粒溶解→自生高岭石形成→方解石溶解→石油侵位→晚期铁方解石充填→晚期白云石充填或交代碎屑颗粒。

(3) 通过对影响长6~8段砂岩储层物性的主要因素分析,总结了影响砂岩孔隙发育的建设性和破坏性成岩作用类型,可以认为石油侵位作用、粘土膜形成作用和溶蚀作用的发育状况是决定研究区储集砂岩的原生孔隙保存和次生孔隙发育的主要因素。

### 参考文献 (References)

- 1 冯增昭. 沉积岩石学(上册)[M]. 北京:石油工业出版社, 1993. 198~221 [Feng Zengzhao, Sedimentary Petrology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. 198~221]
- 2 Harvey Blatt. Sedimentary Petrology [M]. San Francisco USA, 1982. 197~240

- 3 Emery D, Robinson A 等著,王铁冠,金振奎等译. 无机地球化学在石油地质学中的应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1999. 73~89 [Emery D and Robinson A. Translated by Wang Tieguan, Jin Zhenkui et al. Application of inorganic geochemistry to petroleum geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. 73~89]
- 4 刘宝珺,张锦泉主编. 沉积成岩作用[M]. 北京:科学出版社, 1992. 74~77 [Liu Baojun and Zhang Jinquan. Sedimentary Diagenesis [M]. Beijing: Sciences Press, 1992. 74~77]
- 5 Carothers W W, Kharaka Y K. Aliphatic acid anions in oil-field water implications for origin of natural gas[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62: 2441~2453
- 6 Surdam R C, Steven and Laura J. Role of organic and inorganic reactions in development of secondary porosity in sandstone[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66: 635~642
- 7 蔡春芳,顾家裕等. 塔中地区志留系烃类侵位对成岩作用的影响[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 60~64 [Cai Chunfang, Gu Jiayu, et al. Effect of hydrocarbon emplacement on diagenesis of Silurian sandstone of Central Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 60~64]
- 8 胡宗全,朱筱敏. 准噶尔盆地西北缘侏罗系储层成岩作用及孔隙演化[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(3): 16~19 [Hu Zongquan Zhu Xiaomin. Diagenesis and pore evolution of Jurassic reservoir in northwestern edge of Junggar basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(3): 16~19]
- 9 王琪,史基安等. 石油侵位对碎屑岩储集岩成岩作用序列的影响及其与孔隙演化的关系—以塔西南石炭系石英砂岩为例[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 97~101 [Wang Qi, Shi Ji'an, et al. Influence of oil emplacement on diagenetic sequence of the clastic reservoir rock and its relationship to the porosity evolution-taking the Carboniferous quartz sandstone in southwest Tarim depression as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 97~101]
- 10 Saigal G C, Bjorlykke K, Larter S. The effects of oil emplacement on diagenetic processes-example from the Fulmar reservoir sandstone, Central North Sea[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(7): 1024~1032

## Reservoir Sandstone Diagenesis of Member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos Basin

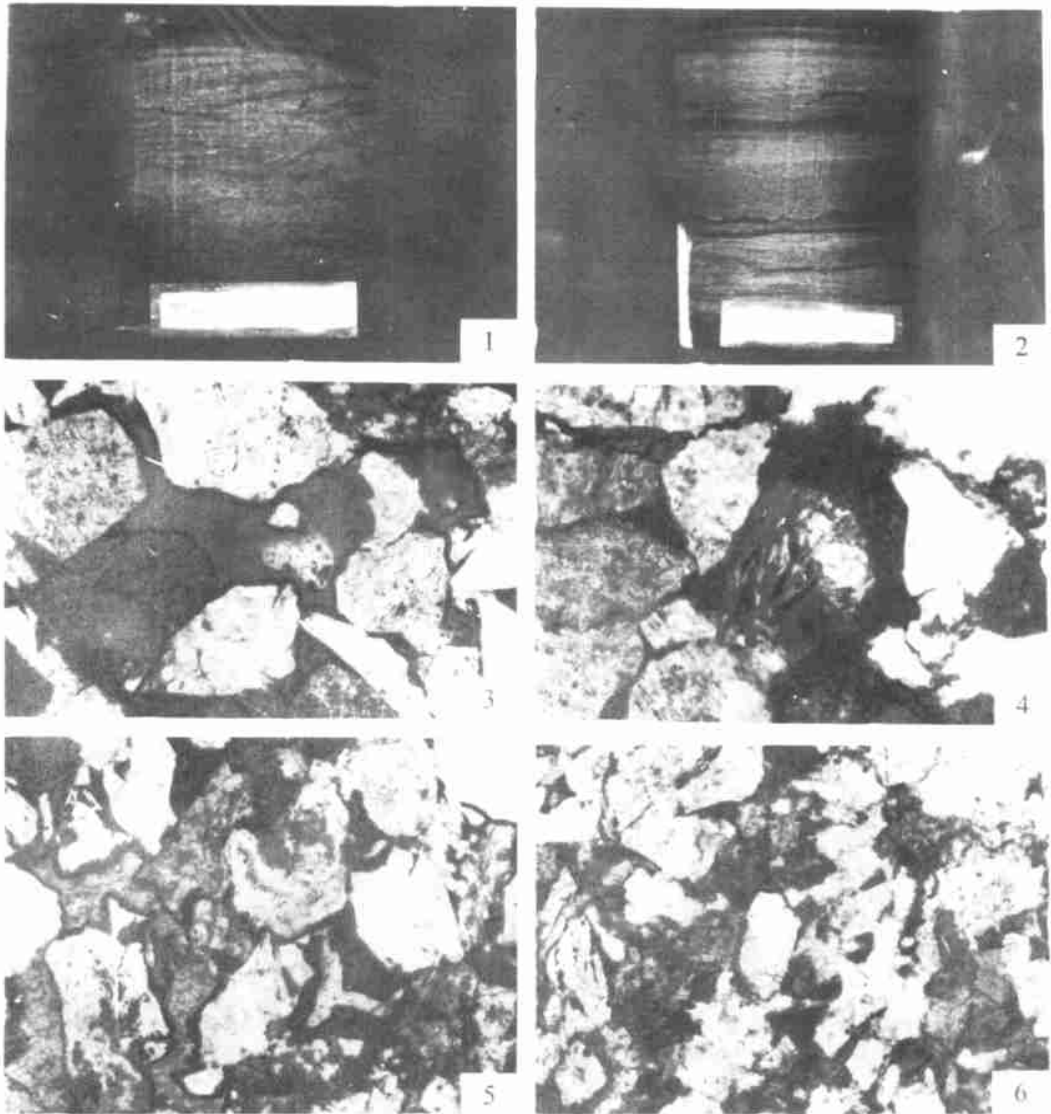
SHI Ji-an<sup>1</sup> WANG Jin-peng<sup>1</sup> MAO Ming-lu<sup>2</sup> WANG Qi<sup>1</sup>  
GUO Zheng-quan<sup>2</sup> GUO Xue-lian<sup>1</sup> LU Long-fei<sup>1</sup>

1 (State Key Laboratory of Geochemistry Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

2 (Research Institute of Exploration & Development, Changqing Oilfield Company, Petrochina, Xi'an 710004)

**Abstract** Reservoir sandstone of Member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic) in Xifeng oilfield of Ordos basin is typical of low porosity and low permeability, which has the characteristics of fine grain size, low compositional maturity, poor roundness and good sorting. Based on thin-section observation and analyses of clay minerals, stable isotopes and physical property, this article takes research on diagenetic characteristics in Member 6 to 8 of Yanchang Formation, analyses their influence on reservoir physical property and determines diagenetic stage of reservoir sandstone. Meanwhile, this article indicates that the development of high quality reservoir is dependent on the development of clay film, hydrocarbon emplacement grain dissolution in reservoir sandstone.

**Key words** Ordos Basin, Yanchang Formation, diagenesis



图版I 说明 1. 灰色粉砂岩和泥质粉砂岩组成的水平层理、透镜状层理和前积纹层。属三角洲前缘亚相远砂坝微相。西33井, 1949.0 m, 长7。  
 2. 具块状层理或递变粒序的细砂岩、具波纹层理的粉砂岩和具水平纹层的深灰色泥质岩组合, 即鲍玛层序的A段与C、D段沉积组合。在细砂岩底部可以见到底冲刷现象。西33井, 1937.0 m, 长7。  
 3. 西41井, 1996.0 m, 长8<sup>1</sup>,  $\times 100$  (—), 砂岩的粒度较粗, 成分及结构成熟度高, 粘土环边和烃类侵蚀作用发育, 孔隙类型以粒间孔和粒间溶蚀扩大孔为主。  
 4. 西45井, 2111.40 m, 长8<sup>1</sup>,  $\times 100$  (—), 砂岩的分选较好, 磨圆度较差, 长石颗粒常发生溶蚀, 溶蚀孔隙边缘发育大量自生高岭石矿物。  
 5. 西39井, 2045.1 m, 长8<sup>1</sup>,  $\times 100$  (—), 砂岩粒间孔比较发育, 其中留下明显的烃类充注痕迹, 粒间孔中沉淀的铁方解石胶结物边缘见有烃类充注的痕迹, 说明其沉淀晚于烃类充注。  
 6. 西41井, 1923.0 m,  $\times 100$  (—), 砂岩粒度较细, 分选度和磨圆度较差, 杂基含量较高, 因此孔渗条件较差, 粒间孔隙中发育大量自形的铁白云石胶结物。