

文章编号: 1000-0550(2007) 06-0903-12

层序界面对砂岩成岩作用及储层质量的影响^① ——以鄂尔多斯盆地延河露头上三叠统延长组为例

罗 忠^{1,2} 罗 平² 张兴阳² 刘柳红² 陈 飞³ 张玄杰⁴

(1. 中国矿业大学(北京)资源与地球科学系 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心 北京 100083;
3. 中国地质调查局天津地质调查中心 天津 300170 4. 中国国土资源航空物探遥感中心 北京 100083)

摘 要 砂岩成岩作用及储层质量是油气勘探的重要研究内容,不同地区砂岩成岩作用及储层质量的主要控制因素各不相同。本文以鄂尔多斯盆地东部延河露头剖面延长组长₇上部一长₄₊₅中部三角洲前缘—三角洲平原沉积为例,重点讨论三级层序界面(长₁₀底)上下不同基准面半旋回中砂岩自生矿物、储集空间类型、储集性能和含油性差异及造成这些差异的原因。指出层序界面之下的下降半旋回中浊沸石和早期钙质砂岩结核的发育阻止了绿泥石等粘土矿物及自生石英和自生钠长石的发育,而界面之上的上升半旋回中因凝灰质不足以及地层温度较低造成浊沸石发育有限,加之受湖水影响较小而缺乏早期方解石胶结物,因而绿泥石等自生粘土矿物及自生石英和自生钠长石较为发育,并保留了一部分原生孔隙。层序界面及紧邻其上大规模发育的长₁₀砂体成为流体运移的优势通道,是界面之上浊沸石、方解石胶结物及长石颗粒被酸性流体溶蚀形成次生孔隙的重要因素,也是石油的重要运移通道和储集体。

关键词 层序界面 基准面旋回 成岩作用 储层质量 延长组 延河露头 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 罗忠 男 1966年出生 在职博士生 成岩作用与储层质量研究 E-mail yk@petrochina.com.cn
中图分类号 P539.2 TE122.2 文献标识码 A

层序地层格架内成岩作用差异及其对储集性能的影响在碳酸盐岩沉积中进行了较为深入的研究^[1-4]。但在碎屑岩层序中较少涉及,孙永传等^[5]、陆永潮等^[6]将成岩作用纳入沉积体系域的沉积过程分析,以三级层序内储集体形成的背景环境和原生孔隙水化学性质为单元,系统分析了不同体系域沉积和早期成岩标志,探讨了沉积体系域构成与早期成岩作用的制约关系及其对砂岩储层储集性的影响。Closs^[7]以河道砂岩储层为例讨论了陆相沉积层序中 A/S 比值变化对槽状交错层组厚度、层厚度、孔隙度、渗透率、保存的河道宽度、连续性和连通程度,以及底形多样性、相分异性、相保存程度和非均质性属性的影响。Morad等^[8]比较系统地评述了相当于层序域尺度的碎屑岩成岩作用的时空分布研究成果,总结了不同沉积背景环境和层序地层框架内碎屑岩早期成岩作用的三维分布模式;Al-Ramadan等^[9]对法国西北部上侏罗统层序框架内硅质碎屑海岸的研究,建立了层序域碎屑成岩模式。

不难看出,前人将成岩作用置入层序地层格架内的讨论主要是比较不同体系域(或不同级次基准面

旋回)储集体成岩作用差异。而对层序界面较少涉及,尤其是对由层序界面及紧邻其上的大套砂体所构成的流体疏导层对成岩作用及储集性能的影响讨论较少。本文以鄂尔多斯盆地延河露头上三叠统延长组长₇上部一长₄₊₅中部沉积为例,试图就这一问题作初步探讨。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地形成于晚三叠世,在此之前它属于华北陆台,伸向秦祁海域台地边缘区。早古生代属华北陆表海沉积范畴;晚古生代华北海退缩,沉积了海陆交互的石炭—二叠系;晚三叠世早期,陕甘宁地区开始下拗,进入湖盆发育阶段,沉积了一套由湖相—三角洲相约 1 000 m 的碎屑岩建造^[10]。根据沉积序列将延长组分为 5 段(T_{3y}¹—T_{3y}⁵),并根据油层纵向分布规律自上而下划分为 10 个油层,即长₁—长₁₀。

延河剖面位于鄂尔多斯盆地东缘,构造位置属于伊陕斜坡,地层平缓,地层倾角不足 1°。延河剖面三叠系延长组长₇上部一长₄₊₅中部地层厚度约 259 m,

①国家十五科技攻关项目资助

收稿日期: 2007-02-07 收修改稿日期: 2007-06-06

对应的剖面长度约 25 km, 剖面穿过延长县城和延长油矿(图 1)。

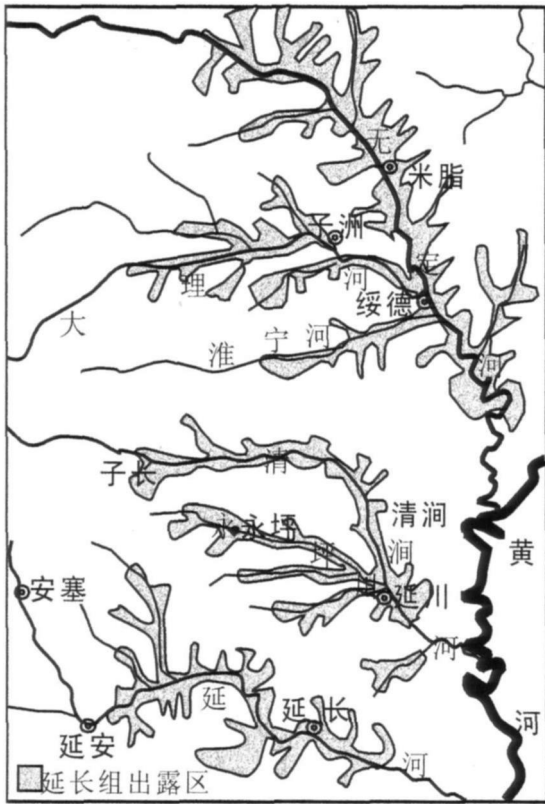


图 1 研究区位置图(引自参考文献 [11], 有修改)

Fig. 1 Location of the study area (modified after references [11])

2 层序格架基本特征

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组为内陆拗陷湖盆沉积, 总体为一准二级基准面旋回。湖盆经历了三次大的沉降, 形成长₉李家畔页岩、长₇张家滩页岩和长₄₊₅泥页岩为标志的三期大规模湖侵。延河露头沉积学与层序地层学研究表明, 长₆¹底为三级层序界面, 长₇上部—长₆²为三级基准面下降半旋回, 包括两个半四级基准面旋回, 属湖泊三角洲前缘—三角洲平原沉积, 骨架砂体类型主要为河口坝、水下分流河道、分流河道和决口扇沉积, 岩性为灰色、肉红色、灰白色、绿灰色细砂岩, 具“麻斑状”构造, 夹多层凝灰质沉积; 长₆¹—长₄₊₅²为三级基准面上升半旋回, 包括一个半四级基准面旋回, 属三角洲平原—冲积平原曲流沉积, 骨架砂体属分流河道、河道、决口扇沉积, 岩性为灰色、浅灰色中砂岩、中细砂岩(图 2)。其中规模最大的长₆¹底部砂体形成于基准面缓慢上升期, 水流局限于大型侵蚀沟谷内, 河道在侵蚀河谷内频繁摆

动迁移, 由于可容空间较小, 河道细粒沉积单元发育程度及保存程度差, 河道砂体彼此切割, 相互叠置, 形成拼合板状砂体结构类型^[11]。

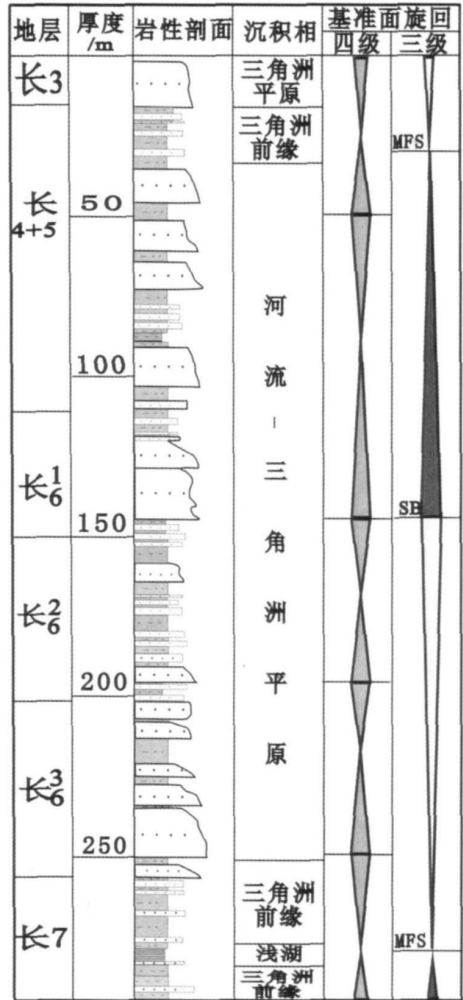


图 2 延河剖面延长组沉积序列剖面(引自参考文献 [11])

Fig. 2 Sequence stratigraphic diagram of upper Chang 7 to Chang 4+5 member along Yanhe River outcrop (after references [11])

3 层序界面上下不同基准面旋回中砂体成岩作用及储集性能差异

3.1 层序界面上下不同基准面旋回中砂体岩石学特征差异

层序界面上下河道砂体、分流河道及河口坝砂体多为块状、厚层状砂岩, 碎屑颗粒多呈次棱角状—次圆状, 分选普遍较好。骨架颗粒成分及含量无显著差异(表 1), 均主要为长石砂岩, 少量岩屑长石砂岩(图 3)。骨架颗粒特征也很相似, 石英均为单晶石

英, 长石均以斜长石 (已完全钠长石化) 为主, 次为钾长石。23 块砂岩样品的 XRD 分析数据也显示了类似特点, 界面上下钠长石 / 钾长石比值分别为 1.7~5.2/3.0 和 1.8~3.9/2.5。缺乏斜长石而出现大量

钠长石表明斜长石颗粒发生了强烈的钠长石化。岩屑均以火山岩岩屑为主, 少量的石英岩和低级变质岩岩屑。褐色—褐黄色黑云母的普遍存在也是本区砂岩的特色之一, 且多呈纹层状分布。

表 1 三级层序界面上下不同基准面旋回中砂岩骨架颗粒含量统计 / % *

Table 1 Composition of framework grains in different base-level cycles sandstones / %

旋回	层位	石英	长石	岩屑	样品数
上升半旋回	长 ₆ ¹ —长 ₄₊₅ 中部	18~42/27.4	42~68/58.8	7~26/13.8	59
下降半旋回	长 ₆ ³ —长 ₆ ²	20~43/28.7	43~64/55.3	11~23/16.0	28

* 含量表示为最小值~最大值/平均值(下同)

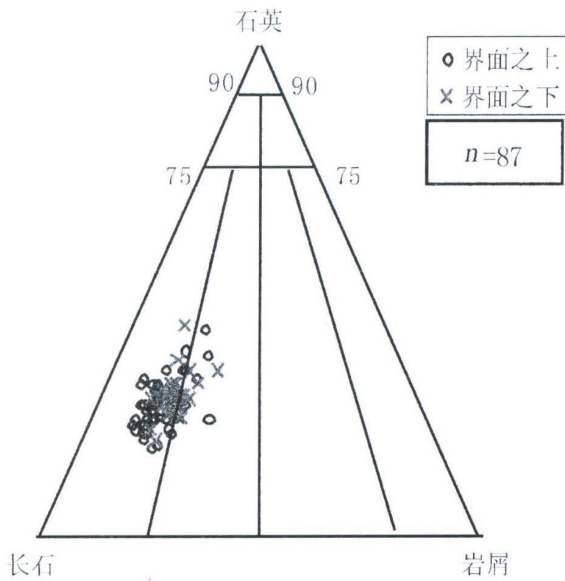


图 3 延河剖面长₆—长₄₊₅砂岩成分三角图

Fig 3 QFL detrital composition of Chang 6 to Chang 4+5 Member sandstones from Yanhe River outcrop plotted on the classification triangle of Folk(1980) [12]

但界面上下砂岩粒级和颜色具有明显差异, 界面之下的分流河道砂体、河口坝砂体多为细砂岩, 普遍含有肉红色或灰白色浊沸石, 形成“麻斑状”构造 (图 4-a)。界面之上的河道砂体颜色单一, 粒级稍粗, 一般为浅灰色中细砂岩或中砂岩 (图 4-b)。

3.2 层序界面上下不同基准面旋回中砂体成岩作用差异

延河剖面长₇上部—长₄₊₅中部的基准面旋回中, 砂岩自生矿物主要有粘土矿物、自生石英、自生钠长石、浊沸石和方解石等。不同自生矿物含量相差较大, 且在层序界面上下不同基准面半旋回中均显示出明显的差异。

3.2.1 粘土矿物

铸体薄片、扫描电镜及背散射图像分析表明, 砂岩中以填隙物状态产出的粘土矿物总量较低, 一般不超过 1%, 充填粒间孔隙的粘土矿物绝大部分属成岩自生成因, 且以绿泥石为主。砂岩 XRD 分析数据表明, 粘土矿物共有四种, 即绿泥石、绿泥石/蒙皂石、伊利石和伊利石/蒙皂石, 未见高岭石和蒙皂石。绿泥

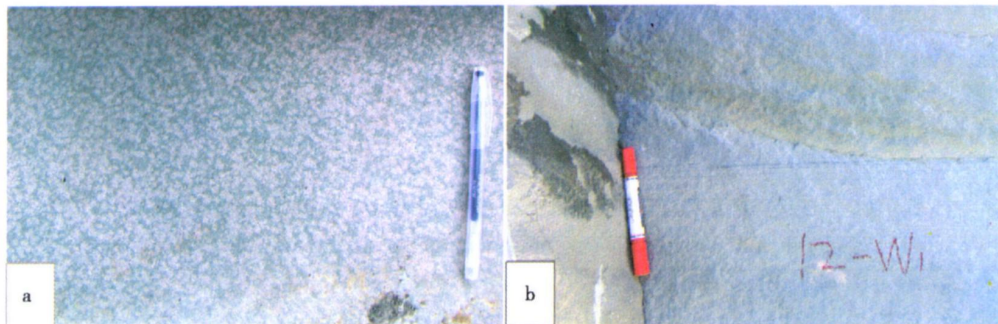


图 4 延河剖面延长组砂体宏观岩石学特征

a 块状细砂岩, 浅灰白色斑点为浊沸石, 分流河道砂体。潭家河村长₆³剖面。

b 浅灰色大型交错层理中细砂岩, 河道砂体。朱家湾₆¹剖面。

Fig 4 Characteristics of petrology in Yanchang Formation, Yanhe River outcrop

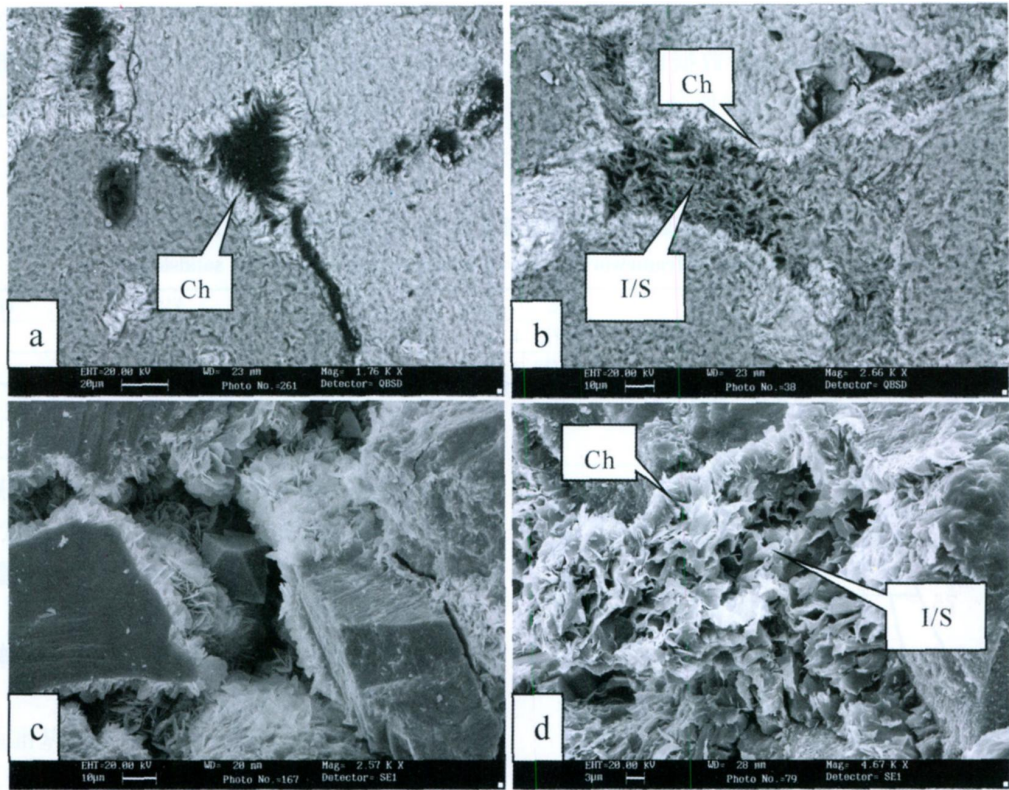


图 5 延河剖面长₇上部—长₄₊₅中部砂岩自生粘土矿物特征

a 垂直粒表的纤状绿泥石 (Ch) 呈孔隙衬里, 冯家村长₄₊₅剖面, Fjc-21-B9, BSE. b 粒表绿泥石 (Ch) 包壳, 残余粒间孔内充填伊利石 / 蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物, 张家滩长₇剖面, Zjt-2-B, BSE. c 粒表针叶状绿泥石, 七里村油矿长₄₊₅剖面, YK-18-W 2 SEM. d 粒表针叶状绿泥石 (Ch), 粒间孔隙内丝状伊利石、片丝状伊利石 / 蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物, 张家滩长₇剖面, 2-W 2 SEM.

Fig 5 Authigenetic clay minerals from upper Chang₇ to middle Chang₄₊₅ member sandstones in Yanhe River outcrop

石、绿泥石 / 蒙皂石混层粘土矿物多呈颗粒包壳或孔隙衬里形式出现, 垂直颗粒表面生长 (图 5-a b), 单个绿泥石晶体多呈针叶状 (图 5-c), 绿泥石 / 蒙皂石多呈片状, 其集合体多呈蜂窝状, 而伊利石和伊利石 / 蒙皂石多充填于残余粒间孔内 (图 5-b), 通常呈丝状和片丝状 (图 5-d)。

22 块砂岩 XRD 分析数据表明, 绿泥石平均含量为 72.3%, 伊利石、伊利石 / 蒙皂石混层矿物、绿泥石 / 蒙皂石混层粘土矿物分别为 11.6%、10.5% 和

表 2 三级层序界面上下不同基准面旋回砂岩中粘土矿物相对含量统计表 /%

Table 2 Composition of authigenetic clay minerals in different base-level cycles sandstones /%

旋回	层位	绿泥石	绿泥石 / 蒙皂石	伊利石	伊利石 / 蒙皂石	样品数
上升半旋回	长 ₆ ¹ —长 ₄₊₅ 中部	65~96/78.1	0~14/7	3~26/12.2	0~20/2.8	12
下降半旋回	长 ₇ 上部—长 ₆ ²	30~84/65.4	0~11/3.9	2~30/11	0~61/19.7	10

5.6%。在不同基准面半旋回中, 上述粘土矿物含量也具有明显差异 (表 2), 在下降半旋回中 (长₇上部—长₆²), 绿泥石、绿泥石 / 蒙皂石、伊利石、伊利石 / 蒙皂石相对含量平均值分别为 65.4%、3.9%、11% 和 19.7%, 而在上升半旋回中 (长₆¹—长₄₊₅中部) 相应的粘土矿物含量平均值分别为 78.1%、7%、12.2% 和 2.8%。可见, 自下而上绿泥石和绿泥石 / 蒙皂石含量明显增加, 伊利石 / 蒙皂石含量明显减少, 而伊利石含量变化不大。

3.2.2 自生石英

自生石英含量虽然较低, 但在不同的基准面半旋

回中差异明显。在长₇上部—长₆²所对应的下降半旋回中, 自生石英发育较差, 加大边窄且常常不连续, 在

扫描电镜下常常呈单个自形晶体或集合体形式出现, 含量为 0~ 2%, 平均为 0.13% (表 3)。而在长₆¹—长₄₊₅上部所对应的上升半旋回中, 自生石英相对发

育, 主要呈石英颗粒加大边的形式出现 (图 6-a b), 加大边最大宽度可达 0.035 mm, 含量为 0~ 2%, 平均为 0.48% (表 3)。

表 3 三级层序界面上下不同基准面旋回砂岩中胶结物含量统计表 /%

Table 3 Composition of cements in different base-level cycles sandstones /%

旋回	层位	自生石英	自生钠长石	浊沸石	方解石	样品数
上升半旋回	长 ₆ ¹ —长 ₄₊₅ 中部	0~ 2/0.48	0~ 0.5/0.03	0~ 10/0.12	0~ 30/2.8	109
下降半旋回	长 ₇ 上部—长 ₆ ²	0~ 2/0.13	0~ 0.5/0.01	0~ 18/7.71	0~ 30/4.1	86

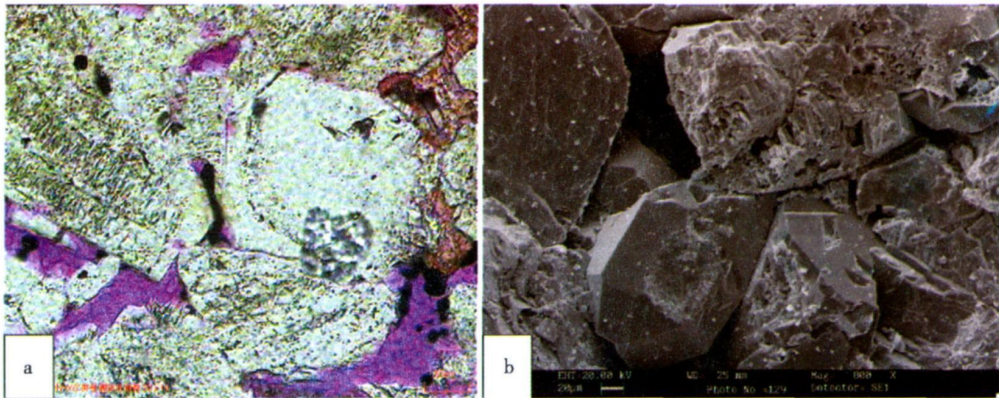


图 6 延河剖面长₇上部—长₄₊₅中部砂岩自生石英特征

a 中粒长石砂岩。液态石油(中)充填于石英加大及钠长石加大后的残余粒间孔内。Zjv-12-W 2, 朱家湾长₆¹剖面。铸体, 单偏光。

b 石英加大发育较完整(中下), 钾长石被部分溶蚀(中上)。朱家湾长₆¹剖面, Zjv-12-W 2 SEM。

Fig 6 Authigenetic quartz from upper Chang 7 to middle Chang 4+5 member sandstones in Yanhe River outcrop

3.2.3 自生钠长石

自生钠长石与自生石英的发育、分布特征相似, 只是自生钠长石的含量更低。在长₇上部—长₆²所对应的下降半旋回中, 自生钠长石发育较差, 仅有个别长石具有很窄的钠长石加大边, 且多不连续, 在扫描电镜下常常呈单个自形晶体或集合体形式出现 (图

7-a), 含量为 0~ 0.5%, 平均为 0.01% (表 3)。而在长₆¹—长₄₊₅上部所对应的上升半旋回中, 自生钠长石相对发育, 呈钠长石(化)颗粒的加大边形式出现 (图 6-a 图 7-b), 但主要呈单个自形晶体或其集合体形式出现的, 其含量为 0~ 5%, 平均为 0.03% (表 3)。此外, 长石颗粒强烈钠长石化是该区的重要特点。

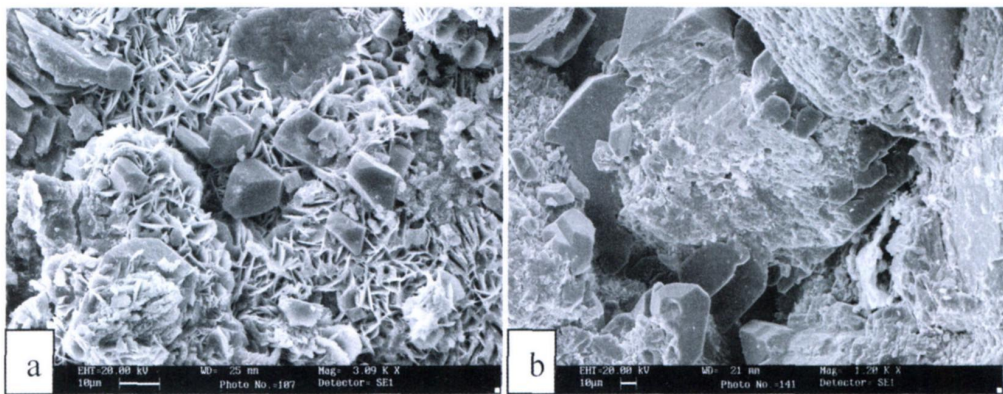


图 7 延河剖面长₇上部—长₄₊₅中部砂岩自生钠长石特征

a 粒状针叶状绿泥石、自生钠长石。谭家河长₃剖面, Tjt-6-W 6 SEM。

b 钠长石加大和自生钠长石小晶体。朱家湾长₆¹剖面, Zjv-12-W 3 SEM。

Fig 7 Authigenetic albite from upper Chang 7 to middle Chang 4+5 member sandstones in Yanhe River outcrop

3.2.4 浊沸石

浊沸石是本区最特征的自生矿物,在研究层段内广泛分布于长₇上部—长₆²所对应的基准面下降半旋回中,其含量为 0~18% 不等,平均为 7.7% (表 3)。而在长₆¹—长₄₊₅上部所对应的上升半旋回中,极少见到浊

沸石胶结物,其含量为 0~10%,平均为 0.12% (表 3)。浊沸石主要呈胶结物形式出现,常呈连晶结构 (图 8-a),扫描电镜下多呈细柱状集合体 (图 8-b),横断面上见浊沸石细柱体中央为空洞。浊沸石交代钠长石 (化) 颗粒现象常见,有时见浊沸石交代火山岩岩屑。

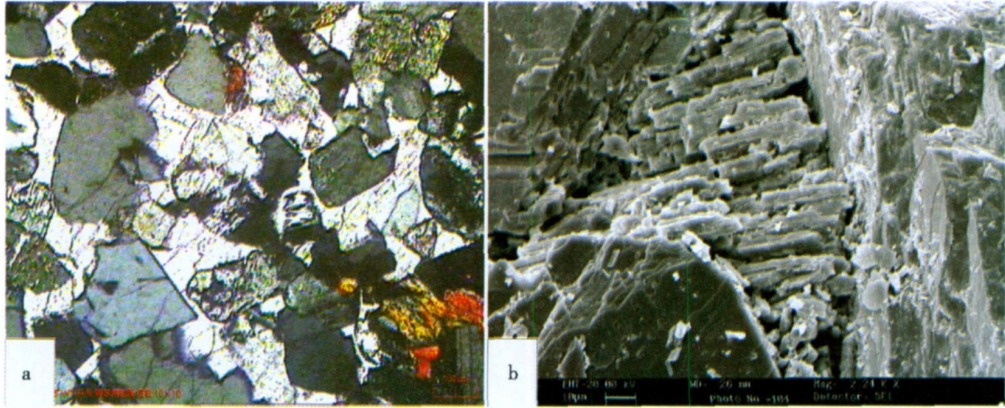


图 8 延河剖面长₇上部—长₄₊₅中部砂岩自生浊沸石特征
a 含浊沸石中粒长石砂岩,浊沸石呈连晶结构。谭家河长₃剖面, Tj₁-5-W 1, 正交。
b 粒间孔内自生细柱状浊沸石集合体。谭家河长₃剖面, Tj₁-6-W 6, SEM。

Fig 8 Authigenic laumontite from upper Chang 7 to middle Chang 4+5 Member sandstones in Yanhe River outcrop

3.2.5 方解石

方解石是仅次于浊沸石的胶结物,可分为两期。在长₇上部—长₆²所对应的基准面下降半旋回中,方解石含量较高,含量为 0~30%,平均为 4.1% (表 3),以细小粒状的早期方解石胶结物为主 (图 9-a),多形成钙质砂岩结核,并呈层状产出,其长度一般为 0.2~1.5 m,厚 0.1~0.3 m,且越靠下部钙质砂岩结核越发育。而在长₆¹—长₄₊₅上部所对应的基准面上升半旋回中,很少见到钙质结核,方解石含量减少,为 0

~30%,平均为 2.8% (表 3)。除钙质砂岩结核外,方解石胶结物多以孔隙式或连晶式产出,并常常交代长石等颗粒 (图 9-b)。

3.3 层序界面上下不同基准面旋回中砂体储集性能差异

3.3.1 储集空间类型及储集性能

延河剖面长₇上部—长₄₊₅中部旋回中,储集空间主要为粒间孔、粒间溶孔和粒内溶孔。但在不同的基准面旋回中,不同储集空间类型所占比例各有差异。

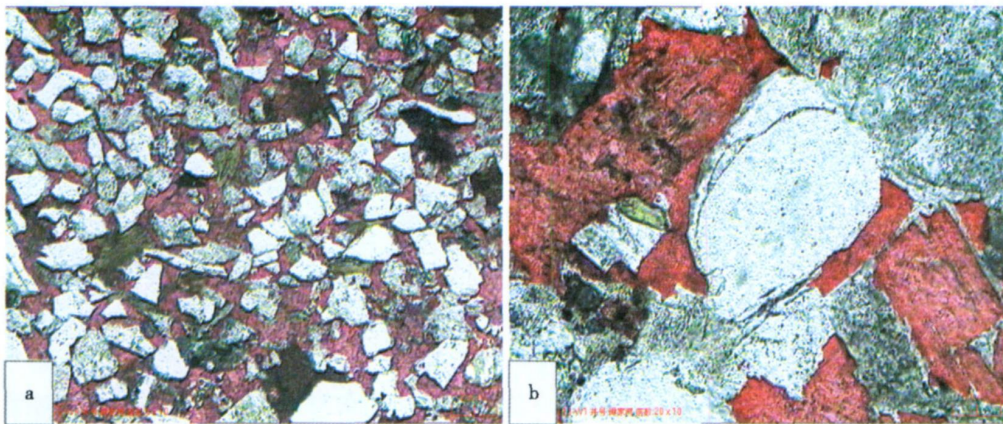


图 9 延河剖面长₇上部—长₄₊₅中部砂岩自生方解石特征
a 钙质结核内灰质中—细粒岩屑长石砂岩。细粒状方解石胶结物。谭家河长₃剖面, Tj₁-5-W 4, 单偏光, 混合液染色。
b 方解石晚于石英加大, 充填粒间孔隙并交代长石。朱家湾长₁剖面, Zj₁-13-W 1, 单偏光, 混合液染色。

Fig 9 Authigenic calcite from upper Chang 7 to middle Chang 4+5 Member sandstones in Yanhe River outcrop

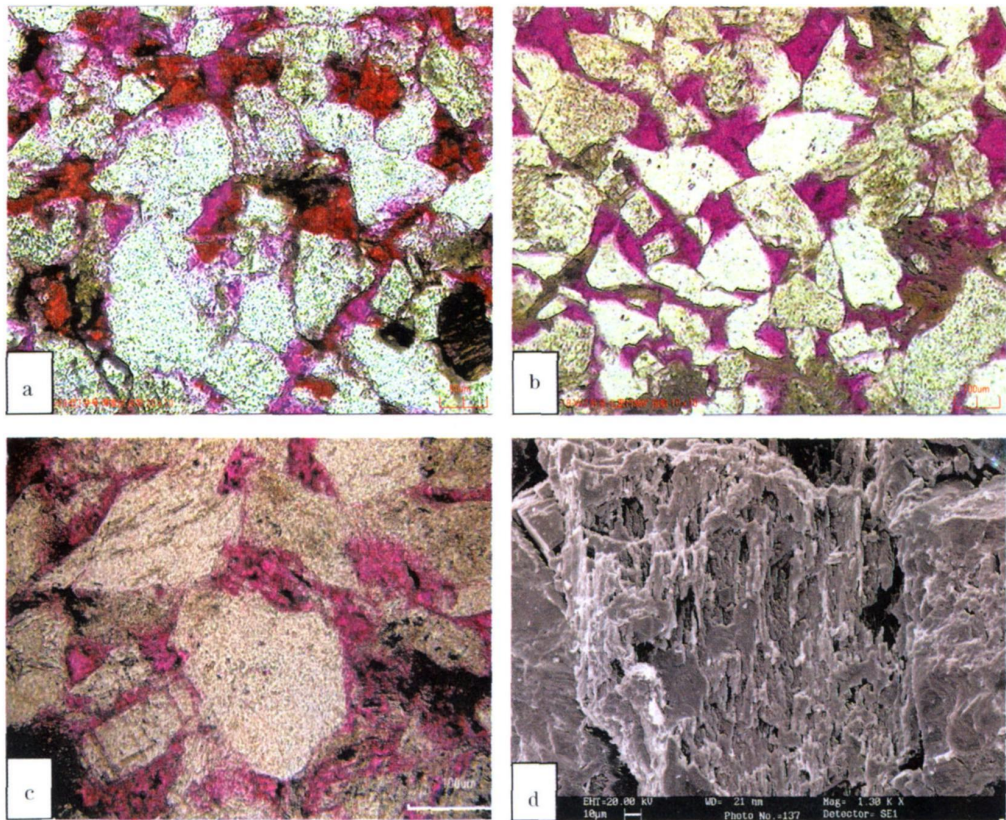


图 10 延河剖面长₇上部一长₄₊₅中部砂岩孔隙类型

a 方解石胶结物被部分溶蚀。郭家川长₆²剖面, Gje-10-B3 单偏光, 混合液染色。b 粒间孔为主。七里村油矿长₄₊₅剖面, YK-18-W 2-c 单偏光。c 浊沸石胶结物被强烈溶蚀, 朱家湾长₆¹剖面, Zjw-12-W 5 单偏光。d 钾长石溶蚀。朱家湾长₆¹剖面, Zjw-12-W 3 SEM。

Fig 10 Porosity types from upper Chang 7 to middle Chang 4+5 Member sandstones in Yanhe River outcrop

其中, 在长₇上部一长₆²所对应的下降半旋回中, 以粒间溶孔和粒内溶孔为主, 少量的粒间孔和铸膜孔等。粒间溶孔主要是方解石胶结物溶蚀所致 (图 10-a), 浊沸石溶蚀作用很弱。而铸膜孔、粒内溶孔基本上是长石, 特别是钾长石溶蚀作用的产物。粒间溶孔和粒内溶孔面孔率分别为 0~3% / 0.64% 和 0~2% / 0.6%, 孔隙度为 1.3% ~ 11.2% / 6.47%, 渗透率为 $0.0049 \times 10^{-3} \sim 0.617 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ / $0.1257 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 4)。而在长₆¹—长₄₊₅中部所对应的上升半旋回中, 储集空间以粒间溶孔和粒间孔 (图 10-b) 为主, 其次为粒内溶孔, 少量的铸膜孔。粒间溶孔主要是方解石和浊沸石溶蚀 (图 10-c) 所致, 粒内溶孔和铸膜

孔也基本上是钾长石溶蚀 (图 10-d) 的产物。粒间溶孔、粒间孔和粒内溶孔的面孔率分别为 0~6% / 1.2%, 0~10% / 1.0% 和 0~3% / 0.7%, 孔隙度为 2.6% ~ 14.5% / 9.72%, 渗透率为 $0.011 \times 10^{-3} \sim 2.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ / $0.3716 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 4)。

图 11 显示了基准面上升半旋回的砂体储集性能明显好于基准面下降半旋回的砂体储集性能。造成这一现象的原因除了上升半旋回中压实作用相对较弱和浊沸石胶结程度明显较弱导致残余原生粒间孔发育外, 溶蚀性孔隙 (如粒间溶孔和粒内溶孔) 比下降半旋回更为发育也是重要的原因 (表 4)。

表 4 三级层序界面上下不同基准面旋回中砂岩储集性能统计表 /%

Table 4 Thin section porosity and petrophysical attributes in different base-level cycles sandstones /%

旋回	层位	粒间孔	粒间溶孔	粒内溶孔	铸膜孔	总面孔率	孔隙度 /%	渗透率		样品数
								$/(\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$	薄片物性	
上升半旋回	长 ₆ ¹ -长 ₄₊₅ 中部	0~10 / 1.0	0~6 / 1.2	0~3 / 0.7	0~0.5 / 0.01	0~14 / 3.0	2.6~14.5 / 9.72	0.011~2.39 / 0.3716	112 / 40	
下降半旋回	长 ₇ 上部一长 ₆ ²	0~0.5 / 0.02	0~3 / 0.64	0~2.8 / 0.6	0~1 / 0.03	0.01~4 / 1.2	1.3~11.2 / 6.47	0.0049~0.617 / 0.1257	80 / 42	

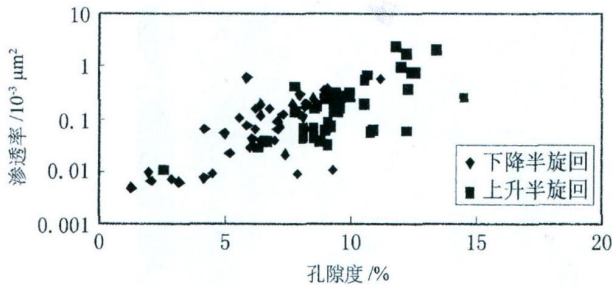


图 11 延河剖面长₇上部一长₄₊₅中部砂岩孔隙度—渗透率散点图

Fig 11 Plot showing porosity vs horizontal permeability of 82 conventional sandstone plug samples from upper Chang 7 to middle Chang 4+5 Member sandstones in Yanhe River outcrop

层序界面之上的基准面上升半旋回中, 地表露头(图 12-a)及镜下均有明显的油气显示(图 12-b), 而在层序界面之下的砂体中均未见油气显示。延长油矿开采的主要层位为长₁砂体, 长₁以下砂体很少产油。由此可见, 无论是地表还是地下, 油气显示在层序界面上下的不同基准面半旋回中均有明显差别。

4 讨论

4.1 成岩序列

虽然延河剖面长₇上部一长₄₊₅中部砂岩内自生矿物形成时间难以准确确定, 但是根据不同自生矿物之间的空间结构关系及交代关系, 可以比较清楚地看出不同自生矿物的形成序次(图 13)。

3.3.2 含油性

含油性在不同基准面旋回砂岩中差异显著。在

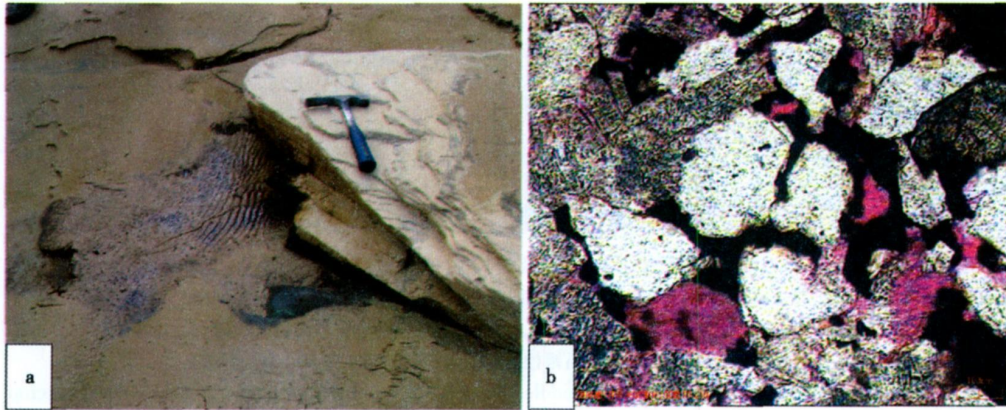


图 12 延河剖面长₇上部一长₄₊₅中部砂岩含油性

a 延河河床长₁中部砂体中的油苗。b 中粒长石砂岩。黑色油质充填粒间孔隙。朱家湾长₆剖面, Zjw-6 单偏光。

Fig 12 Oil-showing from upper Chang 7 to middle Chang 4+5 Member sandstones in Yanhe River outcrop

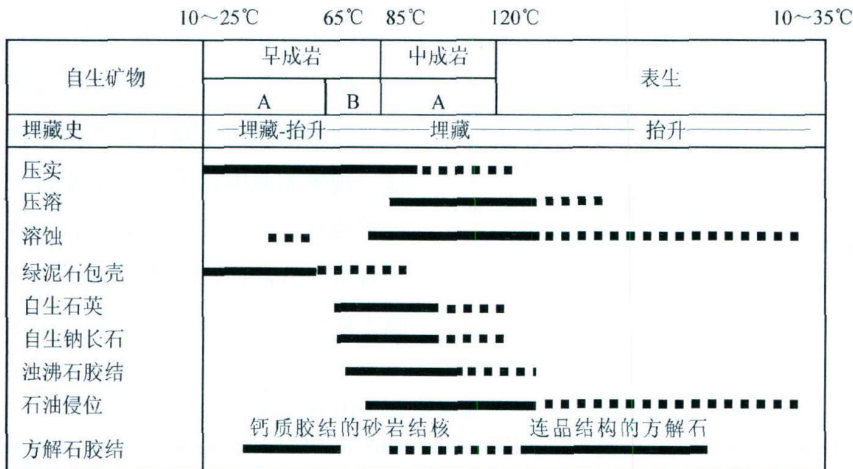


图 13 延河剖面长₇上部一长₄₊₅中部砂岩成岩序列

Fig 13 Paragenetic sequence of diagenetic minerals in upper Chang 7-middle Chang 4+5 sandstones based on diagenetic minerals relations and burial history curve

呈颗粒包壳或孔隙衬里形式出现的绿泥石和绿泥石/蒙皂石混层粘土矿物可能是本区早成岩期最重要的自生矿物之一。尽管有人认为是由其他粘土矿物在中成岩阶段转化而来,但其空间占位关系(图 5-a, b, c, d)表明绿泥石、绿泥石/蒙皂石混层粘土矿物或它们的先驱粘土矿物形成最早。在长₇上部至长₆²下降半旋回中,钙质砂岩结核中细粒状方解石胶结物也是早成岩期的重要自生矿物,在这类结核中,骨架颗粒间的点状接触关系也说明了这一点(图 9-a)。

紧随绿泥石或绿泥石/蒙皂石混层粘土矿物之后的是自生石英和自生钠长石(图 7-a, b),而在长₇上部至长₆²下降半旋回中,钙质砂岩结核中由于早期细粒状方解石胶结物十分发育,缺乏残余粒间孔隙,因而砂岩结核中缺乏自生石英和自生钠长石。

需要指出的是,延长组沉积之后三叠纪末的印支运动造成本区抬升剥蚀,这次抬升剥蚀在鄂尔多斯盆地西部幅度较大,而在东部延长油区一带幅度有限,抬升时间为 208~203 Ma 持续时限约为 5 Ma^[13]。这次抬升剥蚀事件可能对研究区长₄₊₅以下砂体影响不大,因为由大气淡水淋滤长石所形成的高岭石^[13, 14]在本区长₄₊₅以下砂体中并未出现,而且长₄₊₅—长₁地层厚度较大(约 400~500 m)可能阻止了大气淡水的有效下渗。因此可以推测三叠纪末抬升事件造成的大气淡水溶蚀作用对延河剖面研究层段的影响极其有限。

在早成岩 B 期至中成岩阶段,陆续出现了自生石英和自生钠长石,在自生钠长石形成的同时伴随着广泛的长石钠长石化作用。尤其是斜长石的广泛钠长石化作用可能为本区浊沸石的形成提供了重要的物质基础^[15, 16]。在浊沸石胶结物发育的长₇上部—长₆²所对应的下降半旋回中,自生石英和自生钠长石并不发育但可以见到零星的绿泥石,说明浊沸石的形成晚于绿泥石,同时暗示了浊沸石可能与自生石英、自生钠长石形成时期相近,正是由于浊沸石的大量形成阻止了自生石英和自生钠长石的形成。

在早成岩晚期至中成岩阶段,发生了一期构造热事件,尽管对这次热事件发生的具体时间认识不尽相同:中侏罗世末^[17]、晚侏罗世—早白垩世^[18],但其结果使地温梯度升高。导致以长₇张家滩页岩为主的生油岩进入生油窗,液态烃不断注入砂岩储层,与此同时产生的有机酸将对浊沸石、方解石和长石等颗粒产生溶蚀作用。

自晚白垩世以来的构造抬升事件^[13]使长₇上

部—长₄₊₅中部地层压力降低,发生了连晶式方解石沉淀作用。当此次构造抬升使地层埋深进入大气水所能达到的深度时便进入了表生成岩阶段。在表生成岩阶段,大气淡水淋滤作用的规模及其对改善储集性能的贡献大小尚不十分清楚,甚至在表生溶蚀作用的识别上也缺乏确切的标志。

4.2 层序界面上、下自生矿物与储集性能及含油性差异成因探讨

如上所述,延河剖面长₇上部—长₄₊₅中部地层内,层序界面上、下砂岩骨架颗粒成分、结构等方面并无明显差异,但自生矿物发育程度、储集空间类型、储层物性及含油性等特征具有显著的差异。究其原因,我们认为:

A. 界面之下绿泥石、绿泥石/蒙皂石、自生石英、自生钠长石含量比界面之上明显偏低与界面之下大量浊沸石和早期方解石胶结物的发育关系很大。界面之下,早期形成的浊沸石和钙质砂岩结核中的方解石胶结物充填了粒间孔隙,限制了绿泥石等粘土矿物及自生石英和自生钠长石的形成。

B. 界面之下浊沸石含量远大于界面之上可能归因于两个方面。一是界面之下形成的浊沸石胶结物含量本身比界面之上的高。二是界面之下的浊沸石溶蚀程度远不及界面之上的浊沸石溶蚀程度。

就浊沸石形成的物质来源而言,斜长石的钠长石化作用无疑为浊沸石的形成提供一部分 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 和 SiO_4^{2-} , 同时凝灰质沉积也是一种重要来源,而凝灰质沉积在长₆³—长₆²比长₆¹—长₄₊₅中部发育得多,而且长₇张家滩页岩也含有大量的凝灰质沉积,长₇上部砂体及紧邻长₇之上的长₆³、长₆²砂体具有“近水楼台先得月”的优势。那么界面上下的斜长石均普遍强烈钠长石化,为何唯独界面之上的浊沸石形成得少?我们认为,除界面之上缺乏凝灰质这一物质来源外,温度可能是不可忽略的因素。Noh 等^[19]指出北 Tejon 油田火山碎屑砂岩中沸石胶结物分带由浅到深依次为片沸石—片沸石+浊沸石—浊沸石,2642~2729 m 为片沸石带,2703~2743 m 为片沸石+浊沸石共存在带,2743 m 以下为浊沸石带。由此可见,埋深相差不大而沸石种类却发生了变化。所以延河剖面砂岩中浊沸石在界面上下含量差异也很可能与其经历的温度差异有关。

长₁底部的三级层序界面从鄂尔多斯盆地东部大范围来看为一下切谷,该界面之上沉积了基准面缓慢上升期的大规模拼合板状砂体,其连通性好,界面

之下即为长₂顶部的泛滥平原沉积^[11],成为流体运移的阻挡层。因此,该界面连同紧邻其上的长₁大规模砂体成为流体运移的优势通道,以长₇张家滩页岩为主的生油岩在成熟期产生的酸性流体沿这一优势通道运移,沿途溶蚀了界面之上砂体中的浊沸石和方解

石。而界面之下的长₇上部一长₂的砂体规模和连通程度均远不及长₁砂体(图 14),加之浊沸石胶结致密,酸性流体缺乏有效通道,因而浊沸石溶蚀极弱。因此,层序界面上、下浊沸石溶蚀程度差异也导致其现今含量上的差异。

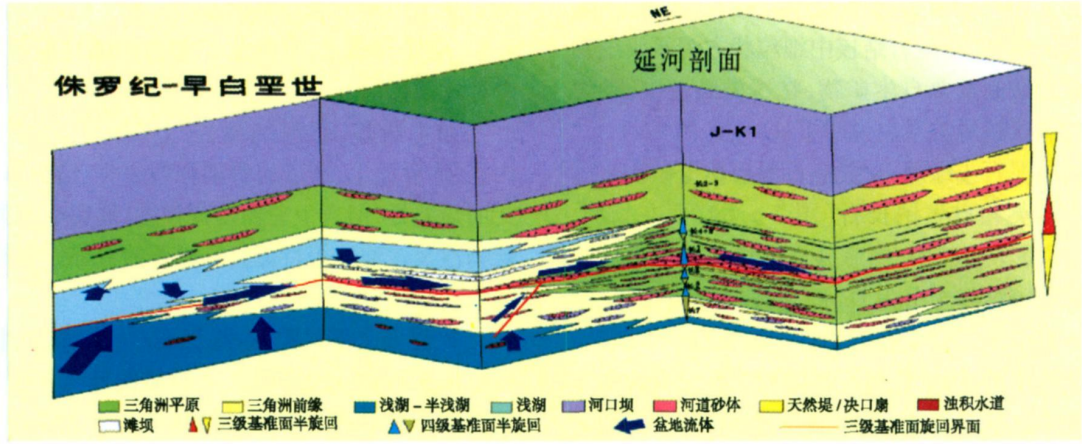


图 14 鄂尔多斯盆地东部长₇-长₁酸性流体和石油优势运移通道示意图

Fig 14 Sketch map showing acidic fluid and oil migration predominant fluid conduits from Chang 7 to Chang 1, eastern Ordos Basin

C. 界面之上砂岩储层物性明显好于界面之下主要与①界面之下早期浊沸石、钙质砂岩结核发育及②界面之上酸性流体对浊沸石、方解石溶蚀强度大关系密切。界面之上浊沸石和早期方解石胶结物少,原生孔隙相对发育,尤其是长₄₊₅的原生孔隙所占比例较大,而界面之下的原生孔隙几乎被浊沸石、方解石胶结物完全充填。界面及紧邻其上的大规模砂体为酸性流体的溶蚀提供了优势通道(图 14),造成界面之上浊沸石、方解石溶蚀所产生的粒间溶孔明显高于界面之下的粒间溶孔(表 4)。晚期方解石胶结物虽然对储层物性有影响,但其含量在界面上、下没有明显差异,此外,界面上、下压实强度也没有明显差异,因此晚期方解石胶结物及压实强度不是界面上、下储层物性差异的主要原因。

D. 含油性在界面上、下的差异显然与储层物性有关,而界面之上储层物性好的原因之一是界面及紧邻界面之上的长₁大规模砂体的优势通道效应。同时,该优势通道也成为石油运移和储集的重要场所(图 14)。

5 结论

通过对鄂尔多斯盆地东部延河露头剖面延长组长₇上部一长₄₊₅中部三角洲前缘—三角洲平原沉积的研究,有以下几点认识:

(1) 长₇上部一长₄₊₅中部沉积序列中,以长₁底部三级层序界面为界,界面上、下砂岩中骨架颗粒成分及含量相近,多为长石砂岩,少量岩屑长石砂岩,且斜长石颗粒普遍发生强烈钠长石化作用,斜长石的钠长石化程度及其含量没有显著差异。但界面之上砂岩多为中—细粒砂岩和中粒砂岩,界面之下多为细粒砂岩。

(2) 界面之下的下降半旋回砂体中浊沸石、方解石胶结物明显比界面之上的上升半旋回砂体中的发育。而界面之上砂体中的绿泥石、绿泥石/蒙皂石、自生石英、自生钠长石比界面之下发育。

(3) 界面之下的储集空间以粒间溶孔和长石颗粒内溶孔为主,界面之上的储集空间以粒间溶孔和残余粒间孔为主,其次为长石内溶孔。界面之上的储集物性明显好于界面之下且含油性远高于界面之下,长₁砂体是延长油区的主要产层。

(4) 界面之下,早期浊沸石胶结物及钙质砂岩结核中方解石胶结物的发育阻碍了绿泥石、绿泥石/蒙皂石及自生石英、自生钠长石的发育,界面之上则因浊沸石发育有限并缺乏早期方解石胶结物而有利于绿泥石、绿泥石/蒙皂石及自生石英、自生钠长石的发育。浊沸石的发育除了与斜长石的钠长石化作用有关外,界面之下含有多层凝灰质夹层也是重要因素之一。此外,界面上、下温度差异可能也是不可忽视的

因素。

(5) 层序界面及紧邻其上大规模发育的长¹₆砂体成为流体运移的优势通道, 是界面之上浊沸石、方解石胶结物及长石颗粒被酸性流体溶蚀形成粒间溶孔、长石颗粒内溶孔等次生孔隙的重要因素, 也是石油的重要运移通道和储集体。

参考文献 (References)

- 1 Stemmerik I, Larsen G B. Diagenesis and porosity evolution of Lower Permian paleoaplysinitid buildups on Bjørnøya: an example of high frequency sea level fluctuations controlling diagenesis in a transgressive sequence. In: Horbury A D, Robinson G, eds. Diagenesis and Basin Development. AAPG Studies in Geology, 1993, 36: 199-212
- 2 Read J E, Horbury A D. Eustatic and tectonic controls on porosity evolution beneath sequence-bounding unconformities and parasequence disconformities on carbonate platforms. In: Horbury A D, Robinson G, eds. Diagenesis and Basin Development. AAPG Studies in Geology, 1993, 36: 155-198
- 3 Friedman G M. Rapidity of marine carbonate cementation: implications for carbonate diagenesis and sequence stratigraphy. Sedimentary Geology, 1998, 119: 1-4
- 4 Moore C H. Carbonate reservoirs porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Amsterdam: Elsevier, 2001: 245-290
- 5 孙永传, 李蕙生. 层序地层学在成岩作用研究中的应用. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 154 [Sun Yongchuan, Li Huisheng. Application of sequence stratigraphy to the study of diagenesis. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences Beijing), 1995, 2(3-4): 154]
- 6 陆永潮, 向才富, 陈平, 等. 层序地层学在碎屑岩成岩作用研究中的应用——以 YA13-1 气田下第三系为例. 石油实验地质, 1999, 21(2): 100-113 [Lu Yongchao, Xiang Caifu, Chen Ping, et al. Application of sequence stratigraphy to the study of diagenesis of siliciclastic rock: take the Lower Tertiary of YA13-1 gas field as an example. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(2): 100-113]
- 7 Cross T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 322-350
- 8 Morad S, Ketzer J M, De Ros L F. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. Sedimentology, 2000, 47(s1): 95-120
- 9 Ahranadan K, Morad S, Proust J N, Ahranad I. Distribution of diagenetic alterations in siliciclastic shoreface deposits within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Upper Jurassic Boulonnais, NW France. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(5): 943-959
- 10 杨俊杰, 李克勤, 张东生, 等. 中国石油地质志 (卷十二: 长庆油田). 北京: 石油工业出版社, 1992: 62-67 [Yang Junjie, Li Keqin, Zhang Dongsheng, et al. Petroleum Geology of China (Vol 12: Changqing Oil Field). Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 62-67]
- 11 张兴阳, 罗平, 顾家裕, 等. 三级基准面旋回内三角洲砂体骨架模型的建立——以陕北安塞三角洲露头为例. 沉积学报, 2006, 24(4): 540-548 [Zhang Xinyang, Luo Ping, Gu Jiayu, et al. Establishment of the delta sandbody framework model in a 3rd order baselevel cycle: take Shanbei Ansa delta outcrop as an example. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 540-548]
- 12 Folk R L. Petrology of sedimentary rock. Austin, Texas: Hemphill Publishing Company, 1980: 1-182
- 13 罗静兰, 张成立, 阎世可, 等. 盆地埋藏史及其对砂岩储层物性演化的影响——以陕北延长油区砂岩储层为例. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 123-127 [Luo Jinglan, Zhang Chengli, Yan Shike, et al. Effect of burial history on physical porosity of sandstone reservoirs: take Yanchang oil region in north Shanxi as an example. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 123-127]
- 14 黄思静, 武文慧, 刘洁, 等. 大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例. 地球科学 (中国地质大学学报), 2003, 28(4): 419-424 [Huang Sijing, Wu Wenhui, Liu Jie, et al. Generation of secondary porosity by meteoric water during time of subaerial exposure: an example from Yanchang Formation sandstone of Triassic of Ordos Basin. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2003, 28(4): 419-424]
- 15 朱国华. 陕北浊沸石次生孔隙砂体的形成与油气关系. 石油学报, 1985, 6(1): 1-8 [Zhu Guohua. Formation of laminitic sandbodies with secondary porosity and their relationship with hydrocarbons. Acta Petrologica Sinica, 1985, 6(1): 1-8]
- 16 杨晓萍, 袁泽楠. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石的形成机理、分布规律与油气关系. 沉积学报, 2002, 20(4): 628-632 [Yang Xiaoping, Yuan Zhenan. Formation process and distribution of lamonite in Yanchang Formation (Upper Triassic) of Ordos basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 628-632]
- 17 赵孟为, Behr H J. 鄂尔多斯盆地三叠系镜质体反射率与地热史. 石油学报, 1996, 17(2): 15-23 [Zhao Mengwei, Behr H J. Vitrinite reflectance in Triassic with relation to geothermal history of Ordos basin. Acta Petrologica Sinica, 1996, 17(2): 15-23]
- 18 任战利, 赵重远. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究. 沉积学报, 1997, 15(2): 134-137 [Ren Zhanli, Zhao Chongyuan. Late Mesozoic comparative research on the geothermal field of the Ordos basin and Qinshui basin. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 134-137]
- 19 Noh J H, Boles J R. Origin of zeolite cements in the Miocene sandstones, north Tejon oil fields, California. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63(2): 248-260

Effect of Sequence Boundary on Sandstones Diagenesis and Reservoir Quality: an outcrop study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, Northwest China

LUO Zhong^{1,2} LUO Ping² ZHANG Xing-yang²

LIU Li-hong² CHEN Fei³ ZHANG Xuan-jie⁴

(1 Department of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Beijing 100083;

2 Central Laboratory of Geological Sciences, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083

3 Tianjin Centre of Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300170;

4 China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083)

Abstract Diagenesis and reservoir quality in sandstones are important research scopes for petroleum exploration. Taking the delta front to delta plain facies from upper Chang 7 to middle Chang 4+ 5 member of Yanchang Formation, Yanhe River outcrop, eastern Ordos Basin as an example, this paper addresses the differences of authigenetic minerals, porosity types, petrophysical attributes and oil showing in sandstones between base-level sea-rising and sea-falling cycles, and their origins. Both of abundant lamontite and early calcite cement in concretion prevent the formation of authigenetic minerals including chlorite, chlorite/smectite, quartz-overgrowth and albite-overgrowth in base-level sea-falling cycle under the 3rd sequence stratigraphic boundary surface, whereas authigenetic chlorite, chlorite/smectite, quartz-overgrowth and albite-overgrowth are relatively well developed resulting from poor development of lamontite cement owing to lack of tuffaceous deposits and lower formation temperature, and lack of early calcite cement due to little influence of lake in base-level sea-rising cycle above the 3rd sequence stratigraphic boundary sequence. The 3rd sequence boundary surface together with well developed Chang₆¹ sandbodies immediately above the sequence boundary surface was the predominant fluid conduits through which acidic fluid, which dissolved lamontite and calcite cement and feldspar grains, and oil migrated originated from the mature source rocks.

Key words sequence boundary, diagenesis, reservoir quality, Yanchang Formation, Yanhe River Outcrop, Ordos Basin