

# 基准面旋回对砂岩成岩作用的控制 ——以鄂尔多斯盆地西南缘纳水河延长组露头为例

孙萍<sup>1,2</sup>, 罗平<sup>2</sup>, 阳正熙<sup>1</sup>, 张兴阳<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 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)

**摘要:** 以鄂尔多斯盆地西南缘纳水河露头剖面延长组长9—长7辫状河三角洲沉积为例, 重点讨论三级层序界面上下的砂岩储层成岩特征。通过大量的铸体薄片鉴定, 扫描电镜、X衍射等实验分析, 发现纳水河延长组露头剖面层序界面对砂岩储层成岩具有控制作用, 基准面下降半旋回内填隙物以浊沸石为主, 基准面上升半旋回内以方沸石为主, 孔隙主要为溶蚀填隙物形成的次生孔隙, 界面之上面孔率好于界面之下的面孔率, 有利于储层发育。

**关键词:** 鄂尔多斯; 纳水河; 层序界面; 延长组; 成岩作用

中图分类号: P588.2; P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)02-0179-06

## The control of the sequence boundary over the sandstone reservoir and diagenesis: a case study of Yanchang Formation outcrop along the Ruishui River profile

SUN Ping<sup>1,2</sup>, LUO Ping<sup>2</sup>, YANG Zheng-xi<sup>1</sup> and ZHANG Xing-yang<sup>2</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Central Laboratory of Geological Sciences, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Exemplified by Chang 9-Chang 7 braided-channel delta sediments of Yanchang Formation along Ruishui River outcrop profile in southwestern Ordos Basin, this paper deals mainly with sandstone reservoir and diagenesis characteristics of the Grade 3 sequence boundary. An analysis by such experimental means as thin-section identification, SEM and X-ray diffraction has revealed that the sequence boundary along the Ruishui River outcrop profile controlled the sandstone reservoir and its diagenetic process, that the main matrix below the sequence boundary is aedelforsite, while that over the boundary is aedelforsite, and that the pores are mainly secondary pores formed by matrix dissolution. The area-porosity ratio is higher over the sequence boundary than below the boundary, which is favorable for the development of the reservoir.

**Key words:** Ordos; Ruishui River; sequence boundary; Yanchang Formation; diagenesis

我国鄂尔多斯西南缘的西峰油田,其主要产油层长8油组砂体主要为辫状河三角洲沉积体系,主要砂体类型为三角洲平原分流河道、三角洲前缘水下分流河道和前三三角洲中的浊积砂体(杨友运等,2005)。众所周知,长8砂体为低渗透储层,经历了复杂的成岩作用过程(李红等,2006;于波等,2007,2008),具有相当大的非均质性,如何在其中寻找好的储层段目前仍是研究难题。罗忠等(2007)以鄂尔多斯盆地延河露头曲流河三角洲沉积为例,针对层序界面对砂岩成岩

作用及储层质量的影响做了系统的研究。不难看出,层序界面对储层的成岩作用有着重要的影响,对储层质量起着控制作用。韩永林等(2005)认为位于鄂尔多斯盆地西南缘的纳水河地区为辫状河沉积体系,并指出不同沉积体系砂体展布有所不同。综合利用野外露头、岩芯、录井、测井、地震和古生物等资料,依据研究区沉积地层特征,杨友运(2005)、张凤奎等(2008)对鄂尔多斯盆地三叠系延长组进行了层序界面的识别以及层序划分。但是关于层序界面对

储层影响的研究却较少。本文以纳水河露头剖面延长组长9—长7油组为例,就这一问题做一初步探讨。

## 1 地质背景

研究区位于西秦岭北缘东西向断裂构造活动带与鄂尔多斯稳定地块的过渡带,受印支早期构造活动的影响,晚三叠世延长组沉积时盆地南缘及西缘的同生构造活动频繁(周鼎武等,1994;张国伟等,1988),在延长组长6—长8油组形成期间,因盆地南部不均沉降,基底地形产生分异,隆起形成大量的沉积物,盆地西南部强烈下陷,使沉积坡度变陡,为大量沉积物快速沉积提供了条件。

纳水河剖面位于鄂尔多斯盆地的西南缘(图1),行政区划属于甘肃省华亭县。剖面起始于阴凹村,终止于安口煤矿,构造位置为伊陕斜坡西南的庆阳鼻褶带上,地层倾角 $40^{\circ}$ 左右。纳水河剖面三叠系延长组地层厚度约2300 m。本文重点研究长9—长7段,地层厚度为759 m。

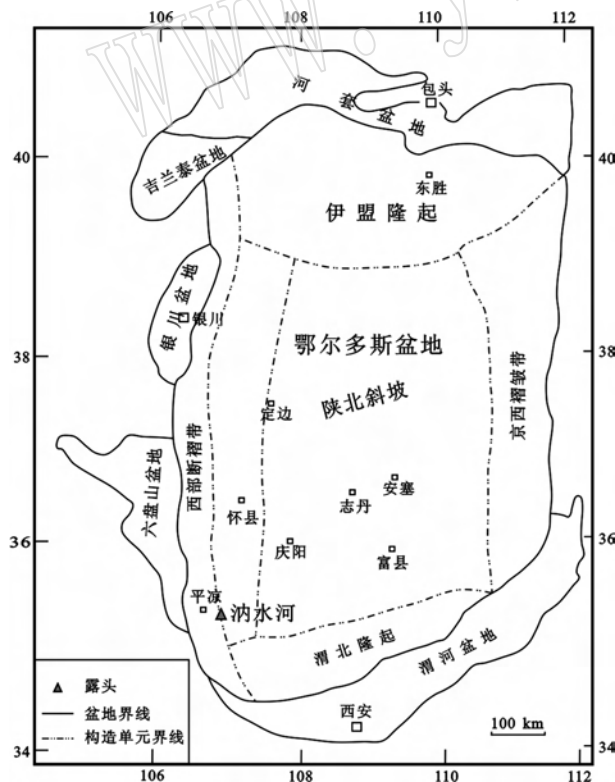


图1 纳水河剖面所在位置图

Fig. 1 Location of the Ruishui River section

## 2 层序地层格架

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组为内陆坳陷湖盆沉积,总体为一个二级沉积旋回(即二级层序),湖盆经历了三次大的湖侵,形成长9李家畔页岩、长7张家滩页岩和长4+5泥页岩。本文研究的层段长7—长9属浅湖相—辫状河三角洲前缘—辫状河三角洲平原沉积。浅湖相沉积主要为细粒沉积,岩性为绿灰、深灰色泥岩夹粉砂岩,内部可见砂纹层理。三角洲前缘亚相主要发育水下分流河道、河口坝、席状砂和辫状水道,岩性为灰色、浅灰色中细砂岩为主,内部可见槽状交错层理。在三角洲前缘与浅湖相沉积中发现大量的植物茎干化石与碎片以及常见的介形虫浅水化石等,生物扰动和潜穴构造也时常出现。平原亚相主要发育辫状河道及河道间沉积,以灰色、浅灰色中至粗粒砂岩为主,底部可见冲刷构造,发育大型槽状交错层理、楔状交错层理及平行层理。

总体上,长9中上部—长7中下部构成了一个完整的辫状河三角洲沉积旋回。层序界面位于长8中上部,位于研究区的中部,对上下储层物性有影响。

## 3 三级层序界面对储层成岩作用的影响

层序界面是一个重要的沉积转换面,在陆相盆地中是构造和气候对沉积的影响产物,其上下的沉积产物属于两个差异较大的沉积环境,必然导致其在沉积初期成分上的差异,进而影响其储层成岩作用。下面从砂岩的岩石学特征、填隙物特征和孔隙发育特征三个方面加以讨论。

### 3.1 层序界面上下砂体岩石学特征差异

纳水河剖面砂体主要以细—中粒长石岩屑砂岩为主(图2),其次为细—中粒岩屑长石砂岩,含有少部分岩屑砂岩及灰质、含灰质长石岩屑砂岩。砂体石英含量平均为29.7%,长石含量平均为32.2%,岩屑含量平均为35.1%。岩屑以火成岩屑为主,有少量的变质岩岩屑与沉积岩屑;褐色—褐黄色黑云母碎屑普遍存在于砂岩内,其最大含量可达19.5%,多呈纹层状分布。

在三级层序中,基准面下降半旋回的砂岩,以长石岩屑砂岩为主,石英、长石含量呈增多趋势,而岩屑含量呈减少趋势;基准面上半旋回的砂

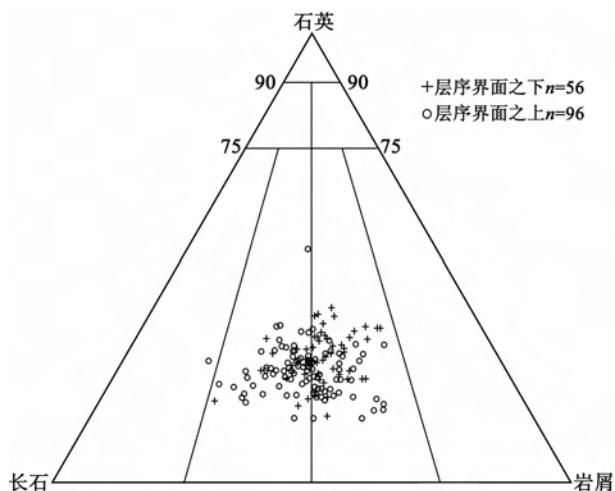


图2 纳水河剖面长9—长7砂岩成分三角图(据 Folk, 1980)  
Fig.2 Triangular diagram showing QFR composition of Chang 9—Chang 7 Member sandstones from Ruishui River profile (from Folk, 1980)

岩以岩屑长石砂岩为主,石英、长石含量呈减少趋势,而岩屑含量呈增多趋势(图3)。由表1可以看出三级基准面下降半旋回的石英含量由最小值17.2%上升到最大值45.5%,长石含量由最小值15.4%上升到最大值42.3%,岩屑含量由最大值46.7%下降到最小值20.5%;基准面上升半旋回的砂岩的石英含量由最大值60.6%下降到最小值16.7%,长石含量由最大值51.7%下降到最小值8.9%,岩屑含量由最小值14.2%上升到最大值54.5%,本剖面的其余三级基准面旋回的岩石组分变化皆具有此规律。

### 3.2 层序界面上下填隙物特征差异

层序界面下的砂岩主要发育浊沸石(图4a、4b、4c),含量相对较高;层序界面上的砂岩方沸石(图4d、4e、4f)胶结物发育。界面下砂岩中浊沸石最大含量可达6%,平均值可达1%,只有个别样品含有微量的方沸石,呈零星分布;界面上的砂岩中方沸石

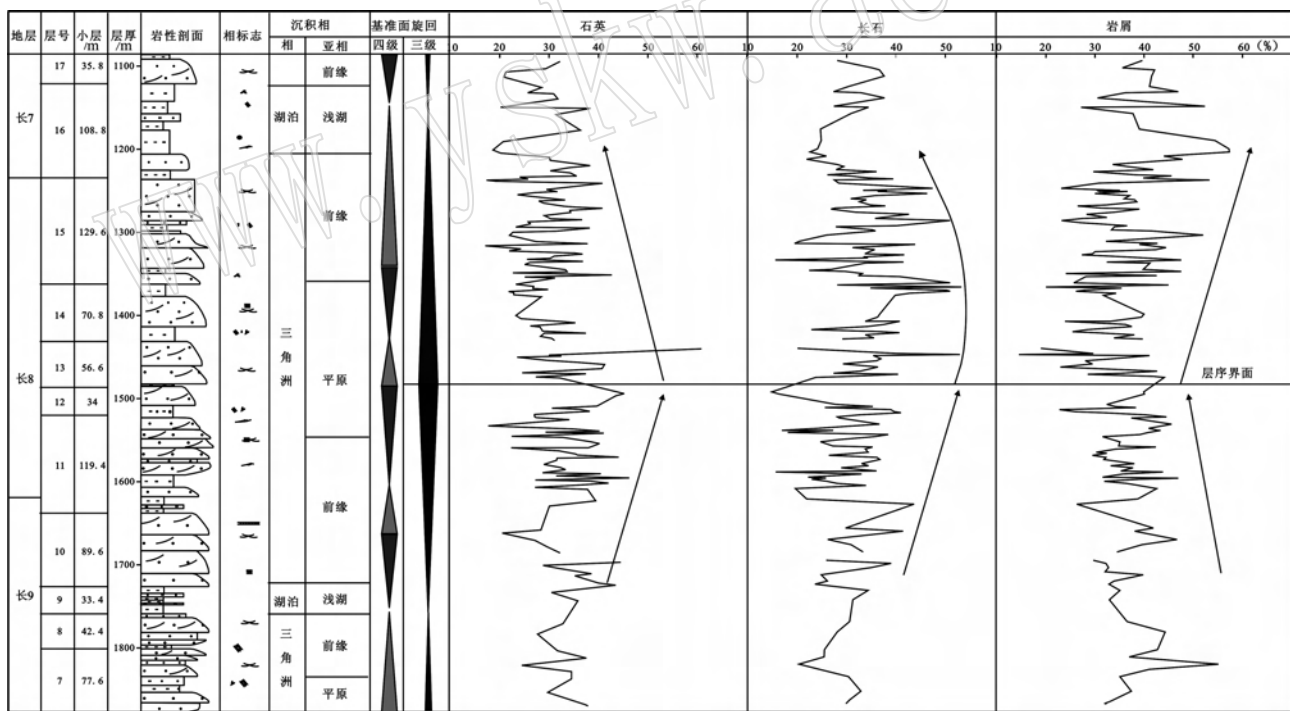


图3 三级层序界面上下砂岩成分含量图

Fig.3 The mineral composition of sandstones over and below the three grade sequence boundary

表1 三级层序界面上下不同基准面旋回中矿物成分含量统计表

Table 1 Mineral composition of sandstones over and below the Grade 3 sequence boundary

旋回	石英/%	长石/%	岩屑/%			薄片块数
			火成岩屑	变质岩屑	沉积岩屑	
上升半旋回	60.6 ~ 16.7(29.1)	51.7 ~ 89.0(32.7)	40.5 ~ 8.5(20.5)	19.9 ~ 0(8.5)	10.3 ~ 0(2.3)	96
下降半旋回	45.5 ~ 17.2(32.8)	42.3 ~ 15.4(29.6)	34.7 ~ 12.5(21.4)	18.0 ~ 0(9.2)	0.4 ~ 0(2.0)	56

备注:含量表示为最大值~最小值(平均值),下同。

最大含量可达4%,平均含量为0.9%,在近百块薄片内只有4块薄片含有浊沸石,含量在 $0.3\% \pm$ (表2)。

浊沸石的形成与斜长石密切相关,因为斜长石( $\text{Ca}, \text{Na}_2$ ) $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ 和浊沸石( $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )都属架状硅酸盐矿物,成分和结构相似,因此

浊沸石可在斜长石发生钠长石化过程中形成(黄思静等,2001)。以钙长石为例,其反应式如下: $2\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (钙长石) +  $2\text{Na} + 4\text{H}_2\text{O} + 6\text{SiO}_2 = 2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (钠长石) +  $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$ (浊沸石) +  $4\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+}$ 。从上述反应可以看出,砂岩中含有的较多斜长石及

表2 三级层序界面上下不同基准面旋回中砂岩中面孔率及填隙物含量统计表  
Table 2 Area-porosity ratio and matrix of sandstones over and below the Grade 3 sequence boundary

旋回	面孔率/%	方解石/%	方沸石/%	浊沸石/%	薄片块数
上升半旋回	6.0~0.00(1.2)	40.0~0(1.0)	4.0~0(0.9)	0.6~0	96
下降半旋回	2.2~0.00(0.4)	35.0~0(1.0)	-	5.0~0(1.0)	56

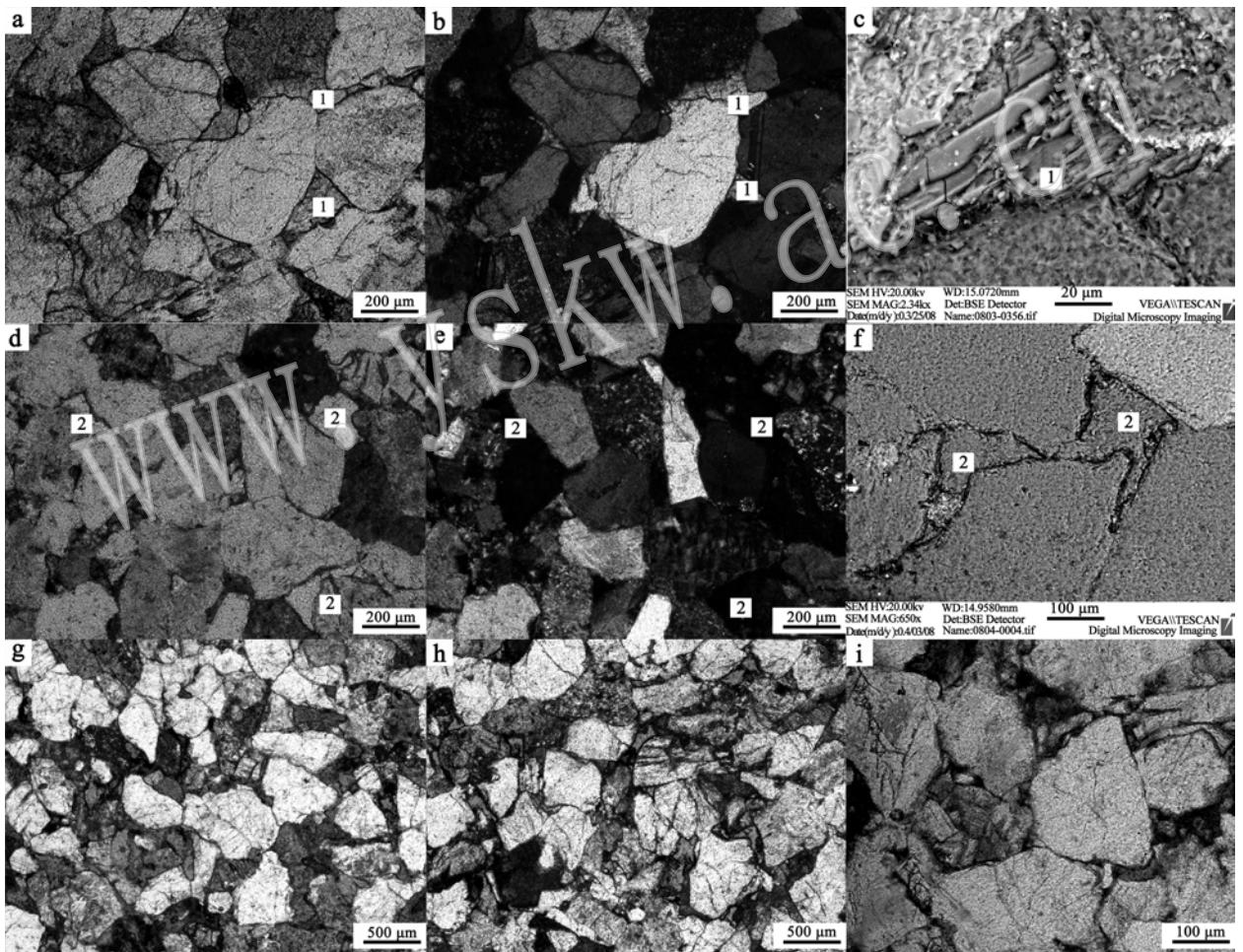


图4 纳水河剖面延长组砂岩成岩及孔隙发育特征

Fig. 4 Characteristic of diagenesis and pores in Yanchang Formation along the Ruishui River profile

a—单偏光下浊沸石(1),充填于颗粒之间;b—正交偏光下的浊沸石(1),呈一级黄干涉色;c—扫描电镜下的浊沸石(1),解理发育;d—单偏光下方沸石(2),充填于颗粒之间;e—正交偏光下的方沸石(2),呈微弱的干涉色,接近全消光;f—扫描电镜下的方沸石(2);g—层序界面上的面孔率,比较发育;h—层序界面下的的面孔率; i—浊沸石被溶蚀的现象

a—aedelforsite(1) filled between grains (single polar); b—aedelforsite(1) assuming interference color of first order yellow (crossed polars); c—cleavage developed in aedelforsite (1) under SEM; d—analcidite(2) filled between grains (single polar); e—analcidite(2) of faint interference color or almost complete extinction (crossed polars); f—analcidites(2) under SEM; g—in-plane pores well developed above the sequence boundary; h—in-plane pores below the sequence boundary; i—aedelforsites corroded

碱性富钠的孔隙水有利于浊沸石的形成。通过扫描电镜分析,粒间孔隙中可见钠长石,说明孔隙水在成岩期有富钠环境,有利于浊沸石的形成。另一方面,浊沸石的形成还可能与盆地北部物源区在延长统时期多次火山活动有关,陕北三角洲长7和长6地层中发育多层凝灰质层或含凝灰质泥岩,这是当时火山活动的直接证据(杨晓萍等,2002)。

方沸石是一种等轴晶系的铝硅酸盐矿物,它的化学分子式为  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,属于硅铝比最低的低硅沸石类矿物,是在  $\text{SiO}_2$  活度很低的溶液中生成的,原始物质属于偏碱性的岩类。方沸石无论是在碱性盐湖还是在海相、非海相环境中都能形成,特别是在蚀变的凝灰岩以及富含火山碎屑的岩石中更为丰富(关德范等,2003)。

浊沸石是一种含钙矿物,方沸石是含钠矿物,砂岩的长石碎屑组分对它们的形成有决定影响。纳水河延长组以火山岩屑为主,长石以斜长石为主。通过

镜下观察,在界面下砂岩中,斜长石的钠长石化现象非常普遍,长石类型主要有中长石,干涉色为一级白到一级黄,富钙,这为浊沸石的形成提供了物质基础。在界面上砂岩中,长石类型以碱性长石为主,主要有微斜长石、条纹长石和钠长石,这为方沸石的生成提供了很好的物质基础。当地层水介质达到一定的条件时,就会从火山岩碎屑中溶解出大量的钠、铝、硅等离子,并在适当的温度和压力下生成方沸石。

### 3.3 层序界面上下面孔率特征差异

经大量薄片鉴定,纳水河剖面孔隙类型主要为次生溶蚀孔。薄片普遍可见胶结物溶蚀孔隙(图4i),如方沸石溶蚀孔隙。层序界面上面孔率比界面下要大得多(图5)。基准面上半旋回的面孔率平均值为1.2%,最大值可达6%;基准面下降半旋回的面孔率平均值为0.4%,最大值只有2%(表2)(图4g,4h)。方沸石具有良好的次生溶蚀孔,浊沸石溶蚀弱,因此层序界面之上,表现出更好的储层物性。

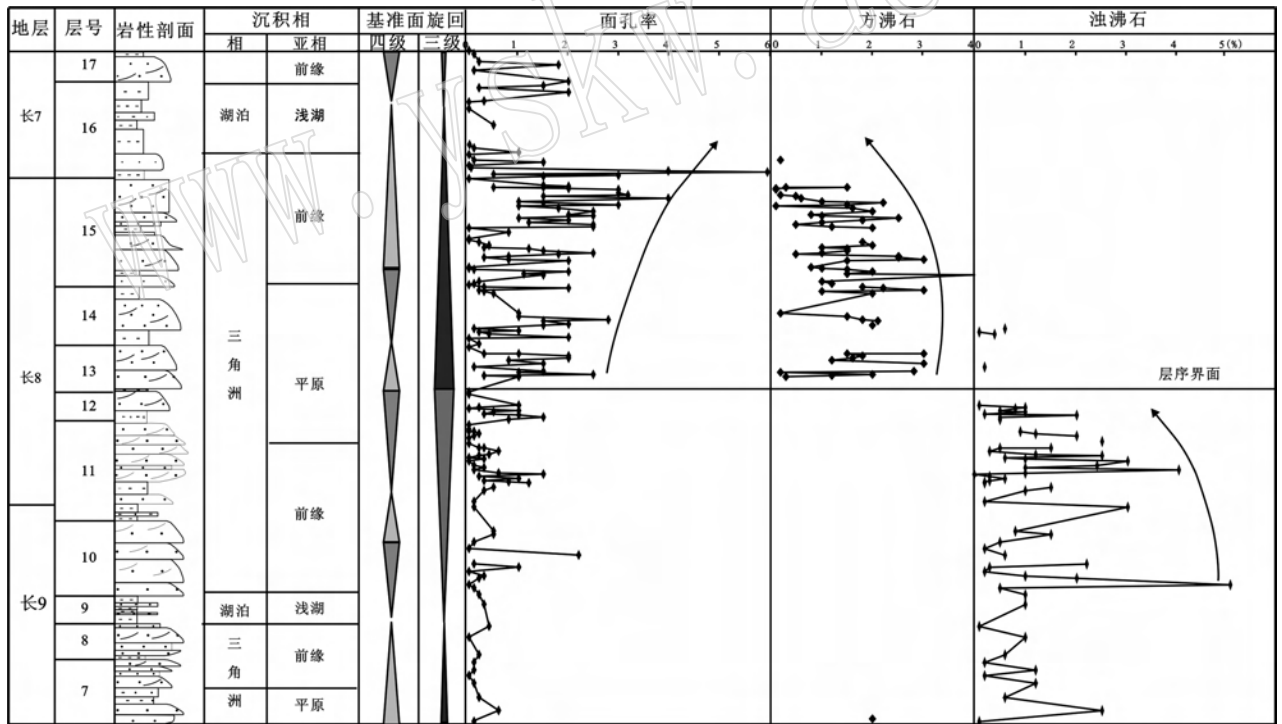


图5 三级层序界面上下面孔率及填隙物含量变化图

Fig. 5 Variation of the area-porosity ratio and matrix in sandstones over and below the Grade 3 sequence boundary

如上文所述,上下不同基准旋回中岩石学特征、成岩作用及储集性能均出现较大的差异,结合基准面旋回变化不难发现,基准面旋回格架控制了沉积环境,沉积环境是控制储集体的形成与分布、影响储层储集性能的宏观因素,而基准面旋回控制了砂体的沉积,进而影响着储层的发育。

## 4 结论

通过对鄂尔多斯盆地西南缘纳水河剖面延长组长9—长7辫状河三角洲沉积旋回的研究,得到以下几点认识:

(1) 层序界面下的砂岩,以长石岩屑砂岩为主,石英、长石含量呈增多趋势,岩屑含量呈减少趋势;界面上砂岩以岩屑长石砂岩为主,石英、长石含量呈减少趋势,岩屑含量呈增多趋势。

(2) 层序界面下为中性富钙环境,填隙物主要发育浊沸石;界面上为碱性富钠环境,发育方沸石。总体向上填隙物的含量呈减少趋势,储层质量向上变好。

(3) 层序界面上的孔隙较界面下发育,溶蚀填隙物形成的次生孔隙,改善了储集性能。

总体而言,在汭水河三级基准面上升下降半旋回内,储层成岩作用都有很大的变化,基准面旋回对储层的好坏有着控制作用,可能存在三叠纪末期大气淡水的淋滤作用。

## References

Folk R L. 1980. Petrology of Sedimentary Rock [M]. Austin, Texas: Hemphill Publishing Company, 1~182.

Guan Derfan, Zheng Herong and Long Shengxiang. 2003. Analysis on exploration potential for oil and gas in eastern exploration region of China Petroleum and Chemical Corporation[J]. Acta Petroleoi Sinica, 24(2): 1(in Chinese).

Han Yonglin, Li Jian, Wang Haihong, et al. 2005. Analyzing sedimentary system of Early stage of Late Triassic in southwest of Ordos Basin [J]. Low Permeable Sublayer Field, 10(4): 1~5(in Chinese).

Huang Sijing, Liu Jie, Shen Licheng, et al. 2001. Thermodynamic interpretation for the conditions of the formation of Laumontite related to clastic diagenesis[J]. Geological Review, 47(3): 301~308(in Chinese).

Li Hong, Liu Yiqun and Liu Linyu. 2006. Diagenesis of Chang 81 reservoir with low permeability in Xifeng oilfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 26(2): 209~217(in Chinese).

Luo Zhong, Luo Ping, Zhang Xinyang, et al. 2007. Effect of sequence boundary on sandstones and diagenesis reservoir quality: an outcrop study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, Northwest China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 25(6): 903~914(in Chinese).

Yang Xiaoping and Qiu Yanan. 2002. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang Formation (Upper Triassic) of Ordos basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 20(4): 628~632(in Chinese).

Yang Youyun. 2005. Characteristics of the depositional systems and sequence evolution of yanchang formation in the southern Ordos Basin [J]. Geological Bulletin of China, 24(4): 369~372(in Chinese).

Yang Youyun, Zhang Fengbo and Zhang Zhongyi. 2005. Sedimentary features and sequence evolution of braided river delta of Chang 8 oil formation of Xifeng oil field in Ordos Basin[J]. Geological Science

and Technology Information, 24(1): 45~48(in Chinese).

Yu Bo, Cui Zhilin, Liu Xuegang, et al. 2008. The diagenesis of Chang-8 reservoir sandstone and its effect on porosity in Xifeng Oilfield[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 38(3): 405~410, 416(in Chinese).

Yu Bo, Nan Junxiang and Zhang Zhongyi. 2007. Sandstone diagenesis of Chang-8 reservoir in Xifeng Oilfield of Ordos Basin [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Science), 43(6): 13~17(in Chinese).

Zhang Fengkui, Zhang Zhongyi and Zhang Lin. 2008. New sequence stratigraphic observations of the triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 32(1): 99~105(in Chinese).

Zhang Guowei, Mei Zhichao, Zhou Dingwu, et al. 1988. The formation and evolution of Qinling orogenic zone [A]. Zhang Guowei. The Formation and Evolution of Qinling Orogenic Zone [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1~16(in Chinese).

Zhou Dingwu, Zhao Chongyuan, Li Yinde, et al. 1994. The Relationship Between Geologic Characteristic of the South-West Ordos Basin and Qinling Orogenic Zone [M]. Beijing: Geological Press, 167~172(in Chinese).

## 附中文参考文献

关德范,郑和荣,龙胜祥. 2003. 中国石化东部探区油气勘探潜力分析 [J]. 石油学报, 24(2): 1.

韩永林,李健,王海红,等. 2005. 鄂尔多斯盆地西南缘晚三叠世早期沉积体系分析[J]. 低渗透率油气田, 10(4): 1~5.

黄思静,刘洁,沈立成,等. 2001. 碎屑岩成岩过程中浊沸石形成条件的热力学解释[J]. 地质评论, 47(3): 301~308.

李红,柳益群,刘林玉. 2006. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长 8 低渗透储层成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 26(2): 209~217.

罗忠,罗平,张兴阳,等. 2007. 层序界面对砂体成岩作用及储层质量的影响—以鄂尔多斯盆地延河露头上三叠统延长组为例 [J]. 沉积学报, 25(6): 903~914.

杨晓萍,裴锋楠. 2002. 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[J]. 沉积学报, 20(4): 628~632.

杨友运. 2005. 鄂尔多斯盆地南部延长组沉积体系和层序特征[J]. 地质通报. 24(4): 369~372.

杨友运,张蓬勃,张忠义. 2005. 鄂尔多斯盆地西峰油田长 8 油组辫状河三角洲沉积特征与层序演化[J]. 地质科技情报, 24(1): 45~48.

于波,崔智林,刘学刚. 2008. 西峰油田长 8 储层砂岩成岩作用及对孔隙影响[J]. 吉林大学学报地球科学版, 38(3): 405~410, 416.

于波,南翔祥,张忠义. 2007. 鄂尔多斯盆地西峰油田长 8 储层的砂岩成岩作用[J]. 兰州大学学报自然科学版, 43(6): 13~17.

张凤奎,张忠义,张林. 2008. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组层序地层特征新认识[J]. 地层学杂志, 32(1): 99~105.

张国伟,梅志超,周鼎武,等. 1988. 秦岭造山带的形成及其演化 [A]. 张国伟. 秦岭造山带的形成及其演化 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1~16.

周鼎武,赵重远,李银德,等. 1994. 鄂尔多斯盆地西南缘地质特征及其与秦岭造山带的关系 [M]. 北京: 地质出版社, 167~172.