

文章编号: 1000-0550(2003)02-0272-06

# 陕甘宁盆地陇东地区长 8 油组厚层 非均质砂体的沉积学解剖<sup>①</sup>

郑希民<sup>1</sup> 宋广寿<sup>2</sup> 王多云<sup>1</sup> 李凤杰<sup>1</sup> 王志坤<sup>1</sup> 李树同<sup>1</sup> 王 峰<sup>1</sup> 刘自亮<sup>1</sup>

1 (中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

2 (长庆油田公司第二采油厂 甘肃庆阳 745100)

**摘 要** 通过对延长统长 8 段厚层砂岩沉积岩石学和层序地层学研究,将其分为两类,一类是由多期单一成因的分流河道砂岩叠加构成;另一类是由三角洲前缘的水下分流河道、河口坝、坝顶席状砂和滑塌砂等多种沉积微相以不同的组合形式叠加构成。首次提出在“高可容纳空间,高沉积通量”背景下,只有经过特殊水动力条件(淘洗)改造后形成的被我们称之为坝顶席状砂的砂岩才有可能成为相对高孔、高渗的优质储层。

**关键词** 陕甘宁盆地 厚层砂体 沉积微相 席状砂

**第一作者简介** 郑希民 男 1962 年出生 副研究员 储层沉积学和煤岩学

**中图分类号** TE122.2 **文献标识码** A

## 1 前言

我国中生代陆相盆地中的厚层砂岩(厚度一般大于 10 m)十分普遍,油(气)往往赋存于厚层砂岩的某一段<sup>①</sup>,因而,人们通常更注重研究与这种储层非均质性有关的砂岩的组成、结构、物性以及开发与有关的流动单元划分等问题,而疏于对其序列的沉积学分析,由此造成对厚层砂体中优质储层的成因解剖、预测方法以及精细对比等问题研究较少。

陕甘宁盆地陇东地区三叠系延长统普遍发育厚层砂岩,尤其在单旋回的延长湖形成发育阶段(长 10 长 9 长 8)和萎缩消亡阶段(长 3 长 2 长 1)最为普遍,它们构成了该地区最主要的储层类型。其中长 8 油组作为陇东地区延长统的主要含油层之一,是在特低孔隙度和特低渗透率的厚层砂岩中保存的相对优质储层(孔隙度大于 12%、渗透率在  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  以上)的典型代表。长 8 油组厚度一般在 12 m 以上,而有效储层厚度为 2~3 m,前人对该套厚砂岩解释为三角洲前缘水下分流河道或河口坝成因,并作为一个整体以其顶底界进行储层对比。但是大量石油钻井资料显示,该套厚层砂岩的物性、含油性在时间位置和空间分布等方面有很大差异。如果将其视为一种沉积成因的砂体,显然无法解释这些现象。本文通过岩心的宏观、微观对比分析、岩相-测井相对比分析,精细解剖了其沉积相序与成因组成,首次发现这套厚层砂岩由多个具有不同

岩性和物性特征的沉积微相复合叠加组成,并结合层序地层学及高分辨率层序地层学理论对优质储层的沉积成因提出了新的认识。作者认为,这种对厚层砂岩及其优质储层段的沉积学解剖和成因分析,对于加深对储层非均质性的认识、提高在勘探阶段对优质储层的预测准确度、细化开发过程中的储层建模及细分流动单元等储层研究具有重要的理论实践意义。

## 2 沉积地质背景

研究区位于陕甘宁盆地西南部,区内上三叠统延长统的物源主要来自西南边缘,其沉积基底相对较陡。区内长 8 主要为辫状河三角洲和湖泊沉积体系,长 8 早期主要为三角洲平原;长 8 晚期湖泊扩张速度加快,大部分区域为三角洲前缘和湖泊,在此期间,尽管三角洲向陆后退,但是陆源碎屑补给量依然充分,使三角洲水下分流河道和前缘朵体部位形成了厚层砂岩<sup>②</sup>。简而言之,这些厚层砂岩的沉积背景是较近距离的物源较陡的沉积基底、快速的湖泊扩张和充分的碎屑补给。

## 3 沉积微相识别标志

本文将区内长 8 油组中厚度大于 10 m 砂岩称为厚层砂岩,这些砂岩普遍发育,根据沉积成因分析,可以归纳为两类:

一类是以 Y1 井为代表的三角洲平原分流河道砂岩,其岩性为灰绿色长石砂岩,中粒与细粒互层,块状

① 中国科学院资环局知识创新工程重要方向项目资助

② 王多云等. 陇东地区长 6-8 优质储层形成机理与有利与区预测. 勘探项目研究报告(内部)

收稿日期: 2003-01-27

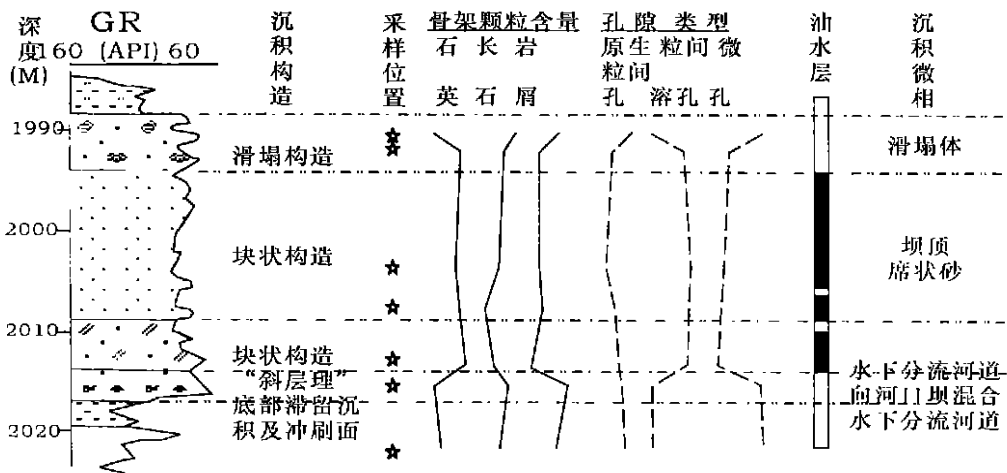


图 1 X33井沉积微相识别及划分综合标志图

Fig. 1 Integrated symbols for identifying and sedimentary microfaies in Well X33

层理与斜层理互层,不含油或仅含油斑,大致分为 T1 至 T5 五期河道充填砂岩。其内部分层现象是由多期河道砂岩充填—天然堤—顶部截削沉积作用造成的, T A Cross 对其成因已作了详细研究<sup>[3]</sup>。由于本区该类厚层砂岩的分选差,造成其物性、含油性差,在区内几乎没有形成具有工业开采价值的储层,故本文不再详细讨论。

另一类是以 X33 井、X17 井为代表的厚层砂岩,它们形成于三角洲前缘,其内部沉积构成复杂,但有规律可循,主要由水下分流河道、河口坝、坝顶席状砂和滑塌体等沉积微相以不同的组合方式复合叠加构成,见图 1 图 2。下面以 X33 井为例对其进行详细剖析。

### 3.1 水下分流河道沉积微相

该微相位于 X33 井 2 014~2 018 m,岩性为浅灰绿色中粒岩屑长石砂岩<sup>[4]</sup>,含云母及暗色矿物,骨架颗粒含量是石英 42%~44%,长石 33%~34%,岩屑 23%~26%;与上部层为对比,石英含量低,长石和岩屑含量高。底部为冲刷面并有底部滞留沉积物,见图版 I-a。该层在岩芯上观察主要为“斜层理”,局部为块状层理。孔隙类型以晶间、粒内和杂基内微孔为主,不含油。自然伽玛曲线为低幅值箱形或钟形。

### 3.2 水下分流河道与河口坝混合微相

由于这套厚层砂岩是在湖泊快速扩张即短期基准面持续上升过程中形成的,在三角洲前缘部位逐渐分流河道后退,以河口坝为主的前缘朵体逐渐发育。在 X33 井的 2 008 至 2 014 m 井段则为二者交互沉积层段。其岩性特征是灰绿色中粒岩屑长石砂岩与中细粒长石砂岩互层,见图版 I-b;由下向上即石英含量逐渐增高,长石与岩屑含量逐渐减少。粒间溶孔开始发育,

微孔急剧减少,含油斑。自然伽玛曲线幅值略微增大同时齿化明显。

### 3.3 坝顶席状砂微相

席状砂是三角洲前缘向湖推进、卸载过程中,随着波浪作用的加强,堆积于河口坝的砂屑被淘洗、搬运再次堆积形成的。在以波浪作用为主的三角洲前缘沉积的几乎所有砂坝都被改造成前缘席状砂,或被搬运到河口两侧沿岸地区堆积成湖滩。这里提出的坝顶席状砂专指在原地被淘洗改造尚未脱离朵体范围的前缘席状砂。另外,坝顶席状砂有些位于水下分流河道的顶部(如图 2a),而有些位于河口坝的顶部(如图 2b);前者是河口坝在替代水下分流河道的同时立刻被改造形成了席状砂,使原生的河口坝特征不够显著。

在 X33 井 1 994 至 2 008 m 井段为坝顶席状砂,其岩性为灰绿色、浅灰绿色细粒长石砂岩,骨架颗粒含量是石英 49%~52%,长石 31%~33%,岩屑 16%~19%;与水下分流河道砂岩相比,其粒度偏细并且均匀,岩屑含量明显偏低,均为块状层理,粒间溶孔占绝对优势,含油丰富(油侵状,见图版 I-c)。自然伽玛曲线相对幅值偏高、线性光滑(X33 井)。在岩芯中可见,坝顶席状砂中局部夹有水下分流河道砂岩或河口坝砂岩,这些夹层小于 0.5 m,不含油或仅含油斑,由于他们的出现,造成了自然伽玛曲线出现小的锯齿。

### 3.4 滑塌体微相

该微相位于 X33 井 1 985 至 1 994 m 井段,岩性为中—细粒岩屑长石砂岩,根据其骨架颗粒成分分析,其底部成分与坝顶席状砂相似,其上部成分与水下分流河道及河口坝相似,因此,判断该滑塌体是由不同微相经多期滑塌组成的。滑塌砂岩的突出特征是含大量

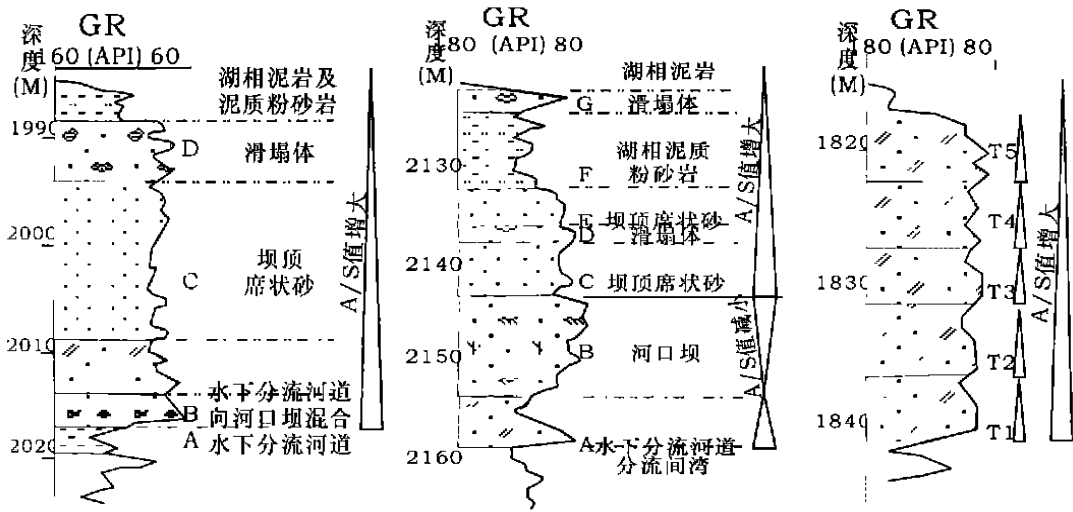


图 2 微相及旋回层序划分图

Fig. 2 Division of microfacies and cyclic sequence

湖相泥岩,这些泥岩呈揉皱变形的片状、块状、角砾状,局部砂泥混杂,显现出典型的滑塌构造特征,见图版 I-e。其原生粒间孔微孔发育,尤其是原生粒间孔要比其他微相更发育。自然伽玛曲线呈复合(短)指型,顶部平直,“突变”为湖相泥岩。该微相在研究区长 81 顶部和长 7 中下部非常发育,经常出现于河口坝或坝顶席状砂的顶部或浊积扇的底部。

### 3.5 河口坝微相

典型的河口坝见于 X17 等井中,见图 2b。其岩性为浅灰绿色中粒、细粒岩屑长石砂岩,局部夹同色、同成分粉—细砂岩,含植物碎片或树干;块状层理和砂纹层理,纹层面上富集云母或植物碎片,不含油或仅含油斑,见图版 I-d。自然伽玛、自然电位曲线为中—高幅漏斗型。

## 4 基准面旋回层序划分

T. A. Cross 将基准面旋回层序(以下简称为旋回层序)分为长期、中期和短期三个级别。本项目根据各级旋回层序的定义及其界面的识别标志<sup>[5]</sup>,结合本区延长统及长 8 层序特征,认为长 8 三角洲前缘的厚层砂岩的规模相当于 1~2 个短期旋回层序。

### 4.1 旋回层序的界面识别标志

在 X33 井和 X17 井厚层砂岩的底部均为水下分流河道,砂岩粒度相对较粗,含有底部滞留沉积物,自然伽玛曲线的底部平直与下部岩层突变,底冲刷面特征明显。该冲刷面为短期旋回层序的底界面,见图 2。在没有冲刷面或者冲刷面不清晰的层段,并不完全意味着没有旋回层序界面。在这种情况下,可以根据岩相

组合特征来判断旋回层序界面是否存在。X17 井厚层砂岩的 A-B 段为不对称的旋回层序。从 C 段向上,粒度逐渐变细,深水沉积微相逐渐增多,呈现出向上“变深”<sup>[6]</sup>的上升半旋回层序特征。在 X17 井附近,这类厚层砂岩普遍存在, C-G 段的厚度达到 20~30 m,在 C-G 段没有发现向上“变浅”的沉积微相类型;依据这些特征判断,该层段不是自旋回沉积作用的结果,而是盆地的 A/S 值逐渐增大造成的,这与下部 B 段的 A/S 值变化趋势相反,因此, B 段与 C 段之间肯定存在一个旋回层序界面。按照厚层砂岩的厚度规可以将岩相组合特征确认旋回界面时,首先要正确识别那些粒序能代表基准面的变化,那些粒序不能代表基准面的变化。例如,两类砂岩上部的滑塌砂岩,其粒度比下部砂岩偏粗,仅从粒序而言,二者为向上变粗的反粒序,似乎是一个基准面下降—三角洲进积的过程。实际上,从河口坝或坝顶席状砂向上变为滑塌体的组合是基准面上升—三角洲退积的过程。所以,向上“变粗”并不完全代表基准面下降,向上“变细”也不完全代表基准面上升。只有用标志层、粒序、微相、岩矿成分等综合标志划分的旋回层序才更接近客观实际。

### 4.2 旋回层序的沉积构型

由图 2 可见,厚层砂岩的短期旋回层序有向上“变深”半旋回和不对称旋回两种类型,而这两种短期旋回层序的沉积构型—沉积微相成因组合却各不相同。

不对称短期旋回层序以 X17 井厚层砂岩下部为代表,上升半旋回为水下分流河道,沉积厚度较薄;下降半旋回为河口坝,沉积厚度较大。关于旋回层序不对称的原因和下降半旋回没有水下分流河道进积只有河

口坝反粒序的问题, 将另文讨论。

向上“变深”旋回层序有两种沉积构型, 一种是以 X33 井厚层砂岩为代表的水下分流河道+ (河口坝) 坝顶席状砂+ 滑塌体微相组合; 另一种是以 X17 井厚层砂岩上部为代表的坝顶席状砂+ 滑塌体+ 湖相泥质粉砂岩+ 滑塌体组合。这两种沉积构型共同反映出, 由下向上三角洲逐渐向后退积, 湖泊逐渐扩张。值得注意的是, 在短期基准面上升的过程中, 可容纳空间 ( $A$  值) 增大, 尽管三角洲的后退改变了砂屑的堆积方式, 但从各沉积微相的砂岩厚度判断, 沉积碎屑通量 ( $S$ ) 并没有明显减少。这个特征表明, 沉积碎屑通量 ( $S$ ) 只是相对于可容纳空间 ( $A$ ) 变小, 而不是其绝对值减小了。在相同的沉积环境中,  $S$  值相对于  $A$  值变小和自身的绝对减小其沉积结果将截然不同。因此, 有必要加以区分和深入研究。

## 5 厚层砂岩的沉积成因讨论

### 5.1 可容纳空间 ( $A$ ) 与沉积通量 ( $S$ ) 同步增大是主导因素

在长 8 三角洲前缘厚层砂岩形成的过程中, 湖泊

向陆地扩张的强度逐渐增大, 可容纳空间向陆迁移; 此时, 来自源区的沉积物供给量依然充分; 这种“高可容纳空间, 高沉积通量”— 湖泊与三角洲对峙的局面使三角洲前缘沉积了厚层砂体。由于湖泊扩张速度过快, 使沉积通量相对变小, 即  $A/S > 1$ , 造成三角洲被动后退, 来自物源的碎屑被迫提前卸载。从三种旋回层序的构型分析, 由下向上, 沉积微相逐渐由浅向深演化, 表明  $A/S$  值逐渐增大。期间三角洲有进积特征, 但持续时间短暂, 发育规模较小。到了厚层砂岩发育的晚期, 湖泊与三角洲的对峙达到高峰, 被动卸载的沉积碎屑量最大, 在三角洲前缘形成的势能也最强, 为滑塌体的形成创造了条件, 见图 3。

### 5.2 坝顶席状砂是湖浪与溯源共同作用形成的

坝顶席状砂的物质基础来自于三角洲前缘的河口坝或水下分流河道。在浪控三角洲中, 席状砂非常发育, 但厚度较薄。本文所称的坝顶席状砂不仅厚度大, 其中还经常夹有发育“斜层理”的水下分流河道砂岩, 在平面上发育于水下分流河道与河口坝的交汇部位。初步判断, 其成因除了湖浪的淘洗, 还有已经堆积的砂屑随湖水溯源再随河水入湖而被往返淘洗, 见图 4。

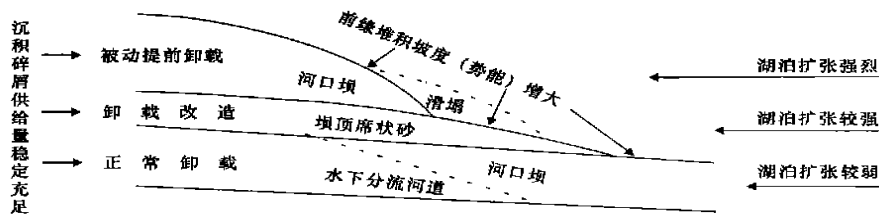


图 3 三角洲前缘厚层砂岩成因模式示意图

Fig. 3 Sketch map on genetic model of thick sandstones at delta front

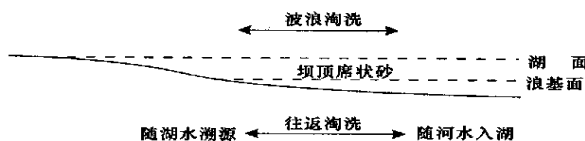


图 4 坝顶席状砂成因模式示意图

Fig. 4 Sketch map on genetic model of the sheet sand over bars

## 6 结论

(1) 本区长 8 厚层砂岩分为两类, 一类是三角洲平原分流河道成因的多期河道充填砂岩, 另一类是由三角洲前缘的水下分流河道、河口坝、坝顶席状砂和滑塌砂等多种沉积微相以不同的组合形式叠加构成的砂

岩;

(2) 本区长 8 三角洲前缘的厚层砂岩不仅能划出几个沉积微相, 其内部甚至存在短期旋回层序界面, 进而分为 (归入) 两个短期旋回层序;

(3) 本区长 8 的分流河道、水下分流河道、河口坝和滑塌体等成因砂岩多为中-细粒岩屑长石砂岩, 分选差, 物性差, 含油性差。坝顶席状砂主要为细粒长石砂岩, 位于河口坝或水下分流河道顶部及滑塌体的底部, 是区内相对高孔、高渗的优质储层;

(4) 坝顶席状砂是在“高可容纳空间, 高沉积通量”背景下, 三角洲前缘砂屑被湖浪和砂屑溯源作用淘洗改造后形成的。

本项目微观资料由史基安研究员提供, 在此深表感谢。

## 参考文献 (References)

- 1 王多云, 陈应泰, 徐洪生. 受周期性湖平面升降控制的冲积扇—扇三角洲沉积体系 [J]. 沉积学报, 1991, 9(4): 43~ 48 [Wang Duoyun, Chen Yingtai, Xu Hongsheng. Alluvial fan-fandelta-lacustrine sedimentary system controlled by lake-level changes: Ganchaigou Formation (Tertiary), Front of Aertjnsan, Western Chaidamu Basin, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 9(4): 43~ 48]
- 2 李凤杰, 王多云, 郑希民等. 陕甘宁盆地华池地区延长组缓坡带三角洲前缘的微相构成 [J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 582~ 587 [Li Fengjie, Wang Duoyun, Zheng Ximin. The microfacies architecture of delta front along gentle slope zone of Yanchang Formation in Huachi Area, Shanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 582~ 587]
- 3 Cross T A., Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata [J]. Earth Science Frontier, 2000, 7(4): 1~ 29
- 4 曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 1986. 114 [Zeng Yunfu, Xia Wenjie. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986. 114]
- 5 邓宏文, 王红亮, 翟爱军等. 中国陆源碎屑盆地层序地层与储层展布 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 108~ 114 [Deng Hongwen, Wang Hongliang, Zhai Aijun. Sequence stratigraphy and reservoir distribution in China Sterrigenous Clastic Basins [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2): 108~ 114]
- 6 郑荣才, 尹世民, 彭军. 基准面旋回结构与叠加式样的沉积动力学分析 [J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 369~ 375 [Zheng Rongcai, Yi Shimin, Peng Jun. Sedimentary dynamic analysis of sequence structure and stacking pattern of base-level Cycle [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 369~ 375]

## Sedimentary Anatomy of Thick Anisotropic Sandstones for Chang 8 Oil Formation in Longdong Area , Shaan-Gan-Ning Basin

ZHENG Xi-min<sup>1</sup> SONG Guang-shou<sup>2</sup> WANG Duo-yun<sup>1</sup> LI Feng-jie<sup>1</sup>

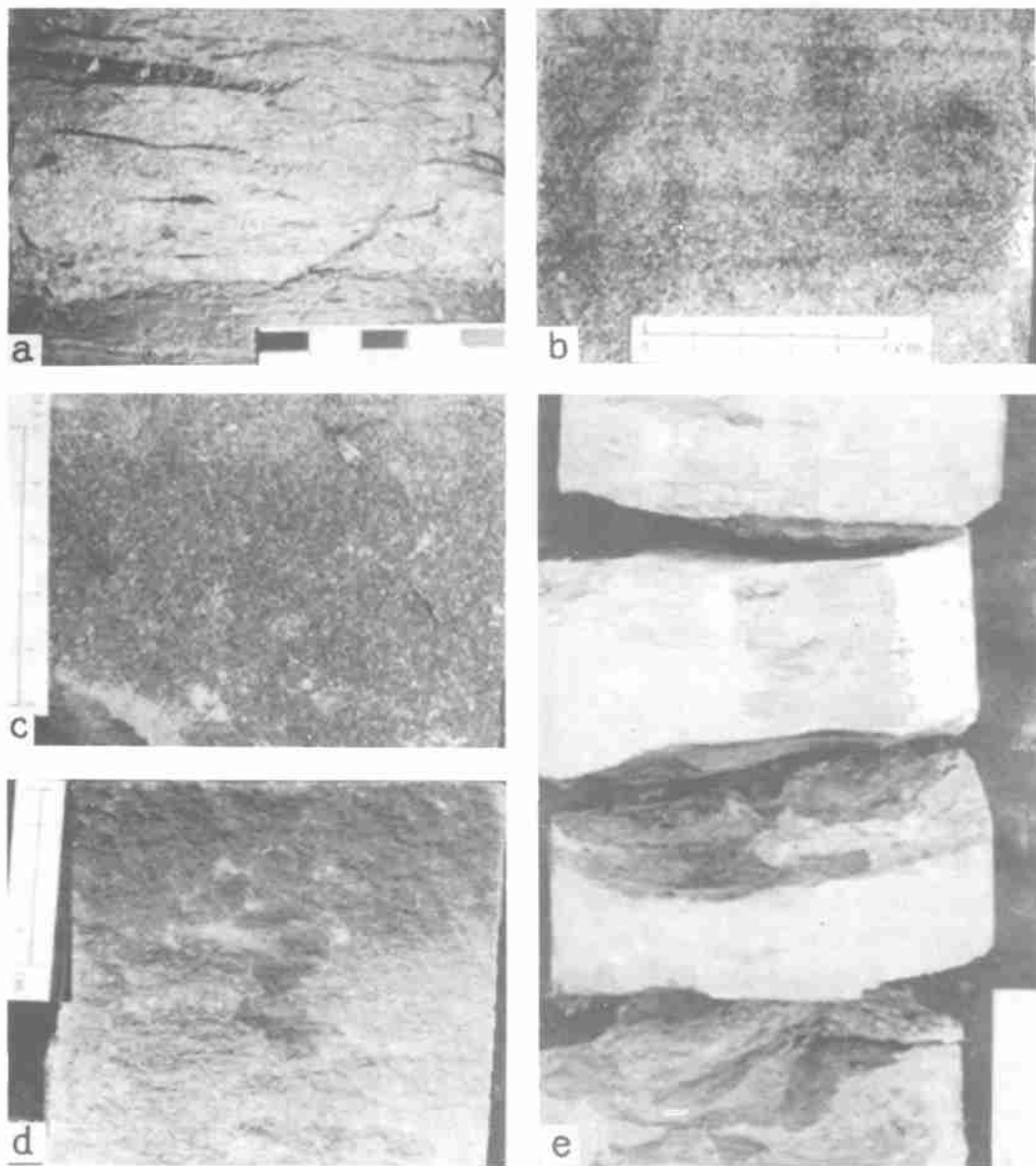
WANG Zhi-kun<sup>1</sup> LI Shu-tong<sup>1</sup> WANG Feng<sup>1</sup> LIU Zi-liang<sup>1</sup>

1(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

2(Second Oil Production Factory, Chang-Qing Corporation, Qingyang Gansu 745100)

**Abstract** The thick sandstones in Chang 8 oil Formation of Yanchang group may be divided into two types by the research on sedimentary petrology and sequence stratigraphy. One is made up of single genetic distributary channel sandstones that is stacked with multiple stages sandstone. The other is consist with many microfacies , including underwater distributary channel, river mouth bar, sheet sand over mouth bar and slump sandstone. They pile up as thick sandbody by different stacking patterns. It has been first proposed that only the sandstone called as sheet sand over mouth bar may become high-quality reservoir with relative high porosity and permeability under the background of high accommodations and high sediment alimentations.

**Key words** Shaan-Gan-Ning Basin, thick sandbody, sedimentary microfacies, sheet sand



**图版 I 说明** a. 水下分流河道底部滞留沉积, X33 井; b. 水下分流河道砂岩与河口坝砂岩互层, X33 井; c. 油浸状坝顶席状砂岩; d. 上部为油浸状坝顶席状砂, 下部为不含河口坝砂, X17 井; e. 滑塌构造, X33 井