

## 四级层序格架内浊流沉积特征及演化模式

——以鄂尔多斯盆地镇泾地区三叠系延长组7段为例

冯 烁<sup>1</sup>,李胜利<sup>1</sup>,于兴河<sup>1</sup>,何发岐<sup>2</sup>,李顺利<sup>1</sup>,齐 荣<sup>2</sup>

[1. 中国地质大学(北京),北京 100083; 2. 中国石化华北油气分公司,河南 郑州 450006]

**摘要:** 沉积期鄂尔多斯盆地西南缘镇泾地区延长组7段(长7段)既是优质烃源岩发育层段,也是浊流沉积发育的重要储集层段。镇泾地区长7段沉积期为湖盆鼎盛时期,发育深湖-半深湖向三角洲过渡的沉积体系。随镇泾地区油气勘探开发的不断深入,尤其是细粒沉积与页岩油气日益受到重视,长7段浊流沉积特征也备受关注。基于露头、岩心与测井资料,结合层序地层与沉积学研究方法,开展了四级层序格架内的浊流沉积演化与沉积模式研究。结果表明:长7段自下而上可分为MSC1、MSC2和MSC3共3个四级层序;长7段总体以细粒沉积为主,表现出前三角洲与湖相背景下的浊流沉积特征,其中前三角洲亚相主要发育在MSC3层序和MSC2层序;MSC1层序主要发育湖相沉积,三角洲不发育;浊流在3个四级旋回中的发育特征不同。结合研究区沉积演化特点,利用湖平面相对位置代表基准面变化( $V_a$ )、去压实后的平均地层厚度表征沉积物供给速率( $V_s$ ),对可容纳空间增加速率( $\Delta V_a$ )及沉积物供给速率( $\Delta V_s$ )的比值变化进行研究,建立了3种浊流沉积演化模式:湖侵泥质型、高位早期砂-泥混合型和高位晚期砂质型,其中高位晚期砂质型浊流砂体应是今后油气勘探的重点目标。

**关键词:** 可容纳空间;沉积物供给速率;四级层序;浊流沉积演化模式;沉积体系;延长组7段;镇泾地区;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:** TE121.3

**文献标识码:** A

## Sedimentary characteristics and evolution model of turbidites within a fourth-order sequence stratigraphic framework: A case study of the Triassic Chang 7 Member in Zhenjing area, Ordos Basin

Feng Shuo<sup>1</sup>, Li Shengli<sup>1</sup>, Yu Xinghe<sup>1</sup>, He Faqi<sup>2</sup>, Li Shunli<sup>1</sup>, Qi Rong<sup>2</sup>

[1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. North China Petroleum Bureau, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China]

**Abstract:** The 7<sup>th</sup> member of Yanchang Formation (Chang 7 Member) in Zhenjing area at the southwestern margin of Ordos Basin, features development of both high-quality source rocks and turbidite reservoirs. The Chang 7 Member is deposited in a period of maximum lake depth of the Ordos Basin, with its sedimentary system transitioning from deep-semi-deep lacustrine facies to deltaic facies. As the oil/gas exploration and development has been progressing in the study area, more and more attention has been paid to fine-grained deposits and shale oil/gas reservoirs, especially the sedimentary characteristics of turbidites therein. An integration of outcrop, core and logging data is applied to study sedimentary evolution and depositional patterns of the turbidites within a fourth-order sequence stratigraphic framework, in which sequence stratigraphy and sedimentology methods are adopted. The results show that the Chang 7 Member can be divided into three fourth-order sequences from bottom to top, namely MSC1, MSC2 and MSC3. The member in general is dominated by fine-grained deposits and exhibits signs of turbidite deposition in a pre-deltaic and lacustrine setting. Among others, the pre-deltaic subfacies is widely seen in MSC3 and MSC2; while the lacustrine facies predominates in MSC1 with underdeveloped deltas facies. The three fourth-order sequences feature diverse kinds of turbidite development. Three sedimentary evolution models are established for the turbidites: the lacustrine

收稿日期:2022-03-12;修订日期:2022-05-06。

第一作者简介:冯烁(1995—),男,硕士研究生,沉积储层。E-mail: 314908179@qq.com。

通讯作者简介:李胜利(1971—),男,教授,沉积储层。E-mail: slli@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(421721112);国家油气重大专项(2017ZX05001-002-003)。

transgressive muddy type, early highstand mixed sandy and muddy type, and late highstand sandy type, with the last type being the major target for future exploration. In the process, the sedimentary evolution characteristics in the study area are considered; the relative position of lake level is taken as the proxy of the base level fluctuation ( $V_a$ ), and the mean decompacted thickness serves to reflect the sediment supply rate ( $V_s$ ). Besides, the variation of the ratio of the increase rate in accommodation space ( $\Delta V_a$ ) to the sediment supply rate ( $\Delta V_s$ ) is also taken into account.

**Key words:** accommodation space, sediment supply rate, fourth-order sequence, evolution model of turbidite deposits, sedimentary system, Chang 7 Member, Zhenjing area, Ordos Basin

引用格式:冯烁,李胜利,于兴河,等.四级层序格架内浊流沉积特征及演化模式——以鄂尔多斯盆地镇泾地区三叠系延长组7段为例[J].石油与天然气地质,2022,43(4):859-876. DOI:10.11743/ogg20220410.

Feng Shuo, Li Shengli, Yu Xinghe, et al. Sedimentary characteristics and evolution model of turbidites within a fourth-order sequence stratigraphic framework: A case study of the Triassic Chang 7 Member in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 859-876. DOI: 10.11743/ogg20220410.

浊流是一种以湍流为特征的沉积物重力流,其具有牛顿流体性质且处于湍流状态,沉积物颗粒由湍流支撑<sup>[1-4]</sup>。浊积体系在中国陆相湖盆中广泛发育<sup>[5]</sup>,浊积体系发育层段可形成重要储集层<sup>[6]</sup>。浊流沉积模式的研究对于非常规油气储集层形成机理研究及页岩油储层具有重要理论价值和现实意义<sup>[7-8]</sup>。鄂尔多斯盆地拥有丰富的油气资源<sup>[5]</sup>,随着该盆地油气勘探开发的不断深入,深水浊流沉积日益受到重视。而浊流沉积模式是分析此类储集砂岩成因和预测储集层分布的基础<sup>[9]</sup>。Posamentier与Richards等认为层序地层格架下的基准面变化、物源供给对深水浊流沉积体系具有控制作用<sup>[10-11]</sup>,因此,针对不同沉积背景进行合理的层序地层划分是深水沉积体系研究的基础。在传统的层序地层划分中,低位域浊流沉积往往以富砂为特征,且更为活跃<sup>[12]</sup>;而深水浊流沉积体系常位于高位体系域的远端与海侵体系域的富泥沉积物之间<sup>[11]</sup>,但深水沉积环境往往更为复杂,需要搭建高精度的层序地层格架进行分析。四级层序是根据湖平面变化周期中最低点与最高点响应界面进行划分的<sup>[13]</sup>,可较为准确地反映浊流形成时可容纳空间特征与沉积背景;而基准面的变化是通过可容纳空间增长速率与沉积物供给速率之比值来度量的<sup>[14]</sup>,对于浊流体系而言,可容纳空间增长速率与沉积物供给速率之比和物源供给对于建立浊流沉积模式尤为重要。由于浊积体系具有向湖盆延伸较远的特点,其可直接与烃源岩接触,成为高效的油气储层。此外,泥岩可作为良好的盖层,因此浊积体系常具有良好的生储盖组合<sup>[15]</sup>。然而,由于浊流沉积常发育于湖盆相对深水区域,常规储集层相对不够发育,湖盆中揭示浊流沉积的井较少,因此湖盆相对深水环境下的浊流沉积模式有待进一步探讨<sup>[16]</sup>。

近年来,随着页岩油气在全球油气中的影响力逐步增大<sup>[17]</sup>,页岩气勘探开发越来越受到重视。中国大多数陆相含油气盆地均广泛发育富含有机质页岩,例如准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地和渤海湾盆地,为页岩油气的形成提供了物质基础<sup>[18]</sup>。鄂尔多斯盆地是中国大型含油气盆地之一,具有丰富的油气资源,其中,三叠系延长组7段(长7段)发育的优质烃源岩是该盆地页岩油的重点勘探层系<sup>[19-21]</sup>,也是浊流发育的重要层段<sup>[22]</sup>。付金华根据鄂尔多斯盆地页岩油的特点,提出了广义页岩油定义,即:鄂尔多斯盆地中生界页岩油是指三叠系长7段烃源岩发育层系内的致密砂岩和泥页岩中未经过长距离运移而形成的石油<sup>[23]</sup>。该盆地西南部镇泾区块(图1a)长7段页岩油勘探开发潜力较大<sup>[24-26]</sup>,但近些年针对长7段的研究主要集中在如何提高地震精度、页岩储层解释、油气成藏模式及地层异常压力与页岩油及页岩气相态等方面<sup>[27-31]</sup>,而对于与页岩油有一定共生关系的浊流沉积特征及沉积模式方面的研究较少。

本文在四级层序识别划分基础上,在四级层序格架下根据可容纳空间与物源供给的变化研究浊流沉积特征与沉积模式,分析长7段内不同层位沉积体系和沉积相的异同,并建立了相应浊流沉积演化模式,为推动镇泾地区长7段页岩油的沉积成因研究与浊流油气储层的勘探进程提供借鉴。

## 1 区域地质背景与层序地层划分

### 1.1 区域地质背景

研究区镇泾地区位于鄂尔多斯盆地西南角(图1a),区块面积约2 511 km<sup>2</sup>(图1b),隶属于甘肃省东部的镇原、泾川、崇信三县管辖(图1c),是当前油气勘探的热

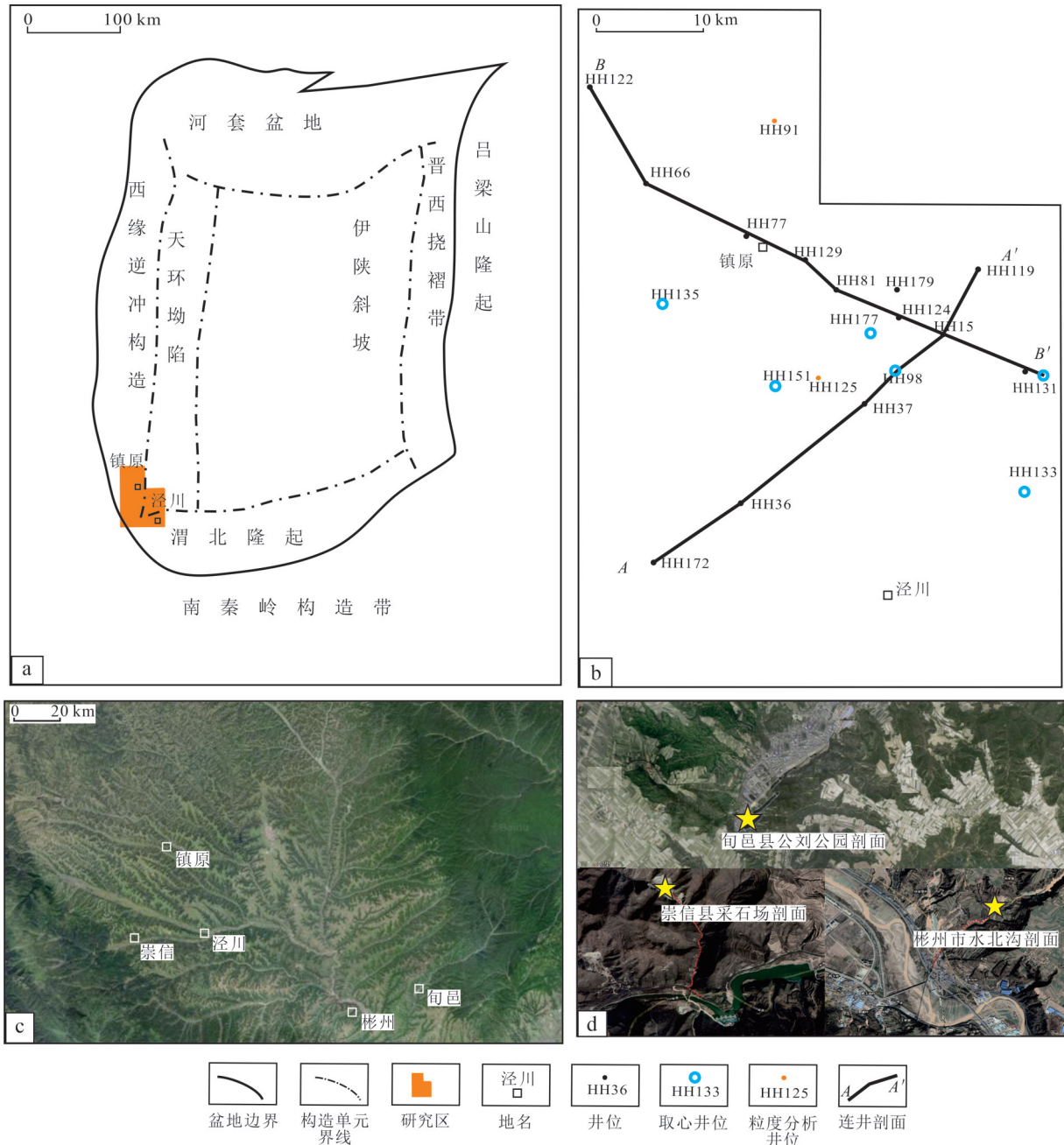


图1 鄂尔多斯盆地镇泾地区区域位置及剖面位置

Fig. 1 Maps showing the location of and cross-sections in Zhenjing area, Ordos Basin

a. 区域构造图; b. 研究区及连井剖面位置; c, d. 野外剖面位置

点地区。研究区在构造上位于鄂尔多斯盆地天环坳陷南部(图1a),受晚印支运动影响,侏罗系与延安组部分缺失,构造沉降及抬升与剥蚀共同控制延长组构造演化过程<sup>[32]</sup>,晚侏罗世之前,构造变形较弱,地层较为平缓,局部发育小型低幅度鼻状隆起<sup>[33]</sup>,自三叠纪以来主要表现为掀斜构造演化过程<sup>[34]</sup>。鄂尔多斯盆地三叠系延长组为一套大型坳陷盆地背景下的河流—三角洲—湖泊相碎屑岩沉积,厚度约为1 000~1 300 m<sup>[35-37]</sup>。镇泾地区延长组自下而上发育长10段—

长1段共10套油层组(图2),经历了河流—三角洲—湖泊—三角洲—河流的完整沉积旋回<sup>[38]</sup>。

本文研究目的层段为长7段。长7段沉积时期为湖盆发育鼎盛阶段,湖盆沉降较快,湖水深度及范围达到最大<sup>[39]</sup>。长7段发育大量暗色泥页岩、油页岩夹薄层粉细砂岩,薄层砂岩与暗色泥岩互层明显,整体处于水下沉积环境。长7段的中、上部沉积厚层块状砂岩夹薄层泥岩,下部主要沉积厚层灰黑色油页岩及深灰色“张家滩页岩”<sup>[35]</sup>。延长组沉积时期,鄂尔多斯盆地

整体发育东北及西南两大沉积体系,研究区位于西南沉积体系,物源方向主要为西南方向<sup>[19-23]</sup>,沉积物源组成主要为西部古陆和南部秦岭的碳酸盐岩、浅变质岩类、中酸性火山岩和陆源碎屑岩等,在长7段时期物源供给强度逐渐增加<sup>[24-25]</sup>。

## 1.2 镇泾地区层序地层划分

综合运用岩心、测井及野外露头等信息建立了层序地层划分方案(图2,图3),并体现了基准面旋回的变化过程。在基准面旋回变化过程中,可容纳空间增加速率与沉积物供给速率比值发生变化,产生了进积与退积的叠加样式。湖泛期形成的稳定泥岩段可作为地层对比和划分的标志层,长7段底部普遍发育1套稳定的页岩(图2),具有一级标志层意义。根据层段内部沉积,结合岩性、测井曲线旋回性及GR(自然伽马)曲线的INPEFA变化特征对层序地层进行划分。INPEFA曲线反映四级层序演变,表现出MSC1层序时期湖侵明显,而向MSC2层序和MSC3层序逐渐减弱的特征。这种层序旋回的演变过程也造成了3个四级层序内浊流的沉积特征与格局存在差异,将长7段划分为3个四级层序,由下至上分别为MSC1, MSC2和MSC3层序。最大洪泛面位于MSC1层序与MSC2层序时期的界线附近(图3),长7段在三级层序内表现出先快速广泛湖侵后,后又逐渐开始水退,但总体湖平面处于相对深水期(图2),而GR曲线的INPEFA变换结果反映了四级层序内湖平面与可容纳空间的变化规律。

MSC1层序时期主要为湖侵期,发育一期上升半旋回与下降半旋回,湖平面变化表现为水进为主、水退为辅的特点,其岩性发育以灰黑色页岩为主,夹部分灰黑色粉砂岩;顶部油页岩,底部发育灰黑色“张家滩页岩”,GR值相对较高,曲线呈巨幅齿状,该时期沉积厚度较为均匀,水动力条件较弱,为低能沉积环境。

MSC2层序时期为高水位早期,基于镇泾区块东南缘旬邑县公刘公园内石桥旁露头(图1c,图4a),观察分析及油页岩标志对比表明, MSC2层序时期(图4b)岩性主要为灰绿色砂岩与色深质纯油页岩,砂岩粒度逐渐变粗,从砂岩颜色判断沉积环境逐渐由还原环境向氧化环境过渡。油页岩与上部黄绿色细砂岩存在明显岩性分界面,该界面为MSC2层序时期的内部洪泛面(图4c),剖面整体可识别出2期冲刷面,其对MSC2层序阶段内部旋回划分具有指示意义(图4c)。湖平面变化表现出短期水进长期水退的特点,GR曲线以指状-齿形为主,曲线变化幅度较小。

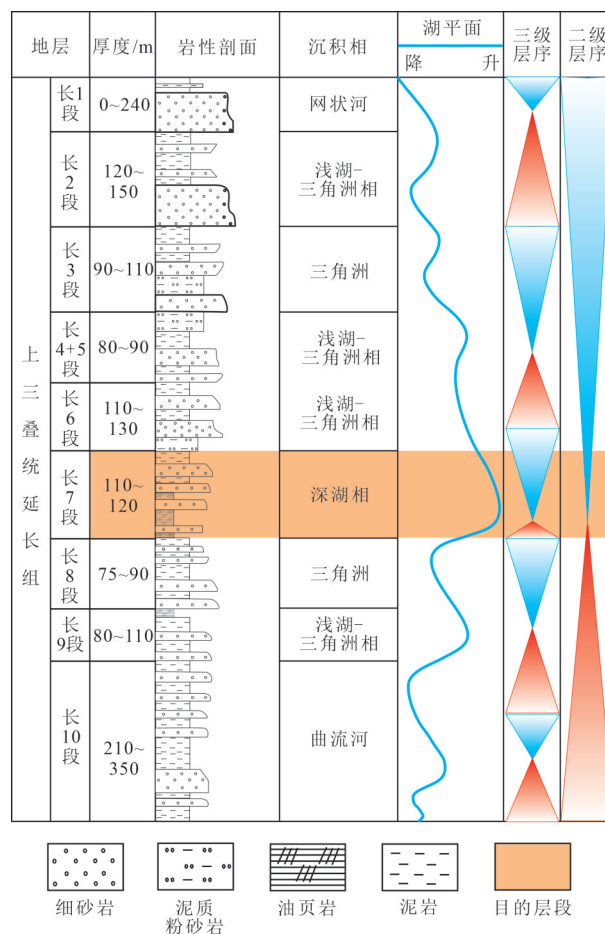


图2 鄂尔多斯盆地三叠系延长组综合柱状图<sup>[40-43]</sup>

Fig. 2 Stratigraphic column of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin<sup>[40-43]</sup>

结合露头观察与INPEFA曲线变化规律可得, MSC2层序阶段早期,随着湖平面的不断上升,在砂体沉积的过程中受到湖水波浪作用的影响,砂体厚度不断减小,其沉积物粒度逐渐由粉砂向泥过渡,且局部水体不稳定。MSC2层序中期,湖平面不断下降,砂体向湖盆方向进积,发育以湖相沉积为主的砂体,砂体规模相对较大,以粉砂岩及细砂岩居多,在基准面旋回下降过程中,可容纳空间增加速率与沉积物供给速率比值发生变化,产生了砂体厚度与粒度的变化。MSC2层序晚期,存在短期的湖平面上升,砂体规模持续变小,沉积物粒度由细砂级向泥级过渡。

MSC3层序时期为高位晚期,岩性主要为黑色油页岩、灰棕色含油砂岩和灰色细砂岩,该时期沉积物粒度为长7段中最粗,从砂岩颜色判断沉积环境由还原环境转换为氧化环境,湖平面整体以水退为主,GR曲线形态以漏斗形-指状为主,该时期砂岩平均沉积厚度为长7段中最厚,反映物源供给逐渐增强,处于高能沉积环境。

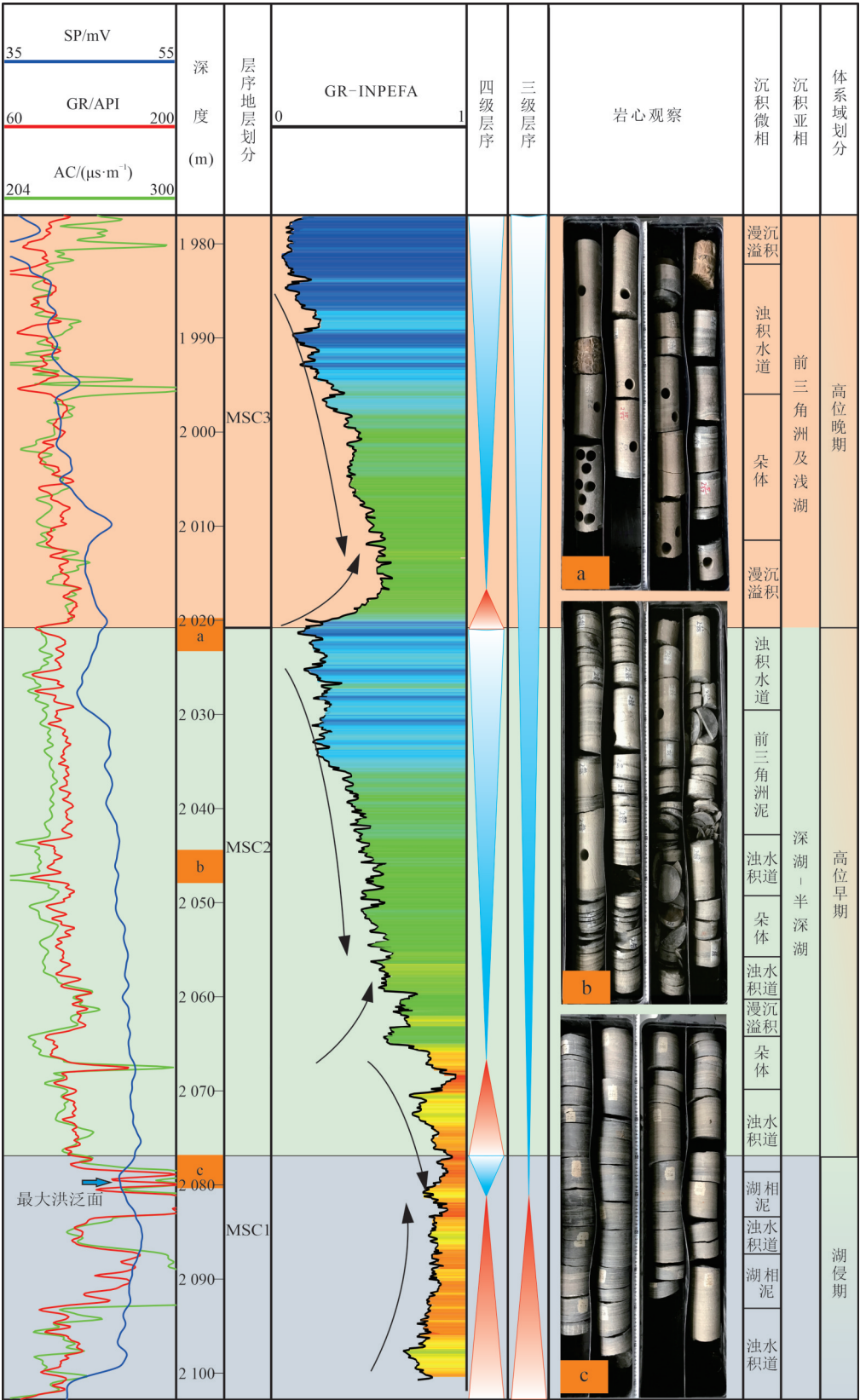


图3 镇泾地区长7段层序地层划分方案(以HH112井为例)

Fig. 3 Sequence stratigraphic division of the Chang 7 Member in Zhenjing area(a case of Well HH112)

(a,b,c对应取心井段位置。)

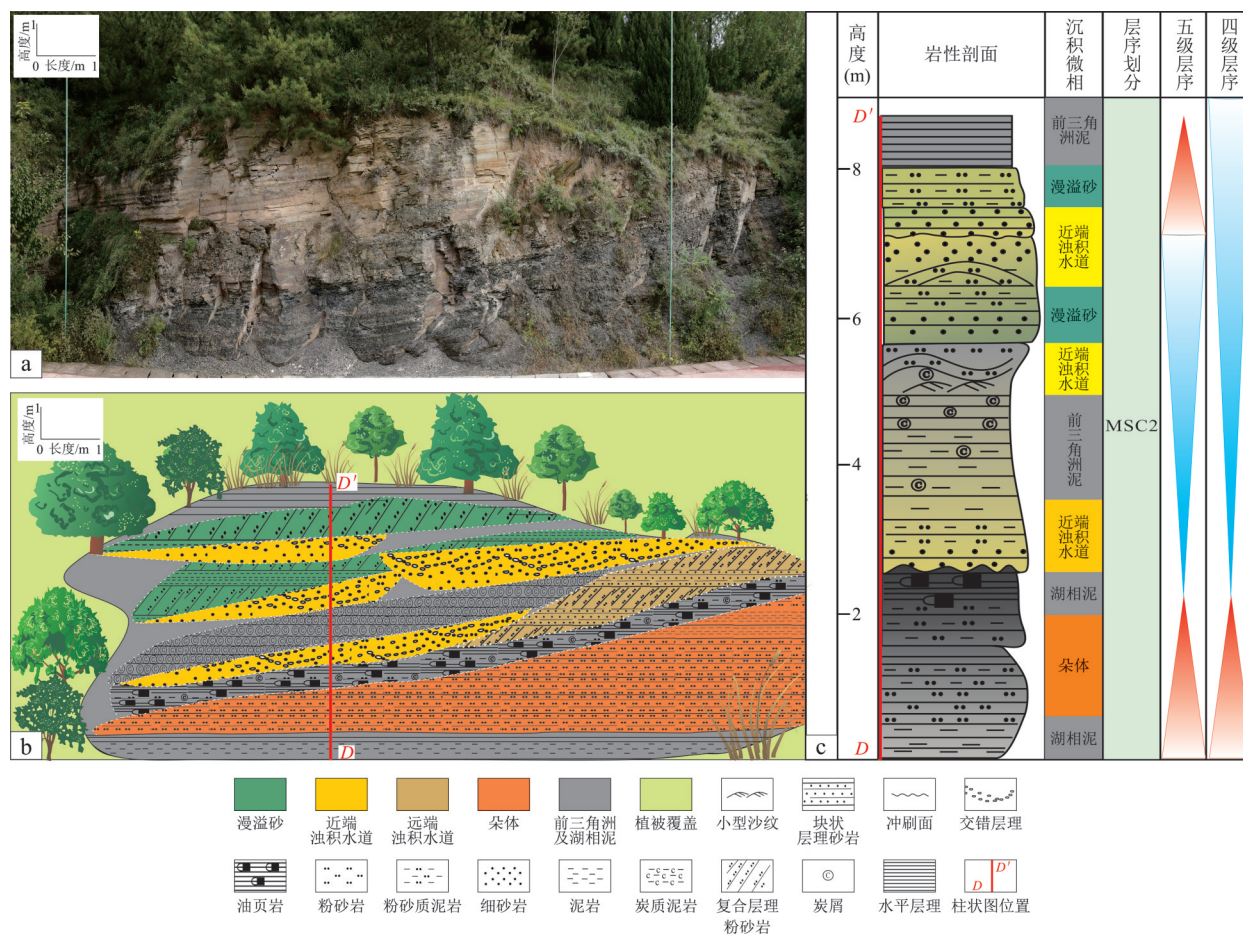


图4 旬邑县公刘公园野外剖面(剖面位置见图1c,d)

Fig. 4 Outcrop in Gongliu Park, Xunyi County (see the profile location in Fig. 1c,d)

a. 野外剖面照片; b. 野外剖面解释; c. 剖面综合柱状图

## 2 沉积相标志

### 2.1 岩相划分

以研究区取心井(图1b)的长7段岩心描述为基础,进行岩相分类,共划分出6种岩相类型(图5),包括3种砂岩类岩相和3种泥岩类岩相,每种岩相类型都具有独特的沉积结构与沉积构造。

#### 1) 块状层理砂岩相(Sm)

该岩相粒序层理段对应鲍马序列A段,岩性以粉细砂岩为主,块状出露,以透镜状或席状展布,内部含少量粉砂岩,无层理构造。该岩相是水流强度衰弱期,短期、高流态事件沉积,多出现在浊积水道内部(图5a)。

#### 2) 小型沙纹层理砂岩相(Sr)

该岩相沙纹层理段对应鲍马序列C段,沉积物粒度较细,是波浪迁移的产物,厚度较小,主要发育于前三角洲浊积水道内部,反映顺水流方向的加积作用,

是浊积水道迁移的产物,受高流态牵引流的影响(图5b)。

#### 3) 水平层理泥岩或油页岩相(Mh)

该岩相反映稳定且低能的水动力条件,沉积环境较为安静,在研究区广泛分布(图5c)。

#### 4) 复合层理粉砂岩相(Fc)

该岩相岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,泥质粉砂岩中粉砂质的含量增多,纹层规模小且密集,常与泥岩在垂向上相互叠置。根据砂泥比,可分为脉状、透镜状及波状三种层理,主要反映前三角洲水体频繁变化的特征(图5d)。

#### 5) 炭质泥岩相(Mc)

该岩相发育于灰黑色炭质泥岩层,细粒沉积为块状层理,处于静水还原环境,可见植物炭屑,多见于湖相沉积环境(图5e)。

#### 6) 块状层理泥岩相(Mm)

该岩相沉积构造不明显,多为块状构造,反映快速沉积或湖相的静水沉积(图5f)。

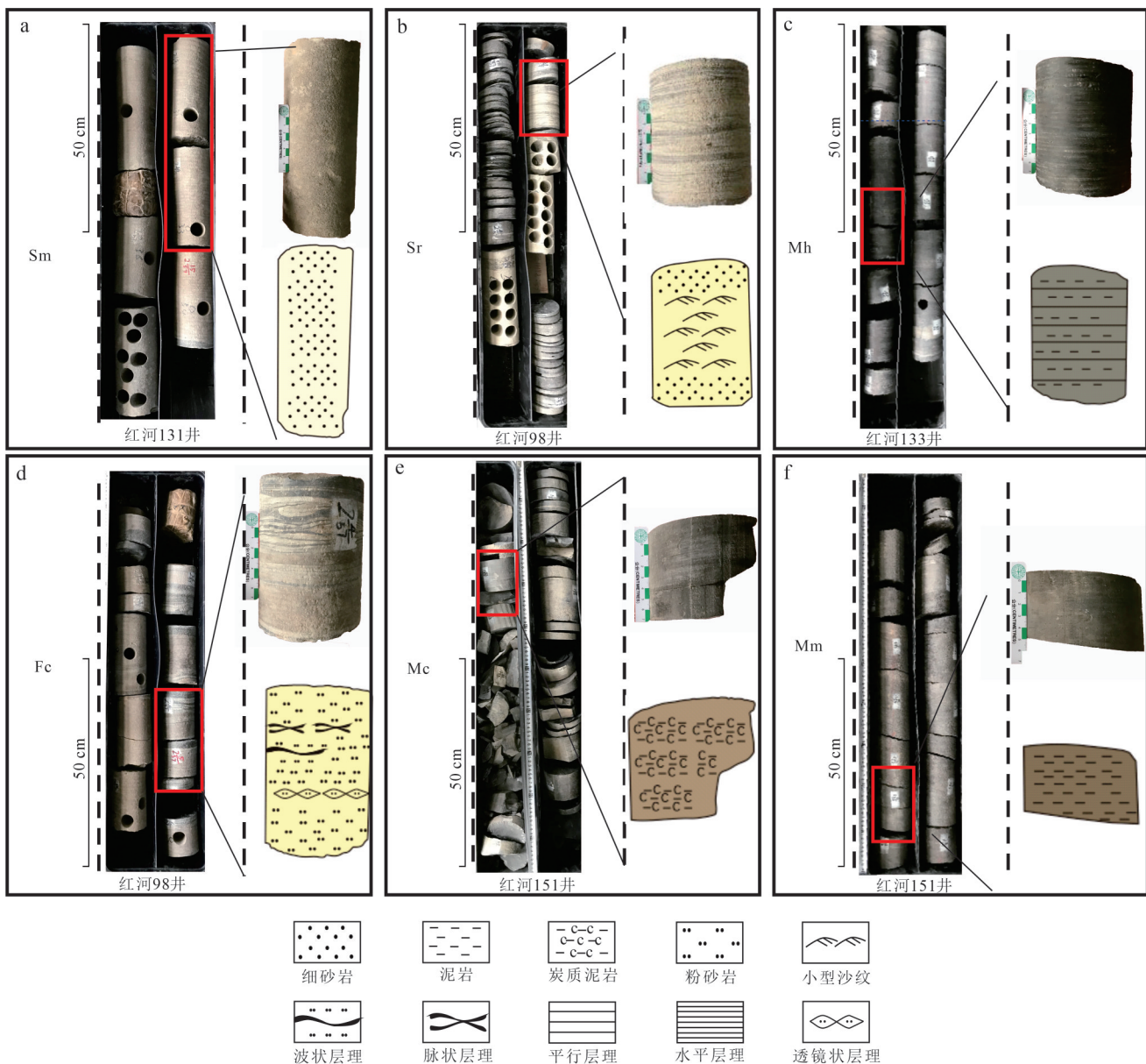


图5 镇泾地区长7段岩相划分

Fig. 5 Lithofacies types of the Chang 7 Member in Zhenjing area

a. 块状层理砂岩相(Sm); b. 小型沙纹层理砂岩相(Sr); c. 水平层理泥岩相(Mh); d. 复合层理粉砂岩相(Fc);  
e. 炭质泥岩相(Mc); f. 块状层理泥岩相(Mm)

## 2.2 粒度特征

粒度概率累积曲线被用来判定研究区的沉积环境及水动力条件<sup>[44-46]</sup>。本次研究粒度分析由油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成,根据粒度进行统计,概率图主要表现为近似两段式(图6a)与一段式(图6b)。

在近似两段式中,缺少牵引组分,跳跃组分约占60%,曲线形态常呈微向上凸的弧线,但斜率较小,悬浮组分较多,颗粒粒度以中-细粒为主,粒径 $\Phi$ 值在1.5~5.5内最为集中,矿物的结构成熟度及成分成熟

度都较低,颗粒以悬浮及跳动的方式进行沉积,反映悬浮搬运与跳跃搬运共同作用,水动力较强,由于浊流为高密度流,水流密度大,埋藏迅速<sup>[47]</sup>,通常情况下以悬浮为主,跳跃总体较少,但浊流沿坡向下的滑动水道中存在滚动搬运,表明研究区内发育浊流沉积(图6a)。

一段式曲线由直线段组成,粒径 $\Phi$ 值在2~5为正态分布,悬浮总体含量较高,反映搬运方式主要为悬浮搬运,粒度区间跨度适中,沉积物颗粒分选较差。线段与横坐标轴夹角为40°~60°,倾斜角度中等,说明流体流速和密度较大,水动力性质为重力流,符合浊流特征(图6b)。

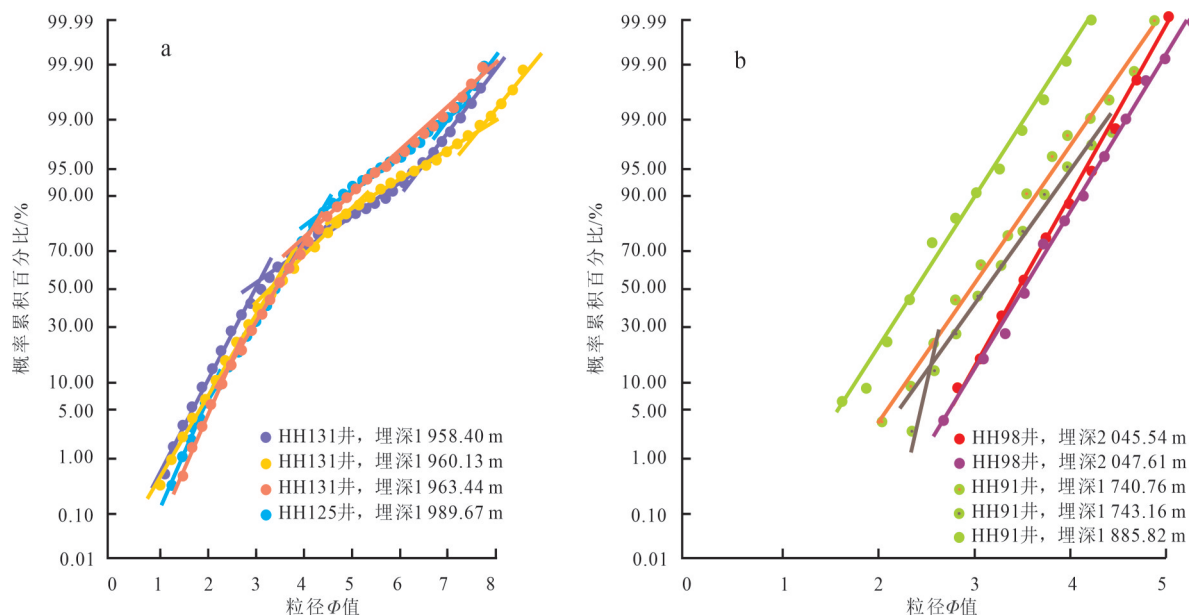


图6 镇泾地区长7段粒度概率累积曲线特征

Fig. 6 Curves showing grain size vs. its accumulative probability in the Chang 7 Member in multiple wells in Zhenjing area

a. 两段式; b. 一段式

### 2.3 野外露头证据

选取镇泾区块东南缘旬邑县公刘公园内石桥旁露头(图1c,图4a)进行分析研究,其主要出露层段为长7段中下部(MSC2层序时期)。露头发育大量暗色泥页岩和油页岩夹薄层粉-细砂岩等,细粒沉积为泥质沉积(图4b,c),反映较深的水体环境且有机质富集。朵体在露头下部发育,岩性以粉砂岩为主,泥质含量适中且发育的范围及厚度较大,反映深水环境中快速沉积或湖相的静水沉积。漫溢沉积在露头上较多表现为粉砂岩与细砂岩互层,展布范围较大,常与浊积水道共生,当水体逐渐变浅后,其易于形成有利储集砂体。浊积朵体表现特征为,在泥质粉砂岩内局部可见细砂岩,发育小型交错层理与浪成沙纹,可见大量云母炭屑沿层分布。滨外较深水沉积特征较为明显,具体表现为:页理较为发育且颜色为灰黄色并有逐渐变深的趋势,内部包含有3个小粒序变化。浊积水道在露头上的典型识别标志为浅绿黄色薄层细砂岩及粉砂质泥岩,存在粒序层理,且砂岩中可见泥砾和炭屑,具冲刷作用,反映了研究区地形平缓。

公刘公园露头由多期浊流沉积组成,受不同期次组合及波浪作用影响,砂岩呈明显反粒序,顶部略见正粒序,颜色向上逐渐变浅,厚度逐渐增加,剖面底部泥质含量高于顶部,整体处于水下还原环境,反映水体逐渐变浅,物源供给持续增加的沉积过程。由于地形坡度较缓且距离物源相对较远,碎屑岩颗粒分选磨圆好,

粒度变化范围较小,实际观察结果与地形坡度对浊流砂体形态的影响一致,由于受到三角洲影响,浊积水道内部砂体存在部分叠瓦状前积结构,可见较多小型流水沙纹。

### 2.4 测井相标志

因“张家滩页岩”具有高伽马、低电阻、自然电位平直分布广和测井响应特征稳定<sup>[48]</sup>,所以将其作为标准层。根据研究区内200余口井的测井相信息,可识别出的沉积微相包含有近端浊积水道、远端浊积水道、漫溢砂和朵体(图7)。①近端浊积水道:在GR曲线上主要表现为箱形、钟形、箱形-钟形(图7a—c)和中-高幅锯齿状,顶部渐变底部突变,具有正递变结构,反映了沉积过程中水动力逐渐增强、水道的下切和叠置以及当坡度变缓后水道的摆动,表明物源供给增加的沉积特征。②远端浊积水道:GR曲线以对称齿形组为主(图7d),齿化程度较高,齿中线呈水平状,少部分可见钟形,反映沉积过程中的物源供给减弱及水动力环境不稳定或能量变化较快。③朵体:GR曲线以漏斗-齿形为主(图7e),较为平滑,厚度较大,主要为以粉砂质泥岩或泥质粉砂岩为主的细粒沉积,反映了水动力条件中等,水体较为稳定并受波浪改造影响明显的沉积特征。④漫溢砂:GR曲线为指形或指状组合为主(图7f),低幅、微齿,顶、底部与泥岩呈突变接触,砂岩厚度较薄。

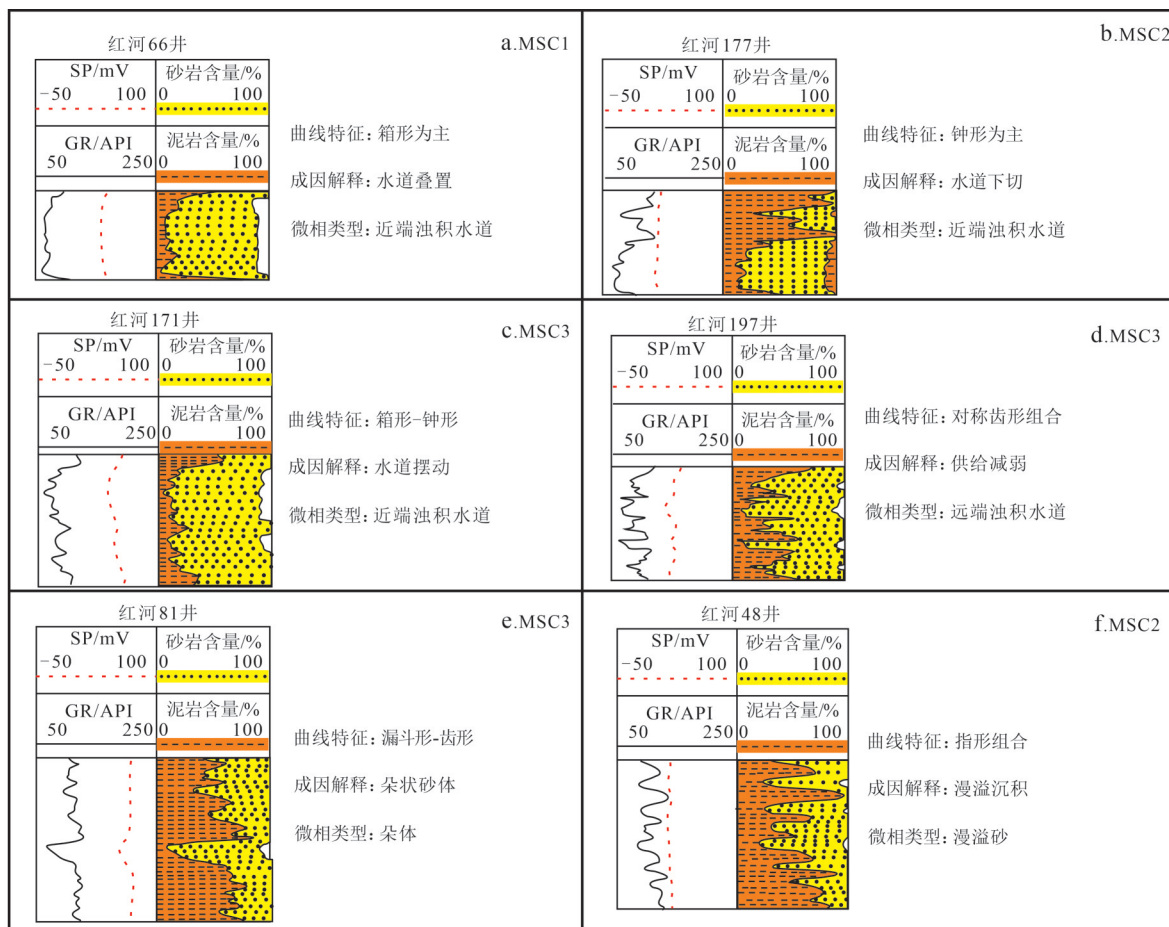


图7 镇泾地区长7段测井相模板

Fig. 7 Logging facies templates of the Chang 7 Member in multiple wells in Zhenjing area

### 3 沉积相类型及特征

研究区长7段岩相、岩相组合及测井特征表明:研究区整体沉积环境的水动力较弱,水体变化较为频繁,以前三角洲和深湖-半深湖沉积背景下的浊流沉积为主,受沉积物供给与可容纳空间变化的影响,导致前三角洲亚相和深湖-半深湖亚相的浊流沉积存在差异,其表现在沉积微相规模、粒度以及沉积构造等方面,根据研究区特点可识别出不同的沉积组合与沉积微相类型。

#### 3.1 前三角洲与浊流体系组合

前三角洲与浊流沉积体系中主要包含前三角洲泥、漫溢砂及近端浊积水道沉积微相。前三角洲体系内,沉积环境水动力较强,浊积体系发育规模小,发育浊积水道数量较少,但厚度较大,弯曲度较低,物源供给较为充足,沉积物粒度较粗,沉积物粒度概率累积曲线以近两段式为主,其沉积物泥质含量低。

##### 3.1.1 前三角洲泥

前三角洲泥与浊积水道密切共生,主要发育在MSC3层序和MSC2层序时期。GR曲线值在泥岩基线附近,低幅、微齿状,相对较为平滑,厚度较大,野外剖面上可观察到前三角洲泥微相内以泥岩和粉砂质泥岩等细粒沉积为主且含碳量较高(图4),岩相以水平层理泥岩相(Mh)为主,反映了水动力条件弱且较为稳定的沉积特征。前三角洲泥微相典型的沉积构造包括植物碎片与生物扰动,由于研究区前三角洲泥微相以泥岩为主,所以生物在沉积物内部或表面活动时易留下生物遗迹(图8a),在研究区前三角洲附近发育大量植物化石(图8b),证明其具有较高的有机质含量。

##### 3.1.2 漫溢砂

漫溢沉积也常与浊积水道伴生,通常由浊流经过时的细粒物质组成,其主要发育在MSC2层序和MSC1层序时期。研究区的漫溢砂沉积主要是由于浊积水道下切作用减弱,沉积物漫过水道后在水道周边

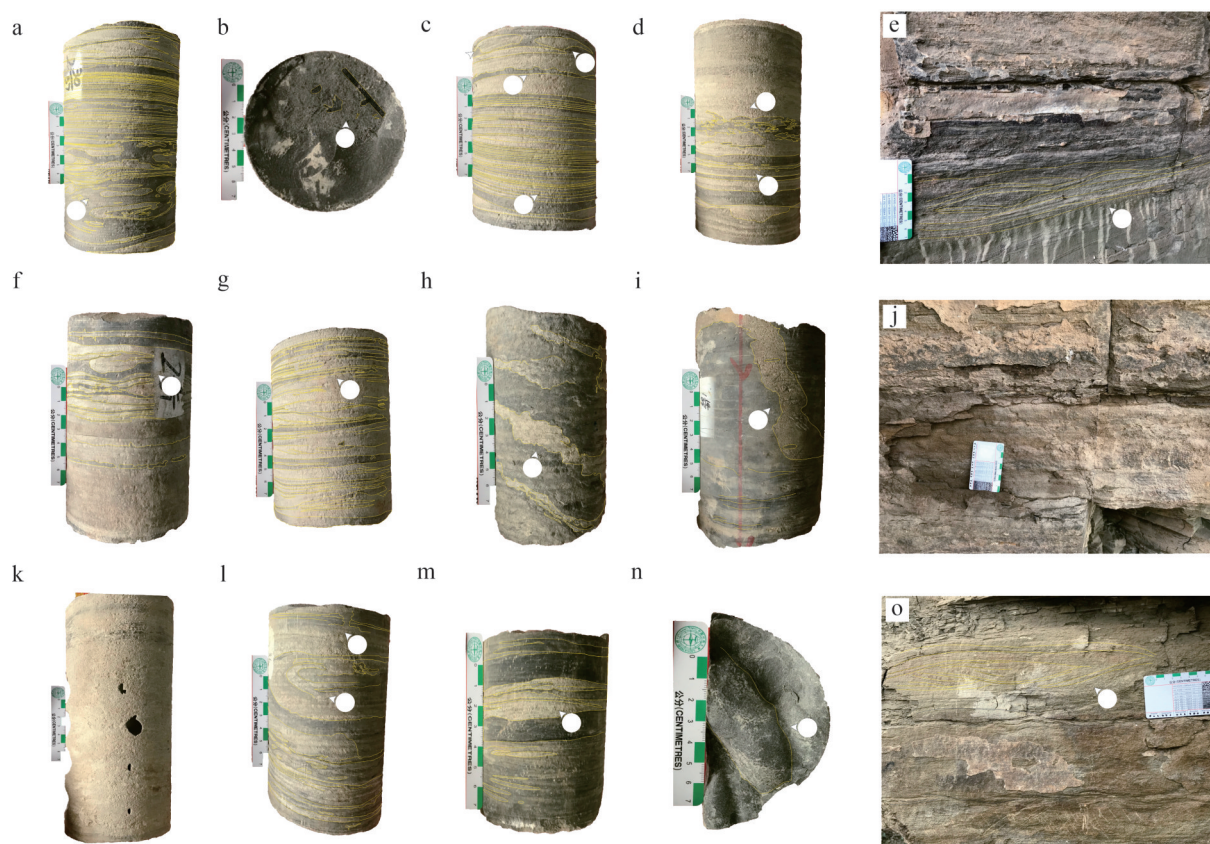


图8 镇泾地区长7段岩心和野外露头指示的沉积特征

Fig. 8 Sedimentary characteristics as displayed by cores taken from the Chang 7 Member and outcrop in Zhenjing area

a. 生物扰动, HH98井, 埋深1 962.4 m, 岩心; b. 植物炭屑, HH98井, 埋深4 964.9 m, 岩心; c. 底部为水平层理, 顶部发育包卷层理, HH98井, 埋深1 961.9 m, 岩心; d. 火焰构造与撕裂屑, HH177井, 埋深2 067.7 m, 岩心; e. 沙纹层理, 彬州公路剖面; f. 脉状-波状层理, HH98井, 埋深1 958.9 m, 岩心; g. 沙纹层理, HH98井, 埋深1 962.6 m, 岩心; h. 粉砂岩含泥砾, HH135井, 埋深2 346.6 m, 岩心; i. 砂岩注入, HH133井, 埋深1 913.7 m, 岩心; j. 块状层理, 崇信县采石场剖面; k. 块状层理, HH98井, 埋深1 963.2 m, 岩心; l. 包卷层理与泄水构造, HH135井, 埋深2 352.2 m, 岩心; m. 脉状层理, HH135井, 埋深2 353.7 m, 岩心; n. 槽模, HH131井, 埋深1 959.1 m, 岩心; o. 小型交错层理, 旬邑县公刘公园剖面

形成细粒薄层沉积。野外露头可观察到漫溢砂较为发育, 且具有粉砂岩与细砂岩高频互层的岩性特点, 其常与浊积水道互相叠置(图4)。测井曲线为指形组合, 常与泥岩突变接触, 岩相组合以FA-1型(图9)为代表, 主要由复合层理粉砂岩相(Fc)、水平层理泥岩相(Mh)及块状层理泥岩相(Mm)构成, 表明沉积环境水动力相对较弱。在漫溢砂内, 沉积物主要为粉砂岩及少量泥岩, 可见较多纹层呈直线状且互相平行的水平层理(图8c), 其主要由进入沉积物中的物质发生变化所导致, 如粒度变化、炭质碎片沿层分布等, 表现研究区低能、相对安静的沉积环境, 属于低流态。

### 3.1.3 近端浊积水道

浊积水道内流体具有牛顿流体性质, 呈湍动状态, 颗粒被湍流支撑且悬浮沉降<sup>[49]</sup>, 主要发育在MSC3层序和MSC2层序时期。近端浊积水道是深水环境中由细粒浊流下切侵蚀形成的水道, 其内部粒度

相对较粗, 水道可使下覆泥岩承受不均匀压力负载而导致上覆砂岩陷入泥岩中(图8d)。野外剖面可较为明显地观察到近端浊积水道主要岩性由细砂岩与粉细砂岩组成且发育粒序层理(图4), 常见岩相组合为块状层理砂岩相(Sm)与小型沙纹层理砂岩相(Sr)所组成的FA-2型岩相组合(图9)。近端浊积水道在平面上呈条带状展布, 发育多种复合层理(图8e)及冲刷面, 在复合层理中波状层理最为典型, 分为对称型(图8f)与不对称型两类。对称型波状层理反映近端浊积水道中的沉积介质受到波浪震荡运动的影响; 而不对称型波状层理则由单向水流的前进运动造成, 反映其叠置及下切等特征, 测井曲线上呈钟形、箱形等样式。除复合层理外, 近端浊积水道内部也可见小型波纹层理, 岩性多为细砂岩及少量粉砂岩(图8g), 反映前三三角洲内近端浊积水道不断前积的过程。

由于浊流自身的沉积物分异与沉积物供给量的变化, 近端浊积水道会产生摆动, 滑塌构造为其摆动的典

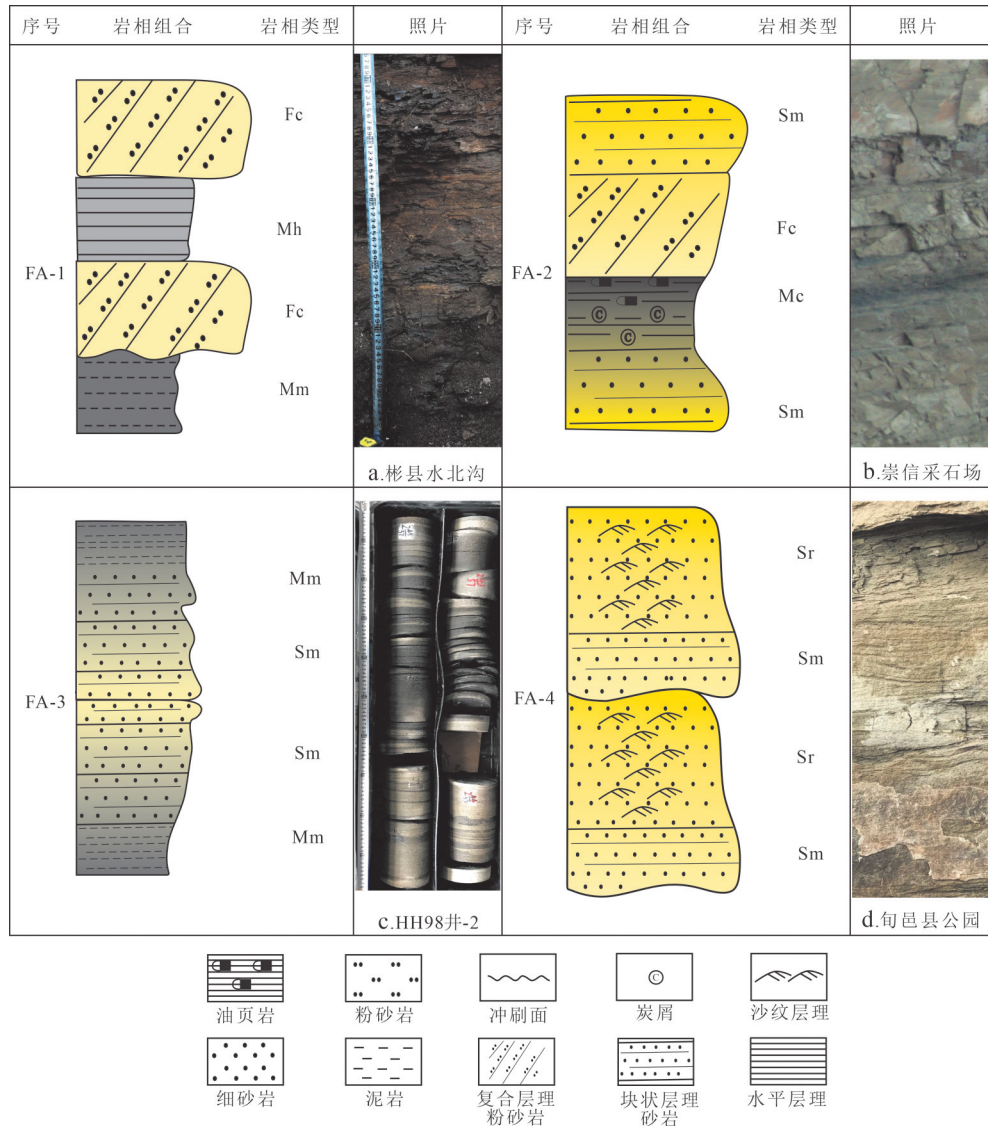


图9 镇泾地区长7段岩相组合(露头位置见图1c)

Fig. 9 Lithofacies assemblages of the Chang 7 Member in Zhenjing area (see Fig. 1c for the outcrop location)

Sm. 块状层理砂岩相; Sr. 小型沙纹层理砂岩相; Mh. 水平层理泥岩相; Fc. 复合层理粉砂岩相; Mc. 炭质泥岩相; Mm. 块状层理泥岩相

型识别特征。浊积水道发生摆动时,对其两侧泥岩进行侵蚀,水道内部沉积物未固结成岩之前尚处在塑性状态时,由于受到重力作用的驱动而发生滑动变形(图8h),伴随快速沉积,最终注入泥岩内部(图8i)。

### 3.2 深湖-半深湖与浊流体系组合

鄂尔多斯盆地长7段时期,湖泊范围达到了最大<sup>[50]</sup>,深湖-半深湖相在研究区内广泛发育,其内部发育浊流沉积,包含远端浊积水道及朵体。在深湖-半深湖相沉积体系内,浊流沉积环境水动力较弱,与前三三角洲浊积体系相比,其发育规模大,浊积水道数量多,但厚度薄且弯曲度高,物源供给较弱,沉积物粒度较细,沉积物粒度概率累计曲线以近一段式为主且沉积物泥质含

量高。远端细粒浊积砂体泥质含量较高,导致其物性较差,但由于距烃源岩较近,其为重要的潜在储层<sup>[51]</sup>。

#### 3.2.1 朵体

朵体主要是由浊积水道流速降低导致其所携带的碎屑物质卸载而沉积形成,发育于浊积体系末端,常见于浊积水道尾部。GR曲线以漏斗-齿形为主,相对较为平滑,顶部多为突变接触、底部多为渐变接触。野外剖面表现为泥质粉砂岩内局部可见细砂岩,发育小型交错层理和浪成沙纹(图4),表明早期朵体常被后期浊积水道或波浪所改造,多见浊积水道朵体在垂向上相互叠置转换的现象,典型岩相为块状层理砂岩相(Sm)及少量块状层理泥岩相(Mm),以FA-3型岩相

组合为主。块状层理细砂岩夹杂粉砂岩为朵体典型特征,其以层内物质均匀、组分和结构上无差异、不显纹层构造的层理为特点,从岩心可较为明显地观察到包卷层理与泄水构造(图8j,k)。在由于重力流的驱动下,悬浮物快速堆积,沉积物来不及分异而不显纹层。沿物源供给方向,伴随浊流强度逐渐衰减,携带粗粒沉积物的能力降低,因而朵体泥质含量与其到物源的距离成正比,朵体平均砂体厚度为各沉积微相中最大。

### 3.2.2 远端浊积水道

研究区物源来自西南部,在横切物源剖面上(图9)反映了远端浊积水道较为发育,其岩性主要发育细砂岩、粉砂岩及部分泥质粉砂岩、粉砂质泥岩与泥岩互层,以块状层理砂岩相(Sm)、复合层理粉砂岩相(Fc)及炭质泥岩相(Mc)所组成的FA-4型岩相组合为主。包卷层理是识别端浊积水道的重要标志,其纹层发生扭曲(图8l,m),为沉积物在远端浊积水道内液化<sup>[52]</sup>所引起层理弯曲。由于研究区内地形较为平缓,所以地形变化所导致的纹层扭曲暂不考虑。除包卷层理外,槽模也可作为远端浊积水道的识别标志。槽模是在深水环境下受底流作用的影响浊流单向迁移形成的水道<sup>[53]</sup>,在尚未固结的软泥表面侵蚀冲刷形成凹槽,随后凹槽处被砂质填充的产物(图8n)。槽模与浊流沉积伴生,在研究区内较为常见,为浊流沉积提供了良好的识别标志。与近端浊积水道相比,远端浊积水道的粒度细且发育多种小型交错层理(图8o),反映远端浊积水道不稳定的特征<sup>[54]</sup>,其主要见于MSC2层序和MSC3层序。在野外露头剖面上可观察到,远端浊积水道砂体为顶平底凸透镜状,且泥质含量较高(图4);GR曲线形态表现为对称齿形组合且具中-高幅锯齿状的特点,反映了沉积过程中水体不稳定及物源供给弱的特征。

## 4 四级层序格架内浊流演化模式

镇泾地区长7段沉积期,在湖侵的背景下,由于受到构造活动的影响,鄂尔多斯盆地强烈扩张,沉降速率快,湖盆发育达到鼎盛时期<sup>[55]</sup>。研究区内浊积砂体与湖相黑色泥页岩形成良好的自生自储岩性油气藏,浊积体系已成为非常规油气勘探研究的重要组成部分<sup>[56]</sup>。浊流沉积体系内的砂体是长7段页岩油重要的储集层<sup>[57-58]</sup>,镇泾地区长7段发育以三角洲-湖泊沉积相为主<sup>[59-60]</sup>的浊流沉积体系,整体处于强还原沉积环境,三角洲整体欠发育。但随着湖水不断东退,前三角

洲开始发育。研究区长7段平面沉积相展布以前三角洲到湖盆中心的单物源供给体系下形成的多个浊积水道、漫溢沉积和朵体为特点。除前三三角洲内发育的近端浊积水道受部分牵引流的影响外,砂体大都属浊流沉积成因。受湖平面升降的影响,长7段发育3个中期旋回,反映四级层序演变(图3),表现为MSC1层序时期湖侵明显,而到MSC2层序和MSC3层序时期逐渐减弱,演化为高位体系域。随着成因地层单元不断向湖盆方向进积,前三三角洲相域内水道垂向叠置,厚度不断增大。研究区沉积物源主要为陆源碎屑,且物源供给强度逐渐增加<sup>[61]</sup>,沉积物粒度从以“泥”为主变为以“砂”为主。深湖-半深湖相域内,由于物源供给充足,浊积水道和漫溢沉积发育增多。

镇泾地区长7段发育在温暖潮湿的气候环境下<sup>[62]</sup>,前三三角洲内逐渐形成近北-东走向浊流沉积体系。Muto与Steel提出,由于基准面的升降变化决定了可容纳空间增加速率( $V_a$ )与沉积物供给速率( $V_s$ )的比值变化<sup>[63]</sup>,本次研究利用湖平面相对位置代表基准面( $\Delta V_a$ )的高低,利用去压实后的平均地层厚度表征沉积物供给速率( $\Delta V_s$ )。长7段的湖退背景与研究区的基准面升降和GR曲线有较好的对应关系。基于可容纳空间增加速率( $V_a$ )与沉积物供给速率( $V_s$ )的比值变化及浊流沉积体系内沉积物粒度变化,认为由下至上,长7段3个中期旋回浊流沉积模式从湖侵泥质型变为高位早期砂泥混合型,最终演变为高位晚期砂质型。

根据岩相(图8)、岩相组合及砂岩厚度的分布规律(图10a—c),对研究区长7段3个四级层序沉积期的沉积相分布进行了恢复(图10d—f)。MSC1层序为湖侵泥质沉积期,该时期湖平面较高且存在湖平面上升,即基准面上升,造成可容纳空间变大。该阶段 $\Delta V_a$ 与 $\Delta V_s$ 的比值较高,沉积物供给速率远小于可容纳空间的生长速率。所发育沉积相为深湖-半深湖相,该时期从单一的湖相与浊流体系组合演化为前三三角洲相及深湖-半深湖相同时发育的浊流体系,其中前三三角洲发育较多漫溢沉积及近端浊积水道(图10),湖相前端存在较多前缘朵体及远端浊积水道。该时期水体深度在长7段沉积时期达到最大,沉积形成的暗色泥岩、页岩、油页岩为长7段主力烃源岩(图10a,d)。在湖侵、缺氧的情况下物源供给减弱,浊积水道及漫溢沉积的细粒沉积物易于保存,砂体分布以孤立分布为主,具有明显较厚的泥质沉积,所形成的砂体为典型的“泥质型”。发育一套平面展布范围小沉积砂体厚度薄,水道弯曲度最高,利于漫溢沉积发育的浊流沉积体系。

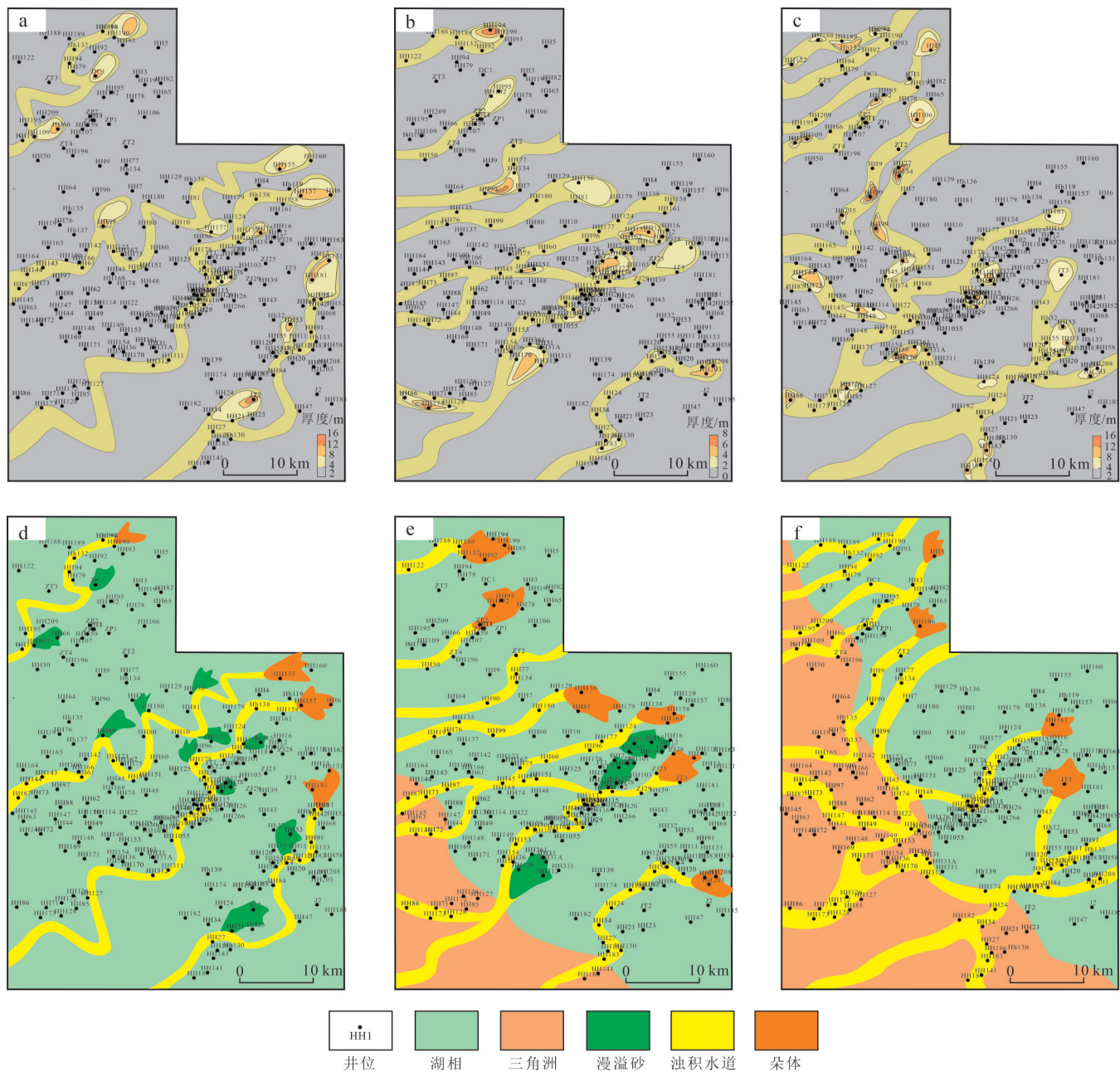


图10 镇泾地区长7段砂体厚度和沉积相

Fig. 10 Sedimentary evolution of the Chang 7 Member in terms of sand body thickness and sedimentary facies in Zhenjing area

a—c. 分别为MSC3, MSC2和MSC1层序沉积时期砂体厚度; d—f. 分别为MSC3, MSC2和MSC1层序沉积时期沉积相

MSC2层序为高位早期砂-泥混合沉积期,  $\Delta V_a$ 与 $\Delta V_s$ 的比值中等时,可容纳空间不断增加,物源供给较充足,沉积相主要发育前三角洲及深湖-半深湖相,该时期为长7段沉积期的过渡阶段,其与MSC3层序不同之处在于,物源供给增强,前三角洲逐渐开始发育,形成完整的浊积水道沉积序列,浊积水道厚度不断增加,水道横向延伸,漫溢沉积逐渐减少,浊积水道弯曲度逐渐降低且水体变浅,并伴随漫溢沉积(图10b, e),沉积物粒度逐渐变粗,由“泥质型”向“砂-泥混合型”过渡,砂质含量逐渐上升,砂体内部隔层较为发

育,砂体以局部接触型为主(图11)。

MSC3层序为高位晚期砂质沉积期,物源位于北东方向,处于持续性水退阶段,湖平面持续下降,即基准面下降,造成可容纳空间变小。该阶段 $\Delta V_a$ 与 $\Delta V_s$ 的比值较低时,沉积物供给的速率远大于可容纳空间增加的速率(图12)。该时期主要发育前三角洲及深湖-半深湖相,且沉积砂体厚度最大,浊积水道存在较多交汇现象,弯曲度相对较低,漫溢沉积不发育(图10c, f)。浊积水道沉积所形成的砂体以进积方式为主,细粒沉积多被侵蚀,浊积体系规模不断增加,浊积水道弯曲度

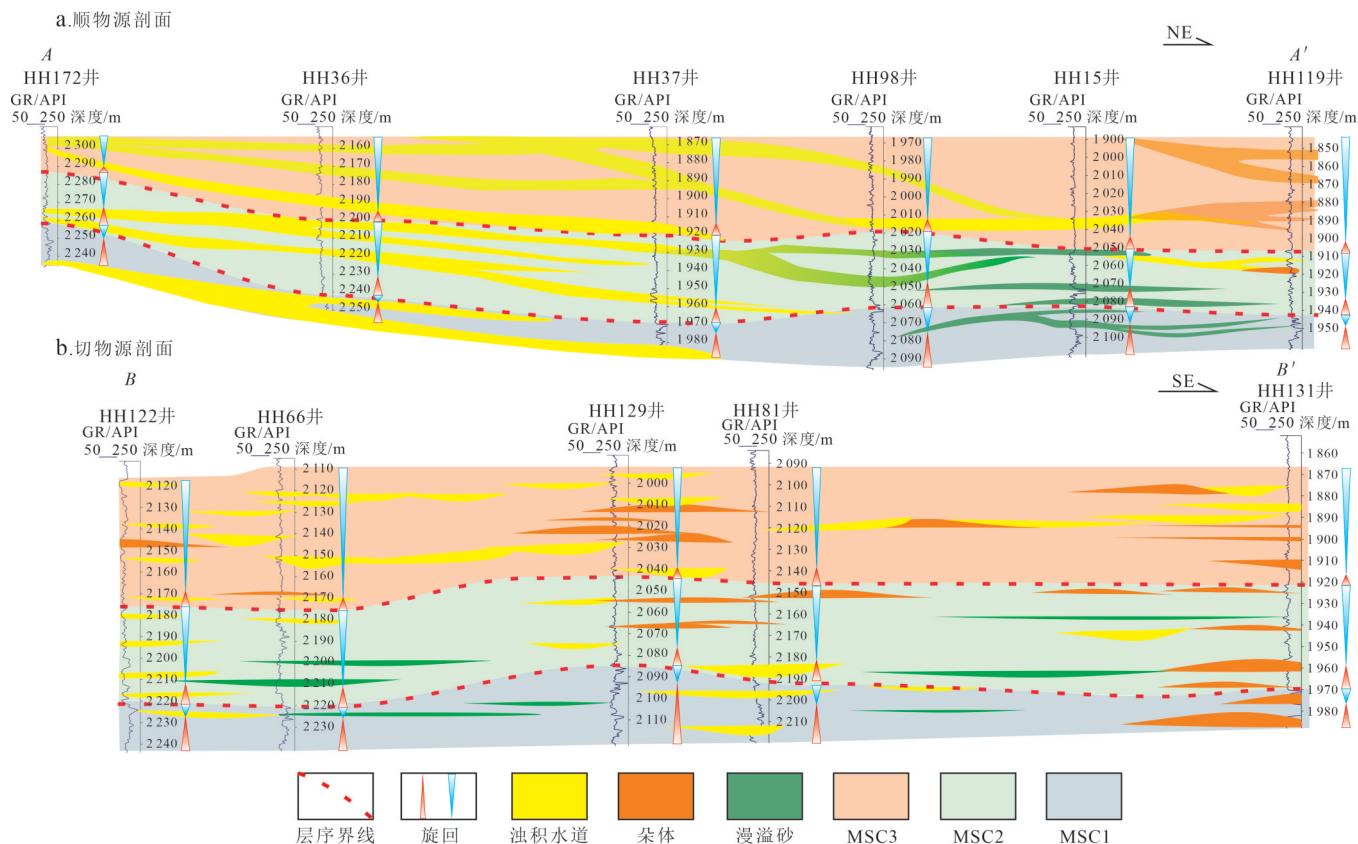


图11 镇泾地区长7段连井沉积微相剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 11 Cross-well correlation of sedimentary microfacies in the Chang 7 Member in Zhenjing area (see Fig. 1b for the section location)

降至长7段最低,不发育水道横向漫溢沉积,浊积体系内沉积物由“砂-泥混合型”变为“砂质型”。三角洲砂质沉积物供应充足,造成砂体横向连续性较好,接触关系以侵蚀接触型为主。这一沉积期,由于持续水退,三角洲前积,导致浊流砂体也更为发育。

从沉积演化模式角度来说MSC1层序—MSC2层序—MSC3层序为完整的四级层序格架内浊流沉积演化过程,MSC1,MSC2和MSC3层序分别对应湖侵期泥质型、高位早期砂-泥混合型和高位晚期砂质型沉积模式(图12)。湖侵期泥质型沉积模式的特点包括:湖水面积范围大,在顺沉积物源方向上,砂体呈明显退积样式,而在切物源方向上浊积水道发育规模较小,沉积物粒度较细,以泥和粉砂为主,浊积水道弯曲度高且处于欠发育状态,而漫溢沉积大量发育。高位早期砂-泥混合型沉积模式特点包括:湖盆内水体逐渐变浅,前三三角洲范围逐渐扩张,顺物源方向砂体呈进积叠置,切物源方向浊积水道规模逐渐增大,沉积物粒度以粉砂及细砂为主,浊积水道弯曲度逐渐降低,开始出现分叉与交汇的现象,漫溢沉积发育减少(图11a)。高位晚期砂质型,沉积模式特点包括:湖盆发育从鼎盛逐渐衰退,湖盆迅速沉降,湖平面范围逐渐

减小,浊积水道弯曲度低且分叉频率高,不发育漫溢沉积,沉积物粒度相对变粗,以细砂为主。顺物源方向砂体呈进积叠置,切物源方向浊积水道宽度达到最大,而在大致横切沉积物源的方向上,浊积水道发育程度较高,且规模大(图11b)。

由于鄂尔多斯盆地长7段为典型烃源岩发育层段,层内油气供给充足,所以优质储层成为勘探重点。对于储层而言,MSC3层序与其他层序相比更具优势,该层序在其他地区已形成了国家级规模开发示范区,已实现规模勘探开发<sup>[64]</sup>。综上所述,MSC3层序具有较好的油气资源潜力,同时也是长7段今后主要的油气勘探目标。

## 5 结论

1) 研究区长7段可划分为3个四级层序(砂组级别),分别为MSC1,MSC2和MSC3层序。其中MSC1层序沉积期湖平面变化表现为水进为主、水退为辅的特点;MSC2层序沉积期湖平面变化表现为短期水进长期水退的特点;MSC3层序沉积期湖平面整体表现以水退为主。

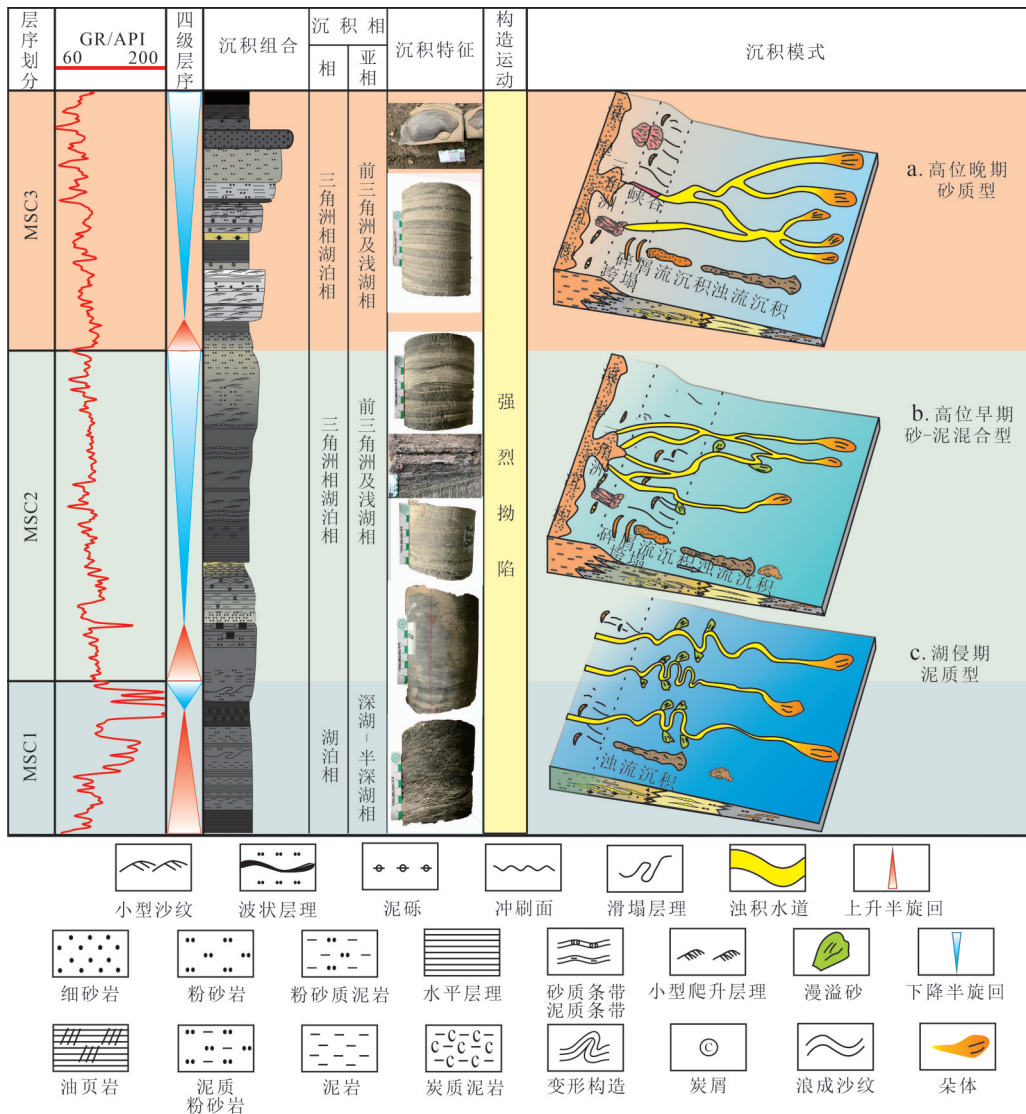


图 12 镇泾地区长7段沉积演化模式

Fig. 12 Sedimentary evolution model of the Chang 7 Member in Zhenjing area

2) 研究区中可识别出6种岩相与4种岩相组合,主要反映了前三角洲-湖泊为背景的浊流沉积特征,并可识别出漫溢砂、近端水道、前三角洲泥、朵体及远端水道5种沉积微相;发育深湖-半深湖与浊流体系、前三角洲与浊流体系两种沉积组合。

3) 长7段MSC1层序沉积期湖水面积逐渐增大,砂体呈明显退积样式沉积,浊积水道弯曲度较高,漫溢沉积大量发育;MSC2层序期湖盆内水体逐渐变浅,前三角洲范围逐渐扩张,砂体呈进积叠置,浊积水道弯曲度逐渐降低,形成浊积砂体与湖相泥质沉积体系;MSC3层序沉积期表现出持续性水退特征,物源供给变强,浊积水道更为发育,浊积水道弯曲度相对较低。

4) MSC1层序的沉积模式为湖侵泥质型, $\Delta V_a$ 与 $\Delta V_s$ 的比值较高,砂体孤立分布且泥质含量高。发育一套平面展布范围大、砂体厚度薄、以泥质沉积物为主的

湖泊-浊积体系。MSC2层序为高位早期砂-泥混合沉积期, $\Delta V_a$ 与 $\Delta V_s$ 的比值中等,浊积水道厚度不断增加,漫溢沉积减少,沉积物砂质含量增加,砂体以局部接触型为主。MSC3层序为高位晚期砂质型,该阶段 $\Delta V_a$ 与 $\Delta V_s$ 的比值较低,砂体以进积方式为主,浊积体系规模不断增加,沉积物砂质含量高,砂体横向连续性较好,是长7段今后主要的油气勘探目标。

### 参 考 文 献

- [1] Kuenen P H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. The Journal of Geology, 1950,58(2):91-127.
- [2] Shanmugam G. 深水砂体成因研究新进展[J]. 石油勘探与开发, 2013,40(3):294-301.  
Shanmugam G. New perspectives on deep-water sandstones: Implications[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40 (3):294-301.
- [3] 文佳涛,吕坐彬,韩雪芳,等. JZ气田湖底扇岩性砂体沉积模式

- 研究与应用[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 75-81.
- Wen Jiatao, Lyu Zuobin, Han Xuefang, et al. Research and application of sedimentary pattern for the sub-lacustrine fan lithologic sandbody in the JZ gas field [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(1): 75-81.
- [4] 苏亚拉图, 李千, 张波, 等. 砂质辫状河砂体构型及剩余油分布模式[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 10-18.
- Suya Latu, Li Qian, Zhang Bo, et al. Sandy braided river sandbody configuration and remaining oil distribution pattern [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(4): 10-18.
- [5] 李相博, 刘化清, 潘树新, 等. 中国湖相沉积物重力流研究的过去、现在与未来[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 904-921.
- Li Xiangbo, Liu Huaqing, Pan Shuxin, et al. The past, present and future of research on deep? Water sedimentary gravity flow in lake basins of China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 904-921.
- [6] 李祥辉, 王成善, 金玮, 等. 深海沉积理论发展及其在油气勘探中的意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 77-86.
- Li Xianghui, Wang Chengshan, Jin Wei, et al. A review on deep-sea sedimentation theory: Significance to oil-gas exploration [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 77-86.
- [7] 杨仁超, 尹伟, 樊爱萍, 等. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组湖相重力流沉积细粒岩及其油气地质意义[J]. 古地理学报, 2017, 19(5): 791-806.
- Yang Renchao, Yin Wei, Fan Aiping, et al. Fine-grained, lacustrine gravity-flow deposits and their hydrocarbon significance in the Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(5): 791-806.
- [8] 李洪楠. 断陷湖盆陡坡带重力流沉积特征及模式[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(4): 12-18.
- Li Hongnan. Sedimentary characteristics and models of gravity flow in steep slope zone of faulted lacustrine basin [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2020, 34(4): 12-18.
- [9] 李相博. 陆相盆地深水沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 877-878.
- Li Xiangbo. Research on deep-water sedimentary systems in continental basins [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 877-878.
- [10] Richards M B. Submarine fans and related depositional systems ii: Variability in reservoir architecture and wireline log character [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15(8): 821-839.
- [11] Posamentier Henry W, Kolla Venkatarathnam, 刘化清. 深水浊流沉积综述[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 879-903.
- Posamentier Henry W, Kolla Venkatarathnam, Liu Huaqing. An overview of deep-water turbidite deposition [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 879-903.
- [12] Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: Concepts, examples, and exploration significance [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(11): 1687-1709.
- [13] 孙佳馨, 辛仁臣, 梁江平, 等. 松辽盆地西斜坡上白垩统青山口组二段及三段底部四级层序格架下沉积微相分布[J]. 古地理学报, 2014, 16(4): 461-471.
- Sun Jiazhen, Xin Renchen, Liang Jiangping, et al. Sedimentary microfacies distribution under the 4th-order sequence stratigraphic framework of the Member 2 and lower Member 3 of Upper Cretaceous Qingshankou Formation in west slope of Songliao Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(4): 461-471.
- [14] 陈亮, 季汉成, 张靓, 等. 裂陷盆地重力流沉积对基准面变化的响应——以乌里雅斯太南洼腾一下亚段为例[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 487-496.
- Chen Liang, Ji Hancheng, Zhang Liang, et al. Responses of gravity flow deposits to base-level variation in rift basin using a case study of Lower Tengl Formation in South Wuliyasitai Sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 487-496.
- [15] 赵俊兴, 李凤杰, 申晓莉, 等. 鄂尔多斯盆地南部长6和长7油层浊流事件的沉积特征及发育模式[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 389-394.
- Zhao Junxing, Li Fengjie, Shen Xiaoli, et al. Sedimentary characteristics and development pattern of turbidity event of Chang 6 and Chang 7 oil reservoirs in the southern Ordos Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2008, 29(3): 389-394.
- [16] 陶泽, 林畅松, 张忠涛, 等. 珠江口盆地白云凹陷中新统韩江组中上部层序结构及深水重力流沉积[J]. 古地理学报, 2017, 19(4): 623-634.
- Tao Ze, Lin Changsong, Zhang Zhongtao, et al. Sequence architecture and deep water gravity-flow deposits of the middle and upper member of Hanjiang Formation of Miocene in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Chinese Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(4): 623-634.
- [17] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458.
- Jin Zhijun, Bai Zhenrui, Gao Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 451-458.
- [18] 盛湘, 陈祥, 章新文, 等. 中国陆相页岩油开发前景与挑战[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 267-271.
- Sheng Xiang, Chen Xiang, Zhang Xinwen, et al. Prospects and challenges of continental shale oil development in China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(3): 267-271.
- [19] 张亚雄. 鄂尔多斯盆地中部地区三叠系延长组7段暗色泥岩烃源岩特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1089-1097.
- Zhang Yaxiong. Source rock characterization: The dark mudstone in Chang 7 Member of Triassic, central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1089-1097.
- [20] 李士祥, 牛小兵, 柳广弟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩油形成富集机理[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 719-729.
- Li Shixiang, Niu Xiaobing, Liu Guangdi, et al. Formation and accumulation mechanism of shale oil in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 719-729.
- [21] 范柏江, 师良, 杨杰, 等. 鄂尔多斯盆地中部湖相有机质沉积环境特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 648-657.
- Fan Bojiang, Shi Liang, Yang Jie, et al. Characteristics of lacustrine organic matter sedimentary environment in the central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 648-657.
- [22] 谷志宇, 刘恩涛, 王香增, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组七段页岩发育特征及勘探潜力[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 95-105.
- Gu Zhiyu, Liu Entao, Wang Xiangzeng, et al. Development characteristics and exploration potential of shale in Chang 7 Member in southeast of Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(1): 95-105.
- [23] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 601-614.
- Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 601-614.
- [24] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
- Zou Caineng, Pan Songqi, Jing Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2020, 41(1): 1-12.

- 1-12.
- [25] 付金华, 郭少斌, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界山西组页岩气成藏条件及勘探潜力[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(2): 382-389.
- Fu Jinhua, Guo Shaobin, Liu Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration potential of shale gas in the Upper Paleozoic Shanxi Formation in the Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(2): 382-389.
- [26] 邓长生, 张毅, 谢小飞, 等. 鄂尔多斯盆地延长油气区延长组长7段陆相页岩含气性分析[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(1): 20-25.
- Deng Changsheng, Zhang Yi, Xie Xiafei, et al. Gas bearing analysis of continental shale of Chang 7 Member of Yanchang Formation in Yanchang oil & gas region of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(1): 20-25.
- [27] 韩双彪. 鄂尔多斯盆地东南部延长组页岩油气生成与相态预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Han Shuangbiao. Oil and gas generation and phase prediction of Yanchang formation shale in the southeastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [28] 万响璐. 鄂南地区三叠系延长组异常压力特征与成藏关系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Wan Yanglu. Study on the relationship between abnormal pressure and accumulation of the Triassic Yanchang Formation in southern Hubei[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [29] 王辉云. 镇泾区块油气成藏模式研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- Wang Huiyun. Research on hydrocarbon accumulation model in Zhenjing Block[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [30] 刘文辉. 镇泾地区页岩储层解释模型及测井评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- Liu Wenhui. Interpretation model and logging evaluation of shale reservoirs in Zhenjing area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [31] 周荔青, 刘忠群, 蒲仁海, 等. 镇泾地区长8段三维地震强振幅异常带成因探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(2): 371-380.
- Zhou Liqing, Liu Zhongqun, Pu Renhai, et al. Origin of 3D seismic strong amplitude anomaly belt in Chang 8 Member in Zhenjing area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(2): 371-380.
- [32] 韦东晓. 鄂尔多斯盆地中西部地区三叠系延长组长6沉积体系及砂体展布规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- Wei Dongxiao. Study on the Chang 6 sedimentary system and sand body distribution of the Triassic Yanchang Formation in the central and western Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [33] 徐梦龙, 何治亮, 尹伟, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组8段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 240-247.
- Xu Menglong, He Zhiliang, Yin Wei, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 8th member of the Yanchang Formation in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 240-247.
- [34] 李超, 张立强, 张立宽, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区中生代地层剥蚀厚度估算及古构造恢复[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(2): 72-79.
- Li Chao, Zhang Liqiang, Zhang Likuan, et al. Estimation of denudation thickness of Mesozoic Strata and paleostructure restoration in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(2): 72-79.
- [35] 杨仁超, 何治亮, 邱桂强, 等. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世重力流沉积体系[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 661-670.
- Yang Renchao, He Zhiliang, Qiu Guiqiang, et al. Late Triassic gravity flow depositional systems in the southern Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 661-670.
- [36] 李松, 尹伟, 刘震, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾区块长8油层成藏过程分析[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(4): 23-28.
- Li Song, Yin Wei, Liu Zhen, et al. Hydrocarbon accumulation of Chang 8 oil layer in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(4): 23-28.
- [37] 王国壮, 梁承春, 聂小创, 等. 镇泾地区侏罗纪古地貌与延安组成藏关系[J]. 特种油气藏, 2016, 23(4): 46-50.
- Wang Guozhuang, Liang Chengchun, Nie Xiaochuang, et al. Relationship between Jurassic paleogeomorphology and Yan'an Reservoirs in Zhenjing area[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(4): 46-50.
- [38] 龙礼文, 李相博, 刘广林, 等. 鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩储层岩石学特征及地质意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(4): 634-640.
- Long Liwen, Li Xiangbo, Liu Guanglin, et al. Reservoir petrology and geological significance of deep water sandstone of Chang 6 Formation in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(4): 634-640.
- [39] 张晓辉, 冯顺彦, 梁晓伟, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7段沉积微相及沉积演化特征[J]. 地质学报, 2020, 94(3): 957-967.
- Zhang Xiaohui, Feng Shunyan, Liang Xiaowei, et al. Sedimentary microfacies identification and inferred evolution of the Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Longdong area, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 957-967.
- [40] Chen P, Xian B, Li M, et al. A giant lacustrine flood-related turbidite system in the Triassic Ordos Basin, China: Sedimentary processes and depositional architecture[J]. Sedimentology, 2021, 68(7): 3279-3306.
- [41] 田荣恒, 鲜本忠, 晁志超, 等. 湖相重力流水道沉积特征与沉积模式: 以鄂尔多斯盆地瑶曲铁路桥剖面三叠系延长组为例[J]. 古地理学报, 2021, 23(5): 967-982.
- Tian Rongheng, Xian Benzong, Chao Chuzhi, et al. Sedimentary characteristics and model of lacustrine gravity flow channels: A case study of the Triassic Yanchang Formation of Yaoqu railway-bridge section in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(5): 967-982.
- [42] 陈林, 陆永潮, 林卫兵, 等. 鄂尔多斯盆地西南部延长组长8油层组层序地层特征及沉积充填模式[J]. 石油学报, 2019, 40(4): 434-447.
- Chen Lin, Lu Yongchao, Lin Weibing, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary filling model of Chang-8 oil layer of Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(4): 434-447.
- [43] 孟昊, 钟大康, 朱筱敏, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组LSC3层序格架与砂体[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(1): 77-87.
- Meng Hao, Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary facies of LSC3 of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(1): 77-87.
- [44] 于兴河, 李顺利, 谭程鹏, 等. 粗粒沉积及其储层表征的发展历程与热点问题探讨[J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 713-736.
- Yu Xinghe, Li Shunli, Tan Chengpeng, et al. Coarse-grained deposits and their reservoir characterizations: A look back to see forward and hot issues[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(5): 713-736.
- [45] 孙乐, 于兴河, 李胜利, 等. 北部湾盆地乌石凹陷东区始新统流三段水进型扇三角洲沉积特征[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 485-498.

- Sun Le, Yu Xinghe, Li Shengli, et al. Sedimentary characteristics of transgressive fan delta of the 3rd Member of Eocene Liushagang Formation in eastern Wushi Sag, Beibuwan Basin[J]. *Geology in China*, 2017, 44(3):485-498.
- [46] 冯烁, 于兴河, 李顺利, 等. 内蒙古岱海元子沟冲积扇内部构型特征及分布规律[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(5):31-40.
- Feng Shuo, Yu Xinghe, Li Shunli, et al. Architectural characteristics and distribution patterns of alluvial fans in Yuanzigou, Daihai, Inner Mongolia[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021, 45(5):31-40.
- [47] Li S, Zhu X, Li S, et al. Trigger mechanisms of gravity flow deposits in the Lower Cretaceous lacustrine rift basin of Lingshan Island, Eastern China[J]. *Cretaceous Research*, 2019, 107: 104269.
- [48] 王永东, 颜其彬. 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩资源应用前景[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2012, 42(3):453-458.
- Wang Yongdong, Yan Qibin. The resource application prospects of Zhangjiantan Shale, Southern Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(3):453-458.
- [49] 刘芬, 朱筱敏, 李洋, 等. 鄂尔多斯盆地西南部延长组重力流沉积特征及相模式[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5):577-588.
- Liu Fen, Zhu Xiaomin, Li Yang, et al. Sedimentary characteristics and facies model of gravity flow deposits of Late Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5):577-588.
- [50] 杨仁超, 尹伟, 樊爱萍, 等. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组湖相重力流沉积细粒岩及其油气地质意义[J]. 古地理学报, 2017, 19(5):791-806.
- Yang Renchao, Yin Wei, Fan Aiping, et al. Fine-grained, lacustrine gravity-flow deposits and their hydrocarbon significance in the Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(5):791-806.
- [51] 孙宁亮, 钟建华, 田东恩, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积与致密油的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(6):30-40.
- Sun Ningliang, Zhong Jianhua, Tian Dongen, et al. Relationship between event deposits and tight oil of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(6):30-40.
- [52] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制[J]. 地学前缘, 2017, 24(3):234-248.
- Cao Yingchang, Yang Tian, Wang Yanzhong, et al. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 234-248.
- [53] 李俞锋, 蒲仁海, 唐明, 等. 一种新型底流与浊流交互作用形成的储集砂体——以北礁凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(6):55-66.
- Li Yufeng, Pu Renhai, Tang Ming, et al. A new reservoir sand body resulted from interaction between turbidity flows and bottom currents: A case from Beijiao Sag of Qiongdongnan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(6):55-66.
- [54] 杜永慧, 李晓路, 韩小琴, 等. 鄂尔多斯盆地东南部山西组沉积特征[J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(3):44-51.
- Du Yonghui, Li Xiaolu, Han Xiaoqin, et al. Sedimentary characteristics of early Permian Shanxi Formation, southeastern of Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017, 41(3):44-51.
- [55] 熊林芳, 刘池阳, 邱欣卫, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世构造活动及对优质烃源岩发育的影响[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2):109-114.
- Xiong Linfang, Liu Chiyang, Qiu Xinwei, et al. Tectonic activity of Late Triassic in Ordos Basin and its effect on the formation of high quality source rocks[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(2):109-114.
- [56] 郝松立, 李兆雨, 李文厚. 鄂尔多斯盆地西南部延长组长7段浊积岩沉积特征[J]. 地质通报, 2016, 35(2):424-432.
- Hao Songli, Li Zhaoyu, Li Wenhao. Sedimentary characteristics of turbidite of Chang 7 Member in southwestern Ordos Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(2):424-432.
- [57] 付锁堂, 姚泾利, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5):698-710.
- Fu Suotang, Yao Jingli, Li Shixiang, et al. Enrichment characteristics and resource potential of continental shale oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5):698-710.
- [58] 时建超, 屈雪峰, 雷启鸿, 等. 陆相湖盆深水重力流沉积特征、砂体结构研究及油气勘探意义——以鄂尔多斯盆地上三叠统长7油层组为例[J]. 地质与勘探, 2018, 54(1):183-192.
- Shi Jianchao, Qu Xuefeng, Lei Qihong, et al. Sedimentary characteristics and sand architecture of gravity flows in terrestrial lacustrine basins: A case study of Chang 7 Formation of the Upper Triassic in Ordos Basin and implications for hydrocarbon exploration[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(1):183-192.
- [59] 周利明. 鄂尔多斯盆地西南部长7沉积环境对细粒沉积物的影响[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- Zhou Liming. The influence of Chang 7 sedimentary environment on fine-grained sediments in the southwestern Ordos Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
- [60] 储昭奎. 鄂南镇泾地区延长组储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- Chu Zhao kui. Reservoir characteristics of Yanchang Formation in Zhenjing area of southern Hubei[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [61] 张才利, 张雷, 陈调胜, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7沉积期物源分析及母岩类型研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(3):430-439.
- Zhang Caili, Zhang Lei, Chen Diaosheng, et al. Provenance and parent-rock types of Member 7 of Yanchang Formation (Triassic), Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(3):430-439.
- [62] 乔世海, 李玉宏, 郭望, 等. 陕西铜川地区延长组长7油页岩无机地球化学特征及古环境恢复[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1):121-126.
- Qiao Shihai, Li Yuhong, Guo Wang, et al. Inorganic geochemical characteristics and paleoenvironmental restoration of Chang 7 oil shale in Yanchang Formation, Tongchuan area, Shanxi Province[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(1):121-126.
- [63] Muto T, Steel R J. Principles of regression and transgression; the nature of the interplay between accommodation and sediment supply[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67(6):994-1000.
- [64] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5):601-614.
- Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5):601-614.