

引用: 孙建博, 石彬, 郭超, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长 $7_3$ 亚段页岩油储层特征与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2023,28(4):79-91.

Sun Jianbo, Shi Bin, Guo Chao, et al. Characteristics of shale oil reservoir and exploration prospects in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(4):79-91.

# 鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长 $7_3$ 亚段页岩油储层特征与勘探前景

孙建博<sup>1,2</sup> 石彬<sup>1,2</sup> 郭超<sup>1,2</sup> 高潮<sup>1,2</sup> 白奋飞<sup>1,2</sup> 刘刚<sup>1,2</sup> 尹锦涛<sup>1,2</sup> 徐杰<sup>1,2</sup>

(1 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院; 2 陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室)

**摘要:** 鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长 $7_3$ 亚段沉积期位于湖盆东部沉积中心, 蕴藏着丰富的页岩油资源, 具有较好的勘探前景, 但对于页岩油储层特征研究较少, 缺乏储集特征和含油性研究, 制约了页岩油勘探部署实践。以富县地区长 $7_3$ 亚段为研究对象, 利用岩心观察、全岩矿物 X-射线衍射分析、氯仿抽提、核磁共振、有机碳及孔隙度测试等多种手段, 从岩石矿物学特征、储集空间、孔隙结构、含油气性等方面开展分析, 明确了长 $7_3$ 亚段发育泥页岩类、粉—细砂岩类、凝灰岩类三大岩石类型, 泥页岩类根据纹层发育程度又可细分为4种岩石类型。泥页岩类矿物组成主要为石英、长石、碳酸盐矿物和黏土矿物, 还有少量的黄铁矿。储层主要发育粒间孔、粒内孔、有机质孔及微裂缝4种储集空间类型。粉—细砂岩中、大孔比较发育, 核磁共振 $T_2$ 谱以多峰型和左偏单峰型为主; 黑色页岩微孔相对较发育, 大孔相对较少, 核磁共振 $T_2$ 谱以多峰型、右偏单峰型为主。含油气性好、油饱和度指数高的粉—细砂岩是长 $7_3$ 亚段最优的页岩油储层, 其次是纹层状泥页岩。综合分析认为, 粉—细砂岩类和泥页岩类目标均具备一定的勘探潜力, 也是未来增储上产的潜在领域。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 富县地区; 长 $7_3$ 亚段; 页岩油; 储集特征; 含油性

**中图分类号:** TE112.23 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.04.008

## Characteristics of shale oil reservoir and exploration prospects in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area, Ordos Basin

Sun Jianbo<sup>1,2</sup>, Shi Bin<sup>1,2</sup>, Guo Chao<sup>1,2</sup>, Gao Chao<sup>1,2</sup>, Bai Fenfei<sup>1,2</sup>, Liu Gang<sup>1,2</sup>, Yin Jintao<sup>1,2</sup>, Xu Jie<sup>1,2</sup>

(1 Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd.; 2 Shaanxi Key Laboratory of Continental Shale Gas Accumulation and Exploitation)

**Abstract:** During the deposition period of the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation (Chang  $7_3$  sub-member), Fuxian area was located in the depo-center of the eastern lake basin, showing abundant shale oil resources and good exploration prospects. However, few studies have been conducted on shale oil reservoir characteristics, and there is a lack of the study on reservoir space characteristics and oil-bearing property, which restrict shale oil exploration and deployment practice. By using core observation, whole rock mineral XRD analysis, chloroform extraction, NMR, organic carbon abundance and porosity test data, the petrological and mineralogical characteristics, reservoir space, pore structure and oil and gas bearing property are analyzed in Fuxian area, which indicates that three rock categories are observed in Chang  $7_3$  sub-member, such as shale, silty-fine sandstone and tuff. Based on the development degree of lamina, the shale category is subdivided into four rock types. The main mineral composition of shale section includes quartz, feldspar, carbonate and clay minerals, as well as a small amount of pyrite. The reservoir is dominated by four types of pores, i.e., intergranular pore, intragranular pore, organic pore and microfracture. The meso-macropores are

基金项目: 国家科技重大专项“延安地区陆相页岩气勘探开发关键技术”(2017ZX05039); 陕西省自然科学基金研究计划“鄂尔多斯盆地陆相页岩气地质—工程一体化智能评价方法研究”(2022JM-171); 陕西延长石油(集团)有限责任公司项目“鄂尔多斯盆地南部下寺湾—直罗地区页岩油气储层综合评价技术研究”(ycsy2022jcts-B-28)。

第一作者简介: 孙建博(1981—), 男, 陕西扶风人, 硕士, 2008年毕业于西北大学, 正高级工程师, 现主要从事页岩油气地质研究工作。  
地址: 陕西省西安市唐延路61号延长石油科研中心, 邮政编码: 710065。E-mail: sjb428@126.com

收稿日期: 2023-03-27; 修改日期: 2023-05-05

relatively developed in silty-fine sandstone, and the NMR  $T_2$  spectrum is characterized by multi-peak and left-biased single-peak types. The micropores are relatively developed in black shale, with relatively few macropores, and the NMR  $T_2$  spectrum is mainly multi-peak and right-biased single-peak types. The silty-fine sandstone with good oil-bearing property and high oil saturation index is the optimal shale oil reservoir in Chang 7<sub>3</sub> sub-member, followed by the laminated shale. The comprehensive study indicates that both silty-fine sandstone and shale targets have certain exploration potential, which are potential fields for increasing reserves and production in the future.

**Key words:** Ordos Basin, Fuxian area, Chang 7<sub>3</sub> sub-member, shale oil, reservoir space characteristics, oil-bearing property

## 0 引言

随着我国经济的持续高速发展及对油气资源需求的不断增大,越来越多的学者将研究重点从常规油气转向非常规油气。页岩油作为重要的非常规油气资源接替之一,受到大家的普遍关注。美国页岩油开发经历 60 余年的不断探索和反复实践,借鉴页岩气理论与发展经验,实现了页岩油的快速发展,获得了巨大成功<sup>[1-2]</sup>。与北美海相页岩油相比,我国页岩油以陆相页岩油为主,具有非均质性强、异常压力不明显、黏土矿物含量高等特点<sup>[3-5]</sup>。近年来,我国加强了陆相页岩油成藏地质理论研究及关键工艺技术攻关,陆相页岩油勘探取得了突破性进展,相继在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、松辽盆地、渤海湾盆地等多个中—新生代湖盆中实现了页岩油资源的工业化开发<sup>[6-12]</sup>。中国石油长庆油田公司在鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段发现并探明了庆城页岩油大油田,累计提交页岩油探明地质储量  $10 \times 10^8 \text{t}$ ,显示出长 7 段页岩油勘探潜力巨大,前景广阔。与此同时,受鄂尔多斯盆地东北物源控制的富县地区长 7 段页岩油勘探也取得积极进展,在长 7<sub>1</sub> 亚段、长 7<sub>2</sub> 亚段部署的 FT 平 1、FT 平 2 等井获得工业油流,预示着该区以细砂岩—粉砂岩等为主要目的层的页岩油具有较好的勘探潜力;但在长 7<sub>3</sub> 亚段部署的以泥页岩为目的层的 YY1、FY2 等井仅获得少量油气流,总结认为勘探初期以泥页岩厚度、 $R_o$ 、有机碳含量、气测显示等为优选指标的参数体系不适合泥页岩段,传统压裂工艺对泥页岩段改造效果不佳等是勘探失利的主要原因,加上对泥页岩段储集空间、可动烃赋存状态等认识不足,对于以泥页岩为对象的新类型页岩油的探索还需要继续深入研究。近期长庆油田公司针对长 7<sub>3</sub> 亚段泥页岩夹薄层砂岩地层部署实施的 LY1H 井试油获得百吨高产,使得在长 7<sub>3</sub> 亚段中进一步寻找“甜点”成为可能。大庆古龙在纯页岩地层中获得高产页岩油流,也为研究区在泥页岩地层中优选富集层提供了借鉴<sup>[13]</sup>。前人在富有机质泥页岩岩相纵向发育模式、深水沉积岩相特征、砂质纹层和油气成藏的关系、泥页岩孔隙结构等方面进行了大量系统研究,但针对长 7<sub>3</sub> 亚段页岩油储层分类评价研

究还比较薄弱<sup>[14-19]</sup>。因此,研究清楚长 7<sub>3</sub> 亚段的岩性、储集空间、物性、孔隙结构、含油气性等关键问题,探讨不同类型岩石储集性能和含油性,对于理清页岩油成藏富集规律,明确勘探方向具有重要意义。本文在借鉴前人研究的基础上,以鄂尔多斯盆地富县地区延长组长 7<sub>3</sub> 亚段为研究对象,利用钻井、测井、分析化验资料,分析泥页岩段岩性特征及有机地球化学特征,探讨页岩油储集和含油性特征,以期对长 7<sub>3</sub> 亚段页岩油“甜点”优选提供指导。

## 1 地质背景

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组沉积期主要发育一套内陆拗陷湖盆碎屑岩沉积,自上而下分为 10 期(长 1—长 10),其中长 7 段沉积期为最大湖泛期,气候温暖潮湿,湖区水深可达 60~120m,半深湖—深湖范围可达  $6.5 \times 10^4 \text{km}^2$ 。大型内陆拗陷湖盆的形成大面积细粒沉积发育奠定了地质基础,盆地内沉积了一套广覆式分布的富有机质泥页岩夹粉—细砂岩的沉积组合<sup>[13-15]</sup>。

盆地内泥页岩层系最大的特点是泥页岩与粉—细砂岩薄夹层频繁互层沉积。其中,长 7 段泥页岩具有稳定分布、厚度大、生烃能力强的特点,为页岩油的规模生烃成藏奠定了物质基础<sup>[19-21]</sup>。富县地区延长组长 7 段沉积期位于东部沉积中心(图 1a),构造平缓,泥页岩最大厚度可达 60m,埋深为 1300~1500m。延长组长 7<sub>3</sub> 亚段以半深湖—深湖沉积为主,整体发育泥页岩类沉积,地层厚度为 50m 左右,岩性以黑色页岩、暗色泥岩、细砂岩及粉砂岩为主(图 1b)。本次工作样品取自富县地区 12 口重点页岩油气探井,井位分布位置见图 1a,共采集长 7<sub>3</sub> 亚段各类岩心样品 205 块,样品岩性主要为黑色页岩、暗色泥岩、泥质粉砂岩和细砂岩等。

## 2 长 7<sub>3</sub> 亚段岩石类型

富县地区长 7<sub>3</sub> 亚段由于受沉积环境控制,岩性主要以富有机质泥页岩为主,局部发育粉—细砂岩等粗粒沉积。同时,受同时期火山及地震等区域地质事件的影响,造成泥页岩中粉砂质纹层和凝灰岩层也普遍

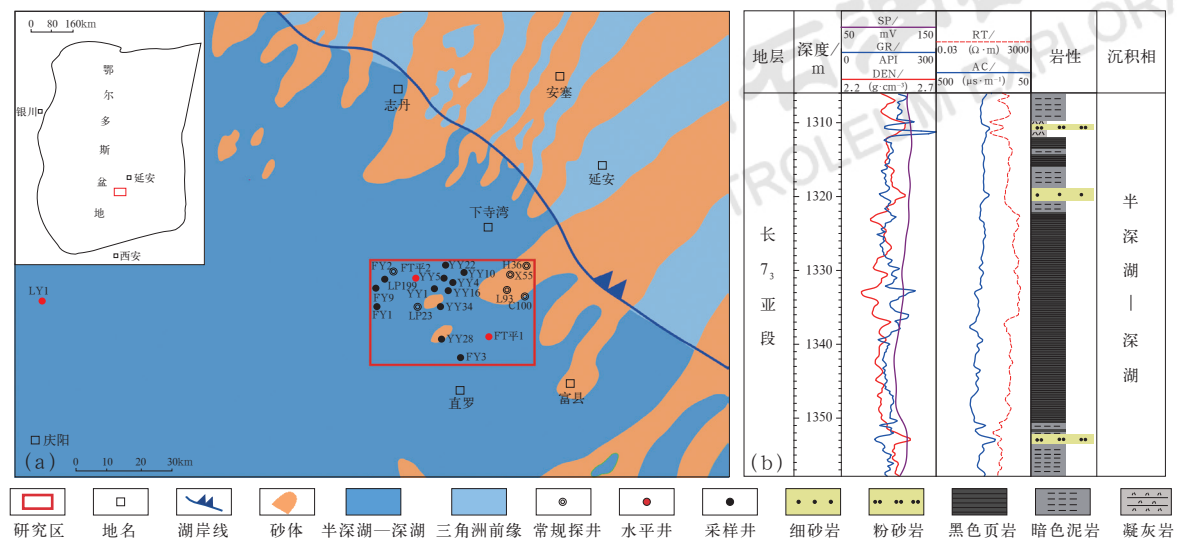


图 1 研究区位置图 (a) 与延长组长 7<sub>3</sub> 亚段地层柱状图 (b)

Fig.1 Location of study area (a) and stratigraphic column of the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation (b)

发育。前人研究成果表明：明确页岩油储层岩性特征，对于揭示易于改造的有利层段和水平井的轨迹设计意义重大<sup>[22-24]</sup>。为系统识别富县地区岩性类型及其特征，对 12 口取心井开展了详细的岩心观察和取样工作，获取了长 7<sub>3</sub> 亚段完整的实物资料，并开展了 X-射线衍射、有机地球化学、储层物性等方面的测试分析工作。

野外剖面及取心井观察结果表明，富县地区长 7<sub>3</sub> 亚段可分为泥页岩类、粉—细砂岩类、凝灰岩类三大类岩性，其中泥页岩类又可分为黑色页岩、暗色泥岩、黑色纹层状页岩、暗色纹层状泥岩 4 种岩性。由于凝灰岩厚度薄，规模小，本次研究不做详细论述。研究区北部

在长 7<sub>3</sub> 亚段全取心的 YY22 井岩性描述结果显示，长 7<sub>3</sub> 亚段主要发育黑色页岩、暗色泥岩、黑色纹层状页岩、暗色纹层状泥岩、泥质粉砂岩或细砂岩（简称粉—细砂岩）、凝灰岩等 6 种岩石类型，其中黑色页岩为主要的岩石类型，其厚度约为 32m，内部发育 5 层黑色纹层状页岩，厚度为 3m；暗色泥岩厚度为 18m，内部发育 7 层暗色纹层状泥岩的混合层，厚度为 9.75m；粉—细砂岩发育 7 层，厚度为 6.25m（图 2）。

从北西—南东向剖面可以看出，各类岩性纵向连续性差，非均质性极强（图 3）。泥页岩中粉砂质纹层比较发育，YY28 井纹层状泥页岩厚度占整个地层

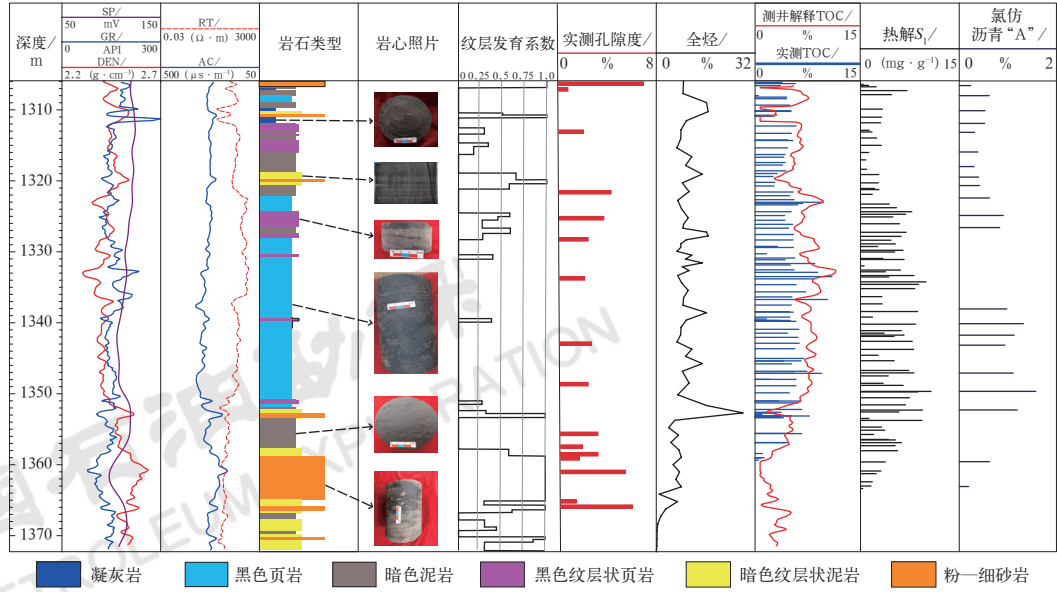


图 2 富县地区 YY22 井长 7<sub>3</sub> 亚段地球化学参数和物性参数综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of geochemical and physical parameters of the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Well YY22 in Fuxian area



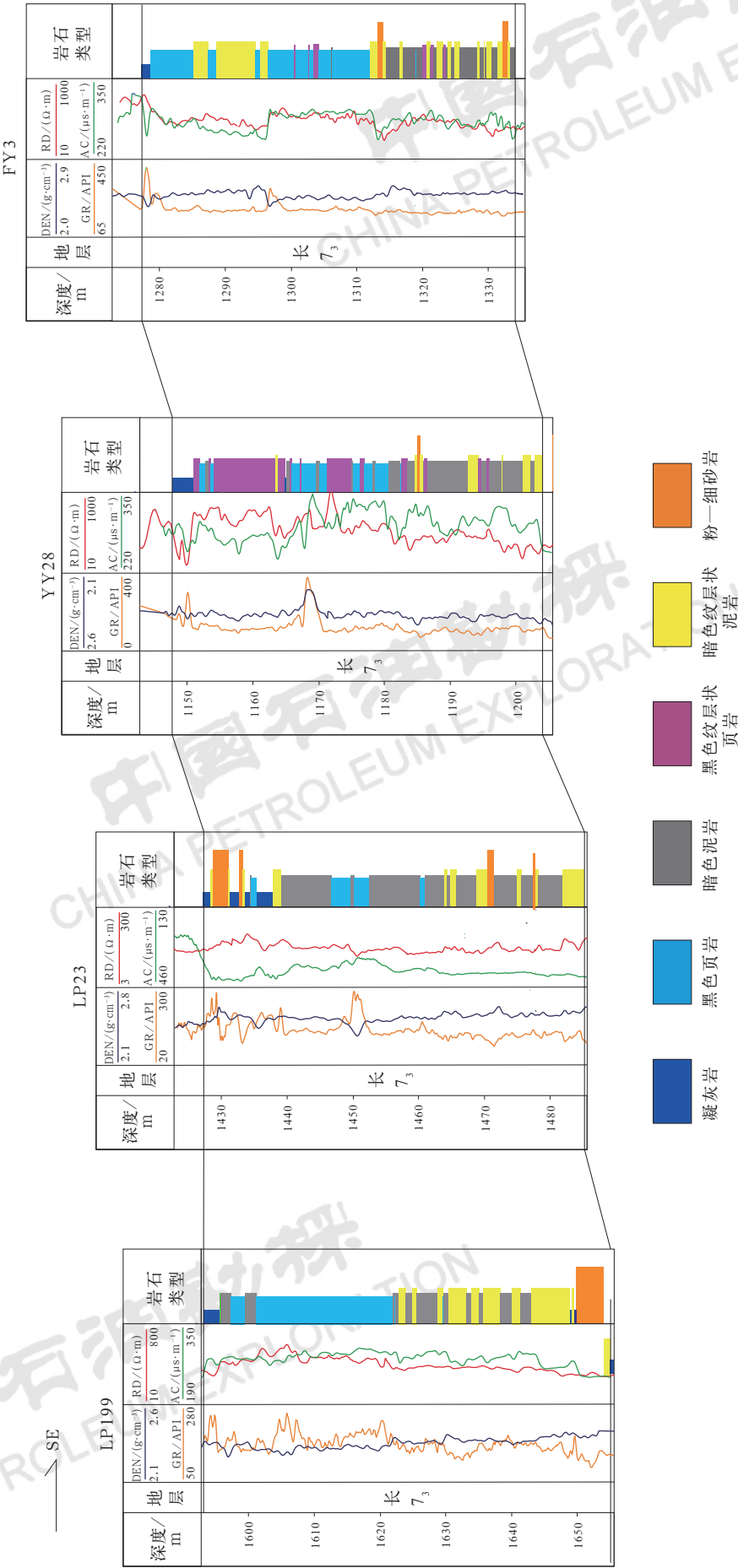


图 3 研究区长 7<sub>3</sub> 亚段岩性变化纵对比图

Fig.3 Well correlation showing vertical lithologic changes of the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in the study area

厚度约 50%；粉—细砂岩类在纵向上具有单砂层层数多、单层厚度薄、局部发育的特点，单层厚度一般小于 2m。平面分布特征显示，泥页岩类厚度中心总体呈北西—南东向展布，累计厚度最大可达 50m，平均

为 35m（图 4）。粉—细砂岩类具有叠置分布的特点，研究区发育两条北东方向的砂质条带，局部厚度可达 10m（图 5）。这些叠置分布的粉—细砂岩类沉积是下一步勘探的重点目标。

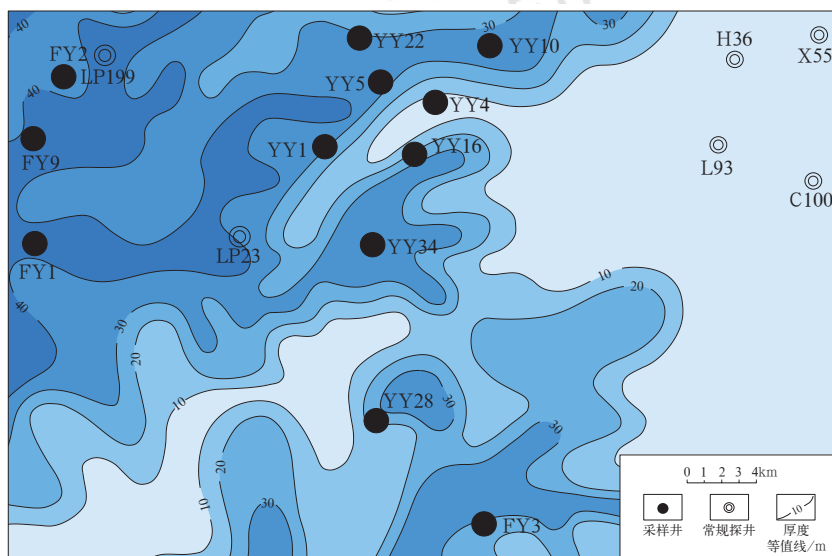


图 4 研究区长<sub>7</sub>亚段泥页岩分布特征图

Fig.4 Distribution characteristics of shale in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in the study area

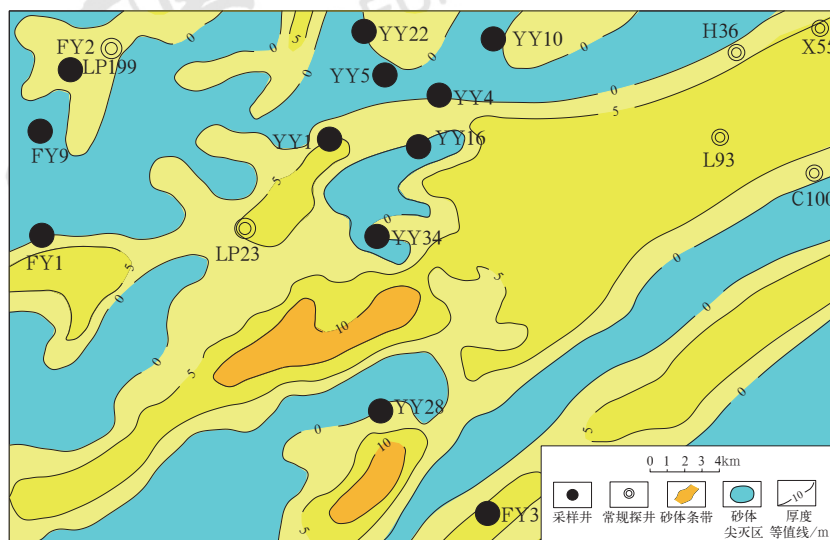


图 5 研究区长<sub>7</sub>亚段粉—细砂岩分布特征图

Fig.5 Distribution characteristics of silty-fine sandstone in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in the study area

### 3 岩石矿物学及有机地球化学特征

#### 3.1 矿物组成特征

研究区 61 个样品的 X-射线衍射 (XRD) 分析结果显示，富县地区长<sub>7</sub>亚段泥页岩类矿物组成以

石英、长石、碳酸盐矿物和黏土矿物为主，还有少量的黄铁矿，不同岩性的岩石矿物组成不同（图 6）。其中，黑色页岩黏土矿物含量平均为 52.4%，长石 + 石英含量平均为 42.2%；暗色泥岩黏土矿物含量平均为 55.3%，石英含量平均为 27%，长石含量平均为 15.7%；黑色纹层状页岩黏土矿物含量低于黑色页

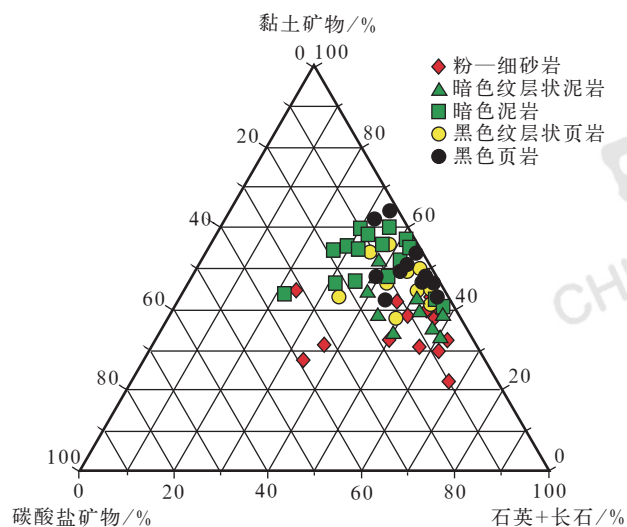


图6 富县地区长<sub>7</sub>亚段不同类型岩石矿物组成三角图  
Fig.6 Triangular diagram of different types of rock mineral composition in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area

岩, 平均为 50.3%, 长石含量平均为 17.8%, 石英含量平均为 31.2%, 高于黑色页岩和暗色泥岩的石英含量; 与暗色泥岩相比, 暗色纹层状泥岩具有相对高的石英、长石含量和相对低的碳酸盐矿物含量、黏土矿

物含量及黄铁矿含量, 石英含量平均为 28.5%, 长石含量平均为 17.7%, 黏土矿物含量平均为 43.2%; 粉—细砂岩矿物组成以石英、长石等碎屑颗粒为主, 石英含量平均为 31.9%, 长石含量平均为 22.4%, 长石成分主要为钠长石和钾长石, 黏土矿物含量低, 平均为 34.9%。

### 3.2 有机地球化学特征

富县地区 12 口井 138 块样品的有机地球化学分析结果表明, 富县地区长<sub>7</sub>亚段泥页岩 TOC 为 0.7%~15.8%, 平均为 4.7%;  $S_1$  为 0.03~11.7mg/g, 平均为 4.11mg/g;  $T_{max}$  为 421~473℃, 平均为 450℃; 氯仿沥青“A”含量为 0.04%~2.83%, 平均为 0.73% (图 7)。黑色页岩的 TOC、 $S_1$  大于黑色纹层状页岩、暗色泥岩和暗色纹层状泥岩及粉—细砂岩, 其中 TOC 平均为 6%,  $S_1$  平均为 4.74mg/g; 黑色页岩氯仿沥青“A”含量平均为 0.88%, 高于暗色泥岩和暗色纹层状泥岩。有机质显微观察结果表明, 干酪根类型以 I—II<sub>1</sub> 型为主, 少量为 II<sub>2</sub> 型干酪根, 具有腐泥型和混合型干酪根的特点。

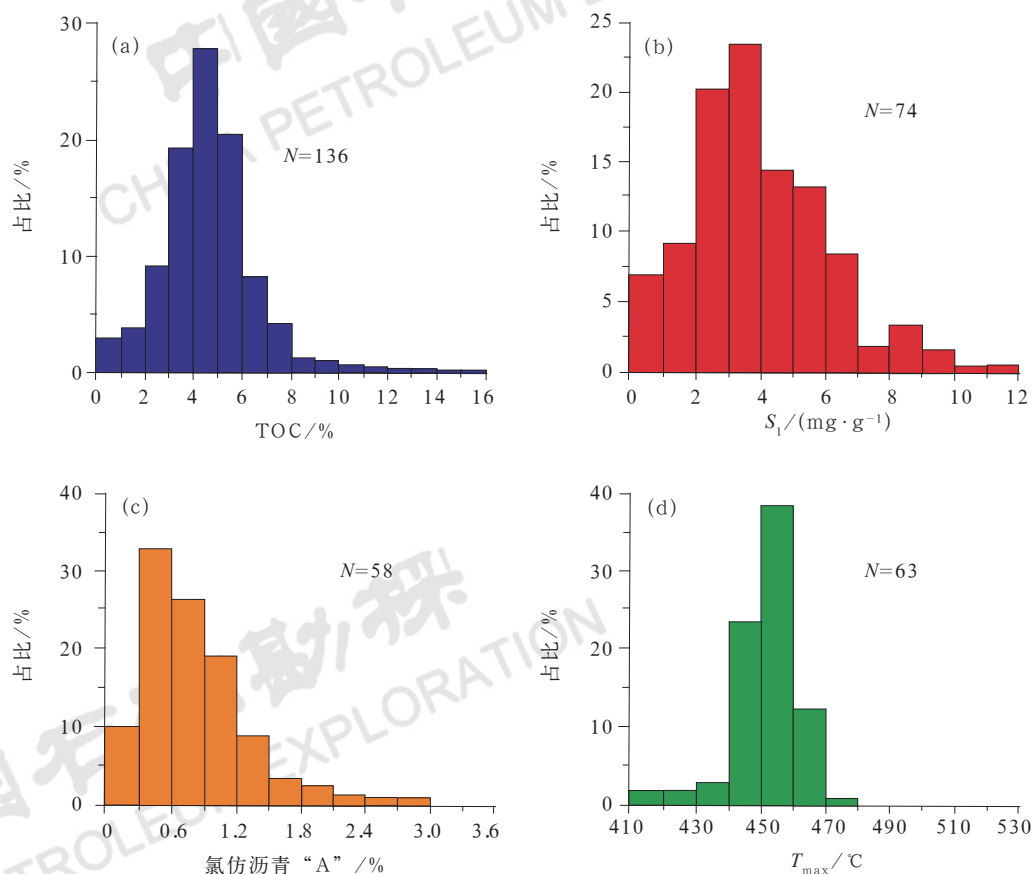


图7 富县地区长<sub>7</sub>亚段泥页岩样品有机地球化学特征分布图

Fig.7 Organic geochemical characteristics of shale samples in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area

有机质赋存形式分为气/液态烃和固体有机质两种类型。其中固体有机质可进一步划分为沉积有机质(干酪根)和运移固体有机质两种类型,主要以顺层富集和分散富集形式赋存于页岩中,部分碎屑颗粒较大处、化石腔体孔、黄铁矿集合体中以沥青形式分布在页岩中<sup>[25]</sup>。顺层富集的有机质平行或近平行于页岩层理分布,主要呈连续或者断续的条带状、波状、纺锤状、丝状或纹层状的形态出现。泥页岩镜质组反射率( $R_o$ )主要介于0.8%~1.1%,少量大于1.2%,处于成熟阶段—湿气(原油伴生气)阶段,具有较强的生烃能力。部分页岩甚至有初期热裂解的油型气生成,造成部分地区油井具有较大的伴生气产出,甚至有气量较大的页岩气井。

## 4 储集空间及孔隙结构特征

### 4.1 储集空间

长<sub>7</sub>亚段不同类型岩石中发育的多种类型储集空间是页岩油赋存的场所。利用薄片及FIB—SEM等观测手段,分析了不同岩石的储集空间类型、发育特征、不同类型孔隙的孔径分布特征,为研究影响页

岩储层孔隙发育和保存的地质因素、页岩储层中流体赋存特征和分布规律等提供依据。研究发现,长<sub>7</sub>亚段主要发育粒间孔、粒内孔、有机质孔及微裂缝4种储集空间类型(图8)。

粉—细砂岩中粒间孔相对较大,孔径多数介于数百纳米到20 $\mu\text{m}$ 之间,部分大于20 $\mu\text{m}$ 。泥页岩中粒内孔的孔径多数小于200nm,最大可达4.7 $\mu\text{m}$ ,孔径较大的粒内孔为长石颗粒的溶孔,孔径的峰值为20~30nm。泥页岩中常见草莓状、团状或不规则状的黄铁矿集合体,内部发育粒内孔。长<sub>7</sub>亚段页岩中有机质孔在一定范围内较为发育,但大小和分布不均一,有机质孔呈圆形、椭圆形,部分孔隙相连形成复杂的大孔隙。有机质孔孔径相对无机孔而言较小,孔径一般小于100nm,多数集中在10~70nm之间,最大可达950nm。统计结果表明,有机质孔面孔率占有有机质面积的比例为19%。有机质孔不仅可以储集页岩油,而且具有较大的比表面积,对于页岩油的吸附和赋存具有重要意义<sup>[26]</sup>。研究区长<sub>7</sub>亚段泥页岩中微裂缝发育较多,主要包括层理缝、低角度裂缝和高角度裂缝等,这些微裂缝对于页岩油气的渗流起着重要的作用。

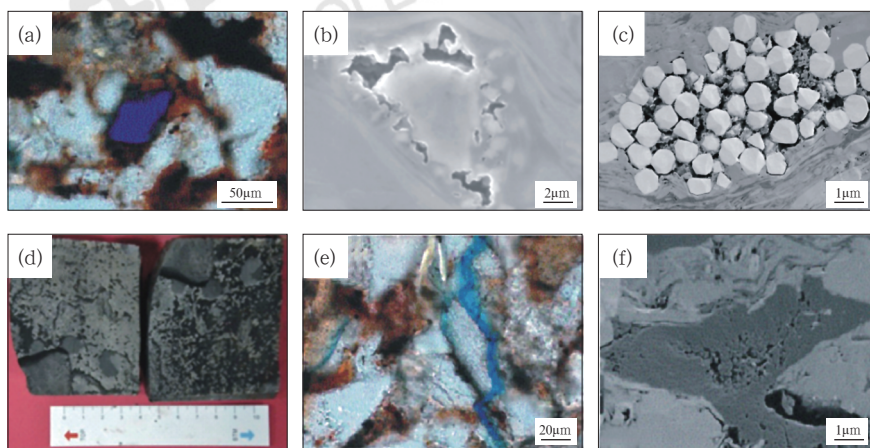


图8 富县地区长<sub>7</sub>亚段储集空间类型

Fig.8 Reservoir space types in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area

(a) 粉—细砂岩中粒间孔, YY1 井, 1355m, 单偏光; (b) 页岩中粒内孔, YY8 井, 1522.8m, SEM; (c) 黄铁矿中粒内孔, YY22 井, 1299.73m, SEM; (d) 被方解石充填的高角度裂缝, YP177 井, 1426m; (e) 粉砂岩夹层中的高角度裂缝, YY11 井, 1378.37m, 正交偏光; (f) 页岩干酪根中有机质孔, YY11 井, 1378.37m, SEM

### 4.2 孔隙结构特征

采用氦气膨胀法、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$  低压吸附及高压压汞等测试分析手段,选取 YY22、YY28、FY1 等井样品合计 32 块,分析了泥页岩层系的孔隙结构及孔隙度特征。研究表明,粉—细砂岩中、大孔比较发育,

核磁共振  $T_2$  谱以多峰型和左偏单峰型为主,平均微孔体积仅占孔隙总体积的 3.8%,中孔和大孔分别占 41% 和 55.2%。粉—细砂岩中孔和大孔发育,一方面和无机粒间孔、溶蚀孔发育有关,另一方面和有机质孔发育的固体沥青有关。黑色页岩的核磁共振  $T_2$  谱以多峰型、右偏单峰型为主,微孔相对较发育,微孔



体积占孔隙总体积的 25.9%，中孔体积占孔隙总体积的 46.0%，大孔相对较少；纹层状泥页岩的核磁共振  $T_2$  谱包括多峰型、右偏单峰型、左偏单峰型等，中孔非常发育，中孔体积占孔隙总体积的 60.0%，大孔体积占孔隙总体积的 33.6%，微孔体积占孔隙总体积的 6.4%（图 9、图 10）。

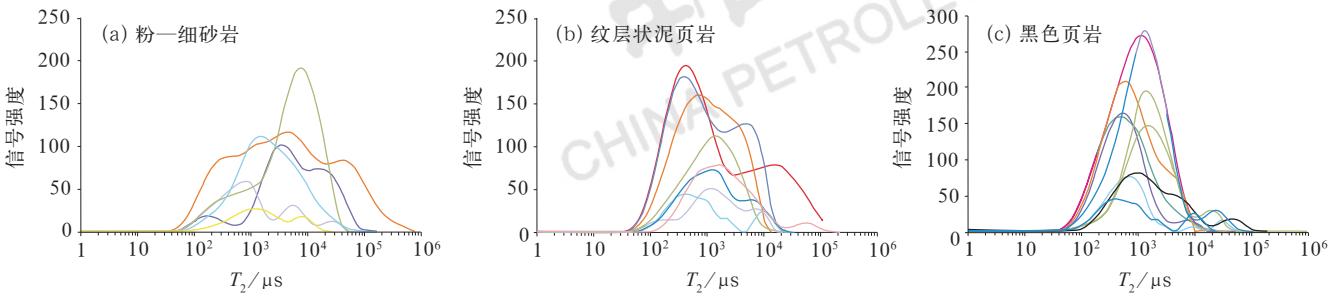


图 9 不同岩性孔隙结构核磁共振  $T_2$  谱特征图

Fig.9 NMR  $T_2$  spectrum characteristics of pore structure of different lithologies

不同颜色曲线代表不同样品

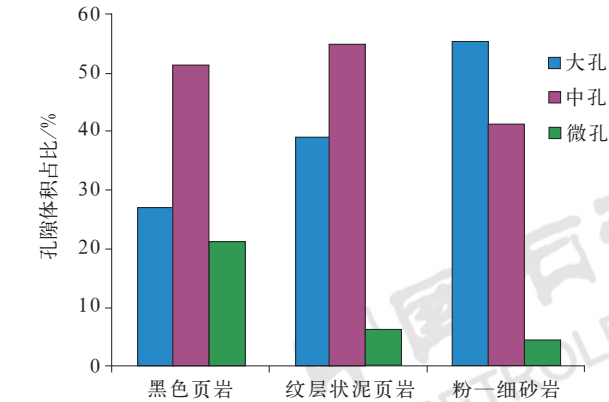


图 10 不同岩性微孔、中孔和大孔体积占比统计图

Fig.10 Volume ratio of micropores, mesopores and macropores of different lithologies

4.3 储层物性特征

研究区 17 块样品的物性分析结果表明（表 1）<sup>[23]</sup>，研究区粉—细砂岩的物性条件最佳，孔隙度平均为 7.27%，垂直渗透率平均为  $923 \times 10^{-6}$  mD，水平渗透率平均为  $3583 \times 10^{-6}$  mD；黑色页岩物性最差，孔隙度平均为 1.96%，垂直渗透率平均为  $67 \times 10^{-6}$  mD；纹层状泥页岩样品物性参数整体介于粉—细砂岩和黑色页岩样品之间，孔隙度平均为 3.7%，垂直渗透率平均为  $293 \times 10^{-6}$  mD，水平渗透率平均为  $769 \times 10^{-6}$  mD。测试数据表明，粉砂质纹层的存在有效改善了泥页岩储层的物性条件，增加了页岩段整体的储渗性能。

表 1 研究区样品孔渗测试结果统计表

Table 1 Porosity and permeability test results of core samples in the study area

井号	深度 /m	岩性	孔隙度 /%	渗透率 / $10^{-6}$ mD	取样岩心柱类型
H36	1393.1	黑色页岩	1.69	76	垂直层理方向
L93	1576.1	黑色页岩	2.22	58	垂直层理方向
H36	1387.3	纹层状泥页岩	3.36	936	平行层理方向
	1390.8	纹层状泥页岩	3.96	603	平行层理方向
X55	1053.3	粉—细砂岩	7.14	3583	平行层理方向
C100	814.19	纹层状泥页岩	3.74	133	垂直层理方向
H36	1387.3	纹层状泥页岩	3.50	491	垂直层理方向
	1390.8	纹层状泥页岩	5.48	255	垂直层理方向
YY22	1341.5	黑色页岩	1.80	—	—
	1341.8	黑色页岩	3.52	—	—
	1349.7	黑色页岩	2.26	—	—
	1352.3	黑色页岩	1.70	—	—



续表

井号	深度 /m	岩性	孔隙度 /%	渗透率 /10 <sup>-6</sup> mD	取样岩心柱类型
YY10	1631.8	纹层状泥页岩	5.30	—	—
YY4	1369.1	纹层状泥页岩	1.20	—	—
FY2	1483.7	粉—细砂岩	6.70	—	—
FY1	1476.9	粉—细砂岩	7.24	—	—
	1480.7	粉—细砂岩	8.00	—	—

注：H36井、L93井、X55井、C100井测试数据来自文献[23]。

## 5 含油气性特征

### 5.1 微观含油气特征

利用荧光显微镜，对长7<sub>3</sub>亚段黑色页岩、纹层

状泥页岩及粉—细砂岩中液态烃的发育特征进行了观测。结果表明，黑色页岩、纹层状泥页岩及粉—细砂岩中的微纳米孔隙、微裂隙中赋存有蓝色、蓝白色、橙黄色、黄绿色等多种荧光特征的液态烃（图11）。

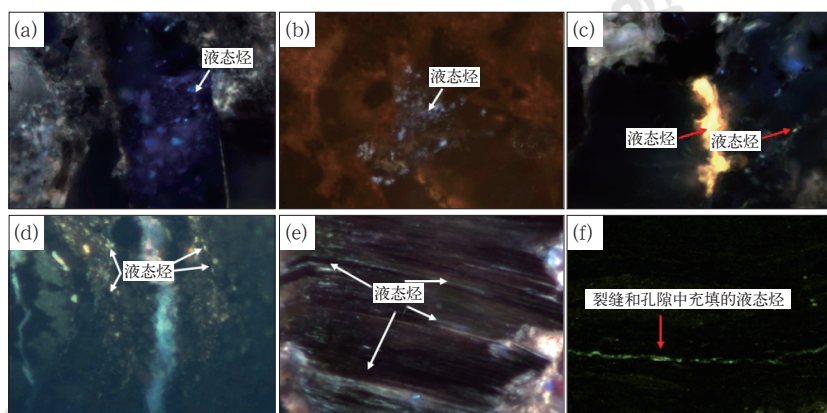


图11 研究区长7<sub>3</sub>亚段液态烃赋存特征图

Fig.11 Occurrence characteristics of liquid hydrocarbons in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in the study area

(a) 粒内孔中的蓝色荧光液态烃，YY1井，1530m，黑色纹层状页岩，50×10；(b) 微孔中的蓝白色荧光液态烃，YY16井，1420m，黑色页岩，50×10；(c) 粒间孔中橙黄色荧光液态烃，YY4井，1298m，粉砂岩，50×10；(d) 微孔中黄绿色荧光液态烃，YY5井，1396m，页岩，50×10；(e) 云母解理缝中充填的黄绿色、黄白色荧光液态烃，YY22井，1349m，页岩，50×20；(f) 微裂缝和微纳米孔隙中赋存的黄绿色荧光液态烃，C106井，1117.54m，暗色纹层状泥岩，50×10

研究区20余口探井岩心含气性测试结果显示，解析含气量（未考虑损失气）主要在0.2~2.4m<sup>3</sup>/t之间，平均为1.30m<sup>3</sup>/t，最大可达2.6m<sup>3</sup>/t，较好的含气性有利于页岩油在纳米孔喉中的流动（图12）。

### 5.2 页岩油可流动性

烃类在地层条件下可以发生自由流动是页岩油具有经济开采的前提条件。当前对于泥页岩中可动烃的表征一般采用油饱和度指数（OSI）来进行（ $OSI=S_1 \times 100/TOC$ ）。国内外学者一般把OSI为100mg/g作为可流动性页岩油的最低指标，认为该数值可以作为页岩油可流动的最低门槛<sup>[27-29]</sup>。

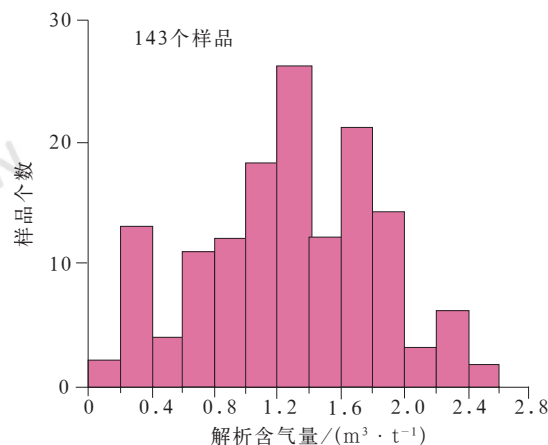


图12 岩心解析含气量直方图

Fig.12 Gas content histogram by core desorption test

研究区长  $7_3$  亚段中不同类型岩石的油饱和度指数的分布特征不同。黑色页岩的油饱和度指数平均为  $77.85\text{mg/g}$ ；纹层状泥页岩的油饱和度指数平均为  $93.55\text{mg/g}$ ；粉—细砂岩的油饱和度指数相对较高，平均为  $131\text{mg/g}$ （图 13）。

利用页岩中固体有机质、液态烃的核磁共振识别模板，对进行洗油处理后的饱和油样品进行测试，分析各样品中可动油的比例。粉—细砂岩中的可动油比例相对较高，介于  $51\%\sim 72.6\%$ ；其次为纹层状泥页岩，其可动油比例介于  $39.2\%\sim 56.7\%$ ，平均为  $46.9\%$ ；黑色页岩中的可动油比例相对较低，介于  $24.2\%\sim 51.9\%$ ，平均为  $39.6\%$ （图 14）。从结果可见，粉—细砂岩超过了可流动性的标准，纹层状泥页岩接近可流动性下限。

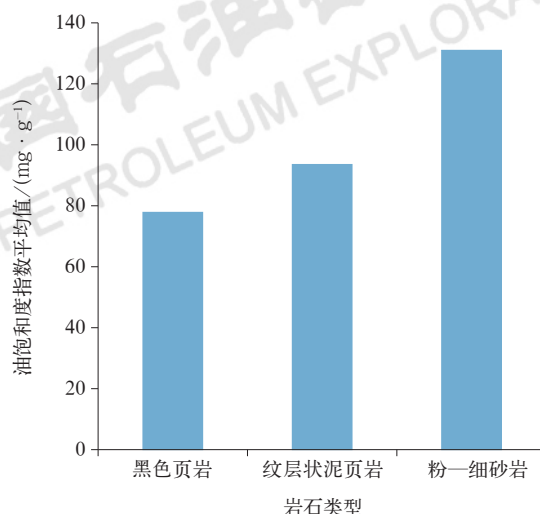


图 13 不同岩石类型油饱和度指数平均值对比图

Fig.13 Comparison of average oil saturation index of different rock types

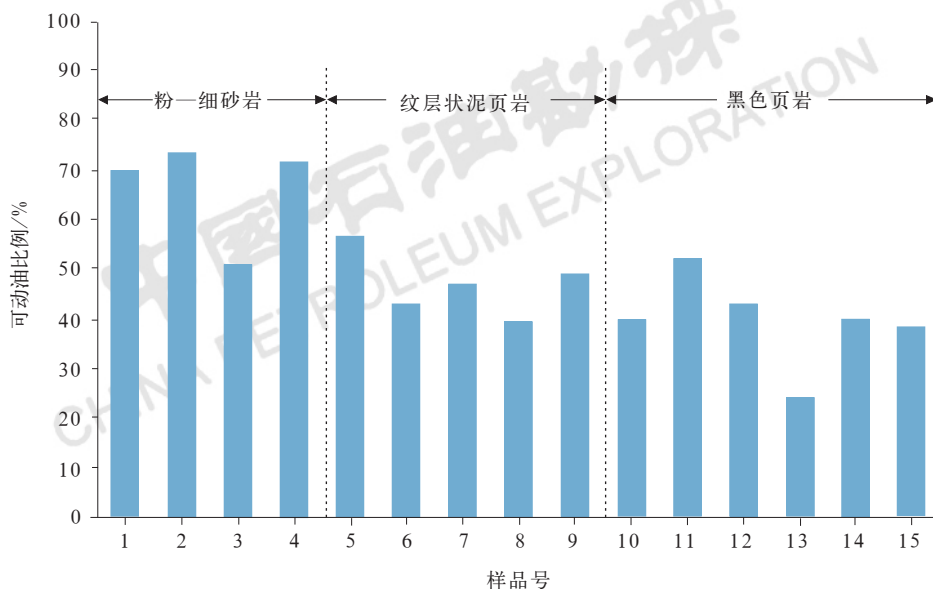


图 14 研究区长  $7_3$  亚段不同类型岩石可动油比例统计图

Fig.14 Statistics of movable oil ratio of different rock types in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation

对 3 种岩性进行氯仿充分抽提处理后，孔隙度明显变大。其中，黑色页岩洗油前孔隙度平均为  $1.96\%$ ，洗油后孔隙度平均为  $4.26\%$ ；纹层状泥页岩洗油前孔隙度平均为  $3.7\%$ ，洗油后孔隙度平均为  $4.84\%$ ；粉—细砂岩洗油前孔隙度平均为  $7.27\%$ ，洗油后孔隙度平均为  $8.38\%$ 。镜下观察结果显示，液态烃可以存于大孔、中孔和微孔中，既可以赋存无机孔和裂缝中，又可以赋存于有机质孔中。对比孔隙度测试实验中洗油前后样品镜下观察可知，有机质中有机质孔相对较少，有机质孔孔径小，洗油后有机质孔数量增加，表明有机质孔被可溶烃占据，液态烃可以游离态、吸附态赋

存于有机质中。微孔和部分中孔中的液态烃以游离态、吸附态赋存，但孔径太小的孔隙中的游离态液态烃是不可流动的，这部分孔隙对页岩油来说是无效孔。由页岩中流体的识别图版、页岩饱和后的  $T_2$  谱表征的孔隙结构可知，页岩中的可动油多数分布在  $T_2 > 1\text{ms}$  的范围内，对应的孔径一般均大于  $20\text{nm}$ ，因此， $20\text{nm}$  可能是页岩油储层有效孔隙孔径的下限。此外，不同岩石类型中可动油的量及比例存在差异，粉—细砂岩中有效孔体积相对较大，可动油含量及所占比例相对较高，纹层状泥页岩其次，黑色页岩相对较低（图 15）。

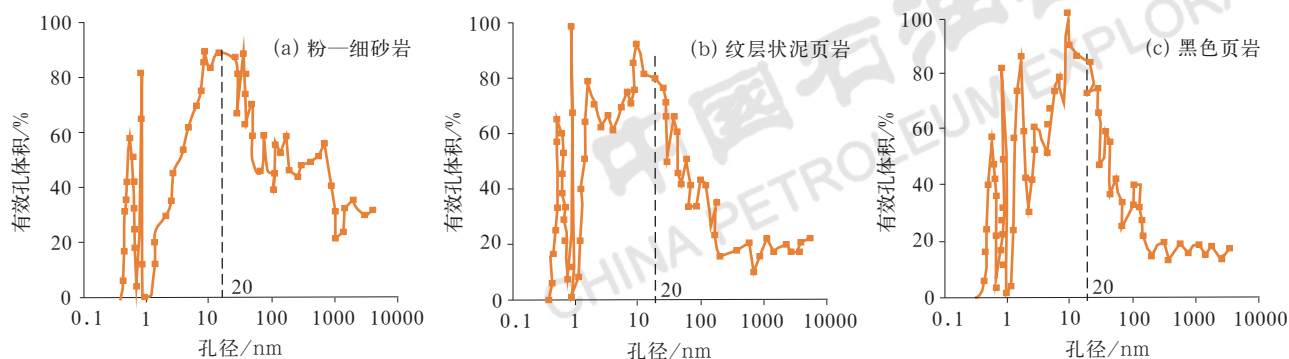


图15 不同类型岩石可动油赋存的孔径分布特征图

Fig.15 Distribution characteristics of pore size with movable oil occurrence of different rock types

## 6 勘探前景

页岩油资源评价结果表明,富县地区长7<sub>3</sub>亚段页岩油资源丰富,初步估算页岩油资源量可达 $1.3 \times 10^8$ t。勘探实践发现不同的岩石类型均具有一定的勘探潜力,也是未来增储上产的重点领域。

### 6.1 粉—细砂岩类

研究区长7<sub>3</sub>亚段虽然主体为泥页岩,但薄层粉—细砂岩发育,砂体主要分布在深湖平原区,岩性组合以厚层泥页岩为主,含薄层粉—细砂岩夹层或纹层(砂地比小于20%),烃源岩与储集体互层共生。研究发现薄层粉—细砂岩单层厚度一般小于2m,源—储一体的先天优势使这些内部粉—细砂岩夹层的原始含油饱和度平均达到50%以上,具有一定的勘探潜力。这种类型页岩油储层的储集空间主要为

粉—细砂岩中的微米级溶孔、残余粒间孔和晶间孔等,孔隙度平均为6.8%,渗透率为0.03mD,孔喉结构相对复杂,平均孔隙半径为3 $\mu$ m,喉道半径为60nm,具有“小孔细喉”的特征,微纳米级孔喉数量多,具备储集空间。

研究区目前针对此类目标尚未开展钻探工作,但长庆油田已获得突破,证实此类资源可以有效开发,也为富县地区页岩油勘探提供了参考。综合成藏主控因素分析,通过砂体展布、孔隙度、含油饱和度等因素叠合,在长7<sub>3</sub>亚段初步确定5个有利目标,面积为185km<sup>2</sup>,这些区域是下一步工作的重点地区(图16)。目前该类型资源勘探的难点在于有利区粉—细砂岩薄储层的精准预测、测井甜点识别及有效评价、适合薄储层的压裂改造技术、试采方案等方面。随着核心关键技术的突破,该类资源将成为增储上产最现实的目标。

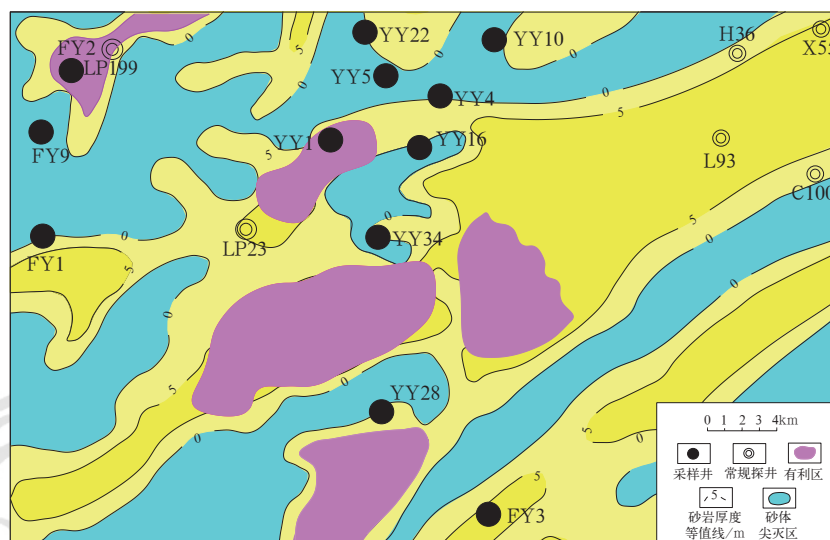
图16 富县地区长7<sub>3</sub>亚段粉—细砂岩类有利区分布图

Fig.16 Favorable exploration zone of silty-fine sandstone in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area



## 6.2 泥页岩类

## 参考文献

研究区长  $7_3$  亚段泥页岩类页岩油资源丰富, 该类型页岩油储层 TOC 高、厚度大、轻烃组分含量 ( $S_1$ ) 高、泥页岩中仍发育一定数量的孔隙, 具备较大的勘探潜力。针对此类目标, 前期钻探的 YY1 井、FY2 井仅获得少量油气, 初步分析失利的原因在于对泥页岩储层地质认识不足, 尽管该层段蕴藏着一定数量的页岩油资源, 但是由于其烃类赋存方式、矿物组成、孔缝系统等和砂岩类储层差异明显, 自然条件下油气无法流动, 需要适合泥页岩储层的压裂工艺有效改造, 形成人工油气藏。加上直井的改造范围有限, 泄流半径和波及范围小, 油气产出量不足以满足商业开发要求。对于该类型资源, 应从两方面展开工作: 一是深化地质认识, 探索泥页岩地质工程双“甜点”评价标准、建立泥页岩体积压裂改造工艺是下一步勘探的攻关方向; 二是中—低成熟度的地区, 地下原位加热转化技术是有望实现该类资源有效开发利用的关键技术。已有学者研究表明, 原位加热过程中可以产生大量孔隙和裂缝, 且产油量高, 油品质量好, 原位转化技术潜力巨大<sup>[30]</sup>。但该技术难点在于原位转化油气的生成及产出机理尚不清楚、如何有效试验选区, 以及该类技术需要耗费巨大的电能和由此产生的环保问题等。

## 7 结论

(1) 富县地区长  $7_3$  亚段主要发育黑色页岩、暗色泥岩、黑色纹层状页岩、暗色纹层状泥岩、粉—细砂岩、凝灰岩 6 种岩石类型, 不同岩性的岩石矿物组成、孔隙结构、物性、含油气性等差异性较大。

(2) 长  $7_3$  亚段页岩油储层中主要发育粒间孔、粒内孔、有机质孔及微裂缝 4 种储集空间类型, 无机孔—微裂缝—有机质—有机质孔和粉砂质纹层构成的网络体系是页岩油气源内运移的重要通道体系和滞留空间。粉—细砂岩中、大孔发育, 黑色页岩中微孔发育, 大孔相对较少。

(3) 富县地区长  $7_3$  亚段页岩油储层整体含油气性好, 不同的岩石类型均具备一定的勘探潜力。粉—细砂岩类目标油饱和度指数高, 可动油比例高, 为最优储层, 下一步工作应重点围绕薄储层如何精准预测、甜点识别、压裂工艺及试采方案等方面展开攻关; 泥页岩类目标应探索泥页岩地质工程双“甜点”评价、泥页岩体积压裂改造工艺和地下原位转化等技术。

- [1] 罗承先, 周韦慧. 美国页岩油开发现状及其巨大影响[J]. 中外能源, 2013,18(3):33–40.  
Luo Chengxian, Zhou Weihui. Shale oil development in US and implications[J]. Sino-Global Energy, 2013,18(3):33–40.
- [2] 汪天凯, 何文渊, 袁余洋, 等. 美国页岩油低油价下效益开发新进展及启示[J]. 石油科技论坛, 2017,36(2):60–68.  
Wang Tiankai, He Wenyuan, Yuan Yuyang, et al. Latest development in US cost effective development of shale oil under background of low oil prices[J]. Oil Forum, 2017,36(2):60–68.
- [3] 聂海宽, 张培先, 边瑞康, 等. 中国陆相页岩油富集特征[J]. 地学前缘, 2016,23(2):55–62.  
Nie Haikuan, Zhang Peixian, Bian Ruikang, et al. Oil accumulation characteristics of China continental shale[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(2):55–62.
- [4] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. 石油实验地质, 2020,42(4):489–505.  
Li Maowen, Jin Zhijun, Dong Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(4):489–505.
- [5] 吴松涛, 朱如凯, 罗忠, 等. 中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价[J]. 中国石油勘探, 2022,27(5):62–72.  
Wu Songtao, Zhu Rukai, Luo Zhong, et al. Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central-western basins in China[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(5):62–72.
- [6] 王瑞杰, 王永康, 马福建, 等. 页岩油地质工程一体化关键技术研究与应用: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段为例[J]. 中国石油勘探, 2022,27(1):151–163.  
Wang Ruijie, Wang Yongkang, Ma Fujian, et al. Research and application of key technologies of geology and engineering integration for shale oil development: a case study of Chang 7 member of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(1):151–163.
- [7] 李松泉, 吴志宇, 王娟, 等. 长庆油田地质工程一体化智能决策系统开发与应用[J]. 中国石油勘探, 2022,27(1):12–25.  
Li Songquan, Wu Zhiyu, Wang Juan, et al. Development and application of geology and engineering integrated intelligent decision-making system of Changqing Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(1):12–25.
- [8] 石道涵, 张矿生, 唐梅荣, 等. 长庆油田页岩油水平井体积压裂技术发展与应用[J]. 石油科技论坛, 2022,41(3):10–17.  
Shi Daohan, Zhang Kuangsheng, Tang Meirong, et al. Development and application of shale oil horizontal well volume fracturing technology in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022,41(3):10–17.
- [9] 付锁堂, 付金华, 牛小兵, 等. 庆城油田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2020,41(7):777–795.  
Fu Suotang, Fu Jinhua, Niu Xiaobing, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies in Qingcheng Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020,41(7):777–795.
- [10] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩型页岩油勘探开发理论与实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例[J]. 石油勘探与开发, 2022,49(3):616–626.  
Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, et al. Theories, technologies and practices of lacustrine shale oil exploration and development: a case study of Paleogene Kongdian Formation

- in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022,49(3):616–626.
- [11] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J]. *石油学报*, 2022,43(1):1–14.  
He Wenyuan, Meng Qi'an, Feng Zihui, *et al.* In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022,43(1):1–14.
- [12] 谢建勇, 崔新疆, 李文波, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践[J]. *中国石油勘探*, 2022,27(1):99–110.  
Xie Jianyong, Cui Xinjiang, Li Wenbo, *et al.* Exploration and practice of benefit development of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022,27(1):99–110.
- [13] 王广昀, 王凤兰, 赵波, 等. 大庆油田公司勘探开发形势与发展战略[J]. *中国石油勘探*, 2021,26(1):55–73.  
Wang Guangyun, Wang Fenglan, Zhao Bo, *et al.* Exploration and development situation and development strategy of Daqing Oilfield Company[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(1):55–73.
- [14] 耳闯, 罗安湘, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地华池地区三叠系延长组长7段富有机质页岩岩相特征[J]. *地学前缘*, 2016,23(2):108–117.  
Er Chuang, Luo Anxiang, Zhao Jingzhou, *et al.* Lithofacies features of organic-rich shale of the Triassic Yanchang Formation in Huachi area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016,23(2):108–117.
- [15] 付金华, 邓秀芹, 楚美娟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义[J]. *沉积学报*, 2013,31(5):928–938.  
Fu Jinhua, Deng Xiuqin, Chu Meijuan, *et al.* Features of deepwater lithofacies, Yanchang Formation in Ordos Basin and its petroleum significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013,31(5):928–938.
- [16] 师良, 王香增, 范柏江, 等. 鄂尔多斯盆地延长组砂质纹层发育特征及油气成藏[J]. *石油与天然气地质*, 2018,39(3):522–530.  
Shi Liang, Wang Xiangzeng, Fan Bojiang, *et al.* Characteristics of sandy lamination and its hydrocarbon accumulation, Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018,39(3):522–530.
- [17] 赵卫卫, 李富康, 单长安, 等. 延安地区延长组长7段陆相泥页岩孔隙类型及其吸附特征研究[J]. *非常规油气*, 2023,10(1):32–43.  
Zhao Weiwei, Li Fukang, Shan Chang'an, *et al.* Pore types and adsorption characteristics of continental mud shale in Chang 7 member of Yanchang Formation of Yan'an area[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023,10(1):32–43.
- [18] 刘月亮. 页岩油气赋存特征及相态理论应用基础研究进展[J]. *非常规油气*, 2021,8(2):8–12.  
Liu Yueliang. Fundamental research on the storage characteristics and phase behavior of shale oil and gas[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021,8(2):8–12.
- [19] 李锦锋, 张凤博, 杨连如, 等. 下寺湾油田延长组长7段页岩油储层特征及勘探开发新突破[J]. *非常规油气*, 2021,8(2):33–42.  
Li Jinfeng, Zhang Fengbo, Yang Lianru, *et al.* The reservoir characteristics and new breakthrough in exploration and development of various types of shale oil in Chang 7 member of Yanchang Formation in Xiasiwan Oilfield[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021,8(2):33–42.
- [20] 林进, 孙建博, 罗腾跃. 富县地区张家滩页岩岩地化特征与油气地质意义[J]. *西安科技大学学报*, 2022,42(6):1122–1132.  
Lin Jin, Sun Jianbo, Luo Tengyue. Geochemistry characteristics and petroleum geological significance of Zhangjiantan shale in Fuxian area[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022,42(6):1122–1132.
- [21] 孙建博, 孙兵华, 赵谦平, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组长7湖相页岩油地质特征及勘探潜力评价[J]. *中国石油勘探*, 2018,23(6):29–37.  
Sun Jianbo, Sun Binghua, Zhao Qianping, *et al.* Geological characteristics and exploration potential of Chang 7 lacustrine shale oil in Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018,23(6):29–37.
- [22] 高岗, 刘显阳, 王银会, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段页岩油特征与资源潜力[J]. *地学前缘*, 2013,20(2):140–146.  
Gao Gang, Liu Xianyang, Wang Yinhui, *et al.* Characteristics and resource potential of the oil shale of Chang 7 layer in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013,20(2):140–146.
- [23] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2013,34(1):1–11.  
Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013,34(1):1–11.
- [24] 孙建博, 郝世彦, 赵谦平, 等. 延安地区二叠系山西组1段页岩气储层特征及勘探开发关键技术[J]. *中国石油勘探*, 2022,27(3):110–120.  
Sun Jianbo, Hao Shiyan, Zhao Qianping, *et al.* Reservoir characteristics and key technologies for shale gas exploration and development of the first member of the Permian Shanxi Formation in Yan'an area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022,27(3):110–120.
- [25] 蔡振家, 雷裕红, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组7段页岩有机孔发育特征及其影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020,41(2):367–379.  
Cai Zhenjia, Lei Yuhong, Luo Xiaorong, *et al.* Characteristics and controlling factors of organic pores in the 7<sup>th</sup> member of Yanchang Formation shale in the southeastern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020,41(2):367–379.
- [26] 孙照通, 辛红刚, 吕成福, 等. 鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>亚段泥页岩型页岩油赋存状态与有机地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 2022,33(8):1304–1318.  
Sun Zhaotong, Xin Honggang, Lv Chengfu, *et al.* Occurrence states and organic geochemical characteristics of shale-type shale oil from Chang 7<sub>3</sub> sub-member in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022,33(8):1304–1318.
- [27] 赵谦平, 张丽霞, 尹锦涛, 等. 含粉砂质层页岩储层孔隙结构和物性特征: 以张家滩陆相页岩为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018,48(4):1018–1029.  
Zhao Qianping, Zhang Lixia, Yin Jintao, *et al.* Pore structure and physical characteristics of shale reservoir interbedded with silty layers: an example from Zhangjiantan lacustrine shale[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2018,48(4):1018–1029.
- [28] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: part 2—shale-oil resource systems [C] // Breyer A. Shale reservoirs—Giant resources for 21 century. AAPG Memoir 97, 2012:89–119.
- [29] Hu T, Pang X Q, Jiang S, *et al.* Oil content evaluation of lacustrine organic-rich shale with strong heterogeneity: a case study of the Middle Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Fuel*, 2018,221(2):196–205.
- [30] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. *石油勘探与开发*, 2018,45(4):537–545.  
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018,45(4):537–545.