

鄂尔多斯盆地延长组砂质纹层发育特征与油气成藏

师良¹,王香增²,范柏江¹,吕磊¹,李亚婷¹,杨森¹

[1. 延安大学 石油工程与环境工程学院,陕西 延安,716000; 2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司,陕西 西安,710075]

摘要:鄂尔多斯(盆)地中南部地区,三叠系延长组页岩内部存在大量的砂质纹层,该类纹层的发育与油气成藏的关系还不明确。为了深入揭示砂质纹层的地质特征、探索砂质纹层的发育对油气成藏的有利作用,综合利用岩心观察、镜下识别及有机地化分析技术,对砂质纹层的岩性特征、物性特征、裂缝发育及油气赋存开展了综合性研究。结果表明,砂质纹层的岩性涵盖粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥页岩;纹层主要呈薄纹层、薄条带及薄夹层的形式出现。砂质纹层的存在,改变了岩性的接触方式。砂质纹层越发育,岩性交互程度越强,往往越有利于排烃。砂质纹层的存在,有利于孔隙的发育,间接改善了储层物性。砂质纹层的存在,改变了岩石的力学性质,使得裂缝展布规律得以改变。砂质纹层的存在,为液态油、溶解气和游离气提供了更多的赋存空间。鄂尔多斯盆地中南部地区,富含砂质纹层的页岩是现今的油气勘探开发目标;深湖相厚层页岩尽管油气潜力巨大,但现有的工程技术尚不能进行有效开发,是未来的勘探开发目标。

关键词:砂质纹层;油气成藏;勘探开发;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Characteristics of sandy lamination and its hydrocarbon accumulation,
Yanchang Formation, Ordos BasinShi Liang¹, Wang Xiangzeng², Fan Bojiang¹, Lyu Lei¹, Li Yating¹, Yang Sen¹

[1. School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China;

2. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China]

Abstract: There are a lot of sandy laminations in the Triassic Yanchang Formation shale in the central and southern Ordos Basin, but their influence on hydrocarbon accumulation is not clear. In order to reveal the geological characteristics of sandy lamination and explore its favorable effect on hydrocarbon accumulation, we have studied its lithologic and porosity-permeability characteristics, fracture development as well as oil and gas accumulation, through integration of methods such as core observation, microscopic identification, and organic geochemical analysis. The result shows that, the lithology of sandy lamination is mostly siltstone, argillaceous siltstone, and silty shale; the lamination mainly appears in the form of thin lamina, thin band, and thin interbed. And the existing sandy laminations have changed the way of lithological contact; denser development of the sandy lamination promotes more intense alternation of rock lithology, which is usually more favorable for hydrocarbon expulsion from source rocks. Besides, the sandy lamination favors pore size growth, so improving the physical property of the reservoir in turn. It changes the mechanical property of rocks, resulting in the change of distribution patterns of fractures. It also provides larger reservoir space for liquid hydrocarbon, dissolved gas, and free gas. Shale with highly developed sandy lamination in the Ordos Basin is the main target for present exploration and development, whereas thick deep-lacustrine shale, which is abundant in hydrocarbon, but due to limitations of present developing techniques, may only be producible in the future.

Key words: sandy lamination, hydrocarbon accumulation, exploration and development, Yanchang Formation, Ordos Basin

针对沉积纹层的研究已经有超过 100 年的历史^[1]。但是,绝大部分的纹层研究,其研究对象为泥页

收稿日期:2017-02-17;修订日期:2018-05-11。

第一作者简介:师良(1988—),女,硕士,烃源岩及储层测试分析。E-mail:45994261@qq.com。

通讯作者简介:范柏江(1983—),男,博士、高级工程师,常规及非常规油气成藏机理研究。E-mail:632258611@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41702136);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2012KTZB03-03-01-01)。

岩纹层^[2-3]。随着页岩油气的开发,对页岩中砂质纹层的研究逐渐得到重视。Sutton 认为,砂质纹层由于其物性明显好于相邻的页/泥岩,因而为页岩油气提供了重要的储集空间,同时为油气运移起到了输导作用^[4]。Lash 认为,砂质纹层的存在增大了地层的脆性,一定程度上利于形成裂缝^[5]。Rokosh 认为,砂质纹层越发育其可压裂性越好^[6]。Broadhead 发现,部分页岩气井的产能与砂质纹层的发育程度呈现正相关关系^[7]。

2009 年以来,针对延长组页岩油气的勘探不断深入,延长组页岩中的砂质纹层也被揭示。程明等人采用分型法对延长组砂质纹层的发育情况进行了统计,认为砂质纹层的累计层数与砂质纹层的总厚度呈线性关系^[8]。杨潇等人基于实验测试,认为砂质纹层的发育有利于改善页岩储层的物性^[9]。学者还针对砂质纹层的成因进行过探索。例如袁选俊等人基于沉积相带的分布规律认为,深湖相页岩中的砂岩纹层可能为砂质碎屑流沉积^[10]。耳闯等人基于岩心沉积构造识别认为,在深湖相页岩段,砂岩纹层为重力流沉积^[11]。尽管开展了一系列相关工作,但针对砂质纹层的研究

还处于起步阶段,该类纹层对油气成藏过程的影响还不明确。基于砂质纹层地质特征的识别,拟从页岩排烃特征、储层物性特征、裂缝发育特征及油气赋存特征方面开展剖析,揭示砂质纹层对油气成藏的影响。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,盆地面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在鄂尔多斯盆地中南部地区,三叠系延长组发育富含有机质的深灰色及黑色泥岩、页岩和油页岩^[12]。延长组页岩厚度大(平均厚度 55 m),有机碳含量高(平均有机碳含量达到 3.5%)。该页岩发育于深湖相沉积环境,平面分布稳定,富含草莓状黄铁矿。由于经历多期的构造运动,页岩现今埋藏深度较浅(埋藏深度大约 800 ~ 1 500 m)。

2 砂质纹层地质特征

本文中的砂质纹层是指在鄂尔多斯盆地中部地区(图 1),延长组深湖相泥/页岩中发育的粉砂岩纹层或

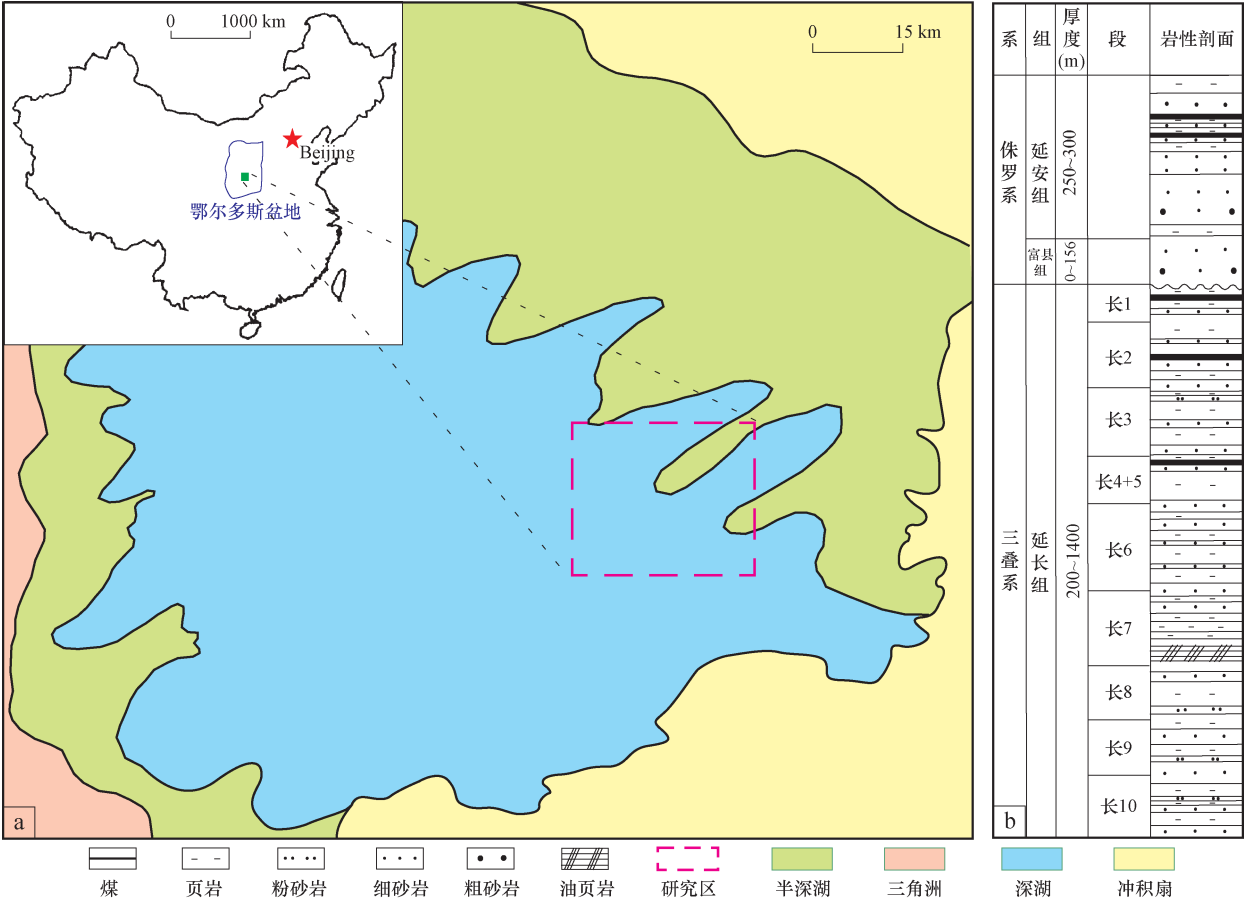


图 1 研究区沉积相展布(a)及地层柱状图(b)

Fig. 1 Map showing the depositional facies in the study area(a) and the stratigraphic column(b)

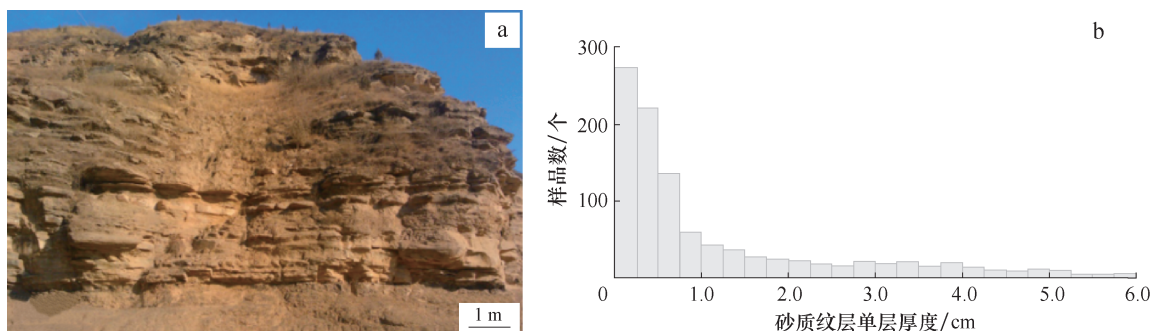


图2 鄂尔多斯盆地中南部延长组砂质纹层宏观地质特征

Fig. 2 Macroscopic characteristics of sandy laminae in the Yanchang Formation, central and southern Ordos Basin

a. 张家滩镇附近的延长组露头; b. YCYV1133 井砂质纹层统计

薄层,其厚度一般较小,多数在毫米级至厘米级变化,仅在局部地区可达到米级。

2.1 宏观地质特征

鄂尔多斯盆地中南部地区,中生界延长组普遍发育砂质纹层。图2a为位于张家滩镇附近的延长组露头(出露厚度约12 m),地层近水平,小断层发育。该露头发育砂质纹层共18层,砂质纹层厚度变化在0.5~82.4 cm,累计厚度约444.2 cm。此处的砂质纹层相对较厚,每层的算数平均厚度大约0.6 m。对YCYV1133井延长组7段(长7段)页岩的岩心观察表明,页岩共发育砂质纹层达到956层,累计厚度4.537 m,纹层在页岩中出现的频率为31.6条/m(图2b)。此外,砂质纹层的频率分布还呈现出不均匀分布的特点,在页岩的中间段部位,砂质纹层出现的频率较高,砂质纹层的厚度较薄;而在页岩的上段部位和下段部位,砂质纹层出现的频率相对较少,砂质纹层的厚度较大甚至转变为砂岩层。

2.2 微观地质特征

采用普通电子显微镜进行观察,可见砂质纹层的岩性为粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥页岩,其主要呈薄纹层、薄条带及薄夹层的形式展布。砂质纹层的镜下厚度变化范围大(图3a—d,图3c来自于文献[13])。而全岩X-射线衍射(XRD)分析结果表明,泥页岩、砂质纹层/薄砂层之间的矿物组分存在较大的差异。YCYV1112井35个样品中,泥页岩的石英含量为26%~40%,平均含量31%;长石含量为13%~32%,平均含量24%;粘土矿物含量为30%~53%,平均含量42%;砂质纹层/薄砂层的石英含量为28%~47%,平均含量36%,长石含量为23%~51%,平均含量35%;粘土矿物含量为25%~45%,平均含量27%(图4)。

砂质纹层中,碎屑颗粒之间的填隙物大致分为两类,即成岩胶结物和同沉积或者后生的粘土矿物。同

沉积粘土矿物因为受到较强的压实作用往往具有不规则状的包裹碎屑颗粒;而成岩胶结物往往以石英出现加大边为特征。研究区的砂质纹层样品,多数具有不规则状的包裹碎屑颗粒,而石英加大边为特征的成岩胶结物较少,因而填隙物以同沉积或后生粘土矿物为主(图3d)。一些纹层内部,裂缝比较发育,有时出现沥青质充填现象(图3e,f)。

3 砂质纹层对油气成藏的影响

3.1 改变了岩性接触方式,利于烃类的排出

不同的岩性接触方式或者不同的岩性组合直接影响烃源岩的排烃能力^[14]。部分厚层烃源岩,尽管其生烃地化指标较好,甚至出现滞排油气的现象^[15]。长7段泥页岩是良好的烃源岩,在地史过程中生成了大量的油气^[16]。因此,采用岩石快速热解仪对岩石中的游离烃(300℃下检测的单位质量岩石中的液态烃含量)进行了分析。YCYV1112井1350~1470 m长7段泥页岩发育。其中,1426 m以浅发育一套厚层泥页岩,1426 m以深则广泛发育砂质纹层或者薄砂岩层(薄砂岩层最大厚度小于3 m)(图5)。在1426 m以浅的厚层泥页岩层段,游离烃含量随埋深的增大呈先增大后减小的趋势。该趋势表明,厚层泥页岩中部的烃类难以排出;而在靠近岩性变化的部位,烃类的排出程度逐渐增强,由此使得残留的游离烃量较少。从游离烃的相对含量上看,厚层泥页岩中的游离烃含量相对较高;厚层泥页岩上/下的砂质纹层及薄砂岩中,游离烃含量相对较低(图5)。由此可见,厚层泥页岩排出的烃量相对少,排烃效率较低。

1426 m以深的层段其游离烃含量变化不大。从游离烃的相对含量上看,无论是泥页岩层段,还是砂质纹层及薄砂岩层,它们游离烃含量大致相当。在埋深

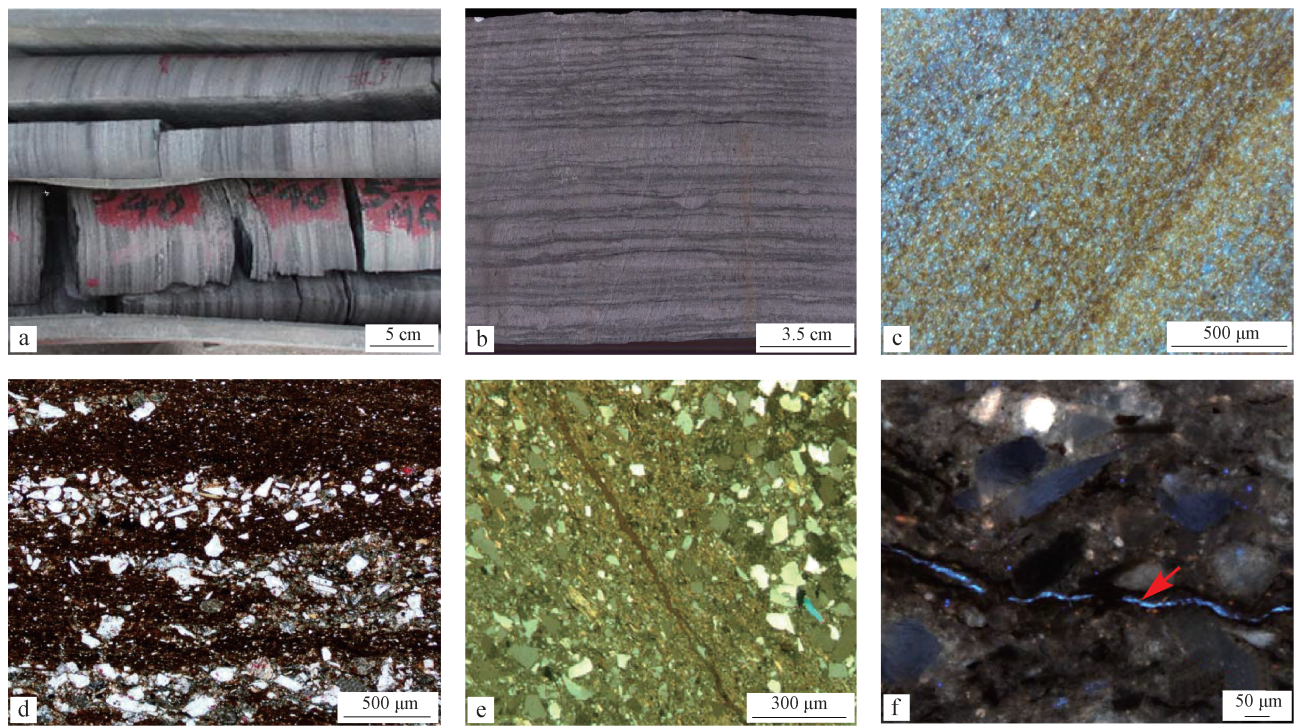


图 3 鄂尔多斯盆地中南部延长组砂质纹层微观地质特征

Fig. 3 Microscopic geology of sandy laminae in the Yanchang Formation, central and southern Ordos Basin

a. 页岩与砂质纹层交互发育, YCCY1138 井, 上部埋深 1 253.6 ~ 1 253.9 m, 下部埋深 1 255.0 ~ 1 255.3 m; b. 砂质纹层, YCYV1112 井, 埋深 1 475.6 m; c. 铸体薄片, 其中暗层指示粘土矿物含量高, 亮层指示碎屑矿物含量高, YCYV1120 井, 埋深 1 516.8 m, 正交偏光; d. 岩石薄片, YCYV1112 井, 埋深 1 357.96 m, 单偏光; e. 铸体薄片, 其中发育微裂缝, YCYV1113 井, 埋深 2487.3 m, 单偏光; f. 荧光薄片, 其中的裂缝充填沥青, YCCY1220 井, 埋深 1 117.5 m

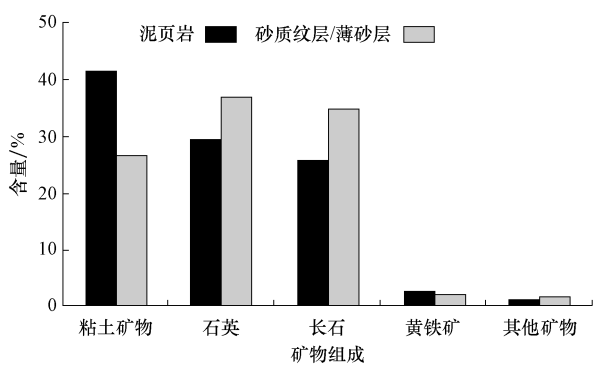


图 4 鄂尔多斯盆地中南部延长组泥页岩与砂质纹层/薄砂层矿物组成对比

Fig. 4 Mineral composition comparison between silty shale and sandy laminae/thin sandy layer in the Yanchang Formation, central and southern Ordos Basin

1 450 m 附近的两个粉砂岩样品 (分别为 2.3 mg/g 和 4.9 mg/g), 其游离烃含量与邻近页岩的游离烃含量几乎一致 (图 5)。由于粉砂岩不能生成油气, 其中赋存的油气只可能来自于邻近的页岩。由此可见, 在砂质纹层或者薄砂岩层与泥页岩交互发育的部位, 油气更容易排出烃源岩。

3.2 基于储集类型, 改善了储层物性

显微镜下观察可见, 泥页岩与砂质纹层均可发育粒间孔、粒内孔和有机质孔等孔隙类型 (图 6)。但是

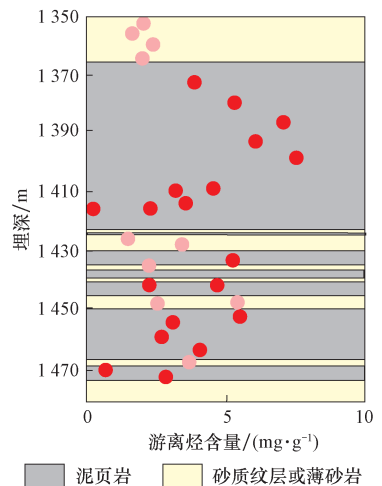


图 5 鄂尔多斯盆地中南部 YCYV1113 井延长组游离烃含量随埋深的变化

Fig. 5 Plot of free hydrocarbon content vs. burial depth from the Yanchang Formation in Well YCYV1113, central and southern Ordos Basin

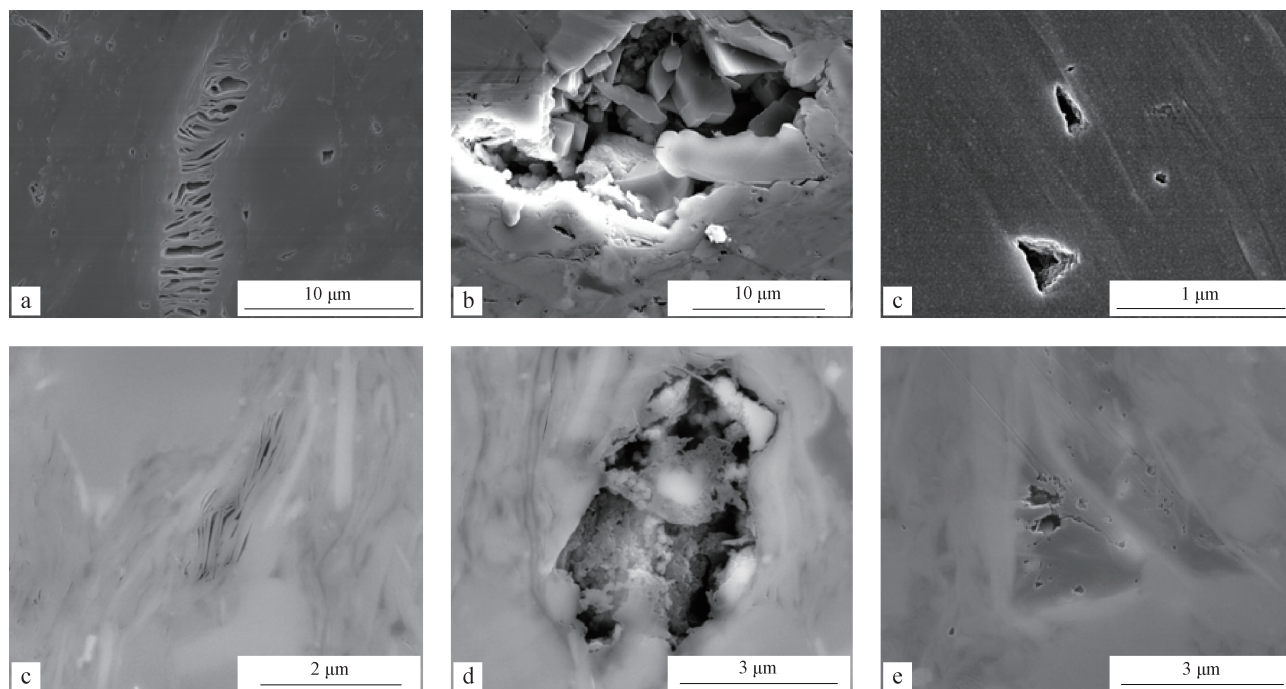


图6 鄂尔多斯盆地中南部延长组砂质纹层与泥页岩的孔隙类型对比

Fig. 6 Comparison of pores developed in sandy laminae and shale in the Yanchang Formation, central and southern Ordos Basin

- a. YCYV1133 井, 长7段, 埋深1 340 m, 粘土矿物间孔隙, SEM; b. YCYV1112 井, 长7段, 埋深1 397.66 m, 粒间溶蚀孔中被自生石英充填, SEM; c. YCYV1133 井, 长7段, 埋深1 341 m, 有机质及有机质孔, SEM; d. YCYV1112 井, 长8段, 埋深1 414 m, 粘土矿物板间孔, SEM; e. YCYV1112 井, 长8段, 埋深1 414 m, 粒内溶蚀孔, SEM; f. YCYV1112 井, 长9段, 埋深1 504.98 m, 混杂于粘土间的有机质孔, SEM
(a—c 为砂质纹层, d—f 为泥页岩)

在发育程度及连通性上具有一定差别。由于石英、长石等碎屑颗粒的含量相对较高, 粒径较大, 砂质纹层中的粒间孔和粒内孔发育程度比较强。与泥页岩相比, 孔隙直径更大, 孔隙的连通性也较好。泥页岩的有机质含量更高, 其有机质孔的发育程度较好, 可以呈片状发育, 而砂质纹层中的有机质孔呈“孤立”状态更加明显。但是, 在部分地区, 泥页岩基本不发育有机质孔, 这可能与有机质的热演化程度有关。热演化程度低, 有机质孔发育程度越差^[17]。此外, 有机质孔的发育程度可能还与有机质类型相关, 陆相沉积往往由于非均质性强, 有机相变化快, 有机质类型多变, 直接影响了有机质孔的发育^[16]。

利用氮气等温吸附曲线可以获得岩石的比表面积和总孔隙体积; 基于等温解吸曲线, 将 DFT 法和 BJH 法相结合还可计算微孔的孔径分布, 理论上可以获得 0.35 ~ 300 nm 的孔径分布^[14]。实验结果表明, 砂质纹层的孔径范围主要分布在 10 ~ 50 nm; 泥页岩的孔径范围主要分布在 5 ~ 20 nm。就微孔而言, 砂质纹层的孔径范围明显较大。这主要是由于砂质纹层的石英、长石等脆性矿物含量较高, 抗机械压实作用较强, 有利于孔隙的保存^[18]。石英、长石、碳酸盐矿物的溶蚀作用, 还能间接有利于孔隙的发育, 从而

增大孔隙度(图6b)。

研究区页岩致密且非均质性强, 测量储层渗透率仍具有不确定性。但理论上, 砂质纹层的脆性矿物含量高, 造缝能力强, 孔隙相对发育, 其渗透率必然相对较高, 这在北美 Bossier 页岩的开发实践中得到了证实^[17]。前人对延长组页岩的相关分析测试也证实了该结论, 页岩中, 砂质纹层越发育, 砂质含量越高, 孔隙度就越大, 渗透率往往越大(表1)^[9]。

3.3 改变力学性质, 产生裂缝

不同的岩性具有不同的力学性质, 砂质纹层的出现使得局部区域的力学性质发生改变, 直接影响了裂缝的发育程度。研究区经历了燕山运动、喜马拉雅运动等多期次的构造活动^[19], 因而构造张裂缝广泛发育(图7a, b)。但是, 砂质纹层的裂隙特征与泥页岩的裂隙特征存在巨大差异。砂质纹层中的裂隙进入泥页岩后会扩散或折射, 使得泥页岩裂隙密度增大(图7c, d)。值得注意的是, 由于出露地表, 野外观察到的该类现象还可能由风化作用导致。但是, 与厚层纯页岩比较而言, 岩性交互发育部位的岩石其抗风化能力相对较强, 裂缝发育雏形基本可见(图7c, d)。

表 1 鄂尔多斯盆地中南部延长组泥页岩物性特征(脉冲衰减法测试结果)^[9]

Table 1 Physical properties of silty shale(results from the pulse-decay test) in the Yanchang Formation, central and southern Ordos Basin^[9]

样号	井号	取心样号或深度	层位	岩性	实测孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	测量方向
1	H36	2~52/54	长 7 段	纯页岩	1.69	0.000 076	垂直层理方向
2	L93	1 576.14 m	长 9 段	纯页岩	2.22	0.000 058	垂直层理方向
3	H36	2~52/54	长 7 段	纯页岩	3.54	0.000 091	垂直层理方向
4	H36	2~34/54	长 7 段	含砂质纹层页岩	3.36	0.000 036	平行层理方向
5	H36	2~34/54	长 7 段	含砂质纹层页岩	3.5	0.000 491	垂直层理方向
6	C100	814.19 m	长 7 段	含砂质纹层页岩	3.74	0.000 133	垂直层理方向
7	H36	2~45/54	长 7 段	含砂质纹层页岩	3.96	0.000 603	平行层理方向
8	C100	814.19 m	长 7 段	含砂质纹层页岩	4.14	—	平行层理方向
9	H36	2~45/54	长 7 段	含砂质纹层页岩	5.48	0.000 255	垂直层理方向
10	X54	1 053.31 m	长 7 段	砂质纹层	7.09	0.000 923	垂直层理方向
11	X54	1 053.31 m	长 7 段	砂质纹层	7.14	0.003 583	平行层理方向

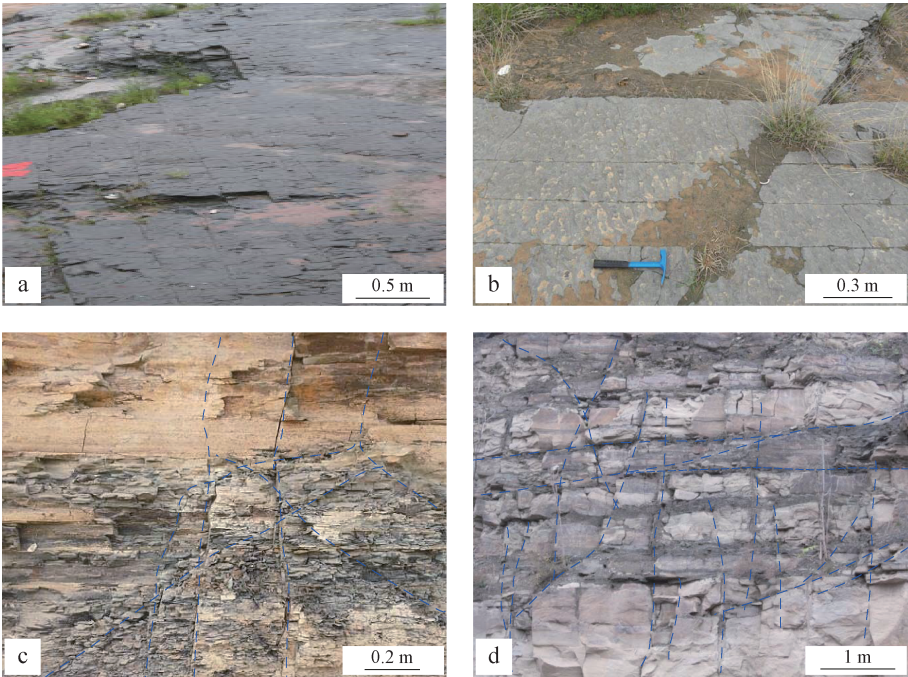


图 7 鄂尔多斯盆地东南部延长组野外构造裂缝

Fig. 7 Outcrop tectonic fractures of the Yanchang Formation, eastern and southern Ordos Basin

a, b, c. 延长县张家滩中心小学剖面; d. 宜川县安家庄剖面

砂质纹层一般发育于较强水动力沉积背景,泥页岩一般发育于较弱水动力沉积背景,两者间的页理面为力学性质的薄弱界面,极易出现剥离而形成裂缝^[20]。因此,砂质纹层的存在还直接导致了层间页理缝的发育。页理缝基本上沿纹层的方向展布,部分页理缝由于充填沥青而具有荧光显示(图 2f),这表明油气组分在砂质纹层中发生了初次运移。此外,页理缝的延伸距离大多较远,该类裂缝一般具有较强的渗流能力。在局部区域,页理缝还会构成“网状”裂缝网

络。这有可能是岩性非均质性太强导致的。砂质纹层的出现改变了应力的均一分布,裂缝在不均衡应力的控制下发生交错而形成“网状”裂缝网络(图 7a, b)。由于裂缝既可以作为油气的运移通道,也可以作为油气赋存的场所,裂缝的分布极有可能改变油气的运移路径和空间分布。

3.4 基于储集类型,改变了油气赋存类型

烃类气体在储层中存在 3 种赋存状态,即吸附态、

游离态和溶解态(包括油溶态和水溶态)。吸附态气体主要由范德华力作用而吸附在有机质、干酪根及粘土矿物的表面。游离态气体以自由流动状态存在于孔隙与裂隙中。溶解态气体呈溶解状态溶解于液态油和液态水中。延长组页岩源岩地化指标好(干酪根为Ⅱ型、平均总有机碳含量 3.5%,粘土矿物达到 42%),吸附能力强。由图 8 可见,6 个样品在地层压力条件下(对应压力大约 5 MPa)的平均吸附气量大约为 2.5 m³/t 页岩(图 8)。由于富有机质页岩的层状吸附作用,吸附态气体极易充满页岩中的微小孔缝空间。因此,在页岩内部中,以吸附态赋存的气体占据很大的比例。

砂质纹层由于其矿物组分以脆性矿物为主,对气体的吸附能力极弱,但其相对较大的孔缝空间为油气提供了场所。YCYV1112 井的纹层样品,平均含油饱和度达到 43%,平均含水饱和度达到 28%,而平均含

气饱和度则为 29%(可视为游离气)(表 2)。气体可以溶解于原油和水中,其计算公式如下:

$$G_{\text{溶解气}} = G_{\text{油溶气}} + G_{\text{水溶气}} \tag{1}$$

$$G_{\text{油溶气}} = \frac{\Phi S_o R_{og}}{100\rho_{\text{页}}} \tag{2}$$

$$G_{\text{水溶气}} = \frac{\Phi S_w R_{wg}}{100\rho_{\text{页}}} \tag{3}$$

式中: $G_{\text{溶解气}}$ 为溶解气含气量,m³/t; $G_{\text{油溶气}}$ 为油溶气含气量,m³/t; $G_{\text{水溶气}}$ 为水溶气含气量,m³/t; R_{wg} 为气体在水中溶解度,m³/m³; R_{og} 为气体在油中溶解度,m³/m³; $\rho_{\text{页}}$ 为页岩密度,g/cm³; S_o 为含油饱和度,%; S_w 为含水饱和度,%; Φ 为总孔隙度,%。

对上述样品的计算结果表明,溶解气平均含量为 0.57 m³/t 页岩。游离气平均含量为 1.00 m³/t 页岩。由此可见,砂质纹层的存在,使得更多的页岩气可以以溶解态和游离态的方式赋存。

4 砂质纹层的分布与油气勘探开发的关系

在深湖相沉积体系,由于距离物源较远,其中沉积的页岩厚度大、有机质含量高,因而往往具有极高的生烃潜力。由于该区砂质纹层的发育程度较弱,页岩中的油气难易排出,油气大量赋存于页岩中(图 5)。在半深湖相沉积体系,距离物源相对较近,其中沉积的页岩厚度减薄、砂质纹层的发育程度增强。页岩与砂质纹层的有效组合导致大量油气运移至砂质纹层中(图 5)。因此,对于页岩油气而言,富含砂质纹层的页岩与厚层纯页岩都可能成为有利的勘探开发目标,深湖相厚层页岩甚至可能是最为有利的勘探开发目标。

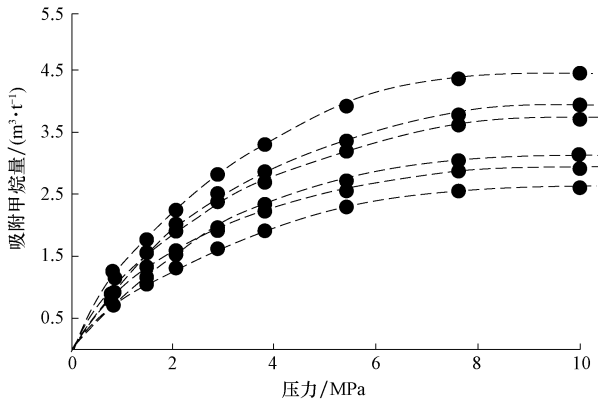


图 8 鄂尔多斯盆地中南部 YCYV1112 井长 7 段页岩样品等温吸附试验结果

Fig. 8 Isothermal adsorption experiment result of sampled shales from the Chang 7 Member in Well YCYV1112, central and southern Ordos Basin

表 2 鄂尔多斯盆地中南部 YCYV1112 井 6 个长 7 段页岩样品溶解气对比

Table 2 Comparison of dissolved gas of 6 shale samples from the Chang 7 Member in Well YCYV1112, central and southern Ordos Basin

样品深度/m	1 337.2	1 293.9	1 315.4	1 402.4	1 425.7	1 502.4
样品密度/(g·cm ⁻³)	1.98	2.37	2.52	2.30	2.52	2.48
总孔隙度/%	9.7	7.3	6.2	8.9	6.6	6.9
含油饱和度/%	11.7	57.3	45.4	62.5	23.1	58.6
含水饱和度/%	48.5	16.3	39.6	5.8	27.6	28.1
含气饱和度/%	39.8	26.4	15.0	31.7	49.3	13.3
油溶气含量/(m ³ ·t ⁻¹)	0.23	0.71	0.45	0.97	0.24	0.65
水溶气含量/(m ³ ·t ⁻¹)	0.10	0.02	0.04	0.01	0.03	0.03
溶解气含量/(m ³ ·t ⁻¹)	0.32	0.73	0.49	0.98	0.27	0.68
游离气含量/(m ³ ·t ⁻¹)	1.95	0.81	0.36	1.23	1.29	0.37

注:根据研究区经验值,天然气在油和水中的溶解度分别取 0.4 和 0.04。

表 3 鄂尔多斯盆地中南部延长组 YCCY1112 井与 YCYV1145 井开发情况对比
Table 3 Comparison of production parameters between the Yanchang Formation in Well YCCY1112 and Well YCYV1145, central and southern Ordos Basin

勘探井	压裂段数	压裂段总长度/m	前置液/ m ³	携砂液/ m ³	工作压力/ MPa	排量/ (m ³ · min ⁻¹)	入地总液 量/m ³	日平均产 油量/m ³	日平均产 气量/m ³
YCYV1145	6	16	733	935	17 ~ 20	12.0	1 668	m	n
YCCY1112	3	9	250	525	23 ~ 28	10.0 ~ 12.0	803	2.5 m	1.02 n

注:此处的产量数据采用相关关系来进行对比。

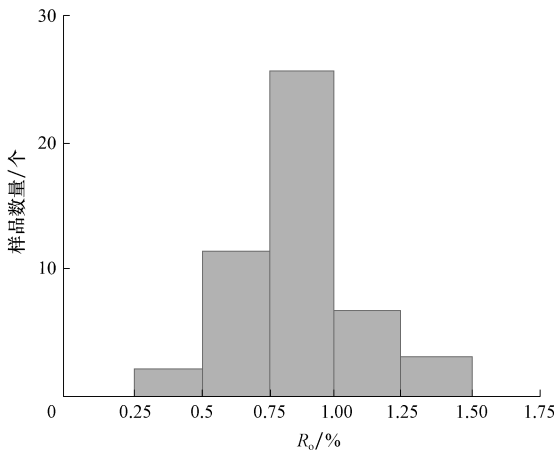


图 9 鄂尔多斯盆地中南部长 7 段页岩镜质体反射率分布
Fig. 9 The vitrinite reflectance distribution of shale in the Chang 7 Member, central and southern Ordos Basin

然而,当前数十口探井的勘探经验表明,深湖相厚层页岩的勘探结果并不理想。以研究区两口井为例,YCYV1145 井岩性以厚层页岩为主,砂质纹层不发育;而 YCCY1112 井岩性仍以页岩为主,但砂质纹层较多。两口探井以水力压裂方式进行作业,尽管 YCCY1112 井的压裂段总长度只有 9 m(压裂段总长度仅为 YCYV1145 的 56%),其日平均产油量和产气量却分别是 YCYV1145 井的 2.5 倍和 1.02 倍(表 3)。由此可以看出,发育砂质纹层的探井显示出较好的页岩油气开发潜力。

从研究区的地质背景进行分析,对于深湖相厚层页岩的开发,主要存在 3 方面的制约因素。第一,延长组页岩的渗透性极差、压力异常低(地层压力与静水压力的比值仅为 0.5 ~ 0.7)^[16],这导致压裂液的返排速度慢、对储层容易造成污染。同时,压裂过程中以及压裂后,容易发生压裂缝重新闭合的问题。第二,研究区页岩热演化程度低,尚处于生油窗阶段(图 9),地层中不仅含有石油和天然气,还有大量的地层水。在压裂液返排过程中,由于地层水的存在,往往出现无法将液体排尽的情况(因此无法获得表 3 中的返排率),这直接妨害了油气在页岩层中的有效

渗流,使得页岩油气的开发效果较差。第三,地层温度低(50 ~ 60 ℃)^[12]。页岩中的吸附气在较高温度条件下容易解析,而在该温度条件下的气体解析非常困难,导致无法获得高产的解析气。此外,由于厚层页岩的粘土矿物含量高,在开发过程中还面临井壁稳定性差,井眼轨迹控制难度大、大型裂缝网络难以形成等工程技术上的问题。

因此,对于鄂尔多斯盆地中南部地区的页岩油气,当前的有效开发目标是砂质纹层较多的页岩。深湖相厚层页岩由于残留大量的油气,因而具备广阔的勘探开发前景。但是,由于受到特殊地质条件的限制,现有的工程技术尚不能对其进行有效开发。未来某个时期,只有攻克了面临的工程技术难题之后,深湖相厚层页岩才能成为有效的勘探开发目标。

5 结论

1) 延长组深湖相页岩中广泛发育砂质纹层。砂质纹层的岩性涵盖粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥页岩,纹层主要呈薄纹层、薄条带及薄夹层的形式出现。

2) 砂质纹层的存在,改变了岩性的接触方式,往往越有利于排烃。砂质纹层的存在,有利于孔隙的发育,改善了储层物性。砂质纹层的存在,改变了岩石的力学性质,使得裂缝展布规律得以改变。砂质纹层的存在,为溶解气和游离气的赋存提供了更多的赋存空间。

3) 鄂尔多斯盆地中南部地区,富含砂质纹层的页岩是现今的油气勘探开发目标;深湖相厚层页岩尽管油气潜力巨大,但现有的工程技术尚不能进行有效开发,是未来的勘探开发目标。

致谢:感谢陕西延长石油(集团)为本文提供的部分基础照片、感谢梁全胜博士对本文的写作支持。

参 考 文 献

[1] Mitchel J M. An overview of climatic variability and its casual mecha-

- nisms[J]. *Quaternary Research*, 1976, 6(4): 481–493.
- [2] Slatt R M, Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales; Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95 (12): 2017–2030.
- [3] 王冠民, 钟建华, 马在平. 湖泊纹层状沉积物的同生期变化研究述评[J]. *世界地质*, 2003, 22(3): 231–236.
Wang Guanmin, Zhong Jianhua, Ma Zaiping. Syngenetic changes in lacustrine lamellar sediments [J]. *Global Geology*, 2003, 22 (3): 231–236.
- [4] Sutton S J, Ethridge F G, Almon W R, et al. Textural and sequence-stratigraphic controls on sealing capacity of Lower and Upper Cretaceous shales, Denver basin, Colorado [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(8): 1185–1206.
- [5] Lash G G, Engelder T. An analysis of horizontal microcracking during catagenesis: Example from the Catskill delta complex [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(11): 1433–1449.
- [6] Rokosh D, Pawlowicz J, Anderson S, et al. Shale fabric, mineralogy and effective porosity of the Upper Colorado Group [C]. *Alberta: CSPG CSEG CWLS Convention*, 2009: 572–576.
- [7] Broadhead R F, Kepferle R C, Potter P E. Stratigraphic and sedimentologic controls of gas in shale-example from upper Devonian of northern Ohio [J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(1): 10–27.
- [8] 程明, 罗晓容, 雷裕红, 等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩粉砂质夹层/纹层分布、分形特征和估算方法研究[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5): 845–852.
Cheng Ming, Luo Xiaorong, Lei Yuhong, et al. The distribution, fractal characteristic and thickness estimation of silty laminae and beds in the Zhangjiantan shale, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(5): 845–852.
- [9] 杨潇, 姜呈馥, 孙兵华, 等. 砂质纹层的发育特征及对页岩储层物性的影响——以鄂尔多斯盆地南部中生界延长组为例[J]. *延安大学学报: 自然科学版*, 2015, 34(2): 18–23.
Yang Xiao, Jiang Chengfu, Sun Binghua, et al. Development characteristics of sandy laminae and their effects on physical properties of shale reservoirs: a case study of the Mesozoic Yanchang Formation in the southern Ordos Basin [J]. *Journal of Yan An University (Natural Science Edition)*, 2015, 34(2): 18–23.
- [10] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 34–42.
Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 34–42.
- [11] Er Chuang, Li Yangyang, Zhao Jingzhou, et al. Characteristics of lacustrine organic-rich shale: A case study of the Chang7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 1(2): 173–185.
- [12] Wang X Z, Zhang L X, Jiang C F, et al. Hydrocarbon storage space within lacustrine gas shale of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Interpretation*, 2015, 3(2): 15–23.
- [13] 刘国恒, 黄志龙, 姜振学, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相页岩纹层发育特征及储集意义[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(3): 408–417.
Liu Guoheng, Huang Zhilong, Jiang Zhenxue, et al. The characteristic and reservoir significance of lamina in shale from yanchang formation of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26 (3): 408–417.
- [14] 王轩, 高岗, 李佳烨, 等. 碳酸盐岩缝合线与基质的排烃效应——以川东地区石炭系和奥陶系碳酸盐岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(3): 534–542.
Wang Xuan, Gao Gang, Li Jiaye, et al. Hydrocarbon expulsion of stylolite and matrix in carbonate rocks: A case study from the Ordovician and Carboniferous carbonate rocks in Eastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3): 534–542.
- [15] 陈中红, 查明. 济阳坳陷古近系烃源岩结构及排烃的非均一性[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(6): 45–48.
Chen Zhonghong, Zha Ming. The structure of source rocks and characteristics of hydrocarbon expulsion-An example from Paleogene system in Jiyang Depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*. 2003, 30(6): 45–48.
- [16] 王香增, 范柏江, 张丽霞, 等. 陆相页岩气的储集空间特征及赋存过程——以鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带延长探区延长组长7段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 651–659.
Wang Xiangzeng, Fan Bojiang, Zhang Lixia, et al. Reservoir space characteristics and charging process of Lacustrine shale gas-a case study of the Chang 7 member in Yanchang Block in Shanbei slope of Erdos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 651–659.
- [17] 王香增, 张丽霞, 李宗田, 等. 鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩孔隙类型划分方案及其油气地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 1–7.
Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Li Zongtian, et al. Pore type classification scheme for continental Yanchang shale in Ordos Basin and its geological significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 1–7.
- [18] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(12): 848–861.
- [19] 李士祥, 邓秀芹, 庞锦莲, 等. 鄂尔多斯盆地中生界油气成藏与构造运动的关系[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 798–807.
Li Shixiang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian, et al. Relationship between petroleum accumulation of Mesozoic and tectonic movement in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 798–807.
- [20] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. *石油学报*, 2010, 31(2): 225–230.
Pu Boling, Jiang Youlu, Wang Yi, et al. Reservoir-forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(2): 225–230.