

引用: 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.

中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价

吴松涛^{1,2,3} 朱如凯^{1,2,3} 罗忠^{1,2,3} 杨智¹ 姜晓华^{1,2,3} 林敏捷¹ 苏玲^{1,2,3}

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 国家能源致密油气研发中心; 3 中国石油天然气集团有限公司油气储层重点实验室)

摘 要: 陆相页岩油已成为中国油气勘探重大接替领域之一。作为页岩独具特色的组构特征, 纹层结构对烃源岩品质、储层品质与工程品质评价具有重要影响, 因而成为关注重点。文章以中国中西部典型咸化湖盆与淡水—微咸水湖盆富有机质页岩为研究对象, 剖析纹层结构特征, 探讨其对甜点优选的影响。研究发现: (1) 不同类型湖盆页岩纹层结构具有差异, 湖盆咸化程度影响纹层结构, 碳酸盐纹层主要发育在咸化湖盆, 在淡水—微咸水湖盆中发育较少; (2) 纹层结构具有亚毫米级非均质性特征, 不同纹层的 TOC 与孔隙结构存在差异, 同一类纹层在不同盆地的品质具有明显差异; (3) 纹层结构决定了页岩油微观运聚特征与“原生源储”富集模式, 影响滞留烃含量、流体可动性及压裂改造。开展陆相页岩纹层结构精细评价, 寻找规模优质页岩岩相分布区, 是油气勘探从源外进入源内后必须关注的问题, 是源内经济有效资源发现的基础, 对页岩油“甜点区”与“甜点段”优选具有重要意义。

关键词: 非常规油气; 非均质性; 微纳米孔喉系统; 富有机质页岩; 细粒沉积

中图分类号: TE112.221 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.05.006

Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central-western basins in China

Wu Songtao^{1,2,3}, Zhu Rukai^{1,2,3}, Luo Zhong^{1,2,3}, Yang Zhi¹, Jiang Xiaohua^{1,2,3}, Lin Minjie¹, Su Ling^{1,2,3}

(1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 National Energy Tight Oil and Gas R&D Center; 3 CNPC Key Laboratory of Oil and Gas Reservoirs)

Abstract: Continental shale oil has grown to be one of the major replacement fields for petroleum exploration in China. The laminar structure, a unique fabric feature of shale, significantly influences the evaluation of source rock quality, reservoir quality and engineering quality, which has attracted increasing attention for study. By taking typical organic-rich shales in saline and fresh-brackish lake basins in the central-western China as study objects, the characteristics of laminar structure are analyzed and their influence on the selection of sweet spot is discussed. The results show that: (1) The laminar structure varies in different types of lake basins, which is affected by the salinity of lake basin. The carbonate laminar is mainly developed in saline lake basin, but less in fresh-brackish lake basin; (2) The laminar structure has strong heterogeneity of sub-millimeter level. There are differences in TOC and pore structure among different laminae, and the quality of the same type of laminae varies greatly in various basins; (3) The laminar structure determines the characteristics of microscopic shale oil migration and accumulation as well as the enrichment mode of “in-situ source rock and reservoir”, and affects the retained hydrocarbon content, fluid mobility and fracturing engineering. The fine evaluation of laminar structure of continental shale and identification of the favorable lithofacies zone for high-quality shale development are the critical issues for petroleum exploration from outside to inside the source rock, which are the basis for the discovery of economic and effective resources inside the source rock and have great significance for the selection of shale oil “sweet spot area” and “sweet spot interval”.

Key words: unconventional oil and gas, heterogeneity, micro/nano pore-throat system, organic-rich shale, fine-grained deposit

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“陆相页岩油富集主控因素与有利区带评价方法”(42090025); 中国石油国际科技合作项目“陆相页岩油微纳米孔喉系统流动模拟研究”(2021DQ-0405)。

第一作者简介: 吴松涛(1985—), 男, 山东广饶人, 博士, 2019年毕业于中国石油勘探开发研究院, 高级工程师, 现主要从事沉积储层、非常规油气地质及 CO₂ 水岩反应与碳封存(CCUS)等方面的工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083。E-mail: wust@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-01-27; 修改日期: 2022-08-03

0 引言

陆相页岩油资源潜力大,已成为中国油气勘探战略性接替领域。初步评估结果表明,中国陆相页岩油技术可采资源量超 $145 \times 10^8 \text{t}$ ^[1-6]。近年来,通过持续开展以“甜点评价、水平井与体积压裂”为核心的技术攻关,准噶尔、鄂尔多斯、松辽、三塘湖、渤海湾等盆地陆相主力页岩层系已取得一系列重要进展^[7-16]。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组上、下甜点段井控资源规模超过 $10 \times 10^8 \text{t}$,并设立了中国第一个国家级陆相页岩油示范区^[7];鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段落落实了3个页岩油富集区带,建成了以西233、庄183等为代表的多个试验区,发现了庆城陆相源内大油田^[11];松辽盆地白垩系青山口组落实7个页岩层系石油富集区带,资源规模超过 $50 \times 10^8 \text{t}$ ^[12];准噶尔盆地西北缘二叠系风城组、四川盆地侏罗系大安寨段、三塘湖盆地马朗一条湖凹陷二叠系芦草沟组等风险勘探取得重要突破^[15-19]。此外,在渤海湾盆地,发现济阳坳陷的东营凹陷、沾化凹陷,辽河坳陷西部凹陷雷家地区、大民屯凹陷,黄骅坳陷的沧东凹陷、歧口凹陷,以及冀中坳陷的束鹿凹陷等7个页岩层系石油富集区带;在柴达木盆地扎哈泉区块新近系上干柴沟组、英西地区古近系下干柴沟组,以及二连盆地阿南凹陷古近系腾格里组一段等页岩层系石油领域也取得较大进展^[4,10,20-21]。

纹层是沉积层理的最基本单位,是沉积物或沉积岩中肉眼可分辨的特色沉积结构之一^[22],主体厚度小于 1cm ^[23-25]。纹层结构在陆相页岩油层系中普遍发育,目前学术界与工业界对纹层结构的研究主要集中在3个方面:纹层类型、纹层成因及纹层对岩石品质的影响^[26-32]。在纹层类型的划分方面,矿物组成与有机质丰度是最常见的划分依据,其中黏土矿物纹层、长英质纹层、碳酸盐纹层、有机质纹层是最主要的纹层类型^[26-27,30],同时也涵盖了具有特殊盆地属性的纹层,如蕙克来等^[26]在长7段页岩中识别出的富凝灰质纹层、李婷婷等^[27]在青西凹陷下沟组识别出的硅质纹层。除矿物组成外,纹层形态与粒度差异也是纹层结构划分的重要依据。例如,Campbell等^[28]根据黑色细粒沉积组成单元的连续性、形状和几何形态,将纹层划分为板状、波状和弯曲状;Yawar等^[29]根据粒度差异提出泥纹层和粉砂纹层。在纹层成因方面,已有研究主要从盆地演化及全球演化的尺度进行了多层次探讨。例如,鄯继华等^[31]从盆地演化的角度指

出气候变化和陆源碎屑供应强度变化对沧东凹陷古近系孔二段混合沉积垂向上组合形式的影响;孙善勇等^[32]从全球演化的尺度通过米兰科维奇旋回预测东营凹陷古近系沙四上亚段富有机质纹层成因。

作为页岩独具特色的组构特征,纹层结构对烃源岩品质、储层品质与工程品质评价具有重要影响,包括有机质丰度、岩石学和矿物学特征^[33-35],以及水平井体积压裂裂缝扩展规律及压裂效果^[36-38]。目前已发表的研究对纹层结构与有机质丰度关系的关注较多,主要认识包括:(1)泥质纹层有机质含量普遍高于粉砂质纹层^[27];(2)不同矿物组分纹层、不同厚度纹层对应的TOC具有明显差异^[22,35,39]。总体来看,目前研究较少关注纹层结构对页岩储集性能的影响,特别是单一纹层对储层品质的影响。尽管有学者关注纹层结构对水平方向及垂直方向渗透率的影响,但已有研究更多的是从岩相角度进行探讨确定优势层段^[21],不同湖盆细粒沉积体系发育的纹层结构具有差异,直接影响了储层品质评价,并对“甜点区/段”的优选造成影响。因此,急需开展不同地区细粒沉积体系纹层结构对储层品质影响的相关研究。

本文以中国中西部典型湖盆富有机质页岩——咸化湖盆富有机质页岩(准噶尔盆地二叠系芦草沟组)和淡水—微咸水湖盆富有机质页岩(鄂尔多斯盆地三叠系长7段)为研究对象,通过有机地球化学分析、X-射线衍射分析、薄片鉴定和场发射扫描电镜观察等手段,划分纹层类型与纹层组合,研究不同纹层对应的孔隙结构特征;探讨纹层结构对页岩层系储集性能与“甜点区/段”优选的影响。相关研究认识以期为中国陆相页岩油规模勘探开发提供理论指导与技术支持。

1 不同页岩纹层结构与地球化学特征

1.1 准噶尔盆地二叠系芦草沟组页岩系统

作为咸化湖盆的典型代表,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组发育4类纹层,包括碳酸盐纹层、长英质粉砂纹层、有机质纹层与黏土矿物纹层(图1)。芦草沟组黏土矿物含量较低,主体低于20%^[7,10,15,39-40],因此黏土矿物纹层发育比例相对较低。长英质粉砂纹层和碳酸盐纹层是最主要的纹层类型(图1a—c),黏土矿物以伊/蒙混层和绿泥石为主,具定向排列特征。长英质粉砂纹层与碳酸盐纹层常呈互层发育,厚度主要为 $200 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$,局部可达 2mm ;碳酸盐纹层以

白云石、方解石和铁方解石为主(图1c)。有机质纹层主要与黏土矿物纹层伴生,在显微镜下呈薄纹层状连续或准连续分布于黏土矿物纹层之间(图1b)。

根据纵向纹层厚度比例,芦苇沟组4类纹层主要构成3种组合样式,包括长英质粉砂纹层—碳酸盐

纹层组合(图1a)、有机质纹层—黏土矿物纹层组合(图1b)、黏土矿物纹层—长英质粉砂纹层—碳酸盐纹层组合(图1c)。其中,在长英质粉砂纹层—碳酸盐纹层组合中,可见少量黏土矿物纹层发育,但厚度与比例较小(图1a)。

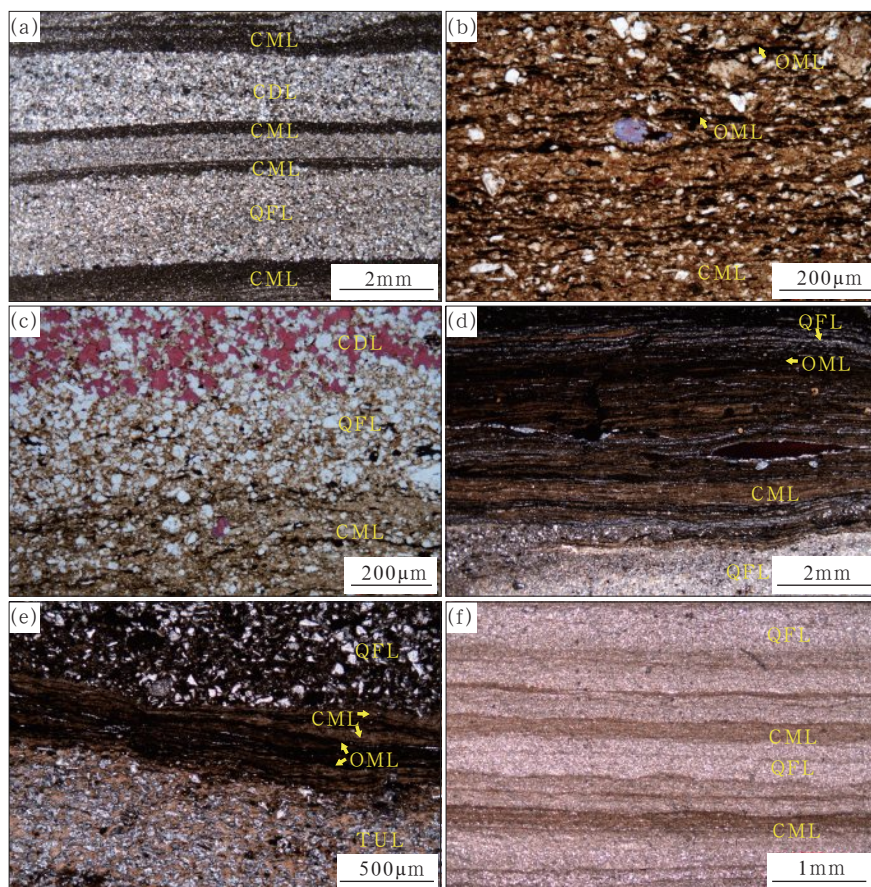


图1 中国中西部不同类型湖盆页岩典型纹层结构显微镜照片

Fig.1 Microscopic photos of typical laminar structure of shale in various types of lake basins in central-western China

(a) 碳酸盐纹层与长英质粉砂纹层,见薄层黏土矿物纹层互层发育,芦苇沟组, J10022井; (b) 黏土矿物纹层与有机质纹层共生,有机质纹层呈薄纹层状连续或准连续分布于黏土矿物纹层之间,芦苇沟组, J10016井; (c) 黏土矿物纹层、碳酸盐纹层与长英质粉砂纹层,3类纹层厚度相当,芦苇沟组, J10016井; (d) 黏土矿物纹层、长英质粉砂纹层与有机质纹层,底部长英质纹层厚度较大,但向上厚度与比例均减小,见椭圆形磷灰石结核发育,长7段,里147井; (e) 凝灰质纹层、黏土矿物纹层、有机质纹层与长英质粉砂纹层,有机质纹层与黏土矿物纹层共生,长7段,里147井; (f) 黏土矿物纹层与长英质粉砂纹层,未见有机质纹层,长7段,白522井。CML—黏土矿物纹层, QFL—长英质粉砂纹层, OML—有机质纹层, CDL—碳酸盐纹层, TUL—凝灰质纹层

从地球化学特征看,不同类型纹层具有明显差异。从有机质丰度看,有机质纹层—黏土矿物纹层组合最高,TOC最高超过8%,平均为7.2%;长英质粉砂纹层—碳酸盐纹层组合最低,TOC主体小于2%,平均仅为1.3%;黏土矿物纹层—长英质粉砂纹层—碳酸盐纹层组合TOC主体为1.8%~3.6%,平均为2.8%(图2a)。不同纹层游离烃含量(S_1)与TOC呈相反特征,即长英质粉砂纹层—碳酸盐纹层组合 S_1 最高,而有机质纹层—黏土矿物纹层组合 S_1 最低

(图2b)。长英质粉砂纹层—碳酸盐纹层组合 S_1 主体为12~19mg/g,黏土矿物纹层—长英质粉砂纹层—碳酸盐纹层组合 S_1 主体为7~14mg/g,有机质纹层—黏土矿物纹层组合 S_1 主体小于4mg/g(图2b)。

1.2 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩系统

鄂尔多斯盆地长7段页岩形成于淡水—微咸水湖盆背景^[1,11,39,41]。显微镜研究表明,长7段发育4类纹层,包括长英质粉砂纹层、有机质纹层、黏土矿物

纹层和凝灰质纹层, 未见碳酸盐纹层发育 (图 1d—f)。长英质粉砂纹层发育比例较低, 粒度变化较大, 从粗粉砂到细粉砂均有发育 (图 1e、f); 黏土矿物纹层是最主要的类型, 发育比例高, 主要以伊/蒙混层为主, 局部见绿泥石发育, 内部见大量黄铁矿发育 (图 1d、e); 长 7 段有机质纹层也与黏土矿物纹层共生, 但与芦草沟组相比, 有机质纹层的连续性、厚度与发育比例更高 (图 1d、e); 凝灰质纹层是长 7 段特色的纹层类型, 与有机质纹层、黏土矿物纹层共生, 在其内部见大量火山灰蚀变及部分方解石胶结 (图 1e)。

长 7 段页岩共发育 3 类纹层组合, 包括黏土矿物纹层—长英质粉砂纹层—有机质纹层组合 (图 1d)、长英质粉砂纹层—凝灰质纹层—有机质纹层—黏土矿物纹层组合 (图 1e)、长英质粉砂纹层—黏土矿物

纹层组合 (图 1f)。不同纹层组合有机地球化学特征具有明显差异。总体来看, 有机质纹层越发育, 对应的有机质丰度越高。黏土矿物纹层—长英质粉砂纹层—有机质纹层组合与长英质粉砂纹层—凝灰质纹层—有机质纹层—黏土矿物纹层组合有机质丰度高, TOC 主体大于 6%, 最高超 16%; 长英质粉砂纹层—黏土矿物纹层组合有机质丰度相对低, TOC 主体小于 8% (图 2c)。与芦草沟组类似, 长 7 段页岩 S_1 与 TOC 呈相反的分布特征: 长英质粉砂纹层—黏土矿物纹层组合游离烃含量最高, S_1 主体为 8~12mg/g, 最高可达 14mg/g; 黏土矿物纹层—长英质粉砂纹层—有机质纹层与长英质粉砂纹层—凝灰质纹层—有机质纹层—黏土矿物纹层的 S_1 分别为 2~11mg/g、1~7.5mg/g (图 2d)。

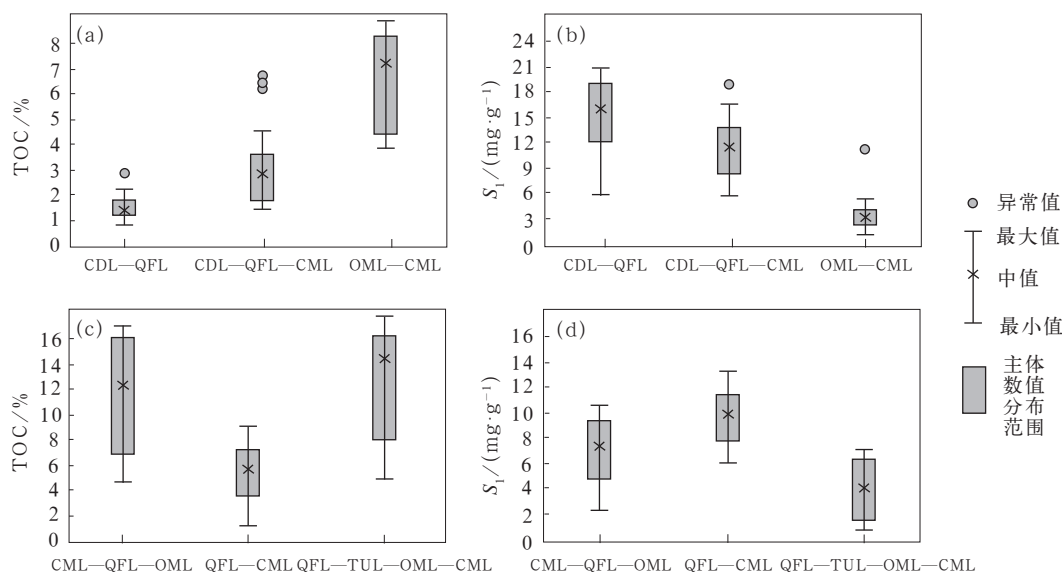


图 2 不同类型湖盆细粒沉积岩典型纹层结构有机地球化学特征差异

Fig.2 Differences of geochemical characteristics of typical laminar structures of fine-grained rocks in various types of lake basins

- (a) 芦草沟组不同纹层组合 TOC 分布; (b) 芦草沟组不同纹层组合 S_1 分布; (c) 长 7 段页岩不同纹层组合 TOC 分布; (d) 长 7 段页岩不同纹层组合 S_1 分布

1.3 不同地区页岩纹层结构差异

综合前文研究可知, 芦草沟组及长 7 段富有机质页岩系统纹层结构具有差异, 表明湖盆水体与沉积环境对纹层类型具有重要影响。从纹层类型看, 从芦草沟组到长 7 段, 沉积水体由咸化湖盆向淡水—微咸水湖盆转变, 盐度逐渐降低, 碳酸盐纹层发育比例与规模减小, 黏土矿物纹层发育的比例与规模增大 (图 1)。长 7 段凝灰质纹层较为发育, 与三叠纪末期火山活动频发密切相关^[41]。从有机质纹层的分

布看, 其主体与黏土矿物纹层共生。其中, 长 7 段有机质纹层的连续性、厚度与规模明显优于芦草沟组, 这一方面与页岩的有机质丰度直接相关, 另一方面可能受热演化成熟度影响。青山口组 R_o 主体大于 1.0%, 最高可达 1.6%^[12], 高于长 7 段和芦草沟组 (R_o 主体为 0.7%~1.0%)^[39]。较高的热演化成熟度可能会导致更多的有机质转化, 从而降低有机质纹层发育的比例。

从不同纹层 TOC 与游离烃含量关系看, 长 7 段与芦草沟组表现出相似的特征: 黏土矿物纹层与有

机质纹层组合对应的 TOC 高, 但 S_1 低; 长 7 段长英质粉砂纹层组合与芦苇沟组碳酸盐纹层组合对应的 TOC 低, 但 S_1 高 (图 2)。需要注意的是, 差异性成熟度带来的生烃演化与成岩作用的不同, 也会导致纹层结构的差异。因此, 在进行中国陆相页岩纹层类型研究时, 需重点关注水体盐度、热演化成熟度与成岩改造的影响。

2 纹层结构与储层品质关系

2.1 纹层结构与孔隙结构

2.1.1 准噶尔盆地二叠系芦苇沟组

除矿物组成与有机地球化学特征具有明显差异

外, 不同纹层孔隙结构也具有明显不同。准噶尔盆地芦苇沟组长英质粉砂纹层与碳酸盐纹层孔隙发育程度较高 (图 3a、b), 黏土矿物纹层次之 (图 3c、d), 有机质纹层孔隙最不发育 (图 3e、f)。长英质粉砂纹层与碳酸盐矿物纹层的孔隙类型以斜长石粒间溶蚀孔、白云石粒间孔为主; 部分斜长石具有明显的溶蚀特征, 局部发育黑云母粒内孔, 孔隙直径最大可达 15~20 μm (图 3b)。黏土矿物纹层的孔隙类型以伊/蒙混层粒内孔为主, 孔隙多但孔径小, 主体孔径为 50~200nm (图 3d)。在有机质纹层中, 有机质主体连续分布在石英、斜长石、白云石及黏土矿物之间, 但孔隙极不发育 (图 3e、f), 这可能与芦苇沟组页岩热演化程度偏低有关。

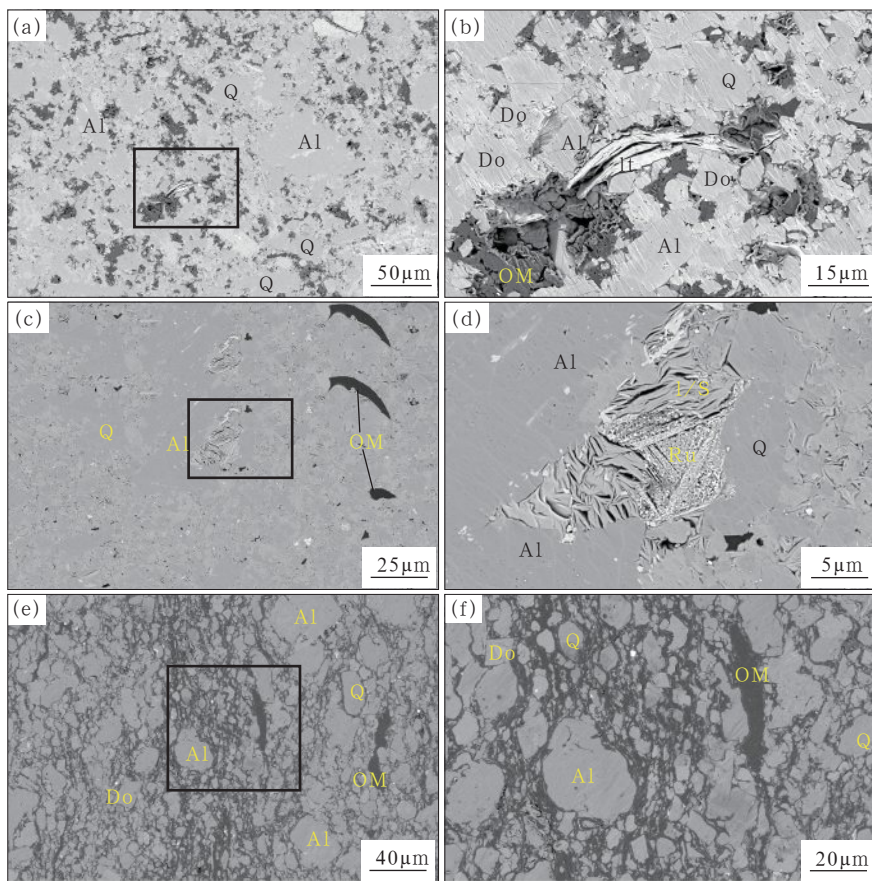


图 3 准噶尔盆地芦苇沟组不同类型纹层孔隙结构特征

Fig.3 Pore structure characteristics of different types of laminae of Lucaogou Formation shale in Junggar Basin

(a) 碳酸盐纹层—长英质纹层组合, 孔隙以斜长石粒间孔、白云石粒间孔为主, 孔隙内部见大量石油赋存; (b) 对应 (a) 中矩形的局部放大, 见黑云母粒内孔、斜长石粒间溶蚀孔及白云石粒间孔发育, 孔隙内大量充填石油, 部分位置见石油呈溢出状产出; (c) 黏土矿物纹层, 见分散状有机质及斜长石发育, 孔隙类型以伊/蒙混层粒内孔为主; (d) 对应 (c) 中矩形的局部放大, 见伊/蒙混层粒内孔发育, 见金红石晶体呈三角形组合分布, 孔隙内未见石油充填; (e) 有机质纹层, 见石英、斜长石、白云石及黏土矿物发育, 有机质孔不发育; (f) 对应 (e) 中矩形的局部放大。Q—石英, Ab—斜长石, Do—白云石, OM—有机质, It—伊利石, I/S—伊/蒙混层, Ru—金红石, Al—钠长石

2.1.2 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段

与芦苇沟组相似, 鄂尔多斯盆地长 7 段页岩不同纹层的孔隙结构也表现出极大的差异 (图 4),

长英质粉砂纹层孔隙发育程度最高, 其次为凝灰质纹层和黏土矿物纹层, 有机质纹层孔隙发育程度最低。在长英质粉砂纹层中, 见钾长石溶蚀孔、斜

长石粒间孔、方解石溶蚀孔及高岭石粒内孔发育（图4c），孔隙直径（孔径）主体超过500nm，部分孔隙直径达10~20 μm ；黏土矿物纹层的孔隙类型以伊/蒙混层粒内孔为主，见少量黑云母粒内孔，孔隙

多但孔径小，主体孔径为30~300nm（图4e、g）；在有机质纹层中，有机质连续分布于黏土矿物之中，孔隙发育程度较低，见草莓状黄铁矿晶内孔（图4h）与少量有机质孔（图4i）。

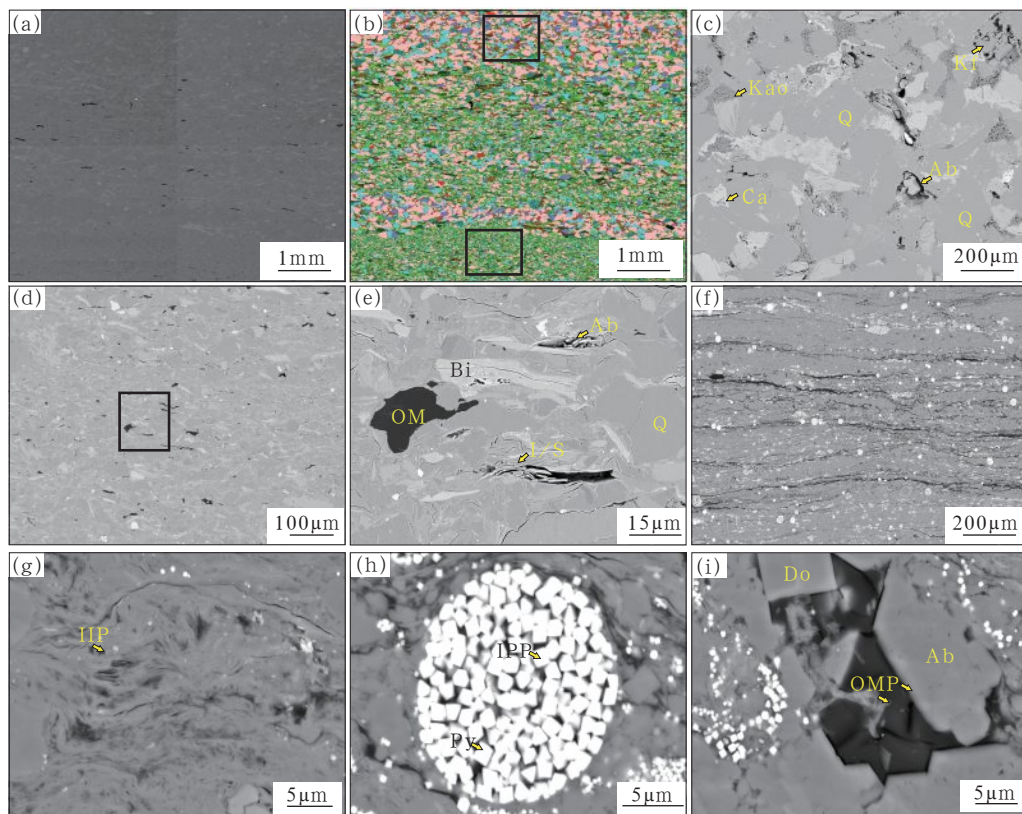


图4 鄂尔多斯盆地长7段不同类型纹层孔隙结构特征

Fig.4 Pore structure characteristics of different types of laminae of Chang 7 member shale in Ordos Basin

(a) 黏土矿物纹层—长英质粉砂纹层组合，场发射扫描电镜照片；(b) 黏土矿物纹层—长英质粉砂纹层组合，扫描电镜矿物定量评价(QEMSCAN)矿物平面展布图；(c) 对应(b)中上方矩形局部放大，长英质粉砂纹层，见钾长石溶蚀孔、斜长石粒间孔、方解石溶蚀孔及高岭石粒内孔发育；(d) 对应(b)中下方矩形局部放大，黏土矿物纹层，见分散状有机质分布；(e) 对应(d)中矩形局部放大，见伊/蒙混层粒内孔、黑云母粒内孔及微裂缝发育，但微裂缝有可能是样品制备过程中造成的，或由于制样过程造成原有微裂缝的扩大；(f) 黏土矿物纹层与有机质纹层，见有机质连续分布，黄铁矿大量发育；(g) 黏土矿物纹层，伊/蒙混层粒内孔(IIP)，孔径主体为20~200nm，连通性较差；(h) 有机质纹层，草莓状黄铁矿晶间孔(IPP)；(i) 有机质纹层，有机质孔(OMP)，在有机质内部表现为狭长缝状，连通性与分布规模小。Kao—高岭石，

Kf—钾长石，Ca—方解石，Bi—黑云母，Py—黄铁矿

2.2 纹层结构与石油赋存

纹层结构在影响页岩孔隙结构的同时，也会对石油的赋存状态产生重要影响。在准噶尔盆地芦草沟组，长英质粉砂纹层与碳酸盐纹层石油发育比例明显高于黏土矿物纹层及有机质纹层（图3）。在长英质纹层和碳酸盐纹层中，石油主要赋存在白云石粒间孔及斜长石粒间溶蚀孔中，石油在孔隙边缘呈散开状产出（图3b）；但在黏土矿物纹层中未见此类石油产出现象（图3d）。

鄂尔多斯盆地长7段页岩，石油赋存表现出类似

的特征，即长英质粉砂纹层与凝灰质纹层的含油性明显优于黏土矿物纹层及有机质纹层。图5展示了长7段页岩荧光显微镜照片，可以看到粒度稍粗的长英质粉砂纹层与凝灰质纹层荧光显示明显增强。凝灰质纹层发育部分火山灰蚀变形成的长石，在高岭石内部及高岭石之间发育大量的孔隙（图5b），可为石油从富有机质纹层运移到凝灰质纹层提供充足的储集空间。长英质粉砂纹层也是石油富集的主要区域，前文研究可知，长英质粉砂纹层具有更多的孔隙且孔隙直径更大，因此在荧光薄片上可见其含油性明显优于邻近的黏土矿物纹层（图5d）。

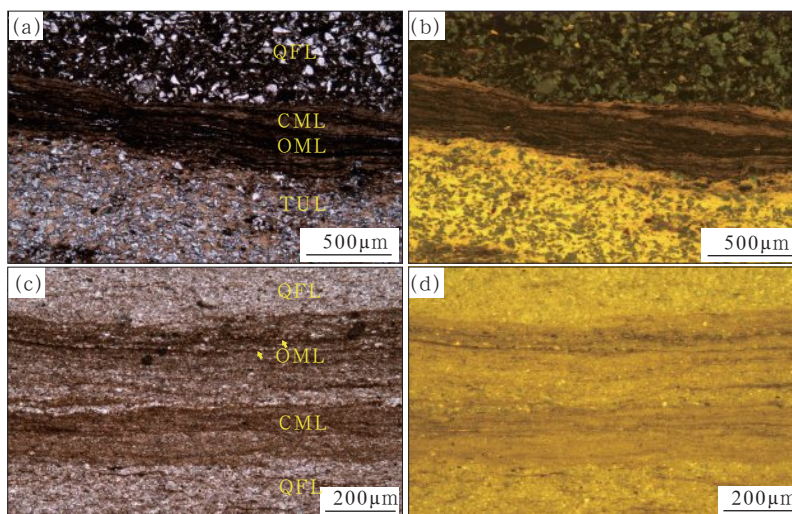


图5 鄂尔多斯盆地长7段页岩含油性荧光薄片照片

Fig.5 Thin section fluorescence photos of Chang 7 member shale in Ordos Basin

(a) 凝灰质纹层、黏土质纹层、有机质纹层与长英质粉砂纹层，单偏光照片；(b) 对应(a)的荧光薄片照片，紫外光激发；(c) 长英质粉砂纹层与黏土矿物纹层，单偏光照片，见有机质纹层发育；(d) 对应(c)的荧光薄片照片，紫外光激发

结合前文研究可知，陆相页岩的孔隙结构与石油赋存具有很好的一致性。对于长7段和芦草沟组页岩系统，长英质粉砂纹层与碳酸盐纹层孔隙发育好，含油性也优于黏土矿物纹层与有机质纹层；青山口组页岩纹层品质与长7段、芦草沟组正好相反，黏土矿物纹层孔隙发育好，其含油性也优于长英质纹层与碳酸盐纹层。需要说明的是，考虑到黏土矿物纹层特殊的结构，目前青山口组在黏土矿物纹层内观察到的石油的可动性，是下一步值得关注的重要内容。

2.3 纹层结构与物性特征

纹层结构在影响孔隙结构与石油赋存状态的同时，也对储层物性产生影响^[42-44]。准噶尔盆地芦草沟组可动孔隙度与长英质含量呈明显正相关（图6a），

而与黏土矿物含量呈明显的负相关（图6b），这与芦草沟组长英质粉砂纹层和黏土矿物纹层孔隙结构一致，即长英质含量越高，孔隙越发育，对应的孔隙度越高。氮气吸附的比孔容代表了储层中孔隙体积。研究表明，长7段页岩比孔容与黏土矿物含量、伊利石含量均呈反比（图7），即黏土矿物含量越高，页岩物性越差，这也进一步反映出黏土矿物纹层孔隙发育差。

本文初步研究认为热演化成熟度与成岩作用是导致不同盆地间纹层性质差异的关键。青山口组页岩热演化成熟度高（ R_o 大于1.3%），黏土矿物纹层以伊利石为主，粒间孔、微裂缝发育程度高，在提高黏土矿物纹层储集能力的同时，微裂缝的发育进一步增强了其渗流能力；同时，相对较高的热演化成熟度导致长英质粉砂纹层内部发生强烈的碳酸盐胶结，使其孔

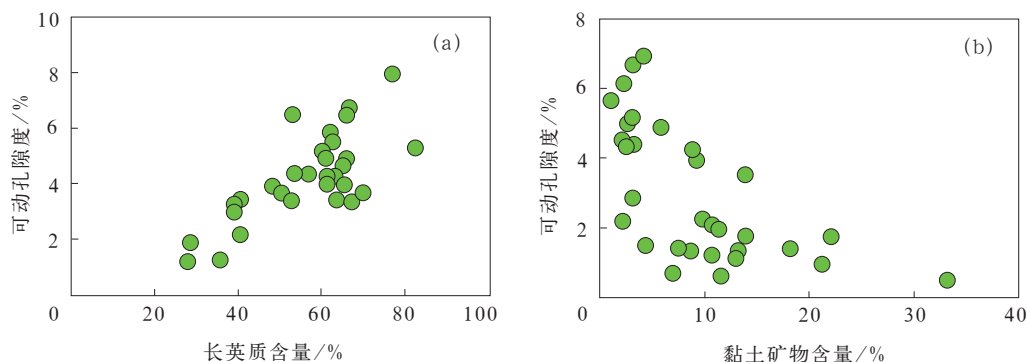


图6 准噶尔盆地芦草沟组可动孔隙度与矿物含量散点图（据新疆油田数据重新编制）

Fig.6 Relationship between movable porosity and mineral content of Lucaogou Formation shale in Junggar Basin
(Modified after data from Xinjiang Oilfield)

(a) 可动孔隙度与长英质含量散点图；(b) 可动孔隙度与黏土矿物含量散点图

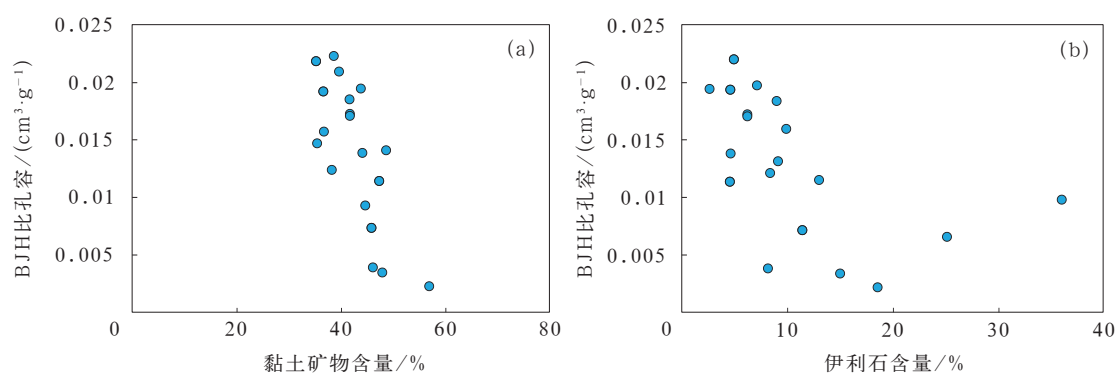


图 7 鄂尔多斯盆地长 7 段黏土矿物与 BJH 比孔容关系图

Fig.7 Relationship between clay mineral content and BJH pore volume of Chang 7 member shale in Ordos Basin
(a) 黏土矿物含量与 BJH 比孔容散点图；(b) 伊利石含量与 BJH 比孔容散点图

隙发育程度降低。与青山口组相比，长 7 段和芦草沟组页岩系统热演化成熟度中等（主体小于 1.0%），黏土矿物纹层整体以伊 / 蒙混层为主，粒间孔与微裂缝发育程度有限；同时，长英质粉砂纹层和碳酸盐纹层碳酸盐胶结作用相对中等，且生油阶段内形成的有机酸对邻近的长英质粉砂纹层和碳酸盐纹层造成溶蚀，进一步增强了其储集性能，导致这两类纹层含油性普遍优于黏土矿物纹层。

3 纹层结构对甜点评价的启示

甜点评价是页岩系统油气勘探的核心，是实现页岩油气规模勘探与效益开发的关键。中国陆相页岩油甜点评价包括“甜点段”评价与“甜点区”评价两个方面^[1,7,9-11,39-43]。陆相页岩油具有“源储一体、源内运聚”的特征，呈“原生源储”的富集特征^[7]；与常规油气勘探重点关注“生、储、盖、圈、运、保”等要素不同，页岩系统“甜点区 / 段”评价更强调烃源岩品质、储层品质、工程品质及流动品质的评价^[2,6,9]，因此源内滞留烃含量、孔隙结构、矿物组成及流体性质成为页岩油甜点评价关注的重点。

综合前文研究可知，纹层作为页岩系统特有的岩石结构之一，直接影响了页岩系统的含油性、孔隙

结构、矿物组成及储层物性。本文通过对比芦草沟组和长 7 段富有机质页岩层系不同纹层结构的游离烃含量、孔隙结构、物性及矿物组成，探讨了不同纹层结构对应的储层品质的差异，进而提出在甜点评价中应如何考虑纹层结构的影响（表 1）。结果表明：不同湖盆甜点评价关注的纹层结构及岩相类型不同。对于咸化湖盆，芦草沟组碳酸盐纹层与长英质粉砂纹层在游离烃含量、孔隙结构及脆性矿物组成方面明显优于黏土矿物纹层及有机质纹层，因此甜点评价应重点关注碳酸盐纹层与长英质纹层发育的细粒沉积岩相。对于淡水—微咸水湖盆，长 7 段页岩与芦草沟组类似，长英质粉砂纹层在游离烃含量、孔隙结构及脆性矿物组成方面明显优于黏土矿物纹层及有机质纹层，凝灰质纹层可作为源内运移的对象，但其在长 7 段页岩中占比较小，因此甜点评价应优先考虑长英质纹层较发育的细粒沉积岩相。需要说明的是，从纹层结构到甜点区 / 段评价优选，不仅涵盖了烃源岩品质、储层品质及工程品质的多方面评价，而且涉及跨尺度表征的问题，直接建立二者之间的联系存在较大的不确定性。本文重点探索了不同纹层结构对应的储层含油性、孔隙结构与物性的差异，进而为甜点区 / 段评价优选提供储层品质方面的重要参考。

表 1 不同类型湖盆纹层结构储层品质与甜点评价

Table 1 Reservoir quality evaluation and sweet spot selection of shales with different laminar structures in various types of lake basins			
湖盆类型	地区与层位	纹层结构与储层品质	甜点优选
咸化湖盆	准噶尔盆地 芦草沟组	①碳酸盐纹层： S_1 高，孔隙发育，物性与含油性好；方解石与白云石为主，脆性好，有利于压裂改造； ②长英质粉砂纹层： S_1 高，孔隙发育，物性与含油性好；长石与石英为主，粒度粗，脆性好，有利于压裂改造； ③黏土矿物纹层：TOC 高但 S_1 低，孔隙发育较差，物性与含油性差；黏土矿物含量高，伊 / 蒙混层为主，不利于压裂改造； ④有机质纹层：TOC 高但 S_1 低，有机质孔不发育，物性与含油性差；塑性有机质改造难度大	优选碳酸盐纹层与长英质粉砂纹层及其组合

续表

湖盆类型	地区与层位	纹层结构与储层品质	甜点优选
淡水—微咸水湖盆	鄂尔多斯盆地长7段	①凝灰质纹层： S_1 高，火山灰脱玻化孔隙较发育，含油性较好，在纹层中整体占比小； ②长英质粉砂纹层： S_1 高，孔隙发育，物性与含油性好；长石与石英为主，粒度粗，脆性好，有利于压裂改造； ③黏土矿物纹层：TOC 高但 S_1 低，孔隙发育较差，物性与含油性差；黏土矿物含量高，伊 / 蒙混层为主，不利于压裂改造； ④有机质纹层：TOC 高但 S_1 低，有机质孔不发育，物性与含油性差；塑性有机质改造难度大	优选长英质粉砂纹层

4 结论

本文以准噶尔盆地二叠系芦草沟组和鄂尔多斯盆地三叠系长7段为研究对象，剖析淡水—微咸水湖盆、咸化湖盆与海侵背景的湖盆富有机质页岩纹层结构特征，划分纹层类型与纹层组合，研究不同纹层结构对应的有机地球化学、矿物组成、孔隙结构及物性特征，探讨纹层结构对页岩层系储集性能与“甜点区 / 段”优选的影响。主要结论包括3个方面：

(1) 湖盆水体环境对页岩纹层类型具有重要影响，不同类型湖盆页岩纹层结构具有差异。湖盆咸化程度越高，碳酸盐纹层发育程度越高。芦草沟组发育碳酸盐纹层、长英质粉砂纹层、黏土矿物纹层及有机质纹层，长7段发育凝灰质纹层、长英质粉砂纹层、黏土矿物纹层及有机质纹层。

(2) 明确不同纹层间 TOC、 S_1 、矿物组分、孔隙结构及含油性的差异，提出同一类纹层在不同盆地的品质具有明显差异。芦草沟组碳酸盐纹层与长英质纹层 S_1 高，孔隙以长石粒间溶蚀孔、白云石粒间孔为主，孔隙大且发育程度高，物性与含油性优于黏土矿物纹层与有机质纹层；长7段长英质粉砂纹层 S_1 高，孔隙以长石溶蚀孔、粒间孔为主，孔隙发育程度高，物性与含油性优于凝灰质纹层、黏土矿物纹层与有机质纹层。

(3) 纹层结构决定了页岩油微观运聚特征与“原生源储”富集模式，影响滞留烃含量、流体可动性及压裂改造。芦草沟组页岩油具有由有机质纹层与黏土矿物纹层向长英质粉砂纹层与碳酸盐纹层运聚的特征，甜点评价应重点关注长英质粉砂纹层与碳酸盐纹层；长7段页岩油具有由有机质纹层与黏土矿物纹层向长英质粉砂纹层与凝灰质纹层运聚的特征，甜点评价应重点关注长英质粉砂纹层。

参考文献

[1] Zou C N, Zhu R K, Tao S Z, *et al.* Unconventional

Petroleum Geology (2nd Edition)[M]. Amsterdam: Elsevier, Waltham, 2017.

[2] Zou C N, Zhu R K, Chen Z Q, *et al.* Organic-matter-rich shales of China[J]. Earth-Science Reviews, 2019,189:51–78.

[3] 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 Petrolei Sinica, 2020, 41(1):1–12.

[4] 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.

[5] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020,47(1):1–10.

Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, *et al.* Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020,47(1):1–10.

[6] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):1–13.

Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):1–13.

[7] 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. 石油学报, 2021,42(1):1–14.

Kuang Lichun, Hou Lianhua, Yang Zhi, *et al.* Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021,42(1):1–14.

[8] 胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油效益勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 2018,45(4):737–748.

Hu Suyun, Zhu Rukai, Wu Songtao, *et al.* Profitable exploration and development of continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(4):737–748.

[9] 杨智, 邹才能. “进源找油”: 页岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019,46(1):173–184.

Yang Zhi, Zou Caineng. “Exploring petroleum inside source kitchen”: connotation and prospects of source rock oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019,46(1): 173–184.

[10] 杨智, 邹才能, 吴松涛, 等. 从源控论到源储共生系统: 论页岩层系油气地质理论认识及实践[J]. 地质学报, 2021,95(3):618–631.

Yang Zhi, Zou Caineng, Wu Songtao, *et al.* From source

- control theory to source-reservoir symbiosis system: on the theoretical understanding and practice of source rock strata oil and gas geology in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(3):618–631.
- [11] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5):870–883.
Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, *et al.* Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5):870–883.
- [12] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3):453–463.
Sun Longde, Liu He, He Wenyan, *et al.* An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3):453–463.
- [13] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(3):19–40.
Fu Jinhua, Dong Guodong, Zhou Xinping, *et al.* Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3):19–40.
- [14] 何海清, 范士芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(1):17–30.
He Haiqing, Fan Tuzhi, Guo Xujie, *et al.* PetroChina: major achievements in oil and gas exploration during the 13th Five-Year Plan period and development strategy for the 14th Five-Year Plan period[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(1):17–30.
- [15] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规—非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 48(1):38–51.
Zhi Dongming, Tang Yong, He Wenjun, *et al.* Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 48(1):38–51.
- [16] 杨跃明, 黄东, 杨光, 等. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气形成地质条件及勘探方向[J]. *天然气勘探与开发*, 2019, 42(2):1–12.
Yang Yueming, Huang Dong, Yang Guang, *et al.* Geological conditions to form lacustrine facies shale oil and gas of Jurassic Da'anzhai member in Sichuan Basin and exploration directions[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2019, 42(2):1–12.
- [17] 胡英杰, 王延山, 黄双泉, 等. 辽河拗陷石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(2):43–54.
Hu Yingjie, Wang Yanshan, Huang Shuangquan, *et al.* The geological conditions, resource potential, and exploration direction of oil in Liaohede Depression[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(2):43–54.
- [18] 高阳, 叶义平, 何吉祥, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油开发实践[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(2):133–141.
Gao Yang, Ye Yiping, He Jixiang, *et al.* Development practice of continental shale oil in the Jimsar Sag in the Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2):133–141.
- [19] 周德华, 孙川翔, 刘忠宝, 等. 川东北地区大安寨段陆相页岩气藏地质特征[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(5):32–42.
Zhou Dehua, Sun Chuanxiang, Liu Zhongbao, *et al.* Geological characteristics of continental shale gas reservoir in the Jurassic Da'anzhai member in the northeastern Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(5):32–42.
- [20] 张林晔, 包友书, 李钜源, 等. 湖相页岩油可动性: 以渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6):641–649.
Zhang Linye, Bao Youshu, Li Juyuan, *et al.* Movability of lacustrine shale oil: a case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6):641–649.
- [21] 蒲秀刚, 金凤鸣, 韩文中, 等. 陆相页岩油甜点地质特征与勘探关键技术: 以沧东凹陷孔店组二段为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(8):997–1012.
Pu Xiugang, Jin Fengming, Han Wenzhong, *et al.* Sweet spots geological characteristics and key exploration technologies of continental shale oil: a case study of member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(8):997–1012.
- [22] Li M Y, Wu S T, Hu S Y, *et al.* Lamination texture and its effects on reservoir and geochemical properties of the Palaeogene Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Minerals*, 2021, 11:1360.
- [23] Ingram R L. Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks[J]. *GSA Bulletin*, 1954, 65(9):937–938.
- [24] 董春梅, 马存飞, 林承焰, 等. 一种泥页岩层系岩相划分方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(3):1–7.
Dong Chunmei, Ma Cunfei, Lin Chengyan, *et al.* A method of classification of shale set[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(3):1–7.
- [25] 刘惠民, 王勇, 杨永红, 等. 东营凹陷细粒混积岩发育环境及其岩相组合: 以沙四上亚段泥页岩细粒沉积为例[J]. *地球科学*, 2020, 45(10):3543–3555.
Liu Huimin, Wang Yong, Yang Yonghong, *et al.* Sedimentary environment and lithofacies of fine-grained hybrid in Dongying Sag: a case of fine-grained sedimentary system of the Es₄[J]. *Earth Science*, 2020, 45(10):3543–3555.
- [26] 蒯克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6):1244–1255.
Xi Kelai, Li Ke, Cao Yingchang, *et al.* Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang 7₃ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6):1244–1255.
- [27] 李婷婷, 朱如凯, 白斌, 等. 酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相细粒沉积岩纹层特征及研究意义[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(1):38–47.
Li Tingting, Zhu Rukai, Bai Bin, *et al.* Characteristics and research significance of fine lacustrine sedimentary rock laminations of Xiagou Formation in Qingxi Depression of Jiuquan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1):38–47.
- [28] Campbell C V. Lamina, laminaset, bed and bedset[J]. *Sedimentology*, 1967, 8(1):7–26.

- [29] Yawar Z, Schieber J. On the origin of silt laminae in laminated shales[J]. *Sedimentary Geology*, 2017;22–34.
- [30] 施振生, 董大忠, 王红岩, 等. 含气页岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因: 以四川盆地志留统龙马溪组一段典型井为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020,47(4):829–840.
- Shi Zhensheng, Dong Dazhong, Wang Hongyan, *et al.* Reservoir characteristics and genetic mechanisms of gas-bearing shales with different laminae and laminae combinations: a case study of member 1 of the Lower Silurian Longmaxi shale in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(4):829–840.
- [31] 鄢继华, 邓远, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒混合沉积岩特征及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017,38(1):98–109.
- Yan Jihua, Deng Yuan, Pu Xiugang, *et al.* Characteristics and controlling factors of fine-grained mixed sedimentary rocks from the 2nd member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017,38(1):98–109.
- [32] 孙善勇, 刘惠民, 操应长, 等. 湖相深水细粒沉积岩米兰科维奇旋回及其页岩油勘探意义: 以东营凹陷牛页 1 井沙四上亚段为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017,46(4):846–858.
- Sun Shanyong, Liu Huimin, Cao Yingchang, *et al.* Milankovitch cycle of lacustrine deepwater fine-grained sedimentary rocks and its significance to shale oil: a case study of the upper Es₄ member of well NY1 in Dongying Sag[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017,46(4):846–858.
- [33] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J]. *石油学报*, 2016,37(5):572–586.
- Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Jin Zhenkui, *et al.* Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng–Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016,37(5):572–586.
- [34] Wang C, Zhang B Q, Hu Q H, *et al.* Laminae characteristics and influence on shale gas reservoir quality of Lower Silurian Longmaxi Formation in the Jiaoshiba area of the Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019,109:839–851.
- [35] 华柑霖, 吴松涛, 邱振, 等. 页岩纹层结构分类与储集性能差异: 以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. *沉积学报*, 2021,39(2):281–296.
- Hua Ganlin, Wu Songtao, Qiu Zhen, *et al.* Lamination texture and its effect on reservoir properties: a case study of Longmaxi shale, Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021,39(2):281–296.
- [36] 蒋廷学, 卞晓冰, 王海涛, 等. 深层页岩气水平井体积压裂技术[J]. *天然气工业*, 2017,37(1):90–96.
- Jiang Tingxue, Bian Xiaobing, Wang Haitao, *et al.* Volume fracturing of deep shale gas horizontal wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2017,37(1):90–96.
- [37] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015,34(2):228–237.
- Heng Shuai, Yang Chunhe, Guo Yintong, *et al.* Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015,34(2):228–237.
- [38] 许丹, 胡瑞林, 高玮, 等. 页岩纹层结构对水力裂缝扩展规律的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2015,42(4):523–528.
- Xu Dan, Hu Ruilin, Gao Wei, *et al.* Effects of laminated structure on hydraulic fracture propagation in shale[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015,42(4):523–528.
- [39] Wu S T, Zhu R K, Yang Z, *et al.* Distribution and characteristics of lacustrine tight oil reservoirs in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019,178:20–36.
- [40] Hou L H, Luo X, Zhao Z Y. Identification of oil produced from shale and tight reservoirs in the Permian Lucaogou shale sequence, Jimsar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *ACS Omega*, 2021,42(1):1–14.
- [41] 吴松涛, 邹才能, 朱如凯, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统长 7 段泥页岩储集性能[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2015,40(11):1810–1823.
- Wu Songtao, Zou Caineng, Zhu Rukai, *et al.* Reservoir quality characterization of Upper Triassic Chang 7 shale in Ordos Basin[J]. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 2015,40(11):1810–1823.
- [42] Guan M D, Wu S T, Hou L H, *et al.* Paleoenvironment and chemostratigraphy heterogeneity of the Cretaceous organic-rich shales[J]. *Advances in Geo–Energy Research*, 2021,5(4):444–455.
- [43] 高瑞祺, 孔庆云. 松辽盆地白垩纪非海相烃源岩的沟鞭藻及其生物标志化合物[J]. *天然气地球科学*, 1992,3(6):9–17.
- Gao Ruiqi, Kong Qingyun. Dinoflagellate and its biomarker compounds from Cretaceous non-marine source rocks in Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1992,3(6):9–17.
- [44] 李颖莉, 蔡进功. 泥质烃源岩中蒙脱石伊利石化对页岩气赋存的影响[J]. *石油实验地质*, 2014,36(3):352–358.
- Li Yingli, Cai Jingong. Effect of smectite illitization on shale gas occurrence in argillaceous source rocks[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014,36(3):352–358.