

页岩沉积环境、岩相及储集空间特征研究进展

张 顺^{1,2}

¹中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营

²页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 山东 东营

收稿日期: 2024年5月9日; 录用日期: 2024年7月19日; 发布日期: 2024年7月30日

摘 要

随着油气勘探领域向湖盆中心的推进, 数量巨大的湖相深水细粒沉积岩已经成为油气勘探开发新的领域。针对页岩等细粒沉积类型复杂、储集空间类型多样等关键问题, 在调研大量国内外研究成果基础上, 综述了页岩等细粒沉积的沉积环境、岩相类型划分、成岩作用及储层微观结构特征, 重点对比了不同地区、不同类型页岩在沉积环境、矿物组成方面的差异, 分析了不同地区页岩岩相划分方案以及储集空间表征技术和分类方案的研究成果, 提出了页岩沉积储层方面的发展方向。结果显示, 页岩一般分布在沉积速度缓慢(饥饿性沉积)盆地的沉积-沉降中心, 沉积环境为深水、低水动力条件下的缺氧环境; 相较于海相页岩, 中国湖相深水细粒沉积岩在矿物组成组构、沉积构造等方面更为复杂, 纹层结构发育; 不同尺度孔隙和裂缝共同构成了页岩储集空间。

关键词

页岩, 细粒沉积, 沉积环境, 岩相, 储集空间

Research Progress on Sedimentary Environment, Lithofacies and Reservoir Space Characteristics of Shale

Shun Zhang^{1,2}

¹Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying Shandong

²National Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanism and Efficient Development, Dongying Shandong

Abstract

With the advancement of oil and gas exploration to the center of lake basin, a large number of lacustrine deep-water fine-grained sedimentary rocks have become a new field of oil and gas exploration and development. In view of the key problems such as the complex sedimentary types and diverse reservoir space types of fine grained shale, this paper reviews the sedimentary environment, lithofacies type division, diagenesis and reservoir microstructure characteristics of fine grained shale and other fine grained sediments on the basis of a large number of research results at home and abroad, and focuses on comparing the differences in sedimentary environment and mineral composition of different regions and different types of shale. This paper analyzes the research results of different shale lithofacies classification schemes, reservoir space characterization techniques and classification schemes, and puts forward the development direction of shale sedimentary reservoirs. The results show that shales are generally distributed in the sediment-subsidence center of basins with slow deposition rate (hungry sedimentation), and the sedimentary environment is anoxic environment in deep water and low hydrodynamic conditions. Compared with marine shales, lacustrine deep-water fine-grained sedimentary rocks in China are more complex in terms of mineral composition and sedimentary structure, and have developed laminar structure. Pores and fractures of different scales together constitute the shale reservoir space.

Keywords

Shale, Fine Sediment, Sedimentary Environment, Lithofacies, Reservoir Space

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

页岩油气是指赋存于暗色泥页岩、高碳泥页岩及其夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、甚至砂岩中以自生自储成藏的油气聚集,即在泥页岩层系中滞留的油气[1]-[3],是自生自储、源储一体的非常规油气资源[4],多为一次运移,主要以游离态、吸附态及溶解态等形式存在,且以游离态和吸附态为主[5] [6]。页岩油气已成为全球油气资源勘探开发的新亮点,影响世界油气资源勘探开发格局,中国是目前世界上实现陆相页岩油商业规模开发最成功的国家之一,相继在鄂尔多斯盆地,准噶尔盆地,松辽盆地,渤海湾盆地等获得陆相页岩油重大发现。形成于不同沉积环境的泥页岩在矿物成分、岩性组合、垂向序列及储层微观结构特征等方面存在很大差异,对泥页岩油气的富集过程有重要影响。本文综述了页岩等细粒沉积的沉积环境、岩相类型划分、成岩作用及储层微观结构特征,以东部陆相断陷盆地典型代表——济阳拗陷为例,分析了页岩沉积环境和储层等方面基本特征,对页岩油气勘探有积极的指导作用。

2. 页岩的沉积环境及矿物岩石学特征

2.1. 细粒沉积环境

泥页岩可形成于陆相、海相及海陆交互沉积环境中。暗色泥页岩的形成环境主要为缺氧的闭塞海

湾、潟湖、湖泊深水区、欠补偿盆地及深水陆棚等[3]，我国松辽、鄂尔多斯盆地等中生代坳陷，渤海湾盆地等新生代断陷，都沉积了厚层湖相富含有机质泥页岩。综合国内相关学者研究成果，认为泥页岩沉积环境具有以下特点：

相对闭塞，深水、低水动力。美国著名的产气页岩——福特沃斯盆地密西西比系 Barnett 页岩是一套富含有机质的黑色页岩，沉积于狭长的深水前陆盆地(陡坡-盆地)的内海环境[7]，与开阔海少有水体交换且距物源区较远，相对闭塞。Bhattacharya J P (2009)和 Boggs S (1995)指出，大量的细粉砂和黏土等悬浮沉积物以及足够弱的水动力是形成泥页岩的重要条件[7] [8]。

诸多研究者[9]-[18]通过地化测试分析泥页岩，尤其是优质烃源岩的沉积环境，并尝试通过分析沉积物中有机硫化物古环境和古生态信息来反映细粒沉积环境[19]。刘传联[9]、朱光有[10]等通过对东营凹陷古近系碳酸盐岩样品碳、氧同位素组分的分析表明，沙一段和沙四段沉积时期的古东营湖均是封闭型湖泊。田景春、曾允孚[12]等在研究东营凹陷沙三段上部的泥岩过程普遍发现具代表低能环境的微细水平层理，认为其形成环境为半深湖。

还原、咸水环境。美国密西西比系 Barnett 页岩风暴浪基面及最小含氧量面之下为一贫氧-厌氧的环境。西弗吉尼亚纹层泥岩中含丰富的有机质和黄铁矿，指示了还原性沉积环境[19]。刘华等(2006)对胶莱盆地暗色泥岩的分布特征进行了相关研究，认为莱阳凹陷泥页岩形成于强还原、半咸水-咸水沉积环境[20]。王丽波、苏爱国等对青藏高原羌塘盆地中生界发育三套海相黑色泥页岩进行了研究，指出其形成环境为有机质比较丰富且易于保存的营养型还原性沉积环境[21]，以台地相为主，其次为盆地相和三角洲相。朱光有、金强[22]根据对东营凹陷中沙三中-沙三下泥岩段有机碳含量测定及古盐度计算，认为东营凹陷沙三下沉积时水体为微咸水-半咸水环境。

沉积速度缓慢的欠补偿盆地。朱光有(2004)认为东营凹陷沙四中亚段沉积时期湖盆处于封闭状态，沉积速度十分缓慢，盆地充填呈现出欠补偿状态，形成了以蒸发岩序列与深灰色泥岩、油页岩、软泥岩间互层的盐湖沉积体系[10]。

总体上看，具有生烃潜力的泥页岩一般分布在沉积速度缓慢(饥饿性沉积)盆地的沉积-沉降中心，沉积环境为深水、低水动力条件下的缺氧环境，包括浅海-深海陆棚相，台地相硅质、钙质黑色泥页岩和陆相的咸水-半咸水深湖-半深湖相以及海陆交互相中与煤层相伴生的碳质页岩。陆相断陷湖盆页岩等细粒沉积形成过程中物理、化学、生物等多重作用的复杂性，沉积环境受控因素多样[22] [23]，近些年随着半深湖-深湖页岩沉积环境的研究，细粒重力流被认为是深湖环境重要的沉积作用之一[24]。

2.2. 细粒沉积岩矿物组成

泥页岩中主要含有黏土矿物(高岭石、伊利石、蒙皂石等)，此外还含有碎屑矿物(石英、长石等)以及自生的方解石、石膏等[24]-[33]。大量统计表明，黏土矿物含量高的泥页岩塑性强；随着脆性矿物成分含量的增加，岩石的强度和脆性程度提高，细粒沉积岩层中裂缝的密度增大。

美国产气页岩中石英含量为 28%~52%，碳酸盐含量为 4%~16%，总脆性矿物含量为 46%~50%。福沃斯盆地 Barnett 页岩实为硅质泥岩，尤其下 Barnett 页岩地层中含有更多的硅质或钙质矿物，上 Barnett 页岩和下 Barnett 页岩均含有一些黄铁矿[34]-[37]；在福沃斯盆地 Barnett 页岩气产量最高的一套页岩中，石英质量分数为 45%，而黏土矿物质量分数只有 27%。

通过调研我国四川盆地志留系龙马溪组、松辽盆地白垩系青山口组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组以及泌阳凹陷核桃园组、东营凹陷沙河街组三段、渤南洼陷沙河街组三段、四段所发育的细粒沉积岩矿物组成特征，发现不同类型盆地中发育的细粒沉积岩在矿物组成上存在较大差异[38]-[44]。但多表现为脆性矿物含量较高，普遍含石英等特点。马文辛，刘树根等(2012)对四川盆地周缘下寒武统筇竹

寺组泥页岩储层的研究中发现, 筓竹寺组下部泥页岩矿物组成中石英和长石占绝大多数, 脆性矿物含量高, 其中隐晶质石英平均质量分数为 17.2% [43] [44]。济阳拗陷古近系三套泥页岩全岩矿物主要以碳酸盐为主, 其次为黏土矿物和石英, 普遍含有黄铁矿, 碳酸盐均以方解石为主。东营凹陷古近系泥页岩的全岩矿物组成主要为黏土矿物和碳酸盐, 普遍含有石英, 脆性矿物含量普遍高于黏土含量[45]; 渤南洼陷古近系沙一段、沙三下和沙四上亚段三套泥页岩全岩矿物组成均表现出低黏土、高脆性矿物的特征[25]。近些年关于页岩矿物组成研究集中在关于页岩中黏土矿物、自生石英及碳酸盐矿物成因研究[46]-[49]。

2.3. 页岩岩相的划分

岩相, 是根据其岩石学(物理的、化学的和生物的)特征与相邻单元进行区别的岩石单元。同一成因单元的不同部分, 也就是在同一亚环境或微环境的不同部位通常存在能量的高低差异, 因而发育不同的岩相[23]。有别于岩石, 岩相既反映现今的岩石组合面貌, 又体现一定的沉积环境, 是对沉积微相的进一步细分。因此, 任何能反映沉积环境因素的岩石学及古生物学标志均可作为岩相和类型的划分标志。

国外岩相研究多集中在海相、海陆过渡相泥页岩, 并通过原始沉积构造和生物扰动特征重建泥页岩沉积时的沉积条件[50]-[62]等, 分别以层理、结构、生物群、成分、成因及纹理、矿物成分等为依据, 对页岩进行岩相划分[50]-[61]。如 Jurgen Schieber (1989)提出页岩包含大量的纹理特征信息, 据此可以将美国中元古代 Newland 地层中页岩划分为条纹页岩、灰色白云页岩、钙质粉砂质页岩、碳质颗粒页岩、碳质漩涡状页岩、粉砂质页岩等岩相。国内学者对于岩相的划分主要依赖于岩性和岩石构造特征。四川盆地筓竹寺组由多种岩相组成, 主要为黏土 - 粉砂级细粒沉积, 马文辛等(2012)根据矿物成分、碎屑、生物和结构特征不同, 将四川盆地筓竹寺组下部分为富有机质(碳质)非纹层状泥页岩、钙质泥岩、纹层状粉砂泥岩或泥质粉砂岩、(含)硅质泥岩、粉砂质灰岩等 7 种主要岩相[43]。

相较于海相页岩, 湖相深水细粒沉积岩在矿物组成组构、沉积构造等方面更为复杂, 中国陆相湖盆页岩纹层结构发育, 发育有富凝灰质纹层、长英质纹层(粉砂质)、富有机质纹层、碳酸盐质纹层、生物纹层、粘土纹层等, 不仅不同盆地岩相存在差异/同一盆地的不同区带不同层系页岩岩相也千差万别[62] [63]。针对该特点, 近几年, 姜在兴等进行了有益的探讨和研究[41] [60] [64] [65], 多在沉积成因限制下, 依据矿物成分、岩石类型、沉积构造、颜色、有机质含量、其他混入物等特征, 对岩相进行大类及亚类的划分(表 1), 并进行测井识别, 开展岩相垂向演化及平面展布特征研究。

不同沉积环境, 尤其是水介质环境发育的主要岩相类型存在差异[62] [66]-[69], 淡水湖盆形成的页岩层系以长英质 - 黏土质页岩为主要岩相, 如松辽盆地上白垩统青一段和鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩; 而咸水湖盆陆相页岩以富碳酸盐 - 蒸发岩类岩相为主, 济阳拗陷古近系沙河街组是典型的实例。近些年, 部分专家针对济阳泥页岩富碳酸盐基本特点, 提出了基于岩石组分、沉积构造、结晶程度和有机质丰度“三端元四要素”岩相划分方案(图 1), 依据三端元矿物类型和含量, 将页岩划分为碳酸盐类页岩(I)、粘土类页岩(II)、长英类页岩(III)及混合类页岩(IV), 再依据沉积构造、有机质含量及碳酸盐矿物晶体形貌进行岩相类型细分。将济阳拗陷古近系泥页岩岩相细分为 16 种, 其中富有机质纹层状碳酸盐页岩和混合页岩最为发育(图 1), 在水体相对较浅的南部缓坡带, 厚度 30~50 m 的小层内, 灰色的富有机质纹层状碳酸盐页岩厚度占比超过 50%, 最多达到 90%。发育受气候、物源和水介质控制, 富有机质纹层状岩相受季节性气候控制明显, 是内源生物化学作用和外源机械絮凝作用交替耦合的产物, 奠定了页岩岩相预测的理论依据。近几年, 随着陆相页岩油勘探突破, 不同类型页岩油产能突破井段往往是两种或者多种岩相的组合[45] [46], 岩相组合的概念开始逐渐得到应用。

Table 1. Summary table of lithofacies classification scheme for fine grained sedimentary rocks
表 1. 细粒沉积岩岩相划分方案汇总表

作者	研究对象	划分依据	岩性、岩相类型
邓宏文(1998)	东营凹陷古近系泥页岩	沉积构造	黑页岩、水平纹层粉砂质泥岩、递变纹层粉砂质泥岩、钙片黑页岩、钙质纹层页岩
Robert I G. Loucks Stephen I C. Ruppel (2007)	Fort Worth 盆地 Barnett 页岩	结构、层理生物群	含条带硅质页岩、含泥质夹层的灰质页岩、含生物骨架残骸的灰岩
Hickey J J, Henk B.	密西西比 Barnett 页岩	矿物成分、生物化石	富有机质页岩、含生物化石页岩、白云石结晶页岩、含白云石页岩、凝结碳酸盐岩、磷灰石、
王冠民(2011)	济阳拗陷古近系泥页岩	纹层组份	黑页岩、钙质纹层页岩、油页岩、纹层状页岩、纹层状灰岩、钙质页岩、泥页岩
Trabucho-Alexandre J (2012)	荷兰中央地堑侏罗纪早期 黑色页岩	结构、沉积构造、 矿物组成	生物扰动粉砂质泥岩、粉砂质泥岩、薄层生物扰动泥岩、薄层粉砂质泥岩、薄层生物扰动粉砂质泥岩、薄层泥岩、波状纹层泥岩、薄层波状纹层泥岩
JIUYI WANG (2012)	上新世 - 早更新世	沉积构造、结构	灰 - 黑色纹层状泥岩相、灰色块状泥岩和粉砂岩相、层状盐岩、松散泥质盐岩、黄褐色含盐粉砂岩和泥岩相
Guochang Wang Timothy R. Carr (2013)	阿巴拉契亚中泥盆 纪马塞勒斯页岩	有机碳含量、 矿物含量	富有机质硅质页岩、富有机质混合页岩、富有机质泥岩、灰色硅质页岩、灰色混合页岩、灰色泥岩、石灰岩
姜在兴(2013, 2023)	我国东部湖相 深水细粒沉积岩	有机碳含量、 矿物含量	高有机质灰岩、高有机质黏土岩、中有机质黏土岩、中有机质灰岩、低有机质灰岩低有机质黏土岩
梁超, 姜在兴(2012)	四川盆地五峰组 - 龙马溪组页岩	矿物成分	碳质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩、普通页岩
付金华(2013)	鄂尔多斯盆地中部 三叠系延长组长 7 油层组深水沉积岩	粒度、沉积结构与 构造、有机地球化学	油页岩岩相、暗色泥岩岩相、砂质泥岩与泥质砂岩岩相和砂岩岩相
王永诗(2013)	济阳拗陷沾化凹陷 古近系泥页岩	岩石结构、构造 特征和成分特征	纹层状泥质灰岩相、层状泥质灰岩相、层状灰质泥岩相和一些过渡型岩相
张顺, 陈世悦(2014)	东营凹陷沙三下 - 沙四上细粒沉积岩	矿物成分、沉积 构造、颜色、 有机质含量	富有机质纹层状灰岩、富有机质夹层状灰岩、中有机质纹层状细粒混合沉积岩、富有机质层状黏土岩、贫有机质块状细粒混合沉积岩
刘群, 袁选俊(2015)	鄂尔多斯盆地 7 油层组黏土岩	岩石组分、纹层 结构、有机碳含 量、沉积结构	块状泥岩、粒序层理泥岩、波状纹层页岩、平直纹层页岩、似块状页岩
刘惠民(2023)	济阳拗陷沙四上 - 沙三下页岩	岩石组分、沉积 构造、结晶程度 和有机质丰度	富有机质纹层状碳酸盐页岩相, 富有机质层状碳酸盐页岩相, 富有机质纹层状灰质混合页岩相, 富有机质纹层状黏土质混合页岩相, 富有机质层状长英质混合页岩相, 富有机质纹层状黏土页岩相等
赵帅等(2024)	四川盆地红星地区二叠系	有机碳含量、 矿物组成	高碳高硅类, 高碳低硅类, 低碳高硅类, 高黏土类和灰质混合类共 5 种岩相类型

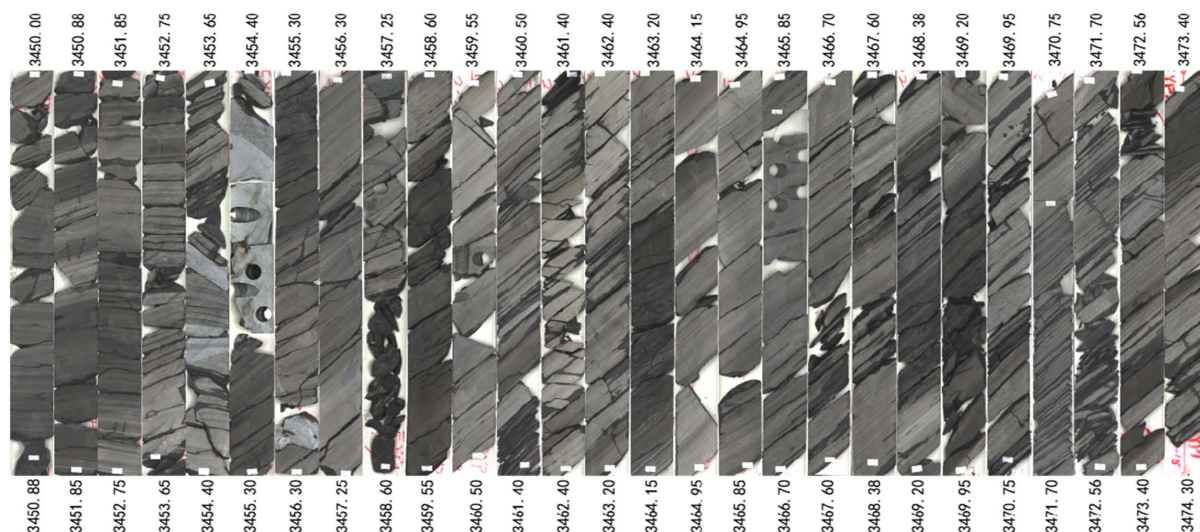


Figure 1. Characteristics of shale core from Sha-4 in FYP1 well, Jiyang depression
图 1. 济阳坳陷 FYP1 井沙四上页岩岩心特征

3. 页岩储层孔隙类型及表征

泥页岩储层物性普遍较差，空气渗透率 <1 mD，孔隙度 $<10\%$ ，具有低孔特低渗的特点[70]-[74]。传统粗碎屑储层的研究在储集空间及成因机理等方面已经较为成熟，泥页岩储层的研究起步较晚，成为近几年非常规油气研究中的一个热点，集中在物性、储集空间类型及表征，国内的研究近两年集中在储层孔隙类型分类及微观结构等方面(表 2)。一般将细粒沉积岩的储集空间分为裂缝和基质孔隙两大类，不同尺度孔隙和裂缝共同构成了页岩储集空间[63] [74]，以纳米 - 微米级的基质孔隙为主。

前人的研究显示不同盆地页岩沉积组分和成岩作用差异使得页岩储集空间发育特征复杂且多变[63] [74]-[77]，页岩微观孔隙和裂缝特征表现出强烈非均质性[78] [79]，区域性的应力变化和构造活动导致页岩宏观裂缝发育的同时也通过影响成岩流体活动，改变了微观孔隙发育和保存特征[80]-[85]。

Kitty L. Milliken, William L. Esch, Robert M. Reed (2012)认为泥页岩中现存孔隙主要是次生孔隙，主要分为有机孔隙和无机孔隙。无机孔隙指基质孔隙(包括裂缝)、矿物间隙和无机矿物粒内孔隙；有机孔隙(pores within organic matter)为有机质内部的孔隙，是由固体干酪根转化为烃类流体而在干酪根内部形成的孔隙。干酪根的生烃作用能使有机质本身产生 5~200 nm 左右的纳米级孔隙，因此，有机孔隙对页岩气的储集能力具有重要影响。朱日房，张林晔等(2012)根据干酪根生烃过程中的体积变化，讨论了渤海湾盆地东营凹陷沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩生烃演化对储集空间的贡献[72]，研究认为高丰度烃源($\text{TOC} > 4.0\%$)，在演化程度较高的条件下生烃转化能形成 4% 以上的次生孔隙。

对于有机孔隙的研究，部分国外学者通过显微照片进行定性研究[80]，范昌育(2010)等根据质量平衡原理计算有机生烃孔隙(intraparticle organic-matter pores created during hydrocarbon maturation)的大小[76] [80]；Loucks R G, Reed R M (2009)等学者把统计学与显微照片相结合，估算有机质中孔隙的大小[60]。邹才能(2011)等首次应用 Nano-CT 成像技术研究泥页岩储层中纳米级孔隙结构，该技术可有效表征油气储层内部纳米级孔隙的变化规律、孔径大小、形状等[75]。Roger M. Slatt, Neal R. O'Brien 等对泥页岩中微孔隙的类型做了归纳总结，主要包括：黏土矿物晶间孔、有机质内微孔隙、粪球粒内孔隙、生物碎屑内孔隙、颗粒间微孔。建议根据国际纯粹和应用化学联合会的分类法，将纳米孔称为微孔。在孔隙微观结构研究的方法技术上，目前常用的主要有压汞法、氩离子抛光技术、扫描电镜观察技术及低温氮气吸附

等。相比传统压汞法，氮气吸附法在表征孔结构时更能得到微观结构的统计信息和总体特征，在海相页岩气储层的研究中得到了广泛应用。

Table 2. Pore types in fine-grained sedimentary reservoirs
表 2. 细粒沉积岩储层孔隙类型

	孔隙类型	作者	研究地区及层位
成因类型	粒间孔隙、粒内孔隙、有机质孔隙	Loucks, 2009	Barnett 页岩
	黏土絮体间孔隙、粪球粒内孔隙、化石碎屑内孔隙、颗粒内孔隙、微裂缝通道、有机孔隙	Slatt, 2011	Barnett 页岩和 Woodford 页岩
	残余原生粒间孔、晶间孔隙、矿物铸模孔、次生溶蚀孔、黏土矿物晶间孔、有机质孔	魏祥峰等, 2013	四川盆地龙马溪组页岩
	粒间微孔、晶间溶孔、黏土矿物晶间孔隙、有机质孔隙	张焯毓等, 2013	鄂尔多斯盆地长 7 油组页岩
	粒间孔隙、晶间孔隙、溶蚀孔隙、有机质孔隙	姜在兴等, 2014	济阳坳陷沙河街组三段、四段页岩
	晶间孔、溶蚀孔隙、生物碎屑体内微孔隙、有机质孔隙	康志宏等, 2014	柴北缘中侏罗统大煤沟组七段泥页岩
孔隙大小	黏土矿物晶间孔隙、黄铁矿晶间孔隙、溶蚀孔隙、有机质孔隙	李占东等, 2015	松辽盆地北部青山口组
	微孔(<2 nm)、中孔(2 nm~50 nm)、宏孔(>50 nm)	IUPAC	
	微微孔(<1 nm)、纳米孔(1 nm~1 μm)、小孔(1 μm~62.5 μm)、中孔(62.5 μm~400 μm)、大孔(400 μm~256 μm)	Loucks, 2012	
	微孔(<10 nm)、过渡孔(10 nm~100 nm)、中孔(100 nm~1 μm)、大孔(1 μm~10 μm)、裂隙(>10 μm)	钟太贤, 2012	南方古生界页岩
	微孔(<10 nm)、小孔(10 nm~100 nm)、中孔(100 nm~1 μm)、大孔(>1000 nm)	魏祥峰等, 2013	
	微孔(<10 nm)、中孔(10 nm~1000 nm)、宏孔(>1000 nm)	冉波等, 2013	四川盆地南缘骑龙村剖面五峰-龙马溪组

勘探实践证明，裂缝不仅为页岩油气提供储集空间，也可为页岩油气生产提供了运移通道[81] [82]。对于济阳坳陷等陆相页岩，无机孔隙和微裂缝形成的孔，缝网络体系是页岩油赋存的有利储集空间[82]。从裂缝的成因角度，分为构造缝和非构造缝 2 大类。构造缝包括剪切裂缝及张剪性裂缝、滑脱裂缝、构造压溶缝合线、垂向载荷裂缝、垂向差异载荷裂缝；非构造缝包括成岩收缩裂缝、成岩压溶缝合线、超压裂缝、热收缩裂缝、溶蚀裂缝、风化裂缝等。泥页岩中最常见的裂缝包括构造缝(张性缝和剪性缝)、层间页理缝、成岩收缩微裂缝和异常压力缝等。

尽管人们普遍认为裂缝是泥页岩最主要的储集空间，但天然裂缝对页岩气储层的重要性依然存在争议。Montgomery (2005)对 Barnett 页岩进行了相关研究，发现在断层发育区裂缝密度很大，但是几乎全部被碳酸盐岩所充填，而且基质中的孔隙也会被方解石部分充填[26]。

含油气盆地的页岩针对济阳坳陷古近系泥页岩储层特征，部分学者进行了研究。邓美寅，梁超等(2012)对济阳坳陷渤南洼陷沙三下亚段泥页岩储集空间进行了研究，认为该研究区泥页岩储集空间中裂缝包括构造裂缝、层间微裂缝、超压破裂缝；孔隙主要为微孔隙，包括黄铁矿晶间孔、黏土矿物晶间孔、方解石晶间孔，总体上来讲，储集空间以构造张裂缝、层间微裂缝、黏土矿物晶间孔及方解石晶间孔为主导

[82]-[84]。济阳拗陷细粒沉积岩中砂泥岩互层频繁,粉砂或者砂质夹层孔隙可以有效改善泥页岩储层储集性能[85]。张林晔,李政等(2012)认为东营凹陷泥页岩碳酸盐矿物含量较高,且泥页岩有机质含量较高,有利于裂缝的形成。大量发育的微裂缝为页岩气的赋存提供了有效的储集空间。久凯(2012)对渤海湾盆地济阳拗陷沙三段富有机质泥页岩进行了研究,发现页岩储层裂缝类型多样,砂泥岩互层频繁,粉砂或砂质夹层孔隙可以有效改善页岩储层储集性能[86],这优于美国海相页岩地层。

目前,针对陆相断陷盆地页岩,目前集成了核磁共振冻融、FIB-FESEM、X射线小角散射测试等多尺度孔缝系统表征技术,刘惠民等认为东营凹陷富碳酸盐纹层状页岩岩相储集空间由基质孔隙、基质微裂缝、层理缝和跨层微裂缝构成,形成多级孔缝网络体系[74][78][82]。不同岩相中出现黏土矿物孔缝和碳酸盐矿物孔缝交替主导现象,孔隙尺度从亚纳米级-微米级均有发育。

4. 结论与展望

相对于海相,湖相沉积类型对气候变迁的响应更为敏感,湖泊沉积物记录所反映的环境信息在不同尺度下存在差异,因此对湖相细粒沉积岩岩相的划分要在海相泥页岩划分基础上更加细致和系统。岩相是由一定岩石特征(颜色、成分、结构、构造、成层性等)所限定的岩石单位。反应了同一亚环境或微环境的不同部位能量的高低差异。岩相命名及划分应充分考虑以上因素。便于微相的命名划分和储层研究。

由于泥页岩的测录井、地震响应不敏感,制约了甜点层段优选的精度,高频层序格架下的页岩岩相类型、岩相组合叠置样式与演化规律尚不明确,多物质来源环境下的页岩沉积成因模式尚未建立,明确天文旋回对页岩岩相的控制作用是下一步研究的热点之一。建立页岩沉积相理论体系,解剖页岩从盆地边缘到中心的一体化发育演化模式,是实现页岩有效地质预测的前提。关于沉积成因机制,比如细粒沉积物的来源、细粒沉积物在水体中混合沉积作用类型、方式及受哪些因素控制也是未来研究的重点方向之一。关于储集空间,多尺度全息表征孔隙和裂缝的基础上,需要进一步探讨孔缝发育机制,建立不同盆地类型、不同沉积环境页岩储集空间的发育烟花模式。

参考文献

- [1] 刘惠民. 济阳拗陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 73-87.
- [2] 孙龙德, 方朝亮, 李峰, 朱如凯, 张云辉, 袁选俊, 贾爱林, 高兴军, 苏玲. 油气勘探开发中的沉积学创新与挑战[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 129-136.
- [3] 康玉柱. 中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 1-5.
- [4] 张金川, 金之钧, 袁明生, 等. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
- [5] 李玉喜, 聂海宽, 龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 115-118, 152-153.
- [6] 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 等. 页岩油气科技进步, 发展战略及政策建议[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1675-1686.
- [7] Tilford, M.J. and Stewart, M.R. (2011) Barnett Shale and Atoka Conglomerate: The Next Horizontal Oil and Gas Play in Oklahoma. *Oil and Gas Exploration*, **62**, 10-31.
- [8] Bhattacharya, J.P. and MacEachern, J.A. (2009) Re-Evaluating Depositional Models for Shelf Shales. *AAPG International Conference and Exhibition*, Calgary, 12-15 September 2010, 81-83.
- [9] Boggs, S. (1995) *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Prentice Hall.
- [10] 刘传联, 舒小辛, 刘志伟. 济阳拗陷下第三系湖相生油岩的微观特征[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 293-297.
- [11] 孔凡仙, 张林晔, 周文, 等. 济阳拗陷优质烃源岩层地球化学特征及成烃潜力[J]. 复式油气田, 2000, 7(3): 13-16.
- [12] 王慧中, 盛蔚, 舒小辛, 等. 东营凹陷牛 38 井沙三中上段红灰韵律层中的环境信息[J]. 沉积学报, 1996, 14(1): 47-58.
- [13] 朱光有, 金强. 东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 506-512.

- [14] 刘传联, 徐金鲤, 汪品先. 藻类勃发: 湖相油源岩形成的一种重要机制[J]. 地质论评, 2001, 47(2): 207-210.
- [15] 朱光有, 戴金星, 张水昌, 等. 中国含硫化氢天然气的研究及勘探前景[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 1-4.
- [16] 田景春, 曾允孚. 东营凹陷西部沙河街组三段上部泥岩中白云岩夹层成因研究[J]. 矿物岩石, 1997, 17(4): 62-68.
- [17] 刘立, 王东坡. 湖相油页岩的沉积环境及其层序地层学意义[J]. 石油实验地质, 1996, 18(3): 311-316.
- [18] Nuhfer, E.B. and Cluff, R.M. (1981) Mudrock Fabrics and Their Significance; Discussion and Reply. *Journal of Sedimentary Research*, **51**, 1027-1031. <https://doi.org/10.1306/212f7e0a-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- [19] Yue, H., Horsfield, B., Schulz, H., Yang, S., Vieth-Hillebrand, A. and Poetz, S. (2023) Preservation of Biotic and Palaeoenvironmental Signatures in Organosulfur Compounds of Immature Fine-Grained Sedimentary Rocks. *International Journal of Coal Geology*, **265**, Article ID: 104168. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104168>
- [20] 刘华, 李凌, 吴智平. 胶莱盆地烃源岩分布及有机地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 574-580.
- [21] 王丽波, 苏爱国, 郑有业, 等. 羌塘盆地中生界海相黑色泥页岩特征及页岩气远景区预测[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 264-279.
- [22] 施振生, 邱振, 董大忠, 等. 四川盆地巫溪 2 井龙马溪组含气页岩细粒沉积纹层特征[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 339-348.
- [23] 邹才能, 冯有良, 杨智, 等. 中国湖盆细粒重力流沉积作用及其对页岩油“甜点段”发育的影响[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 883-897.
- [24] 张善文, 王永诗, 张林晔, 李政, 朱家俊, 巩建强, 郝运轻. 济阳拗陷渤南洼陷页岩油气形成条件研究[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 49-55, 63.
- [25] 朱日房, 张林晔, 李政, 李钜源, 王秀红, 张蕾. 沾化凹陷渤南洼陷沙三段泥页岩油气勘探前景分析[C]/浙江省国土资源厅, 浙江省地质学会. 华东六省一市地学科技论坛论文集. 杭州: 浙江省地质学会, 2011: 4.
- [26] 久凯, 丁文龙, 黄文辉, 李超. 渤海湾盆地济阳拗陷沙三段页岩气地质条件分析[J]. 大庆石油学院学报, 2012, 36(2): 65-70, 80, 127.
- [27] 张顺, 刘惠民, 张鹏飞, 李军亮, 等. 东营凹陷中低成熟度富碳酸盐页岩地质特征——以牛庄洼陷沙四段上亚段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1138-1151.
- [28] 王冠民, 钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(1): 43-48.
- [29] 王冠民. 古气候变化对湖相高频旋回泥岩和页岩的沉积控制——以济阳拗陷古近系为例[D]: [博士学位论文]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2006.
- [30] 王永诗, 李政, 巩建强, 等. 济阳拗陷页岩油气评价方法——以沾化凹陷罗家地区为例页岩油气储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 83-91.
- [31] 李志明, 余晓露, 徐二社, 等. 渤海湾盆地东营凹陷有效烃源岩矿物组成特征及其意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 270-275.
- [32] 李钜源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 616-620.
- [33] Loucks, R.G. and Ruppel, S.C. (2007) Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and Depositional Setting of a Deep-Water Shale-Gas Succession in the Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, **91**, 579-601. <https://doi.org/10.1306/11020606059>
- [34] Milliken, K.L., Esch, W.L., Reed, R.M. and Zhang, T. (2012) Grain Assemblages and Strong Diagenetic Overprinting in Siliceous Mudrocks, Barnett Shale (Mississippian), Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, **96**, 1553-1578. <https://doi.org/10.1306/12011111129>
- [35] Abouelresh, M.O. and Slatt, R.M. (2012) Lithofacies and Sequence Stratigraphy of the Barnett Shale in East-Central Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, **96**, 1-22. <https://doi.org/10.1306/0426110116>
- [36] Curtis, M.E. (2010) Structural Characterization of Gas Shales on the Micro- and Nano-Scales. *Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference*, Alberta, 19-21 October 2010, SPE-137693-MS. <https://doi.org/10.2118/137693-ms>
- [37] 武景淑, 于炳松, 张金川, 等. 渝东南渝页 1 井下志留统龙马溪组页岩孔隙特征及其主控因素[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 260-269.
- [38] 赵迪斐, 郭英海, 解德录, 等. 龙马溪组下部页岩储层孔隙结构特征与评价方案[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 452-457.
- [39] 李占东, 王义军, 胡慧婷, 等. 松辽盆地北部青山口组一段泥页岩储集层特征[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(1): 20-24.

- [40] 张焯毓, 周文, 唐瑜, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 油层组页岩储层特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 671-676.
- [41] 梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 691-698.
- [42] 马文辛, 刘树根, 黄文明, 曾祥亮, 张长俊, 王佳. 四川盆地周缘筇竹寺组泥页岩储层特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 182-189.
- [43] 智慧文, 栗涵洁, 权子涵. 井研地区筇竹寺组页岩储层水平井钻井井壁稳定性评价[J]. 中外能源, 2024, 29(3): 62-66.
- [44] 刘惠民, 包友书, 张守春, 等. 陆相富碳酸盐页岩结构特征与页岩油可动性——以济阳拗陷古近系沙河街组页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2023(6): 1150-1161.
- [45] 滕建彬, 邱隆伟, 张守鹏, 等. 济阳拗陷古近系沙河街组湖相富有机质页岩白云石成因及成岩演化[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1080-1093.
- [46] 刘国恒, 黄志龙, 郭小波, 刘再振, 高潇玉, 陈常超, 张成林, 王昕. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷中二叠统芦草沟组泥页岩层系 SiO₂ 赋存状态与成因[J]. 地质学报, 2016, 90(6): 1220-1235.
- [47] Wang, X., Kong, X., Liu, Q., Li, K., Jiang, Z., Gai, H., *et al.* (2023) Effect of Clay Minerals on Carbonate Precipitation Induced by Cyanobacterium *synechococcus* sp. *Microbiology Spectrum*, **11**, e00363-23. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00363-23>
- [48] Egenhoff, S.O. and Fishman, N.S. (2013) Traces in the Dark—Sedimentary Processes and Facies Gradients in the Upper Shale Member of the Upper Devonian-Lower Mississippian Bakken Formation, Williston Basin, North Dakota, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, **83**, 803-824. <https://doi.org/10.2110/jsr.2013.60>
- [49] Trabuco-Alexandre, J., Dirkx, R., Veld, H., Klaver, G. and de Boer, P.L. (2012) Toarcian Black Shales in the Dutch Central Graben: Record of Energetic, Variable Depositional Conditions during an Oceanic Anoxic Event. *Journal of Sedimentary Research*, **82**, 104-120. <https://doi.org/10.2110/jsr.2012.5>
- [50] Montgomery, S.L., Jarvie, D.M., Bowker, K.A. and Pollastro, R.M. (2005) Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, North-Central Texas: Gas-Shale Play with Multi-Trillion Cubic Foot Potential. *AAPG Bulletin*, **89**, 155-175. <https://doi.org/10.1306/09170404042>
- [51] Curtis, J.B. (2002) Fractured Shale-Gas Systems. *AAPG Bulletin*, **86**, 1921-1938. <https://doi.org/10.1306/61eeddb-e173e-11d7-8645000102c1865d>
- [52] Hickey, J.J. and Henk, B. (2007) Lithofacies Summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 T.P. Sims Well, Wise County, Texas. *AAPG Bulletin*, **91**, 437-443. <https://doi.org/10.1306/12040606053>
- [53] Potter, P.E., Maynard, J.B. and Depetris, P.J. (2005) Mud and Mudstones: Introduction and Overview. Springer Science & Business Media.
- [54] Bowker, K.A. (2007) Barnett Shale Gas Production, Fort Worth Basin: Issues and Discussion. *AAPG Bulletin*, **91**, 523-533. <https://doi.org/10.1306/06190606018>
- [55] Loucks, R.G., Reed, R.M., Ruppel, S.C. and Jarvie, D.M. (2010) Morphology, Genesis, and Distribution of Nanometer-Scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *Journal of Sedimentary Research*, **80**, 919-932.
- [56] Stow, D.A.V. and Bowen, A.J. (1980) A Physical Model for the Transport and Sorting of Fine-Grained Sediment by Turbidity Currents. *Sedimentology*, **27**, 31-46. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1980.tb01156.x>
- [57] Potter, P.E., Maynard, J.B. and Pryor, W.A. (1984) *Sedimentology of Shale*. Springer.
- [58] Schieber, J. (1999) Distribution and Deposition of Mudstone Facies in the Upper Devonian Sonyea Group of New York. *Journal of Sedimentary Research*, **69**, 909-925. <https://doi.org/10.2110/jsr.69.909>
- [59] 付金华, 邓秀芹, 楚美娟, 张海峰, 李士祥. 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.
- [60] 王冠民. 济阳拗陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 666-671, 680.
- [61] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [62] 刘惠民, 王勇, 李军亮, 等. 济阳拗陷始新统页岩岩相发育主控因素及分布特征[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 752-767.
- [63] 刘惠民, 张顺, 王学军, 张鹏飞, 李军亮, 王勇, 魏晓亮, 银燕, 朱德燕. 陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征: 以济阳拗陷东营凹陷沙四上亚段页岩为例[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 30-48.

- [64] 张顺, 陈世悦, 鄢继华, 等. 东营凹陷西部沙三下亚段-沙四上亚段泥页岩岩相及储层特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 320-332.
- [65] 刘群, 袁选俊, 林森虎, 等. 湖相泥岩, 页岩的沉积环境和特征对比——以鄂尔多斯盆地延长组 7 段为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 531-540.
- [66] 赵帅, 刘皓天, 姜新雨, 等. 四川盆地红星地区二叠系页岩岩相及其微观孔隙结构特征[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 994-1006.
- [67] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
- [68] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.
- [69] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.
- [70] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规-非常规油气形成分布, 资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 13-25.
- [71] Xu, S., Gou, Q., Hao, F., Zhang, B., Shu, Z., Lu, Y., et al. (2020) Shale Pore Structure Characteristics of the High and Low Productivity Wells, Jiaoshiba Shale Gas Field, Sichuan Basin, China: Dominated by Lithofacies or Preservation Condition? *Marine and Petroleum Geology*, **114**, Article ID: 104211. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104211>
- [72] Xu, S., Hao, F., Shu, Z., Zhang, A. and Yang, F. (2020) Pore Structures of Different Types of Shales and Shale Gas Exploration of the Ordovician Wufeng and Silurian Longmaxi Successions in the Eastern Sichuan Basin, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **193**, Article ID: 104271. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2020.104271>
- [73] Yang, C., Zhang, J., Tang, X., Ding, J., Zhao, Q., Dang, W., et al. (2017) Comparative Study on Micro-Pore Structure of Marine, Terrestrial, and Transitional Shales in Key Areas, China. *International Journal of Coal Geology*, **171**, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.12.001>
- [74] Zhu, H., Ju, Y., Huang, C., Han, K., Qi, Y., Shi, M., et al. (2019) Pore Structure Variations across Structural Deformation of Silurian Longmaxi Shale: An Example from the Chuandong Thrust-Fold Belt. *Fuel*, **241**, 914-932. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.108>
- [75] Zhang, S., Liu, H., Wang, M., Liu, X., Liu, H., Bao, Y., et al. (2019) Shale Pore Characteristics of Shahejie Formation: Implication for Pore Evolution of Shale Oil Reservoirs in Dongying Sag, North China. *Petroleum Research*, **4**, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2019.01.002>
- [76] 邹才能, 朱如凯, 白斌. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [77] 范昌育, 王震亮. 页岩气富集与高产的地质因素和过程[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 465-469.
- [78] 李文浩, 卢双舫, 张鹏飞, 等. 江汉盆地新沟嘴组页岩油储层储集空间定量表征[C]//2014 年中国地球科学联合学术年会——专题 57: 盆地动力学与非常规能源论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2014: 2513-2515.
- [79] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
- [80] 刘圣鑫, 钟建华, 马寅生, 等. 柴东石炭系页岩微观孔隙结构与页岩气等温吸附研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015(1): 33-42.
- [81] Wang, F.P., Reed, R.M., John, A. and Katherine, G. (2009) Pore Networks and Fluid Flow in Gas Shales. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, 4-7 October 2009, SPE-124253-MS. <https://doi.org/10.2118/124253-ms>
- [82] 丁文龙, 王垚, 王生晖, 等. 页岩储层非构造裂缝研究进展与思考[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 297-314.
- [83] 刘惠民. 济阳拗陷古近系页岩油地质特殊性及其勘探实践——以沙河街组四段上亚段-沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(5): 581-594.
- [84] 孙耀庭. 沾车地区泥岩裂缝成因分析[J]. 地质科技情报, 2014, 33(4): 46-50.
- [85] 邓美寅, 梁超. 渤海洼陷沙三下亚段泥页岩储集空间研究: 以罗 69 井为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 173-181.
- [86] 慈兴华, 冀登武, 陈汉林, 等. 济阳拗陷四凹洼陷泥页岩裂缝储层预测研究[J]. 高校地质学报, 2002, 8(1): 96-105.