

文章编号: 1671-1505(2025)01-0055-17 DOI: 10.7605/gdxb.2025.01.003

细粒沉积岩优质储集层发育主控因素分析： 以渤海湾盆地沾化凹陷为例*

林兴悦^{1,2} 朱筱敏^{1,2} 王晓琳^{1,2} 张美洲^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要 为了深化对湖相细粒沉积岩储集层的认识, 以渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段(Es3L)为研究对象, 利用岩心描述、薄片鉴定、扫描电镜观察、物性分析和测井曲线, 揭示了储集层特征、分布规律及其主控因素。基于矿物组成、沉积构造和有机质含量, 将渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩划分为 6 类岩相: 富有机质纹层状灰质细粒混积岩(LF1)、富有机质纹层状长英质细粒碳酸盐岩(LF2)、富有机质层状灰质细粒混积岩(LF3)、富有机质层状/块状长英质细粒碳酸盐岩(LF4)、富有机质层状含长英质细粒碳酸盐岩(LF5)、含有机质块状含长英质细粒碳酸盐岩(LF6)。储集层的主要储集空间为粒间孔、晶间孔、溶蚀孔和层间微裂缝, 储集层孔隙度主要介于 0.67%~5.56%之间(平均值为 4.93%), 渗透率主要介于 $(0.02 \sim 4.87) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间(平均值为 $0.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩储集层分布的主控因素包括岩相、沉积环境、成岩作用和有机质热演化。渤南洼陷 Es3L 的中下部的陆源输入水平低、水体盐度大、水体分层性强, 主要发育岩相 LF2 和 LF4, 容易发育 I 类和 II 类优质储集层。渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩储集层处于中成岩 A 阶段, 黏土矿物转化作用、溶蚀作用、重结晶和白云石化以及有机质热演化产生次生孔缝, 改善了储集层物性。

关键词 渤南洼陷 沙三下亚段 湖相细粒沉积岩 优质储集层 主控因素 分布规律

第一作者简介 林兴悦, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 从事沉积学及古地理学研究。E-mail: 2320147849@qq.com。

通讯作者简介 朱筱敏, 男, 1960 年生, 教授、博士生导师, 从事沉积地质学和层序地质学方面的教学科研工作。E-mail: xmzhu@cup.edu.cn。

中图分类号: P618.130 文献标志码: A

Reservoir characteristics and distribution of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: a case study from Zhanhua sag, Bohai Bay Basin, China

LIN Xingyue^{1,2} ZHU Xiaomin^{1,2} WANG Xiaolin^{1,2} ZHANG Meizhou^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract In order to deepen the understanding of lacustrine fine-grained sedimentary rock reservoirs, this paper takes the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation (Es3L) of Bonan

* 国家自然科学基金项目(编号: 42272110)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 42272110)]

收稿日期: 2023-11-16 改回日期: 2024-06-03

subsag in Zhanhua sag, Jiyang depression, Bohai Bay Basin as the research object, and uses core description, thin section identification, scanning electron microscope observation, physical property analysis and logging curve to reveal the reservoir characteristics, main controlling factors and distribution patterns. Based on mineral composition, sedimentary structure and organic matter content, fine-grained sedimentary rocks in Es3L are divided into six lithofacies: organic-rich laminated gray fine-grained mixed rock (LF1), organic-rich laminated felsic fine-grained carbonate rock (LF2), organic-rich layered gray fine-grained mixed rock (LF3), organic-rich layered/massive felsic fine-grained carbonate rock (LF4), organic-rich layered felsic fine-grained carbonate rock (LF5), organic-rich massive felsic fine-grained carbonate rock (LF6). The main reservoir spaces of the reservoir are intergranular pores, intergranular pores, dissolution pores, and interlayer micro-fractures. The reservoir porosity mainly ranges from 0.67% to 5.56%, with an average of 4.93%. The permeability mainly ranges from $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ to $4.87 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (average of $0.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$). The dominant control factors for the distribution of the Es3L fine-grained reservoir development include lithofacies, sedimentary environment, diagenesis and thermal evolution of organic matter. In the middle and lower part of the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation, the amount of terrestrial input is low, the water salinity is high, and the water stratification is strong. The main lithofacies area LF2 and LF4, which are prone to the development of Class I and Class II high-quality reservoirs. The fine-grained reservoirs in Es3L are in the intermediate diagenetic stage A. The transformation of clay minerals, dissolution, recrystallization and dolomitization, as well as the thermal evolution of organic matter produce secondary pores and fractures, which improve the physical properties of the reservoir.

Key words Bonan subsag, the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation, lacustrine fine-grained sedimentary rocks, high quality reservoir, main controlling factors, regularity of distribution

About the first author LIN Xingyue, born in 1999, is a master degree candidate in China University of Petroleum (Beijing). She is engaged in sedimentology and palaeogeography research. E-mail: 2320147849@qq.com.

About the corresponding author ZHU Xiaomin, born in 1960, is a professor and doctoral supervisor of College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in teaching and researches on sedimentary geology and sequence stratigraphy. E-mail: xmzhu@cup.edu.cn.

1 概述

粒径小于 $62.5 \mu\text{m}$ 的沉积物称为细粒沉积物。细粒沉积物的含量超过 50% 的沉积岩称为细粒沉积岩 (Macquaker and Adams, 2003; Aplin and Macquaker, 2011; 姜在兴等, 2013), 赋存于细粒沉积岩层段的石油资源称为页岩油 (张建国等, 2021, 2022)。细粒物质的成分包括长石、石英、碳酸盐矿物、黏土矿物和其他自生矿物, 来源则包括陆源输入、盆地内源、火山来源、深部热液来源等 (邓远等, 2019; 姜在兴等, 2021)。

随着中国油气对外依存度的不断增加, 加大页岩油气的勘探开发成为保证中国能源安全的必由之

路 (焦方正, 2019; 李国欣等, 2022; 马永生等, 2022)。当前, 四川盆地页岩气已经建成产量规模, 而页岩油的勘探部开发则处于探索起步阶段。中国东部成熟探区页岩油资源丰富, 将成为未来能源格局中重要的战略接替能源 (金之钧等, 2019; 赵文智等, 2020; 邹才能等, 2023)。渤海湾盆地济阳坳陷古近系发育了一套断陷湖盆深水细粒沉积岩, 分布范围广、厚度大、有机质丰度高、埋藏较浅, 展现出巨大的资源潜力 (宁方兴等, 2017; 张建国等, 2021)。

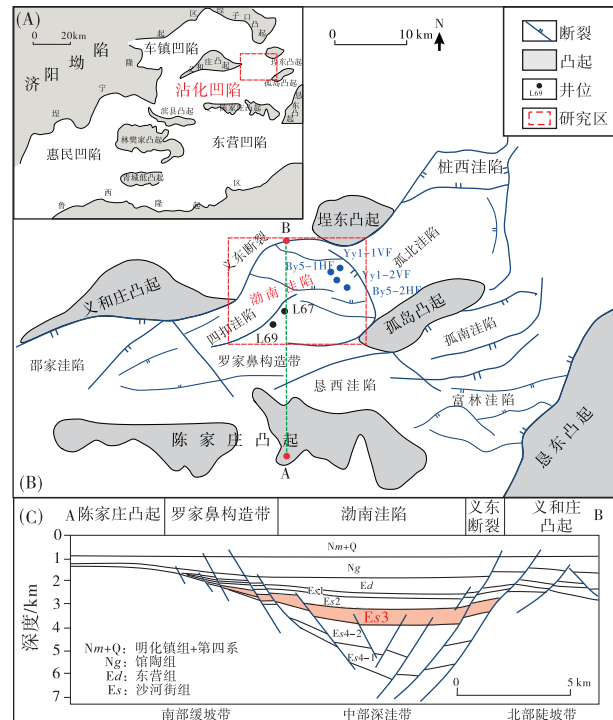
前人对济阳坳陷沾化凹陷古近系沙河街组三段下亚段细粒沉积岩开展了一些研究, 主要包括细粒

岩相的划分 (李超等, 2015; 王雨菡等, 2019)、沉积环境对岩相发育的控制作用 (Ma *et al.*, 2016; 杨万芹等, 2017; 赵琳洁, 2017) 以及储集层的孔隙结构特征 (Li *et al.*, 2017a, 2017b)。然而, 目前关于这套细粒沉积岩的储集特征尚不清楚, 有利储集层的主控因素尚不明确, 这些问题制约了沾化凹陷湖相页岩油的勘探开发进程。本研究以沾化凹陷渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩为研究对象, 在岩相划分的基础上, 明确了不同岩相的储集特征, 阐明了有利储集层的主控因素, 揭示了其时空分布规律。以期本研究成果可以为深入认识湖相细粒沉积岩储集层研究提供实例, 为沾化凹陷湖相页岩油的勘探开发提供理论支撑。

2 区域地质概况

沾化凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷东北部 (图 1-A), 为一个典型的箕状断陷湖盆 (徐守余和严科, 2005; 杨万芹等, 2017; Zhu *et al.*, 2022)。该凹陷东接垦东凸起, 西连义和庄凸起, 南至陈家庄凸起, 北临埕东凸起, 内部可划分为渤南洼陷、四扣洼陷、孤南洼陷等多个次级构造单元 (图 1-B) (张善文等, 2012; 杨万芹等, 2017; 杨棵等, 2022)。剖面上自北向南依次细分为北部陡坡带、中部深洼带和南部缓坡带 (图 1-C) (Zhu *et al.*, 2022), 其中, 位于沾化凹陷中部深洼带的渤南洼陷是本研究的重点研究区 (图 1-B)。

沾化凹陷渤南洼陷经历了古近纪裂陷期和新近纪拗陷期 2 大构造演化阶段, 裂陷期发育孔店组、沙河街组、东营组, 拗陷期发育馆陶组、明化镇组 (李超等, 2015; 梁超, 2015; 张建国等, 2021) (图 2-A)。沙河街组主要为一套咸水湖相沉积。在该组第三段的下亚段沉积期, 由于湖平面上升和水体加深, 渤南洼陷基本被半深湖—深湖区所覆盖, 发育一套典型的湖相深水细粒沉积岩。Es3L 为本研究目的层段, 其厚度为 200~700 m, 局部深洼处沉积厚度较大, 西部深洼厚度为 800~1000 m, 东部深洼处可达 1500 m, 岩性主要为深灰色、灰色泥灰岩及灰质泥岩、深灰色泥岩、页岩等, 夹少量粉砂质泥岩, 局部地区发育粘结岩, 为半深湖—深湖沉积, 为方便岩相、储集层评价和对比, 本研究根据其岩性特征、地层发育厚度以及沉积背景将



A—济阳坳陷区域构造图; B—沾化凹陷区域构造图;
C—沾化凹陷地层剖面图

图 1 沾化凹陷渤南洼陷位置及区域构造、地层特征
(修改自 Zhu *et al.*, 2022)

Fig. 1 Location and regional structure and stratigraphy of Bonan subsag, Zhanhua sag, Bohai Bay Basin
(modified from Zhu *et al.*, 2022)

渤南洼陷 Es3L 分为上部、中部和下部 (图 2-B)。

3 储集层特征

储集层质量的优劣控制了页岩油的储量和产量, 储集层特征是页岩油气研究领域中的核心和重点问题。本研究对渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩储集层的岩相特征、储集空间类型和物性特征等进行了研究。

3.1 岩相特征与分布

目前在岩相划分方面, 国内外的学者提出了多种划分方案, 分类依据包括矿物组成、岩石结构、层理构造、有机碳含量、生物扰动级别等 (Milliken *et al.*, 2014; Lazar *et al.*, 2015; 柳波等, 2015; 何焱, 2021; 操应长等, 2023)。本研究倡导基于矿物组成、沉积构造、有机质含量, 对渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩进行岩相划分。

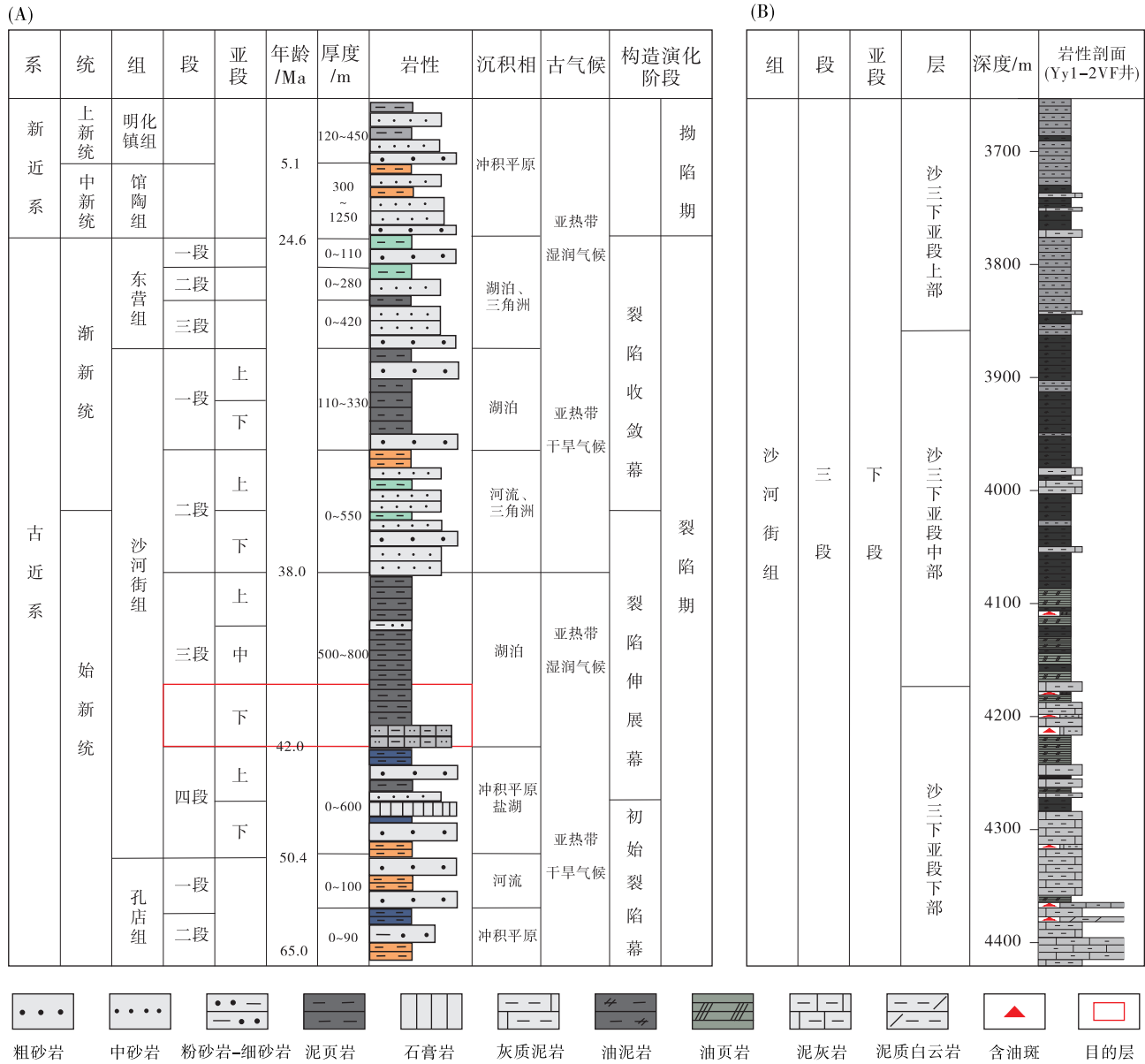


图 2 沾化凹陷地层—沉积—古气候—构造演化综合图 (据张建国等, 2021, 有修改) (A) 及渤南洼陷沙三下亚段岩性剖面 (B)

Fig. 2 Comprehensive diagram of stratigraphy-sedimentary facies-palaeoclimate-tectonic evolution of Zhanhua sag (modified from Zhang *et al.*, 2021) and lithology column of the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag (B)

3.1.1 划分依据

(1) 矿物组成

本研究对渤南洼陷 Yy1-1VF、Yy1-2VF、By5-1HF 和 By5-2HF 井 Es3L 的 325 个样品的 X 衍射全岩矿物分析结果表明, 渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩的主要矿物包括方解石、白云石、石英、长石、白云石、黄铁矿及黏土矿物。其中, 方解石含量为 1.3%~88.1% (平均值为 47.6%), 白云石含量为 1.4%~74.8% (平均值为 9.9%); 石英含量为

4.2%~38.6% (平均值为 20.6%), 长石含量为 0.0%~16.0% (平均值为 2.4%), 黄铁矿含量为 0.7%~24.9% (平均值为 3.4%); 黏土矿物含量为 2.1%~40.7% (平均值为 15.5%)。长英质矿物、碳酸盐矿物、黏土矿物含量见图 3-A。

(2) 有机碳含量

对渤南洼陷 4 口重点井的 Es3L 细粒沉积岩的 TOC 含量进行统计, 结果显示 Yy1-1VF、Yy1-2VF、By5-1HF、By5-2HF 井的 TOC 含量分别介

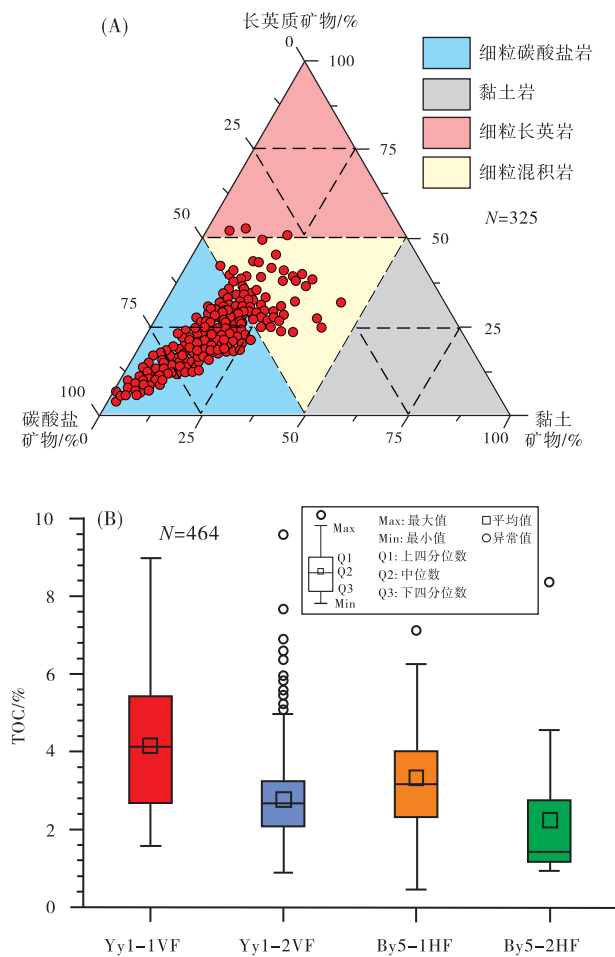


图 3 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段细粒沉积岩矿物组成及 TOC 含量统计

Fig. 3 Statistics of mineral composition and TOC content of fine-grained sedimentary rocks in the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

于 1.57% ~ 8.97% (平均值为 4.14%)、0.89% ~ 9.57% (平均值为 2.78%)、0.47% ~ 7.07% (平均值为 3.32%)、0.94% ~ 8.39% (平均值为 2.24%)(图 3-B)。根据 TOC 含量的分布范围,以 1.00%、2.00%为界,将渤南洼陷渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩划分为贫有机质 (TOC < 1.00%)、含有机质 (1.00% < TOC < 2.00%)、富有机质 (TOC > 2.00%) 3 个等级。

(3) 沉积构造

沉积构造是反映沉积环境和沉积成因的重要标志,渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩多发育水平层理、交错层理和块状层理。根据纹层不同厚度,将 1 mm 以下划分为纹层状,大于 1 mm 的划分为层状,层理不发育的划分为块状。

3.1.2 划分结果

本研究将渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩划分为 6 种岩相:富有机质纹层状灰质细粒混积岩 (LF1)、富有机质纹层状长英质细粒碳酸盐岩 (LF2)、富有机质层状灰质细粒混积岩 (LF3)、富有机质层状/块状长英质细粒碳酸盐岩 (LF4)、富有机质层状含长英细粒碳酸盐岩 (LF5)、含有机质块状含长英细粒碳酸盐岩 (LF6)。不同岩相的矿物组成、沉积构造以及有机质含量如图 4 所示。

3.2 储集空间类型

根据储集空间的类型和成因,将渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩的储集空间分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝 3 类。

3.2.1 原生孔隙

渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩的原生孔隙主要为刚性颗粒间孔。方解石、石英、长石的等刚性颗粒以点接触、线接触形成了储集骨架,在经历了压实作用和胶结作用等破坏性的成岩作用后,这些孔隙得以有效保存。这些颗粒间孔的轮廓清晰,以多边形为主,孔径可达到 10 ~ 50 μm,是比较理想的储集空间。电镜照片显示,原油和固体沥青等原始有机质的次生产物充填于孔隙之中(图 5-A)。

3.2.2 次生孔隙

次生孔隙主要包括黏土矿物间孔、溶蚀孔、晶间孔以及有机质孔。

黏土矿物间孔:在埋藏成岩过程中,渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩中的蒙脱石向伊蒙混层和伊利石转化。这些新生成的黏土矿物大多呈片状集合体的形式存在,发育薄片状、狭缝状的孔隙,孔隙直径在 10 μm 左右。电镜下,可观察到一些次生的有机质充填于这类孔隙中(图 5-B)。

黄铁矿晶间孔:电镜下见草莓状黄铁矿晶间孔,孔隙直径 1 μm 左右(图 5-C)。

溶蚀孔:电镜下,可见方解石、长石等不稳定矿物颗粒的内部或边缘发育溶蚀孔,孔隙的形状不规则。有机质在生烃过程中生成的有机酸和碳酸与矿物发生溶蚀反应,是这些孔隙的主要成因(图 5-D, 5-E)。

有机质孔:原生的沉积有机质在埋藏演化过程中多呈分散的片状,有机质转化为液态或气态的烃类会在其内部形成一些椭圆状、气泡状的有机质

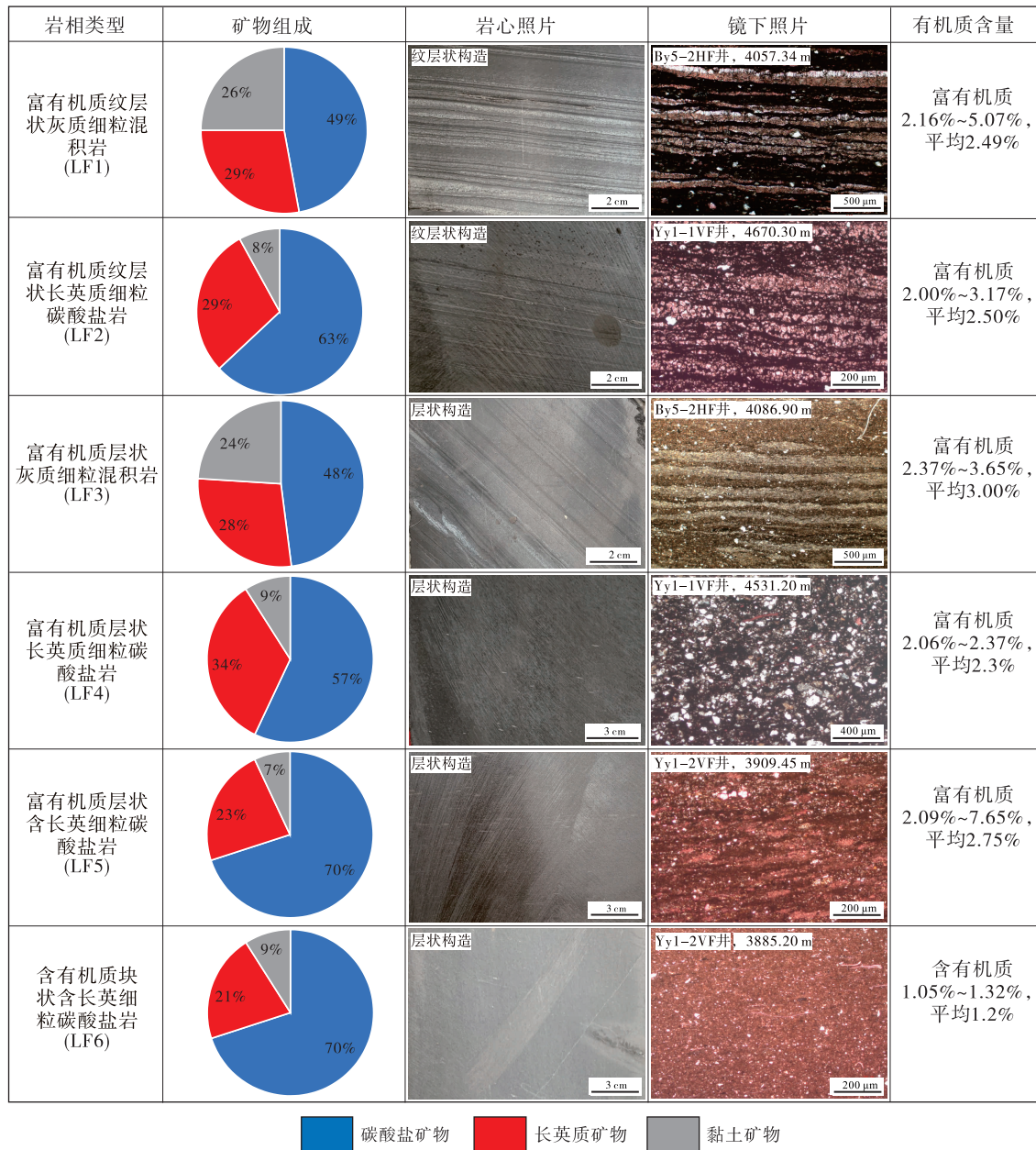


图 4 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段主要细粒沉积岩岩相类型特征

Fig. 4 Lithofacies types of main fine-grained sedimentary rocks in the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

孔，直径一般为 500 ~ 600 nm，局部可达 1 ~ 2 μm (图 4-F)。

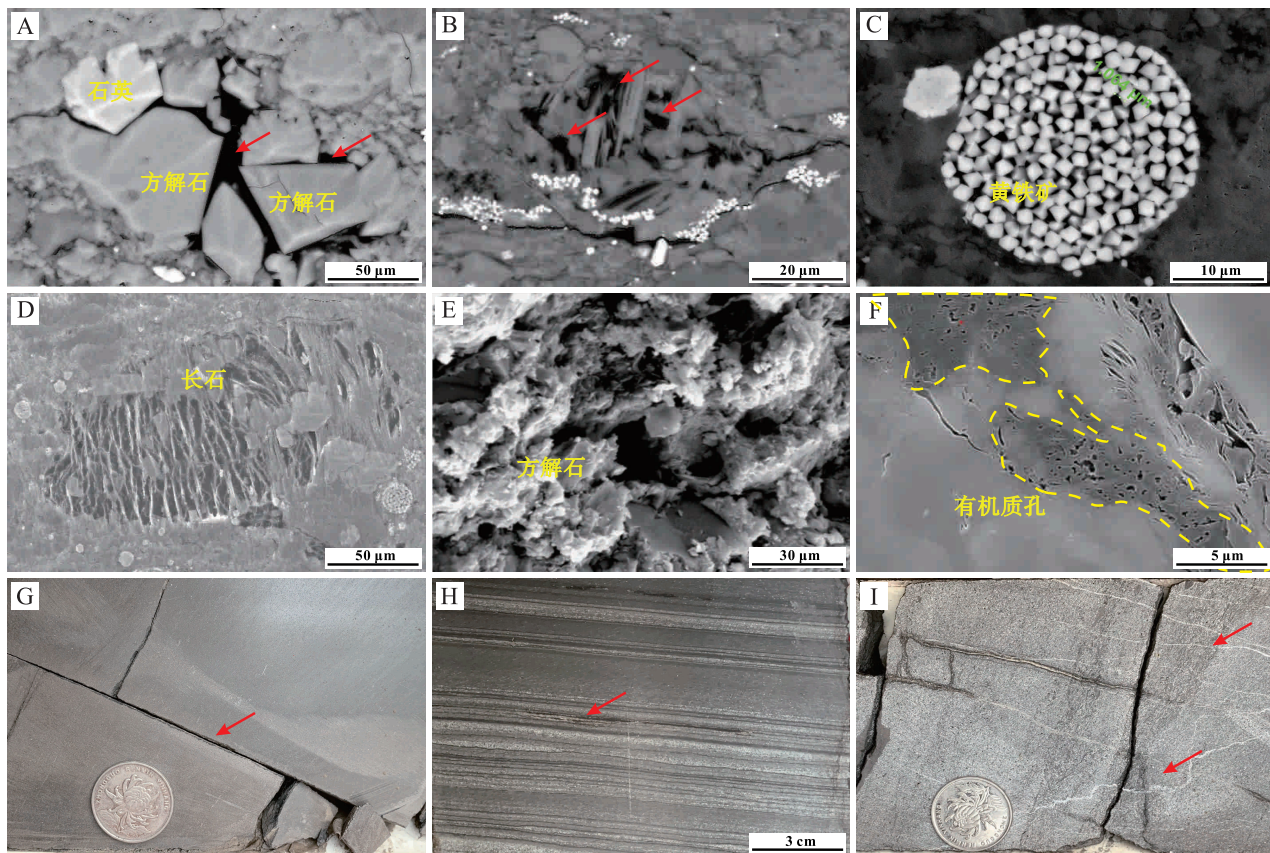
3.2.3 裂缝

研究区 Es3L 多发育裂缝，包括构造裂缝、成岩缝、异常压力缝等。

其中，构造裂缝主要为高角度近直立裂缝，长度一般 10~20 cm 左右，长者可达 50 cm (图 5-G)。在岩心和薄片上可见构造缝有不同程度上的填充：未充填、半充填、充填。未充填裂缝所占比例高，

为有效裂缝，是渤南洼陷 Es3L 低渗透储集层中很好的储集空间和渗流通道。

渤南洼陷 Es3L 发育层间微裂缝地层的厚度约 330 m，占地层总厚的 44%，主要分布在 Es3L 中部和下部的纹层状泥页岩中，Es3L 上部发育层间微裂缝地层的厚度 41 m 左右，在 Es3L 上部地层中占 32%，Es3L 中部发育层间微裂缝地层的厚度 120 m 左右，在 Es3L 中部地层中占 42%，Es3L 下部发育层间微裂缝地层的厚度 165 m 左右，在 Es3L 下部



A—粒间孔, By1-1HF 井, 3729.2 m, 电镜; B—黏土矿物粒间孔, Yy1-2VF 井, 3909.45 m, 电镜; C—黄铁矿晶间孔, Yy1-1VF 井, 4531.2 m, 电镜; D—长石溶蚀孔, Yy1-1VF 井, 4693.2 m, 电镜; E—方解石溶蚀孔, Yy1-1VF 井, 4597.25 m, 电镜; F—有机质孔, By5-2HF 井, 4039.19 m, 电镜; G—构造裂缝, By5-1HF 井, 3790.2 m, 岩心; H—层间微裂缝, Yy1-1VF, 4991.23 m, 岩心; I—生烃高压裂缝, Yy1-2VF 井, 4182.8 m, 岩心

图 5 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段主要储集空间类型

Fig. 5 Main reservoir space types of the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

地层中占比 48%。泥页岩层间微裂缝开度一般为几微米, 较平直连续, 延伸距离较远, 部分被溶蚀, 部分被充填, 未被充填的层间微裂缝后期可能继续破裂、导致开度增大, 可成为很好的油气运移通道和储集空间 (图 5-H)。层间微裂缝主要分布在 Es3L 中下部。

异常压力缝形态不规则, 方向性较差, Es3L 发育异常压力缝的地层厚度约 150 m, 占比地层总厚 20%, 主要分布在有机质含量较高的 Es3L 上部, 发育异常压力缝的地层厚度 50 m 左右, 占上部地层总厚的 37%; 中部发育异常压力缝的地层厚度 60 m 左右, 占中部地层总厚的 21%; 下部发育异常压力缝的地层厚度 45 m 左右, 占下部地层总厚的 13%, 但后期大多数被方解石充填 (图 5-I)。

3.3 物性特征

渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩储集层孔隙度主要介于 0.67% ~ 5.56% (平均值为 4.93%) 之间, 渗透率主要介于 $(0.02 \sim 4.87) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (平均值为 $0.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 之间。本研究以孔隙度、渗透率为划分依据, 将渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩储集层划分 3 个等级。其中, I 类储集层的孔隙度大于 5.00%, 渗透率大于 $0.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; II 类储集层孔隙度介于 4.50% ~ 5.00% 之间, 渗透率介于 $(0.20 \sim 0.50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。III 类储集层的孔隙度小于 4.50%, 渗透率小于 $0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 1)。

3.4 分布特征

3.4.1 储集层纵向分布特征

渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩的非均质性较强,

表 1 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段储集层物性分类
Table 1 Classification of reservoir based on physical properties of the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

储集层类型	I 类	II 类	III 类
孔隙发育	发育	较发育	发育中等
孔隙度/%	> 5.00	4.50~5.00	< 4.50
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	> 0.50	0.20~0.50	< 0.20

优质储集层在纵向上的分布有较大差异 (图 6)。以 Yy1-2VF 井为例, Es3L 下部主要为 II 类储集层, II 类储集层厚度占 Es3L 下部总厚度的 50% 左右, 局部发育 I 类 (发育厚度占 Es3L 下部总厚度的 20% 左右) 和 III 类储集层 (发育厚度占 Es3L 下部总厚度的 30% 左右), 4175 ~ 4180 m 和 4305 ~

4310 m 为 I 类储集层, 4180 ~ 4190 m、4260 ~ 4270 m、4275 ~ 4280 m 以及 4300 ~ 4305 m 为 III 类储集层; Es3L 中部以 I 类储集层和 II 类储集层为主, 其中 I 类储集层厚度占 Es3L 中部总厚度的 30% 左右, II 类储集层厚度占 Es3L 中部总厚度的 50% 左右, 局部发育 III 类储集层, 发育厚度占 Es3L 中部总厚度的 10% 左右, 3865 ~ 3935 m、3955 ~ 3995 m、4035 ~ 4065 m、4090 ~ 4100 m 和 4115 ~ 4120 m 为 II 类储集层, 3840 ~ 3865 m 和 4020 ~ 4025 m 为 III 类储集层, 剩余层段则为 I 类储集层; Es3L 上部以 II 类和 III 类储集层为主, II 类储集层厚度占 Es3L 上部总厚度的 42%, III 类储集层厚度占 Es3L 上部总厚度的 33%, 局部发育 I 类储集层, 占比 25%, 3070 ~ 3040 m 和 3055 ~ 3070 m 为 I 类储集层, 3790 ~ 3810 m 为 III 类储集层, 剩余层段为 II 类储集层。

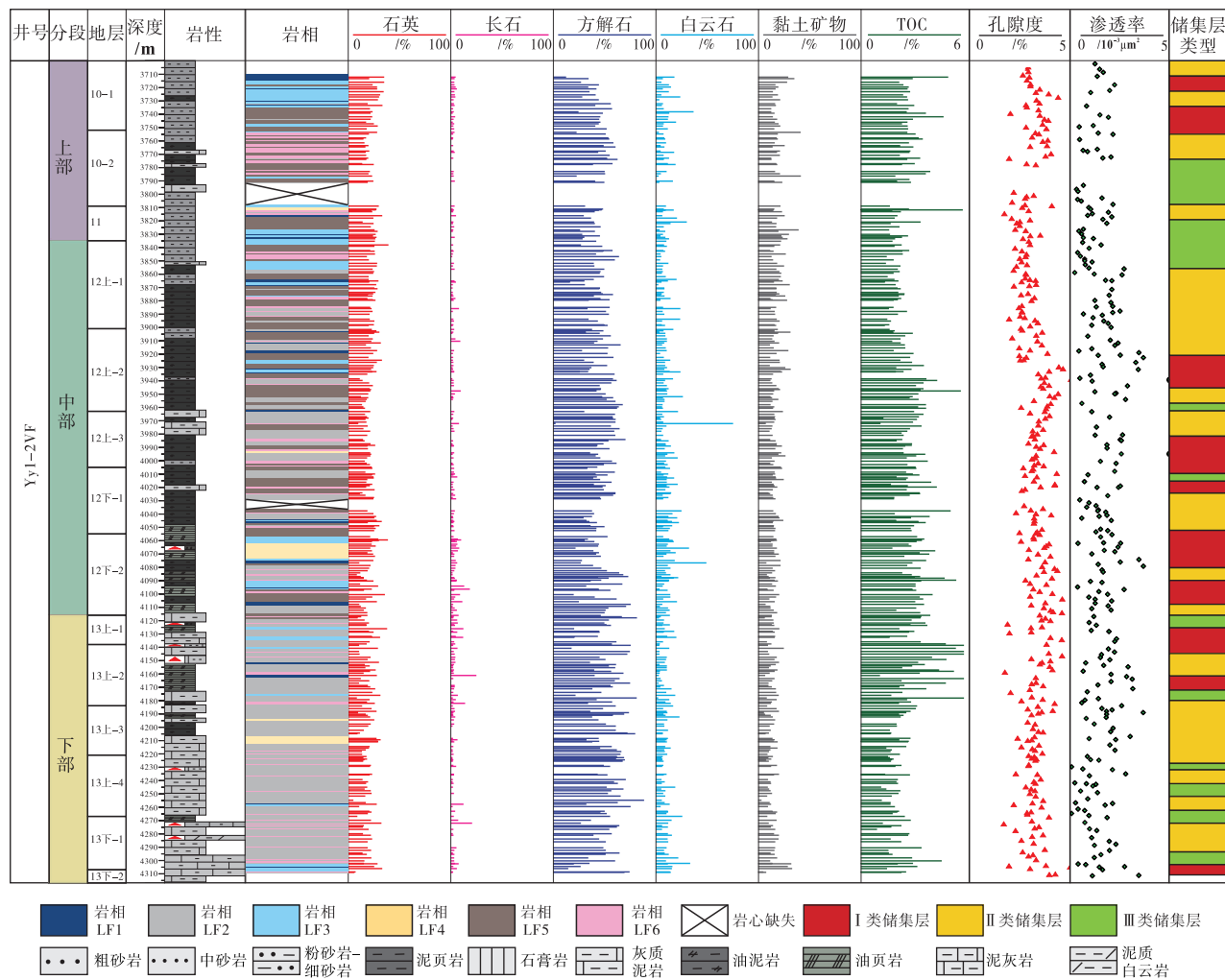


图 6 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段细粒沉积岩储集层纵向分布

Fig. 6 Reservoir distribution of fine-grained sedimentary rocks in the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

总的来看, 渤南洼陷 Es3L 以 II 类储集层为主, 发育厚度占 Es3L 总厚度的 52%, I 类储集层占 28%, III 类储集层占 20%。

3.4.2 储集层横向分布特征

针对渤南洼陷取心井较少和复杂的泥页岩地质特征, 如何通过测井识别细粒混合沉积岩的岩性岩相, 是进行页岩油甜点评价、有利区预测以及井位部署的重点和基础。首先, 利用岩性录井与自然伽马 (GR) 测井曲线的对应关系, 在纵向上调整测井曲线位置使之匹配, 确保测井曲线准确地反映岩性信息。然后提取已有 X 衍射样品对应深度点相关测井数据, 以每个完成矿物组分测试的样品点对应深度为中心, 上下各取 0.2 m, 共计 0.4 m 深度段的测井曲线, 取每段测井曲线数据的平均值。接着将岩心 X 衍射数据与多条测井曲线数据做相关性分析, 包括自然伽马 (GR)、声波时差 (AC)、补偿中子 (CNL)、密度 (DEN)、深侧向电阻率 (RD) 等。根据不同细粒沉积岩岩相常规测井响应特征差异, 建立细粒沉积岩岩相常规测井资料识别图版 (图 7), 在 Yy1-2VF 井等 4 口关键井岩相与储集层纵向变化规律分析的基础上, 结合录井资料和区域沉积背景预测编制了渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩优质储集层的平面分布图 (图 8)。渤南洼陷 Es3L 下部除罗家鼻状凸起发育 I 类储集层外, 其余大部分地区发育 II 类储集层, 少数几口井以 III 类储集层为主 (图 8-A); Es3L 中部以 II 类储集层为主, I 类储集层分布范围比下部增大, 除罗家鼻状凸起外, 4 口关键井以及 Y284 等井也发育 I 类储集层 (图 8-B); Es3L 上部储集层以 II 类储集层为主, I 类储集层主要分布在罗家鼻状凸起, 靠近物源区包括 4 口关键井均以 III 类储集层为主 (图 8-C)。

4 储集层发育主控因素

渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩的储集层质量差异和分布规律受到多种因素的影响, 包括岩相类型、沉积环境、成岩作用、有机质热演化等。

4.1 岩相类型和沉积环境

不同岩相具有不同的矿物成分和结构构造特征, 导致其储集层物性存在差异性 (图 9)。综合孔隙度和渗透率来看, 岩相 LF3 物性最好, 其次是

LF1、LF4、LF5 和 LF2, LF6 物性最差。

湖相细粒沉积岩的物质组成和演化规律由原始沉积环境决定, 提供储集空间发育的物质基础, 导致不同岩相储集能力有一定差异 (邓远, 2019), 因此沉积环境通过控制岩相的宏观分布来控制储集层的发育。一般来说, 可以用于恢复古环境的指标较多, 主要包括特征元素比值、生物标志化合物类型、孢粉类型、黄铁矿粒度等。本研究采用特征元素比值来恢复沉积环境, 主要包括古气候 (Sr/Cu、Rb/Sr)、古盐度 (Sr/Ba)、氧化还原条件 (V/Cr、Ni/Co)、古生产力 (P/Ti)、古陆源输入 (Ti/Al) (邓宏文和钱凯, 1990; 张天福等, 2016)。Es3L 各个分段的古环境指标如表 2 所示。

表 2 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段古环境指标统计
Table 2 Statistics of palaeoenvironment indexes of the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

指标	上部	中部	下部
Sr/Ba	1.04~1.45(1.29)	0.88~9.58(2.11)	1.12~6.87(3.42)
V/Cr	1.46~2.98(2.06)	1.41~2.72(1.88)	1.48~1.84(1.65)
Ni/Co	2.14~3.01(2.62)	1.96~7.25(2.89)	2.01~5.77(2.66)
U/Th	0.37~4.36(2.82)	1.45~4.62(2.56)	1.21~4.37(2.06)
Ti/Al	0.037~0.042 (0.038)	0.036~0.045 (0.040)	0.038~0.049 (0.041)
Sr/Cu	19.82~43.77 (28.11)	20.18~196.42 (47.04)	21.45~185.84 (76.95)
Rb/Sr	0.04~0.13(0.10)	0.01~0.17(0.07)	0.00~0.11(0.02)
P/Ti	0.44~1.07(0.61)	0.34~1.41(0.72)	0.33~2.27(0.62)

注: 指标数据表示: 最小值~最大值(平均值)。

在渤南洼陷 Es3L 的中部、下部沉积时期, 气候较干旱, 蒸发作用导致水体整体较浅。水体盐度高且分层性较强, 形成大量方解石纹层状构造。岩相以 LF3、LF4 和 LF5 为主, 对应的储集层主要为较为优质的 I 类储集层。在渤南洼陷 Es3L 的上部沉积时期, 气候温暖湿润, 此时进入到湖盆的水流增大, 陆源碎屑供给增强, 水体变深, 水体盐度较低且分层性较弱, 沉积大量的黏土矿物, 沉积构造以块状为主 (图 10)。渤南洼陷 Es3L 中部和下部储集层质量整体好于上部, 干旱气候背景下低陆源物质注入、咸水环境和水体分层性强的环境有利于优质储集层的发育。

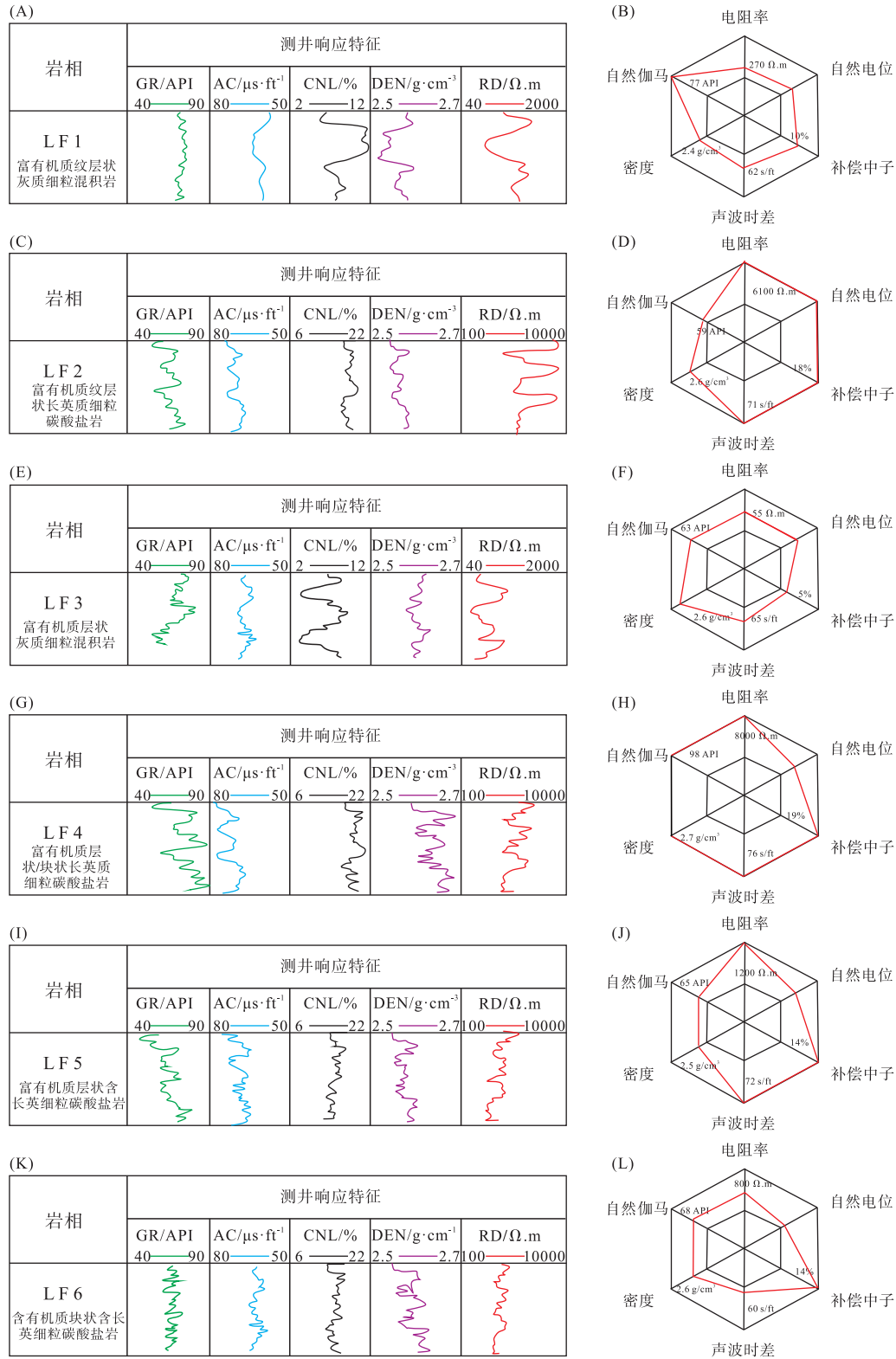


图 7 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段不同岩相测井响应图版

Fig. 7 Logging response charts of different lithofacies in the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

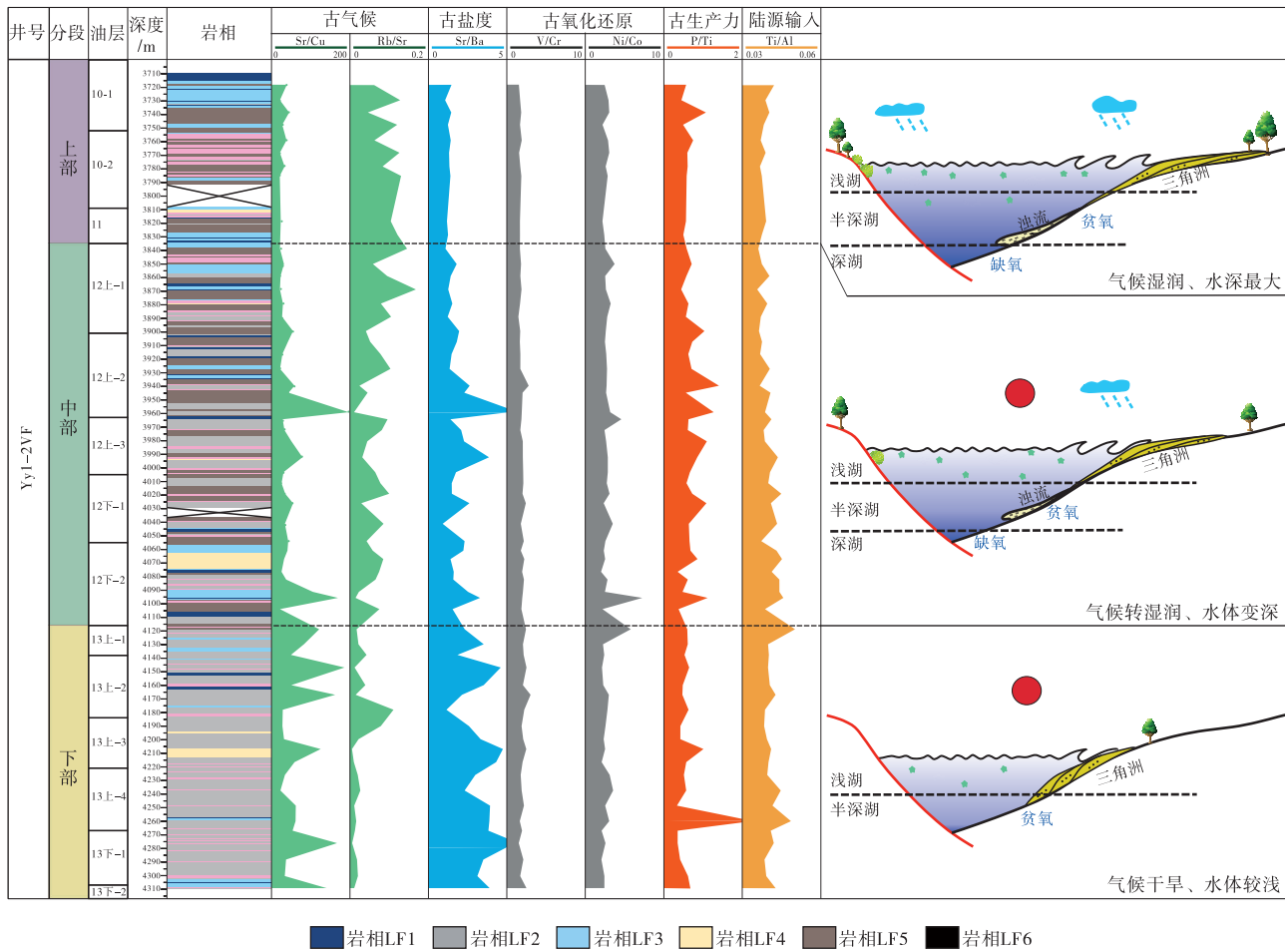


图 10 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段沉积环境模式

Fig. 10 Sedimentary environment model of the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

K⁺的碱性条件下，蒙脱石逐渐转化为伊利石，形成微裂隙较发育的伊蒙混层和伊利石(图 11-E)，可增加储集空间，改善储集层质量(程晓玲, 2006)。渤南洼陷 Es3L 中下部伊利石含量相对较高，同时钾长石含量较低(由于黏土矿物转化消耗大量 K⁺)，表明在 Es3L 中下部大量黏土矿物脱水转化为伊利石，流体压力增加，有利于形成收缩缝和微裂隙，所以 Es3L 中下部收缩缝多于上部，并且孔隙度也相对较高。

4.2.3 白云石化作用

研究区常见具备完整菱面体结构的白云石，晶面较平直，常与伊蒙混层等黏土矿物伴生发育。蒙脱石向伊利石的转化会析出大量 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺和 Fe²⁺等，其中 Mg²⁺和 Fe²⁺为方解石向(铁)白云石转化提供了离子条件(图 11-F, 11-G)。

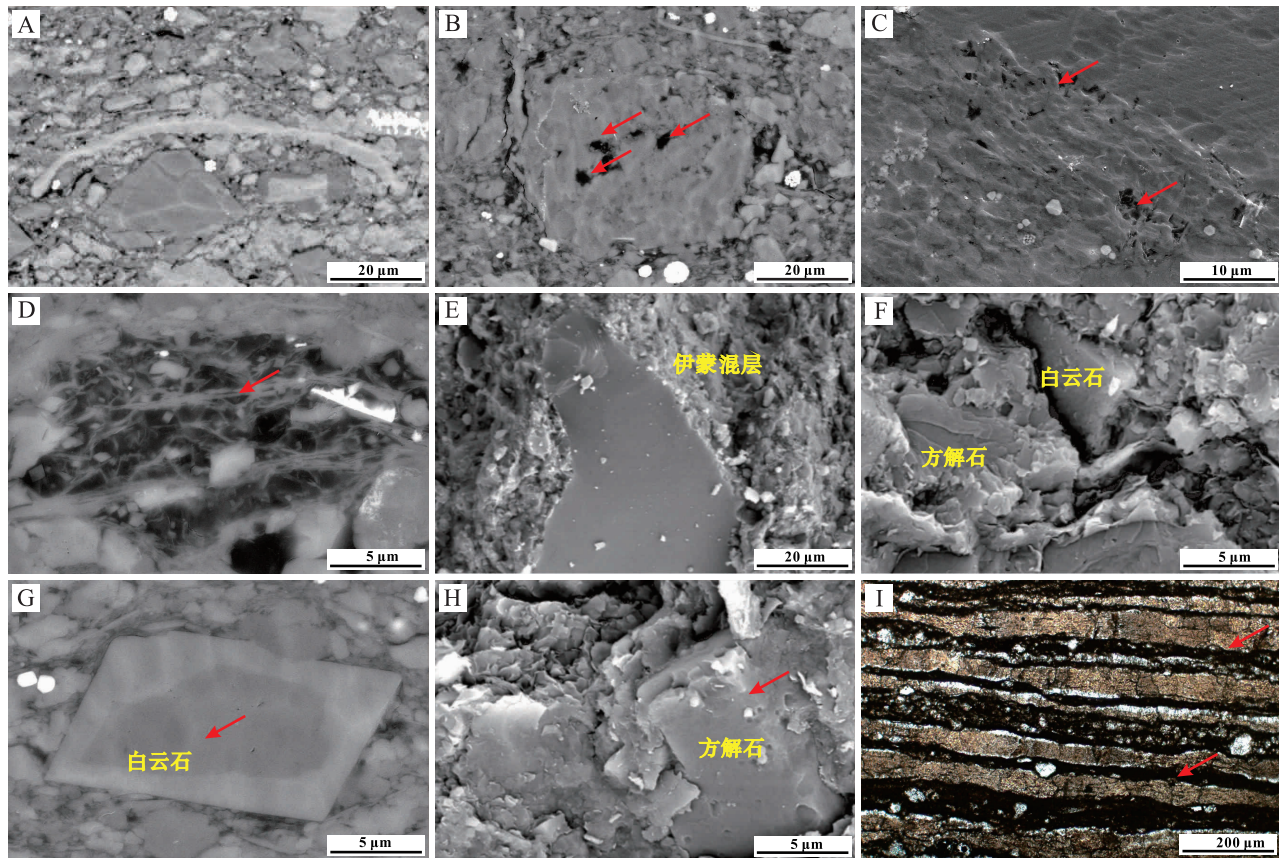
4.2.4 重结晶作用

随着埋深的持续增加，储集层的成岩温度增

高，灰泥沉积物中的文石和高镁方解石经新生变形作用转变为低镁方解石，重结晶作用使原始沉积的泥晶质点增大至微晶、粉晶及细晶，一般而言重结晶程度越高，晶体越大，晶间孔越发育。研究区方解石的重结晶作用广泛发育，显微镜下可观察到马牙状方解石沿纹层状的晶粒方解石边缘分布，以亮晶方解石纹层的形式产出，多与暗色有机质纹层叠置交替出现(图 11-H, 11-I)。

4.2.5 有机质热演化

不同于常规储集层，细粒沉积岩储集层中有机的热演化生烃作用对储集空间和储集性能的影响显著。其影响主要体现在以下 3 个方面：(1) 研究区 Es3L 细粒沉积岩整体有机质丰度较高 (TOC > 2%)，在中成岩 A 阶段，即埋深 3800 ~ 4200 m (Es3L 中部)，有机质转化为烃类的产率大，释放大量有机酸，为溶蚀作用提供溶剂。(2) 有机质生烃、



A—压实作用，颗粒紧密排列，By5-1HF井，4033.44 m，电镜；B—溶蚀作用，颗粒内部溶蚀，Yy1-1VF井，4623.3 m，电镜；C—溶蚀作用，岩屑被溶蚀充填有机质，Yy1-1VF井，4660.7 m，电镜；D—溶蚀作用，岩屑被溶蚀形成铸模孔，Yy1-1VF井，4516.05 m，电镜；E—黏土矿物转化作用，片状伊蒙混层，Yy1-1VF井，4619.20 m，电镜；F—白云石化作用，Yy1-1VF井，4594.95 m，电镜；G—白云石化作用，呈菱面体结构的铁白云石，Yy1-1VF井，4568.39 m，电镜；H—重结晶作用，Yy1-1VF，4594.95 m，电镜；I—重结晶作用，呈马牙状的粗晶方解石，By5-2HF井，4057.34 m，正交偏光

图 11 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段主要成岩作用类型及镜下特征

Fig. 11 Main diagenesis types and microscopic characteristics of the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

脱水后体积收缩，在其边缘形成有机质收缩缝，在有机质内部生成少量的有机质孔（张顺等，2016）。渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩 TOC 含量和孔隙度呈现一定的正相关性。（3）有机质生烃过程中，烃类在生成之后，细粒沉积岩的内部流体压力升高，形成异常高压，在岩心上常见生烃高压裂缝。

4.3 成岩演化过程

在早成岩阶段，干旱多盐少雨的沉积环境形成了沉积期偏碱性的湖泊水体，机械压实和早期胶结作用是该阶段主要成岩作用，随着压实作用增强，原生粒间孔逐渐减少。随着埋深增加达到 2100 m 时，进入中成岩阶段， R_0 达到 0.5%，大量有机质生烃演化形成有机质孔，同时排出有机酸溶蚀碳酸

盐矿物和长石形成粒内溶孔。当埋深达到 3800 m 时，有机质转化为烃类的产率最大，在有机质边缘形成有机质收缩缝，产生的大量有机酸发生溶蚀作用，溶蚀碳酸盐矿物形成溶蚀孔，同时，有机质在热演化过程中还可以为黏土矿物转化提供能量（魏祥峰等，2013；余志云等，2022），随着 R_0 值的增大，蒙脱石逐渐转化为伊利石，析出 Mg^{2+} ，促进白云石化作用，形成微裂隙和晶间孔，改善储集层物性（图 12）。

5 结论

1) 基于矿物组成、沉积构造和有机质含量，将渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚

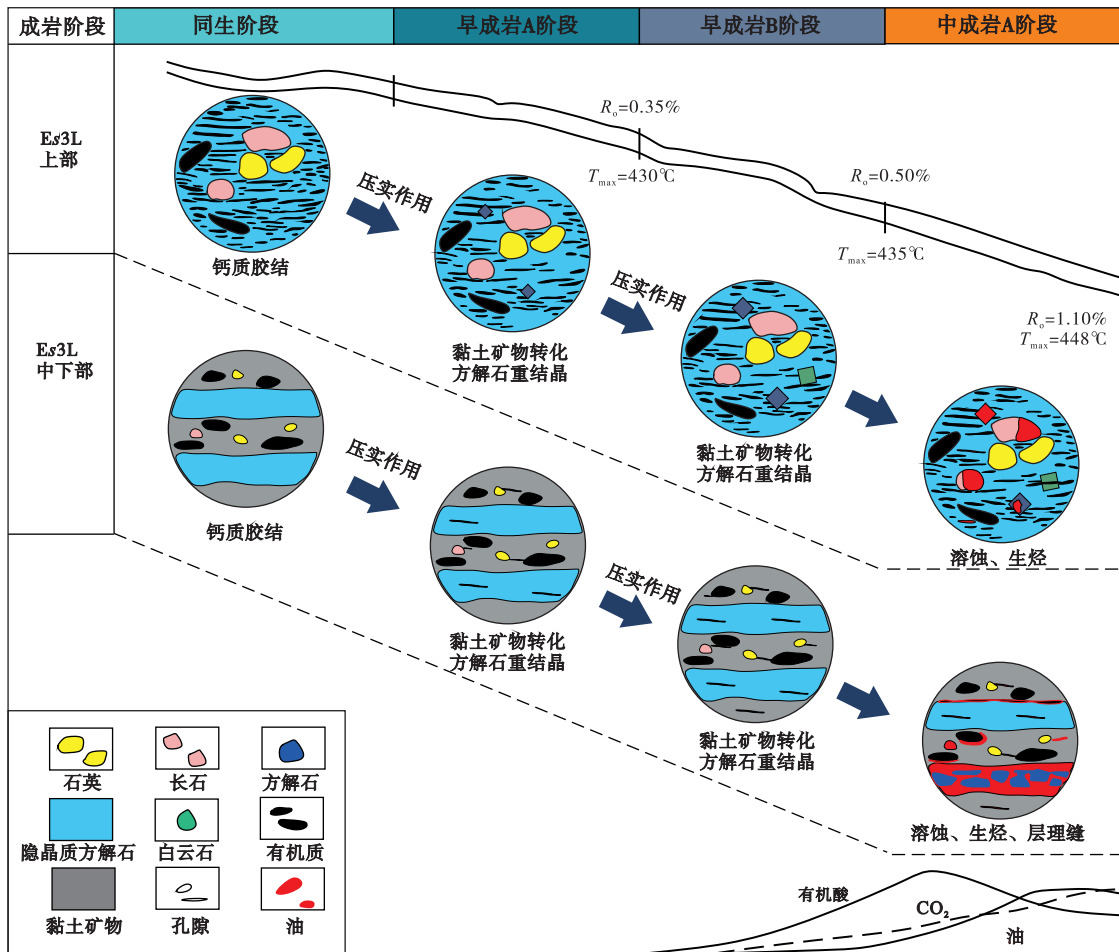


图 12 沾化凹陷渤南洼陷沙三下亚段细粒沉积岩成岩演化模式

Fig. 12 Diagenetic evolution model of fine-grained sedimentary rocks in the Lower Sub-member of Third Member of Shahejie Formation in Bonan subsag, Zhanhua sag

段 (Es3L) 细粒沉积岩划分为 6 类岩相: 富有机质纹层状灰质细粒混积岩 (LF1)、富有机质纹层状长英质细粒碳酸盐岩 (LF2)、富有机质层状灰质细粒混积岩 (LF3)、富有机质层状/块状长英质细粒碳酸盐岩 (LF4)、富有机质层状含长英细粒碳酸盐岩 (LF5)、含有机质块状含长英细粒碳酸盐岩 (LF6)。

2) 渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩储集层的主要储集空间为粒间孔、晶间孔、溶蚀孔、层间微裂缝, 储集层孔隙度主要介于 0.67%~5.56% 之间, 平均值为 4.93%。

3) 渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩储集层发育的主控因素包括: 岩相类型、沉积环境、成岩作用和有机质热演化。渤南洼陷 Es3L 中下部的陆源输入水平低、水体盐度大、水体分层性强, 岩相以 LF2 和 LF4 为主, 容易发育 I 类 (主要分布在罗家鼻

状凸起和 Yy1-1VF 等 4 口关键井附近) 和 II 类优质储集层, 渤南洼陷 Es3L 上部陆源输入强、水体盐度较低、水体分层弱, 岩相以 LF3 和 LF6 为主, 其中 LF3 容易发育 I 类储集层 (主要分布在罗家鼻状凸起), LF6 容易发 III 类储集层 (埕东凸起和陈家状凸起附近)。渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩储集层处于中成岩 A 阶段, 黏土矿物转化作用、溶蚀作用、重结晶作用和白云石化作用以及有机质热演化产生次生孔缝, 改善了储集层物性。

4) 渤南洼陷 Es3L 细粒沉积岩有利岩相类型主要为 LF3, 主要分布在罗家鼻状凸起附近的沙三下亚段中部和上部, 其次是 LF1、LF4、LF5 和 LF2, 主要分布在罗家鼻状凸起和埕东凸起附近的 Y285、Y286 以及 Yy1-1VF、Yy1-2VF、By5-1HF 和 By5-2HF 等 4 口关键井的 Es3L 中下部。

参考文献 (References)

- 操应长, 梁超, 韩豫, 葱克来, 王俊然, 籍士超, 梅俊芳. 2023. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨. 古地理学报, 25(4): 729-741. [Cao Y C, Liang C, Han Y, Xi K L, Wang J R, Ji S C, Mei J F. 2023. Discussion on classification scheme of fine-grained sedimentary rocks based on sediments source and genesis. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(4): 729-741]
- 程晓玲. 2006. 粘土矿物转化与储层孔隙演化的规律性研究: 以苏北盆地台兴油田阜三段储层为例. 大庆石油地质与开发, 25(1): 43-45, 105-106. [Cheng X L. 2006. Laws of clay mineral transformation and reservoir porosity evolution: a case study of fu III member of Taixing oil field in Subei Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 25(1): 43-45, 105-106]
- 邓宏文, 钱凯. 1990. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化. 沉积学报, 8(3): 1-21. [Deng H W, Qian K. 1990. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones. Acta Sedimentologica Sinica, 8(3): 1-21]
- 邓远. 2019. 沧东凹陷孔二段细粒混合沉积岩分布规律及形成机理. 中国石油大学(华东)博士论文. [Deng Y. 2019. The distribution and formation mechanism of the fine-grained mixed sedimentary rocks from the 2nd member of Kongdian Formation in Cangdong depression. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (Huadong)]
- 邓远, 蒲秀刚, 陈世悦, 鄢继华, 时战楠, 张伟, 韩文中. 2019. 细粒沉积岩储层特征与主控因素分析: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例. 中国矿业大学学报, 48(6): 1301-1316. [Deng Y, Pu X G, Chen S Y, Yan J H, Shi Z N, Zhang W, Han W Z. 2019. Characteristics and controlling factors of fine-grained mixed sedimentary rocks reservoir: a case study of the 2nd member of Kongdian Formation in Cangdong depression, Bohai Bay Basin. Journal of China University of Mining & Technology, 48(6): 1301-1316]
- 何焱. 2021. 川东—黔北地区龙潭组海陆过渡相页岩岩相与有机质特征. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [He Y. 2021. Lithofacies and characteristics of organic matter in transitional facies shale of the Longtan Formation in eastern Sichuan and northern Guizhou. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 姜在兴, 梁超, 吴靖, 张建国, 张文昭, 王永诗, 刘惠民, 陈祥. 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题. 石油学报, 34(6): 1031-1039. [Jiang Z X, Liang C, Wu J, Zhang J G, Zhang W Z, Wang Y S, Liu H M, Chen X. 2013. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks. Acta Petrolei Sinica, 34(6): 1031-1039]
- 姜在兴, 孔祥鑫, 杨叶芄, 张建国, 张元福, 王力, 袁晓冬. 2021. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多源成因. 石油勘探与开发, 48(1): 26-37. [Jiang Z X, Kong X X, Yang Y P, Zhang J G, Zhang Y F, Wang L, Yuan X D. 2021. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots. Petroleum Exploration and Development, 48(1): 26-37]
- 焦方正. 2019. 非常规油气之“非常规”再认识. 石油勘探与开发, 46(5): 803-810. [Jiao F Z. 2019. Re-recognition of “unconventional” in unconventional oil and gas. Petroleum Exploration and Development, 46(5): 803-810]
- 金之钧, 白振瑞, 高波, 黎茂稳. 2019. 中国迎来页岩油气革命了吗? 石油与天然气地质, 40(3): 451-458. [Jin Z J, Bai Z R, Gao B, Li M W. 2019. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? Oil & Gas Geology, 40(3): 451-458]
- 李超, 朱筱敏, 朱世发, 耿名扬, 毕玉泉, 束青林, 徐福刚. 2015. 沾化凹陷罗家地区沙三下段泥页岩储层特征. 沉积学报, 33(4): 795-808. [Li C, Zhu X M, Zhu S F, Geng M Y, Bi Y Q, Shu Q L, Xu F G. 2015. Shale reservoir characteristics of the Lower 3th Member of Shahejie Formation, LuoJia Area, Zhanhua Sag. Acta Sedimentologica Sinica, 33(4): 795-808]
- 李国欣, 雷征东, 董伟宏, 王红岩, 郑兴范, 谭健. 2022. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望. 中国石油勘探, 27(1): 1-11. [Li G X, Lei Z D, Dong W H, Wang H Y, Zheng X F, Tan J. 2022. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC. China Petroleum Exploration, 27(1): 1-11]
- 梁超. 2015. 含油气细粒沉积岩沉积作用与储层形成机理. 中国地质大学(北京)博士论文. [Liang C. 2015. The sedimentation and reservoir formation mechanism of hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks. Doctoral dissertation of China University of Geosciences]
- 柳波, 吕延防, 孟元林, 李新宁, 郭小波, 马强, 赵万春. 2015. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义: 以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例. 石油勘探与开发, 42(5): 598-607. [Liu B, Lü Y F, Meng Y L, Li X N, Guo X B, Ma Q, Zhao W C. 2015. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: a case study of Permian Lucaogou Formation in Malang Sag, Santanghu Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 42(5): 598-607]
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 胡宗全, 刘惠民, 高波, 王伟庆, 李志明, 张子麟. 2022. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践. 地质学报, 96(1): 155-171. [Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R, Hu Z Q, Liu H M, Gao B, Wang W Q, Li Z M, Zhang Z L. 2022. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China. Acta Geologica Sinica, 96(1): 155-171]
- 宁方兴, 王学军, 郝雪峰, 杨万芹, 银燕, 丁桔红, 朱德燕, 朱德顺, 朱家俊. 2017. 济阳拗陷不同岩相页岩油赋存机理. 石油学报, 38(2): 185-195. [Ning F X, Wang X J, Hao X F, Yang W Q, Yin Y, Ding J H, Zhu D Y, Zhu D S, Zhu J J. 2017. Occurrence mechanism of shale oil with different lithofacies in Jiyang depression. Acta Petrolei Sinica, 38(2): 185-195]
- 王雨菡, 丁伟铭, 刘璇, 魏韧, 董琳. 2019. 渤海湾盆地渤南洼陷沙河街组三段下亚段岩相特征及有机质富集成因. 石油与天然气地质, 40(5): 1106-1114. [Wang Y H, Ding W M, Liu X, Wei R, Dong L. 2019. Lithofacies and causal mechanism of organic matter enrichment in the lower submember of the 3rd member of Shahejie Formation, Bonan Sag, Bohai Bay Basin. Oil & Gas Geology, 40(5): 1106-1114]
- 魏祥峰, 刘若冰, 张廷山, 梁兴. 2013. 页岩气储层微观孔隙结构特征

- 及发育控制因素:以川南—黔北 XX 地区龙马溪组为例. 天然气地球科学, 24(5): 1048-1059. [Wei X F, Liu R B, Zhang T S, Liang X. 2013. Micro-pores structure characteristics and development control factors of shale gas reservoir: a case of longmaxi formation in XX area of southern Sichuan and northern Guizhou. *Natural Gas Geoscience*, 24(5): 1048-1059]
- 徐守余, 严科. 2005. 渤海湾盆地构造体系与油气分布. 地质力学学报, 11(3): 259-265. [Xu S Y, Yan K. 2005. Structural system and hydrocarbon distribution in the Bohai Gulf Basin. *Journal of Geomechanics*, 11(3): 259-265]
- 杨棵, 朱筱敏, 杨怀宇, 朱世发, 董艳蕾, 金磊, 申婷婷, 叶蕾. 2022. 古物源体系多方法表征: 以渤海湾盆地沾化渤南洼陷沙四下亚段为例. 沉积学报, 40(6): 1542-1560. [Yang K, Zhu X M, Yang H Y, Zhu S F, Dong Y L, Jin L, Shen T T, Ye L. 2022. Multi Method Characterization of a Paleo-provenance System: a case study from the lower 4th member of the Shahejie Formation from the Bonan Sag in Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(6): 1542-1560]
- 杨万芹, 王学军, 丁桔红, 王勇, 张顺. 2017. 渤南洼陷细粒沉积岩岩相发育特征及控制因素. 中国矿业大学学报, 46(2): 365-374. [Yang W Q, Wang X J, Ding J H, Wang Y, Zhang S. 2017. Characteristics and control factors of fine-grained sedimentary rock lithofacies in Bonan subsag. *Journal of China University of Mining & Technology*, 46(2): 365-374]
- 余志云, 陈世悦, 张顺, 刘鑫金, 唐东, 鄢继华. 2022. 成岩作用对泥页岩储集性能的影响: 以东营凹陷古近系沙四上亚段为例. 古地理学报, 24(4): 771-784. [Yu Z Y, Chen S Y, Zhang S, Liu X J, Tang D, Yan J H. 2022. Influence of diagenesis on reservoir performance of shale: a case study of the upper sub-member of Member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(4): 771-784]
- 张建国, 姜在兴, 刘立安, 袁方, 冯路尧, 李长昇. 2021. 渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组三段下亚段细粒沉积岩岩相特征与沉积演化. 石油学报, 42(3): 293-306. [Zhang J G, Jiang Z X, Liu L A, Yuan F, Feng L Y, Li C S. 2021. Lithofacies and depositional evolution of fine-grained sedimentary rocks in the lower submember of the Member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 42(3): 293-306]
- 张建国, 姜在兴, 刘鹏, 孔祥鑫, 葛云锦. 2022. 陆相超细粒页岩油储层沉积机制与地质评价. 石油学报, 43(2): 234-249. [Zhang J G, Jiang Z X, Liu P, Kong X X, Ge Y J. 2022. Deposition mechanism and geological assessment of continental ultrafine-grained shale oil reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 43(2): 234-249]
- 张善文, 王永诗, 张林晔, 李政, 朱家俊, 巩建强, 郝运轻. 2012. 济阳坳陷渤南洼陷页岩油气形成条件研究. 中国工程科学, 14(6): 49-55, 63. [Zhang S W, Wang Y S, Zhang L Y, Li Z, Zhu J J, Gong J Q, Hao Y Q. 2012. Formation conditions of shale oil and gas in Bonan sub-sag, Jiyang Depression. *Engineering Sciences*, 14(6): 49-55, 63]
- 张顺, 刘惠民, 宋国奇, 王永诗, 陈世悦, 张守鹏. 2016. 东营凹陷页岩油储集空间成因及控制因素. 石油学报, 37(12): 1495-1507, 1527. [Zhang S, Liu H M, Song G Q, Wang Y S, Chen S Y, Zhang S P. 2016. Genesis and control factors of shale oil reserving space in Dongying Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 37(12): 1495-1507, 1527]
- 张天福, 孙立新, 张云, 程银行, 李艳锋, 马海林, 鲁超, 杨才, 郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义. 地质学报, 90(12): 3454-3472. [Zhang T F, Sun L X, Zhang Y, Cheng Y H, Li Y F, Ma H L, Lu C, Yang C, Guo G W. 2016. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3454-3472]
- 赵琳洁. 2017. 渤南洼陷古近系沙三下亚段细粒沉积岩形成环境研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Zhao L J. 2017. The forming environment of fine-grained sedimentary rocks of the lower third member of Paleogene shahejie formation, bonan sag. Masteral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 赵文智, 胡素云, 侯连华, 杨涛, 李欣, 郭彬程, 杨智. 2020. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界. 石油勘探与开发, 47(1): 1-10. [Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H, Yang T, Li X, Guo B C, Yang Z. 2020. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil. *Petroleum Exploration and Development*, 47(1): 1-10]
- 邹才能, 马锋, 潘松圻, 张新顺, 吴松涛, 傅国友, 王红军, 杨智. 2023. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展. 地学前缘, 30(1): 128-142. [Zou C N, Ma F, Pan S Q, Zhang X S, Wu S T, Fu G Y, Wang H J, Yang Z. 2023. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 128-142]
- Aplin A C, MacQuaker J H S. 2011. Mudstone diversity: origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems. *AAPG Bulletin*, 95: 2031-2059.
- Lazar O R, Bohacs K M, MacQuaker J H S, Schieber J, Demko T M. 2015. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: nomenclature and description guidelines. *Journal of Sedimentary Research*, 85: 230-246.
- Li T W, Jiang Z X, Xu C L, Liu B, Liu G H, Wang P F, Li X, Chen W T, Ning C X, Wang Z. 2017a. Effect of pore structure on shale oil accumulation in the lower third member of the Shahejie Formation, Zhanhua Sag, Eastern China: evidence from gas adsorption and nuclear magnetic resonance. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 932-949.
- Li T W, Jiang Z X, Li Z, Wang P F, Xu C L, Liu G H, Su S Y, Ning C X. 2017b. Continental shale pore structure characteristics and their controlling factors: a case study from the lower third member of the Shahejie Formation, Zhanhua Sag, Eastern China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45: 670-692.
- Ma Y Q, Fan M J, Lu Y C, Liu H M, Hao Y Q, Xie Z H, Liu Z H, Peng L, Du X B, Hu H Y. 2016. Climate-driven paleolimnological change controls lacustrine mudstone depositional process and organic matter accumulation: constraints from lithofacies and geochemical studies in the Zhanhua Depression, Eastern China. *International Journal of Coal Geology*, 167: 103-118.

MacQuaker J H S, Adams A E. 2003. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: an inclusive nomenclature for mudstones. *Journal of Sedimentary Research*, 73: 735-744.

Milliken K L, Ko L T, Pommer M, Marsaglia K M. 2014. Sem petrography of eastern Mediterranean sapropels: analogue data for assessing organic matter in oil and gas shales. *Journal of Sedimentary Research*, 84: 961-974.

Zhu X M, Zhang M Z, Zhu S F, Dong Y L, Li C, Bi Y Q, Ma L C. 2022. Shale lithofacies and sedimentary environment of the third member, shahejie formation, Zhanhua Sag, Eastern China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 96: 1024-1040.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)

新年贺词并致谢审稿专家

在 2024 年即将过去、2025 年奔腾而来之际,《古地理学报》向各位关心、支持和帮助期刊进步的老师表示最真诚的祝福: 祝福您在新的一年里身体健康, 家庭幸福, 事业有成, 梦想成真!

在过去的 2024 年里, 我们乘风破浪, 笃行不怠。在您的支持与帮助下,《古地理学报》能够顺利地完成了全年 6 期的出版工作, 完成了 1530 页的精心编辑, 完成了网站与公众号的发布与推广。无论您是忠诚的作者、辛苦的审稿专家、热情的读者、具有奉献精神的编委, 还是期刊主管主办单位的领导、同事, 亦或是合作助力期刊发展的网站、学术平台的工作人员, 都是期刊发展不可缺少的一部分, 都是期刊取得进步不可或缺的一分子。在此, 编辑部向您表示最崇高的敬意和感谢!

展望 2025, 百舸争流, 奋楫者先。我们更需要潜心做好各项工作, 精心编辑好作者的每一篇文章, 用心替每一位作者着想, 虚心接受各位老师的建议与意见, 决心让期刊在现在起点上再创新的辉煌。

让我们大家一起更用心地去热爱, 更努力地去生活, 更尽情地去创造, 共赴下一场澎湃。

2024 年共有 204 位专家学者为《古地理学报》审稿, 名单列表如下(括号内数字为 2024 年审稿数量):

鲍志东(1) 曹高社(1) 曹立成(1) 曾雄伟(1) 陈果(1) 陈雷(4) 陈代钊(1) 陈吉涛(1) 陈留勤(1)
陈世悦(2) 陈宇航(2) 褚忠信(1) 崔晓庄(2) 单新(1) 丁晓琪(1) 董进国(1) 杜远生(5) 范代读(1)
范若颖(1) 方修琦(4) 封从军(2) 冯文杰(2) 冯学谦(1) 冯有良(3) 符超峰(3) 付勇(1) 付修根(1)
高抒(2) 高华华(1) 高振中(1) 葛家旺(2) 龚承林(4) 桂和荣(1) 郭岭(2) 郭佩(5) 郭芸(1)
郭艳琴(1) 郭迎春(1) 何贤科(1) 何幼斌(2) 胡作维(1) 黄湘通(3) 黄玉龙(2) 霍飞(2) 纪友亮(7)
季军良(3) 贾进华(3) 简星(4) 姜磊(1) 姜福杰(1) 金中国(1) 靳桂云(1) 旷红伟(3) 赖锦(9)
赖富强(2) 郎咸国(1) 李飞(3) 李钢(1) 李红(2) 李攀(1) 李阳(3) 李凤杰(1) 李全国(1)
李胜利(5) 李世杰(1) 李双应(1) 李文厚(2) 李向东(1) 李孝泽(2) 李元昊(2) 李月从(1) 李增学(1)
梁超(5) 刘健(1) 刘帮军(1) 刘达东(1) 刘大卫(1) 刘建中(1) 刘景彦(1) 刘静江(1) 刘圣乾(1)
刘树根(2) 刘小平(1) 刘亚雷(1) 刘招君(1) 刘自亮(1) 柳波(2) 鲁静(4) 陆扬博(1) 路漫(1)
栾晓聪(1) 罗茂(3) 罗静兰(4) 吕大炜(2) 吕洪波(1) 吕奇奇(1) 马义权(5) 毛小平(1) 孟繁莉(1)
孟庆涛(4) 苗卓伟(1) 庞军刚(1) 彭军(2) 彭阳(3) 蒲秀刚(4) 乔占峰(1) 邱振(2) 邱隆伟(1)
屈海洲(1) 屈红军(1) 任影(1) 阮壮(3) 尚晓冬(1) 邵龙义(8) 沈均均(1) 沈玉林(3) 沈越峰(2)
师素珍(1) 施振生(4) 时志强(4) 宋金民(6) 苏中堂(1) 孙雨(1) 孙海涛(2) 孙娇鹏(1) 孙跃武(1)
谭程鹏(1) 谭秀成(4) 汤冬杰(2) 田景春(1) 王恽(1) 王瑜(1) 王俊辉(1) 王启宇(1) 王濡岳(1)
王秀平(2) 王雪莲(1) 王艳忠(2) 王玉满(1) 王张华(4) 王治祥(1) 王中美(1) 韦恒叶(3) 文华国(3)
吴冬(2) 吴靖(1) 吴朝东(2) 吴驰华(1) 吴怀春(2) 吴胜和(1) 吴仕强(1) 吴文明(1) 吴亚生(3)
吴因业(1) 郗兆栋(1) 蕙克莱(2) 鲜本忠(2) 徐杰(2) 徐尚(1) 徐林刚(2) 许欢(1) 薛进庄(1)
鄢继华(3) 闫建平(2) 杨浩(1) 杨田(2) 杨江海(1) 杨瑞东(2) 杨守业(3) 杨勋林(1) 杨振京(1)
姚铁锋(1) 叶建平(1) 尹帅(2) 于洲(1) 于兴河(1) 余文超(5) 张华(1) 张可(2) 张德民(2)
张建国(1) 张俊娜(3) 张克信(1) 张美洲(3) 张廷山(1) 张晓东(1) 张元动(1) 张元福(1) 张志杰(1)
赵俊峰(3) 赵晓明(2) 赵彦彦(3) 郑景云(1) 钟大康(3) 周传明(2) 周进高(2) 周锡强(1) 周长付(1)
朱茂炎(1) 朱世发(1) 朱晓军(3) 朱筱敏(5) 左昕昕(1)

《古地理学报》编辑部

2024 年 12 月 31 日