

致密砂岩砂-泥结构发育特征及其对储集空间的控制作用 ——以渤海湾盆地临南洼陷古近系沙河街组三段下亚段为例

李军亮¹,王鑫^{2,3},王伟庆¹,李博¹,曾斌辉^{2,3},贾昆昆^{2,3},乔俊程^{2,3},王康亭^{2,3}

[1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257029;2. 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;
3. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249]

摘要:在陆相含油气沉积盆地中,沉积水体变化快,砂岩和泥岩频繁交互。不同的砂-泥互层形式导致砂岩储层的储集空间差异性明显。以渤海湾盆地惠民凹陷临南洼陷古近系沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)为例,基于砂岩和泥岩在空间上的组合形式及其单层厚度分析,利用铸体薄片观察、物性测试和微米CT技术,系统分析不同砂-泥结构下砂岩储层的物性特征、孔隙类型和孔隙结构特征。结果表明,研究区沙三下亚段发育厚泥岩夹薄砂岩、中泥岩夹薄砂岩、厚泥岩夹中砂岩、薄砂岩-薄泥岩互层、中砂岩-中泥岩互层、厚砂岩-厚泥岩互层、中砂岩夹薄泥岩、厚砂岩夹中泥岩和厚砂岩夹薄泥岩9种砂-泥结构类型。砂岩和泥岩之间的离子交互关系,导致不同砂-泥结构砂岩储层储集能力具有较强的非均质性。对于砂/地比较小的砂-泥结构,泥岩能够为砂岩提供充足的 CO_3^{2-} , Ca^{2+} , Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 离子。砂岩被胶结物完全充填,储层变得极为致密。随着砂/地比增大,泥岩无法为砂岩提供充足的 CO_3^{2-} , Ca^{2+} , Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 离子。砂-泥界面附近砂岩中碳酸盐胶结作用较强,储层极为致密;而砂岩内部碳酸盐胶结作用较弱,发育少量的原生孔隙。同时,砂岩厚度比较大的砂-泥结构,有利于有机酸的注入,形成大量的粒间溶蚀孔,改善储层质量。基于砂-泥结构的差异性,揭示了砂-泥结构控制下砂岩储层储集空间演化路径和模式,对指导致密储层的甜点预测具有重要意义。

关键词:胶结作用;孔隙结构;砂-泥结构;致密储层;济阳坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Influence of sand-mud assemblages in tight sandstones on reservoir storage spaces: A case study of the lower submember of the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation in the Linnan sub-sag, Bohai Bay Basin

LI Junliang¹, WANG Xin^{2,3}, WANG Weiqing¹, LI Bo¹, ZENG Jianhui^{2,3}, JIA Kunkun^{2,3},
QIAO Juncheng^{2,3}, WANG Kangting^{2,3}

[1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257029, China;
2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China; 3. College of Geosciences, China University of
Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: The swift shifts in sedimentary water bodies in continental petroliferous sedimentary basins result in frequent intercalation of sandstone and mudstone layers. Various sandstone-mudstone intercalation patterns (sand-mud assemblages) lead to significant differences in the storage spaces in sandstone reservoirs. Focusing on the lower submember of the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation in the Linnan sub-sag, Huimin Sag, Bohai Bay Basin, we first analyze the spatial assemblages and single-layer thickness of sandstone and mudstone layers. Using casting thin section observations, physical property tests, and micro-CT scanning, we systematically elucidate the physical properties, pore types, and pore structures of sandstone reservoirs with different sand-mud assemblages. As indicated by the findings, the lower submember contains nine types of sand-mud assemblages, namely thick mudstone interbedded with thin sandstone, medium mudstone interbedded with thin sandstone, thick mudstone interbedded with

收稿日期:2023-04-07;修回日期:2023-06-02。

第一作者简介:李军亮(1975—),男,博士、高级工程师,油气地质综合研究。E-mail: lijunliang_slyt@sinopec.com。

通信作者简介:王鑫(1993—),男,博士研究生,含油气盆地流体分析与储层评价。E-mail: xinwang_geo@outlook.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41972147)。

medium sandstone, intercalated thin sandstone and thin mudstone, intercalated medium sandstone and medium mudstone, intercalated thick sandstone and thick mudstone, medium sandstone interbedded with thin mudstone, thick sandstone interbedded with medium mudstone, and thick sandstone interbedded with thin mudstone. The ionic interactions between sandstones and mudstones lead to strong heterogeneity in the storage capacity of sandstone reservoirs with different sand-mud assemblages. For sand-mud assemblages with low net-to-gross ratios, mudstones supply ample CO_3^{2-} , Ca^{2+} , Fe^{2+} , and Mg^{2+} to sandstones, and sandstones are completely filled with cements. Consequently, the sandstone reservoirs become extremely tight. However, when this ratio rises, mudstones cannot provide sandstones with sufficient ions mentioned above. In this case, sandstones near the sand-mud interfaces exhibit strong carbonate cementation, forming extremely tight reservoirs. In contrast, the interior of the sandstones shows weak carbonate cementation, with a small number of primary pores present. Additionally, the sand-mud assemblages with relatively thick sandstones promote organic acid infiltration, enhancing reservoir quality through the formation of numerous intergranular dissolution pores. Based on the differences in sand-mud assemblages, we reveal the influence of sand-mud assemblages on the evolutionary path and model of the storage spaces in sandstone reservoirs. Our insights are pivotal for predicting sweet spots in tight sandstone reservoirs.

Key words: cementation, pore structure, sand-mud assemblage, tight reservoir, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

引用格式:李军亮,王鑫,王伟庆,等.致密砂岩砂-泥结构发育特征及其对储集空间的控制作用——以渤海湾盆地临南洼陷古近系沙河街组三段下亚段为例[J].石油与天然气地质,2023,44(5):1173–1187. DOI:10.11743/ogg20230508.

LI Junliang, WANG Xin, WANG Weiqing, et al. Influence of sand-mud assemblages in tight sandstones on reservoir storage spaces: A case study of the lower submember of the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation in the Linnan sub-sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023,44(5):1173–1187. DOI:10.11743/ogg20230508.

致密砂岩油藏是目前油气勘探领域的研究热点,且其资源潜力巨大。相比较于常规储层,致密砂岩储层的矿物组分多样、物性差、孔隙结构复杂、非均质强^[1-6]。以往的砂岩储层评价常把砂岩本身作为独立的地质体来研究,并对致密砂岩储层成储机制进行了大量的报道^[3-13]。然而,陆相含油气沉积盆地中,砂岩和泥岩共同构成了地层的主体。两者都同处于一定的地质背景中,经历了相同的成岩地球物理场(如地温场、地压场)^[14-16]。泥岩常常能够为砂岩提供成岩物质,对砂岩的成储过程有着重要影响。济阳坳陷古近系沙河街组沉积期,沉积环境变化频繁,水体变化快,泥岩和砂岩频繁交互发育^[17-18]。不同类型的沉积组合中,砂岩和泥岩的比例关系和互层形式是不同的。砂岩与泥岩之间的接触方式^[17]、砂岩与泥岩接触面的距离^[19-20]以及泥岩中的物质^[21-22]等都会导致砂岩储层的质量出现强烈的非均质性。复杂的砂-泥结构制约了致密储层的评价与甜点预测^[23-24]。本文针对砂-泥结构对砂岩储层储集空间作用机理,以渤海湾盆地济阳坳陷惠民凹陷致密砂岩为研究对象,开展基础地质资料分析,明确了研究区砂-泥结构类型及其分布特征。并进一步开展了岩心观察描述、薄片观察、孔隙度测试、渗透率测试和微米CT测试,查明了砂-泥结构控制下的胶结减孔作用,最终建立砂-泥结构控制下的储

层演化路径和发育模式,以期对致密油的勘探和开发提供有效的指导。

1 地质背景

惠民凹陷位于中国东部的渤海湾盆地济阳坳陷的西南部(图1a),北部为埕宁隆起,南部对接鲁西隆起,东部为东营凹陷,西部为临清坳陷,整体表现为典型的断陷特征^[25]。临南洼陷位于临商断层与夏口断层之间(图1b),为北东东向不对称地堑式洼陷^[26]。古近系沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)沉积早期盆地处于强烈的沉降阶段^[27]。在夏口断裂剧烈活动的作用下,来自鲁西隆起的碎屑物质在夏口断裂以北的洼陷区沉积,并不断向湖盆推进,形成3个砂体厚度中心,即双丰三角洲、江家店三角洲和瓦屋三角洲^[28]。其中双丰三角洲规模大,发育时期长,江家店三角洲和瓦屋三角洲规模较小,发育时期短。在西北地区,来自埕宁隆起的陆源碎屑在洼陷内聚集,同样形成规模较大的盘河三角洲沉积^[29]。沙三下亚段沉积晚期临商断层的活动对地势起到了一定的影响作用,使临南洼陷产生了陡坡,为三角洲前缘滑塌提供了充足的条件,发育大量深水浊积扇沉积^[30]。纵向上,临南洼陷沙三下亚段发育4套砂岩层组和2套

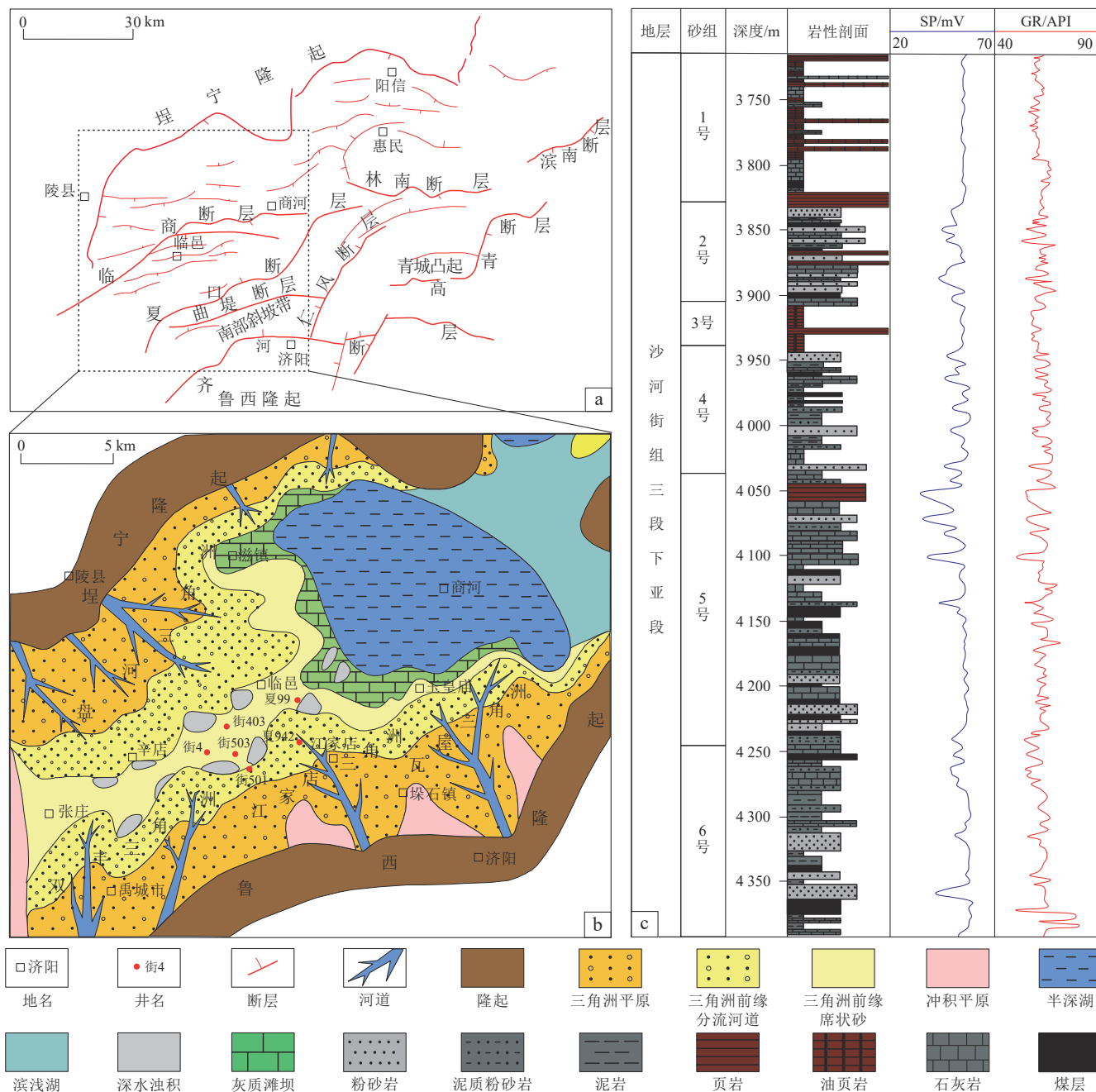


图1 临南洼陷构造背景(a)、沙三下亚段沉积期砂体分布(b)和街503井地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Tectonic setting (a), sand body distribution in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation (b), and composite stratigraphic column of well Jie 503 (c) of the Linnan sub-sag

泥岩层组(图1c)。6号、5号和4号砂组主要发育三角洲沉积砂体,其中三角洲前缘亚相占主体。2号砂组主要发育深水滑塌浊积砂体。基于砂岩的岩石组分和结构数据的统计,6号、5号、4号和2号砂组的原始沉积物源类似,分选系数和粒度中值具有一定的相似性。同时,6号、5号、4号和2号砂组发育厚度不等的泥岩,以灰色和灰绿色为主,缺乏生烃能力。3号和1号砂组为两套富有机质泥岩层组,是沙三下亚段的主要烃源岩。

2 砂-泥结构类型及发育特征

2.1 砂-泥结构类型划分

湖相碎屑沉积物在沉积过程中受湖平面升降的影响而频繁地迁移摆动,砂岩和泥岩之间的叠置关系复杂^[17]。基于岩心观察和岩性录井数据,结合砂岩和泥岩在空间上的接触方式及其组合形式,惠民凹陷临南洼陷沙三下

亚段致密储层的砂-泥结构划分为砂岩夹泥岩型、砂岩泥岩互层型和泥岩夹砂岩型3种主要类型(图2)。砂岩夹泥岩型砂-泥结构在空间上表现为厚层砂岩包裹相对较薄泥岩,砂岩的总厚度明显高于泥岩(图2a)。砂岩、泥岩互层型砂-泥结构在空间上主要表现为泥岩与薄层砂岩频繁互层出现,砂岩和泥岩厚度相近(图2b)。泥岩夹砂岩型砂-泥结构在空间上表现为厚层泥岩包裹相对薄层的砂岩,泥岩总厚度明显大于砂岩(图2c)。

临南洼陷沙三下亚段沉积期处于强烈沉降深凹陷阶段,构造活动剧烈,沉积水体不稳定^[31],导致同类型砂-泥结构中砂岩和泥岩的单层厚度具有明显的非均质性。统计结果表明,砂岩和泥岩单层厚度均呈单峰状分布,集中分布在0.5~2.0 m(图3)。基于单层厚

度累积曲线的三等分点,分别将厚度小于1.0 m的砂岩层和小于1.5 m的泥岩层定义为薄层,厚度介于1.0~2.5 m的砂岩层和介于1.5~3.5 m的泥岩层定义为中层,厚度大于2.5 m的砂岩层和大于3.5 m的泥岩层定义为厚层。因此,在砂-泥结构类型的约束下,结合砂岩和泥岩的单层厚度,对砂-泥结构类型进一步划分为厚泥岩夹薄砂岩、中泥岩夹薄砂岩、厚泥岩夹中砂岩、薄砂岩-薄泥岩互层、中砂岩-中泥岩互层、厚砂岩-厚泥岩互层、中砂岩夹薄泥岩、厚砂岩夹中泥岩和厚砂岩夹薄泥岩9种类型(表1)。

2.2 砂-泥结构分布特征

沙三下亚段沉积期惠民凹陷临南洼陷总体以深

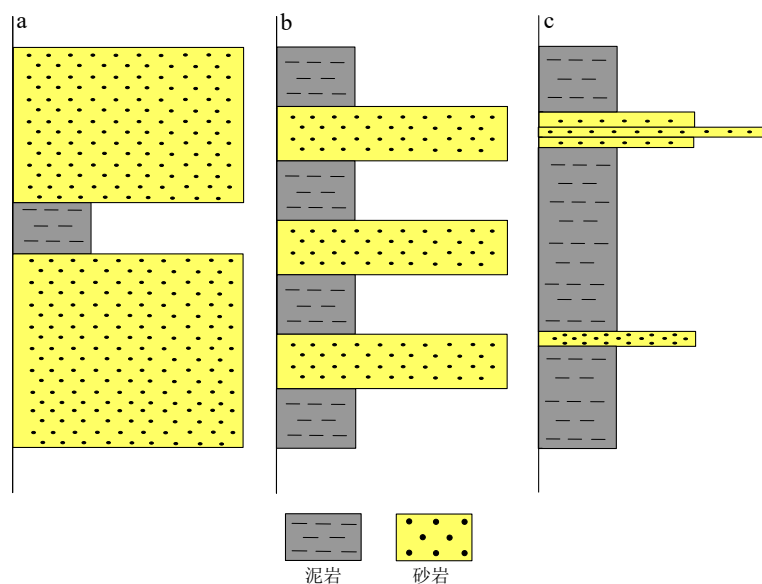


图2 临南洼陷沙三下亚段砂-泥结构类型

Fig. 2 Types of sand-mud assemblages in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

a. 砂岩夹泥岩; b. 砂岩-泥岩互层; c. 泥岩夹砂岩

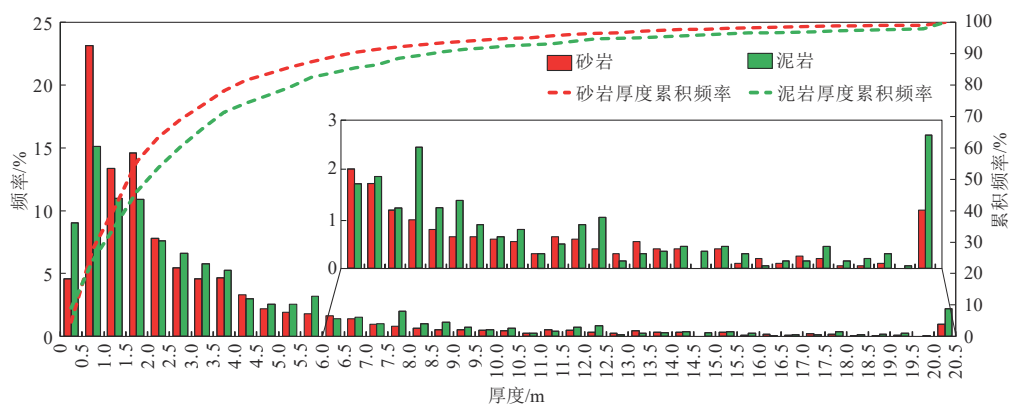


图3 临南洼陷沙三下亚段砂岩和泥岩单层厚度频率分布直方图

Fig. 3 Histogram showing the single-layer thickness frequency distribution of sandstones and mudstones in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

表1 临南洼陷沙三下亚段砂-泥结构类型划分

Table 1 Types of sand-mud assemblages in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

砂-泥结构类型	砂岩厚度/m	泥岩厚度/m	砂/地比
厚泥岩夹薄砂岩	<1.0	>3.5	0 ~ 0.125
中泥岩夹薄砂岩	<1.0	1.5 ~ 3.5	0 ~ 0.250
厚泥岩夹中砂岩	1.0 ~ 2.5	>3.5	0 ~ 0.263
薄砂岩-薄泥岩互层	<1.0	<1.5	0.250 ~ 0.571
中砂岩-中泥岩互层	1.0 ~ 2.5	1.5 ~ 3.5	0.263 ~ 0.571
厚砂岩-厚泥岩互层	>2.5	>3.5	0.263 ~ 0.588
中砂岩夹薄泥岩	1.0 ~ 2.5	<1.5	0.571 ~ 1.000
厚砂岩夹中泥岩	>2.5	1.5 ~ 3.5	0.588 ~ 1.000
厚砂岩夹薄泥岩	>2.5	<1.5	0.769 ~ 1.000

陷、水域扩展为特点^[32]。湖平面升降、古地貌与物源供给强度等复杂多变的地质因素,导致不同沉积期沉积的砂层砂-泥结构类型的分布存在较大差异(图4)。6号、5号和4号砂组沉积期,惠民凹陷临南洼陷古地形平坦,汇水面积大,主要发育三角洲砂体^[33]。其中,6号砂组沉积期古气候条件干旱,水体蒸发严重,水体变化大,洼陷四周物源供给有限。该砂组发育厚度相对较大的泥岩,砂-泥结构非均质性强,以厚泥岩夹薄砂岩型、中砂岩-中泥岩互层型和厚砂岩夹薄泥岩型为主,其次为薄砂岩-薄泥岩互层型、厚砂岩-厚泥岩互层型、中砂岩夹薄泥岩型和厚砂岩夹中泥岩型。4号和5号砂组沉积期盘河三角洲、双丰三角洲、江家店三角洲和瓦屋三角洲逐渐形成,并大规模继承性发展^[28]。这两套砂组的砂岩厚度较大,砂-泥结构分布特征类似,以中砂岩-中泥岩互层型、中砂岩夹薄泥岩型和厚砂岩夹薄泥岩型为主,三者总占比超过50%,

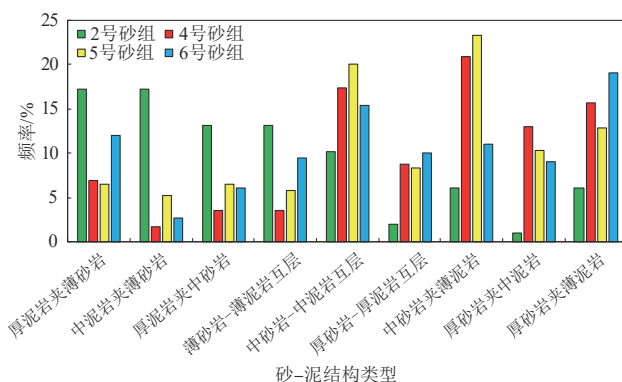


图4 临南洼陷沙三下亚段砂-泥结构类型频率分布直方图

Fig. 4 Frequency histogram showing all types of sand-mud assemblages in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

其次为厚泥岩夹中砂岩型和厚砂岩厚泥岩互层型。2号砂组沉积期处于强烈的断裂阶段,沉降快、水体较深,三角洲前缘滑塌形成大规模的深水浊积砂体^[34]。该砂组砂岩层相对较薄,以厚泥岩夹薄砂岩型和中泥岩夹薄砂岩型为主,占比均大于15%;其次为厚泥岩夹中砂岩型,薄砂岩-薄泥岩互层型和中砂岩-中泥岩互层型,占比均大于10%。

3 储集空间发育特征

3.1 物性特征

基于对收集资料的统计和分析发现,惠民凹陷临南洼陷沙三下亚段砂岩储层具有低孔低渗为主、局部相对中孔中渗的特点,孔隙度主要分布在2%~18%,渗透率主要分布在 $(0.01 \sim 1.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图5)。不同砂-泥结构砂岩储层的物性特征存在差异。砂岩厚度较薄的厚泥岩夹薄砂岩型、中泥岩夹薄砂岩型和薄砂岩-薄泥岩互层型砂岩储层物性最差,孔隙度集中分布在10%以下,渗透率集中分布在 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下。其中,厚泥岩夹薄砂岩型砂岩储层物性极差,中泥岩夹薄砂岩型和薄砂岩-薄泥岩互层型砂岩储层物性略好。厚泥岩夹中砂岩型、中砂岩-中泥岩互层型和厚砂岩-厚泥岩互层型砂岩储层物性中等,且物性分布的非均质性较强,孔隙度集中分布在5%~15%,渗透率集中分布在 $(0.02 \sim 1.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。中砂岩夹薄泥岩、厚砂岩夹中泥岩和厚砂岩夹薄泥岩砂岩储层物性较好,且物性分布的非均质性较强,孔隙度集中分布在7%~19%,渗透率集中分布在 $(0.03 \sim 1.30) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。整体上,砂/地比越大储层物性越好,且相对较厚的砂岩储层物性分布的非均质性较强。

3.2 储集空间类型

基于铸体薄片观察,惠民凹陷临南洼陷三角洲砂体致密储层孔隙类型主要为原生孔隙和次生孔隙(图6)。原生孔隙指的是岩石矿物颗粒与颗粒之间的孔隙^[34],主要由脆性矿物石英之间的支撑或胶结矿物未完全充填而形成的,孔隙形态多为三角形或多边形,也存在如长条形等其他不规则形态(图6a—e)。原生孔隙在9类砂-泥结构中均有发育,类型主要包括压缩原生粒间孔和胶结剩余粒间孔。次生孔隙的形成主要与有机质成熟过程中产生的有机酸有关^[35-36]。有机酸由烃源岩排出后,对相邻砂岩中的碱性矿物进行强烈溶蚀^[37]。砂岩形成大量的次生孔

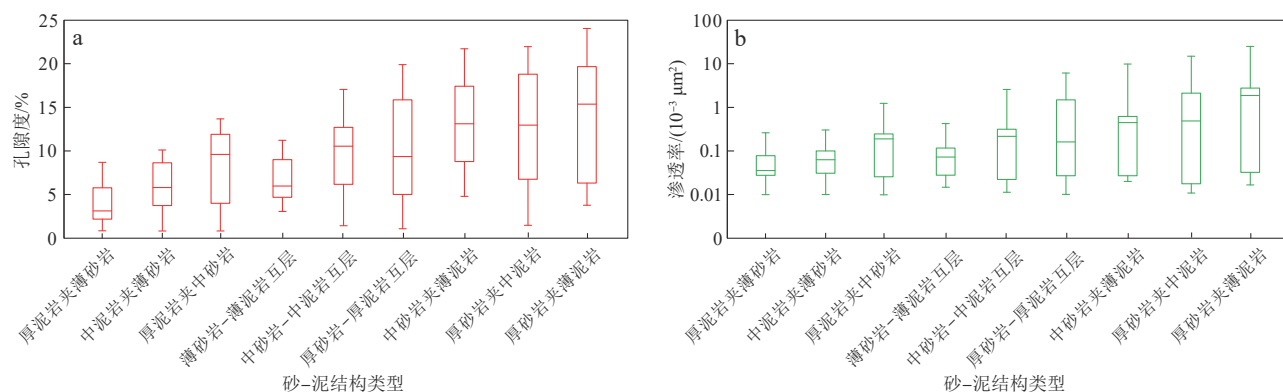


图5 临南洼陷沙三下亚段不同砂-泥结构物性分布箱状图

Fig. 5 Box plots showing the physical property distributions of all the sand-mud assemblages in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

a. 孔隙度; b. 渗透率

(箱状图数值从上到下分别为“最大值、上四分位数、中位数、下四分位数、最小值”。)

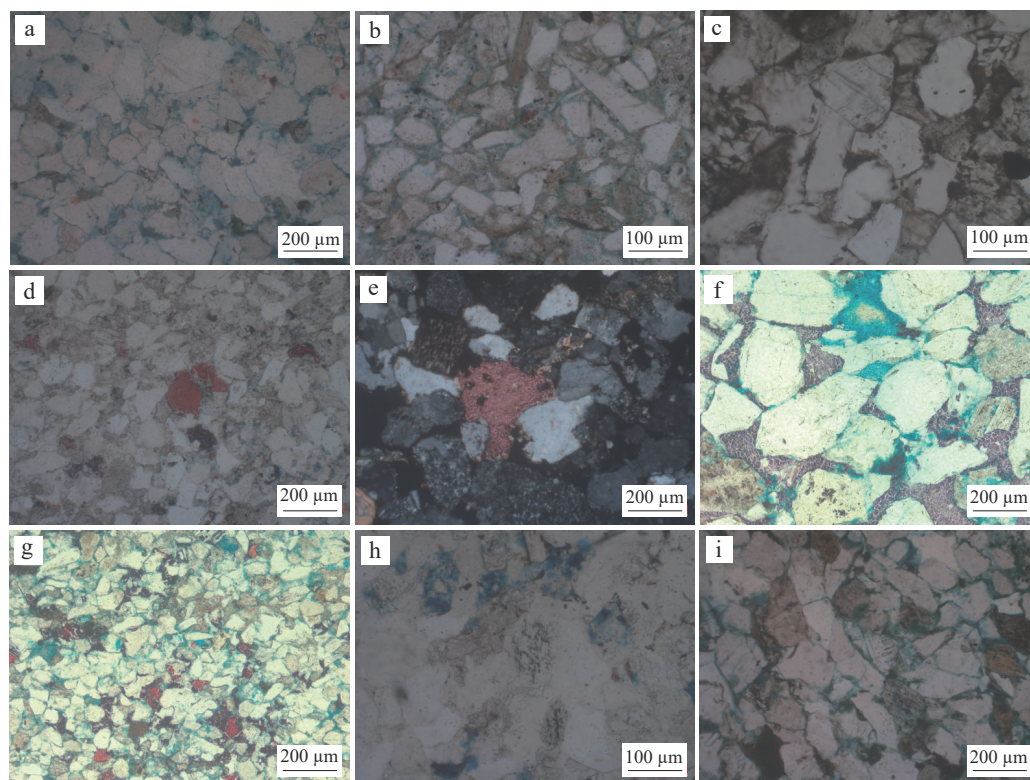


图6 临南洼陷沙三下亚段主要储集空间类型及镜下特征照片

Fig. 6 Types and microscopic characteristics of primary storage spaces in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

a. 单偏光, 街503井, 埋深4 051.26 m, 原生粒间孔; b. 单偏光, 街4井, 埋深3 914.10 m, 原生粒间孔; c. 单偏光, 夏99井, 4 258.87 m, 原生粒间孔; d. 单偏光, 夏99井, 埋深4 254.51 m, 胶结残余孔; e. 正交光, 夏942井, 埋深3 774.41 m, 胶结残余孔; f. 单偏光, 街501井, 埋深4 003.71 m, 粒间溶蚀孔; g. 单偏光, 街403井, 埋深4 244.91 m, 粒间溶蚀孔; h. 单偏光, 夏99井, 埋深4 258.26 m, 粒内溶蚀孔; i. 单偏光, 街503井, 埋深4 084.10 m, 粒内溶蚀孔

隙,且原有粒间孔被改造和溶蚀扩大。次生孔隙多形成于厚砂岩-厚泥岩互层型、厚砂岩夹中泥岩型和厚砂岩夹薄泥岩型砂-泥结构,类型主要包括粒间溶蚀孔和粒内溶蚀孔。粒间溶蚀孔以碳酸盐矿物的部分溶蚀为主,孔隙的边界不规则,并伴有自生黏土矿

物的充填,孔隙较大且连通性好(图6f,g),是油气成藏的重要储集空间。粒内溶蚀孔以长石沿解理面溶解为主,呈蜂巢状、斑块状分布的孔隙,其溶孔中常见溶蚀残晶或自生微晶石英,孔隙连通性较差(图6h,i)。

3.3 孔隙结构发育特征

基于微米CT扫描和灰度阈值分割处理,分别提取厚泥岩夹薄砂岩型、厚砂岩-厚泥岩互层型和厚砂岩夹薄泥岩型致密砂岩储层三维孔喉空间分布(图7a—e),并对图像进行数字化处理,建立其对应的孔隙网络球棍模型(图7f—j)。整体来看,不同的砂-泥结构砂岩样品孔喉发育程度和连通性均随砂地比的增加而增强,相同砂-泥结构砂岩内部的样品孔喉发育程度和连通性好于砂岩砂-泥界面附近的样品。

厚泥岩夹薄砂岩型砂岩孔隙空间分布具有较高的单一性,表现出极差的储集能力和连通能力。砂岩整体孔隙发育程度较差,以小孔零星分布为主(图7a,f),平均孔隙半径集中在 $1.07 \sim 2.24 \mu\text{m}$ (图8a),相邻区域内同颜色的孔隙在空间分布上覆盖的体积极为

有限(图7a),说明孔喉系统整体的连通性较差,平均喉道半径集中分布在 $0.50 \sim 1.46 \mu\text{m}$ (图8b)。

厚砂岩-厚泥岩互层型砂岩孔隙空间分布具有较强的非均质性(图7b, c, g, h)。孔隙集中叠置发育,而相对复杂的喉道类型仅仅连通了局部的孔隙,具有局部连通的特性,因而对储层整体的连通性贡献有限。砂-泥界面附近样品孔喉发育程度较差,平均孔隙半径集中在 $1.07 \sim 2.59 \mu\text{m}$ (图8a),平均喉道半径集中在 $0.50 \sim 1.63 \mu\text{m}$ (图8b)。砂岩内部样品孔喉发育程度略好,平均孔隙半径集中在 $1.07 \sim 2.77 \mu\text{m}$ (图8a),平均喉道半径集中在 $1.01 \sim 2.13 \mu\text{m}$ (图8b)。

厚砂岩夹薄泥岩型砂岩孔隙空间分布较为均一,表现出极好的储集能力和连通能力(图7d, e, i, j)。砂-泥界面附近样品孔喉发育程度略差,平均孔隙半径集中分

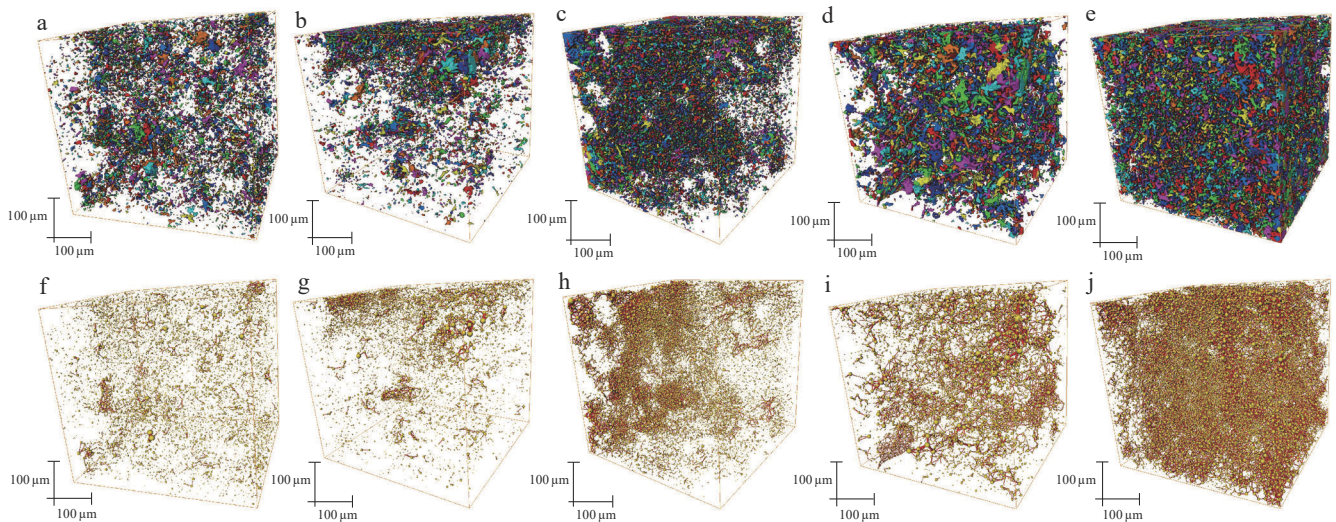


图7 临南洼陷沙三下亚段微米CT三维孔喉空间分布

Fig. 7 Micro-CT-scanning-based 3D pore and throat distributions in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

a, f. 厚泥岩夹薄砂岩型砂岩样品; b, g. 厚砂岩-厚泥岩互层型砂-泥界面的砂岩样品; c, h. 厚砂岩-厚泥岩互层型砂岩内部的砂岩样品; d, i. 厚砂岩夹薄泥岩型砂-泥界面的砂岩样品; e, j. 厚砂岩夹薄泥岩型砂岩内部的砂岩样品

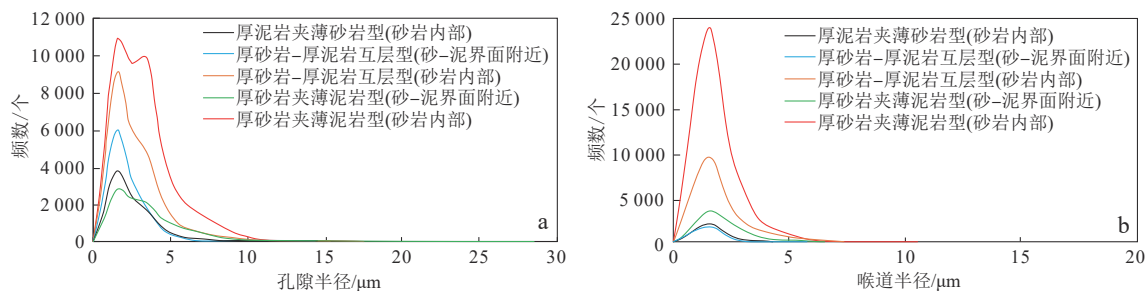


图8 临南洼陷沙三下亚段孔隙半径(a)与喉道半径分布特征(b)

Fig. 8 Distributions of pore radii (a) and pore throat radii (b) in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

布在 $1.07 \sim 3.19 \mu\text{m}$ (图 8a), 平均喉道半径集中分布在 $0.51 \sim 1.72 \mu\text{m}$ (图 8b)。砂岩内部样品孔喉发育程度最好, 平均孔隙半径集中分布在 $1.07 \sim 3.29 \mu\text{m}$ (图 8a), 平均喉道半径集中分布在 $1.00 \sim 2.17 \mu\text{m}$ (图 8b)。

4 砂-泥结构对储集空间的控制作用

4.1 砂-泥结构控制下的胶结减孔作用

砂岩和泥岩之间有明显的离子交互关系: 砂岩向泥岩提供 K^+ 离子, 泥岩以扩散的形式向砂岩提供 CO_3^{2-} , Fe^{2+} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子, 而泥岩提供的这些离子则是形成碳酸盐胶结物的必要条件^[38]。不同砂-泥结构或同一砂-泥结构不同位置的砂岩岩石学特征和孔隙类型存在较强的非均质性(图 9)。对于砂/地比较小的砂-泥结构, 泥岩相对于砂岩较厚(图 9a)。在沉积埋藏的过程中, 泥岩能够对砂岩提供充足的 CO_3^{2-} , Fe^{2+} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子, 整个砂体被胶结物完全充填, 在压实作用的共同作用下储层变得极为致密。对于砂/地比较大的砂-泥结构, 泥岩厚度接近于砂岩或薄于砂岩(图 9b)。在沉积埋藏的过程中, 泥岩无法对砂岩提供充足的 CO_3^{2-} , Fe^{2+} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子, 砂体中碳酸盐胶结强度表现出较强非均质性。邻近砂-泥界面的砂岩中碳酸盐胶结作用极强, 粒间孔完全被碳酸盐胶结物充填, 储层变得极为致密; 而砂岩内部碳酸盐胶结作用较弱, 深埋条件下, 发育少量的原生孔隙。同时, 砂/地比

较大的砂-泥结构类型常常发育较厚的砂岩, 有利于有机酸的注入^[39]。颗粒间的碳酸盐被溶蚀后形成大量的粒间溶蚀孔, 储层质量得到改善。

受控于泥岩向砂岩供给离子量的控制, 砂岩中碳酸盐矿物含量占比与距砂-泥界面的距离存在负相关关系(图 10a)。方解石和白云石胶结物的分布范围很广, 在距砂-泥界面 $0 \sim 8 \text{ m}$ 之内, 并且两种胶结物的含量较高, 尤其是白云石胶结物, 含量最高可达到 26%, 两者的含量随着距砂泥界面的距离的增大而减小。同时, 碳酸盐胶结物对粒间孔隙的充填随着距砂-泥界面距离的增大而减弱(图 10b)。其中距砂-泥界面距离 $0 \sim 1 \text{ m}$ 处, 胶结减孔作用最强, 最高可达 23.9%。

4.2 有机酸对储层的溶蚀增孔作用

惠民凹陷临南洼陷沙三下亚段砂岩储层中溶蚀现象普遍发育(图 6f—i), 是主要的建设性成岩作用, 溶蚀增加孔隙空间 $0.5\% \sim 3.0\%$ (图 11)。长石矿物和碳酸盐矿物是发育次生溶蚀的主要组分, 溶蚀作用包括颗粒的部分溶蚀和全部溶蚀。其中碳酸盐的溶蚀是致密砂岩储层中储集空间增加的主要原因。然而, 基于大量的岩心观察和所收集资料的整理与分析发现, 砂层中的泥岩以灰色和灰绿色为主, 缺乏生烃能力, 难以向砂岩提供有机酸。同时, 通过统计距断层不同距离且与断层连通的砂层的溶蚀增孔率我们发现, 溶蚀现象具有距断层越近溶蚀作用越强, 溶蚀增孔越明显的特征(图 11)。结合前人研究结论认为惠民凹陷临

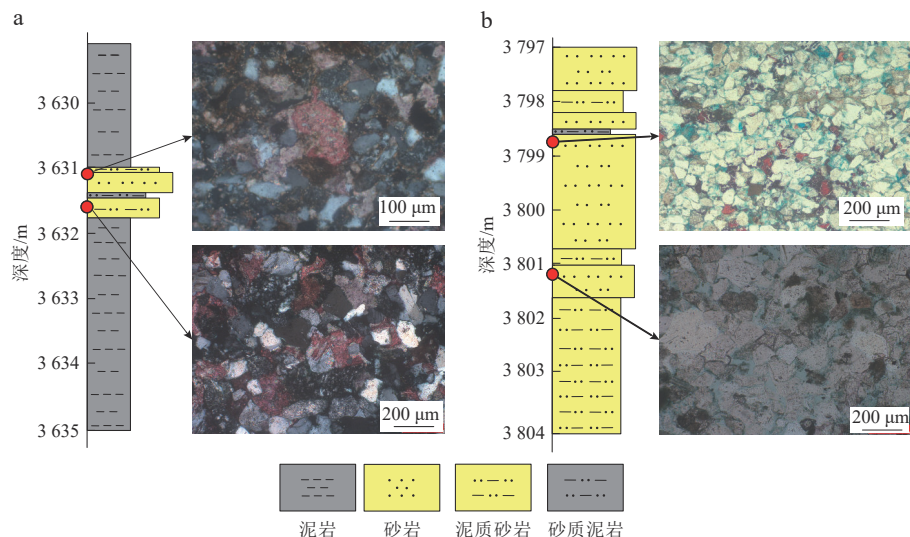


图9 临南洼陷典型井沙三下亚段厚泥岩夹薄砂岩型(a)和厚砂岩夹薄泥岩型储层(b)镜下特征照片

Fig. 9 Microscopic characteristics of reservoirs of thick mudstone interbedded with thin sandstone type (a) and thick sandstone interbedded with thin mudstone type (b) for samples from the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in a typical well, Linnan sub-sag

(a为两张正交光照片;b为两张单偏光照片。)

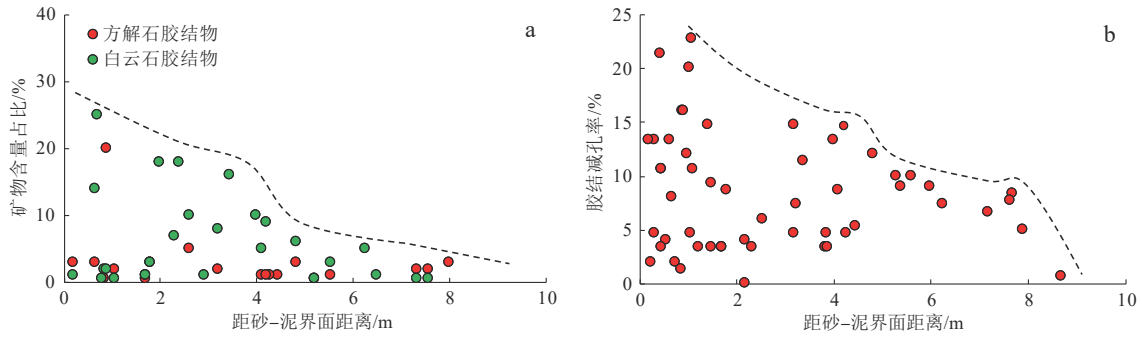


图10 临南洼陷沙三下亚段胶结物含量(a)和胶结减孔强度(b)与距砂-泥界面距离的关系

Fig. 10 Relationships between cement content and the distance from the sand-mud interface (a) and between cementation-induced porosity reduction and the distance (b) for samples from the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation, Linnan sub-sag

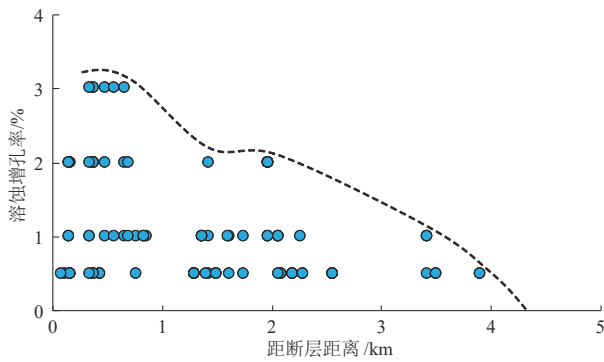


图11 临南洼陷沙三下亚段断层连通的储层距断层距离与溶蚀增孔强度的关系

Fig. 11 Relationship between the distance from faults and dissolution-induced porosity increment for reservoirs connected by faults for samples from the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation, Linnan sub-sag

南洼陷沙三下亚段砂岩储层的酸性流体并不是由砂层中泥岩所提供的,而是来自邻近砂层的烃源岩,后者生

成的有机酸通过断层疏导充注进入与断层相连接的砂层中,进而发生溶蚀作用^[40-41]。

4.3 砂-泥结构控制下的储集空间演化过程

基于矿物之间的交代、切割关系、自生矿物生长次序和古温度等标志,参照前人的研究成果^[42-43],惠民凹陷临南洼陷沙三下亚段不同砂-泥结构类型砂岩具有相似的成岩演化序列,先后经历了早期压实和早期碱性矿物胶结阶段(压实作用和碳酸盐胶结作用)、早期碱性矿物溶蚀和酸性矿物的胶结阶段(长石和碳酸盐溶蚀作用和石英胶结作用)、早期酸性矿物的溶蚀和晚期碱性矿物的胶结阶段(碳酸盐胶结作用和石英溶蚀作用)、晚期酸性矿物的胶结和晚期碱性矿物的溶蚀阶段(长石和碳酸盐溶蚀作用与石英胶结作用)。在成岩演化序列的基础上,结合不同类型孔隙的发育程度,认为惠民凹陷临南洼陷沙三下亚段储集空间演化路径主要存在3种类型(图12)。

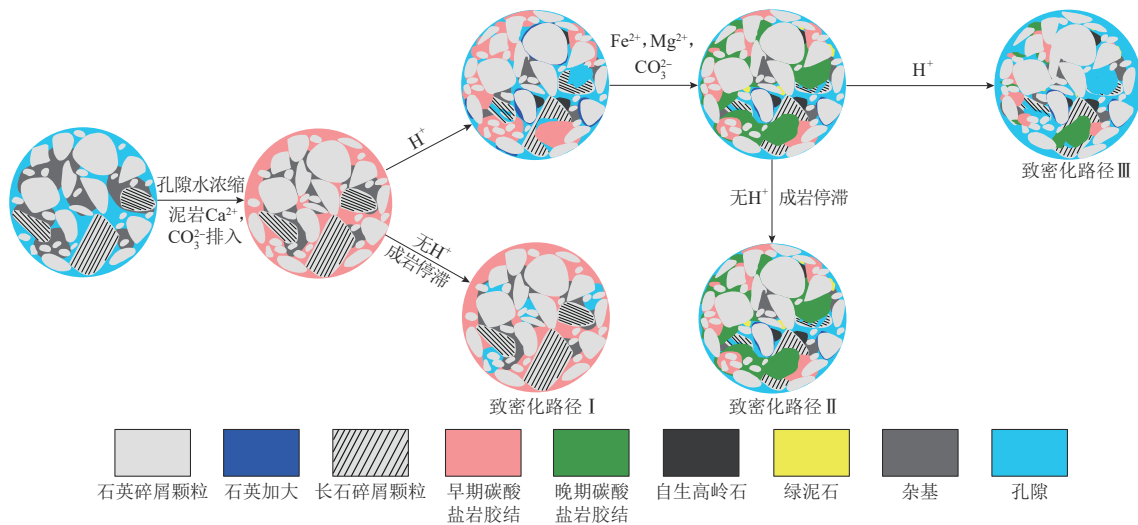


图12 临南洼陷沙三下亚段致密砂岩储层演化路径

Fig. 12 Evolutionary path of tight sandstone reservoirs in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation in the Linnan sub-sag

演化路径 I 只经历了早期碱性矿物的沉淀阶段。早期大量的 CO_3^{2-} , Fe^{2+} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子伴随着离子浓度差所导致的扩散作用从泥岩进入到砂岩中。砂岩内部发育较强的早期碳酸盐胶结作用,而后期有机酸没有对其进行溶蚀改造。砂岩内部没有充足的空间供后期外源流体的进入。流体-岩石相互作用极弱,成岩作用停滞在早期碱性矿物胶结阶段,储层变得极为致密。

演化路径 II 依次经历了早期碱性矿物胶结阶段、早期碱性矿物溶蚀和酸性矿物的胶结阶段、早期酸性矿物的溶蚀和晚期碱性矿物的胶结阶段。在早期碱性矿物溶蚀和酸性矿物的胶结阶段,经历了有机酸对储层的改造作用,大量被碳酸盐充填的储集空间由于溶蚀作用被释放出来。充足的储集空间为外源离子的进入和流体-岩石相互作用提供了有利的场所。泥岩继续以离子扩散的方式为砂岩提供 CO_3^{2-} , Fe^{2+} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子,砂岩进入早期酸性矿物的溶蚀和晚期碱性矿物的胶结阶段。该阶段,砂岩经历了强烈的后期碳酸盐胶结作用。随

后,没有出现晚期碳酸盐胶结物的溶蚀现象,不存在储层储集空间的再次改造作用。砂岩内部没有后期外源有机酸流体的混入,缺乏流体-岩石相互作用的化学反应场所,成岩作用停滞在早期酸性矿物的溶蚀和晚期碱性矿物的胶结阶段,储层变得极为致密。

演化路径 III 分别经历了早期碱性矿物胶结阶段、早期碱性矿物溶蚀和酸性矿物的胶结阶段、早期酸性矿物的溶蚀和晚期碱性矿物的胶结阶段、晚期酸性矿物的胶结和晚期碱性矿物的溶蚀阶段。在晚期酸性矿物的胶结和晚期碱性矿物的溶蚀阶段,酸性流体的不断注入,使得后期碳酸盐胶结物溶蚀,储集空间被释放。

4.4 砂-泥结构控制下的胶结减孔模式

厚泥岩夹薄砂岩型、中泥岩夹薄砂岩型和薄砂岩-薄泥岩互层型砂-泥结构砂/地比较小,均具有泥岩较厚,砂岩较薄的特征(图 13)。较厚泥岩能够以离子扩散的形式为砂岩提供充足的 CO_3^{2-} , Fe^{2+} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+}

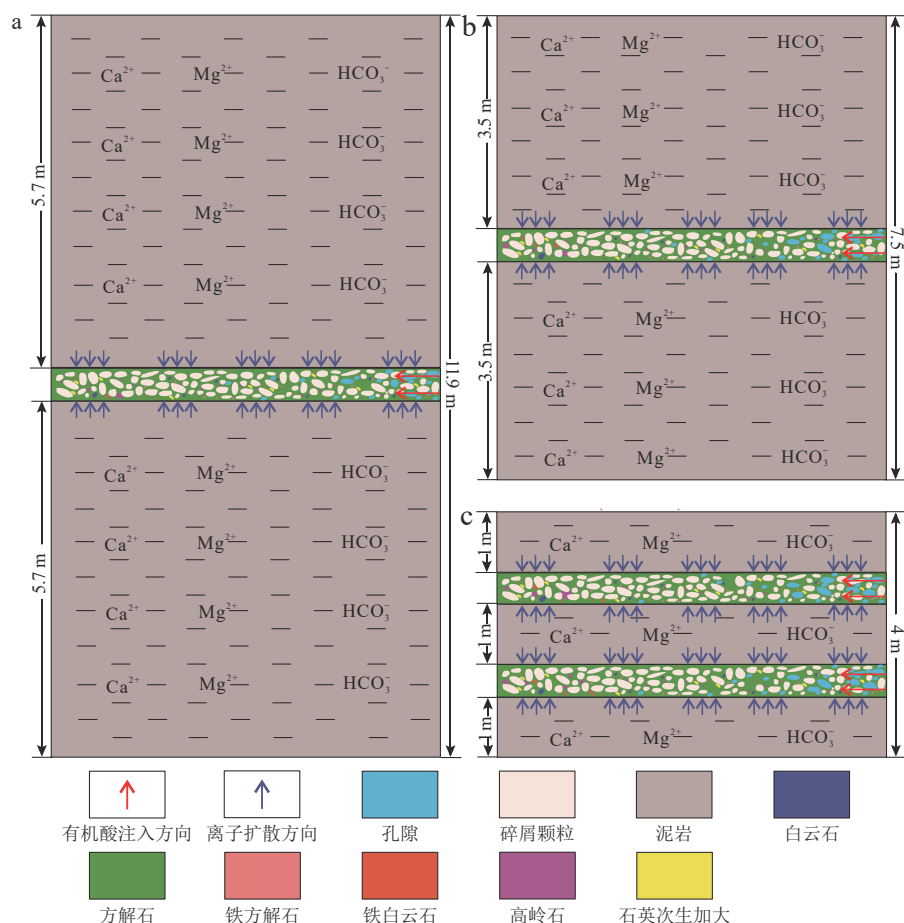


图 13 临南洼陷沙三下亚段厚泥岩夹薄砂岩型(a)、中泥岩夹薄砂岩型(b)和薄砂岩-薄泥岩互层型砂-泥离子交互模式(c)

Fig. 13 Sand-mud ionic interaction patterns of three types of sand-mud assemblages: thick mudstone interbedded with thin sandstone (a), medium mudstone interbedded with thin sandstone (b), and intercalated thin sandstone and thin mudstone (c) for samples from the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation, Linnan sub-sag

离子,然而砂岩中供离子沉淀的空间极为有限,使得早期无铁碳酸盐胶结物在砂岩中极为发育。储层整体孔隙发育程度较差,以小孔零星分布为主(图7a,f),且孔喉系统整体的连通性较差(图8b)。后期通过断层导入的有机酸难以侵入厚度较薄且致密的砂岩内部,无

法形成有利的次生溶蚀孔隙。该类砂-泥结构的砂岩以演化路径 I 为主,砂岩整体极为致密(图5)。

厚泥岩夹中砂岩型、中砂岩-中泥岩互层型和厚砂岩-厚泥岩互层型砂-泥结构砂/地比适中,均具有泥岩厚度与砂岩厚度相近的特征(图14)。该类型砂-泥

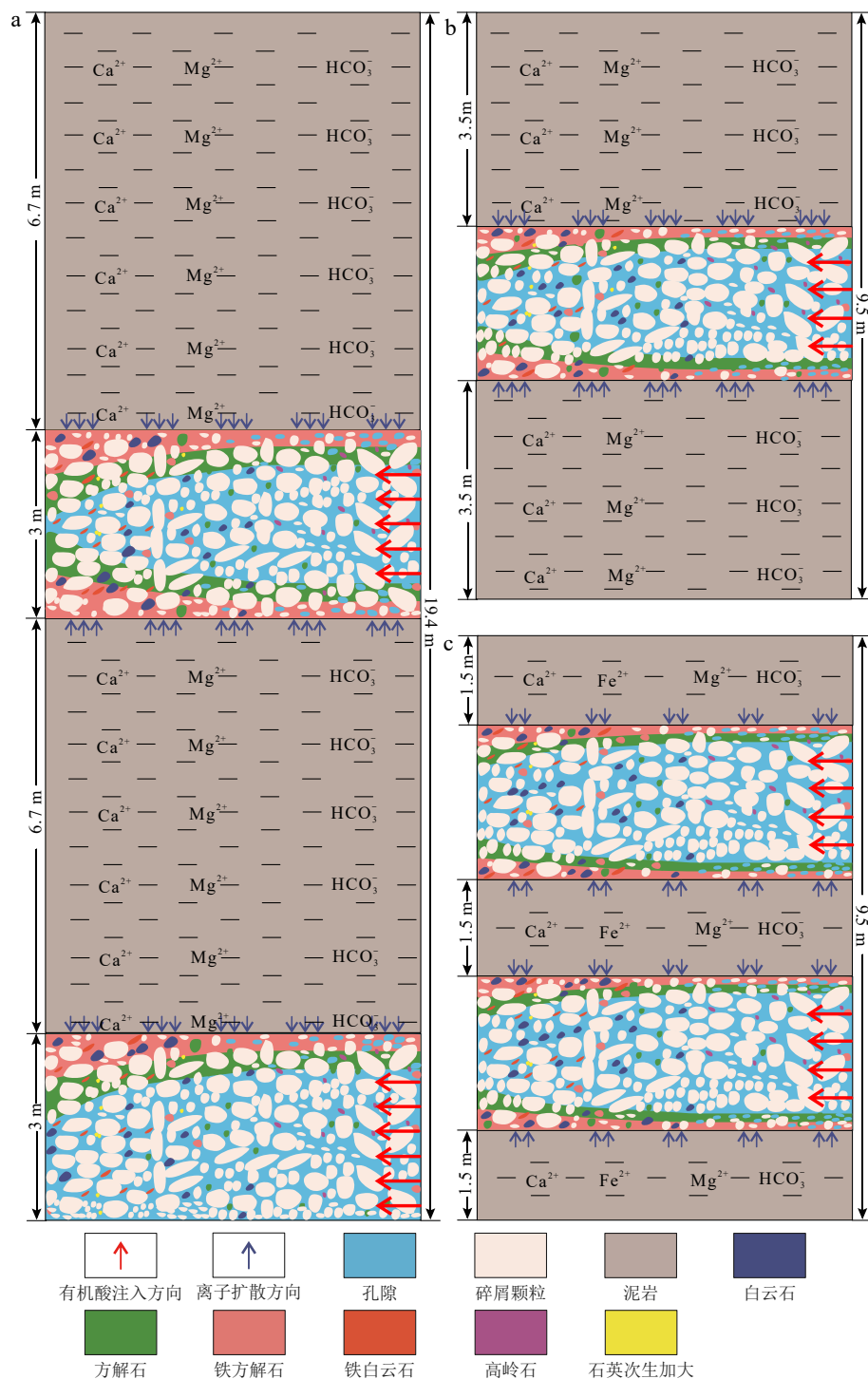


图 14 临南洼陷沙三下亚段厚泥岩夹中砂岩型(a)、中砂岩-中泥岩互层型(b)和厚砂岩-厚泥岩互层型砂-泥离子交互模式(c)

Fig. 14 Sand-mud ionic interaction patterns of three types of sand-mud assemblages: thick mudstone interbedded with medium sandstone (a), intercalated medium sandstone and medium mudstone (b), and intercalated thick sandstone and thick mudstone (c) for samples from the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation, Linnan sub-sag

结构不仅有着充足的 CO_3^{2-} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子来源,而且砂岩中供离子沉淀的空间较为发育。砂-泥界面附近的砂岩中碳酸盐胶结物极为发育,随着距砂泥界面的距离变大,碳酸盐胶结物发育程度降低。有机酸主要由邻近砂层的烃源岩生成,并通过断层的传导,侧向注入到砂岩内部,碳酸盐矿物被溶蚀,形成粒间溶蚀孔隙。受 CO_3^{2-} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子扩散作用和有机酸充注作用的共同控制,砂岩中的孔隙具有局部集中发育的特征(图7b,c,g,h)。因此该类砂-泥结构砂岩的物性非均质性较强(图5)。砂-泥界面附近的砂岩样品胶结减孔作用较强,以演化路径Ⅰ为主,物性较差。砂岩内部的砂岩样品胶结减孔作用较弱,且发育碳酸盐岩溶蚀作用,以演化路径Ⅱ为主,物性较好。

中砂岩夹薄泥岩、厚砂岩夹中泥岩和厚砂岩夹薄泥岩型砂-泥结构砂/地比较大,均具有泥岩较薄,砂岩较厚的特征(图15)。该类型砂-泥结构泥岩无法为砂

岩提供充足的 CO_3^{2-} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子,而砂岩中供离子沉淀的空间较为发育。同样具有随着距砂-泥界面的距离变大碳酸盐胶结物发育程度降低的趋势,但碳酸盐胶结强度较弱,并发育强烈的碳酸盐矿物溶蚀现象。该类砂-泥结构砂岩较厚,且砂岩内部胶结作用较弱,有助于有机酸通过断层传导侧向注入到砂岩内部。有机酸对砂岩进行溶蚀改造作用导致储层表现出极好的储集能力和连通能力。然而,砂岩物性也存在较强的非均质性。砂-泥界面附近的砂岩孔隙结构发育程度相对略差(图7d,i),以演化路径Ⅱ为主,物性略差。砂岩内部的砂岩样品孔隙结构发育程度极好(图7e,j),以演化路径Ⅲ为主,物性最好。

5 结论

1) 临南洼陷沙三下亚段发育厚泥岩夹薄砂岩、中

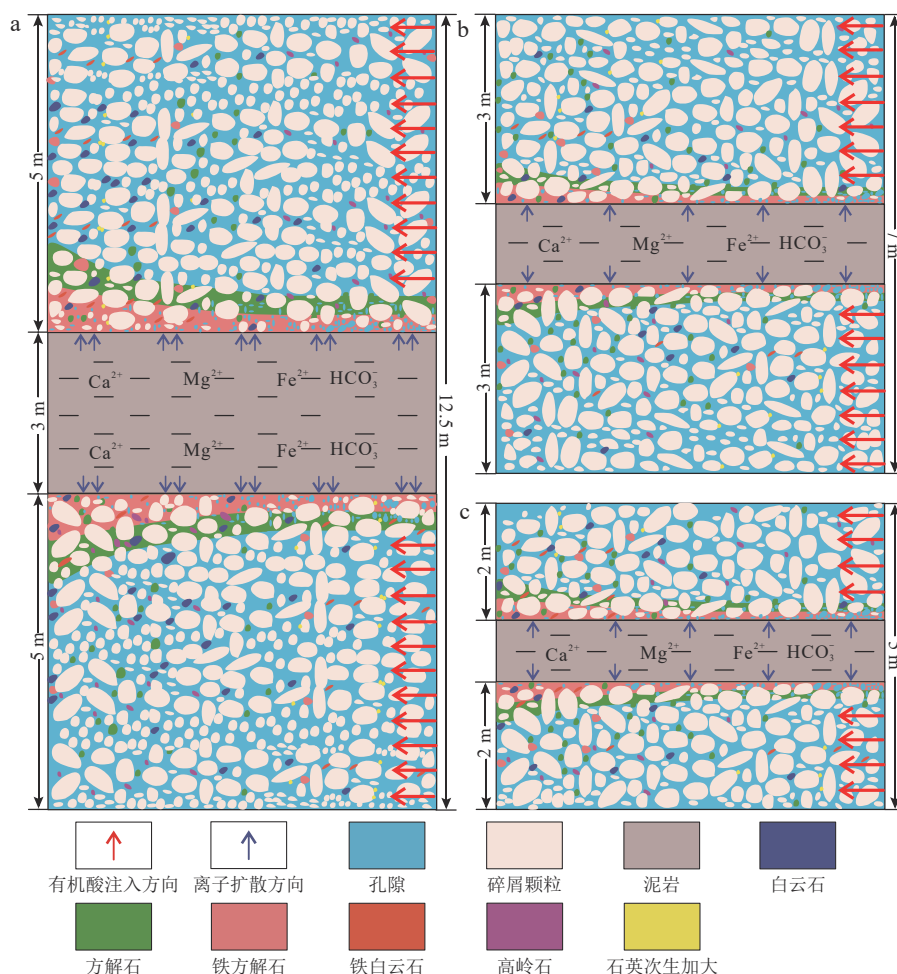


图15 临南洼陷沙三下亚段中砂岩夹薄泥岩型(a)、厚砂岩夹中泥岩型(b)和厚砂岩夹薄泥岩型砂-泥离子交互模式(c)

Fig. 15 Sand-mud ionic interaction patterns of three types of sand-mud assemblages: medium sandstone interbedded with thin mudstone (a), thick sandstone interbedded with medium mudstone (b), and thick sandstone interbedded with thin mudstone (c) for samples from the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation, Linnan sub-sag

泥岩夹薄砂岩、厚泥岩夹中砂岩、薄砂岩-薄泥岩互层、中砂岩-中泥岩互层、厚砂岩-厚泥岩互层、中砂岩夹薄泥岩、厚砂岩夹中泥岩和厚砂岩夹薄泥岩9种砂-泥结构类型。其中,6号砂组以厚泥岩夹薄砂岩型、中砂岩-中泥岩互层型和厚砂岩夹薄泥岩型为主。4号和5号砂组以中砂岩-中泥岩互层型、中砂岩夹薄泥岩型和厚砂岩夹薄泥岩型为主。2号砂组以厚泥岩夹薄砂岩型和中泥岩夹薄砂岩型为主。

2) 砂岩和泥岩之间的离子交互关系,导致不同砂-泥结构砂岩储层储集能力具有较大的差异性。不同砂-泥结构砂岩,砂/地比越大,孔喉发育程度和连通性越好,储层物性越好。同一种砂-泥结构砂岩内部的样品孔喉发育程度和连通性好于砂岩砂-泥界面附近的样品,储层物性分布的非均质性较强。

3) 厚泥岩夹薄砂岩型、中泥岩夹薄砂岩型和薄砂岩-薄泥岩互层型砂-泥结构具有充足的离子供给和有限的沉淀空间。使得砂岩表现出极差的储集能力和连通能力,物性最差。厚泥岩夹中砂岩型、中砂岩-中泥岩互层型和厚砂岩-厚泥岩互层型砂-泥结构具有充足的离子供给和沉淀空间。砂-泥界面附近砂岩孔喉发育程度较差,物性较差。砂岩内部样品孔喉发育程度略好,物性中等。中砂岩夹薄泥岩、厚砂岩夹中泥岩和厚砂岩夹薄泥岩型砂-泥结构中泥岩无法为砂岩提供充足的离子。砂-泥界面附近的砂岩孔隙结构发育程度相对略差,物性略差。砂岩内部的砂岩样品孔隙结构发育程度极好,物性最好。

参 考 文 献

- [1] 袁红旗, 邓馨雨, 杜会尧, 等. 柳江盆地二叠系山西组露头致密砂岩储层非均质性表征方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 468-479.
YUAN Hongqi, DENG Xinyu, DU Huiyao, et al. Characterizing the heterogeneity of tight sandstone in outcropped Permian Shanxi Formation, Liujiang Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 468-479.
- [2] OZKAN A, CUMELLA S P, MILLIKEN K L, et al. Prediction of lithofacies and reservoir quality using well logs, Late Cretaceous Williams Fork Formation, Mamm Creek field, Piceance Basin, Colorado[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(10): 1699-1723.
- [3] 王乾右, 杨威, 葛云锦, 等. 不同沉积微相致密储层的成岩响应及其控储机理——以鄂尔多斯盆地西部延长组为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 841-862.
WANG Qianyou, YANG Wei, GE Yunjin, et al. Diagenetic responses to delta front-lacustrine depositional microfacies and implications for tight reservoir quality differences in the Yanchang Formation, western Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 841-862.
- [4] ZHANG Fan, JIANG Zhenxue, XIAO Hanmin, et al. Testing origin of reservoir quality difference of tight sandstones in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 137: 105507.
- [5] 谭东萍, 罗龙, 谭先锋, 等. 东胜气田二叠系下石盒子组致密砂岩成岩作用及成储效应[J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 68-76.
TAN Dongping, LUO Long, TAN Xianfeng, et al. Diagenesis and reservoir formation effect of tight sandstone in Lower Permian Shihezi Formation, Dongsheng gas field [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 68-76.
- [6] 董姜涛, 王爱国, 樊志强, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组长7段致密储层成因及控制因素[J]. 断块油气田, 2021, 28(4): 446-451.
DONG Jiangchang, WANG Aiguo, FAN Zhiqiang, et al. Origin and dominated factors of Chang 7 Member tight reservoirs in Yanchang formation, central Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(4): 446-451.
- [7] 林良彪, 余瑜, 南红丽, 等. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组四段储层致密化过程及其与油气成藏的耦合关系[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 816-828.
LIN Liangbiao, YU Yu, NAN Hongli, et al. Reservoir tightening process and its coupling relationship with hydrocarbon accumulation in the fourth member of Upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 816-828.
- [8] ZHANG Fan, JIANG Zhenxue, SUN Wei, et al. A multiscale comprehensive study on pore structure of tight sandstone reservoir realized by nuclear magnetic resonance, high pressure mercury injection and constant-rate mercury injection penetration test [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 109: 208-222.
- [9] ZHAO Wen, JIA Chengzao, JIANG Lin, et al. Fluid charging and hydrocarbon accumulation in the sweet spot, Ordos Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 200: 108391.
- [10] ZHAO Wen, ZHANG Tao, JIA Chengzao, et al. Numerical simulation on natural gas migration and accumulation in sweet spots of tight reservoir [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 81: 103454.
- [11] YANG Wei, WANG Qianyou, WANG Yaohua, et al. Pore characteristic responses to categories of depositional microfacies of delta-lacustrine tight reservoirs in the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 118: 104423.
- [12] 郑忠文, 王乾右, 葛云锦, 等. 鄂尔多斯盆地西部延长组长8~长6段致密储层微观孔隙特征差异[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 69-80.
ZHENG Zhongwen, WANG Qianyou, GE Yunjin, et al. Differences of microscopic pore characteristics among the Yanchang

- Formation Chang 8 ~ Chang 6 tight reservoirs in the western Ordos Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(15): 69-80.
- [13] 王乾右, 杨威, 左如斯, 等. 联合微米CT和高压压汞的致密储层孔喉网络结构差异定量评价[J]. *能源与环保*, 2019, 41(7): 80-85, 94.
- WANG Qianyou, YANG Wei, ZUO Rusi, et al. Quantitative evaluation of pore-throat network structure differences in tight reservoirs with combined micro-CT and high pressure mercury[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2019, 41(7): 80-85, 94.
- [14] MILLIKEN K L. 7.07-Late diagenesis and mass transfer in sandstone-shale sequences[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 7: 159-190.
- [15] BJØRLYKKE K, JAHREN J. Open or closed geochemical systems during diagenesis in sedimentary basins: Constraints on mass transfer during diagenesis and the prediction of porosity in sandstone and carbonate reservoirs[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(12): 2193-2214.
- [16] WORDEN R H, BURLEY S D. Sandstone diagenesis: The evolution of sand to stone[M]//BURLEY S D, WORDEN R H. *Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient*. Gent: International Association of Sedimentologists, 2009: 1-44.
- [17] 杨田. 东营凹陷沙三段深水重力流砂岩与泥岩协同成岩演化及优质储层成因[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- YANG Tian. Synergistic diagenetic evolution of deep-water gravity flow sandstones-mudstones and genesis of high quality reservoirs in the third member of the Shahejie Formation, Dongying Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [18] 董道涛, 邱隆伟, 马永达, 等. 多断湖盆构造控砂与沉积充填过程——以渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷东部始新统为例[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 653-663.
- DONG Daotao, QIU Longwei, MA Yongda, et al. Control of tectonics on sedimentation of sandstone and process of sediment filling in multi-fault lacustrine basins: A case study on the Eocene in eastern Zhanhua Sag, Jiyang Depression in Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 653-663.
- [19] CHEN Dongxia, PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue, et al. Reservoir characteristics and their effects on hydrocarbon accumulation in lacustrine turbidites in the Jiyang Super-depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(2): 149-162.
- [20] ZHANG Qin, ZHU Xiaomin, STEEL R J, et al. Variation and mechanisms of clastic reservoir quality in the Paleogene Shahejie Formation of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2014, 11(2): 200-210.
- [21] CURTIS C D. Possible links between sandstone diagenesis and depth-related geochemical reactions occurring in enclosing mudstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1978, 135(1): 107-117.
- [22] 尤源, 刘建平, 冯胜斌, 等. 块状致密砂岩的非均质性及对致密油勘探开发的启示[J]. *大庆石油地质与开发*, 2015, 34(4): 168-174.
- YOU Yuan, LIU Jianping, FENG Shengbin, et al. Heterogeneity of the massive tight sandstones and its inspirations for the exploration and development of the tight oil[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2015, 34(4): 168-174.
- [23] 王永诗, 高阳, 方正伟. 济阳坳陷古近系致密储集层孔喉结构特征与分类评价[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 266-278.
- WANG Yongshi, GAO Yang, FANG Zhengwei. Pore throat structure and classification of Paleogene tight reservoirs in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 266-278.
- [24] 柴君林, 王艳忠, 王铸坤, 等. 惠民凹陷江家店地区古近系沙河街组物源体系特征与演化[J/OL]. *沉积学报*: 1-18. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CJXB20220409000&DbName=CAPJ2022>. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.028.
- CHAI Junlin, WANG Yanzhong, WANG Zhukun, et al. Characteristics and evolution of the provenance systems from the Paleogene Shahejie Formation in the Jiangjiadian area, Huimin Sag[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1-18. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CJXB20220409000&DbName=CAPJ2022>. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.028.
- [25] 高阳. 惠民凹陷南部斜坡带油气成藏控制因素分析[J]. *中国石油大学胜利学院学报*, 2022, 36(2): 45-50.
- GAO Yang. Analysis on controlling factors of hydrocarbon accumulation in southern slope zone of Huimin Depression[J]. *Journal of Shengli College China University of Petroleum*, 2022, 36(2): 45-50.
- [26] 刘建宁, 何幼斌, 王宁, 等. 济阳坳陷惠民凹陷沙三段地震事件沉积特征及地质意义[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(2): 14-23.
- LIU Jianning, HE Youbin, WANG Ning, et al. Sedimentary characteristics and geological significance of earthquake events of Sha 3 member in Huimin Sag, Jiyang Depression[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(2): 14-23.
- [27] 冯佃亮, 傅强, 李德勇. 惠民凹陷沙三下亚段沉积特征与油气储层有利砂体分布[J]. *上海国土资源*, 2015, 36(3): 78-82.
- FENG Dianliang, FU Qiang, LI Deyong. Distribution and sedimentary characteristics of sand bodies favorable for oil and gas reservoirs in the ES_{3x} stratum in Huimin Sag[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2015, 36(3): 78-82.
- [28] 杨俊生, 樊太亮. 惠民凹陷古近系沙河街组三段沉积体系[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(4): 457-461.
- YANG Junsheng, FAN Tailiang. Depositional system of the third member of Shahejie Formation of Paleogene in Huimin Sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(4): 457-461.
- [29] 赵密福, 信荃麟, 刘泽容, 等. 惠民凹陷临南洼陷滑塌浊积岩

- 的分布规律及其控制因素[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 267-271, 284.
- ZHAO Mifu, XIN Quanlin, LIU Zerong, et al. Distribution rules of fluxoturbidite in the Linnan Sag of the Huimin Depression and their control factors[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(3): 267-271, 284.
- [30] 封东晓. 临南洼陷营子街地区沙三下亚段油气富集主控因素[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 54-58.
- FENG Dongxiao. Main controlling factors in hydrocarbon accumulation of lower Sha 3 in Yingzjie area of Linnan Sag[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(2): 54-58.
- [31] 左晓春. 临南洼陷沙三段沉积相与储层特征研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2020.
- ZUO Xiaochun. Study on geographic information system [D]. Fushun: Liaoning Petrochemical University, 2020.
- [32] 张勇, 柳永清. 惠民凹陷西部老第三系沙河街组三段三角洲体系及砂岩体沉积特征和演化规律[J]. 地质论评, 2001, 47(3): 322-328.
- ZHANG Yong, LIU Yongqing. The evolution of Palaeogene delta depositional systems and sand bodies in the western Huimin Depression, Shandong Province[J]. Geological Review, 2001, 47(3): 322-328.
- [33] 陈永红. 惠民凹陷沙三段三角洲前缘滑塌浊积砂体发育规律与油气聚集关系[D]. 北京: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2006.
- CHEN Yonghong. The developing rule of delta-forward creeping turbidite sand body and its oil/gas accumulation relationship of Sha 3 member in Huimin Depression [D]. Beijing: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [34] 常思远, 陈冬霞, 汪成, 等. 深层储层原生孔隙成岩作用保存机制及模式——以珠江口盆地惠州凹陷南部恩平组 and 文昌组为例[J]. 东北石油大学学报, 2022, 46(2): 72-85, 135-136.
- CHANG Siyuan, CHEN Dongxia, WANG Cheng, et al. Preservation mechanism and model of primary pore diagenesis in deep reservoirs: Taking the Enping Formation and Wenchang Formation in the South of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin as examples [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022, 46(2): 72-85, 135-136.
- [35] 操应长, 远光辉, 王艳忠, 等. 典型含油气盆地深层富长石碎屑岩储层长石溶蚀接力成孔认识及其油气地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(9): 1694-1725.
- CAO Yingchang, YUAN Guanghui, WANG Yanzhong, et al. Successive formation of secondary pores via feldspar dissolution in deeply buried feldspar-rich clastic reservoirs in typical petroliferous basins and its petroleum geological significance[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(9): 1694-1725.
- [36] RONALD C S, CROSSEY L J, HAGEN E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- [37] TAYLOR K G, MACQUAKER J H S. Diagenetic alterations in a silt- and clay-rich mudstone succession: An example from the Upper Cretaceous Mancos Shale of Utah, USA [J]. Clay Minerals, 2014, 49(2): 213-227.
- [38] 孙光远, 王哲麟, 刘培刚, 等. 碱性长石溶蚀微孔发育特征及其对致密砂岩储层物性的改造作用——以鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系延长组6段3亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 658-669.
- SUN Guangyuan, WANG Zhelin, LIU Peigang, et al. Dissolved micro-pores in alkali feldspar and their contribution to improved properties of tight sandstone reservoirs: A case study from Triassic Chang-63 sub-member, Huaqing area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 658-669.
- [39] 漆滨汶, 林春明, 邱桂强, 等. 东营凹陷古近系沙河街组砂岩透镜体钙质结壳形成机理及其对油气成藏的影响[J]. 古地理学报, 2006, 8(4): 519-530.
- QI Binmen, LIN Chunming, QIU Guiqiang, et al. Formation mechanism of calcareous incrustation in lenticular sandbody of the Shahejie Formation of Paleogene and its influence on hydrocarbon accumulation in Dongying Sag [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(4): 519-530.
- [40] 刘超英. 惠民凹陷南斜坡油气运移及聚集规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
- LIU Chaoying. Study on hydrocarbon migration and accumulation in south slope belt, Huimin Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007.
- [41] 王慧. 沿断裂运移油气向砂体侧向运移的转换及其控藏作用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- WANG Hui. Lateral transformation migration of oil and gas to sand body along fault and its controlling roles on oil-gas accumulation [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [42] ZHU Xiaomin, ZHONG Dakang, ZHANG Qin, et al. Sandstone diagenesis and porosity evolution of Paleogene in Huimin Depression [J]. Petroleum Science, 2004, 1(3): 23-29.
- [43] 朱筱敏, 潘荣, 李盼盼, 等. 惠民凹陷沙河街组基山三角洲中孔低渗储层成岩作用和有利储层成因[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(5): 1-7.
- ZHU Xiaomin, PAN Rong, LI Panpan, et al. Diagenesis of medium porosity and low permeability reservoir and genesis of favorable reservoir of Jishan delta of Shahejie Formation in Huimin Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(5): 1-7.

(编辑 张 晟)