

贾艳聪,操应长,林畅松,等.东营凹陷博兴洼陷沙四上亚段滩坝优质储层形成机理与分布特征.吉林大学学报(地球科学版),2018,48(3):652-664. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20160368.

Jia Yancong, Cao Yingchang, Lin Changsong, et al. Formation Mechanism and Distribution of High-Quality Reservoirs for Beach-Bar Sandstones in Upper Part of Es₄ in Boxing Sag, Dongying Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(3): 652-664. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20160368.

东营凹陷博兴洼陷沙四上亚段滩坝优质储层 形成机理与分布特征

贾艳聪¹, 操应长², 林畅松³, 王 健²

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

3. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

摘要:综合运用岩心观察、铸体薄片鉴定、扫描电镜分析、岩石物性测试以及试油结果等分析方法,对东营凹陷博兴洼陷沙四上亚段滩坝中深部储层基本特征进行了研究。结果表明:滩坝中深部储层主要为低孔低渗储层,储集空间表现为原生孔隙和次生孔隙并存发育;研究区优质储层的形成机理主要有沉积作用、地层超压、油气充注、酸性溶蚀和绿泥石颗粒包壳;坝主体和滩脊距泥岩层较远部位储层分选好,抗压能力强,由于酸性溶解对储层的改造以及油气充注对胶结作用的抑制,中深层仍发育大量原生孔隙和次生孔隙,储层物性较好,并在异常超压和绿泥石颗粒包壳的保护下保存至今并成为有效优质储层;坝主体和滩脊距泥岩层较近部位储层,由于早期强烈的碳酸盐胶结作用并形成致密胶结壳,导致现今储层物性极差,主要发育无效储层;坝侧缘以及滩席储层原始沉积条件差,杂基含量高,在埋藏过程中以压实作用和泥质碳酸盐胶结作用为主,溶解作用微弱,现今物性差,从浅层到深层基本全为无效储层。博兴洼陷沙四上亚段滩坝优质储层主要分布在厚层坝主体和滩脊砂体的中部位置。

关键词:优质储层;形成机理;滩坝;东营凹陷;博兴洼陷

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20160368

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

Formation Mechanism and Distribution of High-Quality Reservoirs for Beach-Bar Sandstones in Upper Part of Es₄ in Boxing Sag, Dongying Depression

Jia Yancong¹, Cao Yingchang², Lin Changsong³, Wang Jian²

收稿日期:2017-10-07

作者简介:贾艳聪(1989—),女,博士研究生,主要从事沉积学和储层地质学方面的研究,E-mail:yancongjia1989@hotmail.com

基金项目:国家油气重大专项(2016ZX05006-007);中央高校基本科研业务费专项(CUG170630)

Supported by National Oil & Gas Major Project of China (2016ZX05006-007) and Fundamental Research Funds for Central Universities (CUG170630)

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China
3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Based on the core observation, thin section identification, scanning electronic imaging, and petro-physical property and other technical methods, the basic reservoir characteristics of medium-deep strata of beach-bar sandstones were investigated in the upper part of Es_4 (Es_4^s) in the Boxing sag, Dongying depression. The results indicate that the reservoirs are mainly characterized by low porosity and low permeability, and the reservoir spaces are mainly of primary and secondary pores. The formation mechanism of high-quality reservoirs is mainly consist of sedimentation, stratigraphic overpressure, hydrocarbon injection, acid dissolution, and chlorite grain coating. The reservoirs of both bar body and beach edge sub-facies that are far from mudstones are well sorted with strong anti-compacting capacity. Abundant primary and secondary porosities are developed in the medium-deep strata because of the modifications caused by acid dissolution and hydrocarbon filling. These reservoirs are protected by both stratigraphic overpressure and chlorite grain coating, and therefore become effective high-quality reservoirs. The lithofacies of both bar bodies and beach edge sub-facies adjacent to mudstones are typically characterized by the extensive carbonate cementation, which results in the extremely physical properties and invalid reservoir quality. The lithofacies of both bar edge and beach mat sub-facies were deposited under the poor depositional conditions with high contents of matrix. The reservoirs were dominated by compaction and micritic carbonate cementation with weak acidic dissolution. The present physical properties are extremely poor and characterized by invalid reservoirs from shallow to deep strata. The high-quality reservoirs of beach-bar sandstones are located at the central section of thick bar bodies and beach edges.

Key words: high-quality reservoir; formation mechanism; beach-bar; Dongying depression; Boxing sag

0 引言

油气勘探逐步向中深层拓展是当前的发展一个趋势^[1-6]。随着油气勘探的不断深入,在普遍低孔隙度低渗透率储层发育背景下往往可以找到相对优质的储层。这些相对优质的储层孔隙度一般为10%~20%,渗透率为0.1~1.0 μm^2 ,是中深层油气勘探的“甜点区”^[7]。随着埋藏深度的增加,中深部储层成岩演化及物性演化复杂,并且往往存在复杂的油气充注过程,导致中深部储层非均质性较强。因此,明确中深层优质储层形成机理,预测优质储层分布规律,可以为中深层油气勘探提供一定的依据。国内外地质学者对中深部碎屑岩优质储层发育的主控因素进行过相关研究,这些因素主要包括超压泄压、绿泥石包壳、有机酸和热液流体的溶蚀作用以及烃类充注等^[8-13],但是有关这些因素如何有机地作用于储层以及如何影响优质储层形成与分布的研究则相对薄弱。

东营凹陷始新世沙河街组四段上亚段滩坝砂体作为岩性油藏的一种重要类型,已显示出良好的勘探前景^[7]。截止2008年,东营凹陷滩坝砂体油藏累积上报探明储量2.1亿t以上。位于博兴洼陷南坡的G89井、G892井等均已获得工业油流,显示了巨大的勘探潜力。但是博兴洼陷南坡沙四段滩坝砂体整体上表现为:单层砂体厚度小,一般小于5m;砂体横向连续性差,识别难度大;成岩作用复杂,储层非均质性强;虽然具有客观的油气储量,但是油层产能低^[14-15]。因此,本文通过岩心观察、薄片鉴定、物性测试、压汞测试、扫描电镜分析及试油资料等综合分析,对东营凹陷博兴洼陷沙四段滩坝砂体储层特征进行了精细表征,明确了中深层优质储层形成机理,并对优质储层分布特征和“甜点”预测,以期对东营凹陷博兴洼陷滩坝储层的油气勘探提供一定的理论指导。

1 地质概况

博兴洼陷位于济阳拗陷东营凹陷内,是东营凹陷里的一个次一级构造。它西邻高青断裂构造带与青城凸起相接,东北以纯化草桥断裂构造带为界紧邻牛庄洼陷,向南毗邻鲁西隆起,面积达 1 320 km² (图 1a)。沙四段上亚段沉积时期,湖盆处于微陷扩张期,气候温暖潮湿,湖泊面积大,湖岸地势平坦,经过早期的沉积充填,盆地斜坡带形成了相对平缓的古地形背景,在湖盆边缘和湖中局部隆起区的周围广泛发育滨浅湖滩坝砂体^[15](图 1b)。

根据滩坝砂体的形态和产状,并结合沉积水动力条件、沉积构造和岩相特征的差异性,将滨浅湖滩坝沉积可划分为坝亚相和滩亚相(图 1b)。坝亚相可分为坝主体和坝侧缘微相,滩亚相可分为滩脊和滩席微相^[16]。坝主体微相单层旋回厚度大,沉积物粒度粗,以细砂岩和粉砂岩为主,分选好;坝侧缘微

相位于坝主体与正常滨浅湖沉积或滩沉积之间,为两者之间的沉积过渡带,杂基含量相对较高,以粉砂岩和泥质粉砂岩为主;滩脊微相单砂体厚度可达几米,分选相对较好,岩性一般为粉砂岩;滩席微相单砂体厚度薄,泥岩夹层发育,岩性一般为泥质粉砂岩和粉砂岩。

2 储层基本特征

2.1 岩石学特征

东营凹陷博兴洼陷南坡沙四上亚段滩坝储层岩性主要是细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩,夹薄层浅灰色、灰绿色泥岩。碎屑颗粒组分:石英体积分数为 35%~53%,平均为 47%;长石体积分数为 30%~45%,平均为 34%;岩屑体积分数为 6%~31%,平均为 19%(图 2)。岩石成分以岩屑质长石砂岩为主,成分成熟度较高。

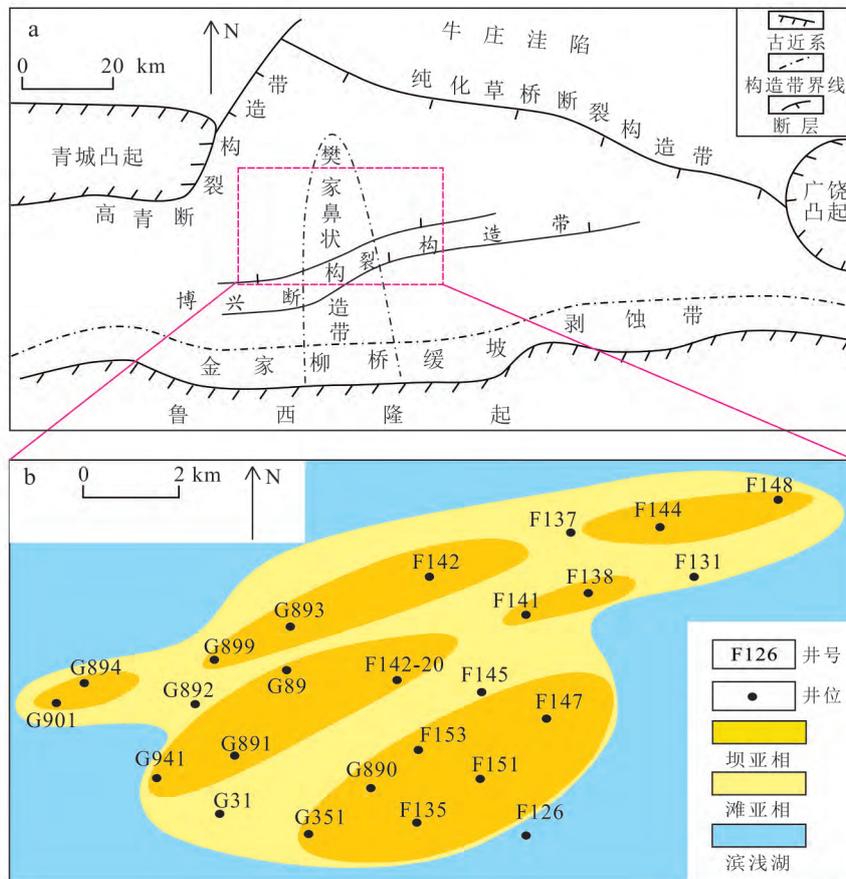


图 1 东营凹陷博兴洼陷区域构造概况(a)和沙四上亚段滩坝沉积微相展布(b)

Fig.1 Regional tectonic features (a) and distribution of micro-facies of beach-bar in the Es₄^s (b) in Boxing sag, Dongying depression

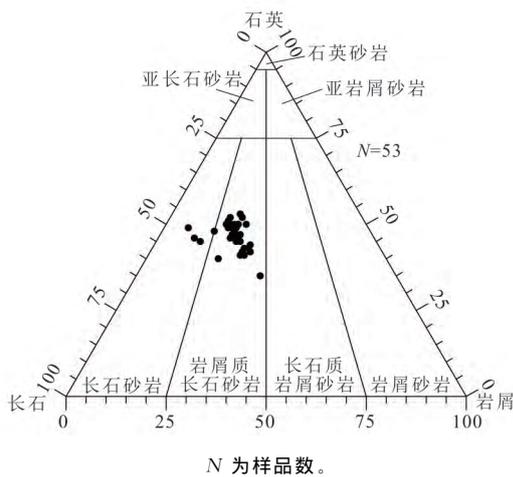


图 2 研究区沙四上亚段滩坝砂岩岩石组分三角图
Fig.2 Ternary plot of rock compositions for beach-bar sandstones in the Es_{4s} in the study area

2.2 储集物性及储集空间特征

通过博兴洼陷沙四上亚段滩坝储层 653 块岩心样品的实测孔-渗交会图(图 3a)可以看出,研究区滩坝储层孔隙度和渗透率相关性较好,但物性分布表现为较强的非均质性;孔隙度为 1.6%~23.2%,平均为 10.0%;渗透率为 $(0.01 \sim 152.28) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $4.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。一般低孔超低孔储层(孔隙度小于 15.0%)占总储层的比例为

86.8%(图 3b),一般低渗超低渗储层(渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)占总储层的比例为 93.4%(图 3c)。整体上,沙四上亚段滩坝储层属于低孔低渗储层。在整体低孔低渗储层普遍发育的背景下,滩坝亦发育部分中高孔和中高渗储层,所占储层的比例分别为 13.2%和 6.6%,并且这些中高孔和中高渗储层在不同深度范围均有发育,它们已成为研究区沙四上亚段中深层勘探的“甜点区”(图 4a,b,c,d,e)。

通过对研究区 120 块铸体薄片观察和定量统计发现,储层原生孔隙和次生孔隙并存发育,裂缝不发育(图 4c,d)。原生孔隙主要为剩余粒间孔隙,形态上多为规则的三角形或多边形(图 5a,b)。原生孔隙面孔率为 0.1%~2.2%,平均为 0.8%。整体上,原生孔隙面孔率随深度增加而有减小的趋势,但在埋深 2 600 m 和 3 200 m 左右存在两个相对高值带(图 4c)。次生孔隙主要包括长石和岩屑等不稳定颗粒组分的溶蚀以及碳酸盐胶结物的溶蚀。长石和岩屑颗粒普遍发生溶蚀,可见港湾状溶蚀颗粒边缘,部分溶蚀强烈的颗粒可形成铸模孔(图 5c,d)。粒间碳酸盐胶结物亦发生了部分溶蚀,但溶蚀程度较弱(图 5e,f)。相对于原生孔隙,次生孔隙较发育,其面孔率为 0.1%~3.3%,平均为 1.0%。与原生孔隙纵向分布类似,次生孔隙面孔率亦在埋深 2 600 m 和 3 200 m 左右存在两个相对高值带(图 4d)。

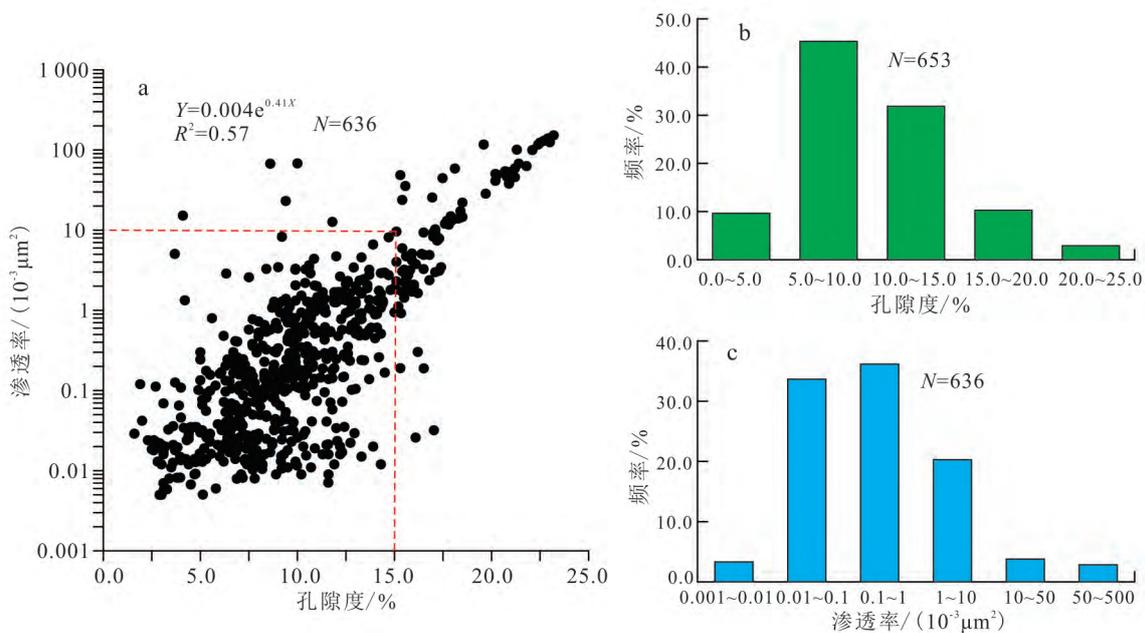


图 3 研究区沙四上亚段滩坝储层物性特征
Fig.3 Characteristics of physical property for beach-bar reservoir in the Es_{4s} in the study area

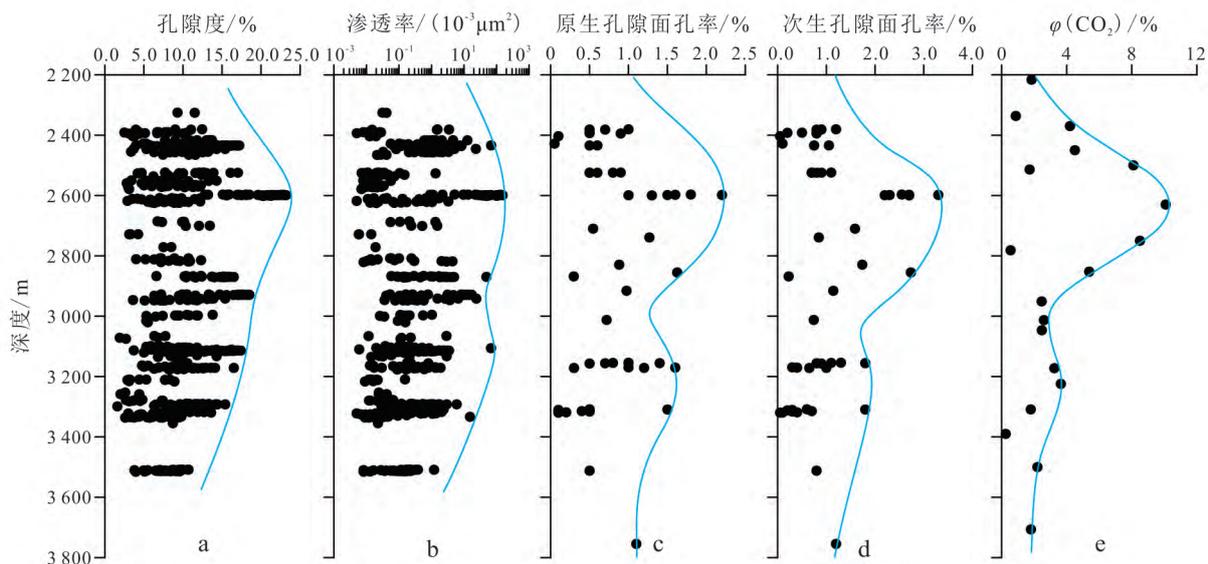
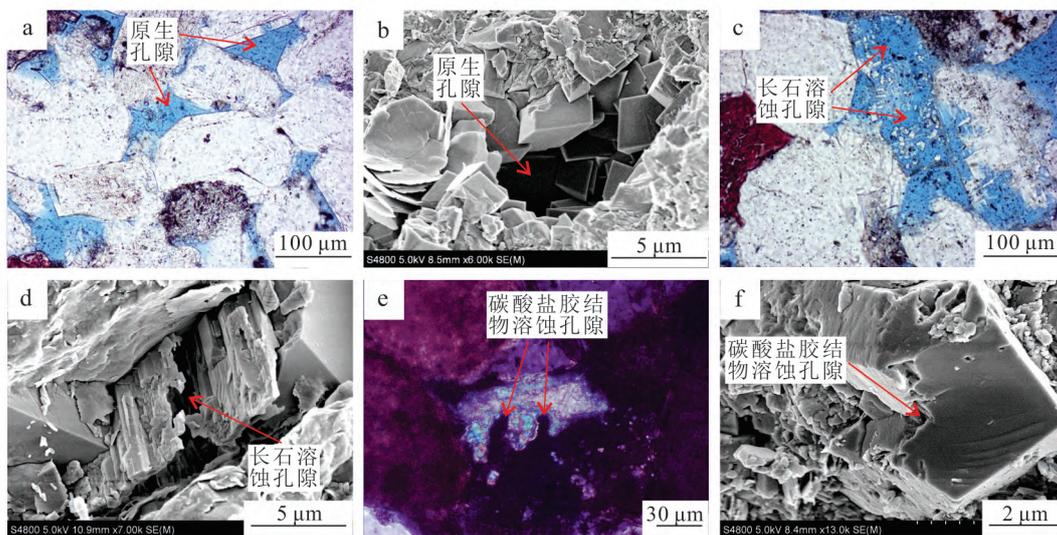


图 4 研究区沙四上亚段滩坝储层物性参数和 CO₂ 体积分数分布特征

Fig.4 Distribution of physical property and contents of CO₂ for beach-bar reservoirs in the Es₄^s in the study area



a.原生粒间孔隙,G890井,2599.7m;b.SEM图像,原生粒间孔隙,G892-1井,3065.9m;c.长石强烈溶蚀形成次生孔隙,G890井,2598.2m;d.SEM图像,长石沿解理缝发生溶蚀形成次生孔隙,G89-8井,2931.6m;e.碳酸盐胶结物溶蚀孔隙,F135井,2524.5m;f.SEM图像,碳酸盐胶结物溶蚀孔隙,G892-1井,3065.9m。

图 5 研究区沙四上亚段滩坝储层储集空间类型

Fig.5 Types of reservoir space of beach-bar reservoirs in the Es₄^s in the study area

3 优质储层形成机理

3.1 沉积作用

优质储层的形成与分布主要受沉积作用和成岩作用两个方面的影响^[7, 10, 17]。沉积作用是优质储

层形成的最根本因素,它决定了储层后期成岩作用类型及强度。薄片观察统计发现,相同埋深条件下,储层成岩作用强度的差异性与其距砂泥接触面距离有关。碳酸盐胶结物体积分数和与砂泥接触面距离关系密切(图 6a);当距离<0.6 m 时,碳酸盐胶结物

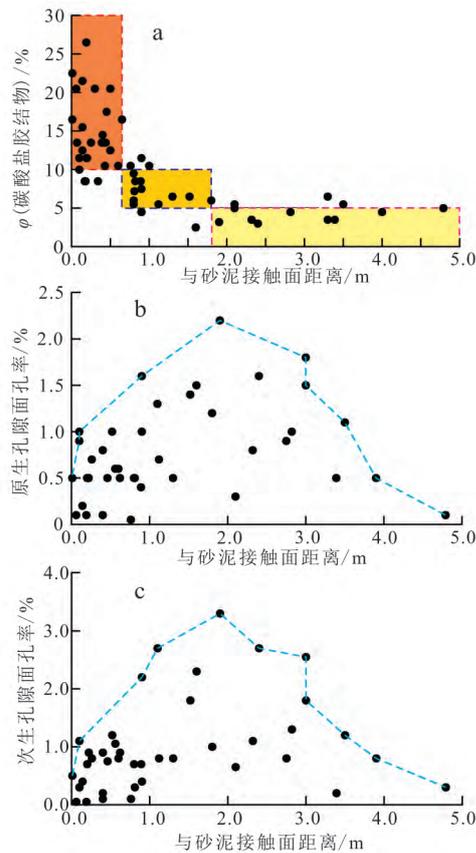


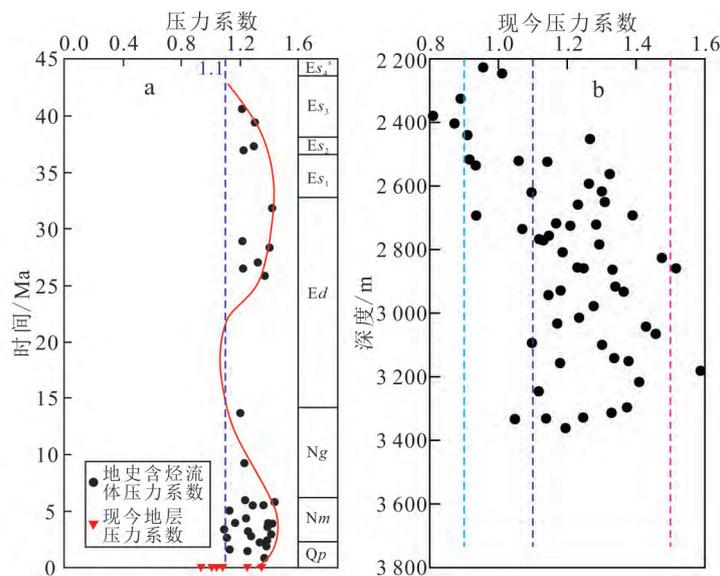
图 6 碳酸盐胶结物体积分数、原生孔隙和次生孔隙面孔率与距砂泥接触面距离关系

Fig. 6 Cross-plots of contents of carbonate cements, primary porosity, secondary porosity versus the distance to sandstone-mudstone contact

体积分数多大于 10%；距离为 0.6~1.8 m 时，碳酸盐胶结物体积分数为 5%~10%；距离 >1.8 m 时，碳酸盐胶结物体积分数多小于 5%。紧邻泥岩部位的砂体：一方面原始沉积水动力条件弱，碎屑物质供给不足，以坝侧缘和滩席沉积为主，原生孔隙不发育；另一方面由于碳酸盐胶结物形成致密胶结壳，次生孔隙亦不发育。而在砂体中部储层，由于水动力条件强、碎屑物质供给充足，以分选较好的坝主体和滩脊沉积为主，溶蚀作用发育，导致原生孔隙和次生孔隙均比较发育(图 6b, c)。由于砂体边部致密胶结，有机酸和 CO₂ 更多地进入砂体中部并导致储层的不稳定矿物发生溶蚀作用。随着溶蚀反应的持续进行，有机酸和 CO₂ 的酸溶能力下降，并导致距砂泥接触面大于 3 m 的储层次生溶蚀面孔率下降(图 6c)。

3.2 地层超压

前人运用与烃类包裹体同期的盐水包裹体的均一温度和盐度资料，定量恢复了研究区滩坝储层的古地层压力。结果显示，博兴洼陷沙四上亚段滩坝储层存在两个明显的增压旋回(图 7a)：第一个增压旋回出现在 45.0~24.6 Ma，最大古压力系数可达 1.43；第二个增压旋回为 15 Ma 至现今，最大古压力系数为 1.46^[18]。前人研究表明，不均衡压实和烃类充注是储层中最重要的两种增压机制^[19-20]。由于沙四上亚段沉积早期地层快速沉降，积累的地层压



a. 古地层压力系数随时间演化特征，据文献[10]改编；b. 现今地层压力系数纵向分布特征。

图 7 研究区沙四上亚段滩坝地层压力系数特征

Fig.7 Formation pressure coefficient of beach-bar reservoirs in the Es₄^s in the study area

力来不及释放导致地层欠压实形成早期第一旋回超压。在东营组沉积末期,由于构造抬升地层遭受剥蚀,导致地层出现泄压,古压力值减小。随着地层再次沉降接受沉积,沙四上亚段烃源岩随着地层温度的升高进入成熟演化阶段,该时期由于烃类充注储层导致地层压力增大,从而形成第二个增压旋回。

在博兴洼陷沙四上亚段 25 口单井 62 个实测地层压力数据测试的基础上,确定了储层现今地层压力纵向分布特征(图 7b)。可以看出,滩坝储层从埋深 2 400 m 开始出现超压,超压出现的时期较早。早期超压的发育:一方面,可以有效地降低储层垂向有效应力,延缓压实作用的持续进行,有利于储层原生孔隙的保存(图 5a,b);另一方面,早期超压可以抑制碎屑颗粒之间的压溶作用,一定程度上可以抑制石英胶结作用^[21]。

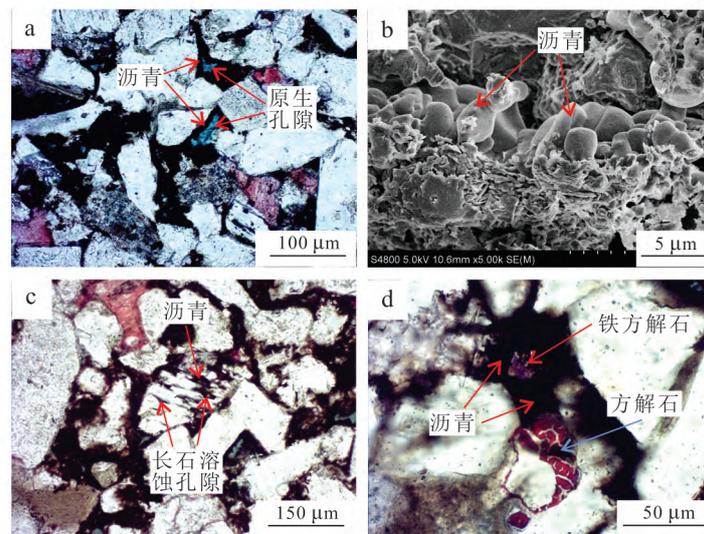
G890 井和 F135 井同属于坝亚相(图 1),G890 井 2 598.0 m 为坝主体细砂岩储层,实测地层压力显示为中超压环境,实测孔隙度为 22.5%,实测渗透率为 $123.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;而 F135 井 2 572.0 m 亦为坝主体细砂岩储层,实测地层压力显示为常压环境,实测孔隙度为 11.3%,实测渗透率为 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.3 油气充注

前人研究表明,博兴洼陷沙四上亚段储层中的

油气主要来自于沙四上亚段烃源岩,以成熟度低、分布范围广为主要特征^[22]。沙四上亚段储层存在东营组末期和馆陶组-明化镇组期两次油气充注过程,其中馆陶组-明化镇组期是油气充注的高峰时期^[23]。

薄片观察及扫描电镜图像分析发现,博兴洼陷沙四上亚段滩坝储层发生了明显的油气充注过程。油气(现今裂解为沥青)充注了原生粒间孔隙,并可见沥青包裹着碎屑颗粒形成类似的颗粒薄膜或颗粒包壳(图 8a)。研究表明,沥青颗粒薄膜或包壳的存在,可以有效减缓以碎屑石英颗粒为核的石英次生胶结作用^[24-25]。扫描电镜下同样可见,沥青围绕着颗粒边缘并充填粒间孔隙和喉道(图 8b)。沥青往往还充填在长石等颗粒溶蚀孔隙内(图 8c)。油气充满度高的储层,后期碳酸盐胶结物往往孤立充填在孔隙间,胶结作用较弱(图 8d),并且随着储层含油级别增高,储层碳酸盐胶结物的体积分数呈减小的趋势(表 1)。分析原因认为,随着储层油气充满度的不断增加,孔隙水被油气排替出储层,可以减缓储层内部水-岩作用的持续进行,从而抑制了储层后期碳酸盐胶结作用。此外,前面分析可知,油气充注可以形成异常超压,减缓颗粒间压实作用,从而可以有效地保存原生孔隙(图 8a)。



a.沥青充填原生孔隙,F129 井,3 154.3 m;b.扫描电镜图像,沥青充填粒间孔隙和喉道,G892-X8,3 170.7 m;c.沥青充填长石溶蚀孔隙,F129 井,3 154.3 m;d.油气充满度高的储层,后期碳酸盐胶结弱,F129 井,3 156.9 m。

图 8 研究区滩坝储层油气充注微观特征

Fig.8 Micro-features of hydrocarbon emplacement for beach-bar reservoirs in the study area

表 1 研究区不同含油级别储层碳酸盐胶结物平均体积分数
Table 1 Average contents of carbonate cements of different oil-bearing grade reservoirs in the study area

含油级别	$\varphi_B/\%$				
	碳酸盐胶结物总量	方解石胶结物	铁方解石胶结物	白云石胶结物	铁白云石胶结物
不含油	14.5	6.4	2.2	4.0	1.9
荧光	11.3	5.5	1.2	3.6	1.0
油迹	8.5	5.0	0.5	3.0	0
油斑	6.6	4.2	0.2	1.8	0.4
油浸	4.4	3.2	0.5	0.7	0

3.4 酸性溶蚀

前人研究表明,博兴洼陷沙四上亚段烃源岩中有机质质量分数比较丰富($w(\text{TOC})$ 一般大于 1.5%)^[26]。在埋藏热演化过程中,有机质成熟会释放大量的有机酸和有机 CO_2 ^[27]。在邻近烃源岩流体超压驱动下^[28-29],有机酸和有机 CO_2 可以迁移至滩坝砂岩储层内并导致长石和碳酸盐胶结物的强烈溶蚀。储层中 CO_2 气体体积分数与次生孔隙发育带具有良好的对应关系(图 4e),同样证实了滩坝储层中次生孔隙的发育主要受到有机酸和有机 CO_2 的影响。

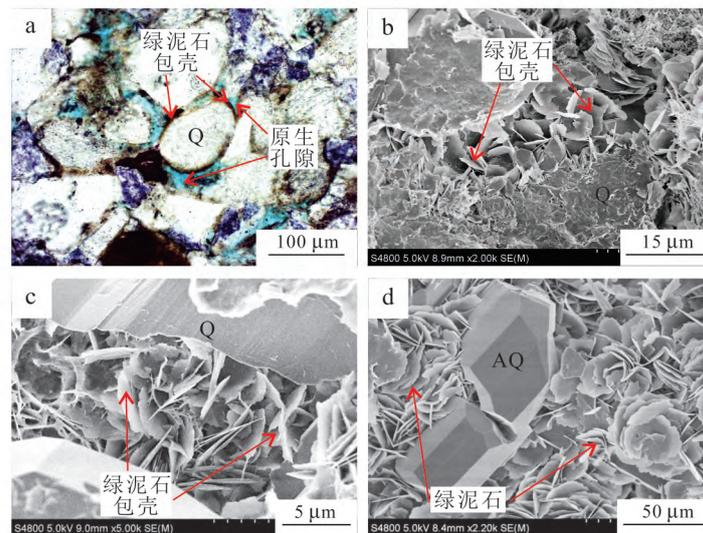
3.5 绿泥石颗粒包壳

博兴洼陷沙四上亚段滩坝储层中自生绿泥石普

遍发育,薄片统计其体积分数可达到 5%。自生绿泥石主要以叶片状颗粒包壳的形式存在,颗粒包壳的厚度为 2~15 μm (图 9a,b,c),同时也可见自生叶片状绿泥石包裹自生棱柱状的石英胶结物(图 9d)。前人研究表明,这些绿泥石包壳包裹着碎屑石英颗粒,对保存储层的孔隙有积极作用^[11, 30]:1)绿泥石包壳可以将碎屑石英颗粒与周围孔隙流体隔离,从而抑制石英次生胶结作用(图 9);2)绿泥石包壳的存在可以增强碎屑颗粒之间的抗压实能力,从而使颗粒间原生孔隙得以保存(图 9a)。

4 优质储层分布

前人研究认为,优质储层是个相对概念,它并无



a.绿泥石颗粒包壳,保存原生粒间孔隙,F137井,3170.4m;b. SEM 图像,叶片状绿泥石颗粒包壳,F151-1井,2701.0m;c. SEM 图像,叶片状绿泥石颗粒包壳,G890井,2597.7m;d. SEM 图像,叶片状绿泥石包裹自生石英胶结物,F151-1井,2701.0m。Q 为碎屑石英颗粒;AQ 为自生石英胶结物。

图 9 研究区滩坝储层绿泥石包壳微观特征

Fig.9 Micro-features of chlorite grain coating for beach-bar reservoirs in the study area

孔隙度和渗透率的绝对标准,而是应根据研究区储层的有效性、含油气性以及实际产油气特征进行综合厘定^[7, 31]。本次研究将研究区大于或等于有效储层孔隙度下限的储层定义为优质储层。有效储层孔隙度下限是利用大量实测物性、测井解释物性和含油性等资料,采用试油法计算的博兴洼陷沙四上亚段有效储层孔隙度下限($\varphi_{\text{cutoff}} = -8.34\ln(H) + 79$, $R^2 = 0.99$ 。其中: φ_{cutoff} 为孔隙度下限,%; H 为埋藏深度,m^[18];R为相关系数)。

坝主体和滩脊微相距泥岩层较远部位储层原始沉积水动力强,坝主体和滩脊微相单层旋回厚度大,沉积物粒度粗,岩性以细砂岩和粉砂岩为主,泥质体

积分数低,分选好,原始孔隙度较高,储层抗压实能力强。初始沉积后,由于地层快速沉降形成不均衡压实产生早期异常超压,能有效减缓压实作用,保存孔隙;随着地层埋深增加,有机质成熟释放大量有机酸和有机 CO₂,发生长石和早期碳酸盐胶结物的强烈溶解,物性显著增加。并且由于绿泥石颗粒包裹的存在,导致石英次生胶结并不发育。随后发生了早期油气充注,油气充注抑制了后期铁方解石和铁白云石胶结作用的进行而使得储层得到较好的保护,并且油气充注可以形成异常超压导致储层孔隙度降低较少(图 10,11)。现今储层从浅到深均发育大量有效优质储层(图 10,11)。

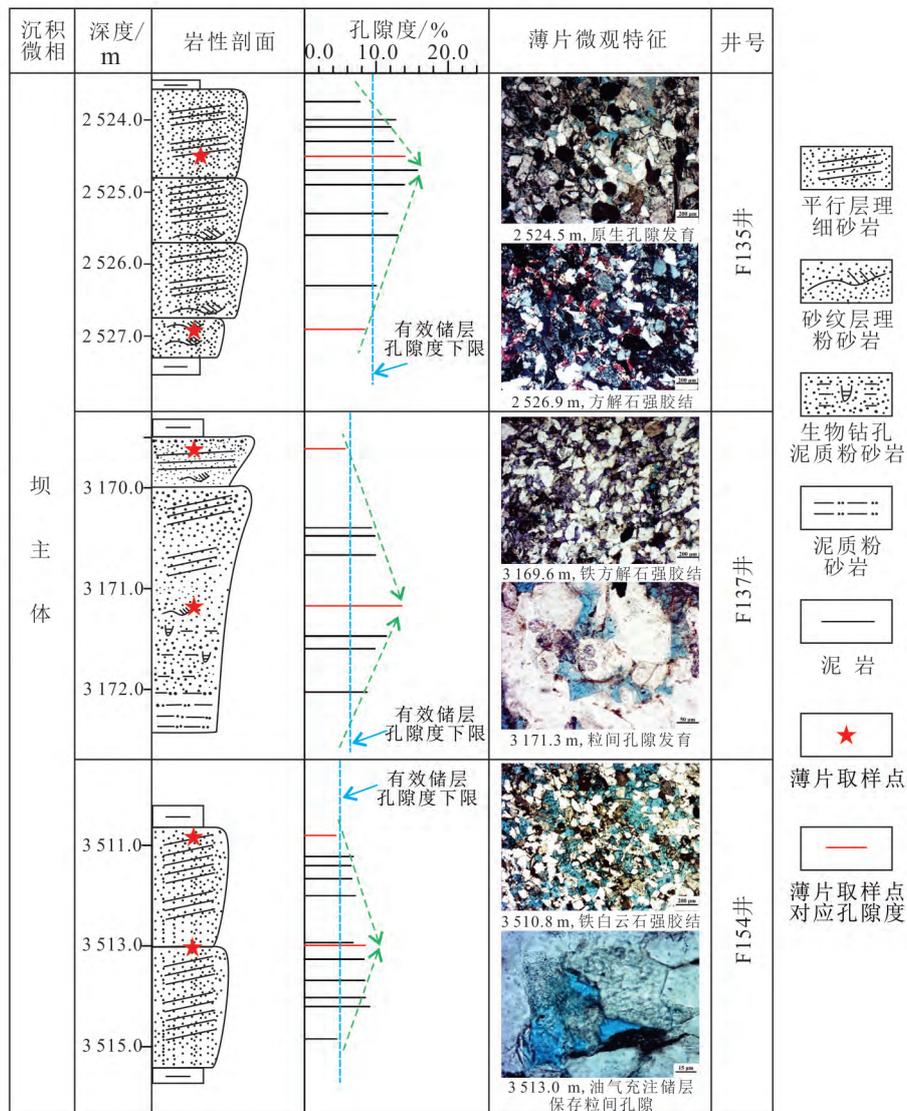


图 10 研究区沙四上亚段坝主体储层孔隙度和成岩作用纵向变化特征

Fig.10 Longitudinal variation of porosity and diagenesis of bar body reservoirs in the Es₄ in the study area

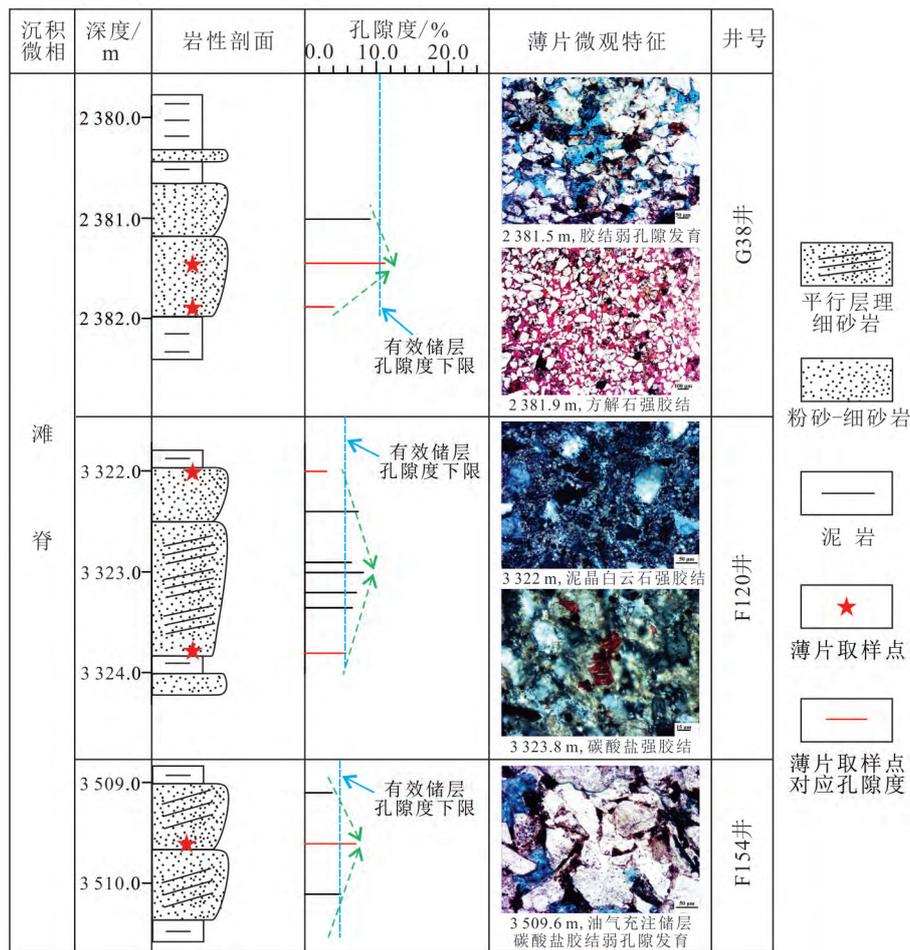


图 11 研究区沙四上亚段滩脊储层孔隙度纵向变化特征

Fig.11 Longitudinal variation of porosity and diagenesis of beach edge reservoirs in the Es₄ in the study area

坝主体和滩脊距泥岩层较近储层,原始孔隙度中等,杂基含量中等,由于靠近泥岩部位,早期邻近泥岩的压实排水作用导致近泥岩部位发生强烈的方解石和白云石胶结作用,储集物性极差,并且导致后期酸性流体难以进入储层内部,极大地抑制了溶解作用的进行,使储层仅发生微弱的溶解。随着埋深增加,地温持续升高导致地层水碱性增强,发生晚期部分铁方解石和铁白云石的胶结。现今储层物性差,主要发育无效储层(图 10,11)。

坝侧缘和滩席微相沉积水动力弱并缺少物源供给,单砂体厚度薄,泥岩夹层发育,以泥质粉砂岩和粉砂岩为主,杂基含量高,抗压实能力弱。储层原始孔隙度低,早期邻近泥岩压实排水导致泥质碳酸盐胶结物的强烈充填,储层孔隙度急剧降低,后期酸性流体和油气难以有效进入储层内部进行改造。现今储层

物性极差,从浅层到深层基本全为无效储层(图 12)。

因此,沉积作用是形成中深部优质储层的基础,只有原始沉积分选好、抗压实能力强的坝主体和滩脊储层,才能在后期埋藏过程中保存大量的原生孔隙,导致有机酸能够大量进入储层发生溶蚀作用,并在早期油气充注作用下有效保存至今而成为优质储层。成岩作用是控制中深部储层有效性纵向变化的关键,紧邻泥岩的砂体边部储层由于发生了碳酸盐胶结作用形成致密胶结壳,孔隙不发育;而在砂体中部储层,由于分选较好、原始孔隙发育,后期酸性溶蚀作用强烈,导致原生孔隙和次生孔隙均比较发育。异常高压和绿泥石颗粒包壳是中深部优质储层的保护条件,异常高压可以有效减缓地层的压实作用,而绿泥石颗粒包壳可以抑制中深部储层的硅质胶结作用,从而有效保存中深部储层的孔隙。

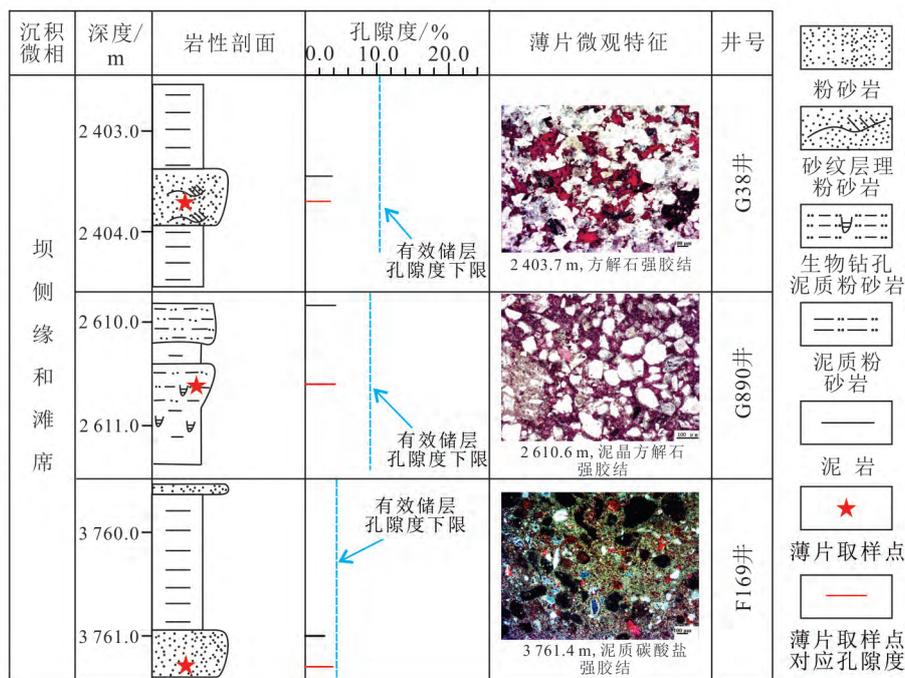


图 12 研究区坝侧缘和滩席储层不同深度范围孔隙度纵向变化特征

Fig.12 Longitudinal variation of porosity and diagenesis of both bar edge and beach mat reservoirs in the Es₄ in the study area

5 结论

1) 东营凹陷博兴洼陷沙四上亚段滩坝储层孔隙度为 1.6%~23.2%，平均为 10.0%；渗透率为 $(0.01 \sim 152.28) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $4.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在整体低孔低渗的背景下，研究区滩坝储层亦发育有效优质储层，优质储层形成机理主要有沉积作用、地层超压、油气充注、酸性溶蚀和绿泥石颗粒包壳。

2) 滩坝砂体不同亚(微)相沉积特征差异性，控制了其成岩演化和物性演化的差异性：坝主体和滩脊距泥岩层较远部位储层分选好，抗压实能力强，由于酸性溶解对储层的改造以及油气充注对胶结作用的抑制，中深层仍发育大量原生孔隙和次生孔隙，并在异常超压和绿泥石颗粒包壳的保护下保存至今成为优质储层。坝主体和滩脊距泥岩层较近部位储层，早期邻近泥岩压实排水导致近泥岩部位发生强烈的方解石和白云石胶结作用，现今物性极差，主要发育无效储层。坝侧缘以及滩席储层原始沉积条件差，在埋藏过程中成岩作用以压实作用和泥质碳酸盐胶结作用为主，溶解作用微弱，现今物性差，从浅层到深层基本全为无效储层。

3) 沉积作用是形成中深部优质储层的基础，成岩作用是控制中深部储层有效性纵向变化的关键，异常高压和绿泥石颗粒包壳是中深部优质储层的保护条件。研究区沙四上亚段滩坝优质储层主要分布在厚层坝主体和滩脊砂体的中部位置。

参考文献(References):

- [1] 王元君, 冯明石, 王峻, 等. 渤中凹陷石南斜坡区古近系中深层优质储层特征[J]. 矿物岩石, 2012, 32(3): 77-84.
Wang Yuanjun, Feng Mingshi, Wang Jun, et al. Characteristics of High-Quality Reservoir of Medium-Deep Paleogene in Shinan Slope Area, Bozhong Depression[J]. Journal of Mineral Petrology, 2012, 32(3): 77-84.
- [2] 韩成, 潘懋, 关平, 等. 柴达木盆地西北部碱山构造中深层储层特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(5): 820-825.
Han Cheng, Pan Mao, Guan Ping, et al. Reservoir Features and Its Genesis in the Middle-Deep Strata of the Jianshan Structure in the Northwestern Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(5): 820-825.

- [3] 郭迎春,庞雄奇,陈冬霞,等.川西坳陷中段须二段致密砂岩储层致密化与相对优质储层发育机制[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(2):21-32.
Guo Yingchun, Pang Xiongqi, Chen Dongxia, et al. Densification of Tight Gas Sandstones and Formation Mechanism of Relatively High-Quality Reservoir in the Second Member of the Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 21-32.
- [4] 罗文军,彭军,曾小英,等.川西丰谷地区须四段钙屑砂岩优质储层形成机理[J].石油实验地质,2012,34(4):412-416.
Luo Wenjun, Peng Jun, Zeng Xiaoying, et al. Formation Mechanism of High-Quality Reservoir of Calcareous Sandstone in Fourth Member of Xujiahe Formation, Fenggu Area, Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(4): 412-416.
- [5] 钟大康,朱筱敏,王红军.中国深层优质碎屑岩储层特征与形成机理分析[J].中国科学:地球科学,2008,38(增刊 I):11-18.
Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Wang Hongjun. Reservoir Features and Formation Mechanism of High-Quality Clastic Reservoir in Deep Strata in China [J]. Science China: Earth Sciences, 2008, 38 (Sup. I): 11-18.
- [6] 袁海锋,徐国盛,董臣强,等.准中地区侏罗—白垩系优质储层形成机理[J].天然气工业,2008,28(5):14-17.
Yuan Haifeng, Xu Guosheng, Dong Chenqiang, et al. Formation Mechanism of High Quality Jurassic-Cretaceous Reservoirs in the Central Junggar Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(5): 14-17.
- [7] 杨晓萍,赵文智,邹才能,等.低渗透储层成因机理及优质储层形成与分布[J].石油学报,2007,28(4):57-61.
Yang Xiaoping, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Origin of Low - Permeability Reservoir and Distribution of Favorable Reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 57-61.
- [8] 马奔奔,操应长,王艳忠,等.车镇凹陷北带古近系中深层优质储层形成机理[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):448-457.
Ma Benben, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Formation Mechanism of High-Quality Reservoir in the Middle-Deep Strata in Palaeogene in the North Zone of Chezhen Depression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43 (3): 448-457.
- [9] 苏奥,杜江民,陈红汉,等.控制异常孔隙带发育的成岩流体类型与活动历史:以琼东南盆地东部宝岛北缘储层为例[J].天然气地球科学,2016,27(10):1837-1847.
Su Ao, Du Jiangmin, Chen Honghan, et al. Diagenetic Fluid Type and Activity History of Controlling the Development of Abnormal Pore Zone: Taking the North Margin of Baodao Sag, Qiongdongnan Basin as an Example [J]. Natural Gas Geosciences, 2016, 27 (10): 1837-1847.
- [10] Taylor T R, Giles M R, Hathon L A, et al. Sandstone Diagenesis and Reservoir Quality Prediction: Models, Myths, and Reality [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94: 1093-1132.
- [11] Nguyen B T, Jones S J, Goulet N R, et al. The Role of Fluid Pressure and Diagenetic Cements for Porosity Preservation in Triassic Fluvial Reservoirs of the Central Graben, North Sea [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(8): 1273-1302.
- [12] Ajdukiewicz J M, Lander R H. Sandstone Reservoir Quality Prediction: The State of the Art [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94:1083-1091.
- [13] Bloch S, Lander R H, Bonnell L M. Anomalously High Porosity and Permeability in Deeply Buried Sandstone Reservoirs: Origin and Predictability [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 301-328.
- [14] 王永诗,刘惠民,高永进,等.断陷湖盆滩坝砂体成因与成藏:以东营凹陷沙四上亚段为例[J].地学前缘,2012,19(1):100-107.
Wang Yongshi, Liu Huimin, Gao Yongjin, et al. Sandbody Genesis and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Beach-Bar Reservoir in Faulted-Lacustrine-Basins: A Case Study from the Upper of the Fourth Member of Shahejie Formation, Dongying Sag [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19 (1): 100-107.
- [15] 李秀华,肖焕钦,王宁.东营凹陷博兴洼陷沙四段上亚段储集层特征及油气富集规律[J].油气地质与采收率,2001,8(3):21-25.
Li Xiuhua, Xiao Huaqin, Wang Ning. Reservoir Characteristics and Hydrocarbon Enrichment Rules in Upper Es⁴ of Boxing Subsag in Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recover Efficiency, 2001, 8 (3):21-25.
- [16] 操应长,王健,刘惠民,等.东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(6):5-10.
Cao Yingchang, Wang Jian, Liu Huimin, et al.

- Sedimentary Characteristics and Models of Beach-Bar Sandbodies in the Upper Part of the Fourth Member of Paleogene in the Southern Slope of Dongying Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2009, 33(6): 5-10.
- [17] Morad S, Al-Ramadan K, Ketzer J M, et al. The Impact of Diagenesis on the Heterogeneity of Sandstone Reservoirs: A Review of the Role of Depositional Facies and Sequence Stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94: 1267-1309.
- [18] 王健. 东营凹陷南部缓坡带薄砂体沉积特征及储层成岩改造模式[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013. Wang Jian. Sedimentary Characteristics and Reservoir Diagenetic Reconstruction Model of Thin Sandbodies of Southern Gentle Slope Belt in Dongying Depression [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Eastern China), 2013.
- [19] Xie X, Bethke C M, Li S, et al. Overpressure and Petroleum Generation and Accumulation in the Dongying Depression of the Bohaiwan Basin, China [J]. *Geofluids*, 2001, 1: 257-271.
- [20] Guo X W, He S, Liu K Y, et al. Oil Generation as the Dominant Overpressure Mechanism in the Cenozoic Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94: 1859-1881.
- [21] Becker S P, Eichhubl P, Laubach S E, et al. A 48 m. y. History of Fracture Opening, Temperature, and Fluid Pressure: Cretaceous Travis Peak Formation, East Texas Basin [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122: 1081-1093.
- [22] 苏永进, 蒋有录, 房新娜, 等. 博兴洼陷古近系沙四上和沙三段油气成藏的差异性研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(2): 11-15. Su Yongjin, Jiang Youlu, Fang Xinna, et al. Otherness on Pool-Forming in the Upper Es₄ and Es₃ of Palaeogene in Boxing Subsag [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2006, 30(2): 11-15.
- [23] 荣启宏. 博兴洼陷东南部沙四段储层的流体史研究 [J]. *矿物岩石*, 2004, 24(2): 61-66. Rong Qihong. Study on Fluid History of Reservoirs from Shasi Member, Southeast Boxing Depression [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 2004, 24(2): 61-66.
- [24] Saigal G C, Bjørlykke K, Larter S. The Effect of Oil Emplacement on Diagenetic Processes: Examples from the Fulmar Reservoir Sandstones, Central North Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76: 1024-1033.
- [25] Aase N E, Walderhaug O. The Effect of Hydrocarbons on Quartz Cementation: Diagenesis in the Upper Jurassic Sandstones of the Miller Field, North Sea, Revisited [J]. *Petroleum Geoscience*, 2005, 11: 215-223.
- [26] 谭丽娟, 蒋有录, 苏成义, 等. 东营凹陷博兴地区烃源岩和油源特征 [J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2002, 26(5): 1-5. Tan Lijuan, Jiang Youlu, Su Chengyi, et al. Characteristics of Hydrocarbon Source Rock and Oil-Source Correlation in Boxing Area of Dongying Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2002, 26(5): 1-5.
- [27] Surdam R C, Crossly L J, Hagen E S, et al. Organic-Inorganic Interactions and Sandstone Diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- [28] Bjørlykke K. Clay Mineral Diagenesis in Sedimentary Basins: A Key to the Prediction of Rock Properties: Examples from the North Sea Basin [J]. *Clay Minerals*, 1998, 33: 15-34.
- [29] Thyne G. A Model for Diagenetic Mass Transfer Between Adjacent Sandstone and Shale [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 743-755.
- [30] Ehrenberg S N. Preservation of Anomalously High Porosity in Deeply Buried Sandstones by Grain-Coating Chlorite: Example from the Norwegian Continental Shelf [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(7): 1260-1286.
- [31] 李克永, 李文厚, 张东阳, 等. 鄂尔多斯盆地安塞油田长10优质储层特征 [J]. *地质通报*, 2013, 32(9): 1453-1460. Li Keyong, Li Wenhong, Zhang Dongyang, et al. An Analysis of Favorable Reservoir Characteristics of Chang 10 Formation in the Ansai Oilfield, Ordos Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(9): 1453-1460.