

辽河坳陷牛居—长滩洼陷沙三段深部储层 成岩相类型及储集特征

杨光达¹, 解宝国¹, 颜新林¹, 杜庆国¹, 何浩瑄¹, 吴一平¹, 王树昆¹, 杨佳奇²

(1. 中国石油辽河油田公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010; 2. 中国石油大学(北京) 石油工程学院, 北京 102249)

摘要:辽河坳陷牛居—长滩洼陷沙三段深部碎屑岩储层具有天然气勘探潜力, 深部储层的储集特征及变化规律不清。基于岩石、X 线衍射、普通薄片、铸体薄片、扫描电镜、物性测试、压汞实验 CT 扫描等资料, 划分牛居—长滩洼陷埋深大于 3 500 m 的沙三段砂岩储层成岩相, 分析不同成岩相储层特征, 明确优质成岩相类型和储集特征。结果表明: 研究区深部储层岩屑和斜长石体积分数较高, 岩性以中粒(长石质)岩屑(杂)岩和细粒(长石质)岩屑(杂)岩为主。深部储层成岩相主要发育强压实孔缝相和中等压实溶蚀相, 在发育深度、成岩作用和储集特征等方面存在明显差异。埋深小于 4 000 m 的储层发育强压实孔缝相, 储集空间以微裂缝和小直径孔隙为主, 孔径主要在 0~60 μm 之间, 以 10~50 μm 为主, 孔隙度随深度增加呈规律性降低, 孔隙度和渗透率呈正相关关系。埋深超过 4 000 m 储层主要发育中等压实溶蚀相, 岩屑、长石颗粒溶蚀孔发育, 孔径在 50~120 μm 之间的较大孔占据主导, 孔径在 50 μm 以上的孔隙对储集空间的贡献大, 孔隙度明显增大, 非均质性强, 孔隙度和渗透率相关关系不明显; 储层溶蚀孔发育与有机酸的溶蚀作用密切相关。中等压实溶蚀相储层孔隙度较大、渗透率较低, 更有利于油气聚集成藏, 是深部油气勘探的有利储集相带。该结果为研究区下一步的勘探开发提供依据。

关键词:深部储层; 碎屑岩; 成岩相; 储集物性; 演化特征; 牛居—长滩洼陷; 辽河坳陷

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2025)04-0025-12

0 引言

深部碎屑岩油气资源勘探潜力巨大, 是中国重要的油气勘探拓展领域^[1-2]。通常将中国东部盆地埋深 3 500 m 以下称为深层^[3-5], 深部碎屑岩储层大多经历高温高压环境、复杂成岩作用及多期油气充注等过程, 储层特征演变复杂, 与中浅层碎屑岩储层具有明显差异^[6-8]。随油气勘探向深层发展^[3-4, 9-10], 以及 CT 扫描、FIB-SEM、核磁共振、压汞—恒速等技术应用^[11-13], 人们研究深层碎屑岩储层的孔隙结构、物性变化和成储成藏机制等。深层碎屑岩储层通常具有低孔隙度和低渗透率, 局部存在由裂缝和溶蚀孔隙形成的高孔高渗带^[1, 14-19]。储集空间类型包括粒间孔、粒内孔、裂缝和溶蚀孔等, 其中次生孔隙占比较大, 对储层物性影响较大^[10, 20]。在深层碎屑岩储层形成机制方面, 沉积、成岩和构造作用制约有利储集相带的发育^[7, 15-18, 21-22], 强动力沉积相带、溶蚀作用与拉张型构造背景决定有利储层发育, 是油气优先充注和成藏的部位。相同的成岩相^[23-24]具有相同的岩性、相似的沉积成因演化过程和储集特征。

牛居—长滩洼陷作为辽河坳陷东部凹陷最大的生烃洼陷, 探明油气储量分布主要集中于 1 200~3 200 m 的中浅层。牛居—长滩洼陷在埋深大于 3 500 m 的深层见到良好的油气潜力, 其中 JT1 井在埋深为 3 616.7~5 835.0 m 范围钻遇 5 套含气层, 气层累计厚度超过 300 m, 在埋深为 5 658.0~5 835.0 m 范围获日产近 $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的高产油气流, 表明深部碎屑岩具有较大勘探潜力。人们研究牛居—长滩洼陷沉积演化、断裂发育特征和成岩演化特征^[25-27], 但对深部碎屑岩储层特征研究不深入。以牛居—长滩洼陷沙三段深部碎屑岩储层为研究对象, 以埋深大于 3 500 m 的岩心样品分析资料为基础, 利用薄片鉴定、铸体薄片、扫描电镜、岩石、X 线衍射、物性测试、压汞实验及 CT 扫描等方法, 划分深部储层成岩相类型, 分析不同成岩相的孔隙结构、储集物性, 明确有利储层发育的成岩相, 为深部储层特征研究提供依据。

收稿日期: 2024-11-07; 编辑: 刘丽丽

基金项目: 辽河油田公司重大科技专项(2024KJZX-02)

作者简介: 杨光达(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事石油勘探部署方面的研究。

1 区域地质概况

牛居—长滩洼陷位于辽河拗陷东部凹陷北部,呈北东向狭长分布,面积约为 250 km²(见图 1(a))。洼陷自东向西依次发育佟二堡断层、牛青断层、茨东断层和茨西断层等正断层,将洼陷分割为多个北东向展布的构造带。茨东与牛青主断层之间发育近东西向次级断层(见图 1(a))。牛居—长滩洼陷古近系自下而上发育房身泡组(E₁f),沙河街组三段(沙三段(E₂s₃))、沙河街组二段(沙二段(E₃s₂))、沙河街组一段(沙一段(E₃s₁)),东营组(E₃d),以及新近系的馆陶组(Ng)、明化镇组(Nm)等。其中,沙三中下段发育暗色泥岩,为研究区主力烃源岩,埋藏深度大,演化程度高,具备形成丰富油气资源的物质基础(见图 1(b));沙河街组和东营组发育各类砂体,是油气勘探开发的主要目的层段^[28-29]。

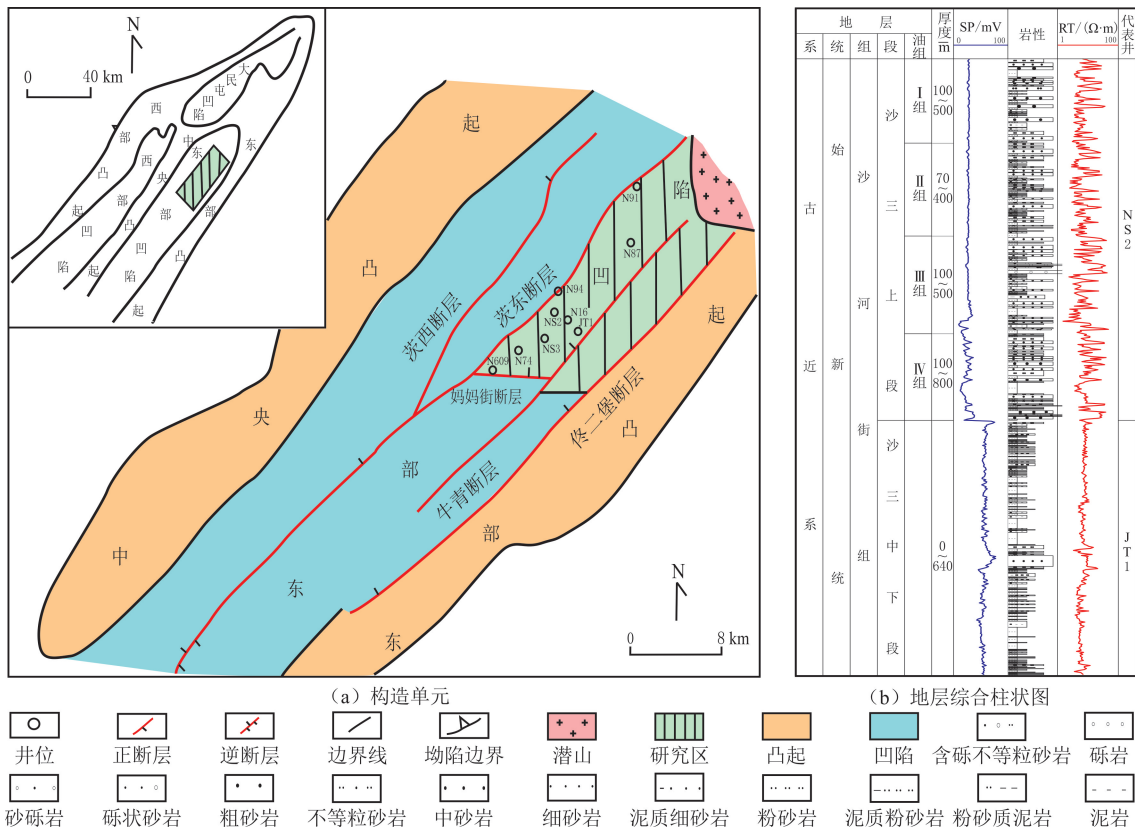


图 1 辽河拗陷主要构造单元、研究区位置及沙河街组地层综合柱状图

Fig. 1 The main structural units of the Liaohe Depression, the location of the study area and stratified columnar diagram of the Shahejie Formation

2 岩石学特征与成岩相类型

2.1 岩石学特征

NS2 井位于研究区中部,是深部取心筒次较多的井,岩心观察沙三段深部储层岩性主要为灰色细砂岩和粉砂岩(见图 2(a))。NS2 井在埋深为 3 600~4 500 m 范围的 79 块岩心薄片鉴定表明,沙三上段储层中石英、长石、岩屑和杂基体积分数较高,碎屑分选中一差,磨圆多呈次棱角一次圆状。石英体积分数为 30.6%~77.8%,长石体积分数为 3.1%~35.7%,泥质体积分数在 25.0%~40.0%之间;岩屑体积分数在 8.1%~61.2%之间,埋深小于 3 677 m 的储层中以沉积岩和岩浆岩岩屑为主,埋深大于 3 677 m 的储层中除沉积岩和岩浆岩岩屑外,还有变质岩岩屑,变质岩岩屑体积分数最高为 30.0%;含有少量方解石、黄铁矿及云母等矿物。整体上,沙三段岩性特征相似,分段性不明显(见图 2(b))。

根据石英、长石、岩屑及杂基体积分数对砂岩分类,沙三段岩石以中粒(长石质)岩屑(杂)岩和细粒(长石质)岩屑(杂)岩为主,其次为泥质粉—细砂岩、细粒岩屑质长石杂岩及中细粒长石岩屑质石英杂砂岩,还

有少量粗粒长石质岩屑杂砂岩(见图 3)。



(i) 粉砂岩, NS2井, 3 683.58 m, (ii) 细砂岩, N94井, 3 909.60 m
(a) 岩心照片

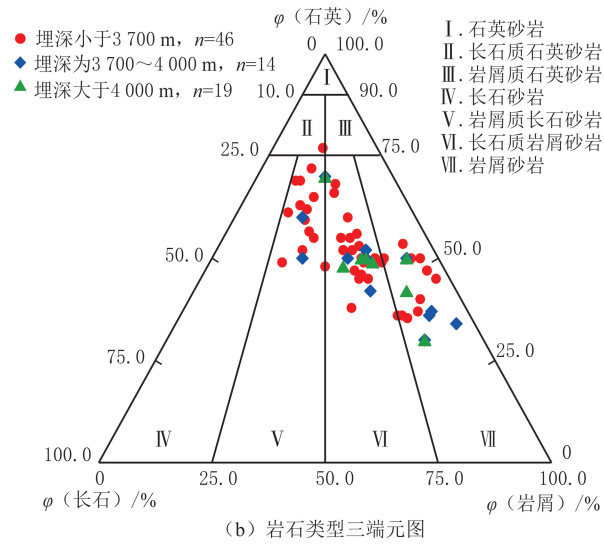


图 2 研究区沙三段深部储层岩心照片与岩石类型三端元图

Fig. 2 Core photographs and ternary diagram of rock types for the deep reservoirs in the E_2s_3 of the study area

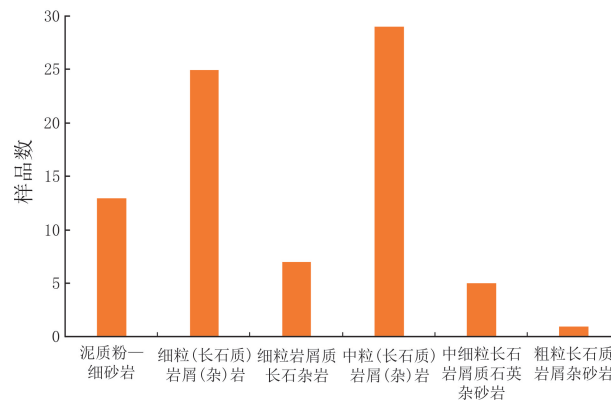


图 3 研究区沙三段储层岩性分布

Fig. 3 Lithology distribution of E_2s_3 reservoirs in study area

根据 NS2 井在埋深为 3 200~4 500 m 范围的 84 块岩心样品 X 线衍射测试结果,沙三段储层的矿物组分以石英和斜长石为主,黏土矿物质量分数为 1.0%~28.1%,含少量碳酸盐和钾长石、微量菱铁矿(见图 4)。

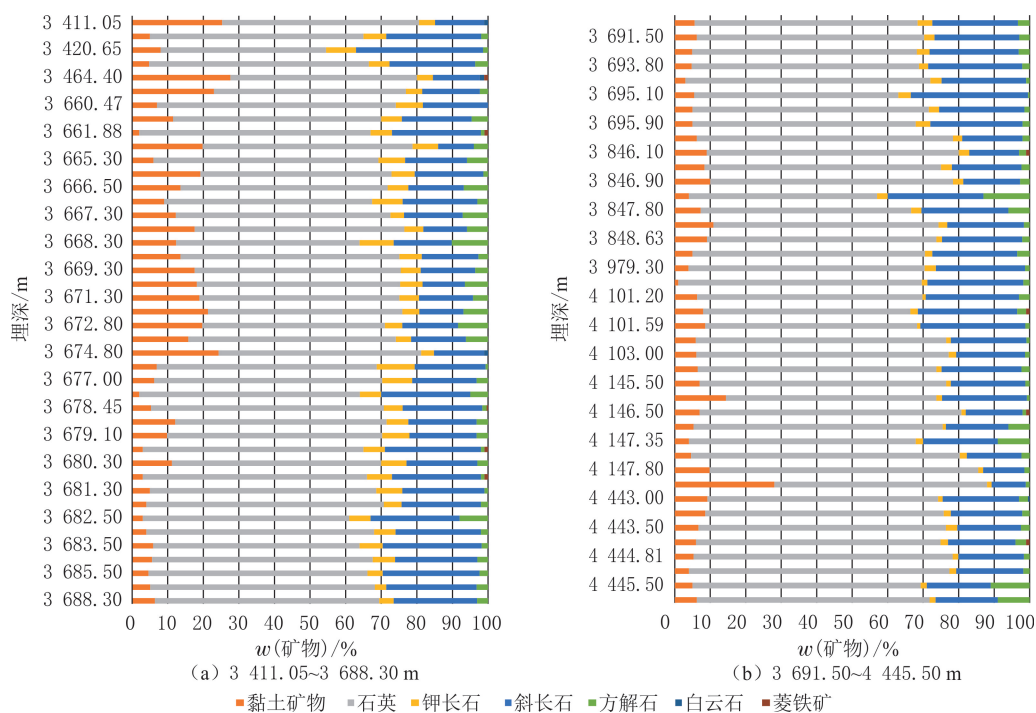


图 4 研究区沙三段主要矿物组成
Fig. 4 Main mineral composition of E₂s₃ rocks in study area

2.2 成岩相类型

成岩相是沉积物主要在成岩作用影响下,经历一定成岩作用和演化阶段的产物,包括矿物组成、孔隙结构和物性等特征^[23],成岩相研究有助于深部有利储层发育带预测^[24,30]。基于 NS2 井岩心样品观察、普通薄片、铸体薄片及扫描电镜等资料,根据岩石结构、成岩作用和孔隙类型等,将沙三段储层成岩相划分为强压实孔缝相和中等压实溶蚀相(见图 5),在胶结类型、碎屑颗粒排列紧密程度、孔隙类型、溶蚀发育及微裂缝发育等方面存在差异。

2.2.1 强压实孔缝相

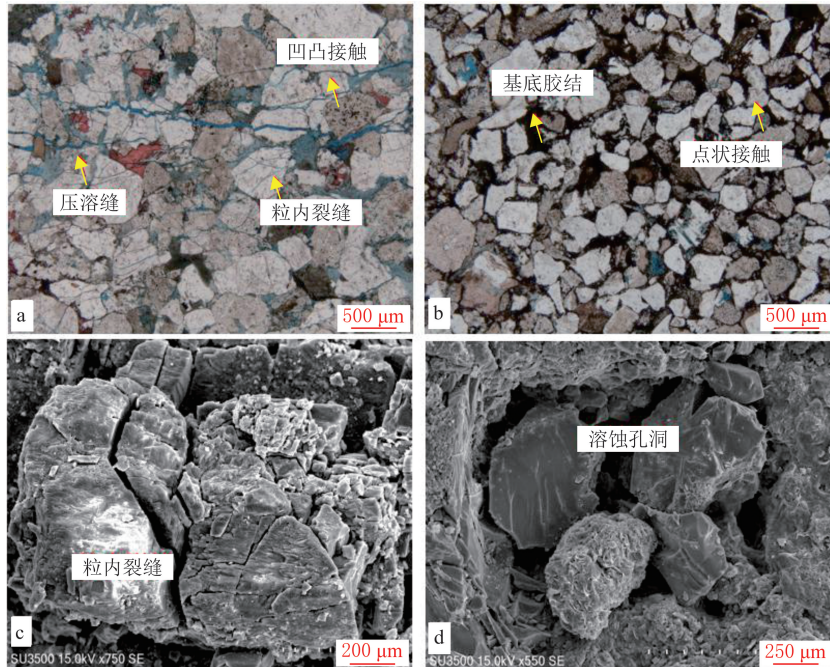
强压实孔缝相主要发育在埋深小于 4 000 m 的层段,镜下可见等粒—不等粒结构,颗粒分选差,以次棱角状为主(见图 6(a-d))。成岩相压实作用强烈,颗粒之间呈线状—凹凸接触,局部可见压溶缝合线。根据铸体薄片资料,颗粒破裂现象明显,粒内缝特别发育,多切穿颗粒,多条破裂缝延伸连接而形成微缝网(见图 6(e-f))。成岩相发育多种孔隙类型,以岩屑粒内溶孔为主,杂基溶孔、长石溶孔和原生粒间孔较少,孔、缝分布相对均匀;局部可见石英次生加大边和碳酸盐胶结。

2.2.2 中等压实溶蚀相

中等压实溶蚀相主要发育在埋深超过 4 000 m 的层段,颗粒分选中—较差,次棱角状为主,颗粒之间以点接触为主(见图 7(a-d))。成岩相压实作用相对较弱,颗粒之间孔隙较大,被岩屑和杂基充填,与岩石颗粒呈基底式胶结。成岩相微裂缝不发育,溶蚀作用较强,岩屑粒内溶孔、长石溶蚀孔、粒间溶蚀孔和杂基溶孔发育。溶蚀孔大小不均,孔径最大为 150 μm,非均质性强,有的被自生石英和黏土矿物充填,部分颗粒表面黏土化(见图 7(e-f))。

根据成岩相特征,研究区埋深小于 4 000 m 的深部储层压实作用强,孔隙发育程度弱,但微裂缝较发育;埋深超过 4 000 m 的深部储层压实程度较弱,原生和次生溶孔发育,粒内裂缝不发育。研究区深层储层压实作用深部较弱的现象,与不同层段岩性组合、沉积速率及其超压保护有关。根据岩心和录井资料,沙三段深部泥地比较大,是研究区主要烃源岩层段,沉积埋藏速率快、生烃作用强,泥岩层由欠压实和生烃产生的异常高压易于向邻近砂体传递而形成统一的超压体系,从而阻碍压实作用、保护粒间孔隙。研究区埋深在 3 500~4 000 m 之间的压力因数小于 1.20,如 NS3 井在 3 819.70 m 处压力因数为 1.11;埋深超

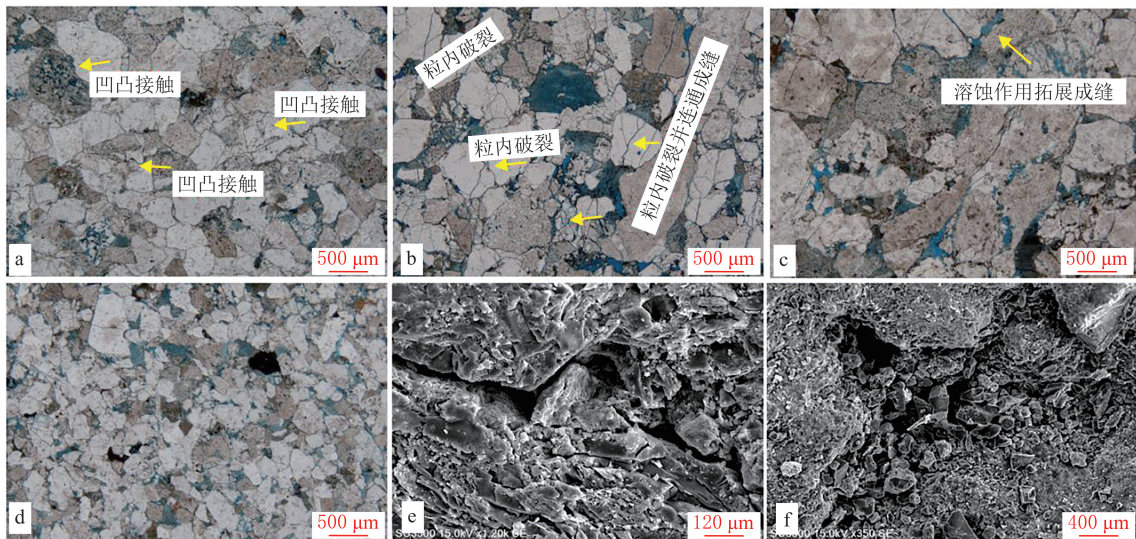
过 4 000 m 的压力因数超过 1.50,如 NS2 井在 4 411.60 m 处压力因数为 1.54。



(a) 中粒砂岩,颗粒之间呈线状—凹凸接触,粒内裂缝发育,发育粒间杂基溶孔,3 695.90 m (—); (b) 中粒细砂岩,颗粒之间呈点状接触,基底胶结,岩屑粒内溶孔较多,4 444.81 m, (—); (c) 浅灰色细砂岩,粒内裂缝发育,3 676.30 m (SEM); (d) 细粒岩屑砂岩,粒间溶孔发育,被自生石英和黏土矿物充填,4 444.70 m (SEM)

图 5 研究区 NS2 井成岩相典型镜下照片

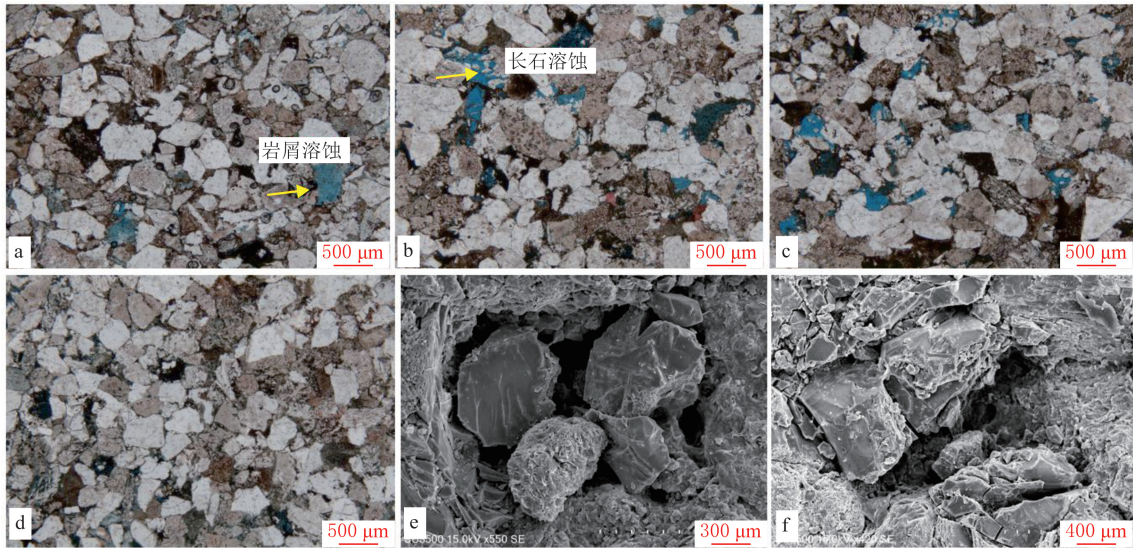
Fig. 5 Typical microscope images of diagenetic facies from well NS2 in the study area



(a) 颗粒之间呈线状—凹凸接触,3 677.50 m (—); (b) 颗粒破裂连通成缝,岩屑粒内溶孔和铸模孔,3 677.90 m (—); (c) 压溶缝,溶蚀拓缝,3 679.50 m (—); (d) 多类型孔缝分布相对均匀,3 846.10 m (—); (e) 粒内缝发育,3 680.70 m (SEM); (f) 溶蚀孔,充填自生石英/黏土矿物,3 660.80 m (SEM)

图 6 研究区 NS2 井强压实孔缝相典型镜下照片

Fig. 6 Typical microscope images of the strong compaction pore-fracture diagenetic facies from well NS2 in the study area



(a) 粒内溶孔发育, 4 444.81 m (-); (b) 岩屑、长石颗粒溶蚀, 4 147.10 m (-); (c) 岩屑粒内溶孔和杂基溶孔, 4 444.92 m (-); (d) 原生孔隙较少, 4 444.00 m (-); (e) 溶孔, 被自生石英和黏土矿物充填, 4 444.10 m (SEM); (f) 粒间溶孔发育, 被自生石英和黏土矿物充填, 4 101.80 m (SEM)

图 7 研究区 NS2 井中等压实溶蚀相典型镜下照片

Fig. 7 Typical microscope images of the moderately compacted dissolution facies from well NS2 in the study area

3 储集空间特征

受岩石成分、成岩作用类型和强度等影响,不同成岩相之间的孔隙构成、孔—渗关系等存在差异。基于 CT 扫描、高压压汞实验和孔—渗等资料,分析研究区深层储层两种成岩相的储集空间类型。

3.1 孔隙构成

根据储层样品 CT 扫描和高压压汞实验资料,分析 NS2 井不同埋深的孔隙特点。对于埋深小于 4 000 m 的强压实孔缝相,储集空间以微裂缝和小直径孔隙为主,孔径分布在 0~60 μm 之间,以 10~50 μm 为主,实测孔隙度为 8.03%,渗透率为 $1.693 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (见图 8(a))。对于埋深超过 4 000 m 的中等压实溶蚀相,微裂缝减少,溶蚀孔增多,孔径增大,孔隙度增加,但是渗透率降低。对于埋深为 4 100.69 m 处的样品,发育孔径为 160~200 μm 的较大孔样品实测孔隙度为 11.31%,但渗透率降低为 $0.246 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (见图 8(b));对于埋深为 4 444.40 m 处的样品,溶蚀大孔显著增多,孔径为 50~120 μm 的较大孔占据主导,孔径 50 μm 以上的孔隙占储集空间的 90% 以上,样品实测孔隙度继续增大到 12.02%,但渗透率降低为 $0.132 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (见图 8(c))。

根据研究区 120 块砂岩样品的岩石密度测定结果,对于埋深小于 4 000 m 的强压实孔缝相,岩石密度随埋深增加而增加,对于埋深为 3 400 m 的岩石密度约为 2.40 g/cm³;对于埋深为 4 000 m 的岩石密度增至 2.60 g/cm³;对于埋深大于 4 000 m 的岩石密度随埋深增加而降低;对于埋深为 4 150 m 的岩石密度为 2.50 g/cm³;对于埋深为 4 450 m 密度降至 2.45 g/cm³。埋深大于 4 000 m 的中等压实溶蚀相具有孔隙空间增大、储层欠压实的特点。

3.2 孔—渗关系

储层孔隙分布均质性是评价储层质量的重要依据。除镜下观察结果外,储层孔隙分布特征还可以通过储层孔隙度—渗透率关系(孔—渗关系)反映,孔—渗相关关系好说明孔隙分布均匀,反之说明孔隙分布均质性强。根据研究区深部储层 73 个实测物性数据,分析两种成岩相孔—渗关系(见图 9)。由图 9 可以看出,对于埋深小于 4 000 m 的强压实孔缝相,储层孔隙度与渗透率呈正相关关系,相关因数为 0.604 1,表明孔隙分布相对均匀;对于埋深大于 4 000 m 的中等压实溶蚀相,储层孔隙度与渗透率无明显相关关系,表现为溶蚀型储层、孔隙分布不均匀的特点。

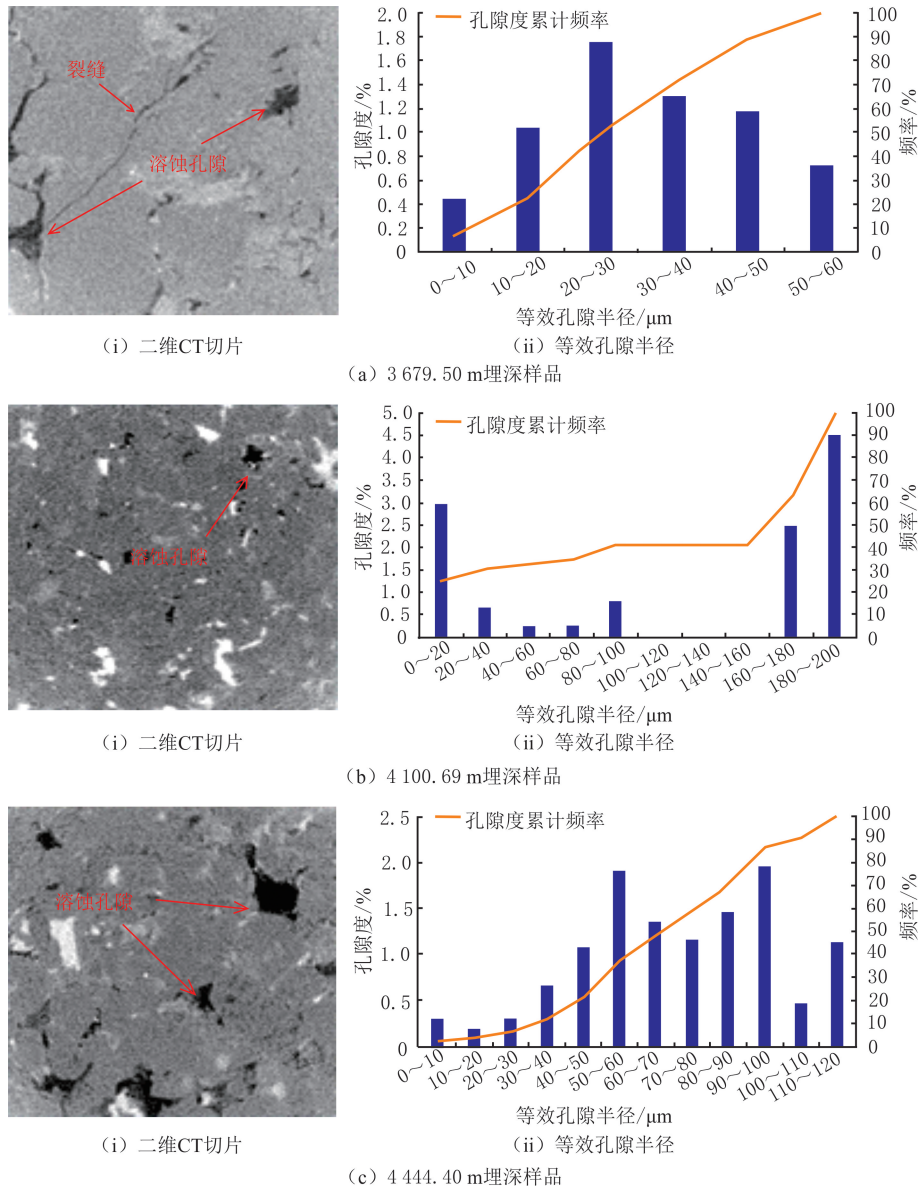


图 8 研究区 NS2 井不同埋深样品 CT 扫描图像和等效孔隙半径分布
 Fig. 8 CT scan images and the distribution of equivalent pore radius of samples at different burial depths from well NS2 in the study area

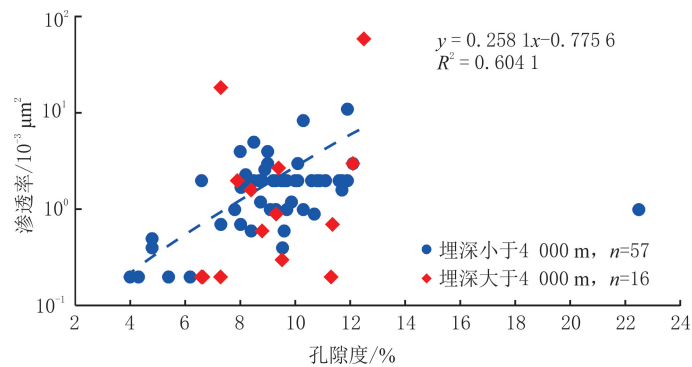


图 9 研究区深部储层样品孔隙度与渗透率关系
 Fig. 9 Relationship between porosity and permeability of deep reservoirs in study area

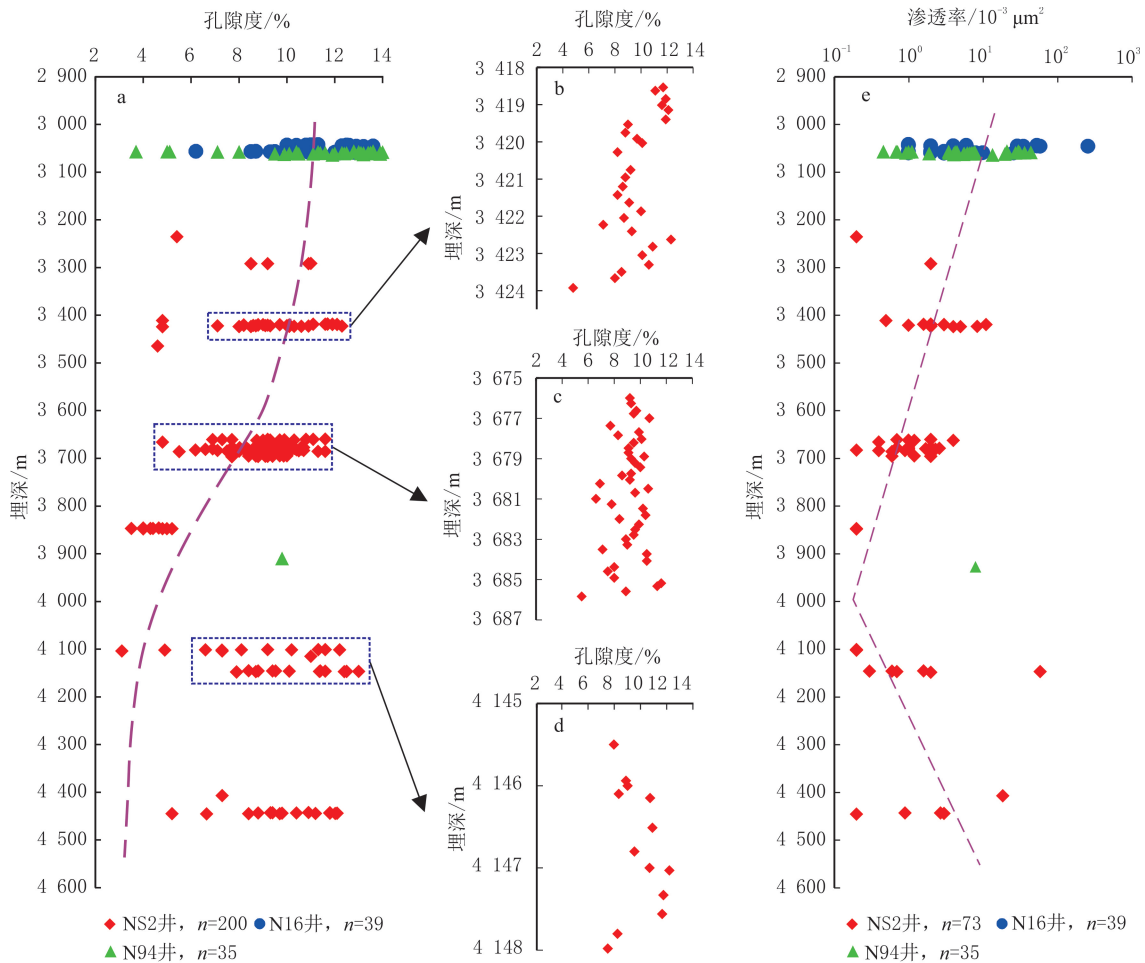
根据研究区 9 口井 477 组测井解释数据的储层孔隙度、渗透率及含油性的关系,当储层孔隙度小于 6% 且渗透率大于 $9.870 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,80% 为无效储层;当孔隙度大于 6% 且渗透率小于 $9.870 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,储层多解释为油层和差油层;当孔隙度大于 6% 且渗透率大于 $9.870 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,储层多为油层和油水同层。研究区深层较高孔隙度和较低渗透率的储层有利于油气聚集成藏,较高的渗透率可能更有利于油气输导而难于聚集。因此,埋深大于 4 000 m 的中等压实溶蚀相更有利于油气充注成藏,是有利的储集相带。

4 储集物性特征

基于不同成岩相储层物性纵向分布特征,根据研究区不同深度岩石薄片、铸体薄片及扫描电镜等资料反映的成岩特征,结合碎屑岩成岩演化规律,厘定深层储层成岩序列,分析研究区埋藏—生烃演化史,明确成岩作用对孔隙的影响。

4.1 物性纵向分布

利用岩心样品物性数据,分析深部储层两种成岩相物性纵向分布规律(见图 10),对于埋深小于 4 000 m 的强压实孔缝相,孔隙度随深度增加而降低;对于埋深大于 4 000 m 的中等压实溶蚀相,孔隙度表现为随深度增加而增大(见图 10(a))。数据点在部分深度段上分布密集,密集段孔隙度变化趋势与总体趋势基本一致(见图 10(b-d))。埋深小于 4 000 m 的强压实孔缝相和中等压实溶蚀相的渗透率随深度增加而快速降低,埋深大于 4 000 m 的中等压实溶蚀相的渗透率出现增大趋势(见图 10(e))。



(a) 孔隙度随深度变化; (b-d) 图(a)数据密集段孔隙度随深度变化; (e) 渗透率随深度变化

图 10 研究区储层孔隙度和渗透率垂向分布

Fig. 10 Vertical variation of porosity and permeability of reservoirs in study area

对于研究区埋深超过 4 000 m 的中等压实溶蚀相,溶蚀孔发育与有机酸的溶蚀作用密切相关,有机质

热演化溶蚀作用是储层形成次生孔隙的重要机制。根据牛居—长滩洼陷古近系长—中期旋回演化特征, NS2 井区埋深大于 4 000 m 发育厚层高位域稳定细粒沉积, 是研究区的主要烃源岩层段, 镜质体反射率 (R_o) 达到 1.3%, 处于高熟阶段。有机质热演化过程中产生的 CO_2 降低地层水 pH, 导致地下碳酸盐矿物的硅铝酸盐矿物溶解。在完全电离且最大限度提供 H^+ 的情况下, 有机质热演化生成的 CO_2 提供 1%~2% 的次生溶孔^[31]。MESHRI I D^[32] 认为烃源岩热演化可以释放大量短链有机酸, 有机酸供给 CO_2 的能力是碳酸的 6~350 倍, 能够溶蚀大量长石和碳酸盐矿物, 为储层提供规模性次生孔隙。有机质热解生酸实验和有机酸溶蚀碳酸盐和硅酸盐矿物实验, 证实在有机质热演化过程中能够生成有机酸, 有机酸通过络合 Al^{3+} , 可以大幅提高铝硅酸盐的溶解度^[33-35]。各类有机酸的溶蚀能力为乙酸>草酸>碳酸>丙酸, 随有机质演化程度增加, 乙酸产率快速增加, 地层水 pH 降低。相同温度、压力条件下, 有机酸对斜长石的溶蚀力度要小于钾长石的, 一方面 Na^+ 发生迁移且迁移速度大于 K^+ 的, 促进斜长石的溶蚀; 另一方面斜长石本身的吉布斯自由能小于钾长石的, 更易发生溶蚀反应^[27, 36-39]。

研究区沙三段储层中的易溶组分主要为长石和岩屑。其中, 长石以斜长石为主, 斜长石通常具有双晶结构, 易沿双晶纹发生溶蚀, 形成相互平行的溶蚀缝。斜长石的溶蚀速率随钙长石比例增加而增加, 富钙斜长石的溶蚀速率大于富钠和钾斜长石的; 岩屑组分性质不稳定也极易发生溶蚀。研究区深部有机质的热演化释放大量有机酸, 强烈溶蚀邻近储层中的铝硅酸盐、碳酸盐矿物及性质不稳定的岩屑, 具备形成规模性次生孔隙的能力。

4.2 物性演化模式

综合岩石薄片、铸体薄片及扫描电镜镜下成岩特征, 研究区深层储层经历不同程度的压实→黏土矿物/碳酸盐矿物胶结→有机质演化提供有机酸→长石和岩屑溶蚀等成岩过程。结合储层的埋藏—生烃演化史及物性纵向分布规律, 建立研究区沙三段储层的物性演化模式。以 NS2 井区为例(见图 11), 沙三段

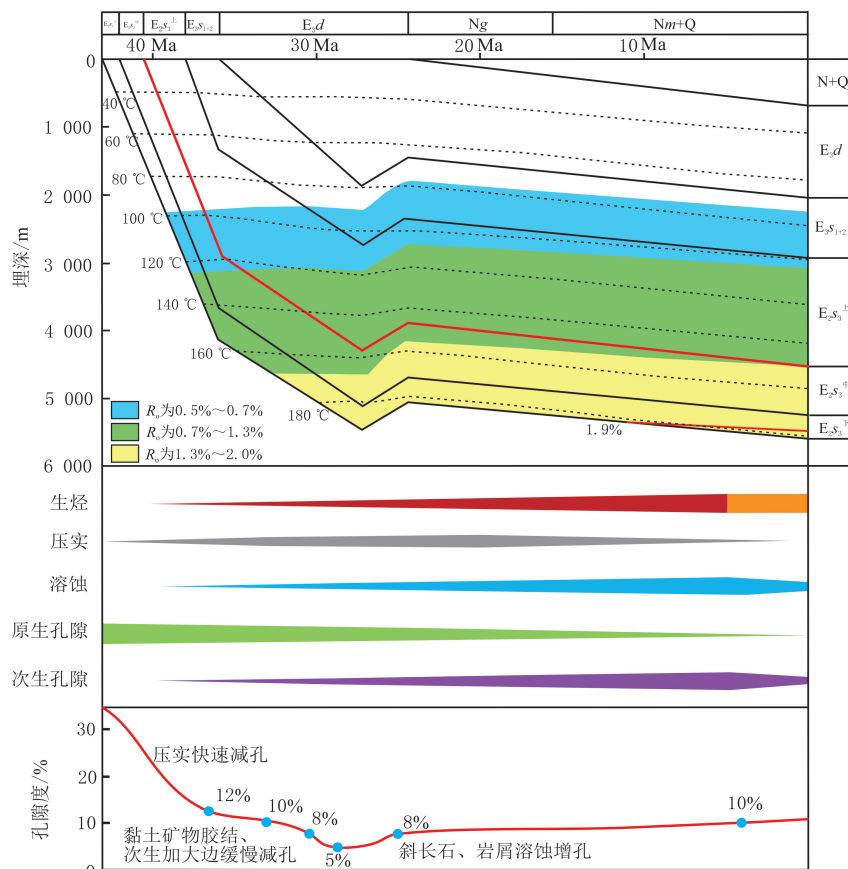


图 11 NS2 井区埋藏、生烃、成岩及孔隙度演化史

Fig. 11 Evolution history of bury, hydrocarbon, diagenesis and porosity in well NS2 area

储层沉积后快速沉降,在压实作用下快速减孔,东营组沉积期前,平均孔隙度降为12%左右。东营组沉积早中期,长石、岩屑出现溶蚀孔,粒内压裂缝发育。黏土矿物胶结、碳酸盐胶结和矿物次生加大造成缓慢减孔,储层总体减孔,埋深为3 400 m时平均孔隙度降为10%,埋深为3 800 m时平均孔隙度降为5%。东营组沉积后期,烃源岩大量生烃并产生有机酸,溶蚀作用主导储层孔隙发育,长石、岩屑溶蚀,新增加大孔径孔隙。馆陶组沉积期前,平均孔隙度恢复为8%。明化镇组沉积后期,平均孔隙度约为10%。

5 结论

(1)辽河坳陷牛居—长滩洼陷沙三段深部储层岩性以中粒(长石质)岩屑(杂)岩和细粒(长石质)岩屑(杂)岩为主;成岩相主要发育强压实孔缝相和中等压实溶蚀相,强压实孔缝相发育于埋深小于4 000 m的层段,微裂缝发育,孔、缝分布相对均匀,压实强烈,粒内缝特别发育,原生粒间孔较少;中等压实溶蚀相发育于埋深4 000 m以下的层段,岩屑、长石溶孔发育,孔径较大,非均质性强。

(2)研究区强压实孔缝相储集空间以微裂缝和小直径孔隙为主,孔隙度随深度增加呈规律性降低,孔隙度和渗透率呈正相关关系;中等压实溶蚀相微裂缝减少,溶蚀大孔增多,孔径50 μm 以上的孔隙对储集空间的贡献大,孔隙度明显增大,孔—渗关系不明显。

(3)研究区埋深4 000 m以上强压实孔缝相储层孔隙度随深度增加而减小,埋深4 000 m以下中等压实溶蚀相孔隙度随深度增加而增大。中等压实溶蚀相储层孔隙度较大、渗透率较低,更有利于油气聚集成藏,是深部油气勘探的有利储集相带。

参考文献(References):

- [1] 罗晓容,杨海军,王震亮,等. 深层—超深层碎屑岩储层非均质性特征与油气成藏模式[J]. 地质学报,2023,97(9):2802-2819.
LUO Xiaorong, YANG Haijun, WANG Zhenliang, et al. Heterogeneity characteristics of clastic reservoirs and hydrocarbon accumulation mode in deep-ultradeep basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2023,97(9):2802-2819.
- [2] 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.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(2):173-187.
- [3] 贾承造,庞雄奇. 深层油气地质理论研究与主要发展方向[J]. 石油学报,2015,36(12):1457-1469.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015,36(12):1457-1469.
- [4] 李阳,薛兆杰,程喆,等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探,2020,25(1):45-57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):45-57.
- [5] 赵文智,胡素云,刘伟,等. 再论中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特征与勘探前景[J]. 天然气工业,2014,34(4):1-9.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, LIU Wei, et al. Petroleum geological features and exploration prospect in deep marine carbonate strata onshore China: a further discussion[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(4):1-9.
- [6] 戴金星. 加强天然气地质研究勘探更多大气田[J]. 天然气地球科学,2003,14(1):3-14.
DAI Jinxing. Enhance the studies on natural gas geology and find more large gas fields in china[J]. Natural Gas Geoscience, 2003,14(1):3-14.
- [7] 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.
- [8] CAO B F, LUO X R, ZHANG L K, et al. Diagenetic evolution of deep sandstones and multiple-stage oil entrapment: a case study from the Lower Jurassic Sangonghe Formation in the Fukang Sag, Central Junggar Basin(NW China)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017,152:136-155.
- [9] 操应长,远光辉,杨海军,等. 含油气盆地深层—超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. 石油学报,2022,43(1):112-140.

- CAO Yingchang, YUAN Guanghui, YANG Haijun, et al. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 112-140.
- [10] 王秋玉, 李树博, 闫文琦, 等. 深层特低孔—特低渗砂砾岩储层特征及主控因素:以准噶尔盆地阜康凹陷二叠系上乌尔禾组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2023, 47(2): 31-43.
- WANG Qiuyu, LI Shubo, YAN Wenqi, et al. Characteristics and main controlling factors of deep ultra-low porosity and ultra-low permeability glutenite reservoirs: a case study of the Upper Wuerhe Formation of Permian in Fukang Depression, Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023, 47(2): 31-43.
- [11] 喻建, 马捷, 路俊刚, 等. 压汞—恒速压汞在致密储层微观孔喉结构定量表征中的应用:以鄂尔多斯盆地华池—合水地区长7储层为例[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(6): 789-795.
- YU Jian, MA Jie, LU Jungang, et al. Application of mercury injection and rate-controlled mercury penetration in quantitative characterization of microscopic pore structure of tight reservoirs: a case study of the Chang 7 reservoir in Huachi-Heshui Area, the Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(6): 789-795.
- [12] 李易霖, 张云峰, 丛琳, 等. X-CT扫描成像技术在致密砂岩微观孔隙结构表征中的应用:以大安油田扶余油层为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(2): 107-115.
- LI Yilin, ZHANG Yunfeng, CONG Lin, et al. Application of X-CT scanning imaging technology in the characterization of microscopic pore structure of tight sandstone: a case study of Fuyu oil layer in Daan Oilfield[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2016, 46(2): 107-115.
- [13] 付炜, 胡望水, 王晓晨, 等. 致密砂岩储层特征及质量影响因素:以鄂尔多斯盆地西北部二叠系下石盒子组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2023, 47(5): 36-48.
- FU Wei, HU Wangshui, WANG Xiaochen, et al. Characteristics of tight sandstone reservoir and influencing factors of reservoir quality: a case study in Lower Shihezi Formation of Permian, Northwestern Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023, 47(5): 36-48.
- [14] 李敏, 张月霞, 吴琼玲, 等. 南海珠江口盆地陆丰凹陷文昌组沉积成岩特征及储层物性控制因素[J]. *东北石油大学学报*, 2024, 48(4): 69-88.
- LI Min, ZHANG Yuexia, WU Qiongling, et al. Sedimentary diagenetic characteristics and controlling factors of reservoir physical properties of Wenchang Formation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024, 48(4): 69-88.
- [15] 田磊, 宋璠, 张世奇, 等. 深层致密砂岩储层非均质性特征及控制因素:以准噶尔盆地永进地区侏罗系齐古组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2024, 48(4): 29-40.
- TIAN Lei, SONG Fan, ZHANG Shiqi, et al. Heterogeneity characteristics of deep tight sandstone reservoir and its controlling factors: a case study of Jurassic Qigu Formation in Yongjin Area, Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024, 48(4): 29-40.
- [16] 韦敏, 于世娜, 佟欢, 等. 济阳拗陷桩海地区碎屑岩优质储层特征及成因机制[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(3): 27-36.
- WEI Min, YU Shina, TONG Huan, et al. Characteristics and genesis mechanism of high-quality clastic reservoirs in Zhuanghai Area of Jiyang Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(3): 27-36.
- [17] 刘金库, 邓明洁, 张泽, 等. 歧北斜坡沙二段储层碱性环境成岩演化及其对储集性能的影响[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(3): 38-46.
- LIU Jinku, DENG Mingjie, ZHANG Ze, et al. Influence of alkaline environment diagenetic evolution on reservoir performance in the second member of Shahejie Formation of Qibei Slope[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(3): 38-46.
- [18] 蔡振忠, 王健, 莫涛, 等. 库车拗陷克拉苏构造带博孜段巴什基奇克组超深储层特征及成岩演化[J]. *非常规油气*, 2024, 11(6): 8-16.
- CAI Zhenzhong, WANG Jian, MO Tao, et al. Characteristics and diagenesis evolution of ultra-deep Bashijiqi Formation reservoir in Bozi Section of Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024, 11(6): 8-16.
- [19] 罗威, 倪玲梅. 致密砂岩有效储层形成演化的主控因素:以库车拗陷巴什基奇克组砂岩储层为例[J]. *断块油气田*, 2020, 27(1): 7-12.
- LUO Wei, NI Lingmei. Main controlling factors of formation and evolution of effective reservoir in tight sandstone: taking Bashijiqi Formation sandstone reservoir in Kuqa Depression as an example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(1): 7-12.
- [20] 刘丽, 赵应成, 王友净, 等. 华庆油田B153井区长63重力流超低渗储层特征及成因机制[J]. *东北石油大学学报*, 2015, 39(6): 66-75.
- LIU Li, ZHAO Yingcheng, WANG Youjing, et al. Genetic mechanism of ultra-low permeability reservoir of Chang 63 gravity flow deposits in B153 Block, Huaqing[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015, 39(6): 66-75.
- [21] 刘佳庚, 王艳忠, 操应长, 等. 渤海湾盆地东营凹陷民丰洼陷陡坡带深层—超深层碎屑岩优质储层控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1203-1217.
- LIU Jiageng, WANG Yanzhong, CAO Yingchang, et al. Factors controlling the development of deep and ultra-deep coarse-grained siliciclastic reservoirs with high quality in the steep slope zone of the Minfeng Sub-sag, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil &*

- Gas Geology, 2023,44(5):1203-1217.
- [22] 王俊鹏,曾联波,徐振平等.成岩流体对超深致密砂岩储层构造裂缝充填及溶蚀改造的影响:以塔里木盆地克拉苏油气田为例[J].地质学前沿,2024,31(3):312-323.
WANG Junpeng, ZENG Lianbo, XU Zhenping, et al. The impact of diagenetic fluids on the structural fracture filling and dissolution alteration of ultra-deep tight sandstone reservoirs: a case study of the Kelasu oil and gas field in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2024,31(3):312-323.
- [23] 邹才能,陶士振,周慧,等.成岩相的形成、分类与定量评价方法[J].石油勘探与开发,2008,35(5):526-540.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, ZHOU Hui, et al. Genesis, classification and evaluation method of diagenetic facies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,35(5):526-540.
- [24] 戴建文,王华,涂乙,等.基于成岩相划分的低渗透储层有利区预测:以陆丰凹陷文昌组砂岩储层为例[J].油气地质与采收率,2025,32(1):40-52.
DAI Jianwen, WANG Hua, TU Yi, et al. Prediction of favorable zones in low-permeability reservoirs based on diagenetic facies delineation: a case study of sandstone reservoirs of Wenchang Formation in Lufeng Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025,32(1):40-52.
- [25] 刘晓晶,谢庆宾,徐翔,等.辽河盆地东部凹陷古近系沙河街组层序地层及沉积相研究[J].东北石油大学学报,2015,39(6):1-11.
LIU Xiaojing, XIE Qingbin, XU Xiang, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary facies in the Shahejie Formation of the Paleogene in Dongbu Sag, Liaohé Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015,39(6):1-11.
- [26] 李思伟,黄玉龙,冯玉辉,等.辽河盆地东部凹陷新生代伸展—走滑构造作用及断裂构造特征[J].地球物理学报,2020,63(2):612-626.
LI Siwei, HUANG Yulong, FENG Yuhui, et al. Cenozoic extension and strike-slip tectonics and fault structures in the Eastern Sag, Liaohé Depression[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020,63(2):612-626.
- [27] 杨佳颖,蒋有录,蔡国钢,等.深层砂岩储层特征及成岩差异演化过程:以辽河坳陷东部凹陷牛居—长滩洼陷沙三上亚段为例[J].天然气地球科学,2022,33(2):233-242.
YANG Jiaying, JIANG Youlu, CAI Guogang, et al. Reservoir characteristics and differential diagenetic evolution process of deep buried sandstone reservoirs: case study of the Upper E₂s₃ in Niuju-Changtan Subsag of Eastern Sag, Liaohé Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2022,33(2):233-242.
- [28] 梁旭.东部凹陷牛居—长滩地区沙河街组层序构型与沉积演化特征研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012:5.
LIANG Xu. Sequence stratigraphical architecture character and depositional evolution research of Shahejie Fm at Niuju-Changtan Area of Eastern Depression[D]. Beijing: China University of Geology(Beijing), 2012:5.
- [29] 马妍.有机酸生成及其对储层溶蚀的定量表征和应用[D].青岛:中国石油大学(华东),2018:6.
MA Yan. Quantitative characterization and application of organic acid generation and its dissolution to reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2018:6.
- [30] 邓秀芹,付金华,姚泾利,等.鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J].古地理学报,2011,13(4):443-455.
DENG Xiuqin, FU Jinhua, YAO Jingli, et al. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration[J]. Journal of Palaeogeography, 2011,13(4):443-455.
- [31] BARTH T, ANDRESEN B, IDEN K, et al. Modelling source rock production potentials for short-chain organic acids and CO₂-a multivariate approach[J]. Organic Geochemistry, 1996,25:427-438.
- [32] MESHRI I D. On the reactivity of carbonic and organic acid sand generation of secondary porosity[J]. SEPM Special Publication, 1986,28:123-128.
- [33] SURDAM R C, BOESE S W, CROSSEY G J. The chemistry of secondary porosity[J]. AAPG Memoir, 1984,37:127-151.
- [34] DUTTON S P, LOUCKS R G, DAY-STIRRAT R J. Impact of regional variation in detrital mineral composition on reservoir quality in deep to ultradeep Lower Miocene sandstones, Western Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012,35:139-153.
- [35] SEEWALD J S. Organic-inorganic interactions in petroleum producing sedimentary basins[J]. Nature, 2003,426:327-333.
- [36] GUDBRANDSSON S, WOLFF-BOENISCH D, GISLASON S R, et al. Experimental determination of plagioclase dissolution rates as a function of its composition and pH at 22 °C[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014(139):154-172.
- [37] FENTER P, PARK C, CHENG L, et al. Orthoclase dissolution kinetics probed by in situ X-ray reflectivity: effect of temperature, pH and crystal orientation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003(67):197-211.
- [38] BLOCH S, LANDER R H, BONNELL L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002,86(2):301-328.
- [39] GILES M R. Mass transfer and problems of secondary porosity creation in deeply buried hydrocarbon reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 1987,4(3):188-204.