

阿联酋东鲁卜哈利盆地白垩系 Mishrif 组 碳酸盐岩储层孔隙特征

叶禹^{1,2}, 李柯然³, 杨沛广¹, 李立基³, 罗贝维¹, 宋金民³, 段海岗¹, 夏舜³, 张庆春¹

1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油集团工程技术研究院有限公司;

3 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室

摘要 上白垩统 Mishrif 组是阿联酋东鲁卜哈利盆地主要的产油层, 目前对 Mishrif-1 段和 Mishrif-3 段储层孔隙特征差异的研究较为薄弱。在岩心描述、薄片鉴定、气测、压汞及核磁共振测试的基础上, 对 Mishrif 组储层储集空间、孔隙结构进行了系统研究, 明确了储层的相控特征以及 Mishrif-1 段和 Mishrif-3 段的差异。结果表明: ① Mishrif 组岩石类型主要包括泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩、亮晶厚壳蛤灰岩, 储集空间类型以粒内溶孔、粒间孔、铸模孔、生物体腔孔和晶间溶孔为主, 属孔隙型储层。② Mishrif 组储层具有明显的相控特征, 优质储层集中在 Mishrif-1 段生物礁和生屑滩微相, Mishrif-3 段厚壳蛤礁滩和生屑滩微相, 平均孔隙度高于 20%, 平均渗透率大于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为高孔高渗储层。③ Mishrif-1 段生物礁微相压汞曲线为斜线型, 核磁共振曲线为锯齿型, 孔隙为大孔径生物体腔孔, 束缚水饱和度低; Mishrif-3 段厚壳蛤礁滩微相压汞曲线为斜线型, 核磁共振曲线为双峰锯齿复合型, 铸模孔、生物体腔孔发育, 同时发育一定的粒间溶孔, 束缚水饱和度低; Mishrif-1 段生屑滩微相压汞曲线为斜线型, 核磁共振曲线为双峰锯齿复合型, 铸模孔、粒间溶孔同时发育, 束缚水饱和度低; Mishrif-3 段生屑滩微相压汞曲线为斜线型, 核磁共振曲线为锯齿型, 孔径分布不集中, 孔隙类型多样, 以粒间溶孔为主。

关键词 碳酸盐岩储层; 沉积微相; 孔隙特征; Mishrif 组; 东鲁卜哈利盆地; 阿联酋

中图分类号: TE122.2 **文献标识码**: A

0 前言

鲁卜哈利盆地油气资源丰富, 已发现 117 个油气田, 探明和控制石油储量 (含凝析油) $158.48 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气储量 $75.73 \times 10^{12} \text{ m}^3$ [1-3]。在阿联酋境内的鲁卜哈利盆地东部 (简称东鲁卜哈利盆地), 油气资源富集在白垩系和侏罗系碳酸盐岩储层中。受新特提斯洋开合与扩张, 阿曼造山带隆起背景下的构造演化、古气候条件及全球海平面高频层序的共同影响, 东鲁卜哈利盆地白垩系发育多套成藏组合 [4-6]。其中的 Mishrif 组作为中东最重要的含油层系之一, 前人已针对其在美索不达米亚盆地及前渊带的两伊 (伊拉克、伊朗) 地区开展了大量的研究工作 [7-16]。伊拉克地区 Mishrif 组勘探和认识程度高: 储层在碳

酸盐台地沉积体系中的高能、低能环境中均有发育, 成因复杂多样, 储层孔隙成因包括与白云石化有关、与构造活动裂缝有关、与生物扰动有关以及与溶蚀有关等多种类型, 储层受成岩作用改造强烈; 储层孔隙类型多样, 包括原生粒间孔、粒内孔、粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔及白云石晶间孔, 高孔高渗储层以粒间孔、粒间溶孔为主, 与生物潜穴、溶蚀作用密切相关 [16-24]。

东鲁卜哈利盆地已有的研究主要集中在成藏模式方面。相关研究 [4-5] 认为白垩系油藏的展布受优质烃源岩、相对古地貌和油气优势运移通道控制; 在古近纪—新近纪扎格罗斯造山运动控制下, 盆地东侧发育大量断裂系统, 配合多期区域性不整合面, 油气生成及运移条件优越。目前有关 Mishrif

收稿日期: 2021-10-11; 改回日期: 2022-01-21

本文受中国石油天然气集团有限公司海外重点领域油气勘探关键技术研究项目“海外复杂碳酸盐岩精细勘探关键技术研究” (编号: 2021DJ3104) 资助

第一作者: 叶禹, 中国石油勘探开发研究院在读博士研究生, 中国石油集团工程技术研究院有限公司工程师, 主要从事油气开发地质方面的研究工作。通信地址: 102206 北京市昌平区黄河街 5 号院 1 号楼; E-mail: yeyu01@cnpc.com.cn

通信作者: 李柯然, 成都理工大学能源学院地质资源与地质工程专业在读硕士研究生, 主要从事沉积储层方面的研究工作。通信地址: 610059 四川省成都市成华区二仙桥东三路 1 号; E-mail: keranli98@outlook.com

组储层的研究较少,储层特征尚不明确。

地震-测井-沉积综合研究结果显示:与两伊地区明显不同,阿联酋地区 Mishrif 组沉积早—中期(Mishrif-1 段、Mishrif-2 段)发育镶边台地,优质储层发育在颗粒滩、礁滩复合体相带;晚期(Mishrif-3 段)发育缓坡^[4-6, 24],在区域性海侵背景下颗粒滩和礁滩复合体厚度减薄,储层质量可能较差。但是研究区 Mishrif 组沉积晚期存在区域性不整合,大气淡水淋滤作用显著^[4-5, 24],对储层性能可能有一定改善。为进一步明确 Mishrif 组储层性质,本文基于 3 口井的薄片、压汞、气测等资料,借助核磁共振手段,系统剖析、对比了 Mishrif 组储层的岩石学及孔隙特点,研究成果可为东鲁卜哈利盆地 Mishrif 组不同类型储层的精细描述提供地质依据。

1 地质背景

研究区位于阿联酋阿布扎比西侧的波斯湾海域。白垩系 Mishrif 组发育开阔台地、台地边缘和深海陆棚沉积环境(图 1a),与下伏深水陆棚或次盆地相 Shilaif 组呈整合接触关系^[7-13]。受海平面升降和构造作用控制,Mishrif 组发育高位体系域生物礁灰岩和生物碎屑(简称生屑)滩灰岩^[10-11]。Mishrif 组自下而上分为 Mishrif-1 段、Mishrif-2 段和 Mishrif-3 段(图 1b)。Mishrif-1 段和 Mishrif-2 段属碳酸盐台地沉积^[12-15, 24],发育开阔台地、台缘和斜坡相;Mishrif-3 段属缓坡沉积^[12-15, 24],发育内缓坡和中缓坡相。优质储层主要发育于碳酸盐台地礁滩相带,生屑丰富,岩石类型主要为亮晶生屑灰岩和泥晶生屑灰岩^[10-14, 24],孔隙类型主要为铸模孔、粒间溶孔和生物体腔孔。

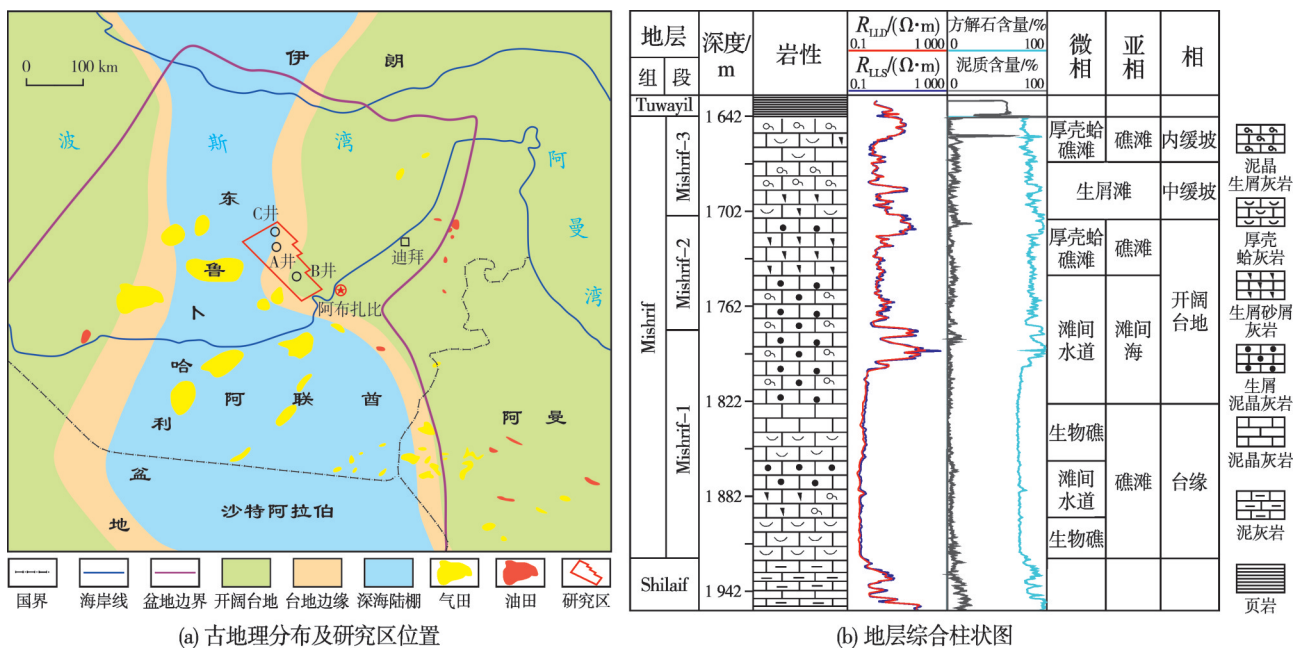


图1 东鲁卜哈利盆地上白垩统 Mishrif 组沉积相分布及地层综合柱状图(据文献[24],有修改)

Fig. 1 Sedimentary facies distribution and stratigraphic comprehensive column of the Upper Cretaceous Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin (cited from reference [24], modified)

2 Mishrif 组沉积微相类型与特征

本文采用的海相碳酸盐沉积相分类方案见表 1。根据岩心、薄片观察分析,研究区 Mishrif 组主要发育泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩、亮晶生屑灰岩等(图 2)。

Mishrif-1 段和 Mishrif-2 段主要沉积于台地环

境。生物礁微相主要发育亮晶厚壳蛤灰岩(图 2a),亮晶方解石胶结,孔隙类型以铸模孔和粒间溶孔为主,储集性极好。滩间水道微相发育生屑泥晶灰岩(图 2b, 2c),具泥晶结构,含生屑,岩石孔隙总体不发育,主要孔隙类型为粒间溶孔,储集性较差。生屑滩微相主要发育泥晶生屑灰岩(图 2d),生屑含量较高,孔隙类型以铸模孔、粒间溶孔为主,储集性能较好。

表 1 海相碳酸盐岩沉积相分类简表
Table 1 Classification of sedimentary facies of marine carbonate rocks

沉积体系	相	亚相	微相	
碳酸盐台地	开阔台地	礁滩	厚壳蛤礁滩	
		滩间海	滩间水道	
			滩间洼地	
	台缘	礁滩	生物礁	
			生屑滩	
			滩间水道	
		斜坡		上斜坡
			下斜坡	
	碳酸盐缓坡	内缓坡	滩间海	滩间水道
				滩间洼地
		礁滩	厚壳蛤礁滩	
中缓坡			生屑滩	
			滩间水道	

下斜坡发育瘤状灰岩(图 2e,2f),瘤状结构为泥晶生物碎屑灰岩和泥晶灰岩的组合,仅有少量晶间孔,储集性能差。

白垩系 Mishrif-3 段主要沉积于缓坡背景。厚壳蛤礁滩微相发育亮晶厚壳蛤灰岩(图 2g),岩石结构与生物礁微相类似。滩间水道微相主要发育生屑泥晶灰岩(图 2h—2j),相对而言,中缓坡比内缓坡生屑含量更高,偶见溶蚀孔。滩间洼地微相主要发育含生屑泥晶灰岩(图 2k),泥晶结构显著,孔隙不发育。生屑滩微相发育泥晶生屑灰岩(图 2l),方解石含量大于 95%,含少量泥质,泥晶生屑灰岩含大量生物碎屑,以厚壳蛤为主,形成颗粒支撑结构;主要孔隙类型为铸模孔和粒间溶孔,储集性能较好。

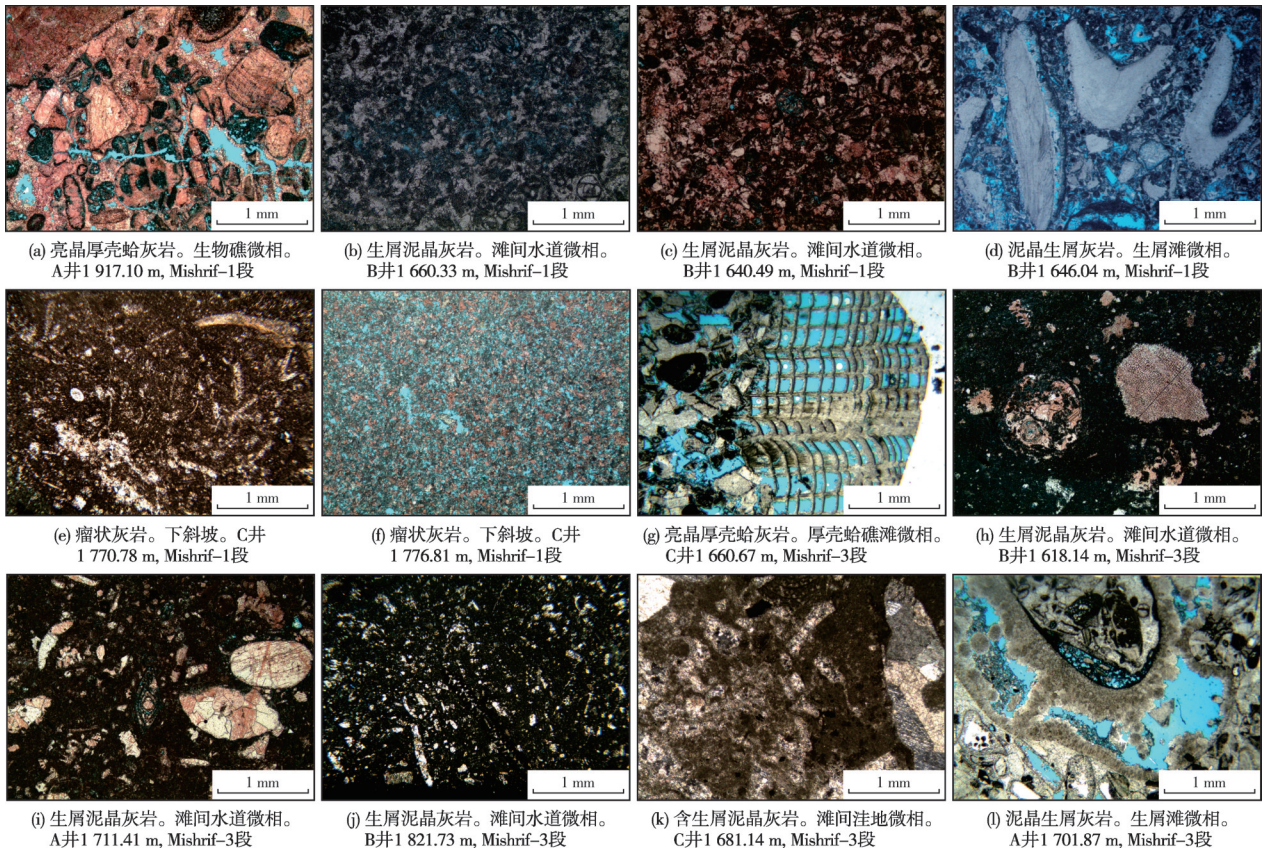


图 2 东鲁卜哈利盆地 Mishrif 组不同沉积微相岩心薄片镜下特征(铸体薄片,单偏光)
Fig. 2 Microscopic characteristics of core thin sections of different sedimentary microfacies of Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin (cast thin section, single polarized light)

3 Mishrif 组储层特征

3.1 储集空间类型

研究区 Mishrif 组储集空间类型以粒内容孔、粒

间溶孔、铸模孔、生物体腔孔和晶间溶孔为主(图 3),局部发育微裂缝,属孔隙型储层。

粒内容孔 指各种颗粒内部部分被溶蚀所形成的孔隙,多是选择性溶蚀作用的结果。颗粒岩中,

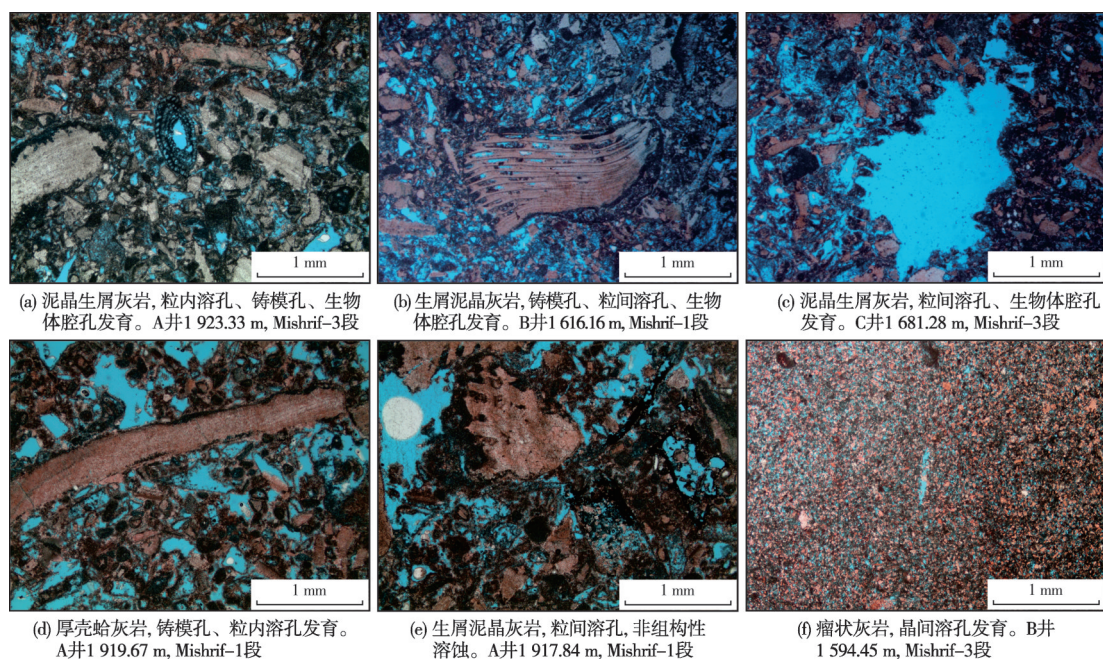


图3 东鲁卜哈利盆地 Mishrif 组储集空间类型(铸体薄片, 单偏光)

Fig. 3 Reservoir space type of Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin (cast thin section, single polarized light)

鲕粒、球粒、砂屑等内部被溶蚀而形成的粒内溶蚀孔隙,形态不规则,大小不一。研究区的粒内溶孔为生物颗粒在同沉积期大气淡水选择性溶蚀所留下的孔隙,主要发育在生屑灰岩等内部,后期被成岩作用改造(图3a—3d)。

生物体腔孔 主要为厚壳蛤体腔孔,主要在 Mishrif 组礁滩微相储层中广泛发育(图3b, 3c),生屑滩微相次之,同时伴随铸模孔和粒间孔发育。研究区生物体腔孔受后期成岩改造弱,保持了生物骨架间的连通性。

铸模孔 由粒内溶孔遭受进一步溶蚀演化而来,颗粒内部几乎全部被溶蚀,只剩下碳酸盐岩颗粒的外壳,一些铸模孔内还可见较难溶的溶蚀残留物。研究区大气水溶蚀作用强烈,形成了大量的铸模孔(图3d)。

粒间溶孔 由于酸性流体(烃类充注)或大气淡水溶蚀的影响,成岩流体沿先期的残余粒间孔扩溶,可部分溶蚀颗粒间的胶结物或基质形成溶扩的粒间孔,其形态不规则,分布不均匀,而且往往能与其他类型孔隙溶通,从而形成连通性极好的网络状孔隙空间(图3e)。

晶间孔 是组成碳酸盐岩的矿物晶粒之间的孔隙。研究区的晶间溶孔是形成于亮晶方解石胶结物晶粒间的次生溶蚀性孔隙(图3f)。

Mishrif-1 段、Mishrif-3 段孔隙类型具有一定差异(图4):Mishrif-1 段各类型孔隙均有发育,主要发育铸模孔、粒间溶孔、生物体腔孔;Mishrif-3 段主要发育铸模孔、粒间溶孔。

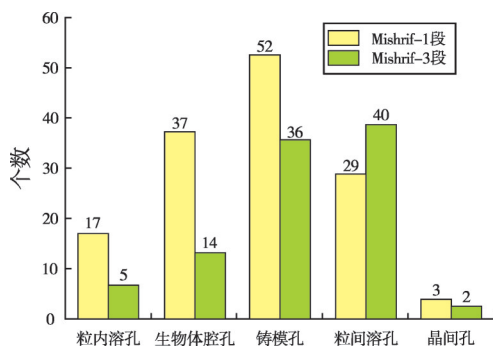


图4 东鲁卜哈利盆地 Mishrif 组不同孔隙类型分段统计直方图

Fig. 4 Sectional statistical histogram of different pore types of Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin

3.2 储层物性特征

东鲁卜哈利盆地 Mishrif 组孔隙较发育,岩心柱塞样气测结果表明,孔隙度主要分布在 15%~25% 区间(图5a)。分段统计显示:Mishrif-1 段孔隙度主要分布在 20%~30% 区间,Mishrif-2 段和 Mishrif-3 段孔隙度主要分布在 15%~25% 区间(图5a)。不同沉积微相的平均面孔率统计显示(图5b):生物礁面孔率为 26.34%,厚壳蛤礁滩面孔率为 29.14%,生屑

滩面孔率为 21.39%, 滩间水道面孔率为 13.75%, 滩间洼地面孔率为 11.25%。区内生物礁、厚壳蛤礁

滩、生屑滩微相孔隙性能优越, 优质储层受礁滩相带控制明显。

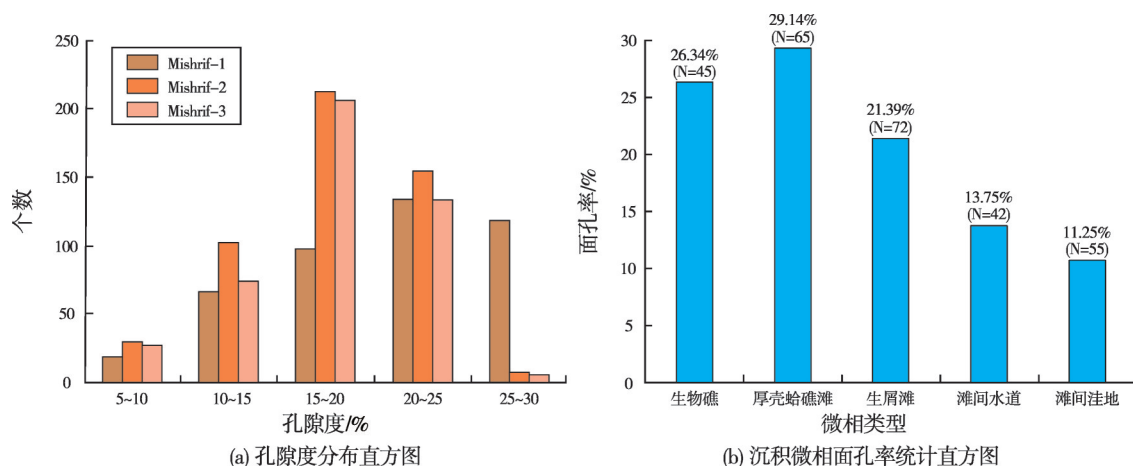


图5 东鲁卜哈利盆地 Mishrif 组储层物性统计直方图
Fig. 5 Statistical histograms of reservoir physical properties of Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin

基于气测、压汞实验结果对 Mishrif 组不同沉积微相的孔隙度与渗透率进行交会分析(图 6)。整体上看,除下斜坡瘤状灰岩的孔隙度-渗透率表现为一定负相关性外,其他微相的孔隙度-渗透率呈现一定正相关性。如图 6a 所示, Mishrif-1 段生屑滩微相孔隙度-渗透率具有一定正相关性,但相关系数(R^2)较小,略大于 0.25,表明生屑滩微相孔隙存在一定的非均质性,发育非连通孔隙。结合薄片观察(图 2d),认为 Mishrif-1 段生屑滩微相孔隙以粒间溶孔为主,发育一定数量的铸模孔。滩间水道微相孔隙度-渗透率存在明显正相关性(R^2 大于 0.5),表明滩间水道非均质性较弱,但样品整体渗透率较低,表明以非连通小孔隙为主。结合薄片观察(图 2b, 2c),认为 Mishrif-1 段滩间水道微相孔隙以粒间溶孔为主,发育一定数量的粒内溶孔。生物礁微相孔隙度-渗透率具有一定正相关性, R^2 均大于 0.25(在 0.3 左右),表明 Mishrif-1 段生物礁微相孔隙存在一定的非均质性;样品整体渗透率高,表明以大孔径连通孔隙为主,发育少量非连通孔隙。结合薄片观察(图 2a),认为 Mishrif-1 段生物礁微相粒间溶孔、铸模孔、生物体腔孔均比较发育。

Mishrif-3 段气测、压汞统计结果显示(图 6b),生屑滩、滩间水道和滩间洼地微相孔隙度-渗透率具有显著正相关性(R^2 多大于 0.5),表明储层非均质性较弱。生屑滩、滩间水道、滩间洼地微相以中-低渗透率为主,孔隙分布范围大。结合薄片观察(图

2h—2l),认为生屑滩发育铸模孔、粒间溶孔、粒内溶孔,其余微相孔隙发育较差。厚壳蛤礁滩微相孔隙度-渗透率正相关性低(R^2 小于 0.25),表明存在一定的非均质性,发育非连通孔隙;样品整体渗透率高,表明以大孔径连通孔隙为主。结合薄片观察(图 2g),认为 Mishrif-3 段厚壳蛤礁滩微相孔隙以铸模孔为主,发育一定量的粒间溶孔。瘤状灰岩微相孔隙度-渗透率具有一定负相关。样品整体渗透率低,结合薄片观察(图 2f),认为晶间溶孔连通性差,因而呈现一定的高孔低渗的特点。

综上所述, Mishrif-1 段和 Mishrif-3 段样品孔隙度-渗透率大多具有正相关关系,以孔隙型储层为主。 Mishrif-1 段生物礁与 Mishrif-3 段厚壳蛤礁滩储层均存在一定非均质性,以大孔径孔隙连通为主,形成高孔高渗储层。 Mishrif-1 段生屑滩,较 Mishrif-3 段生屑滩非均质性更强,但以大孔径连通为主,故 Mishrif-1 段生屑滩渗透率更高。 Mishrif 组滩间水道、滩间洼地孔渗特征相似,孔隙度分布范围广,渗透率相对较低。

3.3 储层孔隙结构

Mishrif 组不同沉积微相的压汞实验结果可分为 2 类:平整直线型,发育在滩间水道、滩间洼地微相等低能相带;倾斜斜线型,发育在生屑滩、生物礁、厚壳蛤礁滩等高能相带。 Mishrif-1 段生屑滩微相排驱压力为 5~80 kPa,中值压力为 120~500 kPa,

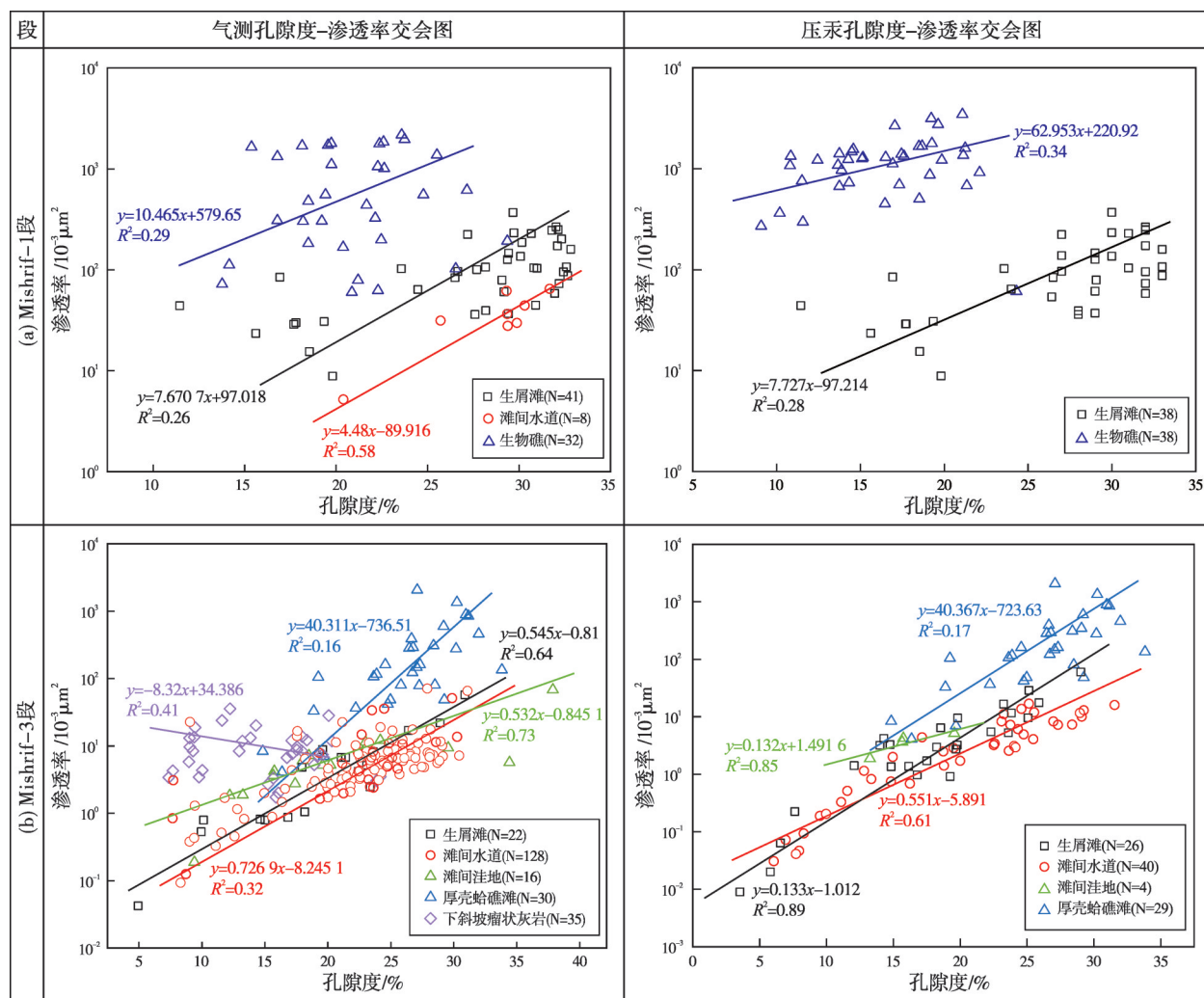


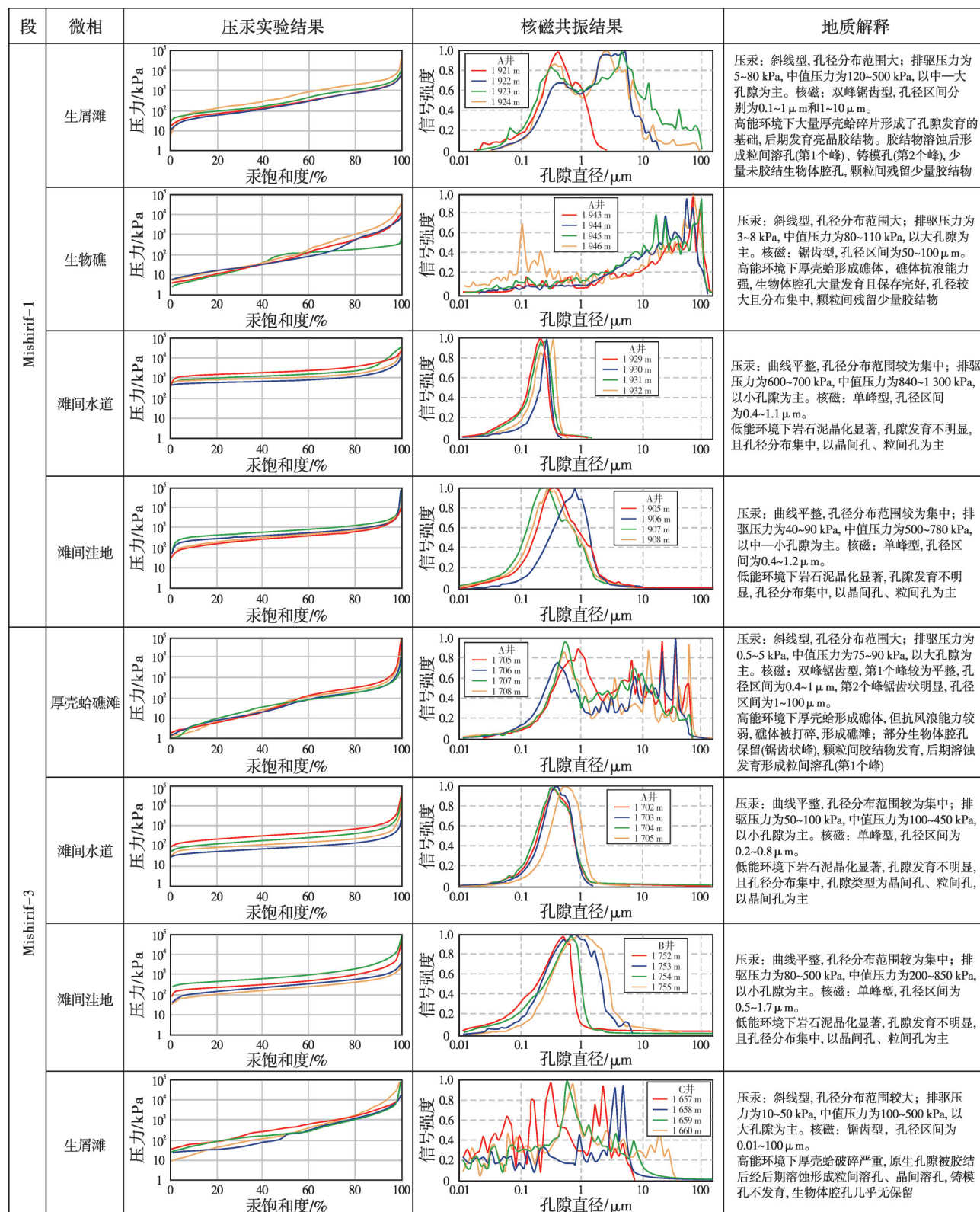
图6 东鲁卜哈利盆地 Mishrif组不同沉积微相气测、压汞孔隙度-渗透率交会图

Fig. 6 Crossplots of gas logging and mercury injection porosity-permeability of different sedimentary microfacies of Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin

以中一大孔隙为主,曲线呈斜线,孔径分布范围较大,束缚水饱和度低(图7)。Mishrif-1段生物礁微相排驱压力为3~8 kPa,中值压力为80~110 kPa,以大孔隙为主,曲线呈斜线,孔径分布范围较大,束缚水饱和度低于1%(图7)。Mishrif-1段滩间水道微相排驱压力为600~700 kPa,中值压力为840~1 300 kPa,以小孔隙为主,曲线平整,孔径分布范围较为集中,束缚水饱和度约为5%(图7)。Mishrif-1段滩间洼地微相排驱压力为40~90 kPa,中值压力为500~780 kPa,以中一小孔隙为主,曲线平整,孔径分布范围较为集中,束缚水饱和度约为5%(图7)。Mishrif-3段厚壳蛤礁滩微相排驱压力为0.5~5 kPa,中值压力为75~90 kPa,以大孔隙为主,曲线先呈倾斜直线后变为平整直线,孔径分布范围大,束缚水饱和度较低于1%(图7)。Mishrif-3段滩间水道微相排驱压

力为50~100 kPa,中值压力为100~450 kPa,以小孔隙为主,曲线平整,孔径分布范围较为集中,束缚水饱和度约为4%(图7)。Mishrif-3段滩间洼地微相排驱压力为80~500 kPa,中值压力为200~850 kPa,以小孔隙为主,曲线平整,孔径分布范围较为集中,束缚水饱和度约为4%(图7)。Mishrif-3段生屑滩微相排驱压力为10~50 kPa,中值压力为100~500 kPa,以大孔隙为主,曲线呈倾斜直线,孔径分布范围较大,束缚水饱和度低于1%(图7)。

Mishrif组不同沉积微相的核磁共振结果可分为单峰型、锯齿型和双峰锯齿复合型(图7):单峰型发育在滩间水道、滩间洼地等低能相带,表明孔隙集中分布在小孔径;锯齿型发育在Mishrif-1段生物礁、Mishrif-3段生屑滩等高能相带,表明孔径分布具有分散性;双峰锯齿复合型发育在Mishrif-1段生



注: 同一段内相同沉积微相的压汞、核磁样品信息及图例一致。信号强度为归一化结果。

图7 东鲁卜哈利盆地 Mishrif组不同沉积微相压汞及核磁共振测试结果

Fig. 7 Mercury intrusion and nuclear magnetic resonance test results of different sedimentary microfacies of Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin

屑滩、Mishrif-3段厚壳蛤礁滩微相,表明孔径分布具有分散性,但也存在一定的集中。核磁共振测试结果显示,Mishrif-1段生屑滩微相孔径分布呈双峰锯齿型,孔径区间分别为 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 和 $1\sim 10\mu\text{m}$ (图7),粒间孔、粒内溶孔、铸模孔发育。Mishrif-1段生物礁微相孔径分布呈锯齿型,孔径区间为 $50\sim 100\mu\text{m}$ (图7),曲线呈锯齿状,孔隙类型为生物体腔孔、铸模孔。Mishrif-1段滩间水道微相孔径分布呈单峰型,孔径区间为 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ (图7),孔隙类型为晶间孔、粒间孔,且以晶间孔为主。Mishrif-1段滩间洼地微相孔径分布呈单峰型,孔径区间为 $0.4\sim 1.2\mu\text{m}$ (图7),孔隙类型为晶间孔、粒间孔。Mishrif-3段厚壳蛤礁滩微相孔径分布呈双峰锯齿型,第1个峰较为平整,孔径区间为 $0.4\sim 1\mu\text{m}$,第2个峰锯齿状明显,孔径区间为 $1\sim 100\mu\text{m}$ (图7),储集空间由粒间溶孔、铸模孔、生物体腔孔组成,铸模孔稍多,孔隙类型多样。Mishrif-3段滩间水道微相孔径分布呈单峰型,孔径区间为 $0.2\sim 0.8\mu\text{m}$ (图7),孔隙类型为晶间孔、粒间孔,且以晶间孔为主。Mishrif-3段滩间洼地微相孔径分布呈单峰型,孔径区间为 $0.5\sim 1.7\mu\text{m}$,孔隙类型为晶间孔、粒间孔(图7)。Mishrif-3段生屑滩微相孔径分布呈锯齿状,孔径区间为 $0.01\sim 100\mu\text{m}$,储集空间由多种孔隙类型形成,优势孔隙类型多样,非均质性强(图7)。

综上所述:①Mishrif组滩间水道、滩间洼地微相孔隙分布集中,以小孔径为主,储层物性较差,与镜下观察到的泥晶结构对应。②生屑滩微相在Mishrif-1段孔隙分布集中,在Mishrif-3段孔隙分布范围较大,与压汞气测结果一致,两个段之间差异明显。Mishrif-1段核磁共振结果呈双峰锯齿型分布,结合薄片观察可以推断第1个峰反映粒间孔、粒内溶孔,第2个峰反映铸模孔和少量生物体腔孔;Mishrif-3段核磁共振结果呈锯齿状,与镜下观察的多种孔隙类型对应,大孔径铸模孔、生物体腔孔较少,粒间溶孔较为发育。③生物礁微相与厚壳蛤礁滩微相整体相似,大孔径生物体腔孔大量发育,构成了高孔高渗储层发育的基础。但是,Mishrif-3段厚壳蛤礁滩大孔径存在分散性,且发育粒间溶孔,显示出Mishrif-3段受到成岩作用改造,储层物性变差,渗透率比Mishrif-1段要低。

4 勘探启示

阿联酋东鲁卜哈利盆地Mishrif组礁滩带是高孔高渗型优质储层发育的重要相带,但未见明显生物扰

动^[9],同时Mishrif组受强溶蚀作用改造而改善了储层物性。Mishrif组中下部(Mishrif-1段、Mishrif-2段)碳酸盐台地发育礁滩相带,生物礁、生屑滩为优质储层发育的微相,储集空间以铸模孔、生物体腔孔为主;上部(Mishrif-3段)碳酸盐缓坡在海平面上升背景下礁滩相带发育程度降低,且受成岩作用影响,厚壳蛤礁滩微相中铸模孔、生物体腔孔减少,孔隙以粒间溶孔为主,生屑滩微相铸模孔显著减少。因此,Mishrif组下部地层中礁滩相带是勘探首选,上部地层中厚壳蛤礁滩微相是有利相带,同时,大气淡水淋滤仍能在部分生屑滩微相形成物性较好的储层。建议综合地质-地球物理资料,优选Mishrif组有利相带的古地貌高点作为勘探目标。

5 结论

(1)阿联酋东鲁卜哈利盆地Mishrif组岩石类型包含泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩、含生屑泥晶灰岩、亮晶生屑灰岩、生屑砂屑灰岩、亮晶厚壳蛤灰岩,储集空间类型包括粒内溶孔、粒间孔、铸模孔、生物体腔孔和晶间溶孔,局部发育微裂缝。

(2)气测渗透率、压汞及核磁共振测试结果表明,Mishrif组储层相控特征明显,生物礁、厚壳蛤礁滩和生屑滩是优势相带。Mishrif-1段生物礁微相压汞曲线为斜线型,核磁共振曲线为锯齿型,孔隙为大孔径生物体腔孔,束缚水饱和度低。Mishrif-3段厚壳蛤礁滩微相压汞曲线为斜线型,核磁共振曲线为双峰锯齿复合型,铸模孔、生物体腔孔发育,同时发育一定的粒间溶孔,束缚水饱和度低。Mishrif-1段生屑滩微相压汞曲线为斜线型,核磁共振曲线为双峰锯齿复合型,铸模孔、粒间溶孔同时发育,束缚水饱和度低。Mishrif-3段生屑滩微相压汞曲线为斜线型,核磁共振曲线为锯齿型,孔径分布无明显集中,孔隙类型多样,孔隙组合以粒间溶孔为主,发育少量铸模孔、生物体腔孔。Mishrif-1段生物礁、生屑滩,Mishrif-3段厚壳蛤礁滩和受大气淡水淋滤改造强的生屑滩是有利储层发育区带。

参考文献

- [1] 童晓光,张光亚,王兆明,等.全球油气资源潜力与分布[J].石油勘探与开发,2018,45(4):727-736.
TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, WANG Zhaoming, et al. Distribution and potential of global oil and gas resources[J]. Petroleum exploration and development, 2018, 45(4): 727-736.
- [2] 童晓光,张光亚,王兆明,等.全球油气资源潜力与分布[J].地学前缘,2014,21(3):1-9.

- TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, WANG Zhaoming, et al. Global oil and gas potential and distribution[J]. Earth science frontiers, 2014, 21(3): 1-9.
- [3] 贾小乐, 何登发, 童晓光, 等. 全球大油气田分布特征[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(3): 1-7.
- JIA Xiaole, HE Dengfa, TONG Xiaoguang, et al. Distribution of global giant oil and gas fields[J]. China petroleum exploration, 2011, 16(3): 1-7.
- [4] 张宁宁, 姚根顺, 王建君, 等. 阿曼山西侧前陆区构造演化特征及地质意义[J]. 地质科学, 2021, 56(4): 1077-1087.
- ZHANG Ningning, YAO Genshun, WANG Jianjun, et al. Western foreland of the northern Oman Mountains: structural evolution and geological significance[J]. Chinese journal of geology, 2021, 56(4): 1077-1087.
- [5] 张新顺, 杨沛广, 段海岗, 等. 泥质粉砂岩盖层厚度下限研究: 以东鲁卜哈利盆地 L 区白垩系 Tuwayl 组为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2021, 36(1): 13-19.
- ZHANG Xinshun, YANG Peiguang, DUAN Haigang, et al. Study on lower limit of thickness of argillaceous siltstone caprock: taking the Cretaceous Tuwayl Formation in L area of Eastern Rub Al Khali Basin as an example[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (natural science edition), 2021, 36(1): 13-19.
- [6] 罗贝维, 张庆春, 段海岗, 等. 中东鲁卜哈利盆地白垩纪构造演化的沉积响应及对石油勘探启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(4): 115-124.
- LUO Beiwei, ZHANG Qingchun, DUAN Haigang, et al. Sedimentary response of Cretaceous tectonic evolution in the Middle East Rub Al Khali Basin and its inspirations for oil exploration[J]. China petroleum exploration, 2020, 36(1): 13-19.
- [7] AL-AMERI T K, AL-KHAFI A J, ZUMBERGE J. Petroleum system analysis of the Mishrif reservoir in the Ratawi, Zubair, North and South Rumaila oil fields, southern Iraq[J]. GeoArabia, 2009, 14(4): 91-103.
- [8] AWADEESIAN A, AL-JAWED S, SALEH A H. Reservoir-scale sequence stratigraphy of Mishrif carbonates and implication to water injection strategy North Rumaila field case[J]. Arabian journal of geosciences, 2015, 8(9): 7025-7040.
- [9] CHEN Peiyuan, GUO Lina, LI Chen, et al. Karstification characteristics of the Cenomanian-Turonian Mishrif Formation in the Missan Oil Fields, southeastern Iraq, and their effects on reservoirs[J]. Frontiers of earth science, 2021(1): 1-11.
- [10] AQRAWI A A M, THEHNI G A, SHERWANI G H, et al. Mid-Cretaceous rudist-bearing carbonates of the Mishrif Formation: an important reservoir sequence in the Mesopotamian Basin, Iraq[J]. Journal of petroleum geology, 1998, 21(1): 57-82.
- [11] AWADH S M, AL-MIMAR H S, AL-YASERI A A. Salinity mapping model and brine chemistry of Mishrif reservoir in Basrah oilfields, Southern Iraq[J]. Arabian journal of geosciences, 2018, 11(18): 1-12.
- [12] 叶禹, 李峰峰, 宋新民, 等. 生物扰动与成岩作用耦合对泥质碳酸盐岩改造机理: 以中东美索不达米亚盆地白垩系为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1187-1201.
- YE Yu, LI Fengfeng, SONG Xinmin, et al. Transformation mechanism of argillaceous carbonate rock by the coupling of bioturbation and diagenesis: a case study of the Cretaceous System of the Mesopotamia Basin in the Middle East[J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(6): 1187-1201.
- [13] 李峰峰, 郭睿, 宋世琦. 层序格架约束下沉积、成岩作用对岩石物性的控制: 以中东 A 油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. 高校地质学报, 2021, 27(4): 432-443.
- LI Fengfeng, GUO Rui, SONG Shiqi. Impacts of the sedimentation and diagenesis on reservoir physical property under the control of sequence: a case study of the Cretaceous Mishrif Formation, A Oilfield in the Middle East[J]. Geological journal of China universities, 2021, 27(4): 432-443.
- [14] 李峰峰, 王振彪, 郭睿, 等. 伊拉克 M 油田 Mishrif 组生物扰动作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 21-30.
- LI Fengfeng, WANG Zhenbiao, GUO Rui, et al. Bioturbation of Mishrif Formation in M Oilfield, Iraq[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2021, 45(2): 21-30.
- [15] 赵晨阳, 王园园, 夏宇. 伊拉克 HF 油田 Mishrif 组层序地层特征[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(2): 17-22.
- ZHAO Chenyang, WANG Yuanyuan, XIA Yu. Sequence stratigraphy of Mishrif Formation in HF Oilfield of Iraq[J]. Petroleum geology and engineering, 2021, 34(2): 17-22.
- [16] 黄茜, 伏美燕, 赵丽敏, 等. 伊拉克 HF 油田 Mishrif 组碳酸盐岩米级旋回的识别及意义[J]. 海相油气地质, 2019, 24(1): 44-50.
- HUANG Qian, FU Meiyuan, ZHAO Limin, et al. Identification and significance of meter-scale cycle of carbonate rocks in Mishrif Formation, HF Oilfield, Iraq[J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(1): 44-50.
- [17] 姚子修, 刘航宇, 田中元, 等. 伊拉克西古尔纳油田中白垩统 Mishrif 组碳酸盐岩储层特征及主控因素[J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 59-69.
- YAO Zixiu, LIU Hangyu, TIAN Zhongyuan, et al. Characteristics and main controlling factors of carbonate reservoir of the Middle Cretaceous Mishrif Formation in the West Qurna Oilfield, Iraq[J]. Marine origin petroleum geology, 2018, 23(2): 59-69.
- [18] 伏美燕, 赵丽敏, 段天向, 等. 伊拉克 HF 油田 Mishrif 组厚壳蛤滩相储层沉积与早期成岩特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 1-9.
- FU Meiyuan, ZHAO Limin, DUAN Tianxiang, et al. Reservoir and early diagenesis characteristics of rudist shoal of Mishrif Formation in HF Oilfield of Iraq[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2016, 40(5): 1-9.
- [19] 张义楷, 康安, 闵小刚, 等. 伊拉克米桑油田群 Mishrif 组 MB₂¹ 段碳酸盐岩储层特征及成因[J]. 石油实验地质, 2016, 38(3): 360-365.
- ZHANG Yikai, KANG An, MIN Xiaogang, et al. Characteristics and genesis of carbonate reservoirs in the Mishrif MB₂¹ Member in the Missan oilfields, Iraq[J]. Petroleum geology and experiment, 2016, 38(3): 360-365.
- [20] 王君, 郭睿, 赵丽敏, 等. 颗粒滩储集层地质特征及主控因素: 以伊拉克哈法亚油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 367-377.
- WANG Jun, GUO Rui, ZHAO Limin, et al. Geological features of grain bank reservoirs and the main controlling fac-

- tors: a case study on Cretaceous Mishrif Formation, Halfaya Oilfield, Iraq [J]. *Petroleum exploration and development*, 2016, 43(3): 367–377.
- [21] 邓亚, 郭睿, 田中元, 等. 碳酸盐岩储集层隔夹层地质特征及成因: 以伊拉克西古尔纳油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(1): 136–144.
- DENG Ya, GUO Rui, TIAN Zhongyuan, et al. Geologic features and genesis of the barriers and intercalations in carbonates: a case study of the Cretaceous Mishrif Formation, West Qurna Oilfield, Iraq [J]. *Petroleum exploration and development*, 2016, 43(1): 136–144.
- [22] 高计县, 田昌炳, 张为民, 等. 伊拉克鲁迈拉油田 Mishrif 组碳酸盐岩储层特征及成因[J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 843–852.
- GAO Jixian, TIAN Changbing, ZHANG Weimin, et al. Characteristics and genesis of carbonate reservoir of the Mishrif Formation in the Rumaila Oilfield, Iraq [J]. *Acta petrolei sinica*, 2013, 34(5): 843–853.
- [23] 韩海英, 穆龙新, 郭睿, 等. 伊拉克艾哈代布油田白垩系生物碎屑灰岩储集层特征及主控因素[J]. *海相油气地质*, 2014, 19(2): 54–63.
- HAN Haiying, MU Longxin, GUO Rui, et al. Characteristics and controlling factors of Cretaceous bioclastic limestone reservoirs in Ahdeb Oilfield, Iraq [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2014, 19(2): 54–63.
- [24] 卞从胜, 李永新, 吕明胜, 等. 碳酸盐岩沉积演化模式与沉积相分布: 以鲁卜哈利盆地东北部上白垩统 Mishrif 组为例[J/OL]. *天然气地球科学*: 1–11. [2021–11–17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.te.20211116.1034.002.html>.
- BIAN Congsheng, LI Yongxin, LÜ Mingsheng, et al. Sedimentary evolution model and sedimentary facies distribution of carbonate rocks: taking Mishrif Formation in northeast Rub Al Khali Basin as an example [J/OL]. *Natural gas geoscience*: 1–11. [2021–11–17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.te.20211116.1034.002.html>.

编辑: 董庸

Pore characteristics of carbonate reservoir of the Cretaceous Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin, UAE

YE Yu, LI Keran, YANG Peiguang, LI Liji, LUO Beiwei, SONG Jinmin, DUAN Haigang, XIA Shun, ZHANG Qingchun

Abstract: The Upper Cretaceous Mishrif Formation is the main oil producing reservoir in Eastern Rub Al Khali Basin. At present, the research on the difference of reservoir pore properties between the Mishrif Member 1 (Mishrif-1) and Member 3 (Mishrif-3) is relatively weak. On the basis of the analysis of core, thin section, gas injection, mercury injection and nuclear magnetic resonance (NMR), the reservoir space types and pore structure types of Mishrif Formation are systemically studied. The results show that: (1) The rock types of Mishrif Formation include micritic bioclastic limestone, bioclastic micritic limestone, and rudist limestone. There are mainly intragranular solution pore, intergranular pore, mold pore, biological cavity pore, and intergranular solution pore in the reservoir, indicating that it is a porous reservoir. (2) The reservoir of Mishrif Formation has obvious facies-controlled characteristics. The high quality reservoirs are concentrated in microfacies including reed and bioclastic shoal of Mishrif-1, bioclastic shoal and rudist reef-shoal of Mishrif-3, with an average porosity of more than 20% and an average permeability of more than $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, which is a high porosity and high permeability reservoir. (3) The mercury injection curve of the reef in Mishrif-1 is oblique, the NMR curve is serrated, the pores are large biological cavities with pore size of 50–100 μm , and the irreducible water saturation is low. The mercury injection curve of Rudist reef-shoal in Mishrif-3 is oblique, and the NMR curve is bimodal-serrated composite, mold pores and biological cavities are developed with pore size of 1–100 μm , and certain intergranular dissolved pores are developed with pore size of 0.4–1 μm at the same time, and the irreducible water saturation is low. The mercury injection curve of bioclastic shoal in Mishrif-1 is oblique, the NMR curve is bimodal-serrated composite, mold pores and intergranular dissolved pores are developed with pore size of 0.1–10 μm , and the irreducible water saturation is low. The mercury injection curve of bioclastic shoal in Mishrif-3 is oblique, the NMR curve is serrated, the pore size distribution is not concentrated, and the pore types are diverse, mainly intergranular dissolved pores.

Key words: carbonate reservoir; sedimentary microfacies; pore feature; Mishrif Formation; East Rub Al Khali Basin; UAE

YE Yu, First author: Engineer, PhD candidate at China Petroleum Exploration and Development Research Institute, mainly engaged in petroleum development geology. Add: China Petroleum Engineering Research Institute Co., Ltd., Building 1, Yard 5, Huanghe Street, Changping District, Beijing 102206, China

LI Keran, Corresponding author: Master candidate at School of Energy, Chengdu University of Technology, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology. Add: No.1 East Third Rd., Erxianqiao, Chenghua District, Chengdu, Sichuan 610059, China