

层序地层级次对生物碎屑灰岩 沉积演化的控制作用 ——以中东X油田 Mishrif 组中下段为例

余义常^{1,2}, 郭睿², 李峰峰², 林敏捷², 沈博珩², 沈毅³, 韩海英², 宋世琦¹

1 中国石油国际勘探开发有限公司; 2 中国石油勘探开发研究院;

3 中国石油集团川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院

摘要 以中东X油田 Mishrif 组中下段为例,综合利用地震、测井、岩心、铸体薄片及常规物性等资料,开展层序地层级次识别及层序地层级次对沉积演化的控制作用研究。结果表明:①Mishrif 组发育5个三级层序和10个四级层序,中下段MB2—MC1层段对应三级层序SQ2—SQ3,包括4个四级层序,其内部发育11个五级层序和多个六级层序。②研究区发育次盆地碳酸盐开阔台地—弱镶边台地沉积,储层主要发育于台内滩和台缘滩中,按照生物碎屑类型可将滩相进一步细分为5种类型。③六级层序控制单滩体的沉积序列,五级层序控制多滩体的组合特征,四级层序决定沉积微相演化特征,三级层序决定沉积体系的演化特征。④SQ2层序的PSS3、PSS4四级层序早期为斜坡环境,发育透镜状滑塌粗粒沉积,后期发育台地边缘滩间→中能滩相沉积序列;SQ3层序的PSS5、PSS6四级层序发育台地边缘滩间→中能滩相→高能滩相沉积序列。SQ3沉积结束后形成了特殊的下切谷充填沉积。

关键词 生物碎屑灰岩;层序地层级次;沉积演化;Mishrif组;中东

中图分类号: TE121.3+4 **文献标识码**: A

引用: 余义常,郭睿,李峰峰,等. 层序地层级次对生物碎屑灰岩沉积演化的控制作用:以中东X油田 Mishrif 组中下段为例[J]. 海相油气地质, 2024,29(1): 57-70.

YU Yichang, GUO Rui, LI Fengfeng, et al. Controlling effects of sequence stratigraphic orders on sedimentary evolution of bioclastic limestone: a case study of middle-lower section of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(1): 57-70.

0 前言

中东地区的石油剩余可采储量占全球的48.3%,石油产量占全球的31.3%,巨大的资源优势、较低的开采成本与特殊的地缘政治环境使得中东地区成为国际石油巨头必争的高端油气市场^[1-3]。中东地区石油主要产自厚层生物碎屑灰岩油藏,储集空间主要为各类孔隙,物性相对较好^[4-6],这与中国的深层缝洞型碳酸盐岩及白云岩油藏区别很大。巨厚生物碎屑灰岩内部存在多个不同级次的层序地层旋回,它们控制了沉积相的演化特征和储层的空间分布规律,极大地影响了油藏的高效开发^[7-10]。相比于碎屑岩,碳酸盐岩层序发育的控制因素更为复杂,如构造活动、海平面升降、古气候及生物生活习性等因素均可对其造成影响,因此研究难度更

大^[11-16]。特别是中东地区的生物碎屑灰岩,由于受资料的限制,关于其层序地层级次的研究较为缺乏,涉及四级、五级和六级等高频层序对沉积演化控制作用的研究较少。

伊拉克X油田的储量规模巨大,主力产油层为白垩系 Mishrif 组中下段MB2—MC1层段,地层厚度超过130 m,是滩相沉积最为发育的层段,具有时代新、埋深小、构造活动强度较低、成岩作用改造相对较弱的特征。这个巨厚油藏内部的层序地层级次性尚不清晰,其对于沉积演化的控制作用也亟待研究。本文综合利用研究区丰富的地震、测井、岩心、铸体薄片及常规物性等资料,针对层序地层级次和沉积相特征进行了系统研究,并逐个厘清了六级到三级的层序地层对于沉积演化的影响,以期为油田高效开发提供地质理论依据。

收稿日期: 2022-09-19; 改回日期: 2023-07-05; 网络出版日期: 2024-01-15

本文受国家科技重大专项下课题“伊拉克大型生物碎屑灰岩油藏注水开发关键技术研究与应用”(编号: 2017ZX05030-001)、中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“中东大型生物碎屑灰岩油藏地质特征及评价技术”(编号: 2017D-4406)联合资助

第一作者: 余义常, 博士, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩储层开发地质研究。通信地址: 100034 北京市西城区阜成门北大街6号-1 中国石油国际勘探开发有限公司; E-mail: yuyichang@petrochina.com.cn

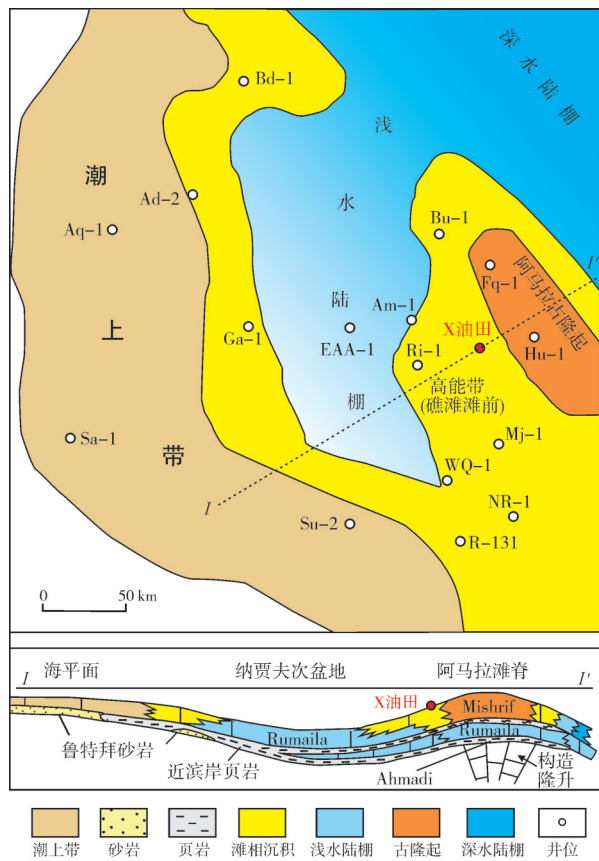
通信作者: 林敏捷, 硕士, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩储层预测研究。通信地址: 100083 北京市海淀区学院路20号 中国石油勘探开发研究院; E-mail: linmj@petrochina.com.cn

1 地质概况

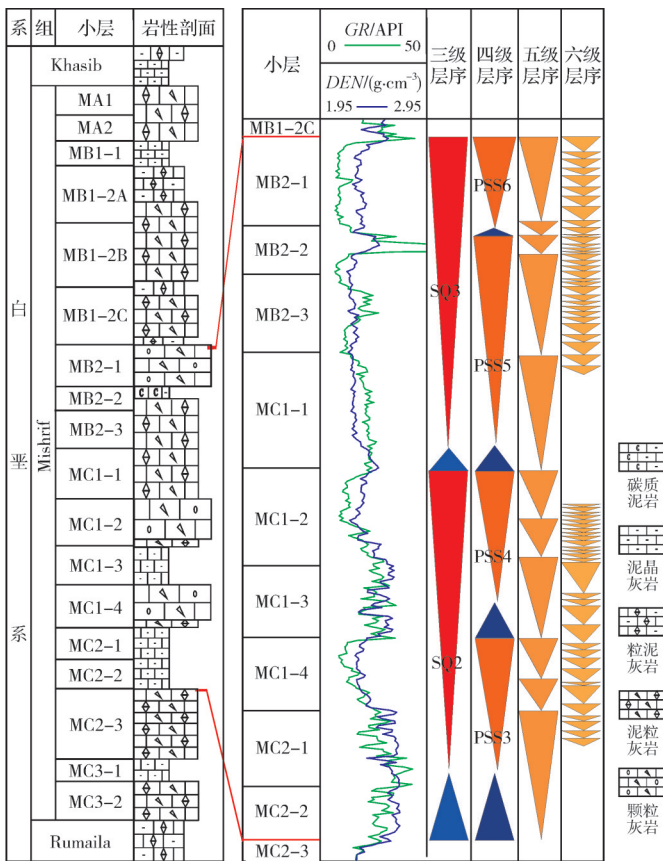
X油田位于伊拉克东南部米桑省内,构造上处于美索不达米亚盆地东南部的东前渊带。自寒武纪以来,X油田所在的区域长期位于古冈瓦纳大陆北缘,主要发育地台型沉积;白垩纪的构造活动总体较弱,处于构造活动平缓期,沉积了厚层的浅海陆架碳酸盐岩。Mishrif组发育在晚白垩世塞诺曼期稳定的被动大陆边缘环境,处于被阿马拉古隆起分隔的纳贾夫内陆棚次盆地,其东北方向为新特提斯洋,西南方向为较局限的海域(图1a)。受控于阿马拉古隆起持续隆升和区域海平面逐渐下降,纳贾夫次盆地水深整体变浅,Mishrif组沉积期逐渐从开阔陆棚环境演变为斜坡、台地边缘和开阔台地环境,最后演变为台内局限沉积环境^[7,17]。

研究区地层发育齐全,从前寒武系到第四系均有分布,包括11个一级层序(AP1—AP11),白垩系Mishrif组位于AP8一级层序顶部,AP8可划分为4个二级层序(从下往上依次为SS1—SS4)^[18-19]。其中,

SS4主要由Ahmadi组页岩、Rumaila组白垩质灰岩和Mishrif组浅水碳酸盐岩组成,整体是一个以海退为主的沉积旋回。Mishrif组逐渐覆盖于下伏的Ahmadi组和Rumaila组之上,与上伏的Khasib组呈不整合接触。Mishrif组沉积厚度约为400 m,包括MA、MB1、MB2和MC层段,可进一步划分18个小层(图1b),颗粒灰岩、泥粒灰岩、粒泥灰岩和泥晶灰岩均有发育,局部层段发育碳质泥岩。中下段MB2—MC1层段发育X油田最重要的优质油藏,沉积期间处于次盆地边缘相对浅水的位置,水动力条件整体较强,这使得该层段台内滩和台缘滩等高能相带最为发育。Mishrif组中下段沉积期间海平面波动频繁,油藏内部发育不同级次的层序地层,各级次层序地层控制下的沉积相空间演化特征也极为复杂,导致储层物性纵向差异大。目前研究区已经从天然能量开发转为了注水开发,但由于层序地层的级次尚不清晰,各级层序对沉积演化和优质储层空间分布的控制作用也不明确,高效注水开发面临重大挑战。



(a) 伊拉克东南部Mishrif组构造及沉积演化图(据文献[17]修改)



(b) X油田Mishrif组地层柱状图

图1 伊拉克东南部Mishrif组构造-沉积背景及地层柱状图

Fig. 1 Structural-sedimentary background and stratigraphic column of Mishrif Formation in southeastern Iraq

2 层序地层划分研究方法及方案

2.1 层序地层级次划分研究方法

层序地层学自面世至今的40多年来,理论方法不断创新,针对经典层序地层学在不同领域的局限性,发展出了成因地层学和高分辨率层序地层学两大重要学派^[16]。碳酸盐岩层序的形成受控于构造运动和海平面的相对升降变化。中东X油田 Mishrif组的时代新、埋深小、成岩作用改造较弱,内部不同级次的层序地层特征较为显著,高频层序地层学适合于精细分析油藏的沉积相和储层特征,对于研究本区域的高频低级层序更为实用。高频层序地层学以不同级次的基准面变化将地层划分为不同的旋回,分为6个层次:巨旋回、超长期旋回、长期旋回、中期旋回、短期旋回和超短期旋回,对应一级层序到六级层序^[20]。不同级次层序的时间跨度差异大,层序界面类型多样,包括

区域性角度不整合、角度不整合、平行不整合和暴露溶蚀面。研究区地震、测井、岩心和镜下薄片等资料丰富,本文采用地震方法、测井曲线法和地质分析法等3个可信度高、应用成熟的方法来精细划分层序地层旋回的级次。

X油田 Mishrif组属于陆表海次盆地内的碳酸盐开闢台地-弱镶边台地沉积,沉积地形坡度小,受地震资料垂向分辨率的限制,原始地震剖面上难以识别出明确的反射终止边界,因此层序格架划分和对比困难。但研究区不同沉积相储层之间的岩性、物性差异大,地震反射系数特征显著,可以采用多段分频资料反演稀疏的反射系数,以显著提高地震资料分辨率,进而分辨出小于调谐厚度的薄层界面,进行层序格架精细解释^[21]。在实际应用中,地震剖面三级层序边界处,下伏高位体系域呈清晰的前积或顶部削截反射结构,上覆海侵体系域呈平行或上超反射结构(图2)。

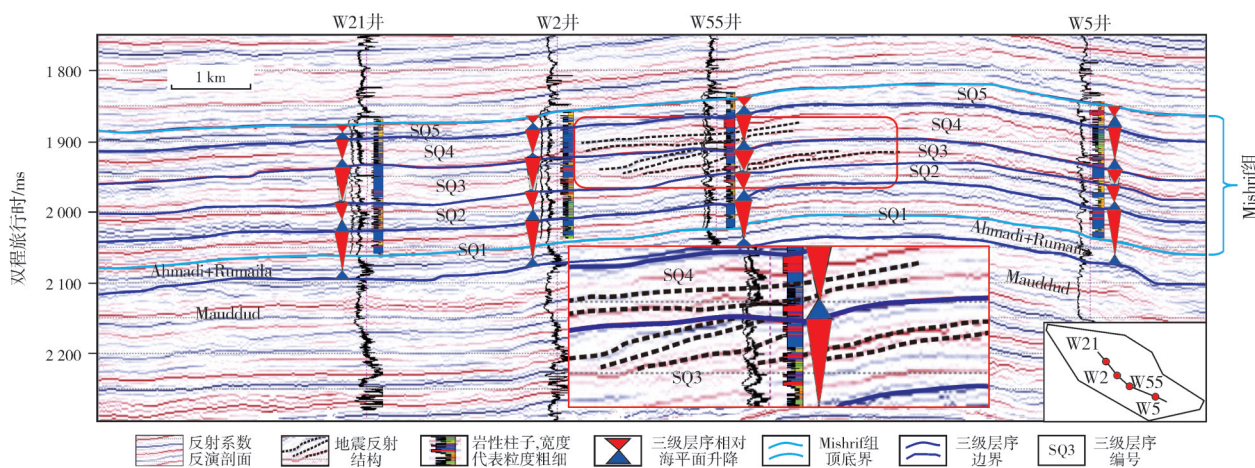


图2 中东X油田 Mishrif组地震反射系数反演剖面显示三级层序界面特征

Fig. 2 Seismic reflection coefficient inversion profile showing the third-order sequence boundary of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield

测井曲线方法通过层序界面上下的岩性和物性差异识别层序界面。层序界面之下相对高能环境和界面之上相对低能环境的沉积差异较大,同时层序界面处暴露形成的淋滤溶蚀进一步增强了这个差异,使得层序界面上下的岩性和物性存在较大差异,这些差异在测井曲线和岩心特征中往往能体现出来。在四级层序界面处,岩心和测井曲线存在2类特征:从粒间溶孔发育的颗粒灰岩转变为孔隙发育较差的粒泥灰岩,测井曲线从低伽马、低密度突变为高伽马、高密度;此外,还存在从碳质泥岩转变为泥粒灰岩的情况,其测井曲线从高伽马、高密

度突变为低伽马、低密度(图3a)。

五级与六级层序界面的识别常常利用地质分析方法。在五级层序界面处,岩性从铸模孔发育、含部分粒间溶孔的泥粒灰岩转变为孔隙发育较差的粒泥灰岩,测井曲线从低伽马向高伽马变化(图3b—3d)。六级层序界面在测井曲线上的响应特征不太明显,一般需要依靠岩心和铸体薄片进行识别:界面之下多为铸模孔发育的泥粒灰岩,界面之上为粒内孔发育的粒泥灰岩(图3e,3f)。

识别特征显著的层序边界是划分层序的重要方法。不同级次层序的内部岩性旋回结构特征也

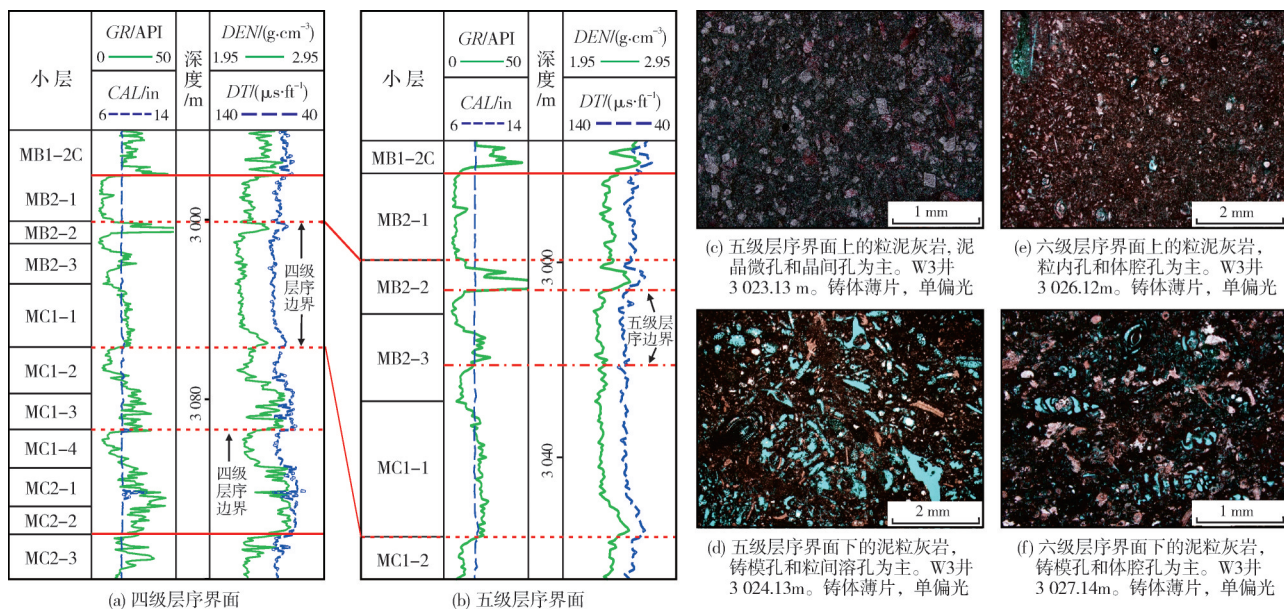


图3 中东X油田 Mishrif组层序界面测井相及岩心特征

Fig. 3 Well logging and core characteristics of sequence boundaries of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield

不一致,主要基于岩心观察的地质分析法可以研究不同尺度上的岩性旋回结构变化特征。在六级层序内的较小尺度上可以明显观察到岩性纵向上的演化现象,如图4所示的岩性向上逐渐变粗的特征:泥粒灰岩→低角度交错层理颗粒灰岩和低角度交错层理颗粒灰岩→平行层理颗粒灰岩(图4)。

在五级层序内的中等尺度上可以看到多个泥粒灰岩→低角度交错层理颗粒灰岩→平行层理颗粒灰岩的高频旋回叠置特征,表现为在垂向上被粗粒沉积和细粒沉积之间的界面频繁分隔,旋回厚度为1~2 m。下部岩性旋回泥粒灰岩占比高,整体厚度大;中部岩性旋回颗粒灰岩占比增加,整体厚度变小;上部岩性旋回主要为颗粒灰岩,粒度显著变大,但旋回整体厚度继续减小(图4)。在四级层序和三级层序内的更大尺度上则呈现出泥晶灰岩→粒泥灰岩→泥粒灰岩→颗粒灰岩的岩性旋回特征(图1b)。

2.2 层序地层划分方案

基于地震反射特征、测井曲线及岩心的综合分析,X油田 Ahmadi组—Mishrif组对应SQ1—SQ5共5个三级层序,Ahmadi组—Rumaila组位于SQ1层序的中下部。由于X油田 Mishrif组沉积期间,阿马拉古隆起持续隆升,海平面逐渐下降,因此所形成的5个三级层序的界面特征也发生规律性的变化

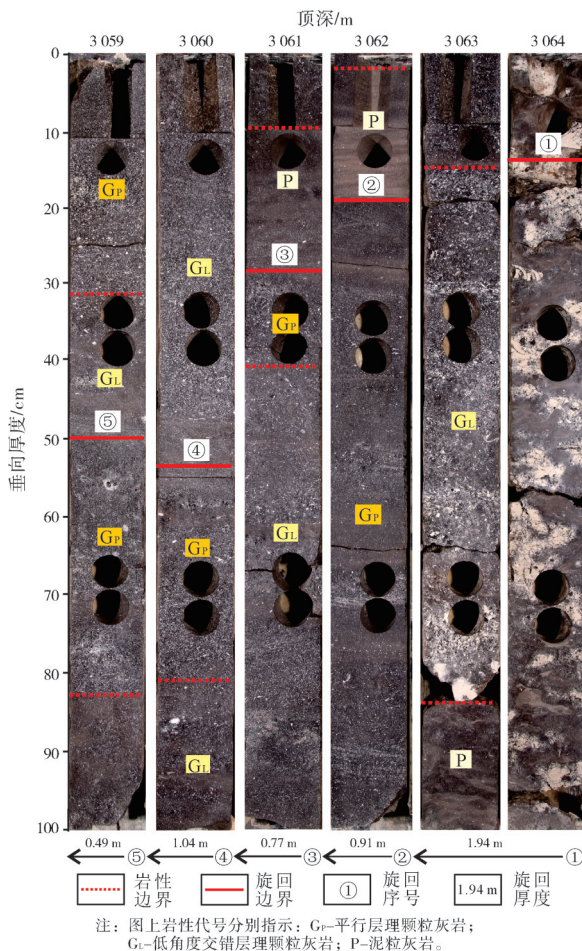


图4 中东X油田 Mishrif组岩心内部岩性旋回结构特征

Fig. 4 Characteristics of lithological cycle structure in core of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield

(图 5a)。从下至上的层序边界从淹没不整合面、局部暴露溶蚀面、暴露溶蚀面、局部不整合面到区域不整合面演化。层序界面之下的岩石类型也呈现相应变化: SQ1 顶部为以铸模孔为主的泥粒灰岩, SQ2 顶部为以粒间溶孔为主的颗粒灰岩, SQ3

顶部为以粒间溶孔和溶蚀孔洞为主的砾屑灰岩, SQ4 顶部为 0.5 m 厚的含泥角砾灰岩, SQ5 顶部为 6 m 厚的风化壳残积角砾岩。岩石类型的变化反映了各层序界面暴露时间的增加, 淋滤溶蚀和风化剥蚀效果的增强(图 5b—5f)。

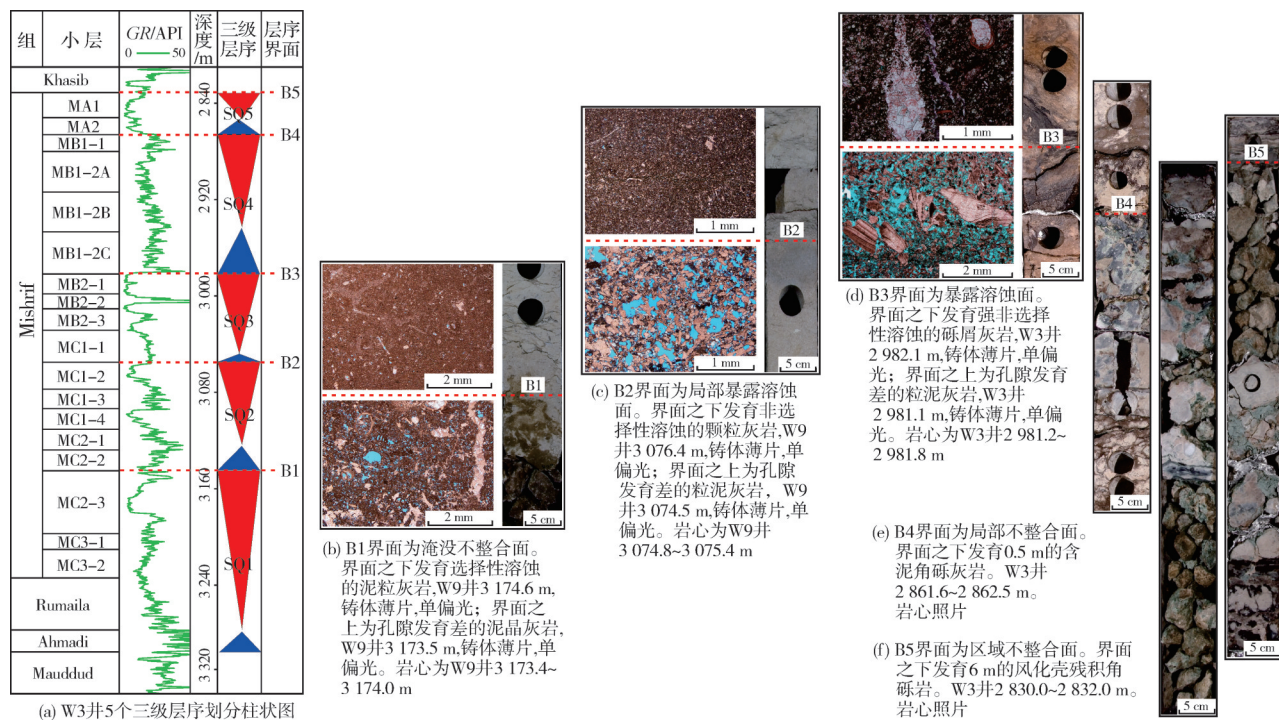


图5 中东X油田 Mishrif 组5个三级层序界面测井和岩心特征

Fig. 5 Logging and core characteristics of five third-order sequence boundaries of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield

在三级层序划分的基础上, 根据海进海退的旋回性, 将 Mishrif 组进一步划分为 10 个四级层序。中下段 MB2—MC1 层段对应 SQ2 和 SQ3 两个三级层序, 其内部发育 PSS3、PSS4、PSS5 和 PSS6 共 4 个四级层序。在四级层序识别的基础上, 综合测井曲线、岩心和铸体薄片等资料划分五级层序和六级层序(图 1b)。

3 沉积相类型及特征

3.1 沉积相类型

X 油田 Mishrif 组中下段岩性以生物碎屑灰岩为主, 采用邓哈姆的岩石分类方法, 将其划分为泥晶灰岩、粒泥灰岩、泥粒灰岩、颗粒灰岩和砾屑灰岩(图 6)。研究区碳酸盐岩的白云石化程度不高, 未见较纯的白云岩, 仅存在一些过渡岩类, 包括白云质灰岩和灰质白云岩。此外, 可见粒径 3~6 cm、外形不规则的硅质团块漂浮在泥晶灰岩中(图 6j)。碳质泥岩是 Mishrif 组中较为特殊的岩石类型, 呈黑

色, 热失重分析表明其有机质含量较高, 发育水平层理, 反映一种孤立缺氧的沼泽沉积环境(图 6i)。

与陆源碎屑相比, 生物碎屑的形成地点与最终沉积地点较为邻近, 因此它们含有沉积时期的地层信息和沉积环境的生态学信息^[22]。X 油田 Mishrif 组中下段沉积期间构造活动总体较弱, 处于温暖湿润的低纬度地区, 阳光充足, 含氧量高, 海水循环畅通, 适宜生物生长。生物碎屑主要包括底栖有孔虫(在低能环境中较多)、非固着类双壳(多出现在水动力较弱及中等的环境中)、厚壳蛤和棘皮动物(多存在于中高能环境中), 并含有少量苔藓动物、藻类和海绵动物(多存在于与广海连通性好的中高能环境中), 其独特的外部形态、内部结构及粒径大小是识别生物碎屑类型的最重要的标志(图 6)。

在建立层序地层格架的基础上, 以岩石类型、沉积构造等特征为标志, 并将生物碎屑类型和含量

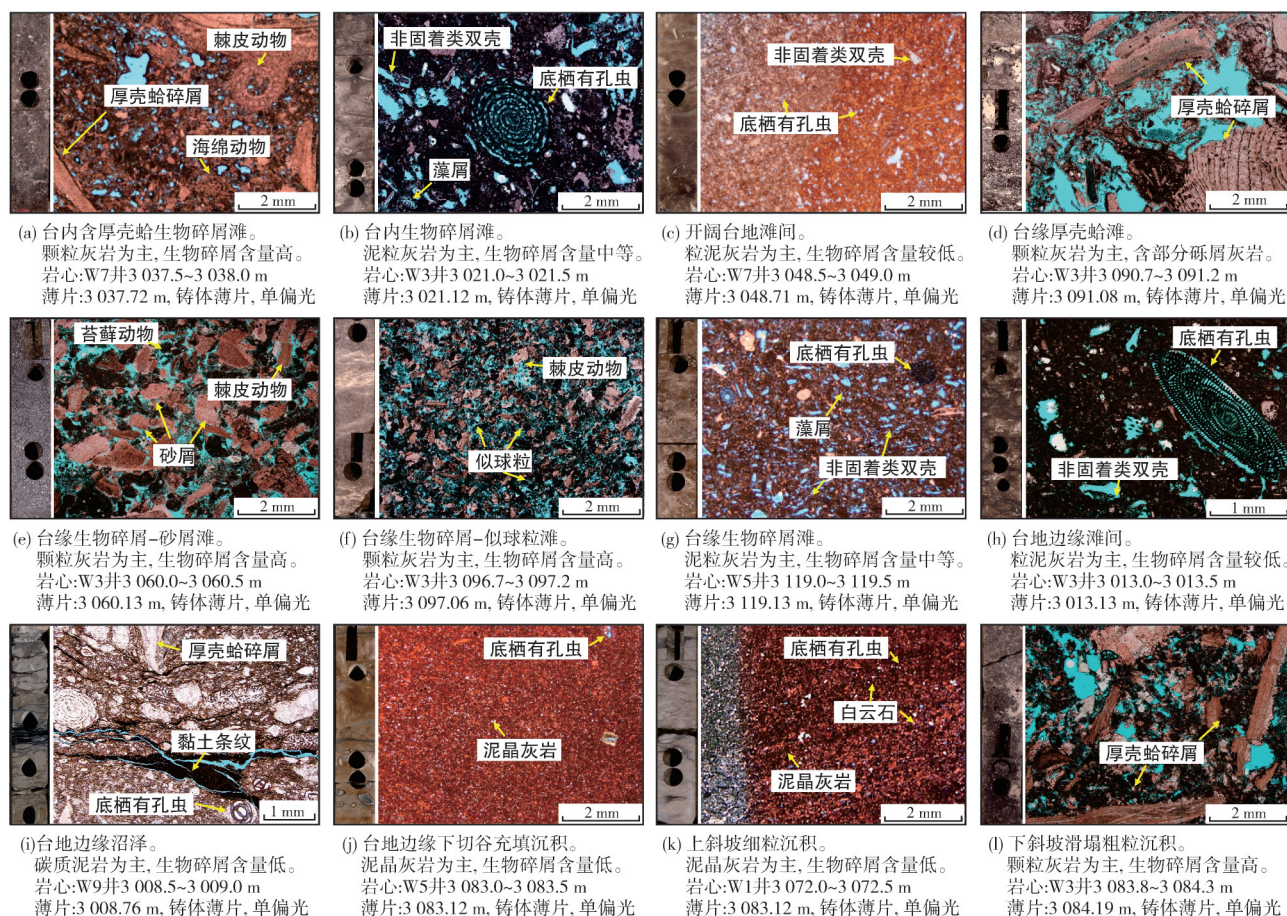


图6 中东X油田 Mishrif组中下段沉积微相与岩石微观特征

Fig. 6 Sedimentary microfacies and rock microscopic characteristics of the middle-lower section of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield

作为重要划分依据,建立X油田 Mishrif组次盆地碳酸盐开阔台地-弱镶边台地沉积模式(表1)。

表1 中东X油田 Mishrif组中下段沉积相类型划分表

Table 1 Classification of sedimentary facies types of the middle-lower section of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield

相	亚相	微相
开阔台地	台内滩	含厚壳蛤生物碎屑滩
		生物碎屑滩
	滩间	滩间
		厚壳蛤滩
台地边缘	台缘滩	生物碎屑-砂屑滩
		生物碎屑-似球粒滩
		生物碎屑滩
	滩间	滩间
台地边缘	沼泽	滩顶沼泽
		滩间沼泽
	下切谷	下切谷
斜坡	上斜坡	细粒沉积
	下斜坡	滑塌粗粒沉积

在研究区识别出局限台地、开阔台地、台地边缘和斜坡等4种沉积相,并进一步识别出各类沉积亚相和沉积微相。研究区所处的纳贾夫次盆地与新特提斯洋相比,水域范围小,水体深度变化较为频繁,这使得其与典型的碳酸盐镶边台地特征不一致,表现为各类相带纵向演化较频繁,横向展布范围相对较小。本文重点研究的 Mishrif 组 MB2—MC1 层段发育开阔台地、台地边缘和斜坡3种沉积相、8种沉积亚相和13种沉积微相(表1,图6)。

3.2 沉积相特征

开阔台地水深一般为几米到几十米,与广海连通性较好,温度和盐度较正常,水体循环中等,生物类型较为丰富,顶部往往较为平坦,局部存在一些微地貌变化。开阔台地晴天浪基面很浅,一般小于5 m,台地顶部沉积界面多位于浪基面之上,水动力条件中等,发育台内滩和滩间2种亚相(图7)。台内滩岩性以泥粒灰岩和颗粒灰岩为主,生物碎屑含量

斜坡位于台地边缘或开阔台地与盆地之间向海方向过渡的区域,是 Mishrif 组水动力最弱的沉积相带。斜坡发育细粒沉积和滑塌粗粒沉积2种特征截然不同的亚相:前者岩性以泥晶灰岩和粒泥灰岩为主,生物碎屑含量低,主要为底栖有孔虫和非固着类双壳,镜下可观察到部分白云石(图6k);后者岩性以颗粒灰岩为主,生物碎屑含量高,以厚壳蛤碎屑为主,是厚壳蛤滩和含厚壳蛤生物碎屑滩滑塌形成(图6l)。

4 层序地层级次对沉积演化的控制作用

4.1 六级层序控制下的单滩体沉积序列

碳酸盐沉积响应与相对海平面升降有着密切的关系,相对海平面升降控制滩体的发育特征与叠

置样式。Mishrif 组沉积期相对海平面表现为高频动荡变化的特征,每一期旋回包括相对海平面的快速上升阶段、较为稳定阶段和缓慢下降阶段^[7-8]。在相对海平面变化过程中,台地上碳酸盐沉积物的产率并非是常量,而是呈“S”形变化^[23](图8a)。海泛初期为一个滞后期,生物种群在台地上重新繁殖和繁盛,碳酸盐沉积则相对较缓慢,这一阶段被称为“初始阶段”(图8b)。当碳酸盐工厂完全发育时,碳酸盐沉积物产率增加,此时相对海平面趋于稳定,可容纳空间逐渐被充填,这一阶段被称为“追补阶段”(图8c)。之后碳酸盐沉积物的产率继续增加,大于可容纳空间的增长速率,可容纳空间被快速充填,这一阶段被称为“并进阶段”(图8d)。随着“并进阶段”的持续,滩体顶部将出现暴露,称为“暴露阶段”(图8e)。

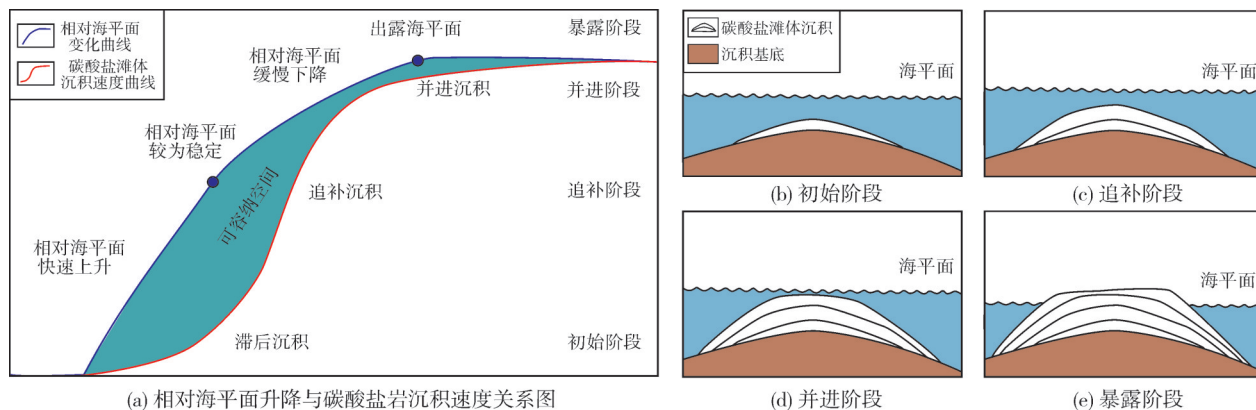


图8 碳酸盐滩体沉积与相对海平面升降的关系(据文献[23]修改)

Fig. 8 Relationship between deposition of carbonate shoal and sea level fluctuation (cited from reference [23], modified)

六级层序内相对海平面的升降改变水体深度和水体动荡程度,控制单滩体的沉积序列。根据相对海平面变化、岩性演化和沉积构造特征,将单滩体划分为缓慢沉积期、中速沉积期、快速沉积期、暴露期等4个沉积阶段(图9),分别对应初始阶段、追补阶段、并进阶段、暴露阶段。

缓慢沉积期相对海平面快速上升,此时滩体处于浪基面附近,水动力中等,滩体缓慢生长,形成粒泥灰岩,发育丘状层理(图9a)。中速沉积期相对海平面较为稳定,碳酸盐沉积物产率上升,滩体处于浪基面之上,水动力较强,滩体逐渐生长,形成泥粒灰岩,发育低角度交错层理(图9b)。快速沉积期海平面缓慢下降,可容纳空间被快速充填,滩体接近海平面,水动力强,波浪作用显著,滩体也快速生长,形成颗粒灰岩,发育平行层理(图9b)。暴露期

出露海面,接受大气淡水溶蚀作用,首先溶蚀不稳定的生物碎屑,随着较长时间的持续暴露,随后大量淡水继续沿着孔隙系统渗滤,发育非选择性溶蚀,形成以粒间溶孔为主要孔隙的储层(图6d,6e)。

在完整单滩体沉积过程中,由下至上相对海平面下降,水体能量增强,可容纳空间逐渐被充填,形成泥晶含量降低、岩性变粗的沉积序列。单个滩体沉积序列的厚度往往能够近似指示单期海平面上升幅度。白垩系 Mishrif 组沉积时期平均海平面较高,由于没有冰川作用的影响,海平面短期波动相对较小(几分米到几米),形成相对薄层的沉积旋回^[6,19]。当相对海平面上升幅度小时,滩体长时间位于浪基面之上,缓慢沉积期粒泥灰岩发育程度低。当下一期海平面上升发生在快速沉积期时,滩体顶部未发生暴露,则不会形成暴露期溶蚀颗粒灰岩。

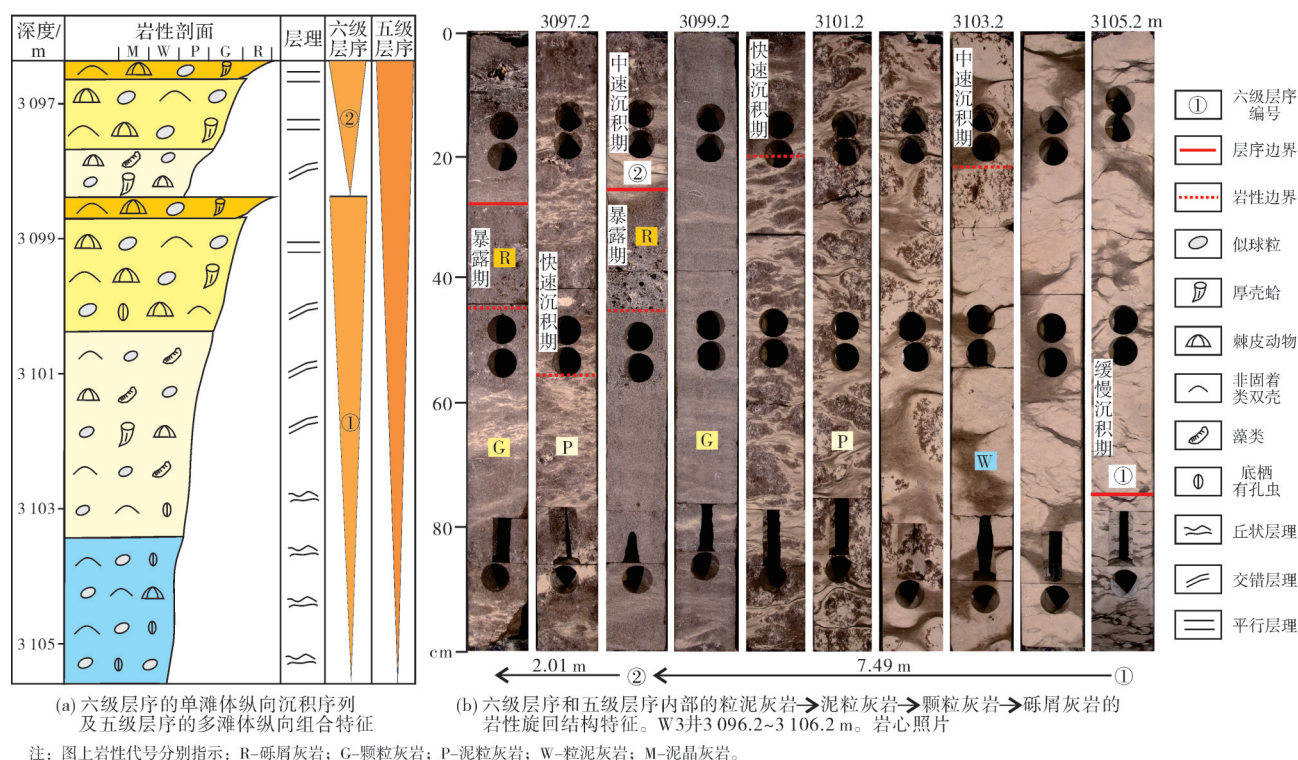


图9 六级层序和五级层序控制下的沉积序列

Fig. 9 Sedimentary sequence stratigraphy controlled by sixth-order and fifth-order sequence

4.2 五级层序控制下的多滩体组合特征

五级层序控制下的滩相沉积由多个单滩体纵向叠置而成,形成于相对海平面下降的背景下。单期海平面震荡上升幅度减小,使得滩体的可容纳空间变小,水动力条件增强,导致不同位置的单滩体厚度和岩性组合呈现规律性变化^[24]。五级层序内多个高频旋回叠加,造成后期海平面上升幅度逐渐减小,单滩体沉积时水动力条件逐渐变大;由下至上单滩体厚度减小,岩性逐渐变粗,颗粒灰岩增多(图4,图9)。

具体而言,下部单滩体初始沉积时水深较大,单滩体处于浪基面附近,水动力和波浪淘洗作用较弱,沉积物中含有一些泥晶,缓慢沉积期粒泥灰岩发育程度高;随着水动力条件和波浪淘洗作用增强,中速沉积期发育泥粒灰岩,快速沉积期发育颗粒灰岩。单滩体出露海平面,形成暴露期溶蚀砾屑灰岩。因此,下部单滩体厚度较大,多形成粒泥灰岩-泥粒灰岩-颗粒灰岩-砾屑灰岩的岩性组合。上部单滩体沉积时水深较小,单滩体处于浪基面之上且距离海平面较近,水动力条件和波浪淘洗作用较强,沉积物的泥晶含量较低;缓慢沉积期粒泥灰岩发育程度

低,单滩体多在中速沉积期沉积,泥粒灰岩开始发育,之后发育快速沉积期颗粒灰岩和暴露期溶蚀砾屑灰岩(图9b)。因此,上部单滩体厚度较小,多形成泥粒灰岩-颗粒灰岩-砾屑灰岩的岩性组合。

4.3 四级层序控制下的沉积微相演化特征

Mishrif组中下段MB2—MC1层段对应于SQ2和SQ3三级层序,从下往上发育PSS3、PSS4、PSS5和PSS6四级层序,控制了不同沉积微相的演化特征(图10)。

PSS3层序开始于MC2-2小层。随着海平面的上升,水体深度增加,水动力减弱,在MC2-2和MC2-1小层进入斜坡沉积环境。随后海平面下降,在MC1-4小层进入台地边缘环境,随着水体逐渐变浅,水动力条件增强,形成了台地边缘滩间→生物碎屑滩→生物碎屑-似球粒滩→厚壳蛤滩的沉积微相演化序列,局部位置在厚壳蛤滩顶部发育薄层沼泽沉积。较深水的细粒沉积减小了早期古地貌的差异,使得MC1-4小层沉积期的台地边缘特征不太明显,整体上以中高能生物碎屑滩和生物碎屑-似球粒滩为主(图10a)。

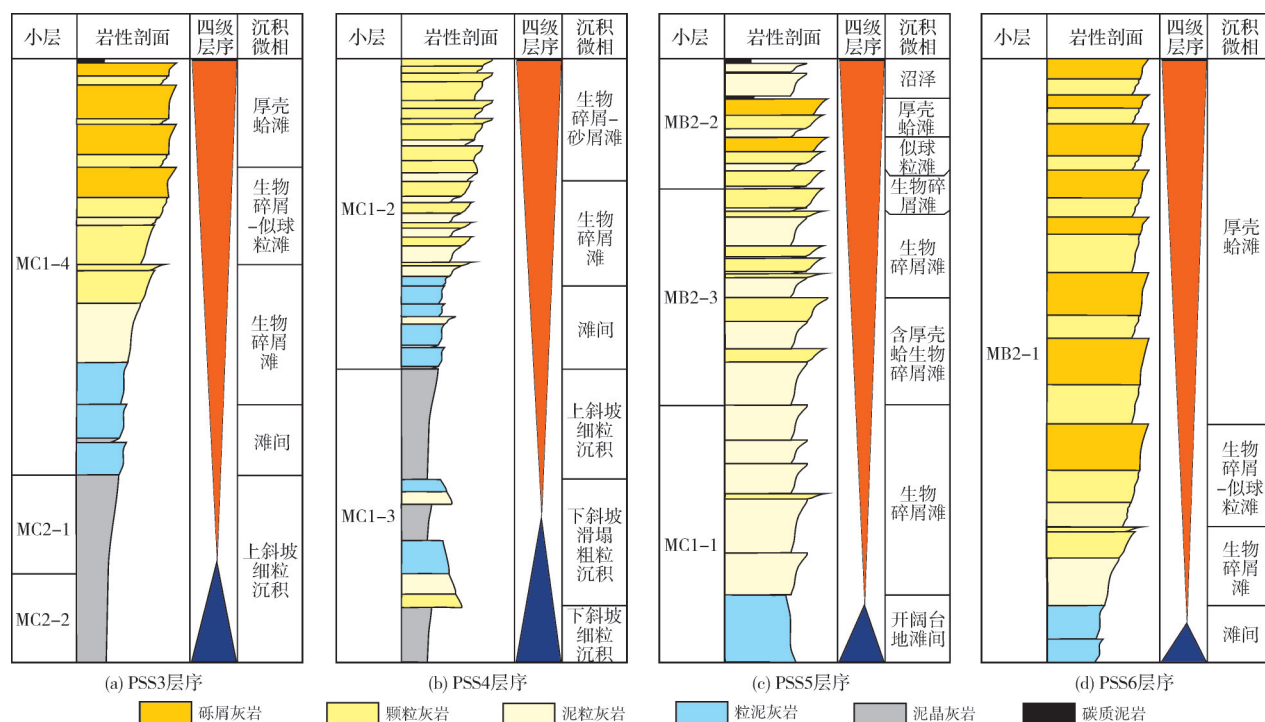


图10 四级层序控制下的沉积微相演化特征

Fig. 10 Characteristics of sedimentary microfacies evolution controlled by fourth-order sequence

PSS4层序开始于MC1-3小层。随着海平面的上升,MC1-3小层再次进入斜坡沉积环境,并且在斜坡上发育透镜状的滑塌粗粒沉积。随后海平面下降,MC1-2小层进入台地边缘沉积环境,随着水动力条件的增强,自下而上形成了台地边缘滩间→生物碎屑滩→生物碎屑-砂屑滩的水体变浅沉积演化序列(图10b)。同MC1-4小层一样,MC1-2小层沉积期的台地边缘特征不明显,整体上以滩间沉积和生物碎屑滩为主,仅在其中高部位发育有生物碎屑-砂屑滩。

PSS5层序开始于MC1-1小层。随着海平面的上升,形成MC1-1小层底部广泛分布的开阔台地滩间细粒沉积。随后海平面下降,沉积了一套横向上变化小、纵向上厚度大、垂向加积的生物碎屑滩,高部位发育含厚壳蛤生物碎屑滩。随着海平面的继续下降,水动力逐渐增强,同时受不同位置不同滩体沉积速率差异的影响,地貌起伏增大,在MB2-2小层逐渐从开阔台地转变为台地边缘环境,沉积了开阔台地生物碎屑滩→台地边缘生物碎屑滩→生物碎屑-似球粒滩→厚壳蛤滩的水体变浅序列。同时由于滩体的快速沉积,在研究区东部形成局限封闭的环境,发育滩间沼泽的碳质

泥岩(图10c)。

PSS6层序对应于MB2-1小层。随着水体逐渐变浅,沉积环境从浪基面之下逐渐演化到浪基面之上直到暴露,水动力条件增强,从下至上沉积了台地边缘滩间→生物碎屑滩→生物碎屑-似球粒滩→厚壳蛤滩的水体变浅序列(图10d)。由于滩体沉积速度更快,在研究区东部形成更大范围的局限封闭环境,发育滩间沼泽的碳质泥岩。

四级层序内的相对海平面升降控制了各类沉积微相的纵向演化特征,不同滩体在横向上也呈现有序组合的特征(图11)。其中,台缘滩发育在台地边缘的高能带,4类滩体相带较窄且变化快。厚壳蛤滩位于相对海平面最低、受中高浪影响的台地边缘高部位;生物碎屑-砂屑滩位于相对海平面较低、受中高浪影响的台地边缘的中高部位;生物碎屑-似球粒滩位于相对海平面中等、受中低浪影响的中部位;在台地边缘浪基面附近发育受低浪影响的生物碎屑滩,在浪基面之下的低能部位发育滩间沉积。随着海平面的变化和沉积相的迁移,纵向上多期多类型台缘滩叠置,逐渐从滩间沉积向低能滩相、中高能滩相再向高能滩相过渡;横向上台缘滩不断向斜坡和局限台地内前积。

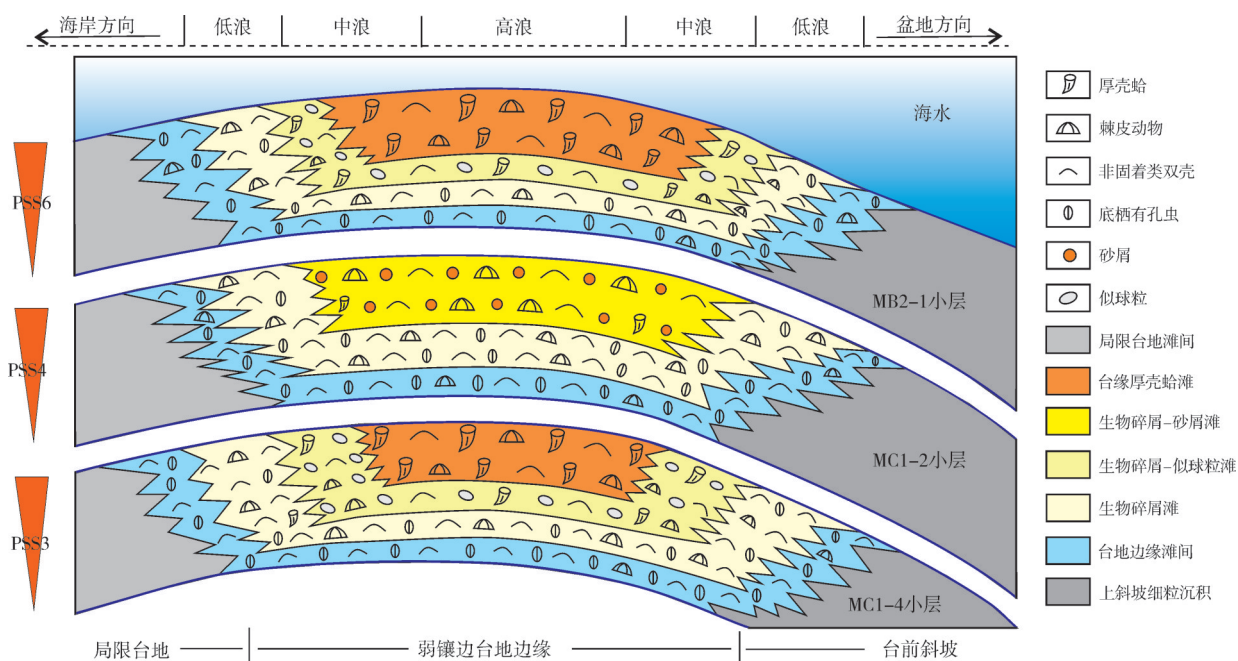


Fig. 11 Spatial evolution characteristics of platform margin shoal controlled by fourth-order sequence

4.4 三级层序控制下的沉积体系演化特征

三级层序决定了沉积体系的演化(图 12)。SQ2 三级层序中的海平面升降幅度较大,沉积体系经历了 PSS3 和 PSS4 两期斜坡向弱镶边台地边缘的演化(图 12d—12f)。受阿马拉古隆起持续抬升

的影响, SQ3 三级层序中的海平面升降变化的幅度较小, 经历了 PSS5 的开阔台地向弱镶边台地边缘的演化(图 12b, 12c); 到 PSS6 时期, 相对海平面处于最低的水平, 水动力条件也最强, 较强的波浪作用更加适合厚壳蛤礁和相应滩体的生长, 滩体最为发育且厚度较大, 台地边缘特征最为典型, 沉积微

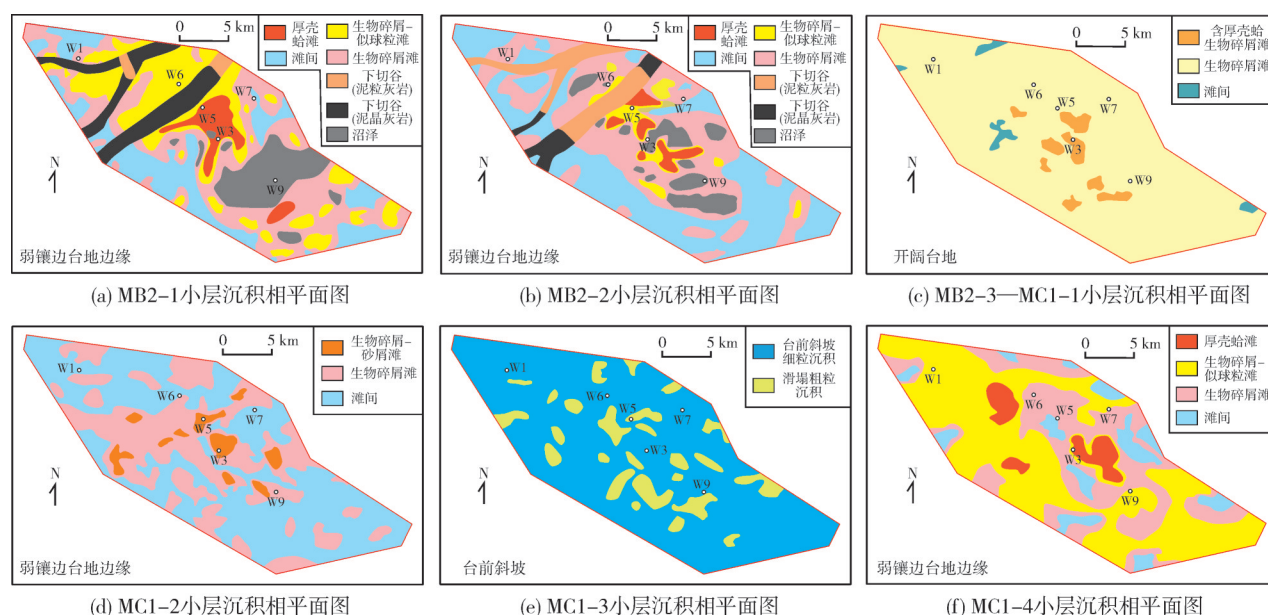


Fig. 12 Characteristics of sedimentary system evolution controlled by third-order sequence

相的类型多样(图12a)。

由于阿马拉构造抬升和区域海平面的下降,在SQ3三级层序沉积结束后,在张性应力的作用下,X油田西北部发育条带状的层内微断裂^[25],边界十分齐整,形似“下切”。下切处的滩相沉积落到下切谷中,其形态和范围与下切条带相一致(图12a,12b)。与I型层序界面发育的碎屑岩下切谷不同,X油田Mishrif组碳酸盐台地下切谷缺少陆源碎屑供应及对应的低位域;此外侵蚀时间相对较短,下切谷深约30 m,底部更平缓,不存在碎屑岩下切谷的多期侵蚀现象。

5 结 论

(1) 根据地震反射结构、测井曲线变化和岩心内部岩性旋回结构特征,将Mishrif组划分为5个三级层序和10个四级层序。中下段MB2—MC1层段对应三级层序SQ2和SQ3,包括4个四级层序,其内部发育多个五级和六级层序。建立碳酸盐开阔台地—弱镶边台地沉积模式,台内滩和台缘滩是储层发育的有利相带,按照主要生物碎屑的类型分为厚壳蛤滩、含厚壳蛤生物碎屑滩、生物碎屑—砂屑滩、生物碎屑—似球粒滩和生物碎屑滩。

(2) 六级层序内沉积初期水体深度较大,波浪淘洗作用中等,单滩体下部以粒泥灰岩和泥粒灰岩为主,后期可容纳空间逐渐被充填,水动力条件增强,单滩体上部以颗粒灰岩为主。

(3) 五级层序内多个高频旋回叠加造成海平面上升幅度逐渐减小,滩体沉积空间缩小,后期单滩体沉积时水动力条件逐渐变大,由下至上单滩体厚度减小,岩性逐渐变粗,颗粒灰岩比例增加。

(4) 四级层序内随着相对海平面的上升和下降,水动力经历先变弱再增强的过程,岩性先变细后变粗,发育斜坡→滩间→中能滩相→高能滩相沉积序列,不同滩体在横向上呈现有序组合特征。

(5) SQ2三级层序海平面升降幅度较大,经历了两期斜坡向台地边缘的演化。SQ3三级层序海平面升降幅度较小,经历了开阔台地向台地边缘的演化;SQ3末期相对海平面最低,水动力条件也最强,滩体最为发育且厚度较大,台地边缘特征最为典型。SQ3沉积结束后,张性应力引起的层内微断裂形成了研究区特殊的下切充填沉积。

参 考 文 献

- [1] 樊大磊,王宗礼,李文博,等. 2021年国内外油气资源形势分析及展望[J]. 中国矿业, 2022, 31(1): 26-31.
FAN Dalei, WANG Zongli, LI Wenbo, et al. Analysis and prospects of oil and gas resource situation at home and abroad in 2021[J]. China mining magazine, 2022, 31(1): 26-31.
- [2] 熊加贝,何登发. 全球碳酸盐岩地层-岩性大油气田分布特征及其控制因素[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(1): 187-200.
XIONG Jiabei, HE Dengfa. Distribution characteristics and controlling factors of global giant carbonate stratigraphic-lithologic oil and gas fields[J]. Lithologic reservoirs, 2022, 34(1): 187-200.
- [3] 余功铭,钟文新,张燕云. 全球油气勘探开发2020回顾与展望[J]. 世界石油工业, 2021, 28(2): 9-17, 24.
YU Gongming, ZHONG Wenxin, ZHANG Yanyun. Review in 2020 and outlook of global oil and gas exploration and development[J]. World petroleum industry, 2021, 28(2): 9-17, 24.
- [4] 叶禹,李柯然,杨沛广,等. 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[J]. 海相油气地质, 2022, 27(1): 45-54.
YE Yu, LI Keran, YANG Peiguang, et al. Pore characteristics of carbonate reservoir of the Cretaceous Mishrif Formation in East Rub Al Khali Basin, UAE[J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(1): 45-54.
- [5] 王宜林,宋新民,王贵海,等. 中东地区油气合作区快速规模上产关键技术与实践[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1633-1642.
WANG Yilin, SONG Xinmin, WANG Guihai, et al. Key technologies and practices for rapid and large-scale production increase in cooperation oil and gas fields of the Middle East[J]. Acta petrolei sinica, 2020, 41(12): 1633-1642.
- [6] EHRENBURG S N, AQRWI A A M, NADEAU P H. An overview of reservoir quality in producing Cretaceous strata of the Middle East[J]. Petroleum geoscience, 2008, 14(4): 307-318.
- [7] 乔占峰,孙圆辉,曹鹏,等. 巨厚灰岩油藏中隔夹层与高渗层成因与发育规律:以伊拉克H油田Mishrif组为例[J]. 海相油气地质, 2022, 27(1): 71-83.
QIAO Zhanfeng, SUN Yuanhui, CAO Peng, et al. Genesis and development law of barrier and baffles and high permeable streak in the massive bioclastic reservoir: a case study of the Upper Cretaceous Mishrif Formation in H Oilfield, Iraq[J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(1): 71-83.
- [8] 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 Meiyun, ZHAO Limin, et al. Identification and significance of meter-scale cycle of carbonate rocks in Mishrif Formation, HF Oilfield, Iraq[J]. Marine origin petro-

- leum geology, 2019, 24(1): 44–50.
- [9] MAHDI T A, AQRAWI A A M. Sequence stratigraphic analysis of the mid-Cretaceous Mishrif Formation, southern Mesopotamian Basin, Iraq[J]. Journal of petroleum geology, 2014, 37(3): 287–312.
- [10] MAHDI T A, AQRAWI A A M, HORBURY A D, et al. Sedimentological characterization of the mid-Cretaceous Mishrif reservoir in southern Mesopotamian Basin, Iraq[J]. GeoArabia, 2013, 18(1): 139–174.
- [11] 谭磊, 刘宏, 陈康, 等. 川中高磨地区震旦系灯影组三、四段层序沉积与储集层分布[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 871–883.
- TAN Lei, LIU Hong, CHEN Kang, et al. Sequence sedimentary evolution and reservoir distribution in the third and fourth members of Sinian Dengying Formation, Gaomo area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2022, 49(5): 871–883.
- [12] 胡罗嘉, 黄世伟, 谭万仓, 等. 四川盆地东部二叠系茅口组层序地层特征及地质意义[J]. 海相油气地质, 2021, 26(4): 357–366.
- HU LuoJia, HUANG Shiwei, TAN Wancang, et al. Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2021, 26(4): 357–366.
- [13] 江维, 高志前, 胡宗全, 等. 塔里木盆地玉尔吐斯组高频层序沉积充填演化特征及控烃作用[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 349–364.
- JIANG Wei, GAO Zhiqian, HU Zongquan, et al. Sedimentary filling evolution and hydrocarbon control of high frequency sequence in Yurtus Formation, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2021, 35(2): 349–364.
- [14] 白晓亮, 郗诚, 和源, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组层序地层特征及沉积演化模式[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(6): 33–42.
- BAI Xiaoliang, XI Cheng, HE Yuan, et al. Sequence stratigraphic characteristics and sedimentary evolution model of the Middle Permian Qixia Formation in the Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2020, 44(6): 33–42.
- [15] 乔占峰, 郑剑锋, 张杰, 等. 海相碳酸盐岩储层建模和表征技术进展及应用[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 15–26.
- QIAO Zhanfeng, ZHENG Jianfeng, ZHANG Jie, et al. The latest progress on reservoir characterization for marine carbonate and its significance[J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(4): 15–26.
- [16] 李峰峰, 郭睿, 余义常. 层序地层划分方法进展及展望[J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 215–224.
- LI Fengfeng, GUO Rui, YU Yichang. Progress and prospect of the division of sequence stratigraphy[J]. Geological science and technology information, 2019, 38(4): 215–224.
- [17] 王欢, 刘波, 石开波, 等. 伊拉克—伊朗地区侏罗纪—白垩纪构造—沉积演化特征[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(3): 39–53.
- WANG Huan, LIU Bo, SHI Kaibo, et al. Characteristics of tectonic-sedimentary evolution from Jurassic to Cretaceous in Iraq-Iran area[J]. Lithologic reservoirs, 2021, 33(3): 39–53.
- [18] 韩海英, 郭睿, 王君, 等. 伊拉克南部白垩系层序格架与沉积特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(2): 122–138.
- HAN Haiying, GUO Rui, WANG Jun, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution of the Cretaceous in southern Iraq[J]. Earth science frontiers, 2023, 30(2): 122–138.
- [19] KHAWAJA A M, THABIT J M. Predicting the depositional environments of Mishrif Formation from seismic isopach map in the Dujaila Oil Field, Southeast-Iraq[J]. Iraqi journal of science, 2021, 62(6): 1943–1955.
- [20] 何治亮, 高志前, 张军涛, 等. 层序界面类型及其对优质碳酸盐岩储层形成与分布的控制[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 853–859.
- HE Zhiliang, GAO Zhiqian, ZHANG Juntao, et al. Types of sequence boundaries and their control over formation and distribution of quality carbonate reservoirs[J]. Oil & gas geology, 2014, 35(6): 853–859.
- [21] 张繁昌, 何晋越, 桑凯恒, 等. 稀疏反射系数频率域正余弦分量协同反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(4): 778–783.
- ZHANG Fanchang, HE Jinyue, SANG Kaiheng, et al. A sparse reflectivity sine-cosine synergistic inversion method in the frequency domain[J]. Oil geophysical prospecting, 2018, 53(4): 778–783.
- [22] 余义常, 宋新民, 郭睿, 等. 生物碎屑灰岩差异成岩及储集层特征: 以伊拉克 HF 油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(6): 1053–1067.
- YU Yichang, SONG Xinmin, GUO Rui, et al. Differential diagenesis and reservoir characteristics of bio-clastic limestone: a case study on the Cretaceous Mishrif Formation in HF Oil-field, Iraq[J]. Journal of palaeogeography, 2018, 20(6): 1053–1067.
- [23] SCHLAGER W. Stratigraphic response of a carbonate platform to relative sea level changes: Broken Ridge, Southeast Indian Ocean: discussion (1)[J]. AAPG bulletin, 1992, 76(7): 1034–1036.
- [24] 余义常, 孙龙德, 宋新民, 等. 厚壳蛤滩沉积成岩特征及对储集层的控制作用: 以伊拉克 H 油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 1007–1019.

- YU Yichang, SUN Longde, SONG Xinmin, et al. Sedimentary diagenesis of rudist shoal and its control on reservoirs: a case study of Cretaceous Mishrif Formation, H Oilfield, Iraq[J]. Petroleum exploration and development, 2018, 45(6): 1007-1019.
- [25] 邵冠铭, 乔占峰, 曹鹏, 等. 碳酸盐台地内下切谷的识别及其意义: 以伊拉克H油田上白垩统 Mishrif组为例[J]. 海相

油气地质, 2022, 27(1): 55-62.

SHAO Guanming, QIAO Zhanfeng, CAO Peng, et al. Identification of incised valleys in carbonate platform and its significance: taking the Upper Cretaceous Mishrif Formation in H Oilfield, Iraq as an example[J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(1): 55-62.

编辑:黄革萍

Controlling effects of sequence stratigraphic orders on sedimentary evolution of bioclastic limestone: a case study of middle-lower section of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield

YU Yichang^{1,2}, GUO Rui², LI Fengfeng², LIN Minjie², SHEN Boheng²,
SHEN Yi³, HAN Haiying², SONG Shiqi¹

1. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd;

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development;

3. Geological Exploration and Development Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Ltd

Abstract: Based on the data of seismic, well logging, core, cast thin sections and conventional physical properties, taking the middle-lower section of Mishrif Formation in the Middle East X Oilfield as an example, the identification of sequence stratigraphic orders and the controlling effects of sequence stratigraphic orders on sedimentary evolution are studied. The results show that: (1) The Mishrif Formation is divided into 5 third-order sequences (SQ1-SQ5) and 10 fourth-order sequences (PSS1-PSS10). The MB2-MC1 single layers in the middle-lower section of Mishrif Formation correspond to SQ2-SQ3, including 4 fourth-order sequences (PSS3-PSS6), in which multiple fifth-order and sixth-order sequences are developed. (2) Carbonate open platform-weakly rimmed platform of a sub-basin is developed in the study area, and the reservoirs mainly exist in platform margin shoals and open platform shoals. The shoal facies can be further subdivided into rudist shoal, rudist-containing bioclastic shoal, bioclastic-arene shoal, bioclastic-spherical shoal and bioclastic shoal according to bioclastic types. (3) The sixth-order sequence controls the sedimentary sequence of a single shoal body, the fifth-order controls the combination characteristics of multiple shoal bodies, the fourth-order sequence determines the evolution characteristics of sedimentary microfacies, and the third-order sequence determines the evolution characteristics of sedimentary systems. (4) In the early stage of PSS3 and PSS4 of SQ2 sequence, the two fourth-order sequences are in a platform front slope environment, with the development of lens-shaped collapsed coarse-grained sediments. In the later stage of PSS3 and PSS4, a sedimentary sequence of the platform margin intershoal → medium energy shoal is developed. The PSS5 and PSS6 of the SQ3 sequence develop a sedimentary sequence of platform margin intershoal → medium energy shoal → high energy shoal. After the completion of SQ3 sedimentation, a special incision filling sedimentation is formed.

Key words: bioclastic limestone; orders of sequence stratigraphy; sedimentary evolution; Mishrif Formation; the Middle East

YU Yichang, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in carbonate reservoir development geology. Add: No. 6-1 Fuchengmen North Rd., Xicheng District, Beijing 100034, China. E-mail: yuyichang@petrochina.com.cn

LIN Minjie, Corresponding author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in carbonate reservoir prediction research. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: linmj@petrochina.com.cn