

深水碳酸盐岩沉积体系与储层发育控制因素 ——以中东H油田白垩系Khasib组为例

张杰^{1,2}, 乔占峰^{1,2}, 王友净³, 王鼎³, 吕洲³

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室; 3 中国石油勘探开发研究院

摘要 深水碳酸盐岩是有利的油气储集岩,中东地区上白垩统Khasib组缓坡型深水碳酸盐岩是重要的产油层系。伊拉克H油田Khasib组储层非均质性较强,储层发育特征及控制因素、油气分布规律不清,制约了选区评价及勘探部署。在区域地质调研的基础上,基于岩心、薄片和测井资料,对H油田Khasib组岩相、沉积微相和沉积模式、储层发育控制因素进行了研究,取得了以下认识:①研究区发育生物碎屑颗粒灰岩、生物碎屑泥粒灰岩、含生物碎屑粒泥灰岩、泥晶灰岩和灰质泥岩5种岩石类型;②研究区中缓坡相海侵体系域发育3类碳酸盐岩沉积微相(生物碎屑滩、滩翼、缓坡灰泥)和1类碳酸盐岩重力流沉积;③Khasib组KA1-2小层和KB段储层的生物扰动较发育,渗透率与骨屑颗粒含量呈正相关,储层主要受沉积微相、生物扰动和准同生溶蚀作用控制。明确了研究区6个小层的沉积微相演化规律,建立了伊拉克地区从西到东的滨岸—内缓坡—中缓坡—外缓坡的缓坡型碳酸盐沉积模式,研究成果对于深水碳酸盐岩储层分布预测具有借鉴和参考意义。

关键词 深水碳酸盐岩;中缓坡;沉积微相;沉积模式;Khasib组;中东

中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

0 前言

碳酸盐岩多被认为是浅水环境的产物,但20世纪60年代以来的深海钻探计划、大洋钻探计划以及巴哈马、澳大利亚等现代深水沉积研究^[1]发现深水环境也发育大量的碳酸盐岩。1975年在美国得克萨斯州召开的深水碳酸盐岩学术会议,第一次系统介绍了深水碳酸盐岩的研究进展,冯增昭将会议论文翻译为《深水碳酸盐环境》一书^[2],带动了国内深水碳酸盐岩的研究。

深水碳酸盐岩是相对于浅水碳酸盐岩而言的,指正常浪基面以下直到洋盆方解石补偿深度(CCD面)以上的较深水—深水环境中所发育的碳酸盐岩,或大陆架边缘至斜坡直到盆地中央沉积的碳酸盐岩^[3]。深水碳酸盐岩包括深水重力碳酸盐岩(浊积岩、重力流等)和非重力碳酸盐岩(宝塔礁、远洋灰岩、泥质灰岩、有孔虫灰岩、牵引流等)^[4-6]。深水碳酸盐沉积不仅在现代沉积中广泛发育^[7],在地质历史时期,深水环境也大量发育碳酸盐沉积^[8]。然而,

相对于“浅、暖、亮”的浅水碳酸盐岩,“深、凉、暗”的深水碳酸盐岩受到的关注相对较少。近30年来,作为油气勘探的新领域,分布广泛的深水环境有多个新的油气发现,深水碳酸盐岩逐渐成为研究热点^[2]。深水碳酸盐岩不仅可以形成有利的生油岩,也是潜在的良好储集体^[3]。受海底地形的影响,深水碳酸盐岩沉积和储层分布存在很大的差异性。

中东是世界上油气发现和储量最多的地区之一,以白垩系碳酸盐岩为主要的储层。在伊拉克中南部地区的艾哈代布油田、东巴格达油田、H油田等多个油田,上白垩统Khasib组均属深水碳酸盐岩油藏^[9-14]。Khasib组含油层分布范围最广,是伊拉克主要的油气富集层位^[12,15]。Khasib组储层主要受沉积相控制,但由于非均质性强,其发育规律不清,因此迫切需要开展沉积体系和沉积演化研究,从而进一步刻画沉积结构和分析储层主控因素。本文基于取心井丰富的岩心薄片资料,结合区域地质背景和测井、地震资料,对研究区深水碳酸盐岩的岩石学特征、生物扰动特征、骨屑颗粒含量、沉积

收稿日期:2021-09-27; 改回日期:2021-12-01

本文受国家科技重大专项下课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号:2016ZX05004-002)和中国石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目“海外重点领域油气勘探关键技术研究”(编号:2021DJ3104)资助

第一作者:张杰,高级工程师,主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号 中国石油杭州地质研究院;E-mail:zhangj_hz@petrochina.com.cn

背景及储层特征进行了深入研究,建立了缓坡型深水碳酸盐岩沉积模式,明确了储层主控因素,研究成果对于深水碳酸盐岩储层分布预测具有借鉴和参考意义。

1 区域地质背景

研究区 H 油田位于伊拉克南部,构造上属于阿拉伯板块美索不达米亚盆地前渊带^[16]的陆上部分,北部为扎格罗斯褶皱带。阿拉伯板块在地质历史时期构造相对稳定,沉积物厚度大,是中东最重要的含油气区,阿拉伯地台上的大部分油气田集中于

此^[17]。H 油田为一北西—南东向的宽缓背斜,其周边发育多个油气田(图1)。

经历了古生代古特提斯洋的开启、闭合及新特提斯洋的开启等阶段后,阿拉伯板块在中生代的沉积演化主要受新特提斯洋扩张的影响,属于被动大陆边缘沉积。晚白垩世土伦期至马斯特里赫特期,随着新特提斯洋的收缩,阿拉伯板块开始发育前陆盆地沉积。古近纪,新特提斯洋逐渐闭合,在阿拉伯板块形成托罗斯—扎格罗斯造山带。中新世时,新特提斯洋消亡,阿拉伯板块的东北被动大陆边缘的前缘变为一个碰撞边缘^[18-19]。

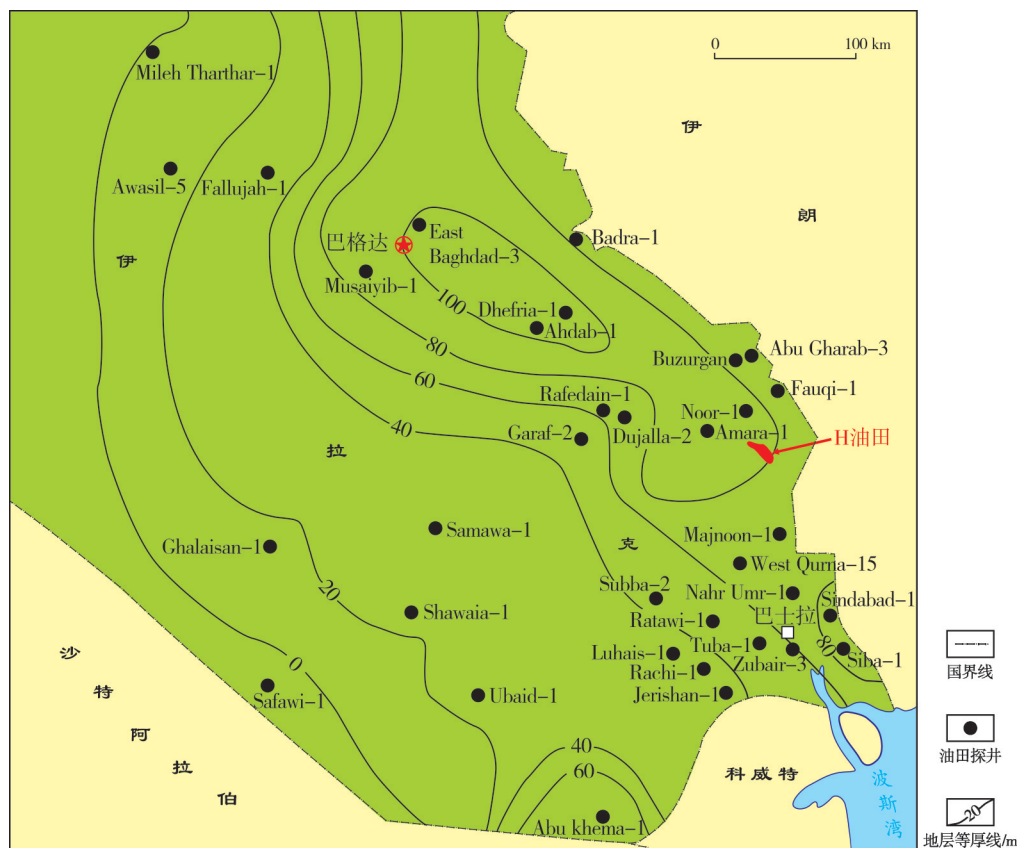


图1 伊拉克中南部地区白垩系 Khasib 组地层等厚图(据文献^[19])

Fig. 1 Isopach map of the Cretaceous Khasib Formation in central and southern Iraq (cited from reference^[19])

伊拉克地区在白垩纪时位于新特提斯洋边缘,主要为浅海沉积环境^[19-20]。中白垩世塞诺曼期末发生的海退形成了中、上白垩统之间的区域性不整合,Khasib 组位于上白垩统下部,与下伏 Mishrif 组为不整合接触,与上覆 Tanuma 组为整合接触(图2)。研究区 Khasib 组厚度介于 70~90 m,自上而下分为 KA1-1、KA1-2、KA2、KB-1、KB-2、KB-3 共 6 个小层(图2),其中 KA1-2 小层和 KB 段

为主要的产层段。

阿拉伯板块自寒武纪至今的地层可以划分为 11 个巨层序^[20],其中,上侏罗统至白垩系顶部属于 AP8 和 AP9 的 2 个巨层序。Khasib 组位于 AP9 巨层序的底部,发育海侵体系域—高位域的三级层序^[22],以 KA2 小层底部发育的泥灰岩/灰质泥岩的底界为最大海泛面,下部的 KB 段发育海侵体系域(TST),上部的 KA 段发育高位体系域(HST)。

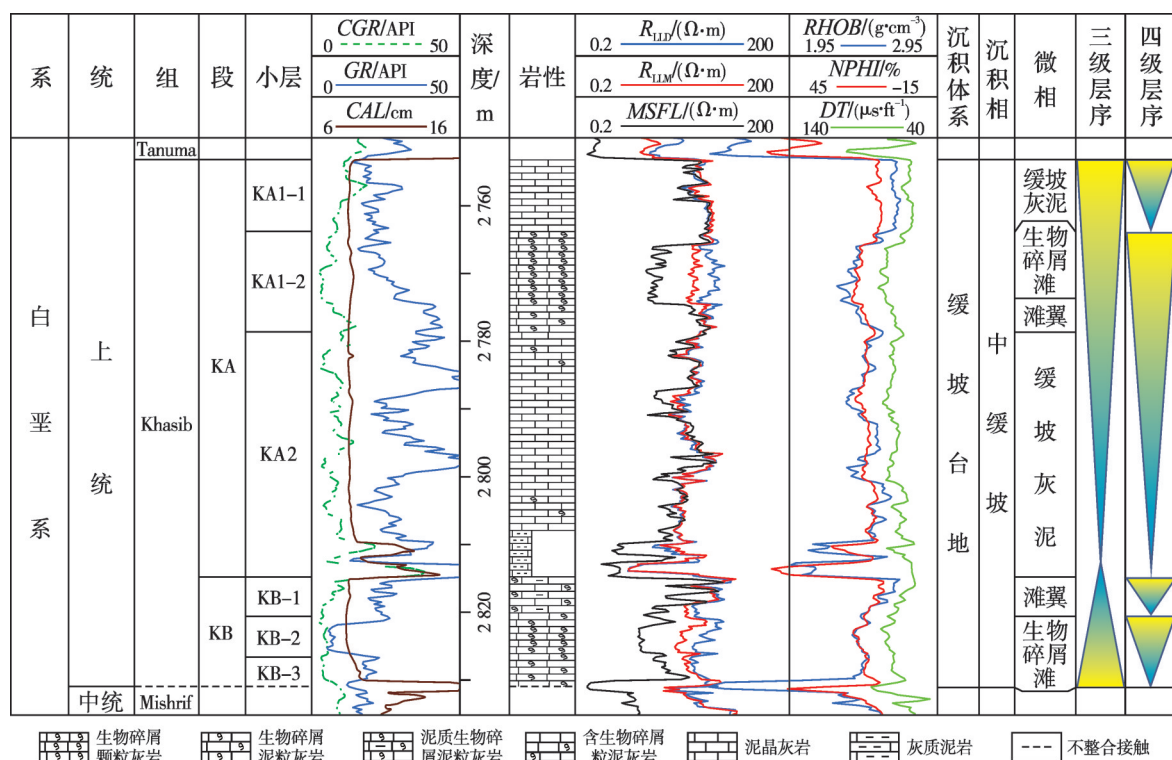


图2 伊拉克H油田白垩系 Khasib 组地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the Cretaceous Khasib Formation in H Oilfield, Iraq

2 沉积特征

2.1 岩石类型

通过对区域岩石学特征的调研^[12,20-21],结合4口取心井(M3、N5、Y1、N8)Khasib组岩心与薄片的观察,发现H油田Khasib组发育的碳酸盐岩泥质含量普遍较高,主要的生物碎屑为浮游有孔虫、颗石藻等微体生物,以及少量双壳类、棘皮类碎片等骨屑颗粒。

Khasib组少见颗粒灰岩,主要岩石类型有5种,分别为生物碎屑颗粒灰岩、生物碎屑泥粒灰岩、含生物碎屑粒泥灰岩、泥晶灰岩和灰质泥岩(图3)。

生物碎屑颗粒灰岩 颗粒以软体类碎片、棘皮类和孔虫为主,颗粒大小普遍为较小的毫米至厘米级(图3a),偶见个别较大的厚壳蛤颗粒(图3b)。颗粒间填充少量灰泥。孔隙发育,主要为粒间孔、粒间溶孔、格架孔。生物碎屑颗粒灰岩主要发育于KA1-2小层和KB段生物碎屑滩、滩翼以及受偶发性风暴影响的沉积微相中。

生物碎屑泥粒灰岩 相较于生物碎屑颗粒灰岩,该类岩石灰泥含量较高(图3c—3e),生物碎屑

以双壳类碎片、有孔虫为主,见少量颗石藻等浮游生物(图3f—3h)。岩石具泥质纹层/条带,局部呈疙瘩状(图3f)。孔隙较发育,主要为粒间孔、体腔孔(图3d,3g,3h)。生物碎屑泥粒灰岩主要发育于KA1-2小层和KB段生物碎屑滩、滩翼以及受偶发性风暴影响的微相中。

含生物碎屑粒泥灰岩 生物碎屑含量为5%~20%,主要为灰泥支撑。生物碎屑主要为微米至毫米级别的双壳、棘皮类、有孔虫、介形虫等(图3i)。孔隙较少,主要为体腔孔。含生物碎屑粒泥灰岩主要发育于KA1-1小层、KA2小层的缓坡灰泥微相。此外,受Mishrif组顶部暴露不整合的影响,Khasib组底部的KB-3小层普遍存在约1m厚的高泥质含量的高GR段,为岩性较为致密的粒泥灰岩(图3i)。

泥晶灰岩 生物碎屑含量不足5%,以灰泥为主,孔隙不发育(图3j)。泥晶灰岩主要发育于KA1-1小层和KA2小层的缓坡灰泥微相。

灰质泥岩 泥质含量高,具纹理特征,较破碎,孔隙不发育(图3k)。灰质泥岩主要发育于KA2小层底部,属于受风暴影响的重力流沉积。

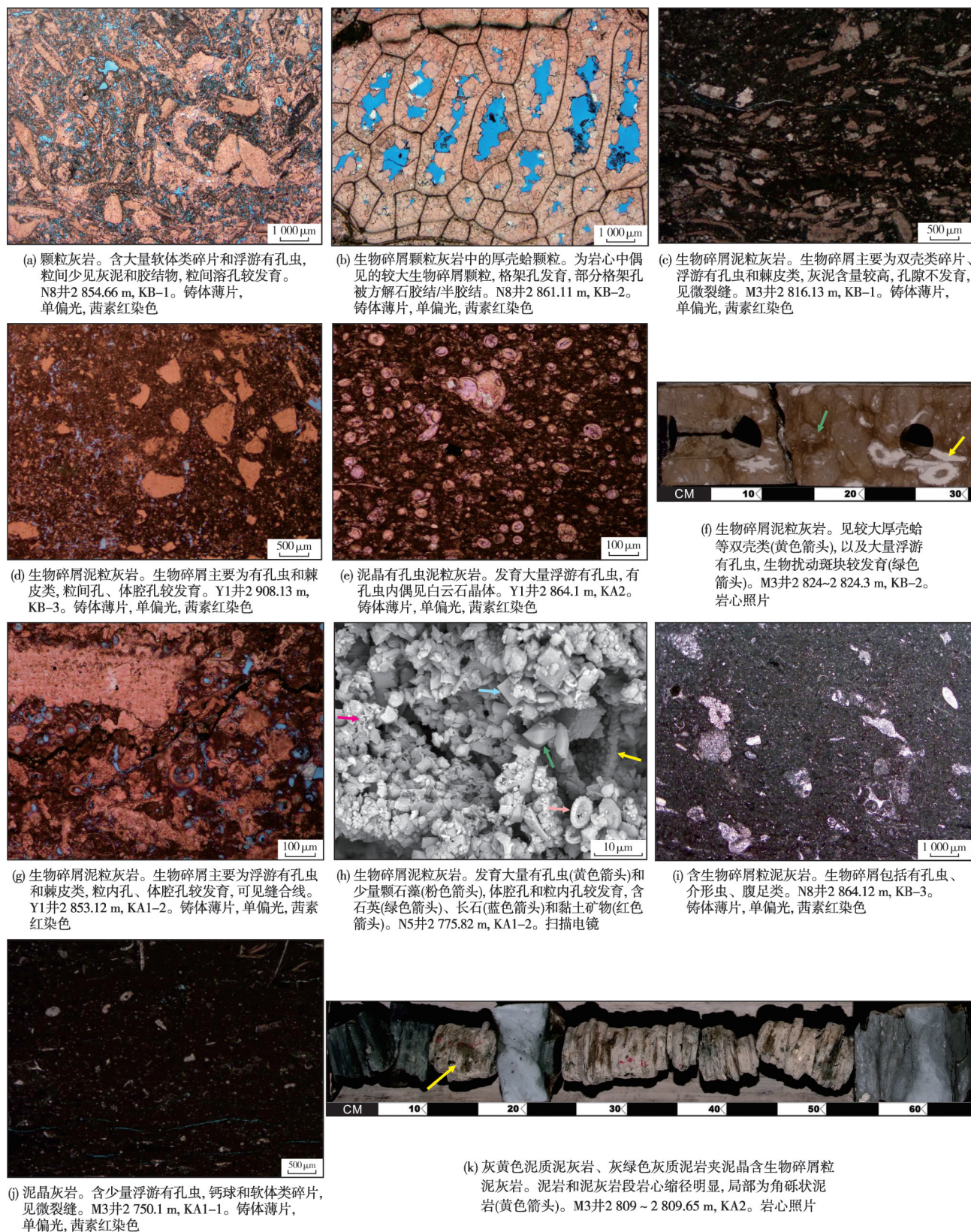


图3 伊拉克H油田Khasib组岩石学特征

Fig. 3 Petrologic characteristics of Khasib Formation in H Oilfield, Iraq

2.2 沉积构造

生物扰动是Khasib组主要的沉积构造,在伊拉克地区白垩系普遍发育。沈瑛楚等^[11]识别了AD油田Khasib组的4类生物遗迹,并划分了3类非均质性储层。H油田的生物扰动主要是由于底栖生物在能量较低的松散基底觅食、潜穴、活动所形成,在整个Khasib组均有发育,包含具蹼状构造的觅食迹 *Teichichnus*、古藻迹 *Paleophycus*、小型 *Chondrites*、居住迹 *Thalassinoides*、漫游迹 *Planolites* 等。不同生物遗迹类型或密集成群分布(如 *Chondrites*),或单独发育(如 *Teichichnus*)。扰动深度一般为几毫米至2 cm,且多与层面呈低角度斜交。

3 沉积体系演化与沉积模式

3.1 沉积微相类型

Khasib组深水碳酸盐岩可以分为非重力碳酸盐岩和重力碳酸盐岩。非重力碳酸盐岩为原地沉积的细粒碳酸盐岩,包括受风暴影响而发育的生物碎屑滩、滩翼以及缓坡灰泥3类沉积微相。

生物碎屑滩 岩心上为深棕色—棕褐色,富含油,其岩性主要为生物碎屑颗粒灰岩、生物碎屑泥粒灰岩,生物碎屑含量介于20%~50%,以厚壳蛤碎片、非厚壳蛤双壳类、棘皮类、藻类、较大的底栖有孔虫为主,生物碎屑较为破碎,大小多为比较小的毫米至厘米级,偶见分米级生物碎屑片,分选较差,分散状分布,主要发育于KA1-2小层和KB段。测井上表现为低GR和CGR(去铀GR),低密度。

滩翼 岩心上为深灰色—灰棕色,含油,岩性主要为生物碎屑泥粒灰岩、含生物碎屑粒泥灰岩,生物碎屑含量为15%~30%,以小的双壳类碎片、棘皮类、有孔虫为主,主要发育于KA1-2小层和KB段。测井上表现为中—低GR和CGR,中—低密度。

缓坡灰泥 岩性主要为含生物碎屑粒泥灰岩,泥晶灰岩以及灰质泥岩。除KB-2小层外的整个Khasib组均有发育,尤以KA1-1小层和KA2小层最为发育。测井上表现为高GR和CGR,高密度。

重力碳酸盐岩为重力流沉积,岩性为含角砾的粒泥灰岩、泥灰岩和灰质泥岩,具有明显的高GR、缩径的特征,仅发育于KA2小层底部(图2,图3k)。

3.2 沉积体系与沉积演化

在中白垩统Mishrif组顶部经历了约3 Ma的暴露剥蚀后^[20],土伦阶沉积末期的海侵使得伊拉克中南部整体进入了浅海缓坡沉积环境。

对伊拉克多个油田区域沉积背景的调研^[11,14]发现,研究区在中白垩统顶部暴露后无明显构造运动,地层横向上较为连续,地层倾角低,不发育台缘带、障壁等沉积相带^[15,22]。从4口取心井的连井相对比来看(图4),Khasib组各层段的沉积比较稳定,沉积厚度变化不大,沉积相平面分布连续性较好。同时结合取心井岩石学特征(图3),认为研究区在Khasib期整体属于缓坡沉积环境^[15,22]。从地层厚度图(图1)和周边油田资料来看,伊拉克西部暴露无沉积,伊拉克中南部为中缓坡/中陆架^[20]的深水沉积环境,主要发育细粒碳酸盐岩。

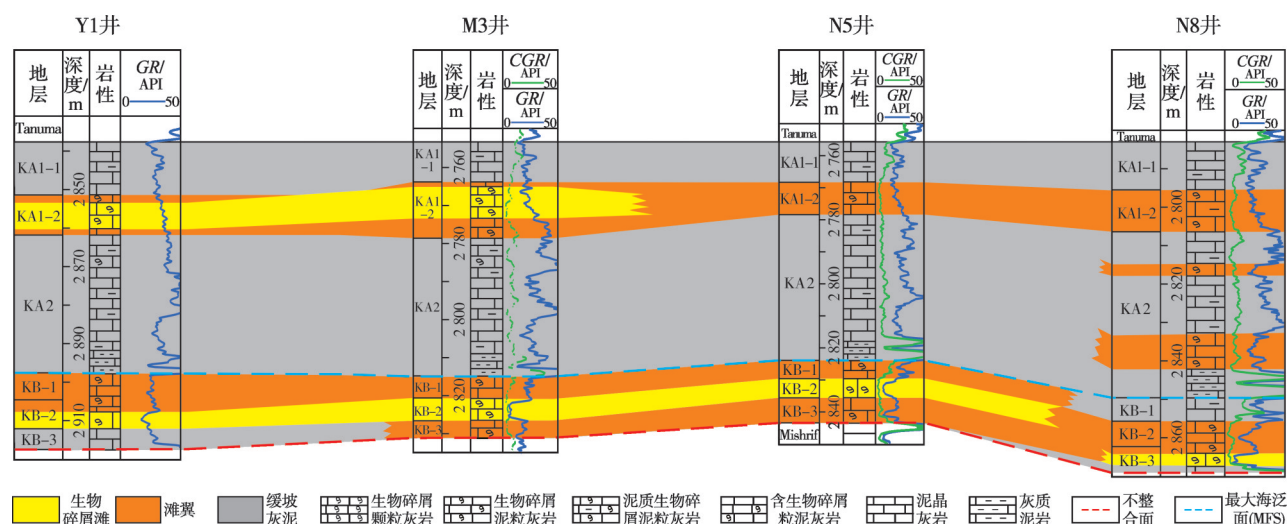


图4 伊拉克H油田Khasib组沉积微相连井对比剖面

Fig. 4 Inter-well correlation section of microfacies of Khasib Formation in H Oilfield, Iraq

研究区 Khasib 组为海侵—高位体系域^[23]的中缓坡沉积环境,其中 KB 段为海侵体系域,KA 段为高位体系域沉积。Khasib 组内部可以识别出 1 个三级旋回、4 个四级旋回(图 2)。

KB 段属于三级层序的海侵旋回,总厚度为 15~25 m。沉积微相类型包括生物碎屑滩、滩翼和缓坡灰泥。岩性以生物碎屑颗粒灰岩(图 3a)、厚壳蛤灰岩(图 3b)和生物碎屑泥粒灰岩(图 3f)为主,其次为含生物碎屑泥粒灰岩(图 3i)。与 KA 段相比,KB 段整体水体能量较高,泥质含量较低。KB 段为研究区主要的储层段,颗粒含量较高,其生物碎屑颗粒主要为毫米至厘米级的厚壳蛤、非厚壳蛤双壳类、棘皮类、腹足类等较大的生物颗粒,以及浮游有孔虫、介形虫、颗石藻等微体生物,孔隙类型主要为粒间孔和格架孔。由于处于海侵体系域早期,研究区 KB-3 和 KB-2 小层的生物碎屑滩和滩翼分布范围相对较大,单个滩体厚度约为 1 m 左右,发育生物碎屑颗粒灰岩、生物碎屑泥粒灰岩。KB-1 小层沉积时,生物碎屑滩和滩翼分布范围明显缩小,颗粒灰岩含量减少,以粒泥灰岩和泥晶灰岩占主导的缓坡灰泥范围扩大。

KA 段属于高位体系域沉积,总厚度为 46~80 m。沉积微相类型主要为缓坡灰泥,局部层段发育生物碎屑滩和滩翼微相。主要岩性为生物碎屑泥粒灰岩(图 3g,3h)和泥晶有孔虫泥粒灰岩(图 3e),其次为泥晶灰岩(图 3j)。主要的生物类型为浮游有孔虫和少量棘皮类、双壳类碎片,其中发育颗石藻(图 3h)。下部的 KA2 小层厚度最大,约为 28~50 m,主要为缓

坡灰泥沉积,泥质含量高,发育生物碎屑粒泥灰岩和泥晶灰岩,生物碎屑以浮游有孔虫和颗石藻等微体生物为主。KA2 小层底部发育灰质泥岩(图 3k)、泥灰岩夹含生物碎屑粒泥灰岩,为泥岩沉积后重力滑塌所致。KA1-2 小层生物碎屑泥粒灰岩发育(图 3g,3h),为主要储层段,其主要沉积微相类型为生物碎屑滩、滩翼和缓坡灰泥,生物碎屑滩局部连片分布,单个滩体厚度均只有几十厘米。KA1-1 小层整体为缓坡灰泥沉积,主要为含少量生物碎屑的泥晶灰岩。

3.3 缓坡型碳酸盐沉积模式

基于区域资料、地层等厚图(图 1)、周边油田资料^[23-28]和 H 油田 4 口取心井岩心薄片资料和连井剖面对比(图 4),认为伊拉克地区 Khasib 期构造活动弱,缺乏台地边缘沉积,主要为缓坡沉积环境,从而建立了伊拉克中南部地区从西到东的缓坡沉积模式(图 5)。该模式展示了从西部滨岸向东直到外缓坡、洋盆的沉积环境^[19]。

内缓坡 伊拉克西部地区在 Khasib 组时期为暴露—滨岸相沉积,向东水体逐渐加深,到正常浪基面以上为内缓坡相,发育潟湖以及较为连片分布的生物碎屑滩、滩翼沉积微相,潟湖内可发育点滩。主要的生物类型为较为完整的厚壳蛤、非厚壳蛤双壳类、苔藓虫、棘皮类、藻类等。

中缓坡 向东直到风暴浪基面以上为中缓坡相,发育缓坡灰泥沉积,局部地势较高,受风暴作用影响,局部发育生物碎屑滩和滩翼沉积;由于重力作用,局

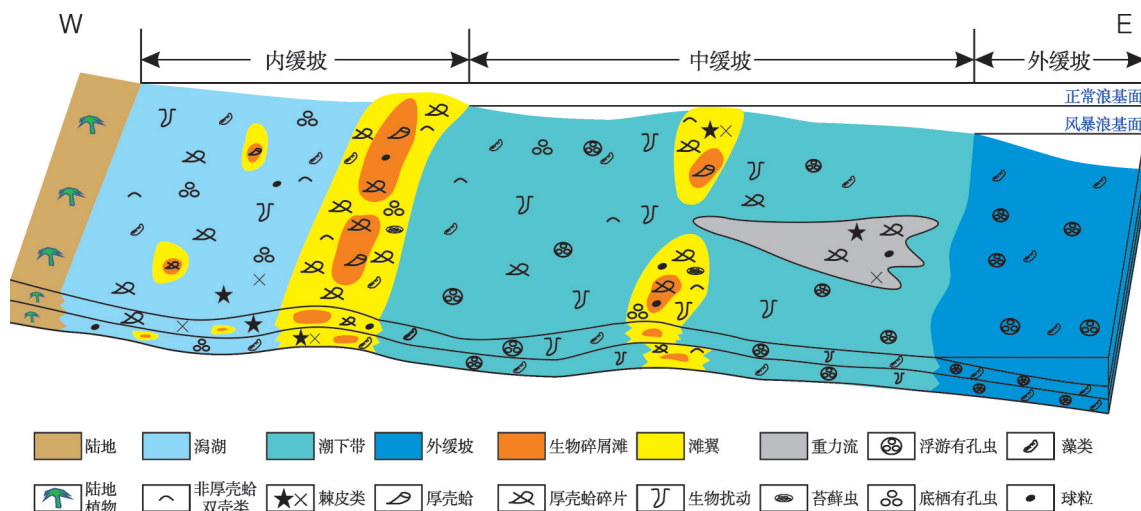


图 5 伊拉克地区白垩系 Khasib 组缓坡沉积模式图(内缓坡部分参考文献[19])

Fig. 5 Ramp sedimentary model of the Cretaceous Khasib Formation in Iraq(inner ramp cited from reference[19])

部发育滑塌重力流沉积的灰质泥岩(图3k)。主要的生物类型为厚壳蛤等双壳类碎片、藻类、有孔虫等。

外缓坡—盆地相 风暴浪基面以下的部分,平面上向东直到伊朗及以东地区为外缓坡—盆地相沉积,主要发育远洋灰岩、白垩灰岩^[19]。主要的生物类型为浮游有孔虫、颗石藻等微体生物。

研究区 Khasib 组主要属于中缓坡深水碳酸盐沉积环境^[26],发育于正常浪基面以下直到风暴浪基面的范围,主要为灰泥支撑的细粒碳酸盐岩,大型

生物碎屑较少。在间发性的风暴作用下会发育生物碎屑滩、滩翼和滑塌重力流沉积。中缓坡的生物碎屑滩以生物碎屑泥粒灰岩为主,主要为灰泥支撑,厚度薄,多为几厘米至几十厘米,局部含有少量厚壳蛤、非厚壳蛤双壳类以及棘皮类等厘米级骨屑颗粒,与内缓坡颗粒灰岩占主导、颗粒支撑、厚度达几米的生物碎屑滩具有明显差别。Khasib 组水体相对比较安静,生物扰动发育,多为水体安静的较深水环境下的居住迹、觅食迹(图6)。

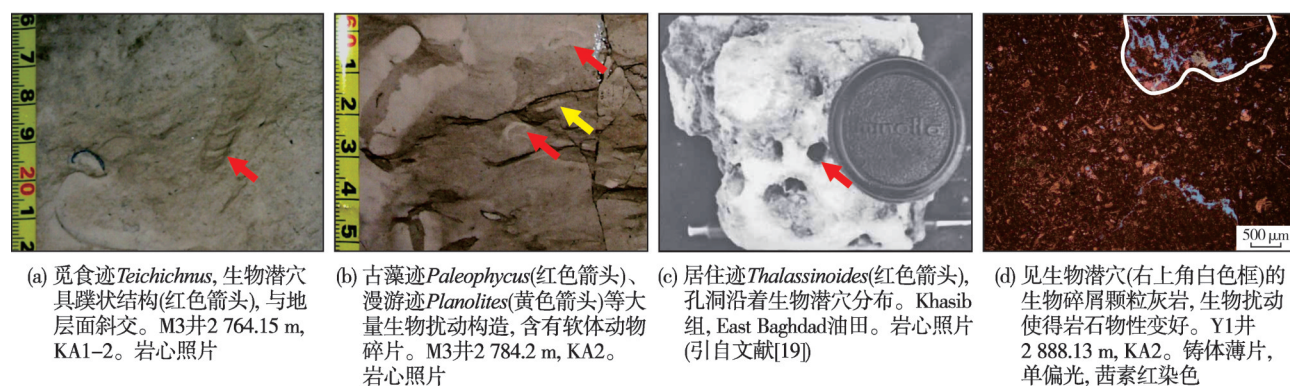


图6 伊拉克H油田白垩系 Khasib 组生物扰动特征及对储层的改造

Fig. 6 Bioturbation characteristics and reservoir reconstruction of Cretaceous Khasib Formation in H Oilfield, Iraq

4 中缓坡深水碳酸盐岩储层发育控制因素

与浅水碳酸盐岩不同,研究区中缓坡深水碳酸盐岩的骨屑颗粒含量较少,而且个体较小(图7)。由于中缓坡环境位于正常浪基面以下,沉积水体环境能量较低,泥质含量较高,中缓坡的生物碎屑滩储层孔隙较小,多为微米至毫米级。作为典型的中缓坡深水碳酸盐岩,研究区 Khasib 组为孔隙型灰岩

油藏,主要的储层段和开发层段为KB段和KA1-2小层。2个储层段厚度变化不大,平均厚度分别为20 m和12 m,骨屑颗粒含量较高,岩石孔隙较发育,平面上分布较为连续(图4)。储层孔隙类型主要为体腔孔、粒内溶孔(图3g,3h)和少量微裂缝(图3j)。其中KB段的孔隙度为10%~25%,平均渗透率为 $2.55 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,KA1-2小层的孔隙度为8%~20%,平均渗透率为 $0.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中高孔低渗型储层。

通过研究发现,储层渗透率与骨屑颗粒含量之

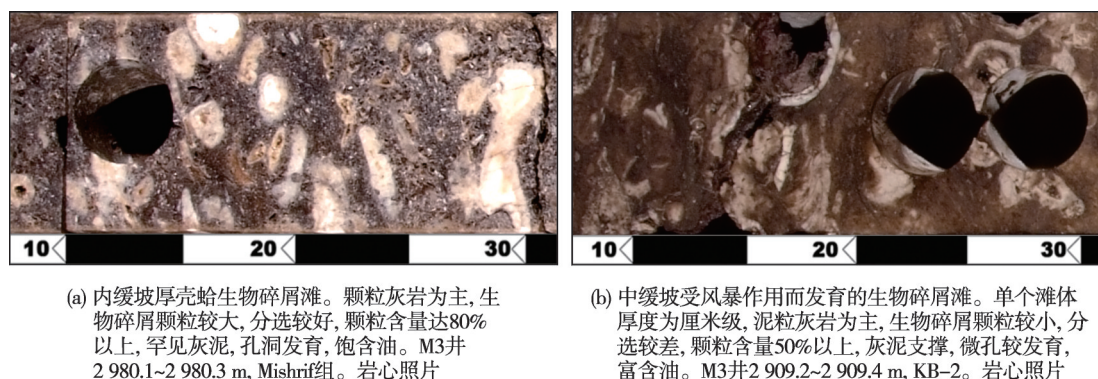


图7 伊拉克H油田白垩系碳酸盐岩缓坡不同环境发育的滩体差异

Fig. 7 Shoal differences in different environments of carbonate ramp of Cretaceous in H Oilfield, Iraq

间具有较好的对应关系,厚壳蛤、棘皮类等较大的生物骨屑颗粒含量越高,渗透率越高,生物碎屑滩部位渗透率最高可以达到 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。有孔虫等微体生物占主导的粒泥灰岩大多孔隙度虽高,但渗透率很低。

在研究区内,较大的生物颗粒主要发育于中缓坡内相对高部位,且受到风暴作用影响的生物碎屑颗粒灰岩(图3a)、生物碎屑泥粒灰岩(图3c—3g)中,而这两种岩石类型主要分布于生物碎屑滩和滩翼微相,可见是否发育较大生物碎屑的沉积微相差异是控制 Khasib 组储层渗透率的主控因素。

此外,在中缓坡沉积环境,岩石受生物扰动较为普遍(图6)。生物扰动导致岩石非均质性增强,扰动部位比未扰动部位灰泥含量少,孔隙较发育(图6c,6d),且孔隙连通性变好,故而在生物扰动比较强烈的部位,岩石孔隙度和渗透率均较高,孔隙度最高可以达到22%,渗透率最高可以达到 $13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此,是否发育生物扰动也是导致 Khasib 组储层差异的主要因素。

Khasib 组发育的主要孔隙为早期的粒内孔、体腔孔(图3),从图2和图4可以看出,孔隙发育段多位于 KA1-2 小层上部、KB-1 小层顶部、KB-2 小层等四级层序顶部海平面相对较低的部位,反映这些孔隙的形成与受到四级层序界面控制的准同生溶蚀作用密不可分。

综上所述,Khasib 组储层发育的主控因素为沉积微相,其次为生物扰动和准同生溶蚀作用。

5 结论与启示

本文以伊拉克 H 油田白垩系 Khasib 组为例,基于区域地质资料、周边油田资料和4口井岩心薄片资料,对深水碳酸盐岩沉积与储层特征进行了深入研究,取得了以下认识:

(1)H 油田 Khasib 组中缓坡深水碳酸盐岩发育5种岩石类型:生物碎屑颗粒灰岩、生物碎屑泥粒灰岩、含生物碎屑粒泥灰岩、泥晶灰岩和灰质泥岩。生物碎屑颗粒灰岩和生物碎屑泥粒灰岩主要发育于 KA1-2 小层和 KB 段,含生物碎屑粒泥灰岩和泥晶灰岩主要发育于 KA1-1 小层和 KA2 小层,灰质泥岩发育于 KA2 小层底部。

(2)研究区 Khasib 组为海侵—高位体系域沉积,可以划分为1个三级旋回、4个四级旋回。KB 段

为海侵体系域,KA 段为高位体系域。建立了伊拉克地区从西到东滨岸—内缓坡—中缓坡—外缓坡的缓坡型碳酸盐沉积模式,识别了 Khasib 组中缓坡的生物碎屑滩、滩翼、缓坡灰泥3类非重力碳酸盐岩沉积微相和1类重力碳酸盐岩沉积微相。KB 段和 KA1-2 小层主要发育生物碎屑滩、滩翼和缓坡灰泥,KA2 小层和 KA1-1 小层主要发育缓坡灰泥,KA2 小层底部发育重力流沉积的灰质泥岩。

(3)沉积微相、生物扰动和受层序控制的准同生溶蚀作用是控制中缓坡深水碳酸盐岩储层发育的主要因素。骨屑颗粒含量与渗透率呈正相关关系,强烈的生物扰动、受四级层序界面控制的准同生溶蚀有利于改善储层物性。

深水碳酸盐岩的分布范围比浅水碳酸盐岩更广泛,深水碳酸盐岩沉积是沉积学重要的组成部分。深水碳酸盐岩领域虽然有一些油气发现,然而目前受到的关注仍然较少。从全球范围来看^[29-30],深水领域已经逐渐成为油气新发现的主要领域,占油气总发现的57.22%^[31-32],具有广阔的发展空间。深水碳酸盐岩是重要的勘探领域,相关研究对我国3大海相盆地乃至全球范围内油气勘探具有重要意义^[33]。深入开展深水碳酸盐岩沉积和油气地质研究,可以拓展勘探接替领域,应用前景广阔。

致谢:感谢中国地质大学(武汉)龚一鸣教授在生物扰动方面给予的指导和帮助,感谢中国地质大学(武汉)颜佳新教授在岩相和沉积相研究方面的指导。

参考文献

- [1] TOURNADOUR E, MULDER T, BORGOMANO J, et al. Submarine canyon morphologies and evolution in modern carbonate settings: the northern slope of Little Bahama Bank, Bahamas[J]. Marine geology, 2017, 391: 76 - 97.
- [2] COOK H E, ENOS P. 深水碳酸盐环境[M]. 冯增昭,译. 北京:地质出版社,1987:1-259.
COOK H E, ENOS P. Deep-water carbonate environments [M]. FENG Zengzhao, Trans. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-259.
- [3] 贾振远. 深水碳酸盐与油气[J]. 地质科技情报, 1987, 6(2): 85-91.
JIA Zhenyuan. Deep-water carbonate and petroleum[J]. Bulletin of geological science and technology, 1987, 6(2): 85-91.
- [4] 贾振远. 深水碳酸盐(上)[J]. 地质科技情报, 1982, 1(1): 6-10.
JIA Zhenyuan. Deep-water carbonate I [J]. Bulletin of geological science and technology, 1982, 1(1): 6-10.
- [5] 贾振远. 深水碳酸盐(下)[J]. 地质科技情报, 1982, 1(2): 6-11.
JIA Zhenyuan. Deep-water carbonate II [J]. Bulletin of geology-

- ical science and technology, 1982,1(2):6-11.
- [6] 江茂生,朱井泉,李学杰,等.深水碳酸盐沉积研究进展[J]. 古地理学报,2001,3(4):61-68.
JIANG Maosheng, ZHU Jingquan, LI Xuejie, et al. New progress in research on deep water carbonate sedimentation [J]. Journal of palaeogeography, 2001, 3(4): 61-68.
- [7] 周小康,卫哲,傅恒,等.南海北部珠江口盆地深水区碳酸盐岩发育特征及地震识别[J].海洋地质与第四纪地质,2018, 38(6):136-148.
ZHOU Xiaokang, WEI Zhe, FU Heng, et al. Development characteristics and seismic identification of carbonate rocks in the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea [J]. Marine geology & Quaternary geology, 2018, 38(6): 136-148.
- [8] 郑兴平,张艳秋,张君龙,等.塔里木盆地东部寒武系碳酸盐深水重力流沉积及其储集性能[J].海相油气地质,2014, 19(4):1-8.
ZHENG Xingping, ZHANG Yanqiu, ZHANG Junlong, et al. Reservoir characteristics of Cambrian deepwater carbonate gravity flow depositional rock in eastern part of Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2014, 19(4): 1-8.
- [9] AL-AMERI T K, AL-OBAYDI R Y. Cretaceous petroleum system of the Khasib and Tannuma oil reservoir, East Baghdad oil field, Iraq [J]. Arab journal geoscience, 2011, 4(5/6): 915-932.
- [10] AL-AMERI T K. Khasib and Tannuma oil sources, East Baghdad oil field, Iraq [J]. Marine and petroleum geology, 2011, 28(4): 880-894.
- [11] 沈瑛楚,宋新民,刘波,等.伊拉克AD油田上白垩统Kh2段生物扰动与储层非均质性[J].天然气地球科学,2019, 30(12):1755-1770.
SHEN Yingchu, SONG Xinmin, LIU Bo, et al. Bioturbation and reservoir heterogeneity study of Upper Cretaceous Kh2 member, AD Oilfield, Iraq [J]. Natural gas geoscience, 2019, 30(12): 1755-1770.
- [12] 郭睿,伏美燕,赵丽敏,等.艾哈代布油田Khasib组沉积相及其对储层发育的控制[J].矿物岩石,2014, 34(1): 95-103.
GUO Rui, FU Meiyan, ZHAO Limin, et al. Sediment facies of Khasib Formation in Ahdeb Oilfield and its controlling effects on carbonate reservoir development [J]. Mineralogy and petrology, 2014, 34(1): 95-103.
- [13] 陈明江,程亮,陆涛. Ahdeb油田Khasib油藏孔隙结构及其对注水开发的影响[J].岩性油气藏,2020, 32(3): 133-143.
CHEN Mingjiang, CHENG Liang, LU Tao. Pore structure characterization and its impact on waterflooding development in Khasib reservoir in Ahdeb Oilfield, Iraq [J]. Lithologic reservoirs, 2020, 32(3): 133-143.
- [14] AL-QAYIM B. Sequence stratigraphy and reservoir characteristics of the Turonian-Coniacian Khasib Formation in central Iraq [J]. Journal of petroleum geology, 2010, 33(4):387-403.
- [15] AL-SAKINI J A. Summary of petroleum geology of Iraq and the Middle East [M]. Kirkuk: Northern Oil Company Press, 1992: 1-179.
- [16] BAHROUDI A, TALBOT C J. The configuration of the basement beneath the Zagros Basin [J]. Journal of petroleum geology, 2003, 26 (3): 257-282.
- [17] 白国平.中东油气区油气地质特征[M].北京:中国石化出版社,2007:1-187.
BAI Guoping. Petroleum geologic characteristics of petroleum district in Middle East [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007:1-187.
- [18] AQRAWI A A M, GOFF J C, HORBURY A D, et al. The petroleum geology of Iraq [M]. Beaconsfield, UK: Scientific Press, 2010:1-424.
- [19] AQRAWI A A M. Carbonate-siliciclastic sediments of the Upper Cretaceous (Khasib, Tanuma and Sa'di Formations) of the Mesopotamian Basin [J]. Marine and petroleum geology, 1996,13(7): 781-790.
- [20] SHARLAND P R, ARCHER R, CASEY D M. Arabian plate sequence stratigraphy [M]. GeoArabia special publication 2, Gulf PetroLink: Bahrain, 2001.
- [21] SADOONI F N, AQRAWI A A M. Cretaceous sequence stratigraphy and petroleum potential of the Mesopotamian Basin, Iraq [M]// GULF A. Middle East models of Jurassic/Cretaceous carbonate systems. SEPM special publication No. 69, 2004: 315-334.
- [22] MOHAMMED A K A. Reservoir characteristics of Khasib Formation in Amara Field, Southern Iraq [J]. Iraqi geological journal, 2018, 51(2): 54-74.
- [23] SABAH N S, MOMTAZ A A. Mid-Turonian-early Campanian sequence stratigraphy of northeast Iraq [J]. GeoArabia, 2007, 12 (2): 135-176.
- [24] AL-BALDAWI B A. Petrophysical evaluation study of Khasib Formation in Amara oil field, South Eastern Iraq [J]. Arabian journal geoscience, 2015, 8: 2051-2059.
- [25] AL-NAQIB K M. Geology of the Arabian Peninsula, southwest Iraq [M]. Alexandria: Distribution Branch, United States Geological Survey, 1967:1-53.
- [26] INSALACO E, VIRGONE A, COURME B. Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture [J]. GeoArabia, 2006, 11 (2): 75-176.
- [27] MCILREATH I A, JAMES N P. Facies models 13: carbonate slopes [J]. Geoscience Canada, 1978, 5(4): 189-199.
- [28] 王欢,石开波,赵丽敏,等.伊拉克A油田Khasib组碳酸盐岩微相及储层特征[J].海相油气地质,2020,25(4):351-362.
WANG Huan, SHI Kaibo, ZHAO Limin, et al. Microfacies and reservoir characteristics of carbonate rocks of Khasib Formation in Iraq A Oilfield [J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(4):351-362.
- [29] 余宽宏,金振奎,潘怡,等.全球显生宙碳酸盐岩储层及油气资源量分布特征[J].天然气地球科学,2012, 23(4): 748-755.
YU Kuanhong, JIN Zhenkui, PAN Yi, et al. Phanerozoic carbonate reservoir characteristics and petroleum resource distribution

- bution in the world[J]. *Natural gas geoscience*, 2012, 23(4): 748–755.
- [30] 徐传洋. 全球深层海相碳酸盐岩油气分布与成藏条件对比分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017: 1–75.
- XU Chuanyang. The oil and gas distribution and comparison analysis for hydrocarbon accumulation conditions in deep marine carbonates [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017: 1–75.
- [31] 秦雁群, 张光亚, 梁英波, 等. 南大西洋深水油气分布特征、聚集规律与勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 229–240.
- QIN Yanqun, ZHANG Guangya, LIANG Yingbo, et al. Distribution characteristics, accumulation rules and exploration directions of deep water hydrocarbon in South Atlantic[J]. *Natural gas geoscience*, 2016, 27(2): 229–240.
- [32] 仇衍铭. 世界油气资源分布特征及战略分析[D]. 北京: 中国地质科学院, 2019: 1–142.
- QIU Yanming. Distribution characteristics and strategic analysis of world oil and gas resources [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2019: 1–142.
- [33] 贾小乐. 波斯湾盆地大油气田形成条件与分布规律[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011: 1–195.
- JIA Xiaole. Formation and distribution of giant oil and gas fields in Persian Gulf Basin [D]. Beijing: China University of Geoscience(Beijing), 2011: 1–195.

编辑: 张润合

Sedimentary system and controlling factors of reservoir development of deep-water carbonate rocks: a case study of Cretaceous Khasib Formation of H Oilfield in the Middle East

ZHANG Jie, QIAO Zhanfeng, WANG Youjing, WANG Nai, Lü Zhou

Abstract: The ramp deep-water carbonate rocks of the Upper Cretaceous Khasib Formation in the Middle East are important oil producing strata. The Khasib Formation of H Oilfield in Iraq is divided into two sections of KB and KA and six layers of KB-3, KB-2, KB-1, KA2, KA1-2 and KA1-1 from bottom to top. The reservoir of Khasib Formation is developed in KA1-2 layer and KB section. The reservoir heterogeneity of Khasib Formation is strong, and the reservoir development characteristics, control factors and oil-gas distribution law are unclear, which restricts the next evaluation and exploration. On the basis of regional geological investigation, based on core, petrographic thin section and logging data, the lithofacies, sedimentary model, sedimentary microfacies and control factors of reservoir development of Khasib Formation in H Oilfield are studied, and the following understandings are obtained: (1) Five rock types are developed in the study area, including bioclastic grainstone, bioclastic packstone, bioclastic wackestone, micrite limestone and calcareous mudstone. Bioclastic grainstone and bioclastic packstone are mainly developed in KA1-2 and KB, bioclastic wackestone and micritic limestone are mainly developed in KA1-1 and KA2, and calcareous mudstone is developed at the bottom of KA2. (2) Three types of non-gravity carbonate microfacies (bioclastic shoal, shoal flank and ramp mud) and one type of gravity carbonate microfacies are developed in the transgressive system tract of middle ramp in the study area. KB and KA1-2 mainly develop bioclastic shoal, shoal flank and ramp mud, KA2 and KA1-1 mainly develop ramp mud, and calcareous mudstone deposited by gravity flow is developed at the bottom of KA2. (3) There developed bioturbation including *Teichichnus*, *Paleophycus*, *Chondrites*, *Thalassinoides* and *Planolites* in KA1-2 and KB reservoir sections, which make the carbonate rocks more heterogeneous. The permeability is positively correlated with the skeletal grain content. The reservoir is mainly controlled by sedimentary microfacies, bioturbation and penecontemporaneous dissolution. Finally, the ramp carbonate sedimentary model of shoreland-inner ramp-middle ramp-outer ramp from west to east in Iraq is established, and the sedimentary microfacies evolution law of six layers in the study area is defined. The research results have important guiding significance for the next exploration of the Upper Cretaceous in the study area, which mainly develops deep-water carbonate rocks. At the same time, they provide a reference for expanding the oil and gas exploration field in deep-water carbonate rocks in the three major marine basins of China and all over the world.

Key words: deep-water carbonate rocks; middle ramp; sedimentary microfacies; sedimentary model; Khasib Formation; Middle East

ZHANG Jie, First author: Senior Engineer, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology of carbonate rocks. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China