

伊拉克东南部白垩系塞诺曼阶—下土伦阶生物碎屑灰岩层序研究进展

李峰峰, 任立新, 李蕾, 万洋, 陈昊卫

中国石油勘探开发研究院

摘要 伊拉克东南部白垩系塞诺曼阶—下土伦阶发育巨厚生物碎屑灰岩,地层结构复杂,不同级次层序嵌套。以6个巨型碳酸盐岩油田为例,对其层序地层特征、沉积演化及控储机制进行了分析讨论:梳理了前人关于塞诺曼阶—下土伦阶层序划分的方案,采用了将其划分为4个三级层序的方案;分析总结了不整合面、淋滤溶蚀面、碳质泥岩层、沉积相转换面、沉积相突变面、最大海泛面及硬底等关键层序界面的形成机理和特征;应用适用的层序地层学理论和方法,基于塞诺曼阶—下土伦阶浅水沉积背景,建立碳酸盐缓坡—弱镶边台地层序旋回模式;揭示层序旋回与沉积演化的规律,阐明层序控储机制,厘清层序级次和层序界面对生物碎屑灰岩储层的控制,明确了海平面下降幅度、地层暴露时间和气候条件对地层结构、岩性和物性的影响。最后,指出伊拉克东南部塞诺曼阶—下土伦阶层序旋回研究存在的问题和发展趋势。研究成果为中东巨厚生物碎屑灰岩油藏分层系注水开发提供了参考依据。

关键词 生物碎屑灰岩;层序;沉积演化;层序控储;塞诺曼阶—下土伦阶;伊拉克东南部

中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

引用:李峰峰,任立新,李蕾,等.伊拉克东南部白垩系塞诺曼阶—下土伦阶生物碎屑灰岩层序研究进展[J].海相油气地质,2025,30(1):41-58.

LI Fengfeng, REN Lixin, LI Lei, et al. Research progress on the bioclastic limestone sequence of Cretaceous Cenomanian-Lower Turonian in southeastern Iraq[J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(1): 41-58.

0 前言

波斯湾地区赋存了特提斯域近72%的常规油气储量,中生代持续稳定的海相碳酸盐沉积为超级含油气盆地的形成提供了物质保障^[1]。热带浅水碳酸盐工厂分布于南北纬30°内热带和亚热带的温暖、营养贫乏、光照充足及富含氧气的海洋表层,碳酸盐沉淀很大程度上受生物作用的控制^[2]。海平面以下100 m的海水层中,特别是表层10 m的海水,水体溶氧浓度高,悬浮着大量能进行光合作用的生物,是碳酸盐沉积物的主要生产场所^[3]。目前发现的碳酸盐岩大油气田集中于海相碳酸盐岩中,主要形成于低纬度温暖清洁的浅海环境^[4]。伊拉克东南部位于阿拉伯板块东北缘,构造上属于美索不达米亚盆地的前渊带,发育巨型碳酸盐岩油田群,是全球最富集的油气聚集区

之一^[5],主力油藏主要分布于白垩系。白垩系被划分为7个二级层序^[6],上白垩统塞诺曼阶—下土伦阶为一个完整的二级层序。塞诺曼阶—下土伦阶发育巨厚生物碎屑灰岩,地层厚度介于350~600 m,内部发育多期层序旋回。层序旋回不但控制了沉积演化,还对准同生成岩作用具有重要影响。受沉积作用和成岩作用的双重控制,巨厚碳酸盐岩油藏的储层内幕结构复杂多变,不同成因的储层相互叠置,导致油藏的平面与垂向非均质性强,开发难度大^[7]。本文选取伊拉克东南部6个巨型碳酸盐岩油田作为实例,明确研究区塞诺曼阶—下土伦阶的三级层序旋回,总结生物碎屑灰岩关键层序界面的类型及特征,建立海平面升降旋回过程中的沉积响应模式,阐明不同水深背景下的层序旋回响应差异,明确不同级次层序旋回对储层的影响,最后指出塞诺曼

收稿日期:2024-04-15;改回日期:2024-08-19;网络出版日期:2025-01-23

本文受中国石油科技重大专项课题“巨厚碳酸盐岩油藏注水开发关键技术研究与应用”(编号:2023ZZ19-01)和“ALBION碳酸盐岩储层联合研究”(编号:2021DQ0407)联合资助

第一作者:李峰峰,高级工程师,主要从事碳酸盐岩沉积与储层研究。通信地址:100083北京市海淀区学院路20号;E-mail: lff1522188426@petrochina.com.cn

通信作者:李蕾,工程师,主要从事储层开发地质方面的研究工作。通信地址:100083北京市海淀区学院路20号;E-mail: lilei12@petrochina.com.cn

阶一下土伦阶层序研究存在的问题,以期为巨厚碳酸盐岩油藏分层系注水开发提供地质依据。

1 生物碎屑灰岩层序划分

早白垩世阿拉伯板块向热带和亚热带运动,新特提斯洋持续裂陷,在阿拉伯板块北缘、东缘由伸展期地幔下沉形成南新特提斯洋^[8];南新特提斯洋的开启导致侏罗纪 Gotina 盆地蒸发岩停止沉积,转换为 Balambo-Garau 盆地^[9]。晚白垩世,前寒武纪霍尔木兹盐丘底辟、基底断层复活形成 Amara 隆起^[10]。塞诺曼期,差异性构造沉降造成在伊拉克中部形成 Najaf 盆地;从 Amara 隆起到 Najaf 盆地,形成宽阔的浅水碳酸盐缓坡^[11](图1)。

受资料基础、研究尺度、地层保存程度及经验认识等因素影响,塞诺曼阶一下土伦阶的三级层序存在多种划分方案。Sharland 等^[12]以阿拉伯板块为研究对象,在白垩系内识别出 18 个最大海泛面(K10—K180),并将白垩系划分为 18 个三级层序,其中塞诺曼阶一下土伦阶内发育 3 个三级层序,即 K120、K130 和 K140。该方案提出后被众多学者接受,构建了白垩系基本的层序地层格架,后期三级层序划分和命名通常以此为基础。K10—K180 原指 18 个最大海泛面,后期也用来作为 18 个层序的代码。Bromhead 等^[13]基于阿曼和阿联酋地区野外露头数据和地下观测数据,将阿拉伯板块塞诺曼

阶一下土伦阶划分 3 个三级层序,每期层序的关键界面与 Sharland 等的方案基本一致。韩海英等^[14]根据岩心、录井、测井和地震等资料,在伊拉克南部塞诺曼阶一下土伦阶中识别出 4 个三级层序,其中 K120、K130、K140 作为最大海泛面与 Sharland 等的方案基本一致,但考虑在 K130、K140 之间发育的具有陆相指示标志的碳质泥岩,将原三级层序划分为 2 个三级层序,并识别出最大海泛面命名为 K135。Razin 等^[15]在伊朗西南部扎格罗斯带塞诺曼阶一下土伦阶中识别出了 4 个三级层序,该方案的层序界面与韩海英的方案^[14]基本等同。Al-Zaidy 等^[16]在伊拉克东南部选取典型井,在塞诺曼阶一下土伦阶中识别出 3 个三级层序,该方案中 K120、K130 与 Sharland 等的方案^[12]基本一致,但 K140 等同于韩海英方案^[14]中的 K135。李峰峰等^[17]在伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶识别出 5 个三级层序,其中 4 个层序界面与韩海英方案^[14]等同,但在 K130 与 K135 之间,通过识别淋滤溶蚀面将层序再次细分。然而,随着资料的丰富,通过区域对比发现,新识别的淋滤溶蚀面跨油田可对比性弱,仅在个别油田中可见,且地层淋滤溶蚀程度低,地层结构保存完好,因此判断其为四级层序界面。Mehrabi 等^[18]在伊朗西南部仅在 Sarvark 组中上部识别出 2 个三级层序,等同于韩海英方案^[14]中的 K135、K140,而在 Sarvark 组下部地层中未识别出明显的层序界面。在其他

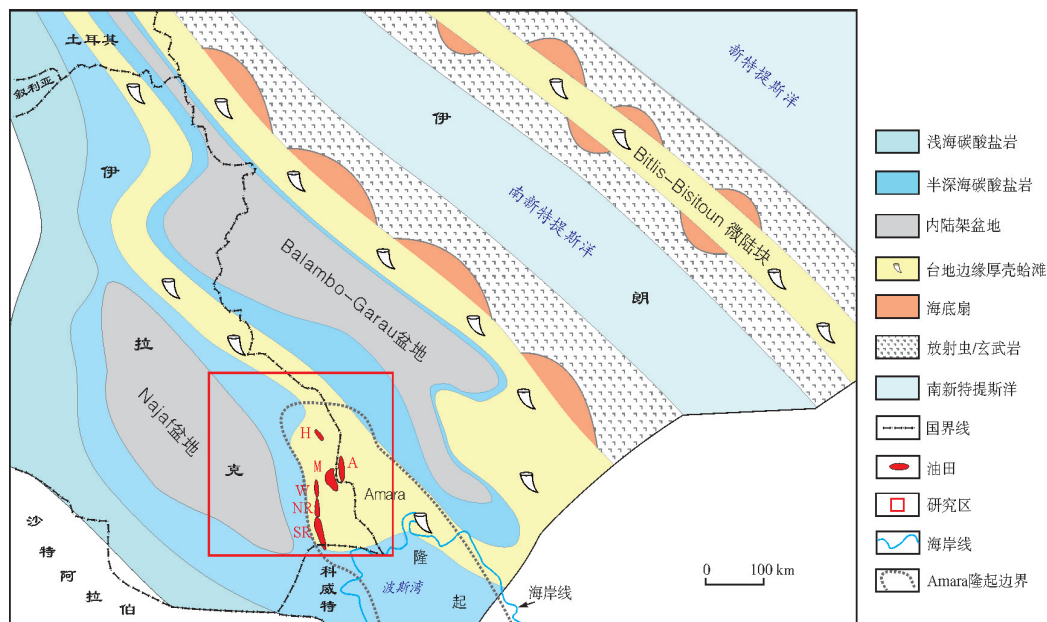


图1 两伊地区塞诺曼期—早土伦期岩相古地理图(据文献[10]修改)

Fig. 1 Lithofacies paleogeography of Cenomanian–Early Turonian in Iraq and Iran (cited from reference [10], modified)

地区,塞诺曼阶一下土伦阶通常具有不同的层序划分方案,与伊拉克东南部具有不同的层序界面特征;Farouk等^[19]在埃及西奈中部地区根据岩相、生物相和沉积微相识别出6个最大海泛面,并将塞诺曼阶—土伦阶划分为6个三级层序旋回;Jaballah等^[20]根据岩相和生物地层等标志,将非洲突尼斯中南部塞诺曼阶—土伦阶划分为6个三级层序旋回。

更多的研究主要针对单个油田,研究层段通常仅涉及主力产层段 Mishrif组。不同油田的地层单元划分和命名存在较大差异,对应关系比较混乱,可比性较差。如对于塞诺曼阶一下土伦阶,伊拉克对应的地层主要为 Ahmadi组、Rumaila组和 Mishrif组,W油田对应的地层为 Tuba组、Ahmadi组和 Mishrif组,而伊朗A油田对应的地层为 Sarvak组和 Mishrif组(图2)。又如对于 Mishrif组,Mahdi等^[21]

在美索不达米亚盆地南部 Mishrif组识别出2个完整层序和1个下降半旋回;高计县等^[22]将伊拉克鲁迈拉油田 Mishrif组划分为3个下降半旋回和1个上升半旋回;李峰峰等^[23]将伊拉克南部M油田 Mishrif组划分为3个三级层序;Wang等^[9]在美索不达米亚盆地中部AD油田 Mishrif组中识别出3个完整的层序;衣丽萍等^[24]将伊拉克H油田 Mishrif组划分为5个三级层序;Lazim等^[25]在伊拉克 Zubair油田 Mishrif组中识别出5个高频层序旋回,虽未明确指出三级层序旋回,但根据其组合可判定为3个三级层序。

由于各油田的地层单元命名存在差异,因此应以塞诺曼阶一下土伦阶为研究单元,根据关键层序界面建立对比关系。综合不同专家学者对塞诺曼阶一下土伦阶层序的研究成果,结合伊拉克东南部的地层特征,本文采用了韩海英等提出的层序划分

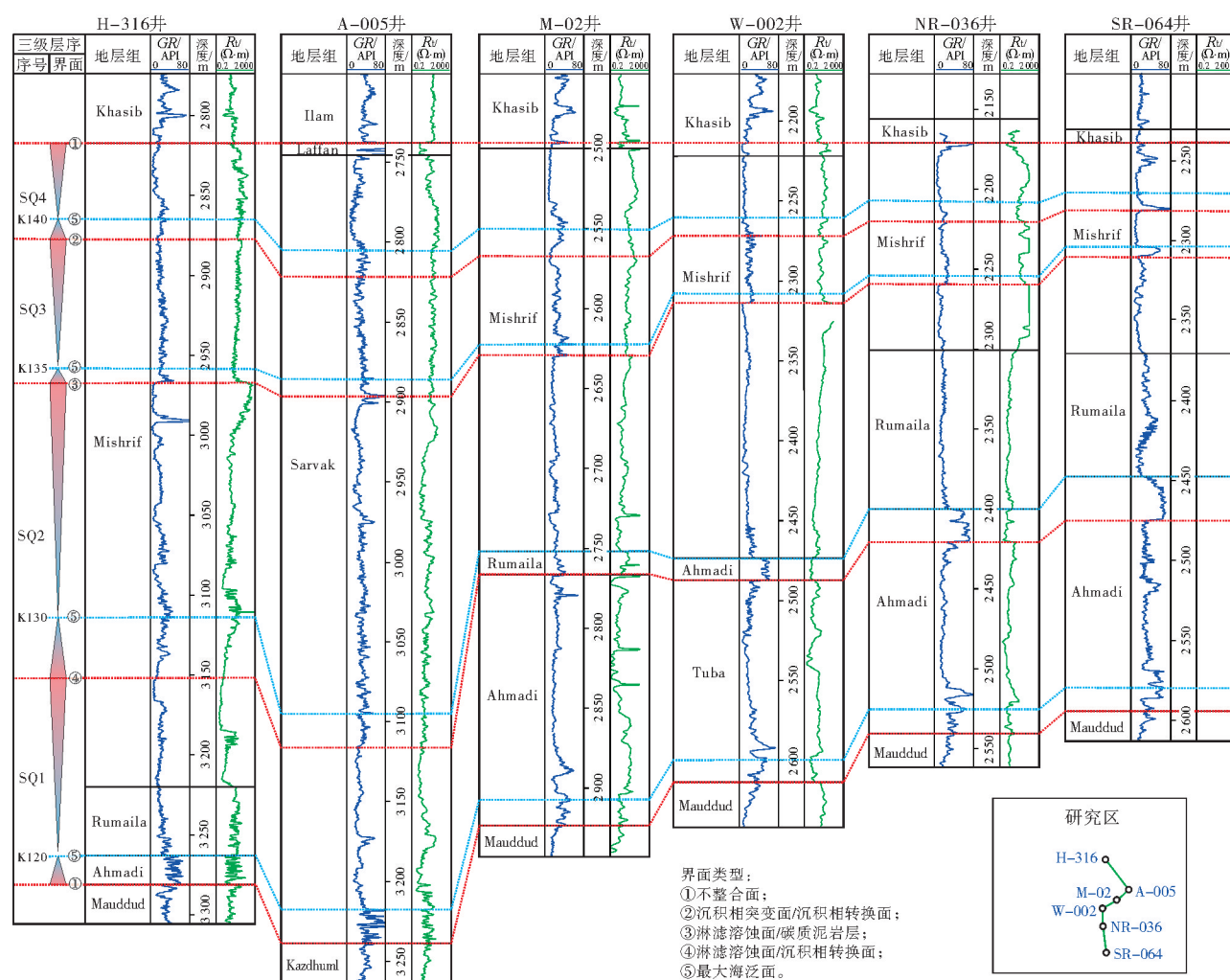


图2 伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶层序地层对比

Fig.2 Sequence stratigraphic correlation of Cenomanian–Lower Turonian in southeastern Iraq

方案(图2),即塞诺曼阶一下土伦阶发育4个三级层序(SQ1、SQ2、SQ3和SQ4),分别对应4个最大海泛面(K120、K130、K135和K140)^[14]。

2 生物碎屑灰岩关键层序界面

伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶巨厚生物

碎屑灰岩地层,沉积时间跨度大,成岩改造强烈且复杂,多级层序嵌套发育,发育多种类型层序界面(表1)。层序界面主要有不整合面、淋滤溶蚀面、碳质泥岩层、沉积相转换面、沉积相突变面、最大海泛面及硬底等,此外,地层中还发育指示暴露的结构、构造和特殊矿物等标志,如鸟眼构造和示顶底构造。

表1 伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶关键层序界面

Table 1 Key sequence boundary of Cenomanian–Lower Turonian in southeastern Iraq

层序界面	驱动机制	层序级次	主控因素	识别特征
不整合面	全球海平面下降或构造抬升,地层遭受风化或剥蚀	一级—三级	气候,暴露时间	角砾岩,测井突变跳跃式响应,地震强反射
淋滤溶蚀面	相对海平面下降,地层遭受淋滤溶蚀	三级、四级	气候,海平面下降幅度,暴露时间	孔洞,蜂窝状孔隙,大粒径生物碎屑,测井呈低伽马、高电阻率和低密度
碳质泥岩层	全球海平面下降,洼地演变为陆相泥沼环境	三级	气候,暴露时间,有机质保存,埋藏温压条件	黑色薄层,测井呈特高伽马
沉积相转换面	相对海平面缓慢变化,沉积相从深水到浅水再到深水	三级	海平面变化速率	沉积相序变化与沉积模式关系
沉积相突变面	相对海平面快速变化,深水沉积直接上覆于浅水沉积	三级	海平面变化速率	沉积相序变化与沉积模式关系
最大海泛面	相对海平面上升至最高,深水缓慢沉积或沉积间断	一级—四级	水深背景,相对海平面变化速率	岩性泥质含量最高,远洋指示生物,粉屑颗粒组分
硬底	长期持续且稳定的沉积界面	低级层序为主	水体深度,水介质条件,碳酸盐堆积速率	白色致密状,生物潜穴普遍

2.1 不整合面

全球海平面大幅下降,地层长期暴露遭受风化剥蚀,后期海平面快速上升,深水沉积物上覆于残留地层之上,两者为明显的不整合接触。不整合面通常是高级层序的界面,在岩心、测井和地震资料上均有明显响应。晚土伦期,阿拉伯板块东北缘相对海平面下降,地层遭受长时间的暴露风化,在Mishrif组和上覆Khasib组之间形成不整合面。该不整合面发育在SQ4层序顶部,在整个阿拉伯板块可进行对比,在伊拉克南部以风化角砾岩为主要特征。如H油田Mishrif组顶部角砾岩厚度近3 m,角砾岩分选较差,岩心呈灰白色镶嵌致密状,粒间可见浅棕色的泥质充填物(图3a);M油田Mishrif组岩溶角砾岩厚度近4 m,缝隙中多充填黄绿色胶结物,角砾岩带之下岩心破碎,上覆Khasib组深水泥岩呈浅黄色,2种岩石为不整合接触关系^[26](图3b)。不整合面的测井特征呈明显的突变响应,测井曲线呈跳跃式突变,通常具特高自然伽马、特低电阻率、特高密度(大于2.65 g/cm³)及低中子等特征,如图2各井所示。不整合面在地震剖面上具强反射特征^[27]。

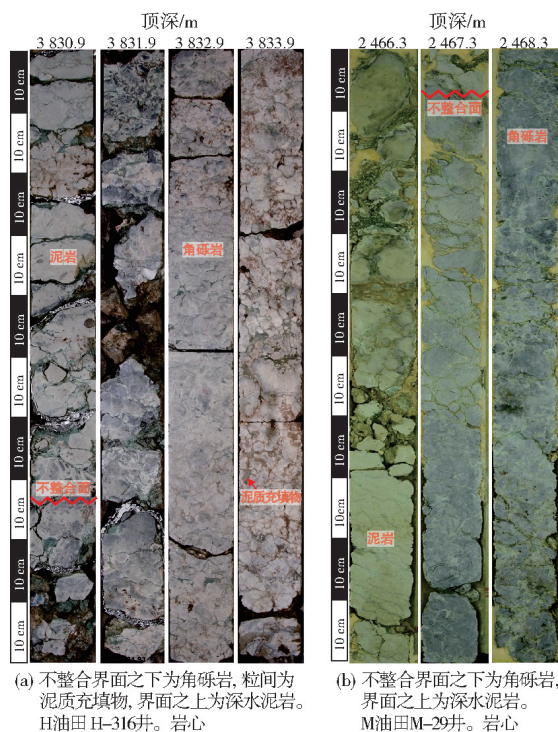


图3 伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶不整合面
Fig. 3 Unconformity interface of Cenomanian–Lower Turonian in southeastern Iraq

2.2 淋滤溶蚀面

淋滤溶蚀面在巨厚生物碎屑灰岩地层中普遍发育,在高级层序和低级层序中均可见。伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶整体处于浅水沉积环境,海平面下降易造成地层暴露,在潮湿气候条件下遭受淋滤溶蚀。若地层结构未被破坏,溶蚀作用可形成大量的次生孔隙,层序界面附近会伴生大量优质储层发育;若地层结构被破坏,则会形成岩溶垮塌,垮塌形成的角砾岩会伴随胶结作用,其特征类似于不整合面。淋滤溶蚀面通常反映海平面持续缓慢

下降,水动力持续增强,界面下部通常为高能滩沉积[28];当海平面快速上升、水体深度较大时,沉积速率较慢,界面之上为深水的泥质灰岩。淋滤溶蚀面可见于SQ1层序和SQ2层序的顶部,这两期层序内部小规模溶蚀面也比较普遍。研究区W油田、H油田和R油田 Mishrif组中普遍发育淋滤溶蚀面,淋滤溶蚀面上下的岩性、物性及含油性突变(图4):界面之下为生物碎屑滩沉积,岩心呈深棕色,颗粒感较强,溶蚀作用明显,肉眼可见溶蚀孔隙和生物碎屑;界面之上为潟湖沉积,岩心呈灰白色致密状,溶蚀作用不明显。

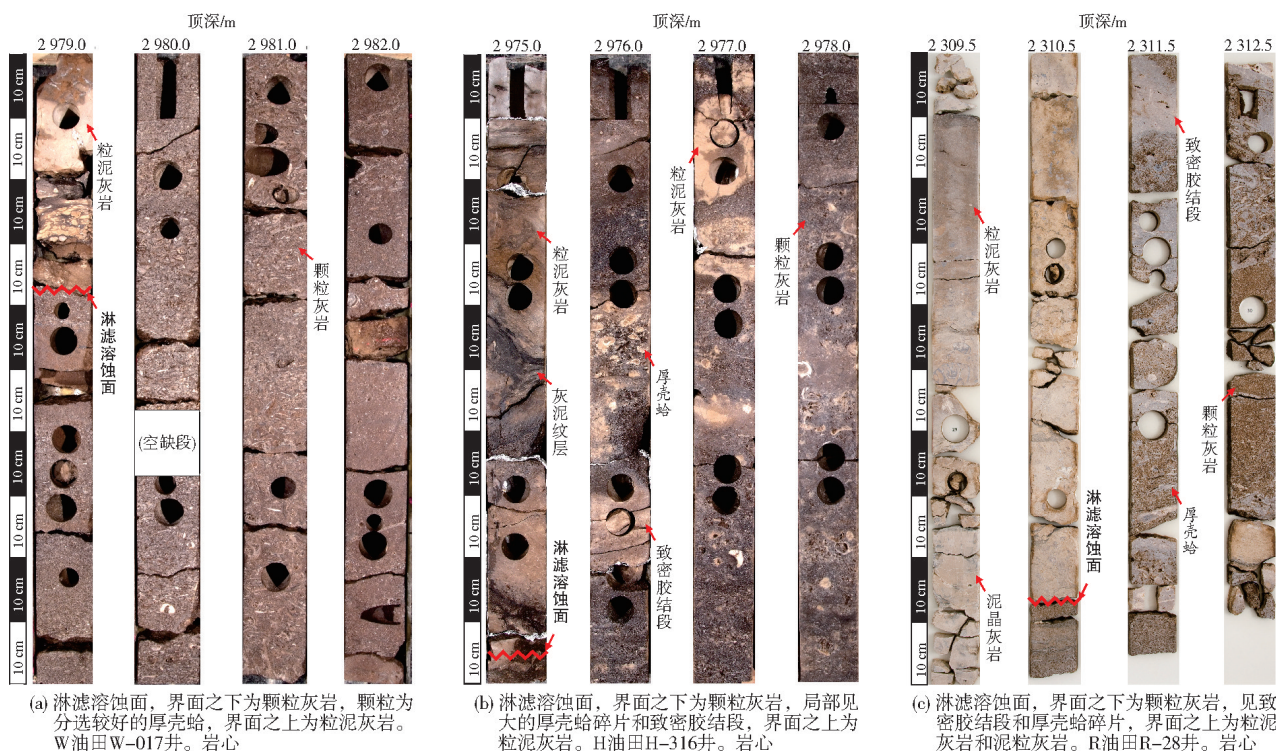


图4 伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶淋滤溶蚀面

Fig. 4 Leaching and dissolution interface of Cenomanian-Lower Turonian in southeastern Iraq

2.3 碳质泥岩层

碳质泥岩夹在巨厚生物碎屑灰岩地层中,厚度较薄且与围岩形成明显对比,是陆相环境重要的指示标志,反映海平面大幅度下降和地层长期的暴露。在伊拉克东南部H油田和M油田 Mishrif组中碳质泥岩均有发育,厚度介于10~20 cm^[29](图5)。热失重分析碳质泥岩中有机物质的含量约为29.3%,全岩分析显示黏土矿物含量为14.6%。碳质泥岩形成于滩间或潟湖,海平面下降后,滩间或潟

湖与广海分开形成独立水体。潮湿气候条件下,潟湖或滩间中发育植被,植被腐烂并就地堆积,逐渐形成了陆相泥沼环境^[30]。植被死亡后被快速埋藏,有机物得以保存,后期埋藏过程中经历了与成煤相似的温压条件,有机质与沉积物逐渐演化为碳质泥岩^[31]。整体来看,碳质泥岩发育需要地层长期暴露、湿润的气候条件、有机质的快速埋藏及适宜的温压条件^[32]。碳质泥岩测井响应明显,整体呈高伽马、中—低电阻率、高密度特征,其自然伽马曲线呈尖峰状,伽马值可达80 API,与围岩易区分。

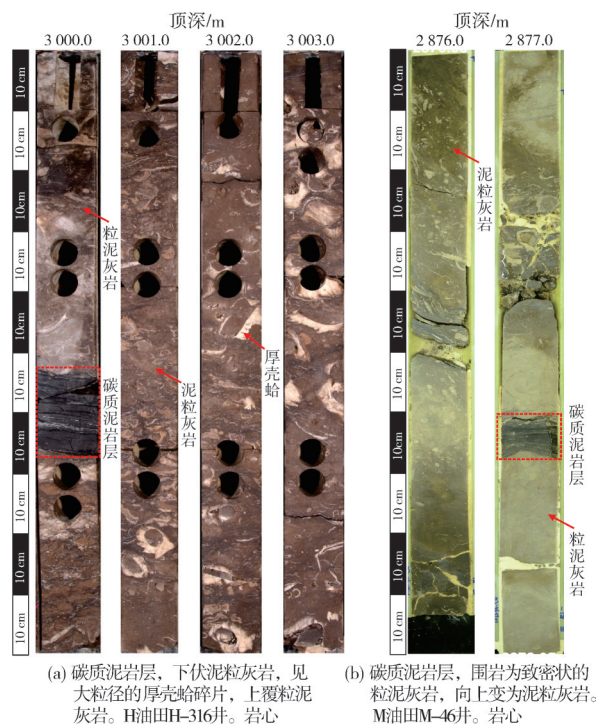


图5 伊拉克东南部塞诺曼阶—下土伦阶碳质泥岩层
Fig. 5 Carbonaceous mudstone layer of Cenomanian–Lower Turonian in southeastern Iraq

2.4 沉积相转换面

沉积相转换面是一个连续沉积界面, 转换节点代表海平面从下降到上升的转换, 故可作为划分层序的重要界面。在不整合面限定的层序单元中, 若

存在沉积相转换面, 则需确定是否有新层序存在。沉积相转换面可见于SQ1层序顶部和SQ3层序顶部。伊拉克东南部塞诺曼阶—下土伦阶为碳酸盐缓坡, 自 Amara 隆起区向 Najaf 盆地相序为潮坪—潟湖/潮道—丘滩—生物碎屑滩—滩前—斜坡脚—开阔陆棚^[33]。常见的沉积相转换面为潟湖—潮坪—潟湖转换: 潮坪通常指潮上坪, 可见准同生白云石化, 偶见石膏, 从潟湖演变为潮上坪, 代表着海平面持续下降, 沉积物持续进积; 而从潮坪演变为潟湖, 则反映海平面上升, 沉积物持续退积, 因此潮上坪反映了海平面下降最低点。如伊拉克 W 油田 W-17 井中潟湖—潮坪—潟湖的转换, 即为 SQ3 层序的顶界面 (图 6)。

2.5 沉积相突变面

沉积相突变面是一个不连续的沉积界面。根据瓦尔特相律, 原本不相邻的沉积相若发生叠置, 则反映了海平面快速上升或快速下降。深水沉积相直接覆盖于浅水沉积相之上, 代表海平面下降至最低点后突然上升, 故沉积相突变面可作为层序界面。沉积相突变面可见于 SQ2 层序内部、SQ3 层序顶部: 伊拉克 W 油田 W-20 井 SQ2 层序的 MB2 段, 浅水的生物碎屑滩上覆于深水的斜坡脚之上, 中间缺乏滩前这一过渡相, 反映了海平面快速下降造成的超覆 (图 6); 在 SQ3 层序顶部, W-002 井 MA 段深水

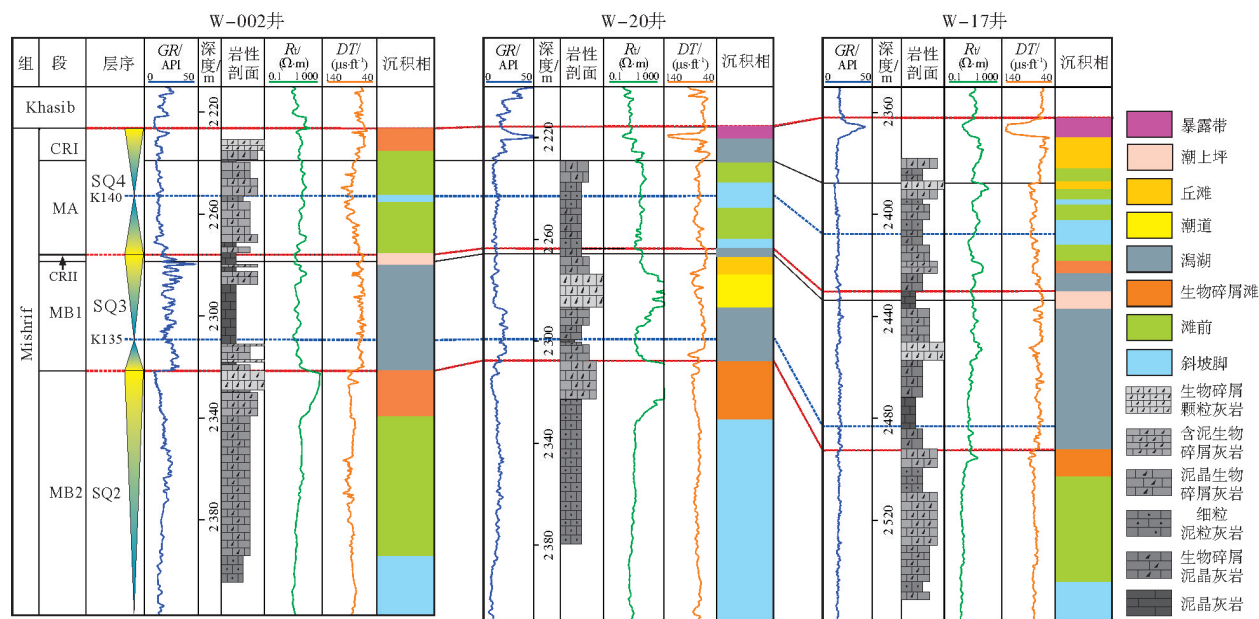


图6 伊拉克东南部 W 油田区塞诺曼阶—下土伦阶沉积相转换面
Fig. 6 Sedimentary facies transition interface of Cenomanian–Lower Turonian in W oilfield, southeastern Iraq

的滩前上覆于CRII段浅水的潮上坪,W-20井MA段深水的斜坡脚上覆于CRII段浅水的潟湖,均反映了海平面快速上升(图6)。

2.6 最大海泛面

巨厚生物碎屑灰岩沉积于浅水环境,即使在最大海泛时期,深水沉积特征也不明显,缺乏可以识别的凝缩段,尤其是在上塞诺曼阶一下土伦阶,岩心和测井上通常缺乏在全油田范围内可以对比的纯泥灰岩。最大海泛面通常根据生物碎屑类型和岩石结构识别。浮游有孔虫和海绵骨针是深水

环境重要的指示生物。浮游有孔虫大多数出现在水体的上部,距表面50~100 m的透光层内,而且是在没有陆源注入的地方,主要聚集在开阔海盆的半深海处^[34]。浮游有孔虫生物碎屑呈圆环状,粒径较小,含少量的棘皮类碎屑(图7a—7c)。海绵骨针通常发育在盆地内部和斜坡带,局部浅水环境中也可发育,海绵骨针长度可达3 mm(图7d)。深水沉积中还发育以粉屑为主的粒泥灰岩或泥粒灰岩(图7e,7f),颗粒分选较好,生物碎屑粒径太小导致不能识别其生物类型,反映沉积物经历了长距离的搬运至深水环境。

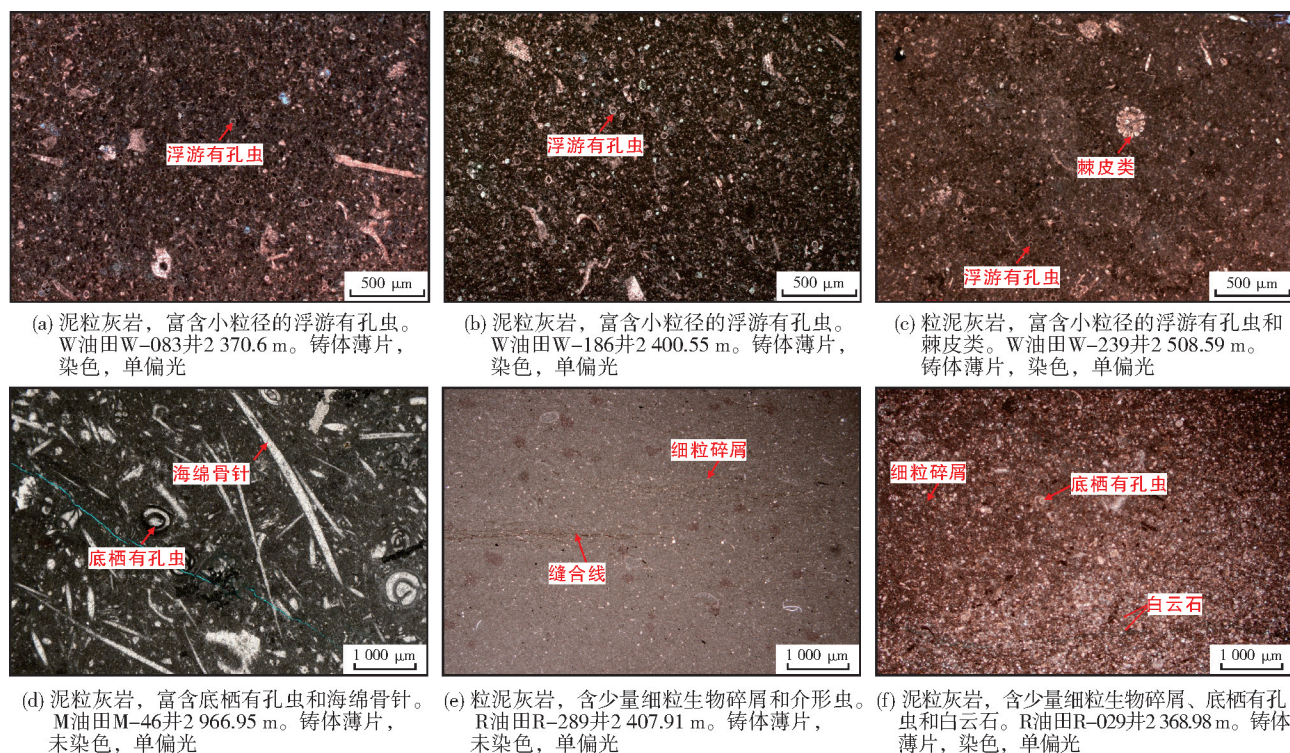


图7 伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶最大海泛面岩性标志

Fig. 7 Lithological markers of maximum flooding surface of Cenomanian-Lower Turonian in southeastern Iraq

2.7 硬底

硬底是指厘米级的同沉积期石化作用的不连续面,在上覆沉积物沉积之前就已坚硬的海底存在^[35]。硬底表明了沉积作用的不连续,是缺失作用面或凝缩作用面,在上覆地层沉积之前于水下环境就已经发生石化作用^[36-37]。硬底形成所需要的基本条件是长期持续且稳定的沉积物-水界面^[38-39]。石化作用的时间不同导致硬底的发育规模存在差异。规模较大的硬底对应较为长期的沉

积间断,其成因包括:全球海平面下降或构造抬升;盆地充填造成水体变浅,导致海水极度局限甚至严重影响碳酸盐的有机生成作用;海平面上升或者构造下降造成水深超越有效的透光带^[40]。规模较小的硬底对应短期的沉积间断,其成因包括:沉积物分布模式的局部变化;水动力条件导致的短期环境变化。硬底可出现在浅水潮下带、远离台地的远洋环境、浅水斜坡和深水盆地^[40]。硬底主要发育于SQ3层序内部。伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶硬底主要发育于潟湖环境,规模较

小,为短期沉积间断。如H油田 Mishrif组 MB1段潟湖中普遍发育硬底,规模介于30~80 cm,呈灰白色致密状(图8,红色线段表示硬底的底界),生物

潜穴普遍发育,深褐色潜穴与灰白色硬底界限明显。硬底之上为泥粒灰岩或粒泥灰岩,呈深褐色,与硬底呈不整合接触,界面清晰易识别(图8)。

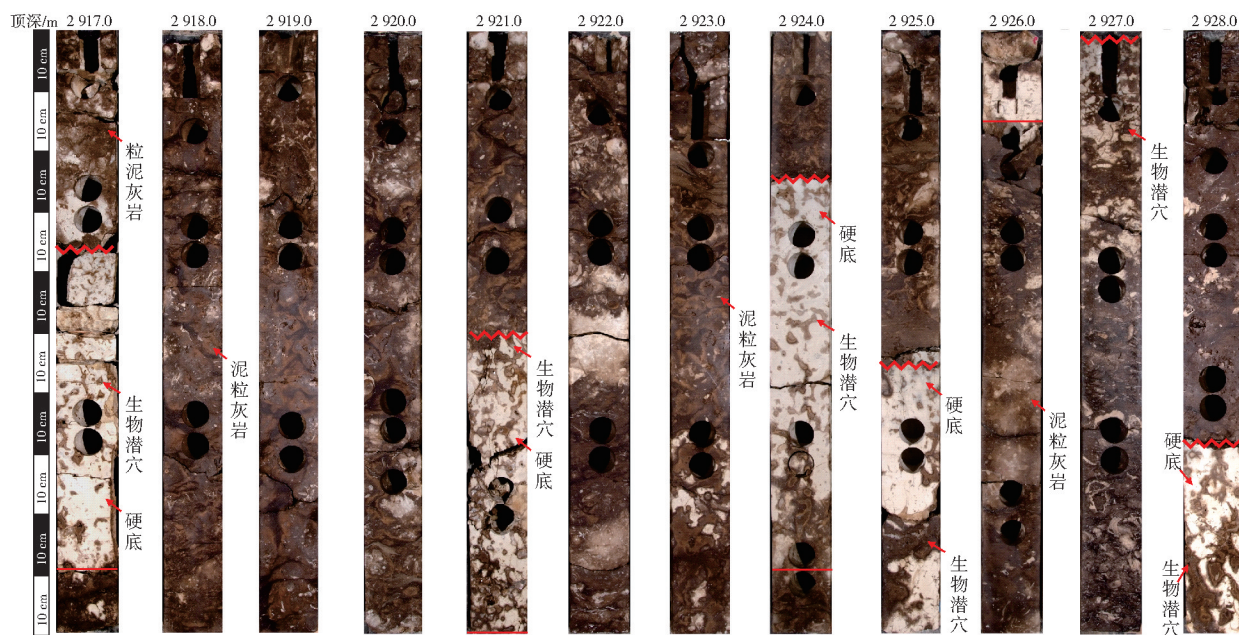


图8 伊拉克东南部H油田 Mishrif组硬底

Fig. 8 Hardground of Mishrif Formation in H oilfield, southeastern Iraq

2.8 其他暴露标志

伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶中某些沉积构造能够反映海平面下降或浅水沉积相,可作为识别层序界面的依据,常见的有鸟眼构造和示顶底构造。鸟眼构造主要是潮上带的碳酸盐沉积物因干燥收缩而形成的,或者是沉积物中的生物腐烂所产生的气泡逸出并被充填所致^[41](图9a),指示了地层间歇性暴露或浅水沉积环境。示顶底构造是指在碳酸盐岩孔隙中同时发育2种充填物,两者界面平直,这2种充填物分别代表不同时期的充填:孔隙底部暗色的泥晶或粉晶方解石形成较早,孔隙形成不久后由上覆水体中呈悬浮状态的灰泥沉积形成的;孔隙顶部色浅的亮晶方解石,是灰泥沉积后沉淀的充填物^[42]。示顶底构造通常形成于潮上带,与鸟眼构造相伴生(图9b,9c)。

3 层序模式

“层序”最早由 Sloss 等于 1949 年提出^[43],后由 Vail 等于 1977 年在地震地层学基础上发展成一门新的地层分支学科^[44]。Vail 等建立的 Exxon 层序地

层模式,即经典层序地层学理论,起源于被动大陆边缘,其概念和理论模型强调的是海平面升降的一致性、同步性、旋回性,受构造沉降、全球海平面变化、沉积物供应及气候等因素的控制^[45]。经典层序地层学中一个完整的层序包括低位体系域(LST)/陆架边缘体系域(SMST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)^[46],后被修订为低位体系域(LST)–海侵体系域(TST)–高位体系域(HST)–FRST(强迫海退楔体系域)^[47-49],且已成为国际层序地层学标准化建议方案的核心概念模型^[50-51]。成因层序地层学是 Galloway 于 1989 年在幕式沉积旋回理论的基础上发展创建的^[52],其选择最大海(湖)泛面为层序边界。旋回层序地层学是由 Embry 等于 1988 年提出,并在 1992 年正式提出了海进–海退层序模式(T-R 模式)^[53],T-R 模式以最大海(湖)退面和最大海(湖)泛面将层序划分为海退体系域和海侵体系域。高分辨率层序地层学由 Cross 于 1994 年提出^[54],其技术应用的关键为确定二分时间单元分界面,进行高分辨率等时地层对比^[55-56]。

伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶地处于稳定的被动大陆边缘,整体位于浅水沉积环境,由于

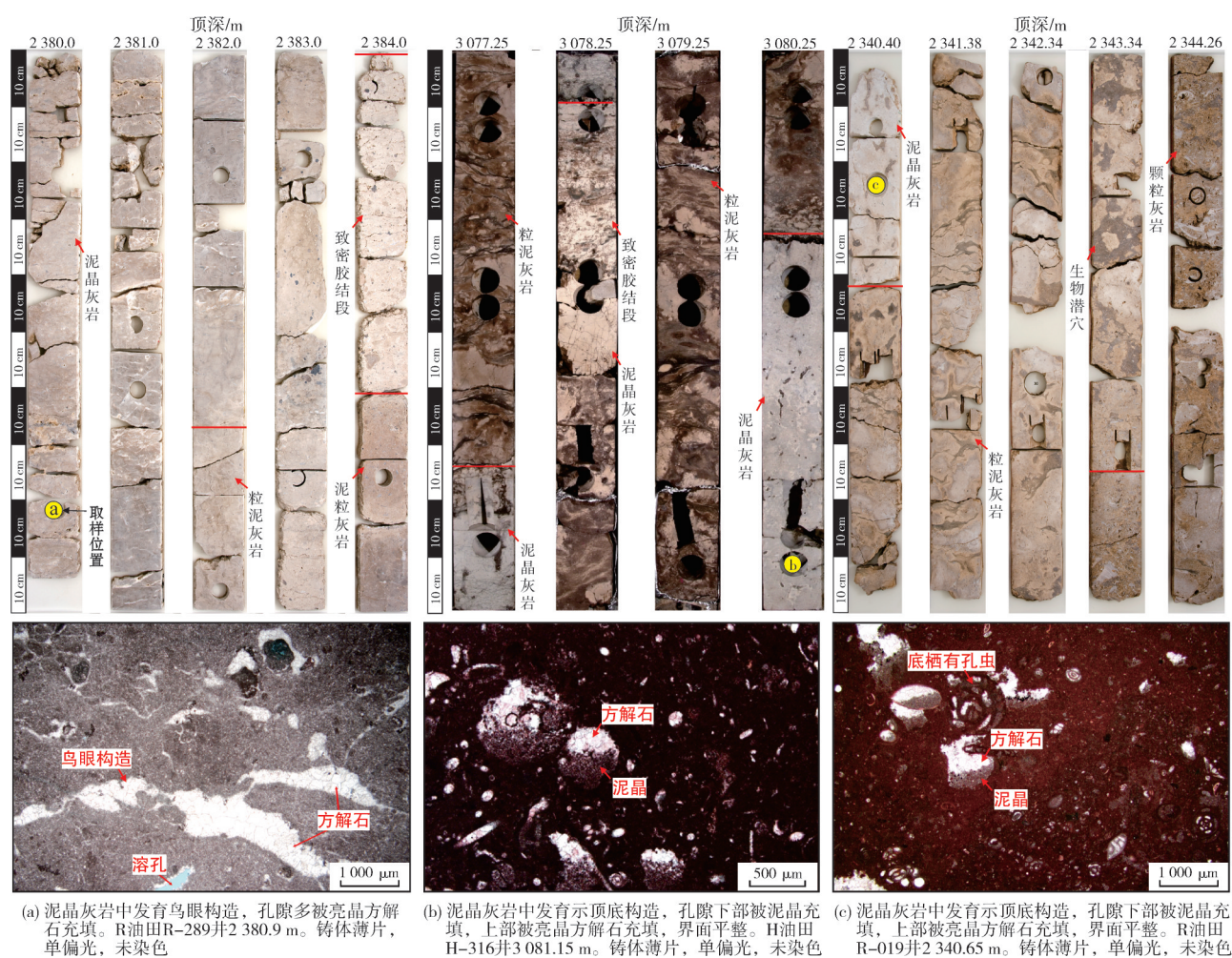


图9 伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶鸟眼构造和示顶底构造

Fig. 9 Birdeye structure and geopetal structure of Cenomanian-Lower Turonian in southeastern Iraq

最大海泛面特征不明显、不易识别,因此,经典层序地层学中的四分模式更适用于巨厚碳酸盐岩层序研究。研究区主体处于Amara隆起区,西北部临近Najaf盆地,自隆起向盆地,不同位置水深不同,对海平面变化的响应差异显著;自东南向西北为宽缓的碳酸盐缓坡,碳酸盐沉积速率高,导致缓坡具有弱镶边台地特征,沉积作用兼具缓坡和镶边台地2种特征(图10)。

(1) 低位前积楔体系域(LST)

相对海平面下降至最低点后开始缓慢上升,相对海平面未越过沉积坡折,碳酸盐缓坡依旧暴露,淋滤溶蚀或风化剥蚀持续,沉积作用主要发生在Najaf盆地及边缘,在水体环境适宜条件下发育薄层自生碳酸盐岩楔,呈弱退积特征(图10)。低位前积楔体系域底界面为层序界面,顶界面为初始海泛

面。研究区低位前积楔发育在工区西北部斜坡和近Najaf盆地,在Amara隆起不发育。

(2) 海侵体系域(TST)

相对海平面快速上升并越过沉积坡折,碳酸盐缓坡风化剥蚀或淋滤溶蚀停止,恢复正常碳酸盐沉积,海侵体系域底界面为初始海泛面,上覆于低位前积楔之上,顶界面为最大海泛面,沉积作用随着海平面上升发生退积(图10)。值得注意的是,伊拉克东南部Amara隆起构造位置较高,即使处于最大海泛时期,也可营造良好的碳酸盐沉积环境,凝缩层不发育,故研究区最大海泛面在岩心和测井特征上不明显,通常根据岩石结构和指示生物对其识别。海平面上升为碳酸盐沉积提供了充足的可容纳空间,故海侵体系域在Amara隆起也形成一定厚度的碳酸盐沉积,而在斜坡和近Najaf盆地由于水体

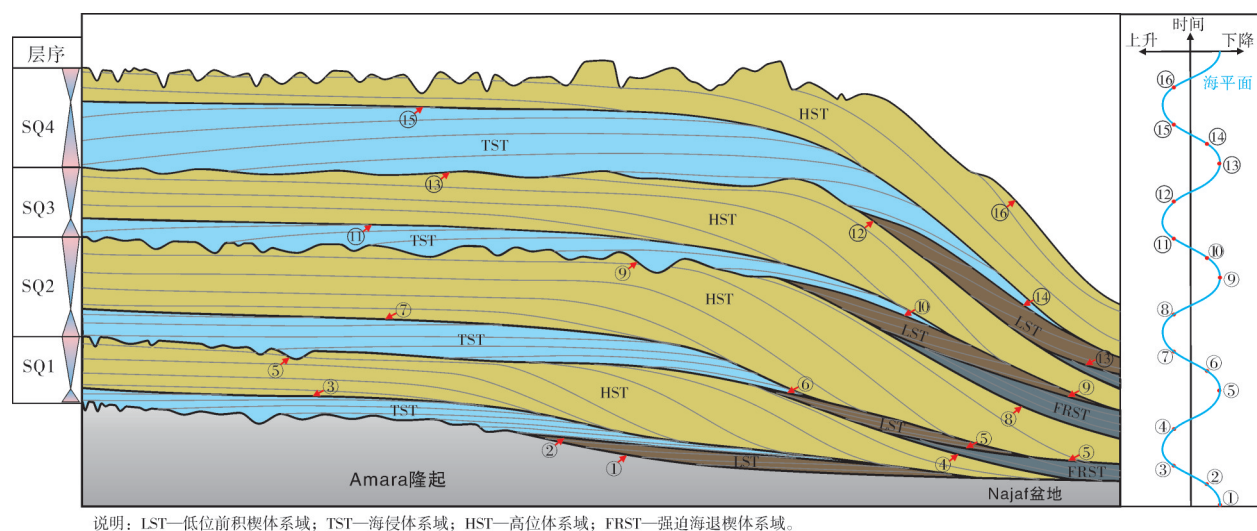


图10 伊拉克东南部塞诺曼阶—下土伦阶碳酸盐缓坡层序模式
Fig. 10 Sequence model of the carbonate ramp of Cenomanian–Lower Turonian in southeastern Iraq

较深,碳酸盐沉积速率低,深水盆地还可能发生沉积间断。塞诺曼早期处于水体较深的沉积背景,至塞诺曼中期—早土伦期,逐渐变为水体较浅的背景,故SQ4层序海侵体系域的沉积厚度通常大于前三期层序,而SQ1层序海侵体系域的沉积厚度最小。

(3)高位体系域(HST)

相对海平面缓慢上升至最高点后缓慢下降, Amara隆起海平面稳定且水体循环良好,碳酸盐产率达到最大,生物碎屑灰岩沉积速率大于相对海平面上升速率。高位体系域是 Amara隆起巨厚生物碎屑灰岩沉积的主要时期, Najaf盆地及其边缘由于水体较深,碳酸盐沉积速率较低。高位体系域底界面为最大海泛面和下超面,顶界面为层序界面或与强迫海退楔体系域的接触面。Amara隆起碳酸盐的持续加积导致可容纳空间不足,碳酸盐沉积向盆地进积,平面上规模不断扩大,沉积坡折向盆地迁移,并导致缓坡具有弱镶边特征,局部在近盆地区域可见滑塌沉积,高位体系域可下超覆盖于低位前积楔体系域和强迫海退楔体系域。可容纳空间的不足导致沉积物容易暴露,遭受大气淡水淋滤溶蚀,在地层结构不受破坏的情况下形成大规模的优质储层。伊拉克东南部 Mishrif组中几乎所有的优质储层均发育于高位体系域。高位体系域碳酸盐横向大规模加积造成 Amara隆起规模扩大,隆起内部水体交流不畅,可形成局限沉积环境,如研究区 Mishrif组上部SQ3层序中广泛的潟湖沉积便是SQ2层序高位体系域大规模的礁滩加积所致。

(4)强迫海退楔体系域(FRST)

相对海平面快速下降越过沉积坡折,碳酸盐缓坡沉积作用停止,高位体系域沉积地层遭受成岩改造,形成风化淋滤面或不整合面。强迫海退楔体系域底界面为与高位体系域的接触面或下超至前期层序的沉积界面,顶界面属于层序界面的一部分(图10)。强迫海退楔体系域发育在研究区西北部斜坡和近 Najaf盆地区域,而在 Amara隆起主要以不整合面或淋滤溶蚀面为主。海平面持续大幅度下降过程中, Amara隆起无沉积作用,以淋滤溶蚀或剥蚀为主,尤其是在SQ4层序中,海平面下降造成高位体系域地层被强烈剥蚀,地层残留厚度小于前三期层序的高位体系域地层厚度,而 Najaf盆地及其边缘的高位体系域沉积厚度较大且遭受剥蚀程度较低。

4 层序旋回与沉积演化

海平面升降旋回中,不同古地理位置具有不同的水深,碳酸盐沉积速率和岩石学特征对海平面变化具有不同的敏感度。水深背景和古地貌控制了研究区不同油田的沉积作用^[57]。深水背景下:海平面上升,构造凸起和构造洼地水体均较深,沉积速率较低;海平面下降,构造凸起水体变浅,沉积水动力和沉积速率均高于构造洼地。浅水背景下:海平面上升,构造凸起沉积速率和沉积水动力均高于构造洼地;海平面下降,构造洼地具有较高的沉积速率,发育高能沉积相带,构造高地发生暴露剥蚀。

古地理位置不同导致沉积环境、沉积速率和剥蚀程度差异较大,造成研究区不同油田同期层序的地层厚度和储层发育程度差异较大(图 11)。研究区塞

诺曼阶一下土伦阶内部自下而上发育 4 期三级层序,自 SQ1 层序至 SQ4 层序,海平面逐渐降低,从深水演化为浅水背景。

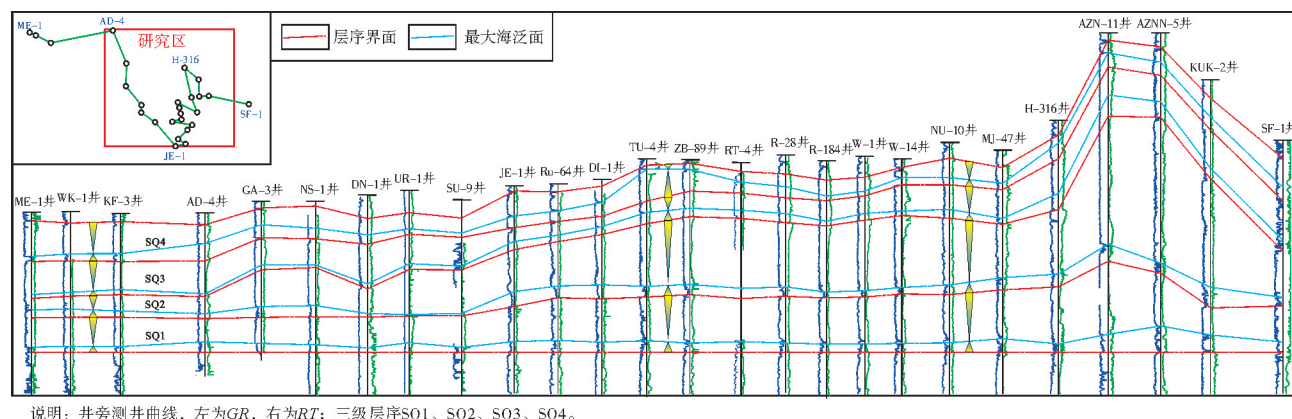


图 11 两伊地区塞诺曼阶一下土伦阶层序格架

Fig. 11 Sequence framework of Cenomanian-Lower Turonian in Iraq and Iran

研究区主要位于 Amara 隆起,向西北临近 Najaf 盆地,层序旋回中的强制海退楔体系域和低位前积楔体系域不甚发育,主要发育海侵体系域和高位体系域;高位体系域地层沉积厚度较大,根据碳酸盐沉积样式分为早期和晚期。SQ1 层序主体处于深水沉积背景:海侵体系域,Amara 隆起和 Najaf 盆地水体均较深,沉积速率较低(图 12a);高位体系域,水体变浅,浅滩沉积向盆地进积,Amara 隆起演化为高能礁滩相,沉积速率高于研究区西北部(图 12b),随着海平面的下降,礁滩规模不断增大(图 12c)。SQ2 层序至 SQ4 层序处于浅水背景。SQ2 层序海侵体系域,深水盆地发育于研究区西北部,沉积速率较低,研究区以大规模斜坡相为主,东南部发育小规模礁滩相,沉积速率较高(图 12d)。SQ2 层序高位体系域早期,相对海平面下降,礁滩和斜坡向盆地进积,深水盆地规模减小(图 12e);随着海平面持续下降,Amara 隆起构造高部位发生暴露,地层遭受风化剥蚀(图 12f),而研究区西北部以斜坡和礁滩相为主,具有较高的沉积速率。SQ3 层序海平面上升幅度较大:海侵体系域,研究区以大规模斜坡为主,西北部发育小规模深水盆地(图 12g),沉积速率较低;高位体系域早期,礁滩向盆地大规模进积,深水沉积消失,礁滩的快速侧积可形成障壁遮挡,造成 Amara 隆起内部水体交流不畅,形成局限潟湖(图 12h),沉积速率较高;随着进积作用的持续,礁滩和潟湖规模也逐渐增大(图 12i)。SQ4 层序海平

面上升:海侵体系域,研究区西北部发育小规模深水盆地,沉积速率较低,东南部 Amara 隆起依旧发育礁滩相(图 12j),沉积速率较高;高位体系域早期,礁滩和斜坡垂向加积并向盆地大规模进积,可容纳空间减小导致局部地区发生暴露剥蚀(图 12k);随着海平面的持续下降,Amara 隆起主体处于剥蚀区,而早期的斜坡和东南部构造洼地演化为礁滩(图 12l),沉积速率较高。不同油田所在的古地理位置不同,在层序旋回中具有不同的沉积速率、沉积环境和剥蚀程度,导致塞诺曼阶一下土伦阶在各油田具有不同的地层厚度、储层规模和储层品质。

5 层序旋回控储模式

层序旋回控制沉积演化和准同生成岩环境,对储层叠置结构、储层物性和孔隙结构具有重要影响,尤其是层序界面,通常控制着超高渗层或稳定隔层的发育^[58-60]。海平面下降幅度、地层暴露时间和气候条件等因素控制了地层结构和物性变化趋势^[61]。通常情况下,高级次的层序界面暴露时间较长,地层结构的改造程度高,在干旱气候条件下发生土壤化、垮塌形成角砾岩,对储层物性产生不利影响,在湿润气候条件下发生大规模的淋滤溶蚀,或局部形成碳质泥岩层;低级次层序界面暴露时间短,地层结构不被破坏,发生淋滤改造可形成优质的储层。以伊拉克东南部碳酸盐缓坡中的潟湖和礁滩为例,说明层序旋回对储层的控制^[62-64](图 13)。

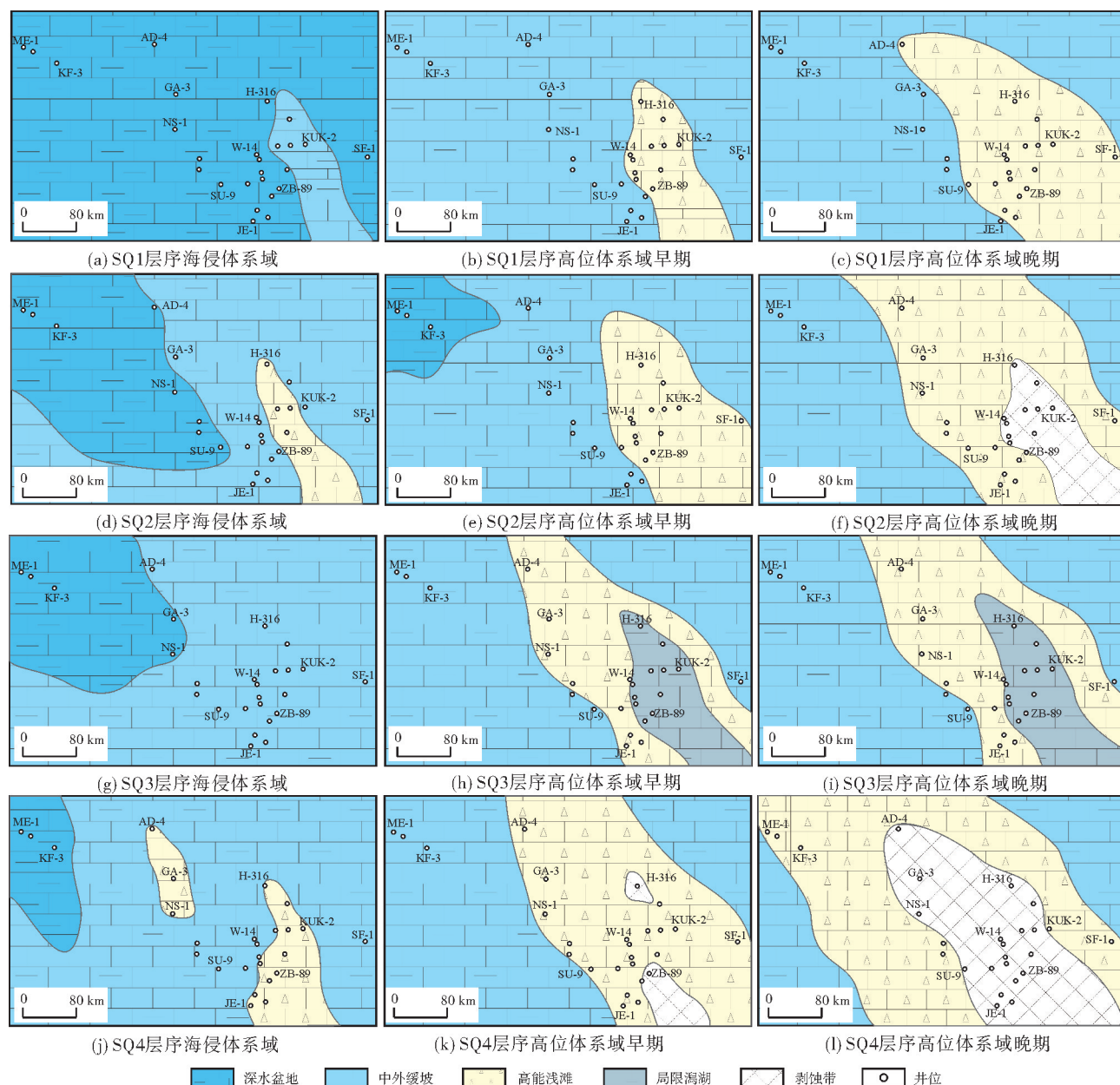


图12 伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶层序旋回与沉积演化

Fig. 12 Sequence cycle and sedimentary evolution of Cenomanian–Lower Turonian in southeastern Iraq

礁滩发育在构造高地,临近正常浪基面,水体开阔且水动力条件强,堆积速率较高,泥质含量低,原生粒间孔发育,原始物性通常较高。潟湖处于礁滩向陆一侧,整体位于正常浪基面之上,由于受礁滩阻挡,水体相对局限,水动力条件较弱,生物扰动现象比较普遍,泥质含量较高,孔隙以基质微孔为主,后期溶蚀作用形成铸模孔、体腔孔等次生孔隙,储层物性以中高孔中低渗为主(图13a)。海平面升降驱动沉积相迁移演化:海侵体系域,礁滩退积上覆于潟湖沉积;高位体系域,潟湖进积上覆于礁滩

沉积。不同物性和微观结构的沉积频繁交替变化,导致储层具有强非均质性。当海平面小幅度下降,处于构造高部位的礁滩发生暴露,而处于构造低洼部位的潟湖依旧处于海水环境。在湿润气候条件下礁滩处于大气淡水环境,顶部发生淋滤溶蚀,但地层结构未被破坏,而溶蚀作用形成大量次生孔隙且增加了孔隙的连通性,储层物性进一步提高。该类淋滤溶蚀面通常对应四级或高频层序界面,在水体较深情况下,三级层序也可发育,如伊拉克东南部SQ1层序顶界面,SQ1层序和SQ2层序内的四级

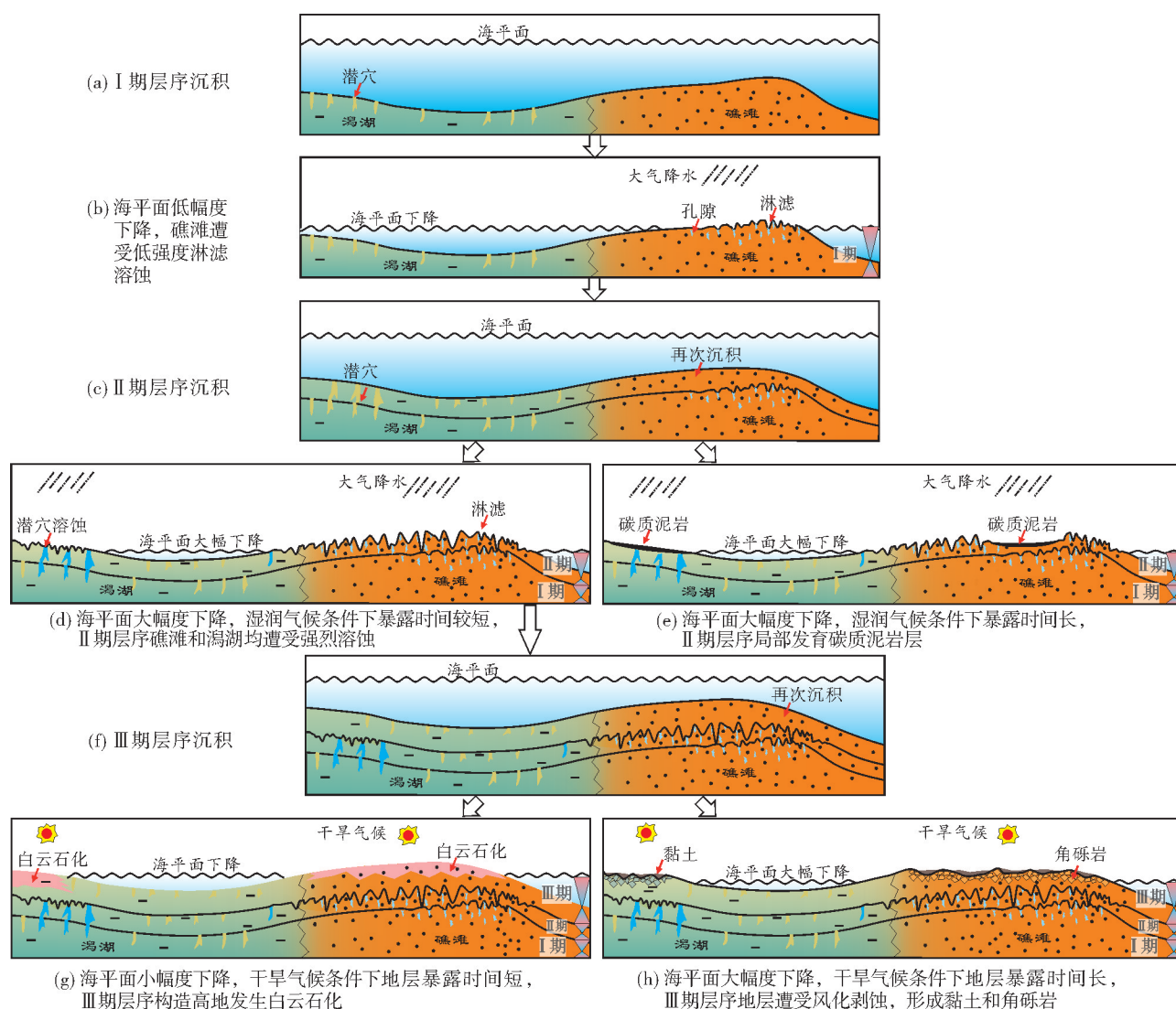


图 13 伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶层序控储模式

Fig. 13 Model of sequence controlling reservoir of Cenomanian-Lower Turonian in southeastern Iraq

层序界面均为该类成因;潟湖在该阶段通常未遭受明显溶蚀改造(图 13b)。

海平面上升,Ⅱ期层序开始,碳酸盐再次沉积,潟湖中生物扰动充分,局部地层被生物钻穿,两期潜穴互相连通(图 13c)。当海平面大幅度下降(图 13d),地层发生短期暴露,在湿润气候条件下礁滩和潟湖均处于大气淡水环境:礁滩原始物性较好,溶蚀性流体运移范围广,形成厚层优质储集层,如伊拉克东南部 SQ2 层序顶部即遭受强烈淋滤溶蚀,是有利储层和高渗层发育的重要层段;潟湖原始物性差,遭受溶蚀后,物性得到改善,且不同期次的潜穴互相溶蚀连通^[65],形成大规模低能沉积储集层(图 13d),伊拉克东南部 H 油田 SQ3 层序中大规模

的潟湖相储层便是多期快速强溶蚀叠加形成。当海平面大幅度下降,若地层暴露时间较长,在潮湿气候条件下潟湖和滩体之间的低洼处发育植被,植被死亡腐烂并发生淤泥化,随后被快速埋藏,有机质逐渐发生煤化,形成碳质泥岩^[66](图 13e)。碳质泥岩物性较差,但发育范围较广,空间可对比性强,油藏开发中可作为稳定的隔层。

当海平面再次上升,Ⅲ期层序开始,碳酸盐再次沉积,早期地层脱离沉积界面并经历埋藏压实(图 13f)。当海平面再次小幅度下降(图 13g),潟湖边缘和礁滩发生短期暴露,在干旱气候条件下发生蒸发白云石化作用而形成薄层白云岩,伊拉克东南部 M 油田 SQ3 层序顶界面白云岩地层即属于该类成

因。若地层长期暴露,在干旱气候条件下遭受风化剥蚀,地层结构被强烈破坏,形成角砾岩或发生土壤化(图13h),伊拉克东南部K140层序顶部不整合面即为此成因。

整体来看,层序旋回对储层的改造方式和改造程度受海平面下降幅度、地层暴露时间和气候条件的影响。

6 塞诺曼阶一下土伦阶层序研究存在的问题

(1)油田层序研究与区域层序衔接不足。区域层序以高级次的层序界面界定,层序格架可比性较强,不确定性低;具体油田目的层层序划分以服务于油藏开发为目的,层序划分注重精细化,层序划分期次与级次较多。当两者衔接不足,则会出现区域层序格架与具体油田层序相矛盾,主要表现为同级次层序期次不同,不同级次层序混用,如油田中将四级层序误判为三级层序,与区域上的三级层序期次不同。油田层序划分应当在区域地层格架的控制下开展。

(2)层序划分受地层命名束缚。研究区不同油田的地层命名不同,导致相同名称的地层非同期沉积,而同期沉积地层具有不同名称的情况非常普遍。层序划分过程中,切忌盲目将同名称地层作为同沉积等时单元。层序划分要突破地层名称的束缚,结合地震响应、测井特征及岩心资料,通过识别关键层序界面,建立等时地层格架。

(3)层序划分存在极端惯性思维。层序划分中存在“以优质储层划分层序”的本末倒置现象,存在“遇优质储层必为层序界面”“遇强溶蚀必为层序界面”“遇高能相带必为层序界面”“遇低伽马低密度必为层序界面”等错误思维,降低了“以层序指导有利储层预测”的应用价值。层序界面处通常是有利储层的发育位置,但也会发育隔层或差储层,储层品质与层序旋回并非线性对应关系。

(4)自旋回和异旋回易混淆。层序地层学所涉及的旋回属于异旋回沉积,受构造、海平面和气候等因素控制。自旋回受沉积水动力条件控制,如河道的二元结构、滩体反韵律等。伊拉克东南部塞诺曼阶一下土伦阶中发育厚层反韵律生物碎屑滩和厚层正韵律潮道,单滩体和单潮道的韵律均属于自旋回沉积,当层序划分精度达到储层级别时应注意

区分,以便更好地服务于储层预测和对比。

(5)层序研究与油藏开发的结合不够。伊拉克东南部油田处于全面注水阶段,巨厚碳酸盐岩油藏基于层序的构型研究较少。层序旋回控制了储层叠置关系和平面展布,是造成巨厚生物碎屑灰岩储层非均质性的的重要因素,层序界面是有利储层和稳定隔层的主要发育位置,层序构型研究对于剩余油挖潜、高渗层利用与规避、开发层系划分、井网优化部署和调整具有重要意义。

7 研究展望

(1)构建层序等时格架,将伊拉克东南部不同油田不同名称的地层建立成因联系,奠定区域地质研究的基础;总结区域地质规律,解释不同油田地层厚度、储层特征和储层发育规模存在差异的主控因素,为各油田之间的成功经验推广和借鉴提供依据;对于研究资料匮乏的区块,可通过类比具有成因联系的成熟区块,获得可靠性较高的地质认识。

(2)深化层序控储认识。层序旋回不但控制了沉积作用,还对准同生溶蚀具有重要影响。生物碎屑灰岩富含易溶型生物碎屑,准同生期溶蚀充足是次生孔隙形成的关键。准同生溶蚀受生物碎屑含量、海平面变化幅度、暴露时间及流体溶蚀性的影响,不同因素的复杂耦合控制了储层的岩性、物性和微观结构。准确把握生物碎屑灰岩对层序旋回的响应特征,为储层评价和有利储层预测提供依据。

(3)深化层序构型研究,助力均衡注水开发。层序内部相序为渐变,储层具有成因联系;层序界面处可形成稳定的隔层,或存在巨大的渗透率级差。层序旋回可指导开发层系的划分,对巨厚复杂油气藏非均质性实现精细化降维,将巨厚油藏划分成多个开发层系,每个层系储层特征不同,而层系内部储层相对均质,对每个层系实施针对性的开发策略,从“一油藏一策略”细化至“一层系一策略”,达到理想的开发效果。

参考文献

- [1] 朱日祥, 张水昌, 万博, 等. 新特提斯域演化对波斯湾超级含油气盆地形成的影响[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 1-11.
ZHU Rixiang, ZHANG Shuichang, WAN Bo, et al. Effects of Neo-Tethyan evolution on the petroleum system of Persian Gulf Superbasin [J]. Petroleum exploration and development, 2023, 50(1): 1-11.

- [2] 古强, 邢凤存, 文娇, 等. 碳酸盐工厂研究进展[J]. 沉积学报, 2024, 42(4): 1128–1149.
GU Qiang, XING Fengcun, WEN Jiao, et al. Research progress on carbonate factory[J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2024, 42(4): 1128–1149.
- [3] 颜佳新, 孟琦, 王夏, 等. 碳酸盐工厂与浅水碳酸盐岩台地: 研究进展与展望[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 232–253.
YAN Jiaxin, MENG Qi, WANG Xia, et al. Carbonate factory and carbonate platform: progress and prospect[J]. *Journal of palaeogeography*, 2019, 21(2): 232–253.
- [4] 张宁宁, 何登发, 孙衍鹏, 等. 全球碳酸盐岩大油气田分布特征及其控制因素[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 54–65.
ZHANG Ningning, HE Dengfa, SUN Yanpeng, et al. Distribution patterns and controlling factors of giant carbonate rock oil and gas fields worldwide[J]. *China petroleum exploration*, 2014, 19(6): 54–65.
- [5] 周长征, 张庆春, 杨沛广, 等. 美索不达米亚盆地成藏主控因素分析[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3): 296–301.
ZHOU Changqian, ZHANG Qingchun, YANG Peiguang, et al. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation in Mesopotamia Basin[J]. *Petroleum geology & experiment*, 2013, 35(3): 296–301.
- [6] SADOONI F N, AQRAWI A A M. Cretaceous sequence stratigraphy and petroleum potential of the Mesopotamian Basin, Iraq [M]//ALSHARHAN A S, SCOTT R W. Middle East models of Jurassic/Cretaceous carbonate systems. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2000: 315–334.
- [7] 宋新民, 李勇, 李峰峰, 等. 中东巨厚复杂碳酸盐岩油藏分层系均衡注水开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(3): 578–587.
SONG Xinmin, LI Yong, LI Fengfeng, et al. Separate-layer balanced waterflooding development technology for thick and complex carbonate reservoirs in the Middle East[J]. *Petroleum exploration and development*, 2024, 51(3): 578–587.
- [8] AHMAD K I, HUSSAIN S A, AL-OBAIDI M. Paleogeographic reconstruction of Upper Cretaceous, black shale succession, Northeastern Iraq using geochemical proxies to indicate paleoredox and paleoenvironment conditions[J]. *Diyala journal for pure science*, 2018, 14(3): 237–264.
- [9] WANG Huan, SHI Kaibo, MA Yongsheng, et al. Control of depositional and diagenetic processes on the reservoir properties of the Mishrif Formation in the AD Oilfield, central Mesopotamian Basin, Iraq [J]. *Marine and petroleum geology*, 2021, 132: 105202.
- [10] AQRAWI A A M, GOF J C, HORBURY A D, et al. The petroleum geology of Iraq [M]. Beaconsfield: Scientific Press Ltd., 2010.
- [11] SHERWANI G H M, AQRAWI A A M. Lithostratigraphy and environmental considerations of Cenomanian–Early Turonian shelf carbonates (Rumaila and Mishrif Formation) of Mesopotamian Basin, Central and Southern Iraq (abstract) [J]. *AAPG bulletin*, 1987, 71: 5.
- [12] SHARLAND P R. Arabian Plate sequence stratigraphy [M]. Manama: Gulf PetroLink, 2001.
- [13] BROMHEAD A D, VAN BUCHEM F S P, SIMMONS M D, et al. Sequence stratigraphy, palaeogeography and petroleum plays of the Cenomanian–Turonian succession of the Arabian Plate: an updated synthesis[J]. *Journal of petroleum geology*, 2022, 45(2): 119–161.
- [14] 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.
- [15] RAZIN P, TAATI F, VAN BUCHEM F S P. Sequence stratigraphy of Cenomanian–Turonian carbonate platform margins (Sarak Formation) in the high Zagros, SW Iran: an outcrop reference model for the Arabian Plate[J]. *Geological Society, London, special publications*, 2010, 329(1): 187–218.
- [16] AL-ZAIDY A A H, AL SHWALIAY H S A. Sequence stratigraphy of the Cenomanian–Early Turonian cycle in the selected wells, Southeastern Iraq [J]. *Iraqi journal of science*, 2018, 59(3C): 1626–1635.
- [17] 李峰峰, 叶禹, 郭睿, 等. 伊拉克东南部白垩系塞诺曼阶一下土伦阶下部沉积微相与沉积模式[J]. 海相油气地质, 2022, 27(1): 33–44.
LI Fengfeng, YE Yu, GUO Rui, et al. Microfacies and sedimentary model of the Cretaceous Cenomanian–Lower Turonian in Southeastern Iraq [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2022, 27(1): 33–44.
- [18] MEHRABI H, RAHIMPOUR-BONAB H. Paleoclimate and tectonic controls on the depositional and diagenetic history of the Cenomanian–Early Turonian carbonate reservoirs, Dezful Embayment, SW Iran [J]. *Facies*, 2014, 60(1): 147–167.
- [19] FAROUK S, JAIN S, HOSNY A, et al. Cenomanian–Turonian facies, sequence stratigraphy and sea-level changes from east-central Sinai (Egypt) [J]. *Cretaceous research*, 2021, 123: 104777.
- [20] JABALLAH J, NEGRA M H, REIJMER J J G. Middle Cenomanian–Turonian sequence stratigraphy of central-southern Tunisia: regional and global control on depositional patterns [J]. *Cretaceous research*, 2020, 111: 104446.
- [21] MAHDI T A, AQRAWI A A M. Role of facies diversity and cyclicity on the reservoir quality of the mid-Cretaceous Mishrif Formation in the southern Mesopotamian Basin, Iraq [M]//ARMITAGE P J, BUTCHER A R, CHURCHILL J M, et al. Reservoir quality of clastic and carbonate rocks: analysis, modelling and prediction. England: Geological Society of London, 2018: 85–105.
- [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 oil field, Iraq [J]. *Acta petrolei sinica*, 2013, 34(5): 843–852.
- [23] 李峰峰, 郭睿, 刘立峰, 等. 伊拉克 M 油田白垩系 Mishrif 组层序构型及储层展布[J]. 沉积学报, 2020, 38(4): 838–850.
LI Fengfeng, GUO Rui, LIU Lifeng, et al. Sequence architec-

- ture and reservoir distribution of the Cretaceous Mishrif Formation in M Oilfield, Iraq [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2020, 38(4): 838–850.
- [24] 衣丽萍, 许家铨, 韩海英, 等. 基于沉积相-岩石类型控制的生物碎屑灰岩油藏三维地质建模方法研究: 以伊拉克H油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(2): 150–162.
- YI Liping, XU Jiacheng, HAN Haiying, et al. Research on 3D geological modeling method of bioclastic limestone oil reservoir controlled by sedimentary facies and rock type: a case study of the Cretaceous Mishrif Formation in H Oilfield, Iraq [J]. *China petroleum exploration*, 2022, 27(2): 150–162.
- [25] LAZIM A A, ISMAIL M J, MAHDI M M. High resolution sequence stratigraphy of the Mishrif Formation (Cenomanian–Early Turonian) at Zubair Oilfield (Al–Rafdhiah dome), Southern Iraq [J]. *Petroleum research*, 2024, 9(1): 61–71.
- [26] 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, an oilfield in the Middle East [J]. *Geological journal of China universities*, 2021, 27(4): 432–443.
- [27] 常少英, 李昌, 陈娅娜, 等. 海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展及应用实效[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(1): 22–34.
- CHANG Shaoying, LI Chang, CHEN Yana, et al. Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2020, 25(1): 22–34.
- [28] 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.
- [29] 李峰峰, 宋新民, 郭睿, 等. 厚层生物碎屑灰岩油藏隔夹层特征及成因: 以中东地区M油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 853–864.
- LI Fengfeng, SONG Xinmin, GUO Rui, et al. Characteristics and genesis of interlayers in thick bioclastic limestone reservoirs: a case study of Cretaceous Mishrif Formation of the M Oilfield in the Middle East [J]. *Acta petrolei sinica*, 2021, 42(7): 853–864.
- [30] 常嘉, 陈世悦, 鄢继华. 淄博博山地区晚古生代煤系层序地层与聚煤作用[J]. *沉积学报*, 2019, 37(5): 968–980.
- CHANG Jia, CHEN Shiyue, YAN Jihua. Sequence stratigraphy and coal accumulation in Late Paleozoic coal-bearing strata in Zibo Boshan area [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2019, 37(5): 968–980.
- [31] 彭格林, 张则有, 伍大茂. 泥炭与煤形成环境对比研究现状[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 247.
- PENG Gelin, ZHANG Zeyou, WU Damao. The study status of correlation of peat with coal forming environment [J]. *Advance in earth sciences*, 1999, 14(3): 247.
- [32] 李增学, 吕大伟, 王东东, 等. 多元聚煤理论体系及聚煤模式[J]. *地球学报*, 2015, 36(3): 270–281.
- LI Zengxue, LV Dawei, WANG Dongdong, et al. The multiple coal-forming theoretical system and its model [J]. *Acta geoscientica sinica*, 2015, 36(3): 270–281.
- [33] LI Fengfeng, LI Lei, CHEN Jiaheng. Characteristics of high flow zones and a balanced development strategy of a thick bioclastic limestone reservoir in the Mishrif Formation in X Oilfield, Iraq [J]. *Energies*, 2023, 16(3): 1451.
- [34] SCHOLLE P A, ULMER–SCHOLLE D S. A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2003.
- [35] 代明月, 尹忠雷, 齐永安, 等. 华北板块南缘寒武系苗岭统碳酸盐岩硬底: 缺乏生物扰动背景下的早期海底胶结作用[J]. *地质学报*, 2024, 98(7): 2041–2052.
- DAI Mingyue, YIN Zhonglei, QI Yongan, et al. Marine carbonate hardgrounds from the Cambrian Miaolingian in southern of North China Plate: early seafloor cementation in the absence of bioturbation [J]. *Acta geologica sinica*, 2024, 98(7): 2041–2052.
- [36] CHRIST N, IMMENHAUSER A, WOOD R A, et al. Petrography and environmental controls on the formation of Phanerozoic marine carbonate hardgrounds [J]. *Earth–science reviews*, 2015, 151: 176–226.
- [37] NOÉ S, TITSCHACK J, FREIWALD A, et al. From sediment to rock: diagenetic processes of hardground formation in deep–water carbonate mounds of the NE Atlantic [J]. *Facies*, 2006, 52(2): 183–208.
- [38] WILSON M A, PALMER T J. A review of evolutionary trends in carbonate hardground communities [J]. *The paleontological society special publications*, 1990, 5: 137–152.
- [39] BRANDANO M, MATEU–VICENS G, GIANFAGNA A, et al. Hardground development and drowning of a Miocene carbonate ramp (Latium–Abruzzi): from tectonic to paleoclimate [J]. *Journal of Mediterranean earth sciences*, 2014, 1: 47–56.
- [40] FLÜGEL E. Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application [M]. Berlin: Springer, 2010.
- [41] 徐亮, 陈天虎, 高扬, 等. 安徽巢湖三叠系东马鞍山组鸟眼构造成因研究[J]. *地学前缘*, 2020, 27(4): 294–301.
- XU Liang, CHEN Tianhu, GAO Yang, et al. Genesis of bird’s-eye structure in the Triassic Dongmaanshan Formation in Chaohu, Anhui Province [J]. *Earth science frontiers*, 2020, 27(4): 294–301.
- [42] 郭沫贞, 文川江, 苑国辉, 等. 三塘湖盆地牛东石炭系火山岩示顶底构造特征、成因及地质意义[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(3): 74–78.
- GUO Mozhen, WEN Chuanjiang, YUAN Guohui, et al. Features, origin and geological significance of geopetal structures in Carboniferous volcanic rocks in Niudong Block, Santanghu Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2010, 15(3): 74–78.

- [43] SLOSS L L, KRUMBEIN W C, DAPPLES E C. Integrated facies analysis[J]. Memoir of the Geological Society of America, 1949, 39(1): 91-123.
- [44] VAIL P R, MITCHUM R M, THOMPSON S. Seismic stratigraphy and global change in sea level, part 3: relative change of sea level from coastal onlap[M]//PAYTON C E. Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 63-81.
- [45] POSAMENTIER H W, MORRIS W R. Aspects of the stratal architecture of forced regressive deposits[J]. Aspects of the stratal architecture of forced regressive deposits, 2000, 172(1): 19-46.
- [46] WAGONER J C V, MITCHUM R M, CAMPION K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1990.
- [47] 李宝庆. 现行层序模型及其标准化[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 134-140.
LI Baoqing. Current models and standardization of sequence stratigraphy[J]. Petroleum geology and experiment, 2015, 37(2): 134-140.
- [48] HUNT D, TUCKER M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall[J]. Sedimentary geology, 1992, 81(1/2): 1-9.
- [49] HUNT D, TUCKER M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall-reply [J]. Sedimentary geology, 1995, 95(1/2): 147-160.
- [50] 李绍虎, 贾丽春. 层序地层学四分模型的非周期性与时序边界调整[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 105-117.
LI Shaohu, JIA Lichun. Adjustment to non-periodicity and sequence boundary in four-divided model of sequence stratigraphy[J]. Acta sedimentologica sinica, 2011, 29(1): 105-117.
- [51] CATUNEANU O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [52] GALLOWAY W E. Genetic stratigraphic sequence in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units[J]. AAPG bulletin, 1989, 73(2): 125-142.
- [53] EMBRY A F, JOHANNESSEN E P. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada[J]. Norwegian Petroleum Society special publications, 1992, 2: 121-146.
- [54] CROSS T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation[C]//Proceeding of Northwestern European Sequence Stratigraphy Congress. Holland: Elsevier, 1994: 105-123.
- [55] POSAMENTIER H W, JERVEY M T, VAIL P R. Eustatic control on clastic deposition I-conceptual framework[M]//WILGUS C K, HASTINGS B S, POSAMENTIER H, et al. Sea-level changes: an integrated approach. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988: 109-124.
- [56] CATUNEANU O. Scale in sequence stratigraphy[J]. Marine and petroleum geology, 2019, 106: 128-159.
- [57] 陈培元. 古地貌对伊拉克米桑油田群 Mishrif组储层质量的影响[J]. 中国海上油气, 2021, 33(6): 119-129.
CHEN Peiyuan. Influence of paleogeomorphology on reservoir quality of Mishrif Formation, Missan Oilfields, Iraq[J]. China offshore oil and gas, 2021, 33(6): 119-129.
- [58] 韩海英, 田中元, 徐振永, 等. 伊拉克 W 油田白垩系生物碎屑灰岩储层高渗层成因及分布规律[J]. 海相油气地质, 2022, 27(3): 261-270.
HAN Haiying, TIAN Zhongyuan, XU Zhenyong, et al. Genesis and distribution of high permeable streaks of the Cretaceous bioclastic limestone reservoir in W Oilfield, Iraq[J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(3): 261-270.
- [59] 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.
- [60] 余义常, 宋新民, 林敏捷, 等. 伊拉克 H 油田 Mishrif组下段隔夹层特征及开发策略[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 1-12.
YU Yichang, SONG Xinmin, LIN Minjie, et al. Characteristics and development strategies of interlayers in the lower member of Mishrif Formation in H Oilfield, Iraq[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2023, 47(2): 1-12.
- [61] NEWPORT R, SEGURA M, REDFERN J, et al. The interaction of tectonics, climate and eustasy in controlling dolomitization: a case study of Cenomanian-Turonian, shallow marine carbonates of the Iberian Basin[J]. Sedimentology, 2020, 67(5): 2223-2247.
- [62] 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.
- [63] 毛先宇, 宋本彪, 田昌炳. 层序界面控制下差异早成岩作用对碳酸盐岩储层的影响: 以伊拉克 R 油田 Mishrif组为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 344-352.
MAO Xianyu, SONG Benbiao, TIAN Changbing. Effect of differential early diagenesis controlled by sequence boundary on carbonate reservoirs: a case study of Mishrif Formation in R Oilfield, Iraq[J]. Fault-block oil and gas field, 2022, 29(3): 344-352.
- [64] 陈培元, 段晓梦, 郭丽娜, 等. 伊拉克米桑油田群中白垩统 Mishrif组岩溶特征及作用模式[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 46-52.
CHEN Peiyuan, DUAN Xiaomeng, GUO Lina, et al. Karst characteristics and karstification model in the Mid-Creta-

- ceous Mishrif Formation of Missan Oilfields, Iraq [J]. China offshore oil and gas, 2017, 29(2): 46–52.
- [65] 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.
- [66] 常嘉, 陈世悦, 王琼, 等. 陆表海背景下障壁海岸体系沉积层序及聚煤模式: 以渤海湾地区晚古生代太原组为例[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 123–133.
- CHANG Jia, CHEN Shiyue, WANG Qiong, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation of barrier coastal system under epicontinental-sea environment: a case study of the Late Paleozoic Taiyuan Formation in Bohai Bay Area [J]. Coal geology & exploration, 2021, 49(4): 123–133.

编辑:董庸

Research progress on the bioclastic limestone sequence of Cretaceous Cenomanian–Lower Turonian in southeastern Iraq

LI Fengfeng, REN Lixin, LI Lei, WAN Yang, CHEN Haowei

Research Institute of Petroleum Exploration & Development

Abstract: The Cenomanian–Lower Turonian in southeastern Iraq is characterized by thick bioclastic limestone, with complex stratigraphic structure and nested sequences of different levels. The sequence recognition is important for stratigraphic division and reservoir correlation. Thick bioclastic limestone reservoir is commonly developed by separated waterflooding, and the study of sequences can lay a geological foundation for the division of development units. Taking six giant oilfields as example, all of which developed thick bioclastic limestone as main pay formations in the Cenomanian–Lower Turonian, the sequence schemes of Cenomanian–Lower Turonian are summarized. This paper adopts the scheme of dividing the Cenomanian–Lower Turonian into four of a third-order sequence corresponding to the four maximum flooding surface (K120, K130, K135, and K140). Mechanisms and characteristics of key sequence boundary such as unconformities, leaching and dissolution, thin carbonaceous mudstone, facies transition, facies mutation, maximum flooding surface, and hardground are summarized. Southeastern Iraq is located in the northeastern margin of the Arabian Plate, and during the Cenomanian–Early Turonian it is in a stable passive continental margin environment. This paper uses the quadratic model of classical stratigraphy to study the sequences of thick bioclastic limestone. According to the sequence theory, the sequence model of slightly rimmed carbonate ramp is established based on the depositional setting of Cenomanian–Lower Turonian. Different paleogeographic locations have different water depths during the process of sea-level rise and fall, so carbonate deposition rates and petrological features have different sensitivities to sea-level changes at different location. The water background and paleogeography control the sedimentation of different oilfields in southeastern Iraq. The sequence and depositional evolution are therefore revealed. Through elucidating the mechanism of sequence, and the effects of sequence order and sequence boundary on bioclastic limestone reservoirs are clarified. The effects of sea-level fall magnitude, exposure span and climate on formation structure, lithology and physical properties are illustrated. Typically, the high-order sequences boundary exposes for a long time, and the stratigraphy is weathered to a high degree. In arid climates, soilization and breccia collapse occur, and an unconformable surface can be formed, which is not conducive to improve the physical properties of the reservoir. In humid climates, large-scale leaching and dissolution occur, or thin carbonaceous mudstone can be formed locally. The exposure time of the low-order sequences boundary is short, and the leaching and dissolution occurs without destroying the strata structure, which can form high-quality reservoirs. Finally, problems and development trend in the sequence study of Cenomanian–Early Turonian in southeastern Iraq are pointed out, providing a reference for the separated waterflooding development of thick bioclastic limestone reservoir.

Key words: bioclastic limestone; sequence; sedimentary evolution; sequence control reservoir; Cenomanian–Lower Turonian; southeastern Iraq

LI Fengfeng, First author: Senior Engineer, mainly engaged in carbonate sedimentology and reservoir geology of carbonate rocks. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: lff1522188426@petrochina.com.cn

LI Lei, Corresponding author: Engineer, mainly engaged in reservoir development geology. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: lilei12@petrochina.com.cn