

伊拉克艾哈代布油田上白垩统 Khasib 组 生物扰动对储层非均质性的影响

王根久¹, 宋新民¹, 刘波², 石开波²

¹ 中国石油勘探开发研究院; ² 北京大学地球与空间学院

摘要 生物扰动可改变碳酸盐岩原始沉积结构,影响后期成岩作用,导致生物潜穴与基质间存在物性差异,进而增强碳酸盐岩储层的非均质性。在大量岩心、薄片观察和点渗透率等多种资料分析的基础上,对伊拉克艾哈代布油田上白垩统 Khasib 组 Kh2 段生物扰动遗迹组构类型及其对储层非均质性的影响开展研究。结果表明:① Kh2 段发育海生迹 (*Thalassinoides*)、蛇形迹 (*Ophiomorpha*)、古藻迹 (*Palaephycus*) 等 3 种主要遗迹组构。*Thalassinoides* 潜穴外壁光滑,不具有衬壁结构,呈三维网状连通管形,单个潜穴直径为 5~25 mm;*Ophiomorpha* 潜穴呈“T”形管状,多呈水平分布,部分发育泥质衬壁结构,直径为 5~15 mm;*Palaephycus* 潜穴呈圆形—椭圆形的轻微弯曲一直管,直径为 2.5~10 mm,主要呈水平分布,不具有衬壁结构。② 由于物性差异导致的含油性差异,岩心具有明显的斑块状特征,同时不同含油级别区域分布与生物遗迹组构的形态及空间展布相关,这表明 Kh2 段储层非均质性主要受生物扰动作用的控制。③ Kh2 段不同沉积环境下发育不同的生物扰动遗迹组构类型,导致潜穴与基质的原始组构及沉积介质化学性质发生变化,形成潜穴与基质之间的孔隙结构差异,在此基础上,叠加后期成岩差异(胶结、溶蚀、压实等),进而导致 Kh2 段不同的储层非均质性类型。*Thalassinoides* 遗迹组构主要发育于中缓坡绿藻生屑滩,潜穴内受到准同生溶蚀而形成大量铸模孔,基质部分受到早期强烈的胶结作用。*Ophiomorpha* 遗迹组构主要发育于中缓坡中—低能浅滩,潜穴内因颗粒充填而发育粒间孔,基质部分灰泥含量高。*Palaephycus* 遗迹组构主要发育于中缓坡颗粒滩,潜穴内颗粒含量高,且早期胶结作用受到抑制;随着海平面下降,大气淡水优先进入潜穴通道进行溶蚀。

关键词 生物扰动; 生物潜穴; 遗迹组构; 储层非均质性; 碳酸盐岩; Khasib 组; 伊拉克

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

0 前言

生物扰动为生物体与沉积物之间的相互作用,是动植物、微生物通过混合重新分布颗粒的方式,它使沉积物变得均质或因压实、脱水、分选(生物分层)、侵位(生物沉积)、清除(生物侵蚀)等作用产生新构造^[1-3]。生物潜穴是生物在软而未固结的沉积物中形成的穴道或构造,是生物扰动作用形成的最常见的遗迹化石种类,不同潜穴的结构与构造可存在较大差异^[4-6]。当生物潜穴建立起较复杂的三维分支结构、潜穴内壁发育胶结物或被其他物质充填时,储层孔隙结构会得到改善或破坏,储层渗流能力随之发生变化,从而增强储层的非均质性^[7-10]。生物扰动作用对油气储层非均质性具有重要影响^[11-24]。迄今为止,在世界范

围内已发现了多套生物扰动储层,大多分布在北美、中东、挪威海域等地,地质时代主要集中在中生代。大量学者针对生物扰动储层开展了研究工作。加拿大阿尔伯塔大学的 Gingras 与 Pemberton 教授带领的研究团队针对北美地区中生代生物扰动遗迹组构类型及对储层的影响、三维建模开展研究,取得了一系列重要进展^[10-12],对油气勘探开发具有一定的指导意义。不同地区生物扰动的类型和作用差别较大,尤其是不同油田、不同油藏的生物扰动作用对油气生产影响差异较大。然而,现有研究多关注对生物扰动储层非均质性的刻画与表征,针对非均质性成因机理的研究相对较少;同时,有关生物扰动储层非均质性的研究多基于碎屑岩储层的开展,而对碳酸盐岩生物扰动储层的关注较少。

收稿日期: 2021-09-27; 改回日期: 2021-11-29

本文受国家科技重大专项课题“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)资助

第一作者: 王根久,高级工程师,主要从事开发地质研究工作。通信地址:100083 北京市海淀区学院路 910 信箱; E-mail: wgji@petrochina.com.cn

伊拉克艾哈代布油田上白垩统 Khasib 组生物扰动作用发育,强烈的生物扰动作用造成储层非均质性很强,导致在注水开发过程中水窜,油井含水率快速上升,油田产量下降。开展 Khasib 组生物扰动及其对储层非均质性影响的研究,对认识中东地区白垩系碳酸盐岩储层非均质性具有重要理论价值,同时对油田开发具有实际指导意义。

1 地质背景

艾哈代布油田位于伊拉克东南部,区域构造上位于阿拉伯板块北缘,受古特提斯洋及新特提斯洋开启—闭合过程影响,经历了内克拉通盆地、弧后裂陷盆地、被动陆缘及活动陆缘等4个阶段。晚白垩世,伊拉克东南部呈内陆棚—盆地相与浅水碳酸盐岩台地相共同发育的沉积格局。晚土伦期—早坎潘期,南新特提斯洋闭合并向板块边缘俯冲,由被动大陆边缘转为前陆盆地,伊拉克东南部地区由浅海碳酸盐台地演变为缓坡,发育 Khasib 组碳酸盐浅滩沉积,主要为一套绿藻生屑灰岩。

艾哈代布油田整体为 NW—SE 向平缓长轴背斜构造,背斜长轴长约 50 km,短轴宽度为 15~20 km,背斜两翼倾角小于 2° ,为一宽缓长轴背斜(图 1)。艾哈代布油田白垩系自上而下发育 4 个含油层系: Khasib 组、Mishrif 组、Rumaila 组和 Maaddud 组,其中

Khasib 组含油层分布最广,储量最大。Khasib 组岩性整体为一套含生物碎屑(简称生屑)的颗粒灰岩及泥晶灰岩,自上而下可划分为 4 个岩性段(图 2a),依次为 Kh1、Kh2、Kh3、Kh4,进一步可划分为 11 个小层。本文研究的 Kh2 段是 Khasib 组的主力产层,也是目前主要的开发层位,自上而下细分为 5 个小层,即 Kh2-1—Kh2-5。Kh2 段沉积具有横向连续性、厚度稳定的特征。

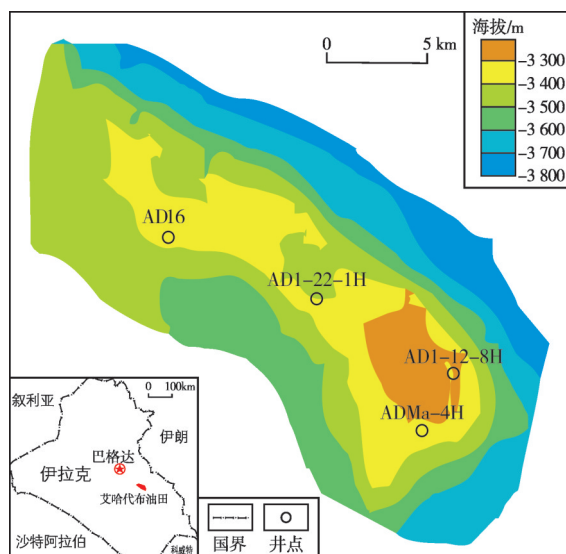
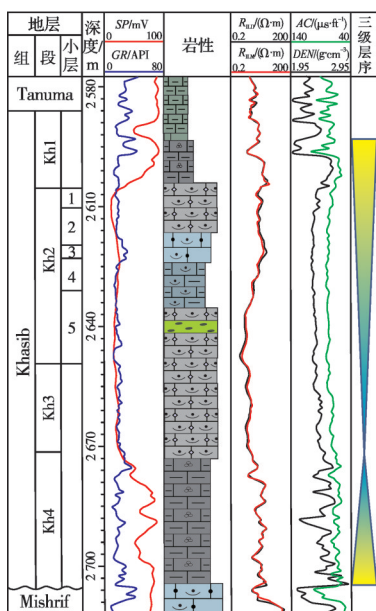
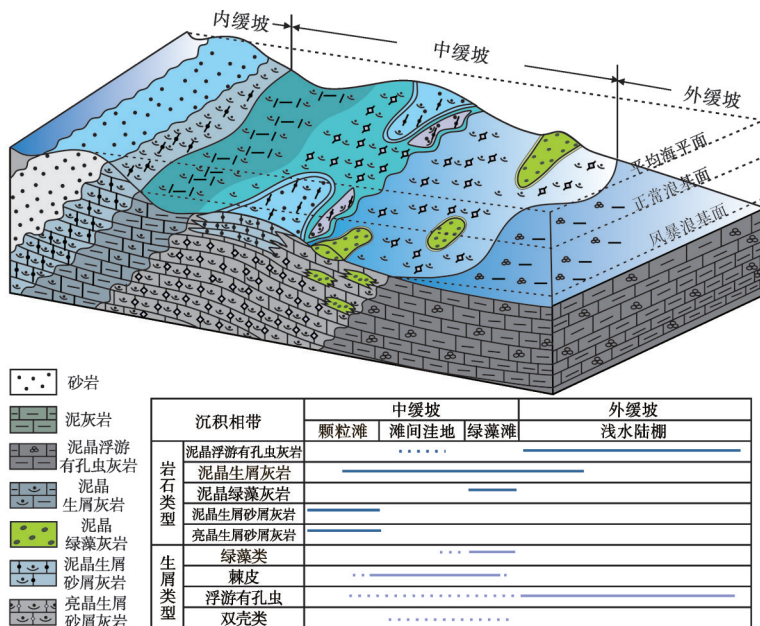


图 1 伊拉克艾哈代布油田上白垩统 Kh2 段顶面构造图

Fig. 1 Structure of top surface of Khasib Member 2 of Upper Cretaceous in AD Oilfield, Iraq



(a) Khasib 组地层综合柱状图



(b) Kh2 段沉积模式

图 2 伊拉克艾哈代布油田 Khasib 组综合柱状图及 Kh2 段沉积模式

Fig. 2 Comprehensive column of Khasib Formation and sedimentary model of Khasib Member 2 in AD Oilfield, Iraq

艾哈代布油田上白垩统塞诺曼阶—坎潘阶发育6个三级层序,主要的层序界面类型包括不整合面、最大海泛面及硬底(hardground)。Khasib组发育1个完整的三级层序(图2a),与下伏Mishrif组之间为不整合接触,界面上下测井响应特征具有明显差异。海侵体系域相当于Kh4段,岩性以泥质灰岩、浮游有孔虫灰岩为主,测井曲线具有波动起伏特征;最大海泛面对应Kh4段中部泥灰岩段,测井响应特征明显,呈明显的高GR、低电阻、低密度、高声波时差;高位体系域由Kh3段、Kh2段、Kh1段组成,岩性为浮游有孔虫灰岩、泥晶生屑灰岩、绿藻灰岩、生屑砂屑灰岩。

基于研究区取心井大量薄片资料分析,将Kh2段划分为5种主要岩石类型:泥晶浮游有孔虫灰岩、泥晶生屑灰岩、泥晶绿藻灰岩、泥晶生屑砂屑灰岩及亮晶生屑砂屑灰岩(图2b)。根据5种主要岩石类型的内在成因联系与垂向演化规律,认为Kh2段整体发育于中缓坡—外缓坡沉积环境,以中缓坡颗粒滩、滩间洼地、绿藻滩及外缓坡浅水陆棚相为主(图2b)。Kh2段的岩石类型自下而上由泥晶浮游有孔虫灰岩逐渐过渡为泥晶/亮晶生屑砂屑灰岩,反映水体逐渐变浅,水动力增强的沉积过程。

2 生物扰动类型及特征

伊拉克艾哈代布油田 Khasib 组 Kh2 段整体受到强烈的生物扰动作用,发育丰富的生物遗迹组构。根据 Kh2 段取心井岩心及薄片资料分析,共识别出3种主要遗迹组构,分别为海生迹(*Thalassinoides*)、蛇形迹(*Ophiomorpha*)以及管状古藻迹(*Paleophycus*)。

2.1 *Thalassinoides* 遗迹组构

该遗迹组构见于多种海相沉积环境,如浅滩、河口与扇三角洲、深水白垩沉积等,它分布时代广泛,从奥陶纪到全新世均有发现,造迹生物随时代不同而有所差异。二叠纪以来的 *Thalassinoides* 造迹生物与 *Ophiomorpha* 类似,以美人虾科为主^[7];古生代的则与节肢动物、蠕虫等的生命活动密切相关^[25]。*Thalassinoides* 遗迹组构在油气储层研究方面具有重要意义^[11],它具有独特的三维网状空间结构,且分布广泛,当其被物性优于基质的沉积物充填时,潜穴可转化为优势通道,从而改善储层的渗流性能。例如,世界第一大油田加瓦尔油田侏罗纪发育的致密固底层中,受到被动充填作用改造的 *Thalassinoides* 遗迹组构发育,显著改善了地层的储集与渗流性能,进而形成了高渗层(Arab-D)^[11]。

艾哈代布油田 *Thalassinoides* 遗迹组构受到油气充注的影响,潜穴与基质部分含油性不同:潜穴部分含油性较好,呈棕色—褐色;而基质部分含油性较差,颜色较浅,部分受到强烈胶结作用呈灰白色(图3a)。这使得遗迹组构形态较为清晰。*Thalassinoides* 潜穴外壁光滑,不具有衬壁结构,呈三维网状连通管形,单个潜穴直径为5~25 mm。一系列相互连通的 *Thalassinoides* 潜穴构成“T”形与“Y”形的三维管状通道,潜穴的空间连通性随生物扰动的增强而变好(图3a)。*Thalassinoides* 遗迹组构在 Kh2 段分布广泛,纵向上按小层来看,发育在 Kh2-3、Kh2-4 上部的中缓坡泥晶绿藻生屑灰岩, Kh2-2 下部、Kh2-3 上部、Kh2-4 中部的中缓坡泥晶生屑灰岩以及 Kh2-1、Kh2-3 上部的中缓坡生屑砂屑灰岩中。

2.2 *Ophiomorpha* 遗迹组构

Ophiomorpha 是一种广为人知、易于识别的遗迹化石类型,主要形成于中生代以来的高能海相沉积,具有良好的古沉积环境识别应用。通常认为 *Ophiomorpha* 的造迹生物与 *Thalassinoides* 一致,以美人虾科为代表,还有摄食泥质物与悬浮沉积物的海蛞蚌类(*Thalassinidean shrimp*)^[7]。

研究区 *Ophiomorpha* 潜穴呈直径5~15 mm的“T”形管状形态(图3b),多呈水平分布。部分 *Ophiomorpha* 潜穴具有明显的泥质衬壁结构,是造迹生物为增加潜穴的支撑性与完整性而建造。同时,部分 *Ophiomorpha* 潜穴周缘可见灰白色的碳酸盐矿物成岩晕,表明生物扰动一定程度上引起了沉积介质的物理及化学性质改变。随着扰动程度的增加, *Ophiomorpha* 潜穴由相对孤立状态转变为空间具有一定的连通性。受油气充注影响,生物潜穴与基质含油性存在差异,二者颜色存在反差,加之 *Ophiomorpha* 潜穴发育泥质衬壁,使得潜穴个体明显可辨(图3b)。该遗迹组构纵向上发育于 Kh2-1、Kh2-2 小层中缓坡浅滩沉积的生屑砂屑灰岩。

2.3 *Paleophycus* 遗迹组构

该遗迹组构发育于陆相与海相的多种沉积环境,如河流相、湖泊相、滨岸相^[7]、大陆坡^[5]、深海扇^[24]等。它在地质历史时期分布广泛,显生宙以来的各个时代均有发现。*Paleophycus* 潜穴与 *Thalassinoides* 的截面形态相近,加之二者常伴生出现,因而通常认为二者可以由同种造迹生物产生。*Paleophycus* 造迹生物主要为蠕虫状动物,如环节

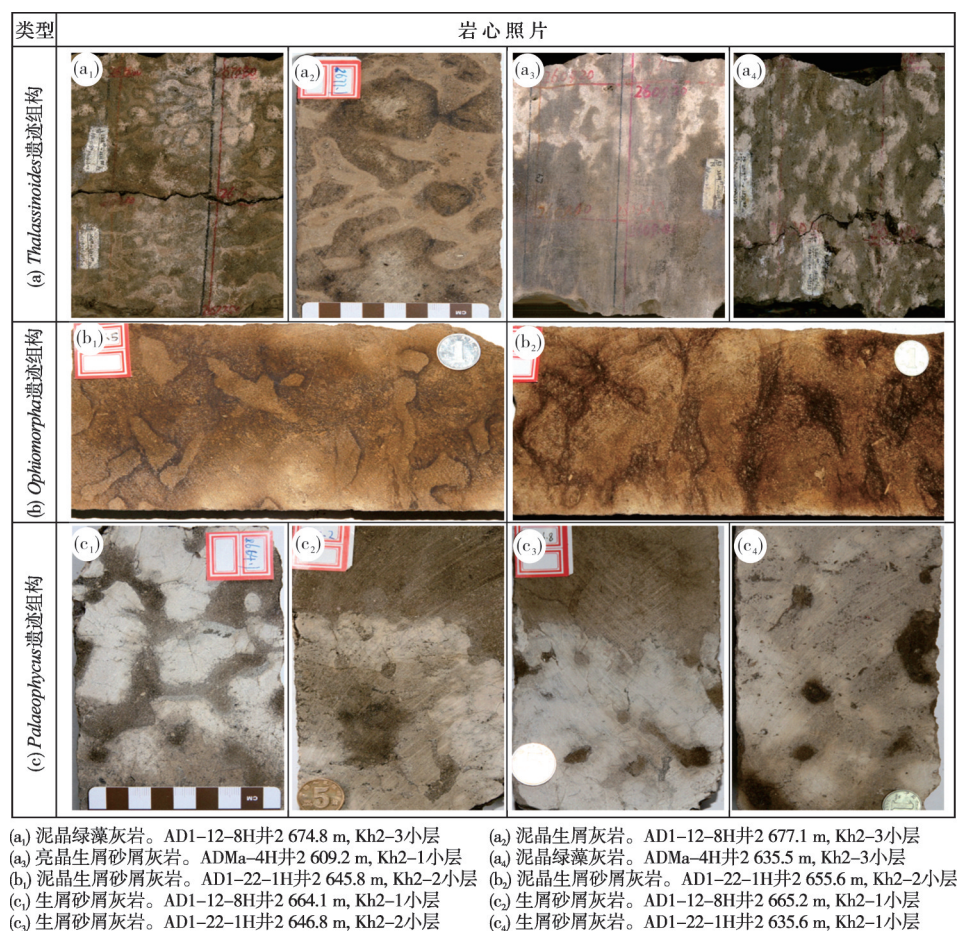


图3 伊拉克艾哈代布油田 Kh2 段生物遗迹组构类型及特征

Fig. 3 Types and characteristics of biological ichnofabrics of Khasib Member 2 in AD Oilfield, Iraq

动物和节肢动物等。

研究区 *Palaeophycus* 潜穴为截面呈圆形—椭圆形的轻微弯曲一直管,直径介于2.5~10 mm,主要呈水平分布,不具有衬壁,部分潜穴相互连通,部分相对孤立分布(图3c)。研究区 Khasib 组 *Palaeophycus* 常与 *Thalassinoides* 伴生出现,其分布同 *Thalassinoides* 具有相似规律,纵向上主要发育在 Kh2-1,在 Kh2-2 下部、Kh2-3 以及 Kh2-4 中上部均有发现。此外, *Palaeophycus* 遗迹组构亦大量出现于沉积水体相对较深的 Kh1 段生屑泥晶灰岩及泥质生屑灰岩。

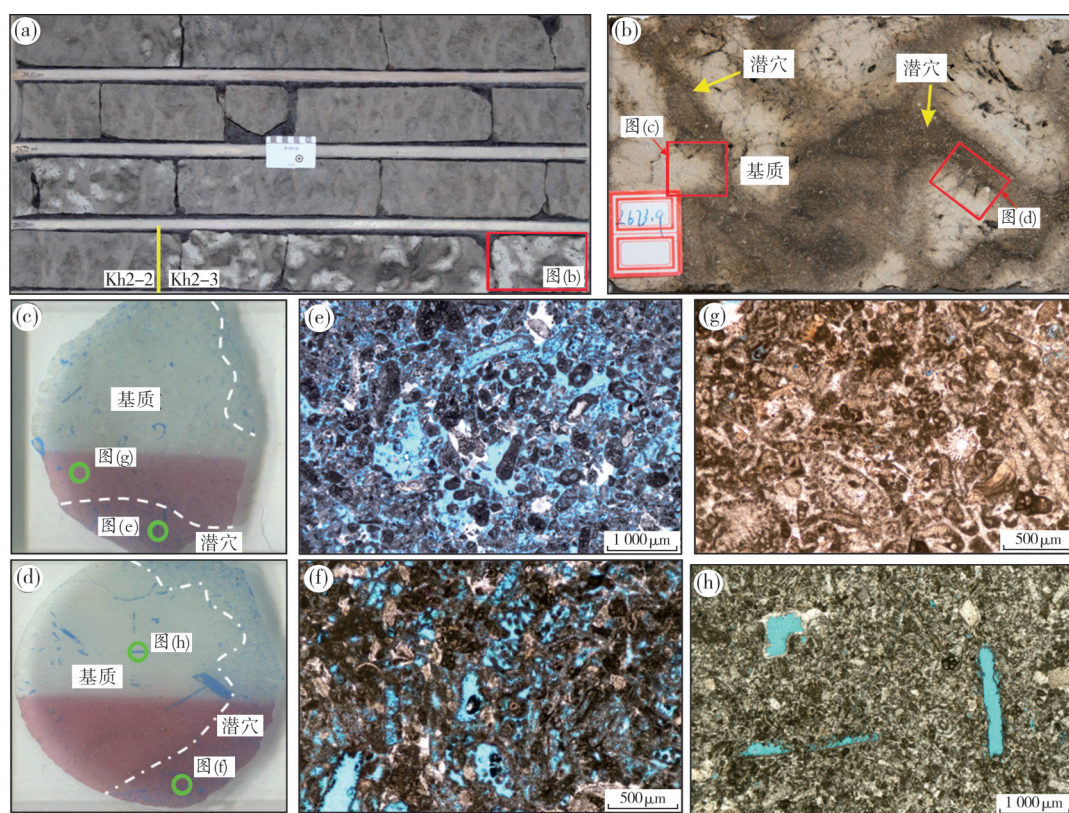
3 生物扰动储层非均质特征

岩心、薄片及物性资料表明 Khasib 组 Kh2 段储层具有强烈的非均质性,由于物性差异导致含油性的差异,岩心具有明显的斑块状特征,同时不同含油级别区域分布与生物遗迹组构的形态及空间展布相关(图3),表明 Kh2 段储层非均质性受生物扰

动作用的控制。

Kh2-3 小层广泛发育的 *Thalassinoides* 遗迹组构,潜穴部分富含油,基质部分不含油—油浸,宏观上呈斑块状发育(图3a,图4a,4b)。薄片分析表明 *Thalassinoides* 遗迹组构主要发育于泥晶绿藻灰岩段,潜穴部分绿藻含量较高,孔隙发育好,以藻类溶蚀形成的铸模孔、粒间孔、粒间溶孔为主,孔隙之间连通性好(图4e,4f);基质部分灰泥含量高、胶结作用强,孔隙发育差,以基质微孔为主,宏观孔隙发育较差,局部发育少量的藻类溶蚀形成的铸模孔,多以孤立孔为主,宏观孔隙之间相互不连通(图4g,4h)。

Ophiomorpha 遗迹组构主要发育于 Kh2-2 小层,潜穴部分含油性较好,为油浸—饱含油,基质部分含油性较差,以油迹、油斑为主(图3b)。由于 *Ophiomorpha* 遗迹组构常常具有泥质衬壁,因此沿潜穴周缘往往见沥青充填痕迹。薄片分析表明 *Ophiomorpha* 遗迹组构主要发育于生屑砂屑灰岩段,潜穴部



(a)–(b) 泥晶绿藻灰岩, *Thalassinoides* 遗迹组发育。潜穴部分富含油。AD1–22–1H 井 2 673.9 m, Kh2–3 小层, 岩心 (c)–(d) 基质、潜穴取样点 (e)–(h) 潜穴部分绿藻含量较高, 孔隙发育好, 以藻类溶蚀形成的铸模孔、粒间孔、粒间溶孔为主, 连通性好; 基质部分灰泥含量高, 孔隙发育差, 以基质微孔为主, 局部发育少量藻类溶蚀形成的铸模孔, 多为孤立孔。铸体薄片, 单偏光

图4 伊拉克艾哈代布油田 Kh2 段 *Thalassinoides* 遗迹组相关储层非均质特征

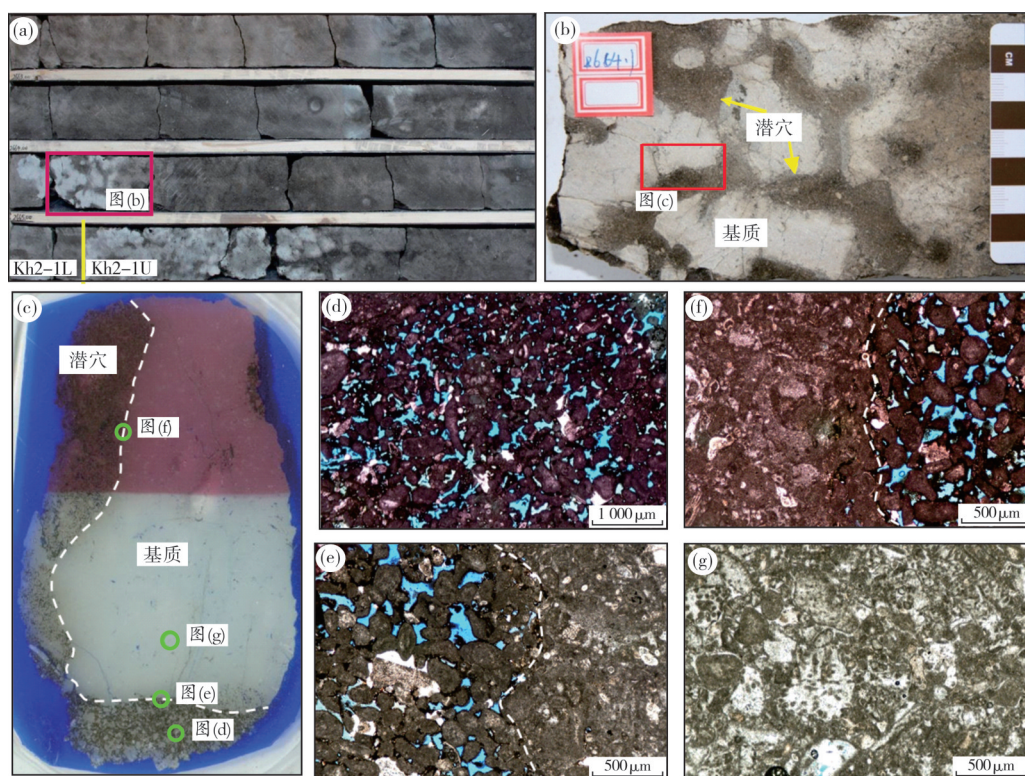
Fig. 4 Heterogeneity characteristics of *Thalassinoides* ichnofabrics-related reservoir of Khasib Member 2 in AD Oilfield, Iraq

分与基质部分呈现2种差异类型: ①潜穴与基质具有组分差异(以泥晶生屑砂屑灰岩为主)。潜穴与基质相比颗粒含量较高, 粒间孔、粒间溶孔、铸模孔发育, 孔隙连通性好; 基质部分灰泥含量高, 原始粒间孔发育较差, 以微孔为主, 孔隙连通性较差。②潜穴与基质组分相同(以亮晶生屑砂屑灰岩为主), 但基质往往受到强烈的方解石胶结, 原始粒间孔隙几乎不发育, 潜穴部分胶结程度弱, 溶蚀作用发育, 残余粒间孔、粒间溶孔发育, 孔隙连通性较好。

Palaeophycus 遗迹组主要发育于 Kh2–1 小层, 潜穴部分富含油, 基质部分不含油—油迹, 宏观上呈斑块状发育, 部分潜穴相互连通, 部分相对孤立分布(图 3c, 图 5a, 5b)。薄片分析表明 *Palaeophycus* 遗迹组主要发育于生屑砂屑灰岩及泥晶生屑灰岩段, 潜穴部分内碎屑颗粒含量较高、生屑及灰泥含量低, 胶结程度弱, 粒间孔、粒间溶孔发育, 孔隙连通性较好(图 5d—5f), 孔隙周缘往往具有残余沥青; 基质部分内碎屑含量降低、生屑及灰泥含量增高, 胶结作用增强, 粒间孔隙不发育, 局部发育少量的粒

内溶孔及铸模孔, 多以孤立孔隙为主(图 5e—5g)。

基于达西渗流定律的常规岩心渗透率测试难以对岩心尺度的强非均质性储层渗透率差异作定量分析, 而利用压力衰减特征的点渗透率测试方法可以对岩心剖面进行连续的渗透率测试, 从而实现对强非均质性储层渗透性定量研究的目的。对艾哈代布油田 Khasib 组 Kh2 段岩心剖面点的渗透率测试表明, 潜穴与基质部分的渗透率具有明显差异(图 6): *Thalassinoides* 遗迹组潜穴部分(黄色圈)渗透率介于 $(12.59 \sim 527.17) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 基质部分(绿色圈)渗透率介于 $(0.22 \sim 10.68) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 6a); *Ophiomorpha* 遗迹组潜穴部分渗透率介于 $(17.57 \sim 567.76) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 基质部分渗透率介于 $(0.19 \sim 8.43) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 6b); *Palaeophycus* 遗迹组潜穴部分渗透率介于 $(15.26 \sim 668.24) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 基质部分渗透率介于 $(0.07 \sim 26.81) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 6c)。由此可见, 生物扰动作用显著改善了潜穴部分的渗透性, 造成潜穴与基质部分之间渗透率具有明显差异, 这是导致 Kh2 段储层非均质性的主要原因。



(a)–(b) 生屑砂屑灰岩, *Palaeophycus* 遗迹组发育。潜穴部分富含油。AD16井2 664.1 m, Kh2-1小层 (c) 示意基质、潜穴取样点 (d)–(g) 潜穴部分内碎屑颗粒含量较高, 粒间孔、粒间溶孔发育, 连通性好; 基质部分受泥质充填及强烈胶结作用影响, 粒间孔隙不发育, 局部发育少量的粒内溶孔和铸模孔, 多为孤立孔。铸体薄片, 单偏光

图5 伊拉克艾哈代布油田 Kh2 段 *Palaeophycus* 遗迹组相关储层非均质特征

Fig. 5 Heterogeneity characteristics of *Palaeophycus* ichnofabrics-related reservoir of Khasib Member 2 in AD Oilfield, Iraq

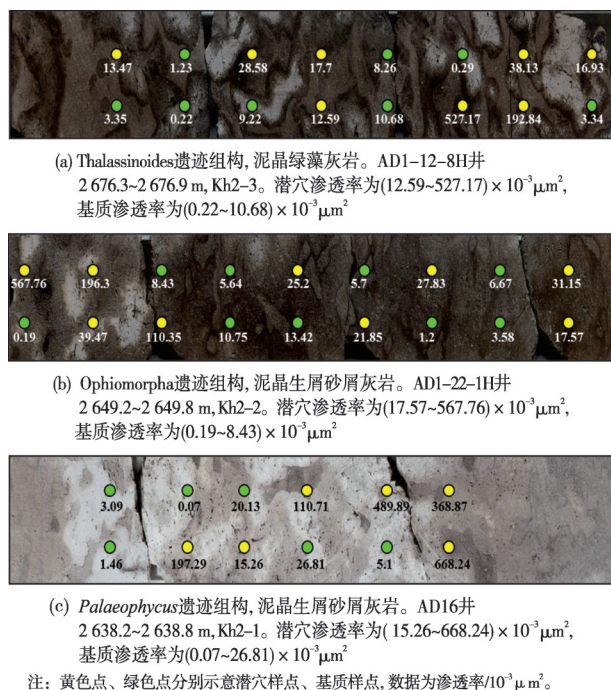


图6 伊拉克艾哈代布油田 Kh2 段生物扰动储层点渗透率图版

Fig. 6 Point permeability chart of bioturbated reservoir of Khasib Member 2 in AD Oilfield, Iraq

4 生物扰动对储层非均质性的影响

生物扰动作用对油气储层非均质性具有重要影响:造迹生物通过一系列生命活动影响沉积物的粒径大小、颗粒分布方式、压实程度、分选性等,造成沉积介质的物理性质变化,进而导致原始沉积结构的差异。其中,沉积物粒径的改变是生物扰动作用造成的最常见的沉积介质物理性质改变^[26],当生物扰动导致潜穴充填物粒度增大时,潜穴区域渗透率得到改善,进而增强储层的非均质性。同时,造迹生物分泌黏液、排泄粪球粒等活性有机质的行为,造成潜穴及其周缘环境的有机质及微生物含量、离子浓度、酸碱度等发生变化,进而改变沉积介质的化学性质,导致潜穴在不同氧化-还原条件下较基质更易发生胶结、溶蚀、白云石化等成岩作用,进一步增强储层的非均质性。

通过对艾哈代布油田 Khasib 组 Kh2 段生物扰动类型及所导致的储层非均质性的研究,认为 Kh2 段不同沉积环境下发育不同的生物扰动遗迹组类

型,导致潜穴与基质组构及成岩作用差异,进而控制了Kh2段储层的非均质性。

4.1 *Thalassinoides* 遗迹组构储层非均质性

原始沉积组构是后期成岩改造的物质基础。生物扰动作用对储层非均质性的控制,首先体现在对原始沉积组构差异的影响。*Thalassinoides* 遗迹组构主要发育于中缓坡绿藻生屑滩沉积环境,岩性以泥晶绿藻生屑灰岩为主,富含棘皮类生屑,纵向上主要发育于Kh2-3小层。原始沉积的富含棘皮的

泥晶绿藻灰岩,由于受到海平面变化的影响,早期胶结作用发育,基质部分形成斑块状胶结。造迹生物活动形成 *Thalassinoides* 遗迹组构,导致潜穴内沉积介质化学性质改变,一方面抑制了潜穴内早期胶结作用,另一方面绿藻主要以文石质仙人掌藻、粗枝藻为主,易受准同生溶蚀改造,导致潜穴内形成大量铸模孔。埋藏阶段,烃类充注优先进入渗透性更好的潜穴,可进一步提高潜穴物性,而棘皮类生屑周缘常形成方解石次生加大胶结,使得基质部分孔隙进一步被破坏(图7),进一步加剧了潜穴与基质的物性差异。

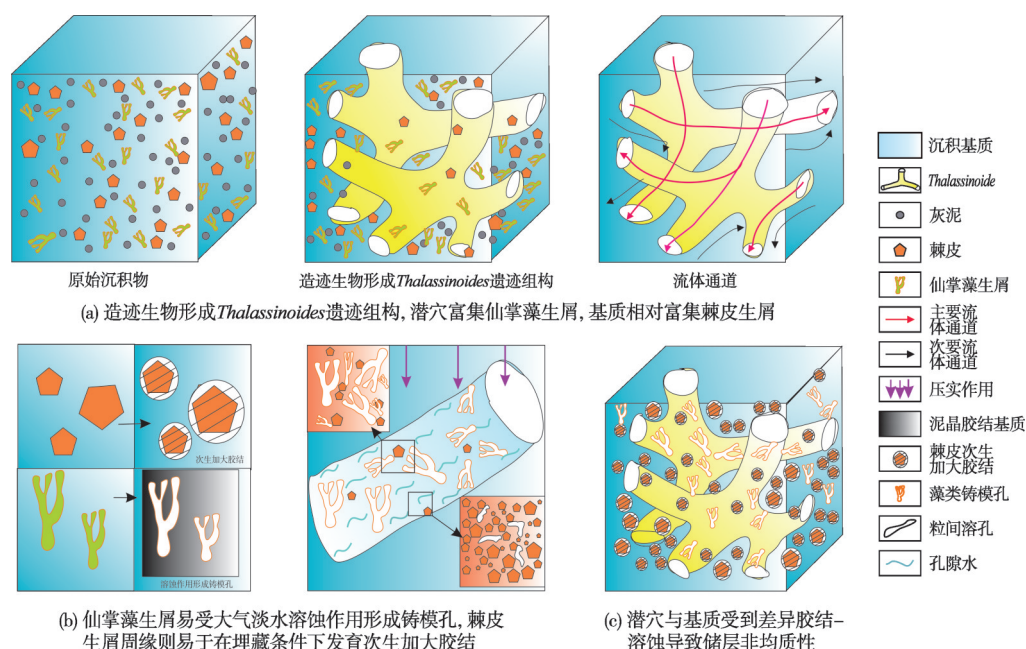


图7 *Thalassinoides* 遗迹组构形成的储层非均质性成因模式图

Fig. 7 Heterogeneity genetic model of *Thalassinoides* ichnofabrics-related reservoir

4.2 *Ophiomorpha* 遗迹组构储层非均质性

Ophiomorpha 遗迹组构主要发育于中缓坡中—低能浅滩环境,岩性以松散底质泥晶生屑砂屑灰岩为主,纵向上主要发育于Kh2-2小层。初始沉积条件下,内碎屑、生物碎屑及碳酸盐灰泥均匀沉积,造迹生物通过摄食悬浮有机质与泥质物而形成 *Ophiomorpha* 遗迹组构的同时,导致潜穴与基质之间形成组构差异:潜穴内泥质含量降低,同时由于造迹生物活动,潜穴内常常被粪球粒等颗粒充填,原始粒间孔隙发育(图8);基质部分保留原始沉积组构,灰泥含量较高,粒间孔隙发育较差,受后期压实作用影响,基质部分物性进一步变差,从而导致储层非均质性。

4.3 *Palaeophycus* 遗迹组构储层非均质性

Palaeophycus 遗迹组构主要发育于中缓坡颗粒滩沉积环境,岩性以固底底质生屑砂屑灰岩、泥晶生屑灰岩为主,纵向上主要发育于Kh2-1小层。岩性主要为原始沉积的生屑砂屑灰岩、泥晶生屑灰岩,受海平面变化影响,早期胶结作用发育,常常形成硬底。造迹生物活动形成 *Palaeophycus* 遗迹组构,潜穴内碎屑颗粒含量较高,生屑及灰泥含量低,基质部分内碎屑含量降低,生屑及灰泥含量增高,同时潜穴内沉积介质化学性质改变,抑制潜穴内早期胶结作用,从而形成早期潜穴与基质之间的物性差异(图9)。在此基础上,由于海平面下降导致成岩环境变化,早期大气淡水溶蚀作用发育,不饱和

- [4] 杨式溥. 遗迹化石的古环境和古地理意义[J]. 古地理学报, 1999, 1(1): 7-19.
YANG Shipu Palaeoenvironmental and palaeogeographic significance of trace fossils[J]. Journal of palaeogeography (Chinese edition), 1999, 1(1): 7-19.
- [5] HUBBARD S M, MACEACHERN J A, BANN K L. Slopes [G]// KNAUST D, BROMLEY R G. Trace fossils as indicators of sedimentary environments. Developments in sedimentology 64, 2012: 607-642.
- [6] KNAUST D. Ichnology as a tool in carbonate reservoir characterization: a case study from the Permian-Triassic Khuff Formation in the Middle East[J]. GeoArabia, 2009, 14(3): 17-38.
- [7] KNAUST D, BROMLEY R G. Trace fossils as indicators of sedimentary environments[G]. Development in sedimentology 64. 2012.
- [8] KNAUST D. Atlas of trace fossils in well core[M]. Springer International Publishing, 2017.
- [9] PEMBERTON S G, MACEACHERN J A, FREY R W. Trace fossil facies models: environmental and allostratigraphic significance[G]// WALKER R G, JAMES N P. Facies models. Geological Association of Canada, 1992: 47-72.
- [10] PEMBERTON S G. Ichnology and sedimentology of shallow to marginal marine systems[J]. Luis Buatois Conicet Palaios, 2001, 18(4/5): 471-472.
- [11] PEMBERTON S G. Classification and characterizations of biogenically enhanced permeability [J]. AAPG bulletin, 2005, 89 (11): 1493-1517.
- [12] PEMBERTON S G, MACEACHERN J A, GINGRAS M K, et al. Biogenic chaos: cryptobioturbation and the work of sedimentologically friendly organisms [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2008, 270(3): 273-279.
- [13] ABDEL-FATTAH Z A, GINGRAS M K, CALDWELL, et al. The glossifungites ichnofacies and sequence stratigraphic analysis: a case study from Middle to Upper Eocene successions in Fayum, Egypt [J]. Ichnos—an international journal for plant & animal traces, 2016, 23(3/4): 157-179.
- [14] ABDEL-FATTAH Z A, GINGRAS M K, PEMBERTON S G. Significance of hypoburrow nodule formation associated with large biogenic sedimentary structures in open-marine bay siliciclastics of the Upper Eocene Birket Qarun Formation, Wadi El-Hitan, Fayum, Egypt [J]. Sedimentary geology, 2014, 233(1): 111-128.
- [15] BANIAK G M, GINGRAS M K, PEMBERTON S G, et al. Reservoir characterization of burrow-associated dolomites in the Upper Devonian Wabamun Group, Pine Creek gas field, central Alberta, Canada [J]. Marine and petroleum geology, 2013, 48: 275-292.
- [16] GOLAB J A, Smith J J, CLARK A K, et al. Bioturbation-influenced fluid pathways within a carbonate platform system: the Lower Cretaceous (Aptian - Albian) Glen Rose Limestone [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 465: 138-155.
- [17] TONKIN N S, MCILROY D, MEYER R, et al. Bioturbation influence on reservoir quality: a case study from the Cretaceous Ben Nevis Formation, Jeanne d'Arc Basin, offshore Newfoundland, Canada [J]. AAPG bulletin, 2010, 94(7): 1059-1078.
- [18] 纪友亮, 赵激林, 刘孟慧, 等. 生物扰动构造对碎屑岩储层储集性能的影响 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 1990, 14 (6): 1-8.
JI Youliang, ZHAO Chenglin, LIU Menghui, et al. The effect of bioturbate structure of the petrophysical properties of sandstone reservoir [J]. Journal of the University of Petroleum (science and technology edition), 1990, 14(6): 1-8.
- [19] 林世国, 施振生, 李君, 等. 四川盆地上三叠统生物扰动环境分析及与储集性能的关系 [J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 74-80.
LIN Shiguo, SHI Zhensheng, LI Jun, et al. Environmental interpretation of Upper Triassic bioturbation structures and correlation with petrophysical properties of reservoir in Sichuan Basin [J]. Natural gas geoscience, 2012, 23(1): 74-80.
- [20] 郝毅, 林良彪, 周进高, 等. 川西北中二叠统栖霞组豹斑灰岩特征与成因 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 652-656.
HAO Yi, LIN Liangbiao, ZHOU Jin'gao, et al. Characteristics and genesis of leopard limestone in Middle Permian Qixia Formation, northwest Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (science and technology edition), 2013, 39(6): 652-656.
- [21] 齐永安, 王敏, 李姐, 等. 洛阳龙门地区中寒武统张夏组下部遗迹组构及其沉积环境 [J]. 中国地质大学学报(地球科学), 2012, 37(4): 694-706.
QI Yongan, WANG Min, LI Da, et al. Ichnofabrics and their sedimentary environments from the lower part of the Middle Cambrian Zhangxia Formation, Longmen area, Luoyang city [J]. Journal of China University of Geoscience (earth science), 2012, 37(4): 694-706.
- [22] 董小波, 牛永斌. 豫西北奥陶系马家沟组三段豹斑灰岩的生物潜穴成因及成岩演化 [J]. 现代地质, 2015, 29(4): 834-843.
DONG Xiaobo, NIU Yongbin. Evolution in the third Member of Majiagou Formation in Ordovician, northwest of Henan Province [J]. Geoscience, 2015, 29(4): 834-843.
- [23] 牛永斌, 齐永安, 胡斌, 等. 遗迹组构的精细分析功能及其应用: 第15届国际遗迹组构专题研讨会综述 [J]. 古地理学报, 2019, 21(5): 768-781.
NIU Yongbin, QI Yongan, HU Bin, et al. Fine analysis functions and their application of ichnofabric: outline of the 15th International Ichnofabric Workshop [J]. Journal of palaeogeog-

- raphy (Chinese edition), 2019, 21 (5): 768–781.
- [24] UCHMAN A, WETZEL A. Deep-sea fans [G]// KNAUST D, BROMLEY R G. Trace fossils as indicators of sedimentary environments. *Developments in sedimentology* 64, 2012: 643–671.
- [25] CHERNS L, WHEELEY J R, KARIS L. Tunneling trilobites: habitual infaunalism in an Ordovician carbonate seafloor [J]. *Geology*, 2006, 34: 657–660.
- [26] BROMLEY R G, EKDALE A A. Chondrites: a trace fossil indicator of anoxia in sediments [J]. *Science*, 1984, 224(4651): 872–874.

编辑:董庸

Effect of bioturbation on reservoir heterogeneity of the Upper Cretaceous Khasib Formation in AD Oilfield, Iraq

WANG Genjiu, SONG Xinmin, LIU Bo, SHI Kaibo

Abstract: Bioturbation can change the original sedimentary fabric of carbonate rocks, and affect later diagenesis, which lead to the difference of physical properties between biological burrows and matrix, and enhance the heterogeneity of carbonate reservoirs. The Khasib Member 2 (Kh2) of Upper Cretaceous in AD Oilfield, Iraq was mainly developed in middle–outer carbonate ramp with upward shallowing cycle, where bioturbation relic fabrics developed widely. Based on the analysis of a large number of core, thin section, point permeability and other test and analysis data, this paper studies the types of bioturbation relic fabric and its influence on reservoir heterogeneity. The results show that: (1) There are mainly three types of relic fabrics: *Thalassinoides*, *Ophiomorpha* and *Palaephycus* in Kh2. The outer wall of *Thalassinoides* burrow is smooth without lining structure, which is in the shape of three-dimensional network connected tube, and the straight diameter of a single burrow is 5–25 mm; *Ophiomorpha* burrow is "T" shaped tubular, mostly horizontally distributed, and partially developed argillaceous lining structure, with a diameter of 5–15 mm; *Palaephycus* burrow is a circular–oval slightly curved–straight pipe with a diameter of 2.5–10 mm, which is mainly distributed horizontally without lining structure. (2) The core has obvious patch-like characteristics due to the oil-bearing difference caused by the difference of physical properties. At the same time, the regional distribution of different oil-bearing levels is related to the morphology and spatial distribution of biological relic fabric, which indicates that the reservoir heterogeneity of Kh2 is mainly controlled by biological disturbance. (3) Different bioturbation relic fabric types are developed in different sedimentary environments of Kh2, resulting in changes in the original fabric and chemical properties of sedimentary media between the burrow and the matrix, forming the differences in pore structure between burrow and matrix. On this basis, the later diagenetic differences (cementation, dissolution, compaction, etc.) are superimposed, resulting in different reservoir heterogeneity types in Kh2.

Thalassinoides relic fabric is mainly developed in green algae shoal of Kh2–3 layer. Due to the change of chemical properties of sedimentary media in the burrow, a large number of mold pore are formed by quasi syngenetic dissolution, while the matrix is strongly cemented in the early stage, which intensifies the physical property difference between the burrow and the matrix. *Ophiomorpha* relic is mainly developed in medium–low energy shoal of Kh2–2 layer. Intergranular pores are developed in the burrow due to particle filling, and the mortar content in the matrix is high, which reflected the reservoir heterogeneity. *Palaephycus* relic fabric is mainly developed in granular shoal of Kh2–1 layer. The content of particles in the burrow is high, and the early cementation in the burrow is inhibited due to the change of chemical properties of sedimentary media. With the decline of sea level, atmospheric fresh water preferentially enters the burrow channel for dissolution.

Key words: bioturbation; biological burrows; relic fabric; reservoir heterogeneity; carbonate rock; Khasib Formation; Iraq

WANG Genjiu, First author: Senior Engineer, mainly engaged in geological research of petroleum development. Add: P. O. Box 910, Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China