

文章编号:1673-5005(2021)02-0021-10 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.003

伊拉克 M 油田 Mishrif 组生物扰动作用

李峰峰¹, 王振彪¹, 郭睿¹, 刘立峰¹, 余义常¹, 宋世琦²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249)

摘要:以伊拉克 M 油田 Mishrif 组生物碎屑灰岩为例, 基于岩心和铸体薄片资料, 研究生物扰动对沉积环境的选择性、生物扰动程度的表征方法, 充填物的形成条件和控制因素及生物扰动对储层物性的改造机制。结果表明: M 油田 Mishrif 组为缓坡-弱镶边台地沉积环境, 生物扰动倾向于在低能安静的局限水体环境中发育, 其中潟湖环境中生物扰动现象最为普遍; 根据扰动面积与岩心切面面积比值, 以 20%、50% 和 80% 为界, 辅以描述扰动连通性的术语, 将生物扰动划分为 I 级斑状扰动、II 级纹层状扰动、III 级迷宫状扰动和 IV 级层状扰动 4 个等级; 生物扰动通道中充填物包括同生碎屑颗粒、白云石和方解石, 其中同生碎屑颗粒为物理成因, 受沉积作用控制, 而白云石和方解石为后期成岩作用产物。白云石成因机制复杂, 晶体形态多样, 其中微晶离散状白云石对储层物性影响较小, 自形细晶白云石有利于改造储层物性, 而自形一半自形镶嵌状白云石降低储层物性; 综合沉积物岩石学特征、生物扰动程度、充填物质差异及对储层物性影响等因素, 建立 M 油田 Mishrif 组生物扰动模式; 沉积环境决定了生物扰动的底质和保存程度, 生物扰动程度反映了储层改造强度, 后期充填物质和成岩作用控制了储层改造性质, 生物扰动强度越大, 自形细晶白云石发育程度越高, 溶蚀作用越强, 储层物性越好。

关键词:生物扰动; Mishrif 组; 白云石; 扰动模式

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

引用格式: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.

Bioturbation of Mishrif Formation in M Oilfield, Iraq

LI Fengfeng¹, WANG Zhenbiao¹, GUO Rui¹, LIU Lifeng¹, YU Yichang¹, SONG Shiqi²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. College of Geoscience in China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Taking the bioclastic limestone of Mishrif Formation in M Oilfield, Iraq as an example, the environment preference, the infilling genesis and controlling factors, and the mechanism of bioturbation were studied. The results show that the research area is a ramp with weak rimmed platform. Bioturbation is more inclined to develop in low-energy environment, especially in the lagoon. According to the ratio of the bioturbated area to the core section area, four grades are defined, which are separated by 20%, 50% and 80% connectivity. The four bioturbation grades are: Grade I porphyritic, Grade II laminated, Grade III labyrinth and Grade IV thick layers. There are three kinds of filling materials, syngenetic clastic, dolomite and calcite in the bioturbation channel. The clastic is the physical genesis and is controlled by sedimentation, while dolomite and calcite are the products of late diagenesis. Dolomite can be divided into the microcrystalline discrete dolomite, the euhedral fine-grained dolomite and the euhedral-semieuhedral mosaic dolomite. Among them, the microcrystalline discrete dolomite has little effect on reservoir physical properties, and the euhedral fine-grained dolomite is beneficial to improve physical properties, while the euhedral-semieuhedral mosaic dolomite reduces physical properties. The bioturbation mode of Mishrif Formation in Moilfield was established by combining petrology, degree of bioturbation, filling material and influences on physical properties. The sedimen-

收稿日期: 2019-12-20

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05030-001)

第一作者: 李峰峰(1990-), 男, 博士研究生, 研究方向为碳酸盐岩储层与沉积。E-mail: 18810853190@163.com。

tary environment determines the substrate and preservation condition, the degree of bioturbation reflects the strength of reconstruction, and the filling material and diagenesis control the transformation properties. The greater the bioturbation intensity is, the more the euhedral fine-grained dolomite is, and the stronger the dissolution is, the better the reservoir properties are.

Keywords: bioturbation; Mishrif Formation; dolomite; bioturbation mode

生物扰动指生物对其周围沉积颗粒进行搅动、混合和破坏形成的沉积构造,包括可以鉴定和无法鉴定的潜穴、钻孔、足迹和移迹等^[1],属于遗迹化石的一种。生物扰动作用既可破坏储层岩石层理及粒序结构,降低储层物性,又能改善储层微观孔隙结构,大幅提高储层渗透率^[2-3]。生物扰动具有发育环境广泛、扰动样式随机、多期扰动叠加及充填物质多样等特征,对储层的改造关系复杂^[4-8]。前人研究表明:与生物扰动相关的白云化作用可显著改善储层渗透率,且生物扰动程度增加,储层物性越好^[9-10];与生物扰动相关的白云化作用受有机质丰度、微生物丰度,氧化还原环境、云化流体的供应、通道的渗流特征等因素控制^[11-12];X射线成像、点渗透率测试、岩心螺旋CT测试、数值模拟等是研究生物扰动有效的技术手段,3ds Max 软件、AdobePhotoshopCS6 软件、交叉网格技术等均可有效定性或定量表征生物扰动^[13-17];现有表征方法多依靠高精尖仪器,技术复杂,受样品分析成本等约束,缺乏适合野外露头及岩心的快速判别方法,对生物扰动对环境的选择、充填物质的成因机制、生物扰动对储层物性的改造机制等研究程度较低。以伊拉克 M 油田 Mishrif 组碳酸盐岩储层为例,基于岩心和铸体薄片资料,明确生物扰动作用优势发育环境,合理表征扰动作用强度,厘清生物扰动其对储层的改造机制,深化储层非均质性认识。

1 生物扰动环境

M 油田位于伊拉克东南部巴士拉以北,构造上位于米索不达米亚盆地构造前缘带^[18],为巨型碳酸盐岩油田,主力油藏为白垩系 Mishrif 组生物碎屑灰岩。储层结构组分复杂,生物种类多样。白垩纪伊拉克地区一直保持浅海碳酸盐岩台地环境^[19],M 油田 Mishrif 组为缓坡-弱镶边台地,主要为内缓坡沉积环境,包括潮坪、潟湖、台内滩、滩后、潮道、台缘滩、滩前等沉积相。根据岩心资料和铸体薄片分析,在潟湖、台内滩、滩后、台缘滩和滩前沉积环境中均识别出生物扰动迹象。潟湖环境中,生物扰动最为发育,样品占潟湖样品总数的 48.5%,其次为藻屑滩,扰动样品百分比为 28.1%。台缘滩环境、台内滩和滩后生物扰动现象较少,滩前生物扰动发育程度最低(图 1)。

潟湖通常是低等安静的水体环境,而台地边缘和滩前通常是水体动荡,能量较高的沉积环境。总体来看,生物扰动作用倾向于在低能安静的水体环境中发育。潟湖位于浪基面之下,水体较深,水动力较弱,适宜于底栖生物生存。岩石泥质含量高,有机质丰富,为生物提供了丰富的营养物质,泥质沉积物硬度较低、生物容易发生掘穴,且后期破坏作用较小,生物扰动痕迹容易被保存下来。台缘滩和滩前等高能沉积环境位于浪基面之上,水体能量强,不利于底栖生物生存,生物碎屑多为固着类硬质生物,岩石类型多为富含生屑的颗粒灰岩,生物掘穴困难,部分钻孔生物虽可形成扰动痕迹,但强烈的水动力容易将生物扰动作用产物破坏,且高能沉积环境多位于构造高部位,海平面下降更易发生暴露溶蚀,生物扰动痕迹遭受破坏,难以保存。

2 生物扰动程度

生物扰动程度是用来表征储层被改造的强度。前人对生物扰动程度已做过分级,其中 Taylor 提出生物扰动指数应用最为广泛,将生物扰动划分为 7 个等级(0~6)^[20-21],该方案需要综合考虑沉积构造界面的可识别度、遗迹化石的密度和清晰度、生物潜穴的分异度和叠加程度等,识别分类过程和级次划分过于繁琐,不同级次间扰动特征差异不明显。齐永安等^[22-23]提出利用岩石切面上遗迹化石所占面积百分比来表征生物扰动丰度,该方法简单易行,适宜野外露头和岩心观察,然而岩石切面面积没有规定统一标准,且生物扰动遗迹并非均可肉眼识别,后期的破坏和成岩作用可造成扰动区域与基质性质趋同,尤其是对扰动强烈的储层样品,肉眼难以识别扰动边界,且分类中只体现了扰动数量的差异,而不能反映不同类型中的连通性差异。基于 M 油田 Mishrif 组生物扰动特征,利用铸体薄片和岩心资料,将生物扰动划分为 4 个等级:Ⅰ级斑状扰动、Ⅱ级纹层状扰动、Ⅲ级迷宫状扰动和Ⅳ级层状扰动(图 2)。该分类通过岩心和铸体薄片相互验证,确定生物扰动面积,避免遗漏肉眼不能识别的扰动遗迹。根据扰动面积与岩心切面面积比值,以 20%、50%和 80%为界,将生物扰动分为 4 级,简化了 Taylor 的 7 级分

类,提高了不同扰动级次的区分性。分类中加入了描述性的术语,反映了扰动的强度和连通性。需要说明的是,该方案中级次和描述语可以交叉应用,提

高级别的适用性,如扰动面积为 30%,但扰动区域均为孤立分布,则扰动级次可以定为 II 级斑点状扰动。

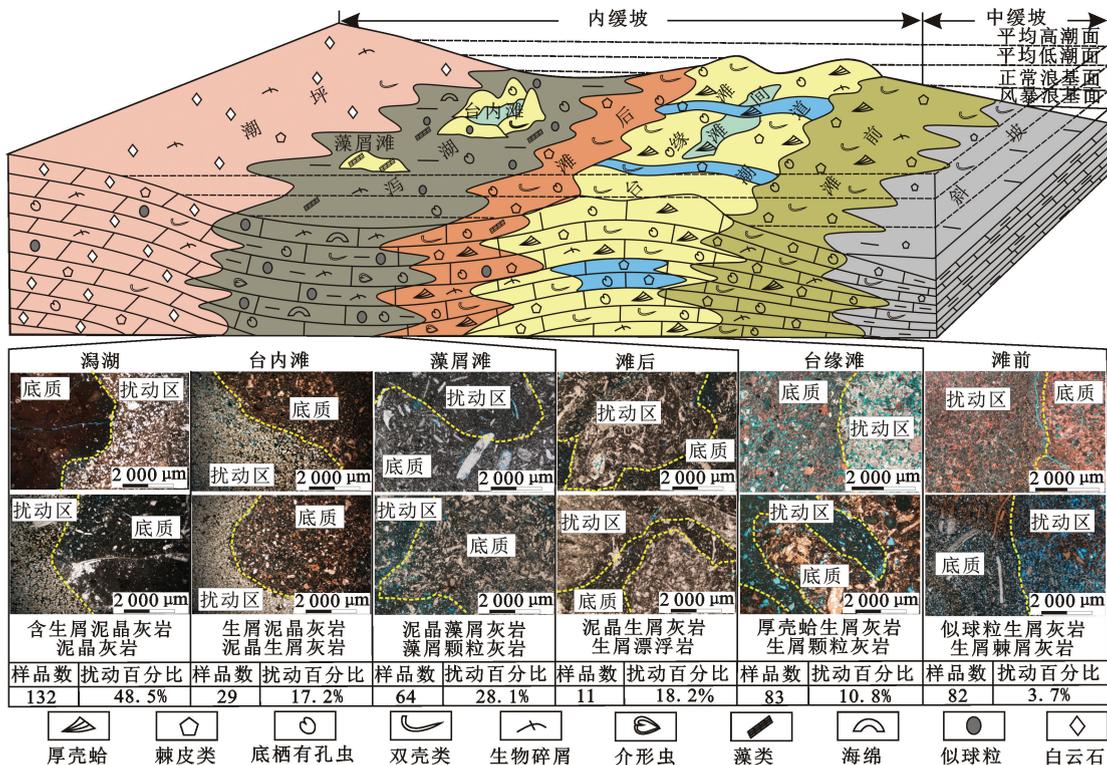


图 1 M 油田 Mishrif 组生物扰动作用发育环境

Fig. 1 Environment of bioturbation in Mishrif Formation of M Oilfield

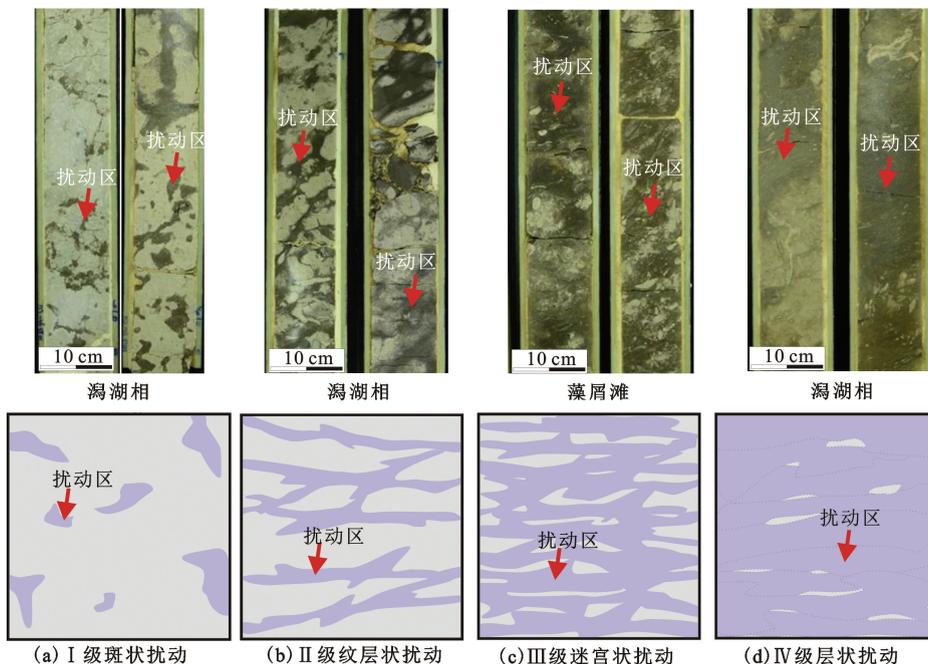


图 2 M 油田 Mishrif 组生物扰动分级

Fig. 2 Gradation of bioturbation in Mishrif Formation of M Oilfield

I 级斑状扰动: 岩心上扰动部分所占面积百分比小于 20%, 扰动处为深棕黄色, 呈孤立的斑点状

或斑块状, 扰动区边界清晰, 连通性差, 沉积物改造程度低, 扰动叠加程度弱(图 2(a))。

Ⅱ级纹层状扰动:岩心上扰动部分所占面积百分比介于20%~50%,扰动区呈暗棕黑色,呈脉络条带状,不同的扰动通道边界清晰,通常以点状接触,扰动处具有一定的连通性,沉积物改造程度中等,扰动叠加程度弱(图2(b))。

Ⅲ级迷宫状扰动:岩心上扰动部分所占面积百分比介于50%~80%,扰动处呈浅黄—暗黄色,扰动通道为线状接触,扰动通道边界模糊,呈迷宫状,连通性较高,未扰动部分呈白色斑状或条带状随机分布,沉积物扰动强度大,扰动叠加程度中等(图2(c))。

Ⅳ级层状扰动:岩心上扰动部分所占面积百分比大于80%,扰动区颜色为浅黄白色和深棕黄色,呈厚层状,扰动部分呈体状接触,难以识别具体生物扰动边界,Ⅳ级扰动生物扰动鉴定需要结合铸体薄片,薄片上通常是自形程度较高的白云石颗粒。扰动通道连通程度较高,沉积物改造程度强,扰动叠加程度强(图2(d))。

3 充填物质

扰动程度控制了储层改造的强度,而扰动通道中的充填物则控制了储层改造的方向。不同充填物对储层物性影响具有明显的差异,且随着扰动程度的增加,充填物对储层物性的影响越显著。基于薄片观察,M油田 Mishrif 组生物扰动通道中发育3种充填物质:同生碎屑颗粒、白云石和方解石。

3.1 同生碎屑颗粒

同生碎屑颗粒指在沉积时期扰动通道中形成

的碎屑充填,这些碎屑是沉积成因的,一定程度上保留了与原沉积物相似的化学组分特征,由于与底质沉积环境不同而表现出明显的结构组分差异(图3)。同生碎屑颗粒最大的特征是物理成因的,其岩石特征受沉积环境的影响。扰动底质和扰动通道中通常发育不同的岩石类型,如图3(a)和图3(b),扰动底质为泥晶灰岩,扰动通道中充填了具泥粒结构的泥晶生屑灰岩,而图3(c)中扰动底质为具泥粒结构的泥晶藻屑灰岩,扰动通道中充填了含藻屑泥晶灰岩。结构组分的改变影响了储层整体物性的变化,若扰动通道中充填了粗粒碎屑,泥质含量降低,则有利于提高储层整体物性;若通道中充填了细粒结构组分,泥质含量增加,则不利于改善储层整体物性。扰动通道中发生的成岩作用对储层物性有重要影响,若发生非选择性溶蚀作用,则会形成大量的粒间孔及粒间溶孔,有效提高储层物性(图3(d)~(f));若碎屑颗粒性质差异较大,发生选择性溶蚀,形成大量的铸模孔或生物体腔孔,可有效提高储层孔隙度,但对渗透率影响较小;溶蚀作用后若发生强烈的胶结作用,胶结物充填孔隙体积,严重降低储层物性。如图3(a)中的碎屑颗粒,经历了选择性溶蚀和胶结作用,颗粒先被溶蚀而后被致密充填,已无法鉴定生屑颗粒类型。图3(b)中碎屑颗粒多为棘屑和似球粒,抗溶蚀能力强,颗粒保存完整,但碎屑颗粒间却被方解石致密胶结。

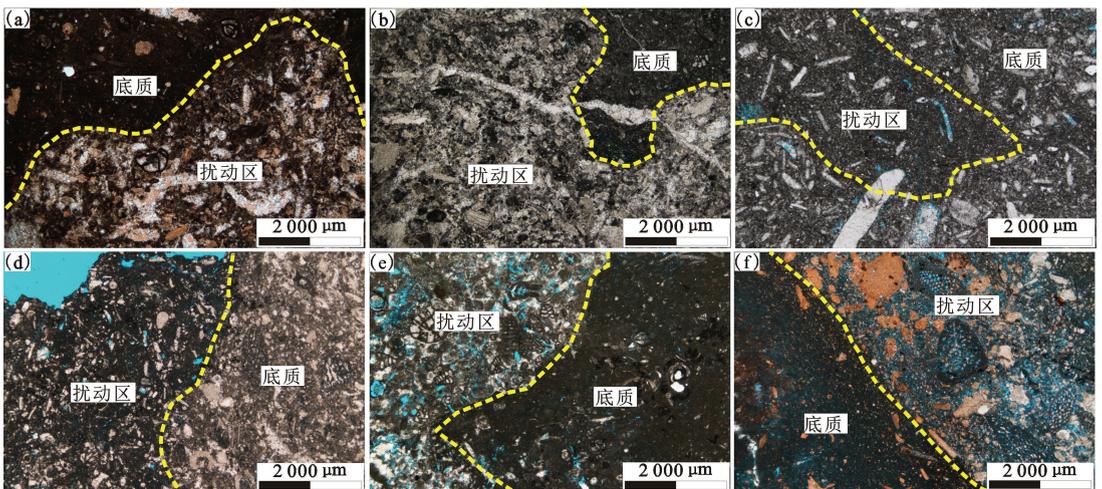


图3 M油田 Mishrif 组生物扰动通道同生碎屑充填物

Fig. 3 Syngenetic clastic in bioturbated channel in Mishrif Formation of M Oilfield

3.2 白云石

白云化作用是与生物扰动相伴生的重要成岩作

用,生物扰动不但改变了沉积物结构组分和构造形态,也改变了沉积物的地球化学环境。白云化作用

需要具备充足的 Mg^{2+} 和适宜物理化学环境,而生物扰动有利于白云化作用的发生,与扰动底质相比,生物扰动通道在沉积物结构和化学环境上均存在显著差异。沉积物结构上,若生物扰动造成岩石颗粒粒径变大,可有效提高通道中的渗流能力,为白云化流体提供了渗流通道,若生物扰动造成沉积物颗粒粒径变小,可增加颗粒与流体的接触面积,亦有利于白云化作用^[11]。

化学环境上,相比基质围岩,生物扰动通道中地球化学环境存在显著差异:

(1)氧化-还原环境。生物扰动通道以还原环境为特征,白云化作用倾向于发生在还原环境,氧化环境中富 CO_2 和含 SO_4^{2-} 易将 Mg^{2+} 绑定,抑制白云石的沉淀, CO_2 的增加促使碳酸盐岩的溶解,使 Mg^{2+}/Ca^{2+} 降低,难以云化^[11]。

(2)有机质丰度。生物扰动通道中有机质丰度较高,这些有机质以生物黏液或排泄物的形式富集^[11],有机物的分解会导致化学环境在厘米尺度上的微小差异。

(3)微生物和细菌富集。扰动通道中有机质的

富集为微生物和细菌的繁殖提供物质基础。还原细菌能够去除绑定 Mg^{2+} 的 SO_4^{2-} ,释放出 Mg^{2+} ,促进白云化作用^[6,12]。

(4)pH 环境。扰动通道中尽管也富集 CO_2 ,但 NH_3 含量也比较高, NH_3 与水分子反映形成碱性环境,造成扰动通道中孔隙流体 pH 值升高,高 pH 增加了 HCO_3^{-} 的活性,直接促进了白云石的沉淀^[11]。

(5)离子浓度。生物扰动通道中, SO_4^{2-} 被硫酸盐还原细菌消耗或被移除,造成通道中 SO_4^{2-} 浓度较低。M 油田 Mishrif 组发育 3 种与生物扰动相关白云石。

3.2.1 微晶离散状白云石

微晶离散状白云石晶体比较洁净,晶体粒度较小,通常小于 $50 \mu m$,且扰动通道中仍以灰质充填物为主,白云石离散分布其中(图 4(a)和(b)),该类白云石颗粒可能形成于准同生期早成岩阶段,生物扰动形成的通道为海水提供了渗流通道,为白云石化提供了丰富的 Mg^{2+} ,白云石与方解石发生等体积交代,白云化作用时间较短,导致晶体颗粒自形程度差,晶体粒径较小。

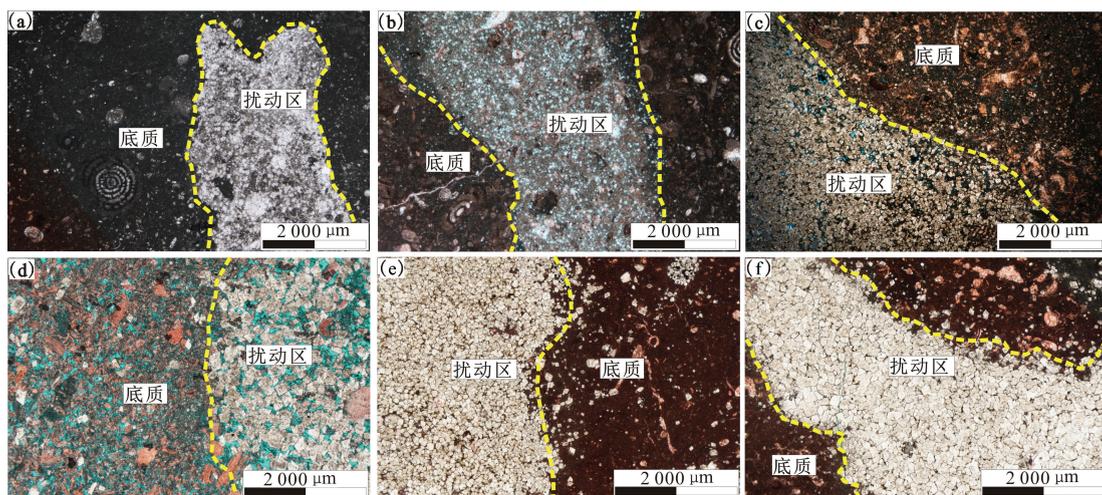


图 4 M 油田 Mishrif 组生物扰动通道白云石充填物

Fig. 4 Dolomite in bioturbated channel in Mishrif Formation of M Oilfield

3.2.2 自形细晶状白云石

自形细晶状白云石晶体比较污浊,颗粒自形程度高,粒度较大,晶体粒径介于 $100 \sim 200 \mu m$ (图 4(c)和(d))。该类白云石可能形成于埋藏成岩环境,白云石与方解石发生等物质的量交代形成的,由于 Mg^{2+} 离子的半径较小,所以白云石的摩尔体积比方解石或文石都要小,因此方解石或文石被白云石交代之后,会使晶体体积减小,导致孔隙体积变高^[24]。然而,等物质的量交代的前提条件是成岩作用发生在封闭的环境中,但封闭的环境是否能满足

白云化作用所需的大量的 Mg^{2+} 值得验证。自形细晶状白云石更有可能是扰动通道早期为开放环境,外来流体提供了大量的 Mg^{2+} ,自形白云石形成后,扰动通道转变为封闭环境。

3.2.3 自形一半自形镶嵌状白云石

该类白云石晶体为浑浊色,晶体呈自形一半自形,晶体粒径介于 $120 \sim 250 \mu m$,颗粒呈线状镶嵌式接触,对孔隙充填程度较高(图 4(e)和(f)),白云石主要是由于过白云化作用形成的,在开放的体系中,外来的白云岩流体的加入,持续不断提供 CO_3^{2-}

和 Mg^{2+} 时,导致原始灰岩发生过白云岩化^[24],白云化作用初期岩石体积减小,孔隙体积增大,而后期白云化作用持续,白云石晶体持续沉淀并逐渐充填孔隙体积。储层孔隙度呈现先增大后减小的变化趋势。过白云岩化前期可能处于封闭的环境中,后期由于裂缝等原因造成体系开放,白云石逐渐占据晶间孔隙体积。

3.3 方解石

生物扰动通道后,若体系处于开放环境中,外来的大量富含 Ca^{2+} 的饱和流体充填扰动通道,较低的

Mg^{2+}/Ca^{2+} 抑制了白云化作用,饱和流体持续发生沉淀,形成的方解石颗粒不断充填孔隙(图5)。若体系处于封闭环境,难以有充足的 Ca^{2+} 供应,方解石不能完全充填孔隙,可形成少量的残余孔隙。生物通道中充填的方解石可能形成于深埋藏成岩环境,颗粒较大,粒径通常大于 $500\ \mu m$,方解石呈线状镶嵌式接触。方解石形成后增加了岩石抗压强度,可有效抵抗压实作用对储层孔隙的破坏,若埋藏后期体系开放,不饱和流体可溶蚀方解石,增加岩石孔隙体积。

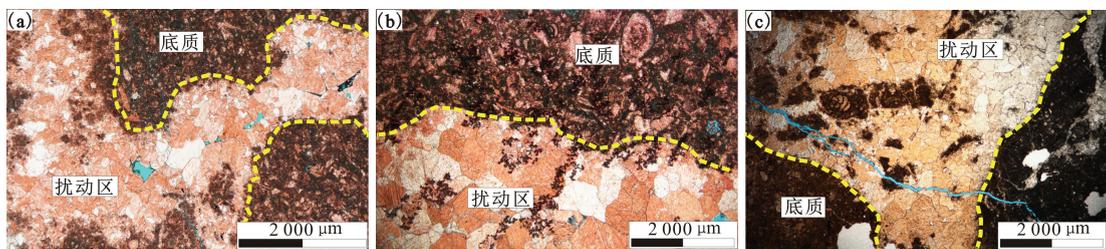


图5 M油田 Mishrif 组生物扰动通道方解石充填物

Fig. 5 Calcite in bioturbated channel in Mishrif Formation of M Oilfield

4 生物扰动模式

基于岩心和铸体薄片资料,综合沉积物岩石学特征、生物扰动程度、充填物质差异及对储层物性影响等因素,建立了 M 油田 Mishrif 组生物扰动模式(图6)。

研究区孔隙型储层中生物碎屑具有多样性,包含底栖有孔虫类、双壳类、棘皮类、厚壳蛤、介形虫、腹足类、海绵骨针、苔藓类和海绵类。扰动底质主要以生物碎屑灰岩为主,包含泥晶灰岩、含生屑泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、生屑颗粒灰岩等。基于薄片统计分析,生物扰动更倾向于发生在低能安静的水体环境中,且低能环境生物扰动痕迹保存程度较好,因此生物扰动在泥晶灰岩、含生屑泥晶灰岩及生屑泥晶灰岩中更易见,白云岩主要是生物扰动发生白云化作用的结果。

模式中以扰动通道的数量、规模和连通性反映生物扰动强度,随着扰动程度的增加,储层的改造越明显。I级斑状扰动中,扰动通道以孤立分布为特征,扰动现象少,深度浅、规模小(图6(a))。II级纹层状扰动中,扰动深度和规模增加,扰动通道连通性也得到改善,扰动通道多以点状接触为主(图6(b))。III级迷宫状扰动中,以普遍的线接触和较好

的连通性为特征,扰动通道从数量上和规模上均具有显著的增加,III级迷宫状扰动中对原沉积物改造程度较强,扰动区域相互接触连通,通道呈现迷宫状(图6(c))。IV级层状扰动已完全改变原岩特征,难以识别原岩石类型,扰动区连接成片,以难以分辨具体扰动通道为特征(图6(d)),IV级层状扰动通道数量最多,规模最大,连通程度最高,通常是多种生物多期次、高强度作用结果。

生物扰动模式中,充填物的差异表现出对储层物性的差异影响。充填物包含同生碎屑颗粒、白云石和方解石3类。同生碎屑颗粒经选择性溶蚀可形成铸模孔或生物体腔孔,但对储层物性的影响通常较小。根据晶形和结构,模式中包含了3类白云石颗粒,白云石颗粒中可见交代残余的生物碎屑。准同生白云石晶体颗粒较小,对储层物性的影响不明显^[25];埋藏白云石对改善储层物性具有重要的影响,其形成的晶间孔和晶间溶孔有效提高储层孔隙度和渗透率。过白云化作用形成自形—半自形白云石,呈密集镶嵌状充填储层孔隙。过白云化作用早期也可形成自形白云石颗粒,发育大量的晶间孔隙,与埋藏白云石不易区分。方解石对孔隙通常是致密充填,后期可发育溶蚀作用。

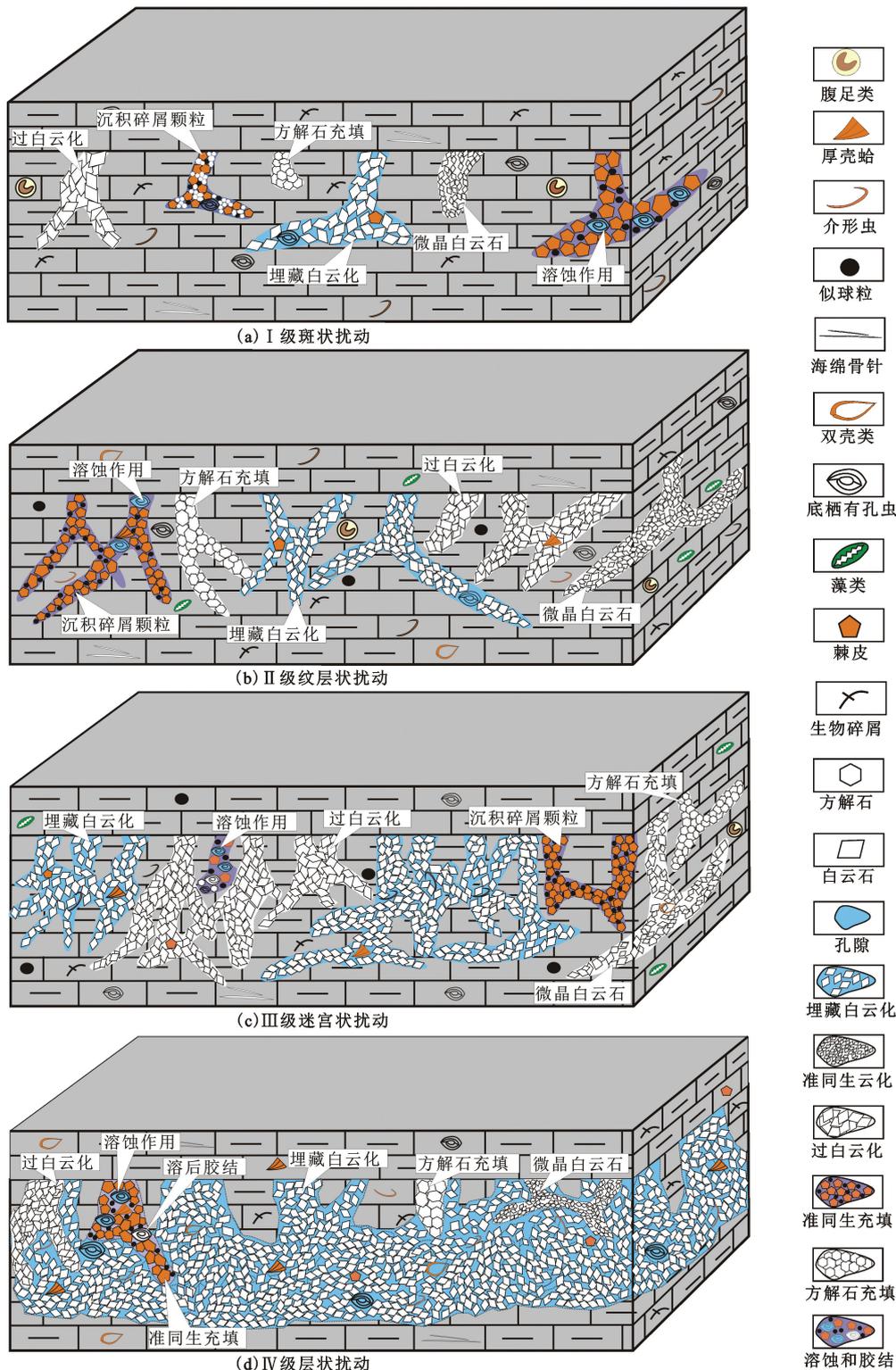


图 6 M 油田 Mishrif 组生物扰动模式

Fig. 6 Bioturbated mode in Mishrif Formation of M Oilfield

5 生物扰动意义

5.1 生物扰动对储层的改造

前人研究已证明生物扰动作用有利于改善储层物性,尤其是可有效提高储层渗透率^[7-9,26],但也有

研究证实扰动通道被方解石胶结后会降低储层的物性,而且随着扰动程度增加,储层物性越差^[3]。生物扰动与储层物性关系控制因素较多,对储层的改造是多种因素多期作用叠加的结果。基于沉积环境、生物扰动程度、充填物质差异和后期成岩作用,

建立了生物扰动与储层物性多因素体系(图7)。总体来说,沉积环境决定了生物扰动的底质和保存程

度,生物扰动程度反映了储层改造强度,后期充填物质和成岩作用控制了储层改造性质。

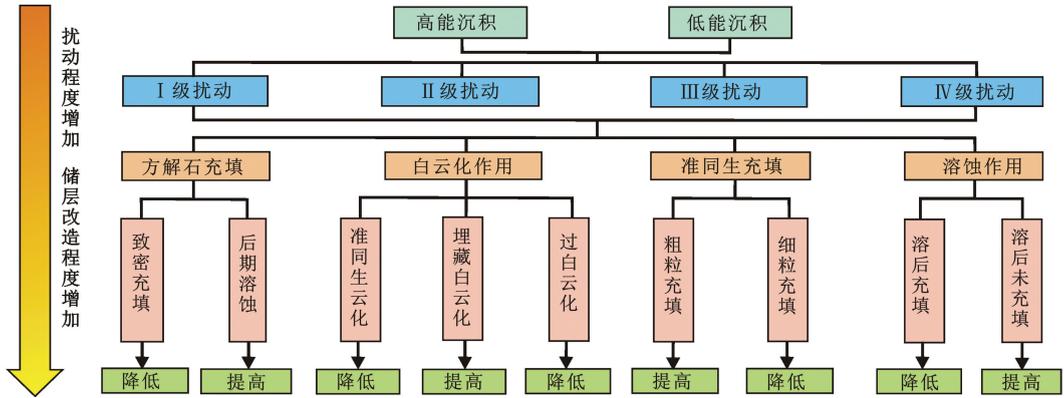


图7 M油田 Mishrif组生物扰动与储层物性多元化体系

Fig.7 Multi-system about bioturbation and physical property in Mishrif Formation of M Oilfield

不同沉积环境其岩石类型、生物类型和丰度及生物扰动方式等存在显著差异。高能沉积环境中岩石颗粒组分较多,泥质含量少,储层原始物性通常较好,而低能沉积环境沉积物泥质组分较高,储层原始物性通常较差,生物扰动发育环境比较宽泛,但在低能环境下扰动遗迹容易被保存下来,相比高能优质储层,其对低能差储层的改造作用更加明显,在研究区各沉积相中生物扰动作用对潟湖相储层物性具有重要的改善,而对其他类型储层的改善效果不明显,如潟湖相储层未扰动部分孔隙度介于4.0%~8.6%,平均为6.0%,渗透率介于(0.01~1.8)×10⁻³ μm²,平均为0.3×10⁻³ μm²,经生物扰动改造的潟湖相储层孔隙度介于3.7%~28.1%,平均为12.8%,

渗透率介于(0.02~26)×10⁻³ μm²,平均为3.1×10⁻³ μm²。随着生物扰动程度的增加,储层物性改造效果更加明显, I级斑状扰动孔隙度平均为8.49%,渗透率平均为1.1×10⁻³ μm²; II级纹层状扰动孔隙度平均为10.7%,渗透率平均为2.2×10⁻³ μm²; III级迷宫状扰动孔隙度平均为14.4%,渗透率平均为2.3×10⁻³ μm²; IV级层状扰动孔隙度平均为15.2%,渗透率平均为4.7×10⁻³ μm²。

储层改造的性质取决于充填物质,扰动通道中通常充填自形细晶状白云石,物性最好,其次是同生粗粒碎屑(表1)。若扰动通道中被方解石致密充填,则储层整体物性降低,若方解石后期遭受溶蚀形成部分残余孔隙,则可提高储层孔隙度。

表1 M油田 Mishrif组生物扰动充填物质与储层物性关系

Table 1 Relationship of bioturbation filling materials and physical properties in Mishrif Formation of M Oilfield

充填物	孔隙度/%			渗透率/10 ⁻³ μm ²		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
方解石	12.0	5.3	9.7	6.8	0.08	2.5
微晶离散状白云石	22.8	8.5	13.1	4.4	0.07	1.2
自形细晶状白云石	28.1	7.6	15.0	26.0	0.05	4.1
自形一半自形镶嵌状白云石	11.3	3.7	6.7	2.7	0.02	0.5
同生粗颗粒	20.5	5.7	11.7	8.7	0.03	3.8
同生细颗粒	13.7	10.5	12.1	3.1	2.40	2.7

不同成因的白云石颗粒对储层物性具有不同的影响,准同生白云化作用形成的微晶白云石对储层物性的影响较小。埋藏白云化和过白云化早期保留了大量的晶间孔和晶间溶孔,而过白云化作用对扰动通道的充填比较严重,严重降低了储层孔隙度。扰动通道若在沉积期充填碎屑颗粒,其对储层物性的影响取决于与底质组分的差异。若底质为粗粒沉

积,而扰动通道充填细粒碎屑,则可降低储层整体物性;若底质为细粒沉积,而扰动通道中充填粗粒碎屑,则有利于提高储层物性;若基质与扰动通道具有相似的颗粒类型,则生物扰动对储层物性没有明显的影响。值得注意的是,溶蚀作用和胶结作用对通道物性影响较大,无论扰动通道中颗粒粒径大小,若发生强烈的溶蚀作用,可形成粒间孔、铸模孔或生物

体腔孔等。溶蚀作用也可以发生在白云化之后,残留的灰质成分遭受外来不饱和流体的溶蚀,形成大量的次生晶间溶孔、生物体腔孔、基质微孔,有效提高储层物性。若溶蚀后又发生强烈的胶结作用,则可降低储层物性。相比灰岩储层,白云岩抗压强度和抗溶蚀能力更强,白云岩地层更容易发生裂缝,裂缝的形成可直接提高储层渗透率,溶蚀流体更容易沿裂缝进入地层,有利于溶蚀作用的进行。

5.2 生物扰动对沉积环境的指示意义

生物扰动底质反映了岩石古沉积环境,若生物扰动作用期间沉积环境稳定,且扰动通道中充填同沉积碎屑颗粒,则充填物与底质具有相似的化学组分或结构组分。因此扰动通道若充填同沉积碎屑颗粒,将扰动区物质恢复至初始成岩演化状态,若与底质存在明显的岩石特征差异,则可用于指示古沉积环境变化。若底质岩石为低能沉积,扰动通道为高能沉积,如图3(a)和(b),原始沉积环境为潟湖相,沉积物为泥晶灰岩—含生屑泥晶灰岩,岩石呈泥晶结构,而扰动区充填物中则是泥晶生屑灰岩,生屑类型包括棘皮类、双壳类、藻类和似球粒等,岩石呈粒泥结构—颗粒结构。两者的差异反映了扰动通道形成后,沉积环境从潟湖相演变为了台内滩相或滩后相等,反映了水动力条件明显增强,海平面下降。若底质岩石为高能沉积,扰动通道为低能沉积,如图3(c)所示,底质沉积环境为藻屑滩,岩石为泥晶藻屑灰岩,呈泥粒结构,而扰动区为含藻屑泥晶灰岩,岩石结构为粒泥结构,反映了海平面上升,水动力减弱的沉积环境。

6 结论

(1) M 油田 Mishrif 组潟湖相生物扰动作用最为发育,潟湖环境位于浪基面之下,水体较深,水动力扰动较弱,有机质丰度高,底栖生物发育,扰动底质硬度小,且后期破坏作用较小,扰动遗迹保存完整。相比高能的台地边缘滩体,生物扰动作用在低能安静的水体环境中更易常见。

(2) 基于前人对扰动强度的表征方案,综合 M 油田 Mishrif 组生物扰动特征,提出了生物扰动四分方案,将生物扰动划分为 I 级斑状扰动、II 级纹层状扰动、III 级迷宫状扰动和 IV 级层状扰动 4 个等级。简化了 Taylor 的 7 级分类,提高了不同级次的区分性,并在分类中结合铸体薄片资料精确标定岩石扰动区域,同时分类中将生物扰动的强度和连通性考虑在内,突出生物扰动与储层物性的改造关系。

(3) 研究区生物扰动通道中发育同生碎屑颗粒、白云石和方解石 3 种充填物质。其中同生碎屑颗粒受沉积作用控制,属于沉积期的产物,而白云石和方解石为后期成岩作用的产物。白云石根据形态差异分为微晶离散状白云岩、自形细晶白云岩和自形一半自形镶嵌状白云岩,不同类型的白云石其形成环境、控制因素及对储层物性的影响存在显著差异。

(4) 生物扰动与储层物性关系复杂,对储层的改造是多种因素多期作用叠加的结果。沉积环境决定了生物扰动的底质和保存程度,生物扰动程度反映了储层改造强度,后期充填物质和成岩作用控制了储层改造性质。潟湖相储层中,通常生物扰动强度越大,自形细晶白云石发育程度越高,溶蚀作用越强,则储层物性越好。

参考文献:

- [1] 杨式溥, 张建平, 杨美芳. 中国遗迹化石[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-17.
 - [2] GINGRAS M K, BANIAK G M, GORDON J, et al. Porosity and permeability in bioturbated sediments[J]. *Developments in Sedimentology*, 2012, 64(27): 837-868.
 - [3] QI Y, WANG M, ZHENG W, et al. Calcite cements in burrows and their influence on reservoir property of the Donghe sandstone, Tarim Basin, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2012, 23(2): 129-141.
 - [4] BANIAK G M, LA CROIX A D, POLO C A, et al. Associating X-ray microtomography with permeability contrasts in bioturbated media[J]. *Ichnos*, 2014, 21(4): 234-250.
 - [5] BANIAK G M, GINGRAS M K, BURNS B A, et al. An example of a highly bioturbated, storm-influenced shoreface deposit: Upper Jurassic Ula Formation, Norwegian North Sea[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(5): 1261-1285.
 - [6] BANIAK G M, AMSKOLD L, KONHAUSER K O, et al. Sabkha and burrow-mediated dolomitization in the Mississippian Debolt formation, Northwestern Alberta, Canada[J]. *Ichnos*, 2014, 21(3): 158-174.
 - [7] BANIAK G M, GINGRAS M K, PEMBERTON S G. 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.
 - [8] 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. Environment

- interpretation of Upper Triassic bioturbation structure and correlation with petrophysical properties of reservoir in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1):74-80.
- [9] LA CROIX A D, GINGRAS M K, PEMBERTON S G, et al. Biogenically enhanced reservoir properties in the Medicine Hat gas field, Alberta, Canada [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43:464-477.
- [10] 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*, 2016, 465:138-155.
- [11] GINGRAS M K, PEMBERTON S G, MUELENBACHS K, et al. Conceptual models for burrow-related, selective dolomitization with textural and isotopic evidence from the Tyndall Stone, Canada [J]. *Geobiology*, 2004, 2(1):21-30.
- [12] CORLETT H J, JONES B. Petrographic and geochemical contrasts between calcite-and dolomite-filled burrows in the Middle Devonian Lonely Bay Formation, Northwest Territories, Canada; implications for dolomite formation in Paleozoic burrows [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(9):648-663.
- [13] 牛永斌, 崔胜利, 胡亚洲, 等. 塔里木盆地塔河油田奥陶系数字岩心图像中生物扰动的定量表征 [J]. *古地理学报*, 2017, 19(2):353-363.
NIU Yongbin, CUI Shengli, HU Yazhou, et al. Quantitative characterization of bioturbation based on digital image analysis of the Ordovician core from Tahe Oilfield of Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(2):353-363.
- [14] 牛永斌, 崔胜利, 胡亚洲, 等. 塔河油田奥陶系生物扰动型储集层的三维重构及启示意义 [J]. *古地理学报*, 2018, 20(4):691-702.
NIU Yongbin, CUI Shengli, HU Yazhou, et al. Three-dimensional reconstruction of the Ordovician bio-disturbing reservoir in Tahe Oilfield and its enlightenment significance [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(4):691-702.
- [15] MARENCO K N, BOTTJER D J. The intersection grid technique for quantifying the extent of bioturbation on bedding planes [J]. *Palaios*, 2010, 25(7):457-462.
- [16] DORADOR J, RODRIGUEZ-TOVAR F J. Digital image treatment applied to ichnological analysis of marine core sediments [J]. *Facies*, 2014, 60(1):39-44.
- [17] DORADOR J, RODRIGUEZ-TOVAR F J. Quantitative estimation of bioturbation based on digital image analysis [J]. *Marine Geology*, 2014, 349(1):55-60.
- [18] AQRAWI A A M, GOFF J C, HORBURY A D, et al. The petroleum geology of Iraq [M]. Bucks, UK: Scientific Press, 2010:1-6.
- [19] 伏美燕, 赵丽敏, 段天向, 等. 伊拉克 HF 油田 Mishrif 组厚壳蛤滩相储层沉积与早期成岩特征 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(5):1-9.
FU Meiyuan, ZHAO Limin, DUAN Tianxiang, et al. Reservoir and early diagenesis characteristics of rudist shoal of Mishrif Formation in HF Oilfield of Iraq [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(5):1-9.
- [20] TAYLOR A M. Trace fossil fabric analysis in the subsurface exploration of Jurassic sequences from the North Sea Basin [D]. Manchester: University of Manchester, 1991.
- [21] TAYLOR A M, GOLDRING R. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric [J]. *Journal of the Geological Society*, 1993, 150(1):141-148.
- [22] 齐永安, 胡斌, 张国成, 等. 遗迹学在沉积环境分析和层序地层学研究中的应用 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007:1-36.
- [23] 齐永安. 生物扰动构造与塔中东河砂岩储集性能的关系 [J]. *石油与天然气地质*, 1998, 19(4):318-320.
QI Yong'an. Relations between bioturbation structures and petrophysical properties of Donghe sandstone reservoir in central Tarim [J]. *Oil & Gas Geology*, 1998, 19(4):318-320.
- [24] 张学丰, 刘波, 蔡忠贤, 等. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性 [J]. *地质科技情报*, 2010, 29(3):79-85.
ZHANG Xuefeng, LIU Bo, CAI Zhongxian, et al. Dolomitization and physical properties of carbonate reservoirs [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(3):79-85.
- [25] 胡亚洲, 牛永斌, 崔胜利, 等. 碳酸盐岩中生物潜穴充填特征及其诱导孔隙演化规律: 以豫西奥陶系马家沟组三段为例 [J]. *沉积学报*, 2019, 37(4):690-701.
HU Yazhou, NIU Yongbin, CUI Shengli, et al. Filling characteristics of burrow in carbonate and the evolutionary principle of burrow mediated pores: a case studied from the third member of Majiagou Formation, Ordovician, west Henan province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(4):690-701.
- [26] GINGRAS M K, PEMBERTON S G, MENDOZA C A, et al. Assessing the anisotropic permeability of Glossifungites surfaces [J]. *Petroleum Geoscience*, 1999, 5(4):349-357.