

DOI: 10.13745/j.esf.2018.02.009

东非鲁武马盆地始新统超深水重力流砂岩储层特征及成因

赵健¹, 张光亚¹, 李志¹, 史卜庆², 范国章³, 王晓丰², 温志新¹, 法贵方¹, 孙国桐¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国石油海外勘探开发公司, 北京 100034
3. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023

ZHAO Jian¹, ZHANG Guangya¹, LI Zhi¹, SHI Buqing², FAN Guozhang³, WANG Xiaofeng², WEN Zhixin¹, FA Guifang¹, SUN Guotong¹

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China
2. China National Oil and Gas Exploration & Development Corporation, Beijing 100034, China
3. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

ZHAO Jian, ZHANG Guangya, LI Zhi, et al. Characteristics and the forming process of the Eocene ultra-deep-water gravity flow sandstone reservoir in the Rovuma Basin, East Africa. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 083-091

Abstract: A number of Paleogene-Neogene large-area gravity flow sand bodies, bearing super huge volume of gas reserve, were developed in the ultra-deep-water region in the Rovuma Basin, East Africa. By studying the Eocene sand body, we investigated the characteristics of the extraordinary sedimentary complex and its corresponding forming mechanisms in different scales, using high quality seabed 3D seismic imaging, well data and nearly one hundred meters of valuable conventional core. From the seismic imaging, it was found that these sand bodies are lenticular and wedge-shaped, enclosed by thick and dark-colored deep-sea mud or shale. From the wire-line logging data, an abrupt-contact exists between sandstone bodies and their surrounding mud. And the sandstones always seem homogenous with excellent porosity, permeability and especially low content of shale in whole interval. However, the detailed observation of bottom-hole core indicated these seemingly homogeneous and extraordinarily thick sand bodies belong to gravity flow deposit of mainly sand-rich turbidite channel and lobe complex, and are composed of several comparable gravity flow deposit units or sub-layers. Each unit or sub-layer mainly consists of coarse grained sandstone in the lower part, and fine grained sandstone, silt or clay in the upper part. A clear boundary could be easily identified between any two units, and the common lack of fine grained deposits in upper layers indicates these sandstones were modified to various extents by a certain geological process. After a comprehensive study of the sandstone complexes, together with research on regional sedimentary environment, the formation mechanism of the sandstones can be summarized as the following, the Rovuma river delta directly supplied huge volume of sand-rich sediments to the large-area deposit complexes; the deep-water gravity flow deposition and block transportation controlled their grained bedding and internal architecture, one of the most important features of gravity flow deposit. Then the bottom current blew away the upper fine-grained suspension of shale and silt-sparing the medium-coarse grained deposits and formed the fascinating deep-water sandstone complexes. Finally, multiple depositional events and channel lateral migration together contributed to the formation of the thick,

收稿日期: 2017-09-10; 修回日期: 2017-10-20

基金项目: 国家科技重大专项 29 课题五(2016ZX05029); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2013E-0501)

作者简介: 赵健(1982—), 男, 博士, 主要从事海外油气勘探、储量评估、储层沉积学研究及石油地质综合研究。E-mail: zhaojian68@petrochina.com.cn

homogeneous and mud-free sandstone bodies of this unique type of excellent sandstone reservoir.

Key words: East Africa; Rovuma Basin; ultra-deep water; gravity flow sand-bodies; reservoir characteristics; forming process; strong bottom current

摘要:鲁武马盆地古近系—新近系发育多套超深水、超大型、富含天然气藏的重力流沉积砂体。以始新统砂体为解剖对象,分析区内重力流砂岩储层特征及成因。结果表明砂体以巨厚层状产出于深海泥岩内部,并与周围泥岩截然接触,测井曲线表现出宏观均一性;岩心揭示此类巨厚砂体是由多期单砂体叠置而成,单砂体是由底部高密度颗粒流和顶部低密度浊流两部分组成,且经历过强底流改造。鲁武马河流三角洲强大物源供给决定了区内砂体分布面积和体积规模;深海滑塌、块体搬运等重力流沉积过程控制了沉积体粒序构造和内部结构;海底区域性强底流持续冲刷并携带走单砂体顶部细粒沉积物,残留了底部“干净”的中粗粒砂岩;多期沉积事件和频繁水道迁移决定了砂体纵、横向叠加展布,并最终形成了区内厚度巨大、岩性宏观均一且连通性极好的超大型深水重力流沉积砂岩储层。

关键词:东非;鲁武马盆地;超深水;重力流砂体;储层特征;成因;强底流

中图分类号:P618.130.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)02-0083-09

近年来随着陆地及陆缘浅水区油气勘探程度的提高,油气勘探难度越来越大,储量增加越来越困难,深海正成为未来油气勘探的重要战略领域^[1-2]。纵观世界范围内海洋油气勘探实践,寻找规模储层始终是油气勘探的首要目标,深海沉积研究也因此一直备受关注。无论是20世纪50—60年代的浊流体系和鲍马序列^[3-4],抑或是近期流行的块体搬运和砂质碎屑流等^[5-9],它们均强调在单一重力作用下流体密度、黏度和沉积物颗粒之间的相互作用及由此形成的各种沉积体结构构造和岩相组合差异^[8]。在此理论上衍生出来的无论是Mutti等^[10]的古代扇模式、Normark^[11-12]的现代扇模式、还是Walker^[13]的综合扇模式,均强调在单一重力作用下沉积体在海底可能的、理想化展布形态^[14]。这些沉积理论和地质模式奠定了海洋沉积学的基础,为海洋沉积体分布预测和海洋油气勘探提供了依据和指导,但随着深海勘探实践增多,认识深化,亦发现现实中的海底沉积体系要复杂得多,这些基础理论和地质模式似乎并不足以解释勘探对象的复杂性和特殊性。

东非鲁武马盆地超深水区(水深>1 500 m)古新统一渐新统发育多套重力流沉积砂体,因蕴藏着储量规模巨大的天然气藏而成为近年来油气勘探的热点^[15-17]。勘探研究已证实,盆内砂体埋深大(水深1 600~2 630 m,地层埋深4 500~6 200 m)、属超深水重力流砂岩储层。多手段综合预测显示砂体连续性好,空间分布广,面积大,属超大型深海储层^[18-19]。同时,砂岩泥质含量少,物性较好,属超“干净”砂岩,与墨西哥湾、西非等深海沉积迥然不同^[20]。认识此类深海重力流砂岩储层特征,并探索其成因不仅有

利于目前油气勘探实践,服务于后期油气藏开发,而且也将极大地丰富和深化人们对深海沉积和此类优质储层形成过程的认识。

本文将基于高质量的三维海底地震和高分辨率测井资料分析盆内砂体展布和产出状态。在此基础上,利用钻井数据、取心资料及测试数据多尺度和多维度探讨沉积砂体内部结构和物性特征,并综合利用现有重力流沉积理论,结合区域地质背景,分析超深水重力流砂体的成因。

1 区域沉积概况

鲁武马盆地属典型的被动陆缘盆地^[21-24],沉积了从二叠系到第四系等多套地层,发育了多套成藏组合^[22-23,25-26]。目前油气发现垂向上主要集中在古近系、新近系,平面上集中分布在宽缓的、无断裂分布的盆地陆坡区^[16,19,27],距离海岸80~100 km,距离现今的鲁武马河流三角洲南东大约100 km,累计叠合面积约1 200 km²(图1)。古近系—新近系整体为“泥包砂”结构,砂体被深海泥质包裹,两者呈突变接触。始新统砂体是区内沉积七套砂体之一,平面分布达274 km²,纵向上厚度52~185 m,多井钻遇巨厚气层(图2)。

2 砂体测井响应及均质性特征

始新世地层测井响应非常明显,在GR和RD组合曲线柱状图上,全井段基本呈低GR、低RD平直基线状,以泥岩为主。局部含规模砂体,砂岩呈高GR、高RD,与低幅泥岩形成明显对比,两者多呈截

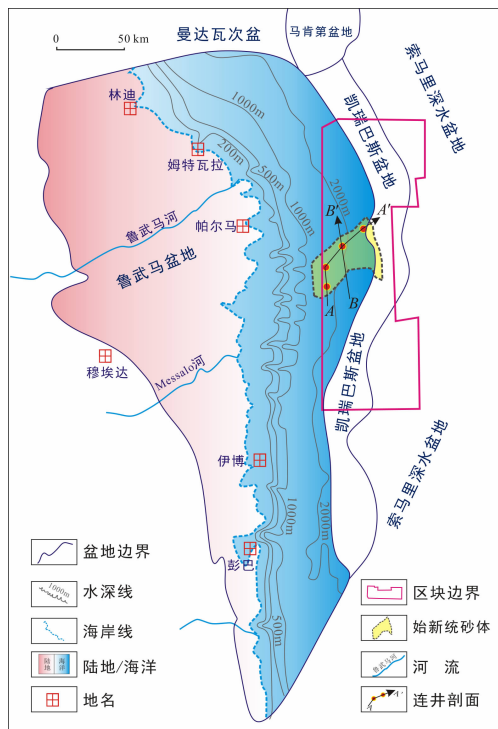


图1 鲁武马盆地位置及重力流砂体分布图
Fig.1 Location map of Rovuma Basin and gravity flow sand bodies distribution within basin

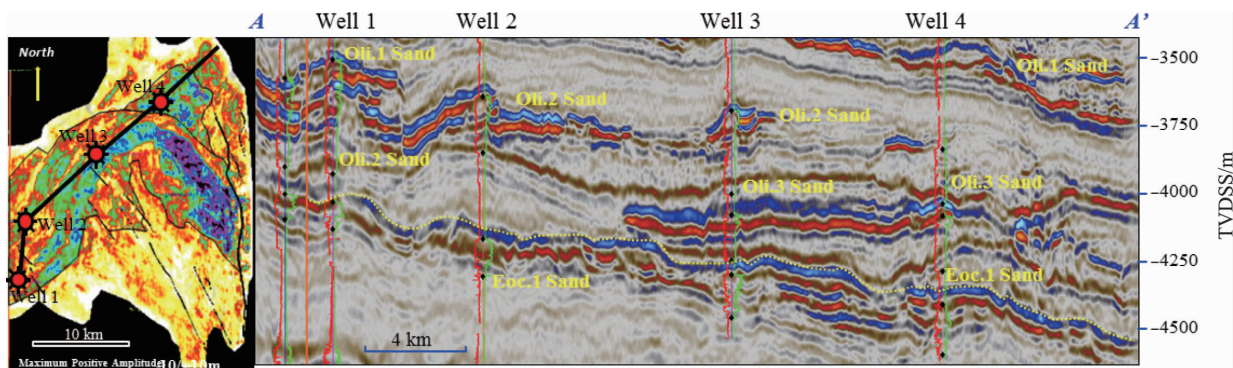
河流相、湖泊相频繁砂泥岩互层形成的齿形、钟形等测井曲线特征截然不同,区内砂体在测井曲线上表现出明显宏观均一性。地震剖面上,砂体反射呈强振幅、中等连续、低频率等特征,易于辨识,多呈楔形、梭形,局部为似层状或透镜体状,与周围泥岩空白反射形成鲜明对比(图2)。

3 储层岩石学特征及内部结构

为分析该种宏观均一的储层砂体,研究中进行了近30 m深海取心并做了详细岩心观察描述(图3)。综合录井资料及岩心,海底泥岩主要呈灰黑色、暗色或深绿色,颗粒较细,具层理构造或块状构造。矿物成分定量分析表明其基本以黏土和云母为主,结晶程度差,不见晶体结构,其含量通常大于45%~65%。除此之外,还含有20%±石英,10%~20%斜长石,钾长石含量通常低于10%,局部含有方解石,呈斑块状、团块状。取心段泥岩较脆,破碎严重(图4)。砂岩呈深灰色、灰色,中粒-粗粒结构,以粗粒为主,局部含砾或巨砾,分选差、磨圆一般-差,与泥岩截然接触。由于两者固结程度不同,取心可发现明显界面(图4)。

不仅砂-泥岩界面清晰明显,厚层砂岩内亦存在明显界面。砂岩呈正粒序构造,旋回性明显,每隔8~10 m即出现粒度突变界面,两个“界面”之间为一期旋回,对应砂体亦可称为单(旋回)砂体,下部砂体颗粒大、分选及磨圆差,向上粒度逐渐变小,分选及磨圆均有所改善,但未见到粉砂及泥质。单旋回砂体底部粗粒砂岩内常见颜色偏深、大小不一,形状不规则的泥质条带、泥质团块,偶见白色、灰白色钙质团块(图5)。对这些泥质团块详细观察后发现其

然接触关系。对比全区所有钻遇始新世砂体钻井测井响应特征,可发现箱状、钟状和锯齿状等多种类型,其中以箱形最常见(图3)。箱形砂体测井曲线旋回性不大,未见明显形态变化;而钟形和齿状多出现在砂层顶面与泥岩过渡地带,具过渡性特征,一定程度上体现了沉积旋回特征。箱形砂体多被认为是重力流水道和朵叶体沉积,而钟形及齿形砂体则被认为是与水道有关的天然堤-溢岸等沉积^[18-19]。值得一提的是,区内砂体由于厚度大,泥质含量多低于10%,特别“干净”,且砂层含气饱和度高,造成中子-密度交汇非常清晰,气层容易识别(图3)。与陆地



左图基于地震震幅异常确立的砂体平面展布;右图为连井地震剖面,剖面位置见图1。Oli.代表 Oligocene, Eoc.代表 Eocene。

图2 重力流砂体地震响应特征及垂向分布

Fig.2 Regional and vertical distribution of gravity flow sand bodies based on seabed seismic imaging

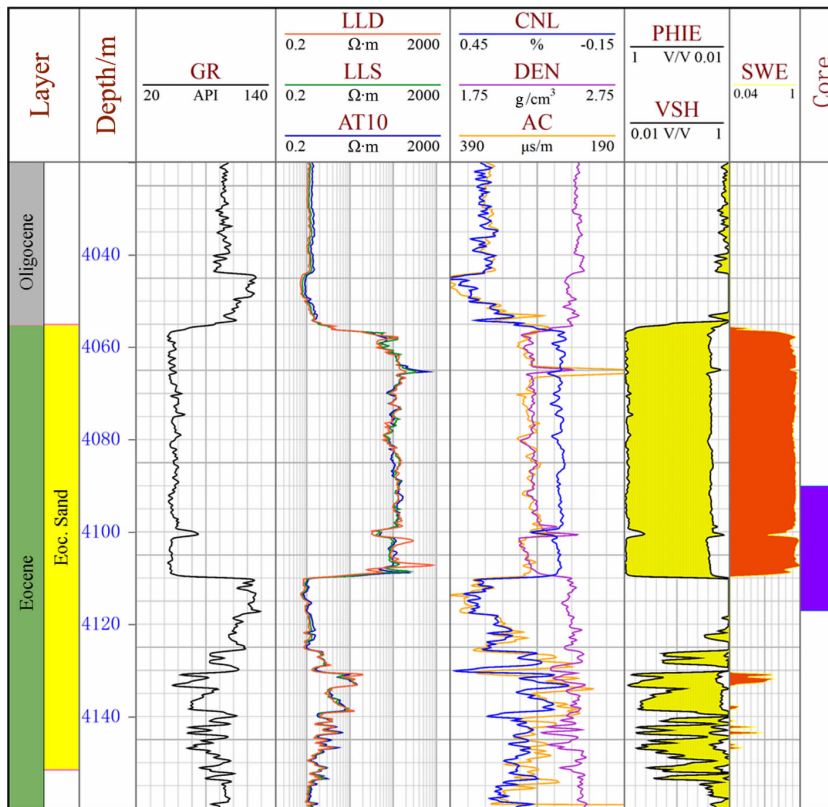


图3 砂体测井响应特征

Fig. 3 Logging signatures of the gravity flow sandstone

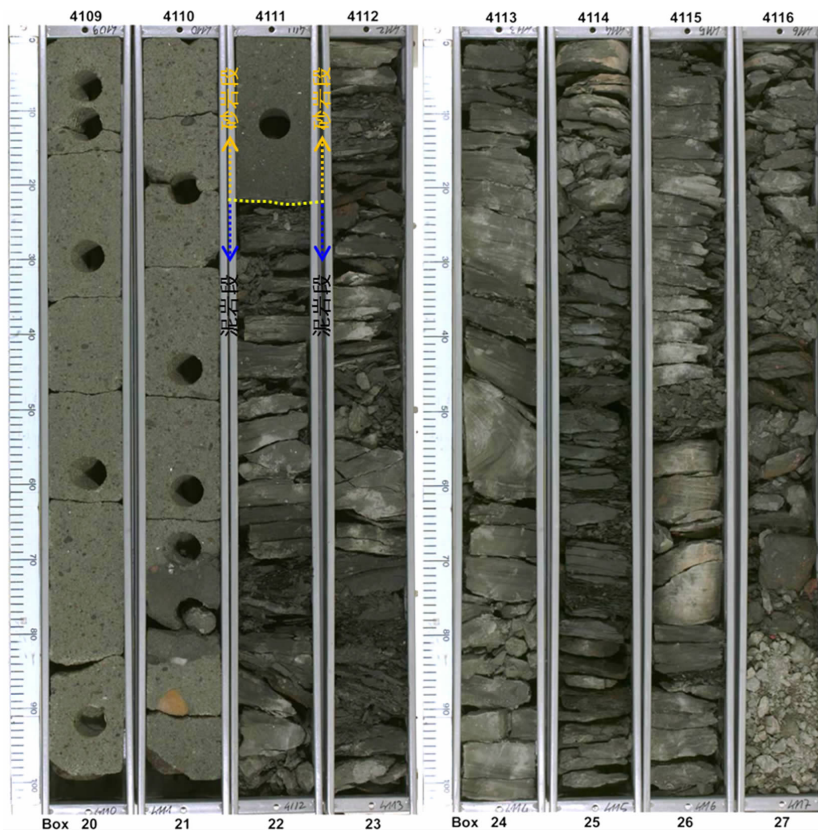


图4 始新统砂岩、泥岩特征及接触关系

Fig. 4 Conventional core pictures for sandstone, mudstone and their contact

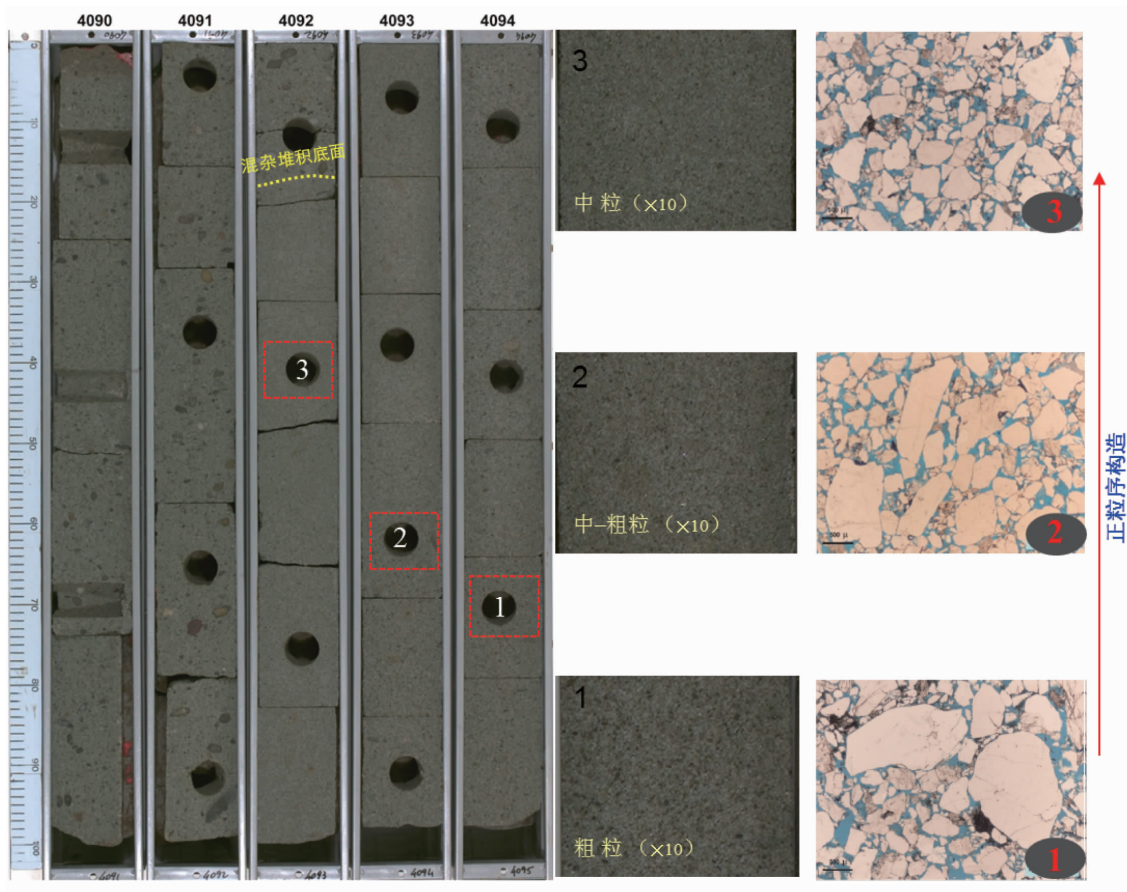


图5 始新统砂岩垂向旋回性及粒度变化

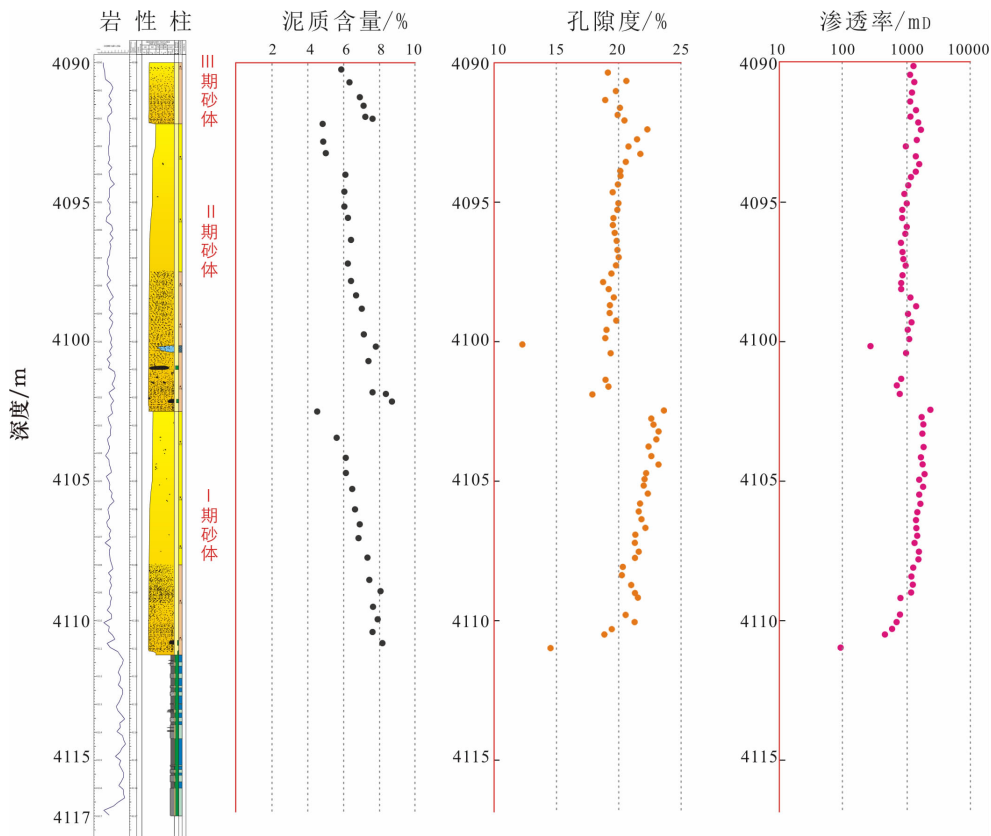
Fig. 5 Gravity flow sandstone sedimentary cycle and graded bedding

多呈拉伸或撕裂状,颜色及矿物组成与海底泥岩基本一致,应属于海底泥岩在沉积初期半固结状态下被重力流等搅扰,卷起后被夹杂在砂岩内再沉积过程,表明其形成时,水体动荡,同时亦表明流体具有一定黏性,可以支撑粗粒沉积物。

为定量分析砂体结构和成分成熟度垂向变化,在单旋回砂体内进行连续取样制作岩石薄片进行镜下观察描述和粒度统计,结果表明砂体垂向上矿物成分几乎相同,差异主要体现在粒度及分选上。砂岩矿物组成基本以石英、长石为主,含少量副矿物和杂基。石英含量差异显著,大部分层段石英含量大于60%,局部层段甚至完全以石英为主(含量大于80%);长石以钾长石和斜长石常见,两者含量均在20%左右,其中钾长石含量略高;杂基含量通常低于2%,以黏土和云母为主;局部含极少量方解石、黄铁矿、绿帘石等重矿物,通常不足1%。按照QRF分类命名规则,区内砂岩整体属长石砂岩,局部可能属长石石英砂岩。选取3个代表性样点进行储层岩石学及成岩特征分析。岩性上,从下向上分别发育含

砾粗粒长石砂岩、中粗粒长石砂岩和中粒长石砂岩。岩石压实程度较低,矿物颗粒基本以点接触为主。胶结程度整体亦较弱,且随泥质含量变化表现出差异性,样点1泥质含量相对较高,则矿物颗粒表面发育一定量黏土膜,样点2次之,样点3矿物颗粒表面干净,不发育黏土膜。矿物颗粒溶蚀现象少见,储层孔隙基本以原生粒间孔为主,垂向差异不大。

为更清晰、直观展示单期砂体垂向结构差异性、反映砂体叠置关系,研究中对该井全部取心进行了素描,并分析其物性垂向变化特征(图6)。图中可以看出,整个取心段包含两个完整单(旋回)和一个不完整单(旋回)砂体。岩石实测数据显示单旋回砂体孔隙度为19%~23%,由下向上呈增加趋势。与之相对应,渗透率变化更明显,呈倍数增加。换言之,单砂体底部粗粒部分孔隙度偏低,向上随粒度减小,砂体物性逐渐变好。这与储层物性通常随矿物粒度增加而变好的传统认识截然相反,表现出明显特殊性。



取心位置见图3。

图6 重力流砂体岩心素描及物性垂向分布

Fig.6 Sketch of whole core interval and corresponding porosity & permeability distribution

4 砂体沉积改造作用和底流活动

宏观均质的厚层砂体实际上是由多期重力流单砂体叠加复合而成,但单砂体结构成熟度、成分成熟度以及物性垂向变化均显示出特殊性,明显不同于墨西哥湾及西非深水重力流沉积体^[20]。不仅如此,单砂层内泥质含量极低,完全未见泥岩层段,不同寻常。理论上讲,一期重力流沉积事件中后期,随着沉积物粒度降低,粉砂和泥等细粒沉积物开始沉降,必然会在纵横向形成一个完整混杂沉积序列,发育一定规模的细粒沉积物^[4-6,28-29],而区内单砂体细粒沉积物及泥质的普遍缺失表明必然还存在其他地质作用影响甚至改造了这些砂体。

通过对单砂体岩心细致观察,尤其是借助高分辨率岩心扫描资料,终于发现单砂体除了具明显正粒序构造外,还发育若干层理构造,出现厚度不均的纹层(图7),表明在重力流沉积过程中或之后有牵引流对砂体进行了改造^[14,18]。为确认牵引流的存在,笔者选择了不同方向连井剖面及地震剖面进行

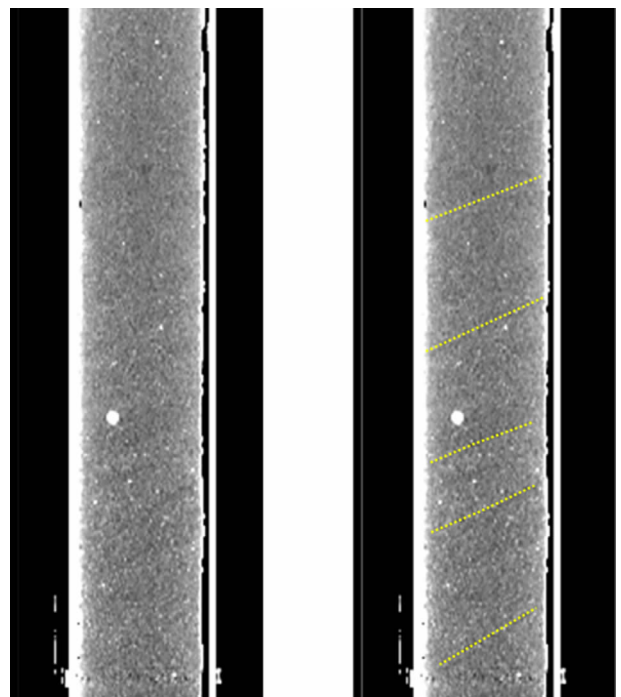


图7 岩心高分辨率扫描照片及层理构造

Fig.7 High resolution scanning picture of sandstone core with bedding

水道形态和砂体粒度区域对比分析,结果均显示同一地层沉积物粒度在区域上从南向北呈降低趋势,水道亦呈明显非对称性,近东西走向的水道南侧以粗砂为主,北侧细粒沉积物更聚集。综合深水沉积动力机制类型及区域地质特征,能够如此大范围影响甚至改造深水沉积物再分配的区域性牵引流只能是东南海域海底存在的活跃的、从南向北活动的深海底流^[30-31]。

在明确辨识底流存在并对砂体进行改造后,不难理解区内砂体的种种特殊性。因为砂体并不是在单一重力作用下的简单沉积过程,而是至少存在重力流和底流两种地质作用。沉积砂体在沿着陆坡滑塌沉积过程中,宏观表现出重力流沉积特征,纵向上形成典型正粒序构造。在沉积过程中及沉积之后,重力作用减弱,底流作用开始凸现,造成细粒沉积物再次分选,已沉积的颗粒也会再次发生侧向迁移,从而使得细粒沉积物沉积“着落点”与下伏粗颗粒沉积不一致,造成不同部位沉积物组成和结构的显著差异(图8)。不仅如此,重力流沉积具有偶发性,而底流活动则表现出持续性。砂体最终清洗干净程度取决于底流作用时间长短和强度,两期沉积事件间隔时间越长,底流活动越强烈,则对底伏砂体改造程度越大,砂体被淘洗得越“干净”;反之,则砂体改造程度越弱,中细砂岩及泥质含量越

高,砂体越“脏”^[18,31]。由此不难看出,区内砂体属强底流改造,且改造程度属较彻底的一类沉积体。

5 砂体沉积模式及成因分析

综合上述工作,并结合区域构造沉积特征不难推测区内砂体沉积演化过程。研究工区西北部发育有鲁武马大型河流三角洲沉积体系,河流携带的大量富砂沉积物及三角洲沉积体受海底地形和各种触发机制的影响,向深海滑塌沉积,该过程也是动力再平衡过程,其运动和停止是沿斜坡重力作用、海水浮力及底流活动综合作用结果。在滑塌沉积的不同阶段,各种动力作用地位不同,在下滑、滑塌、沉积阶段重力作用占据主导,控制着沉积体向下运动。在搬运过程中,块体沉积物含水饱和度增加,对块体稀释,大颗粒首先滞留沉积,细小颗粒随后陆续沉积,对颗粒进行初始筛选、分配,形成正粒序构造-重力流沉积最典型特征^[3-4,8,14]。依据砂体结构成熟度和成分成熟度特征来看,这种砂体既不是简单的浊流沉积砂体,也不同于块体搬运沉积体,因为其粒度明显比传统浊积岩粒度大,颗粒分选明显优于传统块体搬运。因此,笔者认为将其看成由底部高密度砂质碎屑流和顶部低密度浊流复合体则更合适^[3-6]。

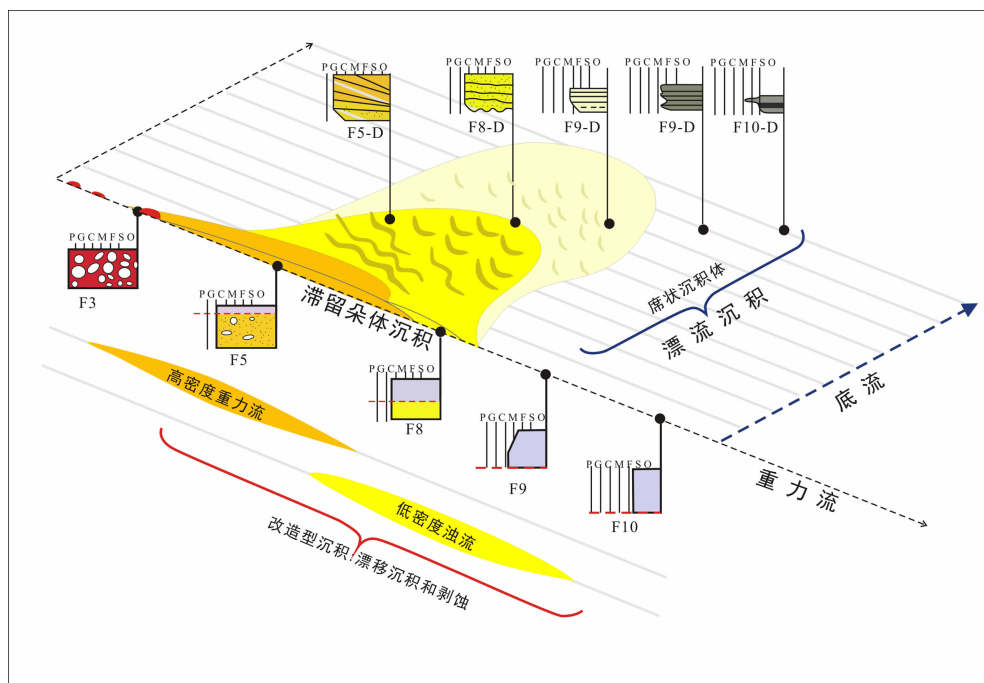
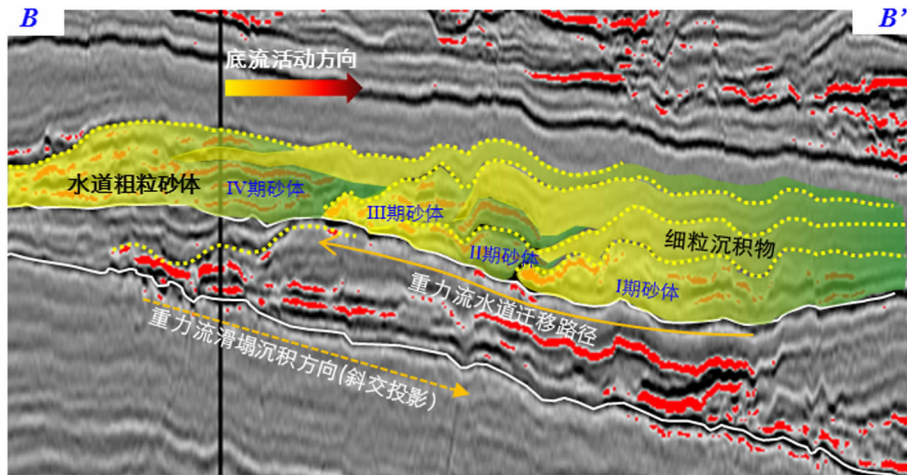


图8 底流改造型重力流沉积模式
(据文献^[29,31]修改)

Fig. 8 Sedimentary model of the gravity flow sandstone strongly altered by bottom current



剖面位置见图1。

图9 始新统重力流砂体侧向迁移及垂向叠置示意图

Fig. 9 Diagram of channel lateral migration and sand bodies' vertical overlap

由于强底流活动,在垂直水道方向将浊流沉积体系中的细粒砂、粉砂或泥质冲刷掉,原地留下相对“干净”的粗粒碎屑流砂体。与砂层底部粗粒碎屑流沉积相比,底流的持续淘洗作用对顶部浊流体系改造明显,造成其泥质含量更低,砂体物性更好,从而形成了区内单砂体底部砂体粒度大,物性却相对偏差;顶部砂体粒度小,物性则相对更好的特殊现象。

概括而言,鲁武马河流三角洲及陆缘沉积体系强大物源供给决定了区内砂体分布面积和体积规模;深海滑塌和块体搬运控制着砂体垂向粒序构造,多期沉积事件和频繁水道迁移决定了砂体空间叠置。对每一期砂体而言,按照经典浊流理论和近期流行的砂质碎屑流理论,其应属于(底部)砂质碎屑流和(顶部)浊流的复合体;由南向北持续的强底流活动冲刷并带走顶部浊流体系中的细粒沉积,剩下底部中粗粒砂岩。多期此类砂岩叠加复合,最终形成了厚度巨大、岩性宏观均一且连通性良好的超大型深水重力流沉积砂体(图9)。

6 结论和认识

(1)鲁武马盆地始新统砂岩储层表现出明显宏观均一性,基本以中-粗粒长石砂岩或长石石英砂岩为主,砂体分选和磨圆较差,结构成熟度和成分成熟度不高,正粒序构造,属重力流沉积。

(2)盆内这种超深水、超大型优质的深水重力流砂岩储层是多期重力流砂体叠置堆积而成,单期砂体是由高密度碎屑流和低密度浊流两部分组成,并

受强底流作用改造,是重力流和底流两种地质作用控制下的复杂沉积体系。

(3)鲁武马河流三角洲及陆缘沉积体系强大物源供给决定了区内砂体分布面积和体积规模;深海滑塌和块体搬运控制着砂体垂向粒序构造,多期沉积事件和频繁水道更替决定了砂体空间叠置;由南向北持续的强底流活动冲刷并带走砂体表层细粒沉积,剩下中粗粒砂岩。多期此类砂岩叠加复合,最终形成了厚度巨大、岩性宏观均一且连通性良好的超大型深水重力流沉积砂体。

本文研究工作得到了Eni东非公司、Eni公司勘探开发部(E & P Department)、中油国际莫桑比克项目的大力支持,岩心样品照片来自Eni东非公司岩矿实验室,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 庞雄, 陈长民, 朱明, 等. 深水沉积研究前沿问题[J]. 地质论评, 2007, 53(1): 36-43.
- [2] 陶维祥, 丁放, 何仕斌, 等. 国外深水油气勘探述评及中国深水油气勘探前景[J]. 地质科技情报, 2006, 25(6): 59-66.
- [3] KUENEN P H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. Journal of Geology, 1950, 58: 97-127.
- [4] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits a graphic approach to facies interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 88-123.
- [5] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents: are they sandy debris flows? [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66: 2-10.

- [6] SHANMUGAM G. The Bouma sequence and turbidite mind set[J]. *Earth-Science Reviews*, 1997, 42(4): 201-229.
- [7] SHANMUGAM G. New perspectives on deep-water sandstones: origin, recognition, initiation, and reservoir quality [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [8] LOWE D R. Sediment gravity flows; their classification, and some problems of applications to natural flows and deposits [M] // DOYLE L J, PILKEY O H. *Geology of continental slopes*. San Francisco: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1979, 27: 75-82.
- [9] 李磊, 王英民, 张莲美, 等. 块体搬运复合体的识别、演化及其油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2010, 25(1): 56-62.
- [10] MUTTI E, RICCI L F. Turbidites of the northern Apennines; introduction of facies analysis[J]. *International Geology Review*, 1972, 20: 125-166.
- [11] NORMARK W R. Growth patterns of deep sea fans[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1970, 54: 2170-2195.
- [12] NORMARK W R. Fan valleys channels and depositional lobes on modern submarine fans characters for recognition of sandy turbidite environments[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1978, 62: 912-931.
- [13] WALKER R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans; models for exploration for stratigraphic traps[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1978, 62: 932-966.
- [14] SANDERS J E. Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related re-sedimentation mechanisms [C] // MIDDLETON G V. *Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation*. San Francisco: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1965, 12: 192-219.
- [15] IHS. International energy oil & gas industry solutions[EB/OL]. [2014-12-30]. <http://www.ihs.com/industry/oil-gas/international.aspx>.
- [16] 张光亚, 刘小兵, 温志新, 等. 东非被动大陆边缘盆地构造-沉积特征及其对大气田富集的控制作用[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(4): 71-80.
- [17] 周总瑛, 陶冶, 李淑筠, 等. 非洲东海岸重点盆地油气资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 543-551.
- [18] DENIS P, MAURO G, MASSIMO F, et al. Insights into a new super-giant gas field-sedimentology and reservoir modeling of the Coral Complex[C] // Offshore technology conference Asia. Kuala Lumpur: Offshore Technology Conference, 2014: 1-8.
- [19] 孙辉, 唐鹏程, 陈宇航, 等. 东非鲁武马盆地陆坡深水沉积特征及主控因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(3): 59-68.
- [20] MUTTI E, CAEMINATTI M. Deep-water sands of the Brazilian offshore basins[C] // Abstract AAPG international conference and exhibition. Milan: AAPG Publication, 2011: 23-26.
- [21] 金宠, 陈安清, 楼章华, 等. 东非构造演化与油气成藏规律初探[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(增刊 2): 121-130.
- [22] 温志新, 童晓光, 张光亚, 等. 东非裂谷系盆地群石油地质特征及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(4): 60-65.
- [23] 张可宝, 史卜庆, 徐志强, 等. 东非地区沉积盆地油气潜力浅析[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(6): 869-874.
- [24] SALMAN G, ABDULA L. Development of the Mozambique and Rovuma sedimentary basins, off-shore Mozambique[J]. *Sediment Geology*, 1995, 96(1/2): 7-41.
- [25] 孔祥宇. 东非鲁武马盆地油气地质特征与勘探前景[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(3): 21-27.
- [26] EDWARDS H, LAINCHBURY S. The prospectively of the Rovuma Basin Mozambique[C] // The 69th annual SEG international meeting, expanded abstracts. Tulsa, Oklahoma, USA: Society of Exploration Geophysicists, 1999.
- [27] MAHANJANE E S, FRANKE D. The Rovuma Delta deep-water fold-and-thrust belt, offshore Mozambique[J]. *Tectonophysics*, 2014, 614: 91-99.
- [28] WYNN R N H, KENYON D G, MASSON D A V, et al. Characterization and recognition of deep-water channel-lobe transition zones[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2002, 86: 1441-1462.
- [29] LOWE D R. Sediment-gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-turbidity currents[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52(1): 279-297.
- [30] 王英民, 王海荣, 邱燕, 等. 深水沉积的动力学机制和响应[J]. *沉积学报*, 2007, 25(4): 495-504.
- [31] SHANMUGAM G, SPALDING T D. Process sedimentology and reservoir quality of deep-marine bottom-current reworked sands (sandy contourites): an example from the Gulf of Mexico[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1993, 77: 1241-1259.