

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020060802

东非鲁伍马盆地深水沉积体系及油气勘探意义

曹全斌¹, 曹旭文², 鲁银涛¹, 陈宇航³, 闫春¹, 许小勇¹, 王朝锋¹

1. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

2. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

3. 西安石油大学, 西安 710065

摘要: 利用高分辨率三维地震资料、测井和钻井数据, 对东非鲁伍马盆地深水沉积特征进行了系统刻画。根据深水沉积体的地震相特征, 识别出峡谷、水道、漫溢沉积、朵体、块体搬运沉积 (MTDs) 和凝缩段等深水沉积单元, 建立了地震识别图版。分析总结了水道和朵体的岩性特征、电性特征和储层物性特征, 砂岩具有低伽马 (GR) 和高电阻 (RT) 特征, 厚层砂岩 GR 曲线呈“箱型”, 有泥岩夹层的砂岩段呈叠加的“钟型”特点; 储层压实程度弱, 发育原生粒间孔隙, 具有中—高孔、中—高渗的特征。结合成藏条件研究, 认为由水道和朵体浊积砂岩储层、凝缩段和漫溢沉积泥岩盖层、天然堤和 MTDs 为侧向遮挡等要素构成的油气储、盖配置关系, 是研究区油气成藏的一个关键因素, 对深水油气勘探具有一定的指导意义。

关键词: 深水; 沉积特征; 沉积结构单元; 油气勘探; 东非; 鲁伍马盆地

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

Deep water depositional system in Rovuma Basin, East Africa and its bearing on hydrocarbon exploration

CAO Quanbin¹, CAO Xuwen², LU Yintao¹, CHEN Yuhang³, YAN Chun¹, XU Xiaoyong¹, WANG Chaofeng¹

1. Hangzhou Research Institute of Petroleum Geology, PetroChina, Hangzhou 310023 China

2. Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China

3. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

Abstract: Based on the high-resolution 3D seismic data, in addition to well logging data and drilling data, the deep-water deposits in the Rovuma Basin of East Africa are systematically studied in this paper. According to the seismic facies of the deep-water depositional bodies, the architectural elements of the system, such as the canyon, channel, overbank, lobe, mass-transport deposits (MTDs) and condensed layers are recognized, and the seismic identification criteria established, while the lithologic, electrical and reservoir-physical characteristics are analyzed and summarized. Sandstones are usually low in gamma ray (GR) and high in electrical resistance (RT). The GR curve of thick sandstone is “boxlike” and the sandstone sequence intercalating mudstone layers in superimposed “bell-shape”. The compaction of reservoirs is rather weak and the primary intergranular pores are relatively developed, and, therefore, medium to high porosity and permeability are widely developed. The overall study of reservoir forming conditions suggest that there occur a good hydrocarbon forming system with channel and lobe turbidite sandstone as reservoirs, condensed section and overbank mudstone as caprocks, and levee and MTDs for lateral plugging. The model has significant implications for deep-water oil and gas exploration.

Key words: deep water; depositional characteristics; depositional architectural elements; hydrocarbon exploration; East Africa; Rovuma Basin

深水沉积是指位于风暴浪基面以下, 在重力流和底流作用下沉积于陆坡到盆地底部的沉积物。20 世纪 80 年代中期以来, 随着油气勘探逐步向海洋深水区拓展, 深水油气勘探不断升温, 国际上各大石油公司纷纷向深水进军^[1-4], 深水领域亦成为地质界和勘探界诸多学者研究的热点^[5-7]。目前, 在北

美墨西哥湾、南美巴西、西非大西洋沿岸、东非印度洋沿岸、东南亚若开海域和中国南海等深水区域发现了丰富的油气资源^[8-10]。在已有深水油气发现中, 部分是和陆上及浅水沉积环境相关, 但也有不少油气发现和深水沉积密切相关。比如西非的尼日尔三角洲盆地和下刚果-刚果扇盆地、东非的鲁

资助项目: 国家科技重大专项“南海中建海域深水油气地质条件及目标评价”(2017ZX05026006); 中国石油天然气集团公司科技项目“海外海域油气地质条件与关键评价技术研究”(2016D-4303); 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室开放基金(OMG18-12)

作者简介: 曹全斌(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地球物理勘探及深水沉积学研究, E-mail: caoqb_hz@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020-06-08; **改回日期:** 2020-07-31。 周立君编辑

伍马盆地和坦桑尼亚盆地、缅甸若开盆地等油气发现均是在深水沉积环境中^[11-13], 储层主要为深水沉积中的水道和朵体浊积砂岩。由于深水沉积环境动力机制和形成过程的复杂性, 造成深水沉积结构单元和沉积物类型呈现多样性^[14-15], 深水沉积体的识别与刻画较为困难^[16]。在深水沉积油气勘探中, 特别是在新项目获取和区块评价初期, 在有限时间内快速确定沉积结构单元类型并初步判断储层物性等沉积特征尤为重要。

本文基于丰富的高精度三维地震和钻、测井基础资料, 对东非鲁伍马盆地海上某区块深水沉积进行了系统研究。根据深水沉积地震相特征, 对本区发育的深水沉积结构单元进行识别, 研究水道和朵体等储层单元的电性、物性特征, 结合油气成藏条件研究, 分析不同沉积结构单元在油气成藏和勘探中发挥的作用, 以期东非其他盆地或具有相似沉积环境的其他地区的油气勘探提供一定的借鉴。

1 地质背景

鲁伍马盆地是发育在东非海岸的一个被动陆缘盆地, 从坦桑尼亚东南部延伸到莫桑比克东北

部, 横跨坦桑尼亚东南和莫桑比克东北海岸。盆地西部以莫桑比克褶皱带(Mozambique Fold Belt)前寒武系基底露头为边界, 北部以坦桑尼亚海岸盆地曼德瓦次盆(Mandawa Sub-basin)为界, 向东以凯瑞巴斯盆地(Kerimbass Basin)为界, 南部边界为莫桑比克褶皱带向东部最大延伸位置(图 1)。盆地面积约 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 超过 50% 面积位于海上, 发育宽约 5~30 km 的狭窄大陆架。研究区位于鲁伍马盆地深水—超深水区域, 最大水深超过 2500 m。2006 年, 意大利埃尼(Eni)和美国安纳达科(Anadarko)石油公司分别获取了该区块和相邻区块的勘探许可权, 随后开展了大量的地震勘探作业^[17]。2010 年以后的 5 年间, 两家石油公司在各自作业区块累计钻探 30 余口探井和评价井, 在深水浊积砂岩中发现多个巨型天然气田, 钻探成功率超过 80%, 获得油气勘探的巨大突破, 东非鲁伍马盆地亦成为以深水沉积为勘探目标的又一个典型的成功案例^[18]。

该区沉积环境为深水浊流沉积, 以砂泥岩沉积为主, 物源为西部陆上鲁伍马三角洲沿陆坡向海底输送的沉积物。区内的主要油气发现集中在古近系, 但古近系以水道和朵体沉积为主, 为了能够涵盖本区发育的所有沉积结构单元类型, 本文研究目

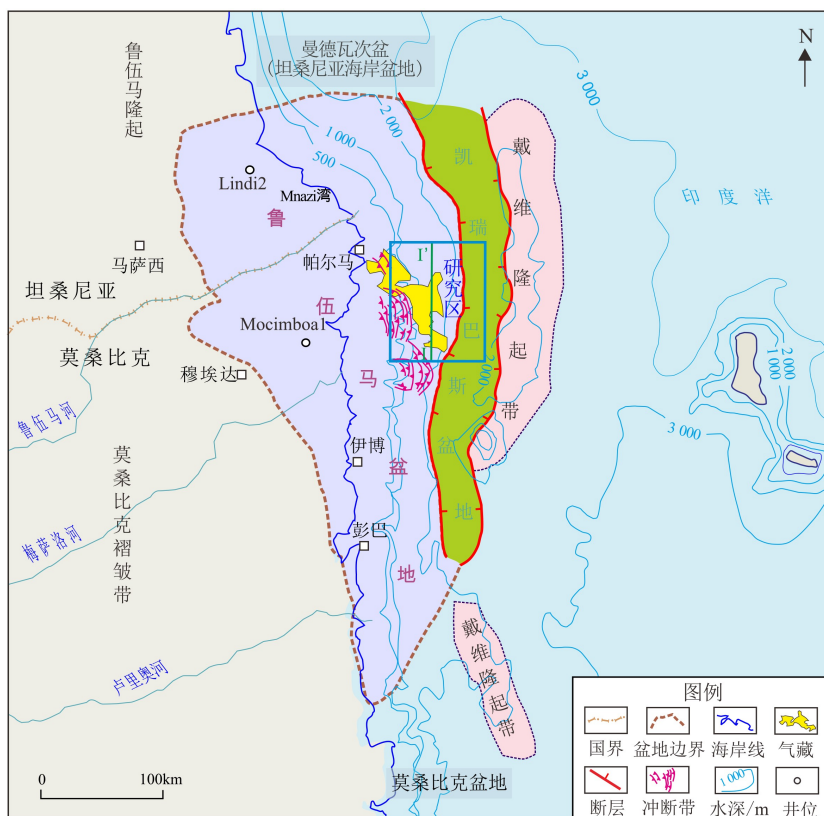


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

的层包括古近系和新近系。

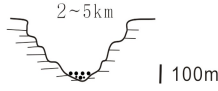
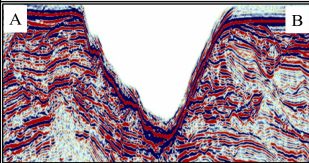
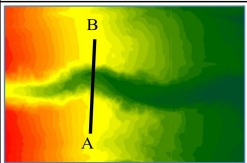
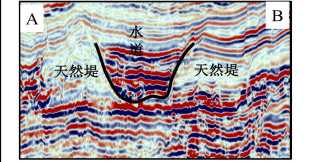
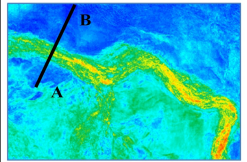
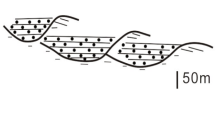
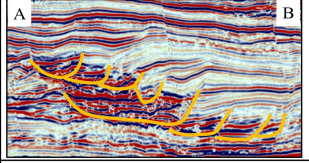
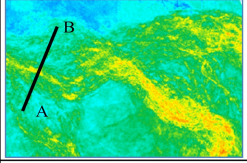
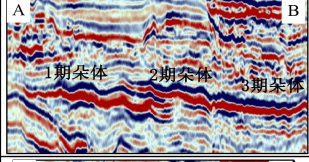
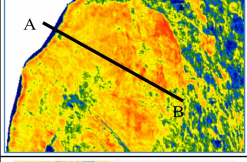
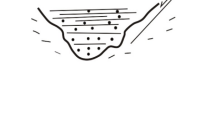
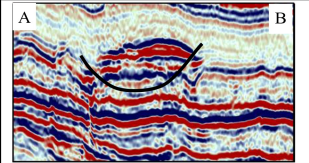
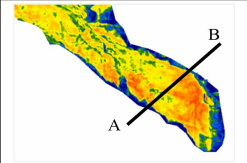
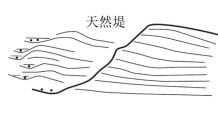
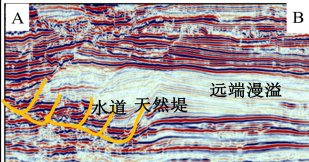
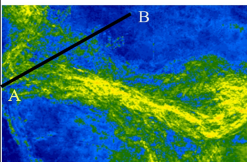
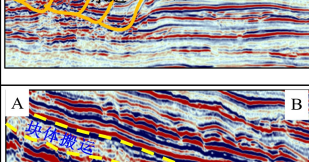
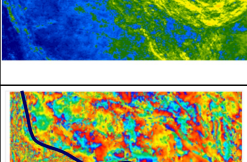
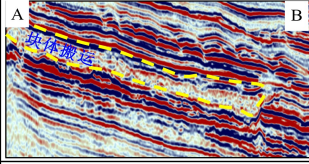
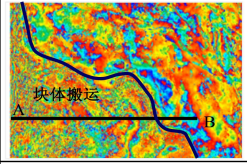
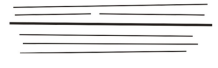
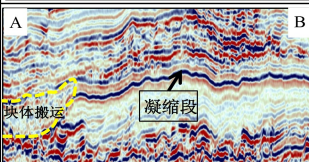
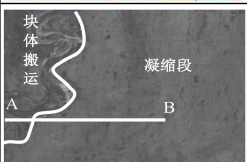
2 地震相特征

基于地震相分析和地震属性分析等地震资料解释成果,系统总结本区发育的主要沉积结构单元地震识别特征,建立了地震识别图版(表 1)。

2.1 峡谷

峡谷位于深水浊流沉积体系的上端,是沉积物向海底搬运的主要运输通道,研究区海底发育多个规模不等的峡谷,全新统发育有被水道-天然堤体系所充填的古代峡谷。地震上具有明显的“V”或“U”字外形,谷底部位有滞留沉积,表现为强反射特

表 1 深水沉积结构单元地震识别
Table 1 Seismic identification criteria for deep-water depositional architectural elements

沉积单元类型		沉积样式	地震反射特征	地震剖面	平面展布
峡谷			具有“V”或“U”字外形,对下伏地层有明显侵蚀作用,呈角度不整合接触,底部有滞留沉积,表现为强反射特征。		
水道	限制性陆坡水道		具有“V”或“U”字外形,双侧带有天然堤沉积;内部充填弱-强振幅反射,底部具有明显侵蚀特征。		
	侧向迁移水道		具有侧向上迁移、垂向上部分叠置的特点,水道边迁移边侵蚀早期水道,内部被强振幅反射充填,仅单侧天然堤发育明显。		
朵体	叠置朵体		由多期朵体平面上部分叠置而成;单个朵体地震上为强振幅-中强连续反射,多呈透镜状,中间厚,向两端减薄。		
	限制朵体		地震反射表现为“V”字外形的水道特征,内部充填多个短轴状强反射,对相邻地层无明显侵蚀作用,钻井岩心上缺少对接触地层的侵蚀证据。		
漫溢沉积	天然堤		位于水道侧翼,地震上表现为中-弱振幅连续近平行反射特征,呈典型的鸥翼状外形。		
	远端漫溢		位置相对天然堤更远端发育、分布更广泛的细粒沉积,地震上呈弱振幅平行反射或近于空白反射。		
块体搬运沉积 (MTDs)			地震上明显异于围岩的地震响应特点,多呈楔形弱振幅杂乱反射,对侧向及下方接触地层有明显侵蚀作用。		
凝缩段			地震上表现为强振幅强连续反射,披覆在下伏地层之上,横向延伸远,局部被MTDs侵蚀。		

征。谷壁高而陡,宽度几百米至数千米不等,峡谷下切深度几十米至数百米,最深处超过 500 m。峡谷对下覆地层有明显的侵蚀作用并呈角度不整合接触。

2.2 水道

水道是本区发育广泛的深水沉积结构单元类型。根据其分布的部位和沉积特征差异,将本区发育水道分为限制性陆坡水道和侧向迁移水道。限制性陆坡水道沉积时受地形限制,主要发育在上新统以上,地震上表现为“V”字外形,底部对下伏地层有明显侵蚀作用,内部呈弱—强振幅反射,反映水道内部充填的复杂性,双侧均带有漫溢天然堤沉积。侧向迁移水道是该区最为常见的一种水道类型,在始新统—上新统均有发育。分析认为,相比前者,其在深水沉积体系中的位置更靠下,并且受地形限制的强度弱于陆坡水道,同时受底流改造影响,细粒沉积物向一侧漂移并沉积下来,形成“单侧带堤”的沉积特征^[19]。由于底流“淘洗”作用,水道充填厚层纯砂岩,地震响应表现为强振幅反射,呈侧向迁移垂向叠置的复合体形式。

2.3 漫溢沉积

漫溢沉积指浊流沉积体系中临近主水道和横向分布范围较广的细粒、薄层沉积物,包括沿主水道边缘分布的天然堤和无地形起伏的远端漫溢沉积。与前面提到的两种主要水道类型对应,本区发育双侧天然堤和单侧不对称天然堤两种类型。前者和限制性陆坡水道相伴生,地震剖面上表现为中—弱振幅连续近平行反射,向两侧逐渐减薄,呈典型鸥翼状特征;后者和侧向迁移水道共生,仅在水道一侧发育明显,地震剖面上为弱振幅强连续近平行反射,内部有多个中等振幅反射界面,解释为多期水道-天然堤的沉积界面。远端漫溢沉积是摆脱地形限制的细粒沉积物,在远离水道、无地形起伏的地方沉积下来,其分布范围更广,常披覆于早期地层之上,远端漫溢沉积在研究区分布广泛。地震上表现为弱振幅平行反射或近于空白反射。

2.4 朵体

朵体常位于水道下倾斜坡处沉积区,与水道伴生组成水道-朵体沉积相组合。受地形坡度变缓等因素影响,水道趋于消亡,沉积物因脱离水道限制发生卸载形成朵体沉积。根据地震响应特征和井上沉积特征分析,研究区发育叠置型朵体和限制性朵体两种类型。前者较为常见,古近系均有发育。

常由多个朵体在平面上部分叠置而成;单个朵体地震上表现为强振幅—中强连续反射特征,多呈透镜状反射,中间厚,向两端减薄。后者在地震剖面上表现为限制性水道的“V”字型特征,内部充填多个短轴状强反射,但钻井岩心缺乏对接触地层的侵蚀标志,地震上缺少对接触地层的侵蚀特征,该类朵体分布较为局限。

2.5 块体搬运沉积

块体搬运沉积(MTDs)是在构造运动等地质营力作用下,沉积物沿着大陆斜坡、峡谷/水道、隆起翼部及水道侧面产生的重力流,包括滑塌体、块体流、碎屑流、陆坡坍塌复合体、块状搬运复合体等^[20],常位于沉积层序下部的底部发生侵蚀,被水道和天然堤等沉积单元所覆盖。MTDs在本区发育较为普遍,规模不等。地震剖面上,其具有与围岩明显不同的地震响应,多呈楔形弱振幅杂乱反射特征,对侧向及下方接触地层有明显侵蚀作用。

2.6 凝缩段

凝缩段是在极低沉积速率下形成的由远洋—半远洋沉积物组成的薄层地层单元,在最大海侵期分布最为广泛,顶面对应于最大洪泛面。研究区古近系顶界发育一套泥岩凝缩段,地震上表现为强振幅强连续反射,披覆在下伏地层之上,全区基本上均有分布,局部被MTDs侵蚀。

3 沉积特征

3.1 沉积结构单元

鲁伍马盆地古近纪以来发育有多期深水浊流沉积体系,尽管研究区在一个完整的深水沉积体系中仅是局限的一部分,并且在不同的地质时期,其在沉积体系中所处的位置可能发生变化,但深水沉积体系中形成的沉积结构单元基本上在本区均有发育,地震剖面上能够清楚地识别出包括峡谷、水道、漫溢沉积(天然堤和远端漫溢)、朵体、块体搬运沉积(MTDs)和凝缩段等深水沉积结构单元(图2)。

3.2 岩性和电性特征

对已发现气藏进行解剖发现,本区主要发育砂岩和泥岩的碎屑岩沉积,储层是水道和朵体的浊积砂岩,盖层为海相泥岩。以具有代表性的Y1井为例,分析其岩性和电性特征。Y1井古近系自下而

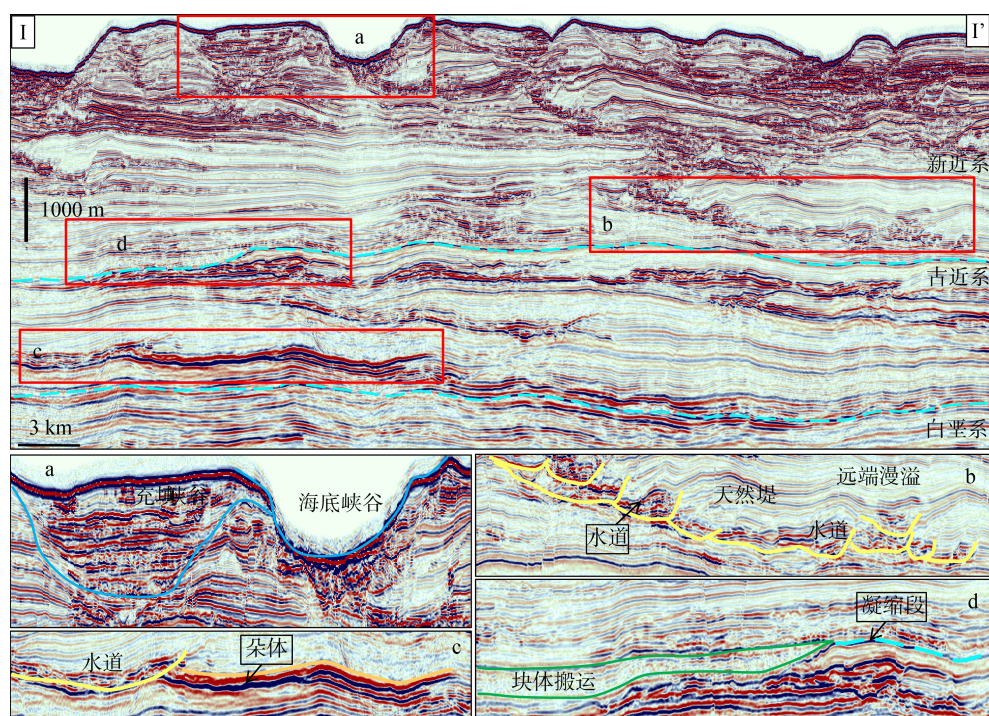


图 2 研究区深水沉积结构单元地震解释剖面

剖面位置见图 1。

Fig.2 Seismic interpretation of deep-water depositional architectural elements in the study area

See Fig.1 for the section location.

上发育 3 套砂体, 砂体 1 解释为位于水道末端的朵体沉积, 砂体总厚度 99 m, 平均单层厚 5 m, 最厚 20 m, 最薄 1 m, 中间夹有 10 余层 1~8 m 泥岩。砂体 2 为朵体沉积, 砂体总厚度 145 m, 平均单层厚 12 m, 最厚 36 m, 最薄 1 m, 中间夹有 3 层 1~2 m 的泥岩。砂体 3 为 2 期纵向叠置的水道沉积, 砂体总厚度达 265 m, 其中下部早期水道砂体厚度 118 m, 中间夹有少许 1~2 m 的泥岩, 上部晚期水道砂体厚度 147 m, 为厚层块状砂岩, 两期水道中间发育一套厚约 30 m 的泥岩。

从井-震对比分析来看, 岩性、测井响应和地震响应具有很好的匹配关系(图 3)。水道和朵体的顶底界面都是砂泥岩突变接触, 地震上有清楚的反射界面, 测井曲线有明显的台阶。砂岩具有低伽马(GR)和高电阻(RT)特征, 泥岩为高 GR 和低 RT 特征, 砂岩顶部含气段 RT 值明显高于下部含水段。厚层砂岩 GR 曲线呈“箱型”, 而具有泥岩夹层的砂岩段呈叠加的“钟型”特点, 泥岩段则呈平直的基线特征。

3.3 储层物性特征

对 Y1 井砂体 2 进行了岩心取样分析, 该套储层为中—细粒长石岩屑质石英砂岩, 分选程度中等, 泥质含量很低, 颗粒间以点-线接触, 压实程度

弱, 主要发育原生粒间孔隙(图 4)。对岩心密集取样并进行储层物性分析, 孔隙度 18%~30%, 平均为 23%, 渗透率 26~1443 mD, 平均为 475 mD, 为中—高孔、中—高渗储层(图 5), 良好的储层物性为油气聚集提供了足够的储集空间, 是本区巨型天然气藏形成的一个必要条件。

4 油气勘探意义

对研究区内已发现气藏分布规律和典型气藏进行对比(图 6), 结合深水沉积特征分析和该区成藏条件研究, 认为不同的深水沉积结构单元对该区油气成藏及勘探具有不同的作用。

水道和朵体是主要的储层, 由于该区浊积砂体在沉积过程中同时受到底流的改造影响, 形成了砂质纯净、物性良好的优质储层, 并且水道和朵体的侧向迁移与垂向叠置使得砂体规模大、厚度大, 储层条件非常好。渐新统顶部发育的一套凝缩段沉积分布广泛, 与披覆在储层之上的远端漫溢泥岩形成一套良好的区域性盖层。

MTDs 可以作为储层, 也可以作为侧向或顶部封堵的地层^[21], 但对该区 MTDs 沉积特征分析认为其为富泥沉积, 可以形成侧向封堵。天然堤沉积位

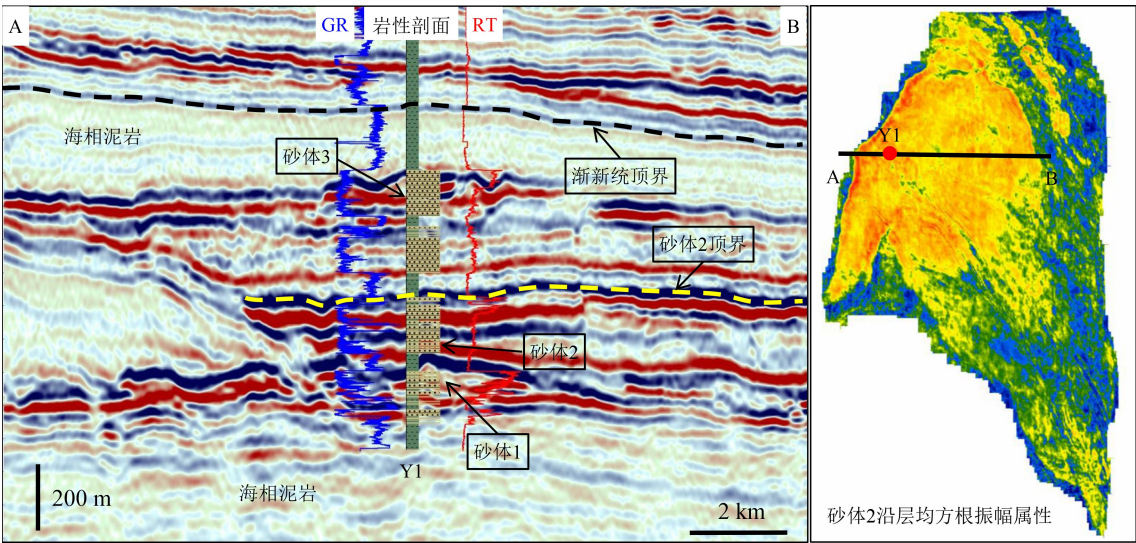


图 3 过 Y1 井岩性、测井曲线与地震叠合剖面

Fig.3 Superimposed section of lithology, logging curves and seismic data through well Y1

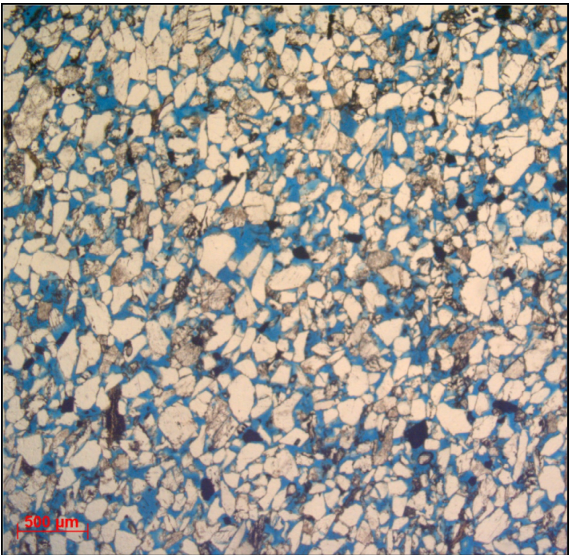


图 4 Y1 井砂体 2 储层微观特征

中—细粒长石岩屑质石英砂岩, 中等分选, 原生粒间孔隙, 孔隙度 26%。

Fig.4 Microscopic characteristics of sand body 2 in well Y1

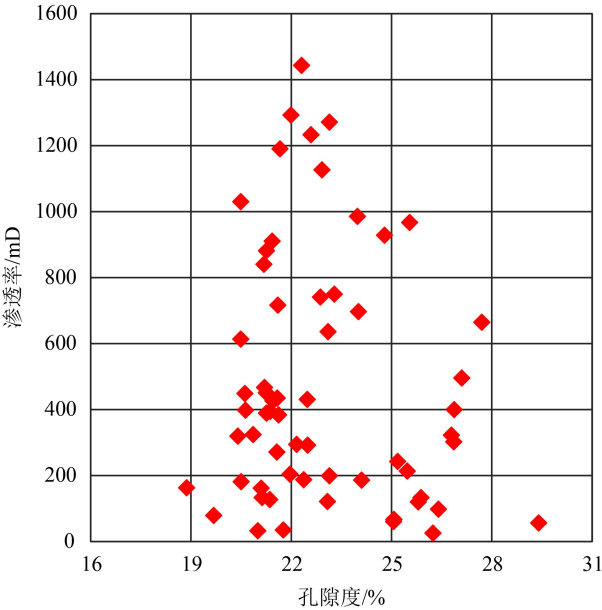


图 5 Y1 井砂体 2 储层孔-渗交会图

Fig.5 Porosity versus permeability of sand body 2 in well Y1

于水道侧翼, 主要由粉砂质泥岩或泥岩的细粒沉积物组成, 渗透性差, 也可以对气藏形成侧向封堵。总之, 良好的储盖组合和侧向封堵条件是本区油气成藏的关键条件。

峡谷作为沉积物从陆地向海底搬运的运输通道, 一方面为形成各种类型的深水沉积结构单元提供物质基础, 对油气成藏具有积极的作用, 另一方面, 在沉积物搬运时由于受到水动力侵蚀, 峡谷壁及邻近地层很容易垮塌, 引发地质灾害。因此, 在油气勘探的同时需要做好海底地质调查, 特别是井位部署时尽量远离峡谷, 避免地质灾害给油气勘探

和生产带来不利影响。

5 结论

- (1) 东非鲁伍马盆地古近系和新近系发育深水沉积体系, 识别出峡谷、水道、漫溢沉积、朵体、MTDs 和凝缩段等沉积结构单元, 不同的沉积结构单元类型在本区油气成藏及勘探中具有不同的作用。
- (2) 本区水道和朵体砂体具有规模大、厚度大、物性好的特点, 为形成巨型天然气藏提供了优质储层, 渐新统顶部广泛分布的凝缩段及其下伏的漫溢

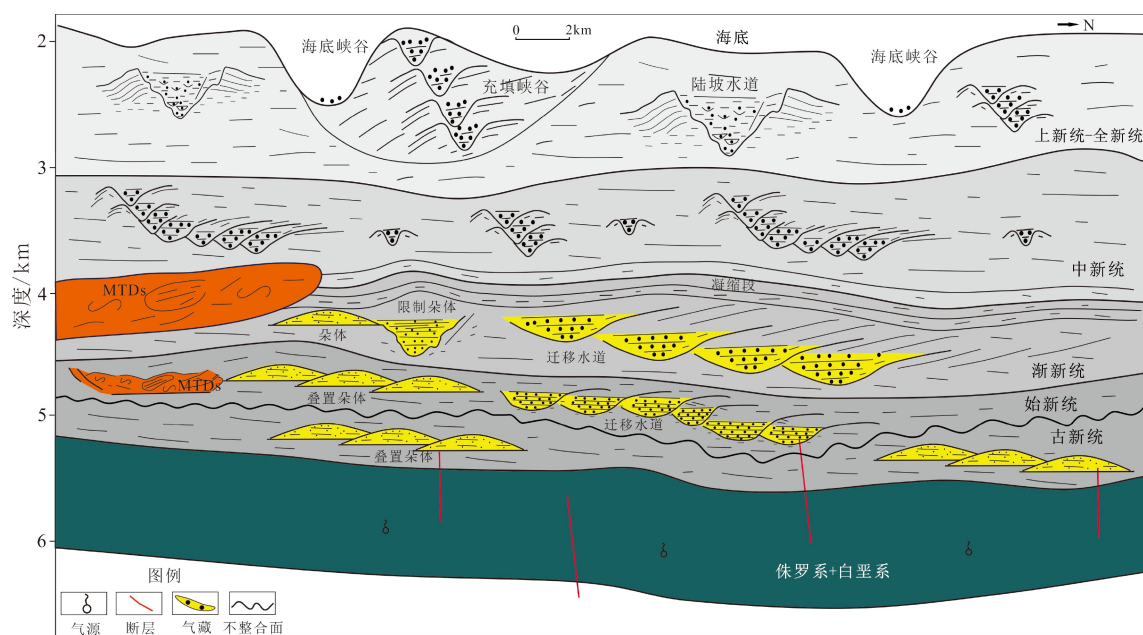


图 6 深水沉积结构单元与气藏垂向分布示意图

Fig.6 Vertical distribution of deep water depositional architectural elements and gas reservoirs

海相泥岩沉积, 为气藏成藏提供了良好的盖层条件, MTDs 和发育在水道侧翼的天然堤可以形成侧向封堵, 良好的储盖配置及侧向遮挡条件是本区油气成藏的关键条件。峡谷作为物源输送通道, 为本区良好的成藏条件形成提供了物质基础, 但靠近峡谷区域容易遭受侵蚀而形成地质灾害, 要考虑由此对油气勘探和生产带来的影响。

(3) 对本区深水沉积结构单元的识别及其沉积特征分析, 对东非其他盆地及具有相似沉积背景的其他区域的油气勘探具有一定的指导意义。

致谢: 在本文撰写过程中, 中国科学院深海所王大伟研究员对本文提出了建设性建议, 在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] Pettingill H S, Weimer P. Worldwide deepwater exploration and production: Past, present, and future [J]. *The Leading Edge*, 2002, 21 (4): 371-376.
- [2] 张艳秋, 张礼貌, 李静黎, 等. 近十年全球石油行业上游勘探投资及勘探新增储量分析 [J]. *国际石油经济*, 2013, 21 (9): 6-10. [ZHANG Yanqiu, ZHANG Limao, LI Jingli, et al. Comparison over the last decade between the global oil industry's upstream exploration investment and incremental reserves [J]. *International Petroleum Economics*, 2013, 21 (9): 6-10.]
- [3] 杨丽丽, 王陆新, 潘继平. 全球深水油气勘探开发现状、前景及启示 [J]. *中国矿业*, 2017, 26 (S2): 14-17. [YANG Lili, WANG Luxin, PAN Jiping. Situation and prospect of global deepwater oil and gas exploration and development [J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26 (S2): 14-17.]
- [4] 金钟, 张礼貌. 国际石油公司上游发展动向探析 [J]. *国际石油经济*, 2019, 27 (5): 54-63. [JIN Zhong, ZHANG Limao. Analysis on the upstream development trend of IOCs [J]. *International Petroleum Economics*, 2019, 27 (5): 54-63.]
- [5] 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. [PANG Xiong, CHEN Changmin, ZHU Ming, et al. Frontier of the deep-water deposition study [J]. *Geological Review*, 2007, 53 (1): 36-43.]
- [6] Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17 (2): 125-135.
- [7] 胡孝林, 刘新颖, 刘琼, 等. 深水沉积研究进展及前沿问题 [J]. *中国海上油气*, 2015, 27 (1): 10-18. [HU Xiaolin, LIU Xinying, LIU Qiong, et al. Advances in research on deep water deposition and their frontier problems [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27 (1): 10-18.]
- [8] 张功成, 屈红军, 赵冲, 等. 全球深水油气勘探40年大发现及未来勘探前景 [J]. *天然气地球科学*, 2017, 28 (10): 1447-1477. [ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, ZHAO Chong, et al. Giant discoveries of oil and gas exploration in global deepwaters in 40 years and the prospect of exploration [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28 (10): 1447-1477.]
- [9] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 全球深水盆地群分布格局与油气特征 [J]. *石油学报*, 2011, 32 (3): 369-378. [ZHANG Gongcheng, MI Lijun, QU Hongjun, et al. A basic distributional framework of global deepwater basins and hydrocarbon characteristics [J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2011, 32 (3): 369-378.]
- [10] 张宁宁, 王青, 王建君, 等. 近20年世界油气新发现特征与勘探趋势

- 展望[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(1): 44-53. [ZHANG Ningning, WANG Qing, WANG Jianjun, et al. Characteristics of oil and gas discoveries in recent 20 years and future exploration in the world [J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(1): 44-53.]
- [11] 蔡露露, 王雅宁, 王颖, 等. 西非深水沉积类型特征及油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2016, 37(S1): 131-142. [CAI Lulu, WANG Yaning, WANG Ying, et al. Type features and hydrocarbon exploration significance of deepwater sedimentary in West Africa [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S1): 131-142.]
- [12] 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. [ZHANG Guangya, LIU Xiaobing, WEN Zhixin, et al. Structural and sedimentary characteristics of passive continental margin basins in East Africa and their effect on the formation of giant gas fields [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(4): 71-80.]
- [13] 马贵明, 马宏霞, 邵大力, 等. 孟加拉湾若开盆地深水沉积体系结构单元类型及演化模式[J]. *海相油气地质*, 2016, 21(1): 41-51. [MA Guiming, MA Hongxia, SHAO Dali, et al. Structural units and evolution model of deepwater depositional system in Rakhine Basin, Bay of Bengal [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2016, 21(1): 41-51.]
- [14] 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. [WANG Yingmin, WANG Hairong, QIU Yan, et al. Process of dynamics and its response of deep-water sedimentation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(4): 495-504.]
- [15] Chen Y H, Yao G S, Wang X F, et al. Flow processes of the interaction between turbidity flows and bottom currents in sinuous unidirectionally migrating channels: An example from the Oligocene channels in the Rovuma Basin, offshore Mozambique [J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 404: 105680.
- [16] 鲁银涛, 范国章, 杨慧良, 等. 延伸的弹性波阻抗反演在东非始新世深水沉积体系刻画中的应用[J]. *中国造船*, 2019, 60(4): 237-246. [LU Yintao, FAN Guozhang, YANG Huiliang, et al. Application of extended elastic inversion in illustrating the Eocene deep water sediment system in offshore East Africa [J]. *Shipbuilding of China*, 2019, 60(4): 237-246.]
- [17] IHS Energy. Rovuma Basin[DB/CD]. Houston: IHS Inc., 2014.
- [18] 曹全斌, 唐鹏程, 吕福亮, 等. 东非鲁伍马盆地深水浊积砂岩气藏成藏条件及控制因素[J]. *海相油气地质*, 2018, 23(3): 65-72. [CAO Quanbin, TANG Pengcheng, LÜ Fuliang, et al. Formation conditions and controlling factors of gas-bearing turbidite sand reservoirs in deep water deposits in the Rovuma Basin, East Africa [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2018, 23(3): 65-72.]
- [19] 陈宇航, 朱增伍, 贾鹏, 等. 重力流沉积砂岩的成因、改造及油气勘探意义[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(5): 148-155. [CHEN Yuhang, ZHU Zengwu, JIA Peng, et al. Genetic mechanism and rework of deep-water sedimentary sand and its significance for petroleum exploration [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(5): 148-155.]
- [20] Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models-a critical perspective [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.
- [21] 王大伟, 吴时国, 吕福亮, 等. 南海深水块体搬运沉积体系及其油气勘探意义[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(5): 14-19. [WANG Dawei, WU Shiguo, LÜ Fuliang, et al. Mass transport deposits and its significance for oil & gas exploration in deep-water regions of South China Sea [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2011, 35(5): 14-19.]