

东非鲁武马盆地渐新统深水沉积层序地层格架组成和时空分布

孙辉,刘少治,吕福亮,范国章,马宏霞

(中国石油 杭州地质研究院,浙江 杭州 310023)

摘要:由于缺乏与陆架边缘的直接联系,深水层序划分在层序地层学研究中成为难点。东非鲁武马盆地渐新统含气砂岩储层为深水沉积环境的重力流沉积,合理的层序地层划分方法可以指导有利目标层系的解释及区域油气勘探。以混合层序地层模型为指导,以三维地震资料应用为主,多种资料综合分析开展深水层序地层学研究,揭示渐新统深水沉积过程和沉积体系的成因联系。根据地层的终止类型、凝缩段、块体搬运沉积等识别层序边界,通过分析沉积物性质、规模以及形成深水沉积的浊流密度差异,确定沉积结构单元与体系域的对立关系,建立渐新统等时地层格架,分析深水沉积演化规律。鲁武马盆地渐新统划分为两个三级层序,强制海退的早期在近陆架边缘陆坡上均形成大规模局部发育的块体搬运沉积,之后在不同层序沉积特征表现出差异性。下渐新统三级层序以粗-中粗砂岩为主、具有高砂/泥比、高密度的大型朵体为强制海退晚期产物。堤化水道体系沉积于低位体系域及海侵早期,顶部为凝缩段沉积,使下渐新统层序具有完整体系域组成;受研究区数据范围影响,上渐新统三级层序缺少大型朵体,层序内缺少下降期体系域晚期沉积,其他体系域内沉积结构单元与下渐新统具有较好的相似性。

关键词:沉积结构单元;体系域;层序;深水沉积;渐新统;鲁武马盆地;东非

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Stratigraphic framework and temporal-spatial distribution of Oligocene deepwater sedimentary sequence in Ruvuma Basin, East Africa

Sun Hui, Liu Shaozhi, Lyv Fuliang, Fan Guozhang, Ma Hongxia

(PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: It is difficult to divide deep water sequences in sequence stratigraphy study due to a lack of direct connection between the sequence and the shelf margin deposition. The Oligocene gas-bearing sandstones in Ruvuma Basin, East Africa, were deposited by gravity flow in deep water environment. A reasonable sequence stratigraphic division is helpful to the interpretation of favorable targets and regional oil and gas exploration. Under the guidance of the mixed sequence stratigraphic model, we put 3D seismic data into application and comprehensively analyzed multiple data to study the sequence stratigraphy, disclosing the genetic relationship between sedimentary processes and sedimentary systems in deep water environment. Sequence boundaries were identified by the strata termination, condensation section and MTD. Consequently, the corresponding relationship between sedimentary architecture element and system tract was established by analyzing the nature and scale of sediments and density difference of turbidity currents leading to deep water deposition, the Oligocene isochronous stratigraphy framework was established and the rules of deep water sedimentary evolution was analyzed. The Oligocene in Ruvuma Basin can be divided into two third-order sequences, for both of which large-scale MTDs accumulated locally on continental slopes near shelf break in early forced regression. But, the sedimentary characteristics of the two sequences show differences. The large lobes in the Lower Oligocene third-order sequence that are dominated by coarse-medium-coarse-grained sandstones and have large sand/shale ratio and high density are products of late forced regressions. The sediments of the leveed channel system were located in the lowstand system tract (LST) and early transgression, with the condensation section overlying the leveed channel system, all of which contribute to the complete system

收稿日期:2018-09-13;修订日期:2018-10-07。

第一作者简介:孙辉(1969—),女,高级工程师,地震深水沉积及储层。E-mail:sun_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2016D-4303)。

tract of the Lower Oligocene sequence. Due to the limited data obtained within the study area, large lobes are absent in the Upper Oligocene third-order sequence, within which there is a lack of late deposition in falling stage system tract (FSST). Besides, the sedimentary architecture elements in other system tracts are quite similar to those of the Lower Oligocene sequences.

Key words: sedimentary architecture element, system tract, sequence, deep water deposit, Oligocene, Ruvuma Basin, East Africa

深水层序地层学研究的主要目的是揭示整个地层的沉积过程和沉积体系的成因联系,预测深水沉积储层的区域时空分布^[1]。深水层序地层学研究历来是高难度的课题^[2],常规的基于砂泥含量、厚度变化的准层序、准层序组的研究不再适用^[3],但层序的发育对不同重力流流体的沉积仍具有控制作用^[4]。因此,合理的层序地层划分是深水沉积体系研究的基础,深入掌握层序地层的划分及解释方法对有利目标层系的解释及区域油气勘探具有重要的指导意义。以常规层序地层学理论为基础,对于一个基于源-汇体系^[5]重力流沉积方式建立的层序地层格架通常是可行的。但很多时候,深水油气勘探相关的资料通常只涉及主要储层的分布区,即陆坡和深水盆地,而缺少陆架边缘海侵或海退滨线的沉积证据。此外,在传统体系域划分方案中,对基准面下降期低位体系域内的低位扇的层序边界存在争议,传统的“高位”和“低位”体系域不能完全应用到深水沉积中,而下降期体系域的定义有助于深水体系的油气勘探^[6]。同时,深水沉积现象复杂,界面不整合极其发育,需要利用多种信息综合分析,寻找一种有效的、适合于深水的层序地层划分方法。

鲁武马盆地(Ruvuma Basin)位于非洲大陆东部,横跨坦桑尼亚东南沿岸和莫桑比克的东北部,东部为凯瑞巴斯盆地(Kerimbas Basin),西部为莫桑比克褶皱带,北部以鲁武马转换带为界,与坦桑尼亚的曼达瓦次盆(Mandawa Sub-basin)分隔,盆地新生界发育由陆架三角洲进积引发的重力滑脱构造^[7-9](图1)。深水区主要沉积了中侏罗世到新生代地层^[10],发育丰富的深水沉积体系,古近系和新近系砂岩是重要的储层,截至2014年底,鲁武马盆地相继发现了7个大气田,均为深海相^[7],具有巨大的资源潜力和良好的勘探前景^[11]。取得的岩心和测井信息明确了深水重力流沉积的岩性特征和电性响应,生物地层资料提供了地层年代信息,井震标定识别了地震反射界面。源于地震资料的振幅属性图、相干切片等图像,反映了构成体系域的主要沉积体的平面分布形态,为深水沉积层序地层的研究奠定了基础。本项研究利用层序地层学原理,通过层序地层学分析方法,系统分析和总结鲁武马

盆地深水沉积层序地层划分方法,力求对具有相似沉积环境的东非深水盆地的后续评价及勘探发挥作用。

1 深水层序地层划分依据

1.1 海平面波动变化与深水沉积物分布具有较好的对应关系

ODP116航次的研究成果发现,印度洋北部中新世以来垂向上的粗粒沉积物的分布与全球海平面短周期波动曲线具有较好的对应关系^[12],证明了全球海平面波动曲线及与之对应的滨线超覆^[13]的变化可以反映鲁武马盆地的滨线迁移,三级海平面变化对应的滨线迁移变化规律反映了层序地层的分布规律,说明层序地层学理论可以指导同处印度洋边缘深水区的鲁武马盆地层序地层解释工作。

1.2 Catuneanu 混合层序地层模型适合指导深水层序地层划分

层序地层学始于20世纪70年代晚期,通过对陆架等盆地边缘浅水区的研究逐步发展而来。经过40年的发展,沉积层序^[14]形成了多种模型。目前层序地层研究中主要采用有多种方案(表1),这些模式的应用效果需要针对具体对象^[15]。在层序模型的指导下,体系域和基准面的关系可以预测,盆地演化过程中不同体系域阶段沉积相的横向变化可以追踪^[6]。因此,层序地层学成为一种寻找盆地内自然资源极为有效的工具,选用合适的层序地层模型及对应的体系域划分标准,对深水油气勘探研究极其重要。Catuneanu采用了沉积层序VI^[16-17]的体系域名称和沉积层序II^[13,18]的层序边界形成的混合沉积层序^[15],按基准面升降和海侵、海退的变化将层序分为下降期体系域(FSST)、低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)以及高位体系域(HST),层序边界位于下降期体系域底部。这种划分方式认为,深水中存在的层序界面有4个:强制海退开始(对应的整合面^[19]),强制海退结束(对应的整合面^[16]),海退结束(最大海退面),海侵结束[最大洪(海)泛面](图2)。上述这种

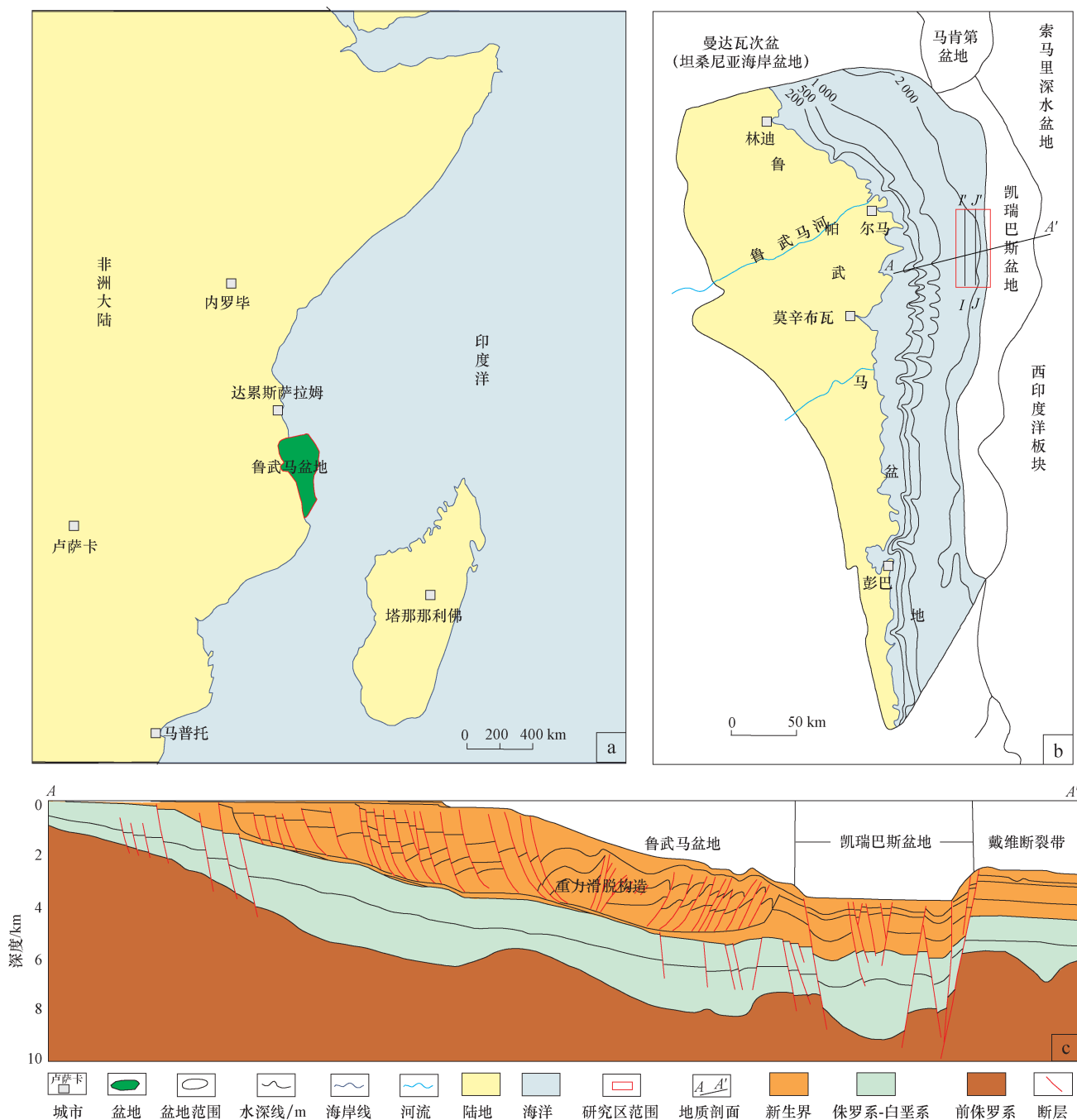


图1 东非鲁武马盆地区域地理位置及构造格局(据文献[7-9]修改)

Fig. 1 Location and structural framework of Ruvuma Basin, East Africa(modified from references[7-9])

a. 东非鲁武马盆地区域地理位置;b. 鲁武马盆地区域构造位置;c. 过鲁武马盆地及凯瑞巴斯盆地的地质剖面

划分方式既反映了基准面下降过程中的4个主要事件,又将重力流沉积与下伏半深海-深海沉积有效分开,每个体系域对应特定的重力流或深海-半深海沉积^[20]。4个层序界面中,尽管理论上存在强制海退终止界面及海退终止界面,由于远离陆架边缘,难以观察到与之相对应的地层终止关系,实际解释时只能依据沉积作用的差异(如高密度浊流与低密度浊流)及产物的差异(不同沉积结构单元类型)加

以推断(图2)。特别是强制海退开始及海侵结束因其与特征沉积物(碎屑流沉积,凝缩段)相对应,界面更易识别。

2 层序界面及体系域识别

2.1 采用的数据

层序界面是研究深水沉积作用和过程的最重要的

表 1 目前使用的层序模式中体系域和层序边界的时间属性(据文献[15]修改)

Table 1 Timing of system tracts and sequence boundaries for the present sequence model(modified from reference[15])

事件	层序模式					
	沉积层序Ⅱ	沉积层序Ⅲ	沉积层序Ⅳ	成因层序	T-R层序	混合沉积层序
海侵结束	HST	HST早期	HST	HST	RST	HST
海退结束	TST	TST	TST	TST	TST	TST
基准面下降结束	LST晚期 (楔状体)	LST	LST	LST晚期 (楔状体)		LST
基准面下降开始	LST早期 (扇体)	HST早期 (扇体)	FSST	HST早期 (扇体)	RST	FSST
	HST	HST早期 (楔状体)	HST	HST		HST

注：—— 层序边界；—— 体系域边界；----- 体系域内部界面

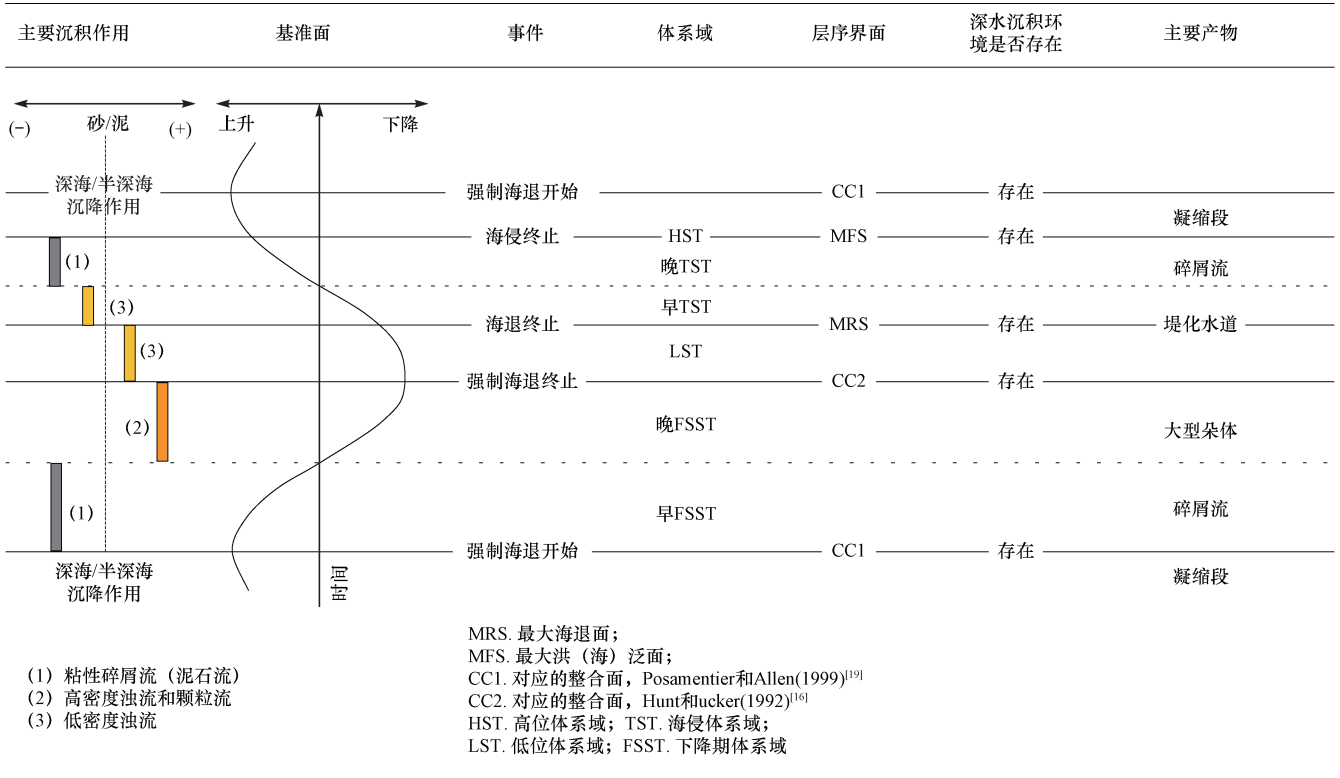


图 2 基准面波动的主要沉积作用、产物以及四个主要事件和对应的层序界面(据文献[15]修改)

Fig. 2 Main sedimentation, products and four major events with their corresponding sequence surfaces during the fluctuation of the base level(modified from reference [15])

界面,界面能否清晰识别,取决于所利用的数据类型和研究区地层的供给和沉积间的相互作用。在层序地层研究中,各种资料不同程度发挥着各自的作用(表 2)。深水区缺少露头资料,岩心较少,而测井资料在层序地层研究中的作用一般;效果最好的是分布范围广、采集成本相对较低的三维地震资料。地震是对深埋的地层

建立三维层序地层格架最重要的资料,特别在新区勘探的预测研究中更是如此^[21]。三维地震资料在构造环境、地层终止关系、沉积趋势、地层几何形态、沉积单元及沉积体系的研究中,具有极大的优势,以地震反射结构为主的深水层序地层学研究可以建立三级层序格架,恢复沉积等时面上的沉积体系分布和相互关系。

表 2 各种资料在层序地层解释中的作用(据文献[15]修改)

Table 2 The role of various data in the interpretation of sequence stratigraphy (modified from reference[15])

主要作用及研究效果	岩石数据			地球物理数据		
	露头		岩心	测井曲线	地震数据	
	大尺度	小尺度			2D	3D
主要作用	岩相结构的三维控制,沉积过程预判,岩相,沉积环境,岩心资料提供的所有其他应用		岩相,结构和沉积构造,地层接触关系,岩石性质,古水流方向,对测井曲线和地震的标定	垂向叠置样式,递变趋势,沉积单元,沉积环境,岩石物理,地震数据标定	地下界面的连续成像,构造样式,超覆关系,地层叠置样式,沉积单元成像,地貌,地层几何形态	
构造环境	中等	差	差	中等	好	好
岩相	好	好	好	中等	差	中等
接触关系	好	好	好	中等	中等	中等
地层终止	好	差	差	差	好	好
沉积趋势	好	中等	中等	中等	中等	好
地层几何形态	中等	差	差	差	好	好
沉积单元	好	中等	中等	中等	差	好
沉积体系	好	中等	中等	中等	差	好

深水层序界面的识别应以三维地震资料为主,多种资料综合分析。

2.2 层序界面识别方法

以高精度三维地震资料为基础,结合岩心、测井等多种资料开展深水层序界面及体系域的识别及解释工作。利用岩心生物地层资料划分地层年代,在此基础上开展井震标定,确定研究区的地震地层界面;同时分析区域及全球海平面变化规律。最终利用三维地震资料开展层序界面识别及层序地层解释。

在陆坡大规模块体搬运沉积(MTDs)发育区,层序界面主要位于MTDs沉积之下;在MTDs不发育区,盆底扇上/下超覆于层序边界之上,并对下部地层形成削截。最大海泛面可以通过凝缩段的识别来确定。利用地震资料的横向可解释性及不整合的识别方法,识别解释区域层序边界。随着深水沉积位置的变化,层序边界可位于峡谷/陆坡水道底部的侵蚀面、或MTDs的底部^[22-23],根据位置不同可在界面上观察到上超、下超、侵蚀等地层接触关系。层序边界的主要识别方法包括

地层的终止类型、凝缩段的识别和MTDs识别等方法。

2.2.1 地层终止类型

Mitchum等最早提出了“地层终止”这一概念的,他认为4种地层的终止类型可以用来识别层序界面,包括两种层序界面之上的地层终止类型(上超、下超)以及两种层序界面之下的地层终止类型(削截、顶超)^[24],其中深水中的“地层终止”以前3种为主(图3),特别是由各种重力流的侵蚀作用所导致的下部地层的削截类型最常见。地层终止与特殊沉积趋势有关,在陆架附近,一般可通过地层终止关系分析推断沉积滨线的迁移类型。但在深水区,地层终止类型主要代表了沉积的不连续,与层序界面有关。

2.2.2 MTDs 识别

鲁武马盆地的MTDs的结构特征及形成机理与其他深水盆地内发育的块体搬运沉积^[25]相似。MTDs在地震剖面上具有明显异于周边其他深水沉积的地震响应,易于识别。地震上主要以杂乱的弱反射为主,并随

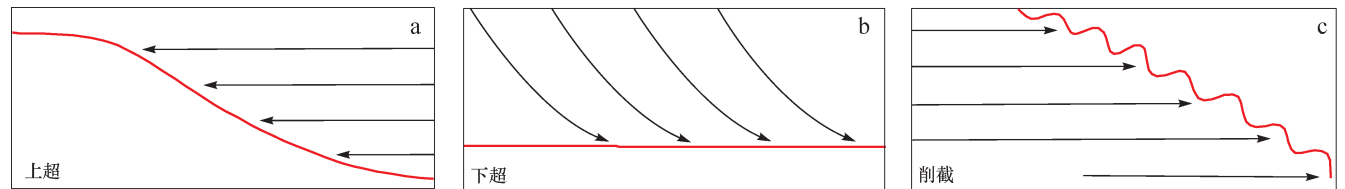


图 3 深水区主要地层终止类型(据文献[24]改)

Fig. 3 Major types of stratigraphic termination in deep water areas (modified from reference[24])

a. 界面上部终止(上超);b. 界面上部终止(下超);c. 界面下部终止(削截)

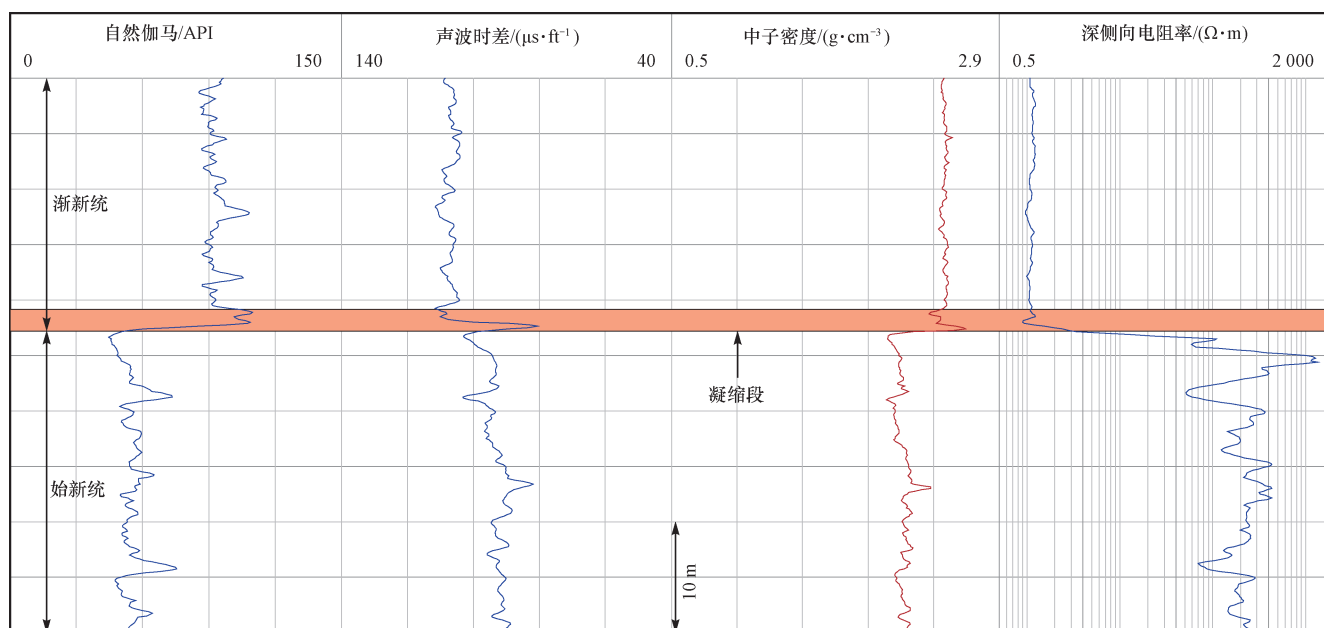


图 4 东非鲁武马盆地渐新统凝缩段测井响应特征

Fig. 4 Logging response characteristics of the Oligocene condensate section in Ruvuma Basin, East Africa

位置的不同而表现出不同产状^[26]。由于 MTDs 是一些粘结碎屑流沉积,这种“塑性”流体与浊流的“液态”相比,更易堆积于深水盆地更近陆架一端的陆坡或盆底区域,同时由于海平面下降早期,陆架的部分地区仍然被浸没,没有陆架边缘三角洲形成,所以重力流沉积物以细粒沉积为主。MTDs 上通常缺乏钻井资料,识别时以地震资料为主。

2.2.3 凝缩段的识别

混合层序地层模型中,凝缩段是海侵终止到强制海退期间沉积的远洋-半远洋沉积物。它与最大海泛面伴生,沉积速率极低,底栖生物富集。由于凝缩段沉积多为富有机质泥页岩或钙质泥页岩,因此常规测井曲线表现为高自然伽马、低电阻率或尖峰状高阻(含钙质泥页岩时)、高密度、高声波速度等特征(图 4)。井震标定后的凝缩段在地震剖面上表现为连续性较好的强振幅反射同相轴,除局部被晚期重力流(MTDs 或浊流沉积)侵蚀以外,可以全区追踪。

2.3 体系域识别方法

深水沉积结构单元是三级层序下降期-海侵期深水沉积的最基本组成部分,虽然每个深水盆地的独特性导致深水沉积结构单元的特征各不相同,但沉积结构单元在特定体系域沉积时是相对稳定的。通常可以通过以下两种方式识别与体系域判断相关的沉积结构单元:①沉积物性质及规模。沉积性质分析用以区分

碎屑流和浊流,规模主要用来分析碎屑流的分布范围及厚度。当碎屑流的沉积与海平面变化相关时,通常大型碎屑流产生于 FSST 早期,小型碎屑流产生于 TST 晚期,由此可以推断不同碎屑流对应的体系域。这里的碎屑流主要指 MTDs,而不是现今仍存在较大争议的砂质碎屑流^[27-28];②形成深水沉积的浊流密度,区分高密度浊流和低密度浊流。这里的高密度浊流^[29]与低密度浊流主要从流体密度加以区分^[30],并没有考虑流体中颗粒支撑机制^[31]。虽然沉积时的流体密度难以直接观测,但水道的侧翼具有形态十分明显的以泥为主天然堤,从该角度出发认为其流体密度应低于下降期体系域的无堤的、以含砾粗砂为主的大型朵体。因此认为具有堤的水道复合体为低位域/海侵体系域早期的低密度浊流,大型无堤的朵体为 FSST 晚期高密度浊流沉积作用的产物。总之,根据基准面变化不同阶段的主要沉积物对应关系(图 2),在鲁武马盆地渐新统共识别了 3 种主要沉积结构单元:水道复合体、大型朵体复合体和块体搬运沉积(表 3),从而判断其所处体系域,分析层序内深水沉积演化规律。

2.3.1 FSST 早期——块体搬运沉积

地震上表现为半透明、弱振幅、杂乱反射特征;内部可见多个较强振幅、叠瓦状逆断层面响应(图 5a)。MTDs 顶、底面地震反射强度总体较弱,可能由于上、下部与之接触的沉积物粒度也较细,两者之间无较大波阻抗差。MTDs 对下伏地层具有明显的侵蚀作用,使局

表 3 东非鲁武马盆地渐新统内识别的 3 种深水沉积结构单元特征参数

Table 3 Characteristic parameters of three deep water sedimentary architecture elements in the Oligocene Ruvuma Basin, East Africa

体系域	沉积结构单元	地震尺度	岩性特征
LST/TST 早期	水道复合体	水道宽度 2.5~5 km, 厚度 50~200 m	含砾的中-粗砂岩, 后层正粒序结构, 单一事件沉积的顶、底部含有岩化的泥屑, 可见生物扰动的粉砂岩, 一些砂层顶部没有保存泥岩或粉砂岩帽
FSST 晚期	大型朵体复合体	面积约 300 km ² (部分被侵蚀), 最大厚度达 320 m	中-粗砂岩为主, 由多个巨厚的事件层叠置而成, 以中-粗砂岩为主, 可见多个以孤立方式存在的细砂。存在多种沉积构造, 如碟状构造、泄水构造、包卷层理、小型撕裂泥屑、波状层理等
FSST 早期	块体搬运沉积	面积 150~200 km ² , 厚度 250~350 m	未钻遇

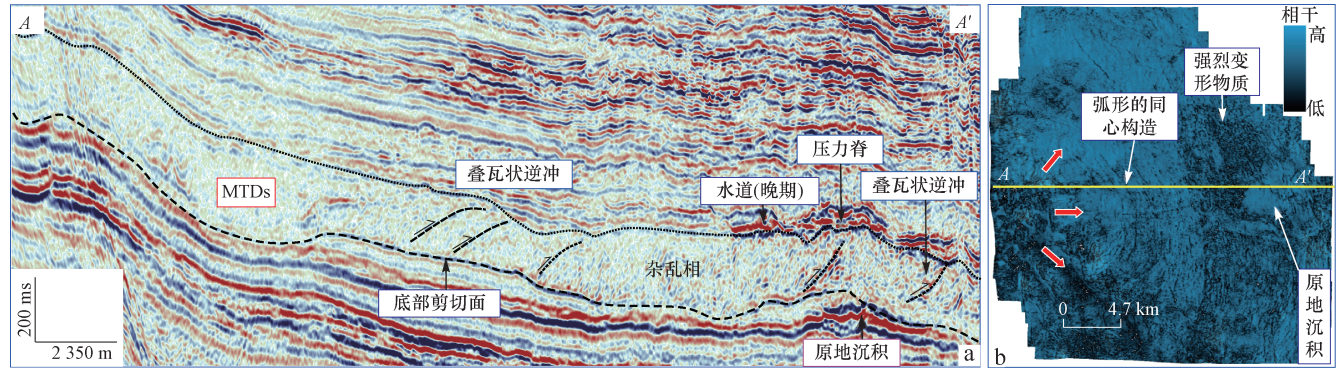


图 5 东非鲁武马盆地渐新统 MTDs 的地震反射特征及相干切片

Fig. 5 Seismic reflection characteristics and coherent slice of the Oligocene MTDs in Ruvuma Basin, East Africa

a. 沿着渐新统 MTDs 运动方向的地震剖面; b. MTDs 底面沿层相干切片

部地层明显减薄。底面沿层相干切片上可以观察到弧形的同心构造(图 5b),分析是受陆架三角洲进积引发的重力滑脱构造(图 1)影响。重力滑脱构造在向海前缘形成两处南北向排列的弧(弓)形复合体,在向海方向主滑脱层中分离出的一系列向上凸起、表面有轻微倾角的掀裂断层,并形成逐渐消失在东部的断层传导褶皱^[32]。在渐新统强制性海退初期,滑脱构造同时活动导致 MTDs 形成与弧(弓)形复合体形态相似的弧(弓)形的同心滑塌构造。在同心滑塌构造的前端,发育了局部分布的原地沉积和强烈变形物质(图 5b)。

2.3.2 FSST 晚期——大型朵体复合体

随着基准面继续下降到陆架海拔以下,具有超覆形态的陆架边缘三角洲进积和下超到大陆斜坡之上,同期深水环境中沉积了由三角洲供给以及分流河道经峡谷直接向深水供给的高密度浊流,形成主要浊流沉积——大型朵体复合体(图 6)。岩心观察结果表明,朵体复合体以粗-中粗砂岩为主(表 2),具有高砂/泥比,容易被过载荷,沉积于陆坡坡度突然变缓之处(图 6a),受均衡剖面的影响,向陆方向的浊流主要以侵蚀或过路的方式通过,并不沉积,显示出无根特征

(图 6a—c);向盆方向由于可容空间增大,空间开阔,浊流发散,为数众多的补给水道-朵体/朵体单元不断迁移叠置,形成大规模的朵体复合体(图 6d,e)。朵体复合体主体砂泥比最大(well 2 井),砂泥厚度比值可达 24;其次为朵体复合体近补给水道口(well 1 井)砂泥厚度比值约 9。

2.3.3 LST/TST 早期——水道复合体

水道复合体主要分布于陆坡区,是鲁武马盆地最重要的储集类型之一,是研究区最主要、也是最容易识别的沉积结构单元。水道复合体形成于复杂的多期侵蚀-充填过程,水道内沉积了大量的低位域粗粒沉积物(图 7)。沿重力流运动方向,水道复合体因沉积时间和沉积位置的差异呈现出不同的变化趋势。水道复合体的天然堤发育(图 7),由浊流经过时的细粒沉积构成,为富泥的细粒沉积物,受底流作用的影响,天然堤主要分布于与底流运动方向一致的水道侧翼^[33]。天然堤原始外部几何形态为楔形,从水道侵蚀轴部向外聚敛。天然堤的地震反射同相轴总是连续的,当天然堤加积时,从下向上地震反射同相轴的倾角逐渐增加。水道复合体内部充填沉积十分复杂,随沉积位置、

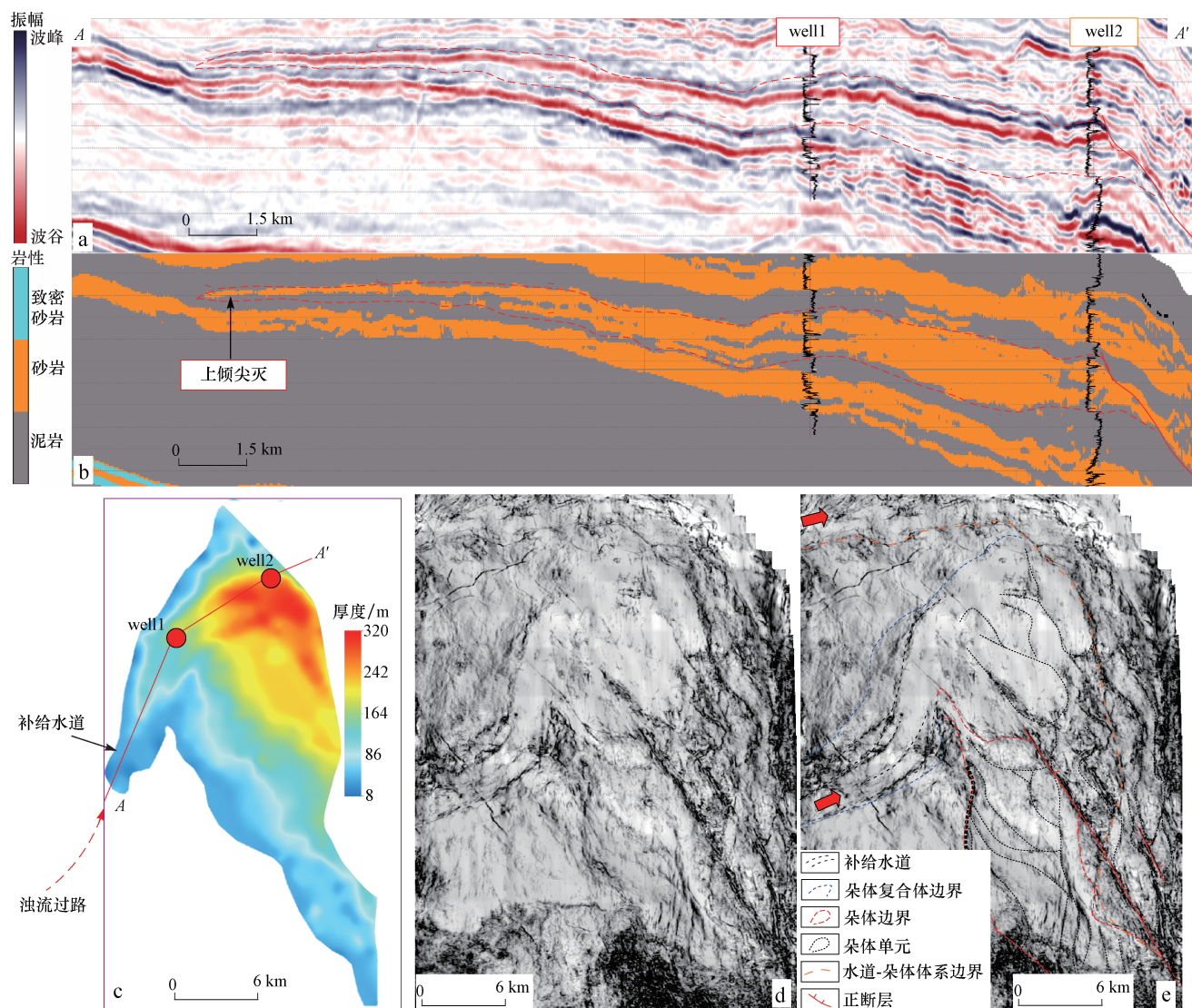


图6 东非鲁武马盆地渐新统大型朵体复合体沉积特征

Fig. 6 Depositional features of the Oligocene large lobe complex in Ruvuma Basin, East Africa

a. 沿着水流方向联井地震剖面; b. 对应于地震剖面的最大概率岩性预测剖面; c. 大型朵体体系厚度分布; d. 渐新统底界向上 64 ms 沿层相干切片(无解释); e. 渐新统底界向上 64 ms 沿层相干切片(解释)

下伏地形坡度的变化而不同,同时又受控于基准面的变化。水道复合体具有多级别、多期次频繁迁移的特征,多期次迁移的水道砂可以形成连片分布的富砂沉积(图7)。

3 层序格架和沉积体系组成演化

3.1 鲁武马盆地渐新统层序格架

等时层序格架的建立,意味着沉积古地理环境的恢复,进而可以揭示各种沉积相带及其相互联系。印度洋南部非洲陆缘的深海沉积岩心的古生物和地化资料准确界定 33.7 Ma 为始新统与渐新统界限,始新世-渐新世的变迁是自白垩纪结束以后对全球最具深

远影响的时期,气候变冷,冰川生长,海平面下降以及加速的生物灭绝均发生在该时期^[34]。自渐新世早期,全球海平面长周期曲线呈现出稳定下降的趋势^[13],渐新统顶底对应两个短周期海平面变化曲线的高点。以研究区内钻屑和岩心资料为基础的渐新统多学科生物(浮游有孔虫亚纲,钙质超微化石,花粉)地层分析结果,确定了渐新统的深水沉积环境及上、下段地层界线。在井标定基础上,分析地震剖面上地震反射特征及上、下地层的接触关系,完成3个层序界面(T_0 , T_{ol} , T_e)的识别和解释,将鲁武马盆地渐新统划分为两个三级层序(图8)。

层序顶部凝缩段通常为富有机质泥岩或钙质泥岩,具有高声速、高密度的电性特性,顶部可以形成较

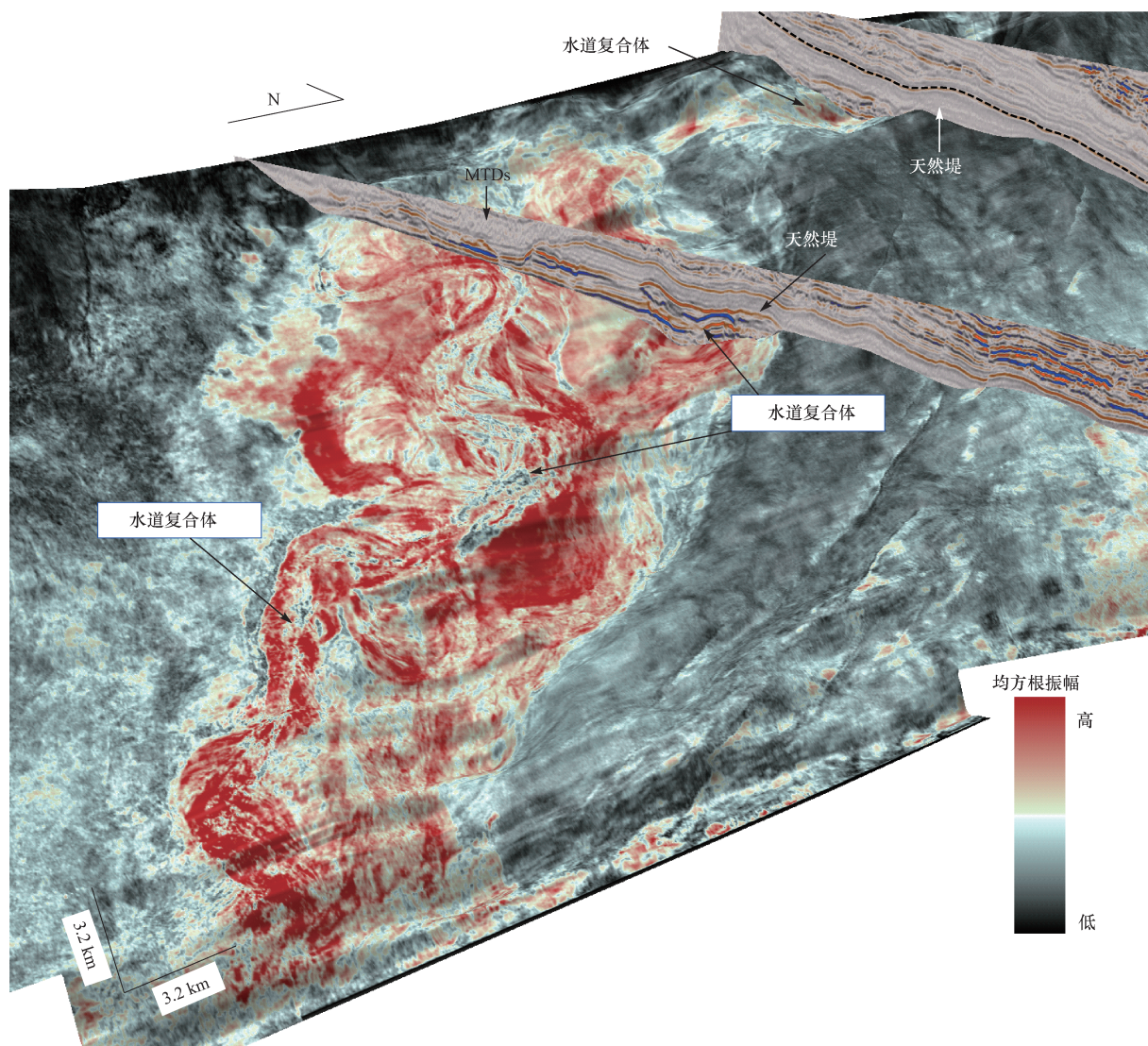


图7 东非鲁武马盆地渐新统水道复合体沉积展布三维可视化图

Fig. 7 3D visualization showing the sedimentary distribution of the Oligocene complex channel system in Ruvuma Basin, East Africa

强的波阻抗界面(T_0)。除近陆架边缘晚期MTDs对 T_0 产生的侵蚀外, T_0 在全区范围内具有很好的连续性。在近陆架区南部,三个层序界面均位于MTDs底部,北部层序以连续性好的凝缩段为界;在远离陆架区,近陆架分布的下渐新统MTDs并没有延伸到较远,图8b剖面上不能观察到;上渐新统MTDs仍然具有较大的规模,分布范围较广。各层序边界以下的凝缩段局部被晚期MTDs、水道、朵体等侵蚀。

3.2 深水沉积体系演化规律

鲁武马盆地在晚侏罗世—早白垩世晚期形成“窄陆架、陡陆坡”的地貌特征^[35]。白垩纪至今的被动大陆边缘期,整个东非大陆构造环境较为稳定。随着全球性海侵的发生,海平面逐渐上升,鲁武马盆地从海陆

过渡相转变为浅海、半深海相。进入渐新世,东非大陆抬升,源自东非大陆的沉积物供应量增加,全球海平面下降^[36-37],在鲁武马盆地上陆坡广泛发育三角洲沉积,随着沉积的不断向海推进,大量沉积物进入深水盆地。强制海退的初期,大部分的砂体聚集于上滨面系统之内,外陆架的下滨面系统以细粒的泥岩为主,伴随着海平面下降速率的增加以及重力滑脱构造活动的影响,局部陆架边缘沉积变得不稳定,在近陆架一侧的局部陆坡上形成大规模的MTDs。这种粘结碎屑流沉积的“塑性”流体特征使之更易堆积于深水盆地的更近源区域(图8)。由于陆架边缘三角洲重力滑脱作用的持续进行,逆冲断裂的持续发育,原来连续性较好的MTDs被逆冲断层破坏(图8b)。伴随海平面继续下降,大型朵体开始沉积(图8d),朵体以粗—中粗砂岩

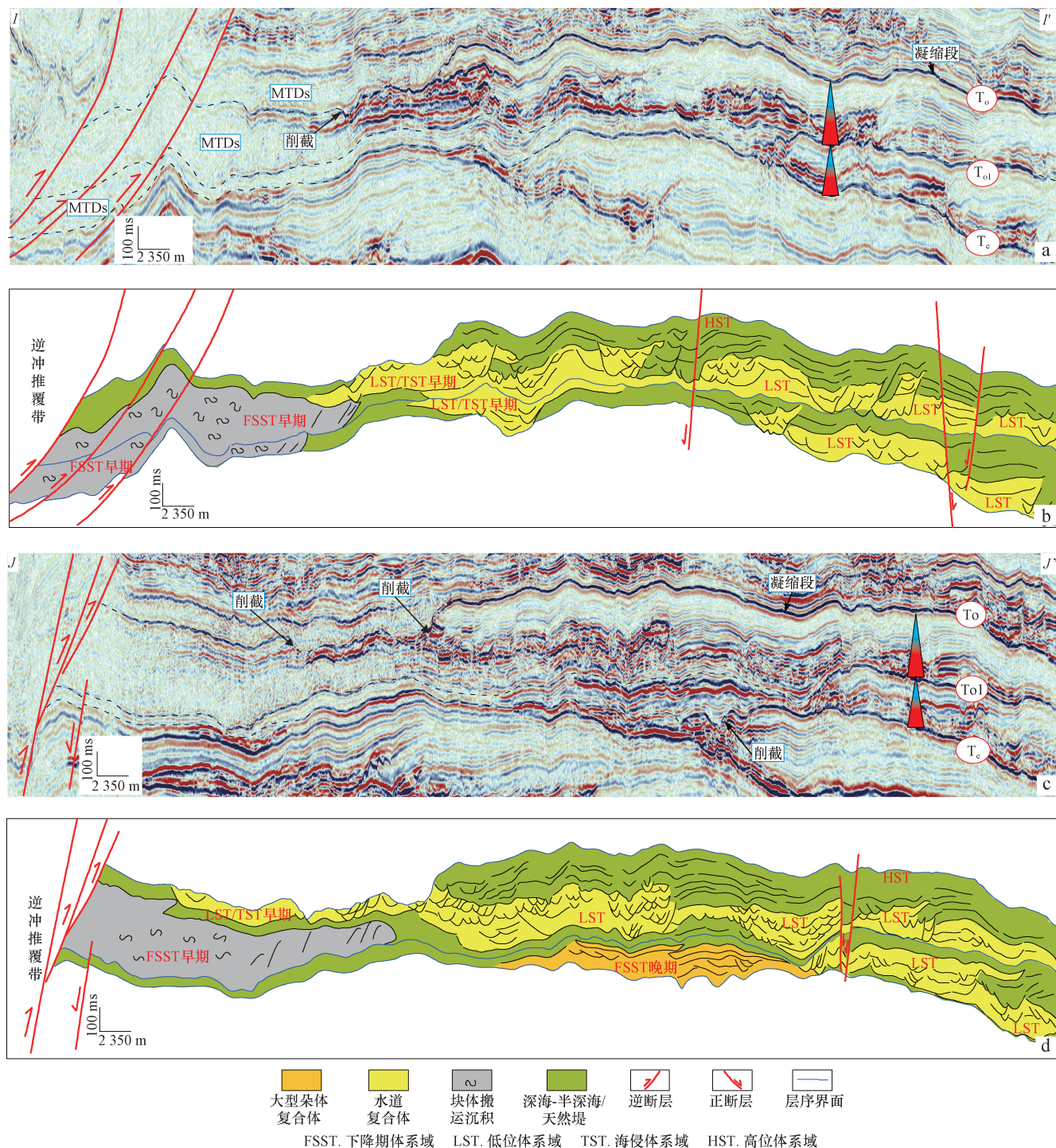


图8 过鲁武马盆地深水区典型层序地层解释剖面(剖面位置见图1)

Fig. 8 Typical sequence stratigraphic interpretation section in deep water area of Ruvuma Basin (see Fig. 1 for the section location)

a. 过研究区近陆的南北向地震剖面; b. 对应于地震剖面 II' 的地质剖面; c. 过研究区近盆的南北向地震剖面; d. 对应于地震剖面 JJ' 的地质剖面

为主,具有高砂/泥比、高密度的特点,沉积于陆坡水道口的近处,为强制海退晚期产物。之后海平面开始上升,陆架的加积减少了沉积物向深盆的供给,此时流体由低密度浊流控制,堤化水道体系开始沉积(图7,图8);随着基准面快速上升,受浪蚀作用影响,深水中仍然有低密度浊流发育;当海平面上升速

率减缓,深水区主要接受细粒的半远洋和远洋沉积而形成凝缩段。(图8)。上渐新统仅观察到低位域/海侵体系域早期的水道复合体沉积,而没有类似于下渐新统层序的大型朵体,推测晚渐新世强制海退晚期的大型朵体可能位于北部研究区以外的更近盆处。

4 结论

1) Catuneanu 的混合层序地层模型可以指导深水层序地层划分,该划分方式反映了基准面下降过程中的4个主要事件,层序边界可以将重力流沉积与下伏半深海-深海沉积有效分开,每个体系域对应特定的重力流或深海-半深海沉积。

2) 鲁武马盆地渐新统识别和解释了3个层序界面(T_0 , T_{ol} , T_e)。MTDs发育区,各层序以MTDs底部为界;MTDs不发育处,层序以高连续的凝缩段为界。各层序边界以下的凝缩段局部易被晚期MTDs、水道、朵体等侵蚀。

3) 鲁武马盆地渐新统陆架边缘形成大规模的MTDs,强制海退的早期在近陆架一侧的陆坡上局部发育。早渐新世的大型朵体以粗-中粗砂岩为主,具有高砂/泥比、高密度的特点,为强制海退晚期产物。堤化水道体系沉积于低位体系域及海侵早期,其顶部为凝缩段沉积;晚渐新世仅观察到低位域/海侵体系域早期的水道复合体沉积,而没有大型朵体,推测晚渐新世强制海退晚期的大型朵体处于北部研究区以外更近盆处,为后续新区评价提供依据。

致谢:感谢审稿专家仔细审阅本文并提出宝贵建议,感谢编辑老师的大力帮助。

参 考 文 献

- [1] 庞雄. 深水重力流沉积的层序地层结构与控制因素—南海北部白云深水区重力流沉积层序地层学研究思路[J]. 中国海上油气, 2012, 24(2): 1-8.
Pang Xiong. Sequence stratigraphy configuration of deepwater gravity-flow sediments and its controls: A line of thinking in sequence stratigraphy of gravity-flow sediments in Baiyun deepwater area, the northern South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(2): 1-8.
- [2] 吴因业, 朱如凯, 罗平, 等. 沉积学与层序地层学研究新进展: 第18届国际沉积学大会综述[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 199-206.
Wu Yinye, Zhu Rukai, Luo Ping, et al. Advance on Sedimentology and sequence stratigraphy: A summary from 18th international sedimentology congress [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 199-206.
- [3] 鲜本忠, 朱筱敏, 岳大力, 等. 沉积学研究热点与进展: 第19届国际沉积学大会综述[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 816-826.
Xian Benzhong, Zhu Xiaomin, Yue Dali, et al. Current hot topics and advances of sedimentology: A summary from 19th International Sedimentological Congress [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(6): 816-826.
- [4] Xian B, An S, Wang L, et al. Lacustrine deep-water sequence stratigraphy and prediction model of gravity flow deposits: a case study of shahejie formation in dongyingdepression, Bohai Bay Basin, China [C] // Abstracts Book of 19th International Sedimentological Congress. Geneva: University of Geneva, 2014: 762.
- [5] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 1-11.
Xu Changgui, Du Xiaofeng, Xu Wei, et al. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basins [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 1-11.
- [6] 吴因业, 张天枢, 张志杰, 等. 沉积体系域类型、特征及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 69-81.
Wu Yinye, Zhang Tianshu, Zhang Zhijie, et al. Types and characteristics of depositional systems tract and its petroleum geological significance [J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(1): 69-81.
- [7] 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.
- [8] 许志刚, 韩文明, 孙玉梅. 东非大陆边缘构造演化过程与油气勘探潜力[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 961-969.
Xu Zhigang, Han Wenming, Sun Yumei. Tectonic evolution and petroleum exploration prospect East Africa [J]. Geology in China, 2014, 41(3): 961-969.
- [9] HIS Energy. Basin monitors: Ruvuma basin [M]. Houston: IHS Inc, 2009.
- [10] Salman G, Abdula L. Development of the Mozambique and Ruvuma sedimentary basins, offshore Mozambique [J]. Sediment Geology, 1995, 96(1-2): 7-41.
- [11] 温志新, 王兆明, 宋成鹏, 等. 东非被动大陆边缘盆地结构构造差异与油气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 671-680.
Wen Zhixin, Wang Zhaoming, Song Chengpeng, et al. Structural architecture difference and petroleum exploration of passive continental margin basins in east Africa [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 671-680.
- [12] Cochran J R. Himalayan uplift, sea level, and the record of Bengal Fan sedimentation at ODP leg 116 sites [C] // Cochran J R, Stow D A V, Proceedings of the ocean drilling program scientific results, USA: A&M University Press, 1990: 397-414.
- [13] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic [J]. Science, 1987, 235(4397): 1156-1167.
- [14] Payton C E. Seismic stratigraphy-application to hydrocarbon exploration [M] // American Association of Petroleum Geologists Memoir, Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977, 26: 3-14.
- [15] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Italy: Elsevier, 2006: 1-375.
- [16] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regres-

- sive wedge systems tract; deposition during baselevel fall [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81 (1/2): 1 - 9.
- [17] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract; deposition during baselevel fall-reply [J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 95 (1/2): 147 - 160.
- [18] Posamentier H W, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition II - sequence and systems tract models [M] // Wilgus C K, Ross C A, Posamentier H W. Sea level changes: An integrated approach, SEPM Special Publication. Tulsa: The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988: 125 - 154.
- [19] Posamentier H W, Allen G P. Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications [M] // SEPM. Concepts in sedimentology and paleontology. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1999, 7: 210.
- [20] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73 (3): 367 - 388.
- [21] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统的层序地层学研究 [J]. *地学前缘*, 2007, 14 (1): 220 - 229.
Pang Xiong, Chen Changmin, Peng Dajun, et al. Sequence stratigraphy of pearl river deep-water fan system in the South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (1): 220 - 229.
- [22] Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition I - conceptual framework [M] // Wilgus C K, Ross C A, Posamentier H W. Sea level changes: An integrated approach, SEPM Special Publication. Tulsa: The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988: 109 - 124.
- [23] Kolla V, Posamentier H W, Eichenseer H. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract; deposition during baselevel fall-discussion [J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 95 (1 - 2): 139 - 145.
- [24] Mitchum R M, Jr. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy [M] // Payton C E. Seismic stratigraphy-Applications to hydrocarbon exploration, memoir. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 205 - 212.
- [25] 秦雁群, 万仑坤, 计智锋, 等. 深水块体搬运沉积体系研究进展 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39 (1): 140 - 152.
Qin Yanqun, Wan Lunkun, Ji Zhifeng, et al. Progress of research on deep-water mass-transport deposits [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39 (1): 140 - 152.
- [26] Suzanne B, Joe C, Mads H. A review of kinematics indicators from mass transport complexes using 3D seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26 (7): 1132 - 1151.
- [27] Hampton M A. Competence of fine-grained debris flows [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975, 45 (4): 834 - 844.
- [28] Shanmugam G, Moiola R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79 (5): 672 - 695.
- [29] Kuenen P H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. *Journal of Geology*, 1950, 58 (2): 91 - 127.
- [30] 裴羽, 何幼斌, 李华, 等. 高密度浊流和砂质碎屑流关系的探讨 [J]. *地质论评*, 2015, 61 (6): 1281 - 1292.
Pei Yu, He Youbin, Li Hua, et al. Discuss about relationship between high-density turbidity current and sandy debris flow [J]. *Geological Review*, 2015, 61 (6): 1281 - 1292.
- [31] Lowe D R. Sediment-gravity flows, II: Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52 (1): 279 - 297.
- [32] Mahanjane E S, Franke D. The Rovuma delta deep-water fold-and-thrust belt, offshore Mozambique. [J]. *Tectonophysics*, 2014, 614 (3): 91 - 99.
- [33] 孙辉, 吕福亮, 范国章, 等. 三级层序内受底流影响的富砂深水沉积演化规律 - 以东非鲁武马盆地中新统为例 [J]. *天然气地球科学*, 2017, 28 (1): 106 - 115.
Sun Hui, Lv Fuliang, Fan Guozhang, et al. Evolution of deepwater sand rich sediments Affected by bottom currents in the 3rd order sequences: A case study of Middle Miocene in the Ruvuma Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28 (1): 106 - 115.
- [34] Paul N P, Ian K M, Bridget S W, et al. Extinction and environmental change across the Eocene-Oligocene boundary in Tanzania [J]. *The Geological Society of America*, 2008, 36 (2): 179 - 182.
- [35] Bosellini A. East Africa continental margins [J]. *Geology*, 1986, 14 (1): 76 - 78.
- [36] Walford H, White N, Sydow. Solid sediment load history of the Zambezi Delta [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 238 (1 - 2): 49 - 63.
- [37] Moore A, Blenkinsop T, Cotterill F W. Southern African topography and erosion history: Plumes or plate tectonics? [J]. *Terra Nova*, 2009, 21 (4): 310 - 315.

(编辑 张亚雄)