

东非鲁伍马盆地窄陆架背景下的深水沉积体系

刘子玉¹, 吕明¹, 卢景美¹, 吕栋², 王颖¹, 郭刚¹

(1 中海油研究总院; 2 中国海洋石油国际有限公司)

摘要 通过岩心、钻井、地震等资料以及物源分析,详细研究了东非鲁伍马盆地构造及沉积演化特征,初步提出了研究区窄陆架背景之下的沉积体系模式。研究认为,鲁伍马盆地陆坡较陡峭且峡谷水道非常发育,而深海平原地形趋于平缓,这有利于形成大型海底扇沉积体系。鲁伍马盆地沉积主要受控于鲁伍马河水系,尤其从渐新世开始受区域隆升影响,导致盆地西缘遭受抬升剥蚀,沉积物源供应充足,加之鲁伍马河水系较为发育,并伴随全球性海退,形成了庞大的向海推进的鲁伍马三角洲沉积体系,这也为海底扇的发育提供了丰富的物源,使得研究区发育了鲁伍马三角洲—水道—海底扇复合沉积体系。

关键词 陆架; 深水沉积; 海底扇; 水道; 鲁伍马盆地; 东非

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

1 引言

随着全球油气勘探的深入,深水沉积越来越成为人们关注的焦点。以往国内外地质家的研究主要集中于宽缓陆架背景下的深水沉积体系,如墨西哥湾、巴西被动大陆边缘盆地等,而对于狭窄陆架—陡坡等特殊背景下的深水沉积却很少涉及。这类大陆边缘盆地由于构造及沉积演化的差异而导致其所处的陆架较窄,或者几乎无陆架发育而直接过渡到陡峭陆坡沉积环境。东非鲁伍马盆地(Ruvuma Basin)即属于典型的窄陆架沉积背景^[1-5]。

鲁伍马盆地属于东非被动大陆边缘盆地体系,横跨坦桑尼亚和莫桑比克两个国家,面积约 $14.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中海上面积占76%(图1)。盆地南窄北宽,呈“鸡腿状”展布。盆地西侧为莫桑比克褶皱带前寒武纪基底露头,北部以鲁伍马隆起与坦桑尼亚盆地的曼达瓦次盆分隔,东部边界位于Davie脊走滑裂陷带以东,延伸至超深水区域。盆地主要由6个构造单元组成(图1),即Lukuledi地堑、Kitere和Miconde基底隆起带、Ruvuma三角洲、Ibo海底高地、Kerimbas地堑带和Davie脊^[6-7]。

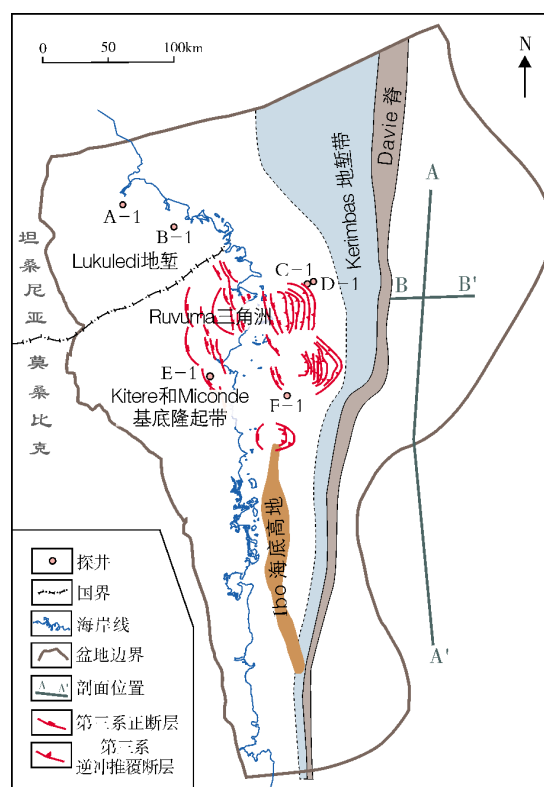


图1 鲁伍马盆地位置及构造区划图

收稿日期: 2015-05-25; 改回日期: 2016-08-25

本文受中海油研究总院专业基础建设自立课题“被动大陆边缘背景下深水沉积体系成因研究”项目(编号:20160T-KTZL-15)资助
刘子玉: 1981年生,高级工程师,2008年硕士毕业于成都理工大学沉积学专业,现主要从事沉积储层方面的研究。通讯地址: 100028 北京市朝阳区太阳宫南街6号院A座1009室; E-mail: 254129811@qq.com

鲁伍马盆地的勘探始于上世纪50年代,但大规模发现却集中于2010年以后,从晚白垩世到中新世的各个层位均钻获天然气,其中又以渐新世储层的发现最为广泛^[8-9]。2011年全球十大油气勘探发现中的两项即来自此盆地^[8-9],证实了鲁伍马盆地蕴含丰富的天然气资源。目前鲁伍马盆地已有钻井39口,其中发现井24口,显示井5口,钻井成功率达75%,表现出良好的勘探前景。截至2013年底,该盆地发现16个油气田,天然气储量 $38\,794\times 10^8\text{ m}^3$,已成为近年来继南大西洋盆地盐下之后最热门的勘探领域之一。本文通过岩心、钻井、地震等资料以及物源分析,详细研究了盆地的构造及沉积演化特征,提出了研究区深水沉积体系模式,以期能对鲁伍马盆地下一步油气勘探部署有所启示。

2 构造沉积演化特征

鲁伍马盆地的形成与冈瓦纳超级大陆的解体以及西印度洋的张开有关^[7,10-12],通过大地构造背景分析,从晚三叠世至今,盆地地区从南纬40°漂移至南纬10°,经历了多期构造运动,可划分为5个构造沉积演化阶段。

(1) 裂陷期(晚石炭世—三叠纪,300~205 Ma): 冈瓦纳古陆沿构造活动带发生裂陷,形成陆内的地堑型裂谷。与我国裂陷期形成大量中—小型的箕状断陷不同,研究区形成一条宽底的大地堑,内部充填了一套较厚、范围较大的河流—冲积扇为主的陆相红层,局部含煤,颇似“拗陷”沉积,但湖泊相较少。推测晚期东北部受海侵影响(图2a)。

(2) 过渡期(早—中侏罗世,205~157 Ma): 冈瓦纳超级大陆开始解体为分离的块体,引起全球海平面上升,环东非和马达加斯加西部边缘,断裂活动减弱,开始转入热沉降。该时期继承了裂陷期的“拗陷”地形,古特提斯洋海水率先沿加宽了的“地堑”从东北方向侵入裂陷盆地,形成了湾状的窄海环境,并且范围逐渐扩大(图2b)。在环东非和马达加斯加边缘发育条带状的碳酸盐障壁礁,内侧分隔了很多盐泻湖,附近一些盆地都揭露了大套盐岩。南部开始发生大规模火山活动,发育了较大范围的玄武岩流(图2b),后期火山活动逐渐减弱。该时期研究区以河流、泻湖、盐岩沉积为主(图2b)。

(3) 漂移早期或过渡晚期(晚侏罗世—早白垩世,157~118 Ma): 海底扩张使原冈瓦纳超级大陆彻底

分离,解体为东、西两个大联合板块,即非洲/南美联合板块与南极/印度/斯里兰卡/马达加斯加/塞舌尔/澳大利亚联合板块(图2c),海侵范围进一步扩大。

晚侏罗世两大板块开始漂移,并被若干转换断层所调节。特提斯洋的广泛海侵导致了包括鲁伍马盆地在内的非洲东北部盆地上侏罗统的海相页岩与石灰岩的不协调沉积。因原属地堑两岸较陡,此时中部深海区主要发育深水沉积,只在陆地边缘发育较窄的河流—三角洲和浅海沉积。南部仍有少量火山活动。研究区以浅海和碳酸盐岩沉积为主(图2c)。

早白垩世索马里和莫桑比克海峡盆地继续海底扩张,两大板块之间海水开始贯通成为一体,海水继续向非洲大陆海侵,至早白垩世末(118 Ma),马达加斯加地块停止了随印度板块漂移,此后就构成了东非大陆边缘的一大障壁岛。沉积上仍以深水相为主,在陆地边缘发育河流—三角洲和滨浅海。研究区以河流、滨浅海沉积为主。

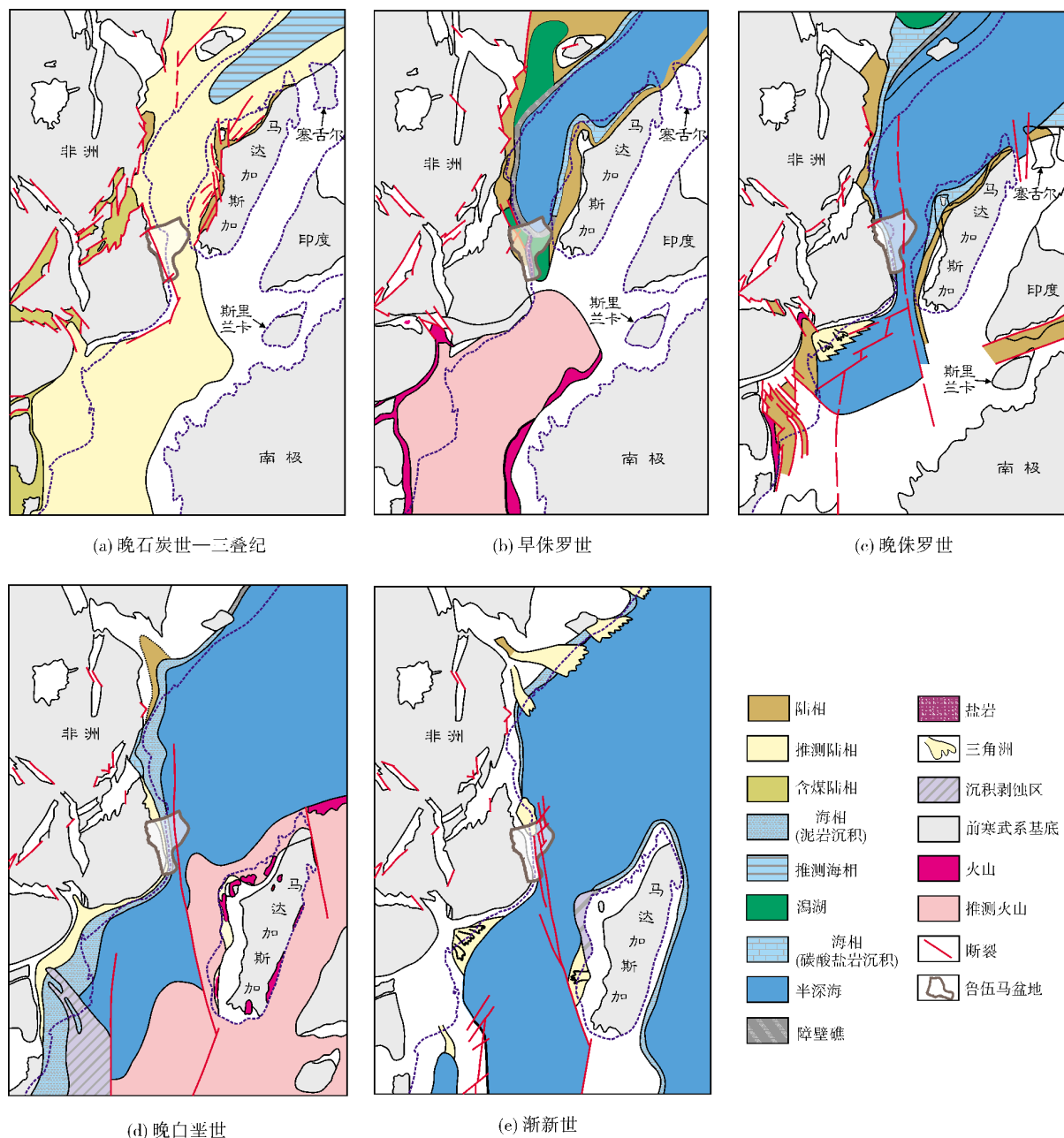
(4) 漂移晚期或被动大陆边缘期(晚白垩世—始新世,118~35 Ma): 晚白垩世马达加斯加陆块到达现今位置并停止漂移,始新世印度板块继续向东北漂移,并逐渐远离。东非边缘进入被动大陆边缘发育期。

晚白垩世东非广泛发育海侵,沿大陆边缘主要发育陆架、陆坡泥质沉积,少量河流—三角洲。在马达加斯加周边区域有大范围的火山活动再次加强,沉积了大范围、厚的火山—沉积层。研究区以河流、滨浅海和半深海沉积为主(图2d)。

古新世—始新世,东非陆架边缘稳定,南部地区浅海碳酸盐岩沉积广泛发育,外陆架边缘及马达加斯加岛周缘发育生物礁,东非北部开始发育较大范围的河流—三角洲。研究区以深水沉积为主。

(5) 新构造抬升期(渐新世至今,35~0 Ma): 东非大陆受新一期陆内裂陷的影响,局部发生抬升,使本区的物源区遭受剥蚀,沉积物的供应量增大;同时由于印度板块与欧亚板块的碰撞、聚合,发生全球大海退,使鲁伍马河三角洲体系迅速向海推进,并越过本区较窄的陆架而进入陆坡深水区。沉积物负载不均,产生泥岩滑脱,盆地内侧发育了伸展体系的铲状断层,盆地外侧发育逆冲推覆褶皱带^[13](图1)。

渐新世东非大陆边缘广泛发育三角洲沉积,研究区也以三角洲沉积为主(图2e);中新世鲁伍马三角洲继续发育,同时南部地区的碳酸盐又广泛发育,并伴随区域性火山活动,研究区仍以三角洲沉积为主。



3 沉积体系分析

3.1 沉积相类型及其识别特征

结合区域沉积背景分析、单井沉积相分析以及对研究区二维地震测线的典型地震相分析,在鲁伍马盆地识别出 5 种主要沉积相类型,并建立了相应的井-震识别标志(图 3)。

(1)三角洲:从目前钻遇井分析,各个层位均有发育,如 A-1 井和 B-1 井(位置见图 1)在图 3 卡鲁(Karoo)期(晚石炭世—三叠纪)及侏罗纪发育三角洲沉积。从地震剖面分析,白垩纪至第三纪亦发育有三角洲沉积。三角洲平原的自然伽马曲线以正旋回为主,箱形或者钟形特征,三角洲前缘呈反旋回,以砂岩为主,夹泥岩,表明碎屑物源注入充足。地震上见明显的前积反射结构。早白垩世全球海平面处于

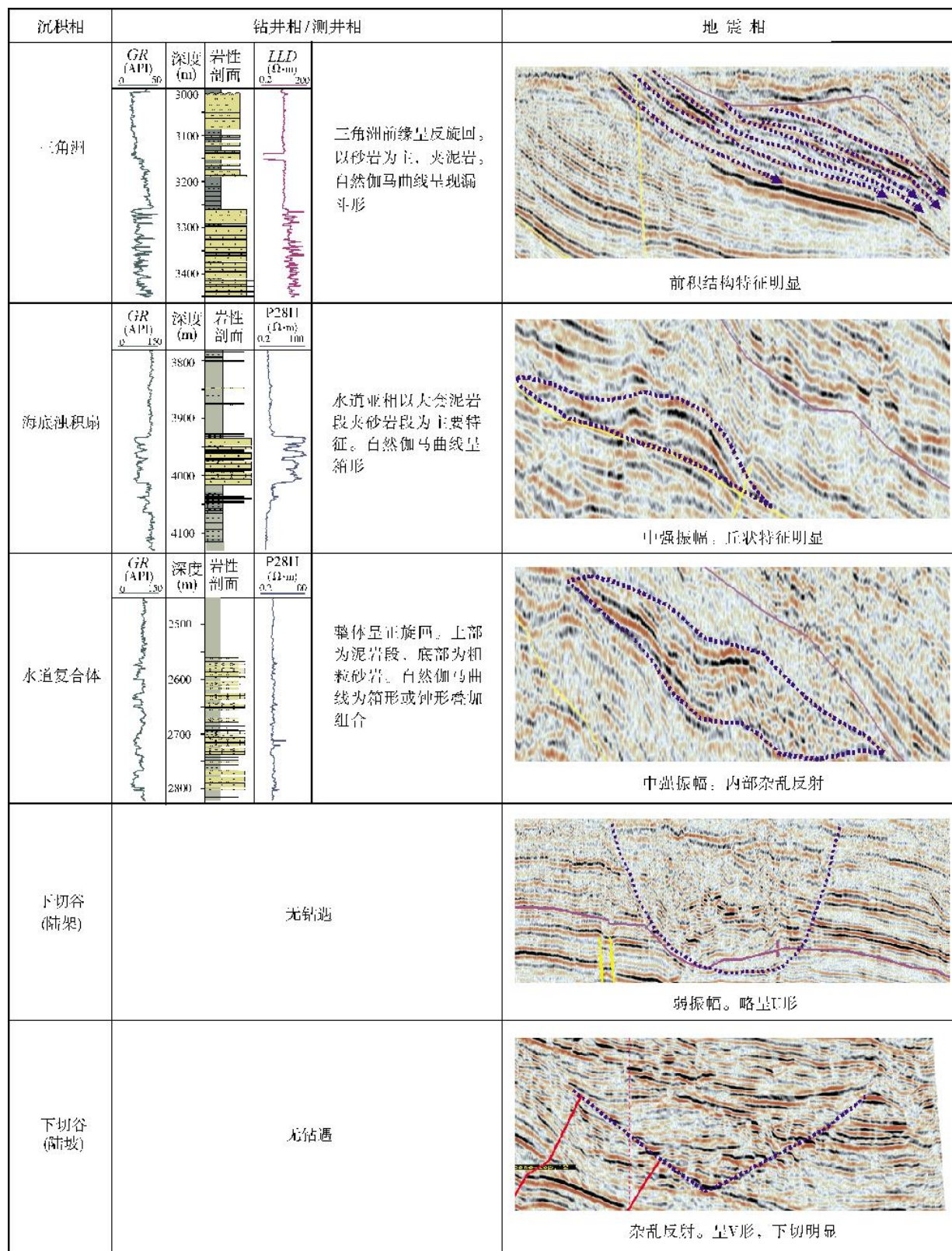
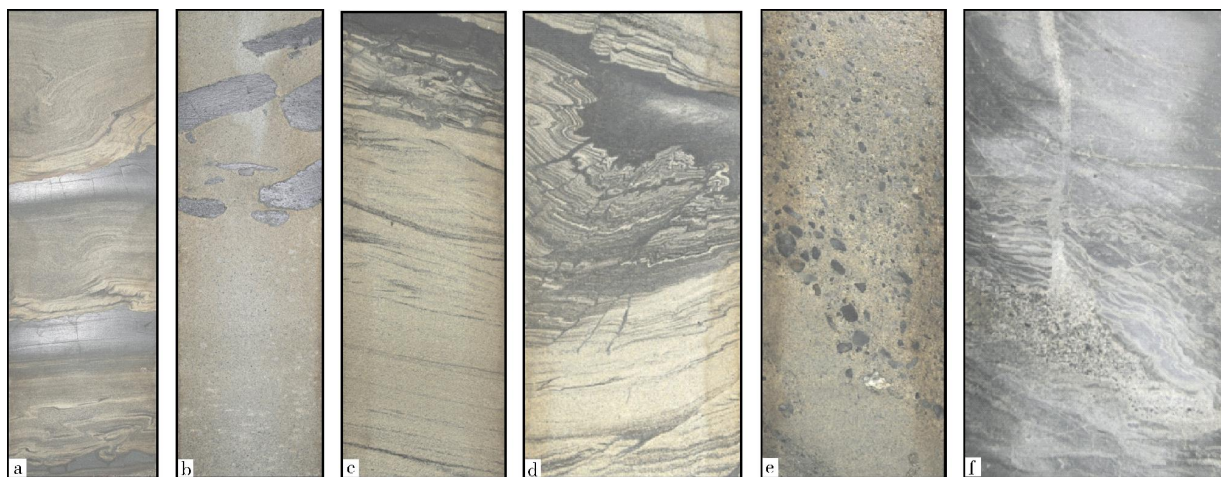


图 3 东非鲁伍马盆地典型沉积相综合特征

上升期,从地震剖面上看,其前积反射特征也非常明显,说明此期物源供应比较充足,促使三角洲发育。

(2) 浊积扇:从已有钻井来看,晚白垩世至中新世均有发育,钻井上表现为大套泥岩段夹顶底突变的砂岩段,自然伽马曲线呈箱形,地震上丘状特征明显,或者透镜体外形,中强振幅。C-1井(位置见图1)

浊积扇以类型多样的重力流朵叶体为主,岩性粗细均有。从旋回数量多、厚度小的特征推测,储层的侧向相变较快,非均质性较强。从岩心上可见丰富的沉积构造,如包卷层理(图4a)、块状结构(图4b)、泄水构造(图4c)、滑塌构造(图4d)、递变层理(图4e)、变形层理(图4f)。



(a) 包卷层理。灰白色砂岩夹泥岩。井深3240.3m

(b) 灰白色块状砂岩。含有泥砾,泥碎片达 $2\times 6\text{cm}$ 。井深3269.2m

(c) 爬升沙纹层理。上部具有泄水构造,含泥岩侵入。井深3318.4m

(d) 滑塌构造。具同生变形层理。井深3322m

(e) 递变层理。界面清晰,主要为杂基支撑。井深3338.3m

(f) 变形层理明显,为块体搬运复合体。井深3394.4m

图4 东非鲁伍马盆地C-1井浊积扇岩心特征

(3) 水道复合体:主要发育于中新世,钻井上呈正旋回,上为泥岩段,底部为粗粒砂岩,自然伽马曲线呈箱形或钟形叠加组合,地震上呈中强振幅,内部反射杂乱。

(4) 下切谷:下切谷主要是基准面较低时期盆地边缘沉积物通过陆架向深海盆地搬运,途中侵蚀下伏地层而成。地震剖面上界面显示清楚,在陆架区表现为“U”形,弱振幅充填;在陆坡区呈“V”形,内部杂乱反射。

3.2 古环境分析

通过深海钻探资料对古环境进行了分析。邻近研究区DSDP25航次242取样点分析结果^[14]表明,远洋沉积物生物成因组分占50%左右,由浮游单细胞藻类和盘星石组成。石英和钾长石含量较高,为20%~30%,可定为半远洋沉积。渐新世—早中新世粉砂质含量减少,但是陆源沉积物增加,沉积速率和陆源组分同时增加表明了陆源供给增强;中—晚中新世厚层半远洋沉积,钙质超微化石含量增加,陆源泥增

加,这表明可能存在海底底流输送体系^[15]。始新世浮游有孔虫含量比底栖类稍多,半深海环境主要含Globigerin(抱球虫)、Globorotalia(圆幅虫)等浮游类有孔虫。研究区D-1井(位置见图1)在始新世、渐新世和中新世均发现Globigerin、Globorotalia有孔虫,由此推断应该为半深海沉积环境。

3.3 物源分析

区域上分析,对盆地沉积影响最大的当属鲁伍马河水系。现今鲁伍马河发源于坦桑尼亚东南部的马塔戈罗山脉,海拔1000m,河流全长近800km,流域面积 $15.55\times 10^4\text{km}^2$,河口平均年流量 $475\text{m}^3/\text{s}$,是非洲常年性河流,世界河流排名80位,由若干支流组成,最大的为卢任达河(图5)。鲁伍马河也是坦桑尼亚和莫桑比克两个国家的天然分界线。

区域资料调研表明,鲁伍马河水系自二叠纪已经开始发育^[7],水系规模不断增大,物源供应充足,促使白垩纪至今海底扇(水道)体系广泛发育,尤其是渐新世随着东非区域抬升遭受侵蚀,大量沉积物

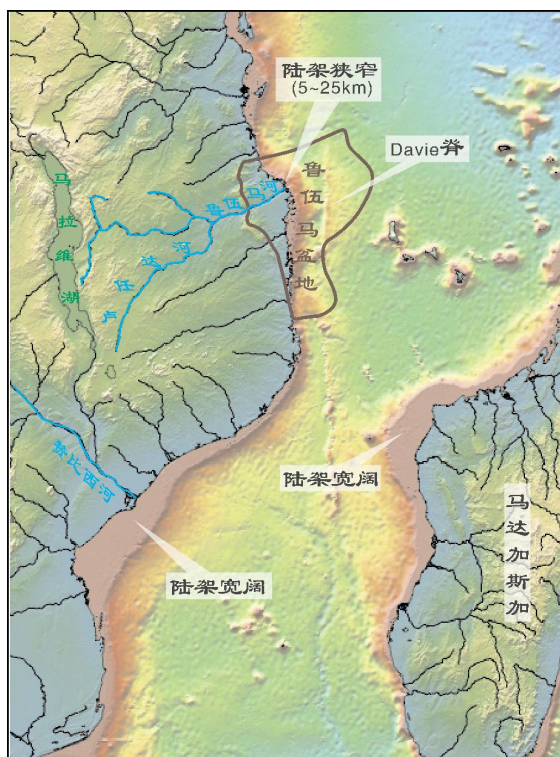


图5 东非现今地貌及水系分布图

随鲁伍马河注入海中,使得深水浊积体系发育。

莫桑比克东北部,陆架比较狭窄,陆坡陡峭,对面马达加斯加陆架则较为宽阔;莫桑比克南部,陆架变宽,陆坡较缓(图5)。由于狭窄的陆架,致使三角洲难以堆积形成大型三角洲体系,沉积物源可以直接越过陆架区经由上陆坡峡谷水道继续向前搬运,在趋于平缓的下陆坡造成大规模、广覆式海底浊积扇发育。

通过将鲁伍马三角洲与赞比西三角洲(受控于赞比西河水系)进行相比分析,二者发育的古地貌不尽相同(图5),鲁伍马三角洲较赞比西三角洲陆架窄,且地形较为陡峭,势能相对较大,更利于碎屑物快速搬运;从第三系沉积厚度图来看,赞比西三角洲范围大、厚度薄,它的面积约 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,沉积厚度达4 000 m,沉积速率约为46m/Ma,而鲁伍马三角洲沉积范围仅有 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$,沉积厚度却大于5 000 m,沉积速率约为62 m/Ma。再者,赞比西三角洲发育于下伏碳酸盐岩之上,而鲁伍马三角洲发育于泥岩之上,泥岩属于良好的润滑层,由于负载不均容易产生泥岩滑脱,因此这里以发育铲式正断层和逆冲推覆构造为显著特征。

此外,研究区重力异常特征也显示,鲁伍马盆地

所处陆架非常狭窄,陆坡陡峭,峡谷非常发育,可为浊积扇沉积提供物源通道。E-1井(位置见图1)揭露白垩系碎屑岩扇体,地震剖面上也见典型的前积反射,其东侧深水区钻井F-1井(位置见图1)也钻遇白垩系海底浊积扇。

3.4 沉积体系模式

在区域沉积背景分析基础上,本文综合沉积相、地震相、地貌分析及物源分析等资料,初步探讨了研究区狭窄陆架、陡陆坡背景下的深水沉积体系模式(图6)。

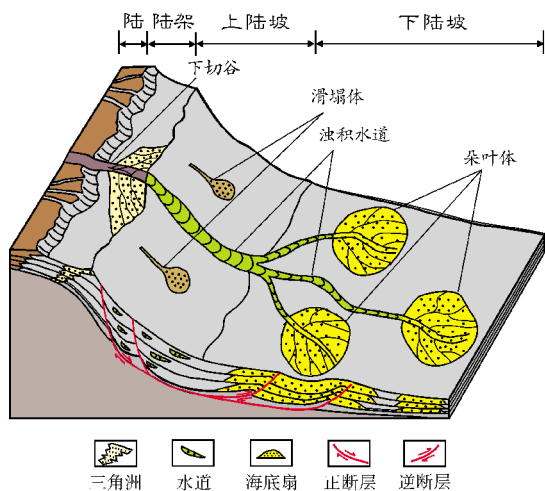


图6 研究区深水沉积体系模式图

鲁伍马盆地所处陆架较窄、陆坡较陡且峡谷水道非常发育,下陆坡—深海平原较为平缓,这种地貌条件有利于形成海底浊积扇沉积。盆地沉积主要受控于鲁伍马河水系,渐新世开始受区域隆升影响,盆地西缘遭受抬升剥蚀,沉积物源供应充足,加之鲁伍马河水系发育,并伴随全球性海退,形成庞大的向海推进的鲁伍马三角洲沉积体系,这可为浊积扇体的发育提供丰富的物源。深水沉积体系的砂体输送方式主要有两种,即陆架补给机制和直接补给机制。前者,砂体首先在陆架区进行沉积,然后再通过下切谷输送至深水区,或者由于过补偿,直接形成砂质碎屑流沉积;后者,河流的负载直接通过峡谷输送至深水,沉积物只是路过陆架区。

从研究区南北向地震剖面分析(图7),海底浊积扇体系在时空演化上具有垂向叠加、横向迁移的特征。从始新世开始可识别出明显的下切水道特征,渐新世规模最大,发育范围最广,中新世持续发育,整

体上呈现出由南向北的迁移趋势,这可能与鲁伍马河水系入海口迁移有关。

从研究区东西向二维地震测线分析(图8),海底

浊积扇强振幅前积特征明显,内含具有下切特征的水道。地震测线位于盆地东部超深水区,明显的叠瓦状前积现象也指示了物源区丰富的碎屑注入。

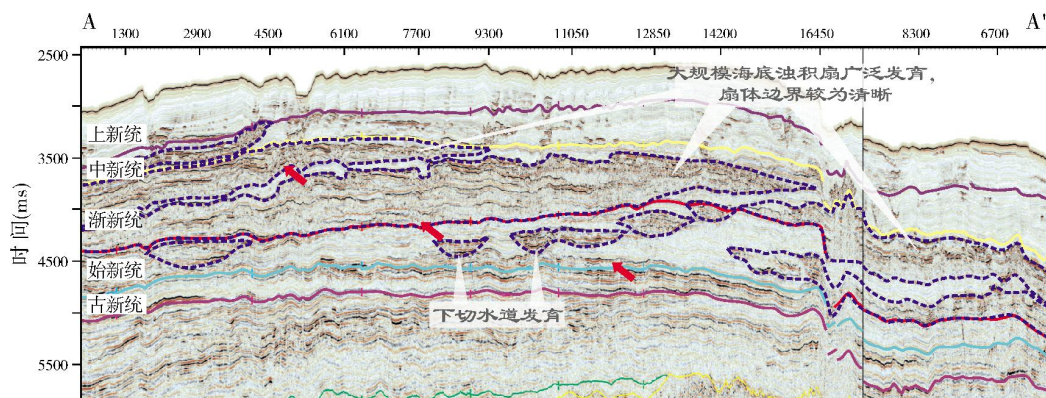


图7 鲁伍马盆地深水区南北向地震剖面沉积相解释
剖面位置见图1

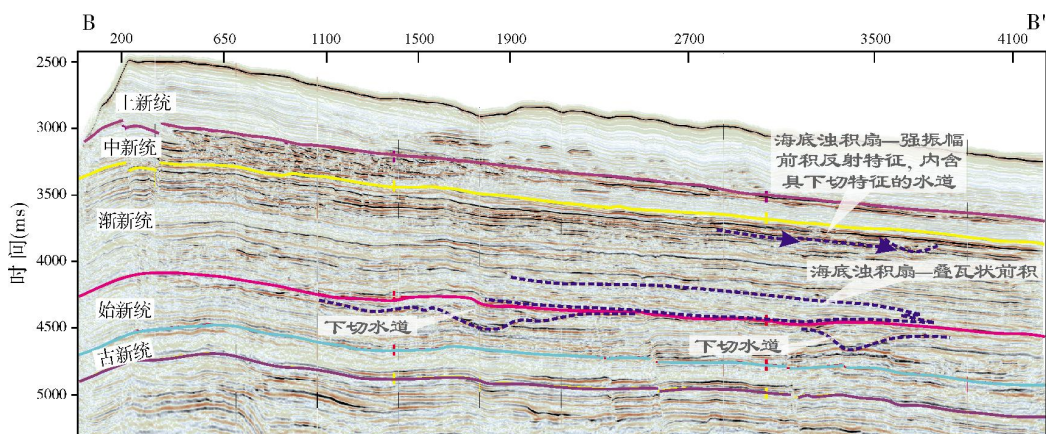


图8 鲁伍马盆地深水区东西向地震剖面沉积相解释
剖面位置见图1

4 结 论

(1)鲁伍马盆地构造演化和冈瓦纳大陆的解体以及印度洋西部的张开有关,可划分为5个构造沉积演化阶段:即裂陷期、过渡期、漂移早期、漂移晚期和新构造抬升期。

(2)盆地沉积主要受控于鲁伍马河水系,尤其是渐新世开始,受区域隆升影响,盆地西缘遭受抬升剥蚀,沉积物源供应充足,加之鲁伍马河水系较为发育,并伴随全球海退,形成了庞大的向海推进的鲁伍马三角洲沉积体系,这也为海底扇体的发育提供了丰富的物源。

(3)初步提出了窄陆架背景下的深水沉积体系模式:盆地陆架较窄、陆坡较陡且峡谷水道非常发育,下陆坡—深海平原趋于平缓。这种地貌条件有利于形成海底大范围的浊积扇沉积体系。

参考文献

- [1] 马君,刘剑平,潘校华,等. 东非大陆边缘地质特征及油气勘探前景[J]. 世界地质, 2008, 27(4): 400-405.
- [2] 朱伟林,陈书平,王春修,等. 非洲含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [3] 朱伟林,白国平,胡根成,等. 南美洲含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] 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.
- [5] 于璇, 侯贵廷, 代双河, 等. 巴西深水盆地对比及油气成藏规律分析[J]. 海相油气地质, 2016, 21(1): 61-72.
- [6] Salman G, Abdula I. Development of the Mozambique and Rovuma sedimentary basins, offshore Mozambique[J]. Sedimentary Geology, 1995, 96(1/2): 7-41.
- [7] GETECH. Geodynamics and petroleum geology of the east african margins[R]. GETECH, 2012.
- [8] 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.
- [9] IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database[DB]. IHS Energy Group, 2012.
- [10] 孙海涛, 钟大康, 张思梦. 非洲东西部被动大陆边缘盆地油气分布差异[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 561-567.
- [11] 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.
- [12] Leinweber V H, Klingelhoefer F, Neben S, et al. The crustal structure of the Central Mozambique continental margin—Wide-angle seismic, gravity and magnetic study in the Mozambique Channel, Eastern Africa[J]. Tectonophysics, 2013, 599(4): 170-196.
- [13] Mahanjane E S, Franke D. The Rovuma Delta deep-water fold-and-thrust belt, offshore Mozambique[J]. Tectonophysics, 2014, 614(3): 91-99.
- [14] Leclaire L. Late Cretaceous and Cenozoic pelagic deposits: Paleoenvironment and paleoceanography of the central Western Indian Ocean[G]// Schlich R, Simpson E S W, Vallier T L, et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 1974, 25: 481-513.
- [15] Eittrheim S, Ewing M, Thorndike E M. Suspended matter along the continental margin of the North American Basin[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1969, 16(6): 613-624.

编辑: 赵国宪, 黄革萍

Deepwater Depositional System in the Background of Narrow Shelf in the Ruvuma Basin, Eastern Africa

Liu Ziyu, Lü Ming, Lu Jingmei, Lü Dong, Wang Ying, Guo Gang

Abstract: Based on the analysis of core observation, drilling data, seismic data and sediment provenance, the tectonic and sedimentary evolution of Ruvuma Basin are characterised in detail, and the preliminary sediment model under the condition of typical narrow shelf is proposed. The analysis result shows that the shelf is very narrow, and the upper slope is rather precipitous where the canyon and channel develop well, but lower slope is tending to flat and it is conducive to developing a wide range of submarine fan system. The deposit is mainly controlled by Ruvuma drainage, and the sediments supply is adequate triggered by uplifting and erosion in western part of Ruvuma Basin which undergone the regional uplift since Oligocene. In addition, Ruvuma drainage developed so well which coincided with the global regressive that huge sedimentary system of delta-channel-submarine fan developed with strong provenance supplying to submarine fan.

Key words: Deep-water; Sedimentary characteristics; Submarine fan; Channel; Ruvuma Basin; Eastern Africa

Liu Ziyu: MSc, Senior Engineer. Add: CNOOC Research Institute, Building A, No.6 Taiyanggong Nanjie, Chaoyang District, Beijing, 100028, China