

文章编号: 1671-1505(2024)04-1005-12 DOI: 10.7605/gdxb.2024.00.054

底流与重力流交互作用下的朵体沉积特征： 以东非鲁伍马盆地中新统为例*

刘钰星^{1,2,3,4} 陈宇航^{1,2,3,4} 范国章⁵ 李 林⁵ 鲁银涛⁵
左国平⁵ 曹全斌⁵ 丁群峰^{1,2,3}

- 1 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065
- 2 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西西安 710065
- 3 自然资源部海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012
- 4 西安石油大学西安市致密油(页岩油)开发重点实验室, 陕西西安 710065
- 5 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

摘要 底流与重力流的交互作用是重要的深水沉积作用类型, 对海底沉积物再分配及海底地貌改造具有重要控制作用。目前对底流与水道中重力流的交互作用研究较成熟, 但对底流影响下朵体的沉积特征研究较少。本研究以东非鲁伍马盆地古近系中新统朵体为目标, 综合利用三维地震和测井资料, 通过地震相和地震属性分析, 确定朵体分布及内部岩性特征。在定量恢复重力流流速基础上, 结合区域洋流资料, 揭示底流与重力流交互作用对朵体沉积的控制作用。结果表明受向北流动的底流影响, 早期水道向南迁移, 北侧天然堤发育, 在水道南侧形成负向地形, 导致后期朵体沉积于水道南侧。底流作用下的朵体沉积特征受底流和朵体内重力流流向的影响。当底流与朵体延伸方向相反且斜交时, 由于重力流流速远大于底流, 朵体在逆底流流向一翼(南侧), 重力流与底流流向几乎相反, 底流影响被抑制, 朵体从轴部向末端逐渐变薄, 泥质含量增加; 在顺底流流向一翼(北侧), 重力流方向与底流斜交, 重力流顶部泥质被底流淘洗出去, 朵体以砂质沉积为主。当底流与重力流流向接近正交时, 朵体受底流影响整体上一致, 重力流顶部泥质被淘洗, 逆底流流向一翼朵体以厚层砂质沉积为主, 向顺底流流向一翼砂体厚度减小、泥质含量增加。

关键词 底流 重力流 交互作用 朵体 鲁伍马盆地

第一作者简介 刘钰星, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事深水沉积研究。E-mail: yuxing0301@163.com。

通讯作者简介 陈宇航, 男, 1988 年生, 博士、副教授, 主要从事海洋油气勘探、深水沉积研究。E-mail: cyh@xsyu.edu.cn。

中图分类号: P512.32 文献标志码: A

Sedimentary characteristics of lobes formed by interacting bottom currents and gravity flows: a case study from the Miocene in Rovuma Basin, East Africa

* 自然资源部海底科学重点实验室开放基金(编号: KLSG2208)、国家自然科学基金(编号: 41802128, 42076219)、陕西省自然科学基金基础研究计划(编号: 2024JC-YBMS-227)和西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划(编号: YCS23113049)联合资助。[Co-funded by the Open Fund of the Key Laboratory of Submarine Science of Ministry of Natural Resources (No. KLSG2208), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41802128, 42076219), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China (No. 2024JC-YBMS-227) and the Postgraduate Innovation and Practice Ability Development Fund of Xi'an Shiyou University (No. YCS23113049)]

收稿日期: 2023-08-31 改回日期: 2024-01-17

LIU Yuxing^{1,2,3,4} CHEN Yuhang^{1,2,3,4} FAN Guozhang⁵ LI Lin⁵ LU Yintao⁵
ZUO Guoping⁵ CAO Quanbin⁵ DING Qunfeng^{1,2,3}

1 School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

3 Key Laboratory of Submarine Geosciences, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

4 Xi'an Key Laboratory of Tight Oil (Shale Oil) Development, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

5 PetroChina Hangzhou Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

Abstract The interplay of bottom currents and gravity flows is an important deep-water sedimentary process, which plays an important role in redistributing submarine sediments and reshaping seafloor bedforms. At present, research on bottom currents and gravity flows interaction in deep-water channels is relatively mature, but little work has been done on the sedimentary characteristics of lobes influenced by bottom currents. Based on an integrated study of seismic facies and seismic attributes using 3D seismic and logging data, this study documents the distribution and lithological characteristics of the Miocene lobes in the Rovuma Basin (East Africa). The effect of bottom currents and gravity flows interaction on lobe sedimentation is revealed through quantitative restoration of gravity flow velocity, combined with regional ocean current data analysis. The results indicate that, early channels migrated southward due to the northward-directed bottom current, and their northern levees are well developed with a negative terrain present to the south of the channels, which led subsequent lobes to deposit to the south of these channels. Deposition of the lobes is influenced by bottom current flow direction and gravity flows forming the lobes. Velocity of the gravity flows is much higher than that of the bottom currents. Therefore, when the directions of bottom currents and the lobe propagation are opposite and oblique, the influence of bottom currents is suppressed on the side against bottom current flow direction (south side), and the lobe gradually thins from the axis to the margin, accompanied by increasing mud content; On the side downstream of bottom current flow direction (north side), gravity flows intersect obliquely with bottom currents, and the mud at the top of turbidity currents is stripped off by the bottom current, leaving sand deposited in the lobe. When bottom current flow direction and lobe propagation direction are close to orthogonal, the influence of bottom current on the lobe is consistent on the whole, and the mud at the top of gravity flows is stripped. Therefore, the lobe is mainly composed of thick sandy deposits at the side against the bottom current flow direction, and the sand content decreases towards the side downstream of the bottom current, accompanied by an increasing mud content.

Key words bottom current, gravity flow, interplay, lobe, Rovuma Basin

About the first author LIU Yuxing, born in 1999, is a master's degree candidate. She is mainly engaged in deep-water sedimentation research. E-mail: yuxing0301@163.com.

About the corresponding author CHEN Yuhang, born in 1988, Ph. D., is an associate professor. He is mainly engaged in offshore oil and gas exploration and deep-water sedimentation. E-mail: cyh@xsyu.edu.cn.

1 概述

深水领域已经成为全球油气勘探大发现的主战场, 在 2011—2020 年间全球新发现的大型油气田

中, 深水、超深水油气可采储量约占 67%, 其中仅 2022 年全球十大油气发现中就有 8 个来自深水(史卜庆等, 2023)。深水沉积砂体作为海洋油气

勘探的重点目标，主要是由重力流（浊流）将陆源物质搬运至深海沉积而成，因此重力流沉积一直是深水油气勘探的研究重点（Viana, 2008; Shanmugam, 2008; Stow *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2020）。而平行陆坡流动的底流（等深流）沉积作用具有与沉积物重力流相比毫不逊色的侵蚀—沉积响应，所形成的等深流沉积体系与重力流沉积体系地位相当，二者共同控制着深水沉积的分布及海底地貌（Rebesco and Stow, 2001; 何幼斌等, 2004; Hernández-Molina *et al.*, 2009; 王玉柱等, 2010; 吴嘉鹏等, 2012; Rebesco *et al.*, 2014; 孙辉等, 2017; Gong *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2020; Fonnesu *et al.*, 2020）。

近年来越来越多的研究表明顺陆坡而下的重力流在向深水搬运的过程中往往被平行陆坡流动的底流改造，重力流与底流在时空上同时存在，进而形成底流与重力流的交互作用（Hernández-Molina *et al.*, 2006; 吴嘉鹏等, 2012; Brackenridge *et al.*, 2013; Stow *et al.*, 2013; Rebesco *et al.*, 2014; Gong *et al.*, 2018; Fonnesu *et al.*, 2020; 龚承林和王英民, 2023）。前人研究表明，重力流与底流的交互作用过程存在 3 种形式：（1）由底流作用形成

于平行陆坡展布的漂积体（Contourite drift）和壕塹（Moat），通过改变海底地貌而影响了后期沿陆坡而下的重力流的流向及其沉积物分布（图 1-a）；（2）底流对早期的重力流沉积的再改造、再搬运，所形成的深水重力流沉积体系（如水道—朵体复合体）往往向靠近底流流向一侧延伸，且沉积边界呈不规则的锯齿状（图 1-b）；（3）底流作用于正在沉积的重力流（图 1-c），这也被认为是最为典型的狭义重力流与底流交互作用（龚承林和王英民, 2023）。在底流作用下，重力流中不同粒径的沉积颗粒受到不同程度的淘洗和筛选，可以改善砂体的储集物性，这对深水油气勘探具有重要意义（Shanmugam, 2014; 陈宇航等, 2020）。单向迁移水道是典型的底流与重力流交互作用的产物，受到广泛关注。Gong 等（2016）在西非陆缘下刚果盆地的研究表明，在不受离心力作用影响且科里奥利作用可忽略的顺直水道内，底流诱发了螺旋环流的形成，并形成了迁移方向与底流流向相同的单向迁移水道（顺向迁移水道）。而在东非莫桑比克海域的研究表明，底流与重力流的交互作用下重力流中细粒物质被淘洗出去，并沉积在顺底流流向一侧的堤岸，导致后期重力流向逆底流流向一侧迁移，最

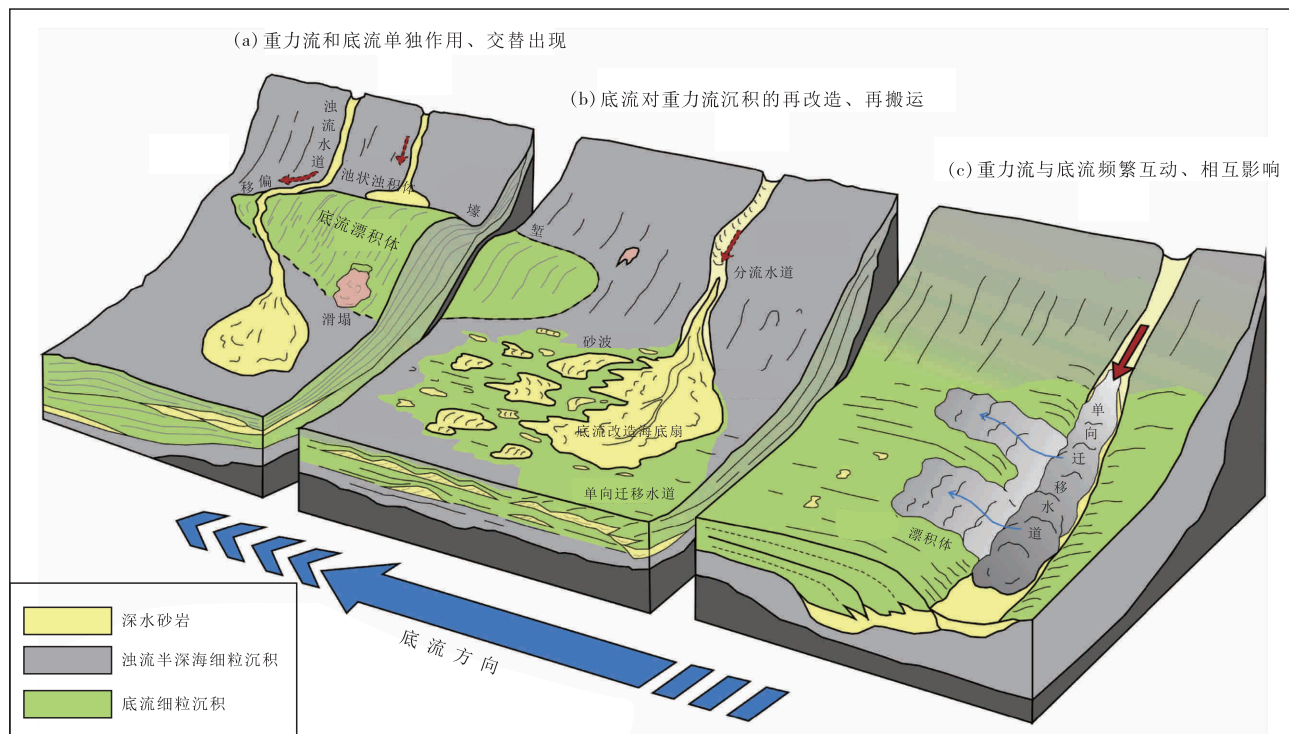


图 1 底流与重力流交互作用模式（据 Fonnesu *et al.*, 2020; 有修改）

Fig. 1 Conceptual models for interplay of bottom currents and gravity flows (modified from Fonnesu *et al.*, 2020)

终形成迁移方向与底流相反的单向迁移水道（反向迁移水道）。Chen 等（2020）在东非鲁伍马盆地将深水水道分为顺直段和弯曲段进行讨论，认为单向迁移水道的形态受底流和重力流流向的影响。

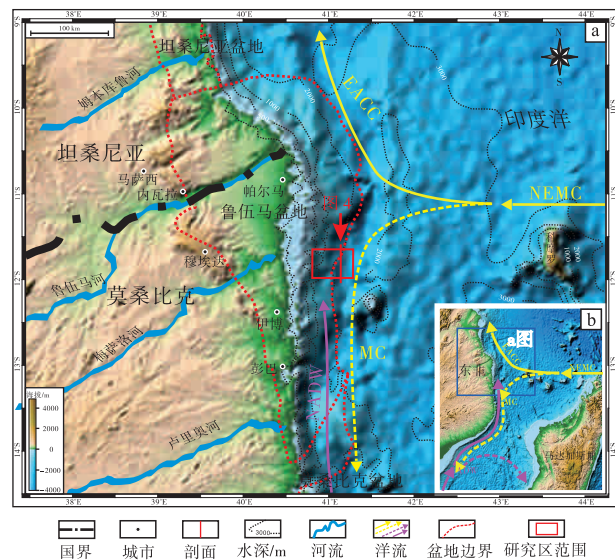
前人针对底流与重力流交互作用下的单向迁移水道研究已经相对成熟，但是对朵体这另一重要的深水重力流沉积单元在底流作用下的沉积特征研究较少。朵体普遍发育大面积的砂体，是重要的深水油气储集体类型（李华等，2014）。而且朵体位于海底扇末端，沉积于相对开阔的非限定性一半限定性沉积环境，更容易受底流的影响。因此开展底流与重力流交互作用下的朵体沉积特征研究，既可以完善底流与重力流交互作用相关理论，又有助于深水油气勘探，兼具科学与生产意义。鲁伍马盆地的海底扇沉积受底流的改造作用明显，底流通过与重力流的交互作用而影响海底扇沉积过程及分布规律（陈宇航等，2020；Fonnesu *et al.*, 2020；龚承林和王英民，2023）。本研究以东非鲁伍马盆地中新统朵体为研究对象，通过测井及地震数据解释，分析朵体沉积演化特征，并揭示在底流与重力流交互作用下的朵体沉积机制。相关研究对东非陆缘盆地及全球其他具有相似地质背景的深水盆地的储集砂体预测与油气勘探有参考意义。

2 区域地质概况

鲁伍马盆地位于莫桑比克东北海域，面积约为 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。作为东非大陆边缘深水盆地群的一部分，鲁伍马盆地在晚石炭世—三叠纪处于陆内裂谷阶段，发育湖相沉积，在中三叠世早期，冈瓦纳大陆裂解，鲁伍马盆地内发育陆间裂谷，并形成洋壳。从中侏罗世开始，马达加斯加地块沿着戴维断裂带向南漂移，在早白垩世的末期结束漂移。从早白垩世末期开始，整个非洲东部大陆边缘基本处于被动大陆边缘演化阶段，构造背景相对稳定，并在陆缘发育多个大型三角洲—海底扇沉积体系（张光亚等，2015）。

研究区位于鲁伍马盆地深水区，平均水深超过 1500 m。现今沿莫桑比克北部大陆架和陆坡的海洋环流以向南流动的表层流和向北流动的深层流为主（de Ruijter *et al.*, 2002）。马达加斯加东北洋流（Northeast Madagascar Currents; NEMC）沿马达加

斯加北部边缘流动时分成 2 个分支：向北流动的东非沿岸流（East African Coastal Current; EACC）和向南流动的莫桑比克峡谷洋流（Mozambique Current; MC）。深层流携带北大西洋底流（North Atlantic Deep Water; NADW）沿着莫桑比克大陆斜坡向北流动（图 2）（de Ruijter *et al.*, 2002；Chen *et al.*, 2020；Fonnesu *et al.*, 2020），并进入索马里盆地（van Aken *et al.*, 2004）。在鲁伍马盆地的深水区使用声学多普勒水流剖面仪测量了底流的速度一般为 0.2~0.4 m/s，最大可达 1.2 m/s（Fuhrmann *et al.*, 2020）。深层底流对东非海域海底沉积物再分配及海底地形改造产生了明显的影响（Schlüter and Uenzelmann-Neben, 2007；Macgregor, 2018）。



NEMC (Northeast Madagascar Currents) = 马达加斯加东北洋流；EACC (East African Coastal Current) = 东非沿岸流；MC (Mozambique Current) = 莫桑比克海岸流；NADW (North Atlantic Deep Water) = 北大西洋底流

图 2 东非鲁伍马盆地位置及洋流分布（据 Breitzke *et al.*, 2017；Fonnesu *et al.*, 2020；Chen *et al.*, 2020；有修改）

Fig. 2 Location and oceanic current distribution map of Rovuma Basin, East Africa (modified from Breitzke *et al.*, 2017；Fonnesu *et al.*, 2020；Chen *et al.*, 2020)

3 数据和方法

3.1 地震资料解释

本次研究主要利用中国石油天然气集团公司提供的 3D 叠前深度偏移地震资料和测井资料。其中地震资料覆盖面积约 800 km^2 ，地震采样率为 4 ms，主频为 40~50 Hz，垂向分辨率约为 10~12 m，横

向分辨率为 $12.5\text{ m} \times 12.5\text{ m}$ 。利用 Petrel 地震解释模块进行目标体的识别和几何形态定量刻画。综合利用地震相和地震属性分析方法，在井震结合基础上确定鲁伍马盆地中新统朵体沉积分布和内部岩性特征。

3.2 流体动力学定量分析

以研究区中新统朵体为目标，对其内部重力流的流动过程进行流体动力学定量分析，以揭示本研究中重力流与底流交互作用的流动过程。本次研究通过 Sequeiros (2012) 建立的公式计算重力流速度 (V_1):

$$V_1 = Fr(g \overline{\Delta\rho/\rho} h)^{1/2} \quad (1)$$

式中： Fr 是弗洛德数； g 是重力加速度（约为 9.8 m/s^2 ）； h 是重力流的流体厚度（m）； $\overline{\rho}$ 表示重力流的层平均密度， $\overline{\Delta\rho}$ 为重力流的层平均密度差， $\overline{\Delta\rho/\rho}$ 表示相对于周围流体密度，重力流的层平均密度差，参考范围是 $0.4\% \sim 0.7\%$ (Sequeiros, 2012)。

Fr 由以下公式计算 (Bowen *et al.*, 1984):

$$Fr^2 = \sin\beta / (C_f + E) \quad (2)$$

式中， β 是倾斜角； C_f 是阻力系数； E 是夹带系数。重力流的 C_f 参考范围是 $3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ (Bowen *et al.*, 1984)， E 的参考范围是 $5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$ (Chen *et al.*, 2020)。

本研究按照以下方式计算得到倾斜角 β ：在顺陆坡而下的沉积物重力流上任取 A、B 两点，分别测量出两点高度差 ($h_A - h_B$) 及水平距离 (S)，从而可以求得 A 点相对于 B 点的倾斜角 β ，进而利用公式 (1)、(2) 估算出 A 点的流速 (V_A) (图 3)。

4 鲁伍马盆地中新统朵体沉积特征

研究区中新统广泛发育水道和朵体等重力流沉积单元。在研究区北部发育一系列向南单向迁移水道。水道剖面形态呈不对称鸥翼状，水道内部充填以强振幅或杂乱反射为主，具有典型的水道充填特征 (Kolla *et al.*, 2007; 李冬等, 2011)。水道北侧天然堤相对发育，向北逐渐尖灭，延伸距离约 $10 \sim 30\text{ km}$ ，天然堤内部为高连续弱振幅反射。在该单向迁移水道的南部，广泛发育朵体，在地震剖面上呈透镜状，内部反射振幅稳定。中新世早期朵体南

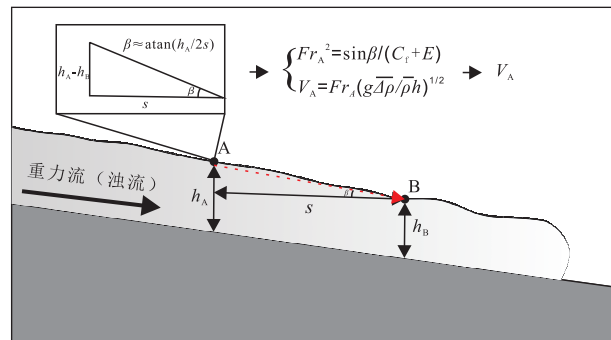


图 3 重力流流体动力学定量分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of quantitative analysis of fluid dynamics of gravity flows

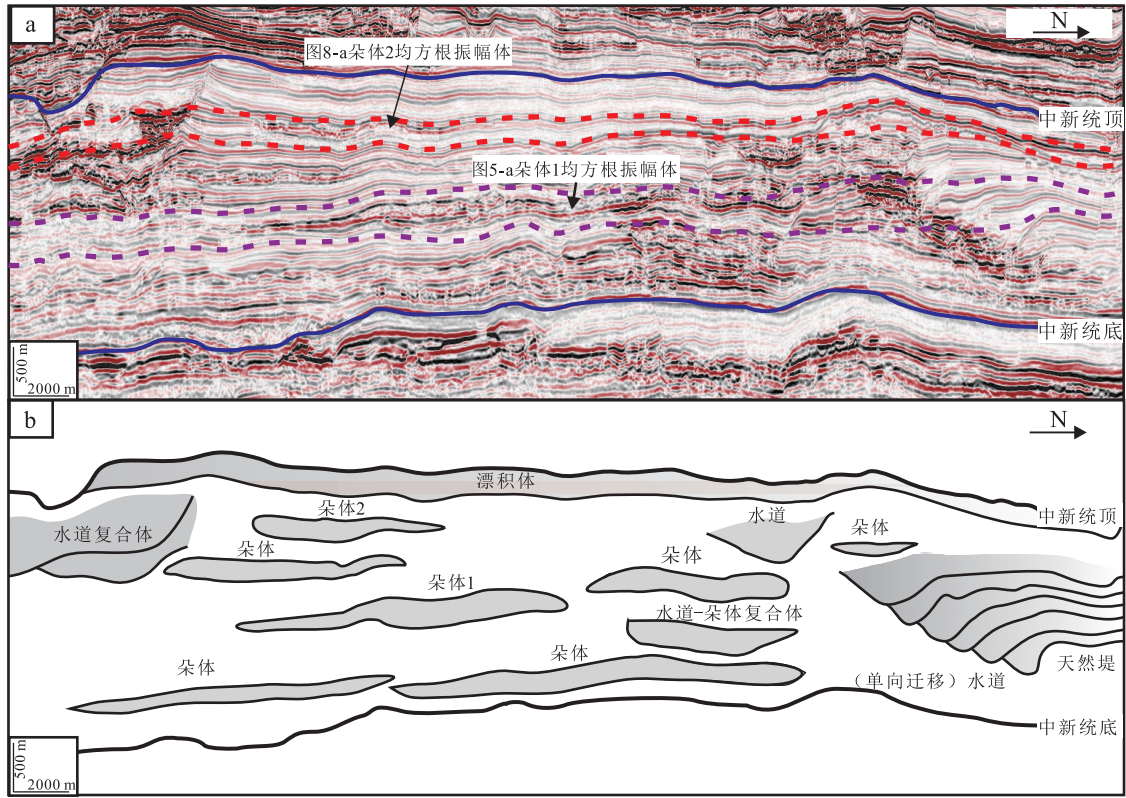
北向延伸距离可达 25 km ，厚度约 200 m ，晚期朵体南北向延伸约 15 km ，厚度约 100 m ，从早到晚朵体规模逐渐减小。本次研究分别选取中新世早期朵体（朵体 1）和晚期朵体（朵体 2）为目标（图 4），在测井资料约束下，综合均方根振幅及地震相分析，确定朵体 1 和朵体 2 的平面分布及内部岩性沉积特征。

4.1 中新世早期朵体特征

均方根振幅平面图（图 5-a）显示，朵体 1 由研究区北部的水道堤岸向南决口后形成，平面上表现为朵叶形态，整体近南北向延伸，长度约 30 km ，宽度约 15 km ，面积约为 408 km^2 。同时，朵体在东北方向延伸距离较短，在西南方向延伸距离较长。地震剖面显示朵体的东北边缘厚度（约 200 m ）明显大于西南部边缘（约 50 m ），而且朵体内部不同位置反射特征也变化较大。在朵体轴部以低连续强振幅反射或杂乱的弱反射为主，且在测井曲线上表现为高伽马和低声波时差，表明为厚层的偏粗粒砂岩（Well-1 井），而在朵体西南一侧以中一高连续低频弱振幅反射为主（图 5-a；图 6；图 7），为薄层细砂岩与泥岩互层（Well-2 井）（图 6；图 7）。值得注意的是，朵体东北部边缘内部反射特征以低连续强振幅反射或者杂乱反射为主，表明朵体东北一侧沉积特征与轴部相同，以偏粗粒的砂岩为主（图 5-a；图 6）。

4.2 中新世晚期朵体特征

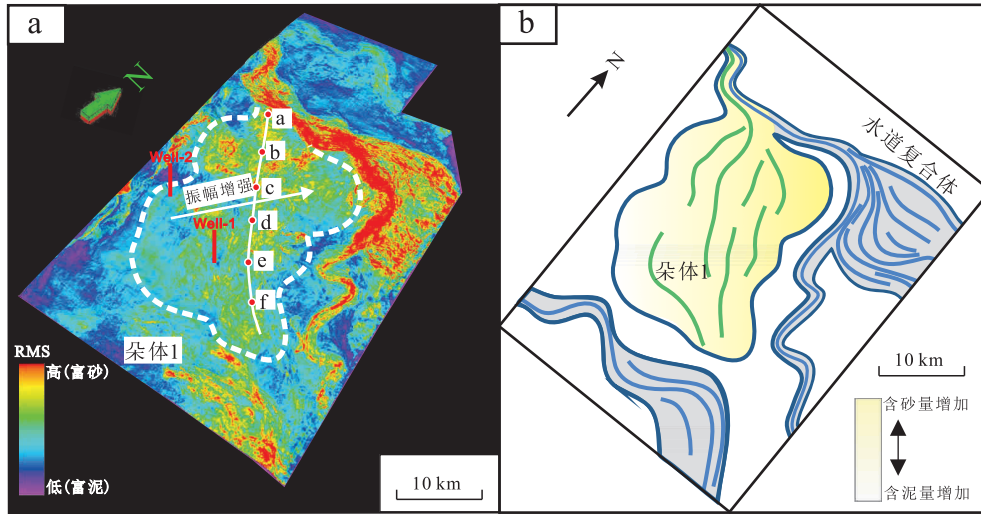
均方根振幅图显示，中新世晚期沉积的朵体 2 近东西向延伸，长度约 21 km ，宽度约 13 km ，面积为 225 km^2 （图 8）。地震剖面显示，朵体的南部边



a—地震剖面图 (剖面位置见图 2); b—地震剖面素描图

图 4 东非鲁伍马盆地中新统典型地震剖面及对应沉积单元解释

Fig. 4 Typical Miocene seismic section and corresponding depositional unit interpretation in Rovuma Basin, East Africa



a—均方根振幅平面图 (属性提取时窗见图 4); b—素描图

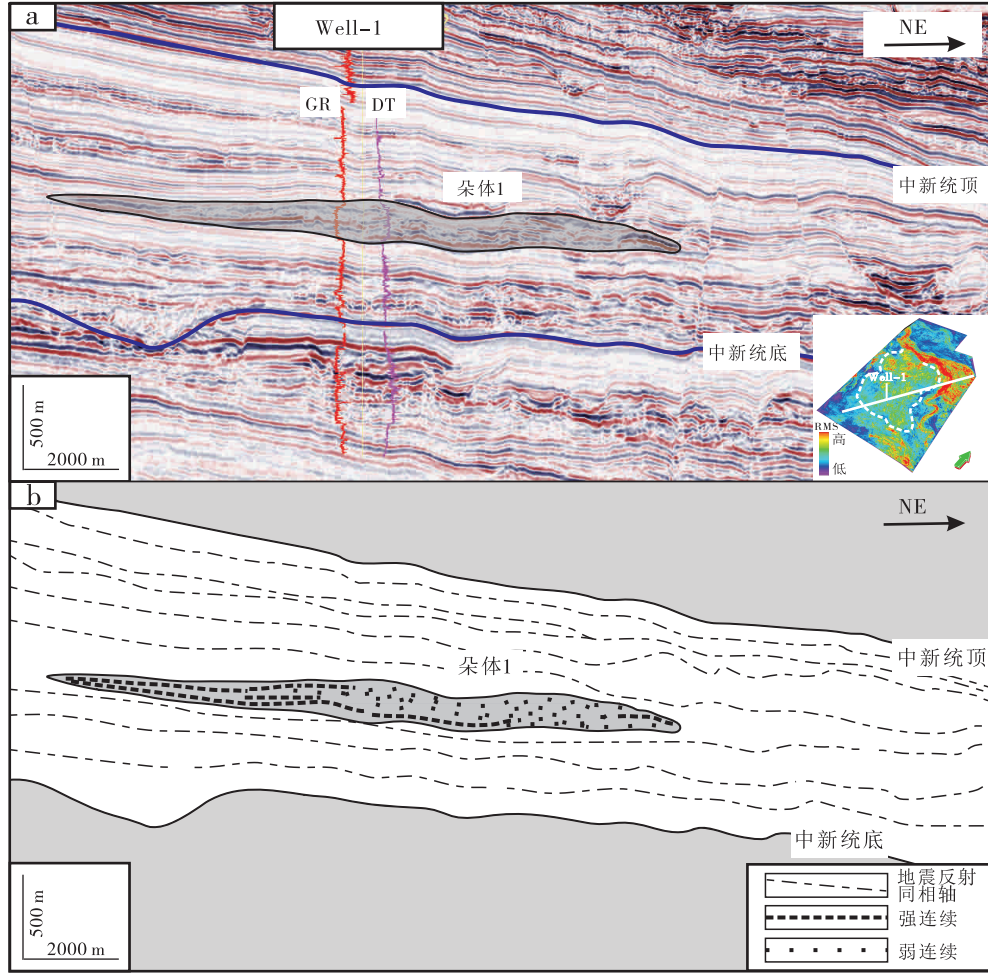
图 5 东非鲁伍马盆地中新世早期沉积平面图

Fig. 5 Early Miocene sedimentary map of Rovuma Basin, East Africa

缘厚度约 200 m, 向北逐渐减薄并尖灭于远洋沉积中。朵体南部以低连续强振幅或杂乱反射为主, 主要为砂质沉积; 朵体北部以中高连续低频弱振幅为主, 主要为薄层砂岩与泥岩互层(图 8; 图 9)。

4.3 朵体内流速特征

沿朵体 1 和朵体 2 轴部选取特征点(图 5; 图 8), 基于公式 (1) 和公式 (2), 估算朵体沉积时重力流的流速。计算结果表明, 朵体近端重力流流



a—地震剖面图；b—地震剖面素描图

图 6 东非鲁伍马盆地中新世早期朵体地震相特征

Fig. 6 Seismic facies of the early Miocene lobe in Rovuma Basin, East Africa

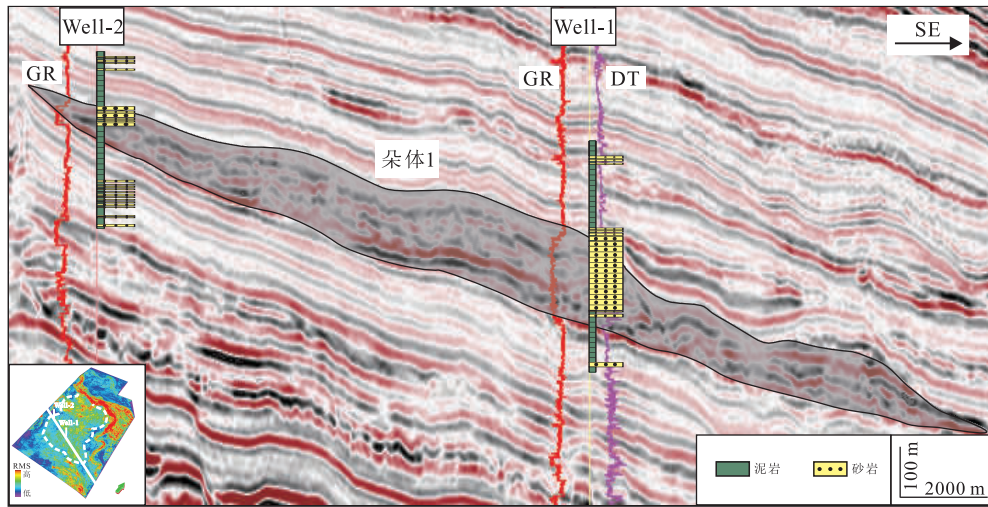
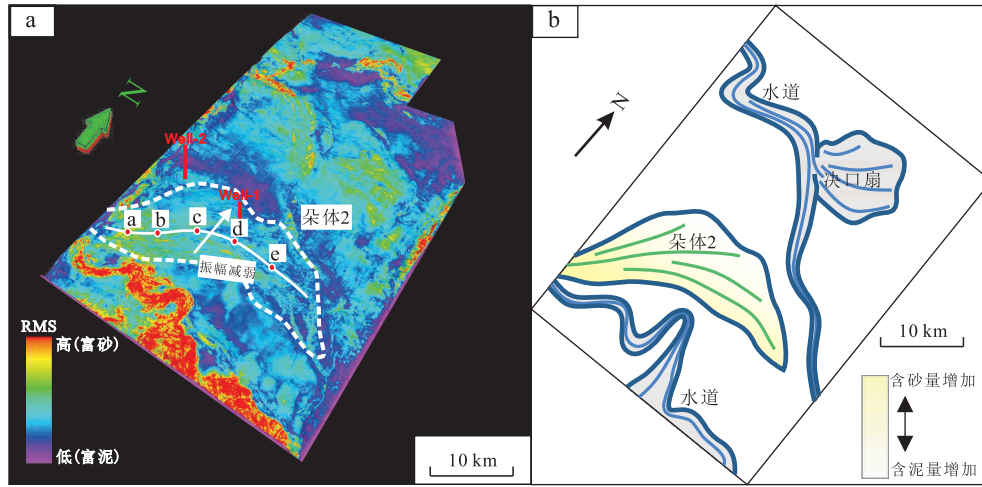


图 7 东非鲁伍马盆地中新世早期朵体井震标定

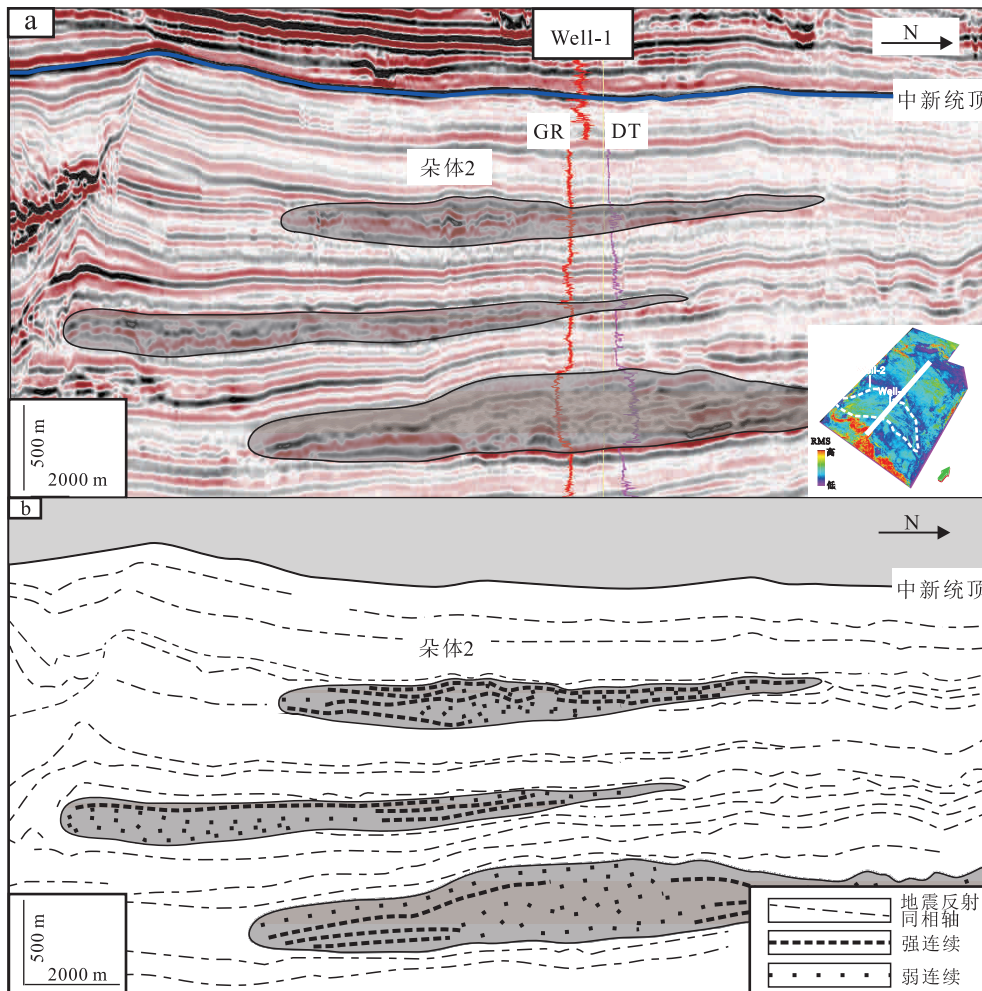
Fig. 7 Seismic-well tie of the early Miocene lobe in Rovuma Basin, East Africa



a—均方根振幅平面图 (属性提取时窗见图 4); b—素描图

图 8 东非鲁伍马盆地中新世晚期沉积平面图

Fig. 8 Late Miocene sedimentary map of Rovuma Basin, East Africa



a—地震剖面图; b—地震剖面素描图

图 9 东非鲁伍马盆地中新世晚期朵体地震相特征

Fig. 9 Seismic facies of the late Miocene lobe in Rovuma Basin, East Africa

速较大，最大可达 4.7 m/s，顺着朵体轴部向下游，随着重力流能量减弱，流速逐渐减小，在远端速度为 2 m/s 左右。早期南北向朵体轴部重力流流速范围为 2.1~4.7 m/s，晚期东西向朵体轴部重力流流速相对较小，为 1.9~3.7 m/s (表 1)。

表 1 东非鲁伍马盆地中新统朵体流体动力学相关数值

Table 1 Numerical correlation of hydrodynamics of the Miocene lobe in Rovuma Basin, East Africa

朵体年代	编号	β /($^{\circ}$)	$\sin\beta$	h /m	Fr	V_t /m · s $^{-1}$
中新世 早期朵体 (朵体1)	a	1.86	0.03	195	1.72	4.7
	b	1.93	0.03	174	1.75	4.6
	c	1.66	0.03	149	1.62	3.9
	d	1.13	0.02	93	1.34	2.6
	e	1.05	0.02	69	1.29	2.1
	f	1.14	0.02	70	1.34	2.2
中新世 晚期朵体 (朵体2)	a	1.77	0.03	127	1.68	3.7
	b	1.89	0.03	87	1.73	3.2
	c	1.22	0.02	77	1.39	2.4
	d	1.30	0.02	71	1.44	2.4
	e	1.03	0.02	55	1.28	1.9

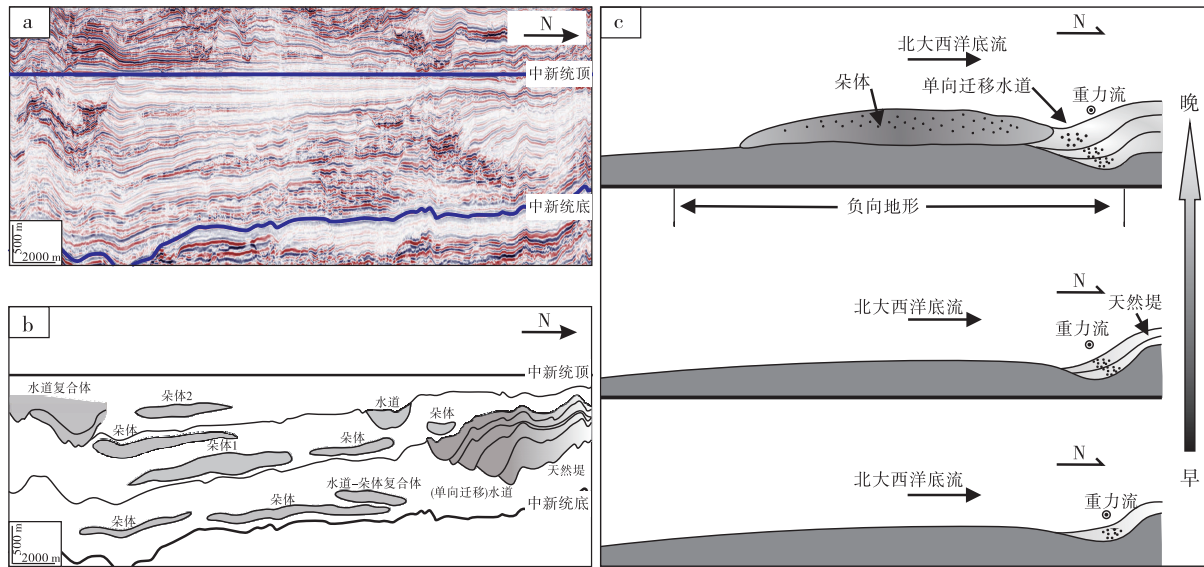
5 底流与重力流的交互作用对朵体沉积的影响

研究区中新世早期在南部发育向南的单向迁移水道。虽然水道的单向迁移也有可能是受科里奥利力的影响，但是在南半球，顺水道流向方向，在科里奥利力的影响下水道会向左（北）偏移，与研究区内水道迁移方向相反。另外，地震剖面显示，从水道充填到天然堤，地震相过渡连续，没有明显的侵蚀反射特征，显示了连续沉积过程。根据以上特征，可以认为中新统单向迁移水道是重力流在沉积时期受底流的淘洗而形成的，是典型底流与重力流交互作用的产物。中新世发生两大重要事件：一是南极冰盖发展，发生了大规模海退；二是地中海与世界大洋隔离，发生盐度危机。在这一系列事件影响下，中新世气候发生强烈波动，世界大洋环流发生改变，并一直持续至今 (Kenyon, 1986; 张兴阳等, 1999)。同时，在研究区邻近的坦桑尼亚盆地中新统深水沉积中发现明显的受北大西洋底流改造的大规模漂积体 (Schlüter and Uenzelmann-Neben, 2007; 陈宇航等, 2021)，综合以上分析，笔者推测研究区中新统单向迁移水道以及不对称朵体沉积是

重力流与北大西洋底流交互作用的结果。过研究区的 S-N 剖面显示，朵体基本都分布在早期单向迁移水道的南边(图 4)。通过层拉平方法，将中新统顶拉平来近似恢复中新统沉积时古地貌，可以看出由于早期水道持续向南迁移，在水道北部形成天然堤导致其地形逐渐增高，相应地在水道南部形成了局部负向地形，为后期的朵体提供了天然的沉积场所，从而形成连续叠置的富砂朵体沉积(图 10)。

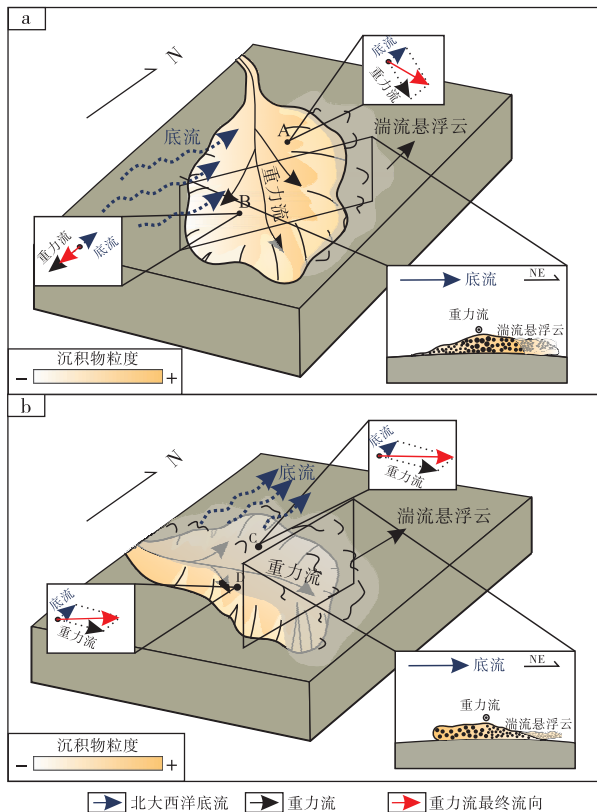
重力流的底部由高密度和高流速的粗砂组成，相对不容易受底流的影响，通过悬浮沉降形成滞留沉积，而重力流上部的细砂和泥质的密度和流速相对较低，因此更容易受到底流的影响而被剥离(陈宇航等, 2020; Fonnesu *et al.*, 2020)。综合研究区的洋流数据，认为中新世底流流速为 0.2~0.4 m/s (Fuhrmann *et al.*, 2020)，远小于重力流流速。以朵体 1 轴部为分界，在其东北侧和西南侧各选取 1 个特征点分析底流与重力流交互作用(图 11-a)。A 点位于朵体东北侧，重力流流向为东南偏东，与底流流向的夹角近乎垂直，因此受底流的影响明显。在底流影响下，重力流向东北方向发生偏转，其上部的细粒砂质和泥质被底流淘洗出去，朵体内部整体为砂质沉积。同时因为主要偏粗砂质、沉降较快，导致东北侧朵体延伸距离较短，故厚度相对西南侧较大。B 点位于朵体 1 西南侧，重力流流向与底流几乎完全相反，该点重力流流速远大于底流，抵消了底流的影响，重力流继续沿近南方向延伸。随着流速降低，朵体厚度逐渐减小，向远洋泥质沉积尖灭，并在边缘形成泥质与薄砂层互层沉积(图 7)，与常规朵体边缘沉积特征相同(Beaubouef, 2004; Gervais *et al.*, 2006)。因此朵体 1 呈现东北厚、西南薄的不对称形态。

中新世晚期的朵体 2 呈近东西向延伸，沉积时的重力流流速虽然较朵体 1 小，但仍远大于底流流速。在朵体 2 北侧和南侧各选取 1 个特征点分析底流与重力流交互作用(图 11-b)。C 点位于朵体北侧，重力流流向为东北偏东，与底流流向接近垂直，D 点位于朵体南侧，重力流流向为近东，与底流流向也呈近乎垂直。因此，和朵体 1 不同的是，朵体 2 整体都明显受底流的影响，重力流上部的细粒砂质及泥质在底流的淘洗下向北或东北偏转。导致朵体南部为厚层偏砂质沉积，向北侧减薄并过渡为泥质。



a—层拉平剖面（剖面位置见图 2）；b—层拉平剖面素描图；c—底流改造古地貌控制后期砂体分布模式图
图 10 东非鲁伍马盆地底流改造古地貌控制后期砂体综合分析

Fig. 10 Comprehensive analysis diagram of sand body in the late period control by paleo-geomorphology influenced by bottom current in Rovuma Basin, East Africa



a—朵体 1；b—朵体 2

图 11 东非鲁伍马盆地朵体不同流向重力流与底流交互作用示意图

Fig. 11 Schematic diagram of interplay of bottom currents and gravity flows in different direction in lobes of Rovuma Basin, East Africa

需要强调的是，一般在底流的影响下，重力流上部被剥离，沿底流流向形成细粒的湍流悬浮云 (Turbulent suspension cloud)，并最终漂积体形式沉积下来，在地震剖面上表现为向底流流向延伸并逐渐尖灭的丘状沉积 (Fonnesu *et al.*, 2020)。研究区的朵体在靠近底流流向一翼（北侧）并没有发现明显的漂积体，但是中新世早期的单向迁移水道以及晚期向北延伸的大规模的漂积体，表明研究区在中新世重力流持续受底流的淘洗 (图 4)。究其原因，笔者认为一般在水道内重力流粗粒砂滞留于水道，而细粒砂和泥质被底流淘洗并沉积于堤岸，水道充填和堤岸沉积物岩性差异明显，因此在地震剖面上可见明显的漂积体。但对于朵体而言，由于其沉积于非限制环境，在底流作用下，沿底流方向朵体内沉积物由砂质过渡为泥质是一个连续的过程，且在朵体末端，其内部岩性已基本为泥质，且厚度也逐渐减小至尖灭，与远洋泥质沉积融合，整个过程没有明显的岩性突变，因此在地震剖面上并没有发现明显的漂积体反射特征。

对比 2 期朵体沉积特征，可以看出朵体的形态及内部岩性特征受到重力流与底流流向的控制。朵体 1 延伸方向（近南北）与底流流向相反且斜交，在东北侧（顺底流流向一翼）砂体相对较厚，砂质纯净，泥岩夹层较薄，为储集层发育有利场所，而西南侧（逆底流流向一翼）砂体厚度较小，且

砂泥互层, 储集层质量较差; 东西向延伸的朵体 2 延伸方向与底流流向呈高角度锐角, 近乎垂直, 在朵体南侧 (逆底流流向一翼) 砂体相对较厚, 砂质纯净, 泥岩夹层较薄, 为储集层发育有利场所, 而北侧 (顺底流流向一翼) 砂体厚度较小, 且砂泥互层, 储集层质量较差。

6 结论

1) 东非鲁伍马盆地古近系中新统广泛发育水道—朵体复合体。受向北流动底流的影响, 早期水道向南单向迁移, 水道北侧天然堤发育, 地形逐渐增高, 在水道南侧形成局部负向地形, 为后期重力流沉积提供理想场所, 导致后期朵体分布在单向迁移水道的南部。

2) 中新世早期朵体 1 呈近南北向延伸, 西南侧重力流与底流流向几乎相反, 由于重力流流速明显大于底流, 抑制了底流的影响。重力流延伸至末端厚度逐渐减小, 形成泥质与薄砂层互层沉积; 东北侧重力流与底流流向的夹角近于垂直, 受底流影响明显, 重力流上部的细粒物质被底流淘洗出去, 朵体内部整体为砂质沉积。朵体呈现东北厚且富砂、西南薄且富泥的不对称形态。

3) 中新世晚期朵体 2 呈近东西向延伸, 朵体南北两侧重力流与底流流向均近于垂直, 都明显受底流影响, 重力流上部的细粒砂质及泥岩在底流的淘洗下向东北偏转, 朵体南部为厚层偏砂质沉积, 向北减薄并过渡为泥质。

4) 底流作用下的朵体沉积受底流和重力流流向的影响。底流与朵体延伸方向相反且斜交时, 朵体在逆底流流向一侧底流影响被抑制, 朵体沉积受自身控制, 从轴部向末端逐渐厚度逐渐减小, 泥质含量增加。朵体在顺底流流向一侧受底流影响明显, 重力流顶部细粒砂及泥质被底流淘洗出去, 以砂质沉积为主; 底流流向与朵体延伸方向近于垂直时, 朵体整体受底流影响, 逆底流流向一侧朵体以厚层砂质沉积为主, 顺底流流向一侧砂体减薄, 泥质含量增加。

参考文献 (References)

陈宇航, 姚根顺, 吕福亮, 邵大力, 鲁银涛, 孙辉. 2020. 东非陆缘深水沉积演化及控制因素: 以鲁伍马盆地为例. 北京: 地质出版社, 108-115. [Chen Y H, Yao G S, Lü F L, Shao D L, Lu Y T, Sun H.

2020. Evolution and Controlling Factors of Deep-water Sediments in the Continental Margin of East African: A Case Study of Rovuma Basin. Beijing: Geological Publishing House, 108-115]

陈宇航, 姚根顺, 邵大力, 鲁银涛, 吕福亮, 曹全斌, 唐鹏程, 李仕芳.

2021. 坦桑尼亚滨海盆地陆坡峡谷沉积特征及其控制因素. 古地理学报, 23(6): 1158-1173. [Chen Y H, Yao G S, Shao D L, Lu Y T, Lü F L, Cao Q B, Tang P C, Li S F. 2021. Sedimentary characteristics and its controlling factors of continental slope canyons in Tanzania Coastal Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(6): 1158-1173]

龚承林, 王英民. 2023. 深海重力流与底流交互作用. 北京: 科学出版社, 1-5. [Gong C L, Wang Y M. 2023. Interaction between Deep-sea Gravity Flow and Bottom Current. Beijing: Science Press, 1-5]

何幼斌, 罗顺社, 高振中. 2004. 内波、内潮汐沉积研究现状与进展. 江汉石油学院学报, 26(1): 5-10, 141. [He Y B, Luo S S, Gao Z Z. 2004. Current situation and advance of internal wave and internal tide deposit study. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 26(1): 5-10, 141]

李冬, 王英民, 王永凤, 徐强, 王杰平. 2011. 琼东南盆地中央峡谷深水天然堤—溢岸沉积. 沉积学报, 29(4): 689-694. [Li D, Wang Y M, Wang Y F, Xu Q, Wang J P. 2011. The sedimentary and foreground of prospect for levee-overbank in central canyon, Qiongdongnan Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 29(4): 689-694]

李华, 王英民, 徐强, 卓海腾, 吴嘉鹏, 唐武, 李冬, 徐艳霞. 2014. 南海北部珠江口盆地重力流与等深流交互作用沉积特征、过程及沉积模式. 地质学报, 88(6): 1120-1129. [Li H, Wang Y M, Xu Q, Zhuo H T, Wu J P, Tang W, Li D, Xu Y X. 2014. Interactions between down-slope and along-slope processes on the northern slope of South China Sea: products, processes, and depositional model. Acta Geologica Sinica, 88(6): 1120-1129]

史卜庆, 丁梁波, 马宏霞, 孙辉, 张颖, 许小勇, 王红平, 范国章. 2023. 东非海域大型深水沉积体系及油气成藏特征. 岩性油气藏, 35(6): 10-17. [Shi B Q, Ding L B, Ma H X, Sun H, Zhang Y, Xu X Y, Wang H P, Fan G Z. 2023. Characteristics of hydrocarbon accumulation in deep-water depositional system in offshore East Africa. Lithologic Reservoirs, 35(6): 10-17]

孙辉, 吕福亮, 范国章, 刘少治, 鲁银涛, 陈宇航. 2017. 三级层序内受底流影响的富砂深水沉积演化规律: 以东非鲁伍马盆地中新统为例. 天然气地球科学, 28(1): 106-115. [Sun H, Lü F L, Fan G Z, Liu S Z, Lu Y T, Chen Y H. 2017. 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. Natural Gas Geoscience, 28(1): 106-115]

王玉柱, 王海荣, 高红芳, 王志宏, 郑良合, 吕友生. 2010. 等深流作用机制和沉积的研究进展. 古地理学报, 12(2): 141-150. [Wang Y Z, Wang H R, Gao H F, Wang Z H, Zheng L H, Lü Y S. 2010. Contour current dynamics process and deposits: a review. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 12(2): 141-150]

吴嘉鹏, 王英民, 王海荣, 李华, 彭学超, 邱燕, 李冬. 2012. 深水重力流与底流交互作用研究进展. 地质论评, 58(6): 1110-1120. [Wu J P, Wang Y M, Wang H R, Li H, Peng X C, Qiu Y, Li D. 2012. The interaction between deep-water turbidity and bottom currents: a review. Geological Review, 58(6): 1110-1120]

张光亚, 刘小兵, 温志新, 王兆明, 宋成鹏. 2015. 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. 中国石油勘探, 20(4): 71-80. [Zhang G Y, Liu X B, Wen Z X, Wang Z M, Song C P. 2015. Structural and sedimentary characteristics of passive continental margin basins in East Africa and their effect on the formation of giant gas fields. *China Petroleum Exploration*, 20(4): 71-80]
- 张兴阳, 高振中, 姚雪根. 1999. 北大西洋洛克尔海槽东北部内波沉积: 深水大型沉积物波成因的再解释. 沉积学报, 17(3): 464-472. [Zhang X Y, Gao Z Z, Yao X G. 1999. Internal-wave deposits in the north-eastern Rockall Trough, North Atlantic Ocean: reinterpretation of deep-water sediment waves formation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(3): 464-472]
- Beaubouef R T. 2004. Deep-water leveed-channel complexes of the Cerro Toro Formation, Upper Cretaceous, southern Chile. *AAPG Bulletin*, 88(11): 1471-1500.
- Bowen A J, Normark W R, Piper D J W. 1984. Modelling of turbidity currents on navy submarine fan, California continental borderland. *Sedimentology*, 31(2): 169-185.
- Brackenridge R E, Hernández-Molina F J, Stow D A V, Llave E. 2013. A Pliocene mixed contourite-turbidite system offshore the Algarve Margin, Gulf of Cadiz: seismic response, margin evolution and reservoir implications. *Marine and Petroleum Geology*, 46: 36-50.
- Breitzke M, Wiles E, Krockner R, Watkeys M K, Jokat W. 2017. Seafloor morphology in the Mozambique Channel: evidence for long-term persistent bottom-current flow and deep-reaching eddy activity. *Marine Geophysical Research*, 38: 241-269.
- Chen Y H, Yao G S, Wang X F, Lü F L, Shao D L, Lu Y T, Cao Q B, Tang P C. 2020. 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. *Sedimentary Geology*, 404: 105680.
- de Ruijter W P M, Ridderinkhof H, Lutjeharms J R E, Schouten M W, Veth C. 2002. Observations of the flow in the Mozambique Channel. *Geophysical Research Letters*, 29(10): 1502.
- Fonnesu M, Palermo D, Galbiati M, Marchesini M, Bonamini E, Bendias D. 2020. A new world-class deep-water play-type, deposited by the syndepositional interaction of turbidity flows and bottom currents: the giant Eocene Coral Field in northern Mozambique. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 179-201.
- Fuhrmann A, Kane I A, Clare M A, Ferguson R A, Schomacker E, Bonamini E, Contreras F A. 2020. Hybrid turbidite-drift channel complexes: an integrated multiscale model. *Geology*, 48(6): 562-568.
- Gervais A, Savoye B, Mulder T, Gonthier E. 2006. Sandy modern turbidite lobes: a new insight from high resolution seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 23(4): 485-502.
- Gong C L, Wang Y M, Steel R J, Peakall J, Zhao X M, Sun Q L. 2016. Flow processes and sedimentation in unidirectionally migrating deep-water channels: from a three-dimensional seismic perspective. *Sedimentology*, 63(3): 645-661.
- Gong C L, Wang Y M, Rebesco M, Salon S, Steel R J. 2018. How do turbidity flows interact with contour currents in unidirectionally migrating deep-water channels? *Geology*, 46(6): 551-554.
- Hernández-Molina F J, Llave E, Stow D A V, García M, Somoza L, Vázquez J T, Lobo F J, Maestro A, Díaz del Río V, León R, Medaldea T, Gardner J. 2006. The contourite depositional system of the Gulf of Cádiz: a sedimentary model related to the bottom current activity of the Mediterranean outflow water and its interaction with the continental margin. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 53: 1420-1463.
- Hernández-Molina F J, Paterlini M, Violante R, Marshall P, de Isasi M, Somoza L, Rebesco M. 2009. Contourite depositional system on the Argentine Slope: an exceptional record of the influence of Antarctic water masses. *Geology*, 37(6): 507-510.
- Kenyon N H. 1986. Evidence from bedforms for a strong poleward current along the upper continental slope of northwest Europe. *Marine Geology*, 72(1-2): 187-198.
- Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. 2007. Deep-water and fluvial sinuous channels: characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation. *Marine and Petroleum Geology*, 24(6-9): 388-405.
- Macgregor D. 2018. History of the development of Permian-Cretaceous rifts in East Africa: a series of interpreted maps through time. *Petroleum Geoscience*, 24: 8-20.
- Rebesco M, Stow D. 2001. Seismic expression of contourites and related deposits: a preface. *Marine Geophysical Researches*, 22: 303-308.
- Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, WaHlin A. 2014. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations. *Marine Geology*, 352: 111-154.
- Schlüter P, Uenzelmann-Neben G. 2007. Seismostratigraphic analysis of the Transkei Basin: a history of deep sea current controlled sedimentation. *Marine Geology*, 240(1-4): 99-111.
- Sequeiros O E. 2012. Estimating turbidity current conditions from channel morphology: a Froude number approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C4): C04003.
- Shanmugam G. 2008. Chapter 5 deep-water bottom currents and their deposits. In: Rebesco M, Camerlenghi A (eds). *Developments in Sedimentology*. Amsterdam: Elsevier Science, 59-81.
- Shanmugam G. 2014. Modern internal waves and internal tides along oceanic pycnoclines: challenges and implications for ancient deep-marine baroclinic sands: reply. *AAPG Bulletin*, 98(4): 858-879.
- Stow D A V, Hernández-Molina F J, Llave E, Bruno M, García M, Díaz del Río V, Somoza L, Brackenridge R E. 2013. The Cadiz Contourite Channel: sandy contourites, bedforms and dynamic current interaction. *Marine Geology*, 343: 99-114.
- van Aken H M, Ridderinkhof H, de Ruijter W P M. 2004. North Atlantic deep water in the south-western Indian Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(6): 755-776.
- Viana A R. 2008. Chapter 23 economic relevance of contourites. In: Rebesco M, Camerlenghi A (eds). *Developments in Sedimentology*. Amsterdam: Elsevier Science, 493-510.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)