

东非鲁伍马盆地始新统不同类型单一水道的分布特征及其底流差异改造机制^{*}

余季陶^{1,2} 吴胜和^{1,2} 文思颖³ 徐振华^{1,2} 王 敏⁴
刘 晗⁵ 王瑞峰⁴ 刘常妮^{1,2}

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

3 中石油西南油气田分公司勘探事业部, 四川成都 610041

4 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

5 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘 要 东非鲁伍马盆地始新统海底扇水道体系是研究深水重力流与底流相互作用的重要实例。针对不同成因单一水道类型及其底流差异改造后分布的关键科学问题, 基于岩心、测井、三维地震数据及实验分析资料, 系统分析研究区下始新统单一水道成因类型、分布特征及底流差异改造机制。结果表明: (1) 研究区深水水道沉积体系由碎屑流、浊流、底流改造和半远洋披覆沉积 4 类成因岩相构成, 进一步细分为 17 种亚类。依据重力流成因岩相占比, 识别出碎屑流沉积充填水道与高密度浊流沉积充填水道 2 种单一水道类型。(2) 碎屑流沉积充填水道以低宽深比、弯曲状为主, 天然堤发育程度低; 高密度浊流沉积充填水道呈顺直或弯曲状, 宽深比显著增大, 天然堤厚度增大及发育程度增强。2 类水道在底流改造下均表现为不对称分布及逆底流侧向迁移叠置特征, 但高密度浊流沉积充填水道的不对称性及迁移程度更强。(3) 成因机制上, 碎屑流因抗剪强度高, 底流改造以“原地淘洗”为主, 内部发育透镜状具牵引构造岩相, 水道—天然堤形态不对称性弱(不对称指数平均约为 1.35), 逆底流侧向迁移程度低(迁移指数平均为 0.65); 而高密度浊流因抗剪强度低, 底流对其细粒悬浮物“整体再搬运”, 导致顺底流一侧侧向漂积体发育, 使得水道—天然堤不对称性增强(不对称指数平均约为 2.5)以及水道北侧限制程度更高, 进而造成水道逆底流迁移叠置程度更高(迁移指数平均为 0.8)。本研究揭示了不同成因单一水道在底流作用下的差异响应机制, 对深水储集层精细勘探具有指导意义。

关键词 底流改造 重力流 单一水道分布特征 始新统 鲁伍马盆地

第一作者简介 余季陶, 男, 2000 年生, 博士研究生, 主要从事深水沉积学、储层表征与建模研究。
E-mail: yjt_cup@foxmail.com。

通讯作者简介 吴胜和, 男, 1963 年生, 教授、博士生导师, 主要从事沉积古地理、储层表征与建模研究。E-mail: reser@cup.edu.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

Distribution characteristics of varied single channels influenced by differential bottom current reworking of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa

^{*} 中国石油大学(北京)科研基金项目资助(编号: 2462025BJRC005)。[Financially supported by the Science Foundation of China University of Petroleum (Beijing) (No. 2462025BJRC005)]

收稿日期: 2025-05-16 改回日期: 2025-06-12

YU Jitao^{1,2} WU Shenghe^{1,2} WEN Siying³ XU Zhenhua^{1,2} WANG Min⁴
LIU Han⁵ WANG Ruifeng⁴ LIU Changni^{1,2}

1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Exploration Division of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610041, China

4 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

5 Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract The Eocene submarine fan channel system in the Rovuma Basin, East Africa, constitutes a significant case study for investigating the interaction between deep-water gravity flows and bottom currents. To address key scientific questions concerning the genetic types of individual channels and their distribution following differential reworking by bottom currents, this study systematically examines the genetic classification, spatial distribution, and mechanisms of bottom-current modification of single-channel systems in the lower Eocene strata of the region. Integrated analysis is based on core samples, well logging data, 3D seismic datasets, and experimental results. The findings reveal the following: (1) The deep-water channel depositional system comprises four genetically distinct lithofacies—debris flow, turbidity current, bottom-current reworked, and hemipelagic drape deposits—which are further classified into 17 subtypes. Based on the relative abundance of gravity flow-related lithofacies, two primary types of single-channel systems are identified: debris flow-dominated fill channels and high-density turbidity current-dominated fill channels. (2) Debris flow-dominated fill channels are characterized by low width-to-depth ratios, sinuous geometries, and poorly developed levees. In contrast, high-density turbidity current-dominated fill channels exhibit straight to moderately sinuous morphologies, significantly higher width-to-depth ratios, and more pronounced levee development and thickness. Under the influence of bottom currents, both channel types display asymmetric cross-sectional profiles and lateral migration opposite to the direction of bottom-current flow. However, the high-density turbidity current-dominated channels exhibit greater asymmetry and more intense migration behavior. (3) Mechanistically, due to the high shear strength of debris flows, bottom-current reworking occurs primarily through “in-situ winnowing,” resulting in lenticular lithofacies containing internal traction structures. These channels show weak levee-channel asymmetry (average asymmetry index ≈ 1.35) and limited lateral migration (average migration index ≈ 0.65). Conversely, high-density turbidity currents, which possess lower shear strength, undergo “bulk reworking” of fine-grained suspended sediments by bottom currents. This process promotes the development of downcurrent-side lateral accretion deposits, leading to enhanced levee-channel asymmetry (average asymmetry index ≈ 2.5), increased confinement along the northern channel margins, and more pronounced migration against the bottom-current direction (average migration index ≈ 0.8). This study elucidates the differential response mechanisms of genetically distinct channel types to bottom-current interactions, offering critical insights for high-resolution characterization and targeted exploration of deep-water reservoirs.

Key words bottom current reworking, gravity flow, single channel distribution characteristics, Eocene, Rovuma Basin

About the first author YU Jitao, born in 2000, is a Ph.D. candidate. He is mainly engaged in research on deepwater sedimentology, reservoir characterization and modeling. E-mail: yjt_cup@foxmail.com.

About the corresponding author WU Shenghe, born in 1963, is a professor and Ph.D. supervisor. He is mainly engaged in sedimentary palaeogeography, reservoir characterization and modeling. E-mail: reser@cup.edu.cn.

深水重力流与底流(包括等深流、内波、内潮汐等)的相互作用是当今沉积学研究的前沿领域(Rebesco *et al.*, 2014)。顺陆坡而下的重力流与沿陆坡方向流动的底流之间的相互作用可分为 3 种类型:(1)底流与重力流单独作用、交替出现;(2)底流对重力流沉积后期改造、搬运;(3)底流与重力流在同一时空频繁互动、交互作用(Mulder *et al.*, 2008; 吴嘉鹏等, 2012; Fonnesu *et al.*, 2020; 李华等, 2023)。海底扇水道作为深水重力流沉积体系的搬运路径和重要沉积场所,其沉积过程与流体动力环境密切相关,使得底流对海底扇水道的改造特征与机制成为研究热点。国内外学者们通过现代沉积实例、古代地层记录及物理模拟实验,明确了在底流改造作用下,水道之间呈现出顺底流方向或逆底流方向侧向迁移的叠置样式,且水道—溢岸体系的不对称性随着底流流速的升高而增强(Gong *et al.*, 2016, 2018; Fonnesu *et al.*, 2020; Fuhrmann *et al.*, 2020; Miramontes *et al.*, 2020; 张佳佳等, 2023)。然而,海底扇水道的流体成因类型多样(浊流、碎屑流等)(Lowe, 1982; Mayall *et al.*, 2006; 刘飞等, 2021),不同成因水道的沉积动力学特征存在区别,这势必将导致底流改造响应的差异。截至目前,前人研究仍主要聚焦于单一类型水道的沉积特征表征,而关于不同成因单一水道的识别,以及底流对不同成因水道的改造机制及其差异分布方面的认识还较为缺乏,这严重制约了相关深水储集层的勘探开发精度。

东非鲁伍马盆地新生代发育大规模深水海底扇沉积,其水道类型多样且底流改造作用显著(陈宇航等, 2017; 孙辉等, 2017; Fonnesu *et al.*, 2020; 王敏等, 2022; Chen *et al.*, 2024)。以东非鲁伍马盆地始新统海底扇水道体系为例,前人曾对研究区下始新统单层级次地层格架及海底扇宏观沉积特征开展了研究(王敏等, 2022; 张佳佳等, 2023),在此基础上,综合应用三维地震数据、岩心及相关实验分析数据等资料,以期明确单一水道的成因类型及分布特征,并进一步探讨底流改造作用的差异性。

1 研究区概况

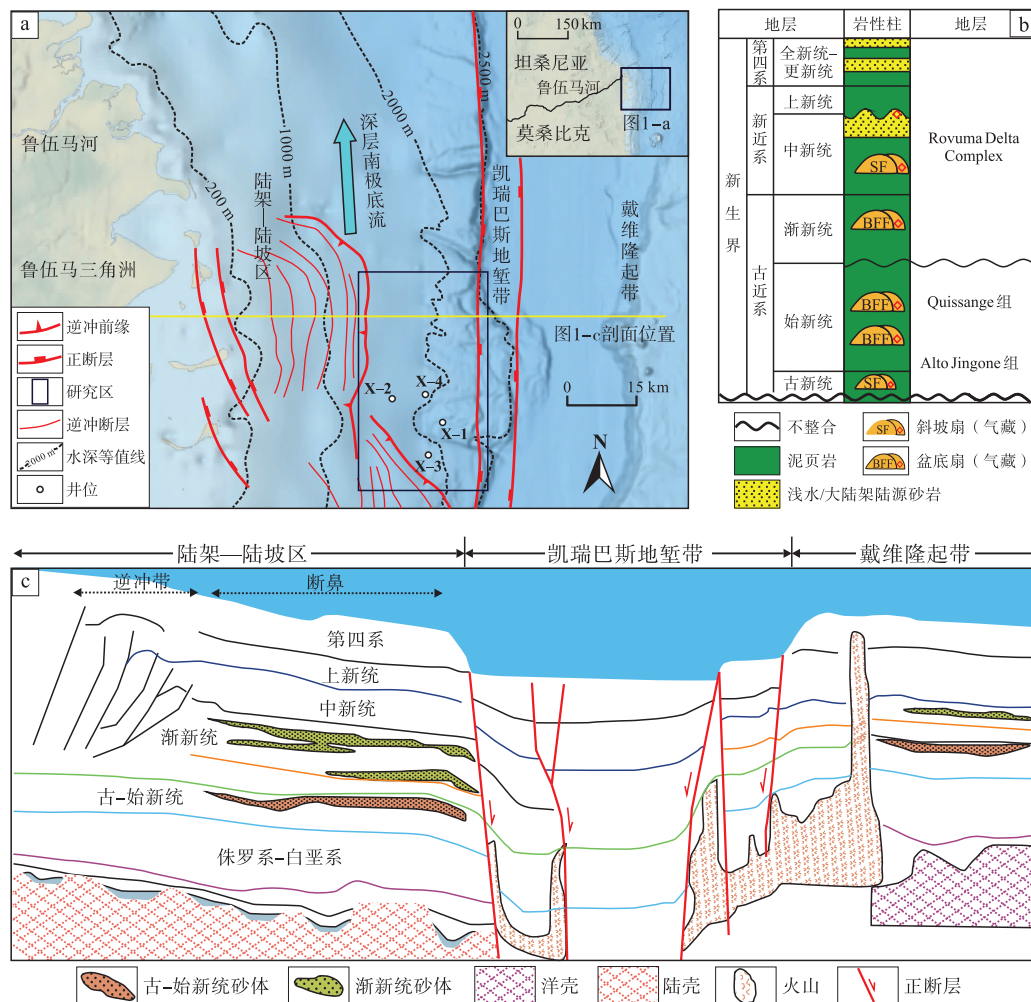
1.1 地质背景

东非鲁伍马盆地位于莫桑比克东北部,是东非被动大陆边缘盆地体系中主要的含油气盆地之一,盆地呈南窄北宽的纵向展布,面积约为 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中超过一半的面积位于海上(图 1-a)(孔祥宇, 2013; 刘子玉等, 2017; 张光亚等, 2018)。鲁伍马盆地自西向东分为陆架—陆坡区、凯瑞巴斯地堑带及戴维隆起带 3 个构造单元(图 1-c)(陈宇航等, 2016)。其中,陆架—陆坡区具有典型的“窄陆架、陡陆坡”的构造特征,使得物源的供给效率较高(刘子玉等, 2017; 张佳佳等, 2023)。鲁伍马盆地在新元古代至奥陶纪莫桑比克带的火成岩和变质岩基底之上发育侏罗系、白垩系、古近系、新近系、第四系(张光亚等, 2018)。自古近纪以来,鲁伍马河流—三角洲沉积体系由西向东向盆地持续高效推进,在陆坡深水区发育大规模海底扇沉积,是盆地内重要的含气储集层(图 1-b)(Chen *et al.*, 2020; Fonnesu *et al.*, 2020; 曹全斌等, 2021; Luan *et al.*, 2021)。

研究区地理上位于鲁伍马盆地中东部,现今水体深度介于 1500~2000 m 之间,构造上处于陆坡区,构造特征比较稳定,内部断层发育较少。此外,研究区深水区存在沿陆坡由南向北流动的南极底流(等深流)(de Ruijter *et al.*, 2002; Breitzke *et al.*, 2017; Fonnesu *et al.*, 2020),与重力流搬运方向垂直。海底实测数据显示,研究区现今南极底流的流速通常为 0.2~0.4 m/s,最大可达 1.2 m/s,且在地质历史时期内长期、准稳态存在。古近纪期间,研究区南极底流的流动方向和强度与现今观测结果大体相同(Chen *et al.*, 2020; Fuhrmann *et al.*, 2020; 张佳佳等, 2023)。本次研究的目的层段为古近系下始新统海底扇峡谷水道体系(图 2)。

1.2 海底扇沉积特征

东非鲁伍马盆地古近系下始新统海退—低位域时期发育海底扇水道体系,张佳佳等(2023)将水道体系内部自上而下划分为 A-F 小层,其中 F-E



a—地理位置（据张佳佳等，2023）；b—新生代地层柱状图（据张光亚等，2018；有修改）；

c—构造及地层发育剖面图（据张光亚等，2018；有修改）

图 1 东非鲁伍马盆地区域地质背景

Fig. 1 Regional geological setting in Rovuma Basin, East Africa

小层为峡谷早期限制性水道复合体，以下切侵蚀及充填底部滞留沉积为主；D-B 小层为中期峡谷弱限制性水道复合体，在底流的影响下，各小层水道复合体之间呈逆底流方向侧向迁移叠置的特征（图 2-a）；A 小层则为晚期非限制性朵叶复合体。研究区储集层砂体总体为长石砂岩，成分成熟度较低，水道体系内部岩石成分差异较小（王敏等，2022）。

1.3 资料概况

东非鲁伍马盆地目的层段共有 4 口探井及评价井，平均井距超过 5 km，均有丰富的测井资料（自然伽马、电阻率、声波时差、密度、中子等）。其中，X-1 井及 X-2 井在目的层段内共取得岩心 145 m，在取心段有岩心 CT 扫描成像图件、微观

薄片以及粒度分析测试等资料。此外，研究区还有深度域的高精度三维地震资料（平面采样精度为 25 m×12.5 m，垂向采样率为 3 ms，目的层段主频约 25 Hz，分辨率 38 m）和基于模型约束稀疏脉冲反演方法得到的目的气藏波阻抗反演数据体，能够满足对水道复合体内部单一水道的识别（张佳佳等，2023）。

2 基于重力流成因岩相类型的单一水道划分

2.1 岩相成因类型

东非鲁伍马盆地深水水道沉积体系由碎屑流、

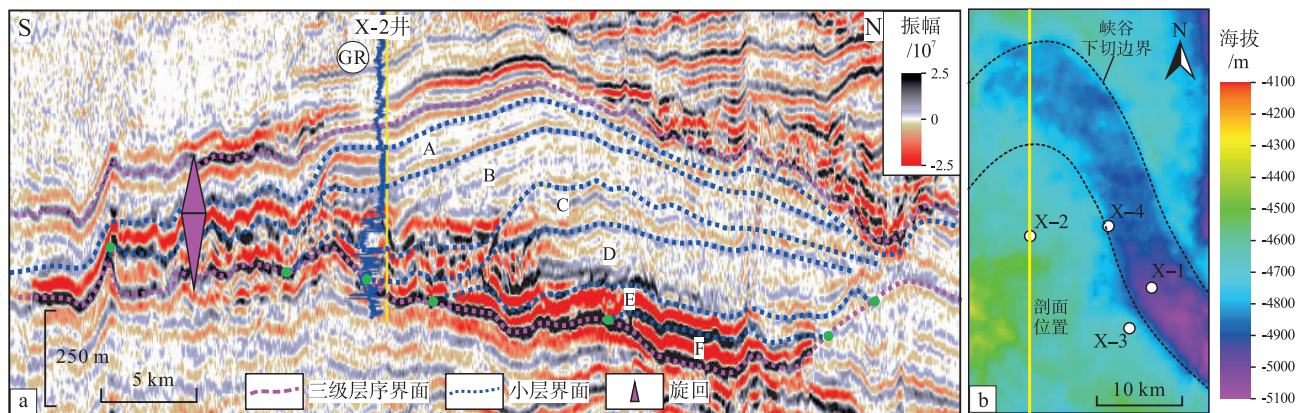


图 2 东非鲁伍马盆地始新统峡谷水道体系内部小层划分 (a) 与底面构造图 (b)

Fig. 2 Subzone division of the target sequence canyon channel systems (a) and base structural map (b) of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa

浊流、底流改造和半远洋披覆沉积 4 类成因岩相构成, 并进一步细分为 17 种亚类。

2.1.1 碎屑流成因岩相

1) 块状砾岩相 (Gm)

岩心上表现为砾石 (直径介于 2 ~ 50 mm 之间) 无序堆积, 以颗粒支撑结构为主, 可见砾石被几厘米厚的泥质外壳所包裹, 漂浮在厚层块状砂岩中, 呈典型的“泥包砾”构造 (图 3-a)。岩心垂向上缺乏层理或递变构造, 颗粒分选差, 发育泥岩撕裂屑, 底部可见剪切构造, 且与顶底泥岩多呈突变式接触。作者认为研究区块状砾岩相的成因与砂质碎屑流密切相关: 砾石与相对细粒颗粒混杂堆积而成的塑性流体, 并在局部发育“泥包砾”构造, 在重力驱动下沿海底峡谷“冻结式”搬运, 快速卸载后形成块状构造 (Shanmugam, 1996; 李相博等, 2014)。

2) 块状含砾粗砂岩相 (GCm)

岩石内部砾石 (多为 2 ~ 30 mm) 与粗砂 (0.5 ~ 2 mm) 混杂堆积, 但砾石含量小于 20%, 以颗粒支撑结构为主, 杂基含量较少, 常见“泥包砾”或泥岩撕裂屑 (图 3-b)。岩心垂向上无明显的粒序变化, 整体上分选差, 以块状构造为主, 砾石和泥质团块“漂浮”在粗砂中, 底部可发育剪切构造, 同样属砂质碎屑流成因。

3) 块状中粗砂岩相 (MCm)

岩心上由中砂 (0.25 ~ 0.5 mm) 和粗砂 (0.5 ~ 2 mm) 混杂堆积而成, 二者总含量超过 50%, 但中砂和粗砂的含量均不超过 50%, 且粗砂含量略高于中砂, 为颗粒支撑结构, 杂基含量较低, 发

育大量泥质团块及泥岩撕裂屑 (图 3-c)。岩心垂向上无层理或粒序的变化, 以块状构造为主, 整体分选较差, 底部偶见火焰状负载构造。块状中粗砂岩相的粒度概率累积曲线呈较陡的“上拱弧形” (图 4-a), 无明显截点, 表明其整体搬运, 且缺乏水力分选 (袁静等, 2011; 王铸坤等, 2017), 也为砂质碎屑流成因。

4) 块状中细砂岩相 (MFm)

岩心上表现为中砂 (0.25 ~ 0.5 mm) 与细砂 (0.1 ~ 0.25 mm) 无序混杂, 两者总含量超过 50%, 但中砂和细砂的含量均不超过 50%, 且中砂含量略高于细砂, 杂基含量低, 呈颗粒支撑结构, 可见零星泥质团块或泥岩撕裂屑 (图 3-d)。垂向缺乏层理或粒序构造, 整体分选一般, 粒度概率累积曲线也呈较陡的“上拱弧形” (图 4-b), 属于砂质碎屑流成因。

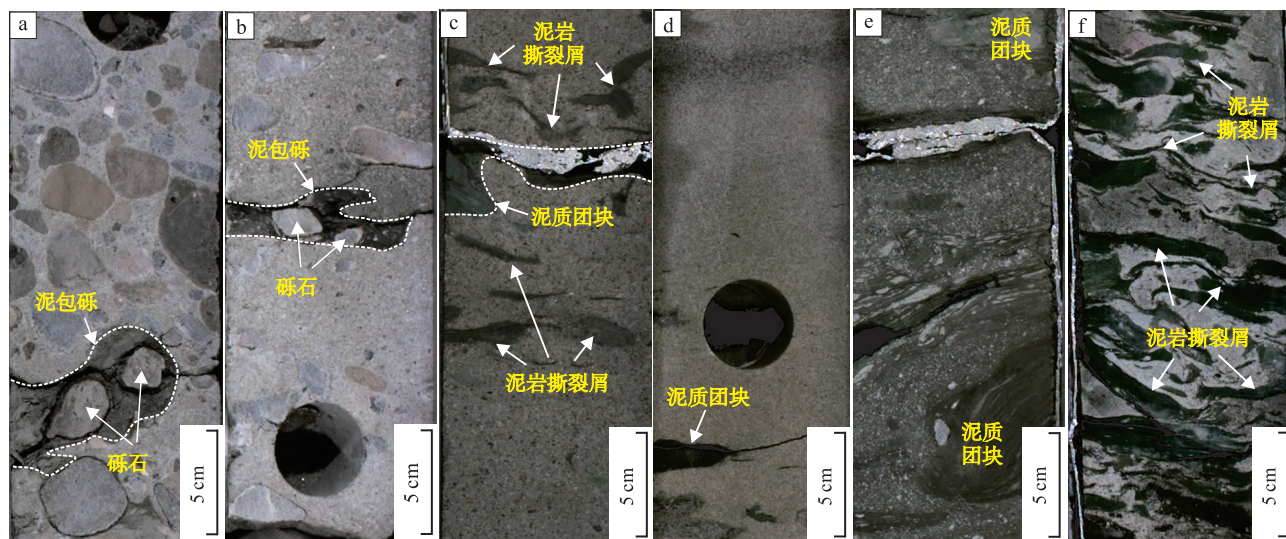
5) 块状砂质泥岩相 (SMm)

岩心上表现为不同粒级的砂分散嵌于泥质基质中, 且基质占比达 70% 以上, 呈典型基质支撑结构。垂向无层理构造, 颗粒分选差, 常见变形泥质团块 (图 3-e) 或撕裂状泥岩碎屑 (图 3-f)。块状砂质泥岩成因与泥质碎屑流密切相关, 陆坡或峡谷边缘泥质沉积物失稳, 形成富泥的塑性流体, 其中高黏度基质通过浮力支撑粗碎屑, 抑制颗粒分异与沉降, 最终整体“冻结式”堆积形成块状构造。

2.1.2 浊流成因岩相

1) 正递变层理含砾粗砂岩相 (GCg)

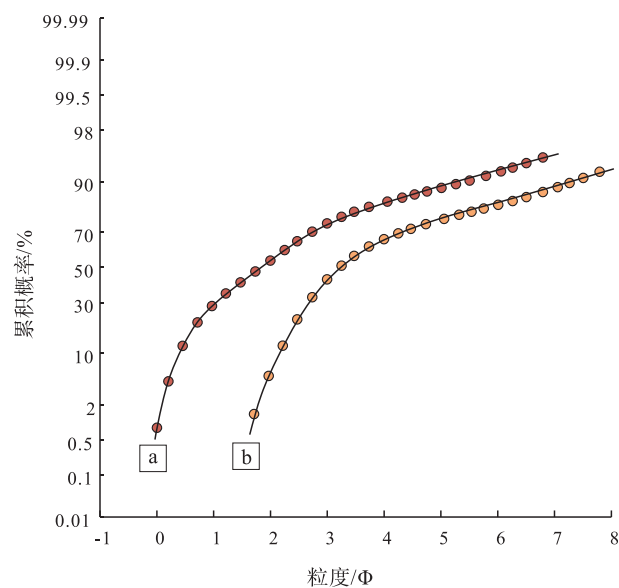
岩心上表现为底部为砾石 (>2 mm), 向上渐



a—块状砾岩相，发育“泥包砾”构造，X-2 井，4553.1~4553.4 m；b—块状含砾粗砂岩相，发育“泥包砾”构造，X-2 井，4617.56~4617.79 m；c—块状中粗砂岩相，发育泥质团块及泥岩撕裂屑，X-2 井，4688.5~4688.75 m；d—块状中细砂岩相，局部发育泥质团块，X-2 井，4612.6~4612.85 m；e—块状砂质泥岩相，发育泥质团块，X-2 井，4535.42~4535.67 m；f—块状砂质泥岩相，发育大量泥岩撕裂屑，X-2 井，4602.75~4603 m

图 3 东非鲁伍马盆地始新统碎屑流成因岩相岩心照片

Fig. 3 Core photos of debris flow genetic lithofacies of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa



a—块状中粗砂岩相，X-2 井，4558 m；b—块状中细砂岩相，X-2 井，4601.49 m

图 4 东非鲁伍马盆地始新统碎屑流成因岩相粒度概率累积曲线

Fig. 4 Grain size probability cumulative curves of debris flow genetic lithofacies of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa

变为粗砂 (0.5~2 mm)，呈典型正粒序结构，对应于鲍马序列的 Ta 段的下部 (Bouma, 1962) (图 5-a)。岩心中底部可见冲刷面，垂向上粒度

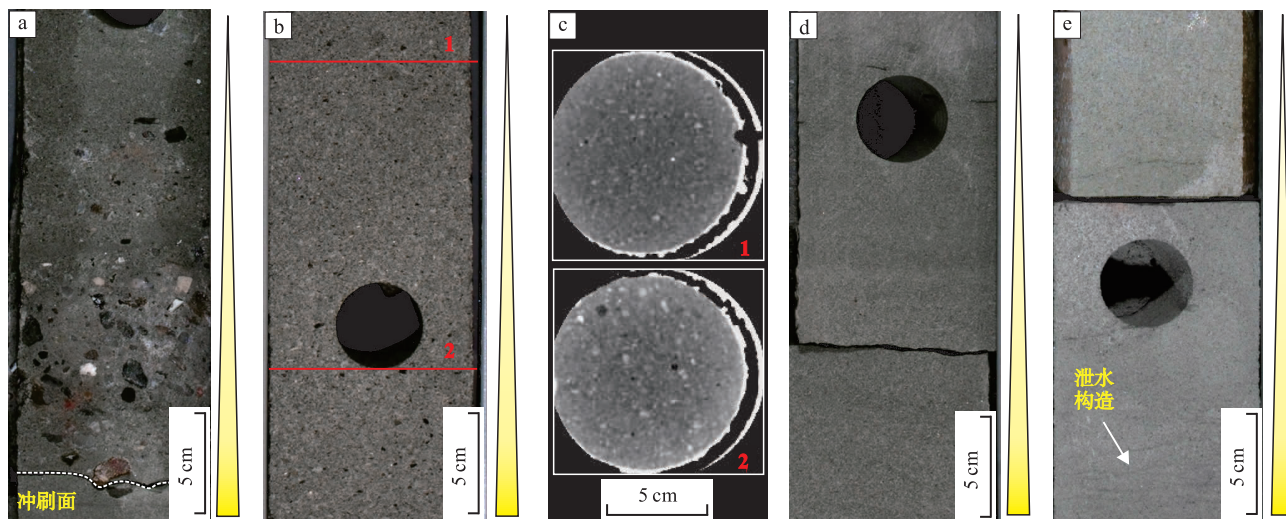
递变清晰，分选中等至差，为高能量浊流流速减慢时按粒度分异沉降，砾石优先沉积于底部，粗砂颗粒逐渐上覆所形成。

2) 正递变层理中粗砂岩相 (MCg)

岩心上表现为底部粗砂 (0.5~2 mm) 向上渐变为中砂 (0.25~0.5 mm)，呈正粒序结构，对应于鲍马序列的 Ta 段的中部 (图 5-b, 5-c)。岩心中单层最大厚度可达 5 m，偶见泄水构造，底部多与正递变层理含砾粗砂岩相拼接，偶见少量泥岩撕裂屑，垂向上粒度递变清晰，分选中等，粒度概率累积曲线形态呈“低斜率两段式” (图 6-a)，由跳跃总体和悬浮总体组成，其中悬浮总体占比约 40%，表明其同样属浊流成因。

3) 正递变层理中细砂岩相 (MFg)

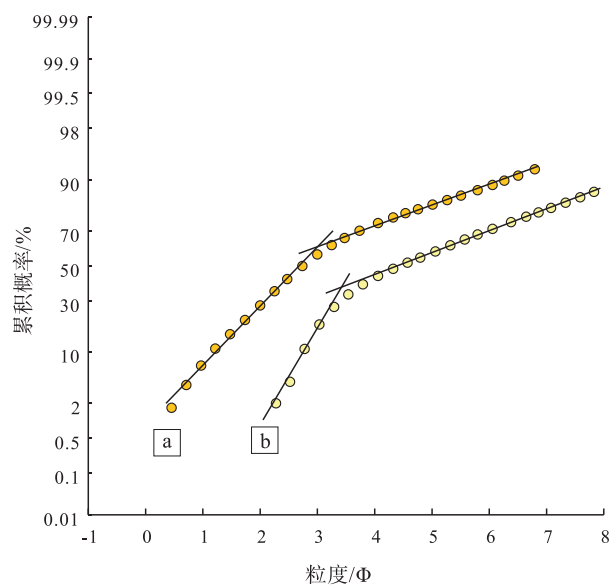
岩心上底部为中砂 (0.25~0.5 mm) 向上渐变为细砂 (0.1~0.25 mm)，对应于鲍马序列的 Ta 段的上部 (图 5-d)。岩心中底部多与正递变层理中粗砂岩相拼接，发育泄水构造 (图 5-e)，顶部多与泥岩突变接触，缺少鲍马序列 Tb-Td 段。垂向上粒度递变较为清晰，分选中等，粒度概率累积曲线形态呈“低斜率两段式” (图 6-b)，由跳跃总体和悬浮总体组成，其中悬浮总体占比约 70%，说明其由浊流所形成。



a—正递变层理含砾粗砂岩相, X-1 井, 4618.50~4618.75 m; b—正递变层理中粗砂岩相, X-1 井, 4613.67~4613.92 m; c—正递变层理中粗砂岩相, X-1 井, CT 扫描图像, 切面位置见图 5-b; d—正递变层理中细砂岩相, X-1 井, 4600.46~4600.71 m; e—正递变层理中细砂岩相, 局部发育泄水构造, X-2 井, 4562.41~4562.66 m

图 5 东非鲁伍马盆地始新统浊流成因岩相岩心照片及 CT 扫描图像

Fig. 5 Core photos and CT scan images of turbidity current genetic lithofacies of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa



a—正递变层理中粗砂岩相, X-2 井, 4613.58 m; b—正递变层理中细砂岩相, X-2 井, 4527.29 m

图 6 东非鲁伍马盆地始新统浊流成因岩相粒度概率累积曲线

Fig. 6 Grain size probability cumulative curves of turbidity current genetic lithofacies of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa

2.1.3 底流改造成因岩相

1) 交错层理含砾粗砂岩相 (GCc)

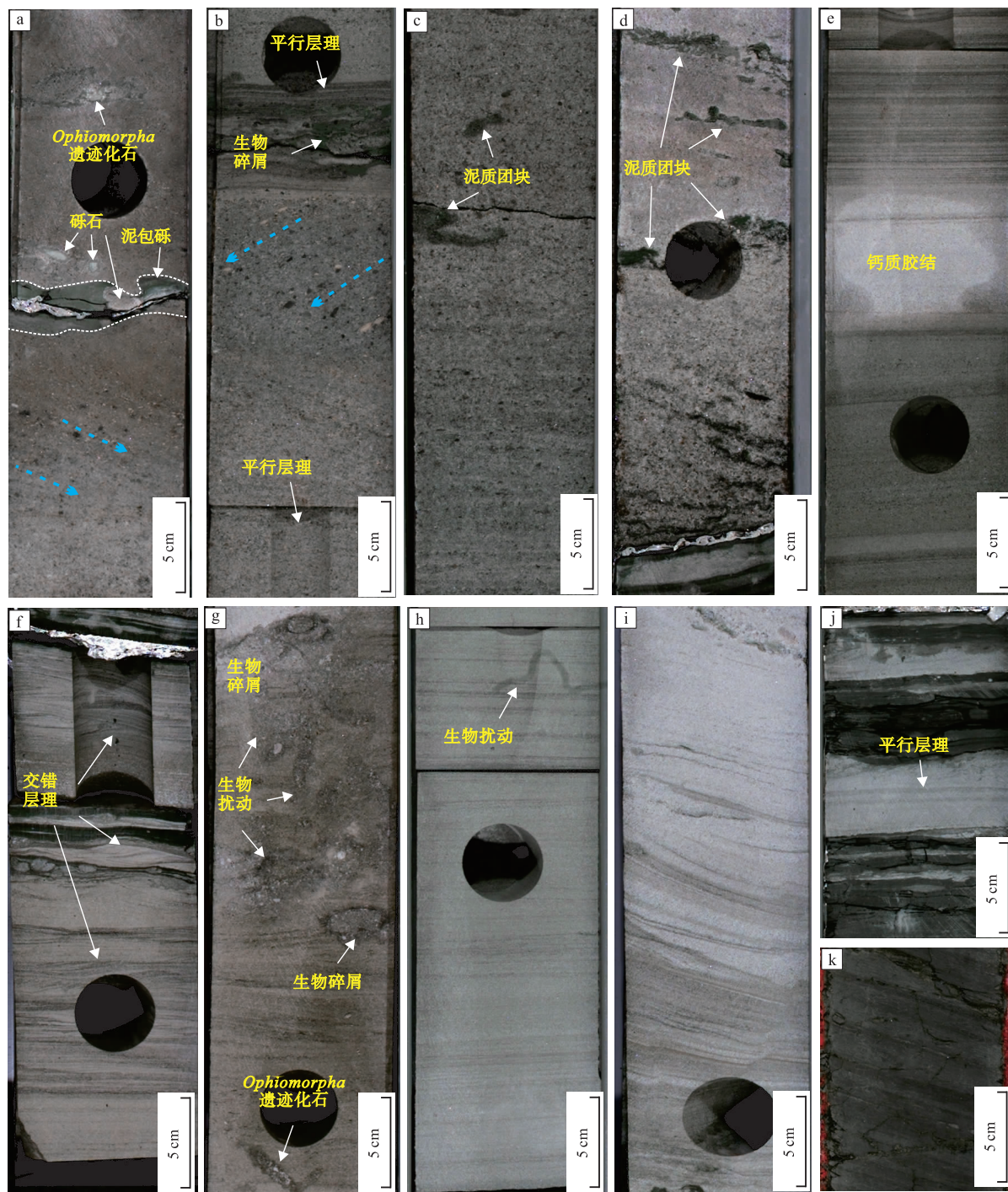
岩心上以粗砂颗粒和砾石 (粒径多小于

4 mm) 的定向排列为特征, 层厚 5~10 cm, 岩心中可见 *Ophiomorpha* 遗迹化石及生物碎屑, 少量砾石呈“泥包砾”或漂浮状嵌于中粗砂中, 分选中等 (图 7-a, 7-b), 垂向上多发育在厚层 MCm 之间。其成因与底流对砂质碎屑流的改造有关: 碎屑流携带中粗砂与少量砾石快速堆积后, 底流对未固结沉积物原地“淘洗”, 移除细粒基质并促使粗砂定向排列或形成平行层理 (图 7-b), 残留黏性较高的“泥包砾”或漂浮状砾石。岩心中发育的 *Ophiomorpha* 遗迹化石及生物碎屑等高能生物记录, 指示着重力流间歇期深水环境中存在由底流改造所形成的稳定沉积界面及高能的水体环境 (Frey *et al.*, 1978; 晋慧娟, 1999)。

2) 平行层理中粗砂岩相 (MCp)

岩心上表现为中粗砂 (0.5~2 mm) 中发育较为清晰的平行层理, 分选较好, 层系厚度 10~30 cm。岩心中偶见不规则泥质团块 (直径 1~5 cm), 团块边缘呈撕裂状 (图 7-c), 垂向上多发育在厚层 MCm 之间或与 GCc 形成薄互层组合。粒度累积概率曲线呈“高斜率两段式”, 由跳跃总体和悬浮总体组成, 其中跳跃总体占比达 90% (图 8-a), 指示牵引流的存在。可能为底流对砂质碎屑流的持续改造所形成。

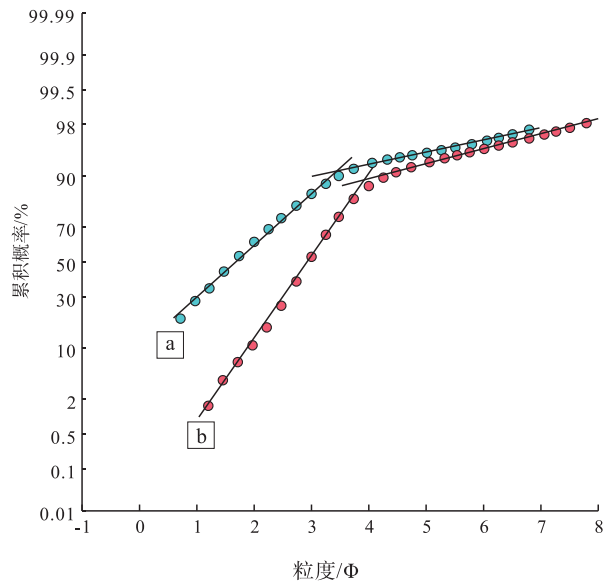
3) 交错层理中粗砂岩相 (MCc)



a—交错层理含砾粗砂岩相，蓝色箭头所示粗砂与砾石的定向排列，内部发育遗迹化石、“泥包砾”构造，X-2 井，4595.7~4596.01 m；b—交错层理含砾粗砂岩相，蓝色箭头所示粗砂与砾石的定向排列，内部发育生物碎屑，X-2 井，4598.77~4599.09 m；c—平行层理中粗砂岩相，局部发育泥质团块，X-2 井，4596.37~4596.68 m；d—交错层理中粗砂岩相，发育泥质团块，X-2 井，4585.61~4585.93 m；e—平行层理中细砂岩相，局部钙质胶结，X-2 井，4587.48~4587.79 m；f—交错层理中细砂岩相，X-2 井，4604.01~4604.31 m；g—交错层理中细砂岩相，发育遗迹化石、生物碎屑及生物扰动构造，X-2 井，4604.98~4605.30 m；h—平行层理细砂岩相，发育生物扰动构造，X-2 井，4570.30~4570.62 m；i—交错层理细砂岩相，X-2 井，4602.4~4602.72 m；j—平行层理粉砂岩相，X-2 井，4555.30~4555.61 m；k—水平层理泥岩相，X-2 井，4539.50~4539.63 m

图 7 东非鲁伍马盆地始新统底流改造成因及半远洋成因岩相岩心照片

Fig. 7 Core photos of bottom current reworked genetic and hemipelagic genetic lithofacies of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa



a—平行层理中粗砂岩, X-1 井, 4618.87 m; b—交错层理中细砂岩相, X-2 井, 4584.30 m

图 8 东非鲁伍马盆地始新统底流改造成因岩相粒度概率累积曲线

Fig. 8 Grain size probability cumulative curves of bottom current reworked genetic lithofacies of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa

岩心上中粗砂 (0.5~2 mm) 构成槽状交错层理, 层系厚度 20~50 cm, 前积纹层倾角 10°~30°, 分选中等, 层内夹带泥质团块, 偶见生物扰动痕迹 (图 7-d), 下部可与 MCc 叠置。其成因可能与底流对砂质碎屑流的改造相关。

4) 平行层理中细砂岩相 (MFp)

岩心上以中细砂 (0.1~0.5 mm) 中发育连续稳定的平行层理为特征, 分选良好, 层厚最大可达 50 cm, 在岩心中未见泥质团块及泥岩撕裂屑, 底部冲刷作用不明显, 局部发育钙质胶结 (图 7-e), 多发育在底流改造形成的沉积物波或漂积体中, 为底流对浊流沉积的持续改造所形成 (张佳佳等, 2023)。

5) 交错层理中细砂岩相 (MFc)

岩心上中细砂 (0.1~0.5 mm) 中发育双向交错层理为特征 (图 7-f), 分选良好, 可见 *Ophiomorpha* 遗迹化石、生物碎屑及扰动构造 (图 7-g)。粒度累积概率曲线呈“高斜率两段式”, 由跳跃总体和悬浮总体组成, 其中跳跃总体占比达 80% 以上 (图 8-b), 同样由底流改造所形成。

6) 平行层理细砂岩相 (Fp)

岩心上细砂 (0.1~0.25 mm) 表现出连续清晰的平行层理, 前积纹层倾角较低, 分选良好, 层厚可达 30 cm (图 7-h)。岩心中发育生物扰动构造, 局部含生物碎屑, 多发育在沉积物波或漂积体中 (张佳佳等, 2023), 可能由底流改造所形成。

7) 交错层理细砂岩相 (Fc)

岩心上细砂 (0.1~0.25 mm) 发育典型的槽状交错层理, 分选良好, 层厚可达 30 cm (图 7-i), 局部发育生物扰动构造, 可能为底流对浊流末端沉积改造所形成。

8) 平行层理粉砂岩相 (Sp)

岩心上表现为粉砂 (0.01~0.1 mm) 中发育平行层理, 厚度多小于 5 cm (图 7-j), 在岩心上多与薄层泥岩互层沉积, 其成因同样可能与底流对浊流的改造作用相关。

2.1.4 半远洋披覆成因岩相

东非鲁伍马盆地半远洋披覆成因岩相为水平层理泥岩相 (Mh) (图 7-k), 在研究区岩心中占比较少, 其形成于浊流与底流活动的间歇期、水动力整体较弱的环境中, 由细粒物质沉降、披覆而成。

2.2 单一水道类型划分与识别

在岩相成因类型识别的基础上, 采用基于重力流成因岩相的单一水道分类方案 (刘飞等, 2021), 东非鲁伍马盆地始新统单一水道可分为碎屑流沉积充填水道和高密度浊流沉积充填水道 2 类。

2.2.1 碎屑流沉积充填水道

东非鲁伍马盆地碎屑流沉积充填水道在岩心上以粒度较粗的砂质碎屑流成因岩相为主 (图 9), 主要为 GCm、MCm 和 MFm, 厚度占比可达 77%。底流改造成因岩相则呈薄层透镜状分布其中, 发育单段厚度小于 30 cm 的 GCc、MCp、MFp 或 Fp 等, 可能为短期底流增强时对碎屑流沉积充填水道的局部改造所形成, 厚度占比约 20%。浊流成因岩相仅占比 2.6%, 以 MCg 为主, 可能由砂质碎屑流剪切稀释而成。碎屑流沉积充填水道中岩相未表现出明显的垂向组合规律, 各岩相在垂向上无序拼接, 体现了碎屑流整体式搬运的特点。

通过岩心、测井、地震相互标定, 明确了研究区碎屑流沉积充填水道的识别特征。碎屑流沉积充填水道由于岩心中泥质团块、泥岩撕裂屑的发育程度高, 导致其自然伽马曲线呈中高幅度的近似钟型

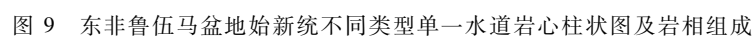
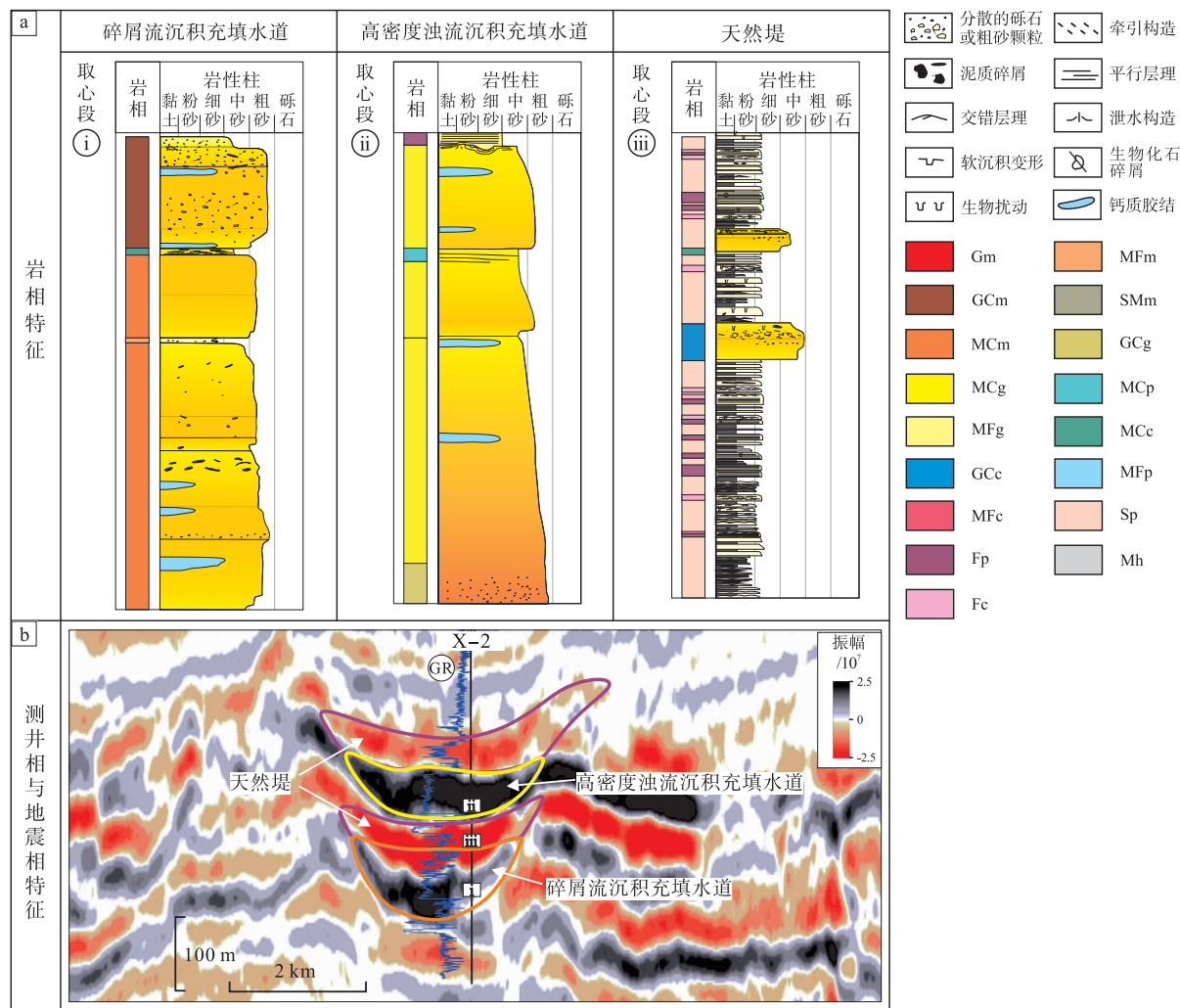


Fig. 9 Core histograms and lithofacies composition of different types of single channels of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa



a—岩相特征；b—测井相与地震相特征

图 10 东非鲁伍马盆地始新统单一水道及天然堤的识别特征

Fig. 10 Identification characteristics of single channels and natural levees of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa

或锯齿状，地震相则表现为中高振幅、连续性一般的“碗状”，水道边界明显（图 10-b）。水道顶部及两翼的天然堤由粒度较细的底流改造成因岩相所组成（图 9；图 10-a），主要为 Fp、Fc 和 Sp，测井相为中低幅度的锯齿状，地震相呈中高振幅、连续性中等的反射特征（图 10-b）。

2.2.2 高密度浊流沉积充填水道

高密度浊流水道在岩心中高密度浊流成因岩相占绝对主导（图 9），主要为 GCg、MCg 和 MFg，厚度占比高达 98%。在研究区高密度浊流水道内部碎屑流成因岩相不发育，同时底流改造成因岩相发育程度也较低，仅在 X-1 井 4619 m 处见厚度约 50 cm 的 MCP。高密度浊流沉积充填水道垂向组合特征显著，自下而上由粒度逐渐变细的 GCg、MCg

和 MFg 所组成的岩相组合垂向拼接而成，但在岩心中水道正递变层理被截切，顶部基本不发育细砂与粉砂级别的岩相（缺少鲍马序列 Tb-Td 段）。

高密度浊流沉积充填水道岩心中泥质碎屑基本不发育，使得其自然伽马曲线呈高幅度的箱型，地震相呈高振幅、连续性较好的“碟状”（图 10-b）。水道顶部及两翼的天然堤在地震上表现为中低振幅、连续性中等的反射特征（图 10-b）。

3 底流差异改造作用下的单一水道分布特征

通过上述单一水道的识别特征，在东非鲁伍马

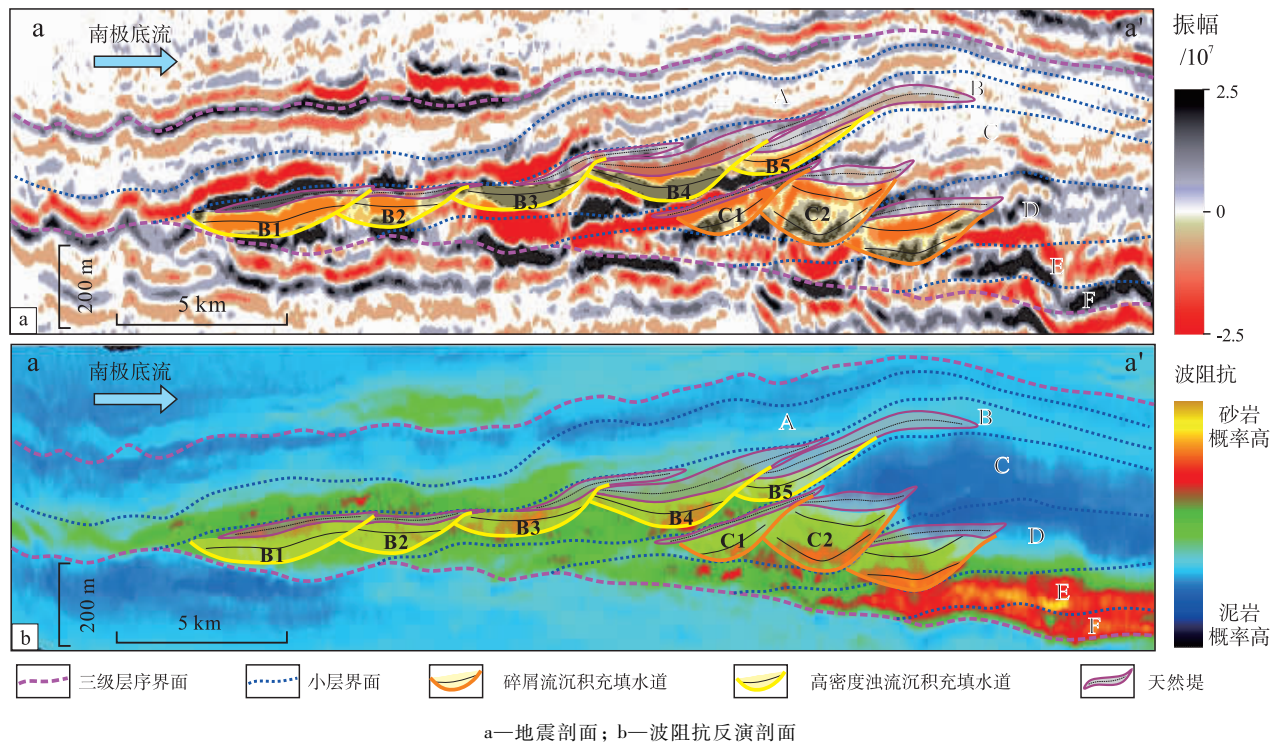


图 11 东非鲁伍马盆地始新统切物源剖面单一水道分布 (剖面位置见图 12)

Fig. 11 Distribution of single channels in the cross-source profile of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa (profile location is shown in Fig. 12)

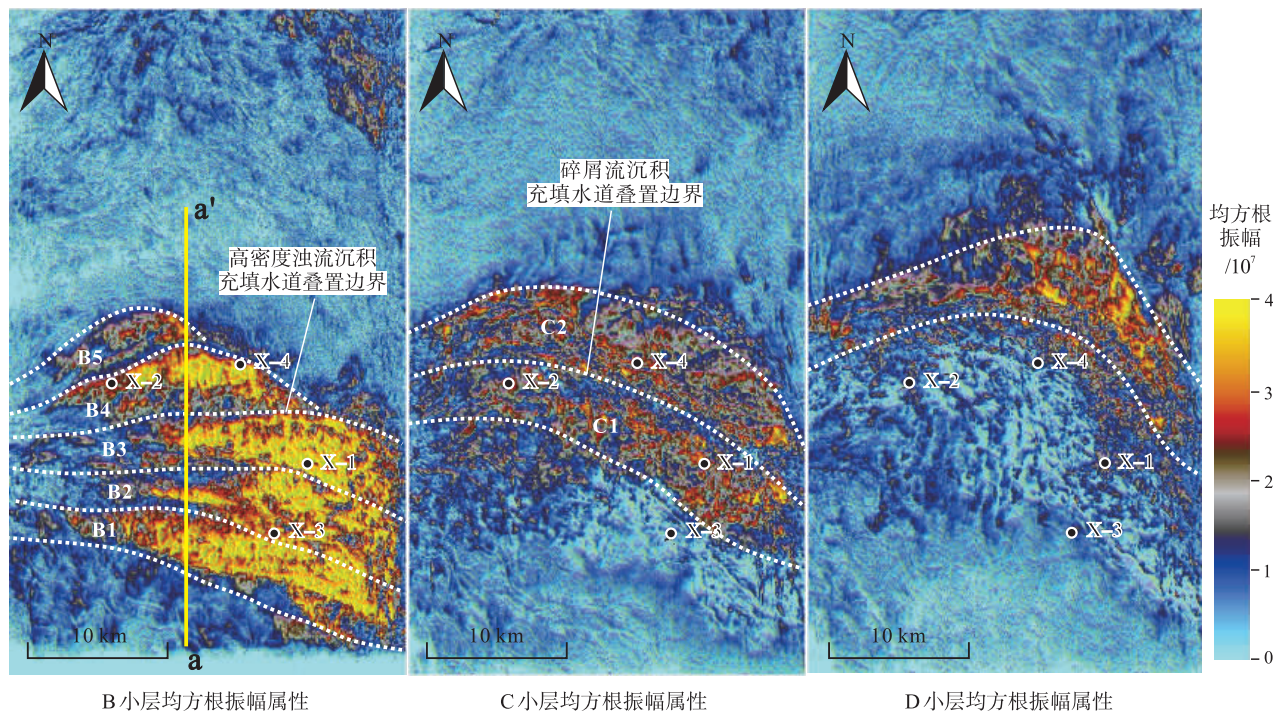


图 12 东非鲁伍马盆地始新统单一水道平面分布特征

Fig. 12 Plane distribution characteristics of single channels of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa

盆地始新统中期峡谷弱限制性水道复合体(D-B 小层)内部识别出 8 期不同类型的单一水道。其中,

碎屑流沉积充填水道分布在 C-D 小层中, 自下而上共发育 3 期(分别为 D、C2 和 C1)(图 11), 高

密度浊流沉积充填水道主要分布在 B 小层中, 自下而上共发育 5 期(分别为 B5、B4、B3、B2 和 B1)(图 11)。下面将进一步阐述底流差异改造作用下不同单一水道的分布特征。

3.1 单一水道的形态及规模

东非鲁伍马盆地始新统地震均方根振幅属性图显示, 碎屑流沉积充填水道(D-C1 水道)在平面上主要呈弯曲条带状(图 12), 水道宽度平均约为 5 km, 而高密度浊流水道可呈弯曲条带状(B5-B4 水道)和顺直状(B3-B1 水道)2 种平面形态(图 12), 宽度平均约为 3.5 km。剖面上, 2 种类型单一水道都由水道主体部位及其顶部天然堤所组成(图 11), 但 2 种单一水道的剖面形态却存在较大的差异。具体表现为: 碎屑流沉积充填水道的宽深比相对较低, 水道顶部天然堤的厚度薄、发育程度低。通过对单一水道-天然堤的不对称指数(定义如图 13-a)进行统计, 结果显示碎屑流沉积充填水道的不对称指数介于 1.2~1.5 之间, 平均约为 1.35(图 14), 不对称性相对较弱。然而, 高密度浊流沉积充填水道具有较高的宽深比, 其顶部的天然堤发育程度更高, 厚度也相对更大, 延伸也更远, 水道-天然堤的不对称性更强, 不对称指数多介于 1.7~3.5 之间, 平均约为 2.5(图 14)。说明底流虽然对于 2 种单一水道均具有一定的改造作用, 但对高密度浊流沉积充填水道的改造程度要高于碎屑流沉积充填水道。在底流较强的搬运下, 高密度浊流沉积充填水道顺底流一侧的天然堤发育程度要远高于迎底流一侧, 形成侧向漂积体, 使得水道-天然堤不对称性更强。

3.2 单一水道的叠置样式

切物源地震剖面显示, 碎屑流沉积充填水道(C1-D 水道)及高密度浊流沉积充填水道(B5-B1 水道)之间, 自下而上均呈逆底流方向侧向迁移叠置的特征(图 11)。这主要由于水道-天然堤的不对称性形态, 导致顺底流一侧天然堤的发育程度要高于迎底流一侧, 且延伸更远, 使得晚期水道在北侧单向强限制作用下, 向限制性较弱的南侧迁移, 形成逆底流方向迁移叠置的样式。对研究区不同位置切物源剖面上单一水道之间迁移指数(定义如图 13-b)的统计结果表明, 高密度浊流沉积充填水道之间的迁移指数多介于 0.65~0.95 之间,

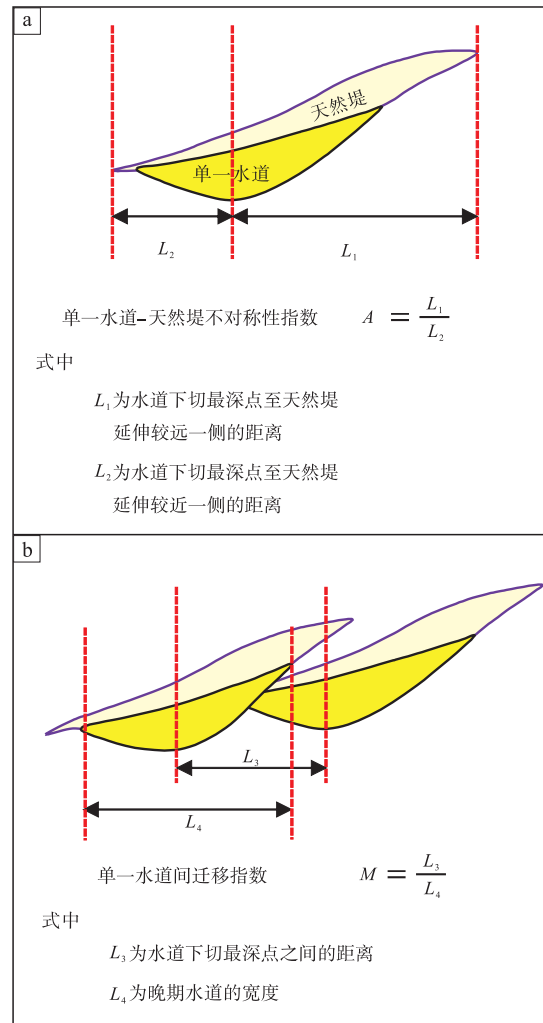


图 13 单一水道-天然堤不对称指数 (a) 及单一水道间迁移指数 (b) 的计算示意图

Fig. 13 Schematic diagram for calculating the single channel-levee asymmetry index (a) and inter-channel migration index (b)

平均约为 0.8; 而碎屑流沉积充填水道之间的迁移指数相对较小, 介于 0.55~0.70 之间, 平均约为 0.65(图 14), 说明高密度浊流沉积充填水道之间的侧向迁移程度要高于碎屑流沉积充填水道。

4 讨论

4.1 底流对不同单一水道的差异改造机制

前人针对鲁伍马盆地海底扇水道的研究表明, 重力流上部的细粒物质在海底底流的剪切作用下被持续搬运至水道北侧, 导致水道-天然堤体系表现为不对称分布及逆底流方向(向南)侧向迁移的特征(陈宇航等, 2017; Fonnesu *et al.*, 2020; Fu-

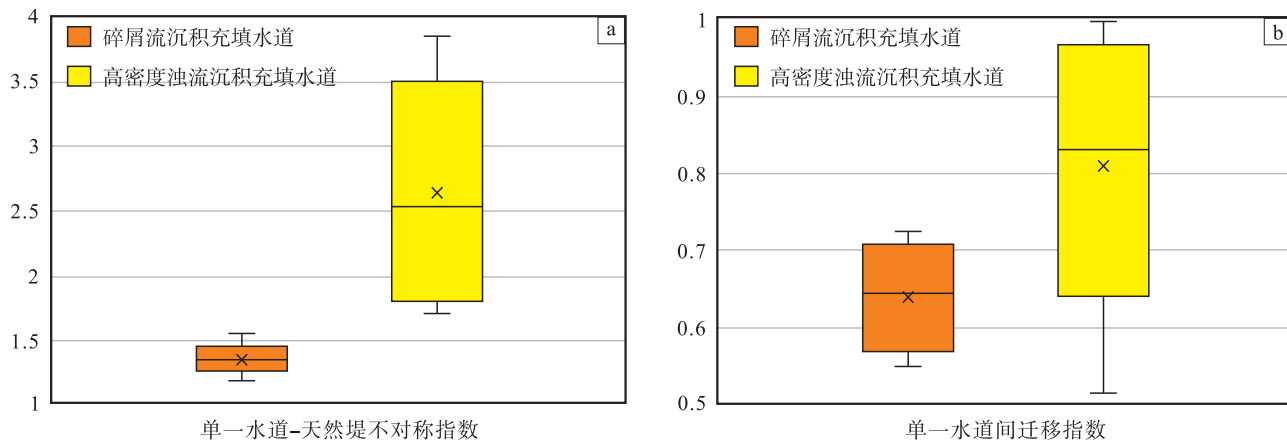


图 14 东非鲁伍马盆地始新统单一水道—天然堤不对称指数 (a) 及水道间迁移指数 (b) 定量统计图

Fig. 14 Quantitative statistical chart of single channel-levee asymmetry index (a) and inter-channel migration index (b) of the Eocene in Rovuma Basin, East Africa

hrmann *et al.*, 2020; 张佳佳等, 2023), 但并未关注到不同流体成因的水道在底流改造过程中的响应差异。本研究表明底流对研究区不同类型单一水道均存在一定程度的改造, 水道—天然堤的形态及叠置样式总体与前人认识相符, 同时还进一步明确了底流改造下不同单一水道分布特征的差异, 即高密度浊流沉积充填水道的不对称性与迁移程度要高于碎屑流沉积充填水道, 这种差异分布可能是不同重力流体系统变特性与底流剪切应力相互作用的结果。

东非鲁伍马盆地始新统碎屑流沉积充填水道形成于海退—低位域早期 (张佳佳等, 2023), 与此同时“窄陆架、陡陆坡”导致物源的供给速率较高, 使得短时间内大量粗碎屑 (砾石、砂质) 快速搬运、堆积, 形成以砂质碎屑流为主的水道沉积。其沉积物粒度较粗 (以中砂及以上的颗粒为主), 在搬运过程中具有塑性流体特征, 呈层流状态, 高浓度颗粒相互摩擦碰撞产生的超孔隙水压力和细粒基质的黏结力 (Shanmugam, 1996; 裴羽等, 2015; 金杰华等, 2019), 使得其具备较高的抗剪强度 (王德坪, 1991; 李相博等, 2011)。因此, 底流能量仅能对砂质碎屑流沉积物表层进行有限的剪切改造, 而无法破坏流体的整体结构。这种特性导致底流对其改造过程可能以“原地淘洗”为主, 水道内部透镜状分布具牵引构造的岩相, 而碎屑流沉积充填水道在底流影响下沉积形态未发生较大改变, 并未像研究区高密度浊流沉积充填水道呈现较强的不对称分布特征。此外, 鲁伍马盆地“窄陆架、陡陆坡”快速高效的沉积物搬运背景,

也使得砂质碎屑流被剪切稀释的窗口期大大缩短, 导致研究区碎屑流沉积充填水道中天然堤或侧向漂积体的发育程度相对较低。

相较于碎屑流沉积充填水道, 高密度浊流沉积充填水道形成于海退—低位域晚期 (张佳佳等, 2023), 前期沉积物的充填使得研究区坡度相对变缓, 导致物源的供给速率相对降低, 颗粒有足够时间与水体混合形成悬浮液, 从而在搬运过程中具备浊流的流变学特征。流体中上部呈紊流状态悬浮搬运 (Lowe, 1982; Postma *et al.*, 1988), 颗粒间缺乏黏结基质, 摩擦阻力更小, 使得其抗剪强度远低于砂质碎屑流 (王德坪, 1991), 底流剪切应力可穿透沉积物中上部, 对其进行“再搬运”。底流在改造过程中优先迁移高密度浊流沉积充填水道顶部的细粒悬浮物 (细砂、粉砂级别), 使得水道内部正递变层理截切 (缺少鲍马序列 Tb-Td 段), 这也解释了研究区高密度浊流沉积充填水道测井曲线形态呈箱型, 而非典型的钟型 (图 9)。被剥离的细粒物质沿底流方向再沉积, 形成侧向漂积体, 导致顺底流方向一侧细粒沉积的延伸范围及厚度大于迎底流一侧, 继而造就了研究区宽深比较高、不对称较强的水道—天然堤形态, 并在侧向漂积体中发育大量具牵引构造的岩相。同时, 在这种较强的单向限制作用下, 水道之间侧向迁移的程度也相对较高。此外, 这种底流对高密度浊流顶部的细粒悬浮物“再搬运”的作用方式, 在朵叶体中亦有体现。在底流作用下, 以浊流沉积充填的朵叶体被明显改造进而沿着顺底流方向偏转、侧向延伸 (罗泉源等,

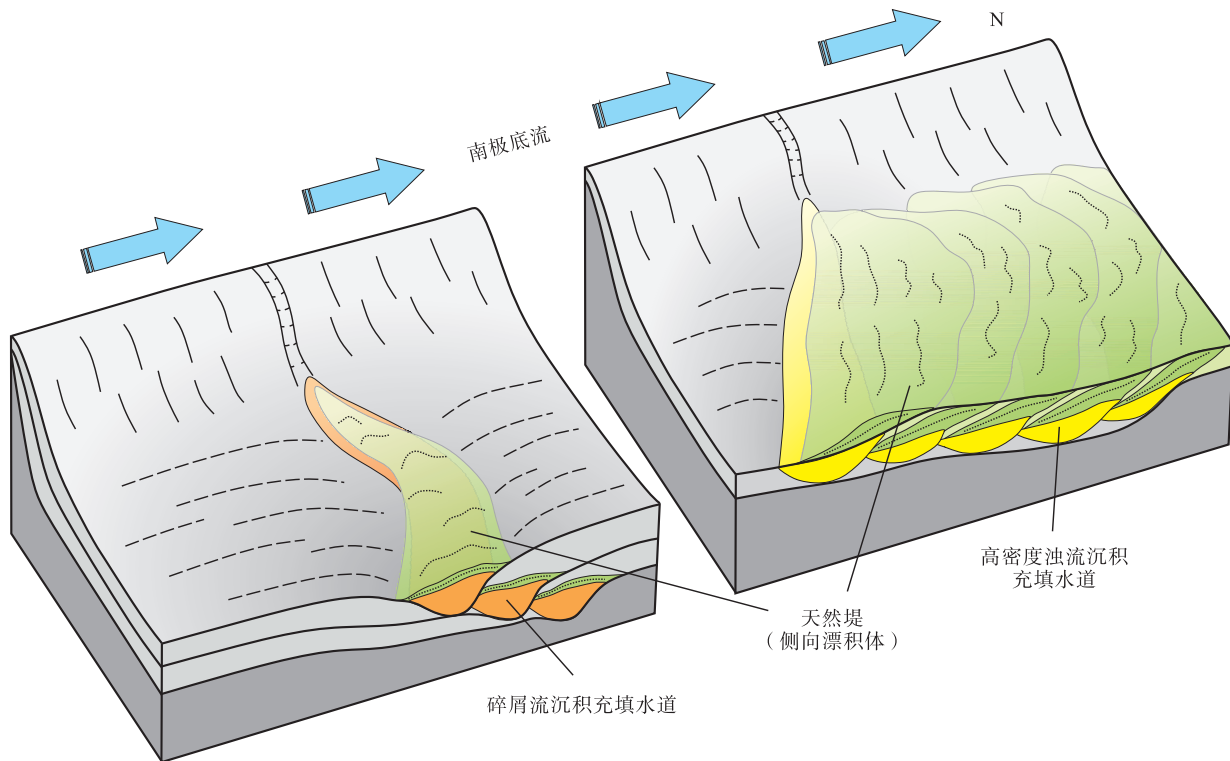


图 15 东非鲁伍马盆地始新统单一水道分布模式

Fig. 15 Distribution patterns of the Eocene single channels in Rovuma Basin, East Africa

2020; 龚承林等, 2024)。

4.2 底流差异改造作用下单一水道分布模式

在上述单一水道类型划分、分布特征及底流差异改造机制分析的基础上, 建立了东非鲁伍马盆地始新统底流改造作用下单一水道分布模式(图 15)。研究区碎屑流沉积充填水道内部由碎屑流成因岩相垂向无序排列组成, 水道顶部天然堤发育程度低, 受底流改造作用偏弱, 内部呈透镜状分布底流“原地淘洗”形成的薄层具牵引构造岩相, 水道一天然堤不对称性较弱, 水道之间逆底流方向侧向迁移叠置, 但迁移程度相对较低。高密度浊流水道由浊流形成的具递变层理的岩相垂向拼接而成, 顶部发育厚度较大的天然堤, 在底流“再搬运”作用下, 水道顺底流一侧天然堤发育程度高于迎底流一侧, 形成侧向漂积体, 增强了水道一天然堤的不对称性以及水道北侧限制程度, 使得水道逆底流方向侧向迁移程度升高。

5 结论

1) 东非鲁伍马盆地始新统深水水道沉积体系

由碎屑流、浊流、底流改造和半远洋披覆沉积 4 类成因岩相构成, 并进一步细分为 17 种亚类。结合水道内部重力流成因岩相类型占比, 可将单一水道划分为 2 种类型, 在演化序列上表现出从早期以碎屑流沉积充填为主向晚期以高密度浊流沉积充填为主的转变。

2) 碎屑流沉积充填水道多呈低宽深比的弯曲状, 天然堤薄且发育程度低。高密度浊流沉积充填水道可呈顺直状或弯曲状, 具有高宽深比, 天然堤的厚度与发育程度显著增加。在底流改造作用下, 2 类水道一天然堤系统均呈不对称分布并表现为逆底流方向的侧向迁移叠置, 其中高密度浊流沉积充填水道的不对称性与侧向迁移程度更为显著。

3) 单一水道的流变学差异主导底流改造响应, 碎屑流沉积充填水道因砂质碎屑流抗剪强度高, 使得底流对其改造作用较弱, 主要表现为水道内部的“原地淘洗”, 形成局部透镜状具牵引构造岩相, 天然堤发育程度低、水道一天然堤不对称性弱(不对称指数平均约 1.35)及逆底流侧向迁移程度低(迁移指数平均为 0.65); 相反, 高密度浊流沉积充填水道因高密度浊流抗剪强度低, 底流对

悬浮细粒物质整体“再搬运”,在顺底流一侧形成侧向漂积体,增强了水道—天然堤的不对称性(不对称指数平均约2.5)以及水道北侧限制程度,进而导致其逆底流方向的侧向迁移程度升高(迁移指数平均为0.8)。

致谢 衷心感谢《古地理学报》编辑部编辑老师和3位审稿专家提出的宝贵意见和建议,使本文得以不断完善。

参考文献 (References)

- 曹全斌,曹旭文,鲁银涛,陈宇航,闫春,许小勇,王朝锋. 2021. 东非鲁伍马盆地深水沉积体系及油气勘探意义. 海洋地质与第四纪地质, 41(2): 173–180. [Cao Q B, Cao X W, Lu Y T, Chen Y H, Yan C, Xu X Y, Wang Z F. 2021. Deep water depositional system in Rovuma Basin, East Africa and its bearing on hydrocarbon exploration. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 41(2): 173–180]
- 陈宇航,姚根顺,吕福亮,唐鹏程,鲁银涛. 2016. 东非鲁伍马盆地深水构造—沉积演化过程及油气地质特征. 海相油气地质, 21(2): 39–46. [Chen Y H, Yao G S, Lü F L, Tang P C, Lu Y T. 2016. Tectonic-sedimentary evolution and petroleum geology characteristics in deepwater area in Rovuma Basin, East Africa. *Marine Origin Petroleum Geology*, 21(2): 39–46]
- 陈宇航,姚根顺,吕福亮,鲁银涛,陈亮,唐鹏程,曹全斌. 2017. 东非鲁伍马盆地渐新统深水水道—朵体沉积特征及控制因素. 石油学报, 38(9): 1047–1058. [Chen Y H, Yao G S, Lü F L, Lu Y T, Chen L, Tang P C, Cao Q B. 2017. Sedimentary characteristics and controlling factors of Oligocene deep-water channel-lobe in Rovuma Basin of the East Africa. *Acta Petrolei Sinica*, 38(9): 1047–1058]
- 龚承林,徐长贵,尤丽,朱一杰. 2024. 深海重力流与底流交互作用的沉积响应及其勘探意义. 矿物岩石地球化学通报, 43(4): 721–733. [Gong C L, Xu C G, You L, Zhu Y J. 2024. Depositional responses of the interaction between deep-marine gravity and bottom currents and their exploration significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43(4): 721–733]
- 金杰华,操应长,王健,杨田,周磊. 2019. 深水砂质碎屑流沉积: 概念、沉积过程与沉积特征. 地质论评, 65(3): 689–702. [Jin J H, Cao Y C, Wang J, Yang T, Zhou L. 2019. Deep-water sandy debris flow deposits: concepts, sedimentary processes and characteristics. *Geological Review*, 65(3): 689–702]
- 晋慧娟. 1999. 古代深海沉积体系遗迹化石研究. 矿物岩石地球化学通报, 18(1): 44–47. [Jin H J. 1999. Study on trace fossils in ancient deep-water sedimentary systems. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 18(1): 44–47]
- 孔祥宇. 2013. 东非鲁伍马盆地油气地质特征与勘探前景. 岩性油气藏, 25(3): 21–27. [Kong X Y. 2013. Petroleum geologic characteristics and exploration prospect in Rovuma Basin, East Africa. *Lithologic Reservoirs*, 25(3): 21–27]
- 李华,何明薇,邱春光,王英民,何幼斌,徐艳霞,何瑞武. 2023. 深水等深流与重力流交互作用沉积(2000—2022年)研究进展. 沉积学报, 41(1): 18–36. [Li H, He M W, Qiu C G, Wang Y M, He Y B, Xu Y X, He R W. 2023. Research processes on deep-water interaction between contour current and gravity flow deposits, 2000 to 2022. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1): 18–36]
- 李相博,付金华,陈启林,刘显阳,刘化清,郭彦如,完颜容,廖建波,魏立花,黄军平. 2011. 砂质碎屑流概念及其在鄂尔多斯盆地延长组深水沉积研究中的应用. 地球科学进展, 26(3): 286–294. [Li X B, Fu J H, Chen Q L, Liu X Y, Liu H Q, Guo Y R, Wan Yan R, Liao J B, Wei L H, Huang J P. 2011. The concept of sandy debris flow and its application in the Yanchang Formation deep water sedimentation of the Ordos Basin. *Advances in Earth Science*, 26(3): 286–294]
- 李相博,刘化清,张忠义,袁效奇,完颜容,牛海青,廖建波,王菁. 2014. 深水块状砂岩碎屑流成因的直接证据: “泥包砾”结构: 以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组研究为例. 沉积学报, 32(4): 611–622. [Li X B, Liu H Q, Zhang Z Y, Yuan X Q, Wan Yan R, Niu H Q, Liao J B, Wang J. 2014. “Argillaceous parcel” structure: a direct evidence of debris flow origin of deep-water massive sandstone of Yanchang Formation, Upper Triassic, the Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(4): 611–622]
- 刘飞,赵晓明,冯潇飞,葛家旺,杨莉,杨宝泉,杨希濮. 2021. 基于重力流相的深水水道分类方案研究. 古地理学报, 23(5): 951–965. [Liu F, Zhao X M, Feng X F, Ge J W, Yang L, Yang B Q, Yang X P. 2021. Research on classification of deep-water channels based on gravity flow facies. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(5): 951–965]
- 刘子玉,吕明,卢景美,吕栋,王颖,郭刚. 2017. 东非鲁伍马盆地窄陆架背景下的深水沉积体系. 海相油气地质, 22(4): 27–34. [Liu Z Y, Lü M, Lu J M, Lü D, Wang Y, Guo G. 2017. Deepwater depositional system in the background of narrow shelf in the Ruvuma Basin, Eastern Africa. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(4): 27–34]
- 罗泉源,焦祥燕,刘昆,李安琪,宋鹏. 2020. 乐东—陵水凹陷梅山组海底扇识别及沉积模式. 海洋地质与第四纪地质, 40(2): 90–99. [Luo Q Y, Jiao X Y, Liu K, Li A Q, Song P. 2020. Identification of submarine fan in the Meishan Formation of the Ledong-Lingshui Sag in the Qiongdongnan Basin and its depositional model. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(2): 90–99]
- 裴羽,何幼斌,李华,肖彬. 2015. 高密度浊流和砂质碎屑流关系的探讨. 地质论评, 61(6): 1281–1292. [Pei Y, He Y B, Li H, Xiao B. 2015. Discuss about relationship between high-density turbidity current and sandy debris flow. *Geological Review*, 61(6): 1281–1292]
- 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]
- 王德坪. 1991. 湖相内成碎屑流的沉积及形成机理. 地质学报, 65(4): 299–316. [Wang D P. 1991. The sedimentation and formation mechanism lacustrine endogenic debris flow. *Acta Geologica Sinica*, 65(4): 299–316]
- 王敏,张佳佳,王瑞峰,徐庆岩,文思颖,曹全斌,余季陶,王黎. 2022. 东非鲁伍马盆地深水海底扇储集层质量差异及主控因素. 石油勘探与开发, 49(3): 491–501. [Wang M, Zhang J J, Wang R F,

- Xu Q Y, Wen S Y, Cao Q B, Yu J T, Wang L. 2022. Quality variations and controlling factors of deepwater submarine-fan reservoirs, Rovuma Basin, East Africa. *Petroleum Exploration and Development*, 49(3): 491–501]
- 王铸坤, 李宇志, 操应长, 王艳忠, 杨田, 赵博. 2017. 渤海湾盆地东营凹陷永北地区沙河街组三段砂砾岩粒度概率累积曲线特征及沉积环境意义. *石油与天然气地质*, 38(2): 230–240. [Wang Z K, Li Y Z, Cao Y C, Wang Y Z, Yang T, Zhao B. 2017. Probability cumulative grain-size distribution curves and their implications for sedimentary environment identification of coarse clastic rocks of the Es³ in Yongbei area, the Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Oil and Gas Geology*, 38(2): 230–240]
- 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]
- 袁静, 杨学君, 路智勇, 陈武杰, 樊海琳, 袁凌荣. 2011. 东营凹陷盐 22 块沙四上亚段砂砾岩粒度概率累积曲线特征. *沉积学报*, 29(5): 815–824. [Yuan J, Yang X J, Lu Z Y, Chen W J, Fan H L, Yuan L R. 2011. Probability cumulative grain size curves in sandy conglomerate of the Upper Es₄ in Yan 22 Block, Dongying Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(5): 815–824]
- 张光亚, 刘小兵, 赵健, 温志新, 张荻荻, 王兆明, 张磊, 马锋, 陈曦. 2018. 东非被动大陆边缘盆地演化及大气田形成主控因素: 以鲁武马盆地为例. *地学前缘*, 25(2): 24–32. [Zhang G Y, Liu X B, Zhao J, Wen Z X, Zhang D Q, Wang Z M, Zhang L, Ma F, Chen X. 2018. Passive continental margin basin evolution of East Africa and the main controlling factors of giant gas fields: an example from the Rovuma Basin. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 24–32]
- 张佳佳, 吴胜和, 王瑞峰, 王敏, 陈梅, 王晓丰, 徐庆岩, 熊绮聪, 余季陶, 王黎. 2023. 东非鲁伍马盆地深水 X 气藏海底扇储层构型研究: 重力流—底流交互作用的指示意义. *古地理学报*, 25(1): 163–179. [Zhang J J, Wu S H, Wang R F, Wang M, Chen M, Wang X F, Xu Q Y, Xiong Q C, Yu J T, Wang L. 2023. Submarine-fan reservoir architecture of deepwater gasfield X in Rovuma Basin offshore East Africa: insights for the interaction between sediment gravity flows and bottom currents. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(1): 163–179]
- Bouma A H. 1962. *Sedimentology of Some Flysh Deposits: a Graphic Approach to Facies Interpretation*. Elsevier.
- 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(3): 241–269.
- Chen M, Wu S H, Wang R F, Zhang J J, Xie P F, Wang M, Wang X F, Yu J T, Xiong Q C. 2024. Sedimentary architecture of submarine channel-lobe systems under different seafloor topography: insights from the Rovuma Basin offshore East Africa. *Petroleum Science*, 21(1): 125–142.
- 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): 140–1–140–3.
- 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.
- Frey R W, Howard J D, Pryor W A. 1978. Ophiomorpha: its morphologic, taxonomic, and environmental significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 23: 199–229.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lowe D R. 1982. Sediment gravity flows; II, depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Research*, 52(1): 279–297.
- Luan X W, Lu Y T, Fan G Z, Ran W M. 2021. Deep-water sedimentation controlled by interaction between bottom current and gravity flow: a case study of Rovuma Basin, East Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 180: 104228.
- Mayall M, Jones E, Casey M. 2006. Turbidite channel reservoirs: key elements in facies prediction and effective development. *Marine and Petroleum Geology*, 23(8): 821–841.
- Miramontes E, Eggenhuisen J T, Jacinto R S, Poneti G, Pohl F, Normandeau A, Campbell D C, Hernández-Molina F J. 2020. Channel-levee evolution in combined contour current-turbidity current flows from flume-tank experiments. *Geology*, 48(4): 353–357.
- Mulder T, Faugères J C, Gonthier E. 2008. Chapter 21 Mixed turbidite-contourite systems. *Developments in Sedimentology*, 60: 435–456.
- Postma G, Nemec W, Kleinspehn K L. 1988. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. *Sedimentary Geology*, 58(1): 47–61.
- Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, Wählin A. 2014. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations. *Marine Geology*, 352: 111–154.
- Shanmugam G. 1996. High-density turbidity currents: are they sandy debris flows? *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 2–10.

(责任编辑 王绍华)