

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*

张佳佳^{1 2} 吴胜和^{1 2} 王瑞峰³ 王 敏³ 陈 梅^{1 2} 王晓丰⁴
徐庆岩³ 熊绮聪^{1 2} 余季陶^{1 2} 王 黎³

1 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249

3 中国石油勘探开发研究院,北京 100083

4 中国石油莫桑比克公司,北京 100034

摘 要 底流在陆缘深水环境下广泛存在,可对深水沉积过程及砂体分布产生重要影响。前人对重力流与底流的交互作用机制及沉积产物开展了大量研究,但目前有关底流改造型的海底扇储层构型模式仍然研究不够深入。东非鲁伍马盆地是当前重力流—底流交互作用研究的热点地区,文中以其代表性的下始新统海底扇水道体系为例,综合岩心、测井及三维地震资料开展储层构型精细表征,建立重力流—底流交互作用下的海底扇水道体系构型模式。研究表明,目标水道体系内部发育水道、溢岸及朵叶 3 种构型要素,其中水道可分为水道复合体、单一水道及其内部不同级次的构型单元。底流对细粒物质的搬运可形成非对称的溢岸沉积,导致水道复合体之间呈逆底流侧向迁移叠置样式,其间泥岩隔层容易保存;单一水道之间呈顺水道纵向迁移或逆底流侧向迁移样式,其中纵向迁移部位水道切叠连通,而侧向迁移部位容易保存泥质侧向隔挡体。受重力流沉积演化的影响,单一水道内部充填由砂泥交互型逐渐演化为富砂型,且在水道弯曲段的轴部砂体最为发育。

关键词 鲁伍马盆地 海底扇 水道体系 储层构型 重力流 底流

第一作者简介 张佳佳,男,1990 年生,博士,中国石油大学(北京)地球科学学院讲师,主要从事油气田储层非均质机理与精细化表征的研究工作。E-mail: zhangjiajia0103@cup.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

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

ZHANG Jiajia^{1 2} WU Shenghe^{1 2} WANG Ruifeng³ WANG Min³ CHEN Mei^{1 2} WANG Xiaofeng⁴
XU Qingyan³ XIONG Qicong^{1 2} YU Jitao^{1 2} WANG Li³

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

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

* 国家自然科学基金(编号: 42002112, 42272110), 中石油与中国石油大学(北京)战略合作课题(编号: ZLZX2020-02) 以及中国石油大学(北京)拔尖人才科研启动基金(编号: 2462022BJRC006) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42002112, 42272110), the Strategic Cooperation Technology Projects of CNPC and CUPB (No. ZLZX2020-02), and the Science Foundation for Youth Scholars of China University of Petroleum (Beijing) (No. 2462022BJRC006)]

收稿日期: 2022-07-25 改回日期: 2022-08-19

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

4 CNODC Mozambique Ltd., Company, Beijing 100034, China

Abstract Bottom currents are common phenomenon in the deepwater setting of continental margins, which have important impacts on the deepwater sedimentary process and sandstone distribution. Extensive studies have been focused on the mechanisms and sedimentary products of gravity flow-bottom current interaction, but it remains much unknown regarding the submarine-fan reservoir architecture model modified by bottom currents. The Rovuma Basin offshore East Africa is a typical region to study the interaction between sediment gravity flows and bottom currents. Taking the representative submarine channel systems from the Lower Eocene as an example, this paper characterizes the reservoir architecture by integrating cores, well logs and 3D seismic data, with an aim to establish the submarine channel architecture model under interaction of sediment gravity flows with bottom currents. Results show that the target channel system developed three types of architectural elements, channel, overbank, and lobe, where channel deposits contain channel complexes, individual channels, and other smaller hierarchical units. Fine-grained materials could be transported by bottom currents forming asymmetrical distribution of overbanks deposits. This forced channel complexes to migrate laterally against bottom currents, with shale barriers easily preserved. Individual channels show downstream migration or lateral migration against bottom currents. In downstream migration, channels incised each other forming good sand connectivity, while inclined shale baffles may develop in lateral migration. As influenced by sediment gravity flows, individual channel-fills evolved from mixed sand-shale to sand-prone channels, and in the mapview sandbodies are mostly distributed in the axis of channel bends.

Key words Rovuma Basin, submarine fan, channel system, reservoir architecture, gravity flow, bottom current

About the first author ZHANG Jiajia, born in 1990, is a lecturer at College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in the study of mechanism and characterization of oilfield reservoir heterogeneity. E-mail: zhangjiajia0103@cup.edu.cn.

深水重力流与底流交互作用是当今世界深水沉积研究的热点领域。在深水陆坡背景下不仅发育顺陆坡向下搬运的沉积物重力流,还可存在平行陆坡搬运的底流,两者方向近于垂直,且相互作用过程复杂,可对海底扇沉积特征产生重要影响。前人在中国南海等地的深水陆坡环境下发现了特殊的顺底流方向单向迁移的水道沉积,这被认为是重力流—底流交互作用形成的沉积产物 (Gong *et al.*, 2013, 2018; 李华等, 2014)。然而,来自东非陆架边缘的最新研究证实,深水单向迁移水道主要表现为逆底流方向侧向迁移 (Palermo *et al.*, 2014; 陈宇航等, 2016; Chen *et al.*, 2020; Fonnese *et al.*, 2020),这也引发了学术界关于重力流—底流交互作用机理的深入探讨。例如,近年来国外学者通过水槽沉积模拟实验、深海底流监测等手段研究了重

力流—底流交互作用的沉积产物与形成机理 (Fuhrmann *et al.*, 2020; Miramontes *et al.*, 2020),深化了该领域的研究认识。然而,现有研究更多关注了重力流—底流交互作用控制下的海底扇水道宏观沉积模式及其砂体分布特征,而关于底流对不同级次水道构型叠置样式的差异影响研究较少,因而限制了重力流—底流交互作用过程的理论认知。另一方面,开展多级次的海底扇沉积构型模式研究对于分析砂体连通性及指导深水油气勘探开发同样具有重要的实际意义。

近年来,在东非鲁伍马盆地深水区陆续发现了多个大型的海底扇气田 (孔祥宇, 2013; 曹全斌等, 2018; 张光亚等, 2018; 王敏等, 2022),引起了学术界与工业界的广泛关注。鲁伍马盆地的海底扇沉积受底流的改造作用较为明显,发育特殊的

沉积模式 (陈宇航等, 2016; Fonnesu *et al.*, 2020), 对深入认识重力流—底流交互作用过程具有重要的指示意义。选取鲁伍马盆地具有代表性的始新统 X 气藏为研究对象, 综合研究区丰富的岩心、测井及三维地震资料开展海底扇储层构型精细表征, 以期阐明目标气藏内部的砂体连通特征, 并建立重力流—底流交互作用控制的海底扇沉积构型模式。

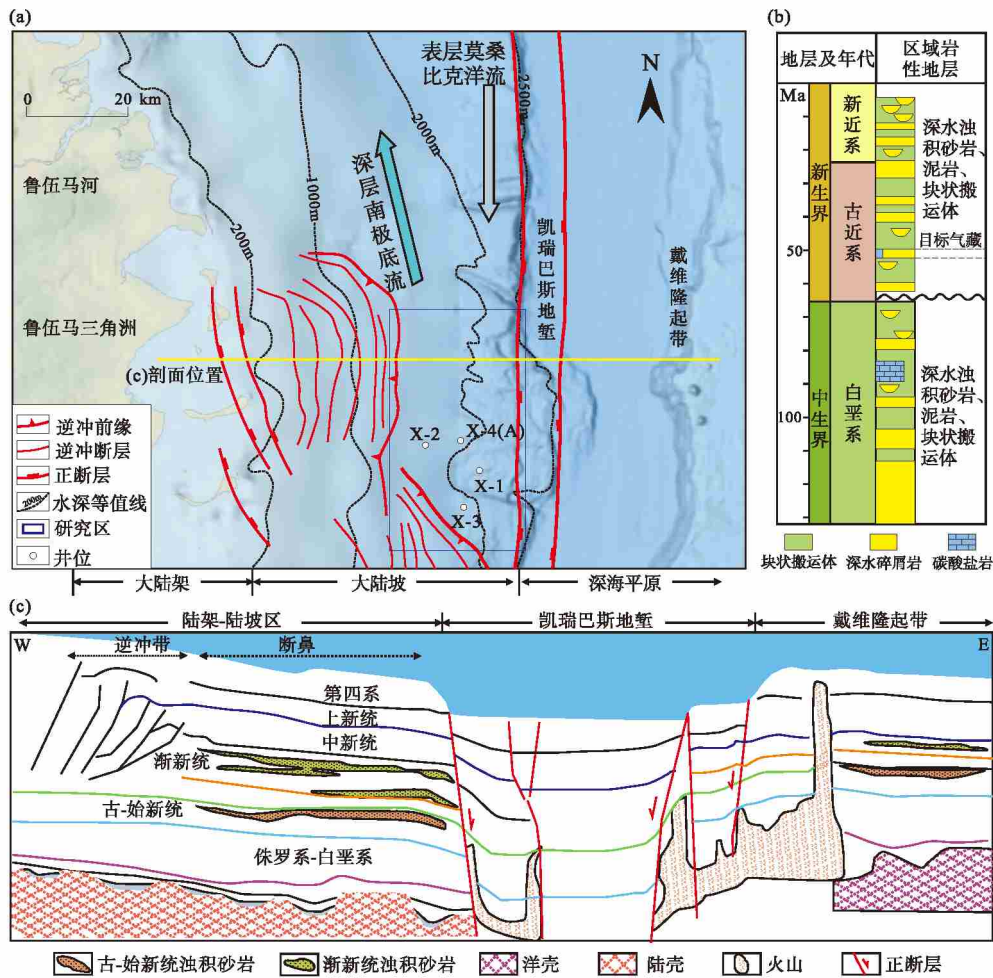
1 研究区概况

1.1 地质背景

东非鲁伍马盆地位于莫桑比克东北部和坦桑尼亚东南部(图 1-a), 是东非被动大陆边缘的主要含油气盆地之一 (张光亚等, 2018)。鲁伍马盆地呈南窄北宽的纵向展布, 具有“陆架窄 (5 ~

30 km)、陆坡陡 (3°~5°)”的特点。盆地深水区自西向东可划分为 3 个构造带, 分别是陆坡逆冲构造带、凯瑞巴斯地堑带及戴维隆起带(图 1-a, 1-c)。研究区位于东非莫桑比克北部海岸线以东约 80 km 处, 面积约 1500 km², 水深约 1500~2000 m, 构造上处于西侧逆冲带与东侧地堑带之间的过渡区域, 构造简单, 为油气的保存创造了条件。

鲁伍马盆地沉积了侏罗系、白垩系、古近系、新近系及第四系的连续地层(图 1-b, 图 2-a), 其中古近系是盆地深水区主要的含气层段 (张光亚等, 2018; Fonnesu *et al.*, 2020; 王敏等, 2022)。自古新世以来, 鲁伍马三角洲沉积不断向海推进, 大量沉积物重力流顺陆坡由西向东搬运至深水区, 形成大规模的海底扇沉积储集层。现今莫桑比克陆架边缘受到自北向南流动的表层莫桑比克洋流及漩涡的影响, 而在深水区存在沿陆坡走向自南向北流



b—据 Fonnesu *et al.*, 2020; c—修改自张光亚等, 2018

图 1 东非鲁伍马盆地区域地质背景

Fig. 1 Regional geological background of Rovuma Basin in East Africa

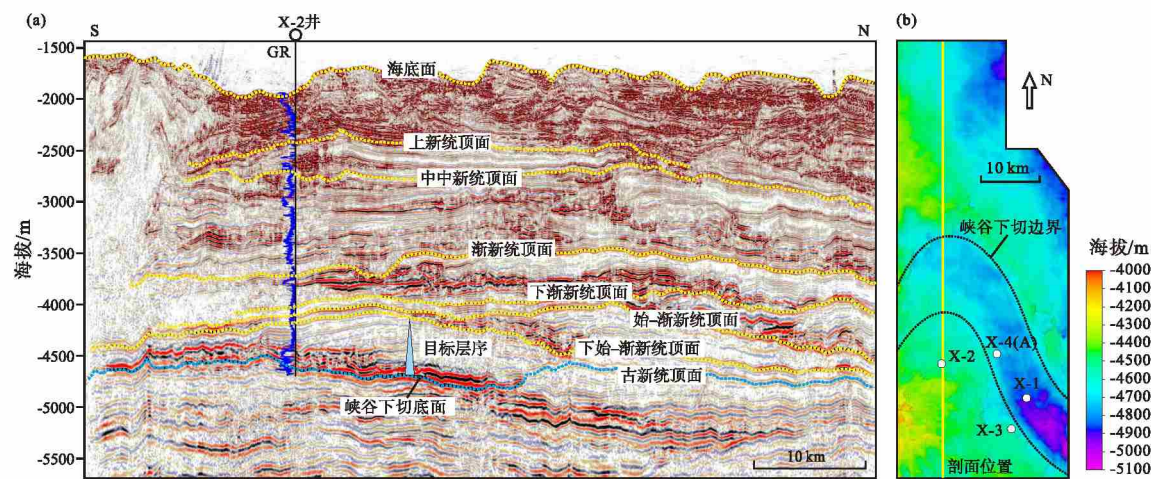


图 2 鲁伍马盆地研究区区域地震剖面 (a) 与目的层序底面构造等值线图 (b)

Fig. 2 Regional seismic profile (a) and structural map of basal boundary of target sequence (b) in the study area of Rovuma Basin

动的南极底流(图 1-a) (de Ruijter *et al.*, 2002; Breitzke *et al.*, 2017)。海底实测数据显示, 深层南极底流的流速平均 0.2 ~ 0.4 m/s, 最大可达 1.2 m/s (Fuhrmann *et al.*, 2020)。相比于事件性的沉积物重力流, 底流在地质历史时期为长期、准稳态存在的, 其运动方向与沉积物重力流近于垂直, 可对海底扇沉积特征产生一定的改造作用。

研究区目的层段为下始新统的完整三级层序, 海底面以下埋深 2200~2500 m。层序底界面为一个大型的峡谷下切面, 其上部地层呈明显的上超接触关系(图 2-a)。该海底扇水道体系在空间上呈近东西走向的弯曲宽条带状, 平面宽度可达 10 ~ 20 km, 下切深度超过 500 m, 其内部净砂体厚度近 400 m (图 2-b)。

1.2 资料方法

研究区目前已钻 5 口探井/取心井, 平均井距超过 5 km。其中, 取心井 2 口 (X-1 井、X-2 井), 累计取心长度约 145 m, 有系统的岩心照片。自然伽马、电阻率、声波时差、密度、中子等各类

测井曲线齐全, 可满足单井岩性识别与井震标定。

研究区有深度域的近角道集、中角道集、远角道集以及三维叠后地震资料, 其覆盖面积约 2500 km²。地震平面采样精度为 25 m×12.5 m, 垂向采样率为 3 ms。对于下始新统目的层段, 不同类型地震资料的主频及垂向分辨率存在差异(表 1), 其中, 近角道集地震能较好反映等时地层分布, 而远角道集地震能较好反映砂体(尤其厚砂体)分布。前人利用不同角道集的地震资料, 采用基于模型的限制稀疏脉冲反演方法得到了目的气藏的波阻抗反演数据体 (Cavanna *et al.*, 2014)。通过井震概率统计分析认为, 该反演数据体总体上能较好地区分砂泥岩, 波阻抗越大, 砂岩概率越高(图 3)。

采用“井震结合、层次约束、多维互动”的海底扇储层构型表征思路 (赵晓明等, 2012), 综合以上的岩心、测井及三维地震资料, 分水道复合体和单一水道 2 个级次依次开展井间砂体构型表征。为充分挖掘地震信息, 综合了地震波形分析、地震属性提取 (振幅属性与相干属性)、RGB 属性融合、波阻抗岩性识别等多种地震砂体解释方法。

表 1 鲁伍马盆地研究区地震资料类型及品质

Table 1 Type and quality of seismic data in the study area of Rovuma Basin

序号	地震资料类型	目的层主频 / Hz	目的层分辨率 / m	用途
1	近角道集叠合地震	30	30	等时地层对比
2	中角道集叠合地震	25	38	地震反演
3	远角道集叠合地震	15	63	振幅属性提取与砂体解释
4	三维叠后地震	25	38	地层对比与砂体解释
5	波阻抗反演数据体	/	/	砂体解释

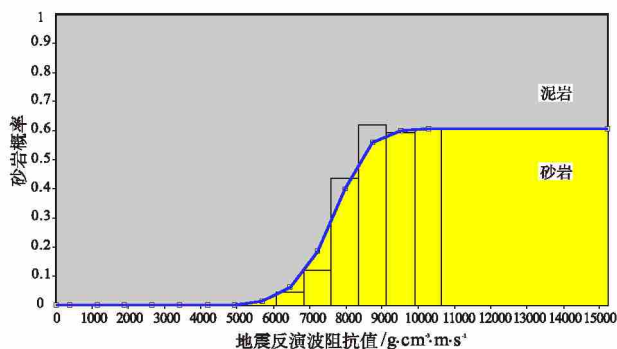
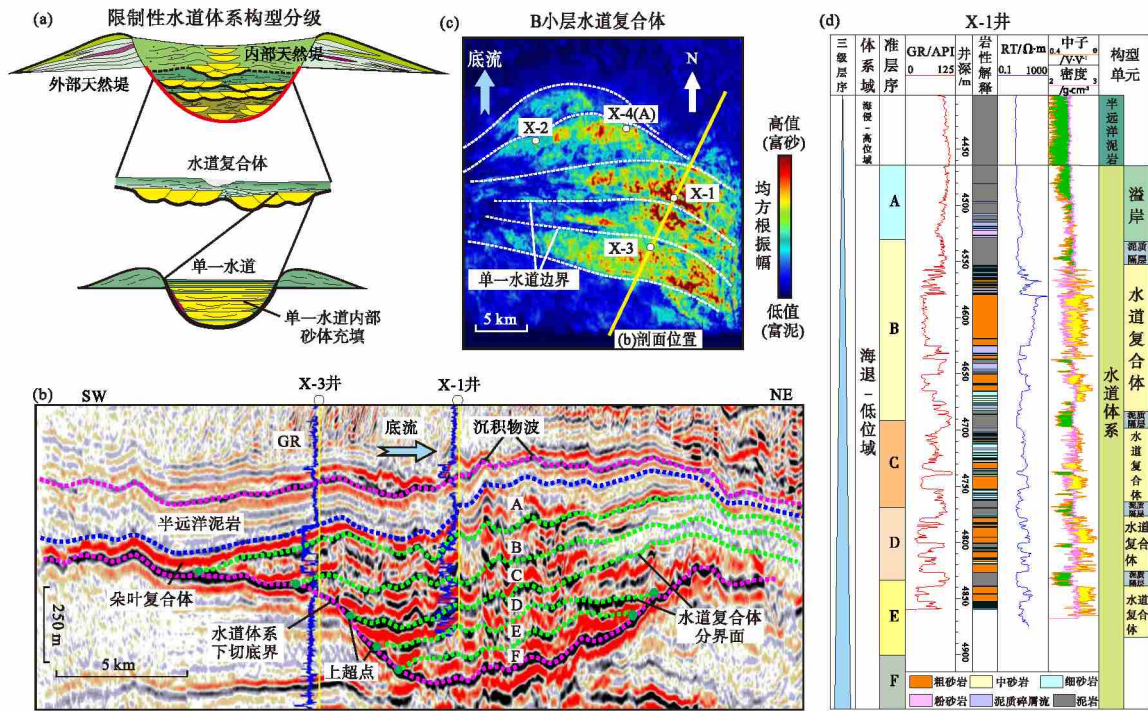


图 3 鲁伍马盆地研究区地震反演波阻抗与砂岩概率统计图

Fig. 3 Statistic plot of seismic impedance and sand probability in the study area of Rovuma Basin

2 海底扇储层构型要素类型及特征

构型要素特征识别是开展储层构型表征的基础。本节通过测井标定地震、岩心标定测井的思路,确定了海底扇水道体系内部发育水道、溢岸及朵叶体 3 类不同的构型要素,下面分别阐述不同类型构型要素的井震识别特征。



a—修改自林煜等, 2013; b—修改自王敏等, 2022

图 4 鲁伍马盆地研究区下始新统海底扇水道体系构型级次与井震响应特征

Fig. 4 Architectural hierarchy and well-to-seismic features of the Lower Eocene submarine channel systems in the study area of Rovuma Basin

2.1 水道沉积

目标水道体系主要形成于三级层序的海退—低位体系域, 而海侵—高位域主要发育稳定的半远洋泥岩(图 4-b, 4-d)。水道体系内部通常发育不同级次的水道构型单元, 根据前人分级方案 (Sprague *et al.*, 2002; Mayall *et al.*, 2006; 林煜等, 2013), 可分为水道体系、水道复合体、单一水道以及单一水道内部若干更小级次的构型单元(图 4-a)。本次研究综合地震、测井及岩心资料, 在水道体系内部识别了水道复合体和单一水道的构型特征, 现分别阐述如下。

2.1.1 水道复合体

水道体系内部一般由多期水道复合体叠置充填而成, 单期水道复合体大致对应一期准层序, 代表一期五级海平面升降旋回的产物 (Zhang *et al.*, 2018)。在地震剖面上, 水道体系内部不同期次的水道复合体之间以侧向较连续的波峰反射轴相区分 (图 4-b), 对应于测井上多期砂体之间的富泥层段 (GR 回返明显), 其厚度 5~10 m (图 4-d)。据此特征, 在地震上识别并追踪了 6 个侧向连续的波

峰反射轴,将水道体系划分为6个准层序,自上而下依次命名为A~F(图4-b,修改自王敏等,2022)。

水道复合体总体分布于水道体系中下部的B~F准层序,单期水道复合体在地震上表现为弱连续(或杂乱)、中强振幅的波状反射特征,底部下切侵蚀特征明显,对应测井上相对富砂的沉积单元(内部含泥岩夹层),垂向上呈现向上变细变薄的沉积序列,其厚度平均40~60 m,最大可达100 m(图4-d)。局部地震反射轴可见叠瓦状结构,反映了水道复合体内部更为复杂的构型组成。在准层序均方根振幅属性上(以B小层为例),水道复合体总体表现为宽条带状的中高振幅反射单元,宽度可达10 km,其内部可见多个窄条带的高振幅反射单元,代表水道复合体内部存在多个单一水道构型单元(图4-c)。

2.1.2 单一水道

水道复合体内部可由多个单一水道复合而成,单一水道是最基本的水道成因单元,具有顶平底凸的形态。在水道复合体内部,地震反射轴的分叉或

不连续现象代表了其内部多个单一水道侧向叠置的部位(图4-b);该部位的砂体厚度一般较薄,对应于RMS振幅属性图上水道复合体内部的相对低振幅响应,而单一水道轴部的砂体厚度一般较大,对应于相对较高的振幅属性(图4-c),单一水道宽度介于800~2000 m之间。

单一水道轴部在测井曲线上整体表现为箱型或钟型的形态特征,以均质序列或向上变薄变细的沉积序列为主,其水道厚度35~80 m(图5-a)。进一步根据岩心观察分析发现,单一水道内部是由多套均质或正旋回的砂体垂向拼接而成,发育富砂型的岩相组合类型。单一水道底部具有明显的侵蚀特征,发育底部滞留成因的块状砂砾岩以及泥质碎屑流成因的块状泥质不等粒砂岩(图5-a),而水道主体以厚层拼接的块状含砾粗砂岩及中粗砂岩组成,局部可见具水平层理或交错层理的中粗砂岩,可能与局部强底流的改造作用有关。

2.2 溢岸沉积

溢岸沉积一般分布于水道沉积的两侧,由水道重力流上部的相对细粒物质向水道两岸漫溢形成。

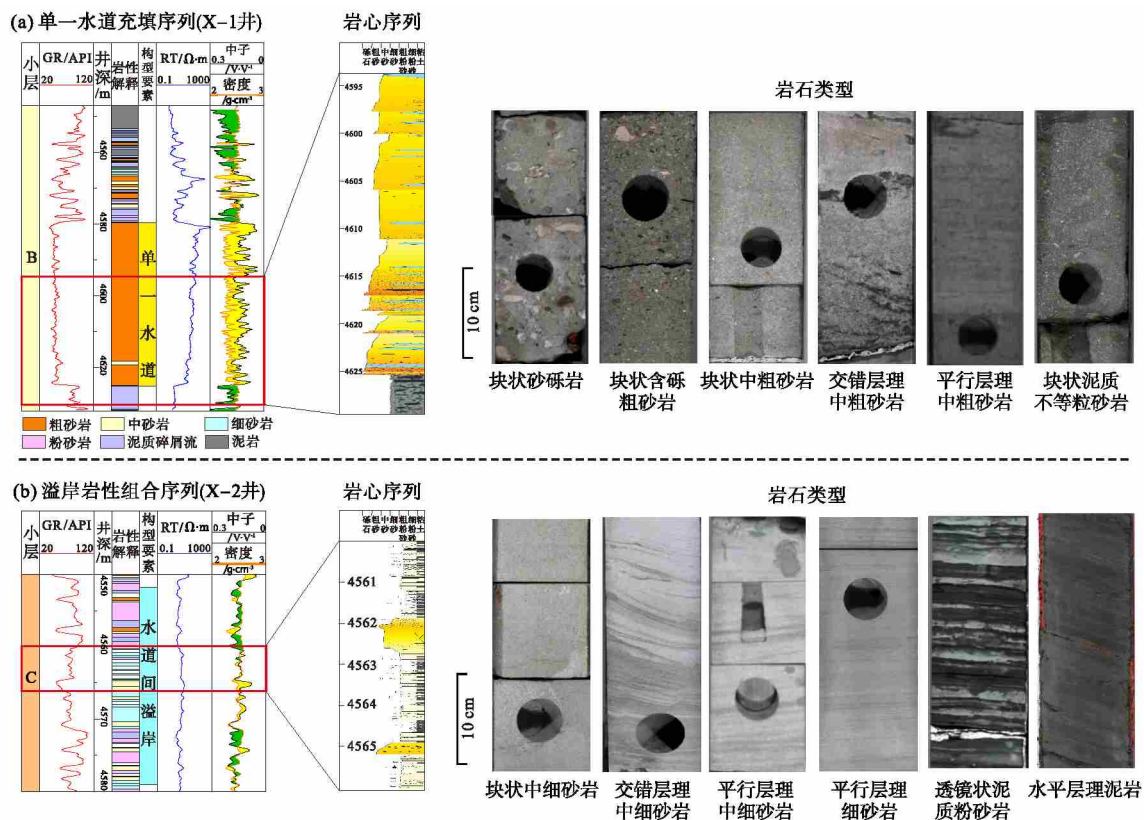


图5 鲁伍马盆地研究区下始新统水道(a)与溢岸(b)的测井及岩心响应特征

Fig. 5 Well-log and core features of channel (a) and overbank (b) deposits of the Lower Eocene in the study area of Rovuma Basin

根据溢岸沉积的分布范围及响应特征, 可以分为外部天然堤和内部天然堤两类。

外部天然堤分布于整个水道体系的顶部及两侧, 尤其在目标水道体系的北侧十分发育, 在地震剖面上呈明显的楔状形态, 厚度大, 侧向延伸距离远(图 4-b)。地震反射轴向南侧的水道方向倾斜, 具有弱振幅、中连续的结构特征, 对应测井上齿化的高 GR 段, 反映总体富泥的岩性组成, 且距离水道体系越远, 泥质含量越高。另外, 位于水道体系顶部附近的天然堤—溢岸沉积在地震上保留了明显的波状形态特征, 在平面 RMS 振幅属性图上表现为明显的波痕构造特征(图 6-a), 可解释为沉积物波。相比于浊流溢出或流体剥离成因的沉积物波(Piper and Normark, 1983; Posamentier and Kolla, 2003; Wynn and Masson, 2008), 研究区的沉积物波主要分布在水道体系的北侧, 且波痕展布呈现向北迁移(底流方向)的特征, 反映了底流对沉积物波的改造作用(Fonnesu *et al.*, 2020)。

内部天然堤分布于水道体系内部, 位于单一水道及水道复合体的两侧, 其规模总体较小, 地震反射较弱, 厚度薄, 地震剖面上不易与水道单元相区分。由于距离水道较近, 其岩性相比外部天然堤较粗, 测井曲线以锯齿状形态为主, 岩心显示其整体发育砂泥交互的岩性组合, 以块状或交错层理中细砂岩、平行层理细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩的薄互层为特征(图 5-b)。该砂泥交互的岩性组合也可出现在水道边缘及顶部等能量相对较弱的

沉积环境中。相比于水道轴部能量较强的含砾粗砂岩或中粗砂岩, 研究区较细粒的岩性(如细砂岩、粉砂岩等)普遍发育类似牵引流的层理构造, 这表明底流对细粒物质具有较明显的改造作用(Shanmugam, 2016)。

2.3 朵叶沉积

朵叶沉积一般形成于水道末端, 为沉积物重力流在相对开阔环境下快速撒开堆积而成的扇状沉积体。在研究区, 朵叶沉积主要分布于目标水道体系顶部的 A 准层序, 在地震剖面上呈席状的高振幅反射特征, 底部无明显侵蚀现象, 两侧不受水道体系下切边界的限制(图 4-b), 对应于平面上连片状的高振幅反射单元(图 6-a)。在海底扇水道体系充填的晚期, 主要表现为侧向较开阔的非限制性地形地貌特征, 因而有利于朵叶体的发育。

根据井震标定结果显示, 朵叶体整体为相对富砂的沉积构型要素, 但在不同部位的沉积序列特征有所差别。朵叶主体在自然伽马曲线上呈箱型特征, 代表整体较均质的沉积序列, 而密度、中子曲线显示, 均质沉积序列内部实际是由多个弱反旋回序列垂向组合而成的, 其间发育薄的粉—细砂或富泥质的夹层(图 6-b), 反映了朵叶体逐渐进积的沉积过程。朵叶边缘或缺口朵叶在测井曲线上呈漏斗型, 为向上变厚、变粗的反旋回序列(图 6-b), 底部为砂泥交互的岩性组合特征。

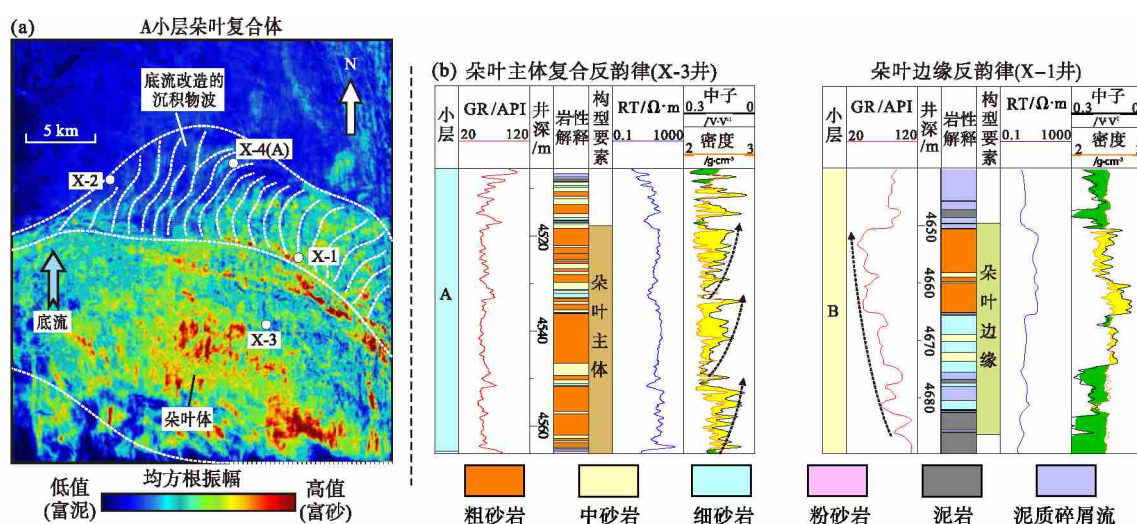


图 6 鲁伍马盆地研究区下始新统朵叶沉积的地震属性 (a) 与测井响应 (b) 特征

Fig. 6 Seismic attributes (a) and well-log features (b) of submarine lobe deposits of the Lower Eocene in the study area of Rovuma Basin

3 海底扇储层构型空间分布特征

在构型要素特征识别的基础上,进一步通过井震结合、平剖互动,分复合砂体和单一连通砂体 2 个级次,依次开展海底扇储层构型的井间预测,确定不同级次砂体构型单元的空间叠置样式及其连通关系。

3.1 复合砂体的宏观分布特征

依据复合砂体的构型识别特征,采用“垂向分期、侧向划界”的方法思路,表征水道体系内部复合砂体的空间分布。首先,在井震标定的基础上,综合地震反射剖面与波阻抗反演剖面,在水道体系内部垂向划分了 6 期复合砂体,分别对应 A—F 6 个准层序(图 7);其次,在单期复合砂体内部,根据溢岸沉积与水道(或朵叶)沉积在地震剖面及平面振幅属性图上的差异响应特征,确定复合砂体的侧向边界与平面分布(图 8)。复合砂体级次的构型表征结果表明,目标水道体系内部不同期次的复合砂体呈现出特殊的空间叠置样式与分布演化规律。

3.1.1 复合砂体的空间叠置样式

据连井地震剖面及复合砂体构型剖面图(图 7)可知,目标水道体系内部的 6 期复合砂体逐渐向南侧向迁移上超,整体表现为逆底流侧向迁移叠置样式。在地震剖面上,水道体系的南侧表现出明显的地层上超现象,多期水道复合砂体(F—B 准层序)的上超点逐渐向南迁移,至最后一期朵叶复合砂体(A 准层序)上超点消失;相比之下,水道体系的北侧主要发育大规模的楔状天然堤沉积。前人通过水槽物理模拟实验证实,底流可将相对细粒的溢岸物质搬运至水道顺底流一侧,形成不对称的天然堤—溢岸沉积(Miramontes *et al.*, 2020)。因此,受这种底流改造的影响,不同期次的复合砂体优先向地形限制程度较弱的逆底流一侧发生侧向迁移叠置。

水道体系内部多期复合砂体之间整体发育较稳定的泥岩隔层,表现为侧向较连续的波峰反射轴与低阻抗层段(图 7-a, 7-b),对应井上的泥岩隔层厚度为 5~10 m(图 7-c)。层间泥岩隔层的存在可导致不同期次的复合砂体之间垂向整体不连通或连通性很弱,这对气藏开发过程具有重要的影响。另据气藏气水分布研究表明,B 复合砂体与 C 复合砂

体的气水界面不一致,两者相差近 15~20 m,这也进一步从侧面证实了层间泥岩隔层对多期复合砂体的分隔作用。

3.1.2 复合砂体的分布演化规律

根据水道体系内部复合砂体的剖面及平面表征结果(图 7; 图 8),发现不同期次复合砂体的成因类型及分布特征存在一定的差异,整体可划分为 3 个演化阶段。

1) 早期峡谷限制性水道复合体。早期的水道复合体(F—E 准层序)整体限制在峡谷水道体系的底部,两侧与峡谷水道壁呈上超接触关系,平面上与峡谷水道形态整体一致,呈近东西走向的弯曲宽条带状(图 8)。由于受到早期峡谷水道壁的限制,水道复合体两侧的天然堤—溢岸发育程度较低或几乎不发育。前人研究认为,峡谷早期以下切侵蚀及底部滞留沉积为主,多为粗粒的砂砾岩及泥质碎屑流沉积,峡谷壁垮塌及变形构造较明显,泥质含量总体较高(Deptuck *et al.*, 2003; Mayall *et al.*, 2006; 林煜等, 2013; Zhang *et al.*, 2015, 2018)。

2) 中期峡谷半限制性水道复合体。随着早期峡谷的充填,峡谷限制性减弱,大量细粒物质可漫溢出峡谷,并由于底流的改造作用,在峡谷北侧(顺底流一侧)形成大规模的天然堤—溢岸沉积,而此时的水道复合体(D—B 准层序)仍然受到峡谷南侧水道壁的限制,并呈向南(逆底流方向)迁移上超的特征。钻井(X-1 井)资料显示,水道复合体内部以砂泥交互或砂夹泥的岩性充填为主,且向上砂质含量逐渐增加,表明水道类型逐渐由早期的侵蚀过路型水道转化为沉积充填型水道。

3) 晚期非限制性朵叶复合体。当水道体系完全被水道复合体充填后,古地貌变得较平坦开阔,此时沉积物重力流快速散开并堆积成朵叶复合体(A 准层序),其南侧不再受峡谷水道壁的限制,上超点消失,而北侧依然受到天然堤—溢岸的限制。钻井(X-1 井)资料显示朵叶复合体整体为厚层的砂岩段。

3.2 单一连通砂体空间叠置样式及连通关系

单一连通砂体是复合砂体内部单一成因的连通单元,在水道沉积中相当于单一水道级次。本节以主力含气的 B 水道复合体为例,在复合砂体构型分布的约束下,充分挖掘地震信息,进一步开展单一连通砂体(单一水道)的构型表征。

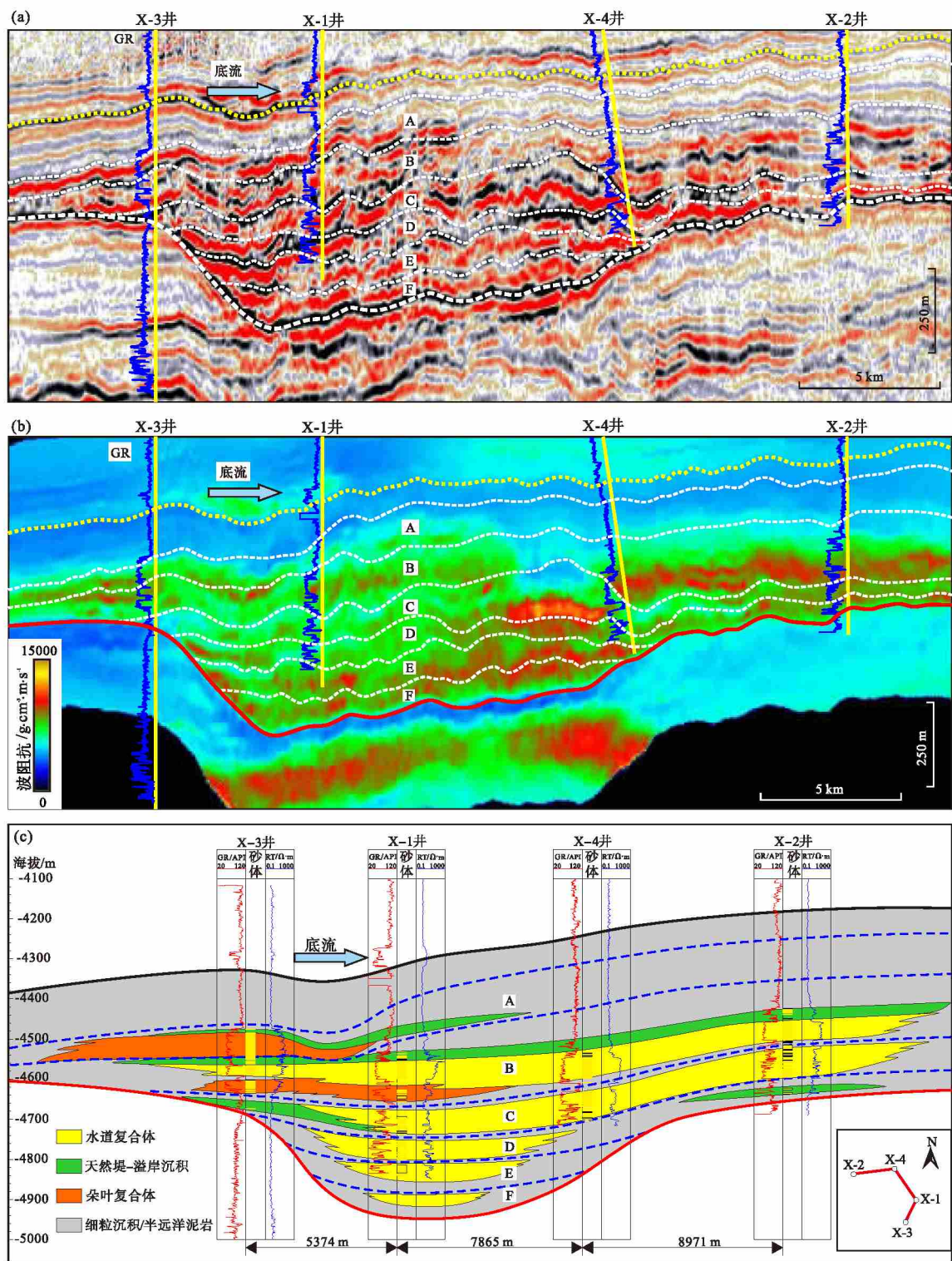


图 7 鲁伍马盆地研究区下始新统水道体系内部复合砂体构型剖面分布图

Fig. 7 Architectural section of composite sand bodies within the Lower Eocene channel system in the study area of Rovuma Basin

单一连通砂体构型表征的技术关键是如何确定水道复合体内部单一水道的侧向叠置边界, 其识别依据主要包括: (1) 地震剖面上同相轴的分叉或不

连续, 前人做过大量的地震正演模拟证实这种地震波形的侧向变化一般对应砂体的叠置部位, 可据此定性地识别单一水道边界(图 9-a, 9-b); (2) 地

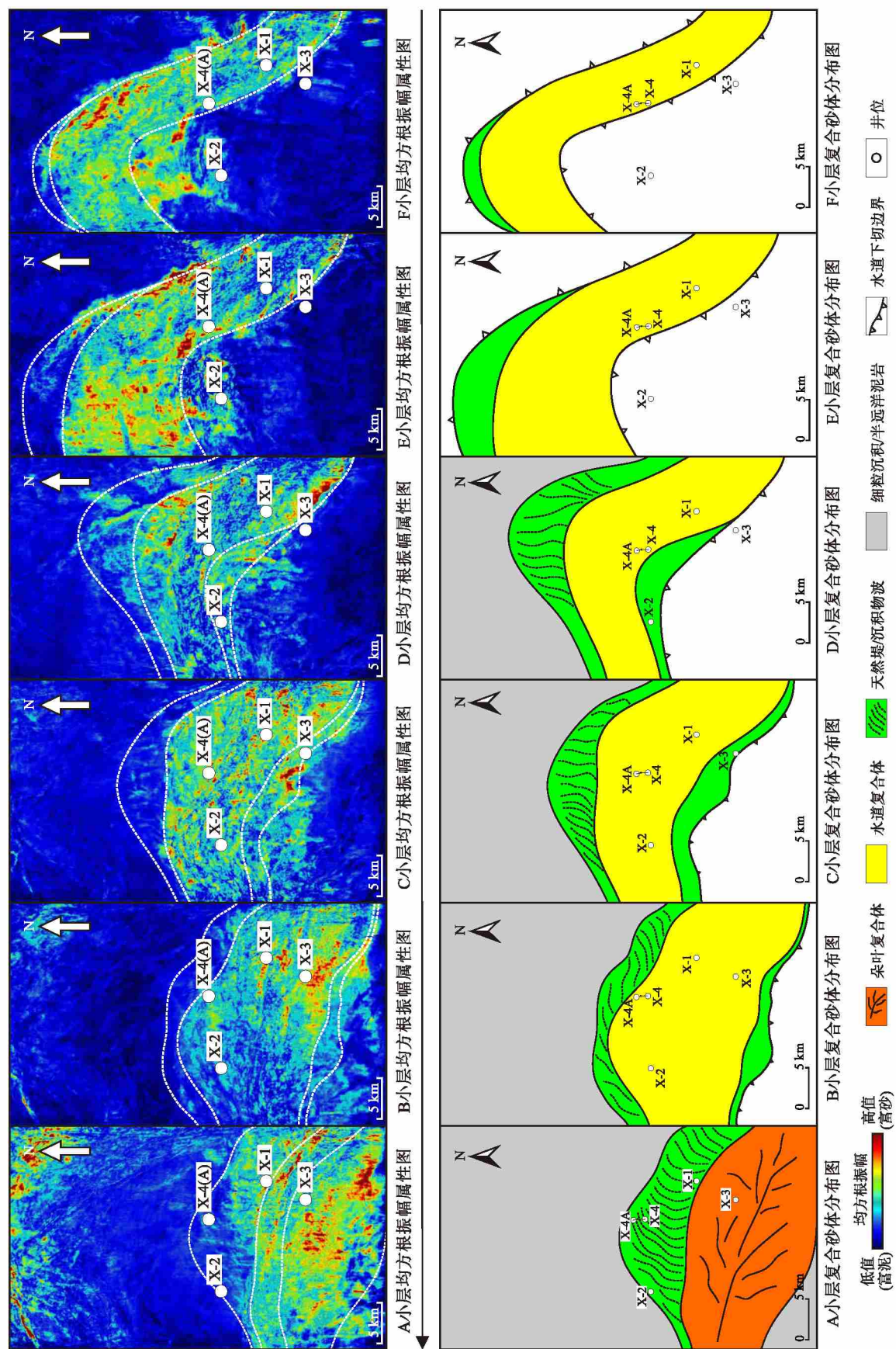


图 8 鲁伍马盆地研究区下始新统水道体系内部不同期次复合砂体的地震属性图与平面构型分布图

Fig. 8 Seismic attributes and architectural maps of composite sandbodies within the Lower Eocene channel system in the study area of Rovuma Basin

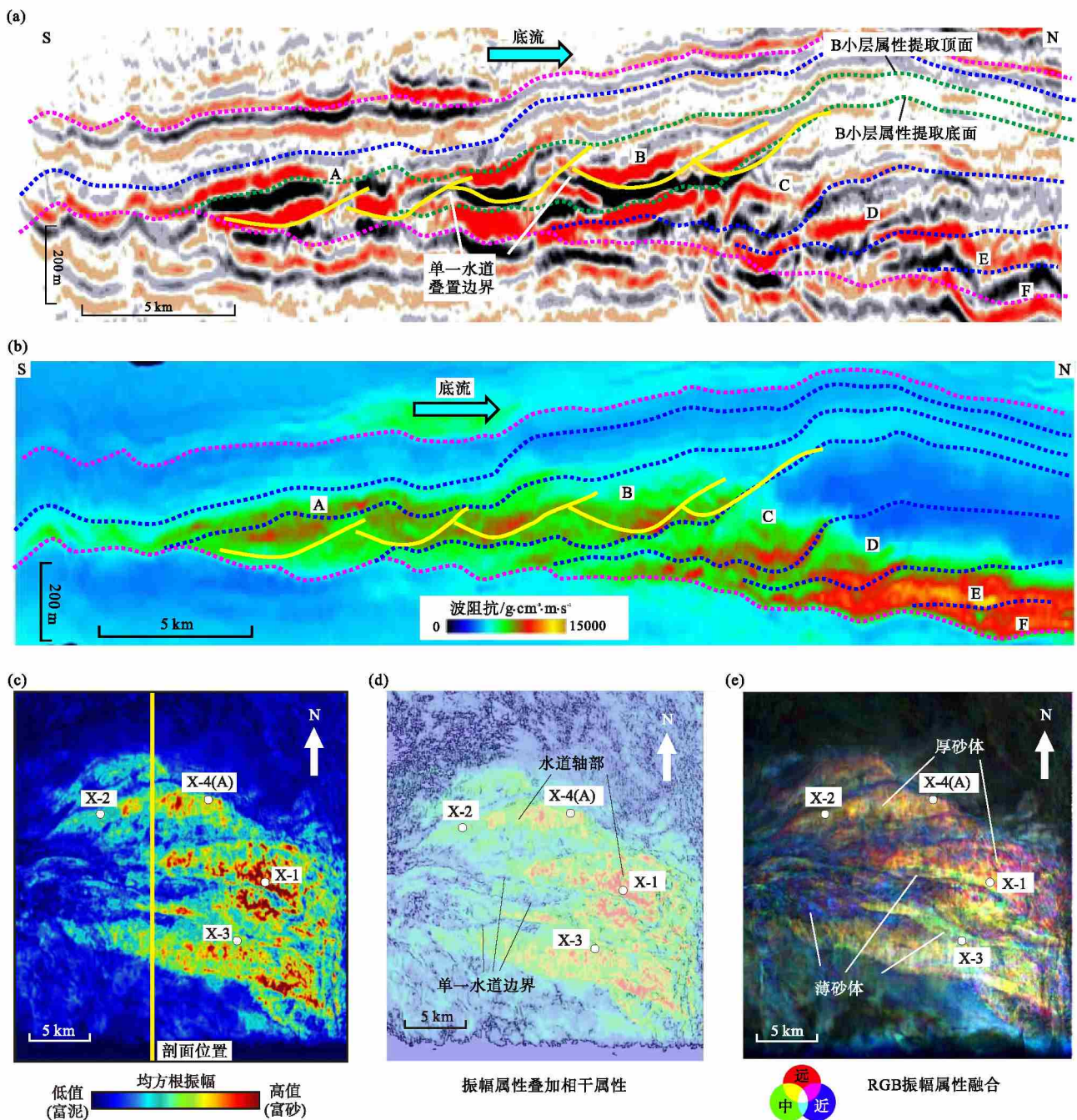


图 9 鲁伍马盆地研究区下始新统水道体系内部 B 小层单一水道叠置边界的识别标志

Fig. 9 Identification marks of stacking boundaries between individual channels in subzone B of the Lower Eocene channel system in the study area of Rovuma Basin

震振幅属性图上的相对弱振幅条带以及相干属性上的高值条带(图 9-c, 9-d), 一般反映单一水道叠置边界处砂体较薄的部位, 另外考虑不同角道集地震数据对砂体厚度识别的差异, 采用 RGB 属性融合显示的方法(图 9-e), 可以看出蓝绿冷色调(高频的近角度地震数据为主)代表单一水道边界

处砂体较薄的部位, 而红黄暖色调(低频的远角道集地震数据为主)反映了单一水道轴部砂体较厚的部位。

根据以上单一水道边界识别依据, 通过井震结合、平剖互动, 在 B 水道复合体内部识别了 5 期单一水道, 从南到北依次命名为 B1—B5

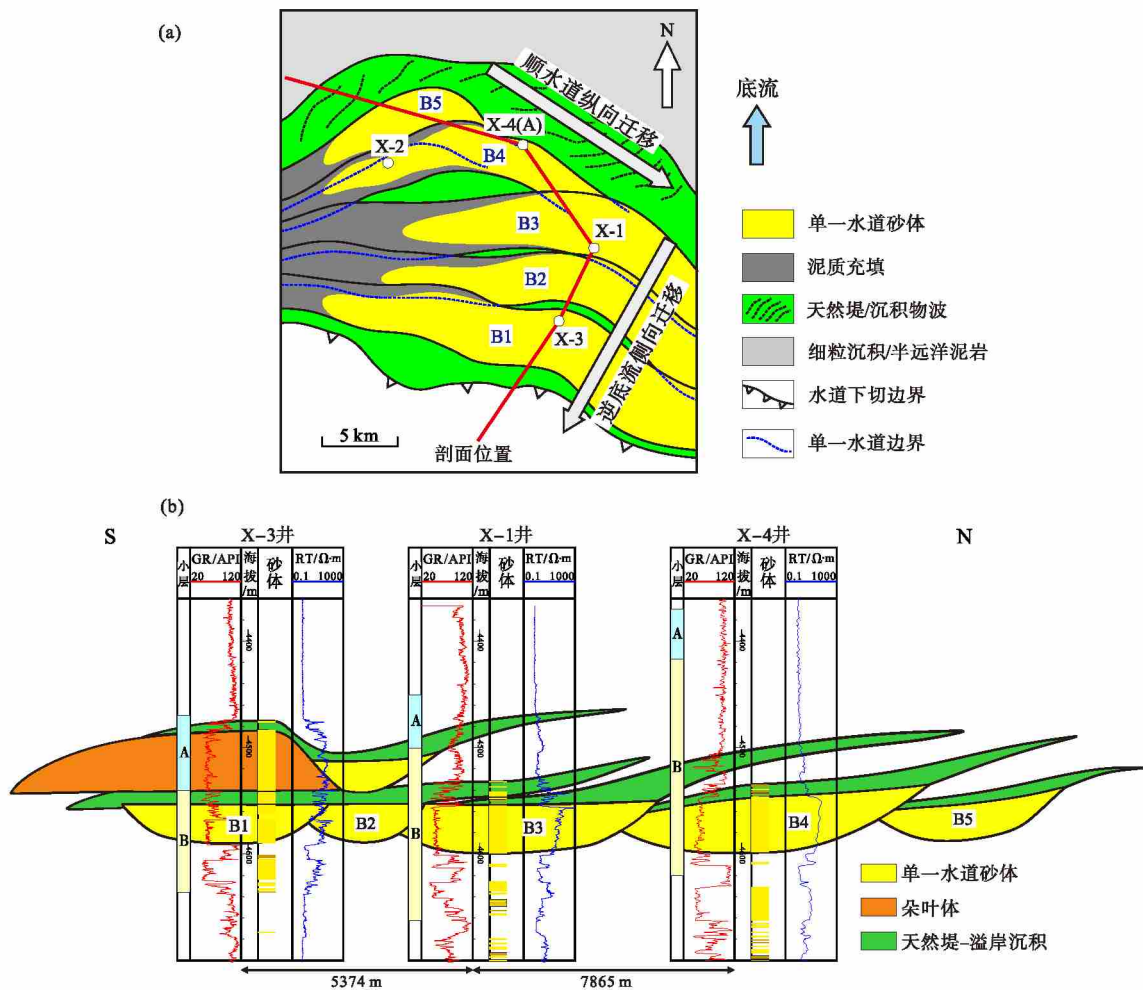


图 10 鲁伍马盆地研究区下始新统水道体系内部 B 小层单一水道构型平面分布 (a) 与剖面分布图 (b)

Fig. 10 Architectural map (a) and section (b) of individual channels within subzone B of the Lower Eocene channel system in the study area of Rovuma Basin

(图 10-a, 10-b)。综合研究认为, 单一水道砂体的空间叠置样式及连通关系具有一定的差异性和规律性。

3.2.1 单一连通砂体的差异复合样式

根据地震剖面上同相轴的叠置关系(图 9-a)以及连井对比剖面(图 10-b)分析判断, 南部单一水道及其天然堤依次叠加在北部相邻的单一水道之上, 表明 5 期单一水道整体呈自北向南(逆底流方向)侧向迁移, 即由北向南 B5—B1 水道逐渐变新。值得注意的是, 由于图 9-a 剖面北部构造高程(偏陆坡上游方向)略高于南部构造高程(偏陆坡下游方向), 造成南部新水道看似埋藏更深。经测量统计, 单一水道的侧向宽度整体介于 800~2000 m 之间。

尽管多期单一水道整体上依次向逆底流方向(南侧)迁移叠置, 但考虑平面上单一水道的迁移路径及切叠关系, 可在水道不同部位进一步划分为 2 种水道迁移样式, 相应的砂体连通性存在一定差异。

1) 顺水道纵向迁移样式。根据单一水道平面构型解释结果, 早期 B5—B3 水道的弯曲段顶点逐渐向东部下游方向发生迁移(图 10-a), 后期水道部分切割早期水道, 表现为典型的顺水道纵向迁移样式(Labourdette, 2007)。据 X-4 井—X-1 井的连井地震剖面显示, 纵向迁移部位的单一水道砂体之间彼此切叠, 地震同相轴没有明显的分叉或断开, 且振幅属性没有明显的减弱(图 11-b), 表明 B3 水道与 B4 水道在该部位切叠连通。

2) 逆底流侧向迁移样式。由 B3 水道至 B1 水

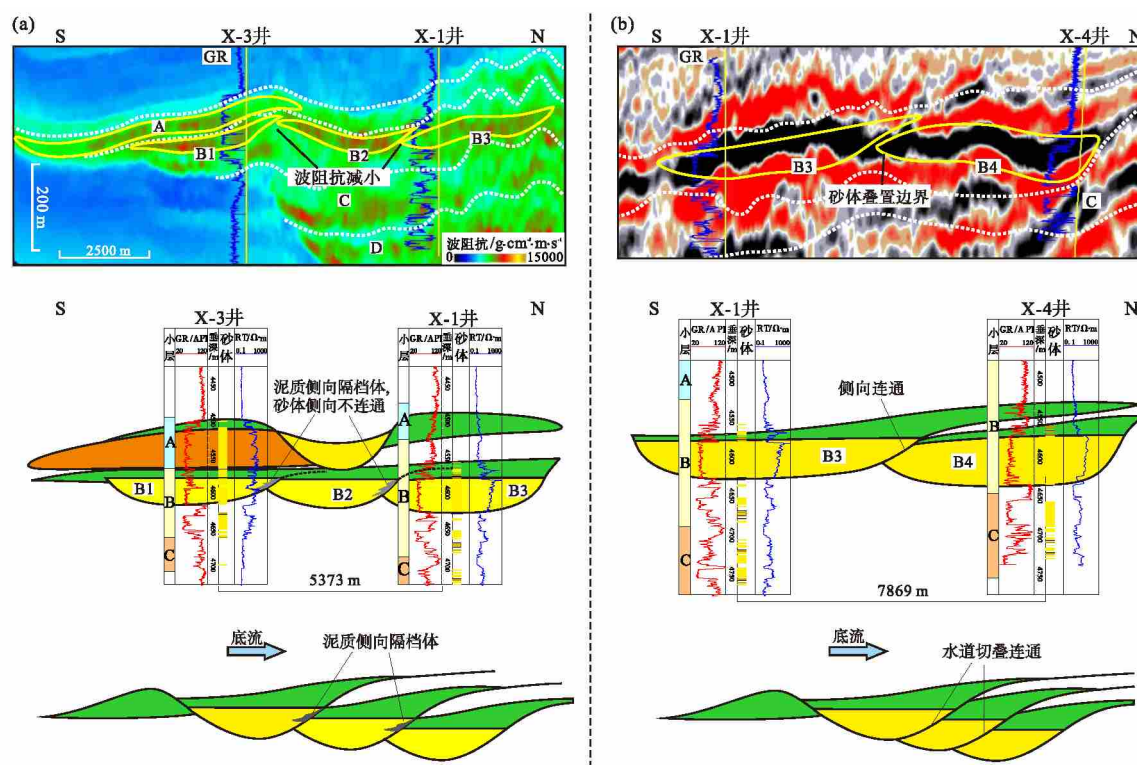


图 11 鲁伍马盆地研究区下始新统水道体系内部单一水道砂体构型叠置样式与连通关系

Fig. 11 Architectural stacking patterns and connectivity between individual channel sand bodies within the Lower Eocene channel system in the study area of Rovuma Basin

道, 水道弯曲段表现为自北向南逆底流方向的侧向迁移(图 10-a)。据 X-1 井—X-3 井的连井波阻抗反演剖面(图 11-a)显示, 单一水道砂体侧向叠置边界部位的波阻抗值明显减弱, 表明该部位发育侧向泥质隔挡层, 导致 B3、B2、B1 单一水道砂体之间的侧向连通性变差。

3.2.2 单一水道内部的砂体分布规律

单一水道作为最基本的成因单元, 其内部砂体分布呈现一定的规律性。在侧向上, 单一水道轴部的水动力较强, 砂体厚度与砂泥比较高; 而水道边缘的水动力较弱, 砂体厚度与砂泥比较低, 多为砂泥交互的岩性组合特征, 尤其是顺底流一侧的水道边缘受底流改造明显, 其砂岩密度较逆底流一侧较高。另一方面, 受沉积物重力流物质组成及沉积过程的影响, 在垂向不同层位以及平面不同部位的单一水道砂体充填特征存在一定的差异(图 10-a, 图 12-a)。

1) 水道充填垂向演化特征。根据测井曲线特征及岩性解释结果, 可将单一水道内部充填划分为砂泥交互型和富砂型两大类。砂泥交互型的水道充

填在测井曲线上表现为锯齿状的钟型特征(图 12-c), 水道内部的泥岩夹层发育程度较高, 主要出现在水道体系的下部(如 D—C 准层序; 图 12-a), 属于低密度浊流成因或高密度—低密度之间的过渡类型(Zhang *et al.*, 2015, 2018; 刘飞等, 2021); 富砂型的水道充填在测井曲线上表现为厚层的弱钟型或箱型特征(图 12-b), 其内部泥岩夹层发育程度较低, 主要出现在水道体系的中上部(如 B 准层序, 图 12-a), 属于高密度浊流成因(Lowe, 1982; Zhang *et al.*, 2015, 2018; 刘飞等, 2021)。总体上, 在层序演化的海退—低位域阶段, 沉积物重力流的砂质含量逐渐增加, 导致水道类型由砂泥交互型逐渐演化为富砂型水道(图 12-a)。

除以上 2 种基本类型外, 前人还识别了碎屑流水道与泥质浊流水道(Mayall *et al.*, 2006; 林煜等, 2013; 刘飞等, 2021)。碎屑流水道一般分布在水道体系底部(研究区未钻遇), 泥质含量较高, 与底部滞留或滑塌变形的砂砾岩伴生; 而泥质浊流水道多分布在水道体系充填晚期的上游部位, 主要为泥质充填, 可夹薄层的粉砂岩及

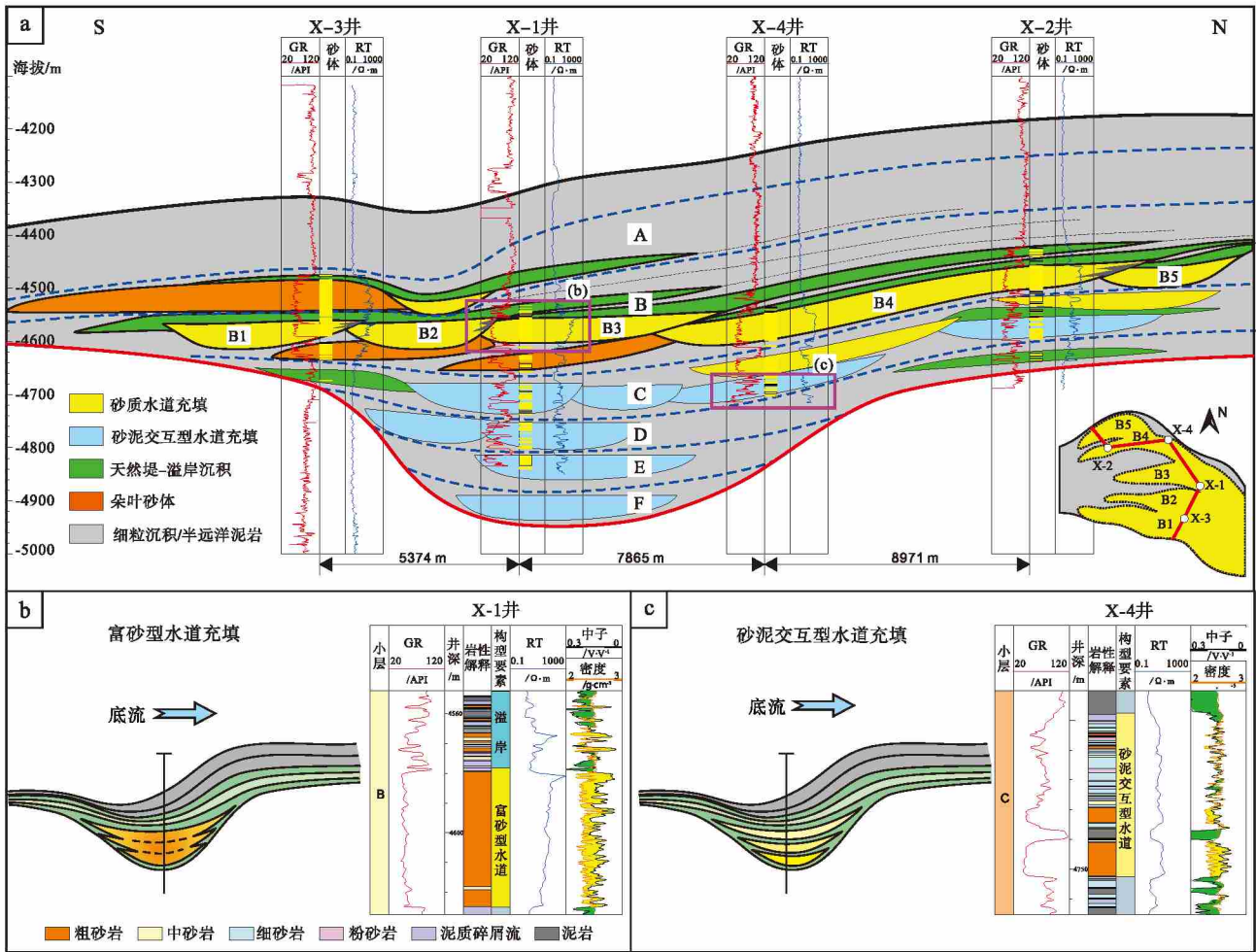


图 12 鲁伍马盆地研究区下始新统水道体系内部单一水道构型分布 (a) 与单一水道内部充填 (b, c)

Fig. 12 Architectural distribution of individual channels (a) and individual channel fills (b, c) within the Lower Eocene channel system in the study area of Rovuma Basin

细砂岩，现有钻井未钻遇，但通过地震属性可粗略识别（见下一部分）。

2) 水道砂体平面分布规律。单一水道平面不同部位的砂体发育程度也不尽相同。根据富砂型水道内部单一连通砂体的表征结果（B 准层序；图 10-a）可知，在单一水道下游弯曲部位的砂体厚度较大（振幅属性较高），而上游顺直部位的砂体厚度较薄（振幅属性较弱），以泥质充填为主，为泥质浊流成因。这种砂体分布可能与地形坡度变化以及弯曲部位的水动力条件有关。前人研究发现，在重力流水道的弯曲部位容易形成类似曲流河的二次环流，但方向与之相反（Peakall *et al.*, 2000），这种反向环流有利于沉积物重力流的沉积，导致弯曲部位的砂体更为发育。

4 讨论：重力流—底流交互作用下的海底扇水道体系构型模式

以上研究揭示了目标海底扇水道体系内部不同级次构型单元的空间叠置样式与连通关系，由于受到重力流与底流的共同影响，其构型特征表现出一定的特殊性。综合研究区的构型研究成果，最终建立了研究区重力流—底流交互作用下的海底扇储层构型模式(图 13)。

4.1 重力流对海底扇水道构型形成演化的控制作用

物源性质、海平面升降、地震海啸、地形地貌等外部因素决定了沉积物重力流的发育频率、物质组成及流动机制，从根本上控制海底扇沉积构型的形成演化。

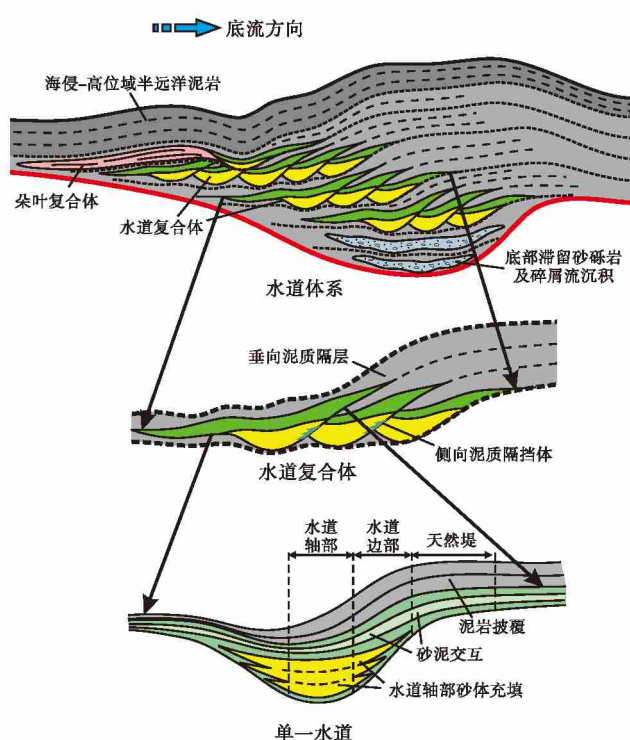


图 13 东非地区重力流—底流交互作用下的海底扇水道体系构型模式

Fig. 13 Architectural model of submarine channel systems in East Africa under interaction of sediment gravity flows and bottom currents

与常规重力流主控的海底扇水道体系构型模式 (Sprague *et al.*, 2002; Mayall *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2018) 相比, 该模式表现出一定的相似性: (1) 海底扇水道体系内部由多级次的构型单元组成 (水道复合体、单一水道及其内部砂体充填), 且发育不同类型的泥质隔夹层, 这主要受控于多期次、多旋回的重力流沉积过程本身; (2) 水道体系内部主要发育水道—天然堤复合体, 而水道体系顶部发育朵叶复合体, 反映了不同地形限制程度对重力流侵蚀—搬运—沉积过程的控制作用; (3) 水道体系内部不同层位的砂泥比例 (向上逐渐增加) 及水道充填类型 (砂泥交互型变为富砂型) 存在差异, 体现了层序演化过程中重力流成因机制变化对水道构型的控制作用。

4.2 底流对海底扇水道差异构型样式的影响

前人研究认为, 底流可对沉积物重力流顶部悬浮、低速的细粒物质起到一定的搬运作用, 并间接影响水道的迁移过程与砂体叠置样式 (Fonnesu

et al., 2020; Fuhrmann *et al.*, 2020; Miramontes *et al.*, 2020)。这种影响在不同级次的水道构型样式上有不同的特征体现, 并区别于常规的浊积水道构型样式:

1) 受底流影响, 水道体系内部不同期次的复合砂体之间表现出规律性地向逆底流方向侧向迁移叠置, 不同于常规情况下的垂向叠置或无序的补偿叠置 (Sprague *et al.*, 2002; Mayall *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2014)。这种复合砂体之间的单向迁移叠置, 在一定程度上有利于层间泥岩隔层的保存, 使得层间砂体连通性较弱。

2) 受底流影响, 水道复合体内部不同单一水道之间主要表现为顺水道纵向迁移或逆底流侧向迁移的样式, 而顺底流的侧向迁移样式受到较大限制, 不易出现。纵向迁移部位由于水道的切叠, 泥岩侧向隔挡体不易保存, 而侧向迁移部位的泥岩侧向隔挡体容易保存下来, 使得砂体侧向连通性减弱。

常规的浊积水道可表现出不同方向的侧向迁移与纵向迁移 (Posamentier and Kolla, 2003; La-bourdette, 2007), 与底流没有直接关系。受水道弯曲段浊流离心力的影响, 水道有向外岸方向发生侧向迁移的趋势, 且水道弯曲度越大, 侧向迁移程度越大 (Lin *et al.*, 2014)。当底流存在时, 水道有向逆底流方向发生侧向迁移的趋势, 且在不同的水道弯曲段, 底流与浊流离心力的作用方向存在差异: 当两者作用方向一致时基本表现为逆底流侧向迁移; 而当两者作用方向相反时可表现为逆底流侧向迁移或顺水道纵向迁移, 顺底流的侧向迁移受到较大程度的抑制, 只有当水道弯曲度足够大时, 浊流离心力产生的侵蚀能力可能克服底流导致的地形限制, 形成顺底流的侧向迁移样式, 这在研究区浅层偶有出现。

3) 受底流影响, 单一水道顶部的细粒物质容易搬运并沉积在顺底流一侧的水道边缘或溢岸部位, 导致高密度浊积水道的正旋回特征不明显 (图 12-b), 多表现为均质序列, 水道内部夹层基本不发育 (不包括早期的砂泥交互型水道充填)。相比之下, 在缺少底流的情况下, 浊积水道上部的细粒物质较多, 充填序列可呈较明显的正旋回特征, 其内部也可存在少量的细粒或泥质夹层 (林煜等, 2013; Zhang *et al.*, 2018)。

4.3 与其他模式的对比

前人对东非海底扇的研究结果总体支持水道逆底流侧向迁移的结论(陈宇航等, 2016; Fonnesu *et al.*, 2020; Fuhrmann *et al.*, 2020), 但未能明确该结论成立的水道级次。作者研究在前人基础上更进一步, 强调水道体系内部不同期次复合砂体之间基本呈逆底流侧向迁移叠置样式, 而水道复合体内部不同单一水道之间除逆底流侧向迁移样式外, 还可呈顺水道纵向迁移样式, 而顺底流的侧向迁移样式不易出现。另外, 研究还突显了不同类型隔夹层分布及砂体连通性的差异, 代表性地揭示了东非陆架边缘重力流—底流交互作用控制的海底扇水道体系构型模式, 对其他地区类似地质条件下的海底扇水道构型模式也有重要的借鉴意义。

与东非海底扇模式刚好相反, 前人对南海地区海底扇水道构型的研究发现, 水道基本呈顺底流侧向迁移的样式(Gong *et al.*, 2013; 李华等, 2014)。针对这种模式, 前人也提出了多种解释, 比如, Fonnesu 等(2020)指出东非逆底流水道迁移样式为重力流—底流同时作用的产物, 而南海顺底流水道迁移样式可能为重力流—底流交替作用的产物。Gong 等(2018)指出南海深水水道不发育类似东非深水水道的不对称天然堤—溢岸沉积, 可能与较大的峡谷深度限制了细粒物质的溢出有关。由此可见, 重力流与底流交互作用的过程机制十分复杂, 不同地区、不同地质背景下的沉积响应可能差别较大, 目前的研究认识仍然十分局限, 需要未来更为深入的探讨。

5 结论

1) 东非鲁伍马盆地研究区下始新统海底扇水道体系内部发育水道、溢岸及朵叶体 3 种构型要素。水道主要分布在水道体系内部, 可分为水道复合体、单一水道等不同级次的构型单元; 溢岸主要分布在水道体系的顺底流一侧; 朵叶体主要分布在水道体系的顶部。

2) 东非鲁伍马盆地研究区底流可影响水道体系内部不同级次的砂体构型叠置样式。不同水道复合体之间整体呈逆底流侧向迁移叠置样式, 其间可发育较稳定的泥质隔层; 不同单一水道之间主要呈顺水道纵向迁移或逆底流侧向迁移样式, 其中纵向

迁移部位的水道彼此切叠连通, 而侧向迁移部位容易保存泥质侧向隔挡体。

3) 由于沉积物重力流性质的不同, 单一水道内部可发育砂泥交互型或富砂型的岩性组合。垂向上, 水道体系下部主要发育低密度浊流成因的砂泥交互型水道, 而水道体系中上部主要发育高密度浊流成因的富砂型水道; 平面上, 在单一水道弯曲段的轴部砂体最为发育, 在水道边缘及上游部位的砂体较薄。

参考文献 (References)

- 曹全斌, 唐鹏程, 吕福亮, 范国章, 邵大力, 鲁银涛, 许小勇, 陈宇航. 2018. 东非鲁伍马盆地深水浊积砂岩气藏成藏条件及控制因素. 海相油气地质, 23(3): 67–74. [Cao Q B, Tang P C, Lü F L, Fan G Z, Shao D L, Lu Y T, Xu X Y, Chen Y H. 2018. Formation conditions and controlling factors of gas-bearing turbidite sand reservoirs in deep water deposits in the Rovuma Basin, East Africa. Marine Origin Petroleum Geology, 23(3): 67–74]
- 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]
- 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, 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]
- 林煜, 吴胜和, 王星, 路瑶, 万琼华, 张佳佳, 张义楷. 2013. 深水浊积水道体系构型模式研究: 以西非尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例. 地质论评, 59(3): 510–520. [Lin Y, Wu S H, Wang X, Lu Y, Wan Q H, Zhang J J, Zhang Y K. 2013. Research on architecture model of deepwater turbidity channel system: a case study of a deepwater research area in Niger Delta Basin, West Africa. Geological Review, 59(3): 510–520]
- 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]
- 王敏, 张佳佳, 王瑞峰, 徐庆岩, 文思颖, 曹全斌, 余季陶, 王黎. 2022. 鲁伍马盆地 X 气田深水海底扇储集层质量差异及主控因素分

- 析. 石油勘探与开发, 49(3): 1-11. [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 in X gas field Rovuma Basin, East Africa. *Petroleum Exploration and Development*, 49(3): 1-11]
- 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]
- 赵晓明, 吴胜和, 刘丽. 2012. 尼日尔三角洲盆地 Akpo 油田新近系深水浊积水道储层构型表征. 石油学报, 33(6): 1049-1058. [Zhao X M, Wu S H, Liu L. 2012. Characterization of reservoir architectures for Neogene deepwater turbidity channels of Akpo oil-field, Niger Delta Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33(6): 1049-1058]
- 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.
- Cavanna G, Castoro A, Fervari. 2014. Hydrocarbon and lithology indicators by coordinate rotations in the AI-Vop/vs domain. In: 76th EA-GE Conference & Exhibition 2014. June, Amsterdam RAI. The Netherlands: 16-19.
- 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: 1-13.
- Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, Pirmez C. 2003. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6-8): 649-676.
- de Ruijter W P, Ridderinkhof H, Lutjeharms J R, 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.
- 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, Zhu W L, Li W G, Xu Q. 2013. Upper Miocene to quaternary unidirectionally migrating deep-water channels in the Pearl River Mouth basin, northern South China Sea. *AAPG Bulletin*, 97(2): 285-308.
- 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.
- Labourdette R. 2007. Integrated three-dimensional modeling approach of stacked turbidite channels. *AAPG Bulletin*, 91(11): 1603-1618.
- Lin Y, Wu S H, Wang X, Ling Y, Lu Y, Zhang J J, Yu Z. 2014. Composite sand bodies architecture of deep-water turbidite channels in the Niger Delta Basin. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1822-1834.
- 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.
- 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.
- Palermo D, Galbiati M, Famiglietti M, Marchesini M, Mezzapesa D, Fonnesu F. 2014. Insights into a new super-giant gas field-sedimentology and reservoir modeling of the coral reservoir complex offshore northern Mozambique. In: *Offshore Technology Conference-Asia*, 25-28 March, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Peakall J, McCaffrey B, Kneller B. 2000. A process model for the evolution, morphology, and architecture of sinuous submarine channels. *Journal of Sedimentary Research*, 70(3): 434-448.
- Piper D J, Normark W R. 1983. Turbidite depositional patterns and flow characteristics, Navy submarine fan, California Borderland. *Sedimentology*, 30(5): 681-694.
- Posamentier H W, Kolla V. 2003. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *Journal of sedimentary Research*, 73(3): 367-388.
- Shanmugam G. 2016. Submarine fans: a critical retrospective (1950-2015). *Journal of Palaeogeography*, 5(2): 110-184.
- Sprague A R, Sullivan M D, Campion K M, Jensen G N, Goulding D K, Sickafoose D K, Jennette D C. 2002. The physical stratigraphy of deep-water strata: a hierarchical approach to the analysis of genetically related elements for improved reservoir prediction. In: *American Association of Petroleum Geologists Annual Meeting Abstracts*, Houston, Texas: 10-13.
- Zhang J J, Wu S H, Wang X, Lin Y, Fang H J, Jiang L, Wang Q H, Yin H, Lu Y. 2015. Reservoir quality variations within a sinuous deep water channel system in the Niger Delta Basin offshore West Africa. *Marine and Petroleum Geology*, 63: 166-188.
- Zhang J J, Wu S H, Hu G Y, Fan T E, Yu B, Lin P, Jiang S N. 2018. Sea-level control on the submarine fan architecture in a deepwater sequence of the Niger Delta Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 94: 179-197.
- Wynn R B, Masson D G. 2008. Sediment waves and bedforms. In: *Rebecco M, Camerlenghi A (eds). Contourites, Developments in Sedimentology*, vol. 60. Elsevier, Amsterdam: 289-300.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐杰)