

西非下刚果盆地深水水道沉积特征及控制因素

李全^{1,2}, 吴伟^{1,3}, 康洪全², 任世君⁴, 逢林安², 杨婷², 蔡露露², 刘小龙²

[1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000; 2. 中海油研究总院, 北京 100102; 3. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 4. 中国石油 青海油田分公司采油三厂, 青海 816400]

摘要:深水水道体系是从大陆斜坡到深海盆地“源-汇”系统的重要组成部分,也是当前国际深水油气勘探的重要储层类型。对下刚果盆地中新统深水水道沉积特征、充填演化和控制因素的研究有助于加深对盆地动力学过程的认知和提高深水储层的预测精度。通过应用三维地震、测井和录井资料综合分析,基于层序地层学、地震地层学和地震地貌学研究的技术方法和手段,对下刚果盆地中新统高精度层序地层格架、深水沉积单元、深水水道发育类型、复合水道体系发生、发展、衰退和消亡的演化过程,以及控制因素进行了深入研究。结果表明:下刚果盆地中新统地层以最大水退面和初始水进面为层序界面,可以划分出14个四级层序,其中四级层序SQ1L, SQ2L, SQ3L, SQ4L, SQ5L, SQ6L和SQ7L是深水水道发育的主要时期。深水水道具有侵蚀界面、水道充填、内天然堤、外天然堤、末端朵体、远洋沉积和滑塌块体7类深水沉积单元,其中水道充填和末端朵体是砂质沉积单元。研究区深水水道可以划分为单期下切、单期加积、垂向加积复合、侧向迁移复合4种基本类型,其中垂向加积复合水道和侧向迁移复合水道同时出现在四级层序SQ7L内,指示了水道充填演化中“自旋回”因素的控制作用。在此基础上,提出构造隆升是形成深水富砂水道体系的原动力,西非海平面变化控制着三级层序的发育,制约着深水水道复合体的发育规模。气候由温室转变为冰室的交替变化控制了深水砂质重力流沉积和深海泥质沉积的四级层序发育部位。

关键词:重力流沉积;高精度层序格架;沉积单元;深水水道;水道类型;“源-汇”系统;控制因素;中新统;下刚果盆地
中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Characteristics and controlling factors of deep-water channel sedimentation in Lower Congo Basin, West Africa

Li Quan^{1,2}, Wu Wei^{1,3}, Kang Hongquan², Ren Shijun⁴, Pang Lin'an², Yang Ting², Cai Lulu², Liu Xiaolong²

[1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing 100102, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. NO. 3 Extraction Factory, Qinghai Oil Field Company, PetroChina, Qinghai 816400, China]

Abstract: Deep-water channel system is an important part of the “Source-to-Sink” system from continental slope to deep-sea basin, and also a critical reservoir type in international deep-water petroleum exploration. The study of sedimentary characteristics, filling processes and controlling factors of the Miocene deep-water channels in Lower Congo Basin is of great help to deepen the understanding of basin dynamics and improve the prediction accuracy of deep-water reservoirs. Based on the integrated analysis of 3D seismic and logging data, we carried out in-depth study on the evolution of the Miocene high-resolution sequence stratigraphic framework, deep-water sedimentary units, types of deep-water channels, and the initiation, development, decline and extinction of channel complex systems, as well as the controlling factors in Lower Congo Basin. The technical means in terms of sequence stratigraphy, seismic stratigraphy and seismic geomorphology were resorted to in this study. The Miocene strata in the Lower Congo Basin can be divided into 14 fourth-order sequences with the maximum regression surface and the initial transgression surface serving as the sequence boundary. Among others, the fourth-order sequences SQ1L, SQ2L, SQ3L, SQ4L, SQ5L, SQ6L and SQ7L embody the major stages of deep-water channel development. Seven types of deep-water sedimentary units were identified, namely the erosional surface, channel filling,

收稿日期:2018-10-02; 修订日期:2019-01-22。

第一作者简介:李全(1982—),男,博士、高级工程师,深水沉积与地震沉积学。E-mail:quincy225@126.com。

基金项目:国家重点实验室开放课题(PRP/open-1504);国家自然科学基金项目(41872112);国家科技重大专项(2017ZX05032-001);河南省博士后经费资助(1902038)。

inner levee, outer levee, terminal lobe, pelagic deposit and slump block. And the channel filling and terminal lobe are arenaceous sedimentary units. The deep-water channels in the study area can be divided into four basic types, namely the single incised-channel, single aggradation channel, vertical aggradation channel complex and lateral migration channel complex. And the vertical aggradation and lateral migration channel complexes occur simultaneously in the fourth-order sequence SQ7L, indicating the controls of “autocyclicity” on channel filling processes. In conclusion, tectonic uplifting is a driving force for the formation of deep-water sand-rich channel systems, and the eustatic fluctuation in West Africa controls the development of third-order sequences and the scale of deep-water channel complex. The alternating climate change between greenhouse and icehouse controls the occurrence of deep-water arenaceous gravity flow deposits and deep-water argillaceous deposits in the fourth-order sequences.

Key words: gravity flow deposit, high-resolution sequence stratigraphic framework, sedimentary unit, deep-water channel, channel type, “Source-to-Sink” System, controlling factor, Miocene, Lower Congo Basin

深水盆地沉积学研究是盆地动力学研究的关键问题之一^[1],是当前全球油气勘探与科学研究的前沿领域^[2-3]。而深水水道体系是研究深水沉积学的主要对象,深水水道构成、发育过程及其控制因素的研究是近年来深水水道体系研究的核心内容^[4-5]。深水水道体系是从陆架到深海沉积区“源-汇”系统的重要组成部分,是最主要的海底地貌要素,既作为陆源碎屑向深海输送的主要通道,也是深水富砂体系沉积的主要场所^[6-8]。其迁移的过程决定着水道复合体的整体沉积结构^[9-10]。水道发育过程中,垂向加积与横向迁移程度的差异和多期的切割-充填组合形成了不同规模、不同形态的砂体复合体:侧向迁移复合体,垂向加积复合体,复杂迁移复合体,这些叠置的复合体被认为是被动大陆边缘盆地油气勘探最重要的烃类储层^[11]。同时深水水道沉积包含着相邻地区关键的沉积和气候信息,因此,深水水道是油气勘探家、沉积学家和古气候学家长期关注的重点^[12-15]。

近年来,随着高分辨海底成像和高质量三维地震数据体在深水沉积研究方面的应用,使得国内外学者在深水水道-天然堤体系的充填演化,深水水道类型划分、充填结构、控制因素研究方面取得了显著的进展^[16-28]。Pirmez 等研究表明深水水道为了达到平缓流畅、上凹水道形态,需要不断调整弯曲度、梯度、水道宽度和深度以响应流体流量和沉积物负载的变化,指出高弯曲水道梯度的变化与浊流流体强度的关系。Sylvester 等开展了斜坡水道体系侵蚀界面与地貌演化、地层结构之间关系的研究,通过三维模拟提出海底水道-天然堤体系仅仅通过简单的单一的水道侵蚀、迁移和叠加过程就能形成深水水道复合体系,这种单一水道多期迁移的充填-侵蚀过程不需要流体流量的变化^[29]。郑荣才等通过对白云凹陷珠江组深水扇砂质碎屑流沉积学特征和识别标志分析,提出深水扇中

广泛发育的厚层块状砂岩主要属于砂质碎屑流沉积的新认识,建立了“源-渠-汇”耦合关系的深水扇砂质碎屑流沉积模式^[30]。Wu 等通过对琼东南盆地中央峡谷陵水段充填过程研究,识别出 6 类沉积要素,划分 5 个演化阶段,建立了完整的深水峡谷的沉积-充填序列,并探讨了海平面变化、构造活动、沉积供给对深水沉积结构和沉积体系的控制作用^[15]。陈宇航等探讨了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,指出了水道、朵体等富砂深水沉积的受“冰室”气候、物源供给等因素控制,着重分析了底流对渐新统水道-朵体沉积分布与演化的影响,建立了南极底流影响下的鲁伍马盆地渐新统深水水道-朵体的沉积模式^[31]。

虽然近 20 年深水水道几何形态识别,内部结构解剖,水道叠置关系及控制因素的研究成果丰富。但大量学者对深水水道沉积过程、沉积作用和沉积模式的理解还莫衷一是。由于水道下切,垂向加积,侧向迁移长期交互错综复杂,形成深水系统形式多样,目前还没有单一相模式能够解释复杂深水环境下的所有变化^[32]。因此我们需要对不同深水环境下沉积作用、充填过程和砂体分布进行精细研究,重构水道的充填演化过程,尤其是水道复合体的形成过程,实现对深水砂岩储层勘探的准确预测。

然而,由于常规地震资料分辨率的限制,传统的地震解释难以识别出多期次水道复合体空间充填演化的过程。虽然近年来,随着地震采集技术的进步,地震分辨率不断提高,加以地震地貌学的发展,深水水道的沉积要素和沉积细节被更加精细的刻画出来^[33-34],同时,水槽实验和流体动力学模拟研究取得的进展,极大的改善了我们对于深水水道沉积充填过程和动力学机制的理解^[35]。但是由于深水沉积不具备直接监测和观察的特点,实验室的模拟无法完全反应深水沉积环

境,因此重力流水道的侵蚀-充填过程响应、内部结构和成因机制一直是探讨的热点问题。

前人对下刚果盆地中新统深水水道开展过大量研究,进行了沉积体系识别、水道类型划分和分类研究^[36-37],但早期的研究工作基于三级层序地层格架内,没有讨论过在四级层序格架约束下应用3D地震资料研究深水水道复合体的沉积充填演化过程,而这一研究对于恢复深水水道复合体的发育过程和预测砂体至关重要。

本文综合应用中海油刚果国家A区块2 000 km²三维地震资料,3口深水钻、测井资料建立了下刚果盆地中新统四级层序地层格架。在高精度层序格架内识别深水沉积要素,划分深水水道类型,分析深水水道沉积充填过程,最后探讨不同类型深水水道沉积的过程和控制因素,进一步明确深水水道沉积体系与构造、海平面变化、古气候变化之间的关系,为深水水道沉积过程的研究提供借鉴与参考。

1 地质背景

下刚果盆地是世界上最富产油气的盆地之一。发育于前寒武系结晶基底之上,沉积地层为白垩系、古近系和新近系,局部发育侏罗系。盆地的北部以马永巴高原为界,南部以安布里什高原为界,东部与前寒武系基底相邻,西部与大陆边缘相接,总面积约为68 000 km²。

下刚果盆地构造演化与南大西洋的裂解密切相关,可划分为裂谷期、过渡期和漂移期3个阶段,其中早白垩世早期纽康姆阶—早白垩世中期巴列姆阶为盆地裂陷阶段,在东西向差异拉张力作用下,盆地从南向北裂解,充填河流和湖泊沉积体系。早白垩世晚期阿普特阶为盆地过渡阶段,发育局限潟湖环境,沉积了广泛分布的盐岩地层,盐岩沉积指示从大陆环境向海相环境转换。早白垩世晚期阿尔比阶—渐新世早期漂移早期阶段,随着西非大陆的隆升和海平面的快速波动,在重力作用下形成了一系列盐岩滑动构造,在构造作用下,沉积了碳酸盐岩台地、深海碎屑砂岩沉积。渐新世早期—第四纪为漂移期,由于海平面的迅速下降,构造隆升和地层沉降,刚果河携砂量剧增,大量陆源碎屑通过东西向的刚果峡谷输送到深水盆地,形成厚度达6 000 m的刚果深水扇复合体^[38](图1)。

本文研究对象刚果扇是渐新世末期开始发育,位于西非大陆边缘刚果(布)和安哥拉境内的世界上最大的深水扇体之一。它由长约4 370 km刚果河点源供给,陆

上汇水面积 3.7×10^6 km²,平均流量为42 800 m³/s^[39],形成的深水扇体东西向延伸800~1 000 km,南北向最小宽度达400 km。研究区位于刚果扇西北部,面积约2 000 km²,现今水深500~1 200 m(图1)。早中新世—晚中新世,刚果河由南向北迁移,造成刚果扇由东南向西北方向的迁移演化,研究区分别经历了刚果扇的不同发育部位。本次研究的主要目的层为中新统,目的层厚度1 200~1 500 m,埋藏深度1 500~3 500 m,目的层段由粉砂岩、砂岩、泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩构成,局部含有砾岩。整体上地层具有“泥包砂”的特征。

2 高精度层序格架的建立

经典层序地层学是通过识别不整合面或与之可对应的整合面、海侵面、最大洪泛面等关键界面研究年代框架所限定的、具有成因联系的地层组合关系^[40]。但是在深水沉积体系中,由于“自旋回”和“它旋回”多种因素的控制与叠加作用,经典层序中的关键界面和地层终止关系往往很难被识别和连续追踪,这给深水层序格架的建立和沉积单元的识别、对比带来了困难^[41]。本文研究中,通过研究区内Well A井和Well B井震标定,明确三、四级层序界面特征。三级层序界面为下切侵蚀不整合面或区域性明显冲刷界面,界面上、下的沉积相发生突变,界面之上为强振幅、弱连续反射,界面之下为弱振幅、连续反射,局部形成一定规模的下切水道或下切谷充填。三级层序界面通常是海平面相对下降导致剥蚀作用、沉积物供给突变及沉积相明显迁移的结果^[42]。由于在研究区内,三级层序内体系域划分难度较大,而初始水进面具有明显的特征,因此,在三级层序内由初始水进面分隔的次级单元定义为四级沉积旋回,对应于四级层序。根据具有年代地质意义的地震等时标志同相轴的追踪,建立四级等时的层序对比格架。本文追踪的四级层序界面在研究区内稳定分布。

2.1 深水层序关键界面的识别

2.1.1 侵蚀冲刷面——三级层序界面

Well A井—震标定揭示,研究区深水环境中,三级层序的底界面定义为深水水道复合体的底界面。该界面是由区域构造隆升或海平面下降期间,陆源供给充足情况下,多期重力流或浊流的底部反复侵蚀冲刷形成。该界面分隔了下部的深海原地沉积体系和上部的重力流沉积体系。

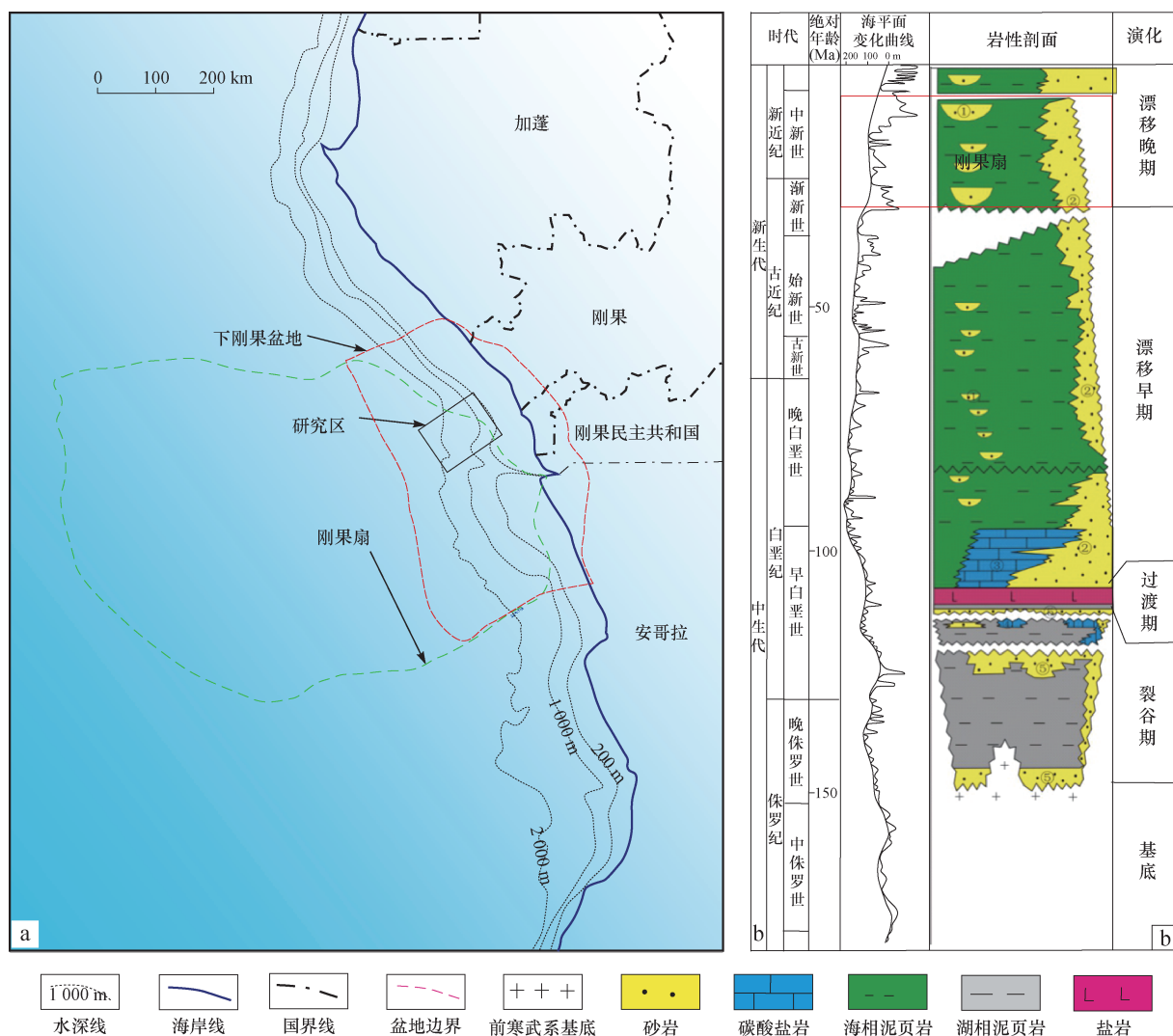


图1 下刚果盆地地理位置示意图(a)及地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Schematic diagram showing the location(a) and composite stratigraphic column(b) of Lower Congo Basin

通过追踪对比,研究区内识别出8个三级层序界面(图2b)。层序界面之上由中低频、杂乱、强振幅地震反射构成,不同规模的水道复合体形成区域侵蚀冲刷不整合面,表现为高能沉积特征。界面之下由高频、平行、弱振幅地震反射构成,是典型的低能沉积特征。测井曲线上层序界面特征为岩性突变面,界面之上GR曲线表现为“钟型”或“箱型”,指示砂岩组合沉积;界面之下表现为“微齿型”或“微指型”,指示深海泥岩沉积(图2a)。

2.1.2 最大水退面/初始水进面——四级层序界面

高精度层序地层定义的四级层序地层单元是由海或湖泛面所限定的沉积旋回沉积体,即由三级层序内四、五级沉积旋回所组成^[43]。本文选取三级层序内初始水进面作为四级层序界面,将三级层序进行了细分。Well A井揭示,该界面在研究区可大范围追踪对比

(图2a)。地震剖面上,初始水进面之下为连续性差、强振幅、高频的地震反射特征为主,界面之上为高连续、弱振幅、中-低频反射特征为主。测井曲线和岩性剖面揭示四级层序界面特征为岩性变化面,界面之上为深海原地泥质沉积,界面之下为异地粗碎屑重力流/浊流沉积。两者之间由最大水退面/初始水进面分隔。

2.2 高精度层序格架的建立

高精度层序地层格架是指以三级层序内四、五级层序和体系域等为地层单元建立的等时地层格架^[24]。本研究为了更精细的刻画出层序格架内的深水浊积水道复合体的充填过程,有必要对三级层序内的可识别的、具有年代意义的等时高精度界面进行识别,建立高精度层序地层对比格架。在此基础上进行地震沉积学研究,通过系列地层切片解释深水沉积相和沉积体系

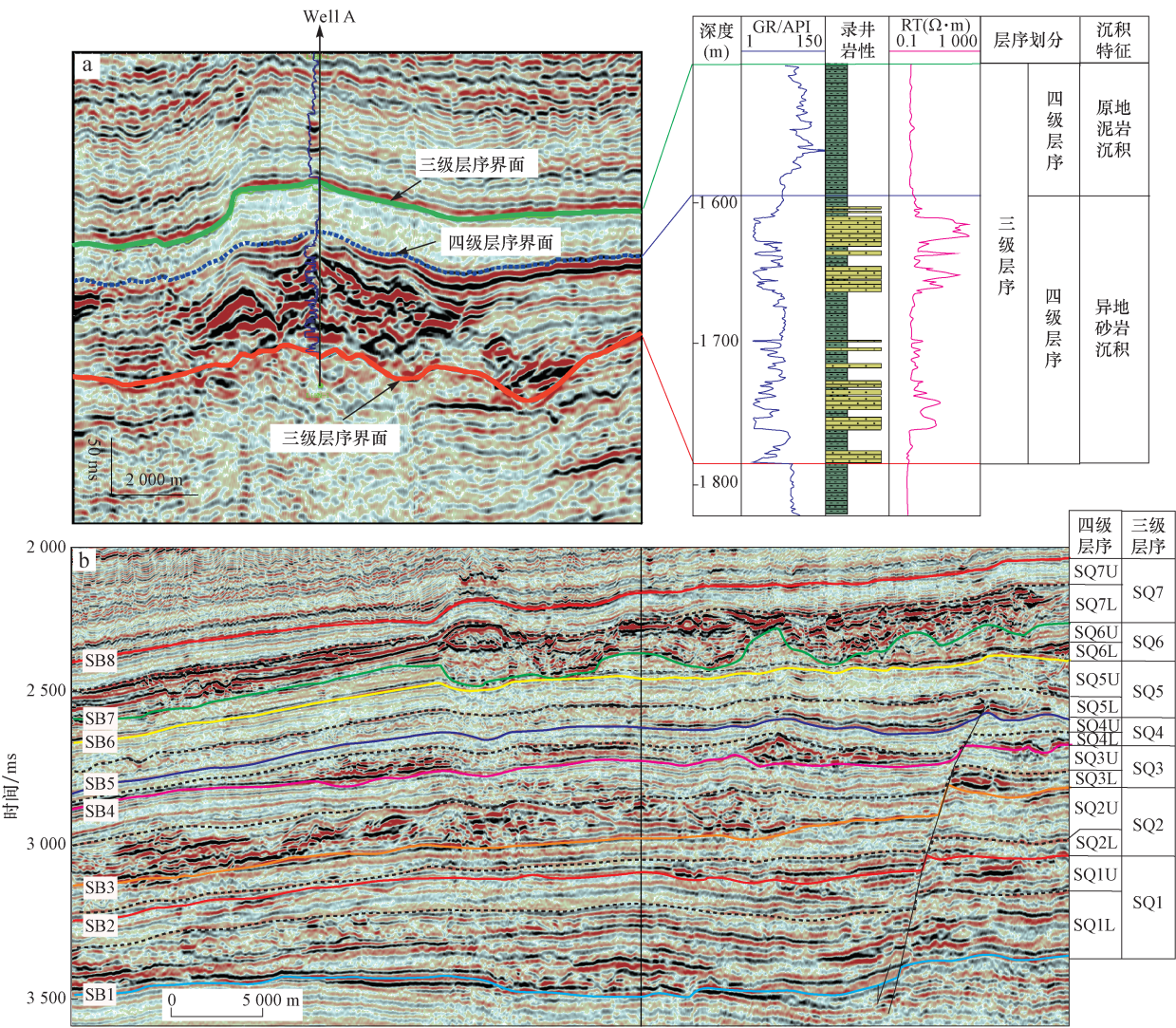


图 2 下刚果盆地中新统井-震层序界面标定特征(a)及层序对比格架(b)
Fig. 2 Characteristics of sequence boundaries from well-to-seismic calibration(a) and sequence stratigraphic correlation framework(b) in the Miocene Lower Congo Basin

的充填演化过程。根据研究区深水沉积旋回特征和识别的三、四级关键界面的追踪对比,将下刚果盆地中新统地层划分为“七期十四个阶段”,分为 7 个三级层序和 14 个四级层序(图 2b)。其中三级层序 SQ1—SQ5 构成下部二级层序,三级层序 SQ6 和 SQ7 构成上部二级层序^[37]。层序格架内浊积水道的发育具有如下特征:SQ1 和 SQ2 是下部二级层序内水道发育的初始期,以发育具有天然堤的加积型水道为主。SQ3 是下部二级层序内水道发育的鼎盛时期,以发育不具天然堤的侵蚀型水道为主。SQ4 是水道发育的衰退期,以混合型复合水道为主,SQ5 是消亡期,以深海原地泥质沉积或水道末端朵体沉积为特征。SQ6 是上部二级层序水道发育初始期,以加积型水道为主。SQ7 是上部二级层序水道发育鼎盛期,以大型侵蚀型复合水道发育为特征。每一个三级层序均由两个四级层序构成,以地

震上可区域连续追踪的界面为界(初始水进面),界面之下的四级层序代表深水水道供给的重力流(碎屑流、高密度浊流、低密度浊流)沉积,地震反射连续性差,层序内部不存在可大范围连续追踪的界面。顶部四级层序代表深海泥质沉积,振幅较弱,连续性中等。两者之间的界面是从水退到水进的转换面(最大水退面),因此以该界面作为四级层序界面。

3 深水沉积单元

研究区水道复合体复杂的充填结构表明水道沉积演化过程中多期下切-充填的过程。通过不同结构要素的发育形态和关系研究可以揭示充填特征。地震剖面上依据内部反射特征和外部反射形态,平面上基于地震地貌学地层切片、“甜点和相干融合”属性分析等

技术手段确定的平面形态,并结合井震标定和前人对深水地震相的分析划分出以下几种沉积要素:两类侵蚀界面和水道充填、两类天然堤、末端朵体、远洋沉积和滑塌块体沉积。

3.1 两类侵蚀界面和水道充填

研究区存在两类侵蚀界面,水道复合体底部大规模复合侵蚀面和单期水道局部侵蚀面。大规模的侵蚀界面发育在水道复合体的底部(图3),侵蚀界面一般宽度为1.3~2.8 km,剖面上可见削截特征,平面上边界具有“线性和齿状”特征。该界面之上有两类水道沉积充填,一类为叠瓦或断续、强振幅反射特征,虽然研究区无井标定,但该特征与 Abreu 提出的深水水道侧积体(LAP)特征相似^[17],因此解释为水道侧向迁移(图3a)。另一类为强振幅、连续反射特征,井震标定指示强振幅为砂岩沉积,并且该特征与 Wu 解释的中央峡谷水道纵向充填特征相似,因此解释为水道垂向叠加^[15];该侵蚀界面之上的弱振幅、杂乱充填,井震标定揭示这类反射特征为泥质沉积,同时前人大量研究成果指示该特征为滑塌块体沉积,因此研究区杂乱充填特征解释为滑塌块体(MTD)充填(图3d)。

单期水道局部侵蚀面规模较小,单期侵蚀界面的宽度为200~350 m。发育在复合水道带内部或单期水道底部。地震剖面上表现为下切,界面之上为平行、弱振幅反射充填,解释为废弃水道充填(图3f)。

3.2 天然堤

研究区发育两类天然堤,内天然堤(图3f)和外天然堤(图3b,f)。外天然堤限定水道复合体的发育规模。内天然堤控制单期水道纵向发育的厚度。

外天然堤厚度150~270 m。地震反射表现为中-高振幅,强连续反射。随着外天然堤的发育,天然堤地层的倾角越来越大。在下斜坡,外天然堤倾角从底部的 $0^{\circ}\sim 0.1^{\circ}$ 变化到顶部的 $0.2^{\circ}\sim 0.3^{\circ}$ 。外天然堤内部有时也发育下超或上超的反射终止特征。

3.3 末端朵体

水道末端朵体是深水沉积重要的烃类储层。地震剖面上表现为强振幅、高连续反射,小尺度朵体由1~2个同相轴构成,平面上表现为朵叶形态,发育在单期侵蚀能力较弱、下切深度小于40 m的水道末端(图3c)。大尺度朵体发育在单期侵蚀能力强、下切

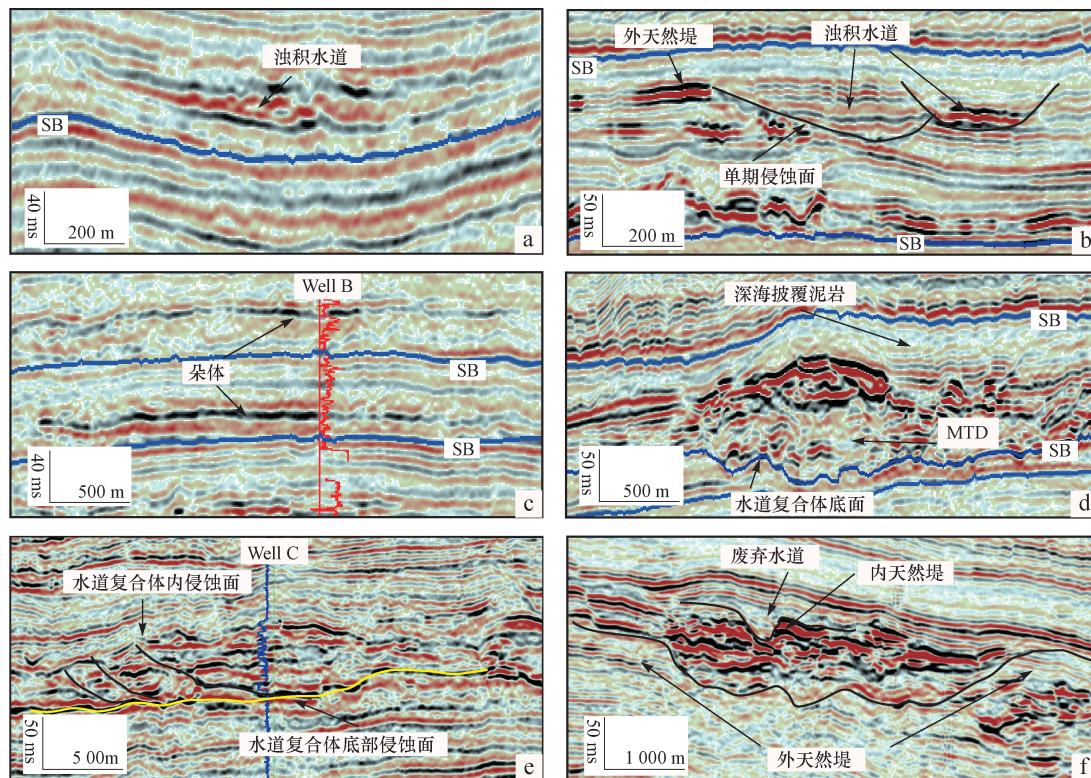


图3 下刚果盆地中新统深水水道研究区沉积要素类型及地震相特征

Fig. 3 Types of sedimentary elements and corresponding characteristics of seismic facies in the Miocene deep-water channels in Lower Congo Basin

- a. 侧向迁移水道反射特征;b. 单期侵蚀水道及外天然堤反射特征;c. 末端朵体反射特征;d. 水道复合体侵蚀底面及深海泥岩反射特征;
e. 非限定性侧向迁移复合水道内侵蚀界面反射特征;f. 限定性垂向叠加水道复合体内废弃水道及内天然堤反射特征

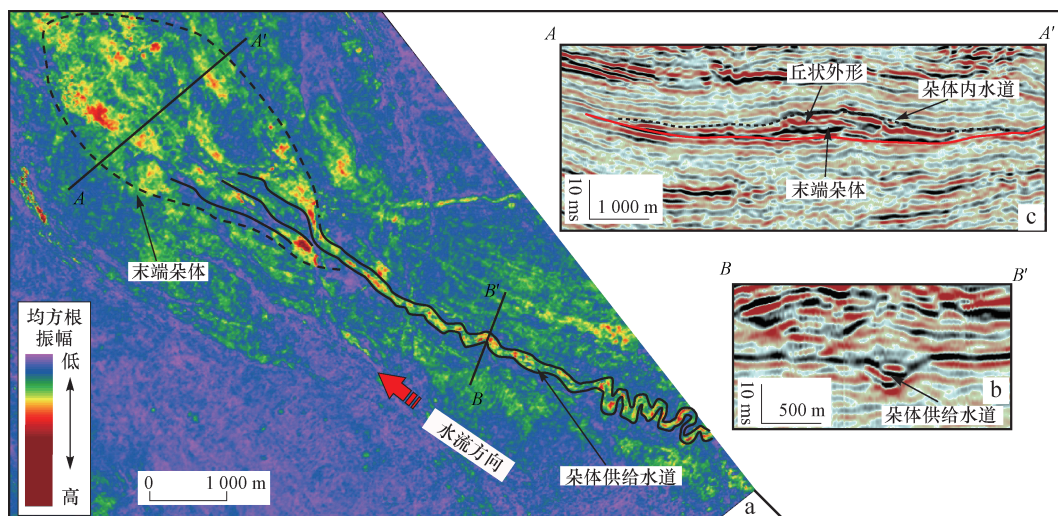


图4 下刚果盆地中新统深水末端朵体发育特征

Fig. 4 Developmental characteristics of deep-water terminal lobes in the Miocene Lower Congo Basin

a. 深水沉积体平面展布; b. 末端朵体地震反射特征剖面; c. 朵体供给侵蚀水道反射特征剖面

深度大于 70 m 的水道末端,由 4~5 个同相轴构成,平面朵体宽度可达 4 km,朵体之上可见多期的分支决口水道,分支水道的宽深比明显低于供给水道(图 4)。

3.4 远洋沉积

三级层序顶部的四级层序内(SQ1U, SQ2U, SQ3U, SQ4U, SQ5U, SQ6U, SQ7U)(图 2b),地震剖面上对应低-中振幅、中-高频、平行连续反射特征(图 3d)。研究区钻井 Well A 标定该地震反射为泥岩,并因此解释为盆地“饥饿期”远洋低能原地泥质沉积(图 2a)。远洋沉积分布范围十分广泛,是三级层序顶部四级层序的主要沉积特征。

3.5 滑塌块体沉积(MTD)

滑塌块体沉积(MTD)是深水盆地最重要的沉积体系之一^[25]。在重力作用下形成的碎屑流、滑塌和滑移均是属于 MTD 沉积。地震剖面上通过外部“底平顶凸”反射形态和内部杂乱、断续反射特征可以进行识别。研究区的 MTD 发育在水道复合体的底部,表现为弱振幅、断续、杂乱反射。平面上被复合水道的外天然堤限定,推测可能为侵蚀水道两岸侵蚀形成的滑塌沉积。水道底部的 MTD 沉积为泥质碎屑流沉积(图 3d)。

4 深水水道沉积类型

4.1 单期水道沉积

研究区发育两类单期水道类型(图 5):一类为以

下切作用为主的水道,不发育天然堤;一类为以加积作用为主的水道,发育天然堤。两种不同的水道特征反映了不同的水动力条件和沉积背景。

4.1.1 单期下切水道

单期下切型水道以四级层序 SQ2L 内最为典型。平面上表现为高弯曲度的线状形态,平均曲率为 1.5,水道宽度 100~200 m,深 20~30 m,宽深比 3~10。振幅属性揭示(图 5a),水道泓线为强振幅、高连续反射充填,地震剖面上后期差异压实作用下导致的水道顶面上凸形态,指示水道泓线高能砂质充填特征。在高弯曲度段,水下水道的“截弯取直”指示流体的能量较高。

该层序内部高弯曲度的单期下切水道发育特征说明在高能浊流发育初级阶段具备形成高弯曲度水道条件,其具体的水下动力成因还需进一步研究。

4.1.2 单期加积水道

单期加积水道发育以四级层序 SQ5L 内最为典型(图 5b),平面上表现出低曲率特征,曲率 1.1~1.5,水道宽度 90~180 m,深度 18~30 m。地震剖面上,泓线为弱振幅、连续充填,两侧的天然堤为不对称的中-强振幅、中-低频率、连续性好的反射充填,具有典型的“海鸥”外形,在地震主频 40 Hz 条件下,揭示天然堤加积高度介于 15~30 m。

该类水道发育特征表明水动力条件较弱,下切能力弱,以加积作用为主,天然堤的发育约束水道形态,以相对顺直水道为主要特征。

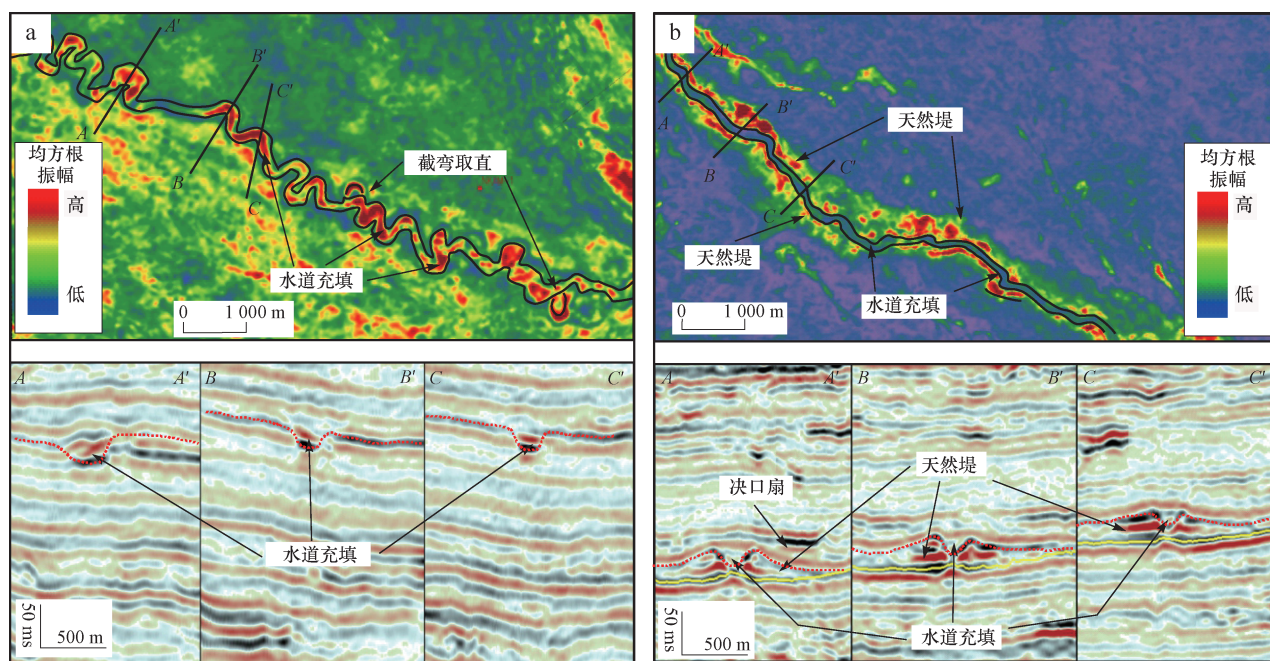


图5 下刚果盆地中新统单期下切水道(a)和单期加积水道(b)发育特征

Fig. 5 Characteristics of single-incised channel(a) and single-aggradation channel(b) in the Miocene Lower Congo Basin

4.2 复合水道沉积

前人将复合水道的类型划分为限制型和非限制型两大类^[36]。本文进一步考虑了复合水道的发育特征、叠加样式和控制因素进行了分类。

由海平面上升导致的可容纳空间增大有利于不同期次水道的垂向叠加,无论是限制环境还是非限制环境,形成水道复合体砂体具有“厚而窄”的特征(图6a)。由海平面下降导致的可容纳空间减小有利于多期水道的侧向迁移,形成的水道复合体砂体具有“宽而薄”的特征(图6b)。可见,海平面变化方式导致了这两种端元水道的相互作用和迁移方式^[44],进而形成了不同形态的水道复合体。

4.2.1 垂向叠加型复合水道

在盆地沉降的高峰期或海平面缓慢上升期,由于水下均衡剖面的调整,导致局部可容纳空间逐渐增大,发育垂向叠加型复合水道。多期水道垂向的充填和切割,形成了复杂的内部结构。四级层序SQ7L内(图6a),地震剖面上表现为一定的迁移,但以叠加作用为主。强振幅反射被后期侵蚀水道切割,整体上具有平行叠置的样式。SQ7L内叠加型复合水道的宽度1.5~3 km,深度可达200 m。

4.2.2 侧向迁移型复合水道

这里的侧向迁移水道不包括高弯水道的点坝侧积

体。点坝侧积体在地震剖面上往往表现为中-高等角度叠瓦状反射特征,以弱振幅充填的水道废弃结束标志,是单支水道逐渐迁移的结果。点坝侧积体常常发育在地形坡度较缓,水体能量较稳定的环境下,属于自旋回因素占主导形成的沉积类型。

侧向迁移复合水道是由于晚期水道横向迁移,侵蚀早期水道形成的横向叠合体,没有明显的水道废弃特征。图6b可见,在四级层序SQ7L内,水道充填在地震剖面上表现为水平叠加、强振幅“台阶式”的反射特征。水道为多期、单向迁移,侧向迁移作用导致后期水道侵蚀前期局部水道,形成多期残余水道叠置复合体。该类复合水道常常发育在地形坡度比较大,水体能量较强的区域。单期水道宽度仅有150 m,叠加水道带宽度可达1.5 km。单井钻遇该类砂体厚度很薄40~100 m。

5 深水水道充填演化过程

三级层序底部的四级层序(SQ1L, SQ2L, SQ3L, SQ4L, SQ5L, SQ6L, SQ7L)是水道复合体最发育的部位,同时,也是砂体主要沉积时期,深水储层发育的关键时期。下面以四级层序SQ7L为例,探讨复合水道的演化过程。SQ7L四级层序的底界面也是三级层序的底界面,对应区域性的大规模海底侵蚀事件^[21]。SQ7L四级层序顶界面是水进面,是可以连续追踪的界面。

通过应用地震沉积学地层属性切片技术^[45],揭示出相距1.5 km的南、北两支复合水道在四级层序内的

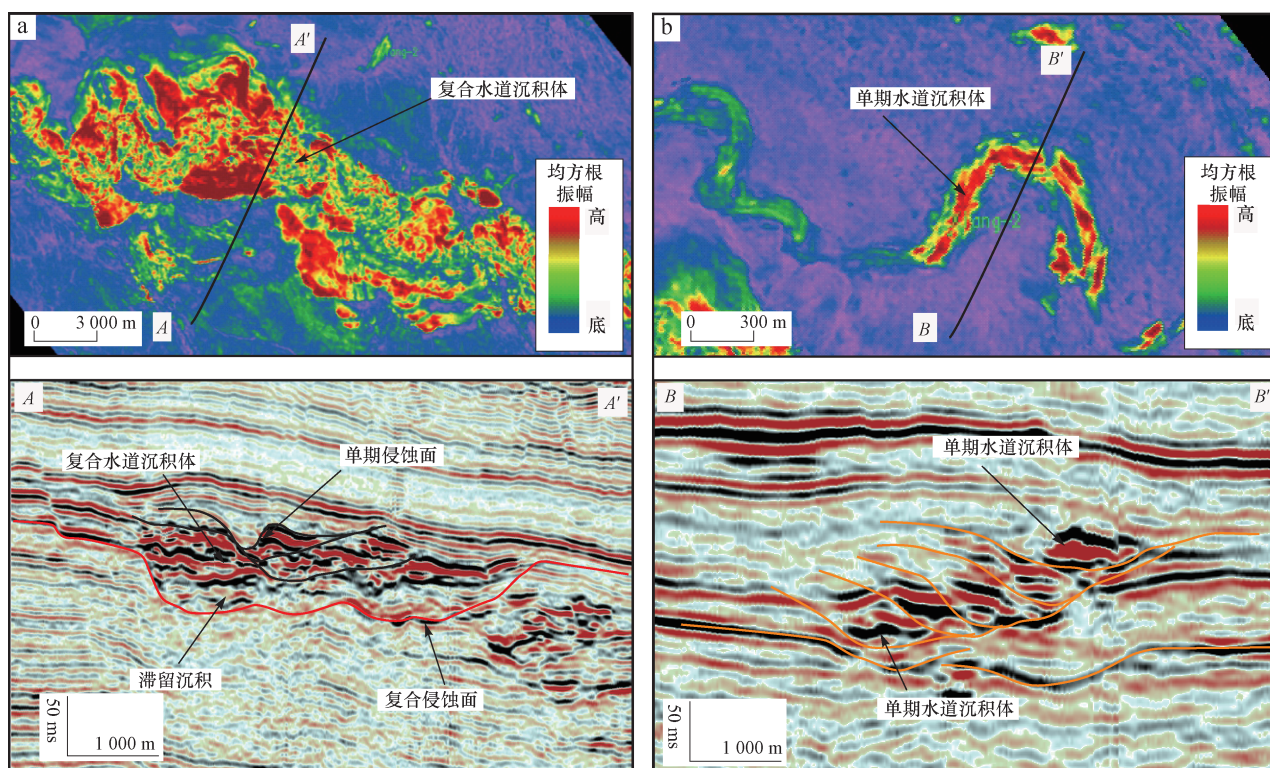


图6 下刚果盆地中新统加积为主复合水道(a)与侧向迁移为主复合水道(b)充填与平面特征

Fig. 6 Sedimentary filling and planar distribution of the channel complexes dominated by vertical aggradation(a) and dominated by lateral migration(b) in the Miocene Lower Congo Basin

发生、发展、衰退和消亡演化过程。分析发现,同一层序格架内,不同位置的水道复合体发育程度和迁移方式存在着差异。

如图7所示,研究区内发育两条近似平行的复合水道(南水道和北水道),南部水道复合体宽度1000~2800 m,北部复合水道宽度300~800 m。平面和剖面揭示南部水道复合体的规模和持续时间均大于北部的水道复合体。

图7a为复合水道形成初始期,南北两支水道形成的限制性地貌规模不同。南部浊积体侵蚀能力强,形成限制性地貌规模大,北部水道侵蚀能力较弱,形成限制性地貌规模较小。这一阶段,主要的沉积体为水道底部的滑塌块体沉积和滞留沉积。从初始期充填特征可见,南部水道复合体的强振幅砂体沉积在水道的南部,北部水道复合体的强振幅砂体充填在水道的北部。

图7b—e揭示了同一四级层序格架内两支相邻水道复合体不同演化过程,南部初始下切规模较大的限制性地貌可容纳空间明显大于北部初始下切规模较小的限制性地貌形成的可容纳空间。这种初始地貌差异必然导致后期重力流优先选择可容纳空间较大的南部负地貌单元推进,因此,流体的体积和流量南水道均优于北水道,南支水道虽然在外天然堤的限定下,频繁摆动,

但是总体上趋向于纵向加积。北支水道,地貌限定性较弱,可容纳空间较小,流体的流量和体积较小,水道更趋向于横向迁移或形成新的侵蚀水道。

南部复合水道内多期水道的切割—充填,纵向加积,形成了厚度较大的高振幅沉积砂体。北部水道由于可容纳空间的限制,向可容纳空间较大的一侧定向迁移,但由于重力流供给的体积和规模越来越小,导致水道在阶段e突然衰退,但没有发育废弃水道,该特征表明后期的浊流很可能在上游汇聚到了南部水道,导致下游北部水道的突然衰退。相反,在阶段e,南部复合水道砂岩沉积充填的规模达到最大。

图7f是南部复合水道发育的衰退期。完整的保留了最后一期高弯曲度浊积水道形态,水道的发育不受天然堤限制,为单期侵蚀型水道,内部充填高振幅属性砂体。

图7g是复合水道的消亡阶段,南北水道均被原地深海泥质沉积覆盖,水道消失。

6 深水水道演化控制因素

深水碎屑流沉积由自旋回和它旋回因素共同控制,包括海平面变化、构造运动、沉积物类型、气候变化、物源供给速率、源区与沉积区距离、母岩的类型、地

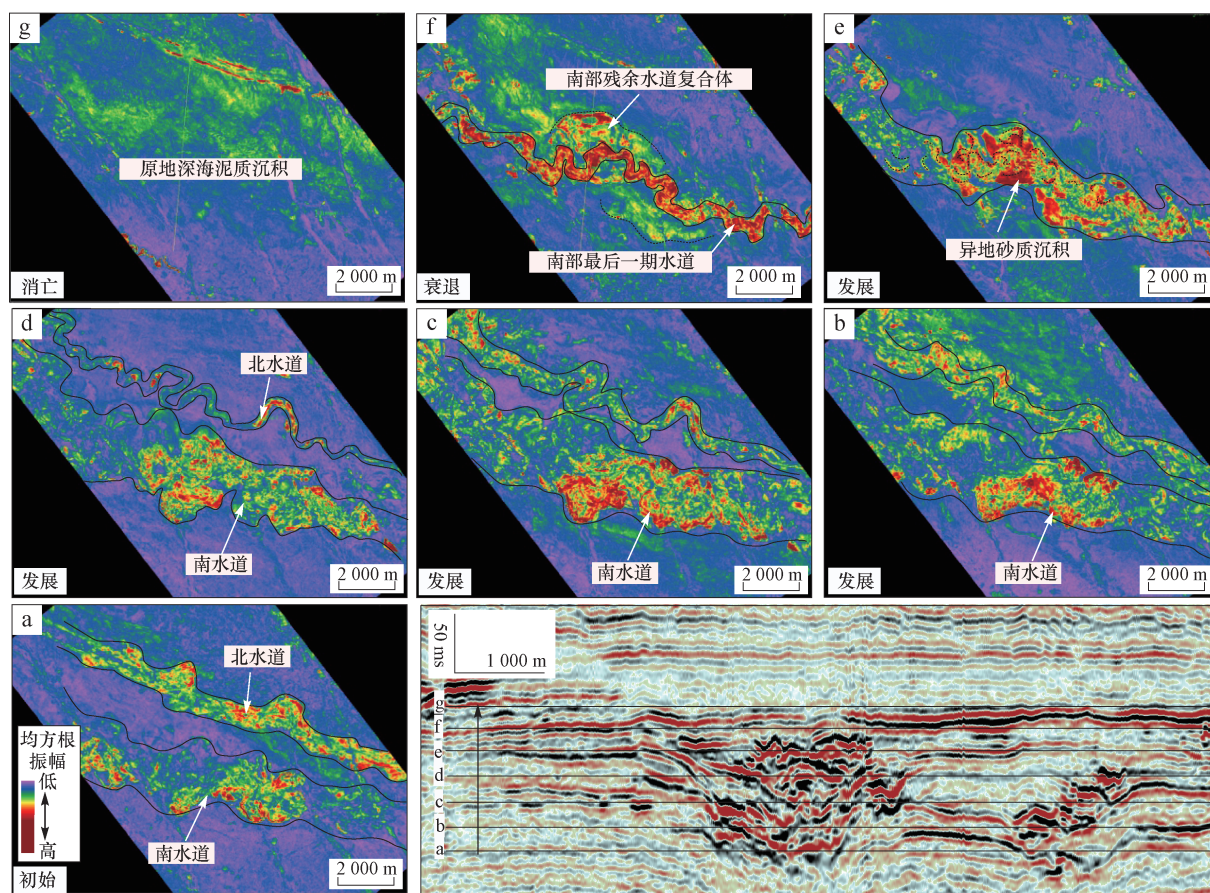


图7 下刚果盆地中新统四级层序(SQ6L)内复合水道演化过程

Fig. 7 The evolution of deep-water channel complexes in the fourth-order sequence(SQ6L) in the Miocene Lower Congo Basin

a. 水道复合体发育初始阶段;b—e. 水道复合体发展阶段;f. 水道复合体衰退阶段;g. 水道复合体消亡阶段

形坡度变化等。同时,地震和海啸等突发性事件也会引起陆架沉积物搬运到深海沉积^[46-47]。这些因素不同程度的叠加引起了深水水道侵蚀能力的差异,进而导致复杂的、多样的砂体叠置关系。

它旋回在海平面高位期控制现象更明显,自旋回在海平面低位期更明显^[48]。当海平面下降期,充足的陆源供给形成的异地砂体供给体系可以形成各种类型的水道。相反,在海平面上升期,沉积物供给减少,浊流水道发育规模降低,以泥岩体系沉积为主。通常情况下,离物源区越近,地形坡度越陡,海平面下降幅度越大,沉积物的供给越充足,沉积物负载密度越大,流体的速度就越大,进而流体的侵蚀的能力就越强^[49]。陡斜坡对流体加速作用,形成强大的侵蚀能力,进而形成可容纳空间较大的限制性水道体系。缓斜坡对初始流体流速改变较弱,导致侵蚀能力较弱,易于形成可容纳空间较小的非限制性水道体系。研究区中新世沉积地层发育时期,海平面波动、构造活动和气候变化控制着水道形态和砂体富集部位(图8)。流体密度和体积、沉积物粒度、斜坡坡度可能控制着道的充填结构水和类型。

渐新世—早中新世,非洲板块和 Iberia 板块碰撞、隆升,形成大面积剥蚀区,大陆架暴露和侵蚀,大量陆源碎屑在斜坡背景下输送到深海盆地,形成了广泛发育的中新世深水重力流水道体系。同时,冰期气候条件刚果河充足的物源供给也对多旋回深水水道体系发育起到重要的控制作用。图8所示,根据前人建立的西非海平面变化曲线对比分析^[50],在SQ3有一次大幅度下降,可能是形成了SQ3下部四级层序(SQ3L)深水水道的大规模分布的主要原因。SQ6海平面下降到最低点,该事件与全球10.5Ma海平面下降事件一致。SQ7缓慢上升,但由于SQ6时期板块碰撞导致的构造抬升,至SQ7时期达到最大,同时物源供给在SQ7时期达到高峰,形成了SQ7大规模的复合水道体系。

$\delta^{18}\text{O}$ 揭示,渐新世以来,西非气候由温室转变为冰室,温湿气候条件下,海平面变化表现为低幅高频特点,而冰室气候条件下海平面转变为高频高幅变化,干燥与潮湿的气候环境交替变化。冰室气候导致沉积物供给幕式变化,形成深水砂质沉积层序(SQ1L, SQ2L, SQ3L, SQ4L, SQ5L, SQ6L, SQ7L)与泥质沉积层序

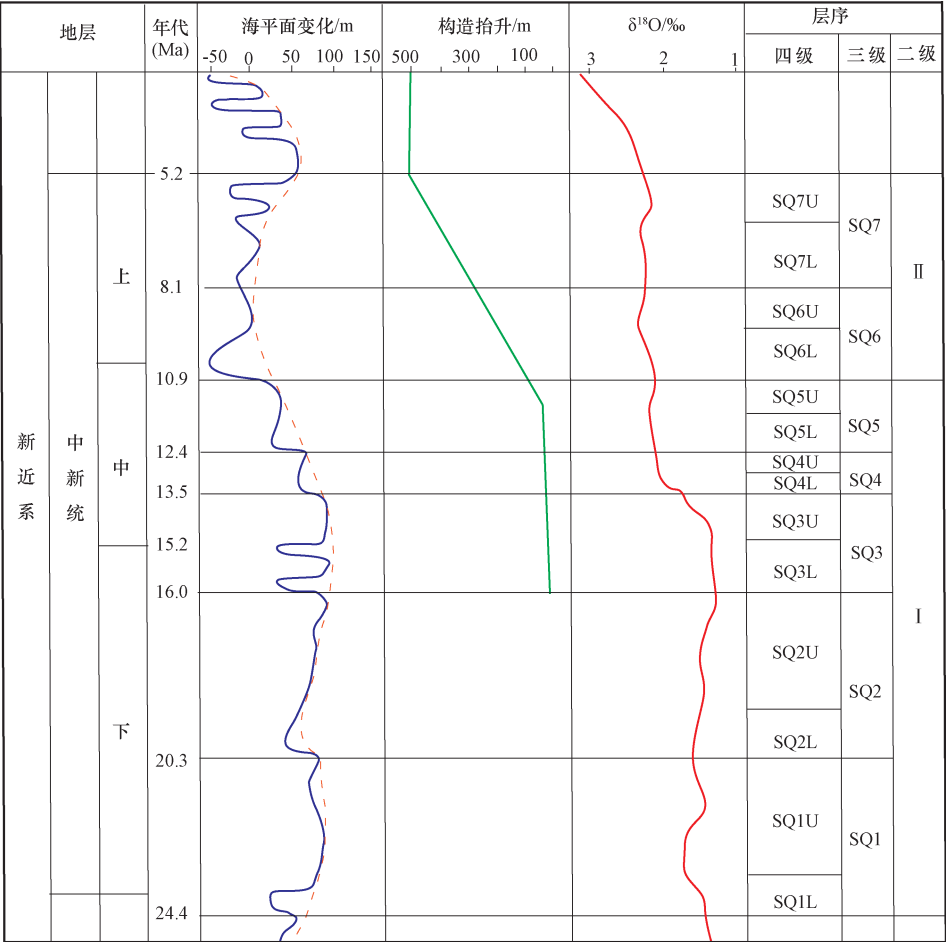


图 8 西非海平面变化、构造抬升和氧同位素变化特征^[50]

Fig. 8 The sea level fluctuation, tectonic uplifting and oxygen isotope changes in West Africa^[50]

(SQ1U, SQ2U, SQ3U, SQ4U, SQ5U, SQ6U, SQ7U) 交互的深水沉积系统。

7 结论

- 1) 建立了下刚果盆地中新统深水沉积高精度地层对比格架。中新统划分 7 个三级层序和 14 个四级层序。每一个三级层序由下部的砂质重力流四级层序和上部的深海泥质沉积四级层序构成。三级层序下部的四级层序是利储层的富集部位。
- 2) 基于钻井和地震相特征, 识别出复合侵蚀和单期侵蚀两类侵蚀界面、水道充填、内天然堤、外天然堤、末端朵体、远洋沉积和滑塌块体沉积 (MTD) 等多种深水沉积单元。其中侵蚀水道充填和末端朵体是砂体富集单元。
- 3) 根据深水水道形态和迁移样式, 将中新统深水水道划分为单期下切型水道、单期加积型水道、垂向加积复合水道、侧向迁移复合水道 4 种基本水道类型。其中在一个四级层序内垂向加积复合水道和侧向迁移

复合水道具有不同的演化过程, 说明“自旋回”因素的控制作用。

4) 应用地震沉积学分析方法, 在四级层序内描述了复合水道发生、发展、衰退和消亡的演化过程, 指出同一层序格架内, 不同位置的水道复合体发育程度、充填过程和迁移方式的差异受可容纳空间变化的控制。同时指出构造隆升是形成深水富砂水道体系的原动力, 西非海平面变化控制着三级层序的发育, 制约着深水水道复合体的整体发育规模。西非气候由温室转变为冰室交替变化控制了深水砂质重力流沉积和深海泥质沉积的四级层序发育部位。

参 考 文 献

[1] 解习农, 任建业, 雷超. 盆地动力学研究综述及展望[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 76-84.

Xie Xinong, Ren Jianye, Lei Cha. Reviews and prospects of depositional basin dynamics[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 76-84.

[2] 庞雄, 陈长民, 朱明, 等. 深水沉积研究前缘问题[J]. 地质论评, 2007, 53(1): 36-43.

- Pang Xiong, Chen Changmin, Zhu Ming, et al. Frontier of the deep-water deposition study[J]. *Geological Review*, 2007, 53(1): 36–43.
- [3] 李相博, 卫平生, 刘化清, 等. 浅谈沉积物重力流分类与深水沉积模式[J]. *地质评论*, 2013, 59(4): 607–614.
- Li Xiangbo, Wei Pingsheng, Liu Huaqing, et al. Discussion on the classification of sediment gravity flow and the deep-water sedimentary model[J]. *Geological Review*, 2013, 59(4): 607–614.
- [4] 苏明, 解习农, 王振峰, 等. 南海北部琼东南盆地中央峡谷体系沉积演化[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 467–478.
- Su Ming, Xie Xinong, Wang Zhenfeng, et al. Sedimentary evolution of the central canyon system in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 467–478.
- [5] 苏明, 姜涛, 张翠梅, 等. 琼东南盆地中央峡谷体系东段形态—充填特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(6): 1805–1815.
- Su Ming, Jiang Tao, Zhang Cuimei, et al. Characteristics of morphology and infillings and the geological significances of the central canyon system in Eastern Qiongdongnan Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(6): 1805–1815.
- [6] Peter T H, Tanya W. Global distribution of large submarine canyons: Geomorphic differences between active and passive continental margins[J]. *Marine Geology*, 2011, 285(1–4): 69–86.
- [7] Andrew A A, Senastian K. Morphology, seismic characteristics and development of Cap Timiris Canyon, offshore Mauritania; A newly discovered canyon preserved-off a major arid climatic region[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(1): 37–59.
- [8] Bouma A H. Fine-grained submarine fans as possible recorders of long-and short-term climatic changes [J]. *Global and Planetary Change*, 2001, 28(1): 85–91.
- [9] Mc Hargue T, Pyrcz M J, Sullivan M D, et al. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: Patterns and predictions [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(3): 728–743.
- [10] Dykstra M, Kneller B. Lateral accretion in a deep-marine channel complex: Implications for channelized flow processes in turbidity currents[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(5): 1411–1432.
- [11] 谢清惠, 邓宏文, 郭佳. 西非下刚果盆地深水曲流水道的地震响应特征与演化模式分析[J]. *石油物探*, 2013, 52(6): 655–661.
- Xie Qinghui, Deng Hongwen, Guo Jia. Seismic response characteristics and evolution models of deepwater meandering channels in Lower Congo Basin, West Africa[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(6): 655–661.
- [12] Gingele F X, Deckker P D, Hillenbrand C D. Late Quaternary terrigenous sediments from the Murray Canyons area, offshore South Australia and their implications for sea level change, palaeoclimate and palaeodrainage of the Murray-Darling Basin [J]. *Marine Geology*, 2004, 212(1–4): 183–197.
- [13] Gong C L, Wang Y M, Zhu W L, et al. Upper Miocene to Quaternary unidirectionally migrating deep-water channels in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(2): 285–308.
- [14] 林畅松, 刘景彦, 蔡世祥, 等. 莺—琼盆地大型下切谷和海底重力流体系的沉积构成和发育背景[J]. *科学通报*, 2001, 46(1): 69–72.
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Cai Shixiang, et al. Sedimentation and evolution background of large incised channel and submarine gravity flow systems in Ying-Qiong basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(1): 69–72.
- [15] Wei W, Quan L, Jing Y, et al. The Central Canyon depositional patterns and filling process in east of Lingshui Depression, Qiongdongnan Basin northern South China Sea [J]. *Geological Journal*, 2018, 53(6): 3064–3081.
- [16] Babonneau N, Savoye B, Cremer M, et al. Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(4): 445–467.
- [17] Abreu V, Sullivan M, Pirmez C, et al. Lateral accretion packages (LAPs): An important reservoir element in deep water sinuous channels[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6–8): 631–648.
- [18] Pirmez C, Imran J. Reconstruction of turbidity currents in Amazon Channel[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6–8): 823–849.
- [19] De Ruig M J, Hubbard S M. Seismic facies and reservoir characteristics of a deep-marine channel belt in the Molasse foreland basin, Puchkirchen Formation, Austria[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(5): 735–752.
- [20] Fildani A, Normark W R, Kostic S, et al. Channel formation by flow stripping: large-scale scour features along the Monterey East Channel and their relation to sediment waves [J]. *Sedimentology*, 2006, 53(6): 1265–1287.
- [21] Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. Deep-water and fluvial sinuous channels—Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6–9): 388–405.
- [22] Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, et al. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6–8): 649–676.
- [23] Deptuck M E, Sylvester Z, Pirmez C, et al. Migration-aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6): 406–433.
- [24] 李华, 王英民, 徐强, 等. 深水单向迁移水道—堤岸沉积体系特征及形成过程[J]. *现代地质*, 2013, 27(3): 653–661.
- Li Hua, Wang Yingmin, Xu Qiang, et al. Characteristics and processes of deep water unidirectionally-migrating channel-levee System [J]. *Geoscience*, 2013, 27(3): 653–661.
- [25] 秦雁群, 万乾坤, 计智锋, 等. 深水块体搬运沉积体系研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 140–152.
- Qin Yanguan, Wan Lunkun, Ji Zhifeng, et al. Progress of research on deep-water mass-transport deposits [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 140–152.
- [26] 赵钊, 汤良杰, 赵志刚, 等. 南海北部珠二坳陷超深水区断层系统分析中的高精度相干技术[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 165–174.
- Zhao Zhao, Tang Liangjie, Zhao Zhigang, et al. High-precision coherence technique in fault system analysis in ultra-deepwater area of the Zhu II Depression, northern South China Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 165–174.
- [27] 孙辉, 刘少治, 吕福亮, 等. 东非鲁武马盆地渐新统深水沉积层序地层格架组成和时空分布[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(1): 170–181.
- Sun Hui, Liu Shaozhi, Lyv Fuliang, et al. Stratigraphic framework and temporal spatial distribution of Oligocene deepwater sedimentary se-

- quence in Ruvuma Basin, East Africa[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(1): 170–181.
- [28] 李向东, 阙易, 郇雅棋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统克里摩里组深水等深流溢岸混合沉积[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1201–1212.
- Li Xiangdong, Que Yi, Huan Yaqi, et al. Mixed carbonate siliciclastic sequences of deep water contour current overflow origin of Kelimoli Formation in Zhuozishan area, western margin of Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1201–1212.
- [29] Sylvester Z, Pirmez C, Cantelli A, et al. A model of submarine channel-levee evolution based on channel trajectories: Implications for stratigraphic architecture[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(3): 716–727.
- [30] 郑荣才, 李云, 戴朝成, 等. 白云凹陷珠江组深水扇砂质碎屑流沉积学特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(6): 1581–1589.
- Zheng Rongcai, Li Yun, Dai Chaocheng, et al. Depositional features of sandy debris flow of submarine fan in Zhujiang Formation, Baiyun Sag[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(6): 1581–1589.
- [31] 陈宇航, 姚根顺, 吕福亮, 等. 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[J]. *石油学报*, 2017, 38(9): 1048–1058.
- Chen Yuhang, Yao Genshun, Lyv Fuliang, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of Oligocene deep-water channel-lobe in Rovuma Basin of the East Africa[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(9): 1048–1058.
- [32] 王英民, 王海荣, 邱燕, 等. 深水沉积的动力学机制和响应[J]. *沉积学报*, 2007, 25(4): 495–504.
- Wang Yingmin, Wang Hairong, Qiu Yan, et al. Process of dynamics and its response of deep-water sedimentation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(4): 495–504.
- [33] Quan L, Shui Y, Wei W, et al. Detection of a deep-water channel in 3D seismic data using the sweetness attribute and seismic geomorphology: A case study from the Taranaki Basin, New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2017, 60(3): 199–208.
- [34] Li Q, Wu W, Yu S, et al. The application of three-dimensional seismic spectral decomposition and semblance attribute to characterizing the deepwater channel depositional elements in the Taranaki Basin of New Zealand[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(9): 79–86.
- [35] Jeff P, Kathryn J A, Gareth M K, et al. Flow processes and sedimentation in submarine channel bends[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6–9): 470–486.
- [36] 蔡露露, 刘春成, 吕明, 等. 西非下刚果盆地深水水道发育特征及沉积储层预测[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(2): 60–70.
- Cai Lulu, Liu Chuncheng, Lyu Ming, et al. The development characteristics of deep water channel and sedimentary reservoir prediction in Lower Congo basin, West Africa[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(2): 60–70.
- [37] 王琳霖, 王振奇, 肖鹏. 下刚果盆地 A 区块中新统深水沉积体系特征[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 963–974.
- Wang Linlin, Wang Zhenqi, Xiao Peng. Characterization of deep water sedimentary system in the Miocene of Block A in Lower Congo Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 963–974.
- [38] Martin P A, Michael R H. Evolution of the Cretaceous Astrid thrust belt in the ultradeep water Lower Congo Basin, Gabon[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(4): 487–511.
- [39] Van W, Van I J. Fine-grained sediments of the Zaire deepsea fan, southern Atlantic Ocean[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1984, 15(1): 95–113.
- [40] Posamentier H, Allen G. Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 86(1–2): 91–109.
- [41] 秦雁群, 计智锋, 万仑坤, 等. 海相深水碎屑岩层序地层学理论进展及关键问题[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 12–21.
- Qin Yankun, Ji Zhifeng, Wan Lunkun, et al. Theory progress and key issues of deep water marine clastic sequence stratigraphy[J]. *Oil and Gas geology*, 2017, 38(1): 12–21.
- [42] 林畅松, 李思田, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的构造格局与古地理演化[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 210–218.
- Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim basin during the Paleozoic major evolutionary stages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 210–218.
- [43] 林畅松, 刘景彦, 刘丽军, 等. 高精度层序地层分析: 建立沉积相和储层规模的等时地层格架[J]. *现代地质*, 2002, 16(3): 276–281.
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Liu Lijun, et al. High resolution sequence stratigraphy analysis: construction of chronostratigraphic sequence framework on facies and reservoir scale[J]. *Geoscience*, 2002, 16(3): 276–281.
- [44] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 尼日尔三角洲盆地深水油田 A 海底扇储层质量差异[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 494–502.
- Lin Yu, Wu Shenghe, Wang Xing, et al. Reservoir quality differences of submarine fans in deep-water oilfield A in Niger Delta Basin, West Africa[J]. *Oil and Gas Geology*, 2014, 35(3): 494–502.
- [45] 朱敏敏, 曾洪流, 董艳蕾. 地震沉积学原理与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017. 20–38.
- Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, Dong Yanlei. *seismic Sedimentology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017. 20–38.
- [46] Zhang Wenbiao, Duan Taizhong, Liu Zhiqiang, et al. Architecture mode, sedimentary evolution and controlling factors of deepwater turbidity channels: A case study of the M Oilfield in West Africa[J]. *Petroleum Science*, 2017, 14(3): 493–506.
- [47] Shanmugam G. The constructive functions of tropical cyclones and tsunamis on deep-water sand deposition during sea level highstand: implications for petroleum exploration[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(4): 443–71.
- [48] Posamentier H W, Kolla V. . Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings[J]. *Journal of Sediment Research*, 2003, 73(3): 367–388.
- [49] Prather B E. Controls on reservoir distribution, architecture and stratigraphic trapping in slope settings[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6–8): 529–545.
- [50] Séranne M. Early Oligocene stratigraphic turnover on west Africa continental margin: A signature of the Tertiary greenhouse to icehouse transition[J]. *Terra Nova*, 1999, 11(4): 135–140.