

文章编号:1000-0550(2025)04-1446-15

刚果扇盆地深水沉积体系及控制因素 ——以渐新统一中新统为例

宫越,郭荣涛,张忠民,苏玉山,林东升,王兴华,吴高奎

中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206

摘要 【目的】刚果扇盆地是海外重要能源战略要地,盆地储层分布及其控砂机制是深水—超深水勘探的关键问题。【方法】基于目前最大范围多区块三维地震及井资料,揭示下刚果盆地主要目的层(渐新统一中新统)浊积水道形态特征、空间展布及控制机制。【结果】第三系浊积水道垂向上由底部滞留沉积、高砂地比叠置水道、低砂地比水道天然堤复合体、泥质充填四段构成,与水道的侵蚀期、充填期、溢出期和消亡期四个水道演化阶段相对应。平面上由陆向海依次发育强限制型—侵蚀深切谷水道、强限制型—侵蚀加积—复合水道、弱限制型—侵蚀加积—复合水道、非/弱限制型—加积—单支水道、加积型朵叶体。刚果扇盆地水道规模从渐新世至中新世先增大后变小,形成向北迁移的四期沉积体系演化阶段。早渐新世物源供给突增和西非陆缘隆升开启深水沉积体系大规模发育的序幕,中中新世的气候事件和海平面下降导致沉积体系在中中新世达到最繁盛阶段;断裂和盐构造等在陆坡上形成多级坡折及古地貌起伏控制平面砂体卸载区;盐构造对砂体分布影响主要体现在宏观大尺度的区域性富砂,及小尺度“三类八种”水道局部控制两方面。【结论】刚果扇盆地储层时空展布及多因素控制机制的揭示对我国能源战略规划和科研学术发展具有重要意义。

关键词 刚果扇;浊积扇;重力流;水道;控制因素

第一作者简介 宫越,女,1991年出生,博士,高级工程师,含油气盆地分析,E-mail: 15845804285@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.113

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.113

0 引言

目前深水和超深水油气勘探已成为上游石油工业的重要部分,而安哥拉刚果扇盆地作为海外深水油气勘探主力区已有大量油气发现^[1-5]。盆内发育规模巨大的深水重力流沉积体系,目前油气发现主要集中于渐新统至中新统^[6-14],储量规模巨大。从国有企业的能源战略规划和科研学术发展考虑,安哥拉深水沉积体系及其控制因素需要进一步的深入研究。

1996—2014年随着地震数据分辨率的不断提高,深水沉积体系的研究热度达到了高峰。目前,深水沉积体系研究主要集中于浊积水道发育特征、深水沉积体系结构和演化、成因机制与控制因素三个方面:学者从内部结构、外部形态、侵蚀能力、限制条件、发育期次等角度对水道特征进行了比较成熟的

研究^[11,14-17],并进一步提出如Mayall *et al.*^[15]的经典深水沉积发育模式理论;Wang *et al.*^[12]、Li *et al.*^[14]及多位学者^[12-14,18-21]针对深水沉积体系成因机制和控制因素也进行了充分讨论,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、母岩类型、地形坡度变化等因素。另外,Oluboyo *et al.*^[6]、陈亮等^[7]及其他学者^[7-11]强调刚果扇盆地盐构造对局部水道的改造机制。

总之,目前刚果扇盆地深水沉积体系的发育和控制因素研究处于百家争鸣的阶段,但由于前期各方研究数据未能连片或覆盖全盆,对中等尺度大规模砂体发育机制的统筹研究开展不够,对于刚果扇盆地深水沉积体系区域展布形态与独特的缓陆坡地貌的关系也未做过讨论。本研究基于目前最大范围的全盆多区块三维地震及井资料,建立刚果扇盆地浊积水道内部结构和平面形态模式,落实渐新统一中新统深水沉

收稿日期:2023-01-09;修回日期:2023-11-01;录用日期:2023-11-24;网络出版日期:2023-11-24

基金项目:中石化科技部项目(P21043-2,P21043-4) [Foundation: SINOPEC Ministry of Science and Technology, No. P21043-2, P21043-4]

积体系的时空展布,揭示大规模浊积扇发育的多因素控制作用,为未来勘探方向提供思路。

1 区域地质及构造背景

刚果扇盆地位于西非大陆边缘中部,盆地北边以马永巴隆起(Mayumba)为界与加蓬盆地相邻,南边以安布里什隆起(Ambrizete)为界与宽扎盆地相接(图1)。其构造演化过程可以划分为三个阶段^[3-6]:晚侏罗世—阿普特早期的裂谷阶段;阿普特—阿尔布期的过渡阶段;阿尔布期至今的被动陆缘阶段(图2)。

1) 晚侏罗世—阿普特早期

早白垩世巴雷姆期特里斯坦热幔柱事件使得西冈瓦纳大陆南端(即现今南非西海岸)开始由南向北拉张伸展,在研究区形成了近南北走向的狭长裂谷带,这些断裂带被东西走向滑断裂带分割成大量与现今海岸线近平行的半地堑,发育湖泊相、河流相等陆相沉积,并在巴雷姆早期沉积了富含有机质的湖相页岩。阿普特早期洋壳生成,开始进入蒸发岩大规模发育的过渡阶段。

2) 阿普特—阿尔布期

早阿普特期南大西洋打开,裂谷同外海开始连通,海水倒灌入侵,同时盆地伴有缓慢热沉降,盆地沉积从陆相转变为海陆过渡相。阿普特中晚期受南

大西洋中部 Walvis 海脊和 Rio Grand 高地的阻隔,裂谷盆地和海水的连通有限或时断时续,使得该区域盆地处于半封闭浅水环境,再因地处气温较高的热带地区,蒸发量大,发育了厚层的蒸发岩。

3) 阿尔布期至今

阿尔布期开始,盆地进入漂移期阶段,或被动陆缘阶段。期间经历热沉降和重力导致的盐运动,使盆地发育近岸拉张区和远岸过渡区及挤压区:在中上陆坡形成一系列与盐构造滑脱相关的断层及大型地堑,并在深海过渡区发育盐拱及盐底辟,在挤压区形成盐底辟和盐墙等。白垩纪晚期刚果扇盆地由局限海过渡为远洋一开阔海的沉积环境。古近纪非洲大陆开始隆升,形成渐新世区域不整合。中新世随着被动陆缘盆地的沉降加剧,海平面上升,物源供应增加,古刚果河由南向北发生大规模改道活动(图2)。上新世至更新世海平面再次下降,形成现代大规模刚果扇。

2 深水沉积体系发育及演化特征

2.1 层序格架划分

研究区以地层接触关系(如顶超、上超、下超、侵蚀、平行不整合)及测井相特征(如自然伽马测井(GR)曲线形态及幅度突变)为标准建立了统一的层序格架,包含5个三级及9个四级层序地层(图3)。

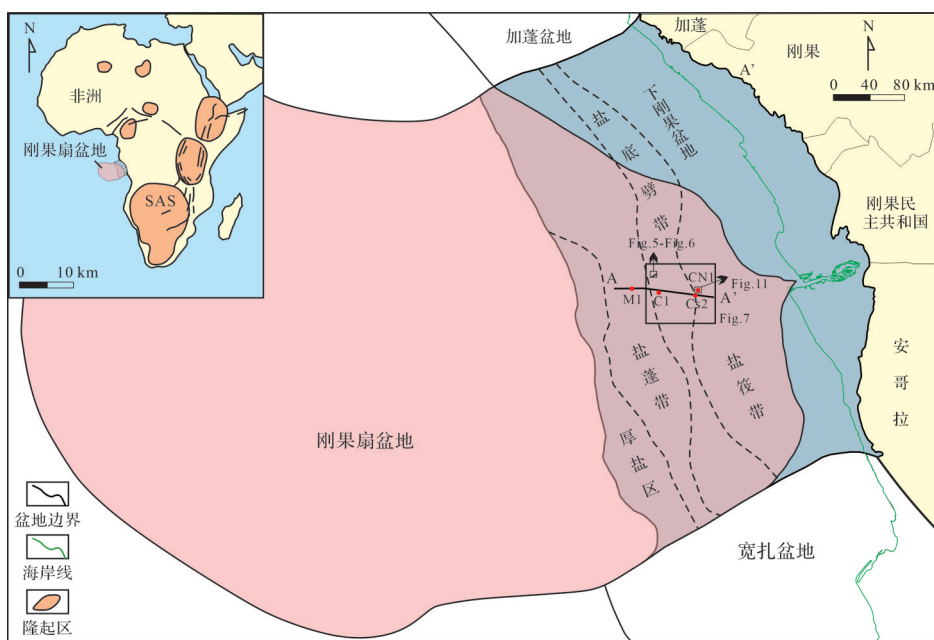


图1 刚果扇盆地区域位置

Fig.1 Regional location of the Congo Fan Basin

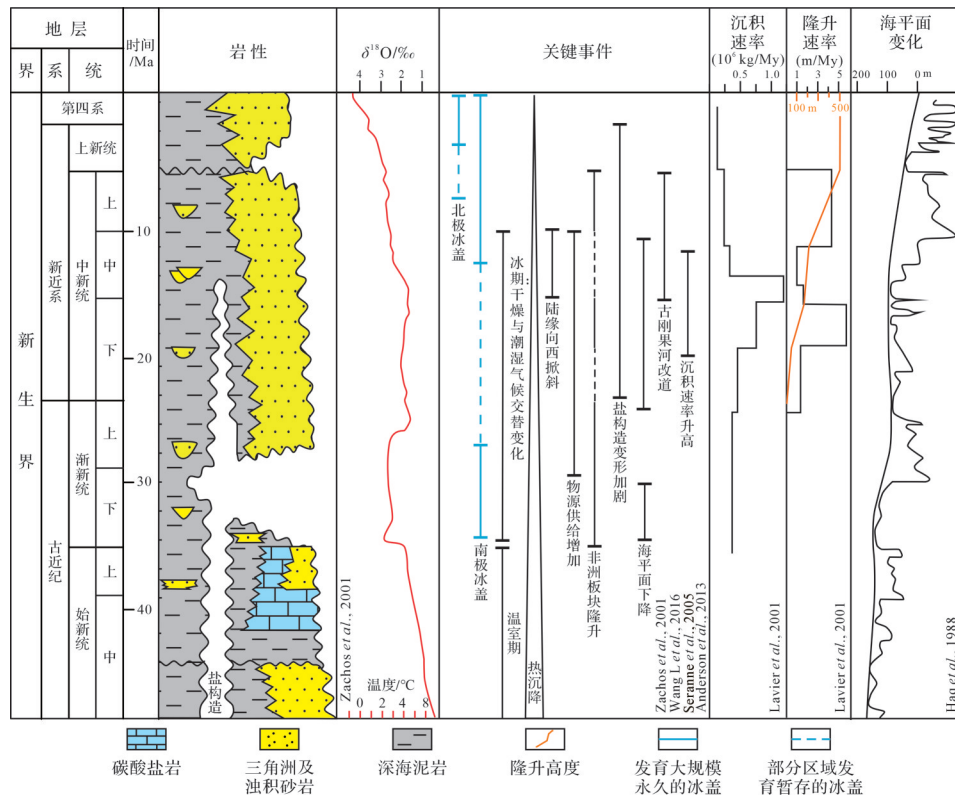


图2 刚果扇盆地区域构造背景及岩性柱状图

Fig.2 Tectonic background and lithologic column diagram of the Congo Fan Basin

三级层序SQ1底界面SB1是年龄约40 Ma的不整合面,陆上可见近4 Ma的地层缺失,在本研究区该界面主要表现为局部下超和平行不整合接触,低频、连续、中—强振幅。在测井曲线上表现为突变面,界面之上GR测井曲线为齿化箱形,界面之下为高伽马值微齿化的曲线特点。

三级层序SQ2底界面SB2,界面年龄约23.8 Ma,为中新统和渐新统分界面。该界面表现为低频、低—中连续性、中—强振幅,在多处可见上覆地层上超,及下伏地层削截的特征。GR测井曲线在该界面上常表现为齿形或指形,底部多呈渐变接触。

三级层序SQ3底界面SB3为中中新统和下中新统的分界面,界面年龄约15.1 Ma。该界面在地震剖面上表现为低—中连续性、低—中频、低—中振幅,可见明显的水道侵蚀界面,之下的地层被下切、侵蚀削截;在GR测井曲线上表现为突变面,界面以上常表现为漏斗形、齿化箱形或指形,界面之下表现为高伽马值的泥岩基线。

三级层序SQ4底界面SB4为中中新统与上中新统的分界面,界面年龄约为10.5 Ma。该界面在地震剖面表现为高频、中—高连续性、中—强振幅特征,局

部可见水道侵蚀特征,下部地层在该界面有顶超或削截现象。GR测井曲线在该界面之上常表现为指状或齿化箱形,之下显示出中—高值微齿化曲线特点。

三级层序SQ5底界面SB5是中新统与上新统分界,为区域性不整合面,界面年龄约为5.3 Ma。该界面呈低频、高连续性、中振幅,界面之下可见下伏地层顶超或削截,之上可见上覆地层上超现象;局部地区发育小规模下切谷沟,界面之下GR测井曲线呈高值,为一段较厚的泥岩,界面之上发育较薄层的砂岩,可见GR测井曲线呈指状。GR和电阻率测井曲线在界面位置皆有突变。

2.2 沉积相识别

根据岩心、测井、地震资料,刚果扇盆地深水沉积体系识别出包括浊积水道、天然堤、朵叶体等沉积单元,其中浊积水道包括水道主体沉积、砂质或泥质碎屑流沉积、滑塌变形、底部滞留沉积等(图4)。

1) 浊积水道

水道主体沉积:在测井资料及岩心资料中,研究区浊积水道储层物性良好,水道主体垂向上一一般呈现b-c-d-b-c叠置重复,粒度总体较细,底部多以粗砂岩为主,少见砾石,内部多以细砂—粉砂岩为主,常

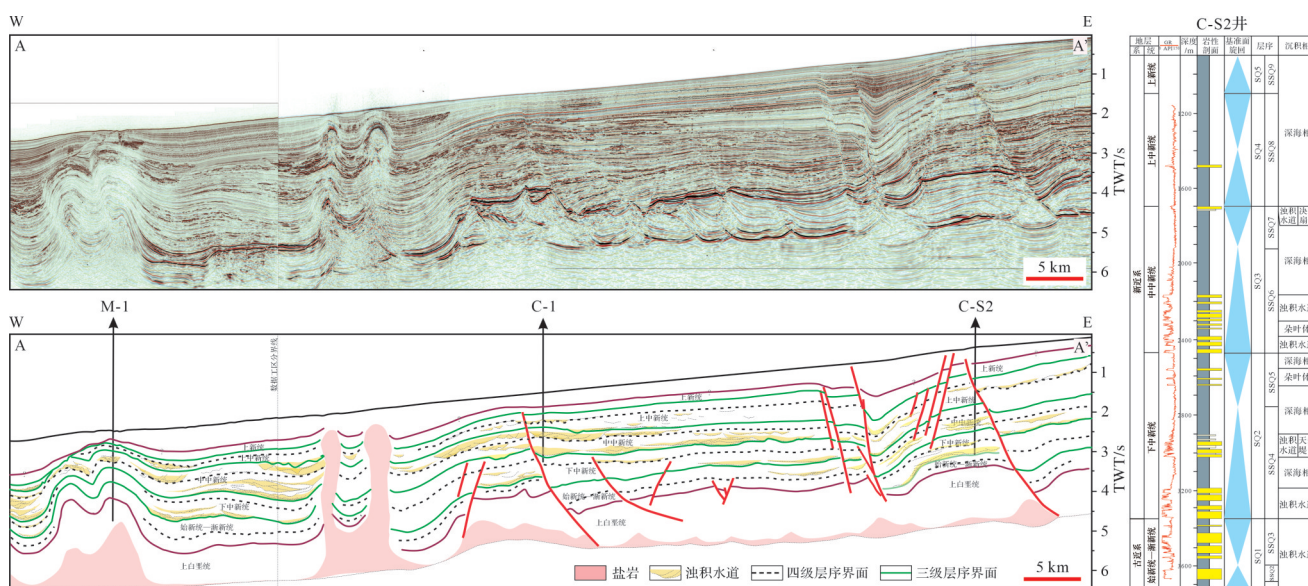


图3 刚果扇盆地层序划分方案及测井—地震剖面解释(位置见图1)

Fig.3 Sequence division scheme and log-seismic profile interpretation of the Congo Fan Basin (see Fig.1 for the location)

夹杂泥质薄层。地震相表现为相互平行的中—强振幅反射轴。GR测井曲线表现为明显的箱形。

底部滞留沉积:多为粒度较粗的砾岩沉积,地震相可见底面呈强振幅,内部充填呈弱振幅、中低频反射特征。重力流侵蚀陆坡及水道侧壁,形成滑塌沉积,同时重力流中粒度较粗的砾岩沉积下来,在水道底部形成滞留沉积。GR测井曲线多表现为指形低值。

滑塌变形:多明显见于岩心和地震剖面,测井曲线识别较难,曲线主要呈齿形特征。岩心可见大小不等泥屑、软变形结构、滑塌变形结构等,地震相表现为强振幅断续杂乱反射。水道在侵蚀发育过程中对水道侧壁及天然堤产生破坏作用,导致陆坡或水道侧壁产生滑塌变形。平面上呈半圆或扇形,多与水道边缘的扇形滑塌痕相伴生,但内部结构差异较大。

碎屑流沉积:具上、下两层韵律结构,下部发育具平行碎屑结构的层流段,上部发育具块状层理的“刚性”筏流段。内部呈块状构造,具有明显的顶底突变面,如砂质碎屑流的块状构造以砂岩与底部泥岩突变接触为典型特征,砂岩层内部不含任何沉积构造,存在漂浮砾石,少见规律的垂向粒度变化;碎屑流底部可见因剪切改造形成的平行排列泥质碎屑或泥质撕裂屑,但砂质碎屑流泥质杂基含量低,其块状砂岩底部的剪切构造可能并不发育。地震相与滑塌变形较为相似,在研究区常表现为频率更高的中振幅杂乱反射。GR测井曲线主要呈齿形或指形特征。

2) 天然堤

天然堤主要由泥质和薄层砂岩组成,GR测井曲线多表现为指状或锯齿状形态。地震剖面上表现为水道两侧近似楔状的强振幅反射,连续性好,其平面上沿河道分布,与浊积水道整体在剖面呈鸥翼形。其中内侧沉积坡度较陡,外侧坡度较缓,由内堤岸向外堤岸,振幅强度逐渐变弱,表明沉积物粒度逐渐变细。

3) 决口扇

常见于天然堤稳定性较差的水道远端至终端,可形成席状砂层,GR测井和岩心相具有逆粒序的特点。地震剖面表现为连续性较好的楔状或相互平行的强振幅反射轴。

4) 朵叶体

朵叶体一般形成于水道末端。由于物源供给少,流速降低,岩性以粉砂岩和细砂岩为主,研究区内多表现为粉砂岩/细砂岩与泥岩互层,局部可见细—中砂岩沉积。地震剖面上常呈平行—亚平行反射特征、强振幅、中频,另可见丘状反射特征。GR测井曲线多为指状特征。

2.3 复合水道结构及演化

复合水道一般由多条特征相似的单一水道所构成,纵向上为多个浊积水道的正旋回叠置。由于长时间的物源供给,其沉积粒度明显比单一水道粗,多以块状砂岩为主,常见砾岩碎屑、角砾等混杂。通过地震剖面及顺层切片属性图(剖面位置见图1虚线),

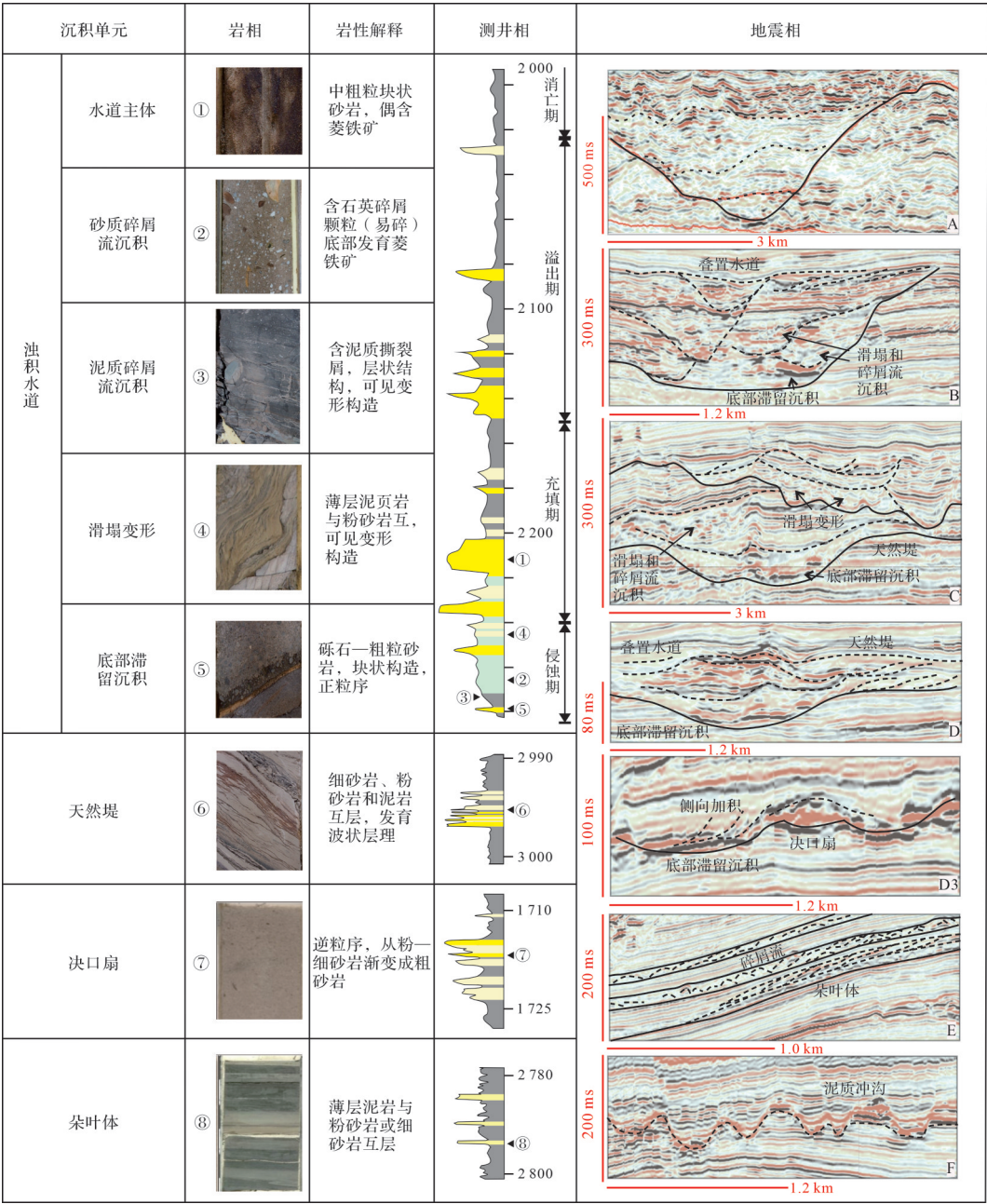


图4 刚果扇盆地深水沉积体系沉积单元识别

Fig.4 Identification of sedimentary units for the deep-water sedimentary system in the Congo Fan Basin

结合测井和岩心相(图3),可以观察到复合水道的纵向变化包括侵蚀期、充填期、溢出期和消亡期四个阶段。

侵蚀期(图5、图6a)水体能量高,对陆坡产生下侵作用,形成V或U形水道,底部滞留的砾岩等在地震剖面上表现为明亮连续的高振幅连续反射,RMS(Root Mean Square)平面属性图上可明显见到水道早期的弯曲形态;GR曲线成指状低值(图3);岩心相可见底部侵蚀面、砾石—粗粒砂岩,向上正粒序。

充填期(图5、图6b,c)复合水道成为稳定输送碎屑沉积的路径,地震剖面可见浊积水道相互叠置,两翼开始发育天然堤,水道外部形态呈宽深比稍大的U形,水道侧壁可见滑塌;RMS平面属性图中复合水道宽度变大,其内部可见高亮的充填物,水道迁移改向特征明显;岩心相可见水道主体以中砂岩为主,低角度交错层理,具有整体向上变细的正粒序,GR曲线呈箱型或钟型,砂地比高。

溢出期(图5、图6d,e)水道的搬运能力变弱,反

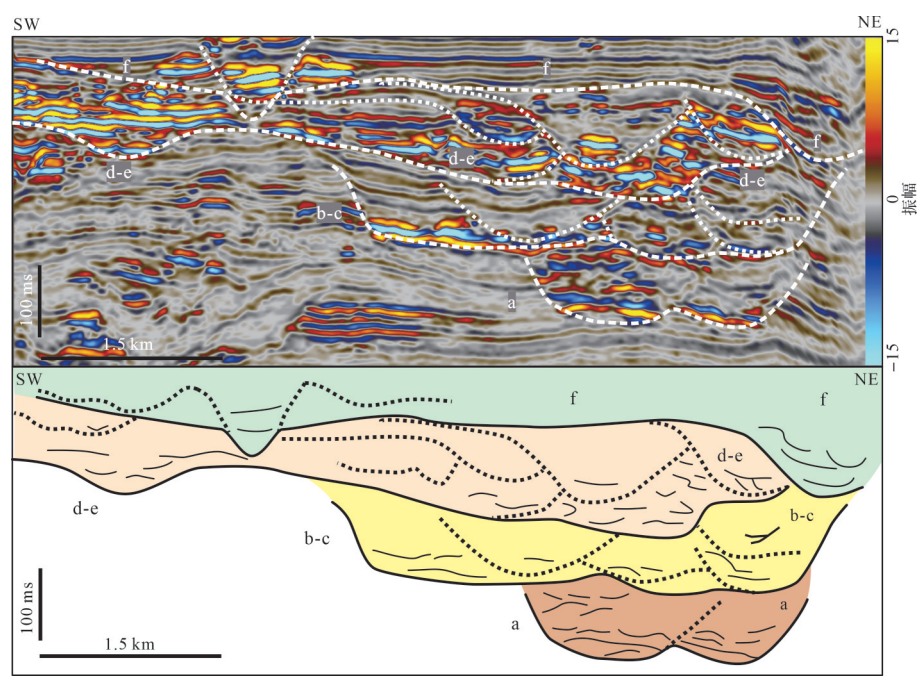


图5 中中新统上部某复合水道地震相解释(剖面位置见于图1、图6)
(a)侵蚀期;(b,c)充填期;(d,e)溢出期;(f)消亡期
Fig.5 Seismic facies interpretation of a composite channel in the upper Middle Miocene
(see Figs1 and 6 for the profile location)

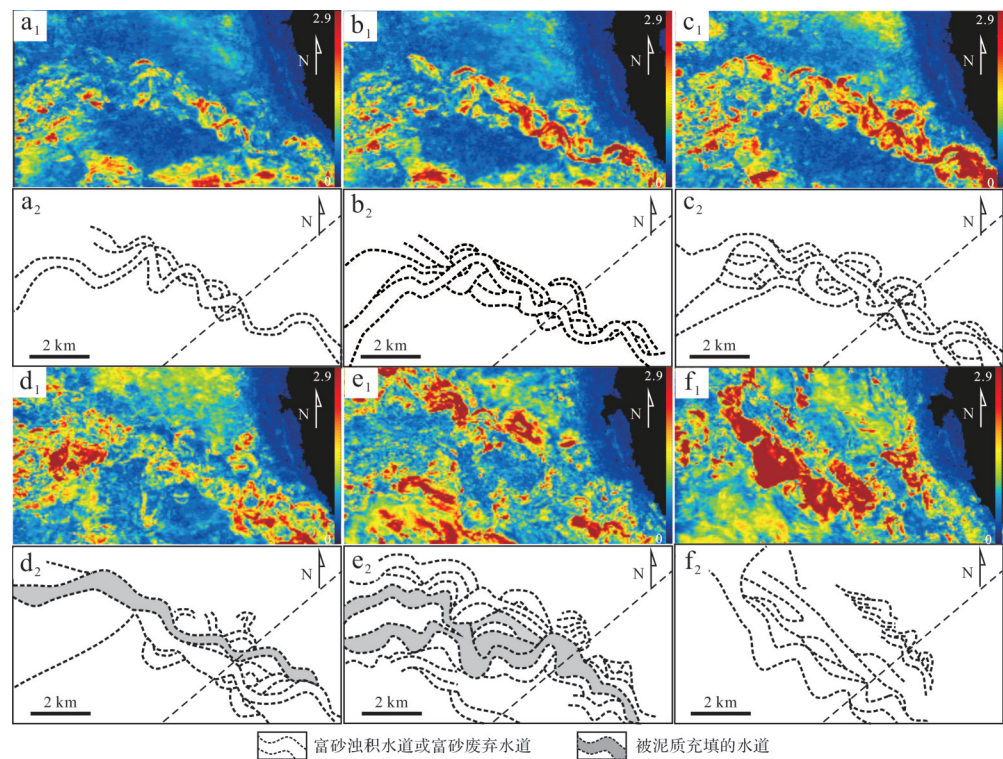


图6 中中新统上部某复合水道RMS均方根顺层切片属性图(位置见图1)
(a)侵蚀期:低弯度水道发展;(b,c)充填期:高弯曲度水道叠置交割;(d,e)溢出期:水道被后期泥质充填,天然堤溢岸沉积频繁发育;(f)消亡期:复合水道消亡并迁移至西南侧
Fig.6 RMS slices of a composite channel in the upper Middle Miocene (Location is shown in Fig.1)
(a) Erosion period: development of low-curvature channel; (b, c) filling period: overlaying delivery of high curvature channel; (d, e) overflow period: the waterway was filled by mud and levee deposits; and (f) dying period: the composite channel dies and migrates to the southwest

复迁移、改向、分流,主要充填粉砂岩和泥岩互层,尤其天然堤发育规模变大,形成水道天然堤复合体,相互切割叠置特征十分明显;RMS均方根振幅属性图上,复合水道分布范围很广,平面结构复杂,废弃水道、决口扇、天然堤等在复合水道两侧频繁出现,呈高亮的弯月或扇形异常区,而复合水道主体被后期泥岩覆盖,RMS属性图上表现为暗色且有明显边界的泥质水道;岩心相上砂岩和泥岩间互出现,GR测井曲线呈指状互层,砂地较充填期降低。

消亡期(图5、图6f)原有复合水道不再有物源碎屑输入,后期泥岩将水道全部充填,岩心相表现为水道顶部以非常细的砂和粉砂质黏土薄互层为主,而且中间偏泥质层段可见扭曲变形构造;地震剖面表现为低振幅连续反射,RMS属性图中原有水道形态不再明显,新的水道开始发育。

由此可见,研究区浊积水道垂向上由底部滞留沉积、高砂地比叠置水道、低砂地比水道天然堤复合体、泥质充填四段构成,与水道的侵蚀期、充填期,溢出期和消亡期四个水道演化阶段相对应。

2.4 复合水道的平面特征

从研究区东部可追溯的源点位置到末端朵叶体,复合水道具有不同的发育特征。以研究区最北部、受盐构造影响最弱的复合水道为例,以限制条件,侵蚀能力及发育期次为复合水道的描述参数^[8],将其从上游至下游分为5种类型(图4A~E、图7):强限制型—侵蚀深切谷水道、强限制型—侵蚀加积—复合水道、弱限制型—侵蚀加积—复合水道、非/弱限制型—加积—单支水道、加积型朵叶体。复合水道的宽深比由源至远端总体呈波动变化,但在同一台阶带内复合水道宽深比逐渐增高。

(1) 强限制型—侵蚀—深切谷水道:这时复合水道具有V形或U形的下切外部形态,峡谷规模巨大,距离水道东部可溯源点位置小于16 km,水道宽深比小于6。水道沉积主要限制于深切谷底部,中上部被晚期深海泥岩填充,偶见水道侧壁的滑塌沉积。上陆坡坡度大,水体能量大,侵蚀和冲刷作用强,形成大型下切峡谷。古刚果河的汇水面积巨大,物源供给稳定,上陆坡的大型下切峡谷成为扇体稳定供给的“渠”。大量碎屑沉积在上陆坡冲刷而过,形成过路不留沉积;(2) 强限制型—侵蚀加积—复合水道:当陆坡坡度稍稍变缓,水体能量稍变弱,但能量依旧较强,复合水道外部形态呈大型U形,规模较大,距

离东部源点位置小于32 km,宽深比介于6~7。其内部表现为向下侵蚀、各期水道向上叠置建设;(3) 弱限制型—侵蚀加积—复合水道:当流经盐底辟对地层改造的区域,古地貌坡度变缓,水体能量进一步减弱,碎屑物质卸载。这时复合水道的宽深比进一步加大,比值介于7~10,距离东部源点位置约31~59 km。外部形态成鸥翼状,内部呈现水道相互切割叠置,向下侵蚀能力变弱,水道侧向加积、溢岸沉积等优势发育。复合水道弯曲度明显增加,开始改向、分散,多分枝状,沉积体系因盐构造的阻挡作用形成了高弯曲度浊积水道和朵叶体;(4) 非/弱限制型—加积—单支水道:复合水道在某一次决口中重新发育出一单支水道。此时水道已穿过南北两侧盐底辟构造形成的狭窄口,宽深比在短距离内急剧增高(图7,点D、D1),采样点比值均大于12。该段水道距离东部源点位置大于60 km,水体能量减弱,水道规模变小,呈向上凸起的丘形,溢岸沉积范围广,向上和侧向加积明显;(5) 加积型朵叶体:至浊积体系尾端,主要发育朵叶体,侵蚀能力达到最弱,宽深比最大,外部形态呈向上凸起的扁平状或丘状,剖面可见朵叶体内部多米诺结构。

3 刚果扇盆地区域展布

基于15/06、17/06、18/06、31、32等多个区块的地球物理资料及钻井资料,对盆内沉积体系分布进行落实。结果显示:刚果扇盆地复合水道规模从渐新世至中新世先增大后变小,形成渐新世单一下侵型、早中新世改向—分流型、中中新世多期叠置型、晚中新世泥质冲沟型四个向北逐渐迁移的沉积体系演化阶段(图8)。

渐新世复合水道剖面呈U型,水道切割交叠程度较少,总体水道向上建设;平面展布相对单一平直。盐体活动对水道方向有一定影响,但影响较小。复合水道主要分布在北区(15~31区块)和南区(17~18区块),各自发育两期复合水道,晚期规模较大。中区(31~32区块)主要发育小型浊积水道和泥质冲沟,且受盐岩构造影响,发生迁移和改向。

早中新世海平面进一步降低,物源供给有所增加,水道规模有所增大,剖面呈U型,总体特征与前期相似,但平面形态主要表现为多枝状,复合水道频繁分流改向。这与早中新世中下坡盐岩活动及构造活动有关:盐筏滑脱、盐底辟、盐棚等构造向上刺穿,

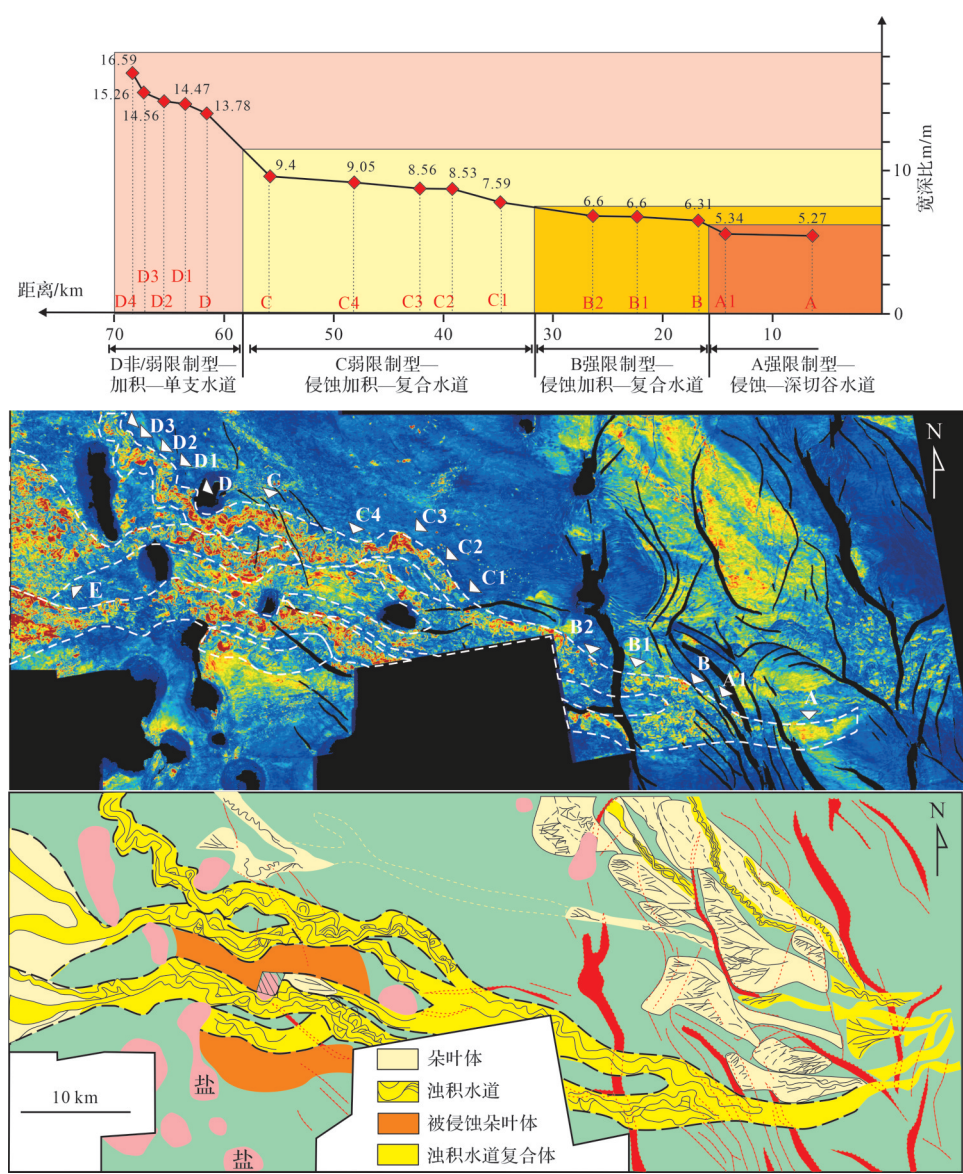


图7 浊积水道宽深比统计及沉积体系形态特征

A、B、C、D、D3、E位置浊积水道地震相见于图3

Fig.7 Channel width-depth ratio statistics and morphological characteristics of the sedimentary system
seismic presence of turbidity channels at positions A, B, C, D, D3, and E is shown in Fig.3

导致地层发生变形,使刚果扇盆地古地貌变化,复合水道携带的沉积物易在盆内发生卸载。此时复合水道形态曲折,分流频繁,规模中等。除31区南部隆起区未有大规模浊积水道发育外,5个区块均有浊积水道分布。早中新世北区(15~31区块)发育三期复合水道,早期规模最大,晚期最小;南区(17~18区块)发育两期复合水道,早期规模较大。

中中新世,物源供给增加至最大,海平面降低幅度最大,水道规模增长到最繁盛的阶段。这时复合水道外部形态呈鸥翼状,宽深比大,水道厚度及宽度均比前期有所增加。朵叶体内可见多期若干小水道扇

状展布,发育水道化朵叶体。盐体及构造活动对水道方向影响小于早中新世,影响中等。此时盆内深水沉积体系开始向北迁移,主要发育在南区(17~18区)和北区(15~31区)北部,中区(32区及31区南侧)不发育浊积体系。中中新世发育两期复合水道;北区(15~31区)规模较大,南区(17~18区)规模较小。

晚中新世海平面上升,物源供给减弱,水道规模明显减小。地震剖面上水道外部形态主要表现为V型小规模冲沟及过路不留沉积,水道内部泥质充填,两侧发育天然堤。晚中新世水道平面形态孤直,水道细窄,朵叶体规模也明显变小,朵叶体内难以见到

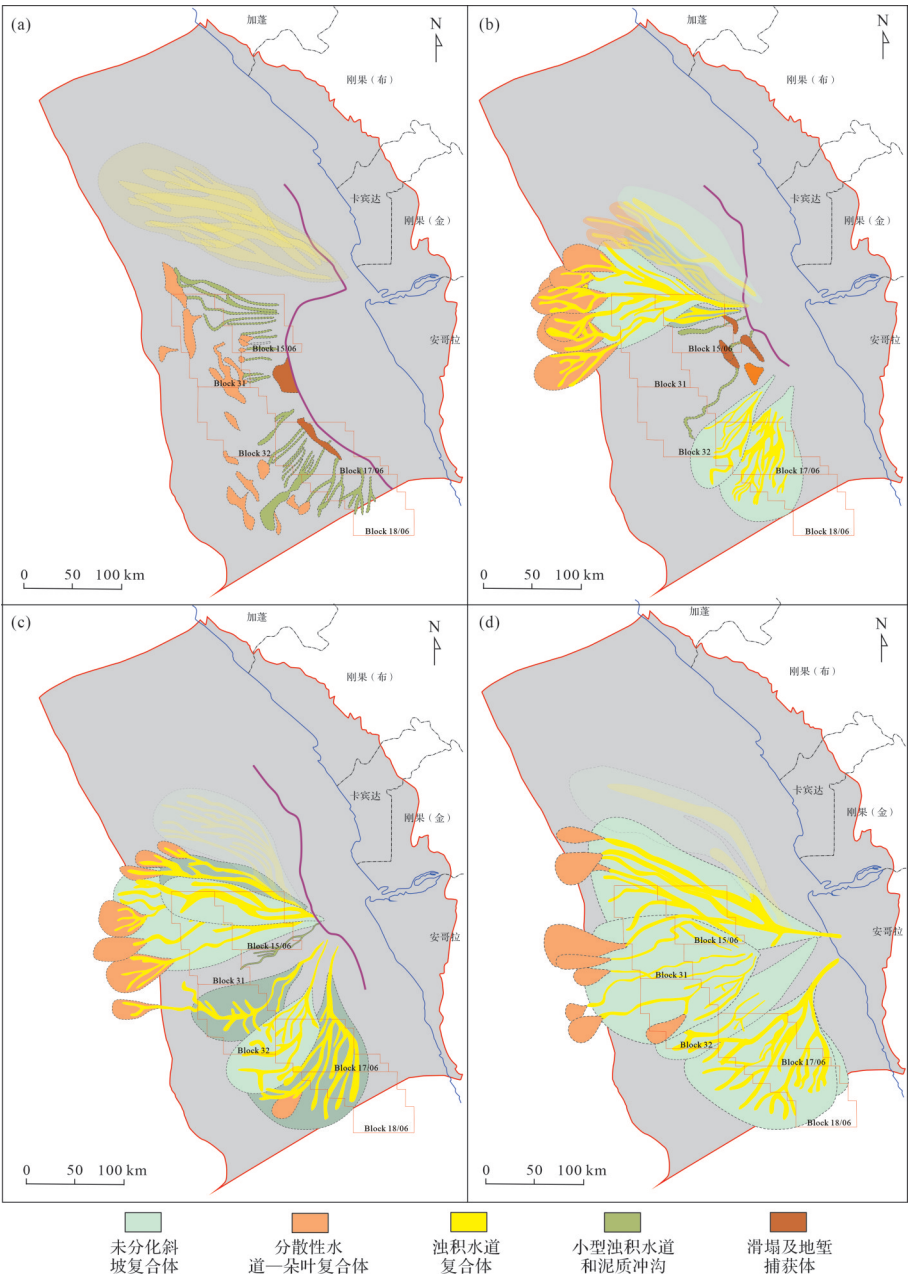


图8 刚果扇盆地浊积水道平面展布及演化

(a)晚中新世;(b)中新世;(c)早中新世;(d)渐新世

Fig.8 Distribution and evolution of turbidite channels in the Congo Fan Basin

(a) Late Miocene; (b) Middle Miocene; (c) Early Miocene; (d) Oligocene

水道特征。此时大规模沉积体系已经向北迁移出去。滑塌和朵叶体受盐活动及古地貌影响呈条带状北西—南东向分布。

4 多因素控制作用

4.1 陆坡古地貌

刚果扇盆地在在中上陆坡的拉张区受盐筏滑脱作

用影响,形成上陆坡的地堑,经过后期碎屑填充后形成了东部的台阶,其与向下继续的陆坡构成了第一个坡折:从图7中可见,在东部由多条伸展断裂形成的地堑内滞留大量碎屑沉积,发育大型朵叶体,且朵叶体受断裂和古地貌影响,呈北西西条带状分布。

向西至过渡区,因盐底辟作用,古地貌发生上隆变形,水道至此开始分流改向,经过碎屑填充后形成第二个坡折:平面属性图可见复合水道的宽度增加,

范围变广;剖面可见水道复合体内部水道侧向迁移频繁,相互切割,宽深比增加(图7,C3~D3段)。

复合水道总是在台阶上变宽或分流,侧向迁移加剧;在坡折之下,水道稍变窄,下侵能力稍有增强,直至下一个台阶或坡折。陆坡多级坡折与复合水道特征变化之间的对应关系在刚果扇盆地频繁出现^[15]。图9是刚果扇盆地陆坡某一区块上中新统的均方根RMS属性图,反映了深水沉积分布与古地貌之间的关系,图中可见浊积水道自陆坡顺流而下,但砂体总是聚集在与断裂或盐构造有关的“台阶”上。

浊积砂岩的搬运和卸载受水体能量影响,而陆坡坡度变化对水体能量具有绝对的控制作用。断裂带和盐底辟带形成的二级坡折与沉积展布之间的关系,实际是陆坡坡度对砂体卸载的控制作用。断裂或盐构造形成的坡折处,浊积水道向下侵蚀冲刷,形成沉积体系稳定供给的“渠”,发育过路不留沉积,后期被泥质充填;当浊积水道向下流至“台阶”,坡度变缓,水体能量变弱,碎屑物质发生卸载,沉积速率增加,形成富砂区。从15/06区块已发现的油田可看出,油气发现多见于坡折下游的“台阶”。

Babonneau *et al.*^[16]通过对现代刚果河的研究发现,浊积水道分流改向与陆坡的坡度变化严格对应。当陆坡坡度突然增大而后突然减小(陆坡坡度曲线呈现峰值时)^[16],浊积水道的曲率就会突然增大,浊积水道迁移的概率增加,复合水道开始分散,造成大量的搬运沉积物发生卸载。国内学者对西非深水水道与坡度关系的研究中得到了相似的结论^[17]。

这种在陆坡坡折处侵蚀、缓台上沉积的改造过

程,前人在其他盆地已有所研究^[15]。学者们针对多地的现代陆坡盆地提出了“充填—溢出”模式,如墨西哥湾相对复杂的陆坡地貌决定其沉积充填过程为“局限、充填、过路、陆坡调整、回填、披覆”6个阶段。墨西哥湾这种“陡坡—沟槽”相间发育的陆坡古地貌在碎屑聚集中具有决定性控制作用。刚果扇盆地由断裂和盐构造形成的多级坡折同样对碎屑沉积和聚集具有非常重要的影响。

4.2 物源供给

渐新世初期陆缘沉积由碳酸盐岩变为碎屑岩沉积,中中新世西非的碎屑岩沉积达到峰值,发育规模最为巨大的多期叠置复合水道。通过沉积速率曲线(图2)可以发现,物源供给有两次比较重大的变化,分别是渐新世初期和中中新世。这两次重大变化都与构造隆升和气候变化有关。

1) 构造隆升剥蚀为第三系深水沉积体系提供了物源基础

西非陆缘在裂后阶段主要经历了两次隆升,分别是白垩纪 Santonian-Maastrichtian 期,和始新世一晚中新世。对研究区浊积水道影响较大的主要是古近纪—新近纪的裂后隆升。Lavie *et al.*^[18]通过古水深恢复发现,安哥拉地区从渐新世 24 Ma 开始快速隆升,抬升近 260 m,至中中新世晚期(16 Ma)抬升速率有所减慢,而后晚中新世隆升再次进入高速阶段^[18],至现代安哥拉陆缘隆升了近 500 m(图2)。加蓬以北的西非陆缘自渐新统以上可见沉积物波(sediment waves)发育,意味着西非陆缘的隆升自渐新世以来一直发生至今。渐新世的构造隆升形成了大规模的区

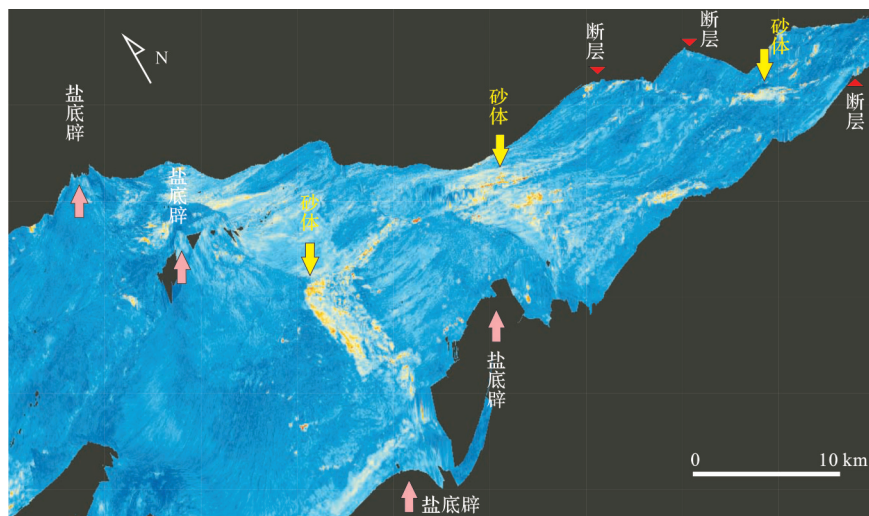


图9 刚果扇盆地上中新统三维(3D)地震属性图^[15]

Fig.9 Three-dimensional (3D) seismic attribute map of the Upper Miocene in the Congo Fan Basin^[15]

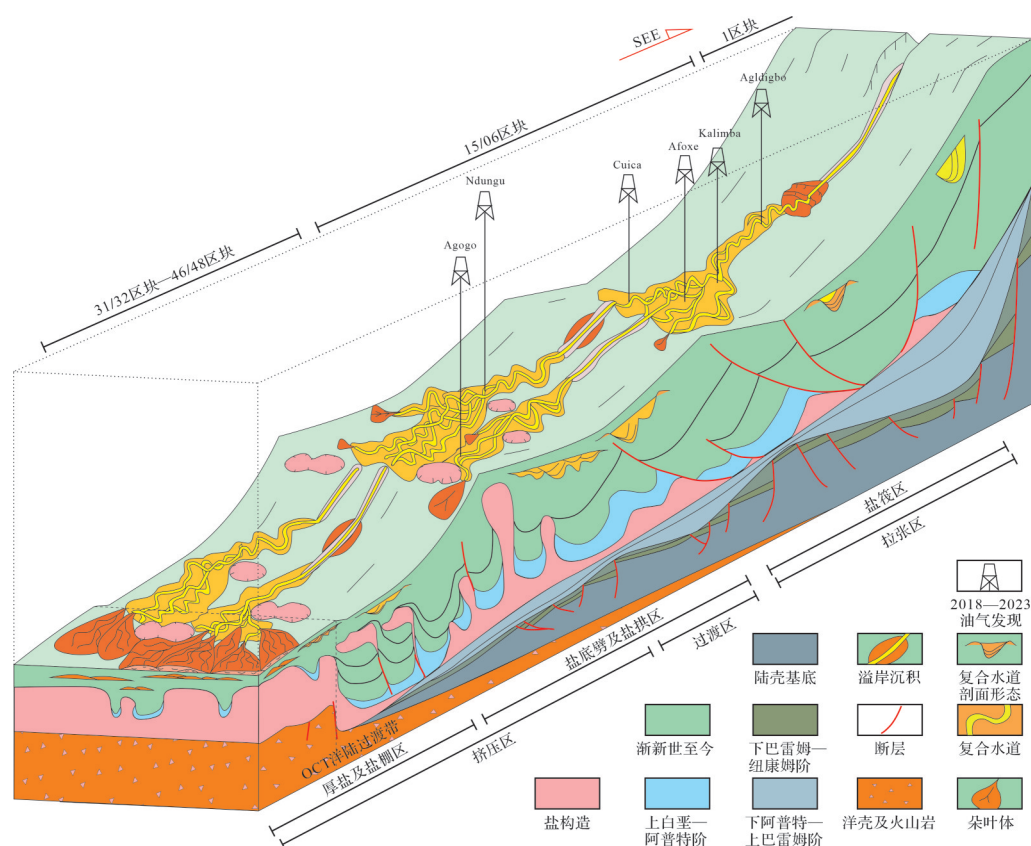


图 10 刚果扇盆地浊积体系发育与局部构造分布模式图

Fig.10 Turbidite system development and local structural distribution model of the Congo Fan Basin

域不整合,在多口井资料及地震剖面可见不整合特征。这次抬升剥蚀事件使陆架与陆坡形成坡度差异,为浊积水道入盆提供势能,也开启了裂后大规模碎屑沉积的序幕。中新世西非陆缘进入了构造抬升的高潮。刚果和安哥拉北部陆缘的最高隆升速率发生在早中新世的 Burdigalian 期,次高隆升速率为晚中新世 Tortonian 早期^[19]。Walgenwitz *et al.*^[20]也通过热年代学的研究证实了中新世加蓬和安哥拉沿岸盆地的隆升。西非陆缘从渐新世至今的大面积隆升剥蚀为深水沉积体系提供了充沛稳定的物源,同时抬升过程发生的地震、火山等事件也成为滑塌等重力流体系沉积的诱因。晚中新世刚果扇盆地深水沉积体系发育逐渐变弱,这与陆缘隆升及其伴生的盐撤活动有关,其导致了在深水区洋陆过渡带形成厚盐陡崖 (salt escarpment),及陆源沉积物向西北盆外转移^[21]。

前人的这些研究解释了渐新世广泛剥蚀及中新世后大规模碎屑沉积的原因。西非陆缘抬升可能与深部热地幔活动有关,Burke *et al.*^[22]证实了非洲大陆的普遍隆升与 31 Ma 的 Afar 地幔柱活动的密切关系。

渐新世末非洲板块与伊比利亚的碰撞挤压也加剧了西非陆缘的抬升。软流圈活动及板块碰撞在南非形成巨大的“非洲隆起”^[21],剥蚀区面积的急剧增加为第三系浊积体系的形成提供了大量物源碎屑。另外,Séranne *et al.*^[23]认为西非陆缘(刚果扇及宽扎)裂后的持续隆升与基底的差异沉降有关:陆壳减薄带的热沉降速率高于陆缘,导致西非陆缘的相对隆升。基底发生向西的倾斜和旋转,并触发了盐岩滑脱及早期的一系列盐构造活动,同时碳酸盐岩的快速生长及其相应的差异负载 (Albian-Turonian) 使盐岩持续滑动^[23]。

2) 气候突变事件触发渐新世陆缘沉积的岩性转变及中中新世的深水沉积体系繁盛

早渐新世气候由温暖向寒冷转变,底层海水温度从 12 °C 降低为 4.5 °C^[24],这促进了陆地剥蚀区的陆缘碎屑供给^[25]。高频率冰期—间冰期环境(湿润—潮湿气候)转化是母岩风化剥蚀增速的重要原因。Séranne *et al.*^[23]基于铍同位素比率研究发现从渐新世开始,气候突然变冷,且陆源放射性花岗岩剥蚀并搬运至海里的速度增加。渐新世西非的区域隆升和气

候的频繁变化共同诱发了物源供给的急剧增加,使西非陆缘沉积由碳酸盐岩转为碎屑岩沉积。

早中新世构造抬升的突然增速固然使刚果扇盆地的物源供给增加,但是与中中新世的最高沉积速率并不严格对应。由西非的沉积速率曲线(图2)可以看出,西非陆缘从渐新世开始物源碎屑沉积增加,逐渐进入碎屑沉积的高峰,在中中新世达到顶峰,约50 m/Ma。因此早中新世的隆升速率峰值与中中新世沉积速率峰值的时间差异说明,构造隆升可能不是中中新世物源供给突然增加的主要原因。Séranne *et al.*^[23]发现气候变化时间与沉积速率高峰期严格对应, $\delta^{18}\text{O}$ 在中中新世(14.6~13.5 Ma)突然增高,再次发生气候强冷事件(图2),且气候变化频率的增加,开启了南极洲永久冰盖发育的序幕。气候突然变冷与物源供给突然增加的对应关系在新泽西陆缘(New Jersey)同样发生^[26]。另外,这次气候变化还与全球海平面下降事件(下降约45~70 m)相对应^[27]。刚果河汇水区广泛,流经了中非和东非隆起,穿过了多个构造和气候区,因此全球性的气候变化对刚果河携带物源的影响比局部陆缘的地质事件更大。

因此,气候变化是导致中中新世物源供给和沉积速率峰值的主要因素,构造隆升是整个新近纪物源供给增加的原因。渐新世和中中新世的气候突然变冷使地表失去了植被的覆盖保护,造成了母岩风化

剥蚀的增速和物源碎屑供给的增加^[27],同时中中新世的气候变冷事件形成了南极洲永久冰盖,极大的影响了全球海平面,海平面的快速降低增加了物源供给暴露区,进一步促进了物源供给^[18]。

气候的区域差异也解释了奥兰治等西南非沿岸盆地与刚果扇盆地巨大的物源供给差异:新近纪随着非洲板块的向北移动,西非沿岸盆地发生变化。以沃尔维斯海脊(Walvis Ridge)为界,刚果扇盆地由温暖干燥的气候带进入热带潮湿气候,具有巨大的汇水区或物源供给区,而南非仍位于温暖干燥气候带内,汇水面积及物源供给区相对较小^[18]。

4.3 海平面变化

海平面变化对深水沉积体系发育有重要的控制作用,在其垂向结构中体现得尤为明显。以CN-1井SSQ5-SSQ8为例,浊积体系粗碎屑砂体的发育与海平面变化严格对应,砂体主要发育在海平面下降时期。SSQ5和SSQ6均能体现海平面迅速大幅度下降与砂体快速堆积的联系(图11)。中中新世早期海平面下降幅度最大(~100 m),持续时间也较长(~1 Ma),而这一阶段的砂体发育也最厚,同时通过上文的沉积相平面图中也可见,此时复合水道规模最大,发育的范围最广。这次大规模的海平面下降事件与气候变冷导致的南极永久冰盖形成有关(图2)。中中新世晚期海平面下降幅度有所减小,约50 m,但持续时间

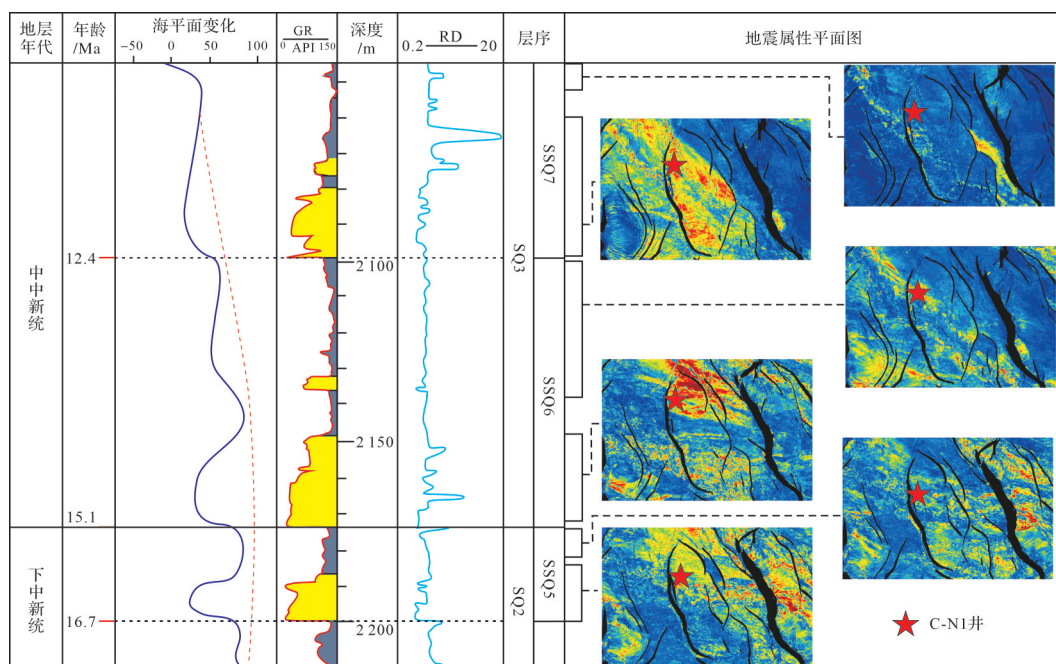


图11 刚果扇盆地C-N1井及其附近均方根RMS属性图与海平面变化

Fig.11 RMS attribute map and sea level change of well C-N1 and its vicinity in the Congo Fan Basin

较长(~ 2 Ma),早期快速下降时形成垂向连续性较好的砂体,晚期则形成砂泥间互发育的垂向结构^[27]。

海平面变化主要通过对“源”和“渠”两方面对沉积体系发育产生控制作用。海平面下降,陆缘剥蚀区面积增加,导致物源供给增大,为深水沉积体系发育提供基本条件。另外,海平面下降时期会发生溯源侵蚀,形成物源剥蚀区与沉积区之间的“渠”,即稳定的碎屑供给通道^[28]。当海平面上升时,浊积水道不再有足够的能量携带碎屑至深海,其内部逐渐被泥质填充,沉积物主要在陆架上卸载。海平面变化通过对物源及输送通道的影响,控制着深水沉积体系的发育及展布规模。当海平面下降强度大、持续时间较长,形成稳定碎屑供给的通道时,才会发育大规模的浊积扇。

4.4 盐构造活动

刚果扇盆地发育白垩系和第三系两期盐岩,白垩系盐构造变形终止于晚白垩世,第三系深水沉积体系分布主要受新近系盐构造活动的影响。盐构造对深水沉积体系空间分布的控制主要体现在宏观大尺度的区域性富砂,及小尺度的水道局部控制两方面。

盐构造在宏观大尺度上影响沉积体系的空间发育及砂体的区域性聚集:中上陆坡的上覆地层因盐岩滑脱作用形成大型伸展构造,发育地堑,捕获部分碎屑岩(图10),在盆地南部形成一个第三系碎屑岩沉积中心;另一方面,中下坡盐底辟和盐墙形成二级坡折,这些坡折控制了复杂盐构造区的浊积水道分布和砂体卸载位置^[7],形成了如早中新世32区块的富砂区。

盐构造的活动还会对局部水道进行改造,可分为三类八种作用改造方式,“三类”是指盐构造在水道沉积前、同沉积和沉积后开始活动:(1)“沉积前”是指在水道形成之前,盐构造已开始发育并形成正向地貌单元,其对水道的控制作用表现为改向作用、限制作用和封挡作用;(2)“同沉积”是指浊积水道发育过程中盐构造持续活动。当浊积水道侵蚀速率小于盐底辟隆升速率时,盐底辟对水道沉积的控制作用主要表现为迁移作用;反之,则表现为侵蚀作用;(3)“沉积后”是指盐构造的活动时期在水道形成之后,其对水道沉积的控制作用主要表现为隆升作用、截断作用和移位作用。关于盐构造对浊积水道的改造作用,陈亮等^[7]学者们已做过论述总结。所以盐底

辟区的浊积水道分布是沉积速率与动态盐间微盆内可容纳空间变化的综合结果,也就是物源供给与盐构造幕式活动耦合过程。刚果扇盆地的盐构造主要在早白垩世晚期(Albian)、渐新世至今两个时期活跃;物源供给速率在渐新世开始增加,在中中新世达到高潮。当盐构造的隆升速度大于沉积建造速率,可容纳空间充沛,盐构造对水道展布有强烈的限制、改造等控制作用。当盐构造的隆升速度小于沉积建造速率,物源碎屑迅速填满可容纳空间,盐构造对水道的控制作用减弱,研究区则表现为浊积体系对盐构造的“同沉积”过程。

5 结论

(1)第三系浊积水道垂向上由底部滞留沉积、高砂地比叠置水道、低砂地比水道天然堤复合体、泥质充填构成,与水道的侵蚀期、充填期、溢出期和消亡期四个水道演化阶段相对应。平面上由陆向海依次发育强限制型—侵蚀深切谷水道、强限制型—侵蚀加积—复合水道、弱限制型—侵蚀加积—复合水道、非/弱限制型—加积—单支水道、加积型朵叶体。

(2)刚果扇盆地复合水道规模从渐新世至中新世先增大后变小,形成渐新世单一下侵型、早中新世改向—分流型、中中新世多期叠置型、晚中新世泥质冲沟型四个演化阶段,沉积体系平面展布逐渐向北迁移。

(3)早渐新世物源供给突增和西非陆缘隆升开启了深水浊积大规模发育的序幕,中中新世的气候事件和海平面下降导致沉积体系在中中新世达到最繁盛阶段;断裂和盐构造等在陆坡上形成的多级坡折及古地貌起伏造成砂体卸载滞留;盐构造对深水沉积体系空间分布的影响主要体现在宏观大尺度的区域性富砂,及小尺度“三类八种”水道局部控制两方面。

参考文献(References)

- [1] 秦雁群,巴丹,许海龙,等. 被动大陆边缘大型峡谷供给型深水扇沉积与油气成藏:以西非刚果扇为例[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(6): 59-68. [Qin Yanqun, Ba Dan, Xu Hailong, et al. Sedimentation and hydrocarbon accumulation of deep-water fan fed by large canyon in passive continental margin: A case of Congo fan in West Africa[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(6): 59-68.]
- [2] 郑应钊,何等发,马彩琴,等. 西非海岸盆地带大油气田形成条

- 件与分布规律探析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(6): 1018-1024. [Zheng Yingzhao, He Dengfa, Ma Caiqin, et al. The forming factors and distribution rules of giant oil and gas fields in the coastal basins of West Africa[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(6): 1018-1024.]
- [3] 郑应钊. 西非海岸盆地油气地质特征与勘探潜力分析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2012. [Zheng Yingzhao. Petroleum geology features and exploration potential analysis in the coastal basins of West Africa[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.]
- [4] 赵红岩, 于水, 胡孝林, 等. 南大西洋被动大陆边缘盆地深水盐下油气藏特征分析[J]. 油气藏评价与开发, 2013, 3(3): 13-18. [Zhao Hongyan, Yu Shui, Hu Xiaolin, et al. Analysis on deep water pre-salt reservoir characteristics of the South Atlantic passive continental margin Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(3): 13-18.]
- [5] 秦雁群, 张光亚, 梁英波, 等. 南大西洋深水油气分布特征、聚集规律与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 229-240. [Qin Yanqun, Zhang Guangya, Liang Yingbo, et al. Distribution characteristics, accumulation rules and exploration directions of deep water hydrocarbon in South Atlantic[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 229-240.]
- [6] Oluboyo A P, Gawthorpe R L, Bakke K, et al. Salt tectonic controls on deep-water turbidite depositional systems: Miocene, southwestern Lower Congo Basin, offshore Angola[J]. Basin Research, 2014, 26(4): 597-620.
- [7] 陈亮, 赵千慧, 王英民, 等. 盐构造与深水水道的交互作用: 以下刚果盆地为例[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1197-1204. [Chen Liang, Zhao Qianhui, Wang Yingmin, et al. Interactions between submarine channels and salt structures: Examples from the Lower Congo Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(6): 1197-1204.]
- [8] 蔡露露, 王雅宁, 王颖, 等. 西非深水沉积类型特征及油气勘探意义[J]. 石油学报, 2016, 37(增刊1): 131-142. [Cai Lulu, Wang Yaning, Wang Ying, et al. Type features and Hydrocarbon exploration significance of deepwater sedimentary in West Africa[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(Suppl. 1): 131-142.]
- [9] 于水. 西非下刚果盆地中新统深水重力流沉积特征与模式[J]. 中国海上油气, 2018, 30(4): 13-19. [Yu Shui. Depositional characteristics and pattern of Miocene deep water gravity flow deposits in Lower Congo Basin, West Africa[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(4): 13-19.]
- [10] 刘新颖, 于水, 陶维祥, 等. 刚果扇盆地上中新世深水水道充填结构及演化特征[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2012, 37(1): 105-112. [Liu Xinying, Yu Shui, Tao Weixiang, et al. Filling architecture and evolution of Upper Miocene deep-water channel in Congo Fan Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(1): 105-112.]
- [11] 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, Lü 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.]
- [12] Wang L L, Wang Z Q, Yu S, et al. Seismic responses and controlling factors of Miocene deepwater gravity-flow deposits in Block A, Lower Congo Basin[J]. Journal of African Earth Sciences, 2016, 120: 31-43.
- [13] 张笑, 王振奇, 李士涛, 等. 下刚果盆地深水沉积中新统层序划分及其控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(10): 27-33. [Zhang X, Zhang Z Q, Li S T, et al. Sequence stratigraphy of the deepwater Miocene in the Lower Congo Basin and its controlling factors[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(10): 27-33.]
- [14] Li Q, Wu W, Liang J S, et al. Deep-water channels in the Lower Congo Basin: Evolution of the geomorphology and depositional environment during the Miocene[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 115: 104260.
- [15] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs-Key elements in facies prediction and effective development[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(8): 821-841.
- [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] 刘新颖, 于水, 胡孝林, 等. 深水水道坡度与曲率的定量关系及控制作用: 以西非 Rio Muni 盆地为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊1): 127-134. [Liu Xinying, Yu Shui, Hu Xiaolin, et al. Quantitative relation between the gradient and sinuosity of deepwater channel and its control: A case study in the Rio Muni Basin, West Africa[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(Suppl. 1): 127-134.]
- [18] Lavie L L, Steckler M S, Brigaud F. Climatic and tectonic control on the Cenozoic evolution of the West African margin[J]. Marine Geology, 2001, 178(1/2/3/4): 63-80.
- [19] Anka Z, Séranne M. Reconnaissance study of the ancient Zaire (Congo) deep-sea fan. (ZaiAngo Project)[J]. Marine Geology, 2004, 209(1/2/3/4): 223-244.
- [20] Walgenwitz F, Richert J P, Charpentier P. Southwest African plate margin: Thermal history and geodynamical implications [M]. Geologic Evolution of Atlantic Continental Rises, 1992.
- [21] Anka Z, Séranne M, Lopez M, et al. The long-term evolution of the Congo deep-sea fan: A Basin-wide view of the interaction between a giant submarine fan and a mature passive margin (ZaiAngo project)[J]. Tectonophysics, 2009, 470(1/2): 42-56.
- [22] Burke K, MacGregor D S, Cameron N R. Africa's petroleum systems: Four tectonic 'Aces' in the past 600 million years[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 207(1): 21-60.

- [23] Séranne M, Anka Z. South Atlantic continental margins of Africa: A comparison of the tectonic vs climate interplay on the evolution of equatorial west Africa and SW Africa margins[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1/2/3): 283-300.
- [24] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693.
- [25] Séranne M, Abeigne C R N. Oligocene to Holocene sediment drifts and bottom currents on the slope of Gabon continental margin (west Africa): Consequences for sedimentation and southeast Atlantic upwelling[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 128(3/4): 179-199.
- [26] Steckler M S, Mountain G S, Miller K G, et al. Reconstruction of Tertiary progradation and clinoform development on the New Jersey passive margin by 2-D backstripping[J]. *Marine Geology*, 1999, 154(1/2/3/4): 399-420.
- [27] Lear C H, Elderfield H, Wilson P A. Cenozoic deep-sea temperatures and global ice volumes from Mg/Ca in benthic foraminiferal calcite[J]. *Science*, 2000, 287(5451): 269-272.
- [28] Fisher W L, Galloway W E, Steel R J, et al. Deep-water depositional systems supplied by shelf-incising submarine canyons: Recognition and significance in the geologic record[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103531.

Study on the Deep-water Sedimentary System and Controlling Factors in the Congo Fan Basin: A case study from the Oligocene and Miocene

GONG Yue, GUO RongTao, ZHANG ZhongMin, SU YuShan, LIN DongSheng, WANG XingHua, WU GaoKui

SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China

Abstract: [Objective] The Congo Fan Basin is an important strategic area for overseas energy. The reservoir distribution and its mechanism are key issues for exploration in deepwater and ultra-deepwater areas. [Methods] Based on the maximum area of multi-block three-dimensional seismic and well data thus far, this study investigated the morphological characteristics, distribution and mechanism of turbidity channels in the main target strata (Oligocene-Miocene) in the Lower Congo Basin. [Results] The tertiary turbidity channel is vertically composed of four strata: channel lag deposit, high NTG (Net to Gross) stacked channel fill, low NTG channel-levee complex, and muddy filling, which correspond to four channel evolution stages: erosion, filling, overflow, and dying. Confined-erosion-valley channel, confined-erosion-stacking channel complex, weakly confined-erosion-stacking channel complex, non/weakly confined-stacking-single channel, and stacking-lobes are developed from source to sea successively. From the Oligocene to Miocene, the channel scale of the Congo Fan Basin first increased and then decreased, forming the four stages. The sedimentary system deposited and moved northward over the past million years. The Early Oligocene supply surging and the West African continental margin uplift initiated the large-scale development of a deep water turbidite. The climatic events and sea level drop in the Middle Miocene led to the maximum development of the sedimentary system in the Middle Miocene. The multi-breaks formed by faults and salt structures on the slope as well as the geomorphology controlled the unloading area of the sand. The influence of salt structures on sand distribution was reflected in macro-scale regional sand enrichment and small-scale local control of "eight kinds of three types" on channels. [Conclusions] The revelation of reservoir distribution and multi-factor control mechanism is important for energy strategic and scientific research development.

Key words: Congo fan; turbidite fan; gravity flow; channel; control factors