

文章编号:1000-0550(2014)06-1140-13

尼日利亚海上区块近海底深水水道体系 地震响应特征与沉积模式^①

孙立春 汪洪强 何娟 王龙 郭丽娜 倪军娥

(中国海洋石油研究总院 北京 100028)

摘要 利用高分辨率三维地震资料,对西非尼日利亚海上 OML130 地区近海底深水沉积进行了研究。剖析了深水水道体系各沉积单元地震反射特征,详细论述了水道与堤岸单元的外形几何特征及内部充填特征,即单一水道在剖面上为 V 字型,下部地震反射为强反射、低连续,代表相对粗颗粒碎屑沉积,顶部为中强振幅、连续性强、水平层状地震反射特征,反映了水道发育晚期废弃充填的特点,平面形态为高弯度条带状。在分析水道下切侵蚀与充填特征的基础之上,总结了水道体系内水道之间的 3 种叠置样式,研究表明平面上类似曲流河沉积体系的水道体系内,后期单一水道的发生不一定是在前期水道基础之上直接侧向迁移与顺流演化,而可能是另一个新的沉积过程,因而在不同位置展现不同的水道叠置样式。通过分析水道体系形成演化的主要影响因素,结合研究区浅层与深层资料,提出了被动大陆边缘深水水道体系的沉积模式。研究认为,在陆坡上某一区域,在物源供给及海平面变化,尤其是流域地形(构造或沉积所致)影响下,使得水道体系、朵叶体系既可以同时出现,也可以在顺流方向交替出现。借助近海底的高分辨率三维地震资料对深水沉积进行研究,可以揭示沉积单元特征,从而建立研究区内适性强的沉积演化模式,为深水油气勘探与开发提供更为成功的服务。

关键词 尼日利亚 深水 水道体系 地震响应特征 沉积模式

第一作者简介 孙立春 男 1969 年出生 博士 油气田开发地质 E-mail: sunlch@enooc.com.cn

中图分类号 P631 TE121.3 **文献标识码** A

0 引言

全球油气勘探与开发技术领域,伴随着油气开发的工程技术进步与油气勘探开发领域的扩展,深水区的油气勘探与开采程度逐步加大。在西非、墨西哥湾、巴西盆地、印度洋等古代与现代深水体系中,均发育外形类似曲流河高弯度斜坡水道体系^[1-7]。西非地区近海深水重力流水道沉积体系为典型的被动大陆边缘斜坡水道沉积,从近年发表的文献来看,尤以安哥拉及尼日利亚地区深水沉积为研究的典型代表^[8-18]。

关于类似曲流河高弯度的深水水道沉积特征、分布与演化模式、控制因素等研究,主要是根据地震资料与钻井资料或野外露头进行研究。野外露头的研究大部分基于小尺度的描述,缺乏对深水水道沉积体系在空间分布的描述^[19]。三维地震资料应用与相应地震解释技术的出现,推动了深水水道构型与模式演化的研究^[5,8,19]。

油气勘探与开发焦点集中于油气赋存层位,从全球来看,深水沉积储层主要为中生界或古近系与新近系,由于水深与地层埋深相对较深,地震资料品质不高,分辨率不高,不能对水道体系内部特征予以相对细致的描述,主要是以复合水道及复合水道体系为对象的研究^[1-3,20,21],即使是所谓的应用地震地层切片开展的单一水道的研究,其研究结论也因地震资料的分辨能力与解释模式问题而存在继续探讨的空间。

本文利用西非尼日利亚海上区块 OML130 地区近海底的高分辨率、高品质的三维地震资料,对深水斜坡水道体系开展研究,剖析了深水斜坡水道沉积体系的地震响应特征、几何形态特征,提出了相应的沉积模式,为类似的深水水道体系构型元素分析、油气藏表征提供指导,从而为类似环境下的勘探开发提供理论依据。

1 研究区概况

尼日尔三角洲盆地位于非洲大陆西部,面积为

^①国家重大专项课题“西非、亚太及南美典型油气田开发关键技术研究”(编号:2011ZX05030-005)资助
收稿日期:2013-10-24;收修改稿日期:2014-03-11

12×10⁴ km²,是世界著名的含油气盆地和油气勘探的热点之一。尼日尔三角洲盆地是非洲板块与大西洋板块边缘三联点上发育的裂谷盆地,基底为元古界火成岩和变质岩,上覆沉积地层包括中生界白垩系、新生界古近系、新近系及表层的第四系。中生代盆地的基底大致呈北高南低的斜坡,新生代转化为以伸展作用为主的张性盆地。新生代沉积地层主要由 3 套进积型的岩性地层单元组成,从下到上分别为 Akata 组、Agbada 组和 Benin 组。尼日尔河沉积物供应充分,在河口形成快速堆积的三角洲沉积,沿断面滑动的塑性地层在三角洲远端可形成逆冲推覆断层,并引起塑性地层的底辟或上隆^[1]。

研究区水深 1 300~1 500 m (对应于地震波 TWT 1 500 ms 左右),距 Harcourt 港以南 200 km 处,位于尼日尔三角洲盆地拉张构造和挤压构造的转换带上^[13,17,22,23](图 1),尽管存在几次明显的海平面下降事件,但研究区一直处于深水沉积环境,沉积相类型包括深水重力流水道和块状搬运物等^[23]。本次研究

层段为上更新统地层,即现今海底往下厚约 250 m 的地层(地震波 TWT 为 1 500~1 800 ms),所采集的三维地震资料优势频宽为 15~90 Hz,主频约为 70 Hz,采样间隔为 3 ms,处理面元为 12.5 m×12.5 m,地层速度若按 1 900 m/s 计算,其分辨厚度约 6 m,可以满足相对高精度的地层沉积分析要求。基于本区近海底的高分辨地震资料,应用相干体技术、相对波阻抗反演技术,结合三维立体地震反射特征分析,确定了本区近海底沉积体系为深水水道体系,包括块状搬运体、深水水道及堤岸等(图 2)。

2 深水水道体系的地震特征

2.1 块状搬运体

块状搬运沉积体位于一套层序的底部,常形成于水道复合体和深海披覆沉积所组成的旋回沉积序列内^[17,24~28],多因沉积与构造等作用造成陆坡失稳所致。海平面的相对下降也会导致峡谷壁的失稳,产生块体搬运沉积。块状搬运沉积体在地震上以杂乱、暗

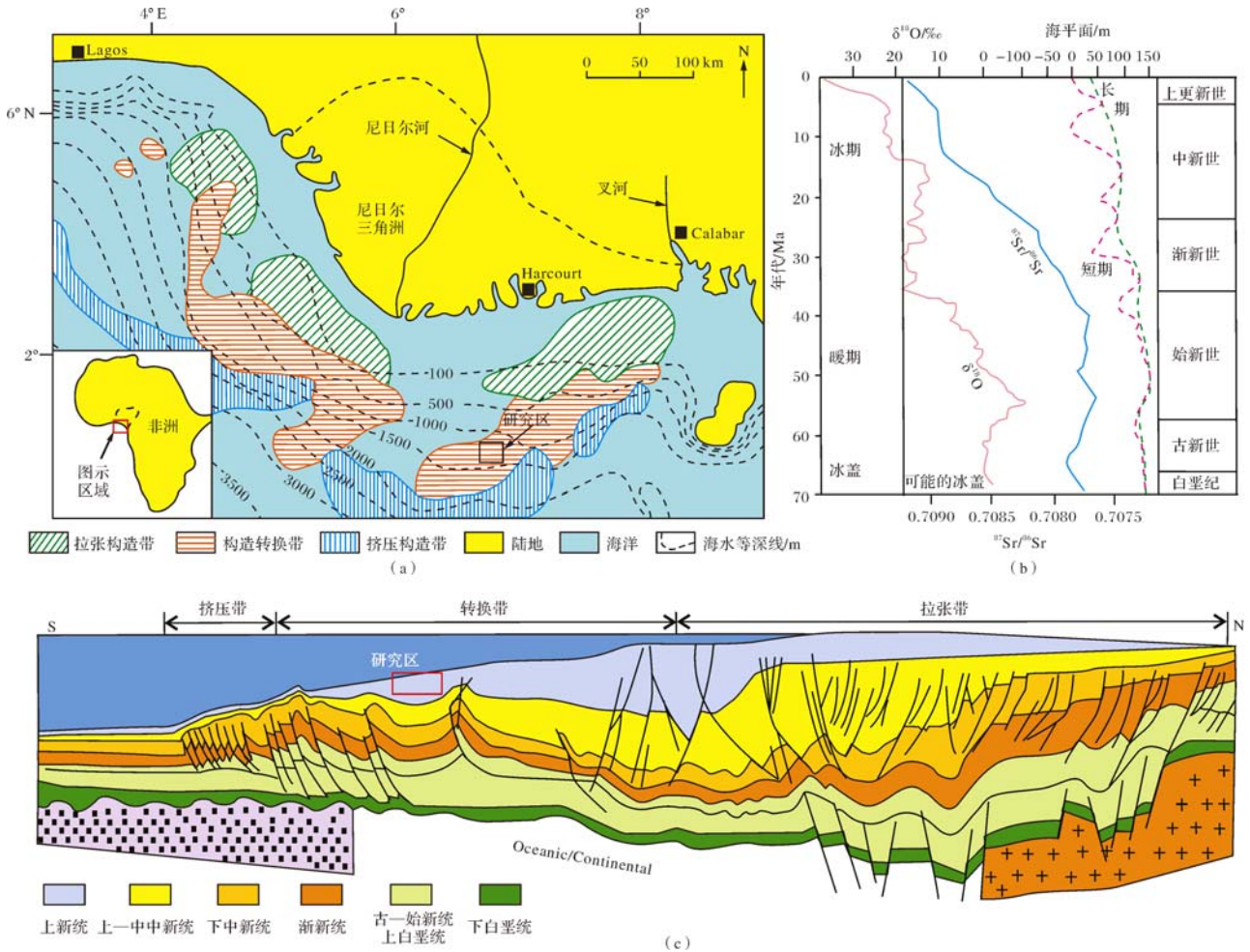


图 1 研究区地理位置及构造背景(据文献[13,17]修改)

Fig.1 Geographical location and regional structure cross-section(after references[13,17])

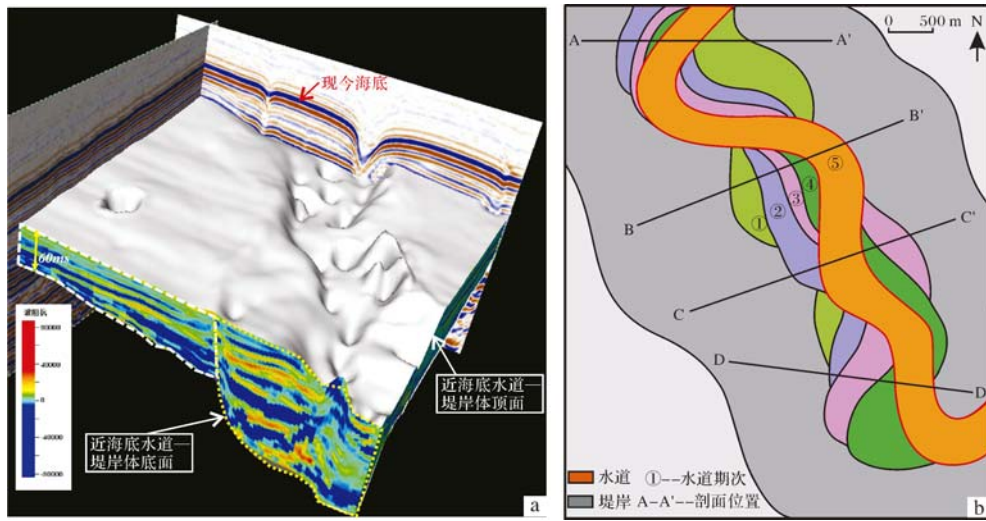


图 2 研究区深水水道—堤岸体系平面解释结果

a. 近海底水道—堤岸体系外形特征与内部充填; b. 近海底水道—堤岸体系内部单元解释成果

Fig.2 The near-seabed submarine leveed-channel complexes in the study area

a. Architecture and internal characteristics of the leveed-channel complex near the seabed; b. Channels developed in the leveed-channel complex

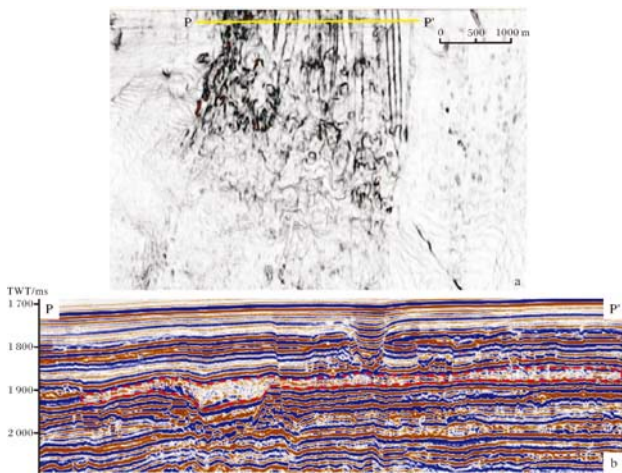


图 3 研究区块状搬运体地震特征

a. 块状搬运体留下的擦痕, 相干体地层切片; b. 块状搬运体地震剖面

Fig.3 Seismic slice of the coherence volume and profile showing the mass-transport deposits

a. scours of the mass-transport complex on the coherence slice; b. seismic profile indicating the mass-transport complex

或透明反射为特征, 一般呈丘状或席状几何形态(图 3b)。造成这些反射特征大体归结于三种原因: 碎屑流沉积中的块体和碎屑物; 泥质占主体, 砂岩含量变化大; 差异压实导致相对围岩较高的阻抗值。一般海底地形会影响块状搬运体的面积和厚度。

块体搬运沉积在搬运过程中, 由于携带有大量粗颗粒物, 侵蚀作用强, 会对底部地层表面形成大量擦痕(图 3a), 在地震剖面上表现为同相轴呈凹凸状。

2.2 深水水道

研究区(AKPO 油田区)深水水道复合体为一个整体自北向南展布的复合水道体系。该复合水道发育 5 期水道, 按发育的时间顺序编号为①~⑤(图 2b)。复合水道内部, 晚期发育的水道下切、侵蚀早期形成的水道, 导致早期水道呈不连续分布。现存复合水道体系为 5 期水道侵蚀—充填—再侵蚀—再充填多期叠置的复合体。其中⑤号水道发育时间最晚, 遭受侵蚀、破坏程度低, 保存较为完整。复合水道内部不同期的水道呈现不同的侵蚀充填特征, 同一期水道在不同沉积部位也呈现不同的侵蚀充填特征。

2.2.1 剖面特征

地震剖面可以清晰地反映水道的内部构型特征, 并识别出不同期次的水道。顺着水流方向选取了 4 条垂直水道的地震剖面(图 4, 图 2b 中所标示的 A-A'、B-B'、C-C' 和 D-D')。

A-A' 地震剖面中, 复合水道包括五期水道, 整体呈 U 字型, 晚期水道侵蚀、下切早期水道。第②期水道在第①水道边部侵蚀, 侵蚀程度高, 切穿整个①水道; ②与①水道垂向上呈侧向叠切的关系。③~⑤水道则主要在早期水道中部侵蚀、下切, 并且充填、沉积, 与早期水道呈垂向叠切关系。

每期水道在剖面上呈 V 字型, 水道底部表现为强振幅、杂乱、不连续反射, 可能为水道早期过路沉积过程中的粗粒沉积物; 上部则有两种地震反射特征, 一种表现为中—弱振幅, 中等连续, 可能是以细粒沉

积物为主,部分遭受后期水道的改造和破坏,保存不完整;另一种表现为强振幅、连续反射,如第⑤期水道上部,可能是水道充填、沉积细粒沉积物和远洋泥,后期破坏较小,保存完整,常出现在水道的顶部。

与 A-A' 剖面相比, B-B' 剖面中水道垂向叠置部分较少, ①~⑤期水道主要以侧向侵蚀、叠置为主。晚期水道主要在早期水道的一侧侵蚀、下切, 侵蚀程度较高, ②和③号水道均侵蚀到早期水道的底部。

C-C' 及 D-D' 剖面中均未见①号水道。追踪地震剖面并结合相干体属性切片, 发现①号水道在该段被晚期水道所侵蚀、破坏。该剖面因位于复合水道相对局限段, 侧向迁移特征较其它地段不同, 晚期形成的水道总是对先期水道不断下切、侵蚀, 致使先期形成的水道①在该剖面位置上消失。在该剖面中, 水道存在侧向叠置和垂向叠置两种方式。

通过 4 条地震剖面可以看出, 研究区此水道体系

由 5 期水道组合而成, 且晚期水道对早期水道有侵蚀、破坏作用。由于晚期水道侵蚀早期水道的部位不同, 水道之间形成了不同的叠加样式, 概括起来主要有三种叠置样式: 垂向叠置、侧向叠置和复合叠置 (图 5)。

垂向叠置样式中, 如 A-A' 剖面, 早期水道侵蚀—充填过程结束后, 晚期水道继承性地在早期水道上部发育, 侵蚀早期水道的主体部位, 形成新的水道。形成这种现象的原因可能是早期水道未完全填平, 下一期水道继承性地在早期水道的低洼地形中发育, 对早期水道的主体进行侵蚀。

侧向叠置样式中, 如 B-B' 和 D-D' 剖面, 晚期水道在早期水道的边部发生侵蚀、下切, 并形成新的水道。在该样式中, 水道的侵蚀下切作用强, 侵蚀程度高, 一般可以侵蚀到早期水道的底部。形成这种现象的原因可能是水道边部是水道和堤岸的结合部位, 水

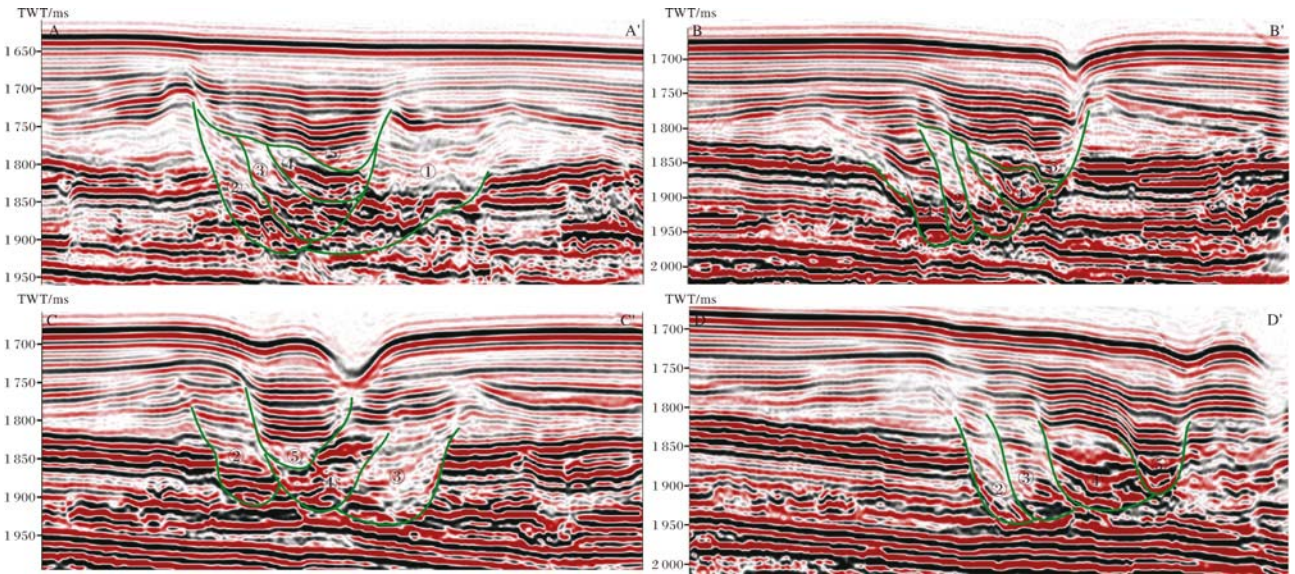


图 4 深水水道地震反射特征(剖面位置面参见图 2b)

Fig.4 Seismic reflection characteristics of leveed-channel complexes

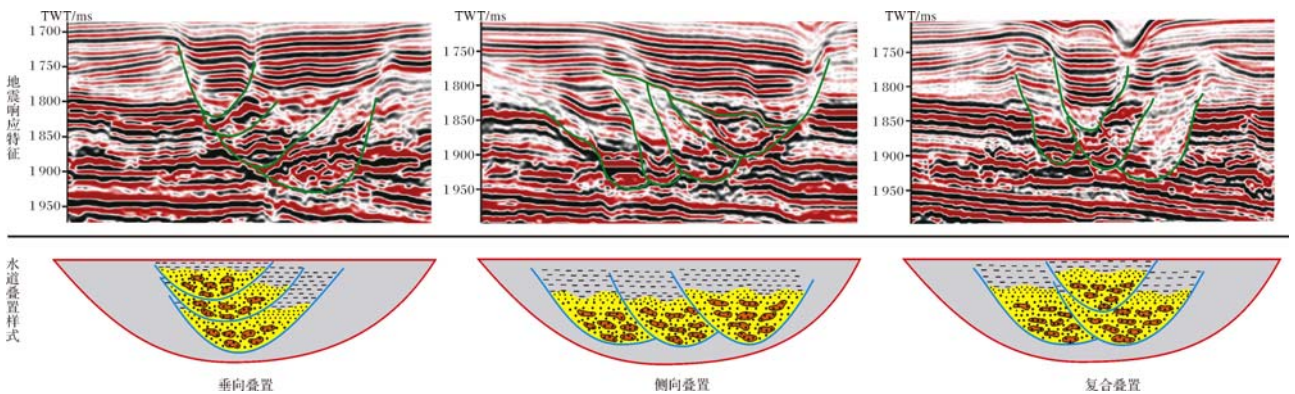


图 5 复合水道中水道叠置样式

Fig.5 The seismic characteristics and the stacking patterns of channel complexes

道沉积粗粒物质,而堤岸沉积细粒物质,沉积物质的不同就导致了在该部位发生侵蚀作用的话,侵蚀相对来说较容易,并且侵蚀和下切程度深。

复合叠置样式中,如C-C'剖面,晚期水道侵蚀早期水道,既有侧向侵蚀,也有垂向侵蚀,水道之间垂向叠置和侧向叠置均有出现。

2.2.2 平面特征

地震相干体属性可以清晰地反映复合水道沉积体的边界,帮助分析水道平面分布特征,并且结合地震剖面可以识别出不同期次水道的展布。在复合水道体系顶底界面内提取相干体地层切片,自下而上选取了可以反映复合水道平面展布演化的6张相干体切片(图6a~e)。由图可以看出,在复合水道底部,水道轮廓比较模糊,边界不明显;越往上,水道的边界越清晰,复合水道多期次的特征也逐渐显示出来。在图6c、6d两个相干体切片中,多期水道在切片中显示出来,并且同一期次水道整体轮廓可以大致连接起来。再结合地震剖面,将每期水道完整地识别出来。图6d、6e中,复合水道中的⑤号水道的边界清晰可见。图6f为复合水道充填结束时的平面分布特征,虽然被细粒沉积物和远洋泥所充填,但依然可以看出水道的轮廓。并且在水道的边部,发育许多的沟槽(图6f中的红色部位),是现今海底地形中水道再次发育的开始。

总的来说,自下而上,复合水道平面轮廓越来越清晰,水道展布范围逐渐增大,复合水道内的多期次水道也可以清晰地显示出来,并且复合水道在平面上呈现出高弯度展布的特征。

对复合水道体系分析结果表明,复合体平面几何形态可呈顺直型,但单一水道多为高弯度,且不同部位的水道间表现为不尽相同的关系,即某些位置上每条单水道几何形态清晰可辨,不同期单水道表现为平面侧向迁移、垂向叠切的特征;而在另外一些局限区域,晚期水道垂向下切早期水道,导致早期部分水道消失。另外,值得注意的是,①至④期水道似乎既有侧向摆动,也有顺流迁移,但最后一期水道⑤发育特征表明复合水道体系内的单水道发育是一个阵发性的独立过程,后期水道的形成与发展可以独立于早期水道。从复合水道完成后的地形几何形态来看(图2a、图6f),复合体内的先期水道事件完成后,也可以为下期水道的形成、发展提供空间。

2.3 堤岸

堤岸多分布于水道两侧,主要沉积物为细砂岩、

粉砂岩及泥岩等细粒沉积物,砂泥比低。堤岸面积较水道大得多,砂体侧向连续性好,总体为下粗上细沉积序列,可能为油气储集体。

堤岸主要为水道内流体溢流垂向加积而成。造成溢流可能有两方面因素,一方面是滑塌体及水道中的沉积物不断增多造成水道堵塞,重力流运动受阻,使得流体溢出水道;另一方面,在高弯度水道部分,重力流(泥质碎屑流或浊流)的惯性作用,也可能导致水流溢出水道形成堤岸沉积^[29~33]。

研究区堤岸沉积以细粒质沉积居多,在地震剖面上通常显示为弱反射或空白反射。由于浊流易越过水道边缘形成溢流,如果砂质含量相对较高,形成的天然堤呈现强振幅特征,海鸥型外形(图7),平面上分布范围相对较宽,地震相干体切片上显示为较均匀特征,说明了堤岸部分的细粒沉积物分布较均匀,非均质程度相对较低(图6、图2b)。

3 深水水道体系沉积模式

3.1 研究区深水水道体系形成控制因素

3.1.1 陆坡负向地形

由于受构造、侵蚀等作用的影响,海底地形会出现隆起和低洼的部位,形成一定程度的凸凹格局,深水陆坡地形是影响沉积体系分布的关键因素^[13,34~37]。当一次水道事件发生时,携带大量沉积物的重力流会沿着凸凹格局中低洼处流动,水道的平面展布也就会受到海底地形的影响。研究区现今海底地形分析及含油气目的层深水水道体系分析提供了进一步的论据。

现今海底地形图表明海底地形凹凸起伏不平(图8a),出现了许多连续分布的沟槽,即使在所研究的复合水道区域仍存在大量的沟槽(图2a),并且这些沟槽大多沿着复合水道内不同期次水道的边部发育。图8b为垂直复合水道走向的地震剖面,可以看到在第五期水道的两侧,发育下切、侵蚀很深的沟槽。

现今海底大量下切、侵蚀很深的沟槽的出现值得关注 and 讨论。笔者认为,这些沟槽主要是在海底地形(由于早期构造运动、沉积作用等所致)以及重力流共同作用下形成的。在研究区,重力流相对发育,携带碎屑物质的流体能量较强,会对下部地层产生强烈的侵蚀作用(包括前面所提的块状体的搬运过程),特别是在地势低洼处和早期发育并且充填结束了的水道的边部。水道边部,即水道与堤岸结合部位,二者存在物质成分的差异(水道内一般沉积粗粒沉积

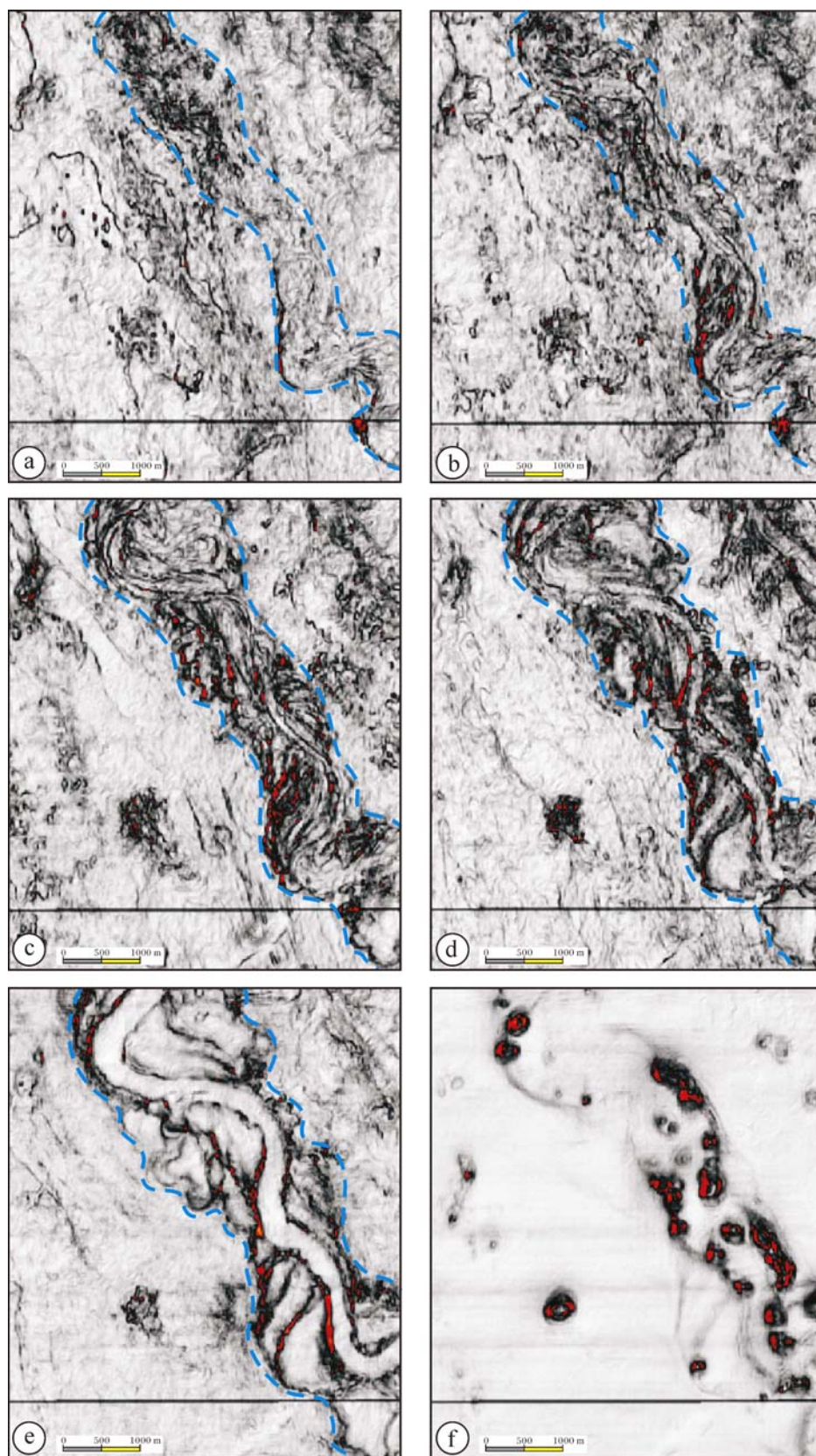


图 6 复合水道相干体属性地层切片(图中蓝色虚线为复合水道体侵蚀边界)

Fig.6 Seismic variance slices indicating submarine channels (erosion boundaries of the channel complex represented by the dash lines in blue)

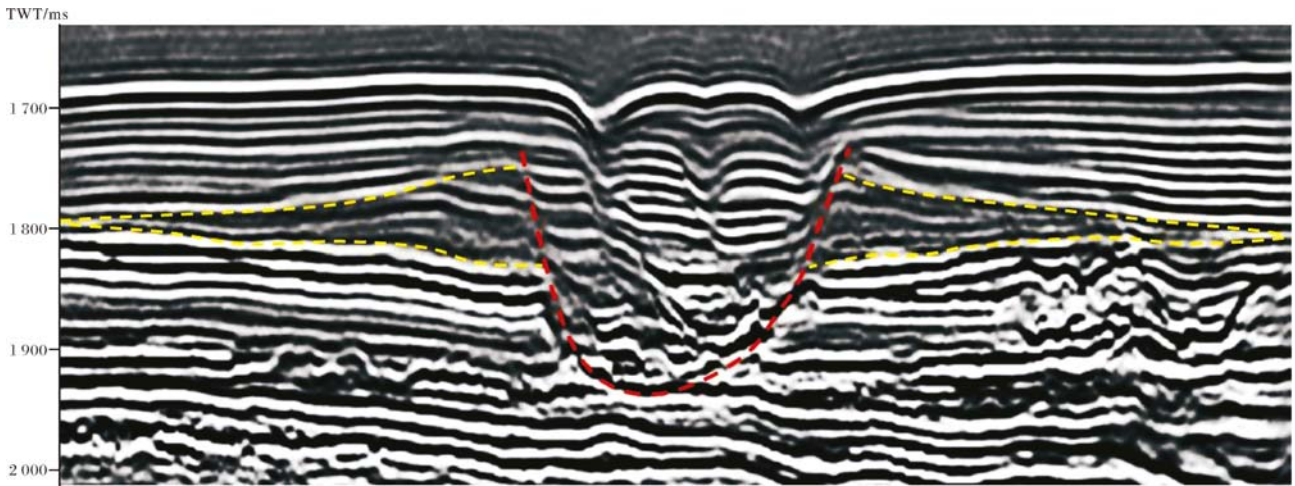
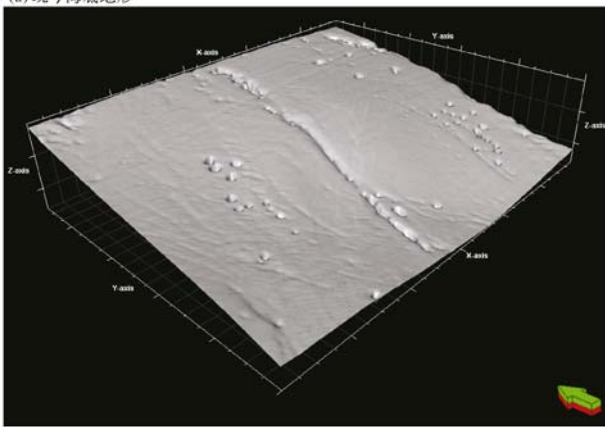


图 7 海鸥外形水道堤岸

Fig.7 Seagull-shaped levees in the seismic section

物,堤岸沉积细粒沉积物和远洋泥),容易被侵蚀,形成沟槽。随着重力流的继续侵蚀,这些在平面上连续分布的沟槽会侵蚀更深,在平面上会逐渐连接起来,形成水道的雏形。因此,沟槽的出现为下期水道的形成、发育提供了前期的地形和通道。

(a) 现今海底地形



(b) 现今沟槽地震反射特征

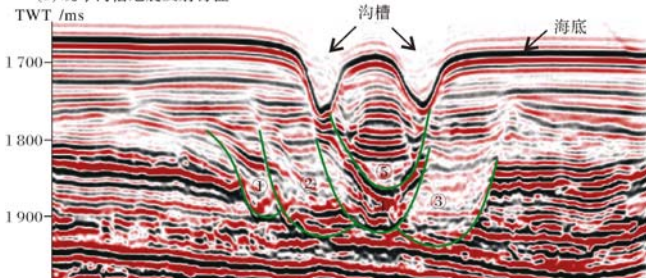


图 8 研究区现今海底地形及沟槽地震反射特征

Fig.8 Topography of the modern seafloor and the seismic reflection features of the trenches

a. topography of the modern seafloor; b. seismic profile with interpretation of the active trenches

研究区 AKPO 油田中新统 Agbada 组为油气生产目的层,其水道复合体分布也说明了地形的控制作用。含油层组内的主力储层为深水水道沉积体 TA^[16-18]。从本区海底地形的继承性及区域物源供给可知,复合水道重力流为北东—南西向。钻井、地震属性与地震反演剖面表明了 TA 水道复合体及水道内的沉积物充填发生在研究区范围内,而在物源供给的上游方向(研究区以北,即图 9 中 AA' 剖面黄色箭头处,水道沉积体顶、底面消失)及沉积体堆积的下游方向(研究区以南,即图 9 中 CC' 剖面中黄色箭头处,水道沉积体顶、底面消失)既没有水道复合体的外部轮廓,更没有其内的沉积物充填特征。用已有的深水水道沉积模式作解释有一定的难度,我们认为可能解释模式是在 TA 水道复合体阵歇式发育的各阶段,在其上游端仅作为 TA 水道体的供给通道,为过路沉积,所携带的碎屑物在下游相对低洼、宽缓地带形成条带状复合体。

3.1.2 海底坡度

海底地形对水道的影响另一个重要的方面为海底坡度对水道弯曲度的影响。坡度对弯曲度的影响主要体现在对水道下切谷底形的控制上:坡度较大时,沉积物流体能量较强,沉积物以相对顺直的轨迹侵蚀切割早期地层;坡度较小时,沉积物流体能量相对较弱,水道平面呈弯曲特征。

坡度对水道内部流体能量的控制,也会影响水道的内部充填结构。在较高的坡度下,水道切谷内部流体能量较强,后期沉积物具有较强的侵蚀能力,往往直接从含砂量相对较高的轴向侵蚀早期水道,伴随着

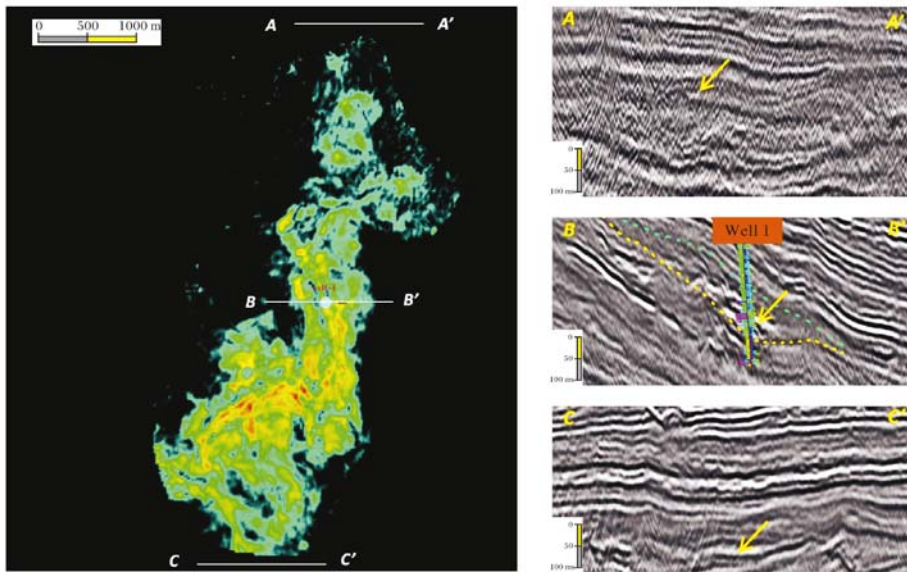


图9 研究区深层新近系 Agbada 组 TA 水道复合体分布地震特征与解释

Fig.9 Seismic interpretations of the channel complex TA developed in the underlying Group Agbada of Neogene

后期沉积物的多期重复侵蚀充填,最终表现为多期水道垂向加积的特征,平面上较为顺直。当坡度较低时,由于沉积物能量的减弱,后期沉积物对先期水道的侵蚀能力不足,沉积物绕过先期水道轴向部位,侵蚀作用往往发生在含砂量相对较低的先期水道侧翼,剖面上表现出多期水道侧向侵蚀、迁移的趋势,从而加剧了水道的弯曲程度。这也就形成了深水水道内不同样式的沉积构型。

本文测量了研究区近海底四条水道底部坡度和水道弯曲度。依据各水道轨迹的弯曲程度,按曲率大致相同的一个波长为一个测量段,将各个样本水道划分为若干个连续的取样段。测量各取样段的上游切谷底深度、下游切谷底深度、水道轨迹长度和切谷直线长度,得到各段的谷底时间域高度差和弯曲度,对时间域高度差进行时深转换,进而可以得到各段的水道底床坡度值。本文重点研究水道与邻近3条水道均为近海底水道,沉积物压实程度低,后期压实作用对下切谷底床坡度的改变较小,该方法计算出来的坡度能较真实地反映水道发育时的底床坡度情况。图10为研究区深水水道坡度与弯曲度的关系图,从图中可以看出,弯曲度与坡度呈负相关,坡度越大,水道弯曲度越小;当坡度大于3°,水道弯曲度逐渐接近于1,水道接近为顺直型。

3.1.3 物源供应和海平面变化

物源供给和海平面变化可能是控制多期次水道

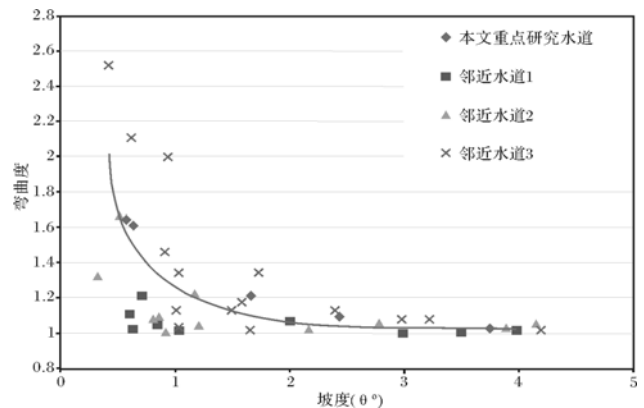


图10 研究区深水水道底部坡度与水道弯曲度的关系

Fig.10 Relationship of channel sinuosity vs. gradient

发育及发育部位的主要因素。物源供给充分、沉积物粒度粗时,形成的重力流规模大,其可使水道特征明显。目前,深水高弯度水道沉积体系的物源常为三角洲,在陆架相对较窄、河流回春作用较强的情况下或洪水期时,沉积物通过峡谷及水道形成重力流沉积,形成大规模深水水道体系,可以在陆坡上,或可以持续推进到海底平原。反之,物源供给少则会导致重力流规模的减小甚至消失,深水水道也就难以保持时间与空间上的持续性。

海平面较低时,陆架暴露面积大,侵蚀作用强,重力流物源充分,且容易搬运至陆架边缘,通过峡谷等通道进入陆坡下端及深海平原;海平面升高时,陆架

暴露面积小,侵蚀作用弱,陆源碎屑相对较少,向陆架边缘搬运距离增加,从而可能减小重力流的规模,甚至导致重力流不发育,可使陆坡上深水水道不发育。

由此,可以推测在研究区近海底现今存在的单一水道(本文未展开讨论),由于物源供给不足或者海平面上升,导致早期水道发育后未能再次发育多期的水道。而在本文所研究的水道复合体内,由于物源供给充分和海平面变化的一致性,可以发育多期水道,形成复合水道。

3.2 研究区深水沉积模式

3.2.1 深水水道体系沉积模式

目前已有较多关于深水水道沉积构型研究与沉积模式的研究成果^[29-32,38-41]。本次依据研究区近海底高分辨率地震资料,结合影响水道发育的因素,分析了尼日尔三角洲盆地深水水道体系沉积模式。

前面已经分析过研究区深层含油层水道体系发育的成因(图9),认为其上游端仅为水道体的供给通道,为过路沉积,所携带的碎屑物在下游相对低洼、宽缓地带形成条带状水道复合体。

韩文明的研究显示^[41],在本研究区邻近区域内深水水道体系与朵叶体系可以同时存在(图11a),主要原因可能与物源供给的强度、频次、古地形存在

关系。Adeogba等利用地震资料对尼日尔三角洲陆坡地区研究后也认为^[13],负地形与物源供应影响着深水沉积模式,一方面水道体系向深海平原过渡为末端朵叶体系,另一方面在陆坡上的负地形区域既可以形成水道体系,也可以形成过渡性朵叶体系(图11b)。

结合上述多个方面的资料及本区域近海底资料,认为在尼日尔三角洲盆地陆坡特定区域,受物源供应、古地形等因素影响,可以发育供给水道、水道—堤岸体系、过渡性(水道)朵叶体系,也可以发育末端朵叶体系,空间上它们既可以沿陆坡等深线方向相邻,也可以向深海平原过渡(图12)。深水水道在陆架上发育下切很深的峡谷,坡折下发育限制性的水道—堤岸体系并可以伴随块状搬运体的形成;在陆坡下部至海底平原,受物源供给、地形、构造强弱及地层稳定性等影响,可发育水道—堤岸体系及水道—朵叶体系等,包括过渡性的水道—朵叶体系或水道—末端朵叶体系。水道受海底地形(特别是坡度)、沉积物物理性质的影响,平面上可呈高弯度的特征。受构造和海平面变化的影响,呈周期性发育,深水水道表现为多期次发育,形成复合水道体系。在陆坡底部和海底平原,由于地势开阔以及水动力能量的减弱,重力流在

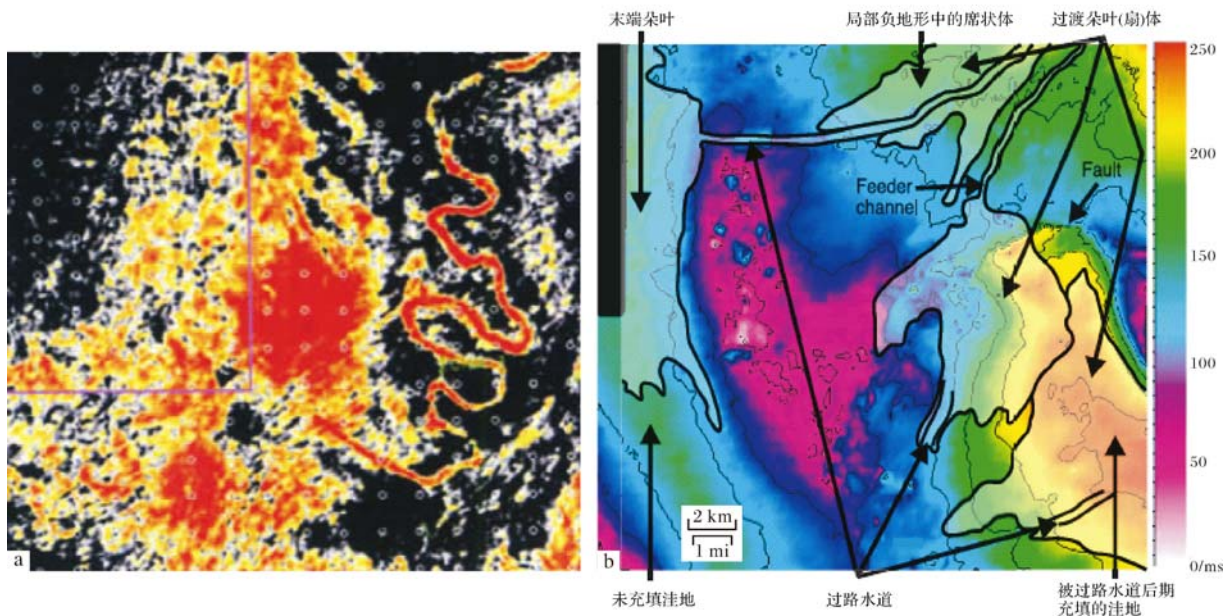


图11 研究区邻近区域深水水道体系地震解释

a.尼日尔三角洲深水沉积地震振幅平面图^[41];b.尼日尔三角洲陆坡深水沉积分析图^[13]

Fig.11 Submarine channel complexes adjacent to the study area interpreted from seismic data

a. the average seismic amplitude maps suggesting the distribution of deepwater deposits^[41];
b. distribution of submarine channels developed on the continental slope in Nigeria offshore^[13]

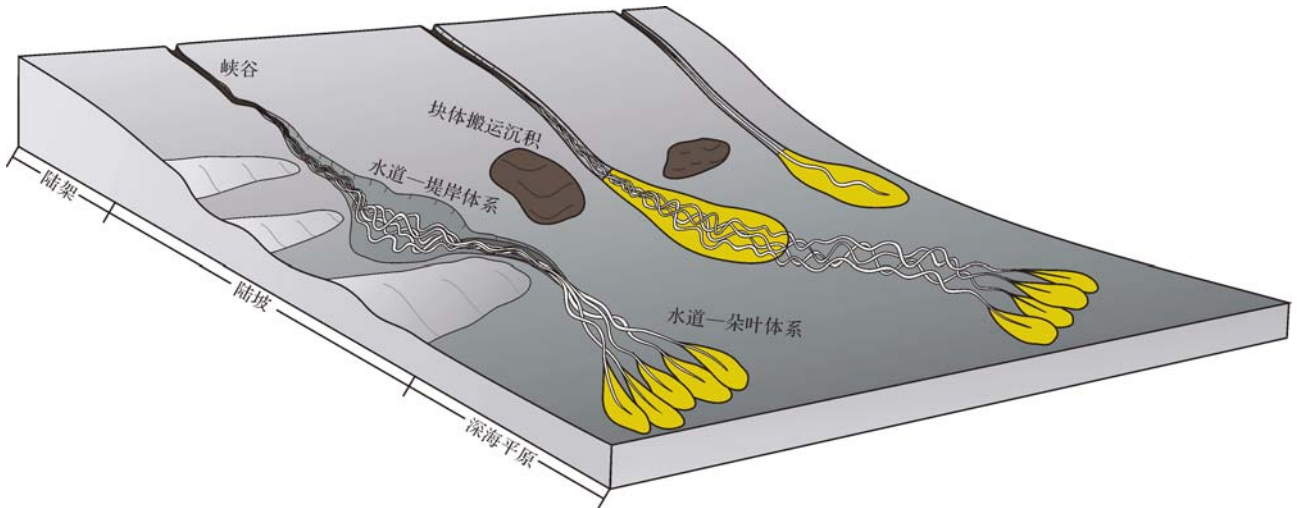


图 12 西非地区深水水道体系沉积模式

Fig.12 A proposed depositional model for the submarine channel complexes in West Africa

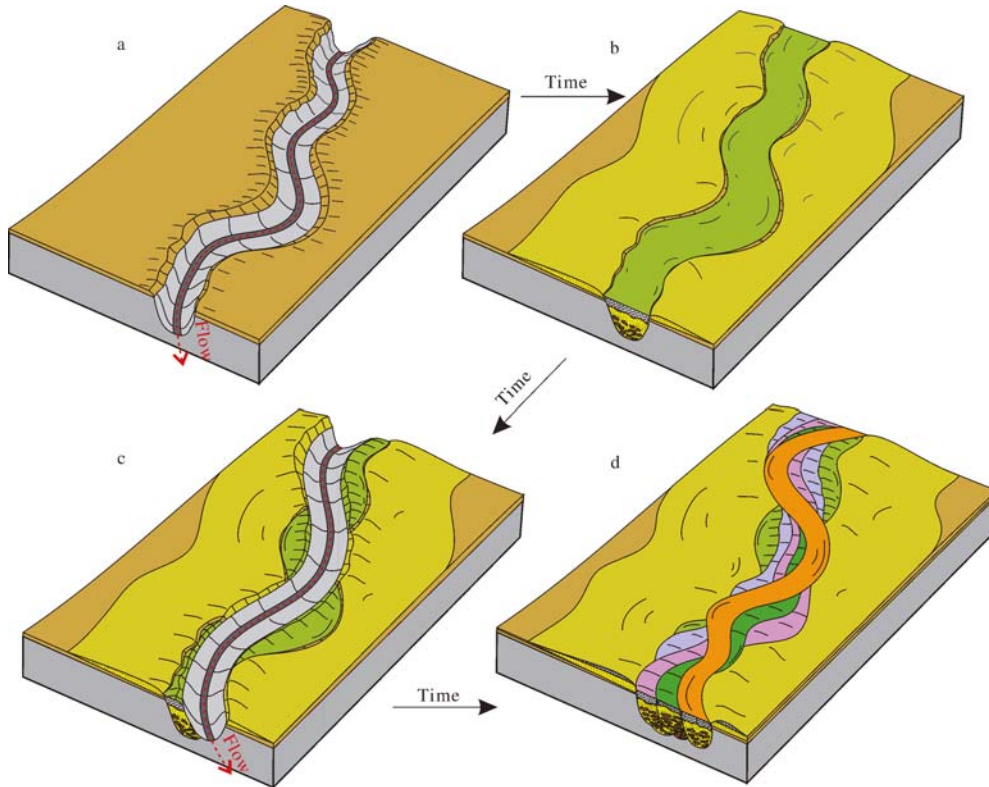


图 13 复合水道演化模式图(以图 2b 中深水水道体系为原型)

Fig.13 Block diagrams showing the evolution processes of the channel complexes developed in the study area

该区域发散,以末端朵叶体系为主。

3.2.2 研究区深水水道体系演化模式

以研究区复合水道为原型,总结了水道体系的演化模式(图 13)。在深水水道发育之前,由于受构造和水流作用的影响,形成海底地形的凸凹格局,并出

现大量连续分布的沟槽。随着重力流作用的进一步发展,沿着海底地形低洼和沟槽的地方,水道开始发育。水道发育早期,重力流能力强,侵蚀作用强,水道下切、侵蚀下部地层,形成 V 字型的水道(图 13a)。由于坡度大小及地层侵蚀差异性的不同,水道的弯曲

度会发生变化。该时期的水道内部以过路沉积为主,仅有少量的粗颗粒物质和滑塌体在水道底部充填。随着重力流作用的减弱,水道由以侵蚀、搬运过程为主逐渐过渡为以充填、沉积过程为主(图 13b),水道进入中—晚期充填—废弃阶段。在水道内充填细砂和粉砂等细粒沉积物,并且在水道两侧发育堤岸,堤岸沉积物较水道内充填物更细,泥质含量高。

一期水道结束后,由于在水道和堤岸的过渡部位存在物质差异,在重力流的作用下容易发生侵蚀,形成新的沟槽,为下一期水道的发育提供通道。当重力流达到一定程度时发生新的水道事件,形成新的水道。此时的水道就会在前期水道边部形成的沟槽和水道内部低洼和物质成分差异较大的部位发育,并对早期形成的水道发生下切、侵蚀作用,破坏早期水道。平面形态上类似曲流河中点坝,但作用过程与动力机制完全不同(图 13c)。

随着多期水道的不断发育,在水道内部就会发生侵蚀—充填—再侵蚀—再充填,从而形成一个多期水道叠置的复合水道(图 13d),但在不同部位叠置方式有所差异,平面上呈现出高弯度的特征。

4 结论

(1) 单一水道外形为 V 字型,水道下部充填粗颗粒碎屑物,地震为强反射、同相轴不连续,地层呈倾斜状或丘状叠置;水道上部为细粒物质(半远洋及远洋沉积物),地震反射为中强反射,同相轴中等连续;顶部为半远洋及远洋沉积,中强反射,地震反射同相轴具很好的连续性,沉积物呈水平层状堆积;复合水道为多期水道垂向、侧向侵蚀—充填形成,外形为 U 字型,不同期水道形成 3 种叠置样式,分别为垂向叠置、侧向叠置和复合叠置,在复合水道的不同部位呈现不同的叠置样式。

(2) 结合研究区水道表现出来的特点,讨论了海底地形、物源及海平面变化对深水水道的影响。海底凸凹格局是水道体系形成、演化的关键控制因素,尤其是在构造相对稳定、相对海平面持续变化的情况下更是如此。海底坡度决定了单一水道的弯曲度变化,坡度越小,弯度越大;物源和海平面的变化决定了水道多期次发育。

(3) 西非被动大陆边缘陆坡深水水道体系沉积模式研究表明,从现今近海底深水沉积体系分布来看,因沉积物源供应(强度、物质成分、频次)、局部地形及已有沉积物的差异性,在某一特定区域,可以发

育供给水道、水道—堤岸体系、过渡性(水道)朵叶体系,也可以发育末端朵叶体系。空间上三者既可以沿陆坡等深线方向相邻,也可以向深海平原过渡。

(4) 以研究区深水水道体系为原型,总结了高弯度复合水道的演化模式:早期水道受海底地形影响,地势低洼处和沟槽部位是水道有利发育区域;晚期水道会侵蚀、破坏早期水道,使早期水道仅部分得以保存,形成类似曲流河中点坝的特征。每期单水道的发生既可以在早期水道的基础上继续,也可以独立于早期水道而发生。

参考文献 (References)

- 1 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(6/7/8/9): 388-405
- 2 Ven Kolla. A review of sinuous channel avulsion patterns in some major deep-sea fans and factors controlling them[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/7/8/9): 450-469
- 3 Kolla V, Bourges Ph, Urruty J M, et al. 2001. Evolution of deep-water Tertiary sinuous channels offshore Angola (West Africa) and implications for reservoir architecture [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(8): 1373-1405
- 4 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*, 2012, 37(1): 105-112 [Liu Xinying, Yu Shui, Tao Weixiang, et al. Filling architecture and evolution of Upper Miocene deep-water channel in Congon Fan Basin [J]. *Earth Science*, 2012, 37(1): 105-112]
- 5 Faugkres J C, et al. Seismic patterns of a muddy contourite fan (Vema Channel, South Brazilian Basin) and a sandy distal turbidite deep-sea fan (Cap Ferret system, Bay of Biscay): a comparison [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 115(1/2/3/4): 81-110
- 6 Wynn R B, et al. Sinuous deep-water channels: Genesis, geometry and architecture [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/7/8/9): 341-387
- 7 Bouma A H. Fine-grained submarine fans as possible recorders of long- and short-term climatic changes [J]. *Global and Planetary Change*, 2001, 28(1/2/3/4): 85-91
- 8 Fonnesu F. 3D seismic images of a low-sinuosity slope channel and related depositional lobe (West Africa deep-offshore) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/7/8): 615-629
- 9 赵晓明,吴胜和,刘丽. 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 [J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 1049-1058 [Zhao Xiaoming, Wu Shenghe, Liu Li. Characterization of reservoir architectures for Neogene deepwater turbidity channels of Akpo oilfield, Niger Delta Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 1049-1058]
- 10 刘新颖. 西非第三系深水扇沉积特征及发育演化规律 [J]. *东北石油大学学报*, 2013, 37(3): 24-31 [Liu Xinying. Depositional char-

- acteristics and evolution of the Tertiary deepwater fan in West Africa [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2013, 37(3): 24-31]
- 11 李明娟,胡滨,白海强,等. 西非深水 Prewei 构造复杂断裂精细解释及沉积体刻画[J]. *石油物探*, 2013, 52(3): 294-300 [Li Mingjuan, Hu Bin, Bai Haiqiang, *et al.* The fine interpretation of complex fracture and characterization of sedimentary body on Prewei structure [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(3): 294-300]
 - 12 Mattern F. Ancient sand-rich submarine fans: depositional systems, models, identification, and analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 70(3/4): 167-202
 - 13 Adeogba H H, *et al.* Transient fan architecture and depositional controls from near-surface 3-D seismic data, Niger Delta continental slope [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(5): 627-643
 - 14 Kolla V, Bourges Ph, Urruty J M, *et al.* Evolution of deep-water Tertiary sinuous channels offshore Angola (west Africa) and implications for reservoir architecture [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(8): 1373-1405
 - 15 Russell B. Wynn, Neil H. Kenyon, Douglas G. Masson, *et al.* Characterization and recognition of deep-water channel-lobe transition zones [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(8): 1441-1462
 - 16 于水,程涛,陈莹. 尼日尔三角洲盆地深水沉积体系特征[J]. *地球科学*, 2012, 37(4): 763-770 [Yu Shui, Cheng Tao, Chen Ying. Depositional characteristics of deepwater systems in the Niger delta basin [J]. *Earth Science*, 2012, 37(4): 763-770]
 - 17 王颖,吕明. 深水沉积储层特征——以尼日利亚 OML130 区块为例[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(2): 228-236 [Wang Ying, Lü Ming. Reservoir characteristics sediment in Nigeria deep-water area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(2): 228-236]
 - 18 赵晓明,吴胜和,刘丽. 西非陆坡区深水复合水道沉积构型模式[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2012, 36(6): 1-12 [Zhao Xiaoming, Wu Shenghe, Liu Li. Sedimentary architecture model of deep-water channel complexes in slope area of West Africa [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(6): 1-12]
 - 19 Gamberi F, *et al.* Integrating modern seafloor and outcrop data in the analysis of slope channel architecture and fill [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 41: 83-103
 - 20 Beaubouef R T. Deep-water leveed-channel complexes of the Cerro Toro Formation, Upper Cretaceous, southern Chile [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(11): 1471-1500
 - 21 Abreu V, *et al.* Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deep water sinuous channels [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/7/8): 631-648
 - 22 马君,刘剑平,潘校华,等. 西非被动大陆边缘构造演化特征及动力学背景[J]. *中国石油勘探*, 2003(3): 60-64 [Ma Jun, Liu Jianping, Pan Xiaohua, *et al.* Evolution Characteristics and dynamic background of passive continental margin structure in West Africa [J]. *China Petroleum Exploration*, 2003(3): 60-64]
 - 23 熊利平,王骏,殷进垠,等. 西非构造演化及其对油气成藏的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 641-646 [Xiong Li-ping, Wang Jun, Yin Jinyin, *et al.* Tectonic evolution and its control on hydrocarbon accumulation in West Africa [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 641-646]
 - 24 Pickering K T, Corregidor J. Mass-transport complexes (MTCs) and tectonic control on basin-floor submarine fans, Middle Eocene, South Spanish Pyrenees [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75: 761-783
 - 25 蒋恕,王华,Paul Weimer. 深水沉积层序特点及构成要素[J]. *地球科学*, 2008, 33(6): 825-833 [Jiang Shu, Wang Hua, Paul Weimer. Sequence stratigraphy characteristics and sedimentary elements in deepwater [J]. *Earth Science*, 2008, 33(6): 825-833]
 - 26 吴时国,秦蕴珊. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 922-930 [Wu Shiguo, Qin Yunshan. The research of deepwater depositional system in the northern South China Seap [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 922-930]
 - 27 马宏霞,吕福亮,范国章,等. 缅甸若开海域块体搬运沉积地震响应及典型地质特征[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(54): 751-759 [Ma Hongxia, Lü Fuliang, Fan Guozhang, *et al.* Seismic responses and geological characteristics of mass-transport deposits in the Rakhine Basin, Offshore Myanmar [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(54): 751-759]
 - 28 李磊,王英民,张莲美,等. 块体搬运复合体的识别—演化及其油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2010, 28(1): 76-81 [Li Lei, Wang Yingmin, Zhang Lianmei, *et al.* Identification and evolution of mass transport complexes and its significance for oil and gas exploration [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(1): 76-81]
 - 29 Droz L, Marsset T, Ondreas H, *et al.* Architecture of an active mud-rich turbidite system: The Zaire Fan (Congo-Angola margin southeast Atlantic): Results from ZaiAngo 1 and 2 cruises [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(7): 1145-1168
 - 30 McHargue 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
 - 31 Henry W. Posamentier. Depositional elements associated with a basin floor channel-levee system case study from the Gulf of Mexico [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/7/8): 677-690
 - 32 Mike Mayalla, Ed Jones, Mick Casey. Turbidite channel reservoirs—Key elements in facies prediction and effective development [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(8): 821-841
 - 33 孙辉,范国章,吕福亮,等. 孟加拉湾缅甸若开盆地上新统斜坡水道复合体沉积特征[J]. *沉积学报*, 2011, 21(9): 695-703 [Sun Hui, Fan Guozhang, Lü Fuliang, *et al.* Sedimentary characteristics of Pliocene slope channel complexes in the Rakhine Basin, Offshore Myanmar [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 21(9): 695-703]
 - 34 Sinclair H D, Tomasso M. Delta-fed turbidites infilling topographically complex basins—A New depositional model for the Annot sandstones, SE France [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(3): 504-519
 - 35 Sinclair D, Tomasso M. Depositional evolution of confined turbidite basins [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(4): 451-456
 - 36 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]
- 37 李华, 何幼斌, 王振奇. 深水高弯度水道—堤岸沉积体系形态及特征[J]. *古地理学报*, 2011, 13(2): 139-149 [Li Hua, He Youbin, Wang Zhenqi. Morphology and characteristics of deep water high sinuous channel-levee system [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(2): 139-149]
- 38 Abreu, *et al.* Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deep water sinuous channels [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/7/8): 631-648
- 39 Deptuck M E, *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(6/7/8/9): 406-433
- 40 Heinio P, Davies R J. Knick point migration in submarine channels in response to fold growth, western Niger Delta[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/7/8/9): 434-449
- 41 韩文明. 2DWRI 深水沉积储层直接预测新方法—基于尼日尔三角洲深水沉积储层研究[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(1): 20-23 [Han Wenming. 2DWRI method to detect directly reservoirs deposited in deep water: Based on a study on the deepwater reservoirs in Niger delta [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(1): 20-23]

Seismic Characteristics and Depositional Model of Near-seabed Submarine Leveed-channel Complexes in Nigeria Offshore Block, West Africa

SUN Li-chun WANG Hong-qiang HE Juan WANG Long GUO Li-na NI Jun-e
(CNOOC Research Institute, Beijing 100028)

Abstract: Submarine leveed-channel complexes on the continental slope in OML130 area of West Africa have been anatomized with high-resolution seismic data near the present seabed. Seismic reflection features for each sedimentary elements of the submarine gravity-flow induced leveed-channel complex has been analyzed and summarized. The geometric outlines and the interior infill characteristics have been introduced in detail. Seismic reflections for single channel have the V-shaped cross-sectional motifs with relatively high amplitudes and low continuities at the lower interval, which indicate the relatively coarse-grained sediments, whilst for the upper part of a channel, seismic reflections have the motifs indicating fine-grained sediments with moderate amplitudes and great continuities and the sinuous ribbon plan form. With the analysis on features of cutting and filling, three stacking patterns of channels in the leveed-channel complexes have been summarized. It is concluded that each later channel develops independently from at most cases the earlier channels in terms of the process compared with the sinuous meandering channels in fluvial systems. So, it leads to the three stacking patterns occurred in the different parts of this submarine leveed-channel system. A depositional model for the continental slope leveed-channel complex in West Africa is envisioned based on the analysis of the controlling factors with the data from near-seabed seismic as well as the deeper hydrocarbon-producing intervals. It is likely that the leveed-channel complexes can be occurred simultaneously with the depositional lobate-fan complexes side by side or alternatively downslope with each other. Near seabed high-resolution seismic data help us gain a much more insight than ever into the characteristics of the deep-water depositional systems and build the more rational and applicable models, which will enhance the related studies more successfully.

Key words: Nigeria; deepwater; leveed-channel complex; seismic characteristics; depositional model