

杨希濮, 陈筱, 冯潇飞, 等. 尼日尔盆地油藏水道沉积构型识别及演化规律[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 49-57.

尼日尔盆地油藏水道沉积构型识别及演化规律

杨希濮¹, 陈筱¹, 冯潇飞^{2*}, 杨宝泉¹, 刘飞², 赵晓明², 葛家旺²

(1 中国海洋石油国际有限公司, 北京 100028; 2 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500)

摘要:深海水道作为深水环境中重要的储层类型, 具有极为丰富的深海油气资源, 近年来一直是深海油田勘探和开发的重点区域, 但对水道内部构型边界的识别刻画仍然是一个难点。依据三维地震数据以及测井和岩心资料, 对西非 X 油藏水道进行了内部构型边界的精细划分, 并分析了其水道演化模式。研究表明: 区内水道体系边界可通过地震相特征差异进行识别, 并将其分为限制性、半限制性和非限制性 3 种类型; 复合水道边界可通过“垂向分期”和“侧向划界”原则进行确定; 单一水道边界可通过水道边界振幅强弱变化进行识别, 其在平面上有单侧向迁移和沿下游摆动迁移 2 种迁移模式, 在剖面上单向侧向迁移段水道呈侧向迁移的特征, 沿下游摆动段呈现出多期水道相互摆动切叠的特征; 水道体系的演化可划分为初始形成、快速发育、平稳发育以及水道消亡 4 个阶段, 对应一个完整的海平面变化旋回。

关键词:深海水道; 水道构型; 边界识别; 演化规律; 控制因素

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.092

0 引言

水道是由陆源碎屑沉积物在重力作用下沿陆架斜坡向深海(水)平原或盆地运移形成的负地貌, 是深水环境下重要的油气富集区域, 近年来一直是深水油气勘探开发的热点领域^[1]。对深海水道油气藏的研究与开发在一定程度上依赖于水道的构型样式, 即水道在空间上的不同叠置组合关系。最早提出水道构型划分方案的是 MUTTI 和 NORMARK 的 5 级划分方案^[2], 将水道体系分为岩石相、水道、微扇体、单一扇体和沉积盆地; LAMB 等^[3]将岩石相进一步划分为沉积单元和沉积单元内部岩石相; 赵晓明等^[4]将微扇体解剖为水道复合体以及水道复合体组合。无论什么划分方案, 深海水道构型级次基本上都可归于单一水道、复合水道、水道体系这 3 个层次^[5]。深水水道构型在一定程度上直接控

制了水道含油气储层砂体的厚度以及其在平面上的展布特征, 因此, 对于这种水道构型控制型油气藏的研究具有非常重要的勘探开发意义。

对于深海水道构型的研究已有较多, 但其都只宏观地解释了水道剖面构型样式, 对水道之间的叠置关系只有理论描述, 并没有说明在实际油田勘探开发中如何识别各类水道构型。实际上由于水道沉积环境的特殊性, 仅凭借某一类勘探方法是难以对不同类型水道进行识别的, 且不同尺度规模水道的识别方法亦有不同。为探究深水水道构型的识别方法, 本文针对西非 X 油藏, 结合三维地震、测井曲线以及部分取心资料, 通过三维地震精细雕刻和地震属性提取, 对油藏发育的不同类型水道边界进行识别刻画, 进而分析其在水道在三维空间的展布特征和演化规律。

1 地质概况

尼日尔三角洲盆地位于西非边缘的几内亚湾, 其盆地主体位于尼日利亚陆上、海岸及陆架海域部分, 其陆上面积约为 140 000 km², 最大厚度可达 12 km^[6]。尼日尔三角洲自北向南按顺序形成伸展构造区、底辟构造区、挤压构造区(图 1)^[7]。在进积三角洲发育过程中, 较早形成的前三三角洲泥岩被后来发育的三角洲前缘及三角洲平原的大量沉积

收稿日期: 2021-04-11

资助项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目“西非水道型浊积储层连续性及其井网适应性研究”(YXKY-2019-ZY-07); 国家自然科学基金面上项目“盐底辟触发型块体搬运沉积: 构型样式及控制因素”(42072183)

作者简介: 杨希濮(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海外油气田开发地质研究工作。E-mail: puxiy@126.com

* 通讯作者: 冯潇飞(1993—), 男, 在读博士, 主要从事深水沉积学方面的研究工作。E-mail: fxf0916@163.com

物所覆盖,上覆沉积物负荷超过下部塑性泥岩承受能力,致使下伏泥岩产生超压并带有流动性,塑性泥岩向海方向进行迁移,使得塑性泥岩在前方形成泥底辟,此时泥岩的向前流动产生了高可容纳空间,从而抑制了三角洲的进积,形成了相对稳定的沉积区,即所谓的沉积带,在这些泥岩附近形成了沿海

岸线走向的同生断层。在塑性泥岩前进的过程中,进积三角洲转变为偏加积的过程,当泥岩逐步埋藏压实脱水后流动性减弱,这时剩余的泥岩无法再继续流动,最终不再产生更多的可容空间。三角洲继续进积,新的底辟区开始发育,旧的沉积带逐渐废弃,新的沉积带逐步形成^[8-9]。

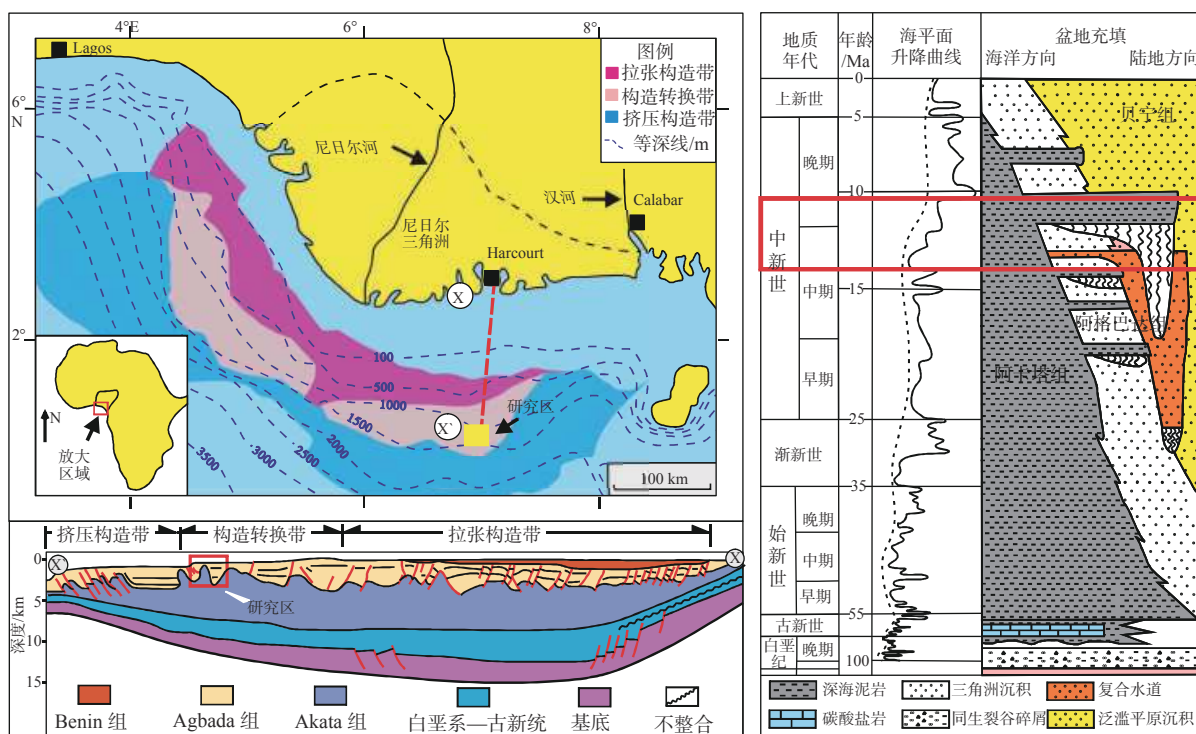


图 1 研究区地质背景及综合地层系统特征剖面^[1]

Fig.1 Tectonic setting and integrated stratigraphic column of the study area^[1]

现今的尼日尔三角洲于始新世开始发育,漂移晚期阶段的海退背景给大型三角洲进积提供了有利条件(图 1)。尼日尔三角洲盆地主要有 3 套进积型岩性地层单元:底部以泥岩为主的前三角洲环境的阿ката组;中部为以砂岩和泥岩为主的三角洲前缘环境的阿格巴达组;顶部为以砂岩为主的三角洲平原和冲积环境的贝宁组^[10]。自早始新世开始到上新世末期,全球海平面下降事件多次发生,尼日尔三角洲地区进入大规模的海退阶段,三角洲逐渐向海推进,于新近纪在深水区发育规模体积较大的深水碎屑岩沉积^[11]。研究区 X 油藏位于尼日尔三角洲盆地 Harcourt 港以南 200 km 处,油气藏类型受构造和岩性的控制。X 油藏主要的含油层系位于阿格巴达组,其砂泥岩交替出现。

2 数据与方法

本次研究采用高品质三维地震数据及大量钻

井资料,钻井资料测井曲线类型齐全。地震数据处理面元为 12.5 m×12.5 m,记录长度 7.5 s,采样间隔 3 ms,频带宽度 5~70 Hz。在目标层段,地震资料成像效果较好,信噪比较高,主频 32 Hz,可分辨厚度约为 20 m。故该资料品质基本能够满足构造解释和储层研究的需要。为此,以下将基于高频地震信息、深层井震联合资料以及取心信息,从单一水道类型及内部充填模式、单一水道垂向演化规律、单一水道宽厚定量分析 3 方面对单一水道沉积构型模式进行研究。

3 水道沉积构型解剖

3.1 水道沉积构型级次划分

水道沉积构型级次的划分是水道内部沉积构型模式研究的根本与关键。关于水道沉积构型级次的划分方案,国内外研究中尚没有形成严格一致

的标准,但近几年在国内深海油气的开发研究中,赵晓明等^[4]于 2010 年提出的水道沉积构型级次划分方案被多数石油工作者所认可^[12-14]。本研究基于前人总结的划分模式,重新厘定了包含水道体系(7 级)、复合水道(5 级)、单一水道(4 级)在内的构型级次划分方案(表 1)。

表 1 构型级次划分方案^[4]
Table 1 Architecture classification^[4]

构型级次	构型单元名称	地下识别资料	与Vail层序对应关系
4级	单一水道	测井/地震	/
5级	复合水道	地震	5级
7级	水道体系	地震	3级

由于低构型级次单元(0~3 级)在空间上不具对比性,因此,在资料允许的前提下,本文重点针对研究区内水道体系(7 级)、复合水道(5 级)、单一水道(4 级)3 个构型单元开展分级研究(图 2)。

3.2 水道体系类型

水道体系是浊积水道沉积构型中最大的一个级次。受物源、构造等多种因素控制,水道体系的形态、规模、空间叠置关系多样,由于水道体系的厚度一般可达几十米至几百米,属于大尺度构型单元研究,可运用地震信息从水道体系类型、水道体系空间演化模式方面进行水道体系沉积构型模式研究。

在研究区地震剖面上,由于水道内外侧沉积物岩性差异,水道沉积整体呈现出中—强振幅、平行或波状反射、较好连续性的内部反射特征。其外部表现出“U”或“V”的地震相形态,宽约 2~3 km,深

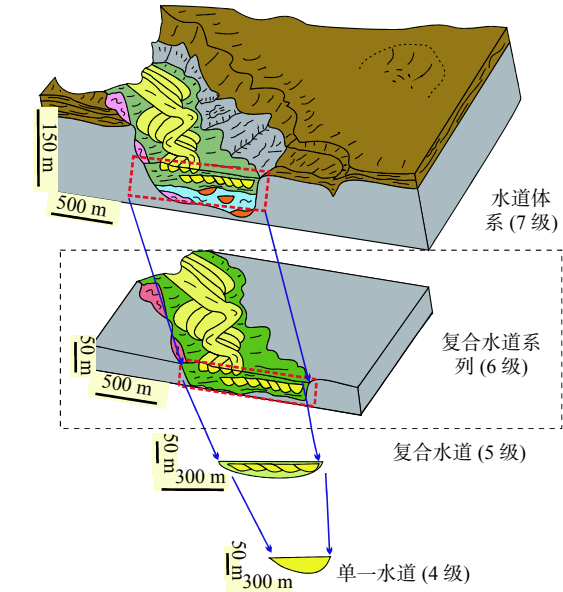


图 2 研究区水道体系构型级次划分方案示意图
Fig.2 Schematic diagram of channel architecture classification

度约 300 m。当水道体系对下伏地层的侵蚀作用较强时,侵蚀面往往发育滞留沉积或滑塌沉积等泥质较高的岩相,在剖面上往往表现为低振幅条带,也可结合测井曲线上较为明显、差异性大的砂泥界线来对水道体系的边界进行识别。在所提取的均方根振幅属性平面图上可以看出,研究区内水道呈带状,北向来的 2 条水道向南合为 1 条,整体具时而顺直时而弯曲的平面形态(图 3)。

水道体系类型不同,其所表现出的地震地貌形态也就不同。根据地震资料上的水道体系外部形态、内部结构等地震反射特征,可将 X 油藏深浅目标层段发育的水道体系划分为限制性、半限制性、非限制性 3 类(图 4)。

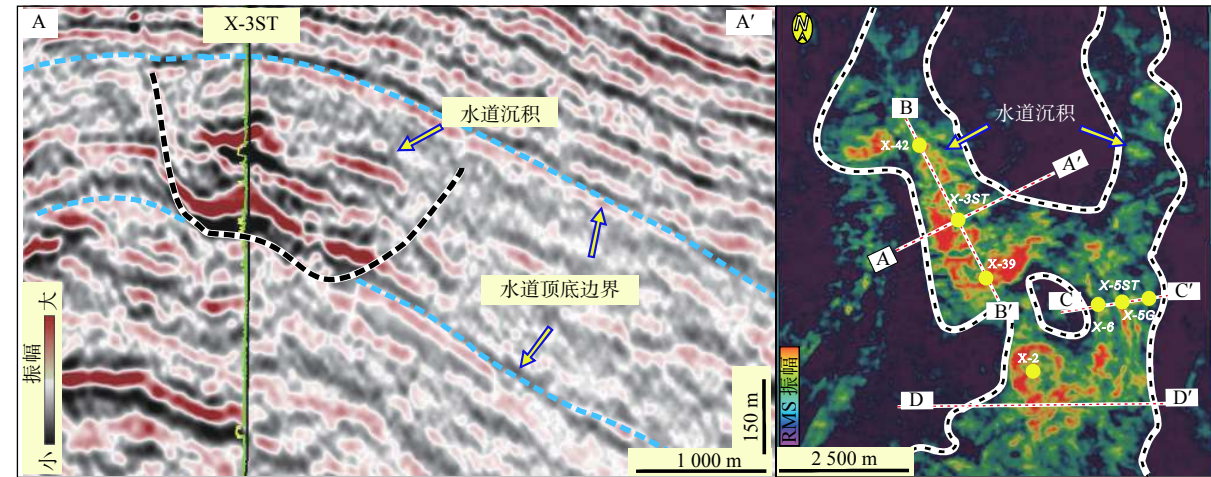
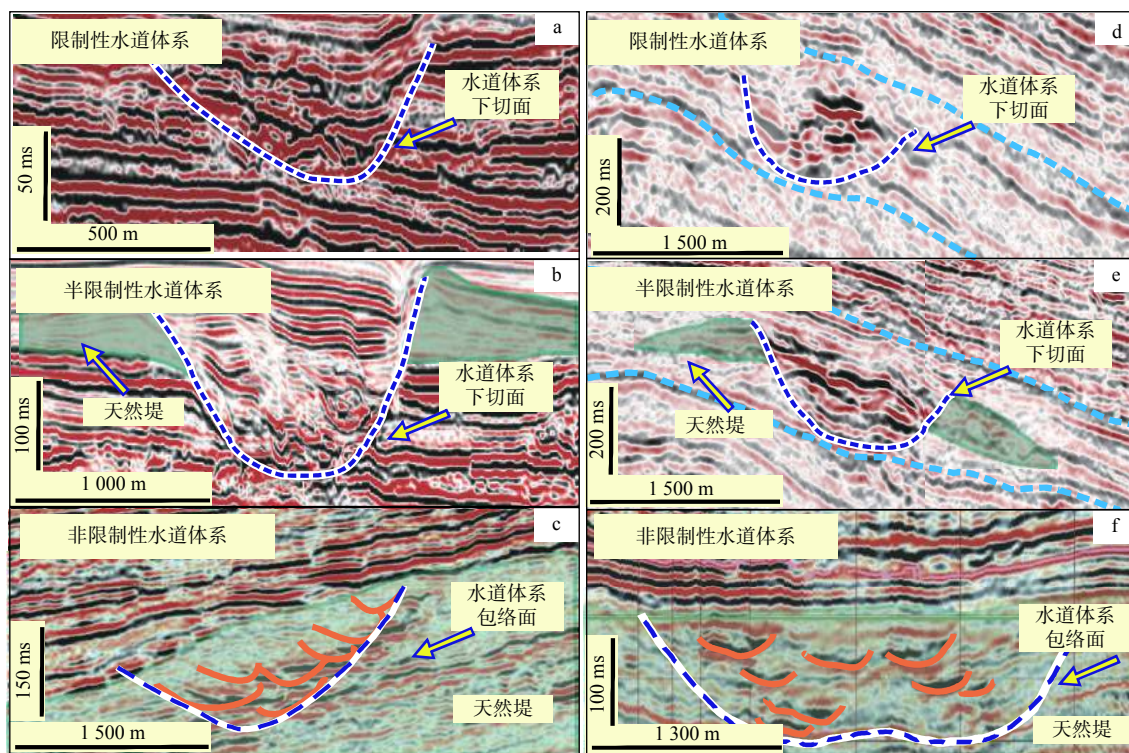


图 3 研究区水道沉积地震响应及平面展布特征
Fig.3 Seismic characteristics and plane distribution of channel deposits



(a)浅层限制性水道体系;(b)浅层半限制性水道体系;(c)浅层非限制性水道体系;(d)深层限制性水道体系;

(e)深层半限制性水道体系;(f)深层非限制性水道体系

图4 研究区不同类型水道体系地震反射特征

Fig.4 Seismic reflection characteristics of different types of channel systems

3.3 复合水道级次划分方案

研究区深层、浅层研究层段水道体系内部发育多期复合水道,由于深水沉积多为阵发性事件,海平面升降、水动力强弱存在变化,因此,单一期次复合水道内部充填末期,存在一定的低砂地比物源供给阶段,此时沉积物多为细粒物质,披覆在先前沉积物之上,这些细粒物质往往构成了复合水道间稳定的隔层。基于上述地质模式发育的特点,复合水道级次构型单元的井震模式拟合可以概括为垂向上的分期以及侧向上的划界。

3.3.1 垂向分期

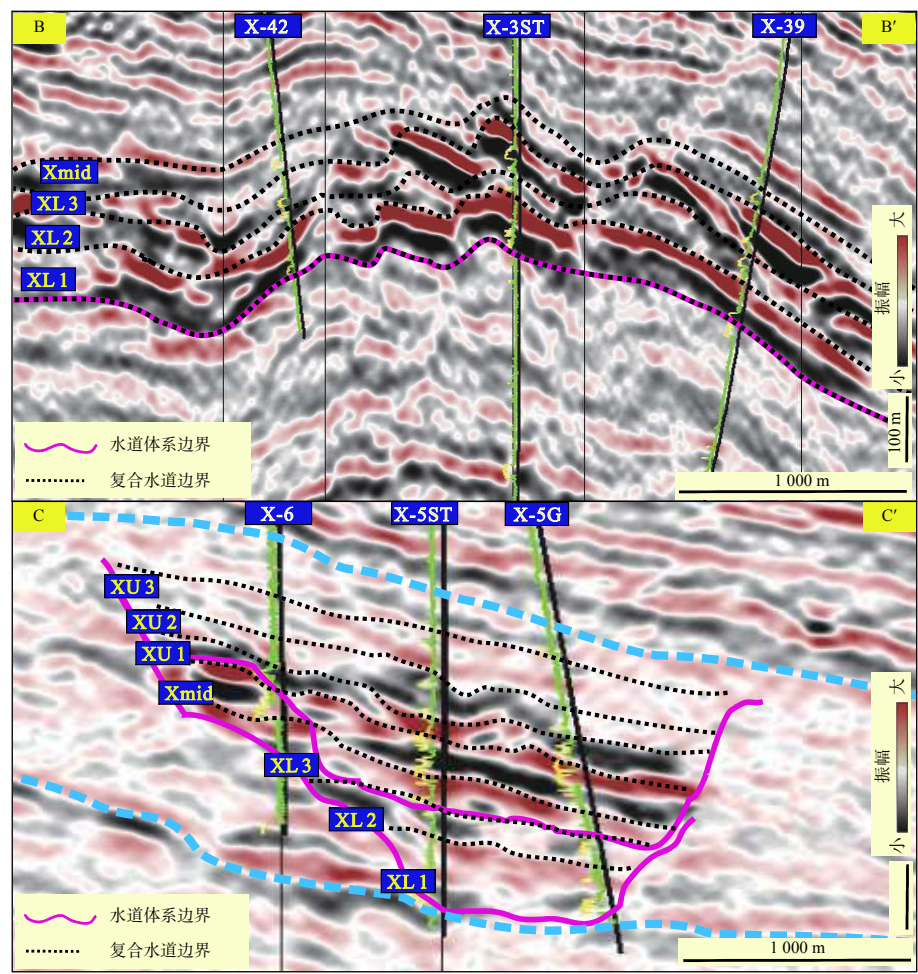
垂向分期包含了2方面的内容:①基于单井,对复合水道的解释并垂向分期;②基于地震剖面,开展复合水道(小层)级别的层位追踪。根据测井、岩心资料在岩电分析的基础上,进行岩电标定,明确单井上复合水道测井响应特征。每期复合水道在测井曲线上都存在有明显的“钟型”正旋回测井相特征,以此特征为依据,建立相应的复合水道测井构型单元解释模板,将其应用到各个单井之上对复合水道进行解释^[15]。依据测井构型单元解释,并在前人研究的基础上,对准层序组内部进行测井上

的垂向分期,进而根据地震合成记录,在井震标定的基础上,进行地震相分析。最终得以在水道体系垂向上,精确的对复合水道进行垂向分期,即进行小层级别的地震层位追踪(图5)。

在以上运用测井、地震响应特征分析的基础上,共识别出7期复合水道(即将X油藏划分为XL1—XL3、Xmid、XU1—XU3共7个小层)。其发育于不同的浊流事件时期,沉积稳定且时间较长,单个小层顶部多被远洋泥岩披覆。在不考虑断层对水道的改造作用的前提下,不同复合水道小层之间呈近平行展布,其间复合水道的下切侵蚀作用发育较少。

3.3.2 侧向划界

侧向划界是指在侧向相变模式的指导下,基于“平剖互动、井震联合”的原则,在横向分辨率较高的地震剖面上,对地震相、测井相侧向发生变化的区域做标记,将映射在平面属性的标记进行边界的连接,从而完成侧向划界。为此,利用RGB地震属性(对相变边界有更好的识别效果)融合平面图来识别各小层复合水道的边界(图6)。结合各小层地震属性图可知,位于水道体系底部的XL1—XL2复合水道物源主要来自西北方,XL3复合水道开始有极为少量东北方向的物源供给,但对于水道的影响



剖面位置见图 3

图 5 研究区主要研究层段复合水道界面划分典型地震剖面

Fig.5 Interfacial classification of complex channel of the main research intervals in the study area

较小; 顶部的 XU1—XU3 复合水道物源来自东北方向, 而 Xmid 小层则同时接受过东北和西北方向的物源供给。

3.4 单一水道构型边界识别

在研究区地震剖面上, 单一水道的侧向迁移以

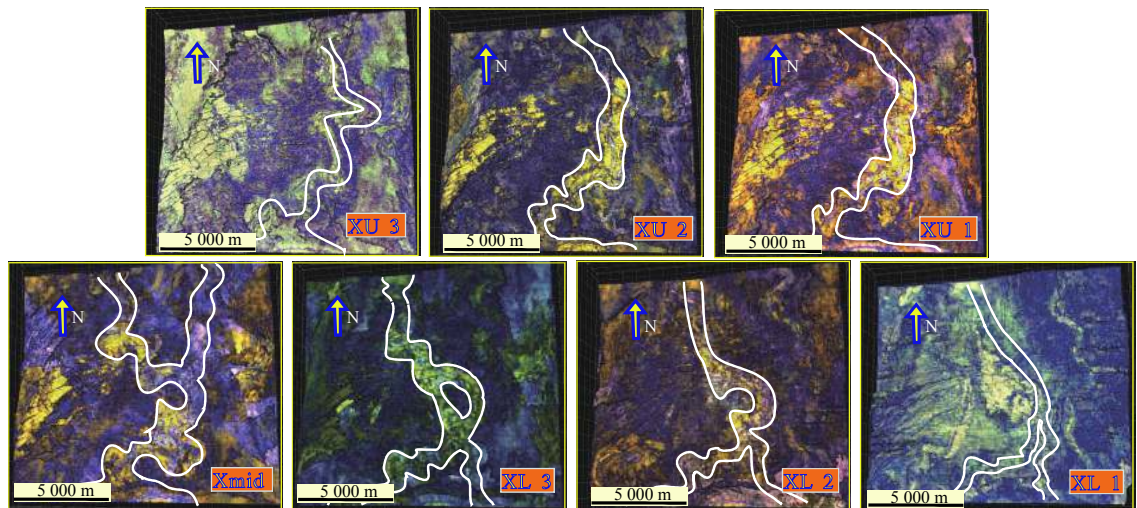
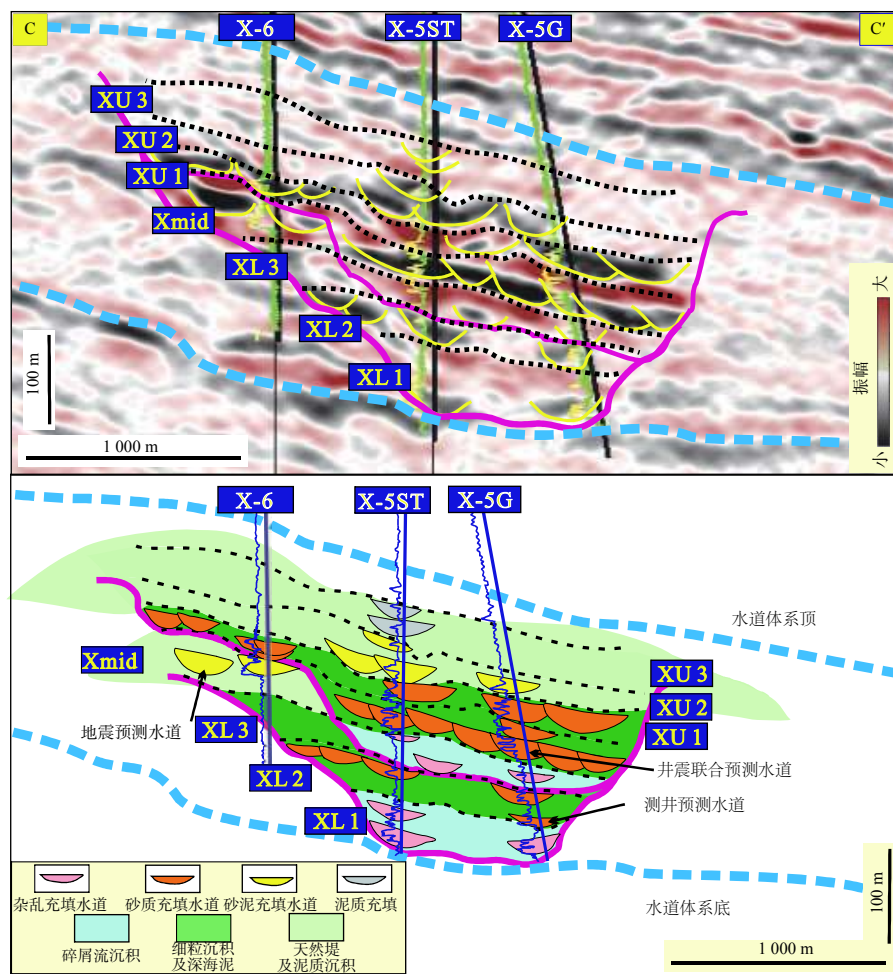


图 6 研究区复合水道 RGB 地震属性特征空间展布

Fig.6 RGB seismic attribute map of complex channel in the study area

及垂向演化可通过剖面地震反射特征进行识别,而想要明确深层单一水道的迁移和演化特征,则需要借助密井网连井剖面的支撑。单一水道是较小级次的事件性沉积单元,其纵向顶底的识别需要借助垂向高分辨率的测井资料,独立的韵律段变化就是纵向上识别单一水道的依据;由于水道边缘部分的

砂质含量相对于水道主体部分的砂质含量更低^[16],所以在地震剖面上,水道边缘处的沉积物颗粒相对于水道主体部分粒度更细,振幅相对于水道主体部分的要弱。这些振幅强弱变换的位置就是侧向识别单一水道边界的依据,基于这些依据最终可以确定出深层单一水道的水道边界(图 7)。



剖面位置见图 3

图 7 研究区深层研究层段单一水道剖面构型特征剖面

Fig.7 Study on the profile of single channel in the deep research interval

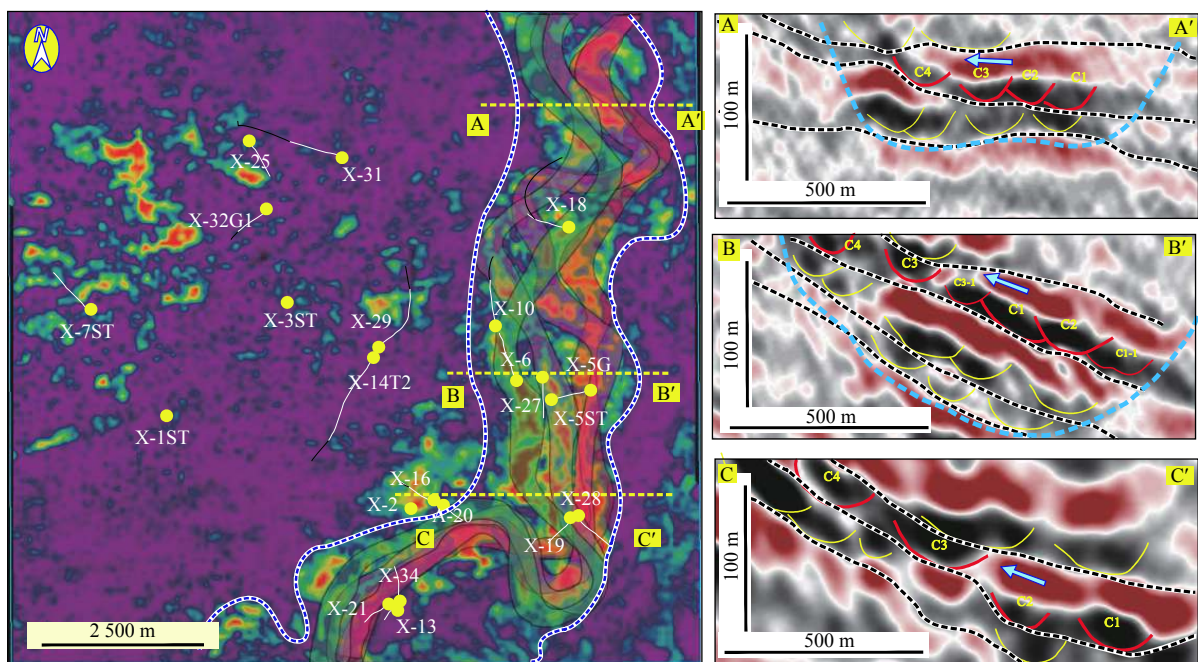
3.4.1 单一水道迁移规律

地震属性对复合水道的边界有较好的识别作用,有助于分析复合水道的平面分布特征,可结合地震剖面最终反映出不同期次的单一水道迁移模式。结合研究区高品质地震资料,以 XU2 小层内部单一水道迁移规律为例,进一步研究单一水道在平面上和剖面上的展布规律。

在平面上,依据地震剖面及 RMS 地震属性图“平剖互动”的原则,识别出水道体系内部单一水道的迁移方式主要有单侧向和沿下游摆动 2 种迁移

模式。在顺直段,所有复合水道沿单一方向进行单侧向迁移,在弯曲段,水道弯曲环有向下游摆动迁移的特征(图 8、9),此种迁移模式在全球其他水道分布区域也类似存在^[17-18]。

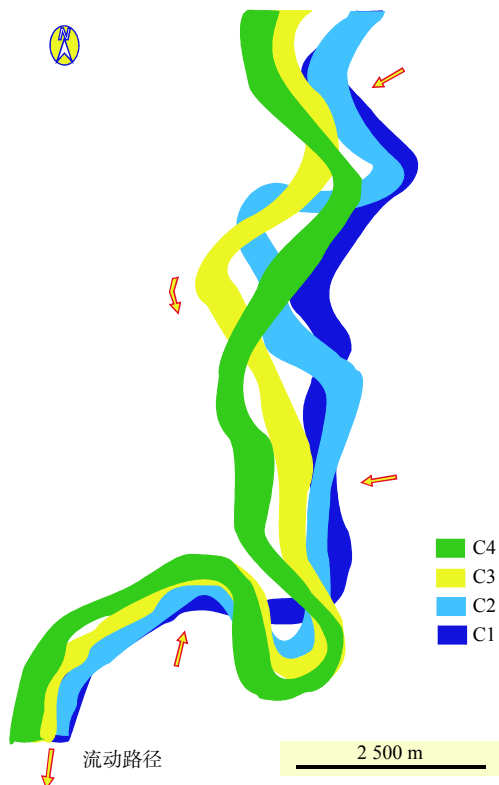
在剖面上,从截取单侧向迁移段与沿下游摆动段的地震反射特征可观察出(图 8),单一水道地震同向轴存在较为明显的侧向迁移, XU2 小层单一水道在单向侧向迁移段水道呈侧向迁移的特征,沿下游摆动段呈现出多期水道相互摆动切叠的特征。



根据同向轴横向连续性强弱、水道边缘切叠的地震反射特征及 AA'—CC' 近远物源端相邻剖面进行单一水道演化期次的识别

图 8 研究区 XU2 小层单一水道迁移规律地震响应特征

Fig.8 Seismic characteristics of single channel migration pattern of XU2



水道迁移流动路径以图 8 平面为原型

图 9 研究区 XU2 层内水道平面迁移演化特征

Fig.9 Single channel migrate characteristics of XU2

4 水道演化规律及控制因素

受海平面变化、沉积物供给类型及供给速率的

影响,水道的形成具有一定的演化规律。根据水道内部沉积物供给类型及水道形态的变化,可建立研究区水道体系垂向演化阶段与海平面升降间良好的时空匹配关系^[19]。以目标层段浅层高频水道体系为例,将水道演化模式在垂向分为水道初始形成、水道快速发育、水道平稳发育和水道消亡 4 个阶段(图 10)。

(1) 水道初始形成阶段

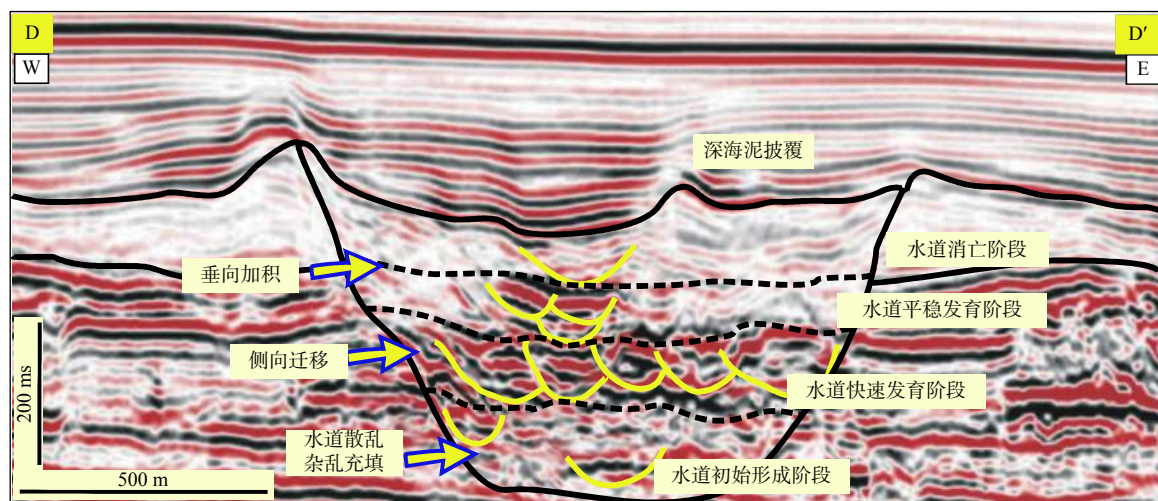
该阶段海平面快速下降,重力流流体主要为碎屑流。此阶段流体流态高且下切侵蚀能力强,逐渐形成下窄上宽的“U”或“V”形峡谷。峡谷的底部主要发育有滑动滑塌体、碎屑流沉积、少量粗粒沉积以及过路沉积,在地震剖面上显示为比较薄的嘈杂、空白、无序的地震反射特征。此时水道体系在平面上基本以顺直型的形态出现。

(2) 水道快速发育阶段

该阶段海平面逐渐到达较低位置,重力流流体逐渐转变为砂质浊流沉积。相对于早期水道底部空白杂乱反射,该阶段地震剖面呈现强振幅、同相轴连续侧向叠置的地震响应特征。该阶段水道具有较强的侧向摆动能力,因此,水道弯曲度在这一时期急剧增大,多以弯曲水道的形态出现^[20]。

(3) 水道平稳发育阶段

该阶段海平面缓慢上升,重力流流体基本以低密度浊流为主。此时在地震剖面上地震反射强度



剖面位置见图 3

图 10 研究区浅层水道体系垂向演化阶段及特征典型地震剖面

Fig.10 The vertical evolution stage of a shallow channel system

相对于上一阶段开始变弱,但水道还存有弱的侧向迁移能力以及弱垂向加积能力,因此,水道形态还是以弯曲水道的形式出现^[21]。

(4) 水道消亡阶段

该阶段海平面逐渐达到高点,沉积物的供给量变得很少(突发事件型沉积除外),流体逐渐转变为泥质浊流。剖面呈现弱振幅、亚平行反射的地震响应特征。水道形态延续了前期弯曲水道的外形,水道体系逐渐废弃,最终被厚度大、同相轴十分连续的半远洋沉积所披覆^[21],水道体系最终消亡。

5 结论

(1)基于现有水道构型模式,不同构型级次水道边界存在不同的识别特征与方法:水道体系内外的地震相振幅存在明显差异,高低振幅的分界线往往指示水道体系边界;复合水道边界可根据其形成期次不同,采用垂向分期以及侧向划界方法进行识别;单一水道边界在地震相上表现为相对较低振幅,可结合测井资料辅助识别。

(2)研究区发育 XL 和 XU 2 套复合水道系列,其中 XL 存在 4 期近平行的复合水道,其物源供给主要来自于西北方向;XU 存在 3 期近平行的复合水道,物源供给主要来自于东北方向。区内发育的单一水道在平面上顺流向迁移和单侧向摆动的演化特征,其在地震剖面上表现为不同期次单一水道间相互切叠。

(3)根据水道在不同时期的地质特征,可将其划分为水道初始形成、快速发育、平稳发育以及消

亡 4 个演化阶段。不同阶段水道内部的沉积物类型存在差异,对应不同的海平面变化时期和物源供给类型。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MUTTI E, NORMARK W R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: problems and concepts[J]. Marine Clastic Sedimentology Concepts and Case Studies, 1987: 1-38.
- [3] LAMB M A, ANDERSON K S, GRAHAM S A. Stratigraphic architecture of a sand-rich, deep-sea depositional system[J]. AAPG Special Publication, 2003: 13.
- [4] 赵晓明,吴胜和,岳大力,等.深水海底扇储层构型浅析:以西非某油田为例[C]//第五届油气成藏机理与油气资源评价国际学术研讨会论文集.北京:石油工业出版社,2010.
- [5] 赵晓明,葛家旺,谭程鹏,等.深海水道储层构型及其对同沉积构造响应机理的研究现状与展望[J].中国海上油气,2019,31(5):76-87.
- [6] DAMUTH J E. Neogene gravity tectonics and depositional processes on the deep Niger Delta continental margin[J]. Marine and Petroleum Geology, 1994, 11: 320-346.
- [7] DOUST H, OMATSOLA E. Niger delta[C]//Edwards J O, Santogross P A. Divergent passive margin basins Tulsa. AAPG Memoir, 1990, 48: 201-238.
- [8] GORDON J, KNOX E M O. Development of the Cenozoic Niger Delta in terms of the escalator regression model and impact on hydrocarbon distribution[J]. Geology and Geotechnology, 1989, 17: 133-138.
- [9] 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,2013,6:655-661.
- [10] SHORT K C, STAUBLE A J. Outline of Geology of Niger

- Delta[J]. AAPG Bulletin, 1967, 51(5): 761-799.
- [11] 吕明, 王颖, 陈莹. 尼日利亚深水区海底扇沉积模式成因探讨及勘探意义[J]. *中国海上油气*, 2008, 20(4): 275-282.
- [12] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 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[J]. *地质论评*, 2013, 59(3): 510-520.
- [13] 陈筱, 卜范青, 王昊, 等. 西非深水浊积复合水道储层连通模式表征[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(6): 39-50.
- [14] 卜范青, 张旭. 深水重力流复合下切水道体系精细地质表征与建模: 以西非尼日尔三角洲盆地OML130区块为例[J]. *海相油气地质*, 2018, 23(2): 90-96.
- [15] 吴元燕, 吴胜和, 蔡正旗. 油矿地质学(第三版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [16] 赵晓明. 西非深水海底扇储层表征与建模[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- [17] PEAKALL J, MCCAFFREY W D, KNELLER B C. A process model for the evolution, morphology and architecture of meandering submarine channels[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70: 434-448.
- [18] RICHARD L, RICHARD R J. Characterization of fluvial architectural elements using a three-dimensional outcrop data set: escanilla braided system, South-Central Pyrenees, Spain[J]. *Geosphere*, 2007, 3: 422-434.
- [19] DEPTUCK M E, SYLVESTER Z, PIRMEZ C, et al. Migration-aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Beninmajor Canyon, western Niger Delta slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24: 406-433.
- [20] 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: 631-648.
- [21] MAYALL M, JONES E, CASEY M, et al. Turbidite channel reservoirs: key elements in facies prediction and effective development[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 821-841.

THE STUDY OF CHANNEL SEDIMENT ARCHITECTURE AND EVOLUTION PATTERN OF RESERVOIR IN NIGER BASIN

YANG Xipu¹, CHEN Xiao¹, FENG Xiaofei^{2*}, YANG Baoquan¹, LIU Fei², ZHAO Xiaoming², GE Jiawang²

(1 China National Offshore Oil International Co., Ltd., Beijing 100028, China;

2 School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: As an important type of reservoir in deep water, the deep sea channel is extremely rich in oil and gas resources. In recent years, it has become a key area for deep sea oil exploration and development. However, it is still very difficult to identify and characterize the internal architecture boundaries of a channel. Based on 3D seismic, well logging and core data, the internal structural boundaries of the West African X reservoir channel are successfully defined by this paper, as the channel evolutionary model is established. Research shows that the boundaries of the channel system in the study area can be defined by the differences in seismic facies characteristics. In a deep sea channel system, there are three types of boundaries: confined, semi-confined and unconfined; the boundaries of a composite channel can be defined according to the principle of “vertical staging” and “lateral zoning”, whereas the boundary of a single channel can be identified and characterized by changes in the amplitude of channel boundary. There are two migration modes: unilateral migration and downstream swing migration on plane, and unidirectional lateral migration on section. The channel characterized by lateral migration and the downstream swing section presents the characteristics of multi-phase swing and overlap of channels. The evolution of the channel system can be divided into four stages: initial formation, rapid development, stable development, and disappearance of the channel, corresponding to a complete sea level change cycle.

Key words: deep sea channel; channel architecture; boundary recognition; evolution pattern; controlling factors