

文章编号: 1009-3850(2011)04-0011-09

尼日尔三角洲高分辨率层序地层及沉积相研究 ——以尼日利亚 M 区块为例

王颖¹, 吕明¹, 王晓州², 谢晓军¹

(1. 中海石油(中国)有限公司北京研究总院勘探研究院, 北京 100027; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 本文采用高分辨率层序地层学理论, 研究尼日尔三角洲中尼日利亚 M 区块的层序及沉积特征。选择基准面对全井段的岩屑资料进行细致的观察描述, 确定自然伽马、声波等曲线对岩性的响应特征; 解释主要钻井的岩性剖面; 根据岩性剖面, 参照地震剖面中揭示的钻井相对于沉积倾向剖面中所在的位置, 选择相应的模型划分不同级别的基准面旋回; 通过对钻井基准面旋回的形态、厚度、出现频率等属性特征的分析, 进行基准面旋回对比, 建立等时的层序格架。研究总结了不同级次旋回界面和旋回类型的识别特征, 将研究层段分为 9 个长期旋回。基于对该区构造、沉积背景、物源供应状况及演化特征, 分析了该区三角洲的基本类型、随层序及体系域的时空演化等要素。总结了分流河道、水下分流河道、砂坝等若干骨架沉积微相的旋回组合特征、叠加样式等, 为储、盖组合及勘探目标评价提供了依据。

关键词: 尼日尔三角洲; 高分辨率层序地层学; 分流河道; 砂坝; 测井相; 地震相

中图分类号: TE121.3⁺⁴

文献标识码: A

尼日尔三角洲自中-上始新世以来为一套前积型的三角洲沉积, 具有良好的烃源岩及储盖组合, 成为世界油气勘探的热点之一, 其中 M 区块位于三角洲前缘坡折附近。由于该三角洲的继承性地发展, 该区各种砂体空间上重叠交织, 形态复杂, 原有的岩性地层界面存在严重的穿时现象, 且古生物资料很少, 为岩性及储盖层预测增加了难度。高分辨率层序地层学是运用地层过程-响应动力学原理建立等时地层格架的先进理论方法^[1~3], 它不依赖于古生物资料而识别等时面, 因此特别适用于陆相及海陆过渡相的某些特殊环境。因此, 本文根据工区处于三角洲环境、古生物资料很少的特点, 选择高分辨率层序分析的方法, 将钻井与地震相结合, 通过对基准面旋回的形态、厚度、出现频率等属性的分析, 提出了新的层序划分与对比方案和沉积相解释方案, 从而为精细研究尼日尔三角洲的沉积特

征奠定了基础。

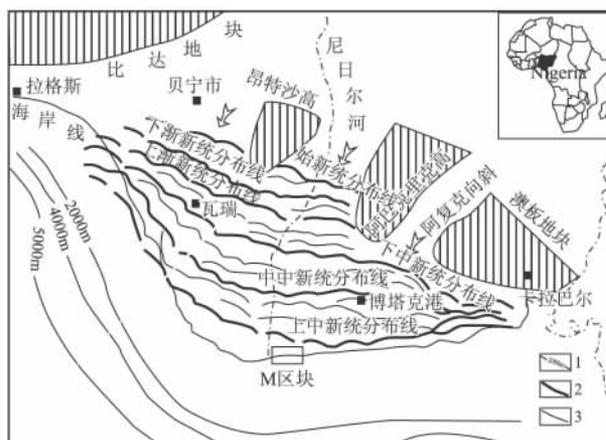


图 1 尼日尔三角洲盆地沉积、构造格架图

1. 水深线; 2. 地层; 3. 断层

Fig. 1 Sedimentary-tectonic framework of the Niger delta basin

1 = bathymetric line; 2 = strata; 3 = fault

收稿日期: 2010-10-22; 改回日期: 2010-11-30

作者简介: 王颖(1976-), 女, 博士, 主要从事层序、沉积、储层研究。E-mail: wangying8@cnooc.com.cn

1 区域地质

尼日尔三角洲盆地位于非洲大陆西部,面积 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$,是世界著名的含油气盆地之一^[4]。M 区块处于尼日尔三角洲盆地的中南部近海沼泽构造-第二沉积带的南部边缘,即处于巨型构造-沉积带末端,区块总体是南倾斜坡,在西北区和东南区断裂较发育(图 1)。

尼日尔三角洲盆地是在非洲板块与大西洋板块边缘三联点上发育的裂谷盆地^[5],该三联点的东北支为贝努埃拗拉槽,延伸进入大陆内部,西支为达浩米(贝宁)盆地,南支延伸进入大西洋,即尼日尔三角洲盆地的主体^[6]。

尼日尔三角洲盆地基底为元古代火成岩及变质岩,其上为白垩系、古近系、新近系,地表为第四系覆盖,地层横向上可见始新统、渐新统、中新统及第四系地层呈渐进式向海推进沉积(图 2),反映地层沉积中地壳运动经历了稳定抬升,退复式沉积的环境特征^[7]。

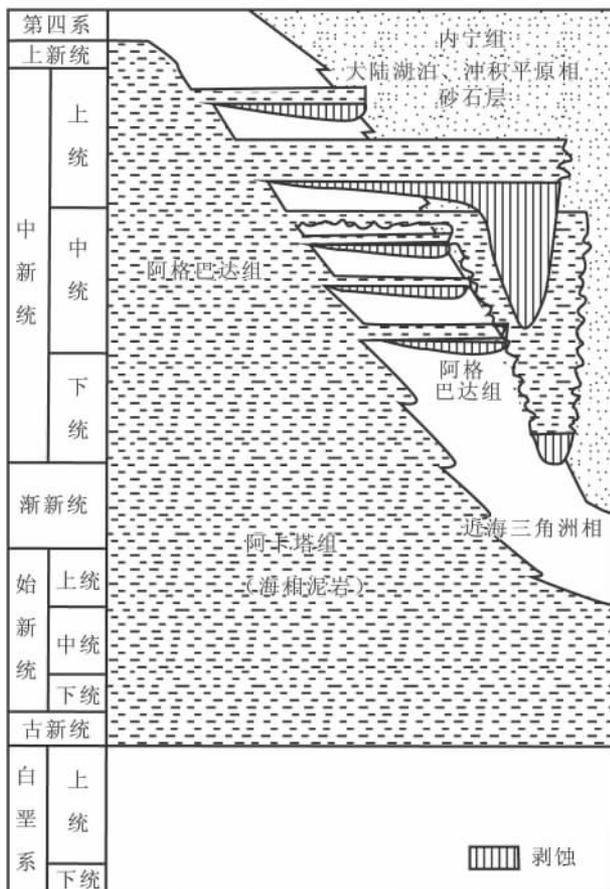


图 2 尼日尔三角洲盆地地层结构图

Fig. 2 Stratigraphic architectures of the Niger delta basin

2 高分辨率地层对比格架

尼日尔三角洲中上始新世至现今为一套海退式前积型建设性三角洲沉积,总厚度约 12000m^[8]。由贝宁组、阿格巴达组、阿卡塔组构成自生自储式生储盖组合。由于三角洲继承式发展,各种砂体重叠交织存在严重的穿时现象(图 2),因此,建立等时地层格架是进一步开展精细地质研究工作的基础。

Cross 倡导的高分辨率层序地层学,强调不同级次的基准面升降运动周期为划分层序的依据,按基准面旋回的结构和叠加样式特征,可以划分出不同级别的层序,基准面升降转换点所对应的沉积作用转换面的识别是高分辨层序地层对比划分的基础^[9,10,11]。测井资料纵向分辨率高,可以直观的反映地层几何形态、旋回叠加样式、相序与相组合的变化以及地层岩石物理性质的变化等特征,易于划分高频旋回,依据地震资料系统性、连续性、区域分布的特点识别出低频旋回,通过综合分析,建立等时地层格架。

2.1 井资料基准面旋回识别

Cross 成因层序是以最大水进面为边界,适合于在钻井上识别层序界面,因此基准面旋回也以相邻两个基准面最高点为边界。本次研究为与地震剖面上识别的不整合层序界面相对应,对基准面旋回作了相应的调整,将相邻两个基准面最低点作为旋回的边界。如此,本区的长期基准面旋回界面在测井曲线上常是一明显的突变面。地层可组成一个完整的水进到水退的比较对称的长期旋回,其转换位置对应于高可容空间条件下缓慢沉积的前三角洲泥岩。在转换面之下,基准面上升的过程中,水体扩张,可容空间增大,三角洲发生退积,测井曲线总体显示为退积型(钟型)为主的曲线特征。在转换面之上情况与之相反,水体萎缩,可容空间逐渐减小,三角洲进积,砂泥比自下而上增大,测井曲线总体显示出进积型(漏斗型)为主的特征(图 3)。

中期旋回主要受控于气候、沉积相类型等因素。由于本区以三角洲沉积为主,且三角洲沉积物的供应量相对稳定,一个中期基准面旋回通常代表着一次较大规模的海进-海退过程。在地震剖面上可以识别,表现为地震反射结构由退积-进积变化的分界面,或地震相类型的转换面。在井上主要表现为同一沉积体系中相似或相邻相序的进积-退积组合的测井相转换面和突变面^[13]。总结出以下的识别标志:

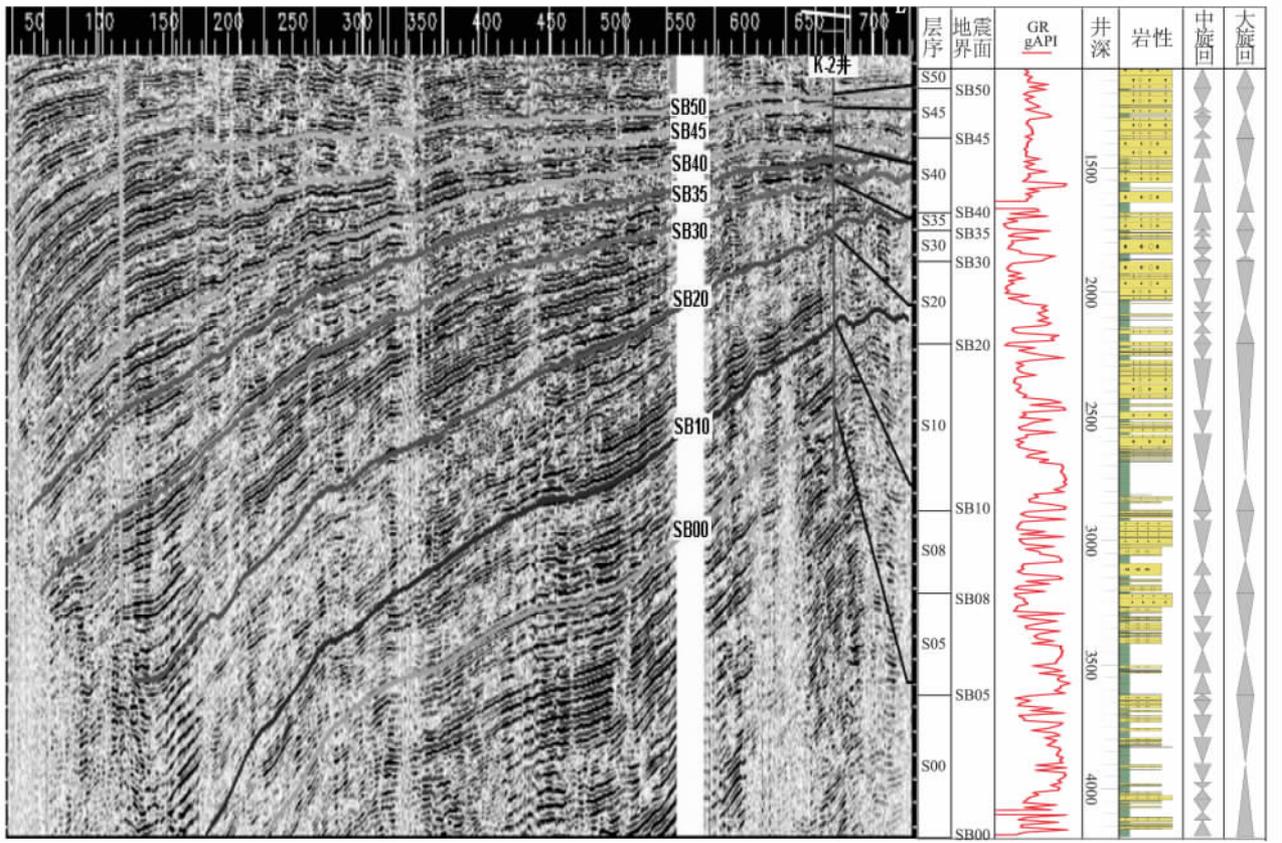


图3 地震测线 66-72-52(测线位置见图 7)及 K-2 井层序分析

Fig. 3 Seismic profile 66-72-52 and sequence analysis for the K-2 well

①地层厚度与岩性变化: 在三角洲平原部位, 转换面与突变面合并, 在转换面/突变面之上地层厚度变大, 粒度变大, 砂泥比增大; 之下均变小。在三角洲前缘部位, 转换面附近地层厚度变大, 粒度变小, 砂泥比减小; 突变面附近地层厚度变小, 粒度变大, 砂泥比增大。在前三角洲部位, 转换面附近地层厚度变小, 粒度变小, 砂泥比减小; 突变面附近地层厚度变大, 粒度增大, 砂泥比增大;

②测井曲线变化: 在三角洲平原部位, 多呈泥岩向上增多后砂岩突然增多变化。在三角洲前缘部位: 多呈砂岩向上增多的进积(漏斗型)突变为水进泥岩的变化。在前三角洲部位与三角洲平原类似, 但上部的泥岩具深水属性。③相组合在垂向上的变化: 主要反映在水深突然加大。三角洲平原部位见河漫沼泽向上突变为河床; 三角洲前缘部位见河口砂坝向上突变为由前三角洲泥、远砂坝等。

2.2 地震地层旋回识别

地震反射界面基本是等时面或平行于地层内的等时界面, 而地层基准面旋回与界面具有成因地层单元和时间界面的含义, 因此地震反射界面应平行于或相当于基准面旋回界面^[12]。研究区块位于

三角洲前缘坡折附近, 地层厚度以及岩性变化明显, 长期基准面旋回界面是受构造强度及沉积作用双重因素影响的侵蚀不整合面及相应整合面^[9], 因此, 利用层序内的地震相特征反映层序的形成过程和岩性、岩相分布及地震资料系统性、连续性、区域性的特点, 在地震剖面上易于识别出反映长期基准面旋回的层序界面, 共划分出 7 个长期旋回。其主要表现为在层序界面之上可见明显的超覆特征, 在本地区个别层位的高部位局部发育削截特征(图 3)。

在 S00 内, 地震层序旋回表现为对称型, 基准面上升和下降时期形成的沉积记录都保存的比较完整, 多发育在坡折之下水体能量均衡时期, 基准面上升期和下降期是逐渐过渡的; S10、S20、S30 内的地震层序旋回表现为以下降半旋回为主的非对称旋回, 在基准面上升期物源供给不足, 沉积物少, 形成高可容空间下的大段泥岩, 在层序界面以上地震相表现为强振幅、较连续性反射。在基准面下降时期, 沉积物供应量逐渐增加, 表现为三角洲向上变粗沉积的进积序列, 大段砂岩发育, 地震相以弱反射为背景, 局部与断续、较强振幅反射交互。S40、

S50 内为向上变深的不对称旋回,底为粗粒含砾砂岩形成的冲刷面,向上粒度逐渐变细,形成向上变深的上升半旋回沉积记录;下降半旋回由于冲刷侵蚀作用而难以保存,最终形成只保存了基准面上升半旋回的明显不对称旋回类型,表现为在低可容空间下,在三角洲平原地区沉积物供应充分,基准面上升幅度有限,多期河道相互切割,砂体相互重叠交织,仅河道底部保留完整。因此在中期旋回中,表现为多期向上变浅的旋回系列。由于大段砂岩发育,仅局部存在少量泥岩,地震相为弱反射背景下局部泥岩发育段地震反射强、连续性好(图3)。

通过井震结合,利用井资料,根据不同级次旋回界面和旋回类型的识别以及组合分析,进一步将研究层段共划分为9个高频层序,分别命名为S00、S05、S08、S10、S20、S30、S35、S40、S45。

3 沉积相分析

M 工区内分流河道、水下分流河道以及河口坝较为发育,为骨架相。这些微相在纵向上均为分布比较集中的砂岩相,但因厚度在同部位不相同,因此在地震剖面上同相轴的形态以及反射振幅特征不同,当骨架相和优势相一致时特征更为明显^[14]。

3.1 分流河道

分流河道是三角洲平原亚相沉积的骨架。其河道迁移迅速,稳定性差,且沿两侧形成螺旋式前进的对称环流,化石少见,最底部可见植物碎片、泥球、炭屑及冲刷-充填构造。在河流形成至废弃过程中,沉积了以河床为中心的带状砂体。河流的迁移、改道使已废弃的河道受到各种作用的改造,一部分形成席状砂,一部分保留下来成为残留河道砂^[15](图4)。

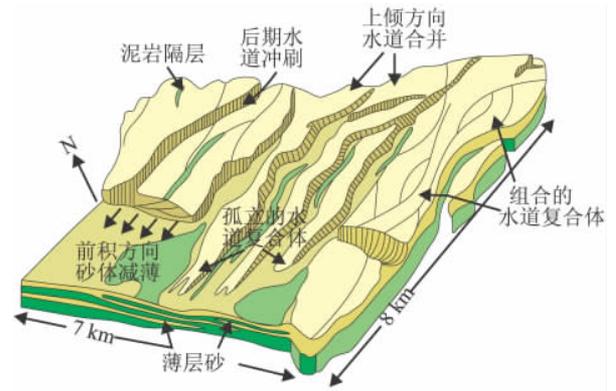


图4 尼日尔三角洲沉积模式图(据 Chapin et al., 2002)

Fig. 4 Sedimentary model for the Niger delta (after Chapin et al., 2002)

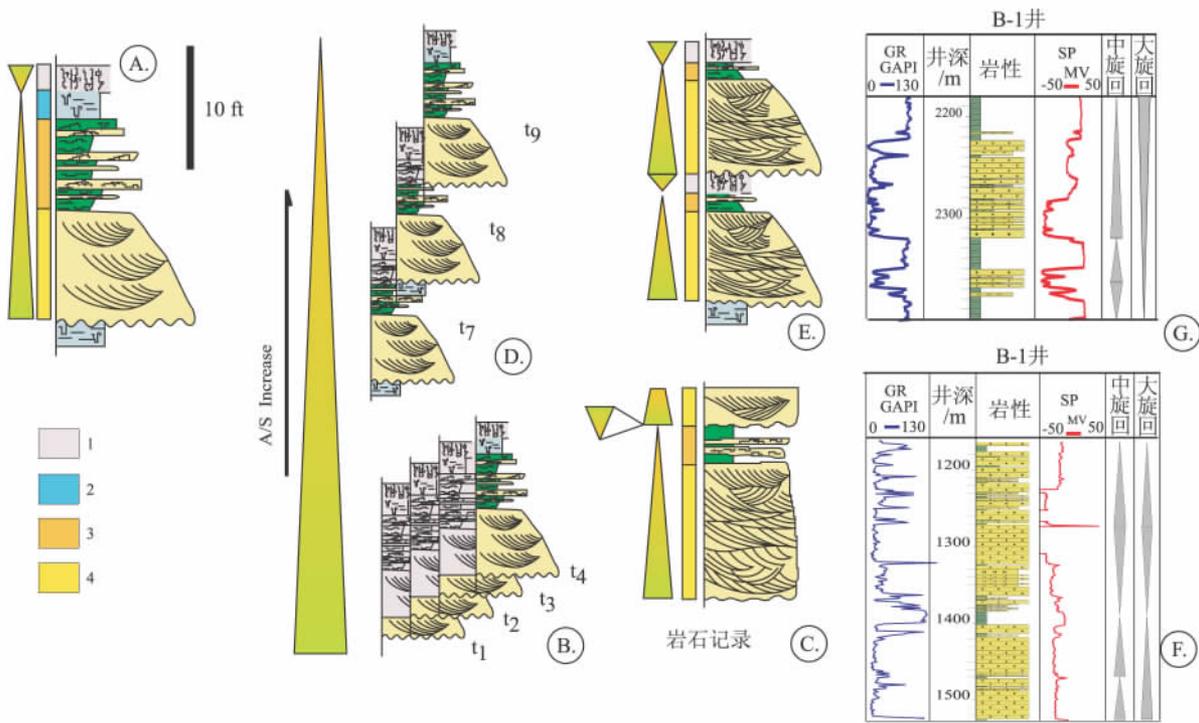


图5 河道在空间上的叠置模式

1. 土壤; 2. 湖泊; 3. 决口扇; 4. 河道

Fig. 5 Stacking patterns for the distributary channels

1 = soils; 2 = lake; 3 = splay; 4 = channel

在废弃河道中,沉积物逐渐变细,由砂岩变为粉砂岩,形成向上变细的正粒序。上部被呈突变接触的泥质沉积物所充填,以泥岩为主,夹薄层粉砂岩(图 5A),垂向上多期河道的叠加形成大段的厚层砂岩,表现为可容空间较小的条件下形成的下粗上细的正韵律或复合韵律特征(图 5B、C、F),中旋回以基准面向上变深的旋回组合为主,代表了低可容空间下垂向上多期砂体叠置的环境特征。

由于分流河道储层在横向上变化大,纵向上多期交错迭加,砂体整体厚度较大,粒度较粗,因而地震剖面上河道期次难以分辨,特征不明显。地震相特征表现为中振幅、连续性中等、低频。在单个较为连续的同向轴下与较弱的同向轴时而合并、时而分离,同向轴向下弯曲,局部发育叠瓦状的特征(图 6)。由于多期河道冲刷、淘洗作用,大套砂岩间残留发育的河道间泥岩表现为强振幅、连续性好,但横向延伸距离短,局部发育(图 6)。

对于三角洲平原上多期叠加的水上分流河道,GR、SP 测井曲线组合特征表现为典型的箱形特征(图 7A 段),在靠近分流河道的边部,由于砂岩含量减少、泥岩含量增多,表现为箱形-锯齿状特征(图 7B 段),在河道间的薄层砂岩表现为指状特征(图 7C 段)。

3.2 水下分流河道

水下分流河道是水上分流河道入水的延伸部分,由于水体的承托力,流速减缓,下切作用变弱^[16],同时由于入水处往往是地形坡度变化的地方,因此水下分流河道变宽、变浅、分叉增多(图 8),同时由于可容空间增大,因此侧向侵蚀作用相对变强,下切作用减弱,在垂向上多期叠加的下粗上细的正韵律特征明显(图 5D、E、G)。

由于进入三角洲前缘,砂岩含量减少,泥岩含量增加,砂泥互层发育,因此水下分流河道的地震相识别易于水上分流河道。在地震剖面上,水下分流河道地震相特征为连续性差、弱振幅丘形反射,双向下超充填,顶平底凹,底形保留完整,易于识别(图 9)。

测井相类型较多,在砂体较为发育、厚度较大的地区,SP、GR、RES 曲线上表现为箱形-漏斗形的反旋回;在砂体发育减少、泥岩段增加的部分,SP、GR、RES 曲线表现为齿化箱形和齿化漏斗形的反旋回特征。对于尼日尔三角洲向海多期推进的特征反映明显,岩性组合从下向上由砂坝或者分流间湾等细粒沉积过渡为水上分流河道的粗粒沉积,位于向上变浅的上升半旋回(图 10A 段)。

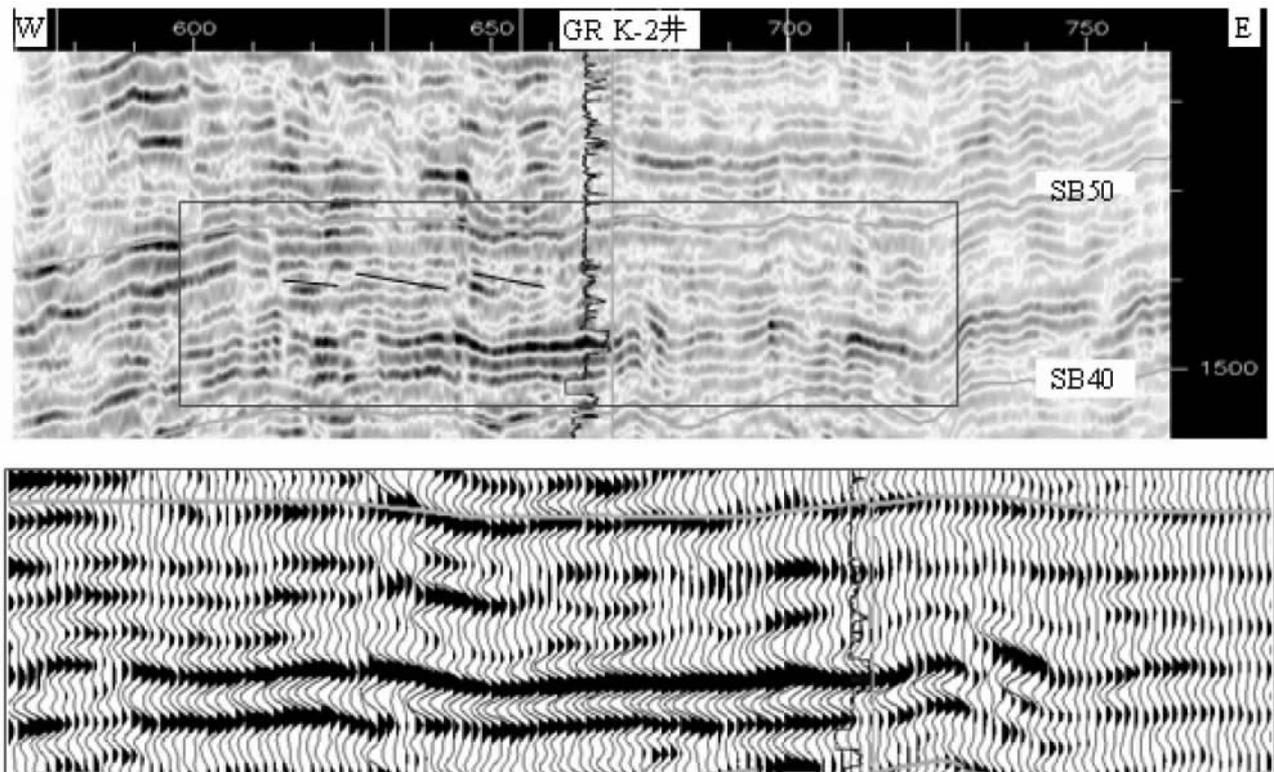


图 6 尼日尔三角洲 M 区块水上分流河道地震相特征(测线 66-72-52 位置见图 7)

Fig. 6 Seismic facies of the distributary channels within the block M of the Niger delta

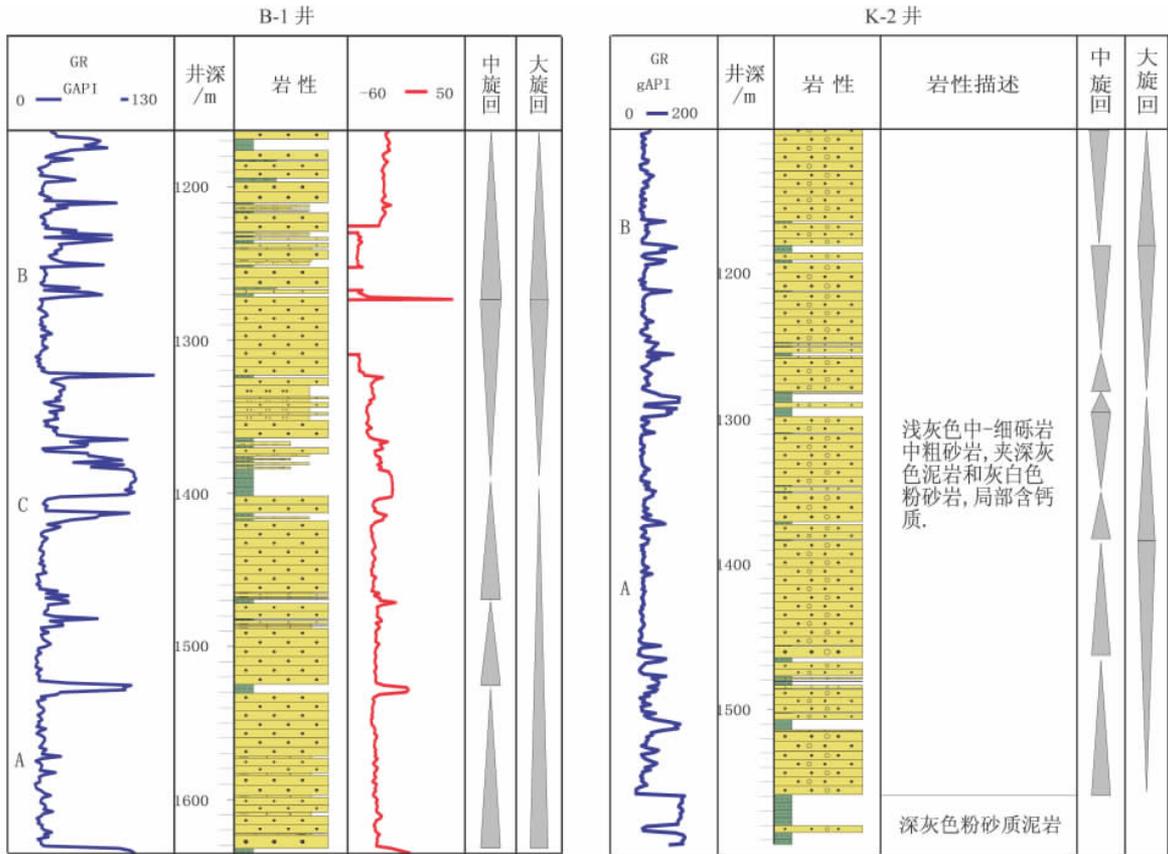


图 7 尼日尔三角洲 M 区块水上分流河道测井相特征

Fig. 7 Well logs for the distributary channels within the block M of the Niger delta

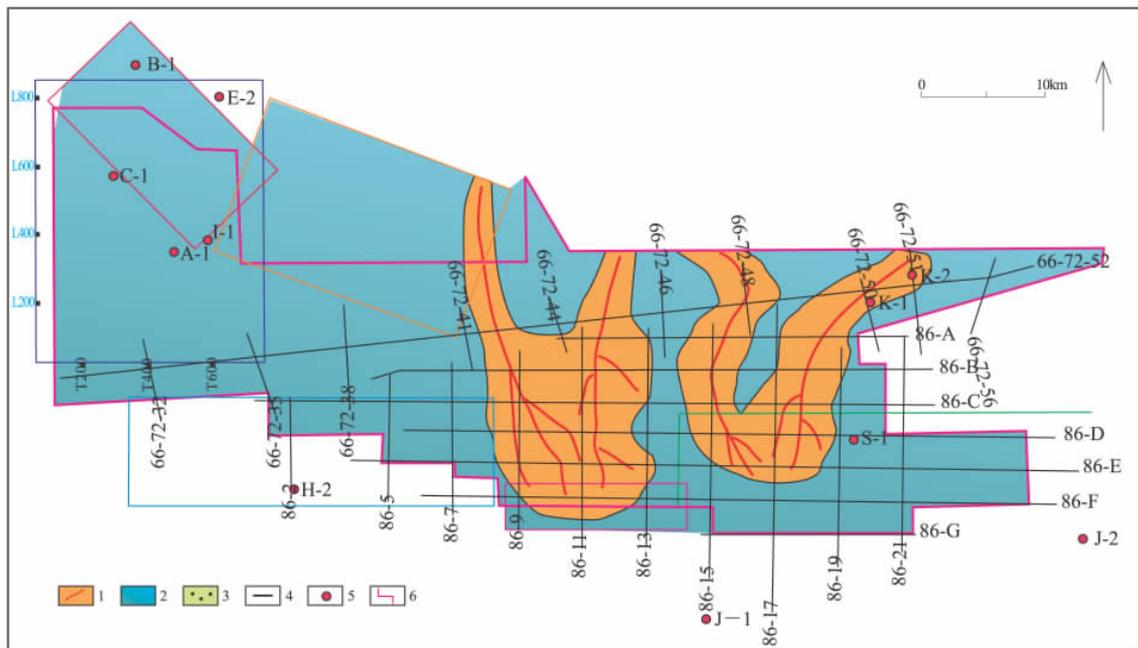


图 8 尼日尔三角洲 M 区块 SB30 下部水下分流河道分布特征

1. 水下分流河道; 2. 滨浅湖; 3. 砂坝; 4. 地震测线; 5. 井位; 6. 工区边界线

Fig. 8 Distribution of the subaqueous distributary channels within the block M of the Niger delta

1 = subaqueous distributary channel; 2 = littoral-shallow lake; 3 = sandbar; 4 = seismic profile; 5 = well site; 6 = boundary of the working area

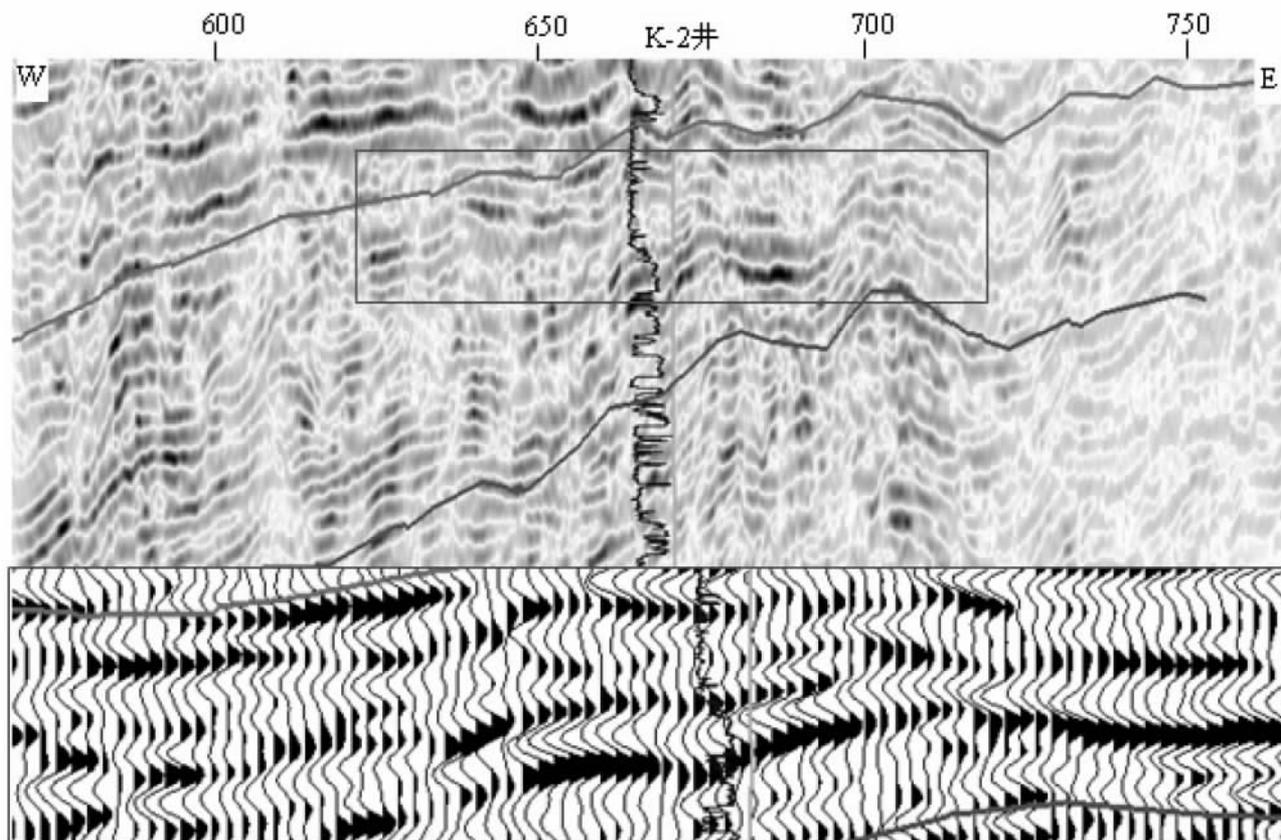


图 11 尼日尔三角洲 M 区块砂坝地震相特征(测线 66-72-52 位置见图 8)

Fig. 11 Seismic facies of the sandbars within the block M of the Niger delta

4 结论

(1) 在三角洲环境古生物资料很少的地区,将钻井与地震相结合,应用测井资料纵向分辨率高的特点,可以直观地反映地层几何形态、旋回叠加样式、相序与相组合的变化以及地层岩石物理性质的变化等特征。通过对基准面旋回的形态、厚度、出现频率等属性的分析,识别出高频旋回;依据地震资料系统性、连续性、区域分布的特点识别出低频旋回。通过综合分析,进行等时高分辨率层序分析。

(2) 长期基准面旋回界面是受构造及沉积作用双重因素影响的侵蚀不整合面或相应整合面,在测井曲线上表现为明显的突变面;中期基准面旋回代表了一次较大规模的海进到海退过程,在地震剖面上表现为地震反射结构变化的分界面或者是地震相类型的转换面。通过井震结合,根据不同级次旋回界面和旋回类型的识别以及组合分析,将研究层段共划分为 9 个高频层序,分别命名为 S00、S05、S08、S10、S20、S30、S35、S40、S45。

(3) 在 S00 内,地震层序旋回表现为对称型,水体能量均衡时期基准面上升期和下降期是逐渐过

渡的; S10、S20、S30 内的地震层序旋回表现为以下降半旋回为主的非对称旋回,在层序界面以上地震相表现为强振幅、较连续性反射;在基准面下降时期,沉积物供应量逐渐增加,表现为三角洲向上变粗沉积的进积序列,地震相以弱反射为背景,局部与断续、较强振幅反射交互; S40、S50 内为向上变深的不对称旋回,底为粗粒含砾砂岩形成的冲刷面,向上粒度逐渐变细,形成向上变深的上升半旋回沉积记录,下降半旋回由于冲刷侵蚀作用而难以保存。

(4) 在等时格架内对尼日尔三角洲 M 区块的沉积相进行了分析,认为发育的主要沉积微相骨架相为水上分流河道、水下分流河道以及砂坝,另外还发育远砂坝、席状砂、河道间湾等微相类型。

(5) 水上分流河道中旋回以基准面向上变深的旋回组合为主,代表了低可容空间下垂向上多期砂体叠置的环境特征。水下分流河道岩性组合从下向上由砂坝或者分流间湾等细粒沉积过渡为水上分流河道的粗粒沉积,位于向上变浅的上升半旋回;在垂向上,砂坝具有上粗下细的反粒序特征。多期发育的砂坝为向上变浅的反旋回组合,在测井曲线上为漏斗型的测井相类型,其上往往是箱形的

河道相,其下是泥岩发育段。

参考文献:

- [1] 陈钢花,王中文,王湘文. 河流相沉积微相与测井相研究[J]. 测井技术, 1996, 20(5): 335-340.
- [2] 马小刚,关达. 地震反射特征在沉积相研究中的应用[A]. 中国地球物理学会第二十年年会论文集[C]. 2004.
- [3] 王荷萍,蔡循华,沈一群. 测井相识别模型及其在东海油气勘探中的应用[J]. 海洋石油, 2003, 23(3): 81-85.
- [4] 甘克文等. 世界含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 1978.
- [5] ADELEYE D R. The geology and stratigraphy of the Bida embayment [D]. Ibadan: Ibadan University, 1972.
- [6] ALLEN J R L. The Nigeria continental marginal: Bottom sediments, submarine morphology, and geological evolution [J]. Marine Geology, 1976, 1: 289-332.
- [7] 张兴. 尼日尔三角洲盆地油气地质特征及潜力分析[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 40-43.
- [8] MATAVA T, ROONEY M A, CHUNG H M, et al. Migration effects on the composition of hydrocarbon accumulations in the OML 67-70 areas of the Niger delta [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(7): 1193-1206.
- [9] 靳松,朱筱敏,钟大康. 扇三角洲高分辨率层序地层对比及砂体分布规律[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 212-220.
- [10] CROSS T A, LESSENGER M A. Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation [A]. Gradstein F M, Sandvik K O, Milton N J. NPF Special Publication 8: Sequence Stratigraphy Concepts and Application [C]. Norway: Elsevier, 1998. 171-196.
- [11] CROSS T A, RAYNOLDS R G. Illustration of correlation techniques, facies prediction and reservoir compartment identification through genetic stratigraphy, Gallup Sandstone and Mesa Verde Group (Cretaceous), Four-Corners region [C]. Rocky Mountain Association of Geologists 1993 Fall Field Trip, USA, 1993.
- [12] 邓宏文,王洪亮,李小孟. 高分辨率层序地层对比在河流相中的应用[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 90-95.
- [13] 郑荣才,彭军,吴朝容. 陆相盆地基准面旋回级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249-255.
- [14] 黎文,周志才,吴焱. 用地震剖面具划分沉积微相[J]. 石油物探, 2000, 39(1): 57-62.
- [15] 王涛. 中国东部裂谷盆地油气藏地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 75-167.
- [16] 于建国,林春明,杨云岭等. 分流河道特征及其识别方法-以东营凹陷东部地区为例[J]. 高校地质学报, 2002, 8(2): 152-159.

High-resolution sequence stratigraphy and sedimentary facies: A case study of the block M in the Niger delta, Nigeria

WANG Ying¹, LU Ming¹, WANG Xiao-zhou², XIE Xiao-jun¹

(1. Research Institute, CNOOC, Beijing 100027, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: The sequence stratigraphy and sedimentary characteristics are dealt with for the block M in the Niger delta, Nigeria on the basis of high-resolution sequence stratigraphic theory, including the description of lithoclastics data from the whole wells, determination of responses of GR and AC to lithology, interpretation of lithologic sections of major wells, division and correlation of base-level cycles of varying orders, and construction of isochronous sequence stratigraphic framework. Nine long-term cycles are discriminated on the basis of cycle boundary and types. The types and spatio-temporal evolution of deltas in response to the sequences and systems tracts are discussed in the light of regional tectonics, sedimentary background and sediment supply. Finally the present paper gives a summary of cycle associations and stacking patterns of the sedimentary microfacies such as distributary channels, subaqueous distributary channels and sandbars aiming at providing the evidences in favour of the assessment of reservoir-seal associations and exploration targets.

Key words: Niger delta; high-resolution sequence stratigraphy; distributary channel; sandbar; well logging facies; seismic facies