

文章编号:1009-2722(2018)01-0042-06

乌干达 Albert 湖凹陷陡坡带成藏模式

陈经覃,韩文明,邱春光,贾 岫
(中海油研究总院,北京 100028)

摘 要:乌干达 Albert 湖凹陷是世界上最年轻的生烃凹陷,至今仍处于断陷伸展阶段,特殊的地质背景使其具有独特油气富集特征。为了预测 Albert 湖西部陡坡带的勘探潜力,利用地震、钻井等资料开展了凹陷构造特征研究,系统分析了陡坡带石油地质条件和成藏模式。研究表明,板式陡坡带油气侧向运移,成藏条件优越;台阶式陡坡带以垂向运移为主,侧向运移为辅,成藏条件一般。运移和保存是 Albert 湖陡坡带油气富集的主控因素,西部陡坡带一台阶是有利勘探区带,资源潜力较大。此研究对非洲陆内裂谷油气勘探具有重要的指导作用。

关键词:东非裂谷系;Albert 湖;成藏模式;乌干达

中图分类号:P618.13 **文献标识码:**A **DOI:**10.16028/j.1009-2722.2018.01007

Albert 湖凹陷位于东非裂谷系西支北段 Albertine 地堑内,乌干达与刚果(金)接壤处(图 1)。凹陷油气勘探工作始于 1913 年,经过多轮勘探,直到 2005 年 Tullow 石油公司才在东部陡坡带钻探 Mputa 构造获得商业发现,测试日产原油 1 120桶(bbl)。在此之前,中国石油勘探者对 Albert 湖凹陷开展了油气地质调查,结合国内和苏丹经验,认为该湖盆具备一定的生、储、盖条件,但是风险相当大,缺少盆地演化的“坳陷期”,难以形成大型油气田^[1-4]。然而,勘探实践表明,Albert 湖凹陷作为世界上最年轻的生烃凹陷,具有独特的油气富集特征和成藏模式,具备形成大型油气田的条件,如 KF 油田被列为 2006 年全球油气十大发现之一。

目前,油气勘探均位于 Albert 湖凹陷东部和北部的乌干达境内(图 1),西部陡坡带尚未钻探。前人已经对 Albert 湖凹陷北部缓坡带的成藏特

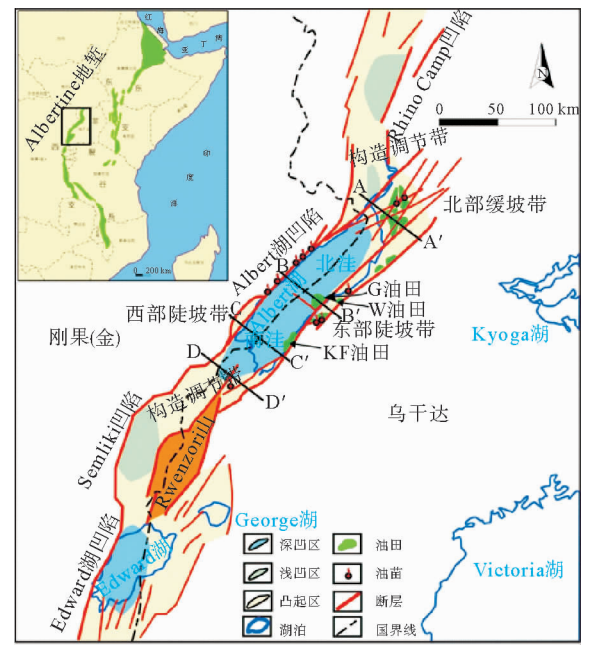


图 1 Albertine 地堑构造单元
(油田位置依据伍德麦肯兹数据库)

Fig. 1 Structural elements map for the Albertine Graben
(Oilfields location from Wood Mackzie)

收稿日期:2017-08-13

基金项目:国家科技重大专项子课题“非洲、中东重点勘探区油气地质评价及关键技术研究”(2011ZX05030-003)

作者简介:陈经覃(1984—)男,硕士,工程师,主要从事非洲油气勘探方面的研究工作. E-mail:chenjt@cnooc.com.cn

点开展了大量研究^[5-7],但对陡坡带油气成藏规律认识不清,制约了其下一步勘探评价。本文利用

地震和测井资料,分析了凹陷陡坡带结构特征,建立了 Albert 湖凹陷陡坡带油气成藏模式,从而预测陡坡带勘探潜力。此研究深化了东非裂谷系油气成藏认识,对非洲陆内裂谷油气勘探具有指导意义。

1 地质概况

Albertine 地堑长约 570 km,宽约 45 km,面积为 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ [8]。根据基底结构、区域断裂的展布,可以把地堑总体划分为 4 个凹陷、2 个调节带和 1 个斜坡(图 1)。南部 Edward 湖凹陷走向为 NNE—SSW 向,呈西断东超半地堑结构;北部 Rhino Camp 凹陷走向与 Edward 湖凹陷相同,为东断西超的半地堑,而边界断层倾向与 Edward 湖凹陷相反;中部 Albert 湖凹陷和 Semliki 凹陷呈双断地堑结构。Albert 湖凹陷面积为 8 850 km^2 ,最大沉积厚度为 6 km,是地堑内最大的凹陷,走向 NE—SW 向,凹陷大部分被湖水覆盖,最大水深 58 m。

Albertine 地堑形成于晚中新世(约 12 Ma) [9,10],已经历了从初始裂陷期、强裂陷期、裂陷后期的一个完整旋回的 I 期裂陷演化,目前处于第 II 期裂陷的初始期(图 2)。晚中新世早期,Albert 湖凹陷断裂带开始活动,在主断层的下降盘,形成小型湖泊,湖泊周边陆源碎屑丰富,经短距离搬运,在湖泊周边形成了近岸扇、扇三角洲,以粗碎屑沉积为主,为初始裂陷期。晚中新世晚期—早上新世,Albert 湖凹陷边界断层活动强,沉降速率大于沉积速率,气候温湿,雨量充沛,湖水变深,湖域面积增大,凹陷以半深—深湖相暗色泥岩沉积为主,并伴有长轴方向的大型三角洲、短轴方向的扇三角洲和湖底扇沉积。此阶段为强裂陷期,是凹陷烃源岩形成期。晚上新世—更新世,Rwenzori 山开始不断隆升,Edward 湖凹陷、Semliki 凹陷和 Rhino Camp 凹陷也开始形成(图 1),整个地堑为湖水所覆盖。然而,Albert 湖凹陷受 Rwenzori 山隆升影响产生压扭作用,边界断层拉张作用减弱,湖水变浅,以河流三角洲—滨浅湖沉积为主,属裂陷后期发展阶段。全新世,边界断层复活,湖水再次加深,处于第 II 期裂陷的初始期。

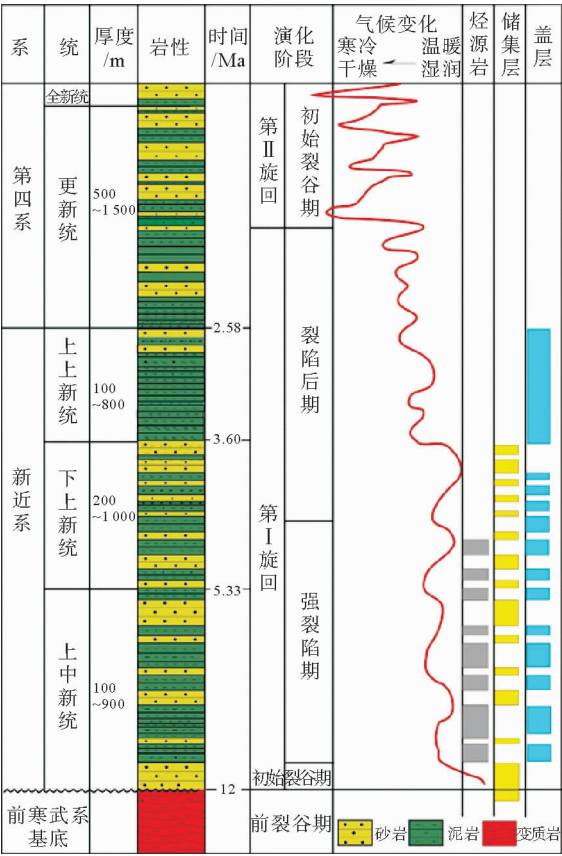


图 2 Albertine 地堑综合地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the Albertine Graben

2 Albert 湖凹陷构造特征

Albert 湖凹陷由 2 条相向倾斜的基底主干断层控制,呈 NE—SW 向的条带状分布。凹陷南区紧邻 Rwenzori 山,断裂体系最复杂。Rwenzori 山北边界断层 F5 延伸至该区中部,在地震剖面上显示负花状构造,具有走滑断层的特征。基底主干断层 F1 走向为 NE—SW,断距约 2 000 m,上盘伴生大量的小位移次级断层(图 3)。

凹陷中部湖区构造简单,断层不发育,南洼和北洼地层产状呈水平状或近于水平状,无中央凸起(图 3)。在湖区南段,东部陡坡带由一条边界断层 F1 控制,形成板式陡坡带;西部陡坡带由 2 条平行的基底断层 F3、F4 控制,形成台阶式陡坡带。湖区北段则反向对称,东部为台阶式陡坡带,西部为板式陡坡带。东西两条主干断层断距大,落差达 6 000 m,断面平直,倾角约 60°。相比之下,东部二台阶比西部二台阶面积大,表现为南北

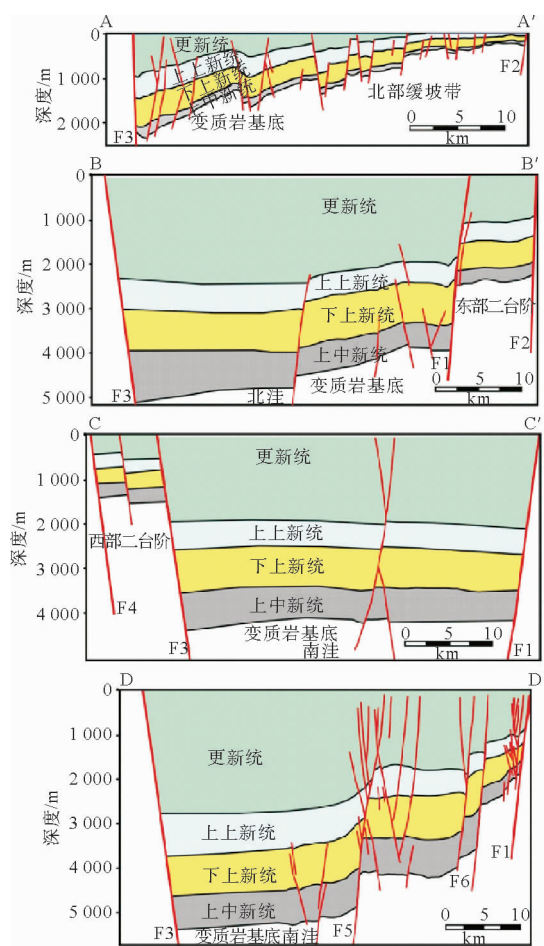


图3 Albert湖凹陷联合剖面(剖面位置见图1)

Fig. 3 Geological cross-sections of the Lake Albert Sag
(see fig. 1 for location)

两端高、中间低的“U型”特征。另外,湖区南段和北段断裂的差异,在两者交接处发育NW向垂直于边界断层的调节断层,形成了南北两洼之间的低凸起,地层扭动变形明显(图3)。该低凸起东部受主干断层F1控制,向西倾没,G油田处于低凸起的东部。

凹陷北区东侧边界断层F2断距变小,西侧边界断层F3转换成两条大断裂(图1),由此形成西深东浅的半地堑结构(图3)。半地堑的缓坡(又称北部缓坡带)地层埋深浅,<1 000 m。北部缓坡带断裂十分发育,断层陡,多数断层两盘地层厚度没有明显变化,为晚期断层。主要由NE—SW向及近乎S—N向2组断层相交形成断块圈闭。该构造带油气十分丰富,集中了凹陷内80%的油气储量。

3 陡坡带油气成藏模式

裂谷盆地油气聚集有许多基本规律是普遍适用的,可以借鉴这些规律进行油气勘探^[11-17]。但是东非裂谷作为世界上最年轻的含油气盆地,有着自身特有的成藏模式。

3.1 烃源岩

通过油源对比表明,目前发现的油气藏均来自上中新统和下上新统烃源岩(图2)。钻井揭示有效烃源岩厚度约为900 m,为咖啡色中深湖相泥岩,有机质类型以藻类和菌类为主,TOC和HI均很高,TOC值为3.07%~9.8%,平均6%;HI值为392~555 mg/g TOC;平均469 mg/g TOC,Ⅰ—Ⅱ₁型干酪根。地化分析显示,这套烃源岩生烃门限2 550 m,生烃高峰3 500 m,现今正处于生排烃高峰^[8]。

3.2 储盖特征

东部陡坡带以牵引流扇三角洲沉积为主,前缘水下分流河道砂体较厚,规模较大^[18-20],上中新统和下上新统为主要含油储层(图2)。在湖区南段,板式陡坡带储层横向范围大,物性好。岩心分析显示砂岩储层孔隙度为20%~33%,平均值为25%,渗透率为 $(100\sim3\,600)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均值为 $1\,553\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,地层砂地比为26%~48%,砂泥岩配置好;在北段,台阶式陡坡带扇三角洲沉积在二台阶之上,由于可容纳空间小,缺少滨浅湖相泥岩,砂地比高达81%,砂岩储层孔隙度为19%~28%,平均值为24%,渗透率为 $(51\sim1\,650)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均值为 $553\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。南段和北段均发育中高孔渗储层,砂岩储层呈夹层或互层状与各自的泥岩构造了良好的储盖组合,且全井段发育。二台阶上的基底风化壳为次要含油储层,但物性差,测试未获得商业油流。

3.3 运移条件

油气运移总是要更多地沿一个最省功的方向运移,这一方向就称为油气运移的优势方向^[21]。Albert湖凹陷砂岩储层物性好,孔喉直径大,渗透性强,油气优先通过砂岩侧向运移。板式陡坡

带紧邻生烃洼陷,砂岩与烃源岩直接接触,油气沿砂体快速侧向运移,路程短,散失量小(图 4)。南北洼之间的低凸起处于洼中隆的位置,南洼和北洼双向供烃,G-2 井含油层段具有异常高压。油气在此聚集后,通过油源断层 F1 垂向运移至东部二台阶南部,最后沿基底之上不整合面和砂体侧向运移(图 5)。东部二台阶北部之下为一斜坡,缺少类似洼中隆这样的中转站,油气直接沿轴向曲流河三角洲砂体运移至北部缓坡带,因此,二台阶北部并非油气优势运移方向,故油气相对贫瘠。与此同时,东部二台阶油源断层 F1 对应的湖面漂浮着大量油膜,可见油气存在散失。因此,板式陡坡带运移条件最好,二台阶南部次之。

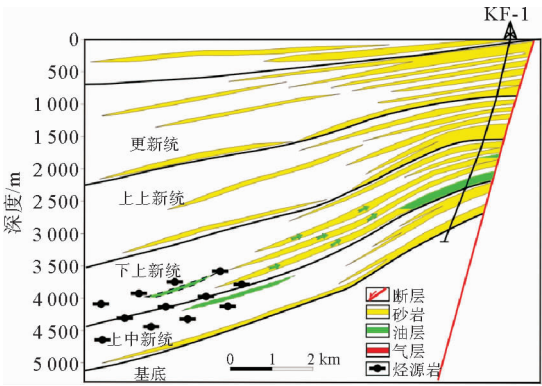


图 4 Albert 湖凹陷铲式陡坡带油气成藏模式

Fig. 4 Oil accumulation pattern in one-fault steep slope of the Lake Albert Sag

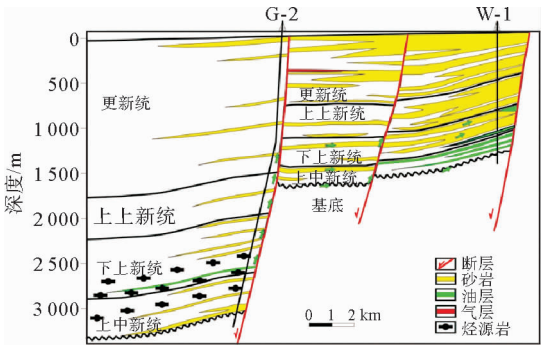


图 5 Albert 湖凹陷台阶式陡坡带油气成藏模式

Fig. 5 Oil accumulation pattern in two-fault steep slope of the Lake Albert Sag

3.4 聚集条件

陡坡带南北段圈闭类型相同,由长期活动的平面式高角度正断层控制形成正牵引断鼻、断块

圈闭。板式陡坡带次级断层不发育,由于缺少有效疏导体系而难以接受下部油源供给。KF 油田油层和油气显示砂层均在上中新统和下上新统,与有效烃源岩发育层位一致。值得一提的是,二台阶之上 W 油田虽然有 F1 断层沟通油源,油层也都在上中新统和下上新统,推测晚上新世—更新世处于裂隙后期,二台阶之上水体浅或出露地表,地层缺少有效泥岩盖层。

烃柱高度对比显示,南段 KF 油田最大烃柱高度 480 m,而北段 W 油田最大烃柱高度 160 m。同时,二台阶南部沿边界断层出露油苗,而板式陡坡带无油苗(图 1),二台阶北部无油苗可能是油气充注不足,表明板式陡坡带保存条件优于台阶式陡坡带。陡坡带泥岩盖层差异小,以上中新统一下上新统储层层内泥岩作为局部盖层,厚度 8~25 m。如前所述,南段具有优越的运聚条件,油气充注量大,现今正处于生排烃高峰,而没有油苗出露,推测边界断层的封堵能力强。前人研究认为断层的封闭性与断层类型、倾角、埋深和塑性岩石含量等有关^[20]。中段和南段侧封边界断层均是高角度平面状正断层,倾角大致相同。不同之处,台阶式陡坡带二台阶之上可容纳空间小,地层以扇三角洲前缘和平原沉积为主,泥岩含量低,为 19%~52%;板式陡坡带可容纳空间大,地层以扇三角洲相与滨浅湖相交互沉积,泥岩含量高,为 52%~74%。板式陡坡带 KF 油田油藏埋深 2 200~2 580 m,二台阶之上 W 油田油藏埋深 920~1 800 m。通常埋藏越深,封闭性强,故板式陡坡带边界断层封堵能力强,保存条件好。台阶式陡坡带的一台阶运移条件和保存条件与板式陡坡带相同,然后砂岩储层欠发育,G 油田探明储量低。可见,板式陡坡带的聚集条件也是最好,二台阶南部次之。

3.5 油气成藏模式

综上所述,构造控制了陡坡带油气富集的差异。板式陡坡带由单条断层控制,比台阶式可容纳空间大,湖水较深,在相同量的物源供给下,地层泥岩含量高,因此,陡坡带南段油气成藏条件优越。板式陡坡带和台阶式陡坡带均为旁生侧储的油气成藏模式,油气并非主要靠断层运移聚集到后裂谷期层序中。油气运聚的方式有所不同,前

者油气从生烃洼陷沿着砂体侧向运移,在边界断层下降盘圈闭内聚集成藏(图4);后者油气从生烃洼陷汇聚至一台阶中转站,通过油源断层垂向运移至二台阶,再经风化壳不整合面和砂体侧向运移至圈闭中成藏(图5)。

4 西部陡坡带勘探潜力

西部陡坡带紧邻生烃洼陷,烃源条件优越。目前没有钻井和地震资料,依据其构造特征与东部陡坡带相同,推测发育扇三角洲砂岩储层,北段板式陡坡带泥岩含量高,储盖组合配置好,边界断层保存条件好,成藏条件优越;南段台阶式陡坡带成藏条件一般,但在低水位时期,南岸曲流河三角洲可能推进至一台阶,形成良好的储盖组合。考虑到西部陡坡带与东部东坡带对称性发育的特点,预测其可采资源量4~6亿桶(bbl),勘探潜力较大。

5 结论

(1)Albert湖凹陷是由2条主干基底断层控制的双断式被动裂谷,内部构造简单。凹陷形成于晚中新世,已经历了从初始裂陷期、强裂陷期、裂陷后期的一个完整旋回的I期裂陷演化,目前处于第II期裂陷的初始期。

(2)湖区东部和西部陡坡带反向对称。在南段,东部陡坡带由1条边界断层控制,形成板式陡坡带,而西部陡坡带由2条平行的基底断层控制,形成台阶式陡坡带。相反,在北段,东部为台阶式陡坡带,西部为板式陡坡带。

(3)板式陡坡带和台阶式陡坡带均为旁生侧储的油气成藏模式,前者油气侧向运移,处于优势运移方向,成藏条件优越;后者以垂向运移为主,侧向运移为辅,油气散失量大,保存条件较差,成藏条件一般。据此推测,西部陡坡带一台阶是有利勘探区带,勘探潜力较大,而西部二台阶地质风险较大。

参考文献:

[1] 张兴,童晓光. 艾伯特裂谷盆地含油气远景评价——极低勘探程度盆地评价实例[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28

(2):102-106.

- [2] 张可宝,史卜庆,徐志强,等. 东非地区沉积盆地油气潜力浅析[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 869-874.
- [3] 金宠,陈安清,楼章华,等. 东非构造演化与油气成藏规律初探[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2012, 42(2): 121-130.
- [4] 窦立荣,王建君,程顶胜,等. 乌干达 Albertine 地堑石油地质条件与油气勘探潜力[J]. 地质学报, 2004, 78(4): 506.
- [5] 陈经覃,胡滨. 乌干达 N 油田流体面积初探[J]. 内蒙古石油化工, 2015(18): 43-45.
- [6] 赵伟,韩文明,胡滨,等. 东非裂谷 Albertine 地堑石油地质条件和成藏规律[J]. 四川地质学报, 2016, 36(2): 275-279.
- [7] 蔡文杰,韩文明,许志刚,等. 东非 Lake Albert 盆地构造调节带特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 地质科技情报, 2015, 34(4): 120-123.
- [8] 程顶胜,窦立荣,王建君,等. 乌干达 Albertine 地堑含沥青砂岩的发现及其地球化学意义[J]. 地球化学, 2002, 31(6): 532-538.
- [9] Chorowicz J. The East African rift system[J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43: 379-410.
- [10] Karner G D, Byamungu B R, Ebinger C J, et al. Distribution of crustal extension and regional basin architecture of Albertine rift system, East Africa[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 1131-1150.
- [11] 童晓光,窦立荣,田作基,等. 苏丹穆格莱特盆地的地质模式和成藏模式[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 19-24.
- [12] 朱俊章,石和生,龙祖烈,等. 珠一坳陷半地堑成藏系统成藏模式与油气分布格局[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 24-37.
- [13] 王永诗,鲜本忠. 车镇凹陷北部陡坡带断裂结构及其对沉积和成藏的控制[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(6): 5-8.
- [14] 王志刚,东营凹陷北部陡坡构造岩相带油气成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 10-12.
- [15] 王家亮,张金川,张杰,等. 海拉尔盆地贝尔凹陷的油气运聚分析[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 459-465.
- [16] 尹丽娟. 济阳凹陷陡坡带油气富集特征[J]. 海洋石油, 2012, 32(1): 45-48.
- [17] 汪立,屈红军,张功成,等. 东非坦桑尼亚盆地油气地质特征与勘探前景[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(12): 46-52.
- [18] 杨小丽,房磊,徐伟,等. 裂谷盆地高凝油藏扇三角洲沉积演化模式[J]. 特种油气藏, 2016, 25(1): 19-23.
- [19] 于水,韩文明,赵伟,等. 裂谷盆地陡断带三角洲沉积特征与成因模式[J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 31-35.
- [20] 董朔朋,祝彦庆. 乌干达 Albert 地堑中新—上新统沉积特征及控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2015, 32(2): 29-37.
- [21] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 第四版. 北京:石油工业出版社, 2013.

HYDROCARBON ACCUMULATION MODEL FOR THE EASTERN
STEEP SLOPE OF LAKE ALBERT SAG, UGANDA

CHEN Jingtian, HAN Wenming, QIU Chunguang, JIA Shen
(CNOOC Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: As the youngest petroliferous basin in the world, the sag of Lake Albert has still undergone rifting up to present. This specific geologic condition leads to a special model of oil and gas enrichment. In order to evaluate and predict the exploration potential on west side of the Lake Albert, we applied seismic and drilling data for studies of the structural characteristics of the sag, and the petroleum geological conditions and accumulation pattern of oil and gas on the steep slope zone. Results show that one-step slope is perfect for lateral hydrocarbon migration and accumulation. Two-step slope is fair, but dominated by vertical migration. Migration and preservation are believed the main controlling factors for oil and gas enrichment on a steep slope as such in the Lake Albert. In the western steep slope, first step slope is favorable zone for exploration.

Key words: East Africa Rift System; Lake Albert; accumulation model; Uganda

(上接第 41 页)

CHARACTERISTICS OF SOURCE ROCKS AND EXPLORATION
POTENTIAL IN THE NORTHERN SAG OF MIAOXI, BOHAI SEA

WANG Guangyuan, GUAN Dayong, LIU Pengbo,
YAO Yongqiang, ZHAO Ye, YUE Junpei
(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: Hydrocarbon source rocks in the Northern Sag of Miaoqi of the Bohai Sea are studied based on the latest 3D seismic, drilling, logging, hydrocarbon source rocks and oil testing data for revealing their geochemical parameters, distribution patterns and forming environment. Basin simulation and mixed oil contribution analysis technique have been adopted for evaluation of main hydrocarbon source rocks and their exploration potentials. Results show that there are two sets of source rocks in the Northern Sag of Miaoqi, called Ed and Es₁₂ respectively. The source rock Es₁₂, which contains high abundance of matured organic matter of good type, is the major source rock in the Sag, of which the amount of hydrocarbon expulsion accounts for 56% of the total. Oil-source correlation further suggests that the crude oil of PL15-2 oilfield is mainly derived from the source rocks Es₁₂. More data indicate that the Northern Sag of Miaoqi has a great exploration potential of hydrocarbons.

Key words: Northern Sag of Miaoqi; major source rocks; geochemical features; oil-source correlation; exploration potential