

DOI: 10.13745/j.esf.2018.02.002

# 中非裂谷系前寒武系基岩油气成藏组合

窦立荣<sup>1</sup>, 王景春<sup>1</sup>, 王仁冲<sup>1</sup>, 魏小东<sup>2</sup>

1. 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100034

2. 中国石油东方地球物理勘探公司, 河北 涿州 072751

DOU Lirong<sup>1</sup>, WANG Jingchun<sup>1</sup>, WANG Renchong<sup>1</sup>, WEI Xiaodong<sup>2</sup>

1. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation Ltd., Beijing 100034, China

2. CNPC Geophysical Company Limited, Zhuozhou 072751, China

DOU Lirong, WANG Jingchun, WANG Renchong, et al. The Precambrian basement play in the Central African Rift System. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 015-023

**Abstract:** The Central African Rift System (CARS) is a group of Mesozoic – Cenozoic rift basins developed on the Precambrian crystalline basement. Our investigation on the outcrops and drilling data in the CARS indicated that the lithology of the basement rocks are mainly igneous rocks and orthometamorphites with small amount of parametamorphites. Based on the content of dark minerals, the basement rocks can be divided into two types: felsic and mafic rocks. The former is prone to be easily weathered and fractured than the latter, and as a result, the felsic rocks have better poroperm. Field investigation showed that a thick wide-spread spherical weathered crust formed during the Cambrian – Jurassic; during the Early Cretaceous, the coupling of the strike-slip of the Central African Shear Zone and Precambrian brittle basement resulted in a group of high-angle faults, en échelon fractures, microfractures and joints within the basement, while weathering, leaching, epithermal and hydrothermal activities controlled dissolution, cementation and development of the secondary pores. Our data further showed that the weathered crust and fractured reservoirs have layer-like features, where the basement reservoir was vertically zoned, displaying the weathered and leached, fractured, semi-filled fractured and tight zones. Moreover, three sets of mudstones formed in the Early Cretaceous, Late Cretaceous and Paleogene, respectively, potentially acting as a top seal for the buried Precambrian hills. The Paleogene mud shales developed immaturity due to shallow burial depth, therefore they could not serve as active source rocks. The Upper Cretaceous shales, deposited in the shallow lake facies, were composed primarily of kerogen type III organic matter, although the overall content of organic matters was not high; whereas the Lower Cretaceous shales, deposited in the deep lacustrine facies, were exceptional regional source rocks, providing an excellent top seal for the basement reservoirs. According to the ages of the cap rocks, there are three hydrocarbon plays in the CARS, i.e., the Lower Cretaceous, Upper Cretaceous and Paleogene plays. The exploration of basement reservoir in Chad has led to the discovery of a number of commercial light oil fields in the crystalline basement reservoirs on the northern slope of the Bongor Basin, and opened a new frontier for the hydrocarbon exploration in the CARS.

**Key words:** Central African Rift System; rift basin; Bongor Basin; play; crystalline basement; fractured basement reservoir

**摘 要:** 中非裂谷系是在前寒武系结晶基岩基础上发育起来的中新生代裂谷盆地群。通过露头 and 钻井资料研究发现,基岩主要由前寒武系岩浆岩、正变质岩和少量副变质岩组成。根据暗色矿物含量可以将基岩划分为长英质和铁镁质岩石两大类,前者更有利于风化和裂缝的形成,储层物性较好。寒武纪—侏罗纪长期风化作

收稿日期:2017-06-08;修回日期:2017-10-28

基金项目:中国石油天然气集团公司科技攻关课题(2013D-0902);国家科技重大专项 29 课题五(2016ZX05029029)

作者简介:窦立荣(1965—),男,教授级高级工程师,主要从事跨国油气勘探和石油地质综合研究。E-mail:doulirong@cnpcint.com

用形成了广泛分布且厚度较大的球形风化壳(段),早白垩世中非剪切带的走滑-拉张应力场与前寒武系刚性基岩的耦合作用在基底产生了大量高角度断层、共轭缝、微裂缝和节理等,风化淋滤、表生和热液作用控制了溶蚀、胶结和次生孔隙发育。风化壳和裂缝储层发育具有“似层状”的特征,垂向上基岩潜山储层序列可进一步划分为风化淋滤带、裂缝发育带、半充填裂缝带和致密带四个区带。中非裂谷系盆地在早白垩世、晚白垩世和古近纪三期裂谷期发育了三期区域性厚层泥页岩,古近系暗色泥岩由于埋藏浅,处于未成熟阶段,不能作为有效烃源岩,上白垩统泥岩以滨浅湖相为主,有机质含量总体不高,以Ⅲ型干酪根为主,下白垩统深湖相泥岩是区域上的优质烃源岩,同时为基岩提供了良好的油源和顶盖层。根据盖层的时代,可以划分出下白垩统、上白垩统和古近系3类成藏组合。乍得 Bongor 盆地基岩勘探获得极大成功,发现了一批高产稀油油田,打开了中非地区一个新的油气勘探领域。

**关键词:**中非裂谷系;裂谷盆地;Bongor 盆地;成藏组合;结晶基岩;裂缝性基岩储层

**中图分类号:**P618.130.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)02-0015-09

基岩是不整合覆盖在沉积层序之上的变质岩或火成岩组合(不论年代)<sup>[1]</sup>,是盆地形成和演化的基础。结晶基岩潜山油气藏虽然在油气勘探和开发中所占比重不大,但在裂谷盆地、前陆盆地和克拉通盆地都有发现,尤其在裂谷盆地是重要的勘探目标。

裂缝性结晶基岩储层是一种非常规储层,但也可以形成世界级大油田,如委内瑞拉的 La Paz 油田<sup>[2]</sup>、越南的 Bach Ho 油田<sup>[3]</sup>和利比亚的 Augilla 油田<sup>[4]</sup>等。基岩油田往往是意外发现的<sup>[5]</sup>,是在浅层发现了碎屑岩油藏多年后加深兼探的结果。如委内瑞拉的 La Paz 油田,基岩油层是在 31 年后通过钻井加深才发现<sup>[2]</sup>。所以,基岩不是盆地勘探早期的主要勘探目标<sup>[6]</sup>。全球已经在中国、印度尼西亚、俄罗斯、印度、加拿大、美国、委内瑞拉、英国、西班牙、澳大利亚、伊朗、也门、埃及和利比亚等国家发现了结晶基岩油气藏<sup>[2-15]</sup>。近年来,随着地球物理技术和钻井技术的发展,使有目的地勘探基岩油气藏成为可能,有不少成功案例,如中国东部渤海湾的锦州 25-1 油田<sup>[14]</sup>和英国北海的 Lancaster 油田<sup>[7-8]</sup>等。

中西非裂谷系自 1960 年代开始成为西方大油公司勘探的热点地区,在一系列裂谷盆地中、新生界沉积地层中发现油气田<sup>[16-27]</sup>,但受地质认识和地震资料品质的限制,很少直接针对前寒武系基岩实施钻探,虽然已有 130 多口井钻遇基岩,但一直没有获得商业稀油发现,仅在 Melut 盆地 Ruman 基岩获得稠油<sup>[26]</sup>。

本文拟在区域地质对比分析研究的基础上,以乍得 Bongor 盆地基岩潜山油藏的发现为例,阐述中非地区基岩成藏组合的特征和勘探方向。

## 1 中非裂谷系的形成和演化

### 1.1 前寒武纪基岩的形成阶段

中西非裂谷系的结晶基底是在泛非造山运动

期间形成的、由元古宙岩浆岩和变质岩组成的活动带,发育了北北西-南南东和北东-南西两组基底断裂<sup>[17-19,28-29]</sup>。其中,西非裂谷系在早白垩世沉积了海相地层,而中非裂谷系则沉积了陆相地层<sup>[19]</sup>。本文的中非裂谷系是指由乍得南部的 Bongor、Doba-Doseo-Salamat 盆地和苏丹/南苏丹的 Muglad、Melut 和 White Nile 等盆地组成的裂谷盆地群,不包含喀麦隆境内的 Benue 海槽<sup>[30-31]</sup>。前寒武系的基底大断裂控制了中生代裂谷盆地的形成和演化(图 1)。

### 1.2 寒武纪-侏罗纪基岩的风化剥蚀阶段

寒武纪-侏罗纪中非地区一直处于干旱气候<sup>[28-29]</sup>,断裂活动不发育,基岩大面积暴露,以物理风化为主,形成大面积的夷平原。露头观察发现,在表层有 10~50 m 厚的大型球形风化形成的大小不等的石块组成风化层,覆盖在块状的结晶岩之上,形成明显的双层结构(图 2)。Bongor 盆地钻井证实不同潜山顶部发育厚度 10~100 m 不等的碎裂岩,构成了风化壳(段)<sup>[32]</sup>。Muglad 和 Melut 盆地多口井在基岩段存在泥浆漏失,反映基岩存在有效的储集空间。

### 1.3 白垩纪-第三纪裂谷发育阶段

进入白垩纪,随着大西洋由南往北裂开,在中非地区发生了北西-南东向和东-西向强烈的裂谷作用,一直持续到阿尔布期。这一区域性的裂谷作用在非洲中部形成了一系列的沉积盆地,沉积了巨厚的下白垩统粗-细-粗完整旋回的陆相地层,发育一套厚层的深湖相富含有机质的泥页岩层<sup>[16-27]</sup>,是中非裂谷系目前已经证实的唯一有效烃源岩。

第二次裂谷作用主要发生在晚白垩世。由于非洲板块与欧洲板块碰撞,区域应力场从南-北向变成北东-南西向。在裂谷盆地中沉积了第二套陆相地层,与下伏的下白垩统裂谷层序呈不整合

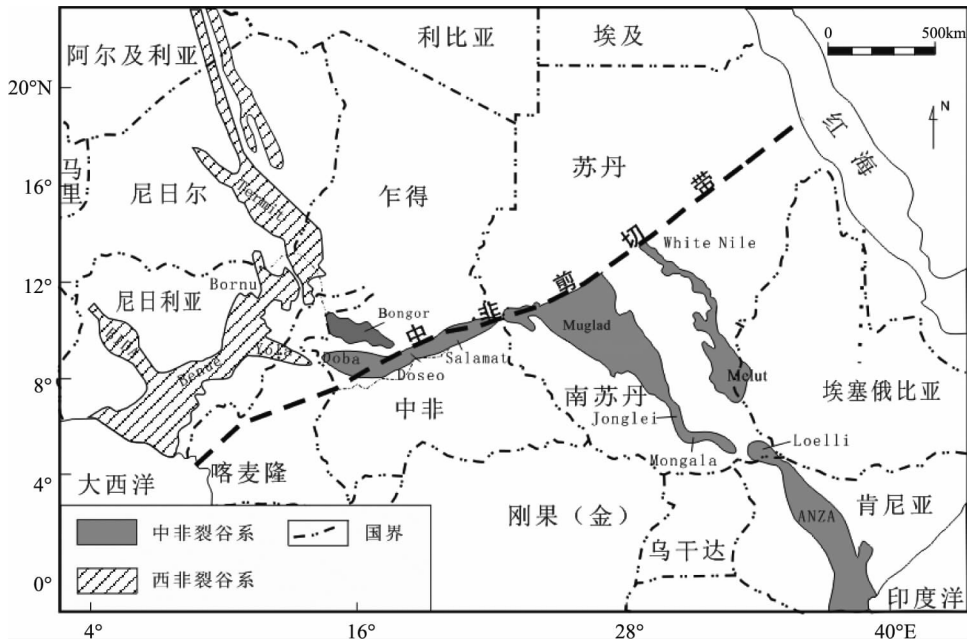
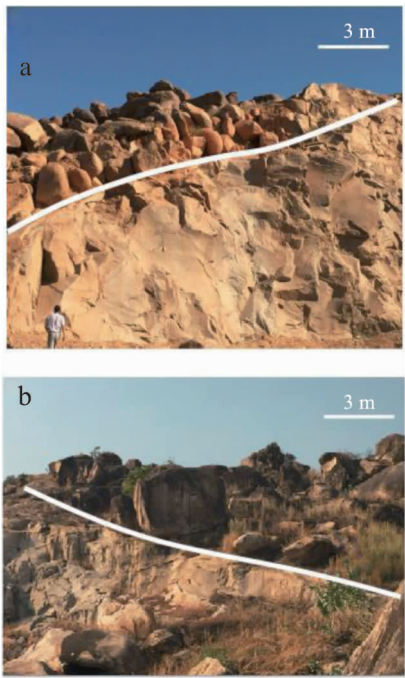


图 1 中非裂谷系主要裂谷盆地分布图  
(据文献[18]修改)

Fig. 1 Map showing the locations of major rift basins in the CARS



a—苏丹喀土穆;b—南苏丹朱巴。  
图 2 具双层结构的基岩露头

Fig. 2 Basement outcrops showing two-layers

接触。如在 Muglad 盆地上白垩统地层主要发育在 Kaikang 槽、Nugara 和 Sufyan 坳陷,为厚 1 500~2 000 m 的滨浅湖相地层,两侧的凹陷上白垩统地层很薄,并且以砂岩为主<sup>[20-22]</sup>,在 Melut 和 White Nile 盆地也是以砂岩为主<sup>[23-27]</sup>。在 Doba - Doseo -

Salamat 盆地同样沉积了一套厚度 1 500 m 左右的陆相地层<sup>[18-19]</sup>。而在 Bongor 盆地则由于强烈反转作用,导致上白垩统地层被抬升并全部剥蚀掉了<sup>[32-33]</sup>。

进入古近纪,中非剪切带活动停止。在 Doba 和 Doseo 等盆地,断层活动基本停止于白垩系顶。受红海张开的影响,北西向分布的裂谷盆地或坳陷进入了第三裂谷发育期。如 Muglad 和 Melut 等盆地,沉积了 1 000~1 500 m 厚的陆相地层<sup>[17-26]</sup>。新近纪—第四纪中非裂谷系以热沉降为主,沉积的地层厚度 50~500 m 不等。

白垩纪—古近纪三期裂谷作用,导致基岩块断,形成了一系列的断块山,如果有合适的泥岩盖层覆盖,则可以形成基岩成藏组合。这是中非裂谷系勘探基岩成藏组合的理论基础。

## 2 下白垩统深湖相泥岩是区域优质烃源岩和盖层

中非裂谷系在早白垩世、晚白垩世和古近纪三期裂谷发育期都不同程度地沉积了厚层的泥页岩。古近系暗色泥岩由于埋藏浅,处于未成熟阶段,不能作为有效烃源岩,但却是 Melut 盆地的区域盖层,90% 的储量分布在古近系 Adar 组泥岩盖层之下<sup>[23-25]</sup>。

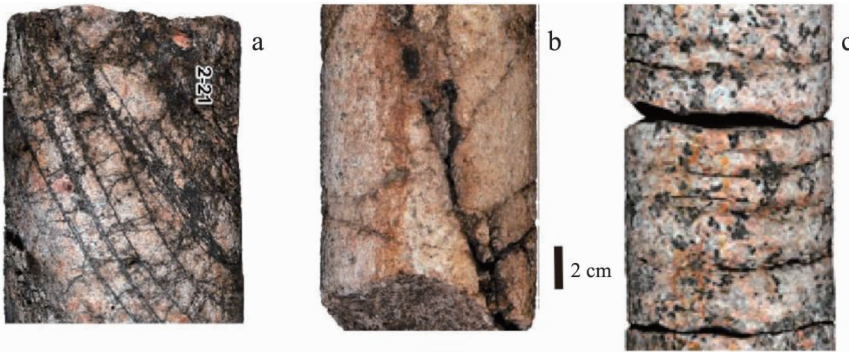
上白垩统泥岩以滨浅湖相为主,有机质含量总体不高,以Ⅲ型干酪根为主,是 Muglad、Doba 和 Doseo 盆地的区域盖层,Muglad 盆地 75%以上的储量分布在上白垩统 Aradeiba 组泥岩之下<sup>[17-22]</sup>。早白垩世强烈伸展断陷活动,广泛发育富含湖生生物的半深湖-深湖相暗色泥岩,有机碳含量平均达到 3.5%以上,有机质类型以 I 型和Ⅱ<sub>1</sub> 型为主,成为区域主力烃源岩。烃源岩热演化分析表明,下白垩统生油岩成熟深度在 2 500~2 900 m<sup>[16-25]</sup>,部分反转盆地现今的门限深度只有 1 500 m 左右,如 Bongor 盆地<sup>[27]</sup>。下白垩统湖相泥岩也是一套优质区域盖层,为下伏的裂谷早期的水下扇和扇三角洲砂体提供了优越的保存条件。如在 Bongor 盆地,在下白垩统烃源岩之下发现了一系列大中型油田<sup>[27]</sup>;在 Muglad 盆地北部的 Sufyan 和 Fula 坳陷等,下白垩统 Abu Gabra 组烃源岩之下的砂体已经成为重要勘探新层系,发现了 Higma 等油田。

3 基岩岩性特征

中国东部的基底主要由太古宙的岩浆岩和变质岩组成,正变质岩和副变质岩都很发育<sup>[13-15]</sup>。元古宙开始被大面积的海相地层覆盖,因此基底的风化时间短,风化作用不如中非地区。元古宙、古生代、中生代的岩浆活动也使得早期的基岩和沉积岩发生变质作用,各种岩墙、岩脉等发育。多期热液活动在基岩中充填早期的裂缝,长英质和铁镁质岩石均发育,基岩的非均质性更强,基岩的风化壳和裂缝段构成的“双层结构”不明显,往往形成内幕油气藏<sup>[15]</sup>,钻前储层预测难度大。

和中国东部相比,中非地区的基底主要由元古宙的火成岩和正变质岩组成<sup>[32]</sup>,副变质岩不发育,长英质岩石占比 75%以上。在南苏丹和苏丹南部的基底岩性由花岗岩、花岗闪长岩、片麻岩、斜长角闪岩、石墨片岩、大理岩、石英岩组成<sup>[35]</sup>。钻井揭示,在 Muglad 和 Melut 盆地基底岩性主要为(540±40) Ma 形成的花岗岩和花岗闪长质片麻岩<sup>[36]</sup>。Doba 盆地多口探井揭露的基岩岩性为花岗岩、片麻岩、片岩、伟晶岩和花岗闪长岩,盆地西部花岗岩露头的 Rb/Sr 分析表明其形成于(481±23) Ma<sup>[18]</sup>。Bongor 盆地大量钻井揭示,基岩主要由花岗岩、正长岩、闪长岩和二长岩等岩浆岩,以及混合花岗岩和片麻岩类等正变质岩构成(图 3),岩浆岩的年龄主要集中在(621±16)~(525.3±2.5) Ma,变质岩的年龄集中在(616±6)~(526.5±2.7) Ma。基岩形成或变质的时代为寒武纪纽芬兰世—新元古代<sup>[32]</sup>。此外,在乍得和苏丹境内也有前寒武系大理岩露头,在 Muglad 盆地的 Bamboo AG-1 也钻遇了前寒武系大理岩,见裂缝发育。

在乍得 Bongor 盆地,对基岩岩心进行了 181 个样品的矿物组成鉴定。基于暗色矿物含量可以将基岩划分为两类:长英质岩石和铁镁质岩石。长英质岩石暗色矿物含量低于 10%,如黑云母、角闪石等,具有高钾、高自然伽马、低密度、低光电因子(PEF)( $<4$ )、低钛、高硅、低铁含量的特征,测井图上密度和中子曲线有一定的交会。而铁镁质岩石暗色矿物含量超过 10%,具有低钾、低自然伽马、高密度、高 PEF( $>4$ )、高钛、低硅、高铁含量等特征,测井图上密度和中子不交会。长英质岩石的石英平均含量为 21.3%,长石含量为 75%,黑云母和角闪石含量为



a—M-10 井(1 072.21 m)碎裂混合花岗岩,裂缝极为发育,与柱面交角小于 30°,密度为 4 条/cm,宽度为 0.5~2 mm,裂缝部分被方解石、长英质碎屑充填;b—RS-11 井(1 409.30 m)粉红色混合花岗岩,岩心较破碎,裂缝较发育,裂缝宽 1~2 mm,裂缝共轭两组,裂缝密度 9 条/10 cm,裂缝半充填,沿缝见溶孔;c—PS-3 井(1 653 m)粉红杂黑色正长岩,水平收缩缝发育,裂缝密度 0.4 条/cm。

图 3 乍得 Bongor 盆地三口井的基岩段岩心照片  
Fig. 3 Cores from the basement of three wells, the Bongor Basin, Chad



3.6%;铁镁质岩石石英平均含量为 11.6%,长石含量为 65%,黑云母和角闪石含量为 23.4%。岩心和井壁取心标定测井资料的解释发现,超过 70%的基岩层段是长英质岩石。

4 基岩的储层特征

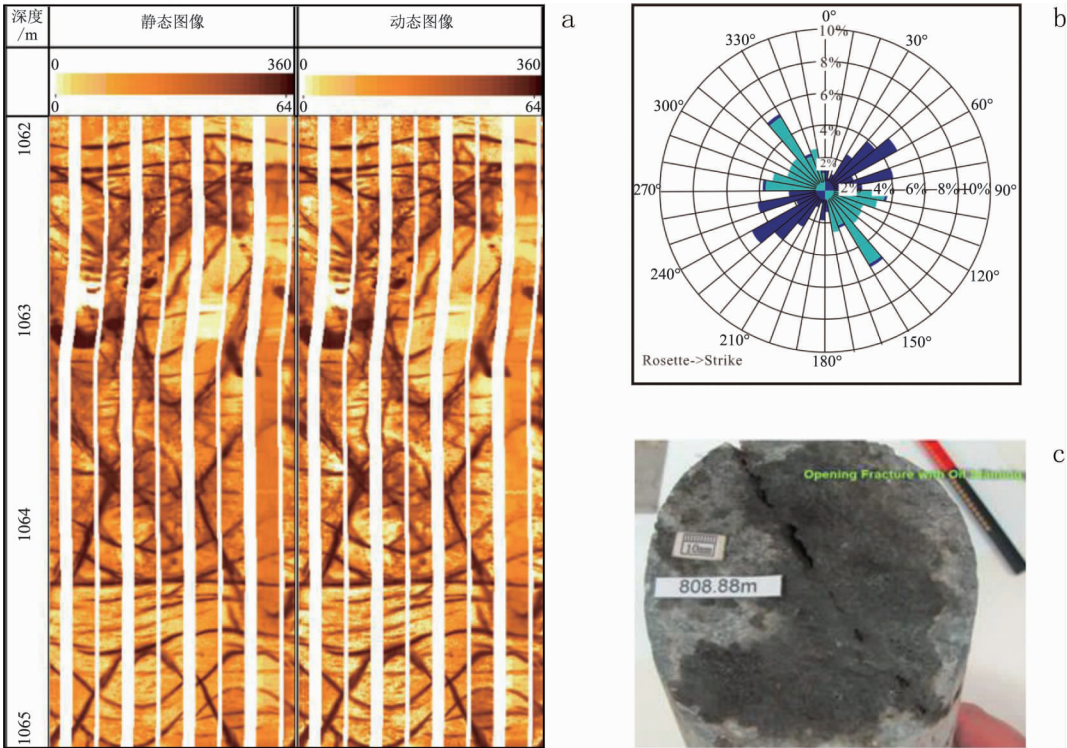
4.1 储集空间

中非地区基底经历了长期的演化,前寒武系基底大断裂及其派生的断层和白垩纪—古近纪裂谷期的新生断裂的叠合,在基底中形成多组高角度断层和裂缝(图 3a、图 3b)和水平收缩缝(图 3c)。在乍得南部的 Bongor 盆地,发育北西西—南东东和北东—南西两组断裂,控制盆地的形成和发育,在北部斜坡的 LE 油田(图 4),基底顶面 0~50 ms 的蚂蚁体追踪图揭示断裂和裂缝发育,LE-4 井地层成像测井揭示,发育两组裂缝(图 4a、图 4b),钻井取心发现,裂缝发育宽度达到 3 mm(图 4c)。Doba、Doseo 和 Salamat 盆地被 Borogop 断裂带北东东—南西西走向控制,但是盆地内部的断裂走向呈北西西—南东东向,与盆地边缘斜交<sup>[18-19]</sup>。苏丹 Muglad 盆地北部以中非剪切带为界,北部的 Sufyan 坳陷呈近东西

走向,而坳陷内的断层为北西—南东向为主<sup>[37]</sup>;Fula 坳陷的边界断层以近南—北向为主,坳陷内的断层为北西—南东向<sup>[22]</sup>;Muglad 盆地向南发育一系列被北西—南东向断层控制的断陷<sup>[20-22]</sup>。南苏丹的 Melut 盆地同样受北西—南东向断层控制<sup>[23-25]</sup>。

早白垩世裂陷期,差异抬升的断块山发生卸荷作用<sup>[38]</sup>,进一步扩大各种级别的张裂缝,大气降水和地下水的侵入,沿裂缝发生一定规模的化学溶蚀,进一步增大裂缝的宽度,甚至形成一定规模的溶蚀孔洞和孔洞发育带(图 3b)。在盆地发育期,潜山深埋后,可能再次受构造运动的影响,会进一步增强节理缝、构造裂缝。在油气生成和充注阶段,地层水的溶蚀和沉淀作用,可以增加孔隙,也可以形成方解石等热液矿物的充填,从而降低裂缝孔隙度。随着埋深增加,裂缝发育的难度增加,最终变为致密的岩石。基岩储层的储集空间包括破碎粒间孔、构造裂缝、长石和角闪石等矿物的溶孔、解理缝和微裂缝等<sup>[32]</sup>。

基岩的岩性对裂缝的发育和溶蚀作用的形成有明显的控制作用。乍得 Bongor 盆地基岩 181 个岩心的岩性、孔隙度测定结果发现,长英质岩石的物性明显好于铁镁质岩石,前者孔隙度为 0.3%~11.8%,



a—LE-4 井基岩(1 062~1 065 m)井段成像测井图;b—LE-4 井基岩段两组天然张开缝玫瑰花图;c—LE-2 井 808.88 m 岩心照片。

图 4 Bongor 盆地 LE 油田基岩成像测井和岩心识别出的裂缝特征  
Fig.4 Fractures recognized from cores and FMI of LE field, the Bongor Basin

后者为 0.5%~3%(图 5)。

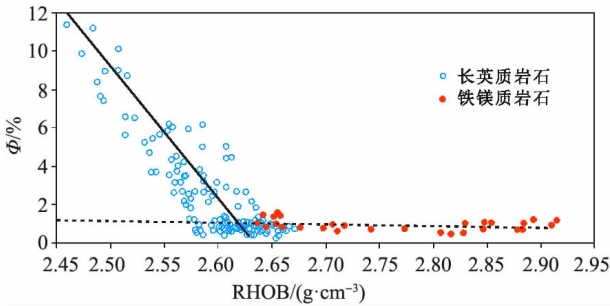


图 5 Bongor 盆地基岩长英质和铁镁质岩石  
岩心测定孔隙度和测井密度关系图  
Fig. 5 Relationship between RHOB and core-measured  
porosity values of felsic and mafic rocks from  
the basement cores of the Bongor Basin

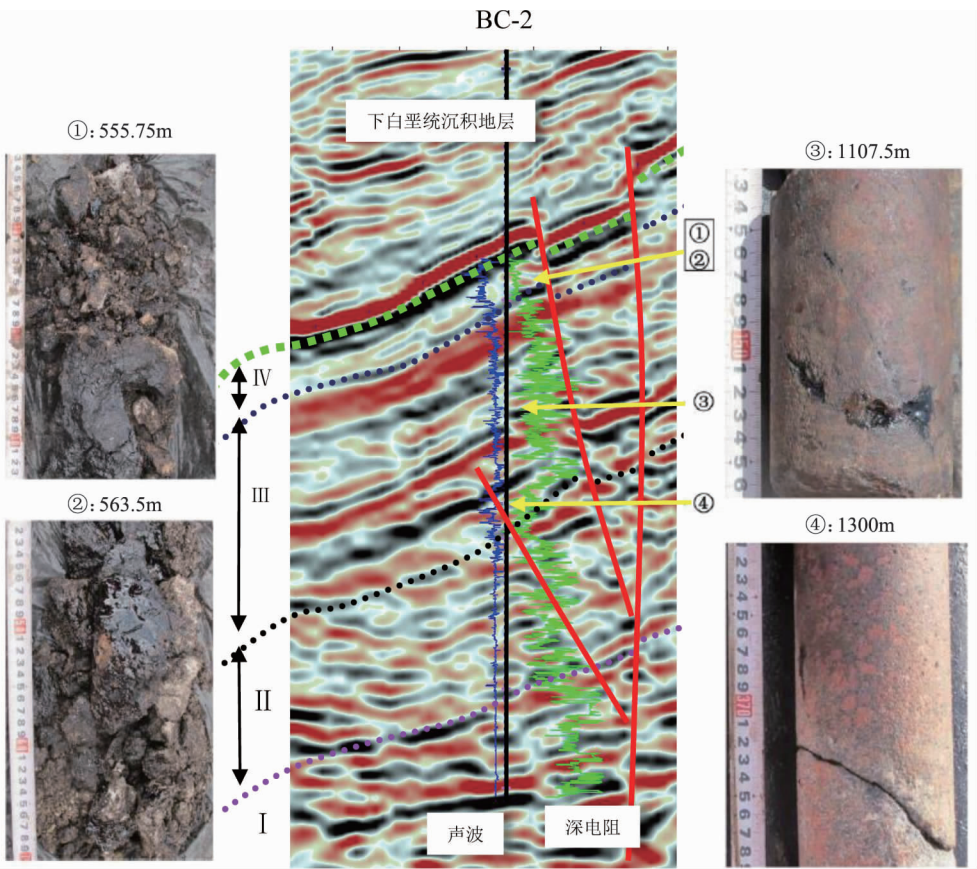
4.2 储层序列

“宽频、宽方位、高密度”三维地震可以较好地刻画基岩顶构造和预测基岩顶部的裂缝发育情况。常规测井和成像测井结合,可以用来刻画基岩段的裂缝发育程度。在岩心上也可以识别出大量地震和测井无法识别的裂缝和微裂缝,大约 50%以上的裂缝

在成像测井图上无法识别,因此,岩心标定是十分必要的。

Bongor 盆地 BC-2 井自 536 m 进入基岩,完钻井深 2 200 m,除常规测井和取心外,还进行了地层成像测井(FMI)、地层元素测井(ECS)等特殊测井,为系统进行潜山的储层序列描述提供了可靠的基础资料。在 BC-2 井系统解剖的基础上,综合基岩潜山储层的储集空间组合特征、储层类型及其岩石物理特征和对应地震响应特征,垂向上将基岩潜山储层序列划分为风化淋滤带,裂缝发育带,半充填裂缝发育带和致密带(图 6)<sup>[32]</sup>。

风化淋滤带主要由球形风化形成的石块构成,在地震剖面上看,具有较连续的强反射特征,主要发育孔隙型和裂缝型储层,以前者为主,总孔隙度在 8%以上,最高达到 30%以上,具有较好的储集性能。裂缝发育带与上覆的风化淋滤带之间有较明显的反射界面,呈块状特征,厚度变化大,在潜山古构造高部位厚度较大,低部位较薄,孔隙度在 3%以上,其中裂缝孔隙度 0.03%~0.3%,具有一定的储



I—致密带;II—半充填裂缝发育带;III—裂缝发育带;IV—风化淋滤带。  
图 6 BC-2 井测井标定的 Baobab C 潜山储层地震垂向分带图

Fig. 6 Seismic profile showing the zonation of buried-hill reservoir calibrated by the logging and core data of Well BC-2



集性能。半充填裂缝发育带岩石结构完整,裂缝偶有发育,以高角度缝为主,溶蚀现象不明显,并且基本被方解石等热液成因的自生矿物充填,裂缝孔隙度 $0\sim 0.03\%$ ,基本为非储层。致密带岩石结构完整,一般不存在天然裂缝,为非储层。

## 5 基岩成藏组合的发现

Bongor 盆地北部斜坡区由于后期反转抬升达 1 500 m 以上,缺失上白垩统地层,下白垩统泥岩和砂岩组合直接覆盖在基岩潜山之上,形成“上生下储式”的成藏组合。2012 年决定在 LE 构造钻探 LE-2 井,探索砂岩地层含油的同时,单独评价基岩的含油性。该构造是一个断块构造,基底埋深预测为 820 m。根据地震预测,潜山顶部发育较连续的地震反射,推测可能发育风化壳(图 7)。该井于 2012 年 12 月 3 日开钻,在 826 m 钻遇基岩,在上覆的砂岩段见到良好的油气显示,测井解释油层 60 m,砂岩油层直接覆盖在基岩之上。在基岩顶下入套管固井,然后改为欠平衡钻井,2012 年 12 月 30 日完钻,井底深度 1 190 m。在基岩段钻井过程中泥浆漏失共  $309\text{ m}^3$ ,并且见到了良好的油气显示。针对基岩段裸眼试油,获得了  $495\text{ m}^3/\text{d}$  的高产稀油,含水为零,原油比重  $0.8578\text{ g}/\text{cm}^3$ ,是首次在中非地区前寒武系基岩获得的商业油流。

与此同时,对 2010 年完钻的 BC-1 井基岩段进行裸眼试油,获得  $650\text{ m}^3/\text{d}$  的高产稀油,原油比重  $0.8819\text{ g}/\text{cm}^3$ 。2013 年 7 月开始对该井进行试采,

截至 2017 年 4 月底,累计生产原油超过  $37\text{ m}^3$ ,平均日产油达到  $245\text{ m}^3/\text{d}$ 。通过对该潜山整体评价,基本证实基岩和上覆的砂岩具有统一的油水边界,是一个整装大油田,基岩潜山是一个亿 t 级的油藏。

2013 年相继钻探了 BC-2、LE-2、RS-8、PS-3、ME-2 等基岩目标,在基岩段试油均获得了高产稀油油流,在 Bongor 盆地北部斜坡证实了 5 个基岩潜山含油带<sup>[32]</sup>,含油井段有时达到 300 m 以上。前寒武系基岩潜山油藏的发现,打开了中非地区新的成藏组合,大大扩展了勘探领域。

中非裂谷系基岩具有相似的形成和演化历史,普遍具有好-较好的储集性能,主要圈闭类型以断块山为主,后期能否成藏主要取决于油气充注系统、顶盖层和断层的侧向封堵等要素。根据基岩上覆的泥岩盖层的时代,可以划分出三类成藏组合,盖层时代越晚,越不利于成藏。第一类是下白垩统成藏组合,即下白垩统烃源岩也是盖层直接覆盖在基岩之上,是最佳的基岩成藏组合,如乍得 Bongor 盆地北部斜坡的基岩潜山油藏<sup>[32]</sup>;第二类是上白垩统成藏组合,上白垩统泥岩覆盖在基岩之上,但油源仍来自侧向的下白垩统烃源岩;第三类是古近系成藏组合,古近系泥岩作为基岩的盖层,如 Melut 盆地的 Ruman 油田,油源也是来自下白垩统烃源岩,试油证实是稠油<sup>[26]</sup>。此外,基岩潜山能否成藏,还取决于上覆的直接地层是否有砂岩地层和油气的充注能力,只有油藏的油柱高度大于砂岩的厚度时,潜山才有可能成藏。因此,钻前基岩潜山上覆沉积层的预测十分重要。

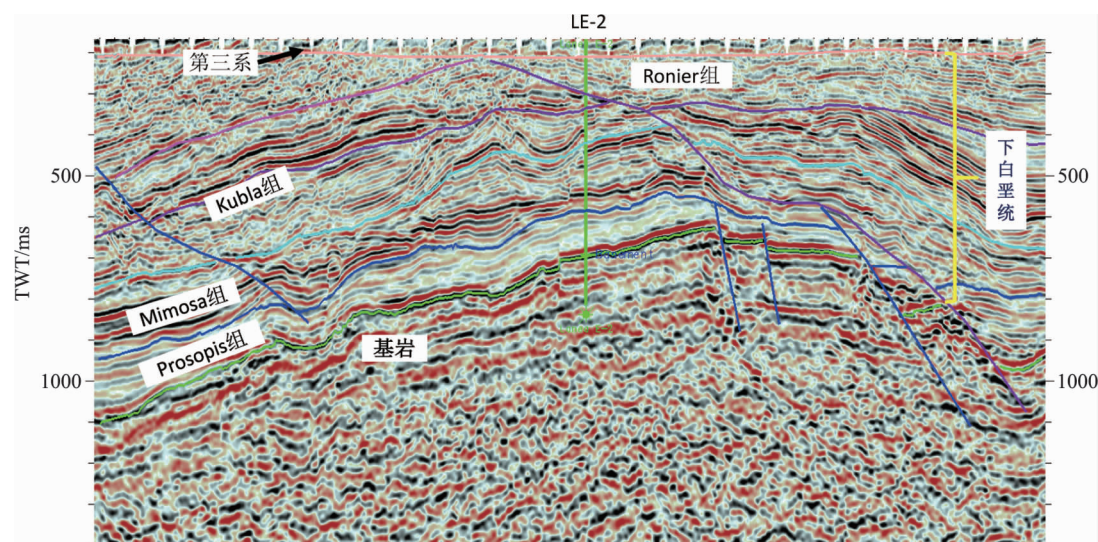


图 7 LE 油田三维地震剖面

Fig. 7 3D seismic profile showing the basement reservoirs of the LE field

## 6 结论和建议

(1)中非裂谷系前寒武系基岩岩性复杂,主要是花岗岩类为主的岩浆岩、以混合花岗岩和片麻岩为主的正变质岩及极少量石英岩和大理岩等。结晶基岩按照暗色矿物的含量可以划分为长英质和铁镁质岩石,前者比后者更有利于风化和裂缝的形成。

(2)长期干旱气候下的球形风化作用控制潜山顶部厚层风化壳的发育,走滑拉张应力场与基岩的耦合作用产生大量高角度共轭裂缝,淋滤和热液作用控制溶蚀和次生孔隙发育。风化壳和裂缝储层发育具有“似层状”的特征,构成了基岩储层的双层结构,是钻前地震储层预测的理论依据。

(3)根据上覆的盖层时代,可以划分出下白垩统、上白垩统和古近系三类成藏组合,盖层时代的差异决定了基岩潜山含油性的好坏和勘探潜力,早期潜山是最有利的潜山勘探目标。

(4)在过去 50 年的中非裂谷系的勘探中,前寒武系基岩的储层潜力被极大低估。Bongor 盆地基岩油气藏的发现成为主动勘探潜山的成功案例,开辟了一个新的油气勘探新成藏组合,也展示了中非裂谷系的勘探潜力。

(5)“宽频、宽方位、高密度”三维地震技术是钻前预测基岩储层的新技术,常规测井和井下成像测井技术等都是描述基岩储层的有效手段。基岩钻井最好钻入基岩 300 m 以上,才能真正评价基岩的储层特征和含油性。

## 参考文献

- [1] LANDES K K. Petroleum resources in basement rock[J]. AAPG Bulletin, 1960, 44(10): 1682-1691.
- [2] NELSON R A, BUENO E, MOLDOVANYI E P, et al. Production characteristics of the fractured reservoirs of the La Paz Field, Maracaibo Basin, Venezuela[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1791-1809.
- [3] CUONG T X, WARREN J K. Bach Ho field, a fractured granitic basement reservoir, Cuu Dank Long Basin, offshore SE Vietnam: a “Buried-hill” play[J]. Journal of Petroleum Geology, 2009, 32(2): 129-156.
- [4] WILLIAMS J J. Augila field, Libya, depositional environment and diagenesis of sediment reservoir and description of igneous reservoir[M]//Stratigraphic oil and gas fields. AAPG Memoir, 1972, 16: 623-632.
- [5] PETFORD N, MCCAFFREY K. Hydrocarbons in crystalline rocks: an introduction[M]. London: Geological Society, Special Publication, 2003, 214: 1-5.
- [6] 龚再升. 继续勘探中国近海盆地花岗岩储层油气藏[J]. 中国海上油气, 2010, 22(4): 213-220.
- [7] TRICE R. Basement exploration, West of Shetlands: progress in opening a new play on the UKCS[M]//CANNON S J C, ELLIS D. Hydrocarbon exploration to exploitation west of Shetlands. London: Geological Society, Special Publication, 2014, 397: 81-105. DOI: org/10.1144/SP397.3.
- [8] BELAIDI A, BONTER D A, SLIGHTAM C, et al. The Lancaster Field: progress in opening the UK's fractured basement play[C]//BOWMAN M, LEVELL B. Petroleum geology of NW Europe: 50 years of learning: proceedings of the 8th petroleum geology conference, 2016. DOI: org/10.1144/PGC8.20.
- [9] SALAH M G, ALSHARHAN A S. The Precambrian basement, a major reservoir in the rifted basin, Gulf of Suez[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998, 19: 201-222.
- [10] YOUNES A I, ENGELDER T, BOSWORTH W. Fracture distribution in faulted basement block, Gulf of Suez, Egypt [M]//COWARD M P, DALTABAN T S, JOHNSON H. Structural geology in reservoir characterization. London: Geological Society, Special Publication, 1998, 127: 167-190.
- [11] TONG X G, HUANG Z. Buried-hill discoveries of the Damin tun Depression in North China [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(4): 780-794.
- [12] SATYANARYANA P, SINHA P K, GUPTA D K, et al. Hydrocarbon prospectivity of the basement of Mumbai High Field[C]//Proceedings of 8th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, 2010: P-374.
- [13] 刘兴周. 辽河拗陷变质岩潜山内幕油气成藏规律初探[J]. 石油地质与工程, 2009, 23(1): 1-3.
- [14] 邓运华. 渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 253-261.
- [15] 谢文彦, 孟卫工, 李晓光, 等. 辽河拗陷基岩油气藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 146.
- [16] GIEDT N R. Unity Field-Sudan, Muglad rift basin, Upper Nile province [M] // BEAUMONT E A, FOSTER N H. Structural traps III: tectonic fold and fault traps. AAPG treatise of petroleum geology atlas of oil and gas fields. 1990: 177-197.
- [17] GUIRAUD R, MAURIN J. Early Cretaceous rifts of West and Central Africa: an overview[J]. Tectonophysics, 1992, 213: 153-168.
- [18] GENIK G J. Regional framework, structural and petroleum



- aspects of rift basins in Niger, Chad and the Central African Republic[J]. Tectonophysics, 1992, 213: 169-185.
- [19] GENIK G J. Petroleum geology of Cretaceous-Tertiary rift basins in Niger, Chad, and Central African Republic[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(8): 1405-1434.
- [20] 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.
- [21] 窦立荣, 潘校华, 田作基, 等. 苏丹裂谷盆地油气藏的形成与分布: 兼与中国东部裂谷盆地对比分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 255-261.
- [22] DOU L R, CHENG D S, LI Z, et al. Petroleum geology of the Fula sub-basin, Muglad Basin, Sudan[J]. Journal of Petroleum Geology, 2013, 36(1): 43-60.
- [23] 窦立荣. 苏丹迈努特盆地油气成藏机理和成藏模式[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(1): 50-57.
- [24] 童晓光, 徐志强, 史卜庆, 等. 苏丹迈鲁特盆地石油地质特征及成藏模式[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 1-5.
- [25] DOU L R, XIAO K Y, CHENG D S, et al. Petroleum geology of the Melut Basin and the Great Palogue Field, Sudan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(3): 129-144.
- [26] AWAD M Z. Petroleum geology and resource of the Sudan [M]. Berlin: Geozon Science Dedia UG, 2015: 427.
- [27] 窦立荣, 肖坤叶, 胡勇, 等. 乍得 Bongor 盆地石油地质特征及成藏模式[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 379-386.
- [28] GUIRAUD R, BOSWORTH W, THIERRY J, et al. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: an overview[J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43: 83-143.
- [29] BUMBY A J, GUIRAUD R. The geodynamic setting of the Phanerozoic basins of Africa[J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43: 1-12.
- [30] OGUNMOLA J K, AYOLABI E A, OLOBANIYI S B. Structural-depth analysis of the Yola Arm of the Upper Benue Trough of Nigeria using high resolution aeromagnetic data[J]. Journal of African Earth Sciences, 2016, 124: 32-43. DOI: org/10.1016/j. jafrearsci. 2016.09.008.
- [31] ABUBAKAR M B. Petroleum potentials of the Nigerian Benue Trough and Anambra Basin: a regional synthesis[J]. Natural Resources, 2014, 5(1): 25-58.
- [32] 窦立荣, 魏小东, 王景春, 等. 乍得 Bongor 盆地花岗质基岩潜山储层特征[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 897-904. DOI: 10.7623/syxb20150800.
- [33] 肖坤叶, 赵健, 余朝华, 等. 中非裂谷系 Bongor 盆地强反转裂谷构造特征及其对油气成藏的影响[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 712-180. DOI: 10.13745/j/esf/2014.03.020.
- [34] WINDLEY B F. The evolving continents[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1984: 399.
- [35] VAIL J R. Pre-Nubian tectonic trends in Northeastern Sudan[J]. Journal of the Geological Society, 1972, 128: 21-31.
- [36] SCHULL T J. Rift basins of interior sudan: petroleum exploration and discovery[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(10): 1128-1142.
- [37] YASSIN M A, HARIRI M M, ABDULLATIF O M, et al. Evolution history of transtensional pull-apart, oblique rift basin and its implication on hydrocarbon exploration: a case study from Sufyan Sub-basin, Muglad Basin, Sudan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 79: 282-299. DOI: 10.1016/j. marpetgeo. 2016.10.016.
- [38] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特征试验研究[J]. 岩石力学与工程力学. 2008, 27(11): 2206-2213.