

文章编号: 0253-9985(2004)06-0671-06

苏丹 Fula 油田油藏地质特征

聂昌谋^{1,2}, 陈发景¹, 白 洋², 汪望泉^{1,2}, 马鹏善¹

(1. 中国地质大学能源地质系, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发公司, 北京 100020)

摘要: 苏丹穆格莱德盆地 Fula 油田主要为较浅的白垩系 Aradeiba 组、Bentiu 组的普通稠油油藏和 Abu Gabra 组的稀油及天然气藏。主体区块 Fula North 断块 Bentiu 组油藏为一垒块上的断背斜块状油藏, 具有倾斜的油水界面。Aradeiba 组为浅湖沉积的层状薄砂岩的高孔、高渗储层, Bentiu 组为辫状河沉积的厚层块状砂岩的高孔、高渗储层, Aradeiba 组和 Bentiu 组油藏埋藏浅, 砂岩胶结疏松、物性好、易出砂、地层压力低, 原油具有密度大、粘度高、酸值高和油稠等特点。Abu Gabra 组的层状油气藏为三角洲前缘沉积砂岩、厚度薄、中孔、中渗、物性差, 具有断块小、储层相变快、油气高度低等特点。Abu Gabra 组油藏的形成主要受侧向封堵条件、储层的储集性等地质条件控制; 有效的生、储、盖组合、泥岩的侧向封堵是 Darfur 群、Bentiu 组油藏最主要的控制因素。

关键词: 穆格莱德盆地; Fula 油田; 地质特征; 稠油

中图分类号: TE111.2

文献标识码: A

Geological characteristics of Fula oilfield in Muglad basin, Sudan

Nie Changmou^{1,2}, Chen Fajing¹, Bai Yang², Wang Wangquan², Ma Pengshan¹

(1. China University of Geosciences, Beijing; 2. Exploration and Development Corporation, CNPC, Beijing)

Abstract: Fula oilfield in Muglad basin, Sudan, is mainly consisted of shallow ordinary heavy oil reservoirs in Cretaceous Aradeiba and Bentiu Formations and light oil and gas reservoirs in Cretaceous Abu Gabra Formation. The reservoir in Bentiu Formation in the major Fula North Block is a faulted anticlinal massive reservoir in a horst block with a dipping oil-water contact. In the Aradeiba Formation there are shallow lake facies thin sandstone reservoirs with high porosity and permeability. While braided river facies thick bedded massive sandstone reservoirs with high porosity and permeability are developed in the Bentiu Formation. The Aradeiba and Bentiu reservoirs are characterized by shallow burial depth, loose consolidation, good poroperm characteristics, high sand production and low formation pressure, and the crude oils are characterized by high density, high viscosity, high acid value and heavy oil. The layered reservoirs in Abu Gabra Formation are of delta front facies thin sandstone reservoirs with medium porosity and medium permeability, being characterized by small fault block, rapid facies change and low hydrocarbon column. The oil and gas accumulations in Abu Gabra Formation are mainly controlled by lateral sealing conditions and poroperm characteristics of the reservoirs. Effective source-reservoir-cap rock combination, and lateral blocking of mudstones are the main control factors of oil and gas accumulations in Darfur Group and Bentiu Formation.

Key words: Muglad basin; Fula oilfield; geological feature; heavy oil

苏丹穆格莱德(Muglad)盆地是具有代表性的非洲白垩纪伸展断陷盆地^[1~3], 具有丰富的油气聚集。目前, 中国参与合作的区块有 6 区和 1/2/4 区(项目合作区块编号), 其中 1/2/4 区 2003 年年产量已超过 $1\,400 \times 10^4$ t, 由中方独资的 6 区块目

前已建成投产, Fula 油田为 6 区主力油田, 具有从稀油到稠油和天然气的复杂的油气集聚特征, 从上到下油藏和储层类型变化也较大。系统研究 Fula 油田油藏地质特征对油田开发和在 6 区寻找类似油气藏具有重要的指导意义。

1 概况

穆格莱德盆地位于非洲苏丹南部、中非断裂带东端南侧,主体部分走向北西向。最北部呈长条状,主体部分为长方形,面积为 $11.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,是具有代表性的非洲白垩纪伸展断陷盆地。盆地构造单元划分为八凹三凸^[4],中非断裂带以北为近东西向构造体系,有四个凹陷三个凸起,该断裂带以南为北西向构造体系,Nugara 凹陷、Kaikang 凹陷和 Fula 凹陷是盆地的主体。

穆格莱德盆地经历了三期裂陷和沉积充填作用,从下至上沉积的地层分别为下白垩统 Abu Gabra 组和 Bentiu 组、上白垩统 Darfur 群(包括 Aradeiba,

Zarqa, Ghazal 和 Baraka 组)和 Amal 组、下第三系 Nayil 组、Tendi 组、Adok 组和第四系 Zeraf 组等。Abu Gabra 组至 Darfur 群沉积时期,湖盆经历了水进与水退的多期演化过程,Abu Gabra 组下部为盆地发育早期的快速充填沉积,以河流、扇三角洲沉积环境为主,Abu Gabra 组上部是湖盆扩张期的沉积产物,发育浅-深湖相的泥岩和三角洲、扇三角洲的灰白色砂岩和细砂岩,Bentiu 组发育在湖盆开始第二轮扩张的初期,沉积厚度大而稳定,为河流相沉积充填。Darfur 群的 Aradeiba 组沉积期为比较稳定的湖泊相沉积;向上到 Ghazal 组和 Baraka 组沉积时期,湖盆有所收缩,Amal 组沉积时期,湖水退出本区,发育了一套以碎屑岩为主的河流相沉积(图 1)。

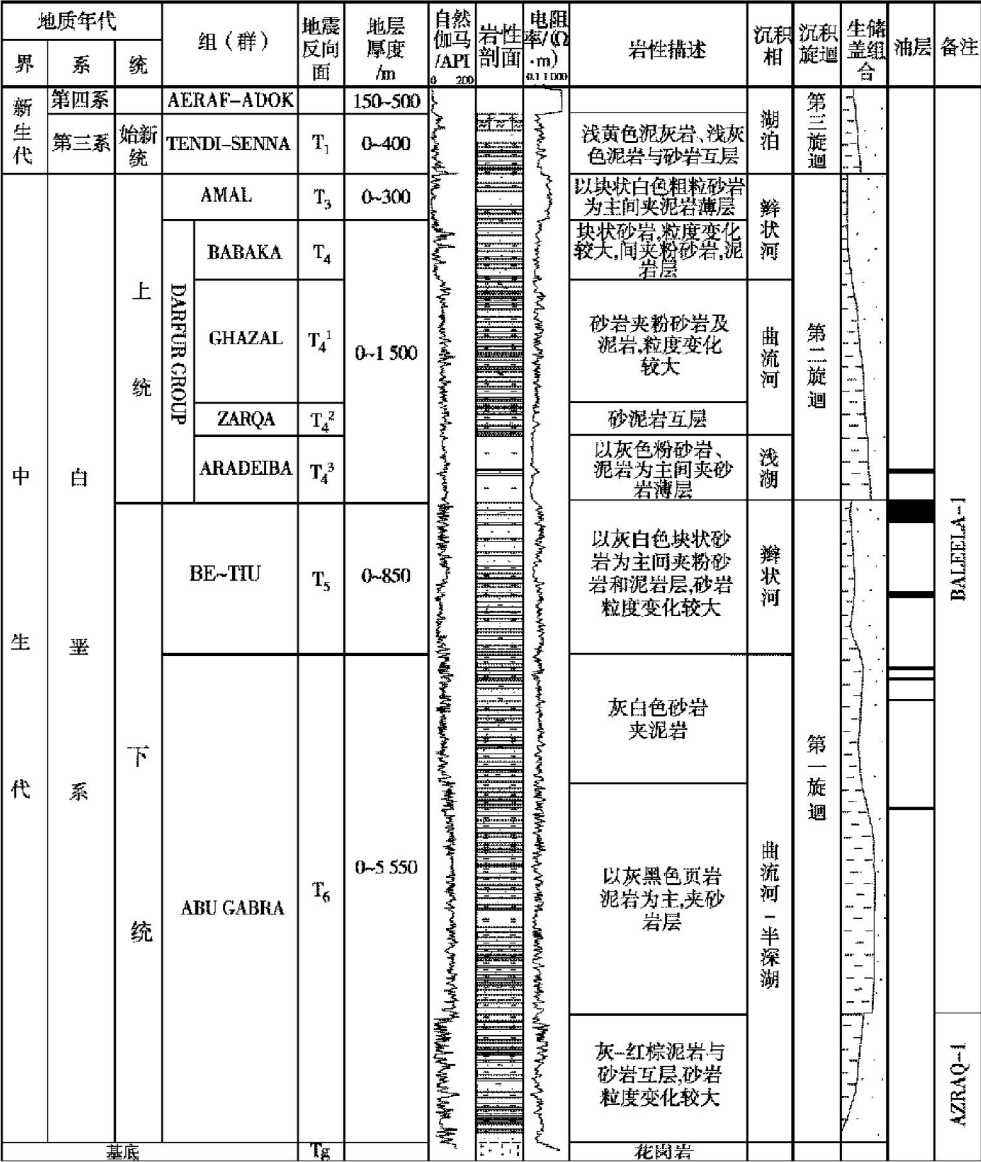


图 1 Fula 凹陷综合柱状图

Fig. 1 Composite stratigraphic column of Fula depression

2 构造与断裂

Fula 凹陷位于盆地的最东部, 属中非断裂带以南北北西向构造体系, 凹陷主体近南北向, 内部构造走向为北西向。面积 5 000 km², 呈长方形, 走向近南北, 东界为富东断裂, 西界以东掉的富西大断层与巴巴努萨隆起分开, 南界以北西-南东向的横向构造与凯康凹陷分开^[3]。该凹陷主体形态为西断东超箕状断陷。Fula 凹陷自西南向北东依次发育南部断阶带、南部次凹、中部构造带、北部次凹和北部断阶带“三正两负”5 个二级构造带, 呈斜列展布。Fula 和 Moga 油田位于中部构造带上。该构造带位于南部次凹以东、Fula1、2 号断层以西, 北西端倾没于南部次凹与北部次凹之间, 面积为 1 000 km²。Fula1 号断层是控制 Fula 凹陷中央断垒带形成演化的主控断层, 从结晶基底形成时就开始活动, 直至第四纪, 是一条北西走向的西南倾的正断层。剖面上断距具有下大上小的特点, 垂直断距为 70~870 m, 平面上具有中间断距大, 向两端减小的特点。受 Fula1 号、Fula2 号断层控制, 紧邻南部次凹分别形成了大 Fula 滚动背斜和 Moga 断鼻构造。同时还发育断背斜、断垒等构造 (图 2)^[5]。

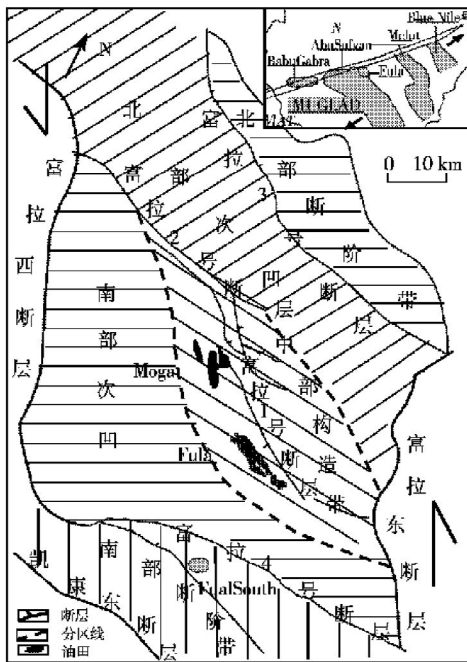


图 2 Fula 凹陷构造纲要图

Fig. 2 Structural outline map of Fula depression

Fula 油田位于中部构造带上, 由 Fula 油田北部 (FN) 、Fula 中部和 Fula 1 三个含油断块组成。主要含油断块 FN 断块位于 Fula 中部构造带上, 是滚动背斜上的一个地垒块, 为两个断层夹持的断背斜, 断层走向为北西-南东, 倾向分别为北东和南西向, 断层倾角近 70°。东北倾断层长约 9.9 km, 断距下大上小, 最大垂直断距为 150 m, 断距中间大两端小。西南倾断层长约 9.5 km, 断距下大上小, 最大垂直断距为 300 m, 断距西北方向大, 向东南方向减小。断层向下深切至 Abu Gabra 组, 向上中止于 Zeraf-Tendi 组。地层倾角为 3°~6°, 构造高点在 FN4 井附近, Bentiu 组顶埋深为 1 230 m (图 3~5)。

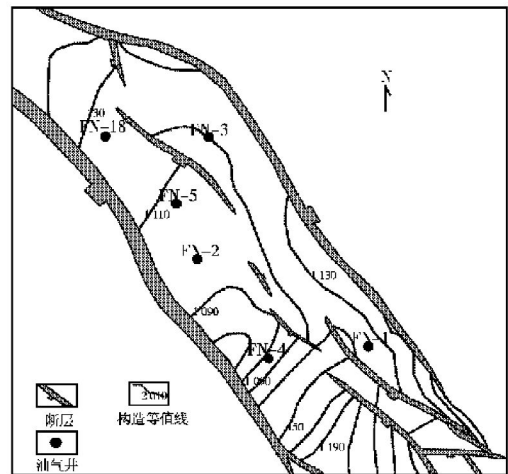


图 3 Fula North 油田 Bentiu 组顶面构造图

Fig. 3 Structural map of top Bentiu Formation in Fula North oilfield

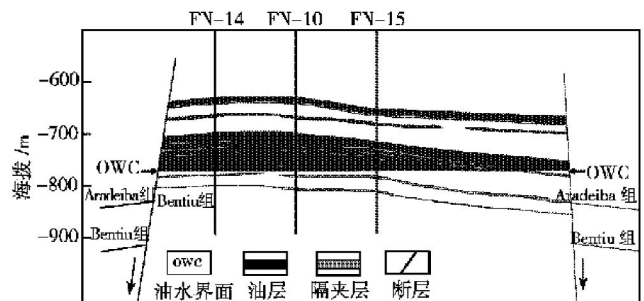


图 4 Fula North 油田 Aradeiba 和 Bentiu 油藏横剖面图

Fig. 4 Cross section showing Aradeiba and Bentiu oil reservoirs in Fula North oilfield

Abu Gabra 油藏由 Fula 油田北部的 FN4 断块、FN6 断块和 FN43 断块组成, FN4 断块为一小的断

背斜, Abu Gabra 组顶埋深为 1 721 m, 断层延伸长度 4~5 km, 断层走向为北西-南东向, 倾向南西, 断层倾角为 $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 。断层向下深切至 Abu Gabra 组, 向上中止于 Darfur 群。FN6 断块和 FN6 断块和 FN43 断块为反向断鼻, 断层走向为北西-南东, 倾向南西, 断层倾角为 52° 。延伸长度为 3~4 km。断层向下深切至 Abu Gabra 组, 向上中止于 Bentiu 组。

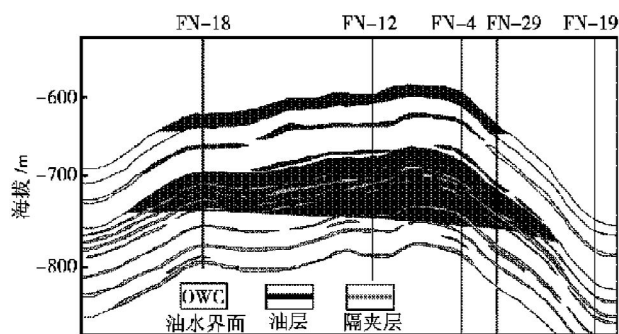


图5 Fula North 油田 Aradeiba 和 Bentiu 油藏剖面图
Fig. 5 Cross section showing Aradeiba and Bentiu oil reservoirs in Fula North oilfield

3 储层

3.1 Aradeiba 组

Aradeiba 组是一套分布广泛的浅湖相沉积, 一般为褐色、红褐色泥岩、粉砂质泥岩与薄砂岩互层。在 Fula 地区, Aradeiba 组厚度为 198~240 m, 砂岩含量为 10% 左右。可明显地分为 A, B, C, D, E, F 等 6 套砂体, 其中 A, B, C 和 D 砂体在全区广泛分布, 厚度 10~20 m。Fula 油田含油砂体为 Aradeiba D, E 和 F。Aradeiba D 砂层厚度为 10 m 左右, 埋深为 1 160~1 190 m, Aradeiba E 和 F 砂岩厚度较薄, 在局部范围分布, 在 Fula 油田仅分布在 FN 断块东北部的 FN3~FN43 井区周围。

砂岩主要为亚长石砂岩和长石砂岩, 从细砂岩到含砾砂岩变化, 粒度中值平均为 0.22 mm, 分选程度中到好, 孔隙类型主要为原生孔隙, 次生粒间孔隙较少, 孔隙大小为 100~200 μm , 孔隙连通性中到好, 颗粒接触关系为点接触和缝合接触。高岭石是主要的自生矿物, 在岩石中占 4%~20%, 在粘土矿物中超过 90%。其次为石英次生加大和较少的菱铁矿、黄铁矿和白云石。储层物性较好, 岩心分析孔隙度为 17.2%~36.4%, 平均为 31.7%, 渗透率为 $98.2 \times 10^{-3} \sim 3 577 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,

平均为 $739 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.2 Bentiu 组

Bentiu 组是一套辫状河至曲流河相沉积, 由厚层的块状中粗石英砂岩夹几层薄泥岩组成, 地层厚度为 380~487 m, 可分上、中、下三段, 相互之间有较厚的块状灰色泥岩夹层。油层主要分布在 Bentiu 组上段(B1), 平均地层厚度 111 m, 分为 A, B, C, D 和 E 5 个砂体, 单砂层厚度一般为 10~30 m, 夹层密度为 10.8%~42.6%, 平均为 26.1%, 夹层频数为每百米 8.1~18.8 条, 平均为每百米 13.3 条, 夹层厚度一般 2~3 m, 其中 B 和 C 砂体底部两个泥岩夹层在全区分布较稳定, 其他夹层仅局部分布, 延伸长度为 300~1 000 m。

砂岩主要为亚长石砂岩, 其次为长石砂岩和石英砂岩等, 从粉砂岩到砾岩都有分布, 但主要为较粗的含砾交错层理砂岩。粒度中值为 0.28 mm, 砂岩分选性从差到好都有, 但总体较 Aradeiba 组差。磨圆度为次棱角状到次圆状。颗粒间以点接触为主, 孔隙类型以原生孔隙为主, 孔隙的分选性不是很好, 为 0~400 μm 。自生矿物含量和分布特征与 Aradeiba 组砂岩相同。

岩心分析砂岩孔隙度为 19.7%~38.2%, 平均为 31.9%, 渗透率为 $87.1 \times 10^{-3} \sim 8 706 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 主要为 $2 960 \times 10^{-3} \sim 6 275 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩石成岩作用弱, 砂岩胶结疏松, 物性非常好, Fula1 井常规取心收获率仅 20%, FN12 井采用特殊取心工具岩心收获率才达 77%。

3.3 Abu Gabra 组

Abu Gabra 组是 6 区最早发现的含油层位, 为盆地早期沉积的砂泥岩互层, 相变快, 地层厚度为 1 000~3 300 m, 分为上、中、下三段, 油气层主要集中在上段, 上段地层厚度一般为 400~600 m, 以砂泥岩互层为主, 砂地比为 50%~70%, 砂岩以灰白色细砂-粉砂岩为主, 分选、磨圆好, 一般厚度在 1~10 m, 属于三角洲前缘相沉积, 根据旋回性分为 A, B, C, D, E 和 F 6 个砂体, 平面稳定性均较差。

砂岩主要为石英砂岩, 其次为长石岩屑砂岩。由于埋藏较深, 储层物性较差, Fula-Moga 地区无取心资料, 根据测井解释其孔隙度为 12%~20%, 大部分储层为中孔、中渗储层。中段则以大段的泥岩发育为特征, 夹有少量的薄层状细-粉砂岩, 厚度一般为 2~6 m, 储层物性差, 部分井段页岩发育, 属于半深湖-深湖相沉积, 在区域上分布较稳

定。Abu Gabra 组下段是河流相沉积的粗碎屑岩, 在 Fula 凹陷的大部分地区, 该段的埋深都超过了 3 000 m, 只能作为潜在的储层^[6]。

4 油气藏特征

4.1 形成条件

根据 Fula 凹陷构造演化史及油源地球化学分

组中段。Bentiu 组上段油藏是 Fula 凹陷的主力油藏, 占石油地质储量的 80%。由于断层的多次活动, 使深部烃源岩与上面的 Bentiu 组砂岩沟通, 生成的油气沿断层面往上大规模运移, 进入 Bentiu 组厚层的块状砂岩中。由于 Bentiu 组砂岩的厚度较大, 进入的油气首先垂向运移至 Bentiu 组上部, 当遇到 Bentiu 组顶部广泛分布的 Aradeiba 区域盖

其油气系统经历了两次地质热事件, 对应着两次成藏期, 早期以形成原生油藏为主, 后期以形成次生油藏为主。Amal 沉积时期, Abu Gabra 组油藏开始注入, 随着白垩纪末构造运动, 断层重新活动, Abu Gabra 组油藏重新分配, 二次运移后到达 Bentiu 组和 Darfur 群的圈闭中。由于剥蚀厚度增加, 油藏温度逐渐降低, 地表水侵入, 发生了生物降解作用, 对油藏有改造和破坏作用。Abu Gabra 组顶部也遭受了部分生物降解, 随着构造运动的停止, 盆地整体下沉, 到第三纪油气再次充注油藏, 但 Abu Gabra 油藏处于半开启状态, 部分油气进入上部 Bentiu 组和 Darfur 群。由于 Bentiu 组和 Darfur 群埋藏较浅, 一直遭受着生物降解作用从而形成稠油油藏。

Abu Gabra 组分为三个层序, 中部层序是主要的烃源岩形成和分布段, 是早白垩世早期水进体系域和高水位体系域沉积形成的半深湖-深湖相泥岩。在晚白垩世, 凹陷进入第二次构造旋回的强烈断陷时期, Abu Gabra 组的主力生油岩已进入成熟期, 开始大量生烃、排烃, 并大规模运移聚集。生成的油气可以直接向上运移, 进入上覆的 Abu Gabra 组砂岩中形成 Abu Gabra 中油藏或 Abu Gabra 上油藏。同时, 部分油气通过侧向或向下运移进入 Abu Gabra 组砂岩中, 形成 Abu Gabra 下段油藏。

Bentiu 组油藏组合包括 Bentiu 组上段和 Bentiu

形成 Darfur 群、Bentiu 组油藏最主要的控制因素, 它决定着 Darfur 群、Bentiu 组油藏的规模和质量;

⑤向下深切 Abu Gabra 地层的大断裂是油气纵向运移的主要通道, 向上通天的断层则是油藏保存的不利因素; ⑥油藏靠近大断裂, 断层活动期长, 保存条件差是浅层形成稠油油藏的主要原因之一。

4.2 油水分布

Aradeiba 组油藏是层状油藏, 单层具有统一的油水界面。FN 断块 Aradeiba D 砂岩的油水界面深度平均为海平面下 700 m。油层主要集中在 Aradeiba D 砂岩, 有效厚度平均为 7.6 m, Aradeiba 组油藏中部埋深 1 190 m。

由于受强大的活跃边底水作用, FN 断块 Bentiu 组块状油藏具有水动力圈闭特征和倾斜的油水界面, 由北到南从 FN18 井的海拔-1 150.5 m(海平面以下深度)变化到 FN29 井的海拔-1 175.6 m, 倾斜度为 0.007 6, Bentiu 组油藏中部埋深 1 270 m, 有效厚度与油柱高度有关, 在构造高部位最厚达 64.7 m, 平均有效厚度为 31 m。

FN 断块构造储层和油水关系与 1/2/4 区 Bamboo West 油藏非常相似。Bamboo West 油水界面倾斜度为 0.009 5。具有典型的水动力圈闭油藏特征, 目前的倾斜程度代表油藏的水动力环境^[8,9]。

Abu Gabra 油气藏聚集特征复杂, 控制 Abu Gabra 组油藏的地质因素主要是侧向封堵条件和

储集层的发育。目前所发现的 Abu Gabra 油气藏均处在(断)背斜构造和顺向断块上。如 FN 断块的 FN4 井就处在一个低幅度断背斜顶部,含油气层位为 Abu Gabra 组上段,井段长达 255 m (1 750~2 305 m),油气层 33 层。在与 FN4 井相距 400 m 完钻的 FN29 井,就有 10 层变为水层。其中在 Abu Gabra 组上段 F 层 FN4 井试油时日产油 63.9 m^3 ,气 $26.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,对应 FN29 井层位仅低 10 m,试油日产气 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和乳化油 73 m^3 。其中,乳化油含水高达 40%,说明该处位于气(水)边界附近。FN6 断块为顺向断块,含油面积仅 0.5 km^2 ,高部位 FN46 井 12 层油,5 层气,低部位相距 500 m 的 FN6 井仅有 2 层含油。Fula 地区的 Abu Gabra 油藏为典型的层状油气藏(图 6)。

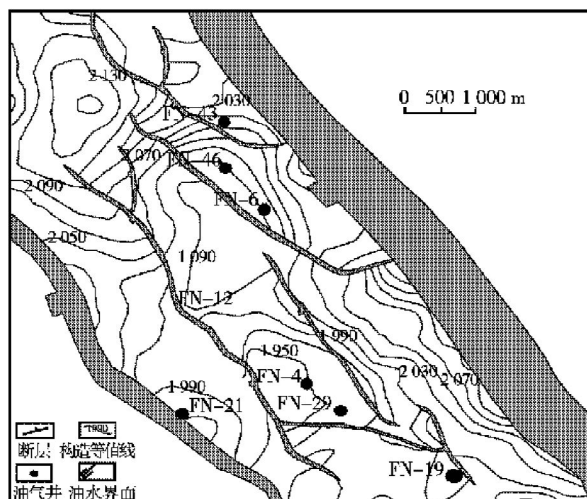


图 6 Fula North 油田 AG1E 面构造图

Fig. 6 Structural map of top Abu Gabra 1 E

4.3 温度和压力

该区油藏为正常的温度压力系统,Aradeiba 组和 Bentiu 组储层的压力系数平均 0.86~0.87, Abu Gabra 组为 0.93。Aradeiba 组和 Bentiu 组储层的温度梯度平均为每百米 2.4°C , Abu Gabra 为每百米 3°C 。

4.4 流体性质

Aradeiba 组原油密度为 0.92 g/cm^3 ,粘度为 $185 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。Bentiu 组原油密度为 0.94 g/cm^3 ,地下原油粘度为 $497 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 左右,酸值(每克原油消耗的

KOH) 高达 13.82 mg ,油藏油气比为 $1.25 \sim 2.49 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。油藏饱和压力为 $0.41 \sim 0.61 \text{ MPa}$,为普通稠油油藏。据流体性质分析,在 Bentiu 组油藏油水界面附近存在沥青垫^[10,11]。其活动的地下水造成原油遭受不同程度的生物降解而稠化^[12]。

Abu Gabra 组油藏原油密度为 $0.78 \sim 0.88 \text{ g/cm}^3$,油气比变化很大,从低于 $50 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 变化到纯气藏,如 FN6 井的油气比为 $46 \text{ m}^3/\text{m}^3$,对应的高部位的 FN46 井变为带气顶的油层。该区天然气甲烷含量为 $80\% \sim 94\%$,不含 H_2S 和有机硫,为正常压力气藏,气层类型有湿气、干气、凝析气等,储层渗透性好,气体绝对无阻流量高达 $0.61 \times 10^4 \sim 324 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

该区地层水水型均为 NaHCO_3 型, Abu Gabra, Aradeiba 和 Bentiu 组水矿化度平均为 1 858, 636 和 526 mg/L 。

参 考 文 献

- 1 吕延仓,何碧竹,王秀林,等.中非穆格莱德盆地 Fula 凹陷石油地质特征及勘探前景[J].石油勘探与开发,2001,28(3): 95~ 98
- 2 Chull T J. Rift basins of interior Sudan: petroleum exploration and discovery[J]. AAPG Bull, 1988, 72: 1 128~ 1142
- 3 魏永佩,刘池阳.位于巨型走滑断裂端部盆地演化的地质模型——以苏丹穆格莱德盆地为例[J].石油实验地质,2003,25(2): 130~ 136
- 4 张亚敏,陈发景.穆格莱德盆地形成特点与勘探潜力[J].石油与天然气地质,2002,23(3): 236~ 240
- 5 Yang Minghui, Liu Chiyang. Sedimentary fills and hydrocarbon potential of rift basin: a case study from the Muglad Basin, Sudan[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2001, 31(2): 162~ 166
- 6 白运台,宋济府,王立新,等.复杂水系下储层油气评价技术及应用[J].断块油气田,2001,8(5): 47~ 49
- 7 孙楠,谢洪森,郭捷,等.构造应力与油气藏生成及分布[J].石油与天然气地质,2000,21(2): 100~ 103
- 8 戴尔勃格.石油勘探实用水动力学[M].王学礼译.北京:石油工业出版社,1992. 84~ 124
- 9 叶加仁,郝芳,陈建渝.辽河油田大明屯油田流体动力场特征[J].石油与天然气地质,2001,22(2): 128~ 132
- 10 张敏,张俊,梅博文.塔里木盆地亚哈油气田沥青垫特征及成因[J].石油与天然气地质,1998,19(1): 49~ 58
- 11 王秀林,汪望泉,李素珍,等 M 盆地的构造特征及与油藏的关系[J].石油与天然气地质,2000,21(1): 76~ 79
- 12 陈章明,王振平,付广,等.油气藏内烃类再运移及原油性质的改造[J].石油大学学报,2000,24(4): 43~ 47