

文章编号: 0253-2697(2018)08-0869-07 DOI:10. 7623/syxb201808003

## Bongor 盆地 Baobab 地区潜山油气成藏期次

文志刚<sup>1</sup> 李 威<sup>1,2,3</sup> 窦立荣<sup>1,4</sup> 张光亚<sup>3</sup> 程顶胜<sup>3</sup> 杜业波<sup>3</sup> 胡 瑛<sup>3</sup> 王 利<sup>3</sup>

(1. 长江大学资源与环境学院 油气资源与勘探技术教育部重点实验室 湖北武汉 430100;  
2. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100028; 3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083;  
4. 中国石油天然气勘探开发公司 北京 100034)

**摘要:** Baobab 潜山油藏是乍得 Bongor 盆地北部斜坡的主力油藏。以 Baobab C-2 井潜山油藏为例,从烃源岩生排烃史、构造热演化史、流体包裹体中含油包裹体颗粒指数特征、显微荧光与测温技术等方面分析其油气成藏史。埋藏史的分析结果表明, Baobab 地区 Mimosa 组 + Prosopis 组主力烃源岩在约 90 Ma 开始生烃,并于约 80 Ma 开始排烃,晚白垩世末约 66 Ma 达到生排烃高峰期,之后由于构造抬升作用,生烃作用停止。Baobab C-2 井潜山油藏经历了晚白垩世 80~55 Ma 的原生油气充注阶段和古近纪约 30 Ma 的次生油气成藏事件。在晚白垩世期间石油的充注表现为充注强度程度不同的连续过程,开始于晚白垩世 80 Ma 的石油充注事件以较低成熟度原油为主,而发生于约 70 Ma 的第二期石油充注事件则以成熟油气为主,该期充注事件是形成现今油气分布格局的主要贡献者。古近纪发生的次生成藏事件代表因构造作用而引起油气调整。

**关键词:** 基岩; 潜山; 油气成藏年代; Bongor 盆地; 乍得

**中图分类号:** TE122.1 **文献标识码:** A

### Buried-hill hydrocarbon accumulation stage of Baobab area in Bongor Basin

Wen Zhigang<sup>1</sup> Li Wei<sup>1,2,3</sup> Dou Lirong<sup>1,4</sup> Zhang Guangya<sup>3</sup> Cheng Dingsheng<sup>3</sup> Du Yebo<sup>3</sup> Hu Ying<sup>3</sup> Wang Li<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Yangtze University; Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of the Ministry of Education, Hubei Wuhan 430100, China; 2. CNOOC Research Institute Co. Ltd., Beijing 100028, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100034, China)

**Abstract:** Baobab buried-hill reservoir is the major oil reservoir in the north slope of Bongor Basin. Taking Baobab C-2 buried-hill reservoir as an example, its hydrocarbon accumulation history is analyzed and studied in terms of the hydrocarbon generation and expulsion history of source rocks, tectonic thermal evolution history, the GOI characteristics of fluid inclusion, micro-photoluminescence, thermometric techniques and etc. Through studying burial history, it is found that the major source rocks in Mimosa Formation and Prosopis Formation of Baobab area began to generate hydrocarbon at about 90 Ma, and started to expel hydrocarbon at about 80 Ma. At about 66 Ma in the Late Cretaceous, hydrocarbon generation and expulsion reached the peak; afterwards, hydrocarbon generation ceased due to tectonic uplift. Baobab C-2 buried-hill reservoir experienced the primary oil-gas charging stage at about 80-55 Ma in the Late Cretaceous and the secondary hydrocarbon accumulation event at about 30 Ma in Paleocene. In the late Cretaceous period, the oil charging was a continuous process with different degrees of charging intensity. The oil charging event beginning at 80 Ma was dominated by low-maturity crude oil; the second stage of oil charging event happening at 70 Ma was dominated by mature oil and gas, and made a major contribution to the formation of current oil-gas distribution pattern. The occurrence of secondary accumulation event in Paleocene represents the oil-gas adjustment event resulted from tectonism.

**Key words:** bed rock; buried-hill; hydrocarbon accumulation age; Bongor Basin; Chad

**引用:** 文志刚, 李威, 窦立荣, 张光亚, 程顶胜, 杜业波, 胡瑛, 王利. Bongor 盆地 Baobab 地区潜山油气成藏期次[J]. 石油学报, 2018, 39(8): 869-875.

**Cite:** WEN Zhigang, LI Wei, DOU Lirong, ZHANG Guangya, CHENG Dingsheng, DU Yebo, HU Ying, WANG Li. Buried-hill hydrocarbon accumulation stage of Baobab area in Bongor Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(8): 869-875.

油气充注成藏及改造是含油气盆地油气藏形成与功与否至关重要。传统的油气充注期次的研究方法主要基于盆地分析、生排烃理论、流体宏观表现形式、圈

**基金项目:** 国家科技重大专项(2011ZX05029, 2016ZX05029-005)、中国石油天然气股份有限公司科技专项(2013D-0902)资助。

**第一作者及通信作者:** 文志刚, 男, 1965 年 7 月生, 1985 年获江汉石油学院学士学位, 1997 年获中国地质大学(北京)博士学位, 现为长江大学教授、博士生导师, 主要从事有机地球化学及石油地质学研究。Email: wzg728@sina.com

闭形成期法、主要排烃期法和饱和压力分析法等。传统的地质判断方法简便、快捷,但较为粗略,不能对油气藏形成期次及过程进行更为细致地刻画。通过精细的微观地球化学方法研究油气在岩层中留下的“痕迹”不失为一种直观有效的分析方法。油气包裹体是微量化的油藏,有效地记录了油气运移过程中的成分、温度和压力等信息,是解决油藏演化问题的重要手段<sup>[1-9]</sup>。

乍得 Bongor 盆地前寒武系基岩潜山油藏的发现打开了非洲陆上油气勘探的新领域,形成了现今潜山一下白垩统多层系含油的局面。迄今为止,对于 Bongor 盆地潜山油藏的充注期次、时间及成藏过程等问题,一直是该区油气勘探和动态成藏机理研究备受关注的议题。据此,选择 Baobab 地区潜山油流井 Baobab C-2,纵向上系统采集基岩样品,在宏观地质分析基础上通过对流体包裹体的细致分析,结合埋藏史、磷灰石裂变径迹分析(AFTA)构造热史对研究区的油气成藏机理进行研究,探究该类潜山油藏的形成过程,以期为该区多期次动态成藏过程的认识提供重要依据。

1 地质概况

Bongor 盆地位于西非裂谷系最东南端,是在前寒武系结晶基底之上受中非剪切带拉张一走滑作用而发育起来的中生代—新生代陆相裂谷盆地,盆地呈 NWW 向展布,面积约  $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,由北向南划分为北部斜坡、中央坳陷、南部隆起、南部坳陷(图 1)。在北部斜坡近百口井钻遇基底,揭示基岩主要为花岗岩、混合花岗岩、片麻岩等<sup>[10]</sup>。沉积地层主要为下白垩统和新生界(古近系、新近系),纵向上缺失上白垩统。关于上白垩统的缺失,曾有学者认为是桑顿事件(约 80Ma)造成的<sup>[11-12]</sup>,但通过区域对比分析,晚白垩世在 Doba、Doseo 等盆地都发育上千米厚的地层,中间不整合不明显,据此推测,桑顿事件不可能是造成 Bongor 盆地区域强烈抬升剥蚀的原因。

Baobab 地区位于 Bongor 盆地北部斜坡,晚白垩世至古近纪遭受强烈抬升反转,剥蚀作用最显著,剥蚀总厚度普遍大于 1 km。依据古生物、钻井、地震资料将下白垩统划分出 5 个地层组:Prosopis 组(P 组)、Mimosa 组(M 组)、Kubla 组(K 组)、Ronier 组(R 组)和 Baobab 组(B 组),其中 M+P 组广泛发育厚层暗色泥岩,有机质丰度高、以 I 型—II 型为主、处于成熟阶段,是盆地主要的烃源岩层段<sup>[13-15]</sup>。

Baobab C-2 井从 536 m 开始进入基岩段,从过井剖面(图 2)中可以看出 Baobab C-2 井基底隆升显著,位于最高点,其上广覆厚层 M+P 组泥岩,在风化、裂隙作用

下基岩储层性能大幅提升,形成丰富的潜山油气藏。宴立荣等<sup>[10]</sup>利用测井、取心及薄片等资料从纵向上将 Baobab C-2 井潜山划分为 4 个带:风化淋滤带、缝洞发育带、半充填裂缝发育带和致密带,各个潜山储层带的地震、测井响应特征不同,物性也各有特色。钻井过程中在基岩段油气显示十分活跃,对不同深度进行了 10 次取心,为储层和成藏研究提供了可靠的岩心样品。

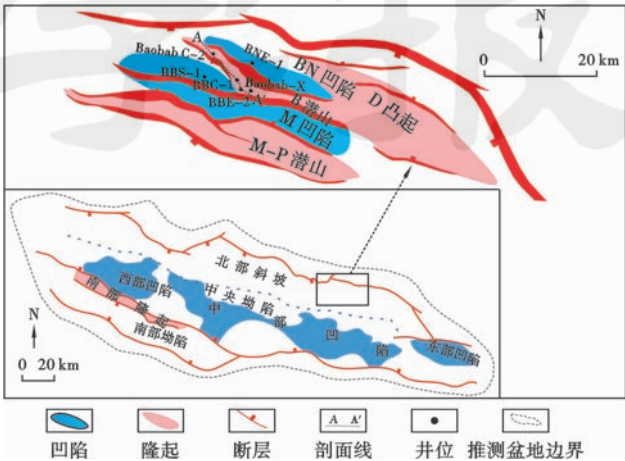


图 1 Bongor 盆地构造单元和潜山油田分布(据文献[10]修改)  
Fig. 1 Division of tectonic unit and distribution of buried-hill oilfields in Bongor Basin

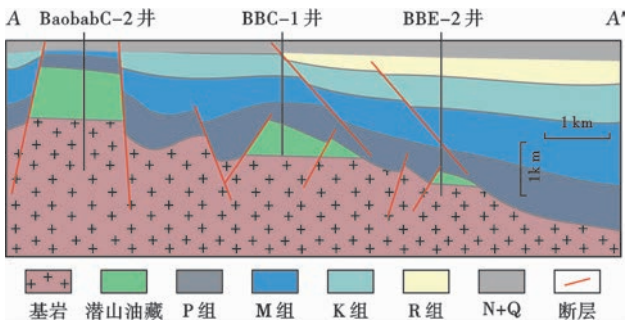


图 2 Baobab C-2 井潜山油藏剖面  
Fig. 2 Buried-hill reservoir profile of Well Baobab C-2

2 样品及实验条件

实验样品采自 Baobab C-2 井的厚层泥岩之下的 9 块油浸基岩和 6 块普通基岩,对油浸基岩进行地球化学分析,针对 15 块基岩进行包裹体分析,同时选取 Baobab-X 井沉积岩及基岩岩屑共 6 块样品进行裂变径迹 AFTA 实验,对其中基岩样品进行 AFTA 分析。

有机地化实验分析在长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室完成。通过抽提、族组分离,饱和烃组分在安捷伦 6890 色谱仪及安捷伦 5975i 质谱仪上进行气相色谱和气相色谱-质谱分析;包裹体分析

在西北大学实验室完成,流体包裹体观测采用的实验设备为偏光显微镜、显微-红外-色谱联用仪,流体包裹体测温使用的仪器是 Linkam-350 显微冷热台;AFTA 由澳大利亚 Geotrack International Pty Ltd 完成,年龄计算采用 Zeta 常数法,年龄标准样品选用国际裂变径迹定年标准化工作组推荐的标准样<sup>[16]</sup>。

3 烃源岩生排烃史

地层埋藏热演化史决定了烃源岩的生排烃历史及相应的含油气流体活动历史。采用镜质体反射率约束校正的方法对 Baobab N 凹陷和 Mimosa 凹陷的地层埋藏史与热演化史进行了模拟。分别选取位于 Mimosa 凹陷中的 BBS-1 井和位于 Baobab N 凹陷中的 BNE-1 井(图 1)进行生排烃史恢复,地层剥蚀厚度主

要参考前人工作<sup>[17]</sup>,2 口井的剥蚀厚度约为 1 300 m,选取 EASY  $R_o$ % 法,利用实测  $R_o$  数据约束,运用 PetroMod 软件进行模拟。模拟结果表明(图 3),研究区 M + P 组主力烃源岩在早白垩世末期开始生烃( $R_o$  = 0.5%),在晚白垩世持续埋藏,地温逐渐升高,晚白垩世末期 Bongor 盆地发生火山活动,毗邻 Baobab 地区的 Ronier 地区火山岩年龄分布在 66~52 Ma<sup>[18]</sup>,在高温流体活动影响下,烃源岩热演化达到生排烃高峰,随后在构造运动影响下,Baobab 地区抬升明显,烃源岩生烃作用逐渐停止。在烃源岩热演化史上表现为(图 3): Baobab 地区 M + P 组烃源岩在晚白垩世早期(约 80 Ma) $R_o$  均达到 0.6%,开始排烃,至晚白垩世末期(约 66 Ma)达到生排烃高峰,晚白垩世末以来区域性的构造抬升使得烃源岩生烃逐渐停止。

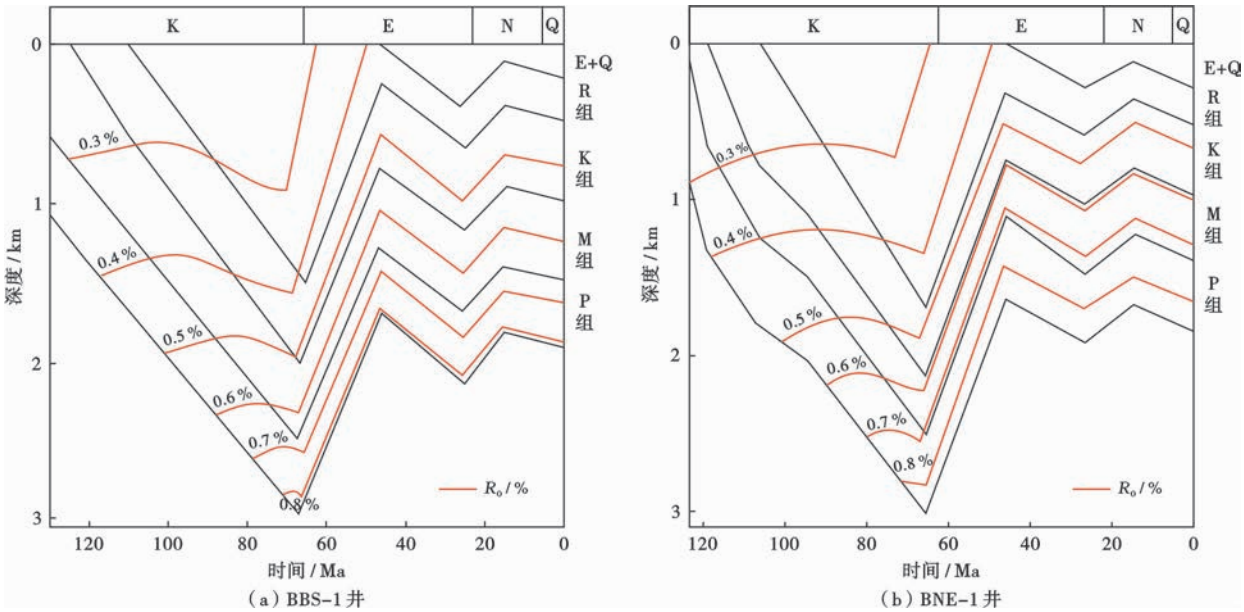


图 3 Baobab N 凹陷—Mimosa 凹陷埋藏史与热演化史  
Fig. 3 Burial and thermal evolution history of Baobab N sag and Mimosa sag

4 油气成藏期次及年代

4.1 烃类流体包裹体特征

选取含油包裹体颗粒指数  $GOI \geq 5\%$  的样品<sup>[19]</sup>并按照荧光颜色、赋存矿物产状及气液比等特征将 Baobab C-2 井烃包裹体分为 2 类:第 1 类包裹体主要分布在石英脉及石英加大边中,烃类荧光颜色主要为橘黄色;第 2 类包裹体主要赋存于穿过石英及其加大边的微裂隙中,烃类荧光颜色主要为黄绿色。两类包裹体气液比均小于 5%,按照成岩序次第 2 类包裹体赋存体“穿过石英及其加大边的微裂隙”晚于第 1 类包裹体赋存矿物“石英脉及石英加大边”。利用傅里叶变换显微红外光谱法分别对不同深度样品中两种烃类包裹体进行

测试;其中, $CH_2/CH_3$  代表亚甲基和甲基的比值, $X_{inc} = [\sum I(CH_2)/\sum I(CH_3) - 0.8]/0.09$  代表有机质烷基链碳原子数, $X_{std} = [\sum I(CH_2)/\sum I(CH_3) + 0.1]/0.27$  代表有机质正烷烃直链碳原子数。随演化程度的增加  $CH_2/CH_3$ 、 $X_{inc}$ 、 $X_{std}$  等参数逐渐变小,据此可以判断油气的成熟程度或油质类型的差异<sup>[20-21]</sup>。第 1 类橘黄色荧光的油包裹体  $CH_2/CH_3$  分布范围为 9.93~18.84,  $X_{inc}$  和  $X_{std}$  分别介于 90.32~200.42 和 33.44~70.14,表明成熟度相对较低。第 2 类黄绿色荧光的油包裹体的  $CH_2/CH_3$ 、 $X_{inc}$ 、 $X_{std}$  分别介于 1.89~6.78、12.12~70.92 和 7.37~28.64,表明甲基相对较丰富,链烃相对较短,成熟度相对较高(表 1)。由此,利用红外光谱参数,初步判断 Baobab C-2 井潜山油藏



具有 2 期油气充注,且充注的油气性质不完全一致,第 1 类包裹体为第 1 期油气充注,第 2 类包裹体代表第 2 期油气充注。

表 1 Baobab C-2 井包裹体荧光参数

Table 1 Inclusion fluorescence parameters of Well Baobab C-2

井深/m	橘黄色荧光包裹体(第 1 类)			黄绿色荧光包裹体(第 2 类)		
	CH <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub>	Xinc	Xstd	CH <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub>	Xinc	Xstd
534.50	9.96	101.80	37.27	1.89	12.12	7.37
534.70	15.09	158.74	56.25	6.63	70.92	28.64
536.10	16.04	169.26	59.75	6.11	59.00	23.00
548.50	14.54	152.00	54.00	5.25	47.22	19.07
549.50	13.05	136.14	50.71	5.81	55.61	21.87
785.50	18.84	200.42	70.14	6.78	66.41	25.47
1 106.09	9.93	90.32	33.44	5.77	44.04	18.01
1 107.15				5.36	50.72	20.24
1 107.34				5.50	52.19	20.73

4.2 流体包裹体均一温度特征

包裹体世代划分与测温数据相结合的分期统计是确定包裹体宿主岩层油气充注期次和时间的重要途径。多期次油气成藏过程形成的不同世代包裹体均一温度往往具有多峰态的分布特征,单一“峰温”基本代表了特定油气充注成藏时期所捕获流体包裹体,不同“峰温”往往指示不同充注成藏期次<sup>[22]</sup>。

Baobab C-2 井潜山储层纵向上与烃类包裹体共生的盐水包裹体丰富,按照烃类包裹体的分类分期方案,将伴生的盐水包裹体均一温度进行统计,发现赋存于石英脉及石英加大边中的第 1 期包裹体均一温度只存在单一的 115~120℃峰温,而赋存于穿过石英及其加大边的微裂隙中第 2 期包裹体均一温度存在两个“峰温”,主峰温为 125~130℃、次峰温为 85~90℃,且两峰之间不连续(图 4)。第 1 期与第 2 期包裹体高温段呈现出双峰态、分段连续的分布类型,且自生矿物“峰温”低于构造缝隙中“峰温”,同时在第 2 期构造缝中存在一期 85~90℃的低峰温值,而在自生矿物中低温段连续分布但并未有峰温出现,两者之间的对比关

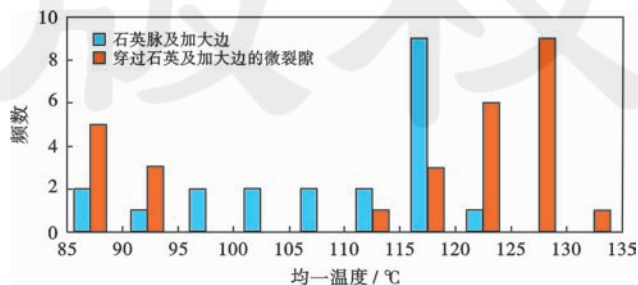


图 4 Baobab C-2 井盐水包裹体均一温度分布

Fig. 4 The homogenization temperature distribution of fluid inclusions of Well Baobab C-2

系表明,构造缝隙中低峰温值可能代表一次相对独立的油气成藏事件。

4.3 油气成藏期次及时间

运用流体包裹体结合埋藏史-热史分析成藏期次及年代是最常见的方式。流体包裹体相对定年,除了取决于测温数据及其世代分期的准确性之外,包裹体宿主岩层的埋藏史、构造热演化史恢复也是非常重要的影响因素<sup>[22]</sup>。Bongor 盆地经历了多旋回的沉积—构造演化与后期改造,构造活动复杂,因此从埋藏史和 AFTA 热史两方面综合进行成藏期次及年代的判断,更精确地获得油气成藏期次和时间。Baobab-X 井位于 Baobab C-2 井 ES 向,属于相同构造区带(图 1),实验所测基岩 AFTA 径迹长度为 11.21 ± 0.40 μm,年龄值为 1.3 ± 0.7 Ma、明显小于前寒武系基岩年龄,代表裂变径迹经历了完全退火,所测年龄和长度不代表母岩信息,主要表征后期构造热事件<sup>[23]</sup>。

Baobab 地区 Baobab-X 井 AFTA 反演的中生代—新生代构造热演化史基本相似即主要为“三降两升”(图 5):早白垩世早期(132~124 Ma)快速沉降增温和早白垩世中期—晚白垩世末(124~65 Ma)期间的埋藏增温过程,即持续退火阶段,该阶段基底长期接受沉积埋藏,是以埋藏增温为主的构造热史时期,形成一个热流高峰期,古地温梯度为 30℃/km,烃源岩大量生排烃,是油气形成的主要阶段;晚白垩世末—古近纪期间(66~40 Ma)为构造抬升冷却阶段,剥蚀厚度达到 1500 m 以上;古近纪末期—新生纪早期(40~20 Ma),盆地进入短暂构造沉降接受沉积埋藏阶段,且位于 60~120℃退火带;新近纪阶段,盆地短暂进入快速抬升剥蚀阶段,随即进入沉降阶段。

综合利用包裹体与埋藏史、热史以及烃源岩生排烃史分析油气成藏期次及年代(图 5):发育于石英脉及石英加大边中的第 1 期包裹体均一温度“峰温”115~120℃,在埋藏史及热史图上对应的充注时间约为 80 Ma;赋存于穿过石英及其加大边的微裂隙中第 2 期包裹体高“峰温”段 125~130℃,同样在埋藏史及热史图上对应的充注时间一致(约 70 Ma),均位于生排烃时间内(图 3)。主力烃源岩地层 M+P 组直接覆盖在潜山之上,表明充注时间的有效性。两次充注高峰值,分别代表了潜山储层在中生代—新生代多旋回沉降埋藏增温过程经历的两期原生油气充注成藏事件。构造缝隙中发育的 85~90℃低峰温段应该属于后期抬升改造阶段捕获包裹体的温度记录,对应在埋藏史及裂变径迹热演化史中为古近纪晚期约 30 Ma,推测该时期代表的是一期油气调整事件。

4.4 主要油气充注阶段

荧光的颜色与强度主要与有机组成的分子结构类型有关,有机包裹体和原油的荧光特征反映了有机质的成分特征及热演化程度,利用红外光谱参数

$\text{CH}_2/\text{CH}_3$ 、 $X_{\text{inc}}$ 、 $X_{\text{std}}$  与油气成熟度的关系标准<sup>[24-26]</sup>,对不同的烃类包裹体成熟度进行分类[表 1、图 6(a)、图 6(b)]表明,发育于石英脉及石英加大边中的第 1 期包裹体,以橘黄色荧光为主,代表低成熟油气充

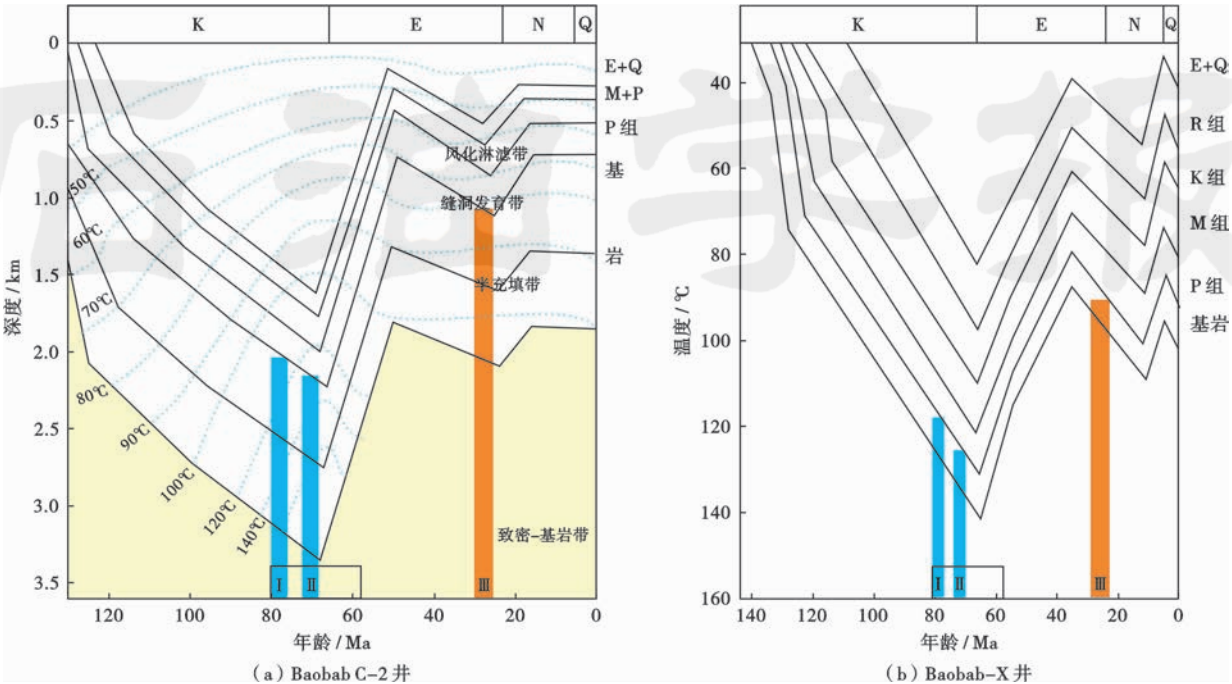


图 5 Baobab 地区埋藏史、构造热史

Fig. 5 Burial and tectonic thermal evolution history of Baobab area

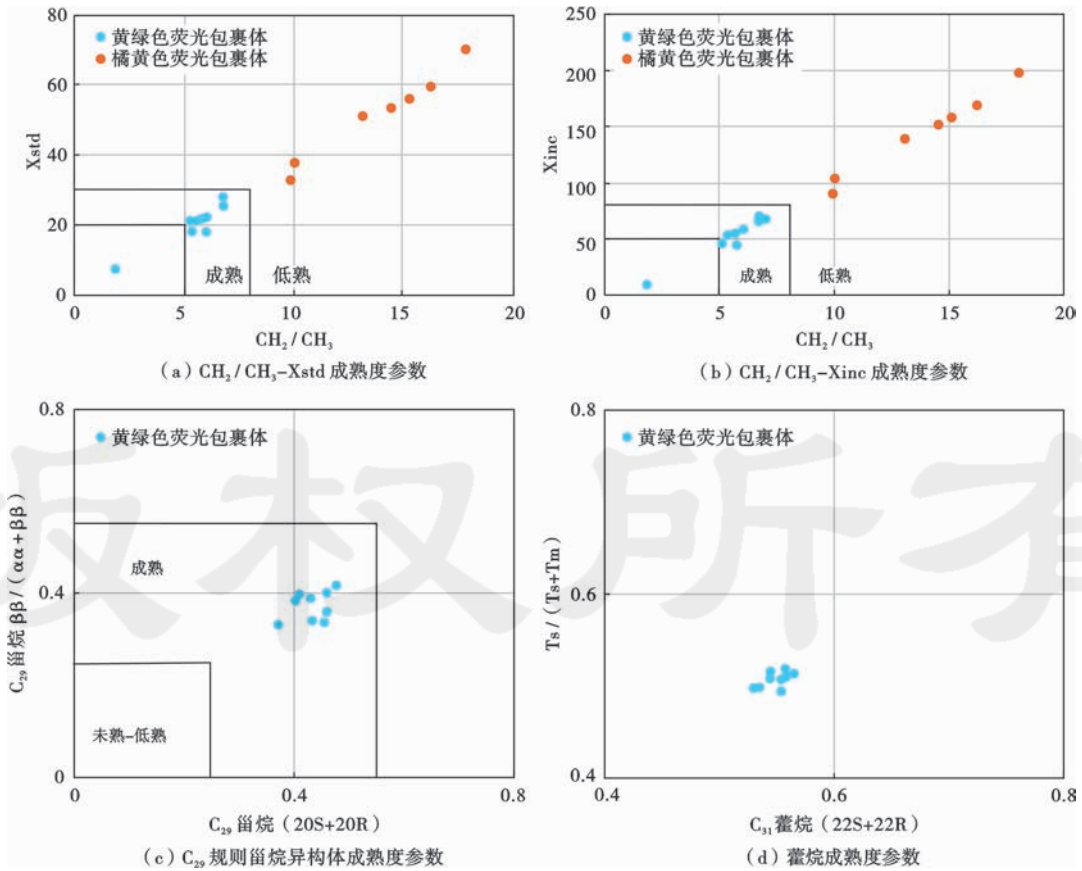


图 6 Baobab C-2 井成熟度参数对比

Fig. 6 Comparison of maturity parameters of Well Baobab C-2

注;赋存于切穿自生矿物的构造缝隙中的第 2 期黄绿色荧光包裹体主要为成岩作用期间捕获的成熟烃类。潜山样品  $C_{29}$  甾烷异构体  $20S/(20S+20R)$  比值分布范围为 0.37~0.48,平均值为 0.44; $C_{29}$   $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$  比值分布范围为 0.34~0.42,平均值为 0.37; $C_{31}$  藿烷异构体  $22S/(22S+22R)$  样品参数值集中分布在 0.54~0.57,均说明现今原油为成熟原油<sup>[27]</sup>[图 6(c)、图 6(d)]。古、今原油成熟度参数对比说明发生于约 70 Ma 的第 2 期成熟油气充注事件对现今油藏的贡献更大。

对岩心进行色谱-地质地球化学分析,正构烷烃遭受降解,但藿烷、甾烷系列正常分布,且未发现 25-降藿烷,表明降解级别在 2~3 级。

同时地球化学分析也发现所取的潜山样品均发生降解,色谱图基线鼓包较明显,正构烷烃遭受破坏,但未出现 25-降藿烷,藿烷、甾烷系列未受降解影响,降解级别达到 3~4 级。充分说明在约 70 Ma 的第 2 期成熟油气充注之后,晚白垩世末—古近纪以来发生的构造抬升作用对油藏产生了明显的调整改造作用,也印证了对 Baobab 地区古近纪以来存在一期油气次生调整成藏事件的认识。

## 5 结 论

(1) Baobab 地区经历了晚白垩世—古近纪、古近纪—新近纪 2 次大规模的构造演化运动,且以第 1 次构造反转为主。Baobab C-2 井基岩为隆起区,在 M+P 组沉积前经过风化剥蚀作用形成大量的构造裂缝及风化壳,泥岩为主的 M+P 组沉积后形成了良好的潜山圈闭。早白垩世末期 M+P 组烃源岩开始生烃,初始低成熟油气开始注入潜山圈闭中,随着埋深的增加,烃源岩进入成熟阶段,紧随其后成熟油气大量注入潜山圈闭中形成高峰成熟油藏,油气充注时间约从 80 Ma 持续到 55 Ma。

(2) 晚白垩世末发生强烈的构造反转作用,白垩纪沉积物被大量剥蚀,生烃作用逐渐停止,构造作用形成大量的断裂和裂缝,并使得油藏遭受破坏,原油生物降解作用普遍发生,降解级别达到 2~3 级。古近纪后期开始新的沉降作用,形成良好的封闭条件,古油藏原油沿着构造反转作用形成的断裂和裂缝向构造高部位运移调整形成新的油藏,即发生一期次生调整成藏事件。

(3) Bongor 盆地潜山圈闭形成时间早,潜山带毗邻生油凹陷,油源充足。但后期构造活跃,油藏往往发生再运移改造调整,优越的盖层封堵性往往是形成油藏的重要因素。

## 参 考 文 献

- [1] PARNELL J, MIDDLETON D, CHEN Honghan, et al. The use of integrated fluid inclusion studies in constraining oil charge history and reservoir compartmentation; examples from the Jeanne d'Arc Basin, offshore Newfoundland[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(5): 535-549.
- [2] BOURDET J, PIRONON J, LEVRESSE G, et al. Petroleum accumulation and leakage in a deeply buried carbonate reservoir, Nispero field (Mexico) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 126-142.
- [3] BURRUSS R C, CERCONE K R, HARRIS P M. Fluid inclusion petrography and tectonic-burial history of the Al Ali No. 2 well: evidence for the timing of diagenesis and oil migration, northern Oman Foredeep[J]. *Geology*, 1983, 11(10): 567-570.
- [4] SWARBRICK R E. Reservoir diagenesis and hydrocarbon migration under hydrostatic palaeopressure conditions[J]. *Clay Minerals*, 1994, 29(4): 463-474.
- [5] LIU K Y, BOURDET J, ZHANG B S, et al. Hydrocarbon charge history of the Tazhong Ordovician reservoirs, Tarim Basin as revealed from an integrated fluid inclusion study[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(2): 183-193.
- [6] MARCHAND A M E, SMALLEY P C, HASZELDINE R S, et al. Note on the importance of hydrocarbon fill for reservoir quality prediction in sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(9): 1561-1571.
- [7] GEORGE S C, KRIEGER F W, EADINGTON P J, et al. Geochemical comparison of oil-bearing fluid inclusions and produced oil from the Toro sandstone, Papua New Guinea[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(3/4): 155-173.
- [8] LIU K Y, EADINGTON P. Quantitative fluorescence techniques for detecting residual oils and reconstructing hydrocarbon charge history[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(7): 1023-1036.
- [9] BODNAR R J, BETHKE P M. Systematics of stretching of fluid inclusions I: fluorite and sphalerite at 1 atmosphere confining pressure[J]. *Economic Geology*, 1984, 79(1): 141-161.
- [10] 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.  
DOU Lirong, WEI Xiaodong, WANG Jingchun, et al. Characteristics of granitic basement rock buried-hill reservoir in Bongor Basin, Chad[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(8): 897-904.
- [11] GUIRAUD R, MAURIN J C. Early cretaceous rifts of western and central Africa: an overview[J]. *Tectonophysics*, 1992, 213(1/2): 153-168.
- [12] 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.
- [13] 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.  
DOU Lirong, XIAO Kunye, HU Yong, et al. Petroleum geology and a model of hydrocarbon accumulations in the Bongor Basin, the Repub-



- lic of Chad[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 379-386.
- [14] 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.
- DOU Lirong, PAN Xiaohua, TIAN Zuoji, et al. Hydrocarbon formation and distribution of rift basins in Sudan: a comparative analysis of them with rift basins in East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(3): 255-261.
- [15] 宋红日, 窦立荣, 肖坤叶, 等. Bongor 盆地油气成藏地质条件及分布规律初探[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(6): 762-767.
- SONG Hongri, DOU Lirong, XIAO Kunye, et al. An exploratory research on geological conditions of hydrocarbon pooling and distribution patterns of reservoirs in the Bongor Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(6): 762-767.
- [16] GREEN P F, DUDDY I R. Thermal history reconstruction in sedimentary basins using apatite fission-track analysis and related techniques[M]// HARRIS N D, PETERS K E. Analyzing the thermal history of sedimentary basins: methods and case histories. SEPM Special Publication, 2013, 103: 65-104.
- [17] 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]. *地质学前沿*, 2014, 21(3): 172-180.
- XIAO Kunye, ZHAO Jian, YU Zhaochua, et al. Structural characteristics of intensively inversed Bongor Basin in CARS and their impacts on hydrocarbon accumulation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(3): 172-180.
- [18] 路玉林, 刘嘉麒, 窦立荣, 等. 非洲乍得盆地玄武岩 K-Ar 和<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 年代学及其动力学背景[J]. *地质学报*, 2009, 83(8): 1125-1133.
- LU Yulin, LIU Jiaqi, DOU Lirong, et al. K-Ar and <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar geochronology of basalts from the chad basins. Africa and its geodynamics setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8): 1125-1133.
- [19] 麻伟娇, 卫延召, 曾德龙, 等. 准噶尔盆地莫索湾凸起古油藏的流体证据[J]. *石油学报*, 2017, 38(4): 414-424.
- MA Weijiao, WEI Yanzhao, ZENG Delong, et al. Fluid evidence of paleo-reservoir in the Mosuowan uplift, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(4): 414-424.
- [20] PIRONON J, BARRES Q. Semi-quantitative FT-IR microanalysis limits: evidence from synthetic hydrocarbon fluid inclusions in sylvite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(3): 509-518.
- [21] 李峰, 姜振学, 李卓, 等. 库车坳陷迪北气藏流体包裹体特征及油气充注历史[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, 47(2): 515-523.
- LI Feng, JIANG Zhenxue, LI Zhuo, et al. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon charge history of Dibe gas reservoir in the Kuqa depression[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, 47(2): 515-523.
- [22] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 多期次油气成藏流体包裹体间接定年——以鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气藏为例[J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 1003-1011.
- CHEN Gang, DING Chao, XU Liming, et al. Indirect dating of multi-stage hydrocarbon accumulations by fluid inclusion data: a case study of the Permian hydrocarbon accumulation in the northeast Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 1003-1011.
- [23] 白冰, 王清斌, 赵国祥, 等. 蓬莱 9-1 构造新生代构造演化: 磷灰石裂变径迹证据[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1098-1107.
- BAI Bing, WANG Qingbin, ZHAO Guoxiang, et al. Cenozoic tectonic evolution of PL9-1 structure: an evidence of apatite fission track[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1098-1107.
- [24] 潘雪峰, 刘麟. 苏北盆地 S-F 油田烃类流体包裹体红外光谱特征研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2013, 36(3): 31-34.
- PAN Xuefeng, LIU Lin. IR spectrum of hydrocarbon-fluid inclusion in S-F oilfield, Subei Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2013, 36(3): 31-34.
- [25] 蒋静, 张鼎, 潘文龙, 等. 塔里木盆地台盆区奥陶系储层烃包裹体成熟度[J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 644-652.
- JIANG Jing, ZHANG Nai, PAN Wenlong, et al. Hydrocarbon inclusion maturity of Ordovician reservoirs in craton area of Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(5): 644-652.
- [26] 王民, 李钟生. 激光拉曼技术评价沉积有机质热成熟度[J]. *石油学报*, 2016, 37(9): 1129-1136.
- WANG Min, LI Zhongsheng. Thermal maturity evaluation of sedimentary organic matter using laser Raman spectroscopy[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(9): 1129-1136.
- [27] 李威, 窦立荣, 文志刚, 等. 乍得 Bongor 盆地潜山油气成因和成藏过程[J]. *石油学报*, 2017, 38(11): 1253-1262.
- LI Wei, DOU Lirong, WEN Zhigang, et al. Buried-hill hydrocarbon genesis and accumulation process in Bongor Basin, Chad[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(11): 1253-1262.

(收稿日期 2017-06-05 改回日期 2017-11-03 编辑 宋 宁)